

10. Εισαγωγή στη Σεισμική Μόνωση

Εαρινό εξάμηνο 2024

Πέτρος Κομοδρόμος
komodromos@ucy.ac.cy

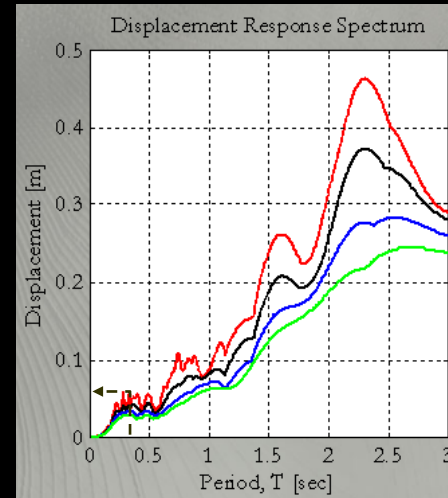
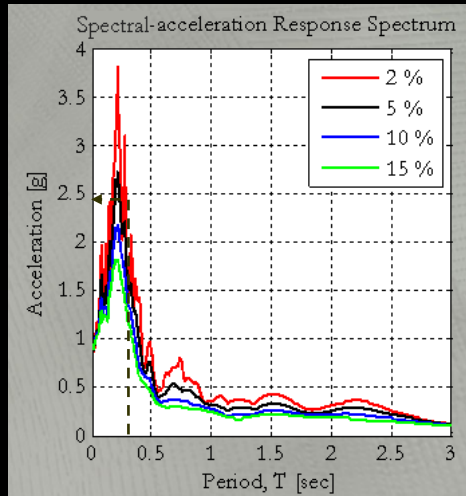
<http://www.eng.ucy.ac.cy/petros>

Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
 - Κλασικός αντισεισμικός σχεδιασμός
 - Εισαγωγή στη σεισμική μόνωση
- Συστήματα σεισμικής μόνωσης
- Συμπεριφορά και προσομοίωση σεισμικά μονωμένου κτηρίου
- Σύγκριση σεισμικά μονωμένου και συμβατικά θεμελιωμένου κτηρίου
- Πλεονεκτήματα και περιορισμοί σεισμικής μόνωσης
- Πρακτικές εφαρμογές σεισμικής μόνωσης

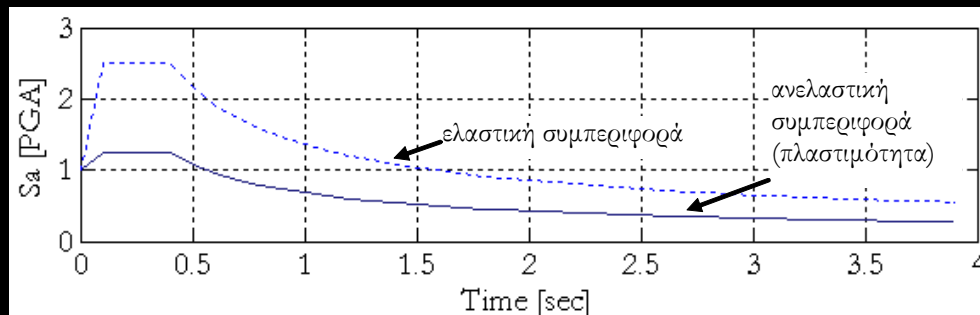
Κλασικός Αντισεισμικός Σχεδιασμός

- Κτήρια χαμηλού και μέσου ύψους ($0.1 \text{ s} \leq T_N \leq 0.6 \text{ s}$) → Σεισμικά ευάλωτα



- Θεμελιώδη Συστατικά

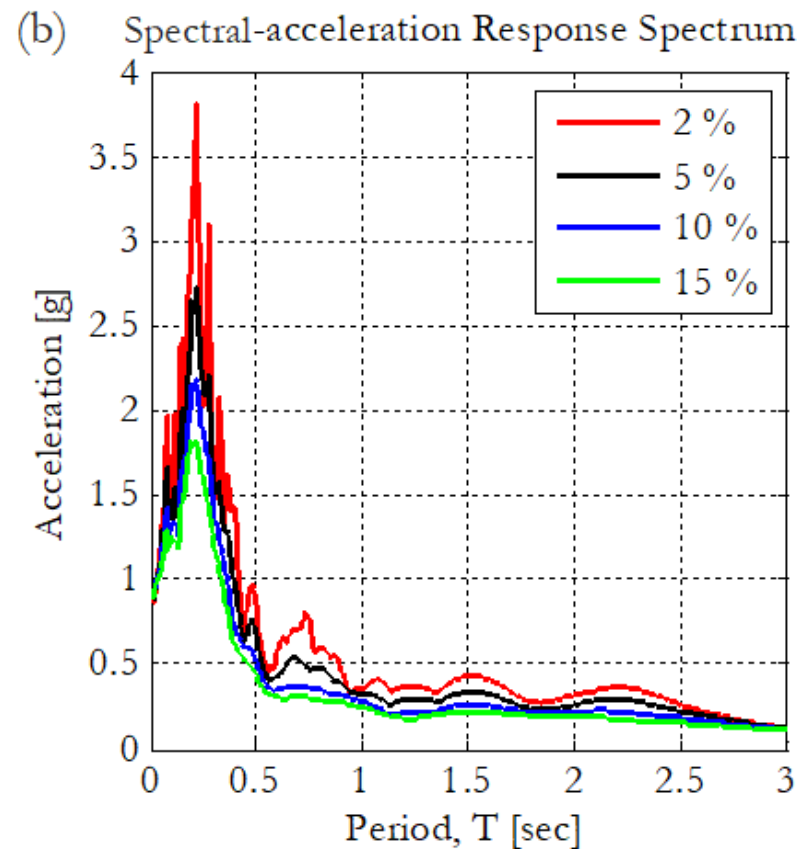
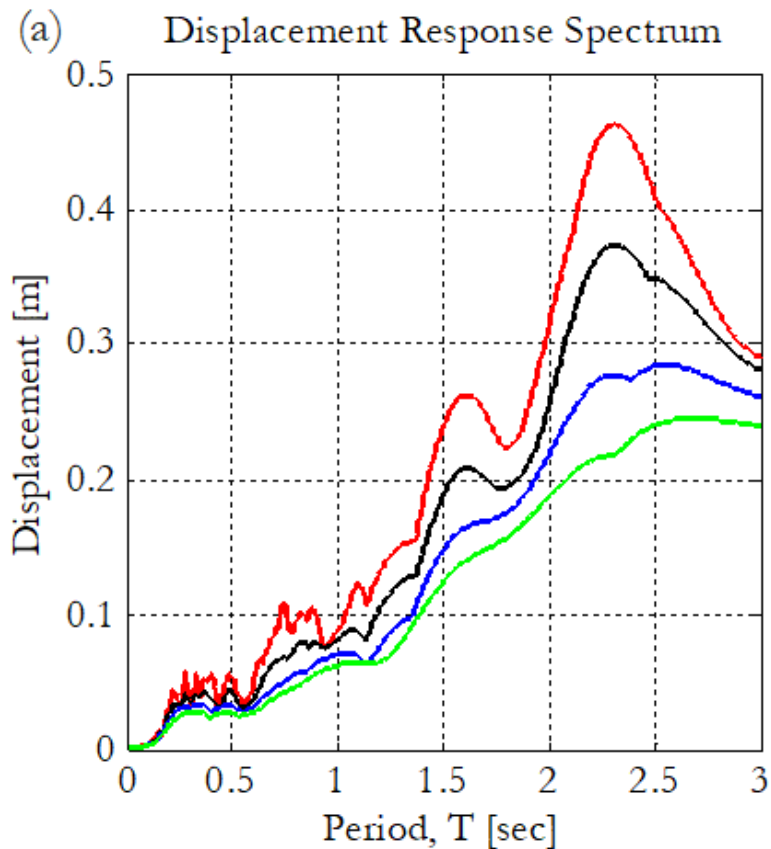
- Πλαστιμότητα: Ικανότητα δομικών στοιχείων και δομημάτων να αναλώσουν σεισμική ενέργεια, αναπτύσσοντας ανελαστικές παραμορφώσεις.
- Ανάλυση και σχεδιασμός φορέων υπό απομειωμένες σεισμικές δράσεις.



Ο κλασικός αντισεισμικός σχεδιασμός κτηριακών κατασκευών στηρίζεται στη διασφάλιση επαρκούς πλαστιμότητας, δηλαδή της ικανότητας των δομικών μελών να αναπτύσσουν ανελαστικές παραμορφώσεις, αναλώνοντας με αυτό τον τρόπο σημαντικό ποσοστό, της εισερχόμενης στην κατασκευή, σεισμικής ενέργειας.

Η κατασκευή πλήρως αντισεισμικών δομημάτων βάσει του κλασικού αντισεισμικού σχεδιασμού και των αντίστοιχων αντισεισμικών κανονισμών είναι πρακτικά ανέφικτη, τόσο για τεχνοοικονομικούς όσο και για λειτουργικούς και αισθητικούς λόγους.

Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό σχετικά δύσκαμπτων κατασκευών, χαμηλού ή μεσαίου ύψους, όπως οι συνήθεις κτηριακές κατασκευές στον Ελλαδικό και Κυπριακό χώρο, είναι το γεγονός ότι η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητά τους, εμπίπτει στο εύρος των κυριαρχουσών συχνοτήτων των πλείστων σεισμικών διεγέρσεων. Ένα σχετικά δύσκαμπτο, μονώροφο έως εξαώροφο, κτήριο, έχει θεμελιώδη ιδιοπερίοδο που κυμαίνεται μεταξύ από 0.1-0.6 sec, αντίστοιχα, ενώ συνήθως οι επικρατούσες περίοδοι των πλείστων σεισμικών διεγέρσεων εκτείνονται χρονικά στο ίδιο εύρος. Εφόσον η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος τέτοιων κτηρίων βρίσκεται εντός των επικρατουσών περιόδων των σεισμών, είναι αναμενόμενη, λόγω του συντονισμού, η ενίσχυση των επιταχύνσεων (Σχήμα 13.1.β) και των αντίστοιχων σεισμικών φορτίων που μεταφέρονται στην ανωδομή, σε επίπεδα που δεν είναι πρακτικά δυνατό, σε περίπτωση ισχυρής σεισμικής διέγερσης, να παραληφθούν χωρίς ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής και τις συνεπακόλουθες ζημιές στα κτήρια όσο και στο περιεχόμενό τους.



Σχήμα 13.1: Φάσματα απόκρισης σχετικών μετακινήσεων και απόλυτων επιταχύνσεων για το σεισμό του Northridge, 17/1/1994, στο Λος Άντζελες της Καλιφόρνιας.

Έτσι, ο συμβατικός αντισεισμικός σχεδιασμός στηρίζεται στη πλαστιμότητα μιας κατασκευής για να μπορέσει να αντέξει διαδοχικούς κύκλους ανελαστικών παραμορφώσεων, αποφεύγοντας καταρρεύσεις και ενδεχομένως ανθρώπινες απώλειες, αλλά επιτρέποντας, σε περίπτωση ισχυρού σεισμού, αναπόφευκτες βλάβες τόσο στα φέροντα όσο και στα μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής, λόγω των μεγάλων σχετικών μετακινήσεων και παραμορφώσεων, καθώς και ζημιές στα περιεχόμενα των κατασκευών, λόγω των μεγάλων απόλυτων επιταχύνσεων. Αυτός ο συμβιβασμός είναι αναγκαίος γιατί θα ήταν πρακτικά αντοικονομική και αρχιτεκτονικά ακαλαίσθητη μια κατασκευή που θα σχεδιαζόταν να είναι τόσο ισχυρή που να μπορεί να παραλάβει ένα πολύ ισχυρό σεισμό χωρίς καμία ανελαστική παραμόρφωση. Επιπλέον, ακόμη και εάν η δυσκαμψία και η αντοχή της κατασκευής μπορούσαν να εξασφαλίσουν την αποφυγή ζημιών στα φέροντα και μη φέροντα στοιχεία του φορέα, οι επιταχύνσεις της κατασκευής πιθανόν να ήταν καταστροφικές για ευαίσθητο εξοπλισμό που τυχόν στεγαζόταν στο κτήριο.

Δηλαδή, στην πραγματικότητα, μια σχετικά δύσκαμπτη κατασκευή σε μια έντονα σειсмоγόνο περιοχή που σχεδιάζεται βάσει των προνοιών ακόμη και των πλέον σύγχρονων κανονισμών συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού δεν είναι άτρωτη από σεισμούς, αλλά αντιμετωπίζει τον κίνδυνο εκδήλωσης σοβαρών βλαβών, στην περίπτωση ενός ισχυρού σεισμού. Τούτο είναι αναπόφευκτο, λόγω ισχυρών σεισμικών φορτίων που αναπόφευκτα προκαλούνται κυρίως από φαινόμενα συντονισμού των θεμελιωδών ιδιοσυχνοτήτων των συνήθων, σχετικά δύσκαμπτων, κατασκευών με τις επικρατούσες συχνότητες των σεισμικών διεγέρσεων στις πλείστες σειсмоγόνες περιοχές.

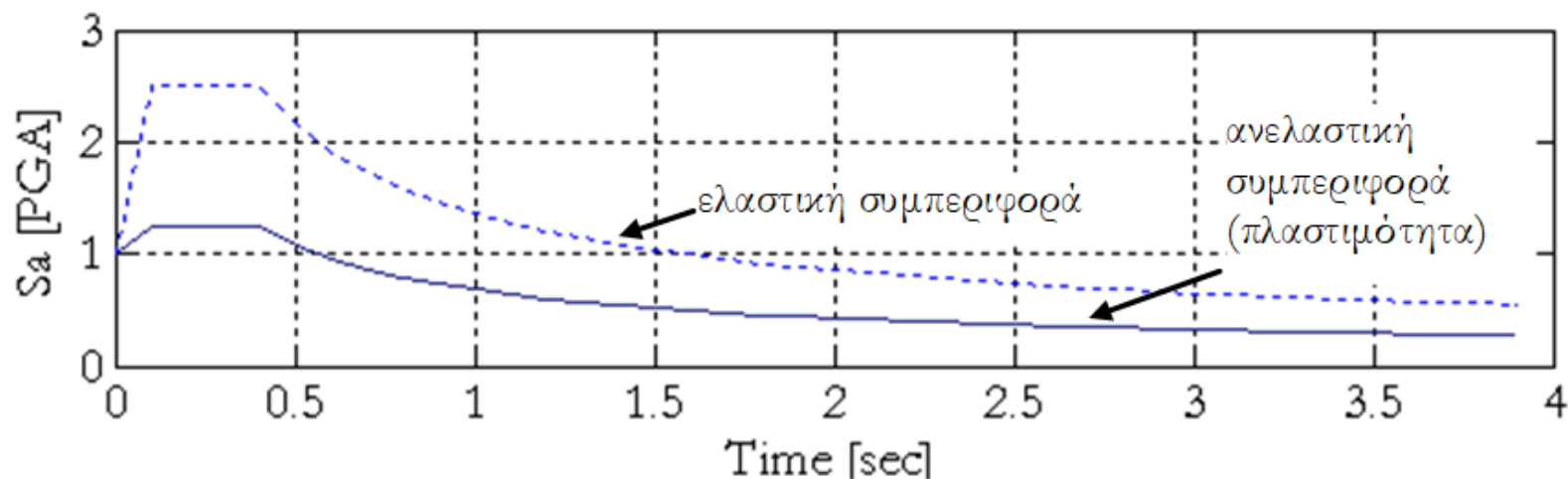
Έτσι, οι περισσότεροι σύγχρονοι κώδικες συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού στοχεύουν στο σχεδιασμό κατασκευών με τέτοιο τρόπο που να μπορούν να αποφύγουν οποιαδήποτε βλάβη σε ασθενείς σεισμικές διεγέρσεις, να αντέχουν σε σεισμικές διεγέρσεις μεσαίου μεγέθους με περιορισμένες βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία και να περιορίζονται πρακτικά στην αποτροπή δομικής κατάρρευσης, αναπτύσσοντας όμως βλάβες σε φέροντα και μη φέροντα στοιχεία, σε ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις. Δηλαδή, ο κύριος στόχος των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών είναι η πρόληψη σοβαρών δομικών αστοχιών και η αποφυγή ανθρώπινων απωλειών, και όχι ο περιορισμός των βλαβών και των λειτουργικών αστοχιών, σε περίπτωση ισχυρών σεισμών, οπότε είναι αποδεκτό και το ενδεχόμενο αναγκαίας κατεδάφισης της κατασκευής μετά το πέρας ενός πολύ ισχυρού σεισμού.

Ουσιαστικά, οι βλάβες που προκαλούνται λόγω των ανελαστικών παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων, συνιστούν την ασφαλιστική δικλείδα για την απόσβεση της σεισμικής ενέργειας που αναπόφευκτα εισέρχεται στην κατασκευή, λόγω της διέγερσης του εδάφους θεμελίωσης και του συντονισμού της κατασκευής με αυτήν, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα κατάρρευσης της. Ο συμβατικός αντισεισμικός σχεδιασμός βασίζεται κυρίως στην πλαστιμότητα, δηλαδή στην ικανότητα των δομικών στοιχείων και των κατασκευών να αναπτύσσουν σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις, ώστε η διαρροή να γίνεται με τρόπο που να αποφεύγεται η κατάρρευση.

Έτσι, θεωρώντας πως μια κατασκευή μπορεί να συμπεριφερθεί πλάστιμα, χωρίς ψαθυρές αστοχίες που ενδεχομένως να προκαλούσαν ανθρώπινες απώλειες, επιτρέπεται η ευχέρεια ανάλυσης και σχεδιασμού της κατασκευής, υπό σημαντικά μειωμένα σεισμικά φορτία σε σύγκριση με τα σεισμικά φορτία που θα αναπτύσσονταν χρησιμοποιώντας γραμμική ελαστική ανάλυση. Τυχόν θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς για την αποφυγή ανελαστικών παραμορφώσεων, θα ήταν τόσο οικονομικά ασύμφορη, λόγω του αυξημένου κόστους υλοποίησης, όσο και λειτουργικά και αισθητικά μη αποδεκτή, λόγω των τεραστίων διαστάσεων που θα απαιτούνταν για τα δομικά στοιχεία.

Με την επιλεκτική διαρροή κάποιων δομικών στοιχείων με συγκεκριμένη ανελαστική συμπεριφορά επιτυγχάνεται η υστερητική απόσβεση σεισμικής ενέργειας, όταν η κατασκευή υπόκειται σε διαδοχικούς κύκλους ανελαστικών παραμορφώσεων. Διενεργώντας ελαστική ανάλυση, η ενέργεια που αναλώνεται λόγω ανελαστικών παραμορφώσεων λαμβάνεται έμμεσα, αλλά σχετικά προσεγγιστικά, υπόψη μέσω κάποιου μειωτικού συντελεστή που σχετίζεται με τη μετελαστική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων. Συγκεκριμένα, στον Ευρωκώδικα 8, η μείωση επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του συντελεστή συμπεριφοράς q , ο οποίος αντιστοιχεί σε μια προσέγγιση του λόγου των σεισμικών δυνάμεων στις οποίες θα υποβαλλόταν ο φορέας εάν η απόκρισή του ήταν απεριόριστα ελαστική με λόγο ιξώδους απόσβεσης ίσο με 5%, προς τις σεισμικές δυνάμεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη, με ένα συμβατικό προσομοίωμα ελαστικής ανάλυσης, εξασφαλίζοντας όμως ικανοποιητική απόκριση του φορέα.

Οι περισσότεροι αντισεισμικοί κανονισμοί για να ορίσουν την εδαφική επιτάχυνση, υπό την οποία θα πραγματοποιηθεί η φασματική ανάλυση μιας κατασκευής, κάνουν χρήση των φασμάτων σχεδιασμού, τα οποία συνιστούν μια ομαλοποιημένη περιβάλλουσα, η οποία σχηματίζεται βάσει του μέσου όρου μιας συλλογής φασμάτων απόκρισης, προστιθέμενου με μια τυπική απόκλιση, ώστε να μειωθεί σε αποδεκτά επίπεδα η πιθανότητα υπέρβασής τους. Στο Σχήμα 13.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό φάσμα σχεδιασμού, με δύο περιβάλλουσες, η μία εκ των οποίων αντιστοιχεί σε ελαστική συμπεριφορά και η άλλη σε ανελαστική συμπεριφορά ενός ΜΒΣ. Το ελαστικό φάσμα αφορά κατασκευές που σχεδιάζονται για να αποκριθούν ελαστικά όταν πληγούν από το σεισμό σχεδιασμού, ενώ το ανελαστικό φάσμα είναι απομειωμένο σε σχέση με το ελαστικό, με την απομείωση να αντιστοιχεί στη σεισμική ενέργεια που μπορεί να αποσβεστεί λόγω πλαστιμότητας.



Σχήμα 13.2: Τυπικό φάσμα σχεδιασμού ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς.

Συνεπώς, οι πλείστοι κώδικες συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού δε βασίζονται στα πραγματικά οριζόντια φορτία στα οποία θα πρέπει να αντισταθεί μια κατασκευή ώστε να παραμείνει ελαστική, αλλά σε απομειωμένα φορτία τα οποία μπορεί να αναλάβει η κατασκευή με επιθυμητές ανελαστικές παραμορφώσεις και αυξημένες μετακινήσεις που να μην προκαλούν όμως την κατάρρευσή της. Λαμβάνοντας υπόψη κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, οι ανελαστικές παραμορφώσεις και οι βλάβες συγκεκριμένων δομικών μελών θεωρούνται αποδεκτές, υπό τις προϋποθέσεις πως η ανελαστική συμπεριφορά έχει όλκιμο χαρακτήρα και πως δε διακυβεύεται η ακεραιότητα της κατασκευής κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά το τέλος της δράσης ενός ισχυρού σεισμού, ώστε να αποφεύγονται ανθρώπινες απώλειες. Η δε επιθυμητή ικανότητα σε πλαστιμότητα της κατασκευής επιτυγχάνεται μέσω ειδικών σχεδιαστικών προνοιών και κατασκευαστικών πρακτικών, οι οποίες καθορίζονται από τους αντίστοιχους κώδικες αντισεισμικού σχεδιασμού.

Έτσι, ο κλασικός αντισεισμικός σχεδιασμός δεν εξασφαλίζει την, εσφαλμένα αναμενόμενη από το μέσο πολίτη, ικανότητα των κατασκευών για να αποκριθούν ικανοποιητικά σε οποιαδήποτε σεισμική διέγερση χωρίς βλάβες. Σε αντίθεση με την επικρατούσα κοινωνική αντίληψη, είναι πιθανόν, αλλά και επιτρεπτό, να αναπτυχθούν σημαντικές βλάβες στο φέροντα οργανισμό μιας κτηριακής κατασκευής αλλά και σε μη φέροντα στοιχεία κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού. Είναι σημαντική η κατανόηση αυτού του δεδομένου από τους μηχανικούς και η αντίστοιχη ενημέρωση του αγοραστικού κοινού, ώστε να μη βασίζεται στην εσφαλμένη εντύπωση για δήθεν απόλυτα διασφαλισμένες κατασκευές έναντι οποιασδήποτε σεισμικής διέγερσης όταν αυτές σχεδιαστούν, αναλυθούν και διαστασιολογηθούν βάσει ενός σύγχρονου αντισεισμικού κανονισμού. Δυστυχώς, το κοινό πληροφορείται για τους περιορισμούς του συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού μόνο μετά από καταστροφικά γεγονότα, έχοντας δηλαδή βιώσει τις ολέθριες συνέπειες μια σεισμικής δόνησης.

Εφόσον το κοινό αγνοεί τους περιορισμούς και αδυναμίες του συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού, δεν δέχεται εύκολα την υιοθέτηση καινοτόμων μεθόδων σχεδιασμού, οι οποίες προϋποθέτουν κάποιο επιπλέον αρχικό κόστος, έστω και εάν αυτές οι επιπλέον δαπάνες είναι ασήμαντες, σε σχέση τόσο με το κόστος άλλων διακοσμητικών στοιχείων της κατασκευής όσο και της ζημιάς που μπορεί να αποφευχθεί σε περίπτωση ισχυρού σεισμού. Άλλωστε, η υπάρχουσα εμπειρία καταδεικνύει πως το κόστος επιδιόρθωσης σεισμικά βλαμμένων κτηρίων ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα υψηλό, ενώ οι εργασίες επιδιόρθωσης είναι χρονοβόρες και ίσως να απαιτούν εκκένωση του κτηρίου από τους ενοίκους. Θα πρέπει επίσης να είναι κατανοητό ότι οι συνέπειες έχουν πολλαπλασιαστικό χαρακτήρα όταν πρόκειται για έργα κοινής ωφελείας όπως γέφυρες, δημόσιες υπηρεσίες και άλλες ζωτικές υποδομές.

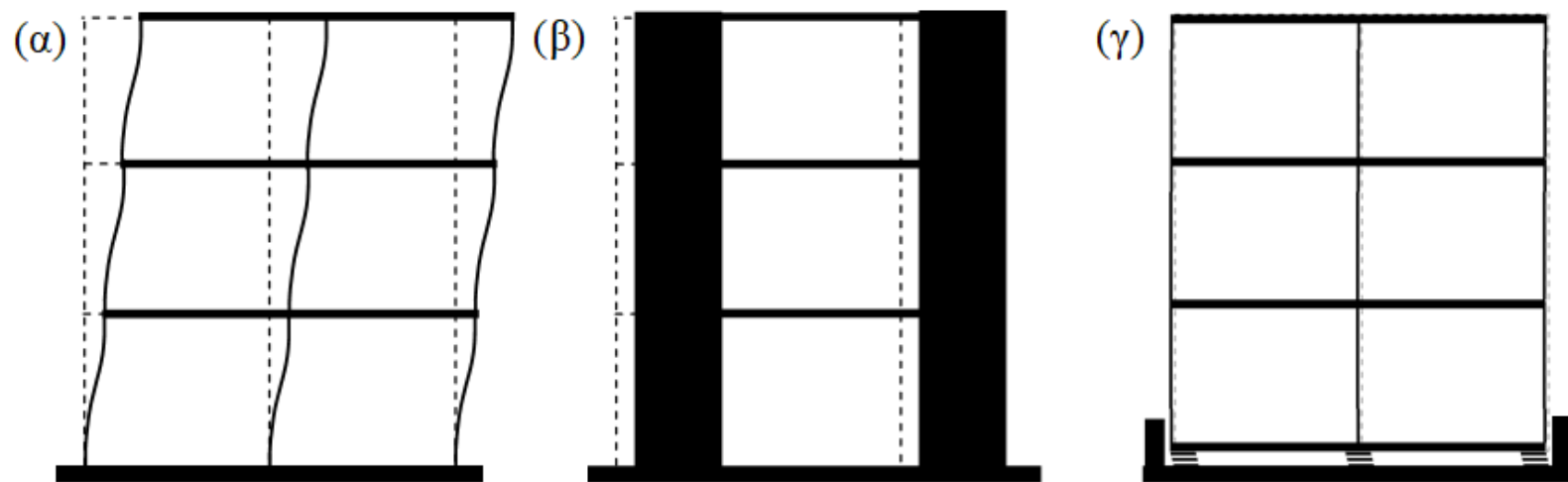
Κατά συνέπεια, είναι προφανής η ανάγκη, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, για μια εναλλακτική φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού, επικεντρωμένη στον περιορισμό, ή αν είναι εφικτό στην πλήρη αποτροπή, των βλαβών και στη μείωση μακροπρόθεσμων δαπανών που συνεπάγονται οι επιδιορθώσεις τυχόν βλαβών μετά από τη δράση ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων.

Εισαγωγή στη σεισμική μόνωση

Η φιλοσοφία της σεισμική μόνωσης, σε αντίθεση με αυτή του συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού, ο οποίος προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τις συνέπειες των αναπόφευκτα, λόγω συντονισμού, μεγάλων σεισμικών φορτίων σε περίπτωση ισχυρής σεισμικής διέγερσης, βασίζεται στην τροποποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, ώστε, αποτρέποντας το φαινόμενο του συντονισμού, να περιοριστούν σημαντικά οι επιταχύνσεις στην ανωδομή και τα εισερχόμενα σεισμικά φορτία.

Προς αυτόν το σκοπό, παρατηρώντας ένα τυπικό φάσμα απόκρισης, θα μπορούσε να επιδιωχθεί ο σχεδιασμός της κατασκευής έτσι ώστε να είναι πάρα πολύ εύκαμπτη (Σχήμα 13.3.α), για να αποφεύγεται το ενδεχόμενο συντονισμού, αυξάνοντας τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του κτιρίου και μετατοπίζοντας την προς τα δεξιά στο φάσμα απόκρισης, όπου είναι μειωμένες οι επιταχύνσεις. Ένα τέτοιο κτίριο ουσιαστικά θα παραμένει σχεδόν ακίνητο, ανίκανο να ακολουθήσει τη, σχετικά πολύ πιο υψίσυχνη, σεισμική διέγερση, καθώς το έδαφος θεμελίωσής του θα κινείται λόγω αυτής. Συνεπώς, ένα τέτοιο, εξαιρετικά εύκαμπτο, κτίριο θα έχει πολύ μικρές απόλυτες επιταχύνσεις και συνεπώς πολύ μικρές σεισμικές δυνάμεις. Όμως, ταυτόχρονα και αναπόφευκτα, θα έχει πάρα πολύ μεγάλες σχετικές μετακινήσεις (Σχήμα 13.1.α) και πολύ μεγάλες παραμορφώσεις των δομικών και μη δομικών στοιχείων του, με τις συνεπαγόμενες ζημιές σε φέροντα και μη φέροντα στοιχεία του. Συνεπώς, δεν θα ήταν πρακτικά δόκιμος ένας τέτοιος σχεδιασμός για την αποφυγή του συντονισμού.

Αντιθέτως, θα μπορούσε να επιχειρηθεί ο σχεδιασμός του κτηρίου έτσι ώστε να είναι πάρα πολύ δύσκαμπτο (Σχήμα 13.3.β), ώστε να αποφεύγονται οι μεγάλες παραμορφώσεις και αντίστοιχες ζημιές των στοιχείων του κτηρίου, αφού θα είναι πολύ μικρή η θεμελιώδης ιδιοπερίοδός του. Όμως το κτίριο θα είναι τόσο δύσκαμπτο που θα κινείται ουσιαστικά μαζί με το έδαφος θεμελίωσης, αναπτύσσοντας επιταχύνσεις ίσες ή μεγαλύτερες των εδαφικών επιταχύνσεων (PGA) που ενδεχομένως να ήταν καταστροφικές για εξοπλισμό και υπηρεσίες που τυχόν στεγάζονται στο κτίριο σε περίπτωση ισχυρού σεισμού.

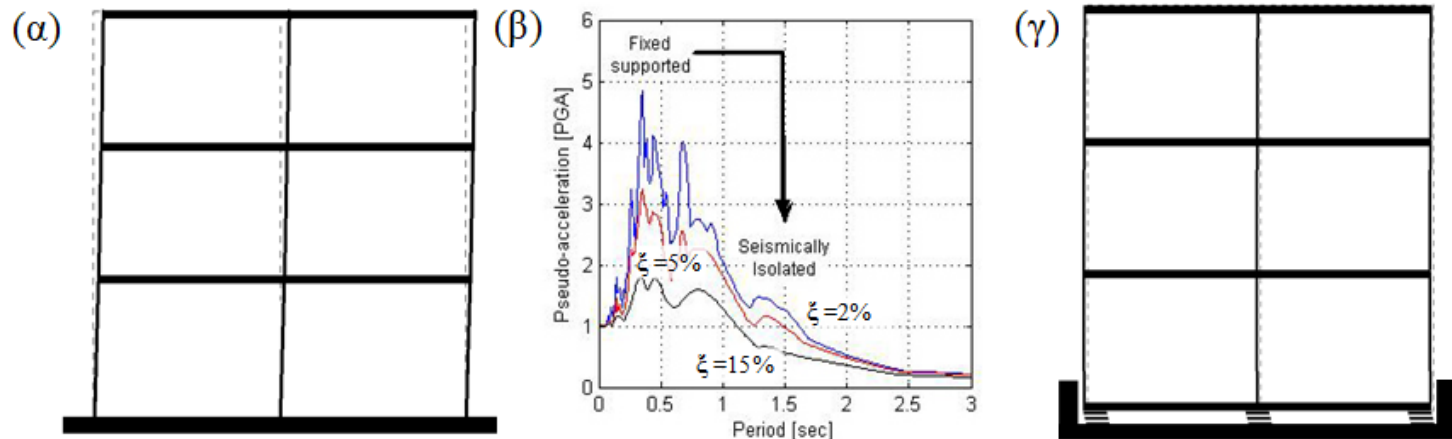


Σχήμα 13.3: (α) πολύ εύκαμπτο κτίριο (β) πολύ δύσκαμπτο κτίριο (γ) σεισμικά μονωμένο κτίριο.

Η αδυναμία του κλασικού αντισεισμικού σχεδιασμού για αποφυγή των ζημιών και των συνεπειών ισχυρών σεισμών, κυρίως λόγω του αναπόφευκτου συντονισμού, οδήγησε στην ανάπτυξη της σεισμικής μόνωσης των κατασκευών, ως μιας καινοτόμας μεθόδου παθητικού ελέγχου με την οποία μπορεί να επιτευχθεί η αντισεισμική προστασία κατασκευών.

Η αδυναμία του κλασικού αντισεισμικού σχεδιασμού για αποφυγή των ζημιών και των συνεπειών ισχυρών σεισμών, κυρίως λόγω του αναπόφευκτου συντονισμού, οδήγησε στην ανάπτυξη της σεισμικής μόνωσης των κατασκευών, ως μιας καινοτόμας μεθόδου παθητικού ελέγχου με την οποία μπορεί να επιτευχθεί η αντισεισμική προστασία κατασκευών.

Σε αντίθεση με τα σχετικά δύσκαμπτα συμβατικά θεμελιωμένα κτήρια (Σχήμα 13.4.α), τα οποία διατρέχουν τον κίνδυνο συντονισμού με τις επικρατούσες συχνότητες των συνήθων σεισμικών διεγέρσεων, η σεισμική μόνωση αντιμετωπίζει τους σεισμούς προσπαθώντας να μειώσει τα σεισμικά φορτία της κατασκευής εισάγοντας εύκαμπτα στοιχεία, τα σεισμικά εφέδρανα ή σεισμικούς μονωτήρες, (Σχήμα 13.4.γ), στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης ώστε να μετατοπιστεί η θεμελιώδης περίοδος μιας κατασκευής εκτός της περιοχής των κυριαρχουσών επιταχύνσεων των συνήθων σεισμικών διεγέρσεων, αποφεύγοντας το συντονισμό με αυτές (Σχήμα 13.4.β).

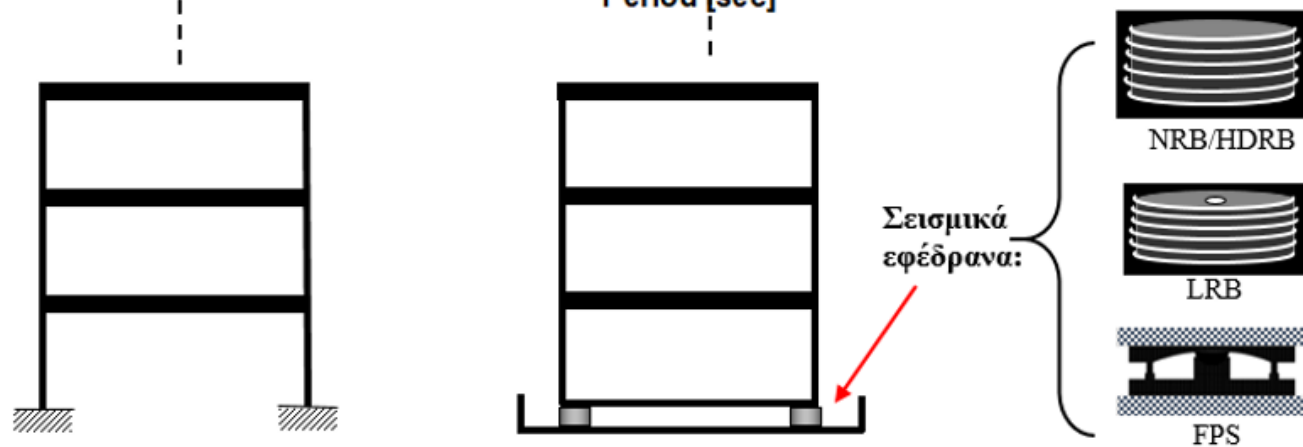
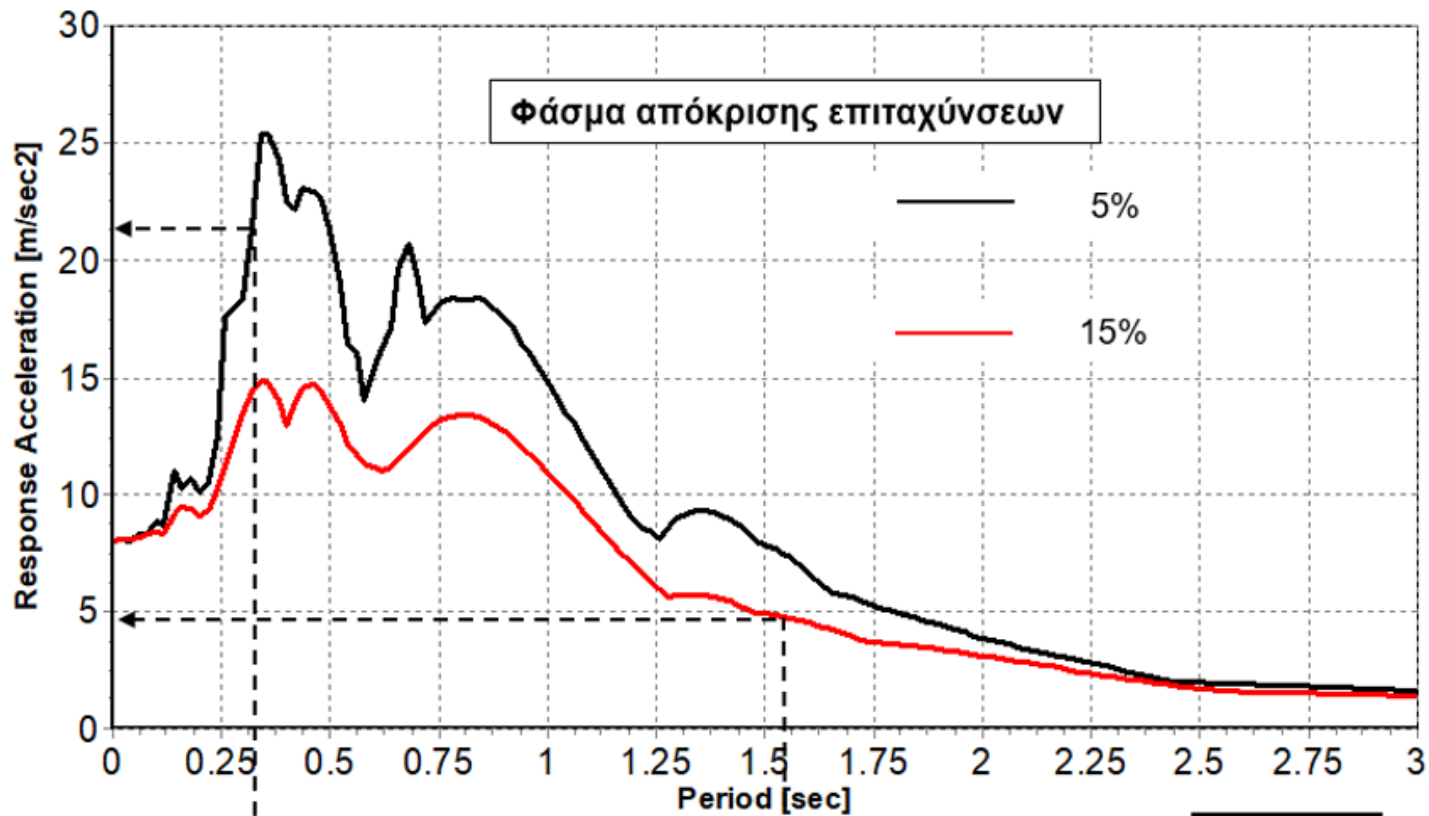


Σχήμα 13.4: (α) συμβατικά θεμελιωμένο κτίριο (β) φάσμα απόκρισης (ψευδοεπιταχύνσεων) για το σεισμό του Kobe με τις περιοχές ιδιοπεριόδων κτηρίων χωρίς και με σεισμική μόνωση (γ) σεισμικά μονωμένο κτίριο.

Με τη σεισμική μόνωση (Σχήμα 13.4.γ), τόσο οι απόλυτες επιταχύνσεις των ορόφων όσο και οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων μειώνονται σημαντικά. Οι παραμορφώσεις περιορίζονται στους σεισμικούς μονωτήρες, οι οποίοι σχεδιάζονται και κατασκευάζονται έτσι ώστε να μπορούν να παραλάβουν τόσο μεγάλες παραμορφώσεις προσφέροντας μάλιστα υψηλά επίπεδα απόσβεσης. Έτσι περιορίζονται σημαντικά οι βλάβες στην ανωδομή, η οποία κινείται σχεδόν σαν στερεό σώμα, ενώ ταυτόχρονα προστατεύεται σημαντικός εξοπλισμός που ενδεχομένως να στεγάζεται στο κτίριο, λόγω σημαντικής μείωσης των επιταχύνσεων στην ανωδομή.

Η σεισμική μόνωση, ως μέθοδος αντισεισμικής προστασίας, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο σε νέες κατασκευές όσο και στην αντισεισμική αναβάθμιση υφιστάμενων κατασκευών μεγάλης αρχιτεκτονικής ή λειτουργικής αξίας. Επιπλέον, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αντισεισμικής αναβάθμισης, η σεισμική μόνωση μιας υφιστάμενης κατασκευής μπορεί συνήθως να επιτευχθεί με την ελάχιστη δυνατή διακοπή της κανονικής χρήσης της κατασκευής και χωρίς απαιτούμενες αρχιτεκτονικές και δομικές επεμβάσεις στην ανωδομή, το οποίο είναι σημαντικό ειδικά σε κτήρια μεγάλης λειτουργικής και αρχιτεκτονικής σπουδαιότητας, αντίστοιχα.

Η βασική αρχή της σεισμικής μόνωσης αφορά την αποσύζευξη μιας κατασκευής, ή τμήματος αυτής, ή και εξοπλισμού που φυλάσσεται εντός της από τις ζημιογόνες επιπτώσεις των σεισμικών δονήσεων. Η φιλοσοφία της σεισμικής μόνωσης βασίζεται στην αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της κατασκευής και στη μετάθεσή της έξω από την περιοχή των δεσποζουσών συχνοτήτων των σεισμικών διεγέρσεων, ώστε να αποφεύγεται ο συντονισμός και να μειώνονται οι επιταχύνσεις και οι αντίστοιχες αδρανειακές δυνάμεις που επιβάλλονται στην κατασκευή (Σχήμα 13.5). Ταυτοχρόνως, παρέχεται κάποιος επιπλέον μηχανισμός απόσβεσης στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης, συνήθως από τους σεισμικούς μονωτήρες, ώστε να αποσβένεται ενέργεια και να περιορίζεται το εύρος των σχετικών μετακινήσεων στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Ενώ ο λόγος ιξώδους απόσβεσης των πλείστων συμβατικά σχεδιασμένων αντισεισμικών κτηριακών κατασκευών κυμαίνεται μεταξύ 2-5 %, η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση ενός σεισμικά μονωμένου κτηρίου είναι της τάξης του 15-20 %, αν και δεν μπορεί να καθοριστεί επακριβώς για τα πλείστα συστήματα σεισμικής μόνωσης αφού είναι κυρίως υστερητικής μορφής και η αντιστοιχία της με ισοδύναμη ιξώδη απόσβεση εξαρτάται από την ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης.



Σχήμα 13.5: Αποφυγή συντονισμού, επιμηκύνοντας τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής με την παρεμβολή σεισμικών μονωτήρων στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης, συνήθως στη βάση της.

Η θεμελιώδης ιδιομορφή μιας σεισμικά μονωμένης κατασκευής αφορά παραμόρφωση μόνο του συστήματος μόνωσης, ενώ η ανωδομή παραμένει ουσιαστικά απαραμόρφωτη. Η συνεισφορά της θεμελιώδους ιδιομορφής στην απόκριση της κατασκευής είναι πολύ πιο σημαντική σε μια σεισμικά μονωμένη κατασκευή, όπως φαίνεται και από την αντίστοιχη ενεργή ιδιομορφική μάζα, από ότι σε μια συμβατικά σχεδιασμένη αντισεισμική κατασκευή. Οι ανώτερες ιδιομορφές παρουσιάζουν παραμορφώσεις ορθογωνικές ως προς την πρώτη ιδιομορφή και επίσης δε συμμετέχουν σημαντικά στην απόκριση και έτσι η ενέργεια της εδαφικής διέγερσης δεν θα μπορεί να μεταδοθεί στην ανωδομή σ' αυτές τις υψηλές ιδιοσυχνότητες. Με αυτή τη ριζοσπαστική μεθοδολογία αντισεισμικού σχεδιασμού, επιτυγχάνεται η μόνωση της κατασκευής από το έδαφος θεμελίωσης με αποτέλεσμα τον περιορισμό της σεισμικής ενέργειας που μεταδίδεται στην ανωδομή.

Συνήθως, η σεισμική μόνωση (*seismic isolation*), για πρακτικούς λόγους, γίνεται με έδραση της κατασκευής σε σεισμικά εφέδρανα, ή σεισμικούς μονωτήρες, αντί της απευθείας στήριξης της στη θεμελίωση, οπότε και ονομάζεται και μόνωση βάσης (*base isolation*). Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις, το σύστημα σεισμικής μόνωσης εισάγεται σε κάποιο άλλο επίπεδο καθ' ύψος, όπως π.χ. στην κορυφή των υποστυλωμάτων του πρώτου ορόφου, λόγω κάποιων συγκεκριμένων πρακτικών λόγων, όπως τον καλύτερο έλεγχο και συντήρηση του συστήματος σεισμικής μόνωσης.

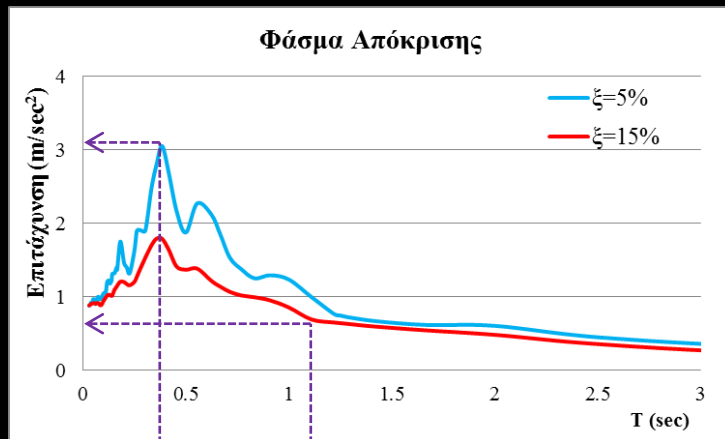
Παρά το ότι έχουν προταθεί και συστήματα σεισμικής μόνωσης τα οποία αντιμετωπίζουν και τις επιταχύνσεις στην κατακόρυφη συνιστώσα, στις πλείστες των περιπτώσεων, η μόνωση σχεδιάζεται με στόχο τον περιορισμό των δράσεων μόνο των οριζόντιων συνιστωσών των σεισμικών διεγέρσεων που είναι κρισιμότερες για τις συνήθεις κτηριακές κατασκευές. Ούτως ή άλλως, η κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα είναι συνήθως αρκετά μικρότερη και συνεπώς λιγότερο επιζήμια από τις αντίστοιχες οριζόντιες σεισμικές συνιστώσες. Επιπλέον, οι κατασκευές, και ειδικότερα οι κτηριακές κατασκευές, είναι σχεδιασμένες και επαρκώς διαστασιολογημένες για να φέρουν σημαντικά κατακόρυφα φορτία, όπως π.χ. τα φορτία βαρύτητας, γεγονός το οποίο τις καθιστά λιγότερο τρωτές όταν υπόκεινται σε κατακόρυφες σεισμικές συνιστώσες.

Παρά το ότι έχουν προταθεί και συστήματα σεισμικής μόνωσης τα οποία αντιμετωπίζουν και τις επιταχύνσεις στην κατακόρυφη συνιστώσα, στις πλείστες των περιπτώσεων, η μόνωση σχεδιάζεται με στόχο τον περιορισμό των δράσεων μόνο των οριζόντιων συνιστωσών των σεισμικών διεγέρσεων που είναι κρισιμότερες για τις συνήθεις κτηριακές κατασκευές. Ούτως ή άλλως, η κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα είναι συνήθως αρκετά μικρότερη και συνεπώς λιγότερο επιζήμια από τις αντίστοιχες οριζόντιες σεισμικές συνιστώσες. Επιπλέον, οι κατασκευές, και ειδικότερα οι κτηριακές κατασκευές, είναι σχεδιασμένες και επαρκώς διαστασιολογημένες για να φέρουν σημαντικά κατακόρυφα φορτία, όπως π.χ. τα φορτία βαρύτητας, γεγονός το οποίο τις καθιστά λιγότερο τρατές όταν υπόκεινται σε κατακόρυφες σεισμικές συνιστώσες.

Φιλοσοφία Σεισμικής Μόνωσης

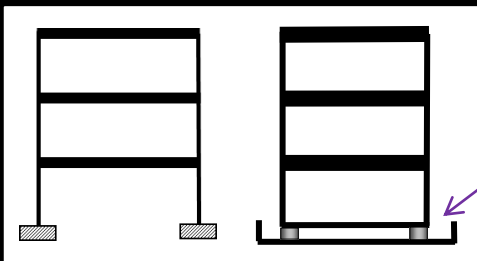
- Κάθε σύστημα, εύκαμπτο ή ολισθαίνον, το οποίο εισάγεται στη βάση ή σε ανώτερη στάθμη μιας κατασκευής, με σκοπό τον περιορισμό της απόκρισης της ανωδομής υπό σεισμικές διεγέρσεις.

- Μετάθεση θεμελιωδών ιδιοσυχνοτήτων εκτός του εύρους των δεσπόζουσων συχνοτήτων των σεισμικών διεγέρσεων
- Παροχή πρόσθετης απόσβεσης



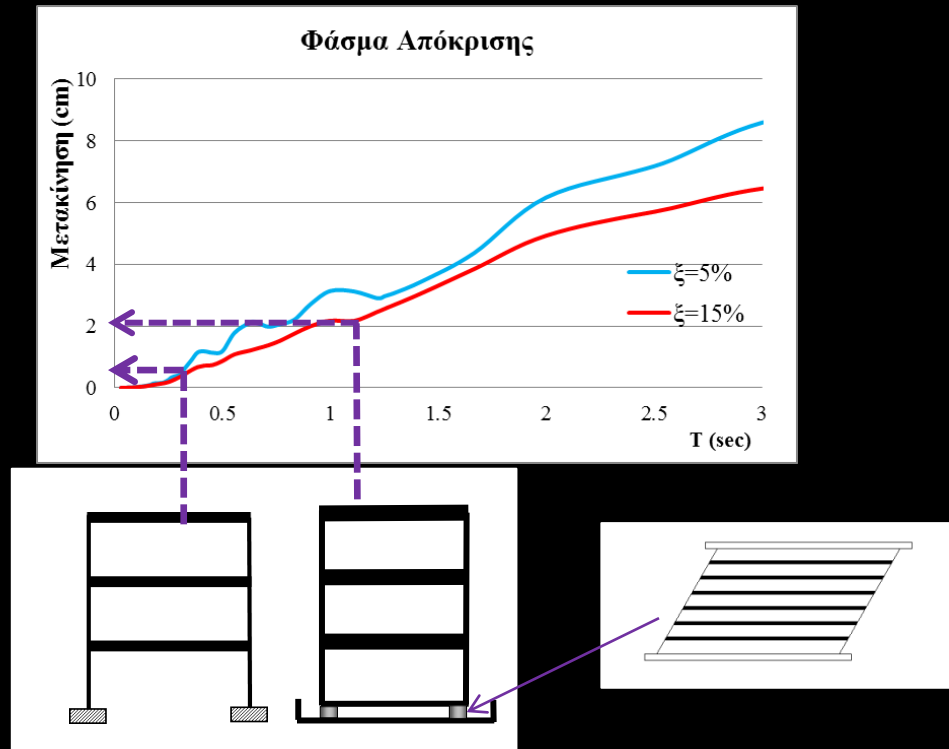
▪ Σημαντική μείωση:

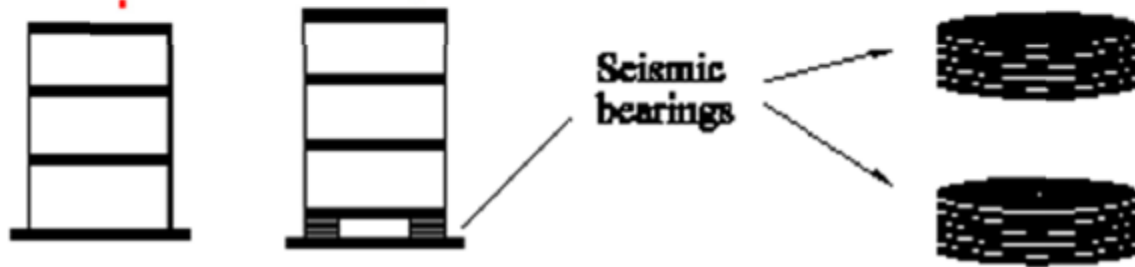
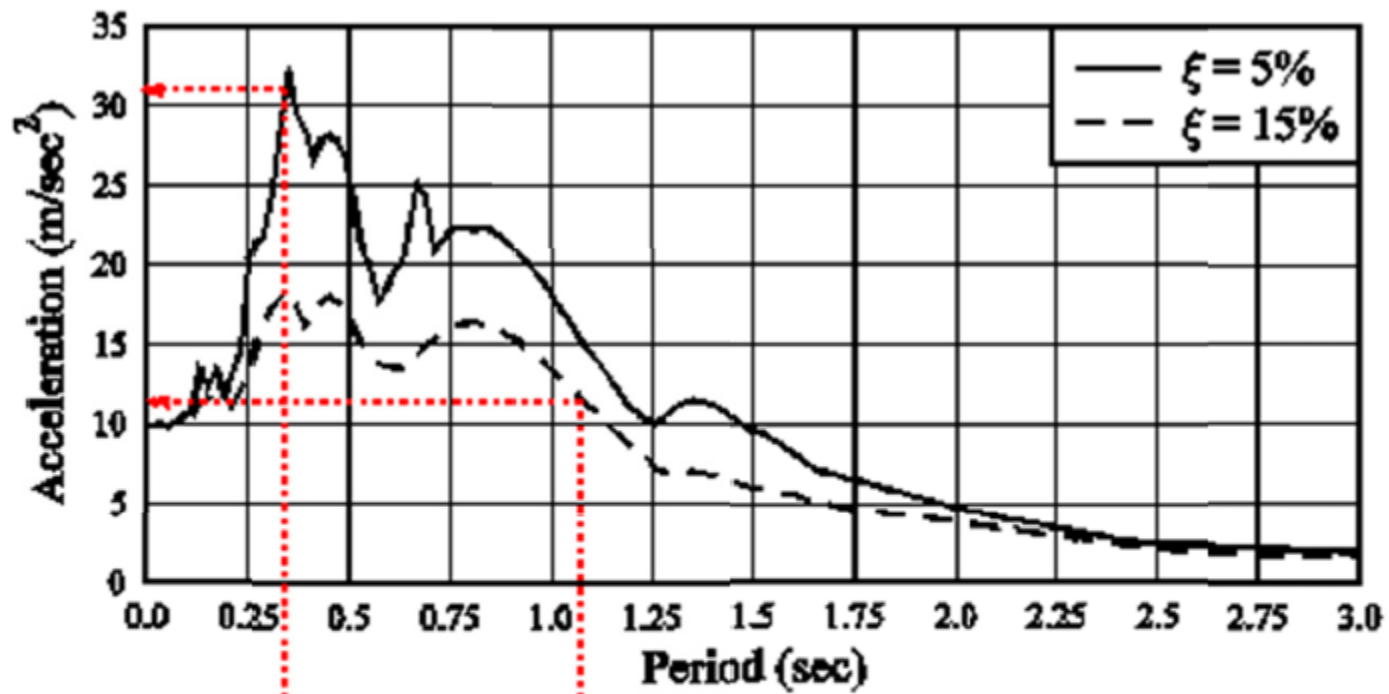
- Σχετικών μετακινήσεων ορόφων
- Απόλυτων επιταχύνσεων
- Εντατικής καταπόνησης



- Με τη σεισμική μόνωση:
 - οι απόλυτες επιταχύνσεις των ορόφων όσο και οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων μειώνονται σημαντικά
 - οι παραμορφώσεις περιορίζονται στους σεισμικούς μονωτήρες, οι οποίοι σχεδιάζονται ειδικά για να μπορούν να παραλάβουν τέτοιες παραμορφώσεις προσφέροντας μάλιστα ψηλά επίπεδα απόσβεσης
 - περιορίζονται σημαντικά οι βλάβες στην ανωδομή, η οποία κινείται, σαν στερεό σώμα
 - ταυτόχρονα προστατεύεται σημαντικός εξοπλισμός που ενδεχομένως να στεγάζει το κτίριο λόγω των πολύ χαμηλών απόλυτων επιταχύνσεων του ορόφου

- Αντίτιμο → Μεγάλες μετακινήσεις συστήματος μόνωσης.
- Οι σεισμικοί μονωτήρες είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι ώστε να αναπτύσσουν τέτοιες μετακινήσεις, χωρίς να υφίστανται λειτουργικές βλάβες ή άλλες αστοχίες.





Συστήματα Σεισμικής Μόνωσης

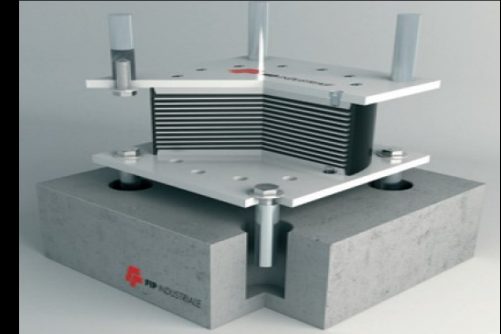
Ένα σύστημα σεισμικής μόνωσης αποτελείται από σεισμικούς μονωτήρες (ή, άλλως, σεισμικά εφέδρανα), οι οποίοι μπορούν τοποθετηθούν σε μια στάθμη της κατασκευής, συνήθως στη βάση της (Σχήμα 13.4.γ), με σκοπό τη σεισμική μόνωση της κατασκευής, δηλαδή τη μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών της, ώστε να βελτιωθεί η δυναμική συμπεριφορά της κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων. Αρκετά διαφορετικά συστήματα σεισμικής μόνωσης έχουν προταθεί, κατασκευαστεί και χρησιμοποιηθεί. Οι δύο πιο κοινές κατηγορίες σεισμικών εφεδράνων είναι τα ελαστομερικά (ή, άλλως, ελαστομεταλλικά), εφέδρανα (*elastomeric bearings*), των οποίων το ελαστομερές υλικό είναι είτε φυσικό ελαστικό είτε νεοπρένιο, και τα σεισμικά εφέδρανα ολίσθησης (*sliding bearings*), των οποίων η επιφάνεια ολίσθησης κατασκευάζεται με ανοξειδωτο χάλυβα ή Teflon ή και άλλα προταθέντα υλικά για να διασφαλίζεται ο επιθυμητός συντελεστής τριβής, όπως και άλλες ιδιότητες. Επιπρόσθετα, έχουν παρουσιαστεί και υβριδικά συστήματα μόνωσης, στα οποία συνδυάζονται διάφοροι τύποι σεισμικών εφεδράνων, όπως π.χ. με την ταυτόχρονη χρήση ελαστομερικών εφεδράνων και εφεδράνων ολίσθησης.

Γενικά, ένα σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να έχει τέτοια χαρακτηριστικά ώστε τα σεισμικά φορτία που θα εισέρχονται στην ανωδομή κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού, για τη συγκεκριμένη περιοχή, σεισμού να περιορίζονται σε χαμηλά επίπεδα που να μην προκαλούνται οποιεσδήποτε ζημιές τόσο στο δομικό και μη δομικό σύστημα όσο και στα περιεχόμενα της κατασκευής, ώστε να μην προκαλείται διακοπή της λειτουργίας της κατασκευής. Ταυτοχρόνως, ένα σύστημα σεισμικής μόνωσης θα πρέπει να έχει ικανοποιητική δυσκαμψία τόσο στην οριζόντια διεύθυνση υπό τα αναμενόμενα δευτερεύοντα οριζόντια φορτία, όπως π.χ. φορτία ανεμοπίεσης, όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση, για την αποφυγή κατακόρυφων ταλαντώσεων ή φαινομένων λικνισμού. Επιπλέον, το σύστημα θα πρέπει να παρέχει κάποιο μηχανισμό απόσβεσης ενέργειας για να περιορίζει τις μεγάλες σχετικές μετακινήσεις που αναμένονται στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης, λόγω της εισαγόμενης εκεί ευκαμψίας, και να αποτρέπονται τυχόν συγκρούσεις με τον περιμετρικό τοίχο ή άλλες γειτονικές κατασκευές (Σχήμα 13.9). Επίσης, είναι σημαντικό για ένα σύστημα σεισμικής μόνωσης να υπάρχει ένας μηχανισμός επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση μετά το πέρας ενός ισχυρού σεισμού, ώστε να αποφεύγονται τυχόν παραμένουσες παραμορφώσεις. Τέλος, είναι απαραίτητο να είναι πρακτικά δυνατός ο έλεγχος των σεισμικών μονωτήρων και η τυχόν αντικατάστασή τους σε περίπτωση βλάβης ή ακόμη και για σκοπούς ελέγχου.

Κατηγορίες Σεισμικών Μονωτήρων

1. Ελαστομερικά Εφεδράνα:

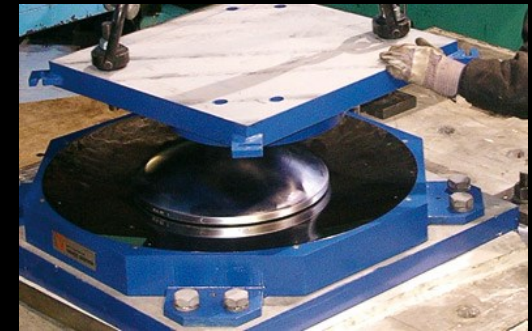
- Διατάξεις εναλλασσόμενων φύλλων ελαστομερούς (φυσικό καουτσούκ ή νεοπρένιο) και χαλύβδινων πλακών
- Υψηλή ευτημήςια ελαστομερούς → μετάθεση ιδιοπεριόδου



▪ FIP INDUSTRIALE

2. Συστήματα Ολίσθησης:

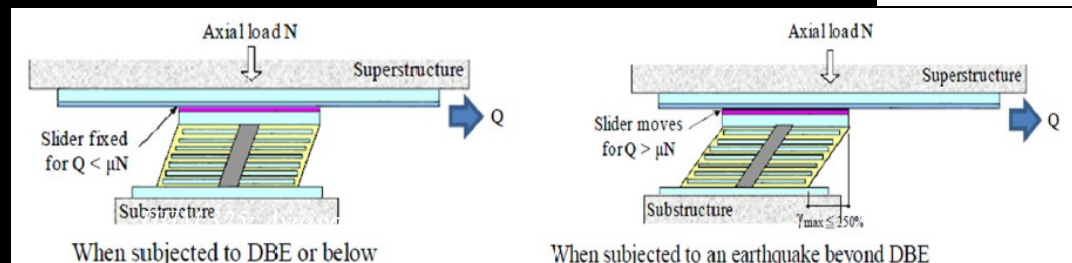
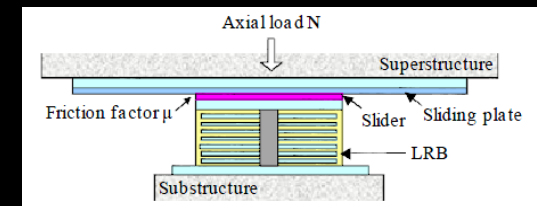
- Σχετική ολίσθηση μεταξύ επιφανειών πέραν μιας συγκεκριμένης δύναμης
- Ανάλωση ενέργειας ως απόρροια της τριβής



▪ Maurer Söhne

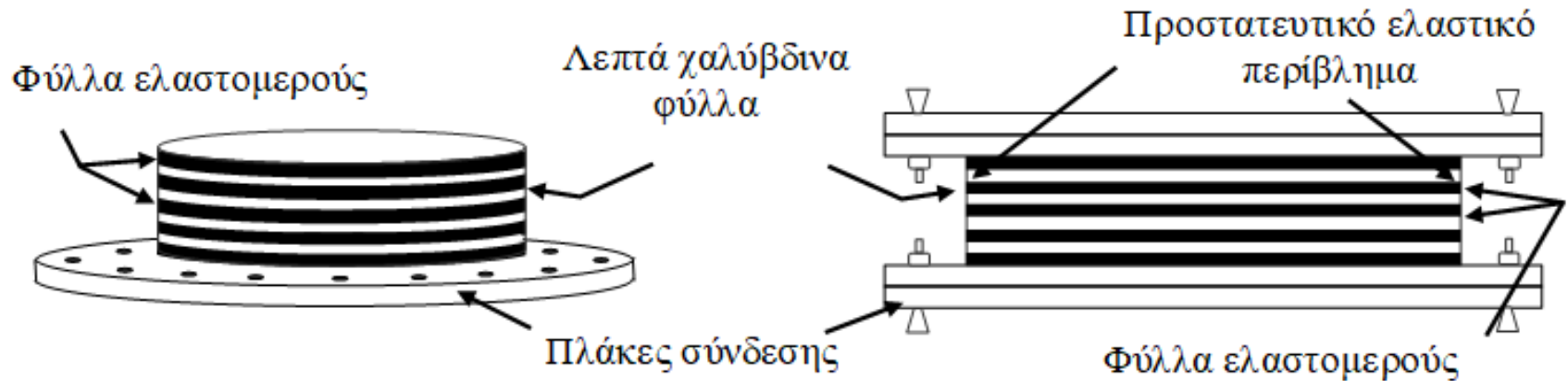
3. Υβριδικοί Μονωτήρες:

- Συνδυασμός ελαστομερικού εφεδράνου και συστήματος ολίσθησης σε μία ενιαία οντότητα
- Συγκερασμός ιδιοτήτων των δύο κατηγοριών συστημάτων μόνωσης



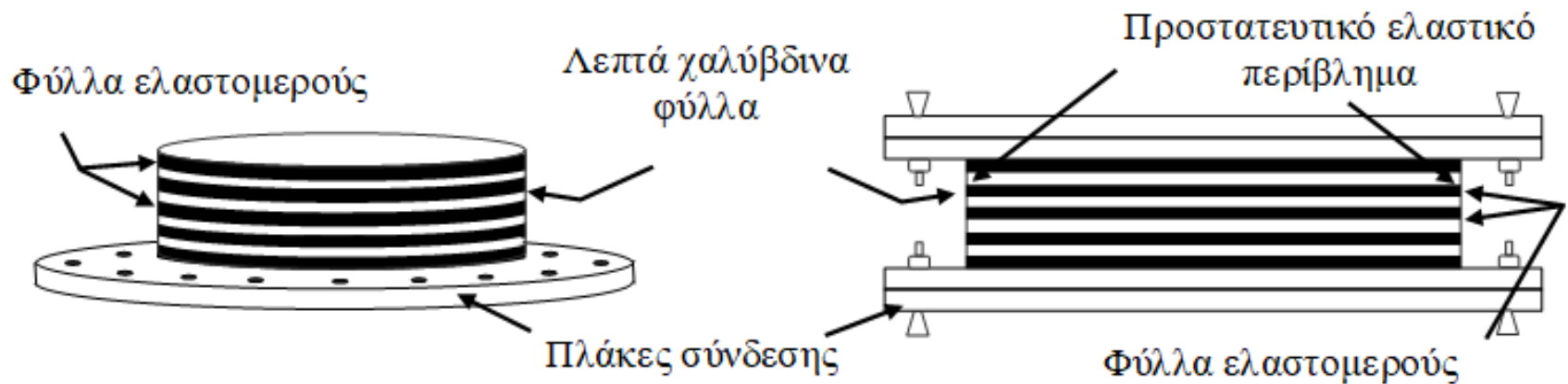
Ελαστομερικά σεισμικά εφέδρανα

Είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος τύπος εφεδράνων παγκοσμίως και παρέχει την επιδιωκόμενη οριζόντια ευτημήςια και συγχρόνως την αυξημένη κατακόρυφη δυστένεια, απαιτητή για τον περιορισμό των εγκάρσιων παραμορφώσεων των μονωτήρων υπό κατακόρυφα φορτία. Τα ελαστομερικά σεισμικά εφέδρανα συνήθως αποτελούνται από φύλλα ελαστομερούς υλικού, πάχους 8-20 χιλιοστών, εναλλασσόμενα με λεπτές πλάκες ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 2-3 χιλιοστών στις οποίες είναι κολλημένα με ειδική επεξεργασία (Σχήμα 13.6), έτσι ώστε να έχουν μεγάλη οριζόντια ευκαμψία αλλά ταυτοχρόνως να διασφαλίζουν πολύ μικρές εγκάρσιες παραμορφώσεις υπό κατακόρυφα φορτία.



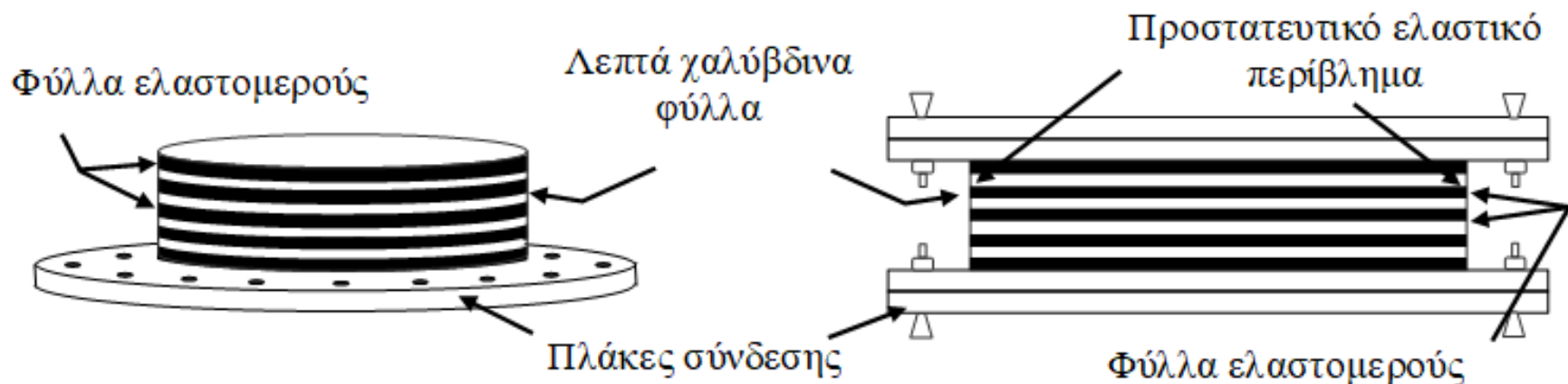
Σχήμα 13.6: Απλό, ελαστομερικό (ελαστομεταλλικό) εφέδρανο, χωρίς πυρήνα μολύβδου.

Συγκεκριμένα, το ελαστομερικό υλικό, υποβάλλεται σε βουλκανισμό, μια χημική διεργασία, κατά την οποία επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής του ελαστικού, μέσω της προσθήκης θείου (ή άλλων ουσιών ανάλογης δράσης), συγκροτώντας έτσι γέφυρες ατόμων θείου, που συνδέουν τις μακρομοριακές αλυσίδες του ελαστικού και αποτρέπουν την άτακτη κίνησή τους, υπό την επίδραση εξωτερικής τάσης. Η σύνδεση των ελαστομερικών φύλλων με τις χαλύβδινες πλάκες, γίνεται μέσα σε εκμαγείο, υπό την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Η φέρουσα ικανότητα σε κατακόρυφα φορτία μπορεί να αυξηθεί με τη μείωση του πάχους των επί μέρους φύλλων ελαστομερούς και την αύξηση του πάχους των χαλύβδινων πλακών, ενώ η δυσμησία εξαρτάται από το ύψος και την επιφάνεια του ελαστομερούς που περιέχεται στο σώμα του εφεδράνου.



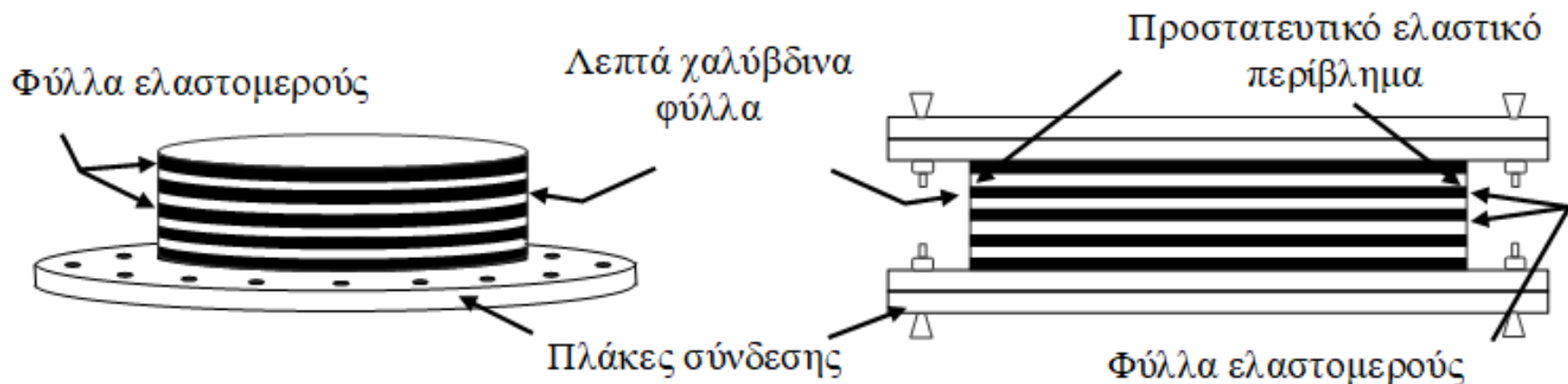
Σχήμα 13.6: Απλό, ελαστομερικό (ελαστομεταλλικό) εφεδράνο, χωρίς πυρήνα μολύβδου.

Με την εναλλαγή ελαστομερικών φύλλων και χαλύβδινων πλακών εξασφαλίζονται ευεργετικές ιδιότητες σε ένα ελαστομερικό εφέδρανο. Οι χαλύβδινες πλάκες αυξάνουν τη δυστένεια του εφεδράνου, κατά το διαμήκη άξονά του (δηλαδή την κατακόρυφη διεύθυνση) και ενισχύουν, έτσι, την αντοχή του εφεδράνου υπό κατακόρυφα φορτία. Επιπλέον, οι χαλύβδινες πλάκες συγκρατούν πλευρικά τα ελαστομερικά φύλλα, όταν στο εφέδρανο επιβληθεί κατακόρυφη φόρτιση, παρέχοντας κατακόρυφη δυσκαμψία και αποτρέποντας έτσι την εγκάρσια διόγκωση του εφεδράνου. Ταυτοχρόνως, οι χαλύβδινες πλάκες δεν επηρεάζουν τη στοχευόμενη, σχετικά χαμηλή δυστημψία του ελαστομερικού υλικού και συνεπώς δεν περιορίζουν την οριζόντια παραμόρφωση του εφεδράνου. Με αυτόν τον τρόπο, το ελαστομερικό εφέδρανο είναι τουλάχιστο δύο τάξεις μεγέθους πιο εύκαμπτο υπό οριζόντια, παρά υπό κατακόρυφα φορτία. Επίσης, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων του ελαστομερούς, παρέχεται επαρκής δύναμη επαναφοράς στο εφέδρανο, ακόμη και στην περίπτωση που αναπτυχθούν σ' αυτό μεγάλες μετατοπίσεις, και έτσι δεν απαιτείται χρήση πρόσθετων μηχανισμών επαναφοράς, όπως αυτά που απαιτούνται σε κάποια άλλα συστήματα σεισμικής μόνωσης (κάποια συστήματα ολίσθησης).



Σχήμα 13.6: Απλό, ελαστομερικό (ελαστομεταλλικό) εφέδρανο, χωρίς πυρήνα μολύβδου.

Το ελαστομερικό που χρησιμοποιείται σε απλά ελαστομερικά σεισμικά εφέδρανα είναι είτε φυσικό ελαστικό είτε συνθετικό ελαστικό, όπως το νεοπρένιο, τα οποία έχουν μικρό λόγο απόσβεσης της τάξης των 2-3 % της κρίσιμης ιζώδους απόσβεσης. Το ελαστομερικό παρέχει την επιθυμητή οριζόντια ευκαμψία ώστε να αυξηθεί κατάλληλα η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής για την αποφυγή του συντονισμού με τις δεσπόζουσες περιόδους των συνήθων σεισμικών διεγέρσεων. Επιπλέον, το ελαστομερές, με τις ελαστικές ιδιότητές του, παρέχει την επιθυμητή δύναμη επαναφοράς για να επαναφέρει την κατασκευή στην αρχική της θέση, μετά το τέλος μιας σεισμικής διέγερσης, ώστε να αποφεύγονται τυχόν παραμένουσες σχετικές μετακινήσεις της κατασκευής. Τα παρεμβαλλόμενα χαλύβδινα φύλλα προσδίδουν την επιθυμητή δυσκαμψία στην κατακόρυφη διεύθυνση, ώστε να αποφεύγονται κατακόρυφες ταλαντώσεις, ενώ, σε συνδυασμό, με το μικρό πάχος των ελαστομερικών στρώσεων, αποτρέπεται ενδεχόμενη πλευρική διόγκωση των στρωμάτων του ελαστικού.

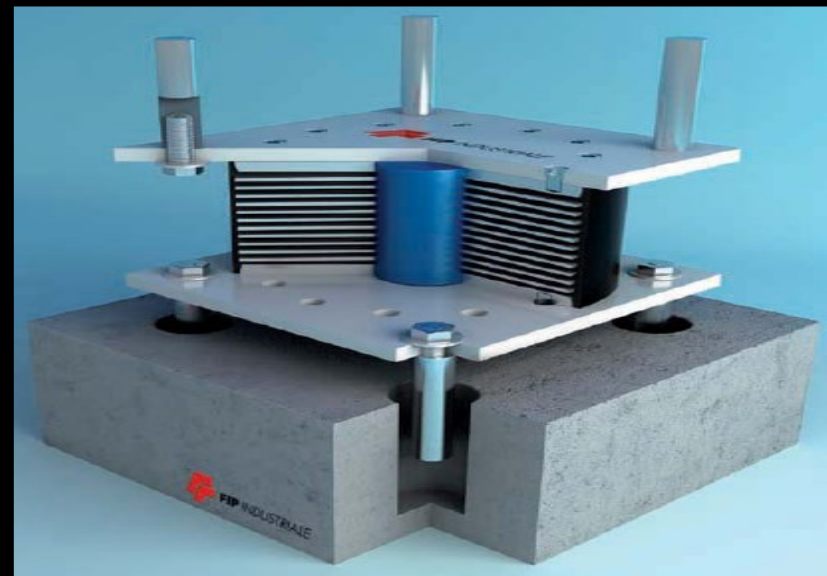
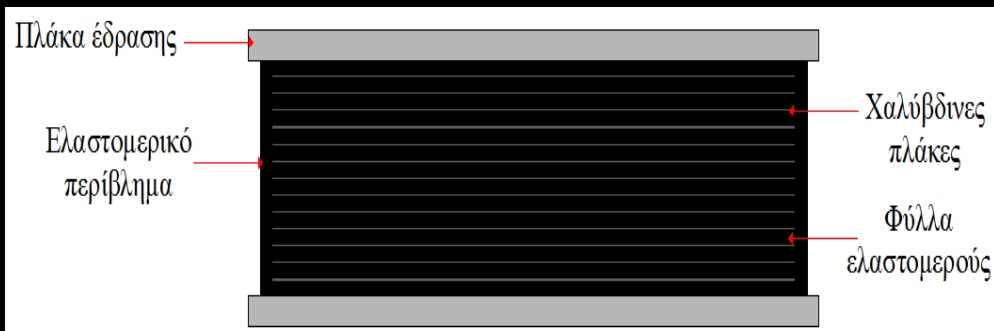


Σχήμα 13.6: Απλό, ελαστομερικό (ελαστομεταλλικό) εφέδρανο, χωρίς πυρήνα μολύβδου.

Επιπλέον, χαλύβδινες πλάκες στο κάτω και το κάτω μέρος των εφεδράνων χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση τους με τα στοιχεία θεμελίωσης και την ανωδομή, αντίστοιχα. Τα ελαστομερικά εφέδρανα μπορούν να κατασκευαστούν σε ορθογώνια και κυκλικά σχήματα, ενώ συνήθως περιβάλλονται από ελαστικό κάλυμμα ώστε να προστατεύονται από διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εκτεταμένη χρήση ελαστομεταλλικών εφεδράνων για πολλά χρόνια καταδεικνύει ότι αυτά τα εφέδρανα μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα για πολλές δεκαετίες ανθιστάμενα στις επιπτώσεις του χρόνου. Περαιτέρω, τα εναλλασσόμενα στρώματα ελαστομερικών φύλλων και χαλύβδινων πλακών, καλύπτονται τόσο στις άνω και κάτω επιφάνειες, όσο και στην παράπλευρη επιφάνεια, με μια στρώση ελαστομερικού υλικού, για τη διαβρωτική προστασία των χαλύβδινων πλακών και την απομόνωση του συστήματος από τις καιρικές συνθήκες, την υγρασία και από χημικές ουσίες.

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες ελαστομερικών (ελαστομεταλλικών) εφεδράνων για τη σεισμική μόνωση κατασκευών, αλλά και τμημάτων κατασκευών:

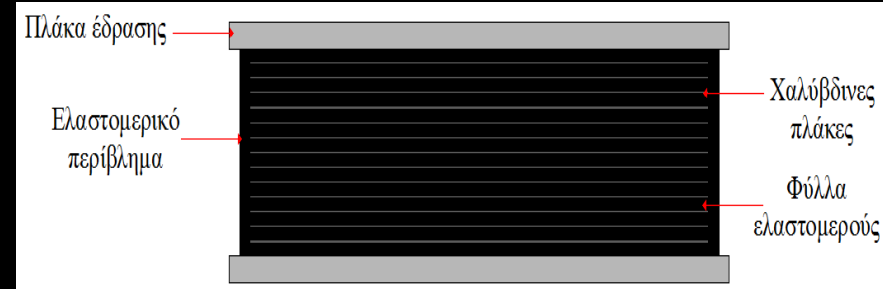
- τα χαμηλής απόσβεσης (φυσικά ή συνθετικά) ελαστομερικά (*Low-Damping Natural or Synthetic Rubber Bearings – NRBs*)
- τα ελαστομερικά εφέδρανα με ένα ή περισσότερους πυρήνες μολύβδου (*Lead Rubber Bearings - LRBs*)
- και τα υψηλής απόσβεσης ελαστομερικά εφέδρανα (*High Damping Rubber Bearings - HDRBs*)



Τύποι Ελαστομερικών Εφεδράνων

1. Κοινό Ελαστομερικό Εφεδρανο (NRB):

- Φύλλα ελαστομερούς → Υψηλή ευτμησία
- Χαλύβδινες πλάκες → Υψηλή δυστένεια
- Ιξώδης απόσβεση ($\xi \approx 2-5 \%$)

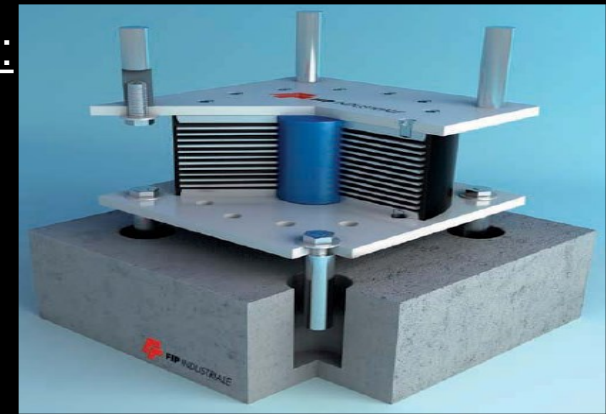


2. Ελαστομερικό Εφεδρανο Υψηλής Απόσβεσης (HDRB):

- Προσθήκη τεμαχιδίων άνθρακα, ελαίων, ρητινών και άλλων πληρωτικών ουσιών.
- Κατ' εξοχήν υστερητικός μηχανισμός ανάλωσης ενέργειας ($\xi \approx 8-20 \%$)

3. Ελαστομερικό Εφεδρανο με Πυρήνα Μολύβδου (LRB):

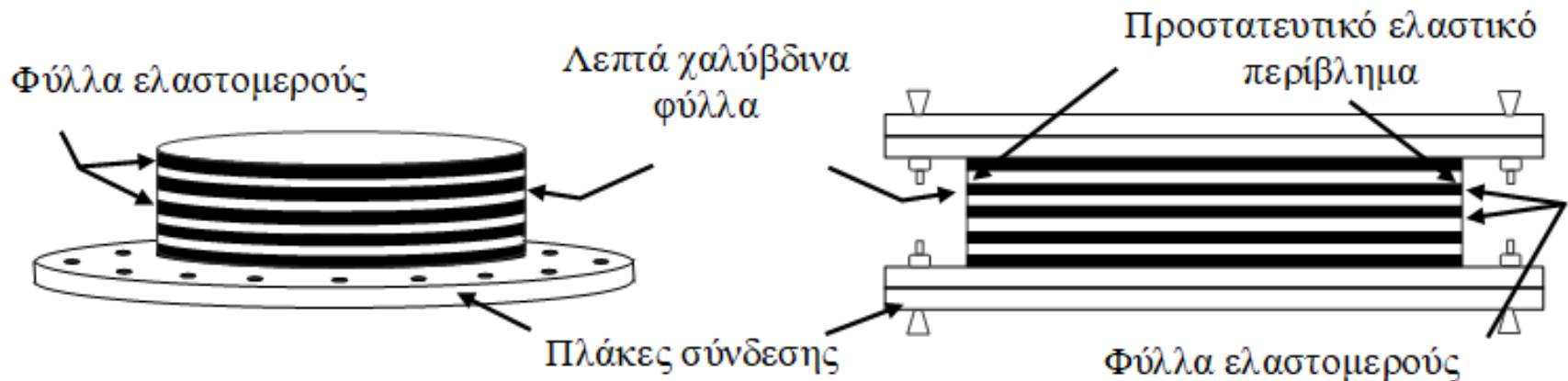
- Εισαγωγή ενός ή περισσότερων πυρήνων μολύβδου
- Υψηλή υστερητική απόσβεση ($\xi \approx 15-35 \%$)



▪ FIP INDUSTRIALE

Χαμηλής απόσβεσης ελαστομερικά εφέδρανα (NRBs)

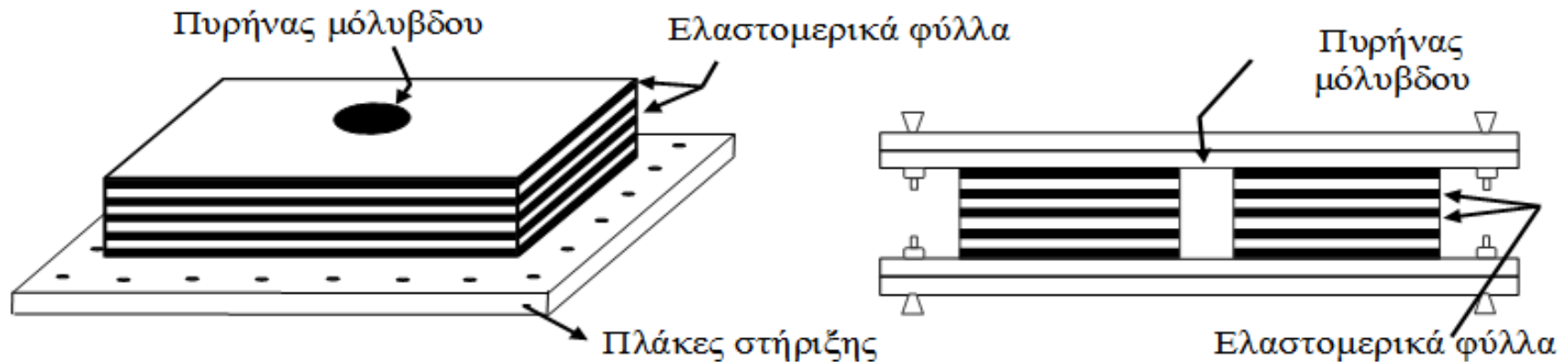
Όταν χρησιμοποιούνται μόνο ελαστομεταλλικά εφέδρανα (Σχήμα 13.6 και Σχήμα 13.9.β) χαμηλής απόσβεσης (*Natural Rubber Bearings – NRBs*), όπου ο λόγος απόσβεσης περιορίζεται σε ένα ποσοστό της τάξης του 2% - 5% του κρίσιμου λόγου ιξώδους απόσβεσης, απαιτείται κάποιος βοηθητικός μηχανισμός απόσβεσης ενέργειας για να περιοριστούν οι αναμενόμενα μεγάλες σχετικές μετακινήσεις στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης, ώστε να περιορίζεται η πιθανότητα ενδεχόμενης σύγκρουσης με τον περιμετρικό τοίχο ή γειτονικές κατασκευές σε περίπτωση πολύ ισχυρού σεισμού. Συχνά, τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης (NRBs) χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνες μολύβδου, ώστε να διασφαλίζεται ο επιθυμητός βαθμός απόσβεσης ενέργειας.



Σχήμα 13.6: Απλό, ελαστομερικό (ελαστομεταλλικό) εφέδρανο, χωρίς πυρήνα μολύβδου.

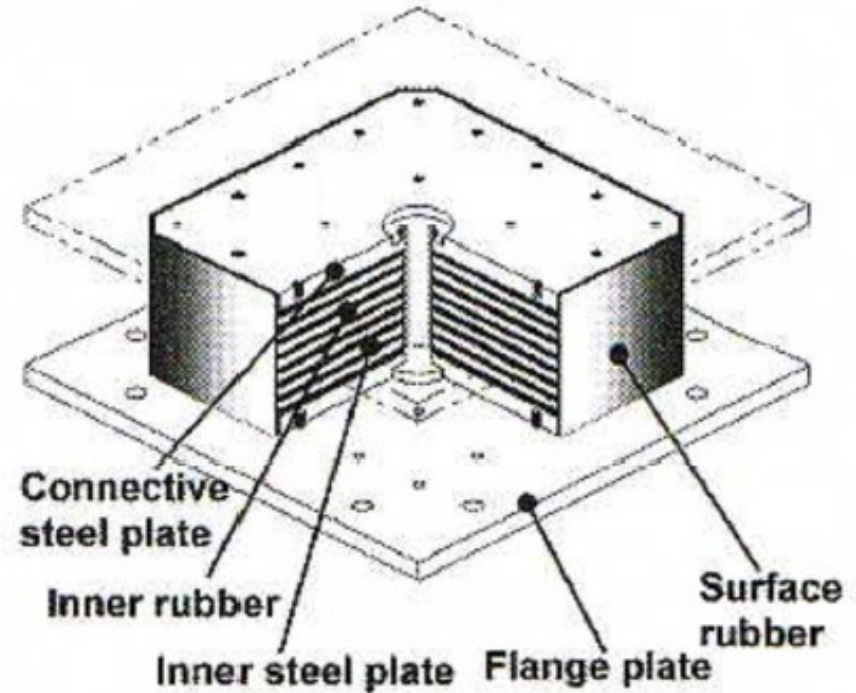
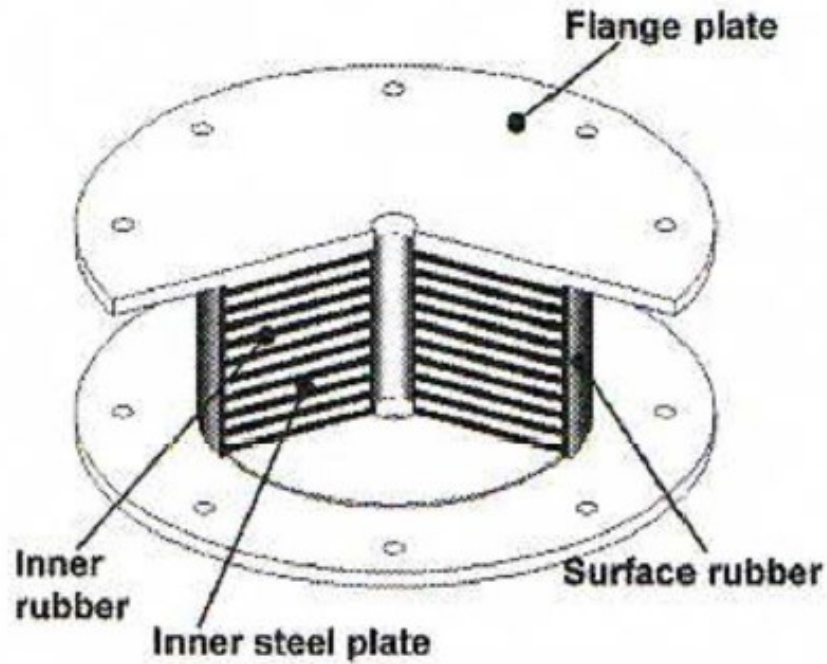
Ελαστομερικά εφέδρανα με πυρήνες μολύβδου (LRBs)

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνες μολύβδου (*Lead Rubber Bearings - LRBs*) πέραν από τα πλεονεκτήματα των απλών ελαστομερικών εφεδράνων, δηλαδή την ικανότητα ανάληψης σημαντικών βαρυτικών φορτίων, την παροχή της επιθυμητής οριζόντιας ευκαμψίας και της απαιτούμενης δύναμης επαναφοράς, επιπρόσθετα διαθέτουν ικανοποιητικές ιδιότητες απόσβεσης, λόγω των ανελαστικών παραμορφώσεων των πυρήνων μολύβδου (Σχήμα 13.7). Η διαφορά με το κοινό ελαστομερικό εφέδρανο (NRB) είναι ότι ένας ή περισσότεροι πυρήνες μολύβδου εισάγονται στο εφέδρανο, σφηνώνοντας τους σε μία ή περισσότερες, αντίστοιχα, διαμορφωμένες οπές, για τη βελτίωση των ιδιοτήτων απόσβεσης του εφεδράνου, αφού όπως προαναφέρθηκε το σύνηθες ελαστομερές έχει χαμηλό λόγο απόσβεσης.

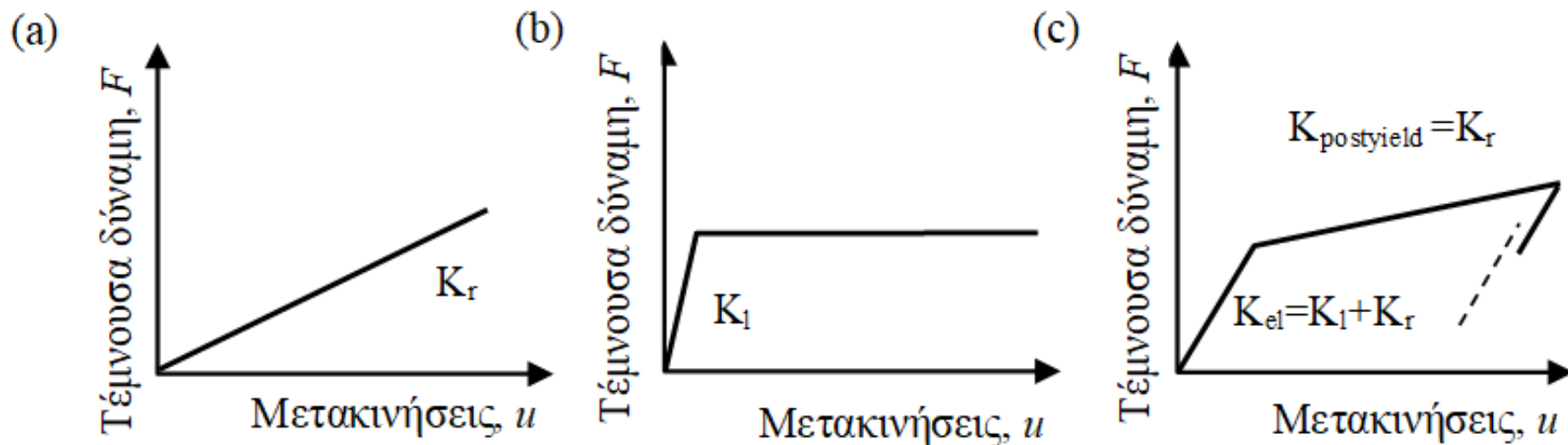


Σχήμα 13.7: Ελαστομερικό εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου.

Ελαστομερικά Εφέδρανα με Πυρήνα Μολύβδου (LRB):

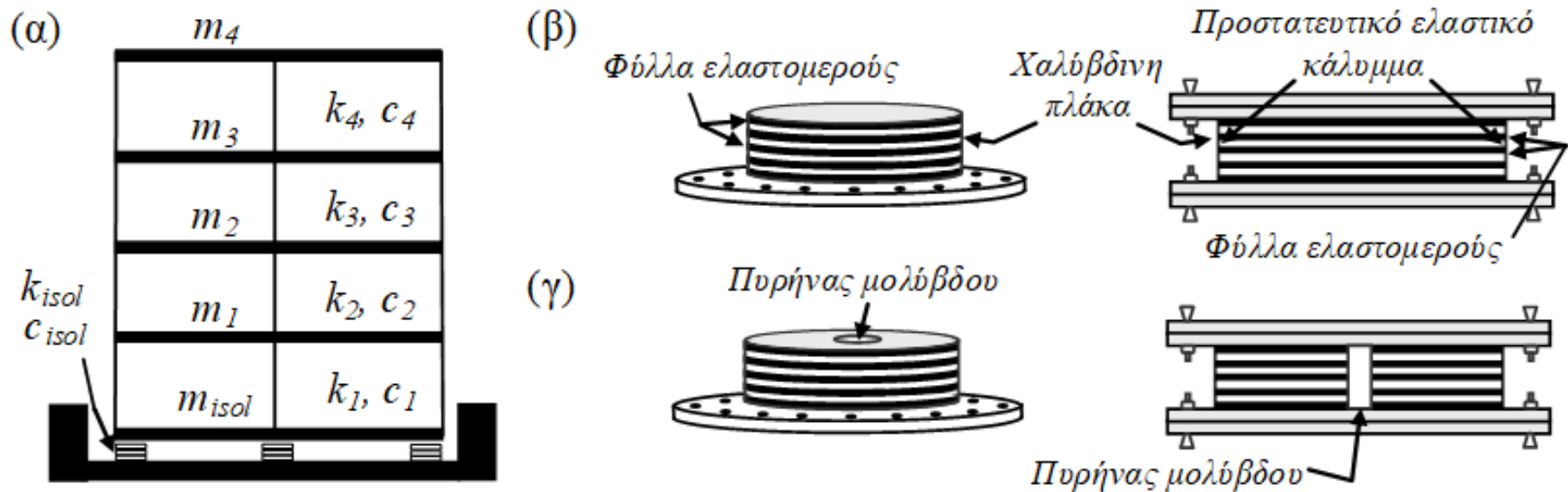


Κατά τη διάρκεια μιας ισχυρής σεισμικής διέγερσης, οι πυρήνες μόλυβδου αναγκάζονται από τις μεταλλικές πλάκες να υφίστανται μεγάλο αριθμό κύκλων πλαστικών παραμορφώσεων, εξασφαλίζοντας την επιθυμητή υστερητική απόσβεση ενέργειας (Σχήμα 13.8.γ). Κατά την οριζόντια παραμόρφωση, μετά τη διαρροή του, ο μόλυβδος δεν συνεισφέρει στην δυσκαμψία μέχρι το μηδενισμό της σχετικής ταχύτητας, οπότε συνεισφέρει ξανά μέχρι τη νέα διαρροή του. Το ισοδύναμο ποσοστό ιξώδους απόσβεσης που θα αντιστοιχούσε στην υστερητική απόσβεση ενέργειας από ελαστομεταλλικά εφεδράνα με πυρήνες μόλυβδου κυμαίνεται μεταξύ 15-35 % ανάλογα με την ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης. Το ελαστομερές εξασφαλίζει την απαιτούμενη δύναμη επαναφοράς (Σχήμα 13.8.α), ενώ η σχετικά αυξημένη δυσκαμψία του ελαστομεταλλικού εφεδράνου με πυρήνα μόλυβδου πριν τη διαρροή (Σχήμα 13.8.β) παρέχει την οριζόντια δυσκαμψία για άλλα δευτερεύοντα οριζόντια φορτία.



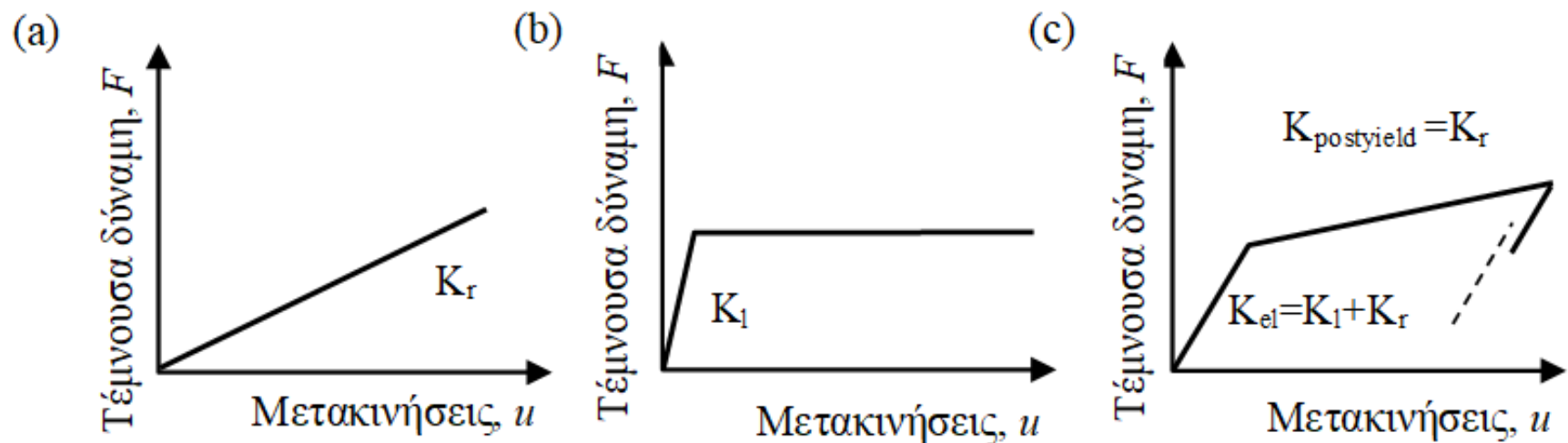
Σχήμα 13.8: Μηχανική συμπεριφορά (α) ελαστομερούς, (β) μόλυβδου (γ) συνολικά.

Παρά το ότι το κόστος του ελαστομερικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου υπερβαίνει το κόστος του κοινού ελαστομερικού εφεδράνου, συνιστά μια οικονομική λύση σεισμικής μόνωσης, αφού παρέχει αυτόνομα τη δυνατότητα ανάληψης κατακόρυφων φορτίων, την οριζόντια ευκαμψία και την υστερητική απόσβεση λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων του μολύβδου (Σχήμα 13.9.γ). Οι πολλαπλές ιδιότητες του συγκεκριμένου τύπου εφεδράνου, το καθιστούν ως το πλέον συχνά χρησιμοποιούμενο εφέδρανο σε περιοχές έντονης σεισμικής δραστηριότητας, όπου το υψηλό ποσοστό απόσβεσης είναι απαραίτητο.



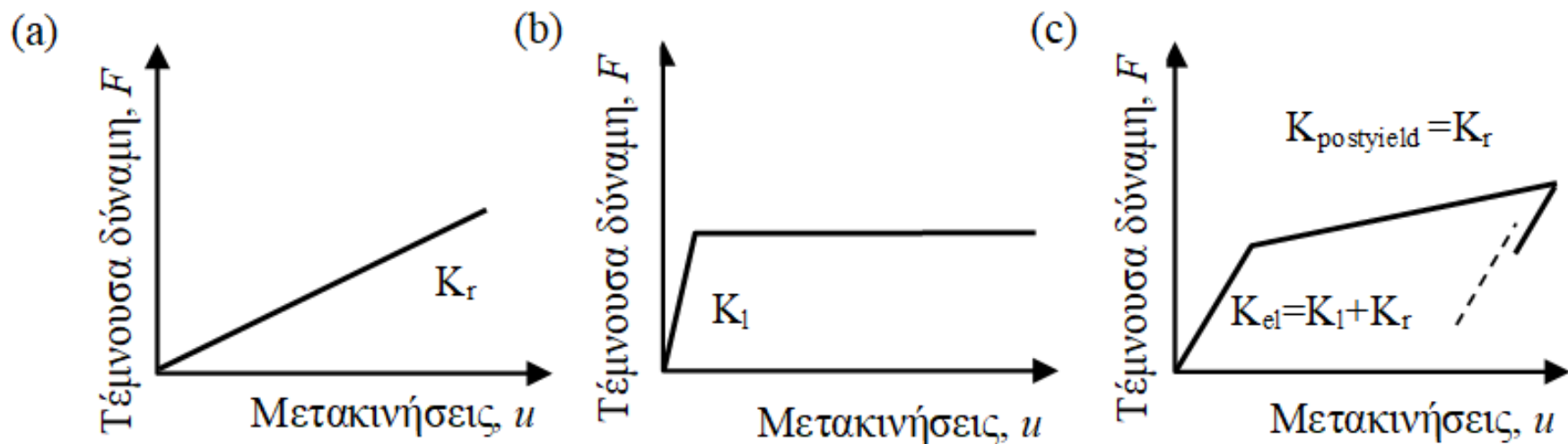
Σχήμα 13.9: (α) σεισμικά μονωμένο κτίριο και περιμετρικό διάκενο (β) απλά εφέδρανα σεισμικής μόνωσης από ελαστομερή (γ) ελαστομερικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου.

Η επιλογή του μολύβδου ως υλικού του πυρήνα είναι σκόπιμη, αφού πρόκειται για ένα κρυσταλλικό υλικό, το οποίο υπόκειται σε προσωρινές μεταβολές στη δομή του, όταν υποστεί παραμορφώσεις που υπερβαίνουν το όριο διαρροής. Η επενέργεια της δύναμης επαναφοράς του ελαστομερούς, οδηγεί στην αναίρεση της παραμορφωμένης κατάστασης του μολύβδου και στην ανάκτηση της αρχικής δομής και των ελαστικών ιδιοτήτων με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται ως ελαστοπλαστικό στερεό. Επιπλέον, ο μολύβδος χαρακτηρίζεται από καλή αντίσταση σε κόπωση, λόγω της διαρκούς αποκατάστασης των μηχανικών του ιδιοτήτων κατά τη διάρκεια ανακυκλικών παραμορφώσεων στην ανελαστική περιοχή. Η υστερητική απόσβεση ενέργειας υπό ανακυκλική φόρτιση είναι ίση με το εμβαδό μεταξύ των καμπυλών φόρτισης και αποφόρτισης, δηλαδή είναι ίση με το εμβαδό μεταξύ υστερητικών βρόχων, το οποίο αντιπροσωπεύει την ενέργεια που μετατράπηκε από κινητική σε θερμική και αναλώθηκε υπό μορφή θερμότητας. Τέλος, η ευρεία διαθεσιμότητα του μολύβδου, τον καθιστά οικονομικά προσιτό για χρήση σε ελαστομερικά εφέδρανα.



Σχήμα 13.8: Μηχανική συμπεριφορά (α) ελαστομερούς, (β) μολύβδου (γ) συνολικά.

Από την άλλη, λόγω της έντονα μη γραμμικής συμπεριφοράς του μολύβδου, οι συνεπαγόμενες αλληπάλλληλες και αιφνίδιες μεταβολές της δυσστησίας των εφεδράνων με πυρήνες μολύβδου, δύναται να προκαλέσουν την εντονότερη διέγερση ανώτερων ιδιομορφών πέραν της θεμελιώδους, κάτι που δεν είναι επιθυμητό για την επίτευξη της επιδιωκόμενης απομείωσης των επιταχύνσεων των ορόφων. Η διάσταση και συγκεκριμένα η διατομή του πυρήνα, είναι η δικλείδα για την επίτευξη της στοχευόμενης δυσστησίας και απόσβεσης, αναλόγως της επιδιωκόμενης συμπεριφοράς της εκάστοτε υπό μελέτη κατασκευής.

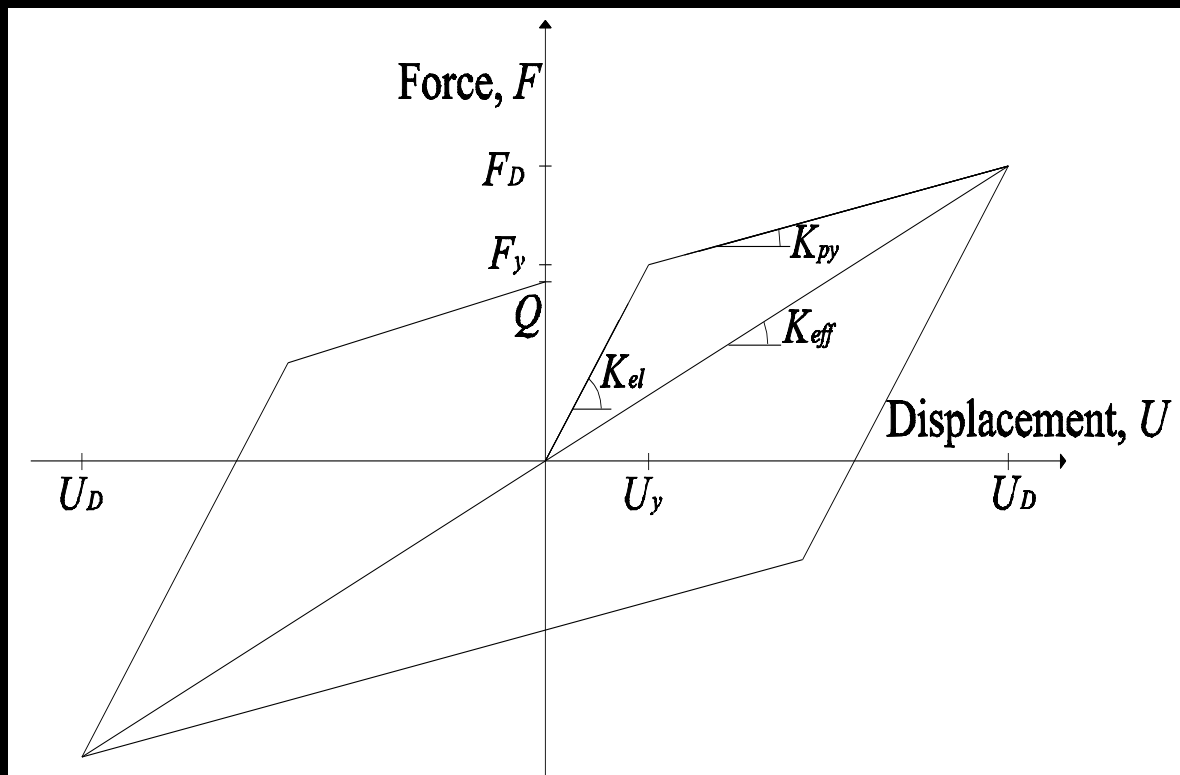


Σχήμα 13.8: Μηχανική συμπεριφορά (α) ελαστομερούς, (β) μολύβδου (γ) συνολικά.

Μη Γραμμική Διατμητική Συμπεριφορά Μονωτήρων LRBs

1. Διγραμμικός καταστατικός νόμος

- Μη γραμμική, συνήθως διγραμμική συμπεριφορά
- Υψηλή ελαστική δυστμησία K_{el}
- Χαμηλή μετελαστική δυστμησία K_{py}



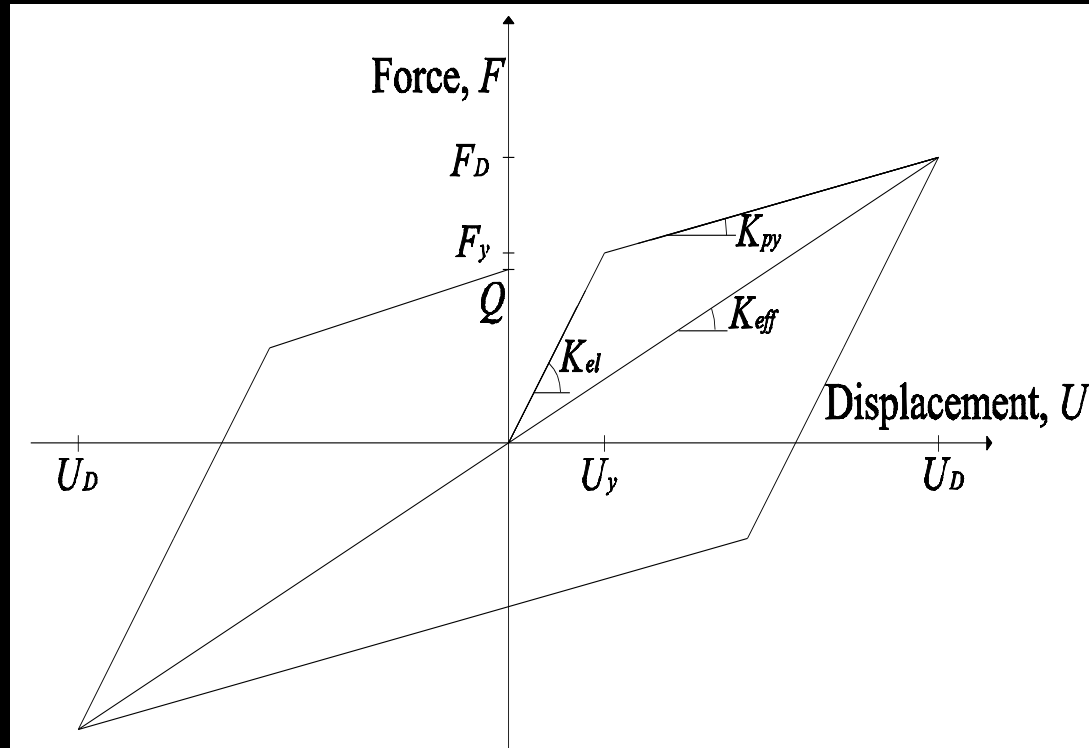
2. Γραμμικοποιημένος καταστατικός νόμος

- Ενεργός δυστημσία

$$K_{eff} = K_{py} + \frac{Q}{U_D}$$

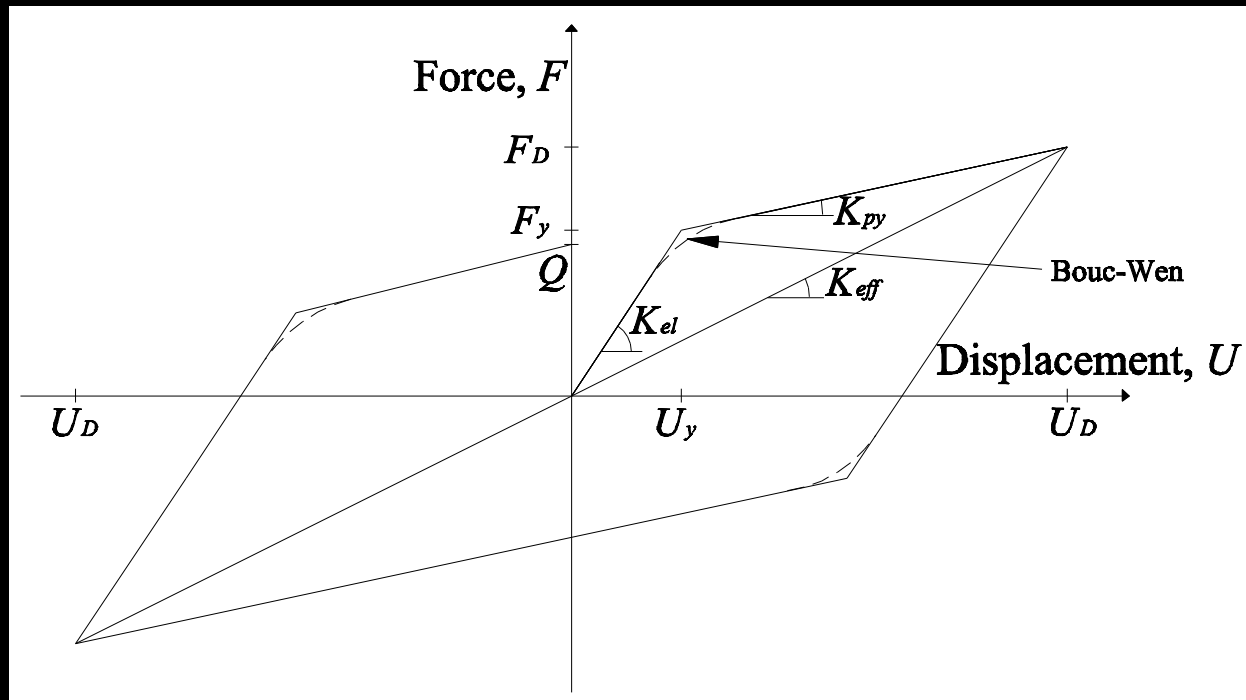
- Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση

$$\xi_{eff} = \frac{W_{U_D}}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff} \cdot U_D^2} = \frac{4Q (U_D - U_y)}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff} \cdot U_D^2}$$



3. Υστερητικό μοντέλο Bouc-Wen

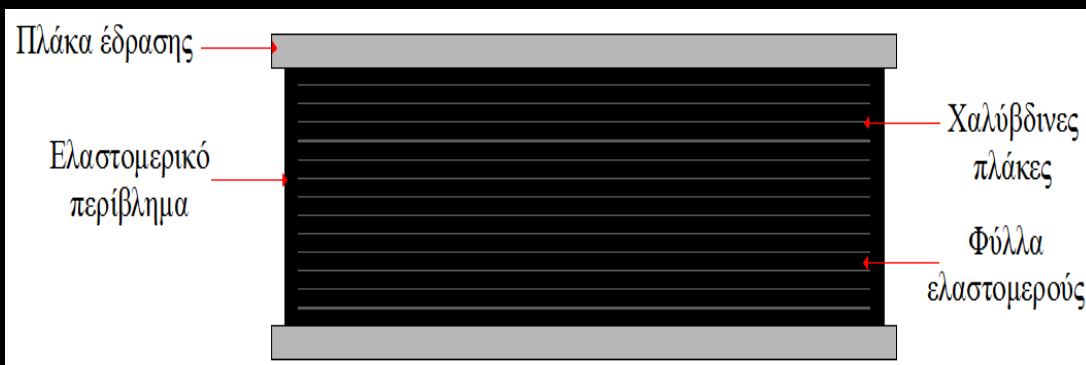
- Προσομοιάζει με το διγραμμικό καταστατικό νόμο
- Διαφοροποίηση: Ομαλή μετάβαση από την ελαστική στη μετελαστική περιοχή αντί ακαριαίας μετάπτωσης
- Υιοθετείται σε ποικίλες εφαρμογές μηχανικής
- Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των LRBs



Υψηλής απόσβεσης ελαστομερικά εφέδρανα (HDRBs)

Προς αντιμετώπιση του κυρίου μειονεκτήματος των κοινών ελαστομερικών εφεδράνων (NRBs), δηλαδή της περιορισμένης δυνατότητας απόσβεσης ενέργειας, και ως εναλλακτικά των ελαστομεταλλικών εφεδράνων με πυρήνες μολύβδου, αναπτύχθηκαν τα υψηλής απόσβεσης ελαστομερικά εφέδρανα (HDRBs). Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (*High Damping Rubber Bearings - HDRBs*) είναι τα ίδια με τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης εκτός από το ότι το ελαστομερές το οποίο χρησιμοποιείται υποβάλλεται σε ειδική κατεργασία ώστε να παρέχει υψηλή απόσβεση ενέργειας.

Με την προσθήκη τεμαχιδίων άνθρακα, ελαίων και ρητινών, καθώς και άλλων προσθετικών πληρωτικών ουσιών (fillers), επιτυγχάνεται αυξημένη απόσβεση ενέργειας κατά την παραμόρφωση του ελαστομερικού υλικού. Η δομή των ελαστομερικών εφεδράνων υψηλής απόσβεσης δε διαφοροποιείται από εκείνη των κοινών ελαστομερικών εφεδράνων, ενώ οι διεργασίες του βουλκανισμού, της σύνδεσης και η όλη μεθοδολογία κατασκευής και συναρμολόγησης παραμένει ως έχει στα απλά ελαστομερικά εφέδρανα.



Η επιβολή διατμητικών τάσεων στο συγκεκριμένο ελαστομερικό υλικό υψηλής απόσβεσης, προκαλεί ολίσθηση και κατ' επέκταση ανάπτυξη τριβής μεταξύ των μορίων, με την οποία αναπτύσσεται θερμότητα, μέσω της οποίας αναλώνεται ενέργεια. Η απόσβεση ενέργεια στα ελαστομερικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (HDRBs) είναι ένας συνδυασμός υστερητικής και ιξώδους μορφής, είναι δηλαδή εξαρτώμενη από τη μετατόπιση, σε αντίθεση με τα κοινά ελαστομερικά εφέδρανα (NRBs) και τα ελαστομερικά εφέδρανα με πυρήνες μολύβδου (LRBs), όπου η απόσβεση είναι αμιγώς ιξώδης. Ο αντίστοιχος ισοδύναμος λόγος απόσβεσης των εφεδράνων υψηλής απόσβεσης κυμαίνεται μεταξύ 8-15%, ενώ στα πλείστα κοινά ελαστομερικά εφέδρανα είναι της τάξης του 2%.

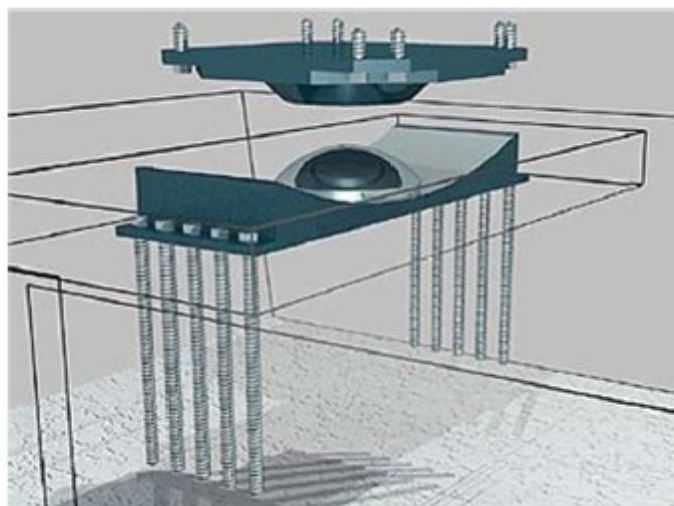
Το ελαστομερικό υλικό υψηλής απόσβεσης, χαρακτηρίζεται από μη γραμμική συμπεριφορά, υπό μικρές διατμητικές παραμορφώσεις, με αρχική υψηλή δυσστησία και απόσβεση του υλικού, χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να συνεισφέρουν στον περιορισμό της απόκρισης της κατασκευής υπό φορτία ανέμου ή σεισμών χαμηλής έντασης. Σε πιο μεγάλες παραμορφώσεις, μεγαλύτερες του 20 %, το μέτρο διάτμησης απομειώνεται, ενώ υπό πολύ ψηλές παραμορφώσεις, μεγαλύτερες του 120 %, σημειώνεται κράτυνση και επομένως αύξηση του μέτρου διάτμησης, χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών διεγέρσεων για την αποφυγή συγκρούσεων με γειτονικές κατασκευές λόγω υπέρβασης του διαθέσιμου διάκενου γύρω από την κατασκευή.

Σεισμικά εφέδρανα ολίσθησης

Πέραν από τα ελαστομερικά εφέδρανα, συχνά χρησιμοποιούνται και τα σεισμικά εφέδρανα ολίσθησης για τη σεισμική μόνωση τόσο κτηριακών κατασκευών, όσο και γεφυρών. Η λειτουργία των εφεδράνων ολίσθησης βασίζεται στην τριβή και συγκεκριμένα στη μεταβίβαση τέμνουσας δύναμης από τη θεμελίωση στην ανωδομή, μέχρι ενός ορίου, πέραν του οποίου παρατηρείται ολίσθηση, η οποία αποτρέπει τη μετάδοση σεισμικής δύναμης πέραν κάποιου συγκεκριμένου μεγέθους.

Πρώτιστη σημασία στο σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων σεισμικής μόνωσης έχει ο καθορισμός του συντελεστή τριβής των ολισθαινουσών επιφανειών. Η μείωση του συντελεστή τριβής συνεπάγεται μείωση των μεταβιβαζόμενων τεμνουσών δυνάμεων, ενώ οι μεταδιδόμενες δυνάμεις στην ανωδομή είναι ανεξάρτητες της σεισμικής έντασης και εξαρτώνται από το συντελεστή τριβής και τα κατακόρυφα φορτία. Επομένως, τα συστήματα ολίσθησης είναι πολύ δραστικά στο μετριασμό της απόκρισης κατασκευών, ακόμη και υπό ιδιαίτερα ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις. Τα χαρακτηριστικά των επιφανειών τριβής των εφεδράνων ολίσθησης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα στη διεπιφάνεια ολίσθησης, το βαθμό φθοράς και την καθαρότητα των επιφανειών ολίσθησης.

Τα αρχικά εφέδρανα ολίσθησης ήταν τα απλά συστήματα ολισθήσεως-τριβής (*Pure-Friction System - PFS*) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν επίπεδα, έχοντας ως βασική αδυναμία την απουσία μηχανισμού επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση μετά το πέρας της σεισμικής διέγερσης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το μειονέκτημα, στη συνέχεια, προτάθηκαν και χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα μόνωσης, των οποίων η λειτουργία στηρίζεται κυρίως στη φιλοσοφία του εκκρεμούς, όπως τα συστήματα ολίσθησης εκκρεμούς (*Friction Pendulum Systems - FPS*).



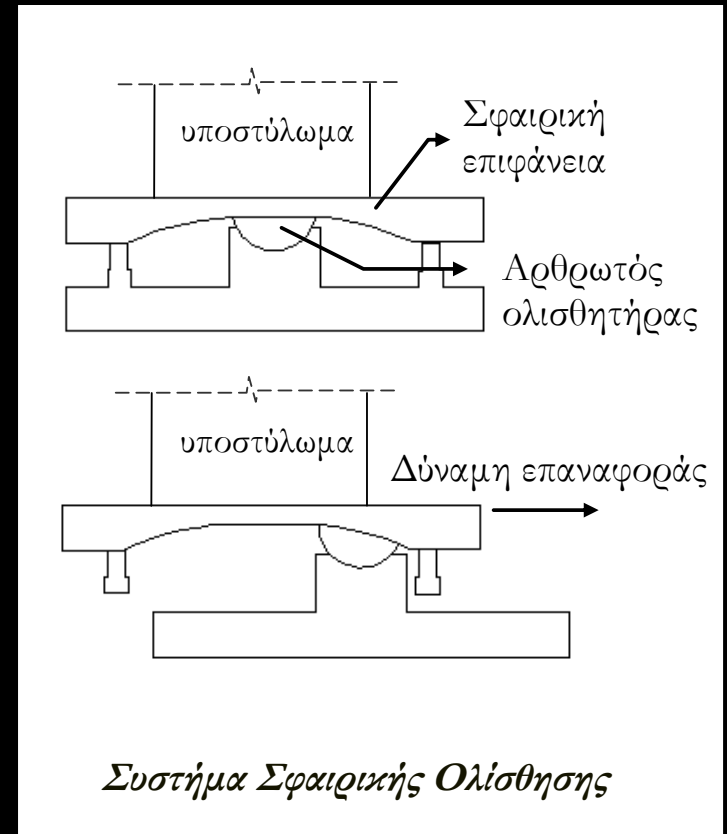
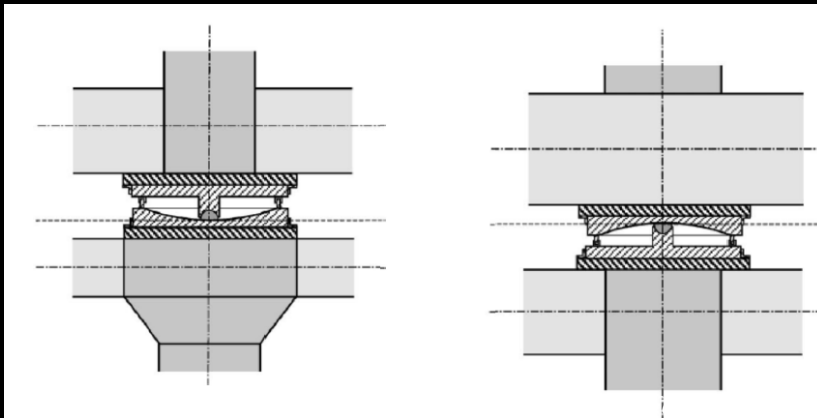
Τύποι Συστημάτων Ολίσθησης

- Συστήματα Ολισθήσεως-Τριβής (Pure-Friction System - PFS)

Υλικό Επιφάνειας Ολίσθησης: τεφλόν ή ανοξείδωτος χάλυβας

- Συστήματα Σφαιρικής Ολίσθησης (Friction Pendulum Systems - FPS)

Ιδιοπερίοδος κατασκευής: εξαρτάται από την ακτίνα καμπυλότητας του εφεδράνου



Απλά συστήματα ολισθήσεως-τριβής (Pure-Friction System - PFS)

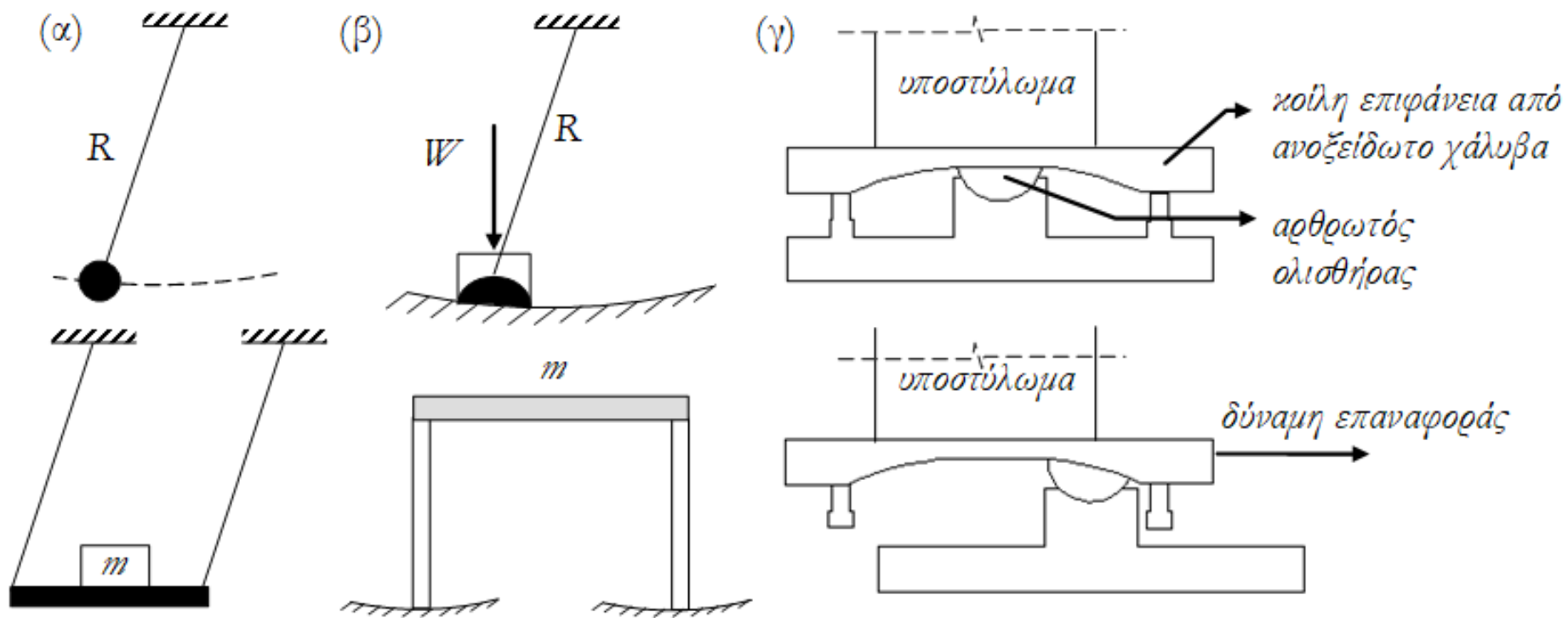
Τα απλά συστήματα ολισθήσεως-τριβής (PFS) αποτελούνται από μια επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης και συνήθως εισάγονται μεταξύ της ανωδομής και της θεμελίωσης της κατασκευής. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την επιφάνεια ολίσθησης είναι συνήθως τεφλόν (teflon) ή ανοξείδωτος χάλυβας, τα οποία προσδίδουν συντελεστή (στατικής) τριβής, μ , μεταξύ 0.02 και 0.03. Η λειτουργία των συστημάτων αυτών βασίζεται στη θεωρία της ολίσθησης σύμφωνα με το Νόμο του Coulomb.

Συγκεκριμένα, όταν ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη δύναμη που ασκούνται στην επιφάνεια ολίσθησης είναι μεγαλύτερος από το συντελεστή τριβής μ , τότε προκαλείται ολίσθηση με αποτέλεσμα η τιμή της σεισμικής τέμνουσας βάσης που μεταφέρεται στην ανωδομή, να περιορίζεται στη μέγιστη τιμή που μπορεί να παραληφθεί με τριβή. Έτσι, περιορίζονται σημαντικά τα σεισμικά φορτία που δρουν στην ανωδομή της κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού. Όμως, η μείωση αυτή συνοδεύεται από μεγάλες μόνιμες σχετικές μετακινήσεις μεταξύ ανωδομής και θεμελίωσης, αφού απουσιάζει ο μηχανισμός επαναφοράς. Για αυτό το λόγο, για τον περιορισμό των μόνιμων σχετικών μετακινήσεων, μετά τη δράση μιας ισχυρής σεισμικής διέγερσης, μπορεί να γίνει συνδυασμός συστημάτων ολίσθησης με ελαστομερικά εφέδρανα τα οποία προσφέρουν δύναμη επαναφοράς, μέσω της αντίστοιχης παραμόρφωσης τους, για να μπορέσει να επανέλθει η ανωδομή στην αρχική της θέση.

Συστήματα ολίσθησης εκκρεμούς (Friction Pendulum Systems - FPS)

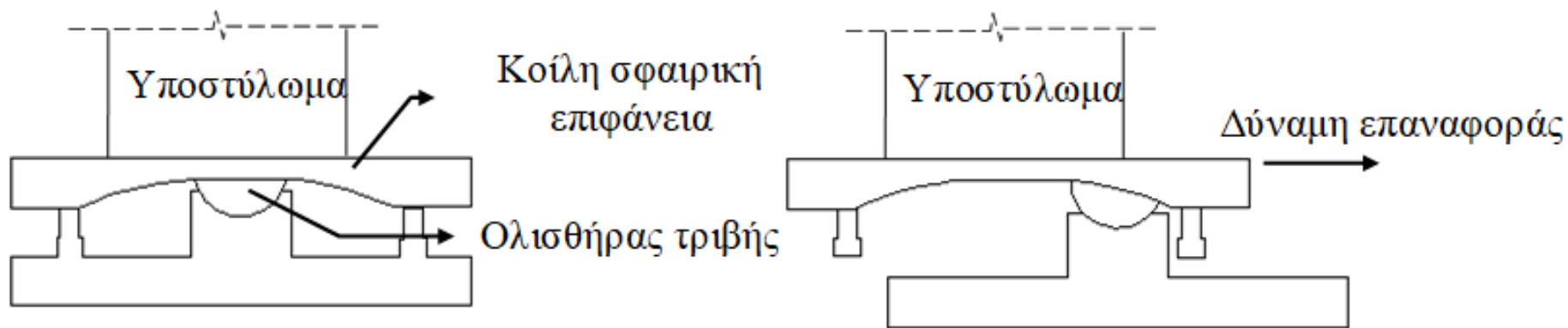
Το εφέδρανο ολίσθησης εκκρεμούς (FPS) είναι ένα σύστημα μόνωσης, που λόγω της γεωμετρικής του μορφής, συνδυάζει την ολίσθηση και τη δύναμη επαναφοράς. Ο μονωτήρας αποτελείται από ένα αρθρωτό ολισθήρα (articulated slider), ο οποίος ολισθαίνει σε σφαιρική επιφάνεια, κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα. Η επιφάνεια του ολισθήρα, που εφάπτεται της κοίλης επιφάνειας, είναι επιστρωμένη με συνθετικό υλικό, χαμηλού συντελεστή τριβής. Η άλλη επιφάνεια του ολισθήρα, είναι επίσης σφαιρική και επιστρωμένη με ανοξείδωτο χάλυβα και εδράζει σε μια σφαιρική κοιλότητα επιστρωμένη με συνθετικό υλικό, χαμηλού συντελεστή τριβής.

Η λειτουργία του συστήματος στηρίζεται στη φιλοσοφία του εκκρεμούς, αφού η ανωδομή στηρίζεται στον ολισθήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.10. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, όταν οι σεισμικές δυνάμεις υπερβούν τη δύναμη στατικής τριβής που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια ολισθήρα – κοίλης επιφάνειας ο ολισθήρας κινείται στην κοίλη επιφάνεια ολίσθησης. Με αυτήν την κίνηση, η ανωδομή ανυψώνεται λόγω καμπυλότητας και έτσι προκύπτει μία δύναμη επαναφοράς, η οποία δίνει τη δυνατότητα στην ανωδομή της κατασκευής να αυτοεπαναφέρεται στην αρχική της θέση μετά το τέλος του σεισμού. Ταυτοχρόνως, με την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του ολισθήρα και της σφαιρικής επιφάνειας, αποσβένεται ενέργεια.



Σχήμα 13.10: (α) Λειτουργία εκκρεμούς (β) λειτουργία ολίσθησης - εκκρεμούς (γ) τομή σε υποστύλωμα εδραζόμενο σε μονωτήρα FPS πριν και κατά την επίδραση ενός σεισμού.

Η ενεργός, ή ισοδύναμη, δυσμησία του εφεδράνου καθώς και η ιδιοπερίοδος μόνωσης εξαρτώνται από την ακτίνα καμπυλότητας της κοίλης επιφάνειας και το συντελεστή τριβής. Επίσης, η οριζόντια δύναμη που απαιτείται για την πρόκληση της ολίσθησης εξαρτάται από την ακτίνα καμπυλότητας και είναι ευθέως ανάλογη του υποστηριζόμενου κατακόρυφου φορτίου, μέσω του συντελεστή στατικής τριβής. Η δύναμη επαφής είναι αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας καμπυλότητας της σφαιρικής επιφάνειας και ανάλογη της μετατόπισης του μονωτήρα (Σχήμα 13.11).



Σχήμα 13.11: Σύστημα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς (FPS).

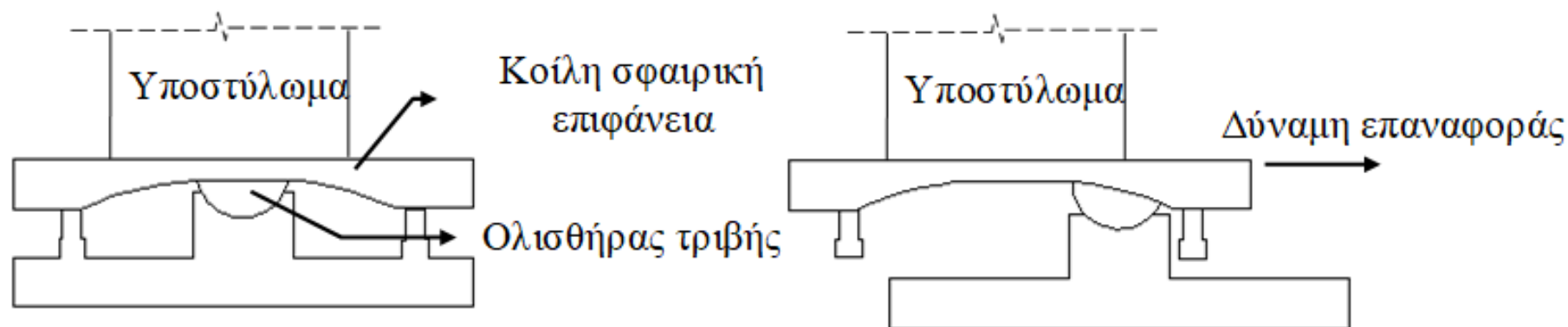
Όμως, ενώ ο συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας ολίσθησης είναι καθοριστικός για τη συμπεριφορά του μονωτήρα FPS, καθώς επηρεάζει τη δυστημψία και την ενεργό ιδιοπερίοδό του, η τιμή του εξαρτάται από ένα ευρύ φάσμα παραγόντων, όπως π.χ. την ταχύτητα ολίσθησης, τη θερμοκρασία και το βαθμό φθοράς των επιφανειών ολίσθησης.

Εάν μια κατασκευή, είναι μονωμένη αποκλειστικά με εφέδρανα FPS, ίδιας γεωμετρίας και ίδιων χαρακτηριστικών τριβής, τα οποία υπόκεινται στην ίδια μετακίνηση, τότε η δύναμη που αναπτύσσεται σε κάθε εφέδρανο είναι πολλαπλάσιο του κατακόρυφου υποστηριζόμενου φορτίου, με αποτέλεσμα την ταύτιση του κέντρου δυσκαμψίας και του κέντρου μάζας του όλου συστήματος μόνωσης, με αποτέλεσμα την αποφυγή στρεπτικών αποκρίσεων στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης.

Το κάθε εφέδρανο ολίσθησης εκκρεμούς (FPS) παρέχει αυτόνομα μηχανισμό απόσβεσης ενέργειας, οπότε δεν απαιτείται η χρήση βοηθητικών μηχανισμών απόσβεσης, και μηχανισμό επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση, μετά το πέρας της σεισμικής δράσης. Επιπλέον, παρέχει ικανοποιητική αντίσταση σε κατακόρυφα φορτία λειτουργίας και σε μικρά οριζόντια φορτία, όπως φορτία ανέμου και μικρού μεγέθους σεισμούς. Επίσης, το χαμηλό σχετικά ύψος των FPS συχνά αποτελεί πλεονέκτημα έναντι των ελαστομερικών εφεδράνων, για χρήση σε επεμβάσεις και αναβαθμίσεις υφιστάμενων κατασκευών, καθώς και για καινούργιες κατασκευές όπου επιδιώκεται η διασφάλιση του μέγιστου δυνατού ωφέλιμου ύψους.

Ωστόσο, η σημαντική διαφορά μεταξύ της αρχικής δυσστησιίας και της δυσστησιίας μετά τη διαρροή των εφεδράνων ολίσθησης, μπορούν να προκαλέσουν ενίσχυση της συνεισφοράς ανώτερων ιδιομορφών και ενδεχόμενη αύξηση των επιταχύνσεων των ορόφων, οι οποίες είναι επιθυμητό να περιορίζονται για την προστασία του περιεχόμενου ευαίσθητου εξοπλισμού μιας κατασκευής.

Το κύριο μειονέκτημα των εφεδράνων τριβής, είναι το γεγονός πως ο συντελεστής τριβής, ο οποίος καθορίζει τις δυνάμεις που θα μεταβιβαστούν στην ανωδομή, δεν είναι σταθερός, αφού εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες και συνθήκες, με κίνδυνο να μεταβιβαστούν στην ανωδομή σεισμικές δυνάμεις μεγαλύτερες των αναμενόμενων τεμνουσών δυνάμεων σχεδιασμού.

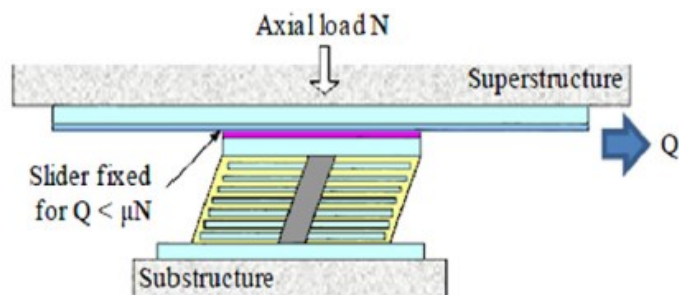


Σχήμα 13.11: Σύστημα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς (FPS).

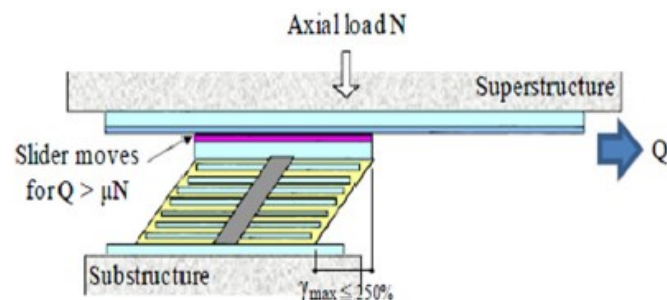
Υβριδικά συστήματα σεισμικής μόνωσης

Συνήθως, στην πλειονότητα των σεισμικά μονωμένων κατασκευών, χρησιμοποιείται ένας τύπος σεισμικών εφεδράνων, ενώ ο κάθε τύπος εφεδράνων παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για τη βέλτιστη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των διαφόρων συστημάτων σεισμικής μόνωσης και απόμβλυνση των σχετικών μειονεκτημάτων τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά περισσότεροι του ενός τύποι εφεδράνων.

Ένας διαδεδομένος συνδυασμός βασίζεται στο συνδυασμό ελαστομερικών εφεδράνων με εφέδρανα τριβής, αφού τα ελαστομερικά παρέχουν μηχανισμό επαναφοράς ενώ τα τριβής παρέχουν ένα αξιόλογο μηχανισμό απόσβεσης ενέργειας και είναι ικανά να φέρουν σημαντικά κατακόρυφα φορτία. Ωστόσο, τα εφέδρανα τριβής επιτρέπουν την ανύψωση της κατασκευής προκειμένου να διασφαλίσουν τη δύναμη επαναφοράς, ενώ παρουσιάζουν και το πρόβλημα της εμπλοκής κατά την ολίσθηση και των απότομων αλλαγών της ενεργής δυσστησίας. Χρησιμοποιώντας απλά εφέδρανα τριβής παράλληλα με ελαστομερικά εφέδρανα, με τον αξιόπιστο μηχανισμό επαναφοράς, βάσει των ιδιοτήτων του ελαστομερούς υλικού, χωρίς την ανάγκη ανύψωσης της κατασκευής, περιορίζονται τα μειονεκτήματα των εφεδράνων τριβής, τα οποία προσφέρουν ικανοποιητική απόσβεση.



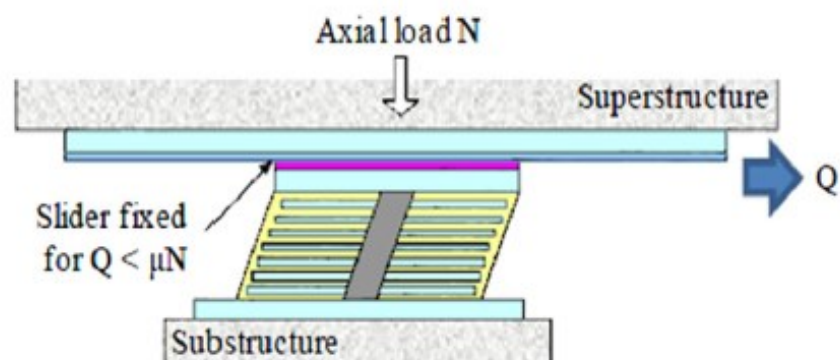
When subjected to DBE or below



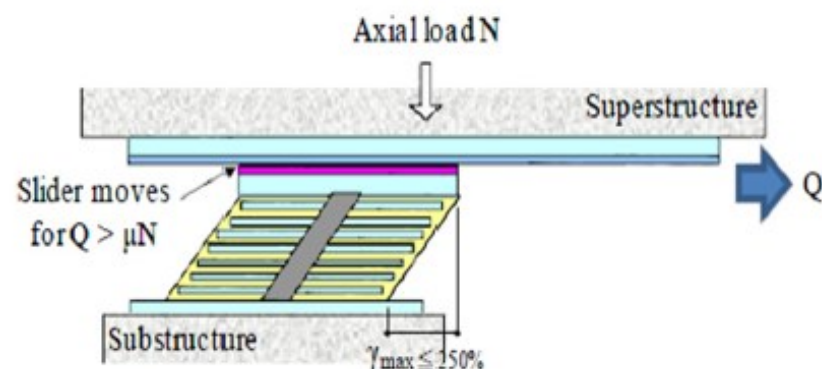
When subjected to an earthquake beyond DBE

Η έναρξη της ολίσθησης συντελείται εφόσον η τέμνουσα βάση υπερβεί μια οριακή τιμή, η οποία είναι ανάλογη του συντελεστή τριβής του εφεδράνου τριβής και συναρτάται του ποσοστού του κατακόρυφου φορτίου που αναλαμβάνεται από τα εφέδρανα τριβής. Έτσι, διασφαλίζεται η επιθυμητή αρχική δυσκαμψία της κατασκευής υπό μικρές φορτίσεις και αποτρέπεται η αθέμιτη κίνηση της πριν την ενεργοποίηση του συστήματος μόνωσης.

Στη συνέχεια, όταν αναπτυχθεί η απαιτούμενη τέμνουσα βάση για την πρόκληση της ολίσθησης των εφεδράνων τριβής, τα ελαστομερικά εφέδρανα παρέχουν πρόσθετη δυσστησία και εξομαλύνεται κάπως η αλλαγή της δυσστησίας. Συγχρόνως, με την ταυτόχρονη χρήση ελαστομερικών εφεδράνων και εφεδράνων ολίσθησης, σε περίπτωση αυξημένων διατμητικών παραμορφώσεων και αξονικών φορτίων, όπου τα ελαστομερικά εφέδρανα θα μπορούσαν να καταστούν ασταθή λόγω λυγισμού, μέρος του αξονικού φορτίου που καταπονεί τα ελαστομερικά εφέδρανα, μπορεί να μεταβιβαστεί στα εφέδρανα τριβής, προς ανακούφιση των ελαστομερικών εφεδράνων.



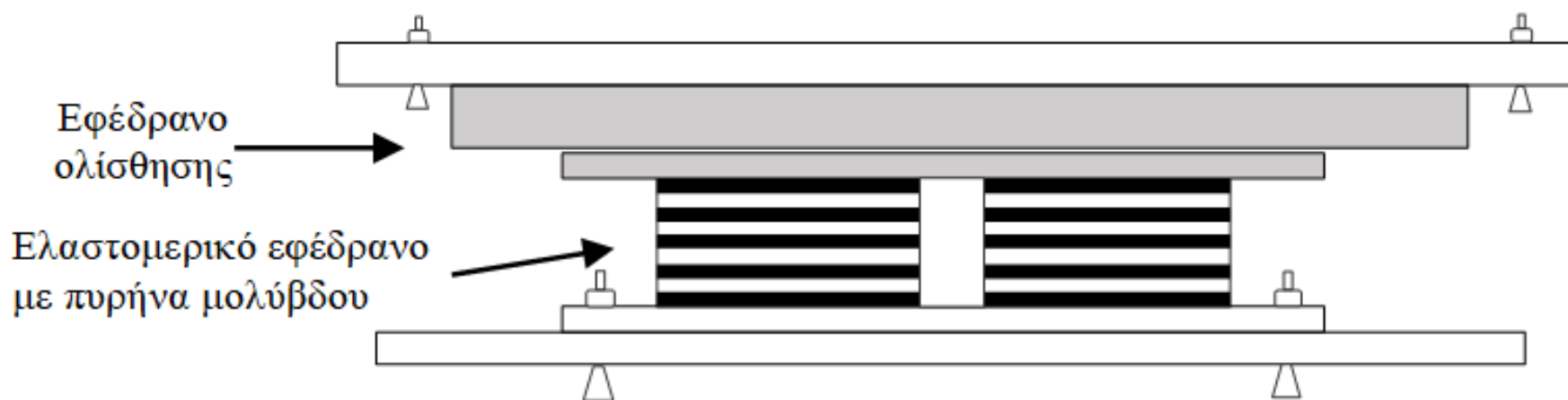
When subjected to DBE or below



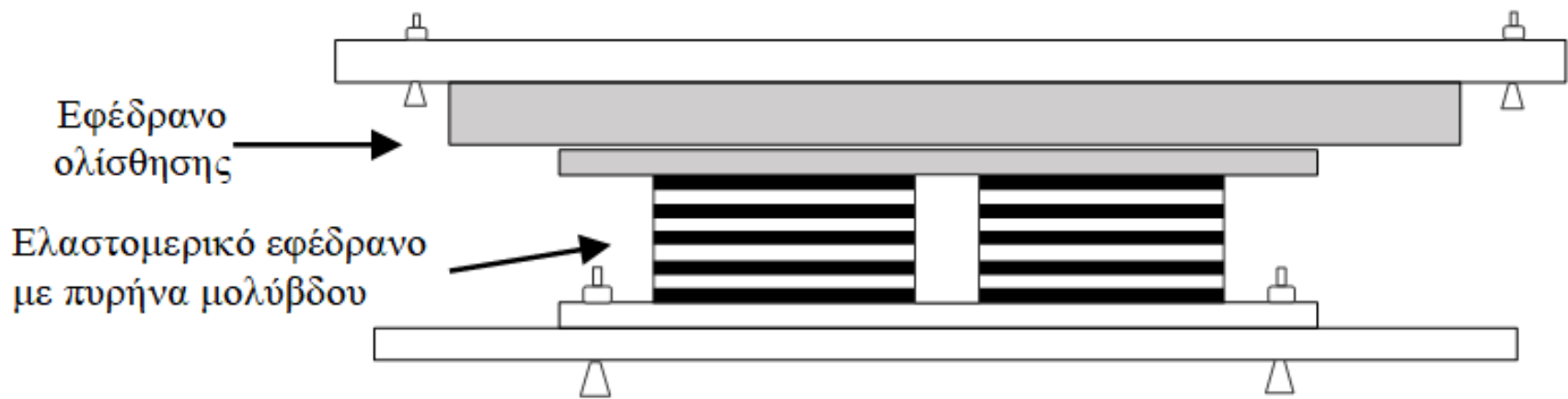
When subjected to an earthquake beyond DBE

Επίσης, θα ήταν πιο αποτελεσματικό ένα σύστημα μόνωσης που διαθέτει δύο μηχανισμούς απόσβεσης, ένα ιξώδη και ένα υστερητικό. Η ιξώδης απόσβεση, η οποία οφείλεται στο ελαστομερές, παρέχει ένα διαρκή μηχανισμό απόσβεσης, ιδιαίτερα αποτελεσματικό για μικρές δονήσεις και λιγότερο αποτελεσματικό για ισχυρότερες. Ενώ, η υστερητική απόσβεση, η οποία παράγεται από την ανάπτυξη τριβής στο ολισθαίνον εφέδρανο, αν και δεν είναι συνεχής, εντούτοις είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις.

Έχει επίσης προταθεί και είναι υπό αξιολόγηση ένας υβριδικός μονωτήρας που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του ελαστομερικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου και του απλού συστήματος ολίσθησης σε μία ενιαία διάταξη (Σχήμα 13.12).



Σχήμα 13.12: Υβριδικό εφέδρανο συνδυασμού ελαστομερικού με πυρήνα μολύβδου.



Σχήμα 13.12: Υβριδικό εφέδρανο συνδυασμού ελαστομερικού με πυρήνα μολύβδου.

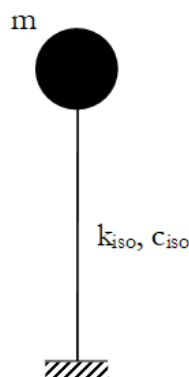
Συγκεκριμένα, στο σύστημα αυτό ένα απλό εφέδρανο τριβής, τα οποίο επικάθεται πάνω από ένα ελαστομερικό εφέδρανο (Σχήμα 13.12), ενεργοποιείται μόνο σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων, με σκοπό την προστασία και τη διατήρηση της λειτουργικότητας των ελαστομερικών μονωτήρων σε σεισμούς μεγαλύτερους του σεισμού σχεδιασμού. Έτσι, με τη συγχώνευση των δύο προαναφερθέντων τύπων σεισμικών εφεδράνων, ελαστομερικών και τριβής, σε ένα ενιαίο σύστημα μόνωσης, μπορεί να προσφερθεί η δυνατότητα διαμόρφωσης της επιδιωκόμενης απόσβεσης για κάθε κατασκευή και η βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης σε ένα αυτόνομο σύστημα.

Συμπεριφορά και προσομοίωση σεισμικά μονωμένου κτηρίου

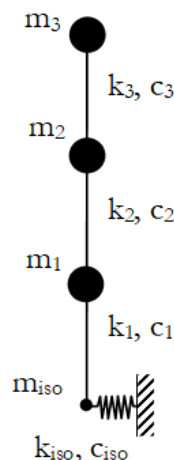
Η απλότητα ή πολυπλοκότητα του προσομοιώματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δυναμική ανάλυση μιας σεισμικά μονωμένης κατασκευής εξαρτάται προφανώς από το σκοπό της ανάλυσης και την απαιτούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων της.

Το πιο απλό μοντέλο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση μιας σεισμικά μονωμένης κτηριακής κατασκευής, κυρίως για σκοπούς προκαταρκτικού σχεδιασμού, είναι ένα μονοβάθμιο σύστημα (ΜΒΣ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.13.α. Σε αυτή την περίπτωση, η μάζα του ΜΒΣ αντιστοιχεί στη μάζα της ανωδομής, δηλαδή της κατασκευής πάνω από το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης, και η δυσκαμψία του ΜΒΣ ισούται με τη δυσκαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης, αφού η ανωδομή μπορεί να θεωρηθεί ότι κινείται ουσιαστικά σαν στερεό σώμα χωρίς παραμορφώσεις, θεώρηση που είναι κοντά στην πραγματικότητα.

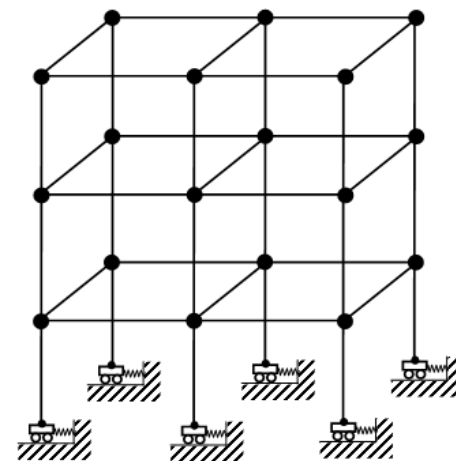
(α)



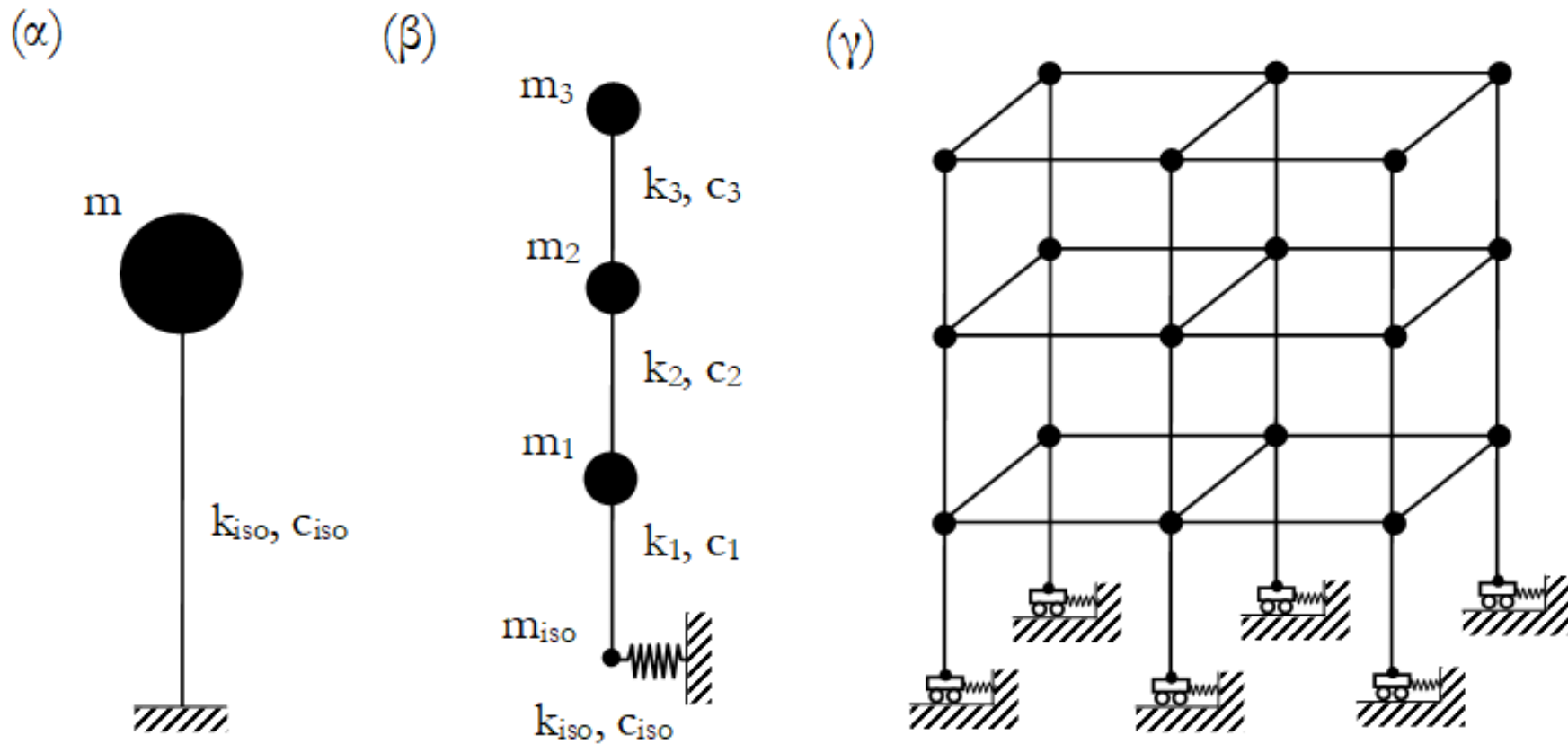
(β)



(γ)



Σχήμα 13.13: Προσομοίωση σεισμικά μονωμένης κτηριακής κατασκευής ως: (α) ΜΒΣ, (β) επίπεδο ΠΒΣ, και (γ) τρισδιάστατο ΠΒΣ.



Σχήμα 13.13: Προσομοίωση σεισμικά μονωμένης κτηριακής κατασκευής ως: (α) ΜΒΣ, (β) επίπεδο ΠΒΣ, και (γ) τρισδιάστατο ΠΒΣ.

Ένα κάπως πιο λεπτομερές, αλλά επίσης πολύ απλοποιητικά προσεγγιστικό, μοντέλο είναι ένα ουσιαστικά μονοδιάστατο (stick model) ΠΒΣ, με συμπεριφορά διατμητικού προβόλου, του οποίου η κίνηση εξετάζεται μόνο στο επίπεδο (Σχήμα 13.13.β), δηλαδή με απόλυτα άκαμπτα ζυγώματα, αξονικά μη παραμορφώσιμα υποστυλώματα και τις μάζες των ορόφων συγκεντρωμένες στα επίπεδα των πλακών, ενώ η σεισμική διέγερση μπορεί να είναι μόνο στην οριζόντια διεύθυνση που είναι εγκάρσια του άξονα του μοντέλου και εντός του επιπέδου ανάλυσης.

Για να μελετηθεί λεπτομερώς τοπικά και αξιόπιστα η δυναμική συμπεριφορά των στοιχείων μιας σεισμικά μονωμένης κατασκευής, αλλά και για να μπορούν να ληφθούν υπόψη τρισδιάστατα φαινόμενα, όπως τυχόν στρεπτική συμπεριφορά λόγω εκκεντροτήτων και δράση σεισμικών διεγέρσεων τουλάχιστον σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις, και ενδεχομένως και στην κατακόρυφη διεύθυνση, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα τρισδιάστατο ΠΒΣ (Σχήμα 13.13.γ). Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός των αποκρίσεων τόσο της κατασκευής όσο και των επιμέρους στοιχείων της, λαμβάνοντας υπόψη και τυχόν στρεπτικές αποκρίσεις της κατασκευής, λόγω ενδεχόμενης εκκεντρότητας μεταξύ του κέντρου μάζας και του κέντρου δυσκαμψίας της κατασκευής.

Εξισώσεις κίνησης σεισμικά μονωμένων κατασκευών - ΜΒΣ

Η εξίσωση κίνησης μιας σεισμικά μονωμένης κατασκευής χρησιμοποιώντας προσεγγιστικά ένα ισοδύναμο γραμμικό ελαστικό ΜΒΣ με μάζα, m_{total} , ίση με τη συνολική μάζα της ανωδομής, οριζόντια δυσκαμψία, k_{iso} , ίση με την ισοδύναμη δυσκαμψία του συστήματος μόνωσης, και ένα ισοδύναμο συντελεστή ισοδύναμης ιξώδους, c_{iso} , ο οποίος δεν μπορεί να υπολογιστεί αλλά έμμεσα να εκτιμηθεί από τον αντίστοιχο λόγο απόσβεσης, ξ_{iso} , έχει την εξής μορφή:

$$m_{total} \cdot \ddot{u}(t) + c_{iso} \cdot \dot{u}(t) + k_{iso} \cdot u(t) = -m_{total} \cdot \ddot{u}_g(t)$$

όπου $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ και $u(t)$ είναι οι σχετικές επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετακινήσεις της μάζας της ανωδομής σε σχέση με το έδαφος στη χρονική στιγμή t , αντίστοιχα.

Διαιρώντας την εξίσωση κίνησης με τη συνολική μάζα της ανωδομής, m_{total} , η εξίσωση παίρνει την εξής μορφή:

$$\ddot{u}(t) + 2 \cdot \xi_{iso} \cdot \omega_n \cdot \dot{u}(t) + \omega_n^2 \cdot u(t) = -\ddot{u}_g(t)$$

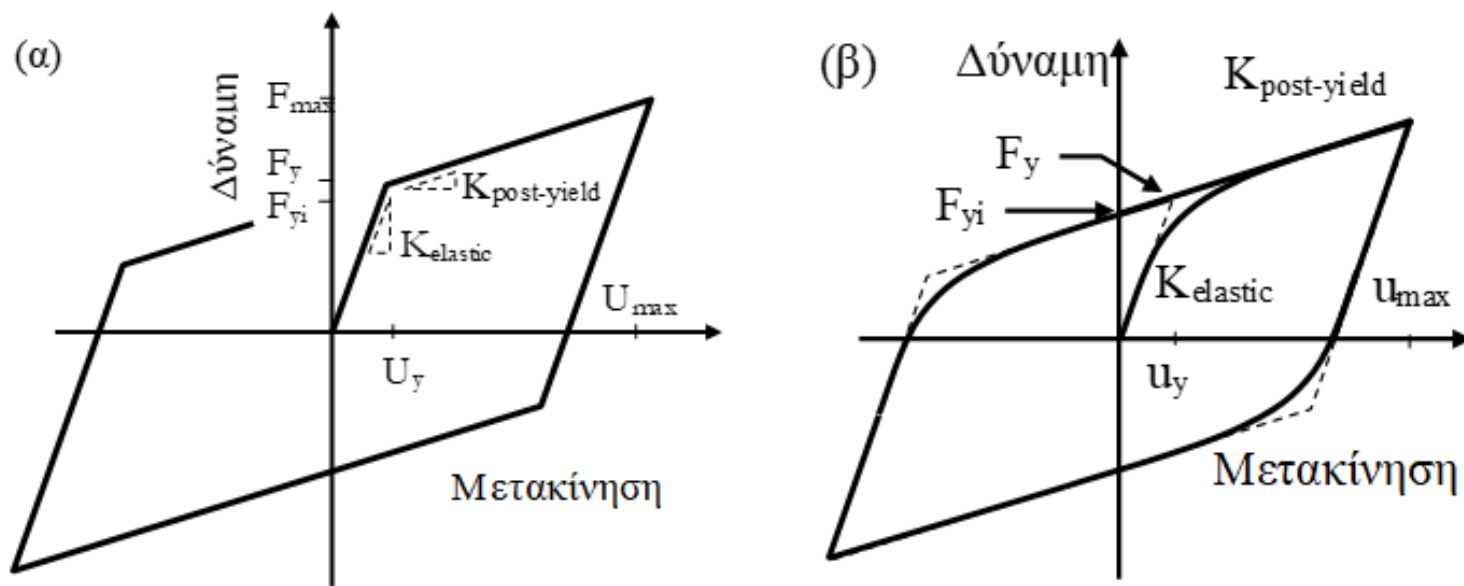
$$\ddot{u}(t) + 2 \cdot \xi_{iso} \cdot \omega_n \cdot \dot{u}(t) + \omega_n^2 \cdot u(t) = -\ddot{u}_{ig}(t)$$

όπου, ξ_{iso} είναι ο ισοδύναμος λόγος ιξώδους απόσβεσης, ο οποίος αντιστοιχεί στην ενέργεια που αποσβένεται στο σύστημα σεισμικής μόνωσης, και ω_n είναι η φυσική ιδιοσυχνότητα που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη δυσκαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης, k_{iso} .

Η πιο πάνω ΔΕ μπορεί εύκολα να επιλυθεί αριθμητικά με μια από τις μεθόδους βήμα-προς-βήμα αριθμητικής ολοκλήρωσης, όπως η ΜΚΔ και η μέθοδος Newmark, όπως έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 11 και υλοποιηθεί στο Κεφάλαιο 15, για να υπολογιστεί προσεγγιστικά η απόκριση μιας σεισμικά μονωμένης κατασκευής προσομοιωμένης σαν ΜΒΣ με ισοδύναμη γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

Όμως, τα πλείστα σεισμικά εφέδρανα δεν παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά, αλλά μη γραμμική ανελαστική με υστερητική απόσβεση ενέργειας. Συνεπώς, πιο σωστή είναι η προσομοίωση σεισμικά μονωμένων κατασκευών λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική ανελαστική συμπεριφορά του συστήματος σεισμικής μόνωσης.

Συγκεκριμένα, τα ελαστομερικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (LRBs), όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζουν υστερητική συμπεριφορά και χαρακτηρίζονται από μη γραμμική σχέση δύναμης-μετακίνησης, η οποία συχνά προσεγγίζεται με ένα διγραμμικό μοντέλο δύναμης-μετακίνησης, το οποίο είναι αρκούντως ικανοποιητικό για το προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού (Σχήμα 13.14.α). Πιο ακριβές είναι το μοντέλο Bouc-Wen, το οποίο έχει πιο ομαλή μετάβαση από τον ελαστικό στον μετελαστικό κλάδο, όπως είναι και η πραγματική σχέση δύναμης-μετακίνησης (συνεχής γραμμή στο Σχήμα 13.14.β) που έχει παρατηρηθεί σε σχετικά πειράματα αυτών των σεισμικών μονωτήρων.



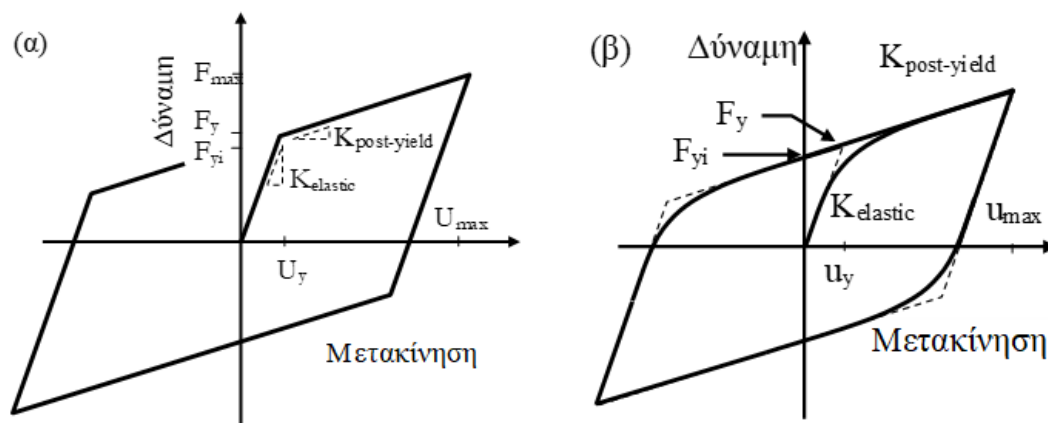
Σχήμα 13.14: Μη γραμμική ανελαστική συμπεριφορά ελαστομερικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου (α) διγραμμικό μοντέλο (β) μοντέλο Bouc-Wen.

Αν και στην πράξη χρησιμοποιείται συχνά και το διγραμμικό μοντέλο για την προσομοίωση ελαστομερικών εφεδράνων με πυρήνες μολύβδου (LRBs), οι απότομες αλλαγές της δυσκαμψίας κατά τη διαρροή έχουν σαν αποτέλεσμα ενίσχυση των επιταχύνσεων και της συνεισφοράς ανωτέρων ιδιομορφών, οι οποίες δεν αντιστοιχούν στην πραγματική συμπεριφορά, όπως πιο επακριβώς αντιπροσωπεύεται από το μοντέλο Bouc-Wen.

Εν πάση περιπτώσει, χρησιμοποιώντας πιο ορθά ένα μη γραμμικό ανελαστικό μοντέλο για το σύστημα σεισμικής μόνωσης, η ΔΕ που χαρακτηρίζει την κίνηση ενός ΜΒΣ έχει την εξής μορφή:

$$m_{\text{total}} \cdot \ddot{u}(t) + c(t) \cdot \dot{u}(t) + F_s(t, u, \dot{u}) = -m_{\text{total}} \cdot \ddot{u}_g(t)$$

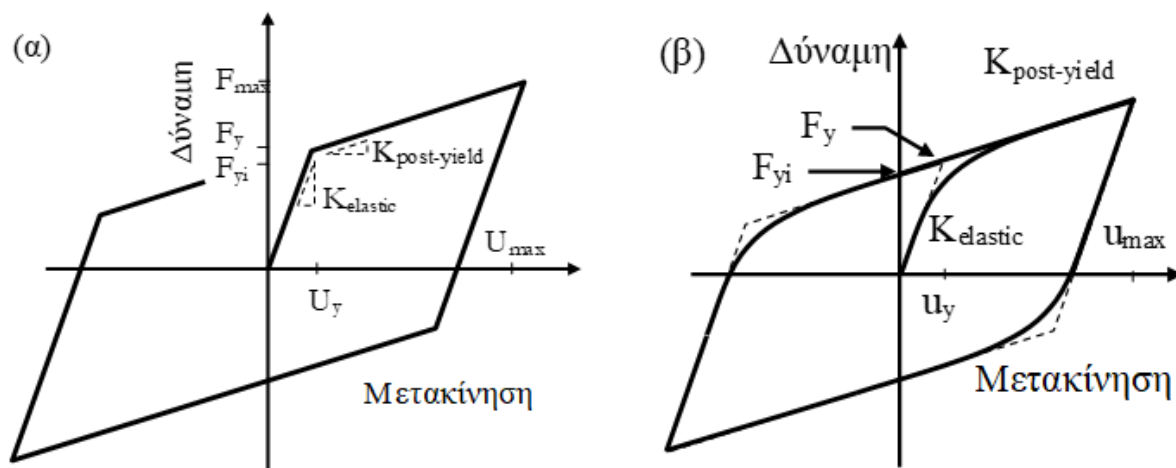
όπου η δύναμη παραμόρφωσης $F_s(t, u, \dot{u})$ του ΜΒΣ εξαρτάται από την χρονοϊστορία της απόκρισης και απαιτεί μη γραμμική δυναμική ανάλυση.



Ο συντελεστής απόσβεσης μπορεί να προσδιοριστεί προσεγγιστικά, σε κάθε χρονική στιγμή, κατά την αριθμητική ολοκλήρωση της ΔΕ κίνησης, βάσει της τιμής της δυσκαμψίας στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή θεωρώντας ένα συγκεκριμένο λόγο απόσβεσης, ξ , ως:

$$c(t + \Delta t) = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot m_{\text{total}} = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{\frac{K(t + \Delta t)}{m_{\text{total}}}} \cdot m_{\text{total}}$$

όπου ω_n είναι η φυσική γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ΜΒΣ κατά τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 13.14: Μη γραμμική ανελαστική συμπεριφορά ελαστομερικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου (α) διγραμμικό μοντέλο (β) μοντέλο Bouc-Wen.

Εξισώσεις κίνησης σεισμικά μονωμένων κατασκευών - ΠΒΣ

Φυσικά για την πιο ακριβή εκτέλεση δυναμικής ανάλυσης και τον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης μιας κτηριακής κατασκευής, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ΠΒΣ, παρά το ότι η χρήση ενός ΜΒΣ συχνά είναι χρήσιμη για σκοπού σχεδιασμού αλλά και παραμετρικών διερευνήσεων. Συνήθως η συμπεριφορά της ανωδομής μπορεί να θεωρηθεί ότι χαρακτηρίζεται από τη συμπεριφορά ενός διατμητικού προβόλου.

Εάν η ανάλυση πραγματοποιηθεί στο επίπεδο, χρησιμοποιώντας μία μόνο σεισμική διέγερση στο οριζόντιο επίπεδο, με τις μάζες συγκεντρωμένες στα ύψη των ορόφων και ένα μετατοπισιακό ΒΕ σε κάθε μάζα, και εάν θεωρηθεί ισοδύναμη γραμμική ελαστική συμπεριφορά για το σύστημα σεισμικής μόνωσης οι ΔΕ κίνησης της κατασκευής έχουν την εξής γνωστή μορφή, θεωρώντας προσεγγιστικά μια ισοδύναμη οριζόντια δυσκαμψία για το σύστημα σεισμικής μόνωσης:

$$\underline{\mathbf{M}} \cdot \underline{\ddot{u}}(t) + \underline{\mathbf{C}} \cdot \underline{\dot{u}}(t) + \underline{\mathbf{K}} \cdot \underline{u}(t) = -\underline{\mathbf{M}} \cdot \underline{\mathbf{1}} \cdot \underline{\ddot{u}}_g(t)$$

$$\underline{\mathbf{M}} \cdot \underline{\ddot{u}}(t) + \underline{\mathbf{C}} \cdot \underline{\dot{u}}(t) + \underline{\mathbf{K}} \cdot \underline{u}(t) = -\underline{\mathbf{M}} \cdot \underline{\mathbf{1}} \cdot \underline{\ddot{u}}_g(t)$$

Αυτό το συζευγμένο σύστημα ΔΕ μπορεί εύκολα να επιλυθεί είτε με τη μέθοδο επαλληλίας των ιδιομορφών είτε με απευθείας ολοκλήρωση, αριθμητικά με μια από τις μεθόδους βήμα-προς-βήμα αριθμητικής ολοκλήρωσης, όπως η МКΔ και η μέθοδος Newmark, όπως έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 11 και υλοποιηθεί στο Κεφάλαιο 15.

Εάν χρησιμοποιηθεί η επαλληλία των ιδιομορφών θα πρέπει να δοθεί ο αυξημένος λόγος απόσβεσης στην 1^η ιδιομορφική εξίσωση, η οποία αντιστοιχεί στην παραμόρφωση του συστήματος μόνωσης και την κίνηση της ανωδομής που προσεγγίζει αυτήν ενός στερεού σώματος. Η συνεισφορά της θεμελιώδους (1^{ης}) ιδιομορφής είναι ιδιαίτερα αυξημένη, σε σχέση με τις συνεισφορές των υπολοίπων ιδιομορφών, όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τις αντίστοιχες ιδιομορφικές μάζες.

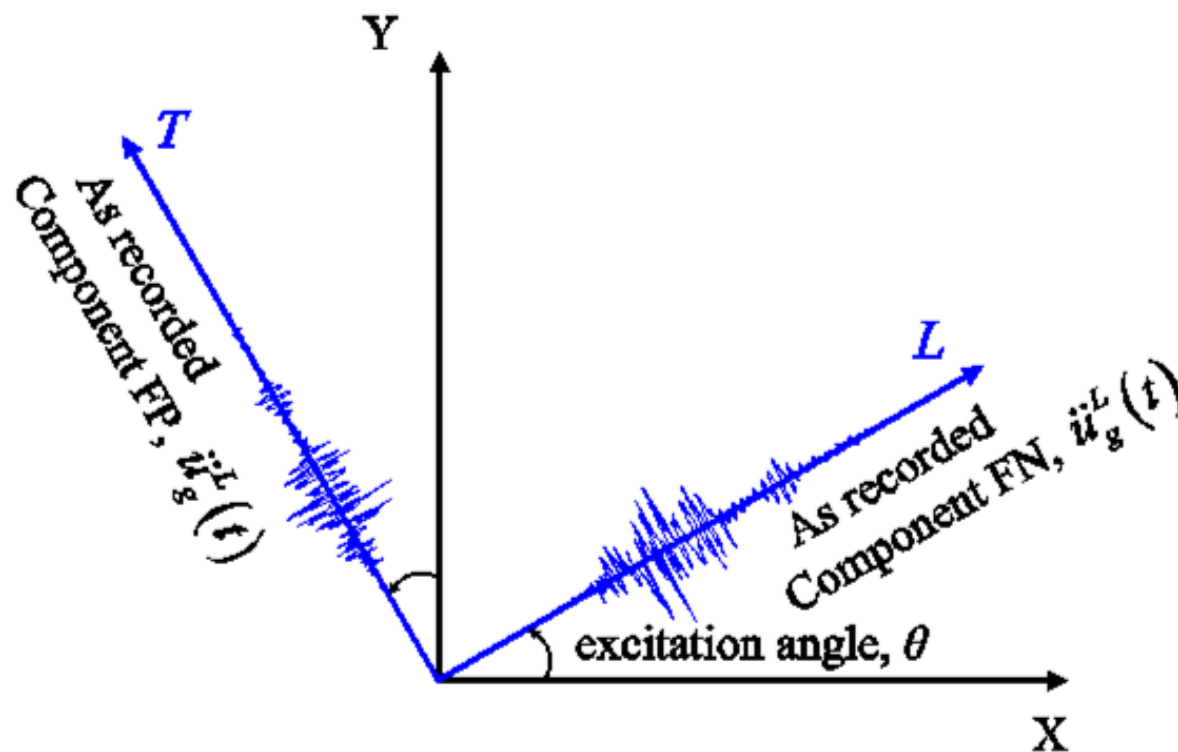
Εάν χρησιμοποιηθεί η απευθείας ολοκλήρωση του συζευγμένου συστήματος ΔΕ, θα πρέπει να σχηματιστεί το μητρώο απόσβεσης $\underline{\mathbf{C}}$, το οποίο μπορεί να σχηματιστεί θεωρώντας απόσβεση κατά Rayleigh και να τροποποιηθεί κατάλληλα με επαύξηση του στοιχείου που αντιστοιχεί στο σύστημα σεισμικής μόνωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική διαφορά στους μηχανισμούς απόσβεσης ανάμεσα στο σύστημα μόνωσης και την ανωδομή, η οποία παραπέμπει σε μη κλασική απόσβεση.

Πιο ακριβής αντιμετώπιση θα είναι εάν ληφθεί υπόψη η μη γραμμική ανελαστική συμπεριφορά των σεισμικών μονωτήρων, πραγματοποιώντας μη γραμμική δυναμική ανάλυση του συζευγμένου συστήματος ΔΕ που εκφράζει τις εξισώσεις κίνησης με την εξής μορφή, το οποίο λόγω της μη γραμμικότητας δεν μπορεί να μετασχηματιστεί και θα πρέπει να επιλυθεί με απευθείας ολοκλήρωση:

$$\underline{M} \cdot \underline{\ddot{u}}(t) + \underline{C}(t) \cdot \underline{\dot{u}}(t) + \underline{F}_s(t, u, \dot{u}) = -\underline{M} \cdot \underline{1} \cdot \underline{\ddot{u}}_g(t)$$

Η ανωδομή μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά, αλλά για το σύστημα της σεισμικής μόνωσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί είτε η διγραμμική σχέση δύναμης μετακίνησης (Σχήμα 13.14.α), είτε η σχέση βάσει του μοντέλου Bouc Wen (Σχήμα 13.14.β). Έτσι, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μη γραμμική ανάλυση με βήμα-προς-βήμα απευθείας αριθμητική ολοκλήρωση.

Ακόμη πιο ακριβής και απαιτούμενη για την λεπτομερή ανάλυση και διαστασιολόγηση είναι η τρισδιάστατη ανάλυση, με την οποία μπορούν να ληφθούν υπόψη στρεπτικά φαινόμενα λόγω εκκεντροτήτων (είτε λόγω τυχηματικών εκκεντροτήτων μαζών, είτε λόγω εκκεντροτήτων σε σχέση με τη δυσκαμψία της κατασκευής), σεισμικές διεγέρσεις τουλάχιστον στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις καθώς και η διεύθυνση επιβολής των σεισμικών διεγέρσεων, παράγοντες που δεν μπορούν να εξεταστούν μέσω επίπεδων αναλύσεων.

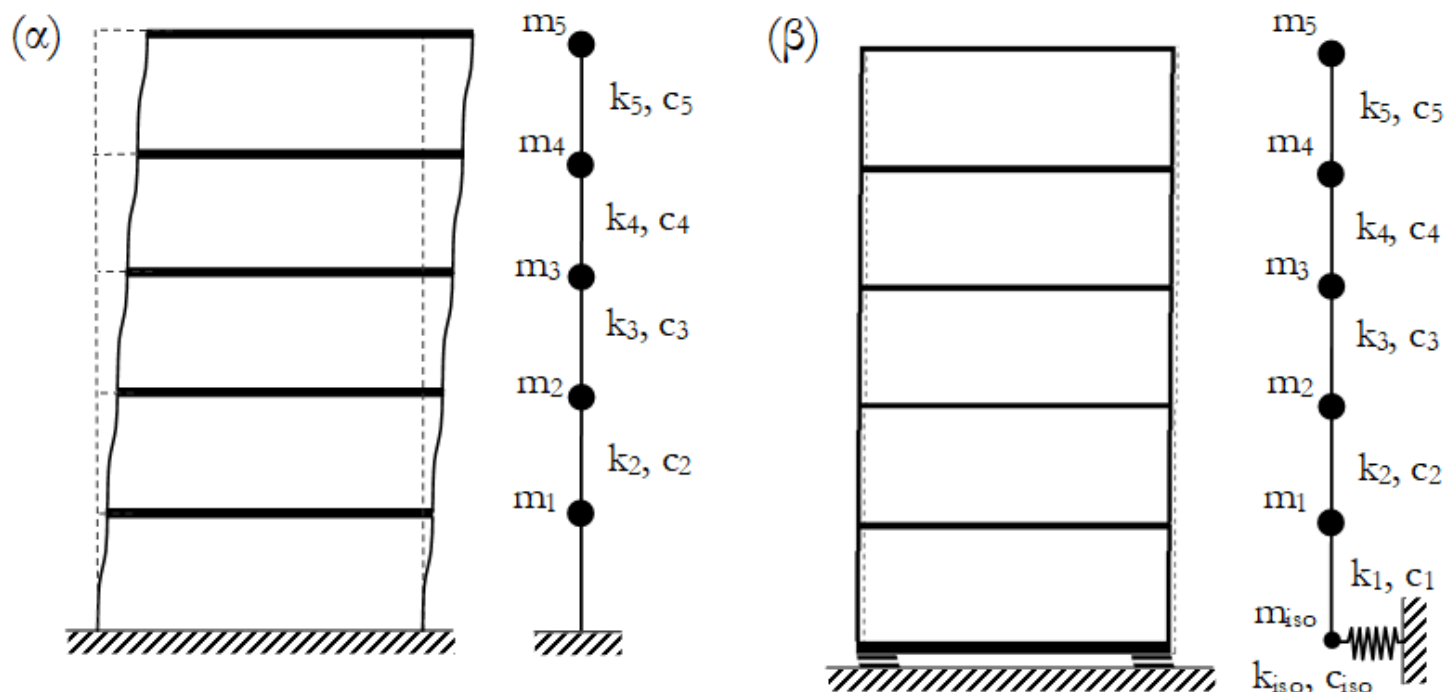


Σχήμα 13.15: Επιβολή οριζόντιων σεισμικών διεγέρσεων στην τρισδιάστατη ανάλυση και μεταβολή της διεύθυνσης της γωνίας επιβολής των σεισμικών διεγέρσεων, θ .

Σύγκριση σεισμικά μονωμένου και συμβατικά θεμελιωμένου κτηρίου

Η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης καταδεικνύεται στην πιο κάτω σύγκριση ενός τυπικού συμβατικά θεμελιωμένου πενταώροφου κτηρίου και του αντίστοιχου σεισμικά μονωμένου, και τα δύο με συμπεριφορά παραμόρφωσης διατμητικού προβόλου.

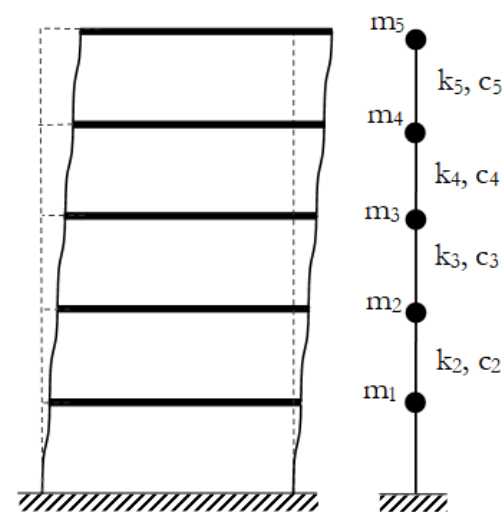
Συγκεκριμένα, το συμβατικά θεμελιωμένο έχει τους 4 πρώτους ορόφους με μάζα 240 τόνους ο καθένας, ενώ ο τελευταίος όροφος έχει μάζα 180 τόνους, και η οριζόντια δυσκαμψία του κάθε ορόφου είναι ίση με 340 MN/m. Το σεισμικά μονωμένο κτήριο έχει επιπρόσθετη μάζα 240 τόνους στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης και οριζόντια δυσκαμψία στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης 19 MN/m, η οποία αντιστοιχεί στη συνολική δυσκαμψία του συστήματος σεισμικής μόνωσης.



Σχήμα 13.16: (α) Συμβατικά θεμελιωμένο και (β) σεισμικά μονωμένο τυπικό πενταώροφο κτήριο.

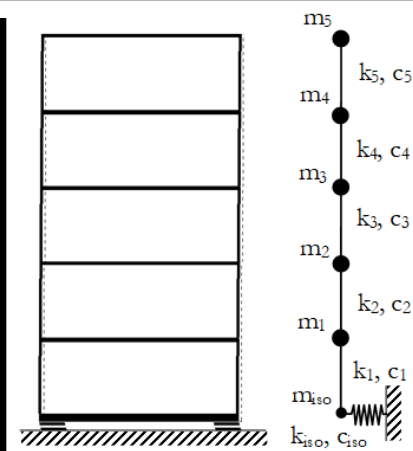
Ο πιο κάτω πίνακας δίνει τις ιδιοπεριόδους, ιδιοσυχνότητες και ενεργές ιδιομορφικές μάζες του συμβατικά θεμελιωμένου πενταώροφου κτηρίου:

Ιδιομορφή	Ιδιοπερίοδος [sec]	Γωνιακή ιδιοσυχνότητα [rad/sec]	Κυκλική ιδιοσυχνότητα [Hz]	Ενεργή μάζα [tons]	% της συνολικής μάζας του κτηρίου
1	0.56	11.22	1.79	1005.85	88.23
2	0.19	32.59	5.19	98.36	8.63
3	0.12	50.89	8.10	26.50	2.32
4	0.10	64.54	10.27	7.78	0.68
5	0.09	72.66	11.56	1.51	0.13



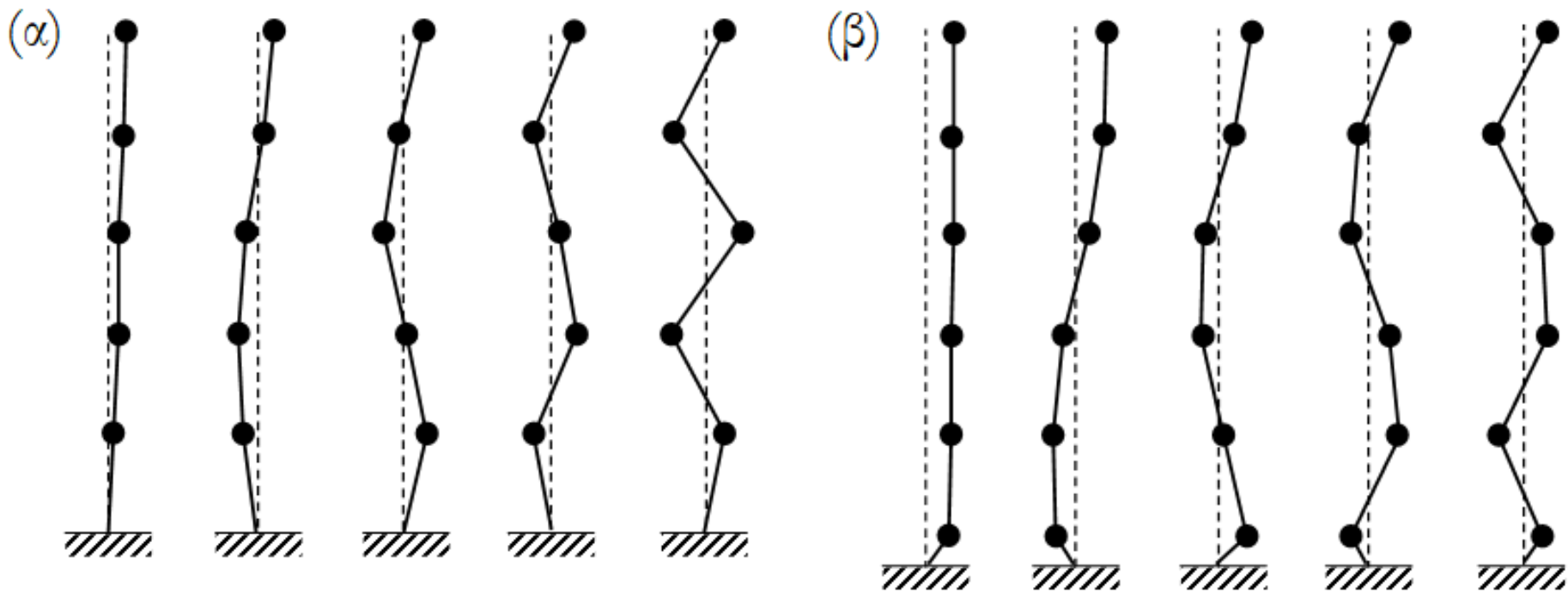
Ενώ ο επόμενος πίνακας παρέχει τις ιδιοπεριόδους, ιδιοσυχνότητες και ενεργές ιδιομορφικές μάζες του σεισμικά μονωμένου πενταώροφου κτηρίου:

Ιδιομορφή	Ιδιοπερίοδος [sec]	Γωνιακή ιδιοσυχνότητα [rad/sec]	Κυκλική ιδιοσυχνότητα [Hz]	Ενεργή μάζα [tons]	% της συνολικής μάζας του κτηρίου
1	1.76	3.57	0.57	1377.24	99.80
2	0.30	20.92	3.33	2.56	0.19
3	0.16	39.25	6.25	0.17	0.012
4	0.11	54.78	8.72	0.03	<0.01
5	0.09	66.24	10.54	0.0061	<0.001
6	0.09	73.06	11.63	0.0010	<0.0001

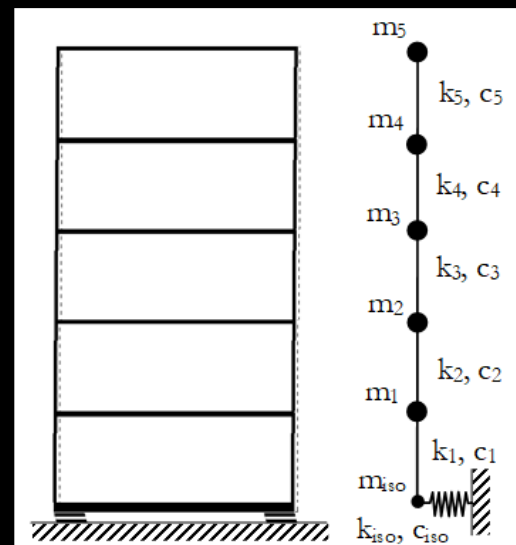
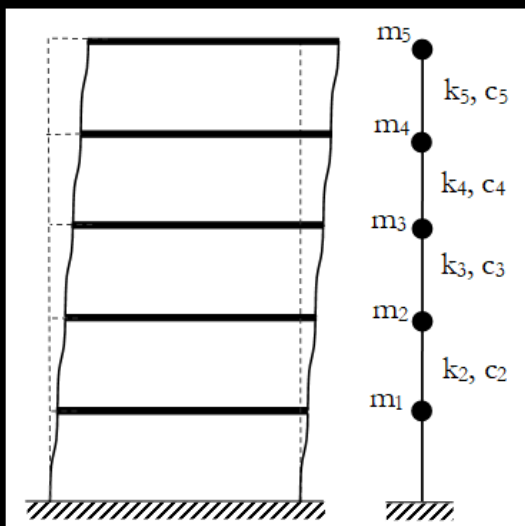


Η ιδιομορφική ανάλυση και οι υπολογιζόμενες ενεργές ιδιομορφικές μάζες, ως ποσοστά της συνολικής μάζας του κτηρίου, καταδεικνύουν ότι η συνεισφορά της θεμελιώδους ιδιομορφής κυριαρχεί τη συνολική απόκριση ενός σεισμικά μονωμένου κτηρίου πολύ περισσότερο από ότι σε ένα συμβατικά θεμελιωμένο κτήριο, όπου δεν είναι τόσο ασήμαντες οι συνεισφορές των άλλων, ανωτέρων, ιδιομορφών. Συνεπώς, η προσομοίωση και ανάλυση ενός σεισμικά μονωμένου κτηρίου ως ΜΒΣ, με μάζα τη συνολική μάζα της ανωδομής, πάνω από το σύστημα μόνωσης, και χαρακτηριστικά δυσκαμψίας και απόσβεσης αυτά του συστήματος σεισμικής μόνωσης, μπορεί να δώσει πολύ καλά προσεγγιστικά αποτελέσματα.

Η θεμελιώδης και πλέον σημαντική ιδιομορφή του σεισμικά μονωμένου πενταώροφου κτηρίου χαρακτηρίζεται από την παραμόρφωση του συστήματος μόνωσης και την κίνηση της ανωδομής ως στερεό σώμα (Σχήμα 13.17.β), σε αντίθεση με την έντονη καθ' ύψος παραμόρφωση της αντίστοιχης συμβατικά θεμελιωμένης κατασκευής.

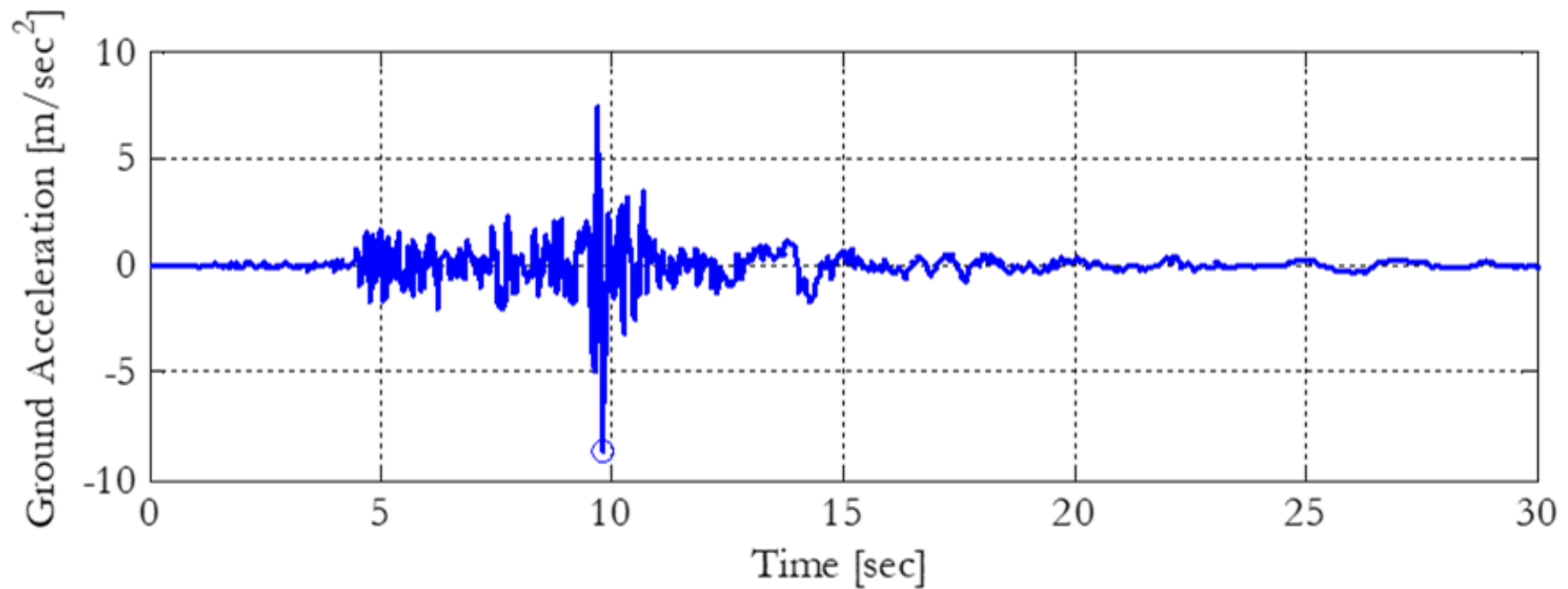
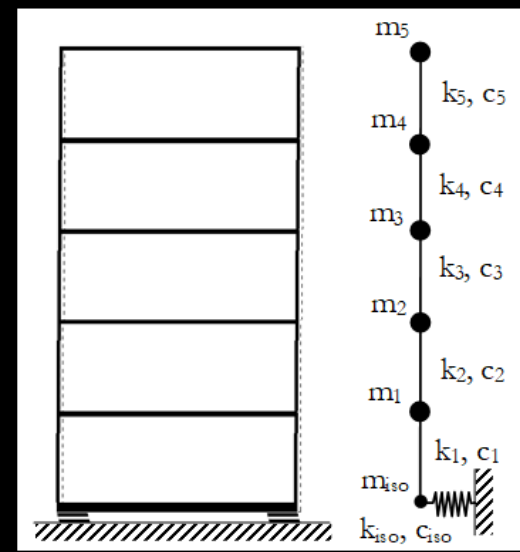
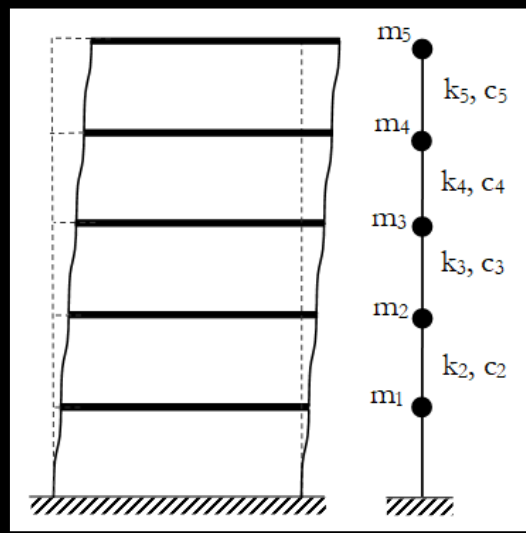


Σχήμα 13.17: Ιδιομορφές του πεντάώροφου κτηρίου προσομοιωμένου στο επίπεδο ως (α) συμβατικά θεμελιωμένου (β) σεισμικά μονωμένου.



Ενδεικτικά παρατίθενται αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης της συγκεκριμένης πεντάωροφης κατασκευής, τόσο συμβατικά θεμελιωμένης όσο και σεισμικά μονωμένης, που πραγματοποιήθηκε υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού του Northridge (Σχήμα 13.18) με $PGA=8.660 \text{ m/s}^2=0.883 \text{ g}$, όπως καταγράφηκε στις 17 Ιανουαρίου του 1994 στη Σάντα Μόνικα (Hall Grounds Chanel 1, 90 degrees-component).

Για την περίπτωση της συμβατικά θεμελιωμένης κατασκευής, δημιουργήθηκε μητρώο απόσβεσης κατά Rayleigh ορίζοντας ως 2 % τους λόγους απόσβεσης που αντιστοιχούν στη μικρότερη και στη μεγαλύτερη ιδιοσυχνότητα, ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάζονται τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας. Ενώ, στην περίπτωση της σεισμικά μονωμένης κατασκευής, ορίστηκε λόγος απόσβεσης 15 % για τη μικρότερη ιδιοσυχνότητα και 2 % για τη μεγαλύτερη ιδιοσυχνότητα, στο σχηματισμό του αντίστοιχου μητρώου απόσβεσης κατά Rayleigh. Με αυτό τον τρόπο αντιπροσωπεύεται προσεγγιστικά, στην ισοδύναμη γραμμική ελαστική ανάλυση, η αυξημένη, συνήθως υστερητικής μορφής, απόσβεση ενέργειας των σεισμικών εφεδράνων.



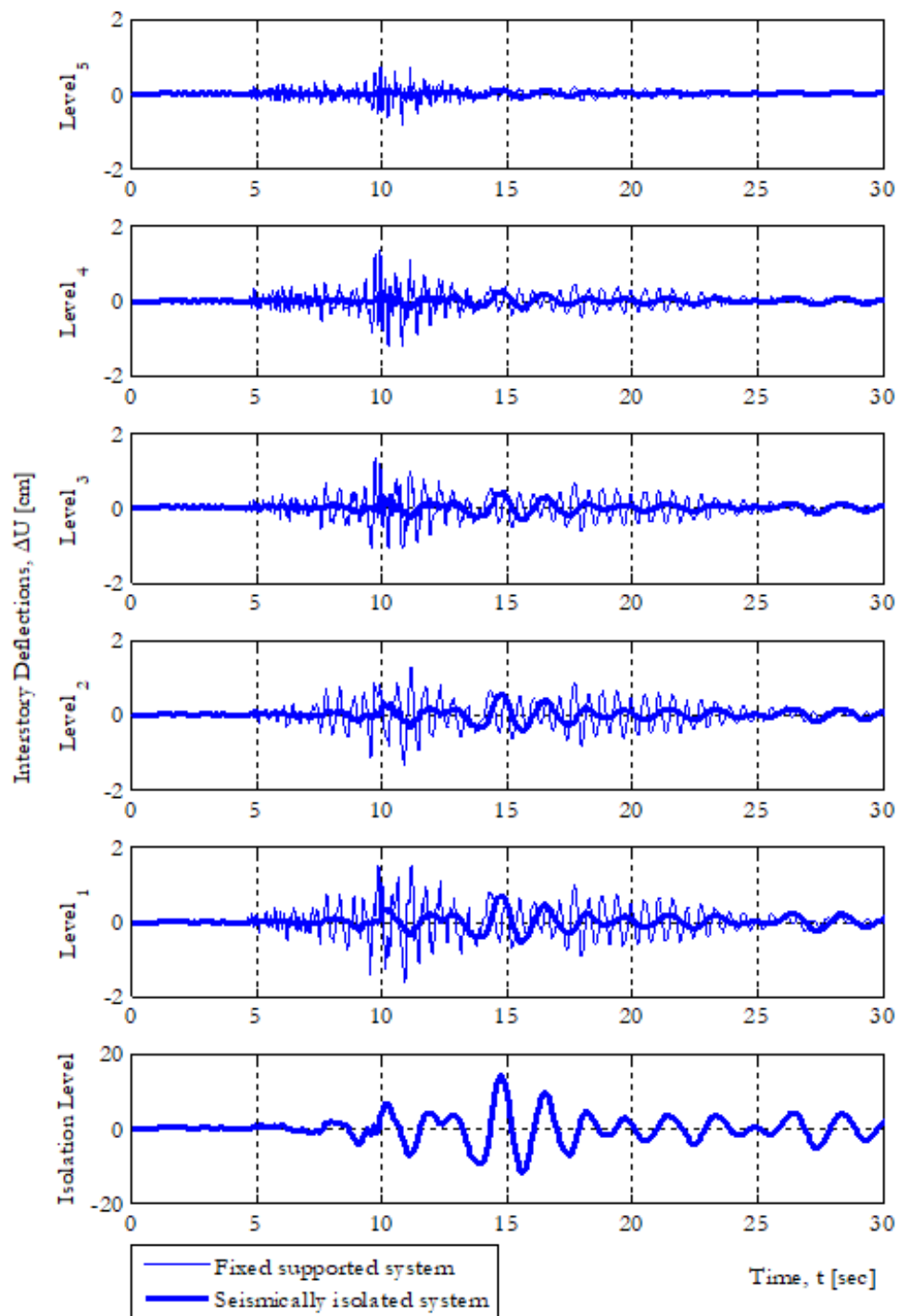
Σχήμα 13.18: : Επιταχυνσιογράφημα της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης (Northridge Earthquake, 90 degrees-component recorder at the Santa Monica City Hall Grounds - Chanel 1).

Τα συγκριτικά αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης με τις μέγιστες αποκρίσεις, όσον αφορά τις μέγιστες σχετικές μεταξύ διαδοχικών ορόφων μετακινήσεις, απόλυτες επιταχύνσεις και τέμνουσες ορόφων, για το συμβατικά θεμελιωμένο και το σεισμικά μονωμένο ΠΒΣ παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα:

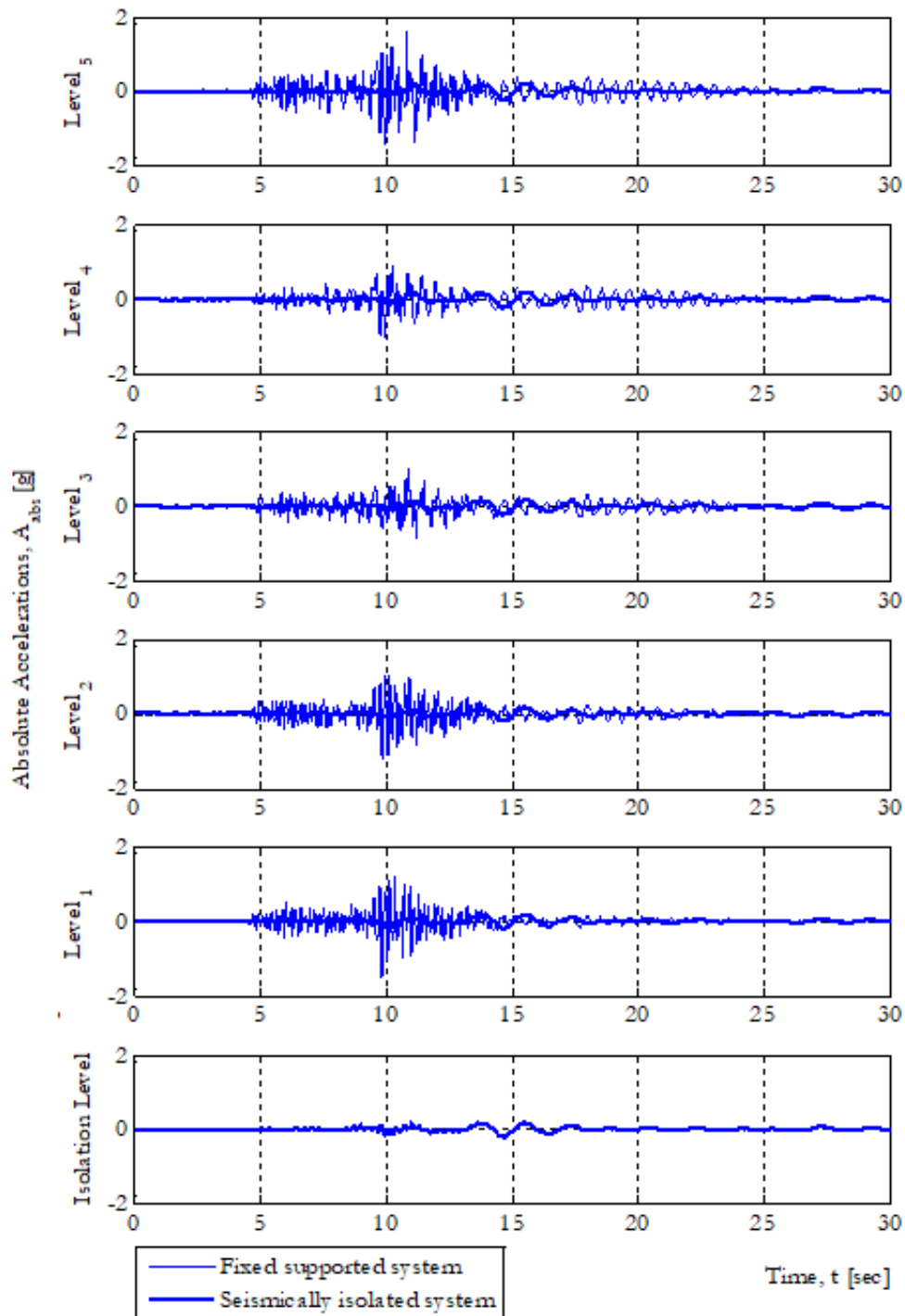
Επίπεδο	Μέγιστες σχετικές μετακινήσεις [cm]		Μέγιστες απόλυτες επιταχύνσεις [m/sec ²]		Μέγιστες τέμνουσες ορόφων [MN]	
	Συμβατικά θεμελιωμένο	Σεισμικά μονωμένο	Συμβατικά θεμελιωμένο	Σεισμικά μονωμένο	Συμβατικά θεμελιωμένο	Σεισμικά μονωμένο
Μόνωσης	---	14.146	---	2.02	---	2.69
1	1.620	0.649	13.11	2.06	5.51	2.23
2	1.322	0.515	11.88	2.08	4.53	1.78
3	1.280	0.383	10.08	2.13	4.56	1.33
4	1.376	0.246	9.56	2.26	4.74	0.87
5	0.864	0.107	16.36	2.34	2.86	0.38

Στο Σχήμα 13.19 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των σχετικών (μεταξύ ορόφων) μετακινήσεων του συμβατικά θεμελιωμένου και του σεισμικά μονωμένου πενταώροφου κτηρίου, υπό τη σεισμική διέγερση του Northridge Earthquake, όπως υπολογίστηκαν από ισοδύναμη γραμμική ανάλυση, ενώ το Σχήμα 13.20 παρουσιάζει τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες των απόλυτων επιταχύνσεων. Είναι προφανής η μείωση τόσο των σχετικών μετακινήσεων (interstory drifts), από τις οποίες εξαρτώνται τυχόν βλάβες σε δομικά και σε μη δομικά στοιχεία, και των απόλυτων επιταχύνσεων του κτηρίου, από τις οποίες εξαρτώνται τυχόν ζημιές σε ευαίσθητο εξοπλισμό και περιεχόμενα του.

Σχήμα 13.19: Χρονοϊστορίες σχετικών (μεταξύ ορόφων) μετακινήσεων του συμβατικά θεμελιωμένου και του σεισμικά μονωμένου πενταώροφου κτηρίου, υπό τη σεισμική δέγερση του Northridge Earthquake, όπως υπολογίστηκαν από ισοδύναμη γραμμική ανάλυση.



Σχήμα 13.20: Χρονοϊστορίες των απόλυτων επιταχύνσεων των ορόφων του συμβατικά θεμελιωμένου και του σεισμικά μονωμένου πενταώροφου κτηρίου, υπό τη σεισμική διέγερση του Northridge Earthquake, όπως υπολογίστηκαν από ισοδύναμη γραμμική ανάλυση.



Συγκεκριμένα, οι μέγιστες απόλυτες επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στους ορόφους του πεντάωροφου κτηρίου όταν είναι συμβατικά θεμελιωμένο φτάνουν τα 1.67 g, ενώ όταν μονωθεί σεισμικά τα 0.24 g, επιτυγχάνοντας μια μείωση της τάξης του 86%. Αντίστοιχα μειώνονται τα σεισμικά φορτία που εισέρχονται στην κατασκευή και οι τέμνουσες που αναπτύσσονται στους ορόφους και στη βάση της κατασκευής.

Όμως, η σχετική μετακίνηση στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης είναι σημαντικά μεγάλη και θα πρέπει να διασφαλιστεί επαρκές διάκενο, γύρω από την κατασκευή, για την αποφυγή τυχόν συγκρούσεων κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων. Επίσης, θα πρέπει να εξασφαλιστεί η απαραίτητη ευκαμψία σε όλες τις υπηρεσίες (π.χ. αγωγοί υδρεύσεως και αποχετεύσεως) που διασχίζουν το επίπεδο μόνωσης, ώστε να μην καταστρέφονται από τις αναμενόμενα μεγάλες μετακινήσεις στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Ο περιορισμός των αναμενόμενα μεγάλων σχετικών μετακινήσεων στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης και του απαιτούμενου πλάτους του διακένου, θα πρέπει να διασφαλιστεί με τη χρήση κατάλληλων μηχανισμών απόσβεσης ενέργειας, είτε βοηθητικών είτε ενσωματωμένων στα σεισμικά εφέδρανα.

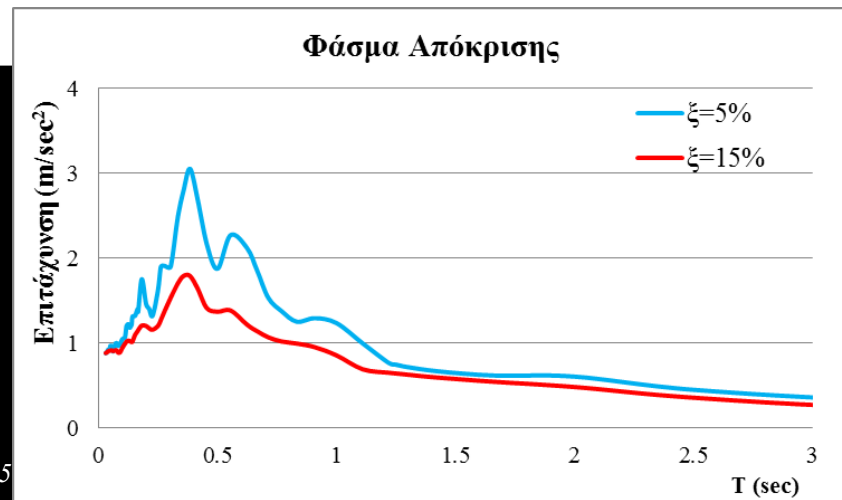
Πλεονεκτήματα και περιορισμοί σεισμικής μόνωσης

Παρά το ότι η σεισμική μόνωση είναι μια πολύ αποτελεσματική φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού, δεν έχει καθολική εφαρμογή, καθώς δεν μπορεί να λειτουργήσει εξίσου αποτελεσματικά για όλους τους τύπους κατασκευών και εδαφών. Η αποτελεσματική λειτουργία της σεισμικής μόνωσης εξαρτάται από τα δυναμικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανωδομής. Εφόσον η σεισμική μόνωση βασίζεται κυρίως στην επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου για την αποφυγή του συντονισμού με τις επικρατούσες συχνότητες των αναμενόμενων σεισμικών διεγέρσεων και τη μεγέθυνση των εδαφικών επιταχύνσεων στην ανωδομή, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική μέθοδος αντισεισμικής προστασίας και σε κάποιες άλλες περιττή ή και μη κατάλληλη. Για αυτό είναι σημαντικό να γίνουν κατανοητά και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει, υπό ποιες συνθήκες και προϋποθέσεις και ποιοι είναι οι περιορισμοί στη χρήση της.

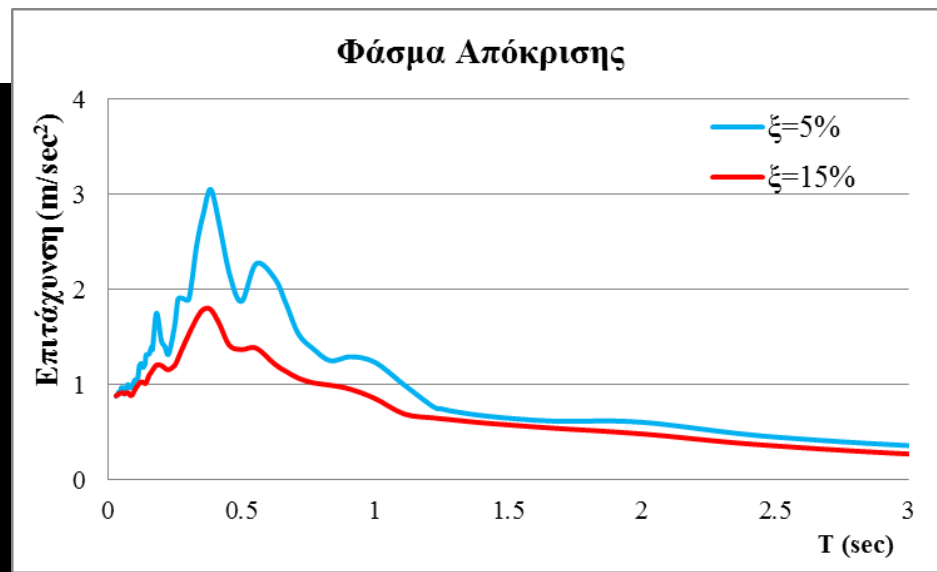
Γενικά, η σεισμική μόνωση προορίζεται για σχετικά δύσκαμπτες κατασκευές χαμηλού ή μεσαίου ύψους, των οποίων η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα βρίσκεται εντός του εύρους των δεσποζουσών ιδιοσυχνοτήτων των σεισμικών δονήσεων. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή της κρίνεται περιττή σε υψηλά κτήρια, τα οποία έχουν σχετικά μεγάλη ιδιοπερίοδο και δε διατρέχουν ιδιαίτερο κίνδυνο συντονισμού ή ενίσχυσης των επιταχύνσεων του εδάφους. Ούτως ή άλλως, σε κτήρια μεγάλου ύψους το κυρίαρχο οριζόντιο φορτίο είναι η ανεμοπίεση, η οποία υπερισχύει έναντι των σεισμικών φορτίων. Παρομοίως, πλεονάζουσα θεωρείται η εφαρμογή συστημάτων σεισμικής μόνωσης σε ιδιαίτερα εύκαμπτες κατασκευές, οι οποίες λόγω μεγάλης ιδιοπεριόδου, δεν αναμένεται να υποστούν φαινόμενα συντονισμού υπό συνήθεις σεισμικές διεγέρσεις.

Πλεονεκτήματα σεισμικής μόνωσης

Με τη σεισμική μόνωση μιας σχετικά δύσκαμπτης, χαμηλού προς μέσου ύψους, κτηριακής κατασκευής, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση τόσο των παραμορφώσεων της ανωδομής, δηλαδή των σχετικών μετακινήσεων μεταξύ διαδοχικών ορόφων, όσο και των επιταχύνσεων των μαζών, περιορίζοντας, ή και αποτρέποντας, βλάβες στα δομικά και μη δομικά στοιχεία της κατασκευής και ζημιές του περιεχομένου της, διατηρώντας τη λειτουργικότητα του κτηρίου, μετά τη δράση ακόμη και πολύ ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων, που θα προκαλούσαν σημαντικές ζημιές σε συμβατικά θεμελιωμένα κτήρια. Ένα σεισμικά μονωμένο κτήριο μετακινείται σαν στερεό σώμα, με σημαντικές παραμορφώσεις μόνο στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης, όπου οι σεισμικοί μονωτήρες είναι σχεδιασμένοι να μπορούν να αναλαμβάνουν κύκλους πολύ μεγάλων παραμορφώσεων. Επιπλέον, με τον κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος σεισμικής μόνωσης μπορεί να περιορίζεται τυχόν στρεπτική απόκριση, λόγω αναπόφευκτης εκκεντρότητας μεταξύ του κέντρου μάζας και του κέντρου ακαμψίας της κατασκευής.



Η σεισμική μόνωση είναι κατάλληλη για χαμηλού και μεσαίου ύψους οικοδομήματα, των οποίων η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα βρίσκεται εντός του εύρους των κυριαρχουσών συχνοτήτων των σεισμικών δονήσεων με αποτέλεσμα τη μεγέθυνση των εδαφικών επιταχύνσεων και την εισαγωγή σημαντικών σεισμικών φορτίων στην κατασκευή λόγω συντονισμού. Πέραν του ότι η σεισμική ενέργεια που εισέρχεται σε ένα σεισμικά μονωμένο κτήριο είναι πολύ περιορισμένη, αποσβένεται στο σύστημα σεισμικής μόνωσης, συνήθως από μηχανισμούς που διαθέτουν τα σεισμικά εφέδρανα, χωρίς να είναι αναγκαία η συμμετοχή των δομικών μελών της ανωδομής στην ανάλωση ενέργειας, όπως με την επιλεκτική ανελαστική παραμόρφωση συγκεκριμένων δομικών μελών στα συμβατικά θεμελιωμένα κτήρια. Αν και δεν απαιτείται να παρέχεται πλαστιμότητα στην ανωδομή μιας σεισμικά μονωμένης κατασκευής, η οποία αναμένεται να έχει γραμμική ελαστική συμπεριφορά, για σκοπούς ασφαλείας, λαμβάνοντας υπόψη και κάποιες αβεβαιότητες, ειδικά όσον αφορά τις σεισμικές διεγέρσεις, είναι καλό να διασφαλίζεται κάποια πλαστιμότητα στην ανωδομή.



Έτσι, λόγω του ότι οι αδρανειακές δυνάμεις που δρουν σε ένα σεισμικά μονωμένο κτίριο είναι γενικά πολύ μικρότερες από ότι στο αντίστοιχο συμβατικά θεμελιωμένο κτήριο, είναι πρακτικά πιο ευέλικτος ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός της ανωδομής, αφού θα είναι μικρότερες οι απαιτήσεις τόσο όσον αφορά την αντοχή όσο και την πλαστιμότητα. Όμως, όσο μικρότερη είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της ανωδομής, εάν τη μελετούσαμε ως πακτωμένη, από τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της σεισμικά μονωμένης κατασκευής τόσο πιο αποτελεσματική και αποδοτική θα είναι η σεισμική μόνωση του.

Το γεγονός πως η πλειονότητα των κατασκευών μονώνεται σεισμικά στο επίπεδο της βάσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση της αντισεισμικής αναβάθμισης υφιστάμενων κατασκευών που στεγάζουν υπηρεσίες που δεν θα μπορούσε να διακοπεί η λειτουργία τους, κάτι πρακτικά αδύνατον να επιτευχθεί σε περίπτωση συμβατικής αντισεισμικής αναβάθμισης. Επίσης, με τη σεισμική μόνωση δεν απαιτούνται σημαντικές τροποποιήσεις στην ανωδομή και έτσι είναι πιο εύκολη η διατήρηση του αρχιτεκτονικού χαρακτήρα της οικοδομής, κάτι πολύ σημαντικό σε κτήρια μεγάλης αρχιτεκτονικής και ιστορικής αξίας.

Όσον αφορά τις σεισμικές αναβαθμίσεις γεφυρών, η σεισμική μόνωση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα αφού μπορεί να υλοποιηθεί με την απλή αντικατάσταση υφιστάμενων εφεδράνων θερμικής διαστολής με σεισμικά εφέδρανα, η οποία μπορεί να γίνει με διατήρηση της λειτουργικότητας της γέφυρας.

Περιορισμοί σεισμικής μόνωσης

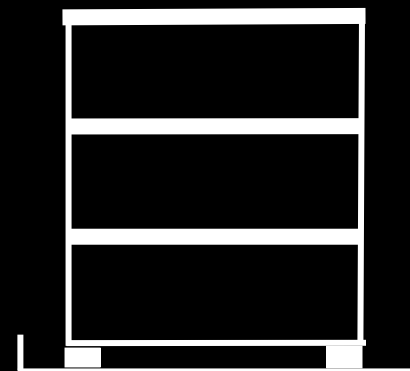
Ο κύριος περιορισμός στη χρήση σεισμικής μόνωσης είναι η απαραίτητη διασφάλιση επαρκούς διακένου περιμετρικά μιας σεισμικά μονωμένης κατασκευής ώστε να λειτουργεί απρόσκοπτα η σεισμική μόνωση και να αποφεύγονται τυχόν συγκρούσεις με τον περιμετρικό τοίχο ή γειτονικές κατασκευές λόγω των μεγάλων μετακινήσεων που παρουσιάζονται στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Τέτοιες συγκρούσεις πιθανόν να ήταν καταστροφικές ειδικά για τα περιεχόμενα της κατασκευής λόγω των υψηλών επιταχύνσεων που ενδέχεται να αναπτυχθούν σε περίπτωση κρούσης και των συνεπαγόμενων αυξημένων σεισμικών φορτίων, τεμνουσών δυνάμεων αλλά και διέγερσης ανωτέρων ιδιομορφών.

Η εξασφάλιση του απαιτούμενου διακένου δεν είναι πάντοτε εφικτή, ειδικά σε πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα, αφού χωροταξικοί περιορισμοί και πολεοδομικοί κανονισμοί ενδεχομένως να μην αφήνουν περιθώρια για τη διαμόρφωση ενός τέτοιου χώρου περιμετρικά της κατασκευής. Επιπλέον, η διαμόρφωση του διακένου συνεπάγεται απώλεια ωφέλιμου εμβαδού και κατ' επέκταση και οικονομική απώλεια, αφού ένα τμήμα του οικοδομικού τεμαχίου παραμένει ανεκμετάλλευτο.



Επιπλέον, σε ένα σεισμικά μονωμένο κτίριο, υπάρχει ανάγκη για εξασφάλιση ενός διαφράγματος πάνω από το επίπεδο σεισμικής μόνωσης, έτσι ώστε να ανακατανέμονται τα οριζόντια φορτία τα οποία προέρχονται από την ανωδομή, μέσα στο σύστημα σεισμικής μόνωσης. Επίσης, η θέση τοποθέτησης της σεισμικής μόνωσης θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά, αφού θα πρέπει να εξασφαλιστεί ικανοποιητικός χώρος για τις εργασίες επέμβασης καθώς επίσης και ευκολότερη εγκατάσταση, αλλά και ενδεχόμενη αντικατάσταση, των μονωτήρων.

Επίσης, το ανασήκωμα (uplift) του συστήματος σεισμικής μόνωσης θα πρέπει να αποφεύγεται, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου το κτίριο έχει σχετικά μεγάλο ύψος σε σχέση με το πλάτος του, όποτε και είναι πιο πιθανόν να αναπτυχθούν ροπές ανατροπής. Για περιορισμό του ανασηκώματος της κατασκευής, μπορούν να γίνουν αλλαγές στην ανωδομή, παραδείγματος χάριν στην ανακατανομή των μαζών. Αυτός είναι ακόμη ένας λόγος που καθιστά ακατάλληλη τη χρήση της σεισμικής μόνωσης σε υψηλά κτήρια. Επίσης, θα πρέπει να αποφεύγονται ανομοιόμορφες κατακόρυφες παραμορφώσεις με την κατάλληλη τοποθέτηση των κατακόρυφων στοιχείων και σεισμικών μονωτήρων.



Σημαντική επίσης, είναι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος σεισμικής μόνωσης στην οποία θα ήταν χρήσιμο να συμμετέχει και ο ιδιοκτήτης της κατασκευής αφού του επεξηγηθούν οι διάφορες επιλογές με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Στην επιλογή του συστήματος μόνωσης θα πρέπει να διασφαλίζεται η σταθερότητα των μηχανικών ιδιοτήτων των σεισμικών μονωτήρων για μακροχρόνια διαστήματα και μετά από δράση ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων.

Τέλος, η καταλληλότητα χρήσης της τεχνολογίας της σεισμικής μόνωσης σε μια κατασκευή εξαρτάται και τα χαρακτηριστικά των αναμενόμενων σεισμικών διεγέρσεων της αντίστοιχης περιοχής. Γενικά, τα συστήματα σεισμικής μόνωσης είναι πιο αποδοτικά σε βραχώδη και συνεκτικά εδάφη, ενώ σε εδάφη με χαλαρή δομή, η σεισμική μόνωση πιθανόν να είναι αναποτελεσματική, λόγω της ψηλής περιόδου του εδάφους. Οι χαλαρές εδαφικές αποθέσεις τείνουν να ενισχύουν τις διεγέρσεις με χαμηλό συχνοτικό περιεχόμενο και να περιορίζουν τις υψίσυχνες, επιβάλλοντας έτσι στις κατασκευές εδαφικές διεγέρσεις χαμηλών συχνοτήτων. Συνεπώς, η ανέγερση εύκαμπτων κατασκευών σε χαλαρά εδάφη αντενδείκνυται, αφού είναι ευάλωτες σε διεγέρσεις χαμηλού συχνοτικού περιεχομένου και με τη σεισμική μόνωση μπορεί να καταστεί πιο ευάλωτη η κατασκευή.

Ανασταλτικοί παράγοντες στην ευρύτερη χρήση της σεισμικής μόνωσης

Ο κύριος ανασταλτικός παράγοντας στην ευρεία διάδοση και εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης σε σεισμογενείς περιοχές ενδεχομένως να είναι η άγνοια του κοινού, το οποίο στις πλείστες περιπτώσεις φαίνεται να μην είναι σωστά ενημερωμένο και να αγνοεί τις πρόνοιες, τους περιορισμούς και τα τρωτά σημεία του συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού. Ο περισσότερος κόσμος έχει την εσφαλμένη εντύπωση ότι η συμβατική θεμελίωση μιας κατασκευής, σύμφωνα με τις πρόνοιες του κλασικού αντισεισμικού κώδικα, εξασφαλίζει ένα απόλυτα αντισεισμικό κτήριο, ικανό να αποκριθεί επαρκώς σε οποιαδήποτε σεισμική διέγερση.

Η σεισμική μόνωση αν και κατά κανόνα προϋποθέτει αυξημένα κόστη ανέγερσης, συνεπάγεται σημαντικές εξοικονομήσεις σε μακροχρόνιο στάδιο, βάσει των σχετικά πολύ περιορισμένων βλαβών από ενδεχόμενες ισχυρές μελλοντικές σεισμικές διεγέρσεις. Το γεγονός είναι ότι το κοινό, έχοντας πρώτιστη μέριμνα τη μείωση των άμεσων δαπανών, δεν επενδύει σε ένα σχεδιασμό που παρέχει μακροπρόθεσμες εξοικονομήσεις, αν και συχνά γίνεται μεγαλύτερη σπατάλη για διακοσμητικά μη απαραίτητα στοιχεία. Εάν και όταν υιοθετηθούν αυστηρότερες απαιτήσεις για τη σεισμική συμπεριφορά και τα επιτρεπόμενα επίπεδα βλαβών των κτηρίων, σε περίπτωση ισχυρής σεισμικής διέγερσης, ενδεχομένως μετά από τραγικές εμπειρίες από κάποιο μελλοντικό καταστροφικό σεισμό, η σεισμική μόνωση θα μπορεί να συγκριθεί επί ίσοις όροις με τη συμβατική μέθοδο αντισεισμικού σχεδιασμού. Τότε, ίσως να αποδειχθεί οικονομικά συμφέρουσα, ακόμη και κατά τα αρχικά στάδια.

Επιπλέον, η ευρεία διάδοση και η εκτενέστερη εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης, θα διευκολυνθεί από την παροχή οικονομικών κινήτρων, τα οποία θα μπορούσαν να δίδονται λαμβάνοντας υπόψη ότι αξιοποίηση της σεισμικής μόνωσης συνεπάγεται σημαντικές εξοικονομήσεις κεφαλαίων, τα οποία θα δαπανούνταν για αποζημιώσεις και παροχές προς τους πληγέντες από τους σεισμούς. Διευρύνοντας τη χρήση της σεισμικής μόνωσης, θα αυξηθεί η παραγωγή σεισμικών εφεδράνων, με αποτέλεσμα την εκλογίκευση των τιμών διάθεσής τους, καθιστώντας αυτά τα συστήματα, οικονομικά ελκυστικότερα στο μέσο αγοραστικό κοινό. Παράλληλα, με τη χρήση της σεισμικής μόνωσης, είναι δυνατός ο σχεδιασμός της ανωδομής με μικρότερες διατομές και ως εκ τούτου περαιτέρω εξοικονομήσεις.

Τέλος, μόνο σε ορισμένα πανεπιστημιακά ιδρύματα η σεισμική μόνωση συνιστά αντικείμενο διδασκαλίας και οι διαθέσιμες πηγές στην κοινωνία των επαγγελματιών δομοστατικών μηχανικών είναι περιορισμένες. Παράλληλα, οι εταιρείες κατασκευής συστημάτων σεισμικής μόνωσης επιλεκτικά διαθέτουν περιορισμένες πηγές και πληροφορίες στους μηχανικούς, λόγω του έντονου ανταγωνισμού που επικρατεί στην κατασκευαστική βιομηχανία. Συνεπώς, είναι επιτακτική η ανάγκη ενημέρωσης και επιμόρφωσης τόσο των φοιτητών όσο και των επαγγελματιών μηχανικών του κλάδου της πολιτικής μηχανικής για την τεχνολογία της σεισμικής μόνωσης ώστε να μπορεί να γίνεται πιο ευρεία αξιοποίησή της. Για αυτό ακριβώς το λόγο, αυτό το κεφάλαιο αφιερώθηκε αποκλειστικά στη σεισμική μόνωση, παρέχοντας μια σύντομη εισαγωγή σε αυτή την καινοτόμο αντισεισμική τεχνολογία.

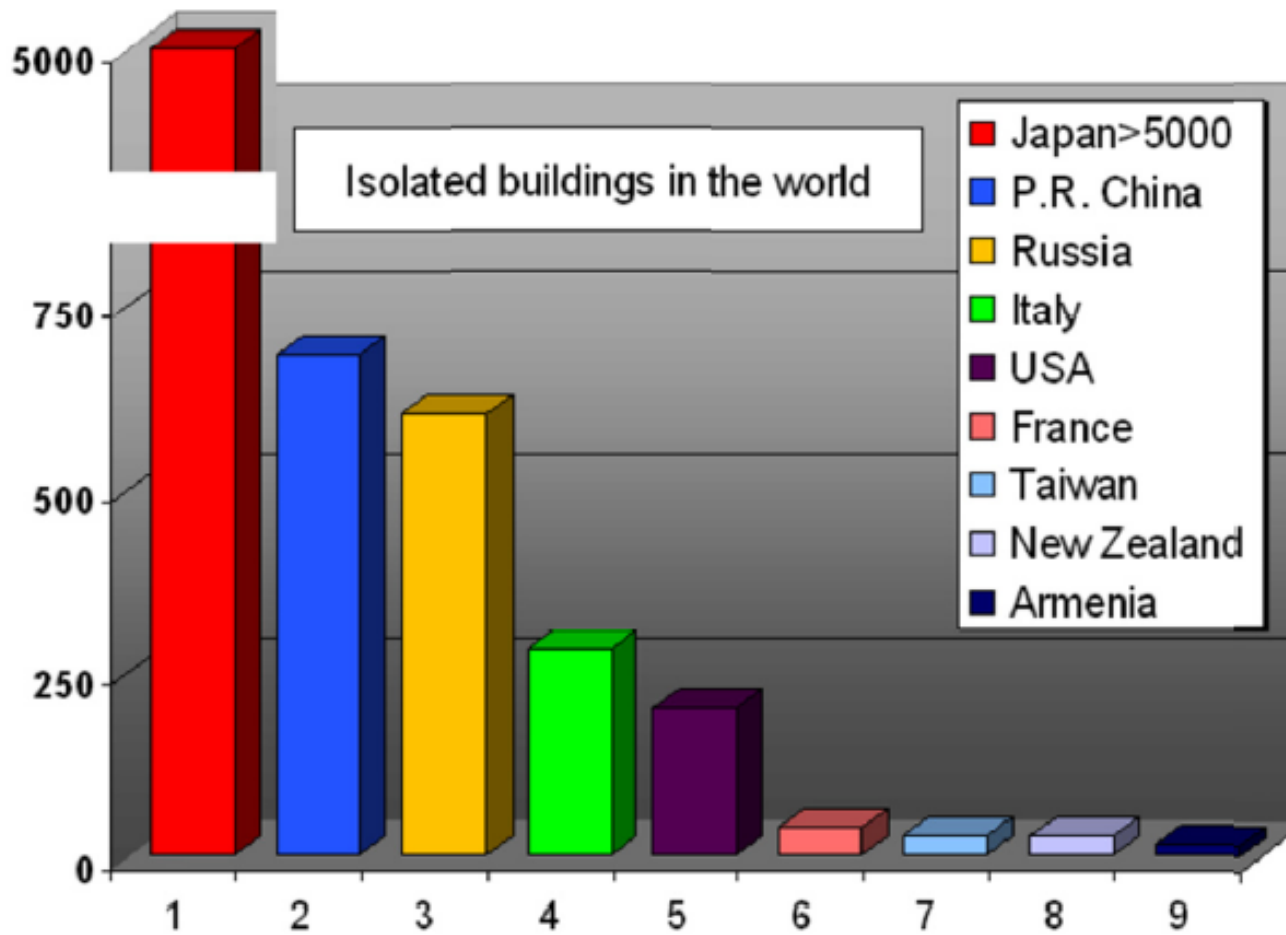
Εφαρμογές Σεισμικής Μόνωσης

- Αρχική ιδέα: Dr. Calantarients (1909)
- 1^η Εφαρμογή σεισμικής μόνωσης με εφέδρανα
 - Pestalozzi School – Σκόπια



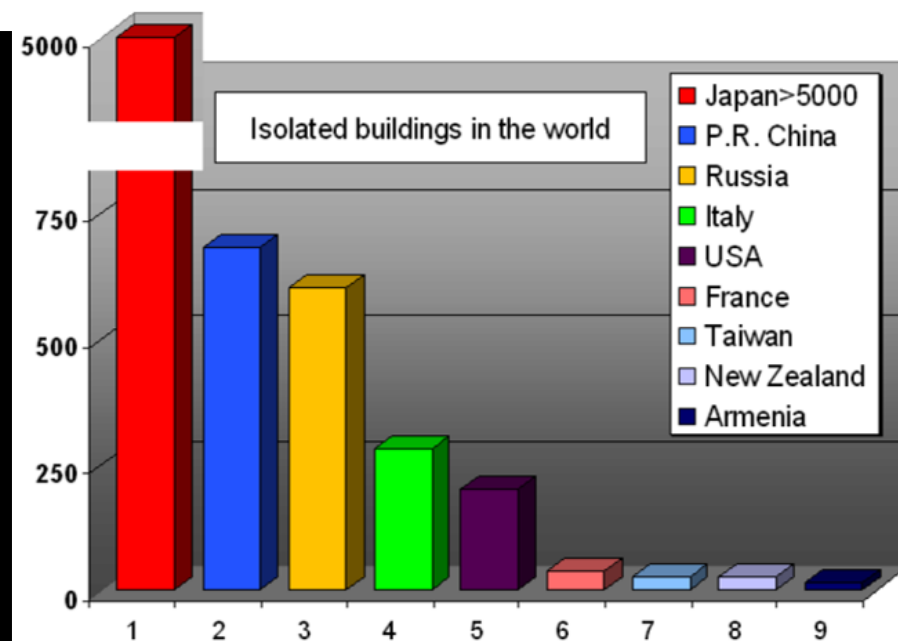
Οι αρχικές ιδέες για τη μέθοδο της σεισμικής μόνωσης κατασκευών χρονολογούνται από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με προτάσεις για χρήση διαφόρων μέσων, από μεταλλικές πλάκες μέχρι στρωμάτων άμμου ή άλλων λεπτόκοκκων υλικών, που θα επέτρεπαν την ολίσθηση της κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού και τη συνεπαγόμενη μείωση των δυνάμεων που θα μεταβιβάζονταν στην ανωδομή. Όμως, μόλις το 1969 καταγράφεται η πρώτη χρήση εφεδράνων στο σχολείο Pestalozzi των Σκοπίων, μια τριώροφη κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος. Σε αντίθεση με τα σύγχρονα ελαστομερικά εφέδρανα, τα εφέδρανα που χρησιμοποιήθηκαν δεν είχαν χαλύβδινες πλάκες και έτσι παρουσίαζαν εγκάρσια διόγκωση, λόγω των επιβαλλόμενων βαρυτικών φορτίων.

Η πρώτη σημαντική εφαρμογή σεισμικής μόνωσης με ελαστομερή εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου ήταν το κτήριο William Clayton, στη Νέα Ζηλανδία το 1981. Έκτοτε, και ιδιαίτερα τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι εφαρμογές σεισμικής μόνωσης αυξάνονται με σχετικά γοργούς ρυθμούς και, βάσει μιας σχετικής έρευνας (Martelli and Forni, 2010¹), μέχρι τότε είχαν καταγραφεί πέραν των 10,000 σεισμικά μονωμένων κατασκευών, κτηριακών και άλλων, αριθμός ο οποίος σήμερα πρέπει να είναι κατά πολύ μεγαλύτερος.



Πλήθος σεισμικά μονωμένων κτηρίων στις πρωτοστατούσες χώρες (Martelli, 2011)

Η Ιαπωνία, αν και μικρή σε έκταση και πληθυσμό χώρα, αριθμούσε πέραν των 5000 σεισμικά μονωμένων κτηριακών κατασκευών (Martelli and Forni, 2010¹), λόγω του ότι πρόκειται για μια περιοχή με έντονη σεισμική δραστηριότητα στην οποία είχε σχετικά νωρίς υιοθετηθεί ένας επαρκής κώδικας σχεδιασμού σεισμικά μονωμένων κτηρίων. Στη Ρωσία αναφέρθηκαν πέραν των 550 κτηρίων στα οποία έχει γίνει εφαρμογή κάποιου συστήματος σεισμικής μόνωσης και άλλα 650 περίπου στην Κίνα, από τα οποία τα περισσότερα είναι ιδιωτικές οικίες. Στις ΗΠΑ ο αριθμός ήταν σχετικά περιορισμένος στις 250, ενδεχομένως λόγω του σχετικά αυστηρού κώδικα για τις σεισμικά μονωμένες κτηριακές κατασκευές. Στην Ευρώπη, ξεχωρίζει η Ιταλία, όπου είχαν ανεγερθεί περί τα 270 σεισμικώς μονωμένα κτήρια. Άλλες χώρες που χρησιμοποιούν σεισμική μόνωση, συμπεριλαμβάνουν την Αρμενία, τη Νέα Ζηλανδία, ενώ σημαντικές εφαρμογές έχουν ξεκινήσει και σε χώρες όπως η Τουρκία, η Ελλάδα, η Πορτογαλία, και φτάνουν μέχρι τη Χιλή.



Εφαρμογές Σεισμικής Μόνωσης στις ΗΠΑ



San Francisco City Hall, San Francisco, California

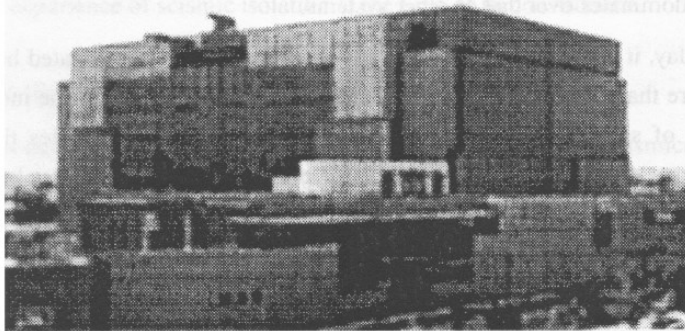


Fire Command and Control Facility, Los Angeles, California



Foothill Communities Law and Justice Center, Rancho Cucamonga, California

Εφαρμογές Σεισμικής Μόνωσης στην Ιαπωνία



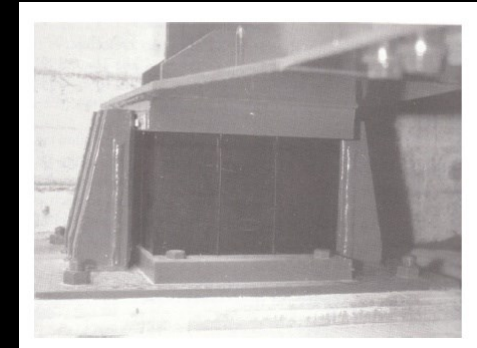
C-1 Building, Fuchi, Tokyo, Japan



San West Japan Postal Computer Center, Sanda, Kobe



Γέφυρα Miyagawa, Shizuoka, Japan



Εφαρμογές Σεισμικής Μόνωσης στη Νέα Ζηλανδία



William Clayton Building, New Zealand



Central Police Station, Wellington, New Zealand



Parliament House & Parliamentary Library, New Zealand

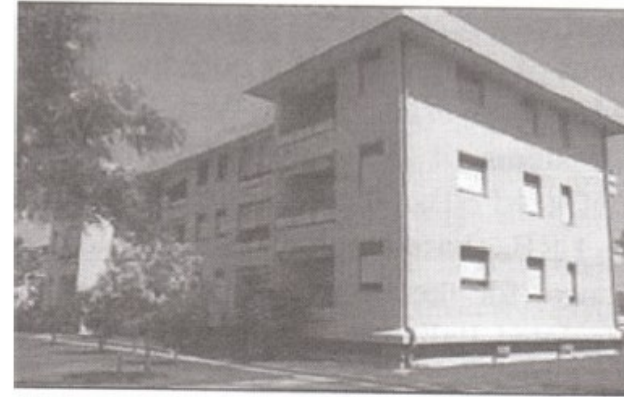


Σιδηροδρομική γέφυρα νότιου Rangitikei, Νέα Ζηλανδία

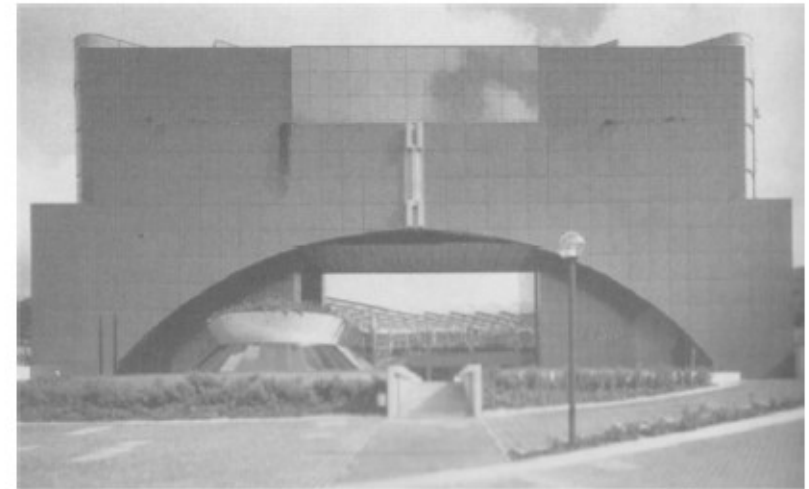
Εφαρμογές Σεισμικής Μόνωσης στην Ιταλία



Bronzes of Riace, Reggio Calabria Museum.



Σεισμικά μονωμένο οικιστικό κτήριο, Squillace, Calabria, Italy



Marche Regional Centre of Telecom-Italia, Ancona, Italy

Εφαρμογές Σεισμικής Μόνωσης στη Ρωσία



Οι κτηριακές εγκαταστάσεις της Irkutsk Bank πριν και μετά την ενίσχυση



Αρχιτεκτονικό προοπτικό σχέδιο του ξενοδοχείου στην πόλη Petropavlovsk-Kamchatsky (Smirnov et al., 2011).



Τρισδιάστατο αρχιτεκτονικό προσομοίωμα του ξενοδοχείου «Hayat», στην πόλη Soschi της Ρωσίας (Smirnov et al., 2011).

Εφαρμογές Σεισμικής Μόνωσης στη Ρωσία



Τρισδιάστατο αρχιτεκτονικό προσομοίωμα του συγκροτήματος «Russian International Olympic University and Multipurpose Hotel Recreational Complex», στη Ρωσία (Smirnov et al., 2011).



Εγκατάσταση ελαστομερικών εφεδράνων με πυρήνα μολύβδου στη θεμελίωση του Russian International Olympic University (Smirnov et al., 2011).



Τρισδιάστατο αρχιτεκτονικό προσομοίωμα του συγκροτήματος «Sputnik Business Center», στη Ρωσία (Smirnov et al., 2011).

Εφαρμογές Σεισμικής Μόνωσης στην Κύπρο

1. Κτηριακές Κατασκευές:

• Mall of Cyprus

- Φέρον οργανισμός: υπόγειο Ο/Σ και μεταλλική ανωδομή
- Εισαγωγή HDRBs στις κεφαλές των υποστυλωμάτων του υπογείου



• ITTL - Trade Tourist & Leisure Park

- Διώροφη μεταλλική κατασκευή με υπόγειο Ο/Σ
- Μη κανονικότητες σε όψη και κάτοψη
- Εφέδρανα HDRBs στις στέψεις των τοιχίων
- Εφέδρανα FPSs στις κεφαλές των υποστυλωμάτων



• Έργα γεφυροποιίας υπεραστικού δρόμου Λεμεσού

- LRBs με δύο πυρήνες μολύβδου
- FPSs



Στην Κύπρο υπάρχει περιορισμένος αριθμός εφαρμογών της τεχνολογίας της σεισμικής μόνωσης, κυρίως σε γέφυρες αυτοκινητοδρόμων (Σχήμα 13.22 και Σχήμα 13.23) και εμπορικά (Σχήμα 13.24) ή δημόσια κτήρια.



Σχήμα 13.22: Εφέδρανα ολίσθησης (FPS) εγκατεστημένα στην κορυφή των υποστυλωμάτων στήριξης του καταστρώματος γέφυρας του αυτοκινητοδρόμου έξω από τη Λεμεσό.



Σχήμα 13.23: Ελαστομερικά εφέδρανα με διπλούς πυρήνες μολύβδου εγκατεστημένα στην κορυφή των υποστυλωμάτων στήριξης του καταστρώματος γέφυρας του αυτοκινητοδρόμου έξω από τη Λεμεσό.



Σχήμα 13.24: Ελαστομερικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (HDRBs) εγκατεστημένα στις κορυφές των υποστυλωμάτων του υπόγειου χώρου στάθμευσης του “The Mall of Cyprus” στη Λευκωσία.