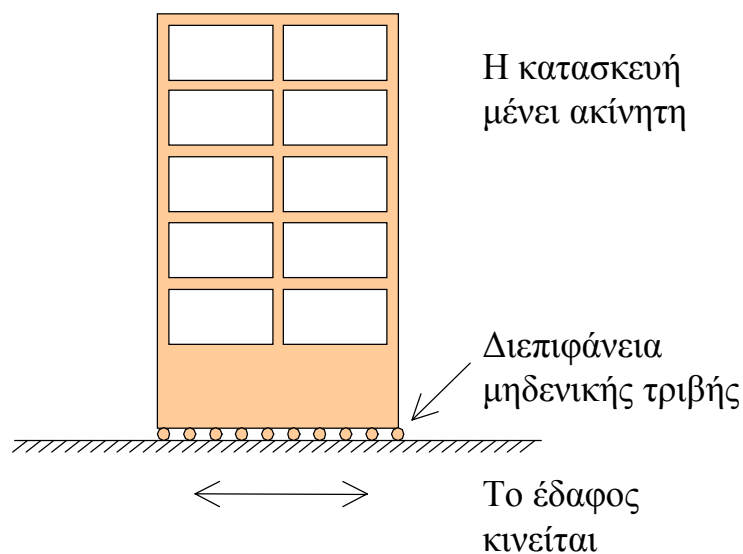


1. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

1.1 Η Έννοια της Σεισμικής Μόνωσης

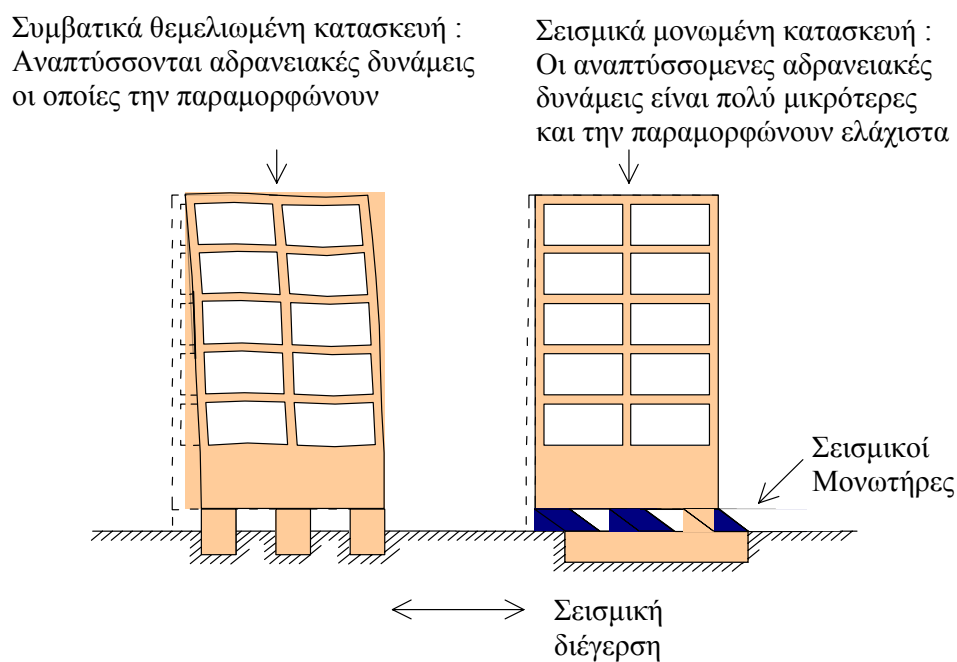
Ο όρος *Σεισμική Μόνωση* αναφέρεται στην στρατηγική σχεδιασμού κατά την οποία η κατασκευή απομονώνεται από την σεισμική εδαφική κίνηση. Κατά τη σεισμική δράση, η κίνηση του εδάφους διεγείρει την κατασκευή η οποία εκδηλώνει σχετικές μετακινήσεις που προκαλούν βλάβες στις κατασκευές. Αν μία κατασκευή μπορούσε να διαχωριστεί πλήρως από το έδαφος (π.χ. αν εδραζόταν στο έδαφος μέσω μίας διεπιφάνειας μηδενικής τριβής) τότε η κίνηση του εδάφους θα την άφηνε ανέπαφη αφού καμία οριζόντια δύναμη δεν θα μπορούσε να μεταδοθεί σε αυτή. Η κατασκευή δεν θα επηρεαζόταν από τον σεισμό, θα έμενε ακίνητη ενώ το έδαφος κάτω της θα εκδήλωνε όλη την κίνηση (Σχήμα 1-1).

Στην πράξη ο πλήρης διαχωρισμός εδάφους-κατασκευής είναι ανέφικτος. Τα φορτία βαρύτητας της κατασκευής πρέπει να μεταφέρονται στο έδαφος. Ακόμα η κατασκευή πρέπει να είναι προσαρτημένη κατά κάποιο βαθμό στο έδαφος έτσι ώστε να μην μετακινείται ανεξέλεγκτα στις υπόλοιπες περιπτώσεις οριζόντιας φόρτισης όπως π.χ. ο άνεμος και σεισμοί μικρής έντασης. Ο συμβιβασμός μεταξύ αυτών των αντικρουόμενων απαιτήσεων επιτυγχάνεται με την παρεμβολή ειδικών δομικών στοιχείων (σεισμικοί μονωτήρες) οι οποίοι παρέχουν πρόσθετη οριζόντια ευκαμψία σε ένα επίπεδο διαχωρισμού, συνήθως στην βάση της κατασκευής (μόνωση βάσης).



Σχήμα 1-1 Η Έννοια της Απομόνωσης της Κατασκευής από την Εδαφική Κίνηση

Η παρεμβολή των σεισμικών μονωτήρων συνιστά ουσιαστικά μια τροποποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Το Σχήμα 1-2 απεικονίζει το αποτέλεσμα αυτής της τροποποίησης.



Σχήμα 1-2 Σύγκριση Σεισμικά Μονωμένης και Συμβατικά Θεμελιωμένης Κατασκευής

Η συμβατικά θεμελιωμένη κατασκευή είναι σχετικώς άκαμπτη. Καθώς κινείται το έδαφος, η κατασκευή συμπαρασύρεται και αδρανειακές δυνάμεις αναπτύσσονται σε όλο το ύψος οι οποίες την παραμορφώνουν και την εντείνουν. Αντίθετα στην περίπτωση της σεισμικά μονωμένης κατασκευής η συγκεντρωμένη ευκαμψία στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης περιορίζει σημαντικά τις δυνάμεις οι οποίες μεταφέρονται στην ανωδομή. Καθώς το έδαφος κινείται σημαντικές μετατοπίσεις αναλαμβάνονται από τους σεισμικούς μονωτήρες. Έτσι όμως πολύ μικρό μέρος της κίνησης μεταδίδεται στην ανωδομή, οι αναπτυσσόμενες αδρανειακές δυνάμεις είναι σημαντικά μικρότερες και η ανωδομή παραμορφώνεται και εντείνεται ελάχιστα.

Η πρώτη δυναμική μορφή (ιδιομορφή) της μονωμένης κατασκευής είναι πολύ εύκαμπτη. Αφορά συγκεντρωμένες μετατοπίσεις στο επίπεδο των σεισμικών μονωτήρων και την ανωδομή να μετακινείται σχεδόν ως στερεό σώμα. Η δυναμική συμπεριφορά της μονωμένης κατασκευής κυριαρχείται από αυτή την πρώτη ιδιομορφή. Οι ανώτερες ιδιομορφές αφορούν σύζευξη του συστήματος σεισμικής μόνωσης με τις ιδιομορφές της ανωδομής και ελάχιστα συμμετέχουν στην κίνηση για τις συνήθεις περιπτώσεις όπου η ανωδομή είναι πολύ πιο δύσκαμπτη σε σχέση με το σύστημα σεισμικής μόνωσης. Σε αυτή την τροποποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής οφείλονται οι μειωμένες μετατοπίσεις και επιταχύνσεις στην ανωδομή.

Είναι φανερό η εισαγωγή της επιπλέον ευκαμψίας στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης επιτυγχάνεται με το τίμημα των αυξημένων μετατοπίσεων στους μονωτήρες, οι οποίοι πρέπει να είναι ικανοί να τις αναλάβουν. Για τον περιορισμό των μετατοπίσεων των μονωτήρων σε λογικά επίπεδα για τον σχεδιασμό τους, η συνήθης πρακτική είναι η αύξηση του βαθμού απόσβεσης β του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Οι συνήθεις τιμές του βαθμού απόσβεσης των πρακτικών συστημάτων σεισμικής μόνωσης κυμαίνονται από 15% έως 40% της κρίσιμης απόσβεσης.

1.2 Φιλοσοφία Σχεδιασμού της Σεισμικής Μόνωσης και Σκοπιμότητα Εφαρμογής της

1.2.1 Σύγκριση με Συμβατικό Αντισεισμικό Σχεδιασμό

Η ιδέα της σεισμικής μόνωσης οδηγεί σε μία διαφορετική φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού. Η βασική απαίτηση του σχεδιασμού είναι η αντοχή της κατασκευής να είναι μεγαλύτερη από την απαίτηση του σεισμού.

Αντοχή Κατασκευής > Απαίτηση Σεισμού

Η φιλοσοφία του συμβατικού σχεδιασμού βασίζεται στην αύξηση της αντοχής της κατασκευής έτσι ώστε να επαρκεί για την απαίτηση του σεισμού.

Συμβατικός Σχεδιασμός \Rightarrow Αύξηση Αντοχής Κατασκευής

Όσο αυξάνει η απαίτηση του σεισμού σχεδιασμού τόσο πρέπει να αυξάνει η αντοχή της κατασκευής. Ο σχεδιασμός για τέτοια επίπεδα αντοχής είναι δύσκολος και αντισυμβατικός. Έτσι ο συμβατικός σχεδιασμός καταφεύγει στην λογική της πλάστιμης συμπεριφοράς. Η πλάστιμη συμπεριφορά αφορά την δυνατότητα της κατασκευής να εισέρχεται στην μετελαστική περιοχή (δηλαδή να παραμορφώνεται μετά το όριο διαρροής) κατά ένα ελεγχόμενο τρόπο. Η πλάστιμη συμπεριφορά της κατασκευής επιτυγχάνεται μέσω συγκεκριμένων μελών της τα οποία αναμένονται να αναλάβουν σημαντικές μετελαστικές παραμορφώσεις χωρίς αστοχία. Όσο μεγαλύτερη ικανότητα πλάστιμης συμπεριφοράς έχουν τα μέλη αυτά τόσο μικρότερη αντοχή απαιτείται για να ικανοποιηθεί η απαίτηση του σεισμού.

Το όριο διαρροής καθορίζει το σημείο πέρα από το οποίο η φόρτιση παράγει μόνιμες παραμορφώσεις στην κατασκευή. Για τα περισσότερα δομικά συστήματα η πλάστιμη συμπεριφορά ισοδυναμεί με μόνιμη βλάβη σε ορισμένες θέσεις του φέροντος οργανισμού. Μετά από ένα ισχυρό σεισμικό επεισόδιο οι αναμενόμενες βλάβες στα στοιχεία του φέροντος οργανισμού της κατασκευής πρέπει να αποκατασταθούν έτσι ώστε η ικανότητα πλάστιμης συμπεριφοράς να είναι επαρκής και για το επόμενο σεισμικό επεισόδιο. Συνεπώς ο σχεδιασμός μέσω πλάστιμης συμπεριφοράς αποδέχεται ένα έμμεσο κόστος επισκευής των φερόντων και μη φερόντων στοιχείων της

κατασκευής μετά από ισχυρά σεισμικά επεισόδια καθώς και μια πιθανότητα κατάρρευσης της κατασκευής στην περίπτωση όπου η σεισμική δράση είναι μεγαλύτερη του σεισμού σχεδιασμού.

Η φιλοσοφία της σεισμικής μόνωσης ακολουθεί την αντίθετη λογική. Έτσι στοχεύει στην μείωση της σεισμικής απαίτησης παρά στην αύξηση της αντοχής της κατασκευής.

Σεισμική Μόνωση \Rightarrow Μείωση Απαίτησης Σεισμού

Βέβαια το σεισμικό επεισόδιο αυτό καθ' εαυτό δεν μπορεί να ελεγχθεί. Όμως μπορεί να μειωθεί η απαίτηση του σεισμού από την κατασκευή με την παρεμβολή ειδικών δομικών στοιχείων μεταξύ εδάφους και κατασκευής τα οποία εξειδικεύονται στην απομείωση της σεισμικής κίνησης η οποία μεταδίδεται στην ανωδομή. Με αυτό τον τρόπο η ανωδομή δεν είναι ανάγκη να συμπεριφέρεται πλάστιμα για να αναλάβει με ασφάλεια την μειωμένη απαίτηση του σεισμού. Για την ακρίβεια δεν είναι επιθυμητό να συμπεριφέρεται πλάστιμα γιατί διαρρέοντας αυξάνει η ευκαμψία της και έτσι μειώνεται η απόδοση του συστήματος σεισμικής μόνωσης, ενώ αυξάνει η πιθανότητα σύζευξης των δύο συστημάτων και εμφάνισης ανεπιθύμητων φαινομένων. Έτσι η μονωμένη κατασκευή σχεδιάζεται για πολύ μικρά επίπεδα πλάστιμης συμπεριφοράς. Για παράδειγμα ο αμερικάνικος κανονισμός IBC 2000 ορίζει τον επιτρεπόμενο συντελεστή συμπεριφοράς R_I των μονωμένων κατασκευών ως τα $\frac{3}{8}$ του αντίστοιχου συντελεστή συμπεριφοράς R της συμβατικά θεμελιωμένης κατασκευής (καθώς επίσης $1.0 \leq R_I < 2.0$). Έτσι εάν $2.66 \leq R < 5.33$, το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να μειώνει τις σεισμικές δυνάμεις κατά 2.66 φορές για να φτάσει τα επίπεδα της πλάστιμης συμβατικά θεμελιωμένης κατασκευής.

Στην πράξη η μείωση της σεισμικής απαίτησης εξαρτάται από το σύστημα σεισμικής μόνωσης, το είδος της κατασκευής και την σεισμικότητα της περιοχής και κυμαίνεται από 3 έως και 8 φορές. Γενικά η μείωση των σεισμικών δυνάμεων δεν ξεπερνάει κατά πολύ την αντίστοιχη μείωση των σεισμικών δυνάμεων λόγω πλάστιμης συμπεριφοράς της συμβατικά θεμελιωμένης κατασκευής. Επίσης η μονωμένη ανωδομή πρέπει να επαρκεί για τα φορτία βαρύτητας καθώς και για τις λοιπές περιπτώσεις οριζόντιας φόρτισης όπως π.χ. ο άνεμος. Έτσι το άμεσο όφελος από την διαστασιολόγηση της ανωδομής για μικρότερες σεισμικές δυνάμεις είναι γενικά μικρό της τάξης του 0% έως 5%. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση ανακατασκευής και ενίσχυσης υφιστάμενων

κτηρίων. Σε αυτή την περίπτωση το δομικό σύστημα της ενίσχυσης δεν είναι δυνατό να σχεδιαστεί για υψηλά επίπεδα πλαστιμότητας επειδή αυτά δεν μπορούν να αναπτυχθούν από το υφιστάμενο δομικό σύστημα. Έτσι η μείωση των σεισμικών δυνάμεων που προσφέρει η λύση της σεισμικής μόνωσης μειώνει σημαντικά το κόστος της αποκατάστασης – ενίσχυσης της ανωδομής.

1.2.2 Σύγκριση Αρχικού Κόστους Κατασκευής

Στις περισσότερες περιπτώσεις το κόστος κατασκευής ενός σεισμικά μονωμένου κτηρίου, συμπεριλαμβανομένου και του οφέλους από την μείωση των σεισμικών δυνάμεων στην ανωδομή, είναι γενικά αυξημένο σε σχέση με το κόστος του συμβατικά θεμελιωμένου κτηρίου κατά 0% έως 12%. Το επιπλέον αυτό κόστος οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες :

- **Κόστος σεισμικών μονωτήρων:** Γενικά το κόστος των σεισμικών μονωτήρων μεταβάλλεται σε μεγάλο εύρος. Για τις συνήθεις περιπτώσεις εξαρτάται κυρίως από την μετατόπιση που πρέπει να αναλάβουν οι μονωτήρες και πολύ λιγότερο από το κατακόρυφο φορτίο το οποίο φέρουν. Επιπλέον οι διάφοροι κανονισμοί απαιτούν πειραματικό έλεγχο των πρότυπων μονωτήρων και πρόγραμμα επιθεώρησης και συντήρησης τους μετά τα σεισμικά επεισόδια κάτι το οποίο αυξάνει το κόστος.
- **Κόστος σχεδιασμού και μελέτης:** Μια μονωμένη κατασκευή έχει μεγαλύτερη απαίτηση από τον μηχανικό για την προδιαστασιολόγηση, την ανάλυση (συνήθως απαιτείται μη-γραμμική δυναμική ανάλυση) και την μελέτη των λεπτομερειών κατασκευής της.
- **Κόστος δομικών και αρχιτεκτονικών αλλαγών:** Το κόστος των δομικών αλλαγών για την εισαγωγή των μονωτήρων αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του επιπλέον κόστους κατασκευής. Εξαρτάται έντονα από την κατασκευή και την θέση τοποθέτησης των μονωτήρων. Λεπτομέρειες για τις απαιτούμενες δομικές αλλαγές παρουσιάζονται στην παράγραφο 1.3 . Επιπλέον για τα στοιχεία που διέρχονται από το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης απαιτούνται αρχιτεκτονικές

αλλαγές, όπως κυλιόμενες στην βάση τους σκάλες και ειδικές λεπτομέρειες εγκαταστάσεων όπως εύκαμπτοι αγωγοί κλπ.

1.2.3 Σύγκριση Έμμεσου Κόστους Αποκατάστασης Βλαβών

Το μεγάλο πλεονέκτημα των σεισμικά μονωμένων κατασκευών έναντι των συμβατικά θεμελιωμένων προέρχεται από την μείωση του έμμεσου κόστους αποκατάστασης των βλαβών μετά τον σεισμό. Ο πρώτος παράγοντας της μείωσης προέρχεται από την μειωμένη απαίτηση πλαστιμότητας από την ανωδομή. Συνεπώς δεν αναμένονται βλάβες στο δομικό σύστημα ακόμα και για ισχυρούς σεισμούς. Επιπλέον μειώνονται σημαντικά και οι πιθανές βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία πληρώσεως όπως τοίχοι, χωρίσματα, παράθυρα κτλ. Η πολύ μικρή απαίτηση πλάστιμης συμπεριφοράς από την ανωδομή μειώνει σημαντικά και την πιθανότητα κατάρρευσης της κατασκευής στην περίπτωση όπου ξεπερνιέται ο σεισμός σχεδιασμού κατά συνέπεια η σεισμική μόνωση οδηγεί σε πολύ ασφαλέστερο αντισεισμικό σχεδιασμό.

Ένας δεύτερος παράγοντας μείωσης του κόστους επισκευής των βλαβών προέρχεται από την μείωση των επιταχύνσεων ορόφων. Οι μεγάλες επιταχύνσεις ορόφων προκαλούν βλάβες στα περιεχόμενα του κτηρίου όπως συσκευές, μηχανήματα, εξοπλισμό κτλ. Κατά τον συμβατικό σχεδιασμό όσο αυξάνει η αντοχή το κτήριο γίνεται πιο δύσκαμπτο και αυξάνουν οι επιταχύνσεις ορόφων. Αντίθετα η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης μειώνει σημαντικά τις επιταχύνσεις ορόφων και τις συνακόλουθες βλάβες.

Η μείωση του έμμεσου κόστους επισκευής των βλαβών μετά τον σεισμό είναι δύσκολο να αποτιμηθεί εκ των προτέρων για όλο τον χρόνο ζωής του έργου και να συμπεριληφθεί στην σύγκριση των λύσεων. Χονδρικές αποτιμήσεις αυτού του κόστους οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η χρήση της σεισμικής μόνωσης οδηγεί σε μακροχρόνιο όφελος της τάξης του 25% έως 50% του αρχικού κόστους κατασκευής του έργου το οποίο είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το πρόσθετο κόστος εγκατάστασης των σεισμικών μονωτήρων.

1.3 Καταλληλότητα Κτηρίων για Εφαρμογή Σεισμικής Μόνωσης

Από τα προηγούμενα είναι φανερό ότι η φιλοσοφία σχεδιασμού της σεισμικής μόνωσης είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τις εξής κατηγορίες κτηρίων :

- κτήρια μεγάλης σπουδαιότητας για τα οποία είναι αναγκαία η χρήση τους μετά το σεισμό (όπως νοσοκομεία, σταθμοί παραγωγής ενέργειας κτλ.).
- κτήρια τα οποία περιέχουν αντικείμενα μεγάλης αξίας (όπως μουσεία, βιομηχανικές μονάδες παραγωγής ευαίσθητων αντικειμένων κτλ.).
- Κτήρια τα οποία έχουν μικρή δυνατότητα πλάστιμης συμπεριφοράς (όπως στις περιπτώσεις ενίσχυσης υφιστάμενων παλαιών κτηρίων).

Η αυξημένη ασφάλεια έναντι σεισμού μπορεί να κάνει ανταγωνιστική την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις συμβατικών έργων. Μέχρι στιγμής η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης δεν έχει επεκταθεί στις συμβατικές κατοικίες, αλλά ο αριθμός των μεγαλύτερων έργων τα οποία υιοθετούν την λογική της σεισμικής μόνωσης διαρκώς αυξάνει.

Γενικά η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι καταλληλότερη για κτήρια στα οποία η μείωση της σεισμικής απαίτησης είναι σημαντική και μεγαλύτερη από άλλες μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού. Μερικοί παράγοντες οι οποίοι κάνουν την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλη είναι οι ακόλουθοι :

- **Βάρος της Κατασκευής:** Για τα περισσότερα συστήματα σεισμικής μόνωσης η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι καταλληλότερη για σχετικά βαριά κτήρια. Αυτό γιατί για να επιτευχθεί μια δεδομένη ιδιοπερίοδος της σεισμικής μόνωσης, αν είναι μικρή η μάζα της υπερκείμενης κατασκευής θα πρέπει να είναι μικρή και η δυσκαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα δεν μπορούν να φτάσουν σε τόσο μικρά επίπεδα δυσκαμψίας γιατί γίνονται ασταθή υπό το κατακόρυφο φορτίο. Αντίθετα τα συστήματα ολίσθησης

δεν έχουν κίνδυνο αστάθειας και η ιδιοπερίοδος τους δεν εξαρτάται από την μάζα της ανωδομής. Κατά συνέπεια και η μετακίνηση του συστήματος σεισμικής μόνωσης είναι ανεξάρτητη από την μάζα της ανωδομής. Όμως το κόστος των συστημάτων ολίσθησης αυξάνει με το μέγεθος των επιφανειών ολίσθησης και κατά συνέπεια εξαρτάται έντονα από την μετατόπιση. Συνεπώς το κόστος αποτελεί σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό του αρχικού κόστους κατασκευής για ελαφριά κτήρια παρά για βαρύτερα.

- **Ιδιοπερίοδος της κατασκευής:** Οι πιο κατάλληλες κατασκευές για την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι αυτές με ιδιοπερίοδο μικρότερη από 0.5sec. Αυτό γιατί η επίδραση της σεισμικής μόνωσης μετατοπίζει την ιδιοπερίοδο της κατασκευής στο διάστημα από 1.5sec έως 3.5sec. Αν η κατασκευή έχει ήδη ιδιοπερίοδο κοντά σε αυτό το διάστημα τότε η μείωση των σεισμικών δυνάμεων η οποία επιτυγχάνεται είναι μικρή και η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης δεν είναι συμφέρουσα.
- **Εδαφικές συνθήκες:** Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης είναι καταλληλότερη σε θέσεις όπου υπάρχει βράχος ή σκληρός εδαφικός σχηματισμός. Οι μαλακοί εδαφικοί σχηματισμοί τροποποιούν την σεισμική διέγερση ενισχύοντας τις μεγάλες περιόδους. Αν ο εδαφικός σχηματισμός ενισχύει την εδαφική κίνηση στο εύρος των ιδιοπεριόδων των σεισμικά μονωμένων κατασκευών τότε η απόδοση της σεισμικής μόνωσης μειώνεται σημαντικά.
- **Απόσταση από ενεργά ρήγματα:** Στην περίπτωση όπου το σεισμογόνο ρήγμα βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την θέση της κατασκευής (μικρότερη από 5Km) τότε είναι δυνατό να εμφανιστεί ένας παλμός υψηλής περιόδου και υψηλής ταχύτητας στην εδαφική κίνηση. Ο παλμός αυτός οφείλεται σε υπέρθεση των σεισμικών κυμάτων κατά την διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος (φαινόμενο Doppler). Το αποτέλεσμα είναι η σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων στις υψηλές περιόδους όπου βρίσκονται οι μονωμένες κατασκευές. Τα συστήματα σεισμικής μόνωσης χρησιμοποιούνται και σε θέσεις κοντά σε ενεργά ρήγματα, αλλά καλούνται να αναλάβουν σημαντικά μεγαλύτερες μετατοπίσεις και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλότερο.

- **Εφελκυστικά Αξονικά Φορτία:** Για τα περισσότερα συστήματα σεισμικής μόνωσης δεν είναι επιθυμητή η εμφάνιση εφελκυστικών καταπονήσεων στους μονωτήρες. Για τα συστήματα ολίσθησης αυτό συνεπάγεται ανύψωση ενώ για τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα συνεπάγεται εφελκυστικές τάσεις στο ελαστικό το οποίο έχει σχετικά χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό (φαινόμενα σπηλαίωσης). Γενικά η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης δεν είναι κατάλληλη για κατασκευές οι οποίες αναλαμβάνουν τα σεισμικά φορτία εμφανίζοντας εφελκυσμό σε μέρος της βάσης τους όπως στην περίπτωση υψηλών διατμητικών πλευρικών τοιχωμάτων τα οποία λειτουργούν ως πρόβολοι.
- **Απαιτούμενες Δομικές αλλαγές:** Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης απαιτεί συγκεκριμένες αλλαγές στο δομικό σύστημα της κατασκευής. Σημαντικό ρόλο παίζει το πόσο εύκολα υλοποιούνται οι αλλαγές αυτές για την δεδομένη κατασκευή.

Πρώτον το σύστημα σεισμικής μόνωσης απαιτεί ένα επίπεδο διαχωρισμού κατά το οποίο εμφανίζονται σημαντικές σχετικές μετακινήσεις. Συνεπώς για την μέγιστη μετακίνηση του συστήματος σεισμικής μόνωσης δεν πρέπει να υπάρχουν προσκρούσεις. Για τα νέα κτήρια, αν το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης βρίσκεται κάτω από το έδαφος, η παραπάνω απαίτηση μπορεί να υλοποιηθεί με περιμετρική τάφρο και τοίχο αντιστήριξης. Για την περίπτωση αποκατάστασης - ενίσχυσης υφιστάμενων κτηρίων ο διαθέσιμος χώρος μπορεί να επιβάλει περιορισμό στην μέγιστη μετακίνηση του συστήματος σεισμικής μόνωσης, ενώ τον καθιστά πρακτικά αδύνατο σε συνεχές σύστημα δόμησης.

Επίσης είναι συνήθης πρακτική η κατασκευή ενός διαφράγματος αμέσως πάνω από το επίπεδο των μονωτήρων για την ομαλή κατανομή των οριζόντιων φορτίων στα εφέδρανα. Έτσι το δάπεδο του υπογείου αμέσως πάνω από το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να κατασκευαστεί ως φέρουσα πλάκα. Αν στην συμβατικά θεμελιωμένη κατασκευή εδραζόταν στο έδαφος τότε η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης συνεπάγεται το επιπλέον κόστος ενός ακόμα φέροντος ορόφου μικρού ύψους, κάτι το οποίο αποτελεί σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους για κτήρια μερικών ορόφων. Κατά συνέπεια η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης συνεπάγεται μικρότερο αρχικό κόστος σε κατασκευές στις οποίες θα

κατασκευαζόταν έτσι και αλλιώς φέρων όροφος αμέσως πάνω από το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Για την περίπτωση ανακατασκευής υφιστάμενων κτηρίων σημαντικό ρόλο έχει η ευκολία με την οποία μπορεί να διαχωριστεί η κατασκευή και να αντιστηριχτεί κατά την εισαγωγή των σεισμικών μονωτήρων.

1.4 Ανάλυση Σεισμικά Μονωμένων Κτηρίων

Οι μέθοδοι οι οποίες υποδεικνύονται από τους διάφορους κανονισμούς για την ανάλυση σεισμικά μονωμένων κατασκευών είναι κατά αύξουσα σειρά ακρίβειας και πολυπλοκότητας οι εξής :

1. Η ισοδύναμη στατική ανάλυση
2. Η δυναμική φασματική ανάλυση
3. Η δυναμική ανάλυση κατάλληλα επιλεγμένου πλήθους χρονιστοριών σεισμών

Η ισοδύναμη στατική ανάλυση επιτρέπεται για ένα περιορισμένο εύρος συστημάτων σεισμικής μόνωσης. Στην πράξη η δυναμική φασματική ανάλυση και η ανάλυση χρονιστοριών είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την μελέτη συστημάτων σεισμικής μόνωσης. Οι δύο αυτές μέθοδοι εξετάζουν την δυναμική απόκριση του σύνθετου συστήματος σεισμικής μόνωσης – ανωδομής.

1.4.1 Η Ισοδύναμη Στατική Ανάλυση

Η ισοδύναμη στατική μέθοδος είναι μια απλοποιημένη διαδικασία ανάλυσης η οποία βασίζεται στην παραδοχή τελείως άκαμπτης ανωδομής πάνω από τους σεισμικούς μονωτήρες. Αν και όλες οι κατασκευές έχουν κάποια ευκαμψία η οποία τροποποιεί την δυναμική απόκριση του συνδυασμένου συστήματος, η παραδοχή της άκαμπτης ανωδομής εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι για τα συνήθη συστήματα σεισμικής μόνωσης οι μετατοπίσεις συγκεντρώνονται στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Η μη-γραμμική δυναμική απόκριση του συνδυασμένου συστήματος προσεγγίζεται με την φασματική απόκριση ενός μονοβάθμιου γραμμικώς ελαστικού ταλαντωτή ο οποίος προσομοιώνει

την ενεργό ακαμψία και τον ενεργό βαθμό απόσβεσης του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά οδηγούν σε μια απλή προσεγγιστική διαδικασία σχεδιασμού η οποία είναι ουσιώδης για την προδιαστασιολόγηση τόσο του συστήματος σεισμικής μόνωσης όσο και της ανωδομής μέσω της μεταφερόμενης τέμνουσας βάσης.

Σύμφωνα με το φάσμα απόκρισης των επιταχύνσεων του κανονισμού, η μετατόπιση σχεδιασμού του μονοβάθμιου ελαστικού συστήματος το οποίο προσομοιώνει την μονωμένη κατασκευή κατά την ισοδύναμη στατική μέθοδο δίνεται από την ακόλουθη γενική σχέση:

$$D = \frac{SA(T, \beta)}{\omega^2} = \frac{SA(T, \beta)T^2}{4\pi^2} \quad (1-1)$$

όπου $SA(T, \beta)$ είναι η ελαστική φασματική επιτάχυνση του κανονισμού για την ιδιοπερίοδο T και τον ισοδύναμο βαθμό απόσβεσης β του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ-2000) η ελαστική φασματική επιτάχυνση προκύπτει αν ο συντελεστής συμπεριφοράς q τεθεί ίσως με την μονάδα.

Η ιδιοπερίοδος του απλοποιημένου μονοβάθμιου μοντέλου της μονωμένης κατασκευής δίνεται από την σχέση :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\sum K_{eff}}} \quad (1-2)$$

όπου m είναι η συνολική μάζα της μονωμένης κατασκευής και $\sum K_{eff}$ είναι η ενεργός ακαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης για εύρος ανακυκλικής μετατόπισης D , η οποία ισούται με το άθροισμα των ενεργών ακαμψιών των μονωτήρων. Τόσο η ιδιοπερίοδος T όσο και ο βαθμός απόσβεσης β είναι συναρτήσεις της μετατόπισης D και κατά συνέπεια απαιτείται επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό της μετατόπισης D στο κέντρο ακαμψίας του συστήματος σεισμικής μόνωσης.

Η επαναληπτική διαδικασία έχει ως εξής:

1. Τίθεται μια αρχική τιμή για την μετατόπιση D

2. Υπολογίζονται η ιδιοπερίοδος T και ο βαθμός απόσβεσης β για αυτό το εύρος μετατόπισης
3. Υπολογίζεται η νέα διορθωμένη τιμή της μετατόπισης από την σχέση (1-1)
4. Επιστροφή στο βήμα 2 με την νέα διορθωμένη τιμή της μετατόπισης

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η μετατόπιση D να έχει την επιθυμητή σύγκλιση (συνήθως 4 έως 5 επαναλήψεις).

Η τέμνουσα βάσης V_b για την οποία πρέπει να σχεδιαστεί το σύστημα σεισμικής μόνωσης και όλα τα στοιχεία κάτω από αυτό είναι ίση με την μέγιστη δύναμη την οποία αναλαμβάνει το σύστημα σεισμικής μόνωσης.

$$V_b = K_{eff} D \quad (1-3)$$

Η σεισμικά μονωμένη ανωδομή απαιτείται να σχεδιαστεί για τέμνουσα βάσης V_s η οποία είναι ίση με την μέγιστη δύναμη την οποία αναλαμβάνει το σύστημα σεισμικής μόνωσης απομειωμένη με τον συντελεστή συμπεριφοράς R_I της μονωμένης ανωδομής.

$$V_s = \frac{K_{eff} D}{R_I} \quad (1-4)$$

Ο συμπεριφοράς R_I της μονωμένης ανωδομής λαμβάνει τιμές κοντά στην μονάδα αφού η μονωμένη ανωδομή έχει πολύ μικρή δυνατότητα πλάστιμης συμπεριφοράς (βλέπε παράγραφο 1.2.1). Στην πράξη συνιστάται να λαμβάνεται ίσος με την μονάδα.

Η τέμνουσα βάσης V_s κατανέμεται στους ορόφους της ανωδομής μέσω τριγωνικής κατανομής. Αν h_i και w_i είναι τα ύψη πάνω από την βάση και το ποσοστό του συνολικού βάρους αντίστοιχα για τους ορόφους της ανωδομής τότε η ισοδύναμη στατικώς επιβαλλόμενη σεισμική δύναμη σε κάθε όροφο x δίνεται από την σχέση :

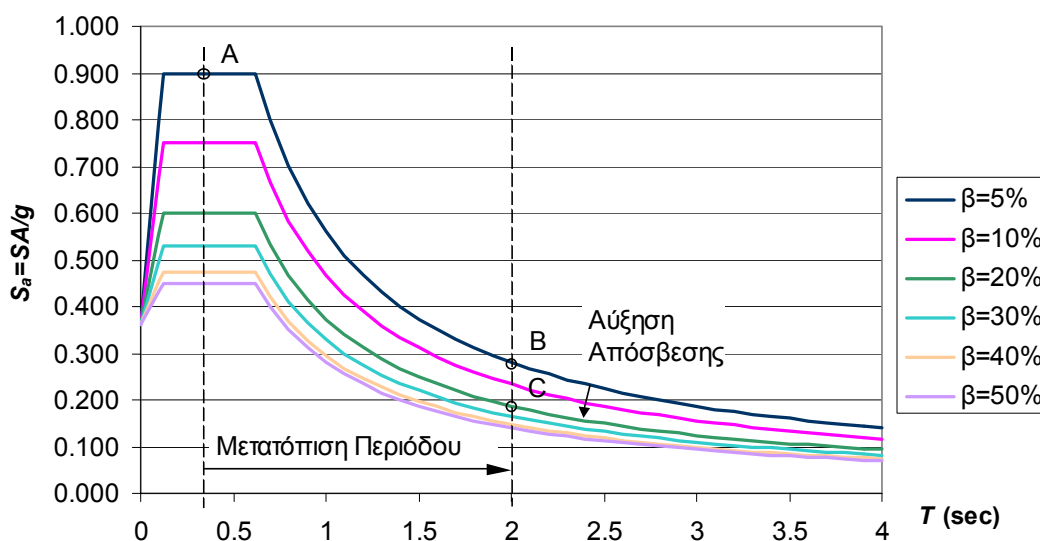
$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (1-5)$$

Θεωρητικά η κατανομή των δυνάμεων για διέγερση μόνο της πρώτης ιδιομορφής της σεισμικά μονωμένης κατασκευής θα έπρεπε να ήταν ομοιόμορφη σε όλους τους ορόφους (παραδοχή άκαμπτης ανωδομής). Η ισοδύναμη στατική μέθοδος εφαρμόζει

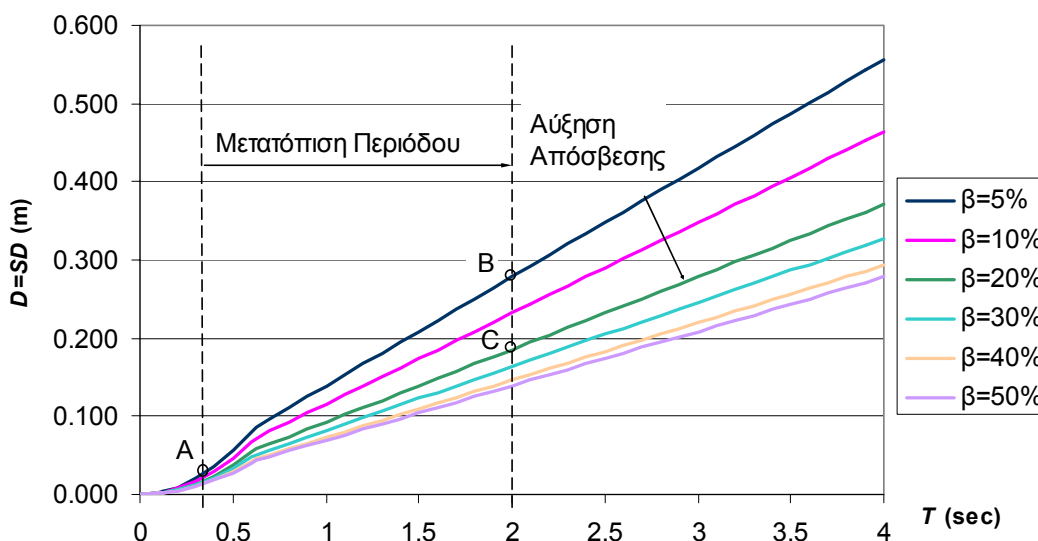
την παραπάνω τριγωνική κατανομή έτσι ώστε να ληφθεί έμμεσα υπόψη η διέγερση των ανωτέρων ιδιομορφών λόγω της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του συστήματος σεισμικής μόνωσης.

Η επίδραση της μετατόπισης της ιδιοπερίοδου και της αύξησης της απόσβεσης κατά την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης μπορεί ναδειχθεί εποπτικά μέσω της φασματικής απόκρισης του κανονισμού κατά την ισοδύναμη στατική μέθοδο. Στο Σχήμα 1-3 και στο Σχήμα 1-4 που ακολουθούν φαίνονται τα φάσματα επιταχύνσεων και μετατοπίσεων του αμερικάνικου κανονισμού IBC-2000 για παραμέτρους $S_{DS}=0.90$, $S_{DI}=0.56\text{sec}$ και για διάφορες τιμές του βαθμού απόσβεσης β . Έστω ότι η συμβατικά θεμελιωμένη κατασκευή έχει ιδιοπερίοδο 0.3sec και απόσβεση 5% ενώ η μονωμένη κατασκευή έχει ιδιοπερίοδο 2.0sec και απόσβεση 20% . Η φασματική απόκριση των δύο κατασκευών περιγράφεται από τα σημεία A και C των σχημάτων αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι κατά την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης, η συνδυασμένη δράση της μετατόπισης της περιόδου και της αύξησης της απόσβεσης μειώνει τις φασματικές επιταχύνσεις της ανωδομής κατά 4.5 φορές. Η μείωση των επιταχύνσεων συνοδεύεται από αύξηση των μετατοπίσεων κατά 7.2 φορές. Έτσι η σεισμικοί μονωτήρες θα πρέπει να είναι ικανοί να αναλάβουν μετατόπιση της τάξης των 18cm . Η μετατόπιση αυτή θα ήταν κοντά στα 30cm αν η απόσβεση του συστήματος σεισμικής μόνωσης είχε παραμείνει στο 5% .



Σχήμα 1-3 Φάσμα Ελαστικών Επιταχύνσεων IBC-2000 ($S_{DS}=0.90$, $S_{DI}=0.56\text{sec}$)



Σχήμα 1-4 Φάσμα Ελαστικών Μετατοπίσεων IBC-2000 ($S_{DS}=0.90$, $S_{DI}=0.56\text{sec}$)

1.4.2 Η Δυναμική Φασματική Ανάλυση

Η εφαρμογή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης ακολουθεί την συνηθισμένη διαδικασία για κτηριακά έργα με δύο τροποποιήσεις. Οι σεισμικοί μονωτήρες προσομοιώνονται με γραμμικά ελατήρια τα οποία έχουν την ενεργό ακαμψία των μονωτήρων για τον σεισμό σχεδιασμού και το φάσμα σχεδιασμού τροποποιείται για να λάβει υπόψη την αυξημένη απόσβεση του συστήματος σεισμικής μόνωσης.

Η εφαρμογή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης συνήθως οδηγεί σε υποεκτίμηση των επιταχύνσεων ορόφων και των ροπών ανατροπής στην βάση.

1.4.3 Η Δυναμική Ανάλυση Χρονοιστοριών Σεισμών

Η ανάλυση χρονοιστοριών είναι η πιο ακριβής και πιο ορθή μέθοδος ανάλυσης των σεισμικά μονωμένων κατασκευών. Η μέθοδος αυτή εξετάζει με ακρίβεια την έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά του συνδυασμένου συστήματος σεισμικής μόνωσης και ανωδομής. Τα μεγέθη σχεδιασμού προκύπτουν από την εν χρόνω ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης της μονωμένης κατασκευής για την διέγερση επιταχυνσιογραφημάτων σεισμών τα οποία προσεγγίζουν το φάσμα σχεδιασμού του κανονισμού.