

Επίδραση των Εφεδράνων Ολίσθησης στη Μεταβολή των Χαρακτηριστικών του Σεισμικού Κύματος

Friction pendulum bearings effect on the alteration of the seismic excitation characteristics

Ιωάννης ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ¹, Λάζαρος ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ², Αναξαγόρας ΕΛΕΝΑΣ³

Λέξεις κλειδιά: Σεισμική Μόνωση, Παράμετροι Σεισμικής Έντασης, Σεισμική Μηχανική
Key words: Base Isolation, Intensity Measures, Earthquake Engineering

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία μελετάται η επιρροή των εφεδράνων τριβής τύπου εκκρεμούς πολλαπλής καμπυλότητας στην διάδοση του σεισμικού κύματος, μέσω ανάλυσης των σεισμικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν μία διέγερση. Πραγματοποιούνται μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, υιοθετώντας προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, με τη χρήση 35 φυσικών επιταχυνσιογραφημάτων. Η διερεύνηση της επίδρασης της σεισμικής μόνωσης σε ένα μεγάλο πλήθος σεισμικών εντασιακών παραμέτρων μπορεί να μας προσδώσει πληροφορίες χρήσιμες τόσο για τη λειτουργία της σεισμικής μόνωσης αυτής καθ' εαυτής όσο και για τις δυνατότητες εφαρμογής της. Επιπλέον, από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, μπορούν να προκύψουν κατευθύνσεις για τη βέλτιστη επιλογή του τύπου και των χαρακτηριστικών του μονωτήρα, ανάλογα με τη χρήση.

ABSTRACT : In the present study the effect of the multi-spherical friction pendulum bearings on the transmissibility of the seismic excitation. That goal is achieved by examining the alteration of the ground motions intensity measures. Non-linear dynamic analysis are conducted, using a set of 35 natural accelerograms. The bearings are simulated with the finite element method. The investigation of the influence of base isolation on seismic signal using a vast number of IMs could provide useful information about the isolation systems' operation or the implementation potential abilities.

¹ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ερευνητής, Εργαστήριο Στατικής και Δυναμικής των Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: ikavvadi@civil.duth.gr

² Αναπληρωτής Καθηγητής, Εργαστήριο Στατικής και Δυναμικής των Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: lvasilia@civil.duth.gr

³ Καθηγητής, Εργαστήριο Στατικής και Δυναμικής των Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: elenas@civil.duth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμική μόνωση αποτελεί μία σύγχρονη τεχνική η οποία αποσκοπεί στη μείωση των σεισμικών δράσεων στην κατασκευή, απομονώνοντάς την από το έδαφος με την χρήση μονωτήρων. Με την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης, τροποποιώντας τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής, επιτυγχάνεται μείωση της σεισμικής απαίτησης (Naeim και Kelly 1999). Αυτό επιτυγχάνεται διότι μετατοπίζεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής εκτός του εύρους των δεσποζουσών συχνοτήτων των σεισμικών διεγέρσεων και παρέχεται στο σύστημα πρόσθετη απόσβεση (Kelly 1999).

Τα συστήματα σεισμικής μόνωσης πρέπει να παρέχουν πλευρική ευκαμψία στη κατασκευή για σημαντικά σεισμικά φορτία αλλά ταυτόχρονα να παραμένουν απαραμόρφωτα για φορτία λειτουργίας. Με τη χρήση των συστημάτων σεισμικής μόνωσης επιτυγχάνεται μείωση των απόλυτων επιταχύνσεων και παραμορφώσεων στην ανωδομή, με τις παραμορφώσεις και κατά συνέπεια τις βλάβες να περιορίζονται στους μονωτήρες. Η χρήση τους σε κατασκευές αποσκοπεί τόσο στην μείωση των εντατικών μεγεθών όσο και στη μείωση των σχετικών επιταχύνσεων των ορόφων (Vasiliadis 2016). Τα συστήματα σεισμικής μόνωσης κατηγοριοποιούνται σε 2 κύριους τύπους, τα ελαστομερικά εφέδρανα (Kelly 1997) και τα εφέδρανα ολίσθησης (Zayas et al. 1990).

Τα εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς εξετάστηκαν αρχικά από τους Zayas et al. (1990). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν και οι πρώτες πειραματικές διερευνήσεις από τους Constantinou et al. (1990a) ενώ αναλυτικό προσομοίωμα προτάθηκε από τους Constantinou et al. (1990b). Η λειτουργία των εφεδράνων ολίσθησης τύπου εκκρεμούς, στηρίζεται στη σχετική ολίσθηση μεταξύ των τμημάτων που συναποτελούν τα εφέδρανα. Η κατανάλωση ενέργειας είναι απόρροια της τριβής, ενώ λόγω της κοίλης επιφάνειας πάνω στη οποία πραγματοποιείται η οριζόντια κίνηση, στον μονωτήρα αναπτύσσονται δυνάμεις επαναφοράς στον μονωτήρα.

Την τελευταία δεκαετία προτάθηκαν συσκευές σεισμικής μόνωσης που διαθέτουν την ικανότητα να προσαρμόζουν την απόκριση τους. Η ικανότητα μεταβολής των χαρακτηριστικών τους ανάλογα με την ένταση της σεισμικής δράσης επιτυγχάνεται από εφέδρανα που διαθέτουν περισσότερες από μία επιφάνειες ολίσθησης (Kelly, 1999, Hall, 1999). Οι μονωτήρες ολίσθησης τύπου εκκρεμούς διακρίνονται αναλόγως του αριθμού των διεπιφανειών που ενεργοποιούνται κατά τη σεισμική φόρτιση. Οι πιο διαδεδομένοι είναι οι μονωτήρες μονής, διπλής και τριπλής καμπυλότητας οι οποίοι διαθέτουν μία, δύο και τέσσερις επιφάνειες ολίσθησης, αντίστοιχα (Fenz και Constantinou, 2008).

Η λειτουργία της σεισμικής μόνωσης συντελεί στη μείωση των επιταχύνσεων και στην αύξηση της περιόδου του σεισμικού κύματος που τελικά πλήττει την ανωδομή. Σημαντική είναι η διερεύνηση της επίδρασης της σεισμικής μόνωσης στη μεταβολή των χαρακτηριστικών του σεισμικού κύματος, μέσω ανάλυσης των σεισμικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν μία σεισμική διέγερση. Η εξέταση της

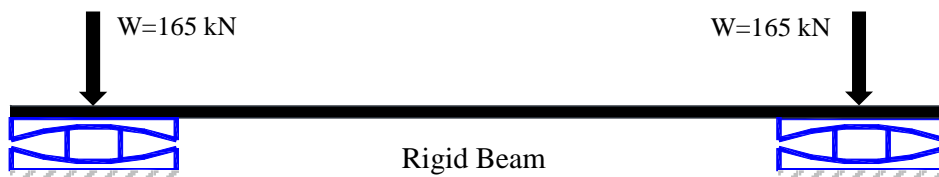
επίδρασης της σεισμικής μόνωσης σε ένα μεγάλο πλήθος χαρακτηριστικών του κύματος θα μπορούσε να προσδώσει πληροφορίες χρήσιμες για την ικανότητα εφαρμογής αυτής της τεχνικής ενίσχυσης σε ειδικές κατασκευές όπως είναι τα μνημεία.

Η μεταβολή των σεισμικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το σεισμικό κύμα θα μπορούσε να μας προσδώσει πληροφορίες τόσο για την λειτουργία της σεισμικής μόνωσης αυτής καθ' εαυτής όσο και για τη διεύρυνση της εφαρμογής της. Επίσης, αξιολογώντας τα αποτελέσματα, μπορούν να προκύψουν κατευθύνσεις για τη βέλτιστη επιλογή του τύπου και των χαρακτηριστικών του μονωτήρα, ανάλογα με τη χρήση τους.

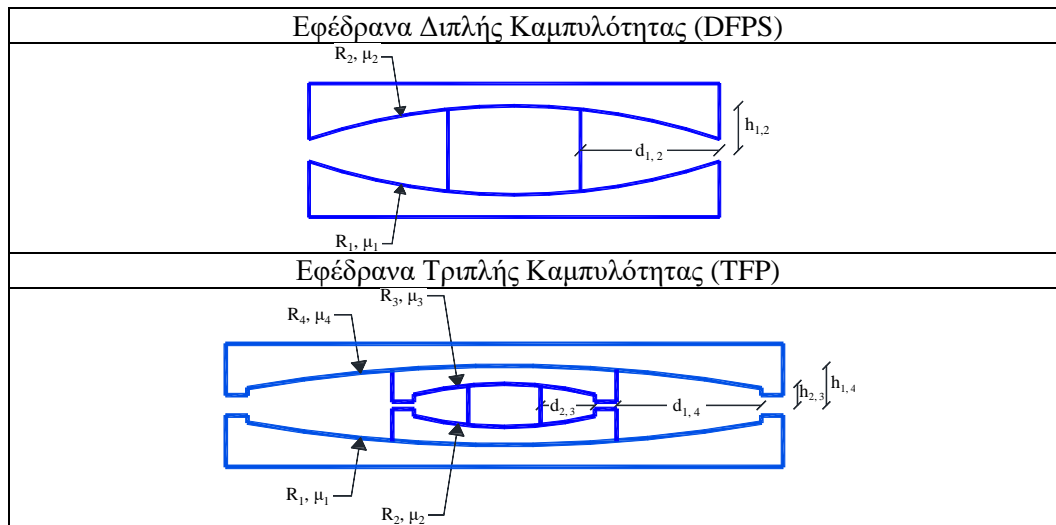
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Επιλέχθηκε μια απλοϊκή διάταξη για την επιβεβαίωση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιώνουν τους μονωτήρες. Η διάταξη αυτή αποτελείται από δυο πανομοιότυπους μονωτήρες που συνδέονται με μια άκαμπτη αβαρή πλάκα. Οι δυνάμεις βαρύτητας είναι συγκεντρωμένες στο πάνω μέρος των μονωτήρων και η εδαφική κίνηση εφαρμόζεται στη βάση τους σε όρους σεισμικής επιτάχυνσης (Σχήμα 1). Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ABAQUS / Explicit και η βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων έχει παρουσιαστεί από τους Kavnadias et al. (2017b).

Εξετάστηκαν δύο μονωτήρες διπλής καμπυλότητας και ένας τριπλής καμπυλότητας (Σχήμα 3). Σχετικά με τους εξεταζόμενους μονωτήρες διπλής καμπυλότητας επιλέχθηκε η άνω και κάτω κοίλη επιφάνεια να έχουν την ίδια καμπυλότητα και τον ίδιο συντελεστή τριβής, αντίστοιχα. Επίσης, στους μονωτήρες τριπλής καμπυλότητας επιλέχθηκε ίδια καμπυλότητα και συντελεστής τριβής για τις άνω και κάτω εξωτερικές επιφάνειες καθώς και ίδια καμπυλότητα και τριβή μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών, αντίστοιχα. Οι ενεργές ακτίνες καμπυλότητας R_{eff} , οι συντελεστές τριβής μ και οι αντίστοιχες ιδιοπερίοδοι ταλάντωσης, για κάθε εξεταζόμενο εφέδρανο, παρατίθενται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 1. Προσομοίωμα ανάλυσης.



Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά καθορισμού ιδιοτήτων μονωτήρων τριβής.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων μονωτήρων τριβής.

Model	$R_{1, \text{eff}}$ (mm)	$R_{2, \text{eff}}$ (mm)	μ_1	μ_2	T_1 (s)	T_2 (s)
DFPS3	1120	1120	0.1	0.1	3	-
DFPS2	500	500	0.1	0.1	2	-
TFP	2000	500	0.1	0.03	4.65	2

ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Για την ανάλυση της μεταβολής των σεισμικών παραμέτρων, εξετάζονται 10 παράμετροι, ορισμοί των οποίων παρατίθενται στον Πίνακα 2. Τα υπό μελέτη μεγέθη σεισμικής έντασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε άκρων τιμών (PGA, PGV), ενεργειακές (A_{rms} , V_{rms} IA) και παραμέτρους συχνοτικού περιεχομένου (PGV/PGA). Μια ακόμη ξεχωριστή κατηγοριοποίηση των σεισμικών παραμέτρων βασίζεται σε παραμέτρους που υπολογίζονται από τα χαρακτηριστικά των επιταχύνσεων, ταχυτήτων, μετατοπίσεων και του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμικού σήματος. Χρησιμοποιήθηκαν 35 επιταχυνσιογραφήματα φυσικών σεισμικών διεγέρσεων (Kanvadias et al., 2017a). Για την ανάλυση των σεισμικών παραμέτρων τα χαρακτηριστικά της εδαφικής διέγερσης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που υπολογίζονται από την χρονοϊστορία των επιταχύνσεων, μετρούμενη στη στάθμη της άκαμπτης μονωμένης βάσης.

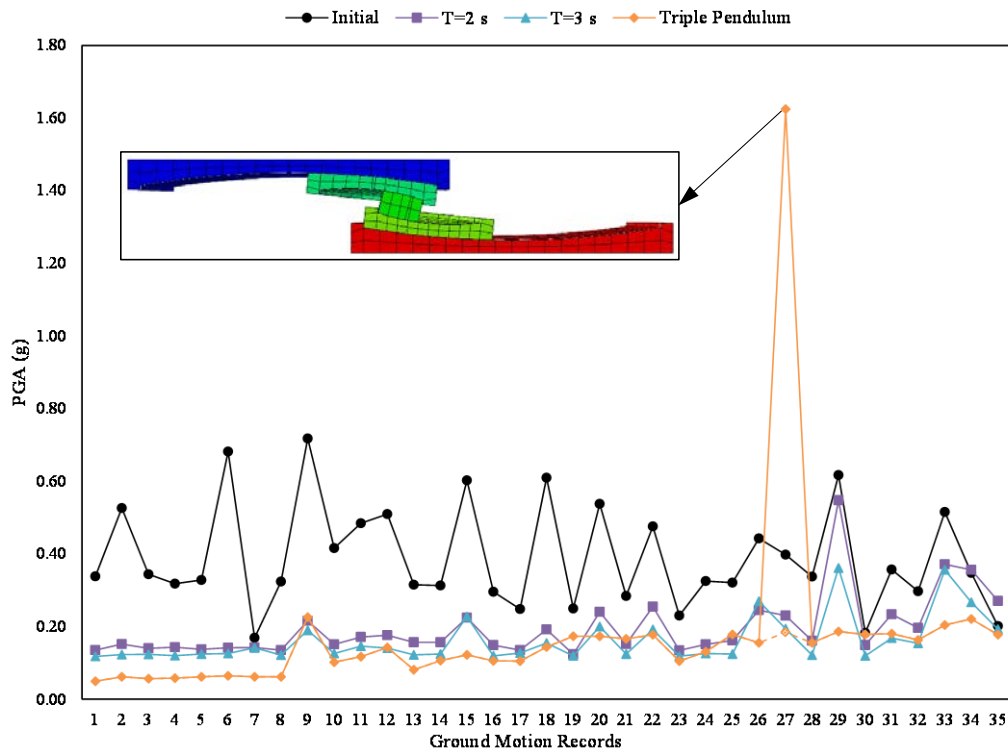
Πίνακας 2. Ορισμοί εξεταζόμενων σεισμικών παραμέτρων.

IM	Definition
PGA	$\max a(t) $
PGV	$\max v(t) $
A_{rms}	$\sqrt{\frac{1}{t_{tot}} \int_0^{t_{tot}} a(t)^2 dt}$
V_{rms}	$\sqrt{\frac{1}{t_{tot}} \int_0^{t_{tot}} v(t)^2 dt}$
I_A	$\frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{tot}} a(t)^2 dt$
CAV	$\int_0^{t_{tot}} a(t) dt$
S_E	$\int_0^{t_{tot}} v(t)^2 dt$
T_D	$T_{0.95} - T_{0.05}$
I_{FVF}	$PGV \cdot T_D^{0.25}$
PGV/PGA	

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

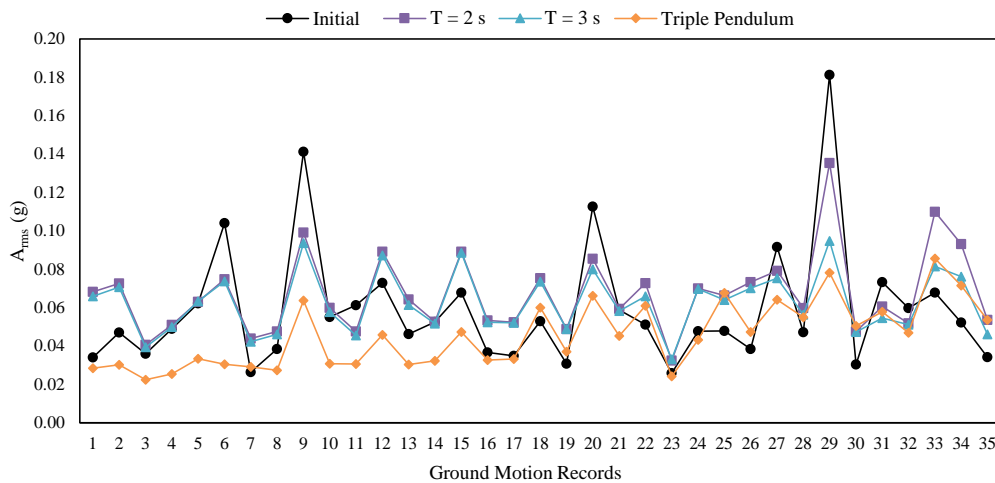
Στα Σχήματα 3 – 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε όρους των 10 εξεταζόμενων σεισμικών παραμέτρων. Σε όλα τα διαγράμματα, στον οριζόντιο άξονα κατατάσσονται οι σεισμικές διεγέρσεις κατά αύξουσα μέση περίοδο. Από την παρατήρηση της μέγιστης απόλυτη τιμή της επιτάχυνσης (PGA) (Σχήμα 3) ανά σεισμική διέγερση, για κάθε θεώρηση μονωτήρα, προκύπτουν χρήσιμες πληροφορίες. Συγκρίνοντας τους δύο μονωτήρες διπλής καμπυλότητας μεταξύ τους, ο μονωτήρας με τη μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας, μειώνει σε μεγαλύτερο βαθμό τη μέγιστη επιτάχυνση. Συγκριτικά με τους μονωτήρες διπλής καμπυλότητας ο μονωτήρας τριπλής καμπυλότητας που εξετάζεται έχει την ικανότητα να μειώνει ακόμα περισσότερο τη μέγιστη αναπτυσσόμενη επιτάχυνση. Μοναδική περίπτωση αύξησης της επιτάχυνσης της βάσης που παρατηρήθηκε είναι στην περίπτωση του μονωτήρα τριπλής καμπυλότητας που υπόκειται στον σεισμό υπ' αριθμόν 27. Αυτό συνέβη λόγω της εξάντλησης της ικανότητας μετακινήσεων όλων των επιφανειών του μονωτήρα. Στιγμιαία λόγω της κρούσης που παρατηρείται στους αποστάτες του μονωτήρα, η επιτάχυνση λαμβάνει αυξημένη τιμή. Επαναπροσδιορίζοντας την ικανότητα μετακίνησης των εξωτερικών

επιφανειών του μονωτήρα, αυξάνοντας δηλαδή την ικανότητα μετακίνησης, προκύπτει η αναμενόμενη ευνοϊκή απόκριση. Είναι εμφανές ότι η σεισμική μόνωση έχει καλύτερη απόδοση όταν υπόκειται σε σεισμικές διεγέρσεις υψηλής συχνότητας.



Σχήμα 3. Μέγιστες απόλυτες επιταχύνσεις.

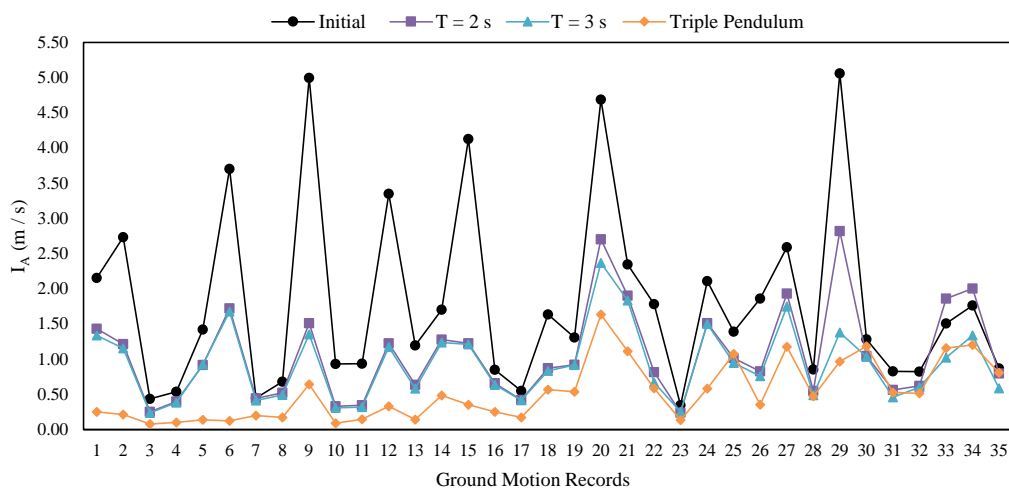
Οι σεισμικές παράμετροι A_{rms} , I_A και CAV αποτελούν ενεργειακές παραμέτρους. Ο υπολογισμός αυτών των τριών παραμέτρων βασίζεται στην επιφάνεια που εμπεριέχεται στην χρονοϊστορία των επιταχύνσεων της κάθε καταγραφής. Λόγω της κοινής υπολογιστικής βάσης είναι αναμενόμενο οι μεταβολές τους να ακολουθούν τον ίδιο κανόνα. Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης δεν φαίνεται να επιδρά ευνοϊκά στις συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως προκύπτει κυρίως από τη μεταβολή του δείκτη A_{rms} (Σχήμα 4). Μόνο στη περίπτωση εφαρμογής του μονωτήρα τριπλής καμπυλότητας παρατηρείται κατά μέσο όρο μείωση του συγκεκριμένου δείκτη.



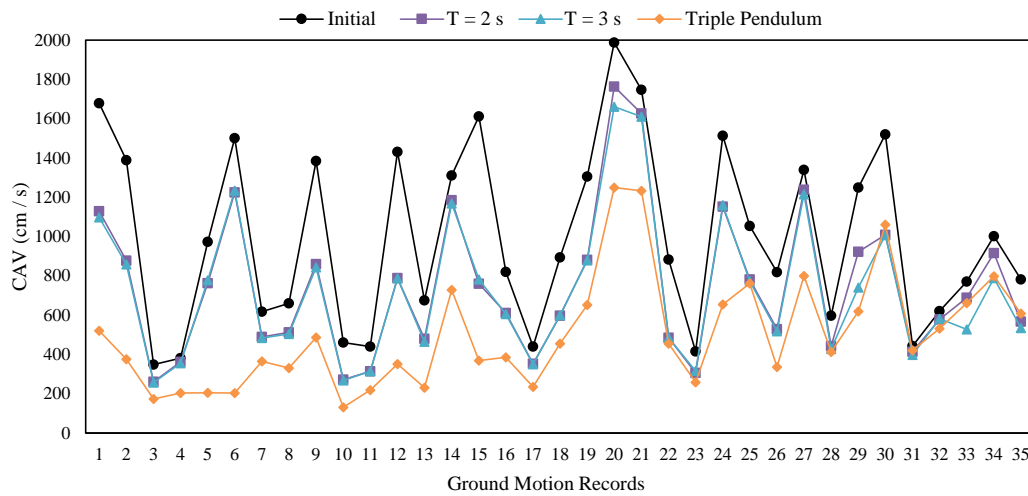
Σχήμα 4. Τιμές σεισμικής παραμέτρου A_{rms} .

Σε ότι αφορά τις μεταβολές των τιμών της ενεργειακής παραμέτρου I_A (Σχήμα 5), η μείωση τους είναι μεγαλύτερη στις περιπτώσεις διεγέρσεων υψηλής συχνότητας. Η απόδοση των μονωτήρων διπλής καμπυλότητας, ανεξάρτητα από την ακτίνα καμπυλότητας τους, είναι περίπου όμοια. Ο μονωτήρας που αντιστοιχεί σε ιδιοπερίοδο $T = 2$ s έχει αρνητική απόδοση στην περίπτωση διεγέρσεων χαμηλής συχνότητας. Η απόδοση του μονωτήρα τριπλής καμπυλότητας είναι εμφανώς καλύτερη σε σχέση με αυτή των μονωτήρων διπλής καμπυλότητας.

Σε ότι αφορά τη σεισμική παράμετρο CAV είναι ευδιάκριτη η καλύτερη απόδοση του μονωτήρα τριπλής καμπυλότητας σε σχέση με την απόδοση των μονωτήρων διπλής καμπυλότητας ανεξάρτητα με την καμπυλότητα που διαθέτουν (Σχήμα 6).



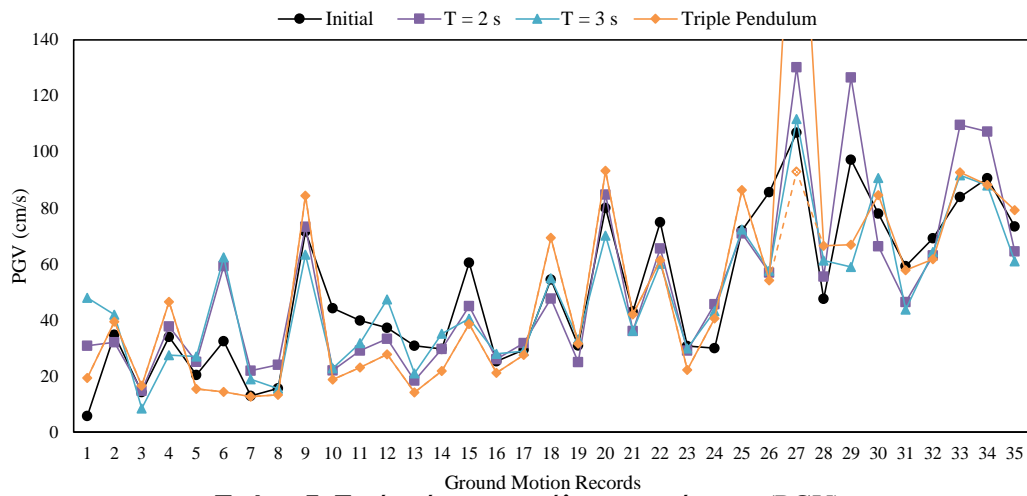
Σχήμα 5. Τιμές σεισμικής παραμέτρου I_A .



Σχήμα 6. Τιμές σεισμικής παραμέτρου CAV.

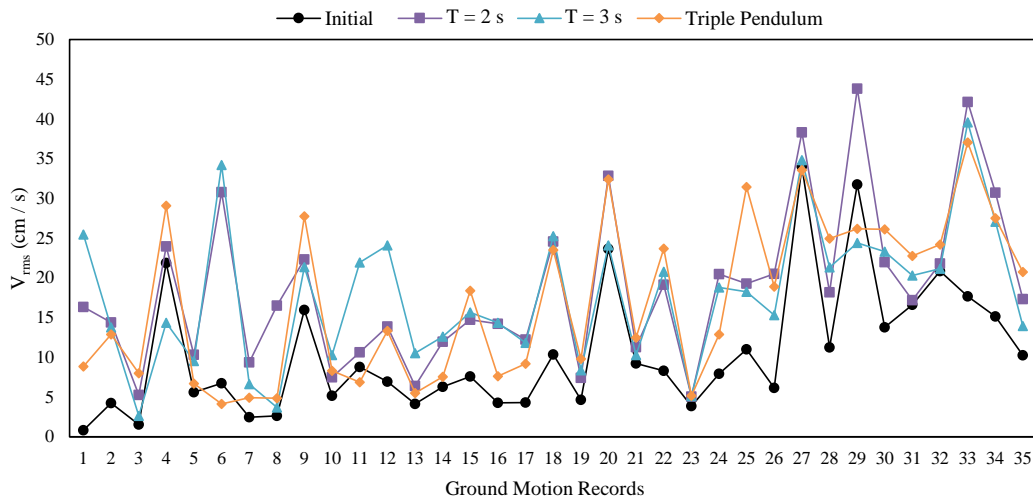
Η ταχύτητα του σήματος εξαρτάται τόσο από την επιτάχυνση όσο και από το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης. Με την εφαρμογή μονωτήρων τριβής οι επιταχύνσεις μειώνονται, όμως ταυτόχρονα αυξάνεται η περίοδος της σεισμική διέγερσης. Λόγω της αντίθετης επίδρασης των παραπάνω χαρακτηριστικών στη ταχύτητα του σήματος, δεν είναι δυνατή η εξαρχής εκτίμηση της επίδρασης της μόνωσης στα χαρακτηριστικά της ταχύτητας του σεισμικού κύματος στη στάθμη της μονωμένης βάσης.

Πράγματι, από τις μέγιστες απόλυτες ταχύτητες (PGV) όπως φαίνεται στο Σχήμα 7 είναι σαφές ότι δεν υπάρχει μονοσήμαντη επίδραση της σεισμικής μόνωσης στη συγκεκριμένη παράμετρο. Η μεταβολή της μέγιστης ταχύτητας είναι πολύ μικρή και δεν ακολουθεί ένα συγκεκριμένο ρυθμό μεταβολής, ανεξάρτητα από την εξεταζόμενη συσκευή σεισμικής μόνωσης. Επίσης, εξετάζοντας τη μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με τη μέση περίοδο του κύματος, δεν προκύπτει κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό. Παρόλη τη σαφέστατη μείωση της μέγιστης επιτάχυνσης, η ταυτόχρονη αύξηση της περιόδου του κύματος οδηγεί ακόμη και σε αύξηση της μέγιστης αναπτυσσόμενης ταχύτητας.

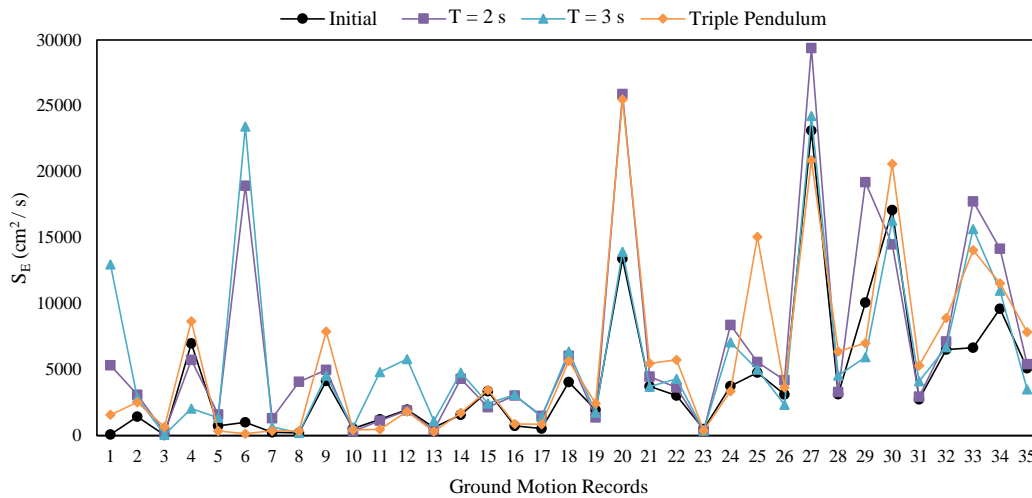


Σχήμα 7. Τιμές μέγιστης απόλυτης ταχύτητας (PGV).

Οι δείκτες V_{rms} και S_E αποτελούν ενεργειακούς δείκτες και υπολογίζονται από την ιστορία των ταχυτήτων. Στο δείκτη V_{rms} (Σχήμα 8) η σεισμική μόνωση επιδρά αρνητικά αφού σχεδόν για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις οι τιμές του συγκεκριμένου δείκτη αυξάνονται. Από τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο δείκτη S_E (Σχήμα 9) προκύπτουν παρόμοιες παρατηρήσεις. Σε λίγες μόνο περιπτώσεις, οι οποίες όμως δε μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση κάποιο χαρακτηριστικό είτε του μονωτήρα είτε της διεγέρσης εμφανίζονται μικρές μειώσεις των τιμών της S_E . Εξαιρουμένων των περιπτώσεων αυτών, κατά κανόνα παρουσιάζονται έντονες αυξήσεις.

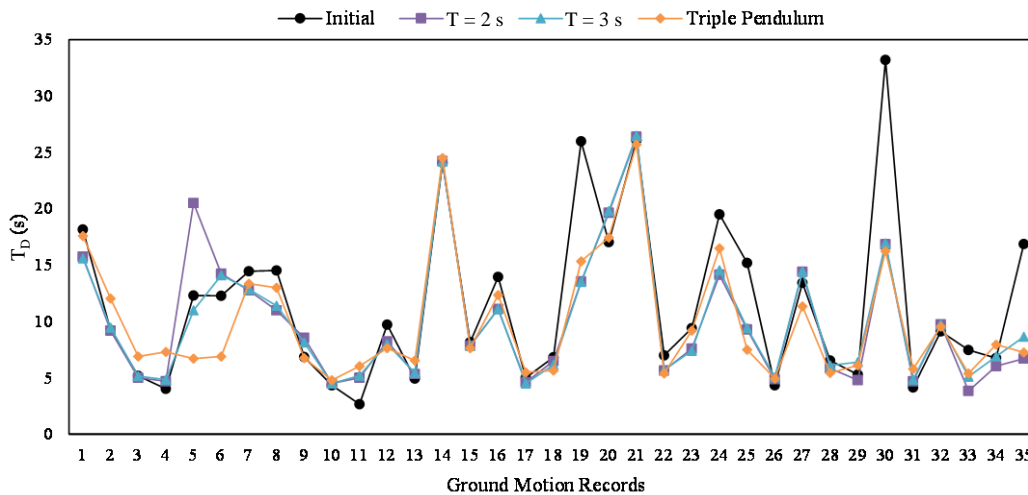


Σχήμα 8. Τιμές σεισμικής παραμέτρου V_{rms} .

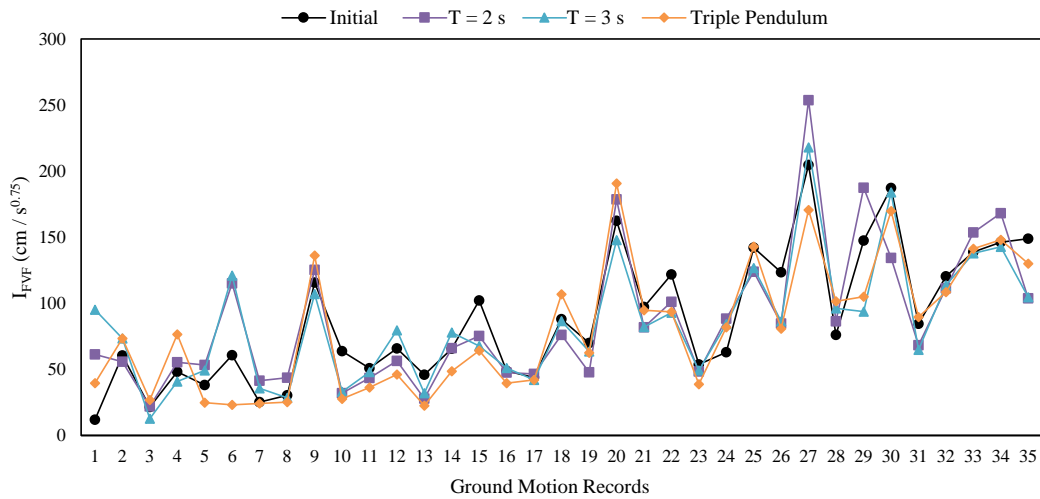


Σχήμα 9. Τιμές σεισμικής παραμέτρου S_E .

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου έντασης I_{FVF} είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της χρονικής διάρκειας της ισχυρής φάσης του σεισμικού κύματος T_D . Στα Σχήματα 10 και 11 εμφανίζονται οι τιμές της T_D και I_{FVF} , αντίστοιχα. Η επίδραση της σεισμικής μόνωσης στη διάρκεια της ισχυρής φάσης της διέγερσης δεν είναι εμφανής. Οι μεταβολές είναι μικρές και με ασαφή πρόσημο. Παρόμοια με τις μεταβολές της μέγιστης ταχύτητας και της σημαντικής διάρκειας, μεταβάλλονται και οι τιμές του δείκτη I_{FVF} . Παρουσιάζονται κυρίως μικρές μεταβολές οι οποίες όμως δεν ακολουθούν ένα συγκεκριμένο κανόνα, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αυξομειώσεις.

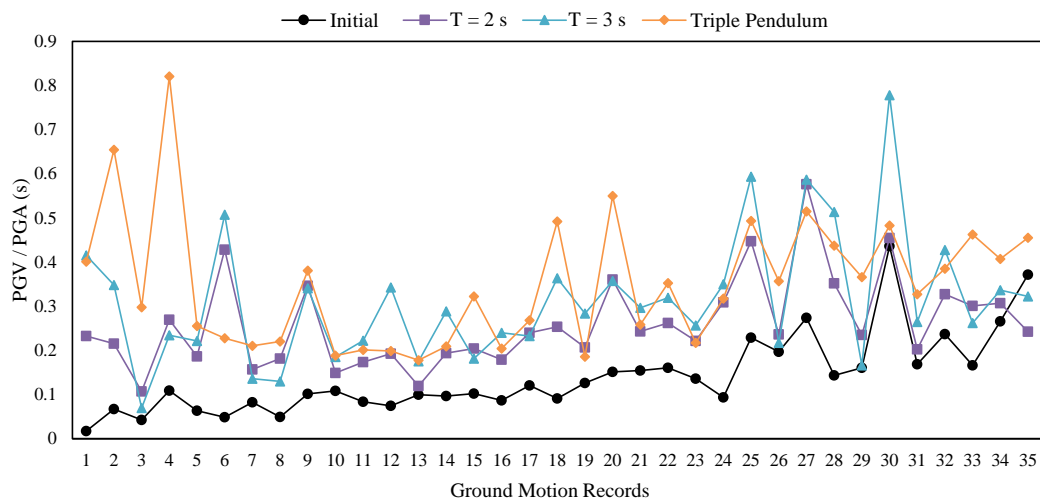


Σχήμα 10. Τιμές σεισμικής παραμέτρου T_D .



Σχήμα 11. Τιμές σεισμικής παραμέτρου I_{FVF} .

Μια σεισμική παράμετρος που αποδίδει αξιόπιστα το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης θεωρείται ο λόγος PGV / PGA. Με βάση τα δεδομένα που φαίνονται στο Σχήμα 12, στις περιπτώσεις διεγέρσεων μικρής αρχικής μέσης περιόδου η αύξηση του λόγου PGV / PGA είναι μεγαλύτερη. Επίσης, στην περίπτωση μονωτήρων που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη ιδιοπερίοδο ταλαντωτή η αύξηση της παραμέτρου είναι ακόμα μεγαλύτερη.



Σχήμα 12. Τιμές σεισμικής παραμέτρου PGV / PGA.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της σεισμικής μόνωσης, με τη χρήση μονωτήρων ολίσθησης πολλαπλής καμπυλότητας, στα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης μέσω σχετικής ανάλυσης της μεταβολής των σεισμικών παραμέτρων. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν κατηγοριοποιήθηκαν ως παράμετροι επιτάχυνσης, ταχύτητας και συχνοτικού περιεχομένου. Όσον αφορά τις παραμέτρους επιτάχυνσης όπως ήταν αναμενόμενο, μειώνονται αισθητά με τη χρήση της σεισμικής μόνωσης. Σημαντική είναι η εξέταση της επίδρασης της σεισμικής μόνωσης στις παραμέτρους ταχύτητας του σεισμικού κύματος. Λόγω ταυτόχρονης μείωσης της επιτάχυνσης και επιμήκυνσης της περιόδου, γεγονότα που έχουν αντίθετη επίδραση στην ταχύτητα, τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας του σήματος παρουσιάζουν στοχαστικές αυξομειώσεις. Αναμενόμενη είναι η αύξηση της περιόδου της σεισμικής διέγερσης με τη χρήση των μονωτήρων ολίσθησης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Becker, T.C. & Mahin, S.A., “Correct treatment of rotation of sliding surfaces in a kinematic model of the triple friction pendulum bearing”. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 42, (2012) 311–317

Constantinou, M., Mokha, A. & Reinhorn, A., “Teflon bearings in base isolation I: testing”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, (1990a) 438-454

Constantinou, M., Mokha, A. & Reinhorn, A., “Teflon bearings in base isolation II: modeling”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, (1990b) 455-474

Dassault Systems Simulia Corp. ABAQUS Analysis user’s manual Version 6.10 (2012)

Fenz, D.M., & Constantinou, M.C., “Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: theory”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, (2008) 163–183

Naeim, F. & Kelly, J.M., «Design of seismic isolated structures», Wiley, New York (1999)

Kavvadias, I.E., Vasiliadis, L. & Elenas A., “Seismic Response Parametric Study of Ancient Rocking Columns”. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 11, No 6 (2017) 791-804

Kavvadias, I.E., Bibo, H. & Vasiliadis, L., “Finite element modeling of single and multi-spherical friction pendulum bearings”, in proceedings of COMPDYN 2017, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (Rhodes, Greece,), (2017)

Kelly, J.M., «Earthquake-Resistant Design with Rubber», 2nd Edition. Springer-Verlag, London (1997)

Vasiliadis, L.K., “Seismic evaluation and retrofitting of reinforced concrete buildings with base isolation systems”. *Earthquakes and Structures*, 10, 293-311, 2016

Zayas, V., Low, S.S. & Mahin, S.A., “A simple pendulum technique for achieving seismic isolation”. *Earthquake Spectra*, Vol. 6, (1990) 317–333