

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ
ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Φοιτητής: Γρηγόρης Σεβαστός


**Επιβλέπων: Δ. Σοφιανόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής**

Βόλος, Οκτώβριος 2009



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7637/1
Ημερ. Εισ.: 03-11-2009
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2009
ΣΕΒ



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ
ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Φοιτητής: Γρηγόρης Σεβαστός

**Επιβλέπων: Δ. Σοφιανόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής**

Βόλος, Οκτώβριος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Γενικές Παρατηρήσεις	1
1.2	Βασικές Αρχές	4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1.	Γενικά	11
2.2.	Συσκευές υστέρησης	13
2.2.1.	Μεταλλικοί αποσβεστήρες	14
2.2.2.	Αποσβεστήρες τριβής	23
2.2.3.	Ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες	42
2.2.4.	Αποσβεστήρες μάζας	57
2.2.5	Συντονισμένοι αποσβεστήρες υγρού	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - ΗΜΙ – ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1	Γενικά	70
3.2	Ημι – ενεργητικοί αποσβεστήρες μάζας	72
3.3	Ημι – ενεργητικοί αποσβεστήρες ρευστού	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΛΕΙΟΛΟΓΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96
----	--------------	----

ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στον έλεγχο της απόκρισης των κατασκευών μέσω της βελτίωσης της ικανότητάς τους να αποσβένουν - απορροφούν τη δυναμική ενέργεια. Αυτή η βελτίωση επιτυγχάνεται με τη χρήση των συστημάτων ελέγχου, των οποίων σκοπός είναι να απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας από τη δυναμική φόρτιση που δέχεται η κατασκευή. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί, αρχικά, στην συνοπτική παρουσίαση των σπουδαιότερων συσκευών απορρόφησης ενέργειας δομοστατικών κατασκευών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αναλυτικά παθητικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας, τα οποία περιλαμβάνουν μεταλλικούς αποσβεστήρες, αποσβεστήρες τριβής, ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες, αποσβεστήρες μάζας και συντονισμένους αποσβεστήρες υγρού. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ημι-ενεργητικά και ενεργητικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας, τα οποία περιλαμβάνουν ημι-ενεργητικούς αποσβεστήρες μάζας και ημι-ενεργητικούς αποσβεστήρες υγρού. Ουσιαστικά, γίνεται μία προσπάθεια κατανόησης των βασικών αρχών λειτουργίας του εκάστοτε συστήματος, καθώς και μία αναφορά στην ιστορική του εξέλιξη από διάφορους μελετητές. Τέλος, γίνεται μία αξιολόγηση των συσκευών απορρόφησης ενέργειας και προβολή των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε συσκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικές Παρατηρήσεις

Πέραν πάσης αμφιβολίας, οι σεισμοί αποτελούν ένα από τα πλέον απρόβλεπτα και συγχρόνως καταστρεπτικά φυσικά φαινόμενα, καθώς μπορούν να απειλούν ανθρώπινες ζωές, να καταστρέφουν ιδιοκτησίες και να αποδιοργανώνουν μια ολόκληρη κοινωνία. Συνεπώς, το ανθρώπινο ενδιαφέρον επικεντρώθηκε, αρχικά, στη κατανόηση της συμπεριφοράς των κατασκευών υπό την δράση σεισμικών φορτίων και στη συνέχεια οι έρευνες στράφηκαν στην ανάπτυξη μεθόδων και συστημάτων για την κατασκευή ασφαλέστερων και ανθεκτικότερων δομημάτων.

Ιστορικά, ο αντισεισμικός σχεδιασμός έχει βασιστεί σε ένα συνδυασμό αντοχής και πλαστιμότητας - ολκιμότητας. Για μικρές, συχνές σεισμικές διαταραχές, η κατασκευή αναμένεται να παραμείνει στην ελαστική περιοχή, με όλες τις αναπτυσσόμενες τάσεις να απέχουν αρκετά από το αντίστοιχο όριο διαρροής. Εντούτοις, δεν είναι λογικό να αναμένει κανείς ότι μια παραδοσιακή κατασκευή θα συμπεριφερθεί ελαστικά σε περίπτωση ισχυρού σεισμού. Αντίθετα ο μελετητής μηχανικός που «σχεδιάζει» την κατασκευή, επαφίεται στο γεγονός της έμφυτης ολκιμότητας – πλαστιμότητας αυτής για την αποφυγή καταστροφικής αστοχίας, ενώ κάνει ως ένα σημείο αποδεκτές κάποιες δομικές ή μη ζημιές. Αυτή η φιλοσοφία έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη αντισεισμικών κωδικών σχεδιασμού, που προκρίνουν τη χρήση μεθόδων πλευρικών δυνάμεων, και πιο πρόσφατα τον ανελαστικό σχεδιασμό φασμάτων απόκρισης. Τελικά, με αυτές τις προσεγγίσεις, η κατασκευή σχεδιάζεται με σκοπό να αντέχει ισοδύναμο στατικό φορτίο με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ακόμα και ένας προσεγγιστικός υπολογισμός των πλευρικών επιδράσεων, σίγουρα, θα βελτιώσει την βιωσιμότητα της κατασκευής.

Σχετικά πρόσφατα, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης προηγμένων υπολογιστικών μεθόδων (που κατά βάση οφείλεται στην αλματώδη πρόοδο της επιστήμης των Η/Υ), οι κατασκευές άρχισαν να γίνονται ελαφρύτερες, πιο εύκαμπτες και αρχιτεκτονικά τολμηρότερες, σε συνδυασμό φυσικά με την εξέλιξη επαναστατικά νέων τεχνικών ανέγερσης αλλά και παραγωγής – εφαρμογής υλικών με αυξημένη ποιότητα συμπεριφοράς, αντοχής, ποιότητας και αξιοπιστίας. Εύλογα όμως, παρουσιάστηκε μια αύξηση των απαιτήσεων ασφαλείας, λειτουργικότητας και άνεσης.

Συνεπώς, ιδιαίτερη έμφαση θα έπρεπε να δοθεί στον έλεγχο των ταλαντώσεων των κατασκευών κυρίως λόγω δυναμικών δράσεων (κυρίως σεισμικών ή ανεμοπίεσης). Οι προσπάθειες των μελετητών οδήγησαν στην ανάπτυξη των ονομαζόμενων *συστημάτων ελέγχου της αποκρίσεως των κατασκευών* (structural control systems), που βασίστηκε σε ανάλυση μέσω κατάλληλου συνδυασμού της επιρροής τόσο της μάζας όσο και δυσκαμψίας των κατασκευών, που επηρεάζουν τα βασικά δυναμικά χαρακτηριστικά τους.

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στον έλεγχο της απόκρισης των κατασκευών μέσω της βελτίωσης της ικανότητάς τους να αποσβένουν - απορροφούν τη δυναμική ενέργεια. Αυτή η βελτίωση επιτυγχάνεται με τη χρήση των συστημάτων ελέγχου, των οποίων σκοπός είναι να απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας από τη δυναμική φόρτιση που δέχεται η κατασκευή. Συνεπώς, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον κατά το δυνατόν αξιόπιστο προσδιορισμό του αντίστοιχου συντελεστή απόσβεσης, ο οποίος εκφράζεται σε αδιάστατη μορφή, ως ποσοστό επί τοις εκατό της συνολικής ενέργειας και ονομάζεται λόγος αποσβέσης (damping ratio). Πληροφοριακά, για μεταλλικές κατασκευές ο λόγος αποσβέσεως επιδιώκεται να είναι περίπου 1%, ενώ για κατασκευές από σκυρόδεμα 2%. Εμπειρικά, ένας λόγος τάξης μεγέθους του 1%, συνήθως, επιφέρει μείωση κατά το ήμισυ του αρχικού εύρους ταλάντωσης, μετά από 11 κύκλους περίπου.

Επιπλέον, το σημαντικότερο πλεονέκτημα της χρήσης συστημάτων απόσβεσης σε μια κατασκευή είναι ότι σε περίπτωση βλαβών από δυναμικές καταπονήσεις, τις επωμίζεται κάθε τέτοιο σύστημα. Τούτο σε αντίθεση με τα απλά δομικά, δηλαδή με αυτά που δεν διαθέτουν συστήματα, οπότε οι τυχόν βλάβες εμφανίζονται στα φέροντα στοιχεία των κατασκευών. Επομένως, το κόστος αποκατάστασης των βλαβών σε ένα σύστημα αποσβέσεως είναι σαφώς μικρότερο από ότι σε όλη την κατασκευή και προφανώς επιτυγχάνεται ευκολότερα και σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Αυτό συμβαίνει διότι τα συστήματα αποσβέσεως δεν έχουν σχεδιαστεί ώστε να αναλαμβάνουν φορτία βαρύτητας και άρα μπορούν να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν ακίνδυνα, χωρίς να απαιτείται η διακοπή της χρήσης της κατασκευής.

Τα συστήματα απόσβεσης μπορούν να τοποθετηθούν εξωτερικά ή εσωτερικά της κατασκευής. Στη πρώτη περίπτωση (external insulation type), δημοφιλέστερα είναι

τα συστήματα σεισμικής μόνωσης, τα οποία τοποθετούνται στις εδράσεις των εκάστοτε κατασκευών. Ενώ στη δεύτερη (internal non-insulation type), αντιπροσωπευτικότερα είναι τα συσκευές απορρόφησης ενέργειας (energy dissipation devices).

Ένας επιπλέον διαχωρισμός των συστημάτων απόσβεσης είναι λόγω των δυναμικών τους χαρακτηριστικών και του τρόπου δράσης τους, ως εξής :

- Συστήματα που επιδιώκουν τη μεταβολή της δυσκαμψίας της κατασκευής, με στόχο η ιδιοπερίοδος της να ευρίσκεται μακριά των δεσποζουσών περιόδων της δυναμικής φόρτισης.
- Συστήματα που επιδιώκουν την αύξηση του λόγου αποσβέσεως της κατασκευής, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα τον έλεγχο τόσο των μετακινήσεων, όσο και των επιταχύνσεων.
- Και τέλος, συστήματα που επιδιώκουν την ανακατανομή της μάζας της κατασκευής και έχουν σκοπό, όπως και η πρώτη κατηγορία, την μεταβολή της ιδιοπεριόδου της κατασκευής.

Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα ελέγχου μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις ευρείες κατηγορίες :

❖ Τα συστήματα παθητικού ελέγχου (passive control devices). Τα συστήματα αυτά λειτουργούν αυτόνομα χωρίς εξωτερική προσφορά ενέργειας. Είναι τα απλούστερα και έχουν μικρό σχετικά κόστος.

❖ Τα συστήματα ενεργητικού ή ημι - ενεργητικού ελέγχου (active or semi-active control system) Τα συστήματα αυτά, απαιτούν για τη λειτουργία τους εξωτερική προσφορά ενέργειας. Αποτελούν τα λεγόμενα "έξυπνα" συστήματα και η λειτουργία τους βασίζεται σε ηλεκτρονικά μέσα, ιδιαίτερα υψηλής τεχνολογίας.

❖ Τα υβριδικά συστήματα (hybrid control devices). Τα συστήματα αυτά αποτελούν συνδυασμό των δύο προηγούμενων κατηγοριών, δεδομένου ότι η εξωτερική προσφορά ενέργειας δεν είναι απαραίτητη για την λειτουργία τους, αλλά ενισχύει την αποδοτικότητά τους.

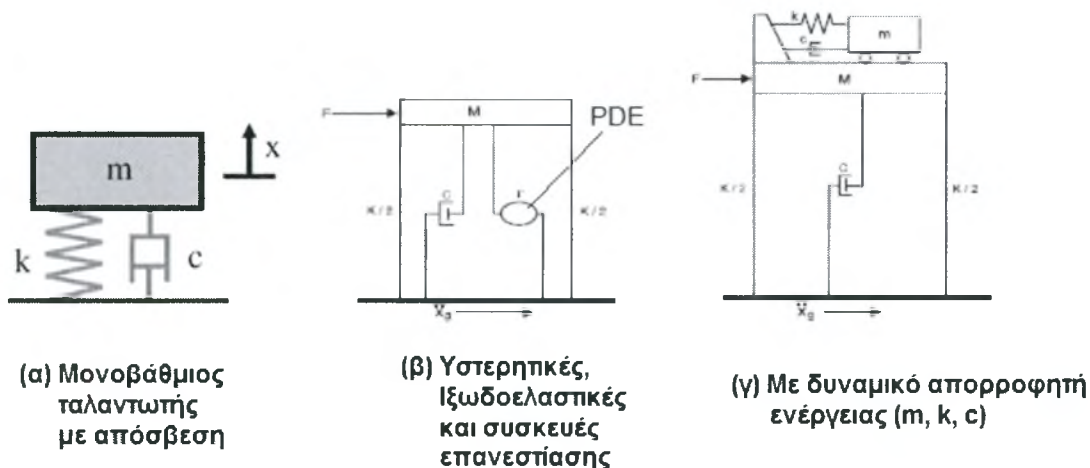
Στη πρώτη κατηγορία μπορούμε να κατατάξουμε και τα συστήματα σεισμικής μόνωσης, τα οποία θεωρούνται ως μια ωριμότερη τεχνολογία με ευρύτερες εφαρμογές σε σχέση με τα άλλα συστήματα που αναφέραμε. Τα παθητικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας καλύπτουν μια σειρά υλικών και συσκευών που αφορούν την απόσβεση, την ακαμψία και την αντοχή της κατασκευής με σκοπό τη μείωση του σεισμικού κινδύνου και αποκατάσταση της γήρανσης της κατασκευής. Γενικά, τέτοια συστήματα χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να ενισχύουν την απορρόφηση

ενέργειας της δομής, στην οποία εγκαθίστανται. Αυτές οι συσκευές λειτουργούν με βάση τις αρχές που διέπουν την τριβή ολίσθησης, τη διαρροή των μετάλλων, τον μετασχηματισμό φάσης των μετάλλων και την παραμόρφωση ιζωδοελαστικών στερεών και ρευστών.

Αντίθετα, τα ενεργητικά, ημι - ενεργητικά και υβριδικά συστήματα ελέγχου αποτελούν τη φυσική εξέλιξη της τεχνολογίας των παθητικών συστημάτων ελέγχου. Η χρήση ενεργητικών συστημάτων ελέγχου αλλά και ο συνδυασμός τους με παθητικά συστήματα, ως μέσων για την προστασία της κατασκευής από σεισμικά φορτία, παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένα τα τελευταία χρόνια. Επιπλέον, τα ενεργητικά, ημι - ενεργητικά και υβριδικά συστήματα ελέγχου είναι συσκευές κατανομής δύναμης που ενσωματώνονται στην κατασκευή και αντιδρούν σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια εκτιμητών / ελεγκτών και αισθητήρων. Ενεργούν ταυτόχρονα με τη δράση της επικίνδυνης διέγερσης με στόχο την ενίσχυση της δομικής συμπεριφοράς της κατασκευής βελτιώνοντας την ασφάλειά της. Στις μέρες μας, οι μελέτες έχουν φτάσει σε τέτοιο επίπεδο, ώστε να εγκαθιστούμε ενεργά συστήματα ελέγχου σε δομήματα πραγματικού μεγέθους για μείωση του σεισμικού κινδύνου.

1.2 Βασικές Αρχές

Οι βασικές αρχές του παθητικού και ενεργητικού ελέγχου αποσαφηνίζονται με τη βοήθεια ενός δομικού προσομοιώματος (μοντέλου) ενός βαθμού ελευθερίας (single-degree-of- freedom, SDOF), σύμφωνα με το Σχήμα 1.1α.



Σχήμα 1.1 Εξιδανίκευση κατασκευών ενός βαθμού ελευθερίας (K, M, C) με παθητικά συστήματα απόσβεσης

Μελετώντας τη πλευρική κίνηση του εν λόγω συστήματος μάζας m με εκτατικά ελατήρια συνολικής γραμμικής ελαστικής δυσκαμψίας k και συντελεστή απόσβεσης c , που υποβάλλεται σε ένα σεισμικό φορτίο, υπό τη μορφή επιτάχυνσης του εδάφους $\ddot{x}_g(t)$, τούτο αποκρίνεται με πλευρική μετατόπιση $x(t)$ σχετική με το έδαφος, η οποία ικανοποιεί την ακόλουθη διαφορική εξίσωση κίνησης:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

Στη συνέχεια εξετάζουμε την προσθήκη ενός γενικού παθητικού στοιχείου απορρόφησης ενέργειας (passive energy dissipation-PED) στο μονοβάθμιο μοντέλο ως άνω (Σχ1.1.β). Τότε η εξίσωση κίνησης για το νέο μοντέλο γίνεται

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \Gamma x = -(m + \bar{m})\ddot{x}_g \quad (2)$$

όπου το \bar{m} αποτελεί τη μάζα του στοιχείου (PED) και Γx η δύναμη της συσκευής, ενώ το Γ αντιπροσωπεύει έναν γενικής φύσεως ολοκληρω - διαφορικό τελεστή.

Η συγκεκριμένη μορφή του όρου Γx , ο οποίος εξαρτάται ισχυρά από τον τύπο της συσκευής, πρέπει να καθοριστεί πριν την επίλυση της εξίσωσης (2). Μπορούμε να διακρίνουμε ότι με την προσθήκη του όρου αυτού στην εξίσωση τροποποιήθηκαν οι δομικές ιδιότητες, με αποτέλεσμα να έχουμε ευνοϊκότερη συμπεριφορά στη σχεδιασμένη ή προσδοκώμενη κίνηση του εδάφους. Είναι σημαντικό να διευκρινίσουμε ότι αν σε μια παθητική κατασκευή προσθέσουμε στοιχεία PED, και πάλι, χαρακτηρίζεται ως παθητική.

Τα παθητικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας διακρίνονται στις εξής τρεις κατηγορίες

- Συστήματα υστέρησης
- Ιξωδοελαστικά συστήματα
- Άλλα συστήματα

Τα συστήματα υστέρησης περιλαμβάνουν συσκευές βασισμένες στην αρχή της διαρροής των μετάλλων ή της τριβής ολίσθησης. Τα απλούστερα μοντέλα υστέρησης εμπεριέχουν αλγεβρικές σχέσεις μεταξύ δύναμης και παραμόρφωσης, για το λόγο αυτό συχνά μπορεί να τα συναντήσουμε ως συστήματα εξαρτώμενα από τη μετατόπιση [displacement-dependent (FEMA,1997)].

Τα ιζωδοελαστικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας περιλαμβάνουν συσκευές αποτελούμενες από ιζωδοελαστικά στερεά υλικά, αποσβεστήρες από ιζώδη ρευστά και συσκευές που λειτουργούν μέσω της παραμόρφωσης ιζωδοελαστικών ρευστών. Τυπικά, οι συσκευές αυτές εμφανίζουν συντελεστές δυσκαμψίας και απόσβεσης, οι οποίοι εξαρτώνται από τη συχνότητα. Επιπλέον, στις συσκευές αυτές η δύναμη απόσβεσης είναι ανάλογη της ταχύτητας, οπότε η συμπεριφορά είναι ιζώδης και τα συστήματα αυτά κατατάσσονται ως ιζωδοελαστικά. Τέλος, μια καθαρά ιζώδης συσκευή αποτελεί μια ειδική περίπτωση ιζωδοελαστικής συσκευής με μηδενική δυσκαμψία και ανεξάρτητη από τις ιδιότητες της συχνότητας.

Τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας, που δε μπορούν να ταξινομηθούν σε μια από τις παραπάνω κατηγορίες, χαρακτηρίζονται ως άλλα συστήματα. Τέτοια παραδείγματα είναι οι συσκευές ελατηρίων τριβής (friction-spring devices) με δυνατότητα επανεστίασης καθώς και συσκευές απόσβεσης και δύναμης επαναφοράς ρευστών.

Αντίθετα, ένα ενεργητικό σύστημα ελέγχου έχει τη βασική διαμόρφωση όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Τα κύρια στοιχεία από τα οποία αποτελείται είναι:

- αισθητήρες, που τοποθετούνται στη κατασκευή και σκοπός τους είναι η μέτρηση και καταγραφή ή των εξωτερικών διεγέρσεων ή των μεταβλητών δομικής συμπεριφοράς ή και τα δύο.
- συσκευές για την επεξεργασία των καταγεγραμμένων πληροφοριών και τον υπολογισμό των απαιτούμενων δυνάμεων ελέγχου με τη βοήθεια ενός δεδομένου αλγορίθμου ελέγχου.
- ενεργοποιητές (actuators), που συνήθως τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές, για την παραγωγή των απαιτούμενων δυνάμεων.



Σχήμα 1.2. Κατασκευή με ενεργητικό έλεγχο

Όταν μετρούνται μόνο οι μεταβλητές δομικής συμπεριφοράς, τότε η διαμόρφωση ελέγχου αναφέρεται ως *έλεγχος ανάδρασης – ανασύζευξης - ανατροφοδότησης* (feedback), δεδομένου ότι η δομική συμπεριφορά ελέγχεται συνεχώς και οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για συνεχείς διορθώσεις στις εφαρμοζόμενες δυνάμεις ελέγχου. Αντίθετα, έλεγχος δράσης (feedforward) προκύπτει όταν οι δυνάμεις ελέγχου ρυθμίζονται μόνο από την μετρούμενη διέγερση, γεγονός που επιτυγχάνεται, για την περίπτωση σεισμών, μέσω της μέτρησης επιταχύνσεων στη βάση της κατασκευής. Στην περίπτωση, όπου οι πληροφορίες τόσων των ποσοτήτων απόκρισης όσον και αυτών των διεγέρσεων χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό ελέγχου, ο έλεγχος χαρακτηρίζεται ως *δράσης – ανάδρασης*.

Για να προσδιοριστεί η επίδραση της εφαρμογής τέτοιων δυνάμεων ελέγχου στη γραμμική κατασκευή που θεωρήθηκε παραπάνω, η εξίσωση (1) λαμβάνει τη μορφή:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -mu(t) - m\ddot{x}_g \tag{3}$$

όπου $u(t)$ είναι η εφαρμοσμένη δύναμη ελέγχου, η οποία αν σχεδιαστεί έτσι ώστε να λαμβάνει τη μορφή $u(t) = \frac{\Gamma x}{m}$ δίδει

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \Gamma x = -m\ddot{x}_g \tag{4}$$

Συνεπώς, παρατηρούμε ότι η επίδραση του ελέγχου ανάδρασης αφορά πάλι την τροποποίηση των δομικών ιδιοτήτων. Σε σύγκριση με τον παθητικό έλεγχο όμως, υφίσταται μια σημαντική διαφορά, η οποία συνίσταται στο ότι η μορφή του όρου

Γχ διέπεται πλέον από το νόμο ελέγχου που ισχύει για μια καθορισμένη εφαρμογή, που μπορεί να μεταβληθεί συναρτήσει της διέγερσης. Μπορεί κανείς να αναφερθεί και σε άλλα πλεονεκτήματα σχετιζόμενα με τα συστήματα ενεργητικού ελέγχου, μερικά από τα οποία είναι:

- Μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στον έλεγχο της απόκρισης, σε ποσοστό που σε γενικές γραμμές εξαρτάται *μόνο* από την ικανότητα των συστημάτων ελέγχου.
- Σχετική ανθεκτικότητα στις συνθήκες του περιβάλλοντος και στη κίνηση του εδάφους.
- Δυνατότητα ελαχιστοποίησης των κινδύνων σε πολλές καταστάσεις. Για παράδειγμα ένα ενεργητικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της μετατόπισης λόγω σεισμικών φορτίων αλλά παράλληλα και λόγω φορτίων ανέμου.
- Επιλεκτικότητα των στόχων ελέγχου. Για παράδειγμα, σε μη κρίσιμες χρονικές στιγμές να προσδίδουν έμφαση στην άνεση πέρα από άλλες πτυχές της δομικής κίνησης, ενώ, κατά τη διάρκεια ισχυρής δυναμικής φόρτισης κύριο στόχο να αποτελεί η αυξημένη δομική ασφάλεια.

Ενώ, η περιγραφή αυτή του ενεργητικού συστήματος ελέγχου ανήκει εννοιολογικά στον τομέα της γνωστής θεωρίας βέλτιστου ελέγχου, που χρησιμοποιείται σε διάφορους κλάδους, όπως ηλεκτρολογία, μηχανολογία, διαστημική μηχανική, για το δομικό έλεγχο των έργων του Πολιτικού Μηχανικού παρουσιάζονται πλήθος διαφορετικών χαρακτηριστικών κατά ένα μεγάλο μέρος σε ζητήματα εφαρμογής. Ειδικότερα, όταν εξετάζουμε δομικές κατασκευές υπάρχει ιδιαίτερη αβεβαιότητα, συμπεριλαμβανομένης τη μη-γραμμικότητας, που σχετίζεται με φυσικές ιδιότητες και διαταραχές, όπως σεισμός, άνεμος. Επίσης, η κλίμακα των δυνάμεων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη και υπάρχει ένας περιορισμός στον αριθμό των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, των οποίων η δυναμική είναι αρκετά σύνθετη και το μέγεθός τους πολύ μεγάλο. Πάντως, χρήσιμο είναι να μπορούμε να διακρίνουμε τους διάφορους τύπους ενεργητικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη πράξη.

Ο όρος *υβριδικός έλεγχος*, γενικά, αναφέρεται σε συνδυασμό παθητικών και ενεργητικών συστημάτων, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 1.3. Πρακτικά, η επίτευξη του ελάχιστου σκοπού ελέγχου ολοκληρώνεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό με

τη συνδρομή ενός παθητικού συστήματος και το υπόλοιπο καλύπτεται με τη βοήθεια ενός ενεργητικού συστήματος οπότε η εμπλοκή του τελευταίου απαιτεί πλέον λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

Παρόμοια μείωση πόρων για το έλεγχο επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ημι-ενεργητικών συστημάτων ελέγχου, σύμφωνα και με το Σχήμα 1.4. Πιο συγκεκριμένα, οι ενεργοποιητές ελέγχου δεν προσθέτουν μηχανική ενέργεια άμεσα στην κατασκευή και ως εκ τούτου επικρατεί μια σταθερότητα στο σύστημα (είσοδος = έξοδος). Οι ημι-ενεργητικές συσκευές ελέγχου συχνά αντιμετωπίζονται και ως ελέγξιμες παθητικές συσκευές.



Σχήμα 1.3. Κατασκευή με υβριδικό έλεγχο



Σχήμα 1.4. Κατασκευή με ημι-ενεργητικό έλεγχο

Τέλος, ένα δευτερεύον όφελος των υβριδικών και ημι-ενεργητικών συστημάτων ελέγχου είναι ότι σε περίπτωση διακοπής της ηλεκτροδότησης, το παθητικό τμήμα ελέγχου προσφέρει ακόμα κάποιο βαθμό προστασίας στην κατασκευή, σε αντίθεση με τα πλήρη ενεργητικά συστήματα που ουσιαστικά τίθενται εκτός λειτουργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1. Γενικά

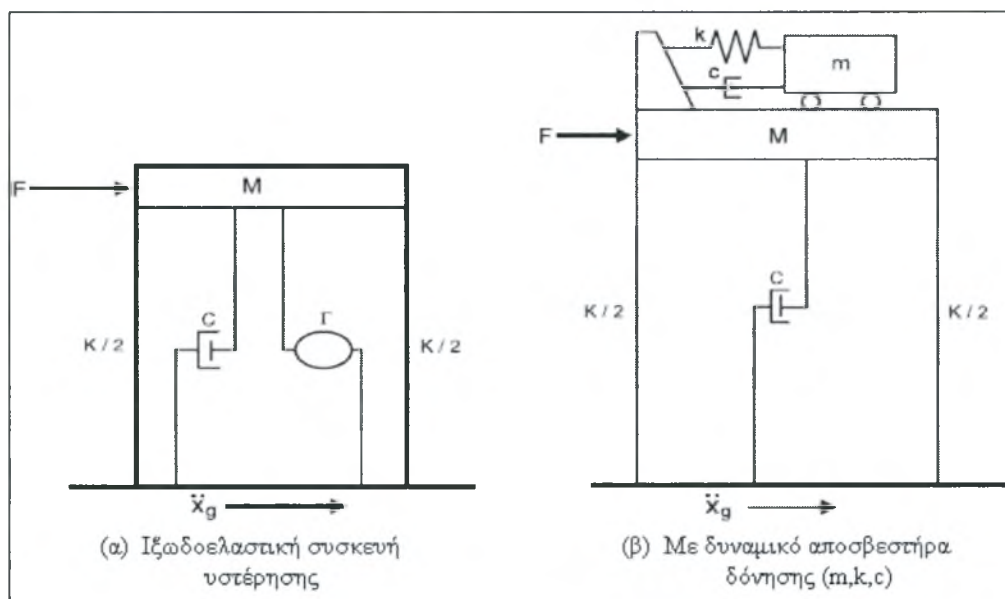
Τα συστήματα παθητικής απορρόφησης ενέργειας, τα οποία ενισχύουν την απόσβεση, την δυσκαμψία και την αντοχή της κατασκευής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ελαχιστοποίηση φυσικού κινδύνου, αλλά και για αποκατάσταση των χρόνιων απωλειών ή της ανεπάρκειας της κατασκευής. Γενικά, τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να αυξάνουν την απόσβεση ενέργειας των κατασκευών. Ουσιαστικά, η απορρόφηση ενέργειας είναι βασισμένη σε δύο παρακάτω απλούς μηχανισμούς:

- Μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε θερμότητα.
- Μεταφορά της κινητικής ενέργειας μεταξύ ιδιομορφών ταλάντωσης.

Ο πρώτος μηχανισμός ενσωματώνει τις *συσκευές υστέρησης*, οι οποίες απορροφούν ενέργεια χωρίς ιδιαίτερη εξάρτηση από τη συχνότητα, και τις *ιξωδοελαστικές συσκευές*, που επηρεάζονται σημαντικά από τη συχνότητα. Στη πρώτη ομάδα, των συσκευών υστέρησης, περιλαμβάνονται συσκευές, που διέπονται από την αρχή της διαρροής των μετάλλων και της τριβής ολίσθησης. Στη δεύτερη ομάδα περιλαμβάνονται συσκευές βασισμένες στη παραμόρφωση των ιξωδοελαστικών στερεών ή υγρών και στη λειτουργία στομίου – διαφράγματος ρευστών (*fluid orificing*). Επίσης, διακρίνουμε και μία τρίτη κατηγορία, η οποία αποτελείται από *συσκευές επανεστίασης* (*re-centering*) χρησιμοποιώντας είτε προφόρτιση μέσω πεπιεσμένων ρευστών ή εσωτερικών ελατηρίων, είτε μετασχηματισμό φάσης για την παραγωγή μίας τροποποιημένης απόκρισης δύναμης - μετατόπισης. Μια εξιδανικευμένη κατασκευή ενός βαθμού ελευθερίας με μια παθητική συσκευή (κάποιου από τα παραπάνω είδη), που δρα παράλληλα, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Απαιτείται ένα μακροσκοπικό μοντέλο, που να καθορίζει την δυσκαμψία και τα χαρακτηριστικά απόσβεσης της συσκευής, προκειμένου να καθοριστεί ευρεθεί η καθολική δομική απόκριση.

Ο δεύτερος μηχανισμός, δηλαδή μεταφορά της ενέργειας μεταξύ μορφών ταλάντωσης, χρησιμοποιείται από τους δυναμικούς αποσβεστήρες δόνησης. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από συμπληρωματικούς ταλαντωτές, που σχετίζονται με τη μάζα, την δυσκαμψία και την απόσβεση. Προκειμένου να ενισχυθεί σημαντικά η απόδοσή τους, πρέπει τα δυναμικά χαρακτηριστικά των συμπληρωματικών ταλαντωτών

να συντονίζονται με αυτά της αρχικής κατασκευής. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν οι ονομαζόμενοι *συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας* και οι *συντονισμένοι αποσβεστήρες υγρών*.



Σχήμα 2.1. Εξιδανίκευση μονοβάθμιων προσομοιωμάτων κατασκευών με παθητικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας (απόσπασμα του Σχήματος 1.1)

Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι κατηγορίες των παθητικών συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.

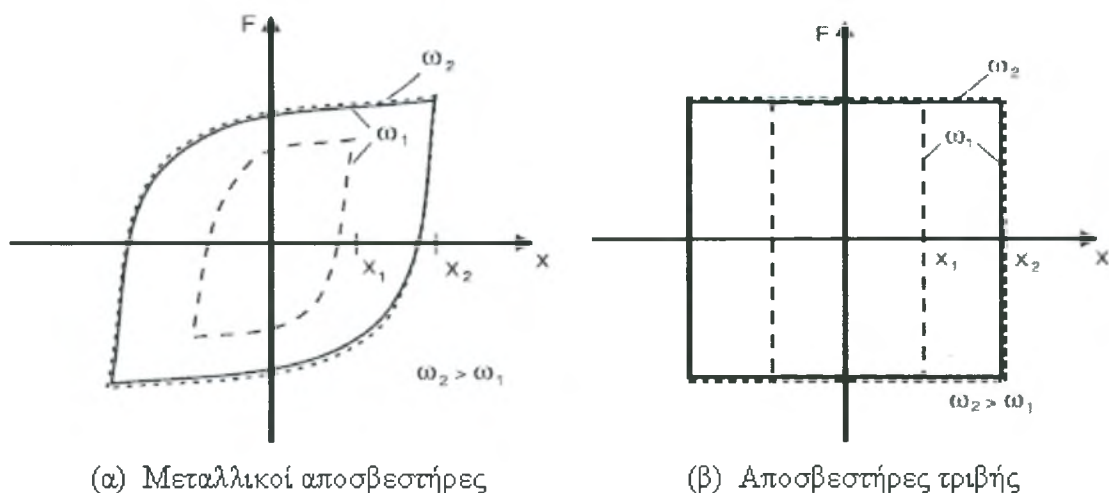
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ	ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	ΣΤΟΧΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Συσκευές υστέρησης	Διαρροή μετάλλων	Χάλυβας ή μόλυβδος	Απορρόφηση ενέργειας, αύξηση αντοχής
	Τριβή	Επαφή μεταξύ μετάλλων ή μετάλλου με μη μέταλλο	
Ιξωδοελαστικές συσκευές	Παραμόρφωση ιξωδοελαστικών στερεών	Ιξωδοελαστικά πολυμερή	Απορρόφηση ενέργειας, αύξηση δυσκαμψίας
	Παραμόρφωση ιξωδοελαστικών ρευστών	Ιδιαζόντως ιξωδοελαστικά ρευστά	
	Λειτουργία διαφράγματος ρευστών	Ρευστά με προχωρημένο σχεδιασμό διαφραγμάτων σφράγισης	
Συσκευές επανεστίασης	Πίεση σε ρευστά, λειτουργία διαφράγματος	Συμπιεστά ρευστά, σφράγιση υψηλής πίεσης	Απορρόφηση ενέργειας, αύξηση αντοχής, δυνατότητα επανεστίασης
	Δράση τριβής - ελατηρίου	Επαφή μεταξύ μετάλλων ή μετάλλου με μη μέταλλο	
	Μετατροπή φάσης μετάλλων	Κράματα μνήμης σχήματος, υπερελαστική συμπεριφορά	
Δυναμικοί απορροφητές ενέργειας	Συντονισμένοι ταλαντωτές μάζας	Απορροφητής ρευστού μάζας - ελατηρίου	Αύξηση απόσβεσης
	Συντονισμένοι ταλαντωτές ρευστών	Δεξαμενές νερού, δοχεία ρευστών σχήματος U	

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε και θα αναλύσουμε τις παρακάτω συσκευές ελέγχου ξεχωριστά. Για να έχουμε μια πληρέστερη εικόνα συμπεριλαμβάνουμε και δυο συσκευές, οι οποίες κυρίως χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των δονήσεων των κατασκευών λόγω φορτίων ανέμου:

1. Μεταλλικοί αποσβεστήρες
2. Αποσβεστήρες τριβής
3. Αποσβεστήρες μάζας
4. Ιξώδεις και ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες

2.2. Συσκευές υστέρησης

Τα συστήματα υστέρησης, εξ' ορισμού, απορροφούν απευθείας την ενέργεια με τη βοήθεια ενός μηχανισμού, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από το ποσοστό των φορτίων εφαρμογής. Όπως προαναφέραμε, περιλαμβάνουν τους *μεταλλικούς αποσβεστήρες*, οι οποίοι ως μηχανισμό απορρόφησης χρησιμοποιούν τη διαρροή των μετάλλων, και τους *αποσβεστήρες τριβής*, οι οποίοι παράγουν θερμότητα μέσω *ξηράς τριβής ολίσθησης*. Τυπικές καμπύλες απόκρισης δύναμης - μετατόπισης αποκτώμενες υπό σταθερού εύρους δονήσεις, απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2. Οι ποσότητες F και x αντιπροσωπεύουν τη συνολική δύναμη και μετατόπιση, αντίστοιχα, της συσκευής. Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για εύρος μετατόπισης x_0 και κυκλική συχνότητα ω , η μετατόπιση σε χρόνο t μπορεί να γραφτεί ως εξής : $x(t) = x_0 \sin \omega t$



Σχήμα 2.2 Ιδεατή απόκριση δύναμης - μετατόπισης για συσκευές υστέρησης

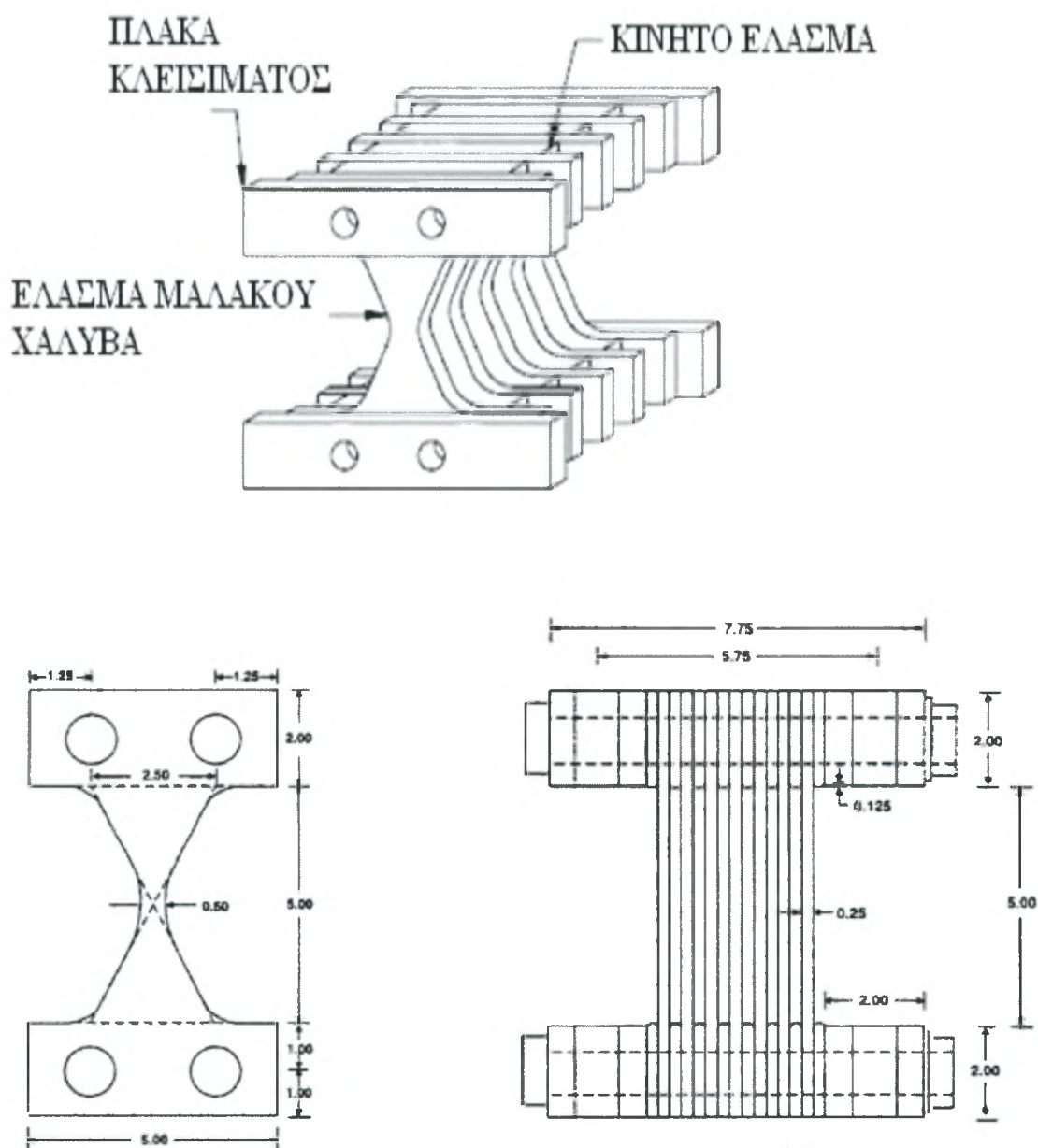
Ουσιαστικά, διακρίνουμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι η απόκριση των συσκευών υστέρησης παραμένει αμετάβλητη για διάφορες συχνότητες διέγερσης, καταδεικνύοντας κατά συνέπεια την ανεξαρτησία τους από τη έννοια της συχνότητας. Εντούτοις, οι συσκευές είναι έμφυτα μη - γραμμικές. Η παραγόμενη δύναμη, σαφώς, δεν κλιμακώνονται σε σχέση με τη μετατόπιση, και παρατηρείται σημαντική εξάρτηση δρόμου. Αυτή η μη-γραμμικότητα των συσκευών υστέρησης πρέπει να ληφθεί υπόψη τόσο στη δομοστατική ανάλυση όσο και στο σχετικό σχεδιασμό. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις, η απορρόφηση ενέργειας εμφανίζεται μόνο μετά την υπέρβαση ενός κάποιου ορίου δύναμης. Συνεπώς, οι συγκεκριμένες διατάξεις απόσβεσης προορίζονται, πρωτίστως, για σεισμικές εφαρμογές.

2.2.1. Μεταλλικοί αποσβεστήρες

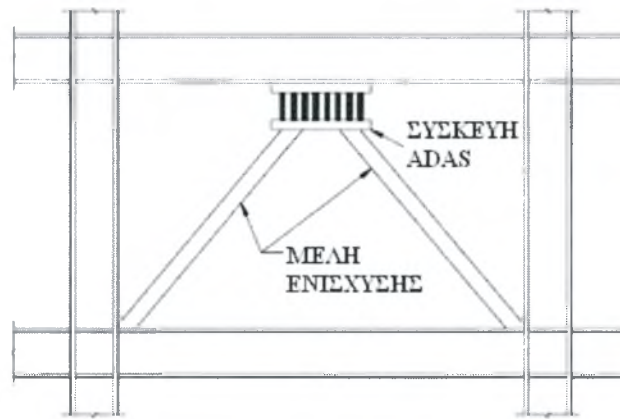
Ένας από τους πλέον αποτελεσματικούς διαθέσιμους μηχανισμούς για την απορρόφηση ενέργειας κατά τη διάρκεια σεισμού, είναι αυτός που βασίζεται στην ανελαστική παραμόρφωση μεταλλικών στοιχείων. Στις κλασικές χαλύβδινες κατασκευές, ο αντισεισμικός σχεδιασμός βασίζεται στην μετά την διαρροή ολκιμότητα των κύριων δομικών στοιχείων για την παροχή της απαιτούμενης απορρόφησης ενέργειας. Εντούτοις, η ιδέα της χρησιμοποίησης συμπληρωματικών μεταλλικών αποσβεστήρων με σκοπό τη απορρόφηση ενός μεγάλου ποσοστού της σεισμικής ενέργειας χρονολογείται από το 1972. Στα επόμενα χρόνια, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη των μεταλλικών αποσβεστήρων και πολλά νέα σχέδια έχουν προταθεί.

Οι μεταλλικοί αποσβεστήρες είναι συσκευές, οι οποίες σχεδιάζονται με σκοπό την απορρόφηση ενέργειας στο φέροντα οργανισμό μιας κατασκευής, μέσω σταθερής ανελαστικής διαρροής ενός στοιχείου από ήπιο χάλυβα. Οι συγκεκριμένοι αποσβεστήρες, όπως και οι αποσβεστήρες τριβής (που θα εξετασθούν παρακάτω), αυξάνουν την αρχική δυσκαμψία του Φ.Ο. και κατ' επέκταση της κατασκευής. Όταν η κατασκευή υποβάλλεται σε φόρτιση μικρότερη από την ελαστική ικανότητα της συσκευής, τότε η αρχική δυσκαμψία παραμένει σταθερή. Μετά την επίτευξη της ελαστικής ικανότητας της συσκευής, το φορτίο στη συσκευή παραμένει σταθερό για περαιτέρω ανελαστικές παραμορφώσεις.

Πολλές από αυτές τις διατάξεις χρησιμοποιούν πλάκες τριγωνικής ή μορφής X κυρίως από ήπιο χάλυβα, έτσι ώστε η διαρροή να διαδίδεται ομοιόμορφα σε όλο το υλικό. Οι δημοφιλέστερες συσκευές είναι οι *συσκευές προστιθέμενης απόσβεσης και δυσκαμψίας*, οι επονομαζόμενες *ADAS* (Added Damping And Stiffness - Σχήματα 2.3 και 2.4). Άλλες συσκευές, που χρησιμοποιούνται συνήθως στην Ιαπωνία, περιλαμβάνουν καμπτικού τύπου κυψελοειδείς αποσβεστήρες και αποσβεστήρες σχισμής και τύπου διατμητικού τοιχώματος.

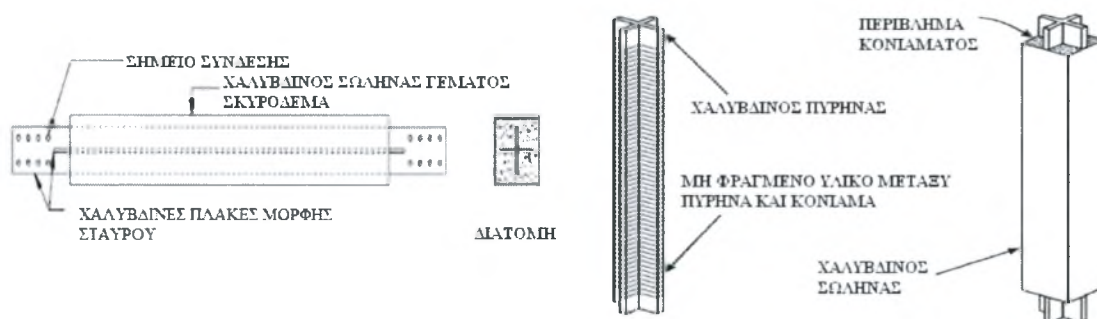


Σχήμα 2.3. Συσκευή ADAS



Σχήμα 2.4. Συσκευή ADAS ενσωματωμένη σε μεταλλικό πλαίσιο

Μία παραλλαγή των παραπάνω συσκευών, που διέπεται από την ίδια φιλοσοφία, αποτελούν οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας διαρροής εφελκυσμού/θλίψης, καλούμενοι "unbounded braces", δηλαδή μη φραγμένοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας, με διαμόρφωση που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5. Οι σύνδεσμοι αυτοί αρχικά εφαρμόστηκαν στην Ιαπωνία και στις Η.Π.Α, η δε διάταξη τους αποτελείται από ενισχυμένα μέλη πυρήνων χαλύβδινων ελασμάτων τοποθετημένων μέσα σε ένα χαλύβδινο σωλήνα, ο οποίος περιέχει σκυρόδεμα. Οι επιφάνειες των ελασμάτων φέρουν ειδική επικάλυψη με σκοπό τη μείωση της τριβής. Η λειτουργία τους είναι απλή. Οι πυρήνες των ελασμάτων παρέχουν σταθερή απορρόφηση ενέργειας μέσω της διαρροής τους κάτω από εναλλασσόμενη αξονική φόρτιση, ενώ ο περιβάλλων σωλήνας με το σκυρόδεμα που περιέχει ανθίσταται σε λυγισμό λόγω θλίψης.

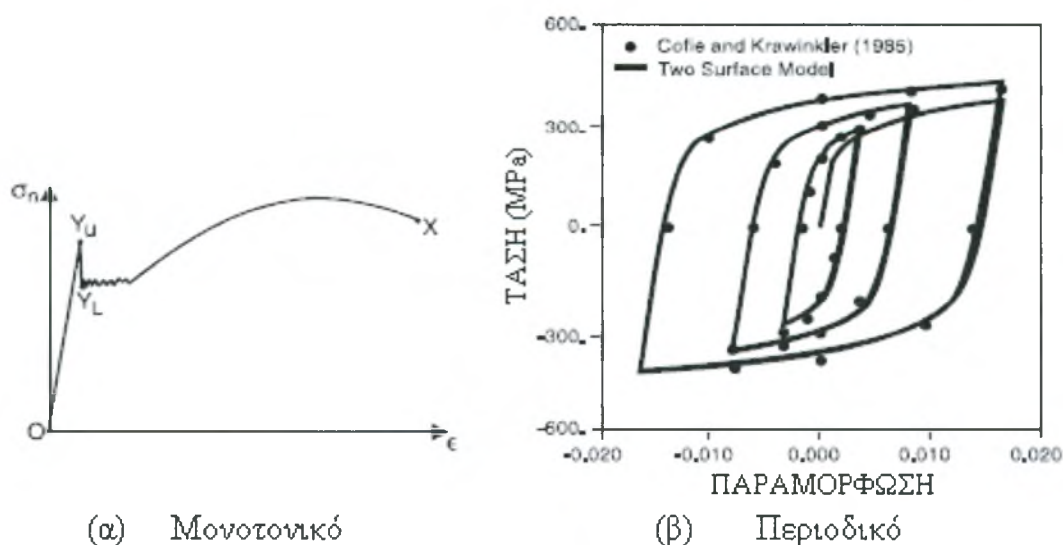


Σχήμα 2.5. Αποσβεστήρας μη φραγμένων συνδέσμων δυσκαμψίας

Σε όλες τις περιπτώσεις, παρά τις διαφορές στη γεωμετρική διαμόρφωση των συσκευών, τον κύριο μηχανισμό απόσβεσης της ενέργειας αποτελεί η

ανελαστική παραμόρφωση του μετάλλου. Συνήθως, το μέταλλο είναι ήπιος χάλυβας, αν και μερικές φορές υιοθετείται μόλυβδος. Μερικά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συσκευών, που αποτελούνται από αυτά τα κράματα, είναι η σταθερή συμπεριφορά υστέρησης, οι μικροί κύκλοι φόρτισης, η μακροχρόνια αξιοπιστία τους και η σχετική τους ανθεκτικότητα στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ο μεταλλικός αποσβεστήρας για τη βελτίωση του αντισεισμικού σχεδιασμού της κατασκευής, πρέπει να δημιουργηθεί ένα λογικό μαθηματικό μοντέλο για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών δύναμης – παραμόρφωσης. Δεδομένου ότι αυτή η γενική απόκριση είναι στενά συνδεδεμένη με τη κυκλική συμπεριφορά τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης (σ - ϵ) του μετάλλου, θα ήταν χρήσιμο να αναφέρουμε εν συντομία τα χαρακτηριστικά της καμπύλης (σ - ϵ) του δομικού χάλυβα.

Η απόκριση ενός δείγματος ανοπτημένου ήπιο χάλυβα, που υποβάλλεται σε μονοτονική μονοαξονική φόρτιση, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6α. Η εικόνα αυτή είναι γνωρίμη και περιλαμβάνει την ανώτερη και κατώτερη τάση διαρροής, την περιοχή κράτυνσης και τέλος την περιοχή λαιμού. Εντούτοις, κάτω από σταθερού εύρους ελεγχόμενων κύκλων παραμόρφωσης, η απόκριση απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6β. Για οποιοδήποτε δεδομένο εύρος, λαμβάνουμε τελικά μία σταθεροποιημένη καμπύλη, η οποία είναι ανεξάρτητη από το προγενέστερο ιστορικό φόρτισης (Cofie & Krawinkler 1985).

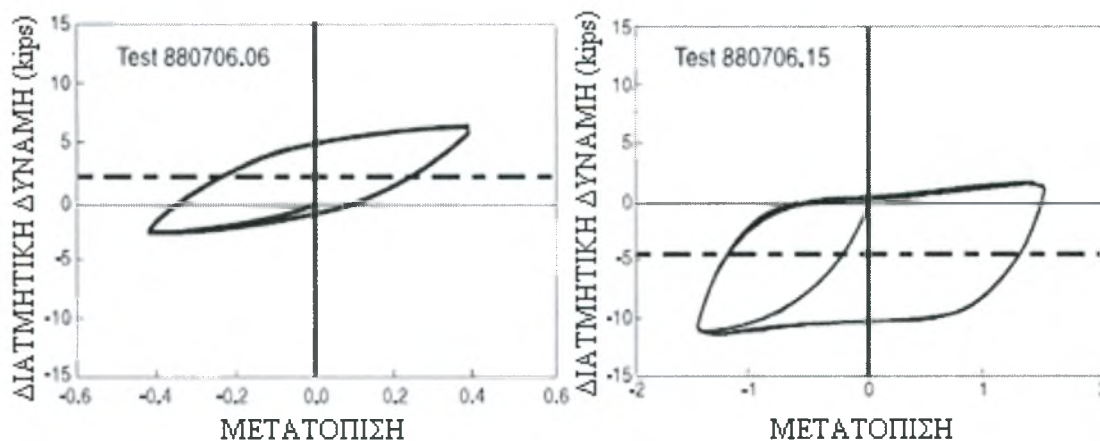


Σχήμα 2.6. Απόκριση τάσης-μετατόπισης δομικού χάλυβα

Υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, που μπορούν να υιοθετηθούν για την κατασκευή ενός προσομοιώματος αποσβεστήρα δύναμης – μετατόπισης. Η πρώτη περιλαμβάνει την άμεση και απ' ευθείας χρήση πειραματικών δεδομένων, που αποκτήθηκαν από εργαστηριακές δοκιμές των συστατικών μερών του μεταλλικού αποσβεστήρα. Η βασική μορφή του μοντέλου δύναμης – παραμόρφωσης επιλέγεται συνήθως με βάση την αναλογία με τη θεωρία της πλαστικότητας, και κατόπιν οι παράμετροι αυτού υπολογίζονται μέσω τεχνικών προσαρμογής καμπυλών. Στη δεύτερη προσέγγιση, το μοντέλο δημιουργείται μέσω μία κατάλληλα διαμορφωμένης καταστατικής σχέσης για το μέταλλο, η οποία βασίζεται στις αρχές της Μηχανικής. Η τελευταία προσέγγιση, συχνά, αυξάνει την διορατικότητα στη συμπεριφορά της συσκευής, με αποτέλεσμα τη μείωση των αναγκών εργαστηριακών δοκιμών.

Η ιδέα χρησιμοποίησης επιπρόσθετων μεταλλικών αποσβεστήρων ενέργειας μέσα σε μια κατασκευή, με σκοπό την απορρόφηση μεγάλου μέρους της σεισμικής ενέργειας, ξεκίνησε από την σπουδαίες εργασίες των Kelly κ.α. (1972) και Skinner κ.α. (1975). Στα επόμενα χρόνια μια μεγάλη γκάμα τέτοιων συσκευών που περιελάμβαναν στρεπτικές δοκούς, καμπτικές δοκούς και αποσβεστήρες ενέργειας σχήματος λωρίδας U, μελετήθηκαν και δοκιμάστηκαν. Πολλές από τις συσκευές αυτές χρησιμοποιούν ελάσματα από ήπιο χάλυβα σχήματος τριγώνου ή X, έτσι ώστε η διαρροή να διαδίδεται σχεδόν ομοιόμορφα στο υλικό.

Η απόκριση δύναμης - παραμόρφωσης σε συσκευή ADAS υπό σταθερούς ελεγχόμενους κύκλους μετατόπισης είχε μελετηθεί από τον Whittaker κ.α. (1991). Ένα χαρακτηριστικό αποτέλεσμα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7., όπου το εμβαδόν εντός των κύκλων υστέρησης αντιστοιχεί στη ποσότητα της απορροφημένης ενέργειας. Άλλα υλικά, όπως κράματα μολύβδου και "πλαστικής μνήμης" έχουν, επίσης, αξιολογεί από τους Sakurai και Aiken. Μερικά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συσκευών αυτών είναι η σταθερή συμπεριφορά υστέρησης, η κόπωση low-cycle, η μακροπρόθεσμη αξιοπιστία και η ανθεκτικότητα τους στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου, πολυάριθμες αναλυτικές και πειραματικές έρευνες έχουν διεξαχθεί για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των μεμονωμένων αυτών συσκευών.



(α) Μετατόπιση πλάτους 0,45m

(β) Μετατόπιση πλάτους 1,5m

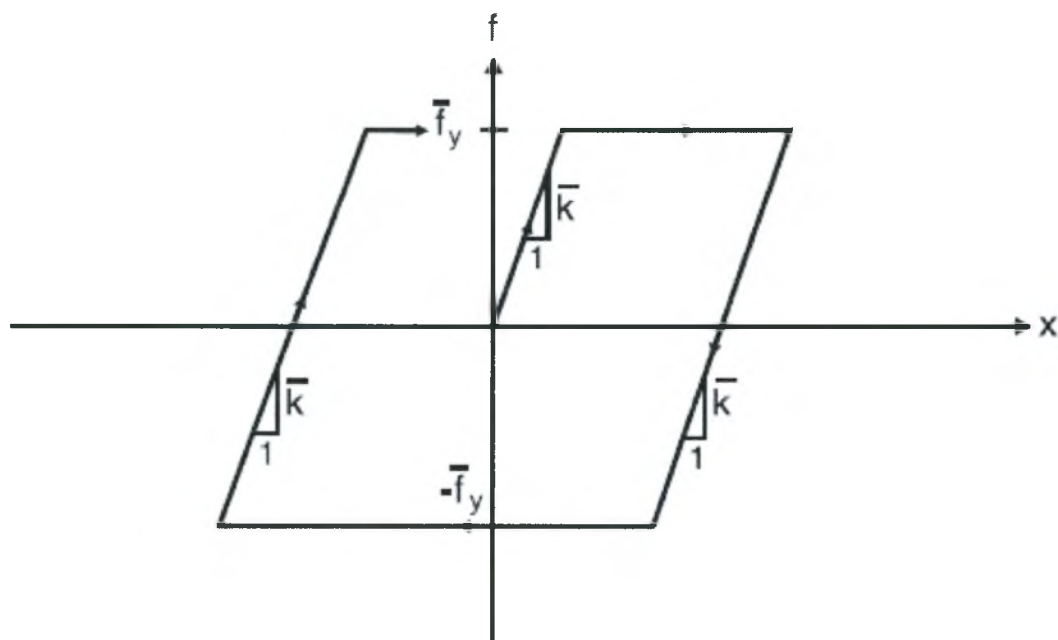
Σχήμα 2.7. Απόκριση δύναμης- μετατόπισης ελασμάτων απόσβεσης χιαστής διάταξης

Παρά τις προφανείς διαφορές στη γεωμετρική και σχηματική διαμόρφωση των μεταλλικών αποσβεστήρων, σε όλες τις περιπτώσεις η απορρόφηση ενέργειας βασίζεται στην αρχή της ανελαστικής παραμόρφωσης των μεταλλικών στοιχείων. Κατά συνέπεια, για να συμπεριληφθούν αποτελεσματικά στο σχεδιασμό μιας κατασκευής, απαιτείται η δυνατότητα χαρακτηρισμού της υστερητικής τους συμπεριφοράς υπό τυχαία ανακυλιζόμενη φόρτιση, όπως ήδη έχει σχολιαστεί.

Ενώ σοβαρές προσπάθειες έχουν γίνει για την ανάπτυξη μίας λογικής σχέσης δύναμης - μετατόπισης για μεταλλικούς αποσβεστήρες, χρησιμοποιούνται ακόμα πιο απλούστερες σχέσεις, βασισμένες στις στοιχειώδεις θεωρίες της πλαστικότητας. Μεταξύ αυτών αναφέρονται από το ελαστικό – σταθερής κράτυνσης μοντέλο (Perry κ.α. 1993), το λεγόμενο Για παράδειγμα, ότι οι μεταλλικοί αποσβεστήρες χαρακτηρίζονται από ένα σταθερό, ελαστικό πρότυπο σκλήρυνσης πίεσης (Perry 1993), από ένα αποκαλούμενο τρι-γραμμικό μοντέλο (Tsai κ.α. 1993), καθώς και το κυκλικό μοντέλο Ramberg-Osgood (Su & Hanson 1990). Πιο πρόσφατα, (Pong κ.α. 1994) υιοθετήθηκε ένα μοντέλο δύο επιφανειών δύναμης – χώρου (two-surface force-space) προκειμένου να εξομοιωθούν μερικά χαρακτηριστικά της απόκρισης των μεταλλικών αποσβεστήρων διαρροής, όπως η κυκλική κράτυνση, τα οποία δεν εξετάζονταν στα στοιχειώδη μοντέλα. Εντούτοις, πρέπει να επισημανθεί ότι όλα τα παραπάνω μοντέλα βασίζονται σε μακροσκοπική προσέγγιση. Το μοντέλο περιγράφει μόνο τη γενική απόκριση δύναμης - παραμόρφωσης μίας συγκεκριμένης διάταξης απόσβεσης με τις πρότυπες παραμέτρους να προσδιορίζονται άμεσα

πειράματα. Οι Dargush και Soong (1995) ανέπτυξαν ένα ανελαστικό καταστατικό μοντέλο για το υλικό των μεταλλικών αποσβεστήρων διαρροής με μία μικροσκοπική μηχανιστική προσέγγιση. Μέσω αυτής επιτράπηκε μια καλύτερη αντίληψη της συμπεριφοράς του αποσβεστήρα. Για παράδειγμα, πληροφορίες σχετικά με το ιστορικό ανελαστικής παραμόρφωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του υλικού αποσβεστήρα έναντι κόπωσης.

Σημαντική πτυχή της δομοστατικής ανάλυσης, που πρέπει εμφατικά να καταδειχθεί, σε σχέση με τους μεταλλικούς αποσβεστήρες, σχετίζεται με την προβλεφθείσα απόκριση υπό σεισμικές διεγέρσεις. Ενώ, η εισαγωγή μεταλλικών αποσβεστήρων σε μία κατασκευή, γενικά, μειώνει την απόκριση με απορρόφηση ενός ποσοστού της ενέργειας, μπορεί η απόκριση να αυξηθεί για μερικές συγκεκριμένες σεισμικές διεγέρσεις. Για παράδειγμα, εξετάστηκε ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας με μάζα m , δυσκαμψία k και λόγο ξώδους απόσβεσης 0.05, το οποίο σύστημα υποβλήθηκε στην κίνηση εδάφους του σεισμού του 1940 El Centro S00E, με τη πρόσθεση ενός αποσβεστήρα, που προσομοιάστηκε σαν ένα στοιχείο χωρίς μάζα ελαστικής – ιδεατά πλαστικής απόκρισης ανεξάρτητης του χρόνου, σύμφωνα με το Σχήμα 2.8.

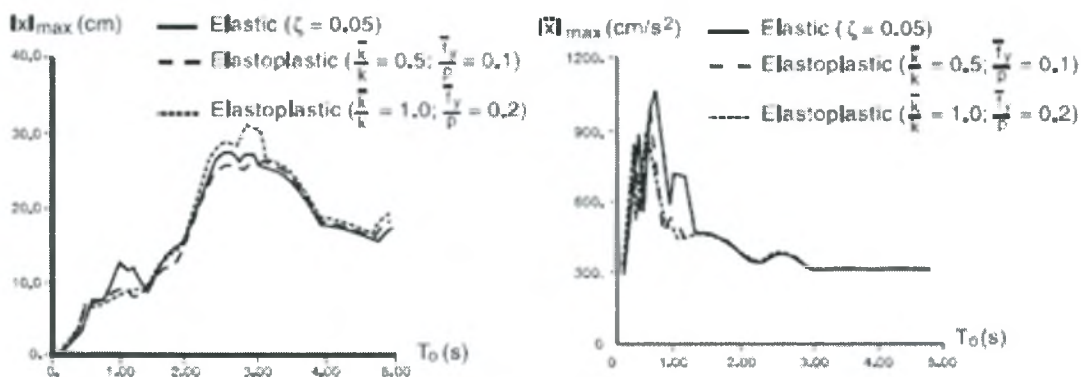


Σχήμα 2.8. Απόκριση φορτίου – μετατόπισης για ελαστικό – ιδεατά πλαστικό στοιχείο

Τα διαγράμματα απόκρισης της μέγιστης επιτάχυνσης και μετατόπισης ως προς την ελαστική φυσική περίοδο απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9., όπου

$$T_0 = 2\pi \left(\frac{m}{k+k} \right)^{1/2} \tag{5}$$

και k επιγραμμή η αρχική δυσκαμψία. Είναι προφανές από τα διαγράμματα αυτά ότι υφίστανται περιοχές της T_0 στις οποίες ο ελαστοπλαστικός αποσβεστήρας είναι είτε ανενεργός είτε ζημιογόνος.



(α) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

(β) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ

Σχήμα 2.9. Απόκριση μονοβάθμιου συστήματος για εδαφική διέγερση 1940 El Centro S00E

Τα παραπάνω αποτελέσματα για το απλό σύστημα του ενός βαθμού ελευθερίας καταδεικνύουν ότι για τη σωστή αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μεταλλικών αποσβεστήρων έναντι σεισμικής προστασίας απαιτούνται λεπτομερείς, μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις. Καταλληλότερη για τέτοιου είδους αναλύσεις παρουσιάζεται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η οποία παρέχει κατάλληλο πλαίσιο για κατασκευές που προσομοιάζονται με πολλούς βαθμούς ελευθερίας (multi-degree-of-freedom MDOF). Για παράδειγμα, η Newton-Raphson χρονική προσέγγιση είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε κατασκευές με μεταλλικούς αποσβεστήρες. Ο συγκεκριμένος τύπος αλγόριθμου είναι διαθέσιμος στα περισσότερα προγράμματα με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία. Επιπλέον, πολλά προγράμματα περιέχουν καθορισμένα δομικά στοιχεία για χρήση, καθώς και σημαντικούς θεμελιώδεις κώδικες που παρέχουν αρκετές ευκολίες, όπως ο διαχωρισμός γραμμικών και μη γραμμικών βαθμών ελευθερίας. Για τη γραμμική περίπτωση, το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας μπορεί να μορφωθεί και να απαλειφθεί μια φορά στην αρχή της

ανάλυσης. Η λύση κάθε φορά περιλαμβάνει το σχηματισμό και αποσύνθεση ενός σχετικά μικρού συστήματος που περιέχει μόνο μη γραμμικούς βαθμούς ελευθερίας. Αυτός ο τύπος διαχωρισμού χρησιμοποιήθηκε από τον Ozdemir (1976) για την ανάλυση κατασκευών, στις οποίες έχουν ενσωματωθεί αποσβεστήρες στρεπτικών δοκών. Στη συνέχεια, η ίδια μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε από τον Bhatti (1978) με σκοπό την ανάπτυξη ενός βέλτιστου σχεδιασμού ενός συστήματος μόνωσης βάσης, το οποίο περιλαμβάνει αποσβεστήρες στρεπτικών δοκών. Η μέθοδος των εφικτών κατευθύνσεων (feasible directions) υιοθετήθηκε για τη βελτιστοποίηση πολλών απλών δομικών συστημάτων. Λαμβάνοντας υπόψη, την αλματώδη εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών αλλά και του λογισμικού τους, μπορεί μια τέτοια προσέγγιση να εφαρμοστεί και στους μεταλλικούς αποσβεστήρες.

Οι Xia και Hanson (1994) μελέτησαν τη χρήση της συσκευής ADAS σε μεταλλικά πλαίσια ροπής. Διάφορα χαρακτηριστικά του πλαισίου και η επιρροή τους στη σεισμική απόκριση των κατασκευών μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιελάμβαναν τη δύναμη διαρροής της συσκευής, τη μετατόπιση διαρροής, το λόγο κράτυνσης, το λόγο της δυσκαμψίας της συσκευής προς τη δυσκαμψία του μέλους – συνδέσμου, και τον λόγο της δυσκαμψίας της συσκευής προς τη δυσκαμψία του σχετικού ορόφου χωρίς τη συσκευή. Συμπερασματικά, η προσθήκη συσκευών ADAS μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της κατασκευής, ενώ παράλληλα, απομονώνει και προστατεύει της ενώσεις δοκού - υποστυλώματος του πλαισίου, που αποτελούν τις συννηθέστερες θέσεις αστοχίας.

Οι Phocas και Pocranshi (2003) παρουσίασαν μία μελέτη, που περιελάμβανε μία παραλλαγή της συσκευής ADAS σε μεταλλικό πλαίσιο ως μέρος του αρχικού σχεδιασμού ή ως μέρος της αποκατάστασης του ήδη υφιστάμενου πλαισίου. Η συσκευή αποτελείται από ένα σύστημα συνδέσμων δυσκαμψίας καλωδίων κλειστού κυκλώματος (closed-circuit, tension-only rod-brace system), συνδεδεμένο με ένα εξάρτημα από πολλαπλά μεταλλικά ελάσματα, στο κατώτερο κέντρο της δοκού. Τα μεταλλικά ελάσματα αναμενόταν να διαρρεύσουν για ένα συγκεκριμένο φορτίο, προσφέροντας μία σταθερή συμπεριφορά υστέρησης. Οι ερευνητές υπέθεσαν ότι το μεταλλικό πλαίσιο και τα καλώδια παραμένουν ελαστικά σε όλη τη φόρτιση και ο

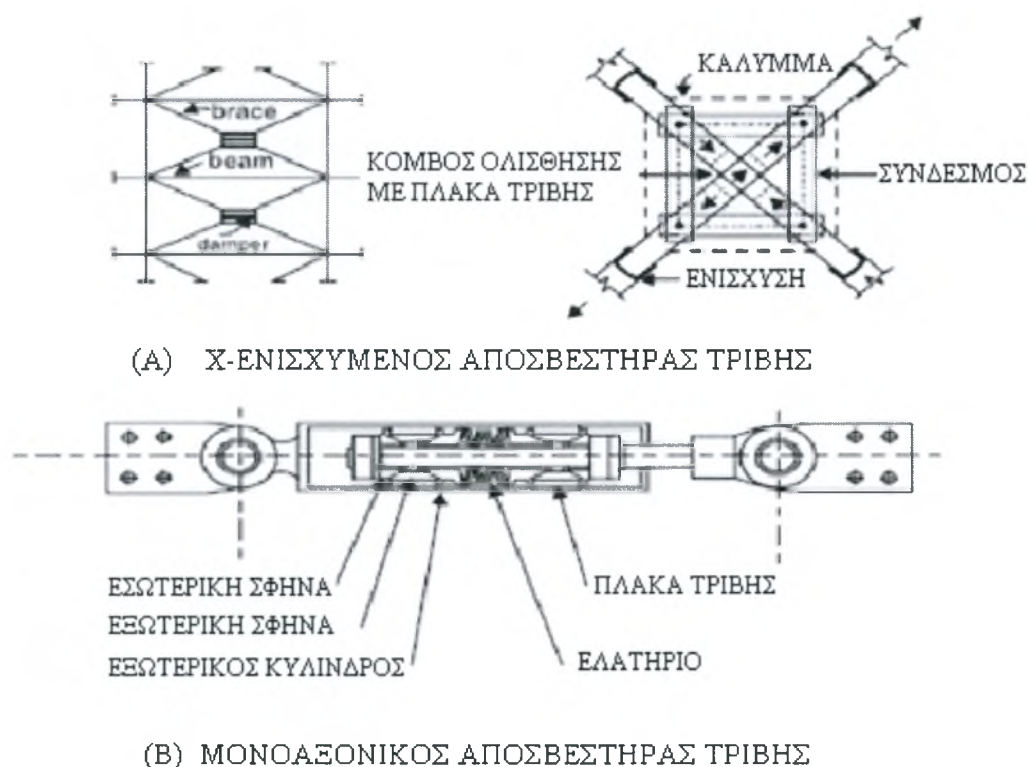
αποσβεστήρας παρουσιάζει μία πλήρως πλαστική συμπεριφορά υστέρησης. Αναπτύχθηκε μια προσεγγιστική μέθοδος σχεδιασμού, βασισμένη σε μία απόκριση φασμάτων για ένα μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας χωρίς απόσβεση, το οποίο επικυρώθηκε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο SAP2000. Τελικά, προτάθηκε να εξεταστεί και περαιτέρω η συγκεκριμένη συσκευή απόκρισης τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.

Το 2004 ο Black κ.α. διεξήγε δοκιμές σε ένα τύπο συνδέσμων δυσκαμψίας παρεμποδισμένων έναντι λυγισμού, γνωστών ως Unbonded Braces και αξιολόγησε τη χρήση τους σε κτηριακές κατασκευές. Οι δοκιμές αποσκοπούσαν στον προσδιορισμό της ανελαστικής απόκρισης και τη βαθμονόμηση του μοντέλου της συμπεριφοράς των συνδέσμων αυτών. Οι έρευνες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ικανότητα των συνδέσμων να υποβάλλονται σε διάφορους κύκλους φόρτισης διατηρώντας τη σταθερή ανελαστική συμπεριφορά τους και περιορίζοντας την οριζόντια μετατόπιση της κατασκευής, ουσιαστικά, τα καθιέρωσε ως αξιόπιστα μέσα για την αντιμετώπιση του σεισμικού κινδύνου.

2.2.2. Αποσβεστήρες τριβής

Ενώ ο μηχανισμός μέσω του οποίου λαμβάνει χώραν απορρόφηση ενέργειας στους μεταλλικούς αποσβεστήρες μπορεί να θεωρηθεί σαν μια μορφή εσωτερικής τριβής, οι αποσβεστήρες τριβής χρησιμοποιούν το μηχανισμό της τριβής, η οποία αναπτύσσεται μεταξύ δύο στερεών σωμάτων, που γλιστρά το ένα πάνω στο άλλο, έτσι ώστε να παρέχεται η επιθυμητή απορρόφηση ενέργειας. Οι αποσβεστήρες αυτοί είναι συσκευές οι οποίες συνδέονται εγκάρσια της διαγωνίου ενός δομικού πλαισίου. Με την επίτευξη ενός ορισμένου φορτίου και την υπέρβαση της στατικής τριβής της συσκευής, εμφανίζεται η εσωτερική ολίσθηση μεταξύ των επιφανειών, η οποία επιτρέπει την απελευθέρωση της ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Είναι σημαντικό να υπάρχει ένας συγκεκριμένο σταθερό συντελεστής τριβής μεταξύ των επιφανειών για να εξασφαλίζεται προβλέψιμη απόκριση. Επομένως, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα υλικά που χρησιμοποιούνται στις δύο επιφάνειες επαφής για να αποτραπεί η ένωσή τους με το χρόνο. Μία έρευνα για την επιρροή χρήσης των αποσβεστήρων τριβής στην απόκριση κτηριακών κατασκευών διεξήχθη από τους Mayes και Mowbray (1975), εντούτοις φαίνεται ότι ο Keightley (1977) ήταν ο πρώτος

που εξέτασε τις συσκευές τριβής σε κτιριακές εφαρμογές. Στη συνέχεια, ο Paul (1980), βασισμένος πρώτιστα σε μία αναλογία των φρένων των αυτοκινήτων, ασχολήθηκε με την ανάπτυξη των παθητικών αποσβεστήρων τριβής για τη βελτίωση της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής. Ο στόχος είναι να επιβραδύνουν την κίνηση των κτηρίων "φρενάροντας" παρά "σπάζοντας". Στα επόμενα χρόνια, υπήρξε σημαντική πρόοδος και διάφορες συσκευές αναπτύχθηκαν. Δύο αντιπροσωπευτικοί τύποι αποσβεστήρων τριβής απεικονίζονται στο παρακάτω Σχήμα 2.10



Σχήμα 2.10. Αντιπροσωπευτικοί αποσβεστήρες τριβής

Στο Σχέδιο 2.10α φαίνεται η συσκευή που πρότειναν οι Paul και March και εφαρμόζεται σε εγκάρσιους συνδέσμους δυσκαμψίας πλαισιωτών κατασκευών, με ενισχυμένες επενδύσεις στις επιφάνειες ολίσθησης. Ένας άλλος αποσβεστήρας τριβής, βασισμένος σε ένα βιομηχανικό αποσβεστήρα, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10β. Σε αυτή τη μονοαξονική συσκευή, η οποία δοκιμάστηκε από τους Aiken και Kelly (1990), οι πλάκες από κράματα χαλκού γλιστρούν στην εσωτερική επιφάνεια του χαλύβδινου κυλίνδρου. Η απαραίτητη δύναμη παρέχεται μέσω της δράσης του ελατηρίου μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών σφηνών.

Ενώ, υπάρχουν πολυάριθμες μορφές τριβής, οι οποίες είναι αποτελεσματικές στη μείωση των ζημιών των κατασκευών κατά τη διάρκεια περιβαλλοντικών διαταραχών, όλες οι συσκευές που θα μας απασχολήσουν σε αυτή την ενότητα υιοθετούν τη στερεά τριβή ολίσθησης ως βασικό μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας. Κατά συνέπεια, στους αποσβεστήρες τριβής παράγεται μη ανακτήσιμο έργο από την επαπτομενική δύναμη, που απαιτείται για να ολισθήσει το ένα σώμα πάνω στο άλλο. Φυσικά είναι υψίστης σημασίας να διατηρείται μία αξιόπιστη και προβλέψιμη απόκριση σε ικανοποιητικά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αποσβεστήρα. Εντούτοις, η απόκριση εξαρτάται σε ένα μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες επί των επιφανειών τριβής, οι οποίες μπορεί να επηρεαστούν από φυσικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες.

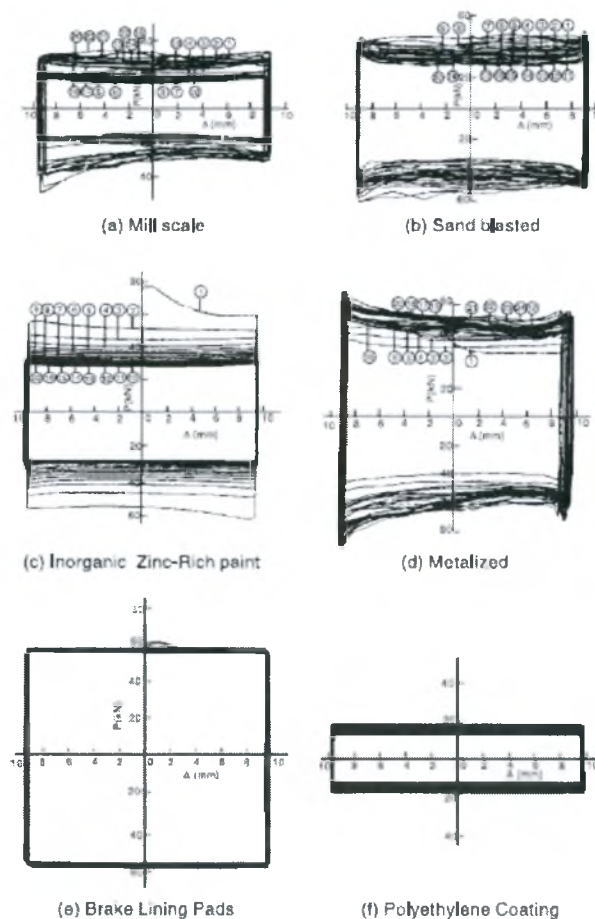
Το κύριο θεωρητικό υπόβαθρο, στο οποίο βασίζεται η λειτουργία των αποσβεστήρων τριβής είναι αυτή καθαυτή η προσέγγιση του Coulomb, που χαρακτηρίζεται από την ευθεία αναλογία μεταξύ κάθετων και επαπτομενικών τροπών (tractions) στην διεπιφάνεια, και δίδεται από τη σχέση:

$$\tau_t = \mu \tau_n \quad (6)$$

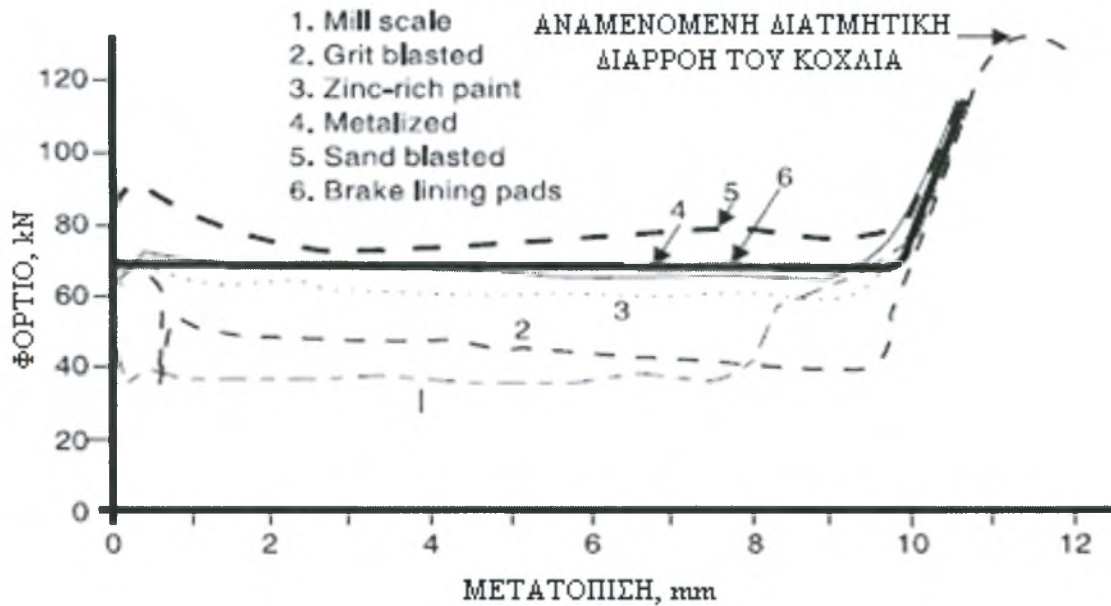
όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής. Πλην όμως, ο συντελεστής αυτός δεν πρέπει να θεωρηθεί σαν σταθερά, αλλά σαν μια μεταβλητή παράμετρο, η τιμή της οποίας εξαρτάται όχι μόνο από την επιλογή των υλικών που ολισθαίνουν σε επαφή, αλλά και από την εκάστοτε κατάσταση, στην οποία βρίσκεται η διεπιφάνεια. Η δεύτερη αυτή εξάρτηση διογκώνει τη δυσκολία του προβλήματος προσομοίωσης της τριβής, καθόσον οι επιφάνειες συχνά αποτελούν την τοποθεσία όπου διαδραματίζονται πολλές φυσικές και χημικές διεργασίες. Αυτές μπορεί να αλλάξουν τον φυσικό και χημικό χαρακτήρα των επιφανειών, και κατά συνέπεια θα έχουν μεγάλη επιρροή στην απόκριση τριβής, μέσω αλλαγής της πραγματικής επιφάνειας τριβής. Ειδικότερα, η χρήση γαλβανικών ζευγών (δηλαδή ήπιου χάλυβα και ορείχαλκου) θα πρέπει να αποφεύγεται, και επίσης να λαμβάνονται επιπρόσθετα προστατευτικά μέτρα σε επιθετικά περιβάλλοντα για αποφυγή διάβρωσης.

Ιδιαίτερη προσπάθεια έχει γίνει για την ανάπτυξη μίας σύγχρονης μηχανιστικής προσέγγισης της τριβής μεταξύ στερεών σωμάτων, μέσω της οποίας να επιτευχθεί μία βελτιωμένη κατανόηση της διαδικασίας. Εντούτοις, μία

ποσοτική αξιολόγηση της απόκρισης σύμφωνα με τις βασικές αρχές δεν είναι ακόμα εφικτή. Το πιο σημαντικό, δεδομένου ότι δεν υπάρχει ακόμα καμία θεωρία για την τριβή ολίσθησης σε σύγκριση με την καθιερωμένη θεωρία της πλαστικότητας των μετάλλων, είναι να υπάρχει περισσότερη εμπιστοσύνη στα πειραματικά αποτελέσματα. Σε αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε ο Paul κ.α. (1980), ο οποίος ξεκίνησε την ανάπτυξη των αποσβεστήρων τριβής μέσω στατικών και δυναμικών δοκιμών σε διάφορα στοιχεία που ολισθαίνουν με διαφορετική επεξεργασία επιφάνειας. Ο στόχος δεν ήταν αποκλειστικά να επιτευχθεί η μέγιστη απορρόφηση ενέργειας, αλλά ο προσδιορισμός ενός συστήματος που να παρέχει αξιόπιστη και προβλέψιμη απόκριση. Για αυτά τα πειράματα, η επαφή μεταξύ των δύο επιφανειών διατηρήθηκε με τη βοήθεια προφόρτισης κοχλιών υψηλής αντοχής, διαμέτρου 12,7mm. Οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης που προέκυψαν από τις δοκιμές κάτω από σταθερού εύρους μετατόπιση και ελεγχόμενης κυκλικής φόρτιση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.11, ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες για μονοτονική φόρτιση στο Σχήμα 2.12.



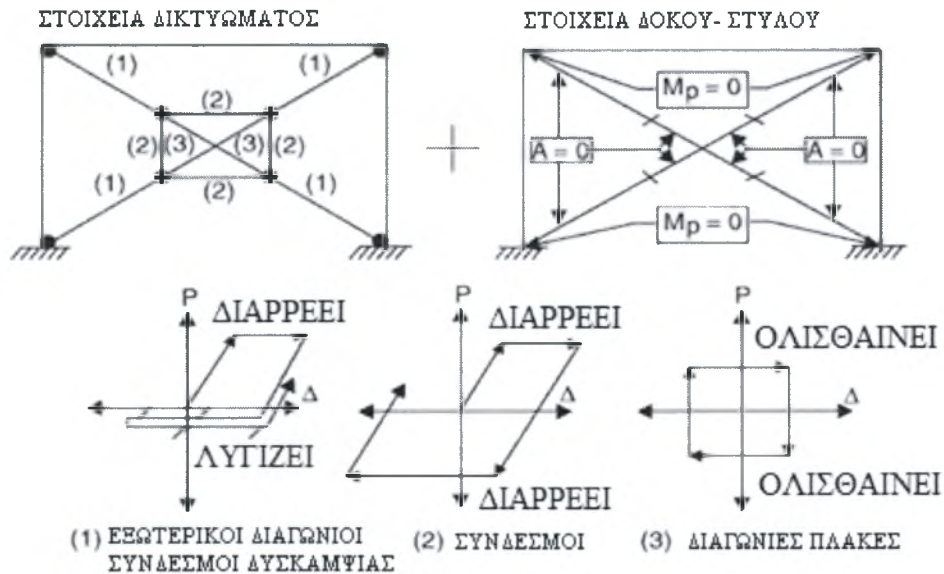
Σχήμα 2.11. Βρόγχοι υστέρησης κοχλιωτών συνδέσεων περιορισμένης ολίσθησης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση



Σχήμα 2.12. Απόκριση φορτίου –μετατόπισης κοχλιωτών συνδέσεων περιορισμένης ολίσθησης υπό μονοτονική φόρτιση

Επανερχόμενοι στη συσκευή των Paul και ο March (1982), πρόκειται για ένα σύστημα, στο οποίο συσκευές τριβής ενσωματώθηκαν στους συνδέσμους δυσκαμψίας του πλαισίου. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν την ίδια επένδυση φρένων. Σε ένα τυπικό σύστημα Χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας, οι σύνδεσμοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να λυγίζουν για σχετικά μικρά θλιπτικά φορτία.. Κατά συνέπεια, συμβάλουν μόνο όταν υποβάλλονται σε εφελκυσμό. Με την εγκατάσταση μονοαξονικών στοιχείων τριβής σε κάθε στήριγμα, η ολίσθηση θα συμβεί μόνο κατά την εφελκυστική και πολύ μικρή απώλεια ενέργειας θα λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης. Εντούτοις, η ειδική διάταξη απόσβεσης των Paul και March (Σχήμα 2.10α) επιτυγχάνει αποτελεσματικότερη λειτουργία. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ο μηχανισμός τείνει να ισιώσει τους συνδέσμους που έχουν λυγίσει και επιτρέπει την ολίσθηση και στην εφελκυστική και στην θλιπτική κατεύθυνση. Αρχικά, οι εν λόγω ερευνητές χρησιμοποιούσαν ένα απλό ελαστοπλαστικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των αποσβεστήρων τριβής σε X - συνδέσμους. Εντούτοις, οι Filiatrault και Cherry (1987) βρήκαν ότι το μοντέλο αυτό είναι έγκυρο μόνο εάν η συσκευή τριβής ολισθαίνει κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου και εάν η ολίσθηση είναι πάντα επαρκής για να ισιώσει τελείως κάθε λυγισμένο μέλος – σύνδεσμο. Διαφορετικά, το μοντέλο των Paul-March υπερεκτιμά τις απώλειες

ενέργειας. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, οι Filiatrault και Cherry πρότειναν ένα πιο λεπτομερές μακροσκοπικό μοντέλο για τη συσκευή, που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.13.

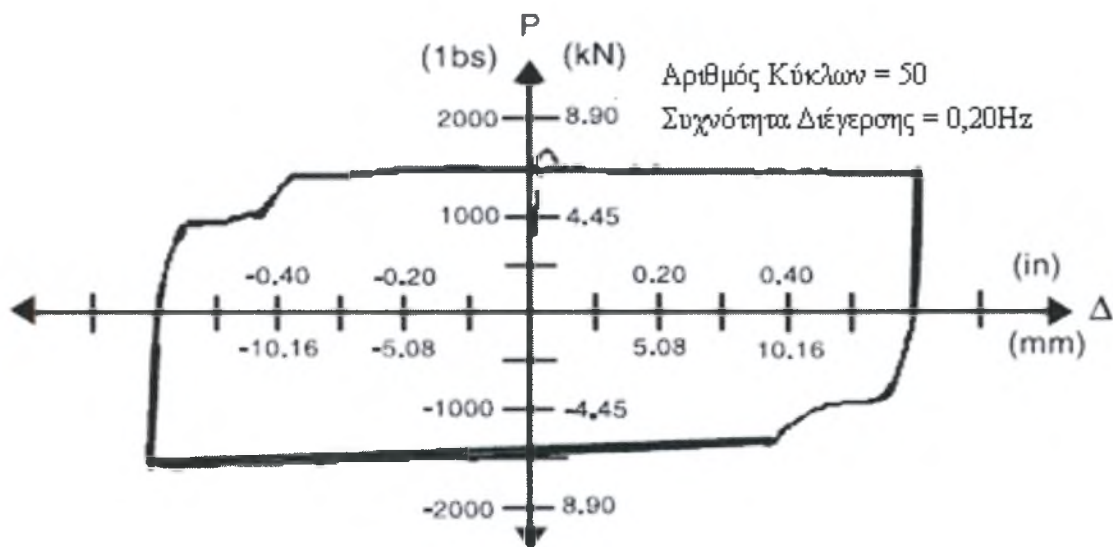


Σχήμα 2.13. Εξευγενισμένο μοντέλο αποσβεστήρων τριβής σε X – συνδέσμους

Κάθε μέλος του συστήματος αντιπροσωπεύεται από μεμονωμένα στοιχεία με αξονικά και καμπτικά χαρακτηριστικά. Κατά συνέπεια, οι σύνδεσμοι υποτίθεται ότι διαρρέουν εφελκυστικά και λυγίζουν ελαστικά υπό θλίψη θλίψη. Οι συνδέσεις των συσκευών επιτρέπεται να διαρρέουν και σε εφελκυσμό και σε θλίψη, ενώ τα ολισθαίνοντα τακάκια αναπαρίστανται μέσω ενός μοντέλου υστέρησης, που αντιστοιχεί στα πειραματικά αποτελέσματα του Paul (1980). Η καμπτική δυσκαμψία λαμβάνεται υπόψη, για να διατηρήσει την ευστάθεια του μηχανισμού απορρόφησης ενέργειας.

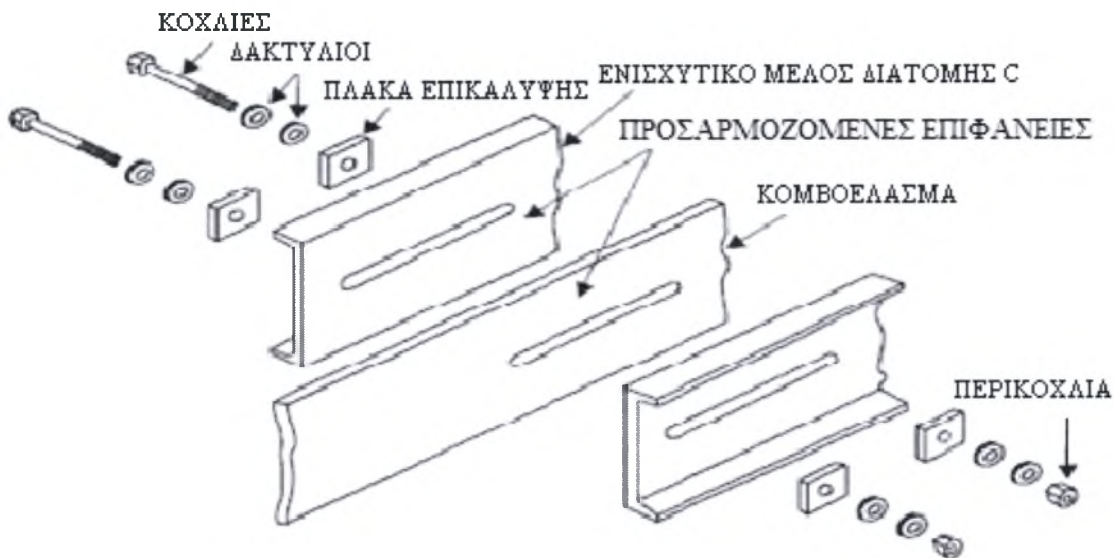
Εκτός από την ανάπτυξη του νέου μοντέλου, οι Filiatrault και Cherry (1987) πραγματοποίησαν μία σειρά από φυσικά πειράματα. Ειδικότερα, εξέτασαν την απόκριση του περιγραφόμενου αποσβεστήρα, με μαξιλάρια επένδυσης φρένων από άσβεστο, που υποβάλλεται σε κυκλική μετατόπιση ελεγχόμενης φόρτισης κατά τη μία διαγώνιο.. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.14, από τα οποία επισημαίνεται ότι μία αξιόπιστη απόκριση διατηρείται ακόμα και με το πέρας 50 κύκλων με μετατόπιση εύρους 15mm, ενώ οι βρόγχοι υστέρησης δεν παραμένουν πλέον τελείως ορθογωνικοί. Οι εγχοπές που εμφανίζονται

στις δύο γωνίες του βρόγχου οφείλονται στη διαφορά της διαμέτρου των κοχλιών και των οπών τους. Στη πραγματικότητα, τα αποτελέσματα του διαγράμματος, επιτεύχθηκαν μετά την εισαγωγή των χαλύβδινων δακτυλίων τριβής στις τρύπες και στις αυλακώσεις της συσκευής. Από αυτή την έρευνα είναι σαφές ότι φαινομενικά δευτερεύουσες λεπτομέρειες επεξεργασίας μπορεί να έχουν επιπτώσεις στη γενική απόδοση του αποσβεστήρα. Ένα μοντέλο υστέρησης μπορεί να αναπτυχθεί από αυτό το ατελές στοιχείο τριβής Coulomb, το οποίο ουσιαστικά περιλαμβάνει αναστολές πολλαπλών επιπέδων.

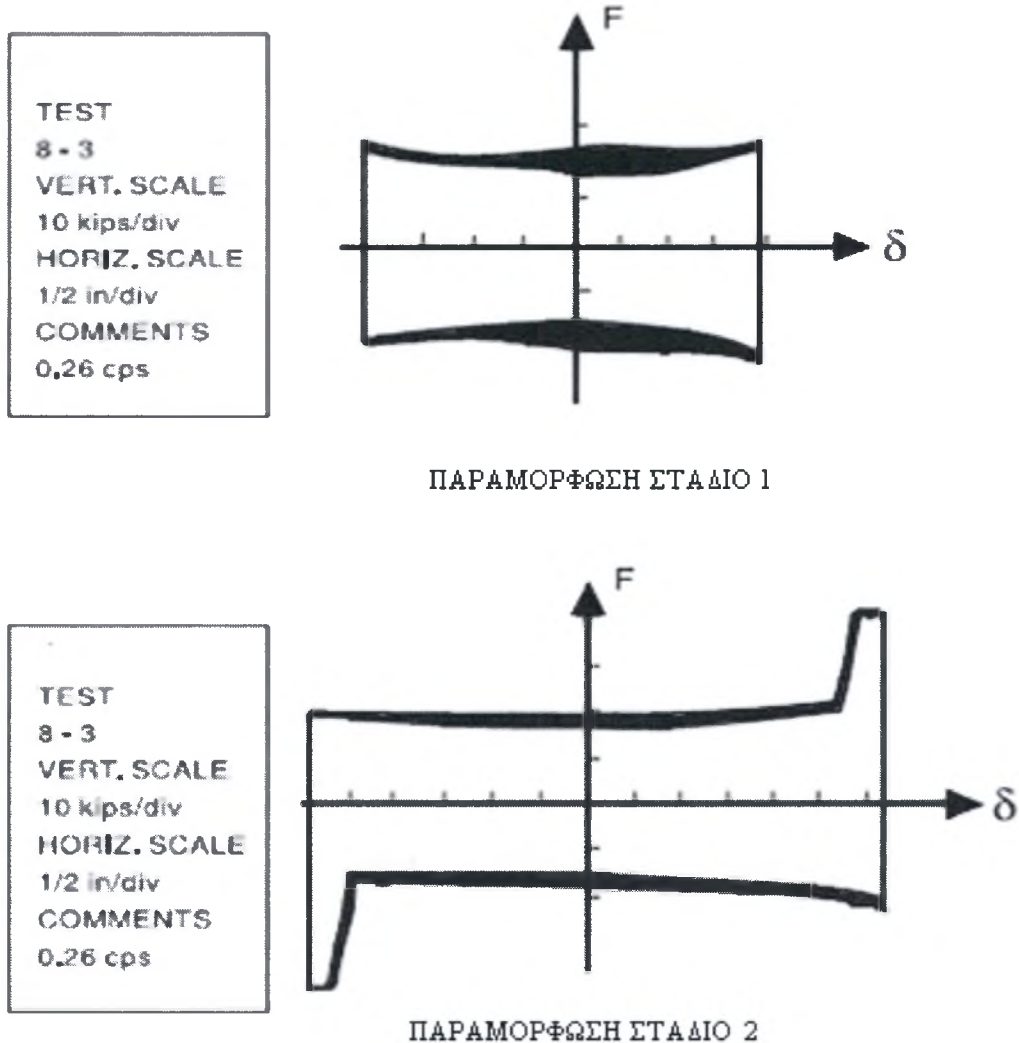


Σχήμα 2.14. Πειραματικοί βρόγχοι υστέρησης αποσβεστήρων τριβής σε X – συνδέσμους

Διάφοροι εναλλακτικοί αποσβεστήρες τριβής έχουν προταθεί στην πρόσφατη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, ο Roik (1988) ασχολήθηκε με το σεισμικό έλεγχο των κατασκευών μέσω της χρήσης στοιχείων τριών σταδίων τριβής (friction-grip). Ο FitzGerald (1989) ασχολήθηκε με ένα άλλο απλό σχέδιο, την κοχλιωτή σύνδεση επιμήκων οπών - σχισμών (slotted bolted connection, SBC) του Σχήματος 2.15, ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα, που προκύπτουν κάτω από μεγάλη μετατόπιση και ελεγχόμενη φόρτιση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.16.

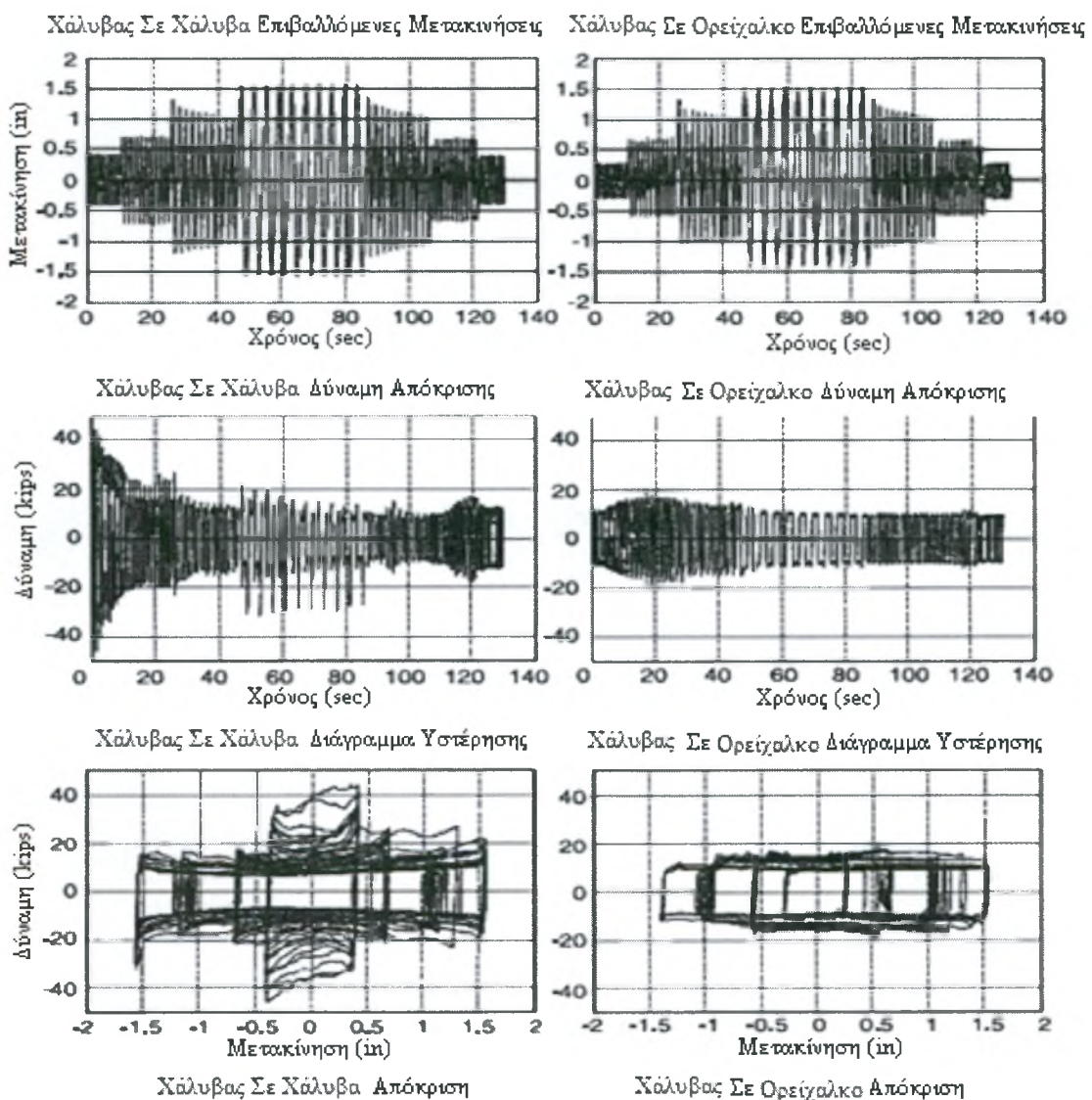


Σχήμα 2.15. Κοχλιωτή σύνδεση οπών – σχισμών (SBC)



Σχήμα 2.16. Τυπικό διάγραμμα φορτίου παραμόρφωσης της SBC

Στη κατάσταση 1, το κομβόελασμα ολισθαίνει ως προς τα ελάσματα του ενισχυμένου μέλους διατομής C, ενώ στη κατάσταση 2 υπάρχει επίσης ολίσθηση μεταξύ του ενισχυμένου μέλους διατομής C και των πλακών επικάλυψης. Πρέπει να επισημάνουμε ότι στα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα, η παρούσα συμπεριφορά αποδίδεται στη χρησιμοποίηση των δακτυλίων ελατηρίων Belleville. Αντίθετα, ο Grigorian (1983) χρησιμοποιεί δακτυλίους Belleville για το σχεδιασμό SBC με μία κακή συμπεριφορά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Προφανώς, μία τέτοια συμπεριφορά από ένα κρίσιμο δομικό στοιχείο κρίνεται ως ανεπίτρεπτη.

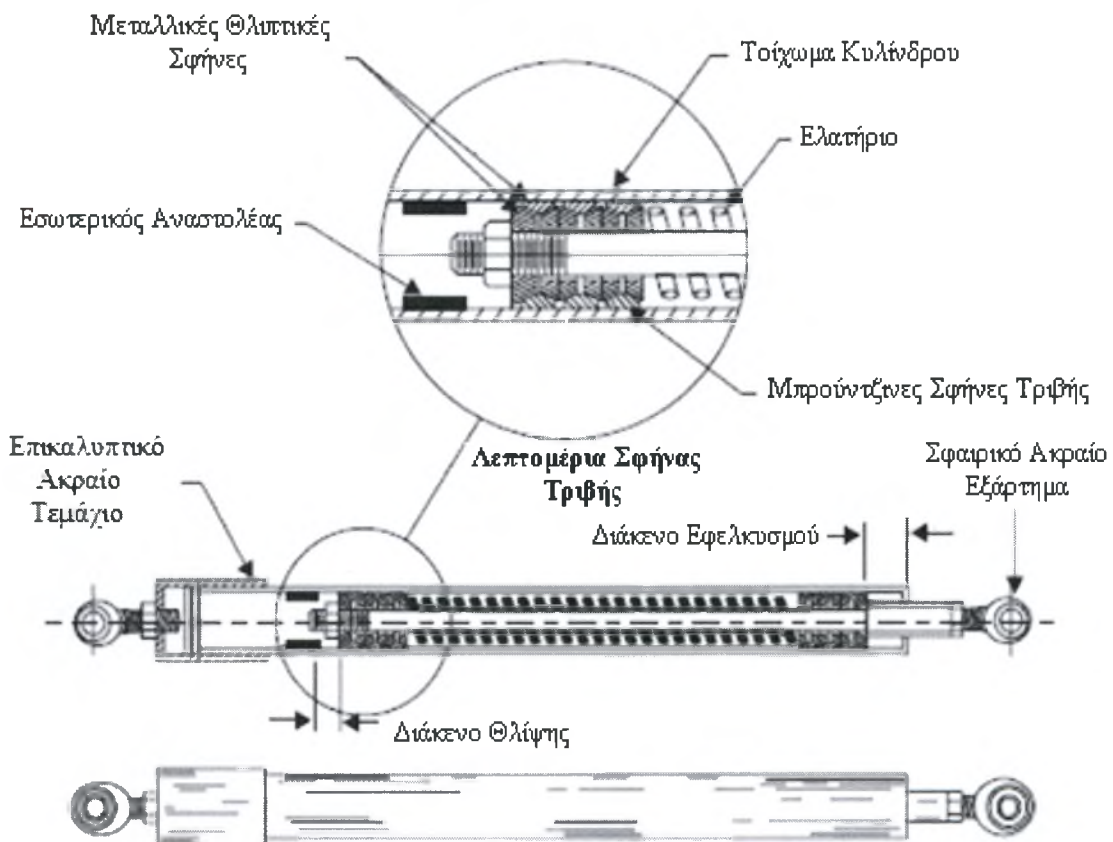


Σχήμα 2.17. Κυκλική Απόκριση της SBC

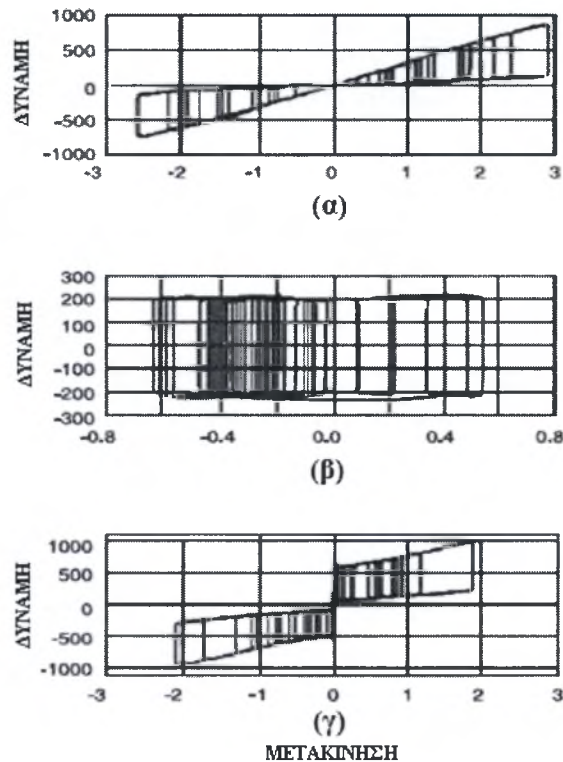
Ο μονοαξονικός αποσβεστήρας τριβής (Σχ. 2.10β), που κατασκευάστηκε από τη Sumitomo Metal Industries Ltd, χρησιμοποιεί ένα ελαφρώς πιο περίπλοκο σχεδιασμό. Το προ-συμπιεσμένο εσωτερικό ελατήριο, ασκεί μία δύναμη, η οποία μετατρέπεται μέσω της δράσης των εσωτερικών και εξωτερικών σφηνών σε δύναμη κάθετη στα τακάκια τριβής. Τα συγκεκριμένα τακάκια από κράματα χαλκού περιέχουν και γραφίτη, ο οποίος παρέχει ξηρά λίπανση, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερός ο συντελεστής τριβής μεταξύ των τακακίων και της εσωτερικής επιφάνειας από ανοξείδωτο χάλυβα. Οι Aiken και Kelly (1990) καταδεικνύουν ότι η συμπεριφορά αυτών των αποσβεστήρων είναι εξαιρετικά κανονική και επαναλαμβανόμενη με ορθογωνικούς βρόγχους υστέρησης. Επιπλέον, η επίδραση της συχνότητας και του εύρους φόρτισης, του αριθμού των κύκλων και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος θεωρείται αμελητέα στην συμπεριφορά του αποσβεστήρα αυτού. Παρόλο που δεν υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα, που να υποστηρίζουν τη συσκευή αυτή, φαίνεται ότι ένα απλό τέλεια ελαστικό – ιδεατά πλαστικό μοντέλο μπορεί να είναι κατάλληλο για την δομοστατική ανάλυση και αυτής της συσκευής.

Μία άλλη διάταξη απόσβεσης τριβής είναι η Energy Dissipating Restraint (EDR), που κατασκευάστηκε από τον Fluor Daniel, λεπτομέρειες της οποίας φαίνονται στο Σχήμα 2.18. Εκ πρώτης όψεως, ο σχεδιασμός είναι παρόμοιος με τη συσκευή Sumitomo, καθώς και η συσκευή αυτή περιλαμβάνει ένα εσωτερικό ελατήριο και σφήνες τοποθετημένα σε ένα χαλύβδινο κύλινδρο. Εντούτοις, υπάρχουν νέες σπουδαία χαρακτηριστικά της συσκευής EDR, που με κατάλληλους συνδυασμούς προσδίδουν διαφορετικά χαρακτηριστικά απόκρισής (Nims κ.α., 1993α). Όπως διακρίνουμε και στο Σχήμα 2.18, η συσκευή EDR χρησιμοποιεί θλιπτικές χαλύβδινες σφήνες και χάλκινες σφήνες τριβής για τον μετασχηματισμό της αξονικής δύναμης του ελατηρίου σε κανονική πίεση, που ασκείται προς τα έξω στα κυλινδρικά τοιχώματα. Συνεπώς, η επιφάνεια τριβής διαμορφώνεται μεταξύ των χάλκινων σφηνών και του χαλύβδινου κυλίνδρου. Μέσα στον κύλινδρο υπάρχουν εσωτερικά stops, προκειμένου να δημιουργηθούν εφελκυστικά και θλιπτικά κενά Συμπερασματικά, σε αντίθεση με τη συσκευή Sumitomo, το μήκος του εσωτερικού ελατηρίου μπορεί να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής, παρέχοντας μία μεταβλητή δύναμη τριβής ολίσθησης. Τυπική πειραματική

συμπεριφοράς υστέρησης για τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις απεικονίζεται στο σχήμα 2.19. Το Σχήμα 2.19α αντιστοιχεί στην απόκριση της συσκευής με μηδενικά κενά και μηδενική προφόρτιση ελατηρίου. Οι τριγωνικοί βρόγχοι υστέρησης καταδεικνύουν ότι η δύναμη ολίσθησης είναι ανάλογη της μετατόπισης της συσκευής. Με προφόρτιση ελατηρίου αλλά χωρίς αρχικά κενά προκύπτουν οι βρόχοι υστέρησης σχήματος σημαίας (Σχ.2.19β). Ενώ, με προφόρτιση ελατηρίου και πολύ μεγάλα κενά (Σχ.2.19γ), η συσκευή συμπεριφέρεται ως τυπικός αποσβεστήρας Coulomb. Προφανώς διαπιστώνουμε ότι τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των συσκευών EDR παρουσιάζουν αρκετές διαφορές σε σχέση με άλλους αποσβεστήρες τριβής.



Σχήμα 2.18. Αποσβεστήρας τριβής τύπου EDR



Σχήμα 2.19. Πειραματικά αποτελέσματα για συσκευή EDR

Ιδιαίτερες πειραματικές μελέτες έχουν διεξαχθεί σε επίπεδο κατασκευής. Αρχικά, οι Filiatrault και Cherry (1987) αξιολόγησαν την απόδοση των cross - braced αποσβεστήρων τριβής. Δύο ίδια τριώροφα μεταλλικά κτήρια κλίμακας 1:3 κατασκευάστηκαν με ιδιαίτερο τρόπο, έτσι ώστε να επιτρέπεται εύκολα ο μετασχηματισμός τους μεταξύ καμπτικού (MR), με συνδέσμους δυσκαμψίας (BMR) και με συνδέσμους δυσκαμψίας αποσβεστήρων τριβής (FDB) πλαισίων. Οι φυσικές συχνότητες και οι λόγοι απόσβεσης μετρήθηκαν για μικρό εύρος και για τις τρεις διαμορφώσεις. Οι δοκιμές έγιναν σε δονητική τράπεζα (shaking table) υπό ένα πλήθος καταγεγραμμένων σεισμών διαφόρων συχνοτήτων και μεγέθους. Γενικά, διαπιστώθηκε ότι οι κατασκευές με αποσβεστήρες τριβής παρουσίασαν σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά σε σεισμούς υψηλής έντασης σε σύγκριση με τις κατασκευές με καμπτικό (MR) και με συνδέσμους δυσκαμψίας (BMR) σχεδιασμό για υψηλής πυκνότητας σήματα. Παρόλα αυτά, πρέπει να αναφερθούμε και στο θέμα της χρήσης των συσκευών σε κατασκευές πραγματικής κλίμακας. Ακόμα και αν στο πείραμα τα φορτία ολίσθησης προσαρμόστηκαν στα κατάλληλα επίπεδα, αυτή η έλλειψη συμμετρίας της κλίμακας μειώνει τη συμβολή οποιοδήποτε γεωμετρικών μη γραμμικοτήτων που μπορεί να

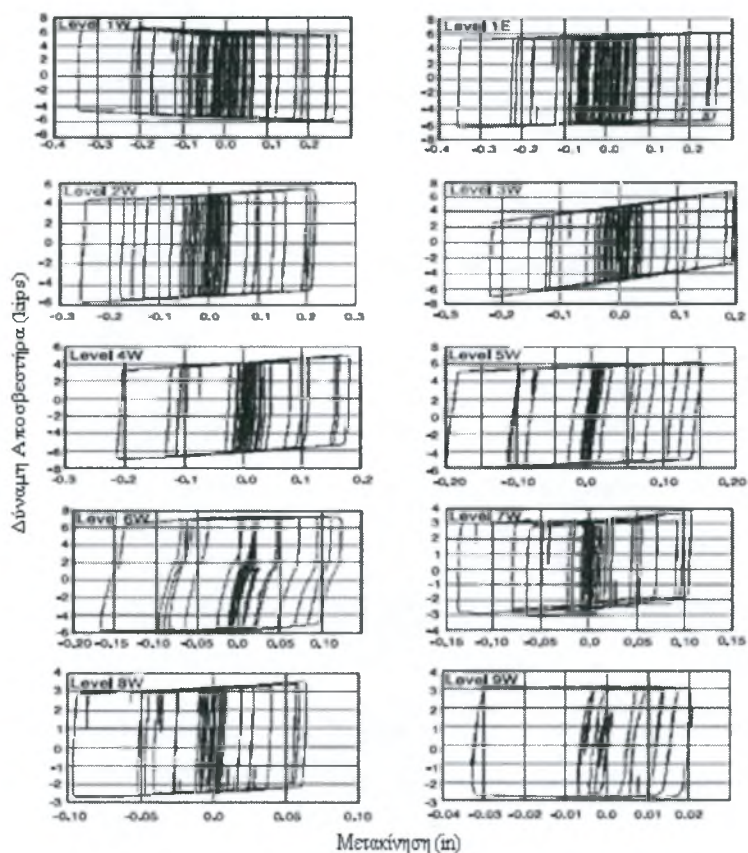
συνδέονται με τη συσκευή. Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η συμβολή αυτή χωρίς περαιτέρω δοκιμή ή λεπτομερή διαμόρφωση.

Μία πρόσθετη πειραματική μελέτη για cross-braced αποσβεστήρες διεξήχθη από τον Aiken κ.α. (1988). Αναλυτικότερα, μία τριών ανοιγμάτων, εννεαώροφη μεταλλική κατασκευή κλίμακας 1:4 εξετάστηκε εκτενώς σε προσομοιωτή σεισμού με MR διαμόρφωση πλαισίου και με διαμόρφωση με χρήση αποσβεστήρων τριβής FDB. Τα στοιχεία απόσβεσης στον σχεδιασμό με χρήση αποσβεστήρων τριβής διέθεταν επένδυση τακακιών/ανοξειδωτο χάλυβα στη διεπιφάνεια τριβής. Μικρό εύρος φυσικών συχνοτήτων και ποσοστών απόσβεσης καθορίστηκαν και για τις δύο διαμορφώσεις. Οι θεμελιώδεις συχνότητες ήταν 2.0 Hz και 2.23 Hz για MR και FDB διαμορφώσεις πλαισίων, αντίστοιχα, ενώ τα σχετικά ποσοστά απόσβεσης υπολογίστηκαν στα 2.4% και 5.6%. Η κατασκευή υποβλήθηκε σε συνολικά 10 σεισμικές διεγέρσεις διαφορετικού μεγέθους. Όπως αναμενόταν, για ένα συγκεκριμένο σεισμό, η αύξηση του μεγέθους του οδηγεί στην αύξηση της αποτελεσματικότητας των αποσβεστήρων τριβής. Για παράδειγμα, ο λόγος επιτάχυνσης εδάφους - οροφής ελαττώθηκε από 3.1 σε 2.0, καθώς η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους μιας χρονο - ιστορίας του σεισμού El Centro αυξήθηκε από 0.3g σε 0.84g. Σε αυτή την υψηλή ένταση, η κατασκευή με αποσβεστήρες τριβής παρουσίασε ισοδύναμο ποσοστό απόσβεσης 32%.

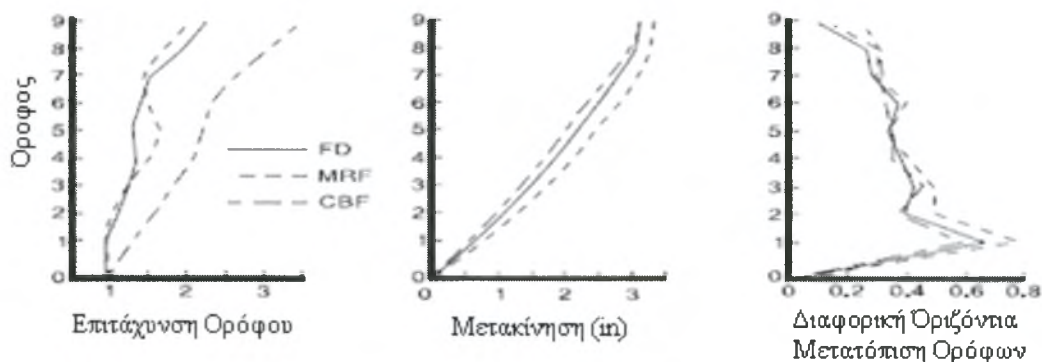
Προκειμένου να γίνει η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ των MR και FDB πλαισίων, ο Aiken (1988) χρησιμοποίησε χρονική κλιμάκωση της επιτάχυνσης της εδαφικής κίνησης του σεισμού του Mexico City (1985) με στόχο την επίτευξη μίας οιονεί - συντονιστικής απόκρισης για κάθε διαμόρφωση. Η κυρίαρχη συχνότητα των σημάτων ήταν ρυθμισμένη για να συμπίπτει με τη θεμελιώδη συχνότητα της κατασκευής. Για το MR πλαίσιο, μια μέγιστη επιτάχυνση εδάφους 0,25g προκάλεσε μετατόπιση 3.1 in ενώ για το πλαίσιο με αποσβεστήρες τριβής, μια μέγιστη επιτάχυνση 0.65 in προκάλεσε μετατόπιση 2.8 in. Επιπλέον, στη τελευταία περίπτωση περίπου το 70% της εισερχόμενης ενέργειας απορροφήθηκε από τις συσκευές τριβής. Τέλος, τα κύρια δομικά μέρη παρέμειναν σε ελαστική περιοχή.

Πιο πρόσφατα, οι Aiken και Cherry (1990), εργαζόμενοι στην ίδια εννεαώροφη κατασκευή με προηγουμένως, παρουσίασαν μία συνδυασμένη

πειραματική και αριθμητική έρευνα που περιελάμβανε μονοαξονικά Sumitomo στοιχεία τριβής εγκατεστημένα σε συνδυασμό με ενίσχυση chevron. Διεξήχθη ένα περιεκτικό πρόγραμμα δοκιμών, που περιελάμβανε ελεύθερη ταλάντωση, τυχαία διέγερση και παλμική φόρτιση μαζί με δεκατέσσερις διαφορετικές εδαφικές κινήσεις. Οι βρόγχοι υστέρησης παρουσιάστηκαν αξιόπιστοι και πολύ κοντά στην ιδεατή συμπεριφορά Coulomb σχεδόν σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών. Ενδεικτικά, η απόκριση της εννεαώροφης κατασκευής, όταν υποβλήθηκε σε μέγιστη επιτάχυνση εδάφους El Centro 0.718g παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20. Περίπου το 60% της εισερχόμενης ενέργειας απορροφήθηκε από τους αποσβεστήρες. Επίσης, οι αντίστοιχες επιταχύνσεις ορόφων, μετατοπίσεις και διαφορές πλευρικής μετακίνησης μεταξύ ορόφων απεικονίζονται στο Σχήμα 2.21, μαζί με αυτά των συμβατικών MR και BMR πλαισίων. Είναι προφανές από τα διαγράμματα ότι η κατασκευή με τους αποσβεστήρες τριβής συνδυάζει τα οφέλη και των BMR πλαισίων, καθώς επιτυγχάνεται παρόμοια μείωση της μετατόπισης, αλλά και των MR πλαισίων με τη μείωση της επιτάχυνσης.



Σχήμα 2.20. Απόκριση αποσβεστήρων Sumitomo σε εννεαώροφο κτίριο για El-Centro 0.712g

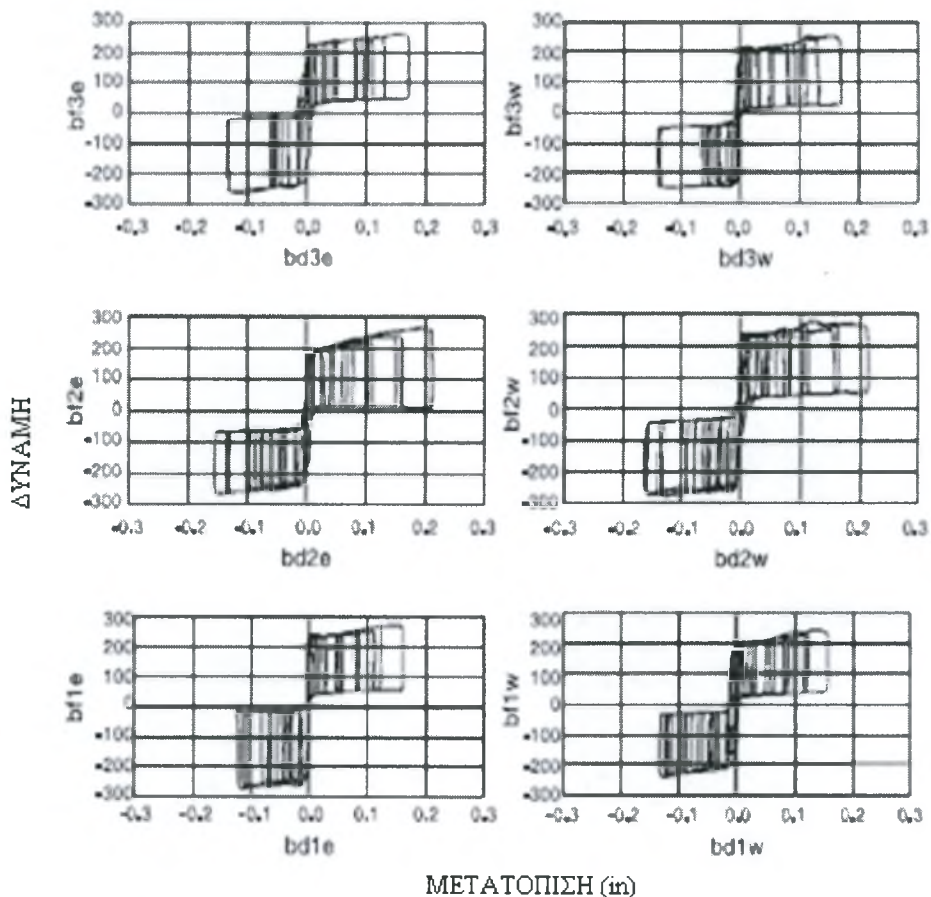


Σχήμα 2.21. Σύγκριση αποκρίσεων εννεαώροφου κτίριου για El-Centro 0.712g

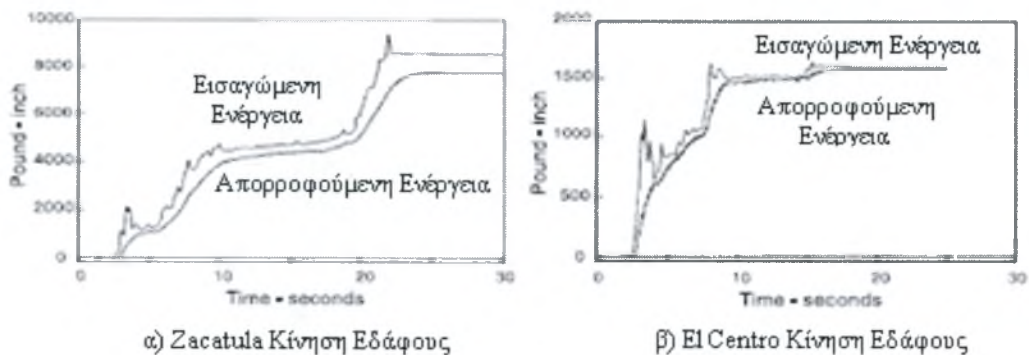
Η πειραματική μελέτη που περιγράφεται στη συνέχεια αφορά τη συμπεριφορά των EDR συσκευών. Ο Richter (1990) πραγματοποίησε πάνω από 400 δοκιμές σε δονούμενη τράπεζα χρησιμοποιώντας ένα μικρό, ύψους 6ft, τριώροφο χαλύβδινο κτήριο. Αν και εξετάστηκαν ποικίλες διαφορετικές εσωτερικές διατάξεις EDR απόσβεσης, σε κάθε περίπτωση, δύο συσκευές τοποθετήθηκαν σε κάθε όροφο. Τυπική συμπεριφορά υστέρησης των αποσβεστήρων που διαμορφώνεται χωρίς κενά και με αρχικό φορτίο ολίσθησης 200lbs παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.22 για κίνηση εδάφους Zacatula, με τους βρόγχους σχήματος σημαίας να είναι καθορισμένοι με σαφήνεια και αρκετά αξιόπιστοι. Επίσης, στα διαγράμματα του Σχήματος 2.23 απεικονίζεται οι χρονο-ιστορίες ενεργειακής συσσώρευσης για τους σεισμούς Zacatula και El Centro. Και στις δύο περιπτώσεις, οι συσκευές απόσβεσης απορροφούν πάνω από το 90% της εισερχόμενης ενέργειας. Εντούτοις, οι μηχανισμοί υστέρησης δεν ανταποκρίνονται γρήγορα σε ξαφνικές ωθήσεις. Αυτό είναι προφανές σε όλες τις καμπύλες ενεργειακής απόκρισης. Επιπλέον μερικές φορές, οι υψηλότερες μορφές διεγέρθηκαν λόγω της αλλαγής της δυσκαμψίας, γεγονός που οφείλεται στις συσκευές τριβής. Παρά τους περιορισμούς, οι EDR συσκευές παρέχουν με αξιοπιστία μείωση των μετατοπίσεων και των διαφορικών οριζόντιων μετατοπίσεων μεταξύ ορόφων και αυξάνουν αποτελεσματικά το ποσοστό απόσβεσης της κατασκευής.

Μετά την επικύρωση του μοντέλου υστέρησης για ένα συγκεκριμένο αποσβεστήρα τριβής, μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε μία γενική ανάλυση μίας κατασκευής. Αν και έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες με στόχο την εισαγωγή της έννοιας της ισοδύναμης ιξώδης απόσβεσης (Scholl 1993), γενικά όμως απαιτείται μία πλήρης μη γραμμική δυναμική ανάλυση. Οι μεθοδολογίες

πεπερασμένων στοιχείων είναι άμεσα εφαρμόσιμες, και στη πραγματικότητα έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες λεπτομερείς αριθμητικές έρευνες, που περιλαμβάνουν αποσβεστήρες τριβής. Το παρόν τμήμα περιέχει μία ανασκόπηση των πιο σημαντικών προσπαθειών για την παρουσίαση των οφελών της ενσωμάτωσης αποσβεστήρων τριβής σε κατασκευές.

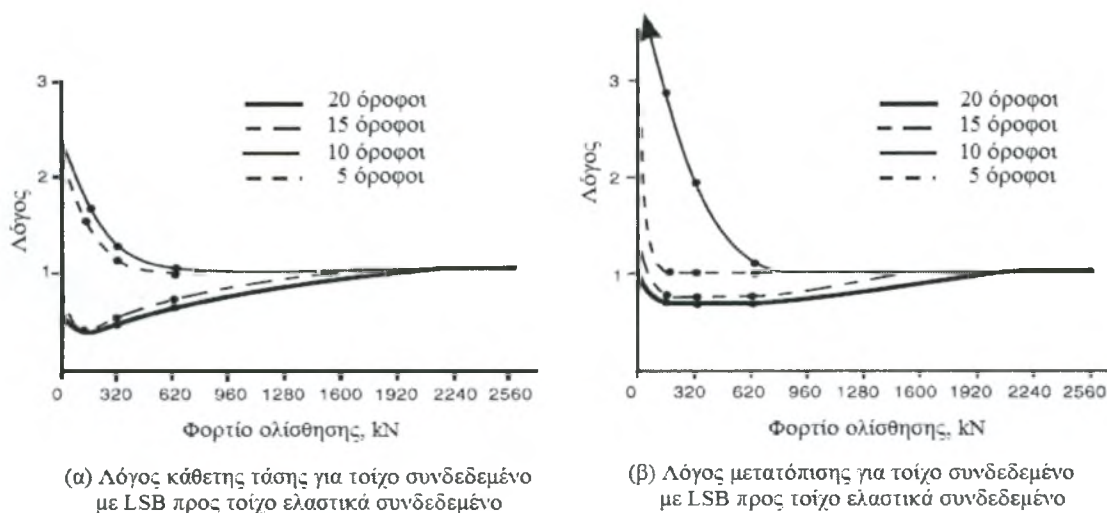


Σχήμα 2.22. Απόκριση EDR σε τριώροφο πλαίσιο δοκιμής για εδαφική κίνηση Zacatula



Σχήμα 2.23. Χρονο-ιστορίες συσσωρευμένης ενέργειας για τριώροφο πλαίσιο δοκιμής με αποσβεστήρες EDR υπό εδαφική κίνηση Zacatula και El-Centro

Ως μέρος των αρχικών εργασιών τους, οι Paul κ.α. (1980) διενήργησαν παραμετρικές μελέτες για ένα υποθετικό κτίριο διαμερισμάτων με panels, με ενσωματωμένες κοχλιωτές ενώσεις περιορισμένης ολίσθησης (Limited Slip Bolted (LSB)). Για τη μη γραμμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα DRAIN-2D (Kanaan & Powell (1973)) για τον καθορισμό της απόκρισης σε κίνηση εδάφους El-Centro S00E και με κλιμακούμενη ένταση. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το ύψος του κτηρίου και το φορτίο ολίσθησης επιδρά σημαντικά στη σεισμική απόδοση. Παραδειγματος χάριν, στο Σχήμα 2.24 παριστάνεται η μέγιστη τάση κάθετη στο τοίχωμα στη βάση και η μέγιστη μετατόπιση στην κορυφή, αντίστοιχα, ως μία συνάρτηση των δύο αυτών παραμέτρων. Λόγοι μικρότεροι της μονάδας καταδεικνύουν ενισχυμένη απόδοση για την κατασκευή με αποσβεστήρες τριβής. Είναι προφανές, ότι σημαντική βελτίωση είναι πιθανή για κτήρια 15 και 20 ορόφων, ενώ η προσθήκη LSB ενώσεων δεν είναι ευεργετική για πιο δύσκαμπτα μοντέλα 5-10 ορόφων. Δυστυχώς, η συμπεριφορά είναι δύσκολο να γενικευθεί, επειδή η απόκριση επηρεάζεται σημαντικά από τη συχνότητα του σεισμικού σήματος.



Σχήμα 2.24. Αριθμητικά αποτελέσματα σύνδεσης LSB για εδαφική κίνηση El-Centro

Οι Paul και Marsh (1982) παρουσίασαν παρόμοιες αριθμητικές μελέτες για ένα 10-όροφο μεταλλικό πλαίσιο επί δύσκαμπτης θεμελίωσης, πάλι σε σεισμό El Centro 1940. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων τριών διαμορφώσεων, MR, BMR και FDB. Η ανάλυση με DRAIN-2D περιελάμβανε εφελκυστική διαρροή και θλιπτικό λυγισμό για τα κύρια στοιχεία του

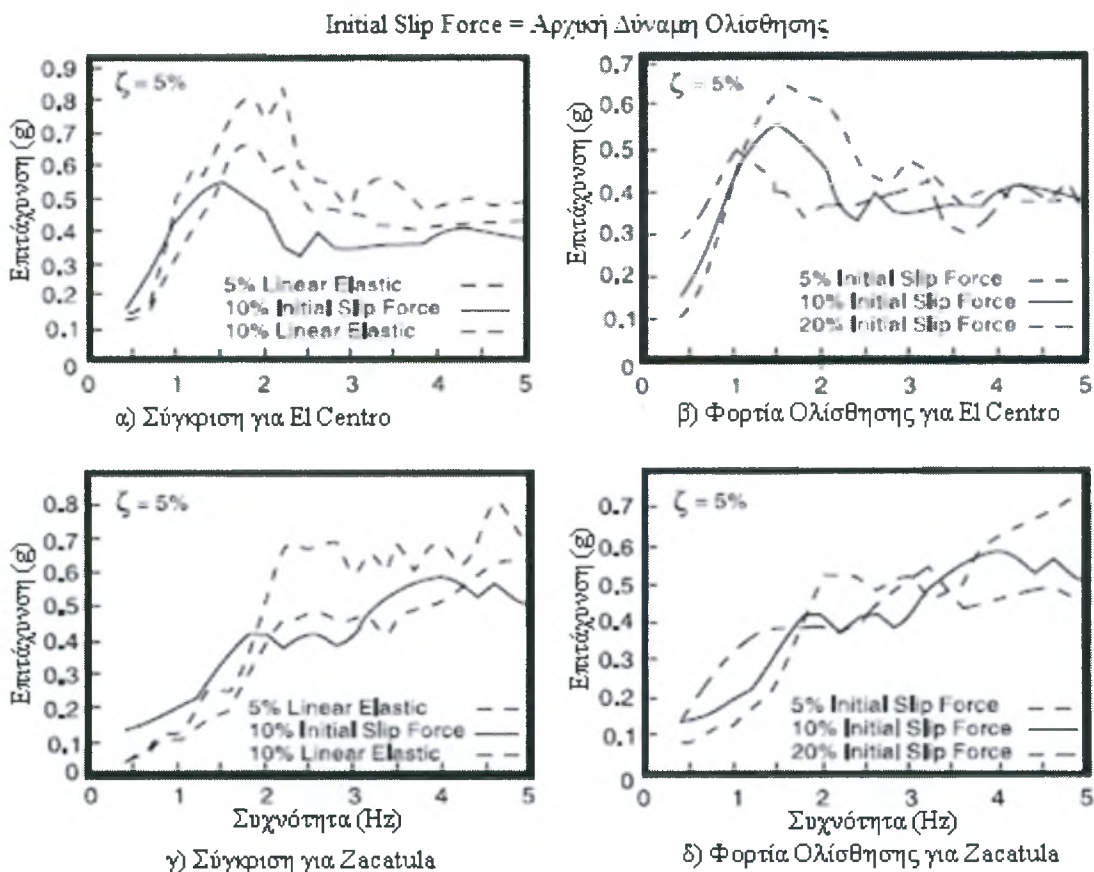
πλαisiού, μαζί με τα απλά μοντέλα υστερήσης των αποσβεστήρων τριβής. Βασική υπόθεση, και για τις τρεις διαμορφώσεις, απετέλεσε η μηδενική ιξώδης απόσβεση της κατασκευής. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη αποσβεστήρων τριβής συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της μεταξύ των ορόφων σχετικής πλευρικής μετατόπισης. Επίσης, είναι προφανής η μείωση της διάτμησης και της κάμψης στους στύλους. Παράλληλα όμως, οι αξονικές δυνάμεις παρουσίασαν μεγαλύτερες τιμές σε σύγκρισή με αυτές του MR πλαισιού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, σχηματίστηκαν πλαστικές αρθρώσεις στις δοκούς του MR και BMR σχεδιασμού, ενώ τα κύρια στοιχεία της FDB διαμόρφωσης για βέλτιστα φορτία ολίσθησης παρέμειναν στην ελαστική περιοχή. Εντούτοις, τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν για ένα μόνο σεισμό, οπότε μπορεί να μην αποτελούν και γενικό συμπέρασμα.

Παρόμοιες μελέτες πραγματοποιήθηκαν και από τους Filiatrault και Cherry (1987,1988). Παρουσιάστηκε μία συγκριτική αριθμητική μελέτη, η οποία περιελάμβανε ένα συμβατικό μεταλλικό κτίριο με αποσβεστήρες τριβής, και ένα κτίριο μονωμένο στη βάση με BMR. Για τη σύγκριση επιστρατεύτηκε ένα τυπικό δεκαόροφο κτίριο με διαγώνιες ενισχύσεις σε κάθε όροφο. Τα βέλτιστα φορτία ολίσθησης των συσκευών τριβής καθορίστηκαν με τη χρήση DRAIN-2D για σεισμικό σήμα El Centro S00E. Με παρόμοιο τρόπο, οι παράμετροι σχεδιασμού καθορίστηκαν για το υστερητικό σύστημα απομόνωσης βάσης μολύβδου – ελαστικού. Μαθηματικά μοντέλα και των τριών συστημάτων υποβλήθηκαν σε σήματα των σεισμών του 1977 Bucharest και του 1985 Mexico City, οι οποίοι παρουσιάζουν πολύ ισχυρή χαμηλή συχνότητα. Κάτω από το πρίσμα των ζημιών σε δομικά στοιχεία, τα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι και τα πλαίσια με μονωμένη βάση (BIBMR) και αυτά με τους αποσβεστήρες τριβής συμπεριφέρθηκαν καλά στον El Centro σεισμό. Εντούτοις, μόνο ο σχεδιασμός με αποσβεστήρες τριβής FDB ήταν αποτελεσματικός και στις δύο υπόλοιπες διαταραχές. Παρ' όλα αυτά, είναι δύσκολο να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα σχετικά με τα πλεονεκτήματα του σχεδιασμού με αποσβεστήρες τριβής FDB και του σχεδιασμού με μονωμένη βάση BIBMR. Επιπλέον, μπορεί κάποιος να υποστηρίξει ότι το σύστημα με τη μόνωση βάσης απλά δεν ήταν σχεδιασμένο κατάλληλα, ώστε να συμπεριφερθεί ευνοϊκά σε σεισμούς με ισχυρή χαμηλή συχνότητα.

Από αυτή την άποψη, η συγκεκριμένη μελέτη των Filiatrault και Cherry επικεντρώνεται στη σημασία της βελτιστοποίησης της απόδοσης της κατασκευής, όχι για ένα μεμονωμένο σεισμικό σήμα, αλλά για ένα εύρος σεισμών που αναμένονται να εμφανιστούν σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Η απαιτούμενη υπολογιστική προσπάθεια για μία τέτοια προσέγγιση βρίσκεται εντός των δυνατοτήτων των μοντέρνων ηλεκτρονικών υπολογιστών, που χρησιμοποιούν οι Μηχανικοί.

Πιο πρόσφατα, αριθμητικές και θεωρητικές έρευνες, που αφορούν την συμπεριφορά των δομικών συστημάτων με ενσωματωμένες συσκευές EDR, έχουν αρχίσει να κάνουν την εμφάνισή τους. Ο Nims (1993α) πραγματοποίησε παραμετρικές μελέτες σε εξιδανικευμένα συστήματα SDOF με προστιθέμενα στοιχεία τριβής που παράγουν σχήματος σημαίας και τριγωνικούς βρόγχους υστέρησης. Οι εξεταζόμενες παράμετροι περιελάμβαναν τις συχνότητες της ενισχυμένης και μη ενισχυμένης κατασκευής, το λόγο απόσβεσης ζ της μη ενισχυμένης κατασκευής, το αρχικό φορτίο ολίσθησης P_1 της συσκευής ως ποσοστό του βάρους της κατασκευής και τα συστατικά εύρους και συχνότητας του σεισμικού σήματος. Στο Σχήμα 2.25 παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό σύνολο αποτελεσμάτων συσκευών, με βρόγχους υστέρησης σχήματος σημαίας. Η απόκριση επιτάχυνσης, λόγω των σεισμών El Centro και Zacamula, παρουσιάζεται σε σχέση με την συχνότητα της μη ενισχυμένης κατασκευής για $\zeta = 0.05$. Η συχνότητα της ενισχυμένης κατασκευής, σε όλες τις περιπτώσεις, υποτίθεται ότι είναι ίση με το διπλάσιο της συχνότητας της μη - ενισχυμένης. Από τα Σχήματα 2.25α,γ, είναι προφανές ότι με τη προσθήκη των συσκευών τριβής επέρχεται μείωση της αποκρίσεως, εκτός των κατασκευών σε φάσμα χαμηλής συχνότητας. Επίσης, περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα μη ενισχυμένης κατασκευής με $\zeta = 0.10$ για την επεξήγηση των επιδράσεων της προσθήκης αμιγώς ιξωδών μηχανισμών απόσβεσης. Η αλλαγή της απόκρισης σε σχέση με το φορτίο αρχικής ολίσθησης ποσοτικοποιείται στα Σχήματα 2.25β,δ. Τα εν λόγω αποτελέσματα EDR αφορούν ένα SDOF σύστημα. Εντούτοις, οι Nims κ.α. (1993β) ανέφεραν και τη συμπεριφορά ενός εξαώροφου, κλίμακας 0.3 μεταλλικού MDOF κτιρίου, το οποίο υποβάλλεται σε σεισμικές διεγέρσεις του El Centro και Zacamula. Οι συγκρίσεις που έγιναν με μη ενισχυμένα και συμβατικά ενισχυμένα πλαίσια καταδεικνύουν ότι οι

αποσβεστήρες τριβής μειώνουν αποτελεσματικά τις μετατοπίσεις, ενώ διατηρούν συγκρίσιμα επίπεδα επιτάχυνσης.



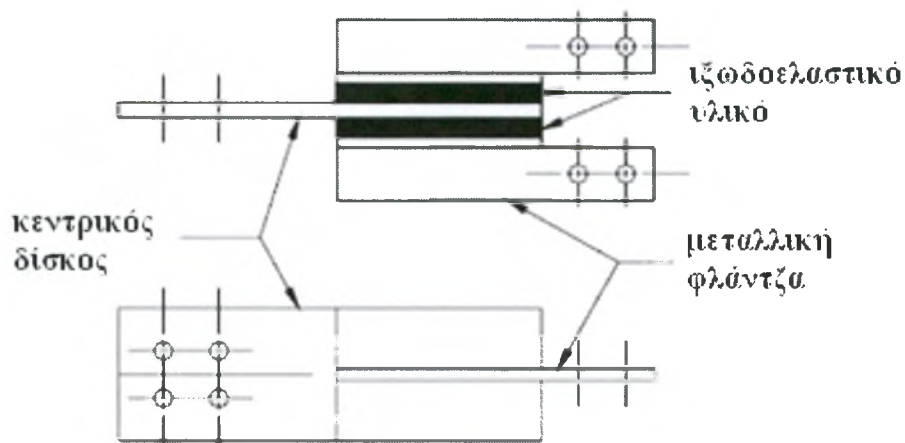
Σχήμα 2.25. Αριθμητική απόκριση SDOF κατασκευής με EDR

2.2.3. Ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες

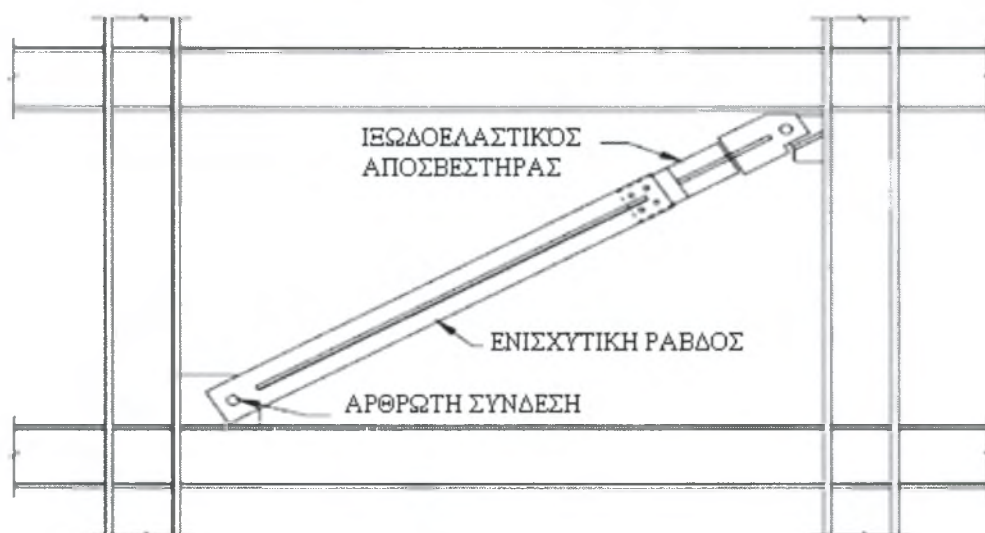
(α) Γενική Περιγραφή

Οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες κατασκευάζονται από ακρυλικά πολυμερή σώματα, τα οποία τοποθετούνται μεταξύ χαλύβδινων ελασμάτων υπό μορφή sandwich, κολλιούνται σε αυτές και χρησιμοποιούνται σε ενισχυμένα πλαίσια, σύμφωνα με τα Σχήματα 2.26 και 2.27. Αρχικά, οι ιξωδοελαστικές διατάξεις απόσβεσης σχεδιάστηκαν με σκοπό τον έλεγχο μικρού εύρους και υψηλών συχνοτήτων ταλαντώσεων, οι οποίες οφείλονται στον άνεμο. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια έγιναν σημαντικές πρόοδοι στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων για σεισμικές εφαρμογές. Προκειμένου να αξιολογηθούν οι σεισμικές δυνατότητες των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς πειραματικές δοκιμές σε μεταλλικά πλαίσια (Constantinou κ.α.1992) και σε

πραγματική κλίμακα σε μεταλλικές κατασκευές. Επίσης, διάφορες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τον καθορισμό των αποδοτικότερων και ακριβέστερων μεθόδων ανάλυσης των ιξωδοελαστικών συσκευών σε δομήματα.



Σχήμα 2.26. Ιξωδοελαστικός αποσβεστήρας



Σχήμα 2.27. Ιξωδοελαστικός αποσβεστήρας σε μεταλλικό πλαίσιο

(β) Ανάλυση γραμμικών ιξωδοελαστικών κατασκευών

Τα ιξωδοελαστικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας μπορούν να πάρουν τη μορφή ιξωδοελαστικού στερεού, ιξωδοελαστικού ρευστού και ιξωδών συσκευών. Γενικά, τέτοιες συσκευές παρουσιάζουν μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες εξαρτώνται από τη συχνότητα, τη θερμοκρασία και υπό συγκεκριμένες συνθήκες και από την παραμόρφωση. Στην τρέχουσα παράγραφο, η ανάλυση περιορίζεται στο

απλούστερο δυνατό μοντέλο για αυτές τις συσκευές, δηλαδή το μοντέλο Kelvin. Η δύναμη σε κάθε μία συσκευή προσδιορίζεται ως συνάρτηση της σχετικής μετατόπισης x και της σχετικής ταχύτητας ως εξής:

$$F = \bar{K}(\omega)x + \bar{c}(\omega)\dot{x} \quad (7)$$

όπου το \bar{K} και το \bar{c} είναι, αντίστοιχα, οι συντελεστές της αποθηκευμένης δυσκαμψίας και της απόσβεσης της συσκευής. Αυτές οι ποσότητες είναι, γενικά, εξαρτώμενες από τη συχνότητα. Εντούτοις, υποτίθεται ότι έχει επιλεγθεί μία αντιπροσωπευτική συχνότητα, έτσι ώστε στην ανάλυση που ακολουθεί οι συντελεστές αυτοί να είναι σταθεροί. Για παράδειγμα, συχνότητα ω πρέπει να είναι η συχνότητα της ελεύθερης δόνησης όταν προσδιορίζονται οι ιδιομορφικές ιδιότητες της κατασκευής με απόσβεση. Μία εφαρμογή αυτού του απλουστευμένου προσεγγιστικού μοντέλου για κατασκευές με συσκευές ιζωδοελαστικών ρευστών (Makris και Constantinou 1990 & 1991) κατέληξε σε αποτελέσματα, τα οποία ήταν σε πολύ καλή συμφωνία με ακριβή αναλυτικά αποτελέσματα.

Ενδιαφέρων είναι ο προσδιορισμός των συχνοτήτων της ελεύθερης δόνησης, των συναρτήσεων σχήματος και των λόγων απόσβεσης των κατασκευών με απόσβεση. Ενώ η κατασκευή είναι γραμμικά ελαστική και η προστιθέμενη δυσκαμψία και απόσβεση παρέχονται από στοιχεία, τα οποία υπακούουν στην απλή εξίσωση (7), το δομικό σύστημα που προκύπτει, δεν διέπεται από την εύκολη λύση προβλήματος ιδιοτιμών. Το πρόβλημα είναι αυτό της κατασκευής με μη κλασσική απόσβεση.

Εδώ χρησιμοποιείται μία προσεγγιστική μέθοδος, η οποία είναι βασισμένη σε ενεργειακές θεωρήσεις. Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ότι οι συχνότητες και οι συναρτήσεις σχήματος της κατασκευής με μη κλασσική απόσβεση είναι ίδιες με αυτές της αρχικής κατασκευής με τη προστιθέμενη επίδραση της αποθηκευμένης δυσκαμψίας, αλλά χωρίς αυτή της απόσβεσης από το σύστημα απορρόφησης ενέργειας (δηλαδή στην εξίσωση (7) $\bar{c}=0$). Κατά συνέπεια, οι συχνότητες και οι συναρτήσεις σχήματος μπορούν να καθορίζονται με τυποποιημένη ανάλυση ιδιοτιμών.

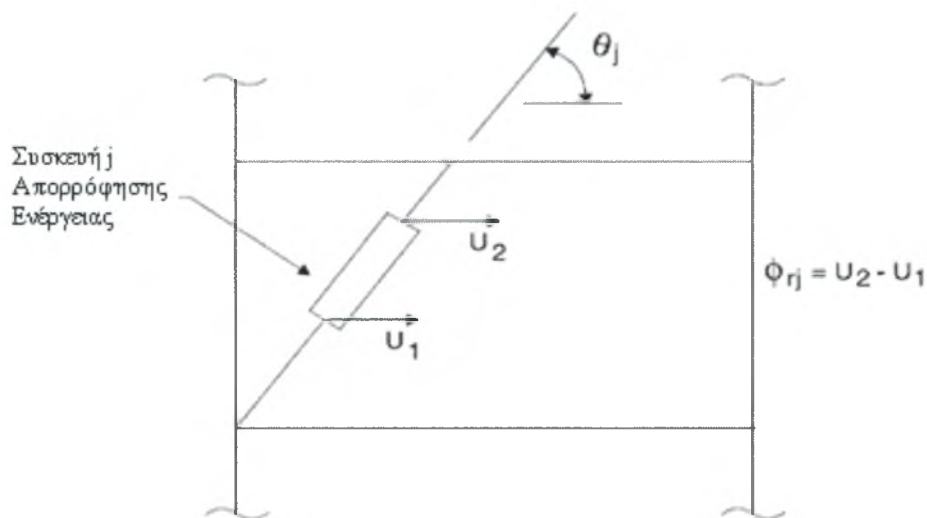
Ο λόγος απόσβεσης στην k τάξης μορφή ταλάντωσης μπορεί να εκφραστεί ως (Chopra 1995):

$$\zeta_{\kappa} = \frac{W_{\kappa}}{4\pi L_{\kappa}} \quad (8)$$

όπου W_{κ} είναι η απορροφημένη ενέργεια σε ένα κύκλο κίνησης και L_{κ} είναι η μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης. Για να υπολογιστούν τα W_{κ} και L_{κ} , γίνεται η υπόθεση ότι η κατασκευή ταλαντώνεται στην k τάξης ιδιομορφή με συχνότητα ω_{κ} και παράγοντα συνάρτησης σχήματος διανύσματος Φ . Επικεντρώνοντας μόνο στην ενέργεια που απορροφάται από τις ιξωδοελαστικές συσκευές, W_{κ} , αυτή μπορεί να διατυπωθεί ως εξής (Constantinou και Symans 1992, FEMA, 1997):

$$W_{\kappa} = \pi \omega_{\kappa} \sum_j \dot{\epsilon}_j \cos^2(\theta_j) \varphi_{rj}^2 \quad (9)$$

όπου $\dot{\epsilon}_j$ είναι ο συντελεστής απόσβεσης της συσκευής j , θ_j η γωνία κλίσης και φ_{rj} είναι η σχετική ιδιομορφική μετατόπιση της συσκευής, όπως απεικονίζεται και Σχήμα.2.28.



Σχήμα 2.28. Προσδιορισμός της σχετικής μετατόπισης και της κλίσης μίας συσκευής απορρόφησης ενέργειας

Η ενέργεια L_{κ} μπορεί να διατυπωθεί είτε ως η μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης ή ως η μέγιστη κινητική ενέργεια (Chang κ.α 1991, Constantinou και Symans 1992):

$$L_{\kappa} = \frac{1}{2} \Phi^T K \Phi = \frac{1}{2} \omega_{\kappa}^2 \sum_i m_i \Phi_i^2 \quad (10)$$

όπου K είναι το μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της αποθηκευμένης δυσκαμψίας των ιξωδοελαστικών συσκευών, m_i είναι η i συγκεντρωμένη μάζα της κατασκευής και Φ_i είναι η ιδιομορφική μετατόπιση της μάζας m_i . Ο λόγος απόσβεσης είναι ίσος με

$$\zeta_{\kappa} = \frac{1}{2} \frac{\sum_j \dot{c}_j \cos^2(\theta_j) \varphi_{rj}^2}{\omega_{\kappa} \sum_i m_i \Phi_i^2} \quad (11)$$

όπου το άθροισμα j αναφέρεται στις συσκευές απορρόφησης ενέργειας και το άθροισμα i στις συγκεντρωμένες μάζες.

Ο υπολογισμός των συχνοτήτων και των λόγων απόσβεσης απαιτεί μία επαναληπτική διαδικασία. Πρώτα, η αποθηκευμένη δυσκαμψία των συσκευών απορρόφησης ενέργειας καθορίζεται σε μία θεωρούμενη συχνότητα (δηλαδή μία εκτίμηση της συχνότητας της ελεύθερης δόνησης μιας επιλεγμένης μορφής) και κατόπιν πραγματοποιείται μία ανάλυση ιδιοτιμών της κατασκευής με την επίδραση και τις προστιθέμενες αποθηκευμένες δυσκαμψία. Έπειτα, συγκρίνονται οι υπολογισμένες και οι υποτιθέμενες συχνότητες και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι δύο συχνότητες να είναι αρκετά κοντά. Αφού πλέον έχουν βρεθεί τόσο η συχνότητα όσο και η συνάρτηση σχήματος, ο λόγος απόσβεσης βρίσκεται άμεσα από την σχέση (11). Ολόκληρη η διαδικασία υπολογισμού πρέπει να επαναληφθεί για κάθε μορφή ταλάντωσης, γεγονός που είναι ενδιαφέρον. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία, κατά προσέγγιση, μετράει την επίδραση της εξάρτησης των ιδιοτήτων των ιξωδοελαστικών συσκευών από τη συχνότητα. Για τον προσδιορισμό των επιδράσεων της εξάρτησης από τη θερμοκρασία και την παραμόρφωση, η ανάλυση πρέπει να εκτελεστεί με τις εφαρμόσιμες μηχανικές ιδιότητες. Η διαδικασία που περιγράφεται είναι απλοποιημένη (αποφεύγεται η επανάληψη) όταν το σύστημα απορρόφησης ενέργειας παρουσιάζει μία γραμμική ιξώδη συμπεριφορά, δηλαδή $\dot{K} = 0$ και \dot{c} είναι ανεξάρτητο από τη συχνότητα.

Μία εναλλακτική μορφή της εξίσωσης (11), η οποία ισχύει μόνο για συστήματα με μη μηδενική αποθηκευμένη δυσκαμψία, χρησιμοποιεί τη σχέση μεταξύ του συντελεστή απόσβεσης και της αποθηκευμένης δυσκαμψίας:

$$\dot{c} = \frac{\eta \dot{K}}{\omega} \quad (12)$$

όπου η είναι ο παράγοντας απώλειας. Το αποτέλεσμα είναι:

$$\zeta_{\kappa} = \frac{\eta}{2} \left[\frac{\sum_j \dot{K}_j \cos^2(\theta_j) \varphi_{rj}^2}{\Phi^T K \Phi} \right] \quad (13)$$

Η σημασία της εξίσωσης (13) έγκειται στο ότι ο παράγοντας απώλειας, για τυπικά ιξωδοελαστικά στερεά υλικά (π.χ. Chang κ.α. 1991), είναι μόνο

ελάχιστα εξαρτημένος από τη συχνότητα, τη θερμοκρασία ή την παραμόρφωση, ενώ η αποθηκευμένη δυσκαμψία και ο συντελεστής απόσβεσης, παρουσιάζουν σημαντική εξάρτηση από αυτές τις παραμέτρους. Τυπικά, ο παράγοντας απώλειας αυτών των υλικών έχει τιμή κοντά στη μονάδα. Στην εξίσωση (11), η ποσότητα στη παρένθεση χαρακτηρίζεται ως η συμβολή στην ενέργεια παραμόρφωσης από το σύστημα απορρόφησης ενέργειας διαιρούμενη με τη συνολική ενέργεια παραμόρφωσης της κατασκευής.

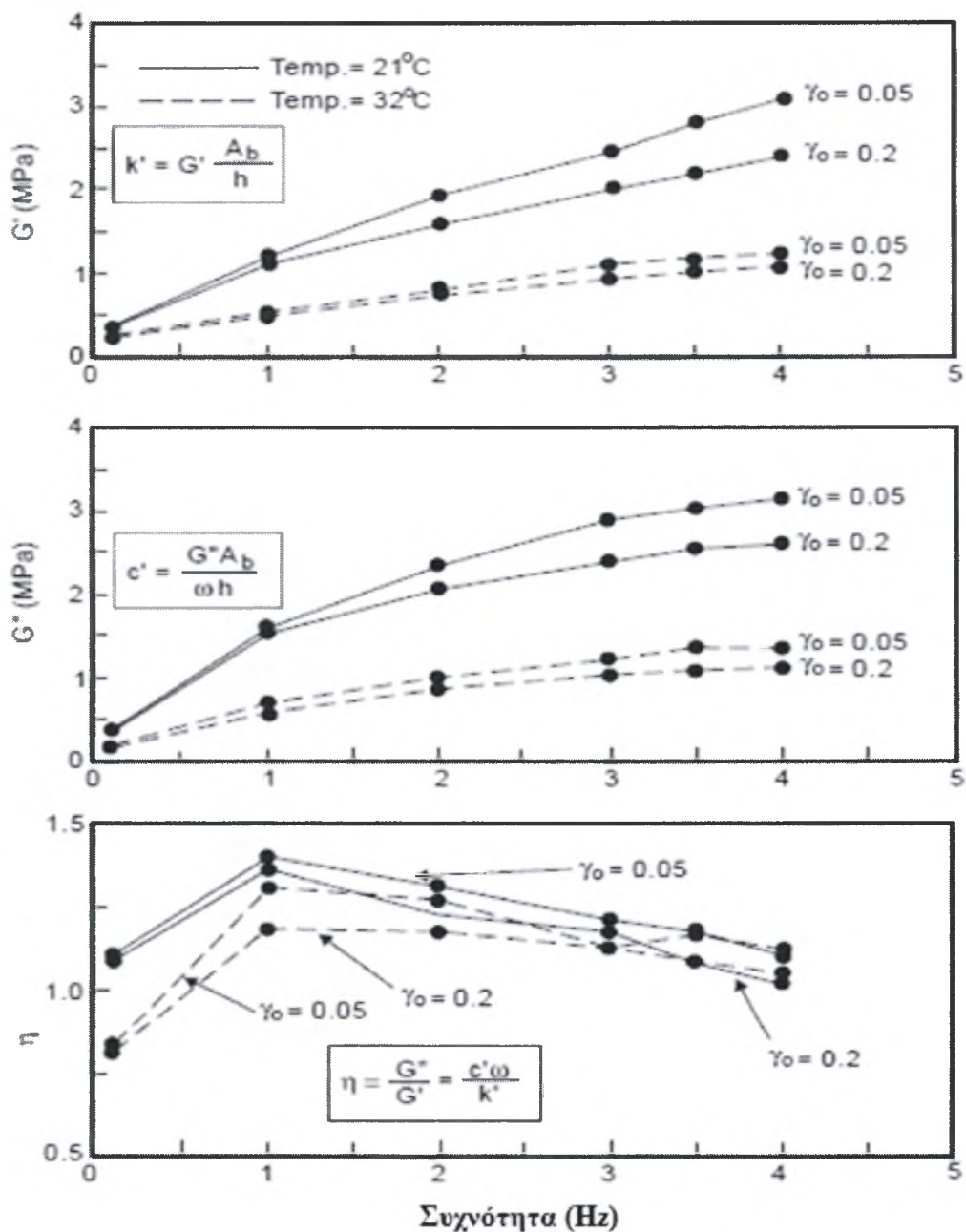
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα, με σκοπό την επίδειξη της όλης διαδικασίας. Μία μονώροφη κατασκευή έχει μία συχνότητα 2 Hz και συγκεντρωμένο βάρος 27000 N. Δύο συσκευές απορρόφησης ενέργειας τοποθετούνται διαγώνια και συνδέονται μέσω άκαμπτων συνδέσμων υπό γωνία 36°. Αρχικά, θεωρούμε ότι αυτές οι συσκευές είναι γραμμικοί ιξώδεις αποσβεστήρες ρευστού με συντελεστή απόσβεσης $\hat{c} = 15,5 \text{Ns/mm}$. Κατά την προσομοίωση της κατασκευής ως συστήματος ενός βαθμού ελευθερίας ισχύει ότι $\varphi_i = 1$ και $\varphi_{r,j} = 1$ ($i = 1, j = 1$). Επιπλέον, η συχνότητα του πλαισίου με απόσβεση μένει αμετάβλητη, καθόσον οι συσκευές στερούνται αποθηκευμένης δυσκαμψίας. Άμεση εφαρμογή της εξίσωσης (11) δίνει αποτέλεσμα $\zeta = 0.29$.

Θεωρούμε τώρα ότι δύο ιξωδοελαστικές στερεές συσκευές απορρόφησης ενέργειας συνδέονται με το πλαίσιο. Οι συσκευές αποτελούνται από το υλικό που εξέτασε ο Chang (1991) και του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.29. Αυτές οι ιδιότητες είναι ομαλοποιημένες ώστε να αντιπροσωπεύουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού παρά της συσκευής. Οι ιδιότητες που παρουσιάζονται είναι η αποθηκευμένη διάτμηση \hat{G} , τα μέτρα απώλειας \hat{G} και ο παράγοντας απώλειας η , οι οποίες σχετίζονται με την αποθηκευμένη δυσκαμψία και το συντελεστή απόσβεσης στην επιφάνεια επαφής A_b και το συνολικό πάχος h του υλικού.

$$\hat{K} = \hat{G} \frac{A_b}{h} \quad , \quad \hat{c} = \frac{\hat{G} A_b}{\omega h} \quad , \quad \eta = \frac{\hat{G}}{\hat{G}} \quad (14)$$

Το Σχήμα 2.29 παρουσιάζει την εξάρτηση των ιδιοτήτων από τη συχνότητα, τη θερμοκρασία και το εύρος παραμόρφωσης γ_0 , το οποίο ορίζεται ως το εύρος διατμητικής παραμόρφωσης διαιρούμενο με το πάχος κάθε στρώματος

υλικού. Για κάθε συσκευή, θεωρείται θερμοκρασία περίπου 20°C, παραμόρφωση περίπου 0.2 και ιδιότητες διαστάσεων $A_b = 2600\text{mm}^2$ και $h = 28\text{mm}$.



Σχήμα 2.29. Ιδιότητες στερεάς ιξωδοελαστικής συσκευής απορρόφησης ενέργειας

Με τις ιδιομορφικές ιδιότητες της κατασκευής με ιξωδοελαστική απόσβεση να έχουν προσδιοριστεί, η ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς μπορεί να εκτελεσθεί με τη προσεγγιστική απόκριση φάσματος. Σύμφωνα με αυτή τη προσέγγιση, η μέγιστη δυναμική απόκριση καθορίζεται για κάθε συγκεκριμένη μορφή ταλάντωσης. Η κατασκευή αναπαρίσταται στη μορφή k ως

σύστημα με ένα βαθμό ελευθερίας με συχνότητα ω_k , λόγο απόσβεσης ζ_k και με ιδιομορφική μάζα ίση με :

$$M_k = \frac{(\sum_i m_i \varphi_{ik})^2}{\sum_i m_i \varphi_{ik}^2} \quad (15)$$

όπου φ_{ik} είναι το εύρος της k τάξης συνάρτηση σχήματος για συγκεντρωμένη μάζα m_i . Η απόκριση της μέγιστης επιτάχυνσης και μετατόπισης του συστήματος με ένα βαθμό ελευθερίας, S_{ak} και S_{dk} αντίστοιχα, καθορίστηκαν από το φάσμα απόκρισης, το οποίο είχε τροποποιηθεί για τον υπολογισμό της αυξανόμενης αναλογίας απόσβεσης ζ_k . Η τέμνουσα βάσης V_k και η μετατόπιση του βαθμού ελευθερίας i , δ_{ik} , τότε λαμβάνονται από τις σχέσεις :

$$V_k = M_k S_{ak} \quad , \quad \delta_{ik} = \varphi_{ik} \Gamma_k S_{dk} \quad (16)$$

όπου Γ_k είναι ο k τάξης συντελεστής ιδιομορφικής συμμετοχής:

$$\Gamma_k = \frac{\sum_i m_i \varphi_{ik} S_i}{\sum_i m_i \varphi_{ik}^2} \quad (17)$$

όπου S_i στη παραπάνω εξίσωση είναι η οριζόντια μετατόπιση της συγκεντρωμένης μάζας i που αντιστοιχεί σε μοναδιαία οριζόντια μετατόπιση εδάφους $S_i = 1$ για ένα δισδιάστατο μοντέλο της κατασκευής.

Σε ότι αφορά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί για το τρέχον είδος αποσβεστήρων, ο Shen (1995) παρουσίασε τα αποτελέσματα δοκιμών σε δονούμενη τράπεζα ενός τριώροφου κτιρίου από σκυρόδεμα κλίμακας 1:3, τριών ανοιγμάτων και ενός ανοίγματος, αποκατασταθέν με δύο διαφορετικούς ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες. Το πλαίσιο από σκυρόδεμα, αρχικά, παρουσίασε ζημιές στις δοκιμές μελετώντας την απόκριση ενός ελαφρά οπλισμένου πλαισίου από σκυρόδεμα. Έπειτα, στο πλαίσιο εγκαταστάθηκαν ιξωδοελαστικές συσκευές σε κάθε όροφο για να παρέχουν πρόσθετη απόσβεση 12% και 20% σε διαδοχικές δοκιμές. Η πραγματική απόσβεση βρέθηκε να είναι 18% και 30%, αντίστοιχα, στις δοκιμές χαμηλού εύρους. Το πλαίσιο υποβλήθηκε στο σεισμό Taft, κλίμακας 0.2g και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά του πλαισίου χωρίς απόσβεση υπό την ίδια σεισμική διέγερση. Η τέμνουσα στη βάση και η σχετική μεταξύ των ορόφων πλευρική μετατόπιση μειώθηκαν σημαντικά, όταν προστέθηκαν οι διατάξεις απόσβεσης. Η συμπεριφορά της κατασκευής με απόσβεση προβλέφθηκε ακριβώς με τη χρήση της μεθόδου ενέργειας παραμόρφωσης για την πρόβλεψη της ισοδύναμης δομικής

απόσβεσης. Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί ήδη ότι είναι πλήρως εφαρμόσιμη σε χαλύβδινες κατασκευές.

Ένα περιοριστικό χαρακτηριστικό των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων έχει αποδειχθεί ότι είναι η αλλαγή της απόκρισής τους λόγω ήπιων μεταβολών της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας. Μια μελέτη για να προσδιορίσει το ποσό της ενεργειακής εξάρτησης και για να αξιολογηθούν οι μέθοδοι με τις οποίες προβλέπεται η συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων κάτω από ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκε από τον Chang (1995). Σε αυτή την έρευνα περιλαμβάνεται μία εκτενής πειραματική μελέτη ενός πενταόροφου χαλύβδινου πλαισίου κλίμακας 2:5 και ενός ανοίγματος με ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες. Τρεις τύποι ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων μελετήθηκαν σε τρία διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα μεταξύ 77°F και 107°F. Το μεταλλικό πλαίσιο υποβλήθηκε σε εδαφικές κινήσεις αυξανόμενης έντασης και παρέμεινε ελαστικό σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών. Επίσης, προσδιορίστηκε ότι ο εφαρμοστέος κρίσιμος λόγος απόσβεσης επηρεάστηκε σημαντικά από μία μεταβολή της θερμοκρασίας υψηλότερη από αυτή της μελέτης. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες πρέπει να σχεδιάζονται για τις μέγιστες αναμενόμενες θερμοκρασίες.

Με σκοπό την επαλήθευση ακριβούς κλιμάκωσης των αποτελεσμάτων των δοκιμών του Chang (1995), πραγματοποιήθηκαν από τους Lai κ.α. δοκιμές σε κατασκευές πραγματικής κλίμακας με ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες. Το πρόγραμμα δοκιμών αποτελούνταν από ένα πενταόροφο χαλύβδινο πλαίσιο βασισμένο σε αυτό του Chang. Το πλαίσιο υποβλήθηκε σε ελεύθερη ταλάντωση και σε ημιτονοειδή φόρτιση. Συμπερασματικά, η γραμμική ιξωδοελαστική θεωρία αποδείχθηκε ότι είναι ακριβής στην πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος τόσο στις δοκιμές υπό κλίμακα όσο και σε κατασκευές πραγματικού μεγέθους.

Οι Shukla και Datta (2001) πραγματοποίησαν μία αναλυτική μελέτη της συμπεριφοράς των κτιρίων με ιξωδοελαστικές συσκευές, χρησιμοποιώντας τρία μοντέλα για τις ιξωδοελαστικές συσκευές, το μοντέλο Kelvin, το γραμμικό μοντέλο υστέρησης και το μοντέλο Maxwell. Οι αποκρίσεις για κάθε μοντέλο προσδιορίστηκαν με τρεις μεθόδους: την επαναληπτική μέθοδο ψευδο-δυνάμεων (pseudo-force), μέθοδο προσεγγιστικής ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης και

μία ακριβή μέθοδο, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση της σχετικής μετατόπισης και της ψευδο-επιτάχυνσης για κάθε μοντέλο και κάθε μια από τις μεθόδους αυτές. Σύμφωνα με τη μελέτη, η ανάλυση με τη χρήση της pseudo-force μεθόδου δίνει ακριβείς αποκρίσεις για όλα τα μοντέλα. Η χρήση της μεθόδου ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης παρείχε ακριβή αποτελέσματα όταν το συνολικό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως κλασσική διάταξη απόσβεσης. Εντούτοις, η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσίασε υπερεκτίμηση της μετατόπισης και της ψευδο-επιτάχυνσης σε συστήματα με μη κλασσικές διατάξεις απόσβεσης. Τέλος, τα μοντέλα γραμμικής υστέρησης και Kelvin εξάγουν τις ίδιες σχεδόν αποκρίσεις, σε αντίθεση με το μοντέλο Maxwell, που παρουσιάζονται κάπως υψηλότερες.

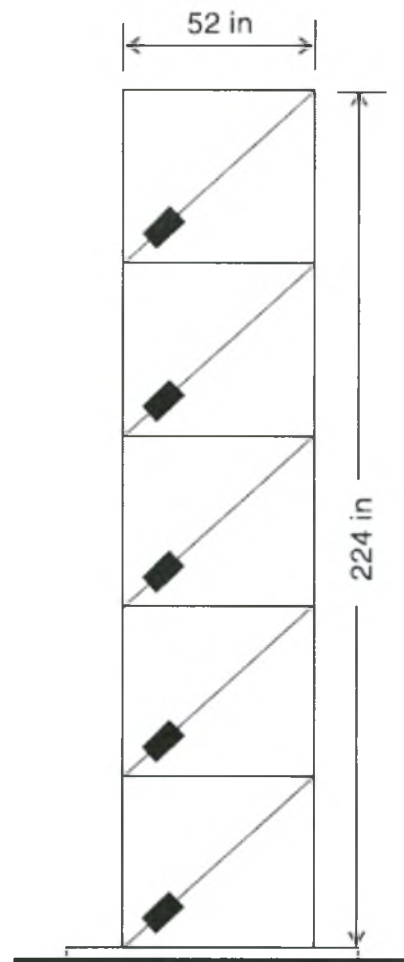
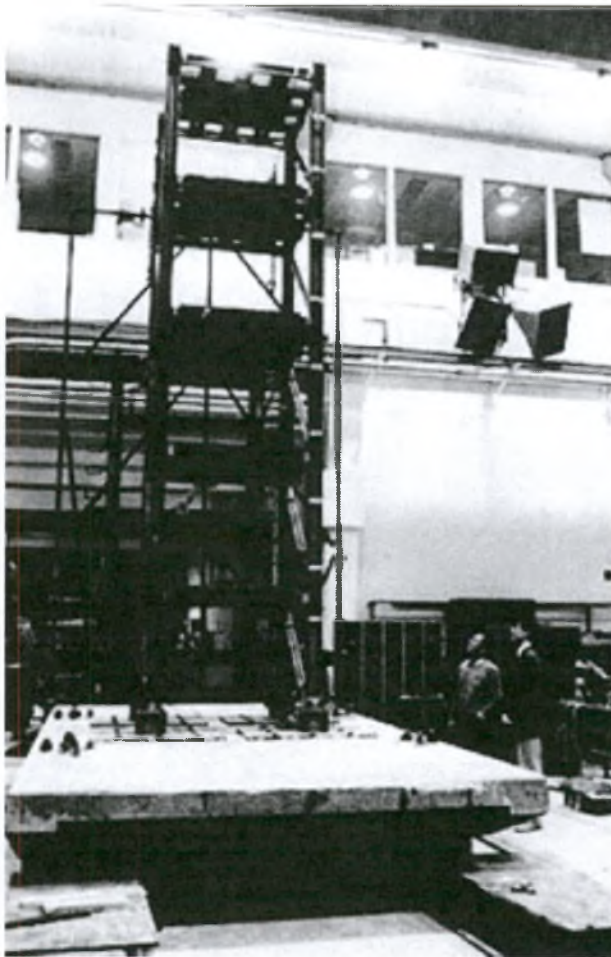
Ο Guo κ.α. (2002) παρέθεσε μια μέθοδο για τη μελέτη αξιοπιστίας μίας κατασκευής τύπου διατμητικής δοκού (shear beam type structure) με ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες, η οποία υποβλήθηκε σε τυχαία σεισμική διέγερση, και ανέπτυξε τις εξισώσεις κίνησης μίας κανονικής κατασκευής με οποιοδήποτε αριθμό ορόφων. Βρέθηκε η στοχαστική απόκριση του συστήματος καθώς και αυτή με αβεβαιότητα παραμέτρων. Η ορθολογιστική μέθοδος που αναπτύχθηκε, εφαρμόστηκε σε μία δεκαόροφη κατασκευή με και χωρίς ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες και υπολογίστηκαν οι πιθανότητες αστοχίας υπό συνθήκες κατά τη διάρκεια 50 χρόνων λειτουργικής ζωής (τόσο της κατασκευής όσο και των αποσβεστήρων). Η δομική οριακή κατάσταση ήταν η μέγιστη πλευρική μετατόπιση των ορόφων και η μέγιστη παραμόρφωση των αποσβεστήρων ήταν η οριακή κατάσταση του αποσβεστήρα. Η πλευρική μετατόπιση των ορόφων και οι ιδιότητες αστοχίας φάνηκαν να μειώνονται, όταν συμπεριελήφθησαν και οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες, εάν οι πιθανότητες αστοχίας των αποσβεστήρων είναι πολύ μικρότερες από αυτές της κατασκευής. Τα αποτελέσματα της έρευνας ήταν αυστηρώς θεωρητικά και απαιτήθηκαν μερικές υποθέσεις που πρέπει να εξεταστούν περισσότερο πριν εφαρμοστεί η μέθοδος.

Ο Lee κ.α (2002) εξέτασε τη χρήση της μεθόδου ιδιομορφικής ενέργειας παραμόρφωσης, της μεθόδου υπέρθεσης μορφών και της μεθόδου απ' ευθείας ολοκλήρωσης για την ανάλυση πρακτικών κατασκευών με ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες. Παρουσιάστηκε μια μέθοδος συμπύκνωσης των μητρώων μάζας, δυσκαμψίας και απόσβεσης μιας τυχαίας κατασκευής, με σκοπό τη μείωση του αριθμού

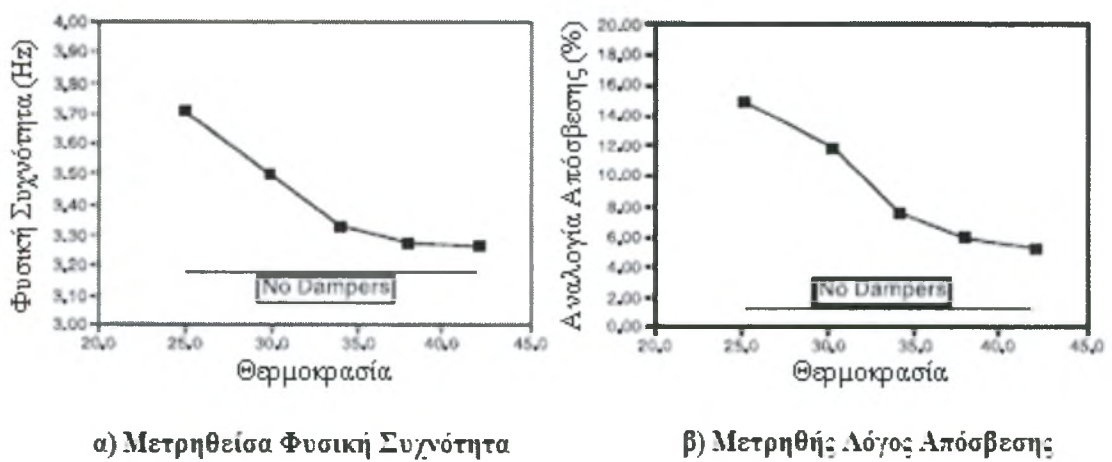
των βαθμών ελευθερίας και εξ αυτού τη μείωση της υπολογιστικής προσπάθειας. Ένα ελατήριο παράλληλο με έναν αποσβεστήρα παρουσιάστηκαν ως μοντέλο για ιξωδοελαστικές συσκευές απόσβεσης, το οποίο διαθέτε δύο βαθμούς ελευθερίας. Το σύστημα ελατηρίου-απόσβεσης είχε δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε ένα από τους δύο ακραίους κόμβους του. Επεξηγήθηκε ότι για λόγους συμβατότητας, η υπόθεση στερεού διαφράγματος αλλά και η τεχνική συμπύκνωσης μητρώων θα πρέπει να εφαρμοστούν και στο σύστημα ελατηρίου/αποσβεστήρα πριν την πρόσθεση τους στο συμπυκνωμένο μητρώο του όλου συστήματος. Οι τρεις μέθοδοι ανάλυσης εφαρμόστηκαν έπειτα σε πλήρες μοντέλο και σε συμπυκνωμένο και συγκρίθηκαν οι πλευρικές μετατοπίσεις των ορόφων που προέκυψαν. Στην ανάλυση ιδιομορφών, ελήφθη το συμπέρασμα ότι οι κύριες μορφές ταλάντωσης συνήθως διατηρήθηκαν σε πολύ μεγάλο ποσοστό, όταν το πλήρες μοντέλο αντικαταστάθηκε από το μοντέλο συμπυκνωμένων μητρώων. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι η τεχνική συμπύκνωσης μητρώων οδήγησε σε ακριβείς σχετικές πλευρικές μετακινήσεις ορόφων, ανεξάρτητα από τη θέση των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων. Η διαδικασία ενδεικνύεται για χρήση σε προκαταρκτικό σχεδιασμό ή σε βελτιστοποίηση της θέσης των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων.

Στο σημείο αυτό και πέραν των προαναφερθέντων περί πειραμάτων σχετικά με το τρέχον είδος αποσβεστήρων, κρίνεται σκόπιμο να παρατεθεί λεπτομερής περιγραφή δοκιμών, που έχουν γίνει για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων στην απορρόφηση σεισμικής ενέργειας, ιδία σε χαλύβδινα πλαίσια. Μία τέτοια δοκιμή πραγματοποιήθηκε από τον Chang κ.α. (1993α) και περιελάμβανε ένα πενταόροφο χαλύβδινο πλαίσιο κλίμακας 2:5 μιας πρωτότυπης κατασκευής, στο οποίο τοποθετήθηκε διαγώνια ένα ζεύγος κατάλληλα σχεδιασμένων αποσβεστήρων, σύμφωνα με το Σχήμα 2.30. Μελετήθηκαν οι αποκρίσεις της κατασκευής με και χωρίς ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες ελεγχόμενης θερμοκρασίας περιβάλλοντος προσομοιώνοντας λευκό θόρυβο και σειμούς ποικίλων εντάσεων. Η φυσική συχνότητα της κατασκευής με την προσθήκη των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων κυμάνθηκε μεταξύ 3.2 Hz και 3.7 Hz, ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι συγκεκριμένοι αποσβεστήρες σχεδιάστηκαν με στόχο την αύξηση του λόγου απόσβεσης της κατασκευής περίπου κατά 15% της κρίσιμης σε

θερμοκρασία δωματίου 25°C, χωρίς σημαντική αλλαγή της φυσικής συχνότητας της κατασκευής.



Σχήμα 2.30. Η πεντάοροφη χαλύβδινη κατασκευή του πειράματος



Σχήμα 2.31. Επίδραση της θερμοκρασίας στη φυσική συχνότητα και τον λόγο απόσβεσης

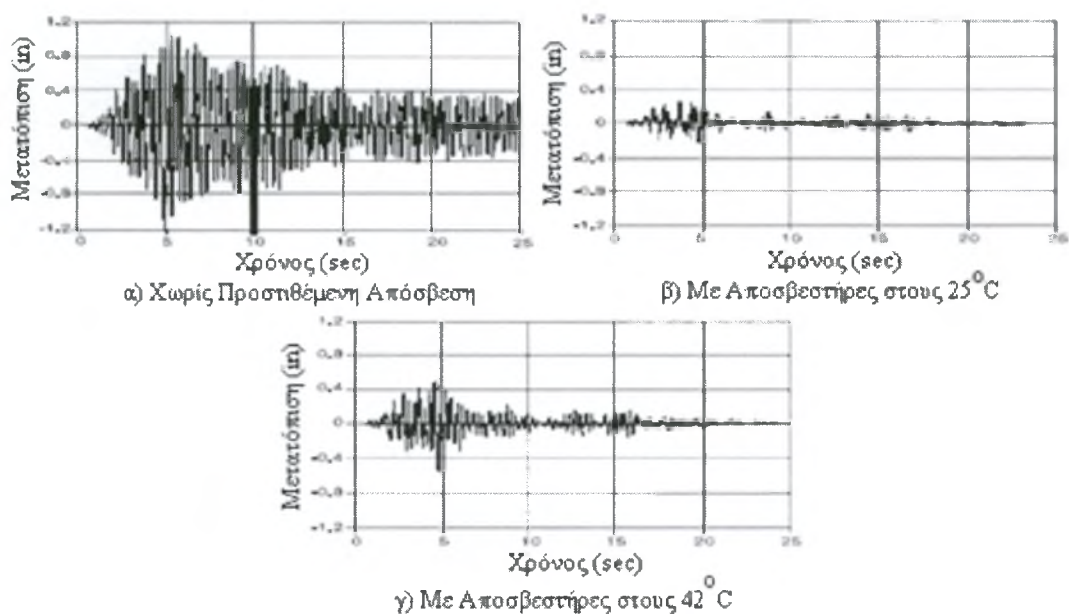
Καθώς η περιβαλλοντική θερμοκρασία αυξάνει, το ιξωδοελαστικό υλικό γίνεται μαλακότερο με συνέπεια να μειώνεται η αποδοτικότητα του αποσβεστήρα. Το Σχήμα 2.31α,β δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας στη φυσική συχνότητα της κατασκευής και στο λόγο απόσβεσης. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει την αποτελεσματικότητα των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (Chang κ.α. 1992). Μια διέγερση 0.12g λευκού θορύβου χρησιμοποιήθηκε ως εισερχόμενη κίνηση για να ελαχιστοποιηθεί η διακύμανση των συχνοτήτων εισόδου, ώστε να γίνει η σύγκριση. Το Σχήμα 2.32 απεικονίζει τις μετατοπίσεις με και χωρίς ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες της οροφής σε θερμοκρασία 25°C και 42°C σε σεισμό 0.19g Hechinohe. Οι λόγοι απόσβεσης παραθέτονται στο Σχήμα 2.30β. Όπως φαίνεται ακόμα και στους 42° C, λόγω της πρόσθετης απόσβεσης που παρέχουν οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες, η κατασκευή ακόμα πετυχαίνει μία σημαντική μείωση της σεισμικής απόκρισης σε σύγκριση με την απλή κατασκευή. Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορεί να γίνουν για τις σχετικές πλευρικές μετακινήσεις των ορόφων αλλά και για την επιτάχυνσή τους σε όλα τα επίπεδα. Καλό είναι να επισημάνουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του ιξωδοελαστικού υλικού κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι ασήμαντη (περίπου 2 °C).

Μέγιστη Απόκριση	Επίπεδο Ορόφου	Χωρίς Απόσβεση	Με Απόσβεση (% μείωση της περίπτωσης χωρίς απόσβεσης)				
			T=25° C	T=30° C	T=34° C	T=38° C	T=42° C
Σχετική Μετακίνηση Ορόφου (m)	5	0.696	81.9	81.3	76.4	70.7	66.7
	4	0.588	83.3	80.1	75.0	69.9	66.7
	3	0.484	84.3	80.8	75.6	71.1	68.6
	2	0.328	83.5	79.6	75.6	71.6	69.5
	1	0.116	76.7	73.3	70.7	65.5	63.8
Διαφορική Οριζόντια Μετατόπιση (m)	5	0.152	78.3	82.2	78.3	75.0	73.0
	4	0.164	86.0	84.1	78.7	73.2	70.1
	3	0.178	82.0	82.0	74.2	68.5	65.2
	2	0.214	85.0	82.7	77.1	72.4	68.2
	1	0.116	76.7	73.3	70.7	65.5	63.8
Μέγιστη Επιτάχυνση Ορόφου (g)	5	1.222	85.7	85.1	81.1	77.0	73.9
	4	0.856	82.5	80.5	76.8	72.5	69.4
	3	0.988	86.5	85.2	81.5	78.7	77.8
	2	0.948	84.6	84.7	84.7	80.1	78.4
	1	0.658	74.6	75.2	77.4	75.2	76.4

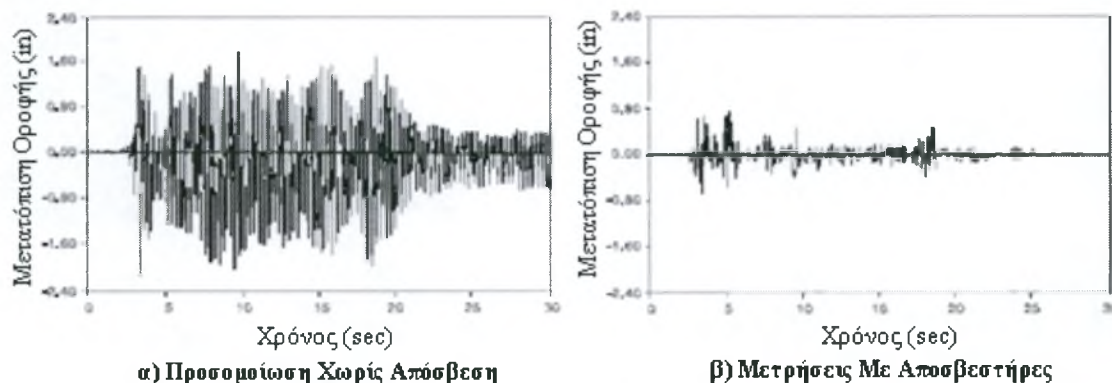
Πίνακας 1. Σύνοψη του ποσοστού μείωσης της δυναμικής απόσβεσης για διέγερση λευκού θορύβου 0.12g

Επίσης έγιναν δοκιμές σε δονητική τράπεζα με μέγιστη επιτάχυνση 0.6g El Centro σε θερμοκρασία 25°C. Αριθμητικές μελέτες, που χρησιμοποιούν το πρόγραμμα ανελαστικής ανάλυσης DRAIN-2D, κατέδειξαν ότι η κατασκευή χωρίς ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες υπόκειται σε ανελαστική παραμόρφωση υπό τέτοιας μορφής ισχυρές εδαφικές κινήσεις. Επομένως, σε τέτοιες συνθήκες, η μελέτη της κατασκευής χωρίς προστιθέμενη απόσβεση έχει πραγματοποιηθεί μόνο με αναλυτικές μεθόδους. Τα αποτελέσματα ανελαστικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητα των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων σε ισχυρούς σεισμούς.

Στο Σχήμα 2.33α,β παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις με και χωρίς ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες σε σεισμική δόνηση 0.6g El Centro της άνω στάθμης του τελευταίου ορόφου. Οι φυσικές συχνότητες με και χωρίς αποσβεστήρες είναι 3.1 Hz και 3.7 Hz αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες παρέχουν σημαντική πρόσθετη απόσβεση στην κατασκευή, η οποία συμπεριφέρεται ελαστικά και η σεισμική απόκριση παρουσιάζεται σημαντικά μειωμένη. Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορεί να γίνουν για τις σχετικές πλευρικές μετακινήσεις των ορόφων αλλά και για την επιτάχυνσή τους σε όλα τα επίπεδα. Στον Πίνακα 2 συνοψίζεται η αποδοτικότητα των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων σε σεισμούς El Centro και Hachirohe.



Σχήμα 2.32. Χρονο – ιστορίες μετατόπισης άνω στάθμης τελευταίου ορόφου



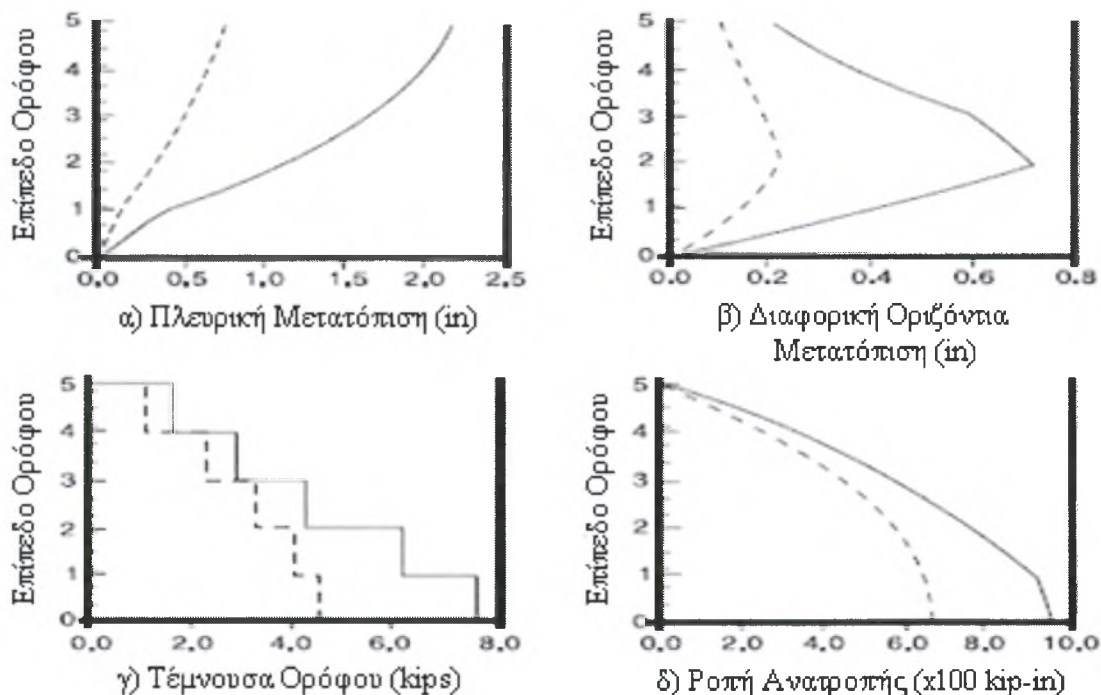
Σχήμα 2.33. Χρονο – ιστορίες μετατόπισης οροφής

Μέγιστη Απόσβεση	Επίπεδο Ορόφου	Χωρίς Απόσβεση (Ανελαστική Ανάλυση)		Με Απόσβεστères (% Μείωση Περίπτωσης Χωρίς Απόσβεσης)	
		El Centro (0.60g)	Hachinohe (0.60g)	El Centro (0.60g)	Hachinohe (0.60g)
Σχετική Μετατόπιση Ορόφου (in)	5	2.150	3.490	0.766 (64.4)	0.823 (76.4)
	4	1.990	3.240	0.665 (66.6)	0.719 (77.8)
	3	1.650	2.700	0.529 (67.9)	0.579 (78.6)
	2	1.110	1.630	0.346 (68.8)	0.382 (76.6)
	1	0.390	0.470	0.143 (63.3)	0.148 (68.5)
Διαφορική Οριζόντια Μετατόπιση (in)	5-4	0.207	0.310	0.104 (49.8)	0.111 (64.2)
	4-3	0.365	0.599	0.137 (62.5)	0.146 (75.6)
	3-2	0.598	1.100	0.187 (68.7)	0.201 (81.7)
	2-1	0.721	1.185	0.214 (70.3)	0.234 (80.3)
	1-0	0.394	0.470	0.143 (63.7)	0.148 (68.5)

Πίνακας 2. Σύνοψη της δυναμικής απόσβεσης υπό 0.6g El Centro και Hachinohe σεισμικές διεγέρσεις

Στο Σχήμα 2.34 παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες καμπύλες της πλευρικής επιτάχυνσης, της διαφορικής οριζόντιας μετατόπισης μεταξύ ορόφων, της συσσωρευθείσας τέμνουσας ορόφου και ροπής ανατροπής της πρότυπης κατασκευής με και χωρίς απόσβεση υπό σεισμό 0.6g El Centro. Είναι προφανές ότι με τη προσθήκη των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων δεν μειώθηκαν μόνο οι παραμορφώσεις αλλά και η διάτμηση βάσης και ροπή ανατροπής, ακόμα και όταν η κατασκευή χωρίς αποσβεστήρες συμπεριφέρεται ανελαστικά. Οι διατάξεις των

ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων απορροφούν ένα σημαντικό ποσό της εισερχόμενης σεισμικής ενέργειας με αποτέλεσμα να αποτρέπουν την κατασκευή από του να παραμορφωθεί ανελαστικά. Παρόμοια αποτελέσματα εξήχθησαν και για το σεισμό 0.6g Hachinohe.



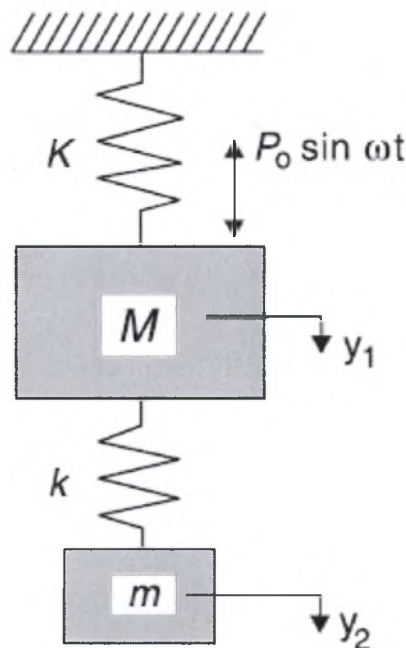
Σχήμα 2.34. Περιβάλλουσες απόκρισης: ----- με αποσβεστήρες, — χωρίς αποσβεστήρες

2.2.4. Αποσβεστήρες μάζας

Οι αποσβεστήρες μάζας είναι συσκευές με ιδιαίτερα μεγάλη μάζα, η οποία συνδέεται ελαστικά (μέσω ελατηρίων ή ενίοτε και αποσβεστήρων) με την κατασκευή. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στις αναπτυσσόμενες ιδιαίτερα μεγάλες αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες αντιτίθενται στις αδρανειακές δυνάμεις της κατασκευής, που αναπτύσσονται κατά την ταλάντωσή της. Για να είναι αποτελεσματικοί οι αποσβεστήρες μάζας, πρέπει η ιδιοσυχνότητα τους να προσεγγίζει κάποια από τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Για τον λόγο αυτό οι αποσβεστήρες μάζας (Mass Dampers) συχνά αναφέρονται και ως συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας (TMD - Tuned Mass Dampers). Οι TMD έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικοί, ιδίως σε εύκαμπτες κατασκευές και αποτελούν, σε διάφορες μορφές, τους συνηθέστερα χρησιμοποιημένους. Η μοντέρνα έννοια των συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας για εφαρμογές σε δομοστατικές κατασκευές έχει τις ρίζες της στους δυναμικούς



απορροφητές δόνησης που μελετήθηκαν το 1909 από τον Frahm (Den Hartog, 1956). Μία σχηματική αναπαράσταση του αποσβεστήρα του Frahm, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.35, ο οποίος αποτελείται από μία μικρή μάζα m και ένα ελατήριο δυσκαμψίας k συνδεδεμένα με την κύρια μάζα M με ελατήριο δυσκαμψίας ελατηρίου K . Υπό ένα απλό αρμονικό φορτίο, η κύρια μάζα M μπορεί να αποδειχθεί ότι παραμένει σταθερή, όταν η φυσική συχνότητα ($\sqrt{k/m}$) του συνδεδεμένου απορροφητή επιλέχθηκε (ή συντονίστηκε) να είναι η συχνότητα διέγερσης.

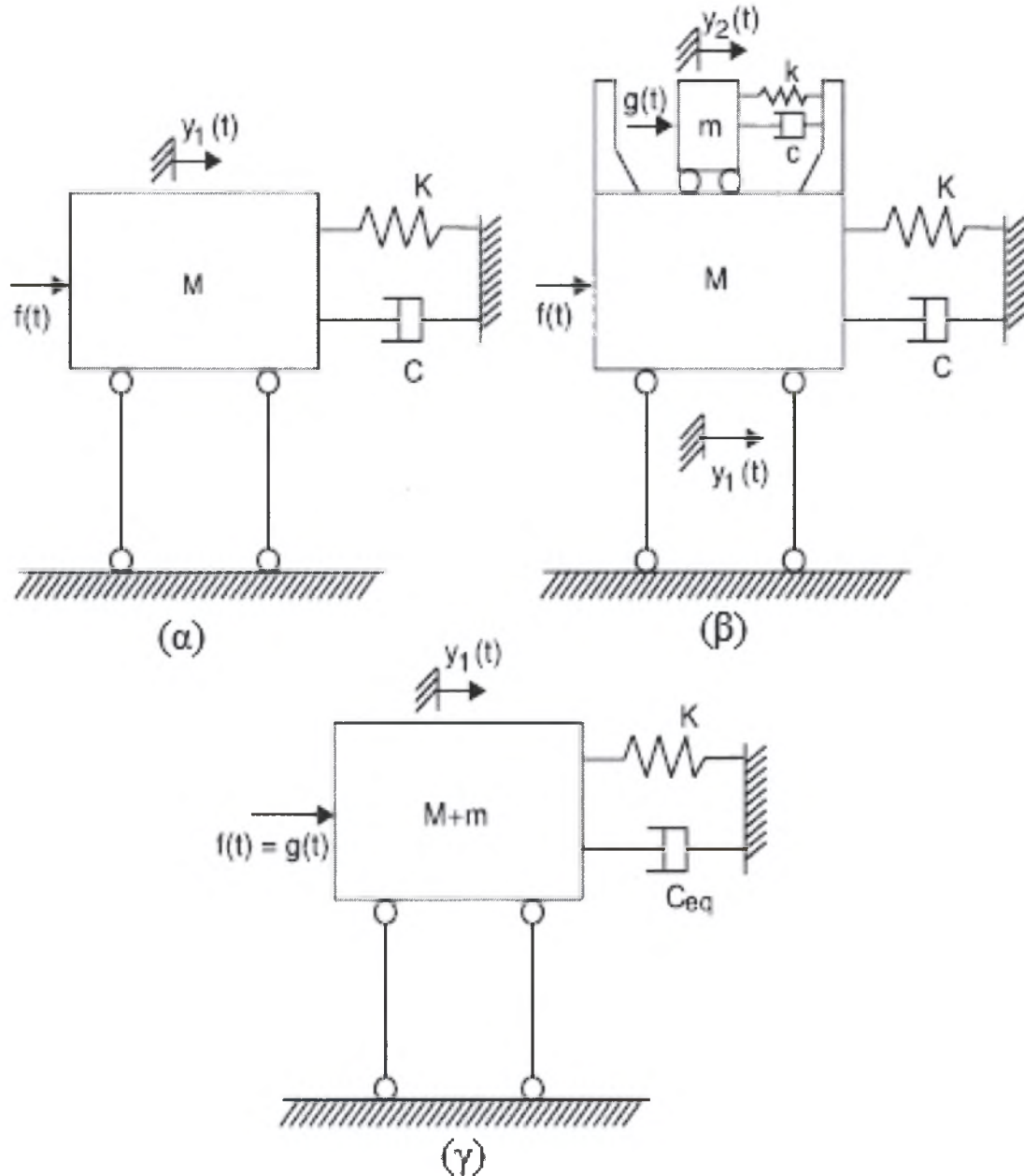


Σχήμα 2.35. Απορροφητής χωρίς απόσβεση και κύρια μάζα σε αρμονική διέγερση

Ένα μεγάλο μέρος της πρόωρης ανάπτυξης περιορίστηκε στη χρήση των δυναμικών απορροφητών σε μηχανολογικά, στα οποία μία συχνότητα λειτουργίας είναι συντονισμένη με τη θεμελιώδη συχνότητα της μηχανής. Εντούτοις, οι κτιριακές κατασκευές υποβάλλονται σε φορτία του περιβάλλοντος, όπως άνεμο και σεισμούς, τα οποία περιέχουν πολλές συνιστώσες συχνοτήτων. Η απόδοση ενός δυναμικού απορροφητή δόνησης, που αναφέρεται συχνά ως συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας (TMD), σε σύνθετες δομικές κατασκευές πολλών βαθμών ελευθερίας, αναμένεται να είναι διαφορετική.

Πρώτα εξετάζεται η απόκριση ενός δομικού συστήματος με ένα βαθμό ελευθερίας (SDOF), το οποίο υποβάλλεται σε μία δύναμη δόνησης $f(t)$ όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.36α. Η απόκριση του δομικού συστήματος μπορεί να

μειωθεί σε μερικές περιπτώσεις με τη προσθήκη μίας δευτερεύουσας μάζας, ή ενός συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας (TMD), η οποία παρουσιάζει σχετική κίνηση με το σύστημα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.36β.



Σχήμα 2.36. Μοντέλα κατασκευής ενός βαθμού ελευθερίας και TMD

Οι εξισώσεις της κίνησης του συστήματος κατασκευής/TMD είναι (χρησιμοποιώντας το συμβολισμό του παραπάνω Σχήματος):

$$M\ddot{y}_1(t) + C\dot{y}_1(t) + Ky_1(t) = c\dot{z}(t) + kz(t) + f(t) \tag{18\alpha}$$

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}_1(t) + g(t) \tag{18\beta}$$

όπου το $y_1(t)$ είναι η μετακίνηση του δομικού συστήματος και $z(t)$ είναι η σχετική μετακίνηση της προστιθέμενης μάζας όσον αφορά τη κατασκευή. Οι συντελεστές απόσβεσης και δυσκαμψίας είναι c και k για τη προστιθέμενη μάζα και C και K για το δομικό σύστημα, αντίστοιχα. Η $f(t)$ υποδηλώνει την εξωτερική δύναμη, ενώ $g(t)$ ισούται με μηδέν για ανεμική διέγερση και με $\mu f(t)$ για σεισμικά φορτία, με $\mu = m/M$ την αναλογία μάζας. Αθροίζοντας τις (18α) και (18β) λαμβάνουμε

$$(M + m)\ddot{y}_1(t) = C\dot{y}_1(t) + Ky_1(t) = f(t) + g(t) - m\ddot{z}(t) \quad (19)$$

Φαίνεται ότι η καθαρή επίδραση της προστιθέμενης μάζας m στη κατασκευή, εκτός από μία μικρή μείωση της φυσικής συχνότητας και μία μικρή αύξηση της εξωτερικής δύναμης από $f(t)$ σε $f(t) + g(t)$, είναι η προσθήκη του όρου δύναμης $[-m\ddot{z}(t)]$.

Όταν η $f(t)$ θεωρείται ως αρμονική δύναμη ή ως σταθερή τυχαία είσοδος, η εξίσωση 2-15 υπό μορφή ενέργειας ή ισορροπίας δυνάμεων ως εξής:

$$(M + m) \langle \ddot{y}_1 \dot{y}_1 \rangle + C \langle \dot{y}_1^2 \rangle + K \langle y_1 \dot{y}_1 \rangle = \langle (f + g) \dot{y}_1 \rangle - m \langle \ddot{z} \dot{y}_1 \rangle \quad (20)$$

στην οποία $\langle \cdot \rangle$ είναι η μαθηματική προσδοκία για τη περίπτωση στοχαστικής εισαγωγής και ο μέσος χρονικός όρος για ένα κύκλο στη περίπτωση αρμονικής διέγερσης. Για απόκριση σταθεράς κατάστασης, ισχύει ότι $\langle \ddot{y}_1 \dot{y}_1 \rangle = \langle y_1 \dot{y}_1 \rangle = 0$.

Έτσι, η εξίσωση (20) μετατρέπεται σε απλή εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων:

$$C \langle \dot{y}_1^2 \rangle = \langle (f + g) \dot{y}_1 \rangle - m \langle \ddot{z} \dot{y}_1 \rangle \quad (21)$$

στην οποία ο όρος $C \langle \dot{y}_1^2 \rangle$ είναι η δύναμη που απορροφάται λόγω της απόσβεσης της κατασκευής και $\langle (f + g) \dot{y}_1 \rangle$ είναι η εισερχόμενη ένταση της εξωτερικής δύναμης, που είναι πάντα θετική.

Η ροή έντασης $m \langle \ddot{z} \dot{y}_1 \rangle$ από το δομικό σύστημα στη δευτερεύουσα μάζα διαδραματίζει ένα βασικό ρόλο στη χρήση των TMD στις κατασκευές και συνεπώς αποτελεί ένα μέτρο της αποτελεσματικότητάς τους, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η ροή έντασης, τόσο μικρότερη είναι η απόκριση ταχύτητας μέσου τετραγώνου του δομικού συστήματος. Μέγιστη ροή έντασης επιτυγχάνεται όταν η σχετική μετατόπιση της δευτερεύουσας μάζας υστερεί χρονικά του δομικού συστήματος κατά φάση γωνίας 90° . Σε αυτή τη περίπτωση, η σχετική επιτάχυνση της

δευτερεύουσας μάζας είναι σε φάση με την ταχύτητα απόκρισης του δομικού συστήματος και η ροή έντασης είναι ισοδύναμη με την ενεργό απορροφημένη δύναμη, η οποία αυξάνει τη συνολική ενεργό απόσβεση $C_{\sigma q}$ στο δομικό σύστημα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.36γ, όπου:

$$C_{\sigma q} = C + m \frac{\dot{y}_1}{y_1} \quad (22)$$

Αξίζει να τονίσουμε ότι η εισερχόμενη ένταση της εξωτερικής δύναμης ποικίλλει με τις παραμέτρους των TMD. Εντούτοις, αυτή η ποικιλία είναι μικρή συγκρινόμενη με τη ροή έντασης και, στη πραγματικότητα, το μέγεθος της εισερχόμενης έντασης μπορεί να μειωθεί για να δημιουργήσει μία αλλαγή, η οποία να είναι ευνοϊκή για την αποδοτικότητα των TMDs.

Μία εκτίμηση της αποδοτικότητας του TMD στη μείωση της δομικής απόκρισης μπορεί να επιτευχθεί ακολουθώντας τη βασική ανάπτυξη του Den Hartog για την απλή περίπτωση, όταν ένα δομικό σύστημα δεν έχει απόσβεση ($C = 0$) και υποβάλλεται σε ημιτονοειδή διέγερση με συχνότητα ω . Σε αυτή τη διαδικασία, η δυναμική επίδραση ενός TMD προσδιορίζεται σε σύγκρισή με τη στατική μετατόπιση, που παράγεται από τη μέγιστη δύναμη που εφαρμόζεται στατικά στη κατασκευή. Αυτή η στατική μετατόπιση είναι $y_{st} = P_0/K$, ενώ ο δυναμικός συντελεστής ενίσχυσης για το δομικό σύστημα χωρίς απόσβεση, R , είναι:

$$R = \frac{y_{max}}{y_{st}} = \sqrt{\frac{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta_\alpha \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \alpha^2 \beta^2 \mu]^2 + (2\zeta_\alpha \alpha \beta)^2 (1 - \beta^2 - \beta^2 \mu)^2}} \quad (23)$$

όπου:

$$\beta = \omega/\omega_s = \text{αναλογία εξαναγκασμένης συχνότητας}$$

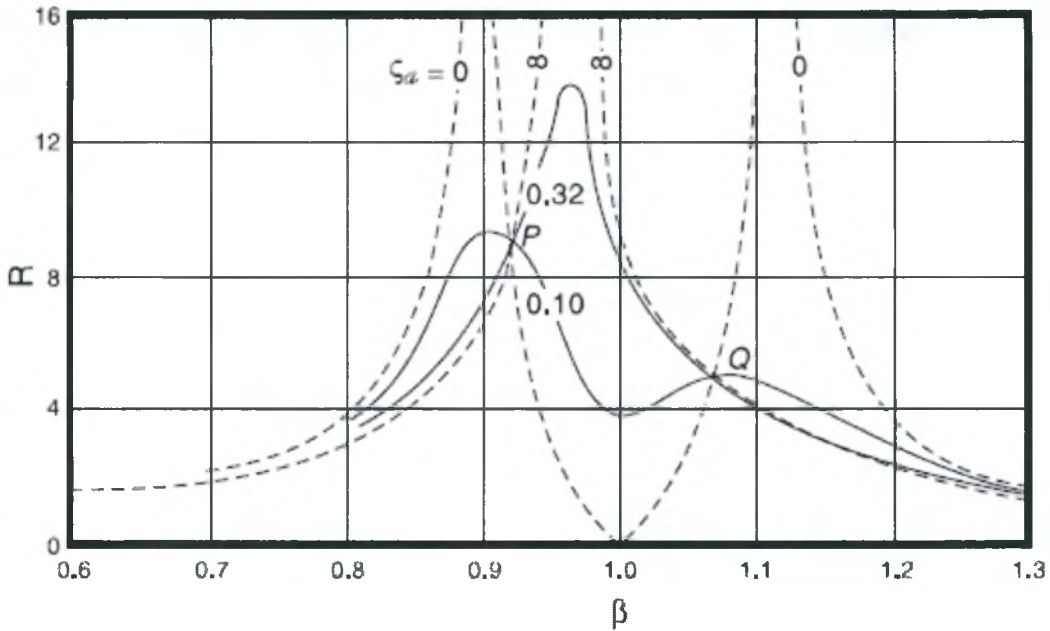
$$\alpha = \omega_\alpha/\alpha_c = \text{αναλογία συχνότητας (φυσικές συχνότητες)}$$

$$\omega_\alpha^2 = k/m = \text{το τετράγωνο της φυσικής συχνότητας του TMD}$$

$$\omega_s^2 = K/M = \text{το τετράγωνο της φυσικής συχνότητας του δομικού συστήματος}$$

$$\zeta_\alpha = c/c_c = c/2m\omega_\alpha = \text{αναλογία απόσβεσης του TMD}$$

Ο συντελεστής ενίσχυσης είναι μία συνάρτηση των τεσσάρων βασικών μεταβλητών μ , ζ_α , α και β . Στο Σχήμα 2.37 παρουσιάζεται το γράφημα της R ως μία συνάρτηση της αναλογίας συχνότητας β για $\alpha = 1$ (συντονισμένη περίπτωση), $\mu = 0.05$ και για διάφορες τιμές της αναλογίας απόσβεσης, ζ_α .



Σχήμα 2.37. Παράγων ενίσχυσης R ως συνάρτηση της παραμέτρου β

Αξίζει να παρατηρηθεί τι λαμβάνει χώραν με την αυξανόμενη απόσβεση στον συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας (TMD). Χωρίς δομική απόσβεση, το εύρος απόκρισης είναι άπειρο σε δύο συντονισμένες συχνότητες του συνδυασμένου συστήματος κατασκευής/TMD. Όταν η απόσβεση του TMD γίνεται άπειρη, οι δύο μάζες είναι ουσιαστικά συνδεδεμένες άρρηκτα μεταξύ τους και το αποτέλεσμα είναι ένα σύστημα SDOF με μάζα 1.05M, έτσι ώστε το εύρος της συντονισμένης συχνότητας γίνεται ξανά άπειρο. Επομένως, κάπου μεταξύ αυτών των άκρων πρέπει να βρίσκεται η τιμή του ζα, για το οποίο η κορυφή γίνεται ελάχιστη.

Σπουδαίος σκοπός της πρόσθεσης TMD είναι να οδηγηθεί η κορυφή συντονισμού στη μικρότερη δυνατή τιμή της, έτσι ώστε να επιτευχθούν μικρότερες ενισχύσεις για μια ευρεία γκάμα συχνοτήτων με το β κοντά στη μονάδα. Η εν λόγω ελάχιστη τιμή κορυφής μπορεί να αποκτηθεί με κατάλληλη επιλογή του α, ώστε να υπάρξει τέτοια προσαρμογή, ώστε τα δύο σταθερά σημεία (P και Q) να φθάσουν σε ίσα ύψη, και με επιλογή του ζ, με σκοπό την προσαρμογή της καμπύλης επιτάχυνσης του συστήματος, με τρόπο ώστε να περνά με οριζόντια εφαπτομένη από ένα από τα δύο αυτά σημεία. Ακολουθώντας τη διαδικασία αυτή, ο βέλτιστος λόγος συχνότητας α υπολογίζεται ίσος με:

$$a_{opt} = 1 / (1 + \mu) \tag{24}$$

η οποία δίδει το εύρος στο P ή στο Q:

$$R = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}} \quad (25)$$

Μια καλή εκτίμηση για το ζ_{opt} μπορεί να καθοριστεί ως ο μέσος όρος δύο τιμών που καθιστούν τα σταθερά σημεία P και Q μέγιστα της καμπύλης (β, R) , δηλ.

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (26)$$

Από την εξίσωση (21), παρατηρούμε ότι μία αύξηση της μάζας απόσβεσης πάντα μειώνει το μέγιστο συντελεστή ενίσχυσης για τον βέλτιστα σχεδιασμένο TMD. Αυτή η μέγιστη ενίσχυση και οι παράμετροι βέλτιστου απορροφητή συνοψίζονται στον Πίνακα 3.

Η εξίσωση (23) μπορεί επίσης να ευρεθεί, όταν η απόσβεση είναι παρούσα στο δομικό σύστημα. Εντούτοις, τώρα τα αμετάβλητα σημεία P και Q δεν υπάρχουν πλέον. Ως εκ τούτου, πρέπει να καταλήξουμε σε αριθμητικές μεθόδους προκειμένου να καθοριστούν οι βέλτιστες τιμές των α και ζ_α . Μία λεπτομερής ανάλυση πραγματοποιήθηκε από τον Warburton (1982) για τον καθορισμό των βέλτιστων παραμέτρων απόσβεσης για αρμονική και τυχαία διέγερση, με τη τυχαία διέγερση να εφαρμόζεται ως δύναμη στη κατασκευή (όπως στη περίπτωση ανέμου) ή ως επιτάχυνση στη βάση (περίπτωση σεισμού). Μία μικρή αναλογία απόσβεσης ζ_s της κύριας κατασκευής είχε υποτεθεί για την ανάλυση.

Για αρμονικές διεγέρσεις, το κριτήριο βελτιστοποίησης ήταν η ελαχιστοποίηση του εύρους απόκρισης R :

$$R_j = \sqrt{\frac{A_j^2 + B_j^2}{C^2 + D^2}} \quad (27)$$

όπου το j είναι ένας αριθμός περίπτωσης, όπως καθορίζεται στο Πίνακα 4, A και B δίνονται στον ίδιο Πίνακα και:

$$C = (\alpha^2 + \beta^2)(1 - \beta^2) - \mu\alpha^2\beta^2 - 4\zeta_\alpha\zeta_s\alpha\beta^2 \quad (28)$$

$$D = 2\zeta_\alpha\alpha\beta(1 - \beta^2 - \mu\beta^2) + 2\zeta_s\beta(\alpha^2 - \beta^2) \quad (29)$$

Οι βέλτιστες τιμές των α και ζ_α μπορούν να προσδιοριστούν θέτοντας τις $\frac{\partial R_j}{\partial \alpha}$ και $\frac{\partial R_j}{\partial \zeta_\alpha}$ ίσες με το μηδέν και επιλύοντας τις εξισώσεις που προκύπτουν.

Εντούτοις, αυτές οι εξισώσεις είναι γενικά μη γραμμικές ως προς α και ζ_α , και απαιτούνται έτσι οι αριθμητικές λύσεις, μερικές από τις οποίες παρουσιάστηκαν από τον Warburton (1982).

Περίπτωση	Διέγερση		Βελτιστοποιούμενη Απόκριση		Βελτιστοποιούμενη Παράμετρος	
	Τύπος	Εφαρμογή σε	Παράμετρος βελτιστοποίησης (R)	R_{opt}	α_{opt}	ζ_{opt}
1	Δύναμη $P_O e^{i\omega t}$	Κατασκευή	$\frac{K \gamma_1}{P_O}$	$\left(1 + \frac{2}{\mu}\right)^{1/2}$	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$
2	Δύναμη $P_O e^{i\omega t}$	Κατασκευή	$\frac{M \dot{\gamma}_1}{P_O}$	$\left(\frac{2}{\mu(1 + \mu)}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{1}{1 + \mu}\right)^{1/2}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu/2)}}$
3	Επιτάχυνση $\ddot{\chi}_g e^{i\omega t}$	Βάση	$\frac{\omega_s^2 \gamma_1}{\ddot{\chi}_g}$	$\left(\frac{2}{\mu}\right)^{1/2} (1 + \mu)$	$\frac{(1 - \mu/2)^{1/2}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)(1 - \mu/2)}}$
4	Επιτάχυνση $\ddot{\chi}_g e^{i\omega t}$	Βάση	$\frac{\ddot{\chi}_g + \dot{\gamma}_1}{\ddot{\chi}_g}$	$\left(1 + \frac{2}{\mu}\right)^{1/2}$	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$
5	Τυχαία Δύναμη	Κατασκευή	$\frac{< \gamma_1^2 > K^2}{2\pi S_O \omega_s}$	$\left(\frac{1 + 3\mu/4}{\mu(1 + \mu)}\right)^{1/2}$	$\frac{(1 + \mu/2)^{1/2}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{\mu(1 + 3\mu/4)}{4(1 + \mu)(1 + \mu/2)}}$
6	Τυχαία Επιτάχυνση	Βάση	$\frac{< \gamma_1^2 > \omega_s^3}{2\pi S_O}$	$(1 + \mu)^{3/2} \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{4}\right)^{1/2}$	$\frac{(1 - \mu/2)^{1/2}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{\mu(1 - \mu/4)}{4(1 + \mu)(1 - \mu/2)}}$

Πίνακας 3. Βέλτιστες παράμετροι απορροφητή συνδεδεμένου με κατασκευή ενός βαθμού ελευθερίας

Περίπτωση	Διέγερση	Θεωρηθείσα Παράμετρος Απόκρισης	Εύρος Απόκρισης R_i	A_i	B_i
1	$P_O e^{i\omega t}$	γ_1	$\frac{K \gamma_1}{P_O}$	$\alpha^2 - \beta^2$	$2\zeta_a \alpha \beta$
2	$P_O e^{i\omega t}$	$\dot{\gamma}_1$	$\frac{K \dot{\gamma}_1}{P_O \omega_s}$	$- 2\zeta_a \alpha \beta^2$	$\beta(\alpha^2 - \beta^2)$
3	$P_O e^{i\omega t}$	$\dot{\gamma}_1$	$\frac{M \dot{\gamma}_1}{P_O}$	$-\beta^2(\alpha^2 - \beta^2)$	$- 2\zeta_a \alpha \beta^3$
4	$P_O e^{i\omega t}$	Δύναμη Βάσης	$\frac{F}{P_O}$	$\alpha^2 - \beta^2 - 4\zeta_s \zeta_a \alpha \beta^2$	$\zeta_a \alpha \beta + \zeta_s \beta(\alpha^2 - \beta^2)$
5	$\chi_g e^{i\omega t}$	γ_1	$\frac{\omega_s^2 \gamma_1}{\chi_g}$	$\alpha^2(1 + \mu) - \beta^2$	$\zeta_a \alpha \beta(1 + \mu)$
6	$\chi_g e^{i\omega t}$	$\gamma_1 + \chi_g$	$\frac{\dot{\gamma}_1 + \ddot{\chi}_g}{\chi_g}$	As Case 4	As Case 4
7	$\chi_g e^{i\omega t}$	$\gamma_1 + \chi_g$	$\frac{\omega_s^2 (\gamma_1 + \chi_g)}{\chi_g}$	$-\frac{A_4}{\beta^2}$	$-\frac{B_4}{\beta^2}$

Πίνακας 4. Τιμές των A_i και B_i για διάφορες διεγέρσεις και παραμέτρους απόκρισης

2.2.5 Συντονισμένοι αποσβεστήρες υγρού

Παρόμοιοι σε σύλληψη με τους TMD, Οι συντονισμένοι αποσβεστήρες υγρού (Tuned Liquid Dampers - TLD) και οι συντονισμένοι αποσβεστήρες στήλης υγρού (Tuned Liquid Column Dampers - TLCD) μεταδίδουν έμμεση απόσβεση στο σύστημα και έτσι βελτιώνουν την απόδοση του (Kareem 1990). Ένας TLD απορροφά τη δομική ενέργεια μέσω ιξωδών δράσεων του ρευστού και διάσπασης κυμάτων (wave breaking). Σε ένα TLCD, η ενέργεια απελευθερώνεται από τη μετάβαση του υγρού από ένα στόμιο με εγγενή χαρακτηριστικά ύψους τριβών (head loss). Η απόδοση μία κατασκευής ενός βαθμού ελευθερίας με ένα συντονισμένο ρευστό αποσβεστήρα (TLD), που υποβάλλεται σε ημιτονοειδή διέγερση, ερευνήθηκε από τον Sun (1991), με παράλληλα με τη μελέτη του Wakahara k.a. (1989) για την εφαρμογή τους στον περιορισμό ταλαντώσεων λόγω ανέμου. Ως αποτέλεσμα αυτών και άλλων μελετών, έχουν δημιουργηθεί πρακτικές εφαρμογές για τους TLD στο τομέα του δομικού ελέγχου των δονήσεων λόγω ανέμου.

Ο Fujino κ.α. (1988) και οι Welt και Modi (1989α,β) ήταν μεταξύ των πρώτων που πρότειναν τη χρήση των TLD για τη μείωση της γενικής απόκρισης κατά τη διάρκεια ισχυρού ανέμου ή σεισμού. Η συμπεριφορά ορθογωνικών ή κυκλικών δοχείων μερικά γεμισμένων με νερό μελετήθηκαν από τον Fujino (1988). Το δοχείο που μελετήθηκε από τους Welt και Modi (1989α,β), είναι γεωμετρικά το ίδιο με έναν αποσβεστήρα κλόνησης (nutational damper). Επίσης, έχουν προταθεί και άλλοι τύποι συντονισμένων αποσβεστήρων υγρών χωρίς τη χρήση κλυδασμού (liquid sloshing), ο απλούστερος των οποίων, γνωστός ως TLCD (Xu 1992α,β), αποτελείται από ένα σωλήνα που περιέχει νερό. Η θεμελιώδης συχνότητα σε αυτό το σύστημα εξαρτάται μόνο από το ύψος της στήλης του νερού, ενώ ο όρος απορρόφησης είναι μη γραμμικός, λόγω της παρουσίας των), και εξαρτάται από τον συντελεστή ύψους τριβών. Μία άλλη μορφή, παρόμοια με τους συντονισμένους αποσβεστήρες στήλης υγρού προτάθηκε από τον Nakamura (1988), στην οποία η απόσβεση δεν επιτυγχάνεται μέσω της παρουσίας των στομιών - διαφραγμάτων, αλλά μάλλον με τη δημιουργία μίας μη γραμμικότητας με ένα χάσμα μεταξύ μίας μάζας και του αποσβεστήρα αυτού καθεαυτού.

Λόγω των απλοποιήσεων που υιοθετούνται από τους περισσότερους ερευνητές όσον αφορά την περιγραφή της κίνησης του ρευστού,

διενεργήθηκαν πειράματα για να εξεταστεί η ισχύς των υποθέσεων αυτών. Γενικά, όταν το εύρος των ταλαντώσεων ήταν μικρό, υπήρχε σημαντική ταύτιση με τη θεωρία. Οι Welt και Modi (1989β) πραγματοποίησαν μία σειρά πειραμάτων σε αποσβεστήρες μερικώς γεμάτους σε σχήμα δακτυλίου. Βάση των αποτελεσμάτων, η αναλογία απόσβεσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στη αναλογία συχνότητας, με ένα μέγιστο περίπου 1.0, όπου παρατηρείται μία αντιστροφή προσήμου της προστιθέμενης μάζας. Για μία αύξηση στο εύρος της ταλάντωσης, παρατηρείται μία μείωση στην απόσβεση. Οι Welt και Modi (1987) έκαναν δοκιμές σε δομικά μοντέλα (κατασκευές) με αποσβεστήρες μορφής τόρου σε αεροσήραγγα. Χρησιμοποιώντας λείες και τυρβώδεις ροές, διάφορα μοντέλα με τετραγωνικό ή κυκλικό διατομή υποβλήθηκαν σε συντονισμό λόγω δίνης και σε καλπάζουσα αστάθεια. Σύμφωνα με τα πειράματα, στα μοντέλα παρουσιάστηκε μία μείωση των ταλαντώσεων. Ο Fujino (1988) μελέτησε και έκανε δοκιμές σε κυλινδρικά διαμορφωμένα κοντίνερ πάνω σε χαλύβδινη πλατφόρμα με σκοπό να προσομοιώσει έναν εύκαμπτο πύργο ή κτίριο. Για αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν αποσβεστήρες πρωτότυπου μεγέθους, αποφεύγοντας την τήρηση των συνθηκών ομοιότητας. Βάσει των αποτελεσμάτων, για ταλαντώσεις μικρού εύρους, η προστιθέμενη απόσβεση εξαρτάται σημαντικά από την αναλογία κατασκευής και συχνοτήτων κλυδασμού¹, με μέγιστη αναλογία περίπου μονάδα. Όσον αφορά για μεγαλύτερα εύρη, η προστιθέμενη απόσβεση στο σύστημα μειώνεται και είναι σχεδόν σταθερή για οποιαδήποτε αναλογία συχνοτήτων.

Αργότερα, ο Sun (1989) πραγματοποίησε δοκιμές σε δονητική τράπεζα πάνω σε ορθογώνιους TLDs για να ελέγξει την ακρίβεια της απλουστευμένης θεωρίας που αναπτύχθηκε. Τα επιπρόσθετα πειράματα, ενός ορθογώνιου κοντίνερ σε μία πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας, πραγματοποιήθηκαν από τον Chaiser (1989). Το πρώτο μέρος του πειράματος αφορούσε μία αρμονική δύναμη σταθερού εύρους, στη φυσική συχνότητα της πλατφόρμας και για διάφορα βάθη νερού. Σύμφωνα με τη δοκιμή, η ελάχιστη απόκριση αντιστοιχεί στη συντονισμένη περίπτωση. Το δεύτερο μέρος του πειράματος αφορούσε μία ποικιλία από συχνότητες διεγέρσεων. Παρόμοια αποτελέσματα επιτεύχθηκαν για μια προς τα εμπρός μια προς τα πίσω σάρωση

¹ Κλυδασμός (sloshing), στη Δυναμική των Ρευστών, είναι η κίνηση ρευστού εντός δοχείου με ελεύθερη επιφάνεια (δλδ. σε επαφή με την ατμόσφαιρα), λόγω οριζόντιας κίνησης της βάσης του δοχείου

συχνοτήτων, γεγονός που καταδεικνύει ότι οι αρχικές συνθήκες της απόκρισης της κατασκευής και των σχετικών κυμάτων δεν είναι σημαντικά.

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, οι συντονισμένοι αποσβεστήρες υγρού λειτουργούν με τις ίδιες βασικές αρχές των συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας. Εντούτοις, μερικά μειονεκτήματα των συστημάτων με συντονισμένους αποσβεστήρες μάζας δεν εμφανίζονται στους TLDs. Λόγω των απλών φυσικών εννοιών, σύμφωνα με τις οποίες η δύναμη επαναφοράς – αποκατάστασης παρέχεται στους TLDs, δεν απαιτείται κανένας μηχανισμός ενεργοποίησης. Επομένως, το κόστος συντήρησης ελαχιστοποιείται. Ο μηχανισμός ενεργοποίησης σε ένα σύστημα TMD πρέπει να ρυθμίζεται σε ένα συγκεκριμένο κατώτερο όριο διεγέρσεων, ενώ ένα σύστημα TLD είναι πάντα ενεργοποιημένο, συνεπώς αποφεύγονται προβλήματα λόγω ανεπάρκειας ενεργοποίησης του συστήματος.

Αν και η μαθηματική θεωρία που απαιτείται για την ακριβή περιγραφή της κίνησης του ρευστού μέσα στο δοχείο είναι αρκετά περίπλοκη, οι απαιτήσεις εξοπλισμού είναι αρκετά απλές και οι εγκαταστάσεις ελάχιστες. Γενικά, ο αποσβεστήρας αποτελείται από μία δεξαμενή από πολυπροπυλένιο, η οποία είναι συνήθως διαθέσιμη στο εμπόριο, με διάφορα ρηχά στρώματα νερού. Η συντήρηση του συστήματος είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Λόγω της απλότητας της εγκατάστασης, οι συντονισμένοι αποσβεστήρες υγρού μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σε ήδη υπάρχοντα κτίρια, ακόμα και για προσωρινή χρήση.

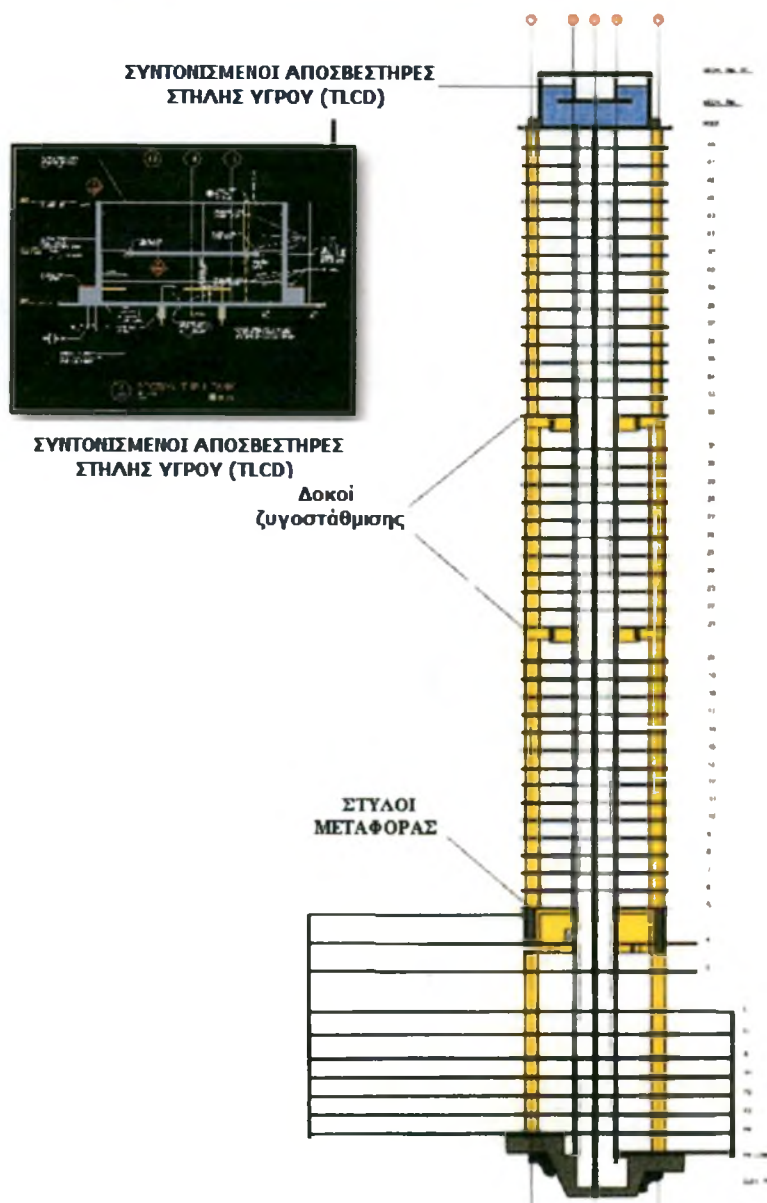
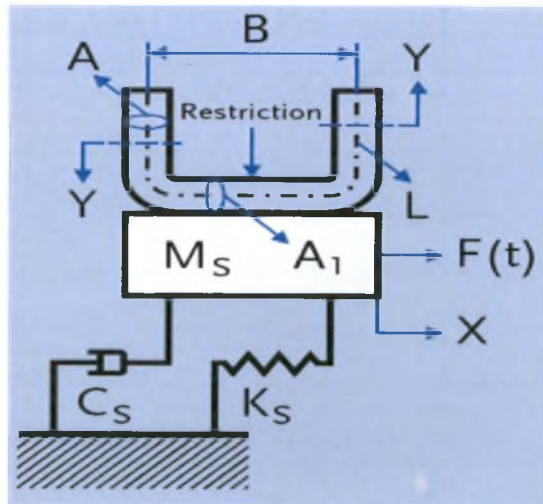
Λόγω της φύσης του συστήματος, αναμένεται ένα μικρό σφάλμα κατά τη μέτρηση της στάθμης του νερού σε ηρεμία, παράμετρος η οποία ελέγχει την τιμή της θεμελιώδους συχνότητας κλυδασμού. Όμως, ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των TLD έναντι των TMD είναι ότι για μεγάλα εύρη ταλάντωσης, το σύστημα δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην πραγματική αναλογία συχνότητας μεταξύ κυρίων και δευτερευουσών συστημάτων. Επισημαίνεται ότι για μικρά εύρη ταλάντωσης, κατάλληλος συντονισμός του συστήματος μπορεί να επηρεάσει αρκετά την απόκριση. Επομένως, το σφάλμα λόγω της μέτρησης του ύψους του νερού, δεν θα τροποποιήσει σημαντικά την απόκριση κατά τη διάρκεια ισχυρών δονήσεων.

Για κατασκευές με διαφορετικές θεμελιώδεις συχνότητες στις δύο κύριες κατευθύνσεις, ο συντονισμός μπορεί να ολοκληρωθεί με τη χρήση

ορθογώνιων δεξαμενών. Με μία επιλογή επαρκών διαστάσεων για τις δεξαμενές, και οι δύο θεμελιώδεις συχνότητες μπορεί να συντονιστούν. Εντούτοις, σε αυτή τη περίπτωση χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς η θεωρία αναπτύχθηκε για δεξαμενές που υποβάλλονται μόνο διέγερση με ίδια κατεύθυνση. Για κατασκευές με ίδια θεμελιώδη συχνότητα και προς τις δύο διευθύνσεις μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί κυκλική δεξαμενή. Χαρακτηριστικές απεικονίσεις των ως άνω αποσβεστήρων φαίνονται στα Σχήματα 2.38 και 2.39, που έπονται.



Σχήμα 2.38. Απεικόνιση ενός συντονισμένου αποσβεστήρα υγρού (TLD)



Σχήμα 2.39. Σχεδιάγραμμα ενός συντονισμένου αποσβεστήρα στήλης υγρού (TLCD)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο **ΗΜΙ – ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ** **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

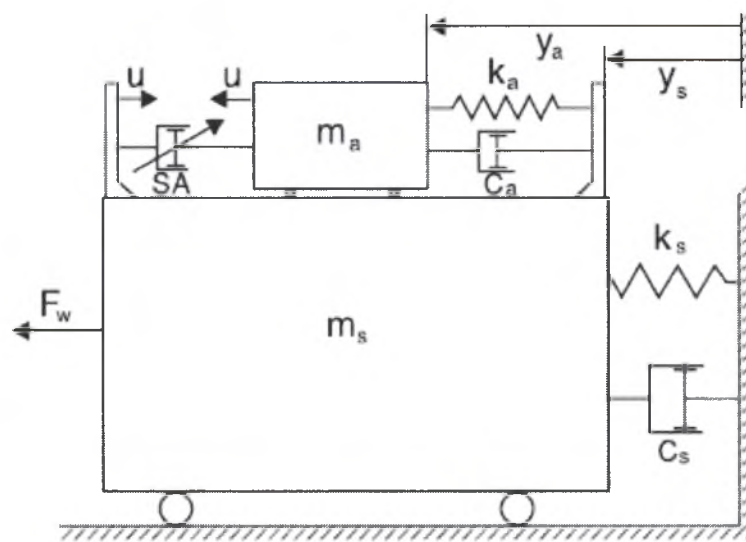
3.1 Γενικά

Τα ημι - ενεργητικά συστήματα ελέγχου είναι μία προέκταση των παθητικών συστημάτων απορρόφησης ενέργειας, τα οποία έχουν διαδοθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια λόγω της προσαρμοστικότητάς τους στα εξωτερικά φορτία. Το προστιθέμενο χαρακτηριστικό γνώρισμα μίας ημι - ενεργητικής συσκευής σε σχέση με μία παθητική έγκειται στο ότι η απόκριση των μηχανικών ιδιοτήτων του στοιχείου Γ (βλ. Σχ.1.1 και 2.1) μπορούν σε πραγματικό χρόνο να ρυθμιστούν σε σχέση με την τα εξωτερικά φορτία ή την δομική απόκριση ή και με τα δύο. Τα ημι - ενεργητικά συστήματα απαιτούν ονομαστικά ποσά ενέργειας για τη ρύθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους και σε αντίθεση με τα πλήρως ενεργητικά συστήματα, δεν μπορούν να προσθέσουν ενέργεια στη κατασκευή καθώς δεν υφίστανται ενεργές δυνάμεις που εφαρμόζονται απ' ευθείας στην κατασκευή.

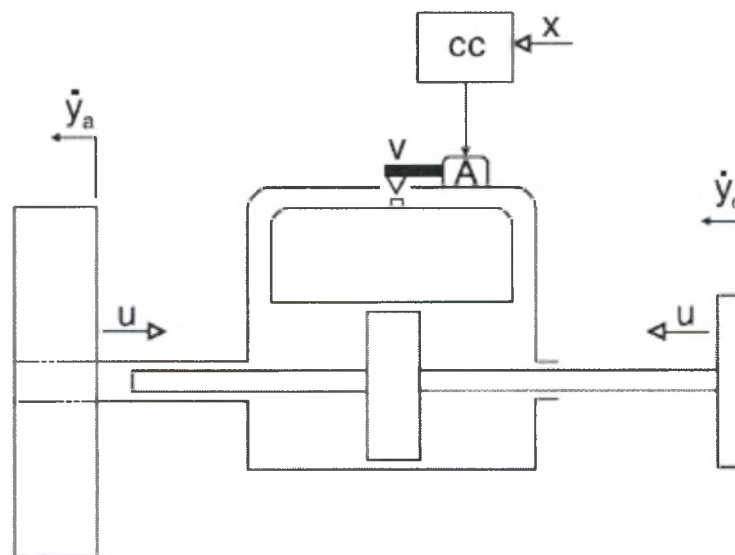
Ενώ τα ημι - ενεργητικά συστήματα ελέγχου έχουν μελετηθεί αρκετά παλιότερα για άλλους τομείς, όπως στα αυτοκίνητα, η εφαρμογή τους στον έλεγχο κίνησης των κατασκευών αρμοδιότητας Πολιτικού Μηχανικού υπό περιβαλλοντικά φορτία ερευνήθηκε πρόσφατα. Μερικά παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι οι ημι - ενεργητικοί αποσβεστήρες μάζας, οι συσκευές με ελεγχόμενη τριβή, οι ημι - ενεργητικοί ιξώδεις αποσβεστήρες ρευστών και, πιο πρόσφατα, ημι-ενεργητικές συσκευές, οι οποίες χρησιμοποιούν “έξυπνα” υλικά, όπως κράματα μνήμης μορφής (shape memory), πιεζοηλεκτρικά υλικά και ηλεκτρο- ή μαγνητο- ρεολογικοί αποσβεστήρες ρευστού.

Η έννοια και η βασική ιδέα ενός ημι - ενεργητικού συστήματος μπορεί να καταδειχθεί με την παρουσίαση ενός ημι - ενεργητικού αποσβεστήρα μάζας. Σε σύγκριση με έναν παθητικό συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας, η ημι - ενεργητική έκδοση, την οποία πρότεινε ο Hroval (1983), περιλαμβάνει έναν προστιθέμενο συνδυασμό κυλίνδρου εμβόλου και μία βαλβίδα ελέγχου, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 ως μονάδα S/A και παρουσιάζεται λεπτομερέστερα στο Σχήμα 3.2. Στον παθητικό τρόπο λειτουργίας, η βαλβίδα στον ενεργοποιητή είναι στάσιμη, πράγμα που αντιστοιχεί σε έναν συμβατικό συντονισμένο αποσβεστήρα μάζας. Κατά τη διάρκεια

της ενεργητικής λειτουργίας, ηλεκτρικά σήματα από τον υπολογιστή ελέγχου (CC στο Σχήμα 3.2) εκκινεί δράση ενεργοποιητή ελέγχου - τιμής, η οποία με τη σειρά της έχει σαν αποτέλεσμα η βαλβίδα (V) να εκτελεί κίνηση πάνω - κάτω. Εάν συγχρόνως το έμβολο κινείται σε σχέση με τον κύλινδρο, τότε παράγονται διαφορετικά επίπεδα δυνάμεων απόσβεσης (μ). Ο ορός ημι-ενεργητικός χρησιμοποιείται καθώς η δράση ελέγχου βαλβίδων απαιτεί ενέργεια, εντούτοις το ποσό της ενέργειας που απαιτείται είναι συνήθως μικρότερο σε σύγκριση με τη συνολική ενέργεια που απορροφάται από τον αποσβεστήρα.



Σχήμα 3.1. Ημι - ενεργητικός αποσβεστήρας μάζας



Σχήμα 3.2. Σχηματική αναπαράσταση ημι - ενεργητικής συσκευής

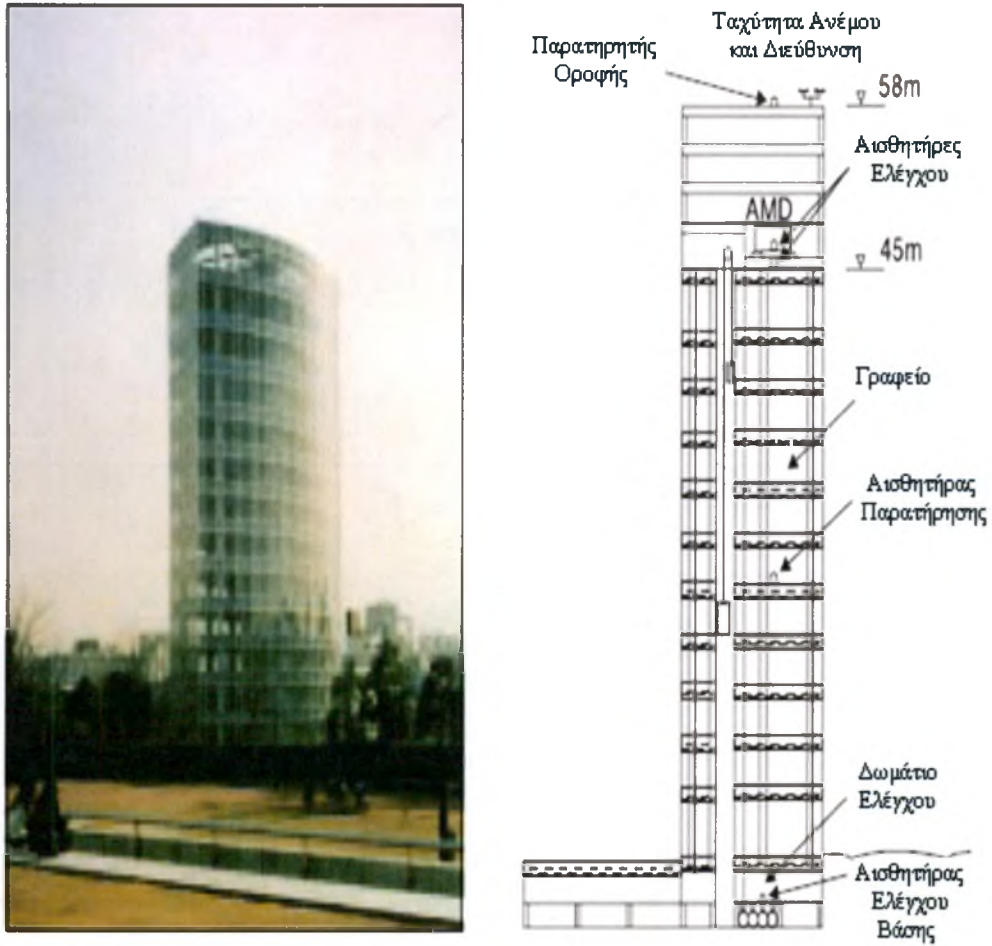
Για μία ημι-ενεργητική συσκευή, η δύναμη ενεργητικού ελέγχου σχεδιάζεται ως συνάρτηση της κατάστασης του δομικού συστήματος και/ή της κατάστασης της εξωτερικής δύναμης, όπως έχουν μετρηθεί από τους αισθητήρες σύμφωνα με τη συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου. Κατά κανόνα προσφέρει αξιόπιστη λειτουργία και μπορεί να θεωρηθεί σαν ασφαλής σε περίπτωση αστοχίας, καθόσον το σύστημα καθίσταται παθητικό αν δυσλειτουργήσει το (ηλεκτρικό) σύστημα ελέγχου.

Από τους τέσσερις ευρείς τύπους ημι-ενεργητικών συστημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι ημι - ενεργητικοί αποσβεστήρες μάζας και οι ημι - ενεργητικοί αποσβεστήρες ρευστού εφαρμόζονται στο δομικό έλεγχο των έργων του Πολιτικού Μηχανικού. Σε αυτούς τους δύο τύπους ημι-ενεργητικών αποσβεστήρων θα εστιάσουμε παρακάτω.

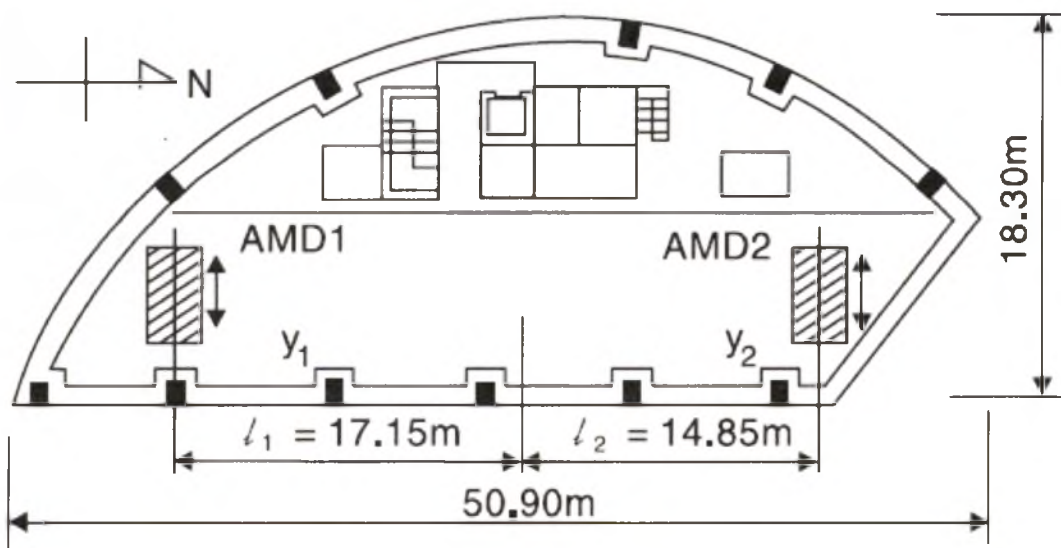
3.2 Ημι – ενεργητικοί αποσβεστήρες μάζας

Τα τελευταία χρόνια, σε μία προσπάθεια για διεύρυνση της αποτελεσματικότητας των συντονισμένων αποσβεστήρων μάζας για την αντιμετώπιση μέτρων σεισμικών φορτίων, καθώς επίσης και ανεμοφορτίων, έχουν αναπτυχθεί οι ημι - ενεργητικοί αποσβεστήρες μάζας ή υβριδικοί αποσβεστήρες μάζας (Hybrid Mass Dampers - HMD), οι οποίοι έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα ψηλά κτήρια, κυρίως στην Ιαπωνία.

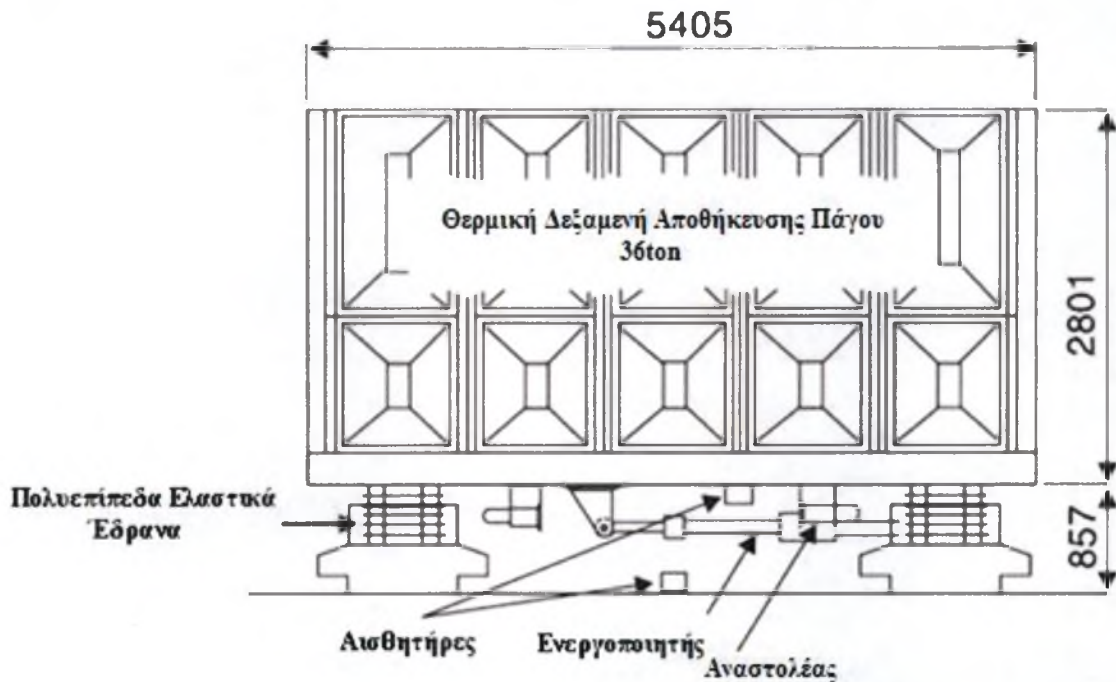
Σε μερικές από αυτές τις εγκαταστάσεις, οι ενεργητικές ικανότητες των HMDs παρέχονται μέσω των ηλεκτρο-υδραυλικών ενεργοποιητών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κτίριο Sendagaya INTES στο Τόκιο (1992), στο οποίο εγκαταστάθηκε ένα σύστημα από υβριδικούς αποσβεστήρες μάζας. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, ο υβριδικός αποσβεστήρας μάζας τοποθετήθηκε στο 11^ο όροφο και αποτελείται από δύο μάζες για τον έλεγχο των εγιάρσιων και στρεπτικών κινήσεων της κατασκευής, ενώ οι ηλεκτρο-υδραυλικοί ενεργοποιητές παρέχουν ενεργητικές δυνατότητες ελέγχου. Η κάτοψη του συστήματος ελέγχου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4 όπου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5, οι θερμικές δεξαμενές αποθήκευσης πάγου χρησιμοποιούνται ως φραγμοί μάζας, έτσι ώστε καμία επιπλέον μάζα να μην εισάγεται. Οι μάζες υποστηρίζονται από πολυβάθμια λαστιχένια ρουλεμάν με σκοπό τη μείωση της ενέργειας ελέγχου που καταναλώνεται στον HMD και την εξασφάλιση ομαλής κίνησης της μάζας (Higashino and Aizawa, 1993).



Σχήμα 3.3. Το κτίριο Sendagaya INTES στο Τόκιο

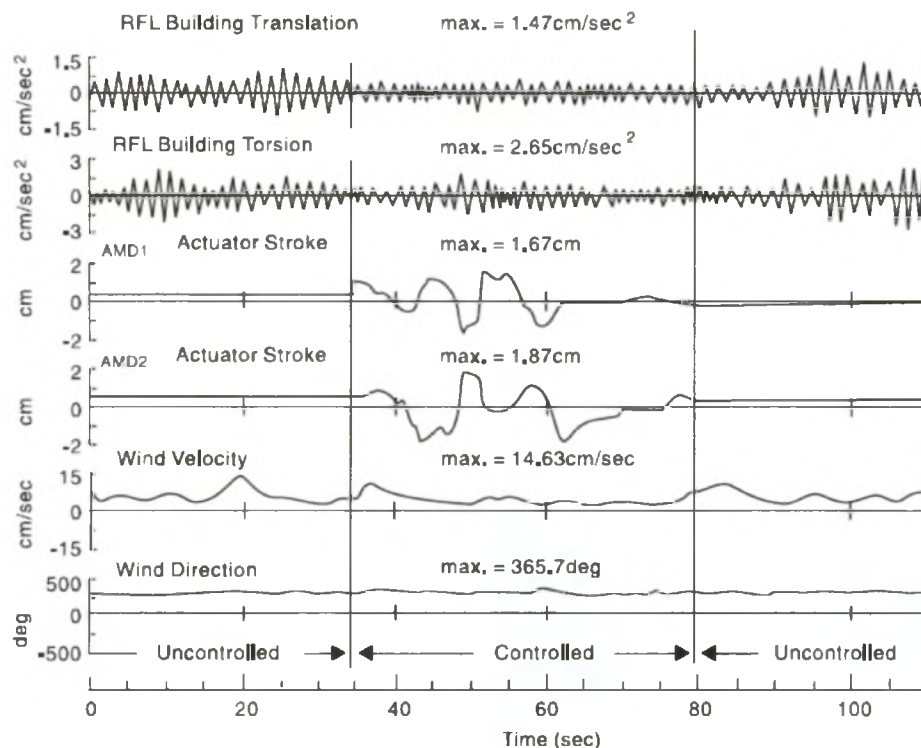


Σχήμα 3.4. Όψη εκ των άνω της TMD

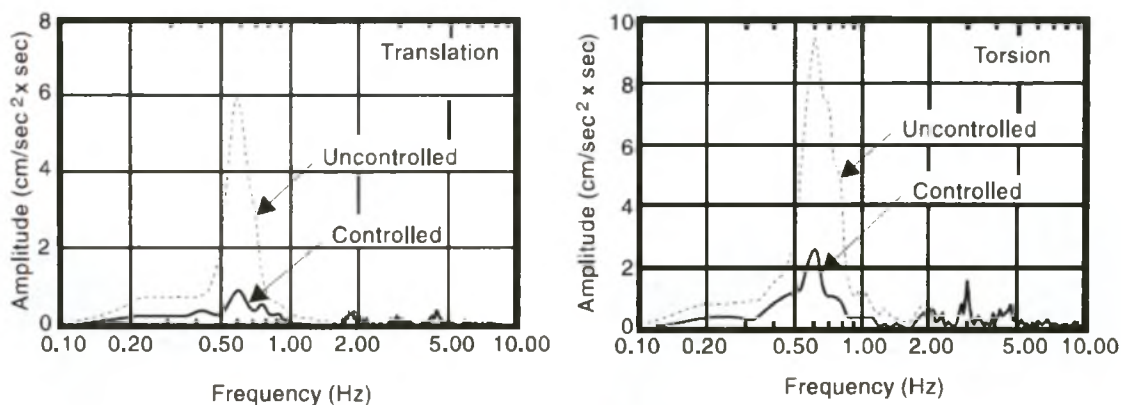


Σχήμα 3.5. Πλαϊνή όψη της TMD

Επαρκή δεδομένα αποκτήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης των AMD όταν το κτήριο υποβλήθηκε σε ισχυρή ανεμοπίεση τις 29 Μαρτίου 1993, με στιγμιαία μέγιστη ταχύτητα ανέμου ίση με 30.6 m/sec. Ένα παράδειγμα των καταγεγραμμένων χρόνο - ιστοριών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6, όπου απεικονίζονται τόσο η ελεγχόμενη όσο και η μη ελεγχόμενη κατάσταση. Τα αφάσματα Fourier αυτών (με χρήση δειγμάτων διάρκειας 30 sec) φαίνονται στο Σχήμα 3.7, από το οποίο τεκμαίρεται ικανοποιητική απόδοση για χαμηλές συχνότητες. Η απόκριση στη θεμελιώδη ιδιομορφή μειώθηκε κατά 18% και 28% για παράλληλη μετατόπιση (translation) και στρέψη, αντίστοιχα. Παρόμοια χαρακτηριστικά απόδοσης παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια μίας σειράς σεισμών, που καταγράφηκαν το 1993.



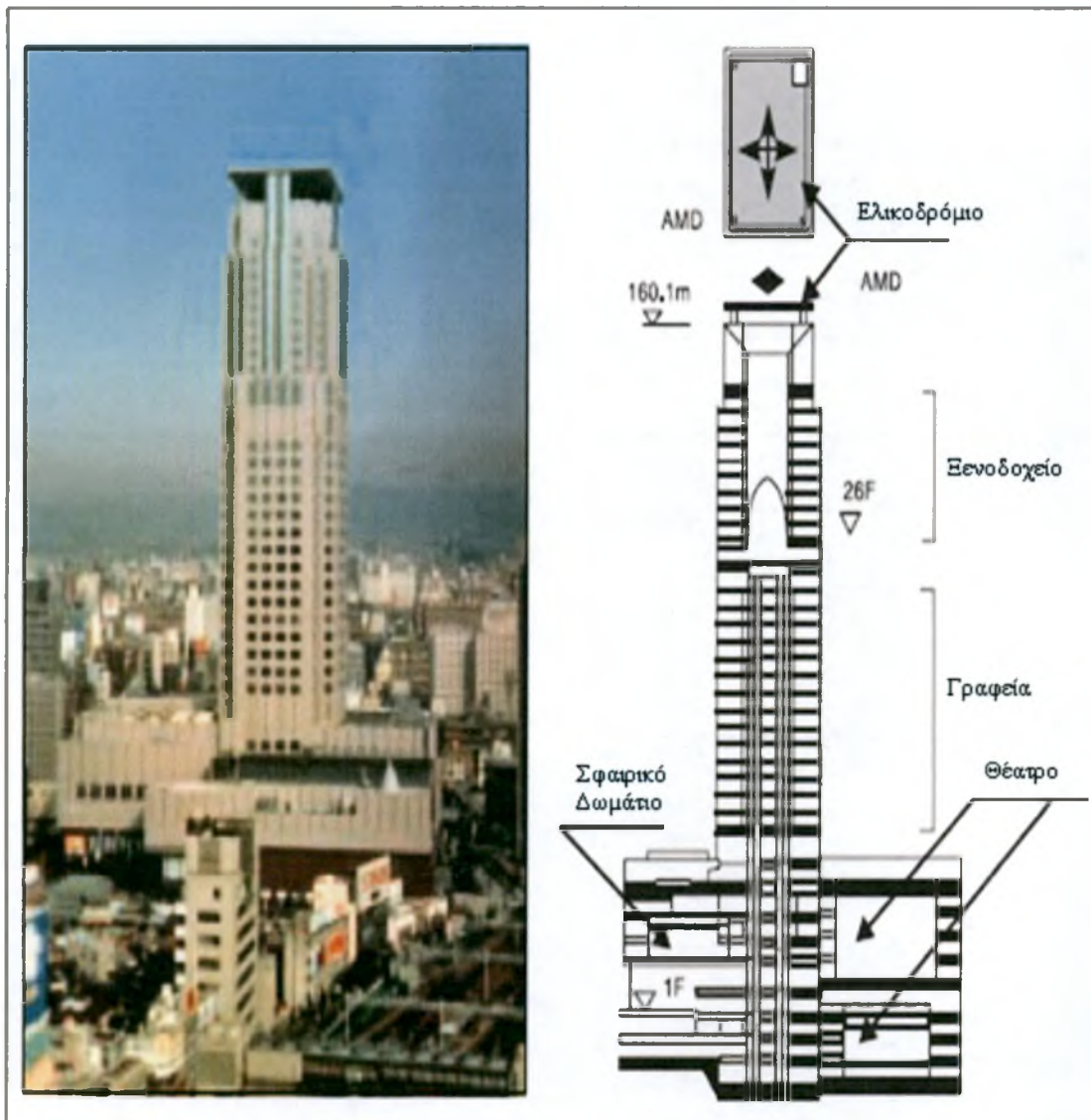
Σχήμα 3.6. Χρονο – ιστορίες απόκρισης (Μάρτιος 1993)



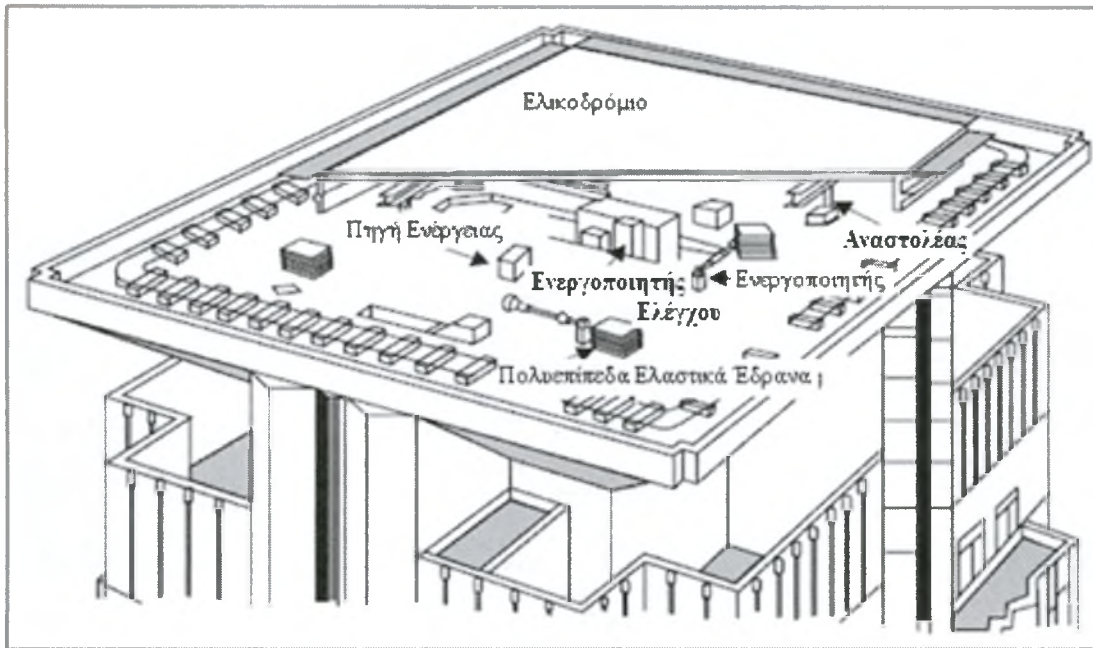
Σχήμα 3.7 Φάσματα Fourier της απόκρισης (Μάρτιος 1993)

Στο κτίριο Hankyu Chayamachi, 34ων ορόφων και ύψος 160 μέτρων, στην Οσάκα της Ιαπωνίας, τοποθετήθηκε ένα σύστημα υβριδικών αποσβεστήρων μάζας (HMD) σύμφωνα με το Σχήμα 3.8. Σε αυτή τη περίπτωση, το ελικοδρόμιο, το οποίο βρίσκεται στο τελευταίο όροφο ζυγίζει 480 τόνους και αποτελεί το 3,5% του συνολικού βάρους του κτιρίου, χρησιμοποιείται ως η κινούμενη μάζα του συστήματος HMD. Το σχεδιάγραμμα του συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9. Το ελικοδρόμιο στηρίζεται από έξι πολυβάθμια ελαστικά ρουλεμάν. Η φυσική συχνότητα

του ελαστικού και του συστήματος του ελικοδρομίου τέθηκε στα 3.6 δευτερόλεπτα, ελάχιστα χαμηλότερα από αυτή του κτιρίου (3.8 δευτερόλεπτα). Ο ενεργητικός μηχανισμός ελέγχου που χρησιμοποιείται έχει την ίδια αρχιτεκτονική φιλοσοφία με αυτόν του κτιρίου Sendagaya INTES, δηλαδή, το σχέδιο του ψηφιακού ελεγκτή, ο υδραυλικός σχεδιασμός και ο σερβομηχανισμός, εκτός από τους δύο επενεργητές, για την λειτουργία των ωθήσεων της τάξης των 5 τόνων, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε οριζόντιες ορθογώνιες κατευθύνσεις. Ο στρεπτικός έλεγχος δεν εξετάζεται εδώ.

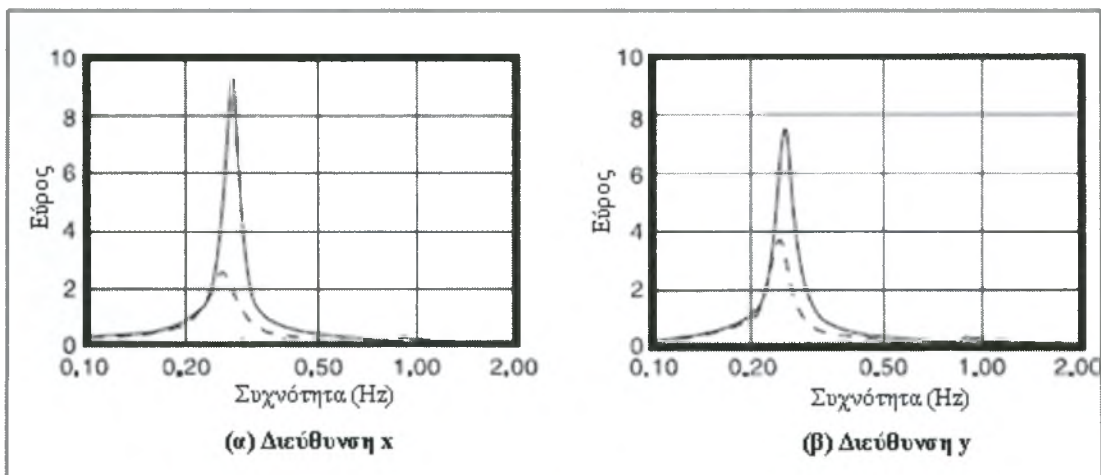


Σχήμα 3.8. Το κτίριο Hankyu Chayamachi



Σχήμα 3.9. Σχεδιάγραμμα του υβριδικού αποσβεστήρα μάζας (HMD)

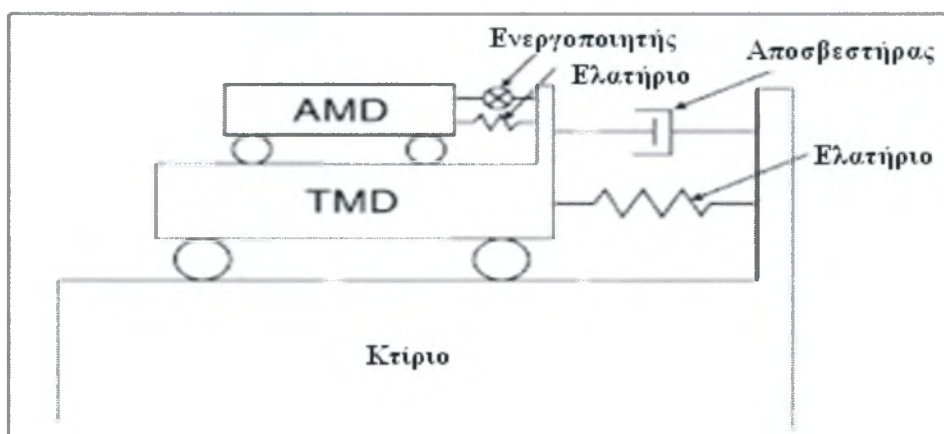
Η επιτάχυνση φάσματος Fourier κατά τη διάρκεια ενός πρόσφατου τυφώνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10. Δεδομένου σε αυτή τη περίπτωση ότι το κτίριο, αρχικά, ταλαντεύτηκε με τη θεμελιώδη ιδιομορφή, αναμένονταν σημαντικές μειώσεις της επιτάχυνσης.



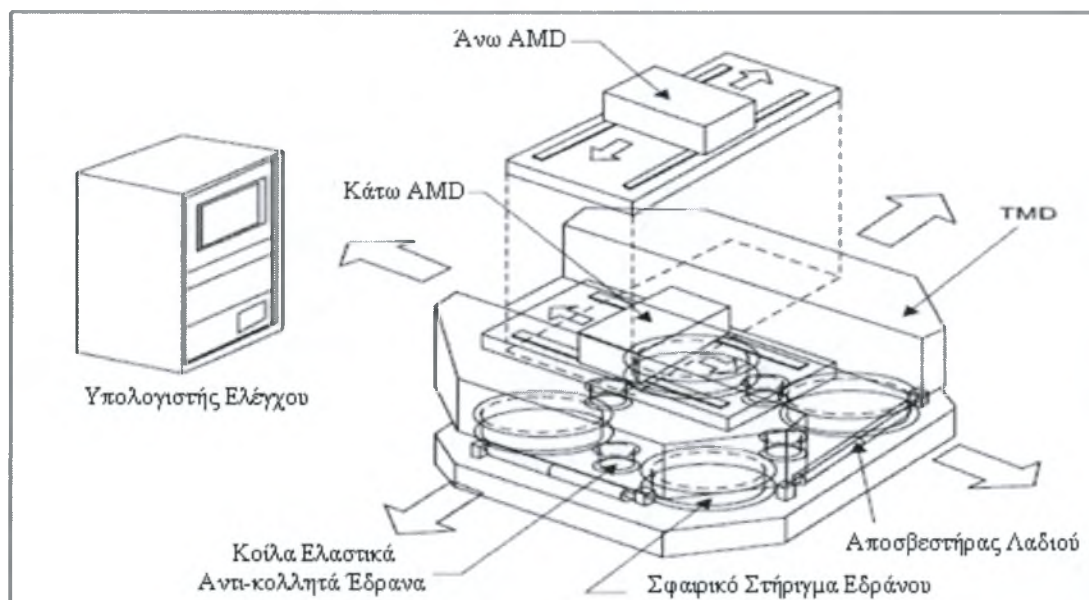
Σχήμα 3.10. Επιτάχυνση φάσματος Fourier

Το σύστημα HMD, το οποίο εγκαταστάθηκε στο κτίριο Ando Nishikicho, είναι ένα σύστημα διπλής μάζας, που ονομάζεται σύστημα DUOX (Nishimura 1993). Ουσιαστικά, είναι ένας συνδυασμός ενός ενεργητικού αποσβεστήρα μάζας (AMD) και ενός παθητικού συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας (TMD), όπως

φαίνεται και στο Σήμα 3.11. Η ενεργός δύναμη παρέχεται στον TMD μέσω του AMD, οδηγούμενου από έναν σερβοκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος και σφαιρικές βίδες. Η σύνθεση του συστήματος DUOX, που χρησιμοποιείται στο κτίριο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12 (Sakatomo and Kobori 1993). Το βάρος της συσκευής ανέρχεται περίπου στο 0,8% του συνολικού βάρους της κατασκευής και το βάρος του AMD είναι περίπου το 10% του βάρους του TMD ή το 0,08% της συνολικής κατασκευής. Ο TMD αποτελείται από ελατήρια και κοίλα ελαστικά αντι-κολλητά έδρανα, τα οποία χρησιμεύουν και ως στηρίξεις της συσκευής, και αποσβεστήρες λαδιού, που παρέχουν απόσβεση στο σύστημα.

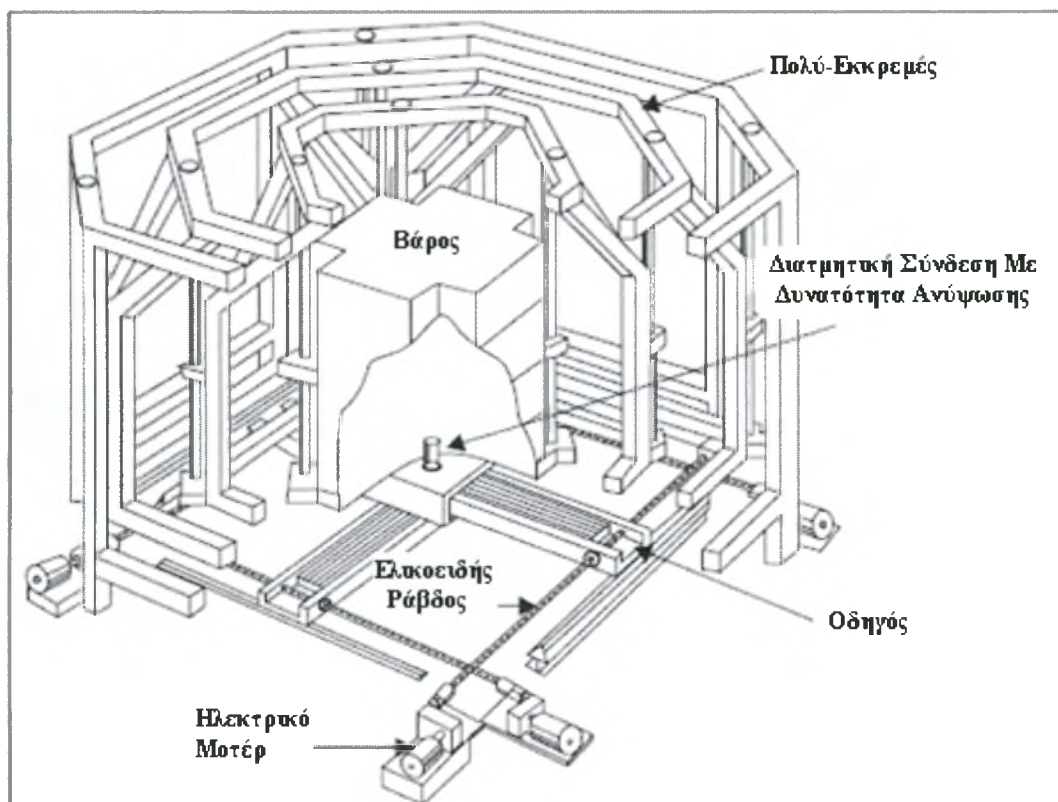


Σχήμα 3.11. Στοιχειώδες σχεδιάγραμμα ενός DUOX συστήματος

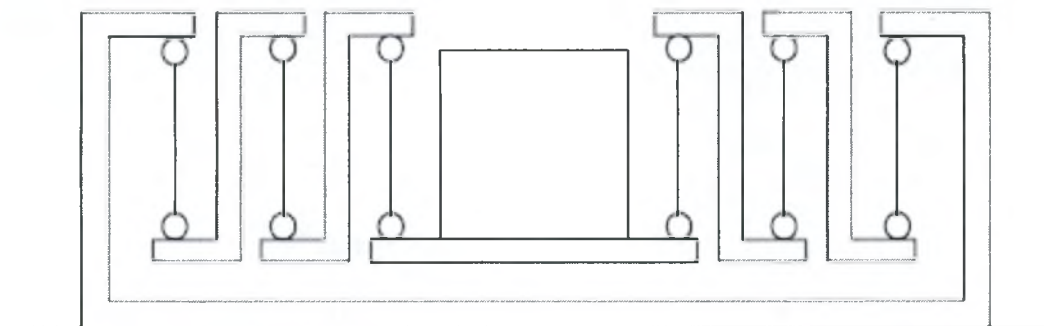


Σχήμα 3.12. Σύνθεση ενός DUOX συστήματος

Μία άλλη παραλλαγή του συστήματος HMD αποτελεί το σύστημα τύπου εκκρεμούς, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί, μεταξύ άλλων, στον 70 ορόφων Yokohama Land Mark Tower, το ψηλότερο κτίριο στην Ιαπωνία (Abiru 1992). Δύο συστήματα εκκρεμών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.13, εγκαταστάθηκαν στον ίδιο όροφο το 1993. Κάθε κινούμενη μάζα έχει τοποθετηθεί στο κέντρο μίας σειράς από ομόκεντρα χαλύβδινα πλαίσια, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους εξοπλισμένα με προσαρμογές ελέγχου της φυσικής περιόδου. Μόνο το πιο ακραίο πλαίσιο συνδέεται με τον όροφο. Αυτή η πολυεπίπεδη ρύθμιση χρησιμοποιείται αντί ενός κανονικού εκκρεμούς μηχανισμού προκειμένου να μειωθεί το ύψος του βραχίονα του εκκρεμούς, όπως δε φαίνεται και στο Σχήμα 3.14, απαιτείται μόνο το 1/3 του ύψους ενός συμβατικού τύπου εκκρεμούς αποσβεστήρα μάζας. Η συσκευή κίνησης έχει τοποθετηθεί κάτω από την κινούμενη μάζα και αποτελείται από σερβομηχανισμούς, σφαιρικές βίδες, μηχανισμό κίνησης κατά ΧΥ και έναν καθολικό κόμβο που συνδέει τη συσκευή οδήγησης με τη κινούμενη μάζα.



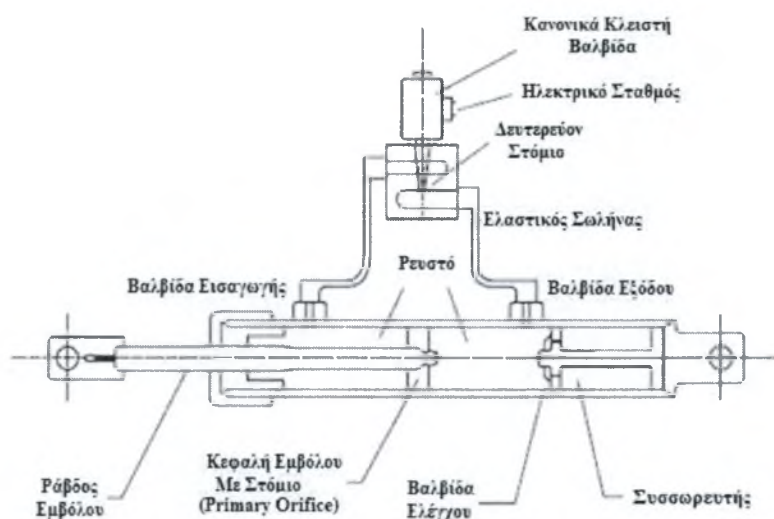
Σχήμα 3.13. Υβριδικός αποσβεστήρας μάζας (HMD) τύπου εκκρεμούς



Σχήμα 3.14. Πολυεπίπεδος αποσβεστήρας μάζας τύπου εκκρεμούς

3.3 Ημι – ενεργητικοί αποσβεστήρες ρευστού

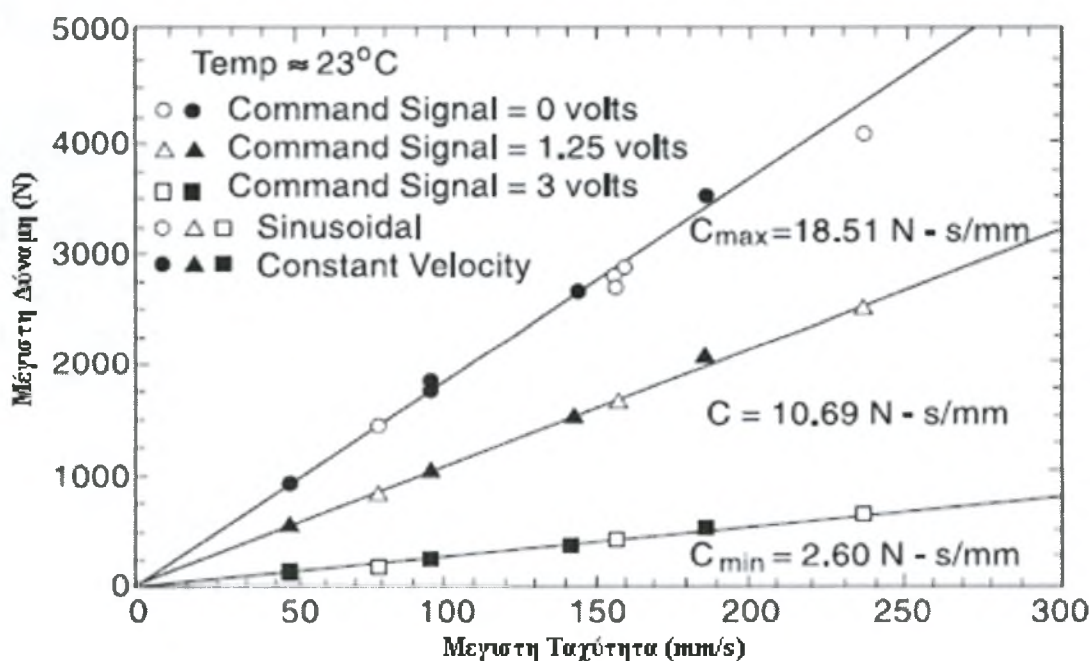
Οι ημι-ενεργητικοί αποσβεστήρες ρευστού, οι οποίοι έχουν μελετηθεί από τους Symans και Constantinou (1995), βασίζονται στο σχεδιασμό των παθητικών συσκευών απόσβεσης ρευστού, στις οποίες έχουμε αναφερθεί και προηγουμένως. Ως ημι - ενεργητική συσκευή, η παθητική διάταξη απόσβεσης τροποποιήθηκε, με την πρόσθεση ενός εξωτερικού βρόγχος παράκαμψης, ο οποίος αποτελείται από μία βαλβίδα ελέγχου, σύμφωνα με το Σχήμα 3.15. Αναπτύχθηκαν δύο συστήματα ημι -ενεργητικών αποσβεστήρων: ένας αποσβεστήρας δύο επιπέδων, που χρησιμοποιεί σωληνοειδή βαλβίδα και ένας μεταβλητός αποσβεστήρας που χρησιμοποιεί μία σερβοβαλβίδα απευθείας μετάδοσης. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των αποσβεστήρων περιλαμβάνουν ένα κύλινδρο μήκους περίπου 17cm, δυνατότητας μετακίνησης $\pm 7.62\text{cm}$ και μέγιστης δύναμης εξόδου 8900N.



Σχήμα 3.15. Ημι-ενεργητικός αποσβεστήρας εξόδου ρευστού

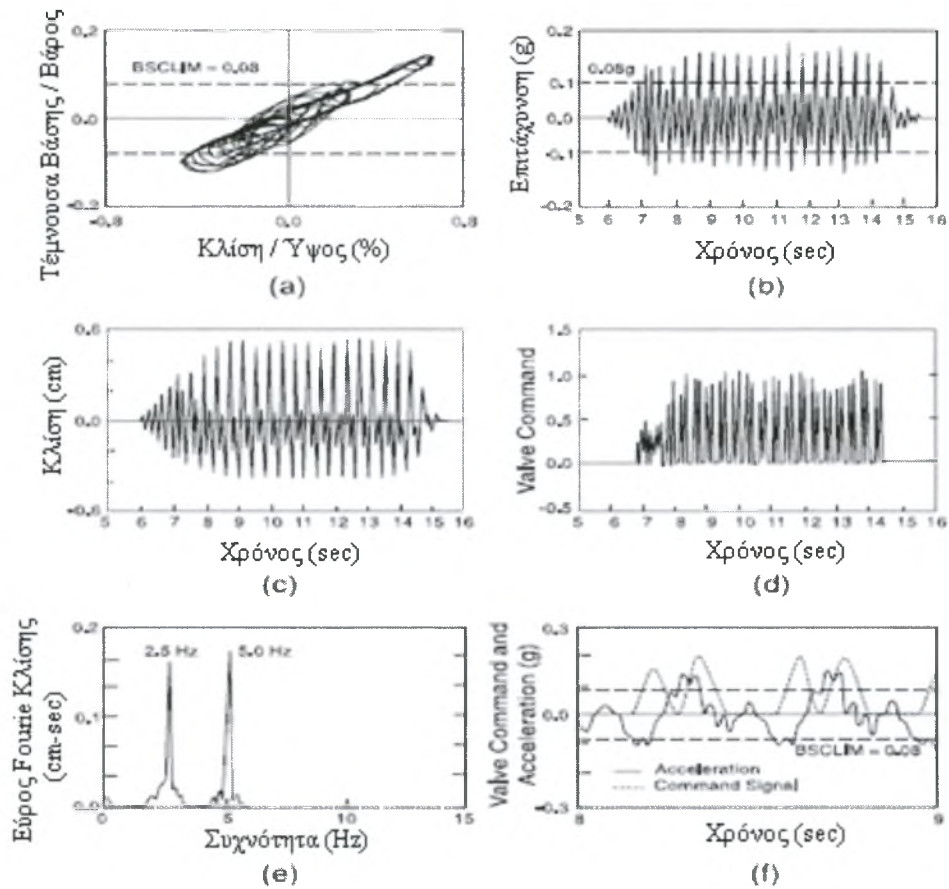
Τα χαρακτηριστικά απόσβεσης του αποσβεστήρα δύο επιπέδων ελέγχονται μέσω της μεταβολής των ποσών ροής, που περνούν μέσω του εξωτερικού βρόγχου παράκαμψης χρησιμοποιώντας μία σωληνοειδή βαλβίδα εναλλασσόμενου ρεύματος. Η σωληνοειδής βαλβίδα έχει την ικανότητα είτε να είναι ανοιχτή ή κλειστή. Επομένως, μόνο δύο επίπεδα απόσβεσης είναι διαθέσιμα για το σύστημα. Η βαλβίδα ελέγχου, που χρησιμοποιείται στους μεταβλητούς αποσβεστήρες, είναι βαλβίδα απευθείας οδήγησης, η οποία μπορεί να είναι κλειστή, πλήρως ανοικτή ή μερικά ανοικτή. Επομένως, μία πλήρης σειρά επιπέδων απόσβεσης είναι διαθέσιμα για αυτό το σύστημα.

Οι μηχανικές ιδιότητες του αποσβεστήρα δύο επιπέδων και του μεταβαλλόμενου αποσβεστήρα προσδιορίστηκαν μέσω της επιβολής των αποσβεστήρων σε ημιτονοειδείς κινήσεις και σε κινήσεις σταθερής ταχύτητας. Στον μεταβαλλόμενο αποσβεστήρα, η σχέση μεταξύ της μέγιστης ταχύτητας και της μέγιστης δύναμης για τρεις διαφορετικές τάσεις σημάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16. Τα δεδομένα για κάθε τάση σήματος μπορεί αντιστοιχεί σε ευθείες, οι οποίες έχουν κλίση ίση με τον αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης.



Σχήμα 3.16. Πειραματικές τιμές της μέγιστης ταχύτητας ως προς τη μέγιστη δύναμη

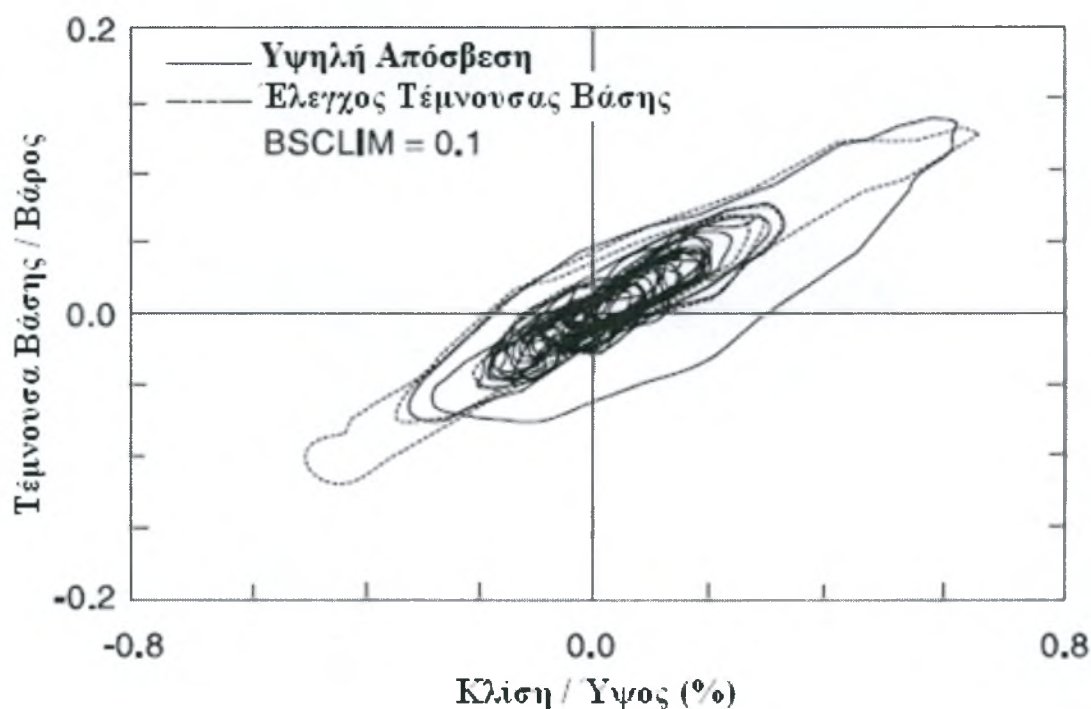
Μία πρότυπη μονώροφη κατασκευή με αποσβεστήρα δύο επιπέδων, ο οποίος παρέχει ημι-ενεργητικό έλεγχο, υποβλήθηκε σε δοκιμές σε δονητική τράπεζα και το σήμα εντολής ήταν μεταξύ κλειστού (0) και ανοικτού (1). Η συγκεκριμένη κατασκευή υποβλήθηκε σε αρμονική εισερχόμενη κίνηση και παρέχονταν έλεγχος σύμφωνα με αλγόριθμο ελέγχου συντελεστού τέμνουσας βάσης (base shear coefficient control algorithm). Υπό αυτόν τον αλγόριθμο ελέγχου, η βαλβίδα είναι ανοιχτή (χαμηλή απόσβεση), όταν ο συντελεστής τέμνουσας βάσης υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή (BSCLIM), η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 0.08. Η απόκριση της κατασκευής που μας ενδιαφέρει, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.17. Προφανώς, η απόκριση αποτελείται από δύο ευδιάκριτες συχνότητες, εκ των οποίων η μία είναι η συχνότητα οδήγησης της εισαγωγής και η άλλη είναι η φυσική συχνότητα της κατασκευής. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αιτιολογηθεί παρατηρώντας ότι η κλίση αυξάνεται σταθερά με το χρόνο (υπό μεγάλη απόσβεση) και κατόπιν, όταν ο συντελεστής τέμνουσας βάσης υπερβαίνει τη τιμή 0.08, οι βαλβίδες ανοίγουν, αρχίζοντας μία διαρμονική κίνηση. Αυτή η διαρμονική κίνηση παρουσιάζεται ευκρινώς τόσο σε χρονο - ιστορίες μετατόπισης όσο και στο φάσμα εύρους Fourier της μετατόπισης. Οι δύο αρμονικές, που παρουσιάζονται στην απόκριση, αντιστοιχούν στην συχνότητα οδήγησης της εισαγωγής (5Hz) και στη φυσική συχνότητα της κατασκευής (περίπου 2Hz). Προφανώς, η τροποποίηση της απόσβεσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής του ημι-ενεργητικού ελέγχου έδωσε το έναυσμα, εκτός από την σταθερής κατάστασης απόκριση της συχνότητας της εισαγωγής, και για μία παροδική απόκριση αντιστοιχεί στη φυσική συχνότητα της κατασκευής. Έχει αποδειχτεί αναλυτικά ότι αυτή η διαρμονική κίνηση είναι αποτέλεσμα των χρονικών καθυστερήσεων του συστήματος (Symans και Constantinou, 1995). Αυτή η συμπεριφορά παρουσιάζει ενδιαφέρον, καθώς δεν παρατηρήθηκε για καμία άλλη εισερχόμενη κίνηση ή αλγόριθμο ελέγχου και εξαφανίστηκε όταν οι χρονικές καθυστερήσεις αντισταθμίστηκαν.



Σχήμα 3.17. Αποτελέσματα των δοκιμών για αποσβεστήρα δύο επιπέδων

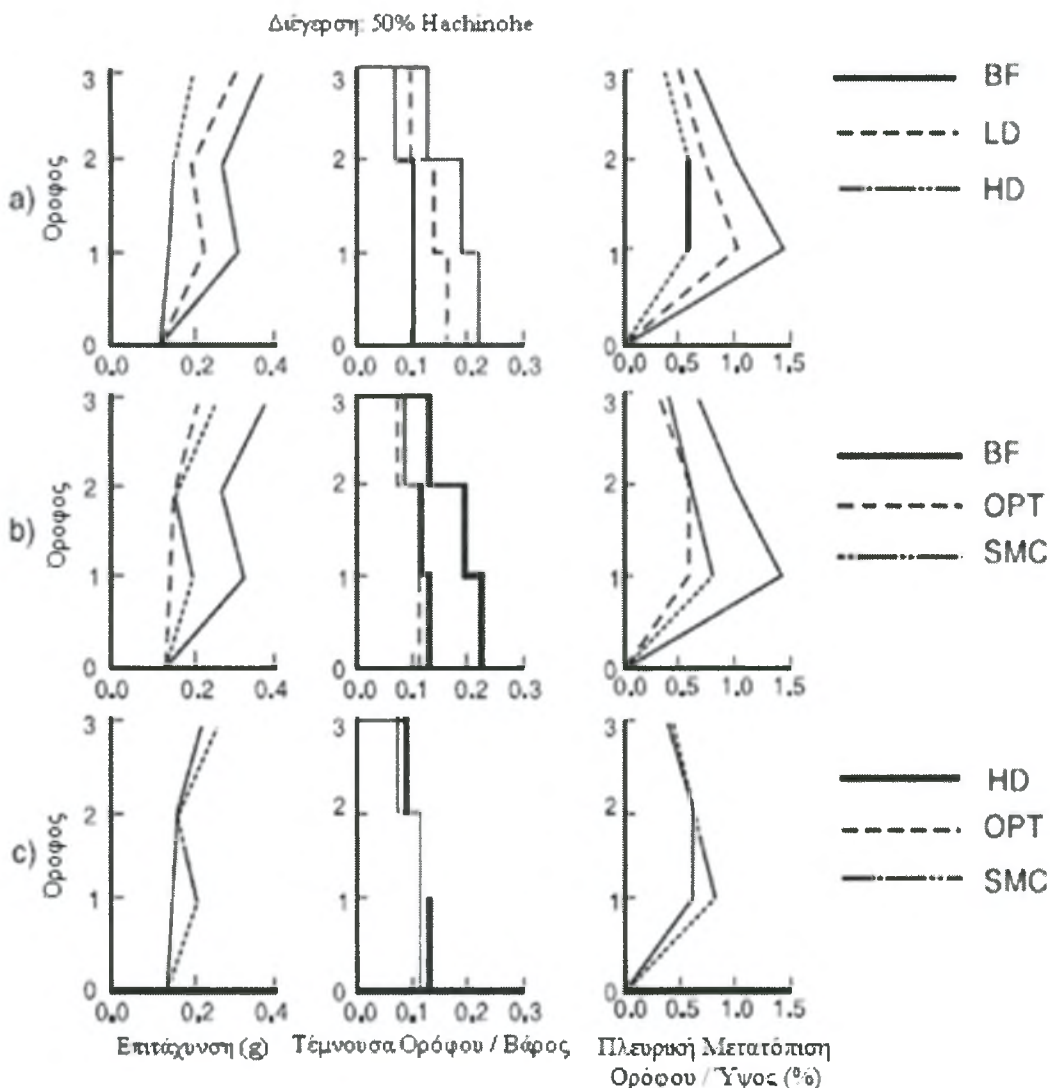
Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζεται μια σύγκριση δύο δοκιμών ενός μονώροφου κτιρίου με αποσβεστήρες δύο επιπέδων, το οποίο υποβάλλεται στο 50% στη κίνηση εδάφους Hachinoche. Στη μία περίπτωση, οι βαλβίδες είναι κλειστές παρέχοντας μεγάλη απόσβεση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, ο αλγόριθμος του συντελεστή τέμνουσας βάσης έχει προσδιοριστεί με όριο της τάξης του 0.1. Η μέγιστη διάτμηση βάσης έχει μειωθεί περίπου κατά 6%, ενώ η μέγιστη κλίση παρουσιάζει αύξηση περίπου 6%. Επομένως, ο ημι - ενεργητικός έλεγχος ήταν ελάχιστα αποτελεσματικός κατά την επίτευξη του στόχου, που ήταν η μείωση της διάτμησης βάσης. Επιπρόσθετα δε, ως αρνητική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται η αύξηση στη πλευρική μετατόπιση του ορόφου. Επισημαίνουμε ότι δεν χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη δοκιμή αντιστάθμιση των χρονικών καθυστερήσεων. Περαιτέρω, η αποτελεσματικότητα του ημι -ενεργητικού συστήματος ελέγχου αξιολογείται με βάση των συγκρίσεων με ένα παθητικό σύστημα ελέγχου υψηλής απόσβεσης. Όταν οι

συγκρίσεις έγιναν με τη απόκριση του σκέτου πλαισίου, δραματικές μειώσεις της απόκρισης παρατηρήθηκαν για το ημι - ενεργητικό σύστημα ελέγχου.



Σχήμα 3.18. Βρόγχοι τέμνουσας βάσης- κλίσης για περιπτώσεις υψηλής παθητικής απόσβεσης και έλεγχου τέμνουσας βάσης

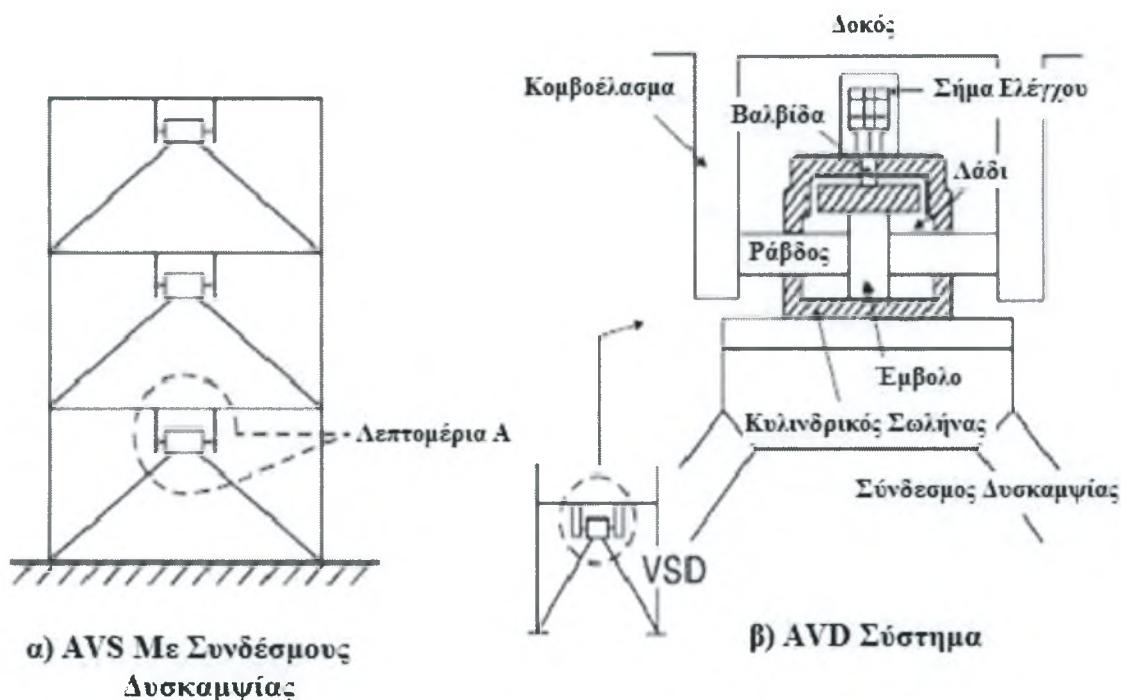
Μία τριώροφη κατασκευή με ημι - ενεργητικό έλεγχο μέσω ενός συστήματος μεταβαλλόμενων αποσβεστήρων υποβλήθηκε σε δοκιμές σε δονητική τράπεζα περιλαμβάνοντας μία ποικιλία αλγορίθμων ελέγχου, και όλοι παρήγαγαν σημαντικές μειώσεις απόκρισης συγκρινόμενες με αυτές του απλού πλαισίου. Εντούτοις, η απόκριση της ημι - ενεργητικά ελεγχόμενης κατασκευής ήταν σχεδόν ίδια με αυτή μίας κατασκευής με κατάλληλα σχεδιασμένο παθητικό σύστημα απόσβεσης. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζονται συγκρίσεις της μέγιστης απόκρισης της κατασκευής, η οποία υποβάλλεται στο 50% της διέγερσης εδάφους Hachinoche και ελέγχεται με διάφορα συστήματα ελέγχου (BF: απλό πλαίσιο, LD: παθητικό σύστημα ιξώδους χαμηλής απόσβεσης, HD: παθητικό σύστημα ιξώδους υψηλής απόσβεσης, OPT: βέλτιστος αλγόριθμος ελέγχου, SMC: αλγόριθμος ελέγχου μορφής ολίσθησης).



Σχήμα 3.19. Σύγκριση της μέγιστης απόκρισης για τριώροφη κατασκευή

Το ενεργητικό σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας (AVS), που είναι λειτουργικά παρόμοιο με μία ημι - ενεργητική συσκευή ρευστού και αναπτύχθηκε από τον Kobori (1993), σχεδιάστηκε με βασικό σκοπό να διατηρεί τη μη συντονισμένη κατάσταση της κατασκευής υπό σεισμικές διεγέρσεις με τη μεταβολή της δομικής δυσκαμψίας, χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που παρέχονται από τις σεισμικές επίγειες κινήσεις. Για την τριώροφη κατασκευή του Σχήματος 3.20α, η AVS συσκευή, η οποία συνδέθηκε μεταξύ του συστήματος ενίσχυσης σχήματος V και των δοκών σε κάθε όροφο, λειτουργεί μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων δυσκαμψίας σύμφωνα με το αν η βαλβίδα στη κυλινδρική συσκευή κλειδώματος είναι ανοικτή ή κλειστή (Σχήμα 3.20β). Αυτή η μετάπτωση μεταξύ των δύο καταστάσεων βασίζεται στην ανάλυση των σεισμικών κινήσεων του εδάφους σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε η

βέλτιστη δυσκαμψία να επιλέγεται από μία σειρά δομικών δυσκαμψιών προκειμένου να επιτυγχάνεται το χαμηλότερο επίπεδο δόνησης.



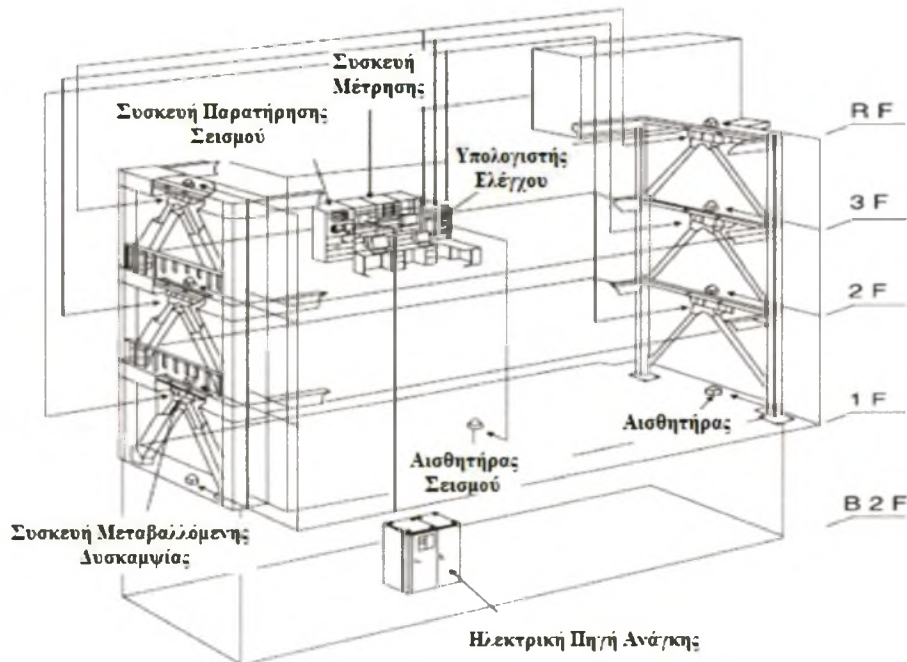
Σχήμα 3.20. Ημι - ενεργητικό σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας

Το AVS σύστημα δοκιμάστηκε σε μία τριώροφη κατασκευή υπό κλίμακα και στη συνέχεια εγκαταστάθηκε σε κτίριο πραγματικής κλίμακας στο Τόκιο το 1993 (Kobori 1993). Το κτίριο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.21 ενώ η γενική διαμόρφωση του AVS συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.22, όπου οι AVS συσκευές τοποθετήθηκαν και στις δύο πλευρές της κατασκευής στη διαμήκη κατεύθυνση. Το κτίριο υποβλήθηκε σε διάφορους πρόσφατους σεισμούς. Η απόδοση του AVS συστήματος κατά τη διάρκεια ενός σεισμού το 1991 ήταν ικανοποιητική, καθώς η επιλογή της δυσκαμψίας ήταν κατάλληλη για τον συγκεκριμένο σεισμό. Εντούτοις, η απόδοση του AVS συστήματος ήταν λιγότερο ικανοποιητική κατά τη διάρκεια ενός σεισμού το 1992, λόγω της επιλογής μη κατάλληλης δυσκαμψίας και της ωστικής φύσης του σεισμού. Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς των AVS συστημάτων, σύμφωνα με τους Yamada και Kobori (1995), αποτελεί η απότομη μετάπτωση μεταξύ των δύο καταστάσεων δυσκαμψίας, η οποία προκαλεί ωστικές δυνάμεις και ως εκ τούτου παλμούς επιτάχυνσης, που μπορεί να αποβούν καταστρεπτικοί για την κατασκευή και το περιεχόμενό της. Επιπλέον, η AVS συσκευή

έχει την ικανότητα να απορροφά ενέργεια λόγω της ροής του λαδιού μέσα στον υδραυλικό μηχανισμό, όποτε η βαλβίδα είναι ανοικτή ή κλειστή για την απενεργοποίηση ή ενεργοποίηση των στηριγμάτων. Η αυξανόμενη απόσβεση είναι έμφυτη στη συγκεκριμένη AVS συσκευή, συνεπώς δεν ήταν δυνατόν να ελεγχτεί ανεξάρτητα όσον αφορά τις μεταβολές δυσκαμψίας.



Σχήμα 3.21. Κτίριο KaTRI

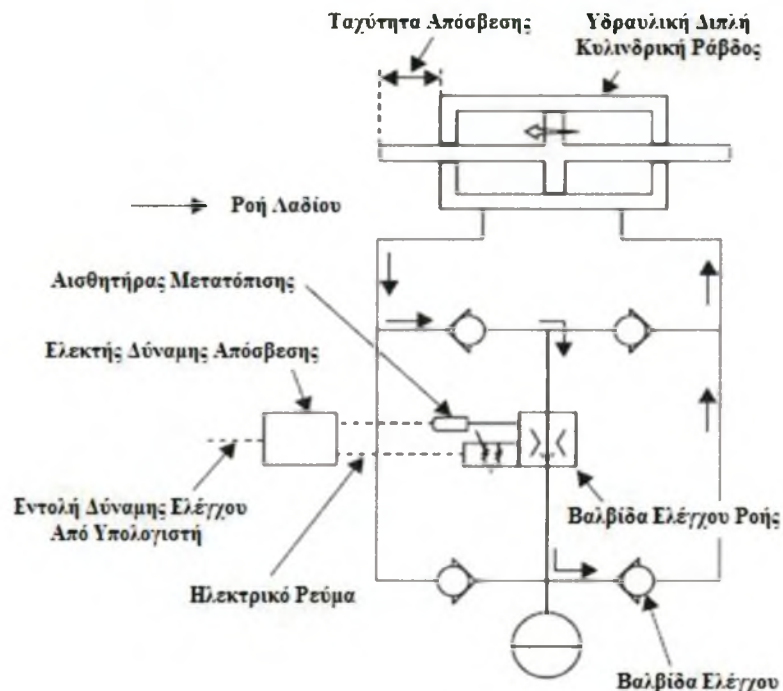


Σχήμα 3.22. Διαμόρφωση συστήματος AVS

Προφανώς, ένα πιο επιθυμητό σύστημα μεταβλητής δυσκαμψίας είναι αυτό που έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει συνεχώς τη δομική του δυσκαμψία. Ένα τέτοιο σύστημα αναπτύχθηκε από τον Nagarajaiah (1995), το οποίο

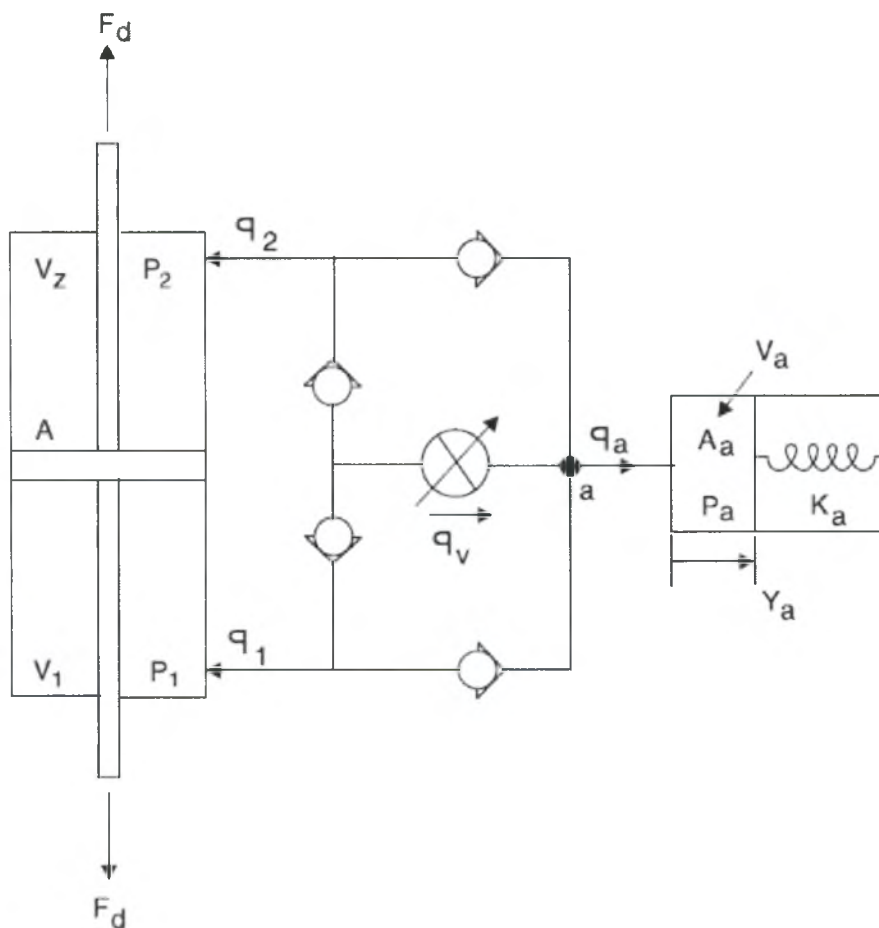
αποτελείται από ένα μη γραμμικό ελατήριο παράλληλα με έναν παθητικό αποσβεστήρα τριβής. Η μη γραμμικότητα του ελατηρίου ποικίλει, γεγονός που οφείλεται σε μία αυτο-ισορροπούμενη μηχανική συσκευή, η οποία ελέγχεται από έναν σερβοκινητήρα κάθετο στον άξονά του ελατηρίου.

Επίσης, έχει προταθεί και ένα σύστημα μεταβαλλόμενης απόσβεσης (AVD) (Kurino 1996). Η AVD συσκευή αποτελείται από ένα μεταβαλλόμενο υδραυλικό αποσβεστήρα και ψηφιακό ελεγκτή δύναμης απόσβεσης. Ο μεταβαλλόμενος υδραυλικός αποσβεστήρας ελέγχει τη δύναμη απόσβεσης μέσω του συντονισμένου του ανοίγματος μίας βαλβίδας ελέγχου ροής μεταξύ δύο θαλάμων σε έναν υδραυλικό κύλινδρο. Δεδομένου ότι ο ελεγκτής ελέγχει άμεσα τη δύναμη απόσβεσης, χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες του πραγματικού ανοίγματος των βαλβίδων και της πίεσης του λαδιού, οι επιρροές από τη θερμοκρασία του λαδιού και τη συχνότητα διέγερσης ελαχιστοποιούνται. Επίσης, ο ελεγκτής έχει το πλεονέκτημα ότι τα χαρακτηριστικά της AVD συσκευής μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν μέσω της αλλαγής της απόκτησης ελέγχου. Ένα σχηματικό διάγραμμα της AVD συσκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.23 και μπορεί να εγκατασταθεί με παρόμοια διαμόρφωση όπως μία AVS συσκευή (Σχ.3.20α) σε μία κατασκευή.



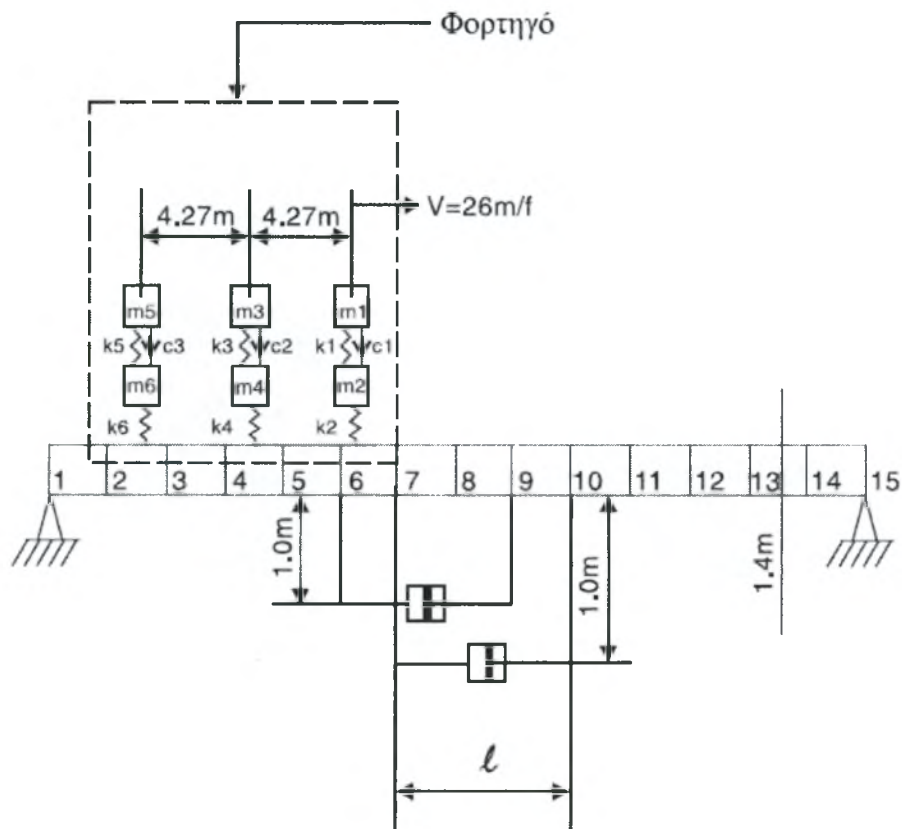
Σχήμα 3.23. Διαμόρφωση μίας AVD συσκευής

Μία αναλυτική και πειραματική μελέτη, που αφορούσε τους ημι- ενεργητικούς αποσβεστήρες ρευστού, πραγματοποιήθηκε από τους Sack και Patten (1993). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24, η διαμόρφωση του αποσβεστήρα περιλαμβάνει ένα ισορροπημένο έμβολο και μία εξωτερική βαλβίδα ελέγχου, η οποία περιέχει ένα στόμιο που διαμορφώνεται από ένα μικρό μηχανισμό. Στη συγκεκριμένη μελέτη, περιγράφεται ένας αλγόριθμος ελέγχου, στον οποίο ο έλεγχος του διευθετήσιμου στομίου περιλαμβάνει γραμμικοποίηση της δυναμικής του αποσβεστήρα. Μέσω αυτής της δυναμικής γραμμικοποίησης, το μεταβαλλόμενο στόμιο ρυθμίζεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η δύναμη που παρέχεται από τον αποσβεστήρα να είναι απ' ευθείας ανάλογη με τη σχετική ταχύτητα του εμβόλου, οπότε ο αποσβεστήρας αναγκάζεται να συμπεριφερθεί ως ένας γραμμικός ιξώδης αποσβεστήρας.



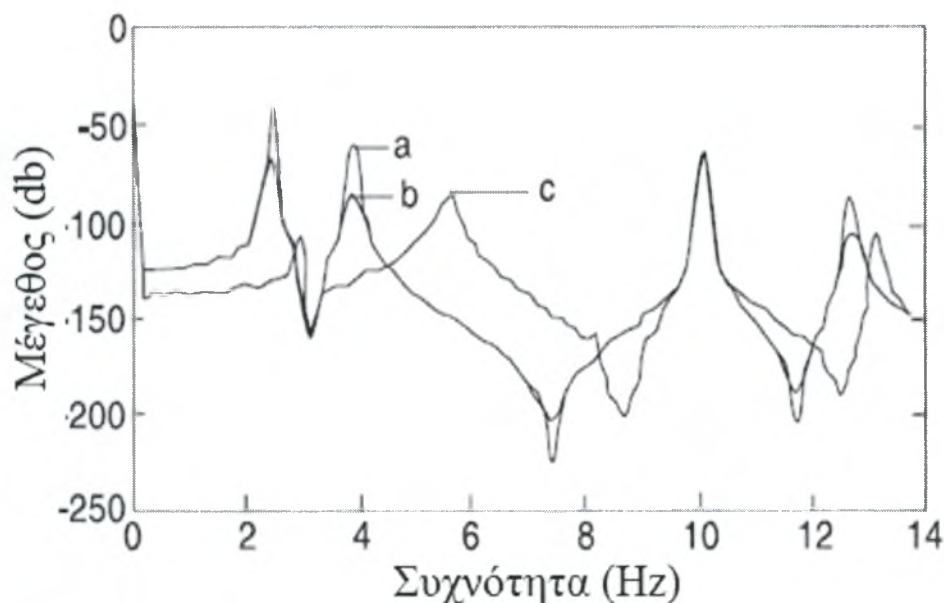
Σχήμα 3.24. Σχηματικό διάγραμμα ενός ημι – ενεργητικού αποσβεστήρα ρευστού

Μία τροποποιημένη έκδοση αυτού του ημι - ενεργητικού αποσβεστήρα ρευστού εξετάστηκε σε σχέση με την μείωση ταλαντώσεων γεφυρών υπό κινητά φορτία (Patten 1996). Ένα άνοιγμα γέφυρας με ένα τυπικό προσομοίωμα φορτηγού που κινείται επ' αυτής απεικονίζεται στο Σχ. 3.25. Χρησιμοποιήθηκαν δύο δυναμικά μοντέλα του συστήματος οχήματος - γέφυρας. Πρώτον, το μοντέλο του οχήματος αντιμετωπίστηκε ως συναρμολόγημα αναπηδούμενων και μη αναπηδούμενων μαζών, συνδεόμενες με κατάλληλα αμαξώματα. Δεύτερον, τα δυναμικά αποτελέσματα των αναρτήσεων των τροχών των φορτηγών δεν λήφθηκαν υπόψη. Έλαβαν χώραν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας παραμέτρους για τη γέφυρα και τα φορτηγά, οι οποίοι απεικονίζουν μία χαρακτηριστική αμερικάνικη γέφυρα με μεταλλικούς στύλους και με σύμμικτο οδόστρωμα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι βραχίονες ελέγχου προσαρτημάτων θα πρέπει να κατασκευάζονται όσο το δυνατόν μακρύτεροι, ενώ διαπιστώθηκε ότι ένας διπλός επενεργητής δεν προσφέρει κάτι ιδιαίτερα καλλίτερο από ένα απλό.



Σχήμα 3.25. Γέφυρα ενός ανοίγματος με προσομοίωμα φορτηγού και διπλό επενεργητή

Παρόμοιες μελέτες πραγματοποιήθηκαν για συνεχή γέφυρα δύο ανοιγμάτων με την ίδια διατομή ως άνω. Οι προσομοιώσεις κατέδειξαν ότι το ημι-ενεργητικό σύστημα που χρησιμοποιεί ένα σχέδιο ελέγχου bistate (διπλής κατάστασης) πετυχαίνει μείωση κατά 60% της καμπτικής καταπόνησης (μείωση βέλους κάμψης) λόγω της κίνησης των φορτηγών. Μία σύγκριση προσομοιώσεων είτε με χρήση μοντέλου κινούμενης δύναμης είτε μοντέλου προσαρμοζόμενης ανάρτησης αποκάλυψαν ομοιότητα στις σχετικές αποκρίσεις. Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.26. Ο έλεγχος bistate τείνει να μειώσει το μέγεθος κάτω από τη πρώτη φυσική συχνότητα και μετατοπίζει σημαντικά τις φυσικές συχνότητες, ειδικά των δευτέρων και υψηλότερων ιδιομορφών. Αυτές οι σημαντικές δομικές αλλαγές δεν επιτυγχάνονται με τη χρήση ενός παθητικού αποσβεστήρα καθόσον ο bistate έλεγχος τείνει να προσθέσει δυσκαμψία στη κατασκευή με αποτέλεσμα μείωση της απόκρισης και σημαντική αλλαγή στο ιδιομορφικό περιεχόμενο της κατασκευής. Αυτή η εργασία έχει οδηγήσει στην τοποθέτηση τέτοιων συστημάτων σε ένα μέρος δύο λωρίδων της I-35 διάβασης του Walnut Creek στην Oklahoma, με σκοπό την αύξηση της φέρουσας ικανότητας και της λειτουργικότητας της γέφυρας υπό φορτία κυκλοφορίας οχημάτων.



Σχήμα 3.26. Συναρτήσεις μεταφοράς για μια συνεχή γέφυρα δύο ανοιγμάτων: (a) χωρίς έλεγχο, με παθητικό αποσβεστήρα και (b) με έλεγχο bistate

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία χρόνια η φιλοσοφία της κατανάλωσης της σεισμικής ενέργειας μέσω της αύξησης της συνολικής απόσβεσης της κατασκευής (αντί της ανελαστικής συμπεριφοράς επιλεγμένων στοιχείων του φέροντος ή και του μη φέροντος οργανισμού) κερδίζει έδαφος, διότι, πέραν του προφανούς πλεονεκτηματός της που συνίσταται στην προστασία του κτιρίου από σεισμικές βλάβες, η λύση αυτή αρχίζει πλέον να παρουσιάζει συγκριτικά οικονομικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την ‘κλασική’ φιλοσοφία, ιδιαίτερα στην περίπτωση της ενίσχυσης/αναβάθμισης υφισταμένων κατασκευών. Η λύση μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε συνδυασμό με σεισμική μόνωση, είτε και αυτοτελώς και έχει τύχει εφαρμογής τόσο στα κτίρια, όσο και σε άλλες κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού, κυρίως τις γέφυρες.

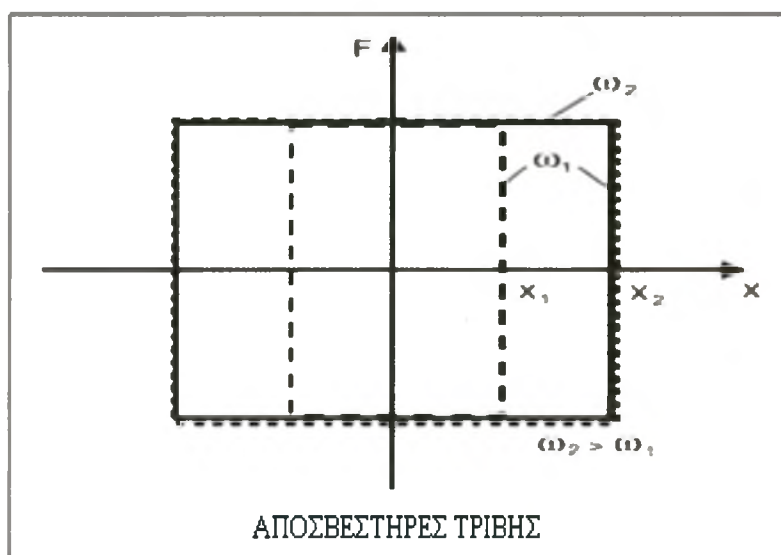
Το ερώτημα που ευλόγως τίθεται είναι ποίος τύπος αποσβεστήρα είναι πιο αποτελεσματικός, πιο αξιόπιστος, πιο οικονομικός και γενικά ο καταλληλότερος για την απόσβεση ενέργειας μίας κατασκευής. Η απάντηση σίγουρα δεν είναι μοναδική και εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Κάθε κατασκευή έχει τις δικές τις ιδιαιτερότητες και ιδιαίτερες απαιτήσεις κατά τον σχεδιασμό. Άρκει να σκεφτούμε ότι άλλες κατασκευαστικές και σχεδιαστικές απαιτήσεις έχει μια γέφυρα και διαφορετικές ένα δημόσιο κτίριο, για παράδειγμα ένα νοσοκομείο. Έναν επιπλέον σημαντικό παράγοντα αποτελούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς την απόδοση του αποσβεστήρα, ιδιαίτερα των αποσβεστήρων ρευστού. Ουσιαστικά, η βέλτιστη επιλογή τύπου αποσβεστήρα βρίσκεται στην κρίση του εκάστοτε Πολιτικού Μηχανικού. Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω θα δοθούν μερικά παραδείγματα.

Γενικά, οι ενεργητικοί αποσβεστήρες αποφεύγονται διότι είναι αντι-οικονομικοί καθώς καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο. Σε περίπτωση που ενεργητικοί αποσβεστήρες έχουν ενσωματωθεί σε μία κατασκευή, το μέγεθός τους θα είναι της τάξης μεγέθους αυτής, καθώς καλούνται να παράγουν δυνάμεις ίσες με αυτές που αναπτύσσονται στη κατασκευή. Οι παθητικοί αποσβεστήρες αποτελούν μία σχετικά οικονομική και αξιόπιστη πρόταση αλλά δεν μπορούν να μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά τους. Για παράδειγμα, ένας παθητικός αποσβεστήρας μάζας συντονίζεται σε μία μόνο συγκεκριμένη συχνότητα, επομένως θα συμβάλει στην απόσβεση όταν η διέγερση έχει

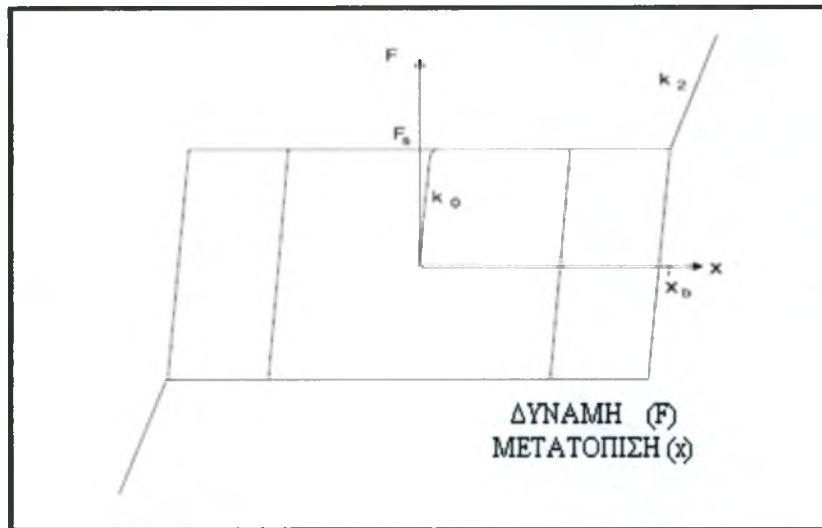
την ίδια συχνότητα. Σε αντίθεση, οι ημι-ενεργητικοί αποσβεστήρες αποτελούν μία ικανοποιητική επιλογή διότι έχουν την ικανότητα με μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να προσαρμόζονται στις εκάστοτε περιπτώσεις και να απορροφούν σημαντικά ποσά ενέργειας.

Είναι κοινά αποδεκτό ότι οι συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας ανεξάρτητα αν είναι παθητικοί, ημι-ενεργητικοί ή ενεργητικοί χρησιμοποιούνται επί το πλείστον σε πολυώροφα κτίρια και γέφυρες. Κυρίως χρησιμοποιούνται για την καταπολέμηση των διεγέρσεων λόγω ανέμου και συχνά απενεργοποιούνται σε περίπτωση σεισμού, διότι ενδέχεται να υπάρξουν δυσμενείς επιπτώσεις στην κατασκευή.

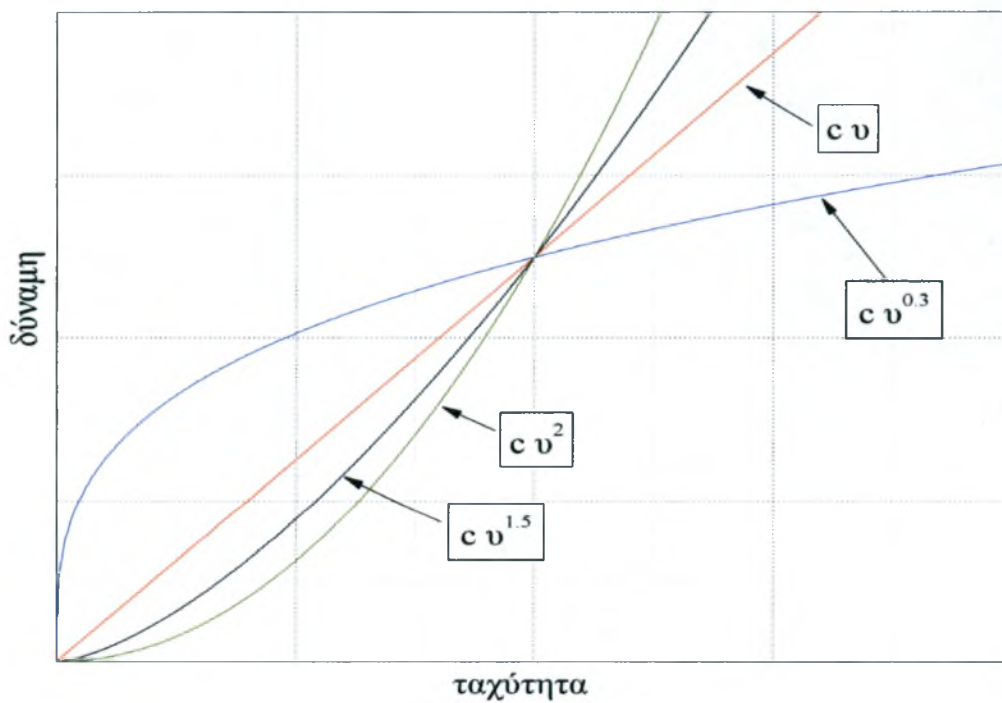
Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα δύναμης μετατόπισης ενός αποσβεστήρα τριβής απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.1. Μπορούμε να διακρίνουμε ότι με τη πρόοδο των ανακυκλήσεων η δύναμη παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από την μεταβολή της μετατόπισης. Δηλαδή είναι εφικτό η δύναμη να μένει αμετάβλητη ενώ η μετατόπιση να αυξάνει. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι για μηδενική μετατόπιση έχουμε και πάλι μέγιστη δύναμη. Συνεπώς, το διάγραμμα δύναμης ταχύτητας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2., με κλίση ίση με την επιτάχυνση. Εκεί, η συνάρτηση $F = c \cdot v$ αντιπροσωπεύει έναν αποσβεστήρα τριβής, η $F = c \cdot v^{0.2}$ έναν ιξώδη αποσβεστήρα υγρού και οι άλλες δύο συναρτήσεις ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες υγρού.



Σχήμα 4.1. (συνεχίζεται)



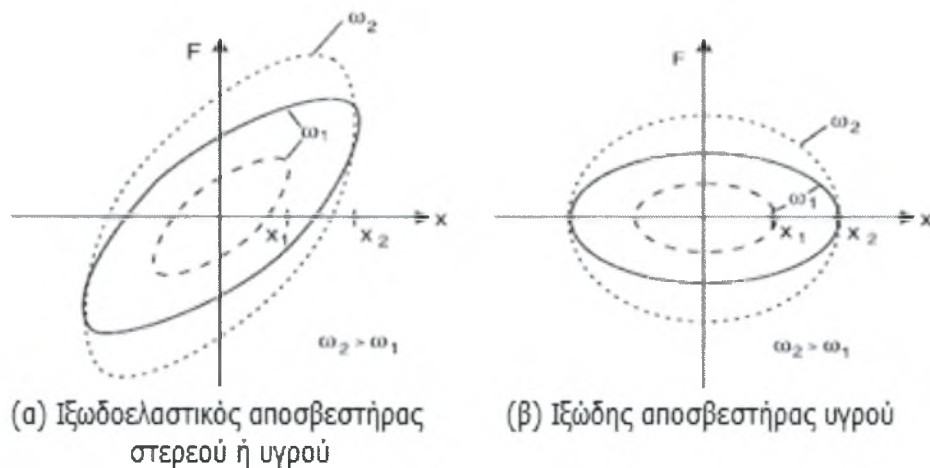
Σχήμα 4.1. Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης ενός αποσβεστήρα τριβής.



Σχήμα 4.2. Ποιοτικό διάγραμμα δύναμης ταχύτητας

Σε αντίθεση, ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα ενός ιξωδοελαστικού αποσβεστήρα έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Δηλαδή, η δύναμη είναι ανάλογη της μετατόπισης και ανάλογη της επιτάχυνσης. Επομένως, σε ένα κτίριο (π.χ. νοσοκομείο που στεγάζει ακριβό εξοπλισμό αλλά και λειτουργίες ζωτικής σημασίας) στο οποίο δεν μας ενδιαφέρει μόνο η απόσβεση ενέργειας μέσω της

μετατόπισης αλλά και η ομαλή απόσβεση, δηλαδή σχετικά μικρή και όσο το δυνατόν σταθερή επιτάχυνση, η επιλογή μίας διάταξης αποσβεστήρων τριβής φαντάζει ως πιο δόκιμη.



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης ιξωδοελαστικού αποσβεστήρα.

Σύμφωνα με όλα τα ανωτέρω αλλά και με το περιεχόμενο των προηγούμενων Κεφαλαίων – όπως άλλωστε αναμενόταν – δεν υφίσταται γενική μορφή αξιολόγησης των αποσβεστήρων, παρά μόνο σε περίπτωση που αυτή καλείται να πραγματοποιηθεί για ένα συγκεκριμένο τύπο και ίδιας κλίμακας μεγέθους κατασκευή.

Κατά συνέπεια, ο μελετητής που καλείται να εγκαταστήσει μία τέτοια συσκευή σε ένα δομικό έργο δεν θα πρέπει μέσω αυτής να επιχειρήσει να « διορθώσει» τυχόν παραλείψεις ή ατέλειες στον αρχικό αντισεισμικό σχεδιασμό του έργου, αλλά, αφού αναγνωρίσει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της μελετώμενης κατασκευής, να βελτιώσει κατά το δυνατόν τη σεισμική της συμπεριφορά με χρήση αποσβεστήρων κατά περίπτωση.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Federal Emergency Management Agency, (1997), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Report No. FEMA-273, and NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Report No. FEMA-274, Washington, D.C., October.
2. Cofie, N. G. and Krawinkler, H., (1985), Uniaxial Cyclic Stress-Strain Behavior of Structural Steel, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 111, No. 9, pp. 1105-1120.
3. Kelly, J. M., Skinner, R. I., and Heine, A. J., (1972), Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 5, pp. 63-88.
4. Skinner, R. I., Kelly, J. M., and Heine, A. J., (1975), Hysteresis Dampers for Earthquake-Resistant Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, pp. 287-296.
5. Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Thompson, C. L., and Alonso, J. L., (1991), Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices, Earthquake Spectra, Vol.7, No. 4, pp. 563-604.
6. Perry, C. L., Fierro, E. A., Sedarat, H., and Scholl, R. E., (1993), Seismic Upgrade in San Francisco Using Energy Dissipation Devices, Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3, pp. 559-579.
7. Tsai, C. S. and Lee, H. H., (1993), Application of Viscoelastic Dampers to High-Rise Buildings, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 4, pp.1222-1233.
8. Su, Y-F. and Hanson, R. D., (1990), Seismic Response of Building Structures with Mechanical Damping Devices, Technical Report UMCE 90-02, The University of Michigan, Ann Arbor, MI.
9. Dargush, G F. and Soong, T. T., (1995), Behavior of Metallic Plate Dampers in Seismic Passive Energy Dissipation Systems, Earthquake Spectra, Vol. 11, No.4, pp.545-568.

10. Özdemir, H., (1976), Nonlinear Transient Dynamic Analysis of Yielding Structures, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, CA.
11. Bhatti, M.A., Pister, K. S., and Polek, E., (1978), Optimal Design of an Earthquake Isolation System, Technical Report UCB/EERC-78/22, University of California, Berkeley, CA.
12. Xia, C. and Hanson, R. D., (1992), Influence of ADAS Element Parameters on Building Seismic Response, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 1903-1918.
13. M.C. Phocas, A. Pocanschi (2003), Steel frame with bracing and hysteretic dampers, Earthquake engineering & Structural Dynamics 32(5), pp. 811-825.
14. C.J Black, N.Makris, I.D. Aiken (2004), Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling- restraining braces, Journal of Structural Engineering 130(6), pp. 880-894.
15. Mayes, R. L. and Mowbray, N. A., (1975), The Effect of Coulomb Damping on Multidegree of Freedom Elastic Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, pp. 275-286.
16. Keightley, W. O., (1977), Building Damping by Coulomb Friction, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Delhi, India, pp. 3043-3048
17. Pall, A. S., Marsh, C., and Fazio, P., (1980), Friction Joints for Seismic Control of Large Panel Structures, Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 25, No. 6, pp. 38-61.
18. Aiken, I. D. and Kelly, J. M., (1990), Earthquake Simulator Testing and Analytical Studies of Two Energy-Absorbing Systems for Multistory Structures, Technical Report UCB/EERC-90/03, University of California, Berkeley, CA.
19. Filiatrault, A. and Cherry, S., (1987), Performance Evaluation of Friction Damped Braced Frames Under Simulated Earthquake Loads, Earthquake Spectra, Vol.3, No. 1, pp. 57-78.
20. Roik, K., Dorka, U., and Dechent, P., (1988), Vibration Control of Structures Under Earthquake Loading by Three-Stage Friction-Grip Elements, Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol. 16, pp.501-521.

21. FitzGerald, T. F., Anagnos, T., Goodson, M., and Zsutty, T., (1989), Slotted Bolted Connections in Aseismic Design for Concentrically Braced Connections, *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 2, pp. 383-391.
22. Grigorian, C. E., Yang, T. S., and Popov, E. P., (1993), Slotted Bolted Connection Energy Dissipators, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 491-504.
23. Nims, D. K., Richter, P. J., and Bachman, R. E., (1993a), The Use of the Energy Dissipating Restraint for Seismic Hazard Mitigation, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 467-489.
24. Nims, D. K., Inaudi, J. A., Richter, P. J., and Kelly, J. M., (1993b), □ Application of the Energy Dissipating Restraint to Buildings, □ Proceedings of ATC-17-1 on Seismic Isolation, Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, CA, Vol. 2, pp. 627-638.
25. Aiken, I. D., Kelly, J. M., and Pall, A. S., (1988), Seismic Response of a Nine-Story Steel Frame with Friction Damped Cross-Bracing, Technical Report UCB/EERC-88/17, University of California, Berkeley, CA.
26. Richter, P. J., Nims, D. K., Kelly, J. M., and Kallenbach, R. M., (1990), The EDR -Energy Dissipating Restraint, A New Device for Mitigation of Seismic Effects, Proceedings of the 1990 Structural Engineers Association of California (SEAOC) Convention, Lake Tahoe, NV.
27. Scholl, R. E., (1993), Design Criteria for Yielding and Friction Energy Dissipators, Proceedings of ATC-17-1 on Seismic Isolation, Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, CA, Vol. 2, pp. 485-495.
28. Kanaan, A. E. and Powell, G. H., (1973), DRAIN-2D - A General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures, Technical Report UCB/EERC 73-06, University of California, Berkeley, CA.
29. Filiatrault, A. and Cherry, S., (1987), Performance Evaluation of Friction Damped Braced Frames Under Simulated Earthquake Loads, *Earthquake Spectra*, Vol.3, No. 1, pp. 57-78.
30. Pall, A. S. and Marsh, C., (1982), Response of Friction Damped Braced Frames, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 108, No. ST6, pp. 1313-1323.

31. Constantinou, M. C. and Symans, M. D., (1992), Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers, Technical Report NCEER-92-0032, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
32. Makris, N. and Constantinou, M. C., (1992), Spring-Viscous Damper Systems for Combined Seismic and Vibration Isolation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 649-664.
33. Makris, N. and Constantinou, M. C., (1991), Fractional-Derivative Maxwell Model for Viscous Dampers, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 9, pp. 2708-2724.
34. Constantinou, M. C. and Symans, M. D., (1992), Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers, Technical Report NCEER-92-0032, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
35. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S-T., and Lai, M .L., (1992), Effect of Ambient Temperature on a Viscoelastically Damped Structure, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 1955-1973.
36. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S-T, and Lai, M. L., (1991), Seismic Response of a 2/5 Scale Steel Structure with Added Viscoelastic Dampers, Technical Report NCEER-91-0012, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
37. Shen, K. L. and Soong, T. T., (1995), Modeling of Viscoelastic Dampers for Structural Applications, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 121, No. 6, pp.694-701.
38. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S-T, and Lai, M. L., (1995), Seismic Behavior of Steel Frame with Added Viscoelastic Dampers, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 10, pp. 1418-1426.
39. Lai, M. L., Chang, K. C., Soong, T. T., Hao, D. S., and Yeh, Y. C., (1995), Full-scale Viscoelastically Damped Steel Frame, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 10, pp. 1443-1447.

40. A.K. Shukla, T.K. Datta (2001), Analysis of building frames with viscoelastic dampers under base excitation, *Structural Engineering and Mechanics* 11(1),pp. 71-87.
41. A.X. Guo, Y.I. Xu, B. Wu (2002), Seismic reliability analysis of hysteretic structure with viscoelastic dampers, *Engineering Structures* 24(3),pp. 373-383.
42. D.G. Lee, S. Hong, J.Kim (2002), Efficient seismic analysis of building structures with added viscoelastic dampers, *Engineering Structures* 24(9), pp. 1217-1227.
43. Den Hartog, J. P., (1956), *Mechanical Vibrations, Fourth Edition*, McGraw-Hill, New York.
44. Warburton, G. B., (1982), Optimal Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 381-401.
45. Wakahara, T., Ohyama, T., and Fujii, K. , (1989), Suppression of Wind-induced Vibration of a Tall Building Using Tuned Liquid Damper, *Proceedings of the Symposium on Serviceability of Buildings*, Tokyo.
46. Kareem, A., (1990), Reduction of Wind Induced Motion Utilizing a Tuned Sloshing Damper, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 36.
47. Sun, L. M., (1991), Semi-Analytical Modeling of the Tuned Liquid Damper with Emphasis on Damping of Liquid Sloshing, Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, Japan.
48. Fujino, Y., Pacheco, B. M., Chaiseri, P., and Sun, L. M., (1988), Parametric Studies on Tuned Liquid Damper (TLD) Using Circular Containers by Free Oscillation Experiments, *Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE*, Vol. 5, No. 2, pp. 381s-391s.
49. Welt, F. and Modi, V. J., (1989a), Vibration Damping Through Liquid Sloshing: Part I – A Nonlinear Analysis, *Proceedings of Diagnostics, Vehicle Dynamics and Special Topics, ASME, Design Engineering Division (DE)*, Vol. 18-5, pp. 149-156.

50. Welt, F. and Modi, V. J. (1989b), Vibration Damping Through Sloshing: Part II - Experimental Results, Proceedings of Diagnostics, Vehicle Dynamics and Special Topics, ASME, Design Engineering Division (DE), Vol. 18-5, pp. 157-165.
51. Nakamura, Y., Watanabe, H., and Kawamata, S., (1988), Seismic Response of Structures by Accelerated Liquid Mass Damper, Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. V, pp.785-790.
52. Modi, V. J. and Welt, F., (1987), Vibration Control using Nutation Dampers, International Conference on Flow Induced Vibrations, Bowness on Windermere, England, pp. 369-376.
53. Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M., and Isobe, M., (1989), Nonlinear Waves and Dynamic Pressures in Rectangular Tuned Liquid Damper (TLD) – Simulation and Experimental Verification, Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 6, No. 2, pp. 251s-262s.
54. Chaiseri, P., Fujino, Y., Pacheco, B. M., and Sun, L. M., (1989), Interaction of Tuned Liquid Damper and Structure: Theory, Experimental Verification and Application, Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 6, No. 2, pp. 273s-282s.
55. Hrovat, D., Barak, P., and Rabins, M., (1983), Semi-active versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 691-705.
56. Higashino, M. and Aizawa, S., (1993), Application of Active Mass Damper System in Actual Buildings, Proceedings of the International Workshop on Structural Control, (G. W. Housner and S. F. Masri, Editors), Honolulu, HI, August 5-7, USC Publication Number CE-9311, pp. 194-205.
57. Nishimura, I., Kobori, T., and Sakamoto, M., (1993), Active Passive Composite Tuned Mass Damper, Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Active Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, San Francisco, CA, Vol. 2, pp. 737-748.

58. Sakamoto, M. and Kobori, T., (1993), Practical Applications of Active and Hybrid Response Control Systems, Proceedings of the International Workshop on Structural Control, (G. W. Housner and S. F. Masri, Editors), Honolulu, HI, August 5-7, USC Publication Number CE-9311, pp. 432-446.
59. Abiru, H., Fujishino, M., and Matsumoto, T., (1992), Modal Seismic Response Control of High Rise Building by Active Tuned Mass, Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, Vol. 4, pp. 2055-2060.
60. Symans, M. D. and Constantinou, M. C., (1995), Development and Experimental Study of Semi-active Fluid Damping Devices for Seismic Protection of Structures, Technical Report NCEER-95-0011, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
61. Kobori, T., Takahashi, M., Nasu, T., Niwa, N., and Ogasawara, K., (1993), Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, pp. 925-941.
62. Yamada, K. and Kobori, T., (1995), Control Algorithm for Estimating Future Responses of Active Variable Stiffness Structure, Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 1085-1099.
63. Nagarajaiah, S., (1995), Development of Novel Semi-active Continuous Variable Stiffness Device, Application in SDOF Cantilever Model and Shake Table Tests, Internal Report, Department of Civil Engineering, University of Missouri, Columbia, MO.
64. Kurino, H., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, N., Kurata, N., and Mizuno, T., (1996), Development and Modeling of Variable Damping Unit for Active Variable Damping System, Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
65. Sack, R. L. and Patten, W., (1993), Semiactive Hydraulic Structural Control, Proceedings of the International Workshop on Structural Control, (G. W. Housner and S.F. Masri, Editors), Honolulu, HI, August 5-7, USC Publication Number CE-9311, pp. 417-431.

66. Patten, W. N., Sack, R. L., and He, Q., (1996), Controlled Semiactive Hydraulic Vibration Absorber for Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 2, pp. 187-192.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000101124

