

## 2. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

### 2.1 Γενικά

Η σεισμική μόνωση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον σχεδιασμό των γεφυρών, λόγω διαφόρων πλεονεκτημάτων που σχετίζονται με κάποια ειδικά χαρακτηριστικά των κατασκευών αυτών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι γέφυρες είναι έργα στρατηγικής σημασίας, τα οποία απαιτούν υψηλό βαθμό προστασίας, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους μετά από ένα σεισμό μεγάλης έντασης. Είναι λοιπόν επιθυμητή και ιδιαίτερα βολική, η συγκέντρωση των ενδεχομένων ζημιών σε ορισμένα μηχανικά στοιχεία, τα οποία μπορούν εύκολα να ελεγχθούν και εφόσον απαιτείται, να αντικατασταθούν. Επιπλέον, το μεγαλύτερο μέρος της μάζας μιας γέφυρας είναι συγκεντρωμένο στο επίπεδο του καταστρώματος, το οποίο συνήθως σχεδιάζεται κατά τρόπο ώστε να παραμένει ελαστικό κατά την σεισμική δράση.

Μία πολύ συνηθισμένη δομική διάταξη γεφυρών, ιδιαίτερα στην Ευρώπη, είναι εκείνη του συνεχούς καταστρώματος το οποίο στηρίζεται σε εφέδρανα τοποθετημένα στο άνω άκρο των βάθρων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα εφέδρανα μπορούν να σχεδιαστούν ως διατάξεις σεισμικής μόνωσης, όπως ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (L.R.B.), επιλέγοντας την ακαμψία τους, την τάση διαρροής, και την ικανότητα οριακής παραμόρφωσης τους (ultimate elongation capacity), με βάση το επιθυμητό επίπεδο προστασίας και την αναμενόμενη σεισμική ένταση.

Λόγω του ότι οι γέφυρες είναι συνήθως απλές κατασκευές, όσον αφορά την σεισμική τους απόκριση, είναι πιο εύκολο να κατανοήσουμε μια κατάλληλη διόρθωση ανακατανομής της ακαμψίας από ότι σε μια πιο πολύπλοκη κατασκευή. Οι διατάξεις σεισμικής μόνωσης μπορούν λοιπόν να χρησιμοποιηθούν για την διόρθωση ή

κανονικοποίηση (ομαλοποίηση) της αναμενόμενης απόκρισης, προσδίδοντας ευκαμψία στα δύσκαμπτα βάθρα, αποφεύγοντας έτσι τυχόν ανεπιθύμητη συγκέντρωση απαίτησης πλαστιμότητας. Επιπλέον, οι γέφυρες έχουν συνήθως μεγάλες ιδιοπεριόδους, ιδιαίτερα όταν κάποια μη-γραμμική απόκριση είναι αποδεκτή και λαμβάνεται υπόψη. Μεγάλες μετατοπίσεις είναι τότε ήδη αναμενόμενες και αποδεκτές. Η προσθήκη λοιπόν, των διατάξεων σεισμικής μόνωσης μπορεί να έχει μικρή επίδραση στις μέγιστες μετακινήσεις, παρ' όλα αυτά εξασφαλίζει υψηλότερο επίπεδο προστασίας σε επιλεγμένα δομικά στοιχεία, και μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι το περιεχόμενο των συχνοτήτων της αναμενόμενης σεισμικής διέγερσης, μπορεί να είναι μεγίστης σημασίας στην περίπτωση των σεισμικά μονωμένων γεφυρών, ιδιαίτερα όταν ως σημαντική παράμετρος του σχεδιασμού θεωρείται η μετατόπιση της ιδιοπερίόδου, παρά η επιπρόσθετη απόσβεση. Αν η πιθανότητα εμφάνισης ενός φάσματος που χαρακτηρίζεται από μεγάλες αποκρίσεις στις υψηλές περιόδους δεν μπορεί να αποφευχθεί, η τεχνητή επιμήκυνση της περιόδου θα μπορούσε τότε να οδηγήσει σε καταστροφικά αποτελέσματα. Απαιτείται λοιπόν, λεπτομερής ανάλυση της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης, σε περιπτώσεις σεισμικής μόνωσης των γεφυρών.

## 2.2 Η Φιλοσοφία του Σχεδιασμού

Όπως συνήθως συμβαίνει στον αντισεισμικό σχεδιασμό, έτσι και στον σχεδιασμό των σεισμικά μονωμένων γεφυρών, δεν είναι ικανή μια απλή εφαρμογή μαθηματικών εξισώσεων και συντελεστών ασφάλειας, αλλά αντιθέτως, απαιτείται η κατανόηση και αποδοχή συγκεκριμένων στρατηγικών σχεδιασμού. Η στρατηγική σχεδιασμού των μη σεισμικά μονωμένων γεφυρών, θεωρεί ότι υπάρχουν συγκεκριμένα τμήματα της κατασκευής, τα άκρα των βάθρων, όπου σημαντική μη γραμμική συμπεριφορά είναι αποδεκτή και χρησιμοποιείται ως βασικό μέσο αντίστασης κατά της αναμενόμενης σεισμικής διέγερσης.

Στην περίπτωση των σεισμικά μονωμένων γεφυρών, τον κρίσιμο ρόλο αναλαμβάνουν οι διατάξεις σεισμικής μόνωσης και απορρόφησης ενέργειας, που τοποθετούνται ανάμεσα στα βάθρα και το κατάστρωμα, ή σε λίγες περιπτώσεις στη

βάση των βάθρων. Οι περισσότερες ζημιές συγκεντρώνονται σε αυτές τις διατάξεις, με σημαντική πλαστικοποίηση και πιθανώς μεγάλες παραμένουσες μετατοπίσεις. Η απόκριση του υπολοίπου τμήματος της κατασκευής είναι αρχικά γραμμική ελαστική, με ορισμένες πιθανές ζημιές εντοπιζόμενες στους κόμβους λόγω των αναπτυσσόμενων μεγάλων μετακινήσεων.

Όπως είναι φυσικό, εύλογα ερωτήματα τίθενται όπως:

Τι συμβαίνει στην περίπτωση ενός σεισμού με μη αναμενόμενα χαρακτηριστικά (είτε όσον αφορά το περιεχόμενο των συχνοτήτων, την μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους, ή ακόμα και την διάρκειά του);

Επιπλέον, είναι δυνατόν ορισμένες ζημιές σε δομικά στοιχεία, όπως τα εφέδρανα, να ληφθούν υπόψη σε περίπτωση που αποφευχθεί μια ολική καταστροφή; Και στην περίπτωση αυτή, πώς μπορεί η μη γραμμική απόκριση της κατασκευής να ληφθεί υπόψη στην πορεία του σχεδιασμού;

Η απάντηση στα ερωτήματα αυτά είναι πως οι ίδιες αρχές σχεδιασμού αντοχής και οι μέθοδοι σχεδιασμού που βασίζονται στις μετακινήσεις (displacement based design), και που χρησιμοποιούνται στις απλές γέφυρες, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και στην περίπτωση των σεισμικά μονωμένων γεφυρών.

Κατά τον σχεδιασμό μιας σεισμικά μονωμένης γέφυρας, είναι βασικό να γνωρίζουμε καθαρά την ολική απόκριση της κατασκευής και ως προς τις δύο διευθύνσεις. Η τοποθέτηση των σεισμικών διατάξεων στο άνω άκρο των βάθρων γίνεται βασικά για πρακτικούς και οικονομικούς λόγους, στις περισσότερες περιπτώσεις όμως ταιριάζει και με την δομική διάταξη της κατασκευής, με την μάζα κυρίως συγκεντρωμένη στο κατάστρωμα και σχετικά μικρά βάθρα. Με την σεισμική μόνωση της ανωδομής τα βάθρα συμπεριφέρονται ως ανεξάρτητες κατασκευές, οι οποίες είναι πακτωμένες στη βάση και ελαστικά στηριζόμενα στην κορυφή. Στην περίπτωση μεγάλων και μη αμελητέας μάζας βάθρων η απόκρισή τους κυριαρχεί στα σεισμικά φορτία των βάθρων και θεμελίων. Σε τέτοιες λοιπόν περιπτώσεις είναι καλύτερα να θεωρήσουμε μία σεισμική μόνωση στη βάση των βάθρων.

## 2.3 Προβλήματα Μετακινήσεων

Οι μετακινήσεις είναι ένα σημαντικό πρόβλημα κατά τον σχεδιασμό των σεισμικά μονωμένων γεφυρών. Η αυξημένη ευκαμψία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των μετακινήσεων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μία σειρά άλλων προβλημάτων. Συγκεκριμένα, δεν πρέπει να ξεχνούμε ότι η μετατοπισμένη θέση του κατακόρυφου φορτίου αυξάνει την ροπή δευτέρας τάξεως στη βάση του βάθρου, μειώνοντας έτσι την αντοχή πρώτης τάξεως. Έτσι λοιπόν, αφού τα όρια διαρροής των διατάξεων σεισμικής μόνωσης σχεδιάζονται συνήθως έτσι ώστε να αποφεύγεται η διαρροή των βάθρων, το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε να αλλοιώσει την όλη φιλοσοφία του σχεδιασμού, προκαλώντας πρόωγη διαρροή των βάθρων. Γι' αυτό λοιπόν, θα πρέπει πάντα κατά τον σχεδιασμό να λαμβάνεται υπόψη η μείωση της αντοχής των βάθρων λόγω των επιδράσεων P-Δ.

Οι σεισμικά μονωμένες γέφυρες έχουν συνήθως συνεχείς ανωδομές μεγάλων διαστάσεων, γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερα μεγάλους κόμβους και αντίστοιχους επιφανειακούς αρμούς οδοστρώματος. Επιπρόσθετοι αρμοί ασφαλείας (sacrificial joints) και γενικά λεπτομέρειες που περιορίζουν τις μετακινήσεις, έχουν συχνά χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τα συστήματα σεισμικής μόνωσης. Η χρήση τους πρέπει να μελετηθεί σε συνδυασμό με την απόκριση των διατάξεων σεισμικής μόνωσης, λόγω των επιδράσεων P-Δ, αφού οι σεισμικές μονώσεις συχνά διαθέτουν ενσωματωμένα χαρακτηριστικά, τα οποία περιορίζουν τις μετακινήσεις τους. Μετά το πέρας του ορίου των μετακινήσεων, έχουμε όπως είναι φυσικό την δημιουργία βλαβών στο δομικό σύστημα, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών σεισμικών φαινομένων.

Σε μια σεισμικά μονωμένη γέφυρα είναι σύνηθες να παρατηρούνται προβλήματα παραμενουσών παραμορφώσεων, λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών και ερπυσμού. Για την αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με την μείωση των σεισμικών αρμών και για τον περιορισμό των μη συμμετρικών μετακινήσεων, θα πρέπει να προγραμματίζονται περιοδικές επιθεωρήσεις του έργου, ενώ θα πρέπει επίσης, κατά τον σχεδιασμό να μελετώνται και τρόποι επανατοποθέτησης του καταστρώματος στην αρχική του θέση.

## 2.4 Παραδείγματα Σεισμικά Μονωμένων Γεφυρών

Μέχρι το 1993, 255 γέφυρες είχαν κατασκευαστεί με χρήση συστημάτων σεισμικής μόνωσης (5 στην Ισλανδία, 49 στη Νέα Ζηλανδία, 12 στην Ιαπωνία, 21 στις Ηνωμένες Πολιτείες, και 168 στην Ιταλία). Ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου, (LRB), χρησιμοποιήθηκαν σε 3 από τις 168 Ιταλικές γέφυρες, και σε 66 από τις υπόλοιπες 87 των άλλων χωρών καθώς επίσης και στην Golden Gate Bridge (Civil Engineering Magazine November 2000) κ.α. Από το γεγονός αυτό φαίνεται καθαρά, ότι τα LRB είναι ο τύπος σεισμικών μονωτήρων που συνηθέστερα χρησιμοποιείται σε όλες τις χώρες, με εξαίρεση την Ιταλία, όπου κατά κανόνα χρησιμοποιούνται απλοί αποσβεστήρες, (συνήθως μεταλλικοί), σε συνδυασμό με κλασικές κυλιόμενες στηρίξεις. Η οικονομία, η απλότητα, η αξιοπιστία, και το χαμηλό κόστος συντήρησής τους, είναι οι λόγοι για τους οποίους τα LRB και οι μεταλλικοί αποσβεστήρες σε συνδυασμό με εφέδρανα από Teflon (πολυτετραφλουοροαιθυλένιο ή PTFE), κυριαρχούν στην αγορά.

Δυστυχώς, ελάχιστες πληροφορίες έχουμε στην διάθεσή μας όσον αφορά την πραγματική απόκριση σεισμικά μονωμένων γεφυρών σε σεισμούς που έχουν συμβεί. Η κοιλαδογέφυρα, "Sierra Point", στο San Francisco, που κατασκευάστηκε το 1956 και αργότερα επισκευάστηκε χρησιμοποιώντας ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου, δέχθηκε μέγιστη επιτάχυνση εδάφους 0.09g κατά την διάρκεια του σεισμού Loma Prieta. Επομένως, η σεισμική διέγερση στην οποία υποβλήθηκε, δεν ήταν ιδιαίτερα σημαντική ώστε να μας οδηγήσει σε αξιόπιστα συμπεράσματα.

Η γέφυρα "Te Teko", στη Νέα Ζηλανδία, επίσης σεισμικά μονωμένη με LRB, χτυπήθηκε από τον σεισμό του Edgacumbe (1987) και δέχτηκε μέγιστη επιτάχυνση εδάφους της τάξεως του 0.3 έως 0.35g. Η συγκεκριμένη γέφυρα έχει 5 ανοίγματα των 20m, ενώ το άκρο κάθε ανοίγματος στηρίζεται σε ένα ζεύγος ελαστομεταλλικών εφεδράνων με πυρήνα μολύβδου. Λόγω κατασκευαστικής ατέλειας, (ενώ τα LRB είχαν σχεδιαστεί με ειδικούς κρίκους συγκράτησης, έτσι ώστε να εμποδίζουν την οριζόντια ολίσθηση με 20mm ενεργό ύψος, ο κρίκος ενός LRB στο δυτικό ακρόβαθρο βρέθηκε τελικά να έχει μόνο 5mm ενεργό ύψος.), για αυτόν τον λόγο το συγκεκριμένο εφέδρανο

δεν λειτούργησε σωστά, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ζημιές στο δομικό σύστημα της γέφυρας. Μετά την αποτίμηση των ζημιών αναφέρθηκε πως αν το εφέδρανο αυτό είχε λειτουργήσει όπως έπρεπε το πιθανότερο είναι πως τα βάθρα δεν θα είχαν αστοχήσει όπως συνέβη. Η γέφυρα τελικά επιδιορθώθηκε, αναστηλώνοντας το δυτικό τμήμα της ανωδομής και αντικαθιστώντας έτσι τα εφέδρανα, καθώς επίσης και τα κατεστραμμένα στοιχεία.

## **2.5 Απόψεις Μελετητών ως προς την Εφαρμογή των Σεισμικών Μονώσεων στις Γέφυρες**

Οι μελετητές και εκείνοι που είναι υπεύθυνοι για την αντισεισμική προστασία των γεφυρών, χωρίζονται σε εκείνους που θεωρούν ότι οι σεισμικές μονώσεις θα λύσουν όλα τα σεισμικά προβλήματα και σε εκείνους που δεν θεωρούν τα αντισεισμικά αυτά συστήματα αξιόπιστα και πιστεύουν ότι δεν θα έπρεπε να εφαρμόζονται σε καμία περίπτωση. Η περιορισμένη εμπειρία που έχουμε, όσον αφορά την πραγματική απόκριση των σεισμικά μονωμένων κατασκευών σε ισχυρούς σεισμούς, σίγουρα συμβάλει σε αυτή την διχογνωμία, παρά την ικανότητα πιστής προσομοίωσης της μη γραμμικής απόκρισης των σεισμικά μονωμένων κατασκευών που διατίθεται σήμερα.

Προς το παρόν πάντως, κατά τον σχεδιασμό μιας σεισμικά μονωμένης γέφυρας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ισχυροί συντελεστές ασφάλειας. Θα πρέπει επίσης να εφαρμόζεται μη γραμμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση επιταχυνσιογραφημάτων στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι διατάξεις σεισμικής μόνωσης θα πρέπει πάντα να δοκιμάζονται προηγουμένως με κάποιο πρόγραμμα ελέγχου, καθώς επίσης και με τακτές επιθεωρήσεις των σεισμικών διατάξεων οι οποίες θα πρέπει οπωσδήποτε να ακολουθούνται με ιδιαίτερη προσοχή.

Η δυνατότητα επιλογής πολλών διαφορετικών μεταβλητών σχεδιασμού έχει ως αποτέλεσμα την ανεύρεση καινοτομικών λύσεων σε πολλά δύσκολα προβλήματα, ταυτόχρονα όμως η μεγάλη αυτή επιλογή καθιστά δύσκολη την δημιουργία απλών κανόνων σχεδιασμού, επιβεβαιώνοντας έτσι την αναγκαιότητα λεπτομερέστατης ανάλυσης. Ο σχεδιασμός, λοιπόν, των σεισμικά μονωμένων γεφυρών θα έλεγε κανείς πως είναι περισσότερο τέχνη παρά συνδυασμός κανόνων. Για τον λόγο αυτό ο εν λόγω

σχεδιασμός θα πρέπει πάντα να ελέγχεται ως προς την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητά του και θα πρέπει να αποδεικνύεται με ειδικά προσομοιώματα ικανά να προσομοιώσουν την πραγματική απόκριση της κατασκευής.

## **2.6 Κριτήρια Επιλογής και Τρόποι Ελέγχου των Διατάξεων Σεισμικής Μόνωσης**

Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης σεισμικής μόνωσης για μια γέφυρα, βασίζεται σε μια σειρά παραγόντων, όπως η διαθεσιμότητα και η οικονομία, καθώς επίσης και σε διάφορους παράγοντες τεχνικής φύσεως. Εξετάζεται λοιπόν στη συνέχεια, ποια πρέπει να είναι τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης, πώς μπορούν να συγκριθούν δύο διαφορετικά συστήματα, και πώς ελέγχονται και πιστοποιούνται τα χαρακτηριστικά τους.

### **2.6.1 Βασικά χαρακτηριστικά.**

Το βασικότερο χαρακτηριστικό των σεισμικών μονωτήρων είναι η μεγάλη τους ευκαμψία, λόγω της οποίας όπως προαναφέρθηκε έχουμε μείωση των σεισμικών δυνάμεων που καταπονούν την κατασκευή. Η ευκαμψία αυτή όμως πρέπει πάντα να συνδυάζεται με διατάξεις απορρόφησης ενέργειας, έτσι ώστε να περιορίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό οι μετατοπίσεις της κατασκευής. Πέρα όμως από τις δύο αυτές βασικές αρχές, υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να διαθέτει ένα καλό σύστημα σεισμικής μόνωσης.

Μια γέφυρα δεν πρέπει να είναι πολύ εύκαμπτη ως προς τα φορτία του ανέμου και της τροχοπέδησης. Εάν το γεγονός αυτό δεν εξασφαλίζεται από το ίδιο το σύστημα της σεισμικής μόνωσης, τότε μάλλον είναι απαραίτητη η προσθήκη ειδικού συστήματος, περιορισμού της ευκαμψίας, για την ασφαλή ανάληψη των φορτίων λειτουργίας. Μετά το πέρας ακόμη και μετρίων σεισμών, είναι πολύ πιθανό ορισμένα στοιχεία του συστήματος αυτού, να χρειάζονται αντικατάσταση.

Καλά συστήματα απορρόφησης ενέργειας έχουν συνήθως ως επακόλουθο μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις, οι οποίες είναι πιθανόν να αποτελέσουν πρόβλημα στην μετασεισμική λειτουργία της κατασκευής. Σε περίπτωση λοιπόν που το σύστημα

δεν διαθέτει ενσωματωμένη δύναμη επαναφοράς, πρέπει να μελετηθούν διαδικασίες επαναφοράς της ανωδομής της γέφυρας στην αρχική της θέση μετά από ένα σεισμικό γεγονός.

Η πιθανότητα να έχουμε μετακινήσεις μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε φαινόμενα εξάντλησης διαδρομής εμβόλου ή εμπλοκής (out of stroke or locking) πρέπει επίσης να μελετάται, έτσι ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος απότομης αστοχίας. Με άλλα λόγια, για σεισμικά γεγονότα υψηλής ιδιοπερίοδου, περισσότερες ζημιές θα πρέπει σίγουρα να γίνονται αποδεκτές, αλλά η απόκριση της κατασκευής θα πρέπει να περιορίζεται ομαλά. Αυτού του τύπου η συμπεριφορά εξασφαλίζεται με την προοδευτική κράτυνση σε μεγάλες μετακινήσεις, συμπεριφορά την οποία διαθέτουν ορισμένοι μεταλλικοί αποσβεστήρες. Με αυτόν τον τρόπο, όταν η απαιτούμενη μετακίνηση τείνει να γίνει μεγαλύτερη από την αναμενόμενη, η απόκριση των βάθρων τείνει να εισέλθει στην μη γραμμική περιοχή.

### 2.6.2 Σύγκριση διαφόρων συστημάτων.

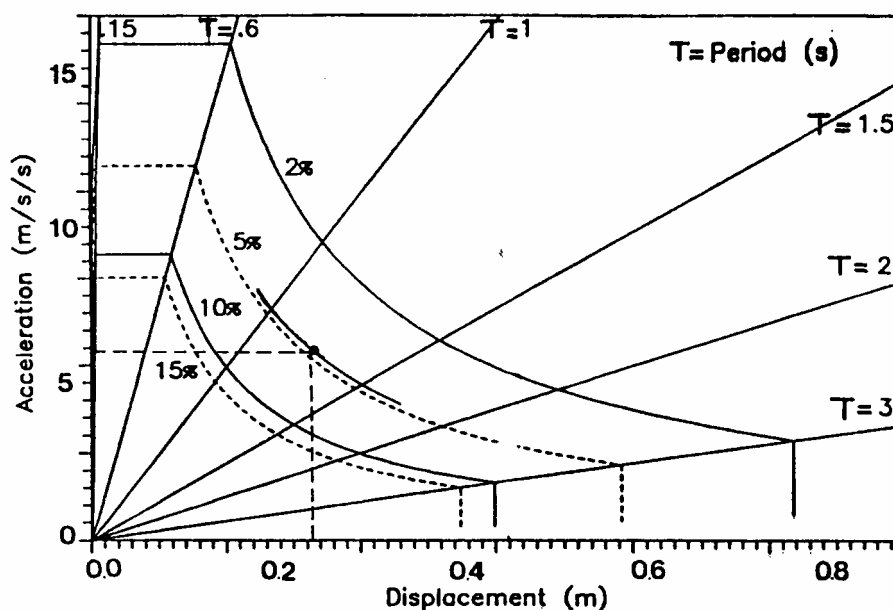
Συνιστάται, η σύγκριση της σχετικής συμπεριφοράς των διαφόρων συστημάτων σεισμικής μόνωσης, να γίνεται με την επιβολή ενός εκ των τριών παρακάτω συνθηκών και έπειτα τον έλεγχο των υπολοίπων δύο παραμέτρων:

- Οι σεισμικά μονωμένες κατασκευές πρέπει να έχουν την ίδια διάτμηση βάσης.
- Πρέπει επίσης να έχουν τις ίδιες μετατοπίσεις.
- Και τέλος πρέπει να έχουν την ίδια ιδιοπερίοδο σεισμικής μόνωσης.

Το κριτήριο αυτό μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί αν γίνουν ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές, όπως η θεώρηση ότι η κατασκευή συμπεριφέρεται ελαστικά. Είναι γνωστό πως η αύξηση της απόσβεσης έχει θετική επίδραση στην απόκριση μιας κατασκευής. Αν λοιπόν για συγκεκριμένη τιμή της απόσβεσης επιβάλουμε μία από τις παραπάνω συνθήκες, οι άλλες δύο παράμετροι καθορίζονται κατά μοναδικό τρόπο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Παρατηρούμε πως σε υψηλότερες αποσβέσεις αντιστοιχούν, μικρότερες ιδιοπερίοδοι και μικρότερες μετακινήσεις για την ίδια δύναμη, ενώ για ίδια μετακίνηση έχουμε μικρότερες περιόδους και μικρότερες δυνάμεις, και για ίδια περίοδο έχουμε μικρότερες δυνάμεις και μικρότερες μετακινήσεις. Όλα αυτά βέβαια υπό την



προϋπόθεση ότι η περίοδος ταλαντώσεως βρίσκεται στον φθίνοντα κλάδο του φάσματος απόκρισης.



Σχήμα 2.1 Σχέση Επιτάχυνσης – Μετακίνησης – Περιόδου, ως προς Σταθερή Απόσβεση

### 2.6.3 Τρόποι ελέγχου των διατάξεων σεισμικής μόνωσης.

Οι τρόποι αυτοί θα έπρεπε κανονικά να καθορίζονται από έναν κώδικα απαιτήσεων, ο οποίος θα έπρεπε να διευκρινίζει τουλάχιστον τα εξής:

- Πόσες διατάξεις θα πρέπει να ελεγχθούν.
- Αν οι δοκιμές σε δοκίμια υπό κλίμακα επιτρέπονται και κάτω υπό ποιες συνθήκες.
- Ποια επιταχυνσιογραφήματα θα πρέπει να εφαρμόζονται.
- Ποια διαβάθμιση φόρτισης θα πρέπει να χρησιμοποιείται και υπό ποιες συνθήκες ψευδοστατικά (quasistatic) φορτία είναι αποδεκτά.
- Τι κατακόρυφο φορτίο πρέπει να εφαρμόζεται σε διατάξεις συστημάτων τριβής.
- Ποια πρέπει να είναι η διάρκεια των δοκιμών.
- Αποδεκτά επίπεδα αντοχής και ακαμψίας στο τέλος των δοκιμών.

Λόγω έλλειψης όμως ενός κώδικα απαιτήσεων, ο παραπάνω κατάλογος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πιστοποίηση των χαρακτηριστικών των διατάξεων σεισμικής μόνωσης ως εξής:

Θα πρέπει να γίνονται τουλάχιστον δύο δοκιμές για κάθε διάταξη, υπό τις κανονικές διαστάσεις, και για ταχύτητα ανάλογη της αναμενόμενης σεισμικής ταχύτητας. Δοκιμές σε δοκίμια υπό κλίμακα και για μικρότερες ταχύτητες, θα πρέπει να γίνονται αποδεκτές μόνο σε συνδυασμό με αριθμητικές μελέτες και με δοκιμές με όλα τα δευτερεύοντα στοιχεία (subelements). Το επιταχυνσιογράφημα θα πρέπει να εξαρτάται από την αναμενόμενη σεισμική διέγερση. Λόγω όμως αβεβαιοτήτων, που σχετίζονται με τυχόν δυσλειτουργία των διατάξεων σεισμικής μόνωσης, και αναλογιζόμενοι τις καταστρεπτικές συνέπειες που μπορεί να έχει ένα τέτοιο γεγονός, κατάλληλοι συντελεστές ασφάλειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

## 2.7 Προσομοίωση Σεισμικά Μονωμένων Γεφυρών.

Η προσομοίωση μιας σεισμικά μονωμένης γέφυρας απαιτεί μία διαφορετική αντιμετώπιση σε σχέση με εκείνη μιας κλασικά σχεδιασμένης γέφυρας. Συγκεκριμένα, μια σειρά από συνδετικά στοιχεία πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη, λόγω της αυξημένης επίδρασής τους στην σεισμική απόκριση της κατασκευής. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν, όχι μόνο τις διατάξεις σεισμικής μόνωσης, αλλά και τα στηρίγματα των εφεδράνων (bearing supports) με τις κατάλληλες δυνάμεις τριβής, τις διατάξεις περιορισμού των μετακινήσεων, που προστατεύουν την κατασκευή από τυχόν αστοχία λόγω των μεγάλων μετακινήσεων που προκαλούν οι διατάξεις σεισμικής μόνωσης, καθώς επίσης και τυχόν συνδετικά στοιχεία μεταξύ παρακείμενων καταστρωμάτων.

Αντιθέτως, εφόσον η κατασκευή θεωρείται ότι προστατεύεται μέσω του συστήματος σεισμικής μόνωσης, τότε δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη μη γραμμική απόκριση των στοιχείων των βάθρων. Εντούτοις, είναι πολύ σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι μάζες των βάθρων και οι ιδιομορφές τους, αφού η σεισμική μόνωση των χαμηλότερων ιδιομορφών που περιλαμβάνουν την μάζα του καταστρώματος, μπορεί να αυξήσει την σπουδαιότητα των ιδιομορφών υψηλότερης συχνότητας, λόγω της απόκρισης των

σχετικά ανεξάρτητων βάθρων, τα οποία θεωρούνται πακτωμένα στην βάση τους και με εμποδιζόμενους βαθμούς ελευθερίας στην κορυφή τους.

Το κατάστρωμα μπορεί να προσομοιωθεί με γραμμικά στοιχεία, ενώ επίσης καλό θα ήταν να γίνει, μια πιο λεπτομερής κατανομή της μάζας και μια πιο προσεκτική θεώρηση των υψηλότερων ιδιομορφών της ταλάντωσης. Από τους διάφορους συνδυασμούς επιλογών που διαθέτουμε για την προσομοίωση του όλου συστήματος συναρμογής, εδάφους - θεμελίωσης - βάθρου - σεισμικών διατάξεων - καταστρώματος, καλό θα ήταν για την τελική επιλογή να ακολουθούνται οι παρακάτω συστάσεις:

### 2.7.1 Προκαταρκτικός σχεδιασμός

Οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης εδάφους θεμελίωσης και κατασκευής μπορούν σε γενικές γραμμές να αμεληθούν. Σε περιπτώσεις που η ευκαμψία του εδάφους θεμελίωσης είναι σημαντική και πρέπει να ληφθεί υπόψη, ένα γραμμικό ελατήριο, που θα προσομοιάζει την συνδυασμένη επίδραση οριζόντιας και στρεπτικής ευκαμψίας. Στην περίπτωση αυτή, μια συνολική απόσβεση της τάξεως του 2% με 5%, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Τα βάθρα μπορούν να προσομοιωθούν με γραμμικά ελατήρια ισοδύναμης ακαμψίας με εκείνη πριν την διαρροή (τέμνουσα ακαμψία διαρροής). Σε γενικές γραμμές, μία απόσβεση της τάξεως του 2% είναι αποδεκτή. Η διάταξη σεισμικής μόνωσης μπορεί να προσομοιωθεί με ένα γραμμικό ελατήριο, με ακαμψία ισοδύναμη με την ακαμψία της ισοδύναμης μετακίνησης. Ισοδύναμη μετακίνηση είναι εκείνη που αντιστοιχεί στην μέγιστη αναμενόμενη μετακίνηση, όταν όλοι οι κύκλοι κατά την διάρκεια της απόκρισης φτάνουν στην ίδια μετακίνηση. Μία μετακίνηση ισοδύναμη της μέγιστης αναμενόμενης μετακίνησης, θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης ακαμψίας, καθώς και για τον υπολογισμό του βαθμού απόσβεσης της προσομοιούμενης κατασκευής, ως ισοδύναμη της υστερητικής ενέργειας που απορροφάται σε έναν πλήρη κύκλο σε μία μετακίνηση μικρότερη από την μέγιστη. Κατά την διάρκεια της σεισμικής απόκρισης σε ένα πραγματικό επιταχυνσιογράφημα μόνο ένας έως δύο κύκλοι θα φτάνουν στη μέγιστη μετατόπιση. Οι περισσότεροι από τους υπόλοιπους κύκλους τυπικά κυμαίνονται σε μια περιοχή μετακινήσεων γύρω στο 50% της μέγιστης μετακίνησης.

Η δεσμευμένη επίδραση του καταστρώματος μπορεί σε γενικές γραμμές να αμεληθεί, αφού η διαδικασία σχεδιασμού επιτρέπει τον καθορισμό μιας σχετικά

κανονικής κατασκευής (η συνολική ακαμψία κάθε συστήματος, εδάφους θεμελίωσης - βάθρου - μονωτήρα, είναι παρόμοια, και η αναμενόμενη μετακίνηση στις κορυφές των διαφόρων βάθρων είναι παρόμοια, που σημαίνει ότι το κατάστρωμα θα παραμείνει ουσιαστικά απαραμόρφωτο). Σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιασμός κάθε συστήματος στήριξης της γέφυρας είναι ανεξάρτητος από τους άλλους. Σε περιπτώσεις όμως που εκτιμάται ότι η δεσμευμένη επίδραση του καταστρώματος μπορεί να έχει σημαντικές επιδράσεις, (όπως για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός άκαμπτου καταστρώματος που στηρίζεται σε βάθρα διαφορετικής ευκαμψίας), ένα γραμμικό πολυβάθμιο σύστημα θα πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται στην φάση του προκαταρκτικού σχεδιασμού.

### 2.7.2 Προσομοίωση κατασκευής για τον σεισμό σχεδιασμού

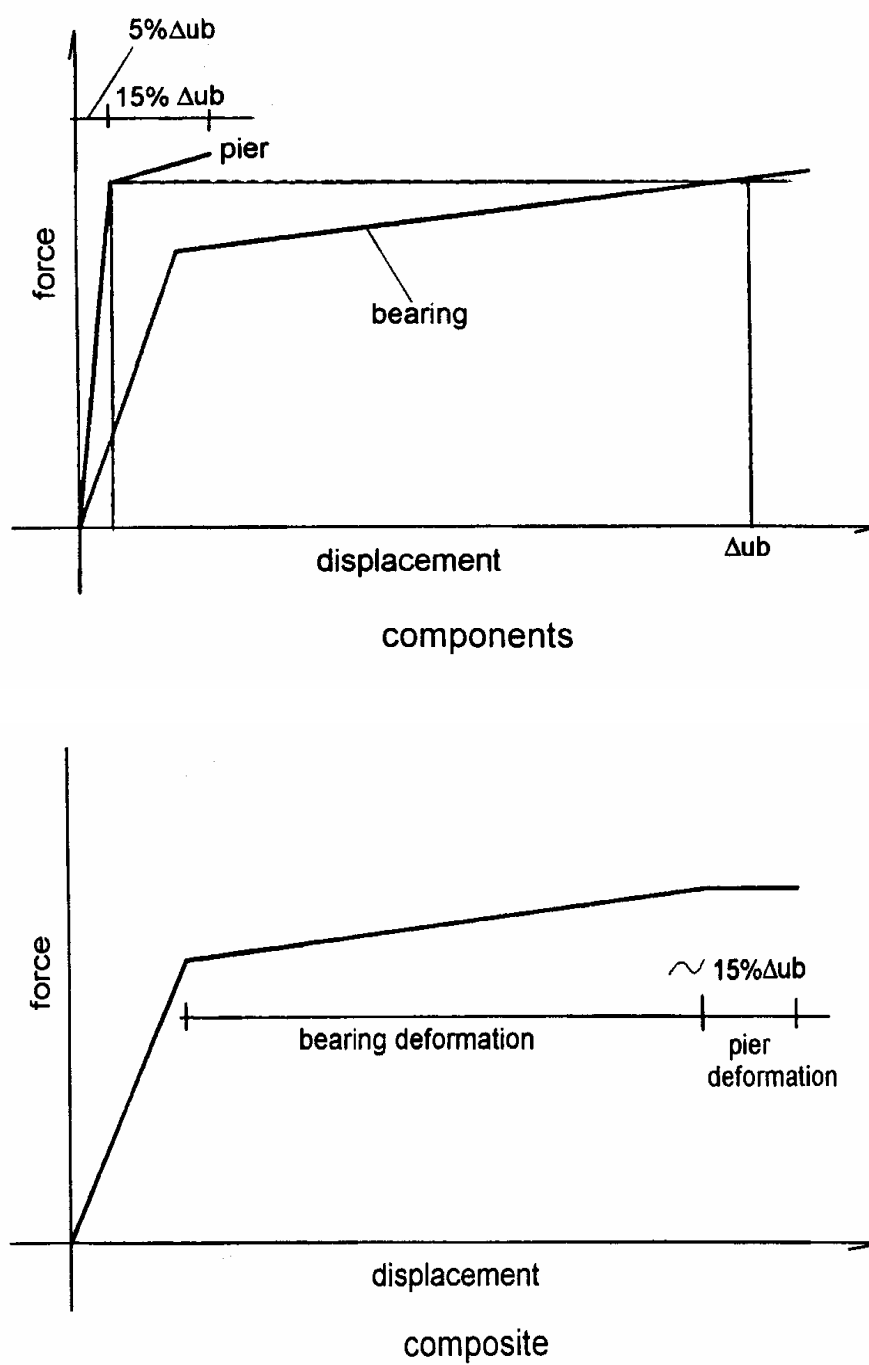
Μετά την ολοκλήρωση του προκαταρκτικού σχεδιασμού μιας γέφυρας, ακολουθεί μια πιο ακριβής ανάλυση ώστε να ελεγχθεί αν το απλοποιημένο προσομοίωμα που υιοθετήθηκε στην προκαταρκτική φάση, δεν έχει διαστρέψει την απόκριση της κατασκευής, καταλήγοντας σε μία ακατάλληλη κατασκευή. Για την τιμή του σεισμού σχεδιασμού αναμένεται ότι η συνολική κατασκευή θα εξακολουθεί να συμπεριφέρεται σχεδόν γραμμικά, με μόνη εξαίρεση το σύστημα σεισμικής μόνωσης. Αυτή η αναμενόμενη συμπεριφορά πρέπει να απεικονίζεται στις επιλογές προσομοίωσης και να ελέγχεται. Ένα πολυβάθμιο προσομοίωμα πρέπει γενικά να χρησιμοποιείται, για να ληφθεί υπόψη η δεσμευμένη επίδραση του καταστρώματος, που προσομοιώνεται με γραμμικά ραβδωτά στοιχεία. Η ακαμψία του καταστρώματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη ένα κατάλληλο επίπεδο αστοχίας. Το σύστημα εδάφους - θεμελίωσης προσομοιώνεται με γραμμικά ελατήρια και τα βάθρα με γραμμικά ραβδωτά στοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη την διατμητική ευκαμψία σε περιπτώσεις πολύ κοντών βάθρων. Οι διατάξεις σεισμικής μόνωσης προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία υψηλής απόσβεσης, όπως προηγουμένως, ή ακόμη καλύτερα με διγραμμικά ελατήρια.

### 2.7.3 Προσομοίωση για ακραίους σεισμούς

Η απόκριση των κατασκευών σε περίπτωση σεισμού μεγαλύτερου του αναμενόμενου παρουσιάζει ενδιαφέρον σε περίπτωση που υπάρχουν ανησυχίες για κατάρρευση λόγω της ευαισθησίας της απόκρισης της γέφυρας στο επίπεδο της αυξημένης σεισμικής δράσης. Για παράδειγμα, σημαντική εντατική κράτυνση στο σύστημα σεισμικής μόνωσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε διαρροή των βάθρων, όπου

η απαίτηση πλαστιμότητας θα μπορούσε σύντομα να γίνει υπερβολική λόγω της μεγάλης ακαμψίας των βάθρων σε σχέση με το συνολικό σύστημα. Ένα παράδειγμα τέτοιας συμπεριφοράς φαίνεται στο σχήμα 2.2.

Στο σχήμα 2.2 παρατηρούμε πως θεωρώντας ότι η μετακίνηση διαρροής του βάθρου ( $\Delta_{yp}$ ) είναι ίση με 5% της μετακίνησης του εφεδράνου για την οποία αρχίζει η διαρροή του βάθρου ( $\Delta_{ub}$ ), φαίνεται ότι η πρόσθετη μετακίνηση, λόγω πλαστικής παραμόρφωσης του βάθρου που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα του βάθρου ίση με 4, είναι περίπου ίση με  $0.15 \Delta_{ub}$  (δηλ., υπέρβαση μετακίνησης κατά 15% θα μπορούσε να προκαλέσει αστοχία του βάθρου). Ασφαλώς, η προσομοίωση τέτοιων ακραίων καταστάσεων πρέπει να είναι πολύ πιο ακριβής, τουλάχιστον στα στοιχεία όπου αναμένεται υψηλή μη γραμμική απόκριση. Σε ελάχιστες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η μη γραμμική προσομοίωση του εδάφους θεμελίωσης. Τα βάθρα πρέπει να προσομοιώνονται με μη γραμμικά προσομοιώματα. Το ελατήριο που θα προσομοιώνει την διάταξη σεισμικής μόνωσης θα απαιτεί γενικά και τρίτο γραμμικό κλάδο για να προσομοιώσει την αυξημένη εντατική κράτυνση ή την προσομοίωση των διατάξεων περιορισμού των μετακινήσεων. Το κατάστρωμα θα μπορεί ακόμη να συμπεριφέρεται σχεδόν γραμμικά, αλλά θα πρέπει μάλλον να λαμβάνεται η ακαμψία διαρροής.



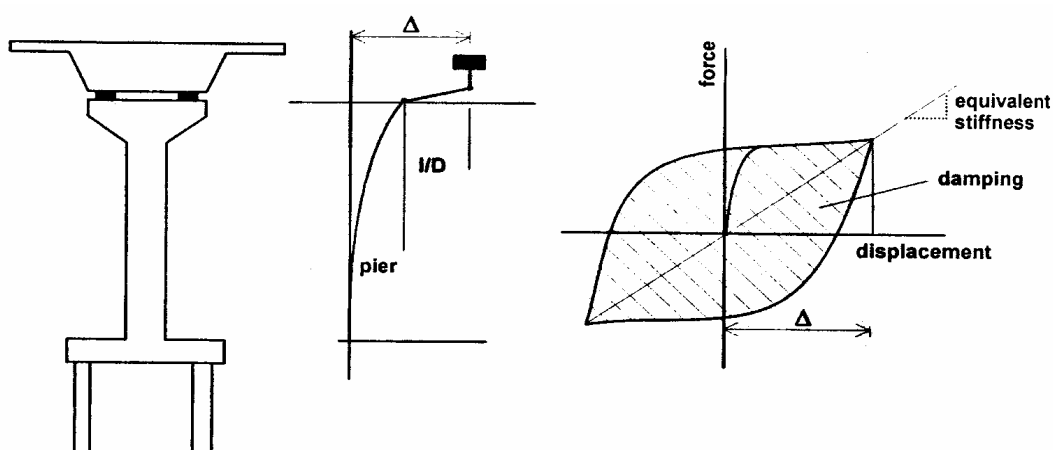
**Σχήμα 2.2** Απόκριση Άκαμπτου Βάθρου με Εύκαμπτο Σύστημα Μόνωσης, σε μια περίπτωση ενός Ακραίου Σεισμού

## 2.8 Ανάλυση των Σεισμικά Μονωμένων Γεφυρών

Για την ανάλυση μιας γέφυρας μπορεί κανείς να ακολουθήσει διάφορες διαδικασίες προσέγγισης, συνδυάζοντας τις εκδοχές: γραμμική / μη γραμμική ανάλυση, στατική / δυναμική, ενός ή πολλών βαθμών ελευθερίας. Η κατάλληλη επιλογή θα εξαρτηθεί, από την φάση του σχεδιασμού όπως προαναφέραμε, από το επίπεδο της αναμενόμενης μη γραμμικής απόκρισης, και από την πολυπλοκότητα της γέφυρας ως προς τον σχεδιασμό. Για τις σεισμικά μονωμένες γέφυρες, οι πιο χρήσιμοι συνδυασμοί ανάλυσης είναι οι εξής:

### 2.8.1 Στατική, Γραμμική, Ανάλυση Ενός Μονοβάθμιου Συστήματος

Αυτού του είδους η προσέγγιση, θα πρέπει σε γενικές γραμμές να εφαρμόζεται σε πολύ απλές γέφυρες και σε φάση προκαταρκτικού σχεδιασμού γεφυρών των οποίων οι δεσμευμένες επιδράσεις του καταστρώματος μπορούν να αμεληθούν. Σε αυτή την περίπτωση κάθε βάθρο της γέφυρας θα θεωρείται ως ένα μονοβάθμιο σύστημα. Η σεισμική δύναμη παριστάνεται με ένα φάσμα επιτάχυνσης/μετακίνησης. Η προσομοίωση της γέφυρας προκύπτει από τον κατάλληλο συνδυασμό ακαμψίας, μάζας, και απόσβεσης των δομικών στοιχείων. Με την ιδιοπερίοδο της ταλάντωσης και την αντίστοιχη συνολική απόσβεση της θεωρούμενης κατασκευής, μπορούμε να διαβάσουμε απευθείας από το φάσμα απόκρισης την αντίστοιχη επιτάχυνση και μετακίνηση.



Σχήμα 2.3 Ποιοτική απόκριση ενός βάθρου μιας σεισμικά μονωμένης γέφυρας

Οι σχετικές παράμετροι της προσομοιωμένης κατασκευής είναι επομένως, η μάζα της, η συνολική ελαστική ακαμψία της, και η συνολική απόσβεσή της. Οι παράμετροι αυτές θα πρέπει να υπολογίζονται με βάση το προσομοίωμα του σχήματος 2.3.

**(α) Ακαμψία.** Η ελαστική ακαμψία κάθε βάρου μπορεί να θεωρηθεί ίση με την τέμνουσα ακαμψία κατά την διαρροή ( $K_{Py}$ ), και η ελαστική ακαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης ίση με την τέμνουσα ακαμψία (secant stiffness) της μέγιστης αναμενόμενης μετακίνησης ( $K_{DE}$ ). Οπότε, η συνολική ακαμψία του συστήματος είναι:

$$K_G = \frac{1}{1/K_{Py} + 1/K_{DE}} \quad (2.1)$$

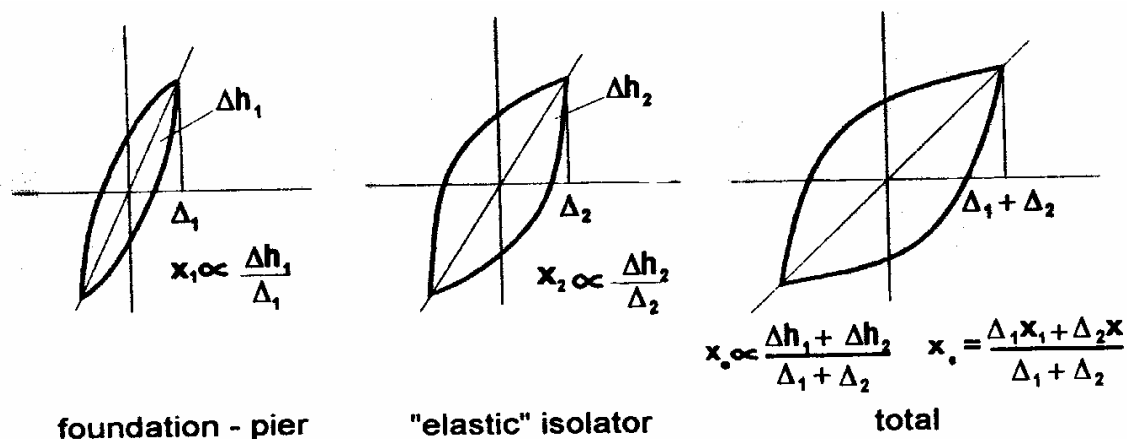
**(β) Απόσβεση.** Το σύστημα εδάφους - θεμελίωσης - βάρου, θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ελαστικά με σταθερή απόσβεση ( $\xi_p$ ), περίπου ίση με 5%. Το σύστημα σεισμικής μόνωσης χαρακτηρίζεται, είτε από υψηλή ιξώδη απόσβεση ( $\xi_{DV}$ ) και κυρίως γραμμική απόκριση, ή από μία ελαστική απόσβεση ( $\xi_{DE}$ ) ίση με την υστερητική ενέργεια που απορροφάται. Στην πρώτη περίπτωση, η συνολική απόσβεση ( $\xi_G$ ) του συστήματος βάρου - μονωτήρα μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση, θεωρώντας απόσβεση ανάλογη της ακαμψίας (Σχήμα 2.4):

$$\xi_G = \frac{\Delta_p \xi_p + \Delta_D \xi_{DV}}{\Delta_p + \Delta_D} \quad (2.2)$$

Στην δεύτερη περίπτωση, η ελαστική απόσβεση του μονωτήρα θα πρέπει να εκτιμάται ως συνάρτηση της υστερητικής του απόκρισης και της αναμενόμενης απαιτούμενης πλαστιμότητας στην αντίστοιχη μετακίνηση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ελαστικής-απολύτως πλαστικής συμπεριφοράς, εφαρμόζεται η σχέση:

$$\xi_{DE} = \frac{2(1 - 1/\mu_D)}{\pi} \quad (2.3)$$





**Σχήμα 2.4** Ισοδύναμη Συνολική Απόσβεση δύο Συστημάτων Ιξώδους Απόσβεσης σε σειρά

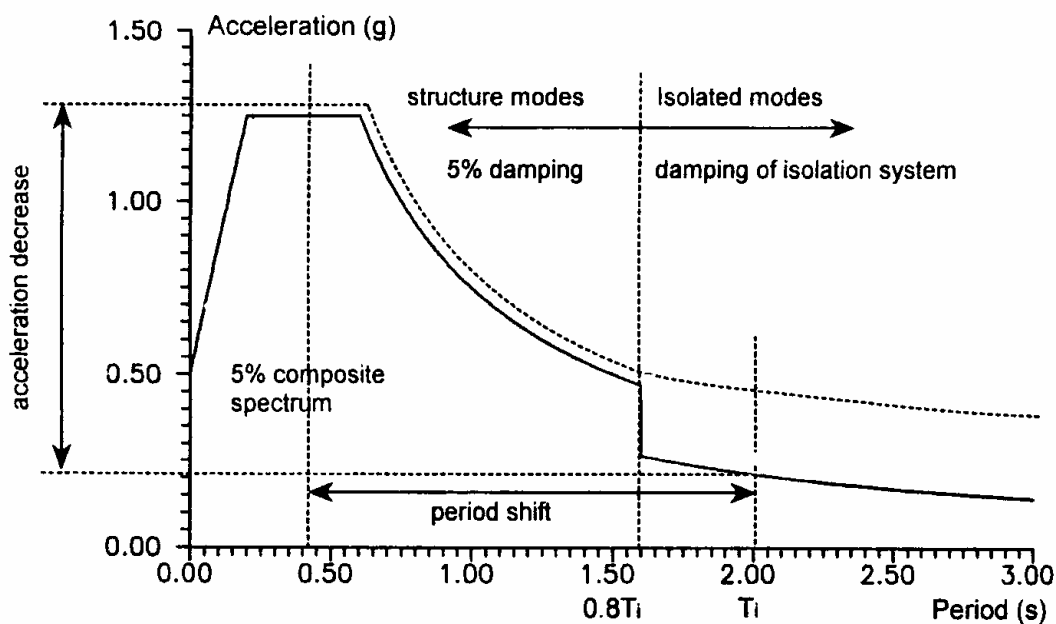
### 2.8.2 Δυναμική Ανάλυση Ιδιομορφών

Εξ' ορισμού η δυναμική ανάλυση ιδιομορφών εφαρμόζεται σε πολυβάθμια γραμμικά συστήματα. Μία ισοδύναμη κατασκευή-προσομοίωμα θα χρησιμοποιηθεί και πάλι, θεωρώντας ισοδύναμη γραμμική ακαμψία για την αναμενόμενη μετακίνηση, και ιξώδη απόσβεση ισοδύναμη με την ενέργεια που απορροφάται λόγω υστέρησης. Για την προσομοίωση της κατασκευής θα χρησιμοποιηθούν τα εξής στοιχεία:

- Γραμμικά ελατήρια για την προσομοίωση του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης.
- Στοιχεία δοκού για την προσομοίωση των βάθρων με ενεργή ακαμψία που λαμβάνει υπόψη τη ρηγμάτωση.
- Ελατήρια για την προσομοίωση του συστήματος σεισμικής μόνωσης, με ακαμψία που λαμβάνει υπόψη και την διαρροή.
- Στοιχεία δοκού για την προσομοίωση του καταστρώματος.

Η αρχή της ισοδύναμης απόσβεσης συνεπάγεται διαφορετική ιξώδη απόσβεση για κάθε δομικό στοιχείο. Δυστυχώς όμως, τα προγράμματα δυναμικής ανάλυσης που διαθέτουν οι περισσότεροι μελετητές μηχανικοί δεν παρέχουν την δυνατότητα επιλογής διαφορετικού συντελεστή απόσβεσης για τα διαφορετικά στοιχεία. Για τον λόγο αυτό συνιστάται να γίνεται μια κατάλληλη διόρθωση του φάσματος απόκρισης, ως μόνη

δυνατή λύση. Αυτή η διόρθωση βασίζεται στην παρατήρηση ότι η ισοδύναμη απόσβεση του συστήματος σεισμικής μόνωσης είναι αποτελεσματική μόνο για κύκλους φόρτισης που περιλαμβάνουν σημαντική διαρροή του αποσβεστήρα, και αυτό ισοδυναμεί σε μεγαλύτερες περιόδους ταλάντωσης. Γι' αυτόν τον λόγο συνιστάται το φάσμα απόκρισης να διορθώνεται σύμφωνα με το Σχήμα 2.5. Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνθετο φάσμα με μία μετάβαση από το αρχικό φάσμα σε άλλο διαφορετικής απόσβεσης. Το σημείο μετάβασης αντιστοιχεί σε τιμή περιόδου λίγο μικρότερη από την περίοδο ταλάντωσης της σεισμικά μονωμένης κατασκευής, έτσι ώστε, μόνο ιδιομορφές που επηρεάζονται από την μόνωση, να εμπίπτουν στο μειωμένο φάσμα επιτάχυνσης, ενώ υψηλότερες ιδιομορφές που δεν περιλαμβάνουν παραμόρφωση των μονωτήρων αποσβένονται μόνο από την ιξώδη απόσβεση της κατασκευής.



**Σχήμα 2.5** Τροποποιημένο Φάσμα Απόκρισης, λαμβάνοντας υπόψη και την Ιξώδη Απόσβεση του Συστήματος Σεισμικής Μόνωσης

Η σκέψη αυτή είναι ξεκάθαρη και πρόσφορη, όχι όμως και πολύ ακριβής, και είναι επόμενο να αναμένει κανείς προβλήματα όταν δεν είναι εφικτός ο διαχωρισμός μεταξύ μονωμένων και μη, ιδιομορφών.

### 2.8.3 Χρονική Ανάλυση Επιταχυνσιογραφήματος

Η χρονική ανάλυση επιταχυνσιογραφήματος είναι η μόνη εφικτή μέθοδος για την μη γραμμική δυναμική ανάλυση, και θα πρέπει να εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση μελέτης σημαντικών γεφυρών, που διαθέτουν και διατάξεις σεισμικής μόνωσης. Η μη γραμμική συμπεριφορά βέβαια, μπορεί να περιοριστεί στο σύστημα της σεισμικής μόνωσης και να χαρακτηρίζεται από μία διγραμμική σχέση δύναμης - μετακίνησης, η οποία μπορεί εύκολα να προσομοιωθεί. Μόνο σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται να ερευνηθεί η απόκριση σε ακραίους σεισμούς, είναι ανάγκη να λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμική απόκριση των άλλων στοιχείων.

Για την πραγματοποίηση μιας χρονικής ολοκλήρωσης επιταχυνσιογραφήματος, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μια σειρά από επιταχυνσιογραφήματα, σύμφωνα με την αναμενόμενη σεισμική διέγερση. Λόγω του ότι η κατασκευή θα ταλαντώνεται με αρκετά μεγάλες περιόδους, ανομοιόμορφες αποκρίσεις θα πρέπει να αναμένονται για διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις, αφού η ένταση του σεισμού κατανέμεται σε λιγότερους κύκλους. Η μέγιστη απόκριση που προέκυψε από τα διάφορα επιταχυνσιογραφήματα, είναι εκείνη που ενδιαφέρει ως ένδειξη απόκρισης σχεδιασμού, παρά ο μέσος όρος.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 η ισοδύναμη πολυιδιομορφική ανάλυση (multi-modal equivalent analysis) επιτρέπεται μόνο όταν ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις:

- Η απόσταση της γέφυρας από όλα τα γνωστά ενεργά ρήγματα είναι μεγαλύτερη από 15km.
- Το έδαφος δεν είναι μαλακό.
- Η περίοδος της σεισμικά μονωμένης κατασκευής δεν υπερβαίνει τα 3sec και είναι μεγαλύτερη από τρεις φορές την περίοδο ελαστικά πακτωμένης κατασκευής.
- Η γέφυρα είναι σχεδόν ευθύγραμμη και η συνολική μάζα των βάθρων είναι μικρότερη από το  $1/5$  της μάζας του καταστρώματος.

- Η ελαστική ακαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης, για την μετακίνηση σχεδιασμού, ( $\Delta_d$ ), είναι τουλάχιστον 50% της τέμνουσας ακαμψίας (secant stiffness) για 0.2 φορές την μετατόπιση  $\Delta_d$ .
- Η απόκριση του συστήματος σεισμικής μόνωσης δεν εξαρτάται από αξονικές δυνάμεις και από τον ρυθμό επιβολής της φόρτισης.
- Το σύστημα σεισμικής μόνωσης παράγει μία δύναμη επαναφοράς, τέτοια της οποίας η αύξηση μεταξύ  $0.5\Delta_d$  και  $\Delta_d$  είναι τουλάχιστον ίση με 0.025 φορές το συνολικό φορτίο βαρύτητας πάνω από το σύστημα σεισμικής μόνωσης.
- Η γέφυρα είναι ολικά μονωμένη.

Η τελευταία συνθήκη αναφέρεται στη περίπτωση όπου είναι σεισμικά μονωμένα μόνο ορισμένα βάθρα της γέφυρας.

## 2.9 Αρχές Σχεδιασμού

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να ερευνάται κατά τον σχεδιασμό μιας σεισμικά μονωμένης γέφυρας, είναι η ύπαρξη των βασικών συνθηκών κάτω από τις οποίες κρίνεται κατάλληλη η χρήση διατάξεων σεισμικής μόνωσης. Ορισμένες από τις συνθήκες αυτές είναι οι παρακάτω τρεις, που από μόνες τους ή σε συνδυασμό, θα μπορούσαν να υποστηρίξουν την ιδέα της κατασκευής μιας σεισμικά μονωμένης γέφυρας:

- Η γέφυρα έχει άκαμπτα βάθρα, με μικρή περίοδο ταλάντωσης.
- Είναι έντονη η μη κανονικότητα της γέφυρας. Για παράδειγμα, τα βάθρα της έχουν έντονα διαφορετικά ύψη, και γι' αυτό έχει υψηλή πιθανότητα συγκέντρωσης απαίτησης πλαστιμότητας.
- Η φύση της αναμενόμενης κίνησης, χαρακτηρίζεται από υψηλές επικρατούσες συχνότητες και μικρή ενέργεια σε μεγάλες περιόδους ταλάντωσης: στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό σημαίνει επιφανειακό σεισμό, κοντά σε ρήγμα.

Το σύστημα σεισμικής μόνωσης έχει διάφορους αντικειμενικούς σκοπούς:

- Την μετατόπιση των βασικών περιόδων της ταλάντωσης σε τιμές για τις οποίες η ένταση του σεισμού είναι χαμηλή.
- Την αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας της κατασκευής, ή με άλλα λόγια την μείωση των σεισμικών δυνάμεων και των οριζόντιων μετακινήσεων, λόγω αύξησης της ισοδύναμης ελαστικής απόσβεσης.
- Την κανονικοποίηση της απόκρισης της κατασκευής, κάνοντας την ελαστική απόσβεση και τις αναμενόμενες μετακινήσεις των βάθρων να μοιάζουν αρκετά μεταξύ τους.

Οι κύριοι αντικειμενικοί σκοποί ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης είναι η κανονικοποίηση και η αύξηση της απόσβεσης, ενώ η μετατόπιση της περιόδου ταλάντωσης προκύπτει συνήθως ως αποτέλεσμα των άλλων δύο στόχων. Ο σχεδιασμός μιας γέφυρας με σεισμικές μονώσεις, μπορεί να είναι πιο απλός από τον σχεδιασμό μιας κλασικής γέφυρας, αφού η ελαστική απόκριση όλων των στοιχείων της μπορεί εύκολα να εξασφαλιστεί, ενώ αντιθέτως μια τέτοια γέφυρα είναι συνήθως πιο απαιτητική κατά την φάση της ανάλυσης, αφού τις περισσότερες φορές απαιτείται μη γραμμική ανάλυση.

## **2.10 Αρχές Ικανοτικού Σχεδιασμού (Capacity Design Principles)**

Κατά τον σχεδιασμό μιας σεισμικά μονωμένης γέφυρας θα πρέπει να θεωρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας απορροφάται από το σύστημα της σεισμικής μόνωσης, και μόνο σε πολύ ακραίες καταστάσεις επιστρατεύεται η πλαστιμότητα των βάθρων. Αυτού του είδους η συμπεριφορά μπορεί εύκολα να επιτευχθεί. Η προστασία δηλαδή των βάθρων από διαρροή, επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό του συστήματος σεισμικής μόνωσης να διαρρέει σε μικρότερη δύναμη. Όταν η απόκριση του συστήματος σεισμικής μόνωσης παρουσιάζει κάποια κράτυνση, τότε για τον καθορισμό των δυνάμεων σχεδιασμού των βάθρων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η δύναμη που αντιστοιχεί στην αναμενόμενη μετακίνηση και όχι η δύναμη διαρροής.

Οι συντελεστές ασφάλειας που θα ληφθούν, εξαρτώνται από την αξιοπιστία των μηχανικών χαρακτηριστικών του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Στις περισσότερες

περιπτώσεις απαιτείται, η πραγματική αντοχή της διάταξης σεισμικής μόνωσης να μην διαφέρει περισσότερο από 10% από την αντοχή σχεδιασμού της, και γι' αυτό απαιτείται η αντοχή της διάταξης στην αναμενόμενη μετακίνηση να είναι ίση με το 85% της ονομαστικής αντοχής σχεδιασμού του βάθρου. Οι συντελεστές ασφάλειας που εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της αντοχής σχεδιασμού, προστατεύουν έτσι τα βάθρα έναντι διαρροής.

Η τελική ικανότητα μετακίνησης που απαιτείται από κάθε διάταξη, υπολογίζεται με την εφαρμογή ενός συντελεστή ασφάλειας στην αναμενόμενη μέγιστη μετακίνηση που προκύπτει από την προκαταρκτική ανάλυση. Η τιμή του συντελεστή ασφάλειας εξαρτάται από την αξιοπιστία της αναμενόμενης μετακίνησης (δηλαδή στην αξιοπιστία της επιβαλλόμενης κίνησης και της μεθόδου ανάλυσης), και στις συνέπειες μεγαλύτερης από την αναμενόμενη απαίτηση μετακίνησης. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που η διάταξη σεισμικής μόνωσης παρουσιάζει αυξημένη κράτυνση, όπως συνήθως συμβαίνει σε ορισμένους μεταλλικούς αποσβεστήρες, μία απαίτηση μετακίνησης μεγαλύτερη από την αναμενόμενη, θα έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση κάποιας πλαστιμότητας στα βάθρα. Το γεγονός αυτό δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ανεπιθύμητο σε περίπτωση εξαιρετικά μεγάλου σεισμού. Αντιθέτως, σε άλλα είδη διατάξεων, μια απαίτηση μεγαλύτερης μετακίνησης μπορεί να οδηγήσει σε κάποια τοπική αστοχία, η οποία θα αλλάξει εντελώς την απόκριση της γέφυρας κατά την υπόλοιπη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης.