

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Αρ. Πρωτ. 1706  
31.12.98

ΠΡΟΣ ΤΟΝ  
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ  
(ΟΑΣΠ)

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ  
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ:

**"ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ  
ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ  
ΥΠΟ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ  
ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ  
ΜΕ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ "**

ΣΥΝΤΑΞΑΝΤΕΣ:  
Μ.Ν. ΦΑΡΔΗΣ, Σ.Ν. ΜΠΟΥΣΙΑΣ, Τ.Β. ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΚΟΣ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 1998

# ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΜΕ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα αφορά την προσομοίωση της συμπεριφοράς μελών οπλισμένου σκυροδέματος οιοδήποτε λόγου διάτμησης, υπό οποιαδήποτε ιστορία τριδιάστατης εντατικής κατάστασης. Περιλαμβάνει μια εκτενή, συστηματική και κριτική ανασκόπηση της πειραματικής συμπεριφοράς γραμμικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, μονοαξονική ή διαξονική, με σταθερό ή μεταβλητό αξονικό φορτίο. Στην ανασκόπηση αυτή δίνεται έμφαση στην επιρροή του λόγου διάτμησης, σαν καθοριστικού στοιχείου του διατμητικού χαρακτήρα της συμπεριφοράς, και υπογραμμίζονται τα διαφορετικά αλλά και τα κοινά στοιχεία της συμπεριφοράς των μελών χαμηλού ή υψηλού λόγου διάτμησης. Περιλαμβάνεται κατόπιν μια επίσης κριτική παρουσίαση των προσομοιωμάτων που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα για την συμπεριφορά στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, κάνοντας διάκριση μεταξύ μελών με υψηλό λόγο διάτμησης και αυτών με χαμηλό. Για τα πρώτα, η παρουσίαση είναι επαγωγική, ξεκινώντας από τα γενικά προσομοιώματα ινών για την τριδιάστατη ένταση και διακρίνοντας κατόπιν από τα υπόλοιπα, τα προσομοιώματα μονοαξονικής κάμψης με ή χωρίς αξονική δύναμη. Για τα προσομοιώματα αυτά υπολογίζεται ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης που είναι συμφυής στο προσομοίωμα υστέρησης. Για τα μέλη με χαμηλό λόγο διάτμησης η παρουσίαση επικεντρώνεται στον υπολογισμό της αντοχής του μέλους στο χώρο ροπής-τέμνουσας-αξονικής δύναμης.

Στη συνέχεια αξιοποιείται μια βάση δεδομένων από 600 διαφορετικά πειράματα μονοτονικής ή ανακυκλιζόμενης φόρτισης για τον ποσοτικό αλλά ημι-εμπειρικό προσδιορισμό των βασικών μεγεθών αντοχής και παραμόρφωσης υπό μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη ένταση, σαν συνάρτηση των γεωμετρικών και μηχανικών στοιχείων του μέλους και του οπλισμού του. Ποσοτικοποιείται η αντοχή υπό συνδυασμό ροπής, τέμνουσας και αξονικής δύναμης, μέσω ενός αναλυτικού προσομοιώματος, που είναι ακριβέστερο και πληρέστερο από οποιοδήποτε προηγούμενο. Το προσομοίωμα αυτό αναφέρεται μόνο σε ορθγωνικές διατομές με οπλισμό στην περίμετρο, υπό μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση, αλλά συνδυάζεται με ένα προσομοίωμα ινών σε επίπεδο διατομής, για την κατασκευή της επιφάνειας που ορίζει την οριακή αντοχή μέλους με οποιαδήποτε κατανομή διαμήκους οπλισμού, υπό διαξονική καμπτοδιατμητική ένταση με αξονική δύναμη. Η επιφάνεια αυτή αποτελεί την Οριακή Επιφάνεια του τελικού προσομοιώματος που αναπτύσσεται για την παραμορφωσιακή συμπεριφορά υπό οποιαδήποτε ιστορία τριδιάστατης έντασης. Με βάση τα ελάχιστα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία για την επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στη μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά μελών οπλισμένου σκυροδέματος, εξάγεται ένας απλός κανόνας για τον καθορισμό του μεγέθους της Οριακής Επιφάνειας υπό ταχύτητες παραμόρφωσης χαρακτηριστικές της σεισμικής απόκρισης. Τέλος προτείνεται μια απλή αλλά γενική μορφή των καταστατικών νόμων που διέπουν την παραμορφωσιακή συμπεριφορά στο προσομοίωμα τύπου Οριακής Επιφάνειας. Οι παράμετροι των νόμων αυτών σχετίζονται ποσοτικά με τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας και της όπλισης του μέλους, μέσω, αφενός μεν της γωνίας στροφής χορδής του μέλους στη διαρροή, αφετέρου δε της συνάρτησης μεταβολής του συντελεστή απόσβεσης από το δείκτη πλαστιμότητας μετανικήσεων.

Το προσομοίωμα τύπου Οριακής Επιφάνειας λογισμητοποιείται στα πλαίσια του προγράμματος μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης στο χώρο ANSR και χρησιμοποιείται για την επιτυχή προσομοίωση της πειραματικής συμπεριφοράς μελών υπό σύνθετη ανακυκλιζόμενη διαξονική φόρτιση.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σεισμικές δράσεις έχουν δυο σύγχρονες οριζόντιες συνιστώσες, που προκαλούν απόκριση μιας κατασκευής σε λοξή διεύθυνση και συνεπώς διαξονική καμπτική καταπόνηση στα υποστυλώματα. Επιπλέον, επειδή οι πραγματικές κτιριακές κατασκευές δεν είναι απολύτως συμμετρικές, αναπτύσσεται στρεπτική περί κατακόρυφο άξονα απόκριση και εξ αυτής διαξονική κάμψη στα υποστυλώματα ακόμη και για σεισμική δράση σε μια οριζόντια διεύθυνση, όπως υποτίθεται στον αντισεισμικό σχεδιασμό. Είναι λοιπόν σχεδόν βέβαιο ότι στην πράξη θα αναπτυχθεί διαξονική ένταση στα υποστυλώματα και μάλιστα, για λόγους που θα εξηγηθούν παρακάτω, η ένταση αυτή συνοδεύεται από ταυτόχρονη μεταβολή του αξονικού φορτίου. Η πολυαξονικότητα της έντασης μπορεί να αλλάξει την αναμενόμενη συμπεριφορά του πλαισιακού συστήματος, ιδιαίτερα όταν τα, γωνιακά κυρίως, υποστυλώματα εισέλθουν στην ανελαστική περιοχή λόγω του συνδυασμού διαξονικών ροπών και αξονικής δύναμης που τα καταπονεί.

Οι σύγχρονοι κανονισμοί επιτρέπουν σημαντικές, αλλά οικονομοτεχνικά επισκευάσιμες, βλάβες στα φέροντα ή μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής, από σειμούς μεγάλης έντασης, αρκεί αυτά να μην καταρρεύσουν εν όλω ή εν μέρει. Έτσι η απόκριση των κατασκευών για αυτούς τους σειμούς επιτρέπεται και αναμένεται να φθάνει στη μη-γραμμική περιοχή, απορροφώντας τη σεισμική ενέργεια με υστέρηση και προκαλώντας μόνιμες ανελαστικές παραμορφώσεις στα μέλη. Ο μηχανισμός απορρόφησης της ενέργειας που υιοθετείται από τους κανονισμούς προϋποθέτει το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών και όχι σε αυτά των υποστυλωμάτων (απαίτηση "ασθενών δοκών-ισχυρών υποστυλωμάτων"), μη αποφεύγοντας εν τούτοις, για την ανάπτυξη αυτού του μηχανισμού, τη διαρροή στη βάση των υποστυλωμάτων του ισογείου. Από τον περιορισμένο όγκο πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν τη συμπεριφορά υποστυλωμάτων που πλαστικοποιούνται από διαξονική καμπτική καταπόνηση, προκύπτει ότι η διαξονικότητα των επιβαλλόμενων ροπών, η τριαξονικότητα της απόκρισης καθώς και η ανακύκλιση της έντασης οδηγούν σε μείωση της καμπτικής αντοχής, της δυσκαμψίας και της απομένουσας μετά την καταπόνηση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Πειραματικές δοκιμές πλαισιακών συστημάτων σε σεισμική τράπεζα έδειξαν ότι λόγω διαξονικής καταπόνησης παρουσιάζεται αυξημένη τάση ανάπτυξης ανελαστικότητας στα υποστυλώματα, προτού παρόμοια φαινόμενα εμφανιστούν στις δοκούς, θέτοντας έτσι υπό αμφισβήτηση την αποτελεσματικότητα των σύγχρονων κανονισμών για εξασφάλιση των υποστυλωμάτων από την εμφάνιση ανελαστικών παραμορφώσεων. Έχουν τέλος παρατηρηθεί πολύπλοκα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των δυνάμεων απόκρισης στις δυο διευθύνσεις. Η α-

νελαστική απόκριση στη μια διεύθυνση αλλάζει το μηχανισμό αντίστασης της εγκάρσιας διεύθυνσης, και ως εκ τούτου η ανεξαρτησία της απόκρισης παύει να ισχύει. Έτσι μπορεί να παρουσιαστεί πλαστικοποίηση σε υποστυλώμα, ακόμη και αν η εφαρμοζόμενη ροπή στην μια διεύθυνση είναι μικρότερη της μονοαξονικής ροπής διαρροής, λόγω ακριβώς αυτής της σύζευξης των αποκρίσεων στις δύο εγκάρσιες στον άξονα του μέλους διευθύνσεις.

Κατά τη διάρκεια της απόκρισης μιας κατασκευής σε οριζόντιες σεισμικές δράσεις οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στα υποστυλώματα μεταβάλλονται λόγω των ροπών ανατροπής, ιδιαίτερα στα εξωτερικά υποστυλώματα. Η μεταβολή του αξονικού φορτίου έχει σημαντική επίδραση στην καμπτική αντοχή και συμπεριφορά, γεγονός που έχει επισημανθεί κυρίως στη δυναμική ανάλυση συζευγμένων τοιχωμάτων. Εν τούτοις, για την περίπτωση των υποστυλωμάτων, η μέχρι τώρα σχετική έρευνα είναι περιορισμένη. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη διάρκεια του σεισμού οι ροπές ανατροπής και η κατακόρυφη συνιστώσα της διέγερσης μπορεί να προκαλέσουν ακόμη και εφελκυσμό σε ορισμένα υποστυλώματα. Στη περίπτωση αυτή ο αξονικός εφελκυσμός συντελεί στο να παραμένουν ανοικτές οι ρωγμές, οδηγώντας σε μείωση της δυσκαμψίας και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Σε μια πραγματική κατασκευή που υπόκειται σε σεισμική διέγερση, είναι δυνατόν ένα υποστυλώμα να μεταπέσει σε ελάχιστο χρονικό διάστημα από έντονη θλίψη σε εφελκυσμό γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς του. Επιπλέον, η περιοχή διακύμανσης του αξονικού φορτίου μπορεί να είναι ευρύτερη από εκείνη που προβλέπεται με βάση την ανάλυση για ισοδύναμα στατικά φορτία, ιδιαίτερα όταν η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας της διέγερσης είναι σημαντική, οδηγώντας σε αισθητά μικρότερη αντοχή υποστυλώματος από εκείνη βάσει της οποίας έγινε ο έλεγχος αντοχών δοκών-υποστυλωμάτων στους αντίστοιχους κόμβους.

Τα ανωτέρω αναφέρονται κυρίως σε σχετικά λυγηρά υποστυλώματα, στα οποία καθοριστική της αντοχής και της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη, οι δε ανελαστικές παραμορφώσεις έχουν καμπτική κυρίως προέλευση. Συχνά όμως τα υποστυλώματα έχουν μεγάλες διαστάσεις διατομής σε σχέση με το ύψος τους, οπότε καθοριστική της αντοχής και των ανελαστικών παραμορφώσεων είναι η διάτμηση, ή τουλάχιστον ο συνδυασμός κάμψης και διάτμησης. Η καμπτοδιατμητική συμπεριφορά είναι πιο ψαθυρή από την καθαρά καμπτική και υπό ανακυκλιζόμενη ένταση δεν επιτρέπει σημαντική απορρόφηση ενέργειας. Μπορεί έτσι να είναι καθοριστική της αντοχής και της παραμορφωσιακής ικανότητας του υποστυλώματος και, κατ' επέκταση, να έχει δυσμενή επιρροή στη συνολική σεισμική συμπεριφορά και ασφάλεια της κατασκευής. Αυτό είναι συχνότερο στα “κοντά υποστυλώματα”, στα οποία η δυσμενής σχέση μήκους-οριζοντίων διαστάσεων οφείλεται στο μικρό τους μήκος, παρά στα κανονικού ύψους αλλά μεγάλων διαστάσεων διατομής, καθότι οι τελευταίες αποτρέπουν κατά κανόνα την

πρώρη αστοχία ή ανάπτυξη ανελαστικότητας στο υποστύλωμα, αντί στις δοκούς με τις οποίες συνδέεται.

Για τη μελέτη της πολύπλοκης μη-γραμμικής απόκρισης κατασκευών στο χώρο, διαθέτουμε σήμερα εργαλεία δύο τύπων: α) το πείραμα σε πραγματικού μεγέθους δοκίμια στο εργαστήριο, υπό κλίμακα σε σεισμική τράπεζα, ή με ψευδοδυναμική φόρτιση, και β) τη μη-γραμμική δυναμική ανάλυση. Αν και τεχνικά εφικτός, ο πρώτος τρόπος είναι εξαιρετικά δαπανηρός, και στην περίπτωση της πολυαξονικής καταπόνησης για την οποία γίνεται λόγος εδώ δεν έχει προσφέρει σημαντικά αποτελέσματα σε σύγκριση με αυτά που υπάρχουν για τη μονοαξονική κάμψη με σταθερό ή μεταβλητό αξονικό φορτίο, έστω και αν καλύπτει μια περίοδο έρευνας σχεδόν 30 ετών. Η προσθήκη μιας ακόμη διάστασης στο πρόβλημα αυξάνει κατά περισσότερο από μια τάξη μεγέθους τη δυσκολία του, λόγω της απειρίας των συνδυασμών εντατικής καταπόνησης που δημιουργεί η μεταβολή και των πέντε, εν γένει, εντατικών μεγεθών, δηλαδή των ροπών κάμψης και των τεμνουσών στις δυο εγκάρσιες διευθύνσεις και του αξονικού φορτίου. Από την άλλη πλευρά η εφαρμογή της μη-γραμμικής ανάλυσης είναι ακόμη περιορισμένη λόγω κόστους και δυσχέρειας, αλλά κυρίως λόγω έλλειψης σχετικά απλών προσομοιωμάτων, τα οποία να μπορούν να αναπαραστήσουν με ακρίβεια και αξιοπιστία την πολύπλοκη ανελαστική συμπεριφορά υποστυλωμάτων σε ταυτόχρονη μεταβολή της αξονικής δύναμης και των δύο οριζοντίων συνιστωσών της ροπής κάμψης και της διατμητικής δύναμης. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος καθιστά αδύνατη την ανάπτυξη φαινομενολογικών—εμπειρικών κανόνων σε τρεις διαστάσεις, ανάλογων με αυτούς που χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τη μονοαξονική κάμψη, οι οποίοι να επιτυγχάνουν την αναπαραγωγή της πειραματικής συμπεριφοράς με την ίδια ακρίβεια που είναι δυνατή και συνήθης στο διδιάστατο πρόβλημα. Έτσι, σε συνδυασμό με την περιορισμένη βάση πειραματικών δεδομένων για την τρισδιάστατη απόκριση, οι γνώσεις μας σήμερα σε αυτόν τον τομέα υστερούν σε σχέση με αυτές για τη συμπεριφορά σε μονοαξονική κάμψη με ορθή δύναμη.

Αντικείμενο της παρούσας έρευνας είναι η αναλυτική προσομοίωση της τρισδιάστατης συμπεριφοράς υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος υπό γενικευμένη τρισδιάστατη καμπτική ή καμπτοδιατμητική ένταση, λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη και την επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται κατά αναλυτικό και κριτικό τρόπο η υπάρχουσα διεθνής βιβλιογραφία για την πειραματική συμπεριφορά στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική ή διαξονική καταπόνηση με μηδενικό, σταθερό ή και μεταβλητό αξονικό φορτίο. Καλύπτονται χωριστά τα λυγηρά στοιχεία, στα οποία καθοριστική της συμπεριφοράς είναι αποκλειστικά η κάμψη και χωριστά τα “κοντά” στα οποία η συμπεριφορά είναι

καμπτοδιατμητική. Στην ανάλυση επισημαίνονται τα σπουδαιότερα σημεία κάθε έρευνας και γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Επίσης παρουσιάζονται σε Παράρτημα υπό μορφή πινάκων τα βασικά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμών 600 περίπου πειραμάτων καθώς και κάποια βασικά αριθμητικά αποτελέσματά τους, τα οποία στη συνέχεια (στο Κεφάλαιο 3) χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση παραμέτρων των προσομοιωμάτων.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται αναλυτικότερα και κατά κριτικό τρόπο η σημερινή Κατάσταση-της-Γνώσης αναφορικά με τα προσομοιώματα που έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της μη-γραμμικής συμπεριφοράς στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη μονοαξονική, διαξονική ή τριαξονική ένταση. Πέραν από το γεγονός της κριτικής και οργανωμένης παρουσίασης των μέχρι σήμερα προσομοιωμάτων, στο Κεφάλαιο 2 υπάρχει μια επιπλέον πρωτοτυπία: ο υπολογισμός της υστερητικής απόσβεσης που είναι εγγενής στα διάφορα φαινομενολογικά προσομοιώματα που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα για τη μονοαξονική κάμψη, συναρτήσει των παραμέτρων του προσομοιώματος και του δείκτη πλαστιμότητας.

Τα υπόλοιπα Κεφάλαια της παρούσας έρευνας αφορούν την κατασκευή του προσομοιώματος μελών οπλισμένου σκυροδέματος για γενικευμένη καμπτική και καμπτοδιατμητική φόρτιση, στο επίπεδο (μονοαξονική κάμψη και διάτμηση, με ή χωρίς αξονική δύναμη) και στο χώρο (διαξονική κάμψη και διάτμηση, με αξονική δύναμη), λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη και την ταχύτητα παραμόρφωσης. Κατ' αρχήν ποσοτικοποιούνται τα βασικά μεγέθη αντοχής και παραμόρφωσης που υπεισέρχονται στο προσομοίωμα, συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του μέλους και των οπλισμών του. Η ποσοτικοποίηση αυτή γίνεται με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των 600 περίπου πειραμάτων που συγκεντρώθηκαν και παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1. Τα μεγέθη παραμόρφωσης που ποσοτικοποιούνται αφορούν τη διαρροή και την αστοχία σε μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση υπό (σταθερή) αξονική δύναμη. Ποσοτικοποιείται επίσης, με τη βοήθεια των πειραματικών αποτελεσμάτων, η υστερητική απορρόφηση ενέργειας σαν συνάρτηση της μέγιστης παραμόρφωσης κατά την ανακύκλιση, αποτελέοντας τη βάση για την επιλογή των παραμέτρων της προσομοίωσης που καθορίζουν την απορρόφηση ενέργειας. Τα μεγέθη αντοχής που ποσοτικοποιούνται αφορούν τη διαρροή και την αστοχία. Για μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση με (σταθερή) αξονική δύναμη, η αντοχή μπορεί να εκφρασθεί (ημι-)αναλυτικά, με βάση την ισορροπία, το συμβιβαστό των παραμορφώσεων τους νόμους σ-ε και τα κριτήρια αστοχίας χάλυβα και σκυροδέματος και κάποιες απλοποιητικές προσεγγίσεις. Για διαξονική καμπτική ένταση,

αναπτύσσεται και χρησιμοποιείται ένα προσομοίωμα τύπου ιών σε επίπεδο διατομής για τον καθορισμό της διαξονικής (καμπτικής) αντοχής. Ο διαξονικός αυτός υπολογισμός αποτελεί τη βάση και για την επέκταση του υπολογισμού της μονοαξονικής καμπτοδιατμητικής αντοχής στην περίπτωση της διαξονικής καμπτοδιατμητικής φόρτισης. Τέλος, για την παραμορφωσιακή συμπεριφορά του μέλους υπό γενικευμένη καμπτοδιατμητική ένταση μέχρι την αστοχία, αναπτύσσεται προσομοίωμα τύπου Οριακής Επιφάνειας. Στο προσομοίωμα αυτό περιλαμβάνεται κατά προσεγιστικό τρόπο και η επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ Η ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ

#### 1.1. Εισαγωγή: Καμπτική ή καμπτοδιατμητική συμπεριφορά, σαν συνάρτηση του λόγου διάτμησης

Σε πρισματικά μέλη οπλισμένου σκυροδέματος, όπως οι δοκοί και τα υποστυλώματα, η μελέτη του μέλους, αναλυτική ή πειραματική, γίνεται με βάση τον άξονα του,  $x$ , και τις κάθετες σ' αυτόν διατομές. Η έντασή τους εκφράζεται μέσω της συνισταμένης δύναμης και των ως προς τους άξονες  $y, z$  ροπών των ορθών τάσεων  $\sigma_x$  της διατομής, δηλ. της αξονικής δύναμης  $N$  και των καμπτικών ροπών  $M_y, M_z$ , και μέσω των συνισταμένων δυνάμεων και της ροπής των διατμητικών τάσεων  $\tau_{xy}$  και  $\tau_{xz}$ , δηλ. των τεμνουσών  $V_y, V_z$  και της στρεπτικής ροπής  $T$ , πάντοτε ως προς τους άξονες  $x, y, z$ . Κατ' επέκταση χαρακτηρίζουμε σαν “καμπτικές” εκείνες τις παραμορφώσεις του μέλους που προκύπτουν με βάση την υπόθεση Navier-Bernoulli, δηλ. ότι κατά την παραμόρφωση οι διατομές παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα  $x$ . Οι καμπτικές παραμορφώσεις οφείλονται στα μεγέθη ορθής έντασης,  $N, M_y, M_z$ . Οι τέμνουσες προκαλούν επιπρόσθετες, “διατμητικές” παραμορφώσεις, οι οποίες κατά κανόνα υπολογίζονται χαλαρώνοντας την υπόθεση Navier-Bernoulli και επιτρέποντας τις διατομές να σχηματίζουν, κατά την παραμόρφωση, γωνία ως προς τον άξονα.

Γενικά στις παραμορφώσεις υπάρχει αλληλεπίδραση κάμψης και διάτμησης, δηλ. τα ορθά εντατικά μεγέθη επηρεάζουν τις διατμητικές παραμορφώσεις και η τέμνουσες τις καμπτικές, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για ανελαστικές παραμορφώσεις υπό ανακυκλιζόμενη ένταση. Εντούτοις, όταν η καμπτική ένταση είναι σημαντική σε σχέση με τη διατμητική, τότε οι καμπτικές παραμορφώσεις όχι μόνον είναι οι καθοριστικές, αλλά και μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες της διατμητικής έντασης. Σαν κριτήριο για τη σχετική σημασία της κάμψης ή της διάτμησης στις παραμορφώσεις, και γενικά στη συμπεριφορά, χρησιμοποιείται συνήθως ο λόγος διάτμησης,  $M/Vh$ , όπου οι ροπές, η τέμνουσα και το ύψος  $h$  της διατομής αναφέρονται στο ίδιο επίπεδο κάμψης (δηλ. στο  $xy$  ή στο  $xz$ ). Από την άποψη αυτή η τιμή του λόγου διάτμησης είναι καθοριστική για τα πρισματικά στοιχεία ακόμα και στα πλαίσια της γραμμικής-ελαστικότητας: σ' ένα πρισματικό μέλος με ορθογωνική διατομή, ο λόγος της μέγιστης ορθής τάσης στη διατομή,  $\max \sigma_x = M/W$ , προς τη μέγιστη διατμητική,



$\max_{xy}=1.5V/A$ , ισούται όντως με  $\max_{sx}/\max_{xy}=4(M/Vh)$ . Ετσι, ακόμα και σε ελαστικά μέλη, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου διάτμησης, τόσο περισσότερο η κάμψη κυριαρχεί της διάτμησης, στην ένταση και στη συμπεριφορά.

Η συμπεριφορά κυριαρχείται καθαρά από την κάμψη, σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος με λόγο διάτμησης μεγαλύτερο του 4.0. Αντίθετα, αν ο λόγος διάτμησης είναι μικρότερος από 2.0, καθοριστική της συμπεριφοράς είναι η διάτμηση. Στο ενδιάμεσο υπάρχει μία γκρίζα περιοχή όπου και η κάμψη και η διάτμηση είναι σημαντικές.

Υπό σημαντική σεισμική δράση (σε συνδυασμό και με τα κατακόρυφα φορτία), το διάγραμμα ροπών κάμψης στα μέλη είναι γραμμικό, είτε ακριβώς, όπως στα υποστυλώματα, είτε κατά καλή προσέγγιση, όπως στα άκρα των δοκών. Για (περίπου) γραμμικό διάγραμμα ροπών, το “άνοιγμα διάτμησης”,  $a=M/V$ , ισούται με την απόσταση της θέσης όπου η ροπή είναι μέγιστη από το σημείο καμπής (όπου  $M=0$ ). Για το σεισμό η διατομή της μέγιστης ροπής είναι κατά κανόνα η ακραία και το μήκος του μέλους μέχρι απόστασης  $h$  από την ακραία διατομή είναι στην ουσία περιοχή ασυνέχειας, μέσα στην οποία δεν ισχύει ικανοποιητικά η υπόθεση της επιπεδότητας των διατομών, ούτε άλλες θεωρήσεις της Τεχνικής Θεωρίας της Κάμψης, όπως το αμελητέο μέγεθος των ορθών τάσεων  $\sigma_y$  και/ή  $\sigma_z$ . Αν στη θέση όπου η ροπή είναι μηδέν ασκείται μία συγκεντρωμένη δύναμη, όπως συμβαίνει σε πειράματα επί δοκιμίων μορφής προβόλου, τότε και το τμήμα του μέλους μέχρι απόσταση  $h$  από τη θέση εφαρμογής του φορτίου είναι περιοχή ασυνέχειας όπου δεν ισχύει η Τεχνική Θεωρία της Κάμψης. Ετσι σε τέτοιου τύπου μέλη, με λόγο μήκους προς ύψος διατομής,  $a/h=M/Vh$ , μικρότερο του 2.0, το πεδίο των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι τουλάχιστον διδιάστατο και όχι μονοδιάστατο, ακόμα και στα πλαίσια της ελαστικής συμπεριφοράς. Επομένως μπορεί να αναλυθεί και να περιγραφεί μόνο με τη βοήθεια της Μηχανικής του Συνεχούς Μέσου (ή της Θεωρίας Ελαστικότητας σε δύο τουλάχιστον διαστάσεις), και όχι με βάση την Τεχνική Θεωρία της Κάμψης.

Εστιάζοντας τώρα αποκλειστικά σε πρισματικά μέλη οπλισμένου σκυροδέματος, αν ο λόγος διάτμησης είναι μεγαλύτερος του 2.5 περίπου, η συμπεριφορά σε μονοτονική μονοαξονική κάμψη με τέμνουσα και αξονική δύναμη περιγράφεται ικανοποιητικά από το γνωστό προσομοίωμα εσωτερικού δικτυώματος, που αποτελείται από δύο παράλληλα πέλματα, ένα θλιβόμενο και ένα εφελκόμενο, ένα πεδίο λοξών θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα, υπό γωνία  $\theta$  ως προς τον άξονα του μέλους, και εγκάρσιους στον άξονα ελκυστήρες, που αποτελούνται από τους συνδετήρες. Αμέσως μετά τη λοξή ρηγμάτωση του σκυροδέματος, η γωνία  $\theta$  ισούται με αυτήν της κύριας θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος ως προς τον άξονα  $x$  (αν  $N=0$ , τότε  $\theta=45^\circ$ ), αλλά αυξάνεται ή μειώνεται βαθμηδόν μέχρι την

οριακή αντοχή, αν οι διαμήκεις ράβδοι διαρρέουν αντίστοιχα πριν ή μετά τους συνδετήρες. Εφόσον υπάρχει πλήρης συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος, η συμπεριφορά περιγράφεται ικανοποιητικά απ' αυτόν το μηχανισμό δικτυώματος μέχρι και την οριακή αντοχή του μέλους.

Για τιμές του λόγου διάτμησης μικρότερες του 2.0 (με όριο την περίπτωση  $M/Vh=0$ , όπου το πρόβλημα ανάγεται σε μεταφορά τέμνουσας από διεπιφάνεια), ο ανωτέρω μηχανισμός δικτυώματος κυριαρχείται από ένα μηχανισμό θλιπτήρων-ελκυστήρων. Σ' ένα μέλος υπό αντιμετρική κάμψη (όπως κατά κανόνα είναι τα στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης υπό σεισμική δράση) αυτός ο τελευταίος μηχανισμός αποτελείται από ένα διαγώνιο θλιπτήρα και δύο διαμήκεις ελκυστήρες (έναν κοντά σε κάθε πέλμα). Το προσομοίωμα αυτό αγνοεί το συμβατό των παραμορφώσεων και τη συνάφεια οπλισμού και σκυροδέματος. Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1, κάθε ελκυστήρας είναι υπό σταθερό αξονικό εφελκυσμό, ίσο με  $M/z-N/2$ , και ο θλιπτήρας αναπτύσσει σταθερή θλιπτική δύναμη, ίση με  $V/\sin\theta$ . Η κλίση  $\tan\theta$  του θλιπτήρα ως προς τον άξονα ισούται με  $z/l=0.5zV/M$ , και μειώνεται όσο αυξάνει ο λόγος διάτμησης. Κατ' αυτό το απλό ισοστατικό προσομοίωμα, η οριακή αντοχή συμβαίνει, είτε όταν αστοχήσει ψαθυρά η θλιβόμενη διαγώνιος, ή όταν διαρρεύσουν οι δύο ελκυστήρες. Αυτός ο δεύτερος τρόπος αστοχίας είναι καμπτικός, και δίνει οριακή αντοχή ίση με αυτήν που αντιστοιχεί σε καμπτική αστοχία των δύο ακραίων διατομών. Αν ο λόγος διάτμησης είναι χαμηλός, και ιδιαίτερα αν η αξονική δύναμη είναι θλιπτική, αυτός ο πλάστιμος τρόπος αστοχίας είναι σπάνιος, ιδίως στα υποστυλώματα, όπου το ποσοστό διαμήκους οπλισμού είναι γενικά υψηλό. Έτσι ο συνήθης τρόπος αστοχίας στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης είναι με διάρρηξη κατά τη διαγώνιο. Σημειωτέον ότι η ανακύκλιση του φορτίου προκαλεί ένα σύστημα διασταυρούμενων μικρορωγμών παράλληλα και στις δύο διαγώνιους του στοιχείου. Το σύστημα αυτό μειώνει την ενεργό θλιπτική αντοχή και επιταχύνει την αστοχία από διαγώνια διάρρηξη.

Επισημαίνεται ότι, σύμφωνα με αυτό το απλό προσομοίωμα θλιπτήρων-ελκυστήρων, η ποσότητα διαμήκων ή εγκάρσιων ράβδων δεν επηρεάζει άμεσα την αστοχία λόγω διαγώνιας θλίψης και άρα ούτε και την οριακή αντοχή. Οι εγκάρσιοι οπλισμοί επηρεάζουν θετικά τη συμπεριφορά μόνον έμμεσα, μέσω της περίσφιξης του λοξά θλιβόμενου σκυροδέματος. Όμως η βελτίωση αυτή αφορά περισσότερο στην παραμόρφωση αστοχίας και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από το μέλος, παρά στην οριακή αντοχή του.

Η οριακή αντοχή λυγηρών μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη, καθορίζεται κατά κανόνα από την κάμψη στις ακραίες διατομές τους και περιγράφεται από το γνωστό διάγραμμα αλληλεπίδρασης  $M-N$ . Για κάθε διάταξη

οπλισμού στην ακραία διατομή, αντιστοιχεί μία (κλειστή) καμπύλη αλληλεπίδρασης σε κάθε ποσοστό διαμήκους χάλυβα. Όσο αυξάνεται το ποσοστό αυτό, τόσο διογκώνεται η καμπύλη αλληλεπίδρασης. Αν  $V_u$  είναι η οριακή τέμνουσα του μέλους, όπως αυτή καθορίζεται από τη θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος του διαγωνίου θλιπτήρα, η αντίστοιχη οριακή τιμή της ροπής,  $M_u$ , ισούται με  $aV_u$ , όπου  $a$  είναι το άνοιγμα διάτμησης του μέλους,  $a=M/V$ . Στη συνήθη αδιάστατη μορφή των εντατικών μεγεθών, όπου οι ροπές διαιρούνται με  $bh^2f_c$  και οι τέμνουσες με  $bhf_c$ , είναι  $\mu_u=(a/h)v_u$ , όπου  $a/h$  είναι ο λόγος διάτμησης. Η τιμή των  $V_u$  και  $v_u$  εξαρτώνται από το λόγο διάτμησης και από το αξονικό φορτίο  $N$ , αλλά όχι από το ποσοστό του διαμήκους χάλυβα. Είναι δηλ.  $v_u=v_u(v)$ . Στο Σχ. 1.2, που δείχνει σχηματικά τη συνήθη μορφή των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης  $M-N$  ( $\mu-v$ ) για τη μονοαξονική κάμψη με ορθή δύναμη, παρουσιάζονται επίσης και καμπύλες  $\mu_u=v_u(v)a/h$ , για διάφορες τιμές του λόγου διάτμησης  $a/h$ . Αν η τιμή του  $a/h$  είναι μεγάλη, οι καμπύλες αυτές δεν τέμνουν την καμπύλη αλληλεπίδρασης  $\mu-v$ , οπότε η αντοχή δεν εηρεάζεται από το λόγο διάτμησης. Όσο μικραίνει ο λόγος  $a/h$ , τόσο πλησιάζουν οι καμπύλες  $v_u(v)a/h$  προς την αρχή των αξόνων, τέμνοντας το διάγραμμα αλληλεπίδρασης  $\mu-v$  σε δύο σημεία, που αντιστοιχούν σε δύο τιμές της αξονικής δύναμης  $v$ . Μεταξύ των τιμών αυτών καθοριστική της οριακής αντοχής και της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς κοντά στην αστοχία είναι η διάτμηση και όχι η κάμψη. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος διάτμησης, τόσο ευρύτερο είναι το διάστημα τιμών της  $N$  για το οποίο καθοριστική είναι η διάτμηση.

Σε πλαισιακές αντισεισμικές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα συνήθη υποστυλώματα και κυρίως οι συνήθεις δοκοί έχουν σχετικά υψηλό λόγο διάτμησης. Έτσι σ' αυτά καθοριστική είναι κατά κανόνα η κάμψη, και όχι η διάτμηση. Ιδιαίτερα μάλιστα καθώς οι κανόνες Ικανοτικού Σχεδιασμού σε τέμνουσα των σύγχρονων Κανονισμών στοχεύουν στο να εξασφαλίσουν ότι οι συνήθεις δοκοί και υποστυλώματα δεν θα πλησιάσουν τη διατμητική αστοχία προτού διαρρεύσουν οι ακραίες διατομές τους σε κάμψη. Για το λόγο αυτό, τόσο η πειραματική έρευνα για δοκούς και υποστυλώματα, που περιγράφεται στο παρόν Κεφάλαιο, όσο και τα σχετικά προσομοιώματα της συμπεριφοράς υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, που περιγράφονται στο επόμενο, εστιάζονται στην καμπτική συμπεριφορά. Περαιτέρω, επειδή οι κανόνες των σύγχρονων Αντισεισμικών Κανονισμών στοχεύουν στην αποφυγή σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα μέσω του Ικανοτικού Σχεδιασμού τους, αναμένεται ότι το κύριο μέρος της ανελαστικής απόκρισης και της απορρόφησης ενέργειας κατά το σεισμό θα συμβαίνει στις δοκούς, και όχι στα υποστυλώματα. Επειδή λοιπόν οι δοκοί καταπονούνται στο σεισμό από μονοαξονική κάμψη χωρίς (σημαντική) αξονική δύναμη, το μεγαλύτερο μέρος της μέχρι σήμερα πειραματικής έρευνας διεθνώς για την

καμπτική συμπεριφορά μελών οπλισμένου σκυροδέματος, αφορά την ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη. Αυτή η περίπτωση εξετάζεται και πρώτη στο παρόν Κεφάλαιο.

Στις αντισεισμικές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης είναι συνήθως οι υψίκορμες δοκοί και τα κοντά υποστυλώματα. Λόγω της εφαρμογής του Ικανοτικού Σχεδιασμού, ο οποίος αποκλείει την ύπαρξη υψίκορμων δοκών στα πλαίσια, υψίκορμες είναι μόνον οι δοκοί σύζευξης συζευγμένων τοιχωμάτων, οι οποίες όμως κατά κανόνα οπλίζονται με ειδικό δισδιαγώνιο οπλισμό, ώστε ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς των δυνάμεων από τα στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης, που είναι κατά τη διαγώνιο, να κυριαρχείται από τον όλκιμο χάλυβα, αντί από το ψαθυρό σκυρόδεμα. Επειδή όμως η παρούσα έκθεση αναφέρεται μόνο σε συμβατικά οπλισμένα μέλη, από τα στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης εξετάζονται εδώ μόνον τα κοντά υποστυλώματα.

Στις αντισεισμικές κατασκευές τα υποστυλώματα μπορεί να είναι “κοντά”, από λόγους που βρίσκονται είτε εντός είτε εκτός των πλαισίων του σχεδιασμού του δομικού συστήματος. Στην πρώτη περίπτωση ανήκουν τα υποστυλώματα που συνδέονται στο ενδιάμεσο του ύψους ορόφου με άλλα στοιχεία (με οριζόντιες ή λοξές δοκούς). Στη δεύτερη περίπτωση ανήκουν τα υποστυλώματα που γίνονται “κοντά” λόγω επαφής τους, μονόπλευρης ή αμφίπλευρης, με τοίχο σε τμήμα μόνο του ύψους τους. Ο τοίχος αυτός εμποδίζει την εγκάρσια μετακίνησή τους και έτσι ενεργό ύψος των υποστυλωμάτων αυτών είναι μόνον το ελεύθερο (Σχ. 1.3) Με τη μείωση του ενεργού ύψους των υποστυλωμάτων αυτών, αυξάνεται η δυσκαμψία τους, με αποτέλεσμα να προσελκύουν υψηλές τέμνουσες δυνάμεις κατά το σεισμό, τις οποίες κατόπιν δεν είναι σε θέση να αναλάβουν κατά πλαστικό τρόπο, με αποτέλεσμα να αστοχούν ψαθυρά, συχνά μάλιστα κατά απότομο και εκρηκτικό τρόπο. Πολλές τέτοιες αστοχίες συνέβησαν στο σεισμό του Tokachi-Oki στην Ιαπωνία το 1968 και σ’ αυτόν της Managua στη Νικαράγουα το 1972. Από τότε μάλιστα ανέπτυξε η διεθνής επιστημονική κοινότητα ενδιαφέρον για το πρόβλημα και άρχισαν και οι πρώτες πειραματικές έρευνες, οι οποίες επιβεβαίωσαν την υψηλή τρωτότητα των στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης. Παρά τη σημασία του προβλήματος όμως, και παρά το γεγονός ότι, σε αντίθεση με το τι συμβαίνει για στοιχεία με μεγάλο λόγο διάτμησης, οι σημερινοί Κανονισμοί δεν αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά τη διαστασιολόγηση των στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης, ο συνολικός όγκος των διαθέσιμων πειραματικών αποτελεσμάτων για στοιχεία τέτοιου τύπου, υστερεί σημαντικά αυτού των αποτελεσμάτων για στοιχεία με μεγάλο λόγο διάτμησης. Αντίστοιχα ισχύουν και για τα διαθέσιμα προσομοιώματα της

παραμορφωσιακής συμπεριφοράς υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2.

Το παρόν Κεφάλαιο αφιερώνεται στην πειραματική συμπεριφορά μελών οπλισμένου σκυροδέματος με χαμηλό ή υψηλό λόγο διάτμησης υπό ανακυκλιζόμενη εγκάρσια φόρτιση, που προκαλεί είτε κυρίως καμπτική συμπεριφορά (Ενότητα 1.2), είτε καμπτοδιατμητική ή κυρίως διατμητική (Ενότητα 1.3). Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα ανακεφαλαιώνονται σε Πίνακες στο Παράρτημα Α. Οι Πίνακες 1 έως 7 του Παραρτήματος αναφέρονται σε μέλη με λόγο διάτμησης μεγαλύτερο του 2 και οι 8, 9 σε μέλη με λόγο διάτμησης μικρότερο του 2. Οι Πίνακες 1 και 8 αναφέρονται σε μονοτονική φόρτιση.

## 1.2 Πειραματική συμπεριφορά στοιχείων με υψηλό λόγο διάτμησης.

1.2.1. Ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη (η περίπτωση των δοκών)

1.1.1.1.1. Εισαγωγή: Πειραματικές διατάξεις και ορισμοί

Υπάρχουν άφθονα πειραματικά αποτελέσματα σε στοιχεία μέσου ή μεγάλου λόγου διάτμησης υπό ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη (π.χ. Burns and Siess, 1962, Bertero et al, 1969, Brown and Jirsa, 1971, Popov et al, 1972, Hanson and Conner, 1972, Celebi and Penzien, 1973, Gosain, 1973, Wight and Sozen, 1973, Bertero et al, 1974, Ma et al, 1976, Scribner and Wight, 1978, Viathanatepa et al, 1979, κ.τ.λ.). Έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα διάφορες γεωμετρικές δοκιμίου και πειραματικές διατάξεις: η συνηθέστερη διάταξη είναι αυτή όπου το δοκίμιο έχει μορφή προβόλου από μία ογκώδη βάση και υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη συγκεντρωμένη δύναμη στο άκρο, με έλεγχο της εγκάρσιας μετακίνησης (Burns and Siess, 1962, Bertero et al, 1969, Brown and Jirsa, 1971, Hanson and Conner, 1972, Celebi and Penzien, 1973, Gosain, 1973, Wight and Sozen, 1973, Ma et al, 1976). Σε μία άλλη διάταξη το δοκίμιο έχει τη μορφή αμφιέριστης δοκού, που υποβάλλεται σε ελεγχόμενη ιστορία εγκάρσιας μετακίνησης (βέλους) στο μέσο του μήκους (Celebi and Penzien, 1973), ή στα τρίτα του μήκους (Bertero et al, 1969). Αν η φόρτιση γίνεται στο μέσο του ανοίγματος, το δοκίμιο τύπου αμφιέριστης δοκού έχει, λόγω συμμετρίας, το πλεονέκτημα της μηδενικής ολίσθησης του οπλισμού στη διατομή της μέγιστης ροπής. Σε άλλες περιπτώσεις το δοκίμιο έχει τη μορφή συνδυασμού δοκού και υποστυλώματος, σε μορφή σταυρού ή T. Αν τα υποστυλώματα του συμπλέγματος είναι πολύ ισχυρότερα από τη δοκό και ο κόμβος τους είναι υπερδιαστασιοποιημένος, τότε το σύνολο

της ανελαστικής δράσης λαμβάνει χώρα στη δοκό και τα πειραματικά αποτελέσματα αντανακλούν τη συμπεριφορά της τελευταίας. Ακόμα και τότε όμως, χρειάζεται να αφαιρεθεί από τα πειραματικά αποτελέσματα η συμβολή των (ελαστικών) παραμορφώσεων των υποστυλωμάτων και του κόμβου.

Σε στοιχεία με μέσο έως υψηλό λόγο διάτμησης, υποτίθεται ότι καθοριστική της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς και της αστοχίας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι η κάμψη και όχι η διάτμηση. Για να ισχύει όμως αυτό δεν αρκεί να μην είναι χαμηλός ο λόγος διάτμησης. Χρειάζεται, επιπλέον, η όπλιση του στοιχείου να είναι τέτοια ώστε καθοριστική της αντοχής να είναι η κάμψη και όχι η διάτμηση, και μάλιστα με κάποιο σημαντικό περιθώριο. Ο λόγος είναι ότι η ανακύκλιση της έντασης μειώνει τη διατμητική αντοχή και δυσκαμψία πολύ περισσότερο απ' ό,τι την καμπτική, με ενδεχόμενο αποτέλεσμα, τη σταδιακή αύξηση με την ανακύκλιση του ποσοστού των παραμορφώσεων που οφείλονται στην τέμνουσα και ενδεχόμενα την πρώιμη αστοχία λόγω διασταυρούμενης λοξής ρηγμάτωσης.

Κατά κανόνα το ανακυκλιζόμενο φορτίο επιβάλλεται με έλεγχο της αντίστοιχης μετατόπισης σε κύκλους με συνεχώς αυξανόμενο εύρος. Αν το δοκίμιο είναι σε φυσική κλίμακα, συχνά οι δυνατότητες μετατόπισης των εμβόλων δεν επαρκούν για την εξάντληση της μέγιστης ικανότητας παραμόρφωσής του σε μονοτονική φόρτιση. Για τον ίδιο λόγο, χρειάζεται να επιβληθούν συνήθως πάρα πολλοί κύκλοι ανακυκλιζόμενης φόρτισης για να φθάσει το δοκίμιο σε μία φυσική κατάσταση που μπορεί να χαρακτηριστεί σαν αστοχία.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δίνονται συνήθως υπό τη μορφή διαγραμμάτων εγκάρσιας δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης,  $F-\delta$ , στο σημείο επιβολής της τελευταίας. Αν εμποδίζεται η στροφή της διατομής του δοκιμίου στη θέση μέγιστης ροπής,  $M$ , τότε το διάγραμμα αυτό, που αντικατοπτρίζει τη συνολική απόκριση του δοκιμίου από απόψεως δυνάμεων και μετακινήσεων, μπορεί να μετατραπεί σε διάγραμμα ροπής-γωνίας στροφής χορδής,  $\theta$ , της διατομής μέγιστης ροπής, με πολλαπλασιασμό της δύναμης  $F$  επί το μήκος διάτμησης  $a$ , και με διαίρεση του βέλους  $\delta$  δια  $a$ . Για δοκίμια τύπου προβόλου, το μήκος διάτμησης  $a$  ισούται με το μήκος  $l$  του δοκιμίου. Σε δοκίμια μορφής αμφιέριστης δοκού με φόρτιση στο μέσο, το  $a$  ισούται με το μισό του μήκους  $l$  και η ροπή  $M$  με  $Fa/2 = Fl/4$ .

Είναι προφανές ότι τα διαγράμματα  $F-\delta$  ή  $M-\theta$  αναφέρονται στο σύνολο του δοκιμίου. Μας ενδιαφέρει όμως βέβαια και η τοπική συμπεριφορά, όπως αυτή εκφράζεται από την ιδεατή σχέση ροπής-καμπυλότητας,  $M-\phi$ , της τυχούσας διατομής. Όμως πολλά από τα φαινόμενα που χαρακτηρίζουν την ανελαστική συμπεριφορά μελών οπλισμένου σκυροδέματος, όπως η ρηγμάτωση, ο λυγισμός των θλιβόμενων ράβδων, η αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης των οπλισμών, κ.α., έχουν διακριτή μορφή, γεγονός που

επιβάλλει τον ορισμό της καμπυλότητας  $\varphi$  υπό ομοιομορφοποιημένη, δηλ. μέση έννοια, σε κάποιο πεπερασμένο μήκος του μέλους, το οποίο περιλαμβάνει κατά αντιπροσωπευτικό τρόπο τα διακριτά φαινόμενα που μας ενδιαφέρουν. Αυτό σημαίνει ότι η καμπυλότητα  $\varphi$  πρέπει να ορισθεί και να υπολογισθεί σαν η σχετική γωνία στροφής  $\theta$  δύο γειτονικών διατομών, διαιρεμένη δια της απόστασης των διατομών αυτών. Η απόσταση των διατομών αυτών χρειάζεται να είναι περίπου ίση με τη μέση απόσταση διαδοχικών ρωγμών υπό συνθήκες σταθεροποιημένης ρηγμάτωσης.

Στο σημείο αυτό χρειάζεται να επισημανθεί η διαφορά μεταξύ: α) της σχετικής γωνίας στροφής  $\theta_{AB}$  δύο διατομών A και B, που ορίζεται σαν η γωνία που σχηματίζουν τα επίπεδά τους ή οι αντίστοιχες εφαπτομένες στον άξονα x στην παραμορφωμένη κατάσταση, και β) της γωνίας στροφής χορδής στα σημεία A και B,  $\theta_A$  και  $\theta_B$ . Οι τελευταίες είναι οι γωνίες μεταξύ της χορδής που ενώνει τα κέντρα των αντιστοίχων διατομών στην παραμορφωμένη κατάσταση, και των εφαπτομένων του άξονα στις θέσεις A και B αντίστοιχα. Η σχετική γωνία στροφής υπολογίζεται με απλή ολοκλήρωση των καμπυλοτήτων:

$$\theta_{AB} = \int_{x_A}^{x_B} \varphi(x) dx \quad (1)$$

ενώ οι γωνίες στροφής χορδής ισούνται με:

$$\theta_A = \int_{x_A}^{x_B} \varphi(x) \left( \frac{x_B - x}{x_B - x_A} \right) dx \quad (2)$$

$$\theta_B = \int_{x_A}^{x_B} \varphi(x) \left( \frac{x_A - x}{x_B - x_A} \right) dx \quad (3)$$

Επομένως:

$$\theta_{AB} = \theta_A - \theta_B \quad (4)$$

Η γωνία στροφής χορδής  $\theta_A$  (αντίστοιχα  $\theta_B$ ) για το τμήμα AB ισούται με το βέλος κάμψης στο B (αντίστοιχα A), μετρούμενο ως προς την εφαπτομένη στον άξονα στο A (αντίστοιχα B). Σ' ένα πείραμα σε δοκίμιο τύπου προβόλου, η εγκάρσια μετατόπιση (βέλος) στη θέση B εφαρμογής του φορτίου (όπου και  $M=0$ ), σε σχέση με την εφαπτομένη του άξονα στη διατομή A όπου η ροπή είναι μέγιστη, διαιρεμένη με το μήκος  $l$  του δοκιμίου (που ταυτίζεται με το μήκος διάτμησης  $a=M/V$ ), δίνεται σαν η μοναδική τιμή της γωνίας στροφής

χορδής, πολλές φορές εκφρασμένη σε % αντί σε rad. Πρόκειται για τη γωνία στροφής χορδής  $\theta_A$ , παρόλο που έχει προκύψει από την εγκάρσια μετακίνηση στο άκρο B.

Οι γωνίες στροφής χορδής  $\theta_A$  και  $\theta_B$  στα άκρα A και B ενός μέλους μας ενδιαφέρουν περισσότερο απ' ό,τι η αντίστοιχη σχετική γωνία στροφής  $\theta_{AB}$ , καθότι: α) Σε προσομοιώματα τύπου μέλους οι  $\theta_A$  και  $\theta_B$  ισούνται με τις επικόμβιες στροφές στα άκρα, μετά την αφαίρεση της μετακίνησης του μέλους σαν στερεό σώμα. Επομένως η σχέση ευκαμψίας ή δυσκαμψίας του μέλους εκφράζεται γι' αυτούς ακριβώς τους βαθμούς ελευθερίας. β) Η γωνιακή παραμόρφωση ενός ορθογωνικού φατνώματος ενός πλαισίου δοκών-υποστυλωμάτων, στο οποίο τόσον οι δοκοί όσο και τα υποστυλώματα είναι σε αντισυμμετρική κάμψη ( $\theta_A = \theta_B$ ) ισούται με το άθροισμα,  $\theta_b + \theta_c$ , των μέσων γωνιών στροφής χορδής στα άκρα των δοκών ( $\theta_b$ ) και των υποστυλωμάτων ( $\theta_c$ ) που περιβάλλουν το φάτνωμα (κανονικά πρέπει να αθροίζεται επιπλέον και η μέση γωνιακή (διατμητική) παραμόρφωση  $\gamma$  των τεσσάρων κόμβων που περιβάλλουν το φάτνωμα). Η γωνιακή αυτή παραμόρφωση χρησιμοποιείται από τους αντισεισμικούς κανονισμούς σαν κριτήριο για την αποφυγή βλαβών σε μή-φέροντα στοιχεία πλήρωσης των φατνωμάτων (τοίχοι πλήρωσης, υαλοστάσια, κ.α).

Παρόλο που στις πραγματικές κατασκευές μόνον οι δοκοί υπόκεινται σε μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη, στα περισσότερα σχετικά πειράματα η γεωμετρία και η όπλιση του δοκιμίου δεν είναι αντιπροσωπευτική των δοκών. Συγκεκριμένα, τα περισσότερα δοκίμια έχουν ορθογωνική διατομή και συμμετρικό οπλισμό. Τα πειράματα ανακυκλιζόμενης μονοαξονικής κάμψης σε δοκούς διατομής T και/ή με ασύμμετρο οπλισμό είναι σχετικά λίγα (π.χ. Ma et al, 1976, Ripa and Carvalho, 1993). Ακόμα όμως και αυτά τα πειράματα έχουν μία σημαντική διαφορά από την κατάσταση των δοκών σε πραγματικές κατασκευές: το άνοιγμα διάτμησης διατηρείται κατά τη δοκιμή σταθερό, ενώ στην πραγματικότητα μεταβάλλεται κατά την απόκριση. Λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας των κατακορύφων φορτίων, σε μία πραγματική δοκό το μήκος διάτμησης είναι ελάχιστο όταν το πάνω πέλμα είναι σε εφελκυσμό (η σεισμική ροπή και η τέμνουσα έχουν το ίδιο πρόσημο με τις λόγω κατακορύφων φορτίων) και μέγιστο όταν εφελκύεται το κάτω πέλμα (σεισμική ροπή και τέμνουσα αντίθετες προς τις λόγω κατακορύφων φορτίων). Στην πρώτη περίπτωση η επιρροή της τέμνουσας στη συμπεριφορά είναι μέγιστη και στη δεύτερη ελάχιστη. Προκύπτει έτσι μία πρόσθετη πηγή ασυμμετρίας στη συμπεριφορά.

#### 1.1.1.2. Μέλη με συμμετρική διατομή και όπλιση

Παρόλο που η συμμετρία στη γεωμετρία και την όπλιση της διατομής χαρακτηρίζουν



περισσότερο τα υποστυλώματα παρά τις δοκούς, πολλά από τα πειράματα σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη έγιναν σε τέτοιου είδους δοκίμια. Παραδείγματα αποτελούν τα πειράματα R5 και R6 των Ma et al (1976), τα No. 7 των Hanson and Conner (1972), τα No. 1 έως 4 των Bertero et al (1969), τα J3, J7 και J12 των Burns and Siess (1962), τα 00.033, 00.048, 00.067, 00.105 και 00.147 των Wight and Sozen (1973), τα 66H-32-RV5-60 και -RV10-60, 88H-32-RV5-60 και RV10-60, 86H-32-RV5-60 και 66H-32-RV5-30 του Gossain (1973), τα No. 1, 2, 4 έως 7 και 9 έως 12 των Celebi and Penzien (1973), τα SP3 και SP5 των Otani et al (1980), το U1 των Saatcioglu and Ozcebe (1989), τα 88-35RV5 και RV10, 66-35RV10, 88-32-RV5 και RV10 και 88-34-RV10 των Brown and Jirsa (1971) και τα No. 14 έως 16 των Ang et al (1989).

Ο Πίνακας 2 του Παραρτήματος δίνει τα βασικά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων της παρούσας περίπτωσης, ενώ το Σχ. 1.4 παρουσιάζει τυπικούς πειραματικούς βρόχους F-δ ή M-θ. Οι βρόχοι αυτοί εμφανίζουν τα κύρια χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς μελών με συμμετρική διατομή και όπλιση, υπό μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής:

- 1) Στον κλάδο πρώτης ή παρθένας φόρτισης, μετά την καμπτική ρηγμάτωση του μέλους στη διατομή της μέγιστης ροπής έχουμε σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας. Η μη-γραμμικότητα της συμπεριφοράς μετά τη ρηγμάτωση οφείλεται στη σταδιακή επέκταση της ρηγμάτωσης κατά μήκος του μέλους, στην έναρξη της μη-γραμμικότητας της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε θλίψη και στη συνακόλουθη μεταβολή του βάθους της θλιβόμενης ζώνης, επηρεάζεται δε και από την εφελκυστική συμβολή του σκυροδέματος και την ολίσθηση των οπλισμών μεταξύ των ρωγμών. Καθώς στις δοκούς ο οπλισμός είναι κατά κανόνα συγκεντρωμένος κοντά στα πέλατα, η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα προκαλεί απότομη μείωση της συνολικής δυσκαμψίας και είναι εμφανής στο συνολικό διάγραμμα F-δ ή M-θ. Μετά απ' αυτή τη διαρροή, η ροπή που μπορεί να αναλάβει το μέλος αυξάνεται, πρώτον επειδή με την αρχική άνοδο του ουδέτερου άξονα αυξάνεται ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων, και δεύτερον λόγω της έναρξης της κράτνσης του χάλυβα. Όταν η βράχυνση στις ακραίες θλιβόμενες ίνες ξεπεράσει το 0.2%, μπορεί να έχουμε αποφλοιώση της επικάλυψης των θλιβόμενων ράβδων, γεγονός που μειώνει την αντίσταση του μέλους σε περαιτέρω παραμόρφωση. Στη συνέχεια μπορεί να διαρρεύσει και ο θλιβόμενος χάλυβας, μειώνοντας περαιτέρω την εφαστομενική δυσκαμψία του μέλους (κλίση του διαγράμματος F-δ). Η αρνητική επιρροή όλων αυτών των φαινομένων στην αντίσταση του μέλους σε περαιτέρω παραμόρφωση, αντισταθμίζεται πλήρως από την αύξηση της

αντοχής και της δυσκαμψίας του περισφιγμένου πυρήνα σκυροδέματος, λόγω της τριαξονικής εντατικής κατάστασης που αναπτύσσεται στη θλιβόμενη ζώνη στο εσωτερικό του κλωβού συνδετήρων και διαμήκων ράβδων.

- 2) Η κλίση του κλάδου της τυχόν αποφόρτισης μετά τη διαρροή είναι αρχικά μεγάλη, παρόμοια με αυτήν του ελαστικού κλάδου πριν τη διαρροή. Ομως, καθώς ο κλάδος αποφόρτισης πλησιάζει τον άξονα των μηδενικών επιβεβλημένων δυνάμεων, η κλίση του μειώνεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση από την οποία αρχίζει η αποφόρτιση, τόσο η μέση δυσκαμψία του κλάδου αποφόρτισης, δηλ. η κλίση της χορδής από την έναρξη της αποφόρτισης μέχρι τον πλήρη μηδενισμό της επιβεβλημένης δύναμης μειώνεται. Η μείωση αυτή αποτελεί μέρος του φαινομένου της “μείωσης δυσκαμψίας” με το μέγεθος της μέγιστης παραμόρφωσης, που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη ένταση. Όταν μηδενισθεί η εξωτερική δύναμη, παραμένει στο μέλος σημαντική μόνιμη παραμόρφωση, η οποία οφείλεται στις πλαστικές παραμορφώσεις που παραμένουν μετά τη διαρροή του στον εφελκυσμένο χάλυβα, αλλά και στη μόνιμη ολίσθηση μεταξύ ράβδων και σκυροδέματος. Λόγω της μόνιμης αυτής ολίσθησης, οι ρωγμές παραμένουν ανοικτές και μετά το μηδενισμό του εξωτερικού φορτίου.
- 3) Ο κλάδος επαναφόρτισης (στην αντίθετη κατεύθυνση) που αρχίζει μετά την αλλαγή προσήμου της επιβεβλημένης δύναμης, έχει αρχικά μικρή κλίση, μικρότερη αυτής του τελευταίου τμήματος του κλάδου αποφόρτισης. Ο λόγος είναι ότι, με την αντιστροφή του προσήμου (φοράς) της εξωτερικής δύναμης, ανοίγουν ρωγμές στο απέναντι πέλμα του μέλους προτού αναιρεθούν πλήρως οι πλαστικές εφελκυστικές παραμορφώσεις των ράβδων του πέλματος που εισέρχεται τώρα σε θλίψη και η ολίσθησή τους σε σχέση με το περιβάλλον σκυρόδεμα. Έτσι για κάποιο διάστημα, οι ρωγμές που άνοιξαν στο πέλμα που ήταν σε εφελκυσμό κατά την αρχική φόρτιση, εξακολουθούν να είναι ανοικτές. Σαν αποτέλεσμα δεν αναπτύσσεται πουθενά στη διατομή θλίψη στο σκυρόδεμα και η λόγω εξωτερικής δύναμης ροπή αναλαμβάνεται αποκλειστικά από ζεύγος δυνάμεων στον εφελκυσμένο και στο θλιβόμενο χάλυβα. Είναι λοιπόν φυσικό η εφαπτομενική δυσκαμψία της συνολικής συμπεριφοράς  $F-\delta$  να εμφανίζεται μειωμένη.
- 4) Κατά την επαναφόρτιση προς την αντίθετη διεύθυνση οι υπάρχουσες ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη σταδιακά κλείνουν, αρχίζοντας με επαφή εξάρσεων στις απέναντι όχθες της ρωγμής, μέχρι την πλήρη επαφή τους και την πλήρη ενεργοποίηση του σκυροδέματος σε θλίψη. Συνήθως αυτό συμβαίνει αφού διαρρεύσει ο χάλυβας της θλιβόμενης ζώνης σε θλίψη. Το σταδιακό κλείσιμο των ρωγμών και η

επανενεργοποίηση του σκυροδέματος προκαλούν αύξηση της εφαπτομενικής δυσκαμψίας του διαγράμματος F-δ του μέλους. Επισημαίνεται ότι, καθώς η μείωση της εφαπτομενικής δυσκαμψίας στο τελικό στάδιο του κλάδου αποφόρτισης και στο αρχικό αυτού της επαναφόρτισης εμφανίζονται και κατά την αποφόρτιση-επαναφόρτιση από την αντίθετη διεύθυνση, όταν δηλ. ο συνολικός βρόχος υστέρησης πάει να κλείσει, ο βρόχος τελικά εμφανίζει μία χαρακτηριστική στένωση στο κέντρο του.

- 5) Μετά την αύξηση της δυσκαμψίας κατά την επαναφόρτιση που ολοκληρώνει τη στένωση του βρόχου στο κέντρο του, η κλίση του πρώτου κλάδου επαναφόρτισης αρχίζει και πάλι να μειώνεται, λόγω διαρροής του εφελκυσμένου χάλυβα. Παρ' όλο που η πρώτη έξοδος του μέλους από την ελαστική περιοχή στην τρέχουσα διεύθυνση της φόρτισης μπορεί να θεωρηθεί σαν πρώτη (παρθένα) φόρτιση στη διεύθυνση αυτή, η μείωση της δυσκαμψίας με τη διαρροή συμβαίνει λιγότερο απότομα απ' ότι στην αρχική διαρροή στην αντίθετη (πρώτη) κατεύθυνση της φόρτισης, γιατί οι ράβδοι που διαρρέουν τώρα σε εφελκυσμό είχαν διαρρεύσει προηγουμένως σε θλίψη και επομένως εμφανίζουν τώρα τη σταδιακή (αντί απότομη) καμπύλωση της σχέσης σ-ε στη διαρροή, η οποία είναι γνωστή σαν το “φαινόμενο Banschinger” στο χάλυβα. Για τον ίδιο λόγο και οι ράβδοι που είναι τώρα θλιβόμενες αλλά είχαν προηγουμένως διαρρεύσει σε εφελκυσμό, διαρρέουν σταδιακά, συμβάλλοντας έτσι στην πιο ομαλή μείωση της κλίσης κατά το τελευταίο στάδιο της επαναφόρτισης. Όταν πάντως ολοκληρωθεί η διαρροή εφελκυσμένων και θλιβόμενων ράβδων, η περαιτέρω συμπεριφορά υπό αυξανόμενες επιβεβλημένες δυνάμεις και μετακινήσεις είναι σαν πρώτη, παρθένα φόρτιση στην τρέχουσα κατεύθυνση, επηρεάζεται δε από την τυχόν αποφλοίωση των ακραίων ινών σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη και από την κράτυνση του χάλυβα στην εφελκυσμένη.

Η επαναφόρτιση σε επόμενους κύκλους μετά από αποφόρτιση μέχρι μεγαλύτερη τιμή της επιβεβλημένης μετακίνησης, ακολουθεί το ίδιο μοτίβο, αλλά με λιγότερο δύσκαμπτη συνολική συμπεριφορά, έτσι ώστε ο κλάδος της επαναφόρτισης να οδεύει προς το ακρότατο σημείο προγενέστερης αποφόρτισης στην τρέχουσα διεύθυνση φόρτισης. Έτσι η μέση δυσκαμψία της επαναφόρτισης μειώνεται, όσο αυξάνεται το μέγεθος της μέγιστης προγενέστερης επιβεβλημένης μετακίνησης. Η μείωση αυτή είναι εκδήλωση της “μείωσης δυσκαμψίας επαναφόρτισης” κατά την ανακύκλιση, με το σταδιακά αυξανόμενο εύρος επιβεβλημένων μετακινήσεων.

- 6) Καθώς οι κλάδοι της επαναφόρτισης οδεύουν προς το ακρότατο προγενέστερο σημείο πάνω στη μονοτονική καμπύλη στην τρέχουσα διεύθυνση της φόρτισης, και επιπλέον η

περαιτέρω φόρτιση μοιάζει σαν συνέχεια του αρχικού κλάδου της μονοτονικής φόρτισης που οδήγησε σ' αυτό το ακρότατο προγενέστερο σημείο της μονοτονικής καμπύλης, η τελευταία λειτουργεί σαν περιβάλλουσα και οδηγός των βρόχων υστέρησης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

- 7) Συχνά η ανακύκλιση προκαλεί κάποια μείωση της δύναμης που αντιστοιχεί σε ορισμένη μέγιστη μετακίνηση του κύκλου, σε σχέση με τη δύναμη που αντιστοιχεί στην ίδια αυτή τιμή της μετακίνησης κατά τη μονοτονική φόρτιση. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται “μείωση αντοχής” λόγω της ανακύκλισης και είναι εμφανέστερο μεταξύ δύο διαδοχικών κύκλων με το ίδιο εύρος μέγιστης μετακίνησης. Οι λόγοι της μείωσης είναι αρκετοί: Πρώτον, μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του εναλλασσόμενου ανοίγματος και κλεισίματος των ρωγμών, επειδή διατμητικές μικροολισθήσεις κατά μήκος της ρωγμής ή μικροαποκολλήσεις αδρανών κ.λ.π. τεμαχίων και συγκέντρωσή τους μέσα στη ρωγμή, εμποδίζουν τις δύο όχθες της ρωγμής από το να έλθουν κατά το κλείσιμο σε πλήρη και τέλεια επαφή. Δεύτερον, η σταδιακή αύξηση της ολίσθησης που συνοδεύει τη συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος, αυξάνει σταδιακά το πλάτος των ρωγμών και μειώνει την εφελκυστική συμβολή του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών. Τέλος, πέραν από τη σταδιακή υποβάθμιση των μηχανισμών μεταφοράς της τέμνουσας κατά μήκος των ρωγμών (αλληλοεμπλοκή αδρανών, δράση βλήτρου) με την ανακύκλιση, η μεταφορά τέμνουσας μέσω της δράσης βλήτρου των διαμήκων ράβδων που διαπερνούν τις ρωγμές που είναι ανοικτές καθ' όλο το ύψος της διατομής στο πρώτο στάδιο της επαναφόρτισης, μπορεί να προκαλέσει διάρρηξη του σκυροδέματος κατά μήκος των ράβδων που λειτουργούν σαν βλήτρα, γεγονός που επιτείνει την υποβάθμιση της συνάφειας κατά μήκος των ράβδων αυτών και μπορεί να προκαλέσει ή να επιταχύνει την αποφλοίωση του σκυροδέματος επικάλυψης των ράβδων.

Σημειώνεται ότι σε μέλη των οποίων η διαστασιολόγηση και οι λεπτομέρειες όπλισης και κατασκευαστικής διαμόρφωσης ακολουθούν τις επιταγές των συγχρόνων κανονισμών, η μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση είναι ελάχιστη. Επιπλέον, αν το μέλος υπόκειται σε περισσότερους από δύο διαδοχικούς κύκλους του ίδιου εύρους, τότε η “μείωση αντοχής” είναι εμφανής μεταξύ πρώτου και δεύτερου κύκλου, αλλά όχι μεταξύ του δεύτερου και των επόμενων. Έτσι, με την εξαίρεση των περιπτώσεων όπου σύντομα επέρχεται αστοχία λόγω του ανακυκλιζόμενου φορτίου (όπως στο Σχ. 4(a)), η επανειλημμένη ανακύκλιση οδηγεί σε πρακτικά σταθερούς βρόχους υστέρησης. Η “μείωση της αντοχής” με την ανακύκλιση περιορίζεται όσο αυξάνεται ο εγκάρσιος οπλισμός, καθώς αυτός βελτιώνει τη διατμητική συμπεριφορά και την συμπεριφορά της

συνάφειας υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, καθώς και τη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε θλίψη μέσω της περίσφιγξης. Αντίθετα η αύξηση του ποσοστού διαμήκους χάλυβα φαίνεται να αυξάνει τη “μείωση αντοχής”, καθώς με τον τρόπο αυτό γίνεται πιο καθοριστικό το σκυρόδεμα, το οποίο είναι πιο ευαίσθητο στην ανακύκλιση της έντασης.

- 8) Η αστοχία μελών υπό ανακυκλιζόμενη κάμψη είναι συνήθως σταδιακή, και οφείλεται στη βαθμιαία υποβάθμιση της θλιβόμενης ζώνης. Η υποβάθμιση αυτή αρχίζει με την αποφλοιώση του σκυροδέματος της επικάλυψης και μπορεί να συνεχισθεί με λυγισμό των ράβδων εξαιτίας της απώλειας της πλευρικής αντιστήριξής τους, και με αποσύνθεση του πυρήνα σκυροδέματος του μέλους, η οποία συχνά οφείλεται σε επέκταση των λοξών διατμητικών ρωγμών στη θλιβόμενη ζώνη. Σε μέλη με μεσαίες-προς-χαμηλές τιμές του λόγου διάτμησης, η σύνδεση των εγκαρσίων στον άξονα ρωγμών των δύο πελμάτων του μέλους σε μία διαμπερή ανοικτή ρωγμή, μπορεί να προκαλέσει διατμητική ολίσθηση κατά μήκος αυτής της διαμπερούς ρωγμής. Μέλη με μικρό ποσοστό διαμήκους χάλυβα μπορεί να αστοχήσουν απότομα λόγω θραύσης των εφελκυσμένων διαμήκων ράβδων. Η θραύση αυτή συνήθως συμβαίνει στο γόνατο που μπορεί να σχηματισθεί στη ράβδο κατά τον τυχόν λυγισμό της στον προηγούμενο ημικόκλο της φόρτισης. Η μείωση της φέρουσας ικανότητας του μέλους λόγω θραύσης μιας ράβδου εκδηλώνεται με μία απότομη πτώση της δύναμης  $F$  στο διάγραμμα  $F-\delta$  του μέλους. Η πτώση αυτή μπορεί να θεωρηθεί σαν αστοχία. Αν δεν υπάρχει τέτοια απότομη πτώση, το μέλος μπορεί να θεωρηθεί ότι αστόχησε αν από κάποιο σημείο και πέρα αλλάξει σαφώς η μορφή της συμπεριφοράς στο διάγραμμα  $F-\delta$ , σε σύγκριση με την μέχρι τότε. Επί παραδείγματι, σε ανακύκλιση σταθερού εύρους, μπορεί η πτώση της τιμής της μέγιστης δύναμης (“μείωση αντοχής”) από έναν κύκλο στον επόμενο να είναι ασυνήθιστα μεγάλη σε σύγκριση με αυτήν μεταξύ οποιωνδήποτε προγενέστερων κύκλων. Αν η ανακύκλιση δεν γίνεται με σταθερό εύρος μετακινήσεων αλλά με συνεχώς αυξανόμενο, ένδειξη αστοχίας είναι η μείωση της μέσης κλίσης του βρόχου υστέρησης ως προς τον οριζόντιο άξονα και η μείωση του πλάτους και της επιφάνειας που περικλείει, σε σχέση με το τι συνέβαινε σε προηγούμενους κύκλους μικρότερου εύρους μετακινήσεων. Όλες αυτές οι μεταβολές στον τρόπο συμπεριφοράς συνεπάγονται μείωση της ενεργού αντοχής, δυσκαμψίας και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, και άρα μπορούν να θεωρηθούν σαν αστοχία.
- 9) Ασχέτως του αν πράγματι συμβαίνει ή όχι μία τέτοια σταδιακή ή απότομη μείωση της αντοχής, δυσκαμψίας ή ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, είναι χρήσιμος και ένας εντελώς συμβατικός ορισμός της αστοχίας. Ένας τέτοιος ορισμός, που καλύπτει την

περίπτωση απότομης ή σταδιακής υποβάθμισης της συμπεριφοράς, αλλά δεν περιορίζεται σ' αυτήν, είναι αυτός που προτάθηκε και εφαρμόστηκε από τους French and Schultz (1991) και Saatcioglu (1991). Κατά τον ορισμό αυτό, σαν αστοχία χαρακτηρίζεται η (σταδιακή ή απότομη) μείωση της μέγιστης δύναμης ενός κύκλου επιβεβλημένων μετακινήσεων, σε επίπεδα κατά 20% μικρότερα απ' αυτό της μέγιστης δύναμης που σημειώθηκε προηγουμένως. Επισημαίνεται ότι για μονοτονική φόρτιση ο ανωτέρω ποιοτικός ορισμός της αστοχίας σαν μεταβολή στο μέχρι τότε τρόπο συμπεριφοράς, δίνει σαν αστοχία την έναρξη της πτώσης του διαγράμματος F-δ μετά την οριακή αντοχή. Αντίθετα ο συμβατικός ορισμός δίνει σαν αστοχία το σημείο του φθίνοντος κλάδου μετά την οριακή αντοχή, όπου η δύναμη έχει μειωθεί στο 80% της τελευταίας.

Λόγω περιορισμών στη διαδρομή του εμβόλου επιβολής του φορτίου, συχνά οι δοκιμές διακόπτονται προτού το δοκίμιο φθάσει σε αστοχία. Στις δοκιμές του Πιν. 1, σημειώνονται τα πειράματα που έφθασαν σε αστοχία (π.χ. αυτά τα πειράματα R5 και R6 των Ma et al (1972), το No. 7 των Hanson and Conner (1972), τα SP3 και SP5 του Otani (1980), κ.λ.π.) σε διάκριση από τα υπόλοιπα.

- 10) Λόγω της ανάπτυξης και της συσσώρευσης μονίμων εφελκυστικών παραμορφώσεων στις διαμήκειες ράβδους και των δύο πελμάτων του μέλους, προκαλείται μία σταδιακή αύξηση του μήκους του. Αυτή η συνολική μήκυνση μπορεί να ιδωθεί και από την εξής σκοπιά: Η μήκυνση  $\varepsilon_0$  στη στάθμη του άξονα του μέλους, συνδέεται με την καμπυλότητα  $\varphi$  ως εξής:

$$\varepsilon_0 = |\varphi| (0.5 - \xi)h \quad (5)$$

Για μηδενικό αξονικό φορτίο, η ανηγμένη στο  $h$  τιμή του βάθους της θλιβόμενης ζώνης,  $\xi$ , είναι μικρότερη από 0.5, και μπορεί να γίνει ακόμα και αρνητική όταν οι ρωγμές είναι διαμπερείς και ανοικτές. Επομένως σε κάθε κύκλο μετακίνησης η ανάπτυξη της καμπυλότητας συνοδεύεται από αξονική μήκυνση, ανεξάρτητα από το πρόσημο της καμπυλότητας. Με εξαίρεση το διάστημα της απόκρισης κατά το οποίο οι καμπτικές ρωγμές είναι διαμπερείς και η ροπή αναλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το ζεύγος των δυνάμεων του χάλυβα, η τιμή του  $\xi$  είναι περίπου σταθερή στο μήκος  $l$  και η συνολική μήκυνση του τελευταίου ισούται με:

$$\delta_x = \int_l \varepsilon_0 dx = (0.5 - \xi)h \int_l |\varphi| dx = (0.5 - \xi) |\mathcal{G}| h \quad (6)$$

όπου  $\theta$  είναι η σχετική γωνία στροφής των δύο διατομών στα άκρα του μήκους διάτμησης  $l$ . Η εξ. (6) ισχύει κοντά στις κορυφές της ιστορίας των επιβεβλημένων μετακινήσεων και δείχνει ότι η μέγιστη αξονική μήκυνση συμβαίνει όταν η σχετική γωνία στροφής είναι μέγιστη και μάλιστα είναι ανάλογη προς αυτήν.

Κατά το ενδιάμεσο τμήμα του κύκλου, που οι μετακινήσεις είναι μικρές και οι ρωγμές διαμπερώς ανοικτές, οπότε η τιμή του  $\xi$  είναι αρνητική, η αξονική μήκυνση προκύπτει από τις ανελαστικές μηκύνσεις που παραμένουν στις ράβδους των πελμάτων, και μπορεί να έχει σημαντικό μέγεθος ακόμα και όταν η σχετική γωνία στροφής των άκρων είναι μικρή. Αυτή η “μόνιμη” συνιστώσα της αξονικής μήκυνσης του μέλους αυξάνεται σταδιακά και μονοτονικά με την ανακύκλιση της εγκάρσιας μετακίνησης.

Η ανάπτυξη μιας καθαρής αξονικής μήκυνσης λόγω ανακυκλιζόμενης κάμψης χωρίς αξονική δύναμη σημαίνει ότι σε μία δοκό υφίσταται σύζευξη της καμπτικής και της μέσης αξονικής συμπεριφοράς. Σ' ένα πραγματικό πλαίσιο το πρακτικό αποτέλεσμα της σύζευξης θα είναι το εξής: Τα υποστυλώματα με τα οποία συνδέεται η δοκός θα τείνουν να περιορίσουν την αξονική της μήκυνση, με την ανάπτυξη τεμνουσών δυνάμεων που μεταφράζονται σε αξονική θλίψη στη δοκό. Αυτή η θλιπτική δύναμη όχι μόνο θα περιορίσει την αξονική μήκυνση της δοκού, αλλά θα επηρεάσει και την καμπτική της συμπεριφορά, αυξάνοντας τη δυσκαμψία και την αντοχή της. Είναι προφανές ότι για να ληφθούν υπόψη αυτές οι δευτερογενείς επιρροές, το προσομοίωμα της δοκού δεν αρκεί να περιλαμβάνει τη μονοαξονική κάμψη της αλλά χρειάζεται να καλύπτει και την αξονική συμπεριφορά της, μαζί με τη σύζευξή της με την καμπτική.

- 11) Εκτός αν υφίσταται πλήρης συμμετρία δοκιμίου και φόρτισης ως προς τη διατομή της μέγιστης ροπής, ή εκτός αν οι διαμήκεις οπλισμοί αγκυρώνονται με συγκόλληση σε ακλόνητη βάση ακριβώς πίσω από τη διατομή της μέγιστης ροπής, η ολίσθηση των οπλισμών από τη ζώνη αγκύρωσής τους μέσα στην εκ σκυροδέματος βάση του δοκιμίου ή μέσα στον κόμβο όπου αυτό καταλήγει, συνεισφέρει στις εγκάρσιες μετακινήσεις όλου του δοκιμίου κατά μία στροφή στερεού σώματος  $\theta_{slip}$ . Αυτή η γωνία στροφής, περιλαμβάνεται στις μετρήσεις των μετακινήσεων του δοκιμίου ως προς τη βάση του ή ως προς τον κόμβο με τον οποίο συνδέεται, δεν επηρεάζει όμως τις μετρήσεις της σχετικής γωνίας στροφής δύο οποιωνδήποτε διατομών του. Αν η ολίσθηση του εφελκόμενου οπλισμού από τη ζώνη αγκύρωσής της πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής συμβολίζεται με  $s$ , αυτή η στροφή στερεού σώματος ισούται με:

$$\theta_{\text{slip}} \approx \frac{s}{(1-\xi)d} \quad (7)$$

όπου στην περίπτωση αυτή το βάθος της θλιβόμενης ζώνης είναι ανηγμένο στο στατικό ύψος  $d$ . Η τιμή τους ισούται με το άθροισμα: α) της ολίσθησης της ράβδου ως προς το περιβάλλον σκυρόδεμα, στο άκρο ευθύγραμμης επέκτασής της μέσα στη ζώνη αγκύρωσης (για ευθύγραμμη αγκύρωση, η τιμή αυτή είναι μηδέν, εκτός αν έχομε αστοχία της συνάφειας και της αγκύρωσης – για καμπύλη αγκύρωση με άγκιστρο, η ολίσθηση αυτή ισούται με την τοπική παραμόρφωση του σκυροδέματος υπό τις τάσεις άντυνας στο άγκιστρο) και β) τη μήκυνση του εγκιβωτισμένου τμήματος της ράβδου, μεταξύ του άκρου της και της ακραίας διατομής του μέλους (όπου και η μέγιστη ροπή). Η μήκυνση αυτή αυξάνεται σημαντικά, μετά τη διείδυση της διαρροής της ράβδου πέραν από την ακραία διατομή του μέλους μέσα στη ζώνη αγκύρωσης. Επειδή στο μήκος διείδυσης της διαρροής στη ζώνη αγκύρωσης δεν μπορούν να αναπτυχθούν τάσεις συνάφειας με το περιβάλλον σκυρόδεμα, η συμβολή του μήκους αυτού στην ολίσθηση ισούται με το μήκος του επί τη μέση ανηγμένη μήκυνση της ράβδου στο μήκος αυτό, που είναι τουλάχιστον ίση με την ανηγμένη μήκυνση του χάλυβα στη διαρροή,  $f_y/E_s$ .

Καθώς η τιμή της ροπής  $M$  στη διατομή της μέγιστης ροπής ισούται με το μοχλοβραχίονα εσωτερικών δυνάμεων επί τη δύναμη του εφελκυόμενου χάλυβα, και καθώς η τελευταία ισούται με τη συνισταμένη των τάσεων συνάφειας στο μήκος αγκύρωσης, η σχέση  $M-\theta_{\text{slip}}$  αντικατοπτρίζει την επιρροή της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης, με την έντονη στένωση των βρόχων υστέρησης. Αυτή η χαρακτηριστική μορφή των βρόχων επηρεάζει το σχήμα των βρόχων  $M-\theta$  που μετρώνται στο πείραμα, στο βαθμό που η στροφή στερεού σώματος  $\theta_{\text{slip}}$  συνεισφέρει στη συνολική γωνία στροφής  $\theta$  που μετράται. Συχνά το μέγεθος της  $\theta_{\text{slip}}$  μπορεί να φθάνει ή και να ξεπερνάει αυτό της καθαρά καμπτικής προέλευσης γωνίας στροφής χορδής, που ισούται με  $\phi/3$ , γεγονός που αυξάνει σημαντικά την φαινόμενη ευκαμψία της δοκού και τη στένωση των βρόχων  $M-\theta$ .

#### 1.1.1.3. Μέλη με ασύμμετρη διατομή και/ή όπλιση

Οι δοκοί έχουν κατά κανόνα ασύμμετρη διατομή και όπλισμό: στα άκρα τους ο πάνω όπλισμός είναι κατά κανόνα περισσότερος από τον κάτω, και επιπλέον η μονολιθική σύνδεση με την πλάκα δημιουργεί διατομή μορφής  $T$  ή  $\Gamma$ , με (συνεργαζόμενο) πλάτος



πέλματος διαφορετικό σε θλίψη ή σε εφελκυσμό. Μάλιστα το συνεργαζόμενο πλάτος μεταβάλλεται κατά την απόκριση και συγκεκριμένα αυξάνεται όταν αυξάνεται η ροπή στην ακραία διατομή και η επιβεβλημένη παραμόρφωση, ιδίως μετά τη διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού που βρίσκεται μέσα στον κορμό. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί προφανώς να αναπαραχθεί σε πείραμα επί μεμονωμένων δοκιμίων. Υπάρχουν βεβαίως πειράματα σε δοκίμια με διατομή T (π.χ. τα T1 έως T3 των Ma et al, 1976, και αυτά των Pira and Carvalho, 1993, βλ. Πίνακα 3 στο Παράρτημα), αλλά είναι σχετικά λίγα σε σύγκριση με αυτά επί δοκιμίων με ορθογωνική διατομή αλλά διαφορετικό οπλισμό στα δύο πέλματα (π.χ. τα πειράματα R-1, R-2, R-3 και R-4 των Ma et al, 1976, τα S3 έως S12 των Scribner and Wight, 1978, τα VBC3 των Viwathanatepa et al, 1979, τα F2 και F4 των Nmai and Darwin, 1986, τα S3-1 έως S3-4 και S2-3 των Hwang and Scribner, 1984).

Η βασική διαφορά στη συμπεριφορά σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη μεταξύ δοκών με συμμετρική διατομή και οπλισμό και αυτών με ασυμμετρία μεταξύ των δύο πελμάτων, είναι ότι οι βρόχοι υστέρησης δεν είναι συμμετρικοί. Η διαφορά δεν περιορίζεται στη μικρότερη δυσκαμψία και αντοχή της μονοτονικής καμπύλης προς την “αδύνατη” πλευρά. Επιπλέον, στη διάρκεια της επαναφόρτισης προς την κατεύθυνση της “αδύνατης” πλευράς, και ειδικότερα όταν οι ρωγμές στο θλιβόμενο πέγμα είναι ακόμα ανοικτές, η διαρροή του (λιγότερου) εφελκυσμένου οπλισμού δεν επαρκεί για να προκαλέσει διαρροή και του θλιβόμενου και επομένως για να κλείσει τις ρωγμές αυτές. Σαν αποτέλεσμα, αν έχει προηγηθεί διαρροή της “ισχυρής” πλευράς της διατομής (δηλ. αυτής με τον περισσότερο οπλισμό), κατά την (επανα)φόρτιση προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλ. προς την “αδύνατη” πλευρά, οι ρωγμές παραμένουν ανοικτές καθ’ όλο το ύψος της διατομής και έτσι ο κλάδος (επανα)φόρτισης δεν χαρακτηρίζεται από αύξηση της δυσκαμψίας μετά από στένωση του βρόχου. Στένωση του βρόχου παρατηρείται μόνον κατά την επαναφόρτιση προς την “ισχυρή” πλευρά και μάλιστα είναι πολύ έντονη, καθώς η στένωση αφορά τη μετάβαση από ένα στάδιο πολύ χαμηλής δυσκαμψίας (αυτό όπου οι οπλισμοί της “αδύνατης” πλευράς εξαναγκάζονται να διαρρεύσουν σε θλίψη με τις ρωγμές ανοικτές καθ’ όλο το ύψος) προς έναν επόμενο υψηλής δυσκαμψίας (κατά το οποίο οι ρωγμές έχουν κλείσει στη θλιβόμενη ζώνη αλλά ο εφελκυσμένος οπλισμός είναι ακόμη ελαστικός).

Οι δύο πλευρές της ασύμμετρης διατομής αστοχούν συνήθως και με διαφορετικό τρόπο: Η αστοχία προς την “ισχυρή” πλευρά είναι κατά κανόνα βαθμιαία και οφείλεται σε σταδιακή αποσύνθεση της θλιβόμενης ζώνης στο πέγμα με τον λιγότερο οπλισμό (Σχ. 1.5(a)). Αντίθετα η αστοχία προς την “αδύνατη” πλευρά είναι απότομη, με θραύση των ράβδων σε εφελκυσμό, αφού έχει προηγηθεί λυγισμός τους στον προηγούμενο ημικύκλο της φόρτισης (Σχ. 1.5(b)).

Αυτής της δεύτερης αστοχίας προηγείται συνήθως μία σημαντική μείωση της δύναμης κατά τον ημικύκλο κατά τον οποίο το πέγμα με τον περισσότερο οπλισμό εφελκύεται. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αστοχία του σκυροδέματος και τον λυγισμό των ράβδων της θλιβόμενης ζώνης και μπορεί να χαρακτηριστεί, κατά το συμβατικό ή κατά τον ποιοτικό τρόπο που αναφέρθηκαν στην Υποενότητα 1.2.1.2, σημείο (8), σαν αστοχία του μέλους. Συμπερασματικά λοιπόν δοκοί με ασύμμετρο ποσοστό οπλισμού, που υποβάλλονται σε συμμετρικούς κύκλους παραμόρφωσης, κατά κανόνα αστοχούν όταν το πέγμα με το υψηλότερο ποσοστό χάλυβα είναι σε εφελκυσμό.

### 1.1.2. Ανακυκλιζόμενη κάμψη με αξονική δύναμη (η περίπτωση των υποστυλωμάτων)

#### 1.1.2.1.1. Μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη

#### 1.2.2.1.1. Εισαγωγή

Από τις αρχές της δεκαετίας του '70 μέχρι σήμερα, έχει δημοσιευθεί μεγάλος όγκος πειραματικών αποτελεσμάτων για την ανελαστική συμπεριφορά πρισματικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος σε ανακυκλιζόμενη κάμψη με αξονική δύναμη. Στα πειράματα αυτά τα δοκίμια ήταν κατά κανόνα αντιπροσωπευτικά υποστυλωμάτων που σχεδιάζονται σύμφωνα με τις διατάξεις των σύγχρονων Κανονισμών για αντισεισμικές κατασκευές. Αυτό σημαίνει ότι ο διαμήκης οπλισμός τους κατανέμεται συμμετρικά και ομοιόμορφα στην περίμετρο της διατομής, το ποσοστό διαμήκους χάλυβα δεν είναι ούτε πολύ χαμηλό ούτε πολύ υψηλό, οι συνδετήρες είναι πυκνοί και κλειστοί, ο χάλυβας είναι αρκετά όλκιμος και συνήθως έχει σαφές πλατώ διαρροής, και η τιμή της ανηγμένης αξονικής δύναμης,  $v=N/A_c f_c$ , είναι σχετικά χαμηλή. Βεβαίως η χαμηλή τιμή του  $v$  συχνά οφείλεται στις περιορισμένες δυνατότητες του εμβόλου επιβολής του αξονικού φορτίου. Φαίνεται, αντιθέτως, να υπάρχει έλλειψη πειραματικών αποτελεσμάτων για υποστυλώματα που δεν ικανοποιούν πλήρως τις απαιτήσεις των σύγχρονων κανονισμών (που έχουν, π.χ., ακραία ποσοστά οπλισμού, ή υψηλές τιμές ανηγμένης αξονικής δύναμης  $v$ , ή ανεπαρκείς συνδετήρες), ή έχουν μη-ορθογωνική διατομή (υπάρχουν κάποια πειραματικά αποτελέσματα για διατομές αντιπροσωπευτικές βάρων γεφυρών, όπως κυκλικές ή κοίλες ορθογωνικές, δεν υπάρχουν όμως για διατομές Γ, ή Τ). Επίσης, τα διατιθέμενα αποτελέσματα για υποστυλώματα οπλισμένα με τους νέους τύπου χάλυβα που έχουν επικρατήσει σήμερα στην Ευρώπη (του ψαθυρότερους χάλυβες τύπου Temprocore), είναι δυσανάλογα λίγα.

Τα πειράματα ανακυκλιζόμενης κάμψης με αξονική δύναμη μπορεί να διακριθούν σε πειράματα μονοαξονικής κάμψης με σταθερή αξονική δύναμη, σε μονοαξονικής κάμψης με ταυτόχρονη μεταβολή του αξονικού φορτίου, και σε πειράματα διαξονικής κάμψης, πάλι με σταθερή ή με μεταβαλλόμενη αξονική δύναμη. Η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται μ' αυτή τη σειρά, που είναι και σειρά αυξανόμενης περιπλοκότητας του πειράματος και των αποτελεσμάτων του, αλλά και αυξανόμενης αντιπροσωπευτικότητας της πραγματικής συμπεριφοράς των υποστυλωμάτων σ' ένα σεισμό. Ως προς το τελευταίο, χρειάζεται να επισημανθεί ότι η διαξονικότητα της κάμψης και η μεταβολή του αξονικού φορτίου, όχι μόνον υπάρχουν πάντα κατά την απόκριση, αλλά και συχνά είναι αυτά που προκαλούν την ανελαστικότητα των υποστυλωμάτων. Ο λόγος είναι ότι στο σύγχρονο αντισεισμικό σχεδιασμό τα υποστυλώματα διαστασιολογούνται με βάση τον Ικανοτικό Σχεδιασμό σε μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη, ώστε για το εύρος διακύμανσης της αξονικής δύναμης που μπορεί να προκαλέσει ο σεισμός σχεδιασμού κατά την ελαστική ανάλυση, να παραμένουν ελαστικά όταν διαρρέουν οι δοκοί με τις οποίες συνδέονται, χωριστά σε κάθε διεύθυνση της πλαισιακής δράσης (δηλ. σε κάθε κατακόρυφο επίπεδο). Έτσι η ανελαστικότητα στα υποστυλώματα συχνά οφείλεται σε μεγάλες διαξονικές ροπές, που εισάγονται σ' αυτά από ταυτόχρονη διαρροή των δοκών με τις οποίες συνδέονται σε δύο κάθετες μεταξύ τους οριζόντιες διευθύνσεις, μαζί με τη διακύμανση του αξονικού φορτίου πέραν από τα όρια που θεωρηθήκαν κατά το σχεδιασμό.

#### 1.2.2.1.2. Μονοαξονική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη

Τα περισσότερα πειράματα σε υποστυλώματα έχουν γίνει υπό μονοαξονική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη. Οι συνήθεις τύποι δοκιμών και πειραματικές διατάξεις είναι αυτές που αναφέρθηκαν στην Υποενότητα 1.2.1.1: δοκίμια σε κάμψη τριών σημείων (Atalay and Penzien, 1975, Priestley and Park, 1987), πρόβολοι πακτωμένοι σε ογκώδη βάση σκυροδέματος (Otani and Cheung, 1981, Li et al, 1987, Saatcioglou and Ozcebe, 1989, Bousias et al, 1992), συμπλέγματα (ισχυρών) δοκών και (αδυνάτων) υποστυλωμάτων (Rabbat et al, 1982, Park et al, 1982, Zagajeski et al, 1978) κ.α. Στις Ιαπωνικές έρευνες τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι αμφίπακτα, σε κορυφή και βάση (Shiryo et al, 1978, Kobayashi et al, 1984, Takiguchi et al, 1980, κ.τ.λ.).

Ο Πίνακας 4 στο Παράρτημα παρουσιάζει γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά δοκιμών και ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα υποστυλωμάτων σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη με ορθή δύναμη. Χαρακτηριστικοί βρόχοι υστέρησης παρουσιάζονται

στο Σχ. 1.6. Από τέτοιου είδους αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα, σχετικά με την επιρροή του αξονικού φορτίου στη συμπεριφορά:

- 1) Η αξονική θλίψη βοηθάει στο κλείσιμο των ρωγμών κατά το τελικό στάδιο της αποφόρτισης και το αρχικό της επαναφόρτισης στην αντίθετη κατεύθυνση, πιθανόν με το να επιταχύνει τη διαρροή των θλιβόμενων ράβδων και την αναίρεση της πλαστικής μήκυνσης που είχαν αναπτύξει στον προηγούμενο ημικόκλο της φόρτισης. Έτσι δεν υπάρχει κάποιο διάστημα στο οποίο οι ρωγμές είναι διαμπερώς ανοικτές και χρειάζεται να αναληφθεί η ροπή από το ζεύγος των οπλισμών. Σαν αποτέλεσμα οι βρόχοι υστέρησης δεν εμφανίζουν τη στένωση περί το μέσο, που χαρακτηρίζει τις δοκούς με συμμετρικό οπλισμό.
- 2) Όσο αυξάνεται η ανηγμένη αξονική θλίψη και πλησιάζει την τιμή που αντιστοιχεί σε ισοζυγισμένη διατομή (στο γόνατο του διαγράμματος M-N, όπου η ροπή αντοχής είναι μέγιστη), αυξάνεται και η “μείωση αντοχής” με την ανακύκλιση. Όμως αυτή η δυσμενής επιρροή της αξονικής θλίψης μπορεί να εξουδετερωθεί όταν υπάρχει ισχυρός εγκάρσιος οπλισμός, που όχι μόνον περισφίγγει καλά το σκυρόδεμα, αλλά και συγκρατεί τις ράβδους έναντι λυγισμού, ακόμη και μετά την αποφλοιώση του σκυροδέματος της επικάλυψής τους (βλ. Σχ. 1.6 (g) για ένα παράδειγμα).
- 3) Η τιμή του ανηγμένου βάθους της θλιβόμενης ζώνης,  $\xi$ , αυξάνεται καθώς η ανηγμένη αξονική θλίψη  $\nu$  αυξάνεται, πλησιάζοντας και ξεπερνώντας το 0.5 όταν η τιμή του  $\nu$  πλησιάζει αυτήν που αντιστοιχεί σε ισοζυγισμένη διατομή. Αυτό σημαίνει ότι η μήκυνση του μέλους που συνοδεύει την κάμψη του κατά την εξ. (6), μειώνεται όσο το  $\nu$  αυξάνεται, και μπορεί να μετατραπεί σε βράχυνση όταν το  $\nu$  πλησιάσει αυτό της ισοζυγισμένης διατομής. Όσον αφορά τη βαθμιαία και παραμένουσα μεταβολή του μήκους λόγω των κύκλων της κάμψης, τα αποτελέσματα των Bousias et al (1995) έδειξαν ότι για τιμές του  $\nu$  μικρότερες από 0.1, η σταδιακή και μόνιμη (δηλ. που παραμένει και μετά το μηδενισμό της εγκάρσιας μετακίνησης) αύξηση του μήκους λόγω της συγκέντρωσης πλαστικών μηκύνσεων στους οπλισμούς και των δύο πελμάτων και λόγω της σταδιακής ολίσθησής τους ως προς το σκυρόδεμα, μπορεί να ξεπεράσει την αρχική βράχυνση του υποστρώματος που προκαλεί η στατική επιβολή του αξονικού φορτίου. Αντίθετα, για τιμές του  $\nu$  πάνω από 0.1 (π.χ. 0.15, βλ. Σχ. 1.6(k)), αντί βαθμιαία ανάπτυξη μιας μόνιμης μήκυνσης, έχουμε βαθμιαία αλλά παραμένουσα βράχυνση. Ο λόγος της βαθμιαίας βράχυνσης φαίνεται να είναι η αποφλοιώση του απερίσφικτου σκυροδέματος και η βαθμιαία συσσώρευση ανελαστικών βραχύνσεων στις ράβδους, αντί μηκύνσεων.

### 1.2.2.1.3. Μονοαξονική κάμψη με μεταβλητή αξονική δύναμη

Οι ροπές ανατροπής που προκαλούνται σε επίπεδα πλαίσια από το σεισμό, προξενούν αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα, εφελκυστικές σ' ένα ημικύκλο της απόκρισης στη μία πλευρά του πλαισίου, θλιπτικές στην απέναντι. Οι αξονικές δυνάμεις είναι μέγιστες στα ακραία υποστυλώματα του πλαισίου και στον κατώτατο όροφο. Η ανάπτυξη στο πλαίσιο ενός πλαστικού μηχανισμού δοκών θέτει ένα πάνω όριο στη μεταβολή της αξονικής δύναμης των υποστυλωμάτων λόγω του σεισμού, καθώς η μέγιστη αξονική δύναμη που μπορεί να εισαχθεί σ' ένα ακραίο υποστυλώμα, π.χ., δεν μπορεί να ξεπεράσει το άθροισμα των μέγιστων τεμνουσών που είναι δυνατόν να αναπτυχθούν στις δοκούς που συνδέονται μ' αυτό από την υπόψη στάθμη και πάνω.

Ανάλογα βέβαια και με το σχετικό μέγεθος των λόγω κατακορύφων φορτίων και των λόγω σεισμού αξονικών δυνάμεων στα υποστυλώματα, η μεταβολή του αξονικού φορτίου κατά την απόκριση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ανελαστική καμπτική συμπεριφορά των υποστυλωμάτων. Για το λόγο αυτό έχουν εκτελεσθεί πειράματα στα οποία, ταυτόχρονα με την ανακύκλιση της εγκάρσιας φόρτισης, μεταβάλλονταν και το αξονικό φορτίο. Επειδή όμως τέτοια πειράματα είναι δυσχερή, ο αριθμός τους είναι πολύ μικρός, σε σχέση βέβαια με τη σοβαρότητα του προβλήματος (βλ. Πίνακα 5 στο Παράρτημα). Τέτοια πειράματα έχουν γίνει από τους Gibbertsen and Moehle (1980), Ristic et al (1986, 1988), Abrams (1987), Kreger and Linbeck (1984) και Li et al (1987). Η μεταβολή του αξονικού φορτίου ήταν ανάλογη της εγκάρσιας επιβεβλημένης μετακίνησης στα πειράματα του Abrams (1987), ή στο εγκάρσιο φορτίο και άρα στη ροπή κάμψης σ' αυτά των Kreger and Linbeck (1984), Li et al (1987), Abrams (1987) και Ristic et al (1986, 1988).

Ως γνωστόν (βλ. τυπικά διαγράμματα αλληλεπίδρασης M-N), οι ροπές διαρροής και αστοχίας σε μονοτονική φόρτιση, και μαζί μ' αυτές και οι τεταγμένες της περιβάλλουσας καμπύλης των κορυφών των βρόχων υστέρησης σε ανακυκλιζόμενη, αυξάνονται όσο αυξάνεται η αξονική θλίψη (με την προϋπόθεση ότι αυτή δεν ξεπερνά την τιμή που αντιστοιχεί στην ισοζυγισμένη διατομή). Μαζί αυξάνεται και η δυσκαμψία σε πρώτη φόρτιση, αποφόρτιση και επαναφόρτιση, καθότι η αύξηση του αξονικού φορτίου αυξάνει το μέγεθος της θλιβόμενης ζώνης και τη συμβολή του σκυροδέματος στη δυσκαμψία. Αν η αξονική δύναμη μεταβάλλεται γύρω από τη μέση τιμή του (αυτήν που αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία) κατ' αναλογίαν προς τη ροπή κάμψης, τότε η επιρροή της αξονικής δύναμης στη δυσκαμψία εμφανίζεται σταδιακά, επιταχύνοντας τη μείωση της δυσκαμψίας με την αύξηση της ροπής στη φόρτιση ή την επαναφόρτιση, αν η αξονική δύναμη μειώνεται με

την αύξηση της ροπής, ή επιβραδύνοντάς την (μέχρι και αντιστροφής της και μετατροπής της σε αύξηση της δυσκαμψίας με την αύξηση της ροπής) αν η αξονική δύναμη αυξάνεται (Σχ. 1.7(a) και (b)). Υπάρχουν περιπτώσεις που, λόγω της αύξησης της αξονικής θλίψης μαζί με την εγκάρσια δύναμη, η αύξηση της δυσκαμψίας είναι τέτοια, που αντί να αυξάνονται οι εγκάρσιες μετακινήσεις με την αύξηση του εγκάρσιου φορτίου, να μειώνονται (Kreger and Linbeck, 1987, βλ. Σχ. 1.7 (c)).

Αν η αξονική δύναμη αυξάνεται ανάλογα της ροπής και όχι ανάλογα της εγκάρσιας μετακίνησης, τότε παραμένει πρακτικά σταθερή μετά τη διαρροή σε πρώτη φόρτιση ή σ' επαναφόρτιση. Στην περίπτωση αυτή, επειδή στις δύο διευθύνσεις (πρόσημα) της κάμψης αντιστοιχεί διαφορετική τελική τιμή της αξονικής δύναμης, η διαρροή συμβαίνει σε διαφορετική τιμή της ροπής, όμως από εκεί και πέρα η συμπεριφορά (και συγκεκριμένα οι βρόχοι υστέρησης) ακολουθούν τη διαφορετική περιβάλλουσα που προκύπτει γι' αυτές τις δύο διαφορετικές αλλά σταθερές τιμές της αξονικής δύναμης (Σχ. 1.7(a)). Αν όμως η μεταβολή της αξονικής δύναμης ως προς τη μέση τιμή της είναι ανάλογη της εγκάρσιας μετακίνησης, τότε η διαρροή υπό συνθήκες μειούμενης αξονικής δύναμης ακολουθείται από φθίνοντα κλάδο M-θ (ή F-δ), καθώς η αύξηση της εγκάρσιας μετακίνησης συνοδεύεται από μείωση της ροπής διαρροής. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό πειραματικά μόνον υπό συνθήκες ελέγχου της εγκάρσιας μετακίνησης, καθότι, αν ελέγχεται αντ' αυτής η εγκάρσια δύναμη, η δοκιμή θα τερματίζονταν λόγω αστάθειας. Στην άλλη κατεύθυνση της φόρτισης, η αύξηση του αξονικού φορτίου, εμφανίζεται σαν μία σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας μετά τη διαρροή (Σχ. 1.7(b)). Σ' αυτήν την ίδια κατεύθυνση, η αύξηση της αξονικής δύναμης με την εγκάρσια μετακίνηση προκαλεί ταχύτερη "μείωση αντοχής" από κύκλο σε κύκλο, η οποία μπορεί τελικά να οδηγήσει σε αστοχία του δοκιμίου. Και όντως σ' αυτήν την κατεύθυνση είναι που συνήθως επέρχεται η αστοχία υπό συνθήκες μεταβλητής αξονικής δύναμης.

#### 1.2.2.2. Διαξονική κάμψη με αξονική δύναμη

##### 1.2.2.2.1. Εισαγωγή

Η σημασία της διαξονικότητας της καμπτικής έντασης δεν οφείλεται τόσο στο γεγονός ότι η πραγματική σεισμική απόκριση των υποστυλωμάτων προκαλεί πάντοτε διαξονική κάμψη, αλλά κυρίως στο ότι η διαξονικότητα της κάμψης μειώνει την αντοχή των υποστυλωμάτων και επιταχύνει τη μείωσή της, καθώς και αυτήν της δυσκαμψίας, με την ανακύκλιση. Πρέπει να επισημανθεί ότι το τρισδιάστατο της σεισμικής απόκρισης πραγματικών κατασκευών, δεν έχει αντίστοιχες δυσμενείς συνέπειες για τις δοκούς. Έτσι η

διαξονικότητα της κάμψης στα υποστυλώματα λειτουργεί εις βάρος της ικανοποίησης της επιταγής των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών για την αποφυγή ανελαστικής δράσης και απορρόφησης ενέργειας στα υποστυλώματα και τη συγκέντρωσή της στις δοκούς.

Επειδή η εκτέλεση των σχετικών πειραμάτων είναι δυσχερής, αλλά και το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας είναι σχετικά πρόσφατο, τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση της διαξονικής κάμψης είναι περιορισμένα. Και αυτό ενώ κανονικά, λόγω της προσθήκης μίας επιπλέον παραμέτρου στο πρόβλημα, δηλ. του τρόπου με τον οποίο συνδυάζονται οι ιστορίες της φόρτισης στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις, η κατανόηση της συμπεριφοράς σε διαξονική κάμψη απαιτεί πολλαπλάσιο όγκο πειραματικών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τη μονοαξονική κάμψη. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι οι σημερινές μας γνώσεις για τη συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη είναι κατά πολύ ατελέστερες αυτών για τη μονοαξονική.

#### 1.2.2.2.2. Διαξονική κάμψη υπό σταθερή αξονική δύναμη

Τα περιορισμένα πειραματικά αποτελέσματα για διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη αναφέρονται στα τελευταία 25 περίπου χρόνια. (Takizawa and Aoyama, 1976, Otani et al, 1980, Takiguchi et al, 1980, Kobayashi et al, 1984, Li et al, 1987, Saatcioglu and Ozcebe, 1984, Bousias et al, 1995). Οι Takiguchi et al (1980) και Kobayashi et al (1984) χρησιμοποίησαν δοκίμια πακτωμένα και στα δύο ακρα τους, ενώ όλοι οι υπόλοιποι ερευνητές χρησιμοποίησαν δοκίμια τύπου προβόλου. Τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 στο Παράρτημα. Όλα τα πειράματα έγιναν με έλεγχο των εγκάρσιων μετακινήσεων στις δύο ορθογωνικές διευθύνσεις.

Τα τέσσερα διαξονικά πειράματα των Takizawa and Aoyama (1976) έγιναν κατά βάση από τον Fujii στο Πανεπιστήμιο του Tokyo. Συμπληρώνονται μ' ένα μονοαξονικό πείραμα αναφοράς υπό σταθερό αξονικό φορτίο, που περιλαμβάνεται στον Πίνακα 4. Το πείραμα No.2 ήταν σε μια διεύθυνση, κατά τη διαγώνιο της τετράγωνης διατομής και μπορεί να θεωρηθεί σαν ειδική περίπτωση μονοαξονικού πειράματος. Όμως, λόγω ανακρίβειών στην πειραματική διάταξη και τις μετρήσεις, οι δυνάμεις που μετρήθηκαν δεν ήταν κατά τη διαγώνιο της διατομής, όπως θα έπρεπε. Οι βρόχοι υστέρησης παρουσιάζονται στο Σχ. 1.8(a). Στο δοκίμιο No.3 εφαρμόστηκε αρχικά μονοαξονική κάμψη σ' επίπεδο παράλληλο στη μία πλευρά της διατομής και κατόπιν επιβλήθηκαν διαξονικές ιστορίες μετακινήσεων μορφής τριών τετραγώνων που περιέβαλαν το ένα το άλλο και είχαν προσανατολισμό κατά  $45^\circ$  ως προς τις πλευρές της διατομής. Τα δύο εξωτερικά τετράγωνα μετακινήσεων

επιβλήθηκαν από δύο φορές το καθένα. Κατά τη διαδρομή των μετακινήσεων πάνω σε κάθε πλευρά του τετραγώνου, το δοκίμιο ήταν σε φόρτιση παράλληλα σε μία πλευρά της διατομής του και σε αποφόρτιση κατά ίση μετακίνηση παράλληλα στην άλλη. Στο πείραμα Νο.4 ο στόχος ήταν πάλι τρία τετράγωνα επιβεβλημένων μετακινήσεων, παράλληλα όμως στις δύο πλευρές, αλλά λόγω πειραματικών ατελειών προέκυψαν τα τρία τετράπλευρα που φαίνονται στο Σχ. 1.8(c). Τέλος το πείραμα Νο.5 αποτελείτο στην ουσία από κύκλους μονοαξονικών μετακινήσεων, που επιβάλλονταν εναλλασσόμενα παράλληλα στις δύο πλευρές.

Οι διαδρομές διαξονικών δυνάμεων που μετρήθηκαν στα πειράματα Νο. 3 και 4 είναι περίπου τετράγωνες και εμφανίζουν τα εξής ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά: Πρώτον, τα τετράγωνα των δυνάμεων πέφτουν ουσιαστικά το ένα πάνω στο άλλο, παρόλο που αυτά των επιβεβλημένων μετακινήσεων διαφέρουν σε μέγεθος περίπου κατά 2.0 φορές. Αυτό σημαίνει ότι μετά την αρχική διαρροή στο μονοαξονικό κύκλο, το δοκίμιο συμπεριφέρεται, από απόψεως ανθισταμένων διαξονικών δυνάμεων, σαν ελαστοπλαστικό. Δεύτερον, τα τετράγωνα των μετρούμενων δυνάμεων έχουν στραφεί, ως προς αυτά των επιβεβλημένων μετακινήσεων, κατά  $15^{\circ}$ - $20^{\circ}$  περίπου, έτσι ώστε το διάνυσμα των μετακινήσεων να βραδυνορεί μέσα στο εγκάρσιο στον άξονα επίπεδο, ως προς αυτό των δυνάμεων, κατά τη γωνία αυτή. Η στροφή αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι, όταν μειώνεται η επιβεβλημένη μετακίνηση στη μία διεύθυνση ενώ αυτή στην άλλη διατηρείται σταθερή, μειώνεται η δύναμη που απαιτείται στη δεύτερη εγκάρσια διεύθυνση για να παραμείνει σταθερή η αντίστοιχη μετακίνηση. Αυτή η πτώση της δύναμης εμφανίζεται στους βρόχους υστέρησης των δύο χωριστών κατευθύνσεων σαν μία αρχικά κατακόρυφη αποφόρτιση, η οποία συνολικά αυξάνει την επιφάνεια που περικλείεται από το βρόχο και μαζί της και την απορρόφηση ενέργειας.

Στο πείραμα Νο.5 οι βρόχοι υστέρησης στις δύο επιμέρους εγκάρσιες διευθύνσεις έχουν τη γνωστή μορφή των βρόχων της μονοαξονικής ανακυκλιζόμενης κάμψης χωρίς αξονική δύναμη. Μέρος της μικρής “μείωσης αντοχής” που παρατηρείται μεταξύ διαδοχικών κύκλων του ίδιου εύρους στην ίδια εγκάρσια διεύθυνση, μπορεί να οφείλεται στον κύκλο που επιβλήθηκε εν τω μεταξύ στην κάθετη διεύθυνση.

Οι Otani et al (1980) εκτέλεσαν τέσσερα πειράματα ανακυκλιζόμενης διαξονικής κάμψης χωρίς αξονική δύναμη, στα δοκίμια SP4 έως SP8 του Πίνακα 6 του Παραρτήματος. Τα δοκίμια SP3 και SP5 που αναφέρονται στον Πίνακα 4 ήταν πανομοιότυπα με τα SP4 και SP6 και δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική ανακυκλιζόμενη κάμψη για σύγκριση με τα SP4, SP6. Τα δοκίμια SP3, SP4 ήταν υπερδιαστασιολογημένα σε διάτμηση ώστε να είναι κρίσιμη η κάμψη, όπως δηλ. απαιτούν και οι σύγχρονοι Κανονισμοί. Τα υπόλοιπα



διαστασιολογήθηκαν έτσι ώστε η κάμψη και η τέμνουσα να είναι εξίσου κρίσιμες. Και τα 6 συνολικά δοκίμια αστόχησαν μετά από εκτεταμένη καμπτική και λοξή ρηγμάτωση, αποφλοιώση της επικάλυψης σκυροδέματος, αποσύνθεση του σκυροδέματος του πυρήνα μετά από επέκταση σ' αυτόν διασταυρούμενων λοξών ρωγμών και τρίψιμο μεταξύ των επιφανειών τους, και τέλος μετά από λυγισμό των ράβδων.

Το δοκίμιο SP4 υπεβλήθη σε δύο μονοαξονικούς κύκλους μέχρι λίγο μετά τη διαρροή (σε μέγιστες μετακινήσεις διπλάσιες αυτών της διαρροής) στη μία διεύθυνση, και κατόπιν σε άλλους οκτώ μονοαξονικούς στην κάθετη διεύθυνση, σε πολύ υψηλότερες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας (γύρω στο 4.5). Κατόπιν επαναλήφθηκαν οι δύο αρχικοί κύκλοι στην αρχική διεύθυνση, και παρατηρήθηκε σημαντική “μείωση αντοχής” για την ίδια μέγιστη μετακίνηση (Σχ. 1.8(e)). Το δοκίμιο SP6 υποβλήθηκε σε μονοαξονικούς κύκλους με μέγιστες μετακινήσεις διπλάσιες αυτών της διαρροής και σε δύο ακόμη με τετραπλάσιες αλλά στην κάθετη διεύθυνση. Όταν οι βρόχοι υστέρησης των δύο εγκαρσίων διευθύνσεων επαλληλίσθηκαν στο ίδιο διάγραμμα, η συνολική εικόνα δεν διέφερε απ' αυτήν του αδελφού δοκιμίου SP5 που δοκιμάστηκε μονοαξονικά (Σχ. 1.8(f)). Η μόνη διαφορά ήταν ότι στη μονοαξονική δοκιμή η αστοχία ήταν εμφανέστερη στους βρόχους υστέρησης απ' ότι στη διαξονική. Το συμπέρασμα είναι ότι η επίπτωση μιας ορισμένης ιστορίας μετακινήσεων στην αντοχή και στη δυσκαμψία, είναι ανεξάρτητη του αν η ιστορία αυτή επιβάλλεται εν μέρει στη μία και εν μέρει στην άλλη διεύθυνση, αρκεί οι μετακινήσεις να μην επιβάλλονται ταυτόχρονα στις δύο διευθύνσεις, αλλά χωριστά.

Τα δοκίμια SP7 και SP8 υποβλήθηκαν σε ιστορίες διαξονικών μετακινήσεων που είχαν μορφή τριών τετραγώνων που περιέβαλλαν το ένα το άλλο, όπως στο πείραμα No.4 των Takizawa and Aoyama (1976), δηλ. παράλληλα στις δύο πλευρές της διατομής. Στο SP7 το εσωτερικό τετράγωνο είχε πλευρά το διπλάσιο της μετακίνησης στη μονοαξονική διαρροή (οπότε με την επιβολή του πρώτου κλάδου του το δοκίμιο μόλις έφθασε στη διαρροή). Το τετράγωνο αυτό επιβλήθηκε δύο φορές δεξιόστροφα (αντίθετα προς τη φορά των δεικτών του ωρολογίου), ενώ τα επόμενα δύο επιβλήθηκαν αριστερόστροφα. Το μεσαίο τετράγωνο είχε διάσταση διπλάσια του πρώτου και επιβλήθηκε δύο φορές, ενώ το εξωτερικό είχε τετραπλάσιο μέγεθος από το πρώτο και μπόρεσε να διαγραφεί μία μόνο φορά πριν την αστοχία. Οι διαδρομές διαξονικών δυνάμεων που μετρήθηκαν και οι βρόχοι υστέρησης των δύο επιμέρους διευθύνσεων εμφανίζουν τα χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν στο πείραμα No.4 των Takizawa and Aoyama (1976). Δηλ. συσσώρευση των διαδρομών των δυνάμεων σ' ένα ουσιαστικά τετράγωνο ενδεικτικό ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, το οποίο είναι στραμμένο ως προς τα τετράγωνα των επιβεβλημένων μετακινήσεων κατά φορά τέτοια ώστε

το διάνυσμα της επιβεβλημένης μετακίνησης να καθυστερεί σε σχέση με αυτό των δυνάμεων (κατά  $10^\circ$  για τα εσωτερικά τετράγωνα και κατά  $20^\circ$  για τα δύο άλλα), έτσι ώστε να διευρύνονται οι επιμέρους βρόχοι υστέρησης και να αυξάνεται η απορρόφηση ενέργειας.

Το δοκίμιο SP8 υπεβλήθη επίσης σε τετράγωνες διαδρομές διαξονικών μετακινήσεων, οι οποίες και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις έφθαναν τη μετακίνηση διαρροής, το διπλάσιο και το τετραπλάσιό της, αλλά μόνον προς τη θετική φορά της φόρτισης, ενώ προς την αρνητική έφθαναν απλώς τη μετατόπιση διαρροής. Έτσι τα τετράγωνα των επιβεβλημένων μετακινήσεων ήταν έκκεντρα και περιέβαλαν το ένα το άλλο στις δύο γειτονικές πλευρές τους, ενώ οι δύο άλλες ήταν συγγραμμικές (Σχ. 1.8(h)). Οι βρόχοι υστέρησης στις δύο επιμέρους διευθύνσεις δεν είναι συμμετρικοί ως προς την αρχή των αξόνων, αλλά οι διαδρομές των διαξονικών δυνάμεων είναι μόνον ελαφρά έκκεντρες και ασύμμετρες, καθότι προς τη φορά των μεγάλων επιβεβλημένων μεταδιαρροϊκών μετατοπίσεων οι δυνάμεις φθάνουν πάντα τη μέγιστη τιμή τους (Σχ. 1.8(h)). Όσο αυξάνεται το μέγεθος των επιβεβλημένων μετακινήσεων, τόσο αυξάνεται το μέγεθος της στροφής του τετραγώνου των δυνάμεων ως προς αυτό των μετακινήσεων, αλλάζοντας όμως φορά (από δεξιόστροφη, σε αριστερόστροφη, π.χ.) αν αλλάξει η φορά διαγραφής του τετραγώνου των επιβεβλημένων δυνάμεων.

Στα πλαίσια του πειραματικού προγράμματος των Takiguchi et al (1980 και Kobayashi et al (1984) που αναφέρθηκε σε σχέση με τη μονοαξονική κάμψη με ορθή δύναμη, 6 δοκίμια πανομοιότυπα μ' αυτά που υπεβλήθησαν σε μονοαξονική ανακυλιζόμενη κάμψη υπεβλήθησαν σε ιστορίες επιβεβλημένων διαξονικών μετακινήσεων με μορφή τεσσάρων κυκλικών ή ελλειπτικών τροχιών, η μία μέσα στην άλλη (Σχ. 1.8(i) και (j)). Η ακτίνα των τροχιών των επιβεβλημένων διαξονικών μετακινήσεων ισούτο με τα ημιεύρη των κύκλων των μονοαξονικών μετακινήσεων των αδελφών δοκιμίων: 50%, 1.5, 2.5 και 3.5 φορές τη μετακίνηση διαρροής. Η αιχμή του διανύσματος των δοκιμίων που μετρήθηκαν ακολούθησε μία σταθερή τροχιά σε επίπεδο κάθετο στον άξονα, με σχήμα παρόμοιο αυτού της τροχιάς επιβεβλημένων μετακινήσεων (δηλ. περίπου κυκλικό ή ελλειπτικό, βλ. Σχ. 1.8(i) και (j)). Οι βρόχοι υστέρησης στις δύο επιμέρους εγκάρσιες διεθύνσεις ήταν παρόμοιοι με αυτούς των αδελφών μονοαξονικών δοκιμίων (μόνον κάπως στενότεροι, Σχ. 1.8(k)). Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα των Kobayashi et al (1984) σε υποστύλωμα κυκλικής διατομής με ιστορίες επιβεβλημένης διαξονικής καμπυλότητας μορφής ομόκεντρων κύκλων (βλ. Σχ. 1.8(l)). Τα συμπεράσματα των ερευνών αυτών, δηλ. ότι η διαδρομή των διαξονικών δυνάμεων σε επίπεδο κάθετο στον άξονα έχει παρόμοιο σχήμα με αυτήν των μετακινήσεων και ότι οι βρόχοι υστέρησης των επιμέρους διευθύνσεων μοιάζουν με τους μονοαξονικούς,

δεν μπορούν να γενικευθούν, καθότι φαίνεται ότι εξαρτώνται άμεσα από την ειδική μορφή της επιβεβλημένης ιστορίας μετακινήσεων και τη συμμετρία της διατομής (κυκλική ή τετράγωνη).

Οι Li et al (1987) έκαναν ένα μόνο διαξονικό πείραμα υπό σταθερό αξονικό φορτίο, σε δοκίμιο πανομοιότυπο με τα δύο που δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη σταθερή, ή μεταβαλλόμενη με την επιβεβλημένη ροπή. Επεβλήθησαν διαδρομές διαξονικών μετακινήσεων μορφής δύο τετραγώνων συνδεδεμένων κατά την κορυφή τους σε σχήμα “8”. Επεβλήθησαν συνολικά τέσσερα τέτοια 8-άρια, με τη μεγάλη διάσταση του “8” παράλληλη στη μία διαγώνιο της διατομής για το 1ο και το 3ο 8-άρι, ή στην άλλη διαγώνιο για το 2ο και το 4ο (Σχ. 1.8(m)). Τα δύο τετράγωνα του κάθε “8” διεγράφησαν δεξιόστροφα στο 1ο και στο 3ο “8” της σειράς (αλλά με διαφορετική σειρά στο 1ο και στο 3ο) και στο 2ο και το 4ο αριστερόστροφα. Αυτές οι διαδρομές μετακινήσεων μπορούν να θεωρηθούν σαν εναλλασσόμενη σταυροειδής φόρτιση κατά μήκος των δύο διαγωνίων της διατομής, με τη φόρτιση και την αποφόρτιση κατά μήκος κάθε διαγωνίου να προκύπτει με χωριστή επιβολή των δύο συνιστωσών της μετακίνησης κατά μήκος των δύο πλευρών της διατομής. Δυστυχώς οι διαδρομές διαξονικών δυνάμεων που προέκυψαν απ’ αυτή την διαξονική ιστορία μετακινήσεων δεν δημοσιεύθηκαν, ούτε μπορούν να ανακατασκευασθούν από τους δημοσιευμένους βρόχους υστέρησης παράλληλα στις πλευρές της διατομής. Οι βρόχοι αυτοί εμφανίζουν τη χαρακτηριστική πτώση της δύναμης στην αρχή των κλάδων αποφόρτισης, όπως οι 23 και 56 στη διεύθυνση NS και 34, 67 την EW, που οφείλεται στη μεταβολή της μετακίνησης στην άλλη εγκάρσια διεύθυνση, γνωστή ήδη από τα τετράγωνα των Takizawa and Ayoma (1976) και Otani et al (1980). Παρόμοια πτώση της δύναμης προκαλείται και από την επάνοδο στο μηδέν της μετακίνησης στην άλλη διεύθυνση (κλάδοι 41’, 71 στη διεύθυνση NS και 1’5, 12 στην EW). Παρά την τοπική στένωση που εμφανίζουν οι βρόχοι κοντά στον άξονα των δυνάμεων, οι βρόχοι είναι ευρύτεροι απ’ αυτούς της μονοαξονικής κάμψης, πράγμα που σημαίνει μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας.

Στην επόμενη Υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών ακόμα πειραμάτων των Li et al (1987), στα οποία η ανωτέρω διαξονική διαδρομή μετακινήσεων επιβλήθηκε υπό μεταβλητό αξονικό φορτίο.

Ο Saatcioglu (1984) και οι Saatcioglu and Ozcebe (1989) παρουσίασαν τα αποτελέσματα δύο διαξονικών πειραμάτων σε δοκίμια πανομοιότυπα με τα  $U_1$  και  $D_1$ , που δοκιμάστηκαν μονοαξονικά χωρίς αξονικό φορτίο (Πίνακας 2 του Παραρτήματος), των  $U_2$  έως  $U_4$ ,  $U_6$ ,  $U_7$  και  $D_2$  έως  $D_4$ ,  $D_6$  και  $D_7$ , που δοκιμάστηκαν πάλι μονοαξονικά υπό σταθερή αξονική δύναμη (Πίνακας 4) και των  $U_5$ ,  $D_5$  (του Πίνακα 5), που δοκιμάστηκαν υπό

μεταβλητό αξονικό φορτίο. Σημειώνεται ότι τα δοκίμια της σειράς D δοκιμάστηκαν κατά τη διαγώνιο, φόρτιση που μπορεί να θεωρηθεί σαν διαξονική ταυτόχρονα και παράλληλα στις δύο πλευρές της διατομής. Τα αποτελέσματα της σειράς δοκιμών D που αναφέρονται στις συνιστώσες δυνάμεων και μετακινήσεων παράλληλα στις πλευρές (οι οποίες ισούνται με τη συνισταμένη κατά τη διαγώνιο δια  $\sqrt{2}$ ), δίνουν την εντύπωση ότι η αντοχή, οι μετακινήσεις στη διαρροή κ.λ.π. είναι μειωμένες κατά  $\sqrt{2}$  σε σχέση με τα αντίστοιχα μονοαξονικά μεγέθη. Αν όμως εκφραστούν σε όρους συνισταμένης δύναμης και μετατόπισης κατά τη διαγώνιο, τα αποτελέσματα των διαγωνίων πειραμάτων φαίνονται πολύ παρόμοια με αυτά των μονοαξονικών κατά την πλευρά, εμφανίζοντας μάλιστα ενίοτε και ελαφρώς καλύτερη αντοχή, παραμορφωσιμότητα και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Σχ. 1.8(a) και (b)). Αυτό σημαίνει ότι η αντοχή και εν γένει η ανελαστική συμπεριφορά των αδελφών διαξονικών δοκιμών B1 και B2 στον Πίνακα 5, είναι η ίδια προς κάθε εγκάρσια στον άξονα διεύθυνση (δηλ. ισότροπη).

Τα δοκίμια B1 και B2 υποβλήθηκαν σε διαξονικές διαδρομές εγκάρσιων μετακινήσεων με μορφή πέντε ομόκεντρων ελλείψεων που περικλείουν η μία την άλλη. Ο μεγάλος ημιάξονας της κάθε έλλειψης είναι διπλάσιος σε μήκος από το μικρό. Το μήκος του είναι πολλαπλάσιο ή υποπολλαπλάσιο της μονοαξονικής μετακίνησης στη διαρροή, με συντελεστές αναλογίας: 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 ή 4.0. Κάθε έλλειψη διεγράφη αριστερόστροφα τρεις φορές. Σημειωτέον ότι η ιστορία της μονοαξονικής συνιστώσας της μετακίνησης είναι όμοια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της σειράς U και D (Σχ. 1.8(h)). Τα δημοσιευμένα αποτελέσματα περιλαμβάνουν δυστυχώς μόνον τους βρόχους υστέρησης των δύο επιμέρους διευθύνσεων. Καθώς αυξάνει το μέγεθος της έλλειψης των επιβεβλημένων μετακινήσεων, οι βρόχοι τείνουν να πάρουν την κυκλική μορφή που οφείλεται στη διαφορά φάσης μεταξύ συνισταμένης δύναμης και συνισταμένης μετακίνησης μέσα στο οριζόντιο επίπεδο (πρβλ. στροφή τετραγώνων διαδρομών φορτίου στα πειράματα Takizawa and Aoyama, 1976, και Otani et al, 1980). Η στρογγύλευση του σχήματος των βρόχων, η διαφορά φάσης συνισταμένης δύναμης και μετατόπισης και το μεγαλύτερο πλάτος βρόχου σε σχέση με τους αντίστοιχους διαξονικούς, είναι όλα ενδείξεις και αποτέλεσμα του ότι η σύζευξη της ανελαστικής συμπεριφοράς μεταξύ των δύο διευθύνσεων της κάμψης αυξάνει την απορρόφηση ενέργειας (Σχ. 1.8(o)). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά του υποστυλώματος κατά το μικρό άξονα της έλλειψης των επιβεβλημένων μετακινήσεων (διεύθυνση EW): τη στιγμή που οι μετακινήσεις στη διεύθυνση αυτή ξεπερνούν κατά 1.5 έως και 2 φορές τη μετακίνηση διαρροής για μονοαξονική φόρτιση, οι ταυτόχρονες δυνάμεις ή

ροπές στη διεύθυνση αυτή υπολείπονται σημαντικά των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών στη μονοαξονική διαρροή. Αυτό είναι πάλι αποτέλεσμα της σύζευξης των δύο διευθύνσεων, εξαιτίας της οποίας, όταν έχουμε μηδενική μετακίνηση στη διεύθυνση του μεγάλου άξονα των επιβεβλημένων μετακινήσεων, το μέγεθος της αντίστοιχης δύναμης δεν είναι μηδέν αλλά σημαντικό, μειώνοντας έτσι το μέγεθος της δύναμης που μπορεί να αναπτυχθεί ταυτόχρονα στην άλλη διεύθυνση (αυτή του μικρού άξονα της έλλειψης), έτσι ώστε η συνισταμένη των δύο δυνάμεων να μην ξεπερνά την τιμή της μονοαξονικής αντοχής κατά τη λοξή διεύθυνση φόρτισης.

Οι Low and Moehle (1987) έκαναν δύο διαξονικές δοκιμές υπό σταθερό αξονικό φορτίο (πειράματα No.2 έως 3 στον Πίνακα 6), σε δοκίμιο πανομοιότυπο με το μονοαξονικό δοκίμιο No.1 του Πιν. 4. Αυτά φαίνεται να είναι τα μοναδικά διαξονικά πειράματα στη βιβλιογραφία επί υποστυλωμάτων με ορθογωνική διατομή και διαφορετική αντοχή και δυσκαμψία στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις. Η δοκιμή No.2 ήταν ουσιαστικά μονοαξονική, καθότι η συνισταμένη επιβεβλημένη μετακίνηση ήταν πάντοτε κατά  $45^\circ$  ως προς τις δύο πλευρές της διατομής και κατά  $7.5^\circ$  ως προς τη διαγώνιό της (ίσες συνιστώσες της μετακίνησης κατά τους δύο άξονες). Όπως και στη σειρά D των πειραμάτων των Saatcioglu and Ozcebe (1989), οι βρόχοι υστέρησης και στις δύο επιμέρους διευθύνσεις εμφανίζουν μικρότερη αντοχή και χαρακτηριστικές παραμορφώσεις (στη διαρροή και την αστοχία) σε σύγκριση με μονοαξονικά πειράματα κατά την “ασθενή” και την “ισχυρή” διεύθυνση. Όμως, λόγω της διαφοράς των αντοχών και των δυσκαμψιών στις δύο διευθύνσεις της κάμψης, η συνισταμένη δύναμη δεν είναι κατά  $45^\circ$  ως προς τις πλευρές, αλλά πλησιέστερα προς την “ισχυρή” διεύθυνση της διατομής.

Το πείραμα No.3 είναι πράγματι διαξονικό, με διαδρομές επιβεβλημένων μετακινήσεων μορφής τεσσάρων ομόκεντρων “τετράφυλλων τριφυλιών”, που περικλείει το ένα το άλλο (Σχ. 1.8(p)). Κάθε “τετράφυλλο τριφύλλι” είναι ισοδύναμο με δύο “8-άρια” κατά τις δύο διαγωνίους, όπως δηλ. τα διαδοχικά 8-άρια των Li et al (1987). Η διαφορά έγκειται στη σειρά εφαρμογής των επιμέρους τετραγώνων: Μετά την ολοκλήρωση κατά δεξιόστροφη φορά του τετραγώνου στο 1ο τεταρτημόριο, ολοκληρώθηκε δεξιόστροφα αυτό του 4ου, αντί του 3ου όπως στους Li et al (1987), ακολουθούμενο από αυτά του 2ου και του 3ου τεταρτημορίου, κατά αριστερόστροφη όμως φορά. Και στα δύο αυτά πειράματα, καθώς και στο No. B8-0 των Li et al (1987), πρόκειται για ιστορία ανακυκλιζόμενων μετακινήσεων στη μία διεύθυνση (στην “ισχυρή” στη δοκιμή των Low and Moehle, 1987) και ζευγών επαναλαμβανομένων κύκλων μετακινήσεων στην άλλη διεύθυνση, με διαφορετικό πρόσημο για κάθε ζεύγος αυτών των μετακινήσεων. Η διαφορά μεταξύ των δοκιμών έγκειται στη

διαφορετική αλληλουχία των τμημάτων που αποτελούν την ιστορία των μετακινήσεων στις δύο διευθύνσεις της κάμψης.

Οι βρόχοι υστέρησης στην “ισχυρή” διεύθυνση είναι όμοιοι με αυτούς που προκύπτουν από τις τετράγωνες διαδρομές μετακινήσεων στο πείραμα No.4 των Takizawa and Aoyama (1976), στο SP7 των Otani et al (1980) και στο S7 των Bousias et al (1995): Χαρακτηρίζονται από την απότομη πτώση της δύναμης στο πρώτο στάδιο της αποφόρτισης, που οφείλεται στην αύξηση της μετακίνησης στην άλλη εγκάρσια διεύθυνση, από το μεγάλο πλάτος βρόχου και την αυξημένη απορρόφηση ενέργειας. Η διαφορά έγκειται στο ότι σε ένα πλήρες τετράγωνο μετακινήσεων στα τρία ανωτέρω πειράματα των άλλων ερευνητών, αντιστοιχούν δύο ορθογωνικές διαδρομές φόρτισης (που αποτελούνται από δύο συνεχόμενα τετράγωνα του “τετράφυλλου τριφυλλίου”) και επομένως σχεδόν διπλάσια απορρόφηση ενέργειας στη διεύθυνση αυτή (την “ισχυρή”). Οσον αφορά την “ασθενή” διεύθυνση, εφόσον τα δύο συνεχόμενα τετράγωνα του “τετράφυλλου τριφυλλίου” αποτελούνται από δύο ζεύγη κύκλων επαναλαμβανόμενης φόρτισης στη διεύθυνση αυτή, με διαφορετικό πρόσημο το κάθε ζεύγος, οι βρόχοι υστέρησης αποτελούνται από δύο συνδεδεμένους ημιβρόχους για κάθε κατεύθυνση (φορά) της φόρτισης. Πέραν όμως απ’ αυτό, η συνολική (εξωτερική) εικόνα των βρόχων θυμίζει αυτήν της “ισχυρής” διεύθυνσης, και η απορροφούμενη ενέργεια είναι επίσης περίπου διπλάσια αυτής που απορροφάται σε μία πλήρη τετράγωνη διαδρομή (Σχ. 1.8(q)).

Επειδή αλλάζει η φορά που διαγράφονται τα διαδοχικά ζεύγη τετραγώνων του “τετράφυλλου τριφυλλίου”, οι διαδρομές της μετρούμενης δύναμης έχουν περίπλοκο σχήμα. Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.8(r), κάθε ζεύγος επιμέρους τετραγώνων που διαγράφεται με την ίδια φορά, αντιστοιχεί σε επίπεδο δυνάμεων σ’ ένα ζεύγος τετραπλεύρων που επικαλύπτονται σε σχήμα L και είναι στραμμένο σε σχέση με το ζεύγος των τετραγώνων των μετακινήσεων, προς την ίδια φορά προς την οποία διεγράφη η αντίστοιχη τετραγωνική διαδρομή. Έτσι το διάνυσμα των μετακινήσεων ακολουθεί πάντα πίσω από αυτό των δυνάμεων, και η απορρόφηση ενέργειας αυξάνεται σε σύγκριση με την περίπτωση της συμπεριφοράς χωρίς σύζευξη μεταξύ των δύο διευθύνσεων, οπότε τα διανύσματα της μετακίνησης και της δύναμης θα ήταν πάντα συγγραμμικά.

Οι Bousias et al (1995) έκαναν 9 διαξονικά πειράματα σε δοκίμια όμοια με το S0 που δοκιμάστηκε για σύγκριση σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη (Πίνακας 4). Στη δοκιμή S1 ασκήθηκαν ζεύγη κύκλων μετατοπίσεων, ο πρώτος στη μία εγκάρσια διεύθυνση, ο δεύτερος στην άλλη, με εύρος αυξανόμενο από κύκλο σε κύκλο κατά αριθμητική πρόοδο. Οι βρόχοι υστέρησης στη μια διεύθυνση εμφανίζουν κάποια

“μείωση αντοχής” λόγω του αμέσως προηγούμενου κύκλου στην κάθετη διεύθυνση (Σχ. 1.8(s)). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέσες μετακινήσεις κατά τον άξονα λόγω της διαξονικής κάμψης: Το μέγεθος των αξονικών μηκύνσεων που συνοδεύουν τις καμπτικές παραμορφώσεις κατά τις εξ. (6) και (7), είναι περίπου ανάλογο των τελευταίων και αναξάρτητο της διεύθυνσης της εγκάρσιας μετακίνησης. Για την ανηγμένη αξονική δύναμη της δοκιμής αυτής ( $\nu=0.12$ ), αναπτύσσεται επίσης μία βαθμιαία βράχυνση του υποστρώματος. Στη δοκιμή S2 η μία εγκάρσια μετακίνηση διατηρείται σταθερή, ενώ στην άλλη επεβάλλοντο κύκλοι μετακινήσεων, με ημιεύρος που αυξάνονταν από κύκλο σε κύκλο γραμμικά, μέχρι να φθάσει το μέγεθος της επιβεβλημένης μετακίνησης στην κάθετη διεύθυνση. Οι βρόχοι υστέρησης στη διεύθυνση αυτή δεν φαίνονται να επηρεάζονται αισθητά από την ταυτόχρονη μετακίνηση στην κάθετη διεύθυνση, αλλά λόγω της σύζευξης μεταξύ των δύο διευθύνσεων, η δύναμη που απαιτείται για να διατηρηθεί σταθερή η μία εγκάρσια μετακίνηση, μειώνεται βαθμιαία μέχρι σχεδόν μηδενισμού, λόγω της ανακύκλισης στην κάθετη διεύθυνση (Σχ. 1.8(t)). Η μείωση αυτή της δύναμης μεταφράζεται σε αύξηση της συνολικής απορρόφησης ενέργειας από το δοκίμιο, και συγκεκριμένα κατά τις φάσεις αφαίρεσης και επανεφαρμογής των τμηματικά σταθερών (αλλά με αυξανόμενο μέγεθος) μετακινήσεων στην κάθετη διεύθυνση αυτής της ανακύκλισης. Στις δοκιμές S3 και S4 η δύναμη στη μία εγκάρσια διεύθυνση διατηρείται τμηματικά σταθερή, με σταδιακά αυξανόμενο μέγεθος στα διάφορα στάδια του πειράματος, ενώ στην κάθετη διεύθυνση ασκούνται για κάθε διαφορετική τιμή αυτής της σταθερής δύναμης τρεις κύκλοι μετακινήσεων με εύρος αυξανόμενο κατά αριθμητική πρόοδο. Η διαφορά του πειράματος S4 από το S3 έγκειται στο ότι η σταθερή δύναμη ασκείται μία φορά με θετική φορά και μία με αρνητική (Σχ. 1.8(u)). Λόγω της σταθερής δύναμης στην κάθετη διεύθυνση, οι βρόχοι υστέρησης στη διεύθυνση της ανακύκλισης εμφανίζουν σταδιακή μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας. Περισσότερο αξιοσημείωτο όμως είναι η σταδιακή και μονοτονική αύξηση των μετακινήσεων στη διεύθυνση της σταθερής δύναμης, που προκαλεί η ανακύκλιση στην κάθετη διεύθυνση. Λόγω αυτής της αύξησης των μετακινήσεων, αυξάνεται σημαντικά η αποταμιευμένη στο δοκίμιο ενέργεια στη διεύθυνση της σταθερής δύναμης (εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες του Σχ. 1.8(u)). Αυξάνεται επίσης η συνολική ενέργεια που απορροφάται με την αφαίρεση της σταθερής δύναμης στη δοκιμή S3, ή με την αφαίρεση και την επανεφαρμογή κατά την αντίθετη φορά στην S4, κ.λ.π.

Στα πειράματα S5 και S6 ασκήθηκαν διαξονικές διαδρομές μετακινήσεων με σχήμα πεταλούδας (Σχ. 1.8(v)), όπου το κάθε τριγωνικό μισό της πεταλούδας διεγράφετο κατά διαφορετική φορά (αριστερόστροφα το ένα, δεξιόστροφα το άλλο). Έτσι στο ένα τρίγωνο οι

μετακινήσεις εφαρμόζονταν χωριστά κατά τις δύο διευθύνσεις και αφαιρούντο ταυτόχρονα (αναλογική αποφόρτιση), ενώ στο άλλο οι μετακινήσεις ασκούνται ταυτόχρονα και αναλογικά και αφαιρούντο χωριστά. Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.8(v), η αλλαγή φοράς διαγραφής του κάθε μισού της διαδρομής επιβεβλημένων μετακινήσεων επηρεάζει το σχήμα της διαδρομής των μετρούμενων δυνάμεων, η οποία είναι μεν πάντοτε τμηματικά γραμμική, αλλά έχει στραφεί σε σχέση με την αντίστοιχη διαδρομή μετακινήσεων, κατά τη φορά κατά την οποία διαγράφεται το αντίστοιχο τμήμα της διαδρομής φόρτισης, έτσι ώστε το διάνυσμα των δυνάμεων να προηγείται πάντοτε αυτού των επιβεβλημένων μετακινήσεων. Όπως και στα πειράματα των Takizawa and Aoyama (1976), Otani et al (1980) και Low and Moehle (1987), η συμπεριφορά αυτή αντιστοιχεί σε αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας λόγω της σύζευξης μεταξύ των δύο διευθύνσεων. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι, επειδή στα πειράματα αυτά η ανηγμένη αξονική θλίψη ήταν σχετικά μικρή ( $\nu=0.10$  έως  $0.12$ ), η ανακύκλιση των καμπτικών παραμορφώσεων προκαλούσε βαθμιαία μονοτονική μήκυνση, αντί βράχυνσης, του μέλους, μήκυνση η οποία στο S6 μετατράπηκε στο τέλος σε βράχυνση, καθώς το δοκίμιο πλησίαζε την αστοχία λόγω θραύσης μίας ράβδου. Η αξονική συμπεριφορά ήταν παρόμοια και στις δοκιμές S7 και S8, οι οποίες επίσης είχαν χαμηλή αξονική θλίψη ( $\nu=0.12$  ή  $0.11$ ). Σ' αυτά τα δύο πειράματα οι διαδρομές διαξονικών μετακινήσεων που επιβλήθηκαν είχαν μορφή ομόκεντρων τετραγώνων, παράλληλων στις πλευρές της διατομής και που περικλείουν το ένα το άλλο. Στο S7 τα τετράγωνα επεβλήθησαν κατά σειρά αυξανόμενου μεγέθους, ενώ στο S8 κατά την αντίθετη σειρά, πάντοτε όμως δεξιόστροφα. Τα αποτελέσματα του S7 είναι ποιοτικά παρόμοια με αυτά του No.4 των Takizawa and Aoyama (1976). Αντίθετα στο S8 οι διαδρομές διαξονικών δυνάμεων και οι βρόχοι υστέρησης δείχνουν το χαρακτήρα “αποφόρτισης” του πειράματος (Σχ. 1.8(x)).

Στο πείραμα S9 των Bousias et al (1995), ασκήθηκαν διαξονικές διαδρομές μετακινήσεων μορφής τεσσάρων ομόκεντρων κύκλων με ακτίνα λίγο κάτω από τη μετακίνηση διαρροής, το διπλάσιο, το τριπλάσιο και το τετραπλάσιό της. Κάθε κύκλος διεγράφη τέσσερις φορές κατά την ίδια κατεύθυνση. Σ' όλα τα επίπεδα μετακινήσεων η κατά τέσσερις φορές επανάληψη της διαδρομής προκάλεσε σημαντική μείωση της αντοχής και ελικοειδή συρρίκνωση της διαδρομής των μετρούμενων δυνάμεων, ιδιαίτερα στον κύκλο της μέγιστης παραμόρφωσης, ο οποίος οδήγησε και σε αστοχία του δοκιμίου. Το Σχ. 1.8(y) παρουσιάζει το λόγο της στρογγύλευσης των βρόχων υστέρησης στις δύο επιμέρους διευθύνσεις αυτής της διαδρομής, καθώς και σ' αυτές με τις κυκλικές ή ελλειπτικές διαδρομές μετακινήσεων κατά Kobayashi et al (1984) και Saatcioglu and Ozcebe (1989): ο λόγος αυτός είναι η διαφορά φάσης μεταξύ διανύσματος δύναμης και διανύσματος



μετατόπισης. Ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης,  $\zeta = \Delta E_s / (4\pi E_{el})$ , ισούται με το ημίτονο της γωνίας της διαφοράς φάσης, η οποία, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.8(y) αυξάνει με το μέγεθος των επιβεβλημένων μετακινήσεων, καθώς και όταν το δοκίμιο πλησιάζει την τελική αστοχία. Τέλος, το Σχ. 1.8(y) παρουσιάζει την εξέλιξη των αξονικών παραμορφώσεων κατά την ανακύκλιση των καμπτικών: στο πρώτο μισό της δοκιμής, όπου η ανηγμένη αξονική δύναμη ήταν πολύ μικρή ( $\nu=0.03$ ), επιπλέον της αναστρέψιμης μήκυνσης που συνοδεύει κάθε ημικόκλιο καμπτικής παραμόρφωσης, υπάρχει μια σταδιακή αλλά μονοτονικά αυξανόμενη αξονική μήκυνση. Η σταδιακή μήκυνση μετατράπηκε βαθμιαία σε βράχυνση στο δεύτερο μέρος του πειράματος, όπου η ανηγμένη αξονική θλίψη αυξήθηκε σε  $\nu=0.15$ , επιταχύνθηκε δε στο τέλος με την έλευση της αστοχίας.

#### 1.2.2.2.3. Διαξονική κάμψη με μεταβλητή αξονική δύναμη

Οι πειραματικές μελέτες της διαξονικής κάμψης με ταυτόχρονη μεταβολή της αξονικής δύναμης είναι πολύ λίγες σε αριθμό. Ο λόγος είναι αφενός μεν η μεγάλη δυσκολία μίας τέτοιας πειραματικής μελέτης, αφετέρου δε το ότι και τα απλούστερα θέματα της διαξονικής συμπεριφοράς με σταθερή αξονική δύναμη, ή της μονοαξονικής κάμψης με μεταβαλλόμενη, δεν έχουν κλείσει ακόμα. Οι παράμετροι κ.λ.π. των διαθεσίμων πειραμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 του Παραρτήματος.

Η πειραματική έρευνα των Li et al (1987) που αναφέρθηκε ανωτέρω για τη διαξονική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη, στην πραγματικότητα εστιάσθηκε στη διαξονική συμπεριφορά με μεταβλητό αξονικό φορτίο. Τα δοκίμια B8-1, B8-2, B40-1, B40-2 υποβλήθηκαν στις ίδιες ιστορίες διαξονικών μετακινήσεων όπως και το B8-0. Επιπλέον όμως η ανηγμένη αξονική δύναμη  $\nu$  μεταβάλλονταν ως προς μία μέση τιμή ίση με 0.07 στα πειράματα B8-1 και B40-1. Η μεταβολή του  $\nu$  μεταξύ 0 και 0.13 για το B8-1, ή μεταξύ 0.19 και 0.45 για το B40-1, ήταν ανάλογη της εγκάρσιας δύναμης στη μία διεύθυνση (στην NS), ενώ στα B8-2 και B40-2, το  $\nu$  μεταβάλλονταν μεταξύ  $-0.06$  (εφελκυσμός) και 0.19 στο πρώτο, και μεταξύ 0.13 και 0.52 στο δεύτερο, κατ' αναλογία προς οποιαδήποτε από τις δύο εγκάρσιες δυνάμεις μεταβάλλονταν. Επισημαίνεται ότι στο B40 η ανηγμένη αξονική δύναμη που αντιστοιχεί στην ισοζυγισμένη διατομή ισούτο με 0.43, ήταν δηλ. κοντά στη μέση τιμή του  $\nu$  που εφαρμόσθηκε (0.32) και ξεπερνώταν κατά τη μεταβολή του  $\nu$  στο πείραμα. Σ' όλα τα πειράματα η μεταβολή της  $\nu$  ήταν τέτοια που αυτή έφθανε τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του στο 90% της καμπτικής αντοχής του δοκιμίου στις δύο διευθύνσεις της κάμψης, και μεταβαλλόταν γραμμικά με τις επιβεβλημένες δυνάμεις ενδιάμεσα.

Οι βρόχοι υστέρησης στις επιμέρους διευθύνσεις, σ' εκείνες τις δοκιμές όπου η  $v$  μεταβαλλόταν μόνο με τη δύναμη στη διεύθυνση NS, εμφανίζαν στη διεύθυνση αυτή τη γνωστή αύξηση ή μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας στις δύο διευθύνσεις της κάμψης, αλλά πάλι μόνο στη δοκιμή B8-1 που είχε χαμηλή μέση τιμή της  $v$ . Στην περίπτωση αυτή οι ακραίες τιμές της  $v$  στις δύο αντίθετες διευθύνσεις της κάμψης (σε κύκλους στο Σχ. 1.9(a)), διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, και επομένως η επιρροή της μεταβολής του  $v$  είναι μεγάλη. Σημειώνεται όμως ότι η  $v$  μεταβάλλεται και κατά τη μεταβολή της δύναμης στη διεύθυνση EW, όχι όμως κατά συστηματικό τρόπο, αλλά έμμεσα, καθώς η δύναμη στη διεύθυνση EW μεταβάλλεται με αυτήν στη NS (με την οποία μεταβάλλεται συστηματικά και η  $v$ ) λόγω σύζευξης μεταξύ των διευθύνσεων. Έτσι οι βρόχοι υστέρησης στη διεύθυνση EW δεν εμφανίζουν συστηματική ασυμμετρία στις δύο διευθύνσεις, αλλά απλώς ταπείνωση εκείνων των κορυφών και στις δύο διευθύνσεις της κάμψης που αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές της  $v$ . Στη δοκιμή B40-1, που έγινε υπό υψηλή μέση αξονική δύναμη, η μεταβολή της  $v$  με τη δύναμη στη διεύθυνση NS δεν φαίνεται να επηρεάζει αισθητά τους βρόχους υστέρησης στη διεύθυνση αυτή, καθώς κοντά στην αξονική δύναμη της ισοζυγισμένης διατομής δεν είναι ξεκάθαρη η επιρροή της αξονικής δύναμης στην καμπτική συμπεριφορά. Αντίστοιχα συμβαίνουν όταν η  $v$  μεταβάλλεται γραμμικά και με τις δύο εγκάρσιες δυνάμεις: οι βρόχοι είναι ασύμμετροι και στις δύο διευθύνσεις για τη χαμηλή μέση  $v$ , ενώ για την υψηλή δεν διακρίνεται κάποια συστηματική επιρροή (Σχ. 1.9(b)).

Οι Low and Moehle (1987) θεώρησαν ανηγμένη αξονική δύναμη που μεταβάλλεται από 0 έως 0.13 (μέση τιμή 0.065) με τη μετατόπιση στην “ασθενή” διεύθυνση της κάμψης, στα πειράματα No.4 και 5. Τα πειράματα αυτά ήταν κατά τα άλλα παρόμοια με τα No.2 και 3 που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη Υποενότητα. Τα αποτελέσματα της δοκιμής No.4, που είναι στην πραγματικότητα μονοαξονική μέσα σε επίπεδο κάμψης που σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με τις δύο πλευρές και  $7.5^\circ$  με τη διαγώνιο, δεν επιτρέπουν ξεκάθαρο συμπέρασμα για την επιρροή της  $v$ : Στην “ασθενή” διεύθυνση οι βρόχοι υστέρησης εμφανίζουν μείωση αντοχής και δυσκαμψίας στην κατεύθυνση της αυξανόμενης  $v$  (!) και καμμία επιρροή στην άλλη κατεύθυνση. Στην “ισχυρή” διεύθυνση η επιρροή της μεταβολής της  $v$  είναι και συστηματική και όπως αναμένεται (Σχ. 1.9(c)). Καθώς η αξονική δύναμη μεταβάλλεται όχι με τις εγκάρσιες δυνάμεις αλλά με τις εγκάρσιες μετατοπίσεις, οι επιρροές της  $v$  είναι σαφέστερες όταν οι ανελαστικές παραμορφώσεις είναι μεγάλες.

Στη δοκιμή No.5 οι βρόχοι υστέρησης στην “ασθενή” διεύθυνση εμφανίζουν σημαντική μείωση αντοχής και δυσκαμψίας στην κατεύθυνση όπου η  $v$  μειώνεται (αριστερό μισό των βρόχων στο Σχ. 1.9(d)), αλλά καμμία συστηματική επιρροή προς την αντίθετη

κατεύθυνση. Παρόλο που η τιμή της  $v$  δεν μεταβάλλεται με τη μετακίνηση στην “ισχυρή” διεύθυνση της διατομής, οι βρόχοι υστέρησης σ’ αυτή τη διεύθυνση (Σχ. 1.9(d)) εμφανίζουν πιο ξεκάθαρη επιρροή της μεταβολής της  $v$ : οι κορυφές δύο κατά τα άλλα όμοιων (τετάρτο-)κύκλων στο δεξιά μισό των βρόχων απομακρύνονται, απλώς και μόνον επειδή αυτός με την υψηλότερη κορυφή αντιστοιχεί σε μετακίνηση στην κάθετη διεύθυνση που δίνει υψηλότερη τιμή της  $v$ , ενώ η χαμηλότερη αντιστοιχεί σε εγκάρσια μετακίνηση με μηδενική αξονική δύναμη (Σχ. 1.9(d)). Στο αριστερό μισό των κύκλων, όμως, οι κορυφές και των δύο (τετάρτο-)κύκλων βρίσκονται πιο ψηλά απ’ αυτές της δοκιμής αναφοράς με το σταθερό αξονικό φορτίο, παρόλο που και στις δύο η τιμή του  $v$  ισούται με τη μέση.

Όλα τα ανωτέρω διαξονικά τετράγωνα με μεταβλητή αξονική δύναμη (Li et al 1987, Low and Moehle, 1987), επιβεβαιώνουν το γενικό συμπέρασμα των μονοαξονικών δοκιμών, ότι δηλ. για μεταβλητό αξονικό φορτίο η αύξηση της αξονικής θλίψης προκαλεί αύξηση της τιμής της αντοχής και της δυσκαμψίας αλλά και κάποια μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση, ενώ η μείωση της αξονικής δύναμης έχει τα αντίθετα αποτελέσματα. Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται να παύει να ισχύει όταν η μεταβολή της αξονικής δύναμης γίνεται κοντά στην τιμή της ισοζυγισμένης διατομής, καθώς εκεί κοντά η καμπτική συμπεριφορά φαίνεται να μην εξαρτάται σημαντικά από την τιμή της αξονικής δύναμης.

Τα δύο πειράματα των Bousias et al (1995) έγιναν σε δοκίμια παρόμοια με αυτά που περιγράφησαν στην προηγούμενη Ενότητα. Ο κύριος στόχος της δοκιμής S10 ήταν η μελέτη του εγκάρσιων μετακινήσεων που προκαλούνται από τη μεταβολή της αξονικής δύναμης υπό σταθερή τιμή της εγκάρσιας δύναμης. Ασκήθηκαν στο δοκίμιο τρεις κύκλοι ανηγμένης αξονικής δύναμης, από  $v=0$  έως  $v=0.29$ . Οι τρεις κύκλοι διαφέρουν ως προς την τιμή εκκίνησης και κατάληξής τους, που είναι  $v_0=0$  στον πρώτο,  $v_0=0.14$  στο 2ο και  $v_0=0.28$  στον 3ο. Κάθε κύκλος της  $v$  ασκήθηκε υπό έξι διαφορετικές τιμές της εγκάρσιας δύναμης, ίσες με 0, 40%, 60%, 80%, 100% και 110% της μονοαξονικής δύναμης διαρροής που αντιστοιχεί στη μέση τιμή της  $v$  (Σχ. 1.9(e)). Οι εγκάρσιες μετακινήσεις οφείλονταν κυρίως στην εγκάρσια δύναμη. Επιπροσθέτως και κατά τα αναμενόμενα, η εγκάρσια μετακίνηση αυξάνονταν όταν μειώνονταν η αξονική δύναμη και μειώνονταν στην αντίθετη περίπτωση. Όμως, επειδή το μέγεθος της αύξησης ξεπερνούσε αυτό της μείωσης, ιδίως όταν η ταυτόχρονη εγκάρσια δύναμη ξεπερνούσε την τιμή διαρροής (βλ. τα τμήματα σχήματος V και Λ στο διάγραμμα μετακίνησης X-μετακίνησης Z του Σχ. 1.9(e)), η ανακύκλιση της αξονικής δύναμης προκαλούσε σταδιακή αλλά μονοαξονική αύξηση των εγκάρσιων μετακινήσεων, το συνολικό μέγεθος της οποίας πλησίασε την τιμή της παραμένουσας εγκάρσιας μετακίνησης λόγω της επαναλαμβανόμενης εφαρμογής της εγκάρσιας δύναμης

μόνης. Επισημαίνεται σχετικά ότι στις πραγματικές περιπτώσεις όπου η εγκάρσια και η αξονική δύναμη μεταβάλλονται ταυτόχρονα, η συσσώρευση εγκαρσίων μετακινήσεων λόγω της μεταβολής της αξονικής δύναμης θα εμφανίζεται σαν σταδιακή αλλά σημαντική μείωση της δυσκαμψίας στην εγκάρσια διεύθυνση.

Στο πείραμα οι αξονικές παραμορφώσεις οφείλονται μερικώς στην αξονική δύναμη και τη μεταβολή της, και μερικώς στις καμπτικές παραμορφώσεις. Το πρώτο τμήμα μεταβάλλεται γραμμικά με την αξονική δύναμη όταν αυτή αυξάνεται και μή-γραμμικά όταν μειώνεται, ιδίως για μεταδιαρροϊκές τιμές της αξονικής δύναμης και όταν η αξονική δύναμη πλησιάζει το μηδέν. Η δυσκαμψία αποφόρτισης και επαναφόρτισης στην αξονική διεύθυνση μειώνεται όταν αυξάνεται η εγκάρσια δύναμη, και καθώς είναι μικρότερη όταν μειώνεται η αξονική δύναμη (αξονική “αποφόρτιση”) παρά όταν αυξάνεται (“φόρτιση”), ιδίως στους μεταδιαρροϊκούς κύκλους της  $v$  που ξεκινούν από αρχική τιμή  $v_0=0.28$ , η ανακύκλιση της αξονικής δύναμης παρουσία εγκάρσιας δύναμης που ξεπερνά τη διαρροή, προκαλεί βαθμιαία αλλά μονοτονική αύξηση των αξονικών παραμορφώσεων (τμήματα μορφής  $\Lambda$  στο διάγραμμα της μετακίνησης στη διεύθυνση  $X$  έναντι αυτής στην  $Z$  στο Σχ. 1.9(e)). Δεν πρόκειται στην περίπτωση αυτή για αμμιγές φαινόμενο σύζευξης μεταξύ αξονικής διεύθυνσης και καμπτικής, αλλά για την επιρροή της παρουσίας της εγκάρσιας δύναμης στην παραμορφωσιακή συμπεριφορά στην αξονική διεύθυνση. Τέλος, στο διάγραμμα αξονικών-εγκαρσίων μετακινήσεων του Σχ. 1.9(e), τα τμήματα με τη μικρότερη κλίση αντιστοιχούν σε μεταβολή της εγκάρσιας δύναμης υπό σταθερή αξονική, ενώ αυτά με τη μεγαλύτερη κλίση (περιλαμβανομένων και των τμημάτων σχήματος  $V$  ή  $\Lambda$ ), οφείλονται στη μεταβολή της αξονικής δύναμης υπό σταθερή εγκάρσια. Η συνολική εικόνα του διαγράμματος αυτού δείχνει ότι: α) η μεταβολή του αξονικού φορτίου προκαλεί μία αναστρέψιμη (ελαστική) αξονική παραμόρφωση που είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη της εγκάρσιας δύναμης και μία μικρή αναστρέψιμη εγκάρσια μετακίνηση, και β) οι αξονικές και εγκάρσιες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται βαθμιαία και μονοτονικά λόγω ανακύκλισης, έχουν τον ίδιο λόγο όπως οι αναστρέψιμες αξονικές και εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω εγκάρσιας φόρτισης, και επομένως μπορούν να συσχετισθούν μέσω της μικρότερης από τις δύο κατηγορίες δυσκαμψιών στο διάγραμμα των μετακινήσεων  $X-Z$ , δηλ. αυτής που αντιστοιχεί σε σταθερή αξονική δύναμη και μεταβολή μόνον της εγκάρσιας δύναμης.

Στη δοκιμή S11 των Bousias et al (1992), η ανηγμένη αξονική μεταβαλλόταν μεταξύ 0 και 0.27, με μέση τιμή  $\langle v \rangle = 0.135$ . Η μεταβολή ήταν ανάλογη της μεταβολής της δύναμης στη μία εγκάρσια διεύθυνση, ενώ στην άλλη η εγκάρσια δύναμη διετηρείτο σταθερή. Εξετάσθηκαν έξι συνδυασμοί της ανηγμένης εκκεντρότητας  $\mu/(v-\langle v \rangle)$  (που ισούτο με 0.4,

0.6, 1.0 και 1.2) και της εγκάρσιας μετακίνησης (που ισούτο με 1.0, 2.0 ή 2.5 φορές τη μετακίνηση διαρροής (Σχ. 1.9(f)). Οι βρόχοι υστέρησης που προέκυψαν στην εγκάρσια διεύθυνση όπου ανακυκλίζονταν η φόρτιση είναι ασύμμετροι, με καθαρή την επιρροή της μεταβολής της αξονικής θλίψης στην αντοχή και στη δυσκαμψία αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Η ασυμμετρία είναι εντονότερη απ' ό τι στα συνήθη πειράματα όπου η αξονική δύναμη μεταβάλλεται και ελέγχεται η εγκάρσια μετακίνηση, καθότι σ' αυτήν ειδικά τη δοκιμή, που έγινε με έλεγχο των δυνάμεων και όχι των μετατοπίσεων, προσεγγίστηκε η διαξονική επιφάνεια αστοχίας προς την κατεύθυνση της μειούμενης αξονικής δύναμης, ενώ προς την άλλη κατεύθυνση η συμπεριφορά ήταν σχεδόν ελαστική. Οι βρόχοι υστέρησης στην αξονική διεύθυνση έχουν την ίδια μορφή όπως και στην εγκάρσια, λόγω της κατά προσέγγιση αναλογίας μεταξύ των εγκαρσίων μετακινήσεων και των αξονικών παραμορφώσεων που προκαλούν αυτές. Και οι δύο κατηγορίες βρόχων επηρεάζονται από την ταυτόχρονη σταθερή μετακίνηση στην εγκάρσια διεύθυνση, ως προς το ότι η σύζευξη προκαλεί μία πρόσθετη μετακίνηση και μία μείωση της δυσκαμψίας (πρβλ. τους βρόχους που διαφέρουν μόνον ως προς τη σταθερή τιμή της εγκάρσιας μετακίνησης, δηλ. αυτούς που συμβολίζονται με 1 και 2 αφενός και 4 και 5 αφετέρου). Λόγω της σύζευξης με τις δύο άλλες διευθύνσεις, η εγκάρσια δύναμη  $F_x$  που απαιτείται για τη διατήρηση σταθερής μετακίνησης στη διεύθυνσή της, μειώνεται με την ανακύκλιση των δύο άλλων δυνάμεων (Σχ. 1.9(f)). Η μείωση αυτή είναι τέτοια που κάνει όλες τις διαδρομές φορτίου στα επίπεδα  $N-F_x$  και  $F_x-F_y$  να κατευθύνονται προς το ίδιο σημείο πάνω στο επίπεδο  $F_x=0$ .

### 1.3. Πειραματική συμπεριφορά στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης

#### 1.3.1. Εισαγωγή

Σε στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης η ανελαστικότητα και τα τυχόν φαινόμενα αστοχίας συμβαίνουν σ' όλο το μήκος του στοιχείου, και όχι απλώς στα άκρα του. Για το λόγο αυτό οι δοκιμές προσπαθούν να αναπαράγουν την πραγματική ένταση στο σύνολο του μήκους του στοιχείου. Έτσι δεν χρησιμοποιούνται συνήθως δοκίμια μορφής απλού προβόλου ή αμφιέριστης δοκού με φόρτιση στο μέσο, με συγκεντρωμένο φορτίο στο σημείο που αντιπροσωπεύει το σημείο καμπής του πραγματικού στοιχείου. Ο Yamada (1976) υποστήριξε πρώτος τη χρήση αμφίπακτων δοκιμίων υπό αντιμετρική κάμψη με ετερόσημη καμπυλότητα και σταθερή τέμνουσα. Στα δοκίμια αυτά το μήκος διάτμησης  $a$  ισούται με το μισό του μήκους  $l$  και ο λόγος διάτμησης  $M/Vh$  ισούται με  $l/2h$ .

Παρά τον σχετικά περιορισμένο αριθμό των πειραμάτων με χαμηλό λόγο διάτμησης, αυτά περιλαμβάνουν και την περίπτωση της διαξονικής κάμψης, καθώς και αυτήν με το μεταβλητό αξονικό φορτίο. Η παρουσίαση στην παρούσα Ενότητα γίνεται μ' αυτή τη σειρά, δίνοντας έμφαση στις διαφορές της συμπεριφοράς μ' αυτήν των στοιχείων με μεσαίο προς υψηλό λόγο διάτμησης που εξετάσθηκε στην Ενότητα 1.2.

Τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα σε στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης παρουσιάζονται σε όρους εγκάρσιων δυνάμεων και συνολικών μετακινήσεων, χωρίς διαχωρισμό των διατμητικών παραμορφώσεων από τις καμπτικές. Η σχετική μετακίνηση των δύο άκρων, διαιρεμένη με το μήκος  $l$  του δοκιμίου, ισούται με τη γωνία στροφής χορδής των δύο άκρων, η οποία είναι το άθροισμα της στροφής χορδής λόγω καμπτικών παραμορφώσεων (κατά τις εξ. (2), (3) της Ενότητας 1.2.1) και της μέσης (κατά την έννοια του μήκους  $l$ ) διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$ .

### 1.3.2. Μονοαξονική διάτμηση υπό σταθερή αξονική δύναμη

Οι πρώτοι που μελέτησαν πειραματικά τα στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση με ορθή δύναμη ήταν οι Ιάπωνες ερευνητές (Yamada and Furui, 1968, Yamada 1974, Building Research Institute, 1976, 1978, Tanaka and Kaneko, 1984). Ακολούθησαν ο Jirsa και οι συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Texas (Jirsa et al, 1980, Woodward and Jirsa, 1984, Maruyama et al, 1984, Umehara and Jirsa, 1982, 1984), και πιο πρόσφατα άλλοι Ιάπωνες (Tanaka et al, 1984, Mizoguchi et al, 1990) και Ευρωπαίοι ερευνητές (Tegos, 1984, König et al, 1993, Garstka, 1993). Σ' όλα σχεδόν τα πειράματα το δοκίμιο ήταν αμφίπακτο σε διπλή καμπυλότητα (Σχ. 1.10(a)). Μόνον οι König et al (1993) χρησιμοποίησαν δοκίμιο μορφής απλού προβόλου με μία μάζα στο άκρο, και το δοκίμασαν σε σεισμική τράπεζα υπό το επιταχυνσιογράφημα του El Centro ή ένα απλό ημιτονοειδές (Σχ. 1.10a).

Οι σημαντικότερες παράμετροι της δοκιμής είναι η γεωμετρία και η όπλιση του δοκιμίου, η τιμή της αξονικής δύναμης και η ιστορία της φόρτισης. Ο Πίνακας 8 στο Παράρτημα παρουσιάζει παραμέτρους από διάφορα πειράματα σε στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης υπό μονοαξονική μονοτονική εγκάρσια φόρτιση με σταθερή (ή και μηδενική) αξονική δύναμη και ο Πίνακας 9 αντίστοιχα για ανακυκλιζόμενη. Η σημαντικότερη σειρά πειραμάτων είναι αυτή του Building Research Institute (1976, 1978) στην Ιαπωνία, που περιελάμβανε συνολικά 200 σχεδόν δοκιμές σε στοιχεία με λόγο διάτμησης  $a/h$  μεταξύ 1.0 και 3.0 (το 80% των οποίων περίπου είχαν λόγο διάτμησης μέχρι 2.0). Ο λόγος διάτμησης

είναι η πιο σημαντική παράμετρος για τον καθορισμό του τρόπου αστοχίας: η οριακή τιμή κάτω από την οποία η ψαθυρή διατμητική αστοχία κυριαρχεί, φαίνεται να είναι μεταξύ 2.0 και 2.5. Έτσι η παρουσίαση στην παρούσα Ενότητα αυτή αφορά στοιχεία με λόγο διάτμησης από 2.0 και κάτω.

Η μέχρι την αστοχία συμπεριφορά στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης υπό μονοτονική φόρτιση διαφέρει σαφώς απ' αυτήν των πιο λυγηρών στοιχείων: η μονοτονική καμπύλη δύναμης-εγκάρσιας μετακίνησης δεν εμφανίζει τη σαφή διαφοροποίηση κλίσης κατά τη ρηγμάτωση και τη διαρροή των διαμήκων ράβδων, ούτε τη μακρά ακολουθία της κράτυνσης, της οριακής αντοχής και του φθίνοντα κλάδου κατόπιν μέχρι την τελική αστοχία, που χαρακτηρίζει τη μονοτονική συμπεριφορά των λυγηρών στοιχείων στα οποία καθοριστική είναι η διάτμηση. Σε στοιχεία όπου καθοριστική είναι η διάτμηση, το περίπου γραμμικό και μεγάλο σε μήκος αρχικό τμήμα της καμπύλης F-δ, ακολουθείται από ομαλή και βαθμιαία καμπύλωση προς μία ξεκάθαρη κορυφή που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή. Ο φθίνων κλάδος μετά την κορυφή είναι σύντομος σε μήκος και απότομος σε κλίση. Το Σχ.1.11, κατά Garstka et al (1993), δείχνει ότι καθώς ο λόγος διάτμησης μειώνεται κάτω από μία κρίσιμη τιμή γύρω στο 2.0, η μορφή της μονοτονικής καμπύλης αλλάζει σταδιακά, από την πλάστιμη που κυριαρχείται από την κάμψη, προς την ψαθυρή που κυριαρχείται από την τέμνουσα. Επισημαίνεται ότι τα τρία δοκίμια του Σχήματος αυτού, είχαν την ίδια γεωμετρία και οπλισμό και όλα αστόχησαν στην ίδια τιμή ροπής στο άκρο, και συγκεκριμένα στην οριακή αντοχή της ακραίας διατομής. Η διαφορά στην παραμορφωσιακή συμπεριφορά τους μετά την οριακή αντοχή οφείλεται στο διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος που μεταφέρει την τέμνουσα κατά το απλό προσομοίωμα θλιπτήρων-ελκυστήρων, και στην επιρροή που έχει αυτός στις τάσεις και παραμορφώσεις της θλιβόμενης ζώνης της ακραίας διατομής. Συγκεκριμένα, η θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος (με εξάντληση της παραμόρφωσης αστοχίας του) μετά τη διαρροή των εφελκυσμένων διαμήκων ράβδων και τη μείωση του βάθους της θλιβόμενης ζώνης που ακολουθεί, λαμβάνει χώρα όχι κάθετα στην ακραία διατομή, όπως δηλ. στα λυγηρά στοιχεία, αλλά υπό κλίση ως προς τη διατομή αυτή και συγκεκριμένα κατά τη διεύθυνση του διαγώνιου θλιπτήρα. Η τιμή της ανηγμένης βράχυνσης στην κάθετη προς την ακραία διατομή διεύθυνση κατά την αστοχία αυτή μειώνεται (και μαζί της μειώνεται και η καμπυλότητα της ακραίας διατομής στην αστοχία, εφόσον ισούται με τη βράχυνση αυτή δια του ύψους της θλιβόμενης ζώνης), όσο μειώνεται η κλίση του διαγώνιου θλιπτήρα ως προς την ακραία διατομή, δηλ. όσο μειώνεται ο λόγος διάτμησης. Όσο περισσότερο πέφτει ο λόγος διάτμησης κάτω από την οριακή τιμή του 2.0 έως 2.5, τόσο περισσότερο η συμπεριφορά καθορίζεται από αυτήν του σκυροδέματος κατά το διαγώνιο

θλιπτήρα. Έτσι τελικά το σχήμα της μονοτονικής καμπύλης F-δ τείνει να μοιάζει με αυτό του διαγράμματος σ-ε του σκυροδέματος σε θλίψη.

Η παρουσία θλιπτικής δύναμης με μικρή-προς-μέση τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης,  $\nu$ , αυξάνει τη μονοτονική οριακή αντοχή, καθώς αυξάνει το βάθος της θλιβόμενης ζώνης που καλείται να αναλάβει τη λοξή δύναμη του διαγώνιου θλιπτήρα, έχει όμως μικρή επιρροή στην παραμόρφωση κατά την οριακή αντοχή και στο φθίνοντα κλάδο μετά απ' αυτήν (Σχ. 1.12).

Η συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη εγκάρσια φόρτιση και σταθερή αξονική δύναμη εξαρτάται κατά βάση: α) από το μέγεθος των επιβεβλημένων παραμορφώσεων σε σύγκριση με αυτές στην οριακή αντοχή υπό μονοτονική φόρτιση, β) από την τιμή και το πρόσημο της αξονικής δύναμης. Όπως δείχνει το Σχ. 1.13(a), η μονοτονική καμπύλη F-δ αποτελεί περιβάλλουσα για την κορυφή του πρώτου βρόχου υστέρησης για ορισμένη μέγιστη τιμή παραμόρφωσης του κύκλου. Οι επόμενοι κύκλοι στην ίδια μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζουν μείωση αντοχής και δυσκαμψίας, η οποία είναι αξιοσημείωτη αν η μέγιστη παραμόρφωση του κύκλου δεν ξεπερνά αυτήν που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή, αυξάνεται όμως δραματικά αν την ξεπερνά (πρβλ. και τους τρεις κύκλους μετά την οριακή αντοχή στο Σχ. 1.13(a)). Όπως δείχνει το Σχ. 1.13(b) και η περιβάλλουσα στον τρίτο κύκλο στο Σχ. 1.13(b), μια τιμή αξονικής θλίψης που αντιστοιχεί σε  $\nu=-0.19$  ή  $\nu=-0.155$  αντίστοιχα σ' αυτά τα δύο Σχήματα, επιταχύνει τη μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση. Αντίθετα, αν η αξονική δύναμη είναι εφελκυστική, από κάποια τιμή του λόγου διάτμησης (μικρότερη από 2.0) και πάνω η συμπεριφορά κυριαρχείται από την κάμψη και είναι πλάσιμη (βλ. και Σχ. 1.2, για τιμές του  $\nu$  κάτω από την τομή της καμπύλης  $\mu_u=(a/h)\nu_u(\nu)$  και του διαγράμματος  $\mu-\nu$  της ακραίας διατομής). Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του Σχ. 1.14(c), στην οποία η συμπεριφορά για  $\nu=0.12$  (εφελκυσμό) έχει τα χαρακτηριστικά της καμπτικής συμπεριφοράς: διαρροή και κράτυνση, απουσία αστοχίας και μείωσης αντοχής με την ανακύκλιση σε μέσες τιμές της γωνίας στροφής χορδής, κ.λ.π. Οι κορυφές του 3ου κύκλου στην ίδια μέγιστη μετακίνηση (που δεν παρουσιάζονται στο Σχ. 1.14(c)) βρίσκονται ελάχιστα μόνο κάτω από αυτές του 1ου. Σ' ένα παρόμοιο πείραμα με  $\nu=0.24$  (εφελκυσμό), δεν υπάρχει καμμία διαφορά μεταξύ 1ου και 3ου κύκλου φόρτισης.

Οι βρόχοι υστέρησης είναι πιο στενοί από αυτούς των λυγηρών στοιχείων και για μεγάλες τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης του κύκλου, ιδίως όταν αυτή ξεπερνά την παραμόρφωση στην οριακή αντοχή, έχουν έντονα τη μορφή ανάστροφου S (Σχ. 1.12 και 1.14). Βρόχοι με μικρές τιμές μέγιστης παραμόρφωσης είναι στενοί και οιονεί γραμμικοί-ελαστικοί.



Το σχήμα των βρόχων υστέρησης σχετίζεται με το ρόλο των συνδετήρων: όπως φαίνεται από τις μετρήσεις των μηκύνσεων στους συνδετήρες στο Σχ. 1.15, οι συνδετήρες παραμένουν αδρανείς μέχρι την εμφάνιση της λοξής ρηγμάτωσης, και λίγο μετά απ' αυτήν διαρρέουν. Πριν την διαρροή των συνδετήρων, η αποφόρτιση και η επαναφόρτιση αναμένεται να είναι σχεδόν ελαστική και δια της αρχής των αξόνων, καθώς για μηδενική εγκάρσια δύναμη οι λοξές ρωγμές κλείνουν και δεν υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση. Μετά τη διαρροή των συνδετήρων, η αποφόρτιση και η επαναφόρτιση οδηγεί στη βαθμιαία συσσώρευση σ' αυτούς ανελαστικών μηκύνσεων, οπότε για μηδενικό φορτίο οι λοξές ρωγμές δεν κλείνουν. Για να μπορέσει να αναπτυχθεί κάποια σημαντική εσωτερική αντίσταση στην εξωτερική επιβεβλημένη παραμόρφωση, οι λοξές ρωγμές χρειάζεται να κλείσουν. Κατά το κλείσιμο των ρωγμών η ενεργός δυσκαμψία είναι πολύ μικρή. Μετά όμως από το κλείσιμο και προτού ανοίξει πλήρως η λοξή ρωγμή στην αντίθετη κατεύθυνση, η ενεργός δυσκαμψία αυξάνει. Αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς είναι η στένωση και η σιγμοειδής μορφή των βρόχων. Όταν διαρρεύσουν περαιτέρω οι συνδετήρες, οι λοξές ρωγμές θα ανοίξουν περισσότερο, η συνάφεια μεταξύ συνδετήρων και σκυροδέματος θα μειωθεί και η στένωση των βρόχων στο μέσο τους θα γίνει εντονότερη.

Η επιρροή της μείωσης του λόγου διάτμησης στη συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενο φορτίο είναι όμοια μ' αυτήν της μετάβασης από εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις σε θλιπτικές. Η σύγκριση των περιβαλλουσών των πρώτων βρόχων υστέρησης που αντιστοιχούν σε λόγους  $a/d$  από 1.25 έως 2.44 στο Σχ. 1.16, καθώς και τα αποτελέσματα του Τέγου (1984) επί πέντε δοκιμίων που έχουν λόγο διάτμησης από 1.0 έως 2.5 αλλά κατά τα άλλα είναι όμοια, δείχνει ότι όσο μειώνεται ο λόγος διάτμησης, τόσο αυξάνεται η μονοτονική οριακή αντοχή αλλά και μειώνεται η αντίστοιχη παραμορφωσιμότητα. Συγχρόνως αυξάνεται η μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση σε επίπεδα παραμορφώσεων πέραν αυτών της μονοτονικής οριακής αντοχής.

Τα πειραματικά αποτελέσματα για την επιρροή της ποσότητας οπλισμού προκαλούν κάποια έκπληξη: η σύγκριση των πέντε περιβαλλουσών των βρόχων 1ου κύκλου στο Σχ. 1.17 κατά Woodward and Jirsa (1984), δείχνει ότι ο τριπλασιασμός του γεωμετρικού ποσοστού συνδετήρων από τη χαμηλή τιμή του 0.07% (απόσταση συνδετήρων  $h/3$ ) αυξάνει την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή αλλά δεν επηρεάζει την ίδια την οριακή αντοχή. Με την περαιτέρω αύξηση του ποσοστού των συνδετήρων σε 0.31%, 0.48% και 0.73% (απόσταση συνδετήρων 2.57m, 1.75m και 1.125m αντίστοιχα) αυξάνει λίγο την οριακή αντοχή, αλλά η παραμορφωσιμότητα και ο φθίνων κλάδος δεν βελτιώνονται άλλο. Από την άλλη πλευρά όμως οι Tanaka et al (1988) διεπίστωσαν ότι, για ανηγμένη αξονική

θλίψη ίση με 0.1, η αύξηση του γεωμετρικού ποσοστού συνδετήρων από 0.56% σε 0.85% βελτιώνει σημαντικά και την οριακή αντοχή αλλά και την αντίστοιχη τιμή της παραμόρφωσης, ενώ η περαιτέρω αύξησή του σε 1.28% αυξάνει μεν σημαντικά την παραμόρφωση στην κορυφή και μειώνει την πτώση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση σε επίπεδα πέραν της οριακής αντοχής, αφήνει όμως αναλώσιμη την ίδια την οριακή αντοχή. Προκύπτει λοιπόν ότι τα πειραματικά αποτελέσματα στο Πανεπιστήμιο του Texas και οι πιο πρόσφατες Ιαπωνικές μελέτες, θέτουν σε αμφισβήτηση το συμπέρασμα των πρώιμων Ιαπωνικών ερευνών (Yamada and Furui 1968, Yamada, 1974) ότι ένα ελάχιστο ποσοστό συνδετήρων ίσο με 0.6% αρκεί για να αποφευχθεί η διατμητική αστοχία. Το τελικό συμπέρασμα είναι πάντως ότι ο εγκάρσιος οπλισμός έχει δευτερεύοντα ρόλο στον καθορισμό της συμπεριφοράς στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης: η σημαντικότερη συμβολή των συνδετήρων φαίνεται ότι είναι η περίσφιγξη του σκυροδέματος του διαγώνιου θλιπτήρα και ο περιορισμός του ανοίγματος των λοξών ρωγμών. Ασχέτως του ποσοστού τους, οι συνδετήρες φαίνεται να εισέρχονται στην ανελαστική περιοχή μόνον όταν, ή αφού επιβληθούν οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στη μονοτονική οριακή αντοχή του στοιχείου. Αφού ξεπεραστούν αυτές οι τιμές παραμορφώσεων, η διαρροή και η σταδιακή απώλεια της συνάφειας στους συνδετήρες συμβάλλουν ασφαλώς στη μείωση της αντοχής, της δυσκαμψίας και της δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας με την ανακύκλιση.

Το Σχ. 1.18 δείχνει την επιρροή της αύξησης του συνολικού ποσοστού διαμήκους χάλυβα από 1.1% σε 2.5%: η οριακή διατμητική αντοχή αυξάνεται μόνον κατά 20%, ενώ η τιμή της αντίστοιχης παραμόρφωσης δεν αλλάζει. Όμως η αύξηση του ποσοστού διαμήκους χάλυβα αυξάνει δραματικά την πτώση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση!

### 1.3.3. Μονοαξονική διάτμηση με μεταβλητή αξονική δύναμη

Ο Τέγος (1984) έκανε μονοτονικά πειράματα επί 6 δοκιμίων με λόγο διάτμησης  $a/h$  ίσο με 1.5, στα οποία η αξονική δύναμη αυξάνονταν με την τέμνουσα μέχρι και την αστοχία. Η σχέση  $F-\delta$  ήταν πιο απότομη και πιο γραμμική μέχρι την αστοχία σε σύγκριση με όμοια δοκίμια με σταθερή αξονική δύναμη, επειδή η αύξηση της δυσκαμψίας με την αύξηση του αξονικού φορτίου αντιστάθμισε τη μείωσή της λόγω της αύξησης της τιμής της τέμνουσας προς την οριακή αντοχή. Παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχ. 1.19, το οποίο δείχνει επίσης ότι όταν η ανηγμένη αξονική θλίψη αυξάνεται με την τέμνουσα μέχρι μέγιστη τιμή  $v=0.48$  στην αστοχία (Σχ. 1.19(a)), η μονοτονική συμπεριφορά γίνεται πιο γραμμική παρά για αύξηση της  $v$  μέχρι  $v=0.25$  (Σχ. 1.19(b)).

Στο πείραμά τους ATC-U οι Maruyama et al (1984) μετέβαλαν την ανηγμένη αξονική δύναμη μεταξύ τιμών  $-0.18$  και  $+0.18$ , κατ' αναλογίαν προς την εγκάρσια μετακίνηση, έτσι ώστε η κορυφή του κάθε κύκλου να συμπίπτει με την ακραία τιμή αξονικής δύναμης. Η μέγιστη απόκριση σε κάθε ημικόκλο δεν διαφέρει ουσιαστικά, σε δύναμη και μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση, από τα αντίστοιχα αποτελέσματα πειραμάτων σε παρόμοια δοκίμια υπό σταθερή αξονική δύναμη, ίση με τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του πειράματος ATC-U. Αυτό σημαίνει ότι όταν η αξονική δύναμη μεταβάλλεται με την εγκάρσια μετατόπιση α) η συμπεριφορά επηρεάζεται ουσιαστικά μόνο από την τρέχουσα, στιγμιαία τιμή της αξονικής δύναμης, και β) όταν η αξονική δύναμη και η εγκάρσια μετακίνηση φθάνουν τη μέγιστη τιμή τους ταυτόχρονα, η μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας καθορίζεται από τη μέγιστη αξονική θλίψη στον κύκλο.

#### 1.3.4. Διαξονική διάτμηση με σταθερή αξονική δύναμη

Το πειραματικό πρόγραμμα του Πανεπιστημίου του Texas περιελάμβανε αρκετές διαξονικές δοκιμές σε στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης. Μερικά από αυτά στην πραγματικότητα ήταν μονοαξονικά κατά τη διαγώνιο της τετραγωνικής διατομής, ή σε επίπεδο υπό γωνία  $30^\circ$  ως προς τον “ισχυρό” ή τον “ασθενή” άξονα δοκιμίων με ορθογωνική διατομή (Umehara and Jirsa, 1984). Τα ψευδοδιαξονικά πειράματα, μονοτονικά ή ανακυκλιζόμενα, στα στοιχεία τετραγωνικής διατομής, με ή χωρίς αξονική δύναμη, έδειξαν παρόμοια συμπεριφορά με αυτά που διεξήχθησαν παράλληλα στις πλευρές της διατομής, αρκεί τα αποτελέσματα να εκφράζονται σε όρους συνισταμένης δύναμης και μετατόπισης. Αυτό σημαίνει ότι όταν η δοκιμή γίνεται κατά τη διαγώνιο, το ενεργό στατικό ύψος της διατομής, που καθορίζει το λόγο διάτμησης, ισούται με το στατικό ύψος  $d$  της τετράγωνης διατομής. Η συμπεριφορά δοκιμίων ορθογωνικής διατομής υπό γωνία ως προς τον “ασθενή” ή τον “ισχυρό” άξονα, ήταν ενδιάμεσα μεταξύ των παράλληλων στις πλευρές της διατομής, πράγμα που σημαίνει ότι το ενεργό στατικό ύψος έχει τιμή ενδιάμεση μεταξύ των δύο τιμών παράλληλα στις πλευρές.

Όταν η ανακύκλιση του φορτίου γίνεται εναλλασσόμενα και ταυτόχρονα κατά δύο κάθετες μεταξύ τους εγκάρσιες διευθύνσεις (είτε παράλληλα στις πλευρές, είτε παράλληλα στις διαγωνίους τετραγωνικών διατομών, είτε και κατά  $30^\circ$  ως προς τον “ασθενή” και τον “ισχυρό” άξονα ορθογωνικών διατομών), η ιστορία της φόρτισης στη μία διεύθυνση επηρεάζει τη συμπεριφορά στην κάθετη διεύθυνση μόνον όταν η μέγιστη παραμόρφωση στην πρώτη διεύθυνση ξεπεράσει αυτήν που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή στη διεύθυνση

αυτή. Όπως δείχνει το Σχ. 1.12(b) για μία δοκιμή στην οποία τρεις κύκλοι με μέγιστη παραμόρφωση πέραν της οριακής αντοχής προηγήθηκαν της φόρτισης στην κάθετη διεύθυνση, σε τέτοιες περιπτώσεις παρατηρείται δραματική μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας. Αυτά σημαίνουν ότι η υπέρβαση σε οποιαδήποτε εγκάρσια διεύθυνση της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή υπό μονοτονική φόρτιση, σημαίνει “αστοχία” του δοκιμίου. Η “αστοχία” αυτή γίνεται αισθητή όχι μόνο στην διεύθυνση της υπέρβασης της παραμόρφωσης στην οριακή αντοχή, αλλά και σε οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση που μπορεί να φορτισθεί κατόπιν. Αυτή είναι και η μόνη περίπτωση που το δοκίμιο φαίνεται να διατηρεί κάποια ανάμνηση της επιρροής της φόρτισης σε μία κάθετη διεύθυνση. Από την άποψη αυτή η διαξονική συμπεριφορά στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης δεν διαφέρει απ’ αυτήν των στοιχείων με μέσο προς υψηλό λόγο διάτμησης, όπως έδειξαν τα πειράματα SP5 και SP6 των Otani et al (1984) και η δοκιμή S1 των Bousias et al (1995).

Οι Umehara and Jirsa (1984) διαπίστωσαν ότι για σταθερή αξονική δύναμη η οριακή διατμητική αντοχή ( $V_x$ ,  $V_y$ ) σε αναλογική διαξονική φόρτιση, είτε μονοτονική, είτε ανακυκλιζόμενη (οπότε μπορεί να υπάρχει μείωση αντοχής λόγω ανακύκλισης), ορίζεται από επιφάνεια με κυκλικό περίγραμμα κάθετα στον άξονα των N για τετράγωνη διατομή, ή με ελλειπτικό για ορθογωνική διατομή.

Οι Maruyama et al (1984) έκαναν δύο διαξονικές δοκιμές, τις O-U2 και O-U4, με ανακύκλιση της μετακίνησης στη μία εγκάρσια διεύθυνση υπό σταθερή μετακίνηση στην κάθετη διεύθυνση. Στο πείραμα O-U2 αυτή η σταθερή μετακίνηση ήταν μικρότερη αυτής που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή, ενώ στο O-U4 ήταν μεγαλύτερη. Στο O-U2 η συμπεριφορά στη διεύθυνση της ανακύκλισης επηρεάστηκε ελάχιστα από την ταυτόχρονη μετακίνηση στην κάθετη διεύθυνση, ενώ παράλληλα η δύναμη που απαιτούνταν σ’ αυτή την τελευταία διεύθυνση για τη διατήρηση σταθερής μετακίνησης μειώθηκε σταθερά, σχεδόν στο μηδέν (Σχ. 1.20(a)). Ιδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε στο πείραμα S2 των Bousias et al (1995), σε λυγηρό υποστύλωμα με  $l/h=6$ . Στη δοκιμή O-U4 όμως η υπέρβαση της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή στη μία διεύθυνση, οδήγησε κατά την ανακύκλιση σε σημαντική μείωση αντοχής και δυσκαμψίας στην κάθετη διεύθυνση (Σχ. 1.20(b)). Και στα δύο πειράματα η μείωση αντοχής ήταν πολύ μικρότερη παρά στα O-B2 και O-B4, στα οποία ασκήθηκαν τρεις κύκλοι παραμόρφωσης με μέγιστη τιμή αυτήν που διατηρήθηκε σταθερή στα O-U2, O-U4, και κατόπιν η παραμόρφωση στη διεύθυνση αυτή μηδενίστηκε προτού αρχίσει η ανακύκλιση στην άλλη διεύθυνση. Φαίνεται, λοιπόν, ότι σε διαξονικά πειράματα η μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση

καθορίζεται όχι μόνον από το αν ξεπεράσθηκε ή όχι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή, αλλά και από την ανακύκλιση που συνδέεται μ' αυτήν την υπέρβαση.

Στη διαξονική δοκιμή O-S των Maruyama et al (1984), ασκήθηκε διαξονική διαδρομή φόρτισης μορφής τεσσάρων ομόκεντρων τετραγώνων που περικλείει το ένα το άλλο, με ημιπλάτος πλευράς ίσο περίπου με το 1/3, 2/3, 1 και 4/3 φορές της παραμόρφωσης στην οριακή αντοχή σε μονοτονική φόρτιση. Κάθε τετράγωνο διαγράφεται τρεις φορές με αριστερόστροφη φορά (Σχ. 1.21(a)).

Οι διαδρομές δυνάμεων που μετρήθηκαν για τους τρεις κύκλους στο εσωτερικό τετράγωνο δείχνουν σχεδόν γραμμική-ελαστική συμπεριφορά, με στενούς και σταθερούς βρόχους και σχεδόν πλήρη απουσία σύζευξης των δύο διευθύνσεων (η οποία μετράται από τη γωνία που σχηματίζει η διαδρομή των δυνάμεων με την αντίστοιχη των μετακινήσεων). Κατά μήκος του δεύτερου τετραγώνου, η συμπεριφορά ήταν αρκετά σταθερή αρχικά και απλώς αυξήθηκε η σύζευξη μεταξύ των δύο διευθύνσεων (με στροφή της διαδρομής δυνάμεων ως προς αυτήν των μετακινήσεων). Όμως οι δυνάμεις άρχισαν να μειώνονται αμέσως μετά τη δεύτερη φορά που η μέγιστη τιμή της συνισταμένης μετακίνησης, στη γωνία του τετραγώνου της διαδρομής των μετακινήσεων, έφθασε μια τιμή ίση με  $\sqrt{2} \times 2/3 = 0.94$  φορές την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μονοτονική οριακή αντοχή υπό μονοτονική φόρτιση. Στο εξής η διαδρομή των δυνάμεων κατέρρευσε σπειροειδώς προς τα μέσα, ιδίως καθώς οι επιβεβλημένες μετακινήσεις αυξήθηκαν περαιτέρω στα δύο εξωτερικά τετράγωνα (Σχ. 1.21(b)). Αυτό είναι ένα ακόμη παράδειγμα της σημασίας της τιμής της παραμόρφωσης στην οριακή αντοχή υπό μονοτονική φόρτιση, σαν κριτήριο για τη σταθερότητα της συμπεριφοράς των στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης.

Στη διαξονική δοκιμή O-Z των Maruyama et al (1984), με τις διαδρομές επιβεβλημένων παραμορφώσεων μορφής ομόκεντρων "8" που περικλείουν το ένα το άλλο, η μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση ήταν ταχύτερη απ' ό,τι στην O-S, μετά από την πρώτη φορά που η συνισταμένη μετακίνηση έφθασε  $\sqrt{2} \times 2/3 = 0.94$  φορές την τιμή της παραμόρφωσης στη μονοτονική οριακή αντοχή. (Αυτό συνέβη στον ενδιάμεσο των τριών διαδρομών μορφής S που επεβλήθησαν). Στη συνέχεια όμως η μείωση ήταν μικρότερη απ' ό,τι η δοκιμή O-S. Αυτό φαίνεται να οφείλεται στο ότι για τη διαδρομή "8" η συνισταμένη μετακίνηση φθάνει τη μέγιστη τιμή της δύο μόνον φορές για κάθε περιστροφή, αντί τέσσερις για την τετραγωνική διαδρομή της δοκιμής O-S.

Το Σχ. 1.22 συγκρίνει τα σημεία της μέγιστης συνισταμένης δύναμης και μετακίνησης σε πέντε ανακυκλιζόμενα πειράματα των Maruyama et al (1984) επί παρόμοιων

δοκιμίων, υπό μηδενικό αξονικό φορτίο: το μονοαξονικό πείραμα O-U, τα μονοαξονικά O-U2 και O-U4, μετά όμως την ολοκλήρωση στην κάθετη διεύθυνση τριών κύκλων με μέγιστη μετακίνηση ίση με  $2/3$  και  $4/3$  αυτής στην οριακή αντοχή, και τα O-Z, O-S, που ήταν διαξονικά με διαδρομές μετακινήσεων μορφής “8” ή τετραγώνων. Το Σχήμα 1.22 δείχνει ότι η επίπτωση της προσέγγισης (ή και υπέρβασης) της μετακίνησης στην μονοτονική οριακή αντοχή είναι πολύ μεγαλύτερες στα διαξονικά πειράματα, και φαίνεται να συναρτώνται με την ενέργεια που απορροφάται κατά την ανακύκλιση. Έτσι στα πραγματικά διαξονικά πειράματα, το απλό κριτήριο της υπέρβασης της παραμόρφωσης στη μονοτονική οριακή αντοχή δεν επαρκεί για την ερμηνεία και την ποσοτικοποίηση της μείωσης της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση.

Τέλος, στη δοκιμή ATC-B οι Maruyama et al (1984) μετέβαλαν και το ανηγμένο αξονικό φορτίο, μεταξύ της τιμής  $v=0.07$  (εφελκυσμός) και  $v=-0.2$  (θλίψη), συγχρόνως με την ανακύκλιση των μετακινήσεων στη μία εγκάρσια διεύθυνση και αφού είχε ολοκληρωθεί ανακύκλιση στην άλλη εγκάρσια διεύθυνση υπό σταθερή αξονική θλίψη  $v=-0.2$ . Κατά τους ημικύκλους στους οποίους η ανηγμένη αξονική δύναμη έφθασε την ακραία τιμή του  $v=0.07$ , η μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη απ’ ότι σε παρόμοια δοκιμή υπό σταθερό αξονικό εφελκυσμό  $v=0.07$ . Αντίθετα, κατά εκείνους του ημικύκλους στους οποίους η αξονική δύναμη έφθανε τη θλιπτική τιμή των  $v=-0.2$ , η μείωση της αντοχής ήταν μικρότερη απ’ ότι σε παρόμοιο δοκίμιο υπό σταθερή αξονική θλίψη  $v=-0.2$ . Τα συμπεράσματα αυτά έρχονται σε κάποια αντίθεση με τα αποτελέσματα του μονοαξονικού πειράματος ATC-U των Maruyama et al (1984), που αναφέρθηκαν στο τέλος της προηγούμενης ενότητας.

Οι Mizoguchi et al (1990) παρουσίασαν ενδιαφέροντα ψευδοδιαξονικά αποτελέσματα υπό μεταβητό αξονικό φορτίο. Δοκιμάστηκαν μονοαξονικά υποστυλώματα με λόγο διάτμησης 1.25 και τετράγωνη διατομή, υπό γωνία  $22.5^\circ$  (σειρά 2...) ή  $45^\circ$  (σειρά 4...) ως προς την πλευρά της διατομής. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά μονοαξονικής δοκιμής κατά την πλευρά της διατομής (σειρά 0...). Στη σειρά πειραμάτων με την ονομασία “V”, και ιδίως στη σειρά V15, η ανηγμένη αξονική δύναμη μεταβάλλονταν γραμμικά με την τέμνουσα V, από  $v=-0.2$  (θλίψη) σε  $v=-0.5$  όταν η V αυξανόταν από 0 σε +100kN (“θετική” V), για να παραμείνει (η v) κατόπιν σταθερή, και από  $v=-0.2$  σε  $v=0.1$  (εφελκυσμός) για μεταβολή της V από 0 έως -50kN (“αρνητική” V), οπότε και παρέμενε σταθερή στο 0.1. Στη σειρά V04, οι ακραίες τιμές της v ήταν -0.4 και 0, αντί του -0.5 και 0.1. Στη σειρά “VA”, η ανηγμένη αξονική παρέμενε σταθερή σε κάθε ημικύκλο και ίση με τις ανωτέρω μέγιστες τιμές.

Το Σχ. 1.23 παρουσιάζει την εικόνα ρηγμάτωσης και τους βρόχους υστέρησης των τριών δοκιμών της σειράς V04. Τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ανεξάρτητα της διεύθυνσης της φόρτισης ως προς τις πλευρές της διατομής, αλλά εμφανίζουν έντονη επιρροή της μεταβολής του αξονικού φορτίου. Στους ημικύκλους με θετική (εφελκυστική) μέγιστη αξονική δύναμη, η ρηγμάτωση ήταν πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη και υπό μεγαλύτερη γωνία ως προς τον άξονα του μέλους, ενώ η σχέση δυνάμεων-μετατοπίσεων χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη αντοχή και δυσκαμψία, αλλά από μεγαλύτερη πλαστιμότητα και μικρότερη μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση μετά την οριακή αντοχή. Όμως η μορφή του βρόχου ήταν η ίδια (ανάποδο S) και προς τις δύο φορές της δύναμης (δηλ. και για θετική και για αρνητική αξονική δύναμη). Η σύγκριση των περιβαλλουσών στις διάφορες δοκιμές, δεν δείχνει σημαντική επιρροή της μεταβολής της αξονικής δύναμης στους δύο ημικύκλους: για φόρτιση υπό γωνία  $0^\circ$  ή  $22.5^\circ$  ως προς την πλευρά (σειρές 0... και 2...), οι δοκιμές V, δηλ. αυτές με γραμμικά μεταβαλλόμενη αξονική δύναμη, εμφανίζουν λίγο μικρότερη αντοχή από τις VA, οι οποίες έχουν σταθερή αξονική δύναμη σε κάθε ημικύκλο. Όμως οι δοκιμές κατά τη διαγώνιο (σειρά 4...) δείχνουν το αντίθετο.

Οι Mizoguchi et al (1990) παρουσίασαν επίσης και τη μεταβολή της μέσης αξονικής παραμόρφωσης με την ανακύκλιση του εγκάρσιου φορτίου. Όπως δείχνει το Σχ. 1.24 για τη σειρά V04, η σύζευξη μεταξύ της εγκάρσιας διεύθυνσης και της αξονικής αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η γωνία της διεύθυνσης της φόρτισης με την πλευρά της διατομής. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά των Bousias et al (1995) για λυγηρά υποστυλώματα, ως προς το ότι η μέση αξονική παραμόρφωση έχει δύο συνιστώσες: η πρώτη αυξάνεται βαθμιαία και μονοτονικά με την ανακύκλιση, η οποία στην περίπτωση αυτή με  $\nu=-0.2$  είναι βράχυνση, ενώ η δεύτερη είναι η αναστρέψιμη αξονική μήκυνση που συνοδεύει σε κάθε ημικύκλο την καμπτική παραμόρφωση και είναι περίπου ανάλογη προς αυτήν. Στην περίπτωση του Σχ., 1.24 η δεύτερη συνιστώσα σχεδόν εξαφανίζεται στους κύκλους στους οποίους η αξονική θλίψη αυξάνεται μαζί με την εγκάρσια μετατόπιση. Αντίθετα στον ημικύκλο όπου η ανηγμένη αξονική θλίψη μεταβάλλεται από  $-0.2$  έως  $0$ , η δεύτερη συνιστώσα εμφανίζεται ενισχυμένη, καθότι επαλληλίζεται με την αναίρεση της αξονικής βράχυνσης που προκαλεί η ανηγμένη θλίψη με τιμή  $\nu=-0.2$ .

### 1.3.5. Συμπεράσματα

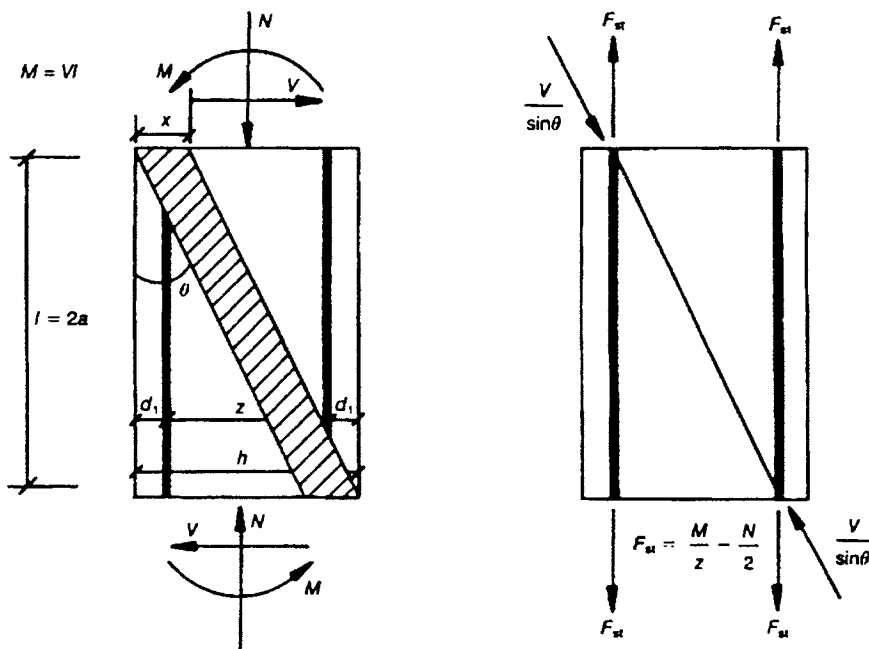
Η ανασκόπηση των κυριοτέρων πειραματικών αποτελεσμάτων στοιχείων με λόγο διάτμησης κάτω από 2.0 έως 2.5, επιτρέπει τα εξής συμπεράσματα:

α) Η μονοαξονική μονοτονική συμπεριφορά είναι ψαθυρή, χωρίς σαφές σημείο διαρροής και με γρήγορη πτώση της αντοχής μετά την οριακή αντοχή. Η οριακή αντοχή συμβαίνει σε σχετικά χαμηλές τιμές της γωνίας στροφής χορδής, που είναι σχεδόν ανεξάρτητες του αξονικού φορτίου και της ποσότητας διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού (τουλάχιστον για το σύννηθες πεδίο μεταβολής τους), αλλά μειώνεται με την τιμή του λόγου διαρροής. Η μονοτονική καμπύλη αποτελεί και την περιβάλλουσα της συμπεριφοράς σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

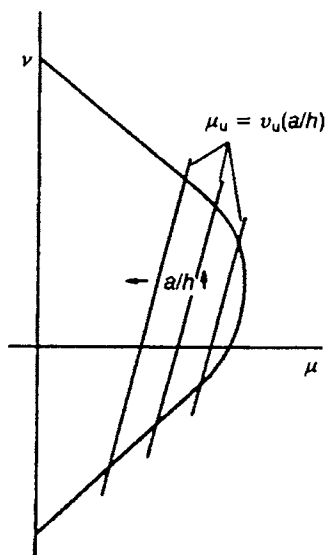
β) Οι βρόχοι υστέρησης έχουν μικρό εύρος και παίρνουν σχήμα ανάποδου S, όταν οι παραμορφώσεις φθάσουν και ξεπεράσουν αυτήν που αντιστοιχεί στη μονοτονική οριακή αντοχή. Επομένως η απορρόφηση ενέργειας κατά την ανακύκλιση είναι περιορισμένη και δεν αυξάνεται με το εύρος των μετακινήσεων. Η ανακύκλιση προξενεί βαθμιαία μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας, που αυξάνεται με την αύξηση της αξονικής θλίψης και με το εύρος των εγκάρσιων μετακινήσεων. Εκτός εάν η αξονική δύναμη είναι εφελκυστική, η υπέρβαση της τιμής της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη μονοτονική οριακή αντοχή, σηματοδοτεί την επιτάχυνση της μείωσης της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση και την εμφάνιση σοβαρής βλάβης στο στοιχείο. Στη βλάβη αυτή οφείλεται η μεγάλη μείωση αντοχής και δυσκαμψίας που παρατηρείται σε οποιαδήποτε μεταγενέστερη φόρτιση καθ' οιανδήποτε εγκάρσια διεύθυνση. Αυτή η μετά την οριακή αντοχή πτώση της αντοχής και της δυσκαμψίας, αυξάνεται με το επίπεδο της αξονικής θλίψης και το ποσοστό του διαμήκους χάλυβα, αλλά είναι σχεδόν ανεξάρτητα από την ποσότητα των συνδετήρων, μέσα βεβαίως στα συνήθη πλαίσια μεταβολής της.

Οι ανωτέρω παρατηρήσεις δείχνουν την εγγενώς χαμηλή πλαστιμότητα γενικά την κακή συμπεριφορά στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης υπό ανακυκλιζόμενη ένταση. Καθοριστικά της συμπεριφοράς αυτής είναι η γεωμετρία του στοιχείου (κυρίως ο λόγος διάτμησης) και μέχρις ενός βαθμού η τιμή της αξονικής δύναμης. Έτσι ο μηχανικός έχει περιορισμένη δυνατότητα βελτίωσης της συμπεριφοράς αυτής μέσω της ποσότητας και των λεπτομερειών της όπλισης.

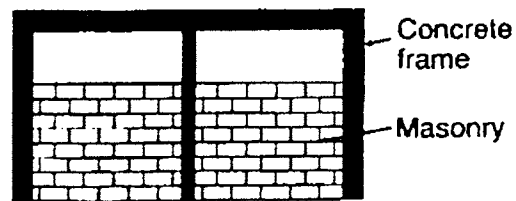




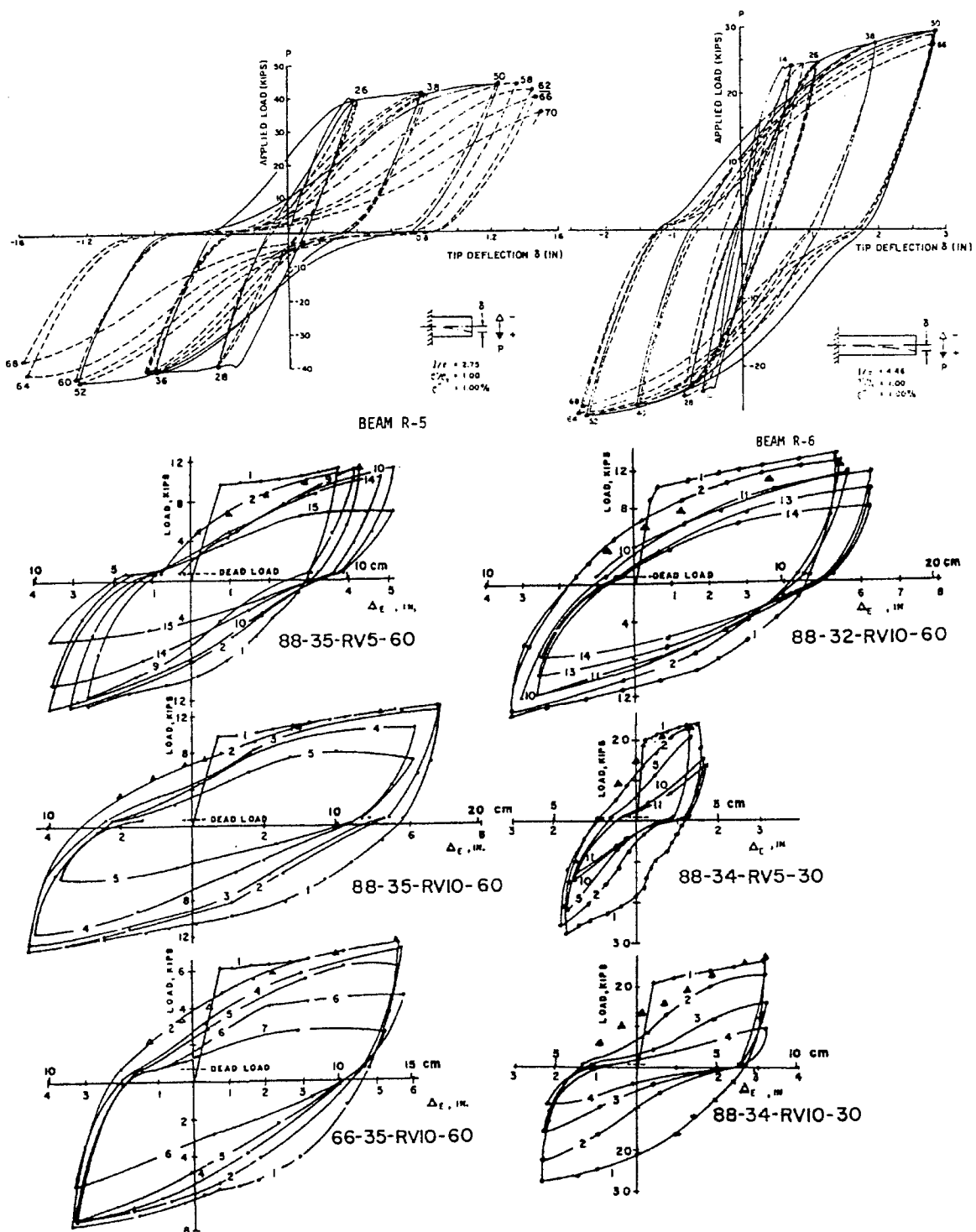
Σχήμα 1.1 Απλοποιημένο προσομοίωμα θλιπτήρων-ελκυστήρων για στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης



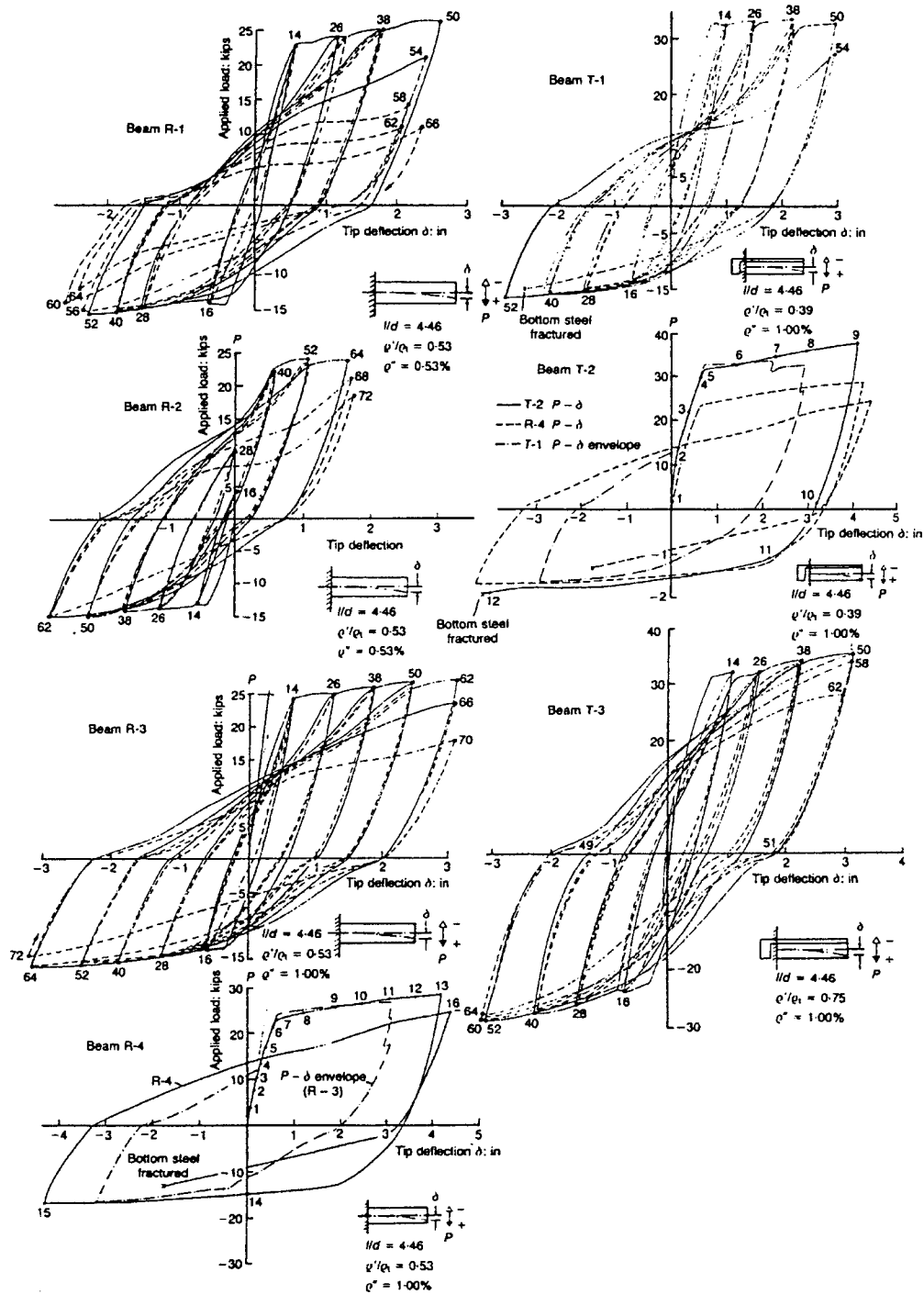
Σχήμα 1.2 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M-N με επιρροή τέμνουσας



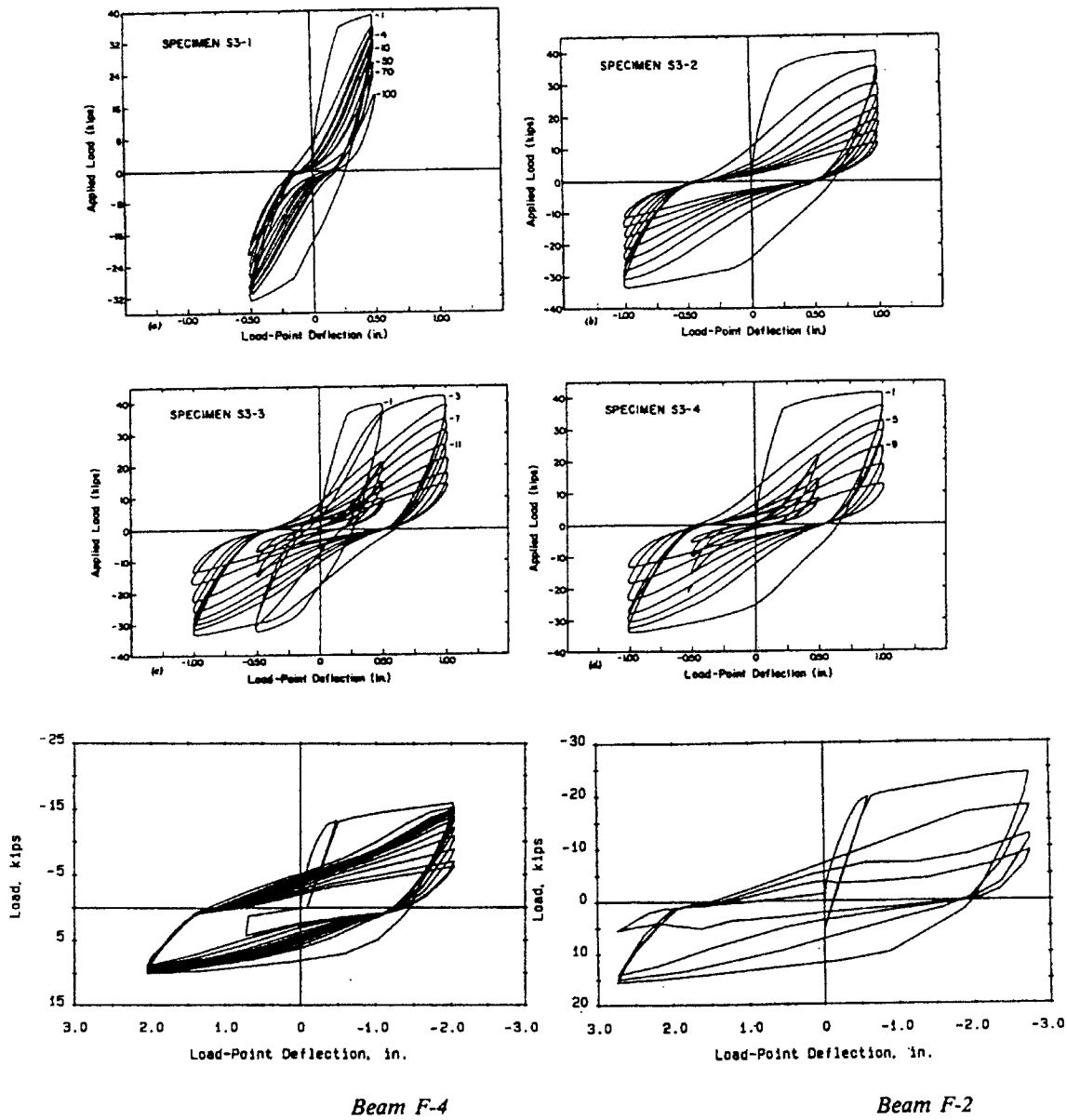
Σχήμα 1.3 Επίδραση της διάτμησης σε "κοντά" υποστυλώματα τοιχοπληρωμένων πλαισίων



Σχήμα 1.4 Αντιπροσωπευτικοί βρόχοι δύναμης-μετατόπισης δοκιμών με συμμετρική διατομή και οπλισμό σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη

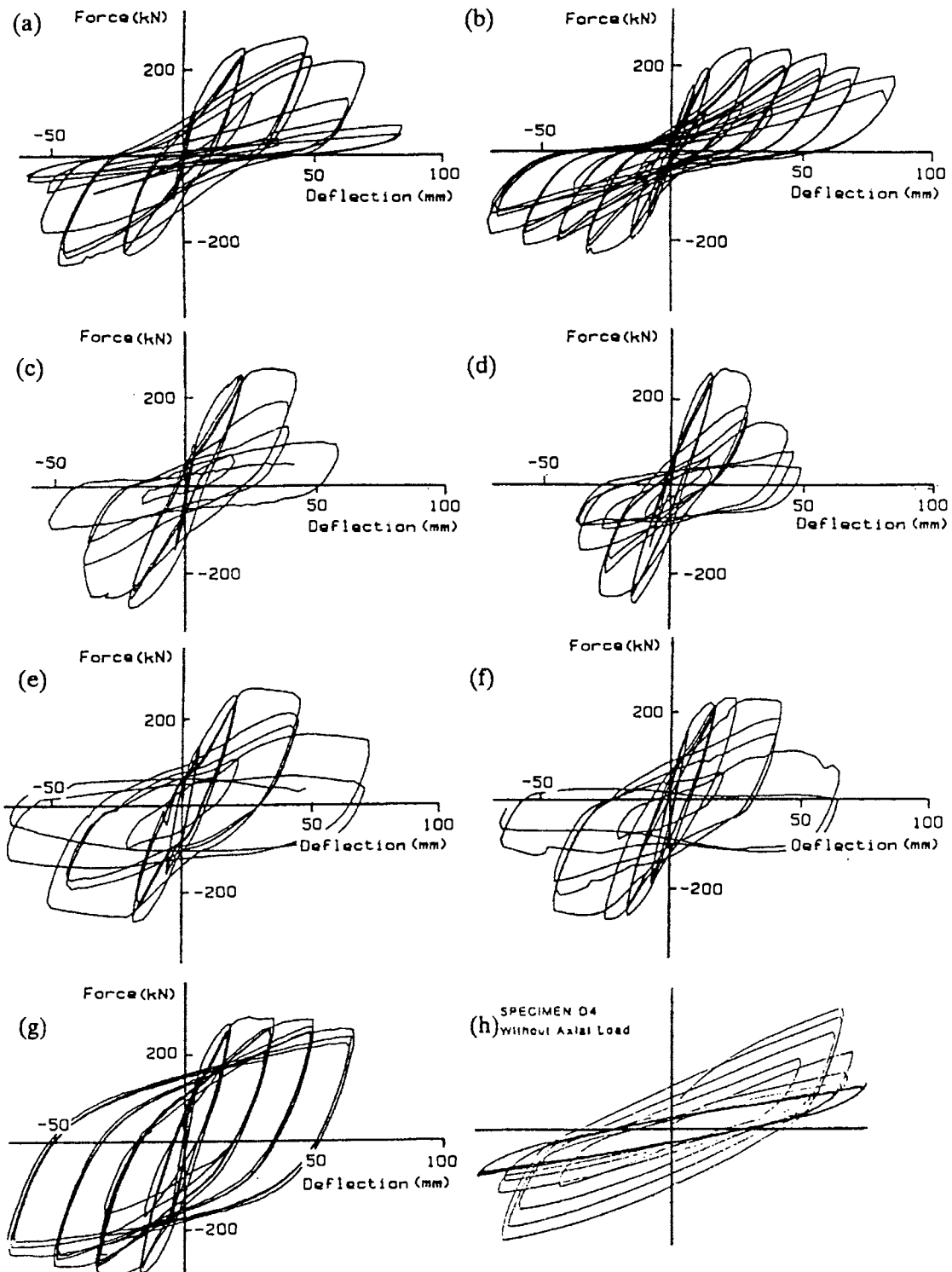


Σχήμα 1.5 Αντιπροσωπευτικοί βρόχοι δύναμης-μετατόπισης δοκιμίων με μη συμμετρική διατομή ή/και οπλισμό σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη, από Ma et al. 1976 (συνεχίζεται)

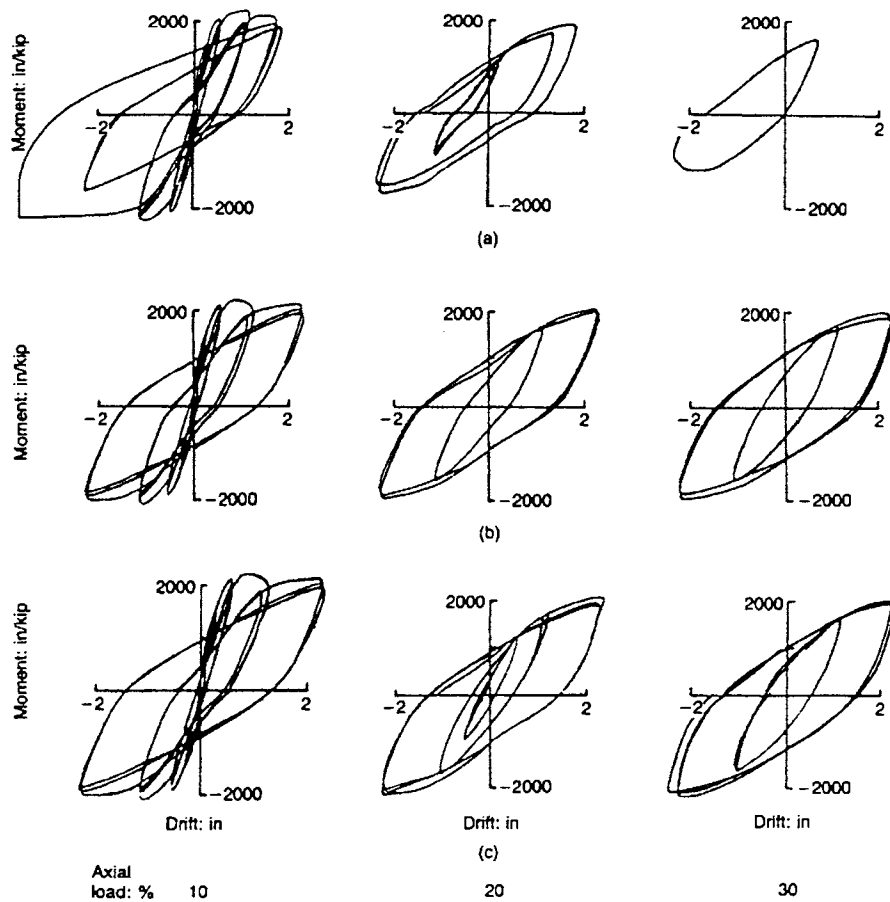


Σχήμα 1.5 (συνεχ.)

Αντιπροσωπευτικοί βρόχοι δύναμης-μετατόπισης δοκιμίων με μη συμμετρική διατομή ή/και σπλισμό σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη (Δοκίμια S3-1 έως S3-4 από Hwang and Scribner, (1984) και Δοκίμια F2, F4 από Nmai and Darwin)

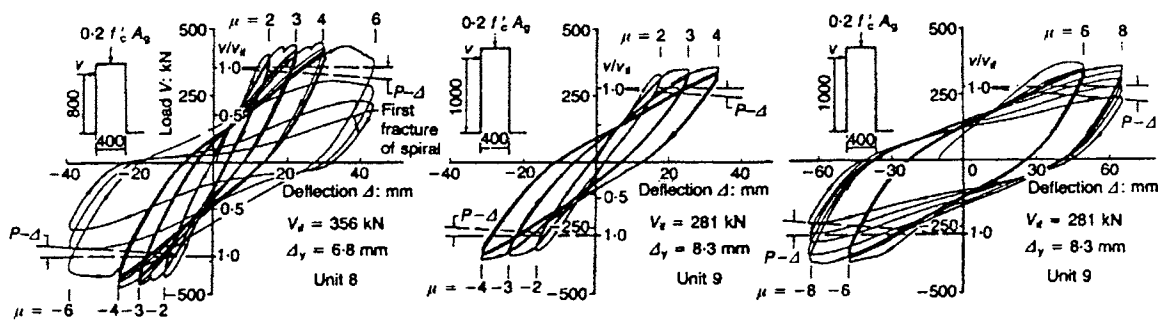


Σχήμα 1.6 Αντιπροσωπευτικοί βρόχοι δύναμης-μετατόπισης δοκιμίων με συμμετρική διατομή και οπλισμό σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη (Saatcioglu and Ozcebe, 1989: (a) Δοκίμιο U1 (b) Δοκίμιο D1 (c) Δοκίμιο U2 (d) Δοκίμιο D2 (e) Δοκίμιο U3 (f) Δοκίμιο D3 (g) Δοκίμιο D4,  $\nu=0.24$  (h) Δοκίμιο D4,  $\nu=0$ )



Επίδραση της περισφιγξης υποστυλώματος : (a) Δοκίμιο LC3, εγκιβωτισμός 0.74%, (b) Δοκίμιο LC4, σπλισμός περισφιγξης 1.6%, και (c) Δοκίμιο LC1, σπλισμός περισφιγξης 3.19%,

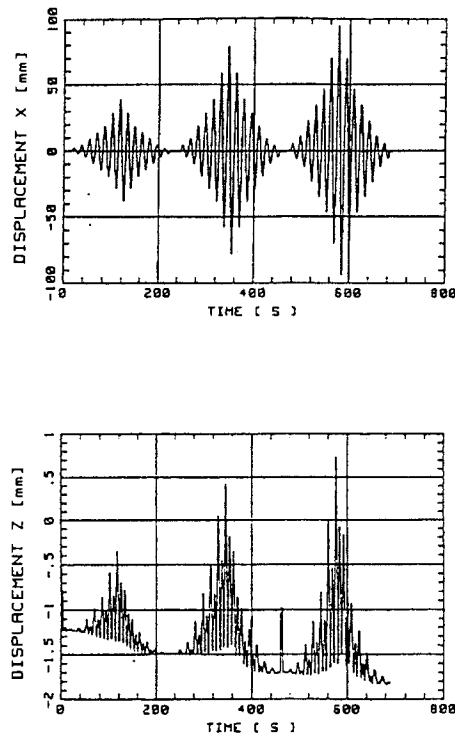
(i)



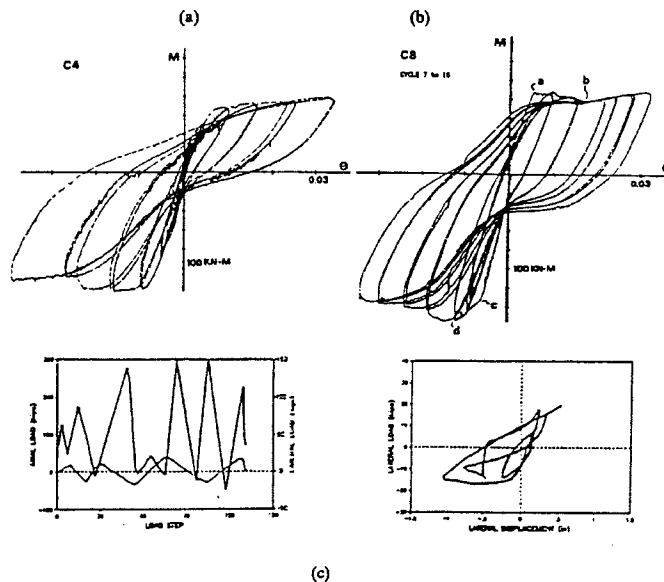
(j)

Σχήμα 1.6 (συνεχ.)

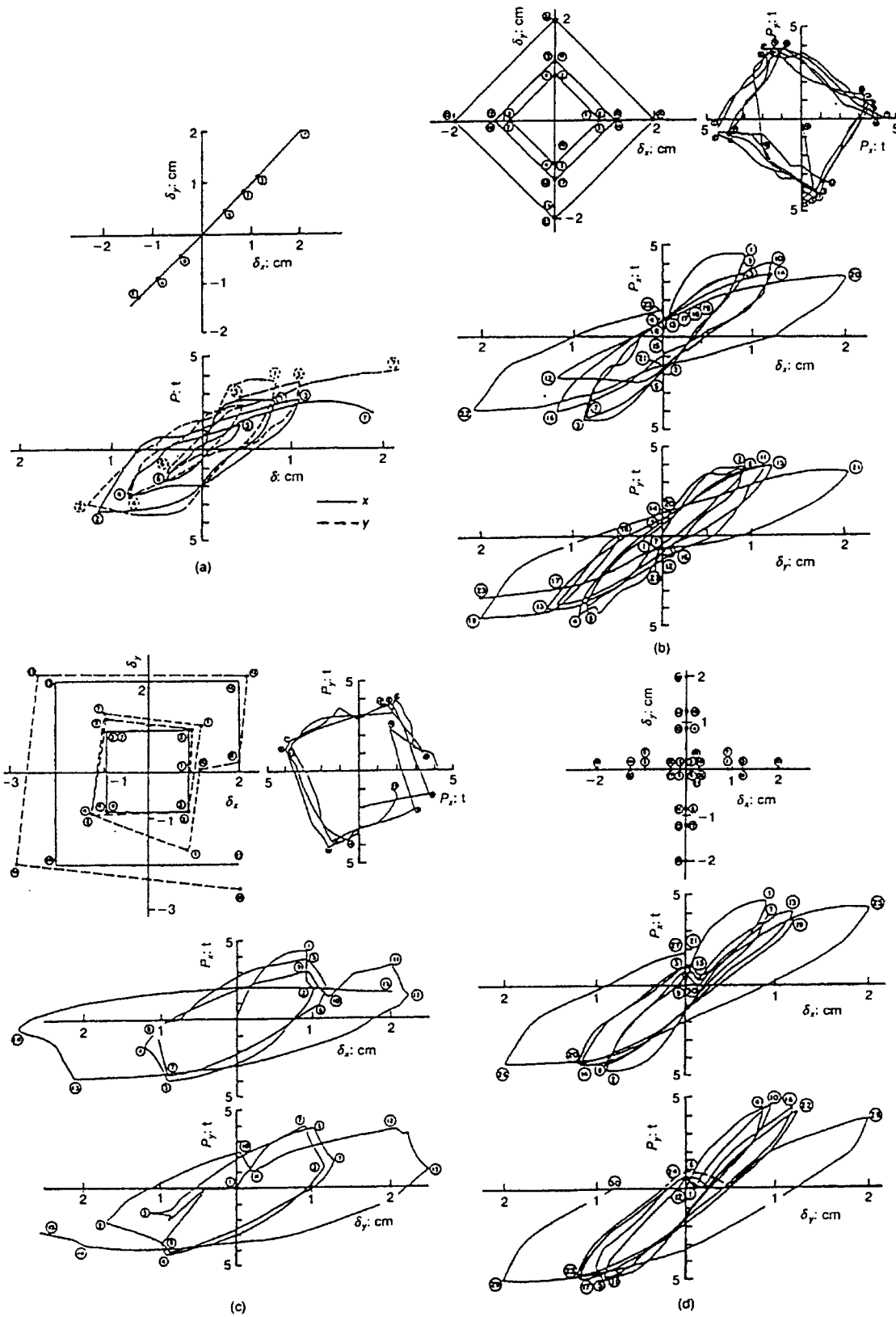
Αντιπροσωπευτικοί βρόχοι δύναμης-μετατόπισης δοκιμίων με συμμετρική διατομή και σπλισμό σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη: (i) Rabbat et al., 1986, (j) Ang et al., 1989.



Σχήμα 1.6 (k) Αξονική παραμόρφωση υποστυλώματος λόγω ανακυκλιζόμενης μονοαξονικής κάμψης με σταθερή αξονική δύναμη, Bousias (1993), Bousias et al. (1995).



Σχήμα 1.7 Βρόχοι δύναμης-μετατόπισης δοκιμίων με συμμετρική διατομή και οπλισμό σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη με μεταβλητή αξονική δύναμη: ((a) και (b): Abrams, 1987, (c) Kreger and Linbeck, 1984)

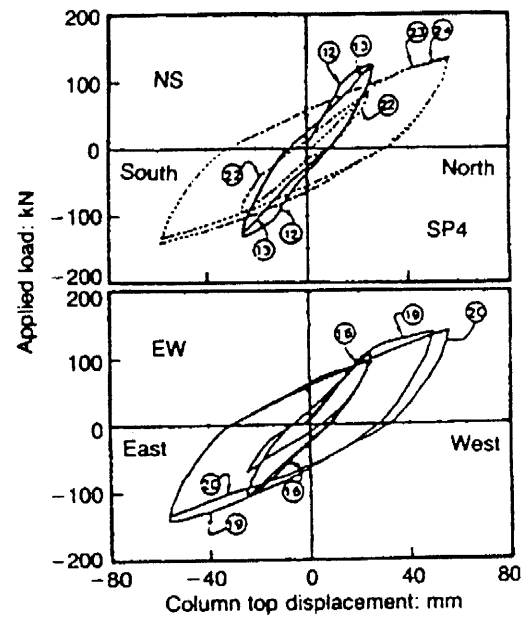
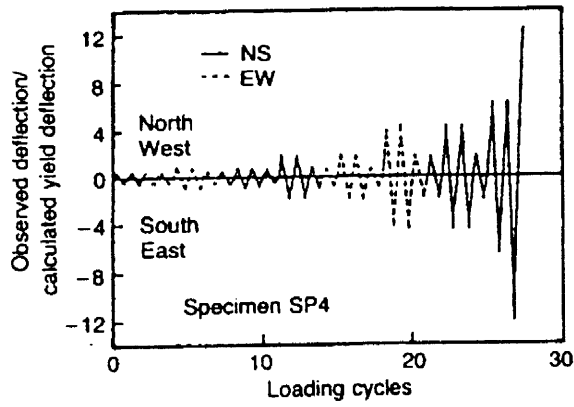


Σχήμα 1.8 (a) εως (d)

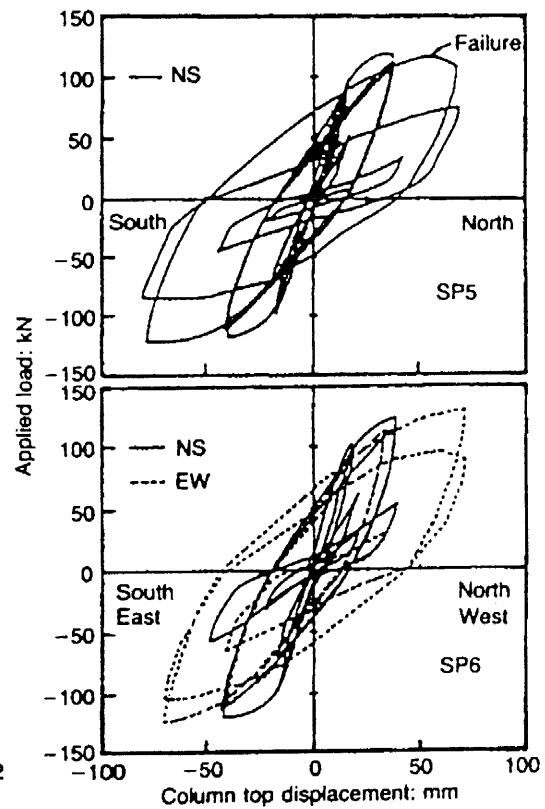
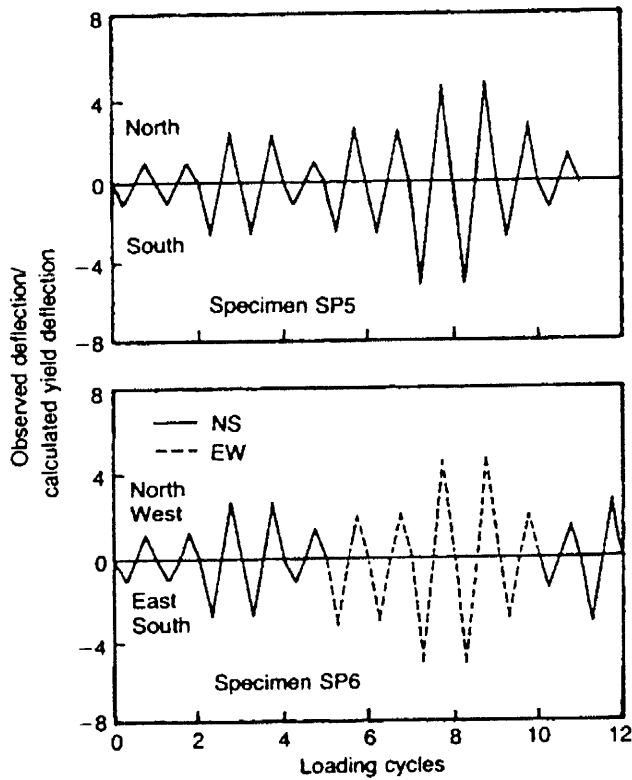
Πειραματικά αποτελέσματα των Takizawa and Aoyama (1976) για διαζωνική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη (δοκίμια No. 2-5)



(e)

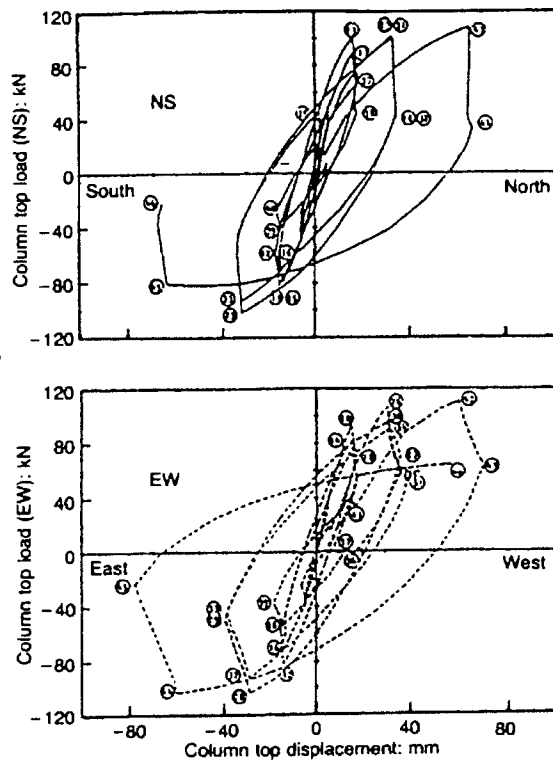
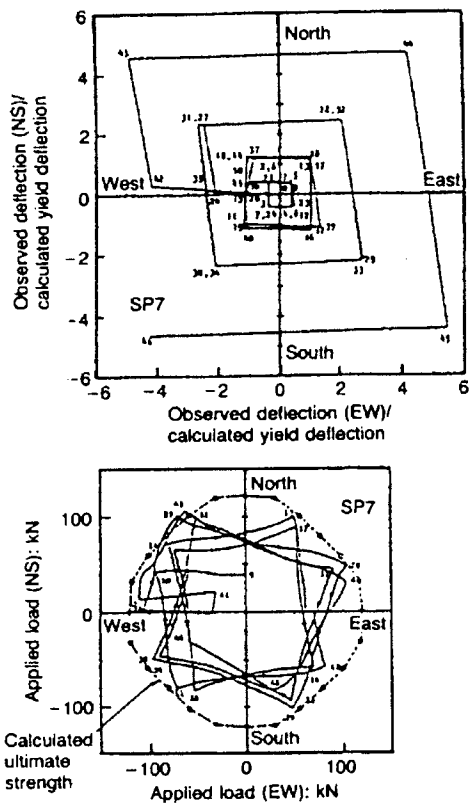


(f)



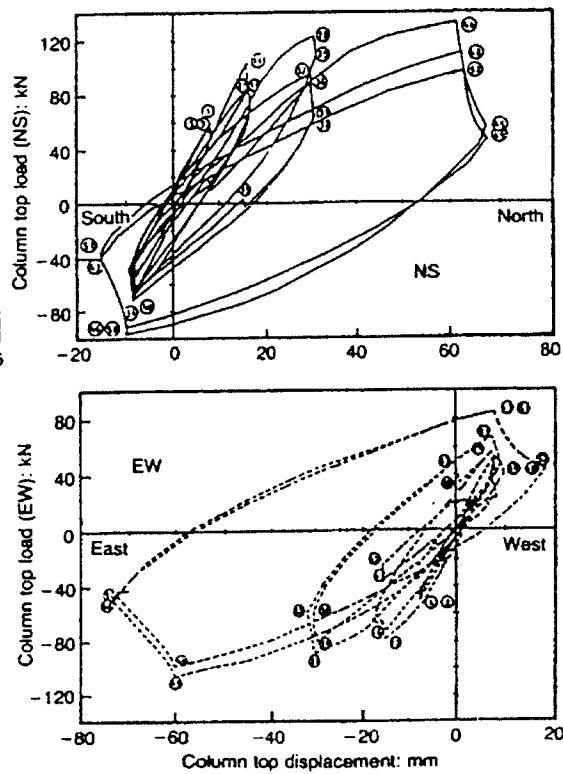
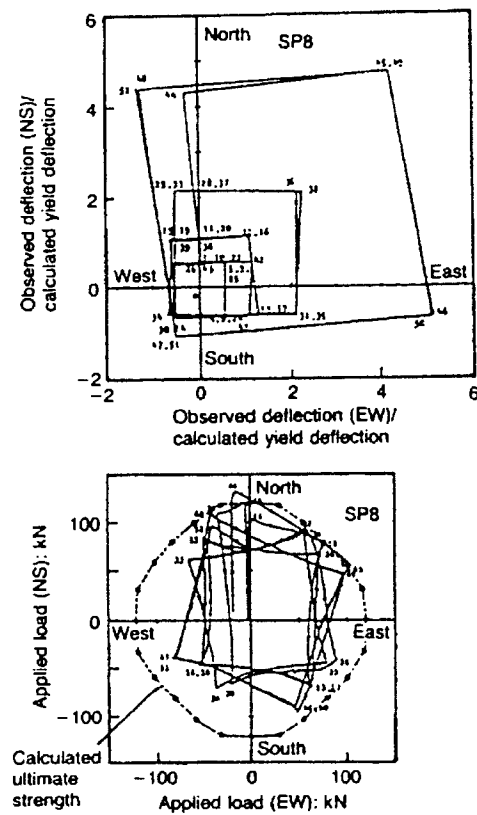
Σχήμα 1.8 (e), (f) Δοκιμές SP4, SP5 και SP6 από τους Otani et al.

(g)



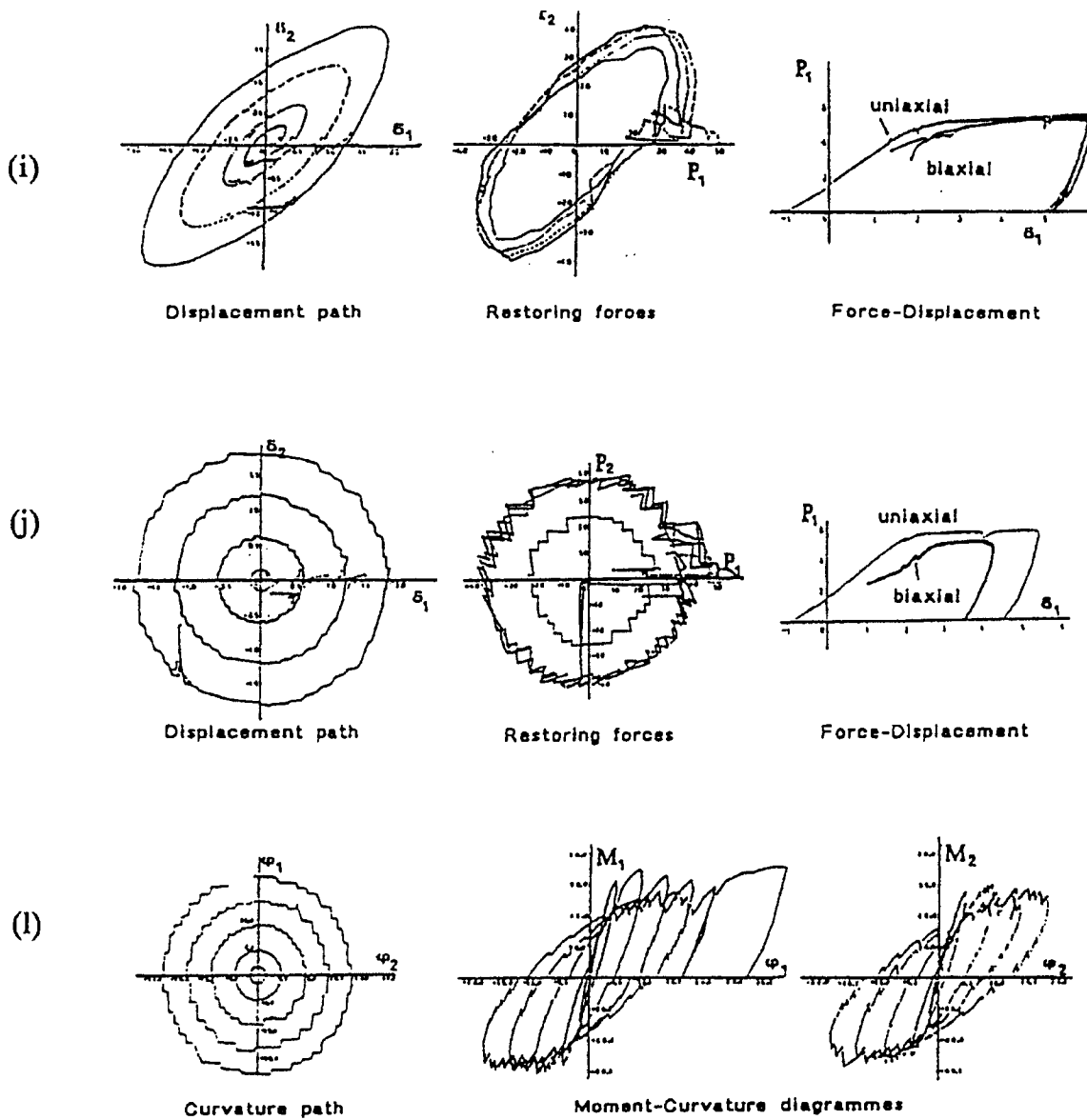
(a)

(h)



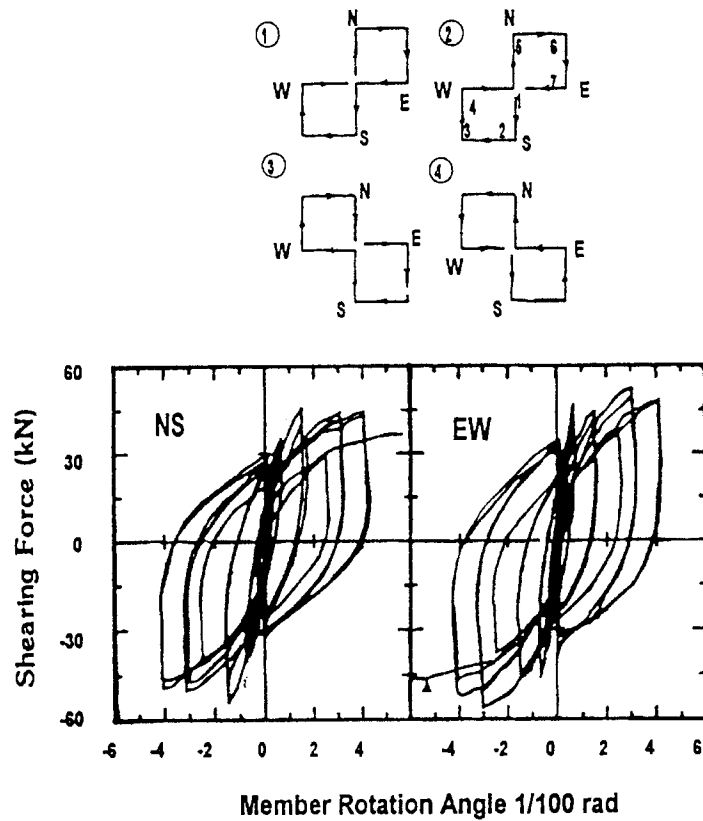
(b)

Σχήμα 1.8(g), (h) Δοκιμές SP7 και SP8 των Otani et al (1980)

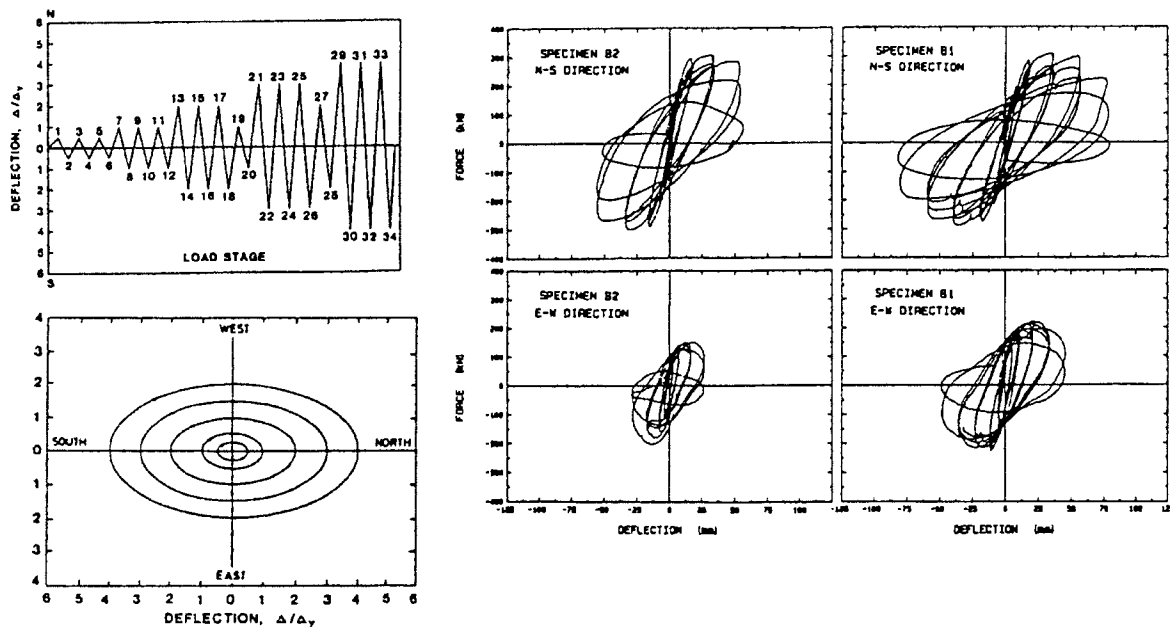


Σχήμα 1.8(i)-(l)

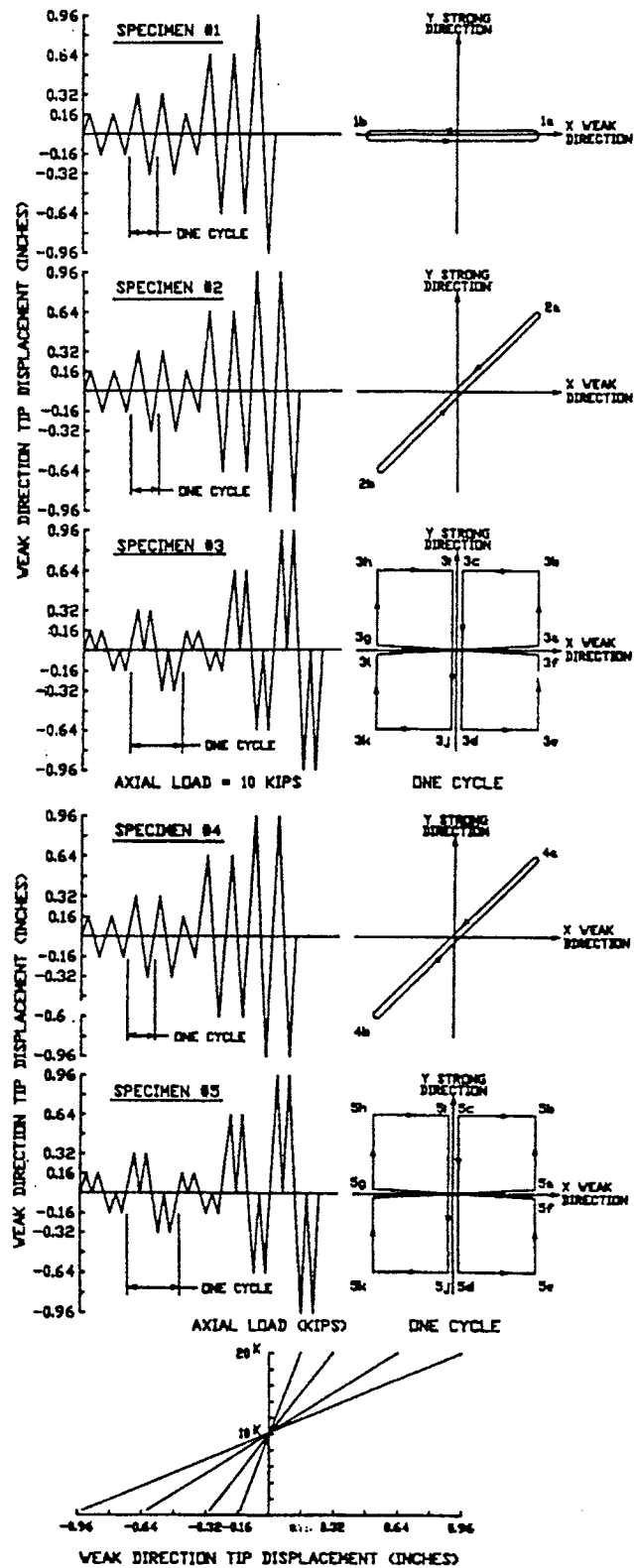
Πειραματικά αποτελέσματα από διαξονικές δοκιμές με σταθερό αξονικό φορτίο ((i)-(k) Takiguchi et al., 1980, και (l) Kobayashi et al, 1984).



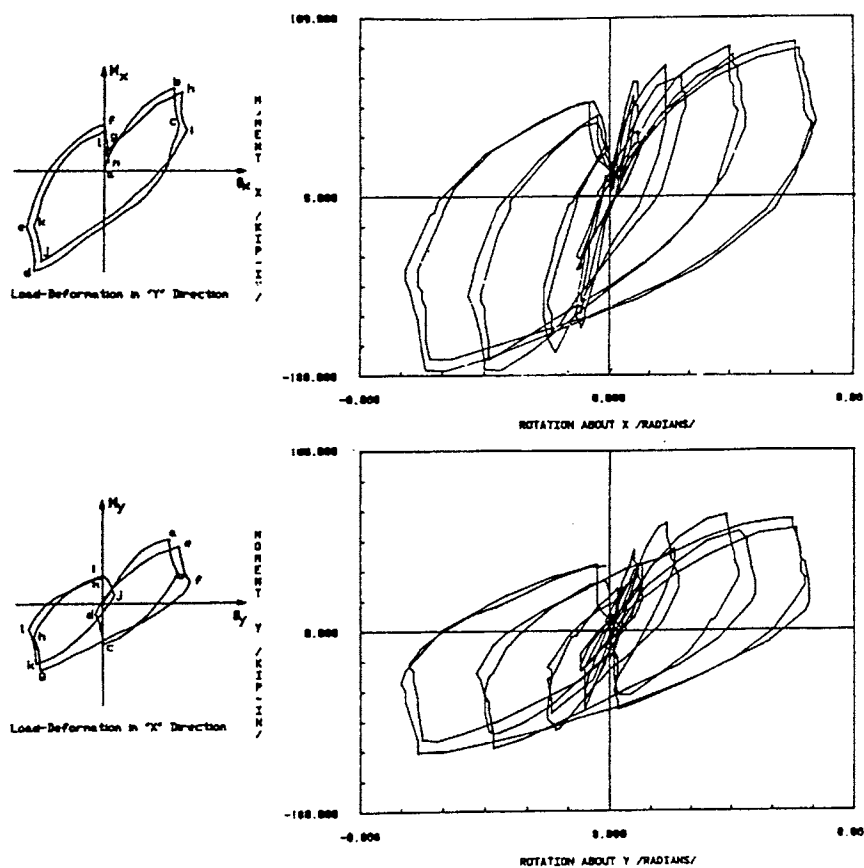
Σχήμα 1.8(m) Πειράματα διαξονικών δοκιμών υπό σταθερό αξονικό φορτίο (Li et al, 1987).



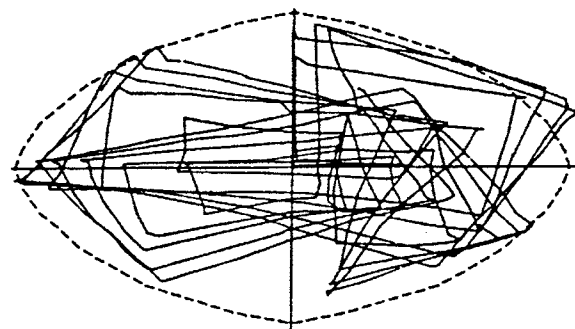
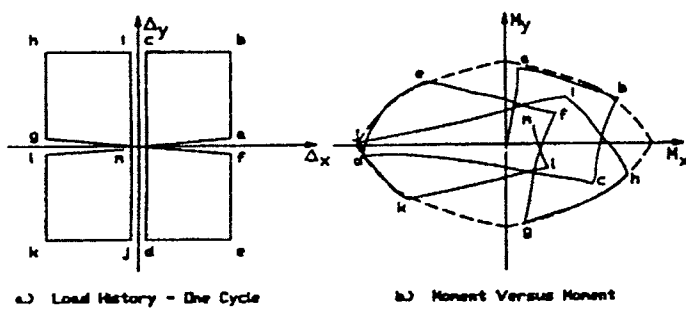
Σχήμα 1.8(n),(o) Δοκιμές B1, B2 των Saatcioglu and Ozcebe (1989) σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη



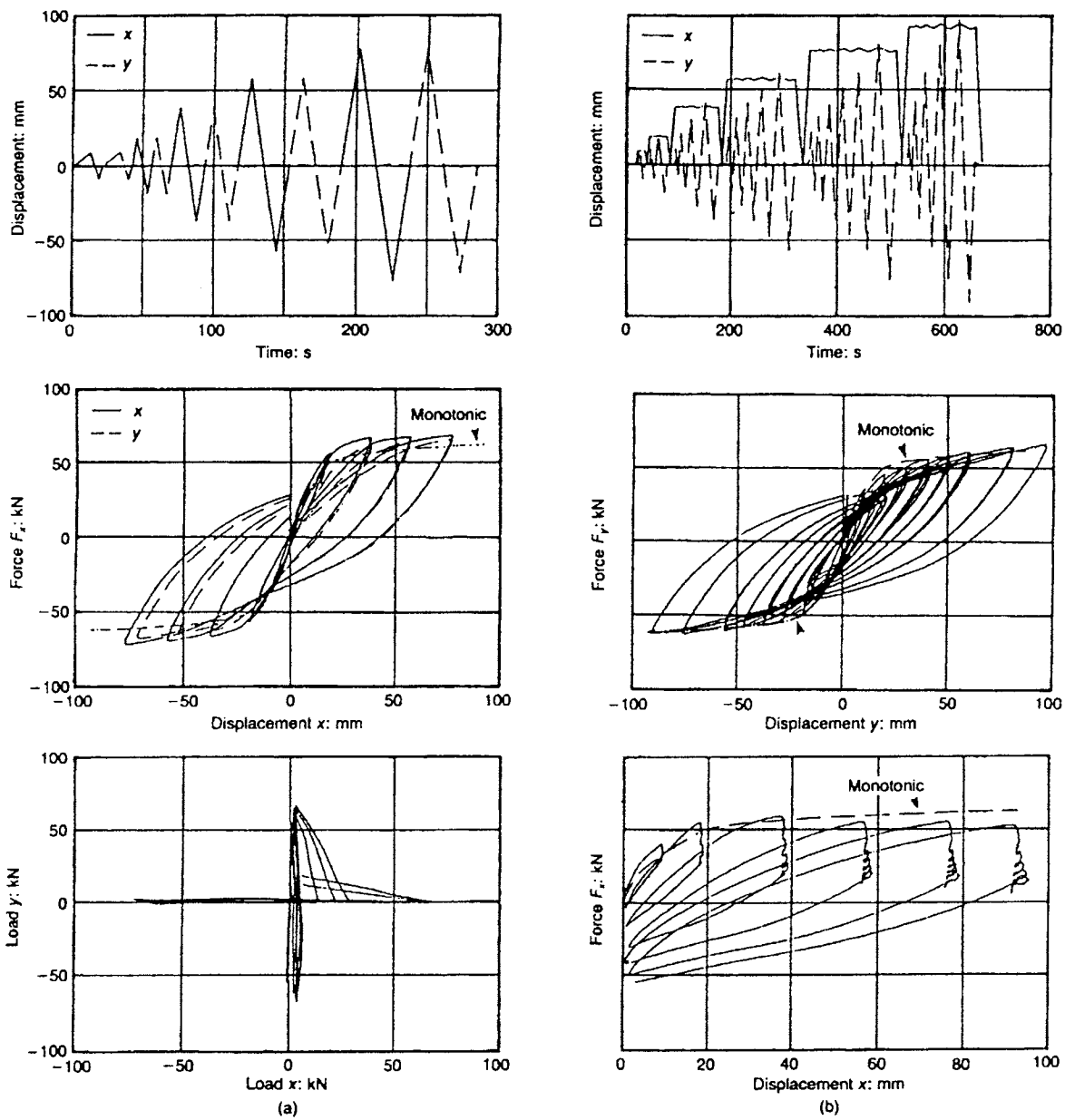
Σχήμα 1.8(p) Επιβεβλημένες διαξονικές, ιστορίες μετατοπίσεων στα πειράματα των Low and Moehle ('1987)



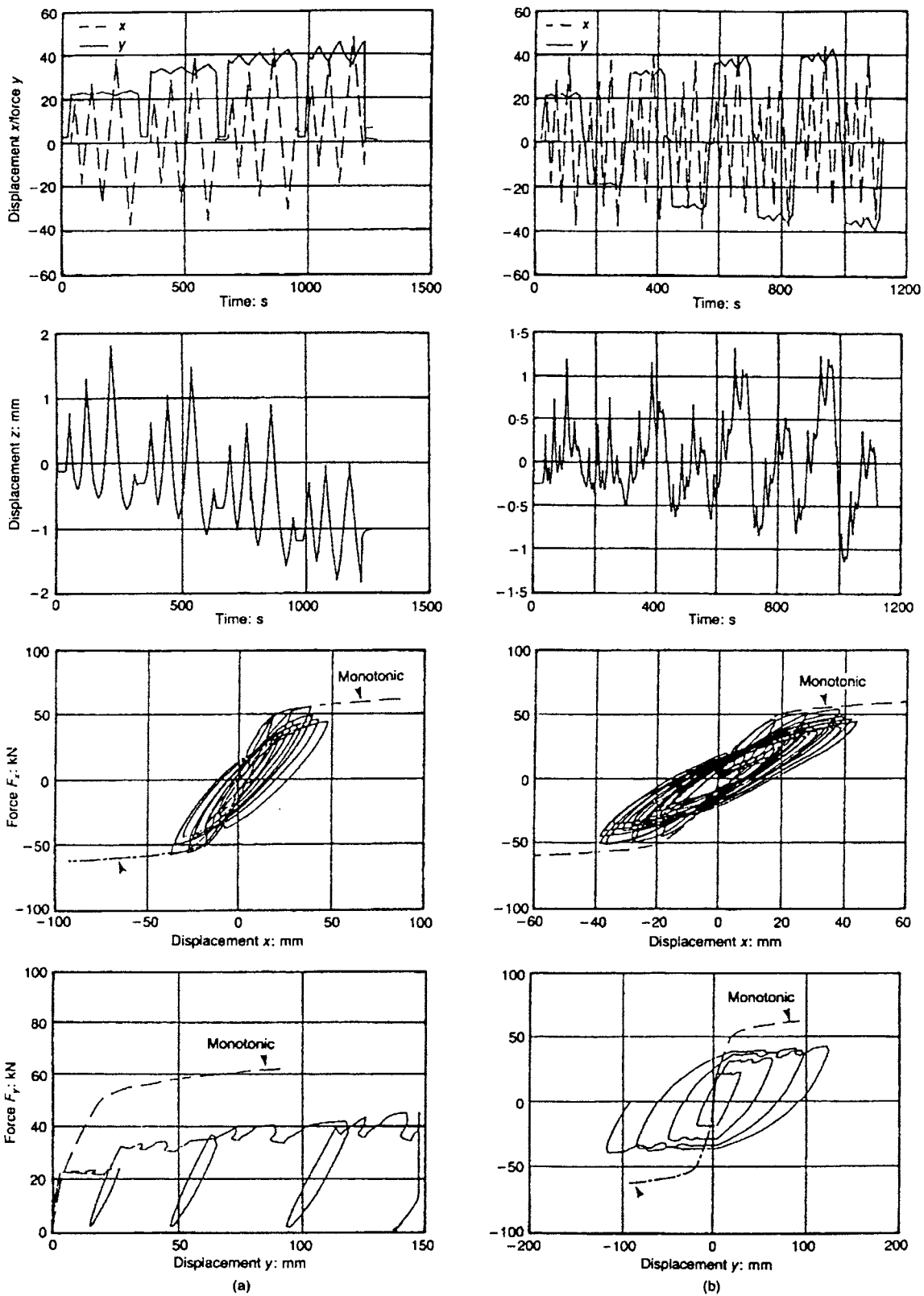
Σχήμα 1.8(q) Βρόχοι υστέρησης στις δοκιμές ανακυκλιζόμενης διαξονικής κάμψης με σταθερή αξονική των Low and Moehle (1987).



Σχήμα 1.8(r) Μετρηθείσες διαδρομές φόρτισης σε ανακυκλιζόμενες διαξονικές δοκιμές με σταθερό αξονικό φορτίο (Low and Moehle (1987)).

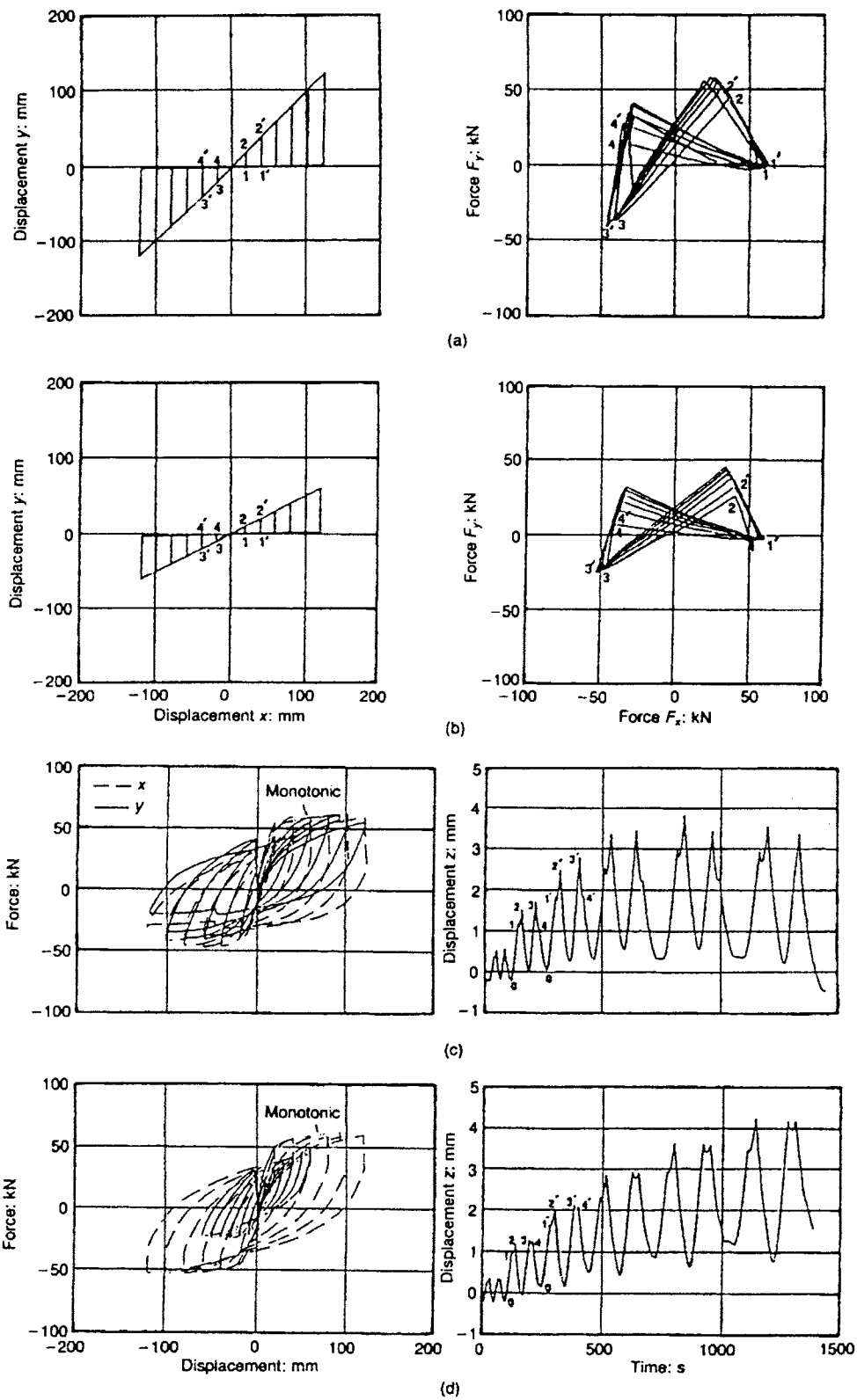


Σχήμα 1.8(s),(t) Αποτελέσματα δοκιμών S1 και S2 σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με σταθερό αξονικό φορτίο κατά Μπούσιας (1993), Bousias et al (1995).

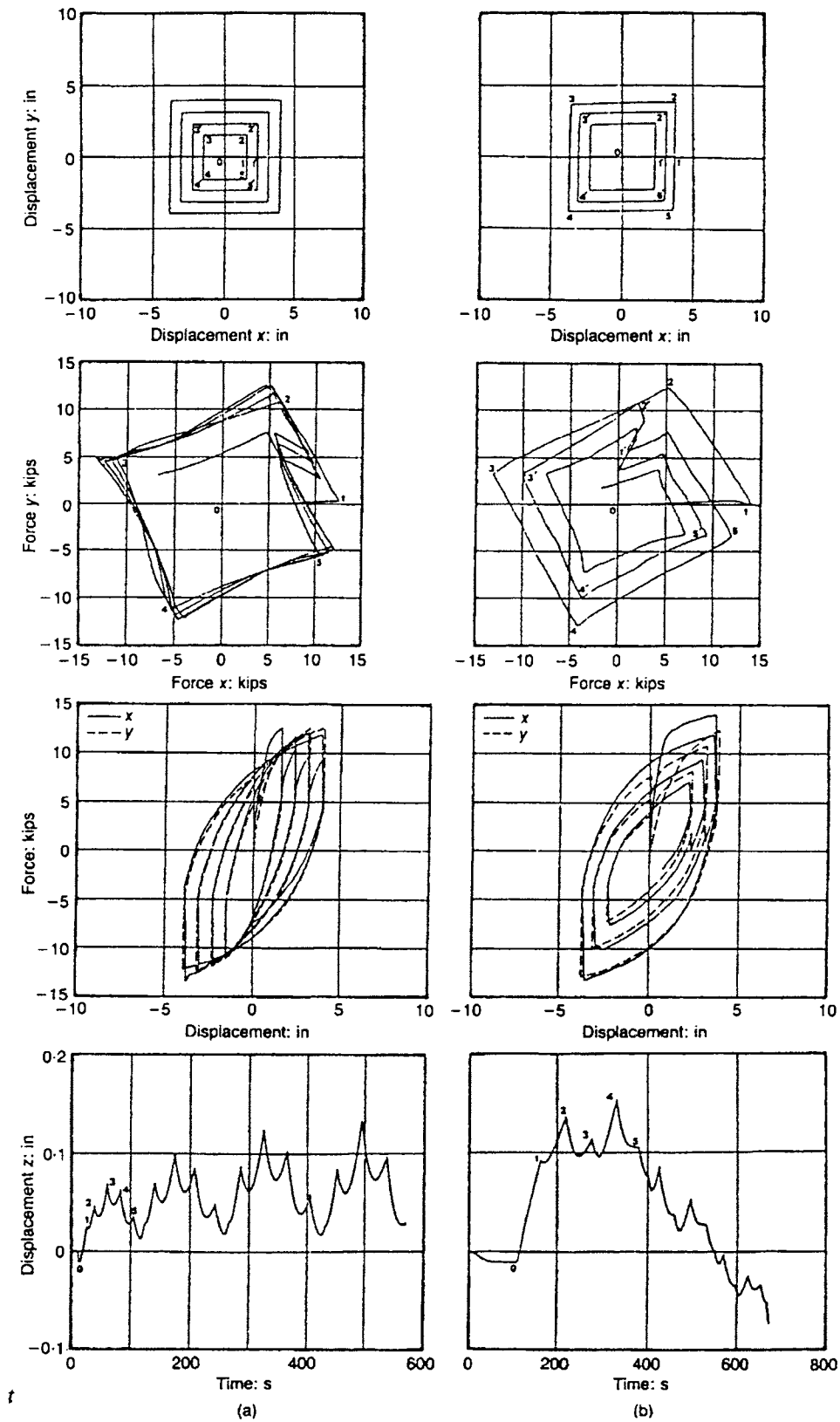


Σχήμα 1.8(u) Αποτελέσματα δοκιμών S3 και S4 σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με σταθερό αξονικό φορτίο κατά Μπούσιας (1993), Bousias et al (1995).

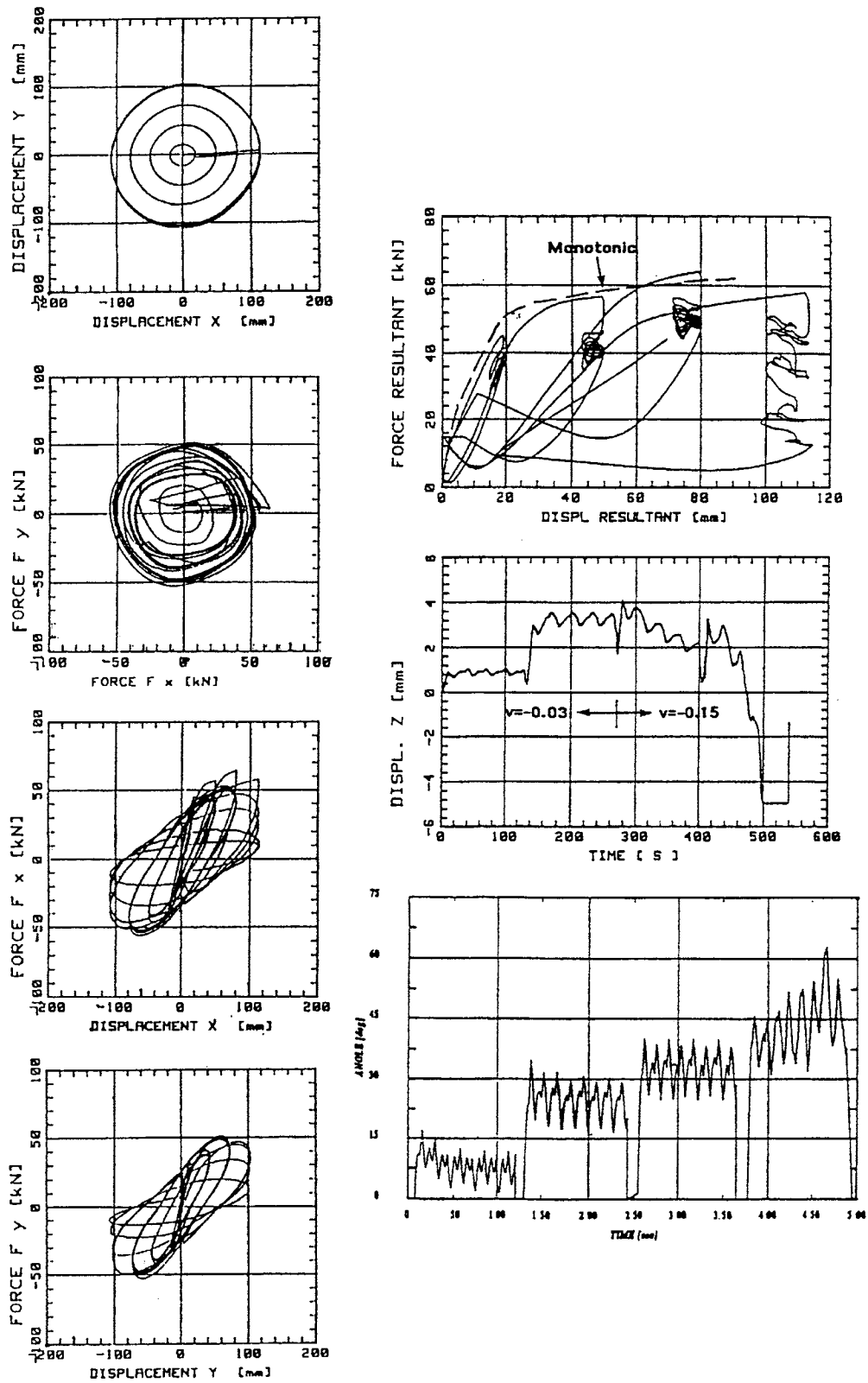




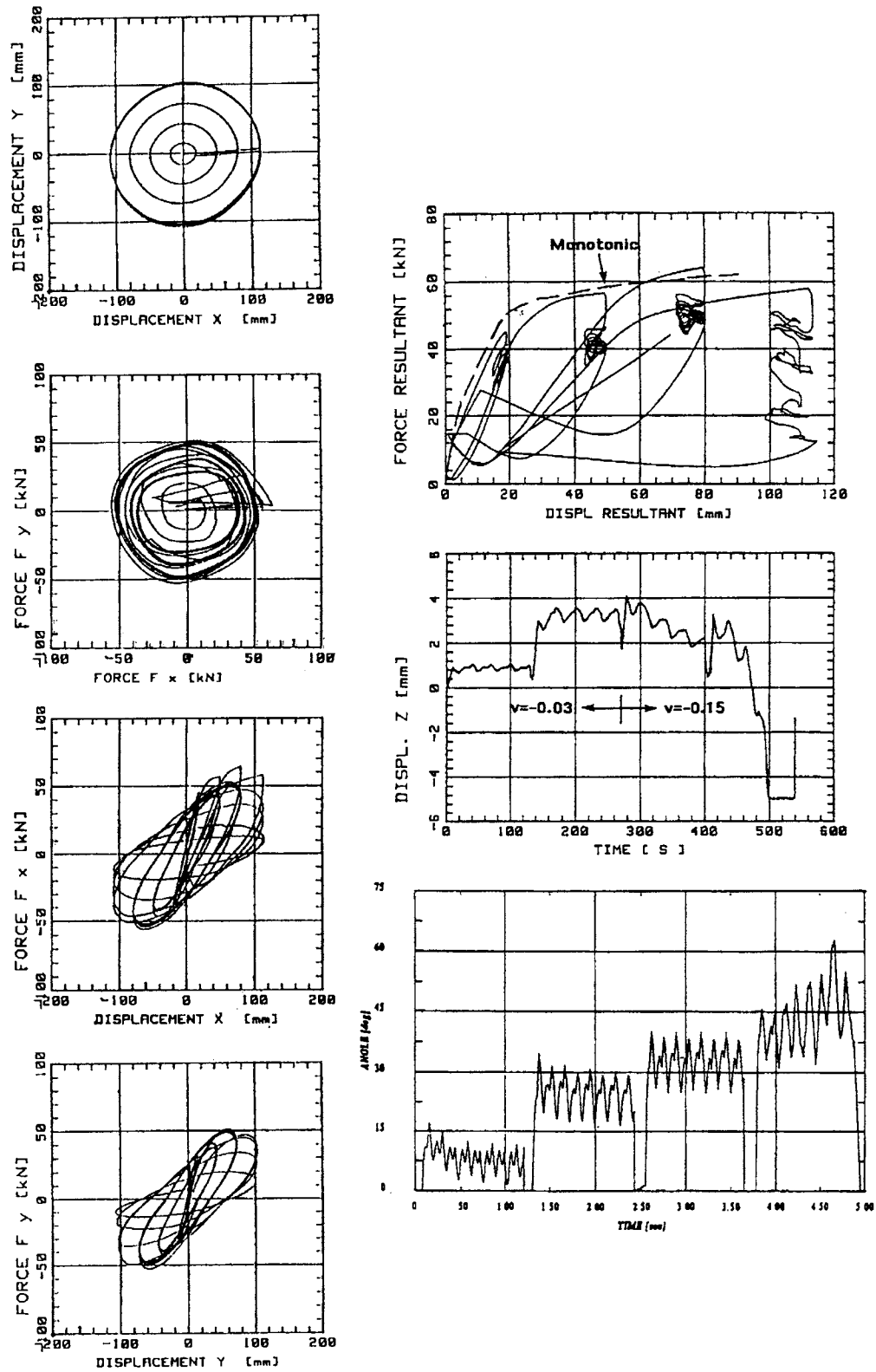
Σχήμα 1.8(v) Αποτελέσματα δοκιμών S5 και S6 σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με σταθερό αξονικό φορτίο κατά Bousias et al (1995).



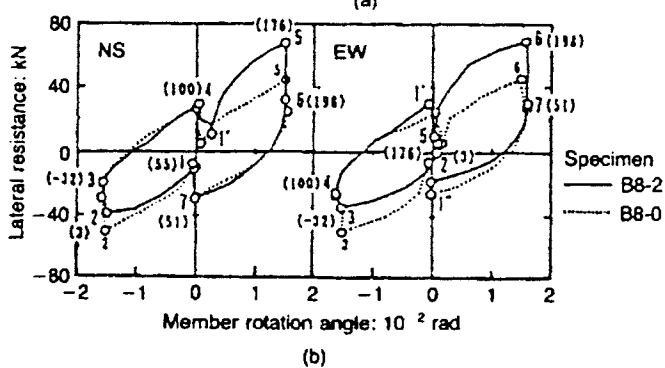
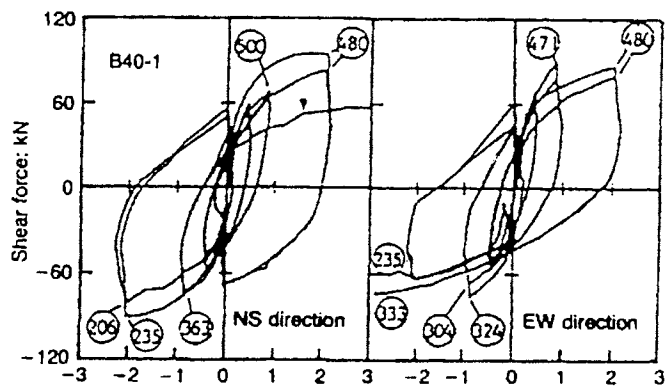
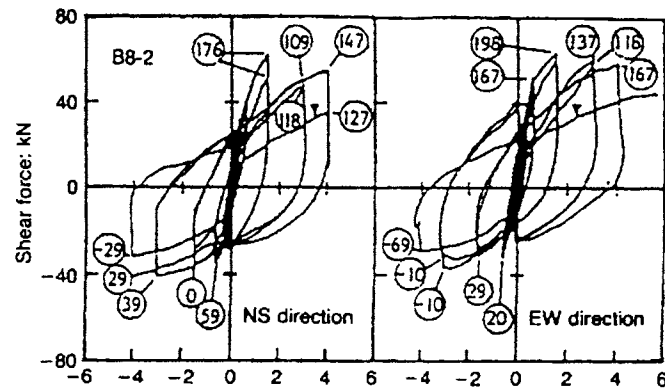
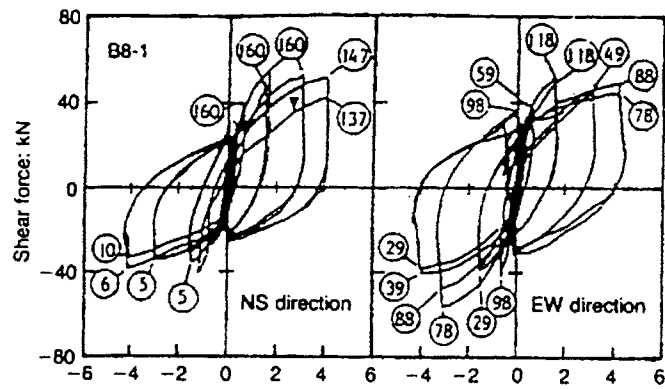
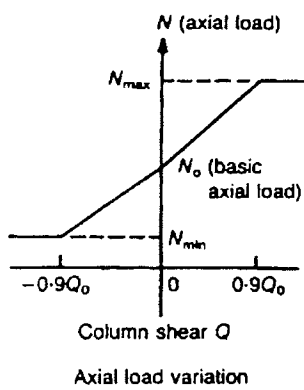
Σχήμα 1.8(x) Αποτελέσματα δοκιμής S8 σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με σταθερό αξονικό φορτίο κατά Μπούσιας (1993), Bousias et al (1995).



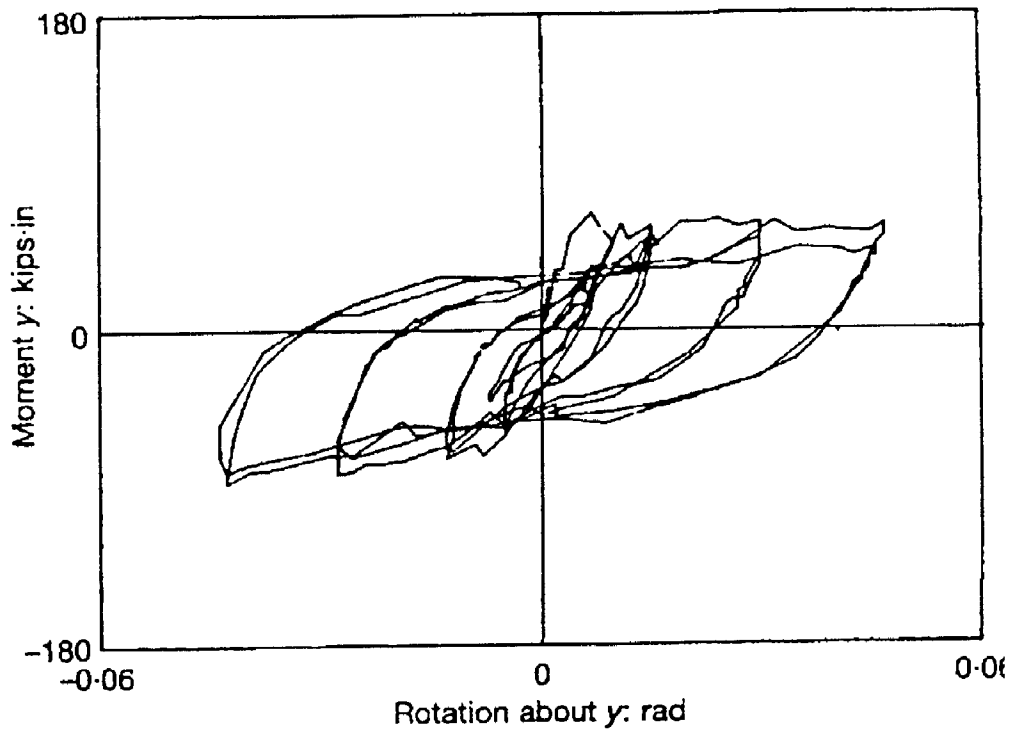
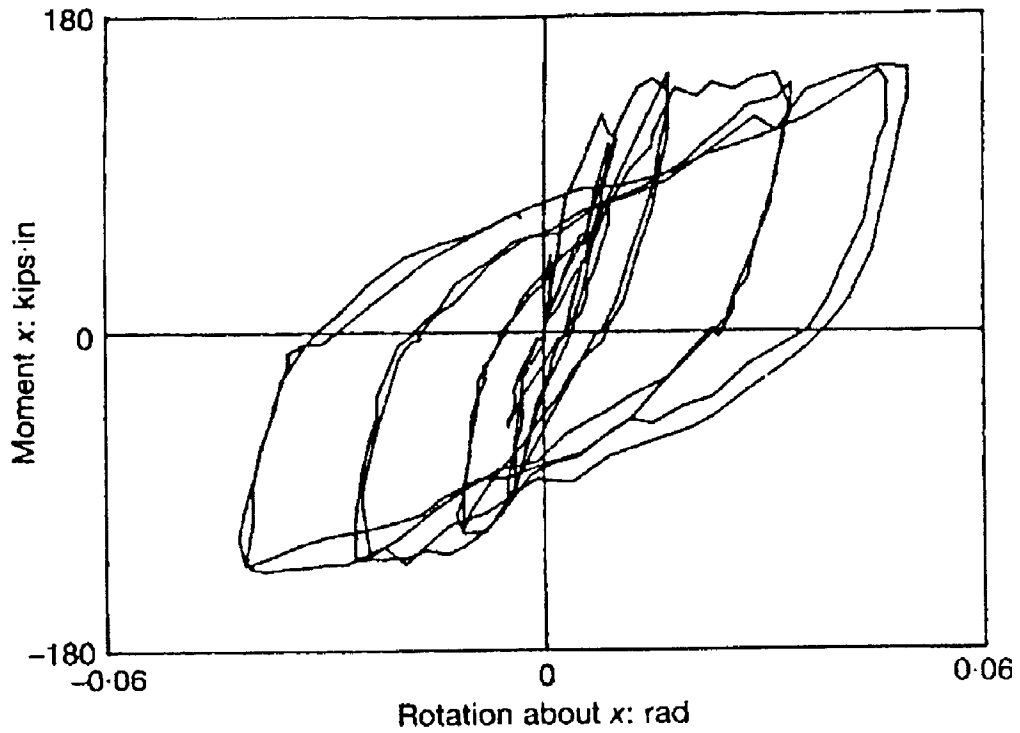
Σχήμα 1.8(y) Δοκιμή S9 σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη κατά Μπούσιας (1993), Bousias et al (1995).



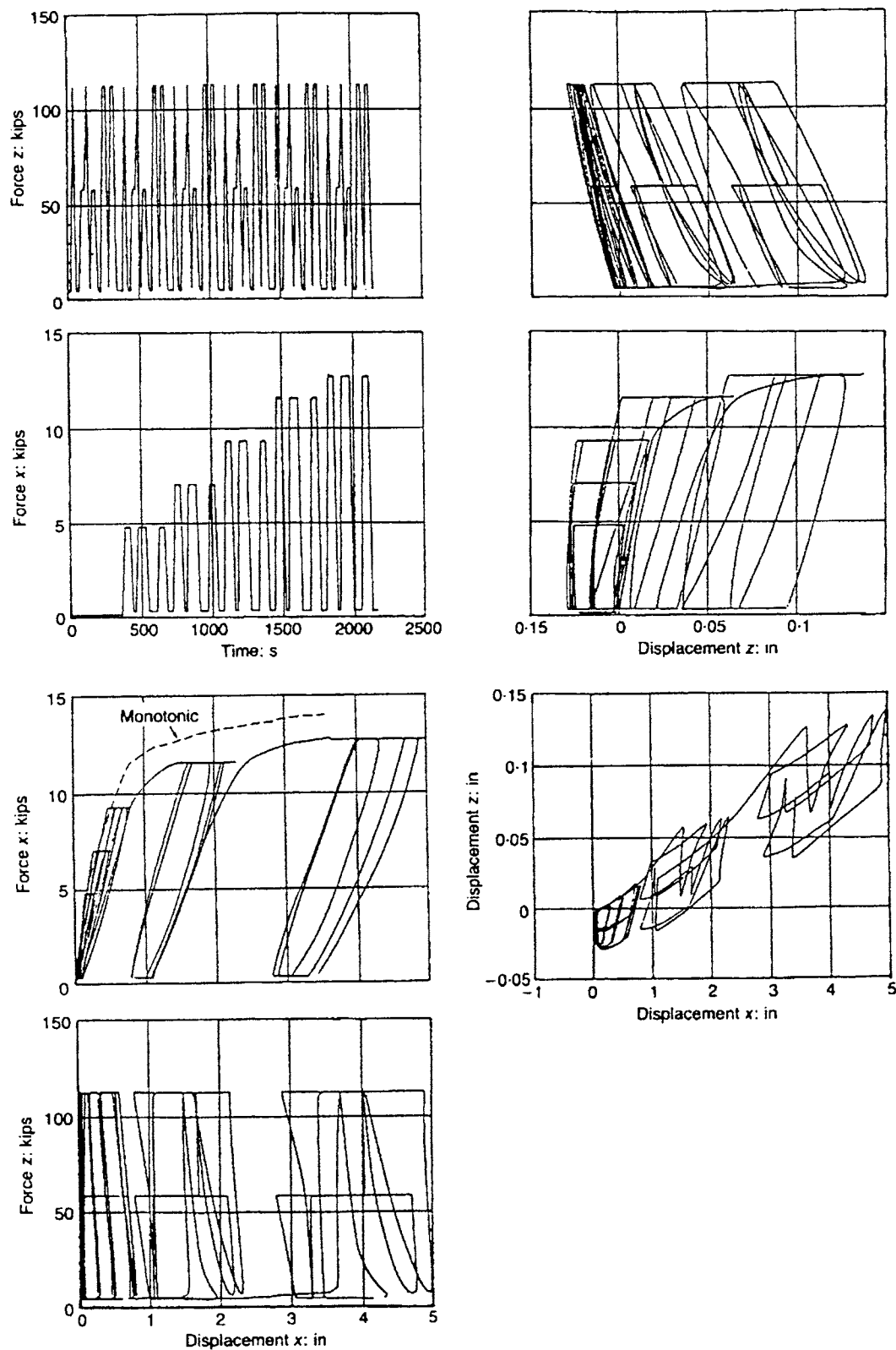
Σχήμα 1.8(y) Δοκιμή S9 σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη κατά Μπούσιας (1993), Bousias et al (1995).



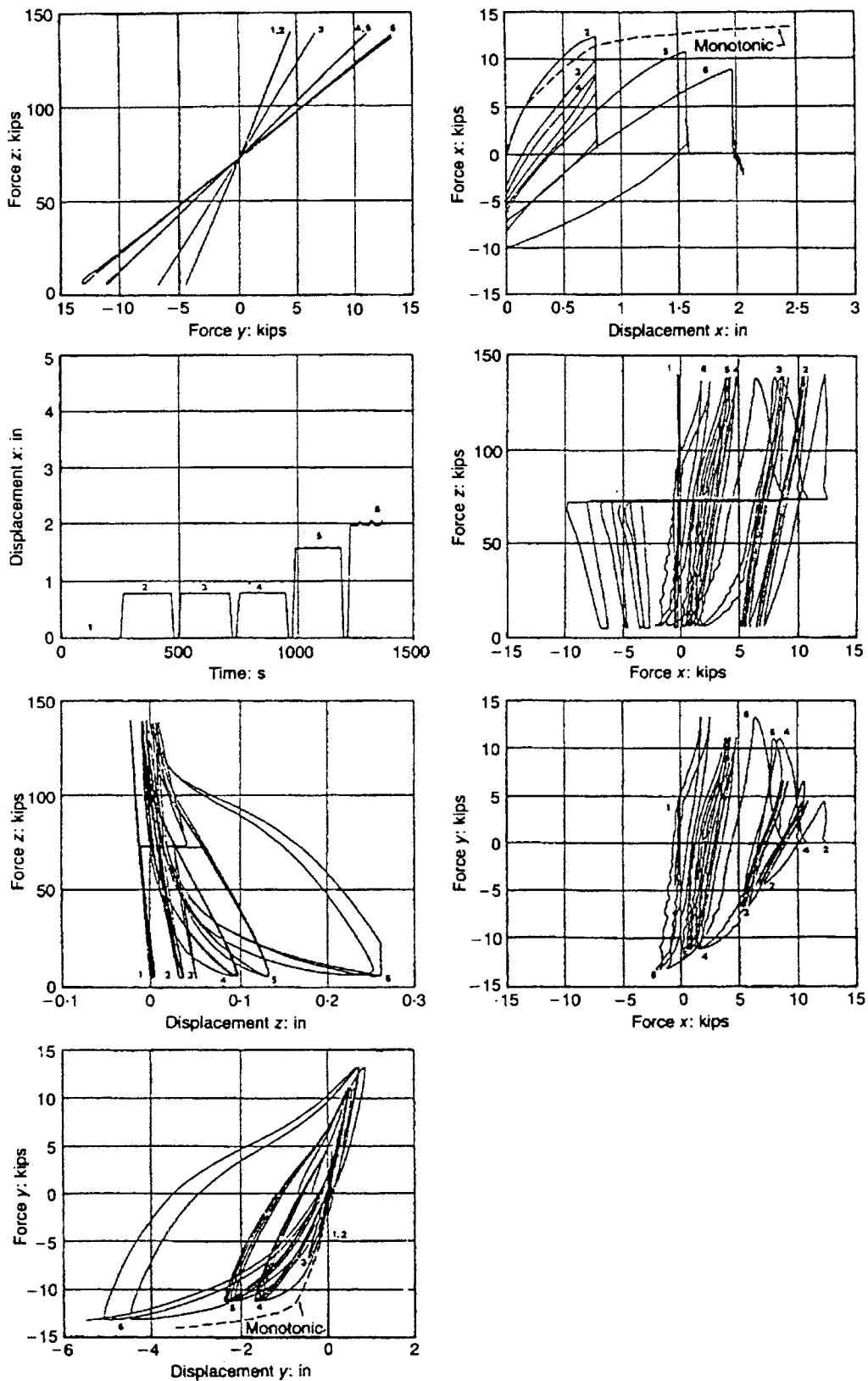
Σχήμα 1.9(a),(b) Αποτελέσματα δοκιμών σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με μεταβλητό αξονικό φορτίο των Li et al, 1987: (a) βρόχοι υστέρησης στις δύο διευθύνσεις, (b) σύγκριση με μονοαξονικά αποτελέσματα



Σχήμα 1.9(c),(d) Αποτελέσματα δοκιμών σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με μεταβλητό αξονικό φορτίο των Low & Moehle, 1987. (c) δοκιμή No. 4 (d) δοκιμή No. 5



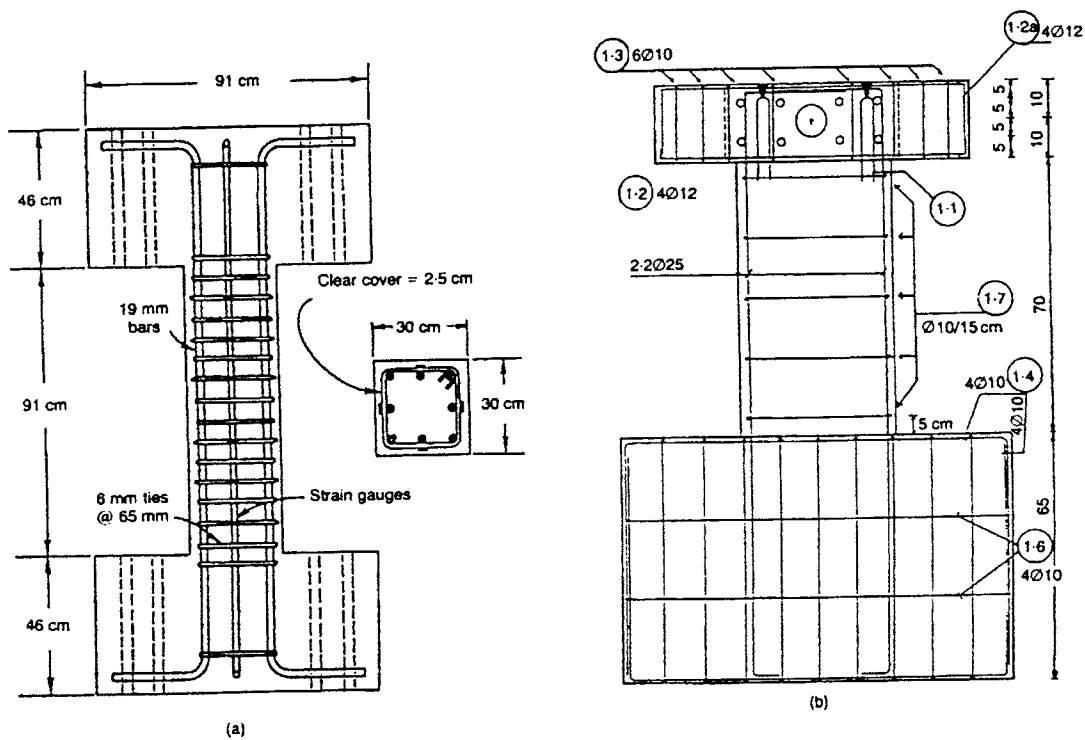
Σχήμα 1.9(e) Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμής S10 σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με μεταβλητό αξονικό φορτίο κατά Μπούσιας (1993), Bousias et al. 1995).



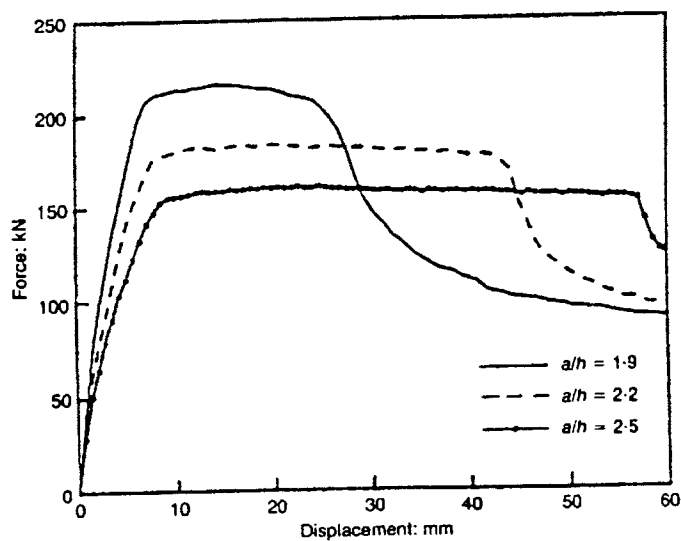
Σχήμα 1.9(f)

Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμής S11 σε ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με μεταβλητό αξονικό φορτίο κατά Μπούσιας (1993), Bousias et al. (1995).

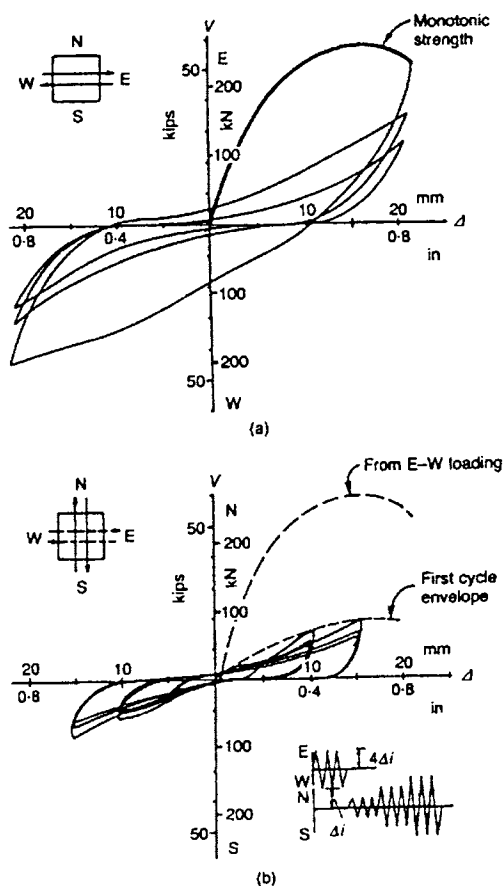




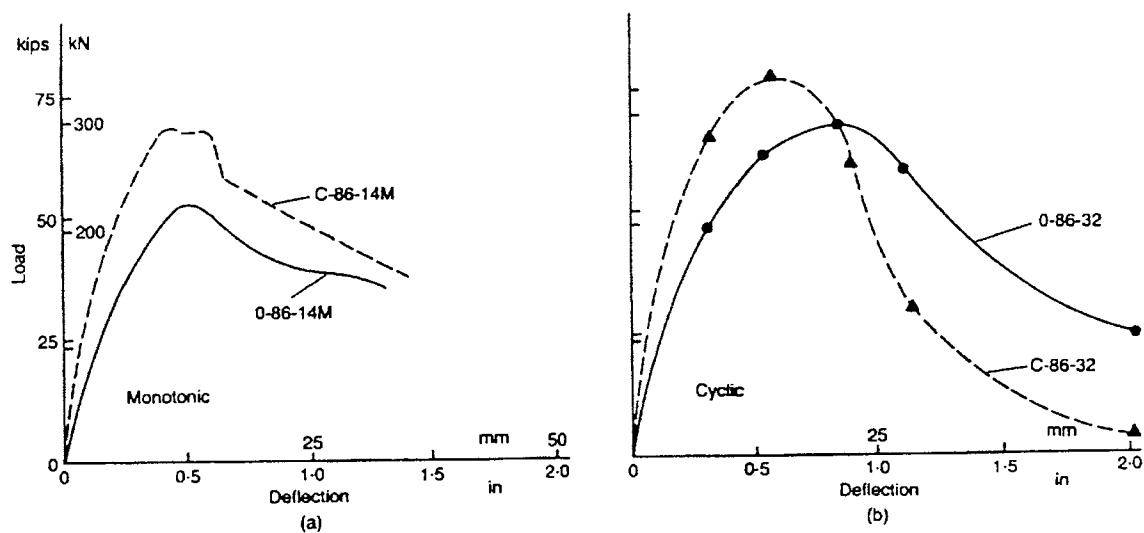
Σχήμα 1.10 Τυπικά δοκίμια κοντών υποστλωμάτων (α) Διπλός πρόβολος της σειράς δοκιμών του Πανεπιστημίου Texas; (β) Δοκίμιο απλού προβόλου σε σεισμική τράπεζα των König et al (1993).



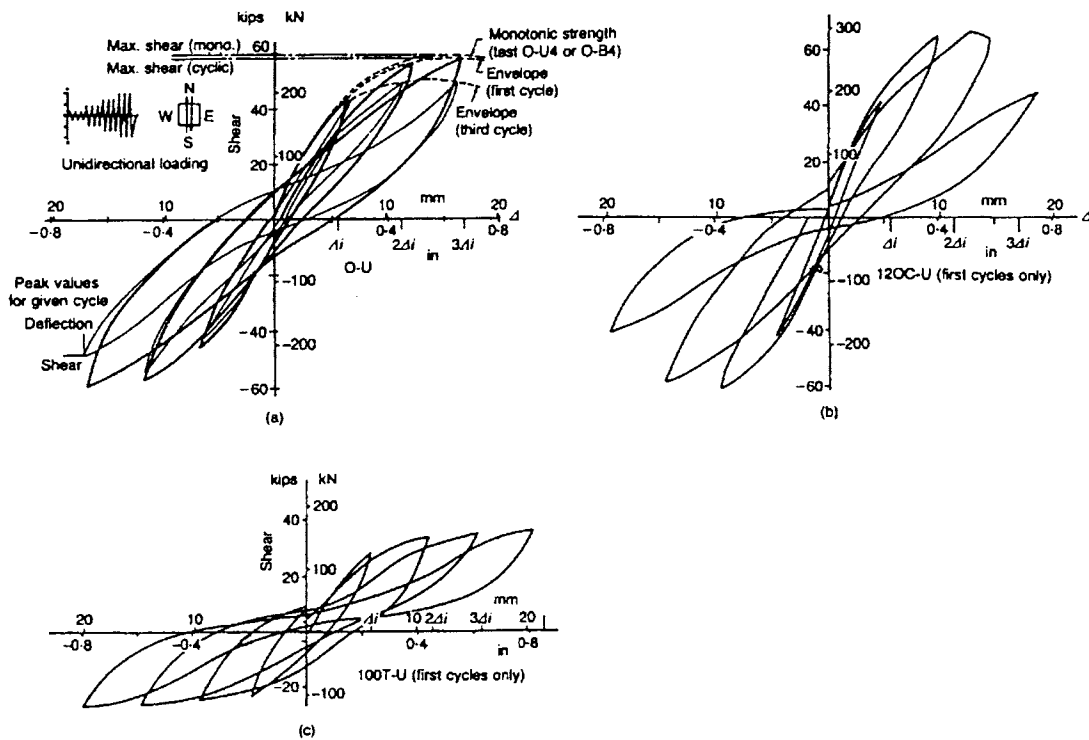
Σχήμα 1.11 Μονοτονικές καμπύλες δύναμης - μετατόπισης (Garstka et al, 1993).



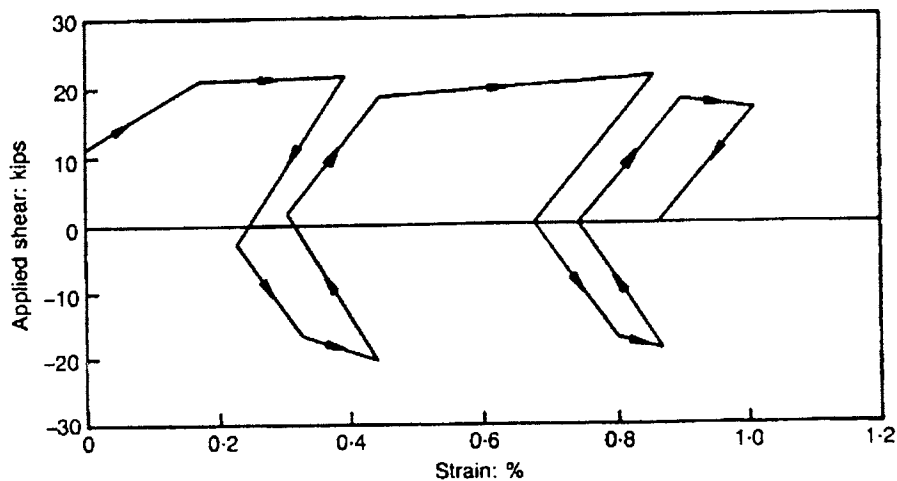
Σχήμα 1.12 Απόκριση δύναμης-μετατόπισης σε δοκιμή 0-B4 των Maruyama et al (1984) σε διαφορετικούς λόγους διάτμησης: α) διεύθυνση E-W, β) διεύθυνση N-S.



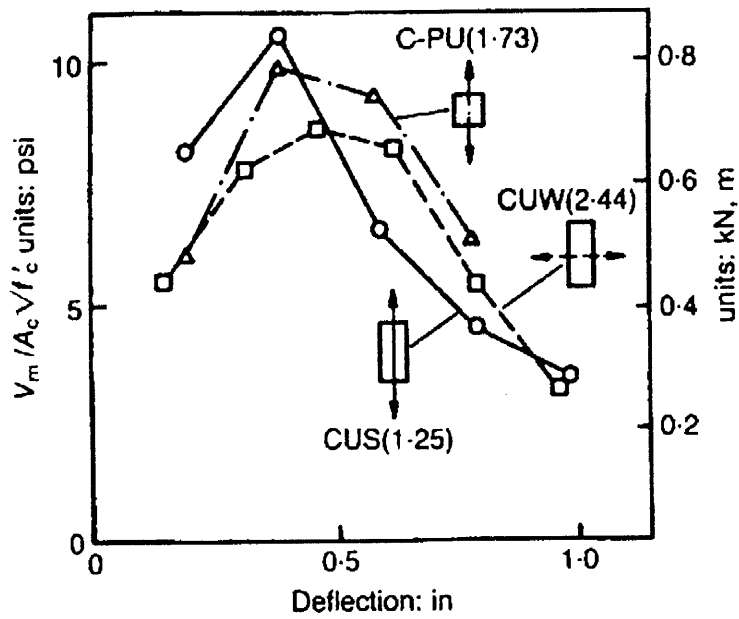
Σχήμα 1.13 Επίδραση αξονικού φορτίου: (α) στην μονοτονική καμπύλη δύναμης-μετατόπισης; (β) στην περιβάλλουσα του τρίτου κύκλου, για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Maruyama et al, 1984; 0-86...: χωρίς αξονικό φορτίο, C-86...:  $\nu = -0.155$ ).



Σχήμα 1.14 Επίδραση του αξονικού φορτίου στην απόκριση σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης: (a)  $v = 0.$ ; (b)  $v = -0.19$ ; (c)  $v = 0.12$ ).

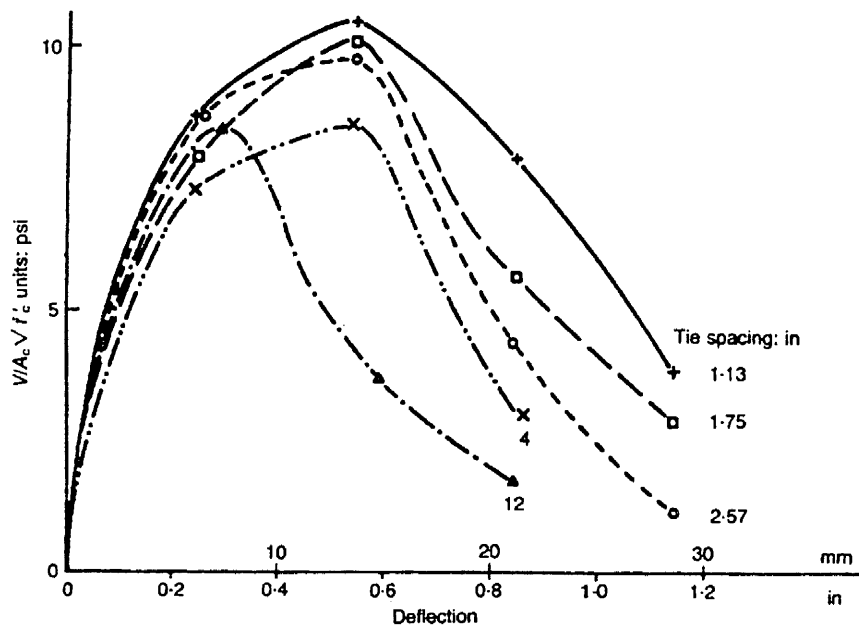


Σχήμα 1.15 Εξέλιξη των παραμορφώσεων των συνδετήρων με την ανακύκλιση της διάτμησης, για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Wight and Sozen, 1975).



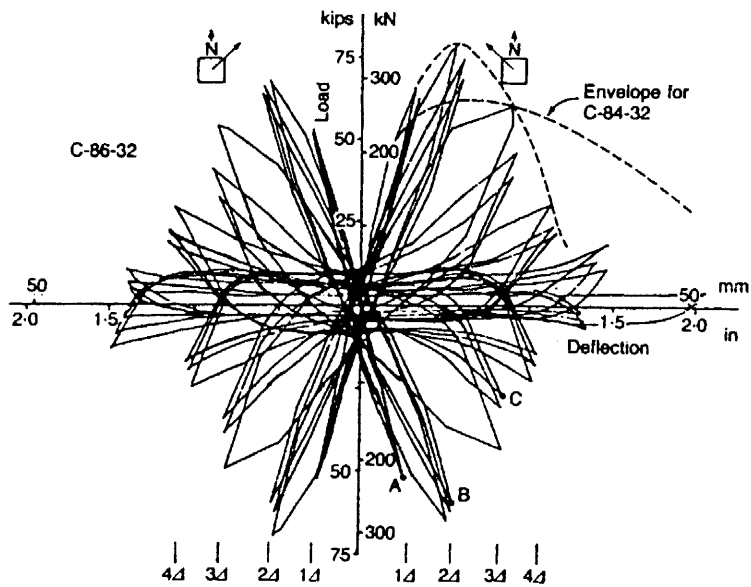
Σχήμα 1.16

Επίδραση του  $a/d$  (τιμές εντός παρενθέσεων) στην περιβάλλουσα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Umebara and Jirsa, 1984).



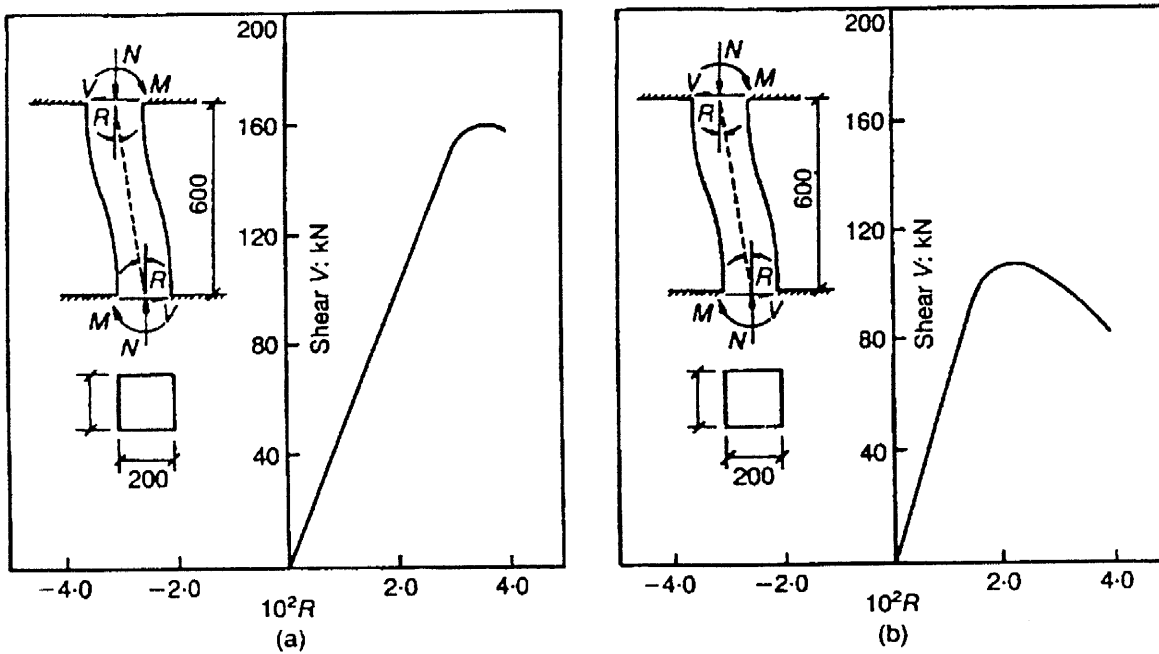
Σχήμα 1.17

Επίδραση της απόστασης των συνδετήρων στην περιβάλλουσα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Woodward and Jirsa, 1984).



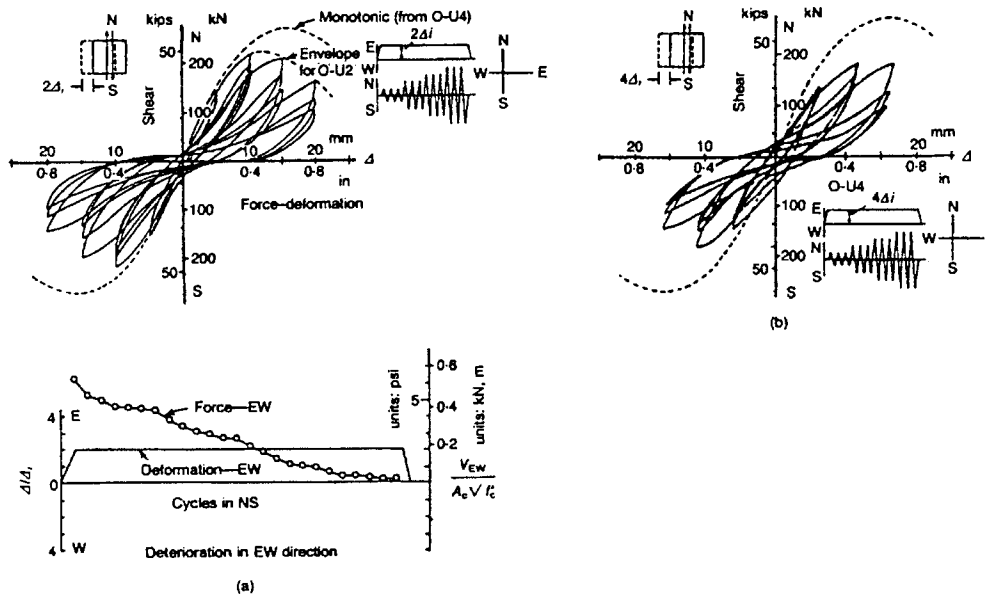
Σχήμα 1.18

Επίδραση του διαμήκου σπλισμού στην περιβάλλουσα ανακύκλισης, για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Woodward and Jirsa, 1984; δοκίμιο C-84...: ποσοστό σπλισμού 1.1%, δοκίμιο C-86...: ποσοστό σπλισμού 2.5%).

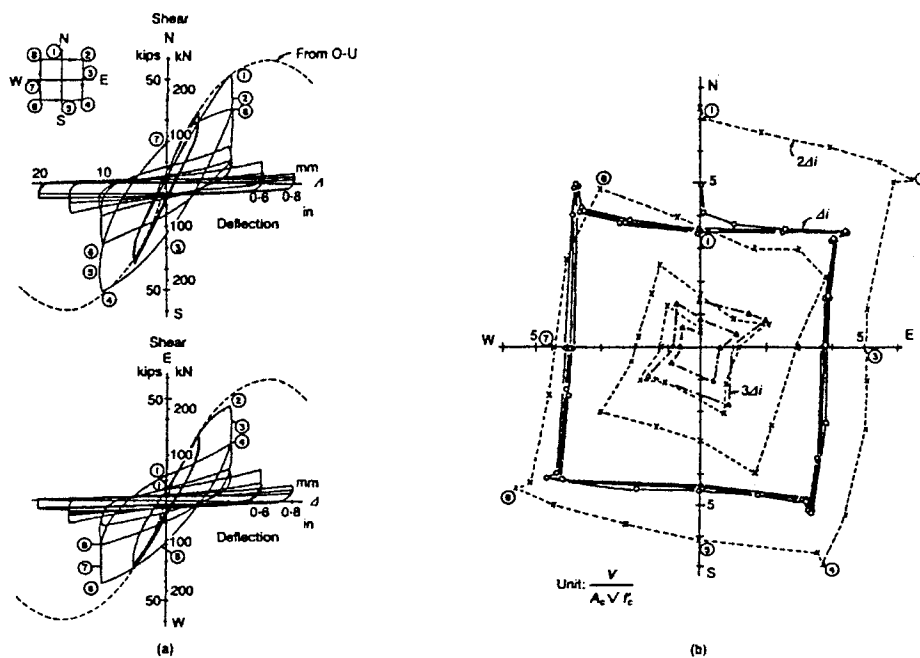


Σχήμα 1.19

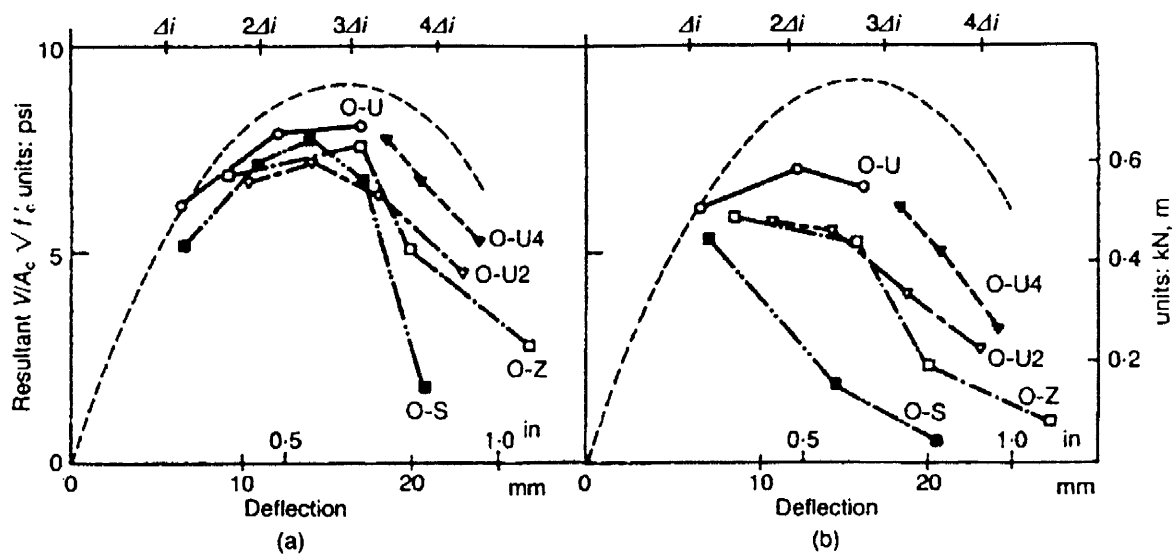
Μονοτονική φόρτιση με αναλογικά αυξανόμενη αξονική δύναμη για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Tegos, 1984).



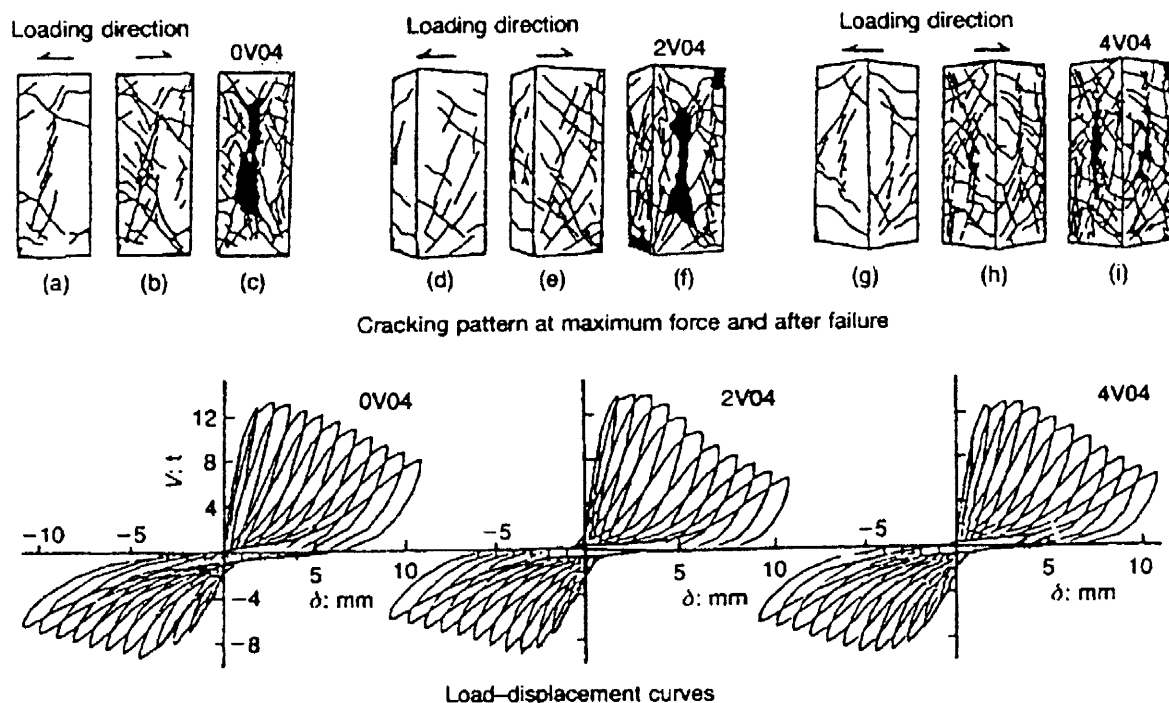
Σχήμα 1.20 Ανακυκλιζόμενη φόρτιση με σταθερή μετατόπιση στην εγκάρσια διεύθυνση για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Δοκιμές 0-U2 και 0-U4 των Maruyama et al, 1984).



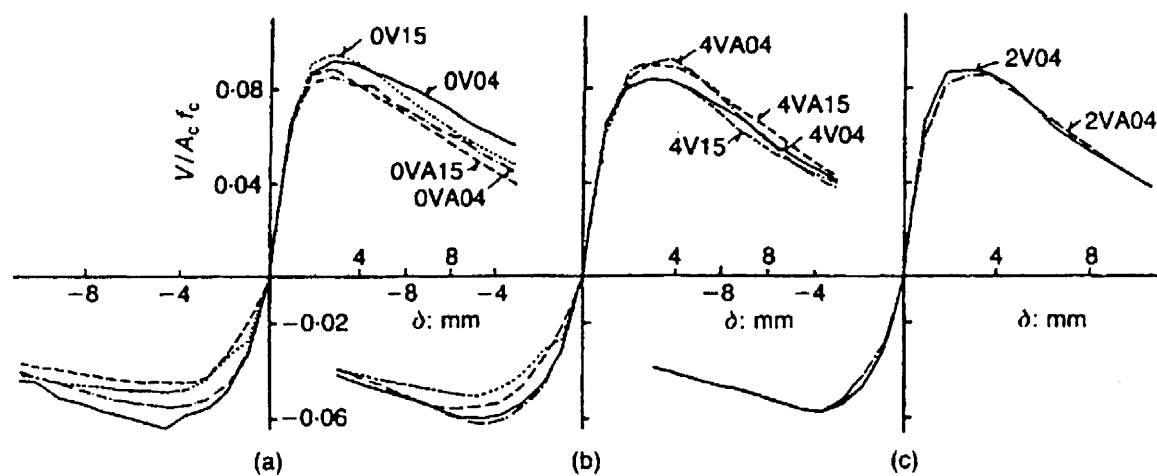
Σχήμα 1.21 Δοκιμή 0-S των Maruyama et al (1984) με τετραγωνικές διαδρομές διαξονικών μετατοπίσεων, για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης



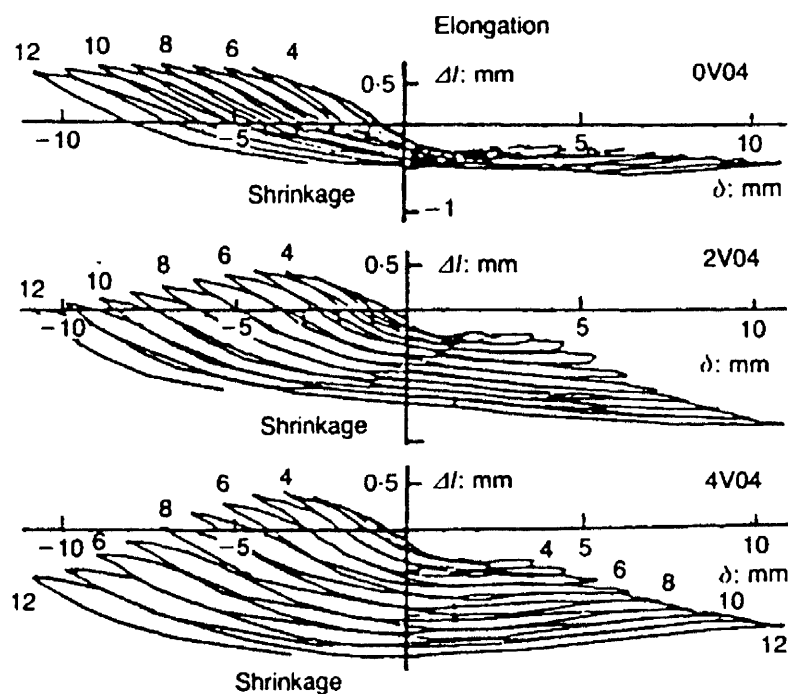
Σχήμα 1.22 Επίδραση της διαδρομής φόρτισης στις περιβάλλουσες συνισταμένης δύναμης – μετατόπισης, για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Maruyama et al, 1984) (a) περιβάλλουσα 1ου κύκλου, (b) περιβάλλουσα 3ου κύκλου.



Σχήμα 1.23 Επίδραση της διεύθυνσης της ανακυκλιζόμενης φόρτισης στη ρηγμάτωση και τη μορφή αστοχίας και στην περιβάλλουσα συνισταμένης δύναμης – μετατόπισης (Mizoguchi et al, 1990).



Σχήμα 1.24 Επίδραση της μεταβολής του αξονικού φορτίου και της διεύθυνση φόρτισης περιβάλλουσες συνισταμένης δύναμης – μετατόπισης, για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Mizoguchi et al, 1990).



Σχήμα 1.25 Αξονικές παραμορφώσεις λόγω ανακύκλισης των εγκάρσιων μετακινήσεων για στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης (Mizoguchi et al, 1990).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΚΡΙΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ Η ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ

#### 2.1. Εισαγωγή

Ανάλογα με το επίπεδο της διακριτοποίησης, η προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να καταταγεί σε μία από τις εξής τρεις γενικές κατηγορίες:

I. Προσομοίωση σημείο-προς-σημείο, σε επίπεδο υλικών: Η κατασκευή διακριτοποιείται σε μεγάλο αριθμό Πεπερασμένων Στοιχείων, με διαφορετικά στοιχεία για το σκυρόδεμα, για το χάλυβα και, ενδεχόμενα, για την αλληλεπίδρασή τους μέσω της συνάφειας. Αυτός ο βαθμός προσομοίωσης επιτρέπει, γενικά, να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση ακόμη και δευτερεύουσες λεπτομέρειες της γεωμετρίας των στοιχείων και να γίνει πρόβλεψη της ιστορίας των τάσεων και παραμορφώσεων σε κάθε σημείο της κατασκευής. Τα τελευταία δέκα χρόνια έγινε τεράστια πρόοδος στις περιοχές: α) των καταστατικών νόμων του αόπλου και του οπλισμένου σκυροδέματος υπό γενικευμένη ή και ανακυκλιζόμενη πολυαξονική ένταση, β) της ανεξάρτητης δικτύου Πεπερασμένων Στοιχείων προσομοίωσης της έναρξης και επέκτασης της ρηγμάτωσης και γ) της προσομοίωσης της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας της ρωγμής (C.E.B., 1991). Παρά την πρόοδο αυτή, η σημείο-προς-σημείο προσομοίωση έχει τέτοιες απαιτήσεις χρόνου και μνήμης υπολογιστή, που η εφαρμογή της έχει μέχρι σήμερα περιορισθεί κυρίως σε μεμονωμένα μέλη (κυρίως τοιχώματα) ή σύνολα μελών (π.χ. κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων, μαζί με τα συντρέχοντα στον κόμβο μέλη) υπό ολιγοκυκλική στατική φόρτιση, ή σε ολόκληρες κατασκευές υπό μονοτονική φόρτιση. Μέχρι σήμερα οι προσπάθειες εφαρμογής μίας τόσο λεπτομερούς προσομοίωσης για τη δυναμική ανάλυση σχετικά μικρών κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ακόμα και πλαισίων) δεν είχαν πλήρη επιτυχία, κυρίως όσον αφορά την εξασφάλιση της συνολικής αριθμητικής της ευστάθειας και την ανωτερότητά της, σε σύγκριση με τις λιγότερο περίπλοκες προσεγγίσεις που αναφέρονται κατωτέρω, στο να αναπαράγει την πειραματική συμπεριφορά.

II. Προσομοίωση μέλος-προς-μέλος, με αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία στοιχείων του προσομοιώματος και μελών της κατασκευής. Στην προσομοίωση αυτή ένα στοιχείο χρησιμοποιείται για κάθε δοκό, υποστύλωμα ή τμήμα τοιχώματος μεταξύ δύο διαδοχικών ορόφων, ή ακόμη και κόμβο δοκών-υποστυλωμάτων, ή για το φάτνωμα ενός εύκαμπτου μέσα στο επίπεδο του πατώματος μεταξύ δύο πλαισίων. Παρόλο που, κατ'αρχήν, η μέλος-προς-μέλος προσομοίωση δεν δίνει τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη κάθε λεπτομέρεια της γεωμετρίας των μελών, όπως, π.χ., η ακριβής θέση και διάταξη του διαμήκους και των εγκαρσίων οπλισμών, επιτρέπει να συμπεριληφθούν όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να περιγράψει την κατανομή της μη-γραμμικής συμπεριφοράς μεταξύ των μελών και κατά την έννοια του μήκους τους. Δεδομένου, τέλος, ότι οι υπολογιστικές απαιτήσεις μίας τέτοιας προσομοίωσης είναι σε λογικά πλαίσια, ακόμη και προκειμένου περί μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης στο χώρο, αυτή έχει καθιερωθεί σήμερα σαν το κύριο υπολογιστικό εργαλείο για τη μη-γραμμική δυναμική ανάλυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

Τα προσομοιώματα τύπου ινών είναι ενδιάμεσα μεταξύ αυτών των ανωτέρω κατηγοριών I και II. Αυτή η ειδική περίπτωση προσομοιωμάτων πλησιάζει αυτά της κατηγορίας I ως προς το ότι σαν συστατικό στοιχείο του συνολικού προσομοιώματος χρησιμοποιεί το στοιχείο μέλους. Αυτό, όμως, το στοιχείο μέλους απαιτεί την παρακολούθηση της ιστορίας της έντασης και της παραμόρφωσης καθ'όλη τη διάρκεια της απόκρισης, σε ένα μεγάλο αριθμό σημείων, σε διάφορες διατομές του μέλους. Έτσι το προσομοίωμα ινών μπορεί να θεωρηθεί σαν εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων στο μονοδιάστατο συνεχές μέσο του μήκους ενός πρισματικού μέλους, χρησιμοποιώντας την υπόθεση της Επιπεδότητας Διατομών κατά Bernoulli σαν κινηματική δέσμευση, προκειμένου να εκφραστούν οι ανηγμένες παραμορφώσεις διαφόρων σημείων μιας διατομής, συναρτήσει των τριών μεγεθών παραμόρφωσής της. Τέλος, ένα άλλο κοινό στοιχείο των προσομοιωμάτων ινών και των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι οι μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις και των δύο.

III. Σχετικά απλά προσομοιώματα με λίγους βαθμούς ελευθερίας, στα οποία ένα και μόνο στοιχείο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ενός ευάριθμου συνόλου μελών ή ακόμη και του συνόλου της κατασκευής. Επί παραδείγματι, σε κτίρια με ισχυρές δοκούς και αδύνατα υποστυλώματα, μπορεί να εφαρμοσθεί ένα προσομοίωμα τύπου διατμητικής δοκού με στενή σύζευξη (Anagnostopoulos, 1972), στο οποίο κάθε όροφος προσομοιώνεται με ένα στοιχείο που συνδέει την τέμνουσα ορόφου με την αντίστοιχη σχετική μετακίνηση των πατωμάτων

(ή τις τέμνουσες ορόφου στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις και την περί κατακόρυφο άξονα στροφή με τις αντίστοιχες σχετικές μεταθέσεις και τη σχετική στροφή των πατωμάτων, σε περίπτωση ανάλυσης στο χώρο). Σε κτίρια με σύζευξη μεταξύ μη-διαδοχικών ορόφων, όπως τα τοιχωματικά και τα δυαδικά, ή ακόμη και αυτά με ισχυρά υποστυλώματα και ασθενείς δοκούς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα υποκατάστατο μη-γραμμικό σύστημα με ένα μόνο βαθμό ελευθερίας σε κάθε οριζόντια διεύθυνση, το οποίο προσομοιώνει την αντίστοιχη σχέση τέμνουσας βάσης-οριζόντιας μετάθεσης κάποιου σημείου της κατασκευής στη θεμελιώδη ιδιομορφή της (Pique, 1976, Saiidi and Sozen, 1981). Εάν σε κάθε οριζόντια διεύθυνση είναι σημαντικές περισσότερες από μία ιδιομορφές, όπως, π.χ., σε δυαδικά κτίρια ή σε κτίρια με ισχυρά υποστυλώματα και ασθενείς δοκούς, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ακανονικότητα στην κατανομή της μάζας και της δυσκαμψίας τους καθ' ύψος, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα υποκατάστατο μη-γραμμικό σύστημα με περισσότερους από δύο βαθμούς ελευθερίας ανά οριζόντια διεύθυνση. Παρά τις συχνά χονδροειδείς απλοποιήσεις τους, τα προσομοιώματα αυτής της κατηγορίας, και ιδίως τα απλά υποκατάστατα συστήματα με έναν ή λίγους βαθμούς ελευθερίας ανά διεύθυνση και κατάλληλα επιλεγμένους νόμους οριζοντίων δυνάμεων-μεταθέσεων, φαίνονται ικανά να αναπαράγουν τα κυριότερα συνολικά χαρακτηριστικά της μη-γραμμικής συμπεριφοράς, όπως η εξέλιξη στο χρόνο της οριζόντιας μετάθεσης στην κορυφή, της τέμνουσας βάσης, ή ακόμη και των σχετικών μεταθέσεων πατωμάτων σε ορισμένες στάθμες, κ.λ.π.. Εν τούτοις, και παρά τη ανωτέρω επιτυχία τους, τα προσομοιώματα αυτά δεν είναι σε θέση να απεικονίσουν την ακριβή γεωμετρία της κατασκευής, ή να δώσουν την κατανομή της ανελαστικής δράσης και της βλάβης στα επιμέρους μέλη της. Επομένως, δεν προσφέρονται για την λεπτομερειακή πρόβλεψη της μη-γραμμικής απόκρισης συγκεκριμένων κατασκευών σε σύνθετες ιστορίες φόρτισης, όπως οι σεισμικές διεγέρσεις της βάσης τους. Είναι περισσότερο κατάλληλες σαν ερευνητικά εργαλεία: α) για τη μελέτη της συνολικής ανελαστικής απόκρισης κατασκευών με σχετικά απλή και κανονική γεωμετρία, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές μίας ευρύτερης ομάδας, και β) για τη διεξαγωγή παραμετρικών αναλύσεων για τη μελέτη της επιρροής διαφόρων παραγόντων, όπως του λόγου αντοχών δοκών - υποστυλωμάτων, του βαθμού της καθ' ύψος ακανονικότητας της μάζας ή της δυσκαμψίας, κ.ά.. Τέλος, με τις δυνατότητες μνήμης και ταχύτητας υπολογιστών που παρέχει η σημερινή τεχνολογία, η εφαρμογή απλών προσεγγιστικών προσομοιωμάτων για σύνθετες κατασκευές στο χώρο μοιάζει περιττή και απηρχαιωμένη.

Λόγω του ειδικού αντικειμένου της παρούσας Εκθεσης, καλύπτονται εδώ αναλυτικά μόνο τα προσομοιώματα τύπου μέλους. Ειδικές δημοσιεύσεις (π.χ. C.E.B., 1991, A.S.C.E.,

1982, Bicanic and Mang, 1989, Mang et al, 1994, κ.ά.) πραγματεύονται με το αντικείμενο της σημείο-προς-σημείο προσομοίωσης με Πεπερασμένα Στοιχεία, υπό μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η παρούσα παρουσίαση αρχίζει με τα προσομοιώματα τύπου ινών, καθώς αυτά αποτελούν την πιο θεμελιώδη φυσική προσέγγιση του προβλήματος και μπορούν, κατ' αρχήν, να αντιμετωπίσουν τη γενική περίπτωση της διαξονικής κάμψης με ορθή δύναμη, καθώς και τις ειδικές περιπτώσεις της μονοαξονικής κάμψης με ή χωρίς ορθή δύναμη. Εμπειρικά ή ημι-εμπειρικά μοντέλα που παρουσιάζονται μετά, αναπτύχθηκαν ιστορικά αναφορικά με ειδικές περιπτώσεις μελών, π.χ. για δοκούς, ή για υποστυλώματα σε μονοαξονική ή σε διαξονική κάμψη. Για το λόγο αυτό παρουσιάζονται ανάλογα, δηλ. χωριστά για μέλη σε μονοαξονική κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη, και χωριστά για υποστυλώματα σε διαξονική ένταση με αξονικό φορτίο. Γίνεται όμως προσπάθεια να εξαχθούν τα προσομοιώματα αυτά σαν απλοποιήσεις της βασικής περίπτωσης του προσομοιώματος ινών.

## 2.2. Το προσομοίωμα Ινών ως θεμελιώδης προσέγγιση της μονοαξονικής και διαξονικής κάμψης με ορθή δύναμη

### 2.2.1. Προσομοίωση στο Επίπεδο Διατομής.

Ανάμεσα στα προσομοιώματα τύπου μέλους, το προσομοίωμα ινών είναι η πιο θεμελιώδης και, σήμερα τουλάχιστον, η περισσότερα υποσχόμενη αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος της ανακυκλιζόμενης ανελαστικής κάμψης μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Σε ένα τέτοιο προσομοίωμα, το μέλος διακριτοποιείται και κατά την έννοια του μήκους, σε τμήματα που αντιπροσωπεύονται από συγκεκριμένες διατομές, και σε επίπεδο διατομής, σε πεπερασμένες περιοχές. Αν η κάμψη είναι μέσα σε ένα επίπεδο (μονοαξονική), η διακριτοποίηση γίνεται σε ένα αριθμό λωρίδων ή ινών κάθετων σ' αυτό το επίπεδο (Aziz et al 1976, Mark 1976). Αν η κάμψη είναι διαξονική, η διατομή διακριτοποιείται συνήθως σε ένα αριθμό πεπερασμένων ορθογωνικών περιοχών, μέσω ενός ορθογωνικού δικτύου παράλληλου στους άξονες της διατομής (Aktan et al 1974, Menegotto and Pinto 1973, Zeris 1986, Zeris and Mahin 1988, 1991, Vaz 1989).

Το Σχ. 2.1 δείχνει τη διακριτοποίηση μιάς διατομής σε πεπερασμένες ορθογωνικές περιοχές. Κάθε περιοχή ή ίνα χαρακτηρίζεται από τη θέση της στο τοπικό σύστημα  $yz$  και από την επιφάνειά της  $dA$ . Οι καταστατικές εξισώσεις της διατομής καθορίζονται από τους καταστατικούς νόμους των υλικών των ινών. Κάθε ίνα περιέχει σκυρόδεμα και/ή χάλυβα

οπλισμού. Οι μη-γραμμικές μονοαξονικές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων αυτών των δύο υλικών σε ανακυκλιζόμενη ένταση, αποτελούν βασικό συστατικό στοιχείο του προσομοιώματος. Ευρεία ανασκόπηση τέτοιων καταστατικών νόμων για το χάλυβα οπλισμού και για το σκυρόδεμα σε εφελκυσμό και σε θλίψη (περιλαμβανομένης της επιρροής της περίσφιγξης) περιλαμβάνεται στο Bull. 210 του C.E.B. (C.E.B., 1991). Η παρουσία διακριτών ρωγμών στο σκυρόδεμα, η συμβολή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό μεταξύ των ρωγμών και η μη-γραμμική σχέση τάσεων συνάφειας-σχετικής ολίσθησης, μπορούν να ληφθούν υπόψη ομοιομορφωποιημένα κατά την έννοια του μήκους, εάν συμπεριληφθεί στο προσομοίωμα η "εφελκυστική συμβολή" του σκυροδέματος (tension stiffening). Αυτό μπορεί να γίνει είτε με τροποποίηση της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος σε εφελκυσμό μετά τη ρηγμάτωση, είτε με κατάλληλη τροποποίηση της μη-γραμμικής σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα σε ανακυκλιζόμενη ένταση. Ο δεύτερος τρόπος είναι και ο προτιμότερος, καθότι η "εφελκυστική συμβολή" του σκυροδέματος σχετίζεται κυρίως με τα φαινόμενα συνάφειας κατά μήκος των ράβδων (C.E.B., 1991).

Εάν παρακολουθείται η ιστορία της τάσης  $\sigma$  και της παραμόρφωσης  $\varepsilon$  στο κέντρο κάθε ίνας, τότε είναι γνωστή, σε κάθε χρονική στιγμή της ανάλυσης της απόκρισης, και η τιμή του εφαπτομενικού Μέτρου Ελαστικότητας,  $E^t$ , του σκυροδέματος ή του χάλυβα της ίνας. Υποθέτοντας ότι οι παραμορφώσεις είναι μικρές και ότι ισχύει η υπόθεση Navier-Bernoulli για την επιπεδότητα διατομών, η ανηγμένη μήκυνση ή βράχυνση στο κέντρο  $(y, z)$  της ίνας συνδέεται ως εξής μ' αυτήν στην αρχή  $O$  των αξόνων (όπου  $y=0, z=0$ ),  $\varepsilon_0$ , και με τις καμπυλότητες  $\varphi_y, \varphi_z$  της διατομής ως προς του τοπικούς άξονες  $y, z$ :

$$\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + y\varphi_z - z\varphi_y \quad (1)$$

Τότε το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας της διατομής,  $K_s^t(x)$ , που συνδέει το διαφορικό του μητρώου-στήλη των ορθών εντατικών μεγεθών της διατομής,  $S_s(x) = [M_y(x) \ M_z(x) \ N(x)]^T$ , μ' αυτό του αντίστοιχου μητρώου-στήλη των γενικευμένων παραμορφώσεων της,  $\varepsilon_s(x) = [\varphi_y(x) \ \varphi_z(x) \ \varepsilon_0(x)]^T$ , προκύπτει από ισορροπία:

$$dS_s(x) = \begin{bmatrix} dM_y(x) \\ dM_z(x) \\ dN(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int E' z^2 dA & \int E' yz dA & \int E' z dA \\ & \int E' y^2 dA & \int E' y dA \\ \text{symm.} & & \int E' dA \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varphi_y(x) \\ d\varphi_z(x) \\ d\varepsilon_o(x) \end{bmatrix} = \mathbf{K}_s^t(x) d\varepsilon_s(x) \quad (2)$$

Για μονοαξονική κάμψη με  $M_z(x)=0$ , το ανωτέρω εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας γίνεται διαστάσεων  $2 \times 2$ , με παράλειψη της 2ης γραμμής και της 2ης στήλης του.

### 2.2.2. Υπολογισμός μητρώου δυσκαμψίας μέλους με τη μέθοδο δυσκαμψίας

Το επόμενο βήμα στο προσομοίωμα ινών είναι ο υπολογισμός του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας του μέλους,  $\mathbf{K}_m^t$ , από αυτά των διατομών του.

Τα μητρώα-στήλες των δυνάμεων στα άκρα του μέλους και των αντιστοίχων παραμορφώσεων μέλους, χωρίς μετακίνηση του μέλους σαν στερεό σώμα, μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\mathbf{S}_m = [M_y^A \quad M_z^A \quad M_y^B \quad M_z^B \quad N]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_m = [\theta_y^A \quad \theta_z^A \quad \theta_y^B \quad \theta_z^B \quad u]^T \quad (4)$$

(βλ. Σχ. 2.2). Στην εξ. (4)  $\theta^A$  και  $\theta^B$  είναι οι γωνίες στροφής χορδής, δηλ. οι γωνίες που σχηματίζουν οι εφαπτόμενες στον άξονα του μέλους στα άκρα A και B με τη χορδή που τα ενώνει στην παραμορφωμένη κατάσταση του μέλους, ενώ η u είναι η σχετική μετακίνηση των A και B κατά τη διεύθυνση του άξονα x του μέλους. (Χάριν απλότητας, παραλείπονται από τις εξ. (3), (4) η ροπή στρέψης T και η αντίστοιχη γωνία στροφής, καθώς τα μεγέθη αυτά είναι ασύζευκτα με τα μεγέθη ορθής έντασης και παραμόρφωσης).

Το εφαπτομενικό μητρώο του μέλους συνδέει τα διαφορικά των μητρώων-στήλη των εξ. (3) και (4), για μέλη χωρίς φόρτιση μεταξύ των άκρων A και B:

$$d\mathbf{S}_m = \mathbf{K}_m^t d\mathbf{v}_m \quad (5)$$

Ενας τρόπος υπολογισμού του  $\mathbf{K}_m^t$  είναι με ολοκλήρωση του μητρώου-στήλη της διατομής,  $\mathbf{K}_s^t(x)$ , κατά μήκος του μέλους, δηλ. από  $x=0$  έως  $x=1$ . Με χρήση της αρχής των

δυνατών μετακινήσεων ή αυτής της ελαχιστοποίησης της δυναμικής ενέργειας, προκύπτει:

$$\mathbf{K}_m^t = \int_1 \mathbf{B}^T(x) \mathbf{K}_s^t(x) \mathbf{B}(x) dx \quad (6)$$

όπου  $\mathbf{B}(x)$  είναι το μητρώο που συνδέει το μητρώο-στήλη των διαφορικών γενικευμένων παραμορφώσεων,  $d\varepsilon_s(x)$ , με το μητρώο-στήλη των παραμορφώσεων του μέλους:

$$d\varepsilon_s(x) = \mathbf{B}(x) d\mathbf{v}_m \quad (7)$$

Σε πρισματικά ραβδόμορφα μέλη με σταθερές ιδιότητες δυσκαμψίας κατά τη διαμήκη έννοια, οι διαφορικές μετακινήσεις εγκάρσια στον άξονα  $x$  είναι πολυώνυμα 3ου-βαθμού ως προς  $x$  (κυβικές συναρτήσεις παρεμβολής Hermite), και το μητρώο  $\mathbf{B}(x)$  ισούται με:

$$\mathbf{B}(x) = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} 2(3x'-2) & 0 & 2(3x'-1) & 0 & 0 \\ 0 & 2(3x'-2) & 0 & 2(3x'-1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

όπου  $x'=x/l$ . Όσο πιο ανομοιόμορφη είναι η κατανομή της δυσκαμψίας κατά μήκος του μέλους, τόσο μειώνεται η ακρίβεια της χρήσης της εξ. (8) στην εξ. (5).

Ο υπολογισμός των τάσεων και παραμορφώσεων  $\sigma$  και  $\varepsilon$  στις ίνες κάθε διατομής γίνεται ως εξής: Σε κάθε βήμα της μη-γραμμικής ανάλυσης υπολογίζεται η διαφορική παραμόρφωση  $d\varepsilon_s(x)$  της κάθε διατομής από τις εξ. (7) και (8). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι διαφορικές παραμορφώσεις  $d\varepsilon(y,z)$  στο κέντρο κάθε ίνας με τη βοήθεια της εξ. (1), και απ' αυτές, με τη βοήθεια των μη-γραμμικών νόμων  $\sigma$ - $\varepsilon$  των υλικών, οι αντίστοιχες ορθές τάσεις,  $\sigma(y,z)$ .

Η εφαρμογή της αρχής των δυνατών μετακινήσεων δίνει το μητρώο-στήλη των εσωτερικών δυνάμεων άκρων,  $\mathbf{Q}_R$ , με τις οποίες ανθίσταται το μέλος στην παραμόρφωση, σαν ολοκλήρωμα των αντίστοιχων ορθών εντατικών μεγεθών, με τις οποίες ανθίστανται στην παραμόρφωση οι διατομές,  $\mathbf{S}_R(x)$ :

$$\mathbf{S}_R(\mathbf{x}) = \left[ \int_A \sigma_x z dA \int_A \sigma_x y dA \int_A \sigma_x dA \right]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{Q}_R = \int_I \mathbf{B}^T(\mathbf{x}) \mathbf{S}_R(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (10)$$

Προσομοιώματα μελών που βασίζονται σ' αυτήν την κλασική μορφή της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων προτάθηκαν, μεταξύ άλλων, από τους Helleland and Scordelis (1981) και Mari and Scordelis (1984). Οι Bazant and Bhat (1977) επέκτειναν τη διατύπωση αυτή για να περιλάβουν την επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων μέσω τριαξονικών προσομοιωμάτων σ-ε που βασίζονται στην ενδοχρονική θεωρία. Στην επέκταση αυτή η διατομή χωρίζεται σε οριζόντιες ίνες, και κάθε ίνα μπορεί να ρηγματωθεί υπό διαφορετική γωνία ως προς τον άξονα  $x$ , ανάλογα με το μέγεθος των ορθών και των διατμητικών της τάσεων.

Επειδή η κατανομή των καμπυλοτήτων κατά μήκος ενός μέλους που έχει διαρρεύσει στα άκρα δεν περιγράφεται ικανοποιητικά από κυβικές συναρτήσεις παρεμβολής Hermite (οι οποίες δίνουν γραμμική μεταβολή της καμπυλότητας στο μήκος του μέλους), επιτυγχάνεται κάποια οικονομία στους υπολογισμούς και βελτιωμένη περιγραφή της κατανομής των παραμορφώσεων στο μέλος εάν εισαχθεί προσέγγιση-παρεμβολή κατά μήκος του μέλους, τόσο των παραμορφώσεων της διατομής (που είναι οι άγνωστοι του προβλήματος) όσο και της ευκαμψίας της.

Οι Menegotto and Pinto (1973) εισήγαγαν παρεμβολή και των δύο αυτών ποσοτήτων, με βάση ένα μικρό αριθμό ενδιάμεσων διατομών του μέλους, περιλαμβάνοντας μάλιστα την αλληλεπίδραση κάμψης και αξονικής δύναμης. Υπέθεσαν γραμμική μεταβολή της ευκαμψίας μεταξύ των ενδιάμεσων διατομών, πράγμα που ισοδυναμεί με μεταβολή της δυσκαμψίας μορφής υπερβολής. Έτσι συνδυάζεται βελτίωση της ακρίβειας με συντομότερους υπολογισμούς, καθότι χρειάζεται μικρότερο αριθμό ενδιάμεσων διατομών για τη διακριτοποίηση του μέλους, παρά σε προσομοιώματα που βασίζονται στη μέθοδο δυσκαμψίας.

Περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας των Στοιχείων επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μεταβλητών συναρτήσεων παρεμβολής: ένα βασικό μειονέκτημα της κλασικής μεθόδου των παραμορφώσεων πηγάζει από την υπόθεση κυβικού πεδίου μετακινήσεων, δηλ. γραμμικής μεταβολής της καμπυλότητας κατά μήκος του μέλους. Η υπόθεση αυτή είναι ικανοποιητική



μόνο για γραμμική ή σχεδόν γραμμική συμπεριφορά. Όταν όμως το μέλος αναπτύξει σημαντική διαρροή στα άκρα του, η καμπυλότητα αυξάνεται έντονα μη-γραμμικά προς τα άκρα. Σαν αποτέλεσμα χρειάζεται τότε να χρησιμοποιηθούν κατά μήκος του μέλους, αντί ένα, πολλά Στοιχεία, που βασίζονται στη μέθοδο δυσκαμψίας.

Για τη διόρθωση του προβλήματος αυτού οι Mehasurevachai and Powell (1982) πρότειναν, σε προβλήματα όπου η μη-γραμμικότητα είναι γεωμετρική αντί να προέρχεται από τα υλικά, την εισαγωγή συναρτήσεων παρεμβολής που βασίζονται στην ευκαμψία και αναθεωρούνται συνεχώς κατά την ανάλυση, καθώς εξελίσσεται η μη-γραμμικότητα. Συγκεκριμένα πρότειναν τον υπολογισμό του μητρώου παρεμβολής  $\mathbf{B}(\mathbf{x})$  σε κάθε βήμα και διατομή, από τις τρέχουσες τιμές του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας διατομής και του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας του μέλους, ως εξής:

$$d \varepsilon_s(\mathbf{x}) = \mathbf{F}_s^t(\mathbf{x}) \mathbf{e}(\mathbf{x}) \mathbf{K}_m^t d \mathbf{v}_m \equiv \mathbf{B}(\mathbf{x}) d \mathbf{v}_m \quad (11)$$

Το βασικό μειονέκτημα των ανωτέρω Στοιχείων που βασίζονται στη μέθοδο δυσκαμψίας, είναι η ανεπάρκειά τους κοντά στην οριακή (δηλ. τη μέγιστη) αντοχή του μέλους, καθόσον υποφέρουν από αριθμητική αστάθεια όταν το μέλος φθάσει την αντοχή του και μπει στο φθίνοντα κλάδο. Όπως αναφέρεται από τους Zeris and Mahin (1988) και φαίνεται στο Σχ. 2.3, όταν στο μέλος (μορφής προβόλου στο Σχ. 2.3) επιβάλλονται παραμορφώσεις που ξεπερνούν την οριακή αντοχή του, η ακραία του διατομή (με αριθμό 1 στο Σχ. 2.3) μπαίνει στο φθίνοντα κλάδο, δηλ. η αντίστασή της σε αυξανόμενη παραμόρφωση μειώνεται. Όλες οι ενδιάμεσες διατομές (δηλ. οι 2 έως 5) αποφορτίζονται, ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία. Τα Στοιχεία που βασίζονται στη μέθοδο δυσκαμψίας δεν μπορούν να παρακολουθήσουν τη συμπεριφορά αυτή, καθότι περιορίζονται από την υπόθεση της γραμμικής μεταβολής της καμπυλότητας κατά μήκος του μέλους, υπόθεση που παραβιάζεται κατάφορα όταν το άκρο του μέλους ξεπεράσει την οριακή αντοχή του, όπως δείχνει το άλμα στην τιμή της καμπυλότητας κοντά στην πάκτωση στο Σχ. 2.3. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν περισσότερα Στοιχεία κατά μήκος του μέλους, χωρίς όμως αυτό να αποτρέπει πλήρως τα προβλήματα αστάθειας. Για την περίπτωση του Σχ. 2.3, ούτε τα πρώιμα προσομοιώματα τύπου ευκαμψίας που περιγράφονται στην παρακάτω Παρ. 2.2.3 είναι επαρκή, καθότι δεν επιβάλλουν την ισορροπία κατά μήκος του μέλους.

### 2.2.3. Η μέθοδος ευκαμψίας για τον υπολογισμό του μητρώου δυσκαμψίας μέλους.

Οι πιο πρόσφατες προσπάθειες για την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων Στοιχείων για γραμμικά μέλη Οπλισμένου Σκυροδέματος ξεφεύγουν από την κλασική μέθοδο δυσκαμψίας και στρέφονται προς συναρτήσεις παρεμβολής που βασίζονται στην ευκαμψία (βλ. εξ. (11)) ή ακόμα περαιτέρω, προς διατυπώσεις που βασίζονται πλήρως στην ευκαμψία, με στόχο την ακριβέστερη περιγραφή της κατανομής της έντασης κατά μήκος του μέλους.

Η μέθοδος ευκαμψίας στηρίζεται στη γνωστή μεταβολή των εσωτερικών δυνάμεων κατά μήκος του μέλους με βάση την ισορροπία:

$$\mathbf{S}_s(x) = \mathbf{e}(x) \mathbf{S}_m \quad (12)$$

$$\mathbf{e}(x) = \begin{bmatrix} x'-1 & 0 & x' & 0 & 0 \\ 0 & x'-1 & 0 & x' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

όπου  $\mathbf{e}(x)$  συμβολίζει το μητρώο ισορροπίας, το οποίο συνδέει το μητρώο-στήλη των ορθών εντατικών μεγεθών στη διατομή  $x$  του μέλους, με το μητρώο-στήλη  $\mathbf{S}_m$  των δυνάμεων στα άκρα του, απουσία εξωτερικής φόρτισης στο ενδιάμεσο του μήκους ( $x'=x/l$ ).

Στη μέθοδο ευκαμψίας το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του μέλους,  $\mathbf{K}_m^t$ , προκύπτει με αντιστροφή του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας,  $\mathbf{F}_m^t$ , το οποίο, με τη σειρά του, προκύπτει από ολοκλήρωση κατά μήκος του μέλους του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας της διατομής,  $\mathbf{F}_s^t(x)$ , κατά την αρχή δυνατών δυνάμεων:

$$\mathbf{F}_m^t = \int \mathbf{e}^T(x) \mathbf{F}_s^t(x) \mathbf{e}(x) dx \quad (14)$$

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι εξισώσεις ισορροπίας, εξ. (11) και (12), ισχύουν ακριβώς, ασχέτως της εσωτερικής κατάστασης του μέλους, με την προϋπόθεση βεβαίως ότι δεν ασκούνται φορτία ενδιάμεσα στο μήκος του. Με άλλα λόγια, η θεώρηση κατανομής των εσωτερικών δυνάμεων στο μέλος ισχύει, ασχέτως της μη-γραμμικότητας υλικού σε επίπεδο διατομής, ακόμη και όταν το μέλος μπει στο φθίνονται κλάδο, μετά την οριακή αντοχή ενός από τα άκρα του.

Το βασικό πρόβλημα της μεθόδου ευκαμψίας είναι ο τρόπος υλοποίησής της στη

σημερινή γενιά των προγραμμάτων Πεπερασμένων Στοιχείων. Τα υφιστάμενα προγράμματα βασίζονται στην (άμεση) μέθοδο δυσκαμψίας. Κατά τη μέθοδο αυτή, μετά την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων για τις άγνωστες επικόμβιες μετακινήσεις, οι μετακινήσεις στα άκρα των μελών (συνολικές και διαφορικές) μεταφέρονται στις υπορουτίνες των Στοιχείων. Στη συνέχεια εκτελείται η φάση καθορισμού της κατάστασης των μελών, όπου καθορίζονται οι εσωτερικές δυνάμεις των μελών που ανθίστανται στις επιβεβλημένες παραμορφώσεις, καθώς και το τρέχον εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του μέλους. Όμως στη μέθοδο ευκαμψίας οι ανθιστάμενες εσωτερικές δυνάμεις δεν μπορούν να υπολογισθούν από την εξ. (10), γεγονός που δημιουργεί την ανάγκη διαφορετικών αλγορίθμων. Το πρόβλημα αυτό εξετάζεται στο υπόλοιπο της παρούσας υποενότητας.

Η βασική υπόθεση σ' ένα Στοιχείο που βασίζεται στη μέθοδο ευκαμψίας είναι η επιλογή της κατανομής των εσωτερικών δυνάμεων, όπως αυτή εκφράζεται από το μητρώο παρεμβολής δυνάμεων  $e(x)$  της εξ. (12). Σε μία εσωτερικά-συμβατή διαδικασία προσδιορισμού της κατάστασης του Στοιχείου, οι εσωτερικές δυνάμεις υπολογίζονται από τις δυνάμεις στα άκρα κατά την εξ. (12), και στη συνέχεια υπολογίζονται οι κατανομές των τάσεων και της ευκαμψίας σε επίπεδο διατομών. Όμως ο υπολογισμός αυτός είναι στατικά άοριστος, καθώς στην περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης οι τάσεις στις ίνες της διατομής δεν μπορούν να υπολογισθούν από τις (δύο) διαθέσιμες εξισώσεις ισοδυναμίας με την αξονική δύναμη και τη ροπή κάμψης της διατομής, αν οι ίνες είναι περισσότερες από δύο. Μια λύση θα ήταν να υποθεθεί εξ' αρχής μια συνάρτηση κατανομής των τάσεων στο Στοιχείο. Όμως τότε το πρόβλημα απλώς θα μεταφέρετο στη φάση του προσδιορισμού της κατάστασης των ινών, καθότι οι νόμοι σ-ε των ινών δίνουν, κατά κανόνα, τις τάσεις από τις παραμορφώσεις, και όχι αντιστρόφως. Η λύση που έχει υιοθετηθεί μέχρι σήμερα στα Στοιχεία που βασίζονται στην ευκαμψία συνίσταται στον υπολογισμό του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας της διατομής,  $K_s^t(x)$ , από την εξ. (2) και στην αντιστροφή του για τον υπολογισμό του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας διατομής,  $F_s^t(x)$ . Αυτό το τελευταίο χρησιμοποιείται επίσης για να υπολογισθούν, σε κάθε βήμα της απόκρισης, οι διαφορικές παραμορφώσεις της διατομής από τις αντίστοιχες διαφορικές δυνάμεις, οι οποίες με τη σειρά τους υπολογίζονται από τις δυνάμεις στα άκρα κατά την εξ. (12).

Τα πρώτα Στοιχεία ινών που προτάθηκαν, δηλ. αυτά των Aziz (1971) και Mark (1976), βασίζονται στη μέθοδο ευκαμψίας. Οι Kaba and Mahin (1984) προχώρησαν τη μέθοδο περαιτέρω για την περίπτωση μονοαξονικής κάμψης, χρησιμοποιώντας το μητρώο ισορροπίας  $e(x)$  για τον υπολογισμό του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας του μέλους. Στη φάση του προσδιορισμού της κατάστασης των Στοιχείων, οι παραμορφώσεις της

διατομής υπολογίζονται από τις μετακινήσεις των άκρων του μέλους, χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις παρεμβολής της εξ. (11), οι οποίες εξαρτώνται από την ευκαμψία. Λόγω της μη-γραμμικότητας της συμπεριφοράς της διατομής, τα εφαπτομενικά μητρώα ευκαμψίας,  $F_s^t(x)$  και  $F_m^t$ , και επομένως και το  $B(x)$ , μεταβάλλονται κατά την απόκριση. Οι παραμορφώσεις  $\epsilon$  των ινών υπολογίζονται από τις παραμορφώσεις της διατομής με τη βοήθεια της εξ. (1), και στη συνέχεια υπολογίζονται οι τάσεις  $\sigma$  και τα αντίστοιχα εφαπτομενικά Μέτρα Ελαστικότητας  $E^t$  από τις σχέσεις  $\sigma$ - $\epsilon$  των ινών. Στη συνέχεια το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας διατομής,  $K_s^t(x)$ , υπολογίζεται από την εξ. (2) και οι ανθιστάμενες δυνάμεις  $S_R(x)$  από τις σχέσεις ισοδυναμίας, εξ. (9). Το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας διατομής,  $K_s^t(x)$ , αντιστρέφεται για τον υπολογισμό του αντίστοιχου μητρώου ευκαμψίας,  $F_s^t(x)$ . Τέλος, το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας μέλους,  $F_m^t$ , προκύπτει από την εξ. (14) και οι δυνάμεις στα άκρα των μελών,  $Q_R$ , που ανθίστανται στις επιβεβλημένες μετακινήσεις, προκύπτουν από την αρχή των δυνατών μετακινήσεων:

$$Q_R = \int_I B^T(x) S_R(x) dx = K_m^t \int_I e^T(x) F_s^t(x) S_R(x) dx \quad (15)$$

Παρά τα γενικώς καλά τους αποτελέσματα, τα ανωτέρω Στοιχεία, με βάση τη μέθοδο ευκαμψίας, έχουν κάποια προβλήματα αστάθειας και αδυνατούν να παρακολουθήσουν τη συμπεριφορά του μέλους στο φθίνοντα κλάδο μετά την οριακή αντοχή. Τα προβλήματα αυτά πηγάζουν από τις ασυμβατότητες στη διατύπωση του Στοιχείου, που οδηγούν σε παραβίαση των συνθηκών ισορροπίας στο εσωτερικό του μέλους, καθώς οι ανθιστάμενες δυνάμεις σε επίπεδο διατομής που υπολογίζονται κατά την εξ. (9), δεν είναι συμβατές με τις σχέσεις ισορροπίας, εξ. (12) και (13). Σαν αποτέλεσμα προκύπτει μη-γραμμικό διάγραμμα ροπών  $M$  και αξονική δύναμη  $N$  που μεταβάλλεται κατά μήκος του μέλους.

Οι Zeris and Mahin (1988, 1991) βελτίωσαν το αρχικό προσομοίωμα των Kaba and Mahin και το επέκτειναν στην περίπτωση της διαξονικής κάμψης. Η κυριότερη βελτίωση αφορά τη φάση προσδιορισμού της κατάστασης του μέλους. Μετά τον προσδιορισμό των διαφορικών παραμορφώσεων του μέλους,  $dv_m$ , από την επίλυση του γενικού συστήματος των εξισώσεων, ακολουθούνται τα εξής βήματα: 1) εφαρμόζεται η εξ. (11) στις ακραίες διατομές, για να προσδιορισθούν οι διαφορικές παραμορφώσεις των διατομών αυτών,  $de_s(0)$  και  $de_s(1)$ , 2) οι αντίστοιχες ροπές κάμψης και αξονικές δυνάμεις στις ακραίες διατομές προσδιορίζονται μέσω μιας διαδικασίας που προχωράει από γεγονός-σε-γεγονός (Zeris, 1986), 3) επικαιροποιούνται οι παραμορφώσεις των ενδιάμεσων διατομών του μέλους, μέσω

μιας επαναληπτικής διαδικασίας που παράγει ανθιστάμενες δυνάμεις σε επίπεδο διατομής, συμβατές με τη γραμμική κατανομή των ροπών κάμψης και με τη σταθερή αξονική δύναμη.

#### 2.2.4. Υπολογισμός του μητρώου δυσκαμψίας μέλους με τη μεικτή μέθοδο των δύο πεδίων

Παρά την αρκετά ικανοποιητική αριθμητική του συμπεριφορά, το προσομοίωμα των Zeris and Mahin (1988, 1991) έχει το μειονέκτημα ότι η διαδικασία προσδιορισμού της κατάστασης του μέλους είναι περίπλοκη και βασίζεται όχι σε ένα καθαρό θεωρητικό υπόβαθρο αλλά σε αποσπασματικές διορθώσεις της πρότασης των Kaba and Mahin (1984). Το πιο πρόσφατο προσομοίωμα των Taucer et al (1991) καλύπτει το θεωρητικό κενό από δύο απόψεις: 1) η διατύπωση του Στοιχείου γίνεται μέσα στο θεωρητικό πλαίσιο των μεικτών μεθόδων, και 2) προτείνεται μία διαδικασία προσδιορισμού της κατάστασης του μέλους, η οποία ικανοποιεί ταυτόχρονα την εσωτερική ισορροπία και το συμβιβαστό των παραμορφώσεων.

Η ανάπτυξη του προσομοιώματος ακολουθεί τη μεικτή μέθοδο των δύο πεδίων, κατά την οποία η μητρική σχέση μεταξύ των γενικευμένων δυνάμεων και των αντιστοίχων μετακινήσεων στα άκρα του μέλους προκύπτει από την ολοκληρωτική σχέση ισορροπίας και τις εξισώσεις δυνάμεων-παραμορφώσεων της διατομής. Αυτές οι τελευταίες εξισώσεις γραμμικοποιούνται στο τρέχον σημείο της απόκρισης, ώστε η διαφορική σχέση να είναι γραμμική. Στη συνέχεια η μη-γραμμική σχέση δυνάμεων-παραμορφώσεων της διατομής ικανοποιείται με τη βοήθεια ενός επαναληπτικού αλγορίθμου, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

Η μεικτή μέθοδος των δύο πεδίων (Zienkiewicz and Taylor 1989) χρησιμοποιεί ανεξάρτητες συναρτήσεις παρεμβολής για τα πεδία δυνάμεων και παραμορφώσεων κατά μήκος του μέλους. Το πεδίο των διαφορικών δυνάμεων ικανοποιεί τις εξ. (12) και (13). Το πεδίο των μετακινήσεων μπορεί να επιλεγεί ανεξάρτητα, αλλά οι Taucer et al (1991) χρησιμοποιούν τις συναρτήσεις παρεμβολής  $B(x)$  της εξ. (13), οι οποίες εξαρτώνται από την ευκαμψία.

Κατά τη μεικτή μέθοδο οι διαφορικές σχέσεις δυνάμεων-παραμορφώσεων διατομής εκφράζονται με τη μορφή ενός σταθμισμένου ολοκληρώματος κατά μήκος του μέλους. Η στάθμιση γίνεται με δυνατές διαφορικές δυνάμεις σε επίπεδο διατομής, οι οποίες ισορροπούν δυνατές διαφορικές δυνάμεις στα άκρα του μέλους κατά τις εξ. (12), (13). Τότε η αρχή των δυνατών δυνάμεων δίνει την εξής ολοκληρωτική μορφή της διαφορικής σχέσης δυνάμεων-παραμορφώσεων:

$$\mathbf{T}d\mathbf{v}_m - \mathbf{F}_m^t d\mathbf{S}_m = 0 \quad (16)$$

όπου  $\mathbf{F}_m^t$  είναι το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας μέλους κατά την εξ. (14) και  $\mathbf{T}$  είναι μητρώο που εξαρτάται από τις συναρτήσεις παρεμβολής δυνάμεων και παραμορφώσεων:

$$\mathbf{T} = \int_I \mathbf{e}^T(\mathbf{x})\mathbf{B}(\mathbf{x})d\mathbf{x} \quad (17)$$

Αν χρησιμοποιηθεί συνάρτηση παρεμβολής  $\mathbf{B}(\mathbf{x})$  που εξαρτάται από την ευκαμψία, το μητρώο  $\mathbf{T}$  γίνεται ίσο με το μητρώο-μονάδα  $\mathbf{I}$  και η εξ. (16) απλοποιείται στη μορφή της εξ. (5), με το εφαπτομενικό μητρώο-στήλη του μέλους να προκύπτει με αντιστροφή του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας,  $\mathbf{F}_{mt}$ . Αυτό το τελευταίο υπολογίζεται κατά την κλασική μέθοδο ευκαμψίας, δηλ. κατά την εξ. (14).

Ο αλγόριθμος προσδιορισμού της κατάστασης του μέλους κατά Taucer et al (1991) βασίζεται στον υπολογισμό "απομενουσών" παραμορφώσεων σε επίπεδο διατομής και μέλους. Καθώς οι καθιερωμένοι μη-γραμμικοί αλγόριθμοι που βασίζονται στη μέθοδο δυσκαμψίας χρησιμοποιούν επαναληπτικές εφαρμογές μη-εξισορροπυμένων φορτίων, είναι φυσιολογικό σε αλγόριθμους που βασίζονται στη μέθοδο ευκαμψίας να χρησιμοποιούνται, αντ' αυτού, μη-εξισορροπούμενες, ή κατά προτίμηση "απομένουσες" παραμορφώσεις. Ένας τέτοιος αλγόριθμος περιλαμβάνει τότε τα εξής βήματα:

- 1) Χρησιμοποιώντας το τρέχον εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας  $\mathbf{K}_m^t$ , υπολογίζονται οι διαφορικές δυνάμεις στα άκρα μελών,  $d\mathbf{S}_m$ , από τις αντίστοιχες διαφορικές παραμορφώσεις,  $d\mathbf{v}_m$ .
- 2) Υπολογίζονται οι διαφορικές εσωτερικές δυνάμεις  $d\mathbf{S}_s(\mathbf{x})$  σε επίπεδο διατομής από την εξ. (12), και επικαιροποιούνται τα μητρώα-στήλη των δυνάμεων διατομής  $\mathbf{S}_s(\mathbf{x})$ .
- 3) Υπολογίζονται οι διαφορικές παραμορφώσεις διατομής από την αντίστροφη της εξ. (5), χρησιμοποιώντας το τρέχον εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας της διατομής,  $\mathbf{F}_s^t(\mathbf{x})$ .
- 4) Καθορίζεται η κατανομή των παραμορφώσεων στη διατομή από την εξ. (1).
- 5) Υπολογίζονται οι τάσεις και το εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας για όλες τις ίνες κάθε διατομής.
- 6) Προσδιορίζεται το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας διατομής  $\mathbf{K}_s^t(\mathbf{x})$  από την εξ. (2) και οι ανθιστάμενες εσωτερικές δυνάμεις  $\mathbf{S}_R(\mathbf{x})$  από την ισοδυναμία τάσεων-δυνάμεων,

εξ. (11), και υπολογίζεται το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας της διατομής,  $F_s^t(x)$  με αντιστροφή του  $K_s^t(x)$ .

- 7) Υπολογίζεται το μητρώο-στήλη των μη-ισορροπούμενων δυνάμεων της διατομής,  $S_U(x)=S(x)-S_R(x)$ .
- 8) Υπολογίζεται το μητρώο-στήλη των απομενουσών παραμορφώσεων της διατομής,  $r(x)=F_s^t(x)S_U(x)$ .
- 9) Από την αρχή των δυνατών δυνάμεων υπολογίζεται το μητρώο-στήλη των απομενουσών παραμορφώσεων του μέλους, και το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας μέλους, κατά την εξ. (14).
- 10) Υπολογίζεται το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας  $K_m^t$  με αντιστροφή του μητρώου  $F_m^t$ .
- 11) Εφαρμόζεται σε κάθε μέλος το μητρώο-στήλη των διαφορικών δυνάμεων  $\Delta S_m=K_m^t(-s)$ , καθόσον με την προσθήκη των "απομενουσών" παραμορφώσεων μελών στα μητρώα-στήλη των μετακινήσεων των άκρων κάθε μέλους, παραβιάζεται το συμβιβαστό των επικομβίων μετακινήσεων. Το μητρώο  $\Delta S_m$  είναι το νέο μητρώο-στήλη διαφορικών δυνάμεων μέλους. Με αυτό αρχίζει νέος κύκλος του υπολογισμού.

Τα βήματα 2) έως 9) επαναλαμβάνονται μέχρις ότου επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση. Σαν κριτήριο σύγκλισης χρησιμοποιούνται το μέγεθος των μη-εξισορροπούμενων δυνάμεων διατομής,  $S_U(x)$ , ή κατά προτίμηση αυτό του γινομένου  $s^T K_m^t s$ , το οποίο έχει διαστάσεις ενέργειας. Στη διάρκεια των επαναλήψεων, η εσωτερική ισορροπία, εξ. (12), και το συμβιβαστό των μετακινήσεων, εξ. (7), ισχύουν συνεχώς. Οι καταστατικοί νόμοι υλικών και μελών ικανοποιούνται με κάποια ανοχή, όταν συγκλίνει ο αλγόριθμος.

#### 2.2.5. Ολοκλήρωση κατά μήκος του μέλους: Η μέθοδος της κατανεμημένης ανελαστικότητας

Ολοκληρώσεις κατά μήκος του μέλους του τύπου των εξ. (6), (10), (10a) και (14), γίνονται αριθμητικά, από τις τιμές των στοιχείων των μητρώων δυσκαμψίας, ευκαμψίας ή ανθιστάμενων δυνάμεων στις διακριτές διατομές που αντιπροσωπεύουν τα τμήματα στα οποία έχει διαιρεθεί το μέλος. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας σημαντικός αριθμός διατομών (6 έως 18 από τους Kaba and Mahin, 1984, 20 από το Mark 1976) σε σταθερές μεταξύ τους αποστάσεις, και χρησιμοποιείται ο τραπεζοειδής κανόνας για την ολοκλήρωση, πράγμα που σημαίνει γραμμική μεταβολή του μεγέθους που ολοκληρώνεται μεταξύ των διατομών αυτών. Ομως είναι υπολογιστικά αποδοτικότερο να μειωθεί ο αριθμός των διατομών στο

κεντρικό τμήμα του μήκους και να αυξηθεί κοντά στα άκρα, καθώς εκεί συγκεντρώνεται η ανελαστικότητα. Από την άποψη αυτή προσφέρεται η ολοκλήρωση κατά Gauss-Lobatto, κατά την οποία τοποθετείται μία διατομή ολοκλήρωσης σε κάθε άκρο, και οι λοιπές (που μπορεί να είναι απλώς μία, δύο, κ.λ.π., ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια) τοποθετούνται σε καθορισμένες θέσεις, συμμετρικές ως προς το μέσο του μήκους, πυκνότερα κοντά στα άκρα και αραιότερα στο κέντρο.

Προσομοιώματα μελών στα οποία η μη-γραμμική απόκριση δυνάμεων-παραμορφώσεων ελέγχεται και παρακολουθείται σ' ένα διακριτό αριθμό διατομών του μέλους, όπου και γίνεται ολοκλήρωση του τύπου των εξ. (6), (10) και (14), ονομάζονται "κατανεμημένης ανελαστικότητας".

#### 2.2.6. Συμπεράσματα

Καθώς τα προσομοιώματα τύπου ινών απαιτούν σε κάθε βήμα της ανάλυσης την εκτέλεση μακρών υπολογισμών για την κατασκευή του μητρώου δυσκαμψίας μέλους και για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων σε όλες τις ίνες κάθε διατομής ελέγχου, είναι κατά αρκετές τάξεις μεγέθους πιο απαιτητικά σε χρόνο υπολογισμού από τα απλούστερα προσομοιώματα μελών που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους αυτού του Κεφαλαίου. Επιπλέον, είναι και εξαιρετικά απαιτητικά σε κεντρική και/ή περιφερειακή μνήμη υπολογιστή, καθώς για τον υπολογισμό του τρέχοντος εφαπτομενικού Μέτρου Ελαστικότητας και της τάσης που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση κάθε ίνας, χρειάζεται να διατηρείται στη μνήμη όλη γενικά η ιστορία των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά την απόκριση, σε κάθε ίνα κάθε διατομής ελέγχου. Το σημαντικότερο πρόβλημα πιθανόν είναι το ότι όσο αυξάνεται ο όγκος των υπολογισμών μιας μη-γραμμικής και επαναληπτικής υπολογιστικής διαδικασίας, τόσο αυξάνεται ο κίνδυνος να παρουσιασθούν τοπικά αριθμητικές αστάθειες και να επεκταθούν κατόπιν στο σύνολο της κατασκευής που αναλύεται.

Σε αντιστάθμισμα των ανωτέρω υπολογιστικών τους μειονεκτημάτων, τα προσομοιώματα ινών είναι σε θέση: α) να παρακολουθήσουν την εξέλιξη της ανελαστικότητας κατά μήκος του μέλους, β) να αναπαράγουν τη στένωση των βρόχων υστέρησης ροπών-καμπυλοτήτων που χαρακτηρίζει την πειραματική συμπεριφορά μελών σπλισμένου σκυροδέματος, γ) να λάβουν πλήρως υπ' όψη όλες τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας της διατομής και της κατανομής των σπλισμών της, και δ) να αντικατοπτρίσουν την επιρροή της μεταβολής του αξονικού φορτίου στη συμπεριφορά, αυτήν της τυχόν



διαξονικότητας της καμπτικής έντασης, καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο διευθύνσεων της κάμψης και της συμπεριφοράς κατά τον άξονα. Επιπλέον, τα προσομοιώματα ινών μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν θεμελιώδη προσομοιώματα, καθώς χρησιμοποιούν άμεσα, μαζί με τη βασική υπόθεση της επιπεδότητας των διατομών και τις συνθήκες ισορροπίας, ρεαλιστικούς νόμους σ-ε των επιμέρους υλικών (περιλαμβανομένης της επιρροής της περίσφιγξης επί του σκυροδέματος, της εφελκυστικής συμβολής του σκυροδέματος μεταξύ ρωγμών, φαινομένων σταδιακής μείωσης της αντοχής και δυσκαμψίας λόγω ανακύκλισης, κ.α.). Αυτό σε αντιπαράθεση με τα κατωτέρω απλούστερα προσομοιώματα τύπου μέλους, τα οποία αποπειρώνται να συλλάβουν την περίπλοκη συνολική συμπεριφορά του μέλους μέσω φαινομενολογικών κανόνων και ημι-εμπειρικών σχέσεων μεταξύ ροπής και καμπυλότητας, ή ροπής και (πλαστικής) γωνίας στροφής, ή δύναμης και μετακίνησης. Πρέπει να επισημανθεί όμως ότι, παρά την περιπλοκότητα και την εκ πρώτης όψεως πληρότητά τους, λόγω της υπόθεσης της επιπεδότητας διατομών στην οποία στηρίζονται τα προσομοιώματα ινών, κατά κανόνα αγνοούν τα μη-γραμμικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάτμηση, όπως τις μη-γραμμικές διατμητικές παραμορφώσεις, και την αλληλεπίδραση κάμψης-τέμνουσας. Επιπλέον, δεν μπορούν να λάβουν υπόψη το σημαντικό φαινόμενο του λυγισμού των ράβδων.

Με βάση όλα τα ανωτέρω δεν προκύπτει ότι η αυξημένη ακρίβεια και το καλύτερο θεωρητικό υπόβαθρο των προσομοιωμάτων ινών αντισταθμίζουν πλήρως τις πολύ αυξημένες υπολογιστικές τους απαιτήσεις και τον κίνδυνο αριθμητικών προβλημάτων, στο βαθμό που να δικαιολογούν τη γενικευμένη χρήση τους.

### **2.3. Προσομοιώματα δοκών με βάση απλουστεύσεις των θεμελιωδών προσομοιωμάτων**

Οι δοκοί θεωρούνται γενικά ότι εντείνονται σε μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη. Αυτό σημαίνει ότι γενικά αγνοείται η αλληλεπίδραση της καμπτικής έντασης και παραμόρφωσης με αυτές στην αξονική διεύθυνση, δηλ. αγνοείται η αξονική μήκυνση που προκαλούν οι καμπτικές παραμορφώσεις, οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται για να περιορίσουν αυτές τις παραμορφώσεις καθώς και η επιρροή των αξονικών παραμορφώσεων και δυνάμεων στις καμπτικές. Έτσι θεωρούνται μόνον οι καμπτικές ροπές, οι καμπυλότητες και οι γωνίες στροφής περί άξονα κάθετο στο επίπεδο της κάμψης (δηλ. στο επίπεδο του πλαισίου στο οποίο ανήκει η δοκός), οι οποίες και συμβολίζονται με  $M$ ,  $\varphi$  και  $\theta$ . Το

εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας διατομής  $F_s^t(x)$  εκφυλίζεται σε βαθμωτό μέγεθος, την εφαπτομενική ευκαμψία,  $f_s^t(x)=d\phi/dM$ , και το μητρώο δυσκαμψίας της διατομής στην εφαπτομενική δυσκαμψία της,  $k_s^t(x)=dM/d\phi$ .

Με ολοκλήρωση της  $k_s^t(x)$  κατά το μήκος του μέλους:

$$K_m^t = \int b^T(x) k_s^t(x) b(x) dx \quad (18)$$

(όπου  $b(x)$  είναι το μητρώο-στήλη παρεμβολής που συνδέει την καμπυλότητα  $\phi$  με τις μετακινήσεις των άκρων), προκύπτει το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του μέλους, διαστάσεων  $2 \times 2$ , το οποίο συνδέει το μητρώο-στήλη των διαφορικών ροπών στα άκρα του μέλους,  $[dM_A, dM_B]^T$ , με αυτό των διαφορικών γωνιών στροφής χορδής,  $[d\theta_A, d\theta_B]^T$ .

Λόγω της μη-γραμμικότητας, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σταθερό μητρώο-στήλη για την παρεμβολή, όπως το  $b(x)=2/l [3x/l-2 \ 3x/l-1]$ . Είναι πιο λογικό να υιοθετηθεί η μέθοδος ευκαμψίας και να υπολογισθεί ως εξής το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας μέλους,  $F_m^t$ , διαστάσεων  $2 \times 2$ :

$$F_m^t = \int e^T(x) f_s^t(x) e(x) dx \quad (19)$$

όπου  $e(x)=[x/l-1 \ x/l]$  είναι το μητρώο ισορροπίας.

Με στόχο τη μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων της θεμελιώδους μεθόδου των ινών και την αποφυγή μερικών από τα προβλήματά της, έχουν προταθεί ημι-εμπειρικές απλουστεύσεις. Οι απλουστεύσεις αφορούν τα εξής θέματα:

1. Τον προσδιορισμό της εφαπτομενικής δυσκαμψίας ή ευκαμψίας τυχούσης διατομής, χωρίς διακριτοποίηση της διατομής σε ίνες και χωρίς την εκτέλεση των ολοκληρώσεων της εξ. (2). Η απλούστευση συνεπάγεται την αποφυγή παρακολούθησης και διατήρησης στη μνήμη της ιστορίας τάσεων και παραμορφώσεων σε διάφορες θέσεις (δηλ. ίνες) της διατομής. Αυτό επιτυγχάνεται με ανάπτυξη και χρήση μίας σχέσης ροπής- (ομοιομορφοποιημένης) καμπυλότητας υπό γενικευμένη, δηλ. ανακυκλιζόμενη, φόρτιση. Η σχέση αυτή θα πρέπει να αναπαράγει φαινομενολογικά τη συμπεριφορά που προκύπτει πειραματικά ή αναλυτικά (από ένα λεπτομερές και αξιόπιστο προσομοίωμα ινών). Η απλουστευμένη μέθοδος χαρακτηρίζεται από τη φαινομενολογική σχέση  $M -$  (ομοιομορφοποιημένων)  $\phi$ , ή  $M -$  (σχετικών)  $\theta$  που χρησιμοποιεί.
2. Την κατασκευή του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας ή ευκαμψίας μέλους, χωρίς επιμέρους διακριτοποίηση του μέλους με τη βοήθεια διατομών ελέγχου και χωρίς τις

αριθμητικές ολοκληρώσεις των εξ. (17) ή (18). Ανάλογα με τις λεπτομέρειες της απλοποίησης, μπορούμε να διακρίνομε τα απλουστευμένα προσομοιώματα σ' αυτά της "διάχυτης" και σ' αυτά της "συγκεντρωμένης" ανελαστικότητας. Τα τελευταία αναφέρονται και σαν προσομοιώματα τύπου "σημειακών αρθρώσεων".

Σημειωτέον ότι παρ' όλο που τα απλουστευμένα ή ημι-εμπειρικά προσομοιώματα παρουσιάζονται εδώ σαν να εξάγονται από τα "θεμελιώδη" προσομοιώματα της Παρ. 2.3.2, δεν σημαίνει ότι έτσι έγινε και στην πραγματικότητα. Αντίθετα τα απλούστερα προσομοιώματα αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα και χρονολογικά προηγήθηκαν.

### 2.3.1. Φαινομενολογικά προσομοιώματα M-φ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται όλα σχεδόν τα εμπειρικά προσομοιώματα που έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται σήμερα, μαζί με αποτίμηση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, και συγκεκριμένα της υστερητικής απορρόφησης ενέργειας.

#### 2.3.1.1. Η καμπύλη μονοτονικής φόρτισης

Η προσομοίωση της σχέσης M - (ομοιομορφοποιημένης) φ υπό μονοτονική φόρτιση είναι σημαντική και απαραίτητη όχι μόνον για τα τμήματα της απόκρισης όπου έχουμε πρώτη (παρθένα) φόρτιση, προς τα θετικά ή προς τα αρνητικά, αλλά και επειδή, όταν δεν έχουμε πτώση της αντοχής με την ανακύκλιση, η καμπύλη M-φ σε μονοτονική φόρτιση αποτελεί περιβάλλουσα των βρόχων υστέρησης σε αποφόρτιση-επαναφόρτιση. Ετσι οι βρόχοι υστέρησης ορίζονται με βάση τη μονοτονική καμπύλη. Ακόμα και όταν έχουμε κάποια πτώση αντοχής, αυτή μετράται ως προς την καμπύλη μονοτονικής φόρτισης. Για τους λόγους αυτούς, η μονοτονική καμπύλη αποτελεί βασικό στοιχείο οποιουδήποτε φαινομενολογικού προσομοιώματος της υστερητικής συμπεριφοράς.

Η πραγματική μονοτονική καμπύλη M - (ομοιομορφοποιημένης) φ προκύπτει είτε πειραματικά (οπότε η φ προκύπτει από τη σχετική γωνία στροφής δύο γειτονικών διατομών σε περιοχή όπου η ροπή M δεν μεταβάλλεται σημαντικά), είτε από ένα προσομοίωμα τύπου ινών σε επίπεδο διατομής, το οποίο να λαμβάνει υπόψη την επιρροή της περίσφιγξης, την ενδεχόμενη αποφλοΐωση του σκυροδέματος επικάλυψης των ράβδων, την εφελκυστική συμβολή του σκυροδέματος, την κράτυνση του χάλυβα, το ενδεχόμενο λυγισμού των ράβδων, κ.λ.π. Η καμπύλη αυτή αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά τμήματα: α) αυτό της

αρηγμάτωτης διατομής, αυτό της ρηγματωμένης μέχρι τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα, το τμήμα μεταξύ διαρροής και οριακής αντοχής (στην κορυφή του διαγράμματος) και τον μετά την αντοχή φθίνοντα κλάδο. Σε δοκούς με σύγχρονες λεπτομέρειες όπλισης και με σύγχρονη κατασκευαστική διαμόρφωση, ο τελευταίος κλάδος κατά κανόνα αγνοείται, καθότι το σχεδόν οριζόντιο τμήμα του διαγράμματος κοντά στην αντοχή και ο φθίνων κλάδος κατόπιν, εκτείνονται οριζόντια τόσο πολύ που ούτε είναι εύκολο να προσδιορισθούν πειραματικά ούτε μας πολυενδιαφέρουν στα πλαίσια αναλύσεων της μη-γραμμικής δυναμικής απόκρισης. Επίσης, στις δοκούς υπάρχει μία μόνο στρώση εφελκόμενου χάλυβα και έτσι η επιρροή της διαρροής του στο διάγραμμα M-φ είναι σαφής. Σαν τελικό αποτέλεσμα, η μονοτονική καμπύλη προσομοιώνεται συνήθως σαν τριγραμμική, εκτεινόμενη ευθύγραμμα επ' άπειρον μετά τη διαρροή.

Περαιτέρω συνήθως αγνοείται η διάκριση μεταξύ ρηγματωμένης και αρηγμάτωτης διατομής, καθότι: α) στα πλαίσια των μη-γραμμικών αναλύσεων της απόκρισης μας ενδιαφέρει κατά βάση η ανελαστική, δηλ. η μεταδιαρροϊκή συμπεριφορά, και β) ο σεισμός βρίσκει συνήθως τα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος ήδη ρηγματωμένα από το συνδυασμό κατακορύφων φορτίων, συστολής ξήρανσης, θερμοκρασιακών μεταβολών, κ.α. Έτσι τελικά η μονοτονική καμπύλη M-φ συνήθως λαμβάνεται διγραμμική. Το γωνιακό σημείο που διαχωρίζει τους δύο ευθύγραμμους κλάδους πριν και μετά τη διαρροή, θεωρείται σαν το σημείο διαρροής του μέλους. Οι δύο κλάδοι και το σημείο διαρροής προσαρμόζονται "με το μάτι", ή με βάση την ισότητα εμβαδών κάτω από την καμπύλη, στην ακριβή πειραματική ή αναλυτική μονοτονική καμπύλη M-φ. Πολλές φορές ο πρώτος κλάδος επιλέγεται να διέρχεται από το σημείο της πραγματικής καμπύλης όπου η ροπή ισούται με το 75% της ροπής διαρροής.

Πολύ συχνά δεν είναι διαθέσιμη πειραματικά ή αναλυτικά η ακριβής καμπύλη M-φ οπότε οι συντεταγμένες του σημείου διαρροής υπολογίζονται με βάση: α) την υπόθεση επιπεδότητας διατομών, 2) τους ελαστικούς νόμους σ-ε του (ρηγματωμένου) σκυροδέματος και του χάλυβα, αγνοώντας την εφελκυστική συμβολή του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών σαν ασήμαντη, στην κατάσταση όπου ο χάλυβας διαρρέει, και 3) τη συνθήκη διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού. Έτσι προκύπτει, με βάση την ισοδυναμία τάσεων-αξονικής δύναμης, η ακόλουθη σχέση για το ύψος θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή, ανηγμένο στο συνολικό ύψος  $h$  της διατομής.

$$\xi_y = \frac{f_c}{E_c \varepsilon_y} [ -(\omega_1 + \omega_2 + v) + [(\omega_1 + \omega_2 + v)^2 + 2 \frac{E_c \varepsilon_y}{f_c} [(1 - \frac{d_1}{h})(v + \omega_1) + \omega_2 \frac{d_1}{h}]]^{1/2} ] \quad (20)$$

όπου  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  είναι τα μηχανικά ποσοστά των εφελκόμενου και του θλιβόμενου χάλυβα,  $\omega$  αυτό των τυχόν οπλισμών που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι καθ' ύψος της διατομής μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού,  $v=N/A_c f_c$  το ανηγμένο αξονικό φορτίο (με τη θλίψη θετική) και  $d_1$  η απόσταση των οπλισμών από την πλησιέστερη ακραία ίνα (πέλμα) της διατομής. Κατόπιν υπολογίζεται η καμπυλότητα της διατομής στη διαρροή:

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_y}{(1 - \xi_y - \frac{d_1}{h})h} \quad (21)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις  $\varepsilon_y=f_y/E_s$  είναι η ανηγμένη μήκυνση του χάλυβα στη διαρροή. Με βάση τις ίδιες υποθέσεις και την ισοδυναμία τάσεων - συνολικής ροπής, προκύπτει η ροπή στη διαρροή:

$$M_y = bh^2 f_c \left[ (\omega_1 + v) \left(1 - \frac{d_1}{h} - \frac{\xi_y}{3}\right) - v \left(0.5 - \frac{d_1}{h}\right) + \omega_2 \left(\frac{\xi_y}{3} - \frac{d_1}{h}\right) \frac{\xi_y - \frac{d_1}{h}}{1 - \xi_y - \frac{d_1}{h}} \right] \quad (22)$$

Τα Σχήματα 3.1 και 3.2 του Κεφαλαίου 3 συγκρίνουν τις προβλέψεις των εξ. (21) και (22) με διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα. Για τη  $M_y$  η συμφωνία είναι πολύ ικανοποιητική. Δεν μπορεί να λεχθεί το ίδιο για τη σύγκριση πειραματικών-θεωρητικών τιμών της  $\varphi_y$ . Ο πιθανότερος λόγος των διαφορών είναι η δυσχέρεια μέτρησης (ή ακόμα και ορισμού) της  $\varphi_y$  στο πείραμα, λόγω της διακριτής φύσης των ρωγμών, της επιρροής της ολίσθησης του χάλυβα και της επίδρασης του μήκους αναφοράς για τον υπολογισμό της  $\varphi_y$  (δηλ. της απόστασης των διατομών μεταξύ οποίων μετράται η σχετική στροφή).

Οι Park and Ang (1985) πρότειναν τον εξής εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της  $\varphi_y$ : Να υπολογίζεται η  $\varphi_y$  από την εξ. (21) χρησιμοποιώντας την τιμή του  $\xi_y$  που προκύπτει από την εξ. (20) για  $\omega=0$  και συμβολίζεται με  $\xi_{y0}$ , και κατόπιν να διορθώνεται εμπειρικά ως εξής:

$$\varphi_y = \left[ 1.05 + \left( \frac{0.45}{0.84 + 2\omega_1 - \omega_2} - 0.05 \right) \frac{v}{0.3} \right] \frac{\varepsilon_y}{\left( 1 - \xi_{y_0} - \frac{d_1}{h} \right) h} \quad (23)$$

Με τον τρόπο αυτό υποτίθεται ότι λαμβάνεται υπόψη και η επιρροή της μη γραμμικότητας του σκυροδέματος σε θλίψη.

Αν η δοκός έχει διατομή Γ ή Τ και/ή ασύμμετρο οπλισμό ( $\omega_1 \neq \omega_2$ ), τότε χρειάζονται δύο διαφορετικές μονοτονικές καμπύλες Μ-φ, δηλ. μία για κάθε φορά της κάμψης. Σε δοκούς που συνδέονται μονολιθικά με την πλάκα, το συνεργαζόμενο με τη δοκό πλάτος της πλάκας, σε εφελκυσμό ή σε θλίψη, αυξάνεται με το επίπεδο της ροπής και της καμπτικής παραμόρφωσης και επιπλέον μεταβάλλεται από διατομή σε διατομή κατά μήκος της δοκού. Η εκτίμηση του μεγέθους του συνεργαζόμενου πλάτους της πλάκας δεν είναι εύκολη, και εισάγει σημαντική αβεβαιότητα στο προσομοίωμα και στους υπολογισμούς. Εν πάση περιπτώσει, άπαξ και επιλεγεί μία τιμή του συνεργαζόμενου πλάτους σε θλίψη, αυτή η τιμή χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί σαν  $b$  στην εξ. (22) και για τον υπολογισμό των  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_v$  και  $v$  που υπεισέρχονται στις εξ. (20) και (22), για φορά της ροπής που προκαλεί θλίψη στην πλάκα. Για την αντίθετη φορά, δηλ. αυτήν που προκαλεί στην πλάκα εφελκυσμό, σαν  $b$  χρησιμοποιείται το πλάτος του κορμού. Και στις δύο όμως περιπτώσεις στον οπλισμό του πέλματος που συνδέεται με την πλάκα χρειάζεται να προστεθεί και κάποιο σημαντικό τμήμα του παράλληλου προς τη δοκό οπλισμού της πλάκας. Για εφελκυσμό στην πλάκα, το τμήμα αυτό του οπλισμού εκτιμάται ότι περιλαμβάνει όλες τις ράβδους μέχρι απόσταση από τη δοκό ίση με το 25% του ανοίγματος της δοκού (αλλά όχι πέραν από τη μεσαπόσταση με την πρώτη παράλληλη δοκό).

Αν η μονοτονική καμπύλη Μ-φ λαμβάνεται διγραμμική, ο λόγος  $M_y/\varphi_y$  παίζει το ρόλο της ενεργού ελαστικής δυσκαμψίας  $EI$  της διατομής και είναι καθοριστικός της ελαστικής δυναμικής απόκρισης. Η κλίση του μεταδιαρροϊκού κλάδου μπορεί να προκύψει μόνον από πειραματική καμπύλη Μ-φ, ή από μία πλήρη αναλυτική καμπύλη Μ-φ που υπολογίζεται από λεπτομερές προσομοίωμα ινών. Αν δεν υπάρχουν τέτοιου είδους πληροφορίες, επιλέγεται κατ' εκτίμηση η τιμή της μεταδιαρροϊκής δυσκαμψίας, σαν ποσοστό  $p$  της προ-διαρροϊκής. Η τάξη μεγέθους του λόγου κράτυνσης  $p$  είναι μεταξύ 0.5% και 5%, ανάλογα με την κράτυνση του χάλυβα. Ευτυχώς πάντως η δυναμική σεισμική απόκριση της κατασκευής δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ακριβή τιμή του  $p$  των επιμέρους μελών.

Κλείνοντας επισημαίνεται ότι η μονοτονική καμπύλη Μ-φ που προκύπτει αναλυτικά από προσομοίωμα ινών της διατομής, είτε προσεγγιστικά με τη βοήθεια και των ανωτέρω

σχέσεων, εξ. (19)-(22), περιλαμβάνει μόνον καμπτικές παραμορφώσεις και όχι την επιρροή των διατμητικών ή της ολίσθησης των ράβδων.

### 2.3.1.2. Εμπερικοί νόμοι υστέρησης

Τα σημαντικά στοιχεία της υστερητικής συμπεριφοράς σε μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη, τα οποία καλόν είναι να αντικατοπτρίζει το προσομοίωμα, υπενθυμίζεται ότι είναι: Πρώτον, η μέση δυσκαμψία στην αποφόρτιση και την επαναφόρτιση, η οποία μειώνεται όσο το μέγεθος της μέγιστης ανελαστικής απόκρισης αυξάνεται. Δεύτερον, το πλάτος των βρόχων υστέρησης, περιλαμβανομένων και της χαρακτηριστικής τους στένωσης (pinching), το οποίο καθορίζει την απορρόφηση ενέργειας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τέλος, η σταδιακή μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση, ως προς τη μονοτονική καμπύλη, η οποία καθορίζει τη σταθερότητα της συμπεριφοράς και ενδεχομένως, το πόσο κοντά είναι η αστοχία λόγω ολιγοκυκλικής κόπωσης.

Δοκοί σχεδιασμένοι σύμφωνα με τους σημερινούς κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης και λεπτομερειών όπλισης έχουν σταθερή υστερητική συμπεριφορά, και επομένως η σταδιακή μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση δεν χρειάζεται απαραίτητα να περιλαμβάνεται στο προσομοίωμα. Αντίθετα είναι εξαιρετικά σημαντικά τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας του προσομοιώματος σε κύκλους μικρού ή μεγάλου εύρους, καθότι αυτά επηρεάζουν την ελαστική ή ανελαστική απόσβεση κατά τη δυναμική απόκριση της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, μετά την κατωτέρω περιγραφή διαφόρων προσομοιωμάτων υστέρησης ακολουθεί χωριστή υποενότητα, αφιερωμένη στην εγγενή απόσβεση που προσφέρουν αυτά. Στην υποενότητα εκείνη υπολογίζεται ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης  $\zeta$ , ο οποίος, για συμμετρικούς κύκλους υστέρησης ορίζεται σαν ο λόγος του εμβαδού της επιφάνειας  $\Delta E$  που περικλείεται από το βρόχο υστέρησης, προς την ελαστική ενέργεια,  $M_{\max}\phi_{\max}/2$ , στη μέγιστη καμπυλότητα,  $\phi_{\max}$ , του κύκλου, επί  $4\pi$ . Υπολογίζεται αναλυτικά η τιμή του  $\zeta$ , σαν συνάρτηση του δείκτη πλαστιμότητας στην κορυφή του κύκλου,  $\mu = \phi_{\max}/\phi_y$ , και των παραμέτρων του προσομοιώματος. Επιπλέον, για κάθε προσομοίωμα παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή του  $\zeta$  συναρτήσει του  $\mu$ , για διάφορες τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος. Τα αποτελέσματα αυτά επιτρέπουν τη σύγκριση των διαφόρων προσομοιωμάτων από απόψεως απορρόφησης ενέργειας, αλλά βοηθούν και στην επιλογή της τιμής των παραμέτρων τους, έτσι ώστε η απορρόφηση ενέργειας που προκύπτει να είναι σύμφωνη με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Σχ. 2.4 και Παρ. 3.4 στο Κεφ. 3).

Σημειωτέον ότι, πέραν της ρεαλιστικής αναπαραγωγής της απορρόφησης ενέργειας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ένα προσομοίωμα πρέπει να διαθέτει εγγυημένη αριθμητική ευστάθεια και να δίνει λογικά αποτελέσματα για οποιαδήποτε ιστορία επιβεβλημένης φόρτισης ή παραμόρφωσης, χωρίς σταδιακή συσσώρευση παραμορφώσεων σε κύκλους μικρού εύρους.

#### *Διγραμμικό και τριγραμμικό προσομοίωμα*

Το διγραμμικό προσομοίωμα αντιστοιχεί σε υλικό της κλασικής Θεωρίας Πλαστικότητας με σταθερό Μέτρο Πλαστικότητας, που ακολουθεί τον κανόνα κινηματικής κράτνσης για διαρροή στην αντίθετη φορά φόρτισης (Σχ. 2.5). Η αποφόρτιση γίνεται παράλληλα με τον ελαστικό κλάδο της μονοτονικής καμπύλης, μέχρι να συμβεί διαρροή στην αντίθετη κατεύθυνση. Το προσομοίωμα παράγει κύκλους υστέρησης μεγάλους εύρους, που σημαίνει μεγάλη απορρόφηση ενέργειας. Για μεγάλες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας  $\mu$ , ο συντελεστής απόσβεσης πλησιάζει ασυμπτωτικά την τιμή του για ελαστοπλαστική συμπεριφορά, δηλ. το  $2/\pi \approx 0.64$ .

Αν η μονοτονική καμπύλη ληφθεί τριγραμμική ώστε να περιλάβει και την αρηγμάτωση συμπεριφορά, μπορεί να διατηρηθεί ο διγραμμικός νόμος αποφόρτισης και επαναφόρτισης, ή μπορεί να αντικατασταθεί από τριγραμμικό νόμο, ο οποίος προκύπτει από το διγραμμικό με εφαρμογή του κανόνα του Masing. Ο τριγραμμικός νόμος αποφόρτισης-επαναφόρτισης μπορεί να θεωρηθεί ότι αντικατοπτρίζει το φαινόμενο Bauschinger, το οποίο χαρακτηρίζει κυρίως τη συμπεριφορά των μετάλλων, και αυξάνει ακόμα περισσότερο το συντελεστή απόσβεσης  $\zeta$ .

Το διγραμμικό και το τριγραμμικό προσομοίωμα υπερεκτιμούν σημαντικά την υστερητική απορρόφηση ενέργειας μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό δεν έχουν μεγάλη εφαρμογή, τουλάχιστον στην περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης με αξονική δύναμη. Περιλαμβάνονται εδώ γιατί αποτελούν το υπόβαθρο κάποιων προσομοιωμάτων διαξονικής κάμψης, καθώς και του προσομοιώματος διπλού μέλους των Clough et al (1965), το οποίο είναι το πρώτο μη-γραμμικό προσομοίωμα που προτάθηκε για δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος.

#### *Προσομοίωμα μειούμενης δυσκαμψίας Clough και παραλλαγές του*

Το προσομοίωμα των Clough and Johnston (1966) ήταν και είναι πολύ δημοφιλές, λόγω της απλότητάς του: Η αποφόρτιση μέχρι τον οριζόντιο άξονα γίνεται ευθύγραμμα, με



την κλίση που ορίζεται από την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με τη διαρροή (η οποία, για διγραμμικό προσομοίωμα σε μονοτονική φόρτιση, ισούται με την ελαστική δυσκαμψία). Στη συνέχεια η επαναφόρτιση στην αντίθετη διεύθυνση κατευθύνεται ευθύγραμμα προς το ακρότατο προηγούμενο σημείο παραμόρφωσης στη διεύθυνση αυτή. Η βασική διαφορά του προσομοιώματος από το διγραμμικό είναι η επαναφόρτιση στην αντίθετη κατεύθυνση μετά τον οριζόντιο άξονα. Με αυτόν τον τρόπο επαναφόρτισης η κλίση (δυσκαμψία) του κλάδου επαναφόρτισης μειώνεται όσο μεγαλώνει το μέγεθος της μέγιστης προηγούμενης παραμόρφωσης, προς τη μία διεύθυνση και προς την άλλη. Μαζί της μειώνεται και η μέση κλίση (δυσκαμψία) της αποφόρτισης-επαναφόρτισης, από τη μέγιστη θετική μέχρι τη μέγιστη αρνητική παραμόρφωση. Σ' αυτό οφείλει το προσομοίωμα το χαρακτηρισμό του σαν μειούμενης δυσκαμψίας. Αν δεν έχει ξεπεραστεί στο παρελθόν το σημείο διαρροής στην τρέχουσα διεύθυνση της επαναφόρτισης, τότε ο κλάδος επαναφόρτισης κατευθύνεται ευθύγραμμα από τον οριζόντιο άξονα προς το σημείο διαρροής,  $(M_y, \varphi_y)$ , (Σχ. 2.6). Ομως, καθώς διαπίστωσαν οι Riddell and Newmark (1979) και οι Filippou and Issa (1988), για επαναφόρτιση μετά από μη-πλήρη αποφόρτιση (που δεν φθάνει, δηλ., μέχρι τον οριζόντιο άξονα) αυτός ο κανόνας οδηγεί σε μη-ρεαλιστική συμπεριφορά. Το πρόβλημα διορθώνεται αν η επαναφόρτιση μετά από τη μερική αποφόρτιση ληφθεί να ταυτίζεται με τη διαδρομή της αποφόρτισης μέχρι τη μονοτονική καμπύλη, όπως πρότειναν οι Filippou and Issa (1988), ή αν, γενικότερα, κατευθύνεται ευθύγραμμα προς το σημείο της πιο πρόσφατης αποφόρτισης, όπως πρότειναν οι Riddell and Newmark (1979).

Ενα άλλο μειονέκτημα του προσομοιώματος Clough είναι η σταθερή δυσκαμψία του στην αποφόρτιση. Καλύτερη προσέγγιση με την πραγματική συμπεριφορά μπορεί να επιτευχθεί αν η κλίση της αποφόρτισης ληφθεί ίση με την ελαστική επί  $(\varphi_y/\varphi_r)^a$ , όπου  $\varphi_r$  είναι η τιμή της καμπυλότητας στην πιο πρόσφατη αντιστροφή της φοράς της φόρτισης και  $a$  είναι σταθερό με θετική τιμή κοντά στο 0.5 (Anagnostopoulos, 1972).

Όπως θα δούμε παρακάτω το προσομοίωμα Clough δίνει απόσβεση περίπου τη μισή του διγραμμικού προσομοιώματος, με ασυμπτωτική τιμή, για μεγάλες τιμές της πλαστιμότητας  $\mu$ , ίση με  $1/\pi \approx 0.32$ . Με την τροποποίηση κατά (Anagnostopoulos, 1972) η ασυμπτωτική τιμή προσεγγίζεται με βραδύτερο ρυθμό.

Οι Wang and Shah (1987) εισήγαγαν στο προσομοίωμα των Clough and Johnston (1966) την αρνητική επιρροή της ανακύκλισης (κόπωση) στην αντοχή και στη δυσκαμψία: η αντοχή και η δυσκαμψία λαμβάνονται ανάλογες του  $1-D_{ws}$ , όπου  $D_{ws}$  είναι κατωτέρω ο

δείκτης βλάβης κατά Wang and Shah. Οι τεταγμένες της μονοτονικής καμπύλης, που χρησιμεύει σαν οδηγός και περιβάλλουσα των βρόχων υστέρησης, πολλαπλασιάζονται επί  $1-D_{ws}$ . Με τον τρόπο αυτό μειώνονται αναλογικά και ο δυσκαμψίες σε αποφόρτιση-επαναφόρτιση, καθώς τα άκρα των βρόχων βρίσκονται πάνω στη μειωμένη μονοτονική-καμπύλη-οδηγό.

Ο δείκτης βλάβης κατά Wang and Shah ορίζεται χωριστά για κάθε διεύθυνση φόρτισης, θετική ή αρνητική, ως εξής:

$$D_{ws} = \frac{e^{n\delta} - 1}{e^n - 1} \quad (24)$$

όπου η παράμετρος βλάβης  $\delta$ , εκφρασμένη εδώ σε όρους καμπυλοτήτων, ισούται με:

$$\delta = c \frac{\sum_i \varphi_i}{\varphi_u} \quad (25)$$

Στην εξ. (25) το άθροισμα και η οριακή τιμή της καμπυλότητας,  $\varphi_u$ , αναφέρονται στην εκάστοτε διεύθυνση της φόρτισης, θετική ή αρνητική. Αν με την αύξηση της παραμέτρου βλάβης  $\delta$ , ο βαθμός βλάβης αυξάνεται ταχύτερα ή πιο αργά απ' ό,τι η τιμή του  $\delta$ , τότε ο εκθέτης  $n$  έχει τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη από 0. Οι Wang and Shah παρατήρησαν ότι σε μέλη διαστασιολογημένα και με λεπτομέρειες όπλισης κατά τις διατάξεις του Κανονισμού ACI 318-83, η βλάβη αυξάνεται μη-γραμμικά και λίγο ταχύτερα ως προς την τιμή του  $\delta$ , κατά τρόπο που αντιστοιχεί σε  $n \sim 1$ . Αν, επιπλέον, τα μέλη αυτά είναι υπερ- ή αντίστοιχα υπο-διαστασιολογημένα έναντι τέμνουσας, ισχύει μία ελαφρώς υψηλότερη ή χαμηλότερη τιμή του  $n$ . Καθώς όμως η απόκλιση από τη γραμμικότητα είναι σχετική μικρή και μη-συστηματική, μπορεί, χάριν απλότητας, να ληφθεί η τιμή του  $n$  ίση με 0, πράγμα που δίνει:

$$D_{ws} = c \frac{\sum_i \varphi_i}{\varphi_u} \quad (26)$$

Στην αρχική του μορφή το προσομοίωμα των Wang and Shah εκφράζεται σε όρους γωνιών στροφής χορδής  $\theta$  και όχι καμπυλοτήτων. Υπ' αυτές τις συνθήκες, αν η οριακή τιμή

της γωνίας στροφής χορδής υπολογίζεται κατά Park and Ang (1985), η τιμή  $c=1.0$  στην εξ.(25) δίνει ικανοποιητική μέση συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

### *Προσομοίωμα Takeda και παράγωγά του*

Το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα περισσότερο απ' οποιοδήποτε άλλο, είναι αυτό των Takeda et al 1970. Το προσομοίωμα αυτό αποτελείται από ένα σχετικά περίπλοκο σύνολο εμπειρικών κανόνων που εξήγαγε ο Takeda με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος στη σεισμική τράπεζα του Πανεπιστημίου του Illinois. Για μονοτονική (παρθένα) φόρτιση, το προσομοίωμα έχει τριγραμμική σχέση έντασης-παραμόρφωσης, με αλλαγή κλίσης στη ρηγμάτωση και στη διαρροή (Σχ. 2.7). Η σχέση αυτή μπορεί να είναι διαφορετική για φόρτιση προς τη θετική ή την αρνητική φορά. Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, το προσομοίωμα διαθέτει 16 κανόνες αποφόρτισης-επαναφόρτισης, που καλύπτουν όλες τις δυνατές ιστορίες φόρτισης. Η αποφόρτιση από το μεταδιαρροϊκό κλάδο γίνεται με κλίση ίση μ' αυτή της ευθείας που ενώνει το σημείο διαρροής με το σημείο ρηγμάτωσης στην αντίθετη διεύθυνση, πολλαπλασιασμένη επί  $(\varphi_y/\varphi_{max})^{0.4}$ , όπου  $\varphi_{max}$  είναι η μέγιστη τιμή της καμπυλότητας που επετεύχθη ποτέ στην διεύθυνση από την οποία γίνεται η αποφόρτιση. Η επαναφόρτιση προς την αντίθετη κατεύθυνση κατευθύνεται προς το σημείο διαρροής, ή προς το σημείο της μέγιστης προηγούμενης παραμόρφωσης πάνω στη μονοτονική καμπύλη, όποιο απ' τα δύο βρίσκεται μακρύτερα (Σχ. 2.7).

Απλοποιήσεις του προσομοιώματος Takeda, έχουν προταθεί από τους Otani (1974) και Litton (1975). Οι απλοποιήσεις αυτές συνίστανται σε αντικατάσταση της τριγραμμικής μονοτονικής καμπύλης με διγραμμική, οπότε αρκούν 9 κανόνες για την αποφόρτιση-επαναφόρτιση αντί 16. Επιπλέον, η μείωση της κλίσης του κλάδου αποφόρτισης επιτυγχάνεται με το να κατευθύνεται αυτός προς το σημείο του οριζοντίου άξονα σε τετμημένη  $(1-\alpha)$  φορές αυτήν της ελαστικής αποφόρτισης (δηλ. αυτής με κλίση την αρχική της διγραμμικής μονοτονικής καμπύλης). Η επαναφόρτιση προς την αντίθετη κατεύθυνση οδεύει προς το σημείο της μονοτονικής καμπύλης που έχει τετμημένη ίση με  $\beta$  φορές τη μέγιστη παραμόρφωση που είχε αναπτυχθεί στο παρελθόν στη διεύθυνση επαναφόρτισης, με  $\beta < 1$  (Σχ. 2.8).

Οι Saatcioglu et al (1983) εισήγαγαν στο τροποποιημένο προσομοίωμα Takeda σταδιακή μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση, για κύκλους με δείκτη πλαστιμότητας  $\mu$  μεγαλύτερο από ένα όριο  $\mu_0$ . Η μείωση επιτυγχάνεται με το να κατευθύνονται οι κλάδοι

επαναφόρτισης όχι προς το σημείο  $(M_{\max}, \varphi_{\max})$  της μονοτονικής καμπύλης όπου συνέβη η μέγιστη προηγούμενη παραμόρφωση  $\varphi_{\max}$  στη διεύθυνση της επαναφόρτισης, αλλά προς ένα σημείο πιο κάτω, με τετμημένη  $\varphi = \varphi_{\max}$  και τεταγμένη  $M = M_{\max} - (p+k)(\varphi_{\max}/\varphi_y - \mu_0)M_y$ , όπου  $k$  είναι παράμετρος που καθορίζει τη μείωση των τεταγμένων, και ισούται με το λόγο της κλίσης της μειωμένης περιβάλλουσας αντοχής προς την κλίση του αρχικού ελαστικού κλάδου.

### *Προσομοίωμα Q-hyst*

Οι Saiidi and Sozen (1981) πρότειναν για τη σχέση δυνάμεων-μετακινήσεων μονοβαθμίων συστημάτων ένα απλό προσομοίωμα, το οποίο φαίνεται να είναι σε θέση να επιτύχει σχεδόν την ίδια συμφωνία με την πειραματική μη-γραμμική δυναμική απόκριση όπως το πιο σύνθετο προσομοίωμα Takeda με την τριγραμμική μονοτονική καμπύλη και τους 16 κανόνες υστέρησης (Saiidi, 1982). Για το λόγο αυτό είναι άξιο αναφοράς ακόμα και για τη σχέση M-φ.

Το προσομοίωμα Q-hyst χρησιμοποιεί διγραμμική μονοτονική καμπύλη συμμετρική για θετική ή αρνητική φόρτιση, έχει κλίση αποφόρτισης ίση με αυτήν της ελαστικής συμπεριφοράς επί  $(\varphi_y/\varphi_{\max})^{0.5}$ , όπου  $\varphi_{\max}$  είναι η μέγιστη προηγούμενη παραμόρφωση, θετική ή αρνητική, και επαναφορτίζει προς την αντίθετη διεύθυνση, από το σημείο κατάληξης της αποφόρτισης στον οριζόντιο άξονα προς το σημείο της μονοτονικής καμπύλης με τετμημένη  $\varphi_{\max}$ , ανεξάρτητα του αν η μέγιστη προηγούμενη παραμόρφωση  $\varphi_{\max}$  επετεύχθη προς την κατεύθυνση της αποφόρτισης ή προς την αντίθετη (Σχ. 2.9).

### *Προσομοίωμα των Roufaiel and Meyer (1987) και παραλλαγές του*

Το προσομοίωμα των Roufaiel and Meyer (1987) χρησιμοποιεί διγραμμική μονοτονική καμπύλη. Η μέση δυσκαμψία αποφόρτισης μειώνεται με το μέγεθος της μέγιστης προγενέστερης παραμόρφωσης. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Για τον καθορισμό της κατάληξης του κλάδου αποφόρτισης πάνω στον οριζόντιο άξονα, φέρεται από το σημείο έναρξης της αποφόρτισης μία βοηθητική ευθεία παράλληλη στον ελαστικό κλάδο της μονοτονικής καμπύλης, μέχρις ότου συναντήσει μία άλλη βοηθητική ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και είναι παράλληλη στο δεύτερο κλάδο της μονοτονικής καμπύλης, δηλ. αυτόν της κράτυνσης. Το σημείο τομής των δύο αυτών ευθειών ενώνεται ευθύγραμμα με το ακρότατο σημείο της προγενέστερης απόκρισης πάνω στη μονοτονική καμπύλη στην αντίθετη διεύθυνση. Η ευθεία αυτή ορίζει πάνω στον οριζόντιο άξονα το

σημείο κατάληξης της καμπύλης αποφόρτισης (Σχ. 2.10). Η συνέχεια της ευθείας μέχρι το ακρότατο σημείο της απόκρισης αποτελεί, για στοιχεία με λόγο διάτμησης  $M/Vh > 4$ , και τον κλάδο επαναφόρτισης. Όμως για μικρότερες τιμές του λόγου διάτμησης ο κλάδος επαναφόρτισης είναι διγραμμικός, δίνοντας στους βρόχους υστέρησης τη χαρακτηριστική στένωση μορφής αντίστροφου S. Το σημείο αλλαγής κλίσης του διγραμμικού κλάδου βρίσκεται πάνω στον ελαστικό κλάδο της μονοτονικής καμπύλης προς την πλευρά της επαναφόρτισης. Η τεταγμένη (δηλ. η τιμή της ροπής  $M$ ) του σημείου αυτού ισούται με  $m$  φορές την τεταγμένη του σημείου τομής του κλάδου επαναφόρτισης με αυτόν τον ελαστικό κλάδο της μονοτονικής καμπύλης. Η παράμετρος  $m$  παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Για  $M/Vh < 1.5$ , ισούται με 0, οπότε ο πρώτος κλάδος της επαναφόρτισης οδεύει πάνω στον οριζόντιο άξονα μέχρι την αρχή των αξόνων. Για  $M/Vh$  μεταξύ 1.5 και 4, το  $m$  ισούται με  $0.4M/Vh - 0.6$ , και γίνεται ίσο με 1.0 όταν  $M/Vh = 4.0$ .

Οι Chang et al (1987) επεξέτειναν το προσομοίωμα των Roufaiel and Meyer ώστε να συμπεριλάβει μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση. Για το σκοπό αυτό το προσομοίωμα απαιτεί δύο πρόσθετες παραμέτρους: την καμπυλότητα  $\phi_f$  και τη ροπή κάμψης  $M_f$  στην αστοχία υπό μονοτονική φόρτιση (Σχ. 2.11). Οι τιμές αυτών των παραμέτρων χρειάζεται να προσδιορισθούν είτε από ένα πείραμα μονοτονικής φόρτισης πέρα από την οριακή (μέγιστη) αντοχή και μέχρι την τελική αστοχία, είτε αναλυτικά, μέσω προσομοιώματος ινών σε επίπεδο διατομής. Στην αναλυτική προσομοίωση η τελική αστοχία μπορεί να ορισθεί σε φυσική βάση, αν ο χάλυβας σπάσει σε εφελκυσμό σε τιμή ανηγμένης μήκυνσης ίση με 1.5 φορές τη μήκυνση στην οριακή (μέγιστη) αντοχή, ή αν το σκυρόδεμα του περισφιγμένου πυρήνα φθάσει τη βράχυνση αστοχίας του, ή αν η αστοχία του απερισφίκτου σκυροδέματος της επικάλυψης προκαλέσει λυγισμό των ράβδων. Εναλλακτικά η αστοχία μπορεί να ορισθεί και συμβατικά, σαν το σημείο της καμπύλης  $M-\phi$  μετά την κορυφή στο οποίο η απομένουσα αντοχή  $M$  ισούται με 75% της οριακής (μέγιστης) ροπής  $M_u$ .

Αν συμβολίσουμε τη διγραμμική προσέγγιση της μονοτονικής καμπύλης  $M-\phi$  με  $M_p(\phi)$ , στην αστοχία, δηλ. για  $\phi = \phi_f$ , η πραγματική καμπύλη υπολείπεται της διγραμμικής κατά  $M_p(\phi_p) - M_p$ . Θεωρώντας τη μονοτονική φόρτιση μέχρι την αστοχία σαν ένα ημίκυκλο μέχρι μέγιστη παραμόρφωση  $\phi_p$ , γίνεται η υπόθεση ότι ημίκυκλος μέχρι μια μέγιστη τιμή  $\phi$ , με  $\phi_y < \phi < \phi_f$ , μειώνει τη ροπή, σε σχέση με τη διγραμμική μονοτονική καμπύλη, κατά:

$$\Delta M(\text{half - cycle at } \varphi) = (M_p(\varphi_f) - M_f) \left( \frac{\varphi - \varphi_y}{\varphi_f - \varphi_y} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (27)$$

Ετσι, η καμπύλη επαναφόρτισης κατευθύνεται πλέον όχι προς το σημείο  $(M_p(\varphi), \varphi)$  της μονοτονικής καμπύλης, αλλά προς το  $(M_p(\varphi) - \Delta M, \varphi)$ .

#### *Προσομοίωμα των Park et al (1987) και παραλλαγές του*

Το προσομοίωμα αυτό με τα παράγωγά του, καθώς και όλα τα άλλα προσομοιώματα που περιγράφονται μέχρι το τέλος της παρούσας Υποενότητας, περιλαμβάνουν μείωση της δυσκαμψίας κατά την αποφόρτιση και στένωση των βρόχων υστέρησης, αλλά και σταδιακή μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση. Όπως και το αρχικό προσομοίωμα Takeda, βασίζεται σε τριγωνική μονοτονική καμπύλη. Η αποφόρτιση-επαναφόρτιση πριν τη ρηγμάτωση γίνεται ασφαλώς πάνω στον πρώτο, ελαστικό κλάδο. Μετά τη ρηγμάτωση, ο κλάδος αποφόρτισης προσδιορίζεται από την απαίτηση η προέκτασή του να κατευθύνεται προς ένα σημείο στην επέκταση του πρώτου κλάδου της μονοτονικής καμπύλης στην αντίθετη διεύθυνση, το οποίο έχει τεταγμένη α-φορές την αντίστοιχη ροπή διαρροής,  $M_y$  (Σχ. 2.12 (b)). Για την παράμετρο α συνιστώνται τιμές γύρω στο 2.0. Το πρώτο τμήμα του κλάδου επαναφόρτισης μετά την αποφόρτιση κατευθύνεται προς ένα σημείο πάνω στον ακρότατο προηγούμενο κλάδο αποφόρτισης στην κατεύθυνση της επαναφόρτισης, το οποίο έχει τεταγμένη ίση με ένα ποσοστό  $\gamma$  της ροπής διαρροής. Προτού όμως φθάσει το σημείο αυτό, και συγκεκριμένα όταν η καμπυλότητα γίνει ίση με τη μέγιστη προγενέστερη παραμένουσα καμπυλότητα στη διεύθυνση της επαναφόρτισης (αυτήν δηλ. που ορίζεται στην τομή του ακρότατου προγενέστερου κλάδου αποφόρτισης με τον οριζόντιο άξονα), ο κλάδος επαναφόρτισης αποκτά μεγαλύτερη κλίση (δυσκαμψία) και κατευθύνεται προς το σημείο της επαναφόρτισης (Σχ. 2.12 (a)). Ετσι προκύπτει στένωση των βρόχων υστέρησης. Για ρεαλιστική στένωση συνιστώνται τιμές της παραμέτρου  $\gamma$  ίσες με 0.5. Σημειώνεται ότι σε πιο πρόσφατη παραλλαγή του προσομοιώματος (Reinhorn et al, 1988), το σημείο αλλαγής κλίσης του κλάδου επαναφόρτισης μεταφέρθηκε στον πρώτο (ελαστικό) κλάδο της τριγωνικής μονοτονικής καμπύλης.

Το προσομοίωμα περιλαμβάνει σταδιακή μείωση της αντοχής σε αναλογία προς την ποσότητα ενέργειας που έχει απορροφηθεί μέχρι τότε,  $dE_s$  (Σχ. 12 (c)). Η σταθερά αναλογίας  $\beta$  μεταξύ μείωσης της αντοχής και ποσότητας ενέργειας  $dE_s$  είναι συνάρτηση της ποσότητας διαμήκους και εγκάρσιου σπλισμού, κ.λ.π.

### *Προσομοίωμα των Costa and Costa (1987)*

Το προσομοίωμα που πρότειναν οι Costa and Costa (1987) για τη σχέση δυνάμεων-μετακινήσεων μονοβάθμιου συστήματος αποτελεί γενίκευση του αρχικού προσομοιώματος Takeda με την τριγραμμική μονοτονική καμπύλη, προς την κατεύθυνση του να συμπεριλάβει στένωση των βρόχων και σταδιακή μείωση της αντοχής. Η στένωση του βρόχου προκύπτει ως εξής: Πρώτον μειώνεται η κλίση του κλάδου επαναφόρτισης, ο οποίος στο προσομοίωμα Takeda κατευθύνεται προς το ακρότατο προγενέστερο σημείο ( $M_{max}$ ,  $\varphi_{max}$ ) της απόκρισης στη διεύθυνση της επαναφόρτισης, με πολλαπλασιασμό της επί  $(\varphi_y/\varphi_{max})^\beta$ , όπου  $\beta > 0$ . Δεύτερον, αφού ο κλάδος επαναφόρτισης συναντήσει την επιβατική ακτίνα από την αρχή των αξόνων μέχρι το ( $M_{max}$ ,  $\varphi_{max}$ ), αλλάζει κλίση ακολουθώντας στο εξής την ακτίνα αυτή μέχρι το σημείο ( $M_{max}$ ,  $\varphi_{max}$ ) (Σχ. 13b). Επιπλέον διαφορές με το αρχικό προσομοίωμα Takeda είναι οι εξής: α) το ότι πριν τη διαρροή αλλά μετά τη ρηγμάτωση οι βρόχοι αποφόρτισης-επαναφόρτισης είναι διγραμμικοί, με κλάδους παράλληλους στους δύο πρώτους κλάδους της μονοτονικής καμπύλης (κλάδοι 1-6 στο Σχ. 2.13(b)), και β) το ότι η αποφόρτιση μετά τη διαρροή γίνεται με κλίση ίση με την ελαστική επί  $(\varphi_y/\varphi_r)^a$ , δηλ. όπως στην κατά (Anagnostopoulos, 1972) παραλλαγή του προσομοιώματος των Clough and Johnson (1966).

### *Προσομοίωμα των Coelho and Carvalho (1990)*

Το προσομοίωμα που πρότειναν οι Coelho and Carvalho (1990) για τη σχέση M-φ των ακραίων περιοχών δοκών, περιλαμβάνει επίσης σταδιακή μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση. Το προσομοίωμα διαφέρει απ' αυτό των Costa and Costa (1987): α) ως προς τη χρήση διγραμμικής μονοτονικής καμπύλης αντί τριγραμμικής, β) στο ότι η μείωση της αρχικής κλίσης του κλάδου επαναφόρτισης γίνεται όχι με πολλαπλασιασμό επί  $(\varphi_y/\varphi_{max})^\beta$ , αλλά επί ένα σταθερό συντελεστή  $m < 1$ , γ) στην έναρξη του δεύτερου κλάδου της επαναφόρτισης στην τομή του πρώτου με τον κατακόρυφο άξονα, αντί με την επιβατική ακτίνα προς το σημείο ( $M_{max}$ ,  $\varphi_{max}$ ), και δ) στην προσομοίωση της μείωσης της αντοχής με την ανακύκλιση μέσω μείωσης μόνον της ροπής στο τελικό σημείο της καμπύλης επαναφόρτισης, αντί και της παραμόρφωσης εκεί (Σχ. 2.14).

### 2.3.1.3. Γενικευμένη παρουσίαση φαινομενολογικών προσομοιωμάτων

Οι προηγούμενες δύο Υποενότητες, 2.3.1.2 και 2.3.1.3, καλύπτουν το σύνολο των εμπειρικών προσομοιωμάτων που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα για τη σχέση M-φ, ή, γενικότερα για τη σχέση μεταξύ της ροπής M και της γωνίας στροφής χορδής θ, ή της δύναμης, F, και της μετακίνησης, δ, διατομών, μελών ή ακόμα και συμπλεγμάτων μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Παρ' όλο που τα προσομοιώματα αυτά παρουσιάστηκαν εδώ για τη σχέση M-φ, τα περισσότερα απ' αυτά έχουν προταθεί για τη σχέση M-θ ή F-δ. Κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η πολυγραμμικότητά τους, η οποία τα καθιστά οικονομικά από υπολογιστικής απόψεως.

Για τη μονοτονική ή πρώτη φόρτιση σε μια διεύθυνση, η καμπύλη που προσδιορίζει τη σχέση M-φ συνήθως θεωρείται πολυγραμμική. Η διγραμμική καμπύλη, με σημείο αλλαγής κλίσης στη διαρροή, είναι η απλούστερη και συνηθέστερη επιλογή. Τριγραμμική καμπύλη, που περιλαμβάνει και το σημείο ρηγμάτωσης, χρησιμοποιείται όταν είναι απαραίτητη η ρεαλιστική περιγραφή της συμπεριφοράς πριν και λίγο μετά τη ρηγμάτωση.

Το υστερητικό τμήμα των σχέσεων M-φ περιγράφεται με ένα σύνολο κανόνων αποφόρτισης-επαναφόρτισης για μικρούς ή μεγάλους κύκλους. Η κλίση της καμπύλης αποφόρτισης από μία τιμή μέγιστης παραμόρφωσης  $\varphi = \mu\varphi_y$  πάνω στον κλάδο της μονοτονικής καμπύλης μετά τη διαρροή ( $\varphi_y$  συμβολίζει την παραμόρφωση διαρροής και  $\mu$  τον αντίστοιχο δείκτη πλαστιμότητας) είναι σταθερή μέχρι ένα σημείο του οριζόντιου άξονα σε παραμόρφωση ίση με  $\varepsilon\varphi_y$  (Σχ. 2.15(α)). Στο προσομοίωμα των Clough and Johnston (1966), όπως τροποποιήθηκε από τον Anagnostopoulos (1972) με κλάδο αποφόρτισης με κλίση ίση με αυτήν του ελαστικού κλάδου διαιρεμένη με  $\mu^a$ , το  $\varepsilon$  ισούται με:

$$\varepsilon = \mu \left( 1 - \frac{1 + p(\mu - 1)}{\mu^{1-a}} \right) \quad (28)$$

Στη παραπάνω σχέση p είναι ο λόγος κράτνσης μετά τη διαρροή.

Στο προσομοίωμα των Clough and Johnston (1966), είναι  $a=0$  και η ανωτέρω σχέση δίνει:  $\varepsilon = (1-p)(\mu-1)$ .

Η εξ. (28) ισχύει επίσης ακόμα και για το προσομοίωμα Q-hyst, καθώς και για τα προσομοιώματα των Costa and Costa (1987) και Coehlo and Carvalho (1990).



Στο προσομοίωμα των Takeda et al (1970), όπως τροποποιήθηκε από τους Otani (1974) και Litton (1975), η αποφόρτιση γίνεται σε μόνιμη παραμόρφωση ίση με  $(1-\alpha)$  φορές την πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε στο μέλος κατά την αντιστροφή της έντασης. Το αντίστοιχο  $\varepsilon$  ισούται με :

$$\varepsilon = (1-\alpha)(1-p)(\mu-1) \quad (29)$$

Στα προσομοιώματα των Park et al (1987) και των Reinhorn et al (1988), στα οποία η αποφόρτιση γίνεται απευθείας προς ένα σημείο του ελαστικού κλάδου της μονοτονικής καμπύλης στην αντίθετη διεύθυνση, στο οποίο η ροπή  $M$  είναι  $\alpha$  φορές μεγαλύτερη της ροπής διαρροής,  $\alpha M_y$  ( $\alpha > 1$ ), το  $\varepsilon$  ισούται με :

$$\varepsilon = \frac{\alpha(1-p)(\mu-1)}{\alpha+1+p(\mu-1)} \quad (30)$$

Για τον προσδιορισμό της εξ. (30) αγνοήθηκε η μεταβολή της δυσκαμψίας πριν και μετά τη ρηγμάτωση στο προσομοίωμα των Park et al (1987).

Στο προσομοίωμα των Roufaiel and Meyer (1987), το  $\varepsilon$  είναι ανεξάρτητο κάθε παραμέτρου του μοντέλου και ισούται με :

$$\varepsilon = \frac{(1-p)(\mu-1)}{1+2p(\mu-1)} \quad (31)$$

Σε όλα τα ανωτέρω προσομοιώματα η πορεία που ακολουθείται κατά την πρώτη φόρτιση στην αρνητική διεύθυνση κατευθύνεται στο σημείο διαρροής της διεύθυνση αυτής και συνεχίζει στο μετά τη διαρροή κλάδο της μονοτονικής καμπύλης (Σχ. 2.15(α)). Η αποφόρτιση από τον τελευταίο αυτό κλάδο ακολουθεί τους ίδιους κανόνες. Έτσι, εάν η αντιστροφή της φόρτισης γίνεται από παραμόρφωση  $-\mu\varphi_y$ , τότε ο κλάδος αποφόρτισης τέμνει τον άξονα  $\varphi$  σε ένα σημείο  $-\varepsilon\varphi_y$ , με  $\varepsilon$  που δίνεται από τις εξ. (28) έως (31).

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς μελών οπλισμένου σκυροδέματος είναι οι βρόχοι μορφής αντίστροφου S και η στένωση που παρατηρείται κατά τους κύκλους φόρτισης πέραν του πρώτου. Τα παλαιά και ευρέως χρησιμοποιούμενα προσομοιώματα των Clough and Johnston (1966), Takeda et al (1970), και Q-hyst κατά Saiidi and Sozen (1981), δεν καλύπτουν το φαινόμενο της στένωσης και η

επαναφόρτιση γίνεται απευθείας προς εκείνο το σημείο του κλάδου μονοτονικής φόρτισης που έχει παραμόρφωση ίση με τη μέγιστη παραμόρφωση  $m\phi_y$  που έχει ποτέ συμβεί στη διεύθυνση της επαναφόρτισης (Clough and Johnston (1966), Takeda et al (1970)), είτε σε κάθε μια από τις δυο διευθύνσεις (Saiidi και Sozen (1981)). Στην τροποποίηση κατά Otani (1974) και Litton (1975) του προσομοιώματος Takeda, ο κλάδος επαναφόρτισης κατευθύνεται απευθείας σε σημείο του κλάδου της μονοτονικής καμπύλης με παραμόρφωση  $(\mu-\beta(\mu-1))\phi_y$ , αντί  $m\phi_y$ .

Στα προσομοιώματα που καλύπτουν και το φαινόμενο της στένωσης με την εισαγωγή διγραμμικής καμπύλης επαναφόρτισης, αυτή κατευθύνεται πρώτα σε ένα σημείο με ροπή  $m_p M_y$  και παραμόρφωση  $m_p \phi_y$ , και εν συνεχεία σε ένα σημείο με τη μέγιστη προηγούμενη παραμόρφωση  $m\phi_y$  στον κλάδο της μονοτονικής φόρτισης.

Στο προσομοίωμα των Roufaiel and Meyer (1987), ο κλάδος επαναφόρτισης κατευθύνεται σε ένα σημείο του ελαστικού κλάδου σε ροπή  $m M_y$ , οπότε  $m_p = m_p = m$ . Στο μοντέλο των Coelho and Carvalho (1990), ο κλάδος επαναφόρτισης έχει κλίση  $m$ -φορές αυτήν που είχε ο κλάδος επαναφόρτισης στη μέγιστη προηγούμενη παραμόρφωση  $m\phi_y$ , μέχρι να τμήσει τον άξονα των ροπών. Έτσι είναι  $m_p = m(1+p(\mu-1))/(\epsilon+\mu)$  και  $m_p = 0$ .

Στο προσομοίωμα των Costa and Costa (1987) ο κλάδος επαναφόρτισης έχει κλίση  $\mu^\beta$ -φορές μικρότερη αυτής του κλάδου επαναφόρτισης προς το σημείο μέγιστης προηγούμενης παραμόρφωσης στη μονοτονική καμπύλη (το  $\mu^\beta$ , με  $\beta < 1$ , αντικαθιστά το  $m$  στο μοντέλο των Coelho and Carvalho (1990)) μέχρι να τμήσει την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο αποφόρτισης στη διεύθυνση αυτή. Τότε είναι:  $m_p = \epsilon/(\epsilon\mu^{\beta-1} + \mu^\beta - 1)$  και  $m_p = m_p(1+p(\mu-1))/\mu$ .

Στα προσομοιώματα των Park et al (1987) και Reinhorn et al (1988) είναι  $m_p = \epsilon$ , και, στο μεν προσομοίωμα των Park et al (1988) είναι  $m_p = 2\epsilon\gamma(1+p(\mu-1))/(2\epsilon(1+p(\mu-1)) + \gamma(\mu-\epsilon))$ , στο δε των Reinhorn et al (1988) είναι  $m_p = 2\epsilon\gamma/(\epsilon+\gamma)$ , με  $\gamma$  παράμετρο που δηλώνει την τεταγμένη του σημείου (σαν ποσοστό της ροπής διαρροής  $M_y$ ) στο οποίο κατευθύνεται ο κλάδος πρώτης επαναφόρτισης. Αυτό το σημείο βρίσκεται πάνω στον κλάδο αποφόρτισης από μέγιστη προηγούμενη παραμόρφωση  $m\phi_y$  στο προσομοίωμα Park et al (1988), ή στον πρώτο (δηλ. ελαστικό) κλάδο της μονοτονικής καμπύλης, σ' αυτό των Reinhorn et al (1988).

#### 2.3.1.4. Υπολογισμός συντελεστή υστερητικής απόσβεσης $\zeta$ φαινομενολογικών προσομοιωμάτων

Η υστερητική απορρόφηση ενέργειας μελών οπλισμένου σκυροδέματος σε

ανακυκλιζόμενη φόρτιση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τη συνολική σεισμική συμπεριφορά κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτή η απορρόφηση ενέργειας μπορεί να εκφραστεί μέσω του λόγου υστερητικής απόσβεσης  $\zeta = E_h / 4\pi E_{el}$ , όπου  $E_h$  είναι η απορροφούμενη ενέργεια σ' ένα πλήρη κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης και  $E_{el}$  η ελαστική δυναμική ενέργεια στη μέγιστη παραμόρφωση του κύκλου, η οποία ισούται με  $F_{max}\delta_{max}/2$  και προκύπτει για τη μέγιστη δύναμη και παραμόρφωση του κύκλου φόρτισης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ο λόγος απόσβεσης που είναι συμφυής στους νόμους υστέρησης των μη γραμμικών προσομοιωμάτων που χρησιμοποιούνται για την φαινομενολογική περιγραφή της ανελαστικής υστερητικής συμπεριφοράς των μελών.

Όταν τόσο η μονοτονική καμπύλη όσο και ο βρόχος υστέρησης είναι πλήρως διγραμμικά, με αποφόρτιση και επαναφόρτιση παράλληλα στην αρχική ελαστική κλίση και στον κλάδο κράτνσης, τότε ο ισοδύναμος συντελεστής υστερητικής απόσβεσης ισούται με:

$$\zeta_{BL} = \frac{2}{\pi} \frac{(1 - \frac{1}{\mu})(1 - p)}{1 + p(\mu - 1)} \quad (32)$$

Καθώς ο λόγος κράτνσης έχει τιμές κοντά στο μηδέν, ο ανωτέρω λόγος απόσβεσης πλησιάζει τον αντίστοιχο για ελαστική-πλήρως πλαστική συμπεριφορά, που ισούται με:

$$\zeta_{BL} (p = 0) = \frac{2}{\pi} (1 - \frac{1}{\mu}) \quad (33)$$

και τείνει για μεγάλες τιμές του  $\mu$  στην ασυμπτωτική τιμή  $\zeta \approx 0.64$ .

Αν η μονοτονική καμπύλη είναι τριγραμμική, αλλά και η καμπύλη αποφόρτισης-επαναφόρτισης είναι επίσης τριγραμμική ακολουθώντας τον κανόνα Masing, τότε ο συντελεστής απόσβεσης ισούται με:

$$\zeta_{PL} = \frac{2}{\pi} \frac{(1 - \frac{1}{\mu})(1 - p) + 0.5 \frac{M_{cr}}{M_y}}{1 + p(\mu - 1)} \quad (34)$$

ή για  $p \approx 0$ :

$$\zeta_{TL} (p = 0) = \frac{2}{\pi} \left( 1 - \frac{1 - 0.5 \frac{M_{cr}}{M_y}}{\mu} \right) \quad (35)$$

Με εξαίρεση τα προσομοιώματα που είναι διγραμμικά ή τριγραμμικά κατά τα ανωτέρω τόσο στη μονοτονική καμπύλη όσο και στο βρόχο υστέρησης, ο συντελεστής υστερητικής απόσβεσης  $\zeta$  διαφοροποιείται (μειώνεται) μεταξύ του 1ου μεταδιαρροϊκού κύκλου σε μέγιστη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας  $\mu$  σε κάθε κατεύθυνση (θετική ή αρνητική), και των επομένων. Για το λόγο αυτό ο συντελεστής απόσβεσης για τον 1ο κύκλο συμβολίζεται με  $\zeta_1$  και αυτός για τους μεταγενέστερους με  $\zeta_{n>1}$ .

Στα προσομοιώματα των Clough and Johnston (1966), καθώς και στην τροποποίησή του κατά Anagnostopoulos (1972), στο απλοποιημένο κατά Otani (1974) και Litton (1975) προσομοίωμα Takeda, και στα προσομοιώματα Park et al (1987), Roufaiel and Meyer (1987), Costa and Costa (1987), και Coelho and Carvalho (1990), η αποφόρτιση από παραμόρφωση  $\mu_y$  πάνω στη μονοτονική καμπύλη καταλήγει σε τετμημένη εφγ πάνω στον οριζόντιο άξονα και η φόρτιση στην αντίθετη κατεύθυνση οδεύει προς το σημείο διαρροής στη διεύθυνση αυτή, κ.ο.κ. Για τα προσομοιώματα αυτά αποδεικνύεται εύκολα ότι κατά τον πρώτο πλήρη κύκλο φόρτισης μέχρι πλαστιμότητα  $\mu$ , ο λόγος υστερητικής απόσβεσης  $\zeta$  ισούται με :

$$\zeta_1 = \frac{2(\mu - 1)(1 - p + \varepsilon p) + 3\varepsilon}{4\pi\mu(1 + p(\mu - 1))} \quad (36)$$

Σύμφωνα με το μοντέλο Q-hyst των Saiidi and Sozen (1981), κατά την πρώτη φόρτιση στην αρνητική διεύθυνση ο κλάδος επαναφόρτισης κατευθύνεται από σημείο παραμόρφωσης  $\varepsilon_y$  στο άξονα των παραμορφώσεων, προς ένα σημείο με παραμόρφωση  $-\mu_y$  στη μονοτονική καμπύλη της διεύθυνσης αυτής (Σχ. 2.15(α)), δίνοντας έτσι λόγο υστερητικής απόσβεσης,  $\zeta$ , ίσο με:

$$\zeta_{1Q} = \frac{(\mu - 1)(1 - p + 3\varepsilon p) + 3\varepsilon}{4\pi\mu(1 + p(\mu - 1))} \quad (37)$$

με το  $\varepsilon$  να δίνεται από την εξ. (28) με  $a=0.5$ .

Σ' εκείνα τα προσομοιώματα στα οποία οι βρόχοι υστέρησής δεν χαρακτηρίζονται από στένωση και στους οποίους ο κλάδος επαναφόρτισης καταλήγει στην αρχή της αποφόρτισης, (Clough and Johnston 1966, Takeda et al 1970, Saiidi and Sozen 1981), ο λόγος υστερητικής απόσβεσης,  $\zeta_{n>1}$ , σε ένα πλήρη επόμενο κύκλο αποφόρτισης-επαναφόρτισης με εύρος παραμόρφωσης  $2\mu\phi_y$ , ισούται με :

$$\zeta_{n>1} = \frac{1}{\pi} \frac{\varepsilon}{\mu} \quad (38)$$

με  $\varepsilon$  να δίνεται από τις εξ. (28) και (29).

Για την τροποποίηση των Otani (1974) και Litton (1975) στο προσομοίωμα Takeda, το  $\zeta_{n>1}$  ισούται με:

$$\zeta_{\text{Litton},n>1} = \frac{(1-p)(\mu-1)}{\pi\mu} (1-\alpha + 0.5\beta(1-p) \frac{1-p(\mu-1)(1-\alpha)}{1+p(\mu-1)}) \quad (39)$$

Για τα λοιπά από τα ανωτέρω προσομοιώματα, η εξ. (38) εξειδικεύεται ως εξής:

Για το προσομοίωμα Clough and Johnston (1966):

$$\zeta_{\text{Cl},n>1} = \frac{1}{\pi} (1 - \frac{1}{\mu})(1-p) \quad (40)$$

δηλ. το μισό περίπου της απόσβεσης του διγραμμικού προσομοιώματος.

Για την τροποποίηση του ανωτέρω προσομοιώματος κατά Anagnostopoulos (1972) και για το προσομοίωμα Q-hyst ( $a=0.5$ ):

$$\zeta_{\text{An},n>1} = \frac{1}{\pi} (1 - \frac{1+p(\mu-1)}{\mu^{1-a}}) \quad (41)$$

σχέση η οποία προσεγγίζει βραδύτερα από την προηγούμενη την ασυμπτωτική τιμή του  $1/\pi=0.32$ .

Για τα προσομοιώματα που εμφανίζουν στένωση του βρόχου υστέρησης, αγνοώντας την τυχόν μείωση της αντοχής από κύκλο σε κύκλο λόγω της ανακύκλισης, ο λόγος

υστερητικής απόσβεσης  $\zeta$  σε πλήρεις μεταγενέστερους κύκλους σε μέγιστη πλαστιμότητας  $\mu$ , ισούται με:

$$\zeta_{\text{pinch},n>1} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\varepsilon - \mu_p}{\mu} + \frac{m_p(\varepsilon + \mu)}{\mu(1 + p(\mu - 1))} \right) \quad (42)$$

Για το προσομοίωμα των Roufaiel and Meyer (1987) η ανωτέρω σχέση δίνει  $\zeta = (1+m)\varepsilon/2\pi\mu$ , δηλ.:

$$\zeta_{\text{RM},n>1} = \frac{1}{\pi} \frac{(1 - \frac{1}{\mu})(1-p)}{1+p(\mu-1)} \frac{1+m}{2} \quad (43)$$

Για λυγηρά στοιχεία με  $M/Vh > 4$  δεν έχουμε στένωση των βρόχων ( $m=1$ ) και η ανωτέρω σχέση δίνει παρόμοια αποτελέσματα με την εξ.(40) για το προσομοίωμα Clough and Johnston (1966).

Για το προσομοίωμα των Costa and Costa (1987), το δεξιά μέλος της εξ. (42) γίνεται  $\zeta_{n>1} = \varepsilon(1 + \varepsilon/\mu(\varepsilon\mu^{\beta-1} + \mu^{\beta} - 1))/2\pi\mu$ .

Το Σχ. 2.16 παρουσιάζει τη μεταβολή του συντελεστή υστερητικής απόσβεσης για τον πρώτο μεταλαστικό κύκλο φόρτισης κατά τις εξ. (32)-(37), για τα διάφορα προσομοιώματα. Κατόπιν τα Σχ. 17 δίνουν το συντελεστή απόσβεσης  $\zeta$  για τους μετά τον πρώτο πλήρεις κύκλους.

### 2.3.2. Απλοποιημένος υπολογισμός του μητρώου ευκαμψίας μέλους

#### 2.3.2.1. Τροποποίηση του προσομοιώματος κατανεμημένης ελαστικότητας

Η γενική μορφή του προσομοιώματος κατανεμημένης ανελαστικότητας, που βασίζεται σε ολοκλήρωση κατά μήκος του μέλους κατά τις εξ. (17) ή (18), καλύπτει οποιαδήποτε κατανομή των ροπών κάμψης και οποιαδήποτε θέση του σημείου καμπής στο μήκος του μέλους. Η ολοκλήρωση γίνεται αριθμητικά, είτε κατά τον τραπεζοειδή κανόνα και (10 περίπου) ισαπέχουσες διατομές κατά μήκος του μέλους, ή με πιο προχωρημένα αριθμητικά σχήματα, όπως το Gauss-Lobatto, το οποίο χρησιμοποιεί σαν διατομές ολοκλήρωσης αυτές των δύο άκρων, με τις υπόλοιπες (3 έως 7 συνήθως) σε ανομοιόμορφες αποστάσεις κατά μήκος του μέλους, και μάλιστα πυκνότερα κοντά στα άκρα.

Η ολοκλήρωση των εξ. (17) ή (18) μπορεί να γίνει και αναλυτικά, χρησιμοποιώντας σαν διατομές ελέγχου μόνον τις ακραίες. Έτσι είναι δυνατή και η παράκαμψη του προβλήματος της παραβίασης της ισορροπίας κατά μήκος του Στοιχείου λόγω ασυμβατότητας μεταξύ ανθισταμένων εσωτερικών δυνάμεων που υπολογίζονται στη φάση προσδιορισμού της κατάστασης του μέλους (εξ. (9)), και δυνάμεων στα άκρα που προσδιορίζονται με τη μέθοδο ευκαμψίας.

Η αναλυτική ολοκλήρωση μπορεί να γίνει κατά δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι αυτός των Park et al (1987) και Kunnath et al (1990, 1991) και ο δεύτερος αυτός των Soleimani (1979), Arzoumanidis and Meyer (1981) και Filippou and Issa (1988).

Στον πρώτο τρόπο γίνεται η υπόθεση ότι η κατανομή της εφαπτομενικής ευκαμψίας  $f_s(x)$  κατά μήκος του μέλους είναι γνωστή. Πιο συγκεκριμένα οι Park et al (1987) και Kunnath et al (1990, 1991) υιοθέτησαν την εύχρηστη πολυγραμμική κατανομή (Σχ. 2.18). Η κατανομή αυτή προσδιορίζεται από τις τιμές της εφαπτομενικής ευκαμψίας στα άκρα A και B, που συμβολίζονται με  $\gamma_a/EI$  και  $\gamma_b/EI$ , και από την ελαστική ευκαμψία  $1/EI$  στο σημείο καμπής. Αν δεν υπάρχει σημείο καμπής μέσα στο μήκος  $l$  του μέλους, υιοθετείται τραπεζοειδής κατανομή μεταξύ των άκρων. Έτσι υπολογίζεται αναλυτικά το ολοκλήρωμα της εξ. (18).

Όπως αναφέρεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4., Παρ. 4.3.5, η τμηματικά γραμμική μεταβολή της ευκαμψίας που πρότειναν οι Park et al (1987) και οι Kunnath et al (1990, 1991), για δοκούς σε μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη, γενικεύθηκε στα πλαίσια της παρούσας έρευνας για τη διαξονική κάμψη με αξονική δύναμη. Στη γενίκευση αυτή οι διαγώνιοι όροι  $f_{ii}(x)$  του μητρώου ευκαμψίας καθορίζονται από τις τιμές τους στα δύο άκρα και απ' αυτήν στο σημείο όπου το εντατικό μέγεθος  $S_i(x)$  που συνδέεται με τον υπόψη διαγώνιο όρο του μητρώου είναι μηδέν (δηλ. το σημείο καμπής). Αν αυτό το εντατικό μέγεθος δεν αλλάζει πρόσημο κατά μήκος τους μέλους, υιοθετείται τραπεζοειδής κατανομή του όρου  $f_{ii}(x)$  μεταξύ των άκρων (βλ. Σχ. 4.19 στο Κεφ. 4). Για τους εκτός-διαγωνίου όρους  $f_{ij}(x)$  του μητρώου ευκαμψίας, η τμηματικά γραμμική κατανομή κατά μήκος του μέλους καθορίζεται από τις τιμές του όρου στα άκρα και από την ελαστική τιμή του  $\sigma'$  εκείνες τις θέσεις όπου η τρέχουσα τιμή ενός από τα δύο εντατικά μεγέθη,  $S_i(x)$ ,  $S_j(x)$ , είναι μηδέν. Αν, βεβαίως, το τοπικό σύστημα  $yz$  της διατομής είναι κύριο σύστημα αξόνων, τότε ο ελαστικός εκτός-διαγωνίου όρος είναι μηδέν.

Ο δεύτερος τρόπος αναλυτικού προσδιορισμού του ολοκληρώματος της εξ. (18), προτάθηκε από τους Soleimani et al (1979) και Arzoumanidis and Meyer (1981) και επεκτάθηκε αργότερα από τους Filippou and Issa (1988). Σύμφωνα μ' αυτό τον τρόπο, οι

ακραίες περιοχές της δοκού όπου η ροπή  $M$  ξεπερνά την αντίστοιχη ροπή διαρροής,  $M_y$ , χαρακτηρίζονται σαν πλαστικοποιημένες και τα μήκη τους συμβολίζονται με  $z_a$  για το άκρο A ή  $z_b$  για το άκρο B. Υποθέτοντας ότι η ευκαμψία όλων των διατομών στο τμήμα μήκους  $z_a$  είναι η ίδια και ίση με  $\gamma_a/EI$ , και ότι αυτή στο τμήμα  $z_b$  είναι επίσης σταθερή και ίση με  $\gamma_b/EI$ , οι ανελαστικές παραμορφώσεις στα τμήματα αυτά αυξάνουν το μητρώο ευκαμψίας του μέλους κατά:

$$\mathbf{F}_{inel}^t = \begin{bmatrix} f_{aa} & f_{ab} \\ f_{ba} & f_{bb} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\text{όπου:} \quad f_{aa} = \frac{1}{3EI} [\gamma_a (1 - (1 - \xi_a)^3) + \gamma_b \xi_b^3] \quad (45)$$

$$\text{και:} \quad f_{ab} = -\frac{1}{6EI} [\gamma_a (3 \xi_a^2 - 2 \xi_a^3) + \gamma_b (3 \xi_b^2 - 2 \xi_b^3)] \quad (46)$$

και ο όρος  $f_{bb}$  προκύπτει από την εξ. (45) με κυκλική εναλλαγή των δεικτών  $a$  και  $b$ . Στις ανωτέρω σχέσεις είναι  $\xi_a = z_a/l$  και  $\xi_b = z_b/l$ . Ο όρος  $f_{ba}$  ισούται με τον  $f_{ab}$  και το ανωτέρω μητρώο ευκαμψίας είναι συμμετρικό.

Η μέση δυσκαμψία  $EI/\gamma_a$  στην πλαστικοποιημένη περιοχή του άκρου A ισούται με  $pEI$  αν το άκρο A βρίσκεται σε σημείο της μονοτονικής καμπύλης  $M-\phi$ , ή με την αντίστοιχη κλίση της καμπύλης αποφόρτισης, αν στο άκρο αυτό έχουμε αποφόρτιση. Εάν, αντίθετα, στο άκρο A έχουμε επαναφόρτιση, οι Filippou and Issa (1988) προτείνουν να λαμβάνεται η μέση δυσκαμψία  $EI/\gamma_a$  ίση με το διπλάσιο της τέμνουσας δυσκαμψίας της διατομής A. Αντίστοιχα για τον όρο  $EI/\gamma_b$ .

Το μήκος  $z_i$  ( $i=a, b$ ) υπολογίζεται κατά τους Filippou and Issa (1988) ως εξής:

$$z_i = \max \frac{M_i - M_y}{V_i} \leq 0.25l \quad (47)$$

όπου η τέμνουσα  $V_i$  στο υπόψη άκρο θεωρείται ότι δεν μειώνεται κατά τη διάρκεια της απόκρισης (δηλ. αν όντως μειώνεται, λαμβάνεται σταθερή και ίση με την πιο πρόσφατη μέγιστη τιμή της, μέχρι που να αρχίσει να αυξάνεται ξανά). Για λόγους υπολογιστικής ευκολίας, οι Filippou and Issa (1988) προτείνουν να αυξάνονται τα μήκη  $z_a$  και  $z_b$  όχι συνεχώς, αλλά με άλματα μεγέθους κάποιου κλάσματος του μήκους  $l$ , π.χ. το 2.5% του  $l$ .



Το ανελαστικό μητρώο ευκαμψίας μπορεί να θεωρηθεί ότι αλλάζει από βήμα σε βήμα της ανάλυσης, είτε λόγω μετάβασης ενός των δύο άκρων από φόρτιση σε αποφόρτιση, ή από αποφόρτιση σε επαναφόρτιση, είτε λόγω αλλαγής του μήκους των πλαστικοποιημένων τμημάτων,  $z_a$  και  $z_b$ .

Επισημαίνεται ότι με την κατά Filippou and Issa (1988) χρήση της δυσκαμψίας επαναφόρτισης του νόμου M-φ, που είναι διπλάσια απ' αυτήν της ακραίας διατομής (που σημαίνει ότι λαμβάνεται μία μέση τιμή της ανελαστικής ευκαμψίας, μεταξύ της μηδενικής τιμής της στην αρχή της πλαστικοποιημένης ζώνης και της μέγιστης στο άκρο του μέλους), η καμπύλη ροπών M-γωνίας στροφής  $\theta$  στο άκρο καταλήγει στην επαναφόρτιση σ' ένα σημείο της καμπύλης πρώτης φόρτισης πριν απ' αυτό που αντιστοιχεί στη μέγιστη προγενέστερη ανελαστική γωνία στροφής προς την ίδια κατεύθυνση. Η συμπεριφορά αυτή είναι ανάλογη μιας μη-μηδενικής τιμής του συντελεστή  $\beta$  στο τροποποιημένο κατά Otani (1974) και Litton (1975) προσομοίωμα Takeda.

Οι ανωτέρω αναλυτικές απλοποιήσεις του προσομοιώματος κατανεμημένης ανελαστικότητας μπορούν να συνδυασθούν με οποιοδήποτε εμπειρικό προσομοίωμα M-φ. Οι Soleimani et al (1979) και οι Filippou and Issa (1988) το συνδύασαν με το προσομοίωμα των Clough and Johnston (1966), ενώ οι Arzoumanidis and Meyer (1981) προτίμησαν το τροποποιημένο προσομοίωμα Takeda. Οι Roufaiel and Meyer (1987) χρησιμοποίησαν τις δικές τους σχέσεις M-φ, που περιλαμβάνουν στένωση των βρόχων λόγω χαμηλού λόγου διάτμησης και μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση, στα πλαίσια μεθοδολογίας όπως αυτή των Soleimani et al (1979) και Arzoumanidis and Meyer (1981). Τέλος οι Park et al (1987) και οι Kunnath et al (1990, 1991) χρησιμοποίησαν το προσομοίωμα M-φ που προτείνεται στην πρώτη από τις εργασίες αυτές και περιλαμβάνει στένωση βρόχων και μείωση της αντοχής με την ανακύκλιση.

#### 2.3.2.1. Προσομοίωμα σημειακών αρθρώσεων ή συγκεντρωμένης ανελαστικότητας

Στο σεισμό οι καμπτικές ανελαστικές παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στις ακραίες περιοχές των μελών, καθώς εκεί οι ροπές κάμψης είναι μέγιστες. Για το λόγο αυτό στα πρώτα ανελαστικά προσομοιώματα δοκών που αναπτύχθηκαν, η ανελαστικότητα εθεωρείτο συγκεντρωμένη στα άκρα των μελών, με τη μορφή “σημειακών αρθρώσεων” μηδενικού μήκους.

### 2.3.2.1.1. Προσομοίωμα διπλού μέλους

Στο πρώτο ανελαστικό προσομοίωμα δοκού, αυτό των Clough et al (1965), η δοκός θεωρήθηκε σαν ένα διπλό μέλος με δύο στοιχεία εν παραλλήλω (Σχ. 2.19).

Το πρώτο στοιχείο είναι μία ελαστική-τέλεια πλαστική δοκός και προσομοιώνει τη διαρροή των άκρων. Πριν τη διαρροή σ' ένα από τα δύο άκρα, το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου αυτού ταυτίζεται με το γνωστό της ελαστικής δοκού. Όταν σ' ένα από τα δύο άκρα η ροπή φθάσει την τιμή διαρροής,  $M_y$ , το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου αυτού αντικαθίσταται με εκείνο της δοκού με άρθρωση (πλήρη ελευθερία στροφής) στο άκρο αυτό. Όταν διαρρεύσει και το άλλο άκρο, το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας γίνεται ίδιο με αυτό ενός μέλους με αρθρώσεις και στα δύο άκρα.

Το δεύτερο στοιχείο εν παραλλήλω είναι μία γραμμική-ελαστική δοκός, με δυσκαμψία διατομής  $pEI$  η οποία προσομοιώνει την κράτυνση. Καθώς τα μητρώα δυσκαμψίας των δύο στοιχείων εν παραλλήλω προστίθενται για να δώσουν το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του συνθέτου μέλους, το μέλος αυτό έχει τελικά διγραμμική καμπύλη ροπών-γωνιών στροφής, δηλ. αρχικά ελαστική, με γραμμική κράτυνση κατόπιν και λόγο κράτυνσης  $p$ . Για να προκύπτει η σωστή ελαστική δυσκαμψία της δοκού, το πρώτο στοιχείο με την ελαστική-τέλεια πλαστική συμπεριφορά πρέπει να έχει ελαστική δυσκαμψία  $(1-p)EI$ . Η υστερητική συμπεριφορά είναι επίσης διγραμμική, με κλάδους αποφόρτισης-επαναφόρτισης παράλληλους στους μονοτονικούς. Η συμπεριφορά αυτή αρμόζει σε μεταλλικές δοκούς, με σταθερούς βρόχους υστέρησης και κάποιο φαινόμενο Bauschinger. Δεν ταιριάζει όμως με τη συμπεριφορά δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίες έχουν στενούς βρόχους υστέρησης και έντονα μειωμένη δυσκαμψία στην αποφόρτιση και την επαναφόρτιση. Επομένως, αν η απόκριση περιλαμβάνει πολλούς ανελαστικούς κύκλους, το προσομοίωμα αυτό υπερεκτιμά σημαντικά την απορρόφηση ενέργειας. Επομένως προσφέρεται μόνο για τις περιπτώσεις εκείνες που η απόκριση του μέλους χαρακτηρίζεται ουσιαστικά από μία μόνο έξοδο του στην ανελαστική περιοχή, και μας ενδιαφέρει κυρίως η εκτίμηση της μέγιστης ανελαστικής παραμόρφωσης. Εντούτοις, το προσομοίωμα διπλού μέλους περιλαμβάνεται στη βιβλιοθήκη προγραμμάτων ευρείας χρήσεως, όπως το DRAIN-2D (Kanaan and Powell, 1973), καθώς έχει κάποια πλεονεκτήματα έναντι των διαφόρων παραλλαγών του προσομοιώματος απλού μέλους που περιγράφονται κατωτέρω.

### 2.3.2.1.2. Προσομοίωμα απλού μέλους

Με στόχο την αποφυγή των διγραμμικών βρόχων υστέρησης του προσομοιώματος διπλού μέλους, ο Gibson (1967) εισήγαγε αυτό του απλού μέλους, το οποίο αποτελείται από ένα γραμμικό-ελαστικό στοιχείο δοκού με ένα μη-γραμμικό στροφικό ελατήριο στο κάθε άκρο (Σχ. 2.20). Σ' αυτό το εν σειρά σύστημα, το ελαστικό στοιχείο αντιπροσωπεύει τις ελαστικές παραμορφώσεις και οι ανελαστικές συγκεντρώνονται στα δύο στροφικά ελατήρια. Το σημείο καμπής θεωρείται κατά κανόνα ότι είναι στο μέσο του μήκους, όπως συνήθως συμβαίνει στην πραγματικότητα σε δοκούς σχετικά ομοιόμορφων πλαισίων που υπόκεινται μόνο σε σεισμική δράση χωρίς (σημαντικά) κατακόρυφα φορτία. Τότε οι ανελαστικές παραμορφώσεις του κάθε μισού του μέλους συγκεντρώνονται σε μία γωνία στροφής  $\theta_i$  στο ακραίο ελατήριο  $i$  και συσχετίζονται μόνο με την ροπή του άκρου  $i$ ,  $M_i$ , και όχι αυτήν του άλλου άκρου,  $M_j$ . Έτσι η συμβολή των δύο μη-γραμμικών ελατηρίων στο εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του μέλους, το οποίο συνδέει τις διαφορικές γωνίες στροφής χορδής στα άκρα A και B,  $d\theta_A$  και  $d\theta_B$ , λόγω των διαφορικών ροπών στα άκρα,  $dM_A$  και  $dM_B$ , είναι διαγώνιο:

$$F_{inel}^t = \begin{bmatrix} f_{AA} & 0 \\ 0 & f_{BB} \end{bmatrix} \quad (48)$$

Το ανελαστικό εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας είναι πράγματι διαγώνιο, μόνον εφόσον ο λόγος των ακραίων ροπών  $M_A$  και  $M_B$  διατηρείται σταθερός κατά την απόκριση. Για τις δοκούς η προφανής επιλογή για σταθερή σχέση ροπών είναι αυτή που προκύπτει από την αντισυμμετρική κάμψη. Αν  $dM_A = dM_B$  και οι ροπές διαρροής και οι ελαστικές και μετελαστικές δυσκαμψίες στα δύο άκρα είναι ίδιες, ο όρος  $f_{AA}$  του διαγώνιου μητρώου ευκαμψίας της εξ. (48) προκύπτει με άθροιση των όρων  $f_{aa}$  και  $f_{ab}$  των εξ. (45)-(46):

$$\frac{d\theta_A^{pl}}{dM_A} = f_{AA} = \frac{\gamma l}{3EI} \xi(3 - 6\xi + 4\xi^2) \quad (49)$$

Στην ανωτέρω σχέση, η παράμετρος  $\gamma$  και το ανηγμένο πλαστικοποιημένο μήκος  $\xi$  θεωρείται ότι έχουν τις ίδιες τιμές στα άκρα A και B του μέλους. Η τιμή του  $\xi$  είναι συνάρτηση της ροπής  $M$  στο άκρο και για αντισυμμετρική κάμψη ισούται με:

$$\xi = 0.5 \left( 1 - \frac{M_y}{M} \right) \quad (50)$$

Αν η μονοτονική σχέση  $M-\phi$  είναι διγραμμική με λόγο κράτυνσης  $p$ , τότε:

$$\gamma = \frac{1-p}{p} \quad (51)$$

και η εξ. (49) ολοκληρώνεται για να δώσει την τιμή της πλαστικής γωνίας στροφής χορδής που αντιστοιχεί σε ροπή  $M$  στο άκρο:

$$\theta_{pl} = \frac{1}{12EI} \frac{1-p}{p} \left( \frac{M-M_y}{M} \right)^2 (2M-M_y) \quad (52)$$

Η ανωτέρω σχέση μεταξύ ακραίας ροπής  $M$  και πλαστικής γωνίας στροφής είναι μη-γραμμική, με κλίση (δυσκαμψία)  $dM/d\theta_{pl}$  ίση με άπειρο κατά τη διαρροή και σταδιακά μειούμενη κατόπιν.

Ο λόγος της ευρύτατης εφαρμογής του προσομοιώματος απλού μέλους και συγκεντρωμένης ανελαστικότητας οφείλεται, αφενός μεν στην υπολογιστική απλότητα που προσφέρει η έλλειψη σύζευξης της ανελαστικής συμπεριφοράς των δύο άκρων της δοκού, αφετέρου δε στη δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε υστερητικού προσομοιώματος για τη ροπή  $M_i$ , συναρτήσει της γωνίας στροφής  $\theta_i$  στο άκρο. Μάλιστα οι υστερητικές σχέσεις  $M-\theta$  που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι κατά κανόνα πολυγραμμικές. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ευρύτατα τα υστερητικά προσομοιώματα που περιγράφησαν στην Υποενότητα 2.3.1.2, όχι πλέον για τη σχέση  $M-\phi$  αλλά για την  $M-\theta$ . Τα προσομοιώματα αυτά συνδυάζονται είτε με μία τριγραμμική μονοτονική καμπύλη, με διάκριση ρηγματωμένου και αρηγμάτωτου μέλους, ή με διγραμμική, που ορίζεται από τη ροπή και τη γωνία στροφής στη διαρροή και τη μεταδιαρροϊκή κλίση, που κατά κανόνα εκφράζεται μέσω του λόγου της  $c$  προς την προδιαρροϊκή, ελαστική κλίση. Η διγραμμική μονοτονική καμπύλη είναι κατά κανόνα διαφορετική για θετική και για αρνητική κάμψη.

Αν το σύνολο των ελαστικών παραμορφώσεων της δοκού προσομοιώνεται από την ελαστική δοκό μεταξύ των δύο μη-γραμμικών ελατηρίων στα άκρα, τότε αυτά τα τελευταία

συγκεντρώνουν μόνον το πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής και το πρώτο τμήμα της μονοτονικής τους καμπύλης είναι κατακόρυφο. Με άλλα λόγια τα ελατήρια είναι εντελώς άκαμπτα, μέχρις ότου η ροπή άκρου ξεπεράσει τη ροπή διαρροής (ή τη ροπή ρηγματώσης, αν η μονοτονική καμπύλη είναι τριγωνική). Ομοίως οι κλάδοι αποφόρτισης ή επαναφόρτισης που τυχόν είναι παράλληλοι στον πρώτο είναι κατακόρυφοι.

Αν η μονοτονική καμπύλη  $M-\varphi$  είναι όντως γραμμική μετά τη διαρροή, τότε, όπως δείχνει η εξ. (52) ο αντίστοιχος κλάδος  $M-\theta_{pl}$  είναι στην πραγματικότητα μη-γραμμικός και η θεώρησή του σαν γραμμικού αποτελεί προσέγγιση για λόγους υπολογιστικής ευκολίας. Η κλίση του μπορεί να ληφθεί ίση με αυτήν της χορδής στο διάγραμμα  $M-\theta$  μεταξύ του σημείου διαρροής,  $(M_y, 0)$  και της κορυφής του διαγράμματος για  $M=M_u$ . Προκύπτει έτσι από την εξ. (52):

$$c = 6EI \frac{p}{1-p} \frac{1}{\left(1 - \frac{M_y}{M_u}\right) \left(1 - \frac{M_y}{2M_u}\right)} \quad (53)$$

Στην πραγματικότητα, λόγω της σταδιακής επέκτασης της μη-γραμμικότητας από τα άκρα προς το ενδιάμεσο του μήκους του μέλους, η κλίση χορδής της καμπύλης  $M-\theta_{pl}$  εξαρτάται από τη ροπή  $M$  και μειώνεται από μία αρχική τιμή ίση με άπειρο μέχρι την τελική κατώτατη τιμή της, που δίνεται από την εξ. (53). Όπως επισήμαναν οι Anagnostopoulos (1981) και οι Filippou and Issa (1988), στη γενική περίπτωση της μη-αντιμετρικής κάμψης η μετα-διαρροϊκή κλίση της καμπύλης  $M-\theta_{pl}$  εξαρτάται από τη σχέση και την ιστορία των ροπών στα δύο άκρα του μέλους.

Η τιμή του λόγου κράτνσης της συνολικής καμπύλης  $M-\theta$ , που ισούται περίπου με το λόγο του  $c$  της εξ. (53) προς  $6EI/(1-p)$ , είναι πολλαπλάσια αυτής του λόγου κράτνσης  $p$  της καμπύλης  $M-\varphi$  κατά το τελευταίο κλάσμα στην εξ. (53). Έτσι για τις συνήθεις τιμές του λόγου  $M_y/M_u$  ο λόγος κράτνσης της καμπύλης  $M-\theta$  είναι περίπου κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερος του λόγου κράτνσης της καμπύλης  $M-\varphi$ . Οι Filippou and Issa (1988) διεπίστωσαν ότι αν ο λόγος κράτνσης της μονοτονικής καμπύλης  $M-\theta$  ληφθεί ίσος με το λόγο κράτνσης  $p$  της καμπύλης  $M-\varphi$ , η μη-γραμμική δυναμική ανάλυση της απόκρισης υποτιμά τις μέγιστες ανελαστικές παραμορφώσεις κατά 50%-100%. Οι ίδιοι προτείνουν να λαμβάνεται ο λόγος κράτνσης της καμπύλης  $M-\theta$  τουλάχιστον διπλάσιος του λόγου  $p$  της καμπύλης  $M-\varphi$ .

Επισημαίνεται ότι το προσομοίωμα διπλού μέλους παράγει πάντοτε διγραμμική μονοτονική καμπύλη  $M-\theta$  και ότι οι παράμετροί του περιορίζονται στις εξής: α) Στις ροπές διαρροής  $M_y$  στα δύο άκρα του μέλους, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν για θετική ή αρνητική κάμψη, β) στην ελαστική δυσκαμψία  $EI$ , η οποία πρέπει να είναι ενιαία για το μέλος και ανεξάρτητη προσήμου της κάμψης, και γ) στο λόγο κράτυνσης  $\rho$ , που επίσης πρέπει να έχει ενιαία τιμή για όλο το μέλος. Ο λόγος κράτυνσης συνιστάται να λαμβάνεται όχι ίσος με το λόγο κράτυνσης  $\rho$  της καμπύλης  $M-\phi$ , αλλά με το πηλίκο του  $\rho$  προς το  $(1-M_y/M_u)(1-0.5M_y/M_u)$ , με μία μέση τιμή του λόγου  $M_y/M_u$  για τα δύο άκρα και τις δύο διευθύνσεις της κάμψης. Τότε, αν ληφθούν επιπλέον οι ίδιες τιμές ροπών διαρροής και  $EI$  στα προσομοιώματα απλού και διπλού μέλους, τα δύο αυτά προσομοιώματα θα διαφέρουν μόνον ως προς το σχήμα του βρόχου υστέρησης και την ισοδύναμη υστερητική απόσβεση. Και στα δύο προσομοιώματα, απλού ή διπλού μέλους, οι τιμές των ροπών διαρροής και του  $EI$  μπορούν να καθορισθούν κατά την επόμενη Υποενότητα 2.3.2.1.3. Επίσης και στα δύο, η τιμή του λόγου κράτυνσης της καμπύλης  $M-\theta$  μπορεί να καθορισθεί, όχι με βάση την ανωτέρω εξ. (53), αλλά ημι-εμπειρικά κατά την Υποενότητα 2.3.2.1.3.

#### 2.3.2.1.3. Άμεσος προσδιορισμός των παραμέτρων της μονοτονικής καμπύλης $M-\theta$ στο προσομοίωμα συγκεντρωμένης ανελαστικότητας

Ένα βασικό πλεονέκτημα του προσομοιώματος συγκεντρωμένης ανελαστικότητας, και ιδίως του προσομοιώματος απλού μέλους, είναι ότι τα περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή βρόχων υστέρησης δύναμης  $F$ -μετακίνησης  $\delta$ , ή (ισοδύναμα) ροπής  $M=Fl$ -γωνίας στροφής χορδής  $\theta=\delta/l$ . Το γεγονός αυτό επιτρέπει την εμπειρική προσαρμογή καμπυλών  $M-\theta$  στα αποτελέσματα και τον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων του προσομοιώματος συγκεντρωμένης ανελαστικότητας. Μάλιστα τα περισσότερα, αν όχι όλα τα εμπειρικά προσομοιώματα της Υποενότητας 2.3.1.2, αναπτύχθηκαν για τη σχέση  $M-\theta$  και όχι για τη  $M-\phi$ , με βάση διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα για τη γωνία στροφής χορδής  $\theta=\delta/l$ . Επιπλέον, παρά τα σχόλια της Υποενότητας 2.3.2.1.2 για τη μη-γραμμικότητα της καμπύλης  $M-\theta$  μετά τη διαρροή, οι πειραματικές μονοτονικές καμπύλες  $M-\theta$  είναι περίπου γραμμικές μετά τη διαρροή και επιτρέπουν την προσαρμογή διγραμμικών ή τριγραμμικών σχέσεων. Τέλος, οι παράμετροι των μονοτονικών καμπυλών  $M-\theta$ , δηλ. η γωνία στροφής στη διαρροή,  $\theta_y$ , και ο λόγος κράτυνσης,  $c$ , μπορούν να καθορισθούν απευθείας με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρ' όλο που η απ' ευθείας προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα είναι εμπειρική και

μειονεκτεί από θεωρητικής πλευράς σε σχέση με την εξαγωγή από τις καμπύλες M-φ με βάση την Τεχνική Θεωρία της Κάμψης, δίνει συνήθως καλλίτερο τελικό αποτέλεσμα, καθ' όσον περιλαμβάνει και μη-καμπτικά φαινόμενα, όπως τις διατμητικές παραμορφώσεις, ελαστικές ή ανελαστικές, και την επιρροή της ολίσθησης των οπλισμών στις ζώνες αγκύρωσης.

Αν είναι γνωστή η τιμή της ροπής διαρροής,  $M_y$ , και η γωνία στροφής χορδής του μήκους διάτμησης  $L_s$  στη διαρροή,  $\theta_y$  (υπενθυμίζεται ότι η γωνία στροφής χορδής του μήκους διάτμησης είναι η εγκάρσια μετακίνηση του άκρου του σε σχέση με την εφαπτόμενη στο άλλο άκρο όπου συμβαίνει η μέγιστη ροπή, διαιρεμένη δια του μήκους  $L_s$ ), τότε η κλίση του πρώτου κλάδου της διγραμμικής μονοαξονικής καμπύλης ισούται με:

$$EI = \frac{M_y L_s}{3\theta_y} \quad (54)$$

Μερικές φορές το προσομοίωμα μέλους περιλαμβάνει ειδικό στροφικό ελατήριο στο άκρο για την προσομοίωση της διακριτής γωνίας στροφής της διατομής άκρου,  $\theta_{slip}$ , λόγω της ολίσθησης των οπλισμών στη ζώνη αγκύρωσής τους πέραν από το άκρο του μέλους (δηλ. στον κόμβο). Επίσης μπορεί η επιφάνεια διάτμησης του μέλους να υπολογίζεται με βάση τη διατμητικής φύσεως γωνιακή παραμόρφωση του μήκους διάτμησης στη διαρροή, η οποία είναι ισοδύναμη με γωνία στροφής χορδής, που συμβολίζεται με  $\theta_{y,sh}$ , ως εξής:

$$GA_{sh} = \frac{M_y}{l\theta_{y, shear}} \quad (55)$$

Αν η επιρροή της ολίσθησης των ράβδων στην ζώνη αγκύρωσης λαμβάνεται υπόψη χωριστά και η επιφάνεια διάτμησης υπολογίζεται από την εξ. (55), τότε στην εξ. (54) σαν  $\theta_y$  λαμβάνεται μόνον η καμπτικής προέλευσης γωνία στροφής χορδής,  $\theta_{y, flex}$ . Αν, ως συνήθως, η ολίσθηση των ράβδων δεν λαμβάνεται υπόψη με χωριστό στοιχείο, τότε σαν  $\theta_y$  στην εξ. (54), λαμβάνεται το άθροισμα της  $\theta_{y, flex}$  και της τιμής στη διαρροή της ισοδύναμης γωνίας στροφής λόγω ολίσθησης,  $\theta_{y, slip}$ .

$$EI = \frac{M_y l}{3(\theta_{y, flex} + \theta_{y, slip})} \quad (56)$$

Τέλος, αν δεν λαμβάνονται υπόψη διατμητικές παραμορφώσεις με πεπερασμένη επιφάνεια διάτμησης κατά την εξ. (55), σαν  $\theta_y$  λαμβάνεται το άθροισμα των  $\theta_{y,flex} + \theta_{y,slip} + \theta_{y,shear}$ .

Για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ , οι Park and Ang (1985) πρότειναν ένα ημι-εμπειρικό προσομοίωμα, σαν συνάρτηση των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των μελών. Η γωνία στροφής χορδής που υπολογίζεται λαμβάνει υπόψη την επίδραση της διατμητικής παραμόρφωσης, της ολίσθησης του οπλισμού και σχεδόν όλα τα άλλα μη γραμμικά φαινόμενα που συμβαίνουν στο μήκος του ανοίγματος διάτμησης. Το προσομοίωμα αναπτύχθηκε με βάση τα αποτελέσματα 244 δοκιμών δοκών και υποστρωμάτων, όλα με ορθογωνική διατομή και οπλισμούς υψηλής συνάφειας. Τα μέλη αυτά είχαν λόγο διάτμησης  $M/Vh$  από 1 έως 7 και αστόχησαν τελικά καμπτικά ή διατμητικά. Σ' όλα τα πειράματα αυτά ο εφελκόμενος οπλισμός διέρρευσε πριν την τελική αστοχία.

Σύμφωνα με το προσομοίωμα των Park and Ang, η στρόφη χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ , περιέχει την συμβολή της καμπτικής παραμόρφωσης, της ολίσθησης του οπλισμού και της διατμητικής παραμόρφωσης, δηλ.:

$$\theta_y = \theta_{y,flex} + \theta_{y,slip} + \theta_{y,shear} \quad (57)$$

Ο πρώτος όρος του δεξιά μέλους της εξ. (57) μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη σχέση:

$$\theta_{y,flex} = \frac{1}{3} \varphi_y L_s \quad (58)$$

στην οποία το  $\varphi_y$  υπολογίζεται κατά την εξ. (21) με  $\xi_y$  το κανονικοποιημένο στο συνολικό ύψος της διατομής ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά την εξ. (20).

Ο δεύτερος όρος στην εξ. (57) υπολογίζεται με βάση κάποιο προσομοίωμα για την συνάφεια και τη σχετική ολίσθηση μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος. Κατά τον Πρότυπο Κανονισμό 1990 των CEB/FIP η τάση συνάφειας συνδέεται με την ολίσθηση ως εξής:

$$\tau = \tau_{\max} \left( \frac{S}{S_1} \right)^\alpha \quad (59)$$



Στη σχέση αυτή οι Park and Ang (1985) πρότειναν: α) για τον εκθέτη α την τιμή α=1/3, β) για το  $S_1=0.025\Phi_L$  και γ) για  $\tau_{\max}=10.3$  MPa ή 6.2 MPa για καλή ή κακή συνάφεια (I ή II) αντίστοιχα, όπου  $\Phi_L$  η διάμετρος των διαμήκων ράβδων.

Επισημαίνεται ότι οι τιμές αυτές είναι διαφορετικές απ' αυτές που υιοθετεί ο Πρότυπος Κανονισμός 1990 των CEB/FIP: α) α=0.4, β)  $S_1=0.6$ mm για απερίσφικτο σκυρόδεμα ή  $S_1=10$ mm για περισφισμένο, γ)  $\tau_{\max}=2\sqrt{f_c}$  (MPa) για απερίσφικτο σκυρόδεμα με καλή συνάφεια, ή  $\tau_{\max}=1.25\sqrt{f_c}$  για κακή (αν το σκυρόδεμα είναι περισφισμένο, οι τιμές αυτές αυξάνονται κατά 25%).

Η εξ. (59) με α=1/3, σε συνδυασμό με τις συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων, επιτρέπει τον υπολογισμό της ολίσθησης του οπλισμού σε μια ρηγματωμένη διατομή όπου η τάση  $\sigma_s$  είναι γνωστή:

$$S = \varphi_L \left( \frac{\varphi_L}{S_1} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{\sigma_s}{\sqrt{6} E_s \tau_{\max}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (60)$$

Με τη χρήση της προτεινόμενης από τους Park and Ang τιμής του  $S_1$ , η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$S \approx 7 \times 10^{-5} \varphi_L \left( \frac{\sigma_s}{\sqrt{\tau_{\max}}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (61)$$

(τάσεις σε MPa). Τα αποτελέσματα των εξ. (60) και (61) δεν διαφέρουν σημαντικά. Έτσι, αντί της εξ. (61) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η (60) με τις τιμές των  $S_1$  και  $\tau_{\max}$  κατά CEB/FIP.

Τελικά ο δεύτερος όρος της εξ. (57) υπολογίζεται ως:

$$\theta_{y,slip} = \frac{S_y}{z} \quad (62)$$

όπου το  $S_y$  υπολογίζεται από την εξ. (60) ή (61) για  $\sigma_s=f_y$ , ενώ  $z=d-d_1$  ή  $z=0.9d$  είναι ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων στη διατομή.

Ο τρίτος όρος της εξ. (57) μπορεί να υπολογισθεί ακολουθώντας την εξής διαδικασία: Σε κάθε λοξή διατμητική ρωγμή υπάρχει μια στροφή  $\theta_s$  περί την κορυφή της ρωγμής, η οποία προξενεί βέλος κάμψης στο σημείο καμπής ίσο με  $\theta_s$  επί τη μέση απόσταση της ρωγμής από

το σημείο καμπής,  $x_i$ . Τότε η ολική μετακίνηση στο σημείο καμπής θα είναι ίση με  $\theta_s$  επί τον αριθμό των λοξών ρωγμών και επί τη μέση απόσταση αυτών από το σημείο καμπής. Το μήκος μέσα στο οποίο δεν υπάρχουν λοξές ρωγμές,  $L'$ , είναι, σύμφωνα με το μοντέλο των Park and Ang (1985), ίσο με:

$$L' = z + \frac{f_{ct}}{\min \left( 0.75\sqrt{f_c}, 0.45\sqrt{f_c} + \frac{100\rho_1}{\max\left(\frac{M}{Vd}, 1\right)} \right)} d \quad (63)$$

όπου  $f_{ct}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa και  $\rho_1$  το ποσοστό του εφελκυσμένου οπλισμού. Στο υπόλοιπο μήκος του μέλους εμφανίζονται λοξές ρωγμές με μέση απόσταση  $z$ . Έτσι, με την προϋπόθεση ότι η πρώτη λοξή ρωγμή ξεκινά από τη διατομή στο άκρο του μέλους, υπάρχουν συνολικά  $\max(0, (L_s - L')/2z)$  λοξές ρωγμές, με μέση απόσταση από το σημείο καμπής ίση με  $(L_s + L')/2$ .

Τελικά ο τρίτος όρος της εξ. (57) υπολογίζεται ως:

$$\theta_{y, \text{shear}} = \left[ 1 + \frac{(L_s + L') \max(0, (L_s - L'))}{2zL_s} \right] \theta_s \quad (64)$$

Η ανάλυση που έκαναν με βάση τα πειράματα οι Park and Ang (1985) οδήγησε στα ακόλουθα αποτελέσματα για τη διατμητική στροφή σε μία λοξή ρωγμή:

$$\text{Όταν } M/Vd > 4.0: \quad \theta_s = \frac{0.002}{\frac{M}{Vd} - 0.5} \quad (65)$$

$$\text{Όταν } 4.0 > M/Vd > 2.5: \quad \theta_s = \frac{0.002}{\frac{M}{Vd} - 0.5} (1 + 1.35u') \quad (66)$$

$$\text{Όταν } M/Vd < 2.5: \quad \theta_s = \frac{0.002}{\max\left(\frac{M}{Vd} - 0.5, 1.0\right)} \left( 1 + \frac{0.925u'}{\sqrt{\max(0.2, 100\rho_{sw})} - 0.4} \right) \quad (67)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις  $\rho_{sw}$  είναι το ποσοστό των συνδετήρων,  $A_{sw}/sb_w$ , παράλληλα στη διεύθυνση της τέμνουσας δύναμης  $V$  και:

$$u' = \max\left(2.4 \frac{\tau_b}{\sqrt{f_c}} - 1, 0.\right) \quad (68)$$

Στην εξ. (68)  $f_c$  και  $\tau_b$  είναι σε MPa και  $\tau_b$  είναι η μέση τάση συνάφειας του εφελκόμενου οπλισμού κατά μήκος του διατμητικού ανοίγματος,  $L_s=M/V$ , μπορεί δε να υπολογισθεί ως:

$$\tau_b = \frac{\phi_L}{4L_s} f_y \quad (69)$$

Για τα 244 πειράματα που χρησιμοποίησαν οι Park and Ang (1985) για την ανάπτυξη του προσομοιώματός τους, η μέση τιμή του λόγου της  $\theta_y$  κατά το προσομοίωμα, που συμβολίζεται με  $\theta_{y,PA}$ , προς την πειραματική, ισούται με 1.0, ο δε συντελεστής μεταβλητότητας με 16.5%. Όπως θα δούμε όμως σε άλλη Ενότητα, για ένα σύνολο 517 πειραμάτων που εξετάζονται εδώ, ο λόγος της  $\theta_{y,PA}$  προς την πειραματική ξεπερνά σημαντικά τη μονάδα, ο δε συντελεστής μεταβλητότητας του λόγου αυτού φθάνει το 59%.

Πέραν από την τιμή της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ , που επιτρέπει τον υπολογισμό της ελαστικής δυσκαμψίας  $EI$  του προσομοιώματος απλού ή διπλού μέλους κατά τις εξ. (54), ή (56), το προσομοίωμα των Park and Ang (1985) περιλαμβάνει και πρόταση υπολογισμού της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ . Η  $\theta_u$  υπολογίζεται κατά τους Park and Ang (1985) σαν

$$\theta_{u,PA} = \mu_{\theta_u} \theta_{y,PA} \quad (70)$$

όπου  $\theta_{y,PA}$  η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή, κατά την εξ. (57) και τις συνοδευτικές της, εξ. (58)-(69), και  $\mu_{\theta_u}$  ο δείκτης πλαστιμότητας γωνίας στροφής χορδής (δηλ. μετακινήσεων του σημείου καμπής) στην αστοχία, όπου σαν αστοχία λαμβάνεται στην περίπτωση αυτή συμβατικά το σημείο εκείνο του φθίνοντα κλάδου της μονοτονικής καμπύλης  $M-\theta$ , όπου η τιμή της ροπής έχει μειωθεί στο 85%-90% της μέγιστης τιμής της,  $M_u$ .

Κατά το προσομοίωμα Park and Ang (1985), η τιμή του  $\mu_{\theta_u}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_{\theta,u} = e^{(65.4\rho_w+0.38)} \cdot \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_o}\right)^{21.8 \min(0.02, \rho_w) - 2.15} \geq 1.0 \quad (71)$$

όπου  $\rho_w$  είναι το ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων (όγκος συνδετήρων δια του όγκου του περισιφισμένου πυρήνα σκυροδέματος) και  $\varepsilon_p$  είναι η κύρια ανηγμένη βράχυνση του σκυροδέματος στη στάθμη του θλιβόμενου οπλισμού κατά τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα. Κατά τον κύκλο του Mohr η τιμή της  $\varepsilon_p$  ισούται με:

$$\varepsilon_p = 0.5(\varepsilon_{s2} + \sqrt{\varepsilon_{s2}^2 + \theta_s^2}) \quad (72)$$

όπου:

$$\varepsilon_{s2} = \varphi_y \left( \xi_y \frac{d_l}{h} \right) h \quad (73)$$

είναι η ανηγμένη βράχυνση του σκυροδέματος στη διαμήκη διεύθυνση στη στάθμη του θλιβόμενου οπλισμού κατά τη διαρροή του εφελκόμενου, και  $\theta_s$  είναι η αντίστοιχη γωνιακή (διατμητική) παραμόρφωση, που δίνεται από τις εξ. (65)-(67).

Στην εξ. (71)  $\varepsilon_o$  είναι η βράχυνση του απερίσφικτου σκυροδέματος στην κορυφή του διαγράμματος σ-ε ( $\varepsilon_o \approx 0.002$ ). Όταν το  $\varepsilon_{s2}$  πλησιάσει το  $1.5\varepsilon_o \approx 0.003$ , που είναι της ίδιας τάξης με την παραμόρφωση αστοχίας του απερίσφικτου σκυροδέματος,  $\varepsilon_{cu} \approx 0.004$ , η εξ. (71) δίνει τιμές του  $\mu_{\theta,u}$  μικρότερες του 1.0. Το φυσικό νόημα είναι ότι το σκυρόδεμα αστοχεί σε (λοξή) θλίψη προτού διαρρεύσει ο εφελκόμενος οπλισμός, οπότε και η κρίσιμη σε κάμψη διατομή του άκρου δεν διαθέτει πλαστιμότητα και αστοχεί προτού ακόμα διαρρεύσει.

Η εξ. (71), προέκυψε εμπειρικά με βάση 142 μονοτονικά πειράματα μέχρι την αστοχία, δοκιμίων με λόγο διάτμησης  $M/Vh = L_y/h$  μεταξύ 1.0 και 7.0, μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού  $\omega_1$  μεταξύ 0.05 και 0.5, ανηγμένο αξονικό φορτίο  $\nu$  μεταξύ 0 και 0.55 και θλιπτική αντοχή σκυροδέματος από 17 έως 35MPa. Γι' αυτά τα 142 πειράματα ο λόγος της  $\theta_u$  από τις εξ. (70)-(73) προς την πειραματική τιμή έχει μέση τιμή 1.0 και συντελεστή μεταβλητότητας 38%.

Επισημαίνεται ότι η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία που δίνεται από τις εξ. (70)-(73) περιλαμβάνει συμβολή και από τις ανελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις και από την ολίσθηση των ράβδων στη ζώνη αγκύρωσής τους.

Σε μία λίγο μεταγενέστερη εργασία, οι Park et al (1987) πρότειναν τον υπολογισμό της  $\theta_u$  απευθείας (δηλ. χωρίς την παρεμβολή της  $\theta_y$ ) ως εξής:

$$\theta_u = 0.0633 \left( \frac{M}{Vd} \right)^{0.93} \left[ \frac{\max(\rho_w, 0.004)}{\max(v, 0.05)} \right]^{0.48} \omega_1^{-0.27} f_c^{-0.15} \quad (74)$$

Η εξ. (74), με  $f_c$  σε MPa, προσαρμόστηκε εμπειρικά (μέσω ανάλυσης παλινδρόμησης) με τα πειραματικά αποτελέσματα μίας ελαφρά μεγαλύτερης βάσης δεδομένων. Για τα αποτελέσματα αυτά δίνει μέση τιμή του λόγου προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή ίση με 1.0 και συντελεστή μεταβλητότητας 48% (έναντι 38% του  $\mu_{\theta_u}$  της εξ. (71)), ο οποίος όμως περιλαμβάνει και την επιρροή της διασποράς στη  $\theta_y$ .

Με βάση τα αρχικά 142 πειράματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της εξ. (71), οι Park and Ang (1985) προτείνουν και την εξής σχέση για τη ροπή αστοχίας  $M_u$ :

$$\frac{M_u}{M_y} = (1.24 - 0.15\omega_1 - 0.5v) \quad (75)$$

Για τα 142 πειράματα η εξ. (75) δίνει μέση τιμή του λόγου προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή 1.0 και συντελεστή μεταβλητότητας 12%.

Εάν οι διατμητικές παραμορφώσεις δεν λαμβάνονται χωριστά στο προσομοίωμα, ούτε σαν ανελαστικές ούτε σαν ελαστικές, και επιπλέον δεν υπάρχει χωριστό μή-γραμμικό στροφικό ελατήριο στα άκρα του μέλους για την προσομοίωση της ολίσθησης των ράβδων στη ζώνη αγκύρωσής τους, τότε το προσομοίωμα συγκεντρωμένης ανελαστικότητας καλύπτει ταυτόχρονα και με τον ίδιο τρόπο όλες τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο μήκος διάτμησης και στην περιοχή αγκύρωσης των ράβδων. Αυτό διευκολύνει την έκφραση του λόγου κράτυνσης της διγραμμικής μονοτονικής καμπύλης  $M$ - $\theta$  συναρτήσει των ανωτέρω αποτελεσμάτων, ως εξής:

$$c = \frac{\frac{M_u}{M_y} - 1}{\frac{\theta_u}{\theta_y} - 1} \quad (76)$$

Η ανωτέρω σχέση αγνοεί το γεγονός ότι η παραμόρφωση αστοχίας,  $\theta_u$ , αναφέρεται όχι στην οριακή αντοχή  $M_u$ - $M_{\max}$  αλλά σε κάποιο σημείο του φθίνοντα κλάδου της μονοτονικής καμπύλης. Συνήθως όμως η διαφορά είναι μικρή. Στην ανωτέρω εξ. (76) οι

παραμορφώσεις αστοχίας και διαρροής περιλαμβάνουν τις επιρροές και της κάμψης, και της διάτμησης, και της ολίσθησης των ράβδων.

Αν στο προσομοίωμα του μέλους οι διατμητικές παραμορφώσεις περιλαμβάνονται χωριστά, ο υπολογισμός του λόγου κράτνσης δυσχεραίνεται από το γεγονός ότι δεν είναι γνωστό το μέγεθος της συμβολής των διατμητικών παραμορφώσεων στη  $\theta_u$ . Τότε, αν οι διατμητικές παραμορφώσεις θεωρούνται ότι παραμένουν ελαστικές μέχρι και την τελική αστοχία από κάμψη, τότε συμβάλλουν στη  $\theta_u$  κατά  $\theta_{y,sh}M_u/M_y$  και προκύπτει ότι ο λόγος κράτνσης της διγραμμικής μονοτονικής καμπύλης που αναφέρεται στους δύο άλλους μηχανισμούς (κάμψη και ολίσθηση ράβδων) ισούται με:

$$c = \frac{\frac{M_u}{M_y} - 1}{\mu_{\theta,uPA} - 1 + \left( \mu_{\theta,uPA} - \frac{M_u}{M_y} \right) \frac{\theta_{y,sh}}{\theta_{y,flex} + \theta_{y,slip}}} \quad (77)$$

Αν πάλι οι διατμητικές παραμορφώσεις θεωρούνται ότι καθορίζονται από την τέμνουσα με βάση διγραμμικό μονοτονικό νόμο και ότι η διαρροή σε διάτμηση συμβαίνει όταν  $M=M_y$ , προκύπτει ότι και οι δύο διγραμμικές μονοτονικές καμπύλες έχουν τον ίδιο λόγο κράτνσης, ο οποίος δίνεται από την προηγούμενη σχέση, εξ. (76). Βεβαίως τότε η διάκριση της ανελαστικής συμπεριφοράς σε διάτμηση από τις άλλες έχει νόημα (αντί της άθροισής της μαζί τους) μόνον αν οι κανόνες υστέρησης που ακολουθεί είναι διαφορετικοί.

#### 2.3.2.1.4. Προσομοιώματα απλού μέλους και συγκεντρωμένης ανελαστικότητας, χωρίς τον περιορισμό της αντισυμμετρικής κάμψης

Επειδή το προσομοίωμα συγκεντρωμένης ανελαστικότητας τύπου απλού μέλους είναι εξαιρετικά εύχρηστο και ευέλικτο και επιτρέπει την προσέγγιση της πειραματικής συμπεριφοράς καλλίτερα από τα περισσότερα άλλα προσομοιώματα για μονοαξονική κάμψη, έχουν γίνει προσπάθειες επέκτασή τους στις περιπτώσεις εκείνες που το σημείο καμπής δεν βρίσκεται (κοντά) στο μέσο του μήκους του μέλους.

Οι Suko and Adams (1971) πρότειναν να κατασκευάζεται η σχέση  $M-\theta$  καθενός από τα δύο άκρα, με βάση τη θέση του σημείου καμπής που προκύπτει για κάθε μέλος από μία αρχική γραμμική-ελαστική ανάλυση της κατασκευής (π.χ. από ισοδύναμη οριζόντια στατική φόρτιση).

Ο Otani (1974) κατασκεύασε το μητρώο ευκαμψίας του ανελαστικού στοιχείου δοκού θεωρώντας τα δύο τμήματά του εκατέρωθεν του τρέχοντος (και μεταβαλλόμενου κατά την απόκριση) σημείου καμπής του μέλους σαν μεμονωμένους προβόλους, πακτωμένους στα δύο άκρα της δοκού, και κατασκευάζοντας τις σχέσεις  $M-\theta$  του καθενός τους με ολοκλήρωση του διαγράμματος μεταβολής της καμπυλότητας  $\varphi$  κατά μήκος τους. Χρειάζονται βεβαίως επαναλήψεις σε κάθε βήμα της ανάλυσης της απόκρισης, ώστε το στιγμιαίο διάγραμμα ροπών κάμψης κατά μήκος του μέλους (που ορίζει και το σημείο καμπής πάνω σ' αυτό), να είναι συμβατό με τις σχέσεις  $M-\theta$  που χρησιμοποιούνται στα δύο άκρα. Υπάρχει εντούτοις σημαντική πιθανότητα αριθμητικής αστάθειας, εξ' αιτίας δραστικών μεταβολών του διαγράμματος ροπών από το ένα βήμα της ανάλυσης στο επόμενο (ιδίως αν αλλάζει πρόσημο η ροπή στο ένα μόνον άκρο). Για την αντιμετώπιση του ενδεχομένου αυτού, ο Otani (1974) πρότεινε τον περιορισμό του τμήματος του μήκους του μέλους μέσα στο οποίο θεωρείται ότι κινείται το σημείο καμπής, για το σκοπό του προσδιορισμού της στιγμιαίας σχέσης  $M-\theta$  στα άκρα του. Πρέπει να επισημανθεί πάντως ότι, με το να θεωρείται η ανελαστικότητα συγκεντρωμένη στα δύο ακραία στροφικά ελατήρια, η γωνία στροφής του κάθε ελατηρίου εξαρτάται μόνον από την τιμή της αντίστοιχης ροπής και από την τρέχουσα θέση του σημείου καμπής, ανεξάρτητα από την προηγούμενη ιστορία της φόρτισης. Έτσι ακόμα και αν ο υπολογισμός της δυσκαμψίας του κάθε ελατηρίου βασίζεται στην τρέχουσα θέση του σημείου καμπής, η στιγμιαία συμπεριφορά είναι η ίδια μ' αυτήν που θα είχαμε αν το σημείο καμπής βρισκόταν στη θέση αυτή από την αρχή της απόκρισης.

Οι Coelho and Carvalho (1990) πρότειναν έναν εναλλακτικό τρόπο κατασκευής του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας του προσομοιώματος απλού μέλους και συγκεντρωμένης ανελαστικότητας: Οι σχέσεις  $M-\theta_{pi}$  των στροφικών ελατηρίων στα άκρα του μέλους καθορίζονται από τις αντίστοιχες σχέσεις  $M-\varphi$  των ακραίων διατομών, με πολλαπλασιασμό των καμπυλοτήτων  $\varphi$  επί κάποιο εμπειρικό, αλλά σταθερό, μήκος πλαστικής άρθρωσης. Κατόπιν το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του μέλους δεν υπολογίζεται με αντιστροφή του αντίστοιχου μητρώου ευκαμψίας που προκύπτει από την άθροιση του μητρώου ευκαμψίας των επιμέρους στοιχείων του (μη-γραμμικών ελατηρίων στα άκρα και ελαστικού μέλους ενδιάμεσα), αλλά με συναρμολόγηση των μητρώων δυσκαμψίας των επιμέρους στοιχείων κατά την Άμεση Μέθοδο Δυσκαμψίας και στατική συμπύκνωση των ενδιάμεσων βαθμών ελευθερίας (δηλ. των γωνιών στροφής των κόμβων μεταξύ των ακραίων ελατηρίων και του ενδιάμεσου ελαστικού μέλους). Στις εμπειρικές εκφράσεις για το μήκος της πλαστικής άρθρωσης υπεισέρχεται συνήθως το μήκος διάτμησης στο αντίστοιχο άκρο του μέλους, το οποίο μπορεί να ληφθεί ίσο, είτε με το μισό του μήκους,

είτε με την απόσταση από το στιγμιαίο σημείο κάμψης. Στην περίπτωση όμως αυτή ισχύει ότι ελέγχθη στο τέλος της προηγούμενης παραγράφου για το προσομοίωμα Otani (1974).

### 2.3.3. Συμπεράσματα για τα προσομοιώματα μονοαξονικής κάμψης χωρίς αξονική δύναμη

Η σημερινή κατάσταση της γνώσης (State-of-the-Art) στον τομέα της προσομοίωσης της ανελαστικής συμπεριφοράς υπό ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη χωρίς αξονική δύναμη, μπορεί να θεωρηθεί σαν πολύ ικανοποιητική. Αυτό οφείλεται όχι τόσο στην ύπαρξη προσομοιωμάτων που λαμβάνουν υπόψη τη σταδιακή επέκταση της ανελαστικότητας καθώς και οποιοδήποτε διάγραμμα ροπών κάμψης κατά μήκος του μέλους, αλλά κυρίως στην ύπαρξη μεγάλης ποικιλίας εμπειρικών αλλά αριθμητικά ευσταθών νόμων, που συνδέουν τη ροπή με το αντίστοιχο μέγεθος παραμόρφωσης (καμπυλότητα ή γωνία στροφής) για οποιαδήποτε ιστορία της φόρτισης. Η ανάπτυξη αυτών των νόμων κατέστη δυνατή λόγω: α) της διαθεσιμότητας ενός πολύ μεγάλου αριθμού πειραμάτων επί λυγηρών μελών χωρίς αξονική δύναμη, που υπεβλήθησαν σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική κάμψη, και β) του μονοδιάστατου χαρακτήρα του προβλήματος (μία ανεξάρτητη μεταβλητή, δύναμη ή μετακίνηση, και μία εξηρημένη, αντίστοιχα μετακίνηση ή δύναμη). Αντίθετα, στις περιπτώσεις που αναφερόμεθα στα επόμενα, δηλ. στη μονοαξονική και στη διαξονική κάμψη με μεταβλητό αξονικό φορτίο, στα στοιχεία στα οποία καθοριστική είναι η διάτμηση και υπάρχει αλληλεπίδραση διατμητικών και ορθών εντατικών μεγεθών, κ.λ.π., η προσθήκη μίας ή περισσότερων ανεξαρτήτων και εξηρημένων μεταβλητών στο πρόβλημα αυξάνει κατά τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους τη δυσκολία της εμπειρικής προσαρμογής καμπυλών, καθώς και τον όγκο των πειραματικών αποτελεσμάτων που απαιτούνται για το σκοπό αυτό. Όμως τα πειραματικά αποτελέσματα που υπάρχουν γι' αυτές τις πιο περίπλοκες περιπτώσεις είναι λιγοστά, πράγμα που συμβάλλει στη μεγάλη υστέρηση της σημερινής κατάστασης της γνώσης από απόψεως προσομοίωσης, σε σχέση με αυτήν της μονοαξονικής κάμψης χωρίς αξονική δύναμη.

### 2.4. Προσομοιώματα για μονοαξονική κάμψη με ορθή δύναμη

Τα απλοποιημένα προσομοιώματα για δοκούς υπό μονοαξονική κάμψη που περιγράφηκαν στην Παρ. 2.3, έχουν εφαρμοσθεί ευρύτατα και σε υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα για ανάλυση στο επίπεδο (σε δύο διαστάσεις), ή ακόμα και στο χώρο



(σε τρεις), αν αγνοείται η μη-γραμμικότητα της συμπεριφοράς σε μία από τις δύο εγκάρσιες στον άξονα (δηλ. οριζόντιες) διευθύνσεις, και λαμβάνεται υπόψη ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Επί παραδείγματι, τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα προγράμματα μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης DRAIN-2D (Kanaan and Powell, 1973) και ANSR (Mondkar and Powell, 1975) περιλαμβάνουν τα προσομοιώματα συγκεντρωμένης ανελαστικότητας τύπου απλού ή διπλού μέλους, προς χρήση όχι μόνο για δοκούς αλλά και για υποστυλώματα. Η εφαρμογή των προσομοιωμάτων αυτών στις δοκούς και στα υποστυλώματα διαφέρει μόνον ως προς το ότι η μονοαξονική ροπή διαρροής στα άκρα των μελών για τα τελευταία, υπολογίζεται από διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής-αξονικής δύναμης (το οποίο έχει κατά κανόνα τυποποιημένη μορφή), με βάση την τιμή της αξονικής δύναμης λόγω κατακορύφων φορτίων. Με τον τρόπο όμως αυτό αγνοείται η σημαντική επιρροή της μεταβολής της αξονικής δύναμης κατά την απόκριση, επί της σχέσης ροπής-παραμόρφωσης του υποστυλώματος. Η επιρροή αυτή αναφέρεται όχι μόνο στην τιμή της ροπής διαρροής, αλλά και στη δυσκαμψία σε πρώτη φόρτιση, αποφόρτιση και επαναφόρτιση, καθώς και στη μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση.

Ενας άλλος παράγοντας που καθιστά τη χρήση του προσομοιώματος απλού μέλους και συγκεντρωμένης ανελαστικότητας κάπως αδόκιμη για τα κατακόρυφα στοιχεία, είναι ότι σ' αυτά το σημείο καμπής μετακινείται κατά την απόκριση από το μέσο του ύψους του υποστυλώματος. Αντίθετα με το τι συμβαίνει για τις δοκούς, κατά τη δυναμική απόκριση το σημείο καμπής κατακορύφων στοιχείων μπορεί να βρίσκεται κοντά σ' ένα από τα δύο άκρα, ή εκτός του μήκους του μέλους μεταξύ των ορόφων. Αυτό συμβαίνει στις φάσεις της απόκρισης όπου κυριαρχούν ανώτερες ιδιομορφές, αλλά ακόμη και όταν κυρίαρχη είναι η πρώτη ιδιομορφή αλλά το κατακόρυφο μέλος είναι πολύ πιο δύσκαμπτο από τα οριζόντια με τα οποία συνδέεται, ή πρόκειται για ανώτατους ή κατώτατους ορόφους. Έτσι δεν ισχύει τότε η υπόθεση της αντιμετρικής κάμψης που χρησιμοποιεί το προσομοίωμα απλού μέλους για τον καθορισμό της σχέσης ροπής-γωνίας στροφής των δύο στρωφικών ελατηρίων στα άκρα. Εξ' αιτίας αυτού του προβλήματος οι γενικεύσεις του προσομοιώματος απλού μέλους από τους Suko and Adams (1971) και Otani (1974) αναφέρονταν ειδικά σε υποστυλώματα. Για τον ίδιο λόγο οι Hsu (1974) και Takayanagi and Schnobrich (1976) ανέπτυξαν το προσομοίωμα των πολλών εν σειρά ελατηρίων για πολυόροφα τοιχώματα δυσκαμψίας. Γι' αυτά τα τελευταία οι Saatcioglu et al (1983, 1987) πρότειναν ένα στοιχείο τύπου απλού μέλους για ολόκληρο το τμήμα του τοιχώματος μεταξύ διαδοχικών πατωμάτων, με σημείο καμπής που προσδιορίζεται με βάση μία αρχική ελαστική ανάλυση για ισοδύναμη στατική φόρτιση. Αντίθετα οι Keshavarzian and Schnobrich (1985) τροποποίησαν για το σκοπό αυτό

το προσομοίωμα απλού μέλους κατά Soleimani et al (1979), το οποίο λαμβάνει κατ' αρχήν υπόψη την εξέλιξη της ανελαστικότητας κατά μήκος του μέλους, την τρέχουσα θέση του σημείου καμπής και την αλληλεπίδραση της ανελαστικότητας μεταξύ των δύο άκρων.

Επειδή η υπόθεση της αντιμετρικής κάμψης συνήθως δεν πληρούται στα κατακόρυφα στοιχεία, είναι πιθανόν προτιμότερο να χρησιμοποιείται σ' αυτά, αντί ενός προσομοιώματος απλού μέλους που στηρίζεται στην υπόθεση αυτή και αγνοεί τη διαφορά των ροπών στα δύο άκρα του μέλους, το προσομοίωμα διπλού μέλους, το οποίο αντιμετωπίζει όχι μόνο ροπές με διαφορετικό μέγεθος στα δύο άκρα αλλά και την τυχόν ομόσημη κάμψη κατά μήκος του μέλους. Αν το κατακόρυφο στοιχείο υπόκειται σε ένα μόνο μεγάλο ανελαστικό κύκλο στη διάρκεια της απόκρισης, η αυξημένη απορρόφηση ενέργειας του προσομοιώματος διπλού μέλους πιθανόν δεν είναι πρόβλημα.

Τα προσομοιώματα ινών που περιγράφησαν στην Ενότητα 2.2, λαμβάνουν κατ' αρχήν υπόψη την επιρροή της μεταβολής του αξονικού φορτίου στην ανελαστική καμπτική συμπεριφορά της διατομής, και επομένως κατ' επέκταση και σ' αυτήν του μέλους. Δεν ισχύει το ίδιο όμως και στις εφαρμογές των απλοποιημένων προσομοιωμάτων της μονοαξονικής κάμψης που αναφέρθηκαν ανωτέρω για κατακόρυφα στοιχεία, ιδίως τοιχώματα. Για το λόγο αυτό, σε ορισμένες από τις εφαρμογές αυτές έγινε σοβαρή προσπάθεια να συμπεριληφθεί η επιρροή της μεταβολής της αξονικής δύναμης, έστω και κατά προσεγγιστικό τρόπο. Επί παραδείγματι, στο προσομοίωμα που πρότειναν οι Saatcioglu et al (1983, 1987) για τα τοιχώματα, περιέλαβαν μία σειρά από υστερητικές σχέσεις ροπής  $M$ -γωνίας στροφής  $\theta$  κατά το τροποποιημένο προσομοίωμα Takeda, την κάθε μία για διαφορετική τιμή της αξονικής δύναμης  $N$  (Σχ. 2.21). Οι σχέσεις αυτές έχουν όλες την ίδια αρχική (ελαστική) δυσκαμψία και την ίδια μεταδιαρροϊκή δυσκαμψία σε μονοτονική φόρτιση, αλλά απλώς η ροπή διαρροής μεταβάλλεται ανάλογα με την τρέχουσα τιμή της αξονικής δύναμης  $N$ . Έτσι, αφού συμβεί η διαρροή, η αρχική φόρτιση, η αποφόρτιση και η επαναφόρτιση ακολουθούν την καμπύλη που αντιστοιχεί στην τρέχουσα τιμή της  $N$ . Η μεταβολή της τιμής της  $N$  κατά την απόκριση αντιμετωπίζεται με μετάβαση από μία καμπύλη  $M$ - $\theta$  σε άλλη.

Οι Keshavarzian and Schnobrich (1985) επέκτειναν ως εξής το προσομοίωμα κατανεμημένης ανελαστικότητας των Soleimani et al (1979), ώστε να συμπεριλάβει τη μεταβολή της  $N$ : Κατασκευάστηκε μία σειρά από διγραμμικές μονοτονικές σχέσεις ροπής ( $M$ ) - καμπυλότητας ( $\varphi$ ), για διάφορες τιμές της  $N$ , και συμπληρώθηκαν με τους κανόνες του τροποποιημένου προσομοιώματος Takeda. Η ροπή κάμψης  $M$  θεωρήθηκε συνάρτηση της  $\varphi$  και  $N$ :  $M=M(\varphi, N)$  και η αξονική δύναμη  $N$  θεωρήθηκε συνάρτηση της μέσης αξονικής

παραμόρφωσης της διατομής,  $\varepsilon_0$ :  $N=N(\varepsilon_0)$ . Αυτό επιτρέπει την κατασκευή σχέσεων δυσκαμψίας που εξαρτώνται από την αξονική δύναμη  $N$ , με διαφορίση της σχέσης  $M=M(\varphi, N)$  και χρήση των μερικών παραγώγων της ροπής  $M$  ως προς  $\varphi$  και  $N$  στις τρέχουσες τιμές των  $\varphi$  και  $N$  (Σχ. 2.22).

Το προγενέστερο προσομοίωμα των Takayanagi and Schnobrich (1976) λαμβάνει υπόψη πληρέστερα και καλλίτερα την επιρροή της μεταβολής της  $N$  στη συμπεριφορά: Κατασκευάζονται οι συναρτήσεις  $M=M(\varphi, N)$  και  $N=N(\varphi, \varepsilon_0)$  για τη διατομή του μέλους και διαφορίζονται ως προς  $\varphi$  και  $N$  η πρώτη και ως προς  $\varphi$  και  $\varepsilon_0$  η δεύτερη, ώστε να προκύψει τελικά η μητρική σχέση μεταξύ  $[dM \ dN]^T$  και  $[d\varphi \ d\varepsilon_0]^T$ . Το σχετικό εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας είναι ασύμμετρο, οπότε απαιτούνται κάποιοι αλγεβρικοί μετασχηματισμοί για τη μετατροπή του σε μία περίπου ισοδύναμη διαγώνια μορφή, με διαγώνιους όρους τις ενεργές καμπτικές και αξονικές δυσκαμψίες  $dM/d\varphi$  και  $dN/d\varepsilon_0$ , που είναι συνάρτηση των τιμών των  $\partial M/\partial\varphi$ ,  $\partial M/\partial N$ ,  $\partial N/\partial\varphi$  και  $\partial N/\partial\varepsilon_0$ , στις τρέχουσες τιμές των  $N$ ,  $\varphi$ ,  $\varepsilon_0$  και  $\varphi$  αντίστοιχα.

Τα ανωτέρω προσομοιώματα μελών, που λαμβάνουν υπόψη, έστω προσεγγιστικά, την επιρροή της μεταβολής της αξονικής δύναμης  $N$ , εφαρμόστηκαν για τη μελέτη της μη-γραμμικής δυναμικής απόκρισης επιπέδων πλαισίων και συζευγμένων τοιχωμάτων. Οι εφαρμογές αυτές έδειξαν σημαντική επιρροή της μεταβολής της  $N$ , με αύξηση της τιμής της να αυξάνει την καμπτική αντοχή και δυσκαμψία, και μείωση να τις μειώνει. Λόγω της επιρροής αυτής της  $N$  στη δυσκαμψία, οι απαιτούμενες ανελαστικές παραμορφώσεις αυξάνονται σε κάθε στιγμή της απόκρισης στα περισσότερα θλιβόμενα στοιχεία και μειώνονται στα άλλα. Από την άλλη πλευρά, η διαθέσιμη τιμή των ανελαστικών παραμορφώσεων μειώνεται με αύξηση της αξονικής δύναμης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει, σε συνδυασμό με την αύξηση των απαιτούμενων ανελαστικών παραμορφώσεων στα ίδια στοιχεία, σε αστοχία τους κατά τη στιγμή της μέγιστης αξονικής θλίψης.

## 2.5. Προσομοιώματα διαξονικής κάμψης με ορθή δύναμη

Οι μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης κατασκευών, συνήθως γίνονται στο επίπεδο, χωριστά στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Τέτοιες όμως αναλύσεις δεν συλλαμβάνουν ορισμένα πολύ σημαντικά στοιχεία της πραγματικής απόκρισης στο χώρο, όπως η τυχόν στροφική απόκριση λόγω ασυμμετριών στην κάτοψη, η σύνθετη αλληλεπίδραση της συμπεριφοράς στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις του υποστυλώματος, κ.α. Η εφαρμογή μη-γραμμικών δυναμικών αναλύσεων στο χώρο είναι

ακόμα περιορισμένη, όχι μόνο λόγω των υψηλότερων απαιτήσεων της σε χρόνο και μνήμη Η/Υ, αλλά επίσης λόγω της έλλειψης σχετικά απλών αλλά ταυτοχρόνως αξιόπιστων προσομοιωμάτων, για την σύνθετη και περίπλοκη ανελαστική συμπεριφορά των υποστυλωμάτων υπό ταυτόχρονη μεταβολή των δύο συνιστωσών της ροπής κάμψης και της αξονικής δύναμης. Βεβαίως τα προσομοιώματα ινών είναι σε θέση να περιγράψουν ορθά τη συμπεριφορά αυτή. Όμως τα υπολογιστικά τους προβλήματα που αναφέρθηκαν στην Υποενότητα 2.2.5, εμποδίζουν ακόμη την πλήρη αξιοποίηση των προσομοιωμάτων αυτών σε τρισδιάστατες εφαρμογές.

Η προσθήκη μιας ακόμη μεταβλητής στο πρόβλημα της κάμψης, δηλ. της ροπής κάμψης και των καμπτικών παραμορφώσεων στη δεύτερη εγκάρσια διεύθυνση του υποστυλώματος, το κάνει πιο σύνθετο κατά μία τάξη μεγέθους και αυξάνει αντίστοιχα τη δυσκολία ανάπτυξης κατάλληλων απλών προσομοιωμάτων. Είναι σχεδόν αδύνατη η ανάπτυξη περίπλοκων εμπειρικών κανόνων σε τρεις διαστάσεις, που να αναπαράγουν την πειραματική συμπεριφορά τόσο καλά όσο αυτά που περιγράφησαν στην Ενότητα 2.3.1 για τη μονοαξονική κάμψη. Επιπλέον τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία δεν είναι ακόμη επαρκή για την ανάπτυξη ενός πλήρους τρισδιάστατου προσομοιώματος της ανελαστικής συμπεριφοράς υπό ανακυκλιζόμενη τρισδιάστατη ένταση. Σαν αποτέλεσμα, η σημερινή κατάσταση της γνώσης των προσομοιωμάτων μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό γενικευμένη τρισδιάστατη ένταση είναι πολύ πίσω αυτής των δισδιάστατων.

Η βασική διαφορά των προσομοιωμάτων της διαξονικής κάμψης με ή χωρίς μεταβολή της αξονικής δύναμης και αυτών της μονοαξονικής υπό σταθερή (ή μηδενική) αξονική δύναμη, έγκειται στους καταστατικούς νόμους μεταξύ των γενικευμένων εντατικών μεγεθών και των αντιστοίχων παραμορφώσεων σε επίπεδο διατομής ή μέλους. Το θέμα της ολοκλήρωσης της ευκαμψίας ή της δυσκαμψίας κατά μήκος του μέλους (προσομοιώματα κατανεμημένης ή συγκεντρωμένης ανελαστικότητας) παραμένει ποιοτικά το ίδιο, με την απλή προσθήκη μιας διάστασης στο πρόβλημα. Έτσι η παρούσα Ενότητα εστιάζεται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς γενικευμένης έντασης-παραμόρφωσης σε επίπεδο διατομής.

Τα πρώτα προσομοιώματα για τη διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη είναι τα λεγόμενα “διαξονικά διγραμμικά”, που αποτελούν άμεση εφαρμογή της Κλασικής Θεωρίας Πλαστικότητας με τον κινηματικό κανόνα κράτυνσης κατά Prager, στο διδιάστατο χώρο  $M_y$ - $M_z$  (ή  $V_y$ - $V_z$ , αν χρησιμοποιούνται οι τέμνουσες του υποστυλώματος, αντί των ροπών κάμψης του, σαν γενικευμένη ένταση), για σταθερή αξονική δύναμη  $N$  (Padilla-Mora and Schnobrich, 1974, Pecknold, 1974).

Αυτά τα πρώϊμα προσομοιώματα διαθέτουν μία “επιφάνεια διαρροής” στο χώρο  $M_y$ - $M_z$  (ή  $V_y$ - $V_z$ ), με ελλειπτικό συνήθως σχήμα. Οποιοδήποτε σημείο μέσα στο εσωτερικό της “επιφάνειας διαρροής” αντιστοιχεί σε ελαστική συμπεριφορά. Η διαρροή αρχίζει όταν το σημείο που καθορίζει την τρέχουσα τιμή της έντασης  $S$ , φθάσει την επιφάνεια διαρροής  $f(S)=0$ . Στο εξής, αν το διάνυσμα του διαφορικού της έντασης,  $dS$ , (ή, ισοδύναμα η προβολή του στην κάθετο της επιφανείας διαρροής στο τρέχον σημείο,  $S$ , της έντασης) έχει φορά προς το εξωτερικό της επιφάνειας αυτής, έχομε “ανελαστική φόρτιση”, που σημαίνει ότι, επιπλέον των ελαστικών διαφορικών παραμορφώσεων, έχομε και ανελαστικές. Οι τελευταίες δίνονται από τη διαφορική σχέση ευκαμψίας. Η σχέση αυτή βασίζεται:

α) Στον “κανόνα καθετότητας”, σύμφωνα με τον οποίο, για να ισχύει η αρχή της ευστάθειας κατά Ducker, οι διαφορικές ανελαστικές παραμορφώσεις πρέπει να έχουν τη διεύθυνση της καθέτου στην “επιφάνεια διαρροής” στο τρέχον σημείο της έντασης,  $S$ .

β) Στην απαίτηση ότι κατά την ανελαστική φόρτιση το τρέχον σημείο της έντασης  $S$  παραμένει συνεχώς πάνω στην “επιφάνεια διαρροής” (“συνθήκη συνέπειας”), που σημαίνει ότι η τελευταία μεταβάλλεται παρακολουθώντας την κίνηση του  $S$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μεταβολή αυτή συνίσταται σε μετάθεση κατά τη διεύθυνση της καθέτου στο τρέχον σημείο της έντασης, χωρίς αλλαγή σχήματος, διαστάσεων ή προσανατολισμού (κανόνας “κινηματικής κράτυνσης” κατά Prager). Υπό τις προϋποθέσεις αυτές οι διαφορικές σχέσεις ευκαμψίας ή δυσκαμψίας είναι πανομοιότυπες με τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων της κλασικής Θεωρίας Πλαστικότητας, με κράτυνση, όπου οι ροπές (ή οι τέμνουσες) και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις παίζουν το ρόλο των γενικευμένων τάσεων  $S$  και παραμορφώσεων  $\epsilon$ :

$$d\epsilon = \left[ K_{el}^{-1} + \frac{\frac{\partial f}{\partial S} \frac{\partial f}{\partial S^T}}{H \frac{\partial f}{\partial S^T} \frac{\partial f}{\partial S}} \right] dS \quad (78)$$

$$dS = \left[ K_{el} - \frac{K_{el} \frac{\partial f}{\partial S} \frac{\partial f}{\partial S^T} K_{el}}{H \frac{\partial f}{\partial S^T} \frac{\partial f}{\partial S} + \frac{\partial f}{\partial S^T} K_{el} \frac{\partial f}{\partial S}} \right] d\epsilon \quad (79)$$

Η γενικευμένη σχέση ευκαμψίας, εξ. (78), ή δυσκαμψίας, εξ. (79) χρησιμοποιεί ένα “Μέτρο Πλαστικότητας”  $H$ , με σταθερή κατά κανόνα τιμή (γραμμική κράτυνση). Αν η συμπεριφορά είναι ελαστική-πλήρως πλαστική, το  $H$  ισούται με μηδέν και η επιφάνεια διαρροής δεν μετακινείται κατά τη διάρκεια της ανελαστικής παραμόρφωσης.

Εάν το διάνυσμα της διαφορικής έντασης,  $dS$ , έχει φορά προς το εσωτερικό της επιφάνειας διαρροής, έχουμε “αποφόρτιση” και ισχύουν οι ελαστικές σχέσεις ευκαμψίας ή δυσκαμψίας. Κατά την αποφόρτιση η επιφάνεια διαρροής δεν μετακινείται στο χώρο των  $S$ , μέχρις ότου το σημείο της τρέχουσας έντασης  $S$  τη φθάσει ξανά, στην ίδια ή σε διαφορετική θέση. Εάν τότε το  $dS$  έχει φορά προς τα έξω, αρχίζει νέος κύκλος ανελαστικής παραμόρφωσης.

Σε μονοαξονική ένταση το “διγραμμικό-διαξονικό” προσομοίωμα εκφυλίζεται σε διγραμμική σχέση  $M$ -φ ή  $M$ -θ, με κλάδους αποφόρτισης και επαναφόρτισης παράλληλους στους δύο κλάδους της μονοτονικής καμπύλης.

Τα αποτελέσματα του “διγραμμικού-διαξονικού” προσομοιώματος είναι ικανοποιητικά μόνο για μονοτονική οιονεί-αναλογική φόρτιση. Για ανακυκλιζόμενη ένταση παράγει σταθερούς διγραμμικούς βρόχους υστέρησης, με αντοχή και δυσκαμψία που δεν μειώνονται κατά την ανακύκλιση. Το πλάτος των βρόχων αυτών είναι υπερβολικά μεγάλο, οπότε υπερτιμάται σημαντικά η ποσότητα ενέργειας που απορροφάται. Αυτό φαίνεται και από τη σύγκριση των προβλέψεων, που συμβολίζονται με BL στο Σχ. 2.23, με τους αντίστοιχους πειραματικούς βρόχους (Lai, 1987).

Οι Tseng and Penzien (1975) περιέλαβαν την επιρροή της αξονικής δύναμης  $N$  στο διγραμμικό διαξονικό τους προσομοίωμα για υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος, με την εισαγωγή “επιφάνειας διαρροής” στο χώρο  $M_y$ - $M_z$ - $N$ . Η επιφάνεια αυτή είναι ελλειπτική σε επίπεδα με σταθερό  $N$ , και οι μεσημβρινές τομές της μέσα σε επίπεδα δια του άξονα των  $N$  περιγράφονται από συναρτήσεις που είναι γραμμικές ως προς  $(M_y^2 + M_z^2)^{1/2}$ , ενώ ως προς  $N$  έχουν τη μορφή πλήρους τριτοβάθμιου πολυωνύμου. Δεν λαμβάνεται υπόψη κράτυνση της επιφάνειας διαρροής, γεγονός που σημαίνει ελαστική-πλήρως πλαστική συμπεριφορά. Από οποιαδήποτε άλλη άποψη το προσομοίωμα αυτό ακολουθεί τις γενικές γραμμές που αναλύθηκαν παραπάνω.

Το τριγραμμικό “διαξονικό” προσομοίωμα αποτελεί γενίκευση του “διγραμμικού διαξονικού” με βάση την πολυεπιφανειακή Θεωρία Πλαστιμότητας κατά Mroz. Στη Θεωρία αυτή η μία και μοναδική “επιφάνεια διαρροής” αντικαθίσταται από  $m$  ( $>1$ ) επιφάνειες διαρροής, που είναι γεωμετρικά όμοιες και περικλείουν η μία την άλλη. Κάθε μία απ’ αυτές συνδέεται με ένα διαφορετικό “Μέτρο Πλαστικότητας”  $H_i$  ( $i=1, m$ ).

Το τριγραμμικό προσομοίωμα των Takizawa and Aoyama (1976) έχει  $m=2$  επιφάνειες διαρροής, η εσωτερική από τις οποίες καλείται “επιφάνεια ρηγμάτωσης” και η εξωτερική “επιφάνεια διαρροής” (Σχ. 2.24). Στο διδιάστατο χώρο  $M_y-M_z$  οι επιφάνειες αυτές είναι ελλείψεις, μπορεί δε να είναι αρχικά έκκεντρες η μία ως προς την άλλη, λόγω ασυμμετρίας της διατομής ή λόγω μη-μηδενικής αρχικής ροπής (π.χ. λόγω ροπών από κατακόρυφα φορτία).

Όσο το σημείο  $S$  της έντασης βρίσκεται στο εσωτερικό της “επιφάνειας ρηγμάτωσης”, η συμπεριφορά είναι ελαστική. Όταν το  $S$  φθάσει την επιφάνεια αυτή, αρχίζουν οι ανελαστικές παραμορφώσεις, σύμφωνα με τη σχέση ευκαμψίας της κλασικής Θεωρίας Πλαστικότητας, εξ. (78), στην οποία χρησιμοποιείται το Μέτρο Πλαστικότητας  $H_1$  που συνδέεται με την “επιφάνεια ρηγμάτωσης”. Εφόσον συνεχίζεται η “φόρτιση”, δηλ. εφόσον το  $dS$  κατευθύνεται προς το εξωτερικό της πρώτης αυτής επιφάνειας, η τελευταία παρακολουθεί την κίνηση του σημείου  $S$  και υφίσταται αντίστοιχη μετάθεση (χωρίς στροφή) στο διδιάστατο χώρο  $M_y-M_z$ . Αν τυχόν το  $S$  φθάσει και τη δεύτερη επιφάνεια, αυτήν της “διαρροής”, την παρασύρει κι αυτήν στην κίνησή του, και στη σχέση ευκαμψίας, εξ. (78), χρησιμοποιείται πλέον το δεύτερο “Μέτρο Πλαστικότητας”,  $H_2$ , δηλ. αυτό που συνδέεται με την “επιφάνεια διαρροής”. Για την αποφυγή αμφιβολιών για το πότε έχουμε αποφόρτιση και για το ποιο από τα δύο Μέτρα Πλαστικότητας ισχύει, αν το σημείο  $S$  έχει παρασύρει ήδη και τις δύο επιφάνειες, πρέπει αυτές να έχουν στο τρέχον σημείο κοινή εφαπτόμενη. Για να συμβαίνει αυτό πρέπει η μετάθεση της εσωτερικής επιφάνειας (της “επιφάνειας ρηγμάτωσης”) μέχρι να παρασυρθεί και η εξωτερική να γίνεται παράλληλα στην ευθεία που ενώνει το σημείο  $S$  με εκείνο το σημείο της εξωτερικής επιφάνειας όπου η εφαπτομένη είναι παράλληλη σ’ αυτήν της εσωτερικής στο τρέχον σημείο  $S$  (Σχ. 2.24). Έτσι η επικείμενη επαφή των δύο επιφανειών θα γίνει σ’ αυτό ακριβώς το σημείο, όπου και θα έχουν κοινή κάθετο.

Αν η διεύθυνση του  $dS$  γίνει τέτοια ώστε η προβολή του στην (κοινή) κάθετο της επιφάνειας (ή των επιφανειών) διαρροής που το  $S$  έχει ήδη παρασύρει να είναι προς το εσωτερικό της (ή τους), τότε έχουμε αποφόρτιση. Η αποφόρτιση λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό της πρώτης “επιφάνειας διαρροής” και είναι πλήρως ελαστική. Στη διάρκεια της και οι δύο “επιφάνειες διαρροής” δεν μετακινούνται. Αν το  $S$  φθάσει την πρώτη “επιφάνεια διαρροής” σε κάποια άλλη θέση, αρχίζει νέα διαδικασία φόρτισης, με το Μέτρο Πλαστικότητας  $H_1$  της πρώτης επιφάνειας να ισχύει, και την επιφάνεια αυτή να παρασύρεται, προς την κατεύθυνση του σημείου όπου η δεύτερη επιφάνεια (που εν τω μεταξύ παραμένει

ακίνητη στη θέση που ήταν όταν άρχισε η αποφόρτιση) έχει παράλληλη εφαπτόμενη με αυτήν της πρώτης στο S, κ.ο.κ., αφού το S φθάσει και τη δεύτερη επιφάνεια.

Στην ειδική περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης, το πολυεπιφανειακό προσομοίωμα δίνει καμπύλη ροπής-παραμόρφωσης που αποτελείται από  $m+1$  ευθύγραμμα τμήματα (τριγωναμική στο προσομοίωμα των Takizawa and Aoyama, 1976), τόσο σε μονοτονική φόρτιση όσο και στην αποφόρτιση-επαναφόρτιση. Αν το μέγεθος των “επιφανειών διαρροής” και/ή τα αντίστοιχα Μέτρα Πλαστικότητας  $H_i$  δεν μεταβάλλονται κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, οι κλάδοι της αποφόρτισης και της επαναφόρτισης είναι όμοιοι προς τη μονοτονική καμπύλη, με μεγέθυνση κατά 2.0 και ως προς τους δύο άξονες (κανόνας Masing). Με τον τρόπο αυτό αναπαράγεται το φαινόμενο Bauschinger, αλλά οι βρόχοι υστέρησης είναι πολύ ευρείς και η απορρόφηση ενέργειας πολύ μεγάλη. Για να διορθωθεί το πρόβλημα αυτό και για να εισαχθεί εξασθένηση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση, οι επιφάνειες διαρροής μπορεί να ληφθούν ότι συρρικνώνονται και/ή τα Μέτρα Πλαστικότητας μπορεί να ληφθούν να μειώνονται κατά την ανακύκλιση της παραμόρφωσης.

Ετσι, αν στο προσομοίωμα των Takizawa and Aoyama (1976) τα Μέτρα Πλαστικότητας για την αποφόρτιση ληφθούν σαν φθίνουσες συναρτήσεις των ανελαστικών παραμορφώσεων σε κάθε μία από τις δύο διευθύνσεις της κάμψης, και αν η εσωτερική επιφάνεια (αυτή της ρηγμάτωσης) έχει διαστάσεις ίσες με το  $1/3$  αυτών της εξωτερικής (της “επιφανείας διαρροής”), και επιπλέον το συνολικό Μέτρο για ανελαστική παραμόρφωση ληφθεί ίσο με τα  $2/3$  του αρχικού Μέρους Ελαστικότητας (που σημαίνει ότι το συνολικό εφαπτομενικό Μέτρο στο διάστημα μεταξύ των δύο επιφανειών ισούται με τα  $2/5$  του αρχικού Μέρους Ελαστικότητας), τότε οι προβλέψεις του προσομοιώματος για μονοαξονική ή διαξονική κάμψη με σταθερή αξονική δύναμη είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με την πειραματική συμπεριφορά.. Στην εφαρμογή του προσομοιώματος στην οποία αναφέρεται το Σχ. 2.23(c), το Μέτρο Πλαστικότητας  $H_2$  που συνδέεται με την εξωτερική επιφάνεια (αυτήν της διαρροής) ελήφθη ίσο με μηδέν, που σημαίνει ότι μετά τη διαρροή η συμπεριφορά είναι πλήρως πλαστική και η εξωτερική επιφάνεια παραμένει σταθερή σε θέση και σε μέγεθος.

Οι Chen and Powell (1982) ανέπτυξαν μια παραλλαγή του προσομοιώματος με τις δύο “επιφάνειες διαρροής” για μέλη οπλισμένου σκυροδέματος στο χώρο, και το εισήγαγαν στο γενικό πρόγραμμα μή-γραμμικής ανάλυσης στο χώρο ANSR, που αναπτύχθηκε αρχικά από τους Mondkar and Powell (1975). Το προσομοίωμα αυτό αποτελεί επέκταση του αντίστοιχου των Takizawa and Aoyama (1982) ως προς τα εξής:

- α) Οι δύο επιφάνειες διαρροής ορίζονται στον τετραδιάστατο χώρο  $M_y$ - $M_z$ - $T$ - $N$ . Υπάρχουν πέντε διαφορετικές μορφές επιφανειών διαρροής, οι τέσσερις από τις οποίες είναι



ελλειψοειδείς στο χώρο  $M_y$ - $M_z$ - $T$ . Μία απ' αυτές είναι ελλειψοειδής και στο χώρο  $M_y$ - $M_z$ - $T$ - $N$  και μία άλλη είναι παραβολή μέσα στα επίπεδα  $M_y$ - $N$ ,  $M_z$ - $N$  και  $T$ - $N$ . Αυτό δίνει σημαντική δυνατότητα επιλογής στο χρήστη, προκειμένου να προσαρμόσει την επιφάνεια διαρροής στις απαιτήσεις των διατομών οπλισμένου σκυροδέματος που έχει.

- β) Το τριγωναμικό προσομοίωμα προκύπτει με εισαγωγή δύο σημειακών (υπο)αρθρώσεων σε κάθε άκρο του μέλους: μία για τη ρηγμάτωση και μία για τη διαρροή (Σχ. 2.25). Οι επιφάνειες διαρροής του κάθε άκρου πρέπει να ανήκουν στον ίδιο τύπο από τους πέντε διαθέσιμους, αλλά δεν χρειάζεται να είναι γεωμετρικά όμοιες. Κάθε επιφάνεια διαρροής της (υπο)άρθρωσης συνδέεται με τέσσερα Μέτρα Πλαστικότητας,  $H_{pi}$  ( $i=1, 4$ ), ένα για κάθε εντατικό μέγεθος. Με τον τρόπο αυτό ο συνδυασμός των δύο σημειακών (υπο)αρθρώσεων παράγει τριγωναμικές μονοαξονικές καμπύλες έντασης-παραμόρφωσης σε μονοτονική φόρτιση (Σχ. 2.26). Οι παραμορφώσεις  $w_1$ ,  $w_2$  και  $w_3$  όπου αυτές οι μονοαξονικές μονοτονικές καμπύλες αλλάζουν κλίση, πρέπει να έχουν την ίδια αναλογία,  $w_1:w_2:w_3$ , και για τα τέσσερα εντατικά μεγέθη.

Για τον προσδιορισμό των Μέτρων Πλαστικότητας  $H_{pi}$  των σημειακών (υπο)αρθρώσεων, για την κάμψη, ο χρήστης οφείλει να κάνει κάποια υπόθεση για την κατανομή των ροπών στο μήκος του μέλους. Οι επιλογές είναι τρεις:

- i. Σταθερή ροπή κατά μήκος (για τις περιπτώσεις που το μέλος διακριτοποιείται σε πολλά επιμέρους στοιχεία μικρού μήκους).
- ii. Αντιμετρικό διάγραμμα ροπών.
- iii. Οιαδήποτε κατανομή των ροπών κατά μήκος, για την οποία όμως ο ίδιος ο χρήστης υπολογίζει τα Μέτρα Πλαστικότητας,  $H_{pi}$ .

Σημειώνεται ότι, παρά την ευελιξία που προσφέρουν αυτές οι τρεις επιλογές, και που δίνει τη δυνατότητα στο προσομοίωμα να μιμηθεί χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων κατανεμημένης ανελαστικότητας ή πολλών ελατηρίων εν σειρά, το προσομοίωμα δεν παύει να είναι συγκεντρωμένης ανελαστικότητας, καθώς υποθέτει σταθερή κατανομή ροπών κατά μήκος του μέλους, αγνοεί την αλληλεπίδραση της ανελαστικής συμπεριφοράς μεταξύ των δύο άκρων και δεν μπορεί να παρακολουθήσει τη σταδιακή επέκταση της ανελαστικότητας κατά μήκος του μέλους.

- γ) Αφού παρασυρθεί από την κίνηση του σημείου  $S$  της έντασης, η επιφάνεια διαρροής  $j$  παράγει τη δική της ανελαστική παραμόρφωση, η οποία έχει την κατεύθυνση της καθέτου  $\sigma'$  αυτήν στο  $S$ . Η παραμόρφωση αυτή προκύπτει από τη διαφορική σχέση ευκαμψίας της Κλασικής Θεωρίας Πλαστικότητας, με χρήση  $\sigma'$  αυτήν, αντί ενός κοινού Μέτρου Πλαστικότητας  $H_{pj}$  για όλες τις συνιστώσες της παραμόρφωσης, ενός διαγωνίου

μητρώου διαστάσεων  $4 \times 4$ ,  $\mathbf{H}_{pj}$ , στοιχεία του οποίου είναι τα Μέτρα Πλαστικότητας  $H_{pji}$  ( $i=1, 4$ ) της (υπο)άρθρωσης  $j$  στις τέσσερις διευθύνσεις  $i$  του χώρου  $M_y$ - $M_z$ - $T$ - $N$ :

$$d\epsilon_j = \frac{\frac{\partial f}{\partial \mathbf{S}} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{S}^T}}{\frac{\partial f}{\partial \mathbf{S}^T} \mathbf{H}_{pj} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{S}}} d\mathbf{S} \quad (80)$$

Καθώς οι “επιφάνειες διαρροής” των δύο (υπο)αρθρώσεων σε κάθε άκρο δεν είναι γεωμετρικά όμοιες, όταν παρασύρονται από το τρέχον σημείο  $\mathbf{S}$  της έντασης μπορεί να έχουν διαφορετική κάθετο στο σημείο αυτό, και μπορεί ακόμα και να αλληλοτέμνονται. Η διαφορετική κάθετος δεν δημιουργεί πρόβλημα, καθώς τα διανύσματα των διαφορικών ανελαστικών παραμορφώσεων που προκύπτουν από τις διάφορες “επιφάνειες διαρροής” προστίθενται (δηλ. επαλληλίζονται τα εφαπτομενικά μητρώα ευκαμψίας τους). Ομως η ενδεχόμενη αλληλοτομία των επιφανειών διαρροής μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην αποφόρτιση, τα οποία αντιμετωπίζονται με ειδικούς κανόνες.

- δ) Σε κάθε υποάρθρωση τα Μέτρα Πλαστικότητας για την αποφόρτιση και την επαναφόρτιση στις δύο διευθύνσεις της κάμψης  $M_y$  και  $M_z$  είναι φθίνουσες συναρτήσεις της μέγιστης κατ’ απόλυτη τιμή προγενέστερης ανελαστικής καμπτικής παραμόρφωσης στην αντίστοιχη διεύθυνση,  $y$  ή  $z$ . Υπάρχουν ειδικοί κανόνες για μικρούς κύκλους αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Δίνονται οδηγίες για την προσαρμογή εμπειρικών καμπυλών στην εξάρτηση των Μέτρων Πλαστικότητας από τις μέγιστες προγενέστερες τιμές των παραμορφώσεων. Ακολουθώντας τις οδηγίες αυτές για τη σταδιακή μείωση των Μέτρων Πλαστικότητας, είναι εφικτή η επίτευξη καλής συμφωνίας με τα πειραματικά αποτελέσματα των Takizawa and Aoyama (1976) (Σχ. 2.27).
- ε) Όταν παρασύρονται από το τρέχον σημείο  $\mathbf{S}$  της έντασης, οι “επιφάνειες διαρροής” μετακινούνται στο χώρο των  $\mathbf{S}$  χωρίς να αλλάζουν σε σχήμα, μέγεθος ή προσανατολισμό. Όταν έχει παρασυρθεί μόνον η εσωτερική επιφάνεια (αυτή της ρηγμάτωσης), αυτή κινείται με το  $\mathbf{S}$  στη διεύθυνση της ευθείας που ενώνει την τρέχουσα θέση του,  $\mathbf{S}_1$ , με αυτήν του σημείου της επόμενης (εξωτερικής) επιφάνειας το οποίο συμπίπτει με το  $\mathbf{S}_1$  αν και οι δύο επιφάνειες μετασχηματισθούν έτσι ώστε να τέμνουν τους τέσσερις άξονες συντεταγμένων,  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $T$ ,  $N$ , στα ίδια σημεία. Όταν έχουν παρασυρθεί και οι δύο επιφάνειες, τότε κινούνται με το  $\mathbf{S}$  στη διεύθυνση της ευθείας

που ενώνει το  $S$  με το κέντρο της εξωτερικής επιφάνειας στην τρέχουσά της θέση (κανόνας κινηματικής κράτynσης κατά Ziegler).

Προκύπτει λοιπόν ότι η Πολυεπιφανειακή Θεωρία Πλαστικότητας προσφέρει γόνιμο έδαφος για την ανάπτυξη προσομοιωμάτων που αντικατοπτρίζουν αρκετά ικανοποιητικά πολλές πλευρές της σύνθετης ανελαστικής συμπεριφοράς μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη. Ομως, για να προκύψει ικανοποιητική συμφωνία με την πειραματική συμπεριφορά, η μορφή και οι λεπτομέρειες του προσομοιώματος χρειάζεται να γίνουν περίπλοκα, και οι υπολογιστικές τους απαιτήσεις να αυξηθούν. Επιπροσθέτως, τα τυποποιημένα σχήματα που περιλαμβάνουν τα προσομοιώματα αυτά για τις “επιφάνειες διαρροής”, δεν ταιριάζουν με αυτά των πραγματικών επιφανειών αλληλεπίδρασης  $M_y$ - $M_z$ - $T$ - $N$  διατομών οπλισμένου σκυροδέματος. Είναι σκόπιμο να προβλέπεται, αντ’ αυτών, ένας πιο ευέλικτος τύπος επιφάνειας διαρροής, με μορφή που είναι συνάρτηση των λεπτομερειών της διατομής και του οπλισμού της. Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται το προσομοίωμα που περιγράφεται αμέσως κατωτέρω.

Το προσομοίωμα τύπου Οριακής Επιφάνειας που προτάθηκε από τους Sfakianakis and Fardis (1990, 1991), αναφέρεται στη διατομή και αφορά την κατασκευή του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας  $F_s^t$ , που συνδέει το διαφορικό μητρώου στήλης των μεγεθών ορθής έντασης,  $S_s = [M_y \ M_z \ N]^T$ , μ’ αυτό του διαφορικού του μητρώου-στήλη των αντιστοιχών παραμορφώσεων της διατομής,  $\epsilon_s = [\varphi_y \ \varphi_z \ \epsilon_o]^T$  (βλ. Παρ. 2.2 για τα προσομοιώματα ιών και εξ. (2), στην οποία το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας  $K_s^t$  είναι το αντίστροφο του  $F_s^t$ ). Το κεντρικό στοιχείο του προσομοιώματος είναι η Οριακή Επιφάνεια της διατομής, που ορίζεται σαν ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που αντιστοιχούν στην οριακή αντοχή της διατομής στο χώρο των κανονικοποιημένων  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $N$ . Η Οριακή Επιφάνεια μπορεί να κατασκευασθεί αριθμητικά για μία δεδομένη διατομή, μέσω οποιουδήποτε αλγορίθμου που βρίσκει, ακριβώς ή προσεγγιστικά, τις κορυφές των διαγραμμάτων  $M$ - $\varphi$  της διατομής για μονοτονική, περίπου αναλογική, φόρτιση από συνδυασμό  $M_y$ - $M_z$ - $N$ . Η σημασία της Οριακής Επιφάνειας έγκειται στο ότι τα Μέτρα Πλαστικότητας για τις αξονικές και τις καμπτικές παραμορφώσεις,  $K_v$ ,  $K_\mu$ , που εμφανίζονται στους παρονομαστές της πρώτης και αντίστοιχα των δύο άλλων γραμμών του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας, είναι συναρτήσεις των προβολών,  $\delta_v$  και  $\delta_\mu$ , της απόστασης  $\delta$  του τρέχοντος σημείου  $S$  της έντασης από την Οριακή Επιφάνεια, πάνω στον άξονα των  $N$  (για την  $\delta_v$  και το  $K_v$ ) και κάθετα σ’ αυτόν (για την  $\delta_\mu$  και το  $K_\mu$ ) – βλ. Σχ. 2.28. Η απόσταση  $\delta$  μετράται κατά την τρέχουσα διεύθυνση του  $dS$ , και οι προβολές της,  $\delta_\mu$  και  $\delta_v$ , υπεισέρχονται στις εκφράσεις που δίνουν τα  $K_\mu$  και  $K_v$  διαιρεμένα με τις πιο πρόσφατες τοπικά μέγιστες

τιμές τους,  $\delta_{\mu,max}$  και  $\delta_{\nu,max}$ , κατά την ιστορία της απόκρισης. Έτσι, όσο οι τιμές των  $\delta_{\mu}$  και/ή  $\delta_{\nu}$  συνεχώς μειώνονται κατά την απόκριση, οι τιμές των  $K_{\mu}$  και  $K_{\nu}$  μειώνονται επίσης, κατ' αναλογία προς το  $(\delta_{\mu}/\delta_{\mu,max})^{0.85}$  και το  $(\delta_{\nu}/\delta_{\nu,max})$ . Όταν το σημείο S πάει να φθάσει την Οριακή Επιφάνεια, τα  $K_{\mu}$  και  $K_{\nu}$  πλησιάζουν ασυμπτωτικά το μηδέν. Αν κατά τη διάρκεια της απόκρισης η διεύθυνση του dS στρίψει έτσι ώστε η τιμή του  $\delta_{\mu}$  ή του  $\delta_{\nu}$  να αρχίσει να αυξάνεται, τότε το  $\delta_{\mu,max}$  ή το  $\delta_{\nu,max}$  τίθεται ίσο με την νέα μέγιστη τιμή του  $\delta_{\mu}$  ή του  $\delta_{\nu}$ , και τα  $K_{\mu}$  ή  $K_{\nu}$  αυξάνονται απότομα, παίρνοντας μία τιμή κοντά στην αρχική τους. Έτσι η στιγμιαία απόκριση, αμέσως μετά από μία απότομη αλλαγή διεύθυνσης του dS που μπορεί να θεωρηθεί σαν “αποφόρτιση”, χαρακτηρίζεται από μεγάλη δυσκαμψία, η οποία μειώνεται πάλι σταδιακά καθώς το σημείο S πλησιάζει ξανά την Οριακή Επιφάνεια στη νέα διεύθυνση του dS (“επαναφόρτιση”).

Οι συντελεστές αναλογίας μεταξύ  $K_{\mu}$  και  $(\delta_{\mu}/\delta_{\mu,max})^{0.85}$  αφενός και  $K_{\nu}$  και  $(\delta_{\nu}/\delta_{\nu,max})$  αφετέρου, είναι συναρτήσεις του  $\nu=N/A_c f_c$  και της ποσότητας και διάταξης του διαμήκου και εγκάρσιου οπλισμού. Οι συναρτήσεις αυτές ποσοτικοποιήθηκαν από τους Sfakianakis and Fardis (1990, 1991) για ορθογωνικές διατομές με οπλισμό κατανεμημένο κατά μήκος των ζευγών απέναντι πλευρών ή συγκεντρωμένο στις τέσσερις γωνίες. Πέραν τούτου, δεν υπάρχει σημαντική πρόσθετη επιρροή της ποσότητας και της διάταξης του οπλισμού στους όρους του μητρώου ευκαμψίας. Έτσι οι αριθμητές των όρων αυτών είναι απλώς συναρτήσεις της τρέχουσας τιμής των  $M_y$ ,  $M_z$  και  $N$ . Οι εκτός κύριας διαγωνίου όροι που συνδέουν την ανελαστική συμπεριφορά στις δύο διευθύνσεις της κάμψης τέθηκαν ίσοι με μηδέν. Δεν ισχύει το ίδιο για τους εκτός κύριας διαγωνίου όρους που συνδέουν την αξονική διεύθυνση με την κάμψη στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις, οι οποίοι έχουν μη-μηδενικές αλλά και μη-συμμετρικές τιμές.

Η κατασκευή του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας της διατομής,  $F_s^t$ , σε κάθε βήμα της μη-γραμμικής ανάλυσης της απόκρισης, απαιτεί τον προσδιορισμό του σημείου τομής της προέκτασης του dS με την Οριακή Επιφάνεια, η οποία ορίζεται σαν ένα σύνολο από στοιχειώδη υπερβολικά παραβολοειδή. Ο προσδιορισμός αυτός απαιτεί ειδικούς αλγορίθμους και καθιστά τον υπολογισμό τμηματικά μη-γραμμικό.

Το ανωτέρω προσομοίωμα διατομής χρησιμοποιείται κατόπιν για την κατασκευή του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας μέλους, με αριθμητική ολοκλήρωση του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας διατομής σύμφωνα με την αρχή των δυνατών δυνάμεων και την εξ. (14) της Υποενότητας 2.2.3. Η αριθμητική ολοκλήρωση γίνεται με τη μέθοδο Gauss-Lobatto, που σκιαγραφείται στην Ενότητα 2.2. Οι λεπτομέρειες για τον υπολογισμό και την σταδιακή ισορρόπηση των μη-εξισορροπούμενων δυνάμεων, καθώς και άλλες αλγοριθμικές

πληροφορίες, δίνονται από τους Sfakianakis and Fardis (1990, 1991). Το προσομοίωμα διατομής και μέλους τύπου Οριακής Επιφάνειας ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης στο χώρο ANSR-I, η αρχική μορφή του οποίου αναπτύχθηκε από τους Mondkar and Powell (1973), και εφαρμόσθηκε για την αναπαραγωγή των διαξονικών πειραματικών αποτελεσμάτων των Takizawa and Aoyama (1976) και άλλων (Σχ. 2.29) και για τη μη-γραμμική δυναμική ανάλυση της απόκρισης στο χώρο διόροφων και τριόροφων κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος σε πραγματικούς σεισμούς.

Το προσομοίωμα “τριαξονικού ελατηρίου” των Lai et al (1984) συνδυάζει ορισμένα στοιχεία του προσομοιώματος ινών για την κατασκευή του μητρώου δυσκαμψίας διατομής, με τις βασικές ιδέες του προσομοιώματος συγκεντρωμένης ανελαστικότητας ή σημειακών αρθρώσεων για τον υπολογισμό του μητρώου δυσκαμψίας του μέλους. Συγκεκριμένα το υποστύλωμα οπλισμένου σκυροδέματος προσομοιώνεται σαν συνδυασμός ενός γραμμικού-ελαστικού στοιχείου δοκού σε τρεις διαστάσεις, και δύο σημειακών μη-γραμμικών ελατηρίων στο χώρο, ένα σε κάθε άκρο του μέλους. Κάθε μη-γραμμικό ελατήριο συνίσταται από πέντε μη-γραμμικά ελατήρια για το σκυρόδεμα και από τέσσερα για το χάλυβα. Τα τέσσερα από τα πέντε ελατήρια σκυροδέματος βρίσκονται κοντά στις γωνίες της διατομής και το πέμπτο είναι στο κέντρο. Τα τέσσερα ελατήρια για το χάλυβα βρίσκονται στις τέσσερις γωνίες της διατομής (Σχ. 2.30). Η επιφάνεια των πραγματικών ράβδων της διατομής συγκεντρώνεται στο πλησιέστερο από τα τέσσερα ελατήρια χάλυβα. Η μονοαξονική σχέση που συνδέει τη δύναμη κάθε ελατηρίου χάλυβα με την αντίστοιχη σχετική μετακίνηση (όχι ανηγμένη μήκυνση) συντίθεται από μία διγραμμική μονοτονική καμπύλη (ελαστική-τέλεια πλαστική, ή με γραμμική κράτυνση) και από κλάδους αποφόρτισης και επαναφόρτισης που ακολουθούν το τροποποιημένο προσομοίωμα Takeda με τους 9 κανόνες υστέρησης (Σχ. 2.31). Η αρχική ελαστική δυσκαμψία του ελατηρίου ισούται με  $2A_{si}E_s/l_b$ , όπου  $E_s$  είναι το Μέτρο Ελαστικότητας του χάλυβα και  $l_b$  το μήκος αγκύρωσης της ράβδου, υπολογισμένο με μέση τάση συνάφειας  $1.5\sqrt{f_c}$  ( $f_c$  σε MPa). Με τον τρόπο αυτό το κάθε ελατήριο χάλυβα προσομοιώνει όχι τη δυσκαμψία της ίδιας της ράβδου, αλλά τη σχέση συνάφειας-ολίσθησης της ράβδου, υποθέτοντας σταθερή τάση συνάφειας κατά μήκος της ζώνης αγκύρωσής της. Η δυσκαμψία της αποφόρτισης λαμβάνεται ανάλογη του  $\delta_{\max}^{-1/5}$ , όπου  $\delta_{\max}$  είναι η κατ' απόλυτη τιμή μέγιστη προγενέστερη παραμόρφωση του ελατηρίου χάλυβα. Κάθε ένα από τα πέντε ελατήρια χάλυβα έχει μηδενική δυσκαμψία σε εφελκυσμό, ενώ σε θλίψη είναι ελαστικό-τέλεια πλαστικό για μονοτονική φόρτιση και γραμμικό-ελαστικό δια της αρχής των αξόνων σε αποφόρτιση-επαναφόρτιση. Η δύναμη αστοχίας του κάθε ελατηρίου σκυροδέματος

λαμβάνεται ίση με τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή,  $f_c$ , του σκυροδέματος, επί το 20% της επιφάνειας της διατομής, ενώ η μετακίνηση (όχι η ανηγμένη μήκυνση) στη διαρροή του λαμβάνεται ίση με αυτήν των ελατηρίων χάλυβα.

Με βάση την υπόθεση της επιπεδότητας διατομών, η μέση αξονική μετακίνηση και οι δύο γωνίες στροφής της διατομής εκφράζονται συναρτήσει των μετακινήσεων των τριών από τις τέσσερις γωνίες. Έτσι τελικά τα πέντε ελατήρια σκυροδέματος και τα τέσσερα ελατήρια χάλυβα της διατομής συγχωνεύονται σ' ένα "διαξονικό ελατήριο" σε κάθε άκρο του μέλους, το οποίο συνδέει την αξονική δύναμη και τις δύο ροπές κάμψης της ακραίας διατομής με τη μέση αξονική μετακίνηση και τις δύο γωνίες στροφής των άκρων.

Οι προβλέψεις του προσομοιώματος "τριαξονικού ελατηρίου" κατά Lai et al (1984) είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα των Otani et al (1980) για μονοαξονική ή διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη (Σχ. 2.29(a)). Κατά την κατασκευή του μητρώου δυσκαμψίας του "τριαξονικού ελατηρίου" από τους Lai et al (1984), υποτίθεται έμμεσα ότι ο ουδέτερος άξονας περνάει πάντα από το κέντρο της διατομής. Έτσι όμως δημιουργείται, ακόμα και στην ελαστική περιοχή, σύζευξη του μεταφορικού και των στρωφικών βαθμών ελευθερίας της ακραίας διατομής, σύζευξη που στην πραγματικότητα δεν υπάρχει. Οι Saiidi et al (1989) διόρθωσαν αυτό το πρόβλημα, προτείνοντας συγχρόνως τη συγχώνευση των γωνιακών ελατηρίων σκυροδέματος και χάλυβα, αφήνοντας έτσι μόνο του μόνο το κεντρικό ελατήριο σκυροδέματος. Για τα ελατήρια που προέκυψαν από τη συγχώνευση, αντικατέστησαν το τροποποιημένο ελατήριο Takeda που χρησιμοποίησαν οι Lai et al (1984) με το πολύ απλούστερο προσομοίωμα Q-hyst των Saiidi and Sozen (1979). Στο προσομοίωμα αυτό θεώρησαν κράτυνση μετά τη διαρροή με κλίση 2% της ελαστικής και δυσκαμψία αποφόρτισης που μειώνεται με τη μέγιστη μετακίνηση κατά τρόπο όμοιο μ' αυτόν που θεώρησαν και οι Lai et al (1984). Οι αρχική δυσκαμψία σε θλίψη προκύπτει με άθροιση των αντιστοίχων ελαστικών δυσκαμψιών χάλυβα και σκυροδέματος.

Παρά τις απλοποιήσεις του, το τροποποιημένο προσομοίωμα "τριαξονικού ελατηρίου" επιτυγχάνει εξίσου καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα των Otani et al (1980) όπως και το αρχικό προσομοίωμα των Lai et al (1984). Επιπλέον κατορθώνει να διορθώσει την έλλειψη εξισορρόπησης του αξονικού φορτίου που χαρακτηρίζει το προσομοίωμα των Lai et al (1984), μέσω μιας διαδικασίας διαδοχικών επαναλήψεων.

Για λόγους πληρότητας αναφέρεται και το βισκοελαστικό προσομοίωμα των Kunnath and Reinhorn (1990) για διαξονική κάμψη με σταθερή ορθή δύναμη. Το προσομοίωμα αυτό χρησιμοποιεί σύστημα τμηματικά μη-γραμμικών εξισώσεων μεταξύ των δύο εγκαρσίων μετακινήσεων και των δύο εγκαρσίων δυνάμεων. Με την εξαίρεση κάποιων ειδικών

περιπτώσεων, όπως η μονοαξονική κάμψη μέσα σε επίπεδο συμμετρίας, το σύστημα αυτό περιλαμβάνει σύζευξη μεταξύ των δύο εγκάρσιων διευθύνσεων. Το προσομοίωμα περιλαμβάνει σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας με το μέγεθος της μέγιστης παραμόρφωσης, και της αντοχής με αυτό της συνολικής απορρόφησης ενέργειας. Η επιλογή των παραμέτρων του γίνεται μέσω ειδικών τεχνικών αναγνώρισης συστημάτων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται συμφωνία με συγκεκριμένα πειράματα μονοαξονικής και διαξονικής κάμψης. Δεν δίνονται όμως οδηγίες για τον καθορισμό των παραμέτρων του, όχι εκ των υστέρων με βάση ήδη γνωστά πειραματικά αποτελέσματα, αλλά εκ των προτέρων με βάση τη γεωμετρία και την όπλιση του μέλους. Για το λόγο αυτό, αλλά και επειδή δεν έχουν γίνει ακόμη αρκετές εφαρμογές που να καταδεικνύουν την αριθμητική ευστάθειά του για σχεδόν οποιαδήποτε ιστορία φόρτισης, το προσομοίωμα αυτό δεν φαίνεται ακόμα ώριμο για εφαρμογή σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Λόγω της μαθηματικής του κομψότητας, όμως, φαίνεται να προσφέρει βάση για περαιτέρω ανάπτυξη.

## 2.6. Προσομοιώματα για στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης, σε κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

### 2.6.1. Εισαγωγή

Εν μέρει λόγω της δυσκολίας της και εν μέρει λόγω του μικρότερου ενδιαφέροντος που έχει δείξει μέχρι σήμερα γι' αυτήν η διεθνής επιστημονική κοινότητα, η προσομοίωση της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς και της αντοχής μελών χαμηλού λόγου διάτμησης υπό ανακυκλιζόμενη καμπτοδιατμητική ένταση, με ή χωρίς αξονική δύναμη, δεν έχει φθάσει ακόμη σε ικανοποιητικά επίπεδα. Οι περισσότερες σχετικές αναλυτικές έρευνες μέχρι σήμερα προσανατολίζονται στον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής, για δεδομένη γεωμετρία και όπλιση. Οι μέχρι σήμερα εργασίες προς την κατεύθυνση της προσομοίωσης της σχέσης έντασης-παραμόρφωσης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι λιγοστές.

### 2.6.2. Υπολογισμός οριακής αντοχής στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης υπό μονοτονική ένταση

#### 2.6.2.1. Θεμελιώδη προσομοιώματα

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ο υπολογισμός της οριακής καμπτικής και διατμητικής αντοχής λυγηρών πρισματικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος, στα οποία καθοριστική είναι η κάμψη, μπορεί να γίνει με τη βοήθεια ενός ιδεατού εσωτερικού δικτύωματος, όμοιου με αυτό που χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση πρισματικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη και σε διάτμηση, μακριά από θέσεις ασυνέχειας της γεωμετρίας. Το προσομοίωμα ιδεατού δικτύωματος υποθέτει πλήρη συμβατότητα των παραμορφώσεων χάλυβα και σκυροδέματος, μέσω της συνάφειας. Αν ο λόγος διάτμησης είναι χαμηλός και καθοριστική είναι η τέμνουσα, τότε η οριακή τέμνουσα μπορεί να εκτιμηθεί από ένα απλούστατο προσομοίωμα θλιπτήρων-ελκυστήρων, στο οποίο η συμβατότητα των παραμορφώσεων χάλυβα και σκυροδέματος μέσω της συνάφειας αγνοείται. Ο συνδυασμός αυτών των δύο μηχανισμών, δηλ. ενός ιδεατού εσωτερικού δικτύωματος και κάποιου είδους προσομοιώματος θλιπτήρων-ελκυστήρων, αποτελεί τη βάση όλων σχεδόν των διαθέσιμων προσομοιωμάτων για τον υπολογισμό της οριακής αντοχής στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης, με ή χωρίς αξονική δύναμη. Αυτά τα θεμελιώδη προσομοιώματα παρουσιάζονται εδώ λεπτομερώς, με έμφαση στα κοινά στοιχεία και τις ομοιότητές τους, αλλά και με κάποιες τροποποιήσεις από την αρχική μορφή τους, οι οποίες διευκολύνουν την ομοιομορφη



παρουσίασή τους.

Τα πρώτα (Ιαπωνικά) προσομοιώματα θεωρούν ότι το στοιχείο αποτελείται από συνδυασμό ενός πυρήνα σκυροδέματος, όπου λειτουργεί ένας λοξός θλιπτήρας, και δύο εξωτερικών στρώσεων κοντά στους οπλισμούς, οι οποίες λειτουργούν σαν ιδεατά δικτύωματα με διαγωνίους κατά  $45^\circ$  κατά Mörsch. Αντιπροσωπευτικό του είδους είναι το προσομοίωμα των Shohara and Kato (1981). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές υπέθεσαν ότι:

α) Στα πέλατα, εφελκόμενο και θλιβόμενο, του κατά  $45^\circ$  δικτύωματος, συμμετέχουν μόνον οι διαμήκεις ράβδοι.

β) Στην οριακή αντοχή οι συνδετήρες (ορθοστάτες του ιδεατού δικτύωματος) έχουν διαρρεύσει και οι κατά  $45^\circ$  θλιβόμενες διαγώνιες του φθάνουν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,  $f_c$ . Υποτίθεται ότι ένα ποσοστό  $\beta$  του πλάτους  $b$  του στοιχείου συμμετέχει στο δικτύωμα των  $45^\circ$ . Το ποσοστό αυτό θεωρείται ότι ισούται με το ποσοστό της  $f_c$  που εξαντλείται από τη δράση ιδεατού δικτύωματος στο σύνολο του πλάτους  $b$ , όταν διαρρεύσουν οι συνδετήρες. Προκύπτει έτσι:

$$\beta = 2 \frac{A_{sw} f_{yw}}{sb f_c} = 2\omega_w \quad (81)$$

Στην ανωτέρω σχέση  $A_{sw}/s$  είναι η ανά  $m$  μήκους του στοιχείου διατομή συνδετήρων και  $\omega_w$  το μηχανικό ποσοστό τους. Το τμήμα του πλάτους του μέλους που είναι διαθέσιμο για το διαγώνιο θλιπτήρα ισούται με  $1-\beta$ , οπότε για να μπορεί να αναπτυχθεί ο μηχανισμός θλιπτήρων-ελκυστήρων πρέπει το  $\omega_w$  να είναι μικρότερο του 0.5.

γ) Η κλίση του θλιπτήρα καθορίζεται από το βάθος  $x$  της θλιβόμενης ζώνης ως εξής:

$$\tan \theta = \frac{h - x}{l} \quad (82)$$

όπου  $l$  είναι το μήκος του μέλους. Για αντιμετρική κάμψη το  $l$  ισούται με το διπλάσιο του μήκους διάτμησης  $a$ .

δ) Στην οριακή αντοχή οι ορθές τάσεις στο θλιπτήρα φθάνουν την αντοχή του σκυροδέματος,  $f_c$ , στο πλήρες πλάτος του θλιπτήρα,  $x \cos \theta$ .

Με βάση τις υποθέσεις αυτές και τις εξισώσεις ισορροπίας, προκύπτει η οριακή διατμητική αντοχή του στοιχείου, σαν το άθροισμα της τέμνουσας δύναμης,  $V_t$ , που αναλαμβάνεται από το κατά  $45^\circ$  δικτύωμα και από την εγκάρσια στον άξονα συνιστώσα,  $V_s$ , της δύναμης  $N_c$  του θλιπτήρα. Είναι:

$$V_t = z \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} \quad (83)$$

$$V_s = N_c \sin \theta = (1 - \beta) b x f_c \cos \theta \sin \theta \quad (84)$$

όπου  $z$  είναι ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ των πελμάτων του δικτυώματος.

Η προβολή των δυνάμεων του προσομοιώματος θλιπτήρα-ελκυστήρων στον άξονα του μέλους δίνει:

$$N_c \cos \theta = N - V_t + 2F_{st} \quad (85)$$

όπου  $N$  είναι η συνολική αξονική δύναμη του στοιχείου (θετική για θλίψη) και  $F_{st}$  οι (θετικές για εφελκυσμό) δυνάμεις των πελμάτων, που αντιπροσωπεύουν τα πέλματα του προσομοιώματος θλιπτήρων-ελκυστήρων (Σχ. 1.1 στο Κεφ. 1).

Με απαλοιφή του  $N_c$  από τις δύο ανωτέρω σχέσεις και αντικατάσταση του  $x$  από την εξ. (82), προκύπτει η κλίση του θλιπτήρα ως προς τον άξονα:

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{\lambda^2 + 4\eta(1-\eta)} - \lambda}{2\eta} \quad (86)$$

όπου:

$$\eta = \frac{N - V_t + 2F_{st}}{(1 - \beta) b h f_c} \quad (87)$$

και:

$$\lambda = \frac{l}{h} = 2 \frac{a}{h} \quad (88)$$

Τότε η  $V_s$  υπολογίζεται ως εξής:

$$V_s = (N - V_t + 2F_{st}) \tan \theta \quad (89)$$

δίνοντας τελικά την οριακή διατμητική αντοχή του μέλους:

$$V = V_t + V_s = z \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (1 - \tan \theta) + (N + 2F_{st}) \tan \theta \quad (90)$$

Οι συνολικές δυνάμεις στους διαμήκεις οπλισμούς ισούνται με το άθροισμα της αντίστοιχης συμβολής από τη δράση θλιπτήρων-ελκυστήρων και των δυνάμεων  $\pm V_t l / 2z$  που προκύπτουν από το κατά  $45^\circ$  ιδεατό δικτύωμα. Οι δυνάμεις αυτές φθάνουν τη μέγιστη τιμή τους: α)  $A_s f_y$  στο εφελκυσμένο πέλμα (διαρροή σε εφελκυσμό, αν  $F_{st} > 0$ ), ή β)  $-A_s f_y$  στο θλιβόμενο (διαρροή σε θλίψη, αν  $F_{st} < 0$ ). Επομένως:

$$F_o \geq F_{st} \geq -F_o \quad (91)$$

όπου:

$$F_o = A_s f_y - \frac{V_t l}{2z} \quad (92)$$

θέτοντας  $F_{st} = F_o$  έχουμε:

$$\eta = \frac{N - V_t \left(1 - \frac{l}{z}\right) + 2A_s f_y}{(1 - \beta) b h f_c} \quad (93)$$

και

$$V = \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (z - (1 + z) \tan \theta) + (N + 2A_s f_y) \tan \theta \quad (94)$$

ή σε αδιάστατη μορφή:

$$v_u = \omega_w (\zeta - (\lambda + \zeta) \tan \theta) + (v + \omega_s) \tan \theta_u \quad (95)$$

όπου  $\omega_s$  είναι το συνολικό μηχανικό ποσοστό διαμήκους χάλυβα.

Όταν η τιμή του  $N$  αυξηθεί, από την ακραία του τιμή του,  $-2A_s f_y$ , που αντιστοιχεί σε αστοχία του μέλους σε καθαρό εφελκυσμό, σε:

$$N = N_1 = \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (1 + z - h) + 0.5 b h f_c - 2A_s f_y \quad (96)$$

τιμή που αντιστοιχεί σε  $\eta = 0.5$  και σε

$$\tan \theta = \sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda \quad (97)$$

τότε η τιμή της οριακής τέμνουσας  $V$  αυξάνεται από μηδέν, μέχρι μία μέγιστη τιμή για όλες τις τιμές του  $N$ :

$$\max V_u = V_t + (0.5bhf_c - \frac{A_{sw}}{s}hf_y)(\sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda) \quad (98)$$

Αν οριακή διατμητική αντοχή διαιρεθεί με  $bhf_c$  ώστε να αδιαστατοποιηθεί, προκύπτει:

$$m\kappa v_u = \omega_w \zeta + (0.5 - \omega_w)(\sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda) \quad (99)$$

Η μέγιστη αυτή τιμή της οριακής αντοχής είναι ανεξάρτητη της ποσότητας του διαμήκους χάλυβα.

Για το διάστημα τιμών του N:

$$-2A_s f_y < N < N_1 = \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (1 + z - h) + 0.5bhf_c - 2A_s f_y \quad (100)$$

ή, σε κανονικοποιημένη μορφή:

$$-\omega_s < v < v_1 = \omega_w (\lambda + \zeta - 1) + 0.5 - \omega_s \quad (101)$$

ταυτόχρονα με την εξάντληση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στις κατά  $45^\circ$  διαγωνίους του ιδεατού δικτύωματος και στο διαγώνιο θλιπτήρα, διαρρέουν οι συνδετήρες και το εφελκόμενο πέλμα. Η αστοχία αυτή είναι καμπτοδιατμητική και είναι πλάστιμη.

Για τιμές του N μεγαλύτερες από το πάνω όριο των ανωτέρω εξ. (100) ή (101), το εφελκόμενο πέλμα παραμένει ελαστικό, με δύναμη τέτοια ώστε η οριακή αντοχή που δίνεται από τις εξ. (98) και (99) διατηρείται και η κλίση του θλιπτήρα εξακολουθεί να δίνεται από την εξ. (97). Αυτό είναι δυνατό μέχρι να διαρρεύσει το εφελκόμενο πέλμα, για τιμή της αξονικής θλίψης ίση με:

$$N = N_2 = -\frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (1 + h - z) + 0.5bhf_c + 2A_s f_y \quad (102)$$

Στο διάστημα τιμών του N:

$$\frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (1 + z - h) + 0.5bhf_c - 2A_s f_y = N_1 < N < N_2 = -\frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (1 + h - z) + 0.5bhf_c + 2A_s f_y \quad (103)$$

ή σε αδιάστατη μορφή:

$$\omega_w(\lambda + \zeta - 1) + 0.5 - \omega_s = v_1 < v < v_2 = -\omega_w(\lambda + 1 - \zeta) + 0.5 + \omega_s \quad (104)$$

ή αστοχία προκαλείται από εξάντληση της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στο διαγώνιο θλιπτήρα και στις κατά 45° διαγωνίους του ιδεατού δικτυώματος, χωρίς διαρροή των διαμήκων ράβδων. Η διατμητική αυτή αστοχία είναι ψαθυρή, εκδηλώνεται με λοξή διάρρηξη κατά τη γωνία ως προς τον άξονα του μέλους που δίνεται από την εξ. (97) και αντιστοιχεί σε οριακή τέμνουσα που δίνεται από τις εξ. (98) ή (99):

Εάν:

$$1 \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} > 2 A_s f_y \quad (105)$$

ή σε αδιάστατη μορφή:

$$\lambda > \frac{\omega_s}{\omega_w} \quad (106)$$

το ενδιαμέσο διάστημα τιμών του  $N$  που αντιστοιχεί σε ψαθυρή αστοχία δεν υπάρχει. Το φυσικό νόημα είναι ότι η τιμή της  $F_o$  στην εξ. (92) είναι αρνητική και η δράση ιδεατού δικτυώματος κατά 45° προκαλεί διαρροή εφελκυόμενου και θλιβόμενου πέλματος προτού διαρρεύσουν οι συνδετήρες, ή (αν  $\omega_w < 0.5$ ) προτού αστοχήσει σε διαγώνια θλίψη το σκυρόδεμα.

Αν  $N > N_2$  ο χάλυβας της θλιβόμενης ζώνης των ακραίων διατομών είναι σε διαρροή, και συγχρόνως η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και η τάση διαρροής των συνδετήρων εξαντλείται, όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Πρόκειται πάλι για αστοχία από συνδυασμό κάμψης-διάτμησης, κατά πιο πλαστικό τρόπο από την ανωτέρω καθαρά διατμητική αστοχία. Η κλίση του θλιπτήρα εξακολουθεί να δίνεται από την εξ. (86), με η ίσο προς:

$$\eta = \frac{N - V_t \left(1 + \frac{1}{z}\right) - 2A_s f_y}{(1 - \beta) b h f_c} \quad (107)$$

Η οριακή διατμητική αντοχή είναι:

$$V = \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (z + (1-z) \tan \theta) + (N - 2 A_s f_y) \tan \theta \quad (108)$$

ή σε αδιάστατη μορφή:

$$v_u = \omega_w (\zeta + (\lambda - \zeta) \tan \theta) + (v - \omega_s) \tan \theta \quad (109)$$

Η διατμητική αντοχή μειώνεται στο μηδέν όταν η αξονική δύναμη  $N$  γίνει ίση με την αντοχή της διατομής σε καθαρή θλίψη, δηλ. όταν:

$$N = 2 A_s f_y + b h f_c \quad (110)$$

ή

$$v = 1 + \omega_s \quad (111)$$

Επομένως οι εξ. (108) και (109) ισχύουν στην περιοχή τιμών του  $N$ :

$$2 A_s f_y + b h f_c > N > N_2 = -\frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (1 + h - z) + 0.5 b h f_c + 2 A_s f_y \quad (112)$$

ή σε αδιάστατη μορφή:

$$1 + \omega_s > v > v_2 = -\omega_w (\lambda + 1 - \zeta) + 0.5 \omega_s \quad (113)$$

Το Σχ. 2.32(a) παρουσιάζει το αδιαστατοποιημένο διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας  $v$  – αξονικής δύναμης  $v$  που προκύπτει από το προσομοίωμα Shohara and Kato (1981), ενώ το Σχ. 2.33(b) δείχνει σε παράδειγμα την εφαρμογή του προσομοιώματος για την κατασκευή διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης ροπής-αξονικής δύναμης και τέμνουσας-αξονικού φορτίου μέλους, σαν συνάρτηση και της λυγηρότητάς του. Καθώς αυξάνει η λυγηρότητα, το διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής-αξονικής δύναμης τείνει προς αυτό της ακραίας διατομής. Για μηχανικά ποσοστά συνδετήρων που ικανοποιούν τις εξ. (105), (106), εξαφανίζεται το τμήμα του διαγράμματος που περιορίζεται από το μέγεθος της τέμνουσας και αντιστοιχεί σε ψαθυρή αστοχία. Εντούτοις το συνολικό διάγραμμα εξακολουθεί να περικλείεται από αυτό των ακραίων διατομών σε κάμψη με αξονική δύναμη, καθώς, με εξαίρεση τις ακραίες τιμές του  $N$  στον κατακόρυφο άξονα, η τέμνουσα επηρεάζει αρνητικά την καμπτική αντοχή.

Οι Minami and Wakabayashi (1981) πρότειναν ανεξάρτητα το ίδιο προσομοίωμα, σε

ελαφρώς πιο γενική μορφή. Η διαφορά με το προσομοίωμα των Shohara and Kato (1981) εντοπίζεται στο κάτω τμήμα του διαστήματος των τιμών του  $N$  στις εξ. (100), (101) και στο πάνω τμήμα αυτού των εξ. (112), (113). Στις περιοχές αυτές οι υποθέσεις του προσομοιώματος των Shohara and Kato (1981) μπορεί να μην ισχύουν, καθώς η συμπεριφορά κυριαρχείται από την αξονική δύναμη, και η θλιβόμενη ζώνη μπορεί να εξαφανισθεί (για  $N$  εφελκυστική και μεγάλη) ή να καταλάβει το σύνολο της διατομής (για  $N$  θλιπτική και υψηλή). Οι Minami and Wakabayashi (1981) πρότειναν εναλλακτικές σχέσεις για τις περιοχές αυτές. Οι σχέσεις αυτές εξήχθησαν ημι-εμπειρικά, έτσι ώστε, για δεδομένη λυγηρότητα στοιχείου, τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης τέμνουσας-αξονικής δύναμης και ροπής αξονικής δύναμης είναι κυρτά. Εν πάσει περιπτώσει, η διαφορά με τις προβλέψεις του προσομοιώματος Shohara and Kato (1981) είναι αριθμητικά ασήμαντη.

Στο Σχ. 2.33(a) παρουσιάζονται διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής-αξονικής δύναμης-τέμνουσας κατά το προσομοίωμα Minami and Wakabayashi (1981) για  $\omega_s=0.4$ ,  $\omega_w=0.05$ ,  $\zeta=0.8$  και για τιμές λυγηρότητας  $\lambda=1/h$  μεταξύ 0.5 και 10 (αντίστοιχες τιμές του λόγου διάτμησης μεταξύ 0.25 και 5.0). Για τιμές της λυγηρότητας  $\lambda$  πάνω από 8.0, ισχύουν οι εξ. (105), (106) και δεν υπάρχει διατμητική αστοχία. Το Σχ. 2.33(b) δείχνει διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής-τέμνουσας για  $\nu=0.5$ ,  $\omega_s=0.5$ ,  $\zeta=0.8$  και για τιμές του  $\omega_w$  από 0 έως 0.7. Το εξωτερικό κυρτό τμήμα του διαγράμματος αντιστοιχεί στις εξ. (105), (106) και σε όλκιμη καμπτική αστοχία.

Το βασικό μειονέκτημα των ανωτέρω προσομοιωμάτων είναι ο πλασματικός μερισμός του πλάτους  $b$  αφενός μεν σ' έναν πυρήνα που αναπτύσσει δράση λοξού θλιπτήρα σ' ένα εσωτερικό δικτύωμα τύπου θλιπτήρων-ελκυστήρων, αφετέρου δε σε εξωτερικά μέρη που συμμετέχουν σ' ένα ιδεατό δικτύωμα κατά  $45^\circ$ . Αυτό σημαίνει ότι στην οριακή αντοχή το σκυροδέμα του πυρήνα αστοχεί σε μονοαξονική θλίψη κατά τη διεύθυνση του διαγωνίου θλιπτήρα, και αυτό των εξωτερικών φλοιών σε μονοαξονική θλίψη κατά  $45^\circ$  ως προς τον άξονα του μέλους. Αυτή η φυσική ασυμβατότητα διορθώνεται από το προσομοίωμα του Τέγου (1984, 1985).

Το προσομοίωμα Τέγου ανήκει στην κατηγορία εκείνων που θεωρούν το στοιχείο με χαμηλό λόγο διάτμησης σαν συνδυασμό ενός προσομοιώματος θλιπτήρων-ελκυστήρων και ενός εσωτερικού δικτύωματος, τα οποία όμως καταλαμβάνουν το σύνολο του πλάτους του στοιχείου. Έτσι, οι τάσεις σκυροδέματος από τα επιμέρους προσομοιώματα επαλληλίζονται στην πλέον κρίσιμη περιοχή του μέλους (δηλ. στη θλιβόμενη ζώνη της ακραίας διατομής) και οι συνθήκες αστοχίας του σκυροδέματος εκφράζονται συναρτήσει των συνολικών τάσεων από τα δύο αυτά προσομοιώματα. Το ιδεατό εσωτερικό δικτύωμα είναι πιο

περίπλοκο: σύμφωνα και με τον τρόπο ρηγγμάτωσης που παρατηρείται πειραματικά, το δικτύωμα αποτελείται από δύο ομάδες θλιπτήρων με ριπδοειδή διάταξη (μαζί με τους αντίστοιχους ελκυστήρες), οι οποίες συγκλίνουν μαζί με το θλιβόμενο πέγμα στις ακραίες διατομές και τερματίζονται προς την άλλη πλευρά στο μέσο του ύψους του μέλους (Σχ. 2.33). Μεταξύ αυτών των δύο ομάδων θλιπτήρων με τη ριπδοειδή διάταξη, υπάρχει ένα τμήμα με παράλληλους θλιπτήρες (μαζί με τους αντίστοιχους ελκυστήρες) υπό γωνία  $\phi$  ως προς τον άξονα του μέλους. Η γωνία αυτή ορίζεται με σύνδεση του θλιβόμενου πέγματος της ακραίας διατομής, με το άλλο πέγμα στο μέσο του ύψους του στοιχείου στην άλλη του πλευρά. Έτσι:

$$\tan \phi = 2 \frac{h - 2d_1}{l} = 2 \frac{z}{l} \quad (114)$$

Υποθέτοντας ότι οι συνδετήρες διαρρέουν, η ισορροπία απαιτεί τη μεταφορά μέσω συνάφειας στα πέγματα μιας δύναμης παράλληλης σ' αυτά, με μέγεθος ανά  $m$  μήκους ίσο με  $\cot \phi \cdot f_{yw} A_{sw} / s$ , όπου  $\phi$  συμβολίζει την τοπική γωνία των θλιπτήρων του δικτύωματος ως προς τον άξονα του μέλους. Αυτό δίνει σταθερή τάση συνάφειας, ίση με  $\cot \phi f_{yw} A_{sw} / s = 0.5 \lambda f_{yw} A_{sw} / s$ , στο κεντρικό τμήμα του δικτύωματος όπου οι θλιπτήρες είναι υπό σταθερή γωνία  $\phi$  που δίνεται από την εξ. (124). Στα τμήματα όμως του δικτύωματος όπου οι θλιπτήρες έχουν ριπδοειδή διάταξη, οι τάσεις συνάφειας μειώνονται γραμμικά μέχρι το μηδέν στις ακραίες διατομές (Σχ. 2.33(b), (c)).

Η τέμνουσα που αναλαμβάνεται από το μηχανισμό δικτύωματος είναι:

$$V_t = z \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} \cot \phi = 0.51 \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} \quad (115)$$

Η τέμνουσα αυτή μεταφέρεται από την ριπδοειδή ομάδα των θλιπτήρων στο θλιβόμενο πέγμα των ακραίων διατομών, όπου συγκλίνουν. Η ομάδα αυτή ασκεί στο σημείο αυτό μία δύναμη θλίψης, ίση με τη συνισταμένη των τάσεων συνάφειας στο ριπδοειδές τμήμα του εσωτερικού δικτύωματος, δηλ. με:

$$N_{ct} = 0.251 \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} \cot \phi = 0.5 V_t \cot \phi \quad (116)$$

Για σύγκριση, στα προγενέστερα προσομοιώματα που περιγράφηκαν ανωτέρω, οι ανωτέρω



δυνάμεις ισούνται με τη  $V_t$  της εξ. (83) και κατανέμονται στο σύνολο του ύψους  $h$  της ακραίας διατομής.

Για το διαγώνιο θλιπτήρα ο Τέγος πρότεινε δύο εναλλακτικές γεωμετρίες. Η απλούστερη από τις δύο είναι αυτή του Σχ. 2.34. Καθώς πρόκειται για προσομοίωμα θλιπτήρων-ελκυστήρων ίδιο με αυτό των Shohara and Kato (1981), όλα τα προαναφερθέντα για το διαγώνιο θλιπτήρα ισχύουν και εδώ με ορισμένες τροποποιήσεις. Μία απ' αυτές είναι το ότι στις εξ. (85) και (89) η  $V_t$  πρέπει να αντικατασταθεί με το άθροισμα  $N_{ct}+N_t^++N_t^-$ , όπου  $N_t$  συμβολίζει τις δυνάμεις στα δύο πέλματα ιδεατού δικτύωματος, με τις θλιπτικές δυνάμεις θεωρούμενες θετικές. (Στο κατά  $45^\circ$  δίκτυωμα των προηγούμενων προσομοιωμάτων, το άθροισμα  $N_t^++N_t^-$  ισούται με μηδέν). Μία άλλη διαφορά έγκειται στο ότι το  $F_o$  στο δεξιό μέλος της ανισότητας της εξ. (91) πρέπει να αντικατασταθεί με το  $A_s f_y + N_t^-$ . Με την αντικατάσταση αυτών των ακραίων τιμών του  $F_{st}$  στις τροποποιημένες εξισώσεις ισορροπίας, εμφανίζεται και στις δύο περιπτώσεις ο όρος  $N_t^++N_t^-$ . Από την ολοκλήρωση των τάσεων συνάφειας στο Σχ. 2.34, ο όρος αυτός ισούται με  $0.75l \cot \phi f_{yw} A_{sw}/s$ , δηλ. με  $1.5V_t \cot \phi$ . Τελικά για εφελκυστικές ή χαμηλές θλιπτικές δυνάμεις  $N$ , για τις οποίες το εφελκυστικό πέλμα είναι σε διαρροή, η οριακή τέμνουσα ισούται με:

$$V = 0.5l \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} \left(1 - \frac{1}{z} \tan \theta\right) + (N + 2A_s f_y) \tan \theta \quad (117)$$

ή σε αδιάστατη μορφή:

$$v_u = 0.5\lambda \omega_w \left(1 - \frac{\lambda}{z} \tan \theta\right) + (v + \omega_s) \tan \theta \quad (118)$$

Οι εξ. (115), (116) αντικαθιστούν τις εξ. (94), (95).

Για υψηλές θλιπτικές δυνάμεις  $N$ , οι οποίες προκαλούν διαρροή του θλιβόμενου πέλματος, η οριακή τιμή της τέμνουσας ισούται με:

$$V = 0.5l \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} \left(1 + \frac{1}{2z} \tan \theta\right) + (N - 2A_s f_y) \tan \theta \quad (119)$$

ή σε αδιάστατη μορφή:

$$v_u = 0.5\lambda \omega_w \left(1 + 0.5 \frac{\lambda}{z} \tan \theta\right) + (v - \omega_s) \tan \theta \quad (120)$$

αντί των εξ. (118), (119).

Η κλίση  $\theta$  του κύριου θλιπτήρα προσδιορίζεται με βάση τη συνθήκη αστοχίας του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη των ακραίων διατομών, υπό τη δράση ορθών και

διατμητικών τάσεων που έχουν ομοιόμορφη κατανομή στη ζώνη αυτή και δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_c = \frac{N_c \cos \theta + N_{ct}}{bh(1 - \lambda \tan \theta)} \quad (121)$$

$$\tau_c = \frac{V}{bh(1 - \lambda \tan \theta)} \quad (122)$$

Ο Tegos (1985) υπολόγισε τις κύριες τάσεις  $\sigma_I$  και  $\sigma_{II}$  με βάση τις διατμητικές,  $\sigma_c$ ,  $\tau_c$ , και χρησιμοποίησε τις τιμές τους  $\sigma'$  ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού ως προς  $\sigma_I/\sigma_{II}$  που προσεγγίζει την περιβάλλουσα αστοχίας του σκυροδέματος  $f(\sigma_I, \sigma_{II})=0$  μέσα στο τεταρτοκύκλιο εφελκυσμού-θλίψης. Στη συνέχεια χρησιμοποίησε μία εμπειρική προσέγγιση για να επιλύσει αναλυτικά την εξίσωση που προκύπτει για την άγνωστη κλίση  $\theta$  του θλιπτήρα. Εδώ όμως επιχειρείται αντ' αυτού η αναλυτική επίλυση με βάση την εξίσωση της  $\sigma_{II}$  με το  $f_c$ . Η εναλλακτική αυτή προσέγγιση αποδεικνύεται εξίσου ικανοποιητική, επιτρέπει δε άμεση σύγκριση με το προσομοίωμα Shohara and Kato (1981), καθώς στο τελευταίο η ορθή τάση  $N_c/(1-\beta)bx\cos\theta$ , που εξισώνεται με  $f_c$ , δεν είναι παρά η θλιπτική κύρια τάση λόγω της δράσης της ορθής δύναμης,  $N_c\cos\theta$ , και της τέμνουσας,  $V_s$ , του ιδεατού δικτυώματος στη θλιβόμενη ζώνη της ακραίας διατομής. Στην παρούσα περίπτωση προκύπτει προς επίλυση μία δευτεροβάθμια εξίσωση για το  $\tan\theta$ . Στην περιοχή εφελκυστικών ή χαμηλών θλιπτικών τιμών της  $N$ , η εξίσωση αυτή είναι η εξής:

$$\left[ \left( v + \omega_s - \frac{\lambda^2 \omega_w}{2\zeta} \right)^2 - \lambda^2 \right] \tan^2 \theta - \lambda \left[ \frac{\lambda^2 \omega_w}{2\zeta} \left( \omega_w - \frac{3}{4} \right) + (v + \omega_s)(1 - \omega_w) - 2 \right] \tan \theta - \frac{\lambda^2 \omega_w}{4\zeta} \left( \frac{3}{2} - \omega_w \zeta \right) + v + \omega_s - 1 = 0 \quad (123)$$

Η αντίστοιχη εξίσωση για την περιοχή των υψηλών θλιπτικών τιμών είναι:

$$\left[ \left( v - \omega_s + \frac{\lambda^2 \omega_w}{4\zeta} \right)^2 - \lambda^2 \right] \tan^2 \theta - \lambda \left[ \frac{\lambda^2 \omega_w}{4\zeta} \left( \frac{3}{2} - \omega_w \right) + (v - \omega_s)(1 - \omega_w) - 2 \right] \tan \theta + \frac{\lambda^2 \omega_w}{4\zeta} \left( \frac{3}{2} + \omega_w \zeta \right) + v - \omega_s - 1 = 0 \quad (124)$$

Εάν:

$$\frac{3}{8} \frac{l^2}{z} \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} > 2 A_s f_y \quad (125)$$

ή, σε αδιάστατη μορφή:

$$\lambda > \sqrt{\frac{8}{3\zeta} \frac{\omega_s}{\omega_w}} \quad (126)$$

δεν υπάρχει η περιοχή αξονικών δυνάμεων όπου προκαλείται ψαθυρή διατμητική αστοχία, ενδιάμεσα των περιοχών όπου ισχύουν οι εξ. (119), (120) και (124), ή οι εξ. (117), (118), (123). Διαφορετικά, δηλ. αν δεν ισχύει η ανωτέρω εξ. (126), υπάρχει η ενδιάμεση περιοχή διατμητικής αστοχίας, κατά προσέγγιση μεταξύ των ορίων:

$$\frac{3}{8} \omega_w \frac{\lambda^2}{\zeta} + 0.5 - \omega_s \approx v_1 < v < v_2 \approx -\frac{3}{8} \omega_w \frac{\lambda^2}{\zeta} + 0.5 + \omega_s \quad (127)$$

Οι λεπτομέρειες είναι περίπλοκες και δεν κρίνεται σκόπιμο να δοθούν εδώ.

Το εναλλακτικό προσομοίωμα θλιπτήρων-ελκυστήρων είναι το παραλληλόγραμμο του Σχ. 2.35, το οποίο εξετάστηκε από τον Τέγο (1984). Το προσομοίωμα αυτό διαθέτει δύο ζεύγη θλιπτήρων και έναν ελκυστήρα εγκάρσιο στον άξονα του μέλους στο μέσο του ύψους του. Τα ζεύγη των θλιπτήρων συγκλίνουν στη θλιβόμενη ζώνη των ακραίων διατομών. Κάθε ένας από τους δύο λοξούς θλιπτήρες αναλαμβάνει το σύνολο της τέμνουσας του προσομοιώματος θλιπτήρων-ελκυστήρων και το 50% της θλιπτικής αξονικής δύναμης που ασκείται στη θλιβόμενη ζώνη της αντίστοιχης ακραίας διατομής. Το άλλο μισό αναλαμβάνεται από τον κατακόρυφο θλιπτήρα του προσομοιώματος. Οι βασικές σχέσεις της απλούστερης εναλλακτικής μορφής που αναλύθηκε παραπάνω εξακολουθούν να ισχύουν, με το  $0.5 \tan \theta$  αντί της  $\tan \theta$ , όπου  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ των δύο θλιπτήρων που συγκλίνουν στη θλιβόμενη ζώνη. Η βασική όμως διαφορά με το απλούστερο προσομοίωμα θλιπτήρων-ελκυστήρων κατά Τεγος (1985) είναι ότι ο εγκάρσιος στον άξονα ελκυστήρας του πιο περίπλοκου προσομοιώματος κατά Τέγο (1984) αναπτύσσει εφελκυστική δύναμη ίση με  $V_s$ . Η δύναμη αυτή χρειάζεται να αναληφθεί από το σύνολο των συνδετήρων που κατανέμονται στο συνολικό μήκος  $l$  του στοιχείου. Ετσι όμως οι συνδετήρες χρειάζεται να αναλάβουν την πλήρη τέμνουσα δύναμη,  $V_s + V_t$ , και των δύο μηχανισμών ανάληψης της τέμνουσας. Αυτό σημαίνει ότι η οριακή τέμνουσα δύναμη καθορίζεται από τη συνολική διατομή εγκάρσιου σπλισμού και δίνεται από το δεξιά μέλος της εξ. (125), ή, ισοδύναμα, από μόνο τον όρο

$0.5\lambda_w$  στο δεξιά μέλος των αδιαστατοποιημένων εξ. (128) και (120). Αυτό όμως το συμπέρασμα δεν ανταποκρίνεται στη φυσική πραγματικότητα και τα πειραματικά αποτελέσματα, οπότε το απλούστερο προσομοίωμα κατά Tegos (1985) και το Σχ. 2.34 είναι προτιμότερο.

Κατά μία εντελώς διαφορετική μεθοδολογία, οι König et al (1993) καθορίζουν την οριακή διατμητική αντοχή από την κορυφή της πλήρους μονοτονικής καμπύλης φορτίου-εγκάρσιας μετακίνησης (βέλους) του στοιχείου, ή σαν το φορτίο που αντιστοιχεί στη βράχυνση αστοχίας του (περισφιγμένου) σκυροδέματος. Για την κατασκευή της καμπύλης φορτίου-παραμορφώσεων οι König et al (1993) χρησιμοποιούν την υπόθεση της επιπεδότητας διατομών και την Τεχνική Θεωρία της Κάμψης, με κάποιες τροποποιήσεις λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών των στοιχείων χαμηλού λόγου διάτμησης.

Για τη γεωμετρία του Σχ. 2.36, όπου σε δύο τριγωνικές ζώνες κοντά στα δύο άκρα αναπτύσσεται ρηγμάτωση υπό γωνία  $\theta$  ως προς τον άξονα του μέλους, ενώ η ενδιάμεση ζώνη είναι αρηγμάτωση, έχουμε τα εξής ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του στοιχείου με χαμηλό λόγο διάτμησης, με τις ανάλογες επιπτώσεις στην ανάλυση:

- (α) Επειδή οι ακραίες διατομές είναι ρηγματωμένες εγκάρσια στον άξονα, στο σκυρόδεμα των ρηγματωμένων τριγωνικών περιοχών δεν μεταφέρονται τάσεις από το περιβάλλον του. Τότε όμως η ισορροπία δυνάμεων στην αξονική διεύθυνση επιβάλλει μηδενικές τάσεις συνάφειας μεταξύ των διαμήκων ράβδων και του σκυροδέματος της ρηγματωμένης περιοχής. Υπενθυμίζεται σχετικά ότι κατά Tegos (1984, 1985) η ανάπτυξη τάσεων συνάφειας μέσα στις ρηγματωμένες τριγωνικές περιοχές των άκρων καθίσταται δυνατή λόγω της ριπδοειδούς διάταξης των θλιπτήρων, οι οποίοι και μεταβιβάζουν στη θλιβόμενη ζώνη των ακραίων διατομών τη διαμήκη δύναμη που εξισορροπεί τις τάσεις συνάφειας.
- (β) Το μήκος  $L_v$  του αρηγμάτωσης σκυροδέματος στο Σχ. 2.36 μπορεί να είναι ανεπαρκές για την ανάπτυξη της πλήρους δύναμης διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού. Επομένως οι König et al (1993) θεωρούν ότι η μέγιστη τάση του τελευταίου ισούται με:

$$\max\sigma_s = \min(f_y, 4f_b L_v / \Phi) \quad (128)$$

όπου η τάση συνάφειας  $f_b$  (σε MPa) λαμβάνεται ίση με  $1.5 + f_c / 8$ .

Οι σχέσεις  $\sigma$ - $\epsilon$  των υλικών κατά König et al (1993) είναι: i) ελαστική-πλήρως πλαστική για το χάλυβα, με μέγιστη τάση κατά την εξ. (128), και ii) κατά Kent and Park

(1971) για το σκυρόδεμα σε μονοαξονική θλίψη, λαμβάνοντας υπόψη και την επιρροή της περισφιγξης. Σαν κριτήριο θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος λαμβάνεται η υπέρβαση μιας τιμής της ανηγμένης βράχυνσης ίση με το διπλάσιο αυτής στο τέλος του φθίνοντος κλάδου και στην έναρξη του οριζόντιου στο προσομοίωμα σ-ε κατά Kent and Park (1971).

Ο αλγόριθμος για την κατασκευή της καμπύλης φορτίου-εγκάρσιας μετακίνησης (βέλους) περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

(α) Καθορίζεται η κλίση των ρωγμών ως προς τον άξονα του μέλους κατά τη σχέση:

$$\theta(^{\circ}) = 70 + 100\nu \geq 20^{\circ} \quad (129)$$

με  $\nu = N/A_c f_c > 0$  για εφελκυσμό.

- (β) Υποτίθεται μία τιμή για το βάθος  $x$  της θλιβόμενης ζώνης στην ακραία διατομή, οπότε και υπολογίζεται το μήκος των εφελκυσμένων ράβδων όπου δεν αναπτύσσονται τάσεις συνάφειας σαν:  $l_s = (h-x)/\tan\theta$ .
- (γ) Αρχίζει η βήμα-προς-βήμα διαδικασία για την κατασκευή της σχέσης τέμνουσας-καμπυλότητας στο άκρο, ξεκινώντας από μία πρώτη τιμή της τελευταίας. Από την τιμή αυτή, για δοσμένη τιμή της αξονικής δύναμης  $N$  και για μία υπόθεση για την αρχική τιμή της δύναμης του εφελκυσμένου οπλισμού  $S_1$ , καθορίζεται η κατανομή των ορθών τάσεων και παραμορφώσεων στην ακραία διατομή, με βάση την υπόθεση της επιπεδότητας διατομών. Υπολογίζεται κατόπιν, από ισορροπία σε επίπεδο ακραίας διατομής, η ροπή κάμψης  $M$  και απ' αυτήν η τέμνουσα δύναμη  $V = 2M/l$ , που αντιστοιχεί στην πρώτη τιμή της καμπυλότητας στο άκρο.
- (δ) Από την τιμή της  $N$  και την πρώτη εκτίμηση της  $V$  στο ανωτέρω γ, καθορίζεται με διαδοχικές επαναλήψεις η κατανομή των παραμορφώσεων σε διάφορες διατομές μέσα στο ρηγματωμένο μήκος  $l_s$  του μέλους, με βάση τις συνθήκες ισορροπίας, τους νόμους σ-ε των δύο υλικών, τη γνωστή κατανομή του βάθους της θλιβόμενης ζώνης κατά μήκος του  $l_s$  και την υπόθεση επιπεδότητας της θλιβόμενης ζώνης κάθε μίας από τις διατομές αυτές.
- (ε) Η συνολική μήκυνση του εφελκυσμένου χάλυβα μέσα στο μήκος  $l_s$  μπορεί να καθορισθεί από τη γωνία στροφής και τη μέση αξονική μετάθεση της διατομής σε απόσταση  $l_s$  από την ακραία. Η μέση αξονική μετάθεση και η γωνία στροφής καθορίζεται με ολοκλήρωση, κατά μήκος του  $l_s$ , της καμπυλότητας και της μέσης ανηγμένης μήκυνσης που καθορίσθηκε στο ανωτέρω δ). Κατόπιν υπολογίζεται η μέση ανηγμένη μήκυνση κατά μήκος του  $l_s$ , από τη συνολική μήκυνση του

εφελκυσμένου χάλυβα, οπότε είναι γνωστές και οι τάσεις και οι δυνάμεις του χάλυβα στην ακραία και στις ενδιάμεσες διατομές.

- (στ) Αν η τιμή της δύναμης του εφελκυσμένου χάλυβα που υπολογίστηκε στο ε) διαφέρει ουσιωδώς απ' αυτήν που υποτέθηκε στο ανωτέρω γ) και χρησιμοποιήθηκε στα βήματα γ) και δ), τότε τα βήματα γ) έως ε) επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Σε κάθε βήμα ελέγχεται το βάθος της ουδέτερης ζώνης στις ενδιάμεσες διατομές με βάση την κατανομή των ανηγμένων μηκώνσεων που χρειάζεται για την ισορροπία. Αν εμφανίζεται μήκυνση στην άκρη της θλιβόμενης ζώνης στην ακραία διατομή, μειώνεται το βάθος της θλιβόμενης ζώνης  $x$  εκεί και επαναλαμβάνονται τα βήματα β) έως στ).
- (ζ) Μετά τη σύγκλιση των ανωτέρω βημάτων, αυξάνεται η τιμή της καμπυλότητας στο άκρο και επαναλαμβάνονται τα βήματα γ) έως στ), για να υπολογισθεί νέα τιμή της τέμνουσας  $V$ . Όλα τα βήματα επαναλαμβάνονται, μέχρι την κορυφή του διαγράμματος ή μέχρι να επιτευχθεί η βράχυνση αστοχίας του σκυροδέματος.

#### 2.6.2.2. Εμπειρικά και ημι-εμπειρικά προσομοιώματα

Στο εμπειρικό τους προσομοίωμα οι Kaneka and Tanaka (1978, 1980) διακρίνουν τρεις διαφορετικούς τρόπους αστοχίας: α) λόγω διαρροής του εφελκυσμένου χάλυβα, β) λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος στα άκρα, και γ) λόγω διατμητικής ολίσθησης κατά μήκος της λοξής ρωγμής και ταυτόχρονης διαρροής των συνδετήρων. Υπολογίζεται εμπειρικά η οριακή αντοχή του μέλους για καθ' έναν απ' αυτούς τους τρεις τρόπους αστοχίας, και επιλέγεται σαν καθοριστική η ελάχιστη από τις τρεις. Από τις παραμετρικές αναλύσεις των Kaneka and Tanaka (1980) προέκυψε σαν κρίσιμος ο τελευταίος τρόπος αστοχίας, για τις περισσότερες περιπτώσεις λόγου διάτμησης, αξονικής δύναμης και ποσοστού οπλισμού που μας ενδιαφέρουν. Αυτός ο τρόπος αστοχίας θεωρείται ότι συμβαίνει αφού εξαντληθεί η αντοχή σε συνάφεια κατά μήκος των διαμήκων ράβδων, και η αντίστοιχη οριακή αντοχή προκύπτει σαν το άθροισμα: α) της τέμνουσας που αντιστοιχεί σε αστοχία της συνάφειας, β) μιας εμπειρικής συμβολής του μηχανικού δικτυώματος, και γ) μιας δεύτερης εμπειρικής συμβολής από το λοξό θλιπτήρα σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη και την ευεργετική δράση των συνδετήρων.

Οι Umehara and Jirsa (1982, 1984) πρότειναν την κάτωθι εμπειρική σχέση, με βάση τα αποτελέσματα πειραμάτων στο Πανεπιστήμιο του Τέξας:

$$V_u = 1150 \left(1 - 0.28 \frac{a}{d}\right) A_c \sqrt{f_c} + \frac{\min(0.2N, 1400A)}{\frac{a}{d}} \quad (130)$$

όπου οι δυνάμεις είναι σε kN, οι επιφάνειες του πυρήνα,  $A_c$ , και της συνολικής διατομής,  $A$ , σε  $m^2$  και η  $f_c$  σε MPa.

Αλλα εμπειρικά ή ημι-εμπειρικά προσομοιώματα έχουν προταθεί από τους Watanabe and Muguruma (1985) και τον Watanabe (1984).

### 2.6.3. Προσομοίωση της σχέσης δυνάμεων-παραμορφώσεων υπό ανακυκλιζόμενη ένταση

#### 2.6.3.1. Εισαγωγή

Σε μέλη με χαμηλό λόγο διάτμησης οι διατμητικές παραμορφώσεις είναι εξίσου σημαντικές με τις καμπτικές. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για ανακυκλιζόμενη φόρτιση μεγάλου εύρους, καθώς τότε η διατμητική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από έντονη μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και σε μέλη στα οποία καθοριστική της μονοτονικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη, μετά από λίγους κύκλους, οι διατμητικές παραμορφώσεις μπορεί να ξεπεράσουν σε μέγεθος τις καμπτικές, οδηγώντας τελικά σε διατμητική αστοχία.

Η σημερινή κατάσταση της γνώσης (State-of-the-Art) των προσομοιωμάτων τύπου μέλους για τις καμπτοδιατμητικές παραμορφώσεις υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, υστερεί σημαντικά αυτής των προσομοιωμάτων για τις καθαρά καμπτικές παραμορφώσεις. Αυτός είναι και ο λόγος που η προσομοίωση με Πεπερασμένα Στοιχεία και σε επίπεδο σημείου στο μέλος, εφαρμόζεται πολύ πιο συχνά σε στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης παρά σε σχετικά λυγηρά πρισματικά μέλη οπλισμένου σκυροδέματος. Τα τελευταία χρόνια πάντως, με τη συγκέντρωση σημαντικού όγκου πειραματικών δεδομένων για την παραμορφωσιακή συμπεριφορά στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης, γίνεται σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη καμπτοδιατμητικών προσομοιωμάτων τύπου μέλους.

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί τρεις προσεγγίσεις για την εισαγωγή των διατμητικών παραμορφώσεων στα προσομοιώματα τύπου μέλους: α) με εμπειρική τροποποίηση των φαινομενολογικών προσομοιωμάτων που έχουν προταθεί για την καμπτική συμπεριφορά, β) με ξεχωριστή προσομοίωση και υπολογισμό των διατμητικών παραμορφώσεων, αγνοώντας την αλληλεπίδραση μεταξύ τέμνουσας ( $V$ ) και μεγεθών ορθής έντασης ( $M$ ,  $N$ ), και τελική

επαλληλία με τις καμπτικές παραμορφώσεις, και γ) με γενίκευση των θεμελιωδών προσομοιωμάτων τύπου ινών για την κάμψη, ώστε να λάβουν υπόψη ότι η ρηγμάτωση και το πεδίο θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος συμβαίνουν υπό γωνία ως προς τον άξονα και τη διατομή.

#### 2.6.3.2. Φαινομενολογικά προσομοιώματα της συνολικής καμπτοδιατμητικής συμπεριφοράς

Αν και κατ' αρχήν γενικότερη, καθώς είναι σε θέση να λάβει υπόψη την αλληλεπίδραση κάμψης και διάτμησης, αυτή η προσέγγιση εφαρμόζεται σχετικά σπάνια, καθώς τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα δεν επαρκούν για την ανάπτυξη φαινομενολογικών κανόνων για το πλήρες φάσμα των δυνατών συνδυασμών τιμών των  $M$ ,  $V$  και  $N$ .

Μία από τις ελάχιστες περιπτώσεις που υιοθετήθηκε η προσέγγιση αυτή είναι το προσομοίωμα μέλους των Roufaiel and Meyer (1987) για μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη. Το βασικό του στοιχείο είναι η υστερητική σχέση ροπών-καμπυλοτήτων που περιγράφηκε στα πλαίσια της Ενότητας 2.3.1.2 και στο Σχ. 2.10. Οι κλάδοι επαναφόρτισης που προβλέπει το προσομοίωμα εξαρτώνται από το λόγο διάτμησης. Αν  $M/Vh > 4.0$ , οι κλάδοι αυτοί είναι ευθύγραμμοι, από το σημείο του άξονα των  $\phi$  όπου καταλήγει ο κλάδος αποφόρτισης, προς το σημείο  $P$  της μέγιστης προγενέστερης καμπυλότητας στη μονοτονική καμπύλη στη διεύθυνση της επαναφόρτισης. Αν  $M/Vh < 1.5$ , ο κλάδος επαναφόρτισης ακολουθεί τον οριζόντιο άξονα μέχρι την αρχή των αξόνων, και οδεύει κατόπιν προς το ανωτέρω σημείο  $P$  της μέγιστης παραμόρφωσης. Για ενδιάμεσες τιμές του  $M/Vh$ , ο κλάδος επαναφόρτισης κατευθύνεται αρχικά προς ένα σημείο του πρώτου κλάδου της μονοτονικής καμπύλης στη διεύθυνση της επαναφόρτισης, με τετμημένη ίση με το  $0.4M/Vh - 0.6$  αυτής του σημείου τομής του κλάδου αυτού της μονοτονικής καμπύλης με την ευθεία που ενώνει την κατάληξη του κλάδου αποφόρτισης με το σημείο  $P$  (κλάδος 4 στο Σχ. 2.10). Μετά το σημείο αυτό ο κλάδος επαναφόρτισης κατευθύνεται προς το σημείο  $P$  της μέγιστης προγενέστερης παραμόρφωσης στη μονοτονική καμπύλη. Έτσι προκύπτει η χαρακτηριστική στένωση των βρόχων λόγω διάτμησης.

Σε οποιοδήποτε προσομοίωμα μέλους που διαθέτει βρόχους υστέρησης με στένωση, η στένωση μπορεί να γίνει συνάρτηση του λόγου διάτμησης. Παραδείγματα αποτελούν τα προσομοιώματα των Park et al (1987), Costa and Costa (1987) και Coelho and Carvalho (1990). Αυτά τα τρία προσομοιώματα μάλιστα περιλαμβάνουν επίσης σταδιακή μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση, χαρακτηριστικό που ταιριάζει με τη



συμπεριφορά των στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης. Εντούτοις, σ' όλα αυτά τα προσομοιώματα ο μεταδιαρροϊκός κλάδος της μονοτονικής καμπύλης ανέρχεται συνεχώς, χωρίς σημείο οριακής αντοχής και φθίνοντα κλάδο. Έτσι λείπει αυτό το σημαντικό στοιχείο της συμπεριφοράς μελών με χαμηλό λόγο διάτμησης.

Πάντως, προκειμένου να περιληφθούν εμμέσως στο προσομοίωμα οι διατμητικές παραμορφώσεις, οι φαινομενολογικοί κανόνες για τη στένωση των βρόχων δεν συνιστάται να εφαρμόζονται σε επίπεδο σχέσης  $M-\Phi$  στα πλαίσια ενός προσομοιώματος κατανεμημένης ανελαστικότητας, που να βασίζεται στην υπόθεση της επιπεδότητας των διατομών για την κατασκευή του μητρώου ευκαμψίας ή δυσκαμψίας μέλους. Αντίθετα συνιστάται να εισάγονται στα πλαίσια προσομοιωμάτων συγκεντρωμένης ανελαστικότητας, στα οποία οι διατμητικές παραμορφώσεις επιπροστίθενται στις καμπτικής φύσεως στροφές που είναι συγκεντρωμένες στα άκρα του μέλους. Επί παραδείγματι αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν οι παράμετροι της διγραμμικής σχέσης  $M-\theta$  των ακραίων στροφικών ελατηρίων καθορίζονται με βάση το προσομοίωμα Park and Ang (1985), συμπεριλαμβάνοντας τη συμβολή των διατμητικών παραμορφώσεων,  $\theta_{y, \text{shear}}$ , στη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ .

#### 2.6.3.3. Επαλληλία διακριτών προσομοιωμάτων για την καμπτική και τη διατμητική συμπεριφορά

Η χωριστή προσομοίωση διατμητικών και καμπτικών παραμορφώσεων και η επαλληλία τους είναι αρκετά συνηθισμένη στις εφαρμογές και έχει εμφανισθεί σε διάφορες μορφές. Και στην περίπτωση όμως αυτή τα διατμητικά φαινόμενα περιγράφονται φαινομενολογικά. Επομένως η κύρια διαφορά της προσέγγισης αυτής από εκείνη της προηγούμενης Υποενότητας, έγκειται στη διακριτή και ανεξάρτητη αντιμετώπιση των καμπτικών και των διατμητικών φαινομένων. Έτσι δίνεται και η δυνατότητα συνδυασμού οποιουδήποτε διατμητικού προσομοιώματος με οποιοδήποτε καμπτικό, δυνατότητα που δεν υπάρχει στην περίπτωση της προηγούμενης Υποενότητας.

Οι Kustu and Bouwkamp (1975) ήταν οι πρώτοι που πρότειναν ένα προσομοίωμα τύπου Takeda για τη σχέση τέμνουσας-διατμητικής παραμόρφωσης σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι νόμοι υστέρησης του προσομοιώματός τους είναι παρόμοιοι με αυτούς του προσομοιώματος Roufaiel and Meyer (1987) για λόγο διάτμησης ίσο με 2.0.

Ο Banon (1980) υιοθέτησε το προσομοίωμα Kustu and Bouwkamp (1975) για ένα πρόσθετο στροφικό ελατήριο σε κάθε άκρο ενός προσομοιώματος συγκεντρωμένης ανελαστικότητας τύπου απλού μέλους κατά Otani (1974). Τα ελατήρια αυτά προσομοίωναν

τις διατμητικές παραμορφώσεις δοκών ή υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος. Παρόμοια ήταν και η αντιμετώπιση των δοκών σύζευξης συζευγμένων τοιχωμάτων από τους Takayanagi and Schnobrich (1979).

Επισημαίνεται ότι με την εν σειρά διάταξη στροφικών ελατηρίων οι (ανελαστικές) διατμητικές και καμπτικές παραμορφώσεις προστίθενται, γεγονός ισοδύναμο με την επαλληλία των αντιστοίχων εφαπτομενικών μητρώων ευκαμψίας. Οποιοσδήποτε φαινομενολογικός νόμος υστέρησης του καμπτικού ελατηρίου για τη σχέση ακραίας ροπής-γωνίας στροφής χορδής, μπορεί να συνδυασθεί με οποιοδήποτε προσομοίωμα για την αντίστοιχη σχέση των διατμητικών ελατηρίων.

Ο Fardis (1991) πρότεινε ένα προσομοίωμα του τύπου επαλληλίας καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων, το οποίο είναι και γενικότερο, καθότι καλύπτει και την περίπτωση διαξονικής δύναμης και μπορεί να συνδυασθεί με οποιοδήποτε προσομοίωμα κατανεμημένης ή συγκεντρωμένης ανελαστικότητας για μονοαξονική ή διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη. Το μητρώο στήλη των διαφορικών παραμορφώσεων μέλους,  $dv_m$  (βλ. εξ. (4) και Σχ. 2.2 του παρόντος Κεφαλαίου) αναλύεται σε μία συνιστώσα καθαρά διατμητικών παραμορφώσεων και σε μία άλλη καθαρά καμπτικών (δηλ. που ικανοποιούν την υπόθεση επιπεδότητας διατομών). Αυτό σημαίνει ότι και το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας,  $F_m^t$ , αναλύεται σε ένα για τη διάτμηση και ένα για την κάμψη,  $F_{sh}^t$  και  $F_{fl}^t$ , αντίστοιχα. Οι λόγω διάτμησης διαφορικές παραμορφώσεις του μέλους είναι οι γωνίες  $d\theta_{i,sh}^A = d\theta_{i,sh}^B$  ( $i=y, z$ , βλ. Σχ. 2.2), οι οποίες ισούνται με τις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις στο μήκος  $l$ :

$$d\theta_{y,sh}^A = d\theta_{y,sh}^B = d\gamma_{xz} = \frac{1}{K_{z,sh}^t} \frac{dM_y^A + dM_z^B}{l} \quad (131)$$

$$d\theta_{z,sh}^A = d\theta_{z,sh}^B = d\gamma_{xy} = \frac{1}{K_{y,sh}^t} \frac{dM_z^A + dM_y^B}{l} \quad (132)$$

Αρα τα στοιχεία 11, 13, 31 και 33 του μητρώου ευκαμψίας  $F_{sh}^t$  ισούνται με  $1/K_{z,sh}^t l$  και τα στοιχεία 22, 24, 42, 44 με  $1/K_{z,sh}^t$ . Όλα τα άλλα είναι μηδενικά. Το εφαπτομενικό Μέτρο διάτμησης  $K_{i,sh}^t$  ισούται με την κλίση της καμπύλης  $\tau$ - $\gamma$  στην τρέχουσα τάση  $\tau_{xi}$ , επί την επιφάνεια διάτμησης του μέλους,  $A_{i,sh}$ , στη διεύθυνση  $i=y, z$ . Το προσομοίωμα  $\tau$ - $\gamma$  που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό και σκιαγραφείται κατωτέρω, βασίζεται στις μετρήσεις διατμητικών παραμορφώσεων σε δοκούς από τον Ma et al (1976) καθώς και σε τοιχώματα δυσκαμψίας. Αποτελεί γενίκευση, αλλά συγχρόνως και απλοποίηση του προγενέστερου

προσομοιώματος των Ozcebe and Saatcioglu (1984). Αυτό το τελευταίο προσομοίωμα είναι λιγότερο γενικό, ως προς το ότι η μονοτονική του καμπύλη, που χρησιμεύει και σαν περιβάλλουσα-σκελετός κατά την ανακυκλιζόμενη ένταση: α) δεν περιλαμβάνει φθίνοντα κλάδο μετά την οριακή αντοχή σε διάτμηση, και β) δεν μειώνεται σταδιακά κατά την ανακύκλιση. Η απλοποίηση έγκειται στο ότι χρησιμοποιεί λιγότερους κανόνες για την αποφόρτιση και την επαναφόρτιση, χωρίς να ξεφεύγει από την πειραματική συμπεριφορά.

Η καμπύλη-σκελετός του προσομοιώματος τ-γ κατά Fardis (1991) είναι πολυγραμμική και συμπίπτει με τη μονοτονική καμπύλη (Σχ. 2.37). Τα δύο πρώτα σημεία αλλαγής κλίσης της μονοτονικής καμπύλης,  $Y_0$  και  $U_0$ , αντιστοιχούν στη ρηγμάτωση και στην οριακή αντοχή, αντίστοιχα. Ο οριζόντιος κλάδος μετά το σημείο  $R_0$  του φθίνοντα κλάδου αντιστοιχεί στην τελική, παραμένουσα αντοχή. Η καμπύλη μονοτονικής φόρτισης στην αντίθετη κατεύθυνση,  $0Y_0'U_0'R_0'$  δεν χρειάζεται να είναι συμμετρική της  $0Y_0U_0R_0$  ως προς το 0. Με βάση τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα, προκύπτει ότι οι παράμετροι της μονοτονικής καμπύλης μπορούν να καθορισθούν ως εξής: Η οριακή τάση στην κορυφή,  $\tau_{u0}$ , μπορεί να καθορισθεί με βάση τα προσομοιώματα της Ενότητας 2.6.2, με διαίρεση της τέμνουσας αντοχής με την επιφάνεια της διατομής του στοιχείου. Ειδικά για τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος, η οριακή τάση  $\tau_{u0}$  μπορεί να ληφθεί ίση με  $(\tau_c^2 + \tau_c \sigma)^{1/2}$ , με  $\sigma = N/A_c$  και  $\tau_c$  την αντοχή του τοιχώματος κατά ACI-318/95 για  $\sigma = 0$ . Οι τάσεις στη διαρροή και στην παραμένουσα αντοχή,  $\tau_{y0}$  και  $\tau_{v0}$ , μπορούν να ληφθούν ίσες με  $0.85\tau_{u0}$  και  $\tau_{u0}/3$  αντίστοιχα. Η διατμητική παραμόρφωση στη διαρροή,  $\gamma_y$ , ποικίλλει μεταξύ 0.15% και 0.45% (μέση τιμή για οποιοδήποτε είδος στοιχείου:  $\gamma_y = 0.35\%$ ), ενώ η διατμητική παραμόρφωση στην αστοχία μπορεί να εκτιμηθεί σαν:

$$\gamma_u = 0.012 \left( \frac{M}{Vh} \right)^{1.5} (1 - 0.1\sqrt{\sigma}) \quad (133)$$

Τέλος η διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_t$  στο τέλος του φθίνοντος κλάδου και στην αρχή του οριζόντιου, μπορεί να ληφθεί ίση με το διπλάσιο της  $\gamma_u$ .

Υπό ανακυκλιζόμενη ένταση η μονοτονική καμπύλη χρησιμεύει σαν οδηγός-περιβάλλουσα των κορυφών των κύκλων σε επαναφόρτιση, αφού βεβαίως ληφθεί υπόψη η μείωσή της λόγω της ανακύκλισης. Συγκεκριμένα, εάν η μέγιστη παραμόρφωση στον ημικόκλο  $i$  συμβολίζεται με  $\gamma_i$ , αν είναι θετική, ή με  $\gamma_i'$ , αν είναι αρνητική, οι τεταγμένες των κορυφών της μονοτονικής καμπύλης λαμβάνονται να μειώνονται ως εξής:

$$\tau_j = \tau_{jo} e^{-0.1 \left[ \alpha \frac{\sum \gamma_i}{\gamma_y} - (1-\alpha) \frac{\sum \gamma'_i}{\gamma'_y} \right]} \quad (134)$$

$$\tau'_j = \tau'_{jo} e^{-0.1 \left[ (1-\alpha) \frac{\sum \gamma_i}{\gamma_y} - \alpha \frac{\sum \gamma'_i}{\gamma'_y} \right]} \quad (135)$$

όπου  $j$  συμβολίζει τα σημεία  $Y$ ,  $U$  και  $R$  και η παράμετρος  $\alpha$  ισούται περίπου με 0.3 (Σχ. 2.38). Η αποφόρτιση από τη (μειωμένη κατά τα ανωτέρω) μονοτονική καμπύλη είναι γραμμική, με κλίση  $K_1 = \tau_y / \gamma_y$  (αντίστοιχα  $K_1' = \tau'_y / \gamma'_y$ ), με  $\tau_y$ ,  $\tau'_y$  τα μειωμένα κατά τις εξ. (134), (135) (κλάδοι 5 και -5 στο Σχ. 2.39).

Αν αντιστραφεί η φορά της φόρτισης κατά την αποφόρτιση προτού η αποφόρτιση φθάσει τον οριζόντιο άξονα στο σημείο  $A$  (ή  $A'$ ), τότε ακολουθείται ο πρόσφατος κλάδος αποφόρτισης προς την αρχή της αποφόρτισης πάνω στη μονοτονική καμπύλη. Αν η αποφόρτιση συνεχίσει μετά το σημείο  $A$  (ή  $A'$ ) στον οριζόντιο άξονα, τότε κατευθύνεται σαν πρώτη φόρτιση στην αντίθετη διεύθυνση προς το σημείο  $I'$  (ή  $I$  αντίστοιχα) που βρίσκεται πάνω στον ελαστικό κλάδο  $0Y'$  (αντίστοιχα  $0Y$ ) σε τεταγμένη  $-\tau_{cr}$  (αντίστοιχα  $\tau_{cr}$ ), όπου  $\tau_{cr}$  είναι η τάση ρηγμάτωσης (κλάδοι 6 και -6 στα Σχ. 2.40, 2.41). Αν η προγενέστερη ιστορία παραμόρφωσης περιλαμβάνει και υπέρβαση της τάσης διαρροής στην αντίθετη κατεύθυνση, μέχρι το σημείο  $E$  (αντίστοιχα  $E'$ ) πέραν από το  $Y'$  (αντίστοιχα  $Y$ ) επί της μειωμένης καμπύλης μονοτονικής φόρτισης, τότε η επαναφόρτιση από το  $A$  (αντίστοιχα το  $A'$ ) οδεύει γραμμικά προς το σημείο  $B'$  (αντίστοιχα  $B$ ), το οποίο έχει τεταγμένη  $-\tau_{cr}$  (αντίστοιχα  $\tau_{cr}$ ). Τα σημεία  $B$  ή  $B'$  ορίζονται με βάση το ότι η προέκταση του κλάδου  $AB'$  (που συμβολίζεται σαν 8 στα Σχ. 2.41, 2.42) και περνάει από το σημείο  $L'$ , το οποίο βρίσκεται πάνω στον κλάδο αποφόρτισης -5 που ξεκινάει από το σημείο  $E'$  (για τον κλάδο  $A'B$ , από το σημείο  $L$ , που βρίσκεται στον κλάδο 5 από το  $E$ ). Τα σημεία  $L'$  ή  $L$  έχουν τεταγμένη:

$$\tau'_L = \tau'_D \left[ 1 - \left( 0.1 - 0.8 \min \left( 0.125, \frac{\sigma}{f_c} \right) \right) \frac{\gamma_{E'}}{\gamma_{y'}} \right] \quad (136)$$

$$\tau_L = \tau_D \left[ 1 - \left( 0.1 - 0.8 \min \left( 0.125, \frac{\sigma}{f_c} \right) \right) \frac{\gamma_E}{\gamma_y} \right] \quad (137)$$

Μετά το σημείο  $B'$  (αντίστοιχα  $B$ ), ο κλάδος αποφόρτισης κατευθύνεται γραμμικά προς το σημείο  $D'$  (αντίστοιχα  $D$ ), το οποίο βρίσκεται στον κλάδο αποφόρτισης -5 από το σημείο  $E'$  (αντίστοιχα κλάδο 5 από το  $E$ ), σε τεταγμένη  $\tau_D' = 0.95 \tau_R'$  (αντίστοιχα  $\tau_D = 0.95 \tau_E$ ). Ο κλάδος

αποφόρτισης  $B'D'$ , ή -7 στα Σχ. 2.41, 2.42 (αντίστοιχα  $BD$  ή 7) συνεχίζει ευθύγραμμα μέχρι το σημείο  $F'$  επί της μειωμένης μονοτονικής καμπύλης  $0Y'U'R'$  (αντίστοιχα το  $F$  επί της  $0YUR$ ). Η αντιστροφή της φόρτισης σε κάποιο σημείο κατά μήκος των κλάδων 6, -7 ή 8 (αντίστοιχα -6, 7 ή -8) γίνεται κατά τον κλάδο -9 με κλίση  $K_1'$  (αντίστοιχα 9 με κλίση  $K_1$ ) μέχρι τον οριζόντιο άξονα, απ' όπου συνεχίζεται σαν νέος κλάδος επαναφόρτισης του τύπου -8 (αντίστοιχα 8) στο Σχ. 2.42.

Το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας για την κάμψη,  $F_{fl}^t$ , μπορεί να κατασκευασθεί με βάση οποιοδήποτε προσομοίωμα τύπου μέλους για (διαξονική) κάμψη με αξονική δύναμη. Το μητρώο αυτό προστίθεται, σε κάθε βήμα της απόκρισης, με το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας για τη διάτμηση,  $F_{sh}^t$ , για να δώσει το συνολικό εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας του μέλους.

Ο υπολογισμός των δυνάμεων στα άκρα του μέλους και του μητρώου-στήλη των μη-εξισορροπούμενων δυνάμεων για το μέλος, μπορεί να γίνει ως εξής: Σε κάθε βήμα της ανάλυσης υπολογίζονται, από τις διαφορικές επικόμβιες μετακινήσεις, το μητρώο-στήλη των διαφορικών παραμορφώσεων του μέλους,  $dv_m$ . Με βάση το τρέχον εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του μέλους,  $K_m^t$  (δηλαδή το αντίστροφο του  $F_m^t$ ), υπολογίζεται το διαφορικό του μητρώου-στήλη των δυνάμεων στα άκρα του μέλους,  $dS_m$  (βλ. εξ. (5) του παρόντος Κεφαλαίου). Κατόπιν υπολογίζονται οι διαφορικές διατμητικές παραμορφώσεις  $d\gamma_{xi}$  ( $i=y, z$ ) από τις εξ. (131), (132). Από αυτές τις τιμές  $d\gamma_{xi}$  και από τις τιμές των  $\tau_{xi}$ ,  $\gamma_{xi}$  που είχαν υπολογισθεί στο προηγούμενο βήμα της ανάλυσης, υπολογίζονται οι νέες (τρέχουσες) τιμές της  $\tau_{xi}$ , μέσω του νόμου  $\tau$ - $\gamma$  του μέλους. Με πολλαπλασιασμό της  $\tau_{xi}$  επί την επιφάνεια διάτμησης  $A_{i,sh}$ , προκύπτει η τέμνουσα δύναμη  $V_i$  ( $i=y, z$ ) του μέλους. Οι τέμνουσες δυνάμεις  $V_y$  και  $V_z$  που υπολογίζονται έτσι, τοποθετούνται στο μητρώο-στήλη των εσωτερικών δυνάμεων στα άκρα του μέλους. Οι άλλοι τέσσερις όροι αυτού του μητρώου-στήλη υπολογίζονται από τις διαφορικές καμπτικές παραμορφώσεις,  $F_{fl}^t dS_m$ . Το μητρώο-στήλη των εσωτερικών δυνάμεων στα άκρα αφαιρείται από το μητρώο-στήλη των επικομβίων εξωτερικών φορτίων, για να δώσει το μητρώο-στήλη των μη-εξισορροπούμενων επικομβίων δυνάμεων, το οποίο χρειάζεται να μηδενισθεί σε επίπεδο συνόλου της κατασκευής, μέσω επαναλήψεων της μη-γραμμικής ανάλυσης.

#### 2.6.3.4. Θεμελιώδη καμπτοδιατμητικά προσομοιώματα

Όπως τονίσθηκε ήδη στην Ενότητα 2.2, το προσομοίωμα ινών είναι το πιο βασικό προσομοίωμα για την περιγραφή της καμπτικής παραμορφωσιακής συμπεριφοράς μελών

οπλισμένου σκυροδέματος, μέχρι και την αστοχία. Η βάση του προσομοιώματος ινών είναι η υπόθεση επιπεδότητας των διατομών. Επομένως, αυτό δεν είναι σε θέση να λάβει υπόψη διατμητικές παραμορφώσεις, τουλάχιστον στο βαθμό που οι θεωρούμενες σαν επίπεδες διατομές διατηρούνται και κάθετες στον άξονα του μέλους.

Οι Bazant and Bhat (1977) πρότειναν μία επέκταση του προσομοιώματος ινών ώστε αυτό να λάβει υπόψη και τις διατμητικές παραμορφώσεις. Στην επέκταση αυτή χρησιμοποιείται, σε κάθε ίνα σκυροδέματος της διατομής, όχι μόνον η ορθή τάση,  $\sigma_x$ , η παράλληλη στον άξονα του μέλους, αλλά και η διατμητική,  $\tau_{xy}$  ή  $\tau_{xz}$ . Απ' αυτές υπολογίζονται οι κύριες τάσεις και συνδέονται με τις κύριες παραμορφώσεις του σκυροδέματος, μέσω του καταστατικού νόμου του σκυροδέματος για διαξονική ή τριαξονική εντατική κατάσταση. Οι κύριες τάσεις και παραμορφώσεις αναπτύσσονται υπο γωνία ως προς τον άξονα του μέλους και τη διατομή και άρα περιλαμβάνουν, έστω και εμμέσως, και διατμητικές παραμορφώσεις. Στο προσομοίωμα των Bazant and Bhat (1977) ο καταστατικός νόμος του σκυροδέματος βασίζεται στην ενδοχρονική θεωρία και κάθε ίνα της διατομής μπορεί να ρηγματώνεται υπό διαφορετική γωνία ως προς τον άξονα, ανάλογα με το συνδυασμό ορθών και διατμητικών τάσεων.

Οι Garstka (1993) και Garstka et al (1993) εισήγαγαν υπολογισμό διατμητικών παραμορφώσεων σ' ένα προσομοίωμα ινών για μέλη υπό μονοαξονική κάμψη και τέμνουσα συν αξονική δύναμη. Στο προσομοίωμα αυτό το μέλος διακριτοποιείται σε επιμέρους υποστοιχεία (πρβλ. πολυελατηριακό προσομοίωμα). Στις κρίσιμες περιοχές των άκρων του μέλους, τα επιμέρους στοιχεία καθορίζονται από τις θέσεις των συνδετήρων, καθώς οι καμπτικές ρωγμές συνήθως συμβαίνουν σ' αυτές ακριβώς τις θέσεις. Σε κάθε επιμέρους υποστοιχείο διακριτοποιούνται σε ίνες μόνον οι ακραίες διατομές, για τις οποίες και μόνον κατασκευάζεται το εφαπτομενικό μητρώο ευκαμψίας. Επειδή στους νόμους  $\sigma$ - $\epsilon$  των υλικών αγνοείται η επιρροή της εφελκυστικής συμβολής του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών, το φαινόμενο αυτό λαμβάνεται υπόψη κατά προσέγγιση κατά την κατασκευή του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας του υποστοιχείου από αυτά των ακραίων διατομών του, υποθέτοντας παραβολική κατανομή των παραμορφώσεων του οπλισμού μεταξύ διαδοχικών ρωγμών. Ο υπολογισμός των διατμητικών παραμορφώσεων γίνεται μέσω της Θεωρίας του Θλιπτικού Πεδίου, επίσης σε επίπεδο υποστοιχείου, χωριστά και ανεξάρτητα από τον ως άνω υπολογισμό των καμπτικών επιρροών. Σε κάθε βήμα της ανάλυσης χρησιμοποιείται η τιμή της μέσης (ομοιομορφοποιημένης) διατμητικής παραμόρφωσης του υποστοιχείου, όπως αυτή προέκυψε από το προηγούμενο βήμα, σε συνδυασμό με μία υποτιθέμενη τιμή της κλίσης  $\theta$  του πεδίου των θλιπτικών τάσεων, για να υπολογισθούν με

τον κύκλο του Mohr οι ανηγμένες μηκύνσεις κατά τη διεύθυνση του θλιπτικού πεδίου και κατά τις διευθύνσεις των διαμήκων και των εγκάρσιων οπλισμών. Κατόπιν εφαρμόζονται οι καταστατικοί νόμοι χάλυβα και σκυροδέματος για να υπολογισθούν οι τάσεις από τις παραμορφώσεις τους, και προσδιορίζεται η εσωτερική τιμή της τέμνουσας στο υποστοιχείο, με προβολή του θλιπτικού πεδίου των τάσεων στην εγκάρσια στον άξονα διεύθυνση. Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται με διαφορετική τιμή της κλίσης  $\theta$  του θλιπτικού πεδίου, μέχρις ότου επιτευχθεί σύγκλιση της εσωτερικής τιμής της τέμνουσας με την εξωτερική που υπολογίζεται από τις επικόμβιες μετακινήσεις του υποστοιχείου. Μετά τη σύγκλιση υπολογίζεται η επαπτομενική διατμητική δυσκαμψία του υποστοιχείου, και χρησιμοποιείται στο επόμενο βήμα της ανάλυσης. Ο καταστατικός νόμος του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη κατά την τρέχουσα διεύθυνση του θλιπτικού πεδίου περιλαμβάνει φθίνοντα κλάδο μετά την οριακή αντοχή, μείωση της δυσκαμψίας αποφόρτισης και επαναφόρτισης με την τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης, καθώς και το γνωστό φαινόμενο της μείωσης ανηγμένης μήκυνσης κάθετα στην εγκάρσια στο θλιπτικό πεδίο διεύθυνση.

Τα ανωτέρω αποτελούν τα ελάχιστα παραδείγματα εφαρμογής της θεμελιώδους προσομοίωσης για τον υπολογισμό των καμπτοδιατμητικών παραμορφώσεων.

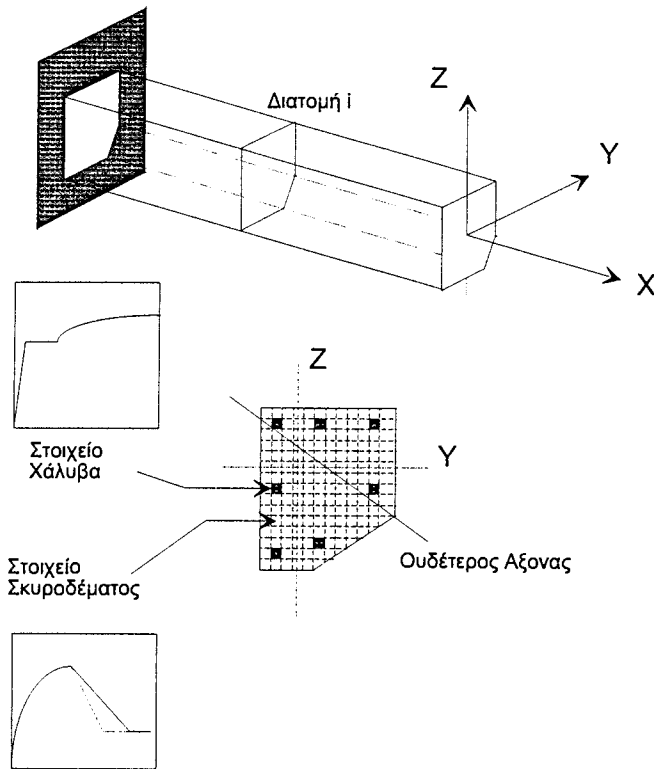
#### 2.6.4. Συμπεράσματα

Οι μέχρι σήμερα προσπάθειες προσομοίωσης της συμπεριφοράς στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με χαμηλό λόγο διάτμησης έχουν επικεντρωθεί κυρίως στον υπολογισμό της οριακής αντοχής τους. Όμως η αντοχή πιθανόν δεν είναι η πιο σημαντική ιδιότητα των στοιχείων αυτών. Από μία πλευρά μάλιστα, η αντοχή αποτελεί περισσότερο μέρος του προβλήματος παρά μέρος της λύσης. Ο λόγος είναι ότι, όπου τα στοιχεία αυτά ανήκουν σε μία πλαισιακή κατασκευή μαζί με άλλα περισσότερο λυγηρά και άρα πιο πλάστιμα στοιχεία, η υψηλή αντοχή και δυσκαμψία τους προσελκύει σ' αυτά υψηλές απαιτήσεις παραμορφώσεων και απορρόφησης ενέργειας, απαιτήσεις στις οποίες αυτά δεν είναι σε θέση να αναπεξέλθουν. Μη όντας ικανά να ακολουθήσουν τις μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις των πλέον πλάστιμων στοιχείων του δομικού συστήματος, αστοχούν κατά ψαθυρό τρόπο, χάνοντας σχεδόν πλήρως τη φέρουσα ικανότητά τους.

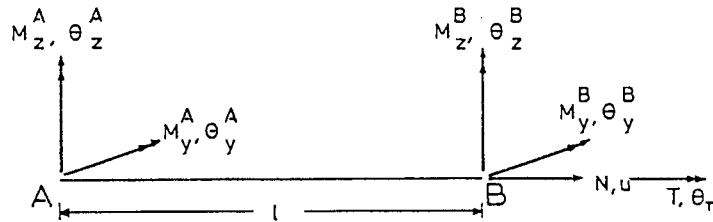
Παρά το ότι η αντοχή δεν αποτελεί το κύριο θετικό χαρακτηριστικό των στοιχείων με χαμηλό λόγο διάτμησης, οι ερευνητικές προσπάθειες για τον προσδιορισμό της είχαν ένα σημαντικό θετικό αποτέλεσμα: τον καθορισμό των περιοχών τιμών των παραμέτρων που την καθορίζουν, οι οποίες αντιστοιχούν στους διάφορους τρόπους αστοχίας. Ένα από τα σχετικά

συμπεράσματα είναι ότι η περιοχή τιμών της αξονικής δύναμης που οδηγεί σε ψαθυρή διατμητική αστοχία μπορεί να περιορισθεί μέχρι και εξαφάνισης, αν αυξηθεί ο εγκάρσιος οπλισμός και/ή μειωθεί ο διαμήκης, ή οι διαστάσεις της διατομής (ώστε να αυξηθεί ο λόγος διάτμησης). Η διατύπωση ειδικότερων συμπερασμάτων για τους δυνατούς τρόπους αύξησης της παραμορφωσιμότητας, της πλαστιμότητας και της δυνατότητας των στοιχείων χαμηλού λόγου διάτμησης για απορρόφηση ενέργειας, χρειάζεται να περιμένει τη βελτίωση των δυνατοτήτων προσομοίωσης της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς αυτού του τύπου των στοιχείων.

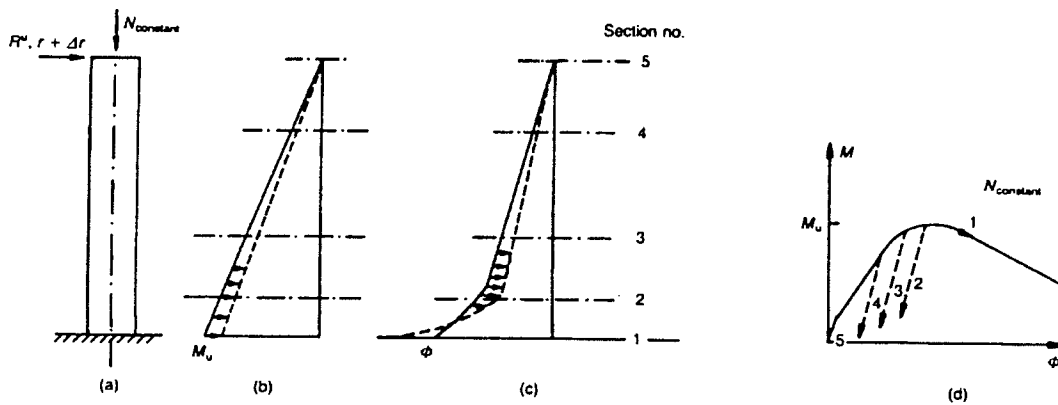




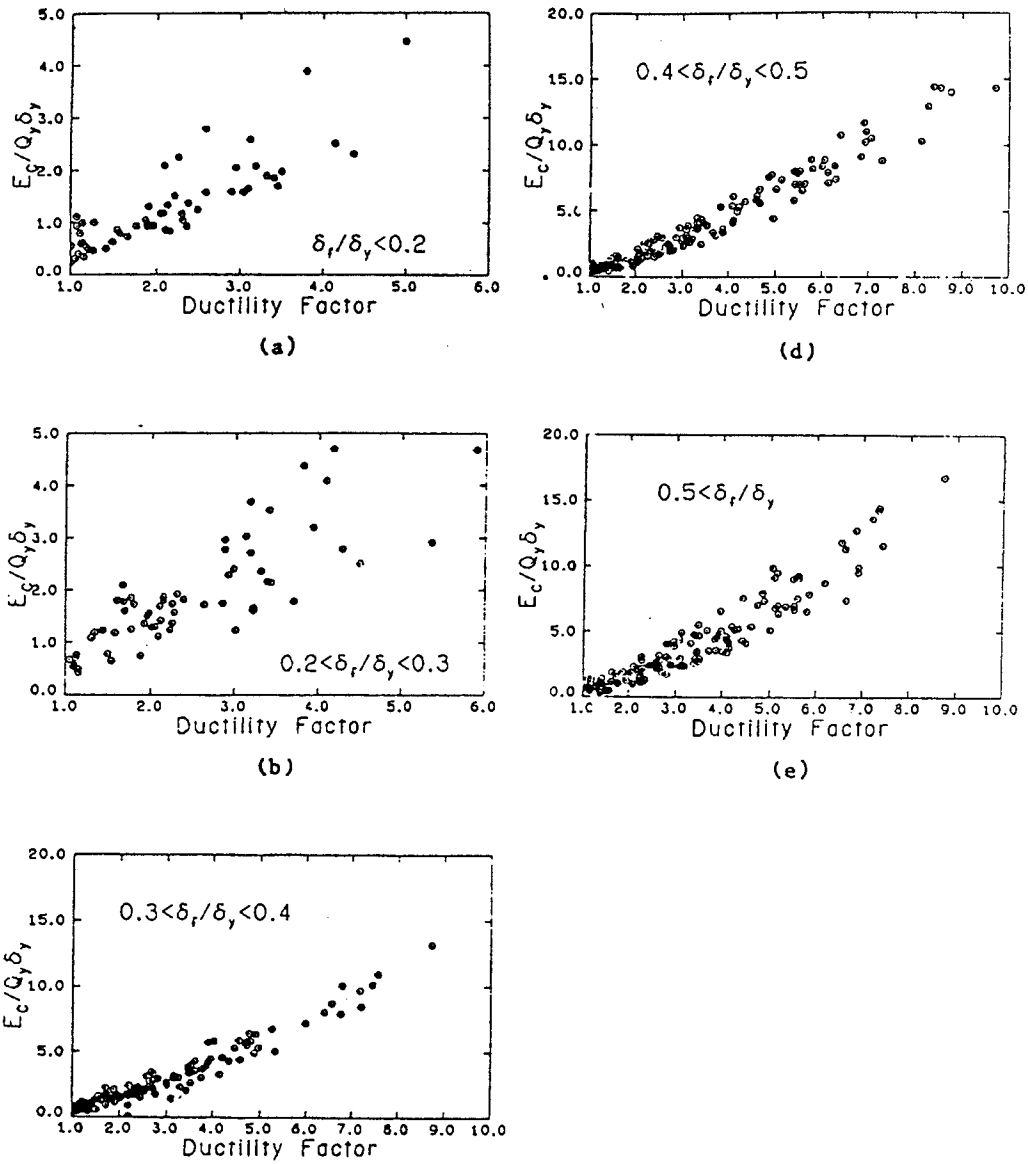
Σχήμα 2.1 Διατομές ελέγχου και διακριτοποίηση διατομής σε προσομοίωμα ινών.



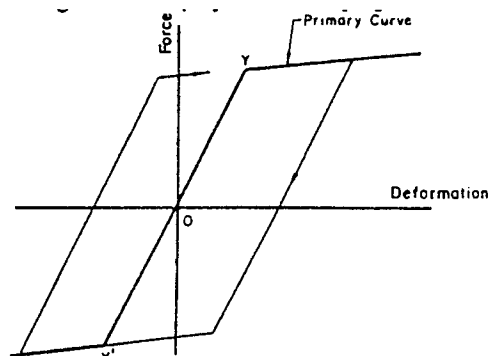
Σχήμα 2.2 Ορισμός δυνάμεων και παραμορφώσεων στα άκρα μέλους



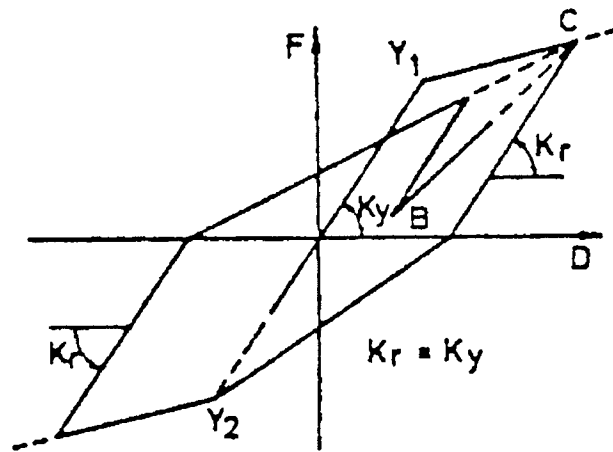
Σχήμα 2.3 Πρόβολος στο φθίνοντα κλάδο της σχέσης δύναμης-μετακίνησης κατά Zeris and Mahin (1988): (a) μέλος και φόρτισή του; (b) κατανομή ροπών; (c) κατανομή καμπυλοτήτων; (d) απόκριση ροπής - καμπυλότητας.



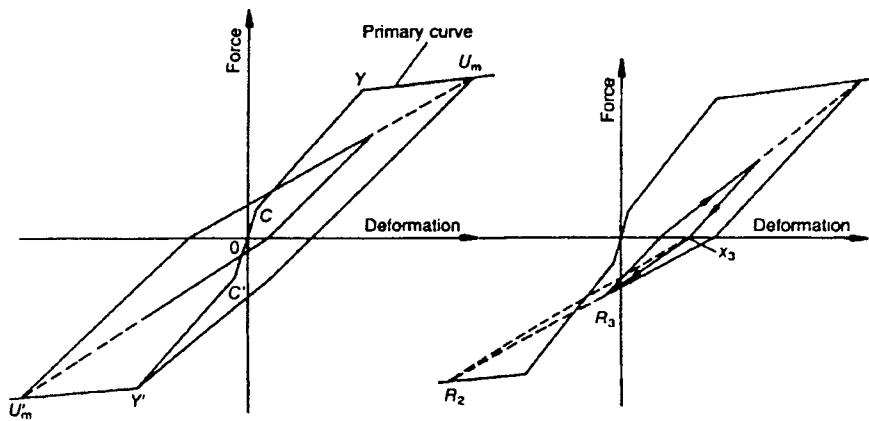
Σχήμα 2.4 Πειραματικά δεδομένα για την υστερητική απορρόφηση ενέργειας κατά την ανακύκλιση σε σταθερή μετατόπιση (Park and Ang, 1985).



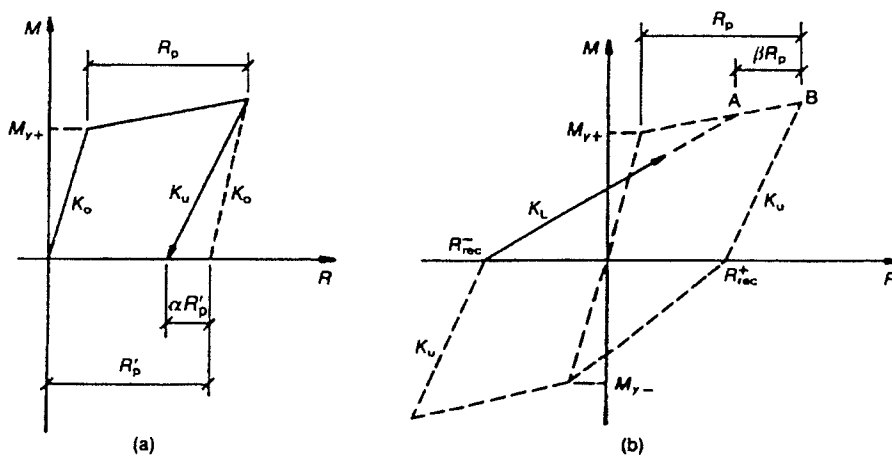
Σχήμα 2.5 Διγραμμικό προσομοίωμα για ανακυκλιζόμενη φόρτιση



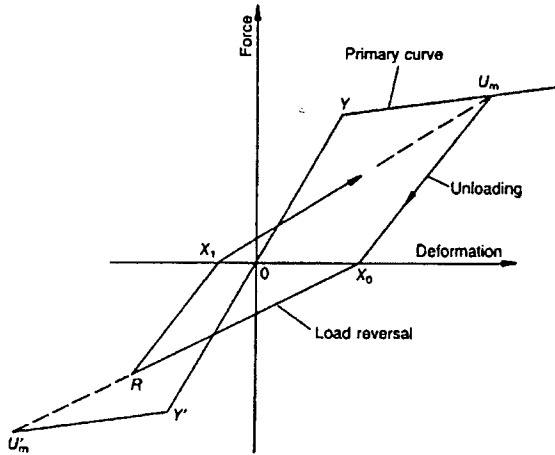
Σχήμα 2.6 Προσομοίωμα των Clough and Johnston (1966) με απομείωση δυσκαμψίας



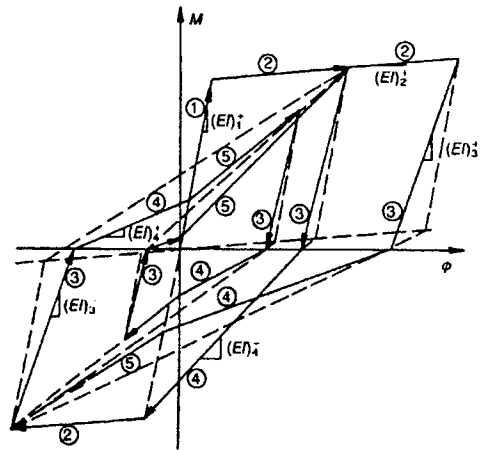
Σχήμα 2.7 Βρόχοι υστέρησης κατά τους Takeda et al (1970).



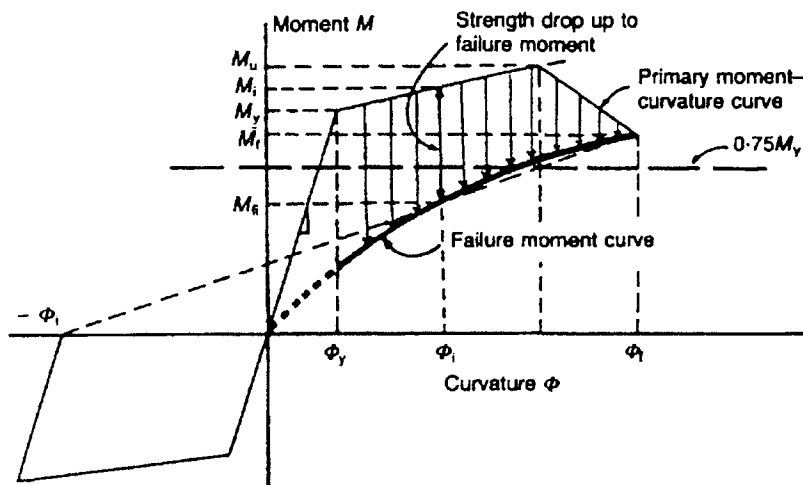
Σχήμα 2.8 Προσομοίωμα Takeda τροποποιημένο από τους Otani (1998) and Litton (1975).



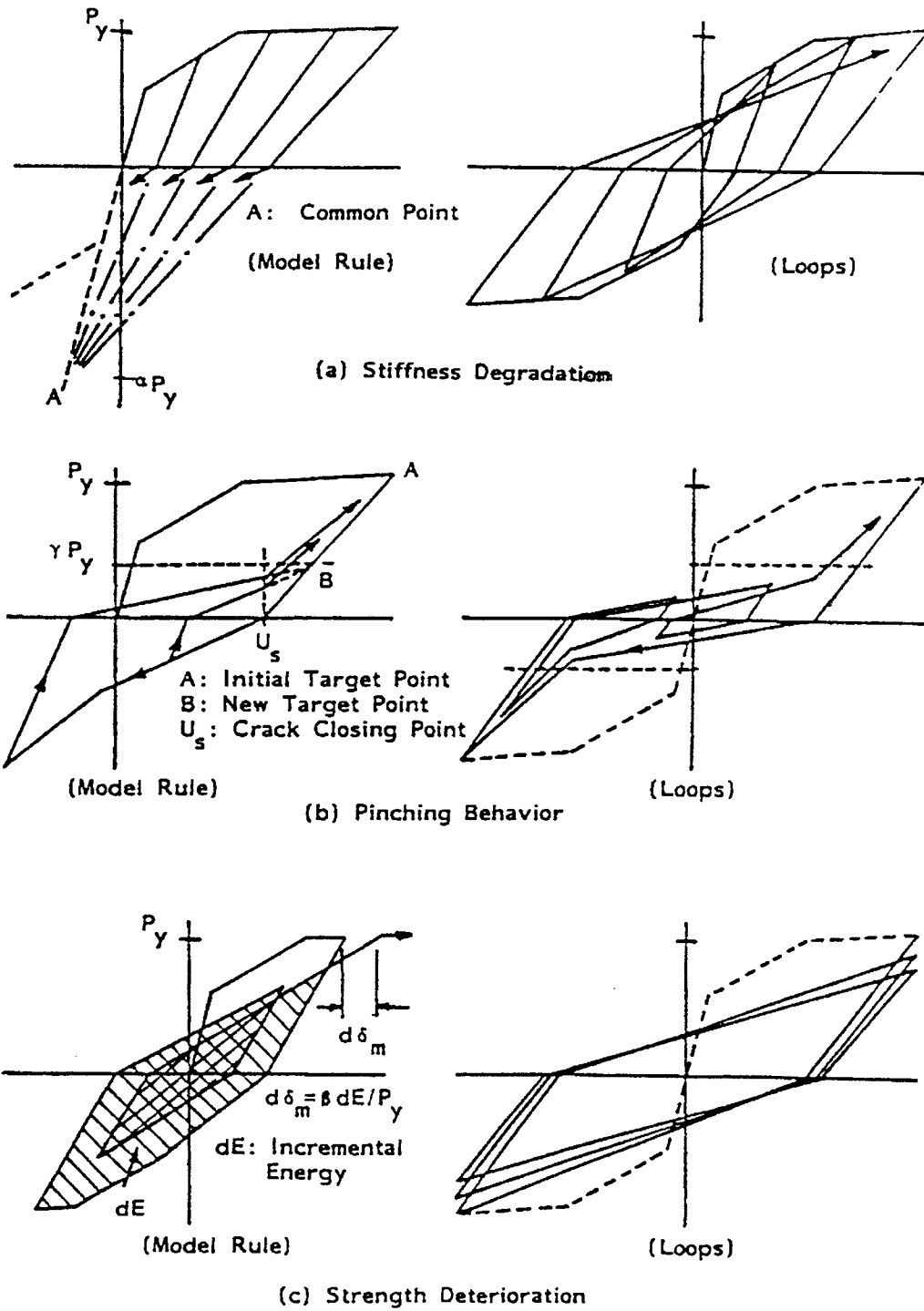
Σχήμα 2.9 Προσομοίωμα Q-hyst των Saiidi et al, 1981.



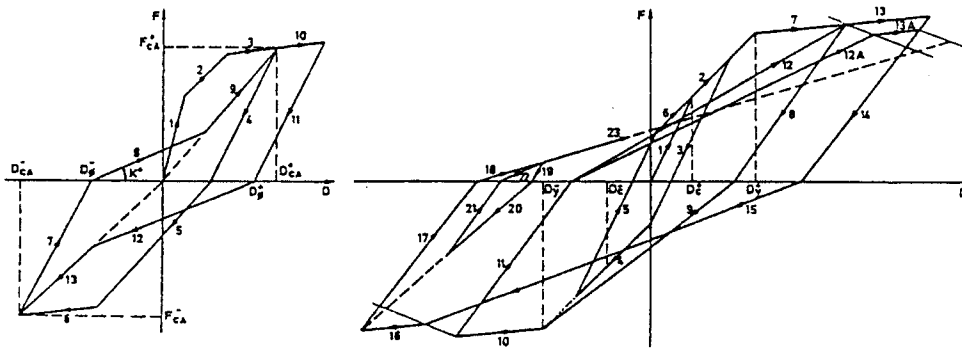
Σχήμα 2.10 Προσομοίωμα των Roufaiel and Meyer (1987) με στένωση των βρόχων υστέρησης



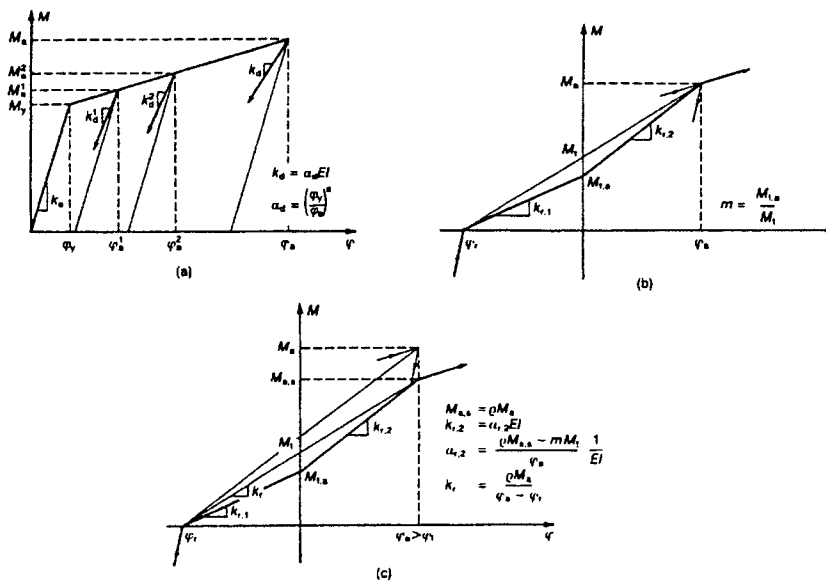
Σχήμα 2.11 Μείωση της καμπύλης M-Φ λόγω ανακύκλισης κατά τους Chang et al (1987).



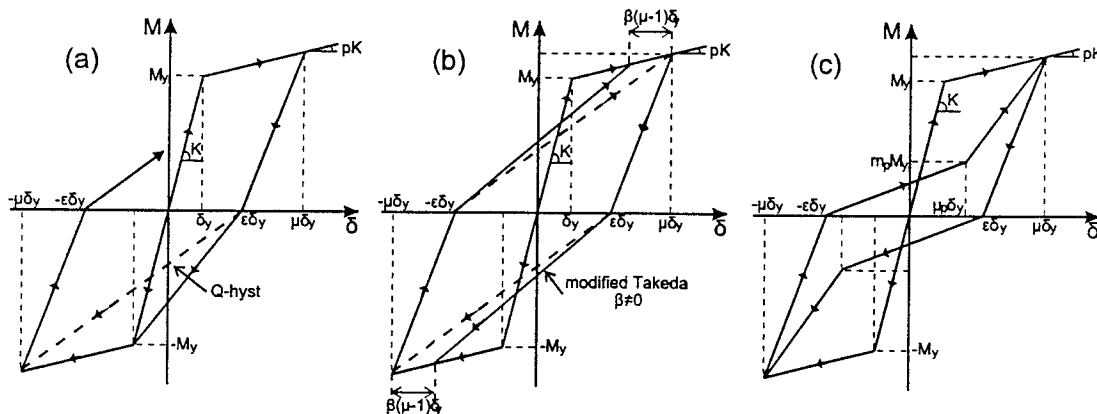
Σχήμα 2.12 Προσομοίωμα υστέρησης των Park et al (1987) με (a) μείωση της δυσκαμψίας αποφόρτισης, (b) στένωση βρόχων και (c) εξασθένηση της αντοχής και δυσκαμψίας κατά την επαναφόρτιση



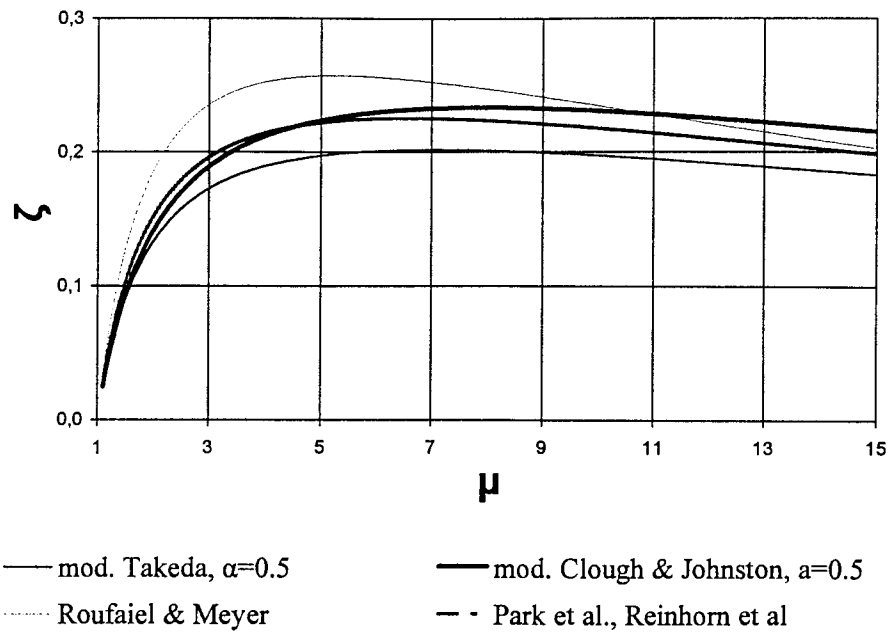
Σχήμα 2.13 Προσομοίωμα των Costa and Costa (1987) με: (a) στένωση βρόχων, και (b) εξασθένηση της αντοχής και δυσκαμψίας



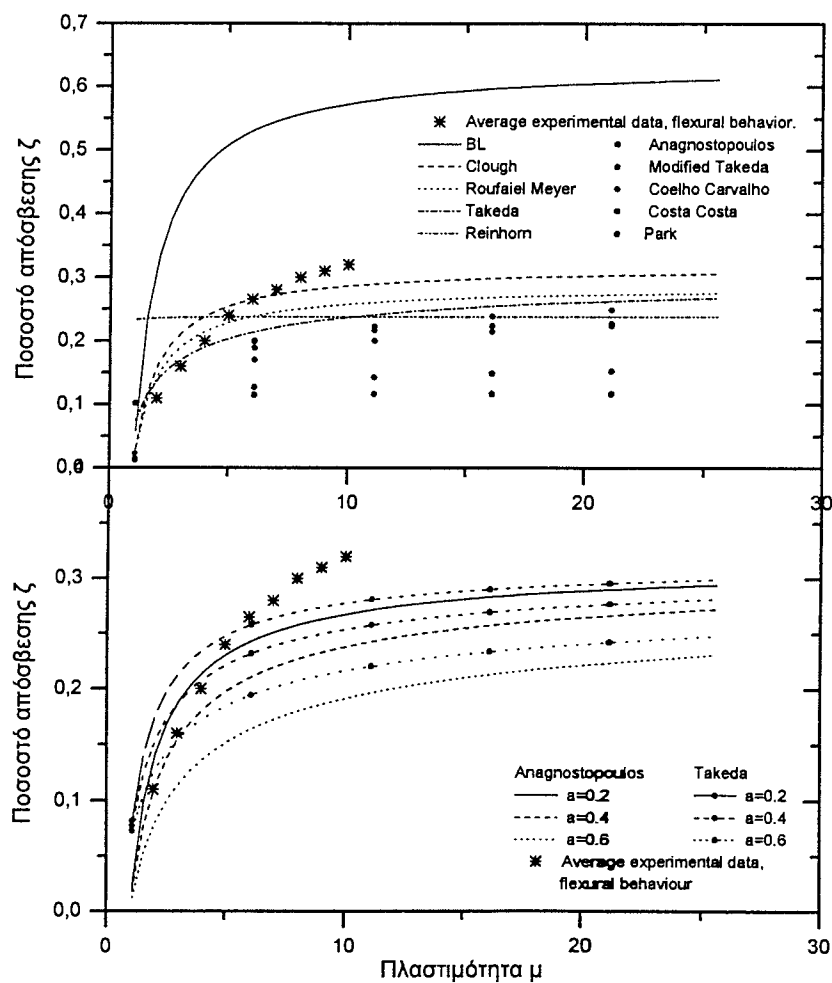
Σχήμα 2.14 Προσομοίωμα υστέρησης των Coelho and Carvalho (1990) με (a) εξασθένηση της δυσκαμψίας αποφόρτισης, (b) στένωση των βρόχων και (c) μείωση της αντοχής και δυσκαμψίας κατά την επαναφόρτιση



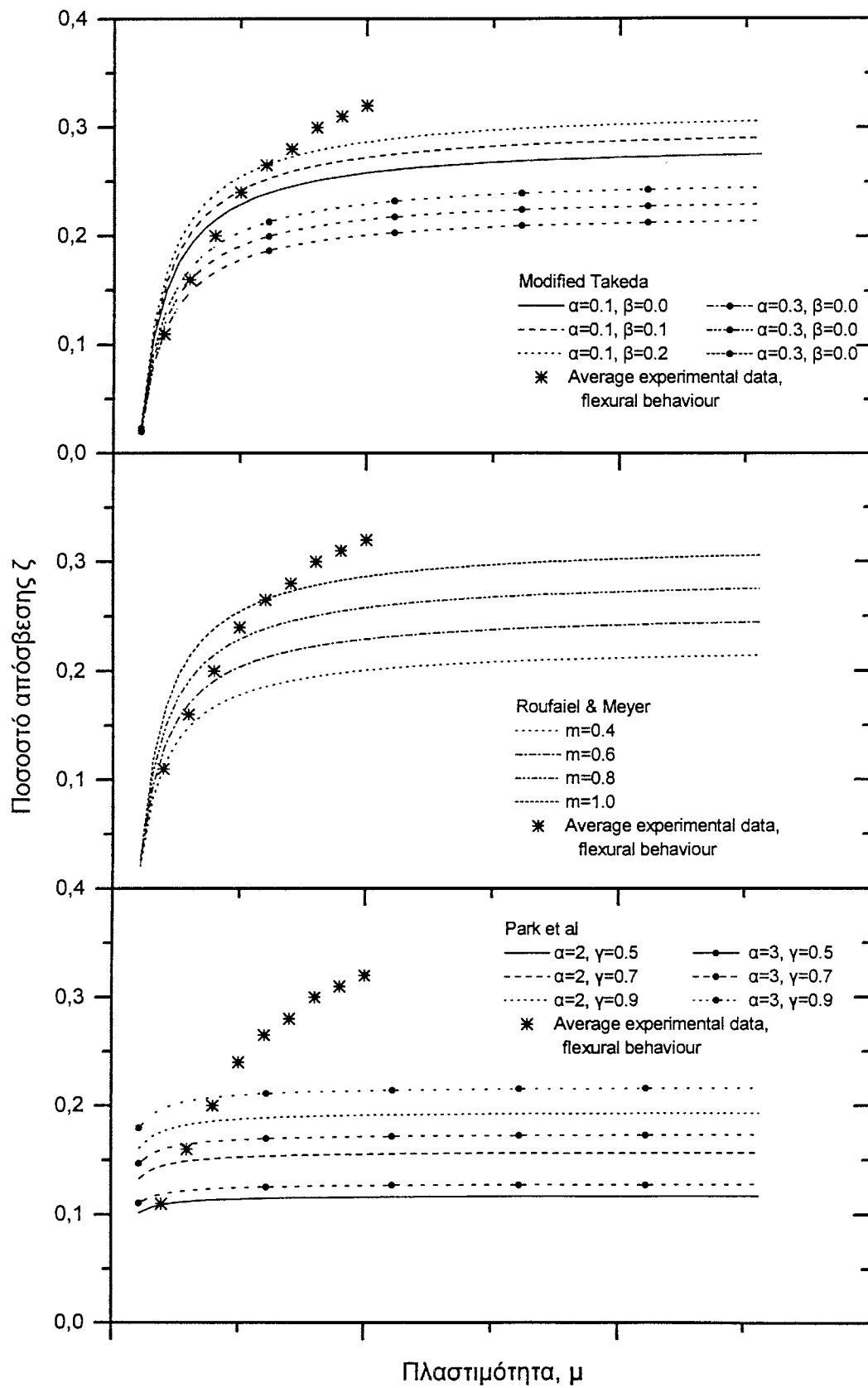
Σχήμα 2.15 Γενικευμένη μορφή προσομοιωμάτων υστέρησης: (a) πρώτος κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης . Επόμενοι πλήρεις κύκλοι: (b) χωρίς, και (c) με στένωση.



Σχήμα 2.16 Λόγος απόσβεσης πρώτου κύκλου συναρτήσει του δείκτη πλαστιμότητας για διάφορα μοντέλα υστέρησης.

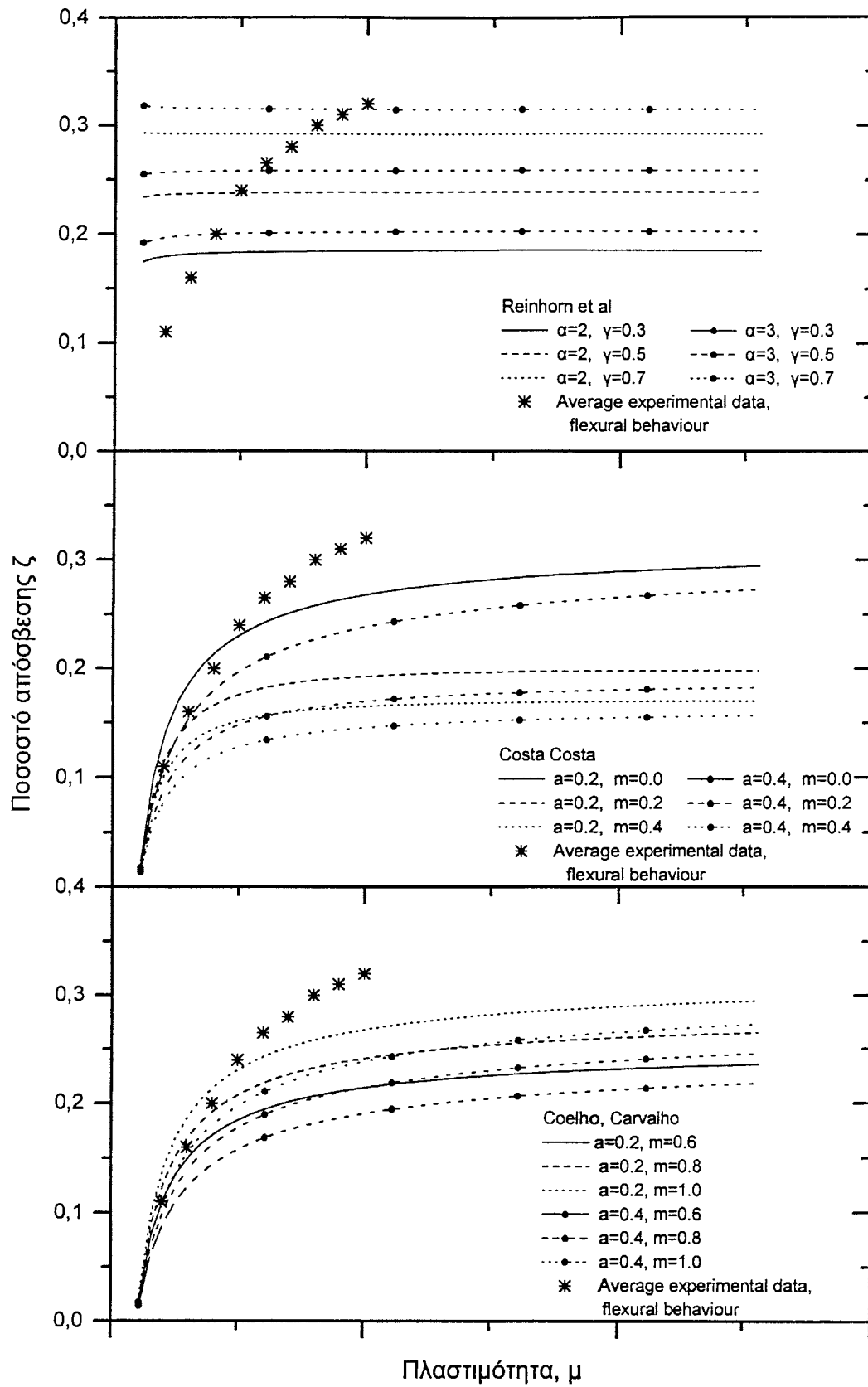


Σχήμα 2.17 Λόγος απόσβεσης επόμενων κύκλων συναρτήσει του δείκτη πλαστιμότητας για διάφορα μοντέλα υστέρησης.

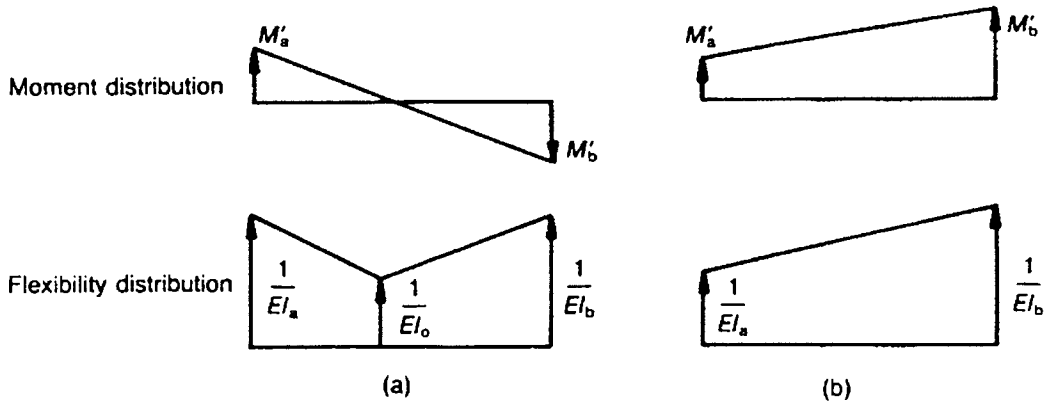


Σχήμα 2.17 (συνεχ.)

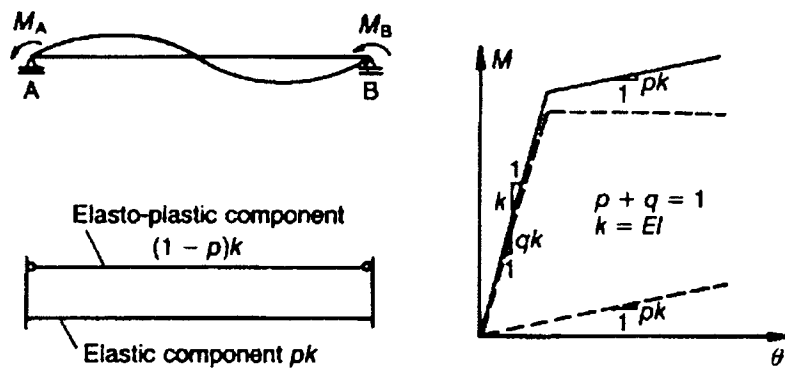




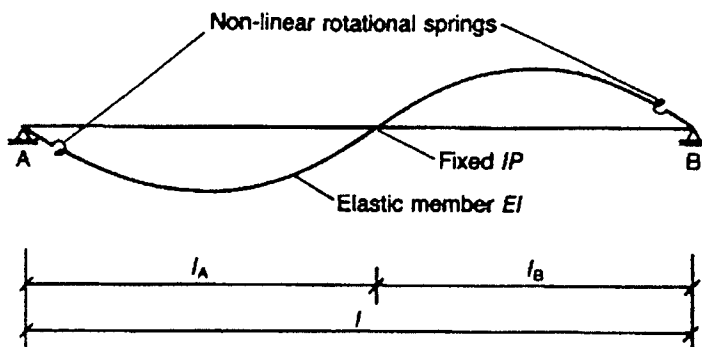
Σχήμα 2.17 (συνεχ.)



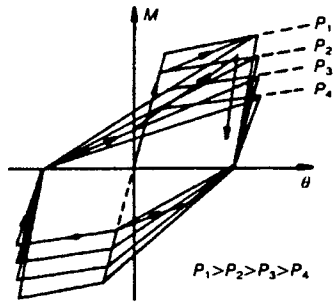
Σχήμα 2.18 Τμηματικά γραμμική κατανομή ευκαμψίας στο προσομοίωμα κατανομής ανελαστικότητας των Park et al (1987) για μονοαξονική κάμψη



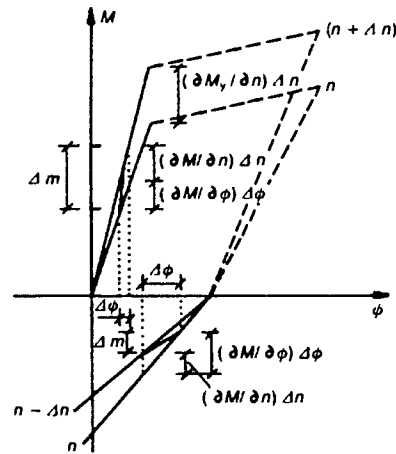
Σχήμα 2.19 Προσομοίωμα δύο στοιχείων



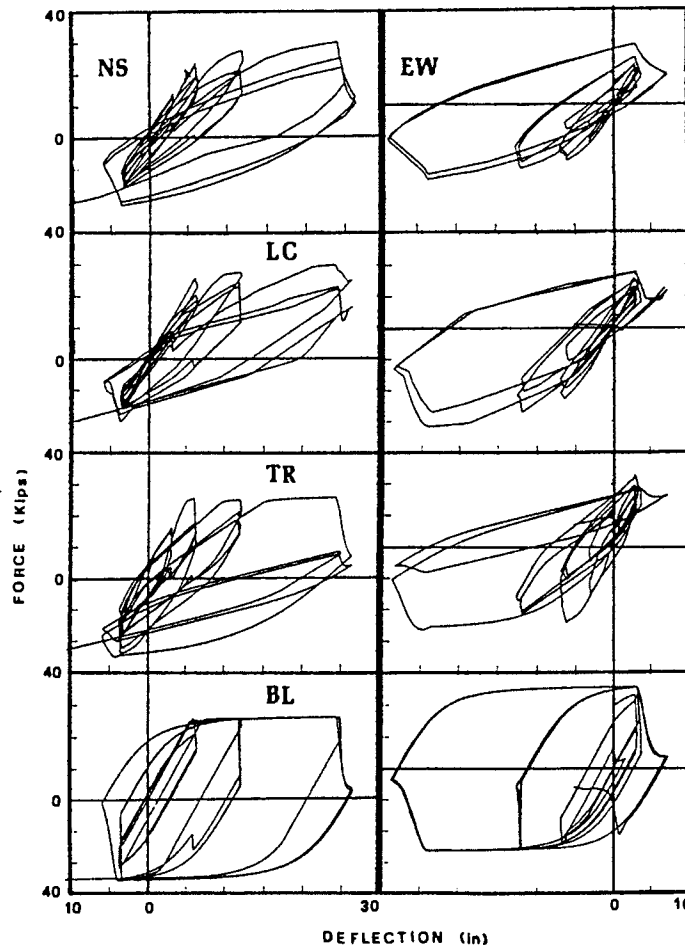
Σχήμα 2.20 Προσομοίωμα ενός στοιχείου



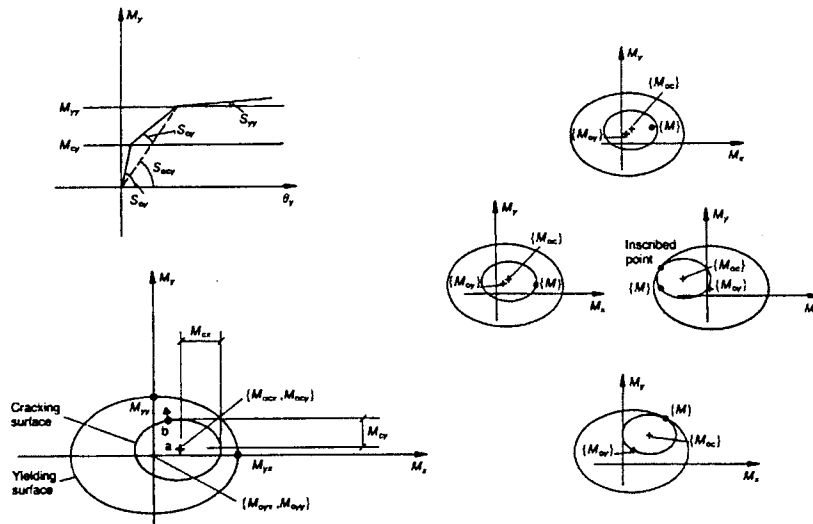
Σχήμα 2.21 Επίδραση του  $N$  στην καμπύλη  $M$ - $\theta$  κατά τους Saatcioglu et al, 1983.



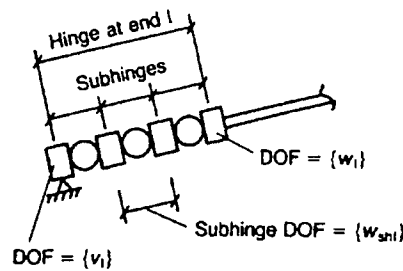
Σχήμα 2.22 Επίδραση του  $N$  στην καμπύλη  $M$ - $\theta$  κατά τους Keshavarzian και Schnobrich (1985).



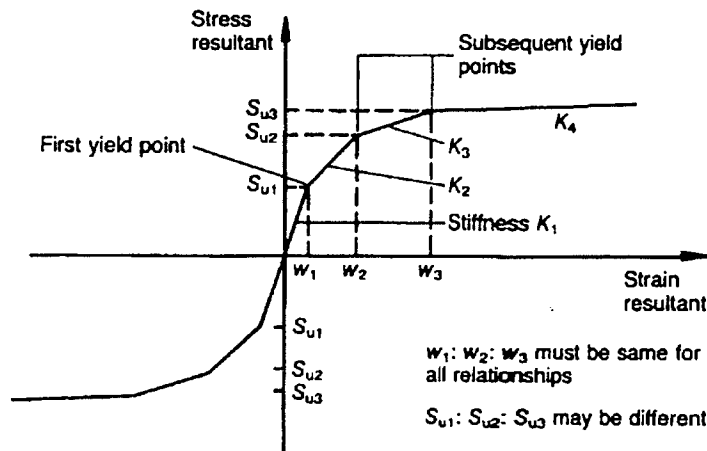
Σχήμα 2.23 Σύγκριση των (α) πειραματικών αποτελεσμάτων του δοκιμίου SP8 των Otani et al (1980) με τις προβλέψεις του: (β) τριαξονικού προσομοιώματος ελατηρίων του Lai (1987), (γ) του τριγωνικού διαξονικού προσομοιώματος, και (δ) του διγραμμικού διαξονικού προσομοιώματος. (Lai, 1987).



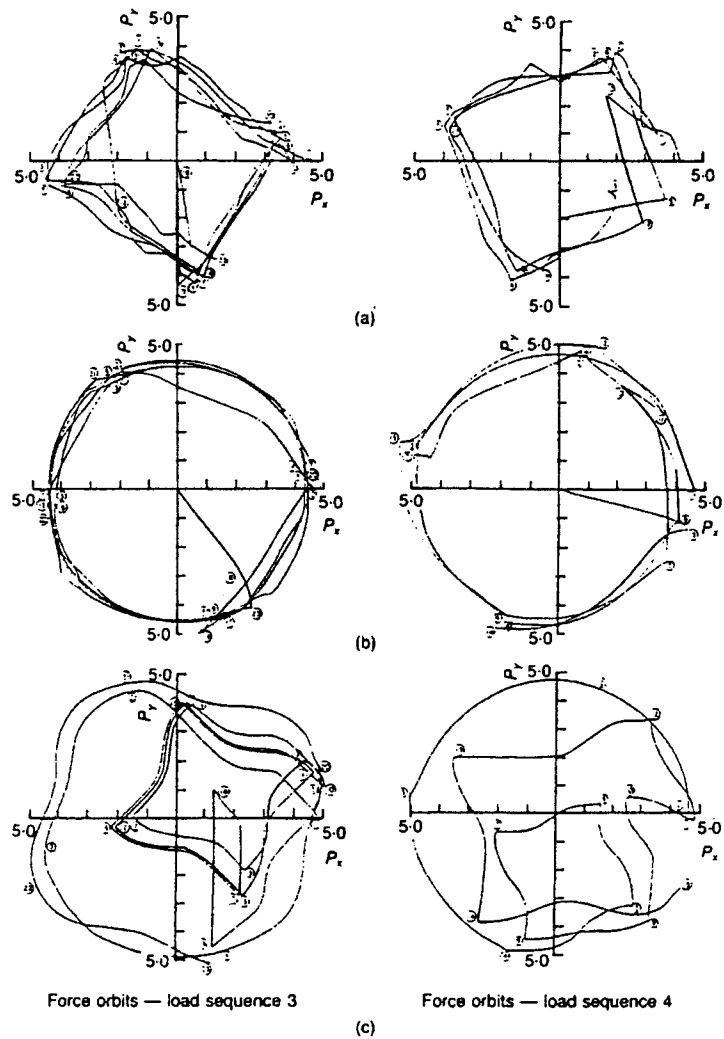
Σχήμα 2.24 Επιφάνειες διαρροής του διαξονικού προσομοιώματος δύο επιφανειών των Takizawa and Aoyama (1976).



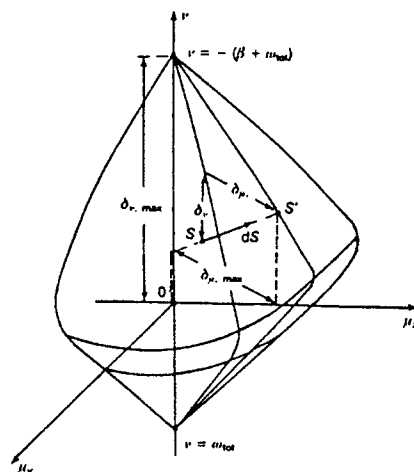
Σχήμα 2.25 Τριδιάστατες ανελαστικές υπο-αρθρώσεις στα άκρα του μέλους κατά τους Chen and Powell, 1982.



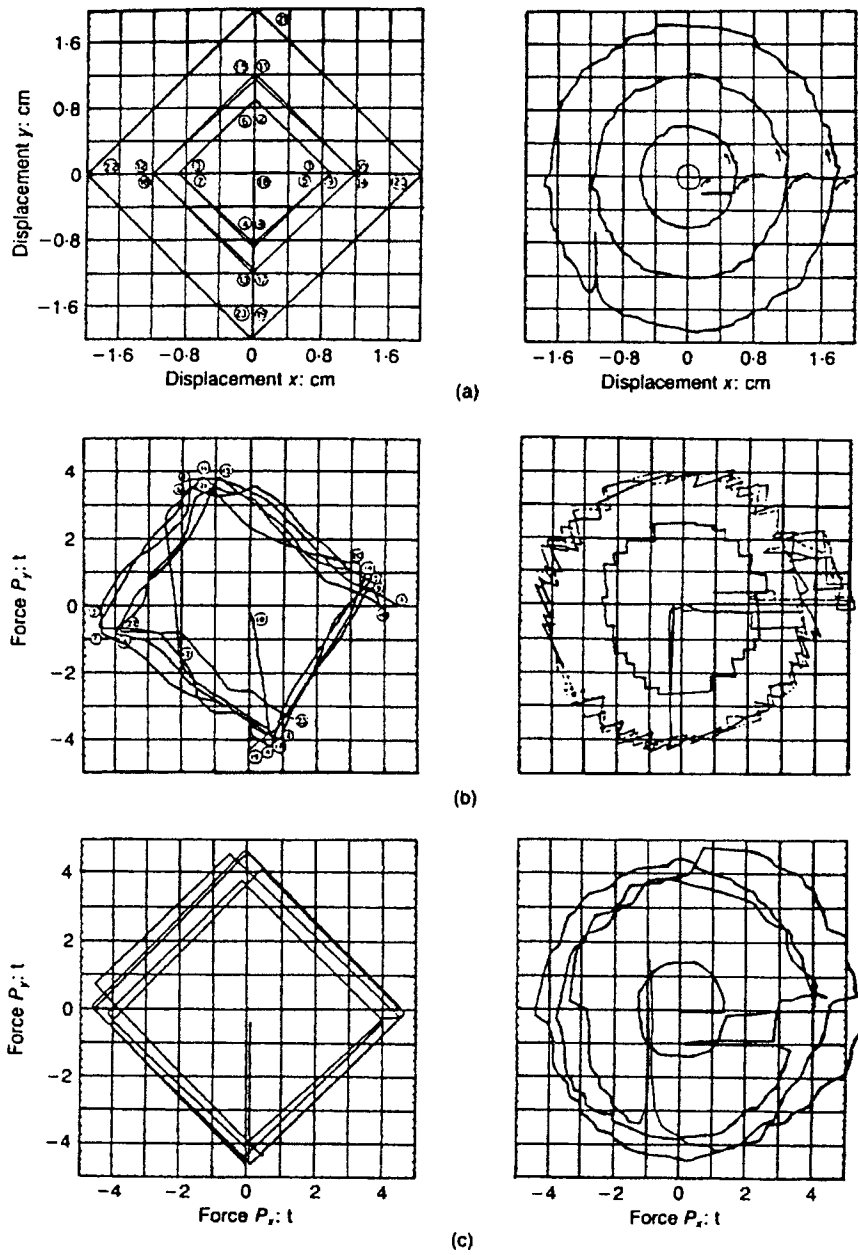
Σχήμα 2.26 Τριγωνικές μονοαξονικές καμπύλες συνισταμένης τάσης - παραμόρφωσης κατά τους Chen and Powell (1982).



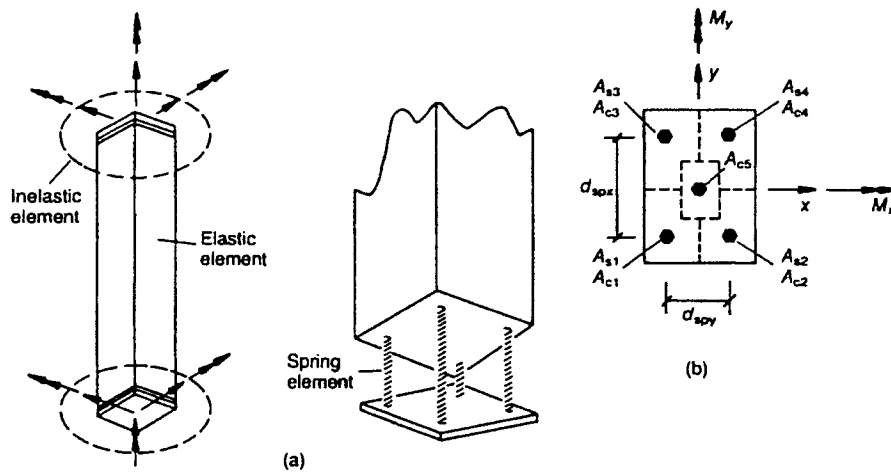
Σχήμα 2.27 Σύγκριση των προβλέψεων του προσομοιώματος των Chen and Powell (1982) με πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα των Takizawa and Aoyama (1976).



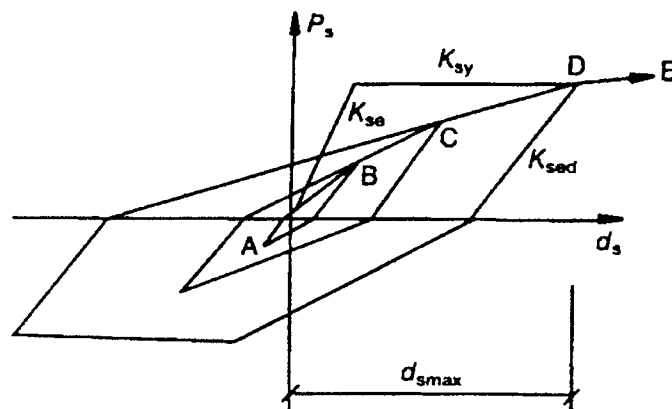
Σχήμα 2.28 Οριακή Επιφάνεια και παράμετροι της απόστασης από αυτή στο προσομοίωμα των Sfakianakis and Fardis (1990, 1991).



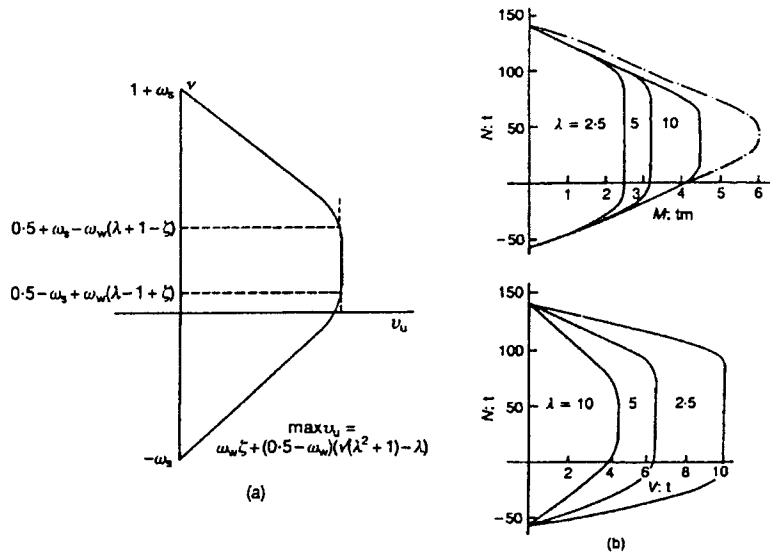
Σχήμα 2.29 Πρόβλεψη της διαδρομής δυνάμεων κατά το προσομοίωμα των Sfakianakis and Fardis, 1990, 1991, (c), σε σύγκριση με μετρηθείσες διαδρομές δύναμης στη δοκιμή No. 3 των Takizawa and Aoyama (1976) και στη δοκιμή κυκλικής διαδρομής των Takiguchi et al (1980) (b), (a): επιβληθείσες διαδρομές διαξονικών μετατοπίσεων.



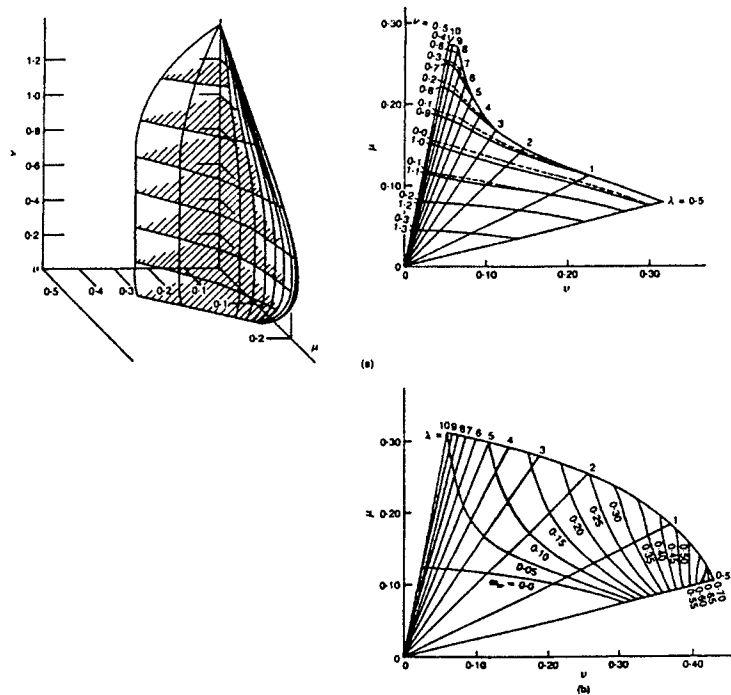
Σχήμα 2.30 Τριαξονικό προσομοίωμα ελατηρίων των Lai et al, 1984: (a) προσομοίωμα μέλους; (b) ανελαστικό ελατήριο στο άκρο του μέλους.



Σχήμα 2.31 Σχέση δύναμης – μετατόπισης του ελατηρίου χάλυβα στο προσομοίωμα των Lai et al, 1984.

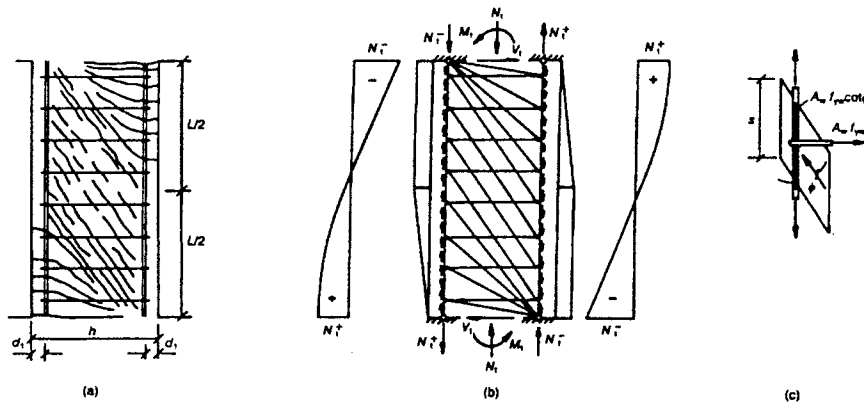


Σχήμα 2.32 Προσομοίωμα των Shihara ανδ Kato (1981): (a) κανονικοποιημένο σχηματικό διάγραμμα V-N; (b) παράδειγμα εφαρμογής για τετραγωνικό υποστύλωμα οπλισμένο με 4Φ16.

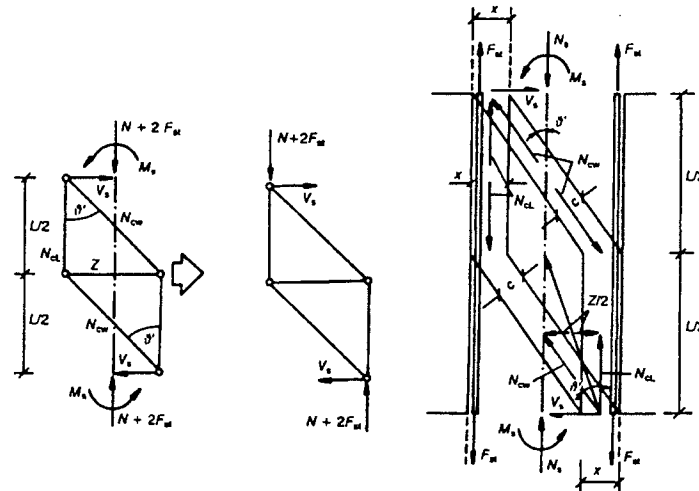


Σχήμα 2.33 Παράδειγμα κανονικοποιημένων διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης M-V-N των Minami and Wakabayashi (1981)

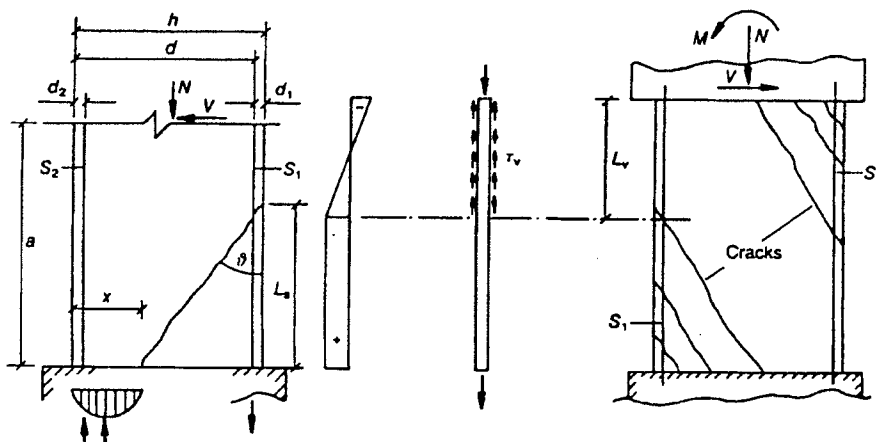




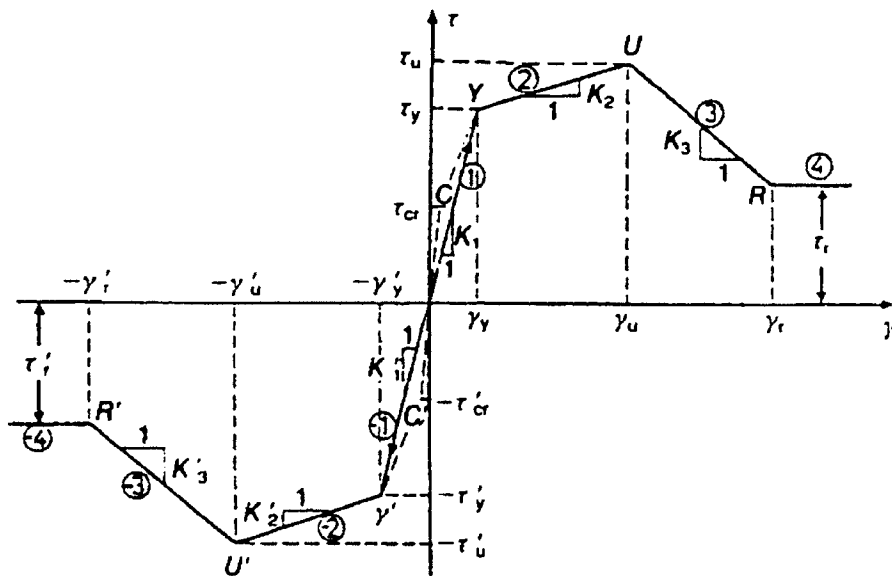
Σχήμα 2.34 Προσομοίωμα και εσωτερικές δυνάμεις δικτύωματος κατά τον Tegos (1984, 1985).



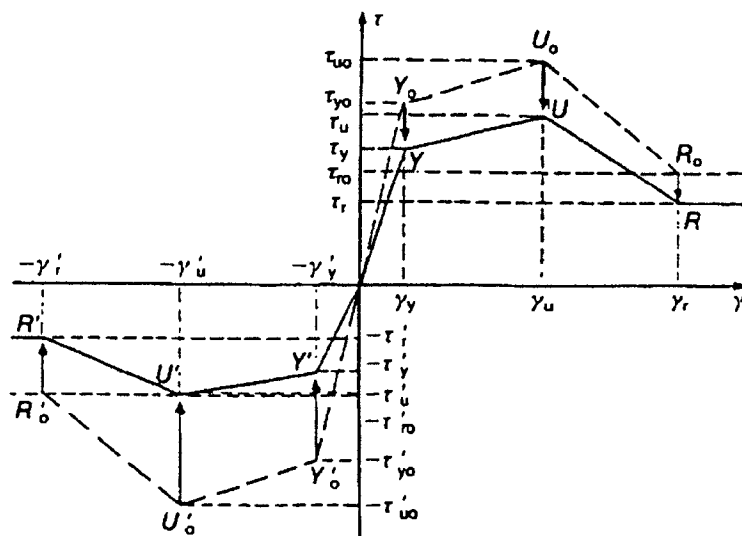
Σχήμα 2.35 Προσομοίωμα θλιπτήρων-ελκυστήρων του Τέγου (1984).



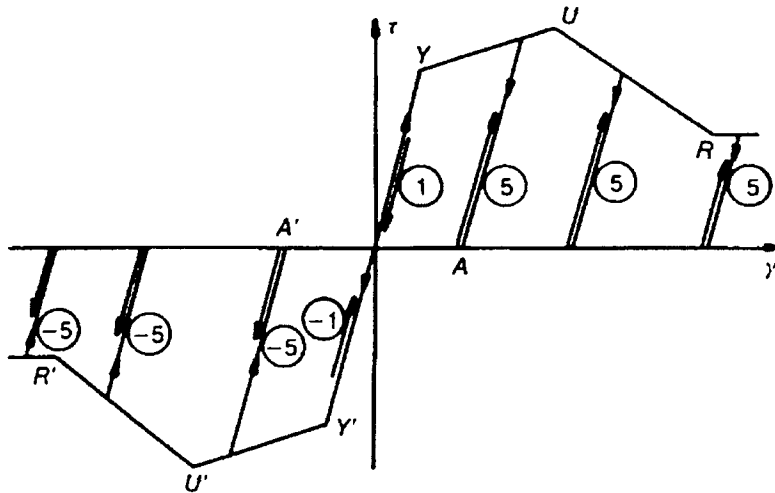
Σχήμα 2.36 Γεωμετρία και εσωτερικές δυνάμεις προσομοιώματος των König et al (1993).



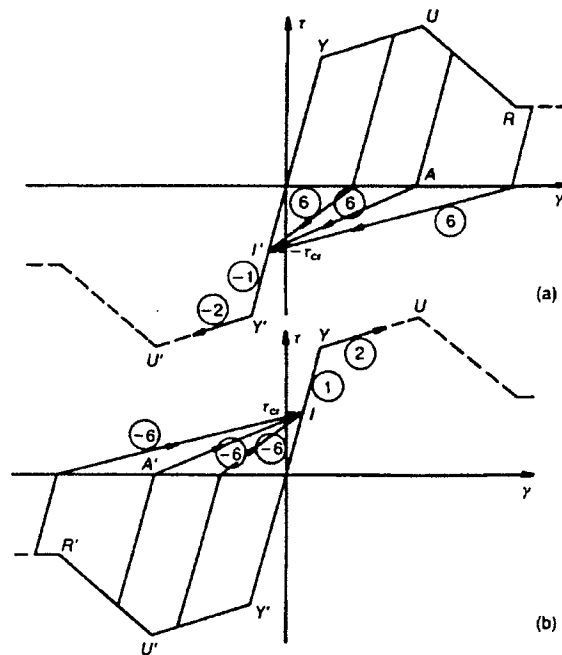
Σχήμα 2.37 Καμπύλη σκελετός μονοτονικής φόρτισης στο διατμητικό προσομοίωμα Fardis (1991).



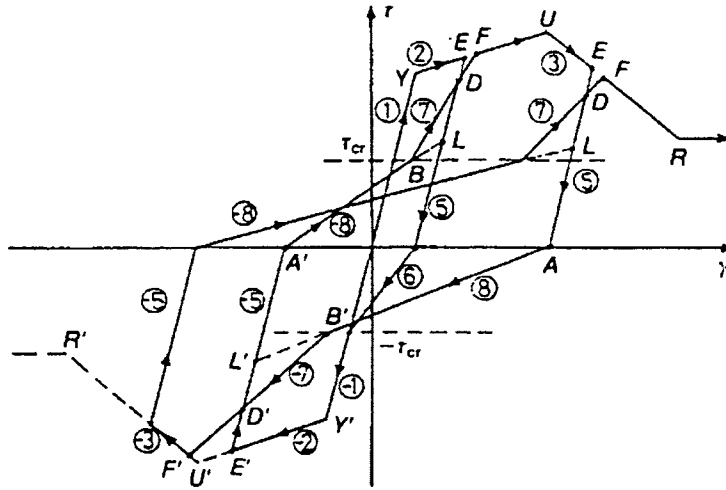
Σχήμα 2.38 Υποβιβασμός καμπύλης-σκελετού κατά την ανακύκλιση, Fardis (1991)



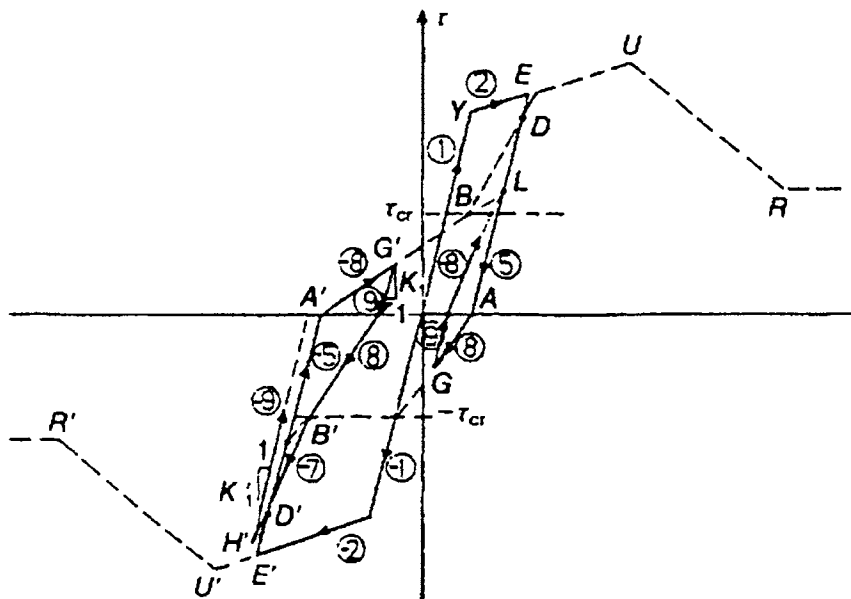
Σχήμα 2.39 Αποφόρτιση-επαναφόρτιση σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση κατά Fardis (1991).



Σχήμα 2.40 Πρώτη φόρτιση στην αντίθετη διεύθυνση στο διατμητικό προσομοίωμα κατά Fardis (1991).



Σχήμα 2.41 Επαναφόρτιση στην αντίθετη διαύθυνση κατά Fardis (1991).



Σχήμα 2.42 Ενδιάμεση αποφόρτιση από κλάδο επαναφόρτισης κατά Fardis (1991).

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ή ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ, ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ή ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ

##### 3.1. Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο εκφράζονται ποσοτικά η αντοχή και οι παράμετροι που καθορίζουν την ανελαστική παραμορφωσιακή συμπεριφορά διατομών και πρισματικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος, υπό μονοαξονική μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη καμπτική ή καμπτοδιατμητική ένταση και σταθερή αξονική δύναμη. Η ποσοτική αυτή έκφραση γίνεται συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του μέλους και των οπλισμών του, δηλ. των διαστάσεων διατομής και του μήκους του μέλους, της ποσότητας και διάταξης του οπλισμού (ποσοστά εφελκόμενου και θλιβόμενου χάλυβα και συνδετήρων, θέση ράβδων στη διατομή, αριθμός και απόσταση σκελών συνδετήρων, κ.λ.π.) και των μονοαξονικών αντοχών χάλυβα και σκυροδέματος.

Η ποσοτικοποίηση της αντοχής υπό το συνδυασμό μονοαξονικής ροπής  $M$ , τέμνουσας  $V$  και αξονικής δύναμης  $N$ , επιτυγχάνεται με συνδυασμό βασικών κινηματικών παραδοχών, συνθηκών ισορροπίας και σχετικά απλών προσομοιωμάτων για τις σχέσεις  $\sigma$ - $\epsilon$  χάλυβα και σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα, και συγκεκριμένα με αυτά των πειραμάτων που παρουσιάζονται στους Πίνακες του Παραρτήματος.

Για μονοτονική φόρτιση, οι παραμορφώσεις που εκφράζονται ποσοτικά εδώ είναι οι γωνίες στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ , και στην αστοχία,  $\theta_u$ . Σαν ενδιάμεσο μέγεθος, εξετάζονται και οι καμπυλότητες, στη διαρροή,  $\phi_y$  και στην (καμπτική) αστοχία,  $\phi_u$ . Αυτά τα μεγέθη παραμόρφωσης εκφράζονται ποσοτικά κατά ημι-εμπειρικό τρόπο (δηλ. με φαινομενολογική προσαρμογή στα πειραματικά αποτελέσματα των Πινάκων του Παραρτήματος, σε συνδυασμό με βασικές παραδοχές και συνθήκες, όπου αυτό είναι δυνατό).

Για την περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, ποσοτικοποιείται η απορρόφηση ενέργειας κατά την ανακύκλιση, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, και γίνεται προσπάθεια καθορισμού των παραμέτρων φαινομενολογικών προσομοιωμάτων της συμπεριφοράς υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, έτσι ώστε να αναπαράγεται κατά μέσο όρο αυτή η πλευρά της πειραματικής συμπεριφοράς.

### 3.2. Παραμορφωσιακά μεγέθη μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική καμπτική ή καμπτοδιατμητική ένταση με σταθερή αξονική δύναμη.

#### 3.2.1. Εισαγωγή

Για μονοτονική φόρτιση υπό σταθερή αξονική δύναμη, η σχέση έντασης-παραμόρφωσης ( $M-\varphi$ , ή  $M-\theta$ , ή  $V-\delta$ ) είναι αρχικά σχεδόν γραμμική με σταθερή κλίση, και κατόπιν καμπυλώνεται ή αλλάζει κλίση βαθμιαία ή απότομα. Η σχετικά απότομη αλλαγή κλίσης χαρακτηρίζει περισσότερο τα στοιχεία με μεγάλο λόγο διάτμησης και κυρίως καμπτική συμπεριφορά και σχετίζεται με τη διαρροή του εφελκυόμενου διαμήκους χάλυβα. Η βαθμιαία αλλαγή κλίσης συναντάται κυρίως σε στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης, στα οποία η συμπεριφορά κυριαρχείται από τη διάτμηση και τις μη-γραμμικές παραμορφώσεις του σκυροδέματος. Και στις δύο όμως περιπτώσεις είναι σχετικά εύκολο να θεωρηθεί το συνολικό διάγραμμα έντασης-παραμόρφωσης μέχρι και την οριακή αντοχή, σαν διγραμμικό. Το σημείο αλλαγής κλίσης στο διγραμμικό διάγραμμα μπορεί να θεωρηθεί σαν σημείο διαρροής, οπότε και η αντίστοιχη ένταση και παραμόρφωση θεωρείται ότι χαρακτηρίζουν τη διαρροή, ακόμα και αν ο λόγος διάτμησης είναι χαμηλός. Για μονοτονική φόρτιση υπό σταθερή αξονική δύναμη, η ένταση μειώνεται σημαντικά με την παραμόρφωση μετά την οριακή αντοχή, ιδιαίτερα αν ο λόγος διάτμησης είναι χαμηλός. Έτσι η παραμόρφωση στην οριακή αντοχή μπορεί να θεωρηθεί κατά (συντηρητική) προσέγγιση σαν παραμόρφωση αστοχίας. Αυτή η θεώρηση απλοποιεί σημαντικά την προσομοίωση της μονοτονικής συμπεριφοράς, καθότι αυτή μπορεί να θεωρηθεί σαν διγραμμική και να καθορίζεται από τις τιμές της έντασης και της παραμόρφωσης στη διαρροή και στην οριακή αντοχή ή αστοχία, π.χ. από τη ροπή διαρροής και την οριακή ροπή,  $M_y$  και  $M_u$  (ή τις αντίστοιχες τέμνουσες,  $V_y=M_y/l$ ,  $V_u=M_u/l$ ) και από τις καμπυλότητες ή γωνίες στροφής χορδής στη διαρροή και στην αστοχία ( $\varphi_y$ ,  $\varphi_u$  ή  $\theta_y$ ,  $\theta_u$ ). Και αυτό, ακόμα και για στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης.

#### 3.2.2. Ροπή και καμπυλότητα διαρροής

Αν μέχρι τη διαρροή του εφελκυόμενου χάλυβα οι τάσεις θλίψης του σκυροδέματος είναι χαμηλές, π.χ. μέχρι  $0.6f_c$ , το σκυρόδεμα μπορεί να θεωρηθεί σαν γραμμικό-ελαστικό με Μέτρο Ελαστικότητας  $E_c$ . Τότε η ισορροπία των τάσεων στη διατομή με τις εσωτερικές δυνάμεις, σε συνδυασμό με την υπόθεση της επιτεδότητας των διατομών, και με τη θεώρηση ότι δεν υπάρχει σχετική ολίσθηση χάλυβα-σκυροδέματος, επιτρέπει τον

υπολογισμό του ανηγμένου (στο συνολικό ύψος της διατομής  $h$ ) βάθους της θλιβόμενης ζώνης κατά τη διαρροή,  $\xi_y$ , ως:

$$x_y = h\xi_y = h \frac{E_s f_c}{E_c f_y} \left[ -(\omega_1 + \omega_2 + \nu) + \sqrt{(\omega_1 + \omega_2 + \nu)^2 + 2 \frac{E_c f_y}{E_s f_c} \left[ \left(1 - \frac{d_1}{h}\right)(\nu + \omega_1) + \omega_2 \frac{d_1}{h} + 0.5\omega_\nu \right]} \right] \quad (1)$$

όπου  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  και  $\omega_\nu$  είναι τα μηχανικά ποσοστά του σπλισμού του εφελκόμενου, του θλιβόμενου πέλματος και του σπλισμού που είναι ισοκατανεμημένος καθ' ύψος της διατομής μεταξύ των πελμάτων,  $\nu$  η ανηγμένη τιμή της αξονικής δύναμης, με τη θλίψη να θεωρείται θετική,  $E_c$  το Μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος,  $f_c$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,  $f_y$  η τάση διαρροής του εφελκόμενου σπλισμού και  $d_1$  η απόστασή του από τις ακραίες ίνες της διατομής.

Με γνωστή την τιμή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή, η καμπυλότητα στη διαρροή,  $\phi_y$ , ισούται με:

$$\phi_y = \frac{f_y}{E_s \left(1 - \xi_y - \frac{d_1}{h}\right) h} \quad (2)$$

Με ισορροπία σε επίπεδο διατομής προκύπτει η ροπή διαρροής,  $M_y$ , ίση με:

$$M_y = bh^2 f_c \left[ \omega_1 \left(1 - \frac{d_1}{h} - \frac{\xi_y}{3}\right) + \nu \left(0.5 - \frac{\xi_y}{3}\right) + \omega_2 \left(\frac{\xi_y}{3} - \frac{d_1}{h}\right) \frac{\xi_y - \frac{d_1}{h}}{1 - \xi_y - \frac{d_1}{h}} + \frac{\omega_\nu}{3} \frac{\left(1 - 2\frac{d_1}{h}\right)(1 - 2\xi_y) - \frac{d_1}{h} \left(1 - \xi_y - \frac{d_1}{h}\right)^2}{1 - \xi_y - \frac{d_1}{h}} \right] \quad (3)$$

Εφαρμογή της εξ. (3) σε 550 από τα πειράματα των Πινάκων 1 του Παραρτήματος, για τα οποία ήταν διαθέσιμη η ροπή διαρροής,  $M_y$ , έδωσε κατά μέσο όρο προβλεπόμενη ροπή διαρροής 0.98 φορές την πειραματική, με συντελεστή μεταβλητότητας του λόγου προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή 25% (Σχήμα 3.1). Η εφαρμογή της εξ. (2) για την καμπυλότητα στη διαρροή,  $\phi_y$ , σε 175 από τα πειράματα για τα οποία ήταν διαθέσιμη, έδωσε μια μέση τιμή 0.872 φορές την πειραματική, με συντελεστή μεταβλητότητας του λόγου προβλεπόμενης προς πειραματική 29% (Σχήμα 3.2). Προκύπτει λοιπόν αρκετά καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά τη ροπή διαρροής, λιγότερο όμως και την καμπυλότητα διαρροής. Το γεγονός ότι η πειραματική τιμή της καμπυλότητας κατά

μέσο όρο ξεπερνά την πρόβλεψη της εξ.(2), καθώς και η διασπορά των πειραματικών τιμών, μπορεί να οφείλεται εν μέρει στο ότι η καμπυλότητα διαρροής μετράται πειραματικά σαν η ανηγμένη στην απόσταση σχετική γωνία στροφής μιας διατομής κοντά στη διατομή μέγιστης ροπής, σε σχέση με το στοιχείο όπου πακτώνεται το μέλος πέραν από τη κρίσιμη διατομή του. Έτσι περιλαμβάνεται στη μέτρηση και η επιρροή της τυχόν ολίσθησης του χάλυβα από την αγκύρωσή του πέραν από την κρίσιμη διατομή (pull-out). Η επιρροή αυτή εξαρτάται από την πειραματική διάταξη, από την απόσταση των δύο διατομών μεταξύ των οποίων μετράται η σχετική γωνία στροφής και τέλος από τα χαρακτηριστικά συνάφειας και αγκύρωσης των οπλισμών. Έτσι υπόκειται σε σημαντική διασπορά.

### 3.2.3. Καμπυλότητα αστοχίας υπό μονοτονική φόρτιση

Η τιμή της καμπυλότητας στην αστοχία,  $\varphi_u$ , εξαρτάται από το εάν η αστοχία οφείλεται στη θραύση του εφελκόμενου χάλυβα, δηλ. στην υπέρβαση της παραμόρφωσής του,  $\varepsilon_{su}$ , στη μέγιστη τάση, ή στην αστοχία του σκυροδέματος των ακραίων θλιβόμενων ινών σε θλίψη λόγω υπέρβασης της βράχυνσης αστοχίας,  $\varepsilon_{cu}$ , του σκυροδέματος. Καθοριστικό είναι εκείνο από τα δυο ενδεχόμενα που συμβαίνει πρώτο, δηλαδή δίνει τη μικρότερη τιμή της καμπυλότητας στην αστοχία:

$$\varphi_u = \min \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\xi_u \cdot h}, \frac{\varepsilon_{su}}{d - \xi_u \cdot h} \right) \quad (4)$$

όπου  $\xi_u$  είναι το ανηγμένο στο ύψος της διατομής βάθος της θλιβόμενης ζώνης στην αστοχία και  $d$  το στατικό ύψος.

Για τους χάλυβες που χρησιμοποιούνται γενικά στις αντισεισμικές κατασκευές, και οι οποίοι είναι αρκετά όλκιμοι, η χαρακτηριστική τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας,  $\varepsilon_{su}$ , είναι μεγαλύτερη από 5%, ενώ θραύση του χάλυβα πριν την αστοχία του σκυροδέματος μπορεί να συμβεί μόνο σε πλακοδοκούς με εξαιρετικά μεγάλο συνεργαζόμενο πλάτος, τέτοιο ώστε στην αστοχία η θλιβόμενη ζώνη να έχει πολύ μικρό ύψος. Έτσι κρισιμότερη φαίνεται να είναι γενικά η αστοχία λόγω υπέρβασης της παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος.

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από την περίσφιγξη. Σύμφωνα με τους Paulay and Priestley (1992), η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος,  $\varepsilon_{cu}$ , θα πρέπει να υπολογισθεί θεωρώντας ότι αυτή συμβαίνει μετά



τη θραύση του πρώτου συνδετήρα. Για το σκοπό αυτό προτείνεται συντηρητικά η εξίσωση:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s\varepsilon_{sm}}{f'_{cc}} \quad (5)$$

όπου  $\varepsilon_{sm}$  είναι η παραμόρφωση του χάλυβα του συνδετήρα στην αστοχία (την οποία ο Priestley προτείνει να λαμβάνεται ίση με 0.15 και 0.10 για χάλυβες με  $f_y=275\text{MPa}$  και  $420\text{MPa}$  αντίστοιχα),  $\rho_s$  το ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων και  $f'_{cc}$  η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος. Κατά τον Priestley (1997) τυπικές τιμές της παραμόρφωσης αστοχίας είναι από 0.012 έως 0.05, που αντιστοιχούν σε τιμές από 3 μέχρι και 14 φορές μεγαλύτερες από την παραμόρφωση αστοχίας του μη-περισφιγμένου σκυροδέματος (0.4%). Η τάση του περισφιγμένου σκυροδέματος υπολογίζεται κατά τους Paulay and Priestley (1992) με βάση το μοντέλο των Mander et al. (1988), σύμφωνα το οποίο η τάση αυτή σε παραμόρφωση  $\varepsilon_c$  ισούται με:

$$f_{cc} = \frac{(\varepsilon_c/\varepsilon_{cc}) \cdot f'_{cc} \cdot (E_c/(E_c - E_{sec}))}{(E_c/(E_c - E_{sec})) + (\varepsilon_c/\varepsilon_{cc}) - 1} \quad (6)$$

όπου  $E_c$  το Μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος (ίσο με  $5000(f_c)^{1/2}$  για  $f_c$  σε MPa),  $E_{sec}$  το τέμνον Μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος στη μέγιστη τάση, δηλ. το  $f_{cc}/\varepsilon_{cc}$ , και  $\varepsilon_{cc}$  η παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος στην μέγιστη τάση  $f_{cc}$ . Η τιμή της παραμόρφωσης  $\varepsilon_{cc}$  ισούται, με βάση το μοντέλο των Mander et al. (1988), με:

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

Η μέγιστη τάση του περισφιγμένου σκυροδέματος,  $f_{cc}$ , είναι για ορθογωνική διατομή:

$$f'_{cc} = f_c \left( 2.254 \sqrt{1 + \frac{5.955 \cdot (\rho_x + \rho_y)}{f_c}} - \frac{1.5 \cdot (\rho_x + \rho_y)}{f_c} - 1.254 \right) \quad (8)$$

όπου  $\rho_x$  και  $\rho_y$  τα μηχανικά ποσοστά συνδετήρων κατά τον x και y εγκάρσιο άξονα της διατομής αντίστοιχα. Με ολοκλήρωση των τάσεων σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη,

προκύπτει η δύναμη που δέχεται το σκυρόδεμα,  $F_{cc}$ :

$$F_{cc} = f'_{cc} \cdot \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} - \left( \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} - 1 \right) \ln \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} + \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} - 1 \right) \right) \xi \cdot b \cdot h \quad (9)$$

Το ανηγμένο στο ύψος της διατομής βάθος της θλιβόμενης ζώνης στην αστοχία  $\xi_u$  μπορεί να υπολογισθεί με βάση την ισορροπία εσωτερικών δυνάμεων της διατομής, λαμβάνοντας υπόψη την αποφλοιώση του σκυροδέματος της επικάλυψης  $c$  των συνδετήρων:

$$\xi_u = \frac{\omega_1 - \omega_2 + \nu}{\left( \frac{F_{cc}}{f_c \cdot b \cdot h} \right) \cdot \alpha \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot c}{h} \right)} \quad (10)$$

Στην παρούσα περίπτωση η τιμή της  $F_{cc}$  μπορεί να υπολογισθεί από την εξ. (9), για  $\varepsilon_c$  ίσο με  $\varepsilon_{cu}$  κατά την εξ. (5). Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης,  $\alpha$ , ισούται κατά τον Πρότυπο Κανονισμό 1990 των CEB/FIP, με:

$$\alpha = \left( 1 - \frac{n \frac{b_i^2}{6}}{b_c^2} \right) \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{s}{b_c} \right)^2 \quad (11)$$

Στην εξ. (11)  $b_c$  είναι η διάσταση του περισφιγμένου πυρήνα σκυροδέματος,  $n$  ο αριθμός ράβδων που συγκρατούνται σε μια γωνία συνδετήρα,  $b_i$  η μέση απόσταση μεταξύ των ράβδων αυτών και  $s$  η απόσταση των συνδετήρων.

Η εξ. (4), με  $\varepsilon_{su}$  την πειραματικά μετρημένη παραμόρφωση αστοχίας του χάλυβα, όπου αυτή παρέχεται (διαφορετικά καθ' υπόθεση ίση με 10%),  $\varepsilon_{cu}$  από τη εξ. (5) και  $\xi_u$  από την εξ. (10) και με τη βοήθεια των εξ. (7)-(9) και (11), δίνει ότι η προσδιοριζόμενη τιμή της καμπυλότητας στην αστοχία είναι 2.562 φορές μεγαλύτερη από την πειραματικά μετρημένη για τα 126 πειράματα μονοτονικής φόρτισης στα οποία είχε μετρηθεί. Επιπλέον ο λόγος προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή έχει συντελεστή μεταβλητότητας 59%. (Για τα 15 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης η αντίστοιχη μέση τιμή είναι 2.764 και ο συντελεστής μεταβλητότητας 67%).

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, με τον Ελληνικό Κανονισμό για τη Μελέτη και

Κατασκευή Έργων Σκυροδέματος, αλλά και με τον Πρότυπο Κανονισμό 1990 CEB/FIP, η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος,  $\varepsilon_{cu}$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$\varepsilon_{cu} = 0.0035 + 0.1\alpha\omega_w \quad (12)$$

όπου  $\omega_w$  είναι το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων και  $\alpha$  ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης κατά την εξ. (11). Το ανηγμένο στο ύψος της διατομής βάθος της θλιβόμενης ζώνης στην αστοχία,  $\xi_u$ , μπορεί να υπολογισθεί πάλι από την εξ. (10), χρησιμοποιώντας για τον υπολογισμό της  $F_{cc}$  το συμβατικό παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος:

$$\xi_u = \frac{\omega_1 - \omega_2 + \nu}{\left(1 - \frac{0.002}{3 \cdot \varepsilon_{cu}}\right) \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot c}{h}\right)} \quad (13)$$

όπου  $c$  η επικάλυψη των συνδετήρων και  $\beta$  ο συντελεστής αύξησης της αντοχής του σκυροδέματος λόγω περίσφιγξης, ο οποίος ισούται κατά τον Πρότυπο Κανονισμό 1990 των CEB/FIP με:

$$\beta = \min(1 + 2.5 \cdot \alpha \cdot \omega_w, 1.125 + 1.25 \cdot \alpha \cdot \omega_w) \quad (14)$$

Χρησιμοποιώντας την εξ. (4), με  $\varepsilon_{cu}$  όπως αυτό προκύπτει από την εξ. (12) και  $\xi_u$  από τις εξ. (13), (14), η τιμή της καμπυλότητας αστοχίας είναι κατά μέσο όρο 0.9 φορές η πειραματική για τα 126 πειράματα μονοτονικής φόρτισης, ενώ ο λόγος προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή έχει συντελεστή μεταβλητότητας 75%. Αντίστοιχα για τα 15 πειράματα κυκλικής φόρτισης, η μέση τιμή προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή είναι 0.763 και ο συντελεστής μεταβλητότητας 62%. Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται και στον Πίνακα 3.1.

Η υποτίμηση της πειραματικής τιμής από την εξ. (4), στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται σ' αυτήν οι εξ. (12) και (14) κατά τον Ευρωκώδικα 8 και τον Πρότυπο Κανονισμό 1990 των CEB/FIP, είναι σε λογικά πλαίσια, τα οποία δικαιολογούνται από την πιθανή επιρροή της ολίσθησης του χάλυβα πέραν από την κρίσιμη διατομή στην πειραματική τιμή (βλ. αντίστοιχη σύγκριση στο τέλος της παρ. 3.2.2). Για το λόγο αυτό στο εξής θα χρησιμοποιηθεί η εξ. (4) με τις εξ. (12)-(14).

Πίνακας 3.1 Στατιστικά στοιχεία προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή καμπυλότητας,  $\varphi_{i,pred} / \varphi_{i,exp}$ , για διάφορους τρόπους προσδιορισμού της παραμόρφωσης αστοχίας σκυροδέματος  $\varepsilon_{cu}$  και του βάθους της θλιβόμενης ζώνης  $\xi_u$  (εξ. (7), (10) και εξ. (13), (14)).

	με βάση $\varepsilon_{cu}$ , $\xi_u$ από εξ.(7), (10)		με βάση $\varepsilon_{cu}$ , $\xi_u$ από εξ.(13), (14)	
	μέσος όρος	τυπική απόκλιση	μέσος όρος	τυπική απόκλιση
μονοτονικά (126)	2.562	1.509	0.900	0.667
ανακυκλιζόμενα (15)	2.764	1.843	0.763	0.474

### 3.2.3. Γωνία στροφής χορδής στη διαρροή

Στο Κεφ. 2 περιγράψαμε αναλυτικά το προσομοίωμα Park and Ang (1985) για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή, για πρισματικά μέλη υπό μονοαξονική κάμψη.

Για το σύνολο των 547 πειραμάτων της παρούσας βάσης δεδομένων για τα οποία υπάρχουν αποτελέσματα για τη στροφή χορδής στη διαρροή, η τιμή της στροφής χορδής στη διαρροή κατά τη διαδικασία των Park and Ang (1985) είναι κατά μέσο όρο 1.40 φορές μεγαλύτερη από την πειραματικά μετρημένη, ενώ ο λόγος προβλεπόμενης προς πειραματικά μετρημένη τιμή έχει συντελεστή μεταβλητότητας 56%. Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία σε 318 πειράματα με δυνατότητα ολίσθησης του οπλισμού ο μέσος όρος προβλεπόμενης προς πειραματικά μετρημένης τιμή ήταν 1.73 με αντίστοιχο συντελεστή μεταβλητότητας 50%. Για τα υπόλοιπα 229 πειράματα στα οποία ουσιαστικά δεν υπήρχε δυνατότητα ολίσθησης του οπλισμού, ο μέσος όρος ήταν 0.93 και ο συντελεστής μεταβλητότητας 40%. (Η λόγω ολίσθησης στροφή λαμβανόταν ή όχι υπόψη στον υπολογισμό αν, ανάλογα με την πειραματική διάταξη, συνέβαινε ή όχι ολίσθηση στο πείραμα). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2 και στο Σχήμα 3.3.

Η σύγκριση δείχνει ότι η πρόταση Park and Ang (1985) υπερτιμά κατά μέσο όρο τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή, πιθανόν λόγω υπερτίμησης της συμβολής της ολίσθησης των ράβδων.

Παρακάτω προτείνονται εναλλακτικοί τρόποι για τον προσδιορισμό της στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ . Η εναλλακτική πρόταση βασίζεται επίσης στο ότι η  $\theta_y$  αποτελείται από τρεις παράγοντες: (α) τις στροφές λόγω κάμψης, (β) τις στροφές λόγω διάτμησης και (γ) τις στροφές λόγω ολίσθησης στην αγκύρωση. Η διαφορά της πρότασης με το μοντέλο Park and Ang (1985) έγκειται στα (β) και (γ).

Πίνακας 3.2 Στατιστικά στοιχεία λόγου προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή γωνίας στροφής χορδής,  $\theta_{y,pred} / \theta_{y,exp}$ , για το μοντέλο Park and Ang (1985) για στροφή χορδής στη διαρροή,  $\theta_{y,pred}$ .

	Μέσος όρος	median	τυπική απόκλιση
σύνολο (547)	1.396	1.165	0.805
με ολίσθηση (318)	1.733	1.510	0.861
χωρίς ολίσθηση (229)	0.928	0.907	0.377

Ως προς το ( $\gamma$ ) η διαφορά είναι η εξής: Στο προτεινόμενο μοντέλο η ολίσθηση θεωρείται ότι προέρχεται από την αγκύρωση πέραν από το άκρο του μέλους και ισούται με το γινόμενο του μήκους διείδυσης της διαρροής του χάλυβα,  $L_y$ , πέραν από το άκρο του μέλους, επί τη μήκυνση διαρροής του εφελκόμενου χάλυβα  $E_{sy}=f_y/E_s$ . Κατά τον Paulay and Priestley (1992) η διείδυση της διαρροής συμβάλει στο μήκος  $L_p$  της πλαστικής άρθρωσης κατά:

$$L_y = 0.022 \Phi_L f_y \quad (15)$$

όπου  $\Phi_L$  η διάμετρος των διαμήκων ράβδων και  $f_y$  η τάση διαρροής τους (σε MPa). Αν υιοθετηθεί η εξ. (15), η οποία σημειωτέον αναφέρεται στο μετα-διαρροϊκό στάδιο και μάλιστα κοντά στην αστοχία, τότε η ολίσθηση ισούται με  $L_y \epsilon_{sy}$  και η εξαιτίας αυτής γωνία στροφής χορδής  $\theta_{y,slip}$  με:

$$\theta_{y,slip} = L_y \frac{\epsilon_{sy}}{z} \quad (16)$$

όπου  $\epsilon_s$  η παραμόρφωση διαρροής του διαμήκη σπλισμού και  $z$  ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων ( $z \approx 0.9d$  ή  $z \approx d - d_1$ ).

Η λόγω διάτμησης στροφή χορδής μπορεί να εκτιμηθεί κατά τον Priestley (1996) κατ' αναλογία προς τη λόγω κάμψης και ανάλογα προς τις ελαστικές παραμορφώσεις σε κάμψη και διάτμηση:

$$\frac{\theta_{y,hear}}{\theta_{y,flex.}} = \frac{1}{GA} \cdot \frac{3EI}{L_s^2} = \frac{3}{4} \left( \frac{h}{L_s} \right)^2 \quad (17)$$

(για ορθογωνική διατομή με  $A_s = 0.8bh$  και  $E = 2.4G$ ).

Υιοθετώντας την εξ. (17), η συνολική στροφή χορδής στη διαρροή ισούται με:

$$\theta_y = \theta_{y,\text{flex}} \left( 1 + \frac{3}{4} \left( \frac{h}{L_s} \right)^2 \right) + 0.022 \Phi_L f_y \frac{\varepsilon_{sy}}{z} \quad (18)$$

όπου  $h$  το ύψος της διατομής,  $L_s$  το μήκος διάτμησης και  $\theta_{y,\text{flex}}$ , η στροφή χορδής στη διαρροή λόγω κάμψης, η οποία υπολογίζεται σαν  $\phi_y L_s / 3$ .

Αν εφαρμοσθεί η εξ. (18) στο σύνολο των 547 πειραμάτων, η μέση τιμή του λόγου της στροφής χορδής στη διαρροή προς την πειραματικά μετρημένη είναι 0.637, ο δε συντελεστής μεταβλητότητας 47%. Εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση ξεχωριστά σε 318 πειράματα με δυνατότητα ολίσθησης του οπλισμού στη αγκύρωση, ο μέσος όρος είναι 0.584 και ο συντελεστής μεταβλητότητας 45.5%, ενώ για τα υπόλοιπα 229 στα οποία δεν υπήρχε δυνατότητα ολίσθησης ο μέσος όρος είναι 0.711 και ο συντελεστής μεταβλητότητας 46%.

Αυτά τα τελευταία 229 πειράματα δείχνουν ότι η διαφορά  $\theta_{y,\text{shear}} - \theta_{y,\text{flex}}$  δεν εξαρτάται από το  $L_s/h$ . Μάλιστα, φαίνεται ανεξάρτητη οποιουδήποτε σχεδόν μηχανικού ή γεωμετρικού στοιχείου του μέλους. Η μέση τιμή της ισούται με 0.3% περίπου και η τυπική της απόκλιση με 0.35%. Η πρώτη πρόταση λοιπόν είναι η  $\theta_{y,\text{shear}}$  να ληφθεί ίση με 0.3%. Τότε ο συντελεστής 0.022 της εξ. (18) χρειάζεται να αντικατασταθεί με 0.04. Έτσι η πρώτη εναλλακτική πρόταση είναι η εξής:

$$\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.003 + 0.04 \alpha_s \Phi_L f_y \frac{\varepsilon_{sy}}{z} \quad (19)$$

όπου το  $\alpha_s$  ισούται με 1.0 ή 0, αν μπορεί να υπάρξει ή όχι ολίσθηση των διαμήκων ράβδων πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής και η  $f_y$  είναι σε MPa (τα  $h$ ,  $L_s$ ,  $\Phi_L$  και  $z$  έχουν όλα τις ίδιες διαστάσεις).

Η τυπική απόκλιση της διαφοράς της πειραματικής τιμής της  $\theta_y$  από τις προβλέψεις της εξ. (19) ισούται με 0.37%, δηλ. δεν αυξάνεται ουσιαστικά (έναντι του 0.35%) λόγω της παρουσίας της ολίσθησης.

Μία λίγο πιο περίπλοκη εναλλακτική πρόταση για τον λόγω διάτμησης όρο της  $\theta_y$  βρίσκεται στο ενδιάμεσο των εξ. (18) και (19). Η πρόταση αυτή είναι:

$$\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} \left( 1 + 2.5 \frac{h}{L_s} \right) + 0.04 \alpha_s \Phi_L f_y \frac{\varepsilon_{sy}}{z} \quad (20)$$

Σημειωτέον ότι επειδή η  $\phi_y$  είναι αντιστρόφως ανάλογη του  $h$ , η εξ. (20) δεν διαφέρει σημαντικά από την εξ. (19).

Ο Πιν. 3.3 δίνει στατιστικά στοιχεία του λόγου της προβλεπόμενης από τις εξ. (19) ή (20) τιμής προς την πειραματική.

Πίνακας 3.3. Στατιστικά στοιχεία του λόγου προβλεπόμενης (εξ. (19) ή (20)) τιμής προς πειραματική για τη γωνία στροφής στη διαρροή

	Μέση τιμή	Median	Τυπική απόκλιση
Σύνολο (547), εξ. (19)	1.035	0.983	0.427
εξ. (20)	1.048	0.993	0.434
Χωρίς ολίσθηση, εξ. (19)	1.064	1.011	0.427
εξ. (20)	1.053	1.015	0.424
Με ολίσθηση, εξ. (19)	1.021	0.948	0.427
εξ. (20)	1.036	0.973	0.441

Το Σχήμα 3.5 συγκρίνει τις προβλεπόμενες από τις εξ. (19) και (20) τιμές της  $\theta_y$  με τις αντίστοιχες πειραματικές. Η σύγκριση κάνει εμφανή μια απόκλιση των προβλεπόμενων τιμών στις ακραίες περιοχές των μικρών και των μεγάλων τιμών της  $\theta_{y,exp}$ , όπου οι εξ. (19) και (20) φαίνεται να υπερτιμούν και να υποτιμούν αντίστοιχα τις πειραματικές τιμές.

Παρά το γεγονός ότι η εξ. (19) φαίνεται να δίνει καλλίτερα στατιστικά στοιχεία στη σύγκρισή της με τα πειραματικά δεδομένα (Πιν. 3.3), το Σχήμα 3.5 δείχνει μία ελαφρή υπεροχή της εξ. (20).

### 3.2.5. Υπολογισμός γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία ημι-εμπειρικά, μέσω καμπυλοτήτων

Ο υπολογισμός της στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του μέλους και του σπλισμού του, μπορεί να γίνει είτε με βάση τις καμπυλότητες και την έννοια του μήκους της πλαστικής άρθρωσης,  $L_p$ , κατά την κατωτέρω εξ. (21), είτε εντελώς εμπειρικά μέσω σχέσεων παλινδρόμησης της τιμής της  $\theta_u$  επί αυτών των χαρακτηριστικών.

$$\theta_u = \varphi_y \frac{L_s}{3} + (\varphi_u - \varphi_y) L_p \left( 1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) = \theta_y + (\varphi_u - \varphi_y) L_p \left( 1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) \quad (21)$$

Ο υπολογισμός της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , με βάση την πρώτη

διαδικασία, απαιτεί τον προσδιορισμό του ισοδύναμου μήκους πλαστικής άρθρωσης,  $L_p$ . Από φυσική άποψη το μήκος αυτό φαίνεται να εξαρτάται από το χάλυβα, το σκυρόδεμα, το μήκος διάτμησης και την τέμνουσα. Στη δεκαετία του '60 προτάθηκαν μια σειρά από εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του  $L_p$ . Οι σχέσεις αυτές βασίσθηκαν σε αποτελέσματα ενός περιορισμένου αριθμού μονοτονικών πειραμάτων. Οι κυριότερες από τις σχέσεις εμπειρικής πρόβλεψης του μήκους πλαστικής άρθρωσης είναι:

$$\text{Sawyer (1964):} \quad L_p = 0.25d + 0.075L_s \quad (22)$$

$$\text{Corley (1966):} \quad L_p = 0.5d + \sqrt{d} \left( \frac{L_s}{d} \right) \quad (23)$$

$$\text{Mattock (1967):} \quad L_p = 0.5d + 0.05L_s \quad (24)$$

όπου  $d$  το στατικό ύψος και  $L_s$  το μήκος διάτμησης του μέλους. Οι Paulay and Priestley (1992) προτείνουν τον υπολογισμό του μήκους πλαστικής άρθρωσης από τη σχέση:

$$L_p = 0.08L_s + 0.022f_y \Phi_L \quad (25)$$

όπου  $\Phi_L$  η διάμετρος των ράβδων διαμήκους σπλισμού του στοιχείου και η τάση  $f_y$  είναι σε MPa. Η σχέση αυτή προσμετρά, μέσω του τελευταίου όρου, στο μήκος πλαστικής άρθρωσης και την επιρροή της διείσδυσης της διαρροής πέραν από την ακραία διατομή, μέσα δηλ. στον κόμβο.

Στα πλαίσια της διερεύνησης της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς μελών οπλισμένου σκυροδέματος και της αναζήτησης τρόπων πρόβλεψης της παραμόρφωσής τους στην αστοχία, εξετάσθηκαν οι παραπάνω εξισώσεις με σύγκριση με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα από 150 περιπτώσεις στις οποίες ήταν γνωστές οι τιμές των  $\phi_y$ ,  $\phi_u$  και  $\theta_u$  καθώς και δυνατός ο υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης,  $L_p$ , από την εξ. (20). Με βάση τις πειραματικές τιμές των  $\phi_y$ ,  $\phi_u$  και  $\theta_y$ ,  $\theta_u$ , επιλύεται η εξ. (21) ως προς  $L_p$ , δίνοντας την “πραγματική”, δηλ. πειραματική, τιμή του μήκους πλαστικής άρθρωσης. Η στατιστική συσχέτιση των παραμέτρων των ανωτέρω τεσσάρων εξισώσεων, δηλ. των  $d$ ,  $L_s$  και  $f_y \Phi_L$ , για τα 150 πειράματα με το “πραγματικό”  $L_p$  οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μήκος πλαστικής άρθρωσης σχετίζεται στατιστικά καλύτερα με το μήκος διάτμησης  $L_s$  (συντελεστής συσχέτισης  $\rho=0.52$ ), και με το γινόμενο  $f_y \Phi_L$  ( $\rho=0.52$ ), και λιγότερο καλά



Πίνακας 3.4: Στατιστικά στοιχεία του λόγου προβλεπόμενου προς πειραματικό μήκος πλαστικής άρθρωσης,  $L_{p,pred} / L_{p,exp}$ , με βάση διάφορα μοντέλα για το μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{p,pred}$  (135 πειράματα μονοτονικής φόρτισης) - Χρήση πειραματικών τιμών καμπυλοτήτων και γωνιών στροφής.

	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Sawyer (1964)	0.698	0.357
Corley (1966)	0.596	0.267
Mattock (1967)	0.811	0.379
Paulay and Priestley (1992)	1.084	0.613

Πίνακας 3.5: Στατιστικά στοιχεία του λόγου προβλεπόμενου προς πειραματικό μήκος πλαστικής άρθρωσης,  $L_{p,pred} / L_{p,exp}$ , με βάση διάφορα μοντέλα για το μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{p,pre}$  (15 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης) - Χρήση πειραματικών τιμών καμπυλοτήτων και γωνιών στροφής..

	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Sawyer (1964)	1.488	0.736
Corley (1966)	1.542	0.783
Mattock (1967)	1.190	0.583
Paulay and Priestley (1992)	0.955	0.498

με το στατικό ύψος  $d$  ( $\rho=0.42$ ). Επίσης η συσχέτιση του μήκους διάτμησης,  $L_s$ , με το ύψος  $d$  είναι σχετικά μεγάλη ( $\rho=0.72$ ), καθώς και του στατικού ύψους  $d$  με το γινόμενο  $f_y\Phi_L$  ( $\rho=0.43$ ), ενώ μικρότερη είναι η συσχέτιση του μήκους  $L_s$  με το γινόμενο  $f_y\Phi_L$  ( $\rho=0.29$ ). Η σημαντική στατιστική συσχέτιση του  $L_s$  με το  $d$  οφείλεται στο ότι τα περισσότερα πειράματα στα οποία μετρείται η καμπυλότητα, στοχεύουν σ' ένα στενό φάσμα τιμών του λόγου διάτμησης  $L_s/d$ , δηλ. αυτό των σχετικά λυγερών στοιχείων. Η υψηλή συσχέτιση των  $L_s$  και  $d$  σημαίνει ότι δεν μπορεί να εξαχθεί, μ' αυτή τουλάχιστον τη βάση δεδομένων, σχέση για το  $L_p$  σαν συνάρτηση των  $L_s$  και  $d$  ταυτόχρονα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η εξ. (25) κατά Paulay and Priestley (1992) περιγράφει στατιστικά ορθότερα το μήκος πλαστικής άρθρωσης.

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα προβλεπόμενων (με βάση τις εξ. (22), (23), (24), (25)) και των "πειραματικών" τιμών του μήκους πλαστικής άρθρωσης.

Οι Πίνακες 3.4 και 3.5 συνοψίζουν τα αποτελέσματα της σύγκρισης, με τη μορφή στατιστικών στοιχείων του λόγου της προβλεπόμενης από κάθε μία από τις ανωτέρω σχέσεις

τιμής του μήκους  $L_p$  προς την πειραματική. Από τους ανωτέρω πίνακες προκύπτει ότι μόνον η εξ. (25) κατά Paulay and Priestley προβλέπει κατά μέσο όρο ικανοποιητικά το μήκος πλαστικής άρθρωσης (παρά τη σημαντική διασπορά που τη συνοδεύει).

Για λόγους σύγκρισης με τα αμέσως επόμενα, παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.6 και 3.7 τα αποτελέσματα της σύγκρισης πειραματικής και προβλεπόμενης τιμής του μήκους πλαστικής άρθρωσης, για τα ίδια πειράματα που εξετάστηκαν στους Πίνακες 3.4 και 3.5 και για την περίπτωση που η πειραματική τιμή του  $L_p$  υπολογίζεται όχι με βάση τις μετρηθείσες τιμές των καμπυλοτήτων  $\phi_y$ ,  $\phi_u$  και της γωνίας στροφής  $\theta_y$ , αλλά από τις εξισώσεις (1), (4), (12), (13) και (19) ή (20). Η  $\theta_u$  είναι στην περίπτωση αυτή η πειραματική. Η διαφορά στον αριθμό των πειραμάτων οφείλεται στην σε ορισμένες περιπτώσεις αδυναμία υπολογισμού του "πειραματικού" μήκους πλαστικής άρθρωσης μέσω της εξ. (21) και με χρήση των προβλεπόμενων τιμών για τα  $\phi_y$ ,  $\phi_u$  και  $\theta_y$ .

Πίνακας 3.6: Στατιστικά στοιχεία του λόγου προβλεπόμενου προς πειραματικό μήκος πλαστικής άρθρωσης,  $L_{p,pred} / L_{p,exp}$ , με βάση διάφορα μοντέλα για το μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{p,pred}$  (85 πειράματα μονοτονικής φόρτισης) - Χρήση προβλεπομένων τιμών καμπυλοτήτων και γωνιών στροφής.

	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Sawyer (1964)	0.737	0.563
Corley (1966)	0.610	0.453
Mattock (1967)	0.837	0.619
Paulay and Priestley (1992)	1.146	0.887

Πίνακας 3.7: Στατιστικά στοιχεία του λόγου προβλεπόμενου προς πειραματικό μήκος πλαστικής άρθρωσης,  $L_{p,pred} / L_{p,exp}$ , με βάση διάφορα μοντέλα για το μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{p,pred}$  (13 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης) - Χρήση προβλεπομένων τιμών καμπυλοτήτων και γωνιών στροφής.

	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Sawyer (1964)	0.722	0.613
Corley (1966)	0.732	0.700
Mattock (1967)	0.921	0.845
Paulay and Priestley (1992)	1.155	1.002

Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι η επιτυχία της σχέσης (25) κατά Paulay and Priestley (1992) μειώνεται όταν τα  $\theta_y$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$ , δεν είναι τα πραγματικά, δηλ. τα πειραματικά, αλλά αυτά που προβλέπονται από τα σχετικά προσομοιώματα που προτείνονται εδώ.

Με βάση την παρατήρηση ότι η εξ. (25) κατά Paulay and Priestley (1992) για το  $L_p$  δεν δίνει πλήρως ικανοποιητικά αποτελέσματα αν χρησιμοποιηθεί με τις “θεωρητικές” τιμές των  $\theta_y$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$ , αντί με τις πραγματικές, και λαμβάνοντας υπόψη ότι όταν χρησιμοποιείται η εξ. (21) για πρόβλεψη της παραμόρφωσης στην αστοχία,  $\theta_u$ , με δεδομένα μόνο τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μέλους, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σ’ αυτήν όχι οι πραγματικές τιμές των  $\theta_y$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$ , αλλά αυτές που προβλέπονται από τα αντίστοιχα προσομοιώματα (εν προκειμένω τις εξ. (19) ή (20), (3), (4), (12), (13)) έγινε προσπάθεια τροποποίησης της εξ. (25) κατά Paulay and Priestley (1992) ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή συμφωνία με τις πειραματικές τιμές της  $\theta_u$  όταν η εξ. (21) χρησιμοποιείται με τιμές των  $\theta_y$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$ , από τις εξ. (19) ή (20), (3), (4), (12), (13). Η τροποποίηση αυτή προέκυψε να είναι:

$$L_p = 0.18L_s + 0.040 \cdot f_y \cdot \alpha_s \cdot \Phi_L \quad (26)$$

με το  $f_y$  πάντοτε σε MPa και το  $\alpha_s$  να λαμβάνεται ίσο με 0 αν δεν υπάρχει ολίσθηση οπλισμού και με 1.0 διαφορετικά.

Στη συνέχεια συγκρίνονται οι τιμές της  $\theta_u$  που προκύπτουν για 187 πειράματα μονοτονικής φόρτισης (με  $L_s/h \geq 1.5$ ) και για 280 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης (με  $L_s/h \geq 1.5$ ) από την εξ. (21), με χρήση σ’ αυτή των τιμών των  $\theta_y$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$  από τις εξ. (19) ή (20), (3), (4), (12), (13) και του  $L_p$  από τις εξ. (22)-(24), προς τις πειραματικές τιμές. Η σύγκριση γίνεται στα Σχήματα 3.7-3.9 αναλυτικά και στους Πίνακες 3.8-3.10 για το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση του λόγου της προβλεπόμενης προς την πειραματική τιμή.

Οι Πίνακες 3.8-3.10 και τα Σχήματα 3.7-3.9, επιτρέπουν το συμπέρασμα ότι η εξ. (26), σε συνδυασμό με τις (19)-(21), (3), (4), (12), (13) για τα  $\theta_y$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$ , δίνει κατά μέσο όρο ικανοποιητική πρόβλεψη για το  $\theta_u$ , αλλά με σημαντική διασπορά, που αντιστοιχεί σε συντελεστή μεταβλητότητας περίπου 70%, και με κάποια συστηματική απόκλιση για τις χαμηλές τιμές των  $\theta_{u,exp}$ , όπου η εξ. (21) υπερτιμά την  $\theta_{y,exp}$ , καθώς και για τις υψηλές, όπου ισχύει το αντίθετο.

Πίνακας 3.8: Στατιστικά στοιχεία του λόγου προβλεπόμενης προς πειραματική γωνία στροφής χορδής στην αστοχία  $\theta_{i,pred} / \theta_{i,exp}$ , για διάφορα μοντέλα για το μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{p,pred}$  και χρήση της εξίσωσης (187 πειράματα μονοτονικής φόρτισης).

	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Sawyer (1964)	0.677	0.510
Corley (1966)	0.650	0.512
Mattock (1967)	0.758	0.601
Paulay and Priestley (1992)	0.897	0.725
εξ. (26)	1.021	0.833

Πίνακας 3.9: Στατιστικά στοιχεία του λόγου προβλεπόμενης προς πειραματική γωνία στροφής χορδής στην αστοχία  $\theta_{i,pred} / \theta_{i,exp}$ , για διάφορα μοντέλα για το μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{p,pred}$  και χρήση της εξίσωσης (280 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης).

	Μέσος όρος	τυπική απόκλιση
Sawyer (1964)	0.898	0.509
Corley (1966)	0.968	0.603
Mattock (1967)	1.102	0.670
Paulay and Priestley (1992)	1.313	0.862
εξ. (26)	1.051	0.594

Πίνακας 3.10: Στατιστικά στοιχεία του λόγου προβλεπόμενης προς πειραματική γωνία στροφής χορδής στην αστοχία  $\theta_{i,pred} / \theta_{i,exp}$ , για διάφορα μοντέλα για το μήκος πλαστικής άρθρωσης  $L_{p,pred}$  και χρήση της εξίσωσης (467 πειράματα μονοτονικής και ανακυκλιζόμενης φόρτισης).

	Μέσος όρος	τυπική απόκλιση
Sawyer (1964)	0.812	0.532
Corley (1966)	0.839	0.593
Mattock (1967)	0.964	0.671
Paulay and Priestley (1992)	1.146	0.841
εξ. (26)	1.038	0.707

### 3.2.6. Εμπειρικός υπολογισμός γωνιών στροφής χορδής στην αστοχία μέσω σχέσεων παλινδρόμησης

Εκτός από τον έμμεσο ημι-εμπειρικό τρόπο υπολογισμού της στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , μέσω της εξ. (21) και του μήκους της πλαστικής άρθρωσης, υπάρχει και η δυνατότητα απ' ευθείας καθορισμού της σχέσης υπολογισμού της  $\theta_u$  με γραμμική παλινδρόμηση στις παραμέτρους των μελών των πειραμάτων (γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά).

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή οι Park et al. (1987) πρότειναν την ακόλουθη εξίσωση για τη γωνία στροφής χορδής στην αστοχία υπό μονοτονική φόρτιση:

$$\theta_u = \frac{0.0633 \left( \frac{L_s}{d} \right)^{0.93}}{\omega_1^{0.27} f_c^{0.15}} \left[ \frac{\max(\rho_w, 0.004)}{\max(v, 0.05)} \right]^{0.48} \quad (26)$$

όπου  $\rho_w$  είναι το γεωμετρικό ποσοστό συνδετήρων.

Η εξίσωση αυτή συγκρίθηκε εδώ με τα αποτελέσματα 187 πειραμάτων μονοτονικής φόρτισης και έδωσε ότι η στροφή χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , είναι 1.26 φορές η πειραματικά μετρημένη, ενώ ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι 50%. Αντίστοιχα εφαρμόζοντας την ίδια εξίσωση σε 341 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης, προέκυψε ότι κατά μέσο όρο η  $\theta_u$  είναι 0.79 φορές η πειραματικά μετρημένη, ενώ ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι 42%. Επισημαίνεται ότι η εξ. (26) έχει προταθεί για μονοτονική φόρτιση και ότι ο λόγος προβλεπόμενης προς πειραματική τιμή θα έπρεπε κανονικά να είναι για τα ανακυκλιζόμενα πειράματα μεγαλύτερος απ' ότι στα πειραματικά (δεδομένου ότι στην παρούσα βάση δεδομένων τα ανακυκλιζόμενα πειράματα είχαν κατά μέσο όρο γωνία στροφής χορδής στην αστοχία τα 2/3 αυτών της μονοτονικής φόρτισης).

Στα πλαίσια της προσπάθειας ανάπτυξης σχέσης απευθείας υπολογισμού της  $\theta_u$  με βάση τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μέλους και του οπλισμού, επελέγησαν εδώ οι εξής παράμετροι σαν δυνητικά κατάλληλοι για την περιγραφή των χαρακτηριστικών αυτών: Το μήκος διάτμησης,  $L_s$ , το ύψος,  $h$  (χωριστά, αλλά και σαν συνδυασμός με το  $L_s$  σαν λόγος διάτμησης  $L_s/h$ ), η θλιπτική αντοχή κυλίνδρου,  $f_c$ , τα μηχανικά ποσοστά εφελκυσμένου και θλιβόμενου χάλυβα,  $\omega_1$  και  $\omega_2$ , το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων,  $\omega_w$ , ο λόγος διαμέτρων διαμήκων ράβδων  $\Phi_L$  προς την απόσταση γειτονικών συνδετήρων  $s$ , η ανηγμένη αξονική δύναμη θλίψης,  $v=N/A_c f_c$ , το είδος

του χάλυβα από απόψεως ολκιμότητας και η ύπαρξη ή όχι ολίσθησης του οπλισμού στην αγκύρωση πέραν από την ακραία διατομή. Έγιναν κατόπιν αναλύσεις μη-γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της πραγματικής γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , και όλων των ανωτέρω παραμέτρων.

Έγιναν αναλύσεις παλινδρόμησης για 187 μονοτονικά και για 341 ανακυκλιζόμενη πειράματα (συνολικά 528). Στα πειράματα αντιπροσωπεύονται τρεις τύποι χάλυβα: (α) Ολκιμος χάλυβας με τάση διαρροής από 280 MPa έως 485 MPa, του τύπου που παραδοσιακά χρησιμοποιείται για αντισεισμικές κατασκευές σε ΗΠΑ και Ιαπωνία και μέχρι πρόσφατα και στην Ευρώπη (κυρίως στη σεισμογενή Νότια Ευρώπη). (β) Χάλυβας τύπου Tempcore, S500, του τύπου που παράγεται και χρησιμοποιείται σήμερα ευρύτατα στην Ευρώπη αλλά και στην Ελλάδα, και ο οποίος έχει οριακή για αντισεισμικές κατασκευές ολκιμότητα. Ο χάλυβας αυτός αντιστοιχεί στον τύπου H του Ευρωκώδικα 2 και στον τύπου B της Euronorm 10080. (γ) Ψαθυρός χάλυβας ψυχρής εξέλασης, συνήθως S500, ουσιαστικά ακατάλληλος για αντισεισμικές κατασκευές. Ο χάλυβας αυτός παράγεται ευρύτατα στη Βόρειο Ευρώπη και αντιστοιχεί στον τύπου N του Ευρωκώδικα 2 ή στον τύπου A της Euronorm 10080.

Στα μονοτονικά πειράματα δεν υπήρχε κατά κανόνα ολίσθηση των ράβδων πέραν από την κρίσιμη διατομή της μέγιστης ροπής (μόνο 14 πειράματα εμφάνιζαν δυνατότητα ολίσθησης). Τα πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης περιελάμβαναν λιγότερες δοκούς και περισσότερα υποστυλώματα και περισσότερες περιπτώσεις με ολίσθηση του οπλισμού πέραν από την αγκύρωση και λιγότερες περιπτώσεις χωρίς ολίσθηση. Κάλυπταν όμως μόνο δύο τύπους χάλυβα: όλκιμο (325 πειράματα) και Tempcore (16 πειράματα).

Η ανάλυση παλινδρόμησης για τα 528 πειράματα έδωσε την εξής μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία:

$$\theta_u (\%) = 1.45 a_{st} a_{cyc} a_{slip} \left[ \frac{\max(\omega_2, 0.01) L_s}{\omega_1 h} \right]^{3/8} \left( \frac{\Phi_L f_c^2}{s} \right)^{1/8} \left( \frac{1}{\max(0.01, \nu)} \right)^{1/5} \quad (27)$$

όπου η μονοαξονική αντοχή  $f_c$  είναι σε MPa.

Στην εξ. (27) ο συντελεστής  $a_{st}$  ισούται με 1 για όλκιμο χάλυβα θερμής εξέλασης, με 0.8 για τύπου Tempcore S500 και με 0.36 για ψαθυρό χάλυβα ψυχρής εξέλασης. Ο συντελεστής  $a_{cyc}$  ισούται με 1.0 για μονοτονική φόρτιση και με 0.65 για ανακυκλιζόμενη. Τέλος, ο συντελεστής  $a_{slip}$  ισούται με 1.03 αν υπάρχει δυνατότητα ολίσθησης του διαμήκους

οπλισμού πέραν από την ακραία διατομή όπου εμφανίζεται η μέγιστη ροπή.

Το Σχήμα 3.10 δίνει όλα τα πειραματικά σημεία και τα αντίστοιχα προβλεπόμενα από την εξ. (27), χωριστά για μονοτονική φόρτιση και χωριστά για ανακυκλιζόμενη.

Τέλος, από αντίστοιχη ανάλυση παλινδρόμησης βρέθηκε ότι η μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία σε πειράματα δοκιμίων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι:

$$\theta_u (\%) = \theta_y (\text{εξ}(19)\text{ή}(20)) + 1.04 a_{st} a_{cyc} a_{slip} \left( \frac{\max(\omega_2, 0.01)}{\omega_1} \right)^{1/2} \left( \frac{L_s}{h} \right)^{3/8} \left( \frac{\Phi_L}{s} \right)^{1/10} \left( \frac{f_c}{\max(0.01, v)} \right)^{1/4} \quad (28)$$

όπου η μονοαξονική αντοχή  $f_c$  είναι πάλι σε MPa.

Στην εξ. (28) ο συντελεστής  $a_{st}$  ισούται με 1.0 για όλκιμο χάλυβα τύπου S400, με 0.68 για τύπου Tempcore και με 0.12 για ψαθυρό χάλυβα. Ο συντελεστής  $a_{cyc}$  ισούται με 1.0 για μονοτονική φόρτιση και με 0.6 για ανακυκλιζόμενη. Τέλος ο συντελεστής  $a_{slip}$  ισούται με 1.03 για πειράματα με δυνατότητα ολίσθησης του οπλισμού πέραν της διατομής μέγιστης ροπής και με 1.0 για πειράματα χωρίς δυνατότητα ολίσθησης του οπλισμού.

Το Σχ. 3.11 παρουσιάζει όλα τα πειραματικά σημεία και τις αντίστοιχες προβλέψεις της εξ. (28).

Παρόλο που οι εξ. (27) και (28) είναι στατιστικά ισοδύναμες, τα Σχ. 3.10 και 3.11 δείχνουν ότι η εξ. (28) υπερέχει ελαφρώς της (27). Η ίδια εξίσωση δείχνει ότι ο τύπος του χάλυβα έχει πολύ μεγαλύτερη επιρροή στο πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία παρά στη συνολική τιμή της. Ο λόγος της προβλεπόμενης από την εξ. (27) προς την πειραματική τιμή έχει για μεν τα 187 πειράματα μονοτονικής φόρτισης μέση τιμή 1.38, συντελεστή μεταβλητότητας 37% και median 1.14, για δε τα 341 της ανακυκλιζόμενης μέση τιμή 1.16, συντελεστή μεταβλητότητας 26 % και median 1.02. Για την εξ. (28), ο λόγος της προβλεπόμενης προς την πειραματική τιμή έχει για μεν τα μονοτονικά πειράματα μέση τιμή 1.22, συντελεστή μεταβλητότητας 41% και median 1.01, για δε τα ανακυκλιζόμενα μέση τιμή 1.14, συντελεστή μεταβλητότητας 26% και median 1.0. Η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα είναι κάπως καλύτερη για την εξ. (28) παρά για την (27).

Η μέση τιμή της στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , στα πειράματα μονοτονικής φόρτισης είναι κατά 50% περίπου μεγαλύτερη παρά στα πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Αυτό οφείλεται στο ότι στα δεύτερα το πρόγραμμα της ανακυκλιζόμενης φόρτισης περιλαμβάνει έναν αριθμό κύκλων σε διάφορες στάθμες παραμόρφωσης, με σταδιακή αύξηση της στάθμης αυτής μέχρι να συμβεί η αστοχία. Έτσι η αστοχία, η οποία κατά κανόνα

χαρακτηρίζεται από εμφανή κατάρρευση του βρόχου υστέρησης σε ένα κύκλο, περιλαμβάνει την επιρροή της ανακύκλισης στην ίδια ή σε μικρότερη στάθμη φόρτισης, και είναι μικρότερη από την παραμόρφωση αστοχίας σε μονοτονική φόρτιση, τόσο ατομικά (δηλ. σε επίπεδο πειράματος) όσο και κατά μέσο όρο, για τα ίδια γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και του οπλισμού του.

### 3.3. Υπολογισμός αντοχής μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική καμπτική ή καμπτοδιατμητική ένταση με αξονική δύναμη.

3.3.1. Αντοχή διατομών οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη

3.3.1.1. Αντοχή ασύμμετρα οπλισμένων διατομών χωρίς αξονική δύναμη

Παρά το γεγονός ότι η παρούσα έρευνα αφορά κατά βάση τα υποστυλώματα, στα οποία η αξονική δύναμη είναι μη-μηδενική ( $v \neq 0$ ) και ο οπλισμός είναι συμμετρικός ( $\omega_1 = \omega_2$ ), για λόγους πληρότητας αναφερόμαστε εδώ και στην περίπτωση ασύμμετρα οπλισμένων διατομών ( $\omega_1 \neq \omega_2$ ) υπό μηδενική αξονική δύναμη ( $v = 0$ ), η οποία αφορά τις δοκούς. Επισημαίνεται όμως ότι αυτό συνάδει με το γεγονός ότι, πάλιν για λόγους πληρότητας, στα Κεφάλαια 1 και 2 καθώς και στο Παράρτημα καλύπτεται επίσης και η πειραματική συμπεριφορά καθώς και η προσομοίωση ασύμμετρα οπλισμένων στοιχείων χωρίς αξονική δύναμη.

Αναφέρθηκε ήδη στο Κεφ. 2 ότι κατά τους Park and Ang (1985) η οριακή καμπτική αντοχή στοιχείων με οποιοδήποτε οπλισμό  $\omega_1 > \omega_2$  και παρουσία μάλιστα αξονικής θλίψης  $v > 0$ , δίνεται από την εμπειρική σχέση εξ. (75) του Κεφ. 2. Η σχέση αυτή λαμβάνει υπόψη την επιρροή της κράτυνσης του χάλυβα.

Η ροπή διαρροής  $M_y$  μπορεί να υπολογισθεί από την εξ. (3) του παρόντος Κεφαλαίου, η οποία επίσης ισχύει και για παρουσία αξονικής δύναμης με  $v > 0$  για θλίψη και για οπλισμό όχι μόνο ασύμμετρο αλλά και που περιλαμβάνει και χάλυβα με μηχανικό ποσοστό  $\omega_v$ , ισοκατανεμημένο στο διάστημα μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού πελμάτων.

Επισημαίνεται πάντως ότι, παρόλον που εμφανίζονται σαν γενικές, τόσο η θεωρητική εξ. (2) για την  $M_y$  όσο και η εξ. (75) του Κεφ. 2 ισχύουν για  $v$  όχι πολύ μεγαλύτερο του μηδενός αλλά και για  $\omega_1 > \omega_2$  μόνον.



Για  $v=0$ , προτείνεται εδώ η εξής θεωρητική σχέση, που αγνοεί όμως την κράτυνση του χάλυβα:

$$M_u = \min(A_{s1}, A_{s2})f_y(d - d_1) + \max(0, A_{s1} - A_{s2})f_y(1 - 0.5(\omega_1 - \omega_2))d \quad (29)$$

ή υπό αδιάστατη μορφή:

$$\mu_u = \frac{M_u}{bd^2f_c} = \min(\omega_1, \omega_2)\left(1 - \frac{d_1}{d}\right) + \max(0, \omega_1 - \omega_2)\left(1 - 0.5(\omega_1 - \omega_2)\right) \quad (30)$$

### 3.3.1.2. Αντοχή συμμετρικά οπλισμένων διατομών με αξονική δύναμη

Αγνοώντας την κράτυνση του χάλυβα, και θεωρώντας διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  για το σκυρόδεμα που είναι παραβολικό μέχρι την κορυφή σε τάση  $f_c$  και παραμόρφωση  $\epsilon_o=0.002$  και κατόπιν οριζοντιώνεται μέχρι μέγιστη βράχυνση αστοχίας  $\epsilon_{cu}$  ( $\epsilon_{cu} \approx 0.004-0.005$  για τις ακραίες θλιβόμενες και απερίσφιγτες ίνες της διατομής), προκύπτουν τα εξής:

Περίπτωση I: Ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος οπλισμός είναι σε διαρροή:

Η περίπτωση αυτή ισχύει για τιμές της ανηγμένης αξονικής δύναμης  $v=N/bhf_c$  ( $>0$  για θλίψη) στο διάστημα τιμών:

$$\left(1 - \frac{\epsilon_o}{3\epsilon_{cu}} + \frac{2\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}}\right) \frac{1 - \frac{d_1}{h}}{1 + \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}}} - \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \geq v \geq \left(1 - \frac{\epsilon_o}{3\epsilon_{cu}} + \frac{2\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}}\right) \frac{\frac{d_1}{h}}{1 - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}}} - \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \quad (31)$$

Το αριστερά (δηλ. το πάνω) όριο τιμών της  $v$  αντιστοιχεί στην έξοδο του εφελκόμενου οπλισμού από τη διαρροή και το δεξιά (δηλ. το κάτω) όριο στην έξοδο του θλιβόμενου.

Η αδιάστατη ροπή αντοχής  $\mu_u = M/bh^2f_c$  ισούται με:

$$\begin{aligned} \mu_u = & \omega_1 \left(1 - \frac{2d_1}{h}\right) + \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \left[ \left(\xi - \frac{d_1}{h}\right) \left(1 - \xi - \frac{d_1}{h}\right) - \frac{1}{3} \left(\frac{\xi\epsilon_y}{\epsilon_{cu}}\right)^2 \right] \\ & + 0.5 \left(1 - \frac{\epsilon_o}{3\epsilon_{cu}}\right) \left(1 - \frac{\epsilon_{cu}(3\epsilon_{cu} - 2\epsilon_o) + 0.5\epsilon_o^2}{\epsilon_{cu}(3\epsilon_{cu} - \epsilon_o)} \xi\right) \end{aligned} \quad (32)$$

Στις εξ. (31), (32),  $\varepsilon_y$  συμβολίζει την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα,  $\varepsilon_y = f_y/E_s$ , ενώ στην εξ. (32) το ανηγμένο βάθος της θλιβόμενης ζώνης ισούται με:

$$\xi = \frac{v + \frac{\omega_v}{1 - \frac{d_1}{h}}}{1 - \frac{\varepsilon_o}{3\varepsilon_{cu}} + \frac{2\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}}} \quad (33)$$

Περίπτωση II: Θλιβόμενος οπλισμός σε διαρροή, εφελκόμενος ελαστικός

Η περίπτωση αυτή συμβαίνει όταν η ανηγμένη αξονική δύναμη θλίψης  $v$  υπερβαίνει το αριστερά (πάνω) όριο της ανισότητας εξ. (31). Τότε η τιμή του  $\xi$  είναι η θετική (και μικρότερη του 1.0) ρίζα της κατωτέρω δευτεροβάθμιας εξίσωσης:

$$\left[ 1 - \frac{\varepsilon_o}{3\varepsilon_{cu}} + \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \left( 1 - \frac{\varepsilon_y}{2\varepsilon_{cu}} - \frac{\varepsilon_{cu}}{2\varepsilon_y} \right) \right] \xi^2 + \left[ \omega_1 \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} + 1 \right) + \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \left( 1 - \frac{d_1}{h} \right) - \frac{d_1}{h} \right) - v \right] \xi - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \left( 1 - \frac{d_1}{h} \right) \left( \omega_1 + \frac{\omega_v \left( 1 - \frac{d_1}{h} \right)}{2 \left( 1 - \frac{2d_1}{h} \right)} \right) = 0 \quad (34)$$

Κατόπιν η αδιάστατη ροπή αντοχής υπολογίζεται ως:

$$\mu_u = \omega_1 \left( 0.5 + \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \frac{1 - \xi - \frac{d_1}{h}}{2\xi} \right) \left( 1 - \frac{2d_1}{h} \right) + \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \left( 1 - \xi - \frac{d_1}{h} \right) \left[ \frac{2\varepsilon_{cu}}{3\varepsilon_y} \frac{\left( 1 - \xi - \frac{d_1}{h} \right)^2}{\xi} + 2\xi - 1 - \frac{\frac{\varepsilon_y}{2\varepsilon_{cu}} \xi}{1 - \xi - \frac{d_1}{h}} \left( \frac{\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{cu}} \xi}{1 - \xi - \frac{d_1}{h}} - 1 \right) \right] \left( \frac{13}{6} - \frac{8}{3}\xi - \frac{5d_1}{3h} + \frac{2\varepsilon_y}{3\varepsilon_{cu}} \xi \right) + 0.5 \left( 1 - \frac{\varepsilon_o}{3\varepsilon_{cu}} \right) \left( 1 - \frac{\varepsilon_{cu}(3\varepsilon_{cu} - 2\varepsilon_o) + 0.5\varepsilon_o^2}{\varepsilon_{cu}(3\varepsilon_{cu} - \varepsilon_o)} \xi \right) \quad (35)$$

Τα ανωτέρω δεν ισχύουν αν η τιμή του  $\xi$  από την εξ. (34) είναι μεγαλύτερη του 1.0. Αυτό συμβαίνει για το κατωτέρω διάστημα τιμών του  $v$ :

$$1 + 2\omega_1 + \omega_v \geq v \geq 1 - \frac{\varepsilon_o}{3\varepsilon_{cu}} + \omega_1 \left( 1 + \frac{\varepsilon_{cu} d_1}{\varepsilon_y h} \right) + \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \left[ 1 - \frac{d_1}{h} - \frac{\varepsilon_{cu}}{2\varepsilon_y} \left( 1 + \left( \frac{d_1}{h} \right)^2 \right) \right] \quad (36)$$

Το διάστημα αυτό αντιστοιχεί στο εξής διάστημα τιμών της οριακής αντοχής  $\mu_u$ :

$$0 \leq \mu_u \leq \frac{\omega_1}{2} \left[ 1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \left( 1 - \frac{d_1}{h} \right) \right] + \frac{\varepsilon_o (\varepsilon_{cu} - 0.5\varepsilon_o)}{18\varepsilon_{cu}^2} + \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \left[ \frac{\varepsilon_y}{6\varepsilon_{cu}} \left( \frac{3}{2} - 5 \frac{d_1}{h} + \frac{2\varepsilon_y}{\varepsilon_{cu}} \right) \left( 1 + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{cu} \frac{d_1}{h}} \right)^2 - \frac{d_1}{h} \left( 1 + \frac{2\varepsilon_{cu}}{3\varepsilon_y} \left( \frac{d_1}{h} \right)^2 \right) \right] \quad (37)$$

Σ' αυτό το διάστημα τιμών το διάγραμμα  $\mu_u$ - $v$  είναι γραμμικό μεταξύ των ακραίων τιμών του διαστήματος.

### Περίπτωση III: Ολιβόμενος σπλισμός ελαστικός, εφελκόμενος σε διαρροή

Η περίπτωση αυτή συμβαίνει όταν η ανηγμένη αξονική δύναμη είναι μικρότερη από το δεξιά (κάτω) όριο της ανισότητας εξ. (31). Η τιμή του  $\xi$  είναι η θετική (και μικρότερη του 1.0) ρίζα της δευτεροβάθμιας εξίσωσης:

$$\left[ 1 - \frac{\varepsilon_o}{3\varepsilon_{cu}} + \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \left( 1 + \frac{\varepsilon_y}{2\varepsilon_{cu}} + \frac{\varepsilon_{cu}}{2\varepsilon_y} \right) \right] \xi^2 + \left[ \omega_1 \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \frac{\omega_v}{1 - \frac{2d_1}{h}} \left( \frac{\varepsilon_{cu} d_1}{\varepsilon_y h} \right) - v \right] \xi - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \left( 1 - \frac{d_1}{h} \right) \left( \omega_1 - \frac{\omega_v \frac{d_1}{h}}{1 - \frac{2d_1}{h}} \right) = 0 \quad (38)$$

Η αδιάστατη οριακή αντοχή ισούται με:

$$\mu_u = \omega_1 \left[ 0.5 + \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \frac{\xi - \frac{d_1}{h}}{2\xi} \left( 1 - \frac{2d_1}{h} \right) + \frac{\omega_v}{6} \left[ \frac{\varepsilon_{cu}}{2\varepsilon_y} \frac{\left( 1 - \frac{2d_1}{h} \right)^2}{\xi} + \left( 0.5 - \xi - \frac{2d_1}{h} \right) \left( 1 - \xi - \frac{d_1}{h} \right) \left( 1 - \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \frac{1 - \xi - \frac{d_1}{h}}{\xi} \right) \right] \right. \\ \left. + 0.5 \left( 1 - \frac{\varepsilon_o}{3\varepsilon_{cu}} \right) \left( 1 - \frac{\varepsilon_{cu}(3\varepsilon_{cu} - 2\varepsilon_o) + 0.5\varepsilon_o^2}{\varepsilon_{cu}(3\varepsilon_{cu} - \varepsilon_o)} \xi \right) \right] \quad (39)$$

Η εξ. (38) παύει να ισχύει όταν δεν δίνει πλέον θετική ρίζα μικρότερη του 1.0. Αυτό συμβαίνει για τιμές της  $v$  αρνητικές (δηλ. εφελκυστικές) και μάλιστα αρκετά μικρότερες του μηδενός. Αυτή η περιοχή τιμών του  $v$ , που καταλήγει στο σημείο ( $\mu_u=0$ ,  $v=-\omega_1-\omega_v$ ) δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον για τα υποστυλώματα. Για λόγους πληρότητας μπορεί στο διάστημα αυτό το διάγραμμα  $\mu_u-v$  να θεωρηθεί ευθύγραμμο.

### 3.3.2. Αντοχή διατομών οπλισμένου σκυροδέματος τυχόντος σχήματος υπό διαξονική κάμψη με αξονική δύναμη

Όταν η κάμψη είναι διαξονική, δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός της αντοχής αναλυτικά, δηλ. με κλειστές σχέσεις, ακόμα και στην απλούστατη περίπτωση της ορθογωνικής διατομής. Για το λόγο αυτό για τον υπολογισμό της οριακής αντοχής υπό διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη, αναπτύχθηκε ένα προσομοίωμα τύπου ινών.

Το προσομοίωμα είναι γενικό και καλύπτει διατομές οποιουδήποτε σχήματος, με οποιαδήποτε κατανομή οπλισμού σ' αυτόν. Επιπλέον, δεν αποτελεί απλώς ένα τρόπο για τον υπολογισμό της οριακής αντοχής, αλλά γενικότερο εργαλείο για τον καθορισμό της ιστορίας της διαξονικής έντασης με ορθή δύναμη, για οποιαδήποτε γνωστή ιστορία επιβεβλημένων διαξονικών καμπυλοτήτων και μέσης αξονικής παραμόρφωσης της διατομής, περιλαμβανομένης της περίπτωσης ανακύκλισης. Το εργαλείο αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της ιστορίας των διαξονικών καμπυλοτήτων και της μέσης ανηγμένης παραμόρφωσης, που προκύπτει από δεδομένη ιστορία έντασης. Επίσης λειτουργεί και στη μεικτή περίπτωση που είναι γνωστή η ιστορία κάποιων από τα εντατικά μεγέθη και των μεγεθών παραμόρφωσης που αντιστοιχούν στα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη, και αναζητείται η εξέλιξη των μεγεθών παραμόρφωσης που αντιστοιχούν στα γνωστά μεγέθη έντασης και των μεγεθών έντασης που αντιστοιχούν στα γνωστά μεγέθη παραμόρφωσης.

Το προσομοίωμα ινών που αναπτύχθηκε μπορεί να καθορίσει την οριακή αντοχή υπό διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη ως εξής: Τα τρία εντατικά μεγέθη,  $M_y$ ,  $M_z$  και  $N$ ,

αυξάνονται μονοτονικά και αναλογικά από το μηδέν μέχρι το συνδυασμό τιμών που αντιστοιχεί σε οριζοντίωση των διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων στις δύο διευθύνσεις  $y$  και  $z$  της διατομής. Το σημείο αυτό ορίζεται σαν οριακή αντοχή. Το ίδιο μπορεί να γίνει κρατώντας την αξονική δύναμη σταθερή και αυξάνοντας αναλογικά μόνο τις δύο συνιστώσες της ροπής.

Επειδή το προσομοίωμα ινών που αναπτύχθηκε είναι ουσιαστικά πλήρες προσομοίωμα της ανελαστικής παραμορφωσιακής συμπεριφοράς υπό οποιαδήποτε γενικευμένη ένταση, η πλήρης περιγραφή του γίνεται αλλού, και συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 4.

### 3.3.2. Προσομοίωμα οριακής αντοχής στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση

#### 3.3.2.1. Εισαγωγή - Συμβολισμοί

Στην συνέχεια αναπτύσσεται ένα προσομοίωμα για τον υπολογισμό της επιρροής της διάτμησης στην οριακή αντοχή μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική αντισυμμετρική κάμψη.

Εισάγονται οι παρακάτω συμβολισμοί:

#### 1) Διαστάσεις και μεγέθη μήκους:

Οι διαστάσεις και τα μεγέθη μήκους αδιαστατοποιούνται με αναγωγή στο ύψος  $h$  της διατομής:

- $b$ : Πλάτος διατομής.
- $h$ : Ύψος διατομής.
- $d_1$ : Απόσταση διαμήκους οπλισμού εφελκυσμένου και θλιβόμενου πέλματος από πλησιέστερη ακραία ίνα.
- $\delta_1 = d_1/h$
- $l$ : Μήκος στοιχείου σε αντισυμμετρική κάμψη.
- $\lambda = l/h$  λυγηρότητα  $l/h$
- $z$ : Μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων ( $= h - 2d_1$ ).
- $\zeta = z/h (= 1 - 2\delta_1)$
- $x$ : Ύψος θλιβόμενης ζώνης.
- $\xi = x/h$ .

#### 2) Αντοχές υλικών:

- $f_c$ : Μονοαξονική αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη.
- $\alpha f_c$ : Μονοαξονική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος ρηγματωμένου σε λοξή ως προς τη θλίψη διεύθυνση και παρουσία οπλισμού υπο τάση, λοξού ως προς τις ρωγμές και τη θλίψη ( $\alpha < 1.0$ , περίπου ίσο με 0.85).
- $f_y$ : Τάση διαρροής χάλυβα.

## 3) Εντατικά μεγέθη:

- $M$ : Ροπή κάμψης ακραίων διατομών.  
 $\mu = M/bh^2f_c$   
 $N$ : Αξονική δύναμη  
 $\nu = N/bhf_c$   
 $V$ : Τέμνουσα δύναμη ( $= Ml/2$ ).  
 $\nu = V/bhf_c (= \mu l/2)$ .

## 4) Διατομές και μηχανικά ποσοστά σπλισμού:

- $A_{s1}$ : Συνολική διατομή διαμήκους σπλισμού διατεταγμένου παράλληλα στις πλευρές μήκους  $b$  της διατομής και σε απόσταση  $d_1$  απ' αυτές.  
 $\omega_1 = A_{s1}f_y/bhf_c$ .  
 $A_{s2}$ : Συνολική διατομή διαμήκους σπλισμού ομοιόμορφα κατανεμημένου παράλληλα στις πλευρές μήκους  $h$  της διατομής.  
 $\omega_2 = A_{s2}f_y/bhf_c$ .  
 $A_{sw}/s$ : Ανά μέτρο μήκους διατομή σκελών συνδετήρων μεταξύ του θλιβόμενου και του εφελκυσμένου πέλματος της διατομής.  
 $\omega_w = A_{sw}f_y/sbf_c$ .

## 3.3.2.2. Μηχανισμοί ανάληψης της τέμνουσας:

Η τέμνουσα θεωρείται ότι αναλαμβάνεται από συνδυασμό α) ενός μηχανισμού λοξού θλιπτήρα σκυροδέματος που συνδέει τις θλιβόμενες ζώνες των δύο ακραίων διατομών, και β) ενός μηχανισμού δικτυώματος με πέλματα τους ακραίους σπλισμούς της διατομής (διατομής  $A_{s1}/2$  στο καθένα), ορθοστάτες τους συνδετήρες και λοξές θλιβόμενες διαγώνιες σκυροδέματος που ακολουθούν τη γενική διάταξη της ρηγμάτωσης του στοιχείου: ριπδοειδής διάταξη στα δύο άκρα που συγκλίνει στη θέση του θλιβόμενου χάλυβα των δύο ακραίων διατομών, και παράλληλη διάταξη ενδιάμεσα υπο γωνία  $\phi$  ως προς τον άξονα του μέλους.

Μεγέθη που αναφέρονται στο μηχανισμό θλιπτήρα έχουν το δείκτη  $s$  (: strut), ενώ αυτά που αναφέρονται στο μηχανισμό θλιπτήρα έχουν το δείκτη  $t$  (: truss).

## 3.3.2.3. Μηχανισμός Θλιπτήρα:

Ο θλιπτήρας σκυροδέματος ορίζεται από τη θλιβόμενη ζώνη πλάτους  $b$  και ύψους  $x$  των δύο ακραίων διατομών. Έτσι η κλίση του ως προς τον άξονα του μέλους ισούται με:

$$\tan \theta = \frac{1 - \xi}{\lambda} \quad (40)$$

Ο θλιπτήρας καταλαμβάνει όλο το πλάτος της διατομής και θεωρείται (επί το δυσμενέστερον) ότι έχει σταθερή διάσταση  $x \cos \theta$  κάθετα στη διεύθυνσή του. Έτσι και οι ορθές θλιπτικές του τάσεις είναι επίσης σταθερές κατά μήκος του. Οι τάσεις αυτές θεωρούνται ομοιόμορφες κατά το πλάτος  $x \cos \theta$  του θλιπτήρα και συμβολίζονται με  $\sigma_1$ .

Η συνολική δύναμη θλίψης του θλιπτήρα ισούται με:

$$N_s = \sigma_1 b x \cos \theta \quad (41)$$

και αναλύεται στις θέσεις των ακραίων διατομών σε μία ορθή δύναμη κάθετη στη διατομή ίση με  $N_s \cos \theta$  και σε μία τέμνουσα παράλληλη σ' αυτήν και ίση με  $V_s = N_s \sin \theta$ . Η  $V_s$  είναι η συνεισφορά του μηχανισμού θλιπτήρα στην τέμνουσα  $V$  του στοιχείου, ενώ η  $N_s \cos \theta$  αποτελεί τμήμα της συνολικής θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη των ακραίων διατομών.

Ο μηχανισμός θλιπτήρα δεν παράγει ένταση στις διαμήκεις ράβδους.

#### 3.3.2.4. Μηχανισμός δικτύματος:

Η ελάχιστη τιμή της  $\omega$  ως προς τον άξονα του στοιχείου γωνίας του ριπιδοειδούς τμήματος του δικτύματος, που συμπίπτει με τη σταθερή τιμή της γωνίας του παράλληλου ενδιάμεσου τμήματός του, περιορίζεται από την εξής γεωμετρική συνθήκη:

$$\frac{\pi}{2} \geq \varphi \geq \max(\theta, \varphi_{\min,1} = \arctan\left(\frac{\zeta}{\lambda}\right)) \quad (42)$$

Η μέγιστη τιμή τέμνουσας που μπορεί να αναλάβει ο μηχανισμός δικτύματος στο μεσαίο και κρισιμότερο τμήμα του καθορίζεται από τη διαρροή των συνδετήρων:

$$V_t = z \frac{A_s}{s} f_y \cot \varphi \quad (43)$$

$$v_t = \zeta \omega_w \cot \varphi \quad (44)$$

Η λοξή τάση θλίψης του σκυροδέματος στο μηχανισμό δικτυώματος ισούται με:

$$\sigma_2 = \frac{V_t}{bz \sin \phi \cos \phi} \quad (45)$$

δηλ., λαμβάνοντας υπόψη την Εξ.(44), για τη μέγιστη τιμή της τέμνουσας του μηχανισμού δικτυώματος κατά τη διαρροή των συνδετήρων:

$$\sigma_2 = \frac{\omega_w}{\sin^2 \phi} f_c \quad (46)$$

Γιά να μην αστοχήσει το σκυρόδεμα σε λοξή θλίψη από μόνη τη δράση του μηχανισμού δικτυώματος, πρέπει η  $\sigma_2$  να είναι μικρότερη από ένα ποσοστό  $\alpha$  της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής  $f_c$ . Η μείωση αυτή της μονοαξονικής αντοχής οφείλεται στην παρουσία ρωγμών ενδεχόμενα μη παράλληλων προς τη διεύθυνση της τάσης θλίψης καθώς και οπλισμών που διαπερνούν λοξά τις ρωγμές (στην περίπτωση αυτή των συνδετήρων) και μεταφέρουν στο μεταξύ των ρωγμών σκυρόδεμα ένα τμήμα της εφελκυστικής τους δύναμης μέσω συνάφειας. Η τιμή του συντελεστή  $\alpha$  είναι κανονικά συνάρτηση της μέσης ανηγμένης μήκυνσης κάθετα στη διεύθυνση της  $\sigma_2$ , αλλά μπορεί να ληφθεί πρακτικά σταθερή και ίση με 0.85.

Η συνθήκη  $\sigma_2 < \alpha f_c$  για την αποφυγή αστοχίας του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη από μόνη τη δράση του μηχανισμού δικτυώματος, μεταφράζεται, με τη βοήθεια της Εξ.(46), σε:

$$\phi \geq \phi_{\min,2} = \arcsin \sqrt{\frac{\omega_w}{\alpha}} \quad (47)$$

Στην περιοχή του ριπδοειδούς δικτυώματος κάθε άκρου, ένα στοιχειώδες τμήμα  $dx$  κατά μήκος του ελκυστήρα του πέλματος (εφελκυσμένου οπλισμού) αντιστοιχεί σε δύναμη συνδετήρων  $dx f_y A_{sw}/s$  (για διαρροή των τελευταίων). Η δύναμη αυτή εξισορροπείται με λοξή δύναμη θλίψης  $f_y A_{sw}/s dx/\sin \phi'$  στον υπό γωνία  $\phi' > \phi$  ως προς τον άξονα αντίστοιχο στοιχειώδη λοξό θλιπτήρα, και με δύναμη συνάφειας  $f_y A_{sw}/s dx \cot \phi'$  κατά μήκος του ελκυστήρα (εφελκυσμένου οπλισμού). Ο στοιχειώδης λοξός θλιπτήρας καταλήγει στη θλιβόμενη ζώνη της ακραίας διατομής, όπου η λοξή στοιχειώδης δύναμη θλίψης του αναλύεται σε μία συνιστώσα  $dx f_y A_{sw}/s$  κατά την εγκάρσια στον άξονα διεύθυνση και σε μία συνιστώσα ίση με  $f_y A_{sw}/s dx \cot \phi' = f_y A_{sw}/s \times dx/z$  κατά τη διαμήκη. Η ολοκλήρωση των



εγκαρσίων συνιστωσών για όλη την έκταση του ριπδοειδούς τμήματος (δηλ. για  $x$  από 0 έως  $z \cot\phi$ ), δίνει  $f_y A_{sw}/s z \cot\phi$ , δηλ. την  $V_t$ , ενώ των διαμήκων δίνει  $f_y A_{sw}/s z^2 \cot^2\phi/2z$ , δηλ.  $0.5 V_t \cot\phi$ . Ετσι, από το μηχανισμό δικτυώματος αναπτύσσεται στη θλιβόμενη ζώνη των ακραίων διατομών, μία τέμνουσα δύναμη  $V_t$  και μία ορθή θλιπτική  $0.5 V_t \cot\phi$ .

Στις διαμήκειες ράβδους ο μηχανισμός δικτυώματος δίνει δυνάμεις που διαφέρουν μεταξύ των δύο άκρων του μέλους κατά τη συνισταμένη των δυνάμεων συνάφειας. Οι δυνάμεις αυτές εξισορροπούν, μαζί με τη λοξή δύναμη των θλιπτήρων, την ανά μονάδα μήκους δύναμη των συνδετήρων στη διαρροή τους. Η συνισταμένη αυτή ισούται με:

$$\begin{aligned} & 0.5 V_t \cot\phi \quad (\text{για το ακραίο ριπδοειδές τμήμα του δικτυώματος κατά τα ανωτέρω}) \\ & + (1 - z \cot\phi) f_y A_{sw}/s \cot\phi \quad (\text{για το υπόλοιπο του μήκους}) \\ & = V_t/l/z - 0.5 V_t \cot\phi. \end{aligned}$$

Αν προστεθεί και η δύναμη θλίψης του σκυροδέματος,  $0.5 V_t \cot\phi$ , στο άκρο της διαμήκου ράβδου με τη μικρότερη εφελκυστική (ή τη μεγαλύτερη θλιπτική) δύναμη, προκύπτει συνολική διαφορά δυνάμεων μεταξύ των δύο άκρων του κάθε πέλματος ίση με  $V_t/l/z$ . Οι δυνάμεις αυτές δίνουν συνολική ροπή κάμψης των δύο άκρων:

$$M_E = 2z V_t/l/z = 2 V_t l$$

δηλ. τη συνολική ροπή του μηχανισμού δικτυώματος σε αντισυμμετρική κάμψη.

### 3.3.2.5. Συνδυασμός δικτυώματος και θλιπτήρα – Κριτήριο αστοχίας

Στις ακραίες διατομές η θλιβόμενη ζώνη σκυροδέματος αναλαμβάνει συνολική δύναμη θλίψης:

$$N_c = N_s \cos\theta + 0.5 V_t \cot\phi = bh(\sigma_1 \xi \cos^2\theta + 0.5 \zeta \omega_w \cot^2\phi f_c) \quad (48)$$

και τη συνολική τέμνουσα:

$$V = V_s + V_t = bh(\sigma_1 \xi \sin\theta \cos\theta + \zeta \omega_w \cot\phi f_c) \quad (49)$$

Μεταξύ των δύο ακραίων διατομών οι τάσεις θλίψης του σκυροδέματος είναι μέγιστες εκεί που επικαλύπτονται το λοξό θλιπτικό πεδίο του θλιπτήρα και αυτό του ενδιάμεσου

τμήματος του μηχανισμού δικτυώματος. Το πρώτο πεδίο έχει σταθερή τάση  $\sigma_1$  υπό γωνία  $\theta$  ως προς τον άξονα του μέλους και το δεύτερο έχει τάση  $\sigma_2$  υπό γωνία  $\phi$ . Η επαλληλία αυτών των δύο μονοαξονικών πεδίων θλίψης δίνει κύριες τάσεις εφελκυσμού και θλίψης ίσες με:

$$\sigma_{1,II} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\sigma_1\sigma_2 \cos 2(\phi - \theta)} \quad (50)$$

Όταν η  $\sigma_{II}$  φθάσει ένα ποσοστό  $\alpha < 1.0$  της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, έχουμε ψαθυρή αστοχία του στοιχείου σε λοξή θλίψη, υπό γωνία:

$$\psi = 0.5 \arctan\left(\frac{\sigma_1 \sin 2\theta + \sigma_2 \sin 2\phi}{\sigma_1 \cos 2\theta + \sigma_2 \cos 2\phi}\right) \quad (51)$$

ως προς τον άξονα του μέλους, ενδιάμεση μεταξύ αυτής της λοξής ρηγμάτωσης ( $\phi$ ) και του θλιπτήρα ( $\theta$ ).

Έτσι, το κριτήριο ψαθυρής αστοχίας είναι το:  $\sigma_{II} = \alpha f_c$ , με ταυτόχρονη διαρροή των συνδετήρων. Η συνθήκη αυτή δίνει:

$$\sigma_1 = \frac{\alpha(\alpha - \frac{\sigma_2}{f_c})}{\alpha - 0.5 \frac{\sigma_2}{f_c} (1 - \cos 2(\phi - \theta))} f_c \quad (52)$$

όπου κατά τη διαρροή των συνδετήρων:  $\sigma_2/f_c = \omega_w/\sin^2\phi$ .

Η αντίστοιχη οριακή τιμή της τέμνουσας δίνεται από την Εξ.(49) για τις τιμές των  $\xi$ ,  $\phi$  και  $\sigma_1$  που ικανοποιούν το κριτήριο αστοχίας καθώς και τις συνθήκες ισοδυναμίας τάσεων-εσωτερικών εντατικών μεγεθών στις ακραίες διατομές. Τα αδιάστατα εσωτερικά εντατικά μεγέθη στις διατομές αυτές είναι η αξονική δύναμη  $v$  (θετική για εφελκυσμό) και η ροπή  $\mu = 0.5 \lambda v$ , δηλ.:

$$\mu = 0.5[\sigma_1 \xi(1 - \xi) \cos^2\theta + \lambda \zeta \omega_w \cot \phi] \quad (53)$$

Στη διατύπωση των εξισώσεων ισοδυναμίας τάσεων-εσωτερικών εντατικών μεγεθών, υπεισέρχεται η ανηγμένη βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος της διατομής,

$\epsilon_{cu}$ .

Θεωρώντας ότι η κατανομή των ορθών τάσεων σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη είναι παραβολική-ορθογωνική, και ότι η αντίστοιχη κατανομή των κάθετων στη διατομή παραμορφώσεων του σκυροδέματος,  $\varepsilon$ , είναι επίπεδη (υπόθεση επιπεδότητας διατομών - Bernoulli), η  $\varepsilon_{cu}$  συνδέεται με τη μέση τάση σκυροδέματος στην ανωτέρω ζώνη,  $\sigma_o$ ,

$$\sigma_o \equiv \frac{N_c}{\xi b h} = \sigma_1 \cos^2 \theta + 0.5 f_c \frac{\zeta \omega_w}{\xi} \cot^2 \phi \quad (54)$$

ως εξής:

$$\sigma_o = 1 - \frac{\varepsilon_o}{3 \varepsilon_{cu}}, \quad \text{για } \varepsilon_{cu} \geq \varepsilon_o = 0.002 \quad (55)$$

$$\sigma_o = \frac{\varepsilon_{cu}}{0.012} (6 - 1000 \varepsilon_{cu}), \quad \text{για } \varepsilon_{cu} \leq \varepsilon_o = 0.002 \quad (56)$$

Επιπλέον, για την αποφυγή αστοχίας της θλιβόμενης ζώνης των ακραίων διατομών σε λοξή θλίψη υπό την ταυτόχρονη παρουσία της διατμητικής και της ορθής έντασης, πρέπει η μέση κύρια θλιπτική τάση στη θλιβόμενη ζώνη,  $\sigma_{II}$ , να είναι μικρότερη από τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος:

$$\sigma_{II} = \frac{\sigma_o}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{2}\right)^2 + \tau^2} \leq f_c \quad (57)$$

όπου η μέση ορθή τάση,  $\sigma_o$ , δίνεται από την εξ. (54) και η μέση διατμητική,  $\tau$ , ισούται με:

$$\tau \equiv \frac{V}{\xi b h} \equiv v f_c \quad (58)$$

Επισημαίνεται ότι για στοιχεία με μικρό λόγο διάτμησης, δηλ. με μικρή τιμή του  $\lambda$ , το κριτήριο αστοχίας της θλιβόμενης ζώνης των ακραίων διατομών σε λοξή θλίψη, δηλ. η Εξ.(58), θεωρούμενη ως ισότητα, δεν εξαντλείται προτού το στοιχείο φθάσει σε αστοχία σκυροδέματος σε διαγώνια θλίψη στο ενδιάμεσο του μήκους του υπό την ταυτόχρονη δράση των θλιπτικών πεδίων του θλιπτήρα και του μηχανισμού δικτυώματος, Εξ.(52). Και αυτό παρά το γεγονός ότι στο ενδιάμεσο του μήκους τα ανωτέρω δύο θλιπτικά πεδία διαχέονται σε μεγαλύτερο πλάτος του στοιχείου απ' ότι το βάθος της θλιβόμενης ζώνης, από το οποίο

διέρχεται η στατικά ισοδύναμη με τα ανωτέρω πεδία ένταση σκυροδέματος της ακραίας διατομής. Ο λόγος είναι δύο: Πρώτον, η μικρότερη της μονάδος τιμή του συντελεστή  $\alpha$  στην Εξ.(52). Δεύτερο και κυριότερο, το γεγονός ότι στο ενδιαμέσο του μήκους του στοιχείου τα δύο θλιπτικά πεδία τάσεων συναντώνται υπό μικρότερη γωνία,  $\varphi-\theta$ , από αυτήν υπό την οποία συγκλίνουν στη θλιβόμενη ζώνη της ακραίας διατομής τα θλιπτικά πεδία των μηχανισμών θλιπτήρα και δικτυώματος, δηλ. την  $2\varphi-\theta$ , και άρα δίνουν μεγαλύτερη συνισταμένη κύρια θλιπτική τάση.

### 3.3.2.6. Εξισώσεις ισοδυναμίας ορθών τάσεων - μεγεθών ορθής έντασης διατομής

Πέραν της υπόθεσης της παραβολικής-ορθογωνικής κατανομής των ορθών τάσεων σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, υιοθετείται και η υπόθεση της επιπεδότητας των διατομών (Bernoulli), όχι μόνον στη θλιβόμενη ζώνη αλλά στο σύνολο της διατομής. Σε στοιχεία με πολύ μικρό λόγο διάτμησης (π.χ. μικρότερο του 1, αντίστοιχη τιμή της λυγηρότητας  $\lambda$  το 2), αυτή η τελευταία υπόθεση δεν φαίνεται να ισχύει, κυρίως όσον αφορά τις παραμορφώσεις των διαμήκων ράβδων, οι οποίες δεν διαθέτουν το μήκος που απαιτείται για σημαντική μεταβολή των τάσεών τους από το ένα άκρο τους στο άλλο μέσω συνάφειας. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα που προκύπτουν με την παρούσα μεθοδολογία για στοιχεία με μικρή λυγηρότητα  $\lambda$  δεν πρέπει να θεωρούνται ακριβή.

Παρ' όλο που για τη συσχέτιση της ακραίας παραμόρφωσης σκυροδέματος,  $\epsilon_c$ , με τη μέση τάση σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη,  $\sigma_o$ , Εξ.(55) και (56), η κατανομή των ορθών τάσεων σκυροδέματος στην ανωτέρω ζώνη ελήφθη παραβολική-ορθογωνική, χάριν απλότητας η συνισταμένη των τάσεων αυτών λαμβάνεται ότι ασκείται στο γεωμετρικό κέντρο της θλιβόμενης ζώνης.

Με βάση τις ανωτέρω υποθέσεις, προκύπτουν οι σχέσεις ισοδυναμίας ορθών τάσεων - ανηγμένων μεγεθών ορθής έντασης,  $\mu$  και  $\nu$ , της διατομής που αναγράφονται παρακάτω. Οι σχέσεις αυτές γράφονται με τη γενική μορφή:

$$\nu = \nu_c + \nu_1 + \nu_2 \quad (59)$$

$$\mu = \mu_c + \mu_1 + \mu_2 \quad (60)$$

όπου ο δείκτης  $c$  δηλώνει τη συμβολή του σκυροδέματος στα ανωτέρω εντατικά μεγέθη και οι δείκτες 1 και 2 αντίστοιχα, τη συμβολή σ' αυτά του διαμήκους σπλισμού του διατεταγμένου

παράλληλα στις πλευρές μήκους  $b$  (μηχανικό ποσοτό  $\omega_1 = A_{s1}f_y/bhf_c$ ) και του ομοιόμορφα κατανεμημένου παράλληλα στις πλευρές μήκους  $h$  της διατομής (μηχανικό ποσοτό  $\omega_v = A_{sv}f_y/bhf_c$ ).

Είναι:

$$v_c = -\xi \frac{\sigma_o}{f_c} \quad (61)$$

και:

$$\mu_c = 0.5\xi(1-\xi) \frac{\sigma_o}{f_c} \quad (62)$$

Γιά τον καθορισμό των  $v_1$ ,  $v_v$ ,  $\mu_1$  και  $\mu_v$ , διακρίνομε τις κάτωθι περιπτώσεις, κατά σειρά αυξανόμενου  $\xi$ :

a) Ακραίος εφελκούμενος χάλυβας σε διαρροή, ακραίος θλιβόμενος ελαστικός:

Γιά:

$$\min(0.5, \xi_1, \xi_2) \geq \xi > 0 \quad (63)$$

και γιά:

$$\min(0.5, \xi_2) \geq \xi > 0, \dots \text{αν} \dots \xi_1 < 0 \quad (64)$$

όπου:

$$\xi_1 \equiv \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_y} \delta_1 \quad (65)$$

$$\xi_2 \equiv \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} (1 - \delta_1) \quad (66)$$

και  $\epsilon_y = f_y/E$  συμβολίζει την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα, είναι:

$$v_1 = 0.5\omega_1 \left(1 - \frac{\epsilon_{cu} \xi - \delta_1}{\epsilon_y \xi}\right) \quad (67)$$

$$v_v = \frac{\omega_v}{1-2\delta_1} (1-\delta_1-\xi-0.5\xi \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}} - 0.5 \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_y} \frac{(\xi-\delta_1)^2}{\xi}) \quad (68)$$

$$\mu_1 = 0.5\omega_1(0.5-\delta_1)(1 + \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_y} \frac{\xi-\delta_1}{\xi}) \quad (69)$$

$$\mu_v = \frac{\omega_v}{1-2\delta_1} [\frac{2}{3} \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_y} \frac{(\xi-\delta_1)^3}{\xi} + (1-2\xi)(\xi-\delta_1) + \frac{1}{6} (\xi(1-\frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}}) - \delta_1)(1 - \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_y} \frac{\xi-\delta_1}{\xi})(\xi \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}} + 5\xi - 2\delta_1 - 1.5)] \quad (70)$$

b) Ακραίος εφελκόμενος και ακραίος θλιβόμενος χάλυβας ελαστικοί:

Γιά:

$$\xi_1 \geq \xi \geq \xi_2, \dots \text{αν} \dots \xi_1 \geq \xi_2 \quad (71)$$

και για:

$$1 \geq \xi \geq \xi_2, \dots \text{αν} \dots \xi_1 < 0 \quad (72)$$

όπου τα  $\xi_1$  και  $\xi_2$  ορίζονται στις Εξ.(65) και (66), είναι:

$$v_1 = 0.5\omega_1 \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_y} \frac{1-2\xi}{\xi} \quad (73)$$

$$v_v = \frac{\omega_v}{1-2\delta_1} \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_y} \left( \frac{0.5-\xi}{\xi} \right) \quad (74)$$

$$\mu_1 = 0.5\omega_1 \frac{(0.5-\delta_1)^2}{2\xi} \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_y} \quad (75)$$

$$\mu_v = 2\omega_v \frac{(0.5-\delta_1)^3}{3\xi} \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_y} \quad (76)$$

c) Ακραίος εφελκόμενος και ακραίος θλιβόμενος χάλυβας σε διαρροή:

Γιά:

$$\xi_2 \geq \xi \geq \xi_1 \geq 0. \quad (77)$$

όπου τα  $\xi_1$  και  $\xi_2$  ως άνω, είναι:

$$v_1 = 0. \quad (78)$$

$$v_v = \frac{\omega_v}{1-2\delta_1}(1-2\xi) \quad (79)$$

$$\mu_1 = \omega_1(0.5-\delta_1)^2 \quad (80)$$

$$\mu_v = \frac{\omega_v}{1-2\delta_1} \left[ (\xi - \delta_1)(1 - \xi - \delta_1) - \frac{\xi^2}{3} \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{cu}} \right] \quad (81)$$

Για:

$$1 \geq \xi \geq \max(0.5, \xi_1, \xi_2) \quad (82)$$

είναι:

$$v_1 = 0.5 \omega_1 \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \frac{1 - \xi - \delta_1}{\xi} - 1 \right) \quad (83)$$

$$v_v = \frac{\omega_v}{1-2\delta_1} \left[ 0.5 \xi \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{cu}} - (\xi - \delta_1) - 0.5 \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{cu}} \frac{(1 - \xi - \delta_1)^2}{\xi} \right] \quad (84)$$

$$\mu_1 = 0.5 \omega_1 (0.5 - \delta_1) \left( 1 + \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \frac{1 - \xi - \delta_1}{\xi} \right) \quad (85)$$

$$\mu_v = \frac{\omega_v}{1-2\delta_1} \left[ \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} \frac{(1 - \xi - \delta_1)^3}{\xi} + (2\xi - 1)(1 - \xi - \delta_1) + \frac{\xi \varepsilon_y}{6 \varepsilon_{cu}} \left( \frac{1 - (1 + \xi) \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{cu}} - \delta_1}{1 - \xi - \delta_1} \right)^2 \left( 4\xi - \frac{2\xi \varepsilon_y}{\varepsilon_{cu}} + \delta_1 - 2.5 \right) \right] \quad (86)$$

### 3.3.2.7. Τρόπος επίλυσης και παραδείγματα αποτελεσμάτων.

Από το συνδυασμό των Εξ.(52)-(86) καθορίζεται με μία επαναληπτική διαδικασία ο συνδυασμός τιμών  $\xi$ ,  $\varphi$  και  $\varepsilon_{cu}$  που για δεδομένες τιμές των  $v$  και  $\lambda$  οδηγεί στη μέγιστη τιμή του  $\mu$ , επομένως και της ανηγμένης τέμνουσας αστοχίας  $v$ . Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ταυτόχρονη διαρροή των συνδετήρων και αστοχία του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη στο

ενδιάμεσο του μέλους. Αν, όμως, η τιμή του  $\varepsilon_{cu}$  προκύπτει μεγαλύτερη από τη βράχυνση αστοχίας της ακραίας ίνας σκυροδέματος (0.35% έως 0.5%), τότε της ανωτέρω ψαθυρής διατμητικής αστοχίας προηγείται η λιγότερο ψαθυρή καμπτοδιατμητική των ακραίων διατομών, με θραύση του σκυροδέματος εκεί υπό την ταυτόχρονη επιρροή της διατμητικής τάσης  $\tau = v_f/\xi$  στη θλιβόμενη ζώνη.

Αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση την ανωτέρω υπολογιστική διαδικασία φαίνονται στα Σχήματα 3.12-3.35, με τη μορφή διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης  $\mu$ - $\nu$  για διάφορες τιμές της λυγηρότητας  $\lambda$  από 2.0 έως 5.0 (αντίστοιχες τιμές του λόγου διάτμησης για αντισυμμετρική κάμψη από 1.0 έως 2.5). Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται στη συνθήκη περίπτωση του συγκεντρωμένου στα δύο πέλατα οπλισμού, δηλ.  $\omega_2 = 0$ , και καλύπτουν όλο το φάσμα των πρακτικά χρήσιμων περιπτώσεων τιμών μηχανικού ποσοστού οπλισμού στη διαμήκη και στην εγκάρσια έννοια ( $\omega_1$  από 0.25 έως 1.0,  $\omega_w$  από 0.05 έως 0.2). Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε χάλυβα S400 και σε ανηγμένη απόσταση οπλισμών από το άκρο  $\delta_1 = d_1/h = 0.10$ .

Στην ακραία περίπτωση λυγηρότητας  $\lambda = 1.0$ , για την οποία το προτεινόμενο προσομοίωμα πιθανότατα δεν ισχύει, δεν δίνονται αποτελέσματα (με εξαίρεση τις περιπτώσεις με μεγάλο ποσοστό συνδετήρων και μικρό ποσοστό διαμήκων ράβδων) λόγω ανεπάρκειας της ανωτέρω υπολογιστικής διαδικασίας.

Στα σχήματα των αποτελεσμάτων δίνονται με διακεκομμένη γραμμή οι αντίστοιχες καμπύλες για καμπτική αστοχία των ακραίων διατομών υπό την ταυτόχρονη επιρροή της διατμητικής τάσης  $\tau = v_f/\xi$  στη θλιβόμενη ζώνη. Οι καμπύλες αυτές ελήφθησαν θέτοντας  $\varepsilon_c = 0.4\%$  στις εξισώσεις ισοδυναμίας εσωτερικών τάσεων - εντατικών μεγεθών διατομής, και επιβάλλοντας την ισχύ της Εξ.(57), που εκφράζει τη θλιπτική αστοχία του συνόλου της θλιβόμενης ζώνης υπό την ταυτόχρονη επιρροή της ορθής και της διατμητικής έντασης, αλλά με οριακή τιμή της κύριας θλιπτικής τάσης  $\sigma_{II}$  το  $\alpha f_c$  με  $\alpha = 0.85$ . Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των δύο ομάδων καμπυλών, οι καμπύλες της καθαρά καμπτικής αστοχίας ακραίων διατομών με συνυπολογισμό της επιρροής της διατμητικής έντασης μόνο στη θλιβόμενη ζώνη των διατομών αυτών, δίνουν από λίγο έως σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή από τις αντίστοιχες της πλήρους καμπτοδιατμητικής αστοχίας του συνόλου του μέλους, ιδίως μάλιστα για τις μικρές τιμές λυγηρότητας και για τα μεγάλα ποσοστά διαμήκους οπλισμού σε σχέση με τον εγκάρσιο.

Οι ανωτέρω καμπύλες της καθαρά καμπτικής αστοχίας ακραίων διατομών με συνυπολογισμό της επιρροής της διατμητικής έντασης μόνο στη θλιβόμενη ζώνη, δίνονται και χωριστά σε ιδιαίτερη σειρά σχημάτων, μαζί με την αντίστοιχη ομάδα καμπυλών για καθαρά



διατμητική αστοχία του ενδιαμέσου του μέλους. Αυτές οι τελευταίες καμπύλες, που φαίνονται στην περίπτωση αυτή διακεκομμένες, έχουν προκύψει από την Εξ.(53) με χρήση των τιμών της μέσης τάσης σκυροδέματος  $\sigma_0$  και του  $\xi$  στη θλιβόμενη ζώνη των ακραίων διατομών (και της αντίστοιχης τιμής της γωνίας  $\theta$ ) που αντιστοιχούν στην τιμή της ροπής της συνεχούς καμπύλης για την ίδια τιμή του  $\nu$ , δηλ. στην καθαρά καμπτική αστοχία ακραίων διατομών με συνυπολογισμό της επιρροής της διατμητικής έντασης μόνο στη θλιβόμενη ζώνη. Κατά την προσέγγιση αυτή η αντοχή για δεδομένη τιμή των  $\nu$  και  $\lambda$  δίνεται από την πιο εσωτερική από τις δύο καμπύλες, δηλ. αυτής της καθαρά διατμητικής αστοχίας και της άλλης της κυρίως καμπτικής. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών ομάδων καμπυλών αφενός και των τελικών της πλήρους καμπτοδιατμητικής αστοχίας του συνόλου του μέλους (των συνεχών καμπυλών της πρώτης ομάδος σχημάτων), αποτελεί το μέτρο της επιρροής της σύζευξης των καμπτοδιατμητικών φαινομένων στο σύνολο του μήκους του μέλους.

#### 3.4. Ποσοτικοποίηση της υστερητικής απορρόφησης ενέργειας σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση

Για να είναι ρεαλιστική η αναπαράσταση της απορρόφησης ενέργειας από τα μέλη ενός συστήματος κατά τον αναλυτικό υπολογισμό της μη-γραμμικής ανελαστικής του απόκρισης, ο λόγος απόσβεσης που χαρακτηρίζει το προσομοίωμα του μέλους πρέπει να ανταποκρίνεται στην τιμή που μετράται πειραματικά για το ίδιο επίπεδο φόρτισης. Στο Κεφάλαιο 2 καθορίστηκε η σχέση μεταξύ του ισοδύναμου λόγου υστερητικής απόσβεσης  $\zeta$  και του δείκτη πλαστιμότητας (γωνιών στροφής, μετακινήσεων κλπ)  $\mu$  συναρτήσεως των παραμέτρων των συχνότερα χρησιμοποιούμενων μονοαξονικών υστερητικών προσομοιωμάτων μελών. Εδώ, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα πειραμάτων ανακυκλιζόμενης φόρτισης μελών οπλισμένου σκυροδέματος για να ποσοτικοποιήσουν τον πραγματικό λόγο απόσβεσης σαν συνάρτηση του δείκτη πλαστιμότητας  $\mu$  και των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του μέλους.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια βάση δεδομένων από 187 από τα μονοαξονικά πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης των Πινάκων του Παραρτήματος για τον υπολογισμό ζευγών  $\zeta$ - $\mu$ . Προς τούτο, οι πλήρεις πειραματικοί βρόχοι υστέρησης ψηφιοποιήθηκαν. Από τα ψηφιοποιημένα πειραματικά αποτελέσματα υπολογίζεται η απορροφούμενη ενέργεια σε κάθε ημικύκλο φόρτισης σε μέγιστη πλαστιμότητα παραμόρφωσης  $\mu$ ,  $E_h$ , και το γινόμενο δύναμης-παραμόρφωσης,  $(F\delta)_{max}$ . Τα πειράματα αυτά είναι των: Abrams (1987), Ang et al (1989), Atalay and Penzien (1975), Bertero et al (1974), Bousias et al (1995), Brown and Jirsa (1971),

Building Research Institute (1976, 1978), Burns and Siess (1966), Celebi and Penzien (1973), Chronopoulos and Vintzileou (1995), Darwin and Nmai (1986), Garstka (1993), Hanson and Conner (1972), Hwang and Scribner (1984), Kraetzig et al (1989), Ma et al (1976), Mander (1983), Otani and Cheung (1981), Otani et al (1980), Park et al (1982), Popov et al (1972), Rabbat et al (1986), Saatcioglou and Ozcebe (1989), Scribner and Wight (1978), Takizawa and Aoyama (1976), Tegos (1984), Umehara and Jirsa (1984), Viwathanatepa et al (1979), Woodward and Jirsa (1984), Zagajeski et al (1978) και Zahn et al (1989).

Η βάση δεδομένων καλύπτει ένα εύρος τιμών του λόγου διάτμησης  $L_s/h$  από 1.0 έως 6.5, της ανηγμένης αξονικής δύναμης  $\nu=N/A_c f_c$  από 0 έως 0.475, του μηχανικού ποσοστού εφελκυσμένου οπλισμού,  $\omega_1$ , από 0.035 έως 0.275 και του θλιβόμενου,  $\omega_2$ , από 0.035 έως 0.21, της αντοχής σκυροδέματος,  $f_c$ , από 14MPa έως 46MPa και του μηχανικού ογκομετρικού ποσοστού οπλισμού περίσφιξης,  $\omega_w$ , από 0.07 έως 0.81.

Σε 14 πειράματα τα δοκίμια είχαν διατομή μορφής T και σε μερικά είχαν κυκλική, πολυγωνική ή κιβωτοειδή. Σε 30 πειράματα ο χάλυβας ήταν τύπου Tempcore S500 ενώ στα υπόλοιπα ήταν μαλακότερος και περισσότερο όλκιμος.

Μια προκαταρκτική στατιστική επεξεργασία των δεδομένων έδειξε ότι:

- α) Υπάρχει πολύ μεγάλη διασπορά ως προς τη μέση τιμή της σχέσης  $\zeta$ - $\mu$ , ακόμα και μέσα σε ομάδες πειραμάτων με τις ίδιες γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες, ή ακόμα και μέσα στο ίδιο πείραμα. Αυτή η διασπορά καθιστά δυσδιάκριτη τη διαφορά απόσβεσης μεταξύ του πρώτου μετελαστικού κύκλου και των επόμενων όπως, απεικονίζεται στις εξ. (29)-(36) του Κεφαλαίου 2 από τη μία πλευρά και στις εξ. (37)-(43) από την άλλη.
- β) Υπάρχει σημαντική απορρόφηση ενέργειας στους μετά τη ρηγμάτωση και πριν τη διαρροή κύκλους, η οποία αντιστοιχεί σε λόγο απόσβεσης περίπου 8% της κρίσιμης, σχεδόν ανεξάρτητο από το μέγεθος της μέγιστης δύναμης και παραμόρφωσης του κύκλου και των χαρακτηριστικών των δοκιμίων.
- γ) Ο μέσος λόγος απόσβεσης αυξάνει με αύξηση του λόγου διάτμησης,  $L_s/h$ , για δεδομένο δείκτη πλαστιμότητας  $\mu > 1$ , μειώνεται με αύξηση του ανηγμένου αξονικού φορτίου  $\nu$ , αυξάνει ελαφρώς με το μηχανικό ποσοστό περίσφιξης,  $\omega_w$ , και μειώνεται με το μηχανικό ποσοστό εφελκυσμένου οπλισμού,  $\omega_1$ .
- δ) Οι τιμές των  $L_s/h$ ,  $\nu$ ,  $\omega_w$  και  $\omega_1$  στα 187 πειράματα είναι στατιστικώς ανεξάρτητες, σε αντίθεση με το  $\omega_2$ , το οποίο είναι ισχυρά συσχετιζόμενο με το  $\omega_1$ , καθώς στα περισσότερα πειράματα ήταν  $\omega_1 = \omega_2$ . Έτσι, μόνο μία από αυτές τις δύο μεταβλητές μπορεί να θεωρηθεί σαν στατιστικώς ανεξάρτητη των άλλων. Το  $\omega_1$  ήταν αυτό που επιλέχθηκε για το σκοπό αυτό.

Η ποσοτικοποίηση της συσχέτισης των ζ-μ με τα  $L/h$ ,  $\nu$ ,  $\omega_w$  και  $\omega_1$ , έγινε μέσω αναλύσεων παλινδρόμησης των παραμέτρων εκείνων των μοντέλων υστέρησης που προαναφέρθηκαν στα οποία η υστέρηση ελέγχεται από μια μόνο παράμετρο, στα  $L/h$ ,  $\nu$ ,  $\omega_w$  και  $\omega_1$ . Από τα πειράματα υπολογίζονται τα ζεύγη τιμών ζ-μ και στη συνέχεια για τα ζεύγη αυτά υπολογίζεται η παράμετρος του κάθε μοντέλου με μη-γραμμική παλινδρόμηση μέσω των εξ. (37) έως (43) του Κεφαλαίου 2. Τελικά οι τιμές των παραμέτρων αυτών συσχετίζονται μέσω γραμμικής παλινδρόμησης με τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων του κάθε πειράματος.

Για το τροποποιημένο από τον Litton (1975) μοντέλο Takeda (1970) με  $\beta=0$ , η παράμετρος της παλινδρόμησης είναι το  $\alpha$ . Στο τροποποιημένο από τον Anagnostopoulos (1972), μοντέλο των Clough and Johnston (1966), η παράμετρος της παλινδρόμησης είναι ο εκθέτης αποφόρτισης  $\alpha$ . Στο μοντέλο των Roufaiel and Meyer η παράμετρος της παλινδρόμησης είναι το  $m$ , το οποίο ελέγχει τη στένωση. Εφόσον η απόσβεση δεν είναι τόσο ευαίσθητη στο λόγο κράτυνσης,  $\rho$ , η τιμή του τέθηκε ίση με 2%.

Η παλινδρόμηση έγινε πρώτα σε όλα τα σημεία με  $\mu > 1$ .

Η “συνολική” συσχέτιση της παραμέτρου  $\alpha$  του τροποποιημένου από τον Litton (1975) μοντέλου Takeda με  $\beta=0$  (2353 τιμές μεταξύ 0 και 1 για τα  $\alpha$ ) και του εκθέτη  $\alpha$  του τροποποιημένου από τον Anagnostopoulos (1972) μοντέλου των Clough and Johnston (1966) (2313 τιμές μεγαλύτερες του 1.0 για το  $\alpha$ ) με τα  $\omega_w$  και  $\omega_1$  δείχνουν ότι αυτά τα δυο χαρακτηριστικά είναι στατιστικά ασήμαντα για την παλινδρόμηση. Έτσι επαρκεί η συσχέτιση με τις παραμέτρους  $L_s/h$  και  $\nu$ , με μικρή μόνο απώλεια στην ικανότητα πρόβλεψης.

Για την παράμετρο  $m$  του μοντέλου των Roufaiel and Meyer (1987) (1247 τιμές μεταξύ του 0 και 1 για το  $m$ ), μόνο το  $L_s/h$  φαίνεται να έχει κάποια περιορισμένη στατιστική σημασία, ενώ οι άλλες τρεις μεταβλητές,  $\nu$ ,  $\omega_w$  και  $\omega_1$ , φαίνεται να είναι στατιστικά ασήμαντες.

Η βέλτιστη “συνολική” συσχέτιση των παραμέτρων αυτών με τα  $L/h$  και  $\nu$  για τα τρία μοντέλα υστέρησης δίνεται από τις σχέσεις:

$$\alpha \text{ (τροποποιημένο μοντέλο Takeda)} = 0.586 - 0.0444(L_s/h) + 0.249\nu \quad (87)$$

$$\alpha \text{ (τροποποιημένο μοντέλο Clough και Johnston)} = 0.606 - 0.0392(L_s/h) + 0.213\nu \quad (88)$$

$$m \text{ (μοντέλο Roufaiel και Meyer)} = 0.432 + 0.0098(L_s/h) \quad (89)$$

Εξαιτίας της μη ομοιόμορφης κατανομής των δεδομένων στο διάστημα τιμών των  $L_s/h$  και  $\nu$ , έγινε μια δεύτερη σειρά παλινδρομήσεων, υποδιαιρώντας το διάστημα των τιμών του  $L_s/h$  σε έξι περιοχές (από 1.0 έως 1.6, από 1.6 έως 2.6, κλπ.) και το εύρος των τιμών του  $\nu$  σε τέσσερις περιοχές (0 έως 0.05, 0.05 έως 0.15, 0.15 έως 0.25 και 0.25 έως 0.475). Τα 24 κελιά

των συνδυασμών των  $L_s/h$  και  $\nu$ , με εξαίρεση δυο από αυτά, περιέχουν μερικές δεκάδες έως και κάποιες εκατοντάδες ζεύγη τιμών  $\zeta$ - $\mu$  με  $\mu > 1$ , επιτρέποντας έτσι τη μη-γραμμική παλινδρόμηση των  $\zeta$ - $\mu$  με βάση τις εξισώσεις του τροποποιημένου μοντέλου Takeda ή του τροποποιημένου μοντέλου των Clough and Johnston, για να υπολογιστούν οι παράμετροι  $\alpha$  και  $a$  αντίστοιχα. Οι υπολογιζόμενες 22 τιμές των  $\alpha$  και  $a$  για τις 22 τιμές των ζευγών ( $L_s/h$ ,  $\nu$ ) συσχετίστηκαν με γραμμική παλινδρόμηση με τα  $L_s/h$  και  $\nu$ . Η παλινδρόμηση τελικά δεν έγινε στο  $\nu$  για τα  $\alpha$  και  $a$ , γιατί αποδείχθηκε ότι η μεταβλητή αυτή ήταν στο στάδιο αυτό στατιστικά ασήμαντη. Τα τελικά αποτελέσματα αυτής της “μερικής” παλινδρόμησης μόνο στο  $L_s/h$  είναι:

$$\alpha \text{ (τροποποιημένο μοντέλου Takeda)} = 0.755 - 0.0936(L_s/h) \quad (90)$$

$$a \text{ (μοντέλο των Clough and Johnston)} = 0.842 - 0.09213(L_s/h) \quad (91)$$

Η “μερική” παλινδρόμηση αυτού του τύπου στη παράμετρο  $m$  του μοντέλου των Roufaiel and Meyer δεν εξυπηρετεί κανένα σκοπό, αφού δεν δίδει μια στατιστικά σημαντικότερη τιμή από τη σχεδόν σταθερή τιμή των 0.46 έως 0.47.

Οι εξ. (90) και (91), κάνοντας χρήση όλων των 3228 σημείων με  $\mu > 1$ , δίνουν καλύτερη προσαρμογή στη σχέση  $\zeta$ - $\mu$  για τις ξεχωριστές περιπτώσεις των ζευγών ( $L_s/h$ ,  $\nu$ ), αλλά δεν αντικατοπτρίζουν την εξάρτηση των  $\alpha$  και  $a$  από το  $\nu$ . Επίσης, η εκτίμηση των συντελεστών τους είναι περισσότερο αβέβαιη απ’ αυτή των σχέσεων (87) και (88).

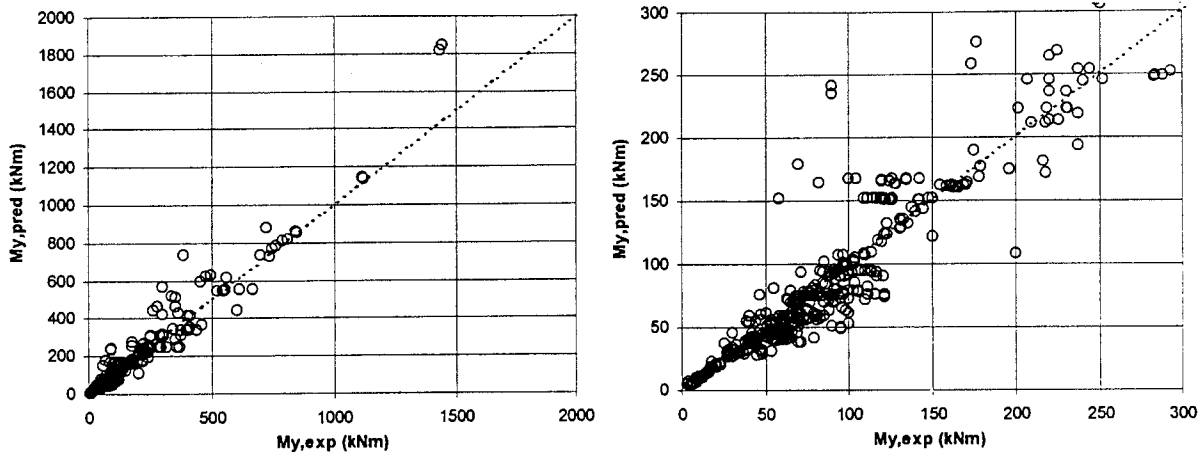
Η σχέση  $\zeta$ - $\mu$  για το τροποποιημένο μοντέλο Takeda και για το μοντέλο των Clough and Johnston με παραμέτρους από τις εξ. (87), (90) και (88), (91) αντίστοιχα (μετά την πρόσθεση της απόσβεσης του 8% που χαρακτηρίζει τους πριν τη διαρροή κύκλους) παρουσιάζεται στο Σχ. 3.36, ξεχωριστά για κάθε ζεύγος ( $L_s/h$ ,  $\nu$ ) και συγκρίνεται με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Οι προβλέψεις όλων των μοντέλων συμπίπτουν για τιμές του  $\mu$  μεταξύ 1 και 2, αλλά αυτές του τροποποιημένου μοντέλου των Clough and Johnston φαίνεται να παρέχουν καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα για μεγαλύτερες τιμές του  $\mu$ .

Η σχέση  $\zeta$ - $\mu$  που προκύπτει από το τροποποιημένο μοντέλο Takeda και το μοντέλο των Clough and Johnston, με παραμέτρους από τη “μερική” και “συνολική” παλινδρόμηση, εξ. (87), (88) και (90), (91) (μετά την προσθήκη της απόσβεσης του 8% για τους πριν τη διαρροή κύκλους), συγκρίνεται στο Σχ. 3.37 με τα αποτελέσματα από 46 πειράματα πραγματικής διαξονικής φόρτισης. Τα δεδομένα προήλθαν από τα πειράματα των Bousias et al (1995), Li et al (1987), Low and Moelhe (1987), Otani et al (1980), Saatcioglou and Ozcebe (1989), Takizawa and Aoyama (1976) και Woodward and Jirsa (1984). Τα περισσότερα σημεία

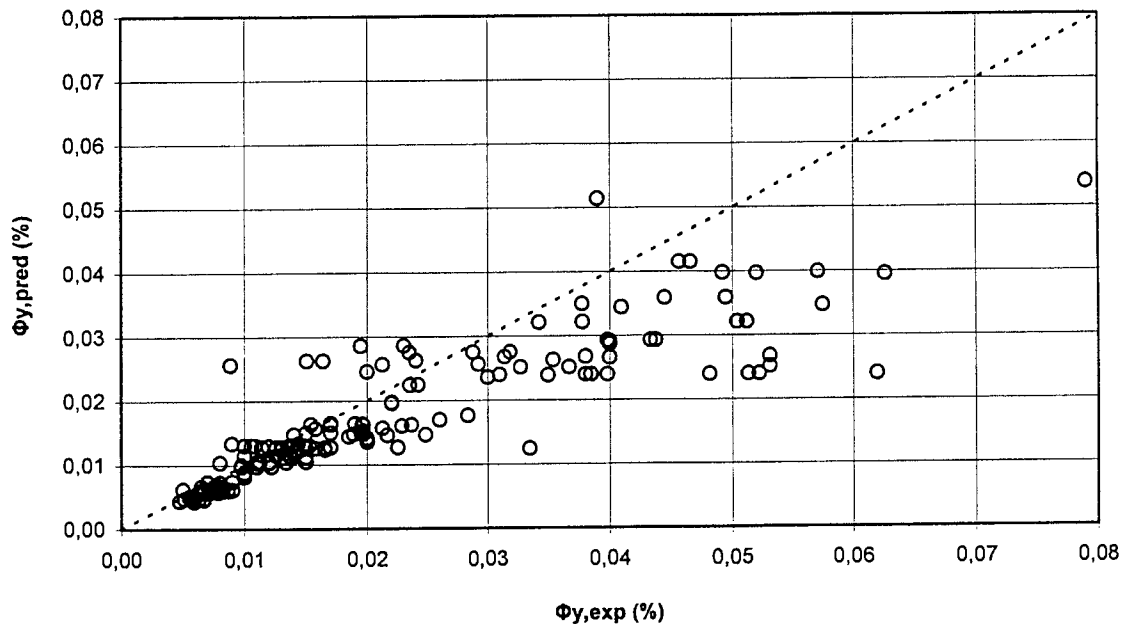
βρίσκονται πάνω από τις καμπύλες που προσαρμόστηκαν στα πειράματα μονοαξονικής φόρτισης, πράγμα που δείχνει την μεγαλύτερη υστερητική απόσβεση κατά τη διαξονική φόρτιση. Η υψηλότερη αυτή υστερητική απόσβεση αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της σύζευξης μεταξύ των δύο εγκάρσιων διευθύνσεων που τονίσθηκε στο Κεφάλαιο 1.

Συμπερασματικά από τα ανωτέρω προκύπτουν τα εξής:

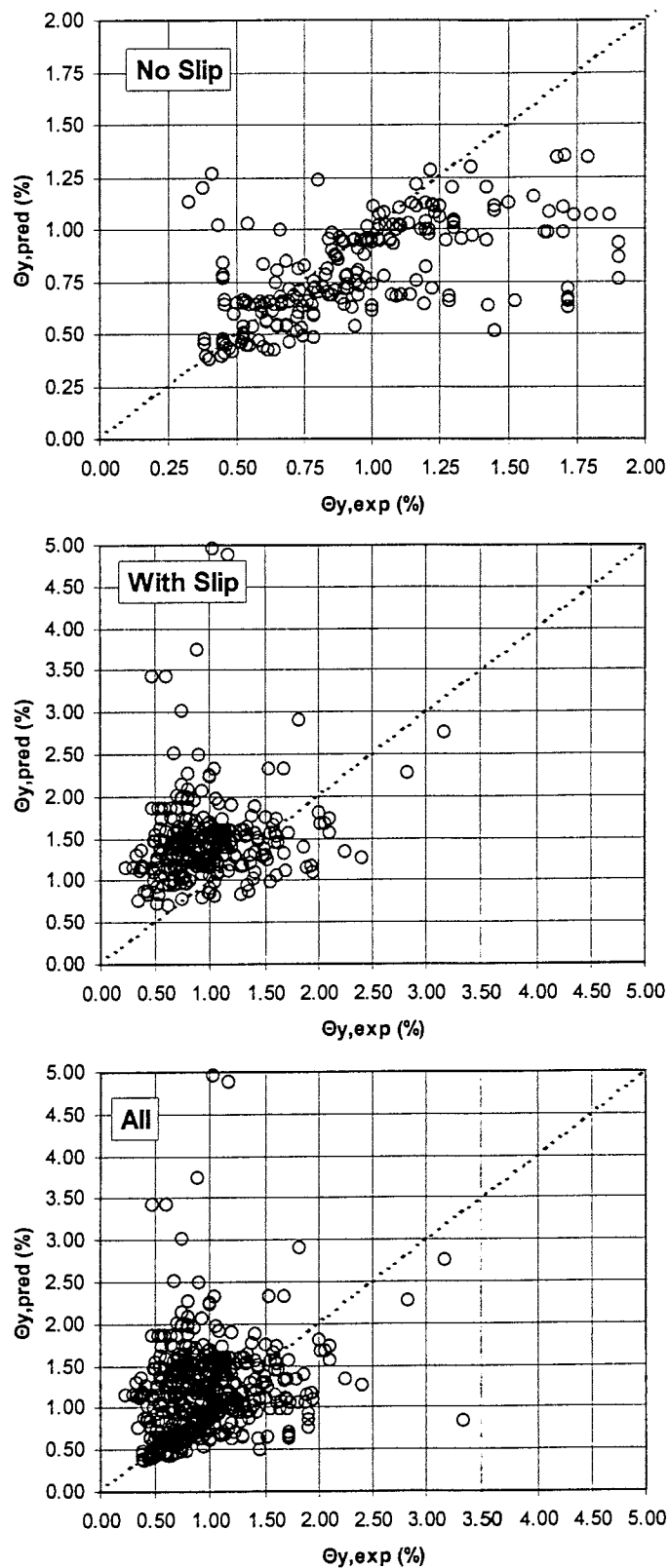
Παρά της μεγάλης διασπορά της πειραματικής σχέσης ζ-μ, είναι προφανής η τάση της απόσβεσης να αυξάνει με της αύξηση του λόγου διάτμησης  $L_s/h$  και τη μείωση της ανηγμένη αξονικής δύναμης  $v$ . Όμως, η υστερητική απόσβεση φαίνεται να είναι σχεδόν ανεξάρτητη του ποσοστού του διαμήκους και εγκάρσιου σπλισμού. Οι εξισώσεις που προέκυψαν στατιστικά για κάποια μονοπαραμετρικά μοντέλα υστέρησης, όπως το μοντέλο των Clough and Johnston (1966), όπως τροποποιήθηκε από τον Anagnostopoulos (1972), και του Takeda et al (1970), όπως τροποποιήθηκε από τον Otani (1974) και τον Litton (1975), δίνουν την μέση απορρόφηση ενέργειας μελών σπλισμένου σκυροδέματος που ακολουθούν τα μοντέλα αυτά στη μετά τη διαρροή περιοχή, συναρτήσει του λόγου διάτμησης  $L_s/h$  και του ανηγμένου αξονικού φορτίου  $v$ . Ένας σχεδόν σταθερός λόγος απόσβεσης περίπου ίσος με 8% φαίνεται να χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση και πριν τη διαρροή. Τέλος, η διαξονική καταπόνηση μελών Ο/Σ συνοδεύεται όντως από πολύ μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης απ' ότι στη μονοαξονική, λόγω της σύζευξης της απόκρισης στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις της φόρτισης.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων (εξ. (3)) - πειραματικών τιμών της ροπής διαρροής για 550 πειράματα.

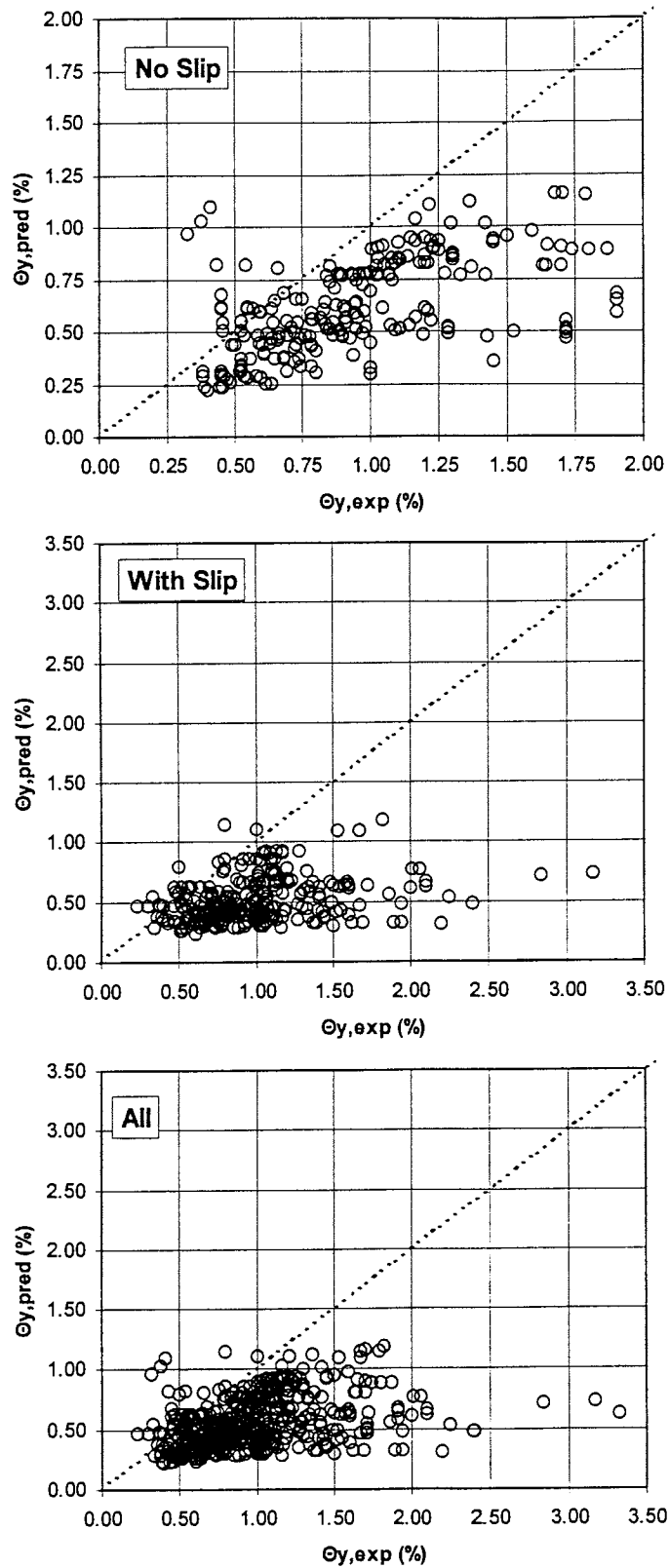


Σχήμα 3.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων (εξ. (2)) - πειραματικών τιμών της καμπυλότητας στη διαρροή για 175 πειράματα.



Σχήμα 3.3

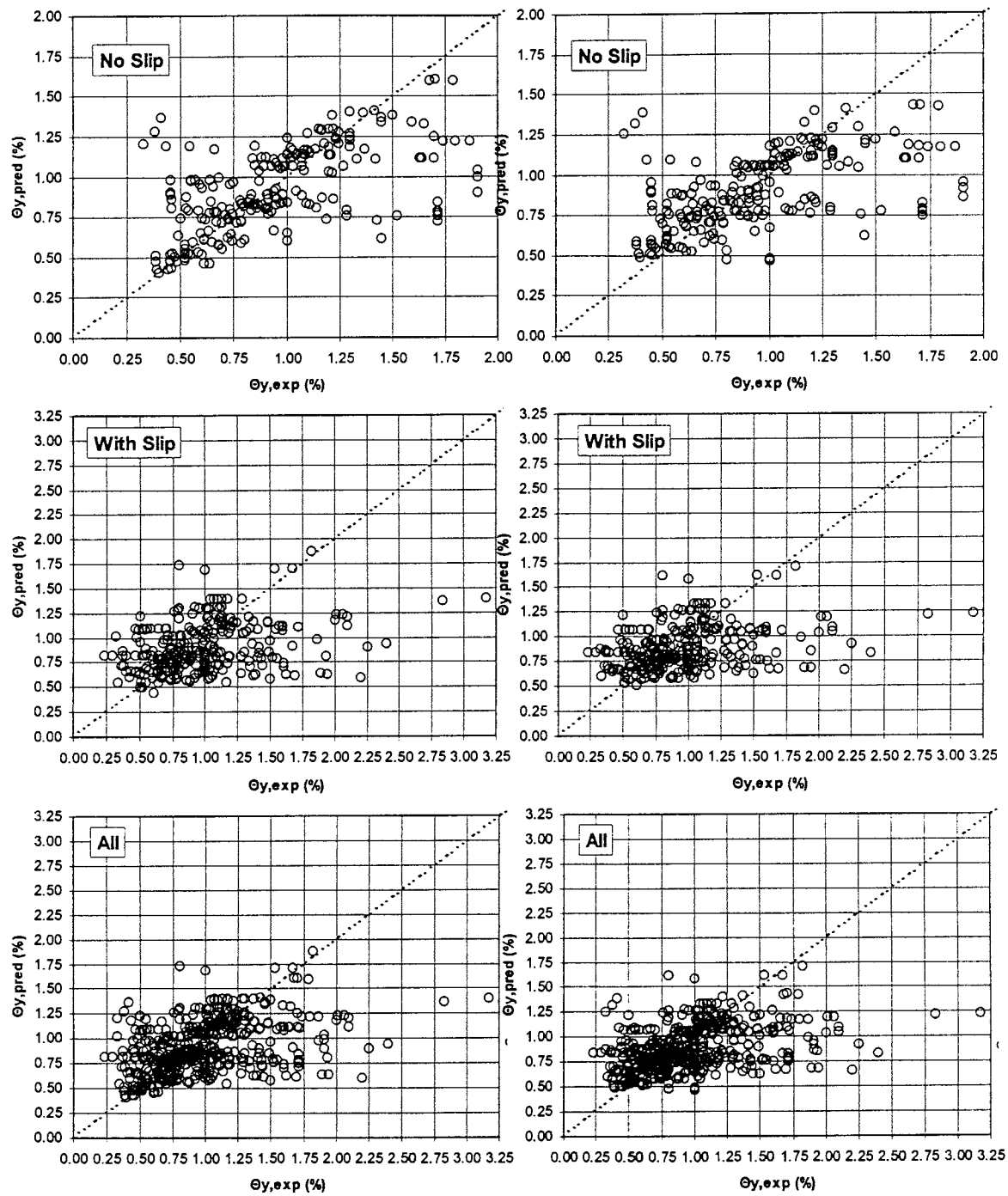
Διάγραμμα προβλεπόμενων κατά Park and Ang (1985) - πειραματικών τιμών της στρωφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ . (a) 229 πειράματα χωρίς δυνατότητα ολίσθησης του οπλισμού, (b) 318 πειράματα με δυνατότητα ολίσθησης του οπλισμού, (c) 547 πειράματα.



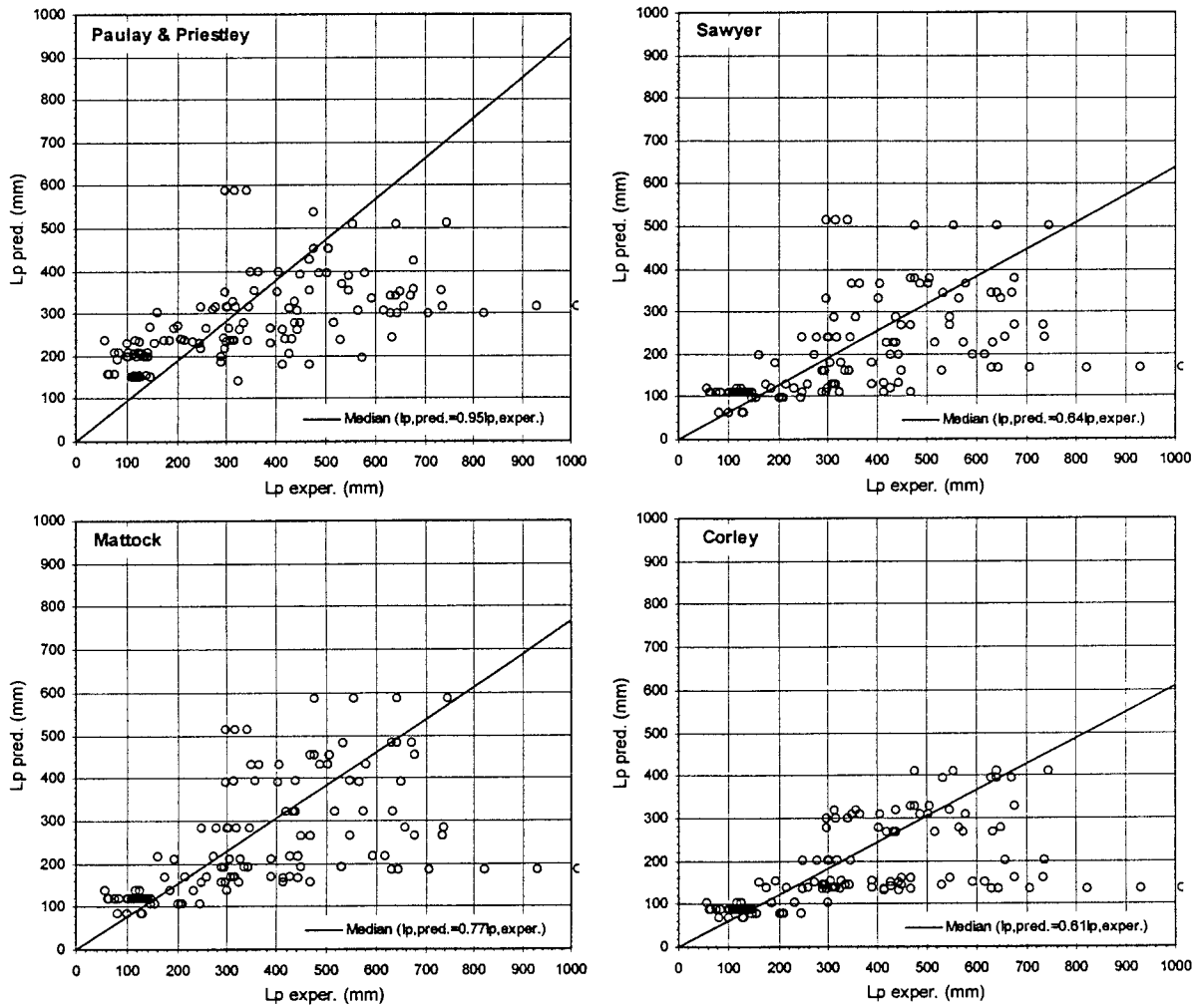
Σχήμα 3.4

Διάγραμμα προβλεπόμενων κατά εξ. (18) - πειραματικών τιμών της στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ : (a) 229 πειράματα χωρίς δυνατότητα ολίσθησης του σπλισμού, (b) 318 πειράματα με δυνατότητα ολίσθησης του σπλισμού, (c) 547 πειράματα.

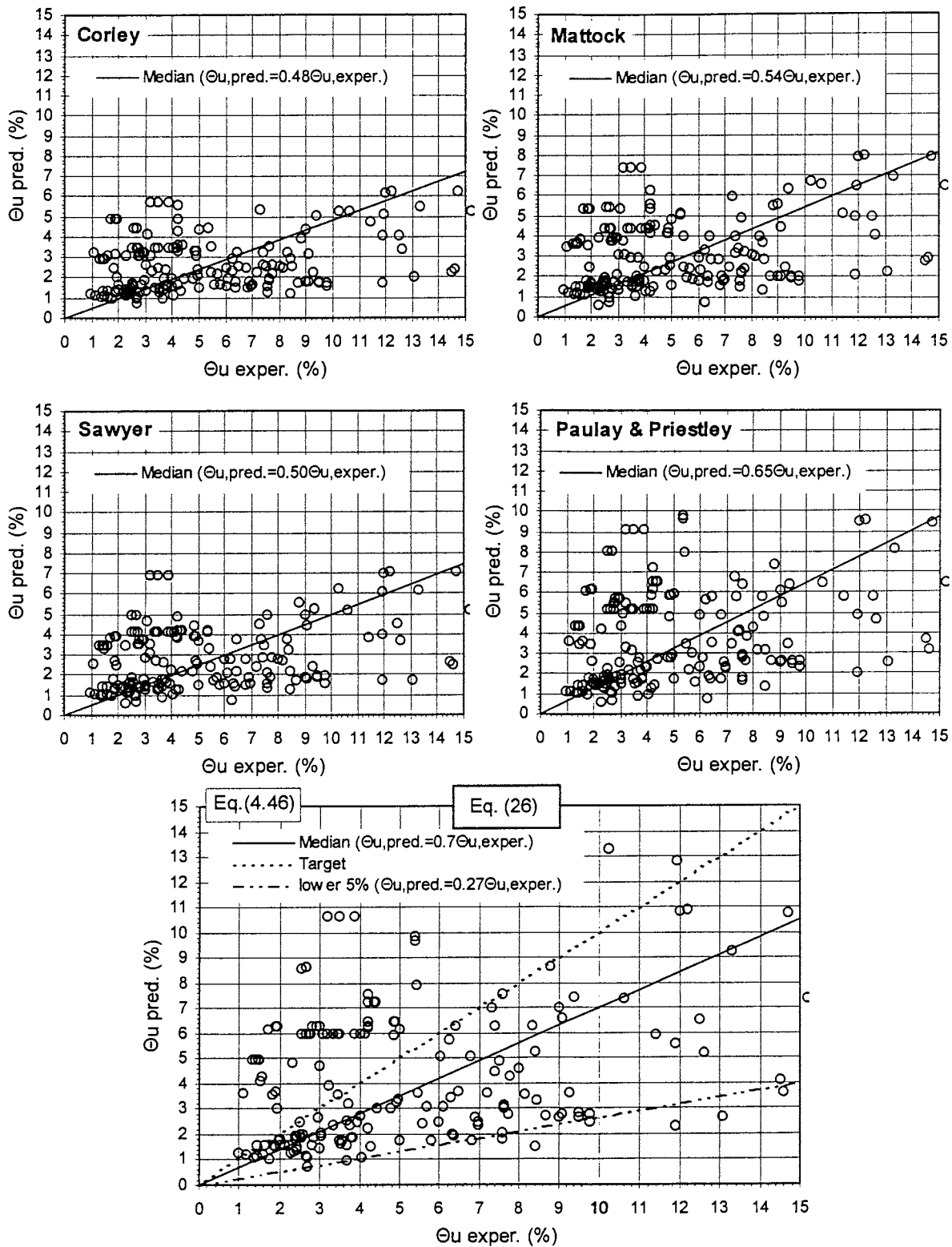




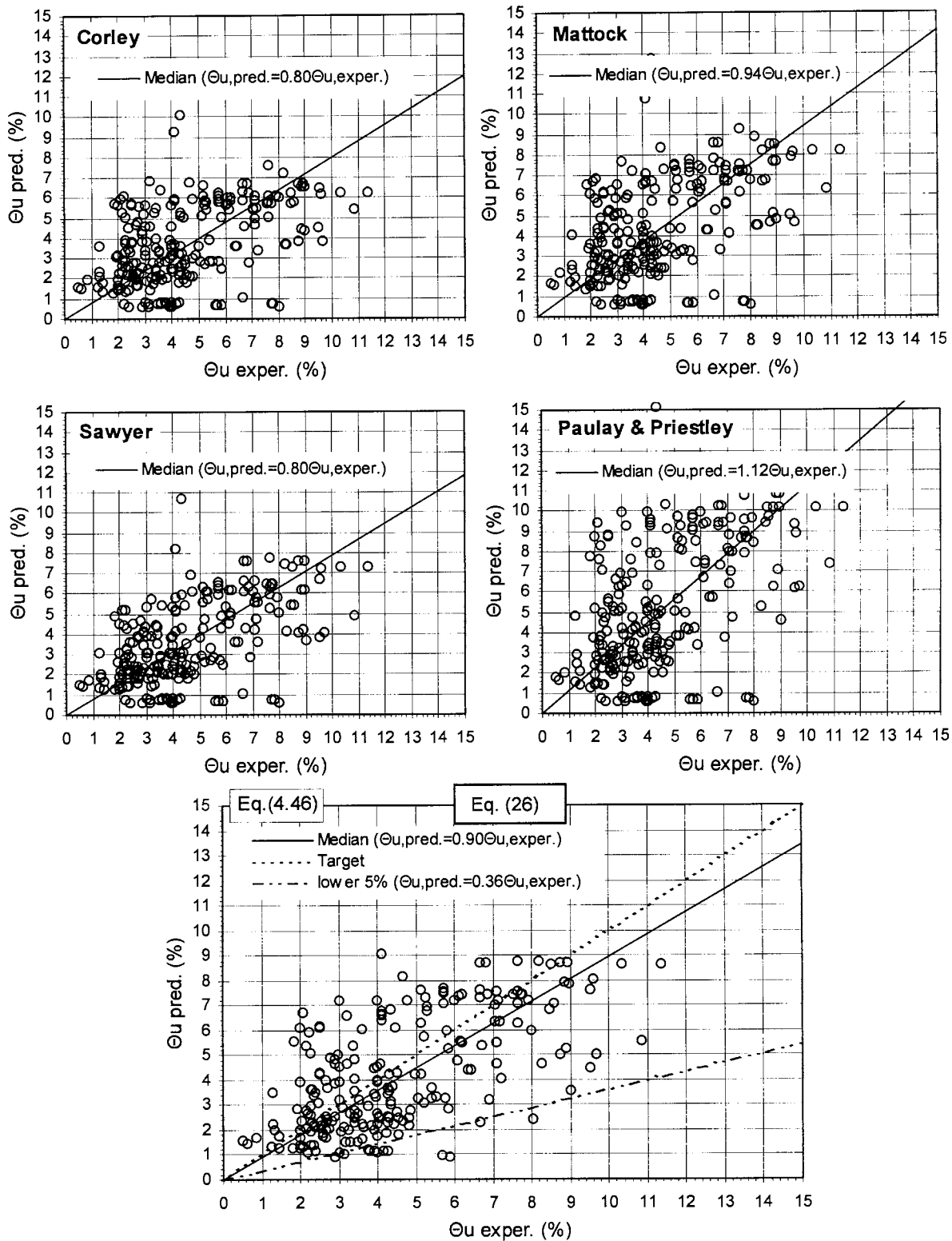
Σχήμα 3.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων (κατά εξ. (19) – δεξιά ή (20) αριστερά)-πειραματικών τιμών της στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ : (a) 229 πειράματα χωρίς δυνατότητα ολίσθησης του σπλισμού, (b) 318 πειράματα με δυνατότητα ολίσθησης του σπλισμού, (c) 547 πειράματα.



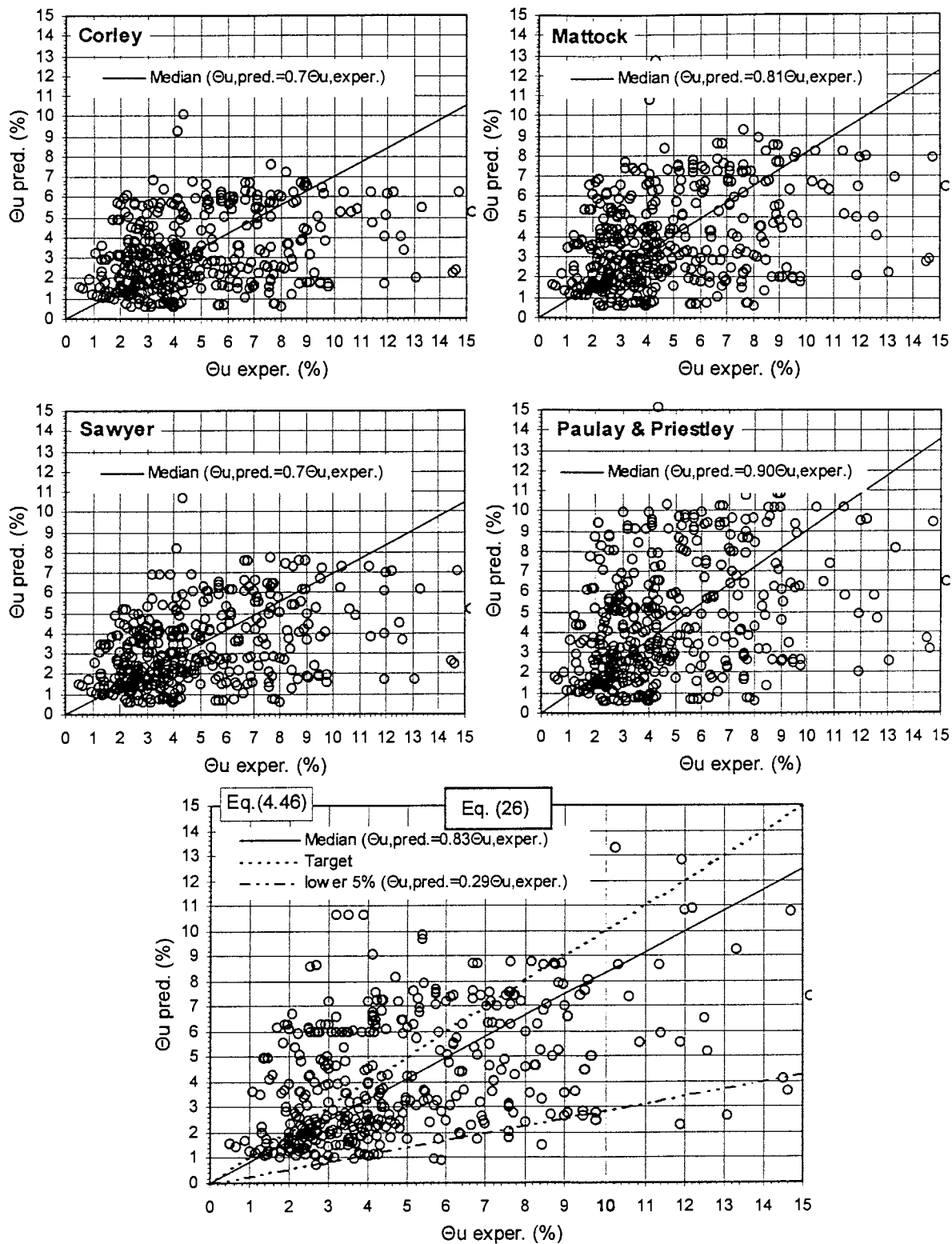
Σχήμα 3.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων (εξ. (22), (23), (24), (25)) - "πειραματικών" τιμών του μήκους πλαστικής άρθρωσης.



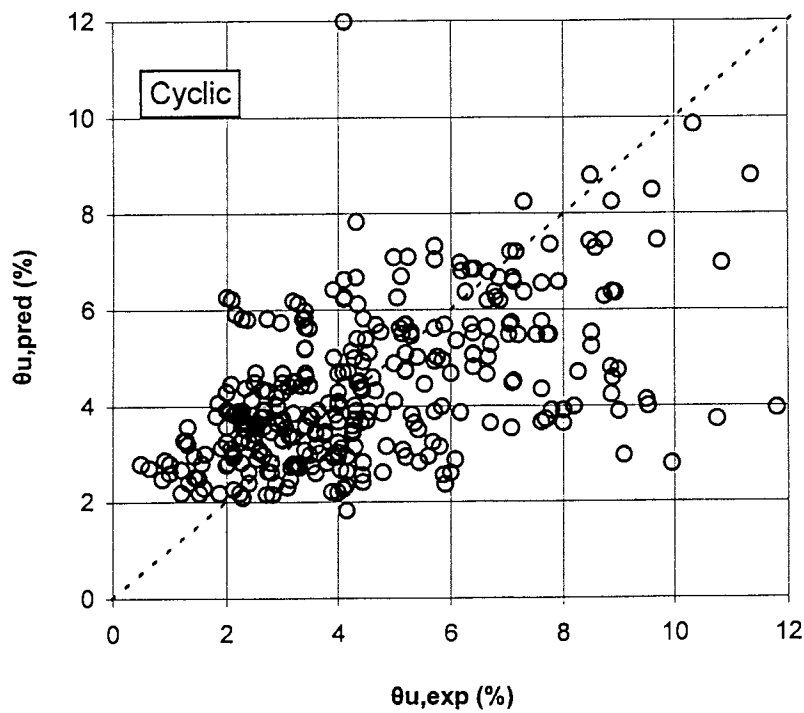
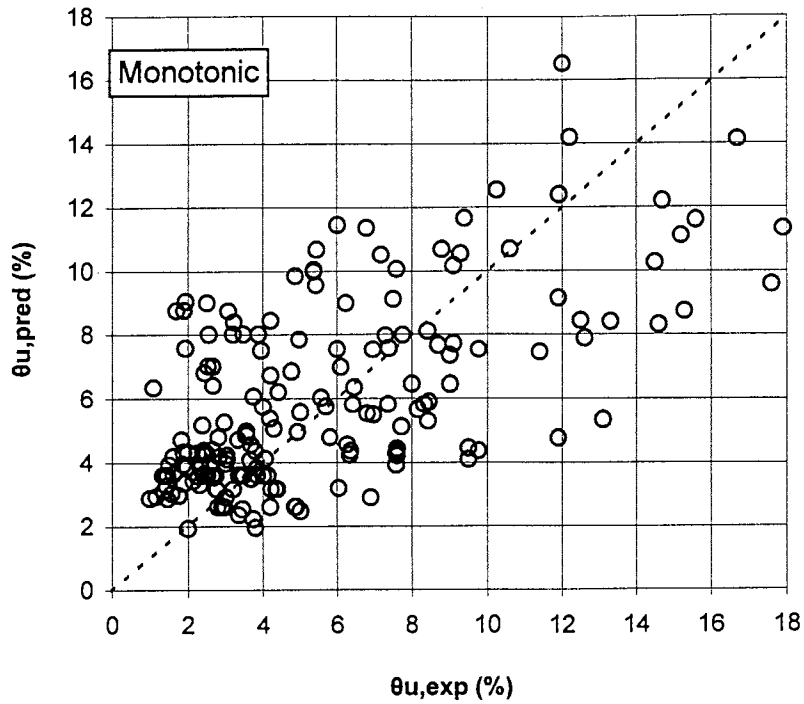
Σχήμα 3.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων, κατά εξ. (21) (με  $L_p$  από εξ. (22)-(26)) - "πειραματικών" τιμών στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , για 187 μονοτονικά πειράματα. Συνεχής γραμμή: ευθεία αριθμητικού μέσου με χρήση "θεωρητικών" τιμών  $\theta_y$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$ .



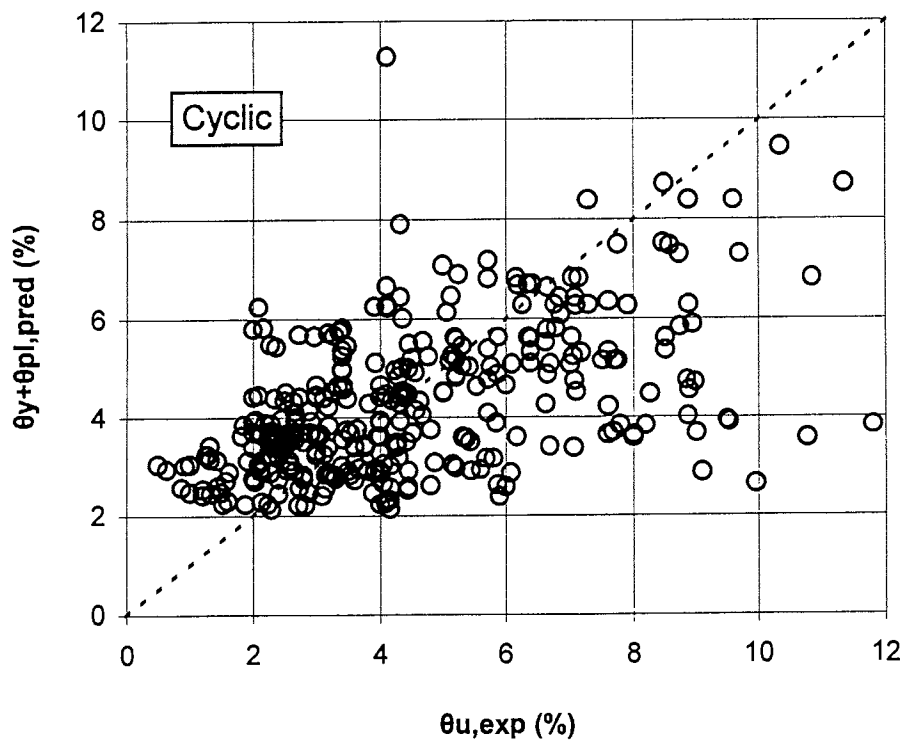
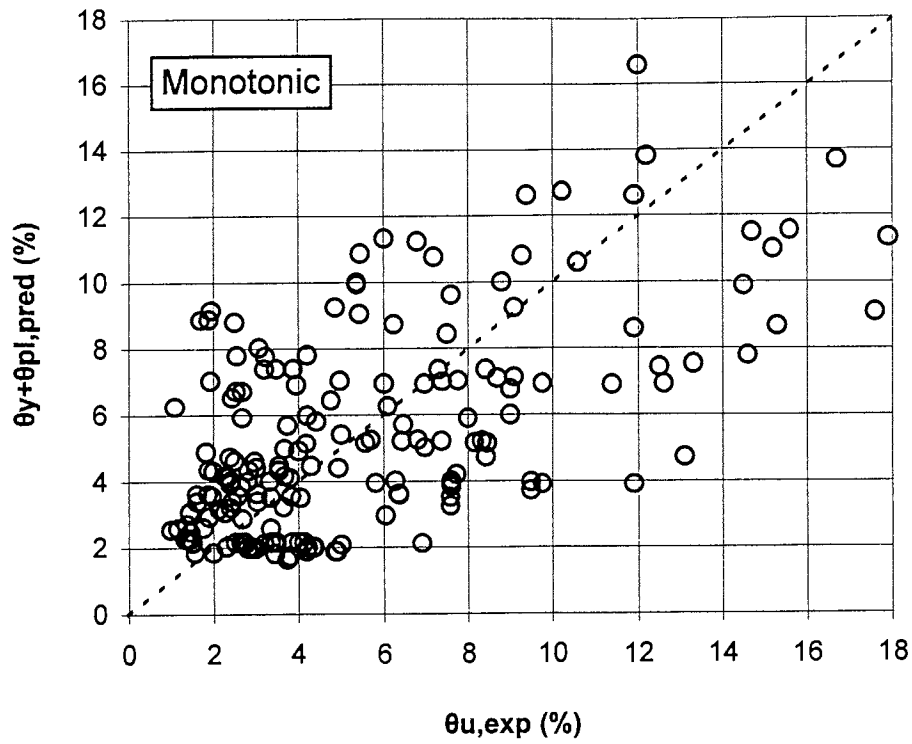
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων κατά εξ. (21) (με  $L_p$  από εξ. (22)-(26)) - "πειραματικών" τιμών στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , για 280 ανακυκλιζόμενα πειράματα. Συνεχής γραμμή: ευθεία αριθμητικού μέσου με χρήση "θεωρητικών" τιμών  $\theta_y$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$ .



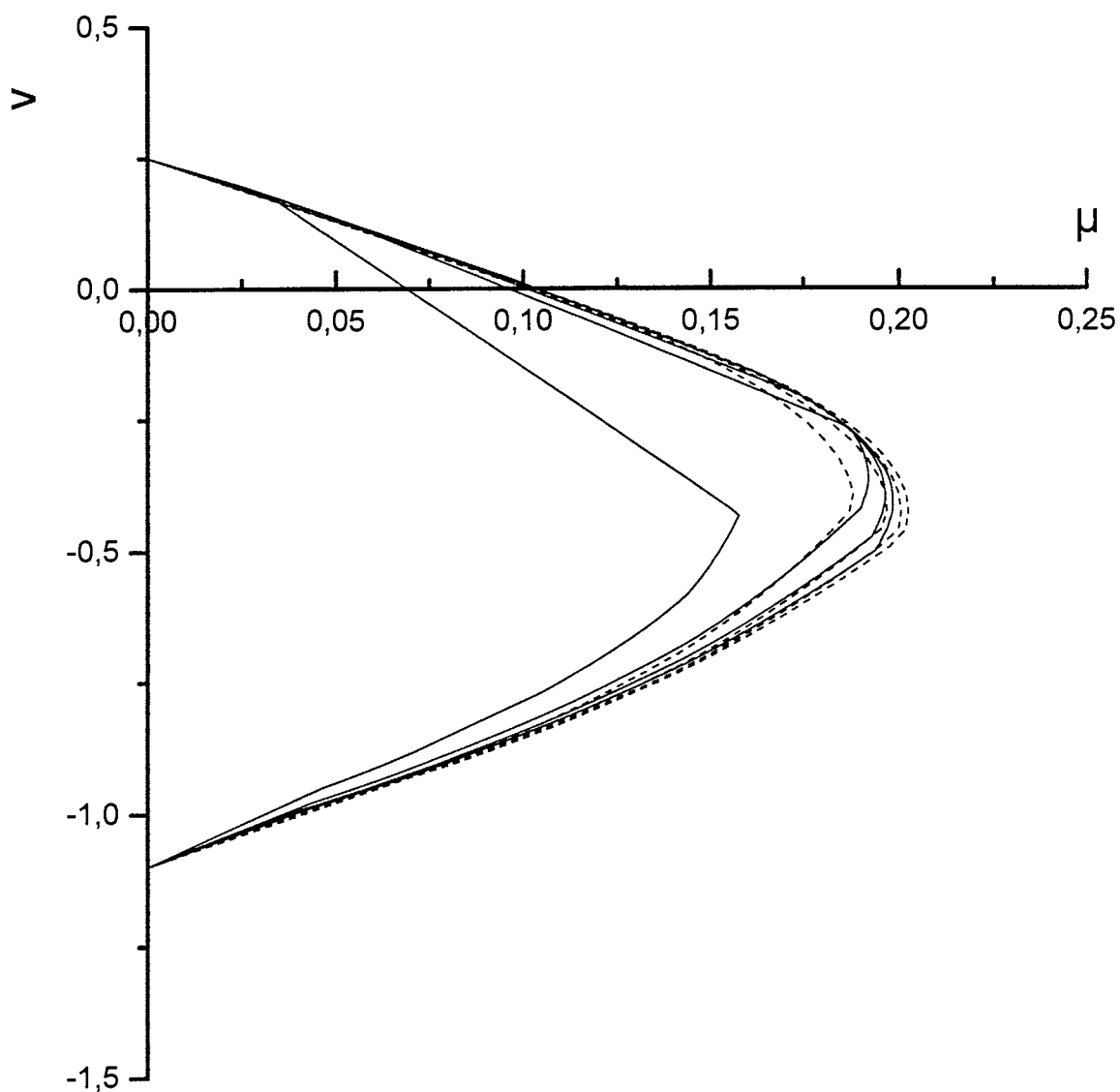
Σχήμα 3.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων κατά εξ. (21) (με  $L_p$  από εξ. (22)-(26)) - "πειραματικών" τιμών στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_u$ , για 467 πειράματα. Συνεχής γραμμή: ευθεία αριθμητικού μέσου με χρήση "θεωρητικών" τιμών  $\theta_y$ ,  $\Phi_y$ ,  $\Phi_u$ .



Σχήμα 3.10 Διάγραμμα προβλεπόμενων (εξ. (27)) - "πειραματικών" τιμών της στροφής χορδής μέλους στην αστοχία,  $\theta_u$ , για 187 πειράματα δοκών σε μονοτονική φόρτιση και για 341 σε ανακυκλιζόμενη.



Σχήμα 3.11 Διάγραμμα προβλεπόμενων (εξ. (28)) - "πειραματικών" τιμών της στροφής χορδής μέλους στην αστοχία,  $\theta_u$ , για 187 πειράματα σε μονοτονική φόρτιση και για 341 σε ανακυκλιζόμενη.



$$\omega_1=0.25, \omega_v=0.0, \omega_w=0.05$$

—— λ=2, 3, 4, 5

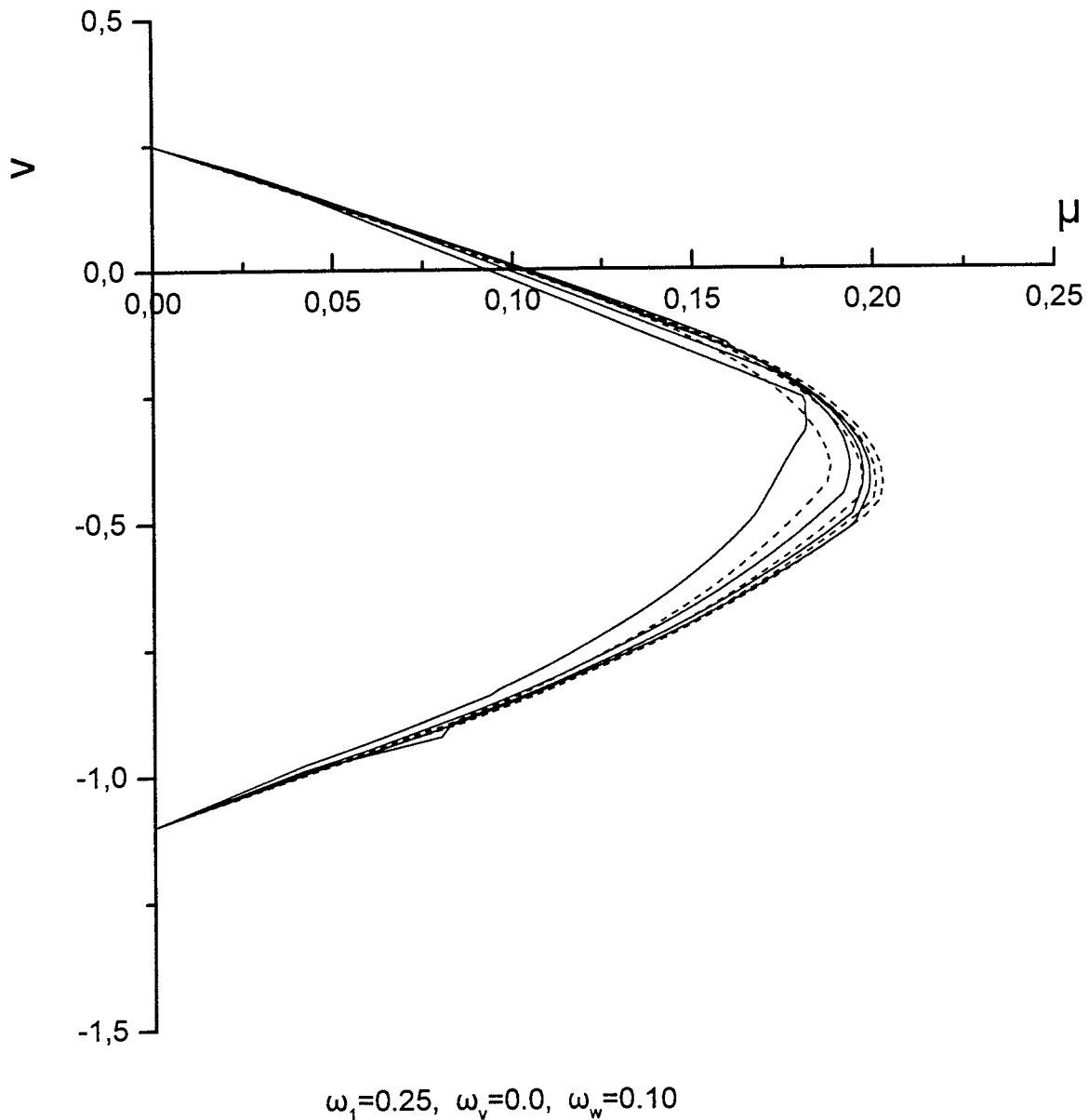
Επιφάνεια καμποδιατητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

----- λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.12 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδιατητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.25$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.05$





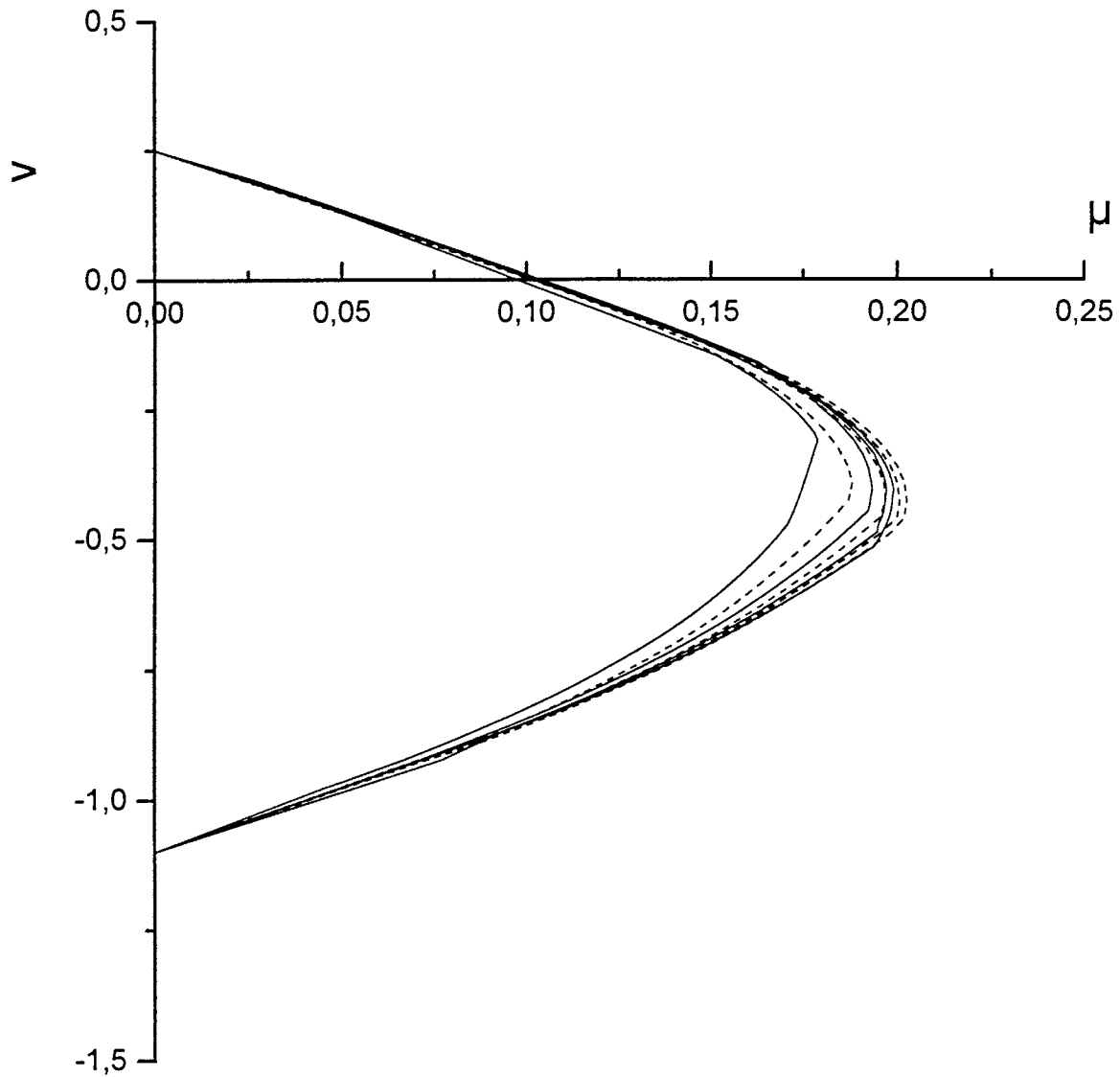
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμποδοιατμητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.13 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατμητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.25$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.10$



$$\omega_1=0.25, \omega_v=0.0, \omega_w=0.20$$

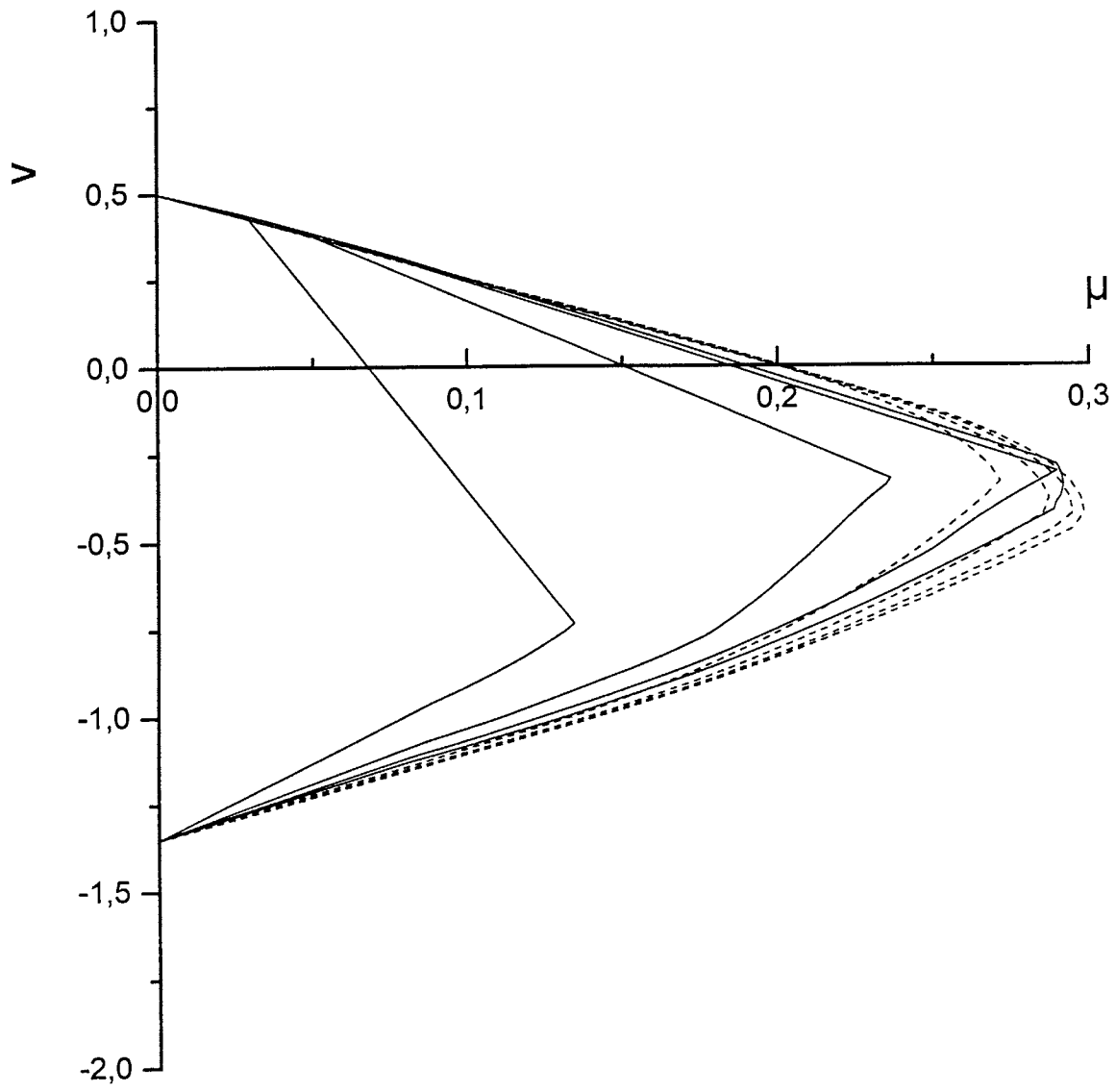
—— λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμποδοιατημικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

----- λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.14 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατημτική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.25$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.20$



$$\omega_1=0.50, \omega_v=0.0, \omega_w=0.05$$

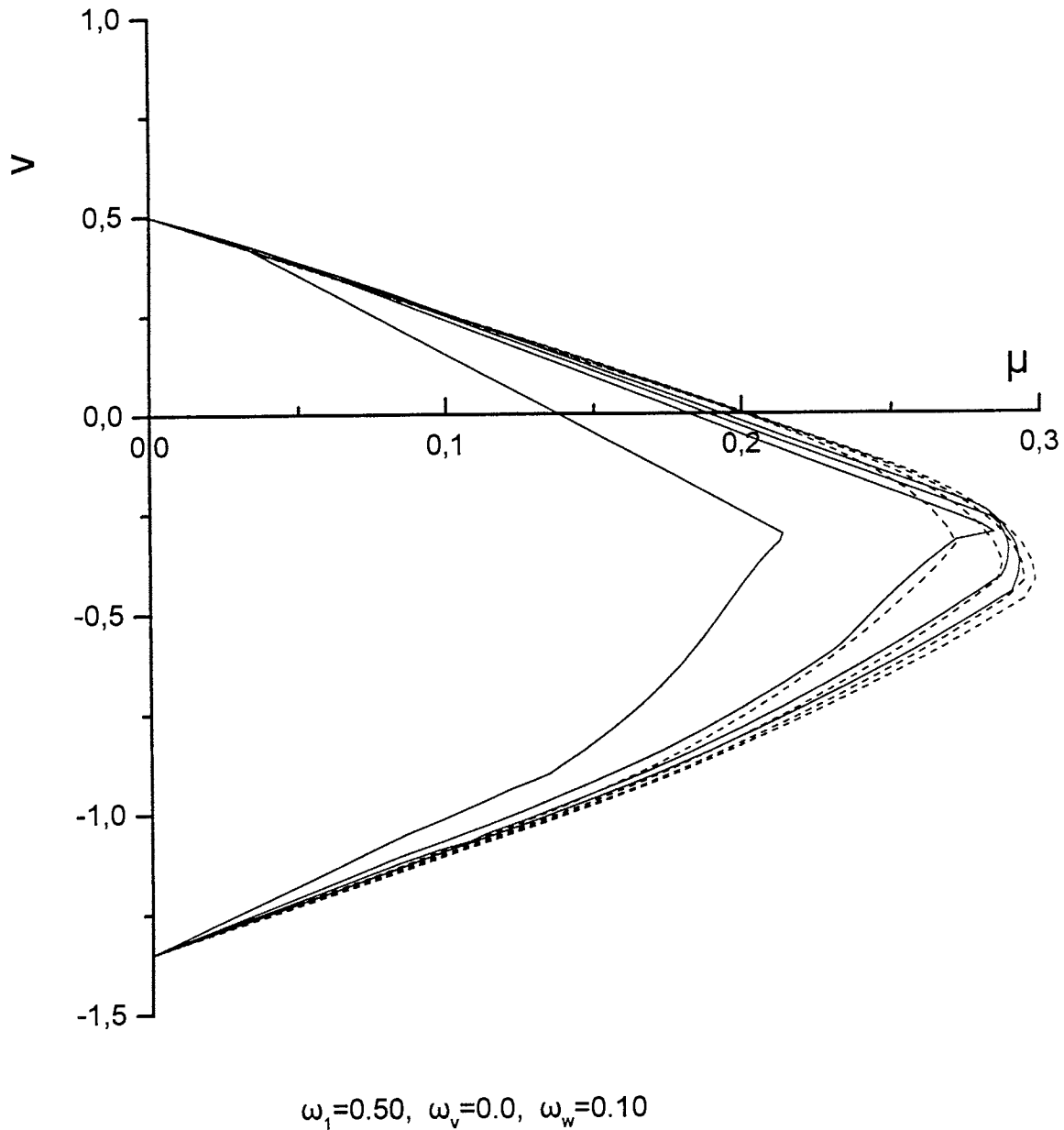
— λ=2, 3, 4, 5

----- λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμποδοιατμητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.15 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατμητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.50$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.05$



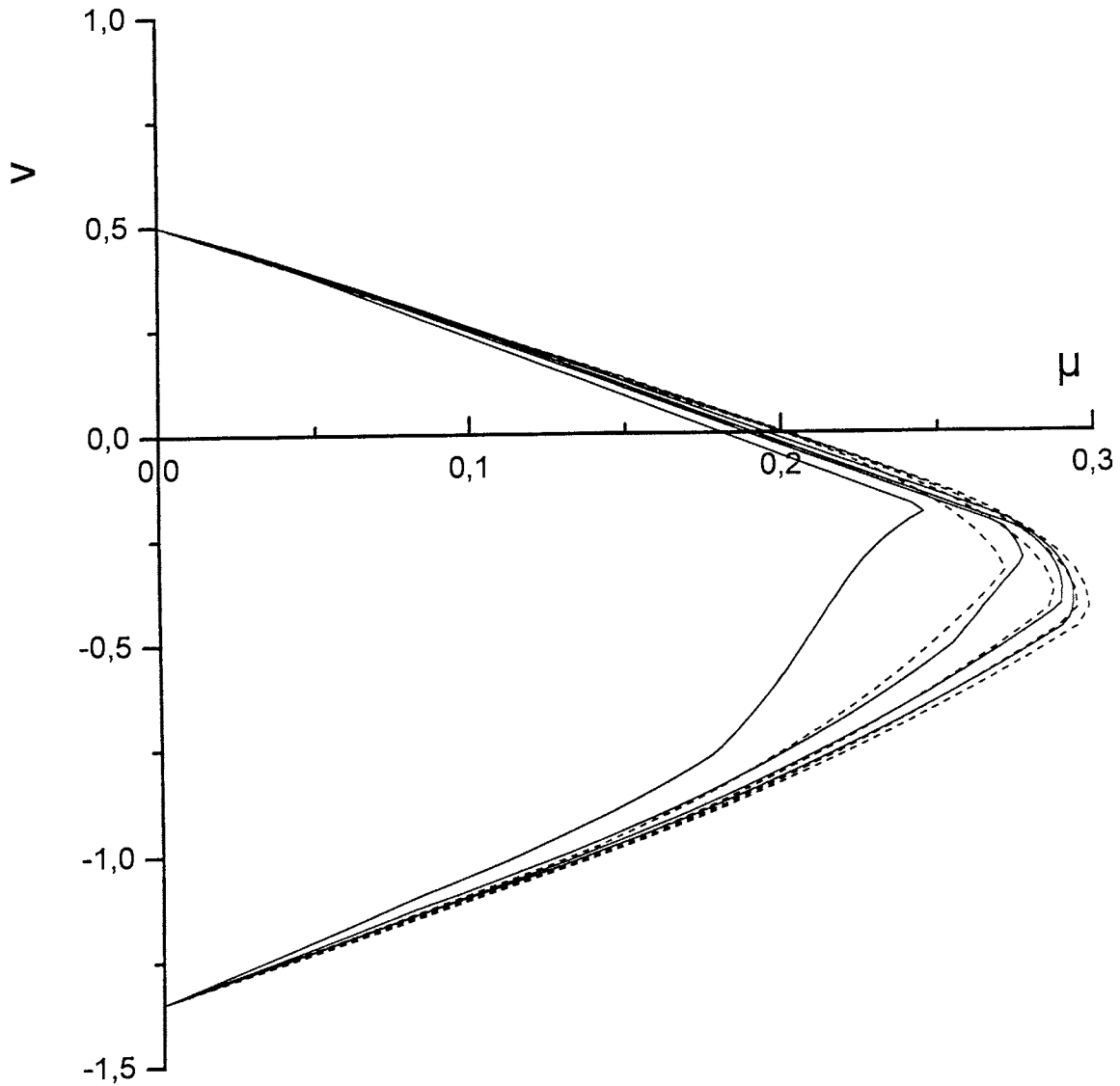
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμποδιατητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.16 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμπτοδιατητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.50$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.10$



$$\omega_1=0.50, \omega_v=0.0, \omega_w=0.20$$

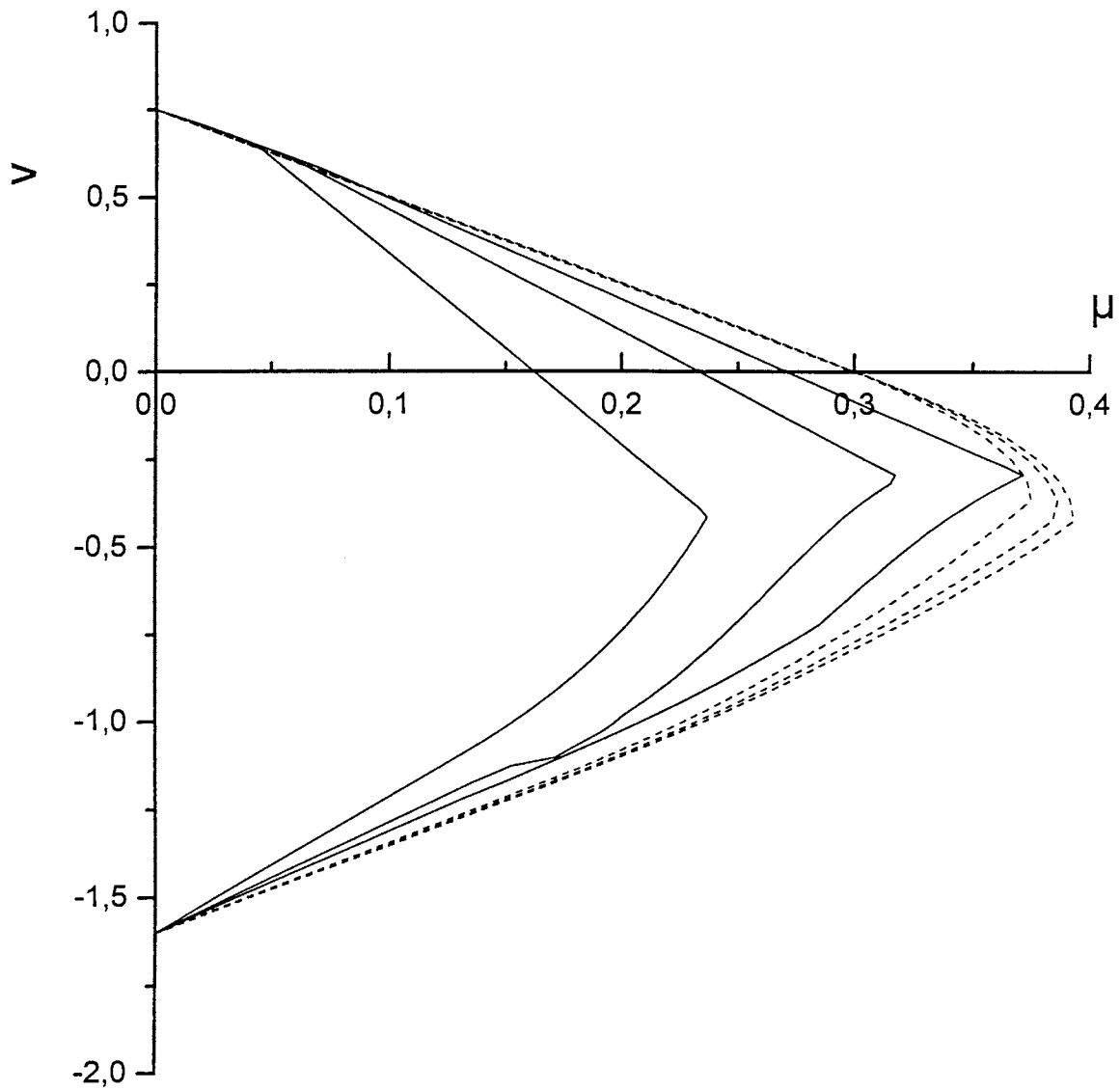
— λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμποδοιατμητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

----- λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.17 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατμητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.50$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.20$



$$\omega_1=0.75, \omega_v=0.0, \omega_w=0.05$$

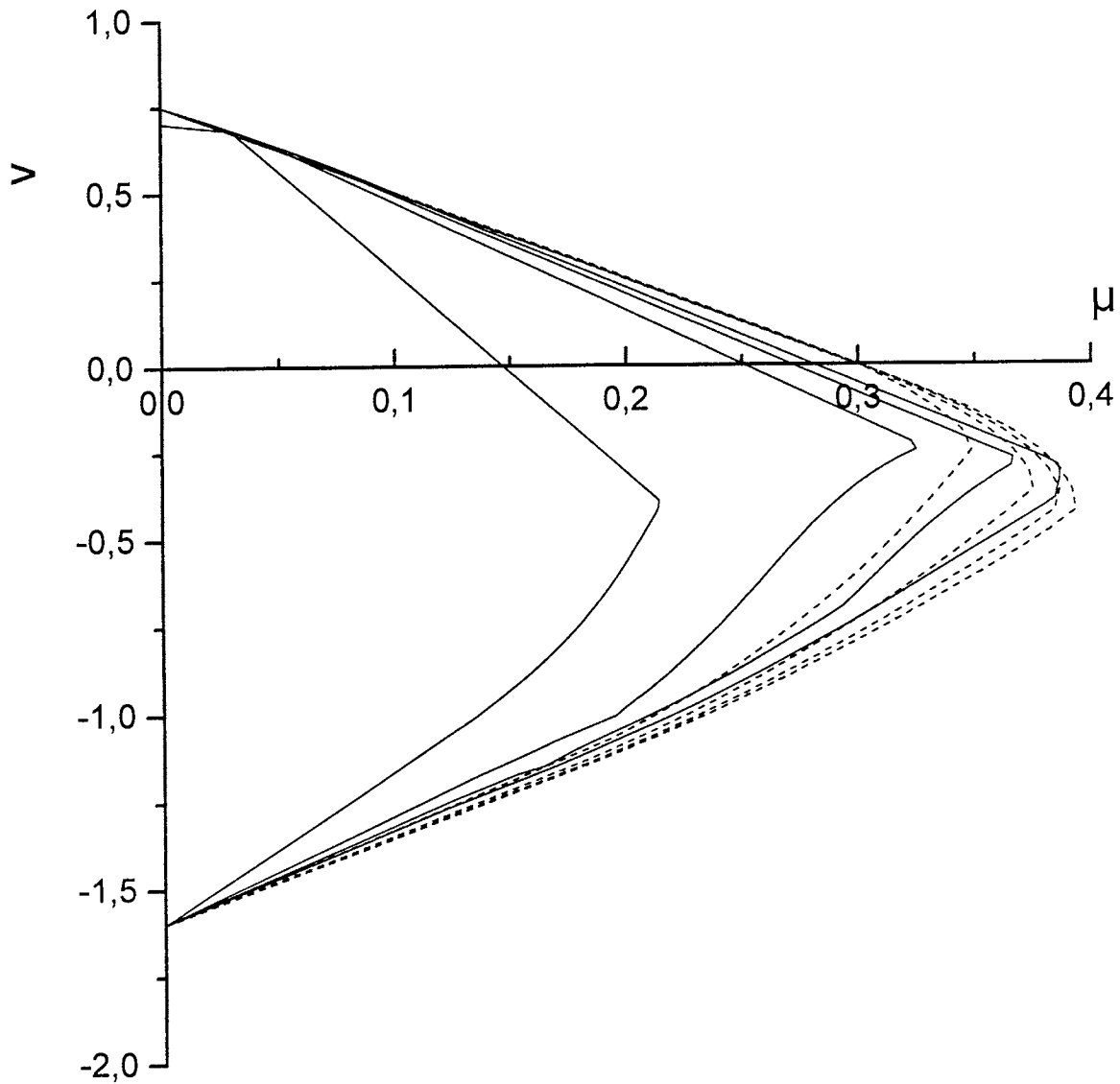
— λ=3, 4, 5

Επιφάνεια καμποδοιατμητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

----- λ=3, 4, 5

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.18 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατμητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.75$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.05$



$$\omega_1=0.75, \omega_v=0.0, \omega_w=0.10$$

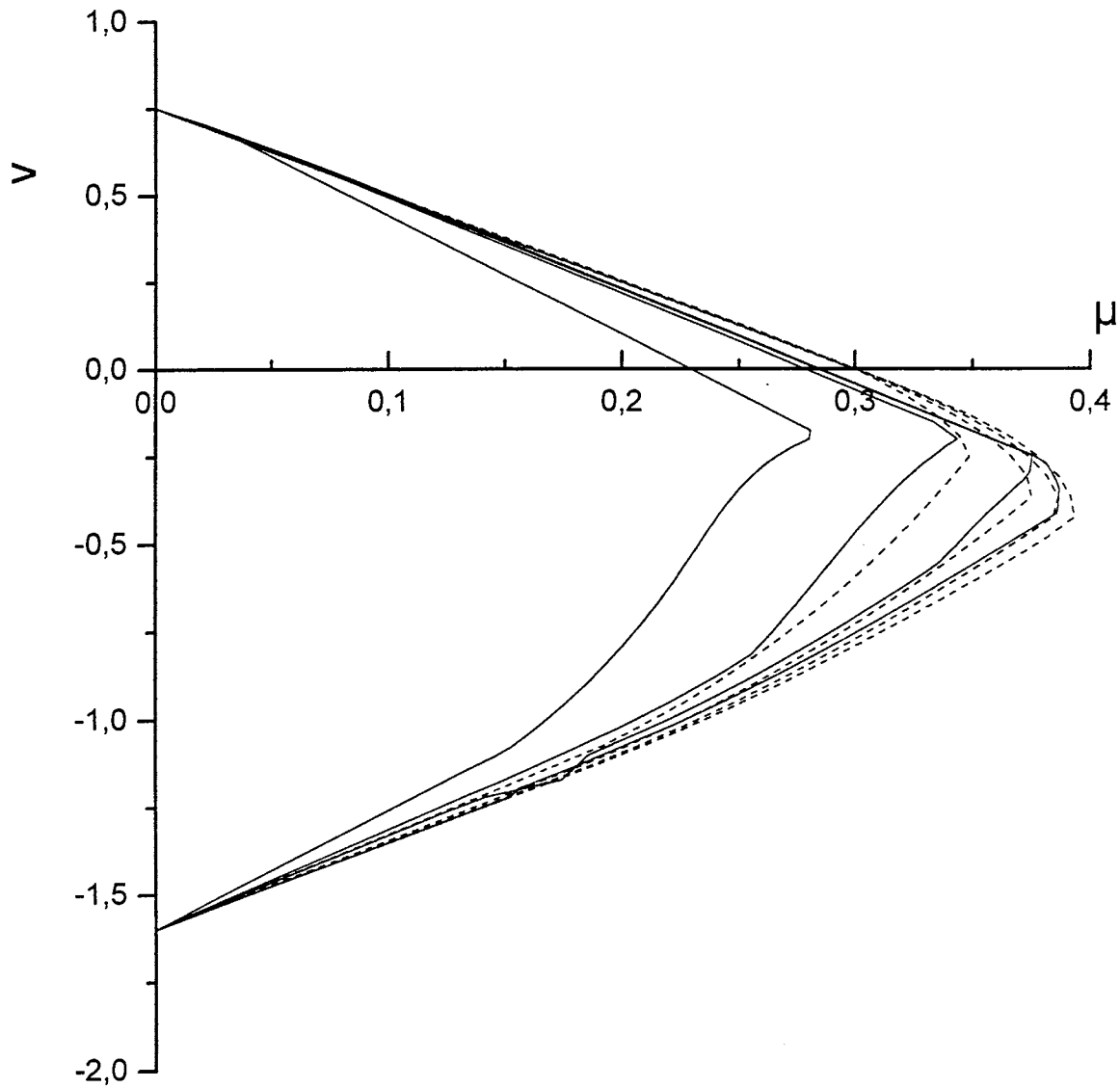
— λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμποδοιατμητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

----- λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.19 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατμητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.75$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.10$



$$\omega_1=0.75, \omega_v=0.0, \omega_w=0.20$$

— λ=2, 3, 4, 5

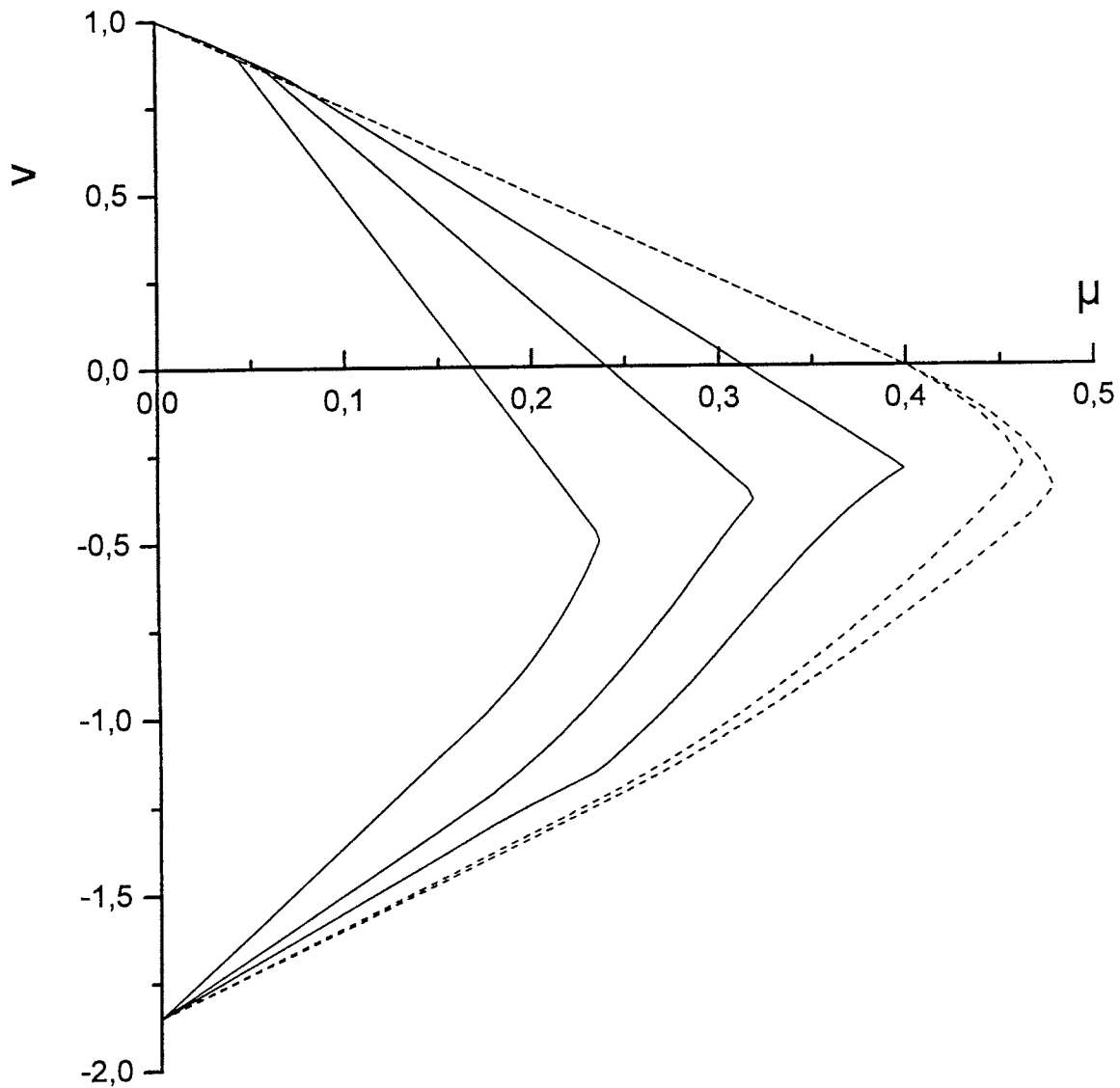
Επιφάνεια καμποδοιατητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

----- λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.20 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.75$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.20$





$$\omega_1=1.0, \omega_v=0.0, \omega_w=0.05$$

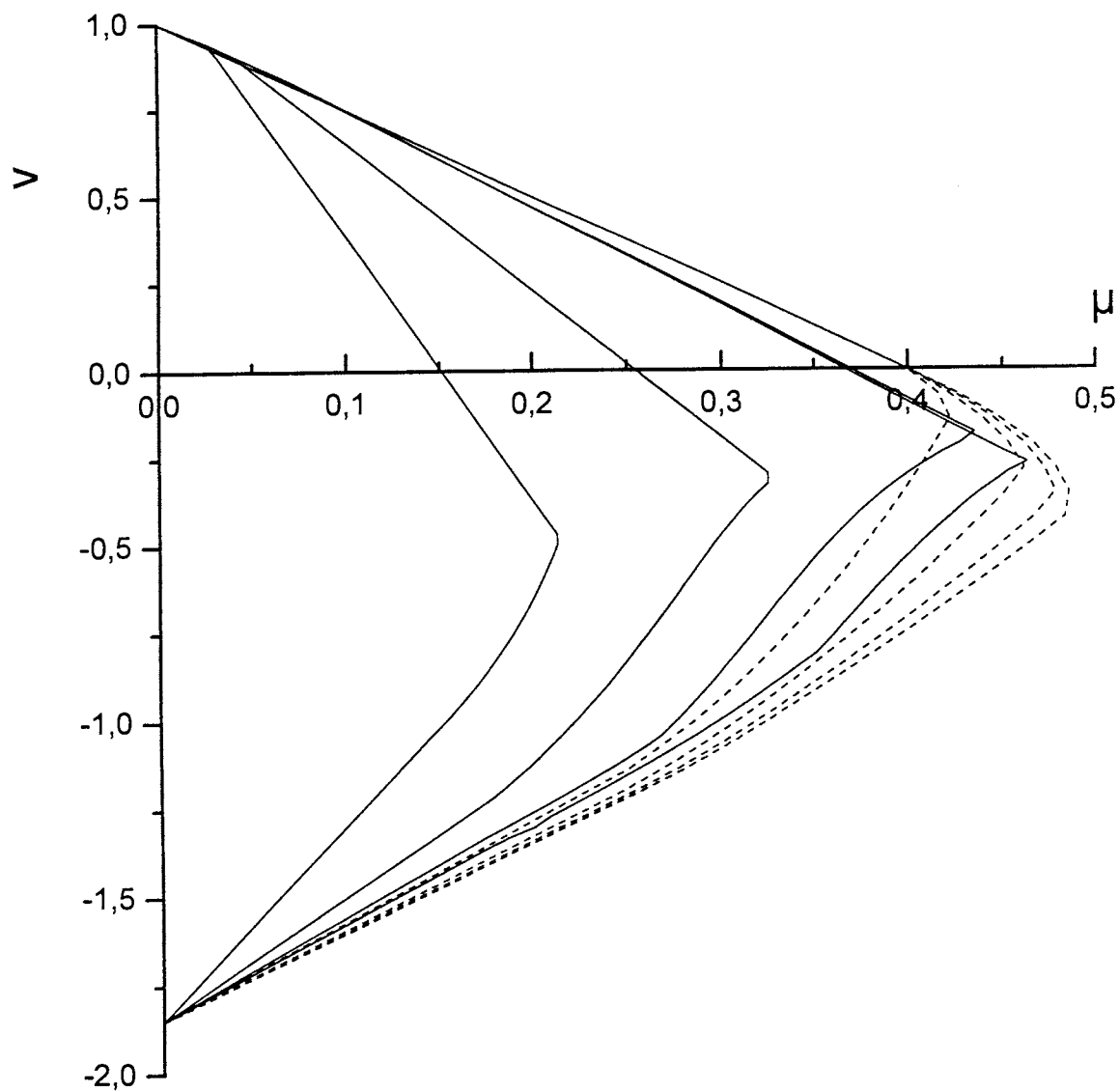
—  $\lambda=3, 4, 5$

Επιφάνεια καμποδοιατμητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

-----  $\lambda=3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.21 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατμητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=1.0$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.05$



$$\omega_1=1.0, \omega_v=0.0, \omega_w=0.10$$

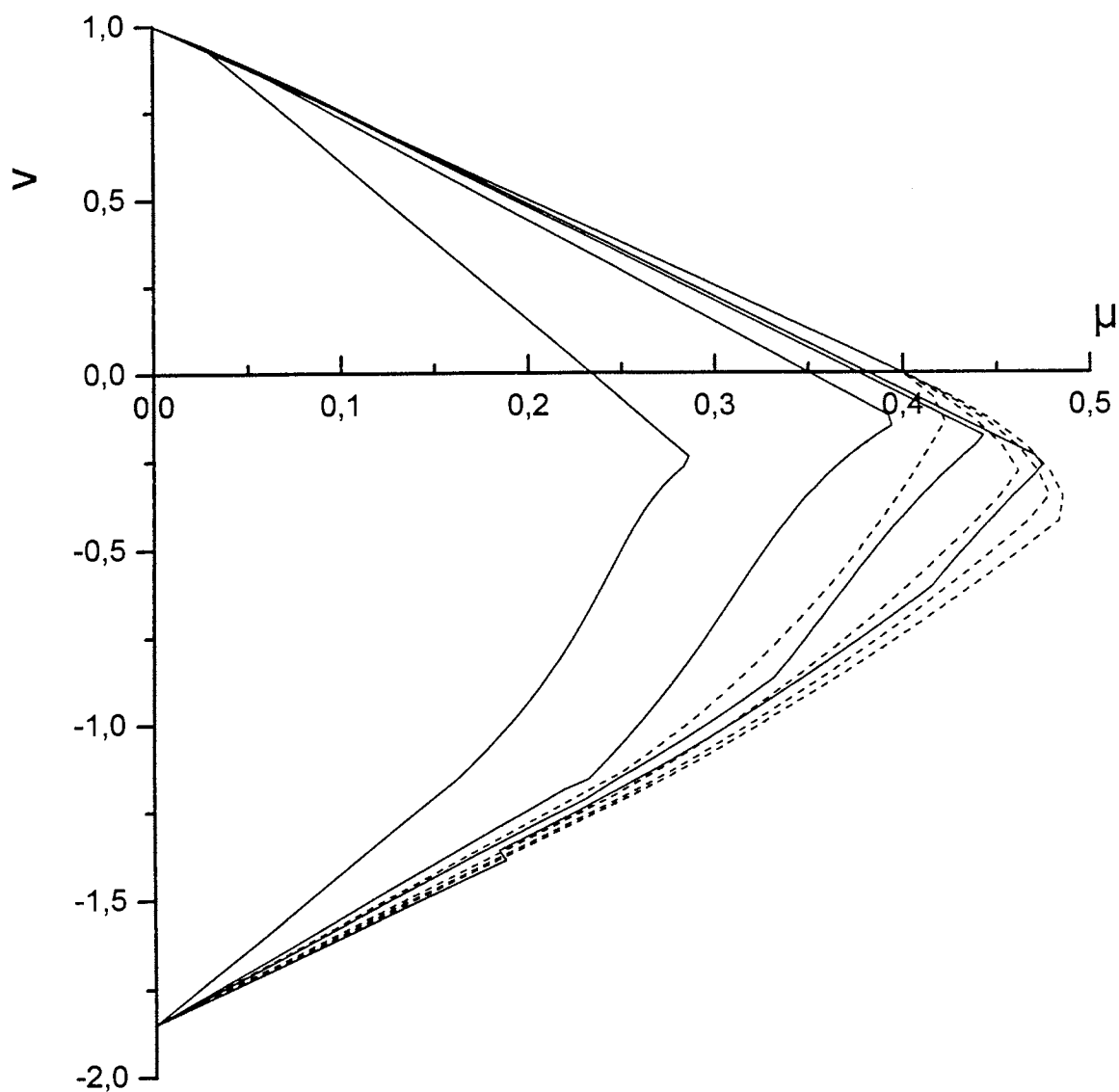
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμποδοιατητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.22 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδοιατητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=1.0$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.10$



$$\omega_1=1.0, \omega_v=0.0, \omega_w=0.20$$

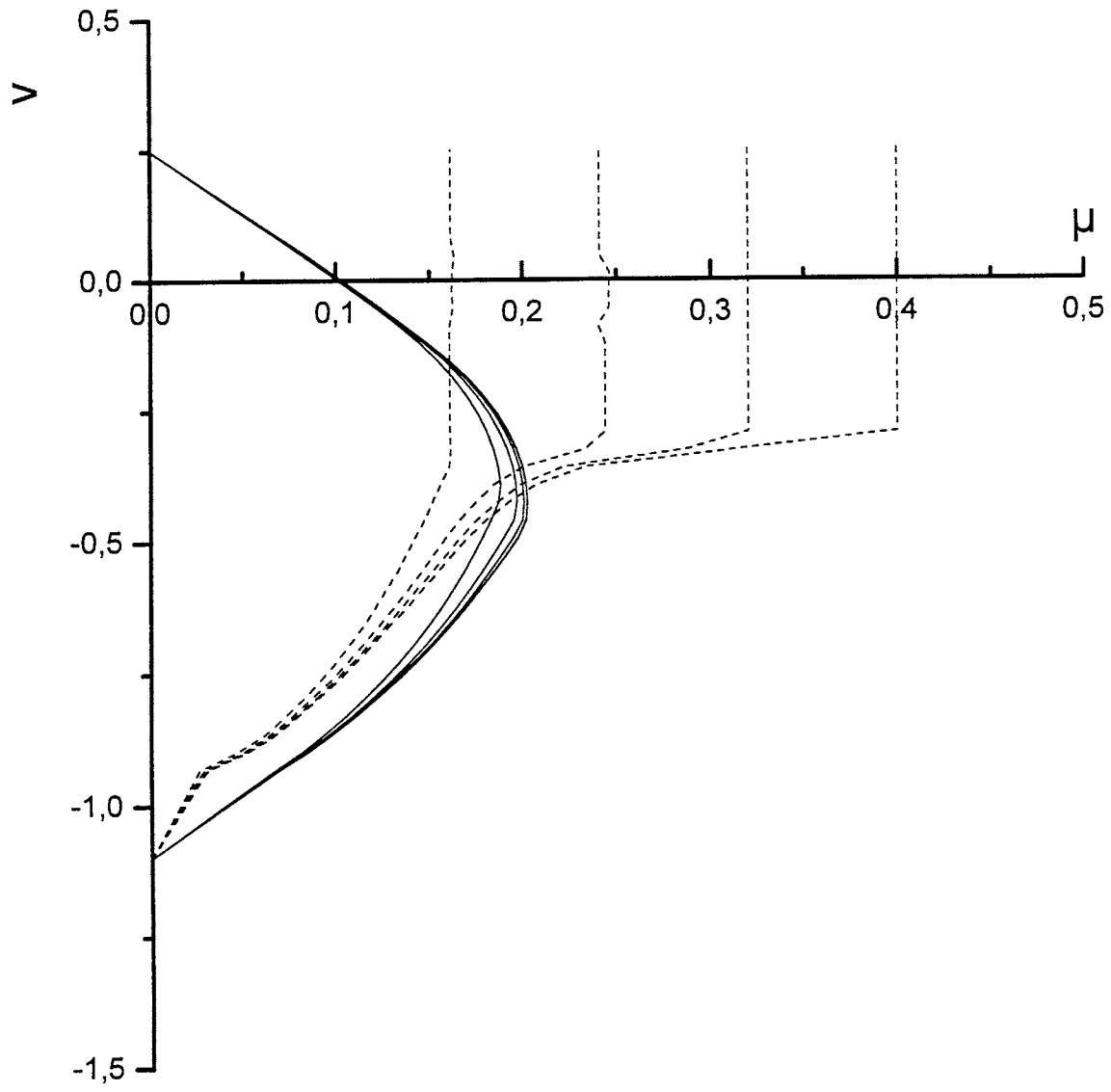
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμποδιατητικής αστοχίας  
(ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος σε  
διαγώνια θλίψη και διαρροή συνδετήρων)

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

Σχήμα 3.23 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμποδιατητική ένταση. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=1.0$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.20$



$$\omega_1=0.25, \omega_v=0.0, \omega_w=0.05$$

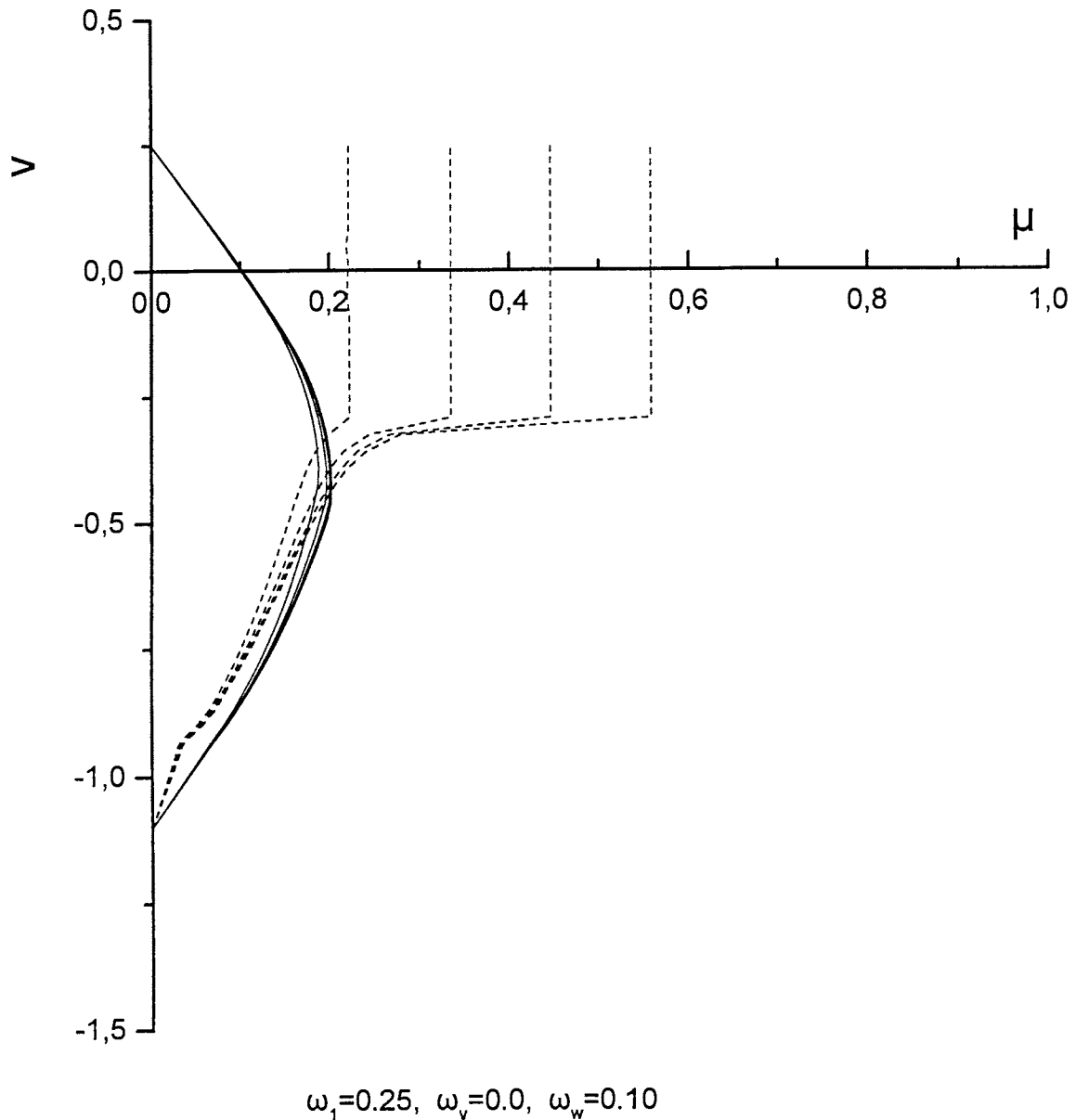
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.24 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.25$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.05$



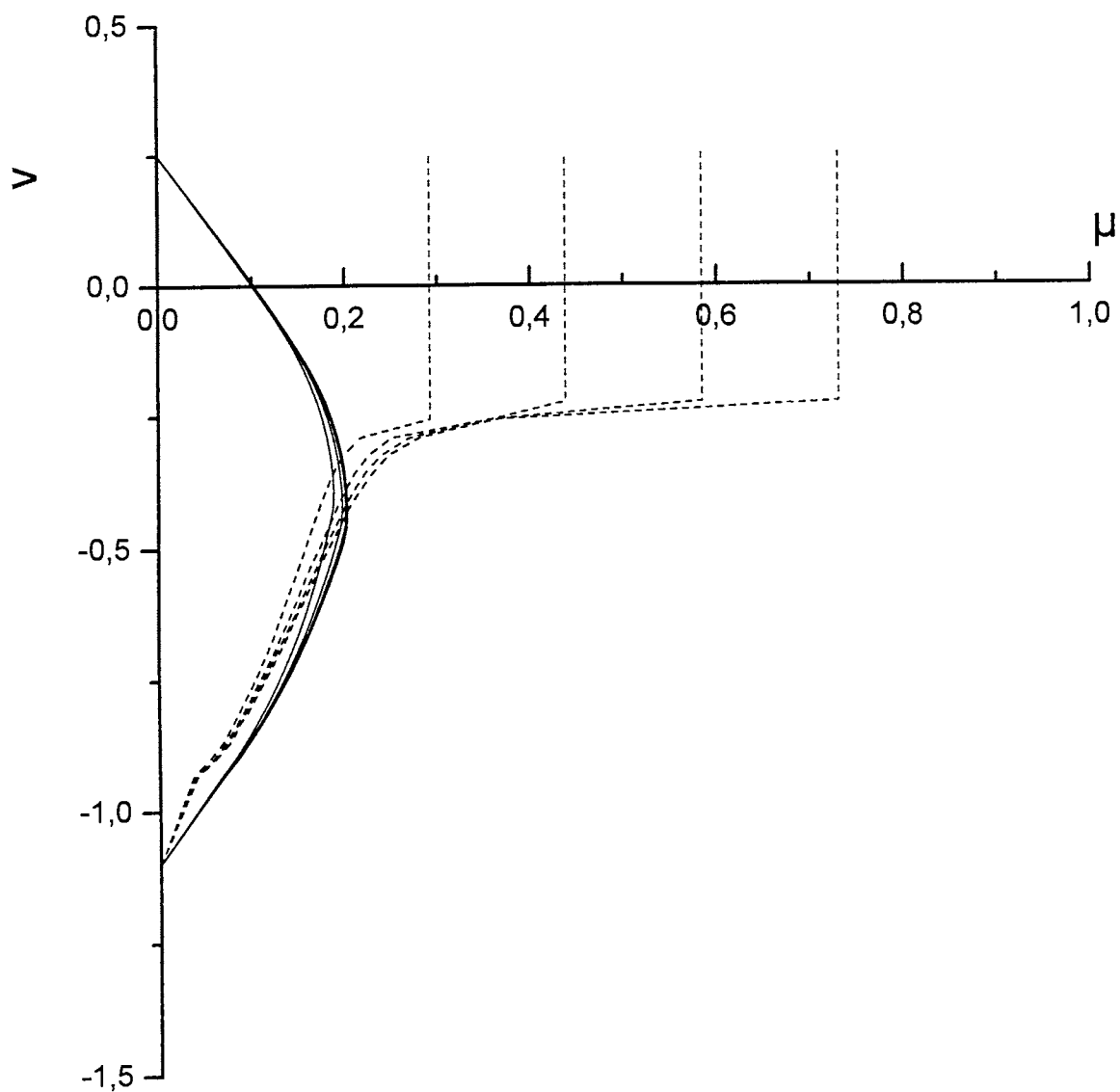
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.25 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική κάμψοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.25$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.10$



$$\omega_1=0.25, \omega_v=0.0, \omega_w=0.20$$

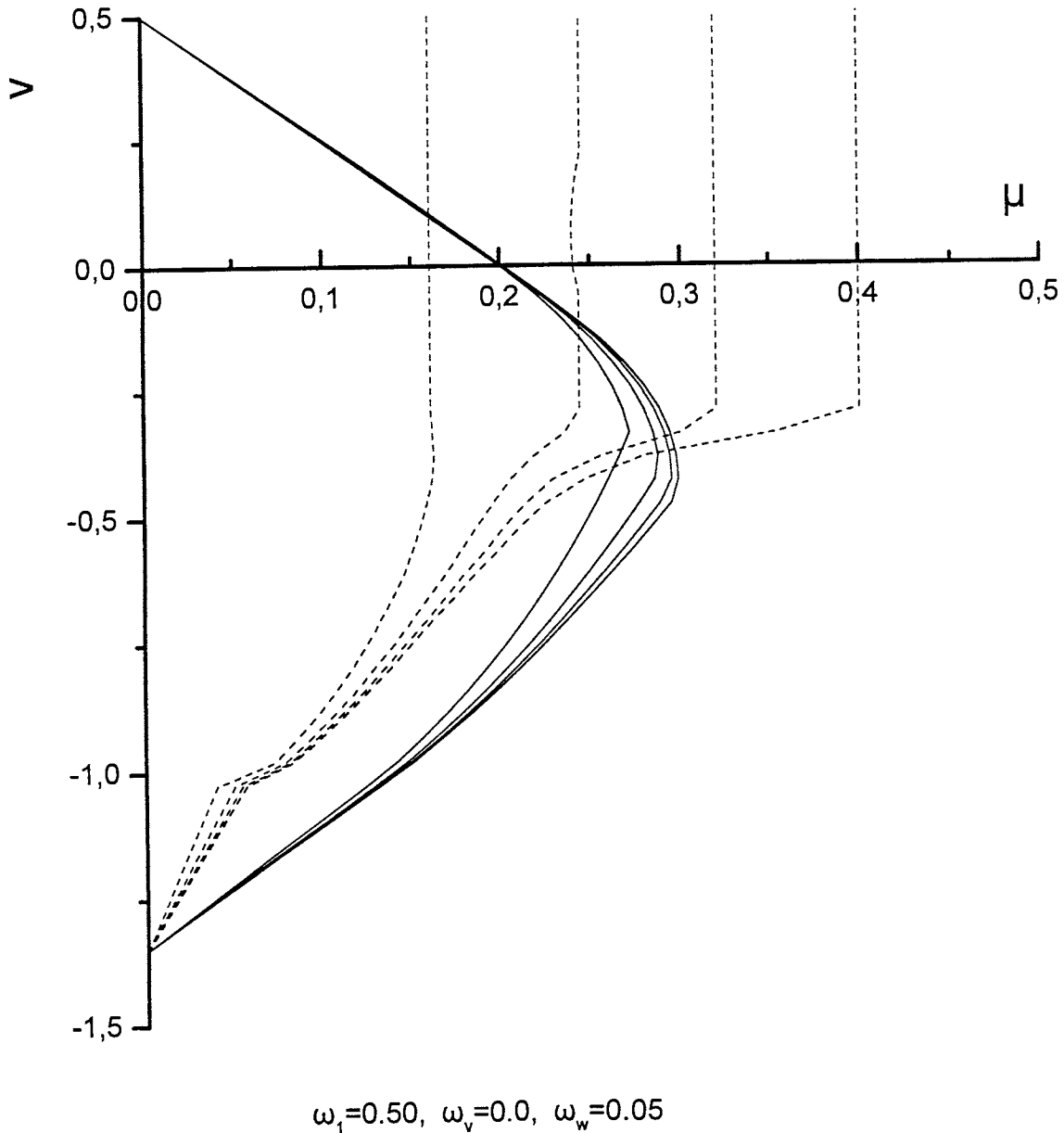
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.26 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.25$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.20$



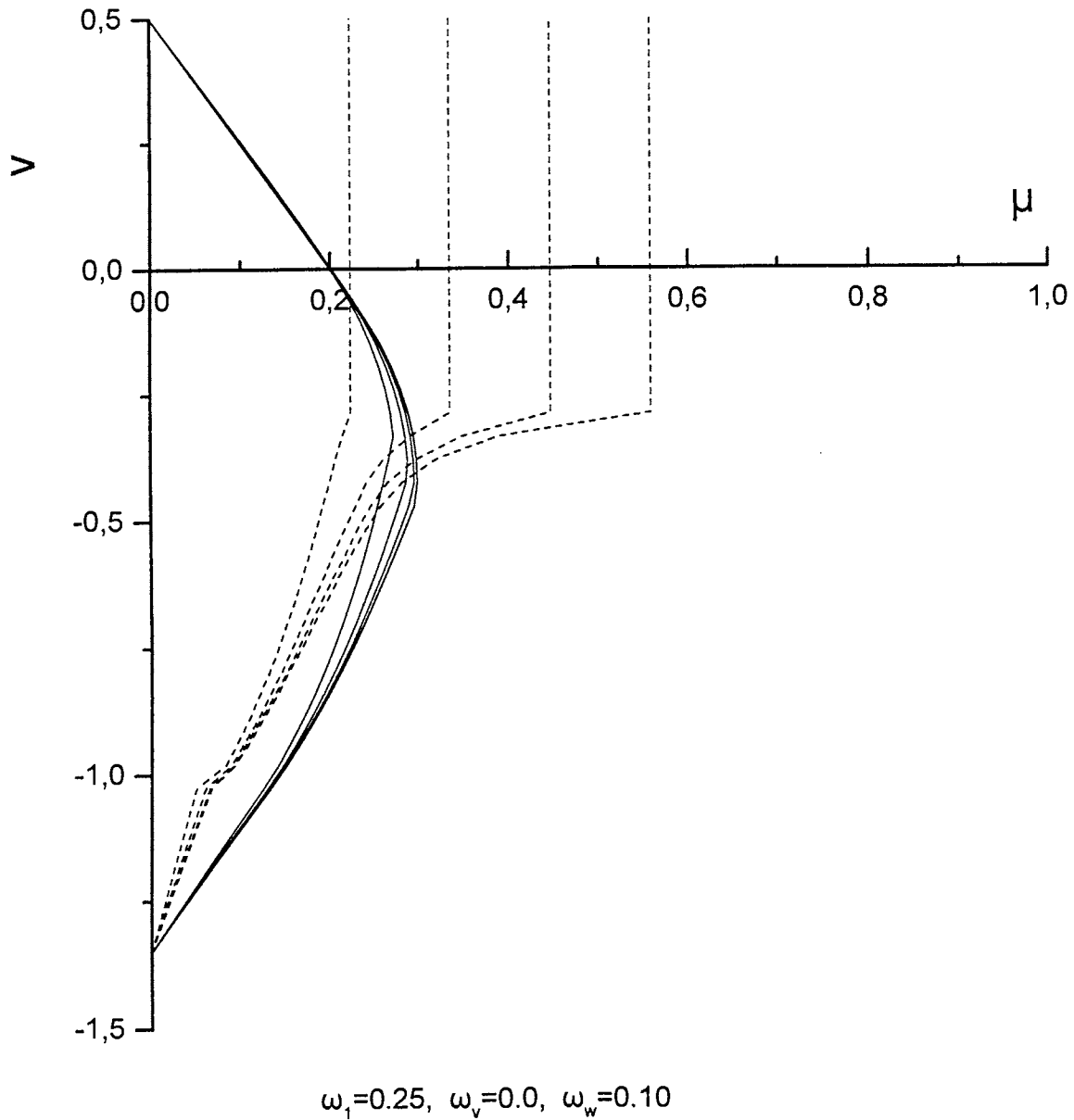
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.27 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική κάμψο-διάτμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.50$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.05$



—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

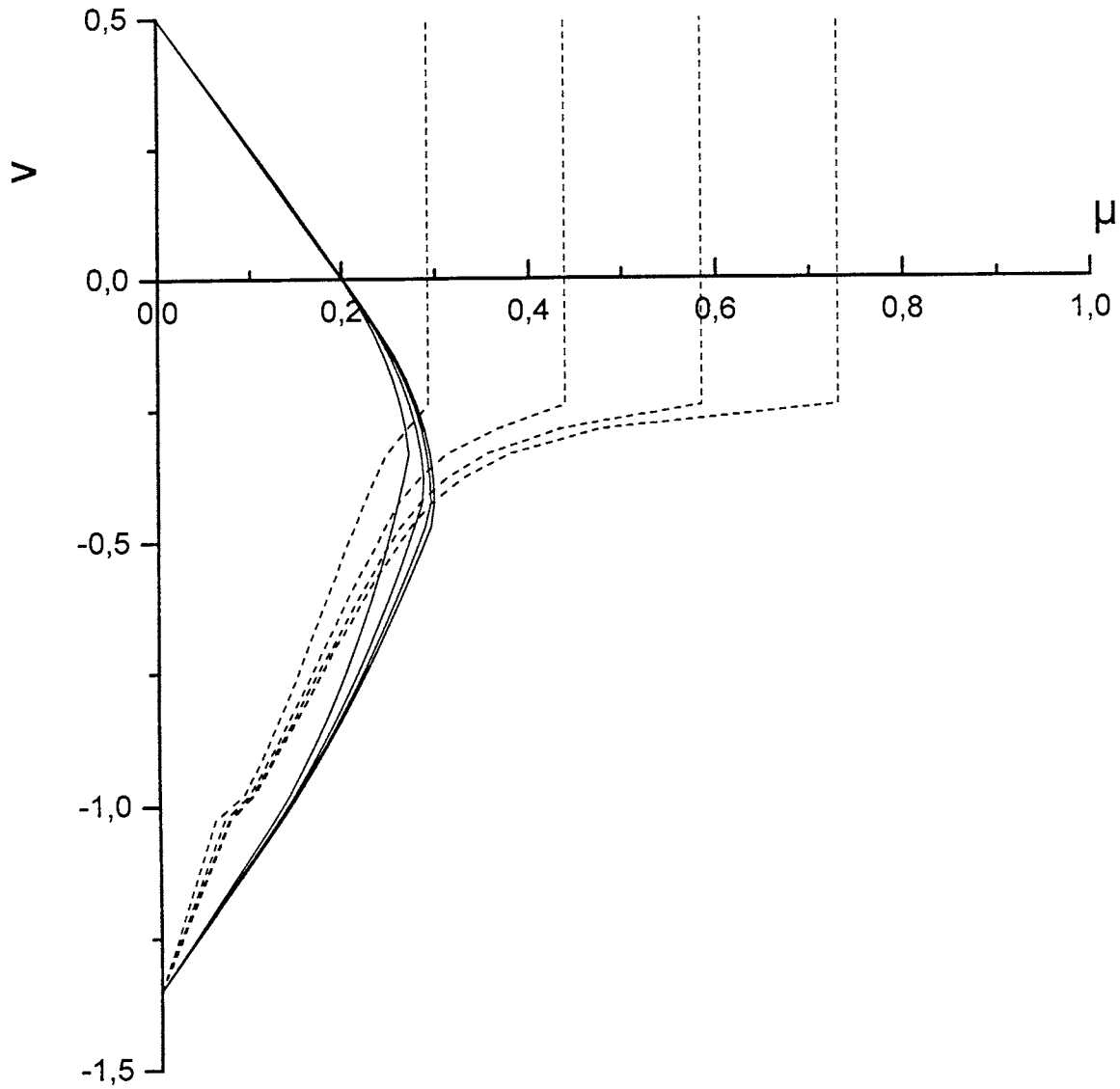
Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.28 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντιμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.50$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.10$





$$\omega_1=0.25, \omega_v=0.0, \omega_w=0.20$$

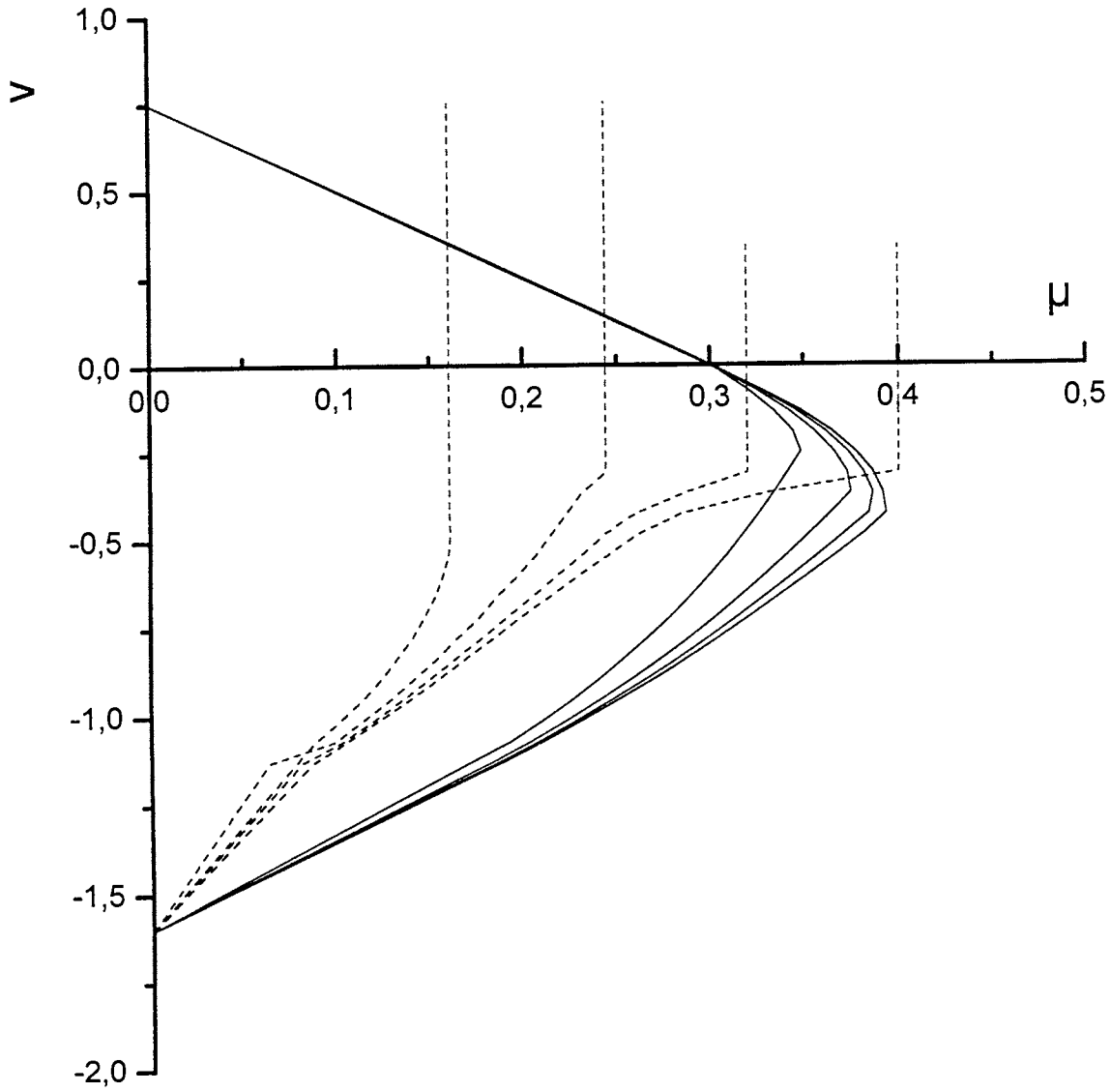
——  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.29 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.50$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.20$



$$\omega_1=0.75, \omega_v=0.0, \omega_w=0.05$$

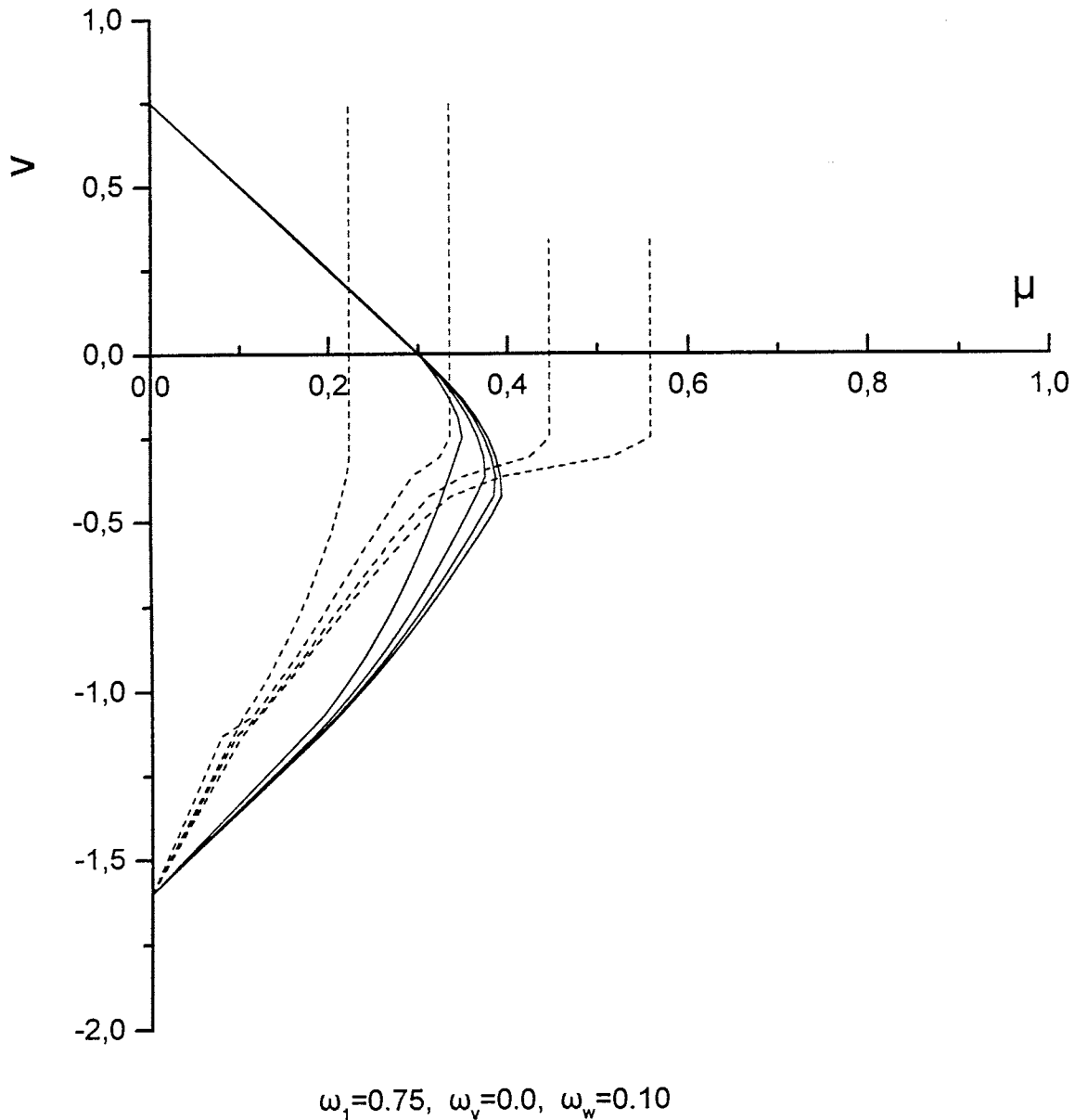
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.30 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.75$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.05$



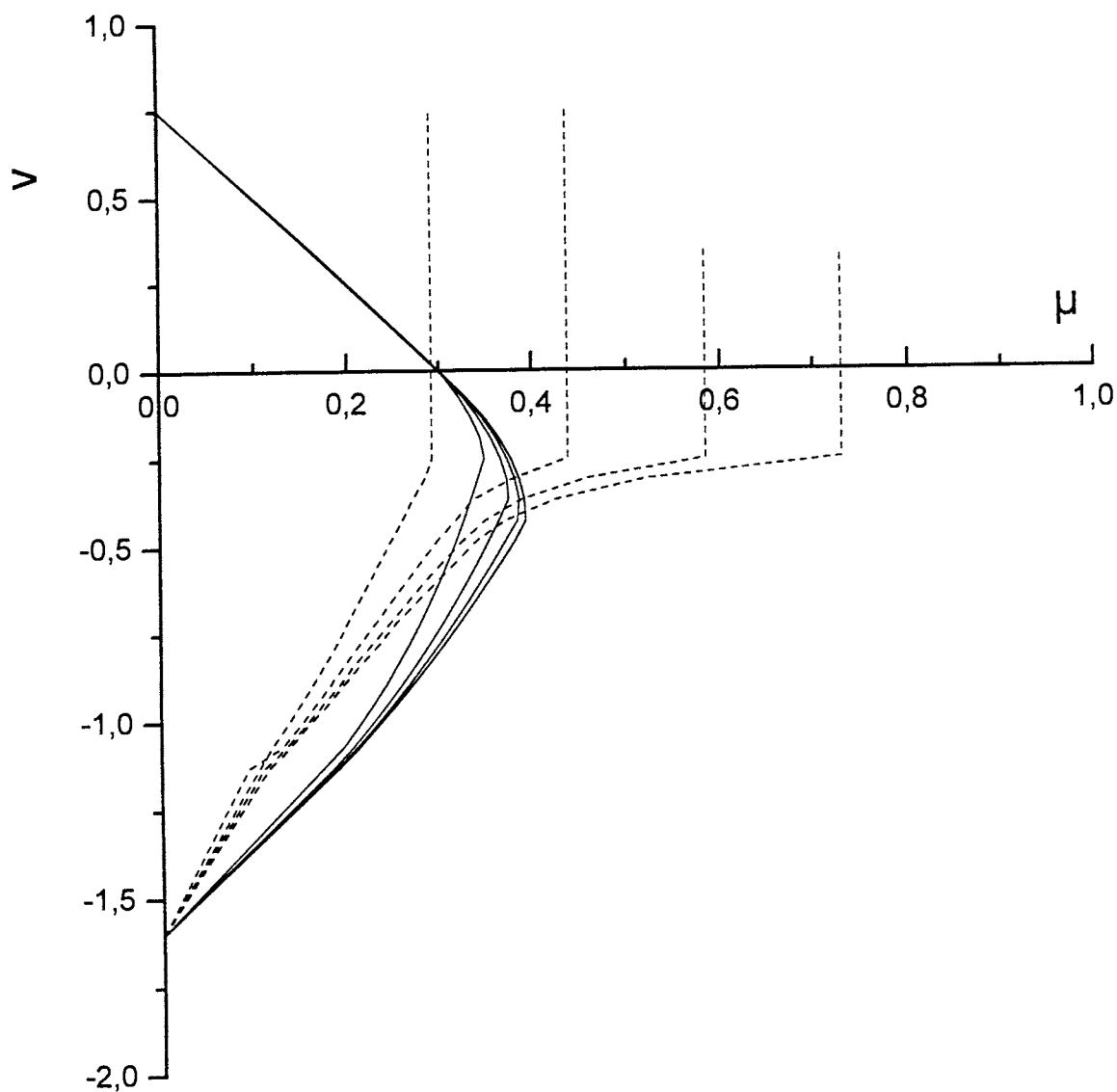
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.31 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.75$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.10$



$$\omega_1=0.75, \omega_v=0.0, \omega_w=0.20$$

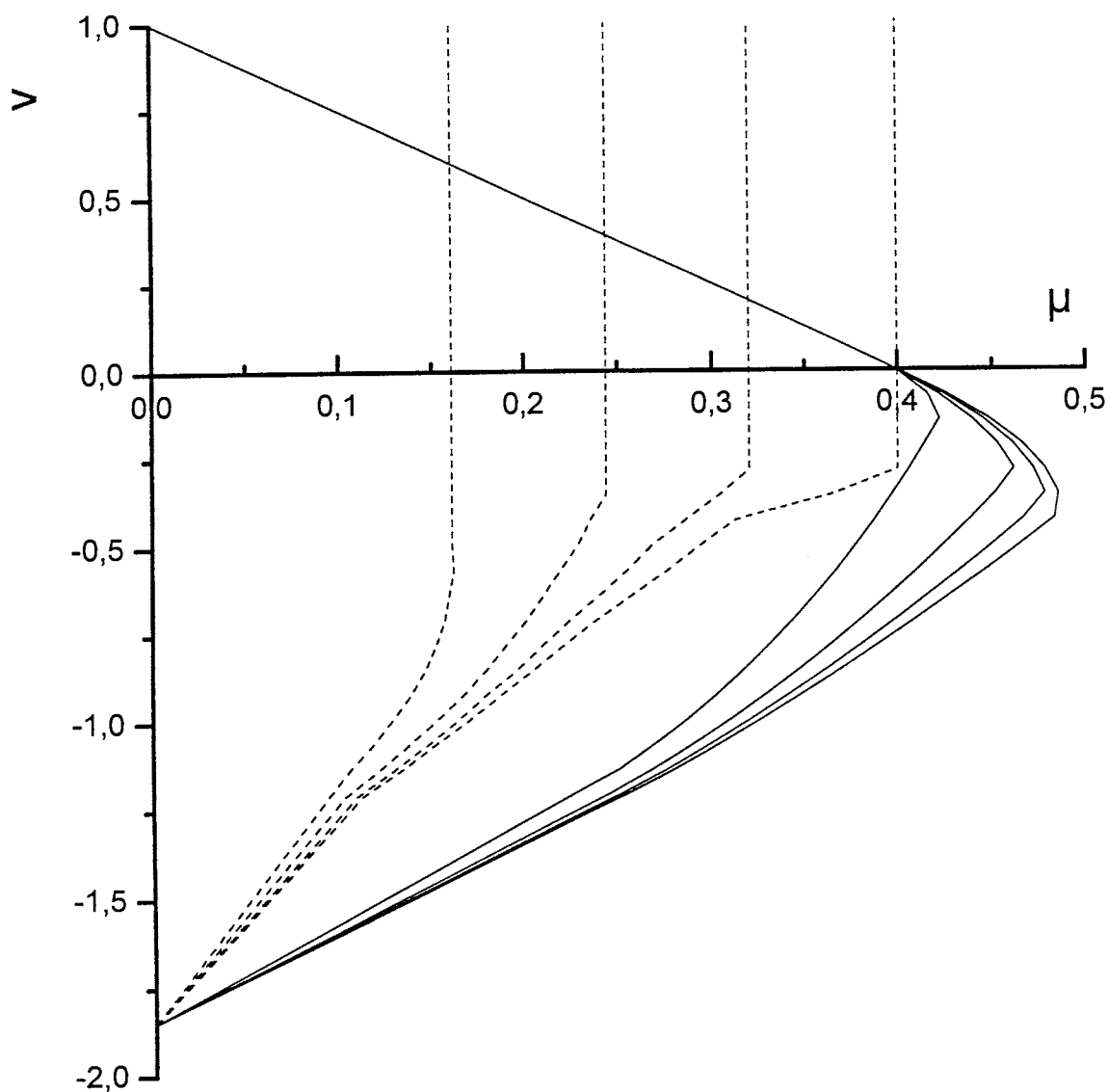
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.32 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική κάμψοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=0.75$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.20$



$$\omega_1=1.0, \omega_v=0.0, \omega_w=0.05$$

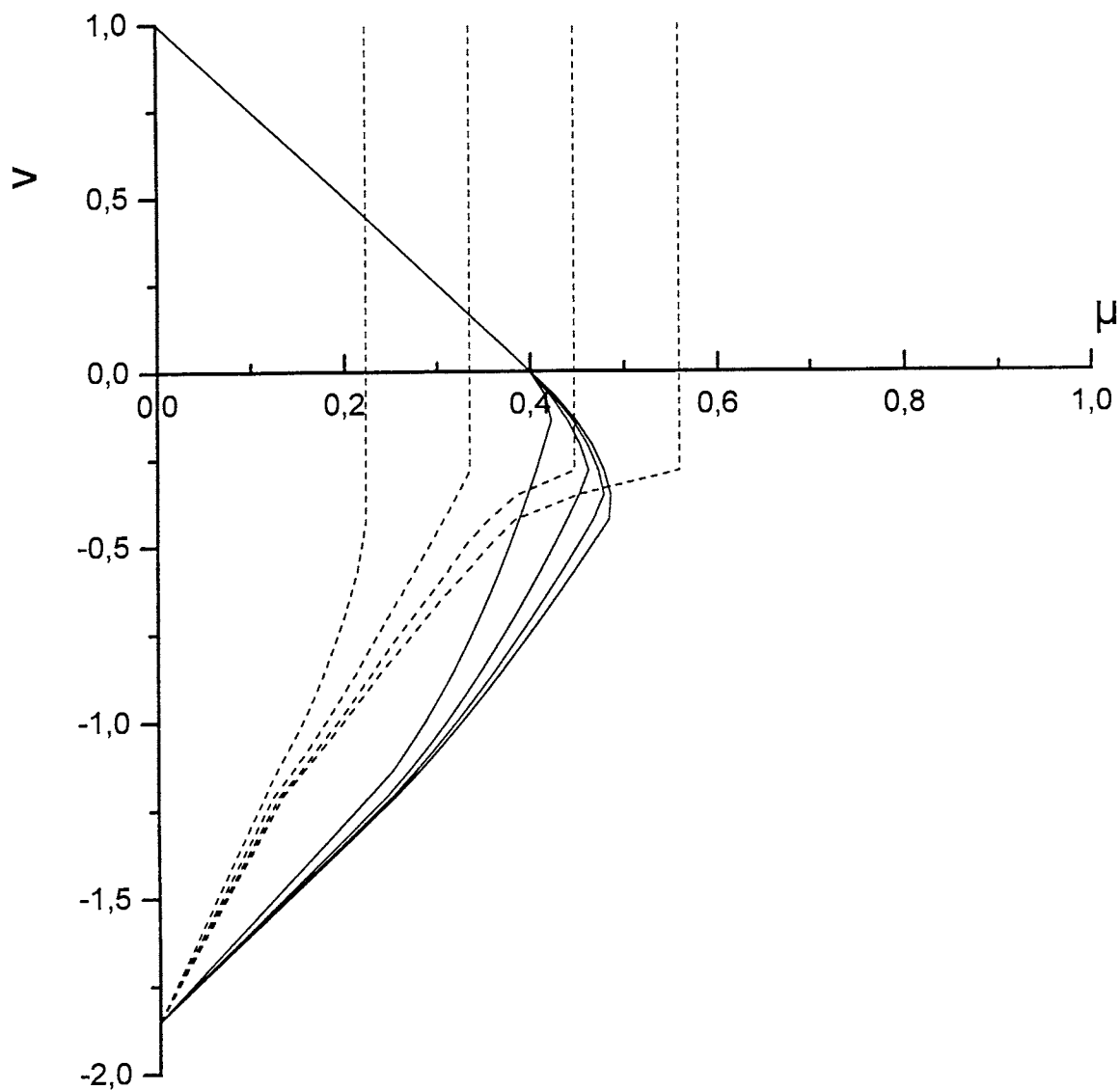
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.33 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=1.0$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.05$



$$\omega_1=1.0, \omega_v=0.0, \omega_w=0.10$$

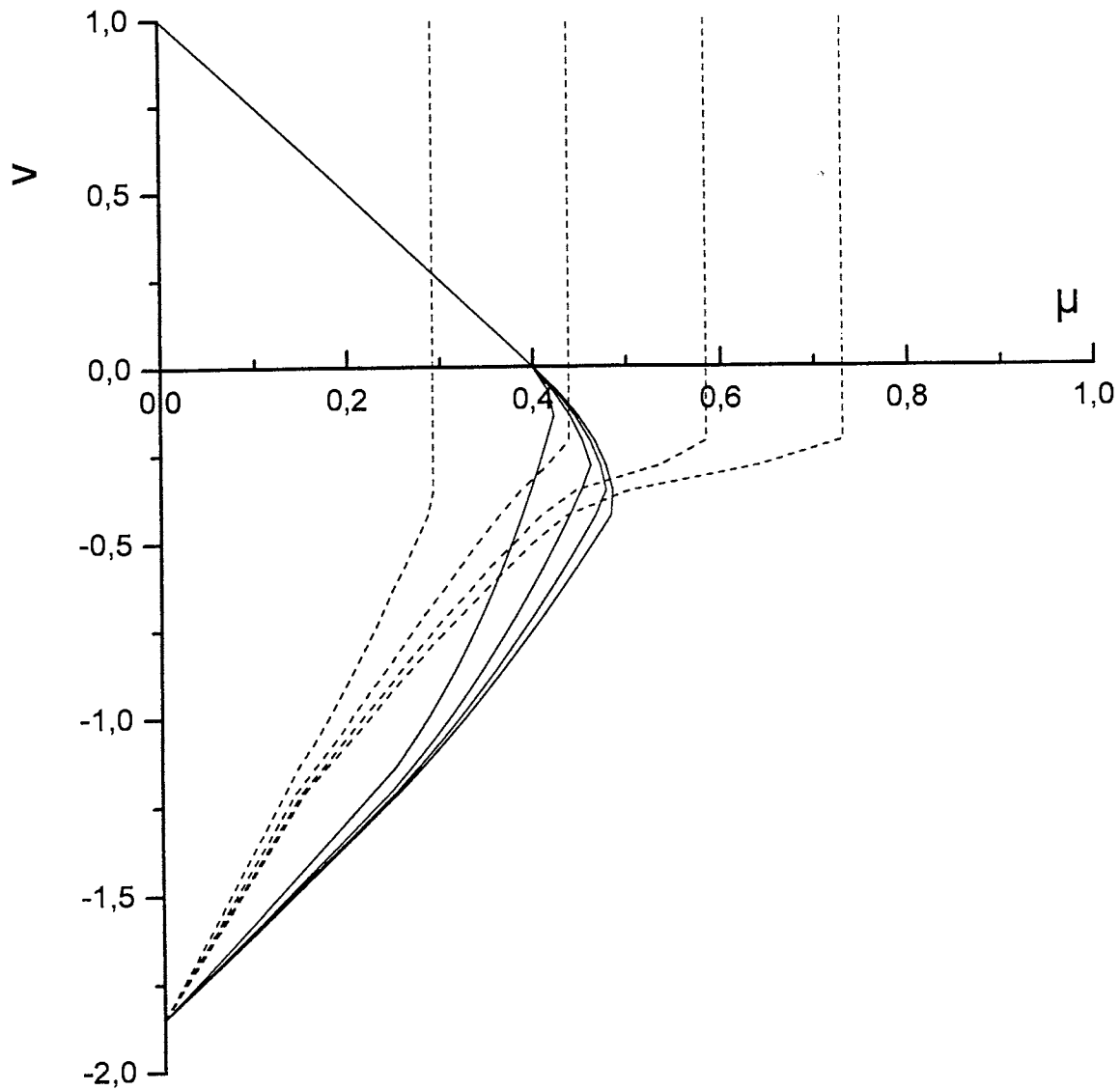
—  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

-----  $\lambda=2, 3, 4, 5$

Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.34 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντιμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλματος  $\omega_1=1.0$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.10$



$$\omega_1=1.0, \omega_v=0.0, \omega_w=0.20$$

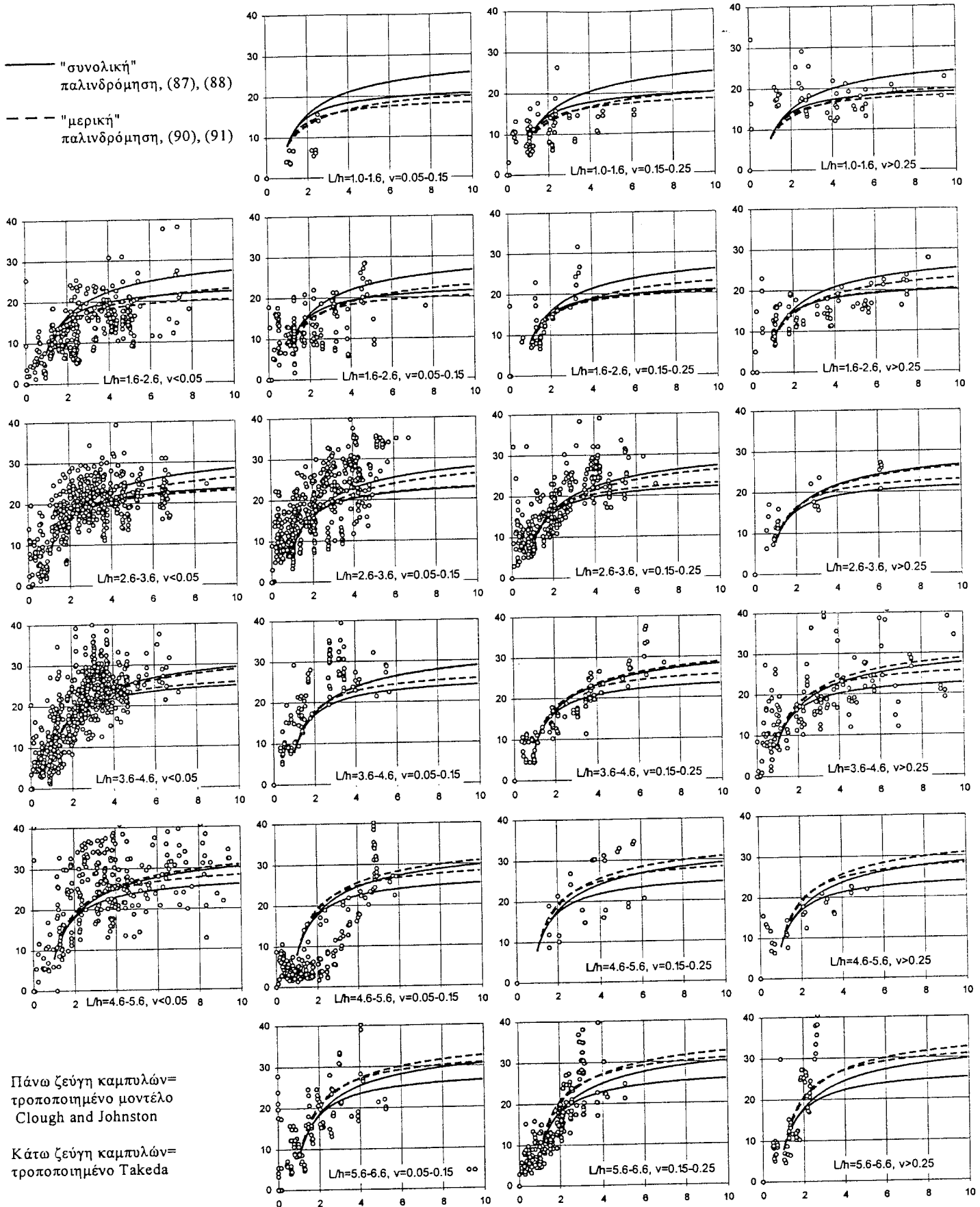
—— λ=2, 3, 4, 5

Επιφάνεια καμπτικής αστοχίας,  
με επιρροή της διάτμησης στη  
θλιβόμενη ζώνη ακραίων διατομών

----- λ=2, 3, 4, 5

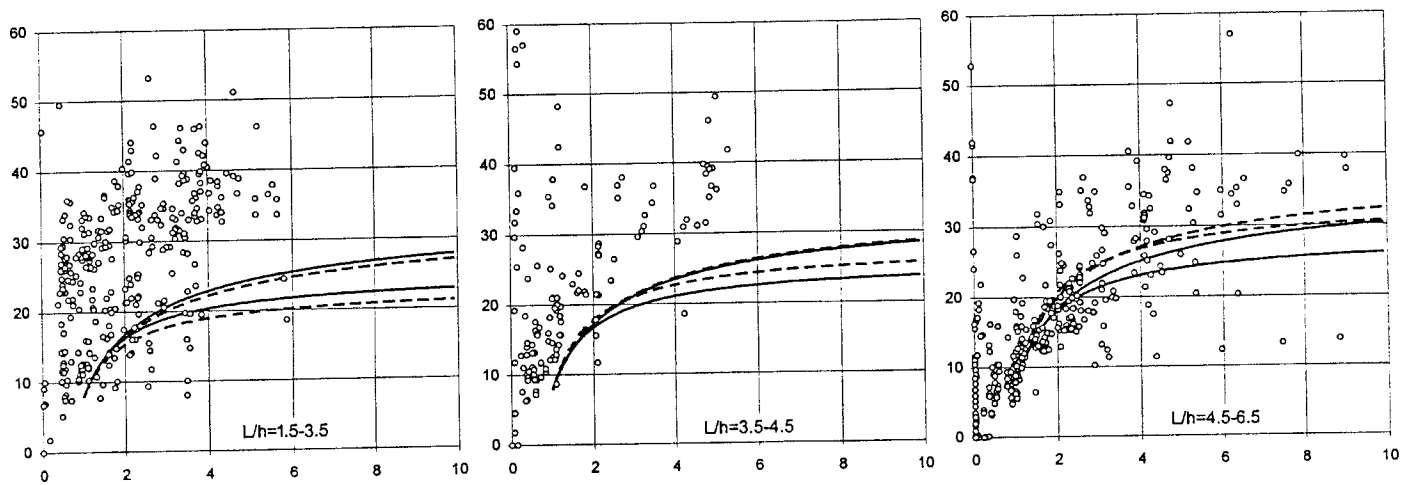
Επιφάνεια διατμητικής αστοχίας  
στο ενδιάμεσο του μέλους  
χωρίς επιρροή της κάμψης

Σχήμα 3.35 Διάγραμμα αστοχίας μέλους οπλισμένου σκυροδέματος σε αντισυμμετρική μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση αγνοώντας τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και διάτμησης στο ενδιάμεσο του μέλους. Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού πέλατος  $\omega_1=1.0$ , μηχανικό ποσοστό συνδετήρων  $\omega_w=0.20$



Σχήμα 3.36 Λόγος απόσβεσης ζ(%) συναρτήσει δείκτη πλαστιμότητας μ σε μονοαξονικά πειράματα. Πειραματικά αποτελέσματα συγκρινόμενα με καμπύλες «συνολικής» παλινδρόμησης των εξ. (87), (88) (συνεχείς γραμμές) και «μερικής» παλινδρόμησης των εξ. (90), (91) (διακεκεκομένες). Πάνω: τροποποιημένο μοντέλο Clough & Johnson (1966), κάτω: τροποποιημένο μοντέλο Takeda (1970).





Σχήμα 3.37 Λόγος απόσβεσης  $\zeta$ (%) συναρτήσει δείκτη πλαστιμότητας  $\mu$  για διαζονικά πειράματα και σύγκριση με τις τέσσερις καμπύλες παλινδρόμησης του Σχ. 3.36.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΜΕ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

#### 4.1. Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο αναπτύσσονται προσομοιώματα για την ανελαστική συμπεριφορά διατομών και μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό γενικευμένη καμπτοδιατμητική ένταση σε τρεις διαστάσεις, δηλ. υπό οποιαδήποτε ιστορία φόρτισης, περιλαμβανομένης της ανακύκλισης, που αποτελείται από διαξονικές ροπές και τέμνουσες και αξονική δύναμη.

Το πρώτο προσομοίωμα που αναπτύσσεται και εφαρμόζεται είναι ένα προσομοίωμα ινών, σε επίπεδο διατομής τυχόντος σχήματος. Το προσομοίωμα αυτό ακολουθεί τη γενική διατύπωση που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 2.2 του Κεφαλαίου 2 και ολοκληρώνεται σε προσομοίωμα μέλους, με την ανάπτυξη μιας πρωτότυπης παραλλαγής της μεθόδου της κατανεμημένης ανελαστικότητας που βασίζεται σε πολυγραμμική κατά μήκος του μέλους μεταβολή της ευκαμψίας σε τρεις διαστάσεις.

Παρ' όλο που αυτό το προσομοίωμα ινών θα μπορούσε να υιοθετηθεί σαν το τελικό προσομοίωμα μέλους υπό γενικευμένη ένταση σε τρεις διαστάσεις, χρησιμοποιείται εδώ ουσιαστικά μόνο για την κατασκευή της επιφάνειας που ορίζει την οριακή αντοχή διατομής υπό διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη. Αυτή η επιφάνεια οριακής αντοχής χρησιμοποιείται κατόπιν, μετά από την τροποποίηση που προτείνεται στο Κεφάλαιο 3 για να ληφθεί υπόψη η επιρροή της τέμνουσας στην αντοχή στοιχείων μικρού λόγου διάτμησης, σαν το βασικό συστατικό του τελικού προσομοιώματος μέλους υπό γενικευμένη τρισδιάστατη ένταση, που είναι όχι μόνον καμπτική, όπως στο προσομοίωμα ινών, αλλά (τουλάχιστον για στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης) καμπτοδιατμητική.

Πέραν της γενικότητάς του, το τελικό προσομοίωμα μέλους τύπου “οριακής επιφάνειας”, έχει πολύ μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις (τόσο από απόψεως μνήμης όσο και από απόψεως χρόνου  $H/Y$ ) από το προσομοίωμα ινών.

## 4.2. Προσομοίωμα ινών για διατομές και μέλη οπλισμένου σκυροδέματος υπό γενικευμένη καμπτική ένταση

### 4.2.1. Εισαγωγή

Επειδή η γενική διατύπωση των προσομοιωμάτων ινών δόθηκε ήδη στην Ενότητα 2.2 του Κεφ. 2, παρακάτω περιγράφονται μόνον οι ιδιαιτερότητες του παρόντος προσομοιώματος, οι οποίες και εντοπίζονται στους καταστατικούς νόμους των υλικών, χάλυβα και σκυροδέματος, υπό μονοαξονική ένταση.

Η ακρίβεια και γενικότερα η αντιπροσωπευτικότητα της μεθόδου είναι συνάρτηση των καταστατικών νόμων που υιοθετούνται για τα επιμέρους υλικά. Η διακριτοποίηση της διατομής σε ίνες επιτρέπει τη χρήση διαφορετικού καταστατικού νόμου για το περισφιγμένο ή μη σκυρόδεμα, καθώς και την προσομοίωση του φαινομένου της αποφλοίωσης. Για την υλοποίηση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω καταστατικοί νόμοι υλικών.

### 4.2.2. Νόμος σ-ε του σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη μονοαξονική ένταση

Ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται για το σκυρόδεμα αποτελεί παραλλαγή του προσομοιώματος των Karsan and Jirsa (1964) που περιγράφει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος τόσο σε μονοτονική όσο και σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η περιβάλλουσα αντοχής σε μονοτονική θλιπτική φόρτιση αποτελείται από μια παραβολή μέχρι την κορυφή του διαγράμματος  $\sigma$ — $\varepsilon$ , με ευθύγραμμο φθίνοντα κλάδο κατόπιν (Σχήμα 4.1 (α)):

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \left( 2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\sigma}{f_c} = 1 - Z(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (2)$$

όπου  $f_c$  είναι η κυλινδρική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,  $\varepsilon_0$  η παραμόρφωση του σκυροδέματος που αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση  $f_c$ , και  $Z$  η κλίση του φθίνοντος κλάδου του διαγράμματος  $\sigma$ — $\varepsilon$ .

Η επίδραση της περισφιγξης από τους συνδετήρες (λόγω της προκαλούμενης τριαξονικής έντασης) στο διάγραμμα  $\sigma$ — $\varepsilon$  του σκυροδέματος, λαμβάνεται υπόψη μέσω του συντελεστή  $\beta$  του Model Code 1990 των CEB/FIP και του Ευρωκώδικα 8:

$$\beta = \min(1 + 2.5\alpha\omega_w, 1.125 + 1.25\alpha\omega_w) \quad (3)$$

όπου  $\omega_w$  είναι το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων, ίσο με:

$$\omega_w = \frac{A_{sw}f_{yw} \sum l_w}{sb_c h_c f_c} \quad (4)$$

όπου  $A_{sw}$  και  $\sum l_w$  η διατομή του σκέλους και το συνολικό μήκος σκελών των συνδετήρων,  $s$  η απόσταση των συνδετήρων κατά μήκος του άξονα του μέλους,  $b_c$ ,  $h_c$  οι διαστάσεις του εγκιβωτισμένου από τους συνδετήρες πυρήνα του σκυροδέματος, και  $f_{yw}$  η τάση διαρροής των συνδετήρων.

Ο συντελεστής  $\alpha$  εκφράζει την επιρροή της πυκνότητας των διαμήκων ράβδων και των συνδετήρων, στο βαθμό περισφιγξης του σκυροδέματος:

$$\alpha = \left(1 - \frac{8}{3n}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_c}\right) \quad (5)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των διαμήκων ράβδων σε γωνία συνδετήρα στην περίμετρο της διατομής.

Η κορυφή του διαγράμματος  $\sigma$ - $\epsilon$  του σκυροδέματος είναι σε τάση  $f_c^* = \beta f_c$  και παραμόρφωση  $\epsilon_o^* = \beta^2 \epsilon_o$ , όπου  $\epsilon_o = 0.002$  (παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη κορυφή του διαγράμματος  $\sigma$ - $\epsilon$ ). Η κλίση του φθίνοντα κλάδου ισούται με:

$$Z' = \frac{\beta - 0.85}{\beta(0.1\alpha\omega_w + 0.0035 - \epsilon_o^*)} \quad (6)$$

Ετσι, η καταστατική εξίσωση τάσης-παραμόρφωσης για περισφιγμένο σκυρόδεμα σε μονοαξονική θλίψη γίνεται:

$$\frac{\sigma}{f_c^*} = \frac{\epsilon}{\epsilon_o^*} \left(2 - \frac{\epsilon}{\epsilon_o^*}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\sigma}{f_c^*} = 1 - Z'(\epsilon - \epsilon_o^*) \quad (8)$$

Υπό σεισμικές δράσεις, το σκυρόδεμα υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, κατά τη

διάρκεια της οποίας μπορούν να συμβούν σημαντικές αναστροφές της παραμόρφωσης. Η αδυναμία του σκυροδέματος στην ανάληψη σημαντικής εφελκυστικής δύναμης και ο σχηματισμός ρωγμών, κάνουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση αρκετά πολύπλοκη. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς εδώ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση βασίζεται στα πειραματικά αποτελέσματα των Karsan και Jirsa (1964), τα οποία έδειξαν ότι για ανακυκλιζόμενη θλιπτική φόρτιση η σχέση  $\sigma$ — $\epsilon$  έχει μια περιβάλλουσα, η οποία θεωρείται μοναδική και ισοδύναμη με τη σχέση  $\sigma$ — $\epsilon$  υπό μονοτονική φόρτιση. Οι κλάδοι φόρτισης-αποφόρτισης εξαρτώνται από τη μέγιστη τάση και παραμόρφωση της προγενέστερης ιστορίας φόρτισης και από την "καμπύλη κοινών σημείων", που ορίζεται σαν ο γεωμετρικός τόπος των σημείων τομής των κλάδων αποφόρτισης—επαναφόρτισης ενός κύκλου (Σχήμα 4.2). Τάσεις πάνω από την καμπύλη κοινών σημείων προκαλούν πρόσθετες παραμορφώσεις, ενώ τάσεις κάτω από αυτήν οδηγούν τη διαδρομή  $\sigma$ — $\epsilon$  στον ίδιο με τον προγενέστερο βρόχο, επαναλαμβάνοντας τον προηγούμενο κύκλο χωρίς επιπλέον παραμόρφωση. Με βάση αυτό τον ορισμό, εάν το επίπεδο της τάσης που αντιστοιχεί σε κοινό σημείο δεν υπερβαίνεται στους επόμενους κύκλους, οι παραμορφώσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή στο κοινό σημείο. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων των Karsan και Jirsa, η καμπύλη κοινών σημείων για το τμήμα της μέχρι την κορυφή του διαγράμματος  $\sigma$ — $\epsilon$  για μη περισφιγμένο σκυρόδεμα (δηλ. για  $0 < \epsilon_{cp} < \epsilon_0$ ), περιγράφεται από την παραβολή:

$$\frac{\sigma}{f_c^*} = 0.9 \frac{\epsilon_{cp}}{\epsilon_o^*} \left( 2 - \frac{\epsilon_{cp}}{\epsilon_o^*} \right) \quad (9)$$

Για το μετά την κορυφή τμήμα, προσαρμόσθηκε εδώ στα πειραματικά δεδομένα η έκφραση:

$$\frac{\sigma}{f_c^*} = 1 - Z^* (\epsilon_{cp} - \epsilon_o^*) \quad (10)$$

όπου  $\epsilon_{cp} = 0.953 \epsilon_{max}$ , και  $\epsilon_{max}$  είναι η μέγιστη τιμή βράχυνσης μέχρι εκείνη τη στιγμή.

Η μορφή των παραπάνω εξισώσεων είναι παρόμοια αυτών της μονοτονικής καμπύλης, ενώ η τάση στην κορυφή του διαγράμματος  $\sigma$ — $\epsilon$  αντιστοιχεί σε  $0.9 f_c$  για την ίδια τιμή παραμόρφωσης ( $\epsilon_o$ ), και το μειούμενης κλίσης τμήμα της καμπύλης είναι παράλληλο στην περιβάλλουσα. Για περισφιγμένο σκυρόδεμα, η μορφή των εξισώσεων που περιγράφουν την καμπύλη κοινών σημείων είναι ίδια με αυτή των εξ. (9) και εξ. (10), με αντικατάσταση του  $f_c$  με  $f_c^* = \beta f_c$ , και του  $\epsilon_o$  με  $\epsilon_o^* = \beta^2 \epsilon_o$ .

Για την προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Karsan και Jirsa (1964) χρησιμοποιήθηκε καμπύλη τρίτου βαθμού για τους κλάδους αποφόρτισης, η οποία ορίζεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, από: α) το σημείο A, από το οποίο ξεκινά ο κλάδος αποφόρτισης, β) το σημείο B, πάνω στην καμπύλη κοινών σημείων, γ) το σημείο C, πάνω στον άξονα των παραμορφώσεων, που ορίζεται από την τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_{pl}$ , σαν συνάρτηση της μέγιστης προγενέστερης παραμόρφωσης:

$$\frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_0} = 0.308 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} \right)^{1.51} \quad (11)$$

όπου  $\varepsilon_{max}$ , η μέγιστη μέχρι εκείνη τη στιγμή παραμόρφωση, και τέλος δ) από την κλίση της καμπύλης στο σημείο τομής με τον άξονα των παραμορφώσεων, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{E_{unl}}{f_c} = \frac{2}{1 + 50 \left( \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_0} \right)^2} \quad (12)$$

Εάν συμβεί ενδιάμεση αποφόρτιση, δηλ. εάν η διαδικασία αποφόρτισης δεν ξεκινά από την περιβάλλουσα (Σημείο D, στο Σχήμα 4.2), χρησιμοποιείται εξίσωση παραβολής που πληρεί τις παραπάνω συνθήκες, πλην της (β). Καθώς στο προσομοίωμα αγνοείται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, στην περίπτωση που η αποφόρτιση συνεχίζεται και μετά το σημείο A (Σχήμα 4.3) η θλιπτική παραμόρφωση μειώνεται χωρίς την παρουσία τάσης (σημεία B και C). Εάν η φάση της επαναφόρτισης αρχίζει από τα σημεία αυτά, πιθανότατα θα ακολουθούσε τη διαδρομή (στικτή γραμμή) του Σχήματος 4.3, αρχίζοντας από το σημείο B. Από απόψεως φυσικής συμπεριφοράς αυτό οφείλεται στην ανώμαλη επιφάνεια των ρωγμών, που δίνει τη δυνατότητα μερικής επαφής μεταξύ των απέναντι επιφανειών της (aggregate interlock). Στο παρόν προσομοίωμα, η επαναφόρτιση θεωρείται ότι αρχίζει από το σημείο A, που σημαίνει ότι το σκυρόδεμα δεν θεωρείται ότι αναλαμβάνει θλιπτικές τάσεις προτού κλείσουν εντελώς οι υπάρχουσες ρωγμές.

Για την προσομοίωση των κλάδων επαναφόρτισης που ξεκινούν από το επίπεδο μηδενικής τάσης (Σχήμα 4.2) υιοθετούνται καμπύλες τετάρτου βαθμού που πληρούν τις ακόλουθες συνθήκες: α) περνούν από το σημείο C, από το οποίο αρχίζει η φάση της επαναφόρτισης, β) έχουν αρχική κλίση στο C ίση με:

$$\frac{E_{rel}}{f_c} = 1.9f_c(0.2)^{\varepsilon_{pl}/\varepsilon_o} \quad (13)$$

γ) περνούν από το σημείο B πάνω στην καμπύλη κοινών σημείων, δ) διέρχονται από το σημείο F, στο οποίο η καμπύλη επαναφόρτισης προσεγγίζει την περιβάλλουσα αντοχής και που αντιστοιχεί σε τιμή παραμόρφωσης  $1.3\varepsilon_{max}$ , και ε) έχουν στο σημείο F κοινή κλίση με τη περιβάλλουσα αντοχής. Στην περίπτωση ενδιάμεσης επαναφόρτισης, δηλαδή επαναφόρτισης προτού επιτευχθεί μηδενική τάση από αποφόρτιση, η συνθήκη β) αγνοείται και ο κλάδος ενδιάμεσης επαναφόρτισης περιγράφεται από καμπύλη τρίτου βαθμού.

Στα Σχήματα 4.4 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του προσομοιώματος για διάφορες διαδρομές φόρτισης, ενώ στο Σχήμα 4.5 γίνεται σύγκριση των προβλέψεων του προσομοιώματος (Σχήμα 4.5b) με τα πειραματικά αποτελέσματα των Karsan and Jirsa (Σχήμα 4.5a).

#### 4.2.3. Νόμος σ-ε του χάλυβα οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη μονοαξονική ένταση

Για τη συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού, τόσο σε μονοτονική όσο και σε ανακυκλιζόμενη ένταση, χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα που αναπτύχθηκε από τους Fardis et al. (1982). Η περιβάλλουσα αντοχής του προσομοιώματος περιγράφεται στην ελαστική περιοχή ( $\varepsilon \leq f_y/E_s$ , όπου  $f_y$  είναι η τάση διαρροής και  $E_s$  το μέτρο ελαστικότητας) από την εξίσωση:

$$\sigma = E_s \varepsilon \quad (14)$$

στην περιοχή διαρροής ( $f_y/E_s < \varepsilon < \varepsilon_{sh}$ , όπου  $\varepsilon_{sh}$  είναι η παραμόρφωση από την οποία αρχίζει η κράτνυση) από την:

$$\sigma = f_y \quad (15)$$

και στην περιοχή κράτνυσης ( $\varepsilon_{sh} < \varepsilon < \varepsilon_u$ , όπου  $\varepsilon_u$  είναι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση,  $f_u$ ), από:

$$\sigma = f_u - (f_u - f_y) \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_i}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) \quad (16)$$

Για ανακυκλιζόμενη (εφελκυστική ή θλιπτική) φόρτιση στην ανελαστική περιοχή, η α-

ποφόρτιση γίνεται αρχικά γραμμικά ελαστικά, αλλά έπειτα μετατρέπεται σε μη-γραμμική για τιμή της τάσης σημαντικά μικρότερη από την τάση διαρροής. Πρόκειται για το γνωστό φαινόμενο Bauschinger, το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο για σωστή αναλυτική προσομοίωση πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι βρόχοι υστέρησης είναι κατά προσέγγιση κλειστοί, ευσταθείς και παρουσιάζουν συμμετρικούς κλάδους αποφόρτισης και επαναφόρτισης.

Τα περισσότερα προσομοιώματα υστερητικής συμπεριφοράς του χάλυβα έχουν τη μορφή της σχέσης Ramberg-Osgood. Επειδή δίνουν την παραμόρφωση σαν συνάρτηση της τάσης, υστερητικά προσομοιώματα του τύπου Ramberg-Osgood δεν προσφέρονται για χρήση σε αλγορίθμους μη-γραμμικής ανάλυσης (στατικής ή δυναμικής), καθώς απαιτούν τη χρήση μιας αριθμητικής διαδικασίας για επίλυση της καταστατικής εξίσωσης ως προς την τάση σε κάθε βήμα φορτίου (ή χρόνου). Το προσομοίωμα του χάλυβα που υιοθετήθηκε για την εφαρμογή του προσομοιώματος των ινών (Fardis et al. 1982), δίνει την τάση σαν συνάρτηση της παραμόρφωσης, για μεν την ελαστική περιοχή μέσω της έκφρασης:

$$\sigma - \sigma_i = E_s(\varepsilon - \varepsilon_i) \quad (17)$$

για δε το υπόλοιπο, μέσω της έκφρασης:

$$\sigma - \sigma_i = \operatorname{sgn}(\varepsilon - \varepsilon_i) \left[ \alpha f_y + \frac{E_s |\varepsilon - \varepsilon_i| - \alpha f_y}{1 + \frac{E_s |\varepsilon - \varepsilon_i| - \alpha f_y}{2f_u - \alpha f_y}} \right] \quad (18)$$

Στις παραπάνω σχέσεις,  $(\sigma_i, \varepsilon_i)$  είναι το τελευταίο σημείο αναστροφής της έντασης και  $\alpha$  είναι σταθερά από την οποία εξαρτάται το μέγεθος του γραμμικού τμήματος του κλάδου αποφόρτισης. Η τιμή της τέθηκε ίση με 1.5 (Fardis et al. 1982). Η εξ. (18) περιγράφει υπερβολή με αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E_c$  (για επίτευξη συνέχειας με την εξ. (17)), και τείνει ασυμπτωτικά σε  $\sigma = f_u$  για φόρτιση κατά τη θετική φορά, ή σε  $\sigma = -f_u$  για φόρτιση κατά την αρνητική. Για μεγάλες τιμές παραμόρφωσης, αυτή η ασυμπτωτική συμπεριφορά είναι πλησιέστερα στη πραγματικότητα από τις προβλέψεις του προσομοιώματος Ramberg-Osgood, στο οποίο δεν υπάρχει άνω όριο για την τιμή της τάσης.

Οι κανόνες υστέρησης εξ. (17), (18) συμπληρώνουν τις εξ. (114)-(16) που ισχύουν για παρθένα φόρτιση. Συμβολίζοντας με  $(\sigma_i, \varepsilon_i)$  την τάση και παραμόρφωση στην  $i$ -οστή αναστροφή της φόρτισης, ο κλάδος που αρχίζει από το  $i$ -οστό σημείο αναστροφής περνά επίσης



από το σημείο της (i-1)—οστής αναστροφής. Αν το τελευταίο αυτό σημείο προσεγγίζεται ενώ η κίνηση γίνεται από το i—οστό προς το (i-1)—οστό σημείο αναστροφής, η παραπέρα κίνηση του σημείου της τάσης γίνεται πάνω στον κλάδο με αρχή στο (i-2)—οστό σημείο αναστροφής, ή ακριβώς πάνω στην περιβάλλουσα αντοχής, εάν το (i-1)—οστό σημείο αναστροφής βρίσκεται πάνω στην τελευταία.

Τέλος, για καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, εισάγεται μια παραλλαγή της μορφής της υστερητικής συμπεριφοράς για αναστροφές της έντασης που μπορεί να γίνουν προτού ξεπεραστεί σε εφελκυσμό ή θλίψη η παραμόρφωση κράτυνσης ( $\epsilon_{sh}$ ). Για αναστροφές αυτής της μορφής, η εξ. (18) αντικαθίσταται από υπερβολή με αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E_s$ , που διέρχεται από το συμμετρικό ως προς την αρχή των αξόνων του σημείου αναστροφής ( $\sigma_i, \epsilon_i$ ):

$$\sigma - \sigma_i = \operatorname{sgn}(\epsilon - \epsilon_i) \left[ \alpha f_y + \frac{E_s |\epsilon - \epsilon_i| - \alpha f_y}{\frac{1}{2|f_u| - \alpha f_y} - \frac{1}{2|\sigma_i| - \alpha f_y}} \right] \quad (19)$$

Οι προβλέψεις της μονοτονικής και υστερητικής συμπεριφοράς του προσομοιώματος βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχήμα 4.6).

#### 4.2.4. Εφαρμογή του προσομοιώματος ινών

Το προσομοίωμα επεκτάθηκε σε προσομοίωμα μέλους, με πολυγραμμική προσέγγιση και αναλυτική ολοκλήρωση της ευκαμψίας κατά μήκος του κατά τον τρόπο που προτείνεται στην επόμενη ενότητα 4.3 για το προσομοίωμα τύπου Οριακής Επιφάνειας. Κατόπιν εφαρμόστηκε για διατομή οπλισμένου σκυροδέματος (Σχήμα 4.7b), ίδια με αυτή των πειραματικών δοκιμών των Bousias et al (1995).

Στο Σχήμα 4.7c παρουσιάζεται η διακριτοποίηση της διατομής, ενώ στο Σχήμα 4.7d παρουσιάζεται η μονοτονική καμπύλη ροπής-καμπυλότητας για αδιάστατο αξονικό φορτίο  $\nu=0.11$ , ίδιο με αυτό της δοκιμής S8 των Bousias et al (1995). Σημειώνεται ότι από τη δοκιμή αυτή προέρχεται η πειραματική μονοτονική καμπύλη.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα της εφαρμογής του προσομοιώματος για μονοαξονική κάμψη (Σχήμα 4.8a), και για διαξονική κάμψη (Σχήμα 4.8c), για διάφορες (σταθερές) τιμές αξονικής δύναμης.

Στο Σχήμα 4.8b παρουσιάζονται διαγράμματα αλληλεπίδρασης σε χαρακτηριστικά σημεία της συμπεριφοράς (αποφλοίωση του μη-εγκιβωτισμένου σκυροδέματος, διαρροή του οπλισμού και αστοχία). Διακρίνεται η αναμενόμενη μείωση της αντοχής (σε σύγκριση με τη μονοαξονική) για διατομή που υπόκειται σε ίσες ροπές κάμψης ταυτόχρονα στις δυο κύριες διευθύνσεις της διατομής. Παρατηρείται ακόμη η παρόμοια επίδραση της παρουσίας σταθερής αξονικής δύναμης στη μονοαξονική και στη διαξονική κάμψη. Ο βρόχος υστέρησης για την περίπτωση ανακυκλιζόμενης έντασης φαίνεται στο Σχήμα 4.8d.

Το προσομοίωμα εφαρμόστηκε επίσης για διαξονική διαδρομή φόρτισης μορφής τετραγώνου. Στο Σχήμα 4.9a φαίνεται η μεταβολή των καμπυλοτήτων στις δυο διευθύνσεις, ενώ στα Σχήματα 4.9b και 4.9c παρουσιάζονται οι βρόχοι υστέρησης στην κάθε εγκάρσια διεύθυνση. Παρατηρείται σημαντική πτώση της αντοχής στην κάθε διεύθυνση, που προκαλείται από την ταυτόχρονη μεταβολή της παραμόρφωσης στην εγκάρσια διεύθυνση. Αυτή η συμπεριφορά δημιουργεί την στροφή της διαδρομής των δυνάμεων απόκρισης (Σχήμα 4.9d) που παρατηρείται και στα αποτελέσματα πειραματικής δοκιμής με αντίστοιχη διαδρομή φόρτισης, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1.

Μια από τις διαδρομές φόρτισης στις πειραματικές δοκιμές των Bousias et al (1995) ήταν μορφής κύκλου. Το προσομοίωμα εφαρμόστηκε για ίδια διαδρομή μετατοπίσεων, δίνοντας τους βρόχους υστέρησης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10. Το εμφανές στρογγύλεμα των άκρων των βρόχων είναι αποτέλεσμα της σύζευξης μεταξύ των εγκάρσιων διευθύνσεων της κάμψης και επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα.

#### **4.3. Προσομοίωμα τύπου οριακής επιφάνειας για υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος υπό γενικευμένη διαξονική καμπτοδιατμητική ένταση με ορθή δύναμη, με επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης**

##### **4.3.1 Εισαγωγή**

Στη συνέχεια αναπτύσσεται και εφαρμόζεται ένα γενικό μηχανικό προσομοίωμα για υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος σε συνθήκες ανακυκλιζόμενης διαξονικής κάμψης και διάτμησης με αξονική δύναμη. Το προσομοίωμα βασίζεται στην Θεωρία Πλαστικότητας τύπου Οριακής Επιφάνειας και εφαρμόζεται σε λυγηρά υποστυλώματα, για τα οποία η ανελαστική παραμόρφωση και η αστοχία καθορίζονται από τα μεγέθη ορθής έντασης και όχι από τα διατμητικά. Το προσομοίωμα διαθέτει την ευελιξία που απαιτείται για να ληφθούν υπόψη η γεωμετρία και η όπλιση της διατομής οπλισμένου σκυροδέματος που προσομοιώνε-

ται, και δεν προσφεύγει, όπως προγενέστερα προσομοιώματα, στη χρήση τυποποιημένων σχημάτων για τις επιφάνειες ρηγμάτωσης και διαρροής (π.χ. ελλειπτικών), τα οποία μπορεί να μην είναι πολύ αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας.

Η Οριακή Επιφάνεια καθορίζει, μέσω της απόστασης από αυτήν του τρέχοντος σημείου στη στιγμιαία διεύθυνση φόρτισης, τα Μέτρα Πλαστιμότητας για τις καμπτικές και τις αξονικές παραμορφώσεις, βάσει των οποίων κατασκευάζεται το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας της διατομής. Το προσομοίωμα καλύπτει με σχετικά απλό τρόπο οποιαδήποτε ιστορία φόρτισης στον τρισδιάστατο χώρο της έντασης. Περιλαμβάνει επίσης άμεση σύζευξη των καμπτοδιατμητικών παραμορφώσεων στις δύο διευθύνσεις που δεν αποδίδεται από προγενέστερα προσομοιώματα (εκτός, πιθανόν, από προσομοιώματα τύπου Ινών). Επισημαίνεται ότι η προσομοίωση της σύζευξης δεν μπορεί να γίνει απλώς με εισαγωγή μη-διαγωνίων όρων στο εφαπτομενικό μητρώο που συνδέει τα διαφορετικά μεγέθη ορθής έντασης με τα αντίστοιχα διαφορετικά μεγέθη παραμόρφωσης, διότι για μονοαξονική κάμψη αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη παραμορφώσεων στην εγκάρσια διεύθυνση, που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

#### 4.3.2. Θεωρία Πλαστικότητας τύπου Οριακής Επιφάνειας

Τα προσομοιώματα Κλασικής Πλαστικότητας με ισοτροπικό ή κινηματικό κανόνα κράτυνσης είναι απλά στη διατύπωσή τους και παρέχουν αποδεκτή ακρίβεια για μονοτονικές ή αναλογικές διαδρομές φόρτισης. Σε περιπτώσεις όμως πολύπλοκων διαδρομών φόρτισης, αδυνατούν να περιγράψουν την παρατηρούμενη υστερητική συμπεριφορά. Στην καμπύλη έντασης-παραμόρφωσης, όπως αυτή υποτίθεται από τα προσομοιώματα Κλασικής Πλαστικότητας θεωρείται ότι ο κύκλος φόρτισης είναι πλήρως ανακτήσιμος, και ως εκ τούτου, δεν εμφανίζεται πρόσθετη ανελαστική παραμόρφωση αν δεν επέλθει διαρροή στην αντίθετη διεύθυνση (Σχήμα 4.11a). Πρόσθετες πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται μόνο με επαναφόρτιση σε ένταση πέραν αυτής του σημείου A και η συμπεριφορά είναι ταυτόσημη αυτής χωρίς αποφόρτιση. Στην πραγματικότητα όμως η συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη ένταση είναι αυτή του Σχήματος 4.11b και χαρακτηρίζεται από τη μη σύμπτωση των σημείων A και A'. Αυτή η αδυναμία των κλασικών προσομοιωμάτων οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικών προσομοιωμάτων πλαστικότητας.

Η εισαγωγή της έννοιας της Οριακής Επιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μαθηματικό εργαλείο με ξεκάθαρη φυσική σημασία, το οποίο είναι πολύ αποτελεσματικό για την περιγραφή των μηχανισμών κράτυνσης καθώς και αυτών της αποφόρτισης και επαναφόρτισης.

Ο ρόλος της Οριακής Επιφάνειας συνοψίζεται ως εξής: Για κάθε δεδομένη εντατική κατάσταση εντός ή εκτός της Οριακής Επιφάνειας, ένας κατάλληλος κανόνας (κανόνας αντιστοίχισης) προσδιορίζει ένα αντίστοιχο σημείο έντασης πάνω στην Οριακή Επιφάνεια. Ένα μέτρο της απόστασης μεταξύ του πραγματικού και του "αντίστοιχου" σημείου έντασης χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί το Πλαστικό Μέτρο στο πραγματικό σημείο έντασης. Ακριβώς αυτός ο προσδιορισμός του Πλαστικού Μέρους διαχωρίζει την Πλαστικότητα τύπου Οριακής Επιφάνειας από την κλασική Πλαστικότητα. Η Οριακή Επιφάνεια εκφράζει μακροσκοπικά μια οριακή κατάσταση του υλικού που αντιστοιχεί στην προηγηθείσα ιστορία φόρτισης, με την έννοια ότι η ανελαστική απόκριση εξαρτάται από το πόσο "μακριά" βρίσκεται το σημείο που αντιπροσωπεύει την τρέχουσα εντατική κατάσταση  $\sigma_{ij}$  από μια "αντίστοιχη" οριακή εντατική κατάσταση  $\sigma_{ij}$  πάνω στην Οριακή Επιφάνεια. Η Οριακή Επιφάνεια δεν είναι αναγκαστικά μια επιφάνεια αστοχίας (αν και μπορεί να θεωρηθεί ως τέτοια), αφού, γενικά, μπορεί να διογκώνεται ή να συρρικνώνεται με την ανελαστική παραμόρφωση.

Η Οριακή Επιφάνεια στον χώρο των αδιάστατων μεγεθών ορθής και διατμητικής έντασης έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- για λόγους δυνατότητας εποπτείας ορίζεται στον τρισδιάστατο χώρο των ανηγμένων μεγεθών ορθής έντασης,  $\mu_y-\mu_z-v$  και όχι στον πενταδιάστατο χώρο των μεγεθών ορθής και διατμητικής έντασης  $\mu_y-\mu_z-\nu_y-\nu_z-v$ . Ομως η επιρροή της τέμνουσας στην αντοχή λαμβάνεται υπόψη μέσω της εξάρτησης της οριακής αντοχής στο χώρο  $\mu_y-\mu_z-v$  από το λόγο διάτμησης και το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού, κατά την Παρ. 3.3.2 του Κεφ. 3.
- περικλείει όλες τις φυσικά πραγματοποιήσιμες εντατικές καταστάσεις του υλικού,
- διατυπώνεται συναρτήσεως μιας ή περισσότερων παραμέτρων που περιγράφουν την προηγηθείσα ιστορία φόρτισης,
- οι πλαστικές παραμορφώσεις αρχίζουν να συμβαίνουν ήδη για εντατικές καταστάσεις πολύ μικρού μεγέθους,
- για κάθε σημείο έντασης ορίζεται στην Οριακή Επιφάνεια ένα "αντίστοιχο" σημείο, με βάση ένα κανόνα αντιστοίχισης που αποτελεί τμήμα των καταστατικών εξισώσεων του προσομοιώματος,
- το διαφορικό των πλαστικών παραμορφώσεων είναι συνάρτηση της απόστασης μεταξύ του τρέχοντος σημείου έντασης και του "αντίστοιχού" του πάνω στην Οριακή Επιφάνεια, και αυξάνεται όταν η απόσταση αυτή μειώνεται.

Η Οριακή επιφάνεια μιας διατομής δεν περιγράφεται, γενικά, από ένα απλό σχήμα που μπορεί να προσεγγισθεί με κλειστές αναλυτικές εκφράσεις. Αντ' αυτού χρειάζεται

συνήθως να κατασκευαστεί σημείο-προς-σημείο για τη συγκεκριμένη γεωμετρία της διατομής, τον υπάρχοντα οπλισμό και την κατανομή του στην διατομή, και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών της διατομής. Για τις συνηθισμένες στην πράξη ορθογωνικές διατομές με ομοιόμορφη κατανομή των ράβδων οπλισμού στα ζεύγη των απέναντι και παράλληλων πλευρών, η Οριακή Επιφάνεια είναι συμμετρική ως προς τα τέσσερα μεσημβρινά επίπεδα  $\mu_y=0$ ,  $\mu_z=0$  και  $\mu_y=\pm\mu_z$  (Σχήμα 4.12). Για καθαρά καμπτική συμπεριφορά (δηλ. για μεγάλη τιμή του λόγου διάτμησης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της Οριακής Επιφάνειας για διάφορα είδη γεωμετρίας διατομών και κατανομής οπλισμού σε αυτές, περιγράφονται αναλυτικά από τον Σφακιανάκη (Σφακιανάκης, 1990). Εν συντομία, η Οριακή Επιφάνεια, όπως και στον Σφακιανάκη (1990) κατασκευάζεται από μια διδιάστατη ακολουθία στρεβλών τετραπλεύρων (Σχήμα 4.13), καθώς διαδοχικές κορυφές κατά μήκος ενός μεσημβρινού σε επίπεδο διά του άξονα του αδιάστατου αξονικού φορτίου  $v$  ή ενός παραλλήλου σε επίπεδο κάθετο σε αυτόν συνδέονται με ευθύγραμμα τμήματα. Οι συντεταγμένες κάθε κορυφής ορίζονται ως το μέγιστο σημείο της καμπύλης ροπής-καμπυλότητας που υπολογίζεται με εφαρμογή της Μεθόδου των Ινών για το συνδυασμό των αδιάστατων εντατικών μεγεθών  $v$ - $\mu_y$ - $\mu_z$ .

Για τη διατομή του δοκιμίου της πειραματικής έρευνας των Bousias et al (1995), η Οριακή Επιφάνεια κατασκευάστηκε εδώ χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα των ινών που παρουσιάστηκε στην Παρ.4.2. Για λόγους υπολογιστικής ευκολίας σημεία της Οριακής Επιφάνειας καθορίστηκαν με τη μέθοδο των ινών μόνο για μονοαξονική και ίση διαξονική κάμψη. Για διαξονική κάμψη με λόγο ροπών διάφορο της μονάδος σημεία πάνω στην Οριακή Επιφάνεια ελήφθησαν με ελλειπτική παρεμβολή, χρησιμοποιώντας τους τύπους που προτείνει ο Σφακιανάκης (1990). Για καλύτερη όμως ακρίβεια η παρεμβολή έγινε κάθε  $5^\circ$  αντί κάθε  $15^\circ$  του Σφακιανάκη (1990) (Σχήμα 4.14).

#### 4.3.3. Διαφορική σχέση μεγεθών ορθής έντασης - παραμορφώσεων διατομής

Στόχος του προτεινόμενου προσομοιώματος είναι ο προσδιορισμός της σχέσης που συνδέει το μητρώο στήλη των διαφορικών παραμορφώσεων  $d\epsilon$  με το μητρώο των μεγεθών ορθής έντασης  $dS$  της διατομής σαν συνάρτηση των τρεχουσών τιμών τους και της ιστορίας φόρτισης.

Τα μεγέθη ορθής έντασης, δηλ. οι καμπτικές ροπές και η αξονική δύναμη, χρησιμοποιούνται σε αδιάστατη μορφή ως:

$$\mu_y = \frac{M_y}{bh^2f_c}, \quad \nu = \frac{N}{bhf_c}, \quad \mu_z = \frac{M_z}{b^2hf_c} \quad (20)$$

Το μητρώο  $[\mu_y \mu_z \nu]^T$  λαμβάνεται ως το διάνυσμα  $S$  της γενικευμένης εντατικής κατάστασης της διατομής.

Το μητρώο των παραμορφώσεων της διατομής περιλαμβάνει την αξονική παραμόρφωση  $\epsilon_0$  στο κέντρο βάρους της διατομής και τις αδιάστατες καμπυλότητες  $\varphi_y'$  και  $\varphi_z'$ . Οι αδιάστατες καμπυλότητες ορίζονται από το γινόμενο των καμπυλοτήτων  $\varphi_y$  και  $\varphi_z$  ως προς τους κύριους άξονες της διατομής επί την διάσταση της κάθετης στον αντίστοιχο άξονα πλευράς διατομής ( $\varphi_y' = h\varphi_y$ , και  $\varphi_z' = b\varphi_z$ ).

Το μητρώο  $d\epsilon$  διασπάται στο ελαστικό,  $d\epsilon_{el}$ , και το ανελαστικό του τμήμα,  $d\epsilon_{pl}$ . Για το πρώτο, υπολογίζεται το ελαστικό μητρώο ευκαμψίας με υπόθεση ελαστικής συμπεριφοράς, θεωρώντας ότι η παρουσία του σπλισμού αντισταθμίζει την επιρροή της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος:

$$d\epsilon_{el} = \begin{bmatrix} \frac{1}{EI_y} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{EI_z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{EA} \end{bmatrix} dS = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.008 \end{bmatrix} dS \quad (21)$$

Οι διαγώνιοι όροι αντιστοιχούν σε  $E_c \approx 1200f_c$  και δίνουν με καλή προσέγγιση την αρχική ελαστική ευκαμψία σπλισμένης και ελαφρά ρηγματωμένης διατομής.

Σαν αντίστοιχο σημείο  $S'$  του τρέχοντος σημείου  $S$  της έντασης λαμβάνεται το σημείο τομής της τρέχουσας διεύθυνσης του  $dS$  με την Οριακή Επιφάνεια. Το μέτρο του ανελαστικού τμήματος του  $d\epsilon_{pl}$  λαμβάνεται εδώ ανάλογο του εσωτερικού γινομένου του  $dS$  και της μοναδιαίας καθέτου,  $\mathbf{n}$ , στην Οριακή Επιφάνεια στο "αντίστοιχο" σημείο του  $S$ .

$$|d\epsilon_{pl}| = \frac{1}{H_p} (\mathbf{n}d\mathbf{S}) \quad (22)$$

Ο συντελεστής αναλογίας  $1/H_p$  είναι το αντίστροφο του ενεργού Μέρους Πλαστικότητας, το οποίο θα καθοριστεί κατωτέρω συναρτήσει της απόστασης του  $S$  από το αντίστοιχό του

σημείο  $S'$ . Ο εντός παρενθέσεων όρος της εξίσωσης είναι η προβολή του διανύσματος  $dS$  στη διεύθυνση του κάθετου στην Οριακή Επιφάνεια διανύσματος  $\mathbf{n}$  στο αντίστοιχο σημείο  $S'$

Τα πειραματικά αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών δείχνουν ότι για το καθορισμό της διεύθυνσης του διαφορικού των ανελαστικών παραμορφώσεων υπάρχουν δύο δυνατότητες: η πρώτη είναι να θεωρηθεί ότι η διεύθυνση του  $d\epsilon_{pl}$  είναι μεταξύ αυτής της κάθετου στην Οριακή Επιφάνεια στο  $S'$ , δηλ. του  $\mathbf{n}$ , και αυτής του  $dS$ :

$$d\epsilon_{pl} = (p\mathbf{n} + q\mathbf{n}_s) \frac{\mathbf{n} \cdot d\mathbf{S}}{H_p} = \frac{1}{H_p} (p\mathbf{n}^T \mathbf{n} + q\mathbf{n}_s^T \mathbf{n}) d\mathbf{S} \quad (23)$$

όπου  $\mathbf{n}_s$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση του  $dS$ , και οι προς προσδιορισμόν παράμετροι  $p$  και  $q$  συνδέονται έτσι ώστε το  $p\mathbf{n} + q\mathbf{n}_s$  να είναι μοναδιαίο διάνυσμα:

$$p^2 + q^2 + 2pq(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_s) = 1 \quad (24)$$

Η δεύτερη δυνατή επιλογή για τη διεύθυνση του  $d\epsilon_{pl}$  βασίζεται στην παρατήρηση ότι τη μεγαλύτερη επίδραση στο μέγεθος του τελευταίου έχει η μεγαλύτερη από τις δύο καμπτικές διαφορικές συνιστώσες. Γεωμετρικά αυτό σημαίνει ότι το διάνυσμα των ανελαστικών παραμορφώσεων κατευθύνεται περισσότερο προς την ακτινική διεύθυνση, παρά παράλληλα προς τη κάθετο της Οριακής Επιφάνειας στο αντίστοιχο σημείο  $S'$ . Είναι δηλαδή:

$$d\epsilon_{pl} = \frac{\mathbf{n} \cdot d\mathbf{S}}{H_p} \mathbf{n}^a \quad (25)$$

όπου  $\mathbf{n}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση του  $dS$  και  $a$  είναι παράμετρος προς προσδιορισμό. Λόγω του σχήματος της Οριακής Επιφάνειας, η οποία είναι κάθετη στην ακτινική διεύθυνση στις  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  και  $90^\circ$ , αποφεύγονται ασυμβατότητες στη μονοαξονική και ίση διαξονική κάμψη.

Συγκεφαλαιώνοντας, το διαφορικό των ανελαστικών παραμορφώσεων σύμφωνα με το προσομοίωμα είναι με μητρωϊκή μορφή, για την πρώτη υπόθεση διεύθυνσης του  $d\epsilon_{pl}$ :

$$d\varepsilon_{pi} = \frac{1}{H_p} \begin{bmatrix} n_{yn}(pn_{yn} + qn_{ys}) & n_{zn}(pn_{yn} + qn_{ys}) & n_{xn}(pn_{yn} + qn_{ys}) \\ n_{yn}(pn_{zn} + qn_{zs}) & n_{zn}(pn_{zn} + qn_{zs}) & n_{xn}(pn_{zn} + qn_{zs}) \\ n_{yn}(pn_{xn} + qn_{xs}) & n_{zn}(pn_{xn} + qn_{xs}) & n_{xn}(pn_{xn} + qn_{xs}) \end{bmatrix} dS \quad (26)$$

όπου,  $p$  και  $q$  παράμετροι,  $H_p$  το Μέτρο Πλαστικότητας,  $dS$  είναι το μητρώο των αδιαστατοποιημένων εντατικών μεγεθών και  $n_{in}(i=x,y,z)$ ,  $n_{is}(i=x,y,z)$  είναι τα συνημίτονα κατευθύνσεως της καθέτου στην Οριακή Επιφάνεια στο σημείο τομής της με το  $dS$  (αντίστοιχο σημείο  $S'$ ), και του διανύσματος  $dS$ , αντίστοιχα. Είναι αξιοσημείωτο ότι για  $q \neq 0$  το μητρώο ευκαμψίας στην εξ. (26) δεν είναι συμμετρικό.

Αντίστοιχα, για τη δεύτερη υπόθεση διεύθυνσης του διανύσματος των ανελαστικών παραμορφώσεων είναι:

$$d\varepsilon_{pi} = \frac{1}{H_p} \begin{bmatrix} n_{yn}n_{yn}^\alpha & n_{zn}n_{yn}^\alpha & n_{xn}n_{yn}^\alpha \\ n_{yn}n_{zn}^\alpha & n_{zn}n_{zn}^\alpha & n_{xn}n_{zn}^\alpha \\ n_{yn}n_{xn}^\alpha & n_{zn}n_{xn}^\alpha & n_{xn}n_{xn}^\alpha \end{bmatrix} dS \quad (27)$$

όπου  $\alpha$  παράμετρος και τα υπόλοιπα σύμβολα έχουν την ίδια σημασία όπως παραπάνω. Το μητρώο στην εξ. (27) είναι ασύμμετρο, όταν η παράμετρος  $\alpha$  είναι διάφορη της μονάδος.

Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα του Κεφαλαίου 1, ο πρώτος όρος, δηλ. ο  $pn_{xn}$ , μέσα στην παρένθεση των δύο πρώτων όρων της τελευταίας γραμμής μητρώου στην εξ. (26), αλλάζει πρόσημο όταν το γινόμενο  $\varepsilon_{pi} \cdot d\varepsilon_{pi}$  είναι αρνητικό (Σχήμα 4.15). Το ίδιο συμβαίνει και για τους αντίστοιχους όρους  $n_{xn}^\alpha$  στην εξ. (27). Με άλλα λόγια, οι δύο πρώτοι όροι της τελευταίας γραμμής του μητρώου ευκαμψίας γίνονται:

$$\left( \left( \frac{\mathbf{S}}{\|\mathbf{S}\|} \cdot \mathbf{n} \right) pn_{xn} + qn_{xs} \right)$$

και

$$\left( \frac{\mathbf{S}}{\|\mathbf{S}\|} \cdot \mathbf{n} \right) n_{xn}^\alpha$$

για την πρώτη και δεύτερη υπόθεση κατεύθυνσης του διανύσματος  $d\varepsilon_{pi}$ , αντίστοιχα.

Για τη γενική περίπτωση που τα  $v$ ,  $\mu_y$  και  $\mu_z$  μεταβάλλονται ταυτόχρονα λαμβάνεται:



$$H_p = \mathbf{n}^T \mathbf{H} \mathbf{n} = H_{\mu y} n_y^2 + H_{\mu z} n_z^2 + H_v n_x^2 \quad (28)$$

όπου  $\mathbf{H}$  είναι διαγώνιο μητρώο με όρους τα  $H_{\mu y}$ ,  $H_{\mu z}$ ,  $H_v$ , δηλ.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{\mu y} & 0 & 0 \\ 0 & H_{\mu z} & 0 \\ 0 & 0 & H_v \end{bmatrix} \quad (29)$$

και  $n_y$ ,  $n_z$ ,  $n_x$  είναι οι προβολές του μοναδιαίου διανύσματος  $\mathbf{n}$  στην Οριακή Επιφάνεια στο αντίστοιχο σημείο  $S'$  στους άξονες  $\mu_y$ ,  $\mu_z$  και  $v$ .

Η ανωτέρω σχέση γίνεται:

$$H_p = H_{\mu} n_{\mu}^2 + H_v n_x^2 = H_{\mu} (1 - n_x^2) + H_v n_x^2 \quad (30)$$

με  $n_{\mu}^2 = n_y^2 + n_z^2$  στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής του οπλισμού στην περίμετρο, όπως δηλαδή στην παρούσα εφαρμογή.

Ο υπολογισμός του Μέτρου Πλαστικότητας βασίζεται στην παρατήρηση ότι για σταθερό  $dS$ , οι όροι του  $d\epsilon_{pl}$  αυξάνουν καθώς το σημείο της τρέχουσας έντασης κινείται προς την Οριακή Επιφάνεια και πρακτικά απειρίζονται όταν τη φθάσει. Μέτρο αυτής της προσέγγισης αποτελεί η Ευκλείδεια απόσταση,  $\delta$ , του τρέχοντος σημείου γενικευμένης έντασης από το "αντίστοιχο" του  $S'$  πάνω στην Οριακή Επιφάνεια. Τα μέτρα  $H_v$  για την αξονική παραμόρφωση και  $H_{\mu}$  για τις καμπτικές λαμβάνονται εδώ ανάλογα της προβολής της Ευκλείδειας απόστασης  $\delta$  στον διαμήκη και τους εγκάρσιους άξονες του μέλους, αντίστοιχα (Σχήμα 4.16). Οι τελευταίες συμβολίζονται ως  $\delta_v$  και  $\delta_{\mu}$ , αντίστοιχα. Η παράμετροι  $\delta_v$  και  $\delta_{\mu}$  χρησιμοποιούνται ανηγμένες στις τιμές των  $\delta_{v,max}$  και  $\delta_{\mu,max}$  οι οποίες είναι οι μέγιστες τιμές των  $\delta_v$  και  $\delta_{\mu}$  στην αρχή της τρέχουσας διαδικασίας φόρτισης και συνιστούν τις παραμέτρους "μνήμης" της πλέον πρόσφατης ανελαστικής ιστορίας φόρτισης Είναι λοιπόν:

$$H_{\mu} \propto \frac{\delta_{\mu}}{\delta_{\mu,max}}$$

$$H_v \propto \frac{\delta_v}{\delta_{v,max}}$$

Επισημαίνεται ότι αν η διαδρομή φόρτισης είναι καθαρά καμπτική, δηλ. με σταθερή  $v$ , η προβολή της απόστασης  $\delta$  στον άξονα των ανηγμένων αξονικών δυνάμεων είναι μηδέν, και άρα  $H_v=0$ , με αποτέλεσμα:

$$H_p = H_\mu (1 - v^2) \quad \text{για } v=\text{σταθ.}$$

Ομοίως για καθαρά αξονική μεταβολή της έντασης είναι  $\delta_\mu=0$  και  $H_\mu=0$ , επομένως:

$$H_p = H_v n_x^2 \quad \text{για } \mu_y=\text{σταθ.}, \mu_z=\text{σταθ.}$$

Στην αρχή κάθε διαδικασίας φόρτισης οι λόγοι  $\delta_\mu/\delta_{\mu,\max}$  και  $\delta_v/\delta_{v,\max}$  είναι ίσοι με τη μονάδα και τα μέτρα  $H_\mu$  και  $H_v$  έχουν τη μέγιστη τιμή τους. Η κίνηση του τρέχοντος σημείου έντασης προς την Οριακή Επιφάνεια μειώνει τις αποστάσεις  $\delta_\mu$  και  $\delta_v$  και οι λόγοι  $\delta_\mu/\delta_{\mu,\max}$  και  $\delta_v/\delta_{v,\max}$  τείνουν στο μηδέν καθώς το σημείο έντασης πλησιάζει την Οριακή Επιφάνεια. Αναστροφή ή γενικά αλλαγή διεύθυνσης της έντασης δημιουργεί νέες τιμές των  $\delta_\mu$  και  $\delta_v$  οι οποίες είναι πιθανό να ξεπερνούν τις τιμές  $\delta_{\mu,\max}$  και  $\delta_{v,\max}$  της μέχρι εκείνη τη στιγμή διαδικασίας φόρτισης. Σε αυτή τη περίπτωση, οι τελευταίες αντικαθίστανται από τις τοπικά μέγιστες τιμές και έτσι η τιμή του αντίστοιχου πλαστικού μέτρου αυξάνεται απότομα καθώς ο λόγος της τρέχουσας Ευκλείδειας απόστασης προς την αντίστοιχη μέγιστη  $\delta_i/\delta_{i,\max}$  ( $i=\mu,v$ ) γίνεται μονάδα.

Με την εξάρτηση των Μέτρων Πλαστικότητας από την απόσταση από την Οριακή Επιφάνεια, ανηγμένη στη μέγιστη τιμή της για τη τρέχουσα διαδικασία φόρτισης, γίνεται εφικτή η προσομοίωση της σταδιακής μείωσης της δυσκαμψίας της διατομής καθώς πλησιάζει την αστοχία αλλά και της απότομης αύξησης της δυσκαμψίας κατά την αλλαγή διεύθυνσης φόρτισης ("αποφόρτιση" ή "επαναφόρτιση") που παρατηρείται στα πειράματα.

Για να ληφθεί υπόψη η βαθμιαία μείωση της καμπτικής δυσκαμψίας με την ανακύκλιση της έντασης το μέτρο πλαστικότητας  $H_\mu$  λαμβάνεται να μειώνεται με την πλαστική διάστατη καμπυλότητα σε μια δύναμη  $\beta < 1$ , δηλ.:

$$\frac{1}{H_\mu} \propto \left( \sqrt{\varphi_{y,pl}^2 + \varphi_{z,pl}^2} \right)^\beta$$

Τέλος, το Μέτρο Πλαστικότητας  $H_\mu$  θεωρείται ότι μειώνεται με την αύξηση της απόστασης  $\delta' = (\mu_y + \mu_z)^{1/2}$  του τρέχοντος σημείου της έντασης από τον άξονα του αδιάστατου αξονικού φορτίου  $\nu$ , γεγονός που δημιουργεί την τάση της στένωσης των βρόχων (pinching) περί την αρχή των αξόνων.

Έτσι η μορφή της συνάρτησης που επελέγη για το μέτρο πλαστικότητας  $H_\mu$ , για την κάμψη είναι:

$$H_\mu = C_\mu \frac{\delta_\mu}{\delta_{\mu, \max}} \frac{1}{\sqrt{(\phi_{y,pl}^2 + \phi_{z,pl}^2)^\beta}} \frac{1}{1 - \gamma \delta'} \quad (31)$$

όπου,  $C_\mu$  είναι ένας συντελεστής μεγέθους,  $\delta'$  είναι η Ευκλείδεια απόσταση του τρέχοντος σημείου έντασης από την αρχή των αξόνων, ενώ ο όρος  $\sqrt{\phi_{y,pl}^2 + \phi_{z,pl}^2}$  είναι η μέγιστη τιμή της συνισταμένης πλαστικής αδιάστατης καμπυλότητας μέχρι την παρούσα στιγμή της ιστορίας φόρτισης. Για μονοτονική αναλογική φόρτιση η τελευταία αυξάνεται συνεχώς, με μέγιστη τιμή τη τρέχουσα τιμή της. Σε περίπτωση αλλαγής διεύθυνσης φόρτισης, οι καμπυλότητες στους δύο άξονες κάμψης  $\phi_{y,pl}$  και  $\phi_{z,pl}$  μπορεί να μειώνονται κατ' απόλυτη τιμή και το ίδιο και η συνισταμένη αδιάστατη ανελαστική καμπυλότητα. Τότε, στην Εξ. (31) χρησιμοποιείται στον παρονομαστή του τρίτου όρου η τιμή της συνισταμένης αδιάστατης καμπυλότητας πριν την αλλαγή διεύθυνσης φόρτισης. Η τιμή αυτή διατηρείται σταθερή, έως ότου ξεπεραστεί στη διάρκεια του υπολοίπου της ιστορίας φόρτισης, οπότε αρχίζει να αυξάνεται ξανά.

#### 4.3.4. Εφαρμογή στη μονοαξονική κάμψη

Για μονοαξονική κάμψη με σταθερό  $\nu$ , η σχέση  $d\phi_{pl} = d\mu/H_\mu$  μπορεί να ολοκληρωθεί αναλυτικά. Για παρθένα μονοτονική μονοαξονική φόρτιση ισχύει (Σχήμα 4.17):

$$\frac{\delta}{\delta_{\max}} = 1 - \frac{\mu}{\mu_u} \quad (32)$$

και

$$\delta' = \mu \quad (33)$$

όπου,  $\mu_u$ , η ροπή αστοχίας για τη συγκεκριμένη τιμή του  $v$ .

Η ολοκλήρωση της σχέσης  $d\phi_{pl} = d\mu/H_\mu$  δίνει:

$$\phi_{pl} = \left\{ \mu_u \frac{1-\beta}{C_\mu} \left[ (1-\gamma\mu_u) \ln \left( \frac{1}{1-\frac{\mu}{\mu_u}} \right) + \gamma\mu \right] \right\}^{1/(1-\beta)} \quad (34)$$

όπου στη τιμή του  $C_\mu$  έχει ενσωματωθεί και ο όρος  $(1-n_x^2)$ .

Αν αντιστραφεί η φορά φόρτισης (αποφόρτιση), η σχέση  $d\phi_{pl} = d\mu/H_\mu$  ολοκληρώνεται πάλι αναλυτικά, με βάση τις νέες αποστάσεις του σημείου  $S$  από την Οριακή Επιφάνεια στη νέα διεύθυνση του  $dS$ :

$$\frac{\delta}{\delta_{max}} = \frac{\mu_u + \mu}{\mu_u + \mu_r} \quad (35)$$

όπου  $\mu_r$  είναι η τιμή της ροπής στην αντιστροφή της φόρτισης.

Η εξ. (35) δίνει για  $\mu > 0$ :

$$\phi_{pl} = \phi_{r,pl} + \phi_{pl,max}^\beta \left( \frac{\mu_u + \mu_r}{C_\mu} \right) \left\{ (1 + \gamma\mu_u) \ln \left( \frac{\mu + \mu_u}{\mu_r + \mu_u} \right) - \gamma(\mu - \mu_r) \right\} \quad (36)$$

όπου  $\phi_{r,pl}$  είναι η τιμή της πλαστικής καμπυλότητας στην αντιστροφή της φόρτισης.

Για  $\mu < 0$  και εφόσον η τρέχουσα τιμή της ροπής είναι μικρότερη αυτής που προκαλεί έναρξη νέας ανελαστικής φόρτισης στην αντίθετη διεύθυνση,  $\mu_r$ , παίρνουμε:

$$\phi_{pl} = \phi_{o,pl} + \frac{\mu_u + \mu_r}{C_\mu} \phi_{r,pl}^\beta \left[ (1 - \gamma\mu_u) \ln \left( 1 + \frac{\mu}{\mu_u} \right) + \gamma\mu \right] \quad (37)$$

όπου  $\phi_{o,pl}$  είναι η ανελαστική καμπυλότητα για  $\mu=0$ , και  $\phi_{r,pl}$  η μέγιστη συνισταμένη αδιάστατη καμπυλότητα ίση με αυτή στο τέλος της μονοτονικής φόρτισης.

Η τιμή της ροπής  $\mu_r$  για την οποία αυξάνεται εκ νέου η συνισταμένη ανελαστική αδιάστατη καμπυλότητα, υπολογίζεται από την Εξ. (37) θέτοντας  $\varphi_{pl} = -\varphi_{r,pl}$ . Όταν  $|\mu| \geq \mu_{-r}$ , οι ανελαστικές παραμορφώσεις προκύπτουν αναλυτικά ίσες με:

$$\varphi_{pl} = - \left\{ |\varphi_{pl,max}|^{1-\beta} - \frac{(1-\beta)(\mu_u + \mu_r)}{C_\mu} \left[ (1-\gamma\mu_u) \ln \left( \frac{\mu_u + \mu}{\mu_u + \mu_r} \right) + \gamma(\mu - \mu_r) \right] \right\}^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (38)$$

όπου  $\varphi_{pl,max}$  η νέα τιμή της μέγιστης αδιάστατης ανελαστικής καμπυλότητας ίση με τη τρέχουσα τιμή της, αφού  $|\mu| > \mu_{-r}$ .

Αν η φορά της φόρτισης αντιστραφεί εκ νέου, έχουμε επαναφόρτιση και ισχύει:

$$\frac{\delta}{\delta_{max}} = \frac{\mu_u - \mu}{\mu_u - \mu_{-r}} \quad (39)$$

Εφόσον η τρέχουσα τιμή της ροπής στη διαδικασία επαναφόρτισης είναι αρνητική, η αναλυτική ολοκλήρωση δίνει για την ανελαστική καμπυλότητα της διατομής:

$$\varphi_{pl} = \varphi_{-r,pl} - \frac{(\mu_u + \mu_r)}{C_\mu} \varphi_{max}^\beta \left[ (1 + \gamma\mu_u) \ln \left( \frac{\mu_u - \mu}{\mu_u - \mu_r} \right) + \gamma(\mu - \mu_r) \right] \quad (40)$$

όπου  $\varphi_{-r,pl}$  η καμπυλότητα στο τέλος της διαδικασίας αποφόρτισης. Για θετική ροπή, αλλά μικρότερη αυτής που προκαλεί έναρξη νέων ανελαστικών παραμορφώσεων, η καμπυλότητα είναι:

$$\varphi_{pl} = \varphi_{-o,pl} - \varphi_{pl,max}^\beta \frac{(\mu_u - \mu_r)}{C_\mu} \left[ -(1 - \gamma\mu_u) \ln \left( \frac{\mu_u - \mu}{\mu_u} \right) + \gamma\mu \right] \quad (41)$$

όπου  $\varphi_{-o,pl}$  είναι η τιμή της καμπυλότητας από την εξ. (39) για  $\mu=0$ .

Πέραν του σημείου στο οποίο συμβαίνει  $\Phi \geq -\Phi_{-r}$ , η μέγιστη πλαστική αδιάστατη καμπυλότητα αρχίζει πάλι να αυξάνει και η ανελαστική καμπυλότητα της διατομής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varphi_{pl} = \left\{ \varphi_{pl,max}^{1-\beta} + \frac{(1-\beta)(\mu_u + \mu_{-r})}{C_\mu} \left[ (1-\gamma\mu_u) \ln \left( \frac{\mu_u + \mu_{rl}}{\mu_u + \mu} \right) + \gamma(\mu - \mu_{rl}) \right] \right\}^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (42)$$

όπου  $\mu_{rl}$  η τιμή της ροπής για την οποία αυξάνεται εκ νέου η ανελαστική αδιάστατη καμπυλότητα.

#### 4.3.5. Ανάπτυξη και εφαρμογή προσομοιώματος στοιχείου

Το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός του εφαπτομενικού μητρώου ευκαμψίας του μέλους, το οποίο συνδέει τις δυνάμεις στα άκρα του μέλους με τις αντίστοιχες παραμορφώσεις. Τα διανύσματα των δυνάμεων και παραμορφώσεων παριστώνται σε αδιάστατη μορφή από τα μητρώα:

$$\mathbf{S}_m = [\mu_y^A \quad \mu_z^A \quad \mu_y^B \quad \mu_z^B \quad v]^T \quad (43)$$

$$\mathbf{v}_m = [\theta_y^A \quad \theta_z^A \quad \theta_y^B \quad \theta_z^B \quad u]^T \quad (44)$$

όπου  $\theta^A, \theta^B$  είναι οι γωνίες που σχηματίζουν οι εφαπτόμενες στα άκρα του μέλους με τη χορδή που συνδέει τα τελευταία (Σχήμα 4.18). Ένας τρόπος σχηματισμού του μητρώου ευκαμψίας είναι με αριθμητική ολοκλήρωση των επιμέρους μητρώων ευκαμψίας των διατομών στις οποίες διακριτοποιείται το μέλος. Όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 2, η εφαρμογή αυτής της αριθμητικής διαδικασίας δημιουργεί στους αλγορίθμους ανάλυσης προβλήματα μη-εξισορροπούμενων φορτίων στα άκρα τα οποία δε διορθώνονται με περαιτέρω επαναλήψεις και απαιτούν ενσωμάτωση εξειδικευμένων και αμφίβολης αποτελεσματικότητας αριθμητικών διαδικασιών. Αντίθετα, εάν υποθεθεί η αναλυτική μορφή της κατανομής της ευκαμψίας κατά μήκος του μέλους η ολοκλήρωση μπορεί να γίνει αναλυτικά.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται συχνά στην περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης με υπόθεση γραμμικής κατανομής της ευκαμψίας κατά μήκος του μέλους, γενικεύεται εδώ στις τρεις διαστάσεις ως εξής: Για τους διαγώνιους όρους του μητρώου ευκαμψίας η κατανομή προσδιορίζεται από τις τιμές των όρων ευκαμψίας στις ακραίες διατομές και από την ελαστική τιμή της ευκαμψίας στο σημείο εκείνο του μήκους όπου η στιγμιαία τιμή του διανύσμα-

τος εσωτερικών δυνάμεων της διατομής,  $S_y$ , που αντιστοιχεί στον εν λόγω διαγώνιο όρο ευκαμψίας, είναι μηδέν (σημείο καμπής, εάν η εσωτερική δύναμη που μας ενδιαφέρει είναι η ροπή). Εάν η εσωτερική δύναμη διατομής που αντιστοιχεί στον εξεταζόμενο διαγώνιο όρο δεν αλλάζει πρόσημο εντός του μήκους του μέλους, χρησιμοποιείται τραπεζοειδής κατανομή του  $f_{ij}(x)$  μεταξύ των δύο άκρων. Για τους εκτός διαγώνιου όρους του μητρώου ευκαμψίας η πολυγραμμική κατανομή του  $f_{ij}(x)$  καθορίζεται από τις τιμές του όρου στα δύο άκρα του μέλους και από την ελαστική του τιμή (δηλ. μηδεν, εφόσον χρησιμοποιούνται οι κύριοι κεντροβαρικοί άξονες της διατομής) στο σημείο/σημεία όπου η στιγμιαία τιμή οιασδήποτε από τις δύο εσωτερικές δυνάμεις που αντιστοιχούν σε αυτό τον όρο είναι μηδέν.

Παρακάτω δίνονται τα στοιχεία του μητρώου ευκαμψίας που συνδέει το διαφορικό μητρώο-στήλη των δυνάμεων ορθής έντασης με το διαφορικό του μητρώου των αντίστοιχων παραμορφώσεων ενός μέλους, με θεώρηση γραμμικής κατανομής των συντελεστών ευκαμψίας μεταξύ των δύο ακραίων κρίσιμων διατομών και του σημείου μηδενισμού των ροπών (Σχήμα 4.19).

Στη γενική περίπτωση μεταβολής της ροπής και στις δύο διευθύνσεις κάμψης, το μητρώο ευκαμψίας του μέλους δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{F}_m = \int_0^L \mathbf{e}^T \mathbf{F}_s \mathbf{e} \, dx = \int_{L_y}^0 \mathbf{e}^T \mathbf{F}_s \mathbf{e} \, dx + \int_{L_z}^{L_z} \mathbf{e}^T \mathbf{F}_s \mathbf{e} \, dx + \int_{L_z}^L \mathbf{e}^T \mathbf{F}_s \mathbf{e} \, dx \quad (45)$$

Ορίζοντας ως:

$$\alpha_y = \frac{M_y^A}{M_y^A + M_y^B} \quad \alpha_z = \frac{M_z^A}{M_z^A + M_z^B} \quad (46)$$

$$\text{και} \quad \begin{aligned} \alpha_1 &= \min(\alpha_y, \alpha_z) \\ \alpha_2 &= \max(\alpha_y, \alpha_z) \end{aligned} \quad (47)$$

οι όροι του μητρώου ευκαμψίας δίνονται από τους παρακάτω τύπους.

Αν  $\alpha_y < 1$  (δηλ. αν τα  $M_y^A, M_y^B$  είναι ομόσημα) :

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_m(1,1) &= \frac{L}{12} f_{11}^A (-3\alpha_y^4 + 12\alpha_y^3 - 18\alpha_y^2 + 12\alpha_y) + \frac{L}{12} f_{11}^{el} (3\alpha_y^4 - 11\alpha_y^3 + 15\alpha_y^2 - 9\alpha_y + 3) + \\ &\quad \frac{L}{12} f_{11}^B (-3\alpha_y^3 - 9\alpha_y^2 - 3\alpha_y + 1) \end{aligned} \quad (48)$$

ενώ αν  $\alpha_y > 1$  ( $M_y^A, M_y^B$  είναι ετερόσημα) :

$$F_m(1,1) = \frac{L}{12}(3f_{11}^A + f_{11}^B) \quad (48\alpha)$$

Αν  $\alpha_1 < 1$  και  $\alpha_2 < 1$  :

$$F_m(1,2) = \frac{L}{12}f_{12}^A(-3\alpha_1^4 + 12\alpha_1^3 - 18\alpha_1^2 + 12\alpha_1) + \frac{L}{12}f_{12}^B(-\alpha_2^3 - 9\alpha_2^2 - 3\alpha_2 + 1) \quad (49)$$

Αν  $\alpha_y < 1$ :

$$F_m(1,3) = \frac{L}{12}f_{11}^A(-3\alpha_y^4 + 8\alpha_y^3 - 6\alpha_y^2) + \frac{L}{12}f_{11}^{el}(3\alpha_y^4 - 7\alpha_y^3 + 5\alpha_y^2 - \alpha_y - 1) + \frac{L}{12}f_{11}^B(-\alpha_y^3 - \alpha_y^2 + \alpha_y - 1) \quad (50)$$

ενώ αν  $\alpha_y > 1$ :

$$F_m(1,3) = \frac{L}{12}(f_{11}^A + f_{11}^B) \quad (50\alpha)$$

Αν  $\alpha_1 < 1$  και  $\alpha_2 < 1$ :

$$F_m(1,4) = \frac{L}{12}f_{12}^A(-3\alpha_1^4 + 8\alpha_1^3 - 6\alpha_1^2) + \frac{L}{12}f_{12}^B(-\alpha_2^3 + \alpha_2^2 + \alpha_2 - 1) \quad (51)$$

Αν  $\alpha_y < 1$ :

$$F_m(1,5) = \frac{L}{3}f_{13}^A(3\alpha_y^2 - \alpha_y^3 - \alpha) + \frac{L}{6}f_{13}^B(-\alpha_y^2 + 2\alpha_y - 1) \quad (52)$$

ενώ αν  $\alpha_y \geq 1$ :

$$F_m(1,5) = \frac{L}{6}(2f_{13}^A + f_{13}^B) \quad (52\alpha)$$

Αν  $\alpha_1 < 1$  και  $\alpha_2 < 1$ :

$$F_m(2,1) = \frac{L}{12}f_{21}^A(-3\alpha_1^4 + 12\alpha_1^3 - 18\alpha_1^2 + 12\alpha_1) + \frac{L}{12}f_{21}^B(-\alpha_2^3 - 9\alpha_2^2 - 3\alpha_2 + 1) \quad (53)$$

Αν  $\alpha_z < 1$  :

$$F_m(2,2) = \frac{L}{12}f_{22}^A(-3\alpha_z^4 + 12\alpha_z^3 - 18\alpha_z^2 + 12\alpha_z) + \frac{L}{12}f_{22}^{el}(3\alpha_z^4 - 11\alpha_z^3 + 15\alpha_z^2 - 9\alpha_z + 3) + \frac{L}{12}f_{22}^B(-3\alpha_z^3 - 9\alpha_z^2 - 3\alpha_z + 1) \quad (54)$$



ενώ αν  $\alpha_z > 1$ :

$$F_m(2,2) = \frac{L}{12} (3f_{22}^A + f_{22}^{el}) \quad (54\alpha)$$

Αν  $\alpha_z < 1$ :

$$F_m(2,3) = \frac{L}{12} f_{21}^A (-3\alpha_1^4 + 8\alpha_1^3 - 6\alpha_1^2) + \frac{L}{12} f_{21}^B (-\alpha_1^3 - \alpha_1^2 + \alpha_1 - 1) \quad (55)$$

$$F_m(2,4) = \frac{L}{12} f_{22}^A (-3\alpha_z^4 + 8\alpha_z^3 - 6\alpha_z^2) + \frac{L}{12} f_{22}^{el} (3\alpha_z^4 - 7\alpha_z^3 + 5\alpha_z^2 - \alpha_z - 1) + \frac{L}{12} f_{22}^B (-\alpha_z^3 - \alpha_z^2 + \alpha_z - 1) \quad (56)$$

Αν  $\alpha_z < 1$ :

$$F_m(2,5) = \frac{L}{12} f_{23}^A (\alpha_z^2 + \alpha_z^3 - \alpha_z) + \frac{L}{12} f_{23}^B (-\alpha_z^2 + 3\alpha_z - 1) \quad (57)$$

ενώ αν  $\alpha_z > 1$ :

$$F_m(2,5) = \frac{L}{6} (f_{23}^A + 2f_{23}^B) \quad (57\alpha)$$

Αν  $\alpha_y < 1$ :

$$F_m(3,3) = \frac{L}{12} f_{11}^A (-3\alpha_y^4 + 4\alpha_y^3) + \frac{L}{12} f_{11}^{el} (3\alpha_y^4 - 3\alpha_y^3 + \alpha_y^2 + \alpha_y + 1) + \frac{L}{12} f_{11}^B (3\alpha_y^3 - \alpha_y^2 - \alpha_y - 1) \quad (58)$$

ενώ αν  $\alpha_y \geq 1$ :

$$F_m(3,3) = \frac{L}{12} (f_{11}^A + 3f_{11}^B) \quad (58\alpha)$$

Αν  $\alpha_1 < 1$  και  $\alpha_2 < 1$ :

$$F_m(3,4) = \frac{L}{12} f_{12}^A (-3\alpha_1^4 + 4\alpha_1^3) + \frac{L}{12} f_{12}^B (3\alpha_2^3 - \alpha_2^2 - \alpha_2 - 1) \quad (59)$$

Αν  $\alpha_y < 1$ :

$$F_m(3,5) = \frac{L}{6} f_{13}^A (3\alpha_y^2) + \frac{L}{12} f_{13}^B (-\alpha_y^2 - \alpha_y + 2) \quad (60)$$

ενώ αν  $\alpha_y \geq 1$ :

$$F_m(3,5) = \frac{L}{6} (f_{13}^A + 2f_{13}^B) \quad (60\alpha)$$

$$F_m(4,1) = \frac{L}{12} f_{21}^A (-3\alpha_1^4 + 12\alpha_1^3 - 18\alpha_1^2 + 12\alpha_1) + \frac{L}{12} f_{21}^B (-\alpha_2^3 - 9\alpha_2^2 - 3\alpha_2 + 1) \quad (61)$$

Αν  $\alpha_z < 1$ :

$$F_m(4,4) = \frac{L}{12} f_{22}^A (-3\alpha_z^4 + 4\alpha_z^3) + \frac{L}{12} f_{22}^{el} (3\alpha_z^4 - 3\alpha_z^3 + \alpha_z^2 + \alpha_z + 1) + \frac{L}{12} f_{22}^B (3\alpha_z^3 - \alpha_z^2 - \alpha_z - 1) \quad (62)$$

ενώ αν  $\alpha_y > 1$ :

$$F_m(4,4) = \frac{L}{12} (f_{22}^A + 3f_{22}^B) \quad (62\alpha)$$

Αν  $\alpha_z < 1$ :

$$F_m(4,5) = \frac{L}{6} f_{23}^A \alpha_z^2 + \frac{L}{12} f_{23}^B (-\alpha_z^2 - \alpha_z + 2) \quad (63)$$

ενώ αν  $\alpha_z > 1$ :

$$F_m(4,5) = \frac{L}{6} (f_{23}^A + 2f_{23}^B) \quad (63\alpha)$$

Αν  $\alpha_1 < 1$  και  $\alpha_2 < 1$ :

$$F_m(5,5) = \frac{L}{2} f_{33}^A \alpha_1 + \frac{L}{2} f_{33}^{el} (\alpha_2 + 1) + \frac{L}{2} f_{33}^B (1 - \alpha_2) \quad (64)$$

Αλγοριθμικά το προσομοίωμα υλοποιείται ως εξής: για τη κατασκευή του εφαπτομενικού μητρώου σε κάθε μια από τις ακραίες διατομές είναι απαραίτητη η γνώση της στιγμιαίας διεύθυνσης του διανύσματος  $dS$ . Η τελευταία καθορίζεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας κατά την οποία υπολογίζεται κατ' αρχήν με το τρέχον μητρώο ευκαμψίας του μέλους και γνωστό το διάνυσμα  $dv_m$ , το διαφορικό του διανύσματος των μεγεθών ορθής έντασης,  $dS_m$ . Το διαφορικό του διανύσματος της έντασης σε κάθε ακραία διατομή υπολογίζεται από ισορροπία:

$$S_s = eS_m \quad (65)$$

όπου  $e$  είναι το μητρώο ισορροπίας που δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} x' & 0 & 1-x' & 0 & 0 \\ 0 & x' & 0 & 1-x' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (66)$$

όπου  $x' = x/L$ .

Η διεύθυνση του  $dS_S$  συγκρίνεται με αυτή του προγουμένου βήματος ή επανάληψης με χρήση του εσωτερικού γινομένου τους και αν η γωνία βρεθεί μικρότερη ενός ορίου (για παράδειγμα,  $1-2^\circ$ ) δεν αναζητείται νέο σημείο τομής με την Οριακή Επιφάνεια και η απόσταση  $\delta$  υπολογίζεται από το τρέχον σημείο έντασης και το πλέον πρόσφατο σημείο τομής του  $dS$  με την Οριακή Επιφάνεια. Διαφορετικά αναζητείται νέο σημείο  $S'$  στην Οριακή Επιφάνεια, "αντίστοιχο" του τρέχοντος σημείου έντασης  $S$ . Το μητρώο ευκαμψίας της διατομής σχηματίζεται τότε με τη νέα τιμή της απόστασης  $\delta$ , ενώ με την υπόθεση γραμμικής κατανομής της ευκαμψίας κατά μήκος του μέλους που παρουσιάστηκε παραπάνω κατασκευάζεται το μητρώο ευκαμψίας του υποστυλώματος. Αυτό το πλέον πρόσφατο μητρώο ευκαμψίας του στοιχείου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό νέου διαφορικού του διανύσματος  $dS_m$  και εξ αυτού νέο  $dS_S$ . Η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται με την εύρεση της νέας διεύθυνσης του διανύσματος  $dS_S$  και των Ευκλείδειων αποστάσεων  $\delta$  από την Οριακή Επιφάνεια, κ.λ.π. Σημειώνεται ότι για την αλγοριθμική υλοποίηση του προσομοιώματος δεν απαιτείται η εισαγωγή κανενός ειδικού αλγοριθμικού κανόνα.

#### 4.3.6. Καθορισμός οριακής επιφάνειας για διαξονική καμπτοδιατμητική ένταση με αξονική δύναμη

Στην Παρ. 4.3.2 η οριακή επιφάνεια διατομής καθορίζεται για καθαρά καμπτική συμπεριφορά, με εφαρμογή του προσομοιώματος ινών της Παρ. 4.2 για μονοαξονική και ίση διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη, και παρεμβολή μεταξύ των περιπτώσεων αυτών για ενδιάμεσες τιμές του λόγου μεταξύ των δύο συνιστωσών της καμπτικής έντασης.

Για να ληφθεί υπόψη η επιρροή της διάτμησης στην οριακή αντοχή, χρησιμοποιείται η εξής διαδικασία:

Για το μέλος που μας ενδιαφέρει κατασκευάζονται τα διαγράμματα  $\mu$ - $\nu$  στην αστοχία για μονοαξονική ένταση κατά την Ενότητα 3.3.2, αφενός μεν λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της τέμνουσας μέσω της λυγηρότητας  $L_s/h$  του μέλους, αφετέρου δε αγνοώντας την πλήρως (δηλ. θεωρώντας  $L_s/h$  πολύ μεγάλο). Κατόπιν, για κάθε τιμή της αξονικής δύναμης  $\nu$  υπολογίζεται ο λόγος της καμπτικής αντοχής  $\mu$  που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη το  $L_s/h$ ,

προς αυτήν που προκύπτει αγνοώντας το. Ο λόγος αυτός πολλαπλασιάζει κατόπιν, σαν μειωτικός συντελεστής, τις τιμές της οριακής επιφάνειας σ' αυτήν την τιμή του  $v$ , που έχουν προκύψει από το προσομοίωμα ινών για διαξονική κάμψη. Αν η διατομή δεν είναι τετραγωνική, οπότε ο λόγος  $L/h$  και ο αντίστοιχος μειωτικός συντελεστής είναι διαφορετικός στις δύο διευθύνσεις,  $y$  και  $z$ , γίνεται γραμμική παρεμβολή για τις διάφορες γωνίες της κάμψης μεταξύ των δύο διευθύνσεων της μονοαξονικής κάμψης. Έτσι κατασκευάζεται οριακή επιφάνεια στον τριδιάστατο χώρο  $\mu_y - \mu_z - v$ , η οποία λαμβάνει υπόψη, έστω κατά προσέγγιση, την επιρροή της τέμνουσας στην οριακή αντοχή του μέλους υπό τριδιάστατη ένταση.

#### 4.3.7. Καθορισμός παραμέτρων προσομοιώματος με βάση τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 3

Πέραν από τα αποτελέσματα που αφορούν τον καθορισμό της οριακής αντοχής υπό μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση, τα αποτελέσματα του Κεφ. 3 δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της τιμής των παραμέτρων που καθορίζουν την παραμορφωσιακή συμπεριφορά μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη καμπτοδιατμητική ένταση.

Τα πίο χρήσιμα μεγέθη που προέκυψαν από το Κεφ. 3 συναρτήσεως των μηχανικών και γεωμετρικών στοιχείων του μέλους και του οπλισμού του, είναι η ροπή και η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή,  $M_y$  και  $\theta_y$ , υπό μονοτονική φόρτιση, και η εξάρτηση της υστερητικής απορρόφησης ενέργειας από το δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων ή γωνιών στροφής,  $\mu$ . Από αυτά μπορούν κατόπιν να καθορισθούν οι τιμές των βασικών παραμέτρων  $C_\mu$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  του προσομοιώματος τύπου οριακής επιφάνειας.

Η παράμετρος  $\beta$ , που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1, δίνει τη μείωση της δυσκαμψίας αποφόρτισης και επαναφόρτισης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση με το μέγεθος της μέγιστης τιμής της πλαστικής παραμόρφωσης σ' όλη την προγενέστερη ιστορία της φόρτισης.

Η παράμετρος  $\gamma$ , με τιμές πάλι μεταξύ 0 και 1, αντικατοπτρίζει τη στένωση των βρόχων υστέρησης κοντά στον οριζόντιο άξονα (δηλ. τις μικρές τιμές της ροπής), που χαρακτηρίζει κυρίως τα στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης.

Και οι τρεις παράμετροι,  $C_\mu$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  (ο πρώτος με τιμή που εξαρτάται από την τιμή της αξονικής δύναμης,  $v$ , οι δύο άλλοι με τιμές ανεξάρτητες της  $v$ ) επηρεάζουν την μονοτονική καμπύλη  $M-\theta$  και την υστερητική απορρόφηση ενέργειας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ομως, οι  $\beta$  και  $\gamma$  παίζουν πίο σημαντικό ρόλο για την απορρόφηση ενέργειας, οπότε η  $C_\mu$  είναι πίο σημαντική για τη μονοτονική συμπεριφορά.

Επειδή τα παραμορφωσιακά μεγέθη του Κεφ. 3 αναφέρονται στο σύνολο του ανοίγματος διάτμησης  $L_s$  του μέλους, ενώ αυτά του παρόντος Καφαλαίου αναφέρονται σε διατομή, είναι απαραίτητη η σύνδεσή τους. Η σύνδεση αυτή γίνεται κατά τρόπο συμβατό με το προσομοίωμα κατανεμημένης ανελαστικότητας που προτείνεται στο παρόν Κεφάλαιο, για τη μετατροπή του προσομοιώματος διατομής τύπου ιών ή οριακής επιφάνειας, σε προσομοίωμα μέλους. Υπενθυμίζεται ότι κατ' αυτό το προσομοίωμα κατανεμημένης ανελαστικότητας, το μητρώο ευκαμψίας μέλους κατασκευάζεται με ολοκλήρωση κατά μήκος του μέλους του μητρώου ευκαμψίας διατομής κατά την εξ. (45), με υπόθεση τμηματικά γραμμικής μεταβολής του μητρώου ευκαμψίας διατομής μεταξύ των άκρων του μέλους και του σημείου μηδενισμού των εντατικών μεγεθών του. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής στο μήκος διάτμησης  $L_s$ , με θεώρηση μονοαξονικής κάμψης, δίνει για τη γωνία στροφής στο άκρο A όπου η ροπή κάμψης είναι μέγιστη:

$$\theta_A = L_s \left( \frac{f_{pl}}{4} + \frac{f_{el}}{3} \right) \frac{M_A}{bh^3 f_c} \quad (67)$$

Στή σχέση αυτή  $f_{el}$  είναι η ελαστική ευκαμψία της διατομής (το  $1/EI$  πολλαπλασιασμένο επί  $bh^3 f_c$  για λόγους αδιαστατοποίησης), και  $f_{pl}$  η πλαστική (ο λόγος της αδιάστατης πλαστικής καμπυλότητας  $\varphi_{pl}$  προς την αντίστοιχη αδιάστατη μονοαξονική ροπή  $\mu = M/bh^2 f_c$ ) στο άκρο A του μέλους. Επειδή κατά την εξ. (21) η  $f_{el}$  ισούται με 0.01, η εξ. (67) δίνει:

$$\theta_A = \frac{L_s}{h} \left( \frac{\varphi_{pl}^A}{4} + \frac{0.01\mu_A}{3} \right) \quad (68)$$

Με βάση την ανωτέρω σχέση και την εξ. (34), που δίνει την πλαστική αδιάστατη καμπυλότητα για δεδομένη αδιάστατη ροπή  $\mu$ , προκύπτει η τιμή του συντελεστή  $C_\mu$  που αντιστοιχεί στην επίτευξη της τιμής διαρροής της γωνίας στροφής χορδής στο A,  $\theta_y$ , για αδιάστατη ροπή κάμψης εκεί  $\mu_y$ :

$$C_{\mu} = \frac{\mu_u(1-\beta) \left[ (1-\gamma\mu_u) \ln \left( \frac{1}{1-\frac{\mu_y}{\mu_u}} \right) + \gamma\mu_y \right]}{\left[ 4 \left( \theta_y \frac{h}{L_s} - 0.01 \frac{\mu_y}{3} \right) \right]^{1-\beta}} \quad (69)$$

Η γωνία στροφής χορδής  $\theta_y$  υπολογίζεται από την εξ. (19) ή (20) του Κεφ. 3. Η αδιάστατη ροπή διαρροής,  $\mu_y = M_y / bh^2 f_c$ , μπορεί να υπολογισθεί είτε από τη τιμή της ροπής διαρροής που δίνει η εξ. (3) του Κεφ. 3, είτε από την εμπειρική σχέση μεταξύ  $M_y$  και  $M_u$ , εξ. (75) του Κεφ. 2, που πρότειναν οι Park and Ang (1985).

Για τον καθορισμό των τιμών των  $\beta$  και  $\gamma$  με τη βοήθεια της σχέσης μεταξύ υστερητικής απορρόφησης ενέργειας και δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων, οι τιμές της πλαστικής καμπυλότητας στην ακραία διατομή χρειάζεται να μεταφραστούν σε γωνίες στροφής χορδής στο μήκος διάτμησης  $L_s$ . Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια της ανωτέρω εξ. (68). Οι τιμές της γωνίας στροφής χορδής  $\theta_A$  που προκύπτουν έτσι, διαιρώνται κατόπιν με τη τιμή της  $\theta_y$  από την εξ. (19) ή (20) του Κεφ. 3, για να μετατραπούν σε τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων  $\mu_{\theta}$ .

Ο συντελεστής υστερητικής απόσβεσης  $\zeta$  για ένα πλήρη κύκλο μεταξύ ίσων και αντίθετων τιμών παραμόρφωσης  $\phi$  στις δύο διευθύνσεις, υπολογίζεται αναλυτικά σαν το πηλίκο του εμβαδού που περικλείεται από το βρόχο δια  $4\pi$ -φορές την ελαστική ενέργεια στην κορυφή του βρόχου. Οι αναλυτικές σχέσεις που προκύπτουν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι οι βρόχοι είναι λίγο ασύμμετροι, λόγω διαφοράς της τιμής της ροπής  $\mu_r$  στη θετική κορυφή του κύκλου από την  $\mu_r$  στην αρνητική κορυφή και από την  $\mu_r$  στην επαναφόρτιση. Για σχετικά μεγάλες τιμές της πλαστιμότητας όμως, οι βρόχοι γίνονται συμμετρικοί και η σχέση για την απόσβεση απλοποιείται ως εξής:

$$\zeta = \frac{(\mu_u + \mu) \left[ \mu_u \ln \frac{\mu_u + \mu}{\mu_u - \mu} - \mu(2 - \gamma(2\mu_u - \mu)) \right]}{2\pi C_{\mu} \phi^{1-\beta} \mu} \quad (70)$$

Τα αποτελέσματα των ακριβέστερων σχέσεων για την εξάρτηση του  $\zeta$  από το δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής  $\mu_{\theta}$  φαίνονται στο Σχ. 4.20. Σ' όλες τις περιπτώσεις η τιμή του  $C_{\mu}$  υπολογίζεται από την εξ. (69), για τις τιμές των  $\theta_y$  και  $\mu_y$  που προκύπτουν με βάση τις

εξ. (19) ή (20) και (3) του Κεφ. 3 για τα πειράματα των Bousias et al. (1995), δηλ.  $\theta_y=0.016$  και  $\mu_y=0.85\mu_u$ , με  $\mu_u=0.20$ .

Τα αποτελέσματα είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά στοιχεία που δίνονται στο Σχ. 3.26 του Κεφ. 3. Μάλιστα πλεονεκτούν έναντι αυτών των εμπειρικών μονοαξονικών προσομοιωμάτων του Σχ. 3.26, καθότι δίνουν ρεαλιστικές τιμές απόσβεσης ακόμα και για τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μικρότερες του 1.0, για τις οποίες τα εμπειρικά μονοαξονικά προσομοιώματα δεν δίνουν απόσβεση (και χρειάζεται να προστεθεί εξωτερικά απόσβεση 8%).

Από τη σύγκριση του Σχ. 4.20 με το 3.26 προκύπτει ότι για λυγηρά στοιχεία, με  $L_s/h$  μεταξύ 4.5 και 6.5, ταιριάζουν χαμηλές τιμές των  $\beta$  και  $\gamma$  (π.χ.  $\gamma=0$  και  $\beta=0.25$ ) και αντίστροφα για χαμηλό  $L_s/h$ .

#### 4.3.8 Εισαγωγή της επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στο προσομοίωμα μέλους υπό γενικευμένη τριδιάστατη καμπτοδιατμητική ένταση

##### 4.3.8.1 Επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών

Εκτενείς πειραματικές έρευνες έχουν καταδείξει τη σημασία της ταχύτητας παραμόρφωσης στην αντοχή, την αρχική δυσκαμψία, την ολκιμότητα και γενικά την καμπύλη σ-ε του σκυροδέματος (σε θλίψη, εφελκυσμό και γενικά πολυαξονική ένταση) και του χάλυβα. Γενικά, αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης σε σχέση με αυτήν των συμβατικών οιονεί-στατικών δοκιμών, αυξάνει επίσης την αντοχή, τη δυσκαμψία, και την ολκιμότητα των ανωτέρω υλικών.

Για το χάλυβα οπλισμού του τύπου που χρησιμοποιείται παραδοσιακά σαν διαμήκης οπλισμός αντισεισμικών στοιχείων (νευροχάλυβας S400, κ.λ.π.), οι πειραματικές έρευνες (Ammann et al 1982, Limberger et al, 1982, Langseth et al, 1991) δείχνουν ότι, κατά καλή προσέγγιση, οι παράμετροι του διαγράμματος σ-ε σε μονοαξονική ένταση αυξάνονται σε σχέση με τις τιμές τους για οιονεί-στατική ταχύτητα παραμόρφωσης,  $\dot{\epsilon}_0=5 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ , κατά  $c \ln(\dot{\epsilon}/5 \times 10^{-5})$ , όπου  $c=6 \text{ MPa}$  για την τάση διαρροής,  $c=7 \text{ MPa}$  για την εφελκυστική αντοχή,  $c=1.5 \text{ MPa}$  για την τάση στην τελική θραύση (τελικό σημείο διαγράμματος σ-ε),  $c=0.3\%$  για την ανηγμένη μήκυνση στην κορυφή του διαγράμματος (στην εφελκυστική αντοχή) και  $c=0.1\%$  για την παραμόρφωση στο τέλος του διαγράμματος, μετρούμενη σε μήκος  $10\Phi$ . Για ψαθυρό χάλυβα ψυχρής κατεργασίας, όπως ο χάλυβας τύπου N του Ευρωκώδικα 2 ή τύπου A της Euronorm 10080, ο συντελεστής  $c$  στην ανωτέρω επαύξηση των ιδιοτήτων κατά  $c \ln(\dot{\epsilon}/5 \times 10^{-5})$

ισούται με  $c=4.3$  MPa για την τάση διαρροής,  $c=6.5$  MPa για την εφελκυστική αντοχή,  $c=1.9$  MPa για την τάση στην τελική θραύση,  $c=0.5\%$  για την ανηγμένη μήκυνση στην εφελκυστική αντοχή και  $c=0.6\%$  για τη μήκυνση στην τελική θραύση, ανηγμένη σε μήκος  $10\Phi$ . Δηλαδή, για τους ψαθυρούς χάλυβες ψυχρής κατεργασίας, που δεν χρησιμοποιούνται συνήθως σε αντισεισμικές κατασκευές, η επιρροή στην αντοχή είναι μικρότερη απ' ό,τι στους όλκιμους χάλυβες, αλλά στην (ούτως ή άλλως μικρή) ολκιμότητα είναι μεγαλύτερη.

Για το σκυρόδεμα σε μονοαξονική θλίψη, οι πειραματικές μελέτες (Watstein, 1953, Mainstone 1975, Hughes and Gregory, 1972, Bhargava and Rehnstrom, 1977, Hatano and Tsutsumi, 1960, Sparks and Menzies, 1973, Reinhardt, 1984, Reinhardt, 1987, Hughes and Watson, 1978, Goldsmith et al, 1966, Evans, 1958, Spooner, 1971, Atchley and Furr, 1967, Suaris and Shah, 1985, Millstein and Sabnis, 1982), κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα, τα οποία υιοθετήθηκαν και από τον Πρότυπο Κανονισμό 1990 των CEB/FIP:

Η τιμή μιάς παραμέτρου του διαγράμματος  $\sigma$ - $\epsilon$  σε ταχύτητα παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}$  ( $\text{sec}^{-1}$ ) μπορεί να υπολογισθεί κατά προσέγγιση από την οιονεί-στατική τιμή της για  $\dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ , με πολλαπλασιασμό επί  $(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^a$ , όπου ο εκθέτης  $a$  ισούται με  $1.026 / (5 + 0.9f_c)$  προκειμένου για την (κυλινδρική) θλιπτική αντοχή  $f_c$  (MPa), με 0.02 προκειμένου για την βράχυνση  $\epsilon_0$  στην κορυφή του διαγράμματος, και με 0.026 προκειμένου για το αρχικό Μέτρο Ελαστικότητας.

Για σκυρόδεμα σε μονοαξονικό εφελκυσμό (Suaris and Shah 1982, Koenig and Dargel, 1982, Zielinski and Reinhardt, 1982, Reinhardt, 1987, Reinhardt, 1984, Zielinski et al, 1981), η ταχύτητα παραμόρφωσης αναφοράς  $\dot{\epsilon}_0$  του ανωτέρω πολλαπλασιαστικού συντελεστή  $(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^a$  ισούται με  $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  και ο εκθέτης  $a$  ισούται περίπου με  $1 / (10 + 0.5f_c \text{ (MPa)})$  για την εφελκυστική αντοχή, με 0.016 για το Μέτρο Ελαστικότητας, με 0.02 για τη μήκυνση αστοχίας (στη ρηγμάτωση) και με 0.045 για την Ενέργεια Θραύσης,  $G$ , (για την οποία όμως πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα ανοίγματος ρωγμής,  $\dot{w}$  αντί της  $\dot{\epsilon}$ , με οιονεί στατική τιμή  $\dot{w}_0 = 0.001 \text{ mm/sec}$ ).

Όσον αφορά την επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στη συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος, οι πειραματικές μελέτες (Vos and Reinhardt, 1982, Shah and Chung, 1987, Chung and Shah, 1987, 1989) έχουν δείξει ότι η επιρροή αυτή είναι σημαντική μόνο για νευροχάλυβες, και ότι μπορεί να προσεγγισθεί ποσοτικά ως εξής: Η τάση συνάφειας  $\tau$  που αντιστοιχεί σε σχετική ολίσθηση  $s$  (mm) αυξάνεται με την ταχύτητα φόρτισης  $\tau$  (MPa/sec) σε σχέση με την τιμή της για  $\tau = \tau_0 = 0.1 \text{ MPa/sec}$ , με πολλαπλασιασμό επί  $(\tau / \tau_0)^\beta$ , όπου  $\beta = 0.7(1 - 2.5s) / f_c^{0.8}$ , με  $s \leq 0.2 \text{ mm}$  ( $f_c$  σε MPa).



Τα ανωτέρω ισχύουν για σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης ή φόρτισης. Για μεταβλητή, δεν υπάρχουν πειραματικά στοιχεία, αλλά θεωρείται ότι μπορούν να εφαρμόζονται κατά προσέγγιση τα ανωτέρω, με χρήση της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας παραμόρφωσης ή φόρτισης.

#### 4.3.8.2 Εκτίμηση τη ταχύτητας παραμόρφωσης των υλικών κατά τη σεισμική απόκριση και των επιπτώσεών της στη συμπεριφορά των υλικών

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, η κύρια επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης είναι στην ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος και όχι στην ελαστική του σκυροδέματος και του χάλυβα, δηλ. στην αντοχή και τις παραμορφώσεις που τη συνδέουν, και όχι στα Μέτρα Ελαστικότητας.

Εφόσον αναφερόμαστε στην αντοχή των υλικών αυτών, ή μέση ταχύτητα παραμόρφωσης κατά τη δυναμική απόκριση στο σεισμό μπορεί να εκτιμηθεί σαν το πηλίκο μιας τιμής της παραμόρφωσης του χάλυβα ή του σκυροδέματος που μπορεί να θεωρηθεί σαν παραμόρφωση αστοχίας, δια του χρόνου που απαιτείται για να αναπτυχθεί η παραμόρφωση αυτή σ' έναν τυπικό κύκλο της δυναμικής απόκρισης. Για το απεριόριστο σκυρόδεμα σαν βράχυνση αστοχίας μπορεί να ληφθεί το 0.4% έως 0.5%. Ο χάλυβας, ιδίως στα υποστυλώματα, δεν πλησιάζει την μήκυνση θραύσης του και πιθανότατα ούτε μπαίνει στην κράτυνση προτού αστοχήσει το ακυρόδεμα. Έτσι μια ρεαλιστική τιμή της μέγιστης μήκυνσης που μπορεί να αναπτυχθεί στο χάλυβα κατά τη δυναμική απόκριση είναι το 1%.

Οι μέγιστες αυτές παραμορφώσεις αναπτύσσονται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ίσο με το ένα τέταρτο της ενεργού περιόδου της απόκρισης, κατά τη στιγμή που συμβαίνει η μέγιστη απόκριση σε επίπεδο υλικού και μέλους. Αν η ενεργός περίοδος της ανελαστικής απόκρισης συμβολίζεται με  $T$  και η αντίστοιχη συχνότητα με  $f$ , η μέση ταχύτητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος και του χάλυβα στον ημικύκλο κατά τον οποίο φθάνει το μέλος στην αντοχή του ισούται περίπου με  $0.0045 \times 4/T \approx 0.018f$  για το σκυρόδεμα ή  $0.01 \times 4/T \approx 0.04f$  για το χάλυβα ( $f$  σε Hz και ταχύτητα παραμόρφωσης σε 1/sec). Για πλαισιακά ή μεικτά/πλαισιακά-τοιχωματικά δομικά συστήματα οπλισμένου σκυροδέματος, μια αντιπροσωπευτική τιμή της ενεργού ιδιοσυχνότητας της ανελαστικής σεισμικής απόκρισης ισούται περίπου με 1Hz, οπότε και η μέση ταχύτητα παραμόρφωσης για το σκυρόδεμα και το χάλυβα ισούται περίπου με  $0.018 \text{sec}^{-1}$  ή  $0.04 \text{sec}^{-1}$ , αντίστοιχα.

Η ταχύτητα παραμόρφωσης μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη δυναμική απόκριση, όντας μέγιστη όταν η παραμόρφωση ισούται περίπου με μηδέν (οπότε η απόκριση είναι

σχεδόν ελαστική) και ελάχιστη (περίπου μηδενική) κατά τη μέγιστη απόκριση, όταν δηλ. επιτυγχάνεται η αντοχή και οι ανωτέρω μέγιστες παραμορφώσεις των υλικών. Έτσι, αν κατά την ανάλυση λαμβάνεται υπόψη η στιγμιαία τιμή της ταχύτητας παραμόρφωσης, η επιρροή στην αντοχή θα προέκυπτε μηδενική. Στην πραγματικότητα, επειδή κατά τη μέγιστη απόκριση η ταχύτητα παραμόρφωσης είναι μηδενική, η αύξηση της αντοχής σε σύγκριση με τη στατική τιμή είναι αυτή που αντιστοιχεί όχι στη μέση ταχύτητα παραμόρφωσης κατά τον ημικύκλο της απόκρισης, αλλά σε μία αρκετά μικρότερη (αλλά μη μηδενική) τιμή. Αυτό προέκυψε και από την αναλυτική εργασία των Shimazaki and Wada (1998), η οποία φαίνεται να είναι και η μόνη πηγή πληροφοριών για την επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στις λεπτομέρειες της δυναμικής απόκρισης.

Συγκεκριμένα, οι Shimazaki and Wada έκαναν μια σειρά αναλύσεων της δυναμικής απόκρισης ενός ομοιώματος τοιχώματος οπλισμένου σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας απλά μονοαξονικά βισκοπλαστικά προσομοιώματα για το σκυρόδεμα και το χάλυβα, τα οποία παίρνουν υπόψη τη ταχύτητα παραμόρφωσης. Από τις αναλύσεις αυτές προέκυψε ότι η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος λόγω της ταχύτητας παραμόρφωσης αντιστοιχεί, κατά τον καταστατικό νόμο  $\sigma$ - $\epsilon$  του σκυροδέματος, σε ενεργό ταχύτητα παραμόρφωσης ίση με το 15%-30% περίπου της μέγιστης ταχύτητας παραμόρφωσης κατά την απόκριση (η οποία συμβαίνει σε κάποια στιγμή που η παραμόρφωση είναι περίπου μηδενική), ή με το 30% περίπου της μέσης ταχύτητας παραμόρφωσης.

Αν υιοθετηθεί το ανωτέρω συμπέρασμα των αναλύσεων των Shimazaki and Wada, η αύξηση της αντοχής σκυροδέματος και χάλυβα θα πρέπει να υπολογισθεί με ενεργό μέση ταχύτητα παραμόρφωσης  $0.3 \times 0.018 \approx 0.005 \text{ sec}^{-1}$  για το σκυρόδεμα ή  $0.3 \times 0.004 \approx 0.012 \text{ sec}^{-1}$  για το χάλυβα. Αν χρησιμοποιηθούν αυτές οι τιμές στις σχέσεις που δίνουν την επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}$  στις ιδιότητες των υλικών, προκύπτουν τα εξής:

#### **Για το χάλυβα**

Για όλκιμο χάλυβα, η τάση διαρροής αυξάνεται κατά 33MPa, δηλ. για χάλυβα S400 με μέση τάση διαρροής 460 MPa, κατά 7%, για S500 με μέση τάση διαρροής 575 MPa, κατά 6%. Η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής είναι αριθμητικά λίγο μεγαλύτερη αλλά ποσοστιαία παρόμοια. Ομως δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον για την αντοχή του μέλους.

#### **Για το σκυρόδεμα**

Για το σκυρόδεμα σε μονοαξονική θλίψη και για (μέση) θλιπτική αντοχή 24MPa (που αντιστοιχεί στην κατώτατη κατηγορία σκυροδέματος, το C16/20), η αύξηση της αντοχής είναι στο 1.21 της στατικής τιμής, ενώ για την πιο πιθανή μέση τιμή αντοχής των 30MPa, η αύξηση της αντοχής είναι στο 1.18 της στατικής αντοχής. Η αύξηση της βράχυνσης στη

θλιπτική αντοχή,  $\epsilon_0$ , είναι στο 1.10 της στατικής τιμής των 0.2% και η αύξηση του Μέτρου Ελαστικότητας είναι στο 1.14 της στατικής τιμής.

#### 4.3.8.3 Επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στη συμπεριφορά μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Τα πειραματικά αποτελέσματα για την επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στη συμπεριφορά μελών οπλισμένου σκυροδέματος είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Οι Mahin and Bertero (1972) αναφέρουν αύξηση της ροπής διαρροής μιας δοκού οπλισμένου σκυροδέματος κατά 20%, λόγω αύξησης της ταχύτητας παραμόρφωσης κατά 100 φορές. Η αύξηση αυτή είναι συμβατή με την ανωτέρω αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος λόγω αύξησης της ταχύτητας παραμόρφωσης κατά 167 φορές, αλλά είναι πολύ μεγαλύτερη της ανωτέρω αύξησης της τάσης διαρροής του χάλυβα λόγω αύξησης της ταχύτητας παραμόρφωσης κατά 400 φορές.. Όμως στους μετελαστικούς κύκλους η αύξηση της αντοχής (δηλ. της μέγιστης αύξησης της δύναμης του κύκλου) λόγω της ταχύτητας παραμόρφωσης μειώνεται, όσο αυξάνεται το μέγεθος της ανελαστικής παραμόρφωσης (δηλ. του δείκτη πλαστιμότητας).

Τα ανωτέρω συμπεράσματα είναι σύμφωνα με εκείνα της έρευνας των Chung and Shah (1989) σε ομοιώματα δοκών μαζί με την αγκύρωση των ράβδων τους στον κόμβο. Στα πειράματα αυτά τα ομοιώματα είχαν κλίμακα περίπου  $1 \div 6$  και ο στόχος ήταν να μελετηθεί η επιρροή της αύξησης της ταχύτητας παραμόρφωσης κατά 800 φορές στη συνάφεια. Εκτός από τα προαναφερθέντα για αύξηση της αντοχής διαρροής κατά σχεδόν 20% (για αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης κατά 800 φορές αντί για 100) και για μειωμένη επιρροή στους μετελαστικούς κύκλους, τα πειράματα αυτά έδειξαν ότι η τελική αστοχία (με συρρίκνωση και κατάρρευση των βρόχων υστέρησης, ή λόγω θραύσης των ράβδων) συμβαίνει ταχύτερα (δηλ. σε μικρότερη παραμόρφωση) για τη μεγάλη ταχύτητα παρά για τη μικρή. Επιπλέον, στις δοκιμές με τη μεγάλη ταχύτητα παραμόρφωσης παρατηρείται μια τάση συγκέντρωσης της ανελαστικής παραμόρφωσης, της ρηγμάτωσης και των βλαβών σε μικρότερη περιοχή του μέλους, από ότι για τη μικρότερη ταχύτητα παραμόρφωσης, για την οποία η ρηγμάτωση και οι βλάβες χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη διασπορά στο μέλος και λιγότερο έντονη συγκέντρωση. Παρόμοια συμπεράσματα εξήγαγαν οι Chung and Shah (1989) και Shah and Chung (1986) από πειράματα σε ομοίωμα εξωτερικού κόμβου δοκού-υποστυλώματος, που δοκιμάστηκε υπό δύο ταχύτητες παραμόρφωσης που διέφεραν κατά 400 φορές.

Πιο πρόσφατα οι Verzeletti et al. (1991) και οι Gutierrez et al. (1993) υπέβαλλαν υποστυλώματα υπό φυσική κλίμακα σε δοκιμές υπό ταχύτητες παραμόρφωσης που διέφεραν είτε κατά 100 φορές είτε κατά 500. Η μέση αύξηση αντοχής που παρατηρήθηκε σ' όλους τους μετελαστικούς κύκλους μέχρι σχεδόν την αστοχία ήταν περίπου 3%, για αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης κατά 100 φορές, ή 5% για αύξηση κατά 500. Επιβεβαιώθηκε η παρατήρηση των Chung and Shah (1989) για εντονότερη συγκέντρωση της βλάβης και της ανελαστικής παραμόρφωσης κοντά στη κρίσιμη διατομή υπό την ταχεία φόρτιση παρά υπό την οιονεί-στατική και για ταχύτερη προσέγγιση της τελικής αστοχίας στις μεγάλες παραμορφώσεις. Όπως και οι Chung and Shah (1989), δεν διεπίστωσαν μεταβολή του ισοδύναμου συντελεστή υστερητικής απόσβεσης στους προ της τελικής αστοχίας κύκλους.

#### 4.3.8.4 Εισαγωγή της ταχύτητας παραμόρφωσης στο προσομοίωμα τύπου Οριακής Επιφάνειας

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι η επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στην ανελαστική συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, δεν είναι, τουλάχιστον για τις ταχύτητες παραμόρφωσης που αναμένονται κατά τη σεισμική απόκριση, πολύ μεγάλη και περιορίζεται στην αντοχή. Για το λόγο αυτό, στο παρόν προσομοίωμα απλώς μεταβάλλεται το μέγεθος της Οριακής Επιφάνειας. Επειδή όμως η Οριακή Επιφάνεια καθορίζει, στα πλαίσια του παρόντος προσομοιώματος, και την παραμορφωσιακή συμπεριφορά μέσω της απόστασης από αυτήν του τρέχοντος σημείου της έντασης, με την αύξηση του μεγέθους της Οριακής Επιφάνειας μεταβάλλεται και η παραμορφωσιακή συμπεριφορά. Μάλιστα, για σταθερό επίπεδο τάσης ή παραμόρφωσης, αυξάνεται η ενεργός δυσκαμψία (λόγω αύξησης της ανηγμένης απόστασης από την Οριακή Επιφάνεια), γεγονός που είναι συμβατό με την κάποια αύξηση του Μέτρου Ελαστικότητας του σκυροδέματος (αλλά όχι του χάλυβα) με την ταχύτητα παραμόρφωσης.

Με βάση τα ανωτέρω συμπεράσματα των πειραματικών ερευνών στα επιμέρους υλικά και κυρίως αυτά των πειραμάτων σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος, επιλέγεται τελικά να ληφθεί υπόψη η επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης με αύξηση του μεγέθους της Οριακής Επιφάνειας κατά 10%, ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η επιλογή αυτή είναι σύμφωνη και με το συμπέρασμα των Soroushian et al (1991), οι οποίοι κατασκεύασαν διαγράμματα έντασης-παραμόρφωσης διατομής (ροπής-καμπυλότητας και αξονικής δύναμης-αξονικής παραμόρφωσης) για διάφορες ταχύτητες παραμόρφωσης, μέσω ενός λεπτομερούς προσομοιώματος ινών που λαμβάνει υπόψη την επιρροή της ταχύτητας

παραμόρφωσης στον καταστατικό νόμο του χάλυβα και του σκυροδέματος. Από τα διαγράμματα αυτά κατασκευάσαν και διαγράμματα ροπής-αξονικής δύναμης στην αστοχία. Για τις ενεργές μέσες ταχύτητες παραμόρφωσης των δύο υλικών που εκτιμώνται για σεισμική απόκριση ( $0.005\text{sec}^{-1}$  για το σκυροδέμα,  $0.012\text{sec}^{-1}$  για το χάλυβα), τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης  $\mu$ - $\nu$  των Soroushian et al (1991) είναι όντως 10% περίπου μεγαλύτερα από αυτό της οιονεί-στατικής φόρτισης, όπως ακριβώς και η Οριακή Επιφάνεια στα πλαίσια της παρούσας πρότασης.

#### 4.4 Λογισμητοποίηση στο πρόγραμμα ANSR και εφαρμογή προσομοιώματος τύπου Οριακής Επιφάνειας

Το προσομοίωμα που περιγράφηκε ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης στο χώρο ANSR, και εφαρμόστηκε για την αναπαραγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων των Bousias et al (1995). Η ενσωμάτωση έγινε με την κατασκευή ειδικού πεπερασμένου στοιχείου και τη προσθήκη του στη βιβλιοθήκη στοιχείων του ANSR.

Η έκδοση του ANSR στην οποία ενσωματώθηκε το προσομοίωμα, είναι αυτή που αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια στο Πανεπιστήμιο Πατρών, με μετατροπή της αρχικής έκδοσης που αναπτύχθηκε στο University of California, at Berkeley από τους Mondkar and Powell (1975).

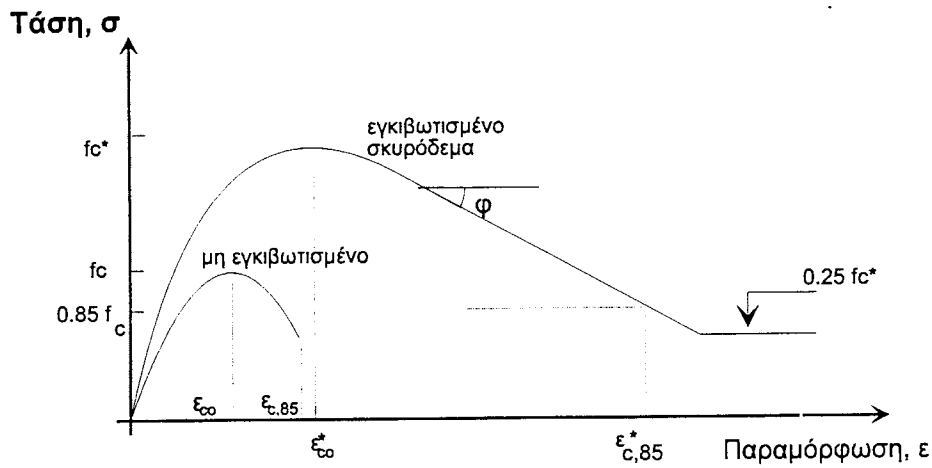
Μέσω του προγράμματος ANSR το προσομοίωμα εφαρμόστηκε για την αναπαραγωγή της μονοτονικής καμπύλης δύναμης-παραμόρφωσης σε κάμψη. Στο Σχήμα 4.21 και για τιμές των παραμέτρων  $\beta=0.25$  και  $\gamma=0.0$ , παρουσιάζεται η πρόβλεψη του προσομοιώματος, η οποία συγκρίνεται με την πειραματική μονοτονική καμπύλη από τη Δοκιμή S8. Η συμφωνία που επιτυγχάνεται είναι περισσότερο από ικανοποιητική.

Το προσομοίωμα εφαρμόστηκε έπειτα για την περίπτωση ανακυκλιζόμενης μονοαξονικής κάμψης με σταθερή αξονική δύναμη της Δοκιμής S0, πάλι για  $\beta=0.25$  και  $\gamma=0.0$ . Τα αναλυτικά αποτελέσματα στη μορφή διαγράμματος δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης (Σχήμα 4.22) δίνουν πιο ομαλούς και λιγότερο ευρείς βρόχους υστέρησης σε σύγκριση με αυτούς του πειράματος, αλλά η γενική συμφωνία είναι ικανοποιητική.

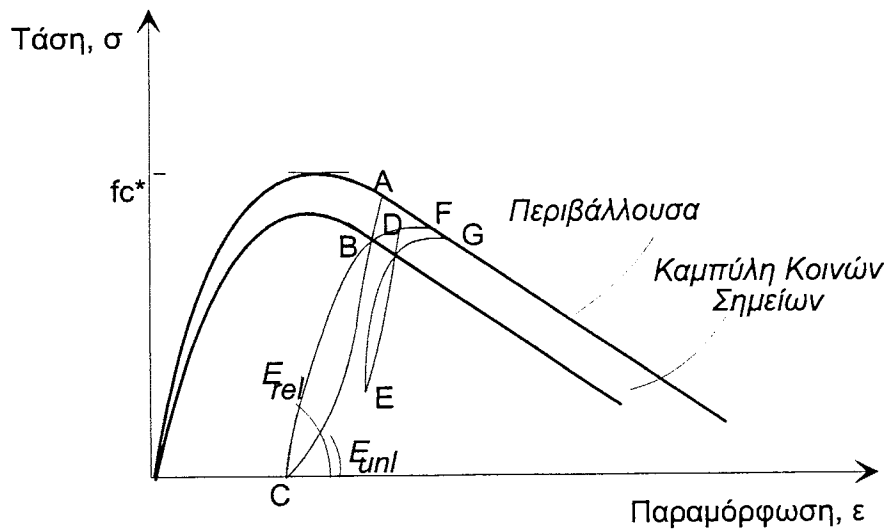
Ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών προβλέψεων του προσομοιώματος επιτεύχθηκε και στη περίπτωση των δοκιμών διαξονικής κάμψης με σταθερή αξονικής δύναμη, ίση με αυτή της αντίστοιχης δοκιμής. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι εξ. (23), (24), (26), με  $q=0.65$ . Οι παράμετροι  $\beta$  και  $\gamma$  διατηρήθηκαν ίσες με 0.25 και 0.0. Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται, μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά, τα ανα-

λυτικά αποτελέσματα για τη Δοκιμή S2 των Bousias et al. (1995). Στη διεύθυνση στην οποία η μετατόπιση διατηρείται κατά τμήματα σταθερή, οι βρόχοι υστέρησης δύναμης-μετατόπισης που παράγει το προσομοίωμα έχουν, για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων, καλή συμφωνία με τους αντίστοιχους βρόχους της πειραματικής δοκιμής (Σχήμα 4.23a). Η χαρακτηριστική πτώση της αντοχής λόγω αλληλεπίδρασης με την εγκάρσια διεύθυνση κάμψης, προσομοιώνεται ικανοποιητικά από το παρόν προσομοίωμα και το ίδιο παρατηρείται για την ενέργεια που απορροφάται από το υποστύλωμα με υστέρηση. Στην εγκάρσια διεύθυνση, αυτή των ανακυκλιζόμενων μετατοπίσεων, οι αναλυτικοί βρόχοι υστέρησης δύναμης-παραμόρφωσης, συγκρινόμενοι με τους αντίστοιχους βρόχους της πειραματικής δοκιμής, αν και λιγότερο ευρείς, προσομοιώνουν ικανοποιητικά τη μείωση της δυσκαμψίας με την ανακύκλιση (Σχήμα 4.23b). Η σύζευξη μεταξύ των δύο διευθύνσεων κάμψης είναι εμφανής στο διάγραμμα μεταβολής των δυνάμεων απόκρισης και προσομοιώνεται ικανοποιητικά από τα αναλυτικά αποτελέσματα.

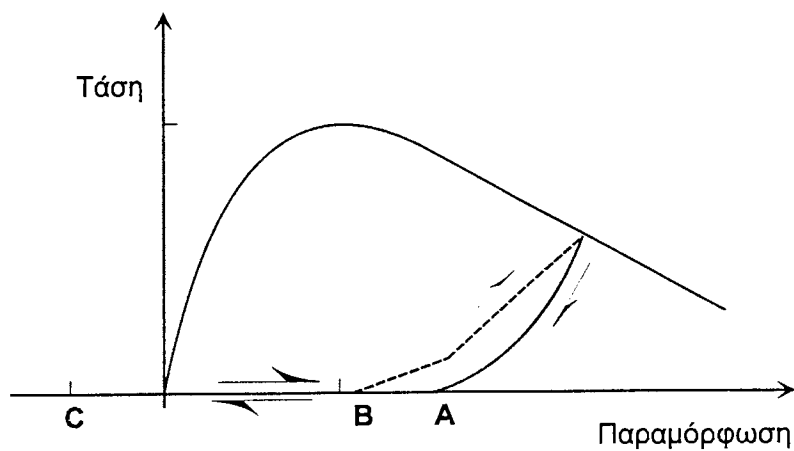
Η επόμενη διαζωνική δοκιμή που αναλύθηκε ήταν η Δοκιμή S3. Υπενθυμίζεται ότι η διαδρομή φόρτισης στη δοκιμή αυτή συνίσταται στην ανακύκλιση των εγκαρσίων μετατοπίσεων στη μια διεύθυνση ενώ ταυτόχρονα η δύναμη στην εγκάρσια διεύθυνση διατηρείται σταθερή. Η αναλυτική προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι γενικά καλή (Σχήμα 4.24). Για τις τιμές των παραμέτρων που επελέγησαν και με εξαίρεση τη μικρότερη αντοχή που προβλέπεται από τα αναλυτικά αποτελέσματα για τη διεύθυνση ανακυκλιζόμενων μετατοπίσεων, η μετατόπιση στην εγκάρσια στην προηγούμενη διεύθυνση έχει πολύ καλή συμφωνία με τις πειραματικά προσδιοριζόμενες τιμές και η γενική πειραματική συμπεριφορά αποδίδεται ικανοποιητικά από το προσομοίωμα. Η ανώμαλη μορφή των βρόχων στα τμήματα σταθερής δύναμης δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική συμπεριφορά, αλλά οφείλεται στην πειραματική διαδικασία. Τέλος, το διάγραμμα δυνάμεων απόκρισης (Σχήμα 4.24c) δείχνει ότι το αναλυτικό προσομοίωμα συλλαμβάνει ικανοποιητικά τη γενική συμπεριφορά.



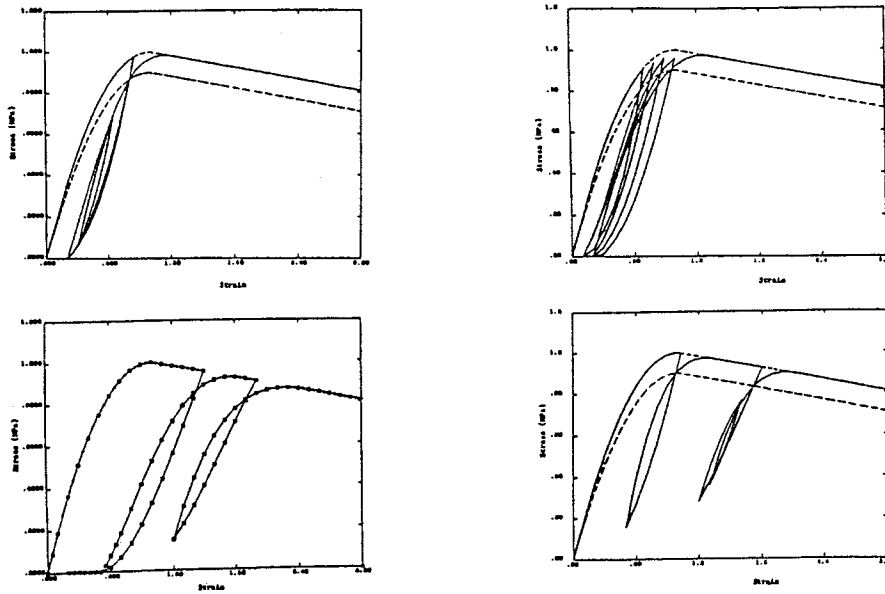
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος



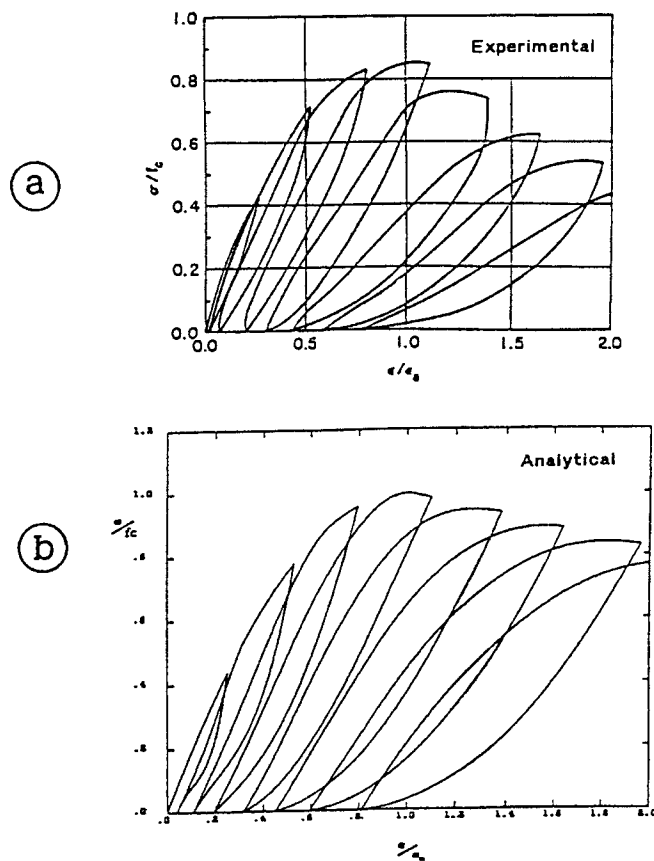
Σχήμα 4.2 Κλάδοι αποφόρτισης/επαναφόρτισης κατά Karsan and Jirsa (1964)



Σχήμα 4.3 Κλάδοι αποφόρτισης/επαναφόρτισης μέχρι μηδενική τάση σ

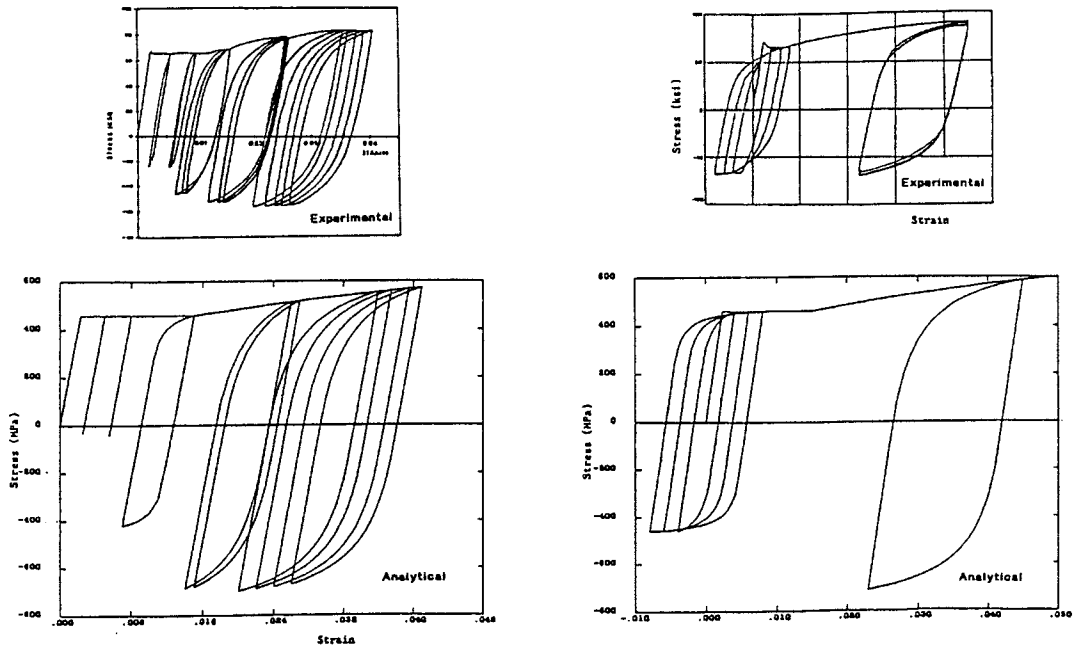


Σχήμα 4.4 Συμπεριφορά του προσομοιώματος σκυροδέματος για διάφορες διαδρομές φόρτισης

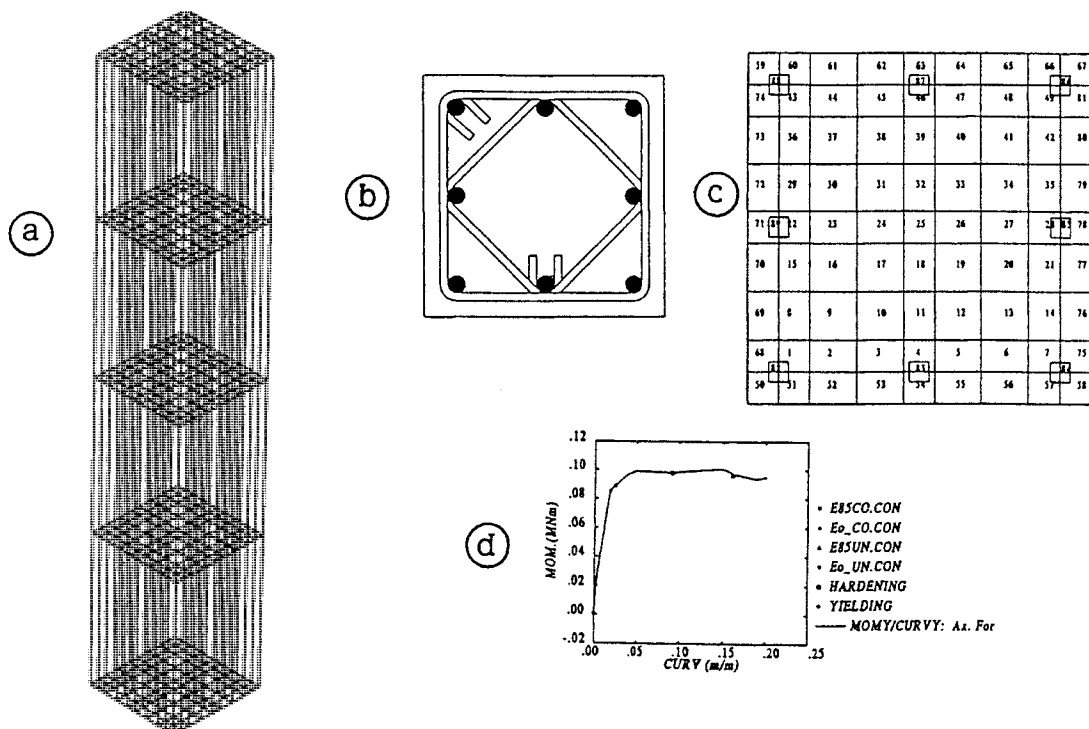


Σχήμα 4.5 Σύγκριση προβλέψεων προσομοιώματος με πειραματικά αποτελέσματα

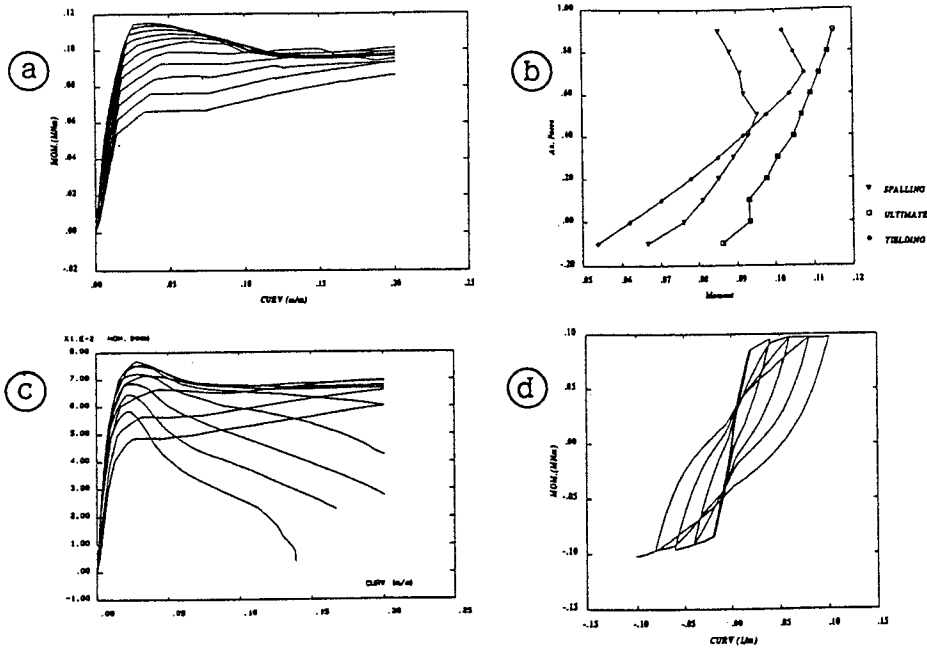




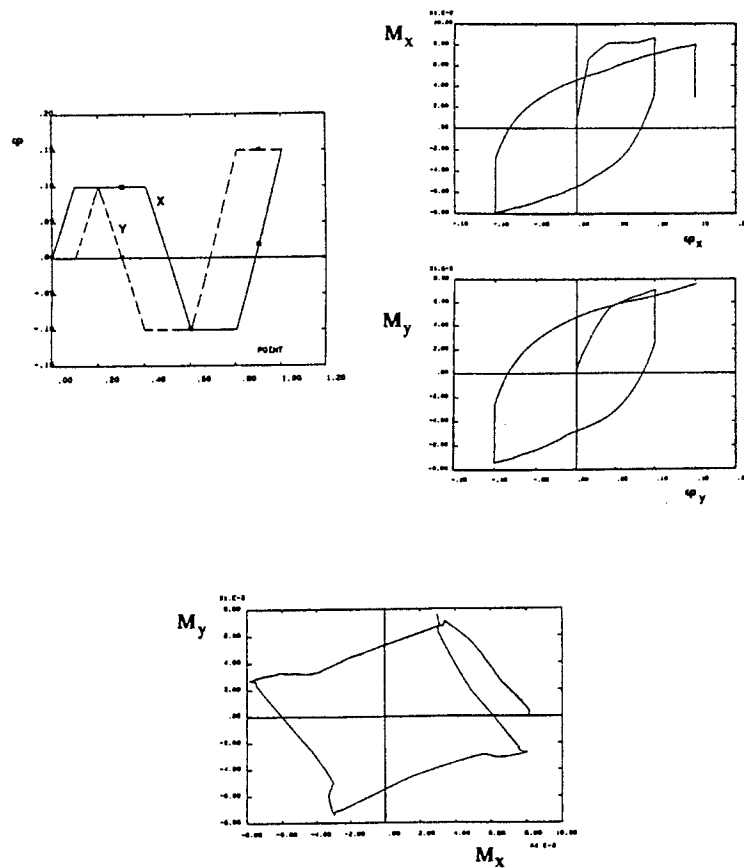
Σχήμα 4.6 Συμπεριφορά του προσομοιώματος του χάλυβα για διάφορες διαδρομές φόρτισης



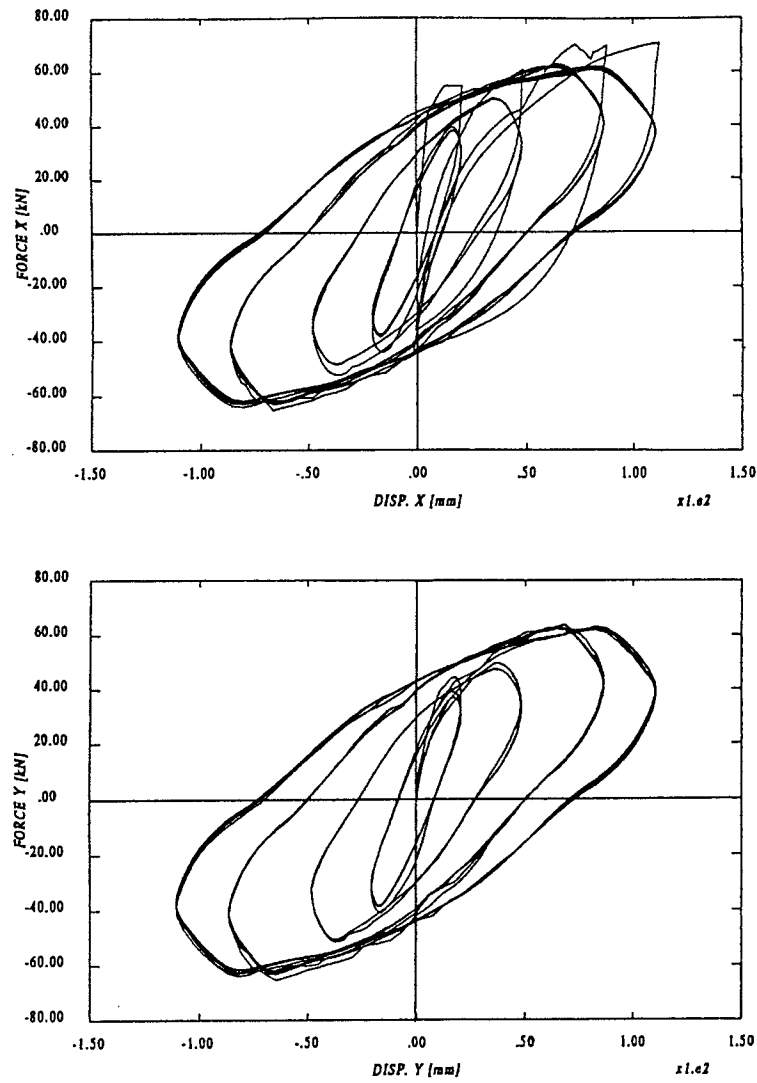
Σχήμα 4.7 Εφαρμογή του προσομοιώματος ινών: (a) διακριτοποίηση μέλους, (b) πραγματική διατομή και οπλισμός, (c) πεπερασμένες περιοχές στη διατομή, (d) μονοτονική καμπύλη ροπής καμπυλότητας



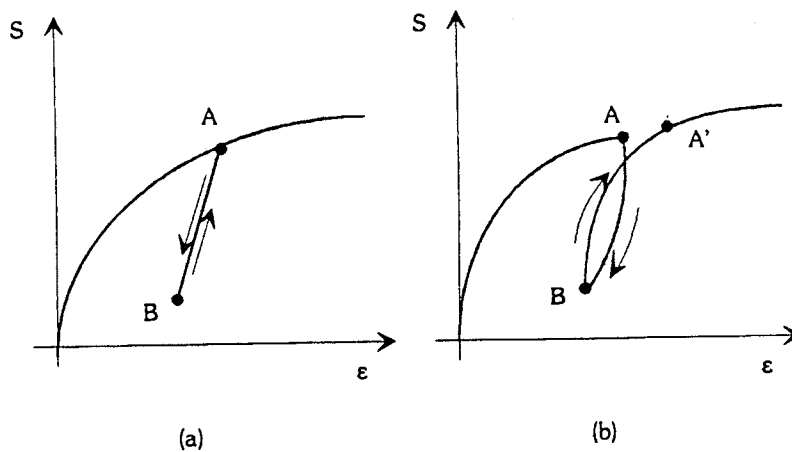
Σχήμα 4.8 Εφαρμογή του προσομοιώματος: (a) μονοαξονική κάμψη, (b) διαγράμματα αλληλεπίδρασης (c) διαξονική κάμψη, (d) βρόχοι υστέρησης



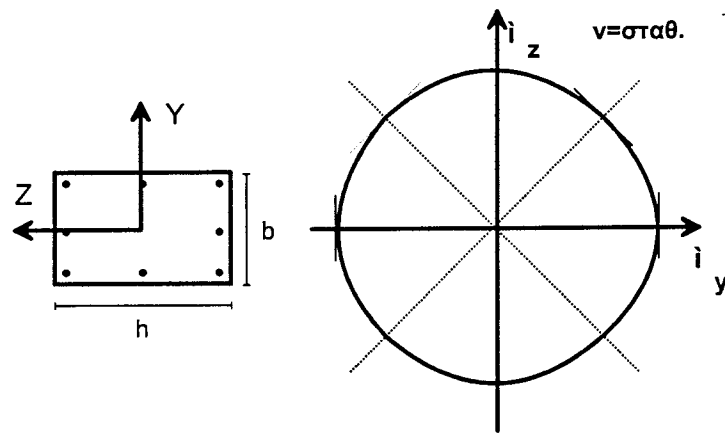
Σχήμα 4.9 Αναλυτικά αποτελέσματα για διαδρομή μορφής τετραγώνου: (a) ιστορία μεταβολής καμπυλοτήτων, (b) και (c) βρόχοι υστέρησης, (d) διαδρομή δυνάμεων απόκρισης.



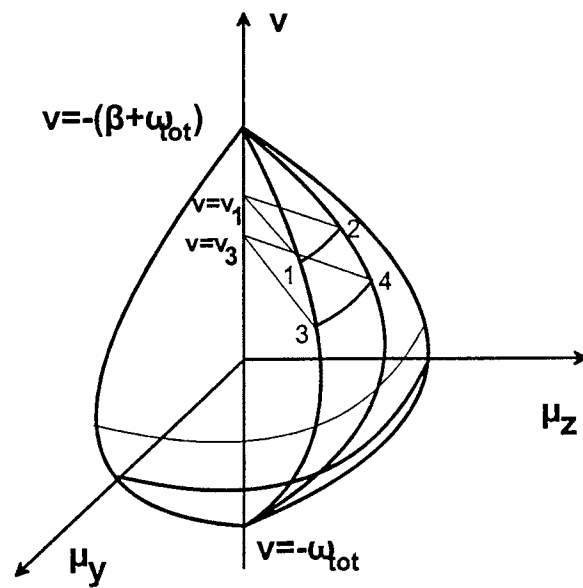
Σχήμα 4.10 Βρόχοι υστέρησης για διαδρομή φόρτισης μορφής «κύκλου»



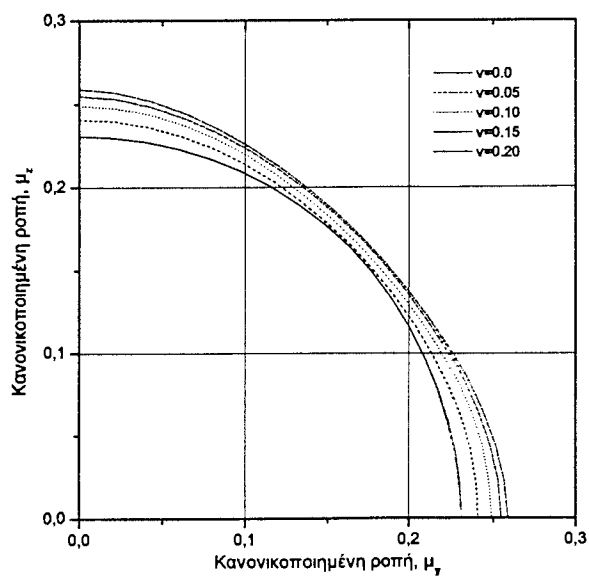
Σχήμα 4.11 Αποφόρτιση/επαναφόρτιση μέσα στη μετελαστική περιοχή: (a) ιδεατή συμπεριφορά, (b) βρόχος υστέρησης κατά το κύκλο φόρτισης



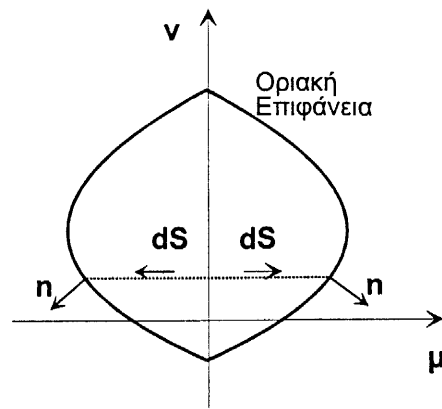
Σχήμα 4.12 Οριακή επιφάνεια ορθογωνικής διατομής



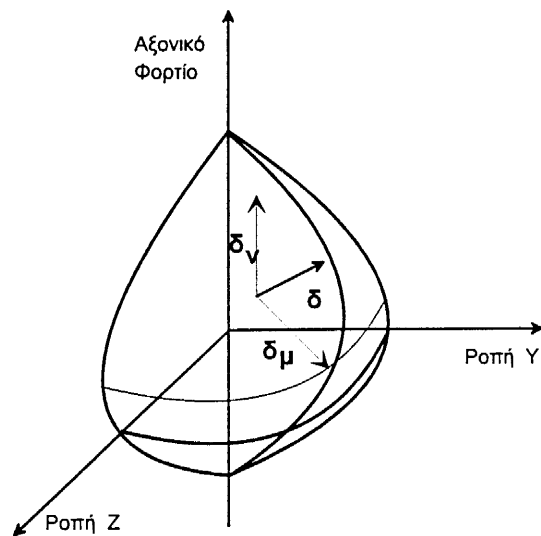
Σχήμα 4.13 Σχηματισμός της οριακής επιφάνειας από στρεβλά τετράπλευρα



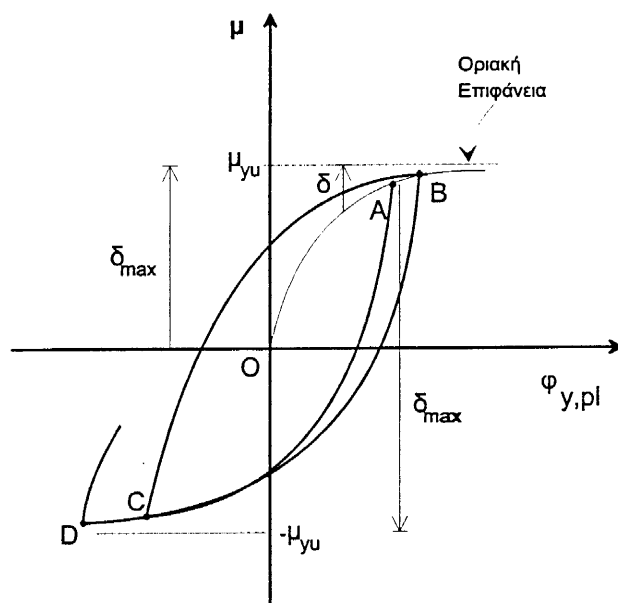
Σχήμα 4.14 Οριακή επιφάνεια για διάφορες τιμές αδιάστατης αξονικής δύναμης – Πρώτο τερτημόριο



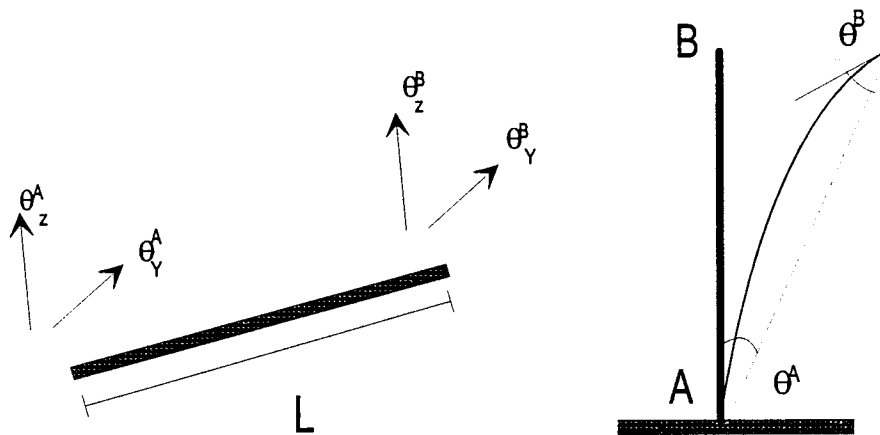
Σχήμα 4.15 Κανόνας διεύθυνσης διανύσματος αξονικών παραμορφώσεων



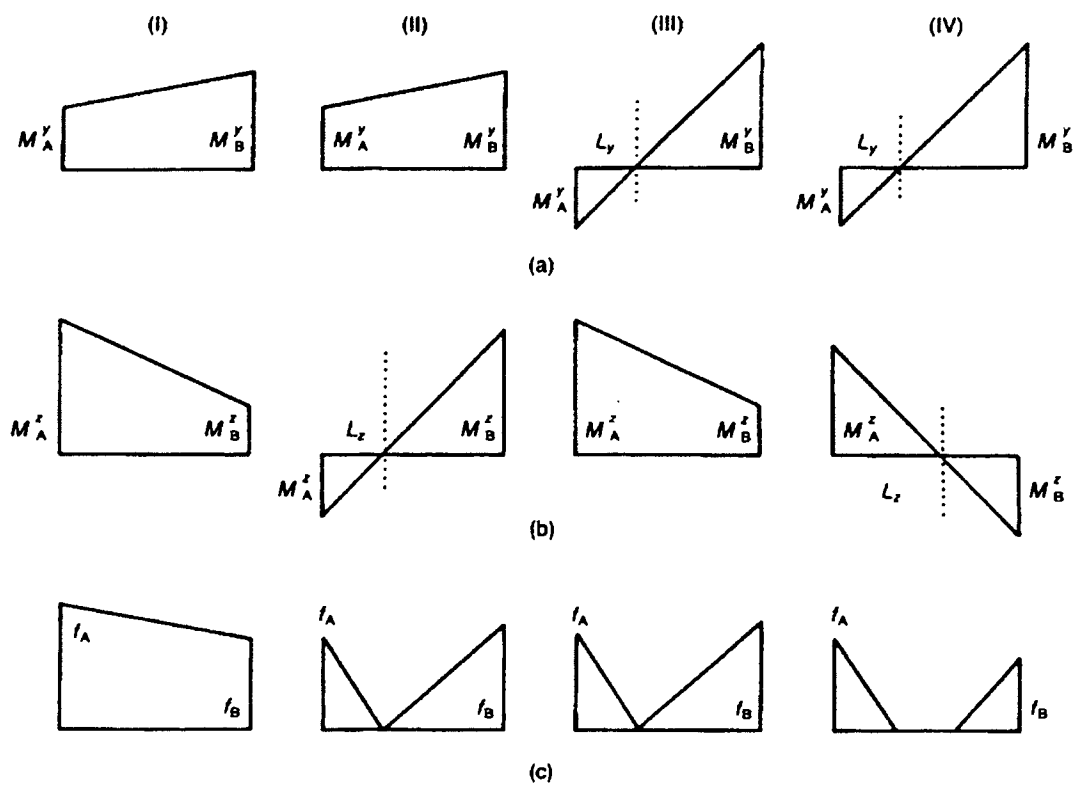
Σχήμα 4.16 Αποστάσεις  $\delta_\mu$  και  $\delta_\nu$  από την Οριακή Επιφάνεια



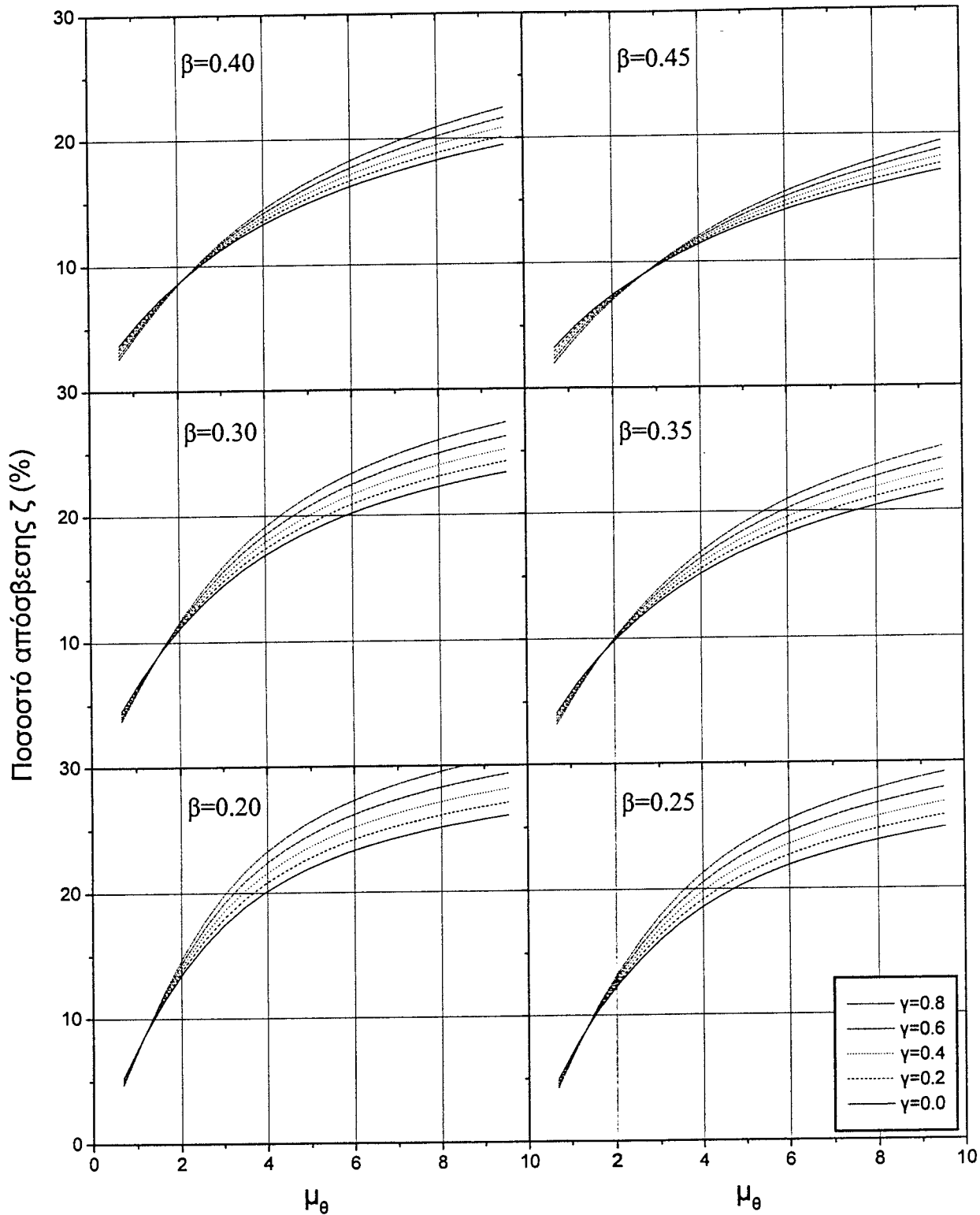
Σχήμα 4.17 Βρόχος υστέρησης για αποφόρτιση/επαναφόρτιση



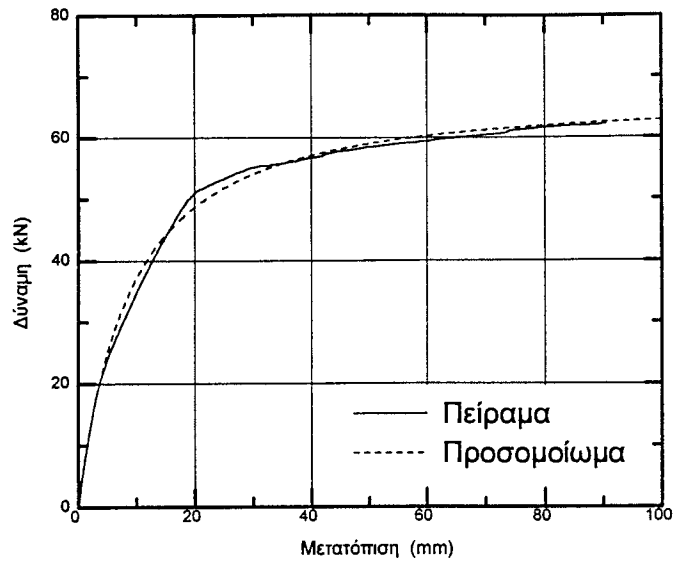
Σχήμα 4.18 Ορισμός της στροφής χορδής



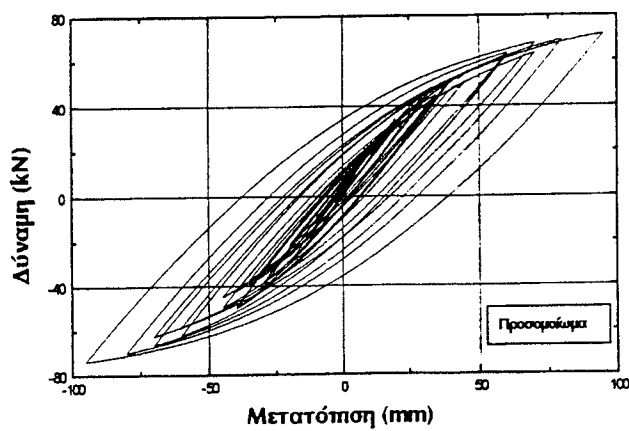
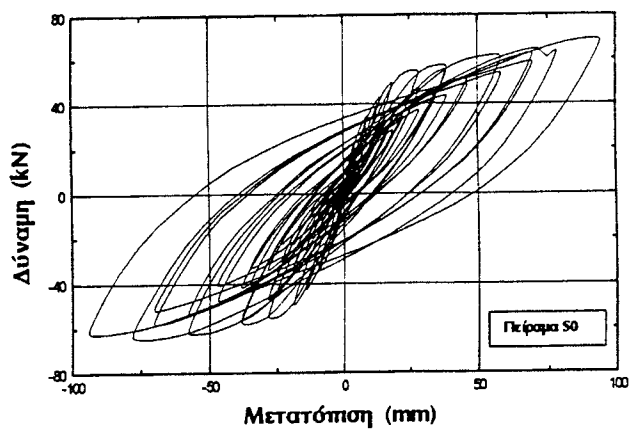
Σχήμα 4.19 Υπόθεση τμηματικά γραμμικής μεταβολής της ευκαμψίας



Σχήμα 4.20 Μεταβολή συντελεστή υστερητικής απόσβεσης  $\zeta$  που προκύπτει από το προσομοίωμα τύπου Οριακής Επιφάνειας για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων  $\beta$  και  $\gamma$

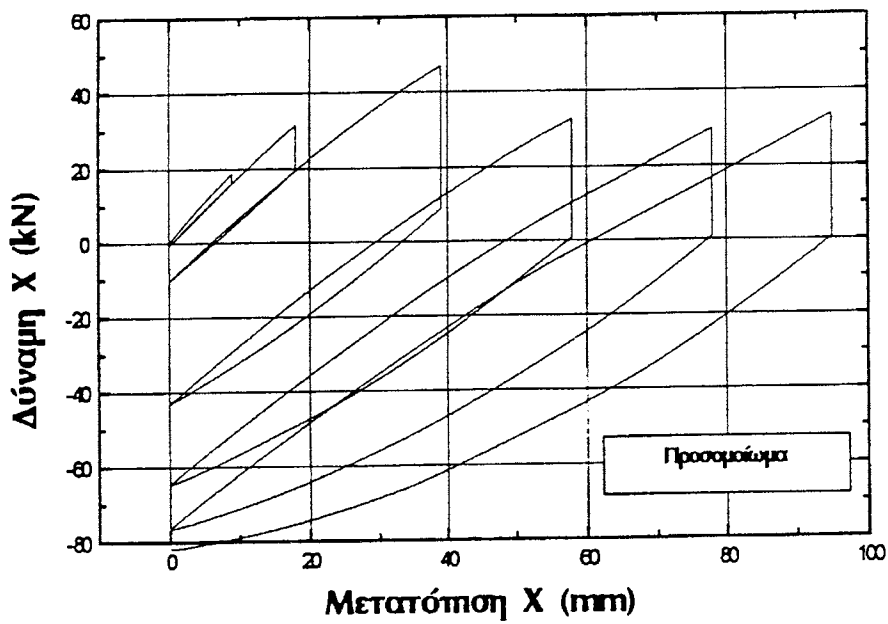
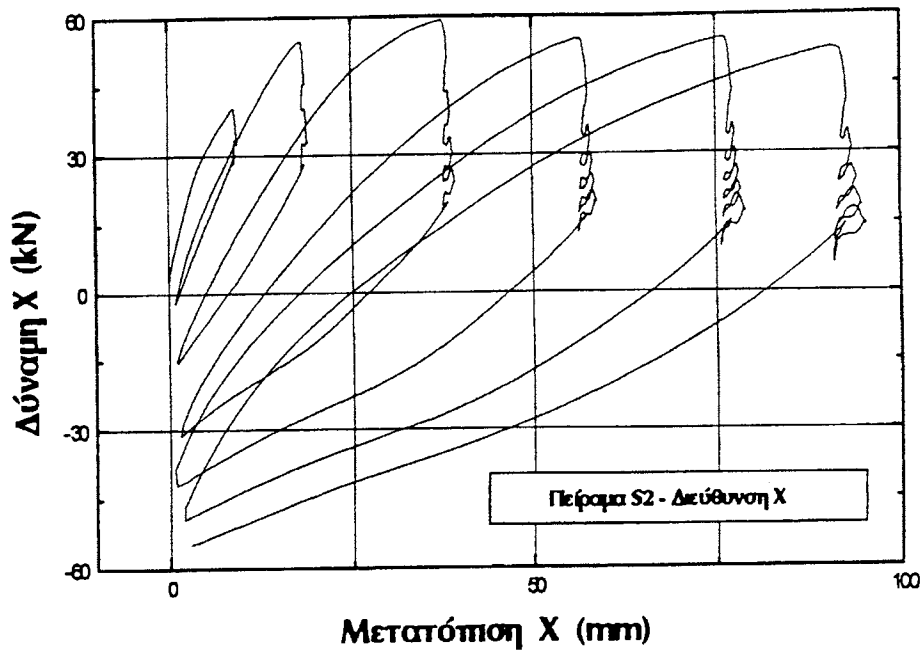


Σχήμα 4.21 Σύγκριση πειραματικής και αναλυτικής καμπύλης μονοτονικής μονοαξονικής κάμψης

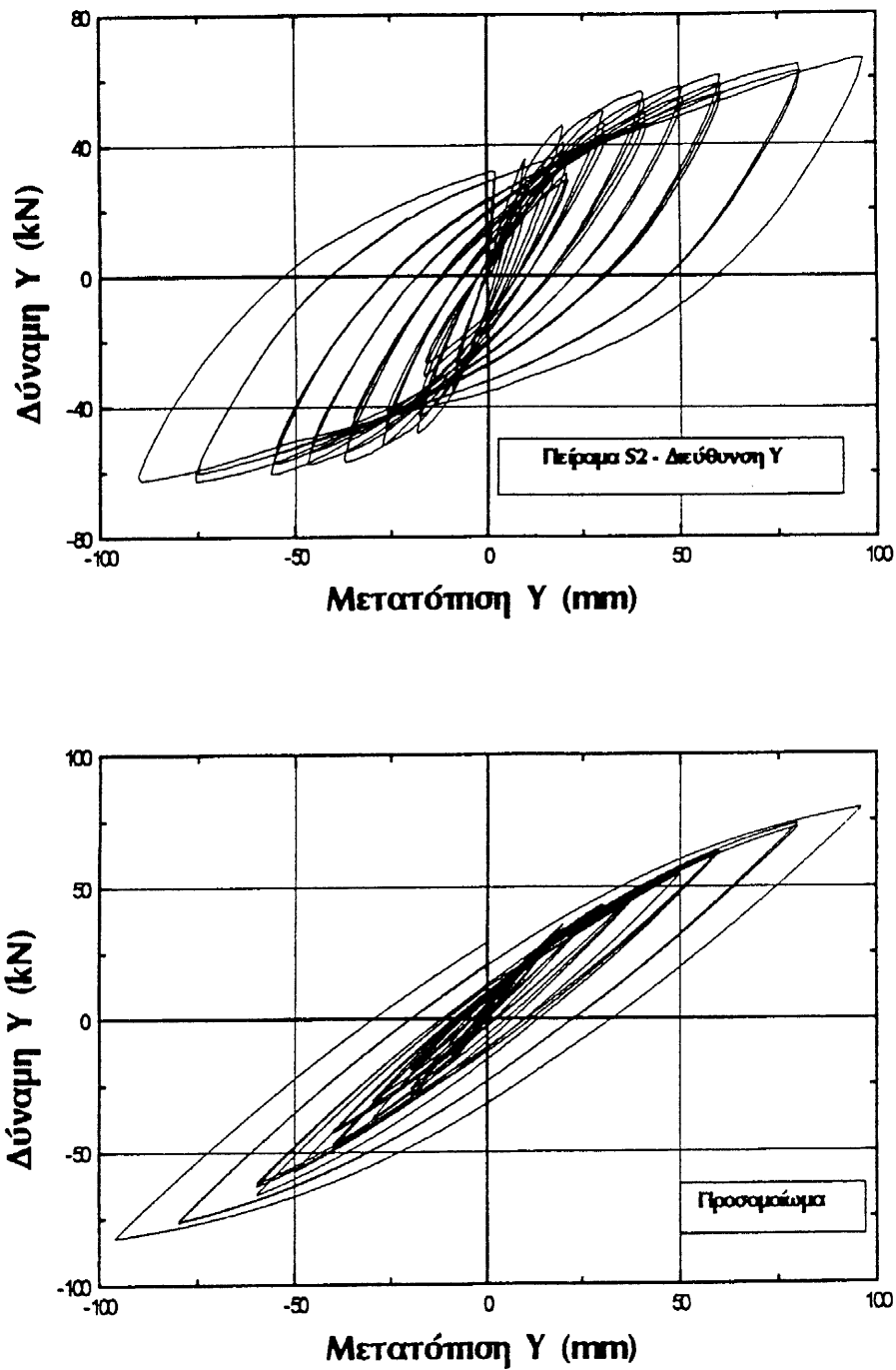


Σχήμα 4.22 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμής S0, Bousias et al. (1995)

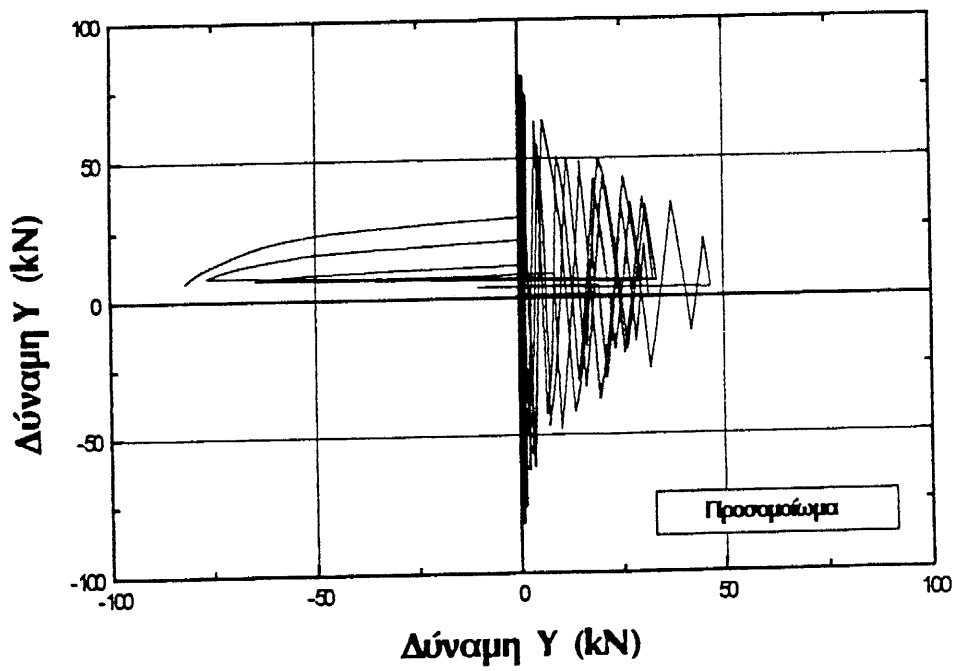
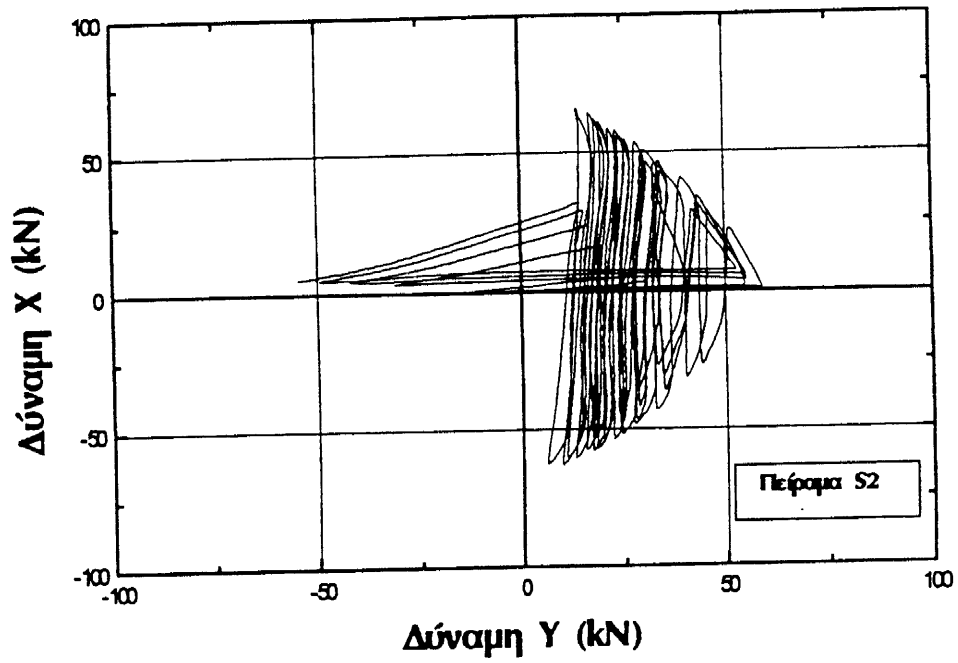




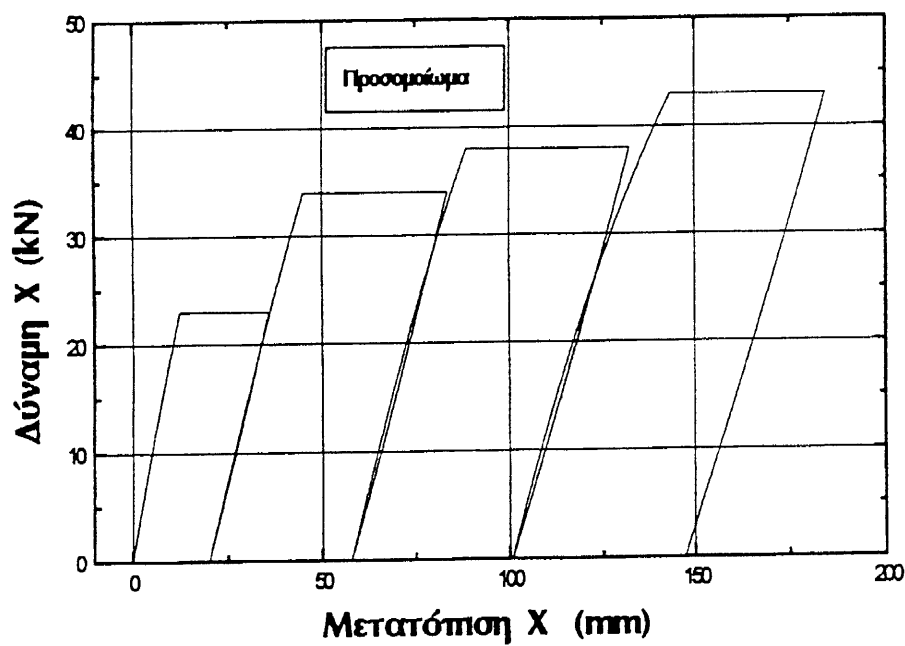
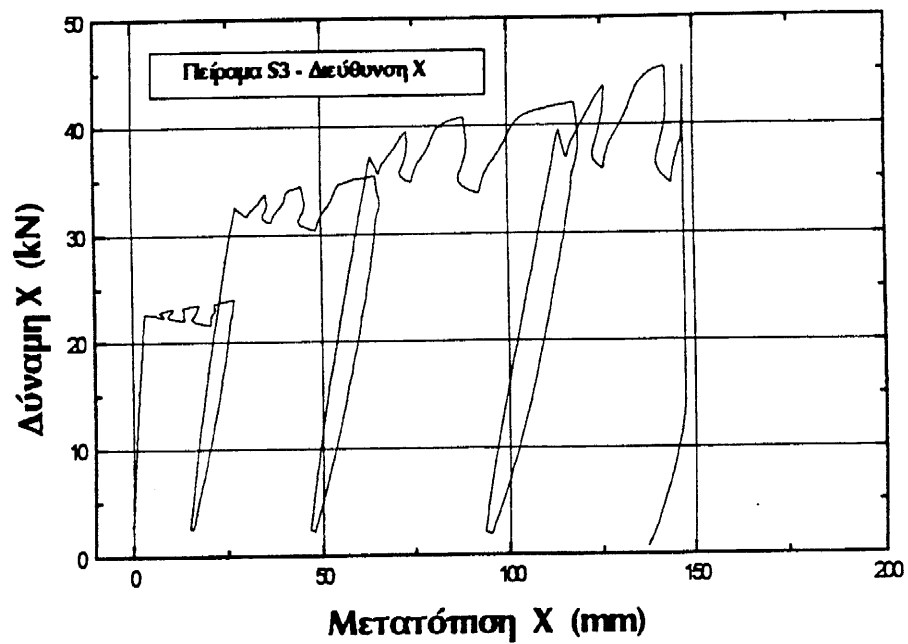
Σχήμα 4.23(a) Σύγκριση πειραματικών–αναλυτικών αποτελεσμάτων διαξονικής κάμψης στη διεύθυνση Y για τη δοκιμή S2 των Bousias et al (1995)



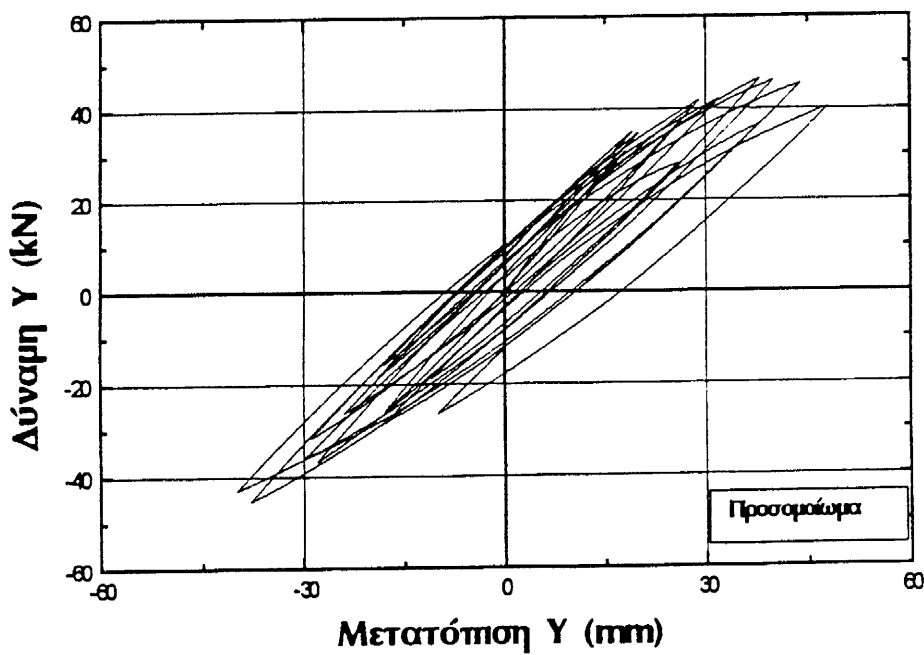
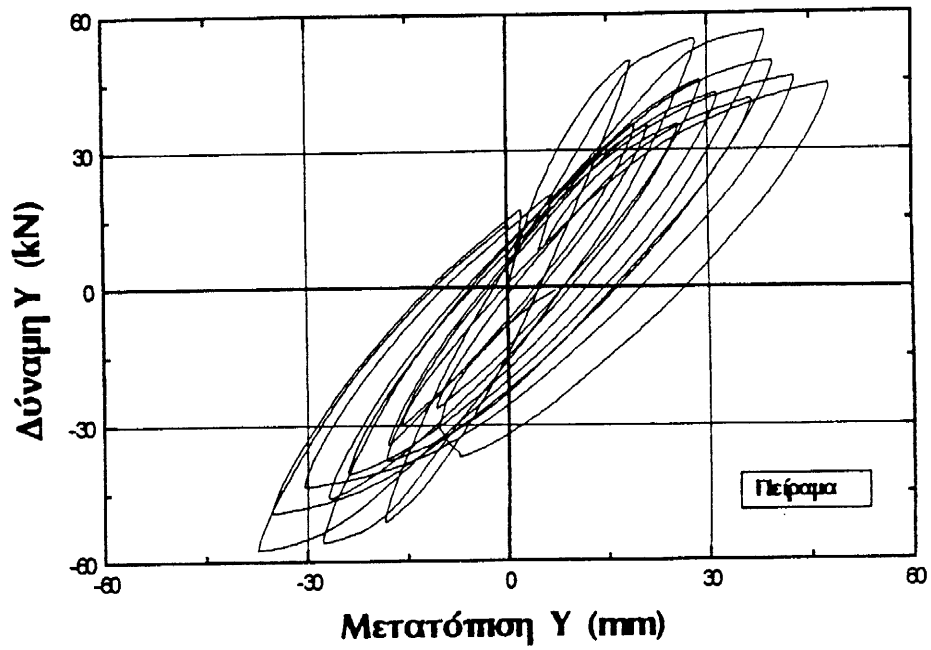
Σχήμα 4.23(b) Σύγκριση πειραματικών–αναλυτικών αποτελεσμάτων διαξονικής κάμψης στη διεύθυνση X για τη δοκιμή S2 των Bousias et al (1995)



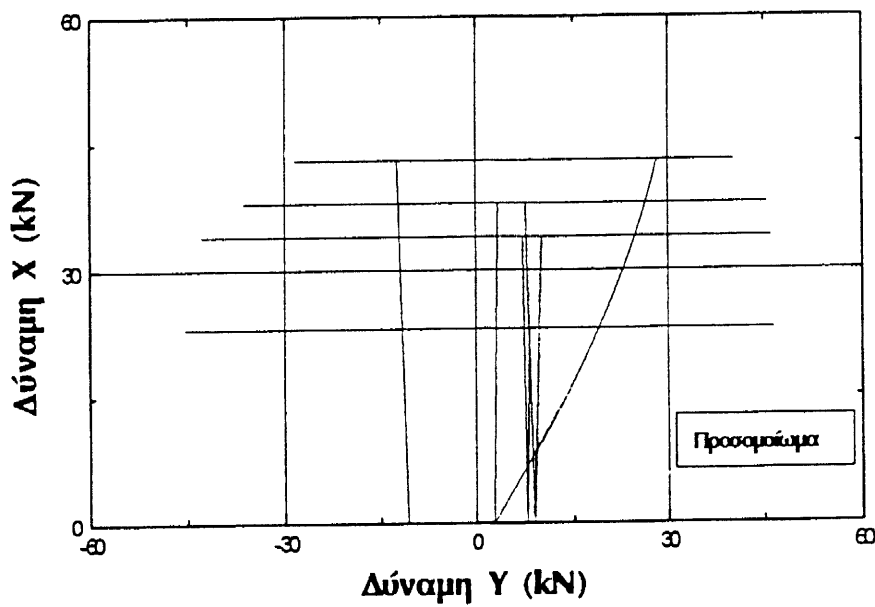
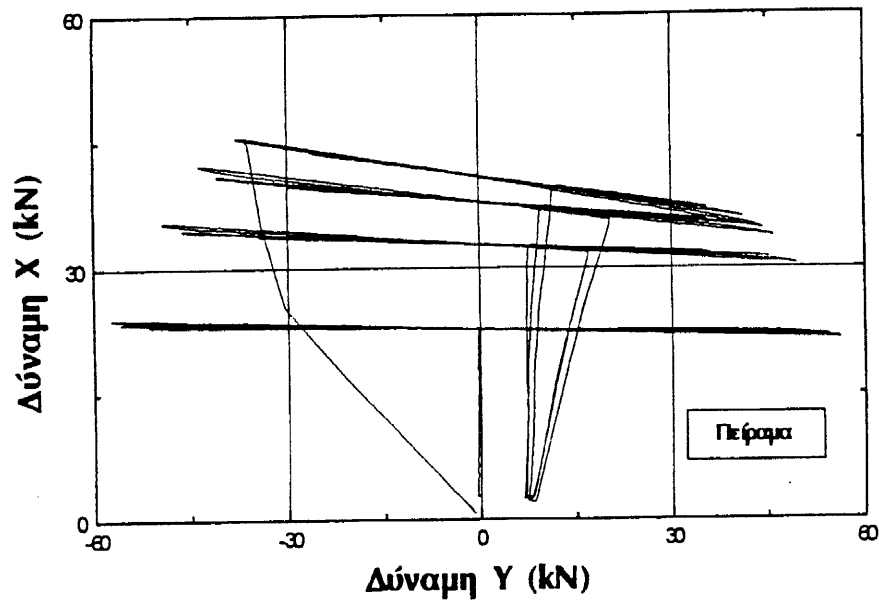
Σχήμα 4.23(c) Διάγραμμα μεταβολής δυνάμεων απόκρισης στο πείραμα και το προσομοίωμα για τη δοκιμή S2 των Bousias et al (1995)



Σχήμα 4.24(a) Σύγκριση πειραματικών-αναλυτικών βρόχων υστέρησης διαξονικής κάμψης στη διεύθυνση X για τη δοκιμή S3 των Bousias et al (1995)



Σχήμα 4.24(b) Σύγκριση πειραματικών-αναλυτικών βρόχων υστέρησης διαξονικής κάμψης στη διεύθυνση Y για τη δοκιμή S3 των Bousias et al (1995)



Σχήμα 4.24(c) Διάγραμμα μεταβολής δυνάμεων απόκρισης στο πείραμα και το προσομοίωμα για τη δοκιμή S2 των Bousias et al (1995))

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα έρευνα αναπτύσσεται και εφαρμόζεται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ένα μαθηματικό προσομοίωμα της ανελαστικής συμπεριφοράς μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό γενικευμένη διαξονική καμπτοδιατμητική ένταση με ορθή δύναμη. Το προσομοίωμα βασίζεται στη Θεωρία Πλαστικότητας τύπου Οριακής Επιφάνειας, και στη μορφή που παρουσιάζεται εδώ ισχύει για κατακόρυφα κυρίως στοιχεία, στα οποία η ανελαστική παραμόρφωση και η αστοχία καθορίζονται από τα μεγέθη ορθής έντασης, και διατμητικής έντασης.

Η Οριακή Επιφάνεια της διατομής κατασκευάζεται με χρήση της Μεθόδου των Ινών, στην οποία ενσωματώνονται εξελιγμένοι καταστατικοί νόμοι υλικών για το χάλυβα και το σκυρόδεμα. Στους καταστατικούς νόμους λαμβάνεται υπόψη η επιρροή του εγκιβωτισμού του σκυροδέματος. Κατόπιν τροποποιείται για να ληφθεί υπόψη η επιρροή του λόγου διάτμησης του μέλους και η επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης

Το προσομοίωμα Οριακής Επιφάνειας αφορά τη μη-γραμμική διαφορική σχέση μεταξύ των μεγεθών ορθής έντασης της διατομής και των αντιστοίχων παραμορφώσεων. Η σχέση αυτή κατασκευάζεται ως σχέση αναλογίας μεταξύ του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων και του εσωτερικού γινομένου του διαφορικού του διανύσματος της έντασης και του μοναδιαίου διανύσματος σε σημείο της Οριακής Επιφάνειας, το οποίο ορίζεται σαν αντίστοιχο του τρέχοντος σημείου της έντασης και βρίσκεται στην προέκταση της διεύθυνση του διαφορικού της τελευταίας.

Για την αναλυτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς ολοκλήρου του μέλους γίνεται ολοκλήρωση των μητρώων ευκαμψίας των επιμέρους διατομών επεκτείνοντας στις δύο διαστάσεις την υπόθεση γραμμικής κατανομής της ευκαμψίας κατά μήκος του μέλους. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται πιθανά αριθμητικά προβλήματα τα οποία δημιουργούνται από προγενέστερα σχήματα ολοκλήρωσης.

Το προσομοίωμα είναι γενικής μορφής, εφαρμόζεται για οποιαδήποτε διαδρομή φόρτισης και λαμβάνει υπόψη τη μείωση της αντοχής και δυσκαμψίας με την ανακύκλιση της έντασης καθώς και την αυξημένη απορρόφηση ενέργειας με υστέρηση. Προσομοιώνει επίσης

με ικανοποιητική ακρίβεια και αλγοριθμική απλότητα τη σύζευξη της απόκρισης μεταξύ των δύο διευθύνσεων κάμψης εγκάρσια στον άξονα του υποστυλώματος.

Λόγω της σχετικά απλής μορφής του, το προσομοίωμα είναι κατάλληλο για ενσωμάτωση σε γενικά προγράμματα μη-γραμμικής ανάλυσης κατασκευών, εφόσον αυτά επιδέχονται την προσθήκη νέων στοιχείων. Τέτοια ενσωμάτωση έγινε για το πρόγραμμα μη-γραμμικής ανάλυσης στο χώρο ANSR.

Σημαντική συνεισφορά της παρούσας έρευνας είναι η συστηματική συγκέντρωση πειραματικών αποτελεσμάτων από την Ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία και η αξιοποίησή της για την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος οποιουδήποτε λόγου διάτμησης, σε μονοαξονική φόρτιση, μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να καθορισθούν οι παράμετροι του προσομοιώματος για οποιαδήποτε γεωμετρία και όπλιση του μέλους.

Συγκεκριλαιώνοντας, η διαδικασία προσομοίωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος που προτάθηκε, υλοποιήθηκε και εφαρμόστηκε στη παρούσα έρευνα είναι η εξής:

1. Για τη διατομή του μέλους κατασκευάζονται διαγράμματα οριακής αντοχής υπό μονοαξονική και υπό ίση διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη, με τη βοήθεια του προσομοιώματος ιών που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 4.2. Αν η διατομή είναι ορθογωνική με οπλισμό περίπου ομοιόμορφα κατανεμημένο σε ζεύγη απέναντι πλευρών, μπορούν αντ' αυτού να χρησιμοποιηθούν οι λιγότερο ακριβείς αλλά απλούστερες αναλυτικές σχέσεις της Ενότητας 3.3.1.
2. Με ελλειπτική παρεμβολή μεταξύ των αποτελεσμάτων του ανωτέρω σταδίου στα μεσημβρινά επίπεδα στις  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  και  $90^\circ$ , κατασκευάζεται "πλήρης" Οριακή Επιφάνεια στο τριδιάστατο χώρο των ορθών εντατικών μεγεθών  $M_y$ - $M_z$ - $N$  της διατομής.
3. Αν το μέλος έχει λόγο διάτμησης μικρότερο ή ίσο του 2.5 (αντίστοιχη οριακή τιμή λυγηρότητας για αντιμετρική κάμψη είναι το  $2 \times 2.5 = 5.0$ ), εφαρμόζεται το προσομοίωμα της Ενότητας 3.3.2 για τον υπολογισμό της μείωσης της μονοαξονικής καμπτικής αντοχής λόγω της τέμνουσας, σαν συνάρτηση του αξονικού φορτίου  $N$ .
4. Εφόσον εφαρμόζεται το ανωτέρω στάδιο 3, για κάθε τιμή της αξονικής δύναμης  $N$  υπολογίζεται ο λόγος της μειωμένης λόγω διάτμησης αντοχής προς την καμπτική μέσα στα δύο κύρια επίπεδα της μονοαξονικής κάμψης, και εφαρμόζεται σαν μειωτικός συντελεστής, με γραμμική παρεμβολή στις ενδιάμεσες διευθύνσεις της (διαξονικής) κάμψης, στα αποτελέσματα του σταδίου 2.



5. Για σεισμική δράση, το μέγεθος της Οριακής Επιφάνειας που καθορίστηκε στα ανωτέρω στάδια 1 έως 4, αυξάνεται κατά 10% ομοιόμορφα σε όλες τις διευθύνσεις, λόγω της επιρροής της ταχύτητας παραμόρφωσης.
6. Στη συνέχεια επιλέγονται οι παράμετροι του προσομοιώματος τύπου Οριακής Επιφάνειας που εξαρτώνται από το λόγο διάτμησης, τη λοιπή γεωμετρία και όπλιση του μέλους και το αξονικό φορτίο. Συγκεκριμένα, για κάθε τιμή της ανηγμένης αξονικής δύναμης  $v$ , καθορίζονται από τις εξ. (19) ή (20) και (3) ή (75) του Κεφ. 3 οι τιμές της γωνίας στροφής χορδής στο μήκος διάτμησης και της ροπής στη διαρροή,  $\theta_y$  και  $M_y$ . Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στην εξ. (69) του Κεφ. 4 για τον καθορισμό της παραμέτρου  $C_\mu(v)$  συναρτήσει των παραμέτρων  $\beta$  και  $\gamma$ . Τιμές των παραμέτρων  $\beta$  και  $\gamma$  επιλέγονται με τη βοήθεια των Σχ. 3.26 και 4.20 (ή αντί του Σχ. 4.20, της εξ. (70) του Κεφ. 4, με μετατροπή της γωνίας  $\varphi$  σε αντίστοιχη  $\theta_A$  μέσω της εξ. (68) του Κεφ. 4 και διαίρεση της τελευταίας δια της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$ , για μετατροπή σε δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων ή γωνίας στροφής,  $\mu_\theta$ ). Για απλότητα η παράμετρος  $\gamma$  μπορεί να ληφθεί ίση με 0, οπότε για στοιχεία με υψηλό λόγο διάτμησης ταιριάζουν χαμηλές τιμές του  $\beta$  (γύρω στο 0.2 με 0.25), και για στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης υψηλές τιμές του  $\beta$  (γύρω στο 0.40). Η παράμετρος  $q$ , που καθορίζει τη διαξονική παραμορφωσιακή συμπεριφορά, μπορεί να ληφθεί στις εξ. (23), (24) και (26) του Κεφ. 4 ίση με 0.65.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Abrams, D. (1987) "Influence of Axial Force Variation on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns", *ACI Struct. Jour.*, V. 84, May-June, 246-254.
- Aktan, A., D. Pecknold and M.A. Sozen (1974) "R/C Column Earthquake Response in two dimensions", *ASCE Jour. of Struct. Div.*, V. 100, ST10, 1999-2015.
- Alca, N., Alexander, S. D. B. and MacGregor, J. G. (1997), "Effect of Size on Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams", *ACI, Journal*, Vol. 94, Jan.-Feb., pp.59-66.
- Ammann,W., Muhlermatter, M. and Bachmann, H. (1982) "Stress-strain behaviour of non-prestressed and prestressed reinforcing steel at high strain rates", *RILEM/CEB/IABSE/IASS Intern. Symp. "Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading"*, BERLIN, 146-156
- Anagnostopoulos, S.A. (1972) "Nonlinear Dynamic Response and Ductility Requirements of Building Structures Subjected to Earthquakes", *Res. Rep. No. R72-54*, Dept. of Civil Engrg, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma.
- Anagnostopoulos, S.A. (1981) "Inelastic Beams for Seismic Analyses of Structures", *ASCE Journ. Struct. Div.*, V. 107, ST7, 1297-1311.
- Ang, B.G., M.J.N. Priestley and T. Paulay (1989) "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns ", *ACI Struct. J.*, V. 86, Jan.-Feb., 45-58.
- Arzoumanidis, S.G. and C. Meyer (1981) "Modelling R/C Beams Subjected to Cyclic Loads", *Tech. Rep. No. SF-PER-7924695- CU-I*, Dept. of Civil Engrg, Columbia University, New York, N.Y.
- ASCE (1982) "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete", *State-of-the-Art Report*.
- Atalay, M.B. and J. Penzien (1975) "The Seismic Behavior of Critical Regions of Reinforced Concrete Components as Influenced by Moment, Shear and Axial Force," *Earthq. Engrg. Res. Center, Rep. No. UCB/EERC 75-19*, Univ. of California, Berkeley, Ca.

- Atchley, B., Furr, H., "Strength and energy absorption capabilities of plain concrete under dynamic and static loadings", ACI Journal, November 1967, pp.745-756.
- Aycardi, L. E., Mander, J. B. and Reinhorn, A. M. (1994), "Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Structures Designed Only for Gravity Loads: Experimental Performance of Subassemblages", ACI, Journal, Vol. 91, Sept.-Oct., pp.552-563.
- Aziz, T.S. (1976) "Inelastic Dynamic Analysis of Building Frames", Res. Rep. No.R76-37, Dept. of Civil Engrg, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma.
- Banon, H. (1980) "Prediction of Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames", Res. Rep. R80-16, Dept. of Civil Engrg, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma.
- Bazant, Z. and P. Bhat (1977) "Prediction of Hysteresis in Reinforced Concrete Frames", J. of Struct. Div., ASCE, V. 107, ST9, 1713-1729.
- Bertero, V.V., B. Bresler and H. Liao (1969) "Stiffness Degradation of Reinforced Concrete Members to Cyclic Flexural Moments", Earthq. Engrg Res. Center, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Bhargava, J., Rehnstrom, A., "Dynamic strength of polymer modified fiber-reinforced concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 7, 1977, pp. 199-208.
- Bicanic, N, Zienkiewicz, O.C., "Constitutive model for concrete under dynamic loading", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, 1983.
- Bicanic, N., de Borst, R. (eds) (1994)"Computational Modelling of Concrete Structures", Proc. EURO-C, Innsbruck, Pineridge Press, UK.
- Bicanic, N., Mang, H., (eds) (1990) "Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures", Proc. SCI-C, Zell-Am-See, Pineridge Press, UK.
- Bigaj, A. and Walraven, J. C. (1993) "Size Effect on Rotational Capacity of Plastic Hinges in Reinforced Concrete Beams", CEB, Bulletin d' Information No. 218, "Ductility - Reinforcement", Progress report of Task Group 2.2, "Ductility Requirements for Structural Concrete - Reinforcement", pp. 7-23.
- Bosco, C. and Debernardi, P. G. (1993) "Influence of Some Basic Parameters on the Plastic Rotation of Reinforced Concrete Elements", CEB, Bulletin d' Information No. 218, "Ductility - Reinforcement", Progress report of Task Group 2.2, "Ductility Requirements for Structural Concrete - Reinforcement", pp. 25-44.

- Bousias, S. N., Verzeletti, G., Fardis, M. N., and Gutierrez, E., "Load-path effects in column biaxial bending with axial force", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 121, No. 5, May. 1995, pp. 596-605.
- Bousias, S.N. (1993) "Experimental and Analytical Study of Reinforced Concrete Columns in Cyclic Biaxial Bending with Axial Force", Thesis submitted to the Dept. of Civil Engrg, Univ. of Patras, in fulfillment of the requirements for the Doctoral Degree.
- Bousias, S.N., G. Verzeletti, M.N. Fardis and G. Magonette (1992) "RC Columns in Cyclic Biaxial Bending and Axial Load", *Proc. 10th World Conf. on Earthq. Engrg*, Madrid, 3041-3046.
- Brown, R.H. and Jirsa, J.O. (1971) "Reinforced Concrete Beams under Load Reversals", *ACI, Jour.*, V. 68, May, 380-390.
- Building Research Institute (1976) "A List of Experimental Results on Deformation Ability of Reinforced Concrete Columns under Large Deflection, (No. 2)", *Rep. No. 49-III.(3).1*, Min. of Construction, Japan.
- Building Research Institute (1976) "A List of Experimental Results on Deformation Ability of Reinforced Concrete Columns under Large Deflection", (No. 2), *Report No. 49-III.(3).1*, Ministry of Construction, Japan.
- Building Research Institute (1978) "A List of Experimental Results on Deformation Ability of Reinforced Concrete Columns under Large Deflection", (No. 3), *Report No. 21*, Ministry of Construction, Japan.
- Burns, N. and C. Siess (1962) "Load-Deformation Characteristics of Beam-Column Connections in Reinforced Concrete", *Civil Engrg Res. Studies, Str. Res. Series No. 234*, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Calvi, G. M., Cantu, E., Macchi, G. and Magenes, G. (1993) "Experimental Investigation on the Rotation Capacity of Concrete Slab Elements Reinforced With Welded Wire Meshes", *Report No. 34*, Dipartimento di Meccanica Strutturale dell'Universita di Pavia.
- Celebi, M. and Penzien, J. (1973) "Experimental Investigation into the Seismic Behavior of Critical Regions of Reinforced Concrete Components as Influenced by Moment and Shear", *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC 73-04*, Univ. of California, Berkeley, California.

- Chen, P.F-S. and G.H. Powell (1982) "Generalized Plastic Hinge Concepts for 3-D Beam-Column Elements", Rep. No. UCB/EERC 82-80, Earthq. Engrg Res. Center, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Chronopoulos, M. P. and Vintzileou, E. (1995) "Confinement of R/C Columns", 5th SECED Conference on European Seismic Design Practice - Research and Application, Chester, UK, pp. 341-348.
- Chung, L., Shah, S.P., "Effect of Loading Rate on Anchorage Bond and Beam-Column Joints", ACI Structural Journal, V. 86, No 2, 132-142.
- Chung, L., Shah, S.P., "Strain rate effects on bond stresses during earthquake loading", Pacific Conference on Earthquake Engineering, New Zeland, 5-8 August, 1987.
- Chung, Y.S., C. Meyer and M. Shinozuka (1978) "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Members", Tech. Report No. NCEER-87-0022, Nat. Center for Earthq. Engrg Research, State Univ. of New York, Buffalo, N.Y.
- Clough, R. and S. Johnston (1966) "Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements", Trans. Japan Earthq. Engrg Symposium, Tokyo, 195-198.
- Clough, R.W. K.L. Benuska and E.L. Wilson (1965) "Inelastic Earthquake Response of Tall Buildings", Proc. Third World Conf. on Earthq. Engrg, New Zealand, V. 11.
- Coelho, E. and E. C. Carvalho (1990) "Nonlinear Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures", Proc. 9th Europ. Conf. on Earthq. Engrg., Moscow.
- Comite Eurointernational du Beton (1991) "Behaviour and Analysis of R.C. Structures under Alternate Actions Inducing Inelastic Response. Vol. I: General Models", Bull. d' Information No. 210, Lausanne.
- Corley, G. W. (1966) "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 92, pp. 121-146.
- Costa, A.C. and A.G. Costa (1987) "Hysteretic Model of Force-Displacement Relationships for Seismic Analysis of Structures", Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon.
- Darwin, D. and C. K. Nmai (1986) "Lightly Reinforced Concrete Beams Under Cyclic Load", ACI J., V. 83, Sept.-Oct., 777-783.

- Evans, R.H., "Effect of rate of loading on some mechanical properties of concrete", Proc. Conf. on Mechanical Properties of non-metallic brittle materials, London 1958, pp. 175-192.
- Fang I-K, Wang C-S, Hong K-L, (1994), "Cyclic Behavior of High-Strength Short Beams with Lower Amount of Flexural Reinforcement", ACI Structural Journal, Jan-Feb, 10-18.
- Fardis, M. N., Nacar, A., and Delichatsios, M. A. (1982) "Reinforced concrete containment safety under hydrogen explosion loading", Research Report, Dept. of Civil Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge Ma., April 1982.
- Fardis, M.N. (1991) "Member-type Models for the Nonlinear Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures", in "Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering", J. Donea and P.M. Jones (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 247-280.
- Filippou, F.C. and A. Issa (1988) "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frames under Cyclic Load Reversals", Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No. UCB/EERC 88-12, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- French, C.W. and A.E. Schultz (1991) "Minimum Available Deformation Capacity of Reinforced Concrete Beams", in SP-127 "Earthquake Resistant Concrete Structures. Inelastic Response and Design", (S.K. Ghosh, ed.), American Concrete Institute, Detroit, Mich., 363-410.
- Garstka, B. (1993) "Untersuchungen zum Trag- und Schädigungsverhalten Stabförmiger Stahlbetonbauteile mit Berücksichtigung des Schubeinflusses bei Zyklischer Nichtlinearer Beanspruchung" Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.
- Garstka, B., W.B. Krätzig and F. Stangeberg (1993) "Damage Assessment in Cyclically Loaded Reinforced Concrete Members", in Structural Dynamics - Eurodyn'93, Moan et al (eds), Balkema, Rotterdam, V.1, 121-128.
- Giberson, M.F. (1967) "The Response of Nonlinear Multi-story Structures Subjected to Earthquake Excitation", Thesis submitted to the California Inst. of Technology, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- Gibbertsen, N. and J. P. Moehle (1980) "Experimental Study of Small Scale R/C Columns Subjected to Axial Load and Shear Reversals", Civil Engrg Studies, Struct. Res. Ser. No. 81, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.

- Goldsmith, W. Polivka, M., Yang, T.; "Dynamic behaviour of concrete", *Experimental Mechanics*, Vol. 6, No. 2, February 1966, pp. 65-79.
- Gosain, N.K. (1973) "Effect of Cyclic Loads on Beams with High-Strength Reinforcement", Thesis presented to the Dept. of Civil Engrg, Rice Univ., in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Houston, TX.
- Gosain, N.K., R.H. Brown and J.O. Jirsa (1977) "Shear Requirements for Load Reversals on RC Members", *Jour. of Struct. Div., ASCE*, V. 103, ST7, 1461-1476.
- Gutierrez, E., Magonette, G. and Verzeletti, G (1993) "Experimental studies of loading rate effects on reinforced concrete columns", *J. of Engng. Mech.*, V. 119, No 5, 887-904
- Hanson, N.W. and H.W. Conner (1972) "Tests of Reinforced Concrete Beam-Column Joints under Simulated Seismic Loading," *Res. and Devel. Bull. RD012.01D*, Portland Cement Association, Skokie, Ill.
- Hatano, T., Tsutsumi, H., "Dynamic compressive deformation and failure of concrete under earthquake load", *Proc. of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, 1960.
- Hellesland, J. and A. Scordelis (1981) "Analysis of RC Bridge Columns Under Imposed Deformations", *IABSE*, Delphi, 545-559.
- Hsu, L.W. (1974) "Behavior of Multistory Reinforced Concrete Walls during Earthquakes," Thesis submitted to the Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- Hughes, B.P., Gregory, R., "Concrete subjected to high rates of loading in compression", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 24, No 78, March 1972.
- Hughes, B.P., Watson, A.J., "Compressive strength and ultimate strain of concrete under impact loading", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 30, No. 105, December 1978, pp. 189-199.
- Hwang, T.H. and C.F. Scribner (1984) "Reinforced Concrete Member Cyclic Response during Various Loadings", *J. of Struct. Div., ASCE*, V. 110, ST3, 477-489.
- Ichinose, T. and Takiguchi, K. (1994) "Experimental Verification of Beams Models for R/C", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 8, pp. 2261-2280.

- Jirsa, J.O., K. Maruyama, and H. Ramirez (1980) "The Influence of Load History on the Shear Behaviour of Short R.C. Columns", Proc. 7th World Conf. Earthq. Engrg, Instabul, V. 6, 339-346
- Kaba, S. and S.A. Mahin (1984) "Refined Modeling of Reinforced Concrete Columns for Seismic Analysis", Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No. UCB/EERC 84-3, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Kanaan, A.E. and G.H. Powell (1973) "General Purpose Computer Program for Inelastic Dynamic Response of Plane Structures", Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No. UCB/EERC 73-6, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Kaneko, Y. and Y. Tanaka (1978) "Shear Failure Mechanism of Reinforced Concrete Short Columns", Proc. 5th Japan Earthq. Engrg Symposium
- Kaneko, Y. and Y. Tanaka (1980) "Brittle Failure Criteria of Reinforced Concrete Short Columns Caused by Earthquake Loading", Proc. 7th World Conf. Earthq. Engrg, V. VI, Istanbul, 1980, 565-568.
- Karsan, I. D., Jirsa, J. O. (1964) "Behaviour of concrete under compressive loading", Journal of Structural Division, ASCE, 95, No. 2, Feb. 1964, pp. 195-211.
- Kent, D.C. and R. Park (1971) "Flexural Members with Confined Concrete", J Struct. Div., ASCE, V. 97, 1969-1990.
- Keshavarzian, M. and W.C. Schnobrich (1985) "Inelastic Analysis of R/C Coupled Shear Walls", Earthq. Engrg and Struct. Dynamics, V. 13, 427-448.
- Kobayashi, K., S. Kokusho, K. Takiguchi and C. Boo (1984) "Study on the Restoring Force Characteristics of RC Columns to Bi-directional Deflection History", Proc. 8th World Conf. on Earthq. Engrg, San Fransisco, Ca., VI, 537-544.
- König, G., S. Tang and C. Graham (1993) "Untersuchung zum Nichtlinearen Verhalten von Kurzen Stützen unter Erdbeben-Beanspruchung", Abschlussbericht, Institut für Bautechnik
- Krätzig, W.B., I.F. Meyer and F. Stangenberg (1989) "Experimentelle Untersuchungen zur Schädigungsevolution und Instandsetzung von Stahlbetonstützen unter erdbebenähnlicher Beanspruchung", SFB 151, Berichte Nr. 14, Ruhr-Universität, Bochum.



- Kreger, M. and L. Linbeck (1984) "Behavior of Reinforced Concrete Columns Subjected to Lateral and Axial Loading Reversals", Proc. 3rd U.S. Nat. Conf. on Earthq. Engrg.
- Kunnath, S.K. and A.M. Reinhorn (1990) "Model for Inelastic Biaxial Bending Interaction of Reinforced Concrete Beam-Columns", ACI Struct. J., V. 87, May-June, 284-291.
- Kunnath, S.K., A.M. Reinhorn and Y.J. Park (1990) "Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of R/C Structures", ASCE Jour. of Struct. Engrg., V. 116, 4, 996-1017.
- Kunnath, S.K., N. Panahshahi and A.M. Reinhorn (1991) "Seismic Response of RC Buildings with Inelastic Floor Diaphragms", ASCE Jour. of Struct. Engrg, V. 117, 4, 1218-1237.
- Kustu, O. and J. Bouwkamp (1975) "Behaviour of Reinforced Concrete Deep Beam-Column Subassemblages under Cyclic Loads", Rep. No. UCB/EERC - 73/8, Earthq. Engrg. Res. Centre, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Lai, S.S. (1976) "Post-Yield Hysteretic Biaxial Models for Reinforced Concrete Members", ACI Struct. Journal, V. 84, 235-245.
- Lai, S.S., G.T. Will and S. Otani (1984) "Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Members", ASCE Jour. of Struct. Engrg, V. 110, 11, 2563-2584.
- Langseth, M., Lindholm, U. S., Larsen, P. K. and Lian, B. (1982) "Strain-rate sensitivity of mild steel Grade St 52-3N", ASCE J. Engrn. Mechanics, 117 (4), 719-732
- Li, K-N., H. Aoyama and S. Otani (1987) "Reinforced Concrete Columns under Varying Axial load and Bi-directional Horizontal Load Reversals", Proc. Pacific Conf. on Earthq. Engrg, New Zealand, V.1, 141-152.
- Limberger, E., Brandes, K. and Herter, J. (1982) "Influence of mechanical properties of reinforcing steel on the ductility of reinforced concrete beams with respect to high strain rates", RILEM/CEB/IABSE/IASS Intern. Symp. "Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading", BERLIN, 134-145
- Litton, R.W.(1975), "A Contribution to the Analysis of Concrete Structures under Cyclic Loading", Thesis submitted to the Dept. of Civil Engrg of the Univ. of California at Berkeley, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Berkeley, Ca.

- Low, S. and J.P. Moehle (1987) "Experimental Study of Reinforced Concrete Columns Subjected to Multi-axial Cyclic Loading", Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No UCB/EERC 87-14, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Ma, S.H., V.V. Bertero and E.P. Popov (1976) "Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams," Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No UCB/EERC 76-2, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Mahasuverachai, M. and Powell, G.H. (1982) "Inelastic Analysis of Piping and Tubular Structures", Rep. No. UCB/EERC 82-27, Earthq. Engrg. Res. Center, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Mahin, S., Bertero, V.V. (1972), "Rate of loading effects on uncracked and repaired reinforced concrete members", EERC Report 72-9, University of California, Berkeley, Dec.
- Mainstone, R.J. (1974), "Properties of material ta high rates of straining or loading", State-of-the-art-report, 21 IL RILEM Committee.
- Malvern, L.E., Tang, T., Jenkins, D.A, and Gong, J.C. (1986), "Dynamic compressive strength of cementitious materials", Material Research Society, Symposium Proceedings, Vol 64.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. (1988) "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- Mander, J.B. (1984) "Experimental Behavior of Ductile Hollow Reinforced Concrete Columns", 529-536.
- Mari, A. and A. Scordelis (1984). "Nonlinear Geometric Material and Time Dependent Analysis of Three Dimensional Reinforced and Prestressed Concrete Frames", Str. Engrg Str. Mech. Rep. No. 82-12, Dept. of Civil Engrg, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Mark, K. (1976) "Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Frames", Res. Rep. No. R76-38, Department of Civil Engrg, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma.
- Maruyama, K., H. Ramirez and J.O. Jirsa (1984) "Short RC Columns under Bidirectional Load Histories", J. of Struct. Engrg ASCE, V. 110, ST1, 120-137.

- Mattock, A. H. (1964) "Rotational Capacity of Hinging Regions in Reinforced Concrete Beams", *Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, Proc. of the International Symposium, ASCE, Miami, Florida*, pp. 143-180.
- Mavis, F.T., Greaves, M.J., "Destructive impulse loading of reinforced concrete beams", *ACI Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 29, No. 3, Sept 1957.
- Menegotto, M. and P.E. Pinto (1973) "Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-elastic Behaviour of Elements under Combined Normal Force and Bending", *Prel. Rep. IABSE, V.13*, 15-22.
- Menegotto, M. and P.E. Pinto (1977) "Slender RC Compressed Members in Biaxial Bending", *J. of Struct. Div. ASCE, V.103, ST3*, 587-605.
- Minami, K. and M. Wakabayashi (1981) "Rational Analysis of Shear in Reinforced Concrete Columns", *IABSE Colloq. 'Advanced Mechanics of Reinforced Concrete'*, Delft, 603-614.
- Mizoguchi, M., T. Arakawa, Y. Arai and M. Yoshida (1990) "Shear Resisting Behaviour of Short Reinforced Concrete Columns under Biaxial Bending-Shear and Varying Axial Load", *Trans. Japan Concrete Institute, V. 12*, 347-354.
- Mondkar, D.P. and G.H. Powell (1975) "ANSR-I, General Purpose Program for Analysis of Structural Response", *Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No. UCB/EERC 75/37*, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Μπούσιας, Σ. Ν. (1993), "Πειραματική και Αναλυτική Μελέτη Ανελαστικής Συμπεριφοράς Υποστυλωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος σε Ανακυκλιζόμενη Διαξονική Κάμψη με Ορθή Δύναμη", *Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών*.
- Μωρέττη, Μ. "Σεισμική Συμπεριφορά Υποστυλωμάτων με χαμηλό λόγο διατμήσεως – Αναλυτική και Πειραματική Έρευνα", *Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 1997*.
- Oetes, (1993) "Quasi-Static Cyclic Tests on R/C Cantilever Beams with Rectangular Section", *Report, Cooperative Research Program on Seismic Response of RC Structures (2nd phase)*
- Otani, S. (1974) "Inelastic Analysis of R/C Frame Structures", *ASCE Jour. of Struct. Div., V. 100, ST7*, 1433-1449.

- Otani, S. and V.W. Cheung (1981) "Behaviour of Reinforced Concrete Columns under Biaxial Lateral Load Reversals, II. Test without Axial Loads", Publ. No. 81-02, Dept. of Civil Engrg, Univ. of Toronto, Canada.
- Otani, S., V.W.T. Cheung and S.S. Lai (1980) "Reinforced Concrete Columns Subjected to Biaxial Lateral Load Reversals", Proc. 7th World Conf. on Earthq. Engrg, Instabul, V. 6, 525-532.
- Ozcebe, G. and M. Saatcioglu (1989) "Hysteretic Shear Model for Reinforced Concrete Members", ASCE J Struct. Engrg, V. 115, 1, 132-148.
- Padilla-Mora, R. and W.C. Schnobrich (1974) "Non-linear Response of Framed Structures to Two-Dimensional Earthquake Motion", Civil Engrg Studies, Struct. Res. Series No. 408, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Park, R., F.A. Zahn and T.J. Falconer (1984) "Strength and Ductility of Reinforced and Prestressed Concrete Columns and Piles Under Seismic Loading", 517-520.
- Park, R., M.J.N. Priestley and W.D. Gill (1982) "Ductility of Square Confined Concrete Columns", J. of Struct. Div., ASCE, V. 108, ST4, 929-950.
- Park, Y.J. and A.M.-S. Ang (1985) "Mechanistic Seismic Damage Model of Reinforced Concrete", J. of Struct. Engrg ASCE, V. 111, ST4, 722-739.
- Park, Y.J., A.H.-S. Ang and Y.K. Wen (1987) "Damage - Limiting Aseismic Design of Buildings" Earthquake Spectra V.3, No.1.
- Park, Y.J., A.M. Reinhorn and S.K. Kunnath (1987) "IDARC: Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame-Shear-Wall Structures", Tech. Rep. No. NCEER-87-0008, Nat. Center for Earthq. Engrg Research, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- Παπανικολάου Κ.Β., (1991), "Αντισεισμική Συμπεριφορά Υποστυλωμάτων και δοκών με Μικρό Άνοιγμα Διάτμησης και Συγκριτική Πειραματική Έρευνα για Διάφορους Τύπους Όπλισης (Αναλυτική και Πειραματική Έρευνα)", Διδακτορική Διατριβή, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Pecknold, D. (1974) "Inelastic Structural Response to 2D Ground Motion", ASCE Jour. of Engrg Mechanics Div., V. 100, EM5, 949-963.

- Pipa, M., Carvalho, E. C. and Otes, A. (1994) "Experimental Behavior of R/C Beams with Grade 500 Steel", Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering (G. Duma, ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 2405-2411.
- Pique, J.R. (1976) "On the Use of Simple Models in Nonlinear Dynamic Analysis", Res. Rep. No. R76-43, Dept. of Civil Engrg, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma.
- Popov, E.P., V.V. Bertero and H. Krawinkler (1972), "Cyclic Behavior of Three R.C. Flexural Members with High Shear", Earthq. Engrg Res. Center, Rep.No. UCB/EERC 72-05, Univ. of California, Berkeley, Ca..
- Priestley, M.J.N. and R. Park (1987) "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading", ACI Struct. J., V. 84, Jan. - Feb., 61-76.
- Rabbat, B., J.I. Daniel, T.L. Weinmann and N.W. Hanson (1986) "Seismic Behaviour of Light Weight and Normal-Weight Concrete Columns", ACI Journal, V. 83, Jan.-Feb., 69-78.
- Reinhardt, H.W. (1984), "Tensile fracture of concrete at high rates of loading", Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites, NATO-ARW, Northwestern University, Illinois, S.P. Shah, Editor.
- Reinhardt, H.W. (1987), "Simple relations for the strain rate influence on concrete", Darmstadt Concrete, Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, Vol. 2.
- Reinhorn, A.M., S.K. Kunnath and N. Panahshahi (1988) "Modelling of RC Building Structures with Flexible Floor Diaphragms (IDARC 2)", Tech. Rep. No. NCEER-88-0035, Nat. Center for Earthq. Engrg Research, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- Riddell, R. and N.M. Newmark (1979) "Force-Deformation Models for Nonlinear Analysis", ASCE Jour. of Struct. Div., V. 105, ST12, 2773-2778.
- Ristic, D., Y. Yamada and H. Iemura (1986) "Effects of Variation of Axial Forces to Hysteretic Earthquake Response of Reinforced Concrete Structures", Proc. 8th Europ. Conf. on Earthq. Engrg, Lisbon, Sect. 7.4, 49-56.
- Ristic, D., Y. Yamada and H. Iemura (1988) "Inelastic Stress-Strain Based Seismic Response Prediction of RC Structures Considering Dynamically Varying Axial Forces", Proc. 9th World Conf. on Earthq. Engrg, Tokyo-Kyoto, V. VI, 531-536.

- Roufaiel, M.S.L. and C. Meyer (1987) "Analytical Modeling of Hysteretic Behavior of R/C Frames", *J. of Struct. Engrg ASCE*, V. 113, ST3, 429-444.
- Ruiz, W. M. and Winter, G. (1969) "Reinforced Concrete Beams under Repeated Loads", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 95, ST 6, pp. 1189-1211.
- Saatcioglou, M. (1984) "Reinforced Concrete Columns Subjected to Uniaxial and Biaxial Load Reversals", *Proc. 8th World Conf. on Earthq. Engrg, San Fransisco, Ca., V. VI*, 585-592.
- Saatcioglou, M. (1991) "Deformability of Reinforced Concrete Columns" in SP-127 "Earthquake Resistant Concrete Structures. Inelastic Response and Design", (S.K. Ghosh, ed.), *ACI, Detroit, Mich.*, 421-452.
- Saatcioglou, M. and G. Ozcebe (1989) "Response of Reinforced Concrete Columns to Simulated Seismic Loading", *ACI Struct. J.*, V. 86, Jan.-Feb., 3-12.
- Saatcioglou, M., A.T. Derecho and W.G. Corley (1983) "Modelling Hysteretic Behavior of Coupled Walls for Dynamic Analysis", *Earthq. Engrg and Struct. Dynamics*, V. 11, 711-726.
- Saatcioglou, M., A.T. Derecho and W.G. Corley (1987) "Parametric Study of Earthquake-Resistant Coupled Walls", *ASCE Jour. of Struct. Engrg*, V. 113, 1, 141-157.
- Saiidi, M. (1982) "Hysteresis Models for Reinforced Concrete", *ASCE Jour. of Struct. Div.*, V. 108, ST5, 1077-1087.
- Saiidi, M. and M.A. Sozen (1979) "Simple and Complex Models for Nonlinear Seismic Response of R/C Structures", *Civil Engrg Studies, Str. Res. Series No. 465*, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Saiidi, M., G.E. Ghosn and Y. Yiang (1989) "Five-Spring Element for Biaxially Bent R/C Columns", *ASCE Jour. of Struct. Engrg*, V. 115, 2, 398-416.
- Sawyer, H. A. (1964) "Design of Concrete Frames for Two Failure States", *Proc. of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete*, ASCE-ACI, Miami, pp. 405-431.
- Scribner, C.F. and J.K. Wight (1978) "Delaying Shear Strength Decay in Reinforced Concrete Flexural Members Under Large Load Reversals," *Dep. of Civil Engrg, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich.*

- Sfakianakis, M.G. and M.N. Fardis (1990) "Biaxial Column Element for Nonlinear Dynamic Analysis of Space-Frame Reinforced Concrete Structures", in *Structural Dynamics*, Kraetzig et al (eds), Balkema, Rotterdam, 557-564.
- Sfakianakis, M.G. and M.N. Fardis (1991) "Bounding Surface Model for Cyclic Biaxial Bending of RC Sections", *ASCE Jour. of Engrg Mechanics*, V. 117, 12, 2748-2769.
- Sfakianakis, M.G. and M.N. Fardis (1991) "RC Column Model for Inelastic Seismic Response Analysis in 3D", *ASCE Jour. of Engrg Mechanics*, V. 117, 12, 2770-2787.
- Shah, S.P., Chung, L., "Effect of cyclic loading rate on response of model beam-column joints and anchorage bond", 3rd National U.S. Conference on Earthquake Engineering,
- Shimazaki, K. and Wada, A. (1998) "Dynamic Analysis of a Reinforced Concrete Shear Wall with Strain Rate Effect", *ACI Structural Journal*, V. 95, No 5, 488-497
- Shohara R. and B. Kato (1981) "Ultimate Strength of Reinforced Concrete Members under Combined Loading", *IABSE Colloquium 'Advanced Mechanics of Reinforced Concrete'*, Delft, 701-716.
- Soleimani, D., E.P. Popov and V.V. Bertero (1979) "Nonlinear Beam Model for R/C Frame Analysis" *ASCE, 7th Conf. on Electronic Computation*, St. Louis, Ms.
- Soroushian, P., Sim, J. and Hsu, J-W (1991) "Axial/Flexural Behavior of Reinforced Concrete Sections: Effects of the Design Variable", *ACI Structural Journal*, V. 88, No 1, 17-21.
- Sparks, P.R., Menzies, J.B., "The effect of rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 25, No. 83, June 1973.
- Spooner, D.C., "Stress-strain-time relationships for concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 23, No. 75-76, June-September 1971.
- Suaris, W., Shah, S.P., "Constitutive model for dynamic loading of concrete", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol 111, No. 3, March 1985, pp. 563-576.
- Suko, M. and P.F. Adams (1971) "Dynamic Analysis of Multibay Multistorey Frames", *ASCE Jour. of Struct. Div.*, V. 97, ST10, 2519-2533.

- Takayanagi, T. and W.C. Schnobrich (1976) "Computed Behaviour of Reinforced Concrete Coupled Shear Walls", Civil Engrg Studies, Struct. Res. Series No. 434, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Takeda, T., M.A. Sozen and N.N. Nielsen, (1970) "R/C Response to Simulated Earthquakes", J. of Str. Div. , ASCE, V. 96, ST12, 2557-2573.
- Takiguchi, K., S. Kokusho and K. Okada (1975) "Experiments on RC Columns Subjected to Biaxial Bending Moments", Trans. Arch. Inst. of Japan, No. 229, March.
- Takiguchi, K., S. Kokusho, K. Kobayashi and M. Kimura (1980) "Response of RC Column to Horizontal Bi-directional Deflection History", Proc. 7th World Conf. on Earthq. Engrg, Instabul, VI, 403-410.
- Takizawa, H. and M. Aoyama (1976) "Biaxial Effects in Modelling Earthquake Response of R/C Structures", Earthq. Engrg and Struct. Dynamics, V. 4, 523-552.
- Tanaka, Y., Y. Kaneko and H. Yashiro (1984) "Tie Confining Effect on Plastic Hinge in Reinforced Concrete Short Columns under Cyclic Shear Loadings", Proc. 8th World Conf. Earthq. Engrg, San Francisco, V. V, 829-836.
- Tanaka, Y., Y. Kaneko, H. Yashiro, M. Nagano and M. Yanagisawa (1984) "Study on Shear Failure Properties of Reinforced Concrete Short Columns", Proc. 9th World Conf. Earthq. Engrg, Tokyo-Kyoto, V. IV, 413-418.
- Taucer, F.F., E. Spacone and F.C. Filippou (1991) "A Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures", Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No. UCB/EERC 91-17, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Tegos, I.A. (1985) "Design of Short Columns", (in Greek), Proc. 7th Greek Concrete Conf., V. I, 52-60.
- Τέγος, Ι. Α. (1984) "Συμβολή στη Μελέτη και Βελτίωση των Αντισεισμικών Μηχανικών Ιδιοτήτων των Δομικών Στοιχείων Μικρής Λυγηρότητας από Οπλισμένο Σκυρόδεμα", Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- Thomsen, J.H., Wallace, J.W., (1994), "Lateral Load Behaviour of Reinforced Concrete Columns Constructed Using High-Strength Materials" ACI Structural Journal, Sep-Oct, 605-614.
- Tseng, W.S. and J. Penzien (1975) "Seismic Analysis of Long Multiple-Span Highway Bridges", Earthq. Engrg and Struct. Dynamics, V. 4, 3-24.



- Umehara, H. and J.O. Jirsa (1982) "The Shear Strength of Short R. C. Columns, Proc. 7th Europ. Conf. Earthq. Engrg, Athens, V. 4, 197-207.
- Umehara, H. and J.O. Jirsa (1984) "Behaviour and Design of Short R. C. Columns, Proc. 8th World Conf. Earthq. Engrg, V. V, San Francisco, 877-884.
- Umehara, H. and J.O. Jirsa (1984) "Short Rectangular RC Columns under Bidirectional Loadings", J. of Struct. Engrg, ASCE, V. 110, ST3, 605-618.
- Vaz, C.T. (1989) "Analise Estatica nao Linear de Pilares de Betao Armado Sujeitos a Accoes Repetidas e Alternadas", Res. Rep. No.036/12/9376, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon.
- Verzeletti, G. Bousias, S. N., Gutierrez, E., Magonette, G., Tognoli, P., "Experimental study of hysteretic energy absorption and load capacity of reinforced concrete columns subjected to different cyclic loading rates", Proc. SECED Conference, Earthquake Blast and Impact, Manchester, UK, Sept. 1991.
- Viwathanatepa, S., E.P. Popov and V.V. Bertero (1979) "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Interior Beam-Column Subassemblages", Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No. UCB/EERC 79-14, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Vos, E., Reinhardt, H.W., "Influence of loading rate on bond behaviour of reinforcing steel and prestressing strands, RILEM Materiaux et Constructions, Vol. 15, No. 85, 1982, pp. 3-10.
- Wang, M.-L. and S.P. Shah (1987) "Reinforced Concrete Hysteresis Model Based on the Damage Concept", Earthq. Eng. and Struct. Dynamics, V. 15, 993-1003
- Watanabe, F. (1984) "Strength Capacity R/C Short Column", Proc. 8th World Conf. Earthq. Engrg, San Francisco, V. V, 853-860.
- Watanabe, F. and H. Murguruma (1985) "Strength Evaluation of R/C Column Failing in Shear", Trans. Japan Concrete Institute, V. 7, 285-292.
- Watson, S., Park, R., (1994), "Simulated Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 6, 1825-1848.
- Watstein, D., "Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete", Concrete, Vol. 61, No. 5, 1953, pp. 729-744.

- Wight, J.K. and M.A. Sozen (1973) "Shear Strength Decay in Reinforced Concrete Columns Subjected to Large Deflection Reversals", Civil Engrg Studies, Str. Res. Series, No. 403, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Wight, J.K. and M.A. Sozen (1975) "Strength Decay of RC Columns under Shear Reversals", J Struct. Div. ASCE, V. 101, 5, 1053-1065.
- Woodward, K.A. and J.O. Jirsa (1984) "Influence of Reinforcement on RC Short Columns Resistance" J Struct Engrg ASCE, V. 110, 1, 90-104.
- Yamada, M. (1974) "Shear Strength, Deformation and Explosion of Reinforced Concrete Short Columns", ACI Spec. Publ. SP-42 'Shear in Reinforced Concrete', Detroit, V.2, 617-638.
- Yamada, M. (1976) Discussion to "Strength Decay of RC Columns under Shear Reversals" by Wight, J.K. and M.A. Sozen, J Struct. Div. ASCE, V. 102, 4, 863-865.
- Yamada, M. and S. Furui (1968) "Shear Resistance and Explosive Cleavage Failure of Reinforced Concrete Members Subjected to Axial Load", Final Report, 8th Congress IABSE, New York, 1091-1102.
- Zagajeski, S.W., V.V. Bertero and J.G. Bouwkamp (1978) "Hysteretic Behaviour of Reinforced Concrete Columns Subjected to High Axial and Cyclic Shear Forces", Earthq. Engrg Res. Center, Rep. No. UCB/EERC 78-05, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Zahn, F., R. Park and M.J.N. Priestley (1989) "Strength and Ductility of Square Reinforced Concrete Column Sections Subjected to Biaxial Bending", ACI Struct. J., V.86, No.2, March-April, 123-131.
- Zeris, C. and S.A. Mahin (1988) "Analysis of Reinforced Concrete Beam-Columns under Uniaxial Excitation", ASCE Jour. of Struct. Engrg, V. 114, 4, 804-820.
- Zeris, C. and S.A. Mahin (1991) "Behavior of Reinforced Concrete Structures Subjected to Biaxial Excitation", J. Struct. Engrg, ASCE, V. 117, ST9, 2657-2673.
- Zeris, C.A. (1986) "Three-Dimensional Nonlinear Response of Reinforced Concrete Buildings", Thesis submitted to the Dept. of Civil Engrg of the Univ. of California at Berkeley, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

- Zielinski, A.J., Reinhardt, H.W., Kormeling, H.A., "Experiments on concrete under uniaxial impact tensile loading", RILEM Materiaux et Constructions, Vol. 14, No. 80, 1981, pp. 103-112.
- Zienkiewicz, O.C. and R.L. Taylor (1989) "The Finite Element Method. Volume 1. Basic Formulation and Linear Problems", Fourth Edition, McGraw Hill, London.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ  
ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 1: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκίμων και κύρια αποτελέσματα μονοτονικών-μονοαξονικών πειραμάτων με λόγο διάτμησης μεγαλύτερο του 2.

	Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	$f_{y1}$ (MPa)	$f_{y2}$ (MPa)	$\Phi L1$ (mm)	$\Phi L2$ (mm)	$f_c$ (MPa)	$\Phi h$ (mm)	s (mm)	$f_{yw}$ (MPa)	v	$\theta_y$ (%)	$\theta_u$ (%)	$M_y$ (kNm)	$M_u$ (kNm)	$\Phi_y$ (1/m)	$\Phi_u$ (1/m)	
1	Alca et al (1997)	LH1 #	2.06	34	68	51.5	4.640	-	406.0 (1)	-	36	36	90.3	5	115 (4)	-	-	-	-	-	1432.0	1546.0	0.010	0.027
2	>>	LH2 #	2.06	34	68	51.5	4.640	-	412.0 (1)	-	36	36	87.7	5	115 (4)	-	-	-	-	-	1440.0	1566.0	0.010	0.028
3	>>	LL1 #	2.06	34	63	51.5	2.320	-	409.0 (1)	-	36	36	54.2	5	230 (4)	-	-	-	-	-	722.0	774.0	0.008	0.027
4	>>	LL2 #	2.06	34	63	51.5	2.320	-	409.0 (1)	-	36	36	43.8	5	230 (4)	-	-	-	-	-	720.2	747.6	0.009	0.020
5	>>	MH1 #	1.44	24	48	36.0	4.730	-	402.0 (1)	-	25	25	90.3	5	160 (4)	-	-	-	-	-	493.8	521.8	0.013	0.036
6	>>	MH2 #	1.44	24	48	36.0	4.730	-	402.0 (1)	-	25	25	73.4	5	160 (4)	-	-	-	-	-	475.5	476.1	0.015	0.022
7	>>	ML1 #	1.44	24	44	36.0	2.360	-	409.0 (1)	-	25	25	52.7	3	160 (4)	-	-	-	-	-	248.2	256.2	0.012	0.033
8	>>	ML2 #	1.44	24	44	36.0	2.360	-	404.0 (1)	-	25	25	54.1	3	160 (4)	-	-	-	-	-	250.6	275.1	0.012	0.053
9	>>	SH1 #	0.92	15	30	23.0	4.640	-	410.0 (1)	-	16	16	90.1	3	115 (4)	-	-	-	-	-	128.2	136.5	0.022	0.061
10	>>	SH2 #	0.92	15	30	23.0	4.640	-	410.0 (1)	-	16	16	85.6	3	115 (4)	-	-	-	-	-	128.8	134.2	0.022	0.055
11	>>	SL1 #	0.92	15	28	23.0	2.320	-	410.0 (1)	-	16	16	51.1	3	115 (4)	-	-	-	-	-	65.3	68.8	0.019	0.053
12	>>	SL2 #	0.92	15	28	23.0	2.320	-	410.0 (1)	-	16	16	51.1	3	115 (4)	-	-	-	-	-	64.9	69.4	0.019	0.071
13	Bigaj Walraven (1993)	B024 #	1.00	10	21	18.0	0.239	-	562.0 (2)	-	8	-	27.5	-	-	-	-	0.75	3.35	5.2	5.7	-	-	-
14	>>	B124 #	1.00	10	21	18.0	0.957	-	573.0 (2)	-	16	-	28.2	-	-	-	-	0.85	3.35	17.1	17.8	-	-	-
15	Bosco Debernardi (1993)	T10A1 #	3.00	30	60	56.5	0.565	0.125	587.3 (2)	587.3 (2)	12	12	25.7	6	150 (4)	587.3	-	0.87	4.93	299.0	320.3	0.007	0.095	
16	>>	T10B1 #	3.00	30	60	56.5	0.565	0.125	595.6 (3)	595.6 (3)	12	12	25.7	6	150 (4)	595.6	-	0.97	3.73	285.0	314.4	0.007	0.080	
17	>>	T11A1 #	3.00	30	60	56.5	1.162	0.129	587.3 (2)	587.3 (2)	12	12	25.7	6	150 (4)	587.3	-	1.37	3.83	561.0	566.1	0.010	0.065	
18	>>	T1A1 #	1.00	10	20	17.5	0.563	0.250	587.3 (2)	587.3 (2)	12	8	25.7	6	150 (4)	587.3	-	0.90	8.00	11.4	12.7	0.030	0.640	
19	>>	T1B1 #	1.00	10	20	17.5	0.555	0.250	595.6 (3)	595.6 (3)	12	8	25.7	6	150 (4)	595.6	-	1.00	3.00	11.8	12.8	0.035	0.400	
20	>>	T2A1 #	1.00	10	20	17.5	1.124	0.500	587.3 (2)	587.3 (2)	12	8	25.7	6	150 (4)	587.3	-	1.30	9.00	23.3	25.3	0.024	0.400	
21	>>	T2B1 #	1.00	10	20	17.5	1.124	0.500	595.6 (3)	595.6 (3)	12	8	25.7	6	150 (4)	595.6	-	1.30	6.90	22.3	24.5	0.040	0.550	
22	>>	T3A1 #	1.00	10	20	17.5	1.687	0.500	587.3 (2)	587.3 (2)	12	8	25.7	6	150 (4)	587.3	-	1.45	6.80	34.5	34.6	0.040	0.250	
23	>>	T3B1 #	1.00	10	20	17.5	1.687	0.500	595.6 (3)	595.6 (3)	12	8	25.7	6	150 (4)	595.6	-	1.50	5.00	33.8	35.7	0.040	0.250	
24	>>	T4A1 #	2.00	20	40	36.5	0.283	0.196	587.3 (2)	587.3 (2)	12	10	25.7	6	200 (4)	587.3	-	0.45	9.00	42.0	58.1	0.008	0.300	
25	>>	T4B1 #	2.00	20	40	36.5	0.283	0.196	595.6 (3)	595.6 (3)	12	10	25.7	6	200 (4)	595.6	-	0.68	2.30	48.5	53.8	0.015	0.085	
26	>>	T5A1 #	2.00	20	40	36.5	0.566	0.196	587.3 (2)	587.3 (2)	12	10	25.7	6	200 (4)	587.3	-	0.85	8.15	92.5	108.2	0.015	0.280	

Πίνακας 1 (συνεχίζεται)

27	>>	T5B1 #	2.00	20	40	36.5	0.566	0.196	595.6 (3)	595.6 (3)	12	10	25.7	6	200 (4)	595.6	-	0.95	3.45	97.5	107.7	0.010	0.100
28	>>	T6A1 #	2.00	20	40	36.5	1.147	0.199	587.3 (2)	587.3 (2)	12	10	25.7	6	200 (4)	587.3	-	1.18	3.80	196.1	201.6	0.017	0.100
29	>>	T6B1 #	2.00	20	40	36.5	1.147	0.199	595.6 (3)	595.6 (3)	12	10	25.7	6	200 (4)	595.6	-	1.30	3.80	178.7	199.8	0.014	0.110
30	>>	T7A1 #	2.00	20	40	36.5	1.769	0.295	587.3 (2)	587.3 (2)	12	12	25.7	6	200 (4)	587.3	-	1.65	2.25	220.0	223.3	0.020	0.030
31	>>	T7B1 #	2.00	20	40	36.5	1.769	0.295	595.6 (3)	595.6 (3)	12	12	25.7	6	200 (4)	595.6	-	1.45	2.00	225.0	239.7	0.020	0.030
32	>>	T8A1 #	3.00	30	60	56.5	0.125	0.125	587.3 (2)	587.3 (2)	12	12	25.7	6	150 (4)	587.3	-	0.45	3.07	63.5	76.1	0.005	0.055
33	>>	T8B1 #	3.00	30	60	56.5	0.125	0.125	595.6 (3)	595.6 (3)	12	12	25.7	6	150 (4)	595.6	-	0.45	1.50	63.0	69.8	0.008	0.040
34	>>	T9A1 #	3.00	30	60	56.5	0.251	0.125	587.3 (2)	587.3 (2)	12	12	25.7	6	150 (4)	587.3	-	0.65	4.20	140.6	163.0	-	-
35	>>	T9B1 #	3.00	30	60	56.5	0.251	0.125	595.6 (3)	595.6 (3)	12	12	25.7	6	150 (4)	595.6	-	0.73	1.57	144.8	153.0	0.007	0.031
36		Burns Siess (1966)																					
37	>>	J-1	1.68	20.5	30.5	25.5	1.641	-	328.0 (1)	-	25	-	34.0	6	152 (4)	319.0	-	0.91	3.33	74.6	83.9	-	-
38	>>	J-10	1.68	20.5	40.5	35.5	1.245	-	310.7 (1)	-	25	-	24.7	6	152 (4)	319.0	-	0.61	7.58	98.8	108.0	-	-
39	>>	J-11	1.68	20.5	30.5	25.5	1.641	-	323.1 (1)	-	25	-	28.3	6	152 (4)	319.0	-	0.83	3.03	70.9	72.8	-	-
40	>>	J-13	1.68	20.5	40.5	35.5	1.245	1.299	314.2 (1)	316.9 (1)	25	25	33.1	6	152 (4)	319.0	-	0.68	20.60	104.0	158.0	-	-
41	>>	J-14	1.68	20.5	40.5	35.5	1.245	0.692	324.5 (1)	344.5 (1)	25	19	31.0	6	152 (4)	319.0	-	0.61	17.60	104.0	147.0	-	-
42	>>	J-17	1.68	20.5	30.5	25.5	1.641	1.641	323.1 (1)	322.5 (1)	25	25	26.9	6	152 (4)	319.0	-	0.91	27.40	70.9	101.0	-	-
43	>>	J-19	1.68	20.5	40.5	35.5	1.245	-	315.6 (1)	-	25	-	26.9	6	152 (4)	319.0	-	0.61	3.03	85.2	107.0	-	-
44	>>	J-2	1.68	20.5	30.5	25.5	1.641	0.923	330.7 (1)	334.9 (1)	25	19	28.1	6	152 (4)	319.0	-	0.98	14.50	76.4	104.0	-	-
45	>>	J-20	1.68	20.5	40.5	35.5	1.245	1.229	315.6 (1)	320.4 (1)	25	25	30.2	6	152 (4)	319.0	-	0.68	15.60	103.0	142.0	-	-
46	>>	J-21	1.68	20.5	51	45.5	0.973	-	328.0 (1)	-	25	-	30.0	6	152 (4)	319.0	-	0.45	6.36	131.0	155.0	-	-
47	>>	J-22	1.68	20.5	51	45.5	0.973	0.973	318.3 (1)	319.7 (1)	25	25	30.5	6	152 (4)	319.0	-	0.45	10.60	136.0	187.0	-	-
48	>>	J-4	1.68	20.5	51	45.5	0.973	-	309.4 (1)	-	25	-	33.2	10	152 (4)	319.0	-	0.45	11.90	131.0	170.0	-	-
49	>>	J-5	1.68	20.5	51	45.5	0.973	0.548	310.7 (1)	336.9 (1)	25	19	34.5	10	152 (4)	319.0	-	0.38	11.90	132.0	171.0	-	-
50	>>	J-6	1.68	20.5	51	45.5	0.973	0.973	318.3 (1)	319.7 (1)	25	25	35.6	10	152 (4)	319.0	-	0.45	15.20	136.0	197.0	-	-
51	>>	J-8	1.68	20.5	30.5	25.5	1.641	1.641	312.8 (1)	313.5 (1)	25	25	32.3	6	152 (4)	319.0	-	0.91	24.70	70.9	101.0	-	-
52	>>	S-8	1.22	15	30.5	27.0	0.540	-	323.8 (1)	-	25	-	28.9	10	152 (4)	319.0	-	0.38	7.58	132.0	155.0	-	-
53	>>	T-1	1.22	15	30.5	27.0	1.232	0.541	288.0 (1)	330.0 (1)	19	13	26.9	6	152 (4)	319.0	-	0.52	6.04	20.7	24.4	-	-
54	>>	T-11	1.22	15	30.5	27.0	1.232	3.522	292.8 (1)	317.6 (1)	19	32	30.8	6	152 (4)	319.0	-	0.52	14.60	38.0	57.0	-	-
55	>>	T-7	1.22	15	30.5	27.0	1.232	1.232	281.8 (1)	292.8 (1)	19	19	31.3	6	152 (4)	319.0	-	0.52	17.90	38.0	55.6	-	-

Πίνακας 1 (συνεχίζεται)

56	>>	T-9	#	1.22	15	30.5	27.0	0.540	1.232	361.7 (1)	285.9 (1)	13	19	18.5	6	152 (4)	319.0	-	0.52	9.38	23.4	34.6	-	-
57	Calvi et al (1993)	S01-1	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.20	2.90	29.0	32.6	0.040	0.168
58	>>	S01-2	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.15	2.80	29.5	33.3	0.044	0.186
59	>>	S01-3	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.15	2.98	29.7	33.4	0.043	0.204
60	>>	S02-1	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	578.0 (2)	578.0 (2)	10	6	39.2	6	150 (4)	578.0	-	1.10	8.32	27.0	31.6	-	0.668
61	>>	S02-2	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	578.0 (2)	578.0 (2)	10	6	39.2	6	150 (4)	578.0	-	1.10	6.42	29.0	30.3	0.019	0.473
62	>>	S02-3	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	578.0 (2)	578.0 (2)	10	6	39.2	6	150 (4)	578.0	-	1.10	7.37	28.1	31.2	0.023	0.535
63	>>	S03-1	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	1.20	4.89	30.2	32.6	0.053	0.332
64	>>	S03-2	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	1.30	4.19	27.0	30.6	0.038	0.268
65	>>	S03-3	#	1.00	44	16	14.0	0.557	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	1.20	4.85	28.0	31.6	0.031	0.327
66	>>	S04-1	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.10	1.46	11.0	12.3	0.035	0.084
67	>>	S04-2	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.03	1.33	10.3	11.6	0.016	0.067
68	>>	S04-3	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.08	1.40	10.8	12.2	0.015	0.066
69	>>	S05-1	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	578.0 (2)	578.0 (2)	6	6	39.2	6	150 (4)	578.0	-	1.09	3.20	10.9	13.5	0.009	0.204
70	>>	S05-2	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	578.0 (2)	578.0 (2)	6	6	39.2	6	150 (4)	578.0	-	1.20	3.48	12.0	14.9	0.029	0.222
71	>>	S05-3	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	578.0 (2)	578.0 (2)	6	6	39.2	6	150 (4)	578.0	-	1.21	3.88	12.1	14.4	0.021	0.228
72	>>	S06-1	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	0.89	3.45	8.9	11.2	0.040	0.265
73	>>	S06-2	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	0.99	2.65	9.9	11.2	0.038	0.201
74	>>	S06-3	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	1.07	2.52	10.7	31.6	0.038	0.146
75	>>	S07-1	#	1.00	44	16	14.0	0.335	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.74	3.20	17.4	19.6	0.029	0.177
76	>>	S07-2	#	1.00	44	16	14.0	0.335	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.80	2.77	18.0	20.3	0.023	0.155
77	>>	S07-3	#	1.00	44	16	14.0	0.335	0.121	591.8 (3)	591.8 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	591.8	-	1.87	2.75	18.7	21.1	0.032	0.142
78	>>	S08-1	#	1.00	44	16	14.0	0.335	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	578.9	-	1.70	4.35	17.0	19.2	0.053	0.288
79	>>	S08-2	#	1.00	44	16	14.0	0.335	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	578.9	-	1.63	4.38	16.3	18.4	0.037	0.325
80	>>	S08-3	#	1.00	44	16	14.0	0.335	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	10	6	39.2	6	150 (4)	578.9	-	1.64	4.21	16.4	18.5	0.033	0.294
81	>>	S11-1	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	1.03	3.35	10.3	10.5	0.031	0.248
82	>>	S11-2	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	0.96	3.49	9.6	10.3	0.038	0.269
83	>>	S11-3	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	0.96	4.13	9.6	10.3	0.052	0.350
84	>>	S12-1	#	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	0.93	4.01	9.3	9.8	0.062	0.332

Πίνακας 1 (συνεχίζεται)

85	>>	S12-2 #	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	0.98	3.85	9.8	10.5	0.051	0.293
86	>>	S12-3 #	1.00	44	16	14.0	0.200	0.121	540.9 (3)	540.9 (3)	6	6	39.2	6	150 (4)	540.9	-	1.27	2.74	12.7	10.1	0.048	0.177
87	Carvalho Pipa (1993)	S1-V1	1.50	20	30	27.0	0.565	1.131	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	6	70 (4)	554.0	-	0.76	12.20	54.0	64.5	0.020	0.650
88	>>	S1-V2	1.50	100	30	27.0	0.226	0.113	536.0 (2)	536.0 (2)	12	12	38.2	6	70 (4)	536.0	-	1.10	12.50	90.0	96.0	0.034	0.425
89	>>	S2-V1	1.50	20	30	27.0	0.377	1.131	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	6	70 (4)	554.0	-	0.50	12.00	35.0	46.5	0.010	0.350
90	>>	S2-V2	1.50	100	30	27.0	0.226	0.095	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	6	70 (4)	554.0	-	1.20	12.60	100.0	101.0	0.023	0.440
91	Corley (1966)	J1 #	0.44	7.5	15	12.5	1.704	1.228	482.3 (1)	547.8 (1)	16	10	30.4	6	64 (4)	334.2	-	0.87	5.37	10.2	13.1	0.050	0.453
92	>>	J11 #	0.45	7.5	15	12.5	1.704	1.228	482.3 (1)	547.8 (1)	16	10	30.6	6	64 (4)	341.7	-	0.97	5.37	10.3	13.2	0.051	0.453
93	>>	J2 #	0.90	7.5	15	12.5	1.704	1.228	477.5 (1)	545.0 (1)	16	10	24.6	6	64 (4)	343.1	-	1.22	11.92	10.4	14.8	0.038	0.622
94	>>	J21 #	0.90	7.5	15	12.5	1.704	1.228	477.5 (1)	545.0 (1)	16	10	25.8	6	64 (4)	351.4	-	1.16	10.25	11.0	15.0	0.034	0.524
95	>>	J3 #	0.44	7.5	15	12.5	2.182	1.228	552.6 (1)	541.6 (1)	13	10	28.3	6	32 (4)	354.2	-	1.21	6.23	15.7	20.3	0.063	0.740
96	>>	J4 #	0.90	7.5	15	12.5	2.182	1.228	554.7 (1)	538.8 (1)	13	10	26.3	6	64 (4)	358.3	-	1.70	9.28	14.9	18.9	0.057	0.417
97	>>	J41 #	0.90	7.5	15	12.5	2.182	1.228	552.6 (1)	538.8 (1)	13	10	26.0	6	64 (4)	350.0	-	1.67	7.18	15.2	17.9	0.049	0.441
98	>>	J42 #	0.90	7.5	15	12.5	2.182	1.228	554.7 (1)	538.8 (1)	13	10	28.8	6	64 (4)	341.1	-	1.79	5.45	16.0	17.7	0.052	0.309
99	>>	J5 #	0.44	7.5	15	12.5	2.454	1.228	470.6 (1)	541.6 (1)	19	10	28.0	6	32 (4)	343.1	-	0.98	5.43	13.7	18.2	0.041	0.535
100	>>	J6 #	0.90	7.5	15	12.5	2.454	1.228	478.9 (1)	532.6 (1)	19	10	28.7	6	64 (4)	353.5	-	1.42	6.78	14.6	18.3	0.038	0.339
101	>>	J61 #	0.90	7.5	15	12.5	2.454	1.228	474.7 (1)	532.6 (1)	19	10	29.0	6	64 (4)	341.7	-	1.30	6.01	13.8	17.6	0.057	0.406
102	>>	K1 #	0.88	7.5	28	25.5	1.862	0.670	471.3 (1)	492.6 (1)	16	10	27.2	6	127 (4)	327.3	-	0.93	2.44	42.0	46.9	0.021	0.118
103	>>	K10 #	1.79	30.5	28	25.5	1.164	0.168	476.8 (1)	485.8 (1)	16	10	26.2	6	127 (4)	334.9	-	1.14	4.41	110.0	129.0	0.020	0.150
104	>>	K11 #	0.88	30.5	28	25.5	1.677	0.168	476.8 (1)	492.6 (1)	16	10	26.7	10	64 (4)	361.0	-	0.90	6.27	148.0	189.0	0.023	0.233
105	>>	K12 #	1.79	30.5	28	25.5	1.677	0.168	478.9 (1)	492.6 (1)	16	10	25.4	6	127 (4)	327.3	-	1.25	4.19	150.0	167.0	0.020	0.098
106	>>	K2 #	1.79	7.5	28	25.5	1.862	0.670	460.2 (1)	480.2 (1)	16	10	28.4	6	127 (4)	314.2	-	1.25	2.50	41.7	48.2	0.020	0.101
107	>>	K3 #	0.88	7.5	28	25.5	2.682	0.670	478.9 (1)	481.6 (1)	16	10	27.6	6	64 (4)	345.2	-	1.07	2.67	60.9	64.8	0.028	0.090
108	>>	K4 #	1.79	7.5	28	25.5	2.682	0.670	464.4 (1)	492.0 (1)	16	10	30.0	6	127 (4)	314.2	-	1.59	2.55	57.5	59.6	0.026	0.045
109	>>	K5 #	0.88	23	28	25.5	1.242	0.223	458.2 (1)	482.3 (1)	16	10	25.6	6	127 (4)	330.7	-	0.78	2.38	79.9	95.3	0.019	0.071
110	>>	K51 #	0.88	23	28	25.5	1.242	0.223	471.3 (1)	526.4 (1)	16	10	29.6	6	127 (4)	529.8	-	0.78	6.97	84.3	116.0	0.025	0.269
111	>>	K6 #	1.79	23	28	25.5	1.242	0.223	466.5 (1)	485.8 (1)	16	10	27.1	6	127 (4)	325.2	-	1.11	4.77	86.0	105.0	0.022	0.116
112	>>	K7 #	0.88	23	28	25.5	1.788	0.223	466.5 (1)	482.3 (1)	19	10	21.2	10	127 (4)	356.2	-	0.90	2.41	118.0	130.0	0.024	0.092
113	>>	K8 #	1.79	23	28	25.5	1.788	0.223	459.6 (1)	478.9 (1)	19	10	26.4	6	127 (4)	331.4	-	1.23	3.75	120.0	138.0	0.016	0.067



Πίνακας 1 (συνεχίζεται)

114	>>		K9	#	0.88	30.5	28	25.5	1.164	0.168	479.5 (1)	477.5 (1)	16	10	29.3	6	64 (4)	332.8	-	0.73	2.96	109.0	133.0	0.019	0.137
115	>>		M1	#	1.79	23	65	61.0	1.151	0.096	447.8 (1)	485.8 (1)	19	10	31.2	10	305 (4)	485.1	-	1.45	2.41	399.0	465.0	0.007	0.041
116	>>		M2	#	3.01	23	65	61.0	1.151	0.096	443.7 (1)	485.8 (1)	19	10	28.3	10	305 (4)	482.3	-	0.82	2.40	411.0	470.0	0.007	0.043
117	>>		M3	#	1.79	23	65	61.0	1.567	0.096	437.7 (1)	483.7 (1)	22	10	30.7	10	152 (4)	476.1	-	0.74	2.27	521.0	597.0	0.008	0.041
118	>>		M4	#	3.01	23	65	61.0	1.567	0.096	436.8 (1)	483.7 (1)	22	10	29.6	10	305 (4)	487.8	-	0.95	1.87	544.0	584.0	0.009	0.029
119	>>		M5	#	1.79	30.5	65	61.0	1.151	0.072	447.2 (1)	488.5 (1)	19	10	29.0	10	203 (4)	480.9	-	0.72	1.89	553.0	614.0	0.008	0.038
120	>>		M6	#	3.01	30.5	65	61.0	1.151	0.072	441.7 (1)	488.5 (1)	19	10	30.0	10	305 (4)	480.9	-	0.78	2.58	546.0	609.0	0.007	0.037
121	>>		M7	#	1.79	30.5	65	61.0	1.763	0.072	436.4 (1)	486.4 (1)	22	10	28.9	10	203 (4)	478.9	-	0.94	1.16	787.0	790.0	0.009	0.016
122	>>		M8	#	3.01	30.5	65	61.0	1.763	0.072	440.3 (1)	486.4 (1)	22	10	30.5	10	305 (4)	483.0	-	1.05	2.13	810.0	830.0	0.009	0.033
123	>>		N1	#	2.05	23	80	76.0	1.481	0.078	428.3 (1)	482.3 (1)	22	10	31.8	10	254 (4)	467.1	-	0.78	1.37	763.0	777.0	0.007	0.019
124	>>		N2	#	4.16	23	80	76.0	1.481	0.078	423.1 (1)	480.2 (1)	22	10	31.1	10	381 (4)	452.7	-	0.90	1.98	744.0	796.0	0.006	0.030
125	>>		N3	#	2.05	23	80	76.0	1.658	0.078	423.1 (1)	482.3 (1)	19	10	32.2	13	254 (4)	436.8	-	0.75	1.75	838.0	883.0	0.007	0.026
126	>>		N4	#	4.16	23	80	76.0	1.658	0.078	420.3 (1)	492.6 (1)	19	10	29.6	10	381 (4)	469.9	-	0.94	1.61	845.0	928.0	0.006	0.019
127	>>		N5	#	2.05	30.5	80	76.0	1.036	0.058	424.4 (1)	477.5 (1)	19	10	27.2	13	381 (4)	438.9	-	0.70	0.99	734.0	752.0	0.006	0.011
128	>>		N6	#	4.16	30.5	80	76.0	1.036	0.058	429.3 (1)	472.0 (1)	19	10	25.6	13	381 (4)	436.8	-	0.78	2.44	699.0	819.0	0.005	0.029
129	>>		N7	#	2.05	30.5	80	76.0	1.658	0.058	423.1 (1)	482.3 (1)	19	10	32.7	13	229 (4)	432.0	-	0.75	1.45	1117.0	1209.0	0.006	0.019
130	>>		N8	#	4.16	30.5	80	76.0	1.658	0.058	426.5 (1)	480.2 (1)	19	10	29.4	13	381 (4)	435.5	-	0.95	1.44	1111.0	1198.0	0.005	0.013
131		Fang et al (1994)	LB 1-1		1.15	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	9.5	80 (4)	420.0	-	1.48	18.26	126.5	144.9	-	-
132	>>		LB 2-1		0.85	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	9.5	80 (4)	420.0	-	1.29	15.29	114.8	152.2	-	-
133		Garsika et al (1993)	SBV3		0.70	30	30	27.0	0.754	0.754	566.0 (2)	566.0 (2)	12	12	39.4	6	60 (4)	566.0	-	1.07	4.20	108.0	108.0	0.014	0.120
134		Kraetzig et al (1989)	S1-0		1.50	30	30	26.0	1.267	1.267	514.0 (2)	514.0 (2)	22	22	32.1	8	80 (4)	514.0	0.10	1.67	2.67	125.0	131.0	-	-
135	>>		S2-0		1.50	30	30	26.0	1.267	1.267	514.0 (2)	514.0 (2)	22	22	32.3	8	80 (4)	514.0	0.10	1.53	2.53	120.0	128.0	-	-
136		Mattock (1964)	A1	#	0.63	15	28	25.5	1.341	0.335	314.9 (1)	339.7 (1)	19	10	38.2	10	127 (4)	339.7	-	0.40	8.45	42.3	67.1	0.012	0.303
137	>>		A2	#	1.32	15	28	25.5	1.341	0.335	317.6 (1)	339.7 (1)	19	10	42.3	6	127 (4)	379.0	-	0.72	7.75	44.3	61.8	0.011	0.177
138	>>		A3	#	2.72	15	28	25.5	1.341	0.335	336.2 (1)	339.7 (1)	19	10	40.9	6	127 (4)	383.0	-	1.03	9.09	44.3	61.8	0.011	0.147
139	>>		A4	#	0.63	15	28	25.5	2.682	0.335	314.9 (1)	343.1 (1)	19	10	42.9	10	64 (4)	343.1	-	0.48	7.72	76.5	11.1	0.014	0.261
140	>>		A5	#	1.32	15	28	25.5	2.682	0.335	314.2 (1)	332.1 (1)	19	10	39.6	10	127 (4)	332.1	-	0.62	5.56	76.4	96.3	0.013	0.178
141	>>		A6	#	2.72	15	28	25.5	2.682	0.335	327.9 (1)	332.1 (1)	19	10	41.1	6	127 (4)	385.8	-	1.17	4.97	78.3	87.9	0.013	0.073
142	>>		B1	#	1.33	15	53.5	51.0	1.404	0.175	328.7 (1)	339.7 (1)	19	10	42.9	10	127 (4)	339.7	-	0.44	5.81	178.0	246.0	0.006	0.117

Πίνακας 1 (συνεχίζεται)

143	>>	B2	#	2.72	15	53.5	51.0	1.404	0.175	321.8	(1)	336.2	(1)	19	10	41.8	10	254	(4)	336.2	-	0.49	4.00	171.0	212.0	0.006	0.067
144	>>	B3	#	1.32	15	55	51.0	2.731	0.171	321.1	(1)	354.8	(1)	19	10	42.9	10	64	(4)	354.8	-	0.47	3.66	299.0	390.0	0.007	0.096
145	>>	B4	#	2.72	15	55	51.0	2.731	0.171	322.5	(1)	336.9	(1)	19	10	42.8	10	127	(4)	336.9	-	0.71	2.80	297.0	323.0	0.006	0.063
146	>>	C1	#	0.63	15	28	25.5	1.341	0.335	328.7	(1)	341.1	(1)	19	10	27.4	10	127	(4)	341.1	-	0.46	13.09	41.8	63.3	0.011	0.583
147	>>	C2	#	1.32	15	28	25.5	1.341	0.335	328.7	(1)	341.1	(1)	19	10	26.0	6	127	(4)	438.9	-	0.63	6.10	42.2	57.2	0.013	0.223
148	>>	C3	#	2.72	15	28	25.5	1.341	0.335	329.6	(1)	341.1	(1)	19	10	25.6	6	127	(4)	395.5	-	1.04	7.50	40.4	54.1	0.011	0.162
149	>>	C4	#	0.63	15	28	25.5	2.682	0.335	325.2	(1)	341.1	(1)	13	10	25.9	10	64	(4)	341.1	-	0.60	6.34	78.3	103.0	0.014	0.254
150	>>	C5	#	1.32	15	28	25.5	2.682	0.335	327.9	(1)	334.2	(1)	13	10	23.4	10	127	(4)	334.2	-	0.86	3.54	80.6	85.1	0.016	0.120
151	>>	C6	#	1.38	15	28	25.5	2.682	0.335	319.0	(1)	334.2	(1)	13	10	27.4	6	127	(4)	427.2	-	0.83	8.42	72.9	77.4	0.014	0.114
152	>>	D1	#	1.33	15	53.5	51.0	1.404	0.175	319.0	(1)	344.5	(1)	13	10	26.7	10	127	(4)	334.5	-	0.39	4.04	162.0	206.0	0.006	0.087
153	>>	D2	#	2.72	15	53.5	51.0	1.404	0.175	316.3	(1)	334.2	(1)	13	10	25.6	10	254	(4)	334.2	-	0.59	3.55	164.0	198.0	0.006	0.064
154	>>	D3	#	1.32	15	55	51.0	2.731	0.171	319.7	(1)	340.4	(1)	19	10	25.9	10	64	(4)	340.4	-	0.53	2.67	303.0	333.0	0.007	0.068
155	>>	D4	#	2.72	15	55	51.0	2.731	0.171	321.8	(1)	319.0	(1)	19	10	26.9	10	127	(4)	319.0	-	0.73	1.61	305.0	316.0	0.008	0.039
156	>>	E1	#	0.63	15	28	25.5	1.341	0.335	403.8	(1)	504.4	(1)	19	10	27.9	10	127	(4)	478.9	-	0.58	5.69	51.0	71.7	0.017	0.243
157	>>	E2	#	1.32	15	28	25.5	1.341	0.335	413.4	(1)	500.9	(1)	19	10	28.3	10	127	(4)	477.5	-	0.79	7.39	52.8	71.4	0.015	0.242
158	>>	E3	#	2.72	15	28	25.5	1.341	0.335	412.0	(1)	500.9	(1)	19	10	29.8	10	127	(4)	496.8	-	1.36	7.59	51.5	65.1	0.014	0.141
159	>>	F1	#	0.63	15	28	25.5	1.341	0.335	403.8	(1)	504.4	(1)	19	10	41.2	10	127	(4)	469.9	-	0.54	6.46	53.3	80.4	0.017	0.314
160	>>	F2	#	1.32	15	28	25.5	1.341	0.335	414.8	(1)	469.9	(1)	19	10	41.3	10	127	(4)	480.9	-	0.69	8.41	53.8	75.5	0.013	0.220
161	>>	F3	#	2.72	15	28	25.5	1.341	0.335	414.8	(1)	463.7	(1)	19	10	42.8	10	127	(4)	499.5	-	1.21	8.79	55.6	75.5	0.011	0.196
162	>>	G1	#	1.33	15	53.5	51.0	1.052	0.175	414.1	(1)	507.1	(1)	19	10	27.4	10	127	(4)	478.9	-	0.46	4.29	166.0	223.0	0.007	0.099
163	>>	G2	#	5.19	15	53.5	51.0	1.052	0.175	413.4	(1)	482.3	(1)	19	10	28.3	10	127	(4)	482.3	-	0.38	3.22	163.0	228.0	0.007	0.106
164	>>	G3	#	1.33	15	53.5	51.0	1.404	0.175	414.8	(1)	469.9	(1)	19	10	27.2	10	127	(4)	477.5	-	0.52	2.65	209.0	250.0	0.008	0.067
165	>>	G4	#	5.19	15	53.5	51.0	1.404	0.175	414.8	(1)	504.4	(1)	19	10	27.2	10	127	(4)	504.4	-	0.41	1.93	218.0	248.0	0.007	0.057
166	>>	G5	#	5.19	15	53.5	51.0	0.702	0.175	416.9	(1)	507.1	(1)	19	10	27.4	10	127	(4)	504.4	-	0.32	4.86	114.0	180.0	0.006	0.145
167	Oetes (1993)	S1-V2		1.50	20	30	27.0	0.565	0.754	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	38.3	6	70	(4)	536.0	-	0.90	14.70	52.5	56.0	-	-
168	>>	S2-V1		1.50	20	30	27.0	0.752	0.377	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	37.4	6	70	(4)	536.0	-	1.03	13.30	65.0	70.0	-	-
169	>>	S2-V2		1.50	20	30	27.0	0.377	0.754	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	37.5	6	70	(4)	536.0	-	0.80	16.70	34.5	36.0	-	-
170	Ruiz Winter (1969)	A-1	#	0.97	20.5	28	23.0	1.605	0.477	429.9	(1)	441.0	(1)	20	19	38.1	6	102	(4)	303.2	-	1.11	3.95	103.0	109.0	-	-
171	>>	A-2	#	0.97	20.5	28	23.0	1.605	0.477	429.9	(1)	441.0	(1)	20	19	38.6	6	102	(4)	303.2	-	0.95	6.00	103.0	109.0	-	-

Πίνακας 1 (συνεχίζεται)

172	>>	A-3	#	0.97	20.5	28	23.0	1.605	0.477	429.9	(1)	441.0	(1)	20	19	38.2	6	102	(4)	303.2	-	0.84	6.96	103.0	109.0	-	-
173	>>	A-4	#	0.97	20.5	28	23.0	1.605	0.477	429.9	(1)	441.0	(1)	20	19	38.2	6	102	(4)	303.2	-	0.85	9.77	105.7	109.0	-	-
174	>>	B-3	#	0.97	20.5	28	24.0	1.495	0.498	441.0	(1)	441.0	(1)	19	19	37.9	6	102	(4)	303.2	-	0.53	9.09	99.0	14.8	0.015	0.157
175	>>	B-4	#	0.97	20.5	28	24.0	1.495	0.498	441.0	(1)	441.0	(1)	19	19	37.2	6	102	(4)	303.2	-	0.58	8.68	106.0	16.7	0.017	0.161
176	>>	C-1	#	1.45	20.5	28	23.0	1.491	-	441.0	(1)	-	-	19	-	32.4	10	102	(4)	303.2	-	0.98	7.60	90.2	16.7	0.0196	0.063
177	>>	C-2	#	1.45	20.5	28	23.0	1.491	-	441.0	(1)	-	-	19	-	33.2	10	102	(4)	303.2	-	1.02	7.60	91.6	16.7	-	0.0748
178	>>	C-3	#	1.45	20.5	28	23.0	1.491	-	441.0	(1)	-	-	19	-	33.8	10	102	(4)	303.2	-	0.94	7.60	96.6	15.4	0.0154	0.0866
179	>>	C-4	#	1.45	20.5	28	23.0	1.491	-	441.0	(1)	-	-	19	-	35.2	10	102	(4)	303.2	-	1.42	7.60	93.6	18.1	-	0.0787
180	>>	D-1	#	1.45	20.5	28	23.0	2.029	-	413.4	(1)	-	-	22	-	34.9	10	102	(4)	303.2	-	0.88	9.49	113	15.4	0.017	0.063
181	>>	D-2	#	1.45	20.5	28	23.0	2.029	-	413.4	(1)	-	-	22	-	38.6	10	102	(4)	303.2	-	1.07	9.77	113	16.9	0.017	0.0709
182	>>	D-3	#	1.45	20.5	28	23.0	2.029	-	413.4	(1)	-	-	22	-	38.6	10	102	(4)	303.2	-	0.84	9.77	114	16.9	0.017	0.0591
183	>>	D-4	#	1.45	20.5	28	23.0	2.029	-	413.4	(1)	-	-	22	-	39.8	10	102	(4)	303.2	-	1.33	9.49	106	15.4	0.017	0.0472
184	Steidle Schaefer (1986)	StSc		1.38	30	30	26.0	1.368	1.368	465.0	(2)	465.0	(2)	28	28	22.8	8	50	(4)	465.0	0.62	1.82	1.82	174.0	174.0	-	-

#: χωρίς ολίσθηση οπλισμών πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής.

\*: χωρίς αστοχία δοκίμιου πριν το τέλος του πειράματος

(1): όγκος χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).

(2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας H κατά EC2 ή B κατά ENV 10080.

(3): ψαθυρός χάλυβας, κατηγορίας N κατά EC2 ή A κατά ENV 10080.

(4): Διτητοι συνδετήρες.

(5): Διτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.

Πίνακας 2: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκίμιων και κύρια αποτελέσματα ανακυκλιζόμενων-μονοαξονικών πειραμάτων με λόγο διάτμησης μεγαλύτερο του 2, συμμετρικό σπλισμό ( $\rho_1 = \rho_2$ ) και μηδενικό αξονικό φορτίο.

	Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	$f_{y1}$ (MPa)	$f_{y2}$ (MPa)	$\Phi L1$ (mm)	$\Phi L2$ (mm)	$f_c$ (MPa)	$\Phi h$ (mm)	s (mm)	$f_{yw}$ (MPa)	v	$\theta_y$ (%)	$\theta_u$ (%)	$M_y$ (kNm)	$M_u$ (kNm)	$\Phi_y$ (1/m)	$\Phi_u$ (1/m)
1	Aycardi et al. (1994)	Spec 1	0.53	10	10	13.3	0.999	0.999	469.0 (1)	469.0 (1)	6	6	31	3	25.4 (4)	381.0	-	1.00	4.10	4.0	5.3	-	-
2	Beng et al (1974)	unit-14	0.80	40	37	36.4	1.995	1.995	424.0 (1)	424.0 (1)	16	16	33.7	6	60.0 (4)	326.0	-	1.27	4.32	295.8	170.8	-	-
3	>>	unit-15	0.80	40	37	36.4	1.256	1.256	436.0 (1)	436.0 (1)	16	16	34.8	6	60.0 (4)	326.0	-	0.98	5.12	176.5	206.3	-	-
4	Brown Jirsa (1971)	rv106635	1.52	15	31	25.4	1.220	1.220	317.0 (1)	317.0 (1)	15	15	37.9	8	127.0 (4)	317.0	-	1.41	9.60	40.7	54.3	-	-
5	>>	rv108832	1.52	15	31	25.4	2.180	2.180	317.0 (1)	317.0 (1)	20	20	37.9	8	50.8 (4)	317.0	-	1.00	10.34	70.0	88.0	-	-
6	>>	rv108834	0.76	15	31	25.4	2.180	2.180	317.0 (1)	317.0 (1)	20	20	37.9	8	101.6 (4)	317.0	-	1.60	10.84	67.0	84.0	-	-
7	>>	rv108835	1.52	15	31	25.4	2.180	2.180	317.0 (1)	317.0 (1)	20	20	37.9	8	127.0 (4)	317.0	-	1.50	11.35	68.0	88.0	-	-
8	>>	rv58834	0.76	15	31	25.4	2.180	2.180	317.0 (1)	317.0 (1)	20	20	37.9	8	101.6 (4)	317.0	-	1.00	6.16	67.8	84.8	-	-
9	>>	rv58835	1.52	15	31	25.4	2.180	2.180	317.0 (1)	317.0 (1)	20	20	37.9	8	127.0 (4)	317.0	-	1.50	8.48	65.0	81.3	-	-
10	Celebi Penzien (1973)	beam1	1.83	23	38	33.0	1.030	1.030	361.6 (1)	361.6 (1)	22	22	18.2	4	152.4 (4)	345.0	-	0.72	-	92.8	-	-	-
11	>>	beam10	1.37	23	38	33.0	1.030	1.030	357.4 (1)	357.4 (1)	22	22	29.3	4	82.6 (4)	362.3	-	0.65	-	92.5	-	-	-
12	>>	beam11	0.91	23	38	33.0	1.030	1.030	345.7 (1)	345.7 (1)	22	22	31.7	4	82.6 (4)	344.0	-	0.61	-	120.9	-	-	-
13	>>	beam12	0.91	23	38	33.0	1.030	1.030	345.7 (1)	345.7 (1)	22	22	31.7	4	82.6 (4)	344.0	-	0.64	-	117.0	-	-	-
14	>>	beam2	1.83	23	38	33.0	1.030	1.030	361.6 (1)	361.6 (1)	22	22	32.8	4	152.4 (4)	345.0	-	0.67	-	94.8	-	-	-
15	>>	beam4	1.83	23	30	25.4	1.030	1.030	361.6 (1)	361.6 (1)	22	22	32.8	4	127.0 (4)	345.0	-	0.83	-	73.2	-	-	-
16	>>	beam5	1.83	23	38	33.0	1.030	1.030	357.4 (1)	357.4 (1)	22	22	28.0	4	82.6 (4)	362.3	-	0.76	-	102.5	-	-	-
17	>>	beam6	1.83	23	38	33.0	1.030	1.030	357.4 (1)	357.4 (1)	22	22	28.0	4	82.6 (4)	362.3	-	0.69	-	84.6	-	-	-
18	>>	beam7	1.37	23	38	33.0	1.030	1.030	357.4 (1)	357.4 (1)	22	22	32.1	4	152.4 (4)	362.3	-	0.65	-	116.9	-	-	-
19	>>	beam8	1.37	23	38	33.0	1.030	1.030	357.4 (1)	357.4 (1)	22	22	32.1	4	152.4 (4)	362.3	-	0.56	-	91.6	-	-	-
20	>>	beam9	1.37	23	38	33.0	1.030	1.030	357.4 (1)	357.4 (1)	22	22	29.3	4	82.6 (4)	362.3	-	0.65	-	113.8	-	-	-
21	Fang et al (1994)	LB 1-4	1.15	20	40	33.7	1.170	1.170	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.48	8.87	126.5	144.9	-	-
22	>>	LB 1-5	1.15	20	40	33.7	1.170	1.170	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.22	7.30	120.8	148.4	-	-
23	>>	LB 2-4	0.85	20	40	33.7	1.170	1.170	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.29	7.76	122.4	142.8	-	-
24	>>	LB 2-5	0.85	20	40	33.7	1.170	1.170	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.29	7.76	125.0	145.4	-	-
25	Ma et al (1976)	r5	0.98	23	41	35.6	1.227	1.227	451.3 (1)	451.3 (1)	19	19	31.6	6	88.9 (4)	413.7	-	0.94	4.10	170.8	191.3	0.010	0.118

Πίνακας 2 (συνεχίζεται)

26	>>	r6	1.59	23	41	35.6	1.227	1.227	1.227	451.3 (1)	451.3 (1)	19	19	29.9	6	88.9 (4)	413.7	-	0.99	4.32	169.4	208.2	0.010	0.105
27	Saatcioglu (1989)	d1	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	1.202	453.0 (1)	453.0 (1)	25	25	40.3	10	150.0 (4)	470.0	-	1.32	8.57	216.2	285.0	-	-
28	>>	u1	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	1.202	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	43.6	10	150.0 (4)	470.0	-	1.86	8.47	217.5	275.0	-	-

#: χωρίς ολίσθηση οπλισμών πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής.

\*: χωρίς αστοχία δοκίμιου πριν το τέλος του πειράματος

(1): όγκιμος χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).

(2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας H κατά EC2 ή B κατά ENV 10080.

(3): ψαθυρός χάλυβας, κατηγορίας N κατά EC2 ή A κατά ENV 10080.

(4): Δίτητοι συνδετήρες.

(5): Δίτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.

Πίνακας 3: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκιμών και κύρια αποτελέσματα ανακυκλιζομένων-μονοαξονικών πειραμάτων με λόγο διάτμησης μεγαλύτερο του 2, ασύμμετρο σπλισμό ( $\rho_1 > \rho_2$ ) και μηδενικό αξονικό φορτίο.

	Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	fy1 (MPa)	fy2 (MPa)	$\phi L1$ (mm)	$\phi L2$ (mm)	fc (MPa)	$\phi h$ (mm)	s (cm)	fyw (MPa)	v (%)	$\theta y$ (%)	$\theta u$ (%)	My (kNm)	Mu (kNm)	$\phi y$ (1/m)	$\phi u$ (1/m)
1	Carvalho Pipa (1993)	s1-v3	1.50	20	30	26.8	1.010	0.505	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	8	70.0 (4)	554.0	-	1.09	7.71	91.5	94.5	-	-
2	>>	s1-v4	1.50	20	30	26.8	1.010	0.505	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	8	70.0 (4)	554.0	-	1.04	7.75	91.5	94.5	-	-
3	>>	s1-v5	1.50	20	30	26.8	1.010	0.505	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	8	70.0 (4)	554.0	-	1.17	7.71	91.5	94.5	-	-
4	>>	s1-v6	1.50	20	30	26.8	1.010	0.505	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	8	70.0 (4)	554.0	-	1.07	7.54	93.0	94.5	-	-
5	>>	s2-v3	1.50	20	30	26.8	1.010	0.337	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	6	70.0 (4)	554.0	-	1.28	8.26	91.5	94.5	-	-
6	>>	s2-v4	1.50	20	30	26.8	1.010	0.337	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	6	70.0 (4)	554.0	-	1.06	4.09	91.5	94.5	-	-
7	>>	s2-v5	1.50	20	30	26.8	1.010	0.337	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	6	70.0 (4)	554.0	-	1.17	8.27	91.5	94.5	-	-
8	>>	s2-v6	1.50	20	30	26.8	1.010	0.337	548.0 (2)	548.0 (2)	12	12	38.2	6	70.0 (4)	554.0	-	1.13	8.27	91.5	94.5	-	-
9	Fang et al (1994)	LB 1-2	1.15	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.48	8.87	115.0	138.0	-	-
10	>>	LB 1-3	1.15	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.22	7.30	120.8	143.8	-	-
11	>>	LB 1-6	1.15	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.04	6.26	109.3	146.1	-	-
12	>>	LB 1-7	1.15	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.13	6.78	115.0	136.9	-	-
13	>>	LB 1-10	1.15	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.13	6.78	111.6	148.4	-	-
14	>>	LB 2-2	0.85	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.06	6.35	117.3	139.4	-	-
15	>>	LB 2-3	0.85	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.18	7.06	119.0	144.5	-	-
16	>>	LB 2-6	0.85	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.18	5.88	114.8	133.5	-	-
17	>>	LB 2-8	0.85	20	40	33.7	1.170	0.587	540.0 (1)	540.0 (1)	16	16	60.2	10	80.0 (4)	420.0	-	1.29	5.18	121.6	132.6	-	-
18	Hwang Scribner (1986)	s3-1	0.64	20	31	24.6	1.879	1.380	408.5 (1)	438.9 (1)	22	19	33.8	10	63.5 (4)	520.2	-	0.81	2.09	99.0	110.0	-	-
19	>>	s3-2	0.64	20	31	24.9	1.879	1.380	408.5 (1)	438.9 (1)	22	19	34.2	10	63.5 (4)	520.2	-	0.98	4.11	97.0	109.0	-	-
20	>>	s3-3	0.64	20	31	24.4	1.879	1.380	408.5 (1)	438.9 (1)	22	19	34.3	10	63.5 (4)	520.2	-	0.93	4.10	98.0	108.0	-	-
21	>>	s3-4	0.64	20	31	24.6	1.879	1.380	408.5 (1)	438.9 (1)	22	19	34.9	10	63.5 (4)	520.2	-	0.86	4.11	97.0	110.0	-	-
22	Ma et al (1976)	r1	1.59	23	41	35.6	1.227	0.639	451.3 (1)	458.2 (1)	19	16	34.9	6	88.9 (4)	413.7	-	0.91	3.90	155.2	183.5	0.010	0.096
23	>>	r2	1.59	23	41	35.6	1.227	0.639	451.3 (1)	458.2 (1)	19	16	28.9	6	88.9 (4)	413.7	-	0.90	4.35	158.8	169.4	0.010	0.107
24	>>	r3	1.59	23	41	35.6	1.227	0.639	451.3 (1)	458.2 (1)	19	16	31.6	6	88.9 (4)	413.7	-	1.02	5.06	170.8	188.4	0.010	0.093
25	>>	r4	1.59	23	41	35.6	1.227	0.639	451.3 (1)	458.2 (1)	19	16	30.2	6	88.9 (4)	413.7	-	0.96	6.88	160.9	199.0	0.010	0.166
26	>>	t1	1.59	23	41	35.6	1.636	0.640	451.3 (1)	458.2 (1)	19	16	33.0	6	88.9 (4)	413.7	-	1.15	4.67	225.8	236.4	0.011	0.084

Πίνακας 3 (συνεχίζεται)

27	>>		12	1.59	23	41	35.6	1.636	0.640	451.3	(1)	458.2	(1)	19	16	31.8	6	88.9	(4)	413.7	-	1.20	6.64	225.8	264.6	0.011	0.198
28	>>		13	1.59	23	41	35.6	1.636	1.227	451.3	(1)	451.3	(1)	19	19	30.8	6	88.9	(4)	413.7	-	1.20	4.99	220.2	248.4	0.011	0.109
29	Nmai Darwin (1986)		F-1	#	19	46	38.7	0.865	0.424	509.0	(1)	509.0	(1)	13	13	29.4	8	96.5	(4)	224.3	-	1.09	4.23	123.4	152.6	-	-
30	>>		F-2	#	19	46	39.1	0.880	0.427	509.0	(1)	509.0	(1)	13	13	29.1	8	96.5	(4)	224.3	-	0.89	4.55	133.6	168.2	-	-
31	>>		F-3	#	19	46	39.1	0.590	0.299	509.0	(1)	509.0	(1)	13	13	29.4	8	96.5	(4)	224.3	-	0.78	3.40	91.6	113.3	-	-
32	>>		F-4	#	19	46	38.7	0.585	0.297	509.0	(1)	509.0	(1)	13	13	29.9	5	40.6	(4)	263.6	-	0.67	3.40	88.2	109.2	-	-
33	>>		F-5	#	19	46	39.4	0.594	0.302	509.0	(1)	509.0	(1)	13	13	30.2	5	53.3	(4)	263.6	-	0.75	3.40	88.2	110.5	-	-
34	>>		F-6	#	19	46	39.1	0.590	0.427	509.0	(1)	509.0	(1)	13	13	29.8	8	96.5	(4)	224.3	-	0.64	3.40	90.2	113.3	-	-
35	>>		F-7	#	19	46	39.1	0.590	0.299	509.0	(1)	509.0	(1)	13	13	29.1	5	96.5	(6)	263.6	-	0.67	3.40	90.2	112.6	-	-
36	Oates (1993)		s1-v3		20	30	26.8	0.754	0.565	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	37.5	6	70.0	(4)	536.0	-	1.01	8.93	63.0	64.0	-	-
37	>>		s1-v4		20	30	26.8	0.754	0.565	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	35.0	6	70.0	(4)	536.0	-	1.11	6.81	61.5	63.0	-	-
38	>>		s1-v5		20	30	26.8	0.754	0.565	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	35.7	6	70.0	(4)	536.0	-	0.95	8.73	63.0	64.0	-	-
39	>>		s1-v6		20	30	26.8	0.754	0.565	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	33.7	6	70.0	(4)	536.0	-	0.80	6.66	63.0	64.0	-	-
40	>>		s2-v3		20	30	26.8	0.754	0.377	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	45.5	6	70.0	(4)	536.0	-	1.03	7.09	63.0	64.0	-	-
41	>>		s2-v4		20	30	26.8	0.754	0.377	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	37.5	6	70.0	(4)	536.0	-	1.09	5.30	64.5	66.0	-	-
42	>>		s2-v5		20	30	26.8	0.754	0.377	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	38.3	6	70.0	(4)	536.0	-	0.92	7.03	58.5	60.0	-	-
43	>>		s2-v6		20	30	26.8	0.754	0.377	536.0	(2)	536.0	(2)	12	12	35.8	6	70.0	(4)	536.0	-	1.13	4.34	67.5	68.0	-	-
44	Scribner Wight (1978)		s10		25	36	30.7	2.244	1.718	414.8	(1)	339.7	(1)	25	25	34.0	10	76.2	(4)	372.1	-	2.06	9.69	231.4	222.6	-	-
45	>>		s11		25	36	30.7	2.244	1.718	414.8	(1)	339.7	(1)	25	25	34.0	10	76.2	(4)	372.1	-	1.60	6.42	201.6	260.5	-	-
46	>>		s12		25	36	30.7	2.244	1.718	414.8	(1)	339.7	(1)	25	25	34.0	10	76.2	(4)	372.1	-	2.10	6.35	218.4	278.1	-	-
47	>>		s3		20	30	25.7	1.380	0.960	336.9	(1)	356.2	(1)	19	19	34.2	6	63.5	(4)	293.5	-	1.28	7.06	66.7	68.0	-	-
48	>>		s4		20	30	25.7	1.380	0.960	336.9	(1)	356.2	(1)	19	19	34.2	6	63.5	(4)	293.5	-	1.94	7.17	74.8	74.3	-	-
49	>>		s5		20	25	21.8	1.104	0.767	363.1	(1)	363.1	(1)	19	19	27.4	6	50.8	(4)	293.5	-	1.49	7.92	56.2	39.0	-	-
50	>>		s6		20	25	21.8	1.104	0.767	363.1	(1)	363.1	(1)	19	19	27.4	6	50.8	(4)	293.5	-	1.06	7.12	41.0	33.4	-	-
51	>>		s7		20	30	25.7	1.380	0.958	363.1	(1)	363.1	(1)	19	19	27.4	10	63.5	(4)	381.7	-	1.41	6.86	65.4	45.0	-	-
52	>>		s8		20	30	25.7	1.380	0.958	363.1	(1)	363.1	(1)	19	19	27.4	6	63.5	(4)	381.7	-	2.25	7.11	76.9	77.9	-	-
53	>>		s9		25	36	30.7	2.244	1.718	414.8	(1)	339.7	(1)	25	25	34.0	10	76.2	(4)	372.1	-	2.01	8.72	230.1	226.7	-	-

#: χωρίς ολίσθηση σπλισμών πέραν από τη διαστολή της μέγιστης ροπής.

\*: χωρίς αστοχία δοκίμιου πριν το τέλος του περάματος

(1): όγκιμος χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).

(2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας H κατά EC2 ή B κατά ENV 10080.

(3): φαθυρός χάλυβας, κατηγορίας N κατά EC2 ή A κατά ENV 10080.

(4): Δίτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.

(5): Δίτητοι συνδετήρες.

Πίνακας 4: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκιμών και κύρια αποτελέσματα ανακυκλιζόμενων-μονοαξονικών πειραμάτων με λόγο διάτμησης μεγαλύτερο του 2, συμμετρικό σπλισμό ( $\rho_1 = \rho_2$ ) και σταθερό, μη-μηδενικό αξονικό φορτίο.

	Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	$f_{y1}$ (MPa)	$f_{y2}$ (MPa)	$\Phi L1$ (mm)	$\Phi L2$ (mm)	$f_c$ (MPa)	$\Phi h$ (m)	s (cm)	$f_{yw}$ (MPa)	v	$\theta_y$ (%)	$\theta_u$ (%)	$M_{iy}$ (kNm)	$M_{ux}$ (kNm)	$\Phi_y$ (1/m)	$\Phi_u$ (1/m)
1	Abrams (1987)	C2	1.60	23	31	26.1	0.810	0.810	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	42.3	10	64.0 (1)	423.0	0.10			115.0	120.0	0.018	0.133
2	Alalay Penzien (1975)	a11	# 1.83	30	30	25.4	0.835	0.835	380.6 (1)	380.6 (1)	22	22	28.0	10	76.2 (4)	380.6	0.31	1.23	3.42	142.0	150.0	-	-
3	>>	a12	# 1.83	30	30	25.4	0.835	0.835	380.6 (1)	380.6 (1)	22	22	28.0	10	127.0 (4)	380.6	0.31	1.00	2.73	143.0	150.0	-	-
4	>>	a4	# 1.83	30	30	25.4	0.835	0.835	380.6 (1)	380.6 (1)	22	22	28.0	10	127.0 (4)	380.6	0.10	1.08	4.50	91.5	95.0	-	-
5	>>	a7	# 1.83	30	30	25.4	0.835	0.835	380.6 (1)	380.6 (1)	22	22	28.0	10	76.2 (4)	380.6	0.21	1.05	4.29	122.0	125.0	-	-
6	>>	a8	# 1.83	30	30	25.4	0.835	0.835	380.6 (1)	380.6 (1)	22	22	28.0	10	127.0 (4)	380.6	0.21	1.08	3.41	123.0	125.0	-	-
7	Aycardi et al. (1994)	Spec_2	0.53	10	10	13.3	0.999	0.999	517.1 (1)	517.1 (1)	6	6	102.9	3	25.4 (4)	792.9	0.10	1.00	5.05	4.7	5.3	0.010	-
8	>>	Spec_3	0.53	10	10	13.3	0.999	0.999	517.1 (1)	517.1 (1)	6	6	86.3	3	25.4 (4)	792.9	0.20	1.50	4.12	3.1	3.7	0.030	-
9	Azizinamini et al. (1994)	Unit_1	# 1.12	31	31	28.0	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	53.7	5	66.7 (4)	413.7	0.17	0.45	3.18	-	248.0	0.01197	-
10	>>	Unit_2	# 1.12	31	31	27.6	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	50.8	4	41.3 (5)	413.7	0.17	0.52	4.18	-	237.7	-	-
11	>>	Unit_3	# 1.12	31	31	28.0	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	100.8	5	66.7 (4)	413.7	0.17	0.59	2.36	-	271.4	0.01302	-
12	>>	Unit_4	# 1.12	31	31	27.6	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	100.3	4	41.3 (5)	413.7	0.17	0.55	3.27	-	295.1	0.01379	-
13	>>	Unit_5	# 1.12	31	31	27.6	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	101.6	4	66.7 (5)	828.0	0.17	0.57	2.27	-	379.8	0.01526	-
14	>>	Unit_6	# 1.12	31	31	27.6	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	101.7	4	41.3 (5)	828.0	0.17	0.64	3.18	-	288.1	0.01056	-
15	>>	Unit_7	# 1.12	31	31	27.6	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	26.3	4	66.7 (5)	413.7	0.17	0.52	2.61	-	173.2	0.01438	-
16	>>	Unit_8	# 1.12	31	31	27.6	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	27.0	4	66.7 (5)	413.7	0.17	0.45	1.82	-	168.2	0.00898	-
17	>>	Unit_9	# 1.12	31	31	27.6	0.190	0.190	413.0 (1)	413.0 (1)	8	8	103.8	4	41.3 (5)	413.7	0.17	0.55	2.00	-	304.0	0.01086	-
18	Beng et al. (1974)	unit-13	0.80	40	37	36.4	1.625	1.625	436.0 (1)	436.0 (1)	16	16	36.2	6	30.0 (4)	326.0	0.10	1.34	6.64	360.3	332.4	-	-
19	>>	unit-17	1.00	40	37	36.4	1.810	1.810	436.0 (1)	436.0 (1)	16	16	34.3	6	60.0 (4)	326.0	0.10	1.33	4.62	275.7	152.9	-	-
20	>>	unit-8	0.80	40	37	36.4	2.729	2.729	448.0 (1)	448.0 (1)	16	16	28.7	6	30.0 (4)	372.0	0.20	1.55	5.31	383.6	364.0	-	-
21	Bousias et al. (1992)	S0	# 1.50	25	25	21.0	0.965	0.965	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	30.8	8	70.0 (4)	440.0	0.16	1.7	7	82.5	-	-	-
22	BRI (1976, 1978)	CABA1	0.75	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	9	50.0 (4)	362.0	0.11	0.52	4.00	72.6	-	-	-
23	>>	CABA2	0.75	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	9	50.0 (4)	362.0	0.11	0.52	6.00	70.0	-	-	-
24	>>	CABB1	0.75	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	9	100.0 (4)	362.0	0.11	0.47	3.00	70.9	-	-	-
25	>>	CABB2	0.75	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	9	100.0 (4)	362.0	0.11	0.69	2.00	77.9	-	-	-
26	>>	CBBA1	0.75	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	27.0	6	120.0 (4)	377.0	0.11	0.64	2.67	43.8	-	-	-
27	>>	CBBA2	0.75	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	27.0	6	120.0 (4)	377.0	0.11	0.52	2.00	41.1	-	-	-
28	>>	CBBB1	0.75	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	27.0	6	250.0 (4)	377.0	0.11	0.23	2.00	37.6	-	-	-
29	>>	CBBB2	0.75	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	27.0	6	250.0 (4)	377.0	0.11	0.52	2.67	40.3	-	-	-
30	>>	SABA1	0.75	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	9	50.0 (4)	362.0	0.11	0.55	4.00	70.0	-	-	-
31	>>	SABA2	0.75	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	9	50.0 (4)	362.0	0.11	0.70	3.00	70.9	-	-	-
32	>>	SABB1	0.75	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	9	100.0 (4)	362.0	0.11	0.64	4.00	70.9	-	-	-
33	>>	SABB2	0.75	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	9	100.0 (4)	362.0	0.11	0.58	3.00	68.3	-	-	-
34	>>	SBBA1	0.75	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	27.0	6	125.0 (4)	377.0	0.11	0.37	2.67	40.3	-	-	-
35	>>	SBBA2	0.75	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	27.0	6	125.0 (4)	377.0	0.11	0.29	2.67	37.6	-	-	-
36	>>	SBBB1	0.75	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	27.0	6	250.0 (4)	377.0	0.11	0.47	2.67	39.4	-	-	-
37	>>	SBBB2	0.75	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	27.0	6	250.0 (4)	377.0	0.11	0.40	2.67	39.4	-	-	-



Πίνακας 4 (συνεχίζεται)

38	>>	DWC10	0.75	25	25	21.5	0.460	0.460	406.0 (1)	406.0 (1)	16	16	22.2	6	30.7 (4)	289.0	0.12	0.84	2.50	71.3	-	-	-	
39	>>	DWC11	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	21.5	6	72.0 (4)	289.0	0.12	0.68	2.04	52.5	-	-	-	
40	>>	DWC12	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	22.0	6	72.0 (4)	289.0	0.12	0.67	2.69	52.1	-	-	-	
41	>>	DWC2-13	0.63	25	25	21.5	0.610	0.610	418.0 (1)	418.0 (1)	13	13	21.5	6	32.0 (4)	289.0	0.12	0.37	2.91	69.0	-	-	-	
42	>>	DWC2-14	0.63	25	25	21.5	0.610	0.610	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	20.5	6	50.0 (4)	289.0	0.13	0.56	4.52	55.3	-	-	-	
43	>>	DWC2-15	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	418.0 (1)	418.0 (1)	13	13	20.7	6	35.5 (5)	289.0	0.25	0.48	2.92	80.5	-	-	-	
44	>>	DWC2-16	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	21.7	6	72.0 (4)	289.0	0.12	0.55	4.32	52.9	-	-	-	
45	>>	DWC2-17	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	405.0 (1)	405.0 (1)	13	13	18.5	6	34.0 (4)	289.0	0.28	0.69	2.89	67.4	-	-	-	
46	>>	DWC2-18	0.75	25	25	21.5	0.960	0.960	405.0 (1)	405.0 (1)	16	16	18.9	6	30.0 (4)	289.0	0.14	0.71	2.89	69.1	-	-	-	
47	>>	DWC3	0.63	25	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	22.7	6	49.5 (4)	289.0	0.12	0.73	2.19	55.9	-	-	-	
48	>>	DWC4	0.63	25	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	19.8	6	49.5 (4)	289.0	0.13	0.73	2.90	55.3	-	-	-	
49	>>	DWC5	0.63	25	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	21.9	6	31.0 (4)	289.0	0.24	0.81	2.34	70.5	-	-	-	
50	>>	DWC6	0.63	25	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	22.8	6	31.0 (4)	289.0	0.23	0.87	2.54	71.0	-	-	-	
51	>>	DWC7	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	22.4	6	45.0 (4)	289.0	0.23	0.81	2.29	71.6	-	-	-	
52	>>	DWC8	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	21.1	6	45.0 (4)	289.0	0.25	0.76	3.06	70.0	-	-	-	
53	>>	DWC9	0.75	25	25	21.5	0.460	0.460	406.0 (1)	406.0 (1)	16	16	24.4	6	30.7 (4)	289.0	0.11	0.81	2.52	69.8	-	-	-	
54	>>	LS3AA	0.75	25	25	21.5	0.960	0.960	356.3 (1)	356.3 (1)	16	16	19.3	9	51.7 (4)	358.9	0.27	1.07	4.27	68.4	-	-	-	
55	>>	LS3AB	0.75	25	25	21.5	0.960	0.960	356.3 (1)	356.3 (1)	16	16	19.3	6	45.5 (4)	384.7	0.27	1.07	4.27	69.2	-	-	-	
56	>>	LS3BA	0.75	25	25	21.5	0.960	0.960	356.3 (1)	356.3 (1)	16	16	19.3	6	44.1 (4)	384.7	0.14	1.00	4.00	61.7	-	-	-	
57	>>	LS3BB	0.75	25	25	21.5	0.960	0.960	356.3 (1)	356.3 (1)	16	16	19.3	4	39.5 (4)	388.7	0.14	1.00	4.00	60.9	-	-	-	
58	>>	LS4AA	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	363.5 (1)	363.5 (1)	13	13	19.3	6	42.9 (4)	387.4	0.27	0.80	3.60	47.1	-	-	-	
59	>>	LS4AB	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	363.5 (1)	363.5 (1)	13	13	19.3	4	38.5 (4)	388.7	0.27	0.80	3.60	53.1	-	-	-	
60	>>	LS4BA	0.75	25	25	21.5	0.610	0.610	363.5 (1)	363.5 (1)	13	13	19.3	4	51.0 (4)	388.7	0.14	0.80	4.80	45.4	-	-	-	
61	>>	Kraetzig et al (1989)	s1.1* #	1.50	30	30	26.0	1.270	1.270	514.0 (2)	514.0 (2)	22	22	35.6	8	80.0 (4)	514.0	0.10	1.02	-	135.0	-	-	-
62	>>		s1.3* #	1.50	30	30	26.0	1.270	1.270	514.0 (2)	514.0 (2)	22	22	35.0	8	80.0 (4)	514.0	0.10	1.02	-	126.0	-	-	-
63	>>		s1.4* #	1.50	30	30	26.0	1.270	1.270	514.0 (2)	514.0 (2)	22	22	36.2	8	80.0 (4)	514.0	0.09	0.66	-	135.0	-	-	-
64	>>		s1.5* #	1.50	30	30	26.0	1.270	1.270	514.0 (2)	514.0 (2)	22	22	28.4	8	80.0 (4)	514.0	0.12	0.54	-	120.0	-	-	-
65	>>		s1.6* #	1.50	30	30	26.0	1.270	1.270	514.0 (2)	514.0 (2)	22	22	30.5	8	80.0 (4)	514.0	0.11	0.43	-	142.5	-	-	-
66	>>	Low Moehle (1980)	No 1 #	0.55	13	17	11.0	0.982	0.982	458.0 (1)	458.0 (1)	10	10	37.2	3	25.4 (4)	420.0	0.06	1.00	5.20	13.1	-	-	-
67	>>	Moretti (1997)	No 8 #	0.75	25	25	21.0	2.000	2.000	480.0 (1)	480.0 (1)	14	14	38.0	8	50.0 (4)	300.0	0.30	1.20	-	105.0	-	-	-
68	>>	Rabbat et al (1986)	lc1*	1.19	38	38	32.2	0.730	0.730	461.5 (1)	461.5 (1)	22	22	37.8	10	51.0 (4)	455.0	0.10	1.13	-	237.0	-	-	-
69	>>		lc10	1.19	38	38	32.2	0.730	0.730	461.5 (1)	461.5 (1)	22	22	37.8	10	121.0 (4)	455.0	0.10	1.13	-	237.0	-	-	-
70	>>		lc11*	1.31	38	38	32.2	0.589	0.589	461.5 (1)	461.5 (1)	19	19	37.8	10	102.0 (4)	455.0	0.10	1.13	-	237.0	-	-	-
71	>>		lc3*	1.19	38	38	32.2	0.730	0.730	461.5 (1)	461.5 (1)	22	22	37.8	10	121.0 (4)	455.0	0.10	1.24	-	237.0	-	-	-
72	>>		lc4*	1.19	38	38	32.2	0.730	0.730	461.5 (1)	461.5 (1)	22	22	37.8	10	102.0 (4)	455.0	0.10	1.13	-	237.0	-	-	-
73	>>		lc7*	1.19	38	38	32.2	0.589	0.589	461.5 (1)	461.5 (1)	19	19	37.8	10	102.0 (4)	455.0	0.10	1.13	-	237.0	-	-	-
74	>>		lc8	1.19	38	38	32.2	0.589	0.589	461.5 (1)	461.5 (1)	19	19	37.8	10	102.0 (4)	455.0	0.10	1.13	-	237.0	-	-	-
75	>>		nc1	1.19	38	38	31.9	0.730	0.730	461.5 (1)	461.5 (1)	22	22	37.8	13	102.0 (4)	455.0	0.15	1.02	5.53	237.0	-	-	-
76	>>		nc2*	1.19	38	38	32.2	0.589	0.589	461.5 (1)	461.5 (1)	19	19	37.8	10	102.0 (4)	455.0	0.10	1.13	-	237.0	-	-	-
77	>>		nc3	1.37	38	38	32.2	0.730	0.730	461.5 (1)	461.5 (1)	22	22	37.8	10	102.0 (4)	455.0	0.10	1.13	-	237.0	-	-	-
78	>>	Saatcioglu Ozcebe (1989)	d2	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	453.0 (1)	453.0 (1)	25	25	30.2	10	150.0 (4)	470.0	0.16	1.37	4.56	244.4	-	-	-
79	>>		d3	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	34.8	10	75.0 (4)	470.0	0.14	1.41	4.39	207.0	-	-	-

Πίνακας 4 (συνεχίζεται)

80	>>	d4	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	43.6	10	50.0 (4)	470.0	0.11	1.60	6.71	252.1	300.0	-
81	>>	d5	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	49.3	10	150.0 (4)	470.0	0.08	1.13	5.41	230.0	254.0	-
82	>>	u2	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	30.2	10	150.0 (4)	470.0	0.16	1.34	5.71	240.0	270.0	-
83	>>	u3	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	34.8	10	75.0 (4)	470.0	0.14	1.54	7.13	220.0	268.0	-
84	>>	u4	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	438.0 (1)	438.0 (1)	25	25	32.0	10	50.0 (4)	470.0	0.15	1.57	8.88	282.8	326.0	-
85	>>	u5	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	49.3	10	150.0 (4)	470.0	0.08	1.00	5.76	220.0	255.0	-
86	>>	u6	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	437.0 (1)	437.0 (1)	25	25	37.3	6	65.0 -	425.0	0.13	1.72	8.98	288.4	343.0	-
87	>>	u7	1.00	35	35	30.5	1.202	1.202	437.0 (1)	437.0 (1)	25	25	39.0	6	65.0 -	425.0	0.13	1.60	8.85	292.9	342.0	-
88	Takizawa Aoyama (1976)	No 1* #	0.60	20	20	16.5	0.635	0.635	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	23.0	6	50.0 (4)	257.0	0.18	0.60	-	27.0	-	-
89	>>	No 2 #	0.60	20	20	16.5	0.635	0.635	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	23.0	6	50.0 (4)	257.0	0.18	0.50	-	27.0	-	-
90	>>	No 3 #	0.60	20	20	16.5	0.635	0.635	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	23.0	6	50.0 (4)	257.0	0.25	0.66	-	27.0	-	-
91	Tegos (1984)	ss5	0.50	20	20	17.5	0.770	0.770	325.0 (1)	325.0 (1)	14	14	19.8	8	50.0 (4)	315.0	0.30	0.79	4.05	30.0	30.0	-
92	Thomsen Wallace (1994)	B_3	0.48	15	15	13.3	1.227	1.227	448.2 (1)	448.2 (1)	10	10	90.0	-	25.4 (6)	792.9	0.20	0.79	3.47	25.8	21.6	-
93	Tsonos et al (1992)	L1	0.70	20	20	17.0	0.770	0.770	485.0 (1)	485.0 (1)	14	14	34.0	8	65.0 (4)	495.0	0.11	1.30	6.40	47.0	49.0	-
94	>>	L1'	0.70	20	20	17.0	0.770	0.770	485.0 (1)	485.0 (1)	14	14	33.8	8	32.5 (4)	495.0	0.11	1.40	8.50	46.0	49.0	-
95	Vinzeleou et al (1995)	empsp1 #	1.05	25	25	24.3	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	6	100.0 (4)	350.0	0.01	1.43	5.71	65.0	105.0	-
96	>>	empsp10 #	1.05	25	25	24.3	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	8	125.0 (4)	450.0	0.04	1.29	5.14	39.0	45.0	-
97	>>	empsp12 #	1.05	25	25	24.5	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	8	125.0 (4)	450.0	0.02	1.71	7.62	100.0	110.0	-
98	>>	empsp13 #	1.05	25	25	23.6	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	8	125.0 (4)	450.0	0.01	1.71	6.67	95.0	105.0	-
99	>>	empsp15 #	1.05	25	25	23.3	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	8	125.0 (4)	450.0	0.01	1.71	6.67	95.0	105.0	-
100	>>	empsp16 #	1.05	25	25	24.3	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	6	100.0 -	350.0	0.05	1.52	6.10	85.0	125.0	-
101	>>	empsp18 #	1.05	25	25	24.5	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	10	50.0 -	350.0	0.35	3.33	8.19	200.0	250.0	-
102	>>	empsp19 #	1.05	25	25	24.7	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	6	100.0 -	350.0	0.04	1.19	4.76	40.0	48.0	-
103	>>	empsp2 #	1.05	25	25	24.7	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	14	50.0 (4)	350.0	0.23	1.17	4.67	100.0	175.0	-
104	>>	empsp22 #	1.05	25	25	23.1	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	6	100.0 -	350.0	0.04	1.14	5.71	40.0	50.0	-
105	>>	empsp3 #	1.05	25	25	23.6	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	6	100.0 (4)	350.0	0.01	1.29	5.24	59.0	95.0	-
106	>>	empsp30 #	1.05	25	25	23.0	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	8	100.0 -	450.0	0.15	1.90	7.62	110.0	125.0	-
107	>>	empsp32 #	1.05	25	25	24.4	1.086	1.086	475.0 (1)	475.0 (1)	12	12	30.0	10	50.0 (6)	350.0	0.48	1.90	7.62	58.0	60.0	-
108	>>	empsp33 #	1.05	25	25	23.5	1.086	1.086	475.0 (1)	475.0 (1)	12	12	30.0	6	100.0 (6)	350.0	0.07	1.71	5.71	55.0	60.0	-
109	>>	empsp36 #	1.05	25	25	23.0	1.086	1.086	475.0 (1)	475.0 (1)	12	12	30.0	6	100.0 (6)	350.0	0.07	0.95	6.67	75.0	110.0	-
110	>>	empsp38 #	1.05	25	25	23.6	1.086	1.086	475.0 (1)	475.0 (1)	12	12	30.0	8	50.0 (6)	350.0	0.31	1.90	9.52	150.0	160.0	-
111	>>	empsp6 #	1.05	25	25	22.8	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	6	100.0 (4)	350.0	0.01	1.29	5.71	60.0	92.0	-
112	>>	empsp8 #	1.05	25	25	23.8	0.739	0.739	475.0 (1)	475.0 (1)	14	14	30.0	8	50.0 (4)	350.0	0.06	1.71	7.62	80.0	120.0	-
113	Zahn et al (1989)	unit-1 #	1.60	40	40	36.9	0.687	0.687	423.0 (1)	423.0 (1)	16	16	36.2	10	84.0 (4)	318.0	0.23	1.22	8.86	338.1	331.5	-
114	>>	unit-2 #	1.60	40	40	36.9	1.094	1.094	423.0 (1)	423.0 (1)	16	16	28.8	10	65.0 (4)	318.0	0.43	0.87	5.36	332.9	375.1	-
115	>>	unit-3a #	1.60	40	40	36.9	1.617	1.617	423.0 (1)	423.0 (1)	16	16	23.6	10	100.0 (4)	318.0	0.38	0.60	3.19	295.9	276.9	-
116	>>	unit-4a #	1.60	40	40	36.9	1.442	1.442	423.0 (1)	423.0 (1)	16	16	25.0	10	90.0 (4)	318.0	0.21	0.64	3.64	263.2	301.5	-
117	Zhang (1996)	C2H1	1.30	30	30	27.5	0.669	0.669	401.0 (1)	401.0 (1)	16	16	29.3	8	47.0 (4)	220.0	0.07	1.04	4.45	112.0	149.0	-
118	>>	C2L1	1.30	30	30	27.5	0.669	0.669	401.0 (1)	401.0 (1)	16	16	33.4	8	100.0 (4)	220.0	0.07	1.36	7.21	104.0	130.5	-
119	>>	C3H2	0.83	20	20	18.5	0.848	0.848	462.0 (1)	462.0 (1)	12	12	33.4	5	27.0 (4)	220.0	0.20	1.33	5.85	45.4	60.0	0.677
120	>>	C3L2	0.83	20	20	18.5	0.848	0.848	462.0 (1)	462.0 (1)	12	12	29.3	5	60.0 (4)	220.0	0.20	1.12	4.44	46.8	56.6	0.626
121	>>	C5H1	0.45	11	11	10.2	0.701	0.701	479.0 (1)	479.0 (1)	6	6	26.4	3	18.0 (4)	220.0	0.07	1.02	5.30	7.0	8.0	1.222

Πίνακας 4 (συνεχίζεται)

122	>>	C5H2	0.45	11	11	10.2	0.701	0.701	479.0	(1)	479.0	(1)	6	6	26.4	3	18.0	(4)	220.0	0.20	1.02	4.35	8.2	9.8	0.047	0.788
123	>>	C5L1	0.45	11	11	10.2	0.701	0.701	479.0	(1)	479.0	(1)	6	6	26.4	3	40.0	(4)	220.0	0.07	0.88	3.92	6.1	7.3	0.045	0.744
124	>>	C5L2	0.45	11	11	10.2	0.701	0.701	479.0	(1)	479.0	(1)	6	6	26.4	3	40.0	(4)	220.0	0.20	1.11	3.82	6.4	7.8	0.046	0.640

#: χωρίς ολίσθηση οπλισμών πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπή.  
 \*: χωρίς αστοχία δοκιμίου πριν το τέλος του περιβάματος  
 (1): όγκιμος χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).  
 (2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας H κατά EC2 ή B κατά ENV 10080.  
 (3): ψαθυρός χάλυβας, κατηγορίας N κατά EC2 ή A κατά ENV 10080.  
 (4): Διτητοι συνδετήρες.  
 (5): Διτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.

Πίνακας 5: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκιμών και κύρια αποτελέσματα ανακυκλιζόμενων-μονοαξονικών πειραμάτων με συμμετρικό σπλισμό ( $\rho_1 = \rho_2$ ), μεταβλητό αξονικό φορτίο και  $l/h > 2$ .

	Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	$f_{y1}$ (MPa)	$f_{y2}$ (MPa)	$\Phi L1$ (mm)	$\Phi L2$ (mm)	$f_c$ (MPa)	$\Phi h$ (mm)	s (mm)	$f_{yw}$ (MPa)	v	$\epsilon_y$ (%)	$\epsilon_u$ (%)	My (kNm)	Mu (kNm)	$\Phi_y$ (1/m)	$\Phi_u$ (1/m)
1	Abrams (1987)	C2	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	24.1	10	64.0 (4)	423.0	0.02/0.22			-	-	-	-
2	>>	C3	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	27.4	10	64.0 (4)	423.0	0.06/0.32			-	-	-	-
3	>>	C4	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	33.4	10	64.0 (4)	423.0	0.02/0.25	2.67	4.0	-	-	-	-
4	>>	C5	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	28.4	10	64.0 (4)	423.0	-0.07			-	-	-	-
5	>>	C6	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	28.2	10	64.0 (4)	423.0	0.07/0.29			-	-	-	-
6	>>	C7	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	17.8	10	64.0 (4)	423.0	0.02/0.35			-	-	-	-
7	>>	C8	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	45.9	10	64.0 (4)	423.0	0.01/0.18	0.37	3.0	-	-	-	-
8	>>	C8	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	43.0	10	64.0 (4)	423.0	0.01/0.19			-	-	-	-
9	>>	C10	1.60	23	31	26.1	0.810	1.600	423.0 (1)	423.0 (1)	19	19	38.1	10	64.0 (4)	423.0	0.02/0.22			-	-	-	-
10	Bousias et al (1992)	S10 *	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	28.5	8	70.0 (4)	440.0	0/0.28	1.11	7.0	75	-	-	-
11	Li et al (1987)	U8-1	0.60	20	20	17.5	0.59	1.57	418.0 (1)	418.0 (1)	10	10	27.1	6	50.0 (4)	386.0	0/0.13	0.89	4.0	33	36	-	-
12	Saatcioglu et al (1989)	U5	1.00	35	35	30.5	1.200	3.210	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	49.3	10	150. (4)	470.0	N/A	1.36	6.0	152	250	-	-
13	Tsonos et al (1992)	L2	0.70	20	20	17.0	0.770	0.770	485.0 (1)	485.0 (1)	14	14	32.4	8	65.0 (1)	495.0	0.08/0.23	1.70	5.0	60.0	60.0	-	-
14	>>	L2'	0.70	20	20	17.0	0.770	0.770	485.0 (1)	485.0 (1)	14	14	32.4	8	32.5 (1)	495.0	0.08/0.23	2.20	7.1	57.0	57.0	-	-
15	>>	L3	0.70	20	20	17.0	0.770	0.770	485.0 (1)	485.0 (1)	14	14	32.8	8	65.0 (1)	495.0	0.08/0.38	1.40	4.3	55.0	55.0	-	-
16	>>	L3'	0.70	20	20	17.0	0.770	0.770	485.0 (1)	485.0 (1)	14	14	32.0	8	32.5 (1)	495.0	0.08/0.39	1.40	4.3	57.0	57.0	-	-

#: χωρίς ολίσθηση σπλισμών πέραν από τη διατομή της μέγιστης ραπής.

\*: χωρίς αστοχία δοκιμίου πριν το τέλος του πειράματος

(1): ολκίμος χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).

(2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας H κατά EC2 ή B κατά ENV 10080.

(3): ψαθυρός χάλυβας, κατηγορίας N κατά EC2 ή A κατά ENV 10080.

(4): Δίτητοι συνδετήρες.

(5): Δίτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.

Πίνακας 6: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκιμών και κύρια αποτελέσματα μονοτονικών-διαξονικών πειραμάτων με συμμετρικό σπλισμό ( $\rho_1 = \rho_2$ ) και σταθερό αξονικό φορτίο.

Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_{tot}$ (%)	$f_{y1}$ (MPa)	$f_{y2}$ (MPa)	$\Phi L1$ (mm)	$\Phi L2$ (mm)	$f_c$ (MPa)	$\Phi h$ (mm)	s (cm)	$f_{yw}$ (MPa)	v	$\theta_y$ (%)	$\theta_u$ (%)	$M_u$ (kNm)	$\Phi_y$ (1/m)	$\Phi_u$ (1/m)
Bousias et al (1995)	S1	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	29.0	8	70.0 (1)	440.0	0.12	1.75	7.00	82.5	-	-
>>	S2	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	31.1	8	70.0 (1)	440.0	0.15	1.40	7.00	82.5	-	-
>>	S3	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	29.0	8	70.0 (1)	440.0	0.17	0.93	7.00	82.5	-	-
>>	S4	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	27.7	8	70.0 (1)	440.0	0.15	1.17	7.00	82.5	-	-
>>	S5	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	33.1	8	70.0 (1)	440.0	0.12	1.33	8.00	82.5	93	-
>>	S6	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	25.7	8	70.0 (1)	440.0	0.10	1.17	7.00	82.5	-	-
>>	S7	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	28.1	8	70.0 (1)	440.0	0.12	1.40	7.00	82.5	-	-
>>	S8	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	25.4	8	70.0 (1)	440.0	0.11	1.46	7.00	82.5	-	-
>>	S9	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	458.0 (1)	458.0 (1)	16	16	23.9	8	70.0 (1)	440.0	0.03*0.15	1.27	7.00	78.0	90	-
Low et al (1980)	No.2	0.55	13	17	11/14.8	0.982	2.270	458.0 (1)	458.0 (1)	9.5/6.5	9.5/6.5	37.2	3	25.4 (1)	420.0	0.06	0.70	5.00	-	-	-
>>	No.3	0.55	13	17	11/14.8	0.982	2.270	458.0 (1)	458.0 (1)	9.5/6.5	9.5/6.5	37.2	3	25.4 (1)	420.0	0.06	0.79	5.00	-	-	-
Oftani et al (1980)	SP4	1.37	31	31	26.5	1.250	3.300	441.0 (1)	441.0 (1)	22	22	33.7	10	53.0 (1)	501.0	0.00	1.06	11.00	175	212	-
>>	SP6	1.37	31	31	26.5	1.250	3.300	441.0 (1)	441.0 (1)	22	22	22.6	7	51.0 (1)	236.0	0.00	1.39	5.00	137	178	-
>>	SP7	1.37	31	31	26.5	1.250	3.300	466.0 (1)	466.0 (1)	22	22	26.7	7	88.0 (1)	302.0	0.00	1.15	6.00	-	-	-
>>	SP8	1.37	31	31	26.5	1.250	3.300	466.0 (1)	466.0 (1)	22	22	26.7	7	88.0 (1)	302.0	0.00	0.80	7.00	-	-	-
Saatcioglu et al (1989)	D1	1.00	35	35	30.5	1.200	3.210	453.0 (1)	453.0 (1)	25	25	40.3	10	150.0 (1)	470.0	0.00	1.31	8.00	210	250	-
>>	D2	1.00	35	35	30.5	1.200	3.210	453.0 (1)	453.0 (1)	25	25	30.2	10	150.0 (1)	470.0	0.16	1.14	5.00	240	270	-
>>	D3	1.00	35	35	30.5	1.200	3.210	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	34.8	10	75.0 (1)	470.0	0.14	1.23	7.00	-	-	-
>>	D4	1.00	35	35	30.5	1.200	3.210	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	43.6	10	50.0 (1)	470.0	0.11	1.25	7.00	-	-	-
>>	B1	1.00	35	35	30.5	1.200	3.210	438.0 (1)	438.0 (1)	25	25	32.0	10	50.0 (1)	470.0	0.15	1.31	8.00	-	-	-
>>	B2	1.00	35	35	30.5	1.200	3.210	437.0 (1)	437.0 (1)	25	25	39.5	10	75.0 (1)	470.0	0.12	0.88	6.00	-	-	-
Takizawa et al (1976)	No.2	0.60	20	20	13.8	0.635	1.270	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	23.0	6	50.0 (1)	257.0	0.18	0.50	3.60	27.0	-	-
>>	No.3	0.60	20	20	13.8	0.635	1.270	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	23.0	6	50.0 (1)	257.0	0.18	0.66	3.30	27.0	-	-
>>	No.4	0.60	20	20	13.8	0.635	1.270	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	16.5	6	50.0 (1)	257.0	0.25	0.61	4.00	27.0	-	-
>>	No.5	0.60	20	20	13.8	0.635	1.270	402.0 (1)	402.0 (1)	13	13	16.5	6	50.0 (1)	257.0	0.25	0.67	3.00	27.0	-	-

- #: χωρίς ολίσθηση οπλισμών πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής.  
\*: χωρίς αστοχία δοκιμίου πριν το τέλος του πειράματος  
(1): όγκιμος χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).  
(2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας H κατά EC2 ή B κατά ENV 10080.  
(3): ψαθυρός χάλυβας, κατηγορίας N κατά EC2 ή A κατά ENV 10080.  
(4): Δίτητοι συνδετήρες.  
(5): Δίτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.

Πίνακας 7: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκιμίων και κύρια αποτελέσματα ανακυκλιζόμενων-διαξονικών πειραμάτων με συμμετρικό οπλισμό ( $\rho_1 = \rho_2$ ) και μεταβλητό αξονικό φορτίο.

Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	$f_{y1}$ (MPa)	$f_{y2}$ (MPa)	$\Phi_{L1}$ (mm)	$\Phi_{L2}$ (mm)	$f_c$ (MPa)	$\Phi_h$ (mm)	s (cm)	$f_{yw}$ (MPa)	v	$\theta_y$ (%)	$\theta_u$ (%)	$M_y$ (kNm)	$M_u$ (kNm)	$\Phi_u$ (1/m)
Bousias et al (1995)	S11	1.50	25	25	21.2	0.965	2.570	440.0 (1)	440.0 (1)	16	16	35.4	8	70.0 (1)	440.0	0/0.27	1.08	7.0	75	108	-
Li et al (1987)	B8-1	0.60	20	20	17.5	0.590	1.570	418.0 (1)	418.0 (1)	10	10	30.8	6	50.0 (1)	386.0	0/0.13	1.00	5.0	27	30	-
>>	B8-2	0.60	20	20	17.5	0.590	1.570	418.0 (1)	418.0 (1)	10	10	30.8	6	50.0 (1)	386.0	*0.06/0.19	0.70	4.0	33	39	-
>>	B40-1	0.60	20	20	17.5	0.590	1.570	418.0 (1)	418.0 (1)	10	10	30.8	6	50.0 (1)	386.0	0.19/0.45	0.57	2.0	45	54	-
>>	B40-2	0.60	20	20	17.5	0.590	1.570	418.0 (1)	418.0 (1)	10	10	30.8	6	50.0 (1)	386.0	0.13/0.52	-	-	-	-	-
Low et al (1980)	No.4	0.55	13	17	11/15	0.980	2.270	458.0 (1)	458.0 (1)	9.5/6.5/9.5/6.5	5/6.5	32.2	3	25.4 (1)	420.0	0/0.13	0.62	5.0	15	-	-
>>	No.5	0.55	13	17	11/15	0.980	2.270	458.0 (1)	458.0 (1)	9.5/6.5/9.5/6.5	5/6.5	32.2	3	25.4 (1)	420.0	0/0.13	0.79	5.0	-	-	-
Saatcioglu et al (1989)	U5	1.00	35	35	30.5	1.200	3.310	430.0 (1)	430.0 (1)	25	25	49.3	10	150.0 (1)	470.0	NA	1.11	6.0	152	250	-

#: Χωρίς ολίσθηση οπλισμών πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής.

\*: Χωρίς αστοχία δοκιμίου πριν το τέλος του πειράματος

(1): Ολικός χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).

(2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας H κατά EC2 ή B κατά ENV 10080.

(3): ψαθυρός χάλυβας, κατηγορίας N κατά EC2 ή A κατά ENV 10080.

(4): Δίτητοι συνδετήρες.

(5): Δίτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.

Πίνακας 8: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκιμών και κύρια αποτελέσματα μονοτονικών-μονοαξονικών πειραμάτων με λόγο διάτμησης μικρότερο του 2.

Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	$f_{y1}$ (MPa)	$f_{y2}$ (MPa)	$\Phi_{L1}$ (mm)	$\Phi_{L2}$ (mm)	$f_c$ (MPa)	$\Phi_h$ (mm)	s (cm)	$f_{yw}$ (MPa)	v	$\theta_y$ (%)	$\theta_u$ (%)	$M_y$ (kNm)	$M_u$ (kNm)	$\Phi_y$ (1/m)	$\Phi_u$ (1/m)
1	B.R.I. (1976, 1978)	0.50	25	25	21.0	0.342	0.342	405.0 (1)	405.0 (1)	10	10	20.6	6	6.3 (4)	446.0	0.25	0.70	2.00	52.7	52.7	-	-
2	>>	0.50	25	25	21.0	0.935	0.935	405.0 (1)	405.0 (1)	10	10	14.3	6	5.0 (4)	446.0	0.18	1.03	1.88	68.7	71.1	-	-
3	>>	0.50	25	25	21.0	0.935	0.935	387.0 (1)	387.0 (1)	16	16	20.6	6	3.7 (4)	446.0	0.13	1.10	5.00	60.0	61.3	-	-
4	Garska et al (1993)	0.50	30	30	27.0	0.754	0.754	566.0 (2)	566.0 (2)	12	12	39.4	6	6.0 (4)	566.0	-	0.93	11.40	83.0	83.0	0.014	0.250
5	>>	0.60	30	30	27.0	0.754	0.754	566.0 (2)	566.0 (2)	12	12	39.4	6	6.0 (4)	566.0	-	0.98	7.30	110.0	110.0	0.014	0.175
6	Maruyama et al (1984)	0.46	30.5	30.5	26.5	0.923	0.923	373.4 (1)	373.4 (1)	19	19	34.5	6	6.5 (4)	465.1	-	1.94	1.94	122.0	122.0	-	-
7	>>	0.46	30.5	30.5	26.5	0.923	0.923	373.4 (1)	373.4 (1)	19	19	30.3	6	6.5 (4)	465.1	-	1.89	1.89	116.0	116.0	-	-
8	Tegos (1984)	0.30	20	20	17.0	0.393	0.393	455.0 (1)	455.0 (1)	10	10	31.4	8	15.0 (4)	495.0	0.25	1.67	2.33	30.0	32.0	-	-
9	>>	0.30	20	20	17.0	0.774	0.774	485.0 (1)	485.0 (1)	14	14	37.8	8	7.5 (4)	495.0	0.36	2.10	2.50	47.5	48.5	-	-
10	>>	0.30	20	20	17.0	0.774	0.774	485.0 (1)	485.0 (1)	14	14	35.9	8	15.0 (4)	495.0	0.32	2.00	3.00	44.0	47.0	-	-
11	>>	0.30	20	20	17.0	1.571	1.571	475.0 (1)	475.0 (1)	20	20	37.0	8	7.5 (4)	495.0	0.32	2.83	3.67	46.5	48.5	-	-
12	>>	0.30	20	20	17.0	1.571	1.571	475.0 (1)	475.0 (1)	20	20	24.9	8	15.0 (4)	495.0	0.48	3.17	3.67	46.5	48.0	-	-
13	>>	0.30	20	20	17.0	0.393	0.393	455.0 (1)	455.0 (1)	10	10	34.2	8	7.5 (4)	495.0	0.29	2.40	2.83	38.1	38.7	-	-
14	Urnahara Jirsa (1984)	0.51	23	40.5	36.5	1.231	1.231	441.0 (1)	413.4 (1)	19	19	42.0	6	8.9 (4)	413.4	0.04	1.00	1.08	175.0	175.0	-	-
15	>>	0.46	30.5	30.5	26.5	0.923	0.923	365.2 (1)	365.2 (1)	19	19	30.0	6	6.4 (4)	468.5	-	1.69	1.69	122.0	122.0	-	-
16	Woodward Jirsa (1984)	0.46	30.5	30.5	26.5	0.923	0.923	373.4 (1)	373.4 (1)	19	19	36.2	6	6.5 (4)	465.1	0.19	1.17	3.50	138.0	138.0	-	-
17	>>	0.46	30.5	30.5	26.5	0.923	0.923	373.4 (1)	373.4 (1)	19	19	41.0	6	6.5 (4)	465.1	-	1.39	4.20	112.0	112.0	-	-

#: χωρίς ολίσθηση οπλισμών πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής.

\*: χωρίς στοιχεία δοκιμίου πριν το τέλος του πειράματος

(1): όγκιμος χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).

(2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας H κατά EC2 ή B κατά ENV 10080.

(3): ψαθυρός χάλυβας, κατηγορίας N κατά EC2 ή A κατά ENV 10080.

(4): Δίτητοι συνδετήρες.

(5): Δίτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.



Πίνακας 9: Γεωμετρικά και μηχανικά στοιχεία δοκίμων και κύρια αποτελέσματα ανακυκλιζομένων-μονοαξονικών πειραμάτων με λόγο διάτμησης μικρότερο του 2.

	Reference	Test	L (m)	b (cm)	h (cm)	d (cm)	$\rho_1$ (%)	$\rho_2$ (%)	fy1 (MPa)	fy2 (MPa)	$\Phi L1$ (mm)	$\Phi L2$ (mm)	fc (MPa)	$\Phi h$ (mm)	s (cm)	fyw (MPa)	v	$\theta_y$ (%)	$\theta_u$ (%)	My (kNm)	Mu (kNm)	$\Phi_y$ (1/m)	$\Phi_u$ (1/m)
1	Beng et al (1970)	unit-19	0.60	40	37	36.4	1.799	1.799	436.0 (1)	436.0 (1)	16	16	34.4	6	80.0 (4)	326.0	0.10	0.95	4.41	350.4	141.3	-	-
2	>>	unit-20	0.70	40	37	36.4	1.932	1.932	482.0 (1)	482.0 (1)	16	16	36.7	6	80.0 (4)	326.0	0.18	1.52	2.31	451.9	152.9	-	-
3	>>	unit-6	0.60	40	37	36.4	2.350	2.350	436.0 (1)	436.0 (1)	16	16	30.1	6	60.0 (4)	328.0	-	1.37	2.72	352.4	271.4	-	-
4	B.R.I. (1976, 1978)	CAAA2	0.38	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	13	50.0 (4)	350.0	0.11	0.80	2.51	90.0	-	-	-
5	>>	CAAB1	0.38	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	13	75.0 (4)	350.0	0.11	0.80	2.51	89.5	-	-	-
6	>>	CAAB2	0.38	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	27.0	13	75.0 (4)	350.0	0.11	0.73	2.51	84.5	-	-	-
7	>>	LM1-1B	0.25	25	25	21.5	0.340	0.340	376.0 (1)	376.0 (1)	10	10	16.3	9	33.3 (4)	350.9	0.32	0.67	2.29	62.3	-	-	-
8	>>	LM1-2A	0.50	25	25	21.5	0.340	0.340	376.0 (1)	376.0 (1)	10	10	16.3	9	71.5 (4)	350.9	0.32	0.36	0.86	50.0	-	-	-
9	>>	LM1-2B	0.50	25	25	21.5	0.340	0.340	376.0 (1)	376.0 (1)	10	10	16.3	6	62.5 (4)	354.0	0.32	0.38	1.44	58.8	-	-	-
10	>>	LM1-3A	0.25	25	25	21.5	0.340	0.340	376.0 (1)	376.0 (1)	10	10	16.3	9	55.5 (4)	350.9	0.16	0.55	2.13	53.3	-	-	-
11	>>	LM1-3B	0.25	25	25	21.5	0.340	0.340	376.0 (1)	376.0 (1)	10	10	16.3	6	50.0 (4)	351.0	0.16	0.64	1.60	48.4	-	-	-
12	>>	LM1-5A	0.25	25	25	21.5	0.610	0.610	387.0 (1)	387.0 (1)	13	13	16.3	13	45.5 (4)	318.0	0.16	0.51	2.40	63.0	-	-	-
13	>>	LM1-5B	0.25	25	25	21.5	0.610	0.610	387.0 (1)	387.0 (1)	13	13	16.3	9	45.5 (4)	350.9	0.16	0.53	1.33	61.5	-	-	-
14	>>	LM1-6A	0.50	25	25	21.5	0.610	0.610	387.0 (1)	387.0 (1)	13	13	16.3	6	43.5 (4)	351.0	0.16	0.75	1.92	60.0	-	-	-
15	>>	LM1-6B	0.50	25	25	21.5	0.610	0.610	387.0 (1)	387.0 (1)	13	13	16.3	4	37.0 (4)	350.0	0.16	0.70	1.32	61.9	-	-	-
16	>>	LM1-7A	0.50	25	25	21.5	0.950	0.950	371.0 (1)	371.0 (1)	16	16	16.3	13	43.5 (4)	318.0	0.32	0.82	3.20	84.4	-	-	-
17	>>	LM1-7B	0.50	25	25	21.5	0.950	0.950	371.0 (1)	371.0 (1)	16	16	16.3	9	41.7 (4)	350.9	0.32	0.76	2.27	85.0	-	-	-
18	>>	LM1-8A	0.50	25	25	21.5	0.950	0.950	371.0 (1)	371.0 (1)	16	16	16.3	9	40.0 (4)	350.9	0.16	0.60	2.24	70.6	-	-	-
19	>>	LM1-8B	0.50	25	25	21.5	0.950	0.950	371.0 (1)	371.0 (1)	16	16	16.3	6	37.0 (4)	351.0	0.16	0.64	1.28	70.6	-	-	-
20	>>	S2BAB1	0.38	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	24.0	6	250.0 (4)	377.0	0.13	0.47	2.80	45.0	-	-	-
21	>>	S2BAB2	0.38	25	25	21.5	0.410	0.410	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	24.0	6	250.0 (4)	377.0	0.13	0.60	2.40	32.5	-	-	-
22	>>	SAAA1	0.38	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	24.0	13	50.0 (4)	350.0	0.13	0.73	2.51	80.5	-	-	-
23	>>	SAAA2	0.38	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	24.0	13	50.0 (4)	350.0	0.13	0.80	2.51	84.0	-	-	-
24	>>	SAAB1	0.38	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	24.0	13	75.0 (4)	350.0	0.13	0.80	2.51	81.5	-	-	-
25	>>	SAAB2	0.38	25	25	21.5	1.240	1.240	401.0 (1)	401.0 (1)	22	22	24.0	13	75.0 (4)	350.0	0.13	0.80	2.00	79.0	-	-	-

Πίνακας 9 (συνεχίζεται)

26	>>	SDBAA2	0.38	25	21.5	0.460	0.460	407.0 (1)	407.0 (1)	10	10	27.0	6	50.0 (4)	377.0	0.11	0.48	2.40	60.5	-	-	-
27	>>	SE-2A	1.00	50	43.0	0.340	0.340	360.7 (1)	360.7 (1)	19	19	26.5	19	133.0 (4)	293.3	0.20	0.43	2.59	457.9	-	-	-
28	>>	SE-2B	1.00	50	43.0	0.340	0.340	360.7 (1)	360.7 (1)	19	19	26.5	13	125.0 (4)	305.2	0.20	0.40	2.09	459.0	-	-	-
29	>>	SE-3A	0.50	50	43.0	0.340	0.340	360.7 (1)	360.7 (1)	19	19	26.5	19	111.0 (4)	293.3	0.10	0.51	2.03	354.4	-	-	-
30	>>	SE-3B	0.50	50	43.0	0.340	0.340	360.7 (1)	360.7 (1)	19	19	26.5	13	111.0 (4)	305.2	0.10	0.52	1.56	364.4	-	-	-
31	>>	SE-4B	1.00	50	43.0	0.340	0.340	360.7 (1)	360.7 (1)	19	19	26.5	9	250.0 (4)	347.3	0.10	0.42	1.25	283.5	-	-	-
32	>>	SE-5B	0.50	50	43.0	0.610	0.610	363.2 (1)	363.2 (1)	25	25	26.5	19	83.0 (4)	293.3	0.10	0.51	1.62	435.0	-	-	-
33	>>	SE-6A	1.00	50	43.0	0.610	0.610	363.2 (1)	363.2 (1)	25	25	26.5	13	87.0 (4)	305.2	0.10	0.76	2.25	374.6	-	-	-
34	>>	SE-6A1	1.00	50	43.0	0.610	0.610	363.2 (1)	363.2 (1)	25	25	26.5	13	105.0 (4)	305.2	0.10	0.76	2.28	402.8	-	-	-
35	>>	SE-6A2	1.00	50	43.0	0.610	0.610	363.2 (1)	363.2 (1)	25	25	26.5	13	125.0 (4)	305.2	0.10	0.76	2.30	394.9	-	-	-
36	>>	SE-6B	1.00	50	43.0	0.610	0.610	363.2 (1)	363.2 (1)	25	25	26.5	9	95.0 (4)	347.3	0.10	0.71	2.14	400.5	-	-	-
37	>>	SE-7B	1.00	50	43.0	0.950	0.950	358.5 (1)	358.5 (1)	32	32	26.5	19	80.0 (4)	293.3	0.20	0.78	2.36	663.8	-	-	-
38	>>	SE-8A	1.00	50	43.0	0.950	0.950	358.5 (1)	358.5 (1)	32	32	26.5	19	77.0 (4)	293.3	0.10	0.61	1.85	598.5	-	-	-
39	>>	SE-8B	1.00	50	43.0	0.950	0.950	358.5 (1)	358.5 (1)	32	32	26.5	13	71.0 (4)	305.2	0.20	0.66	1.31	610.9	-	-	-
40	>>	SPBAA1	0.38	25	21.5	0.460	0.460	407.0 (1)	407.0 (1)	10	10	27.0	9	50.0 (4)	362.0	0.11	0.48	2.40	55.0	-	-	-
41	>>	SPBAA2	0.38	25	21.5	0.460	0.460	407.0 (1)	407.0 (1)	10	10	27.0	9	50.0 (4)	362.0	0.11	0.48	2.40	53.5	-	-	-
42	>>	AF2-1	0.50	25	21.5	0.340	0.340	445.8 (1)	445.8 (1)	10	10	24.1	6	30.0 (4)	380.4	0.32	0.88	2.58	75.3	-	-	-
43	>>	AF2-2	0.50	25	21.5	0.340	0.340	445.8 (1)	445.8 (1)	10	10	24.1	6	30.0 (4)	380.4	0.44	0.51	0.91	81.3	-	-	-
44	>>	AF2-3	0.50	25	21.5	0.340	0.340	445.8 (1)	445.8 (1)	10	10	24.1	6	30.0 (4)	380.4	0.58	0.32	0.64	71.6	-	-	-
45	>>	AF2-4	0.50	25	21.5	0.610	0.610	441.1 (1)	441.1 (1)	13	13	24.1	9	30.0 (4)	334.7	0.44	0.71	2.14	94.7	-	-	-
46	>>	AF2-5	0.50	25	21.5	0.610	0.610	441.4 (1)	441.4 (1)	13	13	24.1	6	30.0 (4)	380.4	0.44	0.71	1.43	95.3	-	-	-
47	>>	AF2-6	0.50	25	21.5	0.610	0.610	441.4 (1)	441.4 (1)	13	13	24.1	9	30.0 (4)	334.7	0.58	0.50	1.00	93.4	-	-	-
48	>>	AF2-7	0.50	25	21.5	0.610	0.610	441.4 (1)	441.4 (1)	13	13	24.1	6	30.0 (4)	380.4	0.58	0.53	0.49	96.9	-	-	-
49	>>	AF210A	0.25	25	21.5	0.610	0.610	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	19.0	4	47.0 (4)	400.0	-	0.88	2.64	45.2	-	-	-
50	>>	AF22CD	0.50	25	21.5	0.610	0.610	378.0 (1)	378.0 (1)	13	13	19.0	9	81.0 (4)	334.8	0.33	0.80	3.60	68.1	-	-	-
51	>>	AF310A	0.25	25	21.5	0.960	0.960	360.0 (1)	360.0 (1)	16	16	19.0	9	50.0 (4)	334.8	-	0.78	3.12	59.4	-	-	-
52	>>	AF310B	0.25	25	21.5	0.960	0.960	360.0 (1)	360.0 (1)	16	16	19.0	6	44.0 (4)	367.6	-	1.50	3.00	62.6	-	-	-
53	>>	AF31TA	0.25	25	21.5	0.960	0.960	360.0 (1)	360.0 (1)	16	16	19.0	4	48.0 (4)	400.0	-0.10	1.16	3.48	47.8	-	-	-
54	>>	AF32CA	0.50	25	21.5	0.960	0.960	360.0 (1)	360.0 (1)	16	16	19.0	13	65.0 (4)	315.3	0.33	1.18	3.54	80.3	-	-	-

Πίνακας 9 (συνεχίζεται)

55	>>	AF32CB	0.50	25	25	21.5	0.960	0.960	360.0 (1)	360.0 (1)	16	16	19.0	9	62.0 (4)	334.8	0.33	1.08	3.24	77.5	-	-
56	>>	AF32OA	0.50	25	25	21.5	0.960	0.960	360.0 (1)	360.0 (1)	16	16	19.0	6	49.0 (4)	367.6	-	0.99	2.97	54.4	-	-
57	>>	AF41OB	0.25	25	25	21.5	1.380	1.380	354.3 (1)	354.3 (1)	19	19	19.0	13	50.0 (4)	315.3	-	1.62	3.24	83.3	-	-
58	>>	AF41TA	0.25	25	25	21.5	1.380	1.380	354.3 (1)	354.3 (1)	19	19	19.0	9	64.0 (4)	334.8	-0.10	0.78	2.34	54.2	-	-
59	>>	AF41TB	0.25	25	25	21.5	1.380	1.380	354.3 (1)	354.3 (1)	19	19	19.0	6	55.0 (4)	367.6	-0.10	1.04	2.08	54.2	-	-
60	>>	AF42CB	0.50	25	25	21.5	1.380	1.380	354.3 (1)	354.3 (1)	19	19	19.0	13	44.0 (4)	315.3	0.33	1.30	5.20	95.0	-	-
61	>>	AF42OA	0.50	25	25	21.5	1.380	1.380	354.3 (1)	354.3 (1)	19	19	19.0	9	53.0 (4)	334.8	-	0.84	3.36	65.0	-	-
62	>>	AF42OB	0.50	25	25	21.5	1.380	1.380	354.3 (1)	354.3 (1)	19	19	19.0	6	46.0 (4)	367.6	-	1.08	2.16	70.6	-	-
63	>>	AF42TA	0.25	25	25	21.5	1.380	1.380	354.3 (1)	354.3 (1)	19	19	19.0	4	63.0 (4)	400.0	-0.10	2.20	4.40	30.4	-	-
64	>>	AR15A2T	0.38	25	25	21.5	0.635	0.635	356.3 (1)	356.3 (1)	16	16	12.4	14	75.0 (4)	353.9	0.21	0.67	2.88	41.0	-	-
65	>>	AR15A5H	0.38	25	25	21.5	0.570	0.570	396.7 (1)	396.7 (1)	10	10	12.4	9	62.5 (4)	349.3	0.21	1.07	3.09	41.5	-	-
66	>>	AR15A5T	0.38	25	25	21.5	0.570	0.570	396.7 (1)	396.7 (1)	10	10	15.3	14	75.0 (4)	353.9	0.17	1.00	3.15	51.0	-	-
67	>>	AR15B2T	0.38	25	25	21.5	0.920	0.920	364.5 (1)	364.5 (1)	19	19	15.3	14	34.1 (4)	353.9	0.17	1.60	5.60	59.0	-	-
68	>>	AR15B5H	0.38	25	25	21.5	1.016	1.016	389.8 (1)	389.8 (1)	13	13	15.3	9	28.9 (4)	349.3	0.17	1.44	6.08	65.0	-	-
69	>>	AR15B5T	0.38	25	25	21.5	1.016	1.016	389.8 (1)	389.8 (1)	13	13	12.4	14	34.1 (4)	353.9	0.21	1.44	5.87	65.0	-	-
70	>>	AR2-2AH(1/4)	0.50	25	25	21.5	0.637	0.637	388.4 (1)	388.4 (1)	16	16	26.1	6	32.3 (4)	371.6	0.20	0.76	4.26	79.4	-	-
71	>>	AR2-2AH(1/8)	0.50	25	25	21.5	0.637	0.637	388.4 (1)	388.4 (1)	16	16	26.1	6	32.3 (4)	371.6	0.10	0.66	9.50	65.6	-	-
72	>>	AR2-2AT(1/4)	0.50	25	25	21.5	0.637	0.637	388.4 (1)	388.4 (1)	16	16	26.1	10	45.5 (4)	344.3	0.20	0.71	4.26	81.3	-	-
73	>>	AR2-2AT(1/8)	0.50	25	25	21.5	0.637	0.637	388.4 (1)	388.4 (1)	16	16	26.1	10	45.5 (4)	344.3	0.10	0.63	11.80	61.9	-	-
74	>>	AR2-2BH(1/4)	0.50	25	25	21.5	0.918	0.918	375.9 (1)	375.9 (1)	19	19	26.1	9	50.0 (4)	314.0	0.20	0.96	3.76	92.5	-	-
75	>>	AR2-2BH(1/8)	0.50	25	25	21.5	0.918	0.918	375.9 (1)	375.9 (1)	19	19	26.1	9	50.0 (4)	314.0	0.10	0.70	5.84	72.5	-	-
76	>>	AR2-2BT(1/4)	0.50	25	25	21.5	0.918	0.918	375.9 (1)	375.9 (1)	19	19	26.1	14	58.8 (4)	314.0	0.20	0.84	3.76	90.6	-	-
77	>>	AR2-2BT(1/8)	0.50	25	25	21.5	0.918	0.918	375.9 (1)	375.9 (1)	19	19	26.1	14	58.8 (4)	314.0	0.10	0.74	7.80	74.4	-	-
78	>>	AR2-5AH(1/4)	0.50	25	25	21.5	0.571	0.571	383.4 (1)	383.4 (1)	10	10	26.1	6	32.3 (4)	371.6	0.20	0.78	3.12	80.6	-	-
79	>>	AR2-5AH(1/8)	0.50	25	25	21.5	0.571	0.571	383.4 (1)	383.4 (1)	10	10	26.1	6	32.3 (4)	371.6	0.10	0.57	9.00	63.8	-	-
80	>>	AR2-5AT(1/4)	0.50	25	25	21.5	0.571	0.571	383.4 (1)	383.4 (1)	10	10	26.1	10	45.5 (4)	344.3	0.20	0.73	5.68	80.6	-	-
81	>>	AR2-5AT(1/8)	0.50	25	25	21.5	0.571	0.571	383.4 (1)	383.4 (1)	10	10	26.1	10	45.5 (4)	344.3	0.10	0.63	10.75	65.0	-	-
82	>>	AR2-5BH(1/4)	0.50	25	25	21.5	1.020	1.020	402.6 (1)	402.6 (1)	13	13	26.1	9	50.0 (4)	314.0	0.20	0.99	3.00	96.9	-	-
83	>>	AR2-5BH(1/8)	0.50	25	25	21.5	1.020	1.020	402.6 (1)	402.6 (1)	13	13	26.1	9	50.0 (4)	314.0	0.10	0.88	3.48	98.1	-	-

Πίνακας 9 (συνεχίζεται)

84	>>	AR2-5BT(1/4)	0.50	25	21.5	1.020	1.020	402.6 (1)	402.6 (1)	13	13	26.1	14	58.8 (4)	314.0	0.20	0.95	4.00	106.3	-	-	-
85	>>	AR2-5BT(1/8)	0.50	25	21.5	1.020	1.020	402.6 (1)	402.6 (1)	13	13	26.1	14	58.8 (4)	314.0	0.10	0.84	7.70	88.8	-	-	-
86	>>	AR20A2H	0.50	25	21.5	0.635	0.635	356.3 (1)	356.3 (1)	16	16	12.4	6	50.0 (4)	369.6	0.21	0.93	3.30	42.5	-	-	-
87	>>	AR20A2T	0.50	25	21.5	0.635	0.635	356.3 (1)	356.3 (1)	16	16	15.3	10	71.5 (4)	370.6	0.17	1.10	3.92	42.5	-	-	-
88	>>	AR20A5H	0.50	25	21.5	0.570	0.570	396.7 (1)	396.7 (1)	10	10	15.3	6	50.0 (4)	369.6	0.17	1.00	2.55	50.0	-	-	-
89	>>	AR20B2H	0.50	25	21.5	0.920	0.920	364.5 (1)	364.5 (1)	19	19	15.3	9	47.6 (4)	349.3	0.17	1.40	5.80	56.3	-	-	-
90	>>	AR20B2T	0.50	25	21.5	0.920	0.920	364.5 (1)	364.5 (1)	19	19	12.4	14	55.5 (4)	353.9	0.21	1.19	3.80	53.8	-	-	-
91	>>	AR20B5H	0.50	25	21.5	1.016	1.016	389.8 (1)	389.8 (1)	13	13	12.4	14	47.6 (4)	349.3	0.21	1.43	3.15	50.0	-	-	-
92	>>	AR20B5T	0.50	25	21.5	1.016	1.016	389.8 (1)	389.8 (1)	13	13	15.3	14	55.5 (4)	353.9	0.17	1.00	4.16	65.0	-	-	-
93	>>	CHT1	0.60	40	34.7	0.610	0.610	365.1 (1)	365.1 (1)	19	19	27.7	13	75.0 (6)	334.7	0.22	0.64	9.09	311.8	-	-	-
94	>>	CHT2	0.80	40	34.7	0.610	0.610	365.1 (1)	365.1 (1)	19	19	27.7	9	67.0 (6)	306.0	0.29	0.81	4.86	350.1	-	-	-
95	>>	CHT3	0.80	40	34.7	0.990	0.990	357.6 (1)	357.6 (1)	25	25	27.7	9	57.0 (6)	306.0	0.22	0.89	7.09	370.0	-	-	-
96	>>	CHT4	0.80	40	34.7	0.990	0.990	357.6 (1)	357.6 (1)	25	25	24.0	13	52.0 (6)	334.7	0.33	0.90	3.61	402.4	-	-	-
97	>>	CHT5	0.80	40	34.7	0.990	0.990	357.6 (1)	357.6 (1)	25	25	24.0	13	64.0 (6)	334.7	0.33	0.86	5.15	407.5	-	-	-
98	>>	DWC1	0.50	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	21.9	6	31.1 (4)	289.0	0.12	0.54	3.01	57.4	-	-	-
99	>>	DWC2	0.50	25	21.5	0.610	0.610	423.0 (1)	423.0 (1)	13	13	22.3	6	31.1 (4)	289.0	0.12	0.59	3.53	56.8	-	-	-
100	>>	LE2-1(3A-CL)	0.25	25	21.5	0.340	0.340	387.3 (1)	387.3 (1)	10	10	14.6	9	55.5 (4)	341.7	0.18	0.86	2.72	47.6	-	-	-
101	>>	LE2-2(3A-CL10)	0.25	25	21.5	0.340	0.340	387.3 (1)	387.3 (1)	10	10	14.6	9	55.5 (4)	341.7	0.18	0.88	2.82	48.0	-	-	-
102	>>	LE2-4(3B-AL)	0.25	25	21.5	0.340	0.340	387.3 (1)	387.3 (1)	10	10	14.6	6	50.0 (4)	398.8	0.18	0.74	2.24	46.5	-	-	-
103	>>	LE2-5(3B-CL)	0.25	25	21.5	0.340	0.340	387.3 (1)	387.3 (1)	10	10	14.6	6	50.0 (4)	398.8	0.18	0.74	1.52	46.9	-	-	-
104	>>	LE2-6(3B-CL10)	0.25	25	21.5	0.340	0.340	387.3 (1)	387.3 (1)	10	10	14.6	6	50.0 (4)	398.8	0.18	0.74	1.88	46.9	-	-	-
105	>>	LE2BAL	0.50	25	21.5	0.340	0.340	413.1 (1)	413.1 (1)	10	10	21.0	6	62.5 (4)	454.6	0.25	0.68	5.44	64.1	-	-	-
106	>>	LE2BCL	0.50	25	21.5	0.340	0.340	413.1 (1)	413.1 (1)	10	10	21.0	6	62.5 (4)	454.6	0.25	0.74	4.45	64.7	-	-	-
107	>>	LE6ACL	0.50	25	21.5	0.610	0.610	422.6 (1)	422.6 (1)	13	13	21.0	6	43.5 (4)	454.6	0.12	0.90	5.42	59.7	-	-	-
108	>>	LE6BCL	0.50	25	21.5	0.610	0.610	422.6 (1)	422.6 (1)	13	13	21.0	4	37.0 (4)	378.9	0.12	0.85	3.42	60.6	-	-	-
109	>>	LE7BCL	0.50	25	21.5	0.910	0.910	395.0 (1)	395.0 (1)	16	16	21.0	9	41.7 (4)	343.1	0.25	1.07	4.30	88.1	-	-	-
110	>>	LE8ACL	0.50	25	21.5	0.910	0.910	395.0 (1)	395.0 (1)	16	16	21.0	9	40.0 (4)	343.1	0.12	1.00	8.00	75.3	-	-	-
111	>>	LE8BAL	0.50	25	21.5	0.910	0.910	395.0 (1)	395.0 (1)	16	16	21.0	6	37.0 (4)	454.6	0.12	1.00	4.00	76.6	-	-	-
112	>>	LE8BCL	0.50	25	21.5	0.910	0.910	395.0 (1)	395.0 (1)	16	16	21.0	6	37.0 (4)	454.6	0.12	1.00	3.00	76.6	-	-	-

Πίνακας 9 (συνεχίζεται)

113	>>	LS0BB	0.38	25	25	21.5	0.960	0.960	356.3 (1)	356.3 (1)	16	16	19.3	9	46.9 (4)	358.9	0.14	1.13	3.40	70.6	-	-
114	>>	LS1AB	0.38	25	25	21.5	0.610	0.610	363.5 (1)	363.5 (1)	13	13	19.3	9	46.9 (4)	358.9	0.27	0.80	4.80	61.8	-	-
115	>>	LS1BB	0.38	25	25	21.5	0.610	0.610	363.5 (1)	363.5 (1)	13	13	19.3	6	50.0 (4)	384.7	0.14	0.67	2.67	52.0	-	-
116	>>	LS2AB	0.38	25	25	21.5	0.340	0.340	381.7 (1)	381.7 (1)	10	10	19.3	6	37.5 (4)	384.7	0.27	1.00	6.00	52.2	-	-
117	>>	LS2BA	0.38	25	25	21.5	0.340	0.340	381.7 (1)	381.7 (1)	10	10	19.3	4	34.1 (4)	388.7	0.14	0.67	4.00	38.8	-	-
118	>>	LS2BB	0.38	25	25	21.5	0.340	0.340	381.7 (1)	381.7 (1)	10	10	19.3	4	68.2 (4)	388.7	0.14	0.67	2.00	39.4	-	-
119	>>	NS1-3AP	0.25	25	25	21.5	0.310	0.310	400.0 (1)	400.0 (1)	9	9	18.0	4	50.0 (4)	400.0	0.15	0.74	5.90	36.6	-	-
120	>>	NS1-4AP	0.50	25	25	21.5	0.310	0.310	400.0 (1)	400.0 (1)	9	9	13.7	4	50.0 (4)	400.0	0.19	0.55	3.30	34.4	-	-
121	>>	NS1-5BP	0.25	25	25	21.5	0.640	0.640	360.0 (1)	360.0 (1)	13	13	13.7	4	48.0 (4)	360.0	0.19	1.02	4.00	43.5	-	-
122	>>	NS1-6BP	0.50	25	25	21.5	0.640	0.640	360.0 (1)	360.0 (1)	13	13	13.7	9	54.0 (4)	400.0	0.19	0.70	2.80	42.2	-	-
123	>>	NS1-7BP	0.50	25	25	21.5	0.960	0.960	340.0 (1)	340.0 (1)	16	16	18.0	6	37.0 (4)	520.0	0.29	0.85	3.50	68.8	-	-
124	>>	NS1-8BP	0.50	25	25	21.5	0.960	0.960	340.0 (1)	340.0 (1)	16	16	18.0	6	47.0 (4)	520.0	0.15	0.77	2.30	52.5	-	-
125	>>	NS2-1509	0.25	25	25	21.5	0.310	0.310	333.2 (1)	333.2 (1)	9	9	26.2	6	51.0 (4)	240.0	0.10	0.61	9.95	32.8	-	-
126	>>	NS2-1513	0.50	25	25	21.5	0.640	0.640	336.0 (1)	336.0 (1)	13	13	26.2	9	54.0 (4)	333.2	0.10	0.66	2.66	78.8	-	-
127	>>	NS2-1516	0.50	25	25	21.5	0.960	0.960	406.2 (1)	406.2 (1)	16	16	26.2	9	52.0 (4)	333.2	0.10	0.76	2.28	100.0	-	-
128	>>	NS2-2009	0.50	25	25	21.5	0.310	0.310	333.2 (1)	333.2 (1)	9	9	26.2	4	50.0 (4)	442.0	0.10	0.34	6.71	37.5	-	-
129	>>	NS2-2013	0.50	25	25	21.5	0.640	0.640	336.0 (1)	336.0 (1)	13	13	26.2	6	41.0 (4)	240.0	0.10	0.76	8.01	60.0	-	-
130	>>	NS2-2016	0.50	25	25	21.5	0.960	0.960	406.2 (1)	406.2 (1)	16	16	26.2	9	57.0 (4)	333.2	0.10	1.12	3.20	78.8	-	-
131	>>	WS21BH	0.25	25	25	21.5	0.340	0.340	382.0 (1)	382.0 (1)	10	10	27.0	9	33.3 (4)	341.0	0.19	0.92	2.74	63.6	-	-
132	>>	WS21BS	0.25	25	25	21.5	0.450	0.450	382.0 (1)	382.0 (1)	10	10	27.0	9	33.3 (4)	341.0	0.19	1.04	4.16	65.8	-	-
133	>>	WS21BT	0.25	25	25	21.5	0.340	0.340	382.0 (1)	382.0 (1)	10	10	27.0	14	41.7 (4)	346.0	0.19	0.74	4.44	65.8	-	-
134	>>	WS25BH	0.25	25	25	21.5	0.610	0.610	389.0 (1)	389.0 (1)	13	13	27.0	9	45.5 (4)	341.0	0.10	1.06	2.12	63.0	-	-
135	>>	WS25BS	0.25	25	25	21.5	0.810	0.810	389.0 (1)	389.0 (1)	13	13	27.0	9	45.5 (4)	341.0	0.10	0.92	3.66	60.4	-	-
136	>>	WS25BT	0.25	25	25	21.5	0.610	0.610	389.0 (1)	389.0 (1)	13	13	27.0	9	55.6 (4)	346.8	0.10	1.06	2.12	63.9	-	-
137	>>	WS26BH	0.50	25	25	21.5	0.610	0.610	389.0 (1)	389.0 (1)	13	13	32.2	4	37.0 (4)	394.0	0.08	0.67	2.66	57.2	-	-
138	>>	WS26BT	0.50	25	25	21.5	0.610	0.610	389.0 (1)	389.0 (1)	13	13	32.2	4	55.6 (6)	394.0	0.08	0.61	2.45	56.6	-	-
139	>>	WS27BH	0.50	25	25	21.5	0.960	0.960	352.0 (1)	352.0 (1)	16	16	32.2	9	41.7 (4)	341.0	0.16	0.99	3.96	90.6	-	-
140	>>	WS27BT	0.50	25	25	21.5	0.960	0.960	322.0 (1)	322.0 (1)	16	16	34.7	14	50.0 (4)	352.0	0.15	1.03	6.18	96.3	-	-
141	Moretti (1997)	No 0	* 0.25	25	25	21.0	2.000	2.000	650.0 (1)	650.0 (1)	14	14	21.3	8	50.0 (4)	430.0	0.30	0.80	1.20	70.0	-	-

Πίνακας 9 (συνεχίζεται)

142	>>	No 1	#	0.25	25	25	21.0	2.000	2.000	480.0 (1)	480.0 (1)	480.0 (1)	14	14	36.0	8	50.0 (4)	300.0	0.30	1.00	1.50	82.5	-	-	-
143	>>	No 3	#	0.25	25	25	21.0	4.000	4.000	415.0 (1)	415.0 (1)	415.0 (1)	20	20	39.0	8	50.0 (4)	300.0	0.30	0.80	1.20	90.0	-	-	-
144	>>	No 4	#	0.25	25	25	21.0	4.000	4.000	415.0 (1)	415.0 (1)	415.0 (1)	20	20	35.0	10	50.0 (4)	305.0	0.30	1.00	1.00	90.0	-	-	-
145	>>	No 7	#	0.50	25	25	21.0	2.000	2.000	480.0 (1)	480.0 (1)	480.0 (1)	14	14	38.0	8	50.0 (4)	300.0	0.30	1.00	3.00	100.0	-	-	-
146	Papanikolaou (1991)	P1		0.45	20	30	28.5	0.670	0.670	482.0 (1)	482.0 (1)	482.0 (1)	16	16	14.8	8	100.0 (4)	502.0	-	1.00	3.33	70.0	78.0	-	-
147	>>	P3		0.45	20	30	28.5	0.670	0.670	482.0 (1)	482.0 (1)	482.0 (1)	16	16	12.7	8	100.0 (4)	502.0	0.26	0.89	3.89	95.0	99.0	-	-
148	>>	P4		0.45	20	30	28.5	0.670	0.670	482.0 (1)	482.0 (1)	482.0 (1)	16	16	16.0	8	50.0 (4)	502.0	-	1.11	4.44	90.0	95.0	-	-
149	>>	P6		0.45	20	30	28.5	0.670	0.670	482.0 (1)	482.0 (1)	482.0 (1)	16	16	12.7	8	50.0 (4)	502.0	0.26	1.06	4.44	100.0	110.0	-	-
150	Tegos (1984)	ss1		0.20	20	20	17.5	0.770	0.770	325.0 (1)	325.0 (1)	325.0 (1)	14	14	21.0	8	50.0 (4)	315.0	0.29	0.60	4.09	28.0	29.0	-	-
151	>>	ss2		0.20	20	20	17.5	0.770	0.770	325.0 (1)	325.0 (1)	325.0 (1)	14	14	22.5	8	50.0 (4)	315.0	0.27	0.74	4.15	30.0	32.0	-	-
152	>>	ss3		0.30	20	20	17.5	0.770	0.770	325.0 (1)	325.0 (1)	325.0 (1)	14	14	27.5	8	50.0 (4)	315.0	0.22	0.64	3.91	31.5	33.0	-	-
153	>>	ss4		0.40	20	20	17.5	0.770	0.770	325.0 (1)	325.0 (1)	325.0 (1)	14	14	21.0	8	50.0 (4)	315.0	0.29	0.55	4.01	30.0	32.0	-	-
154	>>	ss6		0.20	20	20	17.5	0.393	0.393	455.0 (1)	455.0 (1)	455.0 (1)	10	10	14.0	8	100.0 (4)	315.0	0.27	0.74	4.16	18.0	20.0	-	-
155	>>	ss7		0.20	20	20	17.5	0.393	0.393	370.0 (1)	370.0 (1)	370.0 (1)	10	10	19.0	8	50.0 (4)	315.0	0.20	0.73	4.10	20.0	20.0	-	-
156	>>	ss8		0.30	20	20	17.5	0.393	0.393	370.0 (1)	370.0 (1)	370.0 (1)	10	10	19.1	8	50.0 (4)	315.0	0.20	0.79	4.04	21.0	21.0	-	-

#: χωρίς ολίσθηση οπλισμών πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής.

\*: χωρίς στοχία δοκιμίου πριν το τέλος του πειράματος

(1): όλκιμος χάλυβας παλαιού τύπου (όπως ο S400).

(2): χάλυβας τύπου Tempcore, κατηγορίας Η κατά EC2 ή Β κατά ENV 10080.

(3): ψαθυρός χάλυβας, κατηγορίας Ν κατά EC2 ή Α κατά ENV 10080.

(4): Δίτητοι συνδετήρες.

(5): Δίτητοι περιμετρικοί συνδετήρες και ενδιάμεσος ρομβοειδής.