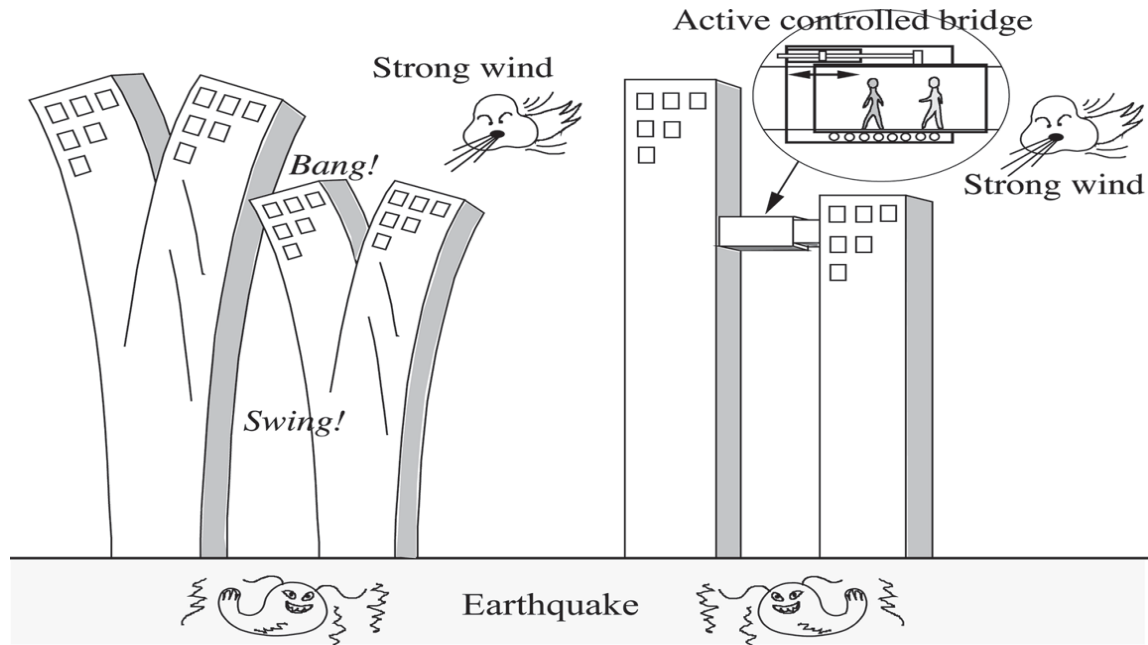


Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: "Μείωση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών με την χρήση ενεργών συστημάτων"

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΠΑΠΑΛΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ

ΠΕΤΡΑΚΗ ΜΑΡΙΑΝΝΑ

ΠΑΤΡΑ 2012

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°- Βασικές έννοιες σεισμολογίας.....	2
1.1 Εισαγωγή.....	2
1.2 Παγκόσμια σεισμικότητα - Τεκτονικές Πλάκες (Plate tectonics)	3
1.3 Θεωρία ελαστικής αναπήδησης (Elastic Rebound theory).....	5
1.4 Ρήγματα (Faults).....	6
1.5 Σεισμικά Κύματα (Seismic Waves).....	9
1.6 Μέγεθος σεισμού (Magnitude)	11
1.7 Ένταση σεισμού(Intensity).....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°- Συστήματα ελέγχου ταλαντώσεων.....	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Σεισμική μόνωση θεμελίωσης.....	15
2.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	15
2.2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας της σεισμικής μόνωσης.....	16
2.2.3 Εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης σε υφιστάμενες κατασκευές.....	18
2.2.4 Τύποι διατάξεων σεισμικής μόνωσης και τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° - Παθητικά / ημιενεργά συστήματα.....	26
3.1 Εισαγωγή.....	26
3.2 Παθητικά συστήματα.....	29
3.2.1 Τύποι αποσβεστήρων τριβής.....	29
3.2.1.1 Αποσβεστήρες τριβής (Pall).....	29
3.2.1.2 Αποσβεστήρες τριβής – ολίσθησης (FS).....	30
3.2.1.3 Αποσβεστήρες τριβής Sumimoto.....	31
3.2.2 Ιξώδεις και ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες (VE).....	32
3.2.3 Υστερητικοί αποσβεστήρες.....	34
3.2.4 Αποσβεστήρες με μορφομνήμονα κράματα νικελίου-τιτανίου(Nitinol).....	35
3.3 Ημιενεργά συστήματα (semi-active damper systems)	36
3.3.1 Ημιενεργοί ρυθμιζόμενοι αποσβεστήρες μάζας (TMD).....	39
3.3.2 Ημιενεργοί ρυθμιζόμενοι αποσβεστήρες με υγρό (TSD).....	40
3.3.3 Ημιενεργοί αποσβεστήρες τριβής.....	41
3.3.4 Ημιενεργοί αποσβεστήρες δόνησης (Semiactive Vibration Absorbers).....	43
3.3.5 Ημιενεργές συσκευές ελέγχου δυσκαμψίας (Semiactive Stiffness Control Devices)	44
3.3.6 Ηλεκτρορολογικοί αποσβεστήρες (ER).....	45
3.3.7 Μαγνητορολογικοί αποσβεστήρες (MR).....	46
3.3.8 Ημιενεργοί ελέγξιμοι υδραυλικοί αποσβεστήρες (Semi-active Controllable Fluid Damper)	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° - Ενεργά συστήματα.....	51

4.1	Εισαγωγή	51
4.2	Ταξινόμηση των μεθόδων ελέγχου δόνησης	52
4.3	Χαρακτηριστικά ενός ενεργού δυναμικού αποσβεστήρα	54
4.3.1	Ενεργά συστήματα αποσβεστήρων (AMD)	57
4.3.2	Συστήματα δομικού ελέγχου με ενεργούς τένοντες	58
4.3.3	Συστήματα ενεργών συνδέσμων (Active Brace Systems)	59
4.3.4	Συστήματα παλμικής παραγωγής (Pulse Generation Systems)	60
4.4	Υβριδικά συστήματα ελέγχου	60
4.4.1	Εισαγωγή	60
4.4.2	Υβριδικοί αποσβεστήρες μάζας	61
4.4.3	Υβριδικά συστήματα απομόνωσης βάσης	62
4.4.4	Υβριδικό σύστημα ελέγχου αποσβεστήρα-ενεργοποιητή με στήριξη (Hybrid Damper-Actuator Bracing Control)	63
4.4.5	Ενεργός ρυθμιζόμενος αποσβεστήρας TRIGON (Active Tuned Mass Damper)	64
4.4.6	Σύνθεση ενεργού - παθητικού ρυθμιζόμενου αποσβεστήρα μάζας DUOX (Active-Passive Composite Tuned Mass Damper)	69
4.5	Συσκευές ελέγχου για τον έλεγχο διέγερσης αέρα στις αστικές δομές	70
4.6	Πραγματικοί πύργοι που χρησιμοποιούν τη συνδεδεμένη μέθοδο ελέγχου	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° - Εφαρμογές ενεργών συστημάτων		74
5.1	Εισαγωγή	74
5.2	Ταξινόμηση του δομικού ελέγχου στα κτήρια	74
5.3	Διαμόρφωση και έλεγχος δόνησης για τις κατασκευές πύργων αντίστοιχα	75
5.4	Ενεργός έλεγχος δόνησης πολλαπλών κτηρίων που συνδέονται με ενεργές γέφυρες ελέγχου που αποκρίνονται στους μεγάλους σεισμούς	77
5.4.1	Οικοδόμηση τεσσάρων πρότυπων κτηρίων	77
5.4.2	Χαρακτηριστικά της δομής των πύργων	79
5.4.3	Πείραμα	79
5.5	Παράδειγμα ελέγχου δόνησης τριπλών πύργων που χρησιμοποιούν CCM (Seto και Matsumoto, 2003)	82
5.5.1	Περιγραφή των τριπλών πύργων	82
5.5.2	Σχεδιασμός των πύργων	82
5.5.3	Προσομοίωση των τριπλών πύργων που χρησιμοποιούν CCM	84
5.5.4	Πραγματοποίηση του CCM	85
5.6	Έλεγχος δόνησης γεφυρών με πύργους που χρησιμοποιούν μια συσσωρευμένη προσέγγιση διαμόρφωσης (<i>Vibration Control of Bridge Towers Using a Lumped Modeling Approach</i>)	89
5.6.1	Πρόβλημα δόνησης γεφυρών με πύργους υπό κατασκευή	89
5.6.2	Αντικείμενο ελέγχου και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του	90

5.6.3	
Προσομοιώσεις.....	91
5.6.4 Πειράματα.....	92
5.6.5 Η [∞] αυτοδύναμος έλεγχος (Kar και λοιποί.,2000a).....	94
5.7 Εγκατάσταση συστήματος AMD στο κτήριο Kyobashi Siewa.....	97
5.8 Εγκατάσταση συστήματος AMD στο κτήριο Sentagaya INTES.....	99
5.9 Εγκατάσταση συστήματος AMD στο κτήριο Hanku Chayamachi.....	100
5.10 Εγκατάσταση συστήματος AMD στον πύργο τηλεπικοινωνιών Nanjing.....	100
5.11 Εγκατάσταση συστήματος TRIGON στο Shinjuku Park Tower.....	101
5.12 Εγκατάσταση συστήματος DUOX στο κτήριο Ando Nishikicho	102
5.13 Εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων HMD στο Osaka Resort City (ORC) 200 Symbol Tower.....	103
5.14 Εγκατάσταση υβριδικού αποσβεστήρα HMD στο Yokohama Landmark Tower.....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	106
6.1 Εισαγωγή.....	106
6.2 Ελαστομερή εφέδρανα... ..	108
6.3 Συμπληρωματική απόσβεση.....	109
6.4 Ρυθμιζόμενος αποσβεστήρας μάζας (Tuned mass damper)	109
6.5 Ενεργός έλεγχος	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°- Συμπεράσματα.....	112
7.1 Εισαγωγή.....	112
7.2 Ανοιχτά προβλήματα.....	112
7.3 Ατενίζοντας το μέλλον.....	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	116
ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	119

Πρόλογος

Σε αυτή τη πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται ένας εναλλακτικός τρόπος αντισεισμικής προστασίας των κατασκευών χρησιμοποιώντας ενεργά συστήματα ελέγχου. Τα συστήματα αυτά έχουν ως χαρακτηριστικό τη μείωση της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής με τη χρήση ενεργών αποσβεστήρων.

Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά σε βασικές έννοιες τις σεισμολογίας, στη μελέτη και ανάλυση των σεισμών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι συστημάτων ελέγχου ταλαντώσεων. Αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας σεισμικής μόνωσης και επεξηγούνται οι τύποι διατάξεων σεισμικής μόνωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των παθητικών και ημιενεργών συστημάτων ελέγχου, επίσης αναφέρονται και τα πιο σημαντικά συστήματα ελέγχου στους τομείς αυτούς καθώς και ο τρόπος λειτουργίας τους μαζί με κάποια παραδείγματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ενεργά συστήματα ελέγχου, αναλύονται τα χαρακτηριστικά ενός ενεργού δυναμικού αποσβεστήρα καθώς και οι διάφοροι τύποι ενεργών και υβριδικών αποσβεστήρων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εφαρμογές και παραδείγματα κατασκευών που χρησιμοποιούν τα ενεργά συστήματα ελέγχου καθώς και πληροφορίες από πειράματα προσομοίωσης που έχουν πραγματοποιηθεί από διάφορους επιστήμονες.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια σύγκριση των μεθόδων που περιγράφηκαν σε όλα τα παραπάνω κεφάλαια και καταγραφή των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται καταγραφή κάποιων συμπερασμάτων όσον αφορά την πρόοδο των συστημάτων ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°- Βασικές έννοιες σεισμολογίας

1.1 Εισαγωγή

Η Σεισμολογία ανήκει στις εφαρμοσμένες επιστήμες και αποτελεί κλάδο της Γεωφυσικής, η οποία με νόμους και αρχές της Φυσικής μελετά την δομή της Γης και άλλων ουρανίων σωμάτων. Ο σεισμός είναι γεωλογικό φαινόμενο ως προς τα αίτιά του, ή έκλυση όμως της ενέργειάς και ο τρόπος διάδοσης αυτής διέπονται από νόμους της Φυσικής.

Ο εικοστός αιώνας υπήρξε ο αιώνας ανάπτυξης της Σεισμολογίας, με κίνητρο την επιθυμία του ανθρώπου να κατανοήσει το φαινόμενο του σεισμού αυτό καθ' αυτό, αλλά και να δώσει λύση στο ενεργειακό πρόβλημα που αντιμετωπίζει (π.χ. εντοπισμός κοιτασμάτων πετρελαίου με σεισμικές μεθόδους).

Η ανάπτυξη της Σεισμολογίας έδωσε πλήθος πληροφοριών για την δομή του εσωτερικού της γης και τις γεωδυναμικές διεργασίες, συνέβαλε στην λύση προβλημάτων γεωτεκτονικής φύσεως (θεωρία λιθοσφαιρικών πλακών) και απετέλεσε πηγή μελέτης για την αντιμετώπιση του ουσιαστικού θέματος της αντισεισμικής προστασίας.

Οι σεισμοί τρομοκρατούσαν ανέκαθεν τον άνθρωπο, γι' αυτό και προσπάθησε να ερμηνεύσει το φαινόμενο, σύμφωνα πάντα με τις παραστάσεις και τις παραδόσεις του: για τους αρχαίους Έλληνες ο Εγκέλαδος, για τους αρχαίους Ιάπωνες το γατόψαρο, για τους Ινδιάνους οι χελώνες που διαφωνούσαν, όλα όντα τεράστια σε μέγεθος, που κατοικούσαν στο εσωτερικό της γης, προκαλούσαν τους σεισμούς καθώς κινούνταν.

Στην ελληνική μυθολογία ο Εγκέλαδος -αρχηγός των Τιτάνων και γιός του Τάταρου και της Γης- φονεύθηκε (κατά την επικρατέστερη παράδοση) από την Αθηνά, η οποία , αφού τον έτρεψε σε φυγή, έρριψε εναντίον του την Σικελία ή το όρος Αίτνα, με το οποίο και τον καταπλάκωσε. Ο Εγκέλαδος κινούμενος ενίοτε μέσα στον τάφο του προκαλεί εκρήξεις ηφαιστείων και σεισμούς.

Ετυμολογικά η λέξη 'εγκέλαδος' προκύπτει μάλλον από σύντμηση (έγκειμαι + λας), και σημαίνει 'ο εγκατεστημένος στα πετρώματα, στον στερεό φλοιό της γης'.

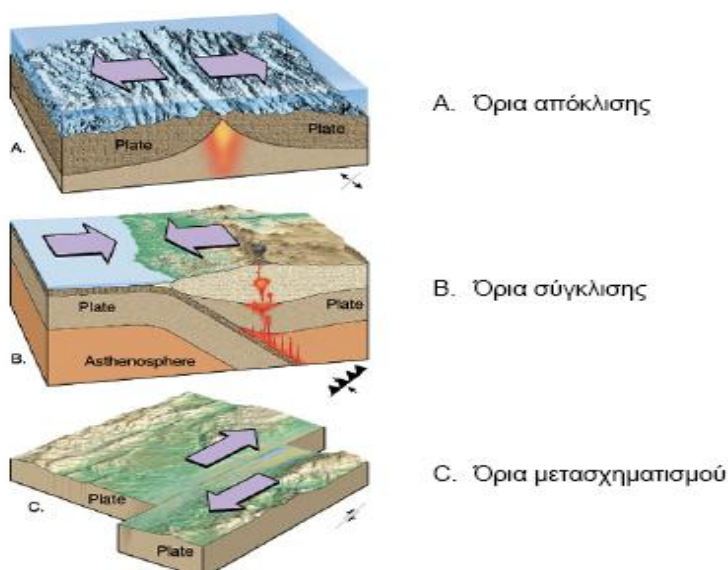
Σήμερα πια γνωρίζουμε ότι ο σεισμός είναι ένα φυσικό φαινόμενο, αποτέλεσμα φυσικών –γεωλογικών διεργασιών, που προέρχεται από την διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων, η δε απελευθερωμένη ενέργεια κατά την διαταραχή αυτή διαδίδεται μέσα στη γη με την μορφή σεισμικών κυμάτων και εκδηλώνεται ως κίνηση του εδάφους.

Η μελέτη των σεισμών βασίζεται αφ' ενός στις παρατηρήσεις των σεισμικών αποτελεσμάτων απ' ευθείας από τον άνθρωπο (γεωλογικογεωγραφική έρευνα) , αφ' ετέρου στις μελέτες των σεισμικών κυμάτων που καταγράφονται από κατάλληλα ευαίσθητα όργανα των σεισμολογικών σταθμών (φυσικομαθηματική έρευνα). Στην πρώτη περίπτωση οι παρατηρήσεις ονομάζονται 'μακροσεισμικές και η αντίστοιχη μέθοδος 'μακροσεισμική'. Στην δεύτερη περίπτωση οι παρατηρήσεις ονομάζονται 'μικροσεισμικές' και η αντίστοιχη μέθοδος 'μικροσεισμική'.

1.2 Παγκόσμια σεισμικότητα - Τεκτονικές Πλάκες (Plate tectonics)

Το 1912 ο Άλφρεντ Βέγκενερ, εξετάζοντας την εικόνα της γήινης σφαίρας, παρατήρησε ότι οι περισσότερες από τις ηπείρους μοιάζουν να μπορούν να ταιριάξουν μεταξύ τους σαν ένα μεγάλο παζλ κι έτσι πρότεινε τη θεωρία ότι κάποτε όλες οι ηπείροι αποτελούσαν μια ενιαία ξηρά, την Πανγαία, και ότι, με τα χρόνια, τα κομμάτια που την αποτελούσαν απομακρύνθηκαν και κατέληξαν στις σημερινές τους θέσεις. Το πρόβλημα ήταν ότι η θεωρία αυτή του Βέγκενερ στερούταν ενός γεωλογικού μηχανισμού που θα εξηγούσε τον τρόπο με τον οποίο έγινε η μετακίνηση των ηπείρων. Αυτό και η επικρατούσα τότε άποψη ότι η γη ήταν σε στερεά κατάσταση και αμετακίνητη είχαν σαν αποτέλεσμα την απόρριψη της θεωρίας αυτής. Τελικά ο Χολμς, το 1960, κατόρθωσε να αποδείξει την θεωρία του Βέγκενερ δουλεύοντας πάνω σε μια υπόθεση που ο ίδιος είχε κάνει, στην υπόθεση των ρευμάτων μεταφοράς, και το 1970 πήρε την τελική της μορφή. Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών δίνει μια σαφή ερμηνεία της παγκόσμιας σεισμικότητας ή τουλάχιστον βρίσκεται σε συμφωνία με το σύνολο σχεδόν των σεισμικών δεδομένων. Σύμφωνα λοιπόν με αυτήν, το επιφανειακό στρώμα της γης, η λιθόσφαιρα, είναι ένα δύσκαμπτο στρώμα πάχους 80 χλμ. περίπου και αποτελείται από επτά λιθοσφαιρικές πλάκες (την Αφρικανική, της Β. Αμερικής, της Ν. Αμερικής, την Ευρασιατική, την Αυστραλιανή, την Ειρηνική) και άλλες μικρότερες (Αραβική, Νάζκα, Φιλιππίνων), οι οποίες κινούνται με σχετικές μεταξύ τους κινήσεις και με διαφορετικές ταχύτητες, γλιστρώντας πάνω σ' ένα πλαστικοειδές στρώμα πάχους 100-200 χλμ., την ασθενόσφαιρα.

Θα πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι τα αίτια κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών αποτελούν ακόμα θέμα συζήτησης μεταξύ των επιστημόνων. Άλλοι την αποδίδουν σε ρεύματα μεταφοράς στην ασθενόσφαιρα και άλλοι στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ ηπειρωτικών και ωκεάνιων πλακών. Τα όρια των πλακών είναι περιοχές έντονης γεωλογικής δράσης, η οποία εκδηλώνεται με την γένεση σεισμών, οροσειρών, ηφαιστείων και ωκεάνιων τάφρων, διακρίνονται δε σε:



Σχήμα 1.1 (Α)Όρια απόκλισης (divergent/spreading boundaries), (Β)Όρια σύγκλισης (convergent/ subduction boundaries),(Γ) Όρια μετασχηματισμού (transform boundaries).

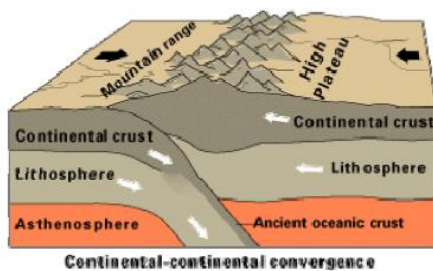
• Όρια απόκλισης - Ωκεάνιες ράχες

Στις ωκεάνιες ράχες έχουμε έξοδο και στερεοποίηση μάγματος, προερχομένου από τον ανώτερο μανδύα, με ταυτόχρονη αύξηση του φλοιού, έχουμε δηλαδή ουσιαστικά την δημιουργία των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι μεσωκεάνιες ράχες μπορεί να έχουν ύψος έως και 3000 μ. από τον ωκεάνιο πυθμένα και πλάτος 2000 χλμ., ξεπερνώντας σε ύψος τα Ιμαλάια, διαχωρίζονται δε σε μικρότερα τμήματα από ένα μεγάλο αριθμό ρηγμάτων, που λέγονται 'ρήγματα μετασχηματισμού'. Η σχετική μετακίνηση των πλακών πάνω στα ρήγματα αυτά έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνσή τους από τις μεσωκεάνιες ράχες. Το γνωστότερο παράδειγμα του μηχανισμού αυτού είναι η Μεσοατλαντική ράχη, η οποία εκτείνεται από τον Αρκτικό Ωκεανό έως τη δυτική πλευρά της Αφρικής, χωρίζει δηλαδή το σύνολο σχεδόν του Ατλαντικού στα δύο. Στις ράχες έχουμε μέτρια σεισμική δράση με επιφανειακούς σεισμούς, με επίκεντρα πάνω στους άξονες των ράχων και στα ρήγματα μετασχηματισμού.

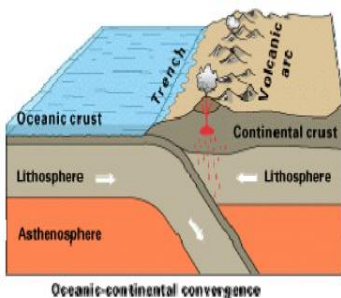
• Όρια σύγκλισης – Ωκεάνιες τάφροι

Εφ' όσον στις μεσωκεάνιες τάφρους έχουμε δημιουργία νέου φλοιού και εφ' όσον το μέγεθος της γης δεν έχει αλλάξει ουσιαστικά από τότε που δημιουργήθηκε, αυτό σημαίνει ότι παράλληλα με την δημιουργία έχουμε και καταστροφή αντίστοιχης ποσότητας φλοιού (ανακύκλωση). Αυτό συμβαίνει στα όρια σύγκλισης των πλακών, εκεί δηλαδή όπου οι πλάκες 'συγκρούονται', με παράλληλη βύθιση της μίας κάτω από την άλλη. Κατά την βύθιση συμβαίνει τήξη της βυθιζόμενης πλάκας, το δε υλικό της τήξης ανέρχεται με την μορφή μάγματος και δημιουργεί ηφαιστεια και ηφαιστειακά νησιωτικά τόξα (περίπτωση σύγκρουσης δύο ωκεάνιων πλακών). Στην περίπτωση 'σύγκρουσης' ωκεάνιας με ηπειρωτική πλάκα έχουμε κατάδυση της ωκεάνιας πλάκας κάτω από ηπειρωτική, το αποτέλεσμα δε είναι η δημιουργία-στο ηπειρωτικό τμήμα- μιας σχεδόν ευθύγραμμης οροσειράς ή αλλιώς 'οροσειράς τύπου Άνδεων'. Τέλος, με τη 'σύγκρουση' δύο ηπειρωτικών τεμαχίων προκύπτει 'ορογένεση', δημιουργία δηλαδή ιδιαίτερα υψηλών οροσειρών (Ιμαλάια, Άλπεις), συνοδευόμενων από μεγάλες πτυχώσεις, ρήγματα και απωθήσεις.

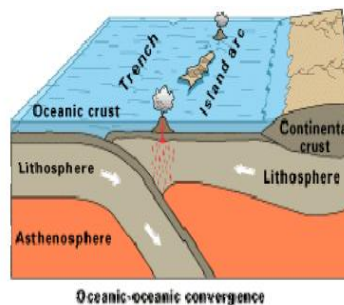
Οι ζώνες σύγκλισης αποτελούν ζώνες έντονης σεισμικής δραστηριότητας που εκτείνεται σε μεγάλο βάθος.



Όριο βύθισης ηπειρωτικής κάτω από ηπειρωτική και ορογένεση.



Όριο βύθισης ωκεάνιας πλάκας κάτω από ηπειρωτική και δημιουργία οροσειράς τύπου Άνδεων.



Όριο βύθισης ωκεάνιας πλάκας κάτω από ωκεάνια και δημιουργία ηφαιστειακού τόξου.

Σχήμα 1.2 Όρια βύθισης πλακών

• Όρια μετασχηματισμού

Στις ζώνες αυτές δεν έχουμε ούτε παραγωγή, ούτε καταστροφή υλικού, διότι οι πλάκες κινούνται με οριζόντιες μεταξύ τους μετατοπίσεις, οι οποίες αυξάνουν την συγκέντρωση τάσεων με αποτέλεσμα την έντονη σεισμικότητα. Ζώνες μετασχηματισμού παρατηρούνται στις μεσωκεάνιες ράχες, όπου ο νέος πυθμένας χωρίζεται με ρήγματα μετασχηματισμού, μήκους λίγων μέτρων έως πολλών χιλιομέτρων.

• Όρια σύγκρουσης (plate boundaries)

Υπάρχουν μεγάλες περιοχές στις οποίες δεν είναι σαφή τα όρια και τα αποτελέσματα των σχετικών μετακινήσεων των πλακών. Παράδειγμα αποτελεί η συνάντηση της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας, ανάμεσα στις οποίες έχουν εγκλωβιστεί μικρότερα τμήματα πλακών, με αποτέλεσμα την δημιουργία περίπλοκων γεωλογικών και σεισμικών δομών.

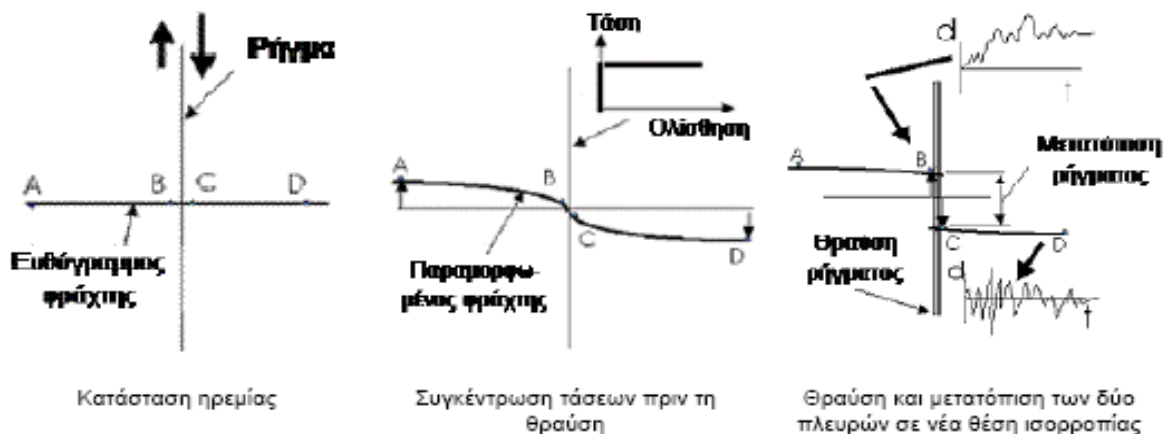
Σεισμοί, οι οποίοι δεν μπορούν να ερμηνευτούν με την θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών συμβαίνουν και σε περιοχές συμπαγών ηπειρωτικών τεμαχίων, όπως η Καναδική και η Βαλτική ασπίδα. Στην περίπτωση αυτή αποδίδονται σε κατακόρυφες κινήσεις, που σκοπό έχουν την αποκατάσταση βαρυτικής ισοστάθμισης.

1.3 Θεωρία ελαστικής αναπήδησης (Elastic Rebound theory)

Η θεωρία της ελαστικής ανάπλασης, η οποία διατυπώθηκε το 1930 από τον Reid, φαίνεται να εξηγεί ικανοποιητικά τον μηχανισμό γένεσης και τη χρονική κατανομή της σεισμικής δράσης των επιφανειακών τεκτονικών σεισμών.

Η θεωρία του Reid προήλθε από παρατηρήσεις των μετακινήσεων κατά μήκος του ρήγματος του Αγ. Ανδρέα, μετά τον μεγάλο σεισμό του Σαν Φρανσίσκο το 1906. Οι παρατηρήσεις του τον οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι σεισμοί πρέπει να είναι το αποτέλεσμα ελαστικής ανάπλασης, λόγω συσσωρευμένων ελαστικών τάσεων στα πετρώματα εκατέρωθεν της ρηξιγενούς επιφάνειας. Τα περισσότερα σκληρά και συμπαγή πετρώματα συμπεριφέρονται ως ελαστικά σώματα, όταν θεωρηθούν ως μονάδες και επομένως, όταν υποβληθούν σε εντατική κατάσταση, παραμορφώνονται γραμμικά, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη δύναμη. Αυτό μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ισχύει, με ορισμένες παραδοχές, για το δύσκαμπτο επιφανειακό στρώμα της γης-την λιθόσφαιρα- και εδώ είναι που γεννώνται οι περισσότεροι επιφανειακοί σεισμοί. Έχουμε δηλαδή σταδιακή συσσώρευση ελαστικών τάσεων, μέχρις ότου αυτές υπερβούν την εσωτερική αντοχή των πετρωμάτων, οπότε η ξαφνική θραύση και ολίσθηση των δύο τεμαχίων απελευθερώνει μέρος ή το σύνολο της συσσωρευμένης ενέργειας. Στη συνέχεια τα τεμάχια ανακτούν νέες θέσεις ισορροπίας, αλλά με σχετική μετατόπιση ως προς τις αρχικές τους θέσεις, (γεγονός που επιβεβαιώνεται με σύγχρονες μεθόδους μέτρησης, όπως το G.P.S), στην περιοχή δε έχει πλέον επικρατήσει ανακατανομή των τάσεων. Η περίοδος της οριακής παραμόρφωσης μπορεί να διαρκέσει από μήνες έως εκατοντάδες χρόνια, η δε περίοδος της ανάκτησης της νέας ισορροπίας των τεμαχίων ανάγεται σε δευτερόλεπτα. Η εκλυόμενη ενέργεια διαδίδεται με την μορφή σεισμικών κυμάτων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την γένεση του επόμενου σεισμού.

Το μοντέλο αυτό πάντως, που έχει επικρατήσει μέχρι σήμερα με ορισμένες τροποποιήσεις, δεν έχει απόλυτη εφαρμογή στη φύση, είτε γιατί η μηχανική συμπεριφορά ενός ρήγματος δεν είναι σταθερή, είτε γιατί στο ρήγμα πραγματοποιείται, εκτός από ελαστική, και ανελαστική παραμόρφωση ('ερπυσμός') και επομένως ασεισμική ολίσθηση.



Σχήμα 1.3 Τρόπος γένεσης των τεκτονικών σεισμών κατά τη θεωρία της ελαστικής ανάπλασης.

1.4 Ρήγματα (Faults)

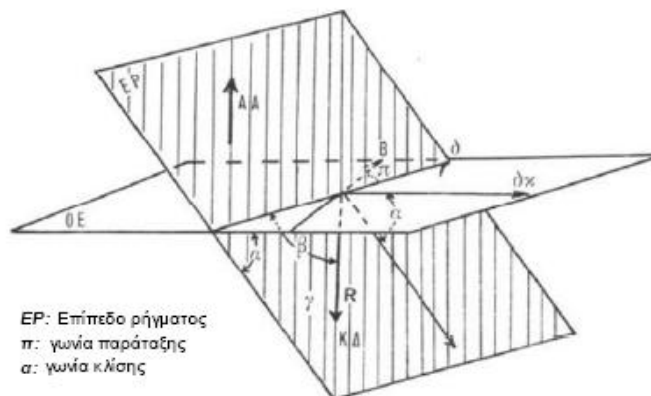
Η θεωρία του Reid αποδίδει τη γένεση των επιφανειακών σεισμών στη συνεχή ελαστική παραμόρφωση των πετρωμάτων, λόγω συσσώρευσης μεγάλων ποσών δυναμικής ενέργειας, η οποία ονομάζεται **‘ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης’**. Όταν οι τάσεις αυτές υπερβούν την αντοχή του πετρώματος έχουμε θραύση και μετακίνηση των δύο τεμαχίων πάνω σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια και κατά συγκεκριμένη διεύθυνση. Ο χώρος στον οποίο γίνεται η συγκέντρωση των τάσεων λέγεται ‘σεισμογόνος χώρος’ και η επιφάνεια ολίσθησης λέγεται **‘ρήγμα’**. Οι ισχυρότεροι σεισμοί προέρχονται από συσσώρευση τάσεων γύρω από παλαιά ρήγματα και όχι από τη δημιουργία νέων. Επιφανειακά ίχνη ρηγμάτων τα οποία έδωσαν μεγάλους σεισμούς, και δίνουν την δυνατότητα επί τόπου μελέτης τους, έχουν παρατηρηθεί σε κάποιες περιοχές, όπως η περίπτωση του ρήγματος του Αγ. Ανδρέα, στην Καλιφόρνια, αλλά και στο γνωστό ρήγμα της βόρειας Ανατολίας, στην Τουρκία. Στις περισσότερες περιπτώσεις πάντως δεν εμφανίζεται επιφανειακό ίχνος και ο τρόπος για να τα μελετήσουμε βασίζεται στην καταγραφή και μελέτη των διαφόρων τύπων σεισμικών κυμάτων, τα οποία μας οδηγούν σε συμπεράσματα σχετικά με τον ορισμό του επιπέδου του ρήγματος, την διεύθυνση και το είδος της διάρρηξης, καθώς και το μέγεθος της μετάθεσης.



Σχήμα 1.4 Επιφανειακό ίχνος του ρήγματος του Αγ. Ανδρέα στην Καλιφόρνια.

Οι πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων ενός σεισμού, όπως αυτές καταγράφονται στο δίκτυο των σεισμολογικών σταθμών, παρουσιάζουν αζιμουθιακή κατανομή, δηλαδή άλλοι σταθμοί καταγράφουν αραιώσεις και άλλοι συμπιέσεις κυμάτων. Ορίζονται με τον τρόπο αυτό, στον εστιακό χώρο, δύο επίπεδα: 'το **επίπεδο του ρήγματος**', πάνω στο οποίο γίνεται η ολίσθηση, και το '**βοηθητικό επίπεδο**', το οποίο είναι κάθετο στη διεύθυνση της κίνησης. Σε γωνία 45° ως προς τα δύο επίπεδα βρίσκονται οι '**άξονες συμπίεσης**' (P) και '**εφελκυσμού**' (T). Το επίπεδο του ρήγματος ή επίπεδο της ρηξιγενούς επιφάνειας προσδιορίζεται στο χώρο από την 'διεύθυνση' και την 'κλίση' του:

- διεύθυνση (strike) ή παράταξη: είναι η γωνία που σχηματίζει το ίχνος του ρήγματος, στην επιφάνεια του εδάφους, με τον Βορρά ($0^\circ - 360^\circ$),
- κλίση (dip): είναι η γωνία της ρηξιγενούς επιφάνειας με το οριζόντιο επίπεδο ($0^\circ - 90^\circ$)



Σχήμα 1.5 Επίπεδο ρήγματος και βοηθητικό επίπεδο.

Μία απλουστευμένη και συνήθως χρησιμοποιούμενη κατηγοριοποίηση των ρηγμάτων είναι αυτή που βασίζεται στην διεύθυνση και φορά της σχετικής κίνησης των τεμαχίων κατά την διάρρηξη:

- **Κανονικά (Normal faults):**

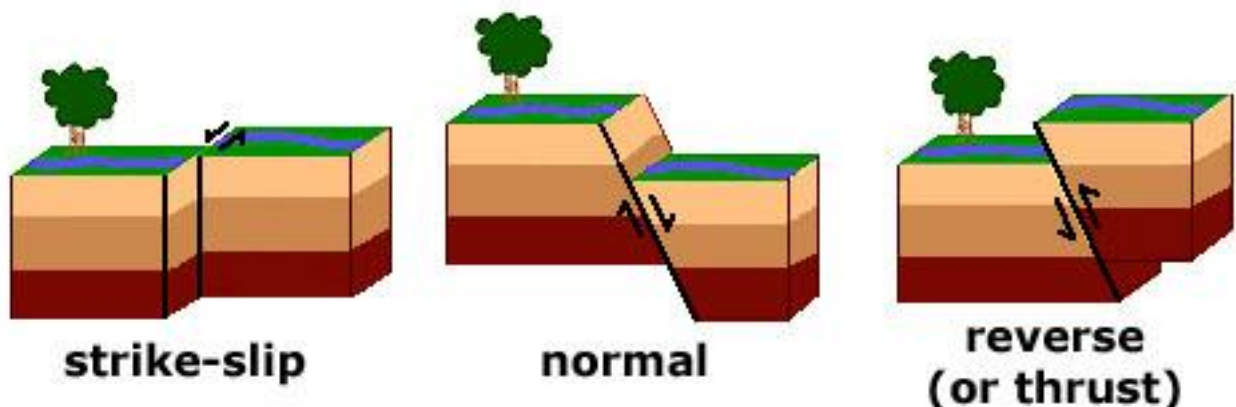
είναι αυτά στα οποία το πάνω τεμάχιο της κεκλιμένης ρηξιγενούς επιφάνειας κινείται προς τα κάτω, δηλαδή τα δύο τεμάχια απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Τα ρήγματα αυτά είναι αποτέλεσμα εφελκυστικών δυνάμεων, συνδέονται επομένως με έκταση του γεωλογικού σχηματισμού και παρατηρούνται εκεί όπου η λιθόσφαιρα

διευρύνεται. Το επίπεδο της ρηξιγενούς επιφάνειας έχει συνήθως μεγάλη κλίση (πάνω από 45°), παρ' όλο δε που ονομάζονται 'κανονικά', δεν είναι τα πλέον συχνά συναντημένα.

- **Ανάστροφα** (Reverse faults):

είναι αυτά στα οποία συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο απ' ότι στα 'κανονικά', δηλαδή το άνω πάνω τεμάχιο του ρήγματος κινείται προς τα πάνω, επομένως τα δύο τεμάχια πλησιάζουν το ένα στο άλλο και έχουμε σμίκρυνση του γεωλογικού σχηματισμού. Τα ανάστροφα ρήγματα συνδέονται με θλιπτικές δυνάμεις και μείωση του φλοιού, παρατηρούνται δε στα όρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών και της δημιουργίας των ορεινών όγκων, που συνοδεύονται από απωθήσεις και πτυχώσεις. Στη βιβλιογραφία γίνεται διαχωρισμός αυτού του τύπου ρηγμάτων, ανάλογα με την γωνία κλίσης του επιπέδου του ρήγματος. Έτσι ανάστροφα θεωρούνται όσα έχουν κλίση μεγαλύτερη των 45° , ενώ αν η κλίση είναι μικρότερη των 45° χαρακτηρίζονται ως **αφιππεύσεις** (thrust faults).

- **Οριζόντιας μετατόπισης** (Strike-slip faults): στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται ρήγματα, στα οποία παρατηρείται οριζόντια μετατόπιση των τεμαχίων επί της ρηξιγενούς επιφάνειας, χωρίς αύξηση ή μείωση του γεωλογικού σχηματισμού. Ο μηχανισμός τους είναι πολύ πιο πολύπλοκος από αυτόν των κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων, συνδέονται με συμπιεστικές κυρίως τάσεις και συναντώνται συνήθως στο άκαμπτο τμήμα του γήινου φλοιού. Εδώ ανήκουν και τα ρήγματα μετασχηματισμού, τα οποία διαφέρουν ως προς τον τρόπο γένεσης και εμφανίζονται στις μεσο-ωκεάνιες ράχες. Διακρίνονται σε δεξιόστροφα (Dextral strike-slip faults) όταν η μία πλευρά του ρήγματος φαίνεται κινούμενη από αριστερά προς τα δεξιά, όταν παρατηρείται από την άλλη πλευρά του ρήγματος, και αριστερόστροφα (Sinistral strike-slip faults) στα οποία η μία πλευρά του ρήγματος φαίνεται να κινείται από δεξιά προς τα αριστερά, όταν παρατηρείται από την άλλη πλευρά του ρήγματος. Τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης αποκτούν όλο και μεγαλύτερη σημασία, διότι φαίνεται να συνδέονται με πολλούς και καταστρεπτικούς σεισμούς. Πολύ γνωστά ρήγματα, όπως αυτό του Αγ. Ανδρέα (Καλιφόρνια) και της Βόρειας Ανατολίας ανήκουν στα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης.



Σχήμα 1.6 Οριζόντιας μετατόπιση, κανονική και ανάστροφη αντίστοιχα.

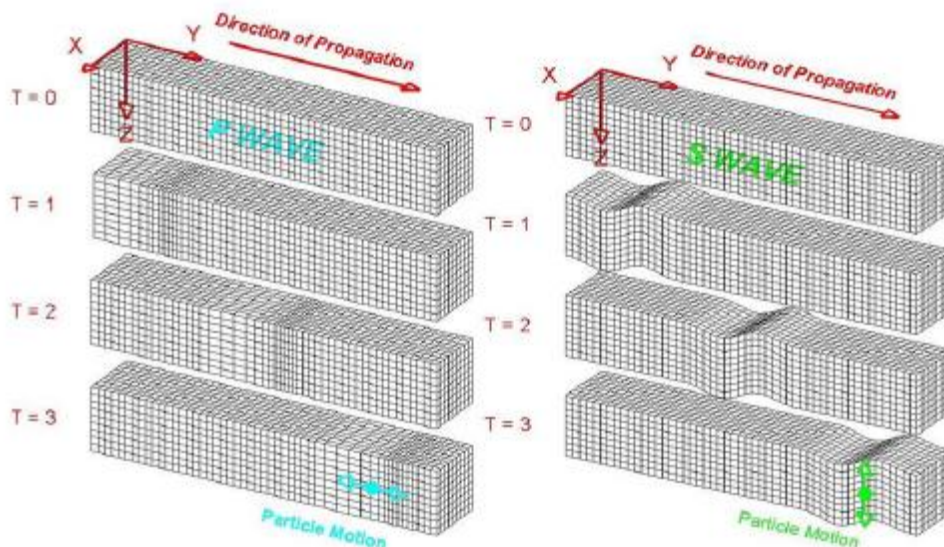
Το μήκος του ρήγματος εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμού και μπορεί να φθάνει τα εκατοντάδες χιλιόμετρα. Το μέγεθος της ολίσθησης και ο χρόνος διάρρηξης είναι επίσης ανάλογα του μεγέθους του σεισμού, όσο δε για την ταχύτητα διάρρηξης, αυτή δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων κυμάτων.

1.5 Σεισμικά Κύματα (Seismic Waves)

Τα σεισμικά κύματα, που είναι ελαστικά κύματα, παράγονται στην εστία του σεισμού διαδίδονται μέσα στη γη και καταγράφονται από το δίκτυο των σεισμολογικών σταθμών. Διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα κύματα χώρου και στα επιφανειακά κύματα.

• Κύματα χώρου (Body waves)

Είναι τα κύματα τα οποία διαδίδονται προς κάθε κατεύθυνση στο εσωτερικό της γης, τόσο στα επιφανειακά, όσο και στα βαθύτερα στρώματα αυτής. Υπάρχουν δύο είδη κυμάτων χώρου, τα *επιμήκη* και τα *εγκάρσια*.



Σχήμα 1.7 Επιμήκη και εγκάρσια κύματα χώρου αντίστοιχα.

– Επιμήκη κύματα: είναι κύματα τα οποία σχετίζονται με τη μεταβολή του όγκου ή της πυκνότητας του μέσου διάδοσης. Λέγονται και P κύματα, από το λατινικό ‘primaе’ που σημαίνει ‘πρώτα’, επειδή είναι τα πρώτα που φθάνουν και καταγράφονται στους σεισμολογικούς σταθμούς. Διαδίδονται και σε στερεό και σε υγρό μέσο και δεν είναι τόσο καταστρεπτικά όσο τα εγκάρσια κύματα. Λέγονται επίσης και κύματα συμπίεσης, γιατί δημιουργούν διαδοχικές συμπίεσεις και αραιώσεις στα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης, παράλληλες προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

– Εγκάρσια κύματα: είναι κύματα τα οποία διαδίδονται με διατμητική μόνο ελαστική παραμόρφωση του μέσου διάδοσης, δηλαδή τα υλικά σημεία πολώνονται σε ορθή γωνία προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Λέγονται και ‘S κύματα’, από το λατινικό ‘secundae’ που σημαίνει ‘δεύτερα’, γιατί φθάνουν μετά τα P στους σταθμούς καταγραφής. Δεδομένου ότι τα υγρά δεν επιδέχονται διατμητικές τάσεις, τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται σε υγρό μέσο, σε ρευστοποιημένο δε μέσο το πλάτος τους μειώνεται σημαντικά. Η ιδιότητα αυτή των εγκαρσίων κυμάτων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ο πυρήνας της γης βρίσκεται σε υγρή μορφή.

Οι ταχύτητες των P και S κυμάτων δίδονται σε συνάρτηση με τα ελαστικά μέτρα και την πυκνότητα του μέσου διάδοσης. Αν κ είναι το μέτρο κυβικής ελαστικότητας, μ ο

συντελεστής δυσκαμψίας, ρ ο δείκτης πυκνότητας του υλικού διάδοσης του κύματος και λ η πρώτη παράμετρος του lamé , τότε οι ταχύτητες των P και S είναι:

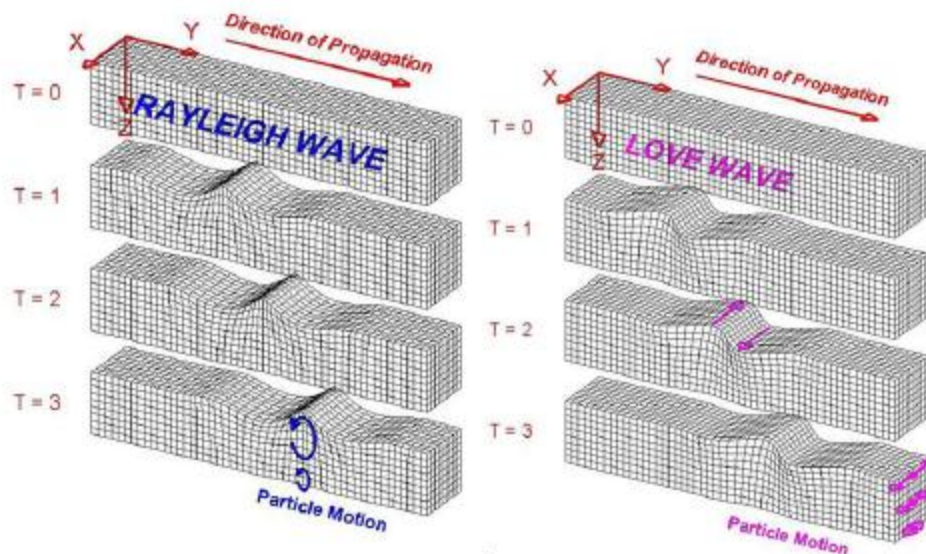
$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{και} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Αν οι τιμές των παραμέτρων κ και ρ ήταν παντού ίδιες, αν δηλαδή η γη ήταν ομογενής, τότε οι ταχύτητες V_p και V_s θα ήταν σταθερές και τα σεισμικά κύματα θα διαδίδονταν ακολουθώντας ευθείες γραμμές. Ο καθορισμός της μεταβολής των κ και ρ και επομένως και οι αλλαγές ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων οδηγούν τελικά στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της γης (σύσταση, πίεση, θερμοκρασία).

Γενικά ισχύει ότι οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων αυξάνονται με την αύξηση της πίεσης, ενώ ελαττώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

• Κύματα επιφανείας (Surface Waves)

Είναι τα κύματα τα οποία περιορίζονται στην επιφάνεια της γης, τα πλάτη τους δηλαδή είναι μεγάλα κοντά στην επιφάνεια της γης και ελαττώνονται όσο αυξάνεται το βάθος. Λόγω της μικρής τους συχνότητας, του αυξημένου πλάτους και της μεγάλης τους διάρκειας είναι ιδιαίτερα καταστροφικά. Τα κύματα αυτά έχουν την μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από όλα τα είδη σεισμικών κυμάτων και διακρίνονται σε δύο τύπους, στα κύματα *Rayleigh* και τα *Love*.



Σχήμα 1.8 Επιμήκη και εγκάρσια κύματα επιφανείας αντίστοιχα.

– Κύματα Rayleigh: κατά την διάδοση των κυμάτων αυτών τα υλικά σημεία του μέσου μετάδοσης διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές των οποίων οι μεγάλοι άξονες είναι κατακόρυφοι προς την διεύθυνση μετάδοσης του κύματος, οι δε μικροί παράλληλοι προς αυτήν. Το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται εκθετικά με το βάθος, λόγω δε μικρότερης ταχύτητας καταγράφονται από τα οριζόντια και κατακόρυφα σεισμόμετρα πάντα τελευταία.

- Κύματα Love: για την δημιουργία τους είναι απαραίτητη η ύπαρξη στρώματος ορισμένου πάχους πάνω σε ημιχώρο. Κατά την διάδοσή τους τα υλικά σημεία του μέσου κινούνται με οριζόντιες ταλαντώσεις κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης, πρόκειται δηλαδή για κύματα οριζοντίως πολωμένα. Επειδή ακριβώς δεν διαθέτουν κατακόρυφη συνιστώσα, αναγράφονται μόνο από τους οριζόντιους σειсмоγράφους.

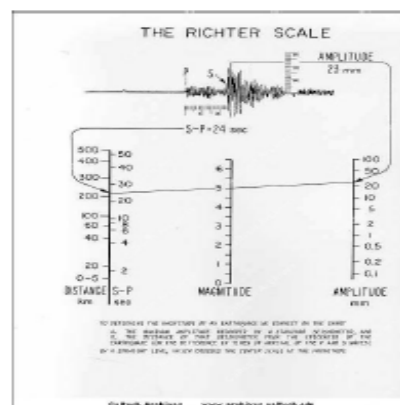
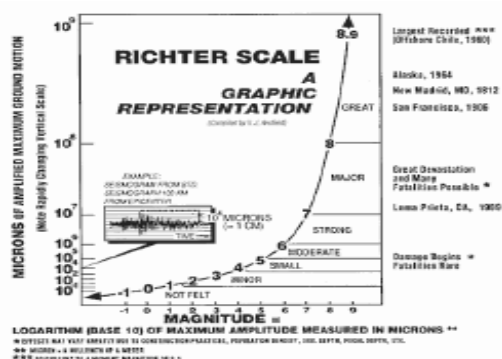
Επιφανειακά κύματα είναι και τα κύματα *Stonley*, τα οποία ακολουθούν επιφάνειες ασυνέχειας μέσα στη γη και δύσκολα διακρίνονται στα σειсмоγραφήματα. Υπάρχουν επίσης και άλλα είδη κυμάτων, που προκύπτουν από συνδυασμός αυτών που αναφέρθηκαν. Τέτοια είναι τα *διαυλικά*, τα κύματα *ουράς* και τα *στάσιμα* κύματα.

1.6 Μέγεθος σεισμού (Magnitude)

Το μέγεθος (M) ενός σεισμού εκφράζει το μέτρο της συνολικής - δυναμικής κατ' αρχήν λόγω παραμόρφωσης των πετρωμάτων - *εκλυόμενης ενέργειας*, η οποία (όπως αναφέρθηκε) στην συνέχεια μετατρέπεται σε κυματική, δηλαδή σε σεισμικά κύματα. Ο υπολογισμός του μεγέθους ενός σεισμού γίνεται με την μέτρηση διαφόρων σεισμικών παραμέτρων των σεισμικών κυμάτων (πλάτος, διάρκεια, περίοδος) επί των σειсмоγραφημάτων. Και επειδή χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών κύματα, αναπτύχθηκαν και διάφορες κλίμακες μεγεθών.

Τοπικό μέγεθος M_L (Local magnitude) :

λέγεται ο δεκαδικός λογάριθμος του μέγιστου πλάτους αναγραφής του σεισμού, σε μm , από πρότυπο βραχείας περιόδου σεισμόμετρο στρέψης, που βρίσκεται σε απόσταση 100 km από το σεισμό. Επειδή λοιπόν πρόκειται για λογαριθμική κλίμακα μεγέθους, κάθε φορά που έχουμε αύξηση του μεγέθους κατά μία μονάδα θα έχουμε αύξηση της σεισμικής ενέργειας κατά 31 φορές και αύξηση του πλάτους των σεισμικών κυμάτων κατά 10 φορές. Δεδομένου δε ότι η δεσπόζουσα περίοδος του Wood –Anderson είναι 0,8 sec, το όργανο αυτό μεγεθύνει επιλεκτικά τα σεισμικά κύματα με περιόδους από 0,5 - 1,5sec περίπου, οι οποίες συμπίπτουν με την περίοδο πολλών κατασκευών και συνεπώς έχουν ιδιαίτερη σημασία για τους μηχανικούς. Όπως προκύπτει από τον ορισμό του τοπικού μεγέθους η κλίμακα Richter δεν έχει θεωρητικά ανώτατο ή κατώτατο όριο. Μπορούμε ωστόσο να πούμε ότι το μέγεθος περιορίζεται στο άνω όριο από την φυσική αντοχή των πετρωμάτων του φλοιού, γι' αυτό και από το 1935 ελάχιστοι σεισμοί μεγέθους πάνω από μέγεθος 8,0 έχουν καταγραφεί.



Σχήμα 1.9 Γραφική παράσταση της κλίμακας Richter και υπολογισμός τοπικού μεγέθους.

Επιφανειακό μέγεθος M_s (Surface magnitude): Η κλίμακα του επιφανειακού μεγέθους βασίζεται σε μετρήσεις του μέγιστου πλάτους αναγραφής των επιφανειακών κυμάτων, με περίοδο 18-22 sec. Αφορά σε επιφανειακούς σεισμούς με βάθος μικρότερο από 60km, οι οποίοι αναγράφονται από σειсмоγράφους οποιουδήποτε τύπου και σε οποιαδήποτε απόσταση.

Χωρικό μέγεθος M_b (Body wave magnitude): Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγέθους σεισμών οποιασδήποτε επικεντρικής απόστασης και οποιασδήποτε βάθους. Ο υπολογισμός του γίνεται με την μέτρηση πλατών των P κυμάτων.

Μειονέκτημα των σεισμικών αυτών κλιμάκων αποτελεί το φαινόμενο του κορεσμού. Οι κλίμακες δηλαδή αυτές παρουσιάζουν κάποια ανώτατα όρια καταγραφής της σεισμικής ενέργειας, που ακτινοβολείται από τις σεισμικές εστίες. Έτσι, πάνω από τα όρια αυτά δεν αυξάνουν οι τιμές των σεισμικών μεγεθών, παρά το ότι αυξάνει η εκλυόμενη σεισμική ενέργεια.

Ένα άλλο μειονέκτημα της έννοιας του σεισμικού μεγέθους ανάγεται στην δυσκολία της άμεσης συσχέτισής του με την διαδικασία της σεισμικής διάρρηξης.

Λύση στα προβλήματα αυτά δίνει η εισαγωγή της έννοιας της **σεισμικής ροπής** (seismic moment) με την σχέση :

$$M_o = \mu DS$$

όπου μ είναι ο συντελεστής ακαμψίας (rigidity) των πετρωμάτων στο υπόκεντρο, D είναι η μέση σεισμική ολίσθηση του ρήγματος και S το συνολικό εμβαδόν της ρηξιγενούς επιφανείας.

Το **Μέγεθος Σεισμικής Ροπής M_w** (Moment Magnitude) προτάθηκε από τον Ιάπωνα Hiroo Kanamori με την σχέση: $M_w = -$

όπου M_o η σεισμική ροπή σε dyn.cm.

Οι διάφορες κλίμακες σεισμικού μεγέθους συνδέονται μεταξύ τους με εμπειρικές σχέσεις, όπως αυτή που πρότειναν οι Gutenberg και Richter (1956):

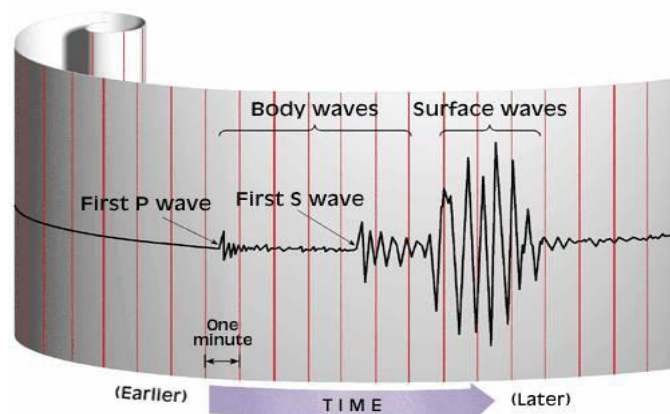
$$M_s = 1,59M_b - 3,97$$

που συνδέει το επιφανειακό M_s με το χωρικό μέγεθος M_b

ή η σχέση :

$$M_b = 2,5 + 0,63M_L$$

που συνδέει το χωρικό μέγεθος με το τοπικό μέγεθος.



Σχήμα 1.10 Τμήμα σειсмоγραφήματος με τα διάφορα είδη κυμάτων, των οποίων τα πλάτη χρησιμεύουν για τον υπολογισμό του μεγέθους του σεισμού.

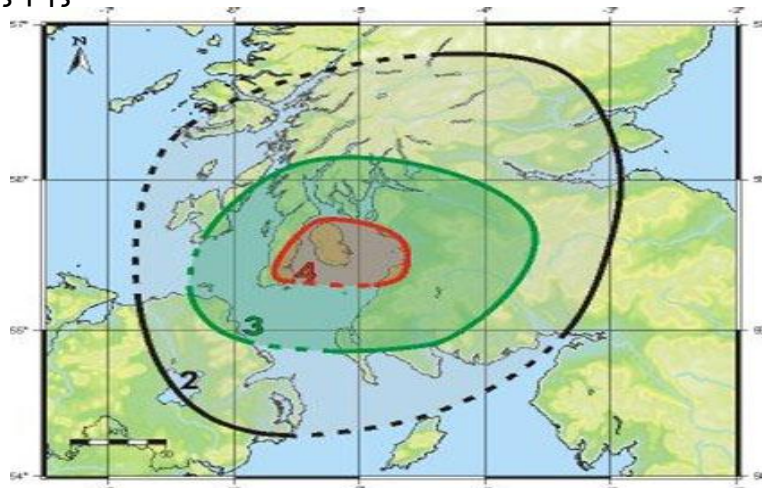
1.7 Ένταση σεισμού(Intensity)

Η ένταση του σεισμού είναι το μέγεθος το οποίο εκφράζει τα μακροσεισμικά αποτελέσματα του σεισμού, έχει δηλαδή σχέση με την επίδραση του σεισμού στο περιβάλλον, στους ανθρώπους, στα ζώα, στις τεχνικές κατασκευές. Τα μακροσεισμικά αποτελέσματα διαφέρουν από τόπο σε τόπο επειδή εξαρτώνται από διάφορους παραμέτρους (όπως οι εδαφικές συνθήκες, ο τρόπος διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, η απόσταση από το επίκεντρο) και επομένως για τον ίδιο σεισμό έχουμε διαφορετικές τιμές έντασης για κάθε περιοχή, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει με το μέγεθος του σεισμού που είναι ένα και συγκεκριμένο, χωρίς τοπικές διαβαθμίσεις.



Σχήμα 1.11 Η ένταση σχετίζεται με την καταστρεπτικότητα του σεισμού.

Η ένταση μετράται με την χρήση των μακροσεισμικών κλιμάκων, που δίνουν τους βαθμούς μακροσεισμικής έντασης σε λατινικούς αριθμούς. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη είναι η κλίμακα *Mercalli-Sieberg (MKS)* ή τροποποιημένη κλίμακα *Mercalli (MM)*. Η γεωγραφική αποτύπωση των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων γίνεται με τις *ισόσειστες καμπύλες*, οι οποίες ενώνουν τόπους της ίδιας έντασης, η δε μορφή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το εστιακό βάθος, ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού, το βάθος θεμελίωσης, ο τρόπος δόμησης των κτιρίων κ.α. Η περιοχή όπου παρατηρείται η μέγιστη τιμή της σεισμικής έντασης ονομάζεται *πλειόσειστη περιοχή* και το –κατά προσέγγιση- κέντρο της *μακροσεισμικό επίκεντρο*. Το μακροσεισμικό επίκεντρο δεν συμπίπτει πάντα με το μικροσεισμικό επίκεντρο, το οποίο ορίζεται ως η προβολή της θέσης της εστίας του σεισμού στην επιφάνεια της γης.



Σχήμα 1.12 Ισόσειστες καμπύλες και μακροσεισμικό επίκεντρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°- Συστήματα ελέγχου ταλαντώσεων

2.1 Εισαγωγή

Η φιλοσοφία των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών στηρίζεται στο γεγονός ότι τα υλικά της κατασκευής μπορούν να απορροφήσουν ποσοστό της σεισμικής ενέργειας λόγω της πλαστικής συμπεριφοράς τους. Αυτό οδηγεί στο σχεδιασμό δομικών έργων που είναι ικανά να αντιστέκονται στους σεισμούς μικρής έντασης χωρίς βλάβες, στους σεισμούς μέτριας έντασης με επισκευάσιμες βλάβες και στους καταστροφικούς σεισμούς χωρίς κατάρρευση.

Μια διαφορετική αντιμετώπιση των σεισμικών δράσεων στις κατασκευές γίνεται με τη χρήση συστημάτων ελέγχου των κατασκευών όπως και με τη χρήση της σεισμικής μόνωσης. Τα συστήματα ελέγχου ταλαντώσεων χρησιμοποιούν ειδικές συσκευές που ελέγχουν τις ταλαντώσεις της κατασκευής. Στη σεισμική μόνωση περιορίζεται το ποσοστό ενέργειας που μπορεί να εισαχθεί από μια σεισμική διέγερση απομονώνοντας την κατασκευή από το έδαφος.

Η έννοια της μόνωσης των κτηρίων από τις σεισμικές δονήσεις είναι γνωστή από τους αρχαίους χρόνους. Στις ελληνικές αποικίες της νότιας Ιταλίας του 5^{ου} π.χ. αιώνα τοποθετούσαν ανάμεσα στη θεμελίωση και την ανωδομή ένα στρώμα άμμου, το οποίο αποτελεί το πρώτο αρχειοθετημένο εφέδρανο.

Μια από τις πιο παλιές εφαρμογές σεισμικής μόνωσης εμφανίζεται στον Παρθενώνα, όπου μετά από μελέτες ανακάλυψαν ότι δεν έχει θεμέλια και είναι τριπλά μονωμένος σεισμικά. Ο λόφος της Ακροπόλεως έχει ισοπεδωθεί στην κορυφή του και εκεί επάνω τοποθετήθηκαν οριζόντια, τεράστια επεξεργασμένα διαδοχικά στρώματα λείων μαρμάρων. Οριζόντια οι πλάκες κάθε στρώματος συνδέονται με μεταλλικούς ελαστικούς συνδέσμους όπου έχουμε στο κέντρο μικρούς σιδηροπασσάλους και γύρω έχει χυθεί μολύβι, γεμίζοντας τελείως τον ενδιάμεσο χώρο. Το μολύβι προστατεύει τον σίδηρο από τη σκουριά αλλά επιπλέον επιτρέπει με την ελαστικότητά του να εξασθενήσει το σεισμικό κύμα, καθώς ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας θα μετατραπεί σε θερμότητα. Οι κολόνες δεν είναι μονοκόμματα, αλλά από φέτες μαρμάρου τέλεια εφαρμοσμένες η μία επάνω στην άλλη. Τα επιφανειακά σεισμικά κύματα κάνουν μόνο να κινηθεί το ένα στρώμα των μαρμάρινων πλακών επάνω στο άλλο, οι σύνδεσμοι ενεργούν και αυτοί εξασθενητικά ενώ οι εύκαμπτες κολόνες επιτρέπουν στο όλο οικοδόμημα να ταλαντωθεί αλλά να μην καταρρεύσει. Αν δηλαδή δεν είχε μεσολαβήσει η έκρηξη των πυρομαχικών την εποχή του Ιταλού Μοροζίνι όλα θα ήταν στη θέση τους στην Ακρόπολη ακόμη και σήμερα.

Η σεισμική μόνωση φαίνεται ότι ήταν γνωστή και σε λαούς όπως οι Αιγύπτιοι οι Βαβυλώνιοι και οι Πέρσες. Έτσι μεταγενέστερα βρίσκουμε ότι τα περσικά τζαμιά θεμελιώνονται επάνω σε μια σχάρα από κορμούς δέντρων μέσα σε μια υπόγεια φλέβα νερού.

Στην σύγχρονη εποχή η σεισμική μόνωση άρχισε να εμφανίζεται με χρήση ειδικών διατάξεων απόσβεσης ενέργειας. Η πρώτη σχετική πρόταση φαίνεται ότι διατυπώθηκε το 1891 στην Ιαπωνία και προέβλεπε τη στήριξη ενός κτιρίου σε δύο επάλληλες στρώσεις κορμών κάθετα τοποθετημένων μεταξύ τους ώστε να επιτρέπεται η κύλιση του κτιρίου σε δύο διευθύνσεις.

Εκτός από τον συμβατικό τρόπο σχεδιασμού των αντισεισμικών κατασκευών υπάρχει κ άλλος τρόπος αποφυγής ζημιών ή κατάρρευσης της κατασκευής με την χρήση συσκευών που μπορούν να ελέγχουν τις ταλαντώσεις της κατασκευής ή να την απομονώσουν από το έδαφος. Ο έλεγχος των ταλαντώσεων μια κατασκευής γίνεται με την χρήση παθητικών και ενεργών συστημάτων ελέγχου.

Οι παθητικοί μηχανισμοί ελέγχου λειτουργούν χωρίς να χρησιμοποιούν οποιοδήποτε εξωτερικό ενεργειακό εφοδιασμό αλλά κάνουν χρήση της ενέργειας που παράγεται από την απόκριση της δομής τους για να τροφοδοτήσουν τις δυνάμεις ελέγχου. Εντούτοις, τα συστήματα αυτά γίνονται πολύ δαπανηρά όταν ικανοποιούν τις αυστηρότερες απαιτήσεις σε σχέση με εκείνα που απαιτούνται για το βέλτιστο σχεδιασμό.

Οι ενεργοί μηχανισμοί ελέγχου λειτουργούν χρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό ενεργειακό εφοδιασμό, όπου οι δυνάμεις ελέγχου εφαρμόζονται στη δομή με τη βοήθεια των ενεργοποιητών. Θεωρητικά μπορούν να ελέγξουν τη δομή για ένα μεγάλο εύρος φορτίσεων, υπό τον όρο ότι είναι τεχνικά εφικτό και κάποιος παρέχει το απαραίτητο ποσό ενέργειας, για την τροφοδότηση του συστήματος.

Οι ακόλουθες καινοτόμες τεχνικές έχουν προταθεί για να ελέγξουν τις δονήσεις των δομών που υποβάλλονται στα δυναμικά φορτία: α) μόνωση θεμελίων (εφέδρανα), β) συμπληρωματική απόσβεση, υπό τη μορφή ιξωδοελαστικού, ιξώδες ρευστού ή υστερικού αποσβεστήρα, γ) αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας απόσβεσης και δ) ενεργά συστήματα ελέγχου.

2.2 Σεισμική μόνωση θεμελίωσης

2.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η βασική αρχή της σεισμικής μόνωσης είναι να εισαγάγει παραμορφωσιμότητα στη κατασκευή ή σε οποιοδήποτε άλλο επίπεδο αυτής, κατά την οριζόντια διεύθυνση, μειώνοντας συγχρόνως το μέγεθος της δράσης του σεισμού που αντιλαμβάνεται η κατασκευή. Ώθηση στην ευρύτερη εφαρμογή μεθόδων σεισμικής μόνωσης έδωσε η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μονωτήρων και των ελαστομερών με μεγάλες αποσβεστικές δυνατότητες (δισκοελαστική συμπεριφορά). Οι μονωτήρες σε συνδυασμό με τη χρήση αποσβεστήρων σε οποιοδήποτε επίπεδο της κατασκευής, έχουν ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα ελέγχου της απόκρισης του κτηρίου περιορίζοντας τις σχετικές μετακινήσεις των ορόφων και δυνάμεις, βελτιώνοντας έτσι τη συμπεριφορά του κτηρίου σε σεισμική δράση. Δηλαδή η ενέργεια του σεισμού

καταπονεί στοιχεία ειδικά σχεδιασμένα για αυτό το σκοπό (μονωτήρες – αποσβεστήρες), ανακουφίζοντας την ανωδομή από το ρόλο του να απορροφά τη σεισμική δράση, περιορίζοντας τις βλάβες αυτής υπό τη συνεχή καταπόνηση από την ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Στα πλεονεκτήματα της σεισμικής μόνωσης περιλαμβάνεται η δυνατότητα να αποτρέψει ή να μειώσει δραστικά βλάβες κατασκευαστικές και μη, να ενισχύσει την ασφάλεια του κτηρίου και να διατηρήσει αμετάβλητη την αρχιτεκτονική ταυτότητα, και προφανώς να μειώσει τις σεισμικές δυνάμεις σχεδιασμού. Τα οφέλη αυτά μεγιστοποιούνται σε δύσκαμπτες κατασκευές με άκαμπτη θεμελίωση, όπως χαμηλά και μεσαίου ύψους κτήρια, γέφυρες, καθώς και κτήρια με μεγάλους κόστους εξοπλισμό. Η ανάγκη για σεισμική μόνωση μιας κατασκευής προκύπτει εφόσον επικρατούν οι κάτωθι συνθήκες:

- Αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας και ανάγκες άμεσης χρήσης μετά το σεισμό.
- Μειωμένες οριζόντιες σεισμικές δράσεις.
- Εναλλακτικές κατασκευές με απαίτηση αύξησης της ιδιοπεριόδου τους.
- Ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών που κρίνεται ότι δεν είναι σε θέση να παραλάβουν σεισμικά φορτία.

Ως αποτέλεσμα σωστής εφαρμογής των μεθόδων σεισμικής μόνωσης προκύπτει βελτιωμένη συμπεριφορά των κατασκευών σε όλα τα επίπεδα επικινδυνότητας καθώς περιορίζονται οι επιβλαβείς παραμορφώσεις σε δομικά ή μη στοιχεία και μειώνεται εμφανώς το φάσμα απόκρισης της κατασκευής ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο απαιτούμενος χρόνος διακοπής χρήσης του κτηρίου. Έτσι, σεισμικά μεμονωμένα κτίρια αποκτούν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Δυνατότητα αύξησης της ιδιοπεριόδου και συνεπώς ελάττωση των οριζόντιων δράσεων του σεισμού.
- Απόσβεση ενέργειας προκειμένου να ελέγχεται η μετατόπιση του συστήματος των μονωτήρων.
- Ευστάθεια έναντι φορτίσεων μικρής έντασης όπως ο άνεμος και σεισμοί μικρού μεγέθους.

Ως εκ τούτου, η σεισμική μόνωση αποτελεί μια πολύ ελκυστική προσέγγιση σε εφαρμογές όπου επιβάλλεται προστασία ευαίσθητου εξοπλισμού για αυτό και έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για νοσοκομεία, υπολογιστικά κέντρα, κέντρα επιχειρήσεων εκτάκτων αναγκών και εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας.

2.2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας της σεισμικής μόνωσης

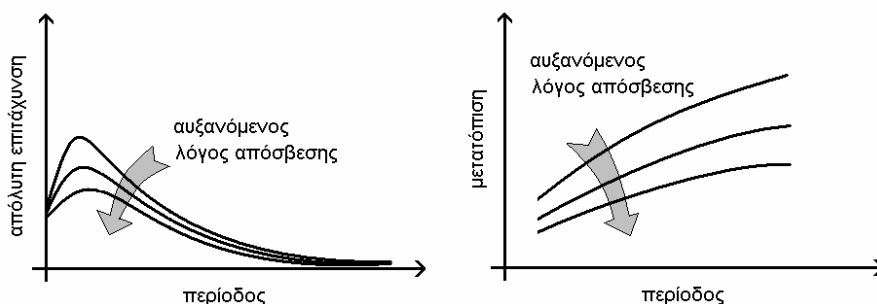
Σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού και δόμησης η σεισμική μόνωση παρουσιάζει την ακόλουθη ιδιαιτερότητα: Αντί να στοχεύει στη διαμόρφωση δομικών στοιχείων επαρκούς αντοχής και πλαστιμότητας τα οποία να μπορούν να δεχθούν με ασφάλεια τη σχετικά μεγάλη ποσότητα μηχανικής ενέργειας η οποία εισάγεται σε μια συμβατικά θεμελιωμένη κατασκευή λόγω του σεισμού σχεδιασμού, επικεντρώνεται στο δραστικό περιορισμό της ποσότητας ενέργειας η

οποία είναι δυνατό να εισαχθεί στην κατασκευή λόγω του σεισμού αυτού. Η τεχνική της σεισμικής μόνωσης περιλαμβάνει την ενσωμάτωση στη δομή ειδικών διατάξεων οι οποίες, μεταβάλλοντας ριζικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της δομής, κυρίως δε τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις οριζόντιες ταλαντώσεις της δομής, εξασφαλίζουν την ευνοϊκότερη απόκρισή της κατά τις αναμενόμενες οριζόντιες σεισμικές διεγέρσεις. Η ευνοϊκή αυτή απόκριση είναι το αποτέλεσμα της επίτευξης τριών παρακάτω τριών πιο άμεσων στόχων:

α) Όταν εφαρμόζεται σεισμική μόνωση ένας από τους βασικούς στόχους είναι ο περιορισμός τις έντασης που αναπτύσσεται στα δομικά στοιχεία μέσω του περιορισμού της σχετικής οριζόντιας μετακίνησης των διαφόρων οριζοντίων επιπέδων της κατασκευής. Επιδιώκεται δηλαδή, στην οριζόντια ταλάντωση της κατασκευής να συμμετέχουν κυρίως ιδιομορφές τέτοιες ώστε το μεγαλύτερο μέρος της οριζόντιας μετακίνησης στην κορυφή, να εμφανίζεται ως σχετική μετακίνηση δύο τμημάτων της κατασκευής σε κάποιο επίπεδο μόνωσης, ενώ στην ταλάντωση του άνω (μονωμένου) τμήματος να συμμετέχουν σε μεγάλο βαθμό οι οριζόντιες μεταφορικές κινήσεις στερεού σώματος. Η σχετική μετακίνηση στο επίπεδο μόνωσης παραλαμβάνεται με παραμορφώσεις ή ολίσθηση στις συσκευές μόνωσης οι οποίες είναι ειδικά σχεδιασμένες για το σκοπό αυτό. Γίνεται αντιληπτό, ακόμα και διαισθητικά, ότι συμμετέχουν μεγαλύτεροι συντελεστές για αυτές τις ιδιομορφές που προκύπτουν από τους επιπλέον βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι εισάγονται στην κατασκευή λόγω της σεισμικής μόνωσης, επιτυγχάνοντας τη μείωση της παραμορφωσιμότητας του συστήματος μόνωσης σε σχέση με τη συνολική παραμορφωσιμότητα καθενός εκ των δύο τμημάτων της κατασκευής.

β) Επιπλέον, επιδιώκεται η ιδιοσυχνότητα που αντιστοιχεί σε αυτές τις ιδιομορφές της σεισμικής μόνωσης να είναι επαρκώς απομακρυσμένη από τις κυρίαρχες ιδιοσυχνότητες της διέγερσης έτσι ώστε η απόλυτη επιτάχυνση απόκρισης, και κατά συνέπεια και οι αντίστοιχες αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται επί της κατασκευής, να είναι αρκετά μικρές. Στο σχήμα 2.1(α) αναπαρίσταται ποιοτικά μια σειρά ομαλοποιημένων φασμάτων απολύτων επιταχύνσεων για διάφορους λόγους απόσβεσης αρκετά αντιπροσωπευτικών των φασμάτων που χρησιμοποιούνται για τον αντισεισμικό σχεδιασμό δομών. Είναι φανερό ότι επιλέγοντας μια επαρκώς μεγάλη ιδιοπερίοδο, είναι δυνατό να μειωθεί δραστικά το μέγεθος των σεισμικών δυνάμεων.

γ) Ο τρίτος στόχος είναι η ενίσχυση της απόσβεσης μέσω απορρόφησης μηχανικής ενέργειας από συσκευές ειδικά σχεδιασμένες για το σκοπό αυτό. Η απορρόφηση μηχανικής ενέργειας είναι πολλαπλώς ευεργετική για την κατασκευή καθώς οδηγεί τόσο στον περιορισμό των απολύτων επιταχύνσεων όσο και των σχετικών μετατοπίσεων όπως, σε μια πρώτη προσέγγιση, προκύπτει από απλή παρατήρηση φασμάτων απολύτων επιταχύνσεων και σχετικών μετατοπίσεων για διάφορους λόγους απόσβεσης, όπως αυτά που αναπαρίστανται ποιοτικά στο σχήμα 2.1(α, β).



Σχήμα 2.1: Τυπική μορφή ομαλοποιημένων φασμάτων απόκρισης: (α) Φάσμα απολύτων επιταχύνσεων, (β) Φάσμα μετατοπίσεων.

2.2.3 Εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης σε υφιστάμενες κατασκευές

Η μέθοδος της σεισμικής μόνωσης είναι μια τεχνολογία η οποία έχει εισαχθεί πρόσφατα στον τομέα της ενίσχυσης των υφιστάμενων κατασκευών. Ευρύτερη χρήση αυτής της μεθόδου άρχισε να γίνεται τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Ενδεικτικά, η πρώτη εφαρμογή σεισμικής μόνωσης για ενίσχυση υφιστάμενου κτηρίου πραγματοποιήθηκε στο Salt Lake City & County Building στη Utah των Ηνωμένων Πολιτειών το 1989. Συγκεκριμένα, η ανάγκη να εισαχθεί η μέθοδος σεισμικής μόνωσης στην ενίσχυση κατασκευών έχει προέλθει από τους παράγοντες:

- Συντήρηση κτηρίων ιστορικής σημασίας. Όπου είναι επιθυμητή η ενίσχυση χωρίς να μεταβληθούν τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά.
- Διατήρηση της λειτουργικότητας του κτηρίου αμέσως μετά την εκδήλωση σεισμού.
- Οικονομία σχεδιασμού και προστασία της επένδυσης, καθώς η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης μπορεί να υπερτερήσει οικονομικά έναντι άλλων μεθόδων ενίσχυσης αλλά και να περιορίσει μακροχρόνιες δαπάνες, όπως το κόστος αποκατάστασης βλαβών από μεταγενέστερο σεισμό.
- Προστασία εξοπλισμού, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις όπου η αξία του εξοπλισμού του κτηρίου υπερβαίνει το κόστος της ίδιας της κατασκευής.
- Αύξηση της απόσβεσης σε κατασκευές όπως γέφυρες, όπου παρατηρούνται μεγάλα βέλη κάμψης, και η ενίσχυση καθ' όλο το μήκος είναι δύσκολα εφαρμόσιμη επιλογή.

Βασικά ζητήματα που ανακύπτουν και πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης σε υφιστάμενες κατασκευές είναι:

- Η δυνατότητα ορθής εφαρμογής της μεθόδου, εξετάζοντας τη δυναμική απόκριση, τη σεισμικότητα της περιοχής, τα γειτονικά κτήρια κτλ.
- Η επιλογή επιπέδου εφαρμογής της σεισμικής μόνωσης (στάθμη εδάφους, υπόγειο ή πρώτος όροφος), καθώς ο παράγοντας αυτός έχει μακράν τη μεγαλύτερη επιρροή στο αρχιτεκτονικό και αισθητικό αποτέλεσμα και στο τελικό κόστος της επέμβασης.

- Η αντιμετώπιση κλιμάκων, ανελκυστήρων και γενικότερα ειδικών στοιχείων της κατασκευής που διέρχονται του επιπέδου της σεισμικής μόνωσης, όπου επιτυγχάνεται με σωστή επιλογή των θέσεων των κόμβων σύνδεσης και του τύπου των μονωτήρων.
- Η πυροπροστασία των μονωτήρων.
- Η εγκατάσταση των μονωτήρων σε συνδυασμό με την υπάρχουσα στατική δομή του κτηρίου, καθώς απαιτείται μια διαφορετική θεώρηση η οποία περικλείει θέματα πέραν αυτών που οι μηχανικοί συνήθως καλούνται να αντιμετωπίσουν σε συμβατικές κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων της προσωρινής στήριξης, της περίσφιξης, των μεθόδων αγκύρωσης, της επίβλεψης των εγκαταστάσεων σεισμικής μόνωσης κ.α.

Οι σεισμικές συσκευές μόνωσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες: παθητικές, ημιενεργές, ενεργές και υβριδικές. Όλες αυτές οι συσκευές στοχεύουν στη μόνωση των κατασκευών από την επίγεια κίνηση, με συνέπεια σε μερικές περιπτώσεις να υπάρχει μεγάλη σχετικά μετατόπιση μεταξύ της μονωμένης δομής και του εδάφους. Επομένως, οι πρόσθετες συσκευές χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη απόσβεση του συστήματος. Αυτές οι συσκευές μπορούν να είναι υστερητικοί αποσβεστήρες, ενεργειακοί απορροφητές εξώθησης μολύβδου, ιξώδεις αποσβεστήρες, αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας ή ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες.

Τα συστήματα μόνωσης, όπως τα ελαστομερή εφέδρανα υψηλής απόσβεσης, έχουν την ικανότητα να απορροφούν αρκετή ενέργεια και δεν απαιτούν οποιοσδήποτε συσκευές απόσβεσης. Ένα τυπικό εφέδρανο αποτελείται από ένα στρώμα καουτσούκ υψηλής απόσβεσης με επάλληλες στρώσεις χαλύβδινων ελασμάτων. Η απόσβεση του ελαστομερούς εφέδρανου θα μπορούσε να φτάσει το 15% ή και υψηλότερα. Η σχετική μετατόπιση μπορεί έτσι να διατηρείται εντός των επιτρεπόμενων ορίων χωρίς καμιά άλλη συσκευή απόσβεσης. Τα ελάσματα χάλυβα χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα της κάθετης ακαμψίας και να ανθίστανται στα κατακόρυφα φορτία.

Στην τεχνική μόνωσης των θεμελίων, τα εύκαμπτα στοιχεία προστίθενται στη δομή για να επιμηκύνουν σημαντικά τη φυσική περίοδο και να τα απομακρύνουν από τις περιόδους των αναμενόμενων σεισμών. Αυτά τα εύκαμπτα στοιχεία βρίσκονται συνήθως στα θεμέλια της κατασκευής, που δέχεται μεγάλο μέρος της παραμόρφωσης που παράγεται από το σεισμό ενώ η κατασκευή τείνει να κινείται ως άκαμπτο σώμα. Τα βασικά συστατικά ενός συστήματος μόνωσης των θεμελίων είναι:

1. Εύκαμπτα στοιχεία που επιμηκύνουν τη φυσική περίοδο της κατασκευής.
2. Ένας αποσβεστήρας ή ένας μηχανισμός απόσβεσης ενέργειας για τον έλεγχο της παραμόρφωσης των εύκαμπτων στοιχείων σε ένα επιθυμητό επίπεδο.

3. Ένας μηχανισμός για να παρέχει στο κτήριο την απαραίτητη δυσκαμψία για τον περιορισμό της δόνησης της δομής κάτω από συνθήκες ισχυρών ανέμων και μικρών σε μέγεθος σεισμούς.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι εφεδράνων, μόνο δύο όμως έχουν υπερισχύσει και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτερα στην μόνωση της κατασκευής: τα συστήματα που βασίζονται στα ελαστομερή εφέδρανα και τα εφέδρανα ολίσθησης. Οι τύποι των ελαστομερών εφεδράνων που διατίθενται είναι:

- Ελαστομερή εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης (Low-Damping Natural or Synthetic Rubber Bearing).
- Ελαστομερή εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (High-Damping Natural Rubber Bearing).
- Ελαστομερή εφέδρανα πυρήνα μολύβδου χαμηλής απόσβεσης (Lead-Rubber Bearing)

ενώ τα εφέδρανα ολίσθησης διακρίνονται σε:

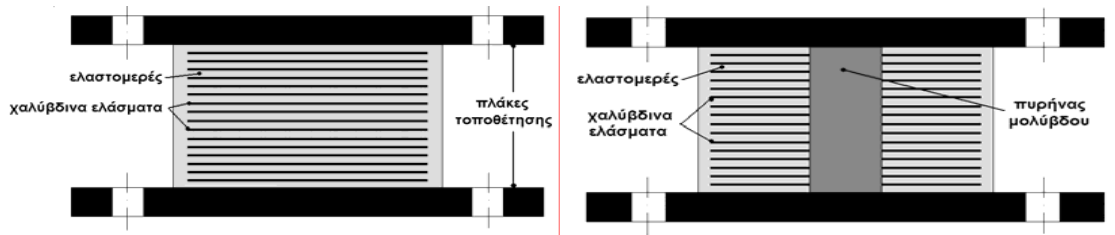
- Πλακοειδή Εφέδρανα Ολίσθησης (Flat Sliding Bearing).
- Σφαιρικά Εφέδρανα Ολίσθησης ή Τριβής (Spherical Sliding Bearing ή Friction Pendulum Bearings) .

2.2.4 Τύποι διατάξεων σεισμικής μόνωσης και τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών

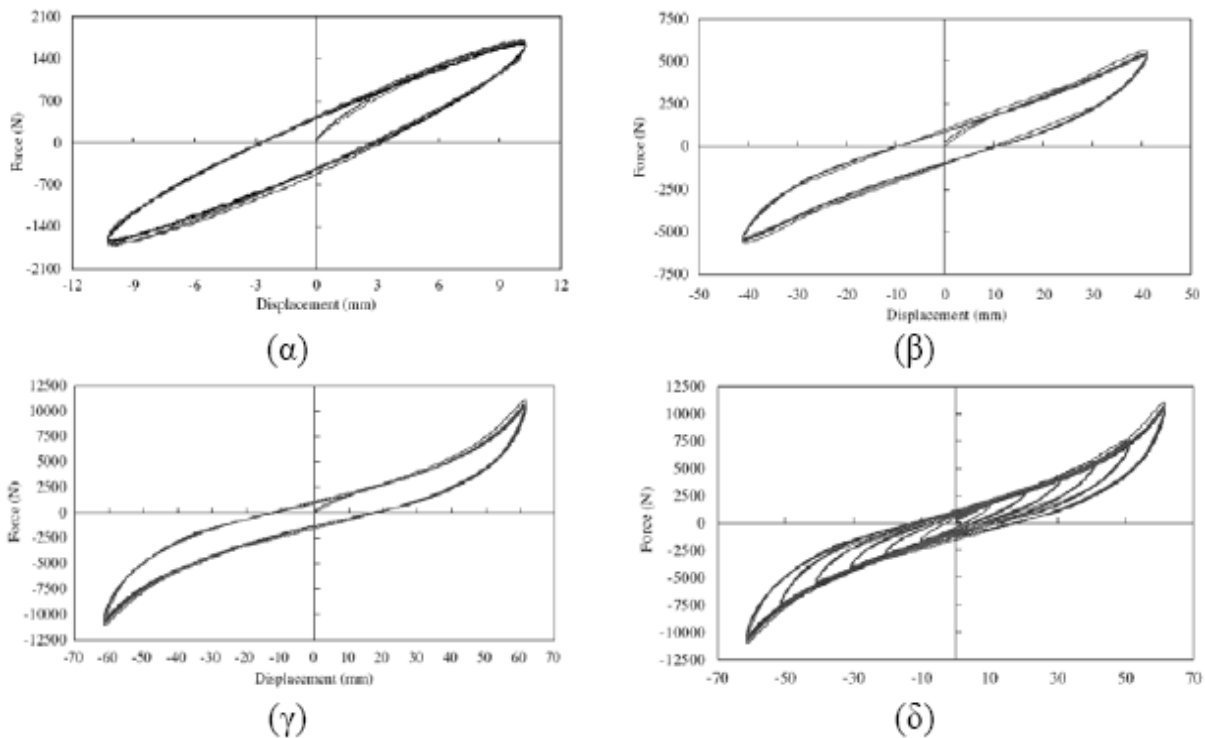
Γενικά, τρία είναι τα στοιχεία τα οποία αναμένει κάποιος να διαθέτει μια διάταξη σεισμικής μόνωσης : α) να φέρει το κατακόρυφο φορτίο της κατασκευής εξασφαλίζοντας παράλληλα κάποιο βαθμό οριζόντιας αποσύνδεσης των τμημάτων της κατασκευής (πάνω και κάτω από το επίπεδο μόνωσης). β) να παρέχει επαρκή δύναμη επαναφοράς και γ) να προκαλεί ικανοποιητική απόσβεση. Κάθε μία από τις παραπάνω απαιτήσεις μπορεί να καλύπτεται από μια ξεχωριστή συσκευή, αλλά είναι επίσης δυνατό, και μάλιστα αποτελεί την πλέον διαδεδομένη πρακτική, μία συσκευή να παρέχει δύο από τα τρία ή και τα τρία στοιχεία της σεισμικής μόνωσης. Υπάρχει μια πληθώρα διατάξεων που χρησιμοποιούνται σήμερα σε διάφορων τύπων εφαρμογές. Τρεις από τις πλέον διαδεδομένες διατάξεις εξετάζονται στην εργασία αυτή: τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με ελαστομερές υψηλής απόσβεσης, τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου και τα γραμμικά ελαστομεταλλικά εφέδρανα σε συνδυασμό με μη γραμμικούς ιξώδεις αποσβεστήρες.

Ελαστομεταλλικά εφέδρανα

Η μορφή των ελαστομεταλλικών εφεδράνων απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα αποτελούνται από επάλληλα στρώματα ελαστικού και χάλυβα. Οι στρώσεις του ελαστικού παρέχουν την οριζόντια (διαμητική) παραμορφωσιμότητα ενώ τα χαλύβδινα ελάσματα εμποδίζοντας την πλευρική διόγκωση του ελαστικού εξασφαλίζουν υψηλή κατακόρυφη δυσκαμψία. Η παραμορφωσιμότητα ελέγχεται επιλέγοντας καταλλήλως το πάχος κάθε στρώσης ελαστικού και των αριθμό των στρώσεων. Δύο φαινόμενα θέτουν σημαντικούς περιορισμούς στο σχεδιασμό των εφεδράνων. Το πρώτο είναι ότι με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων, και άρα και του ύψους του εφεδράνου, δύνανται να προκληθούν σοβαρά προβλήματα αστάθειας σε μεγάλες γωνιακές παραμορφώσεις. Το δεύτερο είναι ότι με την αύξηση του πάχους κάθε στρώσης μειώνεται η κατακόρυφη δυσμορφωσιμότητα.



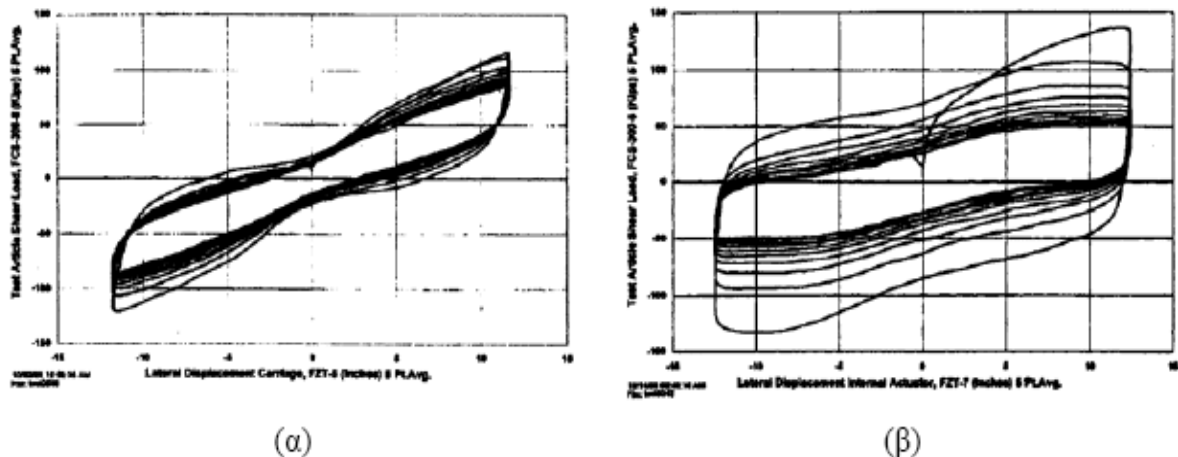
Σχήμα 2.2: Ελαστομεταλλικά εφέδρανα ελαστομερούς υψηλής απόσβεσης και ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου.



Σχήμα 2.3: Βρόχοι υστέρησης ελαστομεταλλικού εφεδράνου με ελαστομερές υψηλής απόσβεσης για κυκλική φόρτιση συχνότητας 0.5 Hz και μέγιστης διαμητικής παραμόρφωσης: α) 25%, β) 100% , γ) 50%. δ) Βρόχοι υστέρησης ελαστομεταλλικού εφεδράνου με ελαστομερές υψηλής απόσβεσης για κυκλική διέγερση συχνότητας 2 Hz και αυξανόμενη ανά τρεις κύκλους μέγιστη διαμητική παραμόρφωση.

Για την εξασφάλιση της επιθυμητής απορρόφησης ενέργειας δύο εναλλακτικές πρακτικές εφαρμόζονται κυρίως: χρήση ελαστομερούς υψηλής απόσβεσης και χρήση πυρήνων μολύβδου. Στα εφέδρανα με ελαστομερή υψηλής απόσβεσης, η απορρόφηση ενέργειας οφείλεται στην κατάλληλη χημική σύνθεση του υλικού. Η απόσβεση που επιτυγχάνεται κυμαίνεται μεταξύ 7% και 14% της κρίσιμης. Το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση των ελαστομερών αυτών είναι μεταξύ 0.35 και 1.4 MPa. Η μέγιστη διαμητική παραμόρφωση στην οποία μπορούν να υποβληθούν τα εφέδρανα του τύπου αυτού κυμαίνεται μεταξύ 200% και 350%. Κάποιες σχέσεις δύναμης-μετατόπισης για τέτοια εφέδρανα, όπως προκύπτουν από πειράματα, φαίνονται στο Σχήμα 2.3. Στα εφέδρανα με πυρήνες μολύβδου χρησιμοποιούνται κανονικά ελαστομερή χαμηλής απόσβεσης, ενώ η απόσβεση προκύπτει από την υστερική συμπεριφορά ενός κυλίνδρου από μολύβδο ο οποίος ενσωματώνεται στο κέντρο του εφεδράνου και εξαναγκάζεται έτσι να ακολουθεί τις διαμητικές παραμορφώσεις

αυτού. Οι διατμητικές δυνάμεις μεταβιβάζονται στον πυρήνα μολύβδου μέσω των χαλύβδινων ελασμάτων τα οποία επίσης εξασφαλίζουν την ομοιόμορφη κατά το μήκος διατμητική παραμόρφωση του πυρήνα. Η διάμετρος του πυρήνα είναι συνήθως μεταξύ 15% και 33% της διαμέτρου του εφεδράνου και από αυτή εξαρτάται και το ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης που επιτυγχάνεται. Το ποσοστό αυτό μπορεί να ξεπεράσει το 40%. Η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση για τα εφέδρανα αυτά είναι μικρότερη από ότι για την προηγούμενη κατηγορία και κυμαίνεται από 125% έως 200%. Στο Σχήμα 2.10 φαίνονται οι σχέσεις δύναμης-μετατόπισης για δύο εφέδρανα τα οποία έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά εκτός από τη διάμετρο του πυρήνα.



Σχήμα 2.4: Βρόχοι υστέρησης ελαστομεταλλικών εφεδράνων με πυρήνα μολύβδου για 10 κύκλους φόρτισης συχνότητας 0.5 Hz: α) Εφέδρανο με μικρό πυρήνα, διαμέτρου 4.75 inches (16% της διαμέτρου του ελαστομερούς), και μέγιστη διατμητική παραμόρφωση 118%. β) Εφέδρανο με μεγάλο πυρήνα, διαμέτρου 6.5 inches (26% της διαμέτρου του ελαστομερούς), και μέγιστη διατμητική παραμόρφωση 152%.

Οι ακόλουθες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν με βάση τα Σχήματα 2.4(α) και 2.4(β):

1) Η συμπεριφορά των εφεδράνων με μικρό ή χωρίς πυρήνα διαμορφώνεται κυρίως από τη συμπεριφορά του ελαστομερούς, η οποία δίνει μικρούς σχετικά βρόχους απορρόφησης ενέργειας με σχήμα το οποίο για μικρές σχετικά παραμορφώσεις προσεγγίζει πλαγιασμένη έλλειψη. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη ενός μεγάλου πυρήνα οδηγεί σε υστερική συμπεριφορά του εφεδράνου, χαρακτηριστικό του μολύβδου, η οποία εξασφαλίζει μεγαλύτερους βρόχους απορρόφησης ενέργειας.

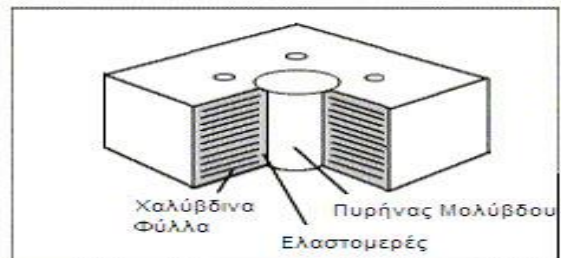
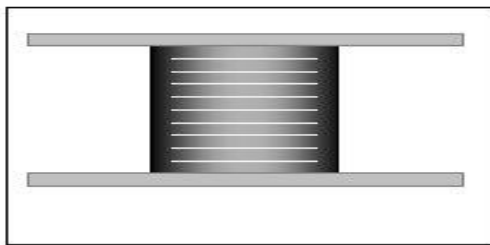
2) Χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς των εφεδράνων με ελαστομερή υψηλής απόσβεσης είναι η αύξηση της δυστημσίας που παρατηρείται για μεγάλες τιμές τις γωνιακής παραμόρφωσης. Το φαινόμενο αυτό είναι χαρακτηριστικό της ελαστικής συμπεριφοράς του ελαστομερούς. Στα εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου στα οποία οι τιμές της γωνιακής παραμόρφωσης κυμαίνονται γενικά μέσα σε πιο στενά όρια το φαινόμενο αυτό δεν εμφανίζεται.

3) Στην περίπτωση ελαστομεταλλικών εφεδράνων με πυρήνα μολύβδου παρατηρείται ότι η δύναμη που αντιτάσσουν τα εφέδρανα μειώνεται από κύκλο σε κύκλο. Το φαινόμενο αυτό είναι χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του μολύβδου. Υπάρχει μια σειρά παραμέτρων που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά των

εφεδράνων. Οι κυριότερες από αυτές είναι η κατακόρυφη πίεση που ασκείται σε αυτά, η συχνότητα της διέγερσης και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ο τρόπος με τον οποίο οι παράμετροι αυτοί επηρεάζουν τη συμπεριφορά των εφεδράνων προσδιορίζεται πειραματικά.

Τα ελαστομερή εφέδρανα αποτελούνται από:

1. Στρώσεις ελαστομερούς υλικού, τα οποία παρέχουν γωνιακή παραμορφωσιμότητα
2. Χαλύβδινα φύλλα, τα οποία παρέχουν αντοχή σε κατακόρυφα φορτία που παραλαμβάνουν το ίδιο το βάρος του κτηρίου περιορίζοντας την εγκάρσια παραμόρφωση του ελαστικού.
3. Πυρήνα μολύβδου.



Εικόνα 1 Ελαστομερές Εφέδρανο



Εικόνα 2 Ελαστομερές Εφέδρανο Πυρήνα Μολύβδου

Σχήμα 2.5 Εφέδρανα

Ελαστομερή εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης

Παρέχουν γραμμική συμπεριφορά σε διάτμηση για διατμητικές τάσεις μέχρι και το 100% της αντοχής των στοιχείων και ποσοστό απόσβεσης 2 με 3%. Στα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνεται η απλότητα της κατασκευής και της μοντελοποίησης τους και η μικρή επίδραση του φορτίου, της θερμοκρασίας και του χρόνου στην απόκριση τους. Το σημαντικότερο μειονέκτημα τους είναι ότι απαιτούν επιπρόσθετο σύστημα απόσβεσης.

Ελαστομερή εφέδρανα υψηλής απόσβεση

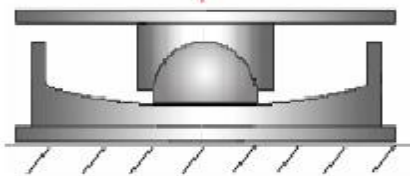
Τα ελαστομερή εφέδρανα υψηλής απόσβεσης παραλαμβάνουν διατμητική καταπόνηση ίση με 200 έως 350% της αντοχής των στοιχείων. Η απόσβεση τους η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20%, μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη στοιχείων πλήρωσης που αποτελούνται από ίνες άνθρακα, έλαια και ρητίνες. Το μέτρο διάτμησης τους είναι μεταξύ 350 και 1400 KPa. Η δυσκαμψία και η απόσβεση τους εξαρτάται από τους εξής παράγοντες: τα ελαστομερή και τα στοιχεία πλήρωσης, την πίεση επαφής, την ταχύτητα της εφαρμογής του φορτίου, το χρόνο φόρτισης και τη θερμοκρασία.

Ελαστικά εφέδρανα πυρήνα μολύβδου

Τα ελαστικά εφέδρανα πυρήνα μολύβδου αποτελούνται από ελαστικό χαμηλής απόσβεσης συνδυασμένο με κεντρικό πυρήνα από μόλυβδο. Το μέτρο διάτμησης τους είναι μεταξύ 525 και 700 KPa και μπορούν να παραλάβουν διατμητική καταπόνηση ίση με 125 έως 200% της αντοχής των στοιχείων. Ο κυλινδρικός πυρήνας μολύβδου, που έχει τάση διαρροής ίση με 1500psi, προσαρμόζεται σε οπή στο κέντρο του ελαστικού εφεδράνου. Η τάση διαρροής του εφεδράνου μειώνεται σε ανακυκλώνόμενη φόρτιση λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και η υστερική του απόκριση εξαρτάται από τη μετακίνηση.

Σφαιρικά εφέδρανα ολίσθησης ή τριβής

Τα σφαιρικά εφέδρανα ολίσθησης βρίσκουν ευρεία εφαρμογή κυρίως στη γεφυροποιία. Ένα τέτοιο εφέδρανο φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 2.6 Σφαιρικά εφέδρανα ολίσθησης ή τριβής

Τα πλακοειδή εφέδρανα ολίσθησης δεν αυξάνουν την ιδιοπερίοδο της κατασκευής της κατασκευής παρά μόνο περιορίζουν την τέμνουσα δύναμη που μεταφέρεται στην ανωδομή. Ακόμα, απαιτούν επιπρόσθετους μηχανισμούς που αποτρέπουν την πλαστική παραμόρφωση του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Για τους παραπάνω λόγους δεν χρησιμοποιούνται σε κτιριακές κατασκευές.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών ενίσχυσης κατασκευών με τη μέθοδο της σεισμικής μόνωσης στις Ηνωμένες Πολιτείες αποτελούν ιστορικές κατασκευές όπως το Salt Lake City & Country Building στην Utah, το MacKay School of Mines στο

πανεπιστήμιο της Νεβάδα, το Oakland City Hall στην Καλιφόρνια και πιο πρόσφατα τα δημαρχεία του Los Angeles και του San Francisco καθώς και η σεισμική ενίσχυση της River Bridge του Sacramento και της Golden Gate Bridge στο San Francisco στην οποία τοποθετήθηκαν σεισμικοί μονωτήρες στα ανοίγματα εισόδου και εξόδου της γέφυρας.

Ευρεία χρήση της μεθόδου έγινε επίσης στην Ιαπωνία, όπου η έντονη σεισμική δραστηριότητα, ιδιαίτερα μετά τον καταστροφικό σεισμό του Kobe το 1995, το επιβάλλει. Τέτοιο παράδειγμα είναι τα κεντρικά γραφεία της τοπικής αυτοδιοίκησης του Yamanashi, τα κέντρα εκπαίδευσης προσωπικού της εταιρείας Taisei στο Τόκιο, το δημαρχείο της Osaka και το Εθνικό Μουσείο Δυτικής Τέχνης κ.α.

Σε διεθνές επίπεδο πολλά παραδείγματα εντοπίζονται στη συντήρηση αρχαίων αγαλμάτων στην Ιταλία, βιομηχανικών και πυρηνικών εγκαταστάσεων στην Κορέα, καθώς και στην αποκατάσταση και ενίσχυση κατοικιών στην Αρμενία μετά τον ισχυρό σεισμό του 1988.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° - Παθητικά / ημιενεργά συστήματα

3.1 Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια των τελευταίων 25 ετών, έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη έρευνα και την ανάπτυξη των δομικών συσκευών ελέγχου, με ιδιαίτερη έμφαση στη μείωση των επιπτώσεων από τον άνεμο και τη σεισμική απόκριση των κτηρίων και των γεφυρών. Σημαντικές προσπάθειες έχουν γίνει για την ανάπτυξη ενός σχεδίου δομικού ελέγχου σε μια εφαρμόσιμη τεχνολογία, και σήμερα μπορούμε να εγκαθιστούμε πολλές τέτοιες συσκευές σε μια ευρεία ποικιλία κατασκευών (Soong και Spencer, 2000).

Σε γενικές γραμμές, τα δομικά συστήματα ελέγχου μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις ευρείς τομείς: (α) απομόνωση βάσης, (β) παθητικοί μηχανισμοί απόσβεσης ενέργειας, (γ) ενεργός, υβριδικός και ημιενεργός έλεγχος. Από τα τρία, η απομόνωση βάσης μπορεί πλέον να θεωρηθεί, ως η πιο ώριμη τεχνολογία που έχει εφαρμοστεί, σε σύγκριση με τις άλλες δύο (ATC 17-1, 1993).

Οι παθητικοί μηχανισμοί απόσβεσης ενέργειας καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα υλικών και συσκευών για την ενίσχυση της απόσβεσης και της δυσκαμψίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για το μείωση του σεισμικού κινδύνου όσο για την αποκατάσταση της γήρανσης στις κατασκευές ή ακόμα και για την στήριξη των ανεπαρκών κατασκευών (Soong και Dargush, 1997., Constantinou και λοιποί, 1998., Hanson και Soong, 2001). Γενικά, τέτοια συστήματα χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους να ενισχύουν την ενέργεια απόσβεσης στα δομικά συστήματα που εγκαθίστανται. Αυτές οι συσκευές βασίζονται σε αρχές όπως η αρχή τριβής ολίσθησης, τα στάδια μετασχηματισμού των μετάλλων, τα όρια διαρροής – παραμόρφωσης των μετάλλων, τα στάδια παραμόρφωσης των ιξωδοελαστικών στερεών ή ρευστών και μέτρησης της ογκομετρικής ροής.

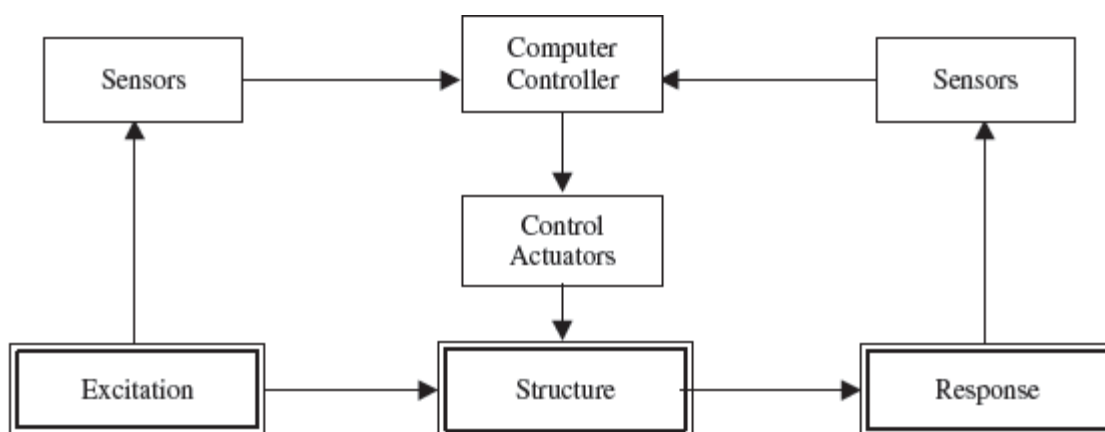
Ο συμβατικός σεισμικός σχεδιασμός στη πράξη επιτρέπει την μείωση των δυνάμεων σχεδιασμού με την προϋπόθεση ότι η ανελαστική δράση σε μια κατάλληλα σχεδιασμένη κατασκευή θα παρέχει ότι η συγκεκριμένη κατασκευή είναι ικανή να απορροφήσει σημαντικό ποσοστό της ενέργειας και ότι μπορεί να επιβιώσει μετά από ένα ισχυρό σεισμό χωρίς να καταρρεύσει. Αυτή η ανελαστική δράση τείνει να εμφανίζεται σε συγκεκριμένα κρίσιμα σημεία της δομής, συνήθως στα σημεία διάτμησης της δοκού ή στις αρθρώσεις δοκού και κολώνας. Η ανελαστική συμπεριφορά σε αυτές τις περιοχές, ενώ είναι ικανή να απορροφά μεγάλα ποσά ενέργειας, συχνά οδηγεί σε σημαντικές βλάβες στα δομικά μέλη και τα μη δομικά στοιχεία, όπως οι τοίχοι, τα χωρίσματα, οι πόρτες και οι οροφές.

Ως απόκριση στις ελλείψεις του συμβατικού αντισεισμικού σχεδιασμού, μια σειρά από καινοτόμες προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί. Μία από αυτές τις προσεγγίσεις είναι η ενσωμάτωση αποσβεστήρων σε κατασκευή που πρόκειται να κατασκευαστεί σε μία σεισμική ζώνη. Ο στόχος είναι η συγκέντρωση συσκευών που χαρακτηρίζονται από

την ανελαστική τους συμπεριφορά σε συγκεκριμένες, ειδικά σχεδιασμένες περιοχές της δομής για να προστατέψουν από τις δυνάμεις εκτροπής τα δομικά στοιχεία που φέρουν το πρωτεύον φορτίο βάρους. Πολλοί τύποι συσκευών απορρόφησης ενέργειας έχουν προταθεί για αυτόν το λόγο. Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας έχει οδηγήσει σε ποικίλους αποσβεστήρες τριβής, ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες, αποσβεστήρες ιξώδους ρευστού, υστερητικούς αποσβεστήρες, αποσβεστήρες με μορφομήμονα κράματα νικελίου και τιτανίου (Nitinol ή NiTi).

Τα ενεργά, υβριδικά, και ημιενεργά δομικά συστήματα ελέγχου είναι φυσική εξέλιξη των παθητικών συστημάτων ελέγχου. Η πιθανή χρήση των συστημάτων ενεργού ελέγχου και μερικοί συνδυασμοί παθητικών και ενεργών συστημάτων ως μέσο δομικής προστασίας ενάντια στα σεισμικά φορτία έχουν λάβει ιδιαίτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Τα ενεργά, υβριδικά και ημιενεργά συστήματα ελέγχου είναι συσκευές παροχής ενέργειας, ενοποιημένες με τους εκτιμητές/ελεγκτές και τους αισθητήρες, οι οποίοι λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο. Ενεργούν ταυτόχρονα με μια επικίνδυνη διέγερση και ενισχύουν τη δομική συμπεριφορά και ασφάλεια.

Είναι χρήσιμο να γίνεται διάκριση μεταξύ των διάφορων τύπων ενεργών συστημάτων ελέγχου που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή στην πράξη. Ένα καθαρά ενεργό σύστημα ελέγχου έχει τη βασική διαμόρφωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 (α) (Soong, 1990). Αποτελείται: (α) από τους αισθητήρες που έχουν τοποθετηθεί στη δομή για να μετρήσουν είτε τις εξωτερικές διεγέρσεις, είτε τις διαφορετικές δομικές αποκρίσεις, είτε και τις δύο, (β) από συσκευές που επεξεργάζονται τις μετρήσεις, υπολογίζουν τις απαραίτητες δυνάμεις ελέγχου που χρειάζονται, και βασίζονται σε ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο ελέγχου, και (γ) ενεργοποιητές, που συνήθως τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές, για να παραγάγουν τις απαραίτητες δυνάμεις.



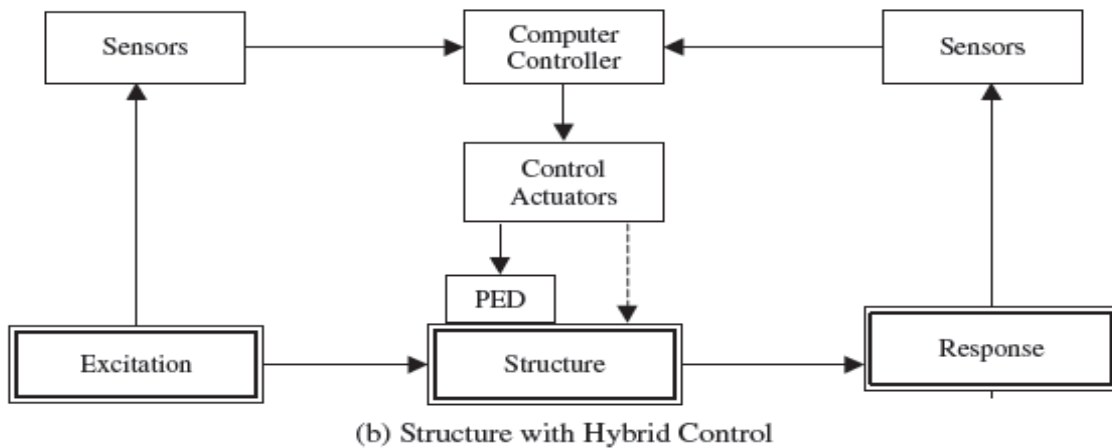
(a) Structure with Active Control

Σχήμα 3.1(α) Δομή με ενεργό έλεγχο.

Όταν μετριοούνται μόνο οι διάφορες σεισμικές αποκρίσεις, ο διαμορφωμένος έλεγχος αναφέρεται ως έλεγχος ανατροφοδότησης (feedback control) δεδομένου ότι η δομική απόκριση ελέγχεται συνεχώς και οι συγκεκριμένες πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τη συνεχή διόρθωση των εφαρμοσμένων δυνάμεων ελέγχου. Αποτελέσματα feed

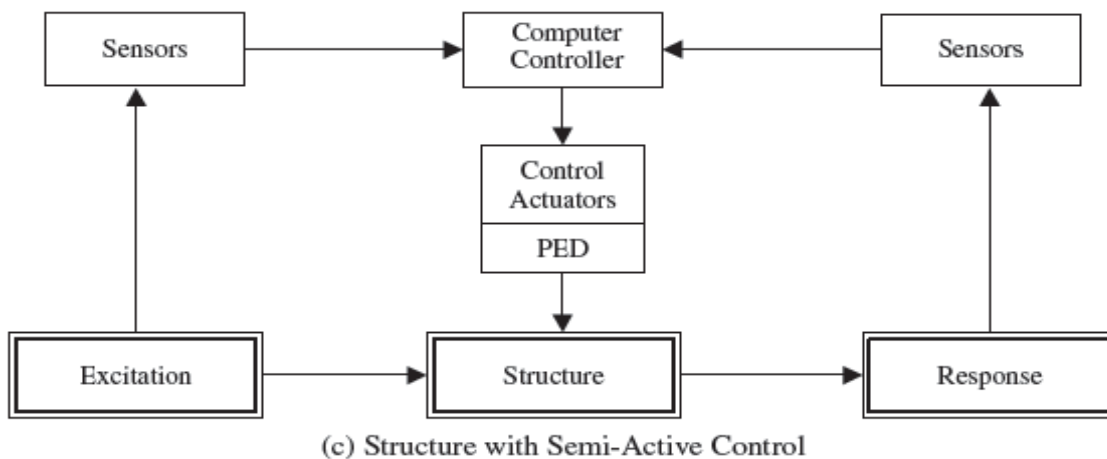
forward ελέγχου έχουμε όταν οι δυνάμεις ελέγχου ρυθμίζονται μόνο από τη μετρημένη διέγερση, η οποία μπορεί να επιτευχθεί, όταν σε περίπτωση σεισμικής δόνησης μετρηθεί η επιτάχυνση στη βάση της κατασκευής. Στην περίπτωση όπου οι πληροφορίες απόκρισης και διέγερσης αξιοποιούνται στο σχεδιασμό ελέγχου, χρησιμοποιείται ο όρος feedback-feed forward (Sudardjo και λοιποί., 1990).

Ο όρος υβριδικός έλεγχος αναφέρεται γενικά στο συνδυασμό ενός παθητικού και ενεργού συστήματος ελέγχου όπως αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 3.1(β). Ένα μεγάλο μέρος του στόχου ενός υβριδικού συστήματος ολοκληρώνεται από το παθητικό σύστημα, το οποίο υποδηλώνει ότι ένα κατάλληλα σχεδιασμένο υβριδικό σύστημα απαιτεί λιγότερη ενέργεια.



Σχήμα 3.1(β) Δομή με υβριδικό έλεγχο.

Παρόμοιοι τρόποι εξοικονόμησης πόρων ενέργειας και ελέγχου μπορεί να επιτευχθούν με τη χρήση του ημιενεργού σχεδιασμού ελέγχου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 (γ), όπου οι συσκευές ελέγχου δεν προσθέτουν μηχανική ενέργεια άμεσα στη δομή, με αποτέλεσμα την οριοθέτηση των εισροών – εκροών ενέργειας και την εγγυημένη σταθεροποίηση τους. Οι ημιενεργές συσκευές ελέγχου αντιμετωπίζονται συχνά ως ελέγξιμες παθητικές συσκευές.



Σχήμα 3.1(γ) Δομή με ημιενεργό έλεγχο.

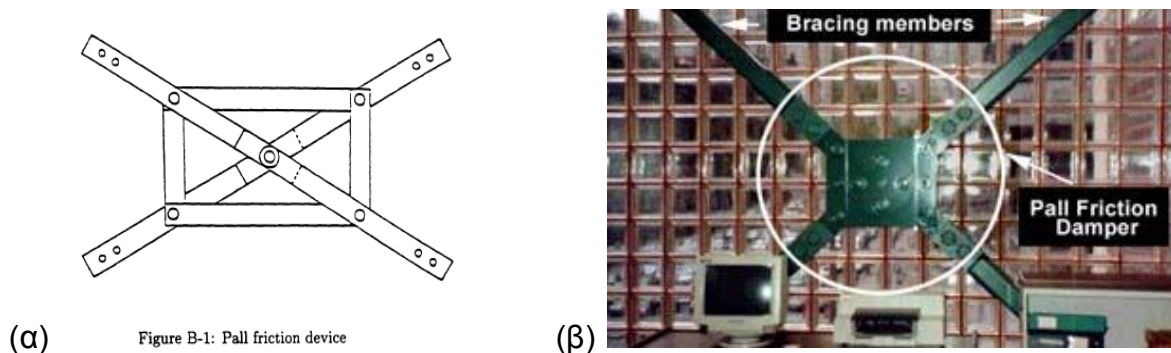
Ένα δεύτερο πλεονέκτημα των υβριδικών και ημιενεργών συστημάτων ελέγχου είναι ότι, στην περίπτωση μιας διακοπής ρεύματος, τα παθητικά στοιχεία ελέγχου προσφέρουν ένα βαθμό προστασίας, αντίθετα από ένα ενεργό σύστημα ελέγχου.

3.2 Παθητικά συστήματα

3.2.1 Τύποι αποσβεστήρων τριβής

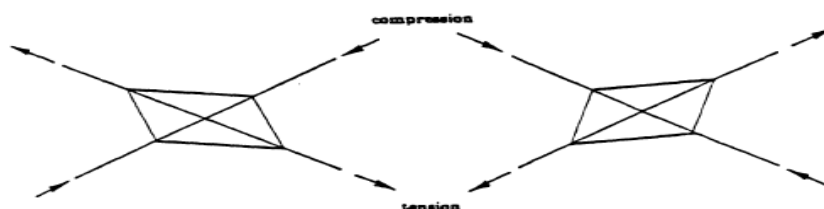
Οι αποσβεστήρες τριβής δημιουργούν ορθογώνιους βρόχους υστέρησης, που παράγονται από τη τριβή Coulomb. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα είδη αυτών των συσκευών.

3.2.1.1 Αποσβεστήρες τριβής (Pall)



Σχήμα 3.2 (α) και (β) Σχέδιο και εφαρμογή του αποσβεστήρα τριβής Pall.

Οι αποσβεστήρες τριβής Pall αναπτύχθηκαν από την A.S. Pall το 1982. Οι λεπτομέρειες του αποσβεστήρα τριβής παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2. Αποτελείται από διαγώνια στοιχεία στήριξης που αλληλεπιδρούν μέσω της τριβής στο σημείο τομής τους, αυτά τα στοιχεία συνδέονται με οριζόντιες και κάθετες συνδέσεις. Αυτές οι συνδέσεις εξασφαλίζουν ότι όταν το φορτίο που εφαρμόζεται μέσω των στηριγμάτων στη συσκευή είναι επαρκές για να αρχίσει η εφελκιστική ολίσθηση διαγωνίως, κατόπιν η διαγώνιος συμπίεσης θα ολισθαίνει επίσης ισόποσα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οι τομείς παραμόρφωσης του αποσβεστήρα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.3.

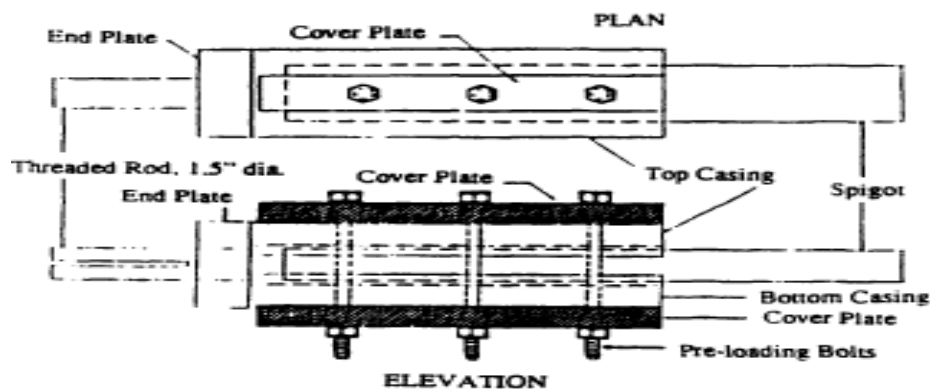


Σχήμα 3.3 Τομείς παραμόρφωσης αποσβεστήρα τριβής Pall.

Η χρησιμοποίηση αυτού του τύπου γεωμετρικής παραμόρφωσης για τη διαγώνια ενίσχυση ενός οικοδομικού πλαισίου που είναι πιθανό να μετατοπιστεί πλευρικά έχει προταθεί ως τρόπος για να είναι δυνατός ο έλεγχος του ενεργειακού διασκεδασμού (Aiken, και λοιποί., 1993). Η αντίσταση τριβής της συσκευής ενεργοποιείται από μια κανονική δύναμη που περνά μέσω ενός μπουλονιού στο σημείο τομής των στοιχείων στήριξης.

3.2.1.2 Αποσβεστήρες τριβής – ολίσθησης (FSD)

Οι αποσβεστήρες τριβής – ολίσθησης (FSD) αποτελούνται από δύο χαλύβδινα περιβλήματα, σχήματος U και ένα στοιχείο ολίσθησης που βρίσκεται μεταξύ των περιβλημάτων (σχήμα 3.4). Το κενό διάστημα μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών στοιχείων γεμίζεται με ένα είδος μαξιλαριού που λειτουργεί ως φρένο και η κανονική δύναμη στην επιφάνεια τριβής απορροφάται από τα προεντεταμένα μπουλόνια. Οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του (FSD) εξαρτώνται από την εκ των προτέρων φόρτωση στο μπουλόνι, τη θερμοκρασία, τα ποσοστά ολίσθησης και την ευθυγράμμιση.



Σχήμα 3.4 Σχηματική τομή αποσβεστήρα FSD.

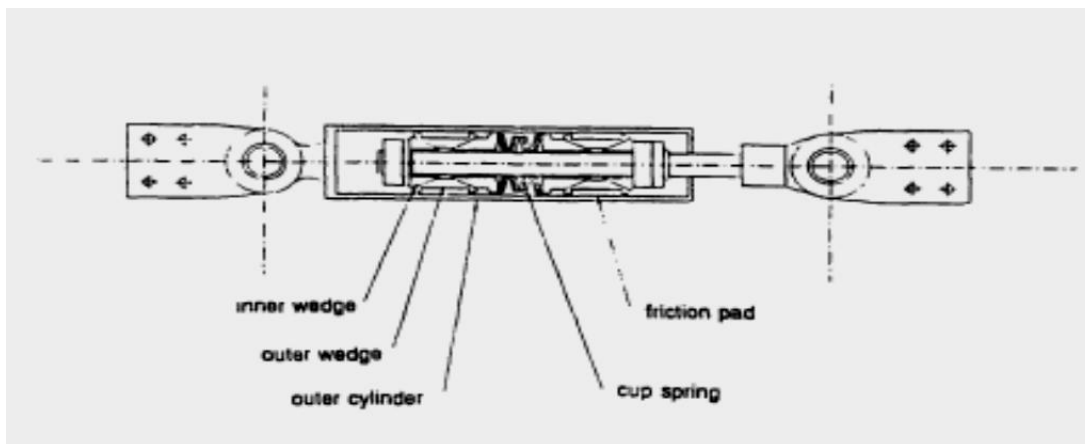
Η εταιρία Flour Daniel ανέπτυξε τις συσκευές περιορισμού διάχυσης της ενέργειας (EDR – Energy Dissipating Restrains), αρχικά, ως συσκευές περιορισμού για την υποστήριξη συστημάτων σωληνώσεων στις εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας. Ο μηχανισμός του EDR χρησιμοποιεί την τριβή ολίσθησης, μέσα σε ένα συγκεκριμένο φάσμα κίνησης, με ένα σημείο τερματισμού στα όρια του φάσματος.

Τα χαρακτηριστικά της συσκευής είναι η αυτό-δυνατότητα επαναφοράς (self-centering), η οποία τείνει να περιορίσει τα μόνιμα αντισταθμιστικά οφέλη αν η κατασκευή τείνει να παραμορφωθεί ανελαστικά. Σε αυτό το σχέδιο η δύναμη τριβής και ως εκ τούτου η ενέργεια διαχέεται αναλογικά σε σχέση με την μετατόπιση. Για αυτούς τους λόγους οι συσκευές EDR μπορούν να είναι αποτελεσματικές σε χαμηλά επίπεδα σεισμικών εισροών ή σε φορτία ανέμων, ενώ συγχρόνως μπορούν να είναι αποτελεσματικές στα υψηλά επίπεδα σεισμικών εισροών. Διαφορετικοί τύποι υστερητικής συμπεριφοράς είναι δυνατοί, ανάλογα με το σταθερό ελατήριο του πυρήνα, του αρχικού φορτίου ολίσθησης, της διαμόρφωσης του πυρήνα και του

μεγέθους του διάκενου. Επιπλέον όταν το φορτίο ολίσθησης αυξάνεται, η χρήση των συσκευών EDR θα οδηγήσει σε συνεπή μείωση της σχετικής τάσης και μετατόπισης. Οι τάσεις επιτάχυνσης δεν είναι καλά καθορισμένες (Aiken, και λοιποί, 1993).

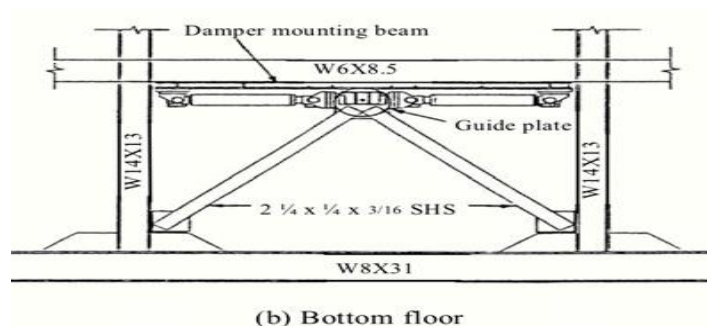
3.2.1.3 Αποσβεστήρες τριβής Sumimoto

Οι αποσβεστήρες τριβής Sumimoto σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν από τη Sumimoto Metal Industries, Ltd, στην Ιαπωνία, και χρησιμοποιήθηκαν αρχικά ως αποσβεστήρες στις ράγες των τριαινών. Η τριβή σε αυτόν τον αποσβεστήρα προκαλείται από την ολίσθηση μιας πλάκας από κράμα χαλκού, στην οποία παρεμβάλλονται κομμάτια γραφίτη, ενάντια στο εσωτερικό ενός κυλίνδρου (σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 Σχηματική τομή αποσβεστήρα τριβής (Sumimoto).

Σημειώνεται ότι ο βρόγχος υστέρησης του αποσβεστήρα τριβής Sumimoto μοιάζει στον νόμο του Coulomb για την τριβή. Στις κατασκευές μπορούν να συνδεθούν στη κάτω πλευρά των δοκών του πατώματος και σε διατάξεις Chevron. Πριν το 1991, ο τύπος αυτού του αποσβεστήρα τριβής ήταν ενσωματωμένος ήδη σε κτήριο τριάντα – ενός ορόφων και σε ένα είκοσι-δύο ορόφων στην Ιαπωνία.



Σχήμα 3.6 Αποσβεστήρες τριβής (Sumimoto) ενσωματωμένοι σε μοντέλο.

3.2.2 Ιξώδεις και ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες (VE).

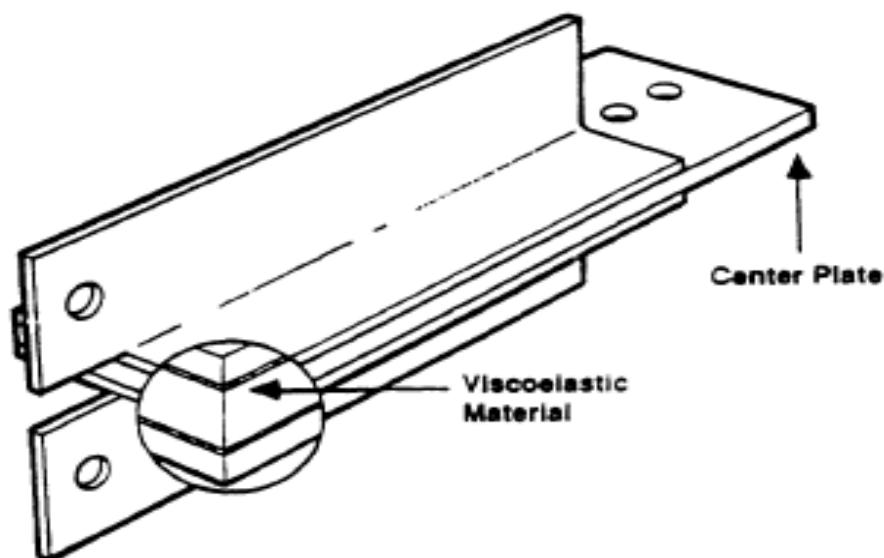
Αν και τα εγγενή χαρακτηριστικά της απόσβεσης δεν έχουν προσδιοριστεί, οι πολιτικοί μηχανικοί χρησιμοποιούν τις συσκευές διάχυσης ενέργειας για να μειώσουν τη δόνηση στις οικοδομές. Συνήθως εξετάζεται το 2% ως 5% της κρίσιμης απόσβεσης, σε μία γραμμική ανάλυση απόκρισης ενός τυπικού κτηρίου. Σύμφωνα με τον Hanson (1993), η αυξανόμενη απόσβεση έχει σημαντική επίδραση στη δυναμική απόκριση του συστήματος μόνο όταν η συχνότητα διέγερσης κυμαίνεται στο 20% του εύρους φάσματος της φυσικής συχνότητας του συστήματος, που σημαίνει ότι η προσθήκη αποσβεστήρων θα είναι αποτελεσματική εάν η διέγερση βρίσκεται σε αυτό το εύρος.

Ιξώδεις συσκευές:

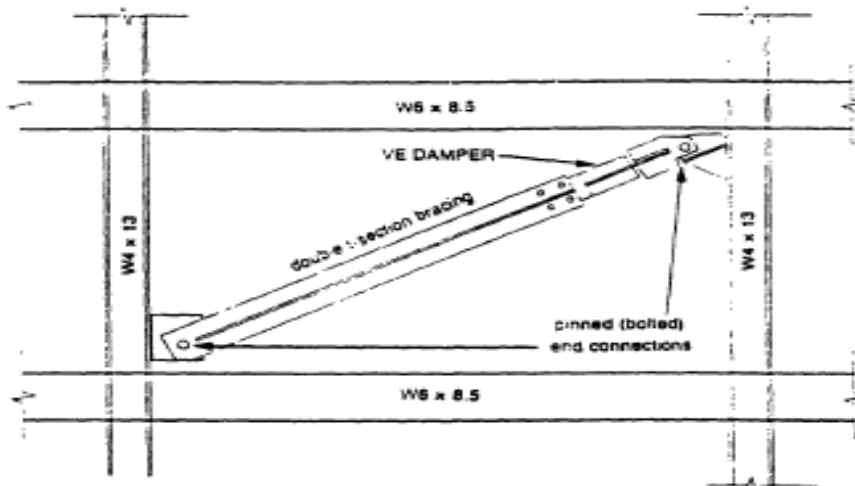
Αυτές οι συσκευές ακολουθούν τις γραμμικές ιξώδεις υποθέσεις απόσβεσης. Οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτές τις συσκευές εξαρτώνται από το συντελεστή απόσβεσης, γ , και τη μέγιστη σχετική ταχύτητα.

Ιξωδοελαστικές συσκευές:

Οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτές τις συσκευές εξαρτώνται από την δυσκαμψία, τη μέγιστη σχετική μετατόπιση της συσκευής, την αποτελεσματικότητα της απόσβεσης και τη μέγιστη σχετική ταχύτητα. Ένας ιξωδοελαστικός αποσβεστήρας παρουσιάζεται στα σχήματα 3.7 και 3.8.



Σχήμα 3.7 Ιξωδοελαστικός αποσβεστήρας VE(Chang,1993).



Σχήμα 3.8 Μοντέλο ιξωδοελαστικού αποσβεστήρα VE (Aiken,1993).

Ιδιότητες ιξωδοελαστικού αποσβεστήρα:

Σύμφωνα με τον Chang (1993), η σχέση τάσης – παραμόρφωσης ενός ιξωδοελαστικού αποσβεστήρα υπό αρμονικά φορτία μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο:

$$\sigma = \gamma_0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (2.1)$$

Όπου το σ είναι το εύρος τάσης (*stress amplitude*), το γ είναι το εύρος διάτμησης (*strain amplitude*) και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα, το G' και το G'' ορίζονται ως το διατμητικό μέτρο αποθήκευσης (*shear storage modulus*) και το διατμητικό μέτρο απώλειας (*shear loss modulus*) αντίστοιχα.

Οι δύο παράμετροι, G' και το G'' καθορίζουν την χωρητικότητα ενέργειας (*energy capacity*) των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων. Το μέτρο αποθήκευσης G' καθορίζει την δυσκαμψία αποθήκευσης του αποσβεστήρα, όπως:

$$K' = \frac{G'A}{\lambda}$$

όπου A είναι η συνολική επιφάνεια διάτμησης και λ το πάχος του στρώματος του ιξωδοελαστικού (VE). Ο λόγος του G' στο G'' είναι ο συντελεστής απώλειας (η). Η αντίστοιχη δομική απόσβεση ενός ιξωδοελαστικού αποσβεστήρα δομής εξαρτάται από το K' και το R . Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων (VE Dampers) είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η συχνότητα δόνησης, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης και το εύρος παραμόρφωσης. Για παράδειγμα, εάν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται η αποδοτικότητα των ιξωδοελαστικών αποσβεστήρων μειώνεται. Εκτός αυτού, εάν αυξηθεί η συχνότητα δόνησης και ανάλογα αυξηθεί και η τιμή των G' και G'' τότε δεν

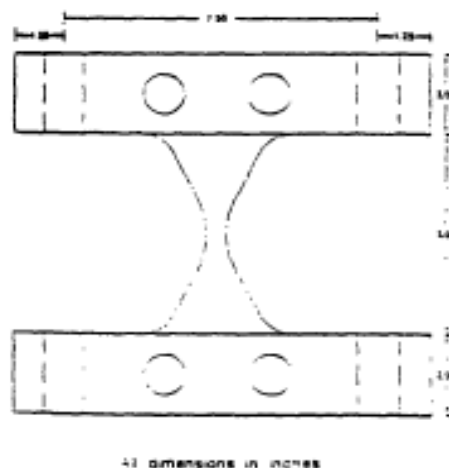
υπάρχει καμιά μεταβολή του συντελεστή απωλειών, όταν δηλαδή υπάρχουν μέτριες αλλαγές στη συχνότητα και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται στους διαφορετικούς τύπους διατάξεων απόσβεσης δεν είναι οι ίδιες. Στους ιξώδεις και ιξωδοελαστικούς αποσβεστήρες η μέγιστη δύναμη είναι ανεξάρτητη από τις μέγιστες σχετικές μετατοπίσεις και τις ταχύτητες. Από τη άλλη πλευρά στις συσκευές τριβής και παραμόρφωσης, η μέγιστη δύναμη εξαρτάται από τη δύναμη τριβής σχεδιασμού ή την απόδοση της δύναμης συν την σκλήρυνση του στελέχους (Hanson, 1993).

3.2.3 Υστερητικοί αποσβεστήρες

Τα πρόσθετα στοιχεία απόσβεσης και δυσκαμψίας (ADAS – Added Damping and Stiffness) έχουν σχεδιαστεί για να διαχέουν την ενέργεια μέσα από την πλαστική διαρροή-παραμόρφωση των πλακών μαλακού χάλυβα. Ένα ερευνητικό πρόγραμμα στο Earthquake Engineering Research Center του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στο Μπέρκλεϋ χρηματοδοτήθηκε για να ερευνηθεί η συμπεριφορά μεμονωμένων στοιχείων ADAS κάτω από δυναμική φόρτιση, και για να προταθούν βελτιώσεις σε μία τριώροφη κατασκευή με δομικό φορέα από χαλύβδινα πλαίσια (MRF) που αναβαθμίστηκε με τα στοιχεία ADAS και υποβλήθηκε στον επιτραπέζιο προσομοιωτή σεισμικής δράσης (Aiken, και λοιποί, 1993).

Τα στοιχεία ADAS αποτελούνται από πολλαπλές πλάκες μαλακού χάλυβα, μορφής-X, διαμορφωμένες παράλληλα μεταξύ της κορυφής και του κατώτατου ορίου σύνδεσης (σχήμα 3.9). Τα στοιχεία ADAS που χρησιμοποιήθηκαν στα δοκιμαστικά τεστ έγιναν με τη χρήση χάλυβα βαθμού ASTM A – 36 και αποτελούνταν είτε από τέσσερις, έξι ή και επτά πλάκες.



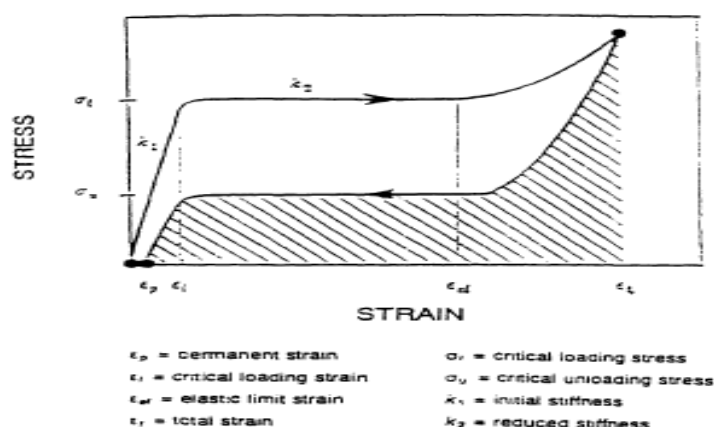
Σχήμα 3.9 Στοιχείο ADAS (Aiken, 1993)

Το ιδιαίτερο πλεονέκτημα μίας πλάκας μορφής-Χ είναι ότι, όταν παραμορφώνεται στην πλαστική περιοχή, η διαρροή διανέμεται ομοιόμορφα, επιπλέον όταν παραμορφωθεί πλαστικά θα επηρεαστούν μόνο οι άκρες της. Αυτή η συγκέντρωση είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη από την άποψη του ποσού ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί σε ένα τέτοιο σχέδιο παραμόρφωσης και από την έμφυτη έλλειψη σταθερότητας και από την επαναληπτικότητα στην πλαστική περιοχή. Οι αρχικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των στοιχείων ADAS είναι η ελαστική ακαμψία της συσκευής (K_e), δύναμη διαρροής (R_y), μετατόπιση διαρροής (A_y).

3.2.4 Αποσβεστήρες με μορφομνήμονα κράματα νικελίου-τιτανίου(Nitinol)

Η επίδραση της μνήμης στα μέταλλα παρατηρήθηκε στη δεκαετία του '30. Το 1962 οι ερευνητές στο Naval Ordnance Laboratory παρατήρησαν το φαινόμενο στο νικέλιο-τιτάνιο (NiTi ή Nitinol). Τα μορφομνήμονα κράματα (SMA's – Shape Memory Alloys) μπορούν να υποβληθούν σε μεγάλες πιέσεις και να ανακτήσουν στη συνέχεια την αρχική τους μορφή. Η βάση για αυτήν την συμπεριφορά είναι ότι, παρά την παραμόρφωση με το συνηθισμένο τρόπο των μετάλλων, τα μορφομνήμονα κράματα υποβάλλονται στους μετασχηματισμούς από την ωστενιτική στη μαρτενσιτική φάση κρυστάλλου. (Aiken, και λοιποί, 1993)

Στις περισσότερες πρόσφατες εμπορικές εφαρμογές η αλλαγή φάσης προκαλείται μέσω της θερμοκρασίας, εντούτοις μπορεί και μέσω της πίεσης να προκληθεί σε θερμοκρασία δωματίου, εάν το Nitinol έχει την κατάλληλη σύνθεση και επεξεργασία. Αυτό το αγχώδες (stress-induced) φαινόμενο αλλαγής φάσης αναφέρεται ως υπερελαστικότητα. Το σχήμα 3.10 δείχνει τη θεωρητική συμπεριφορά των Nitinol όταν αυτά εφελκούνται. Το βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι εάν είναι λιγότερη από την E_{el} δεν υπάρχει καμιά μόνιμη παραμόρφωση.



Σχήμα 3.10 Διάγραμμα υπερελαστικότητας

Ο Aiken δοκίμασε ένα Nitinol καλώδιο που ενσωματώθηκε σε σειρά ως τμήμα ενός διαγώνια ενισχυμένου συστήματος σε ένα μοντέλο. Στη διάταξη αυτή, το Nitinol φορτίστηκε μέχρι το σημείο που επέτρεψε στον πλήρη όγκο

του Nitinol να απελευθερώσει αποτελεσματικά την ενέργεια. Ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό του Nitinol είναι ότι η δύναμη του αυξάνεται όταν το E_{ei} ξεπερνιέται. Αυτό σημαίνει ότι εάν η προβλεπόμενη διέγερση σεισμού επρόκειτο να ξεπεραστεί, η κατασκευή θα σκλήραινε αντί να παραμείνει πλαστική.

Το Nitinol έχει καταδείξει μια πρόσθετη δυνατότητα παραμόρφωσης επανειλημμένα και δεν χάνει την προφόρτιση. Ο Aiken απέδειξε ότι η απόσβεση στη δομή αυξήθηκε από 0.5 σε 3.0% και σε όλες τις δοκιμές η απόκριση μειώθηκε, όταν έγινε χρήση του Nitinol. Ένας Nitinol μηχανισμός διασποράς ενέργειας έχει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα το να είναι μηχανικά απλός και αξιόπιστος.

3.3 Ημιενεργά συστήματα (semi-active damper systems)

Οι στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται στις ημιενεργές συσκευές, συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των παθητικών και ενεργών συστημάτων ελέγχου. Η ιδιαίτερη προσοχή που δίνεται στον συγκεκριμένο τομέα τα τελευταία χρόνια μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι ημιενεργές συσκευές ελέγχου προσφέρουν την προσαρμοστικότητα των ενεργών συσκευών ελέγχου χωρίς να απαιτούν σχετικά μεγάλες πηγές ισχύος. Στην πραγματικότητα, πολλές από αυτές τις συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν με την χρήση μπαταριών, το οποίο είναι πολύ σημαντικό, κατά την διάρκεια σεισμικών γεγονότων, όταν υπάρχει η πιθανότητα να αποτύχει η κύρια πηγή ισχύος στη δομή. Οι εκτενείς μελέτες έχουν δείξει ότι τα κατάλληλα εφαρμοσμένα ημιενεργά συστήματα λειτουργούν πολύ καλύτερα από τα παθητικά και έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν τα πλεονεκτήματα των πλήρως ενεργών συστημάτων, επιτρέποντας κατά συνέπεια την δυνατότητα της αποτελεσματικής μείωσης της απόκρισης κατά την διάρκεια φόρτισης ποικίλων δυναμικών φορτίων.

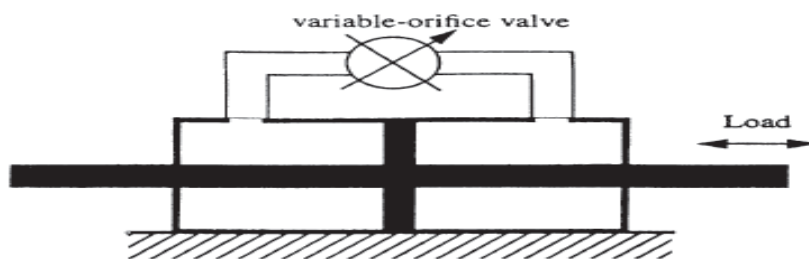
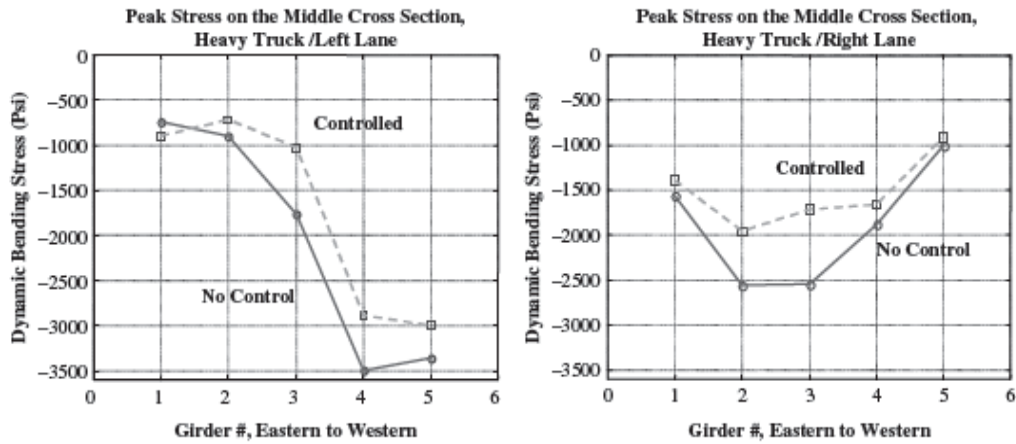


Figure 1.10 Schematic of variable-orifice damper

Σχήμα 3.11 Σχηματική τομή αποσβεστήρα με ηλεκτρονική βαλβίδα μεταβλητής ροής.

Ένας λόγος επίτευξης της ημιενεργού απόσβεσης σε μια συσκευή, είναι η χρήση μιας ελεγχόμενης, ηλεκτρομηχανικής βαλβίδας μεταβλητής ροής, ικανή να μεταβάλλει την αντίσταση στη ροή ενός συμβατικού υδραυλικού αποσβεστήρα. Ένα σχήμα τέτοιας συσκευής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11. Όπως περιγράφεται από τους Sack και Patten (1993), πραγματοποιήθηκαν πειράματα στα οποία ένας υδραυλικός αποσβεστήρας με ελεγχόμενη ροή τέθηκε σε εφαρμογή σε ένα μοντέλο γέφυρας

μονής λωρίδας, για να αποσβέσει την ενέργεια που προκαλείτο από την κυκλοφορία των οχημάτων (σχήμα 3.12), έπειτα πραγματοποιήθηκε πείραμα μεγάλης κλίμακας σε γέφυρα του διαπολιτειακού αυτοκινητόδρομου I -35 προς απόδειξη της ανωτέρω τεχνολογίας (Patten, 1998, Patten και λοιποί., 1999, Kuehn και λοιποί., 1999), όπως; παρουσιάζεται στο σχήμα 3.13.

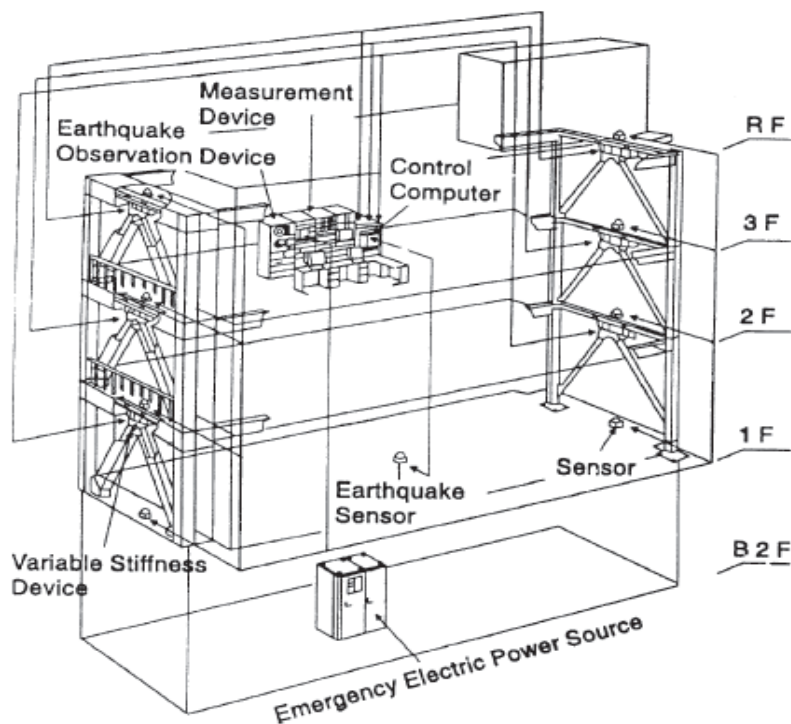


Σχήμα 3.12 Σύγκριση μέγιστης πίεσης για τα βαρέα φορτηγά.



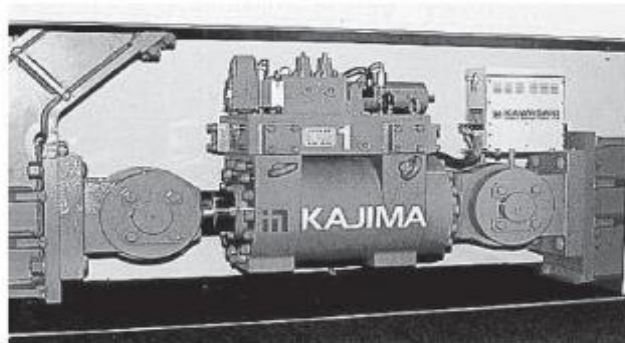
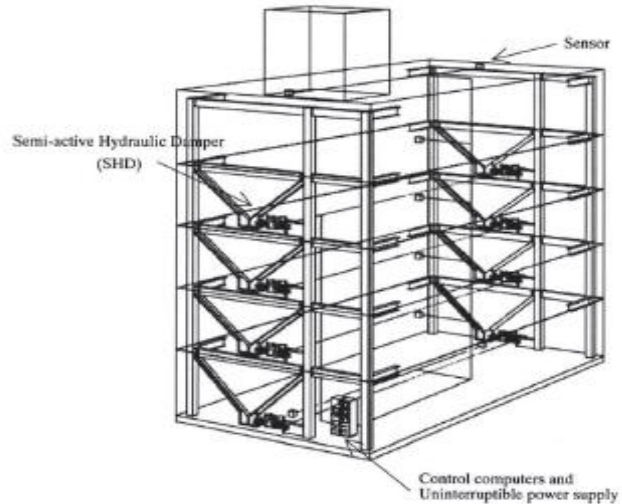
Σχήμα 3.13 Αυτοκινητόδρομος I – 35 με ημιενεργούς αποσβεστήρες.

Αυτό το πείραμα αποτελεί την πρώτη πραγματικού μεγέθους εφαρμογή ενεργού δομικού ελέγχου στις ΗΠΑ.



Σχήμα 3.14 Διαμόρφωση συστήματος SAVS (Kurata, 1999)

Σχεδιάστηκε αρχικά ως μία συσκευή μεταβαλλόμενης ακαμψίας. Ένας υδραυλικός αποσβεστήρας ελεγχόμενης ροής, πραγματικού μεγέθους, εφαρμόστηκε σε ένα ημιενεργό σύστημα μεταβαλλόμενης ακαμψίας (SAVS - semi-active variable-stiffness system) για να ερευνηθεί τον ημιενεργό έλεγχο στο Kabori Research Complex (Kabori και λοιποί, 1993, Kagamata και Kabori, 1994). Ένα γενικευμένο σύστημα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.14 όπου οι συσκευές SAVS εγκαταστάθηκαν στις δύο πλευρές της δομής σε εγκάρσια κατεύθυνση. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλυτικών και πειραματικών μελετών δείχνουν ότι αυτή η συσκευή είναι αποτελεσματική στη μείωση των δομικών αποκρίσεων. Πιο πρόσφατα, ένας ημιενεργός υδραυλικός αποσβεστήρας εγκαταστάθηκε στο κτήριο Kajima Shizuoka στην Ιαπωνία. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15, οι ημιενεργοί υδραυλικοί αποσβεστήρες εγκαθίστανται μέσα στους τοίχους και στις δύο πλευρές του κτηρίου για να λειτουργήσουν ως βάση αρωγής από τις μετασεισμικές καταστάσεις (Kabori, 1998, Kurata και λοιποί, 1999). Κάθε αποσβεστήρας περιέχει μία βαλβίδα, η οποία ελέγχει την ροή, μια βαλβίδα αντεπιστροφής και ένα συσσωρευτή, μια τέτοια συσκευή μπορεί να αναπτύξει δύναμη απόσβεσης 1000 kN. Στο σχήμα 1.15 παρουσιάζεται ένα δείγμα των αποτελεσμάτων από την ανάλυση απόκρισης, τα οποία έχουν βασιστεί σε επιλεγμένα σχέδια ελέγχου και σε διάφορες σεισμικές φορτώσεις σε μία κλίμακα ταχύτητας έως τα 50 cm/s, μαζί με ένα προσομοιωτή κυμάτων Tokai.



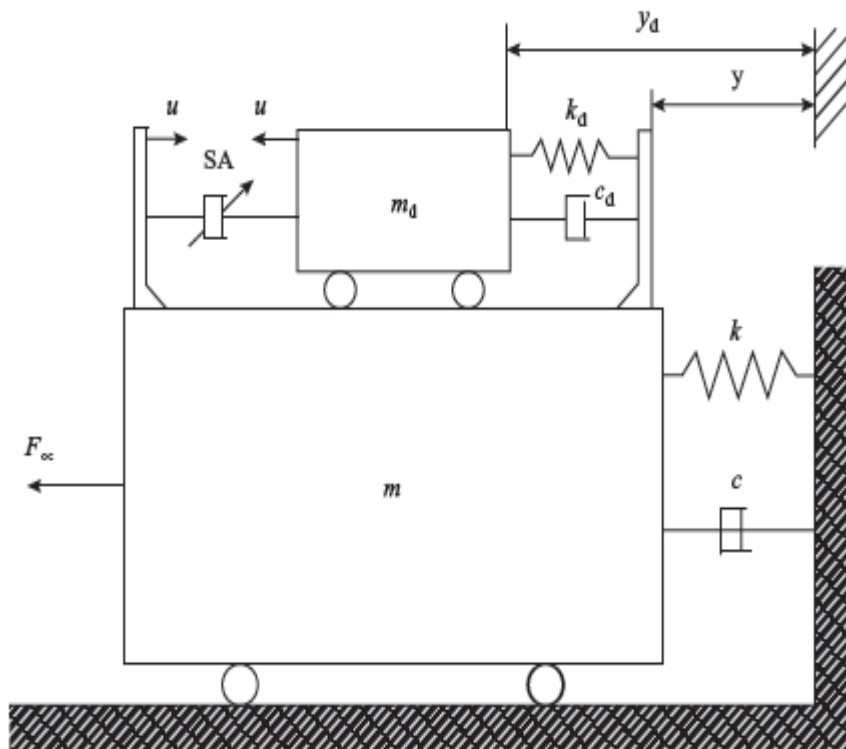
Σχήμα 3.15 Το κτήριο Shizuoka Kajima και οι ημιενεργοί αποσβεστήρες που έχουν εφαρμοστεί σε αυτό.

Έχει παρατηρηθεί ότι και οι δύο διαμητικές δυνάμεις και η μετατόπιση και ολίσθηση των ορόφων μειώνεται σημαντικά όταν ενεργοποιείτε ο ενεργός έλεγχος. Οι διαμητικές δυνάμεις είναι περιορισμένες ανάμεσα στα όρια ελασικότητας ενώ, χωρίς την ύπαρξη ελέγχου, θα μπορούσαν να φτάσουν στο όριο πλαστιμότητας.

3.3.1 Ημιενεργοί ρυθμιζόμενοι αποσβεστήρες μάζας (TMD)

Το 1983, ο Hrovat και λοιποί, πρότεινε ένα ημιενεργό αποσβεστήρα TMD για τον έλεγχο των δονήσεων που προκαλούνται από τους ισχυρούς ανέμους στα ψηλά κτήρια (σχήμα 3.16). Αυτό το σύστημα αποτελείται από ένα TMD και ένα ενεργοποιητή που εγκαθίσταται επάνω στην κύρια δομή. Ο ημιενεργός αποσβεστήρας TMD έχει μάζα m_d , απόσβεση c_d και ακαμψία k_d , ενώ η κύρια δομή αντιπροσωπεύεται από μάζα m , απόσβεση c , και ακαμψία k . Ο ενεργοποιητής που συμβολίζεται με SA, παράγει τη δύναμη ελέγχου u . Η δύναμη ελέγχου u ρυθμίζει την απόσβεση του αποσβεστήρα TMD, έτσι ώστε να είναι πάντα η βέλτιστη σε σχέση με τη συνεχώς μεταβαλλόμενη διέγερση. Δεδομένου ότι η μάζα του TMD m_d είναι πολύ μικρότερη από τη μάζα m και η ενεργή δύναμη ελέγχου χρησιμοποιείτε για να αλλάξει τη δύναμη απόσβεσης του TMD (η οποία είναι πολύ μικρότερη από την δύναμη αδράνειας του TMD), απαιτείται ένα μικρό ποσοστό ισχύος από μια εξωτερική πηγή

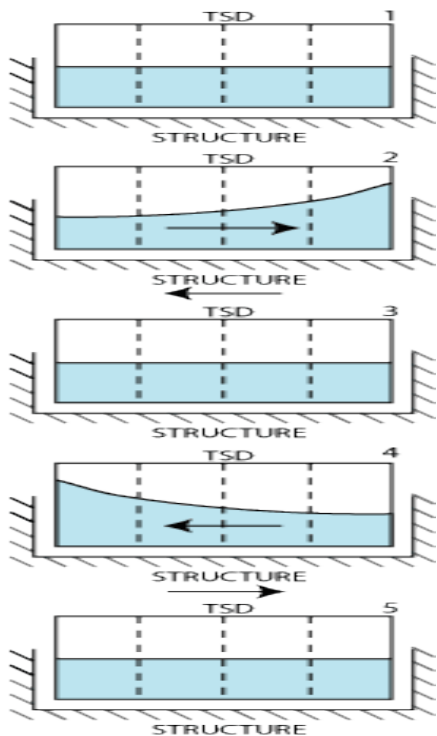
τροφοδοσίας για να επιτευχθεί αυτή η προσαρμογή. Οι ημιενεργοί αποσβεστήρες TMD βρίσκονται ακόμα στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης.



Σχήμα 3.16 Ημιενεργός ρυθμιζόμενος αποσβεστήρας TMD.

3.3.2 Ημιενεργοί ρυθμιζόμενοι αποσβεστήρες με υγρό (TSD)

Ένας ημιενεργός αποσβεστήρας TSD απλά ρυθμίζει τις βραχυχρόνιες διακυμάνσεις ρευστότητας του υγρού που βρίσκεται σε λειτουργία. Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει τους ημιενεργούς αποσβεστήρες TSD υπό τη μορφή σφαιρικής δεξαμενής υγρού και αυτούς υπό τη μορφή στήλης. Ο TSD αποσβεστήρας προτάθηκε από τον Lou το 1994, με την πρόσθεση ενός συνόλου περιστρεφόμενων διαφραγμάτων στη σφαιρική δεξαμενή υγρού. Για τη ρύθμιση του προσανατολισμού αυτών των διαφραγμάτων βάσει των προκαθορισμένων αλγορίθμων χρησιμοποιείται ένας ενεργοποιητής. Όταν τα διαφράγματα είναι σε οριζόντια θέση, η δεξαμενή υγρού διατηρεί το αρχικό μήκος της. Όταν τα διαφράγματα είναι σε κάθετη θέση, η δεξαμενή υγρού διαιρείται σε έναν αριθμό μικρότερων δεξαμενών. Η φυσική συχνότητα του υγρού που περιέχεται στη δεξαμενή μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος αυτής, ο συντονισμός του TSD μπορεί να ελεγχθεί με τη περιστροφή των διαφραγμάτων στην επιθυμητή κεκλιμένη θέση. Με αυτόν τον μηχανισμό, κανένας ισχυρός ενεργοποιητής δεν απαιτείται, αφού το μόνο που κάνει είναι να περιστρέφει τα ελαφριά διαφράγματα. Η απόδοση του TSD μπορεί έτσι να βελτιωθεί με χαμηλό κόστος. Ο



Σχήμα 3.17 Αναπαράσταση διαδικασίας λειτουργίας ενός αποσβεστήρα TSD (Tuned Sloshing Damper)

ημιενεργός αποσβεστήρας στήλης (column) TSD, όπως προτάθηκε από τους Yalla και Karrem to 2002, χρησιμοποιεί ένα μεταβλητό στόμιο σε ένα αποσβεστήρα στήλης TSD για να διατηρήσει τους βέλτιστους όρους απόσβεσης. Ένας ηλεκτρονικός ενεργοποιητής πεπιεσμένου αέρα (electropneumatic actuator) χρησιμοποιείται ως οδηγός μιας σφαιρικής βαλβίδας, για να αλλάξει τη διατομή του αποσβεστήρα στήλης TSD σύμφωνα με τον αλγόριθμο ελέγχου, προσαρμόζοντας τις ιδιότητες του αποσβεστήρα για να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση. Παρομοίως με τους ημιενεργούς αποσβεστήρες TMD και οι TSD βρίσκονται στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης.

3.3.3 Ημιενεργοί αποσβεστήρες τριβής

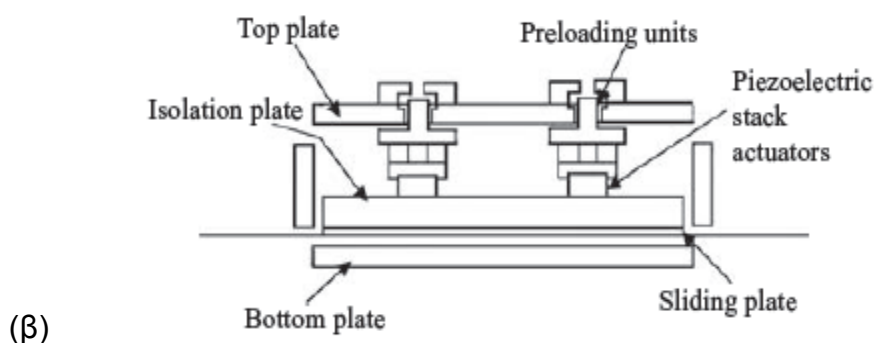
Οι Akbay και Aktan ανέπτυξαν ένα ημιενεργό αποσβεστήρα τριβής το 1991 με τη χρήση ενός ηλεκτρομηχανικού ενεργοποιητή. Αυτή η συσκευή βασίζεται σε ένα αποσβεστήρα τριβής που αποτελείται από ένα φορτισμένο εκ των προτέρων άξονα τριβής που συνδέεται άκαμπτα στην ενισχυμένη με μεταλλικούς συνδέσμους δομή. Οι σύνδεσμοι αυτοί έχουν ως στόχο την φόρτιση εκ των προτέρων με μια φυσική δύναμη στο σημείο επαφής έτσι ώστε να υπάρχει απώλεια ενέργειας μέσω της τριβής. Ένας ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται για να οδηγήσει το έμβολο του ενεργοποιητή, το οποίο εφαρμόζει πίεση (θλιπτική δύναμη) στο σημείο τριβής. Δεδομένου ότι η δύναμη τριβής είναι ανάλογη με την κανονική δύναμη, η ρύθμιση της μετακίνησης του εμβόλου του ενεργοποιητή ελέγχει την ικανότητα της δύναμης τριβής και απόσβεσης της συσκευής. Με τη ρύθμιση της κανονικής δύναμης συμπίεσης μέσω ενός βέλτιστου αλγόριθμου ελέγχου, η τριβή ρυθμίζεται μηχανικά ώστε να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση.

Εικόνα 1: Απεικόνιση αποσβεστήρα σε κατάσταση ηρεμίας.

Εικόνες 2-4: Η κατασκευή ξεκινάει να ταλαντεύεται λόγω ανέμου. Ο κυματισμός του υγρού του αποσβεστήρα κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κατασκευής λόγω της αδράνειας του νερού που προκαλείται από τη βαρύτητα. Η κίνηση του υγρού προκαλεί απόσβεση της ταλάντευσης εξαιτίας του περιορισμού της ροής από τα διαχωριστικά της δεξαμενής. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται μέχρι να σταματήσει ο άνεμος. Η ταλάντωση της κατασκευής μειώνεται.

Εικόνα 5: η κατασκευή βρίσκεται πάλι σε ηρεμία μετά το τέλος εκδήλωσης του ανέμου.

Οι Chen και Chen ανέπτυξαν έναν άλλο τύπο ημιενεργού αποσβεστήρα τριβής με τη χρήση των ενεργοποιητών PZT (Piezoelectric Zirconium and Titanium). Λόγω της ισχυρής ηλεκτρομηχανικής τους ιδιότητας, τα έξυπνα υλικά PZT μπορούν να παραγάγουν ένα σημαντικό ποσοστό δύναμης όταν εκτίθενται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο και υπόκεινται σε περιορισμό της κίνησης τους. Με αυτήν την έξυπνη ιδιότητα τους, τα υλικά PZT έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στις μηχανικές και αεροδιαστημικές βιομηχανίες για να καταστείλουν την υπερβολική δόνηση των κατασκευών. Εντούτοις, η περιορισμένη ικανότητα ενεργοποίησης των PZT τους καθιστά ανίκανους να ελέγξουν άμεσα την απόκριση μεγάλων κατασκευών λόγω του σεισμικού φορτίου ή του φορτίου ανέμου. Κατά συνέπεια, το έξυπνο χαρακτηριστικό γνώρισμα των υλικών PZT υιοθετήθηκε για να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των παθητικών αποσβεστήρων τριβής. Αυτή η ιδέα οδήγησε σε ένα πιεζοηλεκτρικό αποσβεστήρα τριβής (PFD). Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17, ο PFD αποσβεστήρας αποτελείται από τέσσερις μονάδες προφόρτισης, από μια δεσμίδα τεσσάρων ενεργοποιητών PZT, το τμήμα τριβής και ένα κιβώτιο χάλυβα που στεγάζει τα παραπάνω τμήματα. Το τμήμα τριβής αποτελείται από ένα λεπτό φύλλο χάλυβα με ένα υλικό τριβής (όπως η επένδυση των φρένων) που είναι συνδεδεμένο και στις δυο πλευρές του χαλύβδινου φύλλου. Όταν ο αποσβεστήρας PFD εγκαθίσταται σε μια κατασκευή, η σχετική μετακίνηση της βάσης μόνωσης και της κατώτατης βάσης προκαλεί τριβή και απελευθερώνει έτσι την ενέργεια.



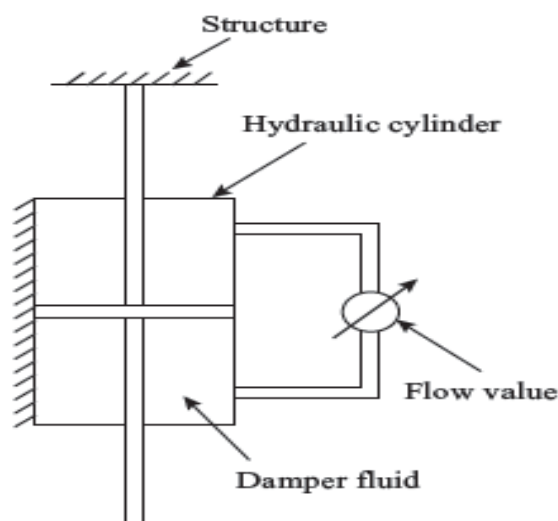
Σχήμα 3.17 (α) Πιεζοηλεκτρικός αποσβεστήρας τριβής και (β) σχηματική τομή.

Η δέσμη των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών είναι τοποθετημένη απευθείας επάνω στη βάση απομόνωσης και η δύναμη ενεργοποίησης χρησιμεύει ως μια φυσική δύναμη προς την επιφάνεια τριβής. Ρυθμίζοντας το ηλεκτρικό πεδίο στους ενεργοποιητές PZT, σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο αλγόριθμο, η φυσική δύναμη και η δύναμη ελέγχου τριβής ρυθμίζονται για να ενισχύσουν σε πραγματικό χρόνο την αποτελεσματικότητα της συσκευής τριβής. Ένας ημιενεργός αλγόριθμος ελέγχου αναπτύχθηκε για το PFD, οι δοκιμές προσομοίωσης της κινήσεως του εδάφους πραγματοποιήθηκαν για ένα τριώροφο μοντέλο μεταλλικής κατασκευής με τον αποσβεστήρα PFD να έχει εγκατασταθεί μεταξύ των συνδέσμων (σχήματος K) και του πρώτου ορόφου. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις και τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο PFD όχι μόνο καταστέλλει αποτελεσματικά τη δομική δόνηση αλλά και προσαρμόζεται στις ποικίλες διεγέρσεις ασθενών και ισχυρών σεισμών.

Οι ημιενεργοί αποσβεστήρες τριβής μπορούν αποδεδειγμένα να εγδυθούν την απόσβεση ενέργειας μέσω της τριβής. Το προσαρμοστικό χαρακτηριστικό γνώρισμα τους ενισχύει την συμπεριφορά του αποσβεστήρα, επίσης λειτουργούν με χαμηλό ποσοστό ενέργειας και δεν προκαλούν αστάθεια στις ελεγχόμενες κατασκευές. Απαιτείται βέβαια περισσότερη έρευνα για την εφαρμογή τους στην εφαρμοσμένη μηχανική.

3.3.4 Ημιενεργοί αποσβεστήρες δόνησης (Semiactive Vibration Absorbers)

Μια αποτελεσματική μέθοδος για να επιτευχθεί ένας ελέγξιμος αποσβεστήρας είναι να χρησιμοποιηθεί μια μεταβλητή βαλβίδα στομίων για να ρυθμίσει τη ροή του υδραυλικού αποσβεστήρα. Αυτή η ιδέα οδήγησε στην εμφάνιση των ημιενεργών απορροφητών δόνησης (SAVA) που ονομάζονται επίσης και ημιενεργοί υδραυλικοί αποσβεστήρες (SAHD). Όπως παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 3.18, μια τέτοια συσκευή ρυθμίζει την απόσβεση και τη δυσκαμψία.

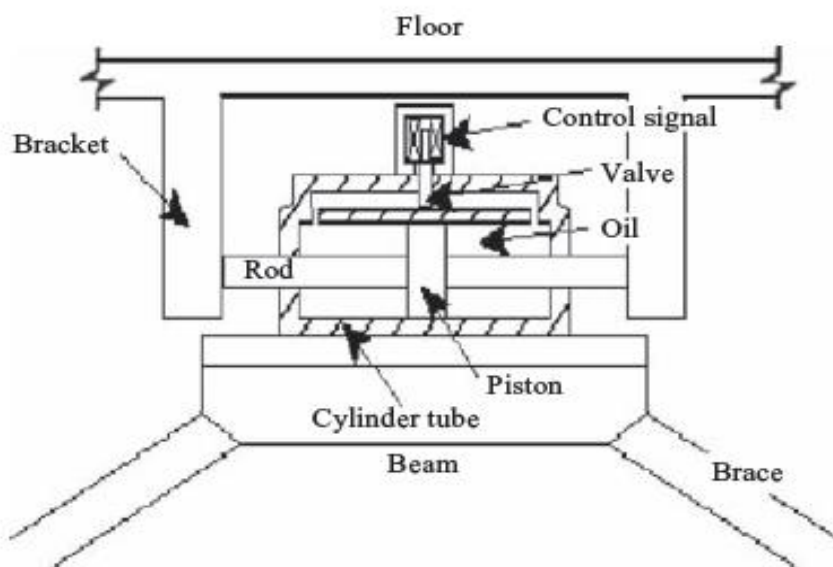


Σχήμα 3.18 Σχηματική τομή του ημιενεργού απορροφητή δόνησης

Η ικανότητα απόσβεσης παράγεται από το ιξώδες ρευστό, και η ακαμψία ρυθμίζεται με το άνοιγμα της βαλβίδας ροής. Εάν η βαλβίδα είναι κλειστή, ο SAVA λειτουργεί ως ελατήριο ακαμψίας. Εάν η βαλβίδα είναι ανοικτή, το ρευστό μπορεί εύκολα να διατρέξει τον σωλήνα και να παρέχει ακαμψία στη δομή. Ο SAVA έχει εφαρμοστεί στα αυτοκίνητα για την βελτίωση της οδήγησης και της σταθερότητας. Οι εφαρμογές των SAVA σε κτήρια και γέφυρες περιλαμβάνουν πειράματα για την αποτελεσματικότητα του σεισμικού ελέγχου με αυτή τη μέθοδο.

3.3.5 Ημιενεργές συσκευές ελέγχου δυσκαμψίας (Semiactive Stiffness Control Devices)

Ένα ημιενεργό σύστημα μεταβλητής ακαμψίας (SAVS) (variable-stiffness system), καλείται επίσης και συσκευή μεταβλητής ακαμψίας (VSD). Όπως παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 3.19, αυτή η συσκευή τοποθετείται σε ένα σύστημα συνδέσμων της δομής. Το VSD αποτελείται από ένα ισοροπημένο υδραυλικό κύλινδρο, ένα πιστόνι ράβδων διπλής δράσης, μια κανονικά κλειστή ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα ελέγχου, και ένα σωλήνα που συνδέει τους δύο κυλινδρικούς θαλάμους. Η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα μπορεί να ρυθμιστεί ανοικτή ή κλειστή. Όταν η βαλβίδα είναι ανοικτή, το υγρό ρέει ελεύθερα και απενεργοποιεί τη σύνδεση της δοκού με το σύνδεσμο, κατά συνέπεια μειώνεται η δομική ακαμψία. Όταν η βαλβίδα κλείνει, το υγρό δεν μπορεί να ρεύσει και κλειδώνει αποτελεσματικά την δοκό με τον σύνδεσμο, αυξάνοντας κατά συνέπεια τη δομική ακαμψία. Με αυτόν τον μηχανισμό, μια συσκευή VSD ρυθμίζει την ακαμψία της δομής ενισχύοντας το σύστημα συνδέσμων, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ηχηρές δομικές αποκρίσεις κατά τη διάρκεια των σεισμών.

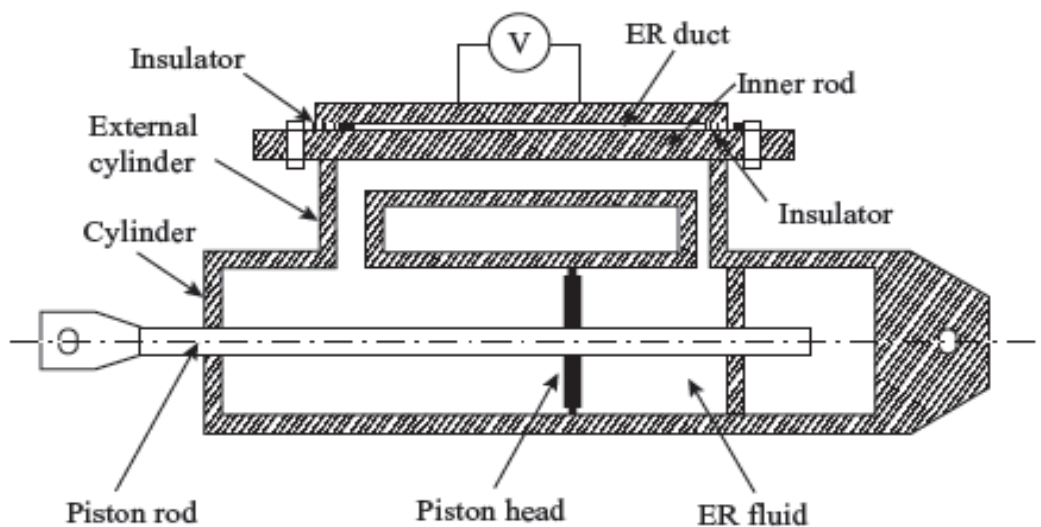


Σχήμα 3.19 Ημιενεργή συσκευή ελέγχου ακαμψίας.

3.3.6 Ηλεκτρορεολογικοί αποσβεστήρες (ER)

Οι αποσβεστήρες ER χρησιμοποιούν έξυπνα ρευστά, τα οποία περιέχουν διηλεκτρικά σωματίδια που συστέλλονται μέσα στα μη αγώγιμα ιξώδη ρευστά (όπως το πετρέλαιο) και απορροφούνται από τα σωματίδια. Όταν το ER ρευστό υποβληθεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, τα διηλεκτρικά σωματίδια πολώνονται και ευθυγραμμίζονται, προσφέροντας έτσι αντίσταση στη ροή.

Τα ER ρευστά είναι σε θέση να υποστούν αντιστρέψιμη αύξηση στην αντίστασης της ροής, μπορούν ανατρεπτικά να αλλάξουν από γραμμικά ιξώδη ρευστά ελεύθερης ροής σε ημι-στερεά με ελεγχόμενη αντοχή διαρροής σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Η ρύθμιση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί επομένως να ρυθμίσει εύκολα τη συμπεριφορά των ρευστών ER.



Σχήμα 3.20 Σχηματική τομή ηλεκτρορεολογικού αποσβεστήρα.

Οι ερευνητές έχουν προτείνει αποσβεστήρες ER που εκμεταλλεύονται την έξυπνη δυνατότητα των ρευστών ER για να ρυθμίσουν την δύναμη απόσβεσης. Η δύναμη απόσβεσης που παράγεται από τον αποσβεστήρα ER ρυθμίζεται από την δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο αλγόριθμο ελέγχου. Ένα δείγμα αποσβεστήρα ER, ο οποίος έχει ένα κύλινδρο που περιέχει μια ισορροπημένη ράβδο εμβόλων και μια κεφαλή εμβόλου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.20. Η κεφαλή του εμβόλου ωθεί το ρευστό του ER μέσω ενός στάσιμου δακτυλιοειδούς αγωγού μεταξύ της εσωτερικής ράβδου και του εξωτερικού κυλίνδρου. Η κλίση της τάσης V , μεταξύ της εσωτερικής ράβδου και του εξωτερικού κυλίνδρου παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στο ρευστό ER. Η ρύθμιση της τάσης V αλλάζει το ηλεκτρικό πεδίο και ελέγχει έτσι την συμπεριφορά του ρευστού ER και ρυθμίζει την ικανότητα απόσβεσης. Η δυναμική ενέργεια απελευθερώνεται εξαιτίας της τριβής καθώς περνάει το ιξώδες υγρό από την οπή.

Οι αποσβεστήρες ER είναι ακόμα υπό έρευνα και ανάπτυξη. Οι ερευνητές έχουν διατυπώσει ένα δυναμικό πρότυπο βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων και έχουν αναπτύξει έναν μεγάλης κλίμακας αποσβεστήρα ER με χωρητικότητα φορτίου 445 kN. Τρεις παράγοντες περιορίζουν τον σεισμικό έλεγχο του αποσβεστήρα ER σε μεγάλες κατασκευές. Κατ' αρχάς, τα ρευστά του ER έχουν πολύ περιορισμένη τάση διαρροής (συνήθως η μέγιστη τάση διαρροής είναι 5-10 kPa). Δεύτερον, κοινές ακαθαρσίες που μπορεί να εισαχθούν κατά τη διάρκεια κατασκευής μπορούν να μειώσουν τις ικανότητες των ρευστών ER σημαντικά. Τρίτον, οι υψηλής τάσεως παροχές ηλεκτρικού ρεύματος (περίπου 4000 V) που απαιτούνται για να ελέγξουν τα ρευστά ER και την ασφάλεια ενός τέτοιου συστήματος, μπορεί να οδηγήσουν σε θέματα κόστους και διαθεσιμότητας.

3.3.7 Μαγνητοροολογικοί αποσβεστήρες (MR)

Πρόσφατα, αναπτύχθηκαν ρευστά MR τα οποία φαίνεται να αποτελούν ελκυστική εναλλακτική λύση, σε σύγκριση με τα ρευστά ER, για τη χρήση τους σε ελεγχόμενους υδραυλικούς αποσβεστήρες (Carlson, 1994., Carlson και Weiss, 1994., Carlson και λοιποί, 1996). Τα MR ρευστά αποτελούνται συνήθως από σωματίδια μεγέθους micron, μαγνητικά πολωμένα διασκορπισμένα σε ένα φορέα, όπως είναι τα ορυκτά ή το λάδι σιλικόνης. Έχει υποδειχτεί από τον Carlson και Weiss (1994) ότι η επιτεύξιμη διατμητική τάση σε ένα ρευστό MR είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το αντίστοιχο ER ρευστό και ότι τα ρευστά MR μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες από -40 έως και 150°C με μικρές μόνο διακυμάνσεις της διατμητικής τάσης. Επιπλέον, τα MR ρευστά δεν είναι ευαίσθητα στις προσμείξεις που ανακλύπτουν κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της χρήσης, επίσης πραγματοποιείται μικρό – διαχωρισμός ανάμεσα στα σωματίδια και στον φορέα, αυτό συμβαίνει σε MR ρευστά υπό κοινές συνθήκες ροής. Το μέγεθος, η μορφή και η απόδοση μιας δεδομένης συσκευής καθορίζονται από τον συνδυασμό των $\tau_{y(\text{field})}$ και η_p . Οι εξισώσεις σχεδιασμού για την καλύτερα ελεγχόμενη γεωμετρία του αποσβεστήρα δείχνουν ότι η αναλογία $\eta_p / \tau_{y(\text{field})}^2$ είναι επιθυμητή. Αυτή η αναλογία για τα MR ρευστά ($\approx 5 \times 10^{-11}$ s/Pa) είναι τρεις τάξεις μικρότερη από την αντίστοιχη αναλογία για τα καλύτερα ER ρευστά. Κατά συνέπεια, ελέγξιμες συσκευές που χρησιμοποιούν τα MR ρευστά, έχουν την δυνατότητα να είναι μικρότερες σε μέγεθος από τις αντίστοιχες ER με παρόμοιες ικανότητες. Επιπλέον, τα MR ρευστά μπορούν να ελεγχθούν εύκολα με χαμηλή ισχύ (π.χ. λιγότερο από 50 W), χαμηλή τάση (π.χ. ~12 - 14 V), και να βασίζονται σε μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (~1 – 2 V). Οι μπαταρίες μπορούν να παρέχουν εύκολα τέτοια επίπεδα ισχύος.

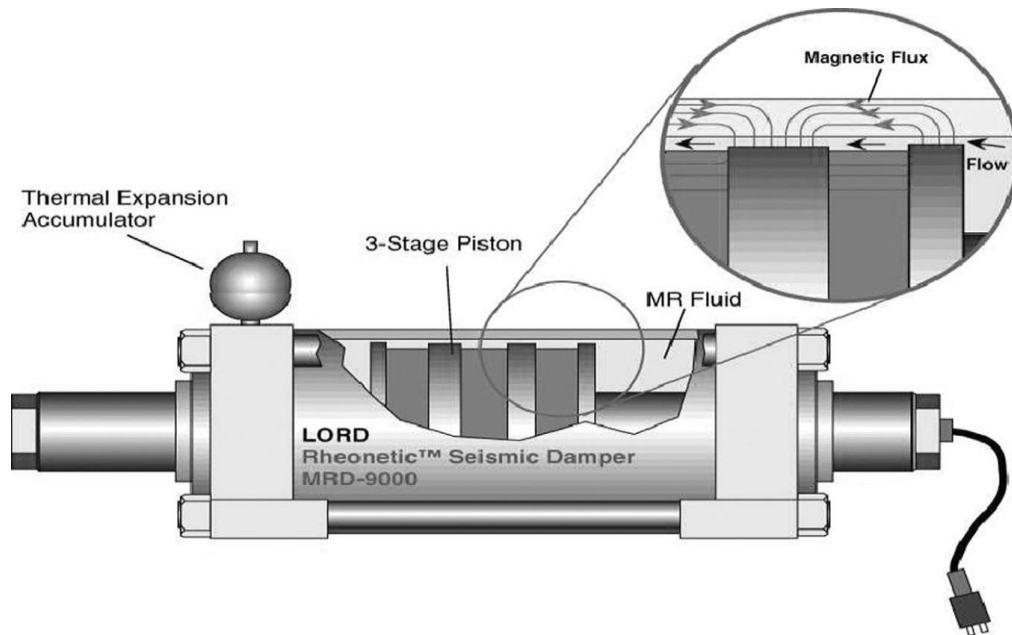
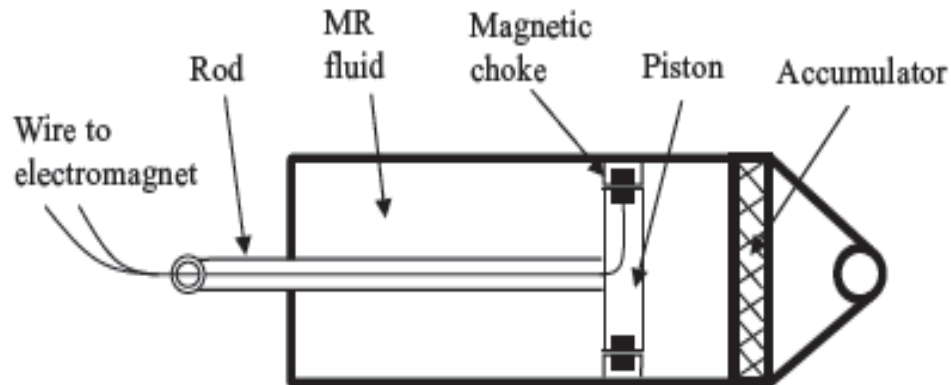


Figure 3.21 Πλήρους κλίμακας αποσβεστήρας MR, 20 τόνων (Dyke και λοιποί., 1998)

Μια σειρά από πιλοτικές μελέτες έχει διεξαχθεί ως προς την αξιολόγηση της χρησιμότητας των μαγνητορεολογικών υδραυλικών αποσβεστήρων για την μείωση της σεισμικής απόκρισης (Spencer και λοιποί, 1996). Στις προσομοιώσεις και τα εργαστηριακά πειράματα που έγιναν από τον Dyke (1996), Baker (1999) και Spencer (1999) έχουν αποδείξει ότι οι μαγνητορεολογικοί αποσβεστήρες, που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις πρόσφατες προτάσεις επιτάχυνσης και στρατηγικές ελέγχου ανάδρασης, υπερτερούν σημαντικά σε σύγκριση με τους παθητικά διαμορφωμένους αποσβεστήρες για τη μείωση της σεισμικής απόκρισης. Επιπλέον, ο σχεδιασμός ενός μαγνητορεολογικού αποσβεστήρα 20 τόνων έχει αναφερθεί (Carlson και Spencer, 1996), αποδεικνύοντας ότι η τεχνολογία αυτή μπορεί να επεκταθεί στις εφαρμογές συσκευών. Σε ταχύτητες σχεδιασμού, το δυναμικό εύρος των δυνάμεων που παράγονται από αυτή τη συσκευή είναι πάνω από 10 (σχήμα 3.21) και η συνολική ισχύς που απαιτείται από τη συσκευή είναι μόνο 20-50 W, κατάλληλη δηλαδή για έργα πολιτικού μηχανικού.

Οι αποσβεστήρες MR χρησιμοποιούν τα έξυπνα ρευστά MR, τα οποία είναι τα μαγνητικά ανάλογα των ρευστών ER και αποτελούνται από τα χαρακτηριστικά σε μικρο-μέγεθος μαγνητικά πολώσιμα μόρια που διασκορπίζονται στο ιξώδες ρευστό, όπως το σιλικονούχο πετρέλαιο. Όταν τα ρευστά MR εκτίθενται σε ένα μαγνητικό πεδίο, τα μόρια των ρευστών πολώνουν και το ρευστό παρουσιάζει βισκοπλαστική συμπεριφορά, προσφέροντας κατά συνέπεια αντίσταση στη ρευστή ροή. Το ρευστό MR χαρακτηρίζεται επίσης από τη δυνατότητα του να υποστεί αντιστρέψιμη αλλαγή από γραμμικό ιξώδες ρευστό ελεύθερης ροής σε ημι-στερεό σε χιλιοστά του δευτερολέπτου όταν υποβάλλεται σε ένα μαγνητικό πεδίο. Ανάλογα με τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο αλγόριθμο, η δύναμη ελέγχου που παράγεται από ένα αποσβεστήρα MR μπορεί να ρυθμιστεί αναλόγως. Σε

σύγκριση με τα ρευστά ER, τα ρευστά MR προσφέρουν το πλεονέκτημα της υψηλής αποδοτικής δύναμης (50-100 kPa), είναι ανεπηρέαστα στους μολυσματικούς παράγοντες, και έχουν σταθερή συμπεριφορά πάνω σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.



Σχήμα 3.22 Σχηματική τομή μαγνητοροολογικού αποσβεστήρα.

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.22, το πρωτότυπο αυτού του αποσβεστήρα MR είναι ένας αποσβεστήρας ακροφυσίου (orifice damper) και η ενέργεια απελευθερώνεται από τα στόμια/οπές. Εντούτοις, αυτός ο αποσβεστήρας χρησιμοποιεί πετρέλαιο υδρογονανθράκων το οποίο διασκορπίζεται τυχαία από τον μαγνητικά μαλακό σίδηρο σε μικρό μέγεθος, το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται κάθετα στην κατεύθυνση ροής του ρευστού, και ένας συσσωρευτής αντισταθμίζει την αλλαγή του ρευστού όγκου. Στις δοκιμές προσομοίωσης της κινήσεως του εδάφους που πραγματοποιήθηκαν για μια πρότυπη τριώροφη χαλύβδινη δομή με τον αποσβεστήρα MR εγκατεστημένο στον πρώτο όροφο, τα αποτελέσματα παρουσίασαν ότι ο αποσβεστήρας MR συμπεριφέρεται παρόμοια με ένα συνδυασμό αποσβεστήρα Coulomb και ιξώδους αποσβεστήρα.

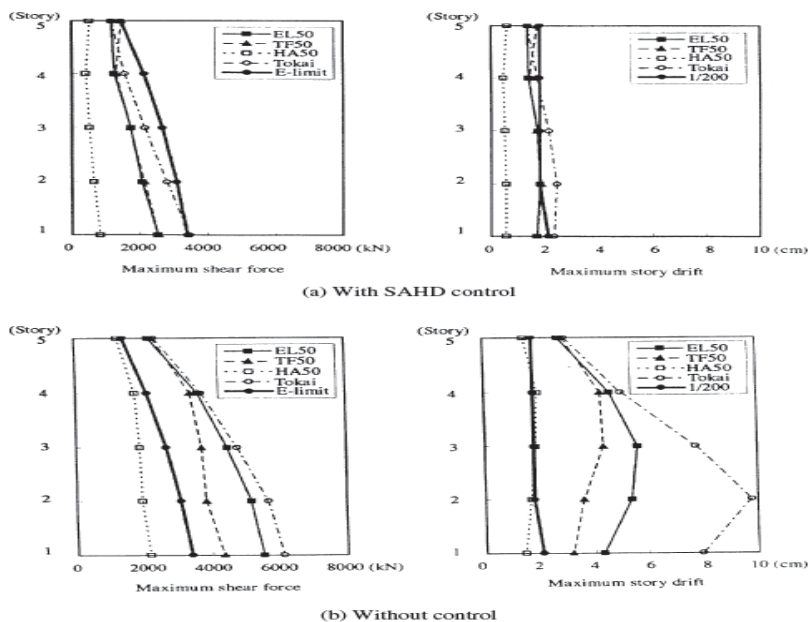
Εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα των MR αποσβεστήρων πραγματοποιήθηκε το 2001. Δύο αποσβεστήρες των 30 τόνων εγκαταστάθηκαν ανάμεσα στον 3^ο και 4^ο όροφο του κτηρίου Tokyo Natural Museum of Engineering Science and Innovation. Το 2002, MR αποσβεστήρες χρησιμοποιήθηκαν για τον εκ των υστέρων εξοπλισμό καλωδιακής γέφυρας διέλευσης της λίμνης Dongting στη Κίνα για τη μείωση των κραδασμών των καλωδίων που προκαλούνται από την βροχή και τον άνεμο (σχήμα 3.23). δύο αποσβεστήρες MR εγκαταστάθηκαν σε κάθε καλώδιο. Τα αποτελέσματα των επί τόπου δοκιμών υπό ακραίες συνθήκες έχουν δείξει μια σημαντική μείωση των κραδασμών των καλωδίων (Spencer, 2002).



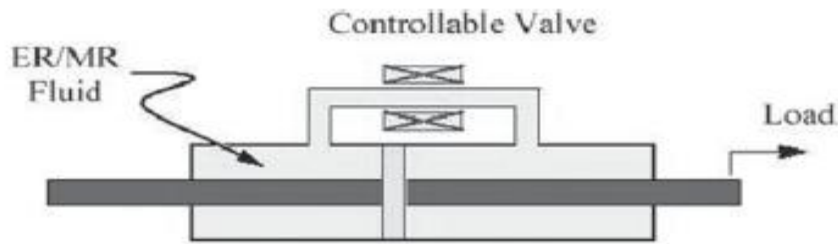
3.23 Εφαρμογή αποσβεστήρων MR (Spencer, 2002)

3.3.8 Ημιενεργοί ελέγξιμοι υδραυλικοί αποσβεστήρες (Semi-active Controllable Fluid Dampers)

Μια άλλη κατηγορία ημιενεργών συσκευών χρησιμοποιεί ελέγξιμα ρευστά, τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 3.25. Σε σύγκριση με τα ημιενεργά υδραυλικά συστήματα, ένα πλεονέκτημα των συσκευών με ελέγξιμα ρευστά, είναι ότι δεν περιέχουν κανένα κινούμενο μέλος εκτός από το έμβολο, το οποίο τις καθιστά απλές και ενδεχομένως πολύ αξιόπιστες.



Σχήμα 3.24(α) Διαγράμματα μέγιστης απόκρισης με σύστημα ελέγχου SAHD και (β) χωρίς σύστημα ελέγχου.



Σχήμα 3.25 Σχηματική τομή ελεγχόμενου υδραυλικού αποσβεστήρα.

Δύο ρευστά που είναι βιώσιμοι υποψήφιοι για την ανάπτυξη ελεγχόμενων αποσβεστήρων είναι: (α) τα ηλεκτροροεολογικά ρευστά (ER), και (β) τα μαγνητοροεολογικά ρευστά (MR). Το ουσιαστικό χαρακτηριστικό αυτών των ρευστών είναι η αντιστρεψιμότητα τους από ένα ελεύθερης ροής, γραμμικό ιξώδες ρευστό σε ένα ημισταθερό ελεγχόμενης δύναμης διαρροής, μέσα σε χιλιοστά του δευτερολέπτου, όταν εκτίθεται ηλεκτρικό (για ER ρευστά) ή μαγνητικό (για MR ρευστά) τομέα. Στην περίπτωση έλλειψης τομέα εφαρμογής, αυτά τα ρευστά ρέουν ελεύθερα και μπορούν να διαμορφωθούν όπως τα νευτώνεια. Στην περίπτωση εφαρμογής του τομέα, συχνά χρησιμοποιείται το πλαστικό μοντέλο Bingham (Shames και Cozzarelli, 1992) για να γίνει περιγραφή της συμπεριφοράς του ρευστού. Σε αυτό το μοντέλο, το πλαστικό ιξώδες ορίζεται ως η κλίση της μετρημένης διατμητικής τάσης συναρτήσεως του ποσοστού της τάσης παραμόρφωσης. Κατά συνέπεια, η συνολική τάση διαρροής δίνεται από τον τύπο:

$$\tau = \tau_{y(\text{field})} \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta_p \dot{\gamma}$$

Όπου το $\tau_{y(\text{field})}$ είναι η διατμητική τάση που προκαλείται από τον τομέα εφαρμογής, το $\dot{\gamma}$ είναι το ποσοστό διατμητικής παραμόρφωσης, και το η_p είναι το πλαστικό ιξώδες, που ορίζεται ως η κλίση της μετρημένης διατμητικής τάσης έναντι του ποσοστού της τάσης παραμόρφωσης.

Αν και η ανακάλυψη των (ER) και των (MR) έγινε την δεκαετία του 1940 (Winslow, 1948, Rabinow, 1948), για πολλά χρόνια τα ερευνητικά προγράμματα επικεντρώνονταν μόνο στα ρευστά (ER). Εντούτοις, κάποια εμπόδια ακόμα παρεμποδίζουν την ανάπτυξη των εμπορικών συσκευών απόσβεσης που χρησιμοποιούν ER ρευστά. Παραδείγματος χάριν, τα καλύτερα ER ρευστά που είναι διαθέσιμα σήμερα έχουν διατμητική τάση μόνο 3.0 – 3.5 kPa και δεν μπορούν να ανεχτούν κοινές προσμείξεις (π.χ. νερό) που μπορεί να εισαχθούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή της χρήσης. Επιπλέον η ασφάλεια, η διαθεσιμότητα και το κόστος των υψηλής τάσεως παροχών (π.χ. ~4000V) ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτούνται για να ελέγξουν τα ρευστά αυτά, θα πρέπει να μελετηθούν και να εξεταστούν, ώστε να βρεθούν καλύτερες δυνατές λύσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° - Ενεργά συστήματα

4.1 Εισαγωγή

Ο έλεγχος δόνησης αποτρέπει τον συντονισμό και την ασταθή δόνηση, καθώς επίσης καταστέλλει γρήγορα την παροδική δόνηση συμπληρώνοντας την έλλειψη της εσωτερικής απόσβεσης εξωτερικά ή εσωτερικά παράγοντας μια δύναμη που ακυρώνει τις εξωτερικές δυνάμεις. Ο παθητικός έλεγχος δόνησης δεν περιλαμβάνει καμία πηγή εξωτερικής ενέργειας. Η πρώτη ενεργή συσκευή ελέγχου δόνησης που παρουσιάστηκε στην Ιαπωνία αποτελούταν από έναν αισθητήρα και έναν ελεγκτή υπό μορφή σέρβο-αποσβεστήρα. Η μέθοδος ελέγχου προτάθηκε το 1970 για να αποτρέψει τη δόνηση των εργαλειομηχανών (Tomimari και λοιποί., 1970). Ενώ αυτή η μέθοδος αποδείχθηκε ότι είχε άριστη απόδοση στον έλεγχο της δόνησης (Tanaka και λοιποί., 1976), δεν υιοθετήθηκε στις πρακτικές εφαρμογές επειδή ήταν δυσνόητη και μη αξιόπιστη.

Ο ενεργός έλεγχος δόνησης έχει γίνει πρόσφατα μια βασική τεχνολογία ελέγχου δόνησης σε ένα ευρύ φάσμα της εφαρμοσμένης μηχανικής (Seto, 1989, 1991). Παραδείγματος χάριν, χρησιμοποιείται στα βιομηχανικά ρομπότ ελαφριάς κατασκευής, τα οποία έχουν ικανότητες αποταμίευσης ενέργειας και απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια και υψηλότερες ταχύτητες. Ένα εμπόδιο στην επίτευξη τέτοιων ιδιοτήτων είναι η έλλειψη διαθεσιμότητας των ελαφριών και εύκαμπτων μελών, η οποία δημιουργεί την ανάγκη να επινοηθεί μια πρακτική μέθοδος ελέγχου της δόνησης. Αν και οι σκελετοί ελαφριάς κατασκευής απαιτούνται για να μειώσουν την κατανάλωση στα αυτοκίνητα, γίνεται απαραίτητο να ελεγχθεί η δόνηση αυτών των κάπως ελαστικών οργανισμών. Όλο και περισσότερο ελαφρύτερα και πιο ψηλά κτήρια έχουν κατασκευαστεί για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για χαμηλότερο κόστος. Τέτοια κτήρια υποφέρουν από ταλαντώσεις που προκαλούνται από ισχυρούς άνεμους. Αιτία αυτής της πρόσφατης ερευνητικής δραστηριότητας θα μπορούσε να είναι το γεγονός ότι, η σύγχρονη θεωρία ελέγχου είχε θεωρηθεί προηγουμένως δύσκολο να γίνει κατανοητή και έτσι μη πιθανή να τεθεί σε πρακτική χρήση, πλέον όμως ο σχεδιασμός ενός συστήματος ελέγχου είναι εφαρμόσιμος χάρη στη πρόοδο των τεχνικών εφαρμογών των υπολογιστών και της εμφάνισης των αποτελεσματικών πακέτων λογισμικού όπως το MATLAB.

Οι δυναμικές συμπεριφορές των συστημάτων των οποίων η δόνηση πρέπει πρώτα να αναλυθούν λεπτομερώς πειραματικά καθώς επίσης και θεωρητικά (Nagamatu, 1985) και με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier που είναι ένα εύχρηστο εργαλείο στην εξέταση των αποτελεσμάτων ελέγχου της δόνησης. Ο ενεργός έλεγχος είναι πιο εφικτός σήμερα λόγω: (i) της ανάπτυξης λογισμικού για τον έλεγχο σχεδιασμού των συστημάτων, (ii) της διαθεσιμότητας επεξεργαστών ψηφιακών σημάτων, (iii) της ανάπτυξης νέων ενεργών συσκευών και ενεργοποιητών ελέγχου δόνησης, (iv) της πρόοδου των μεθόδων ανάλυσης της, (v) της εμφάνισης νέων μεθόδων σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου.

Αυτό το κεφάλαιο ταξινομεί αρχικά τις μεθόδους ελέγχου δόνησης και τους αποσβεστήρες που χρησιμοποιούνται ευρέως στα έργα και πολιτικού μηχανικού. Κατόπιν εξετάζει την κατασκευή των ενεργών δυναμικών αποσβεστήρων και τη χρήση

τους σε κτηριακά έργα. Τέλος, δείχνει ότι το σύστημα ελέγχου του ενεργού δυναμικού απορροφητή σχεδιάζεται αποτελεσματικά με την υιοθέτηση μιας θεωρίας ελέγχου όπως η γραμμική τετραγωνική θεωρία ελέγχου (LQ).

4.2 Ταξινόμηση των μεθόδων ελέγχου δόνησης

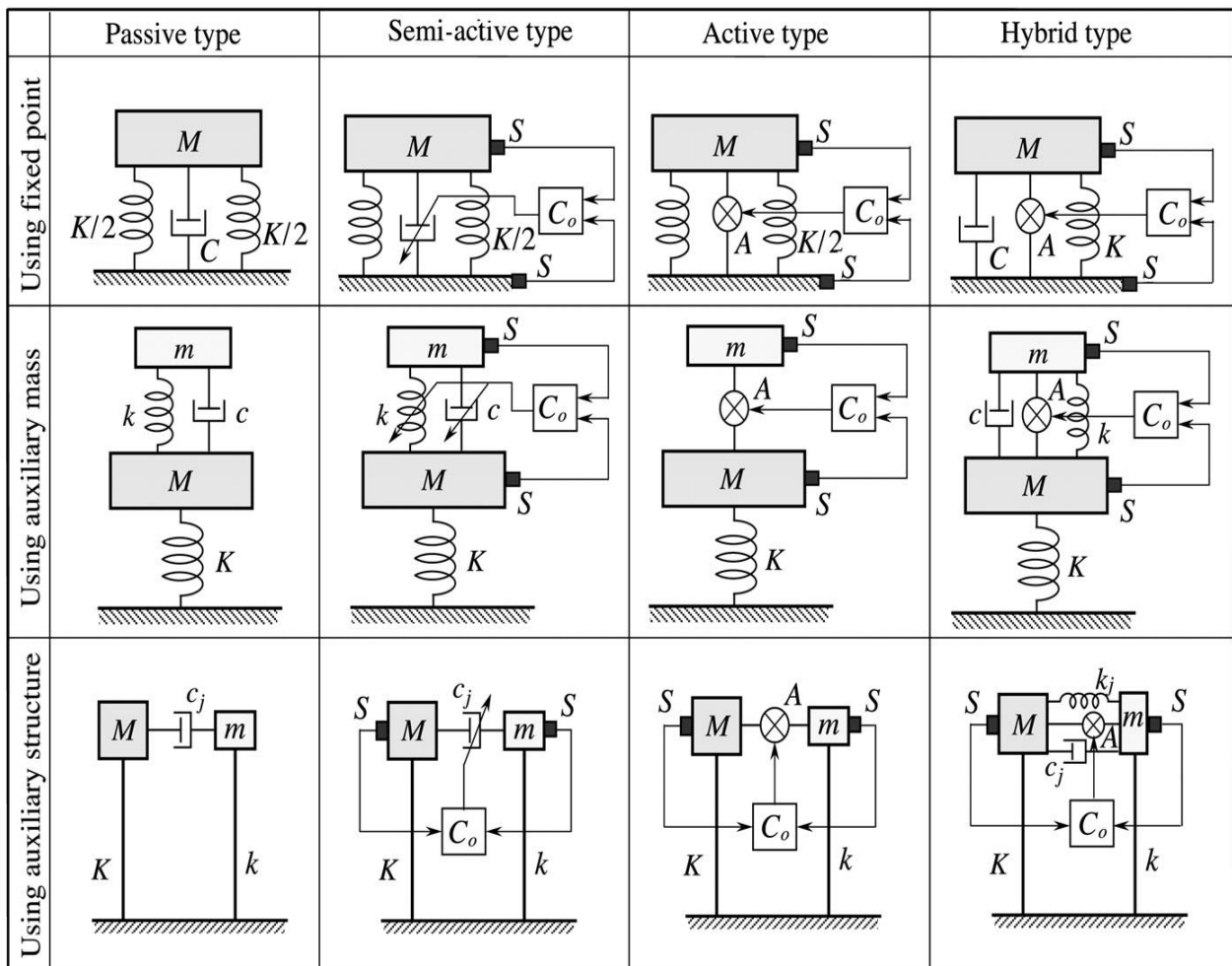
Ο κύριος σκοπός του ελέγχου δόνησης είναι η μείωση της ταλάντωσης ενός αντικειμένου με τη χρήση αξιόπιστων μεθόδων και συσκευών. Οι συσκευές παθητικού ελέγχου δόνησης έχουν χρησιμοποιηθεί παραδοσιακά, επειδή δεν απαιτούν την εισαγωγή ενέργειας στο σύστημα. Εντούτοις, οι παθητικές συσκευές ελέγχου δόνησης δεν έχουν κανέναν αισθητήρα και δεν μπορούν να αποκριθούν στις παραλλαγές των παραμέτρων ελέγχου του αντικειμένου ή της συσκευής ελέγχου. Αυτό έχει οδηγήσει στην εξέλιξη νέων συσκευών ελέγχου δόνησης, των ενεργών συστημάτων δόνησης, τα οποία είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες, ενεργοποιητές, και ελεγκτές που απαιτούν ισχύ.

M, K, C : Mass, spring constant and damping coefficient of controlled object

m, k, c : Mass, spring constant and damping coefficient of control device

A : Actuator S : Sensor C_o : Controller

k_j : Spring constant of joint spring c_j : Damping coefficient of joint damper



Σχήμα 4.1 Ταξινόμηση των μεθόδων ελέγχου δόνησης

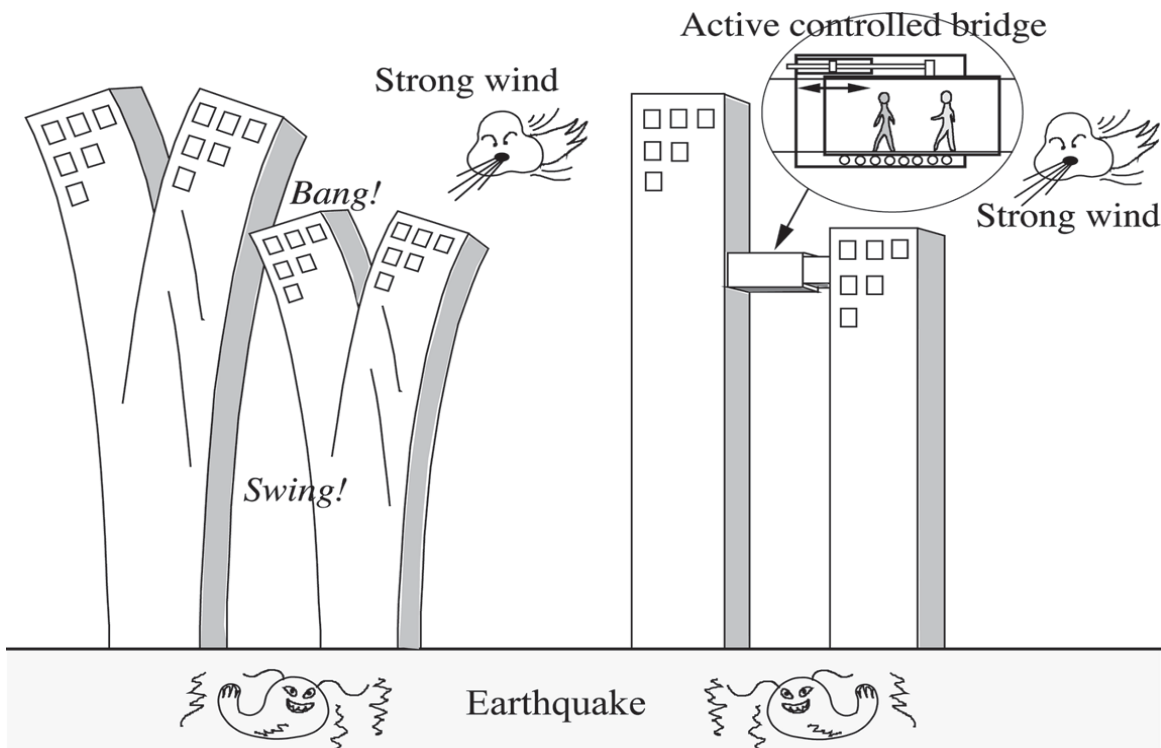
Κατά συνέπεια, τα συστήματα ελέγχου δόνησης μπορούν να ταξινομηθούν στους παθητικούς, ημιενεργούς, ενεργούς, και υβριδικούς τύπους. Δεδομένου ότι η δράση ακολουθείται από την αντίδραση, είναι απαραίτητο, ο ενεργοποιητής για να παράγει μια δύναμη ελέγχου δόνησης να λάβει μια δύναμη αντίδρασης με κάποιο τρόπο. Οι μέθοδοι ελέγχου δόνησης μπορούν επίσης να είναι ταξινομημένες (Seto, 1992) σύμφωνα με τον τρόπο που η δύναμη αντίδρασης παραλαμβάνεται: (1) μέθοδοι που χρησιμοποιούν την αντίδραση σε ένα σταθερό σημείο, (2) μέθοδοι που χρησιμοποιούν την ανάδραση ή αλλιώς feedback μιας βοηθητικής μάζας (ανάδραση ονομάζεται η ανατροφοδότηση της εξόδου ενός συστήματος στην είσοδο του). Τα συστήματα με βρόχο ανάδρασης είναι σημαντικά τόσο στη μαθηματική θεωρία αυτομάτου ελέγχου όσο και σε πολλά τεχνολογικά συστήματα. Η ανάδραση μπορεί να είναι είτε (συνηθέστερα) *αρνητική ανάδραση*, είτε (σπανιότερα) *θετική ανάδραση*), (3) μέθοδοι που χρησιμοποιούν την αντίδραση μιας βοηθητικής δομής. Το σχήμα 4.1 δίνει μια σχηματική επισκόπηση των μεθόδων ελέγχου της δόνησης. Τα ελεγχόμενα αντικείμενα απλοποιούνται σε ένα ενιαίο σύστημα.

Από τις τρεις μεθόδους, η μέθοδος (1) επιτρέπει την απλούστερη κατασκευή ενός συστήματος ελέγχου υπό τον όρο ότι υπάρχει ένα σταθερό σημείο τοποθετημένο κοντά στον ενεργοποιητή (actuator). Για παράδειγμα, τα ενεργά συστήματα απομόνωσης δόνησης και τα ενεργά συστήματα αναστολής για την πτώση αυτοκινήτων υπάγονται σε αυτήν την κατηγορία. Εάν υπάρχει ένα σταθερό σημείο για να τοποθετηθεί ο ενεργοποιητής αυτή η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη. Οι τεχνικές ελέγχου δόνησης ακρίβειας για να απομονωθούν οι περιβαλλοντικές δονήσεις που είναι βασισμένες σε αυτήν την μέθοδο μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλούς τομείς, ιδιαίτερα στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας για τη μέτρηση πρόσθετης ακρίβειας, που χρησιμοποιούνται οι συσκευές λέιζερ, στις ενεργές αναρτήσεις των οχημάτων, κ.λπ. Εντούτοις, αν ένα καθορισμένο σημείο δεν είναι εύκολα διαθέσιμο για να τοποθετηθεί ο ενεργοποιητής (actuator), τότε μια από τις άλλες μεθόδους θα απαιτηθεί για να πάρει τη δύναμη της αντίδρασης.

Η μέθοδος (2) για να αντιδράσει χρησιμοποιεί τη δύναμη της αδράνειας μιας βοηθητικής μάζας για να παράγει μια δύναμη ελέγχου δόνησης σε έναν ενεργοποιητή. Διάφοροι τύποι δυναμικών αποσβεστήρων που κάνουν χρήση αυτής της μεθόδου είναι διαδεδομένοι στον τομέα της εφαρμοσμένης μηχανικής, δεδομένου ότι η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα τοποθέτησης του ενεργοποιητή σε οποιοδήποτε σημείο. Η μέθοδος (2) ταξινομείται, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, στους παθητικούς, ημιενεργούς, ενεργούς και υβριδικούς τύπους. Στον τομέα της εφαρμοσμένης μηχανικής, ο παθητικός τύπος ονομάζεται γενικά δυναμικός αποσβεστήρας, και μπορεί να επιτύχει άριστα στον έλεγχο των αποτελεσμάτων με την κράτηση τριών στοιχείων - τη μάζα, το ελατήριο και τον αποσβεστήρα - στη βέλτιστη ρύθμιση (Ormondroyd και Den Hartog, 1928, Seto και Takita, 1987). Στον τομέα των πολιτικών μηχανικών, αυτό ονομάζεται συντονισμένη διάταξη μαζικής απόσβεσης (tuned mass damper). Εντούτοις, δεδομένου ότι ο δυναμικός αποσβεστήρας δεν έχει δικούς του αισθητήρες, ενδεχομένως δεν μπορεί να προσαρμοστεί στις αλλαγές των χαρακτηριστικών στο αντικείμενο ελέγχου ή στον ίδιο και έχει συχνά τη δυσκολία να ελέγχει αποτελεσματικά τη δόνηση. Αυτό το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σοβαρό όπου η αναλογία μάζας είναι μικρή. Υπάρχουν δύο τρόποι να λυθεί

αυτό το πρόβλημα. Ο ένας τρόπος είναι να αλλάξει τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου ή της διάταξης απόσβεσης του παθητικού δυναμικού αποσβεστήρα, εξασφαλίζοντας ότι ο βέλτιστος όρος ρύθμισης διατηρείται. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται ημιενεργός δυναμικός αποσβεστήρας, αν και πλήρως ανήκει στην παθητική κατηγορία τύπων. Άλλος ο τρόπος είναι να χρησιμοποιηθεί ένας ενεργός δυναμικός αποσβεστήρας με έναν ελεγκτή, οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές. Στον τομέα των έργων πολιτικού μηχανικού, οι ενεργοί και υβριδικοί τύποι καλούνται αποσβεστήρες ενεργής μάζας (AMDs) και, υβριδικές μαζικές διατάξεις απόσβεσης (HMDs), αντίστοιχα.

Η μέθοδος (3) παράγει μια δύναμη ελέγχου με έναν ενεργοποιητή που τοποθετείται παράλληλα στην εύκαμπτη δομή, προκειμένου να ελεγχθεί η δόνηση εκείνης της κατασκευής. Μια εφαρμογή αυτού του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2. Η συσκευή ελέγχου μπορεί να συναρμολογηθεί εύκολα, επειδή απαιτεί μόνο την εισαγωγή ενός ενεργοποιητή μεταξύ των δύο δομών. Το σχήμα 4.2 (α) επεξηγεί τα παρακείμενα αλλά ανεξάρτητα κατασκευασμένα πολυώροφα κτήρια. Αν και αυτό το σχέδιο είναι αρχιτεκτονικά προτιμητέο, είναι δομικά αδύνατο λόγω της ευαισθησίας του στους ισχυρούς άνεμους. Με την τοποθέτηση μιας συσκευής ελέγχου ενεργού δόνησης στο ανώτερο μέρος των δύο κτηρίων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 (β), οι δονήσεις που παράγονται από τη διέγερση αέρα, δηλαδή η διέγερση δίνης Karman, αποβάλλεται.

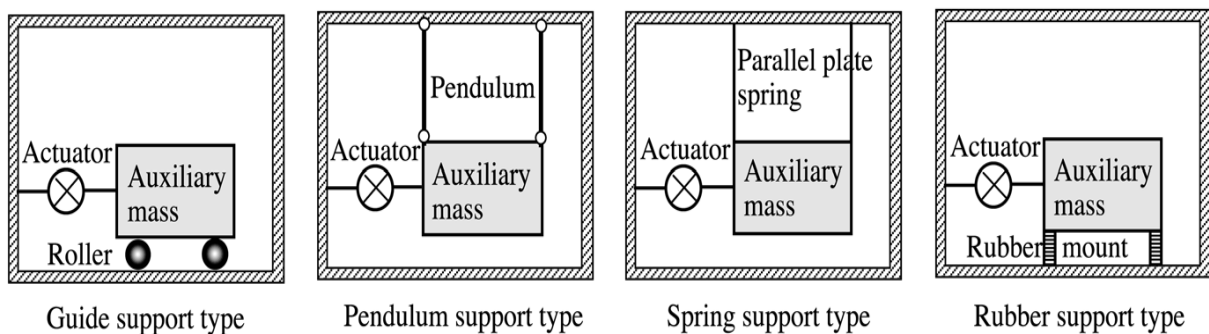


Σχήμα 4.2 της μεθόδου που χρησιμοποιεί την αντίδραση μιας βοηθητικής δομής

Η μέθοδος (3) - που καλούμε συνδεδεμένη μέθοδο ελέγχου (CCM) - ταξινομείται επίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, στους παθητικούς, ημιενεργούς, ενεργούς και υβριδικούς τύπους (Mitsuda και Seto, 1992 Seto, 1996). Μια εφαρμογή αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται αργότερα.

4.3 Χαρακτηριστικά ενός ενεργού δυναμικού αποσβεστήρα

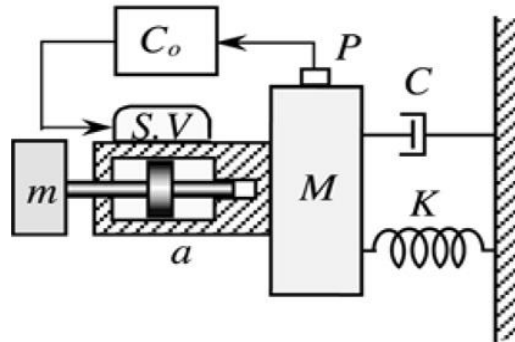
Οι ενεργοί δυναμικοί αποσβεστήρες μπορούν να ταξινομηθούν κατά προσέγγιση στους υδραυλικούς και ηλεκτρομαγνητικούς τύπους, που διακρίνονται από τη πηγή ισχύος που εγχέεται στον ενεργοποιητή. Βασισμένα στη μέθοδο της βοηθητικής μάζας, τα γραμμικά και μηχανικά συστήματα κίνησης είναι διαθέσιμα. Στα πρώτα η βοηθητική μάζα κινείται άμεσα, και στα τελευταία κινείται έμμεσα με την περιστροφή βίδας σφαιρών με έναν σερβοκινητήρα. Επιπλέον, υπάρχουν τρεις τρόποι υποστήριξης της βοηθητικής μάζας – με ελατήριο, με οδηγό και με εκκρεμές – και αυτοί παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα 4.3. Δεδομένου ότι αυτή η βοηθητική μάζα ελέγχεται ενεργά, είναι επίσης γνωστή ως ενεργή μάζα.



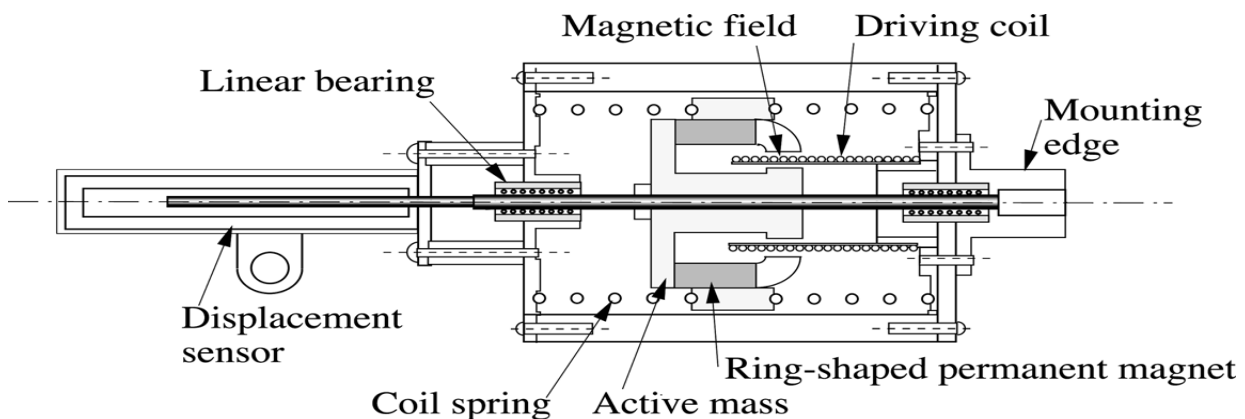
Σχήμα 4.3 Ενεργός δυναμικός αποσβεστήρας με τον ηλεκτρομαγνητικό ενεργοποιητή.

Ο ενεργός δυναμικός αποσβεστήρας (actuator) διαμορφώνεται αντικαθιστώντας το αμορτισέρ του δυναμικού αποσβεστήρα με έναν ενεργοποιητή (actuator) που ελέγχεται από έναν αισθητήρα (sensor) και έναν ελεγκτή (controller). Οι υδραυλικοί τύποι ενεργών δυναμικών αποσβεστήρων είναι εφαρμόσιμοι στον έλεγχο δόνησης ενός αντικειμένου που απαιτεί έναν ισχυρό και συμπαγή ελεγκτή δόνησης. Για να εξαλειφτούν τα χτυπήματα της αυτοδιεργετικής δόνησης στις εργαλειομηχανές, ο υδραυλικός τύπος ενεργού δυναμικού απορροφητή, αποκαλούμενος servodamper, (σχήμα 4.4), προτάθηκε στη δεκαετία του '60 (Tominary και λοιποί, 1970). Ένας χαρακτηριστικός ενεργός δυναμικός αποσβεστήρας που οδηγείται γραμμικά από μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη και το σύστημα ελέγχου του παρουσιάζονται στο σχήμα 4.5. Βασισμένα στη μέθοδο της βοηθητικής μάζας, γραμμικά μηχανικά συστήματα κίνησης είναι διαθέσιμα. Η προηγούμενη μέθοδος κινεί άμεσα τη βοηθητική μάζα και η τελευταία κινεί έμμεσα τη βοηθητική μάζα με την περιστροφή της βίδας σφαιρών με έναν σερβοκινητήρα (Yoshida και λοιποί., 1991). Οι Seto και Furuishi έχουν ήδη προτείνει δύο τύπους ελατηρίων υποστηριγμένων ενεργών δυναμικών αποσβεστήρων γραμμικά καθοδηγημένων από ηλεκτρομαγνητική δύναμη, αλλά στην παρούσα μελέτη, που είναι γενικής φύσης, ένας απλός ενεργοποιητής ενός ενεργού δυναμικού αποσβεστήρα φαίνεται στο σχήμα 4.5.

C_o : Controller
 P : Sensor
 a : Actuator
 $S.V$: Servo value

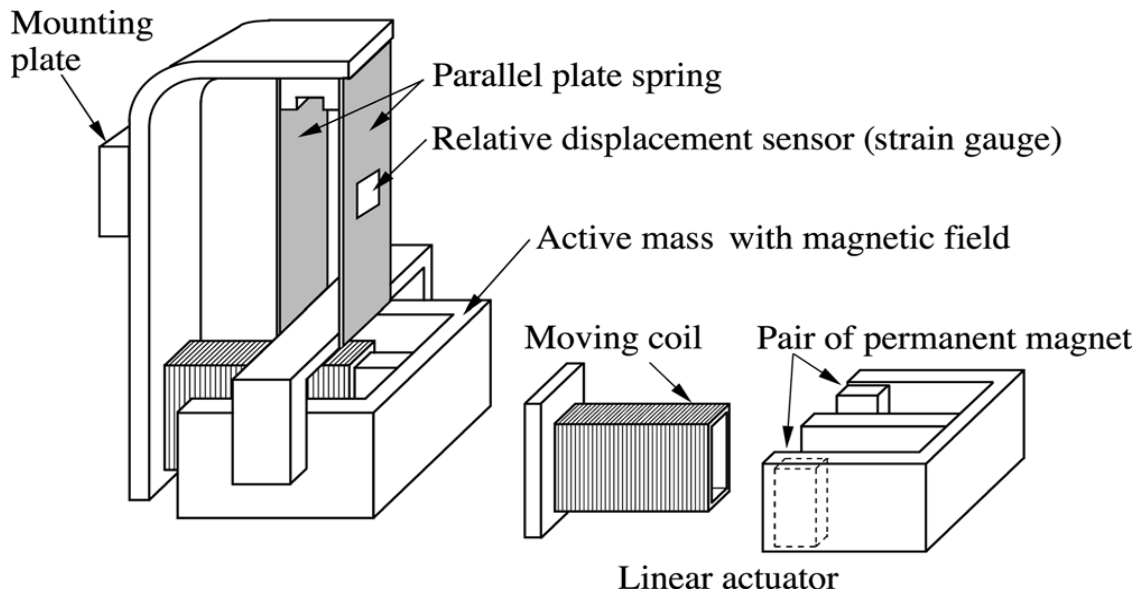


Σχήμα 4.4 Υδραυλικός τύπος δυναμικού αποσβεστήρα.



Σχήμα 4.5 Ηλεκτρομαγνητικός τύπος ενεργού δυναμικού αποσβεστήρα.

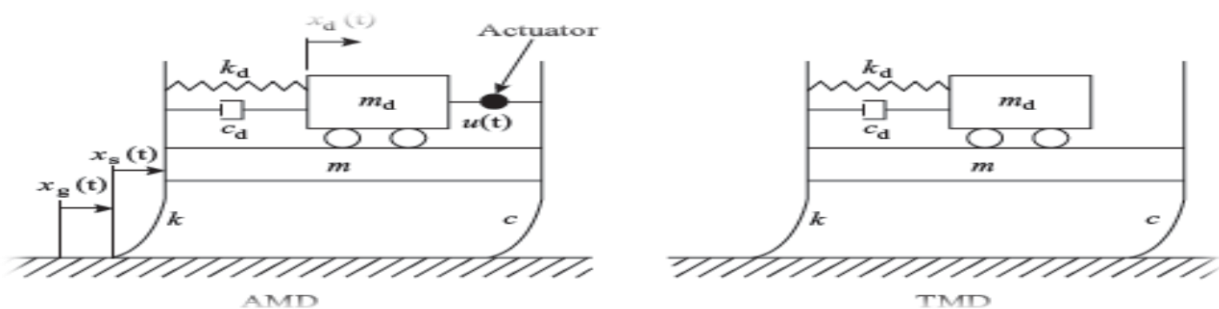
Αποτελείται από μια ενεργό μάζα που κατέχει ένα μαγνητικό κύκλωμα σε σχήμα δακτυλίου, βοηθητικά ελατήρια για να υποστηρίζεται και από τις δύο πλευρές, μια κινούμενη σπείρα, ένα κύριο σώμα με ένα μοντάρισμα για τον έλεγχο του αντικειμένου, και ένας αισθητήρας μετατόπισης για να ανιχνεύει τη σχετική μετατόπιση μεταξύ του κύριου σώματος και της ενεργής μάζας. Δεδομένου ότι η ενεργή μάζα υποστηρίζεται από μια επιφάνεια γραμμικών οδηγών, αυτός ο ενεργός δυναμικός απορροφητής υποστηρίζεται από τον τύπο ηλεκτρομαγνητικού γραμμικού ενεργοποιητή. Ένα παράδειγμα του τύπου υποστήριξης ελατηρίου ενός ενεργού δυναμικού απορροφητή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6. σε αυτό το παράδειγμα, μια ενεργός μάζα υποστηρίζεται από ένα παράλληλο επίπεδο ελατήριο και είναι εξοπλισμένο με έναν γραμμικό ενεργοποιητή που αποτελείται από ένα ζευγάρι από μόνιμους μαγνήτες και μία κινούμενη σπείρα. Οι μετρητές πίεσης επάνω στο επίπεδο ελατήριο χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν τη σχετική μετατόπιση μεταξύ του αντικείμενου ελέγχου και της ενεργής μάζας.



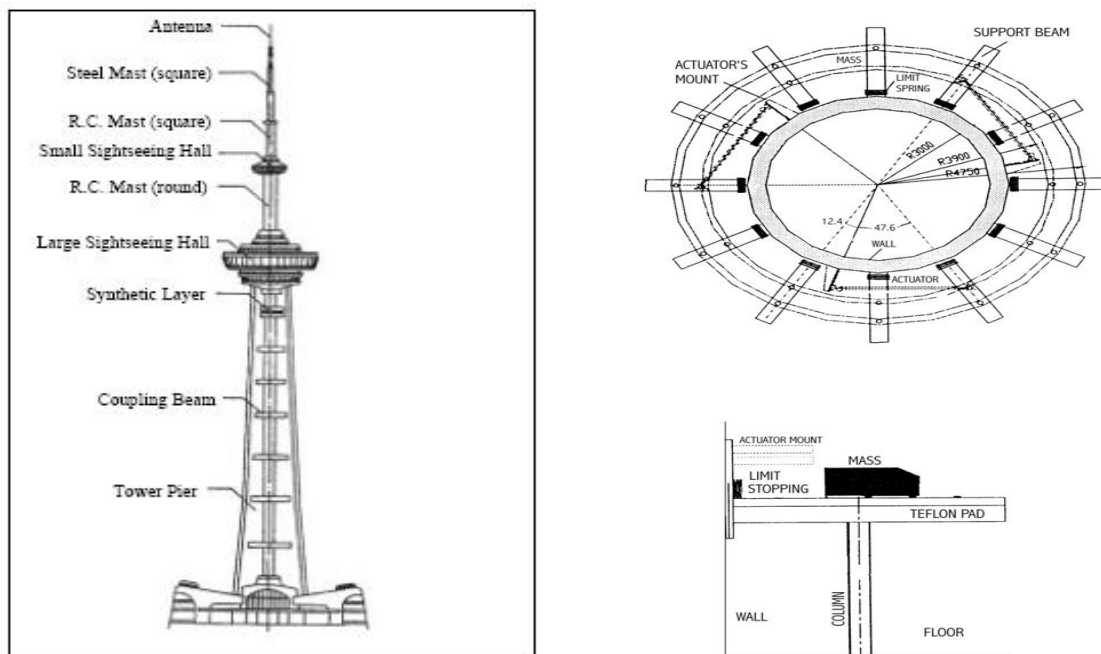
Σχήμα 4.6 Τύπος παράλληλου ελατηρίου ενεργού δυναμικού αποσβεστήρα.

4.3.1 Ενεργά συστήματα αποσβεστήρων (AMD)

Ένα σύστημα AMD καλείται επίσης και ενεργός οδηγός μάζας. Εξελίχθηκε από τα συστήματα TDMs με την εισαγωγή ενός ενεργού μηχανισμού ελέγχου. Τα συστήματα αποσβεστήρων TDM είναι αποτελεσματικά στον έλεγχο της δομικής απόκρισης στην περίπτωση δόνησης που προκαλείται από ισχυρούς ανέμους. Η ανάπτυξη των αποσβεστήρων AMD επιδιώκει τον έλεγχο της δομικής σεισμικής απόκρισης σε μια ευρεία ζώνη συχνότητας. Οι δομές με συστήματα AMD έχουν αποδείξει την ενισχυμένη αποτελεσματικότητά τους σε σχέση τα TDMs. Ένα πρότυπο σύστημα ελέγχου AMD παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7, σε μια σχηματική σύγκριση των AMDs και TDMs. Ένας ενεργοποιητής εγκαθίσταται μεταξύ της δομής και των βοηθητικών συστημάτων TMD. Η κίνηση του βοηθητικού συστήματος μπορεί να ελεγχτεί από τον ενεργοποιητή για να αυξήσει την αποτελεσματικότητά του ελέγχου. Η αναλυτική μελέτη στοχεύει στην έγκαιρη ανταπόκριση του ενεργοποιητή και σε ένα αποτελεσματικότερο σύστημα ελέγχου, ώστε να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη ανατροφοδότηση προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα απόκρισης.



Σχήμα 4.7 Σχηματική σύγκριση των έξυπνων δομών που χρησιμοποιούν αποσβεστήρες AMD και TMD.



Σχήμα 4.8 Πύργος τηλεπικοινωνιών στο Nanjing, Κίνα και σχεδιασμός του AMD.

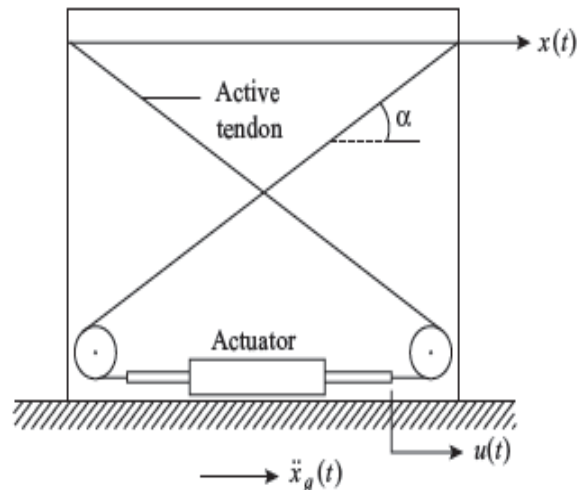
Τα συστήματα AMDs έχουν ένα πλεονέκτημα στις μεγάλες κατασκευές γιατί χρησιμοποιούν ελάχιστη δύναμη έλεγχου και πολύ μικρότερους ενεργοποιητές, από ότι απαιτούν άλλα ενεργά συστήματα.

Το σχήμα 4.8 απεικονίζει το πύργο Nanjing, ύψους 340 μέτρων, τηλεοπτικών μεταδόσεων και παρατήρησης που κατασκευάστηκε το 1996 στη πόλη Nanjing στη Κίνα. Ο πύργος έχει δύο καταστρώματα παρατήρησης, εκ των οποίων το ανώτερο βρίσκεται στα 240 μέτρα. Κατά την διάρκεια ισχυρών ανέμων σε αυτό το παρατηρητήριο προκαλείται υπερβολική δόνηση και επιταχύνσεις που υπερβαίνουν το ανθρώπινο όριο άνεσης 0.15 m/sec. Ο Cheng είχε προτείνει ένα HMD σύστημα, το συνδυασμό δηλαδή ενός ενεργοποιητή ελέγχου με ένα παθητικό υδραυλικό αποσβεστήρα για να μειωθεί η δόνηση στο πύργο. Λόγω του ότι η δομή είχε ήδη κατασκευαστεί, υπήρχαν αρκετοί περιορισμοί στους οποίους θα έπρεπε να προσαρμοστεί ένα τέτοιο σύστημα. Οι WU και Yang υπέδειξαν ως λύση τη χρήση της ελεγχόμενης ολίσθησης. Το σχέδιο δράσης που τελικά επιλέχτηκε για να περιορίσει τη δομική απόκριση μέσα στα αποδεκτά όρια ήταν ένα καινοτόμο σύστημα ενεργού αποσβεστήρα, το οποίο προτάθηκε από τον Cao και Riley. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί μάζα 60 τόνων σε σχήμα δακτυλίου πάνω σε ρουλεμάν τριβής-ολίσθησης και έχει την ικανότητα να μειώνει επαρκώς τη δομική απόκριση μέσω ενός μη γραμμικού ελέγχου χωρίς να παραβιάζει τους περιορισμούς.

4.3.2 Συστήματα δομικού ελέγχου με ενεργούς τένοντες

Τα ενεργά συστήματα τενόντων ελέγχου αποτελούνται από ένα σύνολο προεντεταμένων τενόντων των οποίων ο εφελκυσμός ελέγχεται από ηλεκτρικούς σερβομηχανισμούς. Το σχήμα 4.9 παρουσιάζει την τυπική διαμόρφωση ενός ενεργού συστήματος ελέγχου χρησιμοποιώντας τους ενεργούς τένοντες. Οι ενεργοί τένοντες εγκαθίστανται μεταξύ δύο ορόφων της κατασκευής ενός κτηρίου. Ένας κυλινδρικός ενεργοποιητής συνδέεται με τον όροφο από κάτω. Η μία άκρη του τένοντα συνδέεται με τον ανώτερο όροφο και η

άλλη άκρη στο έμβολο των ενεργοποιητών. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, η δομική δόνηση προκαλεί μετατόπιση της δομής, η οποία οδηγεί στη μετακίνηση του εμβόλου των ενεργοποιητών. Αυτή η σχετική μετακίνηση αλλάζει την τάση των προεντεταμένων τενόντων, εφαρμόζοντας κατά συνέπεια τη δύναμη ελέγχου στη δομή για να μειώσει τη σεισμική απόκριση της.



Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ενός συστήματος ενεργών τενόντων.

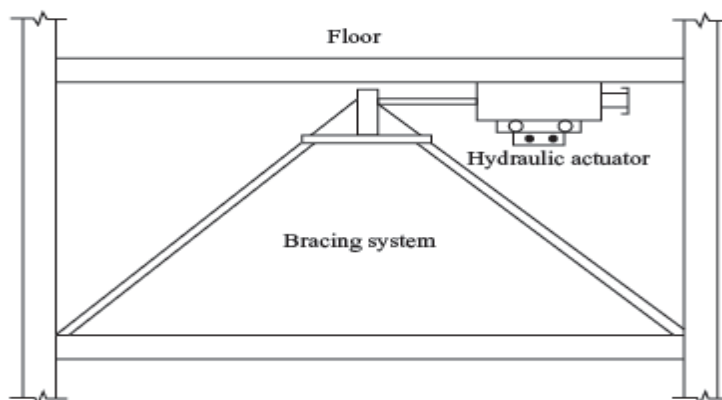
Ο ενεργός έλεγχος των τενόντων έχει μελετηθεί αναλυτικά και πειραματικά. Η εφαρμογή ενός πραγματικού μεγέθους ενεργού συστήματος τενόντων έχει εξεταστεί σε ένα εξαώροφο κτήριο 600 τόνων στο Τόκιο. Τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά και αυτά της προσομοίωσης παρουσιάζουν σημαντική μείωση της σεισμικής απόκρισης των έξυπνων κατασκευών που χρησιμοποιούν συστήματα τενόντων.

Οι ενεργοί τένοντες μπορούν να λειτουργήσουν σε συνεχή χρόνο και παλμικά. Κατά συνέπεια, ο ενεργός έλεγχος τενόντων μπορεί να προσαρμόσει και τους συνεχείς αλγόριθμους ελέγχου και τους παλμικούς, το οποίο ελαχιστοποιεί την ανάγκη για προσθήκες και τροποποιήσεις στη κατασκευή.

4.3.3 Συστήματα ενεργών συνδέσμων (Active Brace Systems)

Ένα ενεργό σύστημα συνδέσμων χρησιμοποιεί τον υπάρχον δομικό φορέα για να εγκαταστήσει μια ενεργή συσκευή ελέγχου (δηλ. τον ενεργοποιητή) επάνω σε μια κατασκευή. Τρεις τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν, η διαγώνια στήριξη, τα στηρίγματα μορφής K και τα στηρίγματα μορφής X, τα παραπάνω χρησιμοποιούνται ήδη και στα παθητικά συστήματα. Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές, οι οποίοι λειτουργούν με σερβοβαλβίδα έχουν την ικανότητα να ελέγχουν μεγάλα μεγέθη δύναμης η οποία συγκεντρώνεται στο σύστημα στήριξης μεταξύ των δύο ορόφων. Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ένα ενεργό σύστημα στηριγμάτων ελέγχου με ένα υδραυλικό ενεργοποιητή που τοποθετείται σε ένα στήριγμα μορφής K. Ο κύλινδρος του ενεργοποιητή τοποθετείται στο πάτωμα της κατασκευής και το έμβολο των ενεργοποιητών συνδέεται με το στήριγμα. Αυτό το σύστημα αποτελείται από μια

σερβοβαλβίδα, μια σερβοβαλβίδα – ελεγκτή, ένα υδραυλικό ενεργοποιητή, μια παροχή υδραυλικού ρεύματος, αισθητήρες και ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή με ένα προκαθορισμένο αλγόριθμο ελέγχου. Οι αισθητήρες υπολογίζουν τη κίνηση της δομής κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Ο υπολογιστής ελέγχου χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ελέγχου για να επεξεργαστεί αυτές τις μετρήσεις και για να παραγάγει το σήμα ελέγχου. Η σερβοβαλβίδα χρησιμοποιεί έπειτα το σήμα ελέγχου για να ρυθμίσει την κατεύθυνση ροής και την ένταση, η οποία παράγει μια διαφορά πίεσης στους θαλάμους των δύο ενεργοποιητών. Η δύναμη ελέγχου παράγεται έτσι από τη διαφορά πίεσης για να αντισταθεί στα σεισμικά φορτία της δομής.



Σχήμα 4.10 Ενεργό σύστημα στήριξης με υδραυλικό ενεργοποιητή.

Τα ενεργά συστήματα στήριξης έχουν μελετηθεί αναλυτικά και πειραματικά. Τα συστήματα ενεργών συνδέσμων προσφέρουν το ίδιο πλεονέκτημα με τα συστήματα ενεργού τένοντα. Οι τροποποιήσεις στη κατασκευή ελαχιστοποιούνται επειδή τα υπάρχοντα δομικά μέλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση του ενεργοποιητή.

4.3.4 Συστήματα παλμικής παραγωγής (Pulse Generation Systems)

Ένα σύστημα παλμικής παραγωγής χρησιμοποιεί μια παλμική γεννήτρια αντί για ένα υδραυλικό ενεργοποιητή. Οι παλμικές γεννήτριες χρησιμοποιούν μηχανισμούς πεπιεσμένου αέρα για να παράξουν μια ενεργή δύναμη ελέγχου. Τέτοιοι μηχανισμοί χρησιμοποιούν τον πεπιεσμένο αέρα για να παράξουν μια παλμικού τύπου δύναμη ώθησης, διαφορετική από τους υδραυλικούς ενεργοποιητές χρησιμοποιώντας ένα υψηλής πίεσης ρευστό. Ένα έξυπνο σύστημα παραγωγής μπορεί να επιτευχθεί με την εγκατάσταση των παλμικών γεννητριών σε διάφορες θέσεις μέσα στη κατασκευή. Όταν μια μεγάλη σχετική ταχύτητα ανιχνεύεται σε οποιαδήποτε από αυτές τις θέσεις, ο ενεργοποιητής συμπιεσμένου αέρα ενεργοποιείται και μια μεγάλη δύναμη ελέγχου εφαρμόζεται στη κατασκευή. Οι ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει προσομοιώσεις σε ένα πλαίσιο χάλυβα έξι ορόφων με μια παλμική γεννήτρια στη κορυφή της δομής και τα αποτελέσματα της δοκιμής έχουν δείξει, ότι οι παλμικές γεννήτριες κατατάσσονται στις συσκευές που μελλοντικά υπόσχονται πολλά στη σεισμική απόκριση.

Η χρήση παλμικών γεννητριών που χρησιμοποιούν την ενέργεια του συμπιεσμένου αέρα δεν έχει υψηλό κόστος. Εντούτοις, η ενέργεια που παράγεται μπορεί να μην είναι αρκετά ισχυρή για να ελέγξει κατασκευές πραγματικού μεγέθους. Επιπλέον, τα συστήματα παλμικής παραγωγής πιθανότατα να έχουν υψηλή μη γραμμικότητα, δεδομένου ότι η δύναμη που παράγεται από τους ενεργοποιητές πεπιεσμένου αέρα μπορεί να παρεκκλίνει από μια ιδανική ορθογώνια παλμική μορφή.

4.4 Υβριδικά συστήματα ελέγχου

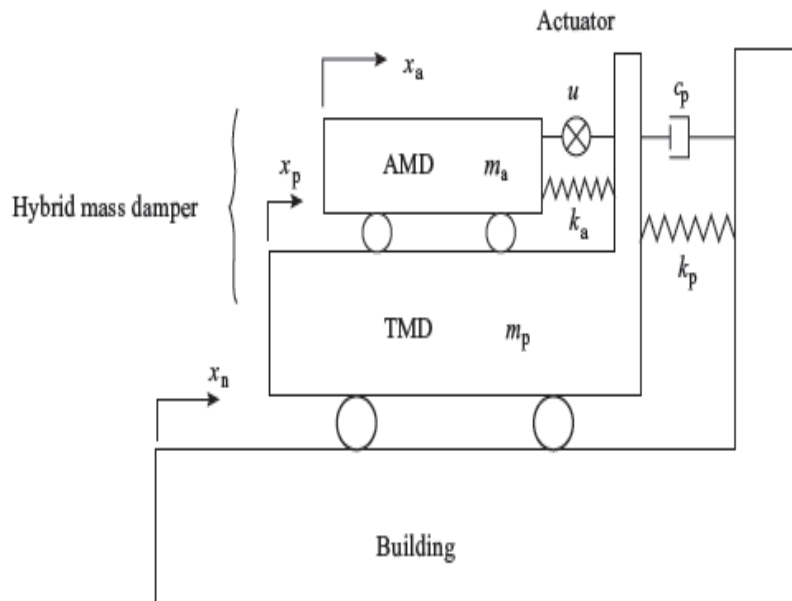
4.4.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των ενεργών συστημάτων ελέγχου έχει ως στόχο την εξέταση της νοημοσύνης και των περιορισμένων ικανοτήτων των παθητικών και ημιενεργών αποσβεστήρων. Εντούτοις, ο ενεργός δομικός έλεγχος έχει δύο μειονεκτήματα. Κατ' αρχάς, η λειτουργία του εξαρτάται στο σύνολο της από μια εξωτερική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και απαιτεί ένα σύνθετο σύστημα αισθητήρων και επεξεργασίας των πληροφοριών. Αυτή η πολυπλοκότητα περιορίζει το σύστημα ελέγχου και μειώνει την αξιοπιστία του. Δεύτερον, για την εφαρμογή ενός συστήματος ενεργού ελέγχου απαιτείται εξοπλισμός που να παράγει μεγάλα ποσά ενέργειας, δηλαδή μεγάλους ενεργοποιητές. Δεδομένου ότι οι σεισμικά ανθεκτικές κατασκευές ζυγίζουν εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες τόνους, η απαραίτητη δύναμη ελέγχου θα πρέπει να υπερβεί εκατοντάδες κιλό-Νιούτον για να αυξήσει τη δομική δύναμη απόσβεσης ικανοποιητικά. Η πρόσφατη ανάπτυξη της βιομηχανικής τεχνολογίας καθιστά εφικτή την κατασκευή ενός μεγάλου ενεργοποιητή, αλλά το κόστος του περιορίζει σοβαρά την εφαρμογή του. Τα καινοτόμα υβριδικά συστήματα ελέγχου, τα οποία συνδυάζουν τις τεχνικές των παθητικών και ενεργών συστημάτων ελέγχου, έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα που τα καθιστούν πιο ελκυστικά. Όταν οι δύο αυτοί τύποι συστημάτων λειτουργούν μαζί, η αξιοπιστία τους εξασφαλίζεται από τα παθητικά και η ικανότητα τους από τα ενεργά συστήματα. Ένα υβριδικό σύστημα αποκομίζει τα πλεονεκτήματα των δύο αυτών συστημάτων και αντισταθμίζει τους περιορισμούς που συνεπάγονται εξ' αυτών ξεχωριστά. Κατά συνέπεια, υπερβαίνει σε αποτελεσματικότητα τα παθητικά, ημιενεργά και ενεργά συστήματα. Τα υβριδικά συστήματα ελέγχου έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται ιδιαίτερα από τα τέλη του 1990. Τρία χαρακτηριστικά υβριδικά συστήματα ελέγχου έχουν αναπτυχθεί: τα HMD, τα υβριδικά συστήματα απομόνωσης βάσης και τα συστήματα αποσβεστήρα-ενεργοποιητή.

4.4.2 Υβριδικοί αποσβεστήρες μάζας

Οι υβριδικοί αποσβεστήρες συνδυάζουν ένα παθητικό σύστημα TMD και ένα ενεργοποιητή ενεργού ελέγχου ή αποτελούνται από την πρόσθεση ενός AMD συστήματος σε ένα TMD, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11. Το AMD έχει τοποθετηθεί σε ένα σύστημα TMD αντί στη δομή. Η ικανότητα καταστολής δόνησης του υβριδικού αποσβεστήρα μάζας (HMD) στηρίζεται κυρίως στη φυσική κίνηση του TMD. Ο ενεργοποιητής παράγει τη δύναμη ελέγχου, η οποία ρυθμίζει το TMD και αυξάνει έτσι την αποδοτικότητα και την ευρωστία της συσκευής για να αλλάξει τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, ο AMD έχει ως σκοπό να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα του ελέγχου

στις υψηλότερες συχνότητες της κατασκευής. Κατά συνέπεια, η ενέργεια και οι δυνάμεις που απαιτούνται για να λειτουργήσει ένα αποσβεστήρας HMD είναι πολύ

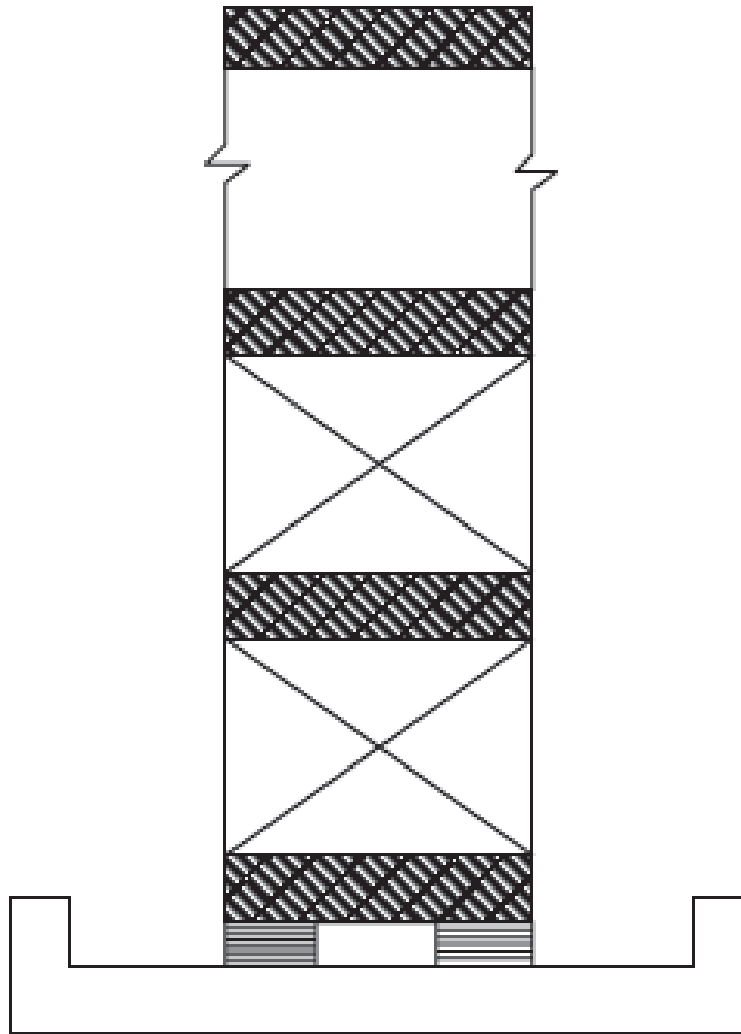


Σχήμα 4.11 Σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού αποσβεστήρα μάζας.

λιγότερες από εκείνες που χρησιμοποιεί ένα πλήρες σύστημα AMD με τη συγκρίσιμη απόδοση. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα κάνει τα HMDs σχετικά ανέξοδα στο να επιτύχουν το βέλτιστο αποτελεσματικό έλεγχο και είναι η πιο κοινή συσκευή ελέγχου που χρησιμοποιείται στις πραγματικού μεγέθους εφαρμογές κτηρίων. Αφενός, οι περιορισμοί στο σχεδιασμό, όπως τα αυστηρά όρια δόμησης, μπορούν να αποκλείσουν τη χρήση ενός συστήματος HMD.

4.4.3 Υβριδικά συστήματα απομόνωσης βάσης

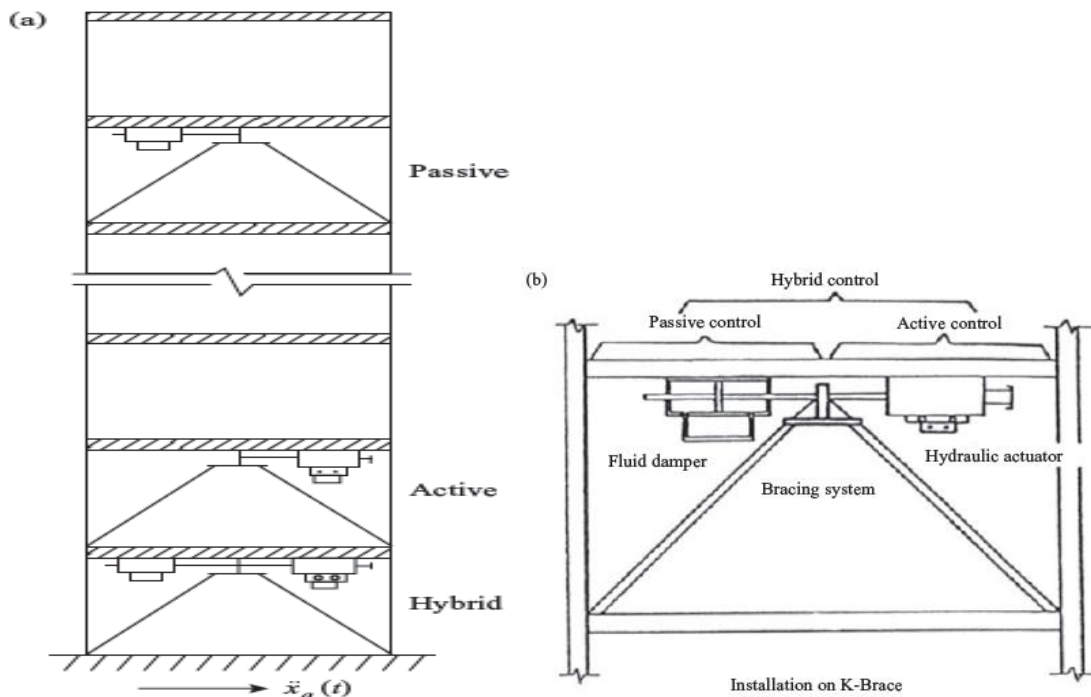
Ένα υβριδικό σύστημα απομόνωσης βάσης που συνδυάζει ένα σύστημα απομόνωσης βάσης και ένα σύστημα ελέγχου έχει προταθεί επίσης. Αυτό το σύστημα (σχήμα 4.12) αποτελείται από ένα ενεργό σύστημα τενόντων τοποθετημένων στην κατασκευή και ένα σύστημα απομόνωσης βάσης μεταξύ των θεμελίων και της κατασκευής. Έχουν πραγματοποιηθεί θεωρητικές μελέτες σύστημα απομόνωσης βάσης με ενεργοποιητές, συμπεριλαμβανομένης της μη γραμμικότητας του συστήματος, την άμεση λειτουργία ανατροφοδότησης και τη τεχνική λειτουργία ελέγχου ολίσθησης. Οι ερευνητές έχουν προτείνει επίσης ένα άλλο τύπο υβριδικού συστήματος απομόνωσης βάσης χρησιμοποιώντας αποσβεστήρες MR στη κατασκευή. Αυτό το σύστημα καλείται έξυπνο ή ευφυές, χρησιμοποιώντας τα ρευστά MR για να προσαρμοστεί στις συνεχώς μεταβαλλόμενες σεισμικές διεγέρσεις. Οι πειραματικές προσομοιώσεις μιας δομής με τη χρήση αυτού του έξυπνου συστήματος απομόνωσης βάσης έχουν πραγματοποιηθεί για να ελέγξουν την αποτελεσματικότητά του.



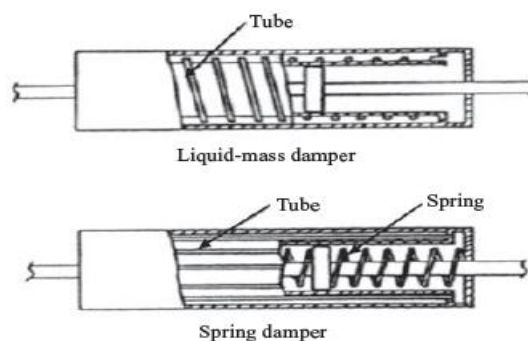
Σχήμα 4.12 Υβριδικό σύστημα απομόνωσης βάσης με ενεργοποιητές.

4.4.4 Υβριδικό σύστημα ελέγχου αποσβεστήρα-ενεργοποιητή με στήριξη (Hybrid Damper-Actuator Bracing Control)

Στις αρχές τις δεκαετίας του 1990, ο Cheng και οι συνάταιροι του ανέπτυξαν ένα υβριδικό αποσβεστήρα-ενεργοποιητή (damper-actuator), που επίσης αποκαλείται υβριδικό σύστημα ελέγχου στήριξης με την τοποθέτηση στηριγμάτων μορφής K, όπως αυτός φαίνεται στο σχήμα 4.13.α. Εξαιτίας των διάφορων στόχων ελέγχου και της οικονομικής εκτίμησης, μια υβριδική συσκευή, ένας ενεργοποιητής, ένας αποσβεστήρας ή καμία συσκευή ελέγχου δεν μπορούν να εγκατασταθούν στο πάτωμα ενός κτηρίου. Οι αποσβεστήρες με υγρά, οι αποσβεστήρες με ελατήρια (spring dampers) και οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες έχουν προταθεί ως οι παθητικές συσκευές για το σύστημα (σχήμα 4.13.β). Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές προτείνονται ως η ενεργή συσκευή του συστήματος λόγω της ισχυρής τους ικανότητας παραγωγής δύναμης.



Σχήμα 4.13 Υβριδικό σύστημα στήριξης και συσκευές ελέγχου, (α) ρύθμιση παραμέτρων.

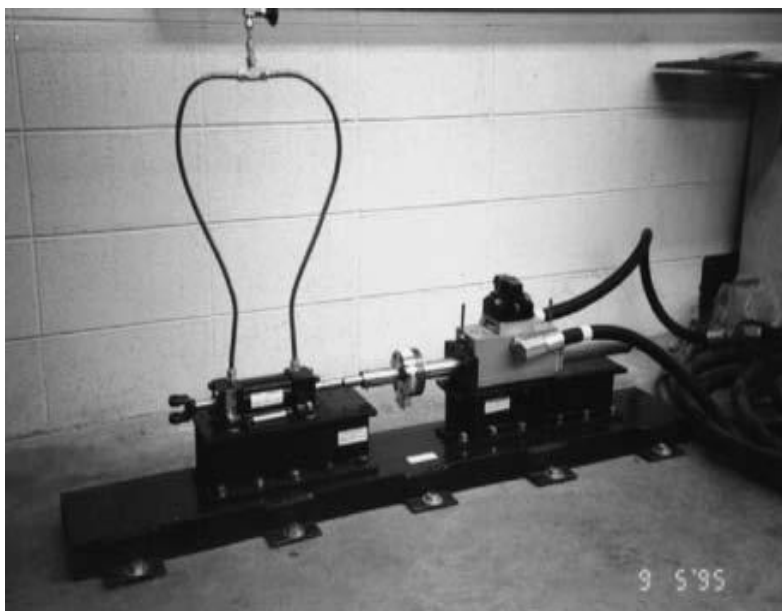


Σχήμα 4.13 (β) εγκατάσταση συσκευής.

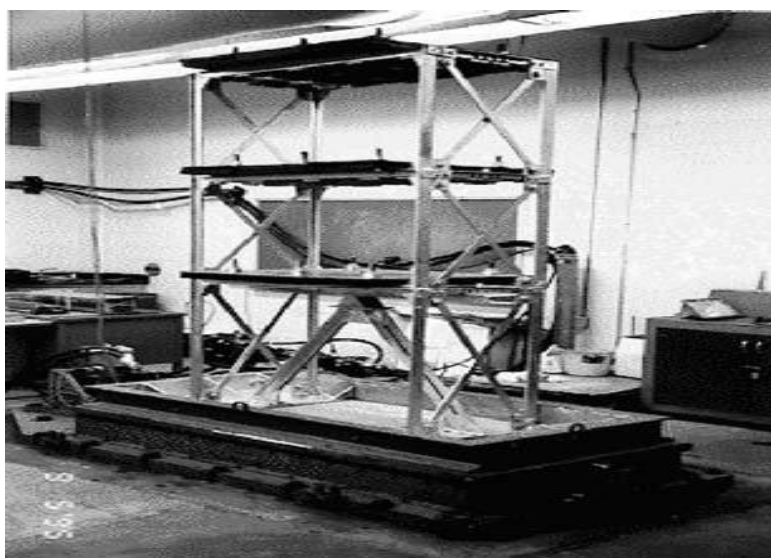
Για το υβριδικό σύστημα αποσβεστήρων με υγρό έχουν πραγματοποιηθεί εκτενείς μελέτες. Οι θεωρητικές μελέτες εστιάζουν στη διαμόρφωση των συστημάτων, στη βέλτιστη ανάπτυξη του αλγόριθμου, στο μηχανισμό απόσβεσης, στη αποτελεσματικότητα και τέλος στην αξιολόγηση. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μελέτες για την συσκευή απόσβεσης και έγιναν δοκιμές προσομοίωσης σε μία κατασκευή τριών ορόφων στην οποία είχε τοποθετηθεί ένα υβριδικό σύστημα ελέγχου (σχήματα 4.14 και 4.15). Το υβριδικό σύστημα ελέγχου στήριξης αποτελείται από ένα υδραυλικό ενεργοποιητή και ένα ιξωδοελαστικό αποσβεστήρα, οι οποίοι έχουν ενσωματωθεί σε ένα στήριγμα μορφής K στο πρώτο όροφο της πρότυπης κατασκευής. Οι δοκιμές αυτές διεξήχθησαν με σκοπό να βρεθούν οι φυσικές συχνότητες και ο τρόπος λειτουργίας της κατασκευής.

Ένα σύστημα αναγνώρισης κλειστού βρόγχου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του υβριδικού ελέγχου της κατασκευής. Η διαδικασία προσδιορισμού πραγματοποιείται από έναν παρατηρητή κατάστασης (OCID), ο οποίος καθορίζει τις παραμέτρους του συστήματος και ένας αλγόριθμος πραγματοποίησης ιδιοσυστήματος (Eigensystem Realization Algorithm) ERA, επιτυγχάνει τον έλεγχο της πρότυπης κατασκευής με

υβριδικό έλεγχο. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν την αναλυτική διαμόρφωση της δομής με υβριδικό έλεγχο. Οι δοκιμές και μελέτες προσομοίωσης σε υπολογιστή έχουν δείξει ότι αυτό το σύστημα έχει μεγαλύτερη ικανότητα από ένα ενεργό σύστημα στη μείωση της σεισμικής δομικής απόκρισης, και απαιτεί λιγότερη ενεργό δύναμη από ένα ενεργό σύστημα ελέγχου για να επιτύχει το βέλτιστο έλεγχο.



Σχήμα 4.14 Δοκιμή του υβριδικού αποσβεστήρα-ενεργοποιητή με στήριξη (HDABC).



Σχήμα 4.15 Δοκιμή σε τριώροφο κτήριο με HDABC.

Ένα υβριδικό σύστημα αποσβεστήρων-ενεργοποιητών είναι ελκυστικότερο από κάθε άλλο υβριδικό σύστημα ελέγχου εξαιτίας των πρόσθετων πλεονεκτημάτων του. Σε αυτό το σύστημα, ένας αποσβεστήρας και ένας ενεργοποιητής μπορούν να συνδυαστούν ή να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά. Η εγκατάσταση των συσκευών ελέγχου επάνω στη κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει τον υπάρχοντα δομικό φορέα και η ενεργός

δύναμη ελέγχου εφαρμόζεται άμεσα στη κατασκευή. Κατά συνέπεια, ένα υβριδικό σύστημα στήριξης κοστίζει λιγότερο από ένα σύστημα μόνωσης βάσης με ενεργοποιητή και έχει περισσότερη ικανότητα ελέγχου από ένα HMD.

Ο υβριδικός έλεγχος, που συνδυάζει τα παθητικά και ενεργά συστήματα, είναι μια ελκυστική καινοτομία και ένα αποτελεσματικό σύστημα προστασίας. Τέτοια συστήματα υπερνικούν τα μειονεκτήματα των παθητικών, ενεργών, και ημιενεργών συστημάτων ελέγχου κερδίζοντας την αξιοπιστία των παθητικών συστημάτων και την ικανότητα των ενεργών συστημάτων ελέγχου. Με δύο τεχνικές ελέγχου σε λειτουργία μαζί, οι περιορισμοί καθεμίας τεχνικής που λειτουργεί μεμονωμένα ανακουφίζονται. Ένα υβριδικό σύστημα έχει μεγαλύτερη ικανότητα και μια μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα από ένα ενεργό σύστημα, κοστίζει λιγότερο και απαιτεί μικρότερη εξωτερική δύναμη από ένα ενεργό σύστημα ελέγχου. Με αυτά τα θετικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, ο υβριδικός έλεγχος γίνεται πολύ ελπιδοφόρος για τη σεισμική μείωση της απόκρισης των κτηρίων.

Full-Scale Structure	Location	Year Completed	Scale of Building	Control System Employed	AMD/HMD		Actuation Mechanism
					No.	Mass (tons)	
Kyobashi Seiwa	Tokyo, Japan	1989	33m, 400 ton, 11 stories	AMD	2	5	hydraulic
Kajima Research Institute KaTRI No. 21 Building	Tokyo, Japan	1990	12m, 400 ton, 3 stories	Active Variable Stiffness System (6 devices)	-	-	hydraulic
Sendagaya INTES	Tokyo, Japan	1992	58m, 3280 ton, 11 stories	AMD	2	72	hydraulic
Applause Tower	Osaka, Japan	1992	161m, 13943 ton, 34 stories	HMD	1	480	hydraulic
Kansai Int. Airport Control Tower	Osaka, Japan	1992	86m, 2570 ton, 7 stories	HMD	2	10	servo motor
Osaka Resort City 2000	Osaka, Japan	1992	200m, 56980 ton, 50 stories	HMD	2	200	servo motor
Yokohama Land Mark Tower	Yokohama, Kanagawa, Japan	1993	296m, 260610 ton, 70 stories	HMD	2	340	servo motor
Long Term Credit Bank	Tokyo, Japan	1993	129m, 40000 ton, 21 stories	HMD	1	195	hydraulic
Ando Nishikicho	Tokyo, Japan	1993	54m, 2600 ton, 14 stories	HMD (DUOX)	1	22	servo motor
Hotel Nikko Kanazawa	Kanazawa, Ishikawa, Japan	1994	131m, 27000 ton, 29 stories	HMD	2	100	hydraulic
Hiroshima Riegha Royal Hotel	Hiroshima, Japan	1994	150m, 83000 ton, 35 stories	HMD	1	80	servo motor
Shinjuku Park Tower	Tokyo, Japan	1994	227m, 130000 ton, 52 stories	HMD	3	330	servo motor
MHI Yokohama Bldg.	Yokohama, Kanagawa, Japan	1994	152m, 61800 ton, 34 stories	HMD	1	60	servo motor
Hamamatsu ACT Tower	Hamamatsu, Shizuoka, Japan	1994	212m, 107500 ton, 46 stories	HMD	2	180	servo motor

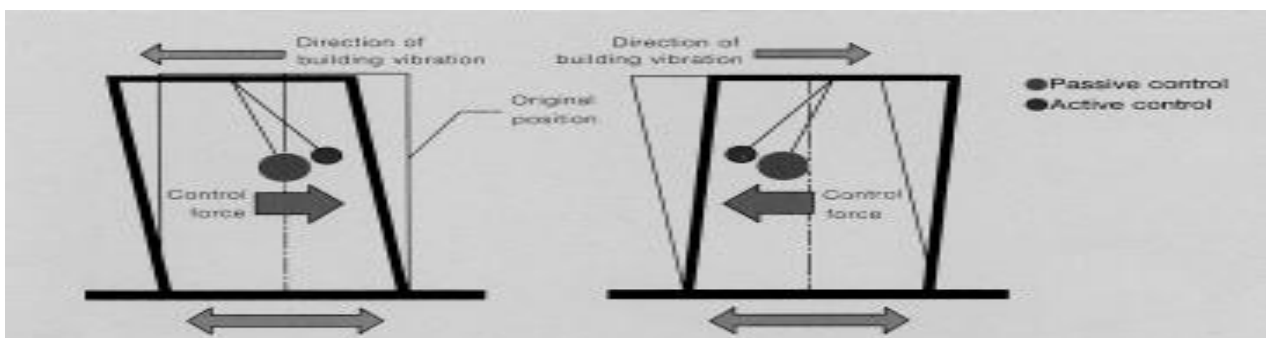
Σχήμα 4.16 Συνοπτική παρουσίαση των ενεργών ελεγχόμενων κτηρίων / Πύργων.

Full-Scale Structure	Location	Year Completed	Scale of Building	Control System Employed	AMD/HMD		Actuation Mechanism
					No.	Mass (tons)	
Riverside Sumida	Tokyo, Japan	1994	134m, 52000 ton, 33 stories	AMD	2	30	servo motor
Hikarigaoka J-City	Tokyo, Japan	1994	110m, 29300 ton, 26 stories	HMD	2	44	servo motor
Miyazaki Phoenix Hotel Ocean 45	Miyazaki, Japan	1994	154m, 83650 ton, 43 stories	HMD	2	240	servo motor
Osaka WTC Bldg.	Osaka, Japan	1994	252m, 80000 ton, 52 stories	HMD	2	100	servo motor
Dowa Kasai Phoenix Tower	Osaka, Japan	1995	145m, 26000 ton, 28 stories	HMD (DUOX)	2	84	servo motor
Rinku Gate Tower North Bldg.	Osaka, Japan	1995	255m, 75000 ton, 56 stories	HMD	2	160	servo motor
Hirobe Miyake Bldg.	Tokyo, Japan	1995	31m, 273 ton, 9 stories	HMD	1	2.1	servo motor
Plaza Ichihara	Chiba, Japan	1995	61m, 5760 ton, 12 stories	HMD	2	14	servo motor
TC Tower	Kao Hsung, Taiwan	1996	85 stories	HMD	2	350	servo motor
Nanjing Tower	Nanjing, China	1997/98	310m	AMD	1	60	hydraulic

Σχήμα 4.17 Συνέχεια συνοπτικής παρουσίασης των ενεργών ελεγχόμενων κτηρίων / Πύργων.

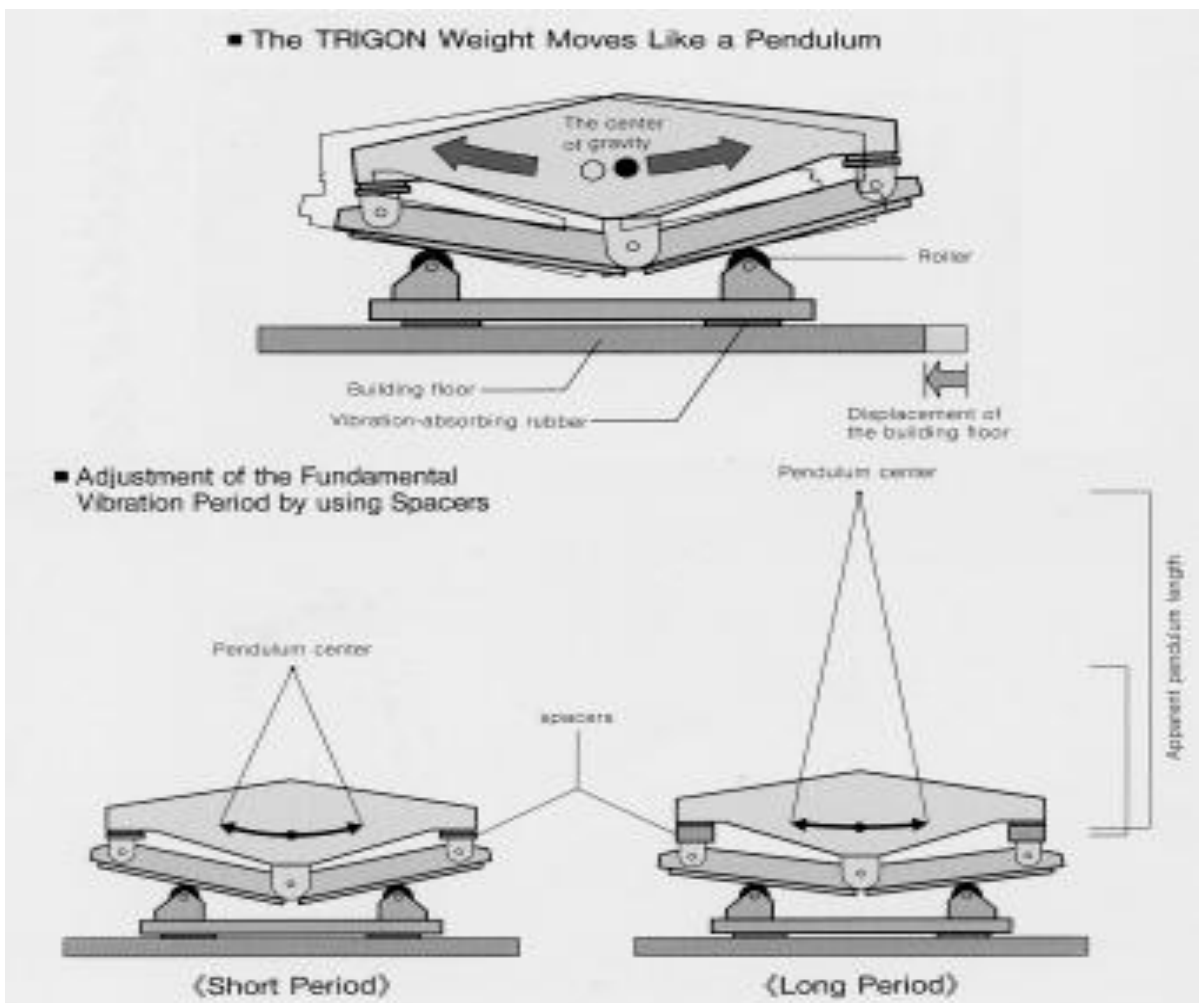
4.4.5 Ενεργός ρυθμιζόμενος αποσβεστήρας TRIGON (Active Tuned Mass Damper)

Το σύστημα TRIGON αναπτύχθηκε από την εταιρεία Kajima, που είχε ως στόχο τη δημιουργία ενός καλύτερου ενεργού συστήματος ελέγχου, το οποίο δεν θα είχε μεγάλες απαιτήσεις εξωτερικής τροφοδοσίας. Ουσιαστικά, η συσκευή είναι παρόμοια με μία κρεμάμενη μάζα που συμπεριφέρεται ως συντονισμένο εκκρεμές, εκτός από το ότι ένας ενεργοποιητής είναι συνδεδεμένος με το εκκρεμές που μπορεί δυναμικά να επεκτείνει το εύρος του εκκρεμούς. Αυτό το εκτεταμένο εύρος δημιουργεί μια μεγαλύτερη δύναμη ελέγχου πάνω στη δομή στην οποία βρίσκεται (σχήμα 5).



Σχήμα 4.18 Παρουσιάζει την ιδέα πάνω στην αναπτύχθηκε το σύστημα TRIGON.

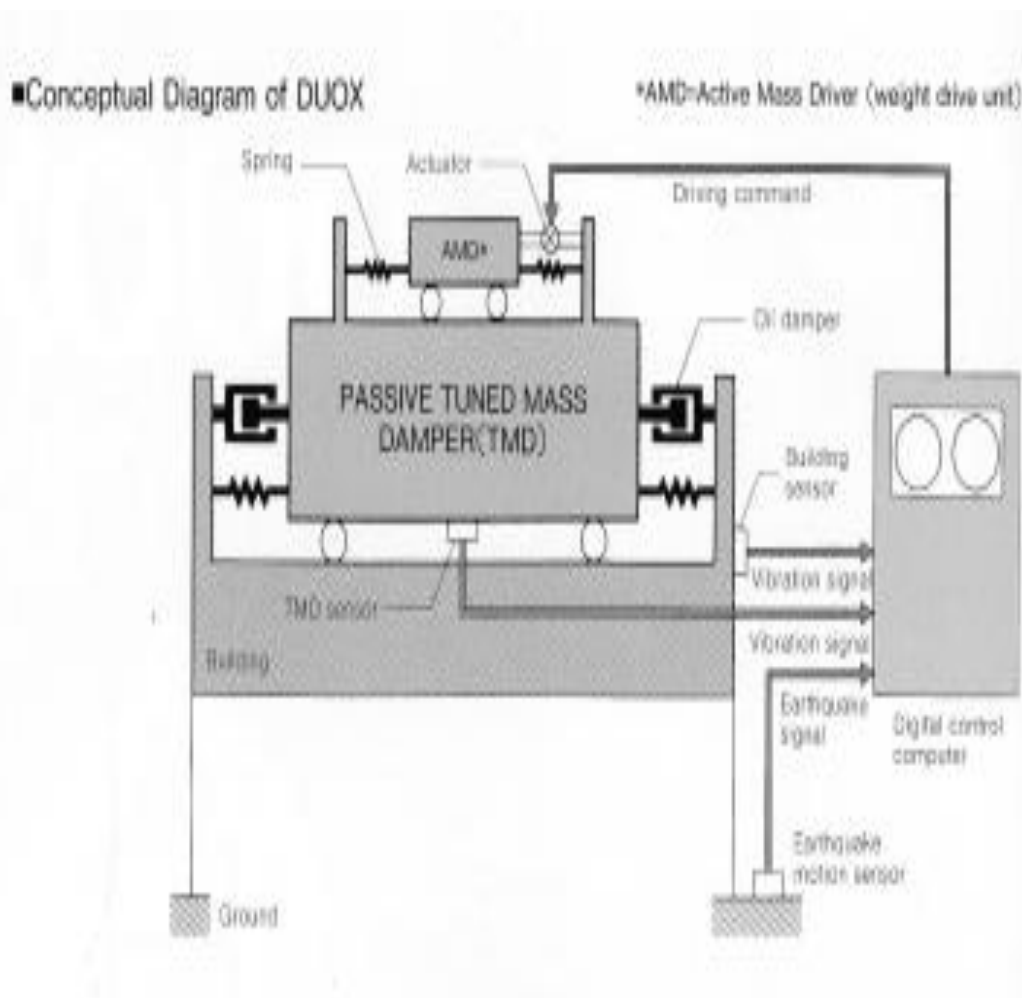
Στη συσκευή TRIGON, η μάζα δεν είναι κρεμάμενη αλλά τοποθετείται επάνω σε μια ράγα σχήματος V που μπορεί να κυλήσει μέσω των κυλίνδρων. Επιπλέον, η διαφορετική τοποθέτηση της μάζας της επιτρέπει να είναι μικρότερη σε μέγεθος για να μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα δωμάτιο ενός κτηρίου (οι διαστάσεις της TRIGON είναι 7.6 4.4 3.5μ). Οι ράγες σχήματος V επιτρέπουν στη μάζα να ταλαντώνεται όπως σε ένα εκκρεμές με μέγιστη διαδρομή το +1 μέτρο. Η TRIGON έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιαδήποτε περίπτωση κτηρίου. Για να είναι αποτελεσματική στην δυσκαμψία διαφόρων κατασκευών, υπάρχει τρόπος να αλλάξει η περίοδος της μάζας, η γωνία της ράγας μπορεί να προσαρμοστεί και να αυξήσει το μήκος του ιδιόμορφου εκκρεμούς ή να το μειώσει, η οποία αντίστοιχα αυξάνει ή μειώνει την περίοδο της μάζας. Η περίοδος μπορεί να ρυθμιστεί από 3.7 έως και 5.8 δευτερόλεπτα ανάλογα με την εφαρμογή. Η δύναμη ελέγχου τοποθετείται άμεσα επάνω στη μάζα μέσω μιας ηλεκτρικής μηχανής με μηχανισμό μείωσης των στροφών και με κρεμαγιέρα. Η δύναμη αδράνειας της μάζας με τη σειρά της γίνεται η δύναμη ελέγχου της κατασκευής. Η μάζα δεν μπορεί να κινηθεί ελεύθερα χωρίς τη βοήθεια του ενεργοποιητή λόγω της επιφάνειας τριβής μεταξύ της μάζας και των κυλίνδρων.



Σχήμα 4.19 Το εκκρεμές TRIGON

4.4.6 Σύνθεση ενεργού - παθητικού ρυθμιζόμενου αποσβεστήρα μάζας DUOX (Active-Passive Composite Tuned Mass Damper)

Η σύνθεση ενεργού και παθητικού ρυθμιζόμενου αποσβεστήρα, καλείται επίσης DUOX και αποτελεί τη δεύτερη προσπάθεια της εταιρείας Kajima να βελτιώσει το σύστημα AMD. Η συσκευή είναι αυτό ακριβώς που το όνομα της υπονοεί, ένας ρυθμισμένος αποσβεστήρας μάζας (TMD), ο οποίος βρίσκεται επάνω σε ένα ενεργό σύστημα καθοδήγησης μάζας. Ένας ενεργοποιητής χρησιμοποιείται σε αυτή τη συσκευή για να ελέγχει την ενεργή μάζα καθοδήγησης της οποίας η δύναμη αδράνειας ελέγχει τον TMD (σχήμα 9). Κατά γενική ομολογία, ένας TMD αποσβεστήρας έχει υποτονική συμπεριφορά. Όταν ένα κτήριο διεγείρεται από ένα εξωτερικό φορτίο, ο TMD χρειάζεται χρόνο μέχρι να τεθεί σε πλήρη λειτουργία για να μπορεί να ενισχύσει τη κατασκευή. Σε παρόμοια περίπτωση, αφού έχει αφαιρεθεί το φορτίο από το κτήριο, το TMD σταματάει αργά τη λειτουργία του, εφαρμόζοντας κατά συνέπεια περιττή δύναμη ελέγχου στην κατασκευή. Το ενεργό σύστημα καθοδήγησης μάζας παρέχει την απαραίτητη δύναμη για να επιταχύνει τις κινήσεις του TMD στην έναρξη της φόρτωσης και παρέχει μια δύναμη φρεναρίσματος στο τέλος της φόρτωσης. Το μέγεθος της συσκευής DUOX είναι περιορισμένο και επομένως χρησιμοποιείται για να ελέγξει ένα κτήριο κατά τη διάρκεια μέτριων σεισμών ή πολύ ισχυρών ανέμων.

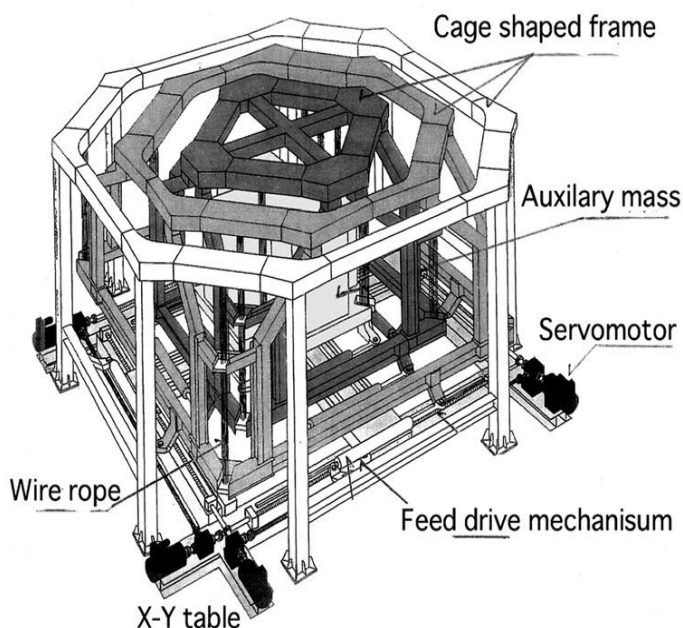
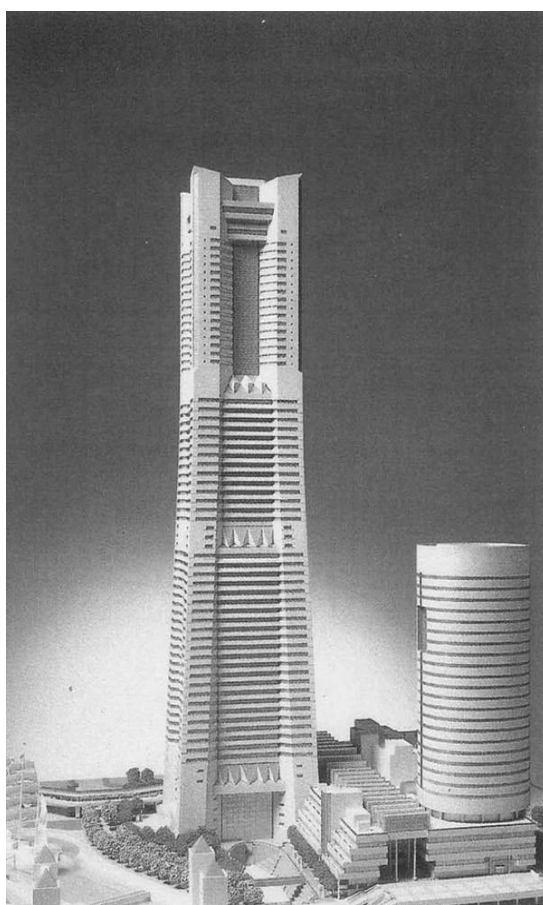


4.20 Διάγραμμα συστήματος DUOX

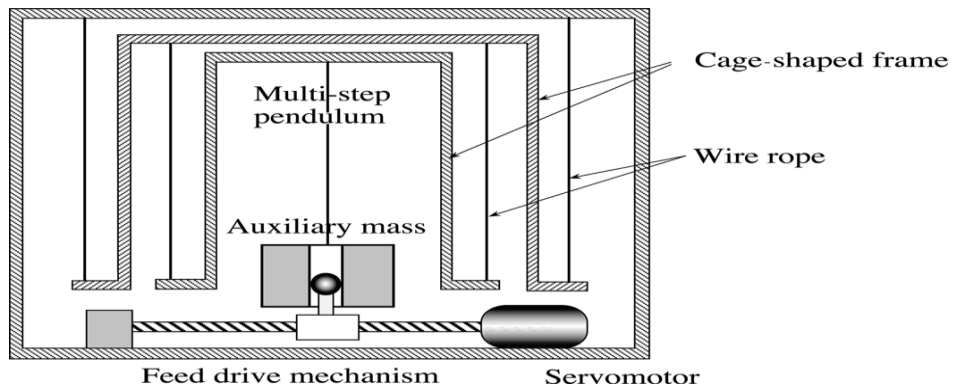
4.5 Συσσκευές ελέγχου για τον έλεγχο διέγερσης αέρα στις αστικές δομές

Πρόσφατα, διάφορα πολυώροφα κτίρια και τεράστιοι πύργοι γεφυρών που εξοπλίζονται με AMDs και HMDs, έχουν κατασκευαστεί στην Ιαπωνία (Spencer και Sain). Αν και οι ενεργές τεχνικές ελέγχου δόνησης ήταν ενεργά επιδιωκόμενες ως αντίμετρα ενάντια στους ισχυρούς άνεμους, μερικά προβλήματα παραμένουν εκκρεμή για την αξιοπιστία και την ικανότητα τους στην αποταμίευση ενέργειας. Η πρακτική λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η υβριδική μέθοδος ελέγχου δόνησης, η οποία συνδυάζει τους παθητικούς και ενεργούς μηχανισμούς ελέγχου δόνησης σε μια ενιαία μονάδα ελέγχου. Παραδείγματος χάριν, αυτή η υβριδική μέθοδος υιοθετήθηκε για το Yokohama Landmark Tower (το υψηλό κτήριο 300 μ που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.21) που ολοκληρώθηκε το 1993. Ένα HMD_ρυθμίζει τον ενεργοποιητή και τον αποσβεστήρα, παράλληλα. Δεδομένου ότι η διάταξη απόσβεσης απελευθερώνει την ενέργεια δόνησης, ένας ορισμένος βαθμός αξιοπιστίας εξασφαλίζεται, ακόμα κι αν ένα ενεργό σύστημα αποτύγχανε. Δύο πρόσφατες εφαρμογές παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους.

Το σχήμα 4.21 παρουσιάζει τη συσκευή ελέγχου δόνησης (Abiru και λοιποί., 1992) που είναι ενσωματωμένη στο Yokohama Landmark Tower. Σε αυτό το παράδειγμα, η ενισχυτική μέθοδος της βοηθητικής μάζας ανήκει στην υποστήριξη εκκρεμών.



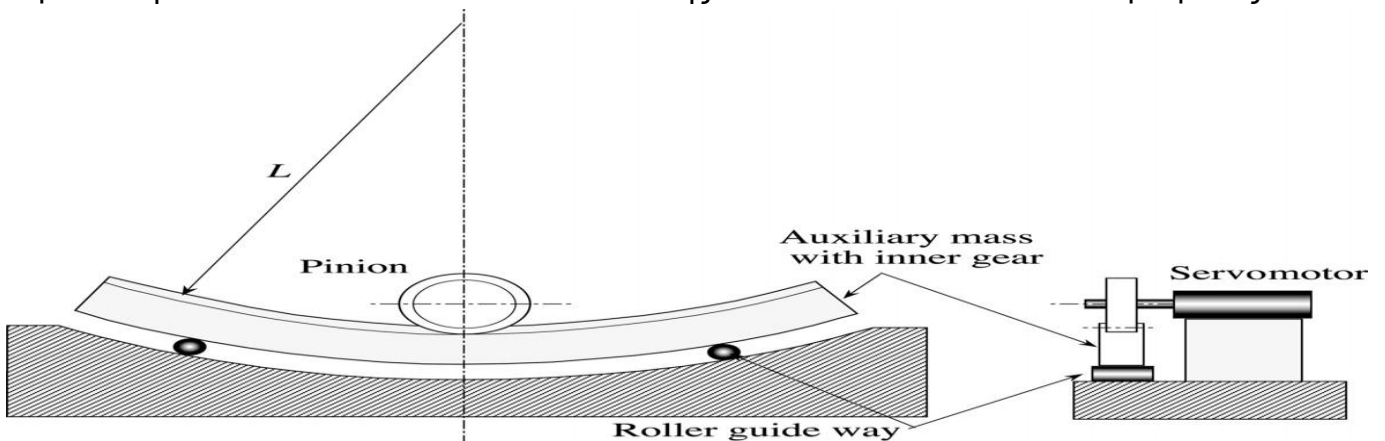
Σχήμα 4.21 Το Landmark tower που είναι εξοπλισμένο με δύο HMDs και μια εξωτερική άποψη του HMD.



Σχήμα 4.22 πολλαπλών βημάτων εκκρεμοειδές HMD.

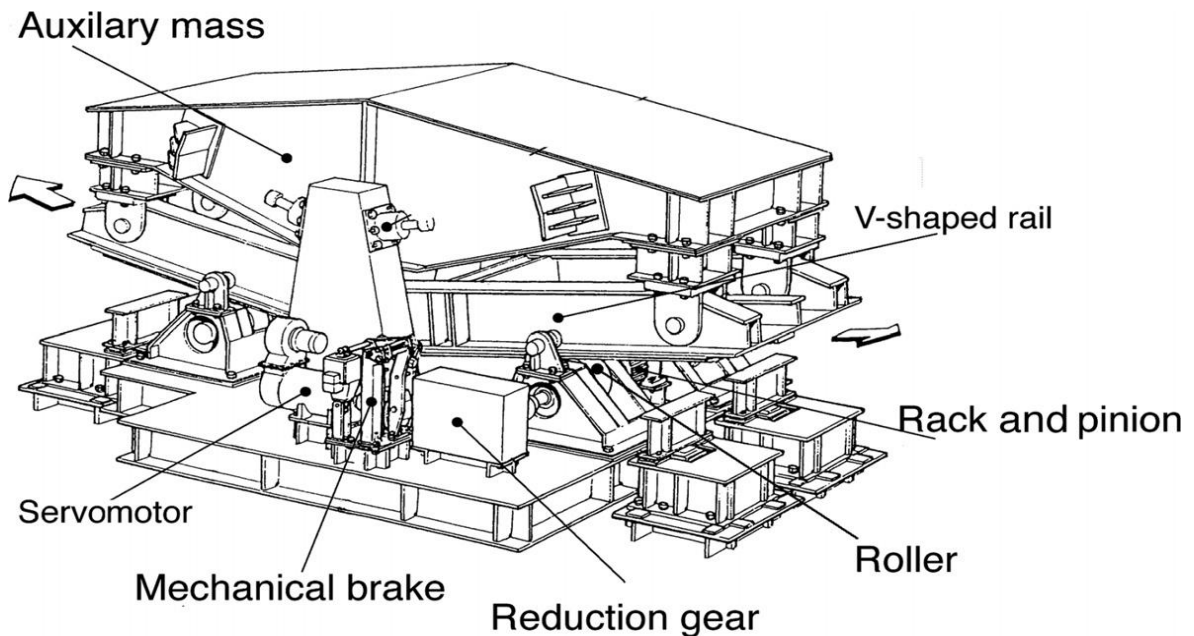
Η φυσική συχνότητα ενός εκκρεμούς τριών σταδίων, το οποίο είναι συντονισμένο σε έναν από τους πύργους, που συμπιέζει ένα εγκατεστημένο διάστημα προς την κάθετη κατεύθυνση είναι συντονισμένο σε έναν από τους πύργους. Στο σχήμα 4.22 παρουσιάζεται το Landmark tower που είναι εξοπλισμένο με δύο HMDs και μια εξωτερική άποψη του HMD που πραγματοποιείται από τις βαριές βιομηχανίες της Mitsubishi. Οι σερβοκινητήρες που λειτουργούν γραμμικά και ανεξάρτητα σε δύο οριζόντιες κατευθύνσεις οδηγούν μια βοηθητική μάζα που κρεμιέται από το εκκρεμές σε τρία στάδια. Είναι πιθανό η φυσική συχνότητα του εκκρεμούς να συντονιστεί με αυτή του κτιρίου. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της ρύθμισης είναι το συμπαγές πολλαπλών βημάτων εκκρεμές που συντονίζει τις φυσικές συχνότητες του πύργου. Ο μετρητής της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που παράγεται από την περιστροφή της μηχανής χρησιμεύει ως ένας αποσβεστήρας.

Το σχήμα 4.23 επεξηγεί ένα σύστημα με μια ενεργό μάζα, η οποία διαμορφώνεται με την κοπή του τόξου ενός κύκλου και οδηγείται από έναν σερβοκινητήρα (Tanida και λοιποί., 1991). Επειδή η κίνηση ενός τόξου ενός κύκλου έχει σταθερή περίοδο, η φυσική συχνότητα της μάζας μπορεί να τεθεί σε οποιαδήποτε τιμή μέσω της κατάλληλης επιλογής της ακτίνας L . Η εφαρμογή της απόσβεσης στην κατεύθυνση της κίνησης διαμορφώνει μια υβριδική συσκευή ελέγχου δόνησης που αποτελείται από τις κινήσεις μηχανών και τις δυνάμεις απόσβεσης. Η αντίθετη ηλεκτρεγερτική δύναμη της μηχανής λειτουργεί όπως ένας αποσβεστήρας. Επιπλέον, η παθητική λειτουργία παρέχεται σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.



Σχήμα 4.23 Τύπος κυλινδρικού οδηγού HMD.

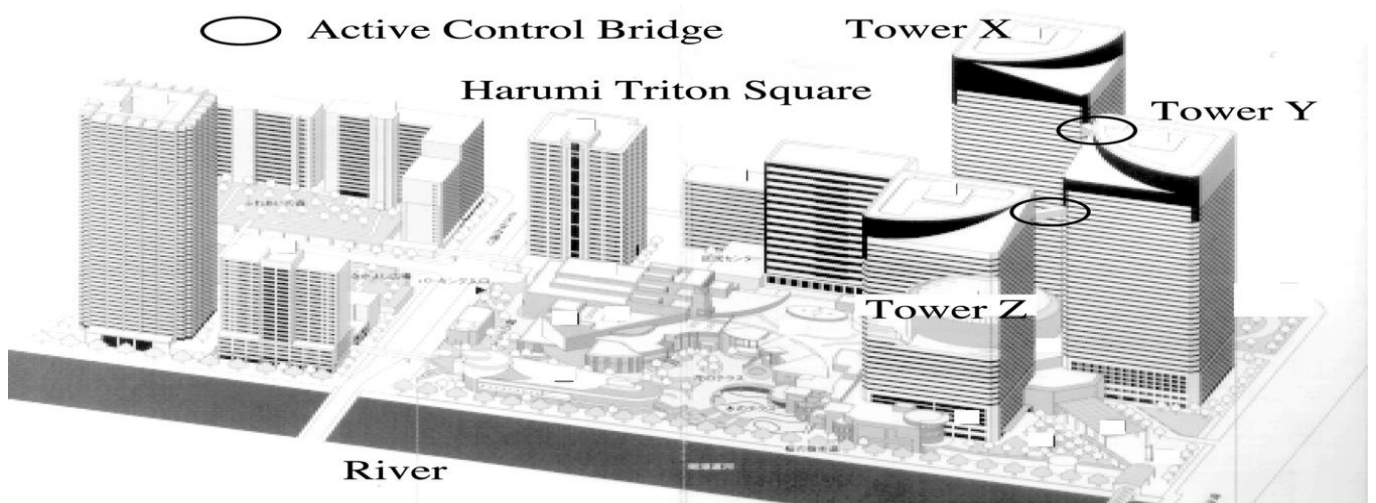
Το σχήμα 4.24 παρουσιάζει το βελτιωμένο HMD αποκαλούμενο V-shaped HMD από τις Ishikawajima Heavy Industries, επειδή η ακτίνα L επιλέγεται με την αλλαγή της γωνίας της V-shaped ράγας. Ο Tokyo Park Tower είναι εξοπλισμένος με τρεις HMDs αυτού του τύπου (Koike και λοιποί., 1998).



Σχήμα 4.24 εξωτερική άποψη του V-shaped HMD.

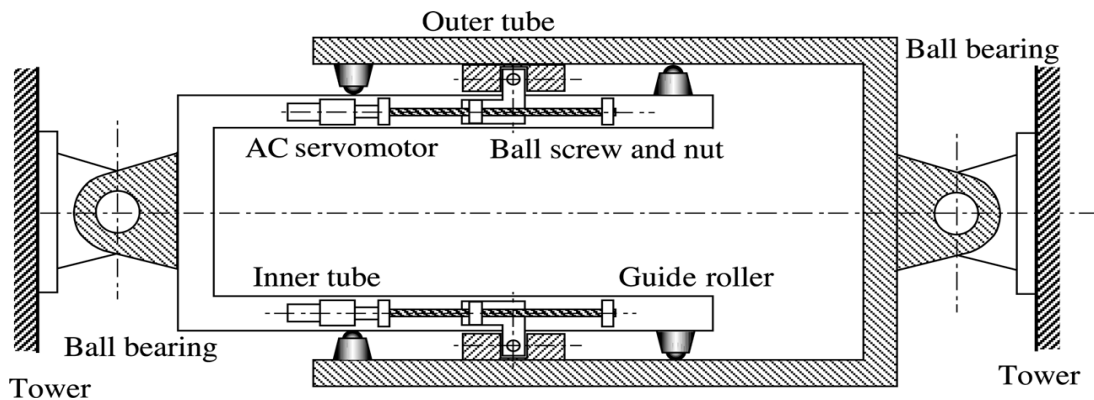
4.6 Πραγματικοί πύργοι που χρησιμοποιούν τη συνδεδεμένη μέθοδο ελέγχου

Μια περίληψη των τριπλών πύργων που βρίσκονται στην πλατεία Harumi Triton στο κέντρο του Τόκιο σκιαγραφείται στο σχήμα 4.25 (Asano και λοιποί., 2002, Seto και Matsumoto, 2003). Οι τριπλοί πύργοι δείχνονται ως X, Y και Z, σε σχέση με τη διαφορά ύψους μεταξύ τους.



Σχήμα 4.25 Σκίτσο των τριπλών πύργων στην πλατεία Harumi Triton στο Τόκιο.

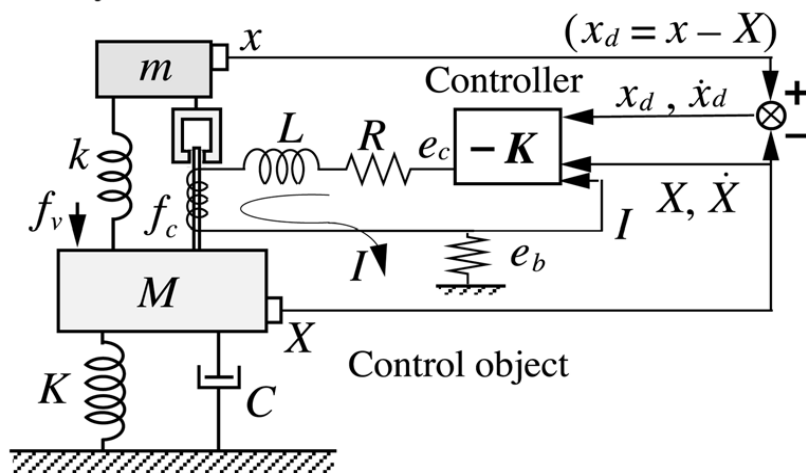
Οι ουρανοξύστες X, Y και το Z είναι 195 μ, 175 μ και 155 μ στο ύψος, με 48, 43 και 38 ορόφους, αντίστοιχα. Στο στάδιο σχεδίου, έγινε σαφές ότι μια σύνθετη διέγερση δίνης από τον αέρα ενέπνεε λόγους ανησυχίας για την πρώτη μέθοδο καμπτικής λειτουργίας των τριπλών πύργων.



Σχήμα 4.26 περίληψη της ενεργού ελεγχόμενης γέφυρας που χρησιμοποιείτε στη πλατεία Harumi Triton.

Για τον έλεγχο κάθε πύργου με την πρώτη καμπτική μέθοδο, θα ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν δύο AMDs, δηλαδή για κάθε μία από τις δύο κατευθύνσεις, επομένως συνολικά έξι AMDs θα απαιτούνταν εάν υιοθετούσαν τη συμβατική μέθοδο ενώ με τη μέθοδο CCM, οι ελάχιστες απαιτήσεις είναι δύο ελεγχόμενες γέφυρες (συσσκευές). Η επιχείρηση αποφάσισε να χρησιμοποιήσει το CCM και τις δύο ελεγχόμενες γέφυρες. Ο πύργος X συνδέεται με τον πύργο Y με μια από τις ελεγχόμενες γέφυρες στον 39 όροφο. Ομοίως, ο πύργος Z συνδέεται με τον πύργο Y στον 33 όροφο. Κάθε πύργος κερδίζει τη δύναμη ελέγχου του ανεξάρτητα και προς τις δύο κατευθύνσεις (X και Y).

Active dynamic vibration absorber



Σχήμα 4.27 Σχηματική άποψη του ενεργού δυναμικού απορροφητή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° - Εφαρμογές ενεργών συστημάτων

5.1 Εισαγωγή

Τα προβλήματα δόνησης στις μεγάλες κατασκευές μπορεί να εξηγηθεί μέσω της εξέτασης των μεγάλης κλίμακας διαστημικών κατασκευών όπως εκείνων που προγραμματίζονταν από τη NASA στη δεκαετία του '70 (Kane και λοιποί., 1983). Όπως είναι ήδη γνωστό, επειδή οι διαστημικές δομές είναι εξαιρετικά ελαφριές και μεγάλες στην κλίμακα, υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταλάντωσης στο εύρος των χαμηλών συχνοτήτων. Έχει επισημανθεί ότι όταν οι τρόποι δόνησης ελέγχονται, των οποίων η ακριβής επικοινωνία με τη γη αποτελεί εμπόδιο, άλλες δονήσεις από αυτές που ελέγχονται προκαλούν βίαιες διεργασίες. Αυτό το φαινόμενο ονομάστηκε εξαπλωμένη αστάθεια (spillover-instability) από τον Balas (1978), και προτάθηκαν μερικά σχέδια για να το καταστείλουν, όπως η άμεση ανατροφοδότηση και οι μέθοδοι ελέγχου του τρόπου δόνησης (Balas, 1982). Αυτό το πρόβλημα οδήγησε σε μια αυτοδύναμη θεωρία ελέγχου (Balas, 1979) στην οποία οι ανεξέλεγκτοι τρόποι θεωρήθηκαν ως αβέβαιες διαταραχές, και ήταν δυνατή η κατασκευή ενός αυτοδύναμου συστήματος ενάντια σε τέτοιες διαταραχές.

Εάν τα συστήματα ελέγχου δεν είναι αποτελεσματικά και δεν βελτιώνουν την απόκριση μεγάλων κατασκευών όπως είναι οι πολυκατοικίες και οι κύριοι πύργοι κρεμαστών γεφυρών μεγάλης έκτασης, η αύξηση βάρους είναι αναπόφευκτη. Εντούτοις, αυτές τις μέρες που ο περιορισμός των ενεργειακών δαπανών είναι αναγκαίος, το πρόβλημα της αύξησης βάρους έχει γίνει ένα αναπόφευκτο σημείο στις μεγάλες κατασκευές. Συνεπώς, αν και κτήρια, όπως οι ουρανοξύστες που έχουν μεταλλικό φέροντα οργανισμό είναι αναγκαίο και σημαντικό να κατασκευάζονται, αυτά τείνουν να είναι ευαίσθητα λόγω της εύκαμπτης δομής τους και με περισσότερα προβλήματα δόνησης, όπως περιγράφεται ανωτέρω. Σε αυτό το τμήμα υιοθετούμε την προσέγγιση ενός ενεργού ελέγχου δόνησης στην κατασκευή των μεγάλης κλίμακας δομών, στις οποίες προσπαθούμε να ισορροπήσουμε επιτυχώς το στόχο της αποταμίευσης των πόρων χωρίς να χρειάζεται συμβιβασμός στη μείωση βάρους τέτοιων μεγάλης κλίμακας κατασκευών (Doyle και λοιποί, 1989).

5.2 Ταξινόμηση του δομικού ελέγχου στα κτήρια

Η ταξινόμηση των δομικών μεθόδων ελέγχου για τα κτήρια που είναι βασισμένα στο επίπεδο διέγερσης (π.χ., διέγερση αέρα και μικροί και μεγάλης κλίμακας σεισμοί) παρατίθεται στον πίνακα 5.1. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί τις μάζες αδράνειας αντιστοιχεί στη μέθοδο (2) στον πίνακα 5.1, αυτή που χρησιμοποιεί την αμοιβαία δράση μεταξύ των δομών αντιστοιχεί στη μέθοδο (3), και αυτή που χρησιμοποιεί την μόνωση βάσεων αντιστοιχεί στη μέθοδο (1). Αν και η μέθοδος που χρησιμοποιεί ένα σύστημα συνδέσμων είναι ιδιαίτερη στο δομικό έλεγχο, φαίνεται να είναι ένας συνδυασμός των μεθόδων (1) και (3). Οι σχηματικές απόψεις κάθε μεθόδου παρουσιάζονται στα σχήματα 5.1 – 5.3. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί τη μάζα αδράνειας είναι αποτελεσματική στον έλεγχο μικρού μεγέθους δονήσεων ή της διέγερσης αέρα, επειδή η δύναμη ελέγχου περιορίζεται από την αδράνεια της μάζας. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί την αμοιβαία

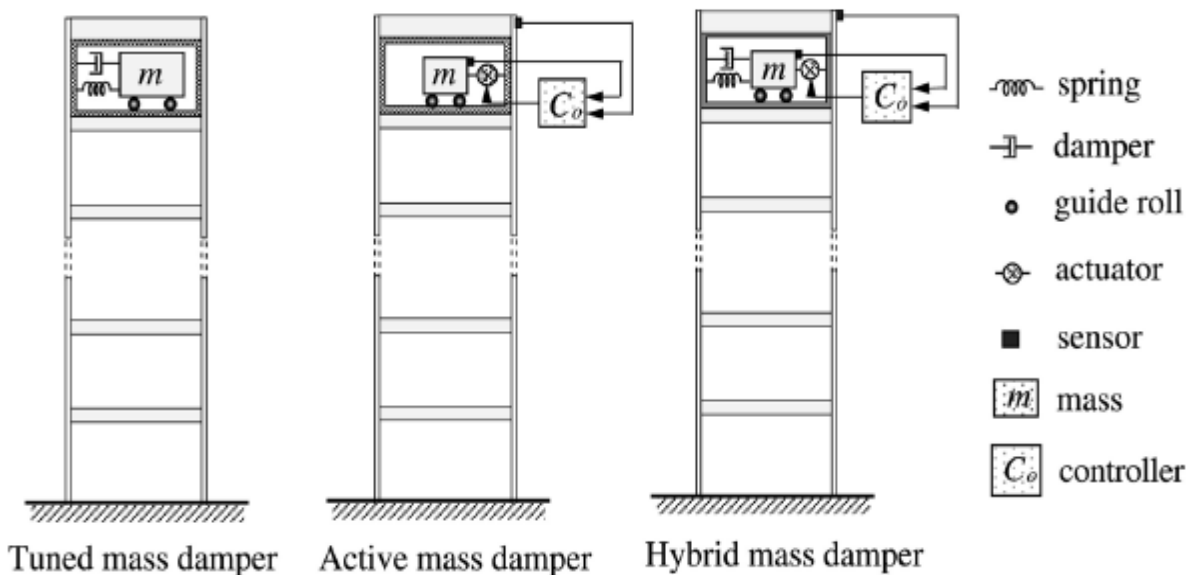
δράση μεταξύ των δομών έχει την ικανότητα να ελέγχει την χαμηλή και την υψηλή διέγερση. Συσκευές που βασίζονται στο AMD, το HMD και τις ενεργές γέφυρες για τον έλεγχο δόνησης σε κτήρια έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.

5.3 Διαμόρφωση και έλεγχος δόνησης για τις κατασκευές πύργων αντίστοιχα

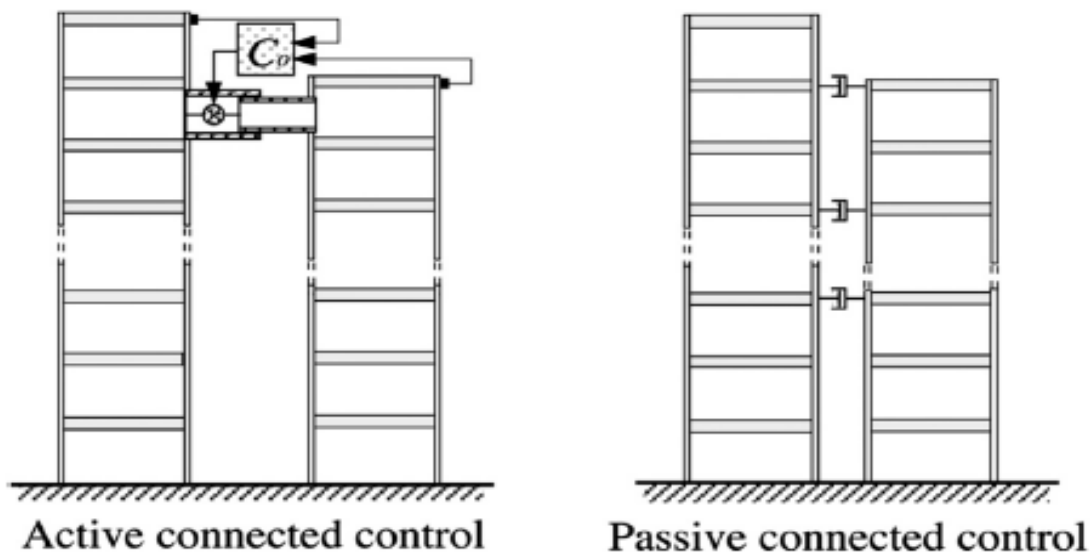
Προκειμένου να ελεγχθούν οι κατασκευές όπως πύργοι, ο σημαντικότερος τρόπος είναι συνήθως ο πρώτος που εκφράζεται από το πρότυπο μοντέλο. Αν ένα πρότυπο μοντέλο λαμβάνεται κατάλληλα, ένα σύστημα ελέγχου με ένα ενεργό αποσβεστήρα ή ένα AMD σχεδιάζεται εύκολα.

	Excitation level	Method	Type	Device
Structural Control	Wind excitation Traffic excitation Small-scale earthquakes	Using inertia of masses	Passive	Tuned mass damper (TMD)
				Sloshing damper (LMD)
			Active	Active mass damper (AMD)
	Large-scale earthquakes	Using mutual action between structures	Hybrid	Hybrid mass damper (HMD)
			Passive	Connected damper
			Active	Active controlled bridge
	Large-scale earthquakes	Using brace system	Hybrid	Hybrid controlled bridge
			Passive	Brace damper
		Using base isolation	Semi-active	Semi-active brace damper
			Passive	Oil damper, Rubber mount Friction damper, etc.
			Semi-active	Adjustable oil damper MR damper etc.

Πίνακας 5.1 Ταξινόμηση της δομικής μεθόδου ελέγχου δόνησης.

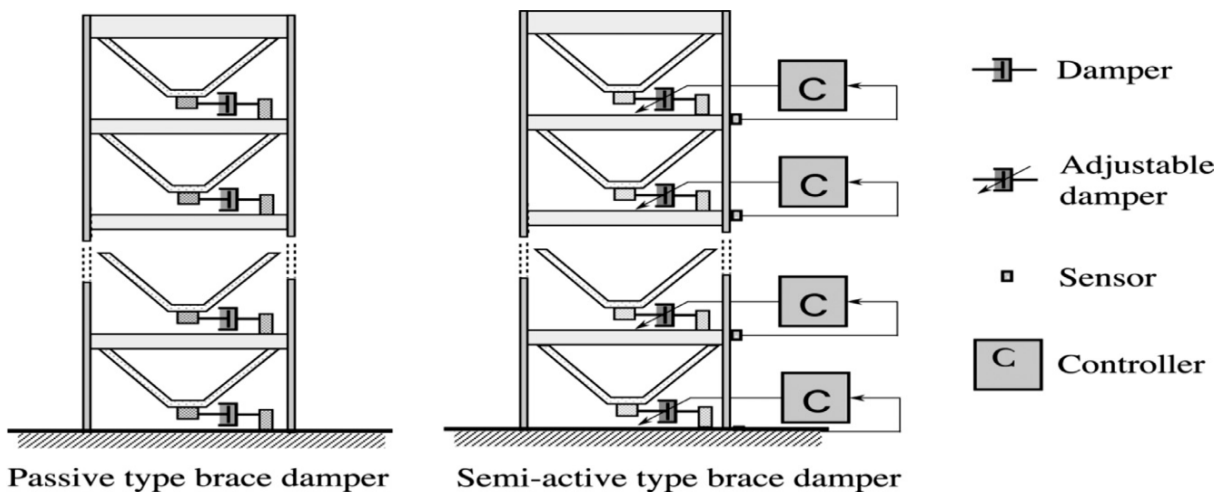


Σχήμα 5.1 Σχηματική άποψη της μεθόδου που χρησιμοποιεί την αδράνεια των μαζών.

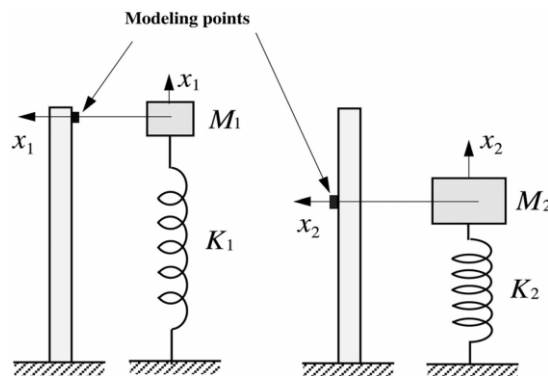


Σχήμα 5.2 Σχηματική άποψη της μεθόδου που χρησιμοποιεί την αμοιβαία αντίδραση μεταξύ των κατασκευών.

Το σχήμα 5.5 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ ενός μοντέλου σε κατάσταση αδράνειας και ένα άλλο αντίστοιχα σε κατάσταση αντίδρασης, όπου M_1 και M_2 και K_1 και K_2 αντιπροσωπεύουν τις μάζες και τα σταθερά ελατήρια που υπολογίζονται σε δύο σημεία της κατάστασης του μοντέλου. Αυτές οι τιμές λαμβάνονται απλά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μαζικής απόκρισης (Seto και λοιποί.,1987). Όταν το σημείο διαμόρφωσης επιλέγεται να είναι στην κορυφή μιας κατασκευής, μια σταθερά μικρότερη μάζα και ένα σταθερό ελατήριο επιτυγχάνουν την πρώτη ιδιομορφή. Επομένως, η καλύτερη θέση τοποθέτησης του AMD ή HMD ελεγκτή (σχήμα 5.3) είναι στη κορυφή της δομής για τον έλεγχο της πρώτης ιδιομορφής.



Σχήμα 5.3 Σχηματική άποψη των μεθόδων που χρησιμοποιούν το σύστημα στηριγμάτων



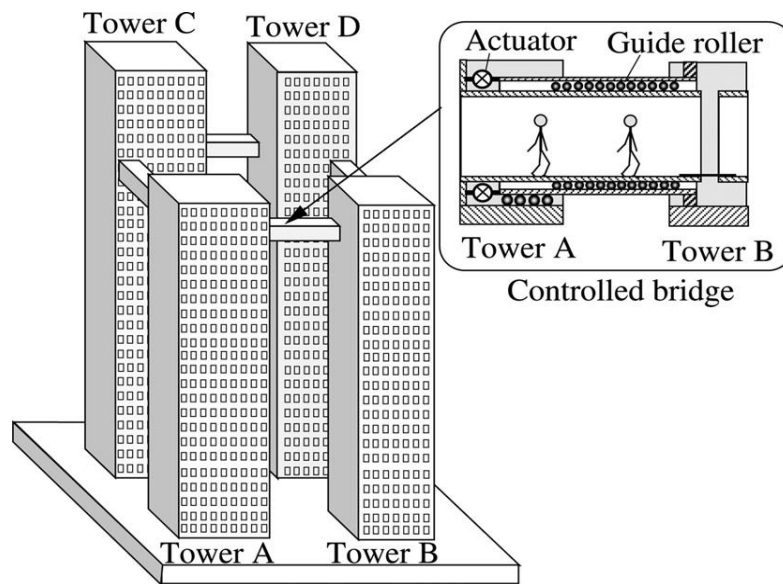
Σχήμα 5.4 Πρότυπο μοντέλο για πολυώροφες κατασκευές.

5.4 Ενεργός έλεγχος δόνησης πολλαπλών κτηρίων που συνδέονται με ενεργές γέφυρες ελέγχου που αποκρίνονται στους μεγάλους σεισμούς (Seto και Matsumoto, 1999)

5.4.1 Οικοδόμηση τεσσάρων πρότυπων κτηρίων

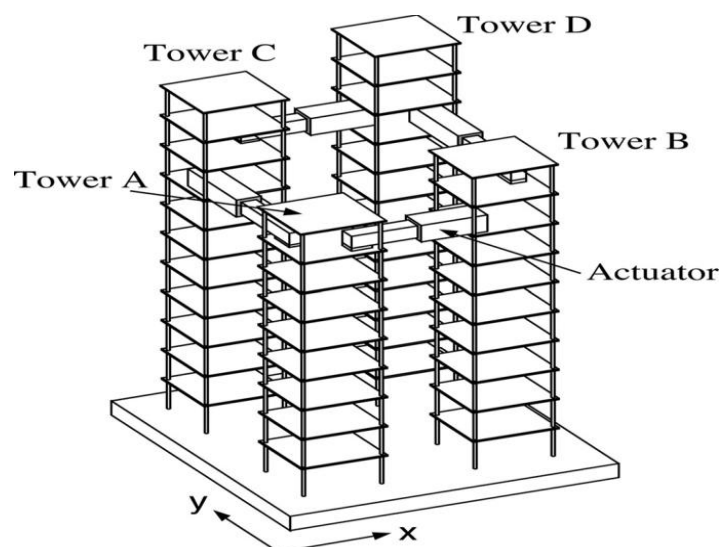
Οι ενεργοί αποσβεστήρες μάζας χρησιμοποιούνται κυρίως προκειμένου να μειώσουν τη δόνηση που προκαλείται στις πολυκατοικίες από μικρούς έως μεσαίας δύναμης σεισμούς ή ισχυρούς ανέμους. Εντούτοις, αυτός ο εξοπλισμός έχει κατασταθεί ατελέσφορος να μετριάσει τη δόνηση που προκαλείται από τους μεγάλους σεισμούς ή τις πολύ χαμηλής συχνότητας δονήσεις που εμφανίζονται στα εξαιρετικά-ψηλά κτήρια, εξαιτίας της δυσκολίας να συγκεντρώσει αρκετή δύναμη ελέγχου για να ελέγξει αυτές τις μετακινήσεις. Προκειμένου να λυθούν αυτά τα προβλήματα, το CCM προτάθηκε στα προηγούμενα τμήματα. Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο, δύο ή περισσότερα κτήρια συνδέονται με μεταβάσεις που εγκαθίστανται με ημιενεργές, ενεργές ή υβριδικές συσκευές ελέγχου, και τα κτήρια ελέγχονται μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος έχει το προτέρημα της λήψης ικανοποιητικής δύναμης ελέγχου υπό χαμηλής συχνότητας συνθήκες. Επιπλέον, επίσης αναμένεται ότι αυτή η μέθοδος θα έχει

περαιτέρω προτερήματα όπως η βελτίωση της άνεσης με τη μείωση της απόκρισης των κτηρίων που χρησιμοποιούν γέφυρες μετάβασης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.

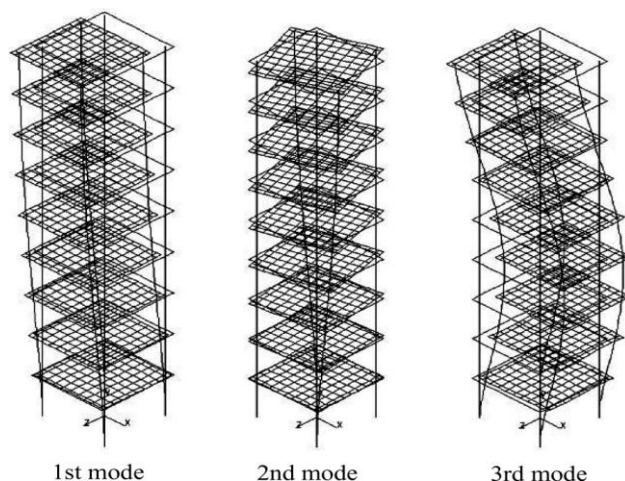


5.5 Σχηματική άποψη των τεσσάρων πύργων με τέσσερις ενεργοποιητές

Σε αυτό το τμήμα, η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου ενάντια στους μεγάλους σεισμούς καταδεικνύεται με την χρήση τεσσάρων πρότυπων δομών- πύργων που αντιπροσωπεύει τέσσερις πολυκατοικίες που συνδέονται με τέσσερις ελεγχόμενες γέφυρες που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.5. Οι πρότυπες κατασκευές-πύργοι παρουσιάζονται στο σχήμα 5.6. Οι τέσσερις πύργοι, Α, Β, Γ και Δ, είναι εύκαμπτες κατασκευές με έναν μεγάλο αριθμό ιδιομορφών, και έχουν 9, 10, 11 και 12 ορόφους αντίστοιχα. Ο πύργος Α συνδέεται με τους πύργους Β και Γ με δύο ενεργοποιητές στον όγδοο όροφο. Ομοίως, ο πύργος Δ συνδέεται με τους πύργους Β και Γ από δύο ενεργοποιητές στον ένατο όροφο. Κάθε πύργος αποκτά την δύναμη ελέγχου σε δύο κατευθύνσεις (Χ και Υ) ανεξάρτητα.



Σχήμα 5.6 Τέσσερα μοντέλα πύργων που συνδέονται με ενεργές γέφυρες.



Σχήμα 5.7 Ιδιομορφές της κατασκευής.

5.4.2 Χαρακτηριστικά της δομής των πύργων

Τα χαρακτηριστικά δόνησης των τεσσάρων πρότυπων δομών πύργων αναλύονται με το πεπερασμένο πρότυπο λογισμικό στοιχείων ANSYS. Τα αποτελέσματα του ANSYS δείχνουν ότι οι τέσσερις δομές έχουν διαφορετικές φυσικές συχνότητες αλλά παρόμοιες μορφές τρόπου δόνησης. Επομένως οι πρώτες τρεις ιδιομορφές του πύργου Α παρουσιάζονται στο σχήμα 5.7, τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων πύργων, και οι φυσικές συχνότητες της δομής τους παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2. Οι ιδιομορφές εμφανίζονται διαδοχικά όπως φαίνεται στο σχήμα: η πρώτη ιδιομορφή είναι μεταφορική, η δεύτερη είναι στρωφική, η τρίτη είναι καμπτική και ούτω καθεξής.

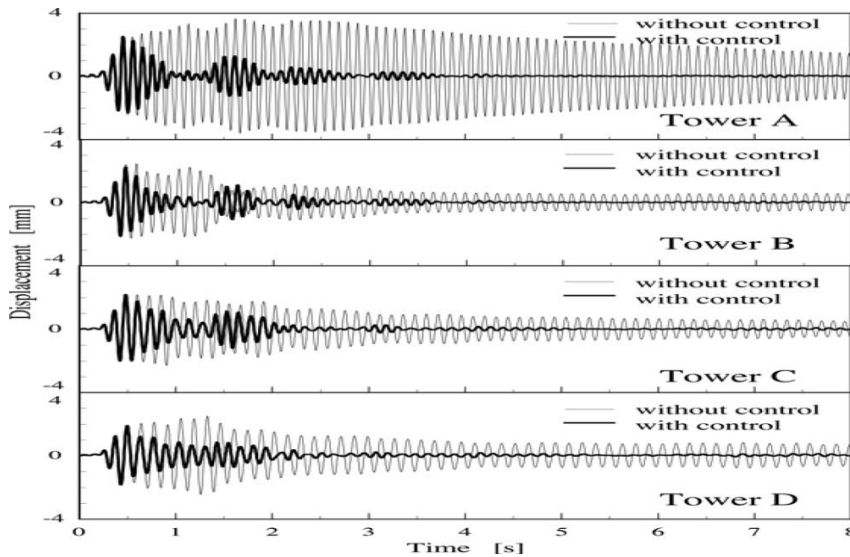
	1st mode	2nd mode	3rd mode
Tower A	10.8	14.8	33.7
Tower B	9.6	13.2	30.0
Tower C	8.7	12.0	27.0
Tower D	7.7	10.7	23.5

Πίνακας 5.8 Φυσικές συχνότητες των κατασκευών

5.4.3 Πείραμα

Οργάνωση πειράματος

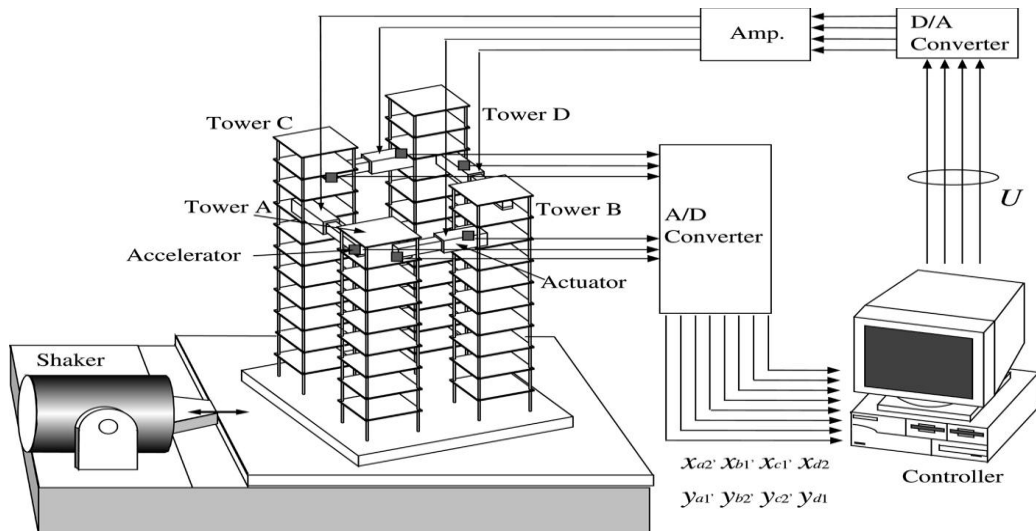
Η πειραματική οργάνωση παρουσιάζεται στο σχήμα 5.10. Οι αισθητήρες μετράνε τις σχετικές μετατοπίσεις της βάσης κάθε πύργου. Αυτά τα σήματα μετατοπίσεων εισάγονται μέσω του μετατροπέα A/D. Στον υπολογιστή τα σήματα ταχύτητας υπολογίζονται από τα σήματα μετατοπίσεων, και η αξία ελέγχου υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το όφελος της μήτρας ανατροφοδότησης από την κατάσταση του διανύσματος. Η αξία ελέγχου μεταφέρεται εξωτερικά μέσω του μετατροπέα D/A και του ενισχυτή. Οι ενεργοποιητές παράγουν τη δύναμη ελέγχου και ελέγχουν τη δόνηση ολόκληρης της δομής. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιούνται οι γραμμικοί ενεργοποιητές που αποτελούνται από τους μόνιμους μαγνήτες και κινούμενη σπείρα.



Σχήμα 5.9 Προσομοίωση χρονικής απόκρισης λόγω της σεισμικής διέγερσης.

Δοκιμή απόκρισης συχνότητας

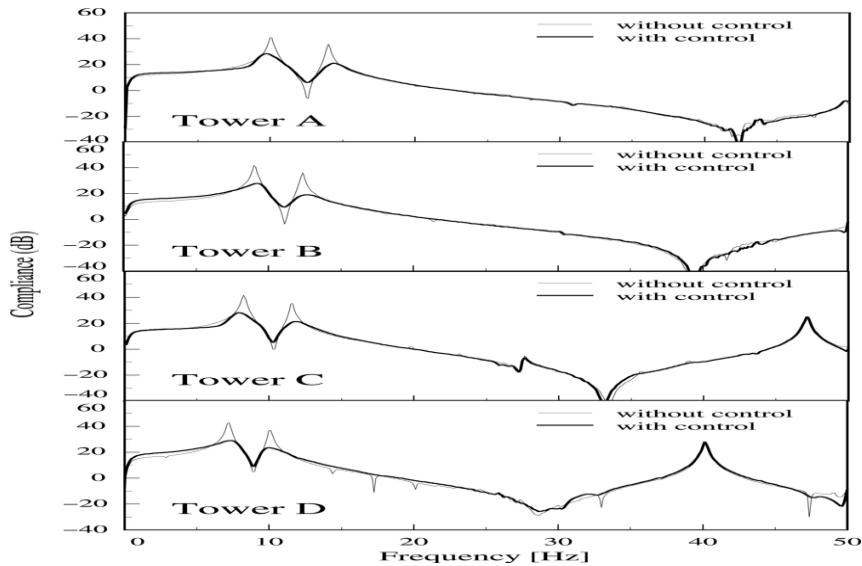
Οι πειραματικές αποκρίσεις που μετριοούνται από τη γρήγορη συσκευή ανάλυσης μετασχηματισμού κατά τον Fourier, κάτω από τη δοκιμή ώθησης παρουσιάζονται στο σχήμα 5.11, υπό τους ίδιους όρους με την προσομοίωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.9. Από αυτό το σχήμα, οι αιχμές αντήρησης της πρώτης και δεύτερης μεθόδου σε κάθε πύργο ελέγχονται καλά. Επομένως είναι επίσης δυνατό να ελεγχθεί ο τρόπος συστροφής αποτελεσματικά μέσω της προτεινόμενης μεθόδου.



Σχήμα 5.10 Οργάνωση πειράματος.

Αποτελέσματα απόκρισης σεισμικού ελέγχου

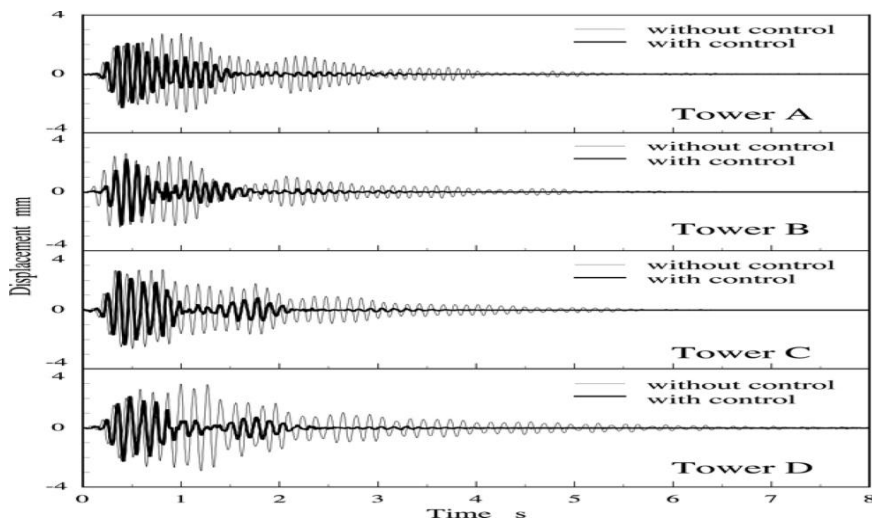
Το πειραματικό αποτέλεσμα, που επιτυγχάνεται υπό τους ίδιους όρους με την προσομοίωση, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.12. Μια λεπτή διαστιγμένη γραμμή παρουσιάζει την απάντηση χωρίς έλεγχο, και μια έντονη στερεά γραμμή παρουσιάζει την απόκριση με τον έλεγχο. Αυτός ο αριθμός δείχνει ότι το πείραμα έχει μια ευνοϊκή επίδραση στους πρώτους τρόπους κάμψης και συστροφής.



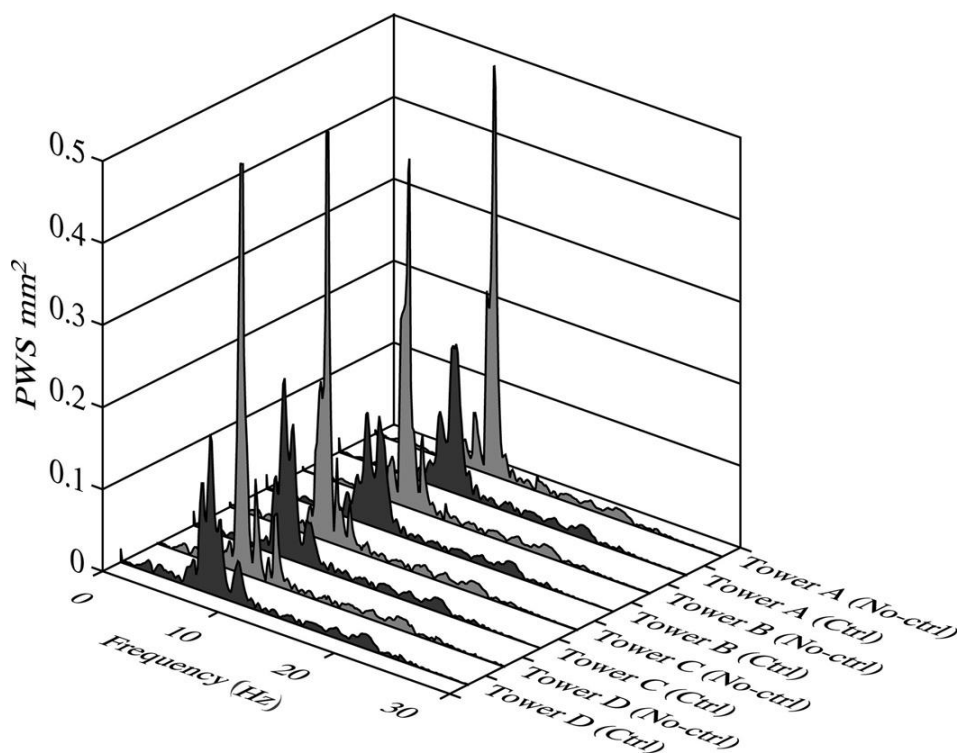
Σχήμα 5.11 Αποκρίσεις συχνότητας δομών.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του ελέγχου στατιστικά, η ανάλυση πυκνότητας φάσματος πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τα στοιχεία χρονικής απόκρισης. Το σχήμα 5.12 δείχνει τη σχέση μεταξύ της πυκνότητας φάσματος με και χωρίς έλεγχο που λαμβάνεται σε κάθε πύργο και συχνότητα. Αν και κάθε πύργος χωρίς έλεγχο είναι διεγερμένος έντονα στη περιοχή των πρώτων και δεύτερων φυσικών συχνοτήτων, αυτοί οι αριθμοί καταδεικνύουν ότι οι αιχμές απόκρισης των πύργων είναι ουσιαστικά μειωμένες με τον έλεγχο.

Αυτή η μέθοδος ελέγχου δόνησης μπορεί να εφαρμοστεί ομοίως σε οποιαδήποτε περίπτωση όπου οι δομές που έχουν διαφορετική δυναμική τακτοποιούνται παράλληλα. Είναι δυνατό να ελεγχθεί η δόνηση όχι μόνο των πολυκατοικιών αλλά και των κύριων πύργων των γεφυρών υπό κατασκευή, διαστημικές δομές και ούτω καθεξής.



Σχήμα 5.12 Καταμέτρηση χρονικής απόκρισης σε σεισμική διέγερση.



Σχήμα 5.13 Πυκνότητα φάσματος χρονικών αποκρίσεων.

5.5 Παράδειγμα ελέγχου δόνησης τριπλών πύργων που χρησιμοποιούν CCM (Seto και Matsumoto, 2003)

5.5.1 Περιγραφή των τριπλών πύργων

Μία κατασκευαστική επιχείρηση έχει παρατηρήσει την αποτελεσματικότητα του CCM, και έχει αποφασίσει να εισαγάγει αυτή τη μέθοδο στους τριπλούς πύργους. Λεπτομερής περιγραφή των τριπλών πύργων που βρίσκονται στη πλατεία Harumi Triton στο κέντρο της πόλης του Τόκιο έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.6 και έχει σκιαγραφηθεί στο σχήμα 4.25. Δεδομένου ότι από το στάδιο σχεδιασμού έγινε σαφές ότι μια σύνθετη διέγερση δίνης από τον αέρα ενέπνεε λόγους ανησυχίας για την πρώτη μέθοδο καμπτικής λειτουργίας των τριπλών πύργων, απαιτήθηκε η τεχνολογία δομικού ελέγχου της δόνησης. Για τον έλεγχο κάθε πύργου με την πρώτη καμπτική μέθοδο, θα ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν δύο AMDs, δηλαδή για κάθε μία από τις δύο κατευθύνσεις, επομένως συνολικά έξι AMDs θα απαιτούνταν εάν υιοθετούσαν τη συμβατική μέθοδο ενώ με τη μέθοδο CCM, οι ελάχιστες απαιτήσεις είναι δύο ελεγχόμενες γέφυρες (συσκευές). Η επιχείρηση αποφάσισε να χρησιμοποιήσει το CCM και τις δύο ελεγχόμενες γέφυρες, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.26.

5.5.2 Σχεδιασμός των πύργων

Τα χαρακτηριστικά δόνησης των πύργων αναλύονται με το ANSYS. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τρεις πύργοι έχουν διαφορετικές φυσικές συχνότητες, αλλά τις παρόμοιες ιδιομορφές. Οι ιδιομορφές των τριών πύργων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.14. Σε αυτήν την μελέτη, ο επιθυμητός έλεγχος πραγματοποιείται με την πρώτη καμπτική ιδιομορφή κάθε πύργου. Επομένως κάθε πύργος θα πρέπει να μετατραπεί σε ένα

συσσωρευμένο μαζικό πρότυπο μοντέλο δύο βαθμών ελευθερίας, εξαιρουμένου του πύργου Υ. Επιλέγονται τα σημεία όπου θα τοποθετηθούν οι θέσεις των γεφυρών. Επομένως είναι απαραίτητο να παρασκευαστούν δύο μαζικά σημεία στον πύργο Υ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15.

Οι παράμετροι του συσσωρευμένου μαζικού πρότυπου μοντέλου, στις κατευθύνσεις X και Y, καθορίζονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διαμόρφωσης μειωμένης διάταξης:

(x-direction)

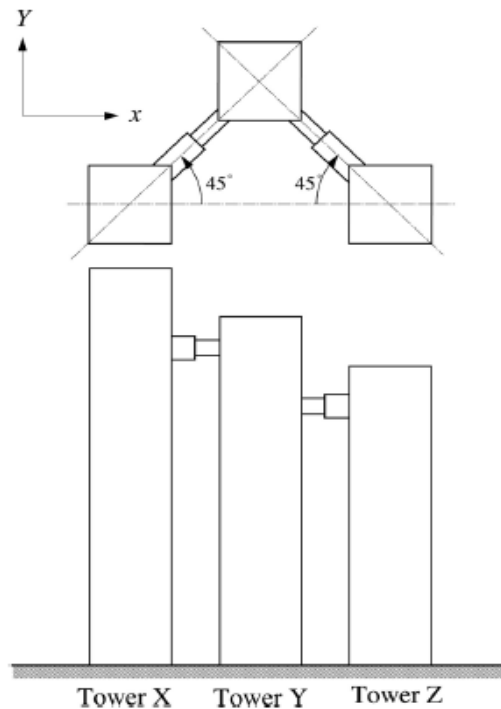
$$\begin{aligned}
 m_{1x} &= 38\,531 \text{ [tonne]} & m_{21x} &= 24\,098 \text{ [tonne]} \\
 k_{1x} &= 7.62 \times 10^7 \text{ [N/m]} & k_{21x} &= 3.32 \times 10^8 \text{ [N/m]} \\
 c_{1x} &= 1.08 \times 10^6 \text{ [Ns/m]} & c_{21x} &= 4.29 \times 10^6 \text{ [Ns/m]} \\
 m_{3x} &= 27\,261 \text{ [tonne]} & m_{22x} &= 8555 \text{ [tonne]} \\
 k_{3x} &= 6.91 \times 10^7 \text{ [N/m]} & k_{22x} &= 9.05 \times 10^7 \text{ [N/m]} \\
 c_{3x} &= 8.68 \times 10^5 \text{ [Ns/m]} & c_{22x} &= 1.17 \times 10^6 \text{ [Ns/m]}
 \end{aligned}$$

(y-direction)

$$\begin{aligned}
 m_{1x} &= 38\,715 \text{ [tonne]} & m_{21x} &= 24\,139 \text{ [tonne]} \\
 k_{1x} &= 7.29 \times 10^7 \text{ [N/m]} & k_{21x} &= 3.54 \times 10^8 \text{ [N/m]} \\
 c_{1x} &= 1.06 \times 10^6 \text{ [Ns/m]} & c_{21x} &= 4.62 \times 10^6 \text{ [Ns/m]} \\
 m_{3x} &= 26\,758 \text{ [tonne]} & m_{22x} &= 9073 \text{ [tonne]} \\
 k_{3x} &= 7.79 \times 10^7 \text{ [N/m]} & k_{22x} &= 8.89 \times 10^7 \text{ [N/m]} \\
 c_{3x} &= 9.13 \times 10^5 \text{ [Ns/m]} & c_{22x} &= 1.16 \times 10^6 \text{ [Ns/m]}
 \end{aligned}$$

	x direction		y direction	
	1st mode	2nd mode	1st mode	2nd mode
Tower X	0.22375	0.57726	0.21842	0.57437
Tower Y	0.24649	0.63744	0.24404	0.64312
Tower Z	0.25341	0.67247	0.27151	0.71048

Πίνακας 5.14 Οι φυσικές συχνότητες των πύργων (Hz)

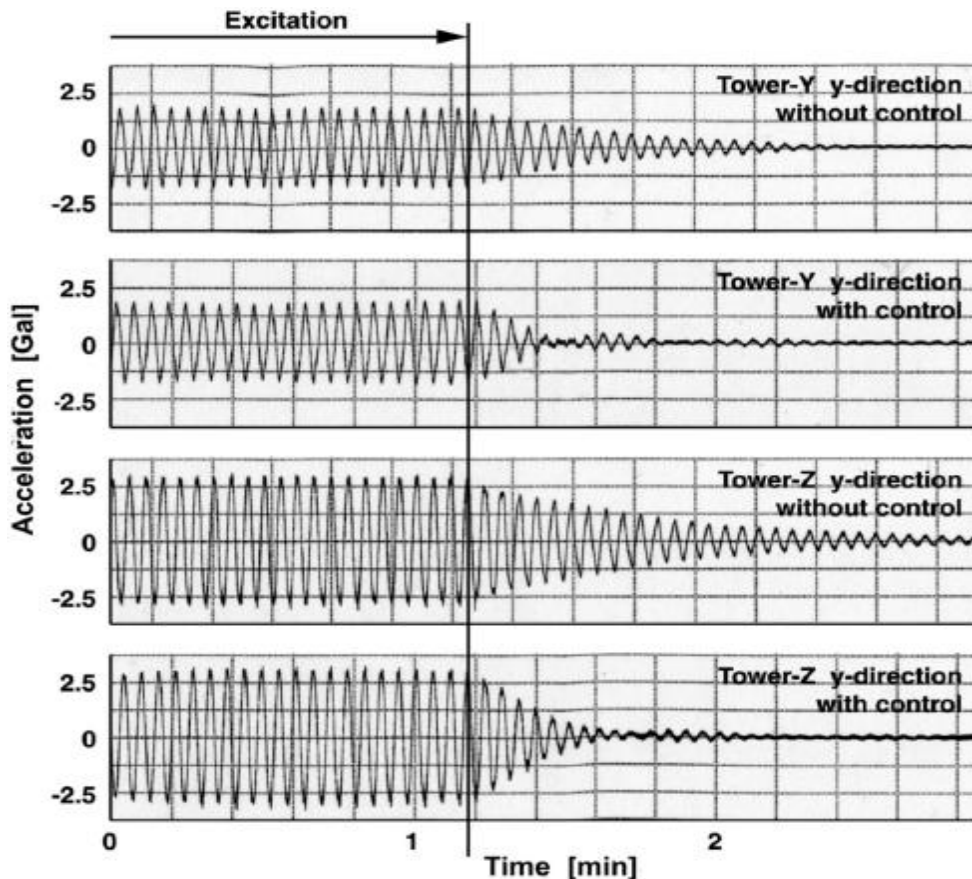


Σχήμα 5.15 Σχηματικό διάγραμμα των τριπλών πύργων

5.5.3 Προσομοίωση των τριπλών πύργων που χρησιμοποιούν CCM

Ελεύθερη απόκριση δόνησης

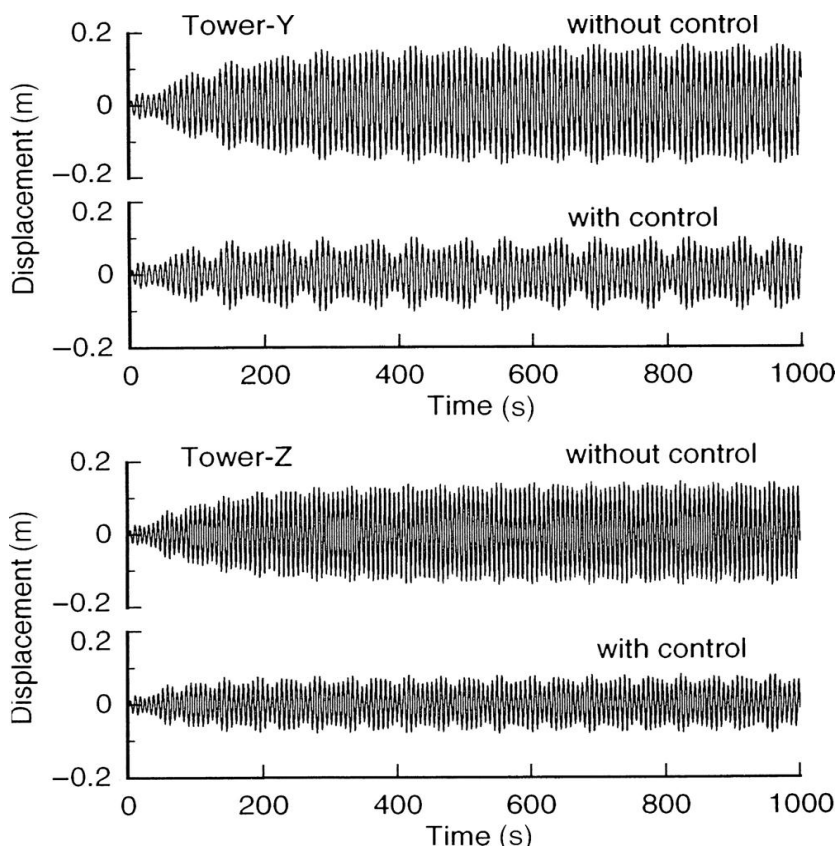
Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση απόσβεσης των ενεργών ελεγχόμενων γεφυρών, οι ελεύθερες αποκρίσεις δόνησης υπολογίζονται μετά από την εισαγωγή της ημιτονοειδούς διέγερσης. Το σχήμα 5.16 παρουσιάζει τις αποκρίσεις που υπολογίζονται στις κατευθύνσεις X και Y των πύργων Y και Z. Επιβεβαιώνεται ότι ο ανωτέρω στόχος σχεδίου πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την περίπτωση 1.



Σχήμα 5.16 Αποκρίσεις των πύργων Y και Z σε ελεύθερη ταλάντωση.

Εκτίμηση της επίδρασης ελέγχου ενάντια στη διέγερση αέρα

Τα αποτελέσματα ελέγχου ενάντια στις δονήσεις που προκαλούνται από τη διέγερση αέρα επαληθεύονται μέσω της προσομοίωσης. Τα στοιχεία διαταραχής αέρα που λαμβάνονται από τη δοκιμή σηράγγων αέρα, χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της επίδρασης ελέγχου. Οι χρονικές αποκρίσεις κάθε πύργου υπολογίζονται, αφότου εισάγεται το στοιχείο, όπως το διάνυσμα διαταραχής. Για παράδειγμα, το σχήμα 5.17 παρουσιάζει χρονικές αποκρίσεις, υπολογισμένες για τους πύργους Y και Z ενάντια στην κατεύθυνση του αέρα. Όταν το σύστημα ελέγχου εφαρμόζεται, επιβεβαιώνεται ότι το εύρος μετατοπίσεων, από τους πύργους το Y και το Z, μειώνεται στο μισό, όπως αναμένεται στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.

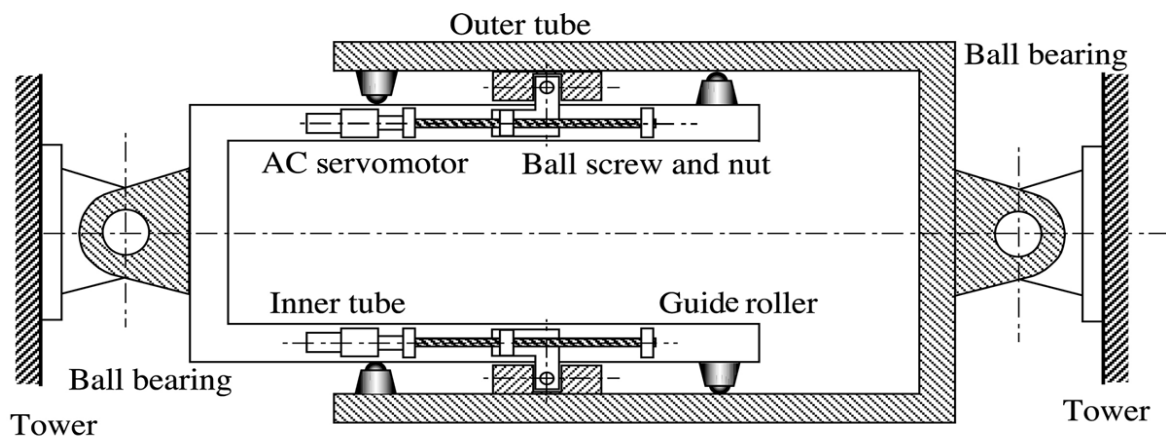


Σχήμα 5.17 Υπολογισμός χρονικών αποκρίσεων πύργων Y και Z.

5.5.4 Πραγματοποίηση του CCM

Ενεργά ελεγχόμενη γέφυρα

Οι πρώτες ενεργά ελεγχόμενες γέφυρες σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν από την Ishikawajima Heavy Industries (Asano και λοιποί.,2002). Η δομή της κατασκευής και οι ιδιότητες της παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα 5.18. Η ενεργά ελεγχόμενη γέφυρα αποτελείται από έναν εξωτερικό σωλήνα, ένα εσωτερικό σωλήνα, ένα οδηγό φωτογραφικών διαφανειών μεταξύ κάθε σωλήνα, ένα μηχανισμό οδήγησης που αποτελείται από δύο σφαιρικές βίδες, και δύο σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, οδηγούν τη σφαιρική βίδα για να κινήσει το εξωτερικό σωλήνα σε μια μπροστινή και οπίσθια κατεύθυνση, και είναι τοποθετημένοι ο ένας στην ανώτερη πλευρά και ο άλλος κάτω από τον εσωτερικό σωλήνα. Επομένως και οι δύο άκρες του σωλήνα επεκτείνονται και συστέλλονται μέσω του ενεργού ελέγχου των σερβοκινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Δεδομένου ότι και οι δύο άκρες του σωλήνα συνδέονται με τους δύο πύργους μέσω των σφαιρικών ενώσεων, αυτοί οι πύργοι κινούνται ομαλά.



Total mass	80 ton
Control force	± 340 kN
Controlling stroke	± 0.1 m
Movable stroke	± 2.4 m

Σχήμα 5.18 Σχηματική άποψη της ενεργά ελεγχόμενης γέφυρας και των ιδιοτήτων της.

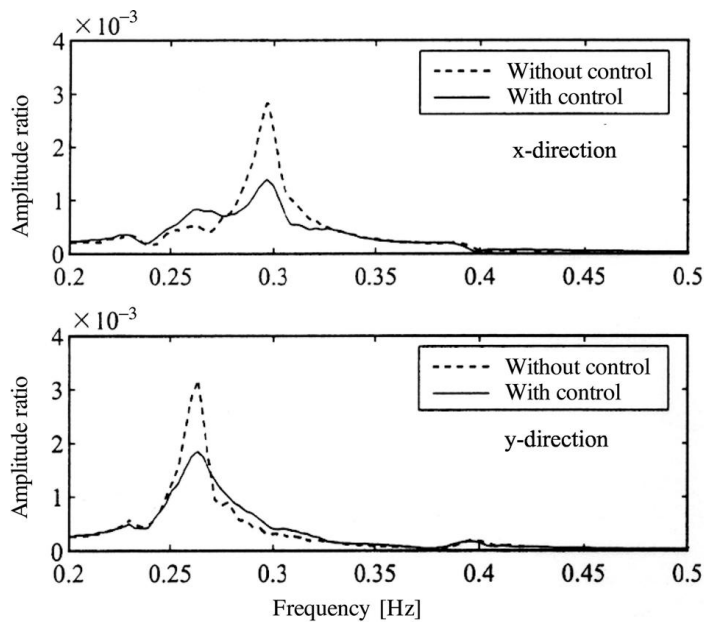
Η εξωτερική άποψη των ενεργών ελεγχόμενων γεφυρών που συνδέονται με τους πύργους Y και Z παρουσιάζεται στο σχήμα 5.19. Οι πρώτοι τριπλοί πύργοι που συνδέθηκαν με δύο ενεργές ελεγχόμενες γέφυρες που χρησιμοποιούν το CCM κατασκευάστηκαν στο κέντρο της πόλης του Τόκιο το 2001 όπως φαίνεται στο σχήμα 5.20.



Σχήμα 5.19 Εξωτερική άποψη των ενεργά ελεγχόμενων γεφυρών που συνδέουν τους πύργους X και Y.



Σχήμα 5.20 Εξωτερική άποψη του τριπλού πύργου που συνδέεται με ενεργές γέφυρες.



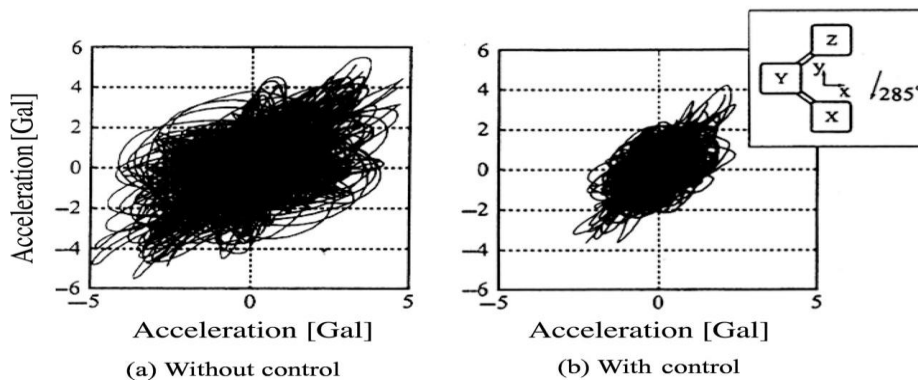
Σχήμα 5.21 Φάσμα απόκρισης των πύργων Y και Z.

Αποτελέσματα δοκιμής της απόσβεσης που χρησιμοποιούνται στους τριπλούς πύργους

Για να εξεταστεί η απόδοση της απόσβεσης, ως αποτέλεσμα των ενεργά ελεγχόμενων γεφυρών των τριπλών πύργων, πραγματοποιήθηκε δοκιμή προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τους πύργους Y και Z, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο σχήμα 5.16. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έρχονταν σε συμφωνία με τους υπολογισμούς που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.16. Αυτό επιβεβαιώνει ότι οι ενεργές γέφυρες διαθέτουν τις προϋποθέσεις για να λειτουργήσουν ικανοποιητικά στη μείωση των δονήσεων, όπως παρουσιάζονται από τις μετρήσεις της απόκρισης συχνότητας των

πύργων Y και Z στο σχήμα 5.21. Για παράδειγμα, στο σχήμα 5.22 παρουσιάζεται η τροχιά απόκρισης της επιτάχυνσης που μετρήθηκε στο πύργο Y ενάντια στην κατεύθυνση του αέρα, στις 285° μοίρες. Επιβεβαιώνεται ότι το εύρος επιτάχυνσης του πύργου Y διχοτομείται όπως αναμένεται στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.

Από την ανωτέρω αριθμητική προσομοίωση και τα πειραματικά αποτελέσματα, μπορούν να συναχθούν μερικά συμπεράσματα. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο, στους τριπλούς πύργους η δόνηση που προκαλείται από την διέγερση του αέρα, ελέγχεται απλά με τη χρησιμοποίηση δύο ενεργών γεφυρών. Δεν είναι απαραίτητη η χρήση βαρέων βαρών όπως είναι τα AMDs, επομένως με τη χρησιμοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου, πραγματοποιείται ένα ελαφρύ και χαμηλού κόστους σύστημα ελέγχου. Η ελεγχόμενη απόδοση μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τους πραγματικούς πύργους. Αν και η συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποίησε πύργους που είχαν διαφορετικές συχνότητες, είναι δυνατός ο έλεγχος πύργων με την ίδια δυναμική. Το σχήμα 5.23 παρουσιάζει την εξωτερική άποψη των τριπλών πύργων που ολοκληρώθηκαν το 2001.



Σχήμα 5.22 Τροχιά απόκρισης της επιτάχυνσης που μετρήθηκε στον πύργο



Σχήμα 5.23 Οι τριπλοί πύργοι που ολοκληρώθηκαν το 2001.

5.6 Έλεγχος δόνησης γεφυρών με πύργους που χρησιμοποιούν μια συσσωρευμένη προσέγγιση διαμόρφωσης (Seto και λοιποί.,1999) *Vibration Control of Bridge Towers Using a Lumped Modeling Approach*

5.6.1 Πρόβληματα δόνησης γεφυρών με πύργους υπό κατασκευή

Το καλύτερο παράδειγμα περίπτωσης όπου βλέπουμε την αποτελεσματική μείωση βάρους μιας μεγάλης κλίμακας δομής, μπορεί να βρεθεί στην κατασκευή του κύριου πύργου της γέφυρας Kurushima Kaikyo, η οποία εκτείνεται στον πορθμό Kurushima στην Ιαπωνία και ολοκληρώθηκε το 1999. Η κατασκευή της γέφυρας Kurushima Kaikyo άρχισε με την κατασκευή των κύριων δομών των πύργων όπως φαίνεται στο σχήμα 5.24.



(a)



(b)

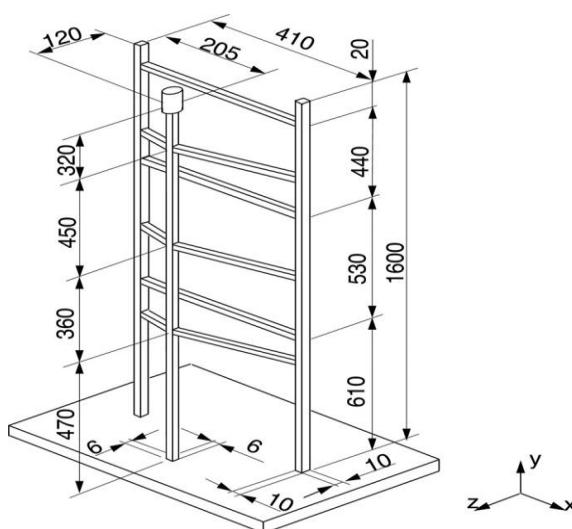
Σχήμα 5.24 Κρεμαστή γέφυρα υπό κατασκευή: (a) πύργοι που στέκονται ανεξάρτητοι, (b) πύργοι που συνδέονται με αναρτημένο καλώδιο.

Βαριά καλώδια τοποθετήθηκαν μεταξύ των πύργων και η γέφυρα κρεμάστηκε από αυτά τα καλώδια. Συνεπώς, εάν ένας ισχυρός άνεμος φυσούσε ενώ αυτοί στέκονταν ανεξάρτητοι, πριν συνδεθούν με τα καλώδια, οι δίνες Karman εμφανίζονται στις πίσω πλευρές των πύργων, οι οποίες όταν συγχρονιστούν με την ιδιοσυχνότητα των πύργων προκαλούν δονήσεις μεγάλου εύρους. Τρία ζευγάρια κύριων πύργων κατασκευάστηκαν για τη γέφυρα Kurushima Kaikyo. Αυτή η γέφυρα είναι πολύ μεγάλη, με τους πύργους να φτάνουν τα 179, 176, 166, 143, 112 και 145 μέτρα στο ύψος, αντίστοιχα. Στην κατασκευή της γέφυρας Kurushima Kaikyo, ένας από τους περισσότερο σοβαρούς παράγοντες ήταν η μείωση δαπανών. Για το λόγο αυτό προτάθηκε ένα σχέδιο για να μειωθεί στο μισό το βάρος της γέφυρας. Εντούτοις, εάν το βάρος μειωθεί στο μισό και το ύψος των πύργων παραμείνει αυτό που περιγράφεται ανωτέρω, ένα νέο πρόβλημα δίνης που θα προκαλέσει ταλάντωση, θα προκύψει φυσικά. Οι κύριοι πύργοι είχαν προηγουμένως απλά απαιτήσει την εκτίμηση των μέτρων δόνησης του πρώτου τρόπου διάταξης. Εντούτοις, στην κατασκευή μιας ελαφριάς, μεγάλης κλίμακας δομής, οι δονήσεις των υψηλότερων διατάξεων απαιτούν πιο προσεχτική εξέταση. Ιδιαίτερα η πρώτη στροφική ιδιομορφή, θέτει τον κίνδυνο βίαιης δόνησης, η οποία συνοδεύεται από ένα τράβηγμα προς τα μέσα. Το φαινόμενο αυτό προκάλεσε την κατάρρευση της γέφυρας Tacoma Narrows στην πολιτεία της Washington, στο παρελθόν.

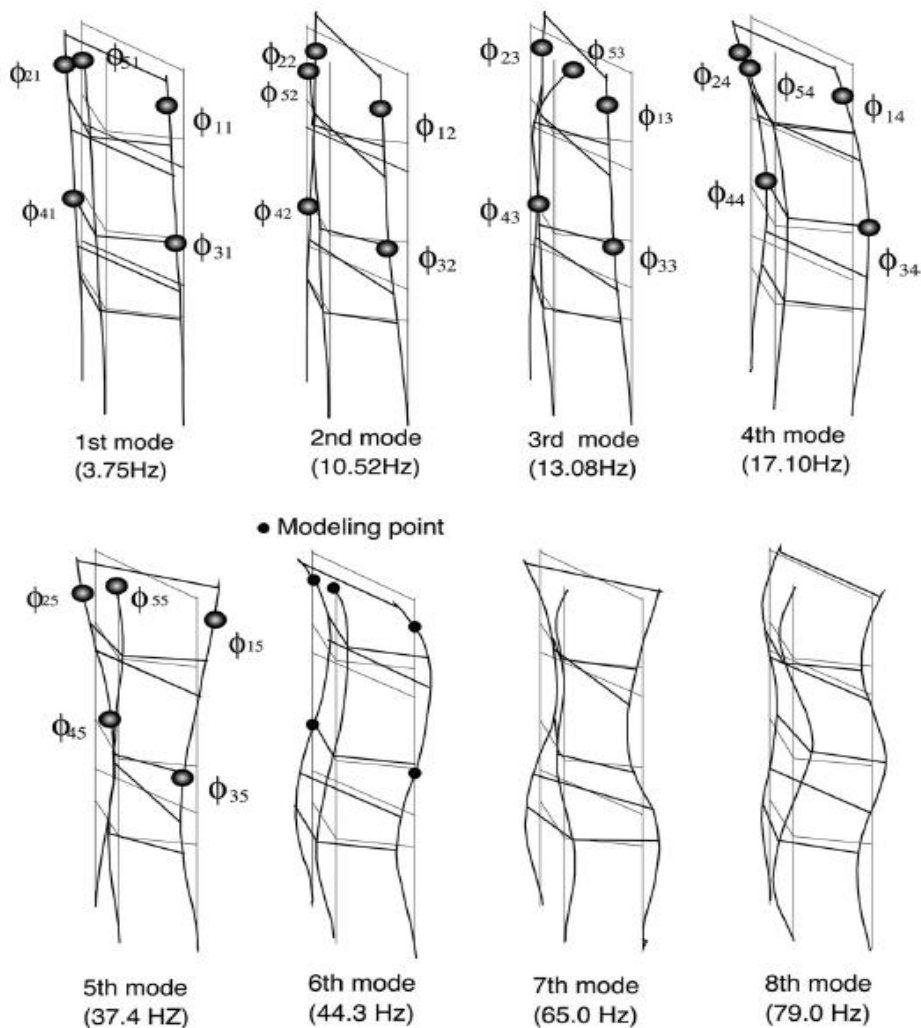
Αυτό το πρόβλημα ρυθμίστηκε με τον έλεγχο δόνησης σε υψηλά επίπεδα μέχρι την ασφαλή ολοκλήρωση της κατασκευής των γεφυρών. Κάθε μία από τις έξι κατασκευαστικές εταιρείες συμμετείχε ανεξάρτητα στην ανάπτυξη των σχεδίων του κύριου πύργου, και τις διάφορες μεθόδους συμπεριλαμβανομένης της άμεσης τροφοδότησης, του βέλτιστου ελέγχου, του αυτοδύναμου H^∞ ελέγχου και του ασταθούς (fuzzy) ελέγχου εφαρμόστηκαν για τον έλεγχο της δόνησης, το όλο εγχείρημα κατέληξε σε ένα διαγωνισμό θεωριών ελέγχου (Spencer και Sain, 1997). Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα του ενεργού ελέγχου για μεγάλης κλίμακας δομές κύριων πύργων, βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της εφαρμοσμένης μηχανικής. Σε αυτόν τον τομέα πολλά μοντέλα έχουν σχεδιαστεί με σκοπό τον έλεγχο της δόνησης των εύκαμπτων πύργων γεφυρών.

5.6.2 Αντικείμενο ελέγχου και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του

Στο σχήμα 5.25 παρουσιάζεται το πρότυπο μοντέλο ενός πύργου με γέφυρες που συνδέεται με ένα πρότυπο μοντέλο πύργου – γερανού. Ο πύργος αυτός συνδέθηκε με τον πύργο με γέφυρες κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Ο τρόπος ανάλυσης της δομής πραγματοποιείται αρχικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το σχήμα 5.26 παρουσιάζει οκτώ ιδιομορφές της κατασκευής. Οι πρώτες πέντε ιδιομορφές, συμπεριλαμβανομένων της καμπτικής και στρεπτικής, είναι εκείνες που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Σε αυτήν την περίπτωση, τα πέντε σημεία διαμόρφωσης επιλέγονται να είναι τοποθετημένα στους κόμβους της έκτης ιδιομορφής, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.26, με το πλεονέκτημα ότι η έκτη ιδιομορφή δεν θα ασκήσει καμία επιρροή στο σημείο διαμόρφωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή των σημείων διαμόρφωσης δεν είναι βασισμένη στη συνέχεια των συντεταγμένων των κατασκευών, αλλά είναι μάλλον βασισμένη στο πεπερασμένο στοιχείο της δομής, δηλαδή μόνο οι κόμβοι του πεπερασμένου στοιχείου είναι υποψήφιοι για τα σημεία διαμόρφωσης. Οι ομαλοποιημένες συνιστώσες του διανύσματος της δομής, όταν υπολογιστούν από το πεπερασμένο στοιχείο στα σημεία διαμόρφωσης, ορίζονται ως τα διανυσματικά τμήματα της μεθόδου των συσσωρευμένων πρότυπων μοντέλων πέντε βαθμών ελευθερίας.



Σχήμα 5.25 Κατασκευαστικό μοντέλο πύργου γέφυρας, εύκαμπτης δομής, εξοπλισμένης με γερανό. (Model structure of a flexible bridge tower with a model crane tower)



Σχήμα 5.26 Ιδιομορφές κατασκευής.

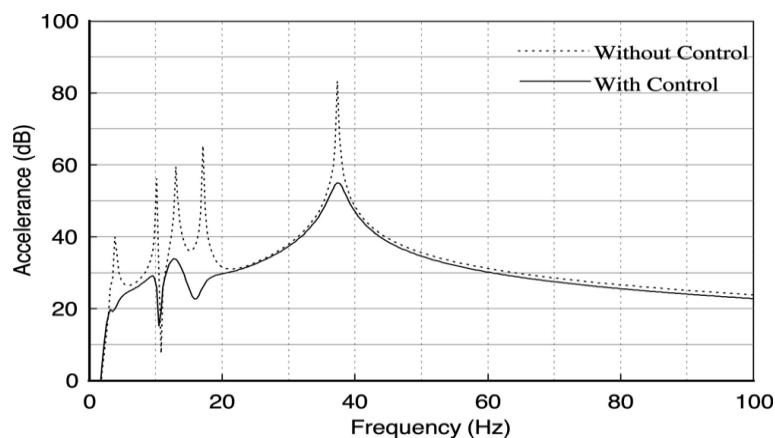
5.6.3 Προσομοιώσεις

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις στο ιδιαίτερο πρότυπο εκτελούνται χρησιμοποιώντας τις βασικές εργαλείοθκες συστημάτων ελέγχου MATLAB. Σε αυτές τις προσομοιώσεις οι τιμές των στοιχείων, που σταθμίζουν τους όρους ταχύτητας στο Q, λαμβάνονται ως μία ενότητα, ενώ τα στοιχεία που υπολογίζουν τις μετατοπίσεις λαμβάνονται ως μηδενικά, δεδομένου ότι έχουν καθιερωθεί από τις διάφορες προσομοιώσεις και πειράματα, μέσω των οποίων υπολογίζονται και ισορροπούνται οι όροι ταχύτητας, έτσι ώστε να είναι πιο αποτελεσματικοί από τους όρους μετατόπισης, ή και οι δύο να είναι εξίσου αποτελεσματικοί. Ρυθμίζοντας τη μήτρα στάθμισης, το R μετατρέπει τα αποτελέσματα της ανατροφοδότησης. Τα κατάλληλα αποτελέσματα που εξετάζονται στη προσομοίωση θα χρησιμοποιηθούν στα πειράματα. Επομένως, η προσομοίωση δεν είναι μόνο μια απλή δοκιμή του μοντέλου αλλά και μία αναπόφευκτη διαδικασία για την προετοιμασία των αποτελεσμάτων ανατροφοδότησης για τα πειράματα. Οι τιμές του R που χρησιμοποιούνται σε αυτό το κεφάλαιο είναι 0.001. Στα σχήματα 5.27 και 5.28 η υπολογισμένη απόκριση της συχνότητας (συμμόρφωση) και η απόκριση της ώθησης παρουσιάζονται, αντίστοιχα, στην περίπτωση όπου μία διέγερση εμφανίζεται στο σημείο

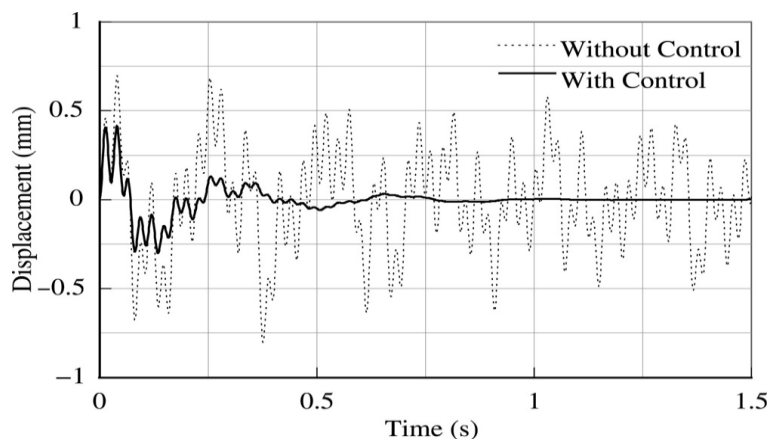
1 και φτάνει στο σημείο 2. Η διακοπή της συχνότητας των χαμηλής διέλευσης φίλτρων τίθεται να είναι στα 30 Hz. Είναι εμφανές ότι οι πέντε μέθοδοι μπορούν να ελεγχθούν καλά.

5.6.4 Πειράματα

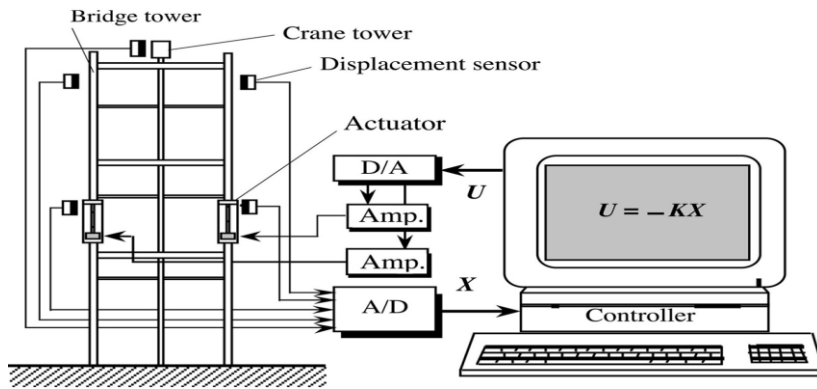
Τα πειράματα πραγματοποιούνται για να ελέγξουν τις μεθόδους διαμόρφωσης και ελέγχου, που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, για τον έλεγχο της δόνησης της δομής πύργων με γέφυρες. Η πειραματική οργάνωση παρουσιάζεται στο σχήμα 5.29. Ένα προσωπικός Η/Υ χρησιμοποιείται ως ελεγκτής. Οι μετατοπίσεις στις θέσεις των μαζικών σημείων 1 έως 4 στη δομή ανιχνεύονται μέσω των τεσσάρων απόλυτων αισθητήρων μετατόπισης, και εισάγονται στον υπολογιστή μέσω των μετατροπέων A/D. Δύο υβριδικό δυναμικό αποσβεστήρες εγκαθίστανται στις θέσεις των μαζικών σημείων 3 και 4. Οι μετατοπίσεις των αποσβεστήρων μετριοούνται από δύο μετρητές πίεσης. Τα έξι αντίστοιχα σήματα ταχύτητας υπολογίζονται από το λογισμικό χρησιμοποιώντας την πεπερασμένη προσέγγιση διαφοράς. Οι τιμές ελέγχου στέλνονται στο μετατροπέα D/A και ενισχύονται έκτοτε για να καθοδηγήσουν τους ενεργοποιητές. Τα αποτελέσματα της ανατροφοδότησης που λαμβάνονται από την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιούνται για να παραχθούν οι δυνάμεις ελέγχου στα πειράματα.



Σχήμα 5.27 Υπολογισμός απόκρισης συχνότητας.



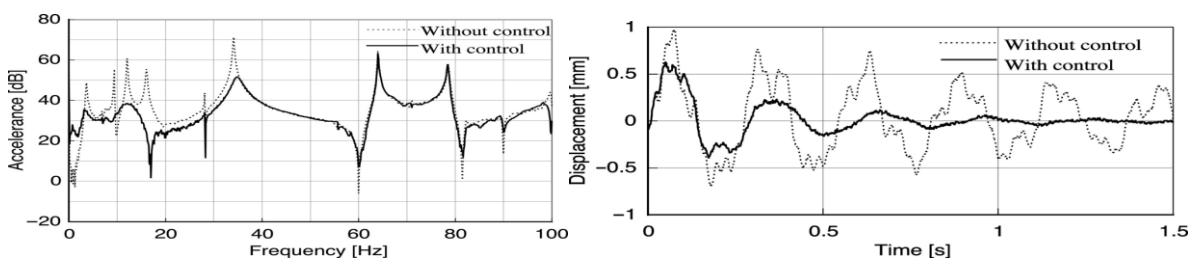
Σχήμα 5.28 Υπολογισμός απόκρισης ώθησης.



Σχήμα 5.29 Οργάνωση πειράματος.

Σε αυτό το πείραμα, δύο ενεργοποιητές τοποθετούνται στα σημεία των κόμβων της έκτης μεθόδου δόνησης. Τέσσερις αισθητήρες μετατόπισης έχουν επίσης τοποθετηθεί στα σημεία των κόμβων της έκτης μεθόδου (περίπου 44Hz), όπου και τα σημεία διαμόρφωσης βρίσκονται. Εντούτοις, η πειραματική έρευνα δείχνει ότι είναι καλύτερο να τοποθετηθούν οι αισθητήρες στα κομβικά σημεία της έβδομης μεθόδου (περίπου 65 Hz) που μετατοπίζονται ελαφρώς από τις θέσεις των κόμβων της έκτης μεθόδου (σχήμα 5.26). Κατά αυτή τη μέθοδο, ο έβδομος τρόπος γίνεται αφανής έτσι ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα διαρροής. Η έκτη και έβδομη μέθοδος, οι οποίες είναι ανεξέλεγκτες και αφανείς, επιτρέπουν σε εμάς τη θεώρηση μιας σχετικά χαμηλής συχνότητας διακοπών για τα χαμηλής διέλευσης φίλτρα, τα οποία οδηγούν σε μια αποβολή επιρροής της όγδοης μεθόδου (περίπου 79 Hz) και των υψηλότερων μεθόδων. Διαφορετικά, ακόμα μία χαμηλότερη συχνότητα διακοπών θα είναι απαραίτητη, οδηγώντας κατά συνέπεια στην υποβάθμιση της επίδρασης ελέγχου στην έκτη μέθοδο (περίπου 37 Hz). Η διακοπή συχνότητας των χαμηλής διέλευσης φίλτρων τίθεται ως 30 Hz σε αυτήν την έρευνα, η οποία αποδεικνύεται μια καλή ανταλλαγή. Πρέπει να επισημανθεί ότι η κίνηση των αισθητήρων μακριά από τα σημεία διαμόρφωσης ισχύει μόνο όταν αυτή η μετακίνηση είναι τόσο μικρή που οι ανιχνευμένες κινήσεις των ελεγχόμενων μεθόδων δεν αλλάζουν κατεύθυνση.

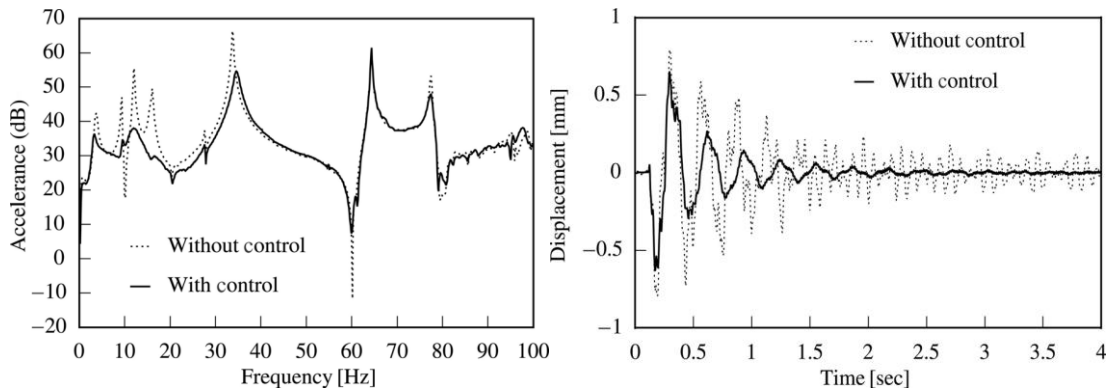
Με τη διέγερση στη θέση του μαζικού σημείου 1, που χρησιμοποιεί ένα σφυρί ώθησης, και μετρώντας την απόκριση στη θέση του μαζικού σημείου 2, το σχήμα 5.30 παρουσιάζει την πειραματική απόκριση συχνότητας (επιτάχυνση) και το σχήμα 5.31 υπολογίζει την αντίστοιχη απόκριση ώθησης της δομής. Είναι φανερό ότι οι πέντε πρώτοι μέθοδοι της δομής ελέγχονται επαρκώς. Δεν έχει παρατηρηθεί καμιά δυσμενής επιρροή των φίλτρων στην απόδοση του ελέγχου. Καμία διαρροή δεν εμφανίζεται για τις υψηλότερες μεθόδους που παραλείπονται (έκτη και έβδομη).



Σχήμα 5.30 και 5.31 Μέτρηση απόκριση συχνότητας και ώθησης, αντίστοιχα.

5.6.5 H^∞ αυτοδύναμος έλεγχος (Kar και λοιποί.,2000a)

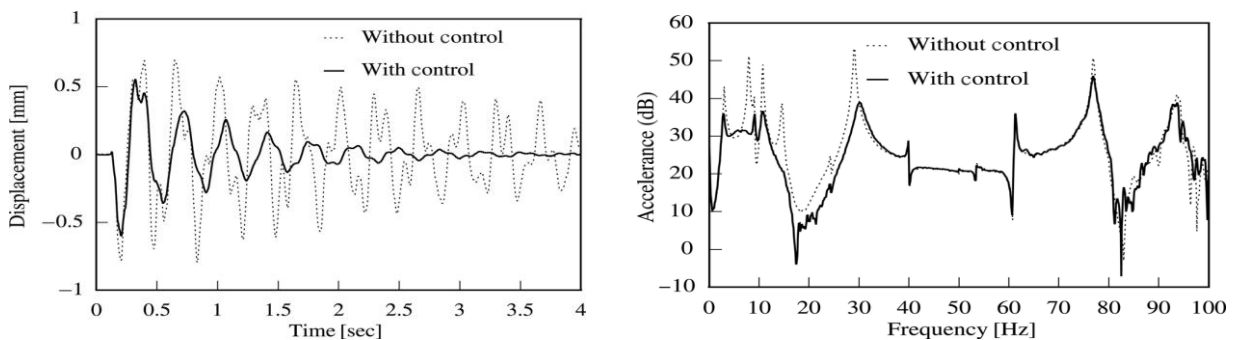
Αν και η θεωρία ελέγχου LQ είναι πολύ χρήσιμη στο σχεδιασμό των συστημάτων ελέγχου, η θεωρία ελέγχου H^∞ , ως η κυρίαρχη θεωρία ελέγχου χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ίδιου πύργου γεφυρών προκειμένου να συγκριθεί με τον έλεγχο LQ.



Σχήματα 5.32 και 5.33 Πειραματικές μετρήσεις απόκρισης συχνότητας και ώθησης, αντίστοιχα.

Η περαιτέρω συζήτηση θα οδηγήσει στην εξέταση, της αποτελεσματικότητας, αυτής της θεωρίας, ως εργαλείο σχεδίου συστημάτων ελέγχου χρησιμοποιώντας MATLAB, και DSP. Πιο συγκεκριμένα, ένα ενδιαφέρον πείραμα έχει ελέγξει την αποτελεσματικότητα στην πρόληψη της διαρροής. Χρησιμοποιώντας τον πύργο με γέφυρες που βρίσκεται υπό κατασκευή, ο οποίος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.26, η αποτελεσματικότητα του ελεγκτή H^∞ με έναν υβριδικό δυναμικό απορροφητή καταδεικνύεται.

Η πειραματική συχνότητα και οι χρονικές αποκρίσεις παρουσιάζονται στα σχήματα 5.32 και 5.33. Αυτές οι αποκρίσεις λαμβάνονται, χρησιμοποιώντας μία γρήγορη συσκευή μετασχηματιστών - αναλυτών (Fourier), με τη διέγερση του μαζικού σημείου 1 και την παρατήρηση της απόκρισης στο μαζικό σημείο 2. Είναι εμφανές ότι οι πρώτες τέσσερις μέθοδοι δόνησης είναι καλά κατασταλαμμένες και επίσης οι υψηλότερες μέθοδοι δεν είναι διεγερμένες, το οποίο υπονοεί ότι δεν υπάρχει καμία αστάθεια και πρόκληση διαρροής. η πέμπτη μέθοδος (που αντιστοιχεί στον πύργο γερανών) επίσης ελέγχεται καλά, παρά τη διαθεσιμότητα της κατάστασης που αντιστοιχεί στο πέμπτο μαζικό σημείο. Αυτές οι μετρημένες αποκρίσεις συμφωνούν καλά με τα αποτελέσματα του ελέγχου LQ.



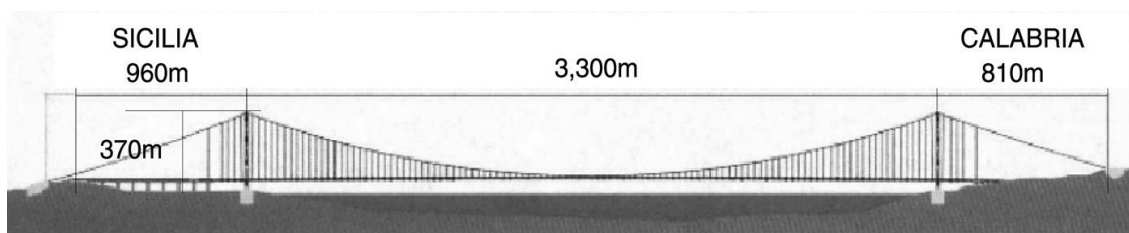
Σχήματα 5.34 και 5.35 Απόκριση ώθησης και συχνότητας αντιστοιχα με πρόσθετη μάζα.

Στην πράξη, οι παράμετροι ενός πύργου με γέφυρες αλλάζουν καθώς οι εργασίες κατασκευής προχωράνε. Για να ελεγχθεί η ευρωστία του προτεινόμενου σχεδιασμού ελέγχου ενάντια στις



Σχήμα 5.36 Η γέφυρα Kurushima Kaikyo ολοκληρωμένη.

αλλαγές των παραμέτρων, μια πρόσθετη μάζα είναι σκόπιμα συνημμένη σε κάθε ένα από τα μαζικά σημεία 1 και 2. Ως αποτέλεσμα των προστιθέμενων μαζών, η φυσική συχνότητα μειώνεται και η ισοδύναμη μάζα αυξάνεται κατά περίπου 50% σε κάθε ένα από τα μαζικά σημεία 1 και 2. Σε αυτό η περίπτωση, τα αποτελέσματα των ελεγκτών που υπολογίζονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται επίσης στον αλγόριθμο ελέγχου. Οι αποκρίσεις συχνότητας και ώθησης της ελεγχόμενης δομής παρουσιάζονται στα σχήματα 5.34 και 5.35. Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ευρωστία του προτεινόμενου σχεδιασμού ενεργού ελέγχου, ενάντια στις αλλαγές των παραμέτρων. Το σχήμα 5.36 παρουσιάζει την ολοκληρωμένη εξωτερική άποψη της γέφυρας Kaikyo Kurushima. Η ανάπτυξη της ενεργού τεχνολογίας ελέγχου για τέτοιας μεγάλης κλίμακας κατασκευή κύριου πύργου, το καθιστά πρωτοπόρο στην τεχνολογία της εφαρμοσμένης μηχανικής. Αναμένεται ότι μια τέτοια τεχνολογία θα διαδραματίσει τον αρχικό ρόλο στην κατασκευή μιας γέφυρας, που θα συνδέει μια ηπειρωτικής χώρα, όπως είναι η Ιταλία με τη νήσο Σικελία, έργο το οποίο έχει δρομολογηθεί πρόσφατα. Οι πύργοι της προγραμματισμένης γέφυρας πρόκειται να είναι 370 μ σε ύψος (σχήμα 5.37), και φυσικά, θα απαιτηθεί η τεχνολογία ελέγχου πολλαπλών τρόπων.



Σχήμα 5.37 Άποψη του έργου μεγάλης κλίμακας, της κρεμαστής γέφυρας.

Name of Bridge	Years Employed	Height, Weight	Frequency Range (Hz)	Moving Mass, Mass Ratio (%) ¹	Control Algorithm	No. of Controlled Modes
Rainbow Bridge Pylon 1	1991 ~ 1992	119m 4800 tonf	0.26-0.95	6 ton x 2 0.6	Feedback control	3
Pylon 2	1991 ~ 1992	117m 4800 tonf	0.26-0.55	2 ton 0.14	DVFB ²	1
Tsurumi-Tsubasa ³	1992 ~ 1993	183m 3560 tonf	0.27-0.99	10 ton x 2 0.16	Optimal regulator DVFB	1
Hakacho Pylon 1	1992 ~ 1994	127.9m 2400 tonf	0.13-0.68	9 tonf 0.4	Sub-optimal feedback control	1
Pylon 2	1992 ~ 1994	131m 2500 tonf	0.13-0.68	4 ton x 2 0.36	DVFB	1
Akashi Kaikyo Pylons 1 & 2	1993 ~ 1995	293m 24,650 tonf	-0.127-	28 ton x 2 0.8	Optimal regulator DVFB	1
Meiko-Central ³ Pylon 1	1994 ~ 1995	190m 6200 tonf	0.18-0.42	8 ton x 2 0.98-1.15	H_{∞} Feedback control	1
Pylon 2	1994 ~ 1995	190 6200 tonf	0.16-0.25	0.17-0.38		1
1st Kurushima Pylon 1	1995 ~ 1997	112m 1600 tonf	0.23-1.67	6 ton x 2 0.15-2.05	Sub-optimal regulator control	3
Pylon 2	1995 ~ 1997	145m 2400 tonf	0.17-1.70	10 ton x 2 0.3-2.6	H_{∞} Feedback control	3
2nd Kurushima Pylon 1	1994 ~ 1997	166m 4407 tonf	0.17-1.06	10 ton x 2 0.41	DVFB/H	2
Pylon 2	1995 ~ 1997	143m 4000 tonf	0.20-1.45	10 ton x 2 0.54-1.01	Fuzzy control	more than 3
3rd Kurushima Pylon 1	1995 ~ 1996	179m 4500 tonf	0.13-0.76	11 ton x 2 0.3-2.4	Variable gain DVFB	1
Pylon 2	1994 ~ 1996	179m 4600 tonf	0.13-0.76	11 ton x 2 0.3-2.4	H_{∞} output feedback control	1
Nakajima Bridge	1995 ~ 1996	71m 580 tonf	0.21-1.87	3.5 ton x 2 1.0-10.6	Fuzzy control	3

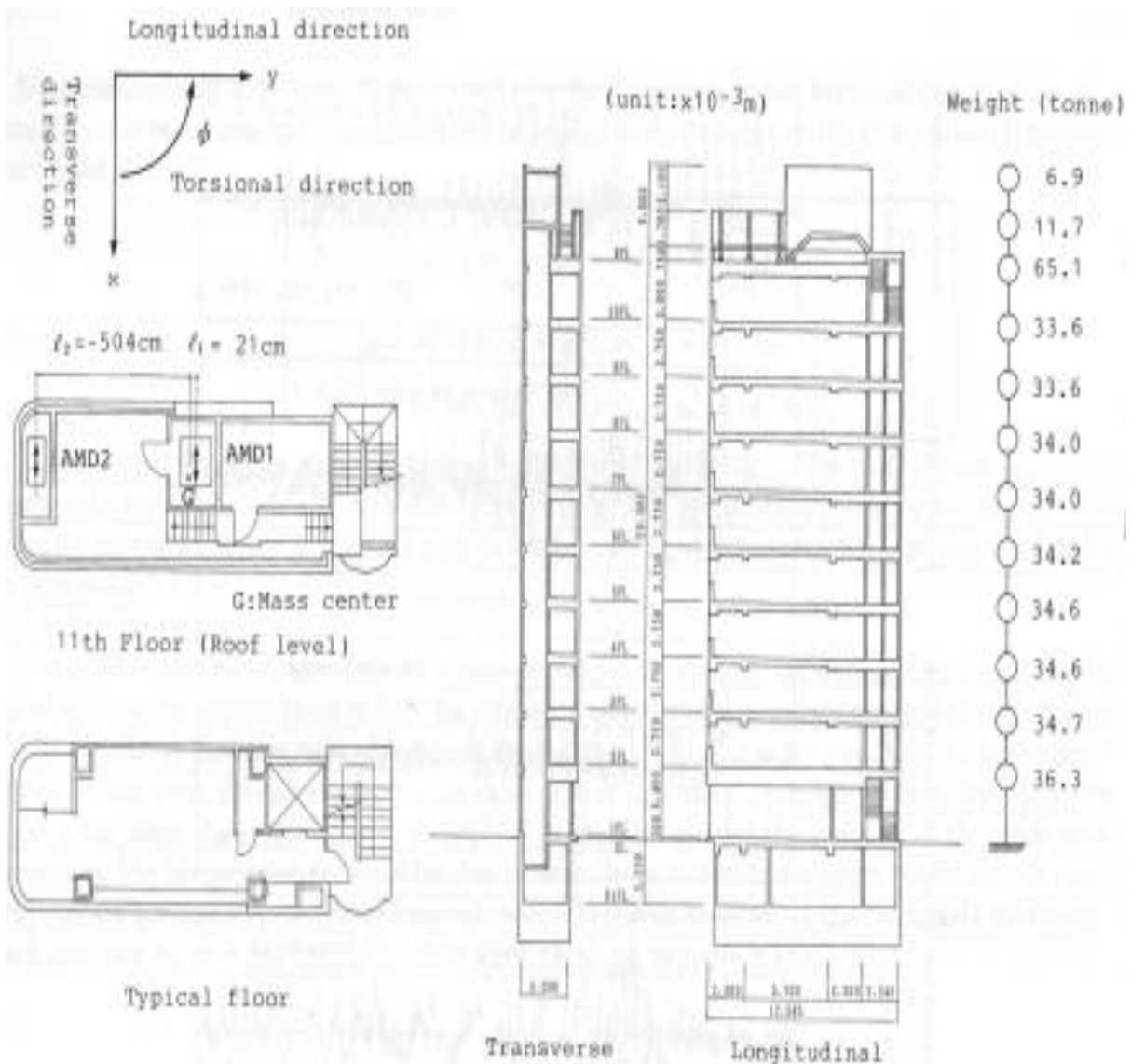
1 Percent of first modal mass.

2 Direct Velocity Feedback.

3 Cable-stayed bridge. Others are suspension bridges.

Σχήμα 5.38 Γέφυρες που έκαναν χρήση ενεργών συστημάτων ελέγχου κατά τη διάρκεια κατασκευής τους.

5.7 Εγκατάσταση συστήματος AMD στο κτήριο Kyobashi Siewa



Σχήμα 5.39 Τομή και κατόψεις του κτηρίου Kyobashi Siewa

Η εταιρία Kajima ήταν αρμόδια για την πρώτη παγκόσμια εγκατάσταση ενός AMD αποσβεστήρα, όταν εξόπλισε το κτήριο Kyobashi Siewa, ύψους 33 μέτρων από εύκαμπτο χάλυβα (σχήμα 5.40α) με ένα τέτοιο σύστημα τον Αύγουστο του 1989. Το σύστημα αυτό (σχήμα 5.40β) εγκαταστάθηκε στο κτήριο για να το προστατεύσει από σεισμούς και ισχυρούς ανέμους, οι αισθητήρες του, (οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο υπόγειο, στον έκτο και στον ενδέκατο όροφο) είναι σε θέση να ανιχνεύσουν στο 1/100 του δευτερολέπτου τις κινήσεις και τις δονήσεις στο έδαφος και στο κτήριο. Δύο AMD αποσβεστήρες εγκαταστάθηκαν, μία μεγάλη μονάδα AMD τεσσάρων τόνων στη μέση της κατασκευής για να ελέγχει τις μεγάλες ταλαντώσεις και δονήσεις σε ολόκληρο το κτήριο και μία μικρότερη μονάδα ενός τόνου, που έχει ως σκοπό την εξουδετέρωση της στρέψης. Σε αυτούς τους δύο αποσβεστήρες η μάζα είναι αναρτημένη από ένα συρματόσχοινο και καθοδηγείται από τους σέρβο-υδραυλικούς ενεργοποιητές. Δύο

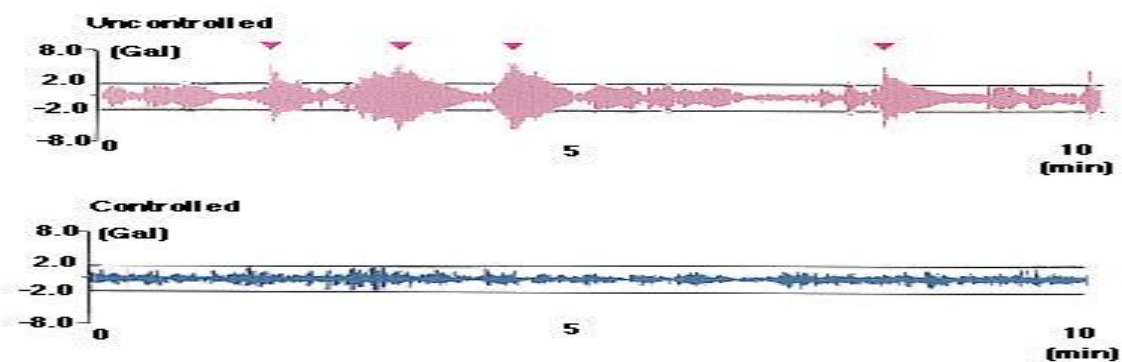
αντλίες και ένας συσσωρευτής ενεργούν ως πηγή υδραυλικής πίεσης για τον ενεργοποιητή, που παρέχοντας έτσι ταχεία συμπίεση με χαμηλό ενεργειακό κόστος. Η εγκατάσταση αυτή αν και ζυγίζει το 1.5% του βάρους του κτηρίου, μπορεί να μειώσει την απόκριση από 1/2 έως 2/3. Κατά τη διάρκεια ισχυρού ανέμου καταγράφηκαν τα στοιχεία που παρουσιάζονται στην εικόνα 5.40(γ), τα οποία αποδεικνύουν τη μείωση της απόκρισης κατά την διάρκεια δράσης του αέρα και τον περιορισμό της επιτάχυνσης κάτω από τα επιτρεπτά όρια.



(α)



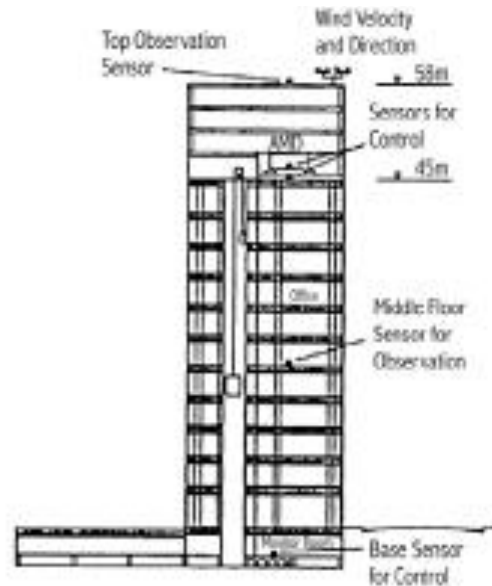
(β)



(γ)

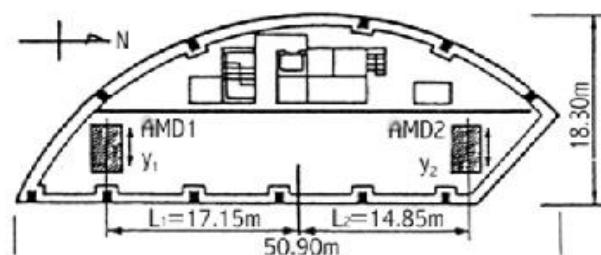
Σχήμα 5.40(α) Άποψη του κτηρίου Kyobashi Siewa, (β) το σύστημα AMD που έχει εγκατασταθεί στην κατασκευή και (γ) το διάγραμμα της απόκρισης κατά τη διάρκεια ανέμου.

5.8 Εγκατάσταση συστήματος AMD στο κτήριο Sentagaya INTES



Σχήμα 5.41 Κτήριο Sentagaya INTES

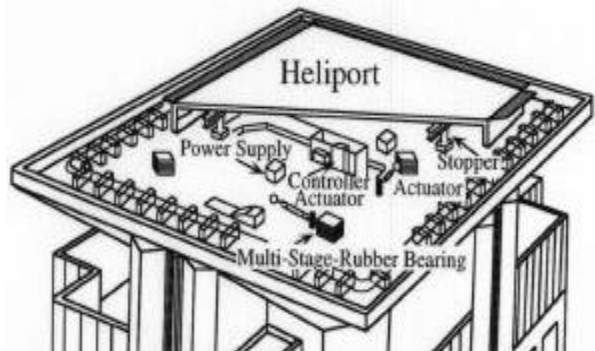
Ένα παράδειγμα πραγματικής εφαρμογής AMD έχει εγκατασταθεί στο κτήριο Sentagaya στο Τόκιο το 1991. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.41, το σύστημα AMD έχει εγκατασταθεί στον 11^ο όροφο και αποτελείται από δύο μάζες που ελέγχουν τις εγκάρσιες και στρεπτικές κινήσεις της δομής, ενώ οι υδραυλικοί αποσβεστήρες παρέχουν τις ικανότητες ενεργού ελέγχου που διαθέτουν. Η κάτοψη του συστήματος ελέγχου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.42, όπου οι θερμικές δεξαμενές αποθήκευσης πάγου χρησιμοποιούνται ως σημεία φραγής μάζας ώστε καμία πρόσθετη μάζα να μπορεί να εισαχθεί. Οι μάζες υποστηρίζονται από πολυβάθμια λαστιχένια ρουλεμάν προοριζόμενα για τη μείωση της ενέργειας ελέγχου που καταναλώνεται στο AMD και για την ασφαλή μετακίνηση της μάζας (Higashino και Aizawa, 1993 – Soong και λοιποί., 1994).



Σχήμα 5.42 Κάτοψη δώματος κτηρίου και σημεία τοποθέτησης του συστήματος ελέγχου.

Κατά την αξιολόγηση της απόδοσης του AMD, όταν το κτήριο υποβλήθηκε σε ισχυρό άνεμο στις 29 Μαρτίου το 1993 με μέγιστη ταχύτητα ανέμου 30.6 m/sec, λήφθηκαν ικανοποιητικά στοιχεία. Η θεμελιώδης συχνότητα απόκρισης μειώθηκε κατά 18% και 28% η στρέψη αντίστοιχα. Παρόμοια χαρακτηριστικά απόδοσης παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια μιας σειράς σεισμών που καταγράφηκαν μεταξύ του Μαΐου το 1992 και Φεβρουαρίου το 1993.

5.9 Εγκατάσταση συστήματος AMD στο κτήριο Hanku Chayamachi



Σχήμα 5.43: Το κτήριο Hanku Chayamachi και το ελικοδρόμιο που χρησιμοποιείτε ως η μάζα του αποσβεστήρα AMD.

Μία άλλη περίπτωση εφαρμογής συστήματος AMD, όπου η μάζα του αποσβεστήρα παρέχεται από στοιχεία ήδη υπάρχοντα στη κατασκευή, είναι το κτήριο Hanku Chayamachi, γνωστό και ως Arplause Tower στην Οσάκα (Σχήμα 5.43). Το ελικοδρόμιο που στεγάζεται στη κορυφή του κτηρίου, το οποίο στηρίζεται σε πολυβάθμια ελαστομερή εφέδρανα, επιλέχθηκε ως η μάζα του αποσβεστήρα AMD, με βάρος 480 τόνων, εξοικονομώντας έτσι χρήματα ενώ δεν προσθέτει κανένα επιπλέον βάρος στη δομή. Για την εφαρμογή του συστήματος ήταν αναγκαίος ο υδραυλικός σχεδιασμός, ένας ψηφιακός ελεγκτής, ένας σέρβο-μηχανισμός και δύο ενεργοποιητές ώθησης 5 τόνων για τις Χ και Ψ κατευθύνσεις. Οι δοκιμές δόνησης αποκάλυψαν την επιτυχία αυτής της εφαρμογής, όπου αυξήθηκε η αναλογία απόσβεσης από 1.4% σε 10.6%.

5.10 Εγκατάσταση συστήματος AMD στον πύργο τηλεπικοινωνιών Nanjing

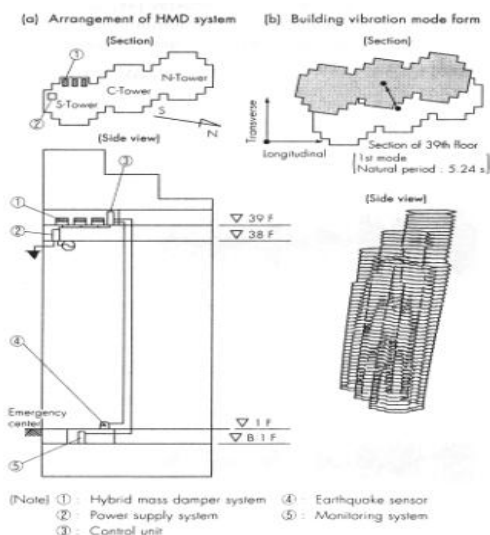


Η εφαρμογή των ενεργών συστημάτων μάζας δεν έχει περιοριστεί μονάχα στην Ιαπωνία. Ένας ενεργός αποσβεστήρας σχεδιάστηκε για να ενσωματωθεί στον πύργο τηλεπικοινωνιών Nanjing, ύψους 340 μέτρων, στην Κίνα. Λόγω του περιορισμένου χώρου, τα παθητικά συστήματα που προτάθηκαν αρχικά, ήταν αδύνατον να ενσωματωθούν. Το σύστημα που εφαρμόστηκε αποτελείται από μία μάζα 60 τόνων, σε σχήμα δακτυλίου πάνω σε ρουλεμάν τριβής-ολίσθησης, η οποία αποτελεί το 1% της μάζας του πύργου και έχει την ικανότητα να μειώνει επαρκώς τη δομική απόκριση. Η μάζα έχει εξωτερική ακτίνα 4,75 μέτρων με εσωτερική ακτίνα 3,9 μέτρων και ελέγχεται από τρεις σέρβο-υδραυλικούς ενεργοποιητές με εύρος κίνησης 1,5 μέτρο.

Σχήμα 5.44 Άποψη του πύργου τηλεπικοινωνιών Nanjing.

5.11 Εγκατάσταση συστήματος TRIGON στο Shinjuku Park Tower

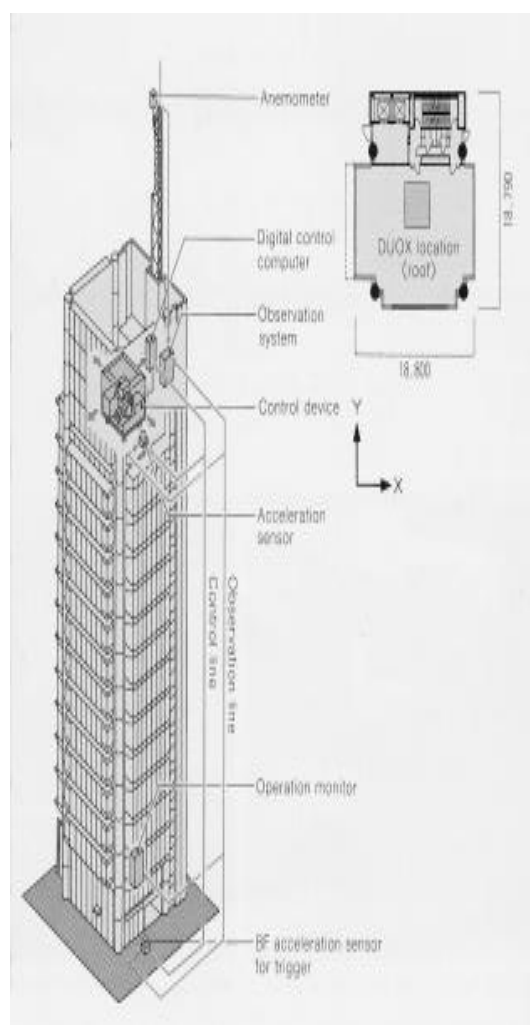
Το 1994, αναπτύχθηκε πλήρως η συσκευή TRIGON, η οποία τοποθετήθηκε για να ελέγχει το Shinjuku Park Tower που είναι ένας ουρανοξύστης 52 ορόφων στην περιοχή Shinjuku στο Τόκιο. Το Shinjuku Park Tower είναι ένα από τα μεγαλύτερα κτήρια της Ιαπωνίας συνολικής έκτασης 264.000 τετραγωνικών μέτρων και έχει ύψος 233 μέτρα. Οι πρώτοι 37 όροφοι χρησιμοποιούνται ως χώροι γραφείων, ενώ οι υπόλοιποι καταλαμβάνονται από το ξενοδοχείο The Park Hyatt Hotel. Το κτήριο αποτελείται από τρεις συνδεδεμένους πύργους (σχήμα 7). Λαμβάνοντας υπόψη την κάτοψη του κτηρίου με διαστάσεις 122 x 70μ, είναι σαφές ότι είναι ευαίσθητο στις εγκάρσιες και στρεπτικές μετατοπίσεις κατά τη διάρκεια ισχυρών ανέμων και σεισμών. Στο Shinjuku Park Tower, μια συσκευή TRIGON δεν θα παρείχε επαρκή έλεγχο των δυνάμεων για να μειωθούν οι μετατοπίσεις του κτηρίου, για το λόγο αυτό τοποθετήθηκαν τρεις ίδιες συσκευές TRIGON συμπληρώνοντας συνολικά 330 μετρικούς τόνους, κατά προσέγγιση το 0.25% του συνολικού βάρους της κατασκευής. Λόγω της υψηλής τιμής μισθώματος στο Shinjuku Park Tower, ήταν περιορισμένος ο διαθέσιμος χώρος στους σχεδιαστές. Η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των συσκευών είναι στην στέγη του κτηρίου, αλλά το εστιατόριο και η πισίνα κατέλαβαν αυτούς τους αίθριους χώρους. Τελικά, οι συσκευές TRIGON τοποθετήθηκαν στον 39 όροφο στη νότια πλευρά του κτηρίου, 45 μέτρα από το κέντρο μάζας της κατασκευής. Η εκκεντρικότητα έχει ως σκοπό τη μικρή αύξηση της επίδρασης ελέγχου για τις στρεπτικές μετατοπίσεις. Οι συσκευές TRIGON λειτουργούν χωρίς να δημιουργούν κακόφωνους θορύβους, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία του ξενοδοχείου. Οι συσκευές ήταν εύκολο να εγκατασταθούν και η εγκατάσταση τους διήρκεσε μόνο 2 μέρες. Το συνολικό κόστος της συσκευής και της εγκατάστασης, αποκλείοντας της δαπάνες έρευνας και ανάπτυξης, ήταν μόνο το 0.5% του συνολικού κόστους κατασκευής του Shinjuku Park Tower.



Σχήμα 5.45 κα 5.46 Κατασκευαστικά σχέδια και άποψη του Shinjuku Park Tower αντίστοιχα.

5.12 Εγκατάσταση συστήματος DUOX στο κτήριο Ando Nishikicho

Η συσκευή DUOX και ένα συμπληρωματικό σύστημα εγκαταστάθηκαν στο κτήριο Ando Nishikicho, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή Chiyoda-chiyoda-ku στο Τόκιο και αποτελείται από 14 ορόφους, καθιστώντας το, το πιο ψηλό κτήριο σε μια περιοχή με χαμηλά κτήρια. Ο φέρον οργανισμός του κτηρίου αποτελείται από χάλυβα με τέσσερις μερικώς ενισχυμένες, εν μέρει από οπλισμένο σκυρόδεμα, κολώνες στις γωνίες της κατασκευής, οι οποίες προσφέρουν ικανοποιητική αντίσταση στα πλευρικά φορτία (σχήμα 11). Το κτήριο νοικιάζεται ως χώρος γραφείων. Προκειμένου να μειωθούν οι μετατοπίσεις, κατά τη διάρκεια των ισχυρών ανέμων, μία συσκευή DUOX εγκαταστάθηκε επάνω στη στέγη του, στο κέντρο μάζας του κτηρίου. Το βάρος του κτηρίου είναι 2.600 μετρικοί τόνοι, έτσι η συσκευή DUOX αντιπροσωπεύει κατά προσέγγιση το 1% της μάζας της κατασκευής. Το σύστημα DUOX προορίζεται να ελέγξει την μετατόπιση του κτηρίου προς την εγκάρσια και διαμήκη κατεύθυνση με φυσικές συχνότητες αυτές των 0.68 και 0.72 Hz.



Σχήμα 5.47 και 5.48 Άποψη του κτηρίου Ando Nishikicho και σχηματικό διάγραμμα

5.13 Εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων HMD στο Osaka Resort City (ORC) 200 Symbol Tower

Το κτήριο Osaka Resort City (ORC) 200 Symbol Tower (σχήμα 5.49) έχει επίσης επωφεληθεί από την εγκατάσταση δύο μονάδων HMD στον τελευταίο όροφο, αφού ήταν ευάλωτο στις πλευρικές και στρεπτικές μετατοπίσεις κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Οι μονάδες (σχήμα 5.50) συμπεριφέρονται ως HMD αποσβεστήρες κατά την εγκάρσια κατεύθυνση και ως TMD αποσβεστήρες προς την άλλη κατεύθυνση. Η κάθε μονάδα ζυγίζει περίπου 100 τόνους. Για λόγους ασφάλειας, το σύστημα διαθέτει φρένα αέρα για να κλειδώσει τη συσκευή σε περίπτωση μεγάλου εύρους δομικών κινήσεων. Η αποτελεσματικότητα του HMD έχει διαπιστωθεί σε ανέμους με ταχύτητα έως 17m/sec και με τη δομική απόκριση να καταστέλλεται περίπου στο 1/2 έως 1/3.



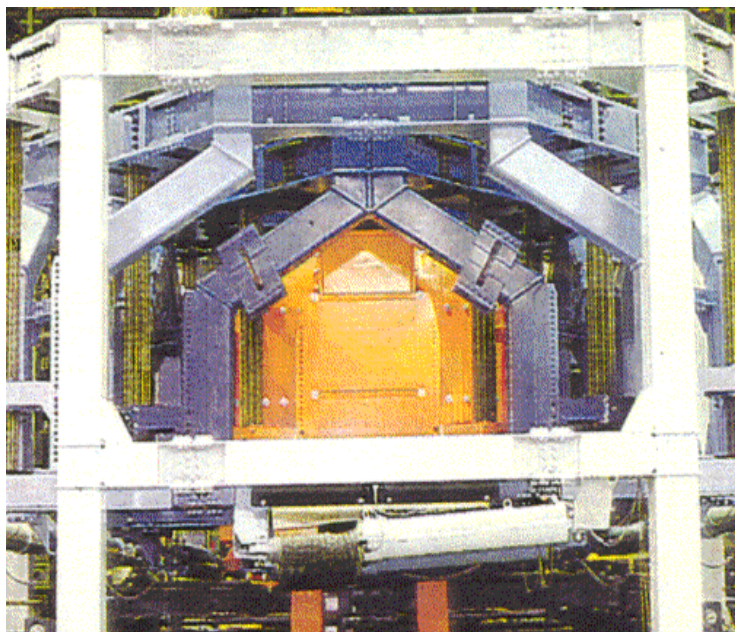
Σχήμα 5.49 Άποψη του κτηρίου Osaka Resort City (ORC) 200 Symbol Tower.



Σχήμα 5.50 Ο υβριδικός αποσβεστήρας που εγκαταστάθηκε στο κτήριο.

5.14 Εγκατάσταση υβριδικού αποσβεστήρα HMD στο Yokohama Landmark Tower

Μια αξιοσημείωτη εφαρμογή του υβριδικού αποσβεστήρα HMD πραγματοποιήθηκε στο κτήριο Yokohama Landmark Tower (σχήμα 5.51). Ο πύργος έχει ύψος 296 μέτρα, διαθέτει 70 ορόφους, κατασκευάστηκε από χάλυβα σε συνδυασμό με οπλισμένο σκυρόδεμα και έχει βάρος 260.000 τόνους. Τον Ιούνιο του 1993, ένα σύστημα ενεργού ρυθμιζόμενου αποσβεστήρα (TAD – Tuned Active Damper) εγκαταστάθηκε στο ρετιρέ του κτηρίου (282 μέτρα πάνω από το έδαφος) που αποτελείται από δύο μονάδες, που η καθεμία τους περιλαμβάνει ένα εκκρεμές τριών σταδίων που δραστηριοποιείται σε δύο κατευθύνσεις, ένα σύστημα ρυθμιζόμενων ελατήριων και ένα σύστημα ελέγχου με ένα σερβοκινητήρα. Το κλιμακωτό εκκρεμές έχει μια περίοδο 6 δευτερολέπτων και μέσω της χρήσης ενός φυσικού ρυθμιστή της περιόδου που μπορεί να αλλάξει το πραγματικό μήκος του εκκρεμούς, ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται σε τιμές τόσο χαμηλές όσο τα 4.3 δευτερόλεπτα, προκειμένου να αντιστοιχούν σε διάφορες περιόδους, συμπεριλαμβανομένων των θεμελιωδών του πύργου. Κάθε μονάδα καταλαμβάνει 9 τ.μ., έχει ύψος 5μ. και ζυγίζει 250 τόνους μαζί με το εκκρεμές, το οποίο ζυγίζει 170 τόνους. Η πρόσθετη μάζα εγκαταστάθηκε στο κέντρο της δομής του κτηρίου ανάμεσα σε τρία πλαίσια που συνδέονται μεταξύ τους με ειδικό τριπλό καλώδιο, ανάμεσα σε κάθε πλαίσιο τοποθετήθηκαν αποσβεστήρες λαδιού μαζί με άλλους συντελεστές απόσβεσης για να διασφαλιστεί η σταθερότητα και η ασφάλεια. Ο συντελεστής απόσβεσης είναι 300Ns/cm όταν η συσκευή σταματά και 300Ns/cm ενώ το σύστημα είναι σε λειτουργία. Μια παρόμοια συσκευή με 2 TAD έχει εγκατασταθεί στο κτήριο ACT Tower στην πόλη Hamamatsu, στην Ιαπωνία και το πύργο ελέγχου του αερολιμένα Kansai, εξυπηρετώντας την περιοχή της Οσάκα του Κιότο.

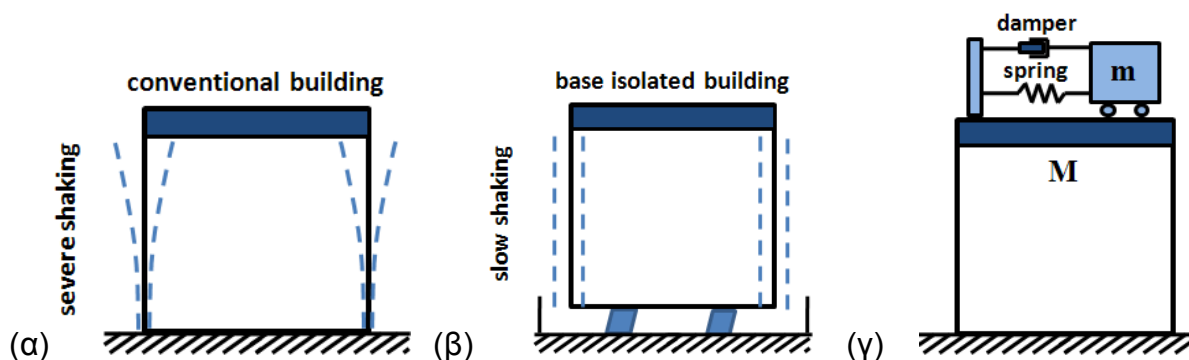


Σχήμα 5.51 και 5.52 Άποψη του Yokohama Landmark Tower και ο HMD που εγκαταστάθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Η παθητική απόσβεση ήταν από τις πρώτες λύσεις που προτάθηκαν για να μειώσουν τις δονήσεις στις αστικές κατασκευές. Αυτοί οι μηχανισμοί απόσβεσης λειτουργούν απορροφώντας την ενέργεια που εισάγεται στο κτήριο και έτσι μειώνουν τις υλικές ζημιές. Οι παθητικοί αποσβεστήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτές βάσεων, όπως φαίνεται στα σχήματα 6.1 (α) και 6.1 (β). Οι μονωτές βάσεων πρέπει να είναι αρκετά άκαμπτοι στην κατακόρυφη διεύθυνση για να υποστηρίξουν τις φορτώσεις που προκαλούνται από τις ισχυρές δονήσεις. Ένα μειονέκτημα είναι ότι η πρόσθετη απόσβεση που παρέχουν στη κατασκευή, στην οποία βασίζονται αυτά τα συστήματα μπορεί να αυξήσει την εσωτερική κίνηση του κτηρίου. Οι παθητικοί αποσβεστήρες μπορούν επίσης να εγκατασταθούν στην κορυφή μιας δομής, όπως οι ρυθμιζόμενοι αποσβεστήρες μάζας (TMD). Η κλασική μορφή του TMD παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1 (γ).



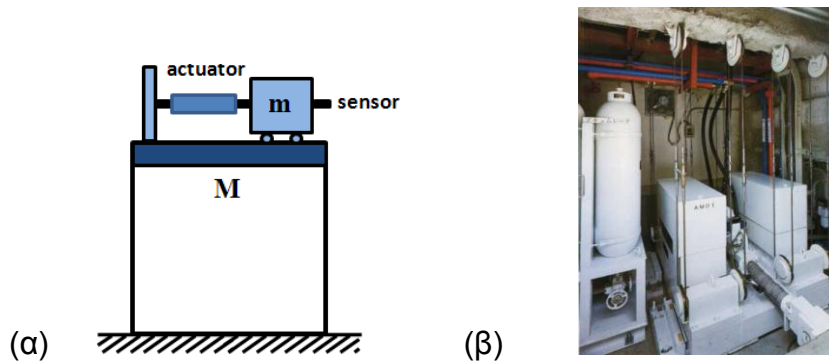
Σχήμα 6.1 Παθητική απόσβεση: (α) μη μονωμένο κτήριο, (β) κτήριο με μονωτή βάσης, (γ) κτήριο με αποσβεστήρα TMD.

Η παθητική απόσβεση έχει το πλεονέκτημα να μην απαιτεί εξωτερική πηγή τροφοδότησης ή κάποιο άλλο εξοπλισμό για να λειτουργήσει. Εντούτοις, μόλις συντονιστούν, δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις ποικίλες φορτώσεις. Αυτό κάνει υποχρεωτική τη ενδελεχή γνώση των χαρακτηριστικών της κατασκευής στην οποία θα τοποθετηθούν τέτοιοι μηχανισμοί και ανάλυση του εδάφους όπου βρίσκεται το κτήριο. Επιπλέον, οι παθητικοί αποσβεστήρες είναι γενικά μη γραμμικές συσκευές και η μείωση της δόνησης δεν είναι η βέλτιστη για ένα ευρύ φάσμα δονήσεων που εισάγονται στη δομή.

Οι περιορισμοί των παθητικών αποσβεστήρων μπορούν να ξεπεραστούν με τη χρήση των ενεργών συστημάτων ελέγχου. Σε αυτή τη κατηγορία συστημάτων, είναι δυνατό να καθοριστούν οι δυνάμεις που σταθεροποιούν τη κατασκευή και ως εκ τούτου έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες φορτώσεις. Οι ενεργοί αποσβεστήρες έχουν εφαρμοστεί ήδη σε διάφορες αστικές κατασκευές. Ένας ενεργός αποσβεστήρας AMD, αποτελείται από μια μάζα συνήθως λιγότερη από το 1% της συνολικής μάζας της δομής, εγκαθίσταται στη κορυφή της δομής και συνδέεται με έναν ενεργοποιητή, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2 (α). Η απόκριση ολόκληρης της

κατασκευής υποβάλλεται σε επεξεργασία από ένα υπολογιστή που στέλνει τα κατάλληλα σήματα στον ενεργοποιητή για να κινήσει τη μάζα και να μετριάσει τη δόνηση. Το σχήμα 6.2 δείχνει την εγκατάσταση ενός AMD σε ένα ιαπωνικό κτήριο.

Τα ενεργά συστήματα ελέγχου, αντίθετα από τους παθητικούς αποσβεστήρες, απαιτούν εξωτερική πηγή τροφοδότησης συνήθως από το ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο μπορεί να σταματήσει να λειτουργεί κατά τη διάρκεια ενός σεισμού ή ενός τυφώνα. Επιπλέον, τα ενεργά συστήματα μπορούν να εγχύσουν την ενέργεια στο σύστημα και να το αποσταθεροποιήσουν, οδηγώντας το σε μια οριακή κατάσταση λειτουργίας. Η χρήση πρόσθετου υλικού, όπως οι αισθητήρες και ενεργοποιητές, είναι αναγκαία.

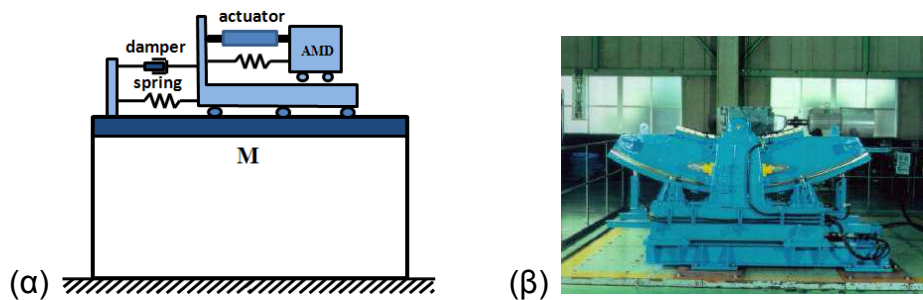


Σχήμα 6.2 Ενεργοί αποσβεστήρες: (α) σύστημα AMD, (β) ο AMD στο κτήριο Kyobashi Seiwa.

Παρά την επιτυχή εφαρμογή των ενεργών συστημάτων απόσβεσης, υπάρχουν μερικές ανησυχίες οι οποίες οδηγούν στη μη ευρεία εφαρμογή τους: 1) το υψηλό κόστος και η συντήρηση, 2) η αναγκαία χρήση εξωτερικής τροφοδότησης, 3) η προσκόλληση στη παλιά τεχνολογία. Αυτές οι ανησυχίες μπορούν να ξεπεραστούν από άλλες τεχνικές ελέγχου όπως τα ημιενεργά και υβριδικά συστήματα ελέγχου.

Τα ημιενεργά συστήματα ελέγχου, αφ' ενός, συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των παθητικών και ενεργών συστημάτων απόσβεσης. Οι ιδιότητες μπορούν να προσαρμοστούν σε πραγματικό χρόνο αλλά δεν μπορούν να εγχύσουν ενέργεια στο σύστημα. Οι ημιενεργές συσκευές μπορούν θεωρητικά να ελεγχθούν στο πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας ένα σχέδιο ελέγχου κλειστών βρόχων. Αυτό επιτρέπει σε μια κατασκευή να αποκριθεί στο σεισμό με ένα θεωρητικά ασφαλές τρόπο δόνησης μέσω της επαρκούς διάχυσης ενέργειας.

Ο υβριδικός έλεγχος είναι βασικά ο συνδυασμός των παθητικών και ενεργών συσκευών, όπως για παράδειγμα, ο υβριδικός ρυθμιζόμενος αποσβεστήρας μάζας. Η δυνατότητα της συσκευής να μειώνει τη δομική απόκριση στηρίζεται στη φυσική κίνηση του TMD. Ο ενεργοποιητής που συνοδεύει τη συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την απόδοση της δομής όταν υπόκειται σε μεταβολές. Το σχήμα 6.3 (α) παρουσιάζει τη σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος DuoX και το σχήμα 6.3 (β) την εικόνα ενός υβριδικού αποσβεστήρα μάζας σε ένα ιαπωνικό κτήριο. Τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν παθητικούς και ενεργούς αποσβεστήρες σε συστήματα μόνωσης βάσης μπορούν να σχεδιαστούν για την ενίσχυση της απόδοσης των παθητικών συσκευών.



Σχήμα 6.3 Υβριδικοί αποσβεστήρες μάζας: (α) σύστημα HMD, (β) χρήση HMD στον πύργο Rainbow, στην Ιαπωνία.

6.2 Ελαστομερή εφέδρανα

Η μόνωση των θεμελίων μειώνει την απόκριση του σεισμού μίας δομής και τις σχεδιασμένες σεισμικές δυνάμεις. Μειώνει τις επιταχύνσεις των ορόφων και τις ζημιές. Ένα σύστημα μόνωσης θεμελίων είναι εύκολο να εγκατασταθεί και να τεθεί σε χρήση σε νέες αλλά και σε υπάρχουσες κατασκευές. Τα μειονεκτήματα της απομόνωσης των θεμελίων είναι ότι η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη μόνο για κτήρια με μικρή περίοδο, που εδράζονται σε εδάφη που δεν παράγουν κίνηση μεγάλης περιόδου και τα φορτία του ανέμου δεν είναι σημαντικά. Επίσης ένα σύστημα μόνωσης απαιτεί ένα χάσμα μόνωσης για να μπορεί να επιτραπεί η ελεύθερη πλευρική μετατόπιση των μονωτών. Λίγα είναι γνωστά για τα αποτελέσματα της γήρανσης και της μακροχρόνιας παραμόρφωσης των εφεδράνων και πως οι χημικές και φυσικές ιδιότητες τους αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Η ακεραιότητα μιας μονωμένης κατασκευής εξαρτάται από τη ακεραιότητα του μονωτή της. Ο συντελεστής τριβής των σφαιρικών εφεδράνων ολίσθησης δεν μπορεί να καθοριστεί με βεβαιότητα μετά από μια μεγάλη περίοδο αδράνειας (Villaverde, 1990). Για τα σεισμικά μονωμένα κτήρια, η θεμελιώδης στροφική συχνότητα μπορεί να είναι πιο κοντά στη θεμελιώδη συχνότητα πλευρικής μετατόπισης από εάν οι ίδιες κατασκευές ήταν σε μια σταθερή βάση. Επίσης, οι διαδικασίες των ράβδων ολίσθησης που είναι συνυφασμένες με το σύστημα μόνωσης των θεμελίων μπορεί να προκαλέσει παλμούς υψηλής συχνότητας που θα διεγείρουν τα υψηλότερα τμήματα του κτηρίου. Οι παρούσες μονωμένες κατασκευές είναι ακριβότερες από τις κατασκευές με σταθερή βάση. Γενικά, έχει διαπιστωθεί ότι δεν γίνεται ολοκληρωτική απόσβεση στο σχεδιασμό της κατασκευής, για να αντισταθμιστεί το κόστος των μονωτών θα πρέπει να προβλεφτεί διπλή πλάκα πατώματος και τοίχων και οι πρόσθετες λεπτομέρειες πρέπει να προβλεφθούν για την καλύτερη ευελιξία. Το μέσο όρος του κόστους μιας μονωμένης κατασκευής είναι 5% ακριβότερο από το κόστος μιας παρόμοιας σταθερής βάσης. Εξαιρούνται οι κατασκευές οι οποίες πρέπει να εγγυηθούν την ασφάλεια των μη δομικών συστατικών τους.

6.3 Συμπληρωματική απόσβεση

Γενικά, οι αποσβεστήρες τριβής, οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες, και οι υστερητικοί αποσβεστήρες μειώνουν τη σεισμική απόκριση των κατασκευών και ελαχιστοποιούν τη δομική και μη δομική ζημιά. Αυτοί είναι εύκολο να εγκατασταθούν και δεν επηρεάζουν τον

σχεδιασμό θεμελίωσης και αποτελούν μία ελκυστική λύση για την αναβάθμιση των υφιστάμενων κτηρίων.

Τα αρνητικά στοιχεία είναι τα εξής: αρχικά, είναι αποτελεσματικοί μόνο για τις εύκαμπτες κατασκευές, οι οποίες μπορούν να υποβληθούν σε μεγάλες παραμορφώσεις. Επίσης, επιβαρύνουν τη διαδικασία σχεδιασμού και τη καθιστούν ακριβότερη. Για παράδειγμα, διάφορες εναλλακτικές λύσεις θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός αναγκαίων αποσβεστήρων και η ορθή τοποθέτησή τους. Η προσθήκη αποσβεστήρα ιξώδους ρευστού σε μία δομή αλλάζει την ακαμψία της και έχει επιπτώσεις στον σχεδιασμό των πλευρικών δυνάμεων. Εκτός αυτού, δεδομένου ότι οι αποσβεστήρες παρουσιάζουν μία μη γραμμική συμπεριφορά μετατόπισης, ο σχεδιασμός των κτηρίων όπου και θα εγκατασταθούν απαιτεί μία μη γραμμική ανάλυση. Στην περίπτωση των αποσβεστήρων τριβής και υστερητικής διάταξης, ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι η επιλογή της κατάλληλης απόδοσης ή του επιπέδου ολίσθησης.

Δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές αρχίζουν να λειτουργούν μόνο όταν το επίπεδο απόδοσης ή το επίπεδο ολίσθησης υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, εάν το όριο που έχει τεθεί είναι πολύ υψηλό υπάρχει κίνδυνος κάποιας δομικής και μη δομικής ζημιάς προτού αρχίσουν να λειτουργούν κανονικά. Επίσης υπάρχουν άλλα ποιο σημαντικά ζητήματα όπως: 1) η εισαγωγή στη συσκευή εξαρτημάτων υψηλής συχνότητας κίνησης σε συνδυασμό με τη ράβδο ολίσθησης, 2) η δυνατότητα μόνιμης εξισορρόπησης μετά από ένα σεισμό, 3) η σταθερότητα των βρόγχων υστέρησης υπό συνθήκες μετά-ελαστικών παραμορφώσεων, 4) η πιθανότητα μιας πρόωρης αστοχίας, λόγω κόπωσης, στην περίπτωση του υστερητικού αποσβεστήρα (the possibility of a premature fatigue failure in the case of the hysteretic dampers)

6.4 Ρυθμιζόμενος αποσβεστήρας μάζας (Tuned mass damper)

Οι ρυθμιζόμενοι αποσβεστήρες μάζας φαίνονται να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος πρόσθεσης απόσβεσης σε μία δομή όπως και ο έλεγχος της απόκρισης στα δυναμικά φορτία. Ο αντίκτυπος τους στο σχεδιασμό της δομής είναι ελάχιστος, δεδομένου ότι μία κατασκευή με αυτό τον τύπο συσκευής δεν απαιτεί πρόσθετες διαδικασίες σχεδιασμού. Είναι εύκολο να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν. Η κατασκευή μίας τέτοιας συσκευής απαιτεί μόνο μία μάζα, ένα ελατήριο και ένα αμορτισέρ σε συγκεκριμένα σημεία της δομής, χωρίς την ανάγκη κάποιου περίπλοκου υλικού. Άλλα πλεονεκτήματα είναι:

- ❖ Δεν εξαρτώνται από μία εξωτερική πηγή ισχύος για τη λειτουργία τους.
- ❖ Δεν παρεμποδίζουν τις κύριες κάθετες και οριζόντιες πορείες των φορτίων της κατασκευής.
- ❖ Μπορούν να αποκριθούν σε μικρά επίπεδα διέγερσης.
- ❖ Οι ιδιότητες τους μπορούν να ρυθμιστούν στο πεδίο.
- ❖ Μπορούν να εξεταστούν και τοποθετηθούν στον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας νέας κατασκευής αλλά και σε μία παλιά κατασκευή με σκοπό την αναβάθμιση της.
- ❖ Μία ενιαία μονάδα μπορεί να είναι αποτελεσματική στη μείωση των δονήσεων που προκαλούνται από τους μικρούς σεισμούς, τον αέρα και την κυκλοφορία.
- ❖ Απαιτούν χαμηλό κόστος συντήρησης.
- ❖ Μπορούν να είναι οικονομικώς αποδοτικοί.

Τα μειονεκτήματα τους είναι:

- ❖ Απαιτείται μία μεγάλη μάζα για την ικανοποιητική αποτελεσματικότητα τους ή ένας μεγάλος χώρος για την εγκατάσταση τους.
- ❖ Βάση του σχεδιασμού τους, οι ρυθμιζόμενοι αποσβεστήρες μάζας, είναι ογκώδης συσκευές, οπότε έχουν αυξημένο κόστος μεταφοράς το οποίο επιβαρύνει τον προϋπολογισμό σημαντικά το εκάστοτε έργο.
- ❖ Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την ακρίβεια συντονισμού τους. Δεδομένου ότι οι φυσικές συχνότητες μίας δομής δεν μπορούν να προβλεφθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, οι ρυθμιζόμενοι αποσβεστήρες μάζας απαιτούν την ρύθμιση τους στο πεδίο κατά την διάρκεια της εγκατάστασης και περιοδικές ρυθμίσεις έκτοτε.
- ❖ Ένας ρυθμιζόμενος αποσβεστήρας μάζας είναι αποτελεσματικός στον έλεγχο της απόκρισης της κατασκευής σε μία από τις συχνότητες στην οποία είναι και συνδεδεμένος. Διάφοροι αποσβεστήρες είναι αναγκαίοι, επομένως, όταν η απόκριση της κατασκευής είναι σημαντική σε περισσότερες από μία συχνότητες.
- ❖ Η αποτελεσματικότητά ενός ρυθμιζόμενου αποσβεστήρα μάζας περιορίζεται από το μέγιστο βάρος που μπορεί να τοποθετηθεί ουσιαστικά πάνω στη κατασκευή.
- ❖ Η τριβή περιορίζει την αποτελεσματικότητά ενός ρυθμιζόμενου αποσβεστήρα μάζας για να αντιδράσει στις διεγέρσεις χαμηλού επιπέδου. Άρα απαιτούνται πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα εάν ένας τέτοιος αποσβεστήρας πρόκειται να ελέγξει τέτοιες διεγέρσεις χαμηλού επιπέδου.

6.5 Ενεργός έλεγχος

Σε γενικές γραμμές, ένα σύστημα ελέγχου ελέγχει συνεχώς τα χαρακτηριστικά της διέγερσης και της δομικής απόκρισης, έτσι η αποτελεσματικότητά του μπορεί να είναι ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά της διέγερσης και τις συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή, έτσι ο μόνος περιοριστικός παράγοντας είναι η ικανότητα των ενεργοποιητών.

Επίσης ένα ενεργό σύστημα ελέγχου μπορεί να είναι αποτελεσματικό στο να μειώνει τις δονήσεις που προκαλούνται από διεγέρσεις μικρής, μέτριας και μεγάλης έντασης.

Αλλά έχει και μερικά μειονεκτήματα επίσης:

- ❖ Επειδή ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι περίπλοκος, είναι πολύ ακριβό.
- ❖ η συντήρηση ενός ενεργού συστήματος είναι πολύ σημαντική επειδή το σύστημα θα χρησιμοποιείται μόνο περιστασιακά.
- ❖ Η ενεργοποίηση ενός ενεργού συστήματος εξαρτάται από μία παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα ηλεκτρικά συστήματα όμως είναι τρωτά στους σοβαρούς σεισμούς και συνεπώς ενδέχεται να αποτύχουν, τη στιγμή δηλαδή που η αποτελεσματικότητά τους θα είναι αναγκαία.

Μια εφεδρική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στη βάση των συσσωρευτών θα μπορούσε να βοηθήσει για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, όμως αυτή η λύση θα ήταν πολύ ακριβή.

- ❖ Ο έλεγχος των κατασκευών απαιτεί μεγάλες δυνάμεις ελέγχου που εφαρμόζονται σε υψηλές ταχύτητες. Επομένως αυτός ο ενεργός έλεγχος κάνει αναγκαία την απαίτηση για χρήση υπερβολικά μεγάλων ενεργοποιητών.

Επειδή η απόκριση που απαιτείται για τον καθορισμό της δύναμης στους ενεργοποιητές, έχει ως αποτέλεσμα τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της ανάγνωσης των πληροφοριών από τον αισθητήρα και την εφαρμογή της δύναμης από τον ενεργοποιητή, εξαιτίας αυτής της χρονικής καθυστέρησης το ενεργό σύστημα ελέγχου μπορεί να οδηγήσει στην αστάθεια της δομής της κατασκευής, εάν τέτοιες δυνάμεις εφαρμόζονται από τους ενεργοποιητές σε λάθος χρονικές στιγμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°- Συμπεράσματα

7.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, έχει υπάρξει μια έντονη ερευνητική δραστηριότητα που στρέφεται στο σχεδιασμό ικανών συστημάτων που μετριάζουν τις δονήσεις στις κατασκευές όπως κτήρια, πύργοι και γέφυρες. Οι δονήσεις που προκαλούνται από τις σεισμικές κινήσεις και τους ισχυρούς ανέμους μπορούν όχι μόνο να ανησυχητικές για τους ανθρώπους αλλά και επικίνδυνες για τη σταθερότητα της κατασκευής και την ασφάλεια των κατοχών αυτής. Η ευπάθεια των δομών αυτών έχει καταγραφεί μετά από ισχυρούς σεισμούς και τυφώνες που έχουν χτυπήσει διαφορετικές περιοχές σε όλο τον κόσμο και έχουν προκαλέσει την κατάρρευση τους με επακόλουθο την απώλεια ζωών.

Προκειμένου να υπάρξουν δομές ασφαλέστερες ενάντια σε αυτά τα φαινόμενα, οι ερευνητές έχουν εκμεταλλευτεί το γεγονός ότι, από την αρχή της διατήρησης ενέργειας, οι συσκευές απόσβεσης μπορούν να προστεθούν σε μια κατασκευή ως προστατευτικά συστήματα. Αυτό οδήγησε στο σχεδιασμό και την εφαρμογή των παθητικών αποσβεστήρων για τη μερική απορρόφηση της ενέργειας που εισάγεται σε μια κατασκευή κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, έτσι ώστε να προστατευθεί η κατασκευή. Εντούτοις, ένα σημαντικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση έγινε όταν οι αστικές δομές θεωρήθηκαν ως προσαρμοστικά συστήματα (adaptronic systems), δηλαδή ως συστήματα που χαρακτηρίζονται από την προσαρμοστικότητα και την πολυλειτουργικότητα. Κατά συνέπεια, οι αστικές κατασκευές μπορούν να γίνουν προσαρμοστικές στα εξωτερικά φορτία. Ο ενεργός έλεγχος ήταν το πρώτο βήμα προς την προσαρμοστικότητα των αστικών κατασκευών, ως μια προσπάθεια η δομές αυτές να συμπεριφέρονται όπως τα αεροσκάφη ή τα μηχανήματα.

Μια θεμελιώδης έννοια των προσαρμοστικών δομών είναι ο έλεγχος της δομικής αντίστασης. Με την τροποποίηση της δομικής αντίστασης, η συμπεριφορά της δόνησης μπορεί να αλλάξει και η αντίσταση στη πρόκληση βλαβών να αυξηθεί. Οι αστικές δομές μπορούν να ελέγξουν τη μετάδοση της κίνησης και τη ροή ενέργειας με τον έλεγχο της αντίστασης της δομής.

7.2 Ανοιχτά προβλήματα

Παρά την πρόοδο που επιτυγχάνεται στον έλεγχο δόνησης των δομών, υπάρχουν ακόμα ανοικτά προβλήματα που παραμένουν να λυθούν. Ένας κατάλογος των κύριων προβλημάτων στο δομικό έλεγχο περιγράφεται παρακάτω.

- ❖ Αβέβαιες παράμετροι: Η διαμόρφωση μεγάλης κλίμακας δομών μπορεί συχνά να οδηγήσει σε λάθη. Αυτά μπορεί να προκύψουν από την παραμέληση της μη γραμμικότητας, τη πολύ γρήγορη δυναμική ή την πολύ αργή δυναμική σύνδεση μεταξύ των συστημάτων και των συσκευών, τη δυναμική των ενεργοποιητών και των αισθητήρων, το κακό σχεδιασμό και τη μη χρήση των γεωμετρικών ιδιοτήτων, τον

είδος απόσβεσης, τη διακριτοποίηση των συνεχών μοντέλων και τη λανθασμένη γραμμική προσέγγιση. Η μη διόρθωση των λαθών έχει ως συνέπεια τη μείωση της σταθερότητας και ευρωστίας της απόδοσης της δομής.

- ❖ Βέλτιστη τοποθέτηση αισθητήρων και ενεργοποιητών: Η επιλογή των μεταβλητών που πρέπει να υπολογιστούν, ποιες από αυτές θα πρέπει να ελέγχονται, επομένως το ποια θα είναι η θέση των αισθητήρων και των ενεργοποιητών είναι ένα αλληλοεξαρτώμενο πρόβλημα. Υπάρχει επιτακτική ανάγκη να είναι γνωστοί ποιοι ενεργοποιητές βοηθούν και ποιοι υποβιβάζουν την ικανότητα απόδοσης του συστήματος. Εκτός αυτού, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι δεν είναι πάντα δυνατό να υπολογιστούν όλες οι βασικές μεταβλητές, όπως η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση, επειδή αυτό θα υπονοούσε τη εγκατάσταση πάρα πολλών αισθητήρων που είναι μη πρακτική λύση, ιδιαίτερα όταν η δομή είναι αρκετά μεγάλη, ένας ουρανοξύστης, παραδείγματος χάριν. Αφενός, η απόδοση ελέγχου μπορεί να επηρεαστεί από τις ιδιότητες μετάδοσης καναλιών (καθυστέρηση, απώλεια στοιχείων) και τον τρόπο που υπολογιστικοί πόροι διανέμονται.

- ❖ Δυναμικός σχεδιασμός και μη γραμμικότητα ενεργοποιητών: Η μη γραμμικότητα των ενεργοποιητών μπορεί να προκαλέσει υψηλή ευαισθησία και μη προβλεψιμότητα του συστήματος στις εξωτερικές διεγέρσεις. Οι αποσβεστήρες που χρησιμοποιούν έξυπνα υλικά, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί και οι μαγνητορεολογικοί αποσβεστήρες έχουν περιορισμούς λόγω της μη γραμμικότητας και της υστερητικής συμπεριφοράς. Αντιπροσωπεύουν μια πρόκληση στην ανάπτυξη απόδοσης της απόκρισης σε ένα ευρύ φάσμα συχνότητας. Οι αποσβεστήρες επίσης παρουσιάζουν μια χρονική καθυστέρηση που πρέπει να ληφθεί υπόψη επειδή οι διαταραχές στη δομή παρουσιάζονται σε μικρά χρονικά διαστήματα. Η χρονική καθυστέρηση των ενεργοποιητών πρέπει να προστεθεί στις καθυστερήσεις του συστήματος ελέγχου, που είναι αποτέλεσμα του χρόνου επεξεργασίας των στοιχείων από τους ενεργοποιητές, για να γίνει χρήση της απαραίτητης δύναμης ελέγχου. Η χρονική καθυστέρηση μπορεί να προκαλέσει συμπεριφορές, όπως ταλάντωση, αστάθεια και χαμηλή απόδοση του συστήματος.

- ❖ Μη συμμετρικές κατασκευές: Η μη συμμετρική διανομή της ακαμψίας ή της μάζας μπορεί να προκαλέσει, στη διάρκεια μιας σεισμική φόρτισης, στρεπτικές και πλευρικές κινήσεις στη κατασκευή. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερες αποκρίσεις από ότι στις συμμετρικές δομές, με συνέπεια βλάβες στο φορέα της δομής. Στα συμμετρικά κτήρια η απόδοση ελέγχου εξαρτάται πρώτιστα από το πάτωμα στο οποίο τοποθετείται η συσκευή ελέγχου, η συγκεκριμένη θέση μέσα σε μια μη συμμετρική δομή μπορεί να μην είναι σωστή επειδή τα κέντρα της μάζας και ακαμψίας δεν συμπίπτουν. Εντούτοις, στις μη συμμετρικές δομές, η ακριβής θέση της συσκευής είναι σημαντική και μπορεί να απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη ελέγχου και συσκευές βάσει των αποκρίσεων.

- ❖ Ελαττώματα: Η ανοχή των ελαττωμάτων είναι η δυνατότητα ενός ελεγχόμενου συστήματος να διατηρήσει τους στόχους ελέγχου ακόμα και με τη παρουσία κάποιου ελαττώματος. Πέρα από τη χρήση αξιόπιστων συσκευών και υλικού, είναι προτιμότερο να εφαρμοστούν συστήματα ανίχνευσης ελαττωμάτων της δομής. Οι αποτυχίες σε ένα σύστημα ελέγχου ανιχνεύονται γενικά από ένα σύστημα ανίχνευσης που διαθέτει δυο λειτουργίες: την ανίχνευση και προσδιορισμό των ελαττωμάτων και στην διόρθωση των ελαττωμάτων. Μέχρι σήμερα, πολύ λίγες έρευνες έχουν εστιάσει στην ανοχή ελαττωμάτων των δομών στις κατασκευές.

7.3 Ατενίζοντας το μέλλον

Έχει υπάρξει μια παγκόσμια αύξηση της επίγνωσης εκ μέρους των μηχανικών για τις δυνατότητες των παθητικών και ενεργών συσκευών που μειώνουν τις δυναμικές φορτώσεις που προκαλούνται από τον αέρα ή τους σεισμούς. Επομένως ανακαλύπτονται συνεχώς νέες μέθοδοι και υλικά που θα οδηγήσουν σε βελτιωμένα συστήματα ελέγχου αλλά και σε νέους τύπους συστημάτων. Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στις πιθανές λύσεις των προβλημάτων που έχουν προκύψει ως τώρα:

- ❖ Η ανάπτυξη νέων ενεργοποιητών και αισθητήρων.
- ❖ Η συνεχόμενη πειραματική έρευνα για τα προτεινόμενα συστήματα ελέγχου.
- ❖ Ανάπτυξη κανονισμών και προτύπων για τα δομικά συστήματα ελέγχου, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών δοκιμής και των κριτηρίων απόδοσης.
- ❖ Ανάπτυξη νέων υλικών.
- ❖ Ανάπτυξη προηγμένης τεχνολογίας υπολογιστών και των συγκεκριμένων συστημάτων για τις εφαρμογές ελέγχου.
- ❖ Αξιοπιστία των συστημάτων κάτω από ακραίες περιστάσεις.
- ❖ Πρακτικές μέθοδοι και τεχνικές σχεδιασμού, κατά την κατασκευή, την επεξεργασία και την εφαρμογή.

Υβριδικά συστήματα ελέγχου

- ❖ Ο συνδυασμός παθητικών και ενεργών συσκευών μπορεί να θεωρηθεί ως τρόπος βελτίωσης της λειτουργίας των δύο αυτών συσκευών, έτσι πρέπει να υπάρξει περισσότερη έρευνα προς αυτή τη κατεύθυνση. Ένα υβριδικό σύστημα έχει μεγαλύτερη ικανότητα και μια μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα από ένα ενεργό σύστημα, κοστίζει λιγότερο και απαιτεί μικρότερη εξωτερική δύναμη από ένα ενεργό σύστημα ελέγχου. Με αυτά τα θετικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, ο υβριδικός έλεγχος γίνεται πολύ ελπιδοφόρος για τη σεισμική μείωση της απόκρισης των κτηρίων.

Εάν οι προαναφερθείσες συστάσεις πραγματοποιηθούν στο μέλλον, θα υπάρξουν νέοι τύποι συστημάτων ελέγχου που θα μπορούν να υποστηρίξουν τη μείωση στο ελάχιστο της δομικής και μη δομικής βλάβης. Ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου θα είναι αποτελεσματικό στη μείωση των δυναμικών φορτίσεων οποιουδήποτε είδους και έντασης.

Ξένα βιβλιογραφία

1. **Practical applications of semi-active control systems to civil engineering structures** – Christian Pastia, Septimiu-George Luca, Florentina Chira
2. **Advances in Structural Control in Civil Engineering in China** - Hongnan Li, Linsheng Huo
3. **Passive and Active Control of Structures** - Julio Cesar Maldonado, Mercado
4. **Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback** - B.F. Spencer, Michael K. Sain
5. **Active, Hybrid, and Semi-active Structural Control – A Design and Implementation Handbook** - S.Y. Chu, T.T. Soong, A.M. Reinhorn
6. **Active and semi-active control of buildings in Japan**- Yoshiki Ikeda
Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.4 No.3 (Special Issue), 2004
7. **Active Control of Structures** - A. Preumont, K. Seto
8. **Active/passive vibration control systems for tall buildings** - Keiji Shibay, Shinji Masey, Yoshitaka Yabey, Kazuo Tamuraz
9. **Active Structural Control Research at Kajima Corporation** - The National Science Foundation's Summer Institute in Japan Program
10. **An overview of active structural control under seismic loads** – T.T. Soong, M.EERI, S.F. Masri, M.EERI, G.W. Housner, H.M.EERI
11. **Biomimetic characteristics of an active deployable structure** -I Sinan Korkmaz
12. **Semi-active isolation systems for seismic structures** - Ging-Long Lin, Lyan-Ywan Lu.
13. **Active, Regenerative Control of Civil Structures** - Jeffrey Scruggs
14. **Full-scale experimental verification of resettable semi-active stiffness dampers** - J. N. Yang, J. Bobrow, F. Jabbari, J. Leavitt, C. P. Cheng, P.Y. Lin
15. **Future trends in earthquake-resistant design of structures** - Durgesh C. Rai
16. **A state of the art review on active control of structures** – T.K. Datta

- 17.State of the art of structural control - B. F. Spencer Jr.**
- 18.Overview of the application of active, semi - active control to building structures in Japan - Akira Nishitani, Yutaka Inoue**
- 19.New applications and development of active, semi – active and hybrid control techniques for seismic and non – seismic vibration in the USA –B.F. Spencer, Jr.**
- 20.Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects – Mir M. Ali, Kyoung Sun Moon**
- 21.Recent structural applications of active control technology – T.T.Soong, A.M. Reinhors**
- 22.Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications - Ahsan Kareem, Tracy Kijewski, Yukio Tamura**
- 23.Robust control of systems subjected to uncertain disturbances and actuator dynamics – Rodolfo Villamizar Mejia**

Ελληνική βιβλιογραφία

- 1. Ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών με αποσβεστήρα τριβής –**
Αβραμοπούλου Ιωάννα, Χαραλάμπους Ελένη (*16ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2010*)
- 2. Εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης για την ενίσχυση κτηρίων και διερεύνηση της ανταγωνιστικότητας του εκκρεμούς τριβής σε σχέση με άλλα συστήματα –**
Βασίλειος Γρηγορίου, Νικόλαος Μέζες (*9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές Κατασκευών – 03», Μάρτιος 2003*)
- 3. Σεισμική μόνωση υφιστάμενων κατασκευών –** Γκάρτζιος Χρήστος, Κάλλιος Αντώνης
- 4. Βασικά τεχνικά προβλήματα στον σχεδιασμό πολύ υψηλών κτηρίων –** Ι. Τζουβαδάκης, Σ.Δούμα (*Τεχνικά χρονικά Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 2008*)
- 5. Εισαγωγή στη Σεισμολογία -** Β.Παπαζάχος, Γ.Καρακαίσης, Π.Χατζηδημητρίου
- 6. Στοιχεία Σεισμολογίας και Φυσικής του Εσωτερικού της Γης -**
Α.Γαλανόπουλος
- 7. Σύγχρονη Σεισμολογία -** Α.Τσελέντης
- 8. The Nature of Earthquake Ground Motion -** B.A.Bolt
- 9. Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία -** Σπυράκος Κωνσταντίνος Έκδοση ΤΕΕ 2004 (*9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές Κατασκευών – 03», Μάρτιος 2003*)
- 10. Σεισμική προστασία κτιρίων με τεχνικές σεισμομόνωσης, Δελτίο ΣΠΜΕ Νο 315 Μάρτιος 2004 -** Δ.Α. Γεωργούλια
- 11. Ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών με αποσβεστήρες –** Δελής Βασίλειος (*17ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2011*)
- 12. Εφαρμογή ιξωδών αποσβεστήρων στην ενίσχυση υφισταμένων κτιρίων από σκυρόδεμα -** Α. Ι. Κάππος, Η. Γ. Δημητρακόπουλος
- 13. Πρόταση νέας διάταξης απόσβεσης ενέργειας για την σεισμική προστασία των κατασκευών -** Πανίκος Παπαδόπουλος, Άλκης Παπαδόπουλος
- 14. Μελέτη της συμπεριφοράς κατασκευών Ο/Σ με διατάξεις συγκράτησης των μετακινήσεων -** Πανίκος Παπαδόπουλος, Στέργιος Δημητράκης
- 15. Εφαρμογές μεθόδων σεισμικής μόνωσης σε υφιστάμενες κατασκευές –**
Γραμματικού, Χολέβας Στέφανος

Διαδίκτυο

- <http://nees.org/>
- <http://www.eeri.org/>
- <http://opensees.berkeley.edu/community/index.php>
- <http://journalseek.net/>
- <http://www.ekt.gr/info-serv/diglib/books/index.html>
- <http://www.onera.fr/dads-en/active-control-principles.php>
- <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2010/936081/>
- http://articles.architectjaved.com/earthquake_resistant_structures/active-control-devices-for-earthquake-resistance/
- http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_engineering
- <http://www.antiseismic-systems.com/>
- www.seismomonosis.com

- <http://www.oiles.co.jp/>
- <http://www.dis-inc.com/>
- <http://www.platectonics.com/>
- <http://www.seismo.unr.edu/>

ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ

Active Brace Systems: συστήματα ενεργών συνδέσμων
Active Systems: Ενεργά συστήματα
Actuator: ενεργοποιητής
Damper: αποσβεστήρας
Configuration : διαμόρφωση
Control: έλεγχος
Deformation: παραμόρφωση
Disruption: διακοπή
Coefficient: συντελεστής
Controllable Fluid Dampers: ελέγξιμοι υδραυλικοί αποσβεστήρες
Clearance: περιθώριο
Elastomeric: ελαστομερές
Elastic Rebound theory: Θεωρία ελαστικής αναπήδησης
Energy dissipation mechanism: μηχανισμός απόσβεσης ενέργειας
Excitation : διέγερση
Feasible: εφικτός
Faults: Ρήγματα
Higher modes: υψηλές ιδιομορφές
Hysteretic: υστερητικό
Hybrid Systems: υβριδικά συστήματα
Intensity: ένταση
Inertia: αδράνεια
Inherent damping properties: έμφυτες ιδιότητες απόσβεσης
Isolation level: στάθμη μόνωσης
Response: απόκριση
Resonance: αντήχηση
Lateral: πλευρικός
Lead: μόλυβδος
Longitudinal: κατά μήκος
Mitigate: μετριάζω
Mounted: εδράζεται
Offset: αντισταθμίζω
Passive Systems: παθητικά συστήματα
Plate tectonics: τεκτονικές πλάκες
Prior to yielding: πριν από την διαρροή
Pulse Generation Systems: συστήματα παλμικής παραγωγής
Retrofit: αποκατάσταση
Resonance: αντήχηση
Semi-active systems: Ημιενεργά συστήματα
Sensor: αισθητήρας
Seismic Waves: σεισμικά Κύματα
Shaking Table: σεισμική τράπεζα
Stiffness control systems: συστήματα ελέγχου δυσκαμψίας
Tension: εφελκυσμός
Torsional effects: στρεπτικές επιδράσεις/αποτελέσματα
Tranverse: εγκάρσια
Vibration Absorbers: αποσβεστήρες δόνησης
Viscous dampers: Ιξώδεις αποσβεστήρες)