

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΝΗΡΤΗΜΕΝΩΝ ΟΡΟΦΩΝ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Ιωάννης Γ. Ραυτογιάννης & Κωνσταντίνος Χ. Σπυράκος
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 9., Ζωγράφου, 15780
e-mail: rafto@central.ntua.gr , spyrakos@hol.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

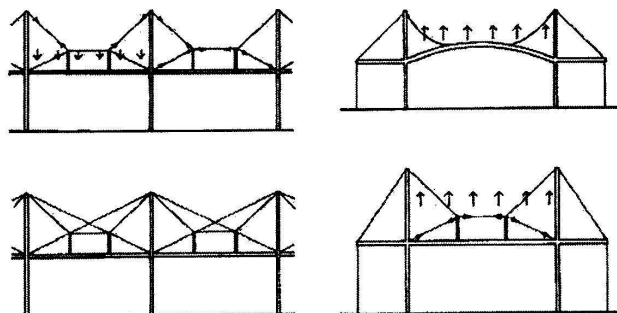
Στην εργασία αυτή μελετάται η μη-γραμμική συμπεριφορά συστημάτων ανηρτημένων οροφών υπό σεισμικά φορτία κοντινού πεδίου. Με εφαρμογή των εξισώσεων Lagrange προσδιορίζεται το αντίστοιχο σύστημα των εξισώσεων κίνησης για τα μοντέλα ανηρτημένων οροφών και γίνεται αριθμητική ολοκλήρωση με χρήση της μεθόδου Runge-Kutta. Για αντιπροσωπευτικούς συνδυασμούς γεωμετρικών παραμέτρων, δυσκαμψιών και απόσβεσης διεξάγεται μη-γραμμική δυναμική ανάλυση για τη μελέτη της συμπεριφοράς των ανηρτημένων οροφών σε σεισμούς κοντινού πεδίου και μακρινούς σεισμούς. Οι αναλύσεις καταδεικνύουν ότι: α) τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού βάσει των κανονισμών υποτιμούν σημαντικά την απόκριση των ανηρτημένων οροφών που υποβάλλονται σε σεισμικές δράσεις κοντινού πεδίου, και β) τα εύκαμπτα συστήματα οροφών επηρεάζονται επίσης σημαντικά από τις σεισμικές δράσεις κοντινού πεδίου, μια συμπεριφορά που δεν παρατηρείται στα δύσκαμπτα συστήματα.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλά σύγχρονα δομικά έργα, όπως εμπορικά κέντρα, αίθουσες αερολιμένων, αθλητικά και εκθεσιακά κέντρα χρησιμοποιούνται προηγμένα συστήματα ανηρτημένων οροφών που συνδυάζουν δομική ευστάθεια, οικονομία και ειδικές αρχιτεκτονικές απαιτήσεις. Στις τελευταίες δύο δεκαετίες, η ανάπτυξη των υπολογιστών και το περίπλοκο λογισμικό μη-γραμμικών αναλύσεων FEM επιτρέπουν στους μηχανικούς να μελετήσουν και να χρησιμοποιήσουν συστήματα ανηρτημένων οροφών σε περίπλοκα μεγάλης κλίμακας δομικά έργα, μερικά από τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν μεταξύ των πλέον προηγμένων παραδειγμάτων της εφαρμοσμένης μηχανικής.

Μια αξιόπιστη μη-γραμμική στατική και δυναμική ανάλυση συστημάτων ανηρτημένων οροφών μπορεί να επιτευχθεί μέσω περίπλοκων αναλύσεων FEM, στις οποίες η κατασκευή προσομοιώνεται με μοντέλα που περιέχουν μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Εντούτοις, η μόρφωση για λόγους σχεδιασμού μοντέλων συστημάτων ανηρτημένων οροφών με πεπερασμένα στοιχεία είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολύ χρόνο και ειδική εμπειρία. Αφ' ετέρου, τα αντίστοιχα απλά μοντέλα συστημάτων ανηρτημένων οροφών με μερικούς μόνο βαθμούς ελευθερίας που παρουσιάζονται εδώ μπορούν να προσομοιώσουν με αξιοπιστία την απόκριση των πραγματικών κατασκευών.

Τα συστήματα ανηρτημένων οροφών απαιτούν αναρτήσεις στο χώρο και εγκάρσιες ενισχύσεις, όντας ευαίσθητα σε οριζόντιες ταλαντώσεις, και μπορούν να χάσουν τη ευστάθειά τους λόγω καταστροφικού δυναμικού λυγισμού. Αφ' ετέρου, οι διπλές και οι πολλαπλώς ανηρτημένες οροφές μπορούν να υπερνικήσουν τα ανωτέρω μειονεκτήματα των απλών αναρτήσεων με επαναλαμβανόμενους επίπεδους σχηματισμούς, που μπορούν αποτελεσματικά να παραλαμβάνουν φορτία άνωσης, όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχ.1.



Σχ. 1: Απλά μοντέλα συστημάτων ανηρημένων οροφών

Επειδή πρόκειται για εύκαμπτα συστήματα, η απόκριση των ανηρημένων οροφών επηρεάζεται συνήθως από δυναμικά φορτία με μεγάλες ιδιοπεριόδους. Η απόκριση τέτοιων συστημάτων σε φορτία ανέμου έχει μελετηθεί εκτενώς και ενσωματώνεται αυτήν την περίοδο σε διάφορους κώδικες, π.χ. στον Ευρωκώδικα 1 [2]. Οι μεγάλες ιδιοπεριόδοι που χαρακτηρίζουν τα συστήματα αυτά μπορούν να τα προστατεύσουν από σεισμικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές ιδιοπεριόδους, μπορούν εντούτοις να αποτελέσουν πρόβλημα όσον αφορά σεισμικές κινήσεις λόγω σειμών κοντινού πεδίου που χαρακτηρίζονται από παλμούς με μεγάλη χρονική διάρκεια.

Οι έρευνες για την απόκριση των κατασκευών που βρίσκονται κοντά σε ρήγματα έχουν αυξηθεί αισθητά μετά από το σεισμό του Northridge το 1994 και τον πιο πρόσφατο σεισμό του Kobe το 1995. Οι παράμετροι των εδαφικών κινήσεων του σεισμού του Northridge είχαν εκτεταμένες επιπτώσεις στο σεισμικό σχεδιασμό και ειδικά στο σχεδιασμό των εύκαμπτων κατασκευών. Έχει διαπιστωθεί ότι οι κατασκευές με μέσες και μεγάλες ιδιοπεριόδους (από 0.5 έως 2.5 sec) φαίνεται να επηρεάζονται συνήθως από τις εδαφικές κινήσεις που χαρακτηρίζονται από έναν παλμό ταχύτητας, ενώ οι μεγάλοι παλμοί μετατοπίσεων είναι καταστρεπτικοί για τις κατασκευές με μεγάλες ιδιοπεριόδους, δηλ. Για ιδιοπεριόδους μεγαλύτερες των 3 sec. Εντούτοις, πρέπει να αναγνωριστεί η πρωτοποριακή συνεισφορά και άλλων ερευνητών, όπως του Bertero [4], που μελέτησαν την απόκριση των κατασκευών σε σειμούς κοντινού πεδίου, όπως του σεισμού του San Fernando.

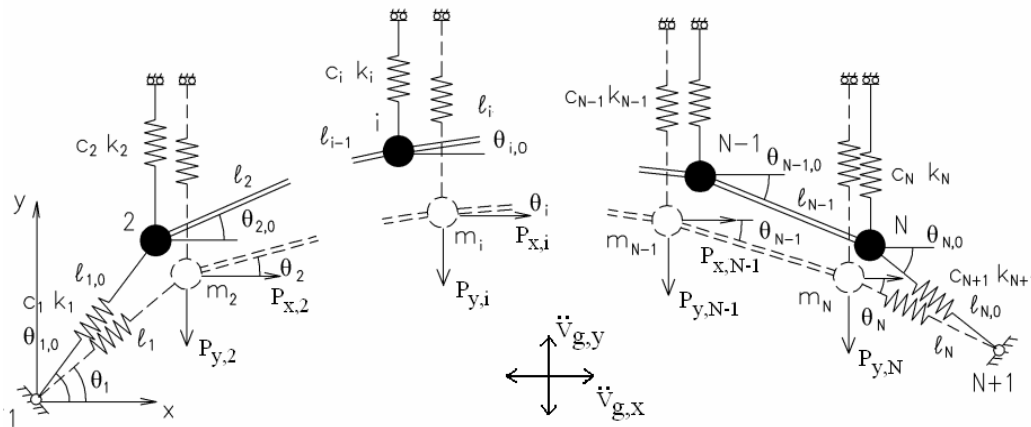
Οι εδαφικές κινήσεις από σειμούς κοντινού πεδίου με παλμό μπορούν να προκαλέσουν εντυπωσιακά υψηλές αποκρίσεις που θα μπορούσαν να υπερβούν κατά πολύ την φέρουσα ικανότητα των εύκαμπτων κατασκευών. Ο Iwan [5] διαπίστωσε ότι οι παλμοί στις εδαφικές κινήσεις σειμών κοντινού πεδίου ταξιδεύουν καθ' ύψος των κτηρίων ως κύματα, και ότι οι συμβατικές τεχνικές που χρησιμοποιούν την μέθοδο υπέρθεσης και την φασματική απόκριση μπορεί να μην πιάσουν τα αποτελέσματα αυτών των παλμών.

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι διπλός: α) να διατυπώσει το πρόβλημα σεισμικής ανάλυσης των ανηρημένων οροφών με μια μεθοδολογία που να μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε έναν προκαταρκτικό σχεδιασμό, και β) να διερευνήσει την απόκριση των ανηρημένων οροφών σε εδαφικές κινήσεις από σεισμό κοντινού πεδίου.

2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΡΟΦΗΣ - ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Τα συνήθη συστήματα ανηρημένων οροφών εδράζονται σε ελαστικές στηρίξεις και αποτελούνται από ένα χωρικό ζευκτό με αρθρωτά συνδεδεμένα μέλη και διάφορους αναρτήρες που στηρίζουν το σύστημα. Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιείται ως απλό, πλην όμως ρεαλιστικό, μοντέλο ανηρημένων οροφών με πολλαπλή ανάρτηση το σύστημα N-βε που φαίνεται στο Σχ. 2. Το μοντέλο αποτελείται από κατακόρυφα N-1 γραμμικά ελατήρια

με δυσκαμψία k_i ($i = 2,3,\dots,N$), τα αντίστοιχα συστήματα απόσβεσης c_i ($i = 2,3,\dots, N$) και από $N-1$ συγκεντρωμένες μάζες m_i ($i = 2,3,\dots, N$) που διασυνδέονται μέσω των $N-2$ αβρών άκαμπτων ράβδων με μήκος l_i .



Σχ. 2: Σύστημα ανηρτημένης οροφής με N -βαθμούς ελευθερίας

Τα συστήματα απόσβεσης δεν παρουσιάζονται στο Σχ. 2 χάριν απλότητας. Οι κομβικές στηρίξεις 1 και $N+1$ είναι ακλόνητες αρθρώσεις που συνδέονται με τις μάζες m_2 και m_N μέσω των κεκλιμένων ελατηρίων με δυσκαμψία k_1 και k_{N+1} και απόσβεση c_1 και c_{N+1} , αντίστοιχα. Οι ελαστικές στηρίξεις προσομοιώνονται με τα ελατήρια k_1 και k_{N+1} που θεωρούνται ως αξονικά εκτεινόμενες ράβδοι με αρχικό μήκος $l_{1,0}$ και $l_{N,0}$, αντίστοιχα, ενώ στην παραμορφωμένη θέση (που παρουσιάζεται με τις διακεκομμένες γραμμές στο Σχ. 2) το μήκος τους γίνεται l_1 και l_N , αντίστοιχα. Δεδομένου ότι τα ελατήρια ανάρτησης 2 έως N δουν κυρίως στην κάθετη διεύθυνση και το σύστημα αναμένεται να εμφανίσει σχετικά μικρές οριζόντιες μετακινήσεις σε σχέση με το συνολικό μήκος του συστήματος, μπορεί να υποτεθεί ότι οι στηρίξεις των αναρτήρων μπορούν να ολισθήσουν ελεύθερα κατά μήκος των οριζόντιων τροχιών όπως φαίνεται στο Σχ. 2.

Η αρχική θέση του συστήματος μπορεί να περιγραφεί από τα μήκη των ράβδων $l_{1,0}$, l_2, \dots , και $l_{N,0}$, και τις αντίστοιχες γωνίες κατεύθυνσης $\theta_{1,0}$, $\theta_{2,0}, \dots$, και $\theta_{N,0}$. Δεδομένου ότι οι κόμβοι 1 και $N+1$ είναι ακλόνητες αρθρώσεις, η παραμορφωμένη θέση περιγράφεται από το μήκος l_1 και τις γωνίες $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}$. Το σύστημα είναι αρχικά σε ισορροπία που περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\left. \begin{aligned} x_{i,0} &= l_{1,0} \cos \theta_{1,0} + \sum_{j=2}^i l_j \cos \theta_{j,0} \\ y_{i,0} &= l_{1,0} \sin \theta_{1,0} + \sum_{j=2}^i l_j \sin \theta_{j,0} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

όπου, $x_{i,0}$ και $y_{i,0}$ είναι οι αρχικές συντεταγμένες του κόμβου i , και l_j και $\theta_{j,0}$ είναι το μήκος και η αρχική γωνία κατεύθυνσης της ράβδου j , αντίστοιχα. Η παραμορφωμένη θέση του συστήματος περιγράφεται από:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= l_1 \cos \theta_1 + \sum_{j=2}^i l_j \cos \theta_j \\ y_i &= l_1 \sin \theta_1 + \sum_{j=2}^i l_j \sin \theta_j \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

όπου, x_i και y_i είναι οι συντεταγμένες του κόμβου i , και θ_j είναι η γωνία κατεύθυνσης της ράβδου j στην παραμορφωμένη θέση. Η δυναμική ενέργεια U του συστήματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$U = \frac{1}{2} k_1 (\ell_1 - \ell_{1,0})^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^N k_i (\ell_1 \sin \theta_1 + \sum_{j=2}^{i-1} \ell_j \sin \theta_j - \ell_{1,0} \sin \theta_{1,0} - \sum_{j=2}^{i-1} \ell_j \sin \theta_{j,0})^2 +$$

$$+ \frac{1}{2} k_{N+1} \{ (\ell_{1,0} \cos \theta_{1,0} + \sum_{j=2}^{N-1} \ell_j \cos \theta_{j,0} + \ell_{N,0} \cos \theta_{N,0} - \sum_{j=1}^{N-1} \ell_j \cos \theta_j)^2 +$$

$$+ (\ell_{1,0} \sin \theta_{1,0} + \sum_{j=2}^{N-1} \ell_j \sin \theta_{j,0} + \ell_{N,0} \sin \theta_{N,0} - \sum_{j=1}^{N-1} \ell_j \sin \theta_j)^2 \} - \ell_{N,0} \quad (3)$$

Δεδομένου ότι το σύστημα προσομοιώνεται με συγκεντρωμένες μάζες m_i αγνοώντας την περιστροφική αδράνεια των άκαμπτων ράβδων, το έργο των εξωτερικών φορτίων Ω λόγω των σεισμικών δράσεων $P_i(t)$ που εφαρμόζονται στις μάζες υπό μορφή οριζόντιων και κατακόρυφων συνιστωσών, δηλ. $P_{x,i}(t)$ και $P_{y,i}(t)$, δίνεται από τη σχέση

$$\Omega = - \sum_{i=2}^N P_{x,i}(t) [\ell_1 \cos \theta_1 + \sum_{j=2}^{i-1} \ell_j \cos \theta_j - \ell_{1,0} \cos \theta_{1,0} - \sum_{j=2}^{i-1} \ell_j \cos \theta_{j,0}] -$$

$$- \sum_{i=2}^N P_{y,i}(t) [\ell_1 \sin \theta_1 + \sum_{j=2}^{i-1} \ell_j \sin \theta_j - \ell_{1,0} \sin \theta_{1,0} - \sum_{j=2}^{i-1} \ell_j \sin \theta_{j,0}] \quad (4)$$

Η κινητική ενέργεια K του συστήματος είναι

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^N m_i [(\dot{\ell}_1 \cos \theta_1 - \ell_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - \sum_{j=2}^{i-1} \ell_j \dot{\theta}_j \sin \theta_j)^2 +$$

$$+ (\dot{\ell}_1 \sin \theta_1 + \ell_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + \sum_{j=2}^{i-1} \ell_j \dot{\theta}_j \cos \theta_j)^2] \quad (5)$$

και η ενέργεια απόσβεσης F είναι

$$F = \frac{1}{2} c_1 (\dot{\ell}_1^2 + \ell_1^2 \dot{\theta}_1^2) + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^N c_i (\dot{\ell}_1 \sin \theta_1 + \sum_{j=1}^{i-1} \ell_j \dot{\theta}_j \cos \theta_j)^2 +$$

$$\frac{1}{2} c_{N+1} [(\dot{\ell}_1 \cos \theta_1 - \sum_{j=1}^{N-1} \ell_j \dot{\theta}_j \sin \theta_j)^2 + (\dot{\ell}_1 \sin \theta_1 + \sum_{j=1}^{N-1} \ell_j \dot{\theta}_j \cos \theta_j)^2] \quad (6)$$

Οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος κατά Lagrange είναι

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\ell}_1} \right) - \frac{\partial K}{\partial \ell_1} + \frac{\partial F}{\partial \dot{\ell}_1} + \frac{\partial U}{\partial \ell_1} &= - \frac{\partial \Omega}{\partial \ell_1} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_1} + \frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}_1} + \frac{\partial U}{\partial \theta_1} &= - \frac{\partial \Omega}{\partial \theta_1} \\ \dots \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_{N-1}} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_{N-1}} + \frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}_{N-1}} + \frac{\partial U}{\partial \theta_{N-1}} &= - \frac{\partial \Omega}{\partial \theta_{N-1}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

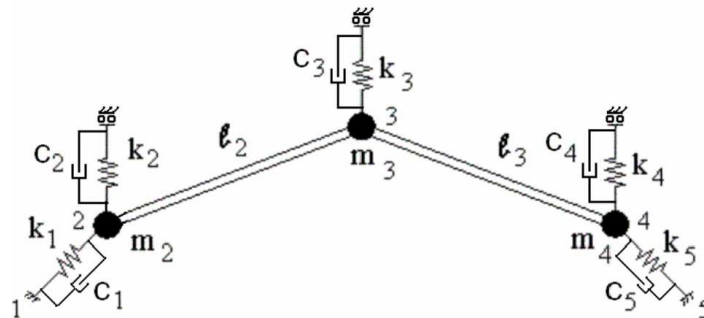
Το σύστημα που φαίνεται στο Σχ. 2 θεωρείται αρχικά ατελές, πράγμα που σημαίνει ότι μερικοί κόμβοι έχουν υποβληθεί σε μια μικρή αρχική μετατόπιση για την οποία όλα τα ελατήρια θεωρούνται αφόρτιστα. Προκειμένου να διευκολυνθεί η παραμετρική μελέτη που ακολουθεί, οι ακόλουθες αδιάστατες ποσότητες εισάγονται στις εξ(7):

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{P_2}{k_1 \ell_{1,0}}, \quad \tau = \sqrt{\frac{k_1}{m_2}} t, \quad \bar{\ell}_{N,0} = \ell_{N,0} / \ell_{1,0} \\ \bar{m}_i &= m_i / m_2, \quad \bar{p}_i = P_i / P_2, \quad \bar{\ell}_i = \ell_i / \ell_{1,0} \quad (i = 2, \dots, N) \\ \bar{c}_i &= c_i / \sqrt{k_1 m_2}, \quad \bar{k}_i = k_i / k_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

όπου k_1 και $\ell_{1,0}$ είναι η δυσκαμψία και το αρχικό μήκος του ελατηρίου στην αριστερή στήριξη, αντίστοιχα, και m_2 και P_2 είναι η μάζα και το συνολικό μέγεθος της σεισμικής δράσης στον κόμβο 2, αντίστοιχα. Οι εξισώσεις κίνησης που προκύπτουν λύνονται αριθμητικά υπό αδιάστατη μορφή.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αριθμητικά παραδείγματα αναφέρονται στο μοντέλο ανηρτημένης οροφής με τριπλή ανάρτηση (σύστημα 4-βε) που φαίνεται στο Σχ. 3 με $\bar{\ell}_2 = \bar{\ell}_3 = 3$, $\bar{\ell}_{4,0} = 1$, $2\bar{m}_3 = \bar{m}_4 = 0.5$, $\theta_{2,0} = -\theta_{3,0} = 30^\circ$ και $\theta_{1,0} = -\theta_{4,0} = 45^\circ$. Για τις πλέον αντιπροσωπευτικές γεωμετρικές παραμέτρους και ένα ευρύ φάσμα των μηχανικών ιδιοτήτων, λαμβάνεται η δυναμική απόκριση κάθε συστήματος για διάφορους τύπους σεισμικών διεγέρσεων. Μελετώνται οι ακόλουθες αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις για διάφορες δυσκαμψίες αναρτήρων (k_2, k_3, k_4) σε σχέση με την πλευρική δυσκαμψία ($k_1 = k_5$): 1) δύσκαμπτη ανάρτηση ($\bar{k}_2 = 2 \bar{k}_3 = \bar{k}_4 = 1$), 2) μέση ανάρτηση ($\bar{k}_2 = 2 \bar{k}_3 = \bar{k}_4 = 0.5$), και 3) εύκαμπτη ανάρτηση ($\bar{k}_2 = 2 \bar{k}_3 = \bar{k}_4 = 0.1$). Σε όλες τις περιπτώσεις, οι συντελεστές απόσβεσης αντιστοιχούν σε σταθερό λόγο απόσβεσης $\xi = 2\%$. Κατά συνέπεια, λαμβάνοντας υπόψη τις εξ(8), προσδιορίζονται οι ακόλουθοι συντελεστές απόσβεσης: $\bar{c}_1 = \bar{c}_2 = \bar{c}_3 = \bar{c}_4 = 0.028$. Στο σύστημα των τεσσάρων μη-γραμμικών εξισώσεων κίνησης, εξ(7), δίνεται μια μικρή αρχική παραμόρφωση με $\theta_{2,0}^* = 0.5^\circ$ και επιλύονται αριθμητικά με τη μέθοδο Runge-Kutta.



Σχ. 3: Μοντέλο ανηρτημένης οροφής με τριπλή ανάρτηση

Πίνακας 1: Ιδιοπερίοδοι του μοντέλου 4-βε για διάφορες δυσκαμψίες ανάρτησης

	$k_2=2 \ k_3 = k_4 =1$	$k_2=2 \ k_3 = k_4 =0.5$	$k_2=2 \ k_3 = k_4 =0.1$
T_1 (sec)	1.967 (v)	1.669 (v)	1.323 (v)
T_2 (sec)	1.528 (c)	1.179 (c)	1.125 (h)
T_3 (sec)	0.926 (h)	0.914 (h)	0.710 (c)

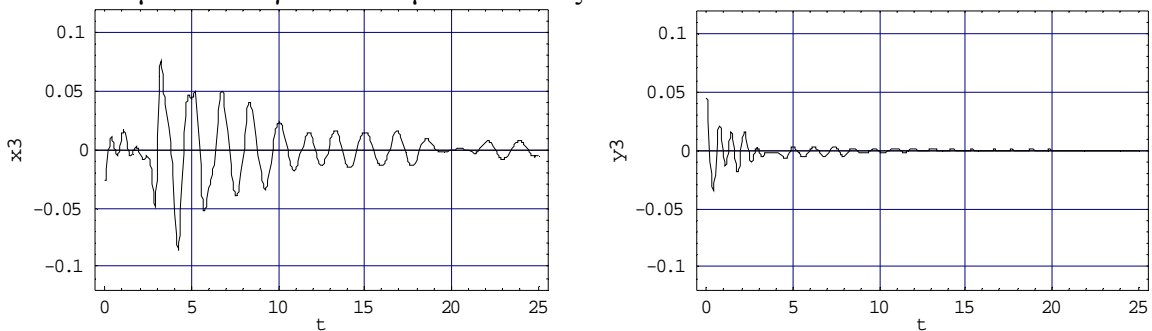
Σημ: (h) οριζόντιος τρόπος, (v) κατακόρυφος τρόπος, (c) μικτός τρόπος

Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι πρώτες τρεις ιδιοπερίοδοι του μοντέλου τριπλής ανάρτησης που αντιστοιχούν στον οριζόντιο, τον κατακόρυφο και τον μικτό τρόπο, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η ιδιοπερίοδος που συνδέεται με τον οριζόντιο τρόπο ταλάντωσης επηρεάζεται ελάχιστα από την μεταβολή της δυσκαμψίας ανάρτησης, σε αντίθεση με τις άλλες δύο ιδιοπεριόδους που συνδέονται με την κατακόρυφη κίνηση.

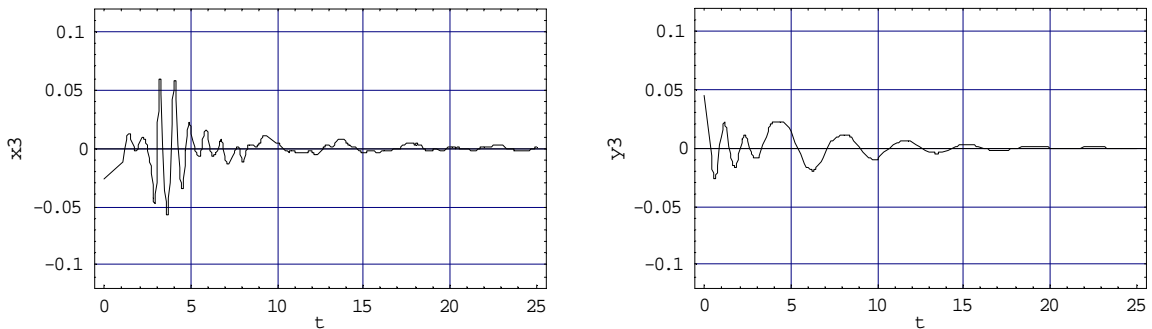
Προκειμένου να ερευνηθεί η συμπεριφορά του συστήματος στις εδαφικές κινήσεις σεισμού κοντινού πεδίου και να εξεταστεί η επάρκεια των αντισεισμικών κανονισμών όσον αφορά σε αυτές, επιλέγεται ένα σύνολο καταγραφών σεισμών κοντινού πεδίου που

γίνονται σε βράχο και επιλεγμένα μαλακά εδάφη. Επιλέχθηκαν οι εδαφικές επιταχύνσεις από το σεισμό του Αιγίου της 06-15-1995 και το σεισμό της Λευκάδας της 08-19-2003 όπως καταγράφηκαν μερικά χιλιόμετρα από τα επίκεντρα. Οι οριζόντιες συνιστώσες επιτάχυνσης κοντινού πεδίου των σεισμών Αιγίου και Λευκάδας χαρακτηρίζονται από παλμούς επιτάχυνσης με μέγιστο εύρος 0.52g. Οι καταγραφές ταχύτητας των σεισμών αυτών περιέχουν δύο ευδιάκριτους παλμούς διάρκειας 0.6 έως 0.7 sec και του εύρους περίπου 44 cm/sec. Για λόγους σύγκρισης, το σύστημα υποβάλλεται επίσης στα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα που αντιστοιχούν στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (φάσματα απόκρισης ΕΑΚ για κατηγορία εδάφους Β - έντονα διαβρωμένοι βράχοι και εδαφικές στρώσεις κοκκώδους υλικού με μέση πυκνότητα) και μέγιστες επιταχύνσεις 0.24g και 0.36g. Τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα αντιστοιχούν στους σεισμούς Αιγίου και Λευκάδας, αντίστοιχα.

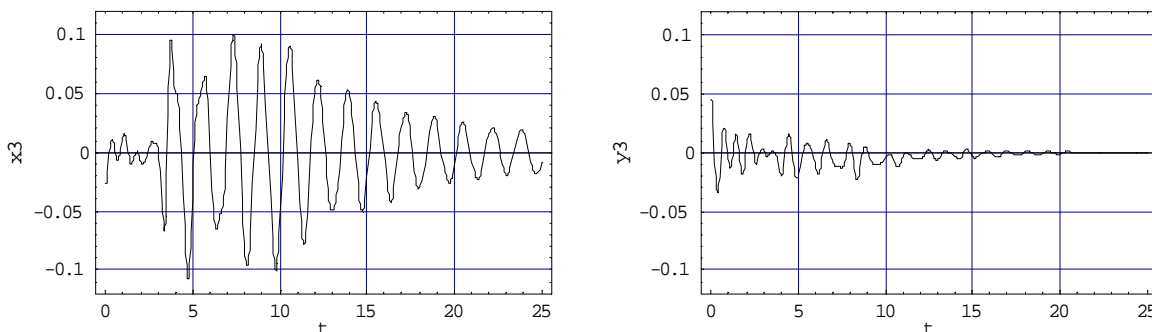
Στα Σχήματα 4 έως 7, οι x_3 και y_3 δείχνουν την οριζόντια και κατακόρυφη απόκριση του κεντρικού κόμβου 3, αντίστοιχα. Τα Σχήματα 4 και 5 παρουσιάζουν τις αποκρίσεις για τα μοντέλα με δύσκαμπτα και μαλακά συστήματα ανάρτησης, αντίστοιχα, που υποβάλλονται στο σεισμό του Αιγίου. Τα Σχήματα 6 και 7 παρουσιάζουν την απόκριση των ίδιων μοντέλων για το σεισμό Λευκάδας.



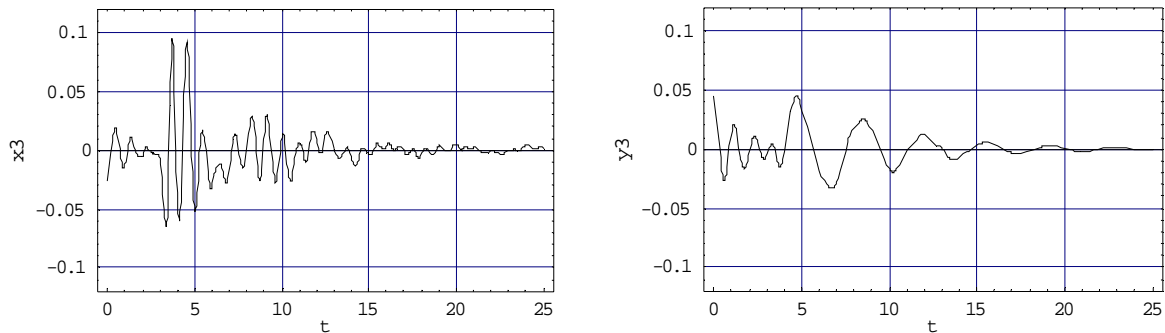
Σχ. 4: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 1$ στο σεισμό του Αιγίου



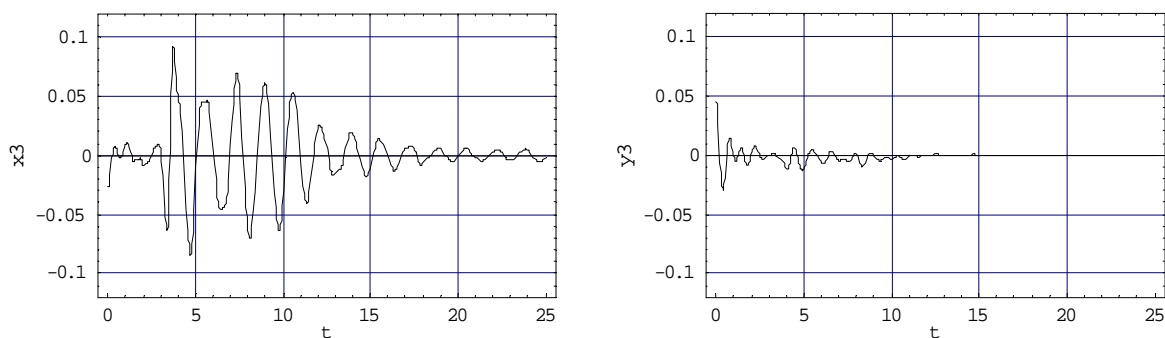
Σχ. 5: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 0.1$ στο σεισμό του Αιγίου



Σχ. 6: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 1$ στο σεισμό της Λευκάδας



Σχ. 7: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 0.1$ στο σεισμό της Λευκάδας

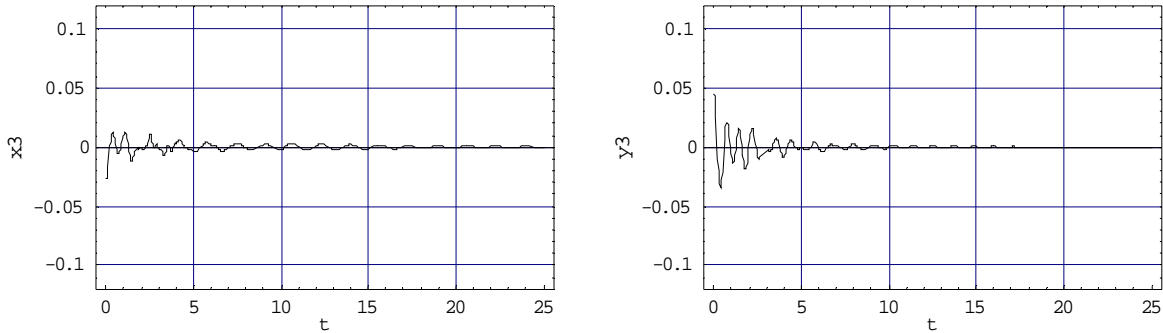


Σχ. 8: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 0.1$ στο σεισμό της Λευκάδας με $\xi=15\%$

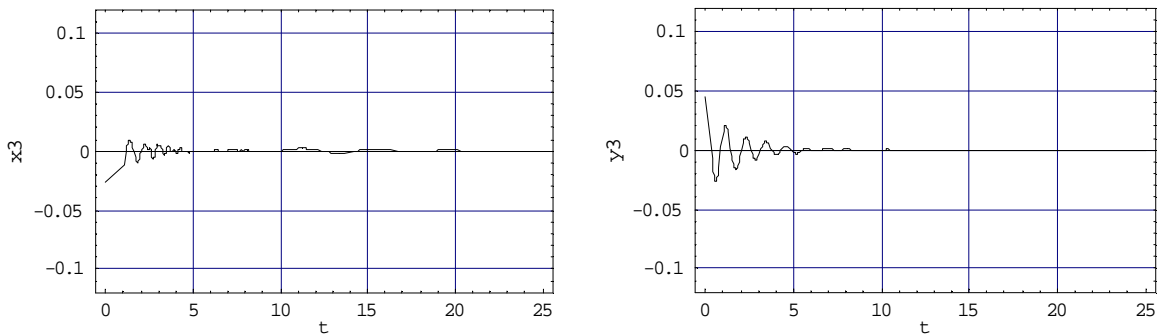
Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι: α) καθώς αυξάνεται η δυσκαμψία ανάρτησης, επιμηκύνεται η διάρκεια απόκρισης των ισχυρών συστημάτων ανάρτησης και β) καθώς η δυσκαμψία ανάρτησης μειώνεται το σύστημα παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερα εύρη απόκρισης στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μια μείωση 15% ως 20% του εύρους στην οριζόντια κατεύθυνση, ενώ μια αύξηση 50% σε 90% στην κατακόρυφη κατεύθυνση.

Στο Σχήμα 8 φαίνεται η απόκριση μιας οροφής 4-βε με ισχυρή ανάρτηση και λόγο απόσβεσης $\xi = 15\%$ για το σεισμό της Λευκάδας. Εδώ φαίνεται η σημαντική επίδραση της απόσβεσης στη μείωση της απόκρισης των συστημάτων κατά περίπου 50% τόσο στην κατακόρυφη όσο και στην οριζόντια κατεύθυνση. Μια παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για την επίδραση της απόσβεσης για άλλες περιπτώσεις δυσκαμψίας και σεισμικές καταγραφές, γεγονός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μειωθεί σημαντικά η απόκριση των συστημάτων ανηρημένων οροφών λόγω των σειμών κοντινού πεδίου. Στα Σχήματα 9 και 10 παρουσιάζεται η απόκριση των δύσκαμπτων και εύκαμπτων συστημάτων ανάρτησης για το τεχνητό επιταχυνσιογράφημα που παράγεται από τα φάσματα ΕΑΚ και αντιστοιχεί στο σεισμό του Αιγίου. Παρατηρείται ότι η απόκριση της οροφής για το σεισμό του Αιγίου υπερβαίνει κατά περίπου 20% την απόκριση του τεχνητού επιταχυνσιογραφήματος για τη δύσκαμπτη ανάρτηση και κατά 15% για τα εύκαμπτα συστήματα ανάρτησης. Μια παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για το τεχνητό επιταχυνσιογράφημα που αντιστοιχεί στο σεισμό της Λευκάδας όπως φαίνεται στα Σχήματα 11 και 12.

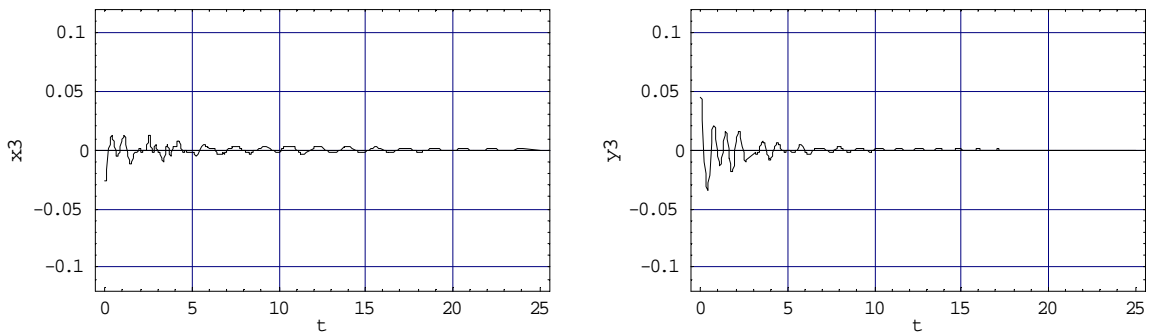
Αυτή η συμπεριφορά καταδεικνύει σαφώς ότι τα εύκαμπτα συστήματα οροφών επηρεάζονται πολύ από τους παλμούς που χαρακτηρίζουν τις καταγραφές κοντινού πεδίου, γεγονός που απαιτεί κατάλληλη προσοχή για το σεισμικό σχεδιασμό των ανηρημένων οροφών. Παραμετρικές αναλύσεις, που δεν παρουσιάζονται εδώ, δείχνουν παρόμοιες διαφορές στην κατακόρυφη απόκριση οροφών για ενδιάμεση δυσκαμψία ανάρτησης.



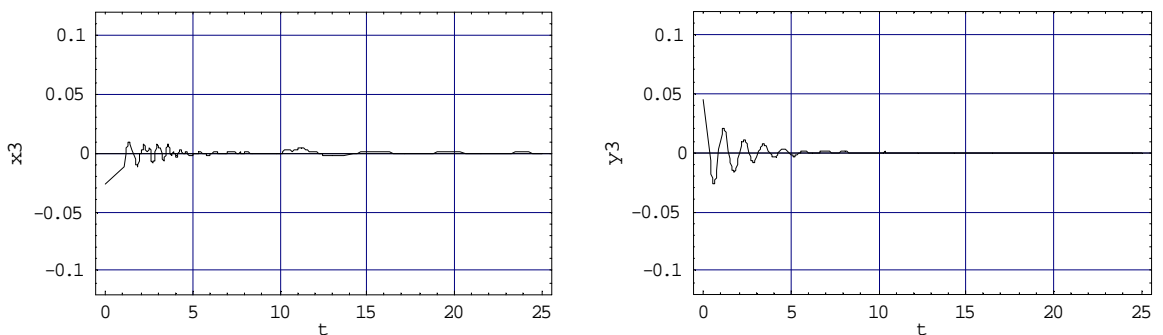
Σχ. 9: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 1$ στο σεισμό κατά ΕΑΚ (0.24g)



Σχ. 10: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 0.1$ στο σεισμό κατά ΕΑΚ (0.24g)



Σχ. 11: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 1$ στο σεισμό κατά ΕΑΚ (0.36g)



Σχ. 12: Απόκριση του συστήματος 4-βε με $\bar{k}_2 = \bar{k}_3 = 0.1$ στο σεισμό κατά ΕΑΚ (0.36g)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα αυτής της εργασίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται εδώ, η απόκριση του συστήματος είναι ευσταθής, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των πολλαπλώς ανηρτημένων οροφών που

- καταδεικνύεται με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία.
- Η κατακόρυφη δυσκαμψία του συστήματος ανάρτησης επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του συστήματος, ενώ η επίδραση της πλευρικής δυσκαμψίας των εδράσεων είναι λιγότερο σημαντική.
 - Καθώς αυξάνει η δυσκαμψία ανάρτησης, η διάρκεια της κατακόρυφης κίνησης επιμηκύνεται χρονικά, ενώ για μειωμένη δυσκαμψία ανάρτησης, το σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερα εύρη απόκρισης στην κατακόρυφη κατεύθυνση.
 - Η επίδραση της απόσβεσης είναι πολύ σημαντική όσον αφορά στη δραστική μείωση της απόκρισης συστημάτων ανηρημένων οροφών.
 - Ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός - ΕΑΚ μπορεί να υποτιμήσει σημαντικά την σεισμική απόκριση των συστημάτων ανηρημένων οροφών.
 - Μια σύγκριση μεταξύ των αποκρίσεων εύκαμπτων συστημάτων ανηρημένων οροφών σε κοντινούς και μακρινούς σεισμούς δείχνει ότι η απόκριση τέτοιων συστημάτων επηρεάζεται πολύ στην κατακόρυφη κατεύθυνση από τους παλμούς που χαρακτηρίζουν τους σεισμούς κοντινού πεδίου, ενώ παρατηρούνται ουσιαστικά μικρότερες διαφορές όσον αφορά τα εύρη απόκρισης στην οριζόντια κατεύθυνση.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Raftoyiannis IG, Michaltsos GT. Nonlinear dynamic stability of multi-suspended roof systems. Proceedings of ICTAM'04, Warsaw PL; 2004.
- [2] Eurocode 1 (EC 1), Actions on structures. European Committee for Normalization CEN, Brussels, 1991.
- [3] EAK, Greek Aseismic Code. O.A.S.P., Athens, 2000.
- [4] Bertero VV, Mahin SA, Herrera RA. Aseismic design implications of San Fernando Earthquake Records. Journal of International Association of Earthquake Engineering, 6(1):31-42, 1978.
- [5] Iwan WD. Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions. J. Struct. Engng. ASCE, 123(4):397-404, 1997.
- [6] Spyrakos CC, Maniatakis ChA, Taflambas J. Critical Evaluation of Near-Source Seismic Records in Greece. Proc. of ERES'05, Skiathos, Greece, 53-62, 2005.
- [7] Spyrakos CC, Toulaitos P, Patsilivas D, Pelekis G, Hampesis A, Maniatakis ChA. Seismic analysis and retrofit of a historic masonry building. Proc. of ERES'05, Skiathos, Greece, 523-532, 2005.

SEISMIC BEHAVIOR OF SUSPENDED ROOFS UNDER NEAR-SOURCE SEISMIC MOTIONS

Ioannis G. Raftoyiannis & Constantine C. Spyrakos

Department of Civil Engineering, National Technical University of Athens
9 Iroon Polytechniou Str., Zografou Campus, Athens 15780, Greece
e-mail: rafto@central.ntua.gr , spyrakos@hol.gr

SUMMARY

The nonlinear behavior of multi-suspended roof systems for seismic loads is studied. The study is based on a formulation that can be easily employed for a preliminary design of multi-suspended roofs subjected to seismic loads. Specifically, applying Lagrange's equations, the corresponding set of equations of motion for discrete models of multiple suspension roofs is obtained and numerical integration of the equations of motion is performed via the Runge-Kutta scheme. For representative realistic combinations of geometric, stiffness and damping parameters, a nonlinear analysis is employed to study the behavior of suspended roofs for near-source and far-field seismic motions. The analysis demonstrates that: i) code-specified design loads could dramatically underestimate the response of suspended roofs subjected to near-source ground motions and ii) flexible roofing systems are greatly affected by near-source ground motions, a behavior that is not observed for stiff systems.