

## ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΡΙΒΗΣ

### ΔΕΛΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

#### Περίληψη

*Η εργασία αυτή πραγματεύεται την ενίσχυση κτιρίων με αποσβεστήρες τριβής. Περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των αποσβεστήρων τριβής καθώς επίσης και τα διάφορα είδη τους. Αναφέρονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου ενίσχυσης, οι κανονισμοί που τον διέπουν και ο τρόπος με τον οποίο πρέπει να αναλύονται οι ενισχυμένες με αποσβεστήρες τριβής κατασκευές. Τέλος παρουσιάζεται μία πολύ ενδιαφέρουσα πρόταση ενίσχυσης δύο γειτονικών κτιρίων με αποσβεστήρες τριβής να τα ενώνουν δίνοντας πολύ καλά αποτελέσματα και μειώνοντας το κόστος κατά πολύ.*

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σεισμός είναι η μεγαλύτερη δοκιμασία για μια κατασκευή και αναδεικνύει τις αδυναμίες της. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού η σεισμική ενέργεια που εισάγεται στο κτίριο καταναλίσκεται από πλαστικές παραμορφώσεις, ρωγμές και εσωτερικές τριβές[12]. Με αυτό το σκεπτικό από τα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα άρχισαν να αναπτύσσονται μέθοδοι ενίσχυσης των κατασκευών με διάχυση της (σεισμικής) ενέργειας παθητικά, ενεργητικά ή και με συνδυασμό των δύο[10]. Στην ενεργητική διάχυση της ενέργειας χρησιμοποιείται εξωτερική ενέργεια και υπάρχει η παρέμβαση του ανθρώπου ή του υπολογιστή ενώ στην παθητική διάχυση της ενέργειας η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα ή μεταφέρεται σε άλλα ταλαντούμενα συστήματα χωρίς καμία εξωτερική παρέμβαση ή ενέργεια[15]. Τα συστήματα παθητικής διάχυσης ενέργειας εισάγουν στο σύστημα απόσβεση, δυσκαμψία και αντοχή[12]. Γενικότερα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτά που εξαρτώνται από τη μετατόπιση, σε αυτά που εξαρτώνται από την ταχύτητα και σε συνδυασμό των δύο. Οι τύποι των συσκευών που διαχέουν την ενέργεια στις κατασκευές και συναντώνται σήμερα είναι οι μεταλλικοί αποσβεστήρες διαρροής, οι αποσβεστήρες τριβής, οι ιξώδεις και ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες, οι αυτοεπανερχόμενοι (selfcentering) αποσβεστήρες, τα συστήματα συντονισμένης μάζας, οι μαγνητορολογικοί (magnetorheologic) και οι ηλεκτρορολογικοί (electrorheologic) αποσβεστήρες[1].

Οι αποσβεστήρες τριβής είναι από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστήματα παθητικής διάχυσης της ενέργειας καθώς καθιστούν προβλέψιμη την αναμενόμενη σεισμική βλάβη και παράλληλα εύκολα επισκευάσιμη [5]. Ωστόσο, η χρήση τους παραμένει περιορισμένη εξαιτίας της έλλειψης γνώσης από τους μηχανικούς ως προς την ανάλυση τέτοιων συστημάτων και εξαιτίας της έλλειψης κανονισμών για ενίσχυση με τέτοιους μηχανισμούς[15].

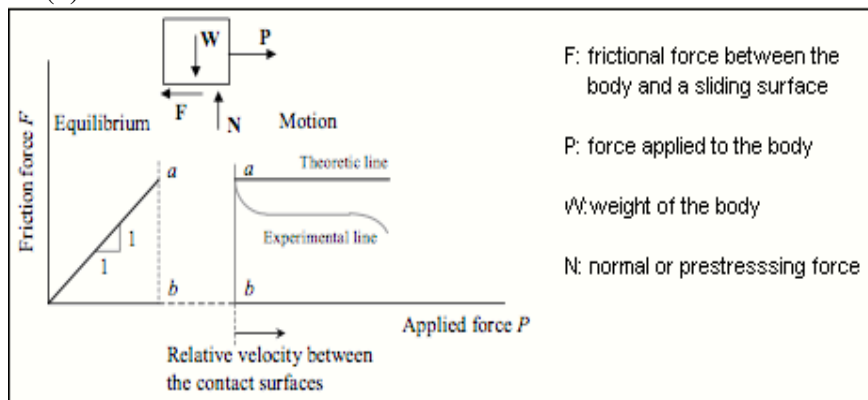
#### ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ ΤΡΙΒΗΣ

Ο μηχανισμός λειτουργίας των αποσβεστήρων τριβής βασίζεται στην ξηρά τριβή, δηλαδή στον νόμο του Coulomb για την ξηρά τριβή ο οποίος δίνεται στη σχέση 1, όπου  $F_{max}$  είναι η μέγιστη στατική τριβή,  $\mu$  ο συντελεστής τριβής και  $N$  η κάθετη στην διεπιφάνεια τριβής δύναμη. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1 από το σύστημα ασκείται μία στατική δύναμη τριβής έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία. Όταν αυτή η στατική τριβή φτάσει τη μέγιστη τιμή της έχουμε ολίσθηση και πλέον τριβή ολίσθησης. Η τριβή ολίσθησης μεταβάλλεται ελαφρώς με την ταχύτητα ολίσθησης αλλά χάριν απλότητας θεωρείται ότι μένει σταθερή. Ο συντελεστής τριβής  $\mu$  είναι ανεξάρτητος της θερμοκρασίας και εξαρτάται από τις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή γι αυτό και οι τελευταίες πρέπει να μένουν στεγνές κατά τη λειτουργία τους.

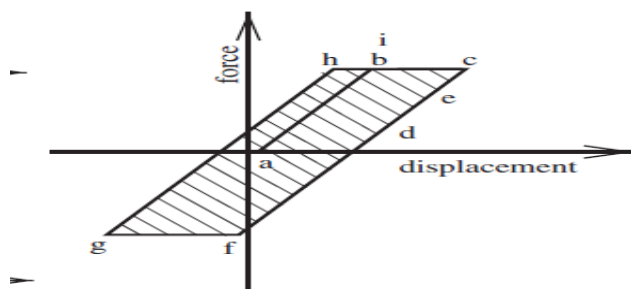
Στο σχήμα 2 φαίνεται και ο βρόγχος υστέρησης της ξηράς τριβής. Επιπρόσθετα, για να εξαλειφθούν φαινόμενα όπως η ανομοιόμορφη κατανομή δυνάμεων και η ανομοιομορφία των επιφανειών τριβής προτείνεται η σχέση 2 όπου  $\tau_i$  και  $\sigma$  είναι ομοιόμορφη διατμητική και ορθή τάση αντίστοιχα που επιβάλλονται στις επιφάνειες τριβής. Επίσης, η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της πραγματικής επιφάνειας τριβής και στη μελέτη των ανελαστικών παραμορφώσεων σε αυτές τις επιφάνειες.[12]

$$\mu = \frac{F_{max}}{N} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\tau_{max}}{\sigma} \quad (2)$$

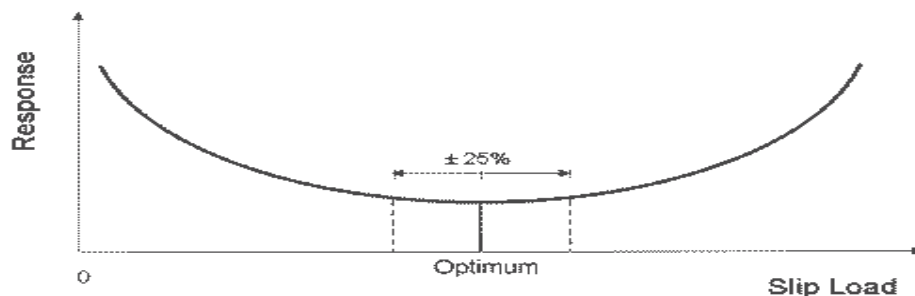


Σχήμα 1. Ξηρά τριβή



Σχήμα 2. Βρόγχος υστέρησης ξηράς τριβής [16]

Επίσης, οι αποσβεστήρες τριβής σχεδιάζονται έτσι ώστε να μην ολισθαίνουν υπό την επίδραση του ανέμου και να ολισθαίνουν υπό την επίδραση ενός έντονου σεισμού με τα μέλη τους να παραμένουν ελαστικά[12]. Το κάτω όριο του φορτίου για το οποίο ξεκινά η ολίσθηση είναι το 135% του φορτίου του ανέμου και το πάνω όριο είναι το 75% του φορτίου για το οποίο διαρρέουν τα μέλη της κατασκευής στα οποία μπαίνει ο αποσβεστήρας τριβής. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα απόκρισης-φορτίου ολίσθησης(Σχήμα 3) όταν το φορτίο ολίσθησης είναι μικρό ή μεγάλο η απόκριση είναι μεγάλη. Παραμετρικές μελέτες έχουν δείξει ότι η πιο σημαντική μεταβλητή για τη ρύθμιση της απόκρισης της ενισχυμένης με αποσβεστήρες τριβής κατασκευής είναι το φορτίο ολίσθησης. Κατάλληλη επιλογή του οδηγεί στη μικρότερη απόκριση. Ακόμη, μεταβολές  $\pm 25\%$  από το βέλτιστο φορτίο ολίσθησης έχουν αμελητέες επιπτώσεις στην απόκριση της κατασκευής(Σχήμα 3). Έτσι μικρές μεταβολές (8-10%)κατά τη διάρκεια της ζωής της κατασκευής δεν απαιτούν επιπλέον ρυθμίσεις ή αντικατάσταση του αποσβεστήρα [8].



Σχήμα 3. Απόκριση-Φορτίο ολίσθησης

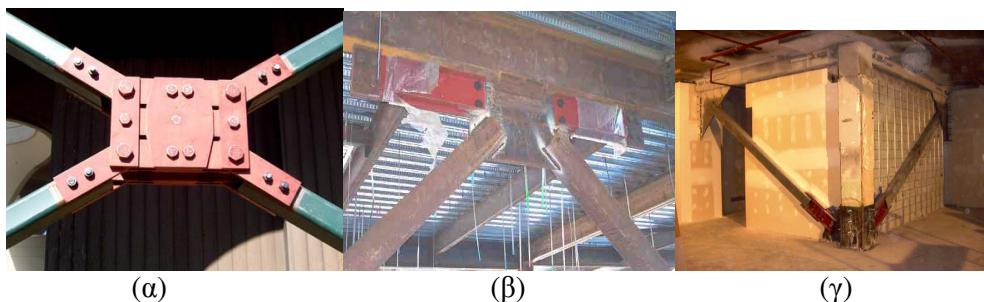
Ακόμη, η διαφοροποίηση της ανελαστικής συμπεριφοράς του αποσβεστήρα τριβής και οι διαφορετικές τιμές της απαιτούμενης τέμνουσας δύναμης από αυτόν μπορούν να επιτευχθούν με τη διαφορετική δύναμη περίσφιξης στους κοχλίες των συνδέσμων του. Η δύναμη προέντασης των κοχλιών ρυθμίζει και την ροπή έναρξης της περιστροφικής ολίσθησης στους αποσβεστήρες περιστροφικών συνδέσμων τριβής(Pall friction dampers)[3][5]. Τέλος, είναι σημαντικό να μειωθεί το φαινόμενο όπου έχουμε στατική τριβή έτσι ώστε να μην εισάγονται υψηλές συχνότητες στην κατασκευή[12].

#### ΕΙΔΗ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ ΤΡΙΒΗΣ

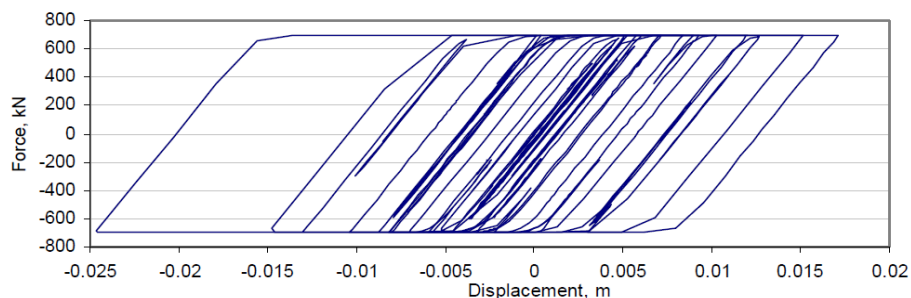
Οι αποσβεστήρες τριβής είναι συσκευές διάχυσης ενέργειας εξαρτώμενες από την μετατόπιση[1]. Τα διάφορα είδη αποσβεστήρων διαφέρουν στα υλικά των επιφανειών τριβής και στον τρόπο που την εφαρμόζουν. Υπάρχουν τα εξής είδη αποσβεστήρων τριβής:

##### Αποσβεστήρες περιστροφικών συνδέσμων τριβής(Pall friction dampers)

Είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι και συναντώνται ως μονά διαγώνια στοιχεία(Σχήμα 4γ), σε διατάξεις Χ(Σχήμα 4α) και σε διατάξεις Λ(Chevron)(Σχήμα 4β). Οι διατάξεις Χ αποτελούνται από διαγώνια στοιχεία τα οποία ενώνονται με οριζόντια και κάθετα στοιχεία τα οποία εξασφαλίζουν ότι όταν το εφελκόμενο διαγώνιο στοιχείο αρχίσει να ολισθαίνει τότε και το θλιβόμενο διαγώνιο στοιχείο θα ολισθήσει το ίδιο. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται τριβή και διαχέεται η σεισμική ενέργεια[12].Οι συνδέσεις αποτελούνται από δακτυλίους τριβής που κοχλιώνονται στους χαλύβδινους δίσκους και τους δακτυλίους διανομής, με υψηλής αντοχής κοχλίες. Η αντοχή των διατάξεων εξαρτάται από το υλικό, τις διαστάσεις των δακτυλίων τριβής και της πίεσης που εφαρμόζεται από τους κοχλίες[5]. Όταν δεν έχουμε διάταξη Χ η τριβή παράγεται από χαλύβδινες πλάκες οι οποίες ενώνονται με κοχλίες υψηλής αντοχής. Ακόμη, η συμπεριφορά αυτών των αποσβεστήρων θεωρείται ελαστοπλαστική όπως φαίνεται και από τον βρόγχο υστέρησης τους(Σχήμα 5). Επίσης, είναι σχεδιασμένοι να μην ολισθαίνουν σε μέτριους σεισμούς και σε μεγάλους σεισμούς να επιστρέφουν στην αρχική τους θέση. Τέλος, έχουν ελεγχθεί πειραματικά μέχρι και για σεισμό 0,9g[2].



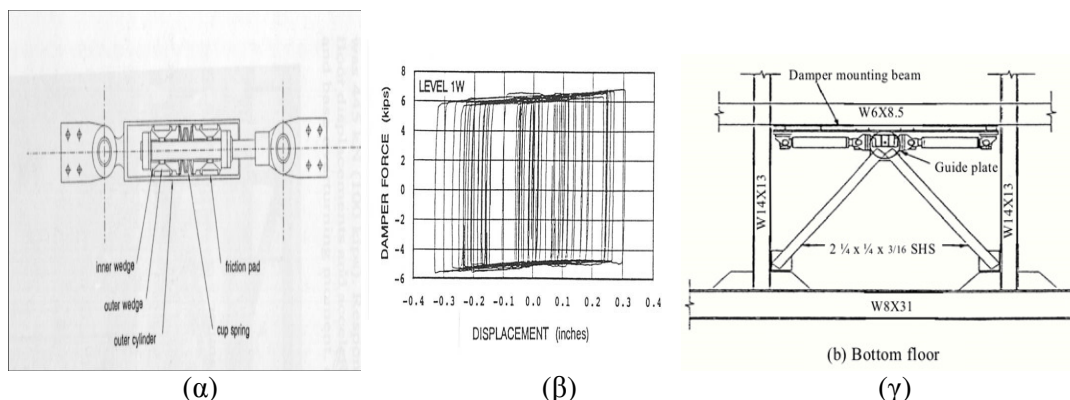
Σχήμα 4. Τύποι Αποσβεστήρες περιστροφικών συνδέσμων τριβής(Pall friction dampers)



**Σχήμα 5.** Βρόγχος υστέρησης αποσβεστήρα περιστροφικών συνδέσεων τριβής(Pall friction damper)

### Αποσβεστήρας τριβής Sumitomo

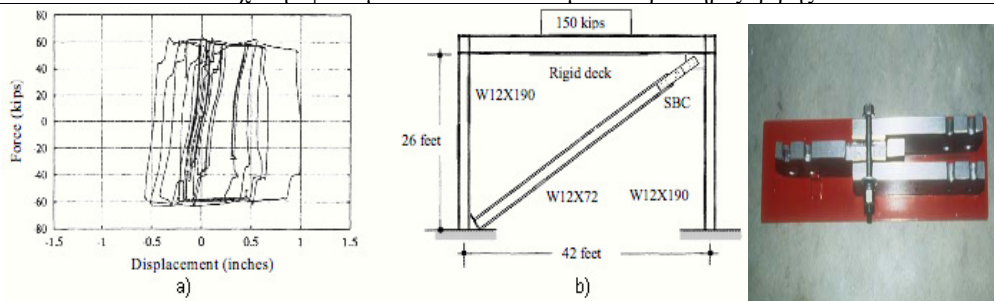
Οι αποσβεστήρες αυτοί σχεδιάστηκαν από την εταιρεία Sumitomo Metal Industries ,Ltd και χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στις ράγες των τρένων. Στις κατασκευές χρησιμοποιούνται για μικρούς και μέτριους σεισμούς και σε διατάξεις Chevron κάτω από τις δοκούς(Σχήμα 6γ). Η τριβή σε αυτές τις διατάξεις προκαλείται από την ολίσθηση μιας πλάκας από κράμα χαλκού, στην οποία παρεμβάλλονται κομμάτια γραφίτη, ενάντια στο εσωτερικό ενός κυλίνδρου. Σημειώνεται ότι ο βρόγχος υστέρησης του αποσβεστήρα τριβής Sumimoto μοιάζει στον νόμο του Coulomb για την τριβή(Σχήμα 6β)[12].



**Σχήμα 6.** α) αποσβεστήρα τριβής Sumimoto β) βρόγχος υστέρησης του αποσβεστήρα τριβής Sumimoto γ) εφαρμογή του [13]

### Αποσβεστήρας τριβής με προεντεταμένους κοχλίες σε επιμήκης οπές(Slotted bolted connections SBC)

Σε αυτή τη διάταξη η διάχυση της ενέργειας γίνεται μέσω της τριβής μεταξύ διεπιφανειών. Η διάταξη αποτελείται από μία χαλύβδινη εσωτερική πλάκα ανάμεσα σε δύο ορειχάλκινες και δύο εξωτερικές χαλύβδινες οι οποίες ενώνονται μέσω των διαμήκων οπών με προεντεταμένους κοχλίες. Ακόμη, η ολίσθηση μεταξύ των διεπιφανειών γίνεται και ως προς τις δύο κατευθύνσεις της διεύθυνσης του αξονικού φορτίου[12]. Παρακάτω δίνεται και ο βρόγχος υστέρησης του αποσβεστήρα με προεντεταμένους κοχλίες σε επιμήκης οπές(Slotted bolted connections SBC)(Σχήμα 7α)

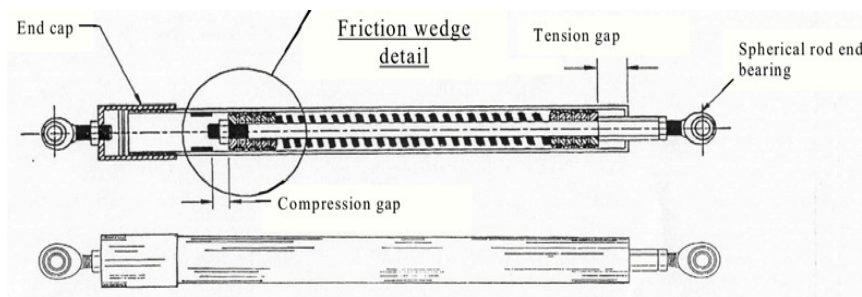


(α) (β) (γ)

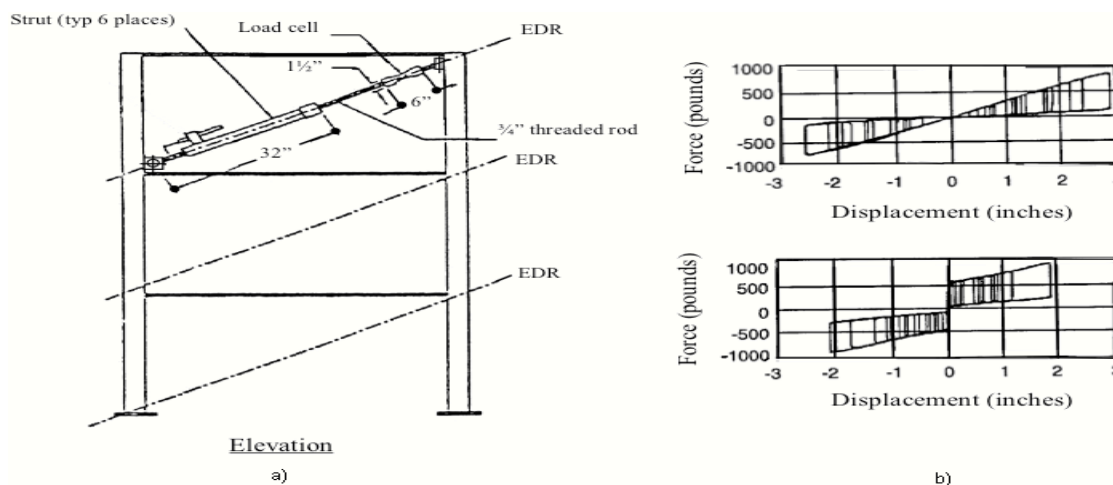
Σχήμα 7. α) βρόγχος υστέρησης αποσβεστήρα με προεντεταμένους κοχλίες σε επιμήκης οπές (Slotted bottled connections SBC) β) εφαρμογή του[14] γ) ο αποσβεστήρας

**Αποσβεστήρας τριβής με διάχυση της ενέργειας συγκράτησης(Energy dissipating restraint(EDR))**

Αυτός ο τύπος αποσβεστήρα αρχικά σχεδιάστηκε για την υποστήριξη σωλήνων σε πυρηνικά εργοστάσια. Με αυτόν τον μηχανισμό υπάρχει ολίσθηση με στάση στο τέλος. Αποτελείται από χαλύβδινες σφήνες που ολισθαίνουν σε έναν κύλινδρο με δυνατότητα επαναφοράς στην αρχική θέση. Ο αποσβεστήρας αυτός εισάγει στην κατασκευή γραμμική δυσκαμψία και τριβή ανάλογη της μετατόπισης. Τέλος, ο βρόγχος υστέρησης παρουσιάζει ποικιλία (Σχήμα9β)[12][14].



Σχήμα 8. Αποσβεστήρας τριβής με διάχυση της ενέργειας συγκράτησης (Energy dissipating restraint (EDR))

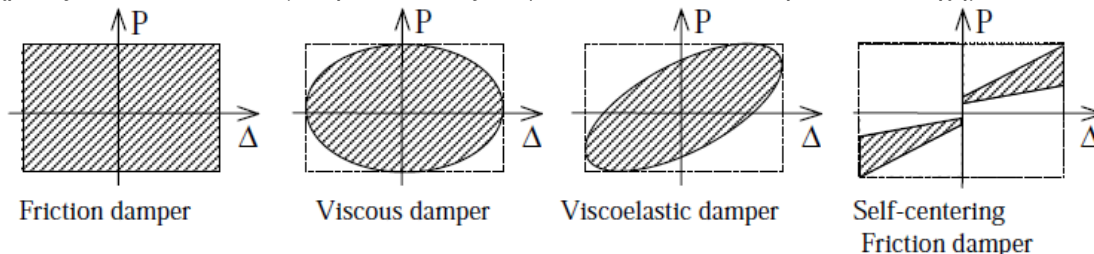


Σχήμα 9. Εφαρμογή του αποσβεστήρα β) βρόγχος υστέρησης του



## ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΡΙΒΗΣ

- Έχουν ορθογώνιο βρόγχο υστέρησης με αποτέλεσμα να διαχέουν περισσότερη ενέργεια για δεδομένη δύναμη σε σύγκριση με τα άλλα είδη αποσβεστήρων άρα χρειάζονται και λιγότεροι όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα[2]



- Εξοικονομούν χρόνο και χρήμα καθώς δεν απαιτούν κατεδαφίσεις, αντικαταστάσεις μελών της κατασκευής και ενίσχυση της θεμελίωσης[2].
- Μπορούν να κρυφτούν μέσα σε τοίχους, δεν παρεμβαίνουν στην αρχιτεκτονική του κτιρίου και αυτό τους κάνει να είναι η ιδανική λύση σε ιστορικά κτίρια[2].
- Καθώς δεν λειτουργούν για μικρά φορτία όπως του ανέμου δεν έχουν πρόβλημα σε κόπωση άρα δεν χρειάζονται αντικατάσταση και η συντήρησή τους είναι μηδαμινή[2]
- Το ότι λειτουργούν υπό συγκεκριμένο φορτίο κάνει τη σχεδίαση των μελών και των συνδέσεων τους εύκολη και οικονομική[2]
- Μετά από σεισμό δεν χρειάζονται αντικατάσταση[2]
- Προσφέρουν αυτονόμηση της στατικής συμπεριφοράς κάθε ορόφου, καλύτερα αποτελέσματα από άλλες μεθόδους όπως η κατακόρυφη διάταξη αντισεισμικών τοιχωμάτων και δεν χρειάζεται να είναι συνεχείς καθ' ύψος[5].

## ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ-ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Οι κανονισμοί που υπάρχουν σχετικά με την ενίσχυση με αποσβεστήρες τριβής είναι οι αμερικάνικοι FEMA 356. 2000.(also ASCE 41-06) Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, ο οποίος είναι σε συνεργασία της FEMA(Federal Emergency Management Agency) και της ASCE(American Society of Civil Engineer), FEMA 172. 1992. NEHRP handbook for seismic rehabilitation of existing buildings και ANSI/AISC 341-05. 2005. Seismic provisions for structural steel buildings, including supplement No.1.. Ακόμη υπάρχει και ο ευρωπαϊκός κανονισμός CEN 2005e. prEN 15129 ο οποίος αναφέρεται στις αντισεισμικές συσκευές[1].

Σύμφωνα με τους παραπάνω κανονισμούς επιτρέπονται γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις αναλύσεις είτε στατικές είτε δυναμικές αρκεί να πληρούνται οι απαιτούμενες προϋποθέσεις για την κάθε περίπτωση. Οι προϋποθέσεις αυτές ,οι οποίες αναφέρονται αναλυτικά στον FEMA 356. 2000.(also ASCE 41-06) Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, έχουν να κάνουν κυρίως με το ποσοστό απόσβεσης της κατασκευής με τους αποσβεστήρες και με το αν το πλαίσιο στο οποίο έχει μπει ο αποσβεστήρας τριβής λειτουργεί ελαστικά μετά την εισαγωγή του τελευταίου[1].Οι αναλύσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για τις μέχρι τώρα ενισχύσεις με αποσβεστήρες τριβής είναι μη γραμμική στατική ανάλυση(pushover) και μη γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας(time history) η οποία είναι και η πιο κατάλληλη και αξιόπιστη εξαιτίας της μη γραμμικότητας που εισάγουν οι αποσβεστήρες τριβής στο σύστημα.[1][2][3][4][5][6][7][8][9][10][11].

Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν την τοποθέτησή τους όλοι οι αποσβεστήρες τριβής ελέγχονται ως προς το φορτίο ολίσθησης τους και ότι μετά την τοποθέτησή τους για σεισμό

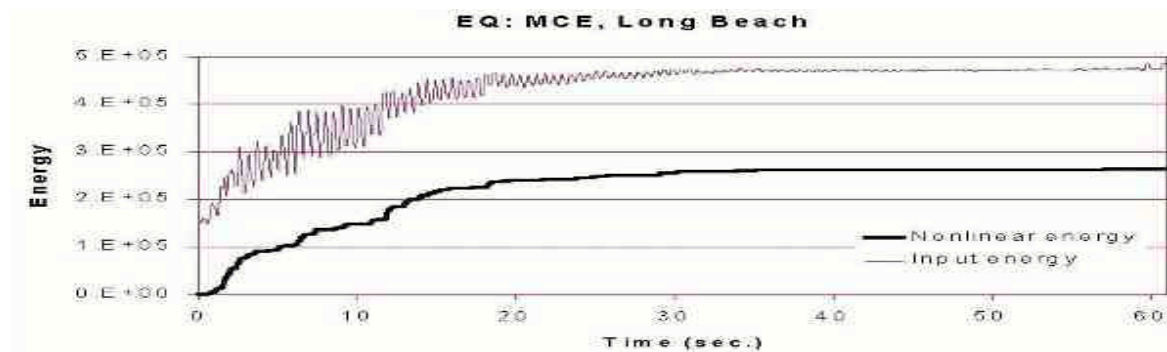
με πιθανότητα εμφάνισης 10% στα 50 χρόνια τα μέλη της κατασκευής δεν πρέπει να ξεπερνούν την αντοχή τους και η σχετική στροφή πρέπει να είναι σε επιτρεπτά όρια. Ακόμη για σεισμό με πιθανότητα εμφάνισης 2% στα 50 χρόνια οι αποσβεστήρες πρέπει να φτάνουν τη μέγιστη μετατόπιση τους καθώς επίσης οι τελευταίοι πρέπει να σχεδιάζονται για το 130% της παραπάνω μετατόπισης με προϋπόθεση την ύπαρξη τουλάχιστον τεσσάρων σε κάθε όροφο.[1][2].

### ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΚΤΙΡΙΑ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΡΙΒΗΣ

Το εργοστάσιο πολιτικών αεροπλάνων Boeing στο Everett (The Boeing Commercial Airplane Factory at Everett) (Σχήμα 10α) είναι το μεγαλύτερο σε όγκο κτίριο στον κόσμο και με επιφάνεια κάτοψης πάνω από 396592,28 m<sup>2</sup> θα μπορούσε να στεγάσει ακόμα και τη Disneyland καθώς είναι ένα σύμπλεγμα 6 κτιρίων. Το 1996 αποφασίστηκε η ενίσχυση του καθώς είχαν αλλάξει οι διατάξεις έναντι σεισμού από όταν κατασκευάστηκε και εντοπίστηκαν φαινόμενα μαλακού ορόφου από το 2<sup>ο</sup> επίπεδο και κάτω. Εφόσον λήφθηκαν υπόψη όλοι οι πιθανοί τρόποι ενίσχυσης επιλέχθηκε η ενίσχυση με 537 αποσβεστήρες τριβής αντοχής μεταξύ 333,75 KN και 890 KN εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο και 30 εκατομμύρια δολάρια καθώς με αυτόν τον τρόπο ενίσχυσης δεν χρειάστηκε να αντικατασταθούν πολλά μεταλλικά υποστυλώματα και δοκοί και δεν χρειάστηκε ενίσχυση της θεμελίωσης. Οι αποσβεστήρες μπήκαν μεταξύ 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> ορόφου μειώνοντας σημαντικά την τέμνουσα βάση, μειώνοντας τη σχετική μετατόπιση στο 0,67% για σεισμό με πιθανότητα εμφάνισης 2% στα 50 χρόνια και απορροφώντας το 60% της εισαγόμενης από τον σεισμό ενέργειας όπως φαίνεται στο σχήμα 11[8][9].



Σχήμα 10.α) The Boeing Commercial Airplane Factory at Everett και μονό διαγώνιο στοιχείο τύπου Pall β) αποσβεστήρας τύπου Pall μορφής X που χρησιμοποιήθηκε



Σχήμα 11. Ενέργεια εισαγόμενη από τον σεισμό και ενέργεια που διασκεδάζεται από τους αποσβεστήρες

Το κτίριο Eaton(Σχήμα12α) είναι ένα κτίριο 9 ορόφων στην καρδιά του εμπορικού κέντρου του Μόντρεαλ με επιφάνεια κάλυψης 92900m<sup>2</sup>. Το 2000 αποφασίστηκε από τους ιδιοκτήτες του η ενίσχυση του έναντι σεισμού έτσι ώστε να προσαρμοστεί στις νέες διατάξεις και επειδή είχαν αποφασιστεί κάποιες αρχιτεκτονικές αλλαγές όπως η δημιουργία ενός αιθρίου. Έγινε μελέτη της ενίσχυσης με μεταλλικούς δικτυωτούς συνδέσμους και με αποσβεστήρες τριβής. Τελικά αποφασίστηκε η ενίσχυση με 161 αποσβεστήρες τριβής καθώς αυτός ο τρόπος παρεμβαίνει λιγότερο στην αρχιτεκτονική του κτιρίου και εξοικονόμησε χρόνο και το 50% του κόστους με άλλους τρόπους ενίσχυσης αφού δεν απαιτεί ενίσχυση της θεμελίωσης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 14 με τους αποσβεστήρες τριβής ο σεισμός εισάγει στο κτίριο το 50% της ενέργειας από ότι όταν έχουμε τα μεταλλικούς δικτυωτούς συνδέσμους. Ακόμη, οι αποσβεστήρες διασκεδάζουν το 50% της παραπάνω ενέργειας. Επομένως, στο κτίριο μένει το 25% της ενέργειας που θα έμενε αν είχαμε τα μεταλλικούς δικτυωτούς συνδέσμους. Η σχετική μετακίνηση των ορόφων είναι μικρότερη του 1% για ενίσχυση με αποσβεστήρες και η συνολική μετακίνηση είναι το 54% αυτής με τους μεταλλικούς δικτυωτούς συνδέσμους(Σχήμα 15). Επίσης τα αξονικά φορτία στα υποστυλώματα, όταν έχουμε αποσβεστήρες τριβής, είναι το 50% των αντίστοιχων όταν έχουμε μεταλλικούς δικτυωτούς συνδέσμους (Σχήμα 16) και η τέμνουσα βάσης μειώνεται από 47000KN και 27000KN (όταν έχουμε μεταλλικούς δικτυωτούς συνδέσμους) στην x και y διεύθυνση σε 16000KN και 13000KN(όταν έχουμε αποσβεστήρες τριβής)[8][10].

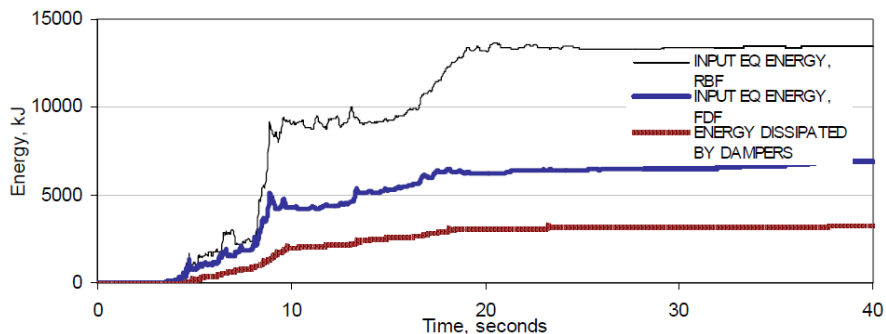


(α) (β)  
**Σχήμα 12.** α) Eaton building β) όψη από το αίθριο κατά την κατασκευή

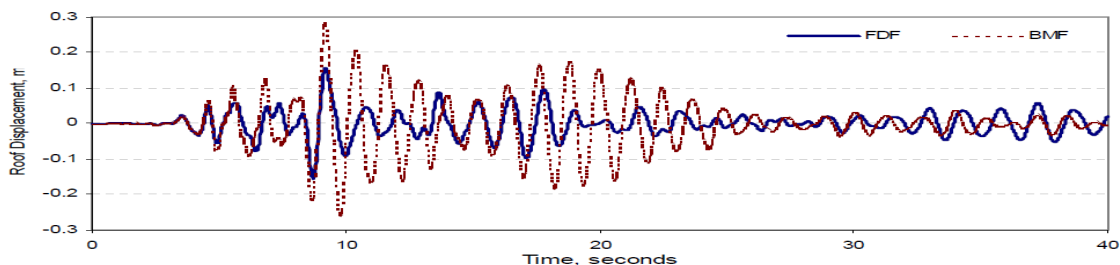


α) β)  
**Σχήμα 13.** α) μονά διαγώνια στοιχεία απόσβεσης β) αποσβεστήρας σε διάταξη Λ(τύπου Chevron)

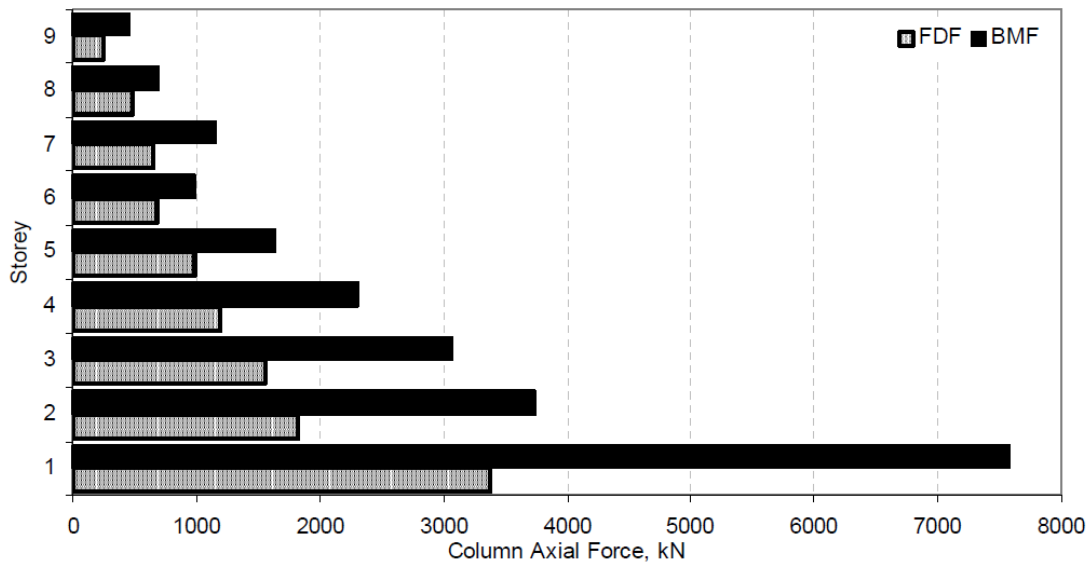




Σχήμα 14. Εισαγόμενες ενέργειες στο κτίριο και ενέργεια που διασκεδάζεται



Σχήμα 15. Χρονοϊστορία μετατοπίσεων οροφής



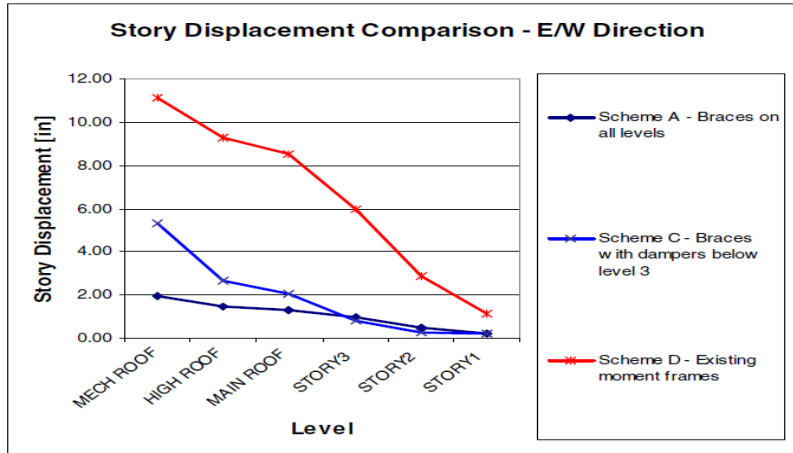
Σχήμα 16. Αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα

Το 2002 αποφασίστηκε η ενίσχυση του Monterey County Government Center (Σχήμα 17α) το οποίο είναι ένα τριώροφο μεταλλικό κτίριο εκτάσεως 9197,1 m<sup>2</sup>. Μια τέτοια επέμβαση θα έπρεπε να είναι πολύ προσεκτική καθώς το κτίριο βρίσκεται πολύ κοντά στο ρήγμα του San Andreas. Τα αρχικά σχέδια ήταν για ενίσχυση με δικτυωτούς μεταλλικούς συνδέσμους σε όλους τους ορόφους αλλά αυτό δεν ήταν εφικτό γιατί θα διακόπτονταν οι δικαστικές λειτουργίες που γίνονταν στον 3<sup>ο</sup> όροφο. Έτσι αποφασίστηκε να το τοποθετηθούν 24 αποσβεστήρες αντοχής 1112,5kN στο επίπεδο του εδάφους και 24 αποσβεστήρες αντοχής 890kN στον 2<sup>ο</sup> όροφο εξοικονομώντας χρόνο και χρήματα και πετυχαίνοντας μείωση των μετατοπίσεων των ορόφων κατά 50% (Σχήμα 18) και των τεμνουσών δυνάμεων σε κάθε όροφο κατά 20 με 30% (Σχήμα 19) από ότι αν είχε γίνει ενίσχυση με μεταλλικούς

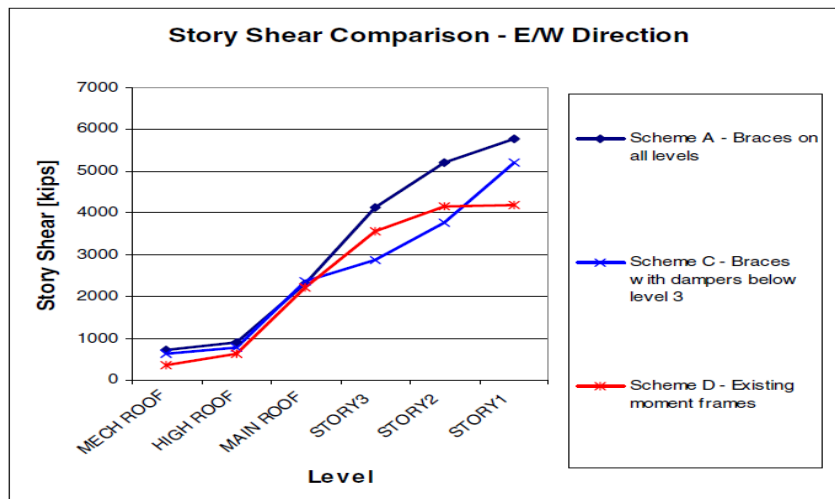
δικτυωτούς συνδέσμους. Επιπλέον, στα σχήματα 18 και 19 γίνεται σύγκριση της κατασκευής χωρίς ενίσχυση, με μεταλλικούς δικτυωτούς συνδέσμους και με αποσβεστήρες τριβής.[11]



Σχήμα 17 α) Monterey County Government Center β) διαγώνιος αποσβεστήρας τριβής



Σχήμα 18. Μετατοπίσεις σε κάθε όροφο

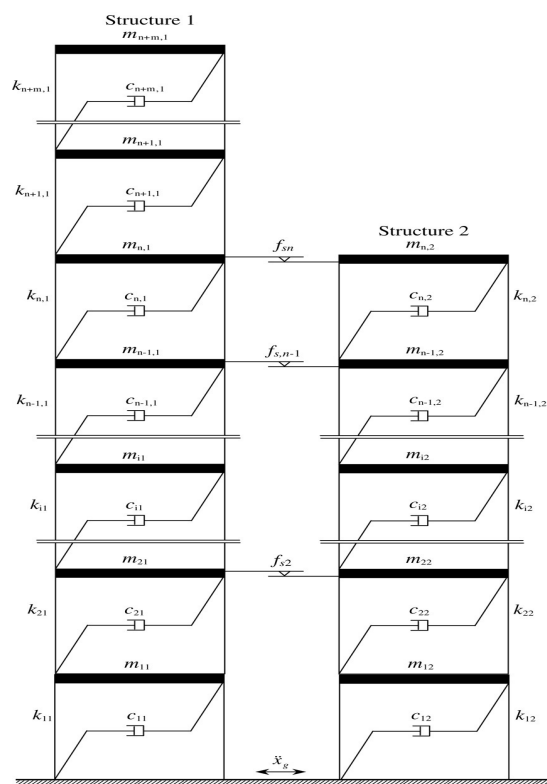


Σχήμα 19. Τέμνουσες σε κάθε όροφο

Υπάρχουν και πολλές άλλες σημαντικές κατασκευές όπου έχει χρησιμοποιηθεί η ενίσχυση με αποσβεστήρες τριβής όπως τα Concordia University Library Building, St.Vincent Hospital, Saint Joseph Hospital, MUCTC Building, Palais Des Congres και άλλα που δεν παρουσιάστηκαν αναλυτικά[8].

### ΜΙΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΥΣΑ ΠΡΟΤΑΣΗ

Το 2005 έγινε μία πολύ ενδιαφέρουσα μελέτη από τους A.V. Bhaskararao, R.S. Jangid. Μελετήθηκε η συμπεριφορά δύο κτιρίων με διαφορετικό αριθμό ορόφων(Σχήμα 20) τα οποία ενισχύονται με σύνδεση τους με αποσβεστήρες τριβής. Στη μελέτη αυτή τα κτίρια θεωρήθηκαν ως συστήματα ενός βαθμού ελευθερίας αλλά και πολλών και δόθηκε η αναλυτική λύση, η λύση όπου θεωρεί τον αποσβεστήρα ως ένα φανταστικό ελατήριο με άπειρη δυσκαμψία όταν δεν ολισθαίνει και μηδενική όταν ολισθαίνει και η λύση όπου ο αποσβεστήρας θεωρείται ως ένα μοντέλο υστέρησης, σύμφωνα με τον Κωνσταντίνου, το οποίο περιγράφεται από την εξίσωση του Wenn. Η μελέτη αυτή κατέληξε στα εξής συμπεράσματα: 1) Η απόκριση των κατασκευών με την αναλυτική λύση σχεδόν ταυτίζεται με αυτή όταν θεωρούνται τα παραπάνω μοντέλα. 2) Η σύνδεση των κατασκευών με αποσβεστήρες τριβής όχι απαραίτητα σε όλους τους ορόφους αλλά στους κατάλληλους (στην συγκεκριμένη περίπτωση 6<sup>ος</sup>, 7<sup>ος</sup>, 8<sup>ος</sup>, 9<sup>ος</sup> και 10ος όροφος) μειώνει πολύ την απόκριση τους. 3) Υπάρχει βέλτιστο φορτίο ολίσθησης για τα δυο κτίρια που μειώνει στο μέγιστο την απόκριση. 4) Οι όροφοι με τη μέγιστη σχετική μετατόπιση είναι οι καταλληλότερες θέσεις των αποσβεστήρων. 5) Η αναλυτική λύση απαιτεί πολύ λιγότερο χρόνο από τη χρήση των μοντέλων. Πολλά από αυτά τα συμπεράσματα φαίνονται και στον πίνακα 1[17].



Σχήμα 20. Κτίρια συνδεδεμένα με αποσβεστήρες τριβής

Table 3  
Peak responses of two MDOF structures connected with friction dampers

Earthquake	Structure	Top floor displacement (cm)			Top floor acceleration (g)			Normalized base shear		
		Case (i)	Case (ii)	Case (iii)	Case (i)	Case (ii)	Case (iii)	Case (i)	Case (ii)	Case (iii)
Kobe, 1995	1	42.42	30.30 (28.57)	30.32 (28.52)	1.31	1.30 (0.76)	1.31 (0.0)	0.33	0.32 (3.03)	0.28 (15.15)
	2	49.36	29.48 (40.28)	32.56 (34.04)	2.70	1.67 (38.15)	1.89 (30.00)	1.58	0.92 (41.77)	1.02 (35.44)
Northridge, 1994	1	89.61	72.35 (19.26)	77.28 (13.76)	1.52	1.48 (2.63)	1.52 (0.0)	0.69	0.59 (14.49)	0.63 (8.70)
	2	25.88	21.47 (17.04)	21.35 (17.50)	1.89	1.57 (16.93)	1.61 (14.81)	1.11	0.83 (25.23)	0.88 (20.72)
Loma Prieta, 1989	1	98.95	60.82 (38.53)	63.94 (35.38)	2.11	1.34 (36.49)	1.54 (27.01)	0.85	0.69 (18.82)	0.70 (17.65)
	2	36.99	25.02 (32.36)	26.68 (27.87)	2.64	1.56 (40.91)	1.65 (37.50)	1.08	0.84 (22.22)	0.91 (15.74)

Quantity within the parenthesis denotes the percentage reduction.

Case (i) : Unconnected.

Case (ii) : Connected at all floors.

Case (iii) : Connected at 6, 7, 8, 9 and 10th floors.

### Πίνακας 1

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση αποσβεστήρων τριβής είναι μία σχετικά καινούρια μέθοδος ενίσχυσης έναντι σεισμού και βασίζεται στην παθητική διάχυση της σεισμικής ενέργειας (περίπου 60%). Έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως το ότι είναι οικονομικός και αρχιτεκτονικά αρεστός τρόπος ενίσχυσης. Έχει χρησιμοποιηθεί στην ενίσχυση πολλών και μεγάλων κτιρίων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση δύο γειτονικών κτιρίων μειώνοντας έτσι το ήδη χαμηλό του κόστος στο 50%. Για να αξιοποιηθούν λοιπόν τα πλεονεκτήματα αυτά κρίνεται αναγκαία η δημιουργία των κατάλληλων κανονισμών και η κατάλληλη εκπαίδευση των μηχανικών και των τεχνικών συνεργείων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] PROHITECH – WP12: DEVELOPMENT OF DESIGN GUIDELINES – D15
- [2] Serge VEZINA1, R. Tina PALL 21, SEISMIC RETROFIT OF MUCTC BUILDING USING FRICTION DAMPERS, PALAIS DES CONGRES, MONTREAL, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 1946
- [3] Πανίκος Παπαδόπουλος, Ευθυμία Μητσοπούλου, Πρόταση προμελέτης με βάση τις οριακές μετακινήσεις πλαισίων φορέων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με ειδικά μεταλλικά αντισεισμικά στοιχεία, 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 1902
- [4] Πανίκος Παπαδόπουλος Ενίσχυση κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος με ειδικά μεταλλικά αντισεισμικά στοιχεία, τοποθετημένα με παρεμβολή ειδικού συνθετικού υλικού, 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 1936
- [5] Πανίκος Παπαδόπουλος, Φώτιος Γραβαλάς . Ελαχιστοποίηση των στροφών των πολυώροφων ασύμμετρων κτιρίων από Ο/Σ με την τοποθέτηση ειδικών μεταλλικών αντισεισμικών στοιχείων, 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 1901
- [6] Dihong Shao, P.E., S.E. Avtar Pall, PH.D. P.E. Bharat Soli, P.E., S.E, FRICTION DAMPERS FOR SEISMIC UPGRADE OF A 14-STORY PATIENT TOWER WITH A 36-FOOT TALL SOFT-STORY
- [7] A. MALHOTRA, D. CARSON, P. GOPAL, A. BRAIMAH, G. Di GIOVANNI, and R. PALL, FRICTION DAMPERS FOR SEISMIC UPGRADE OF ST. VINCENT HOSPITAL, OTTAWA
- [8] <http://www.palldynamics.com/FrictionDampers.htm>
- [9] Charlie VAIL, Jeff HUBBELL, Brian O'CONNOR, John KING, Avtar PALL, SEISMIC UPGRADE OF THE BOEING COMMERCIAL AIRPLANE



FACTORY AT EVERETT, WA, USA, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 3207

[10] C. Pasquin, N. Leboeuf, A. T. Pall

A Pasquin St-Jean & Associates Inc., 41, St-Jacques, Montreal, QC, Canada

B Pall Dynamics Limited, 100 Montevista, D.D.O., Montreal, QC., H9B 2Z9, Canada.

FRICION DAMPERS FOR SEISMIC REHABILITATION OF

EATON BUILDING, MONTREAL, 4th Structural Specialty Conference

of the Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, Canada

5-8 juin 2002 / June 5-8, 2002

[11] Carlos Y.L. Chang, S.E., Avtar Pall, Ph.D., P.Eng., and Jason J.C. Louie, S.E.12, THE USE OF FRICTION DAMPERS FOR SEISMIC RETROFIT OF THE MONTEREY COUNTY GOVERNMENT CENTER

[12] G.W.Housner Member, ASCE, L.A. Bergaman, Member, ASCE, T.K. Caughey A.G. Chassiakos, Member, ASCE, R.O. Claus, S.F. Marsi, Member, ASCE, R.E. Skelton, Member, ASCE, T.T. Soong, Member, ASCE, B.F. Spenser, Member, ASCE and J.T.P. Yao, Member, ASCE, "Structural Control: Past, Present and future", Journal of Engineering of Mechanics, September 1997

[13] Ian Aiken, Ph.D., P.E. SIE inc. Energy Dissipation Devices, April 17, 2006

[14] Αβραμοπούλου Ιωάννα, Χαραλάμπους Ελένη, "Ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών με αποσβεστήρα τριβής"

[15] JRyan, Development of ABAQUS Model for Dynamic Loading

[16] F. Al-Bender, V. Lampaert and J. Swevers, A novel generic model at asperity level for dry friction force dynamics, Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Celestijnenlaan 300B, 3001 Heverlee, Belgium, Tribology Letters, Vol. 16, No. 1, January 2004 (# 2004)

[17] A. V. Bhaskararao, R. S. Jangid, Seismic analysis of structures connected with friction dampers, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai, 400 076, India Received 31 January 2005; received in revised form 22 September 2005; accepted 23 September 2005 Available online 5 December 2005

