

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΜΕ ΠΥΡΗΝΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ LRB

ΚΙΤΣΙΚΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα της ενίσχυσης κτιρίων με την μέθοδο της σεισμικής μόνωσης και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ως μέσο αυτής τα ελαστομερή συστήματα. Στην εισαγωγή παρουσιάζεται η φιλοσοφία της σεισμικής μόνωσης ως τρόπος εφαρμογής του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών. Ακολουθεί η ανάπτυξη θεωρητικού υπόβαθρου ώστε να καταστούν σαφείς οι τεχνικοί όροι που χρησιμοποιούνται στην σεισμική μόνωση. Στην συνέχεια η εργασία επικεντρώνεται στην μέθοδο εφαρμογής εφεδράνων ελαστομερών συστημάτων με εξέχουσα την εκμετάλλευση πυρήνων μολύβδου. Επίσης παρατίθενται παραδείγματα στα οποία έγινε χρήση ελαστομεταλλικών εφεδράνων με πυρήνα μολύβδου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

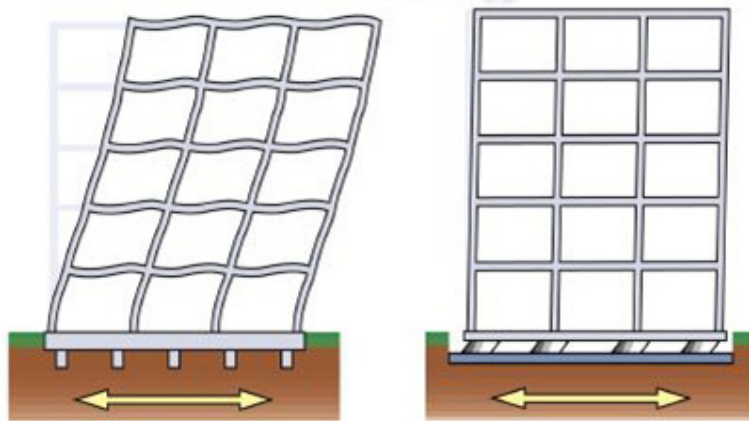
Η συμβατική τεχνική που ακολουθείται στην ενίσχυση υφισταμένων κατασκευών που έχουν υποστεί βλάβες από σεισμούς, επιβάλλει την επέμβαση με σκοπό την αύξηση της αντοχής των μελών που αναλαμβάνουν τις σεισμικές δράσεις με ένα πολύ σημαντικό όμως και αναπόφευκτο μειονέκτημα, την αύξηση των μαζών, άρα και των αδρανειακών δυνάμεων που ασκούνται στην κατασκευή. Σε αυτό το σημείο έρχεται μια εναλλακτική και συγχρόνως ελκυστική για τα πλεονεκτήματά της, μέθοδος αντισεισμικού σχεδιασμού, αυτή της σεισμικής μόνωσης. Πρόκειται δηλαδή για την εφαρμογή μέσω ελέγχου της σεισμικής δόνησης που καταλήγει σε μία κατασκευή, και υλοποιείται με την τοποθέτηση εύκαμπτων στοιχείων στην διεπιφάνεια μεταξύ ανωδομής και θεμελίωσης, τους σεισμικούς μονωτήρες.

Η μέθοδος αυτή, η οποία έχει εξελιχθεί αρκετά τις δύο τελευταίες δεκαετίες, έχει εφαρμοστεί σε έργα διαφόρων τύπων όπως κτιριακά (νοσοκομεία, σχολεία), γέφυρες, δεξαμενές πυρηνικών αντιδραστήρων.

Το αποτέλεσμα; Προκύπτουν κατασκευές οικονομικότερες και πιο ελαφριές λόγω της μείωσης της απαίτησης σε σεισμική επάρκεια εφόσον είναι ελεγχόμενες και προκαθορισμένες οι φορτίσεις που μεταβιβάζονται στην κατασκευή. Αφενός μεν αποτρέπεται η κατάρρευση της κατασκευής, αφετέρου δε μειώνονται σημαντικά οι βλάβες προκαλούμενες από σεισμούς μέτριας έντασης.

2. ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Η εφαρμογή των μεθόδων σεισμικής μόνωσης βάσης έχει ως στόχο την διαφοροποίηση της παλινδρομικής κίνησης (ταλάντωση) της ανωδομής σε σχέση με την ισχυρή κίνηση του εδάφους, συνεπώς και της θεμελίωσης. Επιδιώκουμε οπότε, την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που εισάγεται στην κατασκευή, εν μέρει αντανακλώντας την και εν μέρει αποσβένοντας την ήδη από το επίπεδο της θεμελίωσης [1]. Αποτέλεσμα αυτών είναι η μείωση α) της σχετικής μετακίνησης των ορόφων και β) της απόκρισης της ανωδομής, που οφείλονται αμφότερες σε οριζόντιες σεισμικές δράσεις. Επίσης επιτυγχάνεται η συγκέντρωση των διαρροών στην στάθμη του συστήματος της μόνωσης. Χαρακτηριστική είναι η διαφοροποίηση στην εικόνα παραμόρφωσης του φορέα μεταξύ πακτωμένης και μονωμένης κατασκευής, όπως αυτό που φαίνεται στην σχήμα 1.



Σχήμα 1. Εικόνες παραμόρφωσης συμβατικής κατασκευής και κατασκευής με μονωμένη βάση [2]

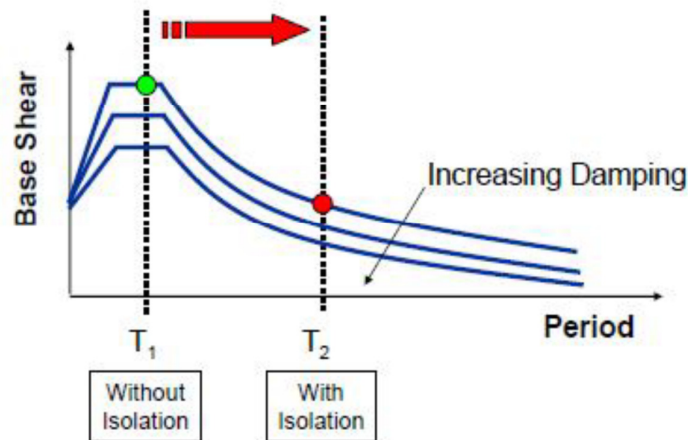
3. ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

Η μείωση της σχετικής μετακίνησης των ορόφων επιτυγχάνεται με τους ακόλουθους τρόπους:

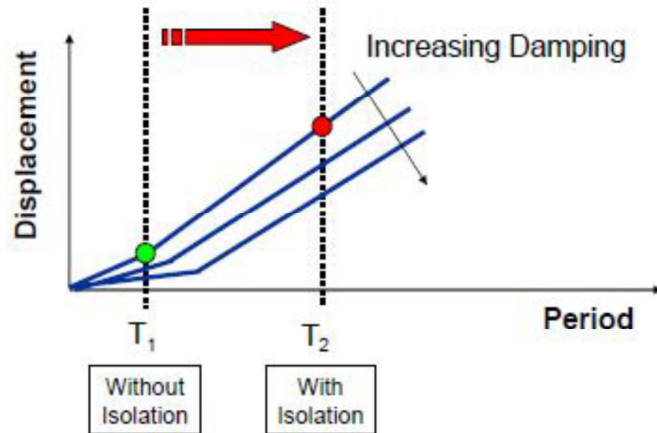
α) Με αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της κατασκευής έτσι ώστε ο ενδεχόμενος σεισμός να έχει περίοδο διεγέρτη απόμακρυσμένη από την ιδιοπερίοδο της κατασκευής, αποτρέποντας την πιθανότητα κατάρρευσης λόγω συντονισμού. Επομένως, έχουμε μείωση της σεισμικής δράσης κατά 5-10 φορές, και παράλληλα αυξάνονται οι πλευρικές μετακινήσεις που όμως συγκεντρώνονται στο επίπεδο της μόνωσης (εικόνες 2, 3)

β) Με αύξηση της ικανότητας απόσβεσης με την οποία επιτυγχάνεται μείωση των μετακινήσεων και ενδεχομένως και των σεισμικών δυνάμεων .

γ) Με συνδυασμό –κατά προτίμηση- των ευνοϊκών αποτελεσμάτων και των δύο παραπάνω μεθόδων.



Σχήμα 2. Επίδραση της αύξησης της ιδιοπεριόδου στην τέμνουσα βάσης σχεδιασμού (φάσμα επιταχύνσεων) [2]



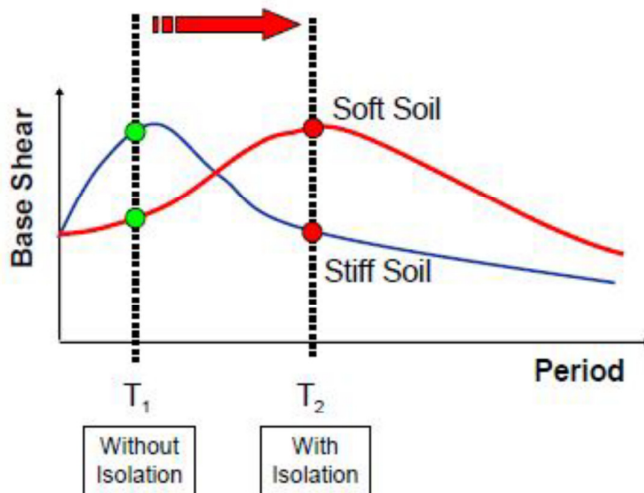
Σχήμα 3. Επίδραση της αύξησης της ιδιοπεριόδου στις μετακινήσεις σχεδιασμού (φάσμα μετακινήσεων) [2]

Επίσης επιδιώκουμε ευκαμψία για ισχυρές σεισμικές δράσεις αλλά ταυτόχρονα ακαμψία της κατασκευής για πλευρικά φορτία ανεμοπιέσεων.

3.1 ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται [3] είναι εν γένει:

- 1) Το έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής να μην ευνοεί εδαφικές δονήσεις με προεξέχουσες τις μεγάλες περιόδους, γεγονός που χαρακτηρίζει τα “μαλακά” εδάφη (σχήμα 4).
- 2) Το κτίριο να είναι σχετικά δύσκαμπτο, δηλαδή να έχει ιδιοπερίοδο μικρότερη από 1,5 έως 2 sec. Γεγονός που χαρακτηρίζει οπωσδήποτε τις δύσκαμπτες κατασκευές, αλλά και ένα ευρύ φάσμα σχετικά εύκαμπτων κατασκευών.
- 3) Το μέγεθος των ανεμοφορτίων σχεδιασμού, καθώς και των υπόλοιπων μη σεισμικών πλευρικών φορτίων να μην ξεπερνά το 10% του βάρους του κτιρίου ($F_{ανέμ} < 10\% W_{κτιρ.}$)



Σχήμα 4. Ευμενής ή δυσμενής επίδραση της σεισμικής μόνωσης στην τέμνουσα βάσης ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες [2]

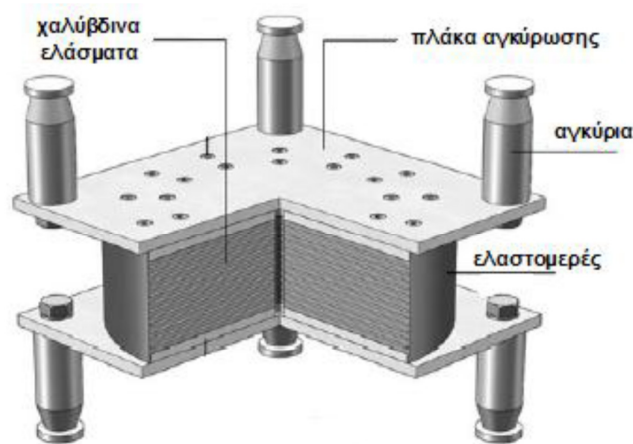
3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται οι πλέον κοινοί τρόποι συστημάτων σεισμικής μόνωσης που χρησιμοποιούνται ευρέως σε έργα ανά τον κόσμο. Γενικά, τα συστήματα αυτά κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: α) στα ελαστομερή συστήματα και β) στα συστήματα

τριβής (ή ολίσθησης). Στα ελαστομερή συστήματα περιλαμβάνονται i) τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης (Low Damping Rubber Bearings - LDRB), ii) τα ελαστομερή εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (High Damping Rubber Bearings - HDRB), iii) τα ελαστομερή εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (Lead Rubber Bearings - LRB). Εν συντομία αναφέρουμε ότι τα συστήματα τριβής περιλαμβάνουν i) μηχανισμούς με σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης και ii) μηχανισμούς με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης.

3.2.1 ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΣΕΙΣΤΗΜΑΤΑ

Συνιστούν τον συνηθέστερο τύπο συστημάτων που έχουν εφαρμοστεί ως σεισμική μόνωση. Αποτελούνται από επάλληλες στρώσεις ελαστομερούς υλικού (Neoprene) – ειδικά επεξεργασμένου (vulcanized) ώστε να καταστεί ανεκτικότερο στις περιβαλλοντικές επιδράσεις- στο οποίο συγκολλώνται και εγκιβωτίζονται πλήρως λεπτά χαλύβδινα φύλλα προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλή δυσκαμψία στην κατακόρυφη διεύθυνση για την ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων και να περιοριστούν σημαντικά οι πλευρικές παραμορφώσεις (λόγω φαινομένου Poisson) του ελαστομερούς. Η σύνδεση των εφεδράνων με την ανωδομή και την θεμελίωση επιτυγχάνεται μέσω μεταλλικών πλακών πάνω στις οποίες κοχλιώνονται βλήτρα τοποθετημένα στα στοιχεία σύνδεσης πάνω και κάτω από τα εφέδρανα. Διατίθενται τόσο σε ορθογωνικές όσο και σε κυκλικές διατομές διαφόρων διαστάσεων ανάλογα με τον σχεδιασμό και τις απαιτήσεις που καλούνται να καλύψουν. Στην σχήμα 5 φαίνεται μια τυπική διατομή ενός τέτοιου εφεδράνου.



Σχήμα 5. Τυπική διατομή ελαστομεταλλικών εφεδράνων χαμηλής ή υψηλής απόσβεσης χωρίς πυρήνα μολύβδου [2]

Τα ελαστομερή εφέδρανα διακρίνονται ανάλογα με το ποσοστό της απόσβεσης που προσδίδουν στο σύστημα σε εφέδρανα υψηλής και χαμηλής απόσβεσης. Η απόσβεση, που εκφράζεται ως ένα ποσοστό % επί της κρίσιμης τιμής, προσδίδεται από το ελαστομερές, το οποίο παράλληλα προσφέρει υψηλή πλευρική ευκαμψία και την απαιτούμενη δύναμη επαναφοράς για την επανακέντρωσή του μετά την επιβολή οριζόντιας μετατόπισης, ενώ στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου η υψηλή τιμή τα απόσβεσης οφείλεται στην παρουσία μολύβδου. Ακολούθως αναφέρονται επιγραμματικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των 3 τύπων ελαστομερών συστημάτων σεισμικής μόνωσης, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

3.2.1.1 ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ (LDRB)

Στα ελαστομερή συστήματα χαμηλής απόσβεσης ο ισοδύναμος λόγος ιξώδους απόσβεσης ζ είναι μικρότερος του 6%, με συνηθέστερη τιμή το 5%. Η συμπεριφορά τους μπορεί να

προσεγγιστεί σαν συμπεριφορά γραμμικών ελαστικών στοιχείων με ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία K_{eff} για διατμητικές παραμορφώσεις ίσες ή και μεγαλύτερες του 100% σύμφωνα με την εξίσωση (1):

$$K_{eff} = G_b * A_b / t_e \quad (1)$$

όπου G_b είναι το μέτρο διάτμησης του ελαστομερούς, A_b η επιφάνεια του και t_e το συνολικό του πάχος.

Στα πλεονεκτήματα χρήσης των LDRB αναφέρουμε την εύκολη και τυποποιημένη πλέον παραγωγή τους και το ότι η απόκριση τους δεν είναι ευαίσθητη σε επιδράσεις του περιβάλλοντος αλλά ούτε και σε παραμέτρους όπως η ταχύτητα και η ιστορία της φόρτισης. Βασικό τους μειονέκτημα όμως αποτελεί η προσφορά χαμηλής απόσβεσης στο σύστημα με αποτέλεσμα την απαίτηση μεγάλης επάρκειας σε μετακινήσεις, οπότε προϋποθέτουν χρήση πρόσθετων μέτρων απόσβεσης.

3.2.1.2 ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ (HDRB)

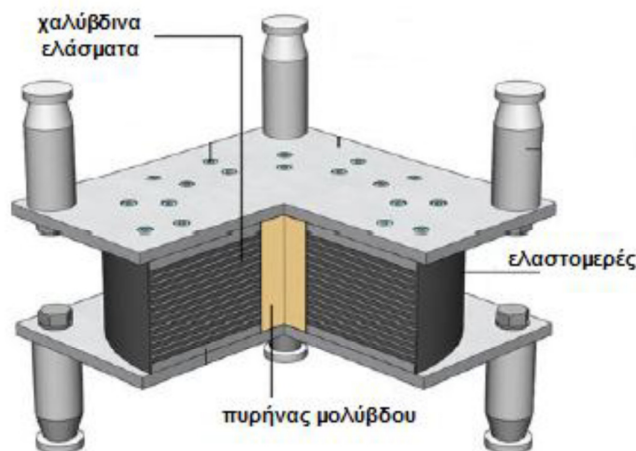
Πρόκειται για ελαστομεταλλικά συστήματα τα οποία εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της υψηλής ικανότητας απόσβεσης του ελαστομερούς που τα αποτελεί. Ο ισοδύναμος λόγος ιξώδους απόσβεσης ζ κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20% για διατμητική παραμόρφωση ίσης με 100%. Η ενεργός τους δυσκαμψία K_{eff} και η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση ζ_{eff} επηρεάζονται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ιστορία και η ταχύτητα της φόρτισης, αλλά και από τα υλικά του ελαστομερούς.

Η συμπεριφορά των παραπάνω μονωτήρων μπορεί να εκφραστεί και με τις ακόλουθες ελαστικές παραμέτρους:

- K_{eff} : ισοδύναμη ελαστική (ενεργός) δυσκαμψία που υπολογίζεται ως η τέμνουσα δύναμη διαιρεμένη με την μετακίνηση σχεδιασμού d_{bd} του μονωτήρα και ισούται με $K_{eff} = F_{max} / d_{bd}$ (2)
- ζ_{eff} : ισοδύναμη ιξώδης (ενεργός) απόσβεση που αντιστοιχεί στην μετακίνηση σχεδιασμού d_{bd} του μονωτήρα και δίνεται από την εξίσωση:
 $\zeta_{eff} = 1/2\pi * (E_D / K_{eff} * d_{bd}^2)$ (3)
όπου E_D η ενέργεια που αποσβέννεται ανά κύκλο στην μετακίνηση σχεδιασμού d_{bd} του μονωτήρα.

3.2.1.3 ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΜΕ ΠΥΡΗΝΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ (LRB)

Τα ελαστομεταλλικά εφεδράνα με πυρήνα μολύβδου αποτελούνται από συνήθη εφεδράνα με ελαστομερές χαμηλής απόσβεσης στα οποία προστίθεται ένας κυλινδρικός πυρήνας μολύβδου όπως φαίνεται στην σχήμα 6.



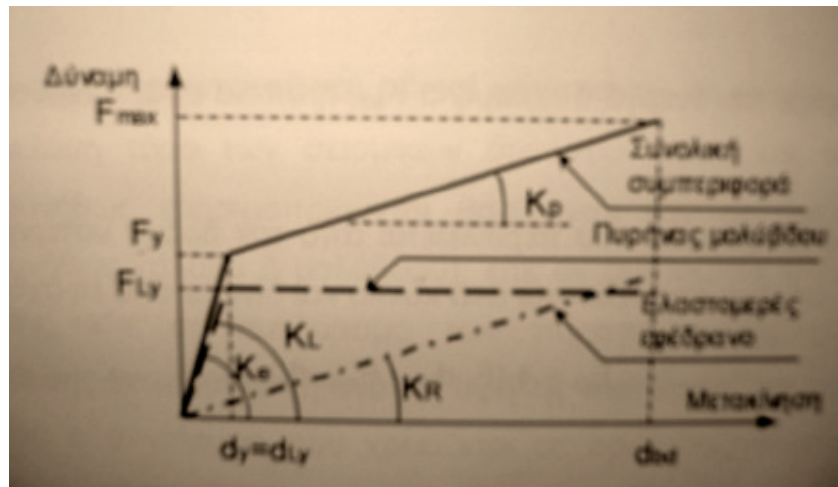
Σχήμα 6. Τυπική διατομή ελαστομεταλλικών εφεδράνων με πυρήνα μολύβδου [2]

Η συμπεριφορά του μολύβδου είναι ελαστική – απολύτως πλαστική με δυσκαμψία K_L στον ελαστικό κλάδο και μηδενική δυσκαμψία μετά την διαρροή, ενώ το ελαστομεταλλικό εφεδρανο συμπεριφέρεται ελαστικά με δυσκαμψία K_R . Συνεπώς, η συνολική ανελαστική συμπεριφορά των συγκεκριμένων εφεδράνων μπορεί να περιγραφεί από τον διγραμμικοποιημένο βρόχο υστέρησης της εικόνας 7, όπου η ελαστική δυσκαμψία είναι ίση με $K_e = K_L + K_R$ (4) και η δυσκαμψία μετά την διαρροή είναι ίση με $K_e = K_R$.

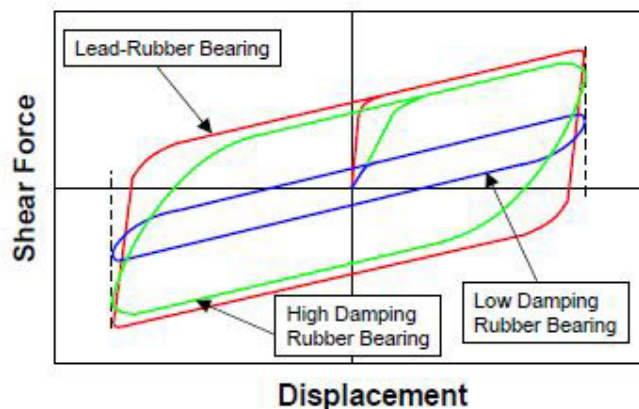
Η δύναμη διαρροής δίνεται από την σχέση:

$$F_Y = F_{LY} * (1 + K_R / K_L) \quad (5)$$

όπου $F_{LY} = K_L * d_{LY}$ είναι η δύναμη στην οποία διαρρέει ο μολύβδος. Συνήθως, η ελαστική δυσκαμψία του μολύβδου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη αυτής του ελαστομεταλλικού ($K_L \gg K_R$) οπότε θεωρείται με επαρκή ακρίβεια ότι $K_e = K_L$ και $F_Y = F_{LY}$.



Σχήμα 7. Συμπεριφορά επιμέρους στοιχείων και συνολικά για ελαστομεταλλικά εφεδρανα με πυρήνα μολύβδου [2]



Σχήμα 8. Σύγκριση βρόχων υστέρησης για τους τρεις τύπους ελαστομεταλλικών εφεδράνων [2]

4. ΤΡΟΠΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ

Για την εγκατάσταση των εφεδράνων, απαιτούνται κατά σειρά οι ακόλουθες εργασίες:

- a) Ενίσχυση των στοιχείων στον όροφο εγκατάστασης και στον υποκείμενο όροφο (υπόγειο όπου υπάρχει).
- b) Προσωρινή στήριξη των στοιχείων.

- c) Αποκοπή των στοιχείων από το επίπεδο εγκατάστασης για να δημιουργηθεί ο αναγκαίος χώρος υποδοχής των εφεδράνων.
- d) Τοποθέτηση και ασφαλής ενσωμάτωση των εφεδράνων με τα φέροντα στοιχεία του φορέα.
- e) Αφαίρεση της προσωρινής στήριξης.

5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΠΥΡΗΝΕΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σεισμική μόνωση του Κτιρίου Μουσείου Δυτικής Τέχνης στο Τόκυο (Ιαπωνία) που φαίνεται στην σχήμα 9.



Σχήμα 9. Μουσείο δυτικής τέχνης στο Τόκυο [4]

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή γίνεται παρουσίαση της μεθόδου της σεισμικής μόνωσης με ελαστομεταλλικά εφέδρανα με εξέχοντα ρόλο να λαμβάνουν τα εφέδρανα με πυρήνες μολύβδου. Γίνεται σαφές ότι τα συγκεκριμένα εφέδρανα υπερτερούν έναντι των εφεδράνων χαμηλής αλλά και υψηλής απόσβεσης διότι ουσιαστικά συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων εφεδράνων επομένως δεν επηρεάζεται από συνθήκες περιβάλλοντος όπως η θερμοκρασία αλλά, και άλλες όπως η ιστορία και η ταχύτητα φόρτισης ενώ παράλληλα προσφέρουν ικανότητα υψηλής απόσβεσης στην κατασκευή.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. Σοφοκλέους, Ι. Κάνας, Ι. Καραμπατζός και Κ. Μυλωνάς, Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης σε υφιστάμενες κατασκευές ως μέσο ουσιαστικής σεισμικής αναβάθμισής τους.
- [2] Β. Δημούδης, Διερεύνηση της επίδρασης της σεισμικής μόνωσης στη συμπεριφορά δώροφης λίθινης κατασκευής έναντι σεισμών εγγύς πεδίου, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ, 2011.
- [3] Κ. Σπυράκος, «Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία», Κεφ.7 "Σεισμική μόνωση των κατασκευών", σελ. 210-215.
- [4] «<http://www.seismomonosis.com/>» [Ηλεκτρονικό].