



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μείωση απόκρισης κατασκευών με τη χρήση αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας

Reduction of structural response using tuned mass damper

Ιορδάνης Πετρίδης / Iordanis Petridis

A.M.: 7137

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Δρ. Αγγελική Παπαλού

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	7
1.1 Γήινος Φλοιός.....	7
1.2 Τεκτονικές πλάκες.....	7
1.3 Τεκτονικοί σεισμοί.....	9
1.4 Ταυτότητα του σεισμού.....	11
1.4.1 Μέγεθος.....	11
1.4.2 Ένταση.....	11
1.4.3 Εστία.....	11
1.4.4 Επίκεντρο.....	11
1.4.5 Εστιακό βάθος.....	11
1.5 Διάδοση των σεισμικών κυμάτων.....	12
1.5.1 Κύματα χώρου.....	12
1.5.2 Επιφανειακά κύματα.....	13
2. Βλάβες από σεισμό σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος	15
2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή κατά την σεισμική διέγερση.....	15
2.1.1 Φάσμα σχεδιασμού.....	15
2.1.2 Ικανοτικός Σχεδιασμός.....	15
2.1.3 Ασύμμετροι φορείς σε κάτοψη.....	16
2.1.4 Μαλακός όροφος (Pilotis).....	18
2.1.5 Κοντά υποστυλώματα.....	18
2.1.6 Κανονικότητα κτιρίου σε κάτοψη.....	20
2.1.7 Κανονικότητα κτιρίου σε τομή ή όψη.....	21
2.1.8 Προσθήκες και επεμβάσεις σε υπάρχοντα κτίρια.....	23
2.2 Ταξινόμηση και τα είδη των βλαβών από σεισμό σε δομικά στοιχεία.....	23
2.3 Τυπικοί Βαθμοί Βλάβης.....	25
3. Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα	32
3.1 Ενεργά συστήματα ελέγχου.....	32
3.2 Παθητικά Συστήματα Ελέγχου.....	35
3.2.1 Σεισμική μόνωση βάσης.....	35
3.2.2 Συσκευές απόσβεσης ενέργειας.....	38
Εργαστηριακές Δοκιμές	56
Εισαγωγικά στοιχεία πειράματος.....	56
Στοιχεία κτιριακού μοντέλου.....	57
Έλεγχος λυγισμού.....	59
Λόγος απόσβεσης.....	61

Πειραματική διαδικασία	62
<i>Root Mean Square</i>	63
<i>Filling Area Ratio</i>	63
Αποτελέσματα Έρευνας	65
<i>Συζήτηση αποτελεσμάτων</i>	65
<i>Πρώτη σειρά πειραμάτων</i>	65
<i>Δεύτερη σειρά πειραμάτων</i>	67
<i>Τρίτη σειρά πειραμάτων</i>	68
Συμπεράσματα	69
Σχόλια	70
Βιβλιογραφία.....	71
Παράρτημα Εικόνων	74

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον έλεγχο της δυναμικής απόκρισης κατασκευών με τη χρήση αποσβεστήρων. Με την εφαρμογή τους ελαχιστοποιείται η δυναμική απόκριση των κατασκευών με αποτέλεσμα την μείωση πιθανών βλαβών που μπορεί να προέλθουν μέσω ενός σεισμού.

Συγκεκριμένα στο πρώτο μέρος, θα αναλυθούν οι βασικές παράμετροι για την κατανόηση του αντικειμένου απασχόλησης και έπειτα τα είδη των βλαβών που μπορεί να επιφέρει ένα δυναμικό φορτίο. Τέλος, θα παρουσιαστούν συμβατικοί και μη συμβατικοί τρόποι αντιμετώπισης των σεισμών, όπως είναι τα ενεργά και τα παθητικά συστήματα ελέγχου απόκρισης κατασκευών δίνοντας έμφαση στους αποσβεστήρες σωματιδίων.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται η πειραματική έρευνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που αφορά τη μείωση απόκρισης ενός μονοβάθμιου κτιριακού μοντέλου υπό τυχαία διέγερση. Στο μονοβάθμιο σύστημα προσαρτήθηκε αποσβεστήρας σωματιδίων με τη δυνατότητα δημιουργίας διαμερισμάτων στο εσωτερικό μέρος του δοχείου όπου τοποθετούνται τα σωματίδια. Στην συνέχεια, μελετήθηκαν διάφορες περιπτώσεις όπου ο αποσβεστήρας αποτελείτο είτε από ένα ενιαίο διαμέρισμα ή από δυο διαμερίσματα του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους. Η κατασκευή δοκιμάστηκε για διαφορετικά μεγέθη διαμερισμάτων και επιπέδων διέγερσης. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και προσδιορίζεται η επιρροή της διαμόρφωσης των διαμερισμάτων του αποσβεστήρα στην απόδοση.

Abstract

The present dissertation discusses the control of the dynamic response of structures using dampers. By applying them, the dynamic response of the structures is minimized, resulting in the reduction of possible damages that can be caused by an earthquake.

Specifically, in the first part, the basic parameters for comprehension of the subject will be analyzed as well as the types of damages that can be caused by a dynamic load. Finally, conventional and non-conventional ways of reducing the seismic effects will be presented, including active and passive structural control systems with emphasis on particle dampers.

In the second part, the experimental research of this thesis is presented, regarding the response reduction of a single-story building model under random excitation. A particle damper is attached to a single degree-of-freedom system with the ability of creating compartments in the inner part of the container where the particles are placed. Subsequently, different configurations of the damper are examined considering a single compartment or two equal or unequal size compartments. The structure is tested for different compartment sizes and excitation levels. Finally, the results are compared and the effect of the configuration of the particle damper on its performance is identified.

Ευχαριστίες

Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων για την στήριξη της επιβλέπουσα καθηγήτριας μου Δρ. Αγγελικής Παπαλού σε όλη τη σταδιοδρομία ως προπτυχιακός φοιτητής αλλά και για την παρούσα διπλωματική εργασία. Η ειδίκευση της στον τομέα του αντισεισμικού σχεδιασμού αλλά και η υποστήριξη της είχε καθοριστικό ρόλο στην διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

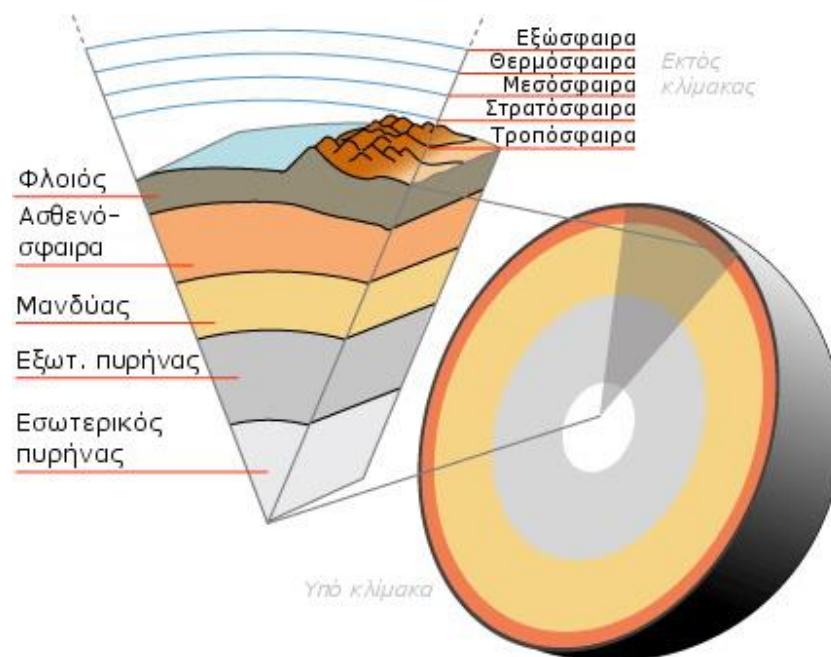
Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου η οποία ήταν στο πλάι μου και με υποστήριξε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών.

Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον αείμνηστό πατέρα μου.

1. Εισαγωγή

1.1 Γήινος Φλοιός

Ο γεωφλοιός είναι το στρώμα της επιφάνειας του πλανήτη Γη. Περίπου το 71% του φλοιού της Γης περιβάλλεται από ύδωρ. Κύριο συστατικό του γεωφλοιού είναι το πυρίτιο, καθώς ένα μεγάλο μέρος του, κατά ποσοστό πάνω από 90%, αποτελείται από πυριτιούχα ορυκτά και διοξείδιο του πυριτίου ένα από τα συστατικά τα οποία περιέχονται σε μεγάλο βαθμό στην σύσταση της άμμου. Ο φλοιός δεν είναι ενιαίος σε όλη την επιφάνεια της Γης, αλλά αυτός διασπάται σε τμήματα τα οποία ονομάζονται τεκτονικές πλάκες.



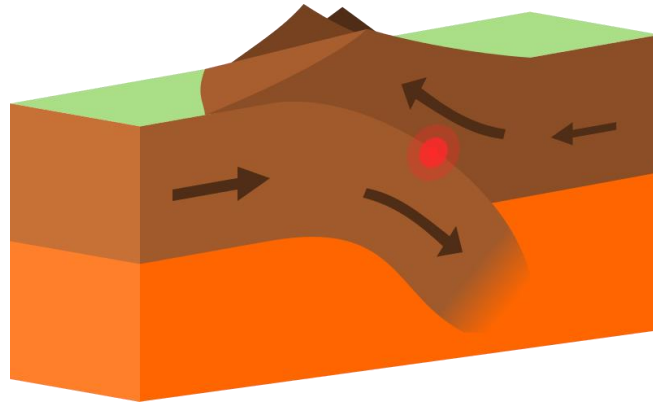
Εικ. 1 Τομή της Γης

1.2 Τεκτονικές πλάκες

Οι τεκτονικές πλάκες είναι οι ασυνέχειες του γεωφλοιού. Σύμφωνα με την θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, βρίσκονται σε συνεχή κίνηση κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, αποδίδοντας τον ζωντανό χαρακτήρα του πλανήτη Γη. Στις λιθοσφαιρικές πλάκες οφείλεται το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής αλλά και ηφαιστειακής δραστηριότητας (περίπου το 80%) της Γης όπου αυτή δημιουργείται κοντά στα όρια των τεκτονικών πλακών. Ο πλανήτης μας αποτελείται από δώδεκα περίπου πλάκες που αποτελούν τις σημαντικότερες και από αρκετές μικρότερες. Η κάθε πλάκα κινείται σχεδόν ως ένα άκαμπτο αδιάσπαστο σώμα.

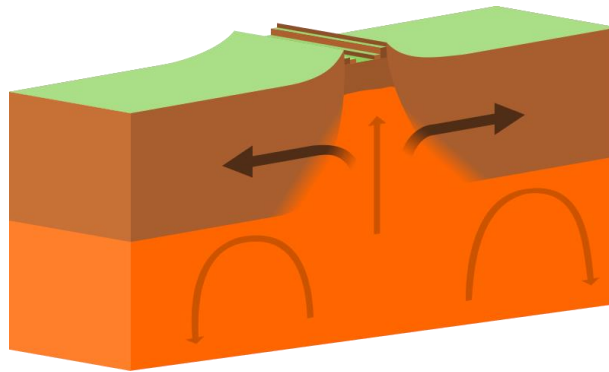
Τα όρια των τεκτονικών πλακών είναι περιοχές όπου παρατηρείται έντονη δραστηριότητα στην επιφάνεια της Γης η οποία προέρχεται κατά κύριο λόγο από κατώτερα στρώματά της και εκδηλώνεται με σεισμούς, οροσειρές, ηφαιστειες και ωκεάνιες τάφρους. Τα όρια αυτά διακρίνονται σε:

i. **Όρια σύγκλισης**, όταν οι γειτονικές πλάκες πλησιάζουν μεταξύ τους και η μια πλάκα βυθίζεται κάτω από την άλλη ως αποτέλεσμα να καταστρέφεται φλοιός.



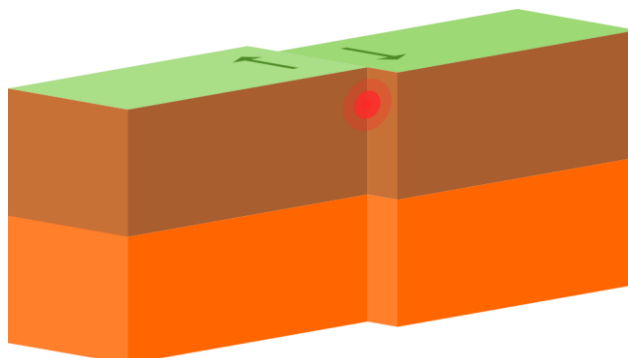
Εικ. 2 Συγκλίνουσες τεκτονικές πλάκες

ii. **Όρια απόκλισης**, όταν οι γειτονικές πλάκες απομακρύνονται η μια από την άλλη με αποτέλεσμα την απελευθέρωση μάγματος το οποίο ψύχεται και παράγεται έτσι νέος φλοιός.



Εικ. 3 Αποκλίνουσες τεκτονικές πλάκες

iii. **Όρια μετασχηματισμού**, όταν η μια πλάκα ολισθαίνει με την άλλη πλευρικά χωρίς την παραγωγή αλλά και την καταστροφή γεωφλοιού.



Εικ. 4 Πλευρικές ολισθαίνουσες πλάκες



Εικ. 5 Όρια τεκτονικών πλακών

1.3 Τεκτονικοί σεισμοί

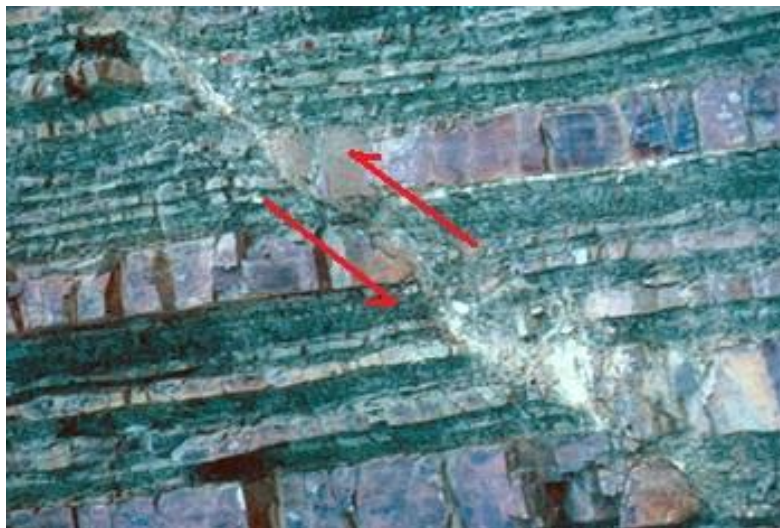
Ως σεισμός ορίζεται η διατάραξη της επιφάνειας ενός ουράνιου σώματος που οφείλεται σε μετακίνηση μαζών και συνοδεύεται από κύματα που μεταφέρουν την σεισμική ενέργεια. Οι τεκτονικοί σεισμοί, οφείλονται στην απελευθέρωση συσσωρευμένης ενέργειας που δημιουργείται κοντά στα όρια των τεκτονικών πλακών. Μεταξύ των ορίων αυτών αναπτύσσεται τριβή η οποία συσσωρεύεται, όταν η δύναμη τριβής υπερνικηθεί έχουμε ως αποτέλεσμα την ολίσθηση μεταξύ των πλακών. Με την ολίσθηση γίνεται ταυτόχρονα η βίαιη απελευθέρωση της συγκεντρωμένης ενέργειας η οποία προκαλεί αυτό που είναι γνωστό στο ευρύ κοινό ως σεισμός.

Ως αποτέλεσμα της ολίσθησης μεταξύ των τεκτονικών πλακών έπονται αστοχίες οι οποίες ορισμένες φορές καταλήγουν στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργώντας ρήγματα. Αυτές οι αστοχίες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ως εξής

- 1) **Κανονικά ρήγματα (normal faults)** τα οποία οφείλονται σε εφελκυστικές δυνάμεις (Εικ.6)
- 2) **Ανάστροφα ρήγματα (reverse faults)** τα οποία οφείλονται σε θλιπτικές δυνάμεις (Εικ.7)
- 3) **Ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip faults)** τα οποία οφείλονται σε διατμητικές δυνάμεις (Εικ.8)



Εικ. 6 Παράδειγμα κανονικού ρήγματος σε ιζηματογενές πέτρωμα στην Γιούτα, Ηνωμένες Πολιτείες



Εικ. 7 Παράδειγμα ανάστροφου ρήγματος



Εικ. 8 Παράδειγμα ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, Τουρκία 1988

1.4 Ταυτότητα του σεισμού

Κάθε σεισμός που συμβαίνει φέρει την δική του ταυτότητα μέσω των φυσικών χαρακτηριστικών που τον διέπουν. Αυτά είναι το μέγεθος, η ένταση, η εστία ή υπόκεντρο, το επίκεντρο και το εστιακό βάθος.

1.4.1 Μέγεθος

Το μέγεθος του σεισμού δείχνει το πόσο μεγάλη είναι η ένταση του, αυτό υπολογίζεται με βάση την κλίμακα Richter, η οποία έχει ως ελάχιστο το 0 και ως μέγιστο τα 12 Richter. Βέβαια, δεν έχει καταγραφεί ποτέ σεισμός μεγαλύτερος από 9,4 με 9,8 της κλίμακας Richter, και αυτός αφορά τον μεγαλύτερο σεισμό στην παγκόσμια ιστορία, τον Μάιο του 1960 στην Βαλδίβια, με τεράστιες καταστροφικές συνέπειες, κοστίζοντας την ζωή σε χιλιάδες ανθρώπους. Η περίπτωση να συμβεί κάποιος σεισμός μεγαλύτερου μεγέθους είναι αδύνατη επειδή η τοπική απελευθέρωση ενέργειας θα πρέπει να είναι τόσο μεγάλη ώστε να προκληθεί πλαστική παραμόρφωση των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Η κλίμακα Richter είναι λογαριθμική, αυτό σημαίνει πως ένας σεισμός με κλίμακα 7 Richter είναι 10 φορές μεγαλύτερος σε ένταση από έναν σεισμό ο οποίος είναι κλίμακας 6 Richter.

1.4.2 Ένταση

Με τον προσδιορισμό της έντασης ενός σεισμού χαρακτηρίζουμε το πόσο εκτεταμένες είναι η καταστροφές που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της δυναμικής διέγερσης. Η ένταση μετριέται με την κλίμακα Mercalli, η οποία κυμαίνεται από 0 την ελάχιστη τιμή έως 12 Μ την μέγιστη. Η ένταση σε μια συγκεκριμένη θέση αποτελεί τον υπολογισμό της βίαιης ανατάραξης του εδάφους και καθορίζεται από τις επιπτώσεις που έχει στους ανθρώπους, τις κατασκευές κ.α.

1.4.3 Εστία

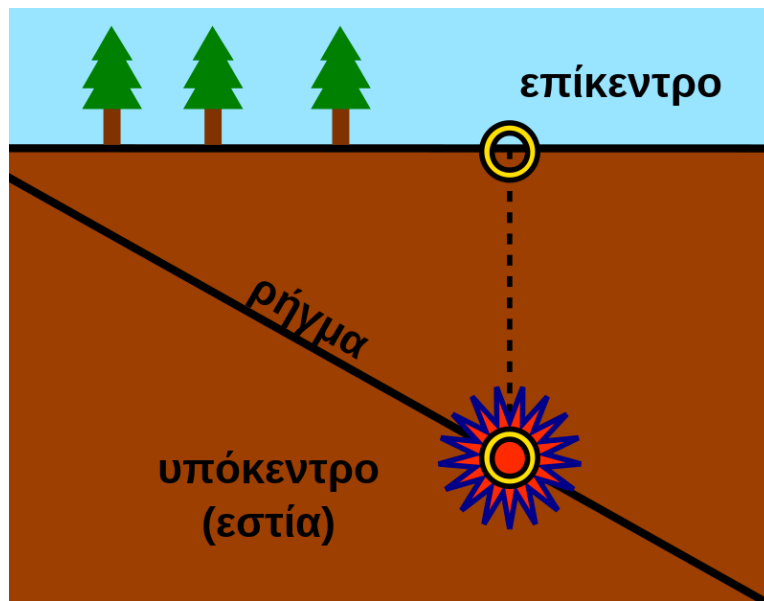
Με τον όρο εστία προσδιορίζεται η πηγή γένεσης του σεισμού, το σημείο έναρξης διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

1.4.4 Επίκεντρο

Ως επίκεντρο ορίζεται η κάθετη προβολή από το σημείο γένεσης του σεισμού (εστία ή υπόκεντρο) έως την επιφάνεια της Γης.

1.4.5 Εστιακό βάθος

Εστιακό βάθος είναι η κάθετη απόσταση από το επίκεντρο έως το υπόκεντρο του σεισμού.



Εικ. 9 Υπόκεντρο, επίκεντρο, ρήγμα, κατεύθυνση σεισμικών κυμάτων

1.5 Διάδοση των σεισμικών κυμάτων

Με την γένεση ενός σεισμού παράγονται ελαστικά κύματα μέσα από τα οποία το σεισμικό φορτίο μεταδίδεται μέσω των στρωμάτων της Γης και καταλήγει στην επιφάνεια της. Τα σεισμικά αυτά κύματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα κύματα χώρου και τα επιφανειακά κύματα.

1.5.1 Κύματα χώρου

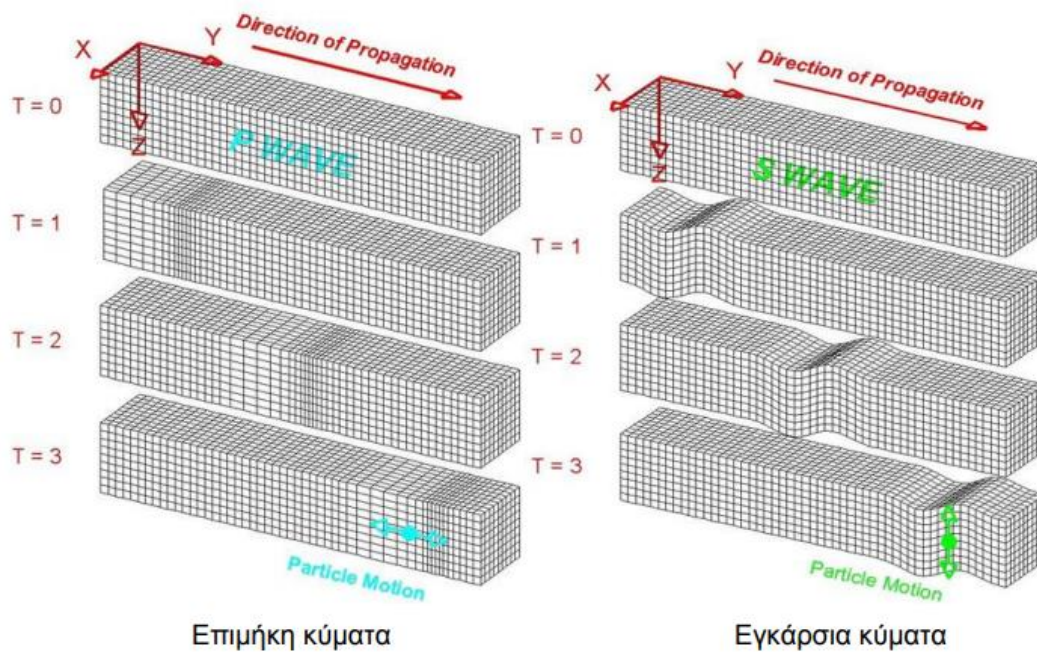
Αυτά διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις στο εσωτερικό της Γης και χωρίζονται στα επιμήκη και τα εγκάρσια επίσης γνωστά ως P Waves και S Waves αντίστοιχα.

1.5.1.1 Επιμήκη κύματα (P Waves)

Στα επιμήκη κύματα, τα μόρια της ύλης δονούνται παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης τους δημιουργώντας έτσι πυκνώματα και αραιώματα στα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης. Αυτά τα κύματα ονομάζονται επίσης πρωτογενή κύματα επειδή είναι τα πρώτα κύματα τα οποία καταγράφονται στους σειсмоγράφους. Διαδίδονται σε στερεό αλλά και υγρό μέσο και οι συνέπειες τους δεν είναι τόσο καταστρεπτικές όσο αυτές των εγκάρσιων κυμάτων.

1.5.1.2 Εγκάρσια κύματα (S Waves)

Στα εγκάρσια κύματα, τα μόρια της ύλης δονούνται κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης δημιουργώντας έτσι όρη και κοιλιές. Ονομάζονται αλλιώς και δευτερογενή κύματα επειδή ακολουθούν τα επιμήκη ταξιδεύοντας περίπου με την μισή ταχύτητα από αυτά και είναι υπαίτια για τις μεγάλες καταστροφικές συνέπειες ενός σεισμού λόγω του μεγάλου πλάτους τους. Αυτά διαδίδονται με ελαστική διατμητική παραμόρφωση του μέσου διάδοσης, πράγμα το οποίο σημαίνει πως δεν διαδίδονται σε υγρά δεδομένου ότι δεν επιδέχονται διατμητικές τάσεις.



Εικ. 10 Επιμήκη και Εγκάρσια κύματα

1.5.2 Επιφανειακά κύματα

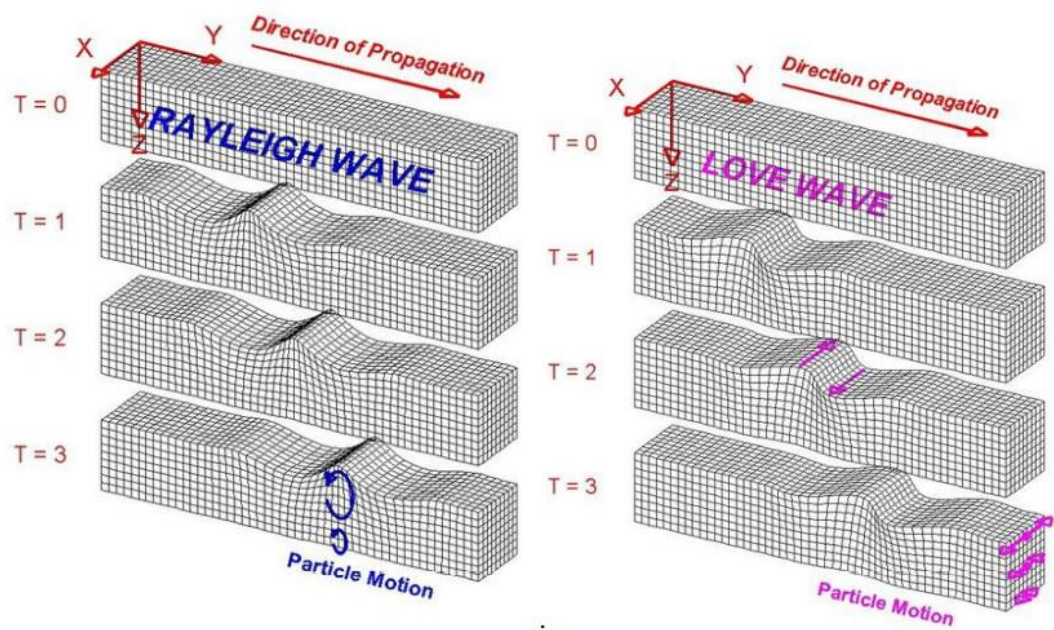
Τα επιφανειακά κύματα, περιορίζονται στον γεωφλοιό και πιο συγκεκριμένα το πλάτος τους είναι μεγάλο κοντά στην επιφάνεια της Γης και ελαττώνεται όσο αυξάνεται το βάθος. Είναι ιδιαίτερα καταστροφικά δεδομένου της μικρή συχνότητας και του μεγάλου πλάτους τους. Τα κύματα αυτά χωρίζονται και εκείνα σε δύο κατηγορίες τα Rayleigh και τα Love.

1.5.2.1 Κύματα Rayleigh

Κατά την διάδοση των κυμάτων Rayleigh τα υλικά μέσα διάδοσης του κύματος σχηματίζουν ελλειπτικές τροχιές των οποίων οι μεγάλοι άξονες είναι κάθετοι προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος ενώ οι μικροί άξονες είναι παράλληλοι στην διεύθυνση διάδοσης του. Το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος και λόγω της μικρής τους ταχύτητας καταγράφονται από τους σεισμογράφους τελευταία.

1.5.2.2 Κύματα Love

Κατά την διάδοση των κυμάτων Love τα υλικά μέσα διάδοσης του κύματος κινούνται σε οριζόντιες ταλαντώσεις οι οποίες είναι κάθετες στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Αυτά τα κύματα είναι πιο γρήγορα από τα Rayleigh και κινούν το έδαφος στην οριζόντια διεύθυνση. Μολονότι είναι πιο αργά, οι καταστρεπτικές συνέπειες τους είναι μεγάλες και συχνά σε αυτά οφείλεται η κατάρρευση κτιρίων.



Εικ. 11 Κύματα Rayleigh και Love

2. Βλάβες από σεισμό σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος

2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή κατά την σεισμική διέγερση

Σε μία χώρα έντονης σεισμικής δραστηριότητας όπως είναι η Ελλάδα οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος δοκιμάζονται σε διάφορα σεισμικά φορτία κατά καιρούς. Τα αποτελέσματα και οι βλάβες που μπορεί από τα διάφορα σεισμικά φορτία εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Πέραν των χαρακτηριστικών τα οποία φέρει ο ίδιος ο σεισμός (μέγεθος, ένταση, βάθος εστίας κλπ.) εξίσου σημαντικά είναι και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εδάφους αλλά και οι ιδιότητες της κατασκευής.

2.1.1 Φάσμα σχεδιασμού

Ο σεισμός είναι ένα τυχηματικό φαινόμενο πράγμα το οποίο τον καθιστά απρόβλεπτο. Με την εξέλιξη των επιστημών έχουν αναπτυχθεί τα κατάλληλα μέσα για την αντιμετώπιση συνήθων σεισμικών φορτίων. Αυτό όμως δεν αποτρέπει τις βλάβες σε παλαιότερες κατασκευές αλλά και σύγχρονες, μιας και ο σεισμός επηρεάζει ένα ευρύ σύνολο κατασκευών, οι οποίες είχαν σχεδιαστεί είτε με ξεπερασμένο αντισεισμικό κανονισμό για τα σημερινά δεδομένα είτε δεν είχαν ληφθεί υπόψη καθόλου τυχηματικές φορτίσεις.

Ο αντισεισμικός κανονισμός κατασκευών συνεχώς εξελίσσεται και βελτιώνεται, ως αποτέλεσμα αυτού δεν είναι απίθανο και μια κατασκευή σύγχρονων προδιαγραφών να παρουσιάσει βλάβες κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Εξάλλου, οι σύγχρονες κατασκευές σχεδιάζονται έτσι ώστε κατά τη διάρκεια ενός δυνατού σεισμού να συμπεριφερθούν ανελαστικά, δηλαδή επιδιώκεται να παρουσιαστεί ένα ποσοστό βλάβης με το οποίο θα απορροφηθεί ένα μέρος της σεισμικής ενέργειας ούτως ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα ολικής κατάρρευσης της κατασκευής.

2.1.2 Ικανοτικός Σχεδιασμός

Ο ικανοτικός σχεδιασμός επιδιώκει να εξασφαλίσει στην κατασκευή την ικανότητα μέγιστης δυνατής απορρόφησης ενέργειας χωρίς την μερική ή ολική κατάρρευση της. Ο ικανοτικός σχεδιασμός βασίζεται στην ιεράρχηση των αστοχιών και την κατανομή τους σε όσο το δυνατόν περισσότερα δομικά στοιχεία. Συγκεκριμένα η κατασκευή σχεδιάζεται έτσι ώστε οι βλάβες να εκδηλωθούν με επιθυμητή σειρά

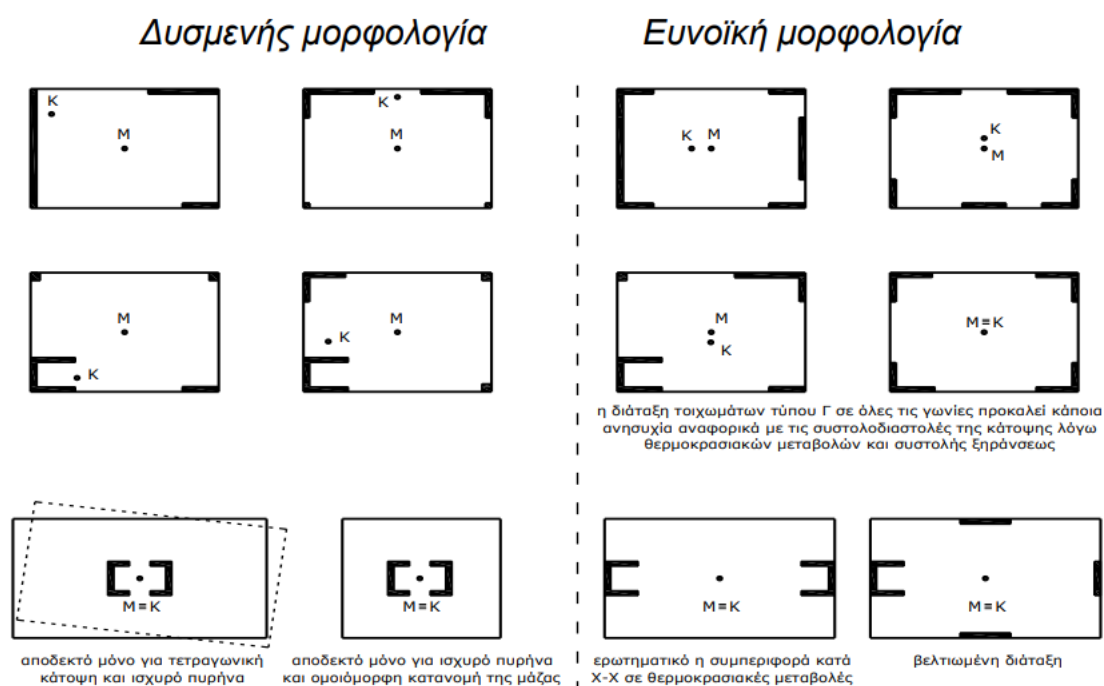
Συγκεκριμένα:

- Δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς πριν τη κρίσιμη περιοχή της δοκού
- Επαρκής ενίσχυση των κρίσιμων περιοχών με πυκνό σύστημα συνδετήρων
- Εξασφάλιση ότι η αστοχία θα συμβεί μακριά από τις συνδέσεις
- Η διατμητική αντοχή θα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντοχή σε κάμψη

Όμως, στην περίπτωση που η κατασκευή έχει σχεδιαστεί με την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς μετά τα υποστυλώματα δεν ικανοποιείται η αρχή του ικανοτικού σχεδιασμού. Τότε οι δοκοί λειτουργούν ως «κριοί» στα υποστυλώματα με αποτέλεσμα την αστοχία τους και την πιθανή ολική ή μερική κατάρρευση της κατασκευής.

2.1.3 Ασύμμετροι φορείς σε κάτοψη

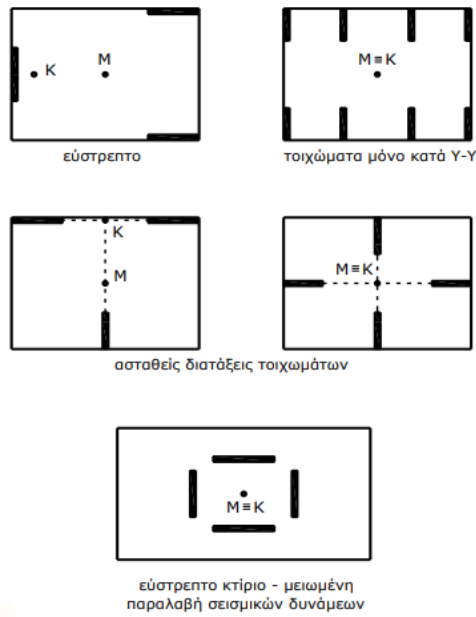
Η συμμετρία της κατασκευής σε κάτοψη έχει αρκετά σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, καθώς τα δυναμικά φορτία κατανέμονται ομοιόμορφα στα φέροντα δομικά στοιχεία. Ο συμμετρικός σχεδιασμός αποσκοπεί στην αποφυγή δημιουργίας κέντρου ελαστικής στροφής κατά την διάρκεια της δυναμικής διέγερσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό των στοιχείων δυσκαμψίας (τοιχία, υποστυλώματα) έτσι ώστε το κέντρο μάζας και το κέντρο δυσκαμψίας της κατασκευής να ταυτίζονται. Ωστόσο δεν αρκεί μόνο αυτό, αλλά θα πρέπει τα στοιχεία δυσκαμψίας να έχουν και την ίδια αντοχή. Στην περίπτωση που το κέντρο δυσκαμψίας αποκλίνει αρκετά από το κέντρο μάζας δημιουργείται μοχλοβραχίονας με αποτέλεσμα κατά την διάρκεια ενός σεισμού η κατασκευή επιδοκιμάζεται με μια επιπλέον ροπή, η οποία έχει προέλθει από αδυναμίες και αστοχίες που υπήρξαν κατά την μελέτη και τον σχεδιασμό.



Εικ. 12 Μορφολογία κτιρίου σε κάτοψη – Κατανομή μάζας και δυσκαμψίας

Πέραν των τοιχιών και των υποστυλωμάτων εξίσου σημαντική είναι η τοποθέτηση του πυρήνα του κλιμακοστασίου. Ο πυρήνας του κλιμακοστασίου είναι το βασικότερο στοιχείο δυσκαμψίας του φέροντα οργανισμού μιας κατασκευής εφόσον μπορεί να παραλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος της σεισμικής φόρτισης, για τον λόγο αυτό πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην τοποθέτηση του κατά τη φάση σχεδιασμού. Όσον αφορά απλές κατόψεις τοποθετείται κεντρικά και αντίστοιχα σε πιο περίπλοκες κατόψεις θα πρέπει να επιλέγεται να τοποθετείται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο μάζας, για να εξασφαλίζεται η συμμετρία των στοιχείων δυσκαμψίας και ταυτόχρονα να αποφεύγεται η δημιουργία κέντρου ελαστικής στροφής.

Δυσμενής μορφολογία



Ευνοϊκή μορφολογία

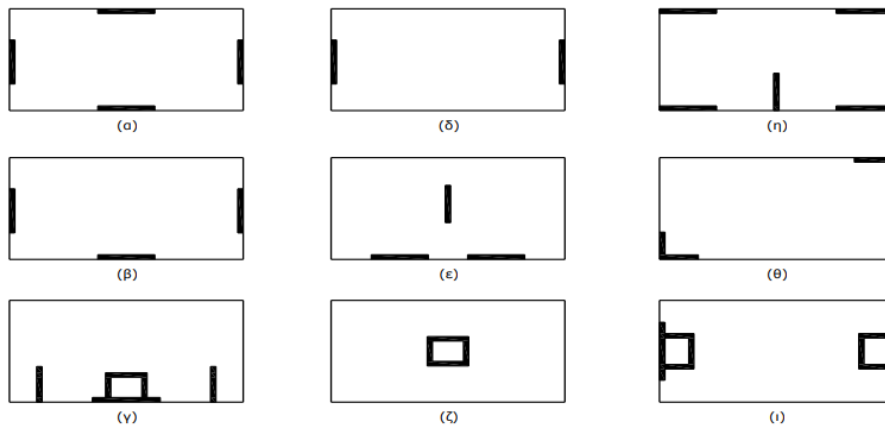


Εικ. 13 Μορφολογία κτιρίου σε κάτοψη – Κατανομή μάζας και δυσκαμψίας

(α)-(β)-(γ) κατάλληλες κατόψεις

(δ)-(ε)-(ζ) σεισμικώς ανεπαρκείς ακατάλληλες κατόψεις

(η)-(θ)-(ι) δύστρεπτες σεισμικά επαρκείς κατόψεις αλλά με ενδεχόμενο καταναγκασμών



Εικ. 14 Μορφολογία κτιρίου σε κάτοψη – Κατανομή μάζας και δυσκαμψίας

2.1.4 Μαλακός όροφος (Pilotis)

Με τον όρο πυλωτή αναφερόμαστε στον ισόγειο χώρο μιας πολυκατοικίας ο οποίος παραμένει ανοιχτός και συχνά χρησιμοποιείται ως χώρος στάθμευσης από τους ενοίκους. Ο όρος «μαλακός όροφος» έχει δοθεί επειδή υπάρχει διαφορά στην δυσκαμψία μεταξύ του ισογείου και των υπερκείμενων ορόφων. Η διαφορά στην δυσκαμψία προκύπτει από την έλλειψη τοιχοποιίας στην στάθμη του ισογείου. Ως αποτέλεσμα έλλειψης της τοιχοποιίας είναι η αλλοίωση της καθ' ύψους κατανομής των δυναμικών φορτίων με την εμφάνιση «γόνατος» στην πρώτη ιδιομορφή της ταλάντωσης. Στις περιοχές εμφάνισης «γόνατος», δηλαδή στα άκρα των υποστυλωμάτων, υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση ανελαστικών παραμορφώσεων, με αυτό να σημαίνει πως η υπερκείμενη κατασκευή συμπεριφέρεται διαφορετικά από το ισόγειο.



Εικ. 15 Αστοχία πυλωτής

Η πυλωτή είναι ένας θεσμός ο οποίος άρχισε να εφαρμόζεται 1968 στην Ελλάδα και θεωρείται από αρχιτεκτονικής άποψης θετικό εργαλείο για την αύξηση των κοινόχρηστων χώρων αλλά και χώρων στάθμευσης. Βέβαια αυτό επέφερε προβλήματα λόγω της υψηλής σεισμικότητας της Ελλάδας και έκτοτε έχουν προστεθεί περιορισμοί στον πολεοδομικό σχεδιασμό ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι βλάβες.

2.1.5 Κοντά υποστυλώματα

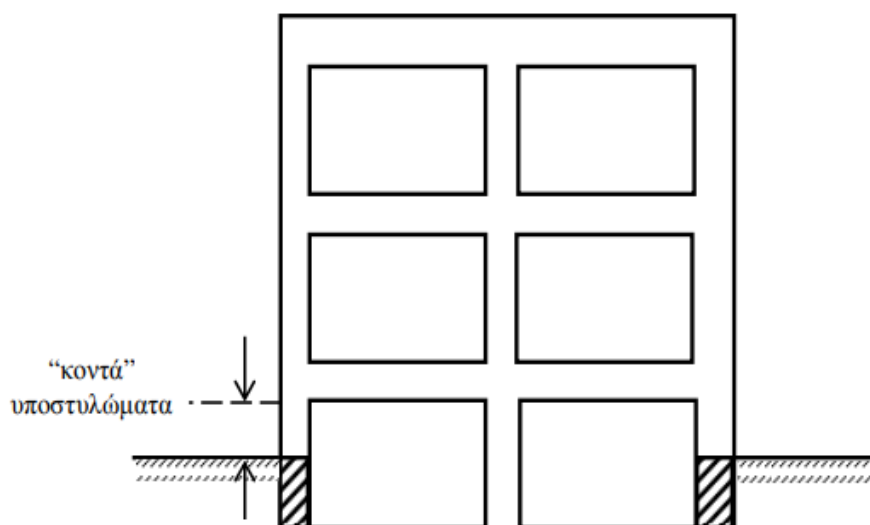
Ως κοντά υποστυλώματα χαρακτηρίζονται εκείνα τα οποία η διατμητικές εντάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις καμπτικές εντάσεις, οδηγώντας έτσι τα υποστυλώματα αυτά σε έντονα ψαθυρή διατμητική αστοχία. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζονται εκείνα με λόγο διάτμησης $a_s = \frac{M_{sd}}{V_{sd}h} < 2.5$. Ο λόγος διάτμησης υπολογίζεται από εντατικά μεγέθη ροπή M_{sd} και τέμνουσας V_{sd} για δυσμενή σεισμικό συνδυασμό φορτίσεων στην κρίσιμη διατομή του άκρου του υποστυλώματος, όπου η M_{sd} είναι μέγιστη ροπή και h η διάσταση διατομής στην διεύθυνση της τέμνουσας και V_{sd} η τέμνουσα.¹

¹ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΝΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ, ΜΠΑΣΑΓΙΑΝΝΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ, 15ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα Φεβρουάριος 2009

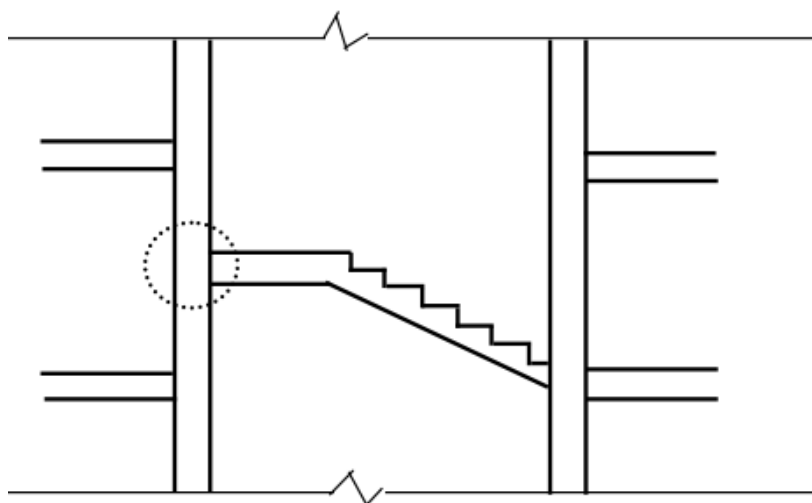
Τα κοντά υποστυλώματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα φύσει και τα θέσει κοντά υποστυλώματα.

Τα φύσει κοντά υποστυλώματα, συνήθως προκύπτουν από την φύση της κατασκευής, παραδείγματος χάρι σε ημιυπόγεια, πατάρια ή αλλού τέτοιου είδους κατασκευές και προβλέπονται από τον κανονισμό.

Τα θέσει κοντά υποστυλώματα προκύπτουν από την μη πλήρωση του φατνώματος με τοιχοποιία μεταξύ δύο διαδοχικών υποστυλωμάτων. Παρόλου που εκ φύσεως δεν είναι κοντά, λόγω της ύπαρξης τοιχοποιίας συμπεριφέρονται ως κοντά. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης η τοιχοποιία εμβολίζει το υποστυλώμα με αποτέλεσμα την έντονα ψαθυρή διατμητική αστοχία του.



Εικ. 16. Κοντό υποστυλώμα λόγω ημιυπόγειου χώρου



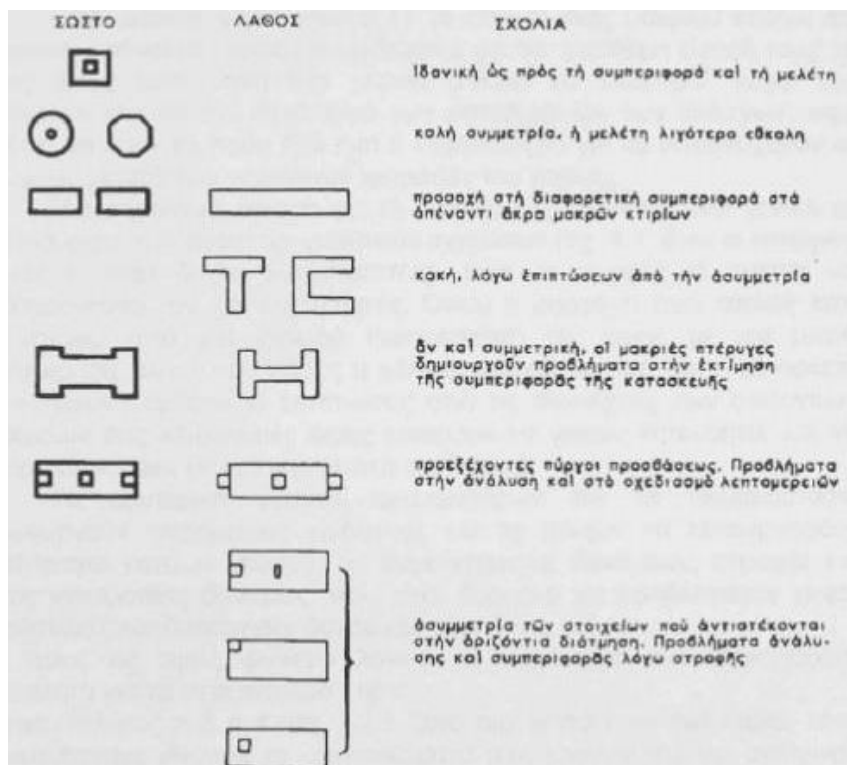
Εικ. 17 Κοντό υποστυλώμα λόγω στήριξης στο ενδιάμεσο του υποστυλώματος



Εικ. 18 Αστοχίες κοντών υποστυλωμάτων

2.1.6 Κανονικότητα κτιρίου σε κάτοψη

Έχει παρατηρηθεί πως τα απλής γεωμετρίας σε κάτοψη κτίρια παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε μια δυναμική φόρτιση από κτίρια τα οποία έχουν ακανόνιστο σχήμα κάτοψης. Αυτός είναι και ο λόγος ο οποίος πολλά από τα διατηρητέα κτίρια δεν έχουν κατεδαφιστεί από ισχυρούς σεισμούς ανά τα χρόνια. Με την κατασκευή απλών μορφών (συμμετρία τουλάχιστον ως προς δύο άξονες του κτιρίου) ελαχιστοποιείται η στρέψη των πλακών και η κατανομή των σεισμικών φορτίων επιτυγχάνεται ομοιόμορφα σε όλη την κάτοψη. Σε περίπτωση όμως που κάτοψη φέρει πολυπλοκότητα, τότε η κατανομή των δυνάμεων αλλάζει με αποτέλεσμα την ύπαρξη συγκεντρωμένων τάσεων.



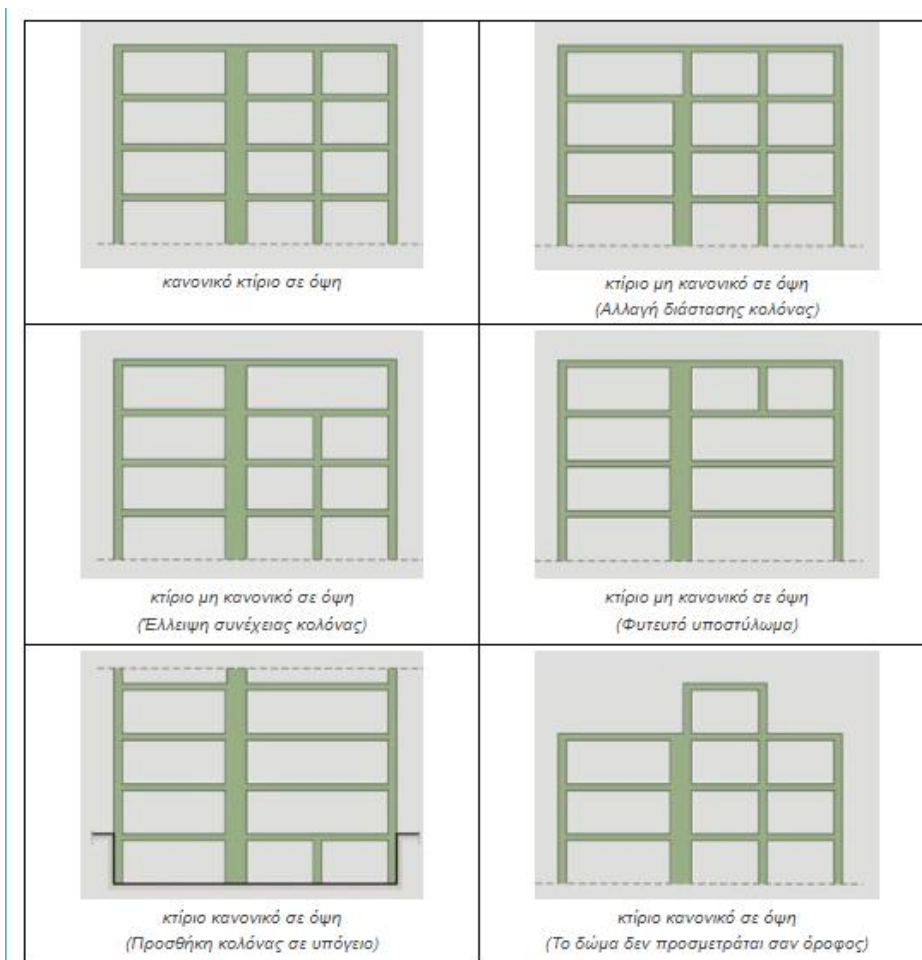
Εικ. 19 Διάταξη κάτοψης για καλύτερη σεισμική συμπεριφορά

Όταν ο απλός σχεδιασμός δεν είναι εφικτός και προκύπτει κάτι το ασύμμετρο, τότε το περίπλοκο σχήμα μπορεί να χωριστεί σε απλούστερα με την βοήθεια αντισεισμικού αρμού. Σαφώς η περίπτωση του αντισεισμικού αρμού αναφέρεται σε μεγάλες κατασκευές, εξαιρουμένων των κοινών κατοικιών ή μικρών πολυκατοικιών, όπου το δυναμικό φορτίο επιδρά περισσότερο λόγω του μεγέθους της κατασκευής.

2.1.7 Κανονικότητα κτιρίου σε τομή ή όψη

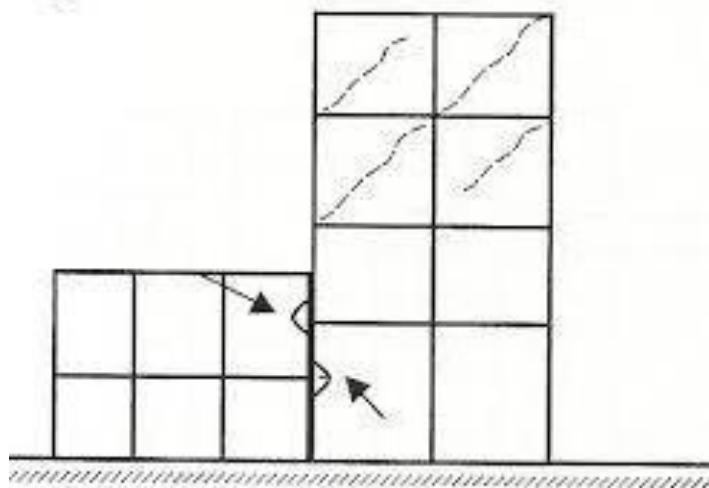
Όσο σημαντική είναι η κάτοψη ενός κτιρίου από αντισεισμικής άποψης άλλο τόσο σημαντική είναι και η καθ' ύψος τομή ή όψη του. Έχει παρατηρηθεί ότι τα κτίρια με καθ' ύψος αλλαγές έχουν δυσμενέστερη συμπεριφορά σε μια δυναμική φόρτιση από εκείνα τα οποία είναι συμμετρικά ή δεν παρουσιάζουν απότομες αλλαγές καθ' ύψος (πχ. εσοχές για την δημιουργία ρετιρέ, φευτευτά υποστυλώματα, αλλαγές διάστασης υποστυλώματος, έλλειψη συνέχειας υποστυλώματος κλπ.).

Η οποιαδήποτε αλλαγή συνεπάγεται την διαφοροποίηση της δυσκαμψίας αλλά και της μάζας του εκάστοτε ορόφου από το υπόλοιπο σύνολο. Αυτό σημαίνει πως κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης η κατανομή του δυναμικού φορτίου δεν θα γίνει ομοιόμορφα. Ως αποτέλεσμα ο όροφος, ο οποίος έχει υποστεί αλλαγές ή κακοτεχνίες που οφείλονται στον σχεδιασμό, συμπεριφέρεται διαφορετικά από το υπόλοιπο σύνολο με αποτέλεσμα την πιθανή αστοχία.



Εικ. 20 Κανονικότητα σε όψη και δυσμενείς περιπτώσεις

Εξίσου σημαντική υποπερίπτωση αποτελεί το σημείο συνάντησης γειτονικών κτιρίων. Στο συνεχές σύστημα δόμησης τα κτίρια αλληλοσυγκρούονται κατά την σεισμική διέγερση. Αυτό καθιστά τους υπολογισμούς που αφορούν την δυναμική απόκριση της κατασκευής άχρηστους. Το πρόβλημα αυτό επιδεινώνεται όταν οι πλάκες των γειτονικών δεν συμπίπτουν υψομετρικά. Ως αποτέλεσμα αυτής της διάταξης είναι ο εμβολισμός των υποστυλωμάτων του ενός κτιρίου από τις πλάκες του γειτονικού του. Η δυσμενής επίδραση μεταξύ των κτιρίων αποφεύγεται με την χρήση αντισεισμικού αρμού. Η χρήση του αντισεισμικού αρμού έχει ως σκοπό να διαχωρίσει τις δύο κατασκευές ούτως ώστε σε μια σεισμική δράση να αποκρίνονται ανεξάρτητα, όπως και έχει σχεδιαστεί.



Εικ. 21 Εμβολισμός μεταξύ γειτονικών κτιρίων τα οποία δεν φέρουν αντισεισμικό αρμό



a.



b.

Εικ. 22 a. Εμβολισμός γειτονικών κτιρίων τα οποία δεν φέρουν αντισεισμικό αρμό, b. Εμβολισμός γειτονικών κτιρίων τα οποία δεν φέρουν αντισεισμικό αρμό και υπάρχει διαφορά στάθμης των ορόφων μεταξύ τους. (Βλάβες σε δομικά και μη δομικά στοιχεία από σεισμό)

2.1.8 Προσθήκες και επεμβάσεις σε υπάρχοντα κτίρια

Έχει παρατηρηθεί πως αρκετοί ιδιοκτήτες ή νέοι ιδιοκτήτες συνηθίζουν να μεταποιούν τα κτίρια τα οποία έχουν στην κατοχή τους ούτως ώστε να τα προσαρμόσουν στις απαιτήσεις τους. Παραδείγματα τέτοιων προσαρμογών συναντάμε καθημερινά και ποικίλουν, από το ποιο απλό, όπως η καθαίρεση κάποιων τοίχων για την ενοποίηση χώρων, έως το πιο περίπλοκο όπως η προσθήκη ενός επιπλέον ορόφου. Τέτοιου είδους προσαρμογές χωρίς την επίβλεψη ή μελέτη ειδικού μπορεί να επιφέρουν προβλήματα. Σε κάθε περίπτωση η όποια επέμβαση ενδέχεται να επηρεάσει την στατική ικανότητα της κατασκευής. Ιδιαίτερη προσοχή βέβαια πρέπει να δοθεί όταν πρόκειται για την προσθήκη νέου ορόφου ή για την μετατροπή ισόγειων χώρων σε επαγγελματικούς χώρους οι οποίοι περιλαμβάνουν μεγάλα ανοίγματα, βιτρίνες κλπ. (αφορά κυρίως παλιές κατασκευές).

Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν θα πρέπει να γίνει προσεκτική μελέτη και ίσως χρειαστεί και η ενίσχυση της κατασκευής για να ανταπεξέλθει στατικά αλλά και αντισεισμικά στις νέες μεταποιήσεις.



Εικ. 23 Οριζόντια και καθ' ύψος προσθήκη και ενίσχυση υπάρχοντος κτιρίου, Κινέτα

2.2 Ταξινόμηση και τα είδη των βλαβών από σεισμό σε δομικά στοιχεία

Η ταξινόμηση των βλαβών που παρουσιάζονται στα διάφορα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής μετά από ένα σεισμικό γεγονός περιλαμβάνει τους βαθμούς βλάβης και τον χαρακτήρα των βλαβών.

Ο χαρακτήρας των βλαβών αναφέρεται σε όλη την κατασκευή και έχει να κάνει με την ασφάλεια χρήσης της κατασκευής, την επιλογή των μέτρων αντιμετώπισης των βλαβών αλλά και το πόσο άμεσα πρέπει να ληφθούν μέτρα και επεμβάσεις για την αντιμετώπιση των βλαβών αυτών.

Οι βαθμοί βλάβης αναφέρονται σε μεμονωμένα δομικά στοιχεία και συσχετίζονται με την απομένουσα αντοχή του μέλους και τα περιθώρια ασφάλειας. Οι βαθμοί βλάβης χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, ανάλογα με τη σημαντικότητα, το μέγεθος και το εύρος τους ως εξής:


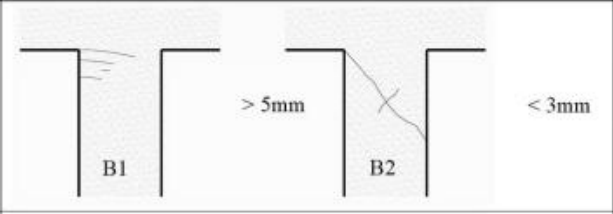
Περιορισμένης σπουδαιότητας

Βαθμού Α, ελαφρές βλάβες

Αναφέρεται για απλές μεμονωμένες ρωγμές μικρού πλάτους ($< 2,0 \text{ mm}$) οι οποίες είναι κάθετες στον άξονα του στοιχείου.

Βαθμού Β, ελαφρές βλάβες

Αναφέρεται για ελαφρές καμπτικές ρωγμές ή μεμονωμένες διατμητικές ρωγμές μικρού πλάτους ($< 0.5 \text{ mm}$) με την προϋπόθεση ότι υπάρχει απουσία εμφανών μόνιμων μετακινήσεων, λυγισμού και αποφλοίωσης.

Περιορισμένης σπουδαιότητας	Ελαφρές βλάβες	A		$d=0$
		B		$d \ll$

Εικ. 24 Βαθμοί βλάβης σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ, όπου d : η σχετική μετακίνηση των άκρων του μέλους

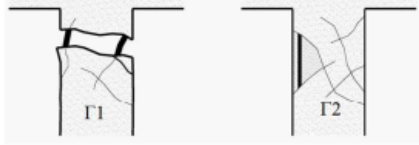
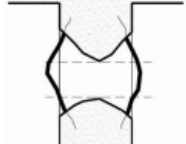
Επηρεάζουν την ασφάλεια του συνόλου

Βαθμού Γ, σοβαρές βλάβες

Αναφέρεται σε έντονες ρωγμές οι οποίες έχουν μεγάλο πλάτος, υπάρχει τοπική αποδιοργάνωση του σκυροδέματος που οφείλεται σε θλιπτικές ή διατμητικές εντάσεις και ως προϋπόθεση οι παραμορφώσεις του μέλους να είναι πολύ μικρές.

Βαθμού Δ, βαριές βλάβες

Αναφέρεται σε πλήρη αστοχία του μέλους, λυγισμός ή/και θραύση των κύριων οπλισμών, ή άνοιγμα των συνδετήρων, ή μόνιμη παραμόρφωση. Επίσης σε αυτή τη κατηγορία κατατάσσεται και η αποδιοργάνωση των κόμβων.

Επιρεάζουν την ασφάλεια του συνόλου	Σοβαρές	Γ		$d < 1\%$
	Βαριές	Δ ή Δ/E	 <p>Λυγισμός ή και θραύση ράβδων, άνοιγμα ή και θραύση συνδετήρων</p>	$d > 2\%$

d: η σχετική μετακίνηση των άκρων του στοιχείου

Εικ. 25 Βαθμοί βλάβης σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ

2.3 Τυπικοί Βαθμοί Βλάβης

2.3.1 Θεμελίωση

Τα προβλήματα στην θεμελίωση χαρακτηρίζονται ως σοβαρά και έχουν μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας για την ίδια την κατασκευή. Αυτό συμβαίνει γιατί στο ύψος της θεμελίωσης καταλήγουν ομοιόμορφα κατανεμημένα όλα τα υπερκείμενα φορτία του συνόλου της κατασκευής. Στην περίπτωση όμως όπου υπάρχει η οποιαδήποτε ανομοιομορφία στα θεμέλια, η κατανομή των φορτίων γίνεται και εκείνη ανομοιόμορφα με αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλημάτων στην ανωδομή ή ακόμη και την οδήγηση της κατασκευής σε ολική κατάρρευση. Συνήθως τα προβλήματα που αφορούν την θεμελίωση προέρχονται από αστοχίες του υπεδάφους όπως οι διαφορικές καθίζεις, οι ολισθήσεις ή ρωγμές κοντά στην περιοχή της θεμελίωσης.

Πασίγνωστο παράδειγμα μιας τέτοιας αστοχίας είναι ο Πύργος της Πίζας. Η κλίση η οποία έχει ο Πύργος οφείλεται στο γεγονός ότι το έδαφος θεμελίωσης του ήταν πολύ μαλακό. Ως αποτέλεσμα η κατασκευή άρχισε σταδιακά να κλίνει και μάλιστα από την φάση κατασκευής της. Η κλίση αυτή μεγάλωνε όσο αυξανόταν και το ίδιο βάρος της και συνέχισε να αυξάνεται σταδιακά μέχρι της σταθεροποίηση του Πύργου μέσα από προσπάθειες ειδικών που καταβλήθηκαν τον 20^ο και 21^ο αιώνα.



Εικ. 26 Πύργος της Πίζας

2.3.2 Ανωδομή

Η ανωδομή είναι το μέρος της κατασκευής που βρίσκεται πάνω από την στάθμη του υπεδάφους. Το τμήμα αυτό της κατασκευής είναι εκείνο το οποίο δέχεται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις και κατά συνέπεια φέρει μεγαλύτερες βλάβες που οφείλονται σε σεισμικές φορτίσεις. Η ανωδομή αποτελείται

από τον σκελετό ή φέροντα οργανισμό, τον οργανισμό πλήρωσης και τέλος τις δευτερεύουσες κατασκευές.

2.3.2.1 Φέροντας Οργανισμός

Ο φέροντας οργανισμός της κατασκευής έχει ως σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στην στάθμη της θεμελίωσης. Αποτελείται από τα υποστυλώματα, τις δοκούς, τις πλάκες και τα κομβικά σημεία.

I. Υποστυλώματα

Τα υποστυλώματα κατέχουν τον πιο σημαντικό ρόλο σε μια κατασκευή καθώς από αυτά εξαρτάται άμεσα η ασφάλεια της κατασκευής. Κατά την διάρκεια ενός σεισμού επιδοκιμάζονται σε δυσμενείς συνθήκες αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις φέρουν σοβαρές βλάβες, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι είναι σημαντικής σπουδαιότητας. Στην περίπτωση εμφάνισης σοβαρών βλαβών η κατασκευή μπορεί να οδηγηθεί σε τμηματική ή ακόμη και σε ολική κατάρρευση. Για αυτό στους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς εφαρμόζεται η αρχή του ικανοτικού σχεδιασμού που προαναφέρθηκε.

Οι βλάβες που εμφανίζουν τα υποστυλώματα μετά από ένα σεισμικό γεγονός είναι καμπτικού ή διατμητικού χαρακτήρα και ο τύπος της βλάβης εξαρτάται από την σχέση της καμπτικής και διατμητικής καταπόνησης του υποστυλώματος.

Οι βλάβες που έχουν καμπτικό χαρακτήρα οφείλονται στην μεγάλη καμπτική ένταση η οποία κατά τη διάρκεια του σεισμού εφαρμόζεται στα άκρα του υποστυλώματος. Οι βλάβες διατμητικού χαρακτήρα παρατηρούνται σε υποστυλώματα με μικρό λόγο διάτμησης στις κρίσιμες περιοχές.

Όσον αφορά τις βλάβες διατμητικού χαρακτήρα, παρουσιάζονται σε υποστυλώματα με μικρό λόγο διάτμησης στις περιοχές με μεγαλύτερη διατμητική αδυναμία. Οι βλάβες αυτές δεν εμφανίζονται κατ' ανάγκη στα άκρα του υποστυλώματος, όμως στη περίπτωση καμπτικών βλαβών, τα άκρα ενός υποστυλώματος είναι επιρρεπείς και σε διατμητικές βλάβες. Επίσης οι βλάβες αυτού του τύπου είναι συνηθέστερες στην περίπτωση κοντών υποστυλωμάτων όπου ο λόγος της διάτμησης είναι μικρότερος από 2,5 καθώς και σε κανονικά υποστυλώματα όπου εμποδίζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις από δύσκαμπτα στοιχεία σε ένα τμήμα του ύψους τους. Οι βλάβες διατμητικού χαρακτήρα παρουσιάζονται με λοξές ρωγμές, όπου λόγω της αντιστροφής της σεισμικής δράσης πολλές φορές παρουσιάζουν χιαστί μορφή, η εμφάνιση αυτών των βλαβών εκδηλώνει τη χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος αλλά και την έλλειψη επαρκούς διατμητικού οπλισμού (Δρίτσος, 2005).

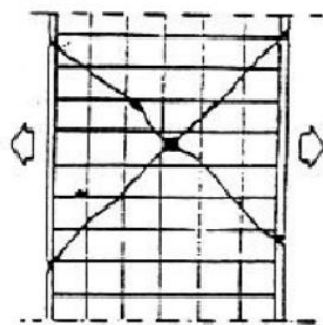


Εικ. 27 Διατμητική αστοχία άκρων υποστυλώματος, λυγισμός ράβδων, θραύση λεπτών συνδετήρων

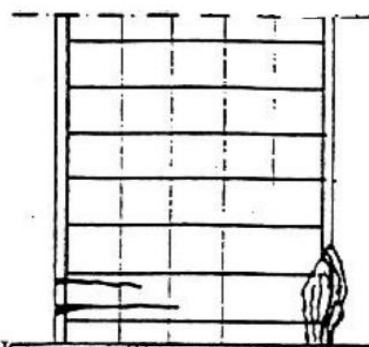
«Η δυσμενέστερη περίπτωση η οποία προκαλεί σοβαρές βλάβες ψαθυρού χαρακτήρα στα υποστυλώματα είναι η ταυτόχρονη ύπαρξη διάτμησης και κάμψης. Οι βλάβες τέτοιου χαρακτήρα εμφανίζονται σε υποστυλώματα με ανεπάρκεια της διατομής τους, τα οποία βρίσκονται σε κόμβους όπου συντρέχουν ισχυρές δοκοί και δεν ικανοποιείται ο ικανοτικός σχεδιασμός. Οι βλάβες αυτές λόγω αντιστροφής της σεισμικής δράσης μπορεί να εμφανιστούν και στις δύο πλευρές του υποστυλώματος εκδηλώνοντας σύνθλιψη και αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης. Ωστόσο συχνά παρατηρείται εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος και η διαρροή ή θραύση των συνδετήρων στη περιοχή θραύσης, έχοντας ως αποτέλεσμα στις πλείστες περιπτώσεις τη βράχυνση του υποστυλώματος και σε λυγισμό του διάμικτες οπλισμού. Η εμφάνιση τέτοιων βλαβών σε υποστυλώματα υποδηλώνει την χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος, την έλλειψη περίσφιξης και την ανεπάρκεια διατμητικού οπλισμού.» (Δρίτσος, 2005).

II. Βλάβες σε τοιχώματα

Τα τοιχώματα σε μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος έχουν σημαντική λειτουργία έναντι σεισμικής δράσης λόγω της δυσκαμψίας που προσδίδουν σε μια κατασκευή αλλά και την κατανομή των κατακόρυφων φορτίων στο έδαφος με ασφάλεια. Μετά από ένα σεισμικό φορτίο, οι βλάβες οι οποίες παρατηρούνται είναι ίδιας φύσης με αυτές των υποστυλωμάτων και χωρίζονται σε διατμητικές και καμπτικές. Οι διατμητικές βλάβες είναι αυτές που καταγράφονται συχνότερα μετά από ένα σεισμικό γεγονός και κατατάσσονται ως οι πιο σοβαρές βλάβες που μπορεί να φέρει ένα τοίχωμα. Η σοβαρότητα της διατμητικής αστοχίας οφείλεται στο γεγονός ότι είναι ψαθυρή και συνοδεύεται από την βράχυνση του τοιχώματος με αποτέλεσμα την αδυναμία να λειτουργήσει ως διαβιβαστής κατακόρυφων φορτίων με αποτέλεσμα μέχρι και την ολική κατάρρευση της κατασκευής.



Σχ.1 Διατμητική βλάβη τοιχείου



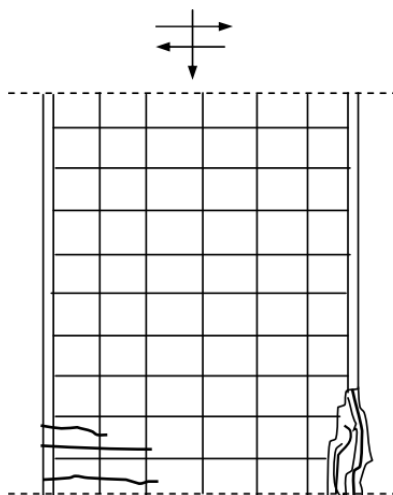
Σχ.2 Καμπτική βλάβη τοιχείου

Εικ. 28 Αστοχίες τοιχωμάτων, διατμητική και καμπτική



Εικ. 29 Διατμητικές αστοχίες τοιχωμάτων που επιφέρουν μεγάλες παραμορφώσεις

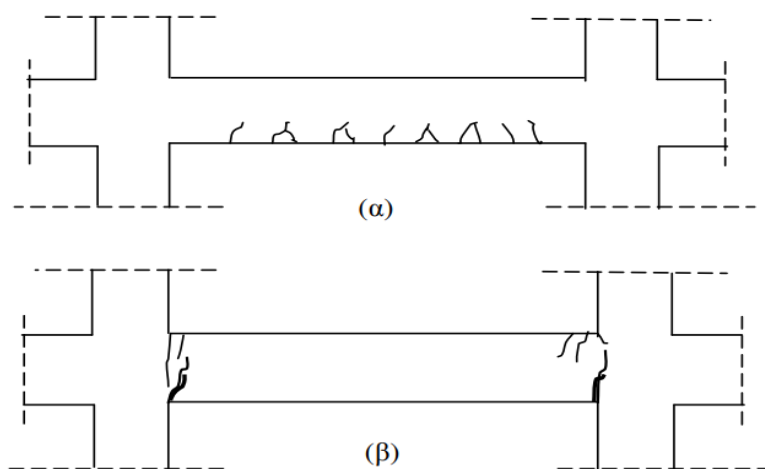
Οι διατμητικές βλάβες σε τοιχώματα συνήθως οφείλονται σε κακό σχεδιασμό ο οποίος περιλαμβάνει ανεπαρκή διατμητικό οπλισμό σε συνδυασμό με εφαρμογή χαμηλής ποιότητας σκυροδέματος. Η περιπτώσεις βλαβών καμπτικού χαρακτήρα είναι λιγότερες σε σχέση με αυτές διατμητικού τύπου. Οι καμπτικές αστοχίες τοιχωμάτων παρουσιάζονται στην βάση του τοιχώματος κοντά στο ύψος της θεμελίωσης και είναι διακριτές στο επίπεδο του ισογείου όταν δημιουργούνται συνθήκες πάκτωσης του τοιχώματος.



Εικ. 30 Καμπτική αστοχία τοιχώματος

III. Δοκοί

Οι βλάβες που παρατηρούνται στις δοκούς μιας κατασκευής είναι λιγότερο επικίνδυνες όσον αφορά την ασφάλεια της κατασκευής και κατά την διάρκεια του σεισμού, επιθυμητές. Αυτό οφείλεται στην αρχή του ικανοτικού σχεδιασμού που αναλύθηκε παραπάνω, και αφορά την εκτόνωση της σεισμικής ενέργειας σε μικρότερης σημασίας κατά προτεραιότητα δομικά μέλη ούτως ώστε να προστατευτούν αυτά που είναι υψίστης σημασίας, τα υποστυλώματα. Οι βλάβες στις δοκούς διακρίνονται σε καμπτικές και διατμητικές.



Εικ. 31 α) Καμπτικές ρωγμές στο εφελκύμενο πέλμα, β) καμπτική αστοχία στο άνω πέλμα και ολίσθηση οπλισμών κάτω

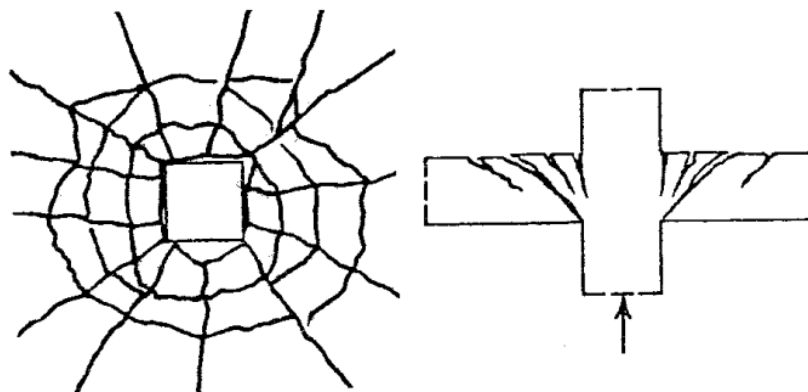
Μετά από μια σεισμική δράση ο πιο συχνός τύπος αστοχίας είναι οι εγκάρσιες καμπτικές ρωγμές στο κάτω πέλμα της δοκού και οφείλεται σε ήδη υπάρχουσες τριχοειδής ρωγμές οι οποίες γίνονται εμφανείς μετά από την επίδραση του σεισμικού φορτίου. Στην περίπτωση όμως όπου παρουσιάζεται αυτή η αστοχία χωρίς την επίδραση σεισμικού φορτίου τότε η δοκός παρουσιάζει καμπτική ανεπάρκεια, που χαρακτηρίζεται από ρωγμές μεγάλου πλάτους οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ανάπτυξη της μέγιστης ροπής και τέλος στην διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα.

Βλάβες καμπτικού χαρακτήρα παρουσιάζονται και στο πάνω πέλμα στα άκρα της δοκού και μπορεί να συμβούν από σεισμική δράση ή από μακροχρόνιες φορτίσεις. Αυτό παρατηρείται σε ισχυρούς σεισμούς ή σε ανεπαρκή αγκύρωση.

IV. Πλάκες

Οι βλάβες οι οποίες παρουσιάζονται μετά από έναν σεισμό στις πλάκες αλλά γενικά σε οριζόντια στοιχεία τις κατασκευής είναι δευτερεύουσας σημασίας καθώς δεν επηρεάζουν την ευστάθεια της κατασκευής. Σε γενικές γραμμές, οι πλάκες δεν επηρεάζονται άμεσα από σεισμικές δράσεις αλλά από βλάβες σε επιμέρους δομικά στοιχεία όπως είναι οι δοκοί. Συνήθεις βλάβες είναι οι καμπτικές ρηγματώσεις οι οποίες οφείλονται στην συνεργασία των δοκών με τις πλάκες. Ωστόσο υπάρχει περίπτωση να παρουσιαστούν πιο σοβαρά προβλήματα όπως στις περιπτώσεις καθίζησης των υποστυλωμάτων.

Επιπρόσθετα, σοβαρή βλάβη σε πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί και η περίπτωση αστοχίας από διάτρηση. Αυτό παρατηρείται όταν η πλάκα στηρίζεται άμεσα στο υποστύλωμα χωρίς να παρεμβάλλεται δοκός. Η περίπτωση της έλλειψης δοκού και η στήριξη της πλάκας άμεσα στο υποστύλωμα αποτελεί μια λύση βελτίωσης της αισθητικής εσωτερικά της κατασκευής. Κάτι τέτοιο όμως θα πρέπει αποφεύγεται σε νέες αντισεισμικές κατασκευές με βάση τους κανονισμούς που τις διέπουν.

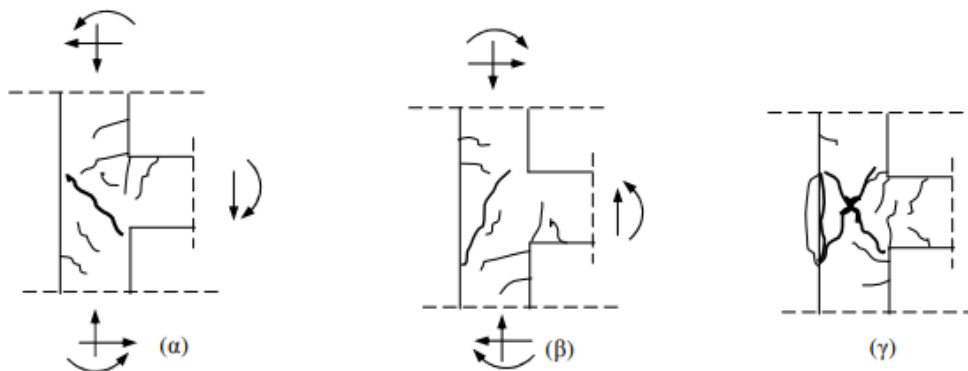


Εικ. 32 Αστοχία πλάκας χωρίς την παρεμβολή δοκών λόγω διάτρησης από συγκεντρωμένο φορτίο

V. Κομβικά Σημεία (Δοκών – Υποστυλωμάτων)

Μετά από έναν μεγάλο σεισμό παρουσιάζονται σοβαρές βλάβες στα κομβικά σημεία μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων και συγκεκριμένα στους εξωτερικούς κόμβους. Οι βλάβες σε κομβικά σημεία θεωρούνται σοβαρές και αποτελούν ζήτημα για την ευστάθεια της κατασκευής.

Η σοβαρότητα αυτού του τύπου βλαβών προέρχεται από το γεγονός ότι μειώνεται η δυσκαμψία των φερόντων στοιχείων με αποτέλεσμα τις μεγάλες ανακατανομές των φορτίων. Για αυτό θα πρέπει από τα πρώτα στάδια εμφάνισης τέτοιων αστοχιών, που μπορεί να είναι ακόμη και μικρού εύρους βλάβες (ρωγμές κλπ.), να γίνουν ενέργειες αποκατάστασης άμεσα.



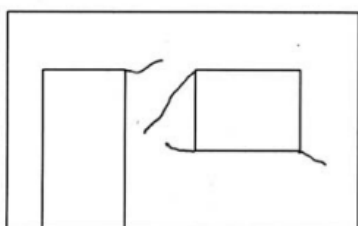
Εικ. 33 Βλάβες σε ακραίους κόμβους πλαισίων. α) σύνθλιψη κάτω παρειάς δοκού, β) σύνθλιψη άνω παρειάς δοκού, γ) αποδιοργάνωση κόμβου από ανακυκλιζόμενη φόρτιση



Εικ. 34 Ρηγμάτωση εξωτερικού κόμβου λόγω σύνθλιψης κάτω παρειάς δοκού

VI. Οργανισμός πλήρωσης

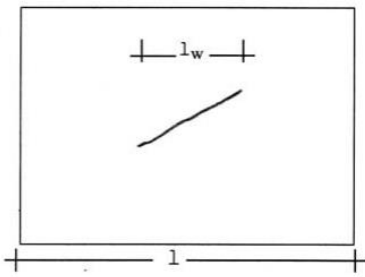
Ο οργανισμός πλήρωσης αποτελείται από το σύνολο της άοπλης οπτοπλινθοδομής που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των φατνωμάτων. Οι βλάβες κατηγοριοποιούνται ως εξής:



Α
Εύρος ραγιάς < 1mm, μήκος < 1m

Εικ. 35 Ελαφριές βλάβες

- i. Ελαφρές βλάβες: αυτού του τύπου οι αστοχίες αναφέρονται σε απλές ρηγματώσεις με άνοιγμα ρηγμάτωσης μικρότερο από 1 mm. Παρατηρούνται κυρίως στις γωνίες των κουφωμάτων.

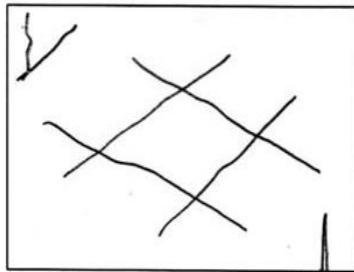


B

$$\frac{l_w}{1} < \frac{1}{3}, \text{ εύρος } \leq 5\text{ m}$$

Εικ. 36 Σοβαρές βλάβες

ii. Σοβαρές βλάβες: αναφέρονται σε έντονες ρηγματώσεις οι οποίες έχουν μορφή χιαστί ή διαγώνιες και με άνοιγμα ρηγμάτωσης το οποίο δεν υπερβαίνει τα 5 mm.



Δ
Τοπική αστοχία, αποδιοργάνωση

Εικ. 37 Βαριές βλάβες

ii. Βαριές βλάβες: στις βαριές βλάβες κατατάσσονται ρηγματώσεις οι οποίες υπερβαίνουν τα 10 mm, ανοικτές ρωγμές, διαγώνιες ή χιαστί ρωγμές, θραύση οπτόπλινθων, θραύση διαζωμάτων, αποκλίσεις από την κατακόρυφο κλπ.

VII. Δευτερεύουσες Κατασκευές

Στις δευτερεύουσες κατασκευές κατατάσσονται κατασκευές όπως υαλοστάσια, πατάρια, καμινάδες κλπ. Οι βλάβες σε αυτά τα στοιχεία δεν επηρεάζουν την ασφάλεια της κατασκευής.

3. Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα

Όπως προαναφέρθηκε ένα σεισμικό γεγονός είναι πιθανό να επιφέρει σημαντικές ζημιές στις κατασκευές με αποτέλεσμα μέχρι και την ολική κατάρρευση του κτιρίου αλλά και την διακινδύνευση της ανθρώπινης ζωής. Οι σημερινοί αντισεισμικοί κανονισμοί θέτουν ως βασική απαίτηση την αποφυγή διακινδύνευσης της ανθρώπινης ζωή ή της σωματικής ακεραιότητας των διαμενόντων λόγω ολικής ή μερικής κατάρρευσης της κατασκευής μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Στόχος των αντισεισμικών κανονισμών είναι η διασφάλιση σε περίπτωση σεισμού, ότι:

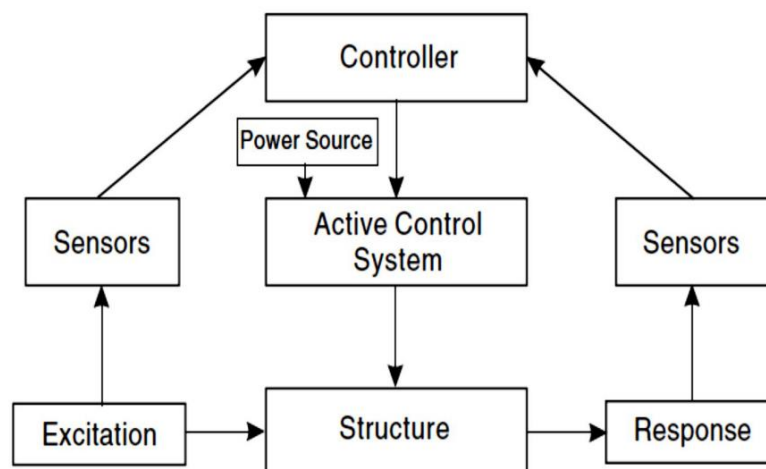
1. Οι κατασκευές θα είναι ασφαλείς για την σωματική ακεραιότητα και την ανθρώπινη ζωή των διαμενόντων μετά από μια σεισμική δράση
2. Οι βλάβες που θα υποστούν τα δομικά στοιχεία θα είναι περιορισμένες
3. Το κτίριο δεν θα οδηγηθεί σε καμία περίπτωση σε ολική κατάρρευση

Ο σεισμός στις κατασκευές αντιμετωπίζεται είτε με συμβατικούς είτε με μη συμβατικούς τρόπους.

Οι συμβατικοί τρόποι αντιμετώπισης εκμεταλλεύονται την πλάσטיμη συμπεριφορά του φέροντα σκελετού της κατασκευής για την απόσβεση της σεισμικής ενέργειας. Επίσης, αναφέρονται σε όλους τους αντισεισμικούς κανονισμούς και έχουν να κάνουν με την εξασφάλιση των κατάλληλων διατάξεων του κτιρίου (της κανονικότητας σε όψη και κάτοψη, του κέντρου ελαστικής στροφής, κλπ.) αλλά την διαστασιολόγηση του (του φάσματος σχεδιασμού, ικανοτικός σχεδιασμός κλπ.), τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω.

Οι μη συμβατικοί τρόποι αντιμετώπισης αναφέρονται σε ειδικές διατάξεις οι οποίες ελέγχουν την απόκριση της κατασκευής κατά την διάρκεια του σεισμού. Αυτοί περιλαμβάνουν δύο μεγάλες κατηγορίες, τα ενεργά και τα παθητικά συστήματα.

3.1 Ενεργά συστήματα ελέγχου



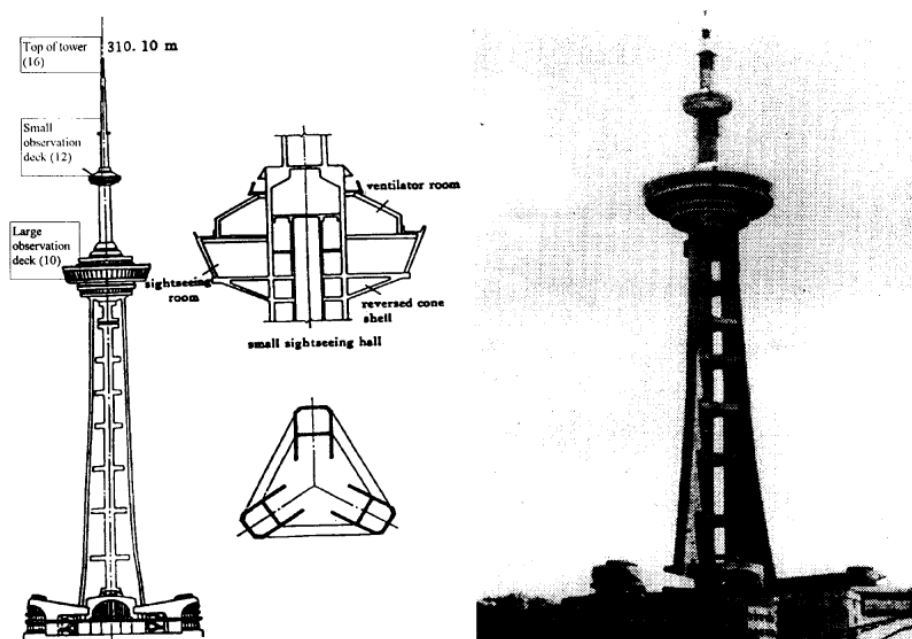
Εικ. 38 Συστήματα ενεργητικού ελέγχου

Τα ενεργά συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν τις μετρούμενες από αισθητήρες (sensors) αποκρίσεις της κατασκευής κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Στην περίπτωση που η απόκριση της κατασκευής δεν είναι επιθυμητή, υπολογίζεται από το σύστημα ένα σήμα το οποίο αναπτύσσει κατάλληλες δυνάμεις ελέγχου που θα σταλεί στον επενεργητή. Αυτό έχει ως σκοπό την μείωση της απόκρισης της κατασκευής στα επιθυμητά επίπεδα και την αύξηση της ασφάλειας αλλά και της λειτουργικότητας της.

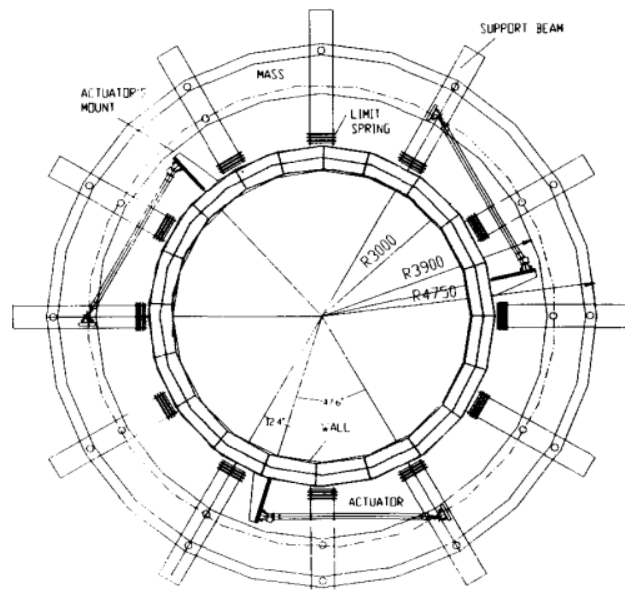
Όμως, τα συστήματα αυτά για να λειτουργήσουν χρειάζονται την παρουσία μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας πράγμα το οποίο σημαίνει πως σε μια διακοπή ρεύματος το σύστημα δεν θα μπορεί να λειτουργήσει. Αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα μιας και κατά την διάρκεια σεισμικών γεγονότων οι διακοπές ρεύματος είναι αρκετά συχνές.

Η πιο συνηθισμένη περίπτωση ενεργού ελέγχου είναι οι ενεργοί αποσβεστήρες. Σε αυτή τη κατηγορία τοποθετούνται στη κατασκευή βοηθητικές μάζες σε σημεία κλειδιά, οι οποίες είναι μικρότερες από 10% της συνολικής μάζας του κτιρίου. Η σύνδεση των βοηθητικών μαζών γίνεται με ειδικά έμβολα τα οποία αποτελούν τους επενεργητές. Με την βοήθεια των αισθητήρων ανιχνεύονται τα φορτία, οι μετακινήσεις και οι επιταχύνσεις του κτιρίου λόγω του σεισμού ή του ανέμου. Τα δεδομένα από τους αισθητήρες στέλνονται στον κεντρικό υπολογιστή ο οποίος βάσει ενός αλγορίθμου αναπτύσσει σήματα ελέγχου, τα οποία στέλνονται στον επενεργητή.

Η πρώτη εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος έγινε το 1998 κατά την κατασκευή του Nanjing TV Tower ύψους περίπου 320 μέτρων, με σκοπό τον έλεγχο της επίδρασης του ανέμου. Οι επιδράσεις του ανέμου ήταν αρκετές ώστε να υπερβαίνουν την ζώνη άνεσης.



Εικ. 39 Nanjing TV Tower

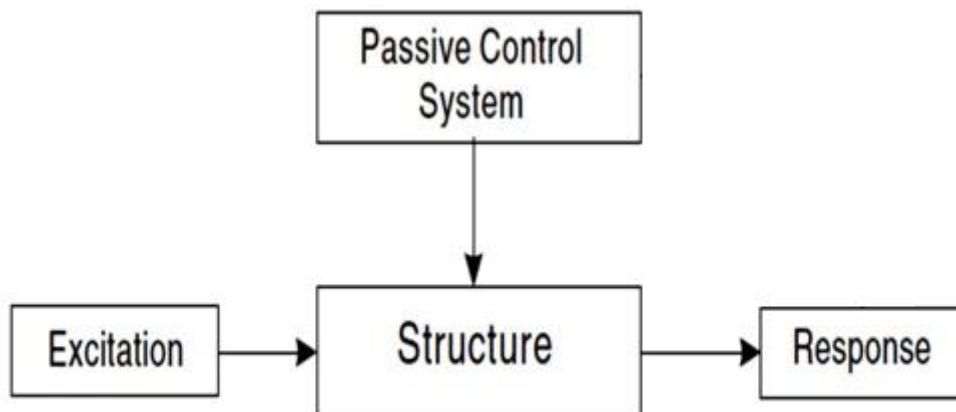


Εικ. 40 Σχέδιο AMD Ninjing TV Tower



Εικ. 41 Ninjing TV Tower

3.2 Παθητικά Συστήματα Ελέγχου



Εικ. 42 Παθητικά συστήματα ελέγχου

Τα συστήματα παθητικού ελέγχου αποτελούνται από συσκευές τα υλικά των οποίων απορροφούν και διαχέουν την εισερχόμενη σεισμική ενέργεια. Συνήθως τα συστήματα αυτά ανταποκρίνονται σωστά μόνο για την συχνότητα για την οποία σχεδιάστηκαν και συντονίστηκαν, για αυτό και θεωρούνται συστήματα με περιορισμένη ικανότητα ελέγχου. Όμως, μπορεί να δημιουργήσουν υψηλότερη δύναμη απόσβεσης όταν η απόκριση της κατασκευής αυξάνεται.

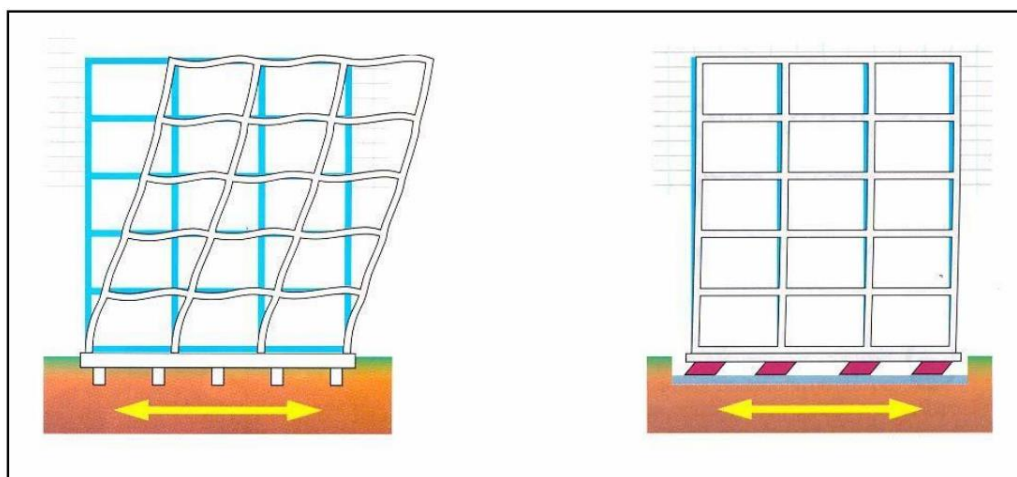
Τα συστήματα αυτά θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα καθώς σε αντίθεση με τα ενεργά συστήματα ελέγχου δεν απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας, πράγμα το οποίο σημαίνει πως δεν επηρεάζονται από διακοπές ρεύματος. Αυτό μειώνει σημαντικά και το κόστος εγκατάστασης.

Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Συσκευές απόσβεσης ενέργειας (Energy Dissipation Devices)
- Σεισμική μόνωση βάσης (Seismic Base Isolation)

3.2.1 Σεισμική μόνωση βάσης

Ως σεισμική μόνωση βάσης καλείται η διαδικασία με την οποία απομονώνεται η ανωδομή από την θεμελίωση. Αυτό επιτυγχάνεται με σεισμικούς μονωτήρες (εφέδρανα) πάνω στους οποίους εδράζεται η ανωδομή με αποτέλεσμα την απόσβεση ενός μεγάλου μέρους της εισερχόμενης σεισμικής ενέργειας στην κατασκευής. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η απομόνωση της κατασκευής από τις οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης μειώνοντας έτσι τις αδρανειακές δυνάμεις στην ανωδομή. Στην περίπτωση της σεισμικής μόνωσης βάσης δεν απαιτείται ο πλάστιμος σχεδιασμός της κατασκευής. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση διαρροής μιας πλάστιμα σχεδιασμένης κατασκευής αυξάνεται η ευκαμψία της με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης του συστήματος μόνωσης. Ο συνδυασμός διαρροής ενός πλάστιμου συστήματος και ενός συστήματος σεισμικής μόνωσης βάσης μπορεί να οδηγήσει σε συντονισμό με ανεπίστρεπτες συνέπειες ακόμη και διακινδύνευση της ανθρώπινης ζωής. Επομένως η χρήση αυτού του συστήματος προϋποθέτει τον ελαστικό σχεδιασμό της κατασκευής ή τον σχεδιασμό για πολύ χαμηλά επίπεδα πλαστιμότητας.



α)

β)

Εικ. 43 α) Συμβατικό σύστημα και β) σεισμικά μονωμένο σύστημα υπό την επίδραση σεισμικού φορτίου

Πλεονεκτήματα σεισμικής μόνωσης βάσης:

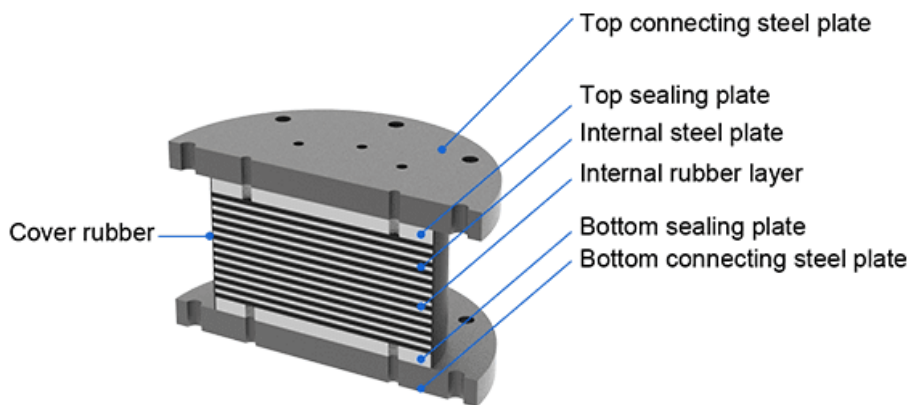
- Αυξημένη ασφάλεια από πιθανότητα ολικής κατάρρευσης
- Εξασφάλιση ελαστικής συμπεριφοράς ακόμα και σε περιπτώσεις ισχυρών σεισμών
- Περιορισμός των βλαβών στα μη-φέροντα δομικά στοιχεία
- Επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία του κτιρίου κατά τη διάρκεια τυχόν μετασεισμικών γεγονότων ή επισκευών
- Μειώνει δραστικά τη διέγερση στην ανωδομή αυξάνοντας έτσι την ποιότητα ζωής
- Αποτρέπει την εμφάνιση προβλημάτων στον φέροντα σκελετό της κατασκευής

Παρακάτω αναφέρονται οι βασικοί τύποι εφεδράνων:

3.2.1.1 Κοινά ελαστομερή εφεδράνα

Την πιο διαδεδομένη κατηγορία συστήματος σεισμικής μόνωσης αποτελούν τα ελαστομερή εφεδράνα. Η φιλοσοφία τους βασίζεται στην ευκαμψία των υλικών που τα απαρτίζουν (φυσικά ή συνθετικά ελαστομερή) για την διάχυση του σεισμικού φορτίου. Αποτελούνται από εναλλασσόμενες στρώσεις χαλύβδινων ελασμάτων και ελαστομερούς υλικού τα οποία είναι καλά συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω ενός αντιδιαβρωτικού υλικού. Τα εφεδράνα περικλείονται από ένα υλικό το οποίο τα προστατεύει από τους εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι η διάβρωση.

Τα εφεδράνα αυτούσια είναι αρκετά άκαμπτα σε κατακόρυφες φορτίσεις, στην περίπτωση όμως της απόσβεσης δεν αρκούν μόνο οι στρώσεις του ελαστομερούς και του χάλυβα. Για τον λόγω αυτό τα εφεδράνα ενισχύονται με πυρήνες μόλυβδου.



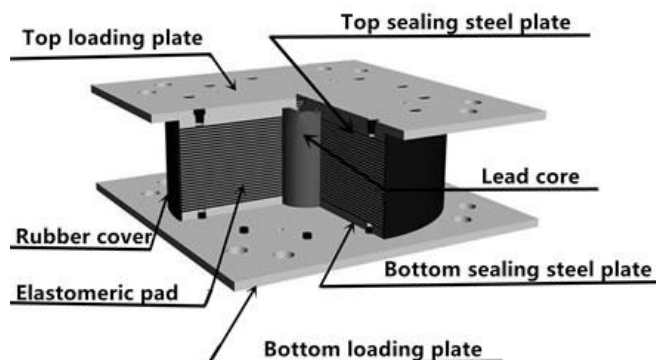
Εικ. 44 Κοινό ελαστομεταλλικό εφέδρανο

3.2.1.2 Φυσικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (HDNR)

Παρατηρήθηκε πως τα κοινά ελαστομεταλλικά εφέδρανα είχαν χαμηλή απόσβεση ενέργειας κατά τη διάρκεια του σεισμού και έτσι το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την δημιουργία ελαστομερών εφεδράνων υψηλής απόσβεσης. Το ελαστομερές υλικό αυτών είναι υλικό το οποίο έχει υποστεί ειδική επεξεργασία με αποτέλεσμα το υλικό να παρέχει υψηλή απόσβεση ενέργειας. Η διαδικασία αυτή περιέχει την προσθήκη ρητινών και σωματιδίων άνθρακα στο ελαστομερές. Έτσι ο λόγος απόσβεσης των HDNR κυμαίνεται μεταξύ 8 – 15% ενώ των κοινών εφεδράνων 2%.

3.2.1.3 Ελαστομερή εφέδρανα με πυρήνα από μόλυβδο

Αυτή η κατηγορία εφεδράνων ανακαλύφθηκε στην Νέα Ζηλανδία το 1970. Αποτελούνται από στρώσεις ελαστομερούς και χάλυβα στο κέντρο των οποίων διανοίγεται μια οπή. Στην οπή τοποθετείται ένα πυρήνας μόλυβδου ο οποίος εισάγεται με υδραυλική πίεση στην προ-ανοιγμένη οπή. Το εφέδρανο περικλείεται από μια επικάλυψη ελαστικού υλικού για την προστασία του από τους εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι η διάβρωση.

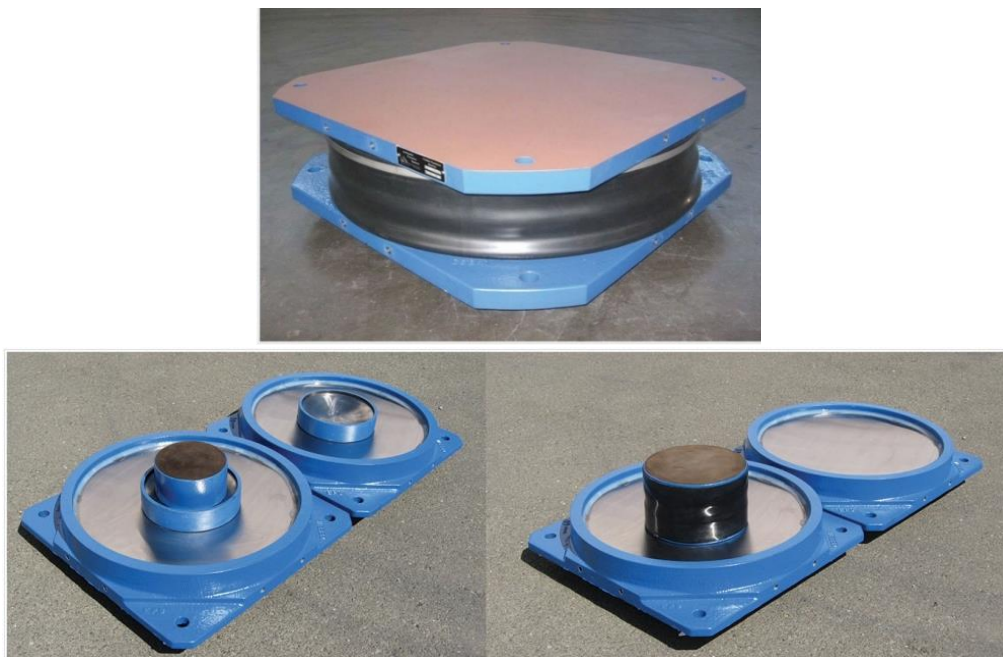


Εικ. 45 Εφέδρανο με πυρήνα μόλυβδου

Στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια του εφεδράνου υπάρχει κατάληξη από παχιές μεταλλικές πλάκες οι οποίες μεταφέρουν τα κατακόρυφα φορτία ομοιόμορφα από την ανωδομή στην θεμελίωση και παράλληλα εξασφαλίζουν την σωστή σύνδεση μεταξύ αυτών των δύο. Τα εφεδράνα με πυρήνα από μόλυβδο χρησιμοποιούνται ευρέως καθώς παρουσιάζουν ευκαμψία στις σεισμικές δράσεις και παράλληλα δυσκαμψία σε κατακόρυφες φορτίσεις.

3.2.1.4 Εφεδράνα εκκρεμούς τριβής

Τα συστήματα αυτά παραλαμβάνουν το φορτίο της κατασκευής σε εφεδράνο που εγκαθίσταται σε μια επιφάνεια με μικρό συντελεστή τριβής. Τα εφεδράνα δεν επιτρέπουν την μετάδοση του σεισμικού φορτίου στην ανωδομή πάρα μόνο όταν η οριζόντια φόρτιση ξεπεράσει το μέγεθος σχεδιασμού. Ο καθορισμός της τριβής μεταξύ των επιφανειών αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Τα συστήματα αυτά βασίζονται στην φιλοσοφία του εκκρεμούς για την επαύξηση της περιόδου της μονωμένης κατασκευής. Η κεκλιμένη επιφάνεια αποσκοπεί στην επαναφορά της κατασκευής στην αρχική της θέση μέσω της δύναμης επαναφοράς που δημιουργείται από εκτροπή της κατασκευής από την αρχική της θέση. Επίσης η ακτίνα καμπυλότητας επηρεάζει τη δυσκαμψία του μονωτήρα. Τέλος, η τριβή μεταξύ των επιφανειών προσδίδει αντίσταση τριβής και σε συνδυασμό με την δύναμη επαναφοράς συντελούν στην απόσβεση της σεισμικής ενέργειας.



Εικ. 46 Εφεδράνο διπλού εκκρεμούς τριβής

3.2.2 Συσκευές απόσβεσης ενέργειας

Οι συσκευές απόσβεσης ενέργειας αποτελούν μηχανισμούς οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να ελαττώνουν εκθετικά το πλάτος μιας ταλάντωσης έως ότου αυτό να μηδενιστεί. Τέτοιες συσκευές συναντιούνται καθημερινά, όπως στα αμορτισέρ των αυτοκινήτων, αναρτήσεις ποδηλάτων κλπ. Οι αποσβεστήρες μετατρέπουν την εισερχόμενη στο σύστημα μηχανική ενέργεια σε θερμότητα. Στην περίπτωση των δομημάτων οι συσκευές αυτές μετατρέποντας την εισερχόμενη σεισμική ενέργεια σε

θερμότητα μειώνοντας τον κίνδυνο υπερφόρτωσης της κατασκευής από δυνάμεις στην οριζόντια διεύθυνση αποφεύγοντας οποιοδήποτε πιθανότητα μερικής ή ολικής κατάρρευσης.



Εικ. 47 Αμορτισέρ αυτοκινήτου

Οι συσκευές οι οποίες αποσβένουν οριζόντιες δράσεις που προέρχονται από ένα σεισμό ή ισχυρό άνεμο ποικίλουν και χωρίζονται σε κατηγορίες. Για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης λαμβάνονται υπόψη κάποιοι παράγοντες όπως είναι η ίδια η κατασκευή και η σημαντικότητα της, η σεισμικότητα της περιοχής ή τα φορτία ανεμοπίεσης που δέχεται καθώς το κόστος συντήρησης και εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος. Ορισμένος φορές βέβαια μπορεί να μην αρκεί ο μηχανισμός αυτούσιος, σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να γίνει και συνδυασμός μηχανισμών οι οποίοι σαν σύνολο να εξυπηρετούν καλύτερα προς την πλευρά της ασφάλειας.

Οι συσκευές απόσβεσης ενέργειας κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες ως εξής:

- Αποσβεστήρες ιξώδους και ιξοελαστικοί αποσβεστήρες
- Αποσβεστήρες τριβής
- Μεταλλικοί αποσβεστήρες
- Δυναμικοί αποσβεστήρες
 - Συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας (TMD)
 - Αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας ρευστού (TLD)
 - Αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας εκκρεμούς (PTMD)
 - Αποσβεστήρες σωματιδίων (PD)

Αποσβεστήρες Ιξώδους

Οι αποσβεστήρες ιξώδους αποτελούνται από έναν κύλινδρο που στο εσωτερικό φέρει ένα πιστόνι με οπές το οποίο κινείται διάμεσου του κυλίνδρου. Το πιστόνι περικλείεται από ένα ιξώδες ρευστό, έτσι με την κίνηση του πιστονιού δημιουργούνται μεγάλες πιέσεις στην πάνω μεριά του κυλίνδρου και χαμηλές στις κάτω. Με την διαφορά πιέσεων ανάντη και κατάντη δημιουργούνται υψηλές

ταχύτητες στο ιξώδες ρευστό με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων τριβής μεταξύ του ρευστού και του πιστονιού.



Εικ. 48 Αποσβεστήρες Ιξώδους

Με την αντίσταση της δύναμης τριβής η επαγόμενη στο σύστημα σεισμική ενέργεια διαχέεται με την μορφή θερμότητας.

Η εξίσωση που περιγράφει την συμπεριφορά μιας τέτοιας διάταξης προέκυψε από πειραματικές δοκιμές το 1997 από τους Seleemah και Constantinou:

$$P(t) = C|\dot{u}(t)|^a \operatorname{sgn}[\dot{u}(t)]$$

όπου:

$P(t)$: η δύναμη που αναπτύσσεται στον αποσβεστήρα

$U(t)$: η μετατόπιση του αποσβεστήρα

C : ο συντελεστής απόσβεσης

a : εκθέτης που είναι σε συνάρτηση με τον σχεδιασμό της κεφαλής του πιστονιού (τιμές 0.3 – 1.0)

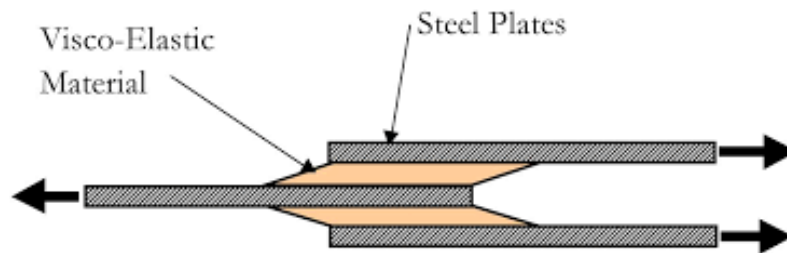
sgn : συνάρτηση signum της ταχύτητας του αποσβεστήρα

Οι αποσβεστήρες αυτοί εκμεταλλεύονται τις μηχανικές ιδιότητες των ρευστών όμως θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τον σχεδιασμό γιατί εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα διέγερσης. Η οποιαδήποτε μεταβολή της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεάσει την συμπεριφορά του αποσβεστήρα. Επίσης θα πρέπει να γίνεται τακτική συντήρηση καθώς υπάρχει η πιθανότητα διαρροής του ιξώδους ρευστού.

Ιξοελαστικοί αποσβεστήρες

Οι ιξοελαστικοί αποσβεστήρες είχαν ως αρχική χρήση της παραλαβή πλευρικών φορτίσεων όπως είναι ο άνεμος αλλά πλέον η χρήση τους είναι διαδεδομένη και στον τομέα του αντισεισμικού σχεδιασμού. Σε αυτή τη περίπτωση η διάχυση της εισερχόμενης σεισμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της παραμόρφωσης του ιξοελαστικού υλικού το οποίο υπόκειται σε διάτμηση. Το υλικό τοποθετείται διαμέσου μεταλλικών πλακών και αποτελείται συνήθως από πολυμερή. Κατά την κίνηση της κατασκευής, στην διάταξη του αποσβεστήρα, δημιουργούνται διατμητικές δυνάμεις που οφείλονται στην κίνηση των μεταλλικών πλακών τις οποίες συγκρατεί κατά κάποιον τρόπο το

ιξοελαστικό υλικό μέσω του δυναμικού ιξώδους και της ελαστικότητας των πολυμερών. Κατά αυτόν τον τρόπο παράγεται θερμότητα με την οποία διαχέεται η σεισμική ενέργεια.



Εικ. 49 Ιξοελαστικός αποσβεστήρας

Το μοντέλο του Kelvin περιγράφει την συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος με την προϋπόθεση σταθερών συνθηκών:

$$P(t) = Ku(t) + C\dot{u}(t)$$

όπου:

$P(t)$: η δύναμη που αναπτύσσεται στον αποσβεστήρα

K : η δυσκαμψία του αποσβεστήρα

C : ο συντελεστής απόσβεσης

$\dot{u}(t)$: η ταχύτητα του αποσβεστήρα

Το μειονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι ο περιορισμός της παραμόρφωσης που μπορούν να δεχθούν καθώς υπάρχει κίνδυνος να αποκολληθούν οι μεταλλικές πλάκες από το ιξοελαστικό υλικό.

Αποσβεστήρες τριβής

Η φιλοσοφία των συστημάτων αυτών βασίζεται στο φαινόμενο της τριβής. Αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες οι οποίες είναι καλά συνδεδεμένες μεταξύ τους με κοχλίες. Κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος αυτές οι πλάκες έχουν την τάση να ολισθαίνουν και ως αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάπτυξη τριβής ανάμεσα στην διεπιφάνεια των μεταλλικών πλακών αλλά και μεταξύ κοχλιών και μεταλλικών πλακών και κατά συνέπεια γίνεται διάχυση της σεισμικής ενέργειας ως θερμότητα. Πέραν της απόσβεσης σε έναν σεισμό προσδίδουν και δυσκαμψία.

Από έρευνες έχει προκύψει πως η συμπεριφορά των αποσβεστήρων τριβής περιγράφεται από το μοντέλο Coulomb της τριβής:

$$P(t) = \mu N \operatorname{sgn}(\dot{u})$$

Όπου:

μ : συντελεστής τριβής ολίσθησης

N : δύναμη που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια ολίσθησης

Οι αποσβεστήρες τριβής αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες όπως προαναφέρθηκε, αυτό σημαίνει πως είναι αρκετά «ευαίσθητοι» σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Συγκεκριμένα, σε μια θερμή περίοδο που οι μεταλλικές πλάκες διαστέλλονται, η συμπεριφορά του αποσβεστήρα επηρεάζεται στην περίπτωση ενός σεισμικού γεγονότος.



Εικ. 50 Αποσβεστήρας τριβής σε υφιστάμενο κτίριο

Μεταλλικοί αποσβεστήρες

Οι μεταλλικοί αποσβεστήρες είναι μια οικονομική λύση διάχυσης της σεισμικής ενέργειας μέσω της κάμψης και της στρέψης των μεταλλικών στοιχείων. Τα συστήματα αυτά εκμεταλλεύονται την συμπεριφορά των μεταλλικών στοιχείων όταν δέχονται παραμορφώσεις στην ανελαστική ζώνη. Οπότε σε μεγάλους σεισμούς δεχόμενοι μικρές παραμορφώσεις αποσβένουν ένα μέρος της εισερχόμενης στο σύστημα ενέργειας μειώνοντας έτσι αρκετά την κίνηση της ανωδομής, αυξάνοντας την ποιότητα ζωής.

Η συμπεριφορά των αποσβεστήρων περιγράφεται από το μοντέλο Bouc – Wen (1976) το οποίο έχει προκύψει από διάφορες έρευνες που βασιζόντουσαν στην συμπεριφορά των μετάλλων μετά τη διαρροή.

$$P(t) = \beta Ku(t) + (1 - \beta)Ku_y Z(t)$$

Όπου:

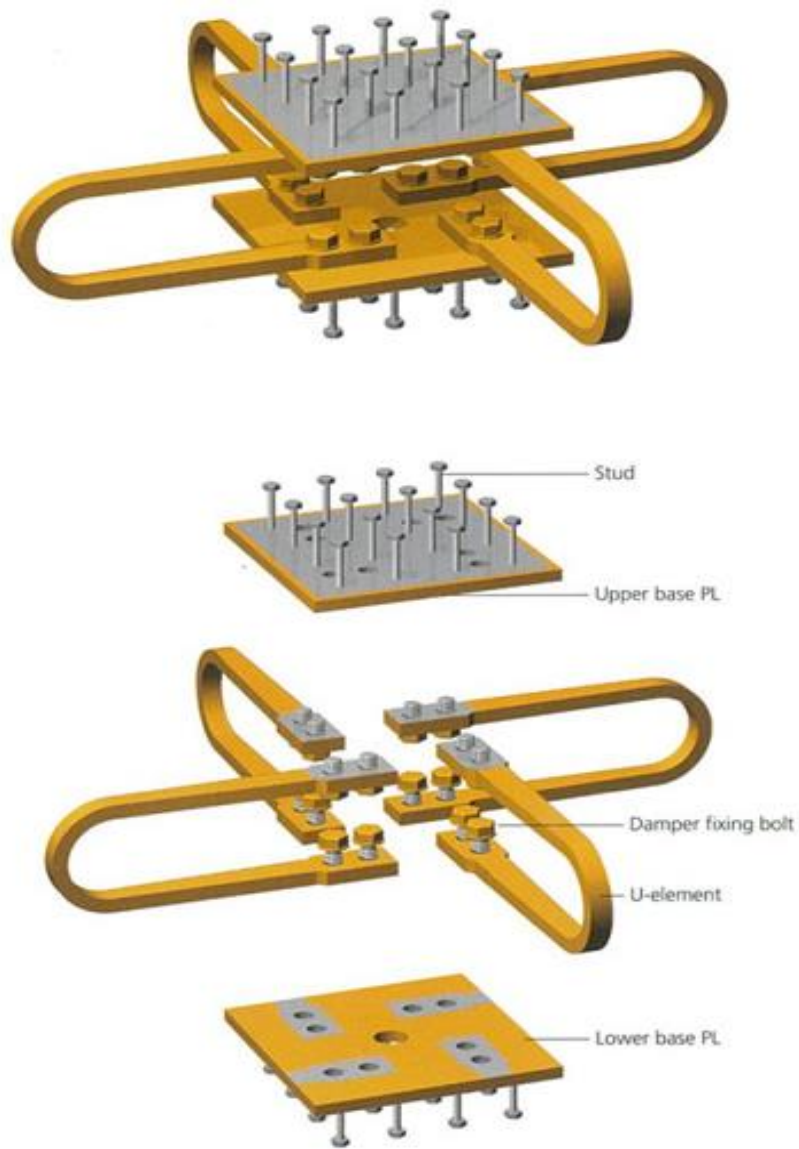
β : ο λόγος δυσκαμψίας μετά και πριν τη διαρροή του μετάλλου

K : δυσκαμψία πριν τη διαρροή

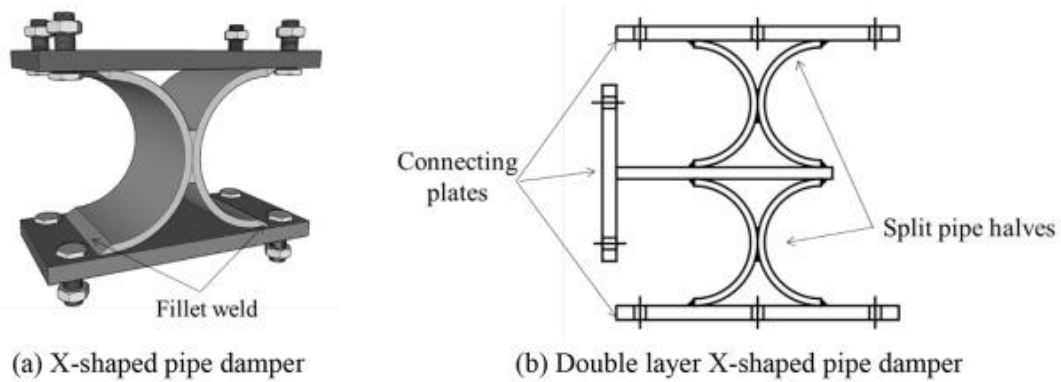
u_y : μετακίνηση διαρροής

Z : εξελικτική μεταβλητή ($u_y \dot{Z}(t) + \gamma |u(t)| |Z(t)| |Z(t)|^{\delta-1} + \eta \dot{u}(t) |Z(t)|^\delta - \dot{u}(t) = 0$)

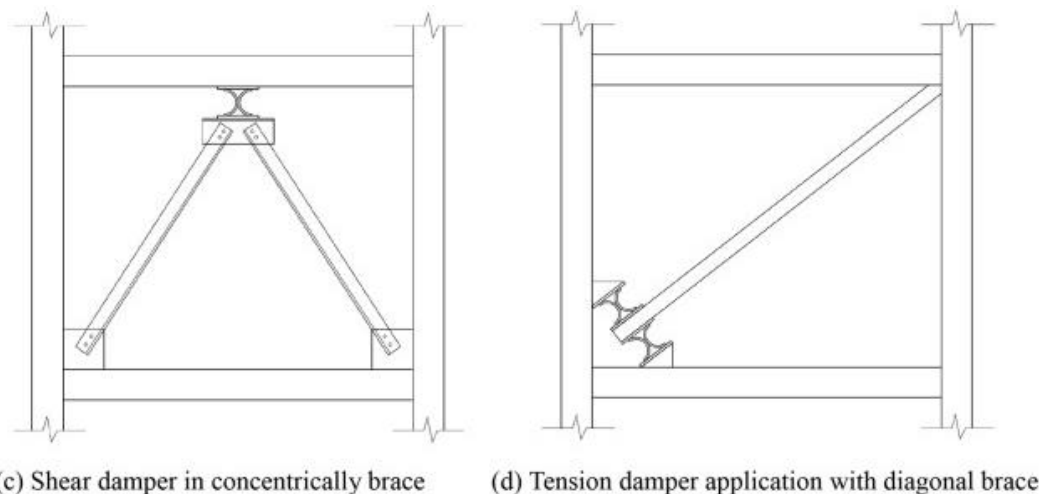
Οι μεταλλικοί αποσβεστήρες χωρίζονται κυρίως σε δύο τύπους, σε μεταλλικές πλάκες μορφής «X» ή τριγωνικής μορφής. Βέβαια έχουν αναπτυχθεί συστήματα τα οποία χαρακτηρίζονται ως έξυπνα μιας και μετά από τη παραμόρφωση επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση με τη χρήση θερμότητας, αυτά ονομάζονται Shape Memory Alloys.



Εικ. 51 Μεταλλικός αποσβεστήρας τύπου «U»



Εικ. 52 Μεταλλικοί αποσβεστήρες α) Τύπου «X», β) Τύπου διπλό «X»



Εικ. 53 Μεταλλικοί αποσβεστήρες, c) Τριγωνικού τύπου, d) Εφελκυσμού σε συνδυασμό με τύπου «X»

Δυναμικοί αποσβεστήρες

Αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (TMD)

Οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας χρησιμοποιούνται κυρίως σε ουρανοξύστες για την αύξηση της ποιότητας ζωής με την μείωση των ανεμοπιέσεων. Αποτελούνται από μια μάζα και ένα ελατήριο τα οποία προσαρτώνται στην κατασκευή με σκοπό να μεταφέρουν την ιδιοσυχνότητα της σε μεγαλύτερες συχνότητες για την αποφυγή κάθε ενδεχόμενο συντονισμού. Τα συστήματα αυτά έχουν σταθερά χαρακτηριστικά συχνότητας και απόσβεσης και μπορούν να συντονιστούν μόνο για μια συχνότητα, συνήθως την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής. Είναι αποτελεσματικά για περιπτώσεις που η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής υπερिशύει της απόκρισης της.

Οι TMD's δεν είναι τόσο εύπιστοι για ιδιαίτερες κατασκευές οι οποίες υπόκεινται σε ισχυρές σεισμικές δονήσεις όταν πολλές διαφορετικές παράμετροι συμβάλουν στην απόκριση της κατασκευής. Επίσης το γεγονός ότι συντονίζονται για μια συχνότητα, αυτή της κατασκευής, έχει το μειονέκτημα ότι δεν παρουσιάζει πλεονέκτημα για κάποιους σεισμούς όπως αυτόν που συνέβη Hanshin τον Ιανουάριο του 1997 (Kobe). Βέβαια αυτό το εμπόδιο έχει ξεπεραστεί τα τελευταία χρόνια με την χρήση πολλαπλών TMD's ή ακόμη και συνδυασμό TMD's με άλλα συστήματα όπως αυτά που προαναφέρθηκαν.

Στην περίπτωση που η εισερχόμενη στο σύστημα συχνότητα ισούται με μια από τις δυο θεμελιώδεις συχνότητες του συνολικού συστήματος, τότε θα πρέπει να γίνει προσθήκη απόσβεσης μεταξύ αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας και κατασκευής.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας για σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας:

Πρωταρχική κατασκευή

$$(1 + \mu)\ddot{x} + 2\xi_s\omega_s\dot{x} + \omega_s^2x = \frac{p}{m_d} - \mu\ddot{u}$$

Σύστημα TMD

$$\ddot{u} + 2\xi_d\omega_d\dot{u} + \omega_d^2u = -\ddot{x}$$

$$\mu = \frac{m_d}{m_s}$$

$$\omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s}$$

$$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d}$$

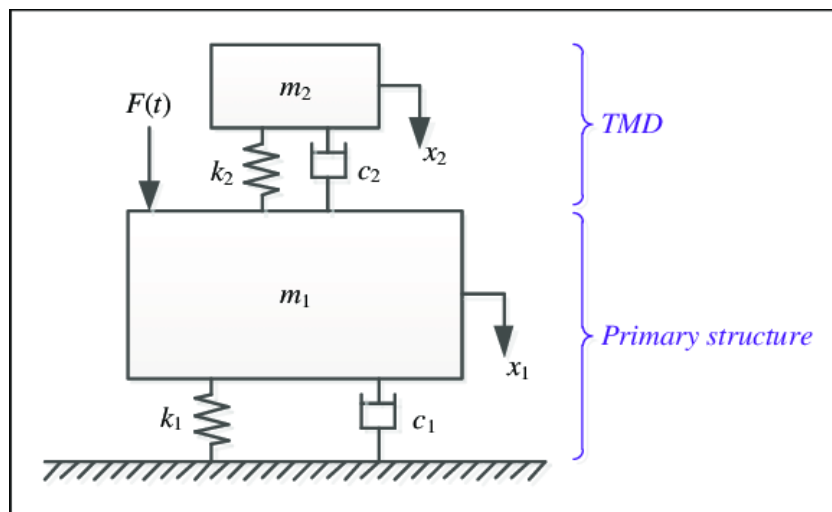
$$\xi_d = \frac{c_d}{2\omega_d m_d}$$

$$\xi_s = \frac{c_s}{2\omega_s m_s}$$

$$\gamma = \frac{\omega_d}{\omega_s}$$

Όπου:

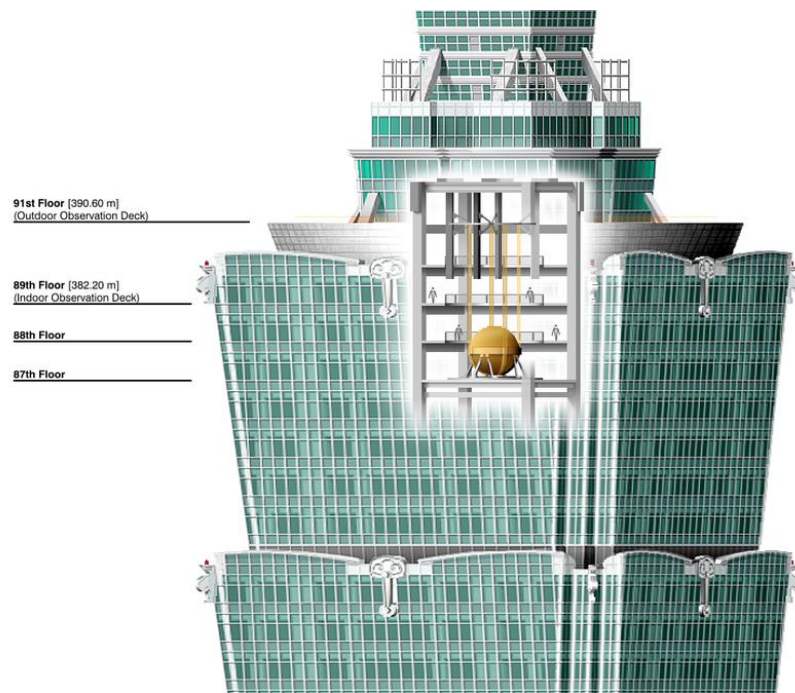
μ η αναλογία μάζας του αποσβεστήρα m_d προς την μάζα της αρχικής κατασκευής m_s , k_s και c_s η δυσκαμψία και ο συντελεστής απόσβεσης της κατασκευής αντίστοιχα, k_d και c_d η δυσκαμψία και ο συντελεστής απόσβεσης του αποσβεστήρα αντίστοιχα, ξ_s ο λόγος απόσβεσης της κατασκευής, ξ_d ο λόγος απόσβεσης του συστήματος TMD, γ ο λόγος συχνότητας του συστήματος TMD (ω_d) προς της συχνότητα της πρωταρχικής κατασκευής (ω_s), x η μετακίνηση της κατασκευής, u η μετακίνηση του αποσβεστήρα, p η εξωτερική διέγερση που επιδρά στην αρχική κατασκευή.²



Εικ. 54 Σχηματική απεικόνιση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας σε συνδυασμό με απόσβεση (c_2)

² Tuned Mass Dampers, Mariantonieta Gutierrez Soto, Hojjat Adeli, 19 October 2013

Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας είναι ένας ουρανοξύστης στην Ταϊπέι της Ταϊβάν. Κατείχε τον τίτλο του ψηλότερου κτιρίου (508 μέτρα) στον κόσμο από το 2004 έως το 2009. Η Rowan Williams Davies & Irwin Inc. σχεδίασε το σύστημα το οποίο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα 660 μετρικών τόνων και διαμέτρου 5.5 μέτρων.



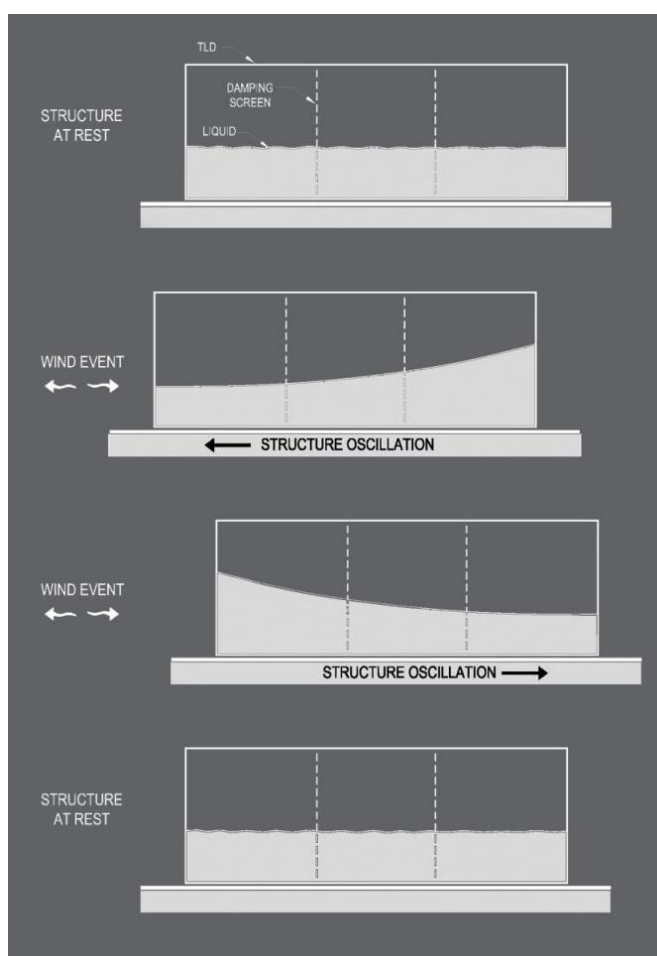
Εικ. 55 Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας, Ταπει 101



Εικ. 56 Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας, Ταπει 101

Αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας ρευστού

Οι αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας ρευστού μειώνουν την κίνηση της κατασκευής μέσω μιας ταλαντούμενης μάζας ρευστού χρησιμοποιώντας τις αρχές του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας. Οι αποσβεστήρες ρευστού χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από έναν τύπο δεξαμενής η οποία χωρίζεται με διαφράγματα δημιουργώντας έτσι πολλά διαμερίσματα στον αποσβεστήρα. Σε κάθε διαμέρισμα τοποθετείται ρευστό, το οποίο κατά τη διάρκεια ενός σεισμού συγκρούεται με τα τοιχώματα, μειώνοντας έτσι την εισερχόμενη σεισμική ενέργεια. Η δεύτερη κατηγορία (Tuned Liquid Column Damper, TLCD), αναφέρεται σε ένα σύστημα του οποίου το ρευστό τοποθετείται σε μια διάταξη σχήματος «U». Κατά την διάρκεια του σεισμού το ρευστό ταλαντεύεται στην διάταξη, μειώνοντας έτσι την απόκριση της κατασκευής σημαντικά, η διάταξη και η κίνηση του ρευστού θυμίζει το φυσικό εκκρεμές. Ωστόσο τα TLCD's δεν αποτελούν πρόσφατη ανακάλυψη μιας και είχαν χρησιμοποιηθεί σε πλοία για την αποφυγή ανατροπής αυτών σε δύσκολες καιρικές συνθήκες.



Εικ. 57 Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας ρευστού

Η αποτελεσματικότητα των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας ρευστού αυξάνεται όταν χρησιμοποιηθούν πολλά συστήματα μαζί (Multiple Tuned Liquid Dampers, MTLCD's). Αξίζει να σημειωθεί πως αυτά τα συστήματα έχουν το πλεονέκτημα χαμηλού κόστους συντήρησης αλλά και εγκατάστασης σε σύγκριση με αυτό των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας TMD's.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας ρευστού για σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας:

Πρωταρχική κατασκευή

$$(m_s + \rho A(L_h + L_v))\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_s x = p - \frac{L_h}{L_v} \rho A(L_h + L_v)\ddot{u}$$

Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας ρευστού

$$\rho A(L_h + L_v)\ddot{u} + \frac{\rho A \zeta}{2} |\dot{u}| \dot{u} + 2g\rho A u = \mu p - \frac{L_h}{L_v} \rho A(L_h + L_v)\ddot{x}$$

όπου: ρ η πυκνότητα του ρευστού, A η επιφάνεια εγκάρσιας τομής, ζ ο συντελεστής απώλειας πιεζομετρικής πίεσης, L_h και L_v οριζόντια και κατακόρυφα μήκη αντίστοιχα. Η μάζα και η απόσβεση του συστήματος ορίζονται από,

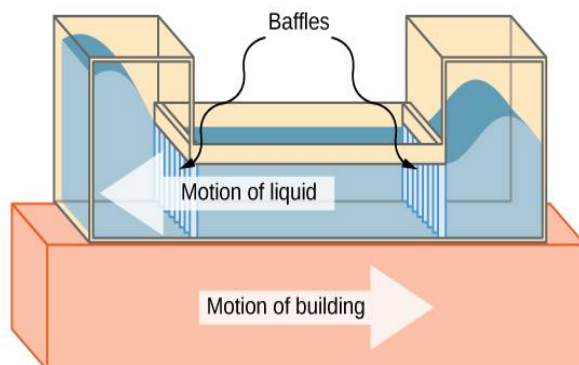
$$m_T = \rho A(L_h + L_v)$$

$$c_T = \frac{\rho A \zeta}{2} |\dot{u}|$$

Παράδειγμα χρήσης ενός συστήματος TLCD είναι το Comcast Building στην Φιλαδέλφεια της Πενσυλβανίας ύψους περίπου 305 μέτρων. Το σχήμα της δεξαμενής «U» επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση του ρευστού μέσα σε αυτή σε συχνότητα η οποία είναι ίδια με αυτή του κτιρίου. Το ποσοστό απόσβεση καθορίζεται από την θραύση του ρευστού στα διάφραγμα (baffles).



(a)



(b)

Εικ. 58 TLCD, Comcast Building Φιλαδέλφεια

Αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας εκκρεμούς

Για την εγκατάσταση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας απαιτείται μια μεγάλη μάζα η οποία προσαρτάται την κατασκευή. Αυτό προϋποθέτει αρκετό ελεύθερο χώρο, δημιουργώντας έτσι αρχιτεκτονικούς περιορισμούς πράγμα το οποίο σημαίνει πως η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος είναι αρκετά δύσκολη. Η διάταξη είναι όμοια με αυτή του φυσικού εκκρεμούς. Όταν το κτίριο ταλαντεύεται η διάταξη δημιουργεί αντίρροπες δυνάμεις.

Η συχνότητα του συστήματος προσαρμόζεται με βάση τη μάζα του αποσβεστήρα m_d και το μήκος του καλωδίου προσάρτησης της μάζας L . Η χρήση του καλωδίου στο οποίο προσαρτάται ο TMD είναι αρκετά επωφελής σε πολυώροφα κτίρια καθώς η συχνότητα του συστήματος μπορεί να αλλάξει πολύ εύκολα προσαρμόζοντας το μήκος του εκκρεμούς.³

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εκκρεμούς για σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας:

Πρωταρχική κατασκευή

$$(1 + \mu)\ddot{x} + 2\xi_s\omega_s\dot{x} + \omega_s^2x = \frac{p}{m_d} - \mu\ddot{u}$$

Με συνθήκη ότι η γωνία εκτροπής $\theta \leq 10^\circ$, τότε προκύπτει $u = L \sin \theta \approx L\theta$ και η τάση η οποία αναπτύσσεται στο καλώδιο προσάρτησης ισούται $T = m_d g$ και η εξίσωση του αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας εκκρεμούς :

$$m_d\ddot{u} + \frac{m_d g}{L}(u) = -m_d\ddot{x}$$

όπου η δυσκαμψία του καλωδίου προσάρτησης της μάζας ισούται :

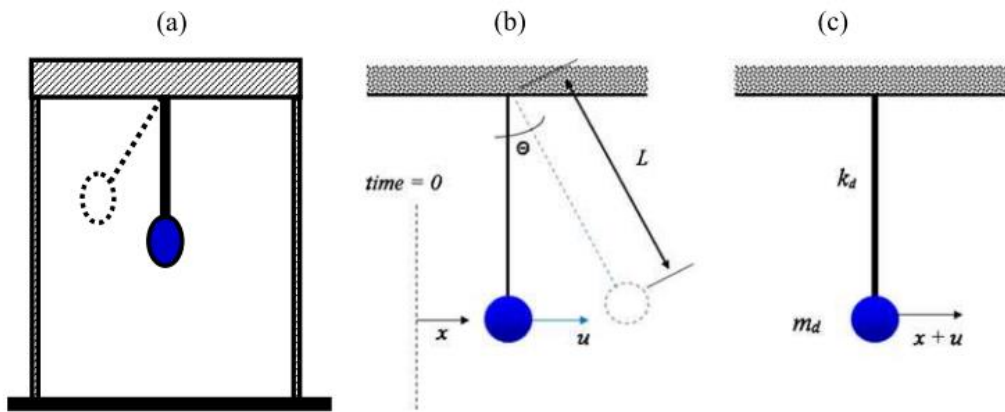
$$k_d = \frac{m_d g}{L}$$

με m_d η μάζα του αποσβεστήρα και L το μήκος προσάρτησής του

Η ιδιοσυχνότητα λαμβάνεται ως :

$$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d} = \frac{g}{L}$$

³ Tuned Mass Dampers, Mariantonieta Gutierrez Soto, Hojjat Adeli, 19 October 2013



Εικ. 59 Αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας εκκρεμούς

Ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας εκκρεμούς έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές κατασκευές, όπως στον «Κρυστάλλινο πύργο» στην Ιαπωνία. Πρόκειται για έναν ουρανοξύστη το οποίο αποτελείται από 37 ορόφους, ύψους 150 μέτρων. Το σύστημα τοποθετήθηκε στην κατασκευή για την μείωση της κίνησης που προέρχεται από ανεμοπιέσεις με αποδοτικότητα έως και 50%. Στο κτίριο υπάρχουν δύο αποσβεστήρες βάρους 180 και 360 τόνων στον τελευταίο όροφο του.



Εικ. 60 Crystal Tower, Οσάκα, Ιαπωνία

Αποσβεστήρες σωματιδίων

Η έννοια της απόσβεσης με την χρήση σωματιδίων μπορεί να εντοπιστεί το 1937 όταν ο Paget Thomson μελετούσε την μείωση κραδασμών στα πτερύγια τουρμπινών. Κατά την διάρκεια αυτής της μελέτης εφηύρε τον πρώτο αποσβεστήρα κρούσης. Ο αποσβεστήρας αυτός αποτελούταν μόνο από μια μάζα, πράγμα το οποίο σημαίνει πως η διάταξη ήταν αρκετά θορυβώδης κατά τη διάρκεια της διέγερσης και παράλληλα αναπτύσσονταν μεγάλες δυνάμεις κρούσης. Το 1945 οι Lieber και Jensen πρότειναν την ιδέα να χρησιμοποιηθεί μια μάζα μεταξύ δύο τοιχωμάτων για να εξαλειφθούν οι κραδασμοί των μηχανικών συστημάτων, που οδήγησε στην εξέλιξη του αποσβεστήρα κρούσης. Η χρήση βέβαια μιας μάζας, εμφάνισε αρκετά προβλήματα στην πορεία με αποτέλεσμα οι επόμενοι ερευνητές να αντικαταστήσουν τη μια μάζα με πολλές μικρότερες μάζας, οι οποίες θα ισοδυναμούν με το βάρος της αρχικής συνολικής μάζας. Ως αποτέλεσμα προέκυψε ο αποσβεστήρας κρούσης σωματιδίων.⁴

Οι αποσβεστήρες σωματιδίων αποτελούνται από ένα κενό δοχείο στο οποίο τοποθετούνται μεταλλικά σωματίδια. Το δοχείο τοποθετείται στην κατασκευή και συνήθως στο υψηλότερο δυνατό σημείο της. Το κενό δοχείο είναι στενά συνδεδεμένο με την κατασκευή. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανταλλαγή ορμής και απόσβεσης ενέργειας. Κατά την διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης τα σωματίδια συγκρούονται μεταξύ τους αλλά και με τα τοιχώματα του δοχείου. Με την κρούσης παράγεται θερμότητα με αποτέλεσμα την εκτόνωση της επαγόμενης στο σύστημα σεισμικής ενέργειας.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν έναν αποσβεστήρα σωματιδίου για σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας⁵:

Πρωταρχική κατασκευή:

$$\ddot{x}(t) + 2\omega\zeta\dot{x}(t) + \omega^2x(t) = \ddot{x}_g \quad (1)$$

όπου:

M : η μάζα του πρωταρχικού συστήματος

$x(t)$: η μετακίνηση της σχετικής μάζας σε σχέση με την βάση

$y(t)$: η μετακίνηση της σχετικής μάζας των σωματιδίων σε σχέση με την βάση

\ddot{x}_g : η επιτάχυνση του εδάφους

ζ : το ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης

ω : ιδιοσυχνότητα

Η κίνηση του συστήματος κατά την διάρκεια της διέγερσης πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω εξίσωση:

$$M\dot{x}_b + m^*\dot{y}_b = M\dot{x}_a + m^*\dot{y}_a \quad (2)$$

όπου:

m^* : η μάζα του σωματιδίου

\dot{x}_b : η ταχύτητα της μάζας του πρωταρχικού συστήματος πριν την διέγερση

\dot{y}_a : η ταχύτητα του σωματιδίου πριν την διέγερση

⁴ Particle impact dampers: Past, present, and future Zheng Lu1,2 | Zixin Wang2 | Sami F. Masri3 | Xilin Lu1,2

⁵ Analytical and experimental studies of particle dampers by Angeliki Papalou, Ph.D. Thesis

\dot{x}_a : η ταχύτητα της μάζας του πρωταρχικού συστήματος μετά την διέγερση
 \dot{y}_b : η ταχύτητα του σωματιδίου μετά την διέγερση

Με βάση τον λόγο τελικής προς αρχικής ταχύτητας προκύπτει:

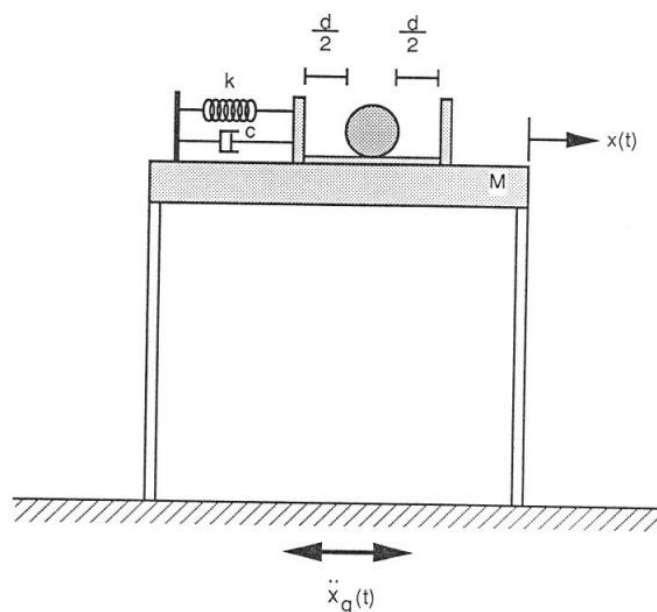
$$e = \frac{\dot{x}_a - \dot{y}_a}{\dot{y}_b - \dot{x}_b}$$

Από τις εξισώσεις (1) και (2) προκύπτει

$$\dot{x}_a = \frac{(1 - \mu^* e)\dot{x}_b + \mu^*(1 + e)\dot{y}_b}{1 + \mu^*}$$

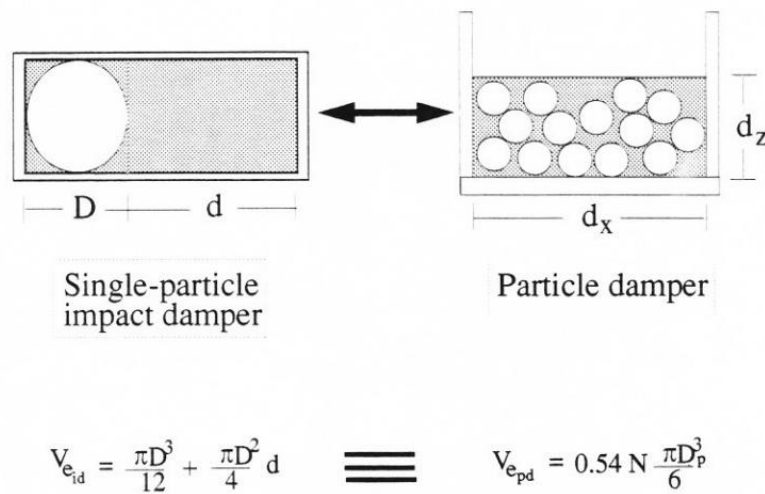
$$\dot{y}_a = \frac{(1 - e)\dot{x}_b + (\mu^* - e)\dot{y}_b}{1 + \mu^*}$$

όπου: μ^* : η αναλογία μάζας αποσβεστήρα προς μάζας πρωταρχικής κατασκευής (m^*/M)



Εικ. 61 Αποσβεστήρας μάζας σωματιδίου (Analytical and experimental studies of particle dampers by Angeliki Papalou, Ph.D. Thesis)

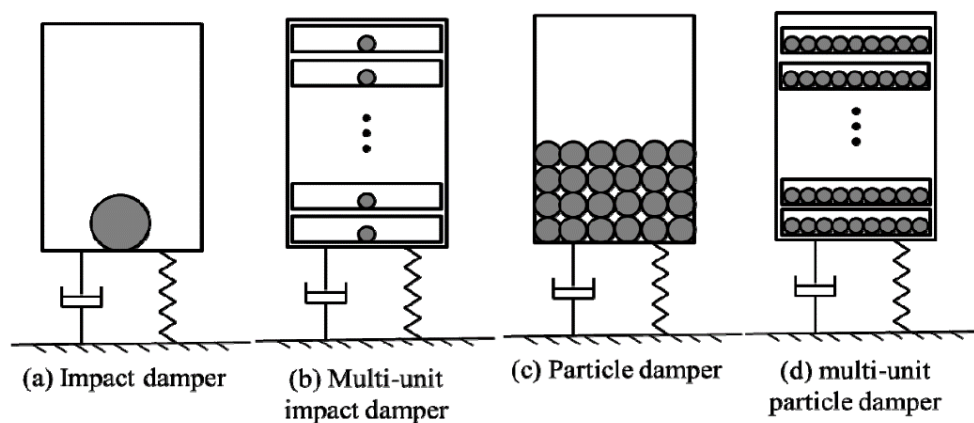
Το ισοδύναμο σύστημα αποσβεστήρα μάζας σωματιδίων περιγράφεται από το παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Εικ. 62 Σχέση μεταξύ αποσβεστήρα μάζας σωματιδίου και αποσβεστήρα μάζας σωματιδίων (Analytical and experimental studies of particle dampers by Angeliki Papalou, Ph.D. Thesis)

Με βάση τις αρχικές κατηγορίες αποσβεστήρα σωματιδίων έχουν εξελιχθεί διάφορες παραλλαγές και συνδυασμοί του συστήματος αυτού. Κάθε παραλλαγή του αρχικού συστήματος αποτελείται από τα δικά της χαρακτηριστικά ούτως ώστε να μπορεί να γίνει κατάλληλη επιλογή με βάση τις μηχανικές απαιτήσεις στην κάθε περίπτωση. Οι βασικές κατηγορίες αποσβεστήρα σωματιδίων χωρίζονται σε τέσσερις περιπτώσεις:

- Αποσβεστήρας ενός σωματιδίου
- Χρήση πολλαπλών αποσβεστήρων ενός σωματιδίου στην ίδια κατασκευή
- Αποσβεστήρας σωματιδίων
- Χρήση πολλαπλών αποσβεστήρων σωματιδίων στην ίδια κατασκευή



Εικ. 63 a) αποσβεστήρας σωματιδίου, b) πολλαπλή χρήση αποσβεστήρων ενός σωματιδίου, c) αποσβεστήρας σωματιδίων, d) πολλαπλή χρήση αποσβεστήρων σωματιδίων

Επίσης δοκιμές έχουν γίνει και για μοντέλα κίωνων με σκοπό την προστασία αρχαίων μνημείων από τις καταστροφές που μπορεί να επέλθουν λόγω σεισμού. Οι δοκιμές προσεγγίζουν το θέμα με την χρήση σωματιδίων από χάλυβα τα οποία τοποθετούνται σε κοίλο σφόνδυλο του οποίου τα τοιχώματα λειτουργούν ως τα τοιχώματα του αποσβεστήρα. Οι σφόνδυλοι αυτοί μπορεί να αντικατασταθούν στην αρχική κατασκευή σε σημεία του μνημείου τα οποία οι αρχικοί σφόνδυλοι είναι κατεστραμμένοι πλήρως ή λείπουν. Η διεξαγωγή των δοκιμών έδειξε πως με σωστό σχεδιασμό η απόκριση του μνημείου μπορεί να μειωθεί έως και 30%.⁶



Εικ. 64 Προστασία μνημείων από τον σεισμό με την χρήση αποσβεστήρα σωματιδίων σε σπονδυλωτούς κίονες (Α. Παπαλού)



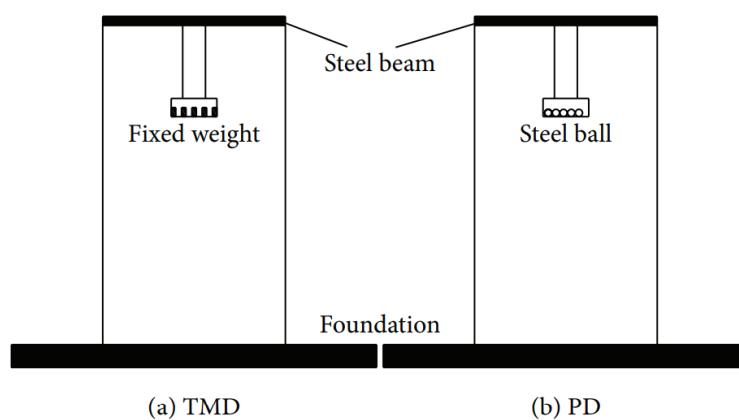
Εικ. 65 Προστασία μνημείων από τον σεισμό με την χρήση αποσβεστήρα σωματιδίων σε σπονδυλωτούς κίονες (Α. Παπαλού)

⁶ Seismic protection of monuments using particle dampers in multi-drum columns, A. Papalou , E. Strepelias , D. Roubien , S. Bousias , T. Triantafyllou

Ο συνδυασμός του αποσβεστήρα σωματιδίων με ήδη υπάρχοντα συστήματα αυξάνει την απόδοση του συστήματος σημαντικά. Η ιδέα της ενσωμάτωσης του αποσβεστήρα κρούσης με τον συντονισμένο αποσβεστήρα εισήχθη πρώτη φορά από τον Marsi το 1971. Οι ερευνητές έχουν εισάγει την τεχνολογία απόσβεσης σωματιδίων σε αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας (TMD's) προκειμένου να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα αυτών των δύο συστημάτων συνδυαστικά. Μέσω αυτού του συνδυασμού σχηματίζεται μια διάταξη η οποία καταλήγει σε ένα μη γραμμικό σύστημα διάχυσης της σεισμικής επαγόμενης στην κατασκευή ενέργειας το οποίο μπορεί να:

- Διευρύνει το εύρος απόσβεσης
- Ενισχύσει την σταθερότητα
- Ενισχύσει τα αποτελέσματα ελέγχου απόκρισης της κατασκευής

Το νέο σύστημα το οποίο προκύπτει ονομάζεται αποσβεστήρας σωματιδίων (PD, Particle Damper). Οι Lu et al. εισήγαγαν τον PD στο πεδίο ελέγχου πολυώροφων κατασκευών, με αρκετές δοκιμές κτιριακών μοντέλων που περιλάμβαναν σεισμική τράπεζα και τούνελ που ασκούσαν ανεμοπιέσεις. Κατά την διάρκεια των δοκιμών το σύστημα αναρτάται στο ψηλότερο τμήμα της αρχικής κατασκευής από τέσσερα σκέλη τα οποία έχουν ίδιο μήκος. Οι δοκιμές αυτές έδειξαν ότι ο αποσβεστήρας μάζας σωματιδίων έχει σημαντική επίδραση στην μείωση απόκρισης της κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος ή κατά την άσκηση ενός φορτίου ανεμοπίεσης.⁷



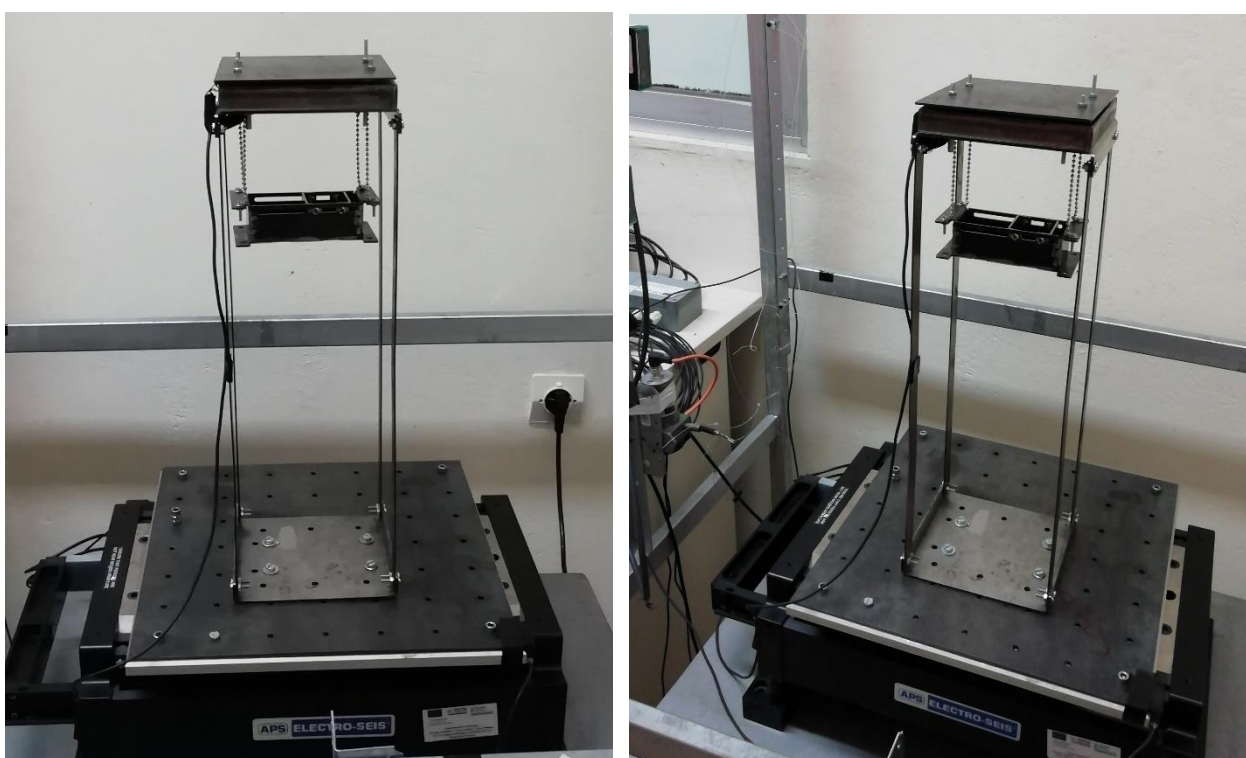
Εικ. 66 α) αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας, β) αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας σωματιδίων

⁷ Particle impact dampers: Past, present, and future Zheng Lu^{1,2} | Zixin Wang² | Sami F. Masri³ | Xilin Lu^{1,2}

Εργαστηριακές Δοκιμές

Εισαγωγικά στοιχεία πειράματος

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η μελέτη απόκρισης της κατασκευής για τυχαία διέγερση πριν και μετά την εφαρμογή αποσβεστήρα συντονισμένη μάζας σωματιδίων με την μορφή εκκρεμούς. Για την εξαγωγή των πειραμάτων έγινε χρήση ενός κτιριακού μοντέλου ενός βαθμού ελευθερίας το οποίο τοποθετήθηκε σε σεισμική τράπεζα με ικανότητα κίνησης σε μια διεύθυνση. Τα πειράματα τα οποία διεξάχθηκαν αφορούσαν ένα τυχηματικό σήμα το οποίο δοκιμάστηκε στη κατασκευή για τέσσερα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης. Οι πειραματικές διεργασίες διεξάχθηκαν με την άδεια της Δρ. Αγγελικής Παπαλού στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών κατά το εαρινό εξάμηνο 2021-2022.



Εικ. 67 Πειραματική Διάταξη

Η διάταξη για την πραγματοποίηση των πειραμάτων περιελάμβανε :

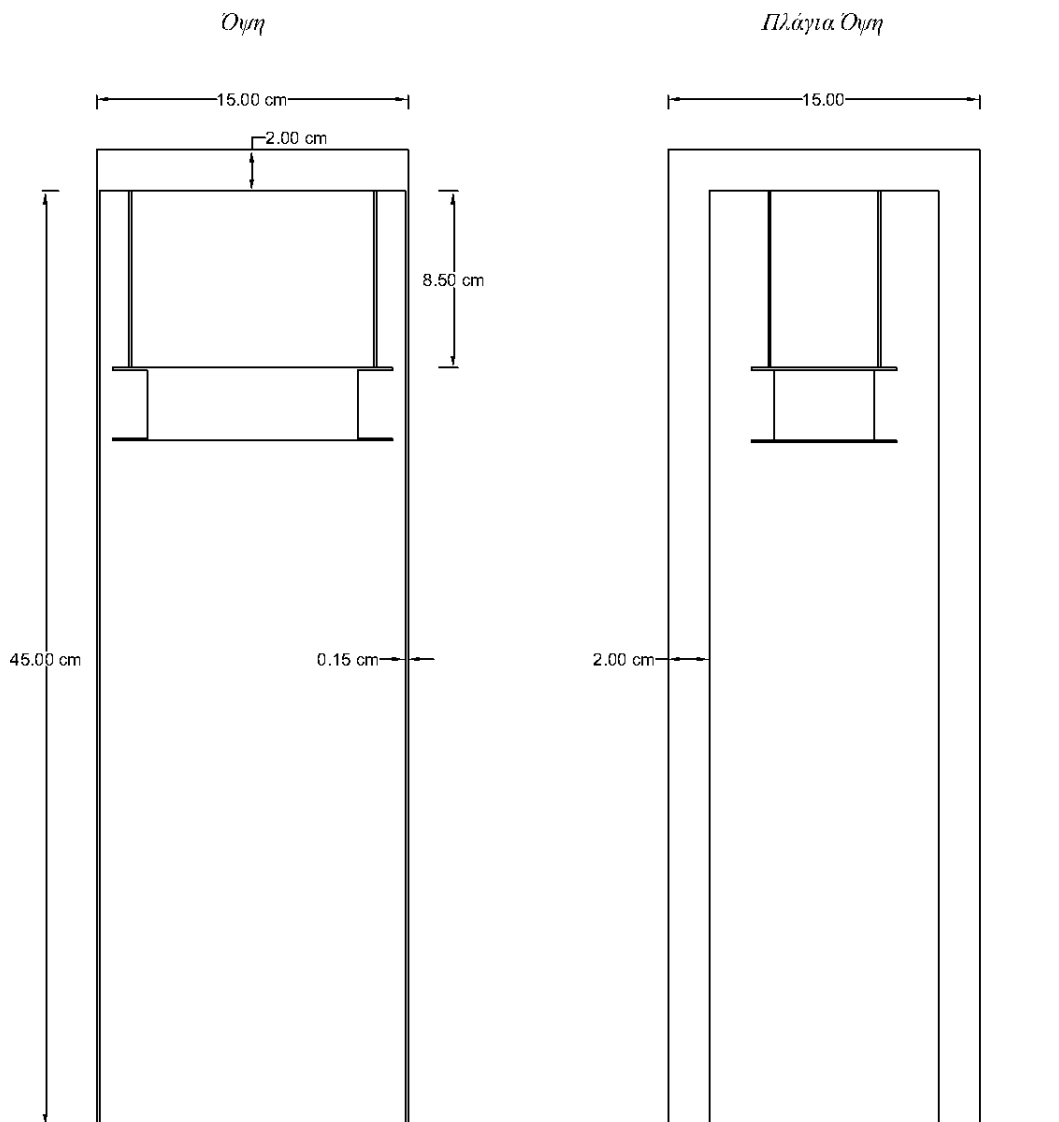
1. Κτιριακό μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας από χάλυβα
2. Σεισμική τράπεζα μικρών διαστάσεων
3. Όργανα καταγραφής μετακινήσεων του μοντέλου κορυφή του κτιριακού μοντέλου (laser)
4. Επιταχυνσιόμετρα τα οποία καταγράφουν την επιτάχυνση στην κορυφή και τη βάση
5. Όργανο καταγραφής μετακίνησης της σεισμικής βάσης (draw-wire) με την μορφή συρματόσχοινο
6. Σύστημα καταγραφής και μετάφρασης των δεδομένων που προκύπτουν από τις μετρήσεις των παραπάνω οργάνων (Data Acquisition System)

7. Υπολογιστικό σύστημα για την επεξεργασία δεδομένων. Συγκεκριμένα έγινε χρήση Η/Υ ο οποίος ήταν εξοπλισμένος με μαθηματικό πρόγραμμα επεξεργασίας, δοκιμαστική έκδοση MATLAB

Στοιχεία κτιριακού μοντέλου

Κατασκευή :

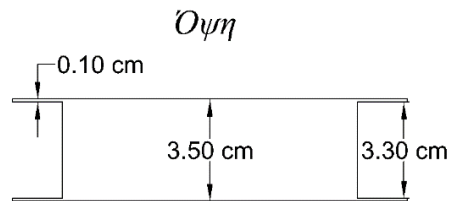
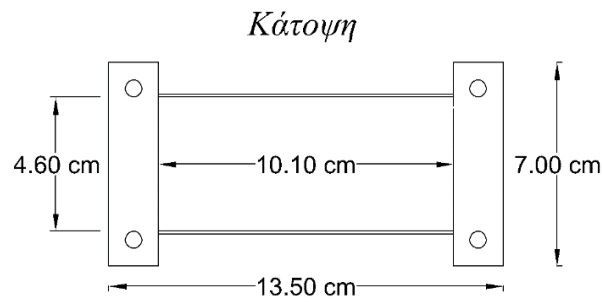
- ✚ Υποστυλώματα : 450*20*1.5 mm
- ✚ Πλάκα : 15*15*2 cm



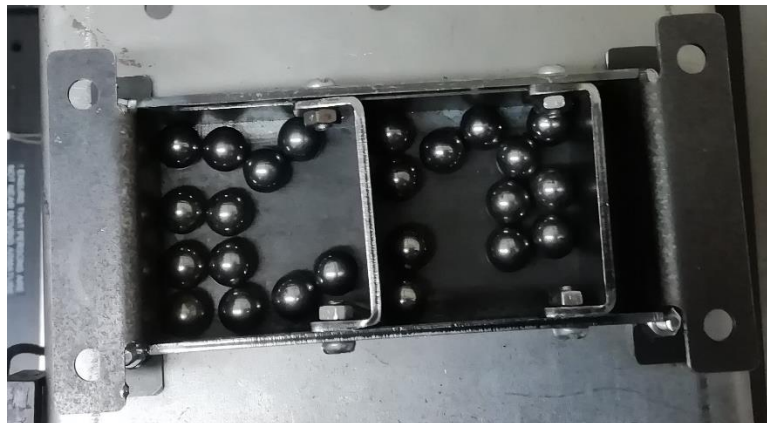
Σχήμα 1 Διαστασιολόγηση κτιριακού μοντέλου (cm)

Αποσβεστήρας :

- ✚ Εξωτερικές διαστάσεις : 13.5*7 cm
- ✚ Διαστάσεις διαμερίσματος : 10.1*4.6 cm



Σχήμα 2 Διαστασιολόγηση αποσβεστήρα σωματιδίων (cm)



Εικ. 68 Απεικόνιση αποσβεστήρα σε κάτοψη

Μάζες :

- ✚ Αποσβεστήρας, χωρίς σωματίδια : 336 gr.
- ✚ Υποστυλωμάτων : 416 gr.
- ✚ Συνολική μάζα κατασκευής : 4562 gr.
- ✚ Για σωματίδια στο δοχείου του αποσβεστήρα χρησιμοποιήθηκαν 24 σωματίδια χάλυβα, διαμέτρου 10mm. Το κάθε σωματίδιο χάλυβα ζυγίζει 4 gr. με τη συνολική μάζα σωματιδίων να είναι 96 gr.

Επιπρόσθετα στοιχεία :

- ✚ Πυκνότητα χάλυβα: $7852 \frac{kg}{m^3}$
- ✚ Μέτρο ελαστικότητας : 210 GPa.

Έλεγχος λυγισμού

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε λυγισμό για την επιλογή κατάλληλων υποστυλωμάτων για την διεξαγωγή των πειραματικών διεργασιών ούτως ώστε να αποφευχθεί η αστοχία της κατασκευής κατά την διάρκεια αυτών.

Αντοχή κατασκευής σε λυγισμό για χρήση υποστυλωμάτων πάχους 1 mm (Euler) :

$$\text{Εξίσωση Euler : } P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

$$\text{Ροπή αδράνειας : } I = \frac{0.001^3 * 0.02}{12} = 1.667 * 10^{-12} m^4$$

Για συνθήκες άρθρωση – άρθρωση $K=1$, τότε :

$$\text{Κρίσιμο φορτίο λυγισμού } P_{cr} = \frac{\pi^2 * 210 * 10^9 * 1.667 * 10^{-12}}{(1 * 0.45)^2} = \frac{17}{9.81} = 1.73 \text{ kg.}$$

Οπότε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού με χρήση υποστυλωμάτων πάχους 1 mm ισούται με 1.73 kg. Για το σύνολο των υποστυλωμάτων το κρίσιμο φορτίο λυγισμού ισούται με $P_{cr} = 6.93 \text{ kg}$.

Το φορτίο που δέχεται η κατασκευή ισούται :

$$P = 0.336 + 0.638 + \frac{0.416}{2} + 3.380 = 4.562 \text{ kg} = 44.75 \text{ N}$$

$$P_{cr} > P$$

Η κατασκευή με πάχος υποστυλωμάτων 1 mm αντέχει για ιδανικές συνθήκες φορτίο λυγισμού ίσο με την μάζας της κατασκευής, 4.562 kg. Ωστόσο, γίνεται χρήση υποστυλωμάτων 1.5 mm διότι πέραν του ιδίου βάρους της, η κατασκευή καταπονείται και λόγω της εξαναγκασμένης ταλάντωσης.

Αντοχή κατασκευής σε λυγισμό για χρήση υποστυλωμάτων πάχους 1.5 mm (Euler):

$$\text{Ροπή αδράνειας : } I = \frac{0.0015^3 * 0.02}{12} = 5.625 * 10^{-12} m^4$$

Για συνθήκες άρθρωση – άρθρωση $K=1$, τότε :

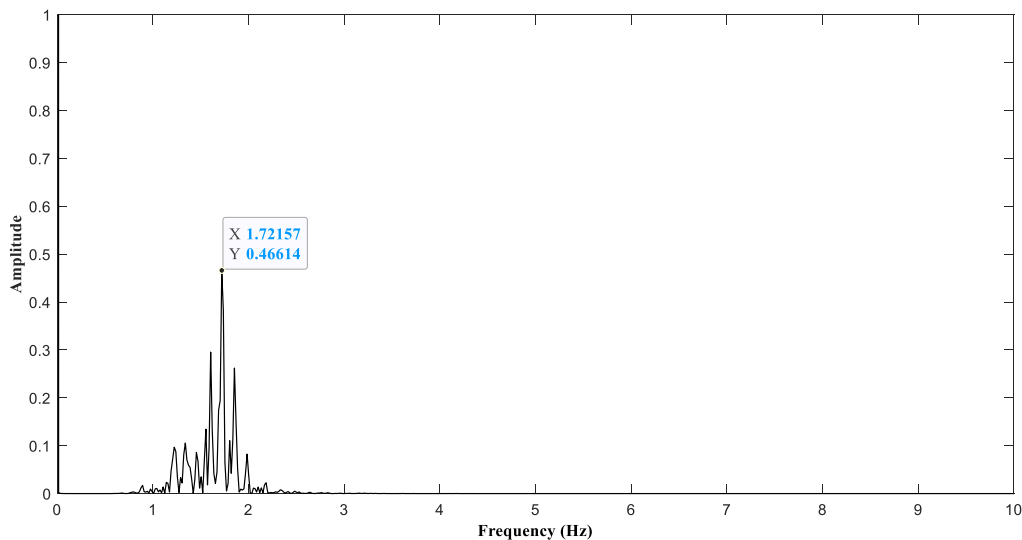
$$\text{Κρίσιμο φορτίο λυγισμού } P_{cr} = \frac{\pi^2 * 210 * 10^9 * 5.625 * 10^{-12}}{(1 * 0.45)^2} \approx 57.57 \text{ N} = \frac{57.57}{9.81} = 5.89 \text{ kg.}$$

Για το σύνολο των υποστυλωμάτων το φορτίο λυγισμού ισούται με $P_{cr} = 23.56 \text{ kg}$.

$$P_{cr} \gg P$$

Fast Fourier Transform (FFT)

Ο FFT ή γρήγορος μετασχηματισμός Fourier αποτελεί έναν αλγόριθμο με την βοήθεια του οποίου υπολογίζεται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier. Η ανάλυση αυτή μεταφράζει την αρχική μορφή ενός σήματος σε συχνότητες. Στην προκειμένη περίπτωση με την ανάπτυξη κατάλληλου αλγόριθμου στο MATLAB, έχει μεταφραστεί το σήμα επιτάχυνσης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I. Από το παρακάτω διάγραμμα προκύπτει η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του μήκους προσάρτησης του αποσβεστήρα σωματιδίων.



Σχήμα 3 FFT σήματος επιτάχυνσης για την πρωταρχική κατασκευή (χωρίς αποσβεστήρα μάζας σωματιδίων)

Από το παραπάνω διάγραμμα της επιτάχυνσης σε συχνότητες μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier προκύπτει ότι η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής ισούται:

$$f_0 = 1.72 \text{ Hz}$$

Μήκος προσάρτησης αποσβεστήρα:

$$\text{Ιδιοπερίοδος εκκρεμούς } T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής ισούται $f_0 = 1.72 \text{ Hz}$ οπότε :

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow \frac{1}{1.72} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{9.81}} \Rightarrow 0.34 = \frac{4\pi^2 l}{9.81} \Rightarrow l = \frac{3.31}{4\pi^2} \Rightarrow l \approx 8.5 \text{ cm}$$

Οπότε προκύπτει ότι το μήκος προσάρτησης του αποσβεστήρα, με βάση την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής θα πρέπει να ισούται με $l \approx 8.5 \text{ cm}$

Λόγος απόσβεσης

Για την εύρεση του συντελεστή απόσβεσης χρησιμοποιείται η εξίσωση της Υστεριτικής Λογαριθμικής Μείωσης.

Για τιμές οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ $0 < \zeta < 1$, ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις για τον υπολογισμό του λόγου απόσβεσης της κατασκευής.

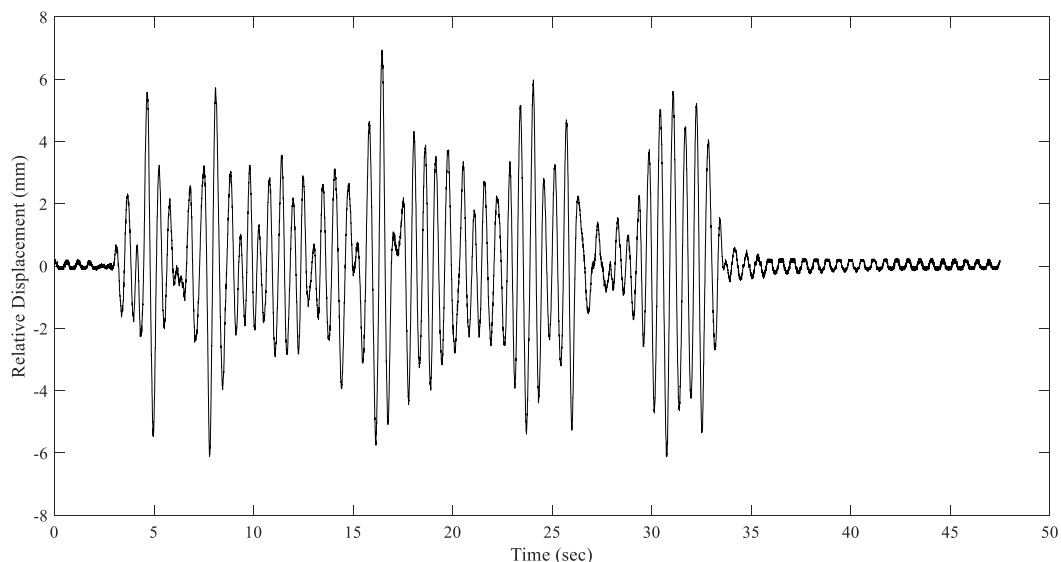
Εξίσωση λογαριθμικής μείωσης :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right)$$

Ο λόγος απόσβεσης προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta} \right)^2}}$$

Για τον υπολογισμό του λόγου απόσβεσης της πρωταρχικής κατασκευής, χρησιμοποιούνται τα σήματα σχετικής μετατόπισης σε συνάρτηση με τον χρόνο. Για καλύτερη προσέγγιση του λόγου απόσβεσης θα χρησιμοποιηθούν δύο υπολογισμοί του λόγου για κάθε επίπεδο διέγερσης από I έως IV, από τα οποία θα προκύψει ο μέσος όρος αυτών. Επιλέγονται δυο μη διαδοχικά μεταξύ τους σημεία με διαφορά $n=4$, τα οποία αφορούν το μέρος του σήματος όπου η κατασκευή εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση.



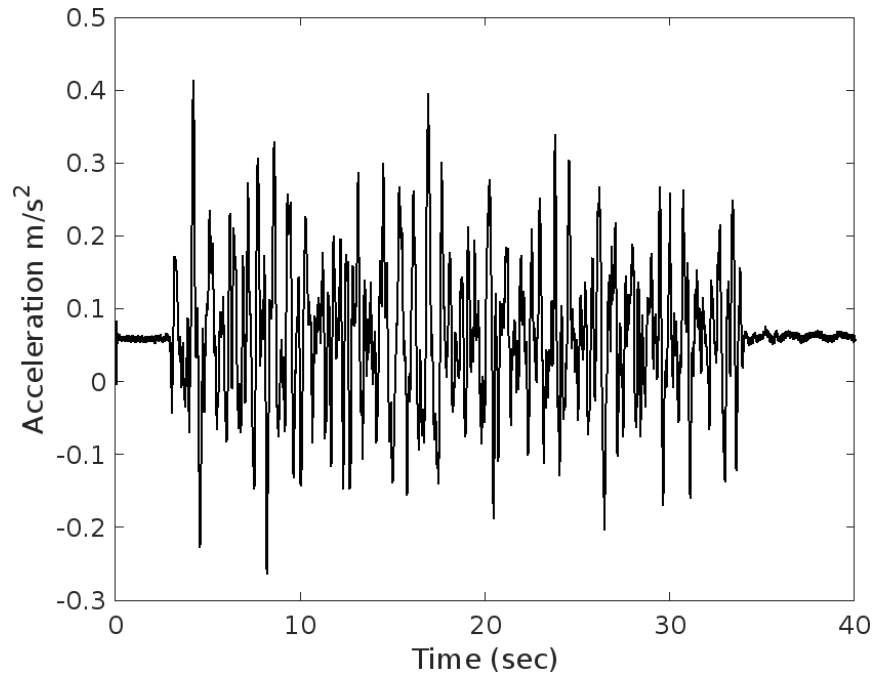
Σχήμα 4 Σχετική μετατόπιση σε συνάρτηση με τον χρόνο, κατασκευή χωρίς αποσβεστήρα, επίπεδο διέγερσης I

Οπότε η μέση τιμή συντελεστή απόσβεσης προκύπτει :

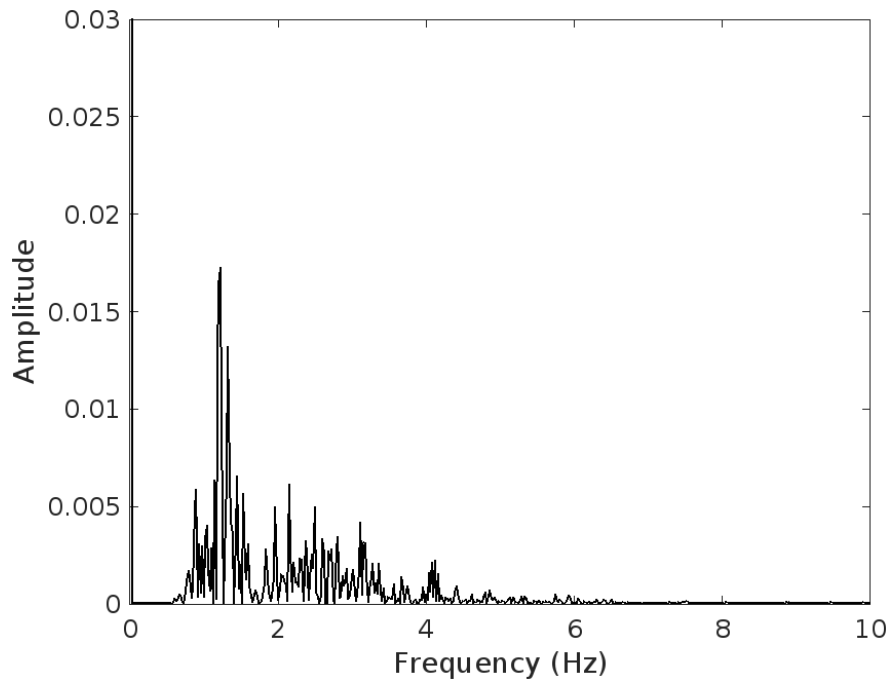
$$\bar{\zeta} = \frac{\sum \zeta}{n} = 0.04 = 4 \%$$

Πειραματική διαδικασία

Ο αποσβεστήρας μάζας σωματιδίων αποτελείται από ένα μεταλλικό δοχείο του στο εσωτερικό του οποίου έχουν τοποθετηθεί κινητά μεταλλικά χωρίσματα που επιτρέπουν διάφορες διαμορφώσεις και αναπροσαρμογές του αποσβεστήρα. Η αναλογία μάζας αποσβεστήρα σωματιδίων είναι $m/M = 7.34\%$ η οποία παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Ως σήμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε ένα τυχαίο σήμα. (Σχήμα 5, Σχήμα 6)



Σχήμα 5 Σήμα διέγερσης κατασκευή για επίπεδο διέγερσης I



Σχήμα 6 FFT του τυχαίου σήματος διέγερσης, για επίπεδο διέγερσης I

Ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν 200 Hz με καταγραφή δεδομένων ανά 0.05 sec και με διάρκεια καταγραφής του κάθε πειράματος περίπου τα 60s. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης (I,II,III,IV) όπου το επίπεδο διέγερσης I χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τα επόμενα επίπεδα διέγερσης τα οποία είχαν ένταση 2,3 και 4 φορές μεγαλύτερη της αρχικής.

Root Mean Square

Για την μετάφραση των αποτελεσμάτων και την σύγκριση τους με την αρχική κατασκευή χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση ρίζας μέσων τετραγώνων (Root Mean Square). Η εξίσωση ρίζας μέσων τετραγώνων παρέχει την κεντρική τάση των δεδομένων απόκρισης της κατασκευής και αποτελεί μια καλή μέθοδο υπολογισμού της αποτελεσματικότητας του αποσβεστήρα, ιδίως για τυχαίο σεισμικό σήμα. Για τον υπολογισμό των RMS εφαρμόστηκαν οι σχετικές μετακινήσεις της κατασκευής υπό διέγερση, σε συνάρτηση με τον χρόνο και το πλήθος αυτών. Λόγω την ανομοιομορφίας του πλήθους των δεδομένων μεταξύ των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πείραμα οι μετακινήσεις από την 1^η καταγραφή έως τη 8001^η με πλήθος μετρήσεων $n = 8000$.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$$

Όπου: n το πλήθος των μετρήσεων και x_n οι σχετικές μετακινήσεις ανά 0.05 sec

Filling Area Ratio

Η επιλογή των διαμερισμάτων στη κάθε πειραματική σειρά έγινε με την αναλογία πλήρωσης της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα σωματιδίων στον αποσβεστήρα (Filling Area Ratio). Συγκεκριμένα, ο συντελεστής FAR είναι η προβολή της περιοχής των τετραγώνων που εγγράφονται στη διάμετρο των σωματιδίων (πλευράς ίσης με εκείνης της διαμέτρου των σωματιδίων)⁸ :

$$FAR = \frac{nd^2}{A}$$

όπου : n το πλήθος των σωματιδίων, d η διάμετρος των σωματιδίων και A η εσωτερική επιφάνεια του δοχείου του αποσβεστήρα.

⁸ Effects of the Design Configuration on the Performance of Compartmental Particle Dampers, Angeliki Papalou, Civil Engineering Department, University of the Peloponnese June 2022

Έχει παρατηρηθεί από διάφορους μελετητές κατά καιρούς πως η ιδανική αναλογία μάζας αποσβεστήρα και μάζας πρωταρχικής κατασκευής δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 10%. Επίσης δεν θα μπορούσε ποτέ στην πραγματικότητα να αναρτηθεί αποσβεστήρας ο οποίος υπερβαίνει το 10% της μάζας της κατασκευής λόγω του μεγάλου βάρους του καθώς και δυσκολιών που θα παρουσιάζονταν κατά την προσπάθεια προσάρτησης του στην κατασκευή. Για τους λόγους αυτούς αυξήθηκε η αρχική μάζα της κατασκευής ούτως ώστε ο λόγος μαζών να μην ξεπερνά το 10%.

Διεξάχθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων ως εξής:

1^η σειρά πειραμάτων :

Με δύο άνισα διαμερίσματα

- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμερίσματα αποσβεστήρα 5 cm και 5 cm, FAR = 52%
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμερίσματα αποσβεστήρα 5 cm και 4.3 cm, FAR = 60%
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμερίσματα αποσβεστήρα 3.7 cm και 3.7 cm, FAR = 70%
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμερίσματα αποσβεστήρα 5 cm και 3.2 cm, FAR = 80%

2^η σειρά πειραμάτων :

Με δύο ίσα διαμερίσματα

- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμερίσματα αποσβεστήρα 5cm και 5 cm
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμερίσματα αποσβεστήρα 4.3 cm και 4.3 cm
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμερίσματα αποσβεστήρα 3.7 cm και 3.7 cm
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμερίσματα αποσβεστήρα 3.2 cm και 3.2 cm

3^η σειρά πειραμάτων :

Με ένα διαμέρισμα

- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμέρισμα αποσβεστήρα 5cm και 6.5 cm, FAR = 80%
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμέρισμα αποσβεστήρα 5cm και 7.5 cm, FAR = 70%
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμέρισμα αποσβεστήρα 5cm και 8.7 cm, FAR = 60%
- ✚ Προσαρτημένος αποσβεστήρας με σωματίδια, διαμέρισμα αποσβεστήρα 5cm και 10.1 cm, FAR = 52%

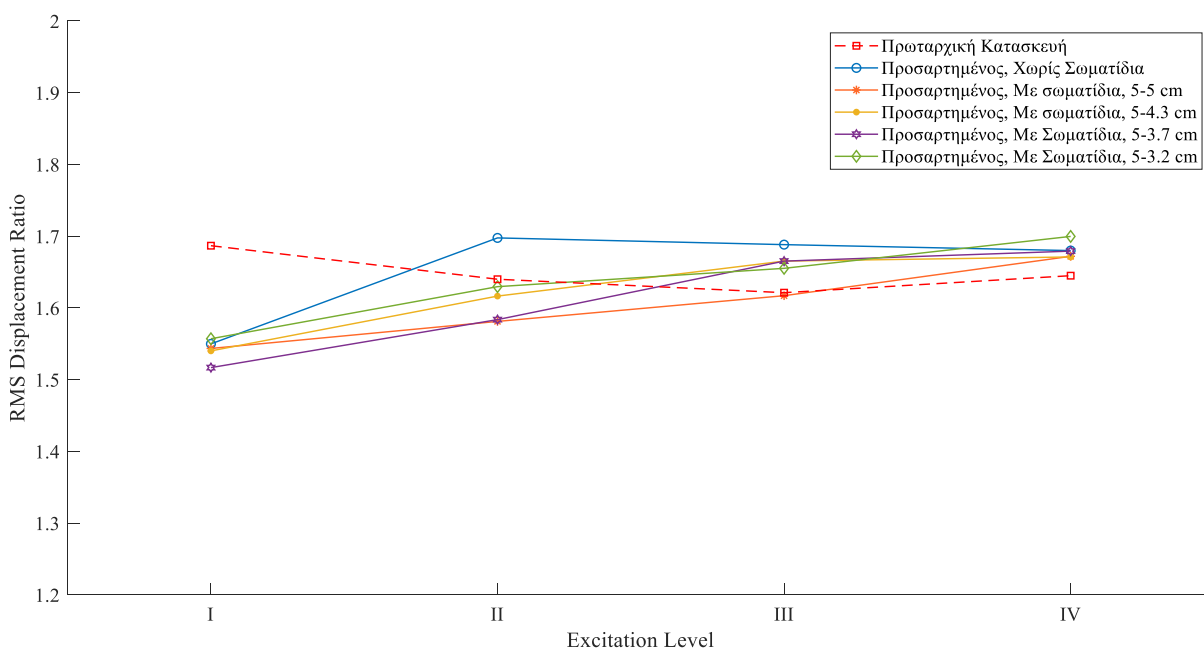
Αποτελέσματα Έρευνας

Η αποτελεσματικότητα του αποσβεστήρα σωματιδίων προσδιορίστηκε από την σύγκριση της απόκρισης της κατασκευής με και χωρίς την χρήση της κρουστικής μάζας. Η πρωταρχική κατασκευή συμβολίζεται με κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη και αποτελεί μέτρο σύγκρισης με την κάθε περίπτωση απόκρισης της κατασκευής με την προσαρτημένη κρουστική μάζα. Επιλέχθηκε η σχετική μετατόπιση για την σύγκριση των πειραμάτων καθώς εκείνη αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην ασφάλεια μιας κατασκευής.

Συζήτηση αποτελεσμάτων

Αρχικά ο αποσβεστήρας προσαρτήθηκε στην κατασκευή χωρίς σωματίδια. Για το συγκεκριμένο μήκος κρέμασης ο αποσβεστήρας ήταν αποδοτικός μόνο για το πρώτο επίπεδο διέγερσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 7 (μπλε γραμμή). Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα σωματίδια στα διαμερίσματα του αποσβεστήρα για την πρώτη σειρά πειραμάτων με σωματίδια.

Πρώτη σειρά πειραμάτων



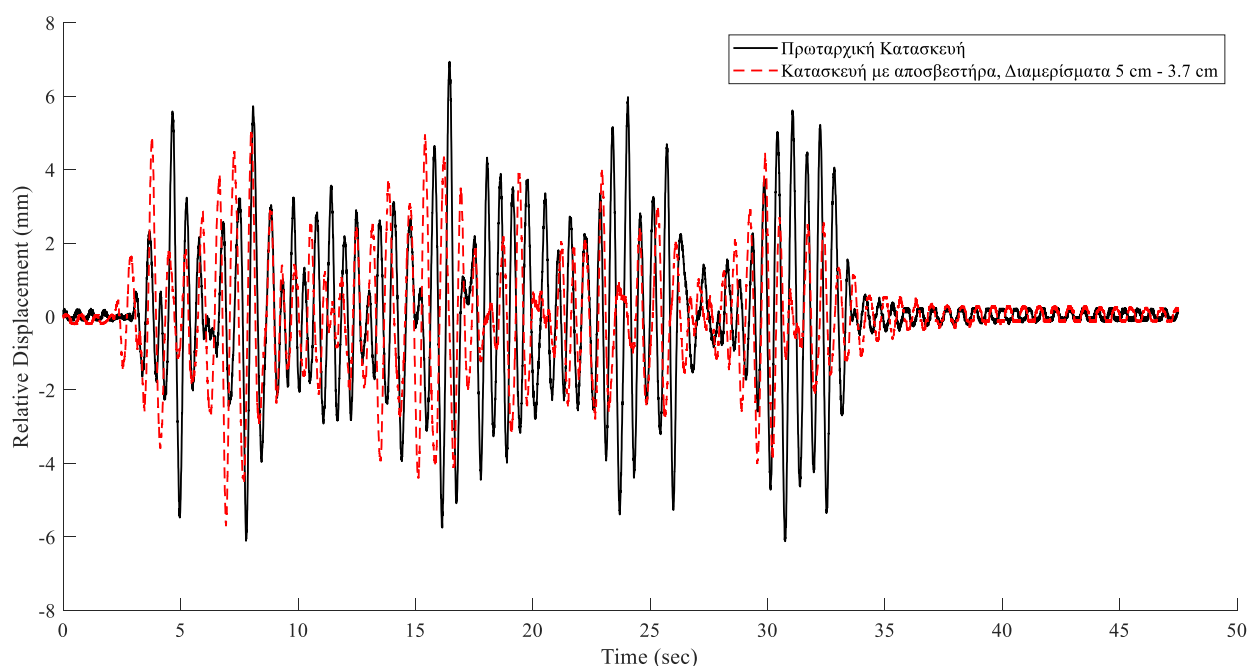
Σχήμα 7 Σχετική μετακίνηση σε συνάρτηση με τον χρόνο για άνισα διαμερίσματα αποσβεστήρα

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις για δύο διαφορετικά μεγέθη διαμερισμάτων στον δοχείο του αποσβεστήρα. Η κρουστική μάζα του κάθε διαμερισματος αποτελεί την μισή της συνολικής μάζας, δηλαδή σε κάθε διαμέρισμα τοποθετήθηκαν 12 σωματίδια συνολικής μάζας 48 gr.

Το Σχήμα 7 παρουσιάζει την απόκριση της κατασκευής σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης για άνισα μεγέθη διαμερισμάτων στο δοχείο του αποσβεστήρα. Για τις περιπτώσεις FAR =

52%, FAR = 60%, FAR= 70%, FAR = 80% η μείωση απόκρισης της κατασκευής για χαμηλά επίπεδα διέγερσης ήταν αποτελεσματική, ενώ για υψηλότερα επίπεδα διέγερσης (III,IV) το σύστημα στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν ήταν αποτελεσματικό.

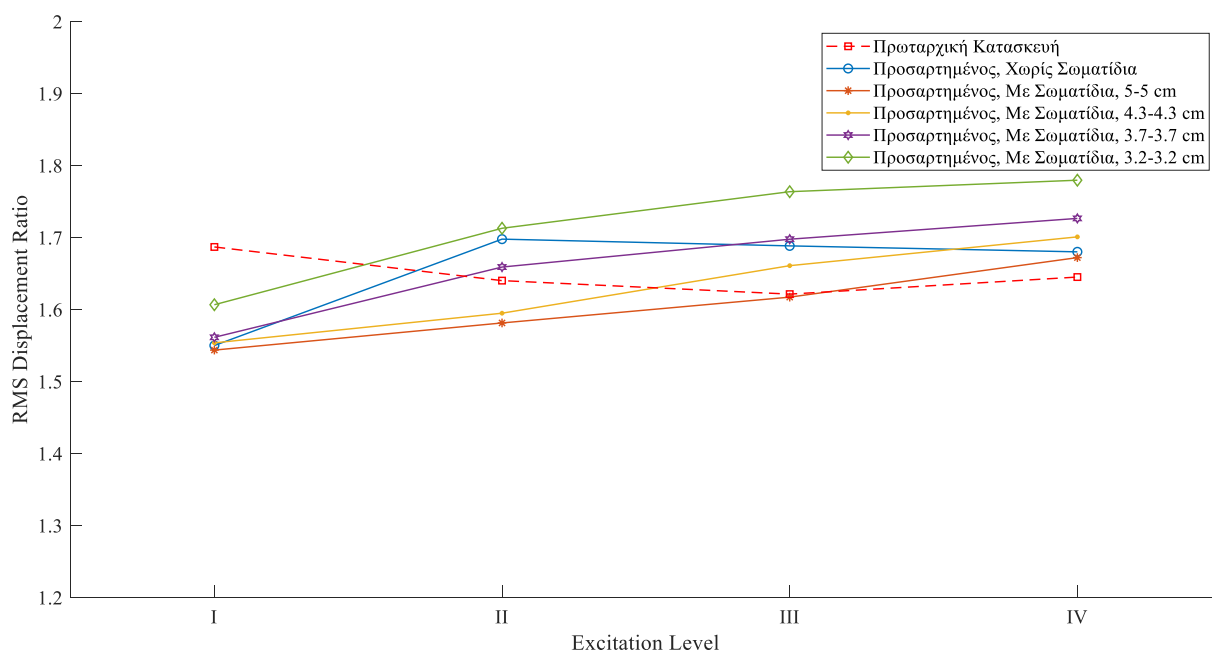
Συγκεκριμένα για την περίπτωση διαμερισμάτων 5 cm – 5 cm (FAR = 52%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 8.49%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.58%, ενώ για τα επίπεδα διέγερσης III και IV το σύστημα παύει να είναι αποτελεσματικό. Για τη περίπτωση διαμερισμάτων 5 cm – 4.3 cm (FAR = 60%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 9.52%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 1.43% ενώ για επίπεδα διέγερσης III και IV η διάταξη δεν είναι αποτελεσματική. Για την περίπτωση 5 cm – 3.7 cm (FAR = 70%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 10.07%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.43 % του οποίου η μείωση είναι αρκετά χαμηλή, ενώ για τα επίπεδα III, IV το σύστημα δεν είναι πλέον αποτελεσματικό. Όπως φαίνεται παρακάτω η περίπτωση 5 cm – 3.7 cm (FAR = 70%) προκύπτει η καλύτερη των περιπτώσεων από όλες τις σειρές πειραμάτων. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το διάγραμμα απόκρισης της κατασκευής με και χωρίς τη χρήση του αποσβεστήρα σωματιδίων για αυτή τη περίπτωση (Σχήμα 8).



Σχήμα 8 Σχετική μετακίνηση σε συνάρτηση με τον χρόνο, πρωταρχικής κατασκευής και αποσβεστήρα σωματιδίων με διαμερίσματα 5 cm - 3.7 cm

Τέλος, για την περίπτωση διαμερισμάτων 5 cm – 3.2 cm (FAR = 80%) για επίπεδο διέγερσης I είναι 7.69%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 0.63% και για επίπεδο διέγερσης III, IV το σύστημα δεν είναι αποτελεσματικό.

Δεύτερη σειρά πειραμάτων



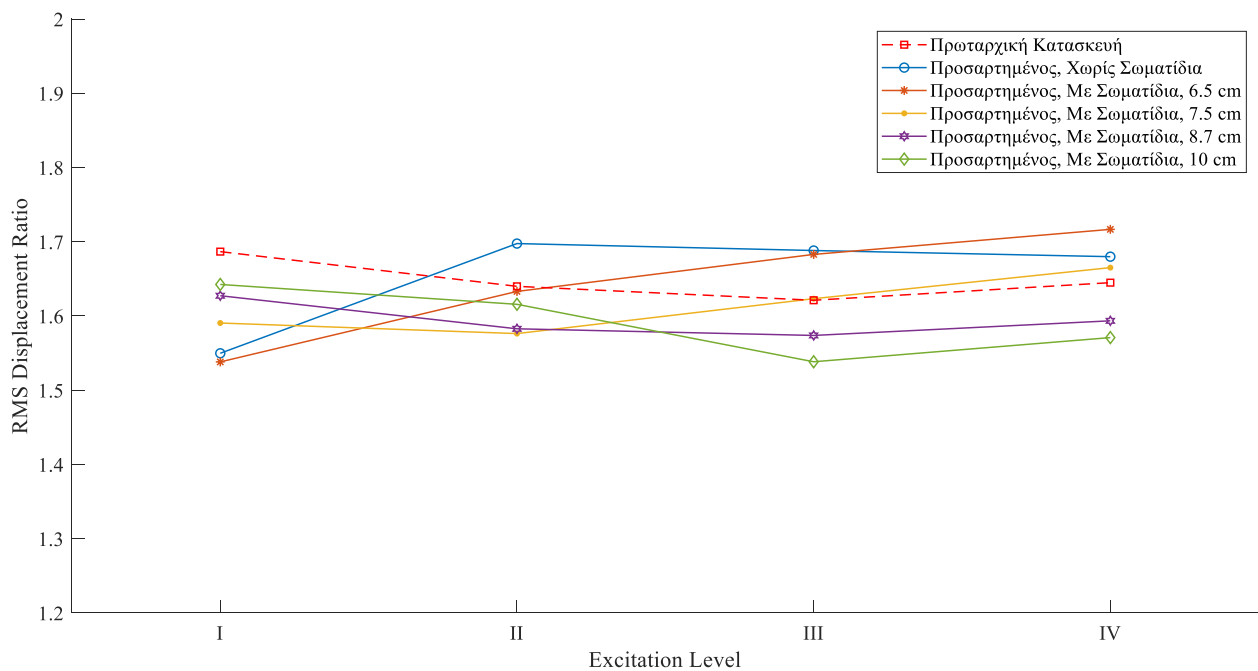
Σχήμα 9 Σχετική μετακίνηση σε συνάρτηση με τον χρόνο για ίσα διαμερίσματα αποσβεστήρα

Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις για δύο ισομεγέθη διαμερίσματα στο δοχείο του αποσβεστήρα. Η κρουστική μάζα του κάθε διαμερίσματος αποτελεί την μισή της συνολικής μάζας, δηλαδή σε κάθε διαμέρισμα τοποθετήθηκαν 12 σωματίδια μάζας 48 gr.

Το Σχήμα 9 παρουσιάζει την απόκριση της κατασκευής σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης για ισομεγέθη διαμερίσματα στο δοχείο του αποσβεστήρα. Για τις περιπτώσεις FAR = 52%, FAR = 60%, FAR = 70%, FAR = 80% η μείωση απόκρισης της κατασκευής για χαμηλά επίπεδα διέγερσης ήταν αποτελεσματική. Για επίπεδο διέγερσης II το σύστημα λειτούργησε μόνο για τις περιπτώσεις FAR = 52 %, FAR = 60 % με μικρή αποτελεσματικότητα στην μείωση απόκρισης της κατασκευής, ενώ για τα επίπεδα διέγερσης III και IV το σύστημα δεν ήταν αποτελεσματικό.

Συγκεκριμένα για την περίπτωση διαμερισμάτων 5 cm – 5 cm (FAR = 52%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 8.49%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.58%, ενώ για τα επίπεδα διέγερσης III και IV το σύστημα παύει να είναι αποτελεσματικό. Για την περίπτωση διαμερισμάτων 4.3 cm – 4.3 cm (FAR = 60 %) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 7.89%, για επίπεδο διέγερσης II η μείωση είναι 2.75% ενώ για τα επίπεδα III, IV το σύστημα δεν είναι αποτελεσματικό. Για τη περίπτωση διαμερισμάτων 3.7 cm – 3.7 cm (FAR = 70 %) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 7.44%, ενώ για επίπεδα II, III, IV το σύστημα δεν λειτουργεί. Τέλος για την περίπτωση διαμερισμάτων 3.2 cm – 3.2 cm, η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 4.47 %, ενώ για τις περιπτώσεις II, III, IV το σύστημα δεν λειτουργεί.

Τρίτη σειρά πειραμάτων



Σχήμα 10 Σχετική μετακίνηση σε συνάρτηση με τον χρόνο για κοινό διαμέρισμα αποσβεστήρα

Στην τρίτη σειρά πειραμάτων εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις χρησιμοποιώντας ένα διαμέρισμα στο δοχείο του αποσβεστήρα. Η κρουστική μάζα του διαμερίσματος αποτελεί την συνολική μάζα των σωματιδίων, δηλαδή στο ενιαίο διαμέρισμα τοποθετήθηκαν 24 σωματίδια μάζας 96 gr.

Το Σχήμα 10 παρουσιάζει την απόκριση της κατασκευής σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα διέγερσης για το κάθε διαμέρισμα στον αποσβεστήρα. Για τις περιπτώσεις FAR = 52%, FAR = 60%, FAR = 70%, FAR = 80% οι περισσότερες των περιπτώσεων λειτούργησαν με μικρή αποτελεσματικότητα.

Συγκεκριμένα για την περίπτωση διαμερίσματος 6.5 cm (FAR = 80%) η μείωση απόκρισης της κατασκευής για επίπεδο διέγερσης I είναι 8.8%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 0.42%, ενώ για επίπεδο διέγερσης III, IV το σύστημα δεν ήταν αποτελεσματικό. Για την περίπτωση διαμερίσματος 7.5 cm (FAR = 70%) η μείωση απόκρισης για επίπεδο διέγερσης I είναι 5.7%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.88%, ενώ για III, IV το σύστημα δεν ήταν αποτελεσματικό. Για την περίπτωση διαμερίσματος 8.7 cm (FAR = 60%) η μείωση απόκρισης για επίπεδο διέγερσης I είναι 3.52%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 3.48%, για επίπεδο διέγερσης 2.92% και για επίπεδο διέγερσης IV είναι 3.12%. Τέλος για την περίπτωση διαμερίσματος 10.1 cm, η μείωση απόκρισης για επίπεδο διέγερσης I είναι 2.62%, για επίπεδο διέγερσης II είναι 1.47%, για επίπεδο διέγερσης III είναι 5.11% και για επίπεδο διέγερσης IV είναι 4.5%.

Συμπεράσματα

Συνολικά παρατηρήθηκε πως σημαντικό ρόλο για την μείωση απόκρισης της κατασκευής κατέχει ο συντελεστής FAR. Η μείωση της απόκρισης της κατασκευής εξαρτάται από την πρόσκρουση των σωματιδίων μεταξύ τους αλλά και με τα τοιχώματα του αποσβεστήρα τα οποία είναι κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του σήματος διέγερσης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής FAR τόσο περισσότερες είναι οι προσκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων και των τοιχωμάτων του δοχείου. Αυτό συμβαίνει διότι τα σωματίδια, καθώς ο συντελεστής μεγαλώνει, καταλαμβάνουν μεγαλύτερο ελεύθερο χώρο. Ως αποτέλεσμα ο χώρος που εναπομένει να κινηθούν τα σωματίδια προκύπτει μικρότερος, επιφέροντας έτσι περισσότερες προσκρούσεις μεταξύ σωματιδίων και δοχείου.⁹

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι όταν ο συντελεστής FAR είναι μεγάλος, το σύστημα δεν είναι αποδοτικό για μεγάλα επίπεδα διέγερσης σε όλες των περιπτώσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι κρούσεις που λαμβάνουν χώρα είναι περισσότερες όσο αυξάνεται το επίπεδο διέγερσης με αποτέλεσμα η απόκριση της κατασκευής να προκύπτει μεγαλύτερη από αυτή της πρωταρχικής κατασκευής.

Για την σειρά πειραμάτων με άνισα διαμερίσματα παρατηρήθηκε ότι το σύστημα ήταν αποδοτικό για όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή FAR (52%, 60%, 70%, 80%) όσον αφορά το επίπεδο διέγερσης I και II. Με καλύτερη των περιπτώσεων εκείνη όπου FAR = 70% και ποσοστό μείωσης απόκρισης της κατασκευής τα 10.07%.

Η περίπτωση όπου ο αποσβεστήρας έχει άνισα διαμερίσματα είναι πολλά υποσχόμενη και συγκεκριμένα όταν χρησιμοποιείται μεγάλη και μικρή τιμή για τα μεγέθη του διαμερίσματος

Για την σειρά πειραμάτων με ίσα διαμερίσματα σημειώθηκε ότι το σύστημα ήταν αποδοτικό για όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή FAR (52%, 60%, 70%, 80%) για επίπεδο διέγερσης I. Με καλύτερη των περιπτώσεων εκείνη όπου FAR = 52% και ποσοστό μείωσης απόκρισης της κατασκευής τα 8.49%. Σε αυτή τη περίπτωση προέκυψε ότι μόνο δύο εκ των τεσσάρων περιπτώσεων λειτούργησαν για μεγαλύτερο επίπεδο διέγερσης.

Τέλος για την σειρά πειραμάτων η οποία αφορά τα μονά διαμερίσματα σημειώθηκε ότι το σύστημα είχε απόδοση για όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή FAR (52%, 60%, 70%, 80%) και για διαφορετικά επίπεδα διέγερσης. Για συντελεστή FAR = 52% η καλύτερη απόδοση του συστήματος ήταν για τα επίπεδα διέγερσης III, IV όπου τα ποσοστά μείωσης ήταν 5.11% και 4.5% αντίστοιχα. Για συντελεστή FAR = 60% το σύστημα είχε σχετικά γραμμική απόδοση με καλύτερα ποσοστά μείωσης απόκρισης της κατασκευής εκείνα για τα επίπεδα διέγερσης I, II και IV όπου το ποσοστά είναι 3.52%, 3.48 και 3.48% αντίστοιχα. Τέλος για FAR = 70% και FAR = 80% το σύστημα είχε απόδοση για επίπεδο διέγερσης I με ποσοστά μείωσης απόκρισης 5.7% και 8.8% αντίστοιχα. Η βέλτιστη μείωση απόκρισης της κατασκευής για την τρίτη σειρά πειραμάτων προκύπτει για FAR = 80% που αφορά το επίπεδο διέγερσης I.

⁹ Effects of the Design Configuration on the Performance of Compartmental Particle Dampers, Angeliki Papalou, Civil Engineering Department, University of the Peloponnese June 2022

Σχόλια

- ✚ Με βάση τους Zheng Lu, Dianchao Wang και Peizhen Li έχει αποδειχθεί πως για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος θα πρέπει η συχνότητα του αποσβεστήρα χωρίς σωματίδια να είναι συντονισμένη στην ιδιοσυχνότητα της κατασκευής που υπόκειται σε φόρτιση.¹⁰ Όταν αυτό δεν συμβαίνει μπορεί να υπάρξει αύξηση της κίνησης αντί να μειωθεί. Με βάση τα παραπάνω και σε συνδυασμό με τους περιορισμούς του πειράματος, δεν επιτεύχθηκε στο πείραμά μας η βέλτιστη ρύθμιση του αποσβεστήρα σωματιδίων ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αποδοτικότητα του. Αναμένεται σε επόμενες έρευνες να μελετηθούν περεταίρω περιπτώσεις για διαφορετικά μήκη εκκρεμούς του αποσβεστήρα σωματιδίων ούτως ώστε να προκύψει η βέλτιστη ρύθμιση.

¹⁰ Comparison Study of Vibration Control Effects between Suspended Tuned Mass Damper and Particle Damper Zheng Lu, Dianchao Wang, and Peizhen Li, July 2014

Βιβλιογραφία

1. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΜΑΝΙΚΑΣ (2018) ,Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, «Βλάβες σε δομικά και μη δομικά στοιχεία από σεισμό. Τύποι και παράγοντες που επηρεάζουν τα κτίρια»
2. H. Cao, A. M. Reinhorn and T. T. Soong (1998) , «Design of an active mass damper for a tall TV tower in Nanjing China», Engineering Structures, Vol. 20, No. 3, pp. 134 143
3. Papalou A., Strepelias E., Roubien D., Bousias S. and Triantafillou T. (2015) , «Seismic protection of monuments using particle dampers in multi-drum columns», Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.77, p. 360-368
4. Εμμανουήλ Νομικός ,«ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ 95000Μ3 ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ FPS ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ., Κεφάλαιο 3 Σεισμική Μόνωση Βάσης»
5. ΓΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΒΛΑΒΕΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ (1999), Εργασία Νο 11, σελ. 171-178
6. Samuele Infanti , Jamieson Robinson , Rob Smith (2018) ,«VISCOUS DAMPERS FOR HIGH-RISE BUILDINGS», The 14 th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17
7. ΓΚΑΡΤΖΙΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ, ΚΑΛΛΙΟΣ ΑΝΤΩΝΗΣ, «ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ», 12^ο Φοιτητικό Συνέδριο 14-15 Φεβρουαρίου 2016, Πάτρα «ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ-ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ Ο/Σ ΚΑΙ ΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»
8. Angeliki Papalou, Ph.D. Thesis ,«Analytical and experimental studies of particle dampers», Chapter 4, p. 126 – 151
9. Παπανικόλαος Θωμάς (2012), Μεταπτυχιακή Εργασία, « Μοντελοποίηση και Αυτόματος Έλεγχος ταλαντώσεων σε Δυναμικά Συστήματα», Κεφάλαια 1.3, 1.4, σελ. 13-33
10. ΓΙΑΝΝΗΣ.Ν ΨΥΧΑΡΗΣ (2014), ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8
11. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ.Ζ ΚΟΠΑΝΟΣ (2013), Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, «ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΜΟΝΩΣΗ ΒΑΣΗΣ: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ»
12. Κιρτάς Εμμανουήλ (2018), Σημειώσεις Θεωρίας: «Ανάλυση Κατασκευών σε Η/Υ»

13. Richard Lourenco (2011), Master Degree Thesis, «Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper»
14. A. Papalou, S. F. Marsi (1996), « Performance of Particle Dampers Under Random Excitation», ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 4, 361-379.
15. Ιορδάνης Πετρίδης (2020), ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, «ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ
16. Zheng Lu, Zixin Wang, Sami F. Masri, Xilin Lu (2017), «Particle impact dampers: Past, present, and future», Structural Control and Health Monitoring - Wiley Online Library
17. Χατζιραι Εργκις (2016), Πτυχιακή Εργασία, «Συνεισφορά Παθητικών Συστημάτων στον Έλεγχο Ταλαντώσεων Κατασκευών»
18. Zheng Lu, Dianchao Wang, and Peizhen Li, Research Article, «Comparison Study of Vibration Control Effects between Suspended Tuned Mass Damper and Particle Damper», Hindawi Publishing Corporation
19. Fan Yang , Ramin Sedaghati and Ebrahim Esmailzadeh , «Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review», Journal of Vibration and Control 2022, Vol. 28(7-8) 812–836
20. » Mariantonieta Gutierrez Soto, Hojjat Adeli (2013), «Tuned Mass Dampers», Journal : Archives of Computational Methods in Engineering
21. Vajreshwari Umachagi , Katta Venkataramana , G. R. Reddy , Rajeev Verma, «APPLICATIONS OF DAMPERS FOR VIBRATION CONTROL OF STRUCTURES: AN OVERVIEW», International Journal of Research in Engineering and Technology
22. Chi-Chang Lin , Jin-Min Ueng (1998) «Seismic response reduction of irregular buildings using passive tuned mass dampers, Engineering Structures, Volume 22, Issue 5, Pages 513-524
23. Khaled Ghaedi , Zainah Ibrahim , Hojjat Adeli, Ahad Javanmardi, Invited Review: «Recent developments in vibration control of building and bridge structures», Journal of Vibroengineering, Vol. 19, Issue 5, 2017, p. 3564-3580

24. Fatemeh Rahimi , Reza Aghayari , Bijan Samali, «Application of Tuned Mass Dampers for Structural Vibration Control: A State-of-the-art Review», Civil Engineering Journal 6(8):1622-1651

25. Κ. Σπυράκος, Ε. Τουτουδάκη, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ, «ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ»

26. ΧΡΗΣΤΟΣ Ι. ΜΠΑΡΚΑΣ, 6ο Φοιτητικό Συνέδριο « Επισκευές Κατασκευών 2000 », «ΒΛΑΒΕΣ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ : ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ»

27. Κίρτας Εμμανουήλ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΗΥ Ενότητα 2, «Μορφολογία φέροντος οργανισμού κτιρίων»

28. Papalou A., (2015), «Passive Control Techniques and their Applications in Historic Structures», Chapter from book : «Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures», IGI Global Publisher

Παράρτημα Εικόνων

Εικ.1	https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%AE%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CF%82_%CF%86%CE%BB%CE%BF%CE%B9%CF%8C%CF%82
Εικ.2	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Continental-continental_destructive_plate_boundary.svg
Εικ.3	https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82_%CF%80%CE%BB%CE%AC%CE%BA%CE%B5%CF%82#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Continental-continental_conservative_plate_boundary_opposite_directions.svg
Εικ.4	https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82_%CF%80%CE%BB%CE%AC%CE%BA%CE%B5%CF%82#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Continental-continental_conservative_plate_boundary_opposite_directions.svg
Εικ.5	https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82_%CF%80%CE%BB%CE%AC%CE%BA%CE%B5%CF%82
Εικ.6	https://wiki.seg.org/wiki/Normal_fault
Εικ.7	https://sites.pitt.edu/~cejones/GeoImages/7Structures/ReverseFaults.html
Εικ.8	https://blogs.egu.eu/divisions/ts/2021/06/30/ts-must-read-sylvester-1988-strike-slip-faults/
Εικ.9	https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%83%CF%84%CE%AF%CE%B1_%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D
Εικ.10	https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/slinky/slinky4.htm
Εικ.11	https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/slinky/slinky4.htm
Εικ.12	http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMB103/Chapter%202%20-%20Eidika%20Kefalaia%20Statikis.pdf , https://www.oasp.gr/userfiles/EAK2000.pdf «Κεφάλαιο 4, §Σ4.1.7.1α»
Εικ.13	http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMB103/Chapter%202%20-%20Eidika%20Kefalaia%20Statikis.pdf , Ιωάννη Αβραμίδη (ΑΠΘ), (Πανεπιστημιακές σημειώσεις στο μάθημα "Αριθμητικές Μέθοδοι Ανάλυσης Κατασκευών", 1995 (1η έκδοση) και 2001)
Εικ.14	http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMB103/Chapter%202%20-%20Eidika%20Kefalaia%20Statikis.pdf , «Ιωάννη Αβραμίδη (ΑΠΘ), (Πανεπιστημιακές σημειώσεις στο μάθημα "Αριθμητικές Μέθοδοι Ανάλυσης Κατασκευών", 1995 (1η έκδοση) και 2001)»
Εικ.15	https://ecopress.gr/charakteristikes-astochies-apo-sismo-ke-i-antimetopisi-tous/
Εικ.16	http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/wp-content/uploads/2015/07/%CE%94%CE%A1%CE%99%CE%A4%CE%A3%CE%9F%CE%A3-%CE%B3-%CE%AD%CE%BA%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7.pdf
Εικ.17	http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/wp-content/uploads/2015/07/%CE%94%CE%A1%CE%99%CE%A4%CE%A3%CE%9F%CE%A3-%CE%B3-%CE%AD%CE%BA%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7.pdf
Εικ.18	http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/ergasies%202005/11.pdf
Εικ.19	http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/wp-content/uploads/2015/07/%CE%94%CE%A1%CE%99%CE%A4%CE%A3%CE%9F%CE%A3-%CE%B3-%CE%AD%CE%BA%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7.pdf
Εικ.20	http://download.pi.gr/Seismic_response.pdf
Εικ.21	https://www.oasp.gr/userfiles/%CE%94%CE%95%CE%9B%CE%A4%CE%99%CE%9F-%CE%94-%CE%95_%CE%9C%CE%A5%CE%A4%CE%99%CE%9B%CE%97%CE%9D%CE%97.pdf
Εικ.22	http://www.teetrip.tee.gr/giannop_1.pdf
Εικ.23	https://smartbuilding.gr

Εικ.24	https://www.oasp.gr/userfiles/%CE%9A%CE%91%CE%9D_%CE%95%CE%A0%CE%95_2%CE%B7%20%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%B8%CE%B5%CF%8E%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B7_2017_Final.pdf
Εικ.25	https://www.oasp.gr/userfiles/%CE%9A%CE%91%CE%9D_%CE%95%CE%A0%CE%95_2%CE%B7%20%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%B8%CE%B5%CF%8E%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B7_2017_Final.pdf
Εικ.26	https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B5%CE%BA%CE%BB%CE%B9%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%BF%CF%82_%CE%A0%CF%8D%CF%81%CE%B3%CE%BF%CF%82_%CF%84%CE%B7%CF%82_%CE%A0%CE%AF%CE%B6%CE%B1%CF%82
Εικ.27	http://www.teetrip.tee.gr/giannop_1.pdf
Εικ.28	http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/ergasies%202002/E12.pdf
Εικ.29	http://www.teetrip.tee.gr/giannop_1.pdf
Εικ.30	http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/wp-content/uploads/2015/07/%CE%94%CE%A1%CE%99%CE%A4%CE%A3%CE%9F%CE%A3-%CE%B3-%CE%AD%CE%BA%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7.pdf
Εικ.31	http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/wp-content/uploads/2015/07/ΔΠΤΣΟΣ-γ-έκδοση.pdf
Εικ.32	http://www.strulab.civil.upatras.gr/sites/default/files/Liossatou_MSc_Thesis.pdf
Εικ.33	http://www.episkeves2.civil.upatras.gr/wp-content/uploads/2015/07/%CE%94%CE%A1%CE%99%CE%A4%CE%A3%CE%9F%CE%A3-%CE%B3-%CE%AD%CE%BA%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7.pdf
Εικ.34	http://www.teetrip.tee.gr/giannop_1.pdf
Εικ.35	http://www.yas.gr/apofaseis/200932414370.%CE%BF%CE%B9%CE%BA%201217.pdf
Εικ.36	http://www.yas.gr/apofaseis/200932414370.%CE%BF%CE%B9%CE%BA%201217.pdf
Εικ.37	http://www.yas.gr/apofaseis/200932414370.%CE%BF%CE%B9%CE%BA%201217.pdf
Εικ.38	https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/6824/Dissertation.pdf?sequence=1
Εικ.39	https://www.academia.edu/27453928/Design_of_an_active_mass_damper_for_a_tall_TV_tower_in_Nanjing_China
Εικ.40	https://www.academia.edu/27453928/Design_of_an_active_mass_damper_for_a_tall_TV_tower_in_Nanjing_China
Εικ.41	https://en.wikipedia.org/wiki/Jiangsu_Nanjing_Broadcast_Television_Tower
Εικ.42	https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/6824/Dissertation.pdf?sequence=1
Εικ.43	http://ikee.lib.auth.gr/record/134421/files/GRI-2014-12446.pdf
Εικ.44	https://www.china-gnma.com/products/natural-rubber-bearing.html
Εικ.45	https://www.bridgebearing.org/bridgebearing/lead-rubber-bearing.html
Εικ.46	https://ktirio.gr/el/%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%B1%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AC/%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B1/eps
Εικ.47	https://www.carandmotor.gr/idioktisia/allagi-amortiser-pote-prepei-na-kano
Εικ.48	https://ryanrakhmats.wordpress.com/2018/04/22/fluid-viscous-damper-fvd/%20,%20https://www.taylordevices.com/products/fluid-viscous-dampers/
Εικ.49	https://www.textroad.com/pdf/JBASR/J.%20Basic.%20Appl.%20Sci.%20Res.,%202%282%291538-1545,%202012.pdf
Εικ.50	http://frictionaldampers.blogspot.com/2011/08/concordias-library-building-lb.html
Εικ.51	https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/response_control_and_seismic_isolation_devices/nsu/
Εικ.52	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X19313598
Εικ.53	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X19313598

Εικ.54	https://www.researchgate.net/figure/Tuned-mass-damper-TMD-attached-to-a-primary-structure_fig1_325068455
Εικ.55	https://en.wikipedia.org/wiki/Taipei_101#/media/File:Taipei_101_Tuned_Mass_Damper.png
Εικ.56	https://en.wikipedia.org/wiki/Taipei_101#/media/File:Taipei_101_Tuned_Mass_Damper.png
Εικ.57	https://nnaimi.civil.iut.ac.ir/content/passive-and-semi-active-structure-multiple-tuned-liquid-damper-systemstd
Εικ.58	https://courses.lumenlearning.com/suny-osuniversityphysics/chapter/introduction-15/
Εικ.59	https://www.researchgate.net/publication/258167207_Tuned_Mass_Dampers
Εικ.60	https://nl.wikipedia.org/wiki/Crystal_Tower_(Osaka)
Εικ.61	Analytical and experimental studies of particle dampers by Angeliki Papalou, Ph.D. Thesis
Εικ.62	Analytical and experimental studies of particle dampers by Angeliki Papalou, Ph.D. Thesis
Εικ.63	https://www.mdpi.com/2076-3417/9/14/2912/htm
Εικ.64	Φωτογραφίες, Αγγελική Παπαλού
Εικ.65	Φωτογραφίες, Αγγελική Παπαλού
Εικ.66	https://www.researchgate.net/publication/274920037_Comparison_Study_of_Vibration_Control_Effects_between_Suspended_Tuned_Mass_Damper_and_Particle_Damper