

## 3. ΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ

### 3.1 Πρακτικά Συστήματα Σεισμικής Μόνωσης

Τα προηγούμενα κεφάλαια υποδεικνύουν τις βασικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν τα πρακτικά συστήματα σεισμικής μόνωσης. Οι βασικές απαιτήσεις είναι :

- **Πρόσθετη ευκαμψία:** Η αύξηση της ιδιοπεριόδου της μονωμένης κατασκευής μειώνει την διέγερση της ανωδομής κατά τον σεισμό και κατά συνέπεια μειώνει την απαίτηση αντοχής από αυτή.
- **Πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας:** Η αυξημένη απόσβεση ενέργειας απαιτείται για τον περιορισμό των μετατοπίσεων του συστήματος σεισμικής μόνωσης σε πρακτικό επίπεδο για τον σχεδιασμό των μονωτήρων καθώς και για την μείωση των επιπτώσεων ενός πιθανού συντονισμού της μονωμένης κατασκευής με την εδαφική κίνηση.
- **Επάρκεια για την ανάληψη των μετακινήσεων:** Οι μονωτήρες πρέπει να είναι ικανοί να αναλάβουν τις αυξημένες μετακινήσεις στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης χωρίς αστοχία.
- **Επαρκής ακαμψία για τις υπόλοιπες οριζόντιες φορτίσεις:** Το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να είναι ικανό να αναλαμβάνει τις υπόλοιπες οριζόντιες φορτίσεις όπως ο άνεμος και τα μικρά σεισμικά επεισόδια χωρίς υπερβολικές μετατοπίσεις (συνήθως απαιτείται να μην διαρρέει ή να μην ολισθαίνει).

- **Επάρκεια για την ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων:** Σε όλες τις φάσεις λειτουργίας το σύστημα σεισμικής μόνωσης πρέπει να είναι ικανό να φέρει με ασφάλεια τα κατακόρυφα φορτία μαζί με τις οριζόντιες μετακινήσεις όταν αυτές συνυπάρχουν.

Αρκετά διαφορετικά συστήματα σεισμικής μόνωσης έχουν αναπτυχθεί τα οποία παρέχουν τις παραπάνω απαιτήσεις. Η πρόσθετη ευκαμψία μπορεί να υλοποιηθεί από :

- ελαστομεταλλικά εφέδρανα
- συστήματα ολίσθησης (πάνω σε επίπεδη ή σφαιρική επιφάνεια)
- κυλίσεις
- μεταλλικά ελατήρια
- συστήματα λικνισμού
- αναρτώμενα συστήματα μέσω καλωδίων.

Η πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας μπορεί να εισαχθεί από:

- υστερητική συμπεριφορά (πλαστική παραμόρφωση μολύβδου ή χάλυβα, μίγματα ελαστικού υψηλής απόσβεσης)
- ιξώδη συμπεριφορά (ιξώδεις αποσβεστήρες)
- τριβή ολίσθησης
- απόσβεση συντονισμένου εκκρεμούς μάζας (tuned mass dampers)

Η σεισμική μόνωση άρχισε να εφαρμόζεται ως μια πρακτική στρατηγική αντισεισμικού σχεδιασμού στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Οι πρώτες εφαρμογές αφορούσαν σεισμική μόνωση γεφυρών στις οποίες συνήθως υπάρχουν εύκαμπτα ελαστομεταλλικά εφέδρανα μέσω των οποίων εδράζεται το κατάστρωμα τους στα βάθρα. Οι πρώτες εφαρμογές σε κτηριακά έργα άρχισαν από το τέλος της δεκαετίας του 1970.

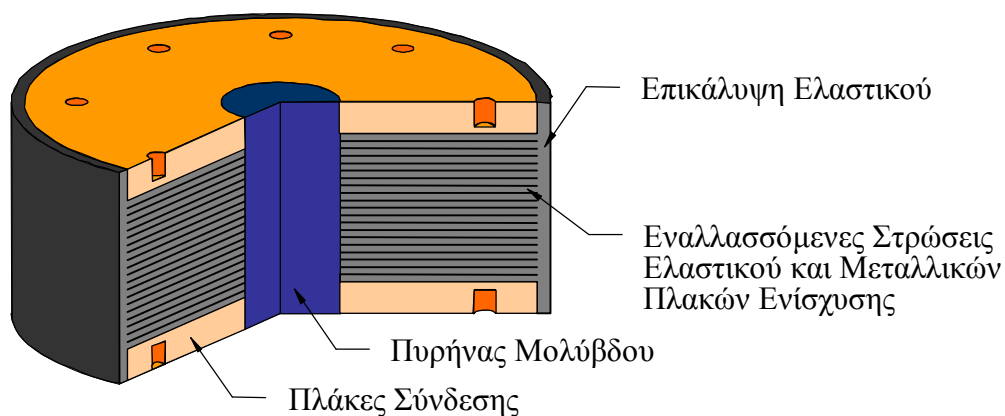
Δύο βασικά συστήματα στα οποία στηρίχθηκαν οι πρώτες εφαρμογές σεισμικής μόνωσης είναι τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα φυσικού ελαστικού και τα συστήματα ολίσθησης σε επίπεδη επιφάνεια τριβής. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα φυσικού ελαστικού είναι πολύ πιο εύκαμπτα στην οριζόντια διεύθυνση σε σχέση με την κατακόρυφη διεύθυνση. Παρουσιάζουν μια σχετικά γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με μικρό βαθμό απόσβεσης της τάξης το 2% με 3%. Δύο σημαντικά μειονεκτήματα τους είναι η απουσία επαρκούς απόσβεσης και το γεγονός ότι παραμένουν εύκαμπτα και για τις μη σεισμικές οριζόντιες φορτίσεις. Τα εφέδρανα ολίσθησης σε επίπεδη επιφάνεια τριβής, αν και εμφανίζουν υψηλούς βαθμούς απόσβεσης και παραμένουν επαρκώς δύσκαμπτα μέχρι να αρχίσει η ολίσθηση, δεν έχουν κάποια δύναμη η οποία να τα επαναφέρει στην αρχική θέση ηρεμίας. Έτσι είναι πολύ πιθανό να καταλήξουν σε μετατοπισμένη θέση μετά το τέλος του σεισμικού επεισοδίου. Τα μειονεκτήματα των δύο παραπάνω συστημάτων οδήγησαν στην παράλληλη χρήση τους σε μερικές πρώιμες εφαρμογές σεισμικής μόνωσης. Αργότερα τα μειονεκτήματα αυτά ξεπεράστηκαν με τους τρεις παρακάτω τύπους σεισμικών μονωτήρων οι οποίοι αποτελούν σήμερα την συνήθη επιλογή για τα συστήματα σεισμικής μόνωσης.

### **3.1.1 Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα με Πυρήνα Μολύβδου (Lead Rubber Bearings - LRB)**

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (Lead Rubber Bearing ή LRB) εφευρέθηκαν στην Νέα Ζηλανδία την δεκαετία του 1970. Αποτελούνται από ένα κεντρικό πυρήνα μολύβδου ο οποίος εισάγεται με πίεση στην προανοιγμένη οπή ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής (Σχήμα 3-2). Όλο το εφέδρανο περιβάλλεται από επικάλυψη ελαστικού (σύνηθες πάχος από 5mm έως 10mm) για λόγους περιβαλλοντικής προστασίας. Στις άνω και κάτω επιφάνειες καταλήγει σε παχιές μεταλλικές πλάκες (πάχος από 2 έως 3cm) οι οποίες ισοκατανέμουν την κατακόρυφη παραμόρφωση και προσφέρουν την σύνδεση με την ανωδομή και την θεμελίωση.



Σχήμα 3-1 Εφέδρανο LRB – Κτήριο Μουσείου Δυτικής Τέχνης (Τόκιο, Ιαπωνία)



Σχήμα 3-2 Σκαριφηματική Τομή Εφεδράνου LRB

Το κύριο πλεονέκτημα του εφεδράνου LRB είναι ότι παρέχει ευκαμψία για τις σεισμικές ανακυκλικές μετακινήσεις, ακαμψία για τις μη σεισμικές οριζόντιες φορτίσεις, υψηλό βαθμό υστερητικής απόσβεσης και επάρκεια στην ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων με την μορφή ενός εφεδράνου σεισμικής μόνωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτυγχάνονται με τον συνδυασμό του ελαστομεταλλικού μέρους και του πυρήνα μολύβδου και κάνουν τα εφέδρανα LRB ένα ανταγωνιστικό σύστημα σεισμικής μόνωσης για εφαρμογή σε κτήρια και γέφυρες.

Το ελαστομεταλλικό μέρος κατασκευάζεται από εναλλασσόμενες στρώσεις ελαστικού και μεταλλικών πλακών οι οποίες συνενώνονται κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας μέσα σε ένα καλούπι. Οι μεταλλικές πλάκες (τυπικό πάχος 2 έως 3mm) εμποδίζουν το ελαστικό από το να διογκώνεται πλευρικά λόγω του κατακόρυφου φορτίου αλλά δεν έχουν καμία επίδραση στις οριζόντιες παραμορφώσεις του ελαστικού. Όσο μειώνεται το πάχος των στρώσεων ελαστικού τόσο αυξάνει η κατακόρυφη δυσκαμψία και η επάρκεια ανάληψης των κατακόρυφων φορτίων. Όμως η οριζόντια ακαμψία του ελαστομεταλλικού μέρους παραμένει χαμηλή λόγω του χαμηλού μέτρου διάτμησης του φυσικού ελαστικού (από 0.4 έως 1.0MPa). Το ελαστομεταλλικό μέρος από μόνο του εμφανίζει μια σχεδόν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά με μικρό βαθμό απόσβεσης της τάξης του 2% με 3%.

Η παρουσία του πυρήνα μολύβδου τροποποιεί την συμπεριφορά του εφεδράνου. Ο πυρήνας έχει υψηλή ελαστική ακαμψία η οποία παρέχει επαρκή ακαμψία στο εφέδρανο για τις μη σεισμικές οριζόντιες φορτίσεις. Όταν το εφέδρανο υποβάλλεται σε ανακυκλικές σεισμικές μετατοπίσεις, ο πυρήνας μολύβδου αναγκάζεται σε διατμητική παραμόρφωση από τις μεταλλικές πλάκες και διαρρέει εύκολα σε χαμηλά επίπεδα τάσεων της τάξης των 10MPa. Μετά την διαρροή ο μολύβδος παρουσιάζει σχεδόν τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Το αποτέλεσμα είναι το εφέδρανο να εμφανίζει μια σχεδόν διγραμμική υστερητική συμπεριφορά. Η ενεργός ακαμψία του εφεδράνου κάτω από την ανακυκλική σεισμική φόρτιση μειώνεται σημαντικά όσο το εύρος της ανακυκλικής παραμόρφωσης ξεπερνά την μετατόπιση διαρροής του μολύβδου. Για τα επίπεδα του σεισμού σχεδιασμού ιδιοπερίοδοι της τάξης των 2 sec είναι εύκολο να επιτευχθούν για την μονωμένη κατασκευή. Ακόμα ενέργεια καταναλώνεται με την μορφή θερμότητας η οποία είναι ανάλογη με το εμβαδόν που σχηματίζουν οι βρόχοι υστέρησης. Ο ισοδύναμος βαθμός ιξώδους απόσβεσης ο οποίος επιτυγχάνεται είναι αρκετά υψηλός, της τάξης του 15% έως 30%.

### **3.1.2 Ελαστομεταλλικά Εφέδρανα Ελαστικού Υψηλής Απόσβεσης (High Damping Rubber Bearings – HDRB)**

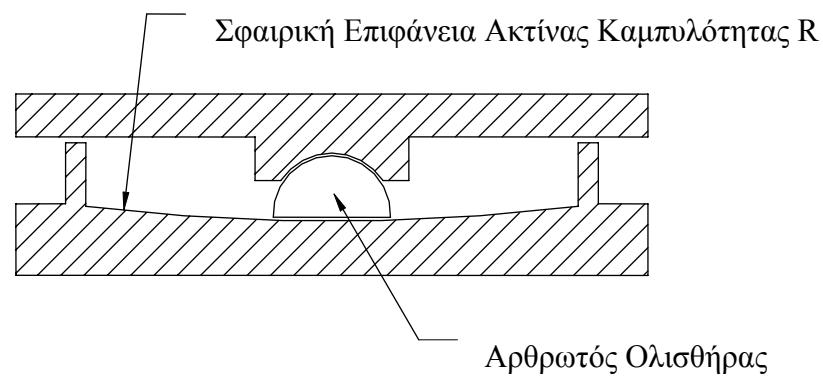
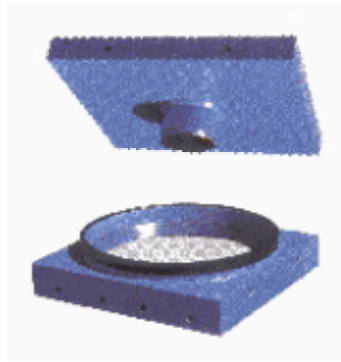
Το 1982 εφευρέθηκαν διάφορα μίγματα συνθετικού ή φυσικού ελαστικού τα οποία εμφανίζουν υψηλό βαθμό απόσβεσης έτσι ώστε να μην απαιτούνται πρόσθετοι

μηχανισμοί απόσβεσης. Η αύξηση του βαθμού απόσβεσης επιτυγχάνεται με την προσθήκη κατάλληλων συμπληρωματικών ουσιών όπως άνθρακα και ρητινών. Η απόσβεση αυτή είναι κάτι ενδιάμεσο μεταξύ της υστερητικής απόσβεσης και της ιξώδους απόσβεσης με το κυρίαρχο κομμάτι της να είναι το υστερητικό. Με βάση αυτά τα βελτιωμένα μείγματα ελαστικού κατασκευάζονται τα ελαστομεταλλικά εφεδράνα ελαστικού υψηλής απόσβεσης (High Damping Rubber Bearing ή HDRB). Η μέθοδος κατασκευής των HDRB είναι ίδια με αυτή των ελαστομεταλλικών εφεδράνων φυσικού ελαστικού.

Το ελαστικό των εφεδράνων HDRB παρουσιάζει μη-γραμμική συμπεριφορά για διατμητικές παραμορφώσεις μικρότερες του 20%. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζεται από υψηλό μέτρο διάτμησης (της τάξης των 2MPa) και υψηλό βαθμό απόσβεσης, τα οποία μειώνουν την απόκριση για τις μη σεισμικές οριζόντιες φορτίσεις όπως ο άνεμος. Για διατμητικές παραμορφώσεις στο διάστημα 20% έως 120% το μέτρο διάτμησης είναι μικρό και σταθερό (της τάξης του 0.5MPa) ενώ ο βαθμός απόσβεσης κυμαίνεται από 10% έως 20%. Για τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης υψηλότερες από 120% το μέτρο διάτμησης και ο βαθμός απόσβεσης αυξάνουν λόγω ενός φαινομένου κρυσταλλοποίησης των μακρομορίων του ελαστικού. Η παραπάνω μεταβολή της οριζόντιας δυσκαμψίας και της απόσβεσης των εφεδράνων HDRB είναι χρήσιμη για την κατασκευή ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης το οποίο είναι σχετικά δύσκαμπτο για μικρού εύρους μετακινήσεις, έχει την απαιτούμενη ευκαμψία για τις σεισμικές μετακινήσεις σχεδιασμού ενώ αυξάνει πάλι την δυσκαμψία και περιορίζει τις μετακινήσεις στην περίπτωση όπου ξεπερνιέται ο σεισμός σχεδιασμού.

### 3.1.3 Σύστημα Εκκρεμούς Τριβής (Friction Pendulum System – FPS)

Το σύστημα εκκρεμούς τριβής (Friction Pendulum System ή FPS) συνδυάζει την ολίσθηση σε επιφάνεια τριβής με μια δύναμη επαναφοράς η οποία προκύπτει από την γεωμετρία της σφαιρικής επιφάνειας ολίσθησης. Στο Σχήμα 1-5 εικονίζεται η τομή ενός μονωτήρα FPS. Αποτελείται από ένα αρθρωτό ολισθήρα ο οποίος ολισθαίνει πάνω σε σφαιρική επιφάνεια τριβής από χάβυβα ακτίνας καμπυλότητας  $R$ . Η επιφάνεια του ολισθήρα η οποία έρχεται σε επαφή με την σφαιρική επιφάνεια έχει επικάλυψη από συνθετικό υλικό συνήθως Teflon ©.



**Σχήμα 3-3 Τομή Εφεδράνου Συστήματος Εκκρεμούς Τριβής (FPS)**



**Σχήμα 3-4 Εγκατεστημένο Εφέδρανο FPS**

Καθώς ο ολισθήρας ολισθαίνει στην σφαιρική επιφάνεια η υποστηριζόμενη μάζα της ανωδομής ανυψώνεται και έτσι εμφανίζεται δύναμη επαναφοράς η οποία τείνει να επαναφέρει το εφέδρανο στην θέση ισορροπίας. Αυτή η δύναμη επαναφοράς είναι ανάλογη της μετατόπισης του μονωτήρα και αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας καμπυλότητας  $R$ . Επιπλέον η τριβή μεταξύ του αρθρωτού ολισθήρα και της σφαιρικής

επιφάνειας παράγει την απόσβεση των μονωτήρων. Η ενεργός ακαμψία και ο βαθμός απόσβεσης του μονωτήρα εξαρτώνται από την ακτίνα καμπυλότητας  $R$  της σφαιρικής επιφάνειας.

Δύο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του συστήματος FPS είναι ότι η ιδιοπερίοδος της μονωμένης κατασκευής καθώς και ο βαθμός απόσβεσης δεν εξαρτώνται από την μάζα της κατασκευής. Επίσης για ένα σύστημα σεισμικής μόνωσης το οποίο αποτελείται από σεισμικούς μονωτήρες FPS ίδιας ακτίνας καμπυλότητας  $R$ , η ενεργός ακαμψία κάθε μονωτήρα είναι ανάλογη του βάρους που υποστηρίζει και κατά συνέπεια το κέντρο ακαμψίας του συστήματος σεισμικής μόνωσης ταυτίζεται με το κέντρο μάζας. Η ιδιότητα αυτή τείνει να μηδενίσει τις στρεπτικές κινήσεις της μονωμένης κατασκευής.

### 3.2 Συμπεριφορά Ελαστομεταλλικών Εφεδράνων σε Οριζόντια Διάτμηση

Η δυσκαμψία σε οριζόντια διάτμηση ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου σύμφωνα με την θεωρία γραμμικής ελαστικότητας δίνεται πολύ απλά από την σχέση :

$$K_H = \frac{GA_r}{t_r} \quad (3-1)$$

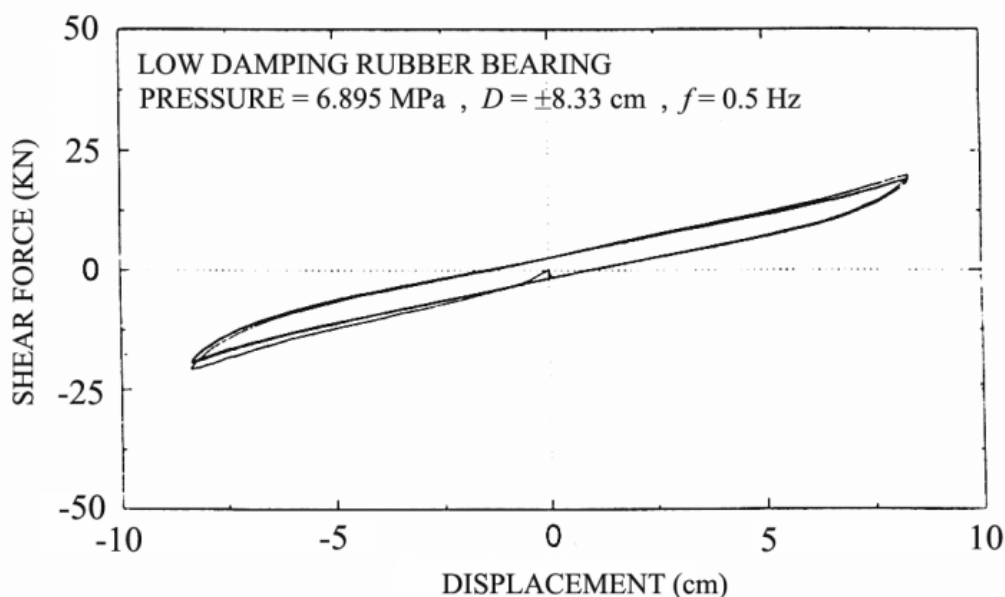
όπου  $G$  είναι το μέτρο διάτμησης του ελαστικού,  $A_r$  είναι η επιφάνεια του συγκολλημένου ελαστικού στις μεταλλικές πλάκες και  $t_r$  είναι το συνολικό πάχος ελαστικού το οποίο συντίθεται από  $n$  στρώσεις ελαστικού πάχους  $t_i$  η κάθε μία (δεν προστίθεται το πάχος των μεταλλικών πλακών οι οποίες δεν συμμετέχουν στην διατμητική παραμόρφωση). Η οριζόντια ακαμψία ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου είναι αρκετά μικρή λόγω του χαμηλού μέτρου διατμήσεως  $G$  του ελαστικού (από 0.4MPa έως 1.2MPa) και έτσι είναι κατάλληλο για εφαρμογές γεφυροποιίας και σεισμικής μόνωσης.

Υπό οριζόντια διάτμηση το ελαστικό των στρώσεων υποβάλλεται σε διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_s$  η οποία συνδέεται με την οριζόντια μετατόπιση  $D$  σύμφωνα με την σχέση :



$$\gamma_s = \frac{D}{t_r} \quad (3-2)$$

Στην πραγματικότητα η συμπεριφορά ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου κάτω από ανακυκλικές επιβαλλόμενες μετακινήσεις, όπως συμβαίνει κατά τον σεισμό, είναι μεταξύ υστερητικής και ιξώδους ελαστικής. Στο Σχήμα 3-5 εικονίζονται πειραματικοί βρόχοι υστέρησης ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου φυσικού ελαστικού υπό ανακυκλική οριζόντια διάτμηση. Ο βαθμός απόσβεσης παραμένει αρκετά χαμηλός της τάξης του 2% με 3% του κρίσιμου και οι σχηματιζόμενοι βρόχοι έχουν μικρό εύρος. Συνεπώς η προσομοίωση των ελαστομεταλλικών εφεδράνων φυσικού ελαστικού μέσω γραμμικώς ελαστικού στοιχείου έχει πολύ καλή εφαρμογή.



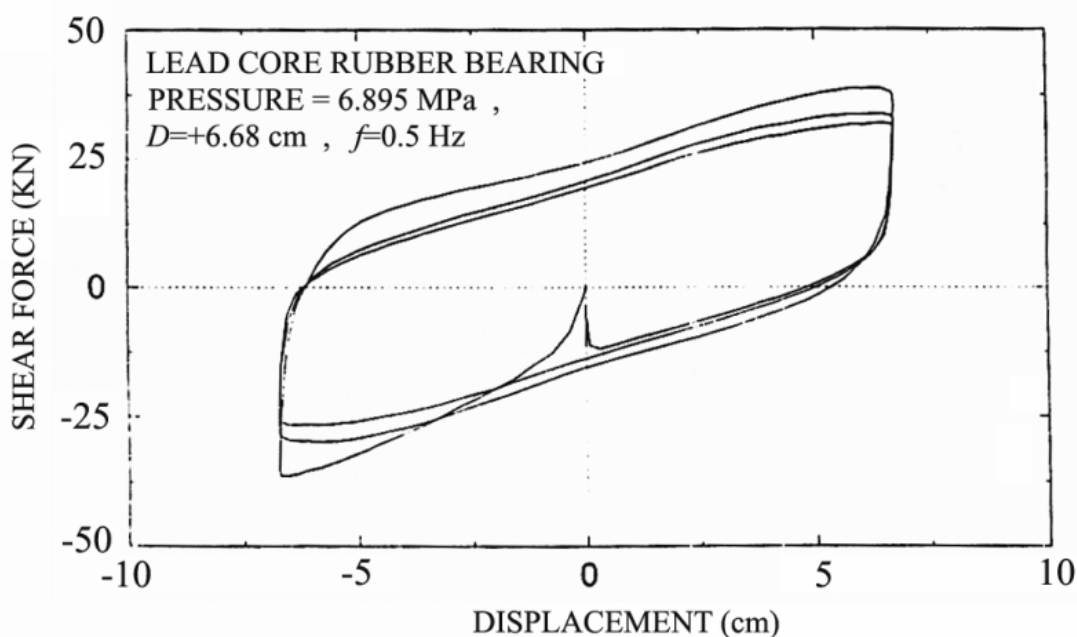
Σχήμα 3-5 Ανακυκλική Φόρτιση Ελαστομεταλλικού Εφεδράνου Χαμηλής Απόσβεσης

### 3.3 Συμπεριφορά Ελαστομεταλλικών Εφεδράνων με Πυρήνα Μολύβδου (LRB) σε Οριζόντια Διάτμηση

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (LRB) αποτελούν τον συνδυασμό του ελαστομεταλλικού μέρους με τον πυρήνα μολύβδου. Ο πυρήνας

μολύβδου έχει αρκετά μεγάλη ελαστική ακαμψία η οποία παρέχει δυσκαμψία στο εφεδράνο LRB για τις μη σεισμικές οριζόντιες φορτίσεις (π.χ. άνεμος). Όταν όμως το εφεδράνο υποβάλλεται σε ανακυκλικές σεισμικές μετακινήσεις, τότε ο πυρήνας μολύβδου αναγκάζεται να παραμορφωθεί διατμητικά από τις μεταλλικές πλάκες και διαρρέει σε χαμηλά επίπεδα τάσης, της τάξης των 10MPa. Μετά την διαρροή ο πυρήνας μολύβδου εμφανίζει μια σχεδόν πλήρως πλαστική συμπεριφορά.

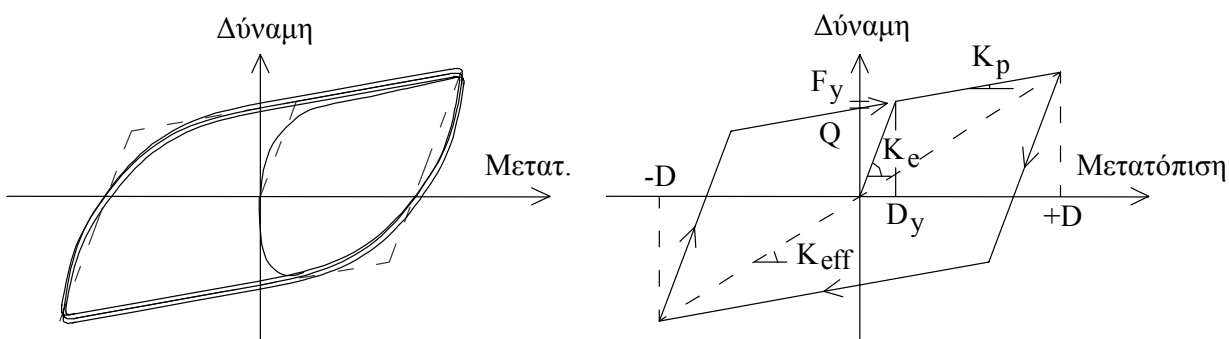
Ο συνδυασμός της σχεδόν γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς του ελαστομεταλλικού μέρους και της σχεδόν ελαστικής-πλήρως πλαστικής συμπεριφοράς του μολύβδου οδηγεί στον σχηματισμό σχεδόν διγραμμικών βρόχων υστέρησης για τα ελαστομεταλλικά εφεδράνα με πυρήνα μολύβδου (LRB). Πειραματικώς μετρημένοι βρόχοι υστέρησης ενός εφεδράνου LRB εικονίζονται στο Σχήμα 3-6. Αν το εύρος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής μετακίνησης  $D$  ξεπερνά την μετατόπιση διαρροής του μολύβδου τότε η οριζόντια δυσκαμψία του εφεδράνου LRB είναι σημαντικά μειωμένη. Ακόμα ενέργεια καταναλώνεται σε κάθε κύκλο με την μορφή υστερητικής απόσβεσης. Η καταναλισκόμενη ενέργεια ισούται με το εμβαδόν των σχηματιζόμενων βρόχων υστέρησης και αντιστοιχεί σε αρκετά υψηλό ισοδύναμο βαθμό ιξώδους απόσβεσης  $\beta$ , της τάξης του 15% έως 30% για τα συνήθη συστήματα σεισμικής μόνωσης εφεδράνων LRB.



Σχήμα 3-6 Ανακυκλική Φόρτιση Ελαστομεταλλικού Εφεδράνου με Πυρήνα Μολύβδου (LRB)

### 3.3.1 Προσομοίωση μέσω Διγραμμικού Υστερητικού Μοντέλου

Οι πραγματικοί βρόχοι υστέρησης των εφεδράνων LRB σε ανακυκλική μετατόπιση εύρους  $D$  δεν είναι εντελώς διγραμμικοί. Η απόκλιση από τον διγραμμικό βρόχο υστέρησης είναι γενικά μεγαλύτερη όσο λιγότερο αποτελεσματικός είναι ο εγκιβωτισμός του πυρήνα μολύβδου από τις μεταλλικές πλάκες. Για τον σκοπό της ανάλυσης και του σχεδιασμού των εφεδράνων LRB η προσομοίωση μέσω ενός ισοδύναμου διγραμμικού υστερητικού μοντέλου είναι επαρκής (Σχήμα 3-7).



Σχήμα 3-7 Προσομοίωση Υστερητικής Συμπεριφοράς Εφεδράνων LRB μέσω Διγραμμικού Υστερητικού Μοντέλου

Οι σταθερές ποσότητες του διγραμμικού υστερητικού μοντέλου είναι η ακαμψία μετά την διαρροή  $K_p$ , η ελαστική ακαμψία (ή ακαμψία αποφόρτισης)  $K_e$ , η δύναμη διαρροής  $F_y$ , η μετακίνηση διαρροής  $D_y$  και η χαρακτηριστική δύναμη  $Q$  (σημείο όπου ο βρόχος υστέρησης τέμνει τον άξονα της δύναμης). Μόνο 3 από τις 5 προηγούμενες ποσότητες απαιτούνται για να περιγράψουν πλήρως τον διγραμμικό υστερητικό βρόχο. Οι δύο εξισώσεις οι οποίες συνδέουν τις επιπλέον ποσότητες είναι οι εξής :

$$D_y = F_y / K_e \quad \text{και} \quad F_y = Q + K_p D_y \quad (3-3)$$

Η ακαμψία μετά την διαρροή  $K_p$  και η χαρακτηριστική δύναμη  $Q$  οι οποίες μαζί ορίζουν τον μετελαστικό κλάδο του διγραμμικού βρόχου μπορούν να εκτιμηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια. Η ακαμψία μετά την διαρροή  $K_p$  είναι ίση με την οριζόντια

ακαμψία του ελαστομεταλλικού μέρους του εφεδράνου μόνο, προσανυξημένη με ένα παράγοντα  $f_L$  :

$$K_p = f_L \frac{GA_r}{t_r} \quad (3-4)$$

όπου  $A_r$  είναι η επιφάνεια του συγκολλημένου ελαστικού στις μεταλλικές πλάκες,  $t_r$  είναι το συνολικό πάχος του ελαστικού και  $G$  είναι το μέτρο διάτμησης του ελαστικού το οποίο κυμαίνεται από 0.40MPa έως 1.20MPa. Το μέτρο διάτμησης του φυσικού ελαστικού το οποίο χρησιμοποιείται για τα εφέδρανα LRB είναι πρακτικά ανεξάρτητο από την εφαρμοζόμενη διατμητική τάση και εμφανίζει μικρή μόνο εξάρτηση από το κατακόρυφο φορτίο. Ο παράγοντας  $f_L$  είναι μεγαλύτερος από την μονάδα και λαμβάνει υπόψη την αύξηση της μετελαστικής ακαμψίας του μολύβδου λόγω μη τέλει πλαστικής συμπεριφοράς. Τυπική τιμή του παράγοντα  $f_L$  είναι το 1.15 η οποία επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα. Ο παράγοντας  $f_L$  θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη με κατάλληλα προσανυξημένο μέτρο διάτμησης  $G$ .

Η χαρακτηριστική δύναμη  $Q$  ισούται με την δύναμη διαρροής του μολύβδου και εκφράζεται ως :

$$Q = A_{pb} f_{ypb} \quad (3-5)$$

όπου  $A_{pb}$  είναι η επιφάνεια κάτοψης του πυρήνα μολύβδου και  $f_{ypb}$  είναι η τάση διαρροής του μολύβδου η οποία έχει θεωρητική τιμή 10.5MPa. Για τους σκοπούς του σχεδιασμού και της ανάλυσης θεωρείται μια μικρότερη φαινόμενη τιμή η οποία εξαρτάται από το πόσο επαρκής είναι η περίσφιξη του πυρήνα μολύβδου από τις μεταλλικές πλάκες. Τυπική τιμή για συνήθη εφέδρανα LRB είναι τα 7.5MPa η οποία επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα.

Η ενεργός ακαμψία  $K_{eff}$  ορίζεται ως η κλίση της ευθείας μεταξύ των κορυφών του βρόχου υστέρησης για τις ακραίες μετατοπίσεις και εξαρτάται από την μετατόπιση. Για δεδομένο εύρος ανακυκλικής μετατόπισης  $D$  η ενεργός ακαμψία δίνεται από την σχέση:

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{D} \quad \text{για } D > D_y \quad (3-6)$$

Για εύρος ανακυκλικής μετατόπισης  $D$  μικρότερο από την μετατόπιση διαρροής  $D_y$  η ενεργός ακαμψία  $K_{eff}$  ισούται με την ελαστική ακαμψία  $K_e$ . Για μεγαλύτερο εύρος ανακυκλικής μετατόπισης  $D$  η  $K_{eff}$  μειώνεται και τείνει στην ακαμψία μετά την διαρροή  $K_p$  όταν η  $D$  γίνεται πολύ μεγάλη.

Η μετατόπιση διαρροής  $D_y$  μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των κύριων παραμέτρων ως εξής :

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} = \frac{Q}{K_p (K_e / K_p - 1)} \quad (3-7)$$

Η τρίτη παράμετρος η οποία ορίζει πλήρως τον διγραμμικό υστερητικό βρόχο είναι ο λόγος της ελαστικής ακαμψίας προς την μετελαστική ακαμψία  $K_e/K_p$ . Συνήθως ορίζεται εμπειρικά έτσι ώστε το εμβαδόν του διγραμμικού βρόχου να ισούται με το εμβαδόν των πειραματικά μετρημένων βρόχων υστέρησης. Έχει τυπικές τιμές από 6 έως 25 με συνήθη τιμή για τα εφέδρανα LRB το 10. Η παράμετρος  $K_e/K_p$  δεν έχει καμία επίδραση στην ενεργό ακαμψία  $K_{eff}$  αλλά έχει σημαντική επίδραση στον ισοδύναμο βαθμό απόσβεσης  $\beta$ .

Η επιφάνεια υστέρησης του διγραμμικού μοντέλου αντιπροσωπεύει την καταναλισκόμενη ενέργεια  $ED$  σε κάθε κύκλο φόρτισης και ισούται με :

$$ED = 4Q(D - D_y) \quad (3-8)$$

Η υστερητική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από την μετατόπιση. Για τον σκοπό της ανάλυσης πρέπει να μετατραπεί σε ισοδύναμο βαθμό απόσβεσης ενός καθαρού ιξώδους αποσβεστήρα όπου η δύναμη απόσβεσης είναι ανάλογη της ταχύτητας. Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης  $\beta$  ορίζεται ως ο βαθμός απόσβεσης ενός ιξώδους ελαστικού στοιχείου το οποίο κάτω από ανακυκλική μετατόπιση εύρους  $D$  καταναλώνει ίδια ποσότητα ενέργειας με αυτή που καταναλώνεται από τον υστερητικό βρόχο. Δίνεται από την σχέση :

$$\beta = \frac{ED}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (3-9)$$

όπου η μετατόπιση διαρροής  $D_y$  εκτιμάται από την εξίσωση (3-7). Τόσο ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης  $\beta$  όσο και η ενεργός ακαμψία  $K_{eff}$  εξαρτώνται έντονα

από το εύρος της ανακυκλικής παραμόρφωσης  $D$ . Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης  $\beta$  εξαρτάται επίσης έντονα από τον λόγο ακαμψιών  $K_e/K_p$  του διγραμμικού υστερητικού βρόχου.

### 3.4 Συμπεριφορά Συστήματος Εκκρεμούς Τριβής (FPS) σε Οριζόντια Διάτμηση

Η συμπεριφορά ενός συστήματος FPS ουσιαστικά ελέγχεται από μία παράμετρο, την ακτίνα καμπυλότητας  $R$  της κοίλης επιφάνειας ολίσθησης κάτι το οποίο κάνει την προσομοίωση της συμπεριφοράς του αρκετά απλή. Η δύναμη επαναφοράς ενός συστήματος FPS δίνεται από την σχέση:

$$F = \frac{W}{R}D + \mu W \text{sign}(\dot{D}) \quad (3-10)$$

όπου  $W$  είναι το κατακόρυφο φορτίο στο εφέδρανο FPS,  $D$  είναι η οριζόντια μετατόπιση,  $\dot{D}$  είναι η οριζόντια ταχύτητα,  $R$  είναι η ακτίνα καμπυλότητας της διεπιφάνειας ολίσθησης και  $\mu$  είναι ο συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας ολίσθησης. Ο πρώτος όρος είναι η δύναμη επαναφοράς λόγω της ανύψωσης της μάζας η οποία παρέχει μια οριζόντια ακαμψία:

$$K_H = \frac{W}{R} \quad (3-11)$$

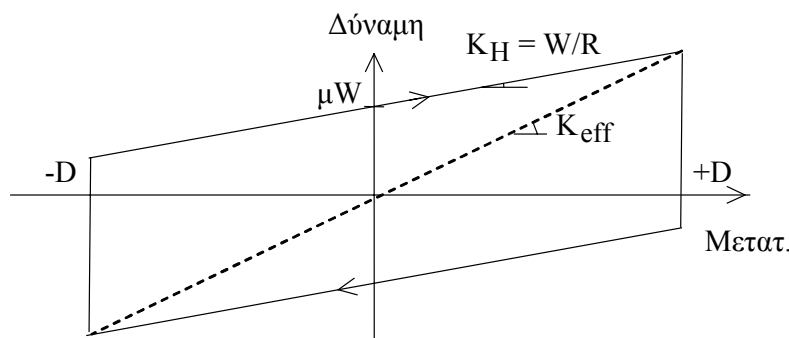
Η συμπεριφορά του συστήματος FPS μπορεί να προσομοιωθεί μέσω ενός διγραμμικού μοντέλου με μηδενική μετατόπιση διαρροής (Σχήμα 3-8). Η ενεργός ακαμψία  $K_{eff}$  ορίζεται ως η κλίση της ευθείας μεταξύ των κορυφών του βρόχου υστέρησης για τις ακραίες μετατοπίσεις και εξαρτάται από την μετατόπιση. Για δεδομένο εύρος ανακυκλικής μετατόπισης  $D$  η ενεργός ακαμψία δίνεται από την σχέση:

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (3-12)$$

η οποία αντιστοιχεί σε ιδιοπερίοδο της σεισμικής μόνωσης:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{eff}}} = 2\pi \sqrt{\frac{RD}{gD + \mu gR}} \quad (3-13)$$

Η ιδιοπερίοδος  $T$  είναι ανεξάρτητη της υποστηριζόμενης μάζας.



**Σχήμα 3-8 Προσομοίωση Υστερητικής Συμπεριφοράς Συστημάτων FPS μέσω Διγραμμικού Υστερητικού Μοντέλου**

Η επιφάνεια υστέρησης του διγραμμικού μοντέλου αντιπροσωπεύει την καταναλισκόμενη ενέργεια  $ED$  σε κάθε κύκλο φόρτισης και ισούται με :

$$ED = 4\mu WD \quad (3-14)$$

Η υστερητική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από την μετατόπιση. Για τον σκοπό της ανάλυσης πρέπει να μετατραπεί σε ισοδύναμο βαθμό απόσβεσης ενός καθαρού ιξώδους αποσβεστήρα όπου η δύναμη απόσβεσης είναι ανάλογη της ταχύτητας. Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης  $\beta$  ορίζεται ως ο βαθμός απόσβεσης ενός ιξώδους ελαστικού στοιχείου το οποίο κάτω από ανακυκλική μετατόπιση εύρους  $D$  καταναλώνει ίδια ποσότητα ενέργειας με αυτή που καταναλώνεται από τον υστερητικό βρόχο. Δίνεται από την σχέση :

$$\beta = \frac{ED}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{4\mu WD}{2\pi(W/R + \mu W/D)D^2} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu}{D/R + \mu} \quad (3-15)$$

Τόσο ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης  $\beta$  όσο και η ενεργός ακαμψία  $K_{eff}$  εξαρτώνται έντονα από το εύρος της ανακυκλικής παραμόρφωσης  $D$ . Ο ισοδύναμος βαθμός

απόσβεσης  $\beta$  δεν εξαρτάται από την υποστηριζόμενη μάζα. Ο ισοδύναμος βαθμός απόσβεσης μειώνεται από  $2/\pi$  για πολύ μικρές μετατοπίσεις σε 0 για πολύ μεγάλες μετατοπίσεις.

Ο συντελεστής τριβής  $\mu$  στην διεπιφάνεια Teflon-χάλυβα γενικά εξαρτάται από την ταχύτητα ολίσθησης και από την πίεση. Η επίδραση αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την μη-γραμμική ανάλυση της σεισμικά μονωμένης κατασκευής. Ο συντελεστής τριβής  $\mu$  μειώνεται όσο αυξάνει η πίεση και αυξάνει όσο αυξάνει η ταχύτητα ολίσθησης. Για αρκετά μεγάλη ταχύτητα ολίσθησης ο συντελεστής τριβής γίνεται πρακτικά ανεξάρτητος της ταχύτητας.

Ο συντελεστής τριβής  $\mu$  για μια δεδομένη πίεση μπορεί να προσομοιωθεί μέσω της παρακάτω εξίσωσης η οποία προτάθηκε από τον Constantinou, 1990.

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) \exp(-a|\dot{U}|)$$

Όπου  $f_{\max}$  είναι η μέγιστη τιμή του συντελεστή τριβής (για  $|\dot{U}|=\infty$ ) και  $f_{\min}$  είναι η ελάχιστη τιμή του συντελεστή τριβής (για  $|\dot{U}|=0$ ). Επιπλέον,  $a$  είναι συντελεστής ο οποίος ελέγχει την μεταβολή του συντελεστή τριβής με την ταχύτητα. Όταν  $f_{\max}=f_{\min}$  τότε το μοντέλο αυτό εκφυλίζεται στο μοντέλο τριβής του Coulomb.

Οι παράμετροι  $f_{\max}$ ,  $f_{\min}$ ,  $a$  εξαρτώνται από την πίεση στο εφεδρανο ολίσθησης. Ο Constantinou, 1990 και 1993 περιέγραψε την εξάρτηση των παραμέτρων αυτών από την πίεση. Γενικά την πιο σημαντική εξάρτηση εμφανίζει ο συντελεστής  $f_{\max}$ . Για την επίδραση αυτή προτάθηκε η ακόλουθη σχέση

$$f_{\max} = f_{\max,0} - (f_{\max,0} - f_{\max,p}) \tanh(\varepsilon p)$$

Όπου  $p$  είναι η πίεση,  $f_{\max,p}$  είναι ο μέγιστος συντελεστής τριβής για υψηλές πιέσεις,  $f_{\max,0}$  είναι ο μέγιστος συντελεστής τριβής για μηδενική πίεση και  $\varepsilon$  είναι ένας συντελεστής ο οποίος ελέγχει την μετάβαση του  $f_{\max}$  μεταξύ των πολύ χαμηλών και των πολύ υψηλών πιέσεων. Πειραματικά μετρημένες τιμές των παραπάνω παραμέτρων για την περίπτωση ενός εφεδράνου FPS είναι οι εξής:  $f_{\max,0}=0.12$ ,  $f_{\max,p}=0.05$ ,  $f_{\min}=0.04$ ,  $\varepsilon=0.012 \text{ MPa}^{-1}$ ,  $a=0.0429 \text{ sec/mm}$ .