

ΟΑΣΠ

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ**

Α ΦΑΣΗ

Αθήνα Ιούνιος 2004

Θεωρητική και Πειραματική Διερεύνηση της Κατακόρυφης Συνιστώσας του Σεισμού.

Α ΦΑΣΗ

1.	Εξέταση (ανάλυση, σχολιασμός και συσχέτιση) της υπάρχουσας βιβλιογραφίας	3
1.1	Γενική θεωρητική και ερευνητική προσέγγιση και διερεύνηση της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού	4
1.2	Η επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού στις γέφυρες	15
1.3	Κανονιστικές διατάξεις	21
2.	Τεκμηρίωση της δράσης της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού	23
2.1	Γενικά	23
2.2	Χαρακτηριστικές περιπτώσεις	24
3.	Περιγραφή και χαρακτηριστικά της κατακόρυφης σεισμικής κίνησης	29
3.1	Γενικά	29
3.2	Η σεισμική καταπόνηση των κατασκευών	30
3.3	Η σεισμική διέγερση στην επικεντρική περιοχή	31
4.	Συμπεράσματα και προτάσεις	33

Παράρτημα Α: Κανονιστικές διατάξεις που αφορούν την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού

1. Εξέταση (ανάλυση, σχολιασμός και συσχέτιση) της υπάρχουσας βιβλιογραφίας

Σε ότι ακολουθεί εξετάζονται τόσο οι κυριώτερες μελέτες και έρευνες που έχουν γίνει με αντικείμενο την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού όσο και ο τρόπος με τον οποίο η δράση αυτή του σεισμού αντιμετωπίζεται από τους Αντισεισμικούς Κανονισμούς.

Κατ' αρχάς στο 1.1 εξετάζονται οι έρευνες και μελέτες που αντιμετωπίζουν το θέμα στη γενική του μορφή και των οποίων τα ευρήματα και οι όποιες προτάσεις και συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν αφορούν αφ' ενός μεν την κατακόρυφη δράση του σεισμού γενικότερα και αφ' ετέρου την απόκριση στη δράση αυτή φορέων και κατασκευαστικών διατάξεων που απαντούνται κυρίως σε κτίρια.

Στη συνέχεια στο 1.2 εξετάζονται οι αντίστοιχες έρευνες, μελέτες, ευρήματα, προτάσεις και συμπεράσματα που αφορούν ειδικότερα τις γέφυρες και τις ιδιαίτερες κατασκευαστικές τους διατάξεις (π.χ. εφέδρανα).

Τέλος στο 1.3 εξετάζονται οι κανονιστικές διατάξεις των κυριότερων Αντισεισμικών Κανονισμών που αφορούν την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού.

1.1 Γενική θεωρητική και ερευνητική προσέγγιση και διερεύνηση της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού

Σε ότι ακολουθεί εξετάζονται σε βάθος δύο από τις, κατά την γνώμη μας, πιο αξιόλογες ερευνητικές εργασίες που αφορούν την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού. Στη συνέχεια εξετάζονται πιο συνοπτικά και με αναφορά στις δύο αυτές βασικές εργασίες και οι σημαντικότερες άλλες μελέτες και έρευνες που αφορούν την δράση αυτή του σεισμού.

- **Procedure and Spectra for Analysis of RC Structures subjected to strong vertical earthquake loads** by A. S. Elnashai and A. J. Papazoglou - Vol.1, No.1 (1997) 121-155, Imperial College Press

Αυτή η εργασία των **Elnashai & Papazoglou** έχει σκοπό να αναδείξει τα χαρακτηριστικά του κατακόρυφου φάσματος απόκρισης σε περιοχές που έγκεινται κοντά σε ρήγματα. Απαρχή του όλου προβληματισμού στάθηκαν οι απροσδόκητες εκτεταμένες ζημιές που προκάλεσαν πρόσφατοι σεισμοί, όπως στο Northridge (1994) και στο Hyogo-ken Nanbu (1995), σε κατασκευές με σύγχρονο αντισεισμικό σχεδιασμό.

Κατ' αρχάς γίνεται λόγος για την εξάρτηση της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού από τα σεισμικά κύματα P και τονίζεται η συσχέτιση της με υψηλές συχνότητες όπως δείχνουν τα επιταχυνσιογραφήματα. Ακολουθεί σχολιασμός για τη συνάρτηση που μπορεί να συνδέει τις μέγιστες κατακόρυφες και οριζόντιες επιταχύνσεις (V/H) και υπογραμμίζεται ότι ο γνωστός κανόνας $V/H = 2/3$ είναι μη συντηρητικός σε περιοχές κοντά σε ρήγματα. Αναλυτικά αναφέρεται ότι ο συντελεστής V/H μπορεί να ξεπεράσει την μονάδα σε θέσεις κοντά σε ρήγματα (απόσταση μικρότερη από 5km) και για μεγάλα μεγέθη σεισμών. Σε αντίθεση για μεγάλες αποστάσεις της τάξης των 50km ο συντελεστής V/H μπορεί να πέσει πολύ πιο κάτω από την τιμή των 2/3 και να αγγίξει αυτήν της 0,50.

Κατακόρυφα Φάσματα Απόκρισης

Οι περισσότεροι κανονισμοί που λαμβάνουν υπόψη την επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού εξάγουν το κατακόρυφο φάσμα από το οριζόντιο χρησιμοποιώντας τον κανόνα των 2/3 ή κάποια παρεμφερή σχέση. Δηλαδή δέχονται ότι το κατακόρυφο φάσμα είναι εξαρτημένο από το οριζόντιο τόσο στο σχήμα όσο και στις τιμές του. Ωστόσο αυτή η διαδικασία δεν είναι ρεαλιστική, όπως έχει ειπωθεί και παραπάνω, αφού αγνοεί τον κίνδυνο της ισχυρής κατακόρυφης δόνησης σε περιοχές κοντά σε ρήγματα.

Για να γενικευθεί η αλήθεια των παραπάνω ισχυρισμών 35 τρισδιάστατες καταγραφές χρησιμοποιήθηκαν ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα οριζόντια και κατακόρυφα φάσματα απόκρισης. Στη συνέχεια συγκρίθηκαν αυτά με τα αντίστοιχα φάσματα σχεδιασμού που ορίζει ο Ευρωκώδικας 8 (EC-8). Όσον αφορά τη σύγκριση των οριζόντιων φασμάτων τα συνημμένα διαγράμματα έδειξαν ότι οι απαιτήσεις του ορίζει ο EC-8 είναι ικανοποιητικές αφού το φάσμα

σχεδιασμού και τα οριζόντια φάσματα απόκρισης των καταγραφών συμφωνούν τόσο στο σχήμα όσο και στις τιμές. Δεν συνέβη ωστόσο το ίδιο με τη σύγκριση των κατακόρυφων φασμάτων. Το γεγονός ότι οι καταγραφές προέρχονταν από περιοχές κοντά σε ρήγματα έδωσαν φάσματα απόκρισης που υπερέβαιναν κατά πολύ το φάσμα σχεδιασμού του κανονισμού, μάλιστα οι διαφορές και οι αποκλίσεις ήταν έντονες όχι μόνο στις τιμές αλλά και στο σχήμα του φάσματος.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα, εκτός του ότι επαλήθευσαν όσα έχουν τονιστεί ανωτέρω, αναδεικνύουν & τα εξής που πρέπει οι κανονισμοί πλέον να λάβουν υπόψη:

- Οι οριακές περίοδοι που ορίζουν το εύρος του φάσματος που σημειώνεται η μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση πρέπει να αλλάξουν στο κατακόρυφο φάσμα σχεδιασμού των κανονισμών. Τα ρεαλιστικά όρια είναι 0,05 και 0,15sec.

- Η ιξώδης απόσβεση που προτείνεται ως απόσβεση σχεδιασμού κατακόρυφης ταλάντωσης είναι πιθανότατα μικρότερη από αυτή οριζόντιας ταλάντωσης.

Διγραμμικά Ελαστικά Φάσματα

Στο πλαίσιο της ερευνάς έγινε υπολογισμός μιας πλειάδας φασμάτων απόκρισης μονοβάθμιων ταλαντωτών με άνισες αξονικές εφελκύστηκες και θλιπτικές ακαμψίες και για διάφορες αρχικές προφορτίσεις. Στην ανάλυση οι συντελεστές ακαμψίας θλίψης προς εφελκυσμό έπαιρναν τιμές από 1 έως 10, τα μέγιστα των υπό κλίμακα επιταχυνσιογραφημάτων έπαιρναν τιμές από 0.2g έως 1,0g ενώ τα αξονικά φορτία από 0.50 έως 1.50. Παντού χρησιμοποιήθηκε ιξώδης απόσβεση 2% ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες καταγραφές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Η εφαρμογή της διγραμμικής ανάλυσης σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ανέδειξε την ιδιαίτερη επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα της όλης διαδικασίας αξονικές εφελκυστικές τάσεις μπορεί να προκύψουν ακόμα και για χαμηλές κατακόρυφες επιταχύνσεις όταν το αξονικό φορτίο είναι χαμηλό (μικρή θλιπτική προφόρτιση). Τα αποτελέσματα έχουν κωδικοποιηθεί σε πίνακα όπου παραστατικά γίνονται σαφείς οι συνθήκες (κατακόρυφη επιτάχυνση – αξονική προφόρτιση) που ευνοούν την εμφάνιση εφελκυσμού. Σαφώς υψηλές κατακόρυφες επιταχύνσεις και μειωμένη αρχική προφόρτιση κάνουν πιθανή την εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά του διγραμμικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε δεν επηρεάζουν την εμφάνιση των εφελκυστικών τάσεων. Η σημαντική επίδραση τους έγκειται στη μείωση των φασματικών επιταχύνσεων και επομένως των εφελκυστικών τάσεων όταν συμβαίνει εφελκυσμός. Παράλληλα επηρεάζουν το μέγεθος των εφελκυστικών παραμορφώσεων με τη διαφορά ότι ενώ μειώνονται οι εφελκυστικές τάσεις, οι εφελκυστικές παραμορφώσεις μεγαλώνουν.

Ανελαστικά Φάσματα

Σε αυτό το στάδιο πέρα από τη διγραμμικότητα της αξονικής ακαμψίας λήφθηκε υπόψη και η ανελαστικότητα του υλικού καθώς και η υστερητική απόσβεση. Χρησιμοποιήθηκε ένα απλό μοντέλο για τη συμπεριφορά της υστέρησης. Η ανάλυση περιορίστηκε σε 10 από τις καταγραφές με μεγάλη ποικιλία από μέγιστες κατακόρυφες επιταχύνσεις.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω σύνθετης διαδικασίας ανέδειξαν την δυναμική της κατακόρυφης συνιστώσας να προκαλέσει αστοχίες. Σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και για συντελεστή αξονικού φορτίου (που εκφράζει την αναλογία της μάζας που συμμετέχει στην κατακόρυφη σεισμική δράση) ίσο με 1 συνέβη εφελκυσμός τόσο στις τάσεις όσο και στις μετατοπίσεις. Επιπρόσθετα έγινε σαφές ότι η κατακόρυφη σεισμική δράση από μόνη της είναι σε θέση να οδηγήσει σε δραματική θλιπτική αστοχία τους στύλους συνοδευόμενη από μεγάλη απαίτηση πλαστιμότητας. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι δεν μπορεί κάποιος να αποδώσει τις παραπάνω καταστροφικές συμπεριφορές στις υψηλές επιταχύνσεις των καταγραφών αφού οι συγκεκριμένες καταγραφές είναι συνήθεις και όχι εξαιρετικές περιπτώσεις.

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα επιπλέον έδειξαν ότι μικρού μεγέθους και υψηλών συχνοτήτων ταλαντώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε διαδοχική κατάρρευση στύλων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η υστερητική απόσβεση εμφανίζεται ανίκανη να εμποδίσει μεγάλες πλαστιμότητες, ακόμα και να εμποδίσει την εμφάνιση εφελκυσμού. Ωστόσο με τη βοήθεια της αρχικής προφόρτισης κατορθώνει να αποτρέπει τη διαρροή στον εφελκυσμό.

Προτάσεις για την κατακόρυφη Κίνηση

➤ Προτεινόμενο σχήμα φασμάτων

Οι συγγραφείς τελικά προτείνουν ότι η κατακόρυφη κίνηση του σεισμού πρέπει να αναπαριστάται σε φάσμα απόκρισης συσχετισμένο με την κατακόρυφη μέγιστη επιτάχυνση του σεισμού και να μην είναι εξαρτημένη από τη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση. Επιπρόσθετα επειδή η κατακόρυφη σεισμική διέγερση είναι συνυφασμένη με ταλαντώσεις υψηλών συχνοτήτων κρίνεται ορθό η απόσβεση να μην λαμβάνεται ίση με 5% όπως υποδεικνύουν οι κανονισμοί αλλά ίση με 2%. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής φασματικής μεγέθυνσης β_0 προκύπτει ίσος με 3,48% για απόσβεση 2%.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, προτείνεται οι οριακές περίοδοι του φάσματος, που ορίζουν το διάστημα στο οποίο το φάσμα παίρνει τις μέγιστες τιμές του, να είναι ίσες με 0,05 και 0,15 sec. Μάλιστα δεν κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιούνται διαφορετικά σχήματα φάσματος και διαφορετικές οριακές περίοδοι για τους διάφορους τύπους εδαφών επειδή η επιρροή της τοπικής γεωλογίας στις κυρίαρχες περιόδους είναι παρά πολύ μικρή.

➤ Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση

Κρίνεται αναγκαίος ο ορισμός της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης σχεδιασμού ώστε από εκεί να απορρέει το κατακόρυφο φάσμα απόκρισης. Αποδεκτή λύση είναι μια σχέση που να συνδέει την μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση με την οριζόντια, με σύνθετη όμως μορφή και όχι με μια απλή εξάρτηση όπως ο κανόνας των 2/3 που έχει αποδειχτεί ανεπαρκής.

Οι συγγραφείς τελικά προτείνουν τις εξής σχέσεις:

✓ Για επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες από 15km προτείνονται οι εκφράσεις V/H των **Ambraseys and Simpson** (1995).

✓ Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 30km προτείνεται η μειωτική σχέση που δίνει ο **Abrahamson** (1989).

✓ Για αποστάσεις μεταξύ 15 και 30km κρίνεται σωστό να γίνεται γραμμική παρεμβολή των παραπάνω δυο μεθόδων. Μάλιστα με αυτόν τον τρόπο έχει παρατηρηθεί ότι δεν εισάγεται σημαντικό λάθος στον υπολογισμό της κατακόρυφης επιτάχυνσης.

➤ Περαιτέρω σκέψεις και προβληματισμοί

Πολύ σημαντική κρίνεται η σχέση που ορίζει πότε πραγματοποιούνται τα μέγιστα των επιταχύνσεων σε όλες τις διευθύνσεις. Αρκετές καταγραφές έχουν δείξει ότι η μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση συμβαίνει 1 με 2 sec νωρίτερα της μέγιστης οριζόντιας. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αποδεκτό ότι οι κατασκευές μπορούν να σχεδιαστούν διαφορετικά για την κατακόρυφη και τις οριζόντιες συνιστώσες. Αντιστρόφως στις περιπτώσεις που υπάρχει σύμπτωση στα μέγιστα των επιταχύνσεων χρειάζεται να ληφθούν υπόψη οι συνέπειες της συνδυασμένης συμπεριφοράς.

Ωστόσο ουδείς είναι σε θέση a priori να ξέρει ποια ακριβώς θα είναι η συμπεριφορά της συνολικής σεισμικής διέγερσης. Για αυτό το λόγο είναι πρακτικό και ασφαλές να θεωρείται ότι το χρονικό διάστημα σύμπτωσης των μέγιστων θα είναι σχετικά μικρό. Με αυτή την υπόθεση η πλαστιμότητα και καμπτική αντοχή των στύλων υπολογίζονται με βάση το μέγιστο αξονικό θλιπτικό φορτίο ενώ ο υπολογισμός της διατμητικής αντοχής με βάση το ελάχιστο αξονικό θλιπτικό φορτίο.

Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι λίγα μπορούν να γίνουν από απόψεως σχεδιασμού ώστε να αποφευχθεί η σύμπτωση των κυρίαρχων περιόδων της κατακόρυφης κίνησης και του σκελετού των κατασκευών. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν μπορεί να γίνει εύκολα επέμβαση στη ρύθμιση των στατικών φορτίων ούτε στα ύψη. Ρυθμίσεις ωστόσο μπορούν να γίνουν στα μήκη των ανοιγμάτων αν και σύνθετα και προεντεταμένα πατώματα δυσκολεύουν την όλη διαδικασία λόγω ότι προσβάλλονται αρκετά από την κατακόρυφη συνιστώσα.

- **The Vertical - To - Horizontal Response Spectral Ratio and Tentative procedures for developing simplified V/H and Vertical Design Spectral** by *Yousef Bozorgnia and Kenneth W. Campbell* - 8 August 2003

Αυτή η δημοσίευση παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας έρευνας των **Yousef Bozorgnia & Kenneth W. Campbell** σχετική με τα χαρακτηριστικά της κατακόρυφης σεισμικής κίνησης. Η έρευνα βασίστηκε σε ένα μοντέλο που έδινε τη συσχέτιση μεταξύ της κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας του σεισμού (V/H ratio) και σε φάσματα απόκρισης που προέκυψαν από μια βάση δεδομένων 443 επιταχυνσιογραφημάτων. Τα επιταχυνσιογραφήματα είχαν καταγραφεί σε περιοχές κοντά σε ρήγματα και τα έδωσαν συνολικά 36 σεισμοί σε ολόκληρο τον κόσμο με μεγέθη από 4,7 – 7,7 Richter.

Στην αρχή γίνεται εκτενής αναφορά σε όλους τους ερευνητές που έχουν καταπιαστεί με το ίδιο θέμα. Γίνεται λόγος για τους **Niazi & Bozorgnia, Watabe et al, Silva** όπου όλοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο λόγος V/H είναι στενά εξαρτημένος από την περίοδο και ειδικά ότι οι μικρές τιμές περιόδων δίνουν υψηλές τιμές στον συντελεστή V/H. Στη συνέχεια αναφέρονται οι ερευνητές που έδωσαν μειωτικές σχέσεις για τις οριζόντιες και την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού. Μεταξύ άλλων αναφέρονται οι **Bozorgnia & Niazi, Abrahamson & Litchiser, Abrahamson & Silva, Campbell**. Η εισαγωγή κλείνει με τους ερευνητές που πρόσφεραν εξηγήσεις για την παρατηρούμενη εξάρτηση του συντελεστή V/H από την επικεντρική απόσταση και από τις τοπικές συνθήκες. Αναφέρονται οι **Silva, Kawase & Aki**. Δεν λησμονούνται επίσης να τονιστούν κι άλλες πιο ειδικές μελέτες σχετικά με τη μορφή των φασμάτων απόκρισης, τόσο των οριζόντιων όσο και των κατακόρυφων.

Βάση Δεδομένων Επιταχυνσιογραφημάτων

Οι συγγραφείς εδώ δίνουν τον πλήρη κατάλογο των σεισμών των οποίων τα επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν σε διάφορες περιοχές χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα. Η βάση περιελάμβανε 443 επιταχυνσιογραφήματα οριζόντιας συνιστώσας από 36 σεισμούς αλλά και 439 κατακόρυφα επιταχυνσιογραφήματα από 34 σεισμούς.

Από τα επιταχυνσιογραφήματα στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους και το φάσμα απόκρισης για 5% απόσβεση για περιόδους από 0,05 έως 4,0 sec. Επίσης από τις καταγραφές των σεισμών αξιοποιήθηκαν όλα τα δεδομένα που έχουν σχέση με το μέγεθος του σεισμού, την επικεντρική απόσταση, τον τύπο του ρήγματος και τις τοπικές συνθήκες. Σε πίνακες και σε γραφήματα έχουν κωδικοποιηθεί οι καταγραφές των σεισμών ώστε να γίνει εύκολα η παραμετρική ανάλυση τους. Για τις παραμέτρους οι συγγραφείς δίνουν πολλές λεπτομέρειες, ειδικά για τον τύπο του ρήγματος (διαχωρισμός σε strike slip, reverse & thrust) και για τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες (διαχωρισμός εδαφών σε firm soil, very firm soil, soft rock & firm rock).

Μοντέλο Κίνησης Εδάφους

Οι συγγραφείς πιστεύουν ότι μια στατιστικά αξιόπιστη σχέση που μπορεί να περιγράψει με επιτυχία τον συντελεστή V/H είναι η εξής:

$$\ln(V/H) = \ln Y_V - \ln Y_H$$

Όπου Y_V & Y_H είναι η κατακόρυφη και η μέση οριζόντια συνιστώσα του σεισμού όπως προκύπτουν από τις μειωτικές σχέσεις που έχουν αναπτύξει οι ίδιοι οι συγγραφείς. Η μειωτική σχέση γράφεται συνοπτικά ως εξής.:

$$\ln Y = c_1 + f_1(M_w) + c_4 \ln(f_2(M_w, r_{\text{seis}}, S)^{1/2} + f_3(F) + f_4(S) + f_5(HW, F, M_w, r_{\text{seis}}) + \varepsilon$$

Όλοι οι όροι της παραπάνω σχέσης αναλύονται εκτενώς στη δημοσίευση. Αναφέρεται ότι ο όρος f_1 δίνει την εξάρτηση του συντελεστή V/H από το μέγεθος του σεισμού, ο όρος f_2 από την επικεντρική απόσταση, ο όρος f_3 από τον μηχανισμό του ρήγματος, ο όρος f_4 από την μακριά - από - την - πηγή επίδραση των τοπικών συνθηκών του εδάφους ενώ ο όρος f_5 την εξάρτηση του συντελεστή V/H από την επίδραση 'Hanging Wall'. Πρέπει να τονιστεί ότι οι όροι f_i είναι σύνθετες συναρτήσεις που περιέχουν μια πλειάδα από άλλες μεταβλητές με συνέπεια το παραπάνω μοντέλο V/H να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο.

Οι συγγραφείς δίνουν παραστατικά την παραπάνω σχέση σε μια μεγάλη ποικιλία από γραφήματα ώστε εποπτικά να βγουν εύκολα αρκετά συμπεράσματα. Κατ' αρχάς γίνεται σαφές από γραφήματα V/H συναρτήσει της επικεντρικής απόστασης ότι ο λόγος V/H δεν είναι ευαίσθητος ούτε στο μέγεθος του σεισμού ούτε στην επικεντρική απόσταση εκτός από ένα εύρος περιόδων γύρω από την τιμή 0,10sec. Για τιμή περιόδου ίση με 0,10sec και για σταθερό έδαφος ο λόγος V/H αυξάνει με το μέγεθος του σεισμού ενώ μειώνεται ραγδαία με την απόσταση. Βέβαια οι συνέπειες της συνδυασμένης επίδρασης μεγέθους σεισμού και επικεντρικής απόστασης είναι λιγότερο εμφανείς σε υγιή βράχο. Άλλα γραφήματα V/H συναρτήσει της περιόδου έρχονται να επιβεβαιώσουν όσα έχουν ειπωθεί ανωτέρω. Και σε αυτά γίνονται εμφανείς οι υψηλές τιμές που παίρνει ο λόγος V/H για μεγάλα μεγέθη σεισμών και μικρές επικεντρικές αποστάσεις στην περιοχή περιόδων της τάξης του 0,1sec. Επίσης η μεγαλύτερη επιρροή του σταθερού εδάφους σε σχέση με τον υγιή βράχο για το ίδιο εύρος περιόδων γίνεται εμφανής από αντίστοιχο γράφημα ενώ ο μηχανισμός του ρήγματος δεν δείχνει να έχει ιδιαίτερη επίδραση στον συντελεστή V/H .

Για να γίνει αποδεκτό το παραπάνω μοντέλο κίνησης εδάφους εκτελέστηκε μια ανάλυση υπολοίπων ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία των μειωτικών σχέσεων που εφαρμόστηκαν. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης έδειξε ότι ο συντελεστής V/H είναι αμερόληπτος και το μοντέλο της παλινδρόμησης δεν έδειξε καμία συσχέτιση με καμία παράμετρο (μέγεθος σεισμού, απόσταση, μηχανισμός ρήγματος, συνθήκες εδάφους & άλλες περιόδους).

Σύγκριση Με Προηγούμενες Έρευνες

Εδώ οι συγγραφείς συγκρίνουν τις μειωτικές σχέσεις άλλων ερευνητών με αυτήν που αναλύθηκε ανωτέρω. Επιλέχθηκαν τρεις μειωτικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως. Πρόκειται για αυτές που πρότειναν οι **Sadigh et al (1993)**, **Abrahamson & Silva (1997)** και **Campbell (1997)**.

Κατ' αρχάς τονίζονται οι κύριες διαφορές μεταξύ τους. Τονίζεται ότι η μειωτική σχέση των Sadigh et al είναι αξιόπιστη μόνο για βράχο (generic rock) ενώ αναφέρεται αναλυτικά για όλες τις μειωτικές σχέσεις ο τρόπος που κατηγοριοποιούν τους τύπους των εδαφών και τους μηχανισμούς ρηγμάτων.

Στη δημοσίευση υπάρχουν συνημμένα δυο διαγράμματα που εμποπτικά δίνουν τις αποκλίσεις μεταξύ των παραπάνω τριών μειωτικών σχέσεων και αυτής της παρούσας ερευνάς. Τα γραφήματα δίνουν τον λόγο V/H συναρτήσει της περιόδου για μαλακό και υγιή βράχο (1^ο γράφημα) αλλά και για σταθερό και πολύ σταθερό έδαφος (2^ο γράφημα). Τα γραφήματα αναφέρονται σε μια περιοχή που απέχει 10km επικεντρική απόσταση από σεισμό μεγέθους 7,0 Richter. Στο 1^ο γράφημα οι διαφορές των τεσσάρων μειωτικών σχέσεων είναι σχετικά μικρές για όλο το φάσμα των περιόδων. Ωστόσο στο 2^ο γράφημα για σταθερό και πολύ σταθερό έδαφος υπάρχει απόκλιση στον υπολογισμό του συντελεστή V/H για μικρές τιμές της περιόδου. Την μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τη μειωτική σχέση της παρούσας ερευνάς παρουσιάζει αυτή των Abrahamson and Silva μιας και τα μέγιστα του λόγου V/H είναι κατά 25% υψηλότερα. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν οι συγγραφείς, ύστερα από όσα υποδεικνύουν τα γραφήματα, είναι ότι είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός του εδάφους σε κατηγορίες σταθερό και πολύ σταθερό αλλά και του βράχου σε μαλακό και σκληρό.

Απλοποιημένα Φάσματα V/H

Εδώ προτείνεται η χρήση ορισμένων απλοποιημένων φασμάτων V/H προορισμένα για πρακτικούς σκοπούς όπως προέκυψαν από το μοντέλο της κίνησης του εδάφους της παρούσας εργασίας ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία. Πρόκειται για δυο φάσματα, το πρώτο για σταθερό έδαφος και το δεύτερο για μαλακό / σκληρό βράχο και πολύ σταθερό έδαφος. Και στα δυο γίνεται εμφανής η εξάρτηση του συντελεστή V/H από την περίοδο και την επικεντρική απόσταση και είναι εύλογες οι υψηλές τιμές του για μικρές τιμές αυτών, ειδικά στο γράφημα για σταθερό έδαφος.

Προκαταρκτικά Κατακόρυφα Φάσματα Σχεδιασμού

Στις πρακτικές περιπτώσεις που δεν είναι διαθέσιμα κατακόρυφα φάσματα απόκρισης είναι επιθυμητό να μπορούν να παραχθούν κατακόρυφα φάσματα εφαρμόζοντας μια απλή διαδικασία. Αυτά που πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα είναι δυο στοιχεία: α) ότι το μέγιστο της κατακόρυφης επιτάχυνσης σχεδιασμού συμβαίνει στις μικρές περιόδους & β) οι περίοδοι της κατακόρυφης απόκρισης πολλών κατασκευών έχουν μικρές τιμές.

Το προκαταρκτικό κατακόρυφο φάσμα σχεδιασμού, βασισμένο στο μοντέλο σεισμικής κίνησης που ανέπτυξαν οι συγγραφείς είναι απλό ως προς τη μορφή του: περιλαμβάνει ένα σταθερό τμήμα A_{vs} έως την οριακή περίοδο $T = 0,15\text{sec}$ και ένα μειούμενο που δίνεται από τη σχέση $A_{vs}(0,15/T)^{0,75}$. Η τιμή A_{vs} ορίζεται ως η τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης για περίοδο $0,1\text{sec}$.

➤ 1η Περίπτωση

Αν είναι γνωστή η τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης για $T=0,1\text{sec}$ τότε το προκαταρκτικό φάσμα σχεδιασμού είναι πλήρως ορισμένο αφού η τιμή A_{vs} είναι γνωστή και το σταθερό και μειούμενο τμήμα χαράσσονται χωρίς πρόβλημα.

➤ 2η Περίπτωση

Αν είναι γνωστή η τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης για $T=0,1\text{sec}$ τότε από τα απλοποιημένα φάσματα V/H , για τα οποία έχει γίνει λόγος προηγουμένως, εξάγεται η τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης για την ίδια περίοδο και αναγόμεστε πλέον στην περίπτωση 1.

Με αυτή τη διαδικασία τα προκαταρκτικά φάσματα σχεδιασμού που παράγονται είναι ελαφρώς συντηρητικά όπως έδειξαν συγκρίσεις αυτών με τα αναλυτικά που παράγονται από την μειωτική σχέση της ερευνάς.

Η δημοσίευση κλείνει με μια ανακεφαλαίωση όλων όσων έχουν αναφερθεί, τονίζοντας για άλλη μια φορά την υψηλή εξάρτηση του συντελεστή V/H από την περίοδο, την επικεντρική απόσταση και τις τοπικές συνθήκες της περιοχής και την ασθενή εξάρτηση του από το μέγεθος του σεισμού και τον μηχανισμό του ρήγματος.

- Λοιπές εργασίες

Vertical/Horizontal ratio for strong ground motion in the near field and soil non-linearity by G. Mohammadioun, B. Mohammadioun, 11th WCEE (1998)

Η εργασία αυτή, αφού διαπιστώνει τις μεγάλες επιταχύνσεις που έχουν παρατηρηθεί σε σεισμούς, σε περιοχές κοντά σε σεισμικώς ενεργά ρήγματα επικεντρώνεται στην διαφοροποίηση του μεγέθους της κατακόρυφης συνιστώσας ανάλογα με το έδαφος και κυρίως ανάλογα με την μηχανική αντοχή των εδάφων. Χωρίς να προτείνεται συγκεκριμένη λύση, συνιστάται η υιοθέτηση για το ίδιο έδαφος διαφορετικών συντελεστών φασματικής ενίσχυσης για την οριζόντιο και κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού.

Καιτοι ή παρατήρηση αυτή είναι λογική η έλειψη συγκεκριμένης πρότασης αφήνει το θέμα ανοικτό.

Contribution of vertical ground motion to the damage of R.C. buildings by A. Ghobarah, A.S. Elnashai 11th ECEE (1998)

Από την θεωρητική αυτή εργασία και χρησιμοποιώντας καταγραφές από πραγματικούς σεισμούς διαπιστώνονται τα εξής:

- Η κατακόρυφη συνιστώσα επιδεινώνει σημαντικά, ανάλογα με την έντασή της βέβαια, την σεισμική συμπεριφορά κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα ελατώνεται η πλαστιμότητα ενώ αυξάνεται τόσο η διαφορετική μετακίνηση πλακών ορόφων όσο και το επίπεδο των βλαβών.
- Διαπιστώθηκε επίσης μία μείωση της αντοχής μέχρι 20% καθώς και μία μείωση της τιμής του δείκτη συμπεριφοράς q κατά 30%. Η κατακόρυφη συνιστώσα προκάλεσε επίσης αλλαγές τόσο στην κατανομή όσο και στη διαδοχική εμφάνιση των πλαστικών αρθρώσεων.

Πρόκειται για μία εφαρμογή των ιδέων και σκέψεων που έχουν αναπτυχθεί στην προηγούμενη εργασία του Elnashai. Η παρουσίαση συγκεκριμένων αριθμητικών εκτιμήσεων της επιρροής της κατακόρυφης συνιστώσας είναι μεν σημαντική αλλά προς το παρόν πολύ μεμονωμένη για χρήση σε κανονιστικές διατάξεις. Χρειάζεται απαραίτητα και πειραματική επιβεβαίωση.

Structural response considering the vertical component of earthquakes by A.R. Salazar, A. Haldar, (1999)

Πρόκειται για μία θεωρητική εργασία στην οποία η πραγματική επιρροή (μέσω μη-γραμμικής ανάλυσης στο χρόνο) της ταυτόχρονης παρουσίας οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού συγκρίνεται με τις σχετικές διατάξεις τόσο του Αμερικάνικου όσο και του Μεξικάνικου Κανονισμού.

Τα αποτελέσματα είναι τόσο συγκεχυμένα όσο και αντιφατικά. Αλλού ο ένας κανονισμός είναι συντηρητικός, αλλού ο άλλος, αλλού ο ένας κανονισμός είναι ανασφαλής και αλλού ο άλλος. Το μόνο σημείο στο οποίο υπάρχει συμφωνία είναι στο ότι και οι δύο κανονισμοί υποτιμούν σημαντικά την επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας για λόγους της κάθετης προς την οριζόντια επιτάχυνση μεγαλύτερους από το περιβόητο 2/3 των Κανονισμών.

Το βασικό συμπέρασμα των συγγραφέων είναι ότι το θέμα απαιτεί περισσότερη μελέτη και ότι οι Κανονισμοί χρειάζονται ριζική ανασύνταξη.

Observed spectral characteristics of vertical ground motion recorded during worldwide earthquakes from 1957 to 1995 by Y. Bozorgnia, K. Campbell, M. Niazi, 12th WCEE (2000)

Εκείνο που πρέπει να συγκρατηθεί από την εργασία αυτή, και θα είναι χρήσιμο τόσο για τον σχεδιασμό μιάς πειραματικής έρευνας της

κατακόρυφης συνιστώσας όσο και για τις σχετικές με την κατακόρυφη συνιστώσα κανονιστικές διατάξεις είναι το εξής:

Ο λόγος των φασματικών αποκρίσεων (V/H) στις δύο διευθύνσεις είναι μέγιστος στις μικρές περιόδους και μπορεί να φτάσει την τιμή του 1.5 (αντί του περιβόητου $2/3$ των Κανονισμών) για περιόδους 0.1 sec. Αντίθετα για μεγάλες τιμές της περιόδου ο μέγιστος V/H λόγος απαντάται σε συμπαγή βράχο με μέγιστη τιμή 0.7. Γενικά πάντως ο λόγος V/H για περιόδους 0.3 έως 2.0 sec είναι 0.5 ή και μικρότερος.

Γενικά αυτή η εργασία επιβεβαιώνει τις επικρατούντες επι του θέματος της κατακόρυφης συνιστώσας απόψεις αλλά, και τούτο είναι λίαν σημαντικό, τις συγκεκριμενοποιεί και αριθμητικά.

Seismic behaviour of a reinforced concrete building due to large vertical ground motion in near-source region by M. Kikuchi, K. Dan, K. Yashiro, 12th WCEE (2000)

Η θεωρητική αυτή εργασία, και οι χρησιμοποιείται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας του Elnashai (1997) καταλήγει σε τελείως αντίθετα αποτελέσματα και συμπεράσματα απ'ότι η αντίστοιχη του Elnashai στο 11^ο ECEE (1998) καθόσον καταλήγει ότι ακόμη και η έντονη κάθετη συνιστώσα, σε περιοχές κοντά σε ενεργά ρήγματα, έχει πολύ μικρή επιρροή στις βλάβες του δομήματος. Βέβαια οι συγγραφείς κρατούν μια επιφύλαξη (χρησιμοποίησαν ένα μόνο τύπο κτιρίου και δύο μόνο πηγές σεισμικών δεδομένων – El Centro και Kobe) και προτείνουν τη συνέχιση της έρευνας για διαφορετικούς τύπους κτιρίων και σεισμικών δεδομένων.

Είναι φανερό ότι οι αντιφάσεις αυτές μπορεί να λυθούν, ή τουλάχιστον να αρχίσουν να λύνονται, μόνο με ένα κατάλληλο εργαστηριακό πρόγραμμα δοκιμών.

Tests on low ductibility RC frames under high – and low – frequency excitations by S. Quek, C. Bian, X. Lu, H. Xiong (2002)

Εδώ έχουμε μεν πειραματική εργασία αλλά όχι και την πιο κατάλληλη για τη χώρα μας καθόσον αφορά πλαίσια και κατασκευές περιορισμένης πλαστιμότητας για περιοχές χαμηλής σεισμικότητας. Παρ'όλα αυτά οι δοκιμές έχουν τη σημασία τους καθώς εφαρμόστηκαν οριζόντιες επιταχύνσεις από 0.2 έως 1.2 g και κατακόρυφες από 0.4 έως 0.6 g. Οι δοκιμές βασικά έγιναν ξεχωριστά για οριζόντιες και ξεχωριστά για κατακόρυφες επιταχύνσεις και μόνο σε μία περίπτωση για τον συνδυασμό και των δύο. Διαπιστώθηκε, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, ότι εφόσον η ρηγμάτωση παραμένει περιορισμένη τα εντατικά μεγέθη από την συνδυασμένη καταπόνηση δεν διαφέρουν από τον συνδυασμό των επιμέρους εντατικών μεγεθών που προκαλούνται από τις μεμονομένες καταπονήσεις.

Εκείνο που είναι σημαντικό, και είχε παρατηρηθεί τουλάχιστον θεωρητικά και από προηγούμενους ερευνητές, είναι το γεγονός ότι, όσο αυξάνει η

ρηγμάτωση (π.χ. για οριζόντια επιτάχυνση 0.8 g) η παραμόρφωση τείνει να διπλασιαστεί στην περίπτωση της συνδιασμένης καταπόνησης. Τούτο συνεπάγεται μία έντονη μείωση της ακαψίας (κυρίως) και της αντοχής που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην αντιμετώπιση της κατακόρυφης συνιστώσας, αλλά είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν με βάση μία και μόνο δοκιμή, και δὴ φορέων με μειωμένη πλαστιμότητα.

Διαπιστώθηκε επίσης ότι η κατακόρυφη συνιστώσα επιβαρύνει σημαντικά τις δοκούς και τα υποστυλώματα και μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις σε φορείς που έχουν σχεδιαστεί κυρίως για φορτία βαρύτητας.

Επισημαίνεται ότι η διαπίστωση αυτή, που έχει επισημανθεί και από άλλους ερευνητές, έχει οδηγήσει ορισμένους κανονισμούς στην αντιμετώπιση του φαινομένου της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού μέσω μιας αυξομείωσης των μονίμων φορτίων, δηλαδή του ιδίου βάρους. Η ποσοτικοποίηση βέβαια αυτή της αυξομείωσης παραμένει ασαφής.

1.2` Η επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού στις γέφυρες

Η πιο ουσιώδη αντιμετώπιση του θέματος αυτού έχει γίνει από την ομάδα των Button, Colman, Cronin και Mayers που παρουσίασαν την εργασία τους τόσο σε μία τεχνική έκθεση το 1999 όσο και σε μία επιστημονική δημοσίευση το 2002. Οι δύο αυτές παρεμφερείς εργασίες που παρουσιάζονται και σχολιάζονται παρακάτω έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι καταλήγουν σε συγκεκριμένες κανονιστικές προτάσεις, βάση των οποίων είναι η λήψη υπόψη της κατακόρυφης συνιστώσας μέσω ενός συντελεστή αυξομείωσης του ιδίου βάρους που εξαρτάται από το έδαφος, την απόσταση από το ρήγμα, το δομικό μέλος που εξετάζεται (βάθρο ή φορέας) και το υπο εξέταση εντατικό μέγεθος (αξονική δύναμη, ροπή, τέμνουσα).

Είναι πάντως αυξοσημείωτο το γεγονός ότι στην τόσο σημαντική αυτή εργασία δεν επισέρχεται ως καθοριστικός παράγων ο ρόλος των εφεδράνων. Είναι γνωστό ότι ένας βασικός λόγος που δεν έχουν παρατηρηθεί βλάβες στις ανωδομές γεφυρών λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας είναι η μεσολάβηση μεταξύ ανωδομής και υποδομής στις περισσότερες περιπτώσεις ελαστομερών, ή αναλόγου συμπεριφοράς, εφεδράνων. Εικάζεται ότι με την παρεμβολή των εφεδράνων αυξάνεται η ιδιοπερίοδος σε σημείο που να βρίσκεται πλέον χαμηλά στον φθίνοντα κλάδο του φάσματος απόκρισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη σεισμική διέγερση. Θα ήταν σκόπιμη, στη Β φάση του παρόντος έργου, μία εμπειριστατωμένη θεωρητική και εργαστηριακή διερεύνηση της συμβολής αυτής των εφεδράνων.

- **Effect of Vertical Ground Motions on the Structural Response of Highway Bridges** by Martin R. Button, Colman J. Cronin and Ronald L. Mayes – (1999), *Τεχνική Έκθεση*

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να καθορίσει κάτω από ποιες συνθήκες η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού είναι κρίσιμη στον ορισμό των απαιτούμενων εντατικών μεγεθών στα στοιχεία γεφυρών. Γίνεται ανάλυση σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα γεφυρών και εξάγονται συμπεράσματα για το πότε η δράση της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού είναι δυνατόν να αγνοηθεί ή όχι.

Αντιπροσωπευτικό Δείγμα Γεφυρών:

Επιλέχθηκαν για ανάλυση οι εξής τύποι γεφυρών:

1. Συνεχής γέφυρα δυο ανοιγμάτων από προεντεταμένο σκυρόδεμα – διατομή κιβωτιοειδής. Το κατάστρωμα εδράζεται σε δυο ακρόβαθρα ενώ ενδιάμεσα σε αυτά υπάρχει ένα σκελετικό υποστήριγμα αποτελούμενο από τρεις στύλους.

2. Σιδηρά γέφυρα τριών ανοιγμάτων με σύμμεικτο κατάστρωμα. Οι στηρίξεις της γέφυρας περιλαμβάνουν δυο ακρόβαθρα απλής έδρασης και δυο τοιχώματα εσωτερικά. Όλες οι στηρίξεις είναι λοξές κατά 25° ως προς την κάθετη διεύθυνση στον άξονα της γέφυρας. Η θεμελίωση γίνεται πάνω σε σκληρό και υγιή βράχο.
3. Γέφυρα ενός ανοίγματος με κατάστρωμα αποτελούμενο από 8 ισαπέχοντες προκατασκευασμένες AASHTO δοκούς. Τα ακρόβαθρα έχουν λοξότητα 28° ως προς την κάθετο στον άξονα της γέφυρας ενώ πέραν των εφέδρανων υπάρχουν shear keys (κλειδιά διάτμησης).
4. Γέφυρα τριών ανοιγμάτων, κιβωτιοειδούς διατομής τριών κυψελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα δυο εσωτερικά υποστηρίγματα της γέφυρας αποτελούνται από δυο κυκλικούς στύλους με αρθρωτή σύνδεση σε πέδιλα.
5. Γέφυρα εννέα ανοιγμάτων. Η διατομή της ανωδομής αποτελείται από τέσσερις σιδερένιες δοκούς με σύμμεικτο κατάστρωμα. Όλα τα υποστηρίγματα της γέφυρας συμπεριλαμβανομένων των ακροβάθρων είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα και θεμελιωμένα σε σιδερένιους τύπου H πασσάλους.
6. Γέφυρα 3 ανοιγμάτων, κιβωτιοειδούς διατομής τριών κυψελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η Γέφυρα εμφανίζει κυρτότητα 104° ως προς το οριζόντιο επίπεδο ενώ είναι θεμελιωμένη σε μη συνεκτικό έδαφος.

Γραμμική Ελαστική Ανάλυση

Και οι έξι γέφυρες αναλύθηκαν με τη μέθοδο των Φασμάτων Απόκρισης με πολλές εισαγόμενες παραμέτρους όπως τον τύπο εδάφους, την επικεντρική απόσταση του σεισμού και το μέγεθος αυτού. Επιπρόσθετα οι γέφυρες 1,4 & 5 αναλύθηκαν και με τη μέθοδο των Χρονοιστοριών (time history analysis) με την εισαγωγή υπό κλίμακα επιταχυνσιογραφημάτων. Όλες οι γραμμικές δυναμικές αναλύσεις έγιναν με το εμπορικό πρόγραμμα SAP2000.

Επιλέχθηκαν δυο μέθοδοι ανάλυσης (Φασματική Ανάλυση – Μέθοδος Ολοκλήρωσης Χρονοιστοριών) για να γίνει σύγκριση μεταξύ τους και να διαπιστωθεί η αξιοπιστία της φασματικής ανάλυσης που εφαρμόστηκε σε όλες τις γέφυρες. Παρατηρήθηκε ότι η φασματική ανάλυση είναι σε θέση με μεγάλη ακρίβεια να αναπαραστήσει την επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας σε σύνθετες τρισδιάστατες γέφυρες υπό τρισδιάστατη σεισμική διέγερση αφού τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων συνέκλιναν.

Κατά την ανάλυση (Φασματική σε όλες τις γέφυρες) μετρήθηκαν ποικίλα εντατικά μεγέθη και μετατοπίσεις, όπως κατακόρυφες, διαμήκεις και εγκάρσιες μετατοπίσεις των εσωτερικών ανοιγμάτων, των βάθρων, κατακόρυφες τέμνουσες και ροπές κάμψης καταστρώματος στα εσωτερικά

των ανοιγμάτων αλλά και στους στύλους. Δεν παραλείφθηκαν επίσης να μετρηθούν οι αξονική δύναμη, η διαμήκης και εγκάρσια τέμνουσα στη βάση των στύλων.

Τα αποτελέσματα των φασματικών αναλύσεων εμφανίζονται με τη μορφή του συντελεστή $(3-2)/DL$ που σχετίζει την επιπρόσθετη επιρροή εξαιτίας της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού (3 συνιστώσες μείον 2 οριζόντιες συνιστώσες) προς την απόκριση από τα νεκρά μόνο φορτία (Dead Load). Μια πλειάδα γραφημάτων δίνει την εξάρτηση των προαναφερθέντων εντατικών μεγεθών με τη μορφή $(3-2)/DL$ σε σχέση με την απόσταση για διάφορα είδη εδάφους, μεγέθη σεισμών ταυτόχρονα και για τις έξι γέφυρες. Επιπλέον οι συγγραφείς οριοθετούν στα γραφήματα τις συνθήκες και τα όρια (περιβάλλουσες) στα οποία η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας είναι εντυπωσιακή ή αξιοσημείωτη.

Οι γέφυρες 4 & 6 αναλύθηκαν φασματικά για άλλη μια φορά με μεταβαλλόμενη ακαμψία καταστρώματος για να διαπιστωθεί αν υπάρχει εξάρτηση αυτής με την κατακόρυφη συνιστώσα. Ακόμα οι ίδιες γέφυρες αναλύθηκαν και με μεταβλητές συνθήκες θεμελίωσης (ελαστικές έως λειτουργία πλήρης πάκτωσης) και κατεγράφησαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ανάλυσης.

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν ύστερα από μελέτη των γραφημάτων αλλά και των εκτενών αποτελεσμάτων που έδωσε το πρόγραμμα SAP2000 για όλες τις αναλύσεις που έγιναν είναι συνοπτικά τα εξής:

✓ Οι γέφυρες που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό ιδιομορφικής μάζας να κείται στο εύρος της μέγιστης κατακόρυφης φασματικής επιτάχυνσης δέχονται και την μεγαλύτερη επιρροή από την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού.

✓ Τα γραφήματα τα οποία έδωσαν οι γραμμικές ελαστικές φασματικές αναλύσεις μπορούν να αποτελέσουν οδηγό για την αποφυγή της ανάγκης της εισαγωγής της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού στην ανάλυση. Το τίμημα ωστόσο είναι να προσαυξάνονται τα νεκρά φορτία με ένα συντελεστή που δίνεται από την περιβάλλουσα κάθε γραφήματος όπως την σχεδίασαν οι συγγραφείς.

✓ Ωστόσο για τον καθορισμό των δυνάμεων σχεδιασμού με την προσαύξηση των νεκρών φορτίων μέσω ενός συντελεστή για μικρές επικεντρικές αποστάσεις κάτω από 10km και για μεγέθη σεισμού πάνω από 6,5 Richter παρουσιάζεται πρόβλημα μιας και ο συντελεστής παίρνει πολύ μεγάλες τιμές έως την τιμή 1.9. Σε αυτές τις περιπτώσεις κρίνεται ορθότερο να εισάγεται η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού στην ανάλυση από το να γίνονται αποδεκτοί τόσο μεγάλοι πολλαπλασιαστές των νεκρών φορτίων.

✓ Η απόκριση των γεφυρών κατά το οριζόντιο επίπεδο δεν επηρεάζεται σημαντικά από την κατακόρυφη συνιστώσα.

✓ Οι συγγραφείς τονίζουν ότι οι σύγχρονοι κανονισμοί πρέπει να σταματήσουν να θεωρούν ότι η κατακόρυφη συνιστώσα είναι η ίση με τα $2/3$ της οριζόντιας. Και αυτό γιατί έρευνες των **Abrahamson and Silva** έδειξαν ότι ναι μεν το “Φάσμα $2/3$ ” δίνει συντηρητικά αποτελέσματα στα κατακόρυφα εντατικά μεγέθη καταστρώματος αλλά στο αξονικό φορτίο βάθρων δεν προσεγγίζει καθόλου σωστά την πραγματικότητα.

✓ Η μείωση της ακαμψίας του καταστρώματος λόγω ρηγμάτωσης μειώνει την επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας.

✓ Η γρήγορη άφιξη του κύματος της κατακόρυφης συνιστώσας δεν δείχνει να έχει ιδιαίτερη επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών.

✓ Εύκαμπτες θεμελιώσεις δίνουν μεγαλύτερους συντελεστές εντατικών μεγεθών $(3-2)/DL$ που σημαίνει ότι υποφέρουν από την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού. Οι πλήρεις πακτώσεις θεμελιώσεων ωστόσο δίνουν μεγαλύτερες απόλυτες τιμές εντατικών μεγεθών σε τρισδιάστατη σεισμική φόρτιση.

Μη Γραμμική Ανάλυση

Η γέφυρα 6 αναλύθηκε & μη γραμμικά εξαιτίας της ευαισθησίας της στην επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού. Πλαστικές αρθρώσεις επιτράπηκαν στην κορυφή και στη βάση των βάθρων ενώ όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της γέφυρας συμπεριλαμβανόμενων των στοιχείων θεμελίωσης δεν επιτράπηκαν να διαρρεύσουν. Για την μη γραμμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSR-II.

Από τη σύγκριση της γραμμικής (SAP2000) και της μη γραμμικής ανάλυσης (ANSR-II) προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

✓ Η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα βάθρα δεν αλλάζει σημαντικά την επιπρόσθετη απόκριση εξαιτίας της κατακόρυφης συνιστώσας σε σχέση με την περίπτωση που ανελαστικά φαινόμενα δεν λαμβάνονται υπόψη.

✓ Η διαπίστωση ότι ‘η μείωση της ακαμψίας του καταστρώματος λόγω ρηγμάτωσης κατά τη διάρκεια του σεισμού περιορίζει τις επιπτώσεις της κατακόρυφης σεισμικής δράσης’ συνεχίζει να ισχύει ακόμα και όταν πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται στους στύλους.

✓ Συμπεριλαμβάνοντας μη γραμμική συμπεριφορά στους στύλους η σεισμική απόκριση κατά το οριζόντιο επίπεδο επηρεάζεται πάρα πολύ παρόλο που οι οριζόντιες μετατοπίσεις δεν αλλάζουν σημαντικά.

✓ Οι συντελεστές $(3-2)/DL$ είναι λίγο μεγαλύτεροι αλλά βασικά οι ίδιοι τόσο για τη γραμμική όσο και τη μη γραμμική ανάλυση της συγκεκριμένης γέφυρας.

- **Effect of Vertical Motions on Seismic Response of Highway Bridges** by Martin R. Button, Coleman J. Cronin and Ronald L. Mayes – Journal of Structural Engineering / December 2002

Αυτή η δημοσίευση (έτος 2002) ουσιαστικά δε διαφέρει ως προς το περιεχόμενο της από την προηγούμενη (έτος 1999). Απλά είναι πιο περιληπτική και οι συγγραφείς τονίζουν μόνο τα συμπεράσματα της ερευνητικής προσπάθειας χωρίς να αναφέρονται καθόλου σε ειδικές λεπτομέρειες, οι οποίες ούτως ή άλλως έχουν αναφερθεί παραπάνω στην πρώτη δημοσίευση το έτος 1999. Ωστόσο τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των εξαγομένων είναι πιο ολοκληρωμένα.

Κατ' αρχάς γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά της κίνησης του εδάφους. Τονίζεται η γρήγορη άφιξη των κυμάτων της κατακόρυφης σεισμικής δράσης με μικρή περίοδο σε σχέση με τις οριζόντιες δράσεις ενώ σημειώνονται και οι διαφορές των φασμάτων απόκρισης της κατακόρυφης και οριζόντιων συνιστωσών του σεισμού. Αναφέρεται ότι στην περιοχή των μικρών περιόδων της τάξης του 0,10sec το κατακόρυφο φάσμα απόκρισης μπορεί να ξεπερνά τις τιμές του οριζόντιου φάσματος όταν οι επικεντρική απόσταση του σεισμού είναι μικρή. Αντίθετα για μεγάλες αποστάσεις και για περιόδους μεγαλύτερες των 2sec τα φάσματα κατακόρυφης και οριζόντιας κίνησης συμπίπτουν. Συνεπώς η χρήση του κανόνα που αναδεικνύουν οι περισσότεροι κανονισμοί ότι το κατακόρυφο φάσμα απόκρισης ισούται με τα 2/3 του οριζόντιου δεν είναι απολύτως ορθή αφού παρατηρούνται οι προαναφερθείσες αποκλίσεις οι οποίες στις μικρές περιόδους είναι παρά πολύ μεγάλες.

Στη συνέχεια γίνεται λόγος για το αντιπροσωπευτικό δείγμα των έξι γεφυρών, τα χαρακτηριστικά τους και τα μοντέλα τους όπως δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα ανάλυσης SAP2000. Για την εφαρμογή της φασματικής ανάλυσης γίνεται ειδική μνεία ότι τα οριζόντια φάσματα απόκρισης που εφαρμόστηκαν προέκυψαν από εμπειρικές μειωτικές σχέσεις των **Sadigh and others** και **Abrahamson and Silva**. Παράλληλα τα κατακόρυφα φάσματα απόκρισης προέκυψαν από τα οριζόντια με τους V/H συντελεστές του **Silva**.

Όπως και στη δημοσίευση του 1999 έτσι και εδώ γίνεται εκτενής αναφορά στα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης με όλες τις παραμέτρους που εισάχθηκαν. Οι παράμετροι περιελάμβαναν μεταβλητές επικεντρικές αποστάσεις, μεγέθη σεισμών και τύπων εδαφών. Κάθε γέφυρα αναλύθηκε με δυο περιπτώσεις φορτίων, α) με τη δισδιάστατη οριζόντια δράση και β) υπό τρισδιάστατη σεισμική καταπόνηση. Μετρήθηκε μια μεγάλη ποικιλία από μετατοπίσεις και εντατικά μεγέθη τα οποία παρουσιάστηκαν με τη μορφή γραφημάτων σε συνάρτηση με την επικεντρική απόσταση. Στα γραφήματα τα εντατικά μεγέθη (αξονικό φορτίο βάθρων, κλπ) δεν εμφανίζονται με την απόλυτη τιμή τους αλλά με το γνωστό συντελεστή (3-2)/DL για να τονιστεί η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού & αν αυτή μπορεί να αγνοηθεί ή όχι.

Ακόμα τονίζεται η επίδραση της μεταβλητής ακαμψίας του καταστρώματος και της ευκαμψίας της θεμελίωσης στη σεισμική συμπεριφορά των γεφυρών 4 & 6. Οι αναλύσεις ολοκληρώνονται με τη μη γραμμική ανάλυση της γέφυρας 6 για να διαπιστωθεί η τυχούσα επιρροή που μπορεί να έχει η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στους στύλους στη συνολική σεισμική απόκριση της κατασκευής.

Οι συγγραφείς κλείνουν την δημοσίευσή τους με τα εξής συμπεράσματα, που αναμενόμενα δε διαφέρουν κατά πολύ με αυτά της εργασίας τους το 1999:

- ✓ Η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας αυξάνει σημαντικά όταν η γέφυρα έγκειται κοντά ολοένα και περισσότερο σε ρήγμα.

- ✓ Οι τιμές των εντατικών μεγεθών της οριζόντιας απόκρισης δεν επηρεάζονται σημαντικά από την κατακόρυφη σεισμική δράση.

- ✓ Τα γραφήματα που παρήχθησαν κατά την εργασία παρέχουν **DL** πολλαπλασιαστές που μπορούν να αναιρέσουν με απλή προσαύξηση των νεκρών φορτίων την ανάγκη εισαγωγής της κατακόρυφης συνιστώσας στην ανάλυση. Ωστόσο για μικρές αποστάσεις της γέφυρας από το ρήγμα (λιγότερο από 10 - 20km) κρίνεται ορθό να αναλυθεί η γέφυρα και με την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού παρά να χρησιμοποιηθούν παρά πολύ μεγάλοι πολλαπλασιαστές **DL**.

- ✓ Οι γέφυρες που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό ιδιομορφικής μάζας να κείται στο εύρος της μέγιστης κατακόρυφης φασματικής επιτάχυνσης δέχονται και την μεγαλύτερη επιρροή από την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού.

- ✓ Οι τιμές των εντατικών μεγεθών φασματικής ανάλυσης όπως προκύπτουν από ορθολογιστικά κατακόρυφα φάσματα απόκρισης μπορεί να είναι έως και 40% μεγαλύτερες ή μικρότερες από αυτές που απορρέουν από ανάλυση με κατακόρυφα φάσματα απόκρισης ίσα με τα 2/3 των οριζόντιων.

- ✓ Η γρήγορη άφιξη του κύματος της κατακόρυφης συνιστώσας δεν δείχνει να έχει ιδιαίτερη επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών.

- ✓ Μη γραμμική συμπεριφορά των στύλων επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής από οριζόντιες δράσεις παρόλο που οι μετατοπίσεις παραμένουν περίπου οι ίδιες.

- ✓ Η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού δεν επηρεάζει αρκετά τις τιμές των οριζόντιων εντατικών μεγεθών παρά τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στους στύλους.

1.3` Κανονιστικές διατάξεις

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τα αποσπάσματα των κυριότερων κανονισμών που αναφέρονται στη κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού. Συγκεκριμένα, το Παράρτημα Α περιλαμβάνει τα σχετικά αποσπάσματα από τους Κανονισμούς:

ΕΑΚ 2000
Ευρωκώδικας 8 Μέρος 1 – Γενικά και κτίρια
Ευρωκώδικας 8 Μέρος 2 – Γέφυρες
Οδηγίες ΥΠΕΧΩΔΕ για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό Γεφύρων
SEAOC
International Building Code 2000
UBC
CALTRANS

Λόγω της σημασίας και σπουδαιότητάς τους, στο Παράρτημα Α έχουν επίσης περιληφθεί και οι αναλυτικές κανονιστικές προτάσεις, για εφαρμογή σε γέφυρες, της ομάδας των Button, Colman, Cronin και Mayers καθώς και η πρόταση του AASHTO σχετικά με την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε ένα μονωτήρα και που περιέχεται στο “Interim guide specification for seismic isolation design” (2000).

Από μία ανάλυση των Κανονιστικών διατάξεων διαφαίνεται μία μεγάλη διαφοροποίηση των κανονισμών μεταξύ τους κυρίως σε ότι αφορά το φάσμα της κατακόρυφης απόκρισης (από το 0.50 έως το 0.70 της οριζοντίας) την τιμή του δείκτη συμπεριφοράς στην κατακόρυφο έννοια (από 1 έως 0.50 q_{horiz}) και το πότε (πάντα, ενίοτε, καθόλου) και για τον σχεδιασμό ποιών στοιχείων (προεντεταμένα στοιχεία, πρόβολοι, φυτευτά υποστυλώματα, εφέδρανα γεφυρών, κλπ) πρέπει να ληφθεί υπόψη η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού.

Είναι αξιοπαρατηρητό επίσης ότι άλλοι κανονισμοί (π.χ. Caltrans) δέχονται την αντικατάσταση του ελέγχου στην κατακόρυφη συνιστώσα από ένα έλεγχο σε αυξημένα ή μειωμένα μόνιμα φορτία και άλλοι όχι (Ευρωκώδικας 8). Αλλά και εκείνοι που το δέχονται διαφέρουν τόσο στο μέγεθος του πρόσθετου φορτίου όσο και στις συνθήκες κάτω από τις οποίες επιτρέπεται μία τέτοια διαδικασία (ένταση σεισμού, απόσταση από ρήγμα, κλπ).

Είναι λοιπόν φανερό, από μία επισκόπηση των κανονιστικών διατάξεων ότι, σε αντίθεση με τους παράγοντες του σεισμικού σχεδιασμού σε οριζόντια καταπόνηση (επιτάχυνση, φάσμα, απόκριση κατασκευών, επιρροή των ιδιομορφών, δείκτες συμπεριφοράς, κλπ.) όπου υπάρχει μία γενική ταύτιση των διατάξεων των διάφορων κανονισμών, στην περίπτωση της κάθετης συνιστώσας του σεισμού ή συμβολή των παραγόντων αυτών αντιμετωπίζεται διαφορετικά και ενίοτε αντιφατικά από Κανονισμό σε Κανονισμό.

Χαρακτηριστική της ρευστότητας των κανονιστικών διατάξεων στα θέματα της κατακόρυφης συνιστώσας είναι η εξέλιξη των σχετικών διατάξεων στον Ευρωκώδικα 8. Στον ισχύοντα σήμερα Κανονισμό χρησιμοποιείται το φάσμα απόκρισης στην οριζόντια διεύθυνση πολλαπλασιασμένο επί ένα μειωτικό συντελεστή 0.50 έως 0.70 για περιόδους $\leq 0.15\text{g}$ και $\geq 0.50\text{g}$ αντίστοιχα. Στην έκδοση που ψηφίστηκε τον Απρίλιο του 2004 και θα αρχίσει να ισχύει μέσα στο 2005 ισχύουν τα εξής:

- Οι εξισώσεις που ορίζουν τα οριζόντια και κατακόρυφα φάσματα απόκρισης είναι οι ίδιες με τις εξής δύο διαφορές:
 - Ο εδαφικός συντελεστής S είναι πάντα 1.0 για την κατακόρυφη διέγερση.
 - ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης β_0 λαμβάνεται ίσος με 2.50 στην οριζόντια (όπως παλαιότερα) και ίσος με 3.0 στην κατακόρυφη διεύθυνση.
- ο λόγος α_{vg}/α_g λαμβάνεται ίσος με 0.90 για σεισμούς τύπου 1 και 0.45 για σεισμούς τύπου 2 με τους σεισμούς τύπου 1 να αντιστοιχούν σε μεγαλύτερης εντάσης σεισμούς και σε περιοχές πιο κοντά στο επίκεντρο.
- για τον καθορισμό των παραμέτρων T_B , T_C και T_D που ορίζουν το κατακόρυφο φάσμα λαμβάνονται σε όλες τις περιπτώσεις οι ίδιες τιμές, ανεξάρτητα του εδάφους ή του τύπου του σεισμού (οι τιμές αυτές περιέργως αντιστοιχούν περίπου σε βράχο για σεισμό τύπου 2).

Βλέπουμε δηλαδή ότι ενώ γίνεται μία προσπάθεια κάποιας συσχέτισης της κάθετης συνιστώσας με την απόσταση από το ενεργό ρήγμα (μεγαλύτερες τιμές του λόγου α_{vg}/α_g για τους σεισμούς τύπου 1) ή έλλειψη οποιασδήποτε συσχέτισης της κατακόρυφης συνιστώσας με το έδαφος που εισάγεται τώρα έρχεται σε πλήρη αντίφαση με τα μέχρι σήμερα δεδομένα (θεωρητικά, τεκμηρίωση, κανονιστικά). – Ευτυχώς το γεγονός ότι δίνεται η δυνατότητα σε κάθε κράτος να ορίζει τους δικούς του παράμετρους αμβλύνει τις συνέπειες μιάς τέτοιας αντιφατικής διατάξης του Ευρωκώδικα 8 –

2. Τεκμηρίωση της δράσης της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού

2.1 Γενικά

Οι πρόσφατοι σεισμοί της Αθήνας (Πάρνηθα 7-9-99) αποτέλεσαν μία αδιάψευστη τεκμηρίωση του φαινομένου και της συμβολής της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού στις καταρρεύσεις πολλών κτιρίων. Χαρακτηριστική είναι η σχετική με την κατακόρυφη συνιστώσα έκθεση της “Επιτροπή ελέγχου εφαρμογής κείμενης νομοθεσίας και των αιτίων κατάρρευσης κτιρίων κατά τον σεισμό του 7-9-99” που συνέστησαν τα Υπουργεία Δικαιοσύνης και ΥΠΕΧΩΔΕ και που αποτελείτο από 13 εμπειρογνώμονες σε θέματα σεισμού. Η έκθεση αυτή την οποία συνέταξε το μέλος της Επιτροπής κ. Α. Πλάκας (που είναι και στέλεχος της παρούσας ερευνητικής ομάδας) εγκρίθηκε ομόφωνα από όλα τα μέλη της Επιτροπής που προαναφέρθηκε.

Η έκθεση αυτή παρατίθεται αυτούσια στη συνέχεια καθόσον αποτελεί βασικό στοιχείο τεκμηρίωσης της δράσης της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού, δεδομένου ότι εκφράζει την ομόφωνη άποψη κορυφαίων Ελλήνων εμπειρογνομόνων σε θέματα σεισμού.

2.2` Χαρακτηριστικές περιπτώσεις

Σε ότι ακολουθεί παρουσιάζονται ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις καταρρεύσεων ή βλαβών όπου η κατάρρευση ή βλάβη είτε αποδίδεται απ' ευθείας στη κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού ή δεν μπορεί να αιτιολογηθεί χωρίς αναφορά στη συμβολή της συνιστώσας αυτής. Έχουν χρησιμοποιηθεί παραδείγματα από τους πιο πρόσφατους σεισμούς (Αιγίου 1996 και Πάρνηθας 1999) με τους οποίους τα στελέχη της παρούσας ερευνητικής ομάδας κκ. Καρύδης και Πλάκας είχαν άμεση σχέση και πληροφόρηση ως μέλη των Επιτροπών που διερεύνησαν τα αίτια των καταρρεύσεων που παρατηρήθηκαν κατά τους σεισμούς αυτούς.

- α) Κατα τον σεισμό του Αιγίου πολλά υποστυλώματα του ισογείου ενός μοντέρνου και καλά μελετημένου κτιρίου υπέστησαν ανεπανόρθωτες βλάβες, κυρίως στην κεφαλή τους, που μπορεί να αποδοθούν στον εγκλοβισμό των κατακόρυφων κυμάτων P - που συνδέονται με την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού – στο πάνω μέρος των υποστυλωμάτων κάτω από την μεγάλη μάζα της πλάκας. Η συμβολή της κατακόρυφης συνιστώσας στην περίπτωση αυτή ενισχύεται και από δύο πρόσθετες παρατηρήσεις: Αφ' ενός μεν οι σημαντικής έκτασης υαλοπίνακες έμειναν άθικτοι, πράγμα που σημαίνει μικρές οριζόντιες δράσεις και αφ' ετέρου ο σιδηροπλισμός των υποστυλωμάτων εμφανίζει έντονο λυγισμό, που με τη σειρά του σημαίνει σημαντικές κατακόρυφες δράσεις (εικόνες 1α, 1β)



εικόνα 1α

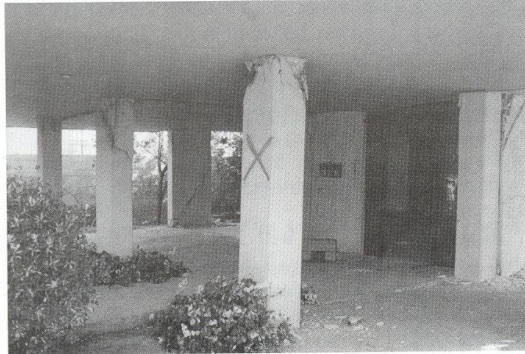


εικόνα 1β

- β) Περιπτώσεις ανάλογες με την παραπάνω περίπτωση του Αιγίου παρατηρήθηκαν και σε πολλά κτίρια κατά τον σεισμό της Πάρνηθας. Αντιπρόσωπτικές των περιπτώσεων αυτών είναι οι εικόνες 2α και 2β. Η πρώτη δείχνει τις βλάβες και τον λυγισμό του οπλισμού στα εσωτερικά υποστυλώματα του ισογείου ενός μοντέρνου κτιρίου και η δεύτερη τους άθικτους υαλοπίνακες στην είσοδο του κτιρίου.

Δεν υπάρχουν ενδείξεις σημαντικών οριζοντίων μετακινήσεων και το γεγονός ότι πρόκειται για εσωτερικά υποστυλώματα ενισχύει την άποψη ότι η σημαντική κατακόρυφη δράση σ' αυτά δεν μπορεί να αποδοθεί σε ροπές ανατροπής. Έτσι μία λογική εξήγηση του

φαινομένου οδηγεί στην ύπαρξη μιας σημαντικής κατακόρυφης συνιστώσας που ενισχύεται και από το γεγονός ότι δεν έχουν σπάσει οι υαλοπίνακες στην είσοδο του κτιρίου, ένδειξη περιορισμένης οριζόντιας δράσης.

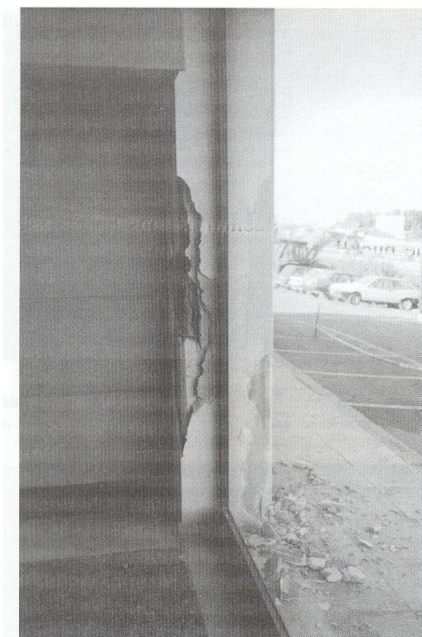


εικόνα 2α



εικόνα 2β

- γ) Η περίπτωση αστοχίας που απεικονίζεται στις εικόνες 3α και 3β, πάλι από τον σεισμό της Πάρνηθας, δείχνει έντονες βλάβες και λυγισμό του σιδηροπλισμού στη μεσαία περίπου διατομή υποστυλωμάτων. Δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές στα άνω ή στα κάτω άκρα των υποστυλωμάτων, πράγμα που θα συνέβαινε εαν είχαμε σημαντική οριζόντια δράση. Επίσης, οι υαλοπίνακες του κτιρίου έμειναν άθικτοι, σημάδι και αυτό περιορισμένης οριζόντιας δράσεις. Ως εκ τούτου οδηγούμεθα και πάλι στην συμβολή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού για μία λογική εξήγηση του τι συνέβη.



εικόνα 3α



εικόνα 3β

- δ) Η περίπτωση που απεικονίζεται στην εικόνα 4 φαίνεται να είναι μία κλασσική περίπτωση “κοντου υποστυλώματος”. Καθώς όμως δεν υπάρχει ένδειξη οριζόντιας μετατόπισης ή καθοριστική επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας είναι μία *sine qua non* συνθήκη μιας λογικής επεξήγησης του φαινομένου.



εικόνα 4

- ε) Ανάλογα με την προηγούμενη είναι και η περίπτωση αστοχίας των κοντών υποστυλωμάτων του κτιρίου της εικόνας 5 όπου κανένα από πάρα πολλά τζάμια του κτιρίου δεν έσπασε και ούτε υπάρχουν ενδείξεις κάποια σημαντικής οριζόντιας κίνησης. Εικάζεται ως εκ τούτου ότι καθώς η οριζόντια δράση ήταν περιορισμένη ο πραγματικός λόγος της αστοχίας πρέπει να αναζητηθεί στη συμβολή της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού.



εικόνα 5

- στ) Η εικόνα 6 δείχνει τις σοβαρές βλάβες στους τοίχους ενός κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα. Δεδομένου ότι σε ένα τοίχο από κλασσική τοιχοποιία (τούβλα) η διάταξη των βλαβών που οφείλονται σε πλευρικές δράσεις είναι παρόμοια με αυτών που οφείλονται σε κατακόρυφες δράσεις και ότι στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχουν ενδείξεις σημαντικής οριζόντιας μετατόπισης είναι λογικό να

αποδοθούν οι βλάβες στη επίδραση βασικά της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού.



εικόνα 6



εικόνα 7

- ζ) Στην περίπτωση του κτιρίου της εικόνας 7 τα υποστυλώματα της πιλοτής διέτρησαν την πλάκα σκυροδέματος του δαπέδου του πρώτου ορόφου. Εικάζεται ότι τούτο οφείλεται στην κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού καθώς και εδώ δεν υπάρχουν κάποιες ενδείξεις οριζοντίων μετατοπίσεων.
- η) Η εικόνα 8 αποτελεί μια ακόμη περίπτωση όπου η αστοχία των υποστυλωμάτων σε συνδυασμό με τον λυγισμό των σιδηροπλισμών την διάταξη των ρωγμών και την απουσία ενδείξεων πλευρικής μετατόπισης οδηγούν στην καθοριστική συμβολή στην αστοχία της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού.



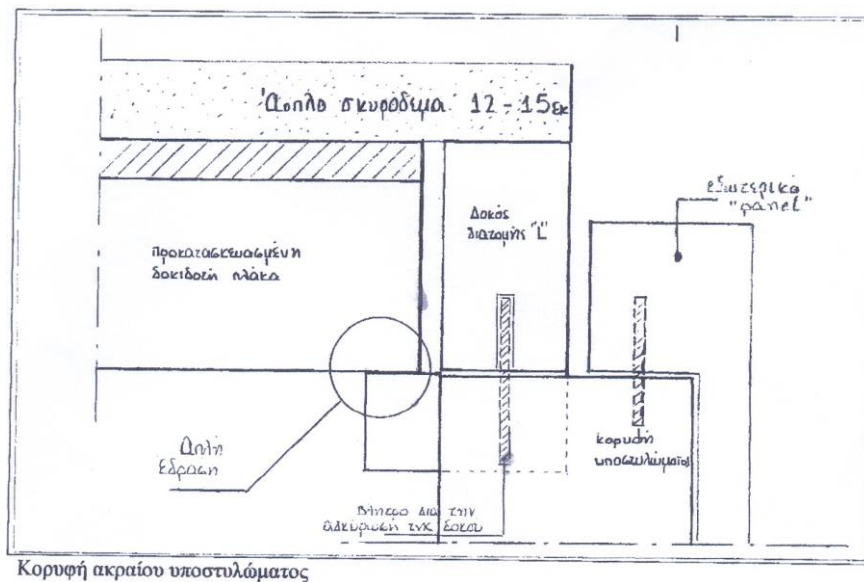
εικόνα 8



εικόνα 9

- θ) Υπήρχαν επίσης περιπτώσεις όπου μόνο ένα τμήμα του κτιρίου κατέρρευσε, ενώ το υπόλοιπο παρέμεινε σχεδόν ανέπαφο. Στην περίπτωση του κτιρίου της εικόνας 9, η κατάρρευση θα μπορούσε να αποδοθεί τόσο στην πλημμελή κατασκευή του τμήματος που κατέρρευσε όσο και στην κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού καθώς τα ανέπαφα τζάμια του τμήματος που δεν κατέρρευσε αποτελούν στοιχεία περιορισμένης οριζόντιας δράσης.
- ι) Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί και η περίπτωση του κτιρίου με προκατασκευασμένες πλάκες μορφής π που εδράζοντο απ' ευθείας σε προκατασκευασμένους δοκούς που με τη σειρά τους ακουμπούσαν χωρίς σύνδεση και πάλι σε φουρούσια

υποστυλωμάτων (εικόνα 10). Κατά την αστοχία τα υποστυλώματα παρέμειναν στη θέση τους ενώ οι δοκοί, άλλοι έμειναν στη θέση τους και άλλοι απλώς έπεσαν στο έδαφος, χωρίς όμως να παρουσιάσουν ενδείξεις καμπτικής ή αλλης αστοχίας. Αντιθέτως όλες οι πλάκες αστόχησαν, προφανώς κάτω από το ίδιο βάρος τους, τα βαριά φορτία που έφεραν και την επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας. Επισημαίνεται ότι λόγω των μη μονολιθικών συνδέσεων δεν υπήρχε επαύξηση του φορτίου στις πλάκες λόγω της οριζόντιας δράσης του σεισμού. Έτσι, η αστοχία των πλακών μπορεί να αποδοθεί είτε σε πλευρικές μετακινήσεις και απώλεια στήριξης (λόγω και της μερικής στροφής της στήριξης λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας) ή στην αύξηση της καταπόνησης των πλακών από την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού. Επισημαίνεται ότι η αστοχία του κτιρίου αυτού απετέλεσε και το ένευσμα για την πρόταση άμεσης τροποποίησης του Κανονισμού, σε ότι αφορά το έλεγχο στη κατακόρυφη συνιστώσα προκατασκευασμένων στοιχείων με πλημμελή σύνδεση, που αναφέρεται στο εδάφιο 2.1 παραπάνω.



εικόνα 10

3. Περιγραφή και χαρακτηριστικά της κατακόρυφης σεισμικής κίνησης

3.1 Γενικά

Σε μία σωστή διαδικασία αντιμετώπισης του σεισμικού φαινομένου είναι πρωταρχικής σημασίας να σχηματίσουμε μια όσο το δυνατόν πιο σαφή εικόνα της πραγματικής κίνησης του εδάφους κατά τη διάρκεια του σεισμού προτού προβούμε σε οποιαδήποτε εκτίμηση της συμπεριφοράς της κατασκευής.

Τα χαρακτηριστικά του σεισμικού κραδασμού διαφοροποιούνται ποιοτικά και ποσοτικά από τη μία θέση στην άλλη και ιδιαίτερα έντονα μέσα στην επικεντρική περιοχή. Έτσι πολύ μικρή σχέση μπορεί να έχουν οι καταγραφές των επιταχυνσιογράφων εκτός πλειόσειστης περιοχής με αυτό που πραγματικά συμβαίνει μέσα στις διάφορες θέσεις της περιοχής.

Από την άλλη μεριά η σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών συσχετίζεται ευθέως με τον σεισμικό κραδασμό όπως αυτός διεγείρει την κατασκευή. Γενικά η σεισμική διέγερση έχει 6 βαθμούς ελευθερίας η οποία διαδίδεται κατά μήκος της θεμελίωσης της κατασκευής με κάποια ταχύτητα. Επομένως η κατασκευή διεγείρεται διαφορετικά σε κάθε σημείο της ως προς τον χρόνο, το εύρος και τη συχνότητα. Η διέγερση ξεκινάει πάντοτε από τα σημεία της κατασκευής που βρίσκονται πιο κοντά στην εστία του σεισμού.

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού αναπτύσσονται, ως γνωστόν, τα κύματα χώρου (P-Διαμήκη και S-Εγκάρσια) και τα κύματα επιφάνειας (R-Rayleigh και L-Love). Σε κατασκευές δε με υλικά όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα ή ο χάλυβας τα κύματα διαδίδονται ταχύτερα από ότι στο έδαφος, και είναι αναμενόμενο μέσα στο σώμα της κατασκευής να εμφανίζονται σημεία συμβολής των κυμάτων (κρασσοί) όπου και παρατηρείται συγκέντρωση υψηλών τάσεων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών δεν γίνεται ούτε μπορεί να γίνει διαχωρισμός ως προς την προέλευση του κάθε σεισμικού κραδασμού. Εκείνο που έχει σημασία είναι η προκύπτουσα οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμικού κραδασμού που, λόγω της φύσεως των κυμάτων που τις προκαλούν είναι ασυγχρότιστη η μία με την άλλη.

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι να τεκμηριωθεί περαιτέρω αυτό που αναπτύξαμε προηγουμένως στα κεφάλαια 2. “Τεκμηρίωση της δράσης της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού” και 1.3 “Κανονιστικές διατάξεις” δηλαδή ότι α) η κατακόρυφη συνιστώσα είναι από τα βασικά αίτια καταστροφών από σεισμούς καθώς αποτελεί δεσπόζουσα παράμετρο στις επικεντρικές περιοχές επιφανειακών σεισμών και β) η κατακόρυφη συνιστώσα, όπως αντιμετωπίζεται σήμερα από τους Αντισεισμικούς Κανονισμούς πολύ μικρή σχέση έχει με αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα

3.2 Η σεισμική καταπόνηση των κατασκευών

Η θεμελιώδης απαίτηση σωστής σεισμικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής, σύμφωνα με τους Αντισεισμικούς Κανονισμούς, είναι η αποφυγή κατάρρευσης, όσο μεγαλύτερη κι αν είναι η ένταση του σεισμού από τον σεισμό σχεδιασμού, να είναι περιορισμένες και επιδιορθώσιμες οι βλάβες από τον σεισμό σχεδιασμού και να διασφαλίζεται μία ελάχιστη στάθμη λειτουργιών του δομήματος ανάλογα με τη χρήση του.

Αυτές όμως οι απαιτήσεις δεν μπορούν να διασφαλιστούν αν το δόμημα δεν έχει σχεδιασθεί και κατασκευαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση που αναπτύσσεται στα διάφορα μέλη του, κατά την διάρκεια ενός σεισμού, να έχει κάποια αναλογία με τα εντατικά μεγέθη που έχουν ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό. Είναι προφανές ότι κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει σε μία κατασκευή που ενώ έχει σχεδιασθεί για οριζόντια σεισμική φόρτιση καταπονείται από την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού.

Έχει αποδειχθεί και πειραματικά ότι όταν διεγείρουμε μία κατασκευή με διαδοχικούς σεισμούς που έχουν αυξανόμενη ένταση αλλά προκαλούν εντατική κατάσταση παρόμοια με αυτή για την οποία έχει σχεδιαστεί η κατασκευή τότε, λόγω και της ανάπτυξης σημαντικών μηχανισμών απόσβεσης, μπορεί να πετύχουμε διεγέρσεις 2 και 3 φορές μεγαλύτερες από τον σεισμό σχεδιασμού, χωρίς κατάρρευση. Αντίθετα όταν η διέγερση και η συμπεριφορά της κατασκευής δεν ακολουθούν αυτή την αρχή της αναλογίας είχαμε κατάρρευσες και για μικρότερης έντασης σεισμούς και χωρίς να έχει εξαντληθεί η αντισεισμική ικανότητα της κατασκευής, καθώς οι αναπτυσσόμενοι μηχανισμοί απόσβεσης σ'αυτήν την περίπτωση είναι γενικά πολύ μικροί.

Είναι προφανές ότι στην τελευταία αυτή περίπτωση εντάσσονται και οι καταρρεύσεις που οφείλονται στην κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού καθώς, με βάση τους Αντισεισμικούς Κανονισμούς τα δομήματα μελετώνται και κατασκευάζονται μόνο για την αντιμετώπιση της δράσης σεισμικών γεγονότων από μέσες αποστάσεις και άνω και όχι για να αντιμετωπίσουν με αξιοπιστία και τη δράση γειτονικών σεισμών στην πλειόσειστη περιοχή, εκεί όπου η κατακόρυφη συνιστώσα έχει μεγάλες τιμές και υψηλή συχνότητα.

3.3 Η σεισμική διέγερση στην επικεντρική περιοχή

- Μια κατασκευή δεν αποτελεί ένα σημείο επάνω στο έδαφος αλλά χαρακτηρίζεται από ορισμένες διαστάσεις. Οι διαστάσεις αυτές παίζουν όλο και σημαντικότερο ρόλο στον τρόπο διέγερσης της κατασκευής όσο η κατασκευή βρίσκεται πιο κοντά στην εστία του σεισμού. Έτσι μπορεί να ερμηνευτεί και το γεγονός ότι παρατηρείται πολύ μεγάλη μεταβλητότητα των σεισμικών δονήσεων σε γειτονικά σημεία μέσα στην επικεντρική περιοχή.
- Από μακροσεισμικές παρατηρήσεις της συμπεριφοράς διαφόρων αντικειμένων προκύπτει ότι στην επικεντρική περιοχή σε πλείστους όσους επιφανειακούς σεισμούς οι επιταχύνσεις ήταν της τάξεως του $1g$. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμικού κραδασμού είναι ιδιαίτερα έντονη πάνω στο έδαφος ή στους χαμηλούς ορόφους κτιρίων, ενώ στους υψηλούς ορόφους είναι λιγότερο αισθητή.
- Ο κλασικός επιταχυνσιογράφος διαθέτει φίλτρα κάτω διαβάσεως, τα οποία αρχίζουν να κόβουν επιταχύνσεις με υψηλότερες συχνότητες από περίπου 25Hz . Επομένως, και αν ακόμη συνέβαινε να υπάρχει επιταχυνσιογράφος στην επικεντρική περιοχή ενός ισχυρού σεισμού δεν είναι σίγουρο ότι θα παίρναμε τις πληροφορίες που θέλουμε μία και ενδιαφερόμαστε για επιταχύνσεις σε υψηλότερες συχνότητες. Έτσι, ενώ το φάσμα ενός κρουστικού τύπου κραδασμού, ο οποίος δεσπόζει στην επικεντρική περιοχή, είναι επίπεδο στο πεδίο των συχνοτήτων, θα λαμβάναμε ένα φάσμα μικρότερου πλάτους μία και κόβονται οι υψηλότερες συχνότητες που μας ενδιαφέρουν στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως και οι αντιστοιχούσες σ' αυτές υψηλές επιταχύνσεις. Η αντίθετη οριακή περίπτωση για να έχουμε ένα πολύ στενό φάσμα είναι ο κραδασμός να μοιάζει με κάποια ημιτονική κίνηση. Επειδή λοιπόν το φάσμα στην επικεντρική περιοχή είναι επίπεδο, στην περιοχή αυτή οι ιδιοπερίοδοι των κατασκευών και όλα τα συναφή θέματα της κλασικής δυναμικής παίζουν ένα αρκετά περιορισμένο ρόλο στη συμπεριφορά των κατασκευών.
- Η κλασική έννοια του συντονισμού των κατασκευών ως συνέπεια της σεισμικής διέγερσης στην επικεντρική περιοχή δεν έχει νόημα, λόγω του κρουστικού τύπου και της μικρής διάρκειας σεισμικού κραδασμού. Ο σεισμός αυτού του συγκεκριμένου τύπου δεν κάνει διάκριση και επομένως δεν υπάρχει επιλεκτικότητα ως προς τα δυναμικά χαρακτηριστικά των κατασκευών (ύψος, ακαμψία, μαζες, κ.α.).
- Όσο πλησιάζουμε προς το επίκεντρο επιφανειακών σεισμών τόσο η κατακόρυφη συνιστώσα είναι εντονότερη. Το αναδυόμενο κύμα χώρου P δημιουργεί τα επιφανειακά κύματα Rayleigh και ο συνδυασμός των δύο αυτών κυμάτων έχει προκαλέσει

καταρρεύσεις, όπου πρωταγωνιστικό ρόλο παίζει η κατακόρυφη συνιστώσα, ακόμα και για μέτριου μεγέθους γειτονικούς σεισμούς.

4. Συμπεράσματα και προτάσεις

Από τη σύγκριση τόσο των σχετικών ερευνητικών εργασιών όσο και των σημερινών κανονιστικών διατάξεων είναι προφανές ότι οι υφιστάμενες κανονιστικές διατάξεις δεν αντιμετωπίζουν επαρκώς και με την απαιτούμενη ασφάλεια και σαφήνεια το θέμα της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού. Είναι χαρακτηριστικό, σε ότι αφορά το θέμα αυτό, η διαφορετική αντιμετώπιση του από κανονισμό σε κανονισμό. Τούτο δεν οφείλεται μόνο στο γεγονός ότι όπως δείξαμε και στο μέρος 1.1 και 1.2 οι μέχρι σήμερα έρευνες στο τομέα της κατακόρυφης συνιστώσας είναι περιορισμένες αλλά και στο γεγονός που επίσης επισημάναμε στο 1.1 κυρίως, ότι πολλές από τις έρευνες αυτές καταλήγουν σε άκρως αντιφατικά αποτελέσματα και συμπεράσματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τελείως διαφορετικές εκτιμήσεις των βλαβών σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος που οφείλονται στην κατακόρυφη συνιστώσα μεταξύ των Elnashai και Ghobarah αφ' ενός και των Kikuchi, Dan και Yashiro αφ' ετέρου. Επειδή και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για θεωρητική και όχι εργαστηριακή έρευνα, η απάντηση μπορεί να προκύψει μόνο μετά και από μια εργαστηριακή, αυτή τη φορά, διερεύνηση του θέματος. Μία άλλη αντίφαση, που αφορά τους κανονισμούς αυτή τη φορά, είναι η ορθότητας και το πεδίο εφαρμογής της αντιμετώπισης της κατακόρυφης συνιστώσας μέσω της αυξομειώσης (και πόσο;) του ιδίου βάρους. Είναι λοιπόν απαραίτητη και μία εργαστηριακή υποστήριξη της διερεύνησης του ζητήματος της κατακόρυφης συνιστώσας. Η εργαστηριακή αυτή έρευνα που θα αποτελέσει και την δεύτερη φάση του παρόντος έργου θα έχει τον διπλό στόχο να εμπλουτίσει αφ' ενός τα δεδομένα επί των οποίων μπορεί να στηριχθούν κανονιστικές διατάξεις και να αρει αφ' ετέρου ορισμένες από τις καίριες αντιφάσεις που έχουν παρατηρηθεί και επισημανθεί (τόσο από ερευνητικής όσο και από κανονιστικής απόψης) στην προηγηθείσα αξιολόγηση της μέχρι σήμερα αντιμετώπισης της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού.

Για τους λόγους αυτούς και για την δυνατότητα σύγκρισης με τα, έστω και πολύ λίγα, υφιστάμενα πειραματικά δεδομένα η Β φάση του παρόντος έργου πρέπει να περιλάβει δοκιμές στη σεισμική τράπεζα στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα που θα καταπονηθούν τόσο σε συνδυασμούς οριζοντίων και κατακορύφων σεισμικών διεγέρσεων όσο και σε συνδυασμούς οριζόντιας διέγερσης και αυξομειώσης της φόρτισης για να ελεγχθεί και αυτός ο τρόπος προσέγγισης της κατακόρυφης συνιστώσας που έχει υιοθετηθεί από ορισμένους κανονισμούς.

Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει απαραίτητως να ερευνηθεί και τεκμηριωθεί τόσο θεωρητικά όσο και εργαστηριακά στη Β φάση είναι η συμβολή των εφεδράνων στην αντιμετώπιση της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού στις γέφυρες.

Από τα παραπάνω που δεν είναι παρά ένα δείγμα των θεμάτων που παραμένουν ανοικτά, προκύπτει ότι η πραγματοποίηση της κυρίως εργαστηριακής Β φάσης του παρόντος έργου είναι μία *sine qua non*

συνθήκη για την ρεαλιστική αντιμετώπιση του τόσο σημαντικού αλλά μέχρι σήμερα υποτιμημένου ζητήματος της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού.

ΠΑΡΑΤΗΜΑ Α

Κανονιστικές Διατάξεις που αφορούν την Κατακόρυφη Συνιστώσα του Σεισμού.

1. ΕΑΚ 2000
2. Ευρωκώδικα 8 Μέρος 1 – Γενικά και κτίρια
3. Ευρωκώδικα 8 Μέρος 2 – Γέφυρες
4. Οδηγίες ΥΠΕΧΩΔΕ για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό Γεφύρων
5. SEAOC (Σεισμολογικά)
6. SEAOC (Υπολογιστικά)
7. International Building Code 2000
8. Ευρωκώδικα 8 Μέρος 1 – Γενικά και κτίρια (Σχέδιο τροποποίησης που εγκρίθηκε)
9. CALTRANS
10. Κανονιστικές Προτάσεις (Button et al.)
11. AASHTO (Σεισμική μόνωση)