

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

ΑΛΕΞΑΚΗΣ Δ. ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ, ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ, Α.Μ. 241

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την παρουσίαση των βασικών αρχών, που διέπουν τα συστήματα σεισμικής μόνωσης, μέσω σύγκρισης αποτελεσμάτων ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης (χρονοϊστορίας) 7 διαφορετικών προσομοιωμάτων. Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή των συστημάτων, περιγραφή του τρόπου δράσης τους και αναφορά στα διάφορα είδη τους. Στο 2^ο κεφάλαιο δίνονται οι παράμετροι και οι βασικές εξισώσεις τους, σε ένα γραμμικό και ένα μη γραμμικό (διγραμμικό) σύστημα, θεωρώντας συμπεριφορά μονοβάθμιου ταλαντωτή. Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα δεδομένα της ανάλυσης και οι ιδιότητες και χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται, συγκρίνονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Στο παράρτημα, που ακολουθεί, είναι συγκεντρωμένα τα απαραίτητα σχήματα, πίνακες και διαγράμματα, ανά κεφάλαιο στο οποίο αναφέρονται.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μεγάλο μέρος του πληθυσμού της γης κατοικεί σε περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας. Τα κράτη αυτά, ύστερα από έναν ισχυρό σεισμό, καλούνται να πληρώσουν εκτός από το υλικό κόστος και το πιθανό ανυπολόγιστο κόστος της απώλειας ανθρώπινης ζωής. Μετά τα μέσα του περασμένου αιώνα, γίνονται οι πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης συστημάτων μόνωσης της βάσης κατασκευών από τις διεγέρσεις του εδάφους, με σκοπό την μετρίαση των δυσμενών αποτελεσμάτων της σεισμικής έντασης. Η αποτελεσματικότητά τους ήταν εντυπωσιακή και γι' αυτό, από τα πρώτα χρόνια, ξεκίνησαν οι πρώτες εφαρμογές και παρόλο που η επιστημονική έρευνα ήταν περιορισμένη, πολλά από τα πρώτα σεισμικά μονωμένα κτίρια συμπεριφέρθηκαν ικανοποιητικά σε πρόσφατους σεισμούς. Στις ΗΠΑ, Ιαπωνία, Νέα Ζηλανδία αλλά και Ευρώπη, τα συστήματα αυτά τυγχάνουν με το πέρασμα του χρόνου ευρύτατης εφαρμογής σε γέφυρες, κατασκευές με ευπαθή περιεχόμενο, σημαντικά κτίρια αλλά και σε επισκευές και αναστηλώσεις. Σήμερα υπάρχει παγκόσμιο ερευνητικό ενδιαφέρον, μιας και η τεχνική μετράει μονάχα μερικές δεκαετίες ζωής και παραμένει μεγάλο το περιθώριο εμβάθυνσης σε θεωρητικό επίπεδο αλλά και στην διαδικασία εφαρμογής της.

Μια τυπική διάταξη συστήματος σεισμικής μόνωσης φαίνεται στο σχήμα 1.1^[1] (βρίσκεται στην βάση των κατασκευών, με εξαίρεση ορισμένες γέφυρες όπου τοποθετείται ανάμεσα στην κορυφή των βάρων και την ανωδομή). Αποτελείται από τους μονωτήρες βάσεων και συνήθως συνδυάζεται με συσκευές απόσβεσης ενέργειας. Με τον παραπάνω συνδυασμό, στόχος είναι να δοθούν στην κατασκευή νέα κινηματικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η μεγάλη αύξηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης και επομένως η μεταπήδηση (shift) στο φάσμα απόκρισης ψευδοεπιταχύνσεων σε πολύ μικρότερες επιταχύνσεις και άρα μείωση των σεισμικών δυνάμεων σχεδιασμού (σχήμα 1.2)^[2]. Οι επικίνδυνες περιοχές, όπου υπάρχει περίπτωση να συντονιστούν συνήθεις κατασκευές στο σεισμό, είναι για περιόδους που βρίσκονται ή πλησιάζουν το διάστημα των 0.2-0.6 sec. Με την σεισμική μόνωση είναι δυνατών να επιτευχθούν μεγάλες τιμές ιδιοπεριόδου της κατασκευής, που συνήθως κυμαίνονται στο διάστημα των 2-5 sec.

Η αύξηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης είναι αποτέλεσμα των μονωτήρων βάσεως, επειδή έχουν πολύ μικρή δυσκαμψία σε σχέση με αυτή μιας τυπικής κατασκευής. Ανάλογα

με το είδος του μονωτήρα βάσεως, παρέχεται ή όχι δύναμη επαναφοράς κατά την ταλάντωση (λειτουργία ελατηρίου), καθώς και απόσβεση. Επίσης μπορεί να έχει γραμμική ή και μη γραμμική συμπεριφορά (βλ. παρακάτω). Όμως η μεγάλη αύξηση της ιδιοπεριόδου έχει ως αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη, σε πολλές περιπτώσεις υπερβολική, αύξηση των μετατοπίσεων ταλάντωσης (σχήμα 1.3)^[2]. Αυτός είναι ο λόγος που οι μονωτήρες βάσεως συνδυάζονται με αποσβεστήρες. Μέσω της κατανάλωσης της σεισμικής ενέργειας, δηλαδή μέσω της επιλογής του βαθμού απόσβεσης, είναι εφικτό να περιοριστούν οι μετακινήσεις αυτές (σχήμα 1.4)^[2]. Επίσης με την αύξηση της απόσβεσης του συστήματος, μειώνονται οι τιμές των επιταχύνσεων στο φάσμα απόκρισης (σχήμα 1.5)^[2]. Οι αποσβεστήρες είναι διαφόρων ειδών και μπορεί να έχουν και αυτοί γραμμική ή μη γραμμική συμπεριφορά.

Στο σχήμα 1.6^[2] απεικονίζεται ένα τυπικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων μιας γέφυρας. Αρχικά η γέφυρα έχει ιδιοπερίοδο αυτήν που αντιστοιχεί στο σημείο A₁. Μέσω της αύξησης της ιδιοπεριόδου από την εφαρμογή συστήματος σεισμικής μόνωσης μετατοπιστήκαμε στο σημείο A₂. Τελικά μέσω της αύξησης της απόσβεσης καταλήγουμε στο σημείο A₃ (δηλ. διπλός μηχανισμός μείωσης σεισμικής απόκρισης). Το σημείο A₃ είναι αυτό που θα χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό της γέφυρας ή αντίστοιχα μιας κατασκευής. Η μείωση των επιταχύνσεων φάσματος είναι εντυπωσιακή.

Χαρακτηριστικά των συνηθέστερων μονωτήρων βάσεως και συστημάτων απόσβεσης παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.1^[1]. Τελικά μέσω της επιλογής του συνδυασμού των παραπάνω, καταλήγει κανείς σε ένα γραμμικό ή μη γραμμικό σύστημα σεισμικής μόνωσης με ποικίλες ιδιότητες.

2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

2.1 Εξίσωση ταλάντωσης μονοβάθμιου ταλαντωτή^[1]

Η εξίσωση ταλάντωσης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή δίνεται από την σχέση

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (2.1)$$

όπου u η μετατόπιση του ταλαντωτή στο χρόνο, m η μάζα, c ο συντελεστής απόσβεσης, k η δυσκαμψία, \ddot{u}_g η επιτάχυνση του εδάφους. Η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα ω και ιδιοπερίοδος T δίνονται από τις σχέσεις

$$\omega^2 = k/m \quad (2.2)$$

$$T = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (2.3)$$

Εάν $c_{cr} = 2\sqrt{m/k}$ είναι η απόσβεση στην οποία παύει να υπάρχει ταλάντωση και εάν ζ είναι το αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει την απόσβεση του ταλαντωτή ως ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης, τότε

$$\zeta = cT/(4\pi m) \quad (2.4)$$

Τελικά η εξίσωση κίνησης θα δίνεται από την σχέση

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g \quad (2.5)$$

2.2 Γραμμικό σύστημα^[1]

Υποθέτουμε αρχικά ότι έχουμε μία κατασκευή, η οποία είναι άκαμπτη, έχει μάζα M και μπορεί να μετακινηθεί μονάχα πλευρικά, μέσω συστήματος μόνωσης γραμμικής συμπεριφοράς, συνολικής δυσκαμψίας K_b . Δηλαδή έχει μονάχα μια ιδιοπερίοδο ταλάντωσης και συμπεριφέρεται ως μονοβάθμιος ταλαντωτής. Το σύστημα μόνωσης προσδίδει στον

ταλαντωτή συντελεστή ιξώδους απόσβεσης C_b (βλ. σχήμα 2.1(a)). Τα K_b , C_b είναι οι παράμετροι του συστήματος μόνωσης (ο υποδείκτης b δηλώνει την γραμμική συμπεριφορά). Από τις εξισώσεις (2.3) και (2.4) προκύπτει

$$T_b = 2\pi\sqrt{M/K_b} \quad (2.6\alpha)$$

$$\zeta_b = C_b T_b / (4\pi M) \quad (2.6\beta)$$

Το σχήμα 2.1(b) δείχνει το βρόχο υστέρησης δύναμης – μετατόπισης του γραμμικού συστήματος. Ύστερα από κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης προκύπτει το ζεύγος των μέγιστων τιμών της δύναμης S_b και της μετατόπισης X_b . Η ενεργός δυσκαμψία του συστήματος ορίζεται ως

$$K_b = S_b / X_b \quad (2.7)$$

2.3 Διγραμμικό σύστημα^[1]

Εκτός από τα γραμμικά συστήματα μόνωσης, υπάρχουν και τα μη γραμμικά (δηλ. αυτά που έχουν έντονη μετελαστική συμπεριφορά, σημείο διαρροής, μεταβολή της δυσκαμψίας κλπ), τα οποία συνήθως εξιδανικεύονται σε διγραμμικά (σχήμα 2.2). Ένα διγραμμικό σύστημα έχει μια αρχική ελαστική δυσκαμψία K_{b1} , η οποία μετά το θεωρητικό σημείο διαρροής μετατρέπεται σε μία μικρότερη K_{b2} στην πλαστική περιοχή. Κατά αναλογία με το γραμμικό σύστημα θα έχουμε

$$T_{b1}, T_{b2} = 2\pi\sqrt{M/K_{b1}}, 2\pi\sqrt{M/K_{b2}} \quad (2.8\alpha)$$

$$\zeta_{b1}, \zeta_{b2} = C_b T_{b1} / (4\pi M), C_b T_{b2} / (4\pi M) \quad (2.8\beta)$$

Μία επιπλέον παράμετρος, που υπεισέρχεται στα διγραμμικά συστήματα, είναι ο λόγος διαρροής Q_y/W , ο οποίος συσχετίζει την δύναμη διαρροής Q_y με το βάρος W της κατασκευής. Έχει βρεθεί πως μια τιμή του λόγου διαρροής 5% δίνει τιμές δύναμης και μετατόπισης πολύ κοντά στα πραγματικά αποτελέσματα για συνήθη συστήματα μόνωσης.

Κατά αναλογία με το γραμμικό σύστημα μπορούμε να θεωρήσουμε μία ενεργή τιμή K_B (ο υποδείκτης B χρησιμοποιείται για ενεργές τιμές), η οποία ορίζεται ως (σχήμα 2.2(b))

$$K_B = S_b / X_b \quad (2.9\alpha)$$

και αντίστοιχα ενεργή ιδιοπερίοδο

$$T_B = 2\pi\sqrt{M/K_B} \quad (2.9\beta)$$

Το ενεργό ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης θα δίνεται από την σχέση

$$\zeta_B = \zeta_b + \zeta_h \quad (2.9\gamma)$$

όπου ζ_b το υπάρχον ποσοστό ιξώδους απόσβεσης

$$\zeta_b \approx C_b T_B / (4\pi M) \quad (2.10)$$

και ζ_h το επιπλέον ισοδύναμο ποσοστό ιξώδους απόσβεσης λόγω της υστερητικής συμπεριφοράς του συστήματος

$$\zeta_h = (2/\pi) A_h / (4S_b X_b) \quad (2.11)$$

όπου A_h το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης. Σημειώνεται εδώ ότι συνήθως το ζ_h είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ζ_b , που σημαίνει ότι για μη γραμμικά συστήματα καθοριστική είναι η απόσβεση της ενέργειας λόγω της υστερητικής συμπεριφοράς και όχι η ιξώδης απόσβεση του συστήματος.

Μία ακόμα παράμετρος είναι ο συντελεστής μη γραμμικότητας \underline{NL} που χαρακτηρίζει την μορφή του βρόχου υστέρησης και παίρνει τιμές από 0, για απόλυτα γραμμική συμπεριφορά, έως 1, για βρόχο απόλυτα ορθογωνικό. Αν P_1 , P_2 ορίζονται όπως δείχνει το σχήμα 2.2(c), τότε

$$\underline{NL} = P_1/P_2 \text{ ή ισοδύναμα } \underline{NL} = A_h / (4S_b X_b) = Q_y/S_b - X_y/X_b \quad (2.12)$$

Μία τελευταία παράμετρος που χαρακτηρίζει το βρόχο υστέρησης είναι το R (από τον όρο Ratio), ο λόγος της δυσκαμψίας στην πλαστική περιοχή προς την ελαστική δυσκαμψία.

$$R = K_{b2} / K_{b1} \quad (2.13)^{[4]}$$

2.4 Υπολογισμός σεισμικής απόκρισης^[1]

Για τον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης μίας κατασκευής, η οποία μονώνεται γραμμικά κατά τέτοιο τρόπο ώστε να κυριαρχεί η πρώτη ιδιοπερίοδος ταλάντωσης, εφόσον διατίθενται φάσματα σχεδιασμού, μπορούμε κατά προσέγγιση να υπολογίσουμε την μέγιστη μετατόπιση και τέμνουσα βάση από τις σχέσεις

$$X_b \approx S_D(T_b, \zeta_b) \quad (2.13a)$$

$$S_b \approx M S_A(T_b, \zeta_b) \quad (2.13b)$$

Στην περίπτωση διγραμμικού συστήματος, μπορούμε πάλι να χρησιμοποιήσουμε τα φάσματα σχεδιασμού αλλά τα αποτελέσματα θα ήταν λιγότερο αξιόπιστα απ' ό,τι στο γραμμικό. Για την εύρεση των μετακινήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας διορθωτικός συντελεστής C_F (εμπειρικός)

$$X_b \approx C_F S_D(T_B, \zeta_B) \quad (2.14a)$$

Εύκολα προκύπτει από το σχήμα 2.2(b) ότι

$$S_b \approx Q_y + K_{b2} (X_b - X_y) \quad (2.14b)$$

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ – ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η συμβολή των διαφόρων παραμέτρων σεισμικής μόνωσης στην απόκριση των κατασκευών, γίνεται ανάλυση σε Η/Υ ενός πλαισιακού φορέα οπλισμένου σκυροδέματος, πακτωμένο στην βάση του και σε άλλες έξι περιπτώσεις, όπου ο ίδιος φορέας μονώνεται σεισμικά με συστήματα διαφόρων χαρακτηριστικών. Η εργασία είναι μία νέα εφαρμογή ήδη υπάρχουσας εργασίας^[1] και έχει δανειστεί πολλά στοιχεία από αυτήν, ώστε να είναι δυνατή η ποιοτική επαλήθευση των αποτελεσμάτων, τα οποία θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Περίπτωση 1: Ο πλαισιακός φορέας είναι πακτωμένος στην βάση του. Έχει τέσσερις στάθμες: την στάθμη θεμελίωσης (0m), δύο ενδιάμεσες (3m και 6m) και την στάθμη οροφής (9m), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Τα οριζόντια στοιχεία (μήκους 4m) είναι πλακοδοκοί σκυροδέματος C28 με διαστάσεις 0.60 m κρέμαση, 0.25 m πλάτος κάτω πέλματος, 1 m πλάτος άνω πέλματος, 0.15 m πάχος πλάκας και οπλισμός S400, 2Φ18+4Φ14 άνω και 4Φ14 κάτω. Τα υποστυλώματα είναι διαστάσεων 0.5x0.5 m και οπλίζονται περιμετρικά με 8Φ16. Θεωρούμε διαφραγματική λειτουργία για κάθε μία από τις τέσσερις στάθμες του φορέα. Τρεις μάζες $M_1=M_2=M_3=60.77 \text{ kNsec}^2/\text{m}$ είναι συγκεντρωμένες στη μέση κάθε πλακοδοκού στις τρεις άνω στάθμες.

Ύστερα από δυναμική ανάλυση προέκυψε η τιμή της θεμελιώδους ιδιομορφής $T=0.5 \text{ sec}$. Για να μπορεί να γίνει μια πρώτη εκτίμηση των κινηματικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, εάν θεωρήσουμε πως η στάθμη κορυφής έχει συμπεριφορά μονοβάθμιου ταλαντωτή, με ιδιομορφή ταλάντωσης αυτήν της θεμελιώδους του πλαισίου, τότε η οριζόντια μετακίνηση της στάθμης κορυφής συνδέεται με αντίστοιχη οριζόντια δύναμη εφαρμοζόμενη στην στάθμη αυτή, πάντα μέσω $K=14881 \text{ kN/m}$. Θεωρούμε ότι ο φορέας έχει $\zeta=5\%$, όπως οι συνήθεις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές

και τις εξισώσεις του μονοβάθμιου ταλαντωτή προκύπτει $c_{cr} = 2369.58 \text{ kNsec/m}$ και επομένως $c = c_{cr}\zeta = 118.479 \text{ kNsec/m}$.

Σημείωση: οι μονάδες είναι σε kN, m, sec και στο εξής δεν θα αναγράφονται για εποπτικούς λόγους.

Πριν προχωρήσουμε στις επόμενες περιπτώσεις, θα ορίσουμε ένα ακόμα μέγεθος, τον δείκτη σεισμικής μόνωσης I , που είναι ο λόγος της ιδιοπεριόδου που αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή $T_{b1}(K_{b1})$, προς την ιδιοπερίοδο της αρχικής μη μονωμένης κατασκευής T (στην περίπτωση γραμμικού συστήματος μόνωσης ισχύει $T_{b1} = T_b$).

Περίπτωση 2 και 3: Ο πλαισιακός φορέας μονώνεται σεισμικά με γραμμικό σύστημα υψηλού βαθμού μόνωσης ($T=0.5, T_b=2 \rightarrow I=4$), με χαμηλό βαθμό πρόσθετης ιξώδους απόσβεσης $\zeta_b=5\%$ για την περίπτωση 2 και με υψηλό βαθμό πρόσθετης ιξώδους απόσβεσης $\zeta_b=20\%$ για την περίπτωση 3. Θεωρούμε ότι επειδή η δυσκαμψία του αρχικού μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος μόνωσης, τα κινηματικά χαρακτηριστικά του συστήματος μόνωσης θα είναι αυτά που θα καθορίζουν την απόκριση του φορέα. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις του κεφαλαίου 2 για εύρεση των υπόλοιπων παραμέτρων. Το ίδιο ισχύει και για τις περιπτώσεις που ακολουθούν.

Περίπτωση 4: Ο πλαισιακός φορέας μονώνεται σεισμικά με διγραμμικό σύστημα υψηλού βαθμού ελαστικής και πλαστικής ευκαμψίας ($T=0.5, T_{b1}=0.8, T_{b2}=2 \rightarrow I=1.6$) και με χαμηλό βαθμό πρόσθετης ιξώδους απόσβεσης $\zeta_b=4\%$. Επίσης $R = 0.16$.

Περίπτωση 5: Ο πλαισιακός φορέας μονώνεται σεισμικά με διγραμμικό σύστημα χαμηλού βαθμού ελαστικής και πλαστικής ευκαμψίας ($T=0.5, T_{b1}=0.3, T_{b2}=1.5 \rightarrow I=0.6$) και με χαμηλό βαθμό πρόσθετης ιξώδους απόσβεσης $\zeta_b=4\%$. Επίσης $R = 0.04$.

Περίπτωση 6: Ο πλαισιακός φορέας μονώνεται σεισμικά με διγραμμικό σύστημα χαμηλού βαθμού ελαστικής και υψηλού βαθμού πλαστικής ευκαμψίας ($T=0.5, T_{b1}=0.3, T_{b2}=3 \rightarrow I=0.6$) και με χαμηλό βαθμό πρόσθετης ιξώδους απόσβεσης $\zeta_b=3\%$. Επίσης $R = 0.01$.

Περίπτωση 7: Ο πλαισιακός φορέας μονώνεται σεισμικά με διγραμμικό σύστημα υψηλού βαθμού ελαστικής και υψηλού βαθμού πλαστικής ευκαμψίας ($T=0.5, T_{b1}=1, T_{b2}=5 \rightarrow I=2$) και με χαμηλό βαθμό πρόσθετης ιξώδους απόσβεσης $\zeta_b=3\%$. Επίσης $R = 0.04$.

Στις περιπτώσεις 4-7 θεωρήθηκε λόγος διαρροής $Q_y/W=5\%$.

Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις εφαρμόστηκε ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας^{[3],[4]} στο πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών SAP2000. Εφαρμόστηκε το επιταχυνσιογράφημα του σχήματος 3.2, διάρκειας 0-60sec με ακραίες τιμές επιτάχυνσης εδάφους 0.66g και -0.55g. Οι αναλύσεις έγιναν για τα πρώτα 12.1sec για κάθε 0.01sec (δηλαδή συνολικός αριθμός βημάτων-κύκλων υπολογισμού 1210).

Για τις περιπτώσεις 2-7, το σύστημα σεισμικής μόνωσης προσομοιώθηκε ως ένας ιξωδοελαστικός αποσβεστήρας σε συνδιασμό με εφέδρανα βάσης υστερητικής γραμμικής (περιπτώσεις 2,3) και διγραμμικής συμπεριφοράς (περιπτώσεις 4-7)^[4].

Τα δεδομένα του κεφαλαίου παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 3.1

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά: Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στους πίνακες 4.1, 4.2 και στα σχήματα 4.1, 4.2. Με την τοποθέτηση του συστήματος μόνωσης, παρατηρείται μια μεγάλη μείωση της τέμνουσας βάσης που αναλαμβάνει το πλαίσιο, για την συγκεκριμένη σεισμική διέγερση, σε σχέση με την περίπτωση 1. Οι τιμές κυμαίνονται από 4.8-34.4% της αρχικής. Η μέγιστη

επιτάχυνση στην οριζόντια διεύθυνση της στάθμης οροφής μειώνεται σημαντικά και οι τιμές κυμαίνονται από 11-22.4% της αρχικής. Μη επιθυμητά είναι τα αποτελέσματα της αύξησης της μετακίνησης της στάθμης οροφής σε τιμές 174-219% της αρχικής. Όμως η εικόνα αυτή αντιστρέφεται στα αποτελέσματα της σχετικής μετακίνησης ορόφων. Το τελευταίο μέγεθος είναι πολύ σημαντικό γιατί οι πιθανές βλάβες που μπορεί να προκληθούν εξαρτώνται από αυτό. Ο μέσος όρος της σχετικής μετακίνησης στις στάθμες μειώθηκε σημαντικά και οι τιμές κυμαίνονται από 7-34.9%. Τέλος, παρατηρώντας την απόκριση της στάθμης οροφής του πλαισιακού φορέα στον πίνακα 4.1 για την περίπτωση 1, η κορυφή στις φασματικές επιταχύνσεις συμβαίνει για $T=0.5$, όση δηλαδή η πρώτη ιδιοπερίοδος της κατασκευής, και είναι ασύγκριτα μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές της απόκρισης. Αυτή η συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική σε κατασκευές όπου κυριαρχεί η πρώτη ιδιομορφή (πολύ μεγάλο ποσοστό συμμετοχής ιδιομορφικής μάζας) και είναι αυτή που ουσιαστικά καθορίζει την απόκριση. Συνεπώς επαληθεύεται η αρχική υπόθεση πως ο πλαισιακός φορέας μπορεί να θεωρηθεί ως μονοβάθμιος ταλαντωτής.

Περίπτωση 2: Η τέμνουσα βάσης που αναλαμβάνει το σύστημα είναι 18% της αρχικής και θεωρείται μια μικρή μείωση σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Η πολύ μικρή απόσβεση του συστήματος (αυτό φαίνεται και από τον πολύ στενό βρόχο υστέρησης του πίνακα 4.1) είναι ο λόγος για τον οποίο συμβαίνουν οι μεγαλύτερες μετακινήσεις της στάθμης οροφής σε τιμή 219% της αρχικής. Η μέγιστη τιμή στο φάσμα απόκρισης συμβαίνει για την θεμελιώδη ιδιομορφή του συστήματος $T=2$ και για τις υπόλοιπες περιόδους οι τιμές είναι αρκετά μικρότερες. Επομένως και σε αυτήν την περίπτωση, που η συμπεριφορά του συστήματος μόνωσης είναι έντονα γραμμική και μικρής απόσβεσης, η πρώτη ιδιομορφή είναι αυτή που καθορίζει την απόκριση.

Περίπτωση 3: Η τέμνουσα βάσης που αναλαμβάνει το σύστημα είναι γενικά μειωμένη σε σχέση με την περίπτωση 2. Εφόσον αγνοήσουμε την «μεμονωμένη» αρνητική τιμή των -575 (23% της αρχικής), οι τιμές κυμαίνονται στο διάστημα ± 360 (14.4% της αρχικής). Ο λόγος είναι η μεγάλος βαθμός απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας του συστήματος. Για τον ίδιο λόγο έχουμε ακόμα μεγαλύτερη μείωση της μετατόπισης οροφής σε 177% της αρχικής αλλά και της σχετικής μετακίνησης των στάθμων σε 14%. Η επιτάχυνση της οροφής παραμένει στα ίδια επίπεδα με την περίπτωση 2. Η αύξηση της απόσβεσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνεισφοράς των μεγαλύτερων ιδιομορφών, χωρίς όμως να παύει η θεμελιώδης να είναι η πιο σημαντική για την απόκριση.

Περίπτωση 4: Από την περίπτωση αυτή και στο εξής, ασχολούμαστε με συστήματα μόνωσης διγραμμικής συμπεριφοράς. Η τέμνουσα βάσης είναι 16-19.2% της αρχικής, η επιτάχυνση οροφής 11.2%, η μετατόπιση οροφής 187% και η σχετική μετακίνηση στάθμων 18.6%. Όλες οι παραπάνω τιμές είναι ενδιάμεσες με τις αντίστοιχες των υπόλοιπων περιπτώσεων. Το σημαντικό στοιχείο που πρέπει να επισημανθεί εδώ, είναι πως ενώ η πρόσθετη ιξώδης απόσβεση ζ_b είναι μόλις 4%, η μορφή του φάσματος απόκρισης είναι παρόμοια με αυτή της περίπτωσης 3 με την μεγάλη απόσβεση. Ο λόγος είναι η υστερητική απόσβεση ζ_h του βρόχου, που φαίνεται να είναι πολύ πιο σημαντική από την αρχική ιξώδη του συστήματος, όσο αναφορά τον καθορισμό του ποσοστού συμβολής των μεγαλύτερων ιδιομορφών.

Περίπτωση 5: Το σύστημα χαρακτηρίζεται από την μεγαλύτερη ελαστική και πλαστική δυσκαμψία. Αυτό είχε δυσμενέστερα αποτέλεσμα στην κατασκευή, αφού είναι πιο φτωχή με διαφορά η μείωση την αρχικής τέμνουσας βάσης σε 34.4%, της επιτάχυνσης οροφής σε 22.4% και της σχετικής μετακίνησης ορόφων σε 34.9%. Η μορφή του φάσματος απόκρισης είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης περίπτωσης.

Περίπτωση 6: Το σύστημα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ελαστική και μικρή πλαστική δυσκαμψία. Η μικρή πλαστική δυσκαμψία είναι υπεύθυνη για την μικρή κλίση του βρόχου υστέρησης, μη αφήνοντας το σύστημα να αναλάβει παρά μόνο πολύ μικρές τιμές τέμνουσας βάσης, 8-11.2% της αρχικής. Το ίδιο συμβαίνει και με την επιτάχυνση και μετακίνηση οροφής 13.5% και 11.8% αντίστοιχα. Η μετακίνηση οροφής σε τιμή 174% της αρχικής είναι η μικρότερη απ' όλες τις άλλες περιπτώσεις λόγω της μεγάλης ελαστικής δυσκαμψίας. Από το διάγραμμα φασματικών επιταχύνσεων είναι εύλογη η μεγάλη συνεισφορά των μεγαλύτερων ιδιομορφών σε σχέση με την θεμελιώδη. Στην περίπτωση αυτή ο λόγος $R=K_{b2}/K_{b1}=0.01$, ο μικρότερος από όλους, δείχνοντας την πολύ μεγάλη πλαστική ευκαμψία σε σχέση με την ελαστική. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος αυτός, τόσο πιο έντονη είναι η συνεισφορά των μεγαλύτερων ιδιομορφών. Επίσης στο σχήμα 4.2 φαίνεται πως η επιτάχυνση από στάθμη σε στάθμη δεν είναι σταθερή αλλά μεγαλύτερη στην βάση και την κορυφή και μικρότερη στις μεσαίες στάθμες. Αυτό συμβαίνει λόγω της έντονης συνεισφοράς της 2^{ης} ιδιομορφής όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4^[1].

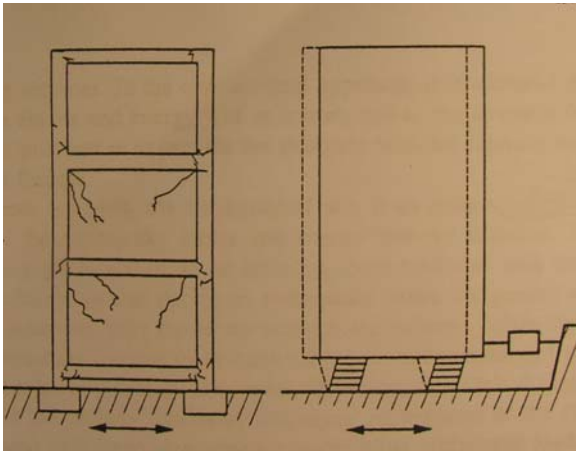
Περίπτωση 7: Η πολύ μεγάλη τιμή της πλαστικής ευκαμψίας, είχε ως αποτέλεσμα την μικρότερη κλίση του βρόχου υστέρησης και επομένως την μικρότερη ανάληψη τέμνουσας βάσης, μόλις 4.8-8% της αρχικής καθώς και τις μικρότερες τιμές στην επιτάχυνση και την σχετική μετακίνηση στάθμεων σε 11% και 7% αντίστοιχα. Και εδώ η συνεισφορά των μεγαλύτερων ιδιομορφών είναι σημαντική, όχι όμως τόσο όσο στην προηγούμενη περίπτωση, γιατί μπορεί η πλαστική ευκαμψία να είναι η μεγαλύτερη, όμως ο λόγος $R=0.04>0.01$. Αυτό μας δείχνει ότι μία υψηλή ελαστική ευκαμψία είναι ικανή να ενισχύσει τον ρόλο την πρώτης ιδιομορφής παρόλη την μεγάλη πλαστική ευκαμψία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

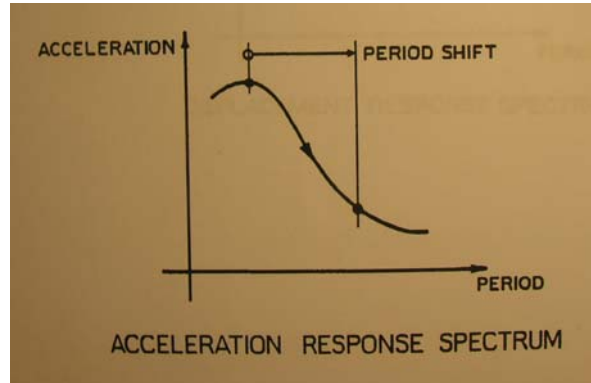
- [1] An Introduction to Seismic Isolation, R. Ivan Skinner, William H. Robinson and Graeme H. McVerry, DSIR Physical Sciences, Wellington, New Zealand, copyright 1993
- [2] Guide Specifications for Seismic Isolation Design, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, copyright 1999
- [3] Κανονισμός Επεμβάσεων (KAN.ΕΠΕ), ΟΑΣΠ, Σχέδιο κειμένου-1, Φεβρουάριος 2004
- [4] Computer and Structures Inc. Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS and SAFE, Berkeley, California, USA, September 2004

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

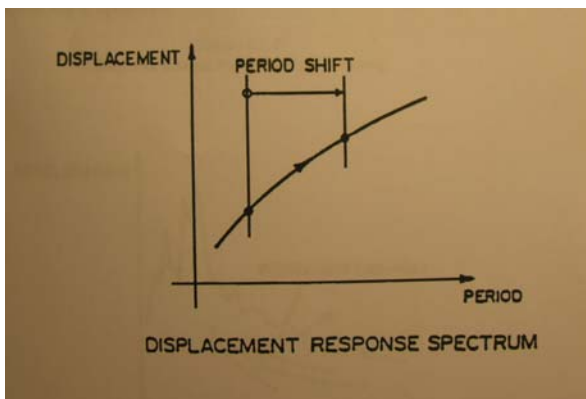
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο



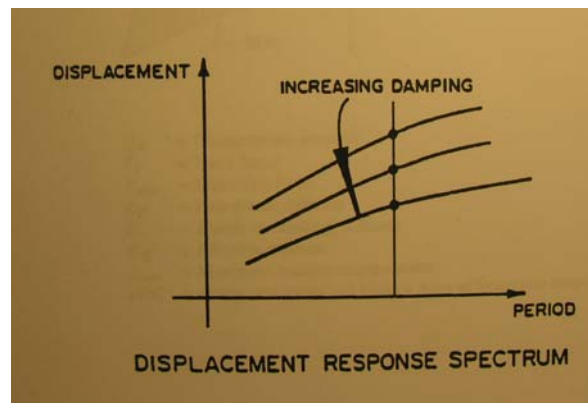
Σχήμα 1.1 Συμπεριφορά μονωμένου και μη μονωμένου κτιρίου στο σεισμό ^[1]



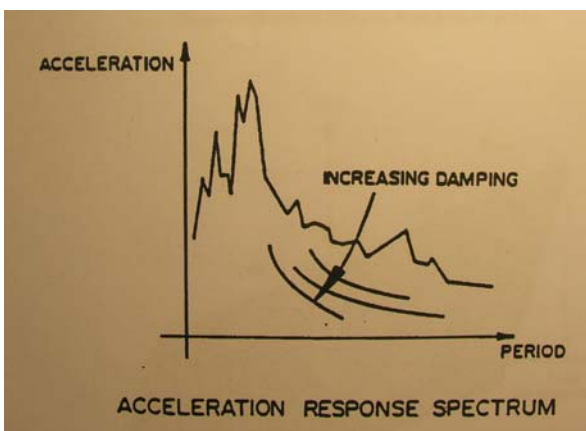
Σχήμα 1.2 Φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων: αύξηση ιδιοπεριόδου → μείωση επιταχύνσεων απόκρισης ^[2]



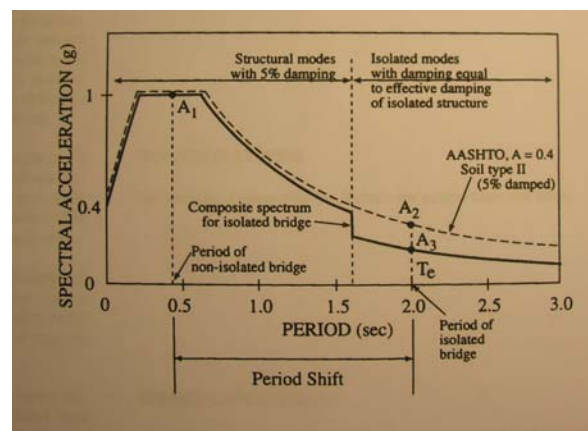
Σχήμα 1.3 Φάσμα απόκρισης μετακινήσεων: αύξηση ιδιοπεριόδου → αύξηση μετακινήσεων απόκρισης ^[2]



Σχήμα 1.4 Φάσμα απόκρισης μετακινήσεων: αύξηση απόσβεσης → μείωση μετακινήσεων απόκρισης ^[2]



Σχήμα 1.5 Φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων: αύξηση απόσβεσης → μείωση επιταχύνσεων απόκρισης ^[2]



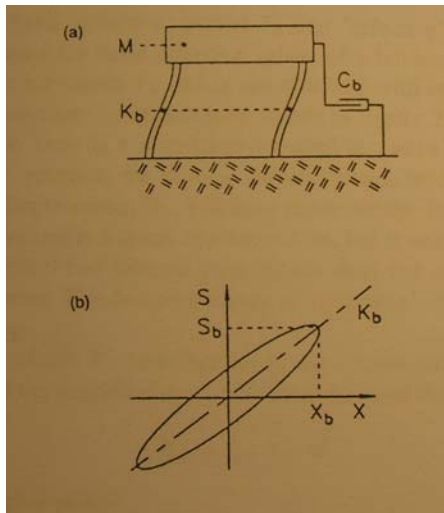
Σχήμα 1.6 Τυπικό φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων γέφυρας: διπλός μηχανισμός μείωσης της απόκρισης ($A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3$) ^[2]

Πίνακας 1.1^[1]

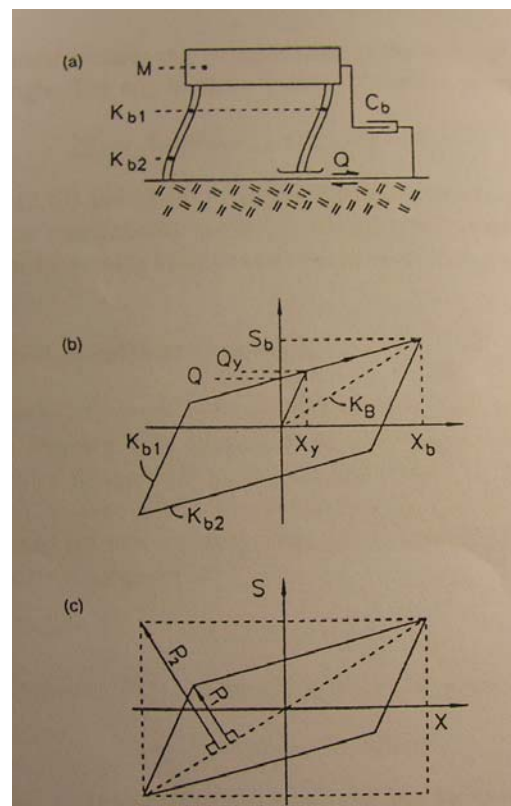
Ιδιότητα	Γραμμική συμπεριφορά	Μη γραμμική συμπεριφορά
Δύναμη επαναφοράς (παρέχει σταθερά ελατηρίου και ευκαμψία)	Ελαστομεταλλικά εφέδρανα * Εύκαμπτα πάσσαλοι ή υποστρώματα Ελατήρια Συστήματα με ρουλεμάν	Υψηλής απόσβεσης ελαστομερές εφέδρανο * Ελαστομερές εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου * Buffers Stepping Εφέδρανα τριβής εκκρεμούς (FPS) *
Απόσβεση	Ελαστομεταλλικά εφέδρανα Ιξώδοελαστικοί αποσβεστήρες	Υψηλής απόσβεσης ελαστομερές εφέδρανο Ελαστομερές εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου LED (Lead-Extrusion Damper) Διατάξεις μεταλλικών αποσβεστήρων Εφέδρανα οριζόντιας ολίσθησης-τριβής Εφέδρανα τριβής εκκρεμούς (FPS)

* έχουν και τις δύο αναγραφόμενες ιδιότητες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

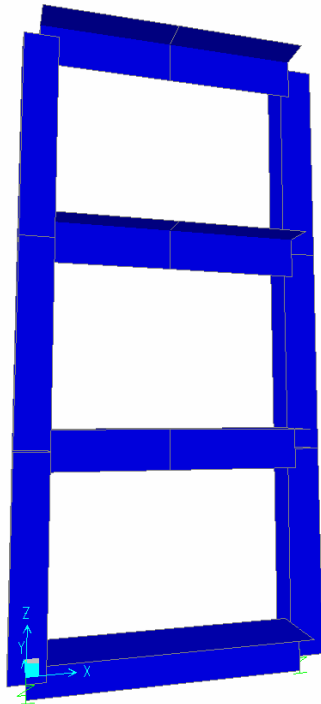


Σχήμα 2.1 Γραμμικό σύστημα μόνωσης: (a) προσομοίωμα, (b) διάγραμμα συμπεριφοράς^[1]

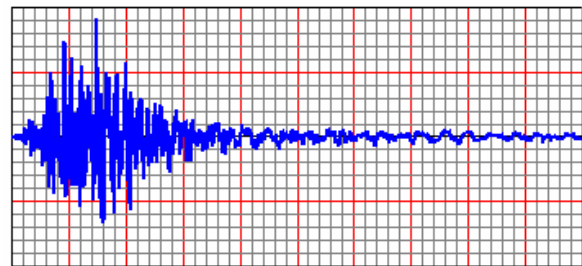


Σχήμα 2.2 Διγραμμικό σύστημα μόνωσης: (a) προσομοίωμα, (b) διάγραμμα συμπεριφοράς, (c), ορισμός του συντελεστή μη γραμμικότητας^[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο



Σχήμα 3.1 Αρχικό προσομοίωμα (από το γραφικό περιβάλλον του SAP2000)



Σχήμα 3.2 Επιταχυνσιογράφημα: οριζόντιος άξονας ο χρόνος 0-60sec, κατακόρυφος η επιτάχυνση εδάφους (σεισμός lace_nor-1, SAP2000)

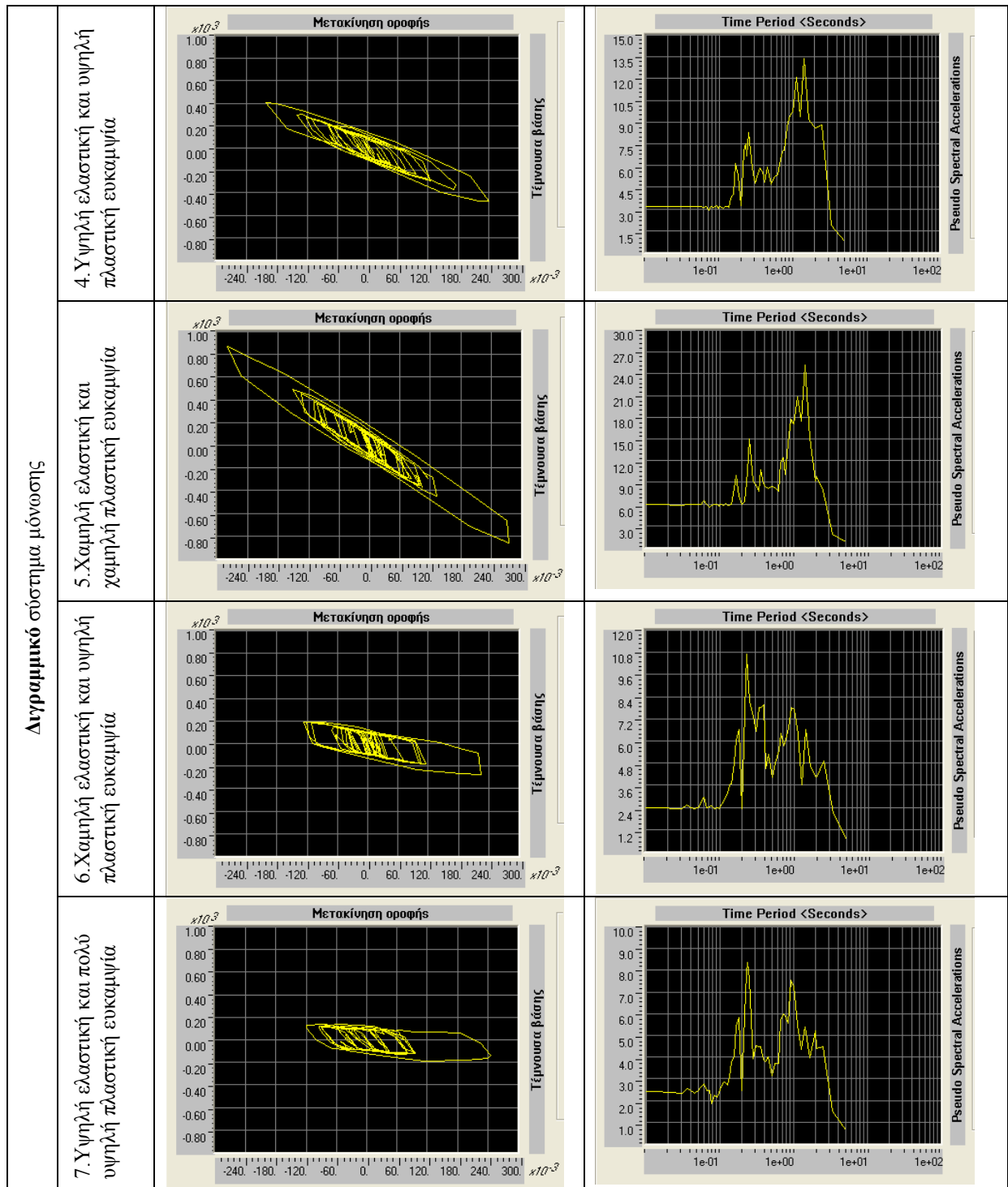
Πίνακας 3.1

	Μονάδες	Μη μονωμένο	Σεισμικά μονωμένο						
			Γραμμικό σύστημα		Μη γραμμικό σύστημα				
			Χαμηλή απόσβεση	Υψηλή απόσβεση	Υψηλή ελαστική και πλαστική ευκαμψία	Χαμηλή ελαστική και πλαστική ευκαμψία	Χαμηλή ελαστική και υψηλή πλαστική ευκαμψία	Υψηλή ελαστική και πολύ υψηλή πλαστική ευκαμψία	
Περίπτωση		1	2	3	4	5	6	7	
T αρχικού πλαισίου	sec	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
T _b ή T _{b1} , T _{b2} μόνωσης	sec		2	2	0.8, 2	0.3, 1.5	0.3, 3	1, 5	
ζ αρχικού πλαισίου	%	5	5	5	5	5	5	5	
ζ _b μόνωσης	%		5	20	4	4	3	3	
λόγος διαρροής Qy/W	%				5	5	5	5	
I= (T _b ήT _{b1})/T			4	4	1.6	0.6	0.6	2	
Ratio=K _{b2} /K _{b1}					0.16	0.04	0.01	0.04	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

Πίνακας 4.1

Περιπτώσεις		Διάγραμμα Τέμνουσας βάσης – Μετακίνησης στάθμης οροφής*	Φάσμα ψευδοεπιταχύνσεων απόκρισης στάθμης οροφής – Περίοδος**
Γραμμικό σύστημα μόνωσης	1. Μη μονωμένο		
	2. Χαμηλή απόσβεση		
	3. Υψηλή απόσβεση		



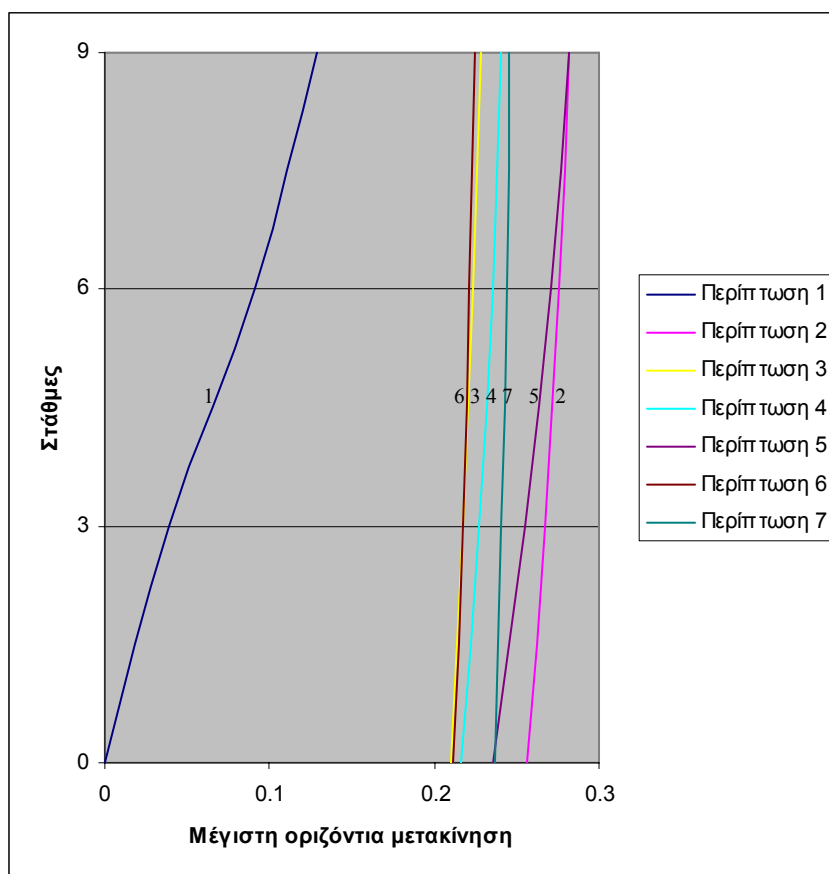
* Ο κατακόρυφος άξονας στην περίπτωση 1 είναι διαστήματος ± 2500 , σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις που είναι ± 1000 και ο οριζόντιος άξονας είναι διαστήματος ± 0.3 για όλες τις περιπτώσεις.

**Μόνο ο οριζόντιος άξονας είναι σταθερός σε όλες τις περιπτώσεις, διαστήματος 0.01-100, με λογαριθμική διαβάθμιση.

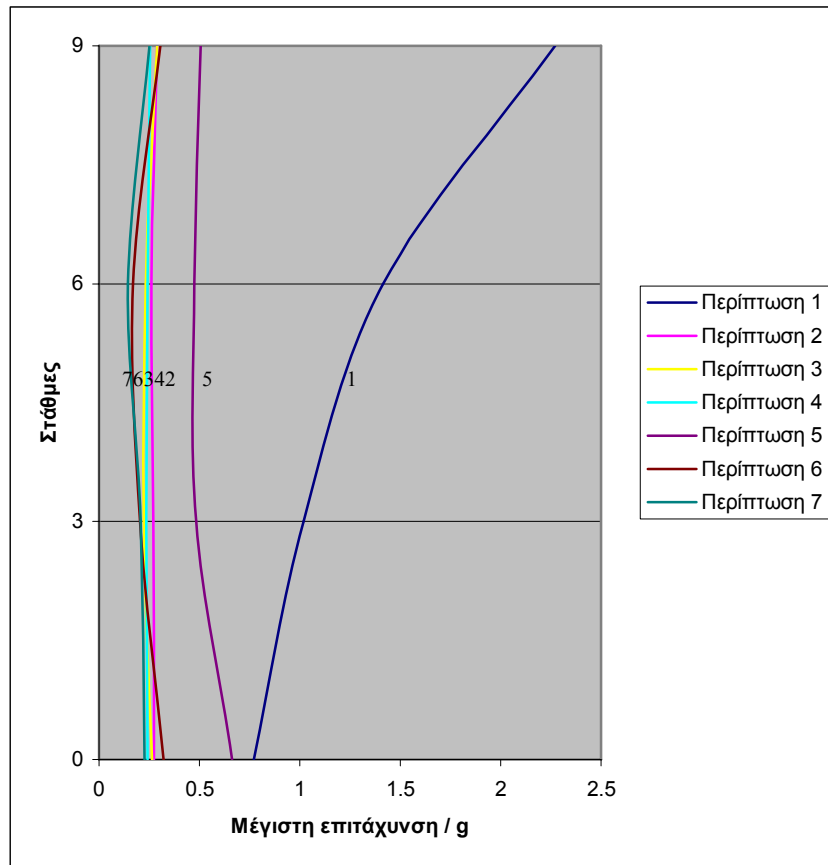
Πίνακας 4.2

Περίπτωση	Μη μονωμένο	Σεισμικά μονωμένο					
		Γραμμικό σύστημα		Μη γραμμικό σύστημα			
		Χαμηλή απόσβεση	Υψηλή απόσβεση	Υψηλή ελαστική και πλαστική ευκαμψία	Χαμηλή ελαστική και πλαστική ευκαμψία	Χαμηλή ελαστική και υψηλή πλαστική ευκαμψία	Υψηλή ελαστική και πολύ υψηλή πλαστική ευκαμψία
Τέμνουσα βάσης (max(+), min(-))	±2500	±450 18%*	+360,-575 14.4, 23%	+400,-480 16, 19.2%	±860 34.4%	+200,-280 8, 11.2%	+120,-200 4.8, 8%
Επιτάχυνση στάθμης οροφής (max) /g	2.27	0.29 12.8%*	0.29 12.8%	0.25 11.2%	0.51 22.4%	0.31 13.5%	0.25 11%
Μετατόπιση στάθμης οροφής (max)	0.129	0.282 219%*	0.228 177%	0.241 187%	0.282 219%	0.224 174%	0.246 191%
Σχετική μετακίνηση στάθμεων (μέσος όρος)	0.043	0.008 18.6%*	0.006 14%	0.008 18.6%	0.015 34.9%	0.004 11.8%	0.003 7%
Συμμετοχή 1-ιδιομορφής Συμμετοχή μεγαλύτερων-ιδιομορφών	Κυρίαρχη Ελάχιστη	Μεγάλη Ελάχιστη	Μεγάλη Μικρή	Μεγάλη Μικρή	Μεγάλη Μικρή	Μέτρια Μεγάλη	Μέτρια Μέτρια

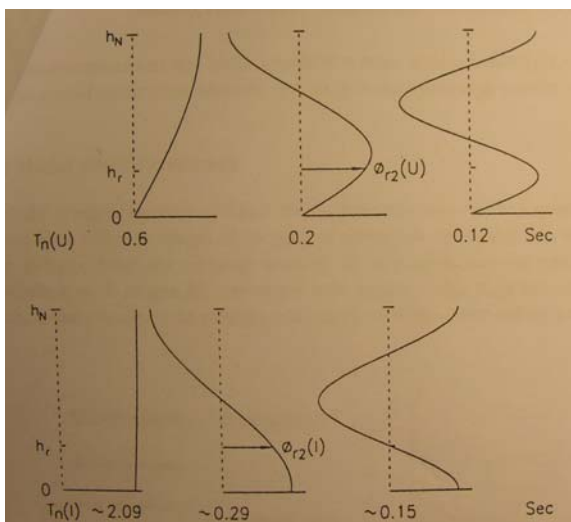
* είναι το ποσοστό της αντίστοιχης τιμής σε σχέση με αυτή του αρχικού μη μονωμένου πλαισίου



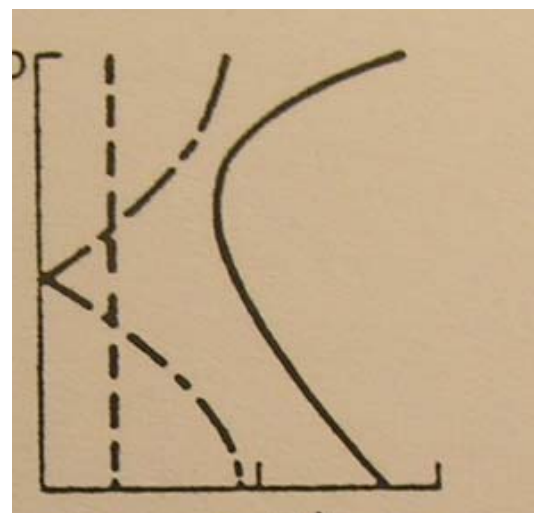
Σχήμα 4.1 Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση ανά στάθμη ύψους 0, 3, 6, 9



Σχήμα 4.2 Μέγιστη επιτάχυνση /g ανά στάθμη ύψους 0, 3, 6, 9



Σχήμα 4.3 Προφίλ τριών πρώτων τυπικών ιδιομορφές μη μονωμένης (πρώτη σειρά) και μονωμένης (δεύτερη σειρά) κατασκευής^[1]



Σχήμα 4.4 Τυπικό διάγραμμα μέγιστης επιτάχυνσης απόκρισης (οριζόντιος άξονας) για τις διάφορες στάθμες της κατασκευής, μονωμένη με σύστημα πολύ μικρού λόγου R. Η συνεχής γραμμή είναι η συνολική απόκριση, η διακεκομμένη της 1^{ης} και η αξονική της 2^{ης} ιδιομορφής^[1]