

Αστάθεια πρανών γεωφραγμάτων λόγω σεισμικής καταπόνησης

Β. Ζανιά

Υποψήφια Διδάκτωρ, Τομέας Μηχανικής, Γενικό Τμήμα Πολυτεχνείου Κρήτης

Ι. Τσομπανάκης

Επίκουρος Καθηγητής, Τομέας Μηχανικής, Γενικό Τμήμα Πολυτεχνείου Κρήτης

Π. Ν. Ψαρρόπουλος

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Τομέας Μηχανικής, Γενικό Τμήμα Πολυτεχνείου Κρήτης

Λέξεις κλειδιά: δυναμική απόκριση, ευστάθεια πρανούς, σεισμικές μετακινήσεις, μη-γραμμική εδαφική συμπεριφορά.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα γεωφράγματα είναι κατασκευές δεσπόζουσας σημασίας, κυρίως λόγω των κοινωνικο-οικονομικών οφελών που προκύπτουν από την εύρυθμη λειτουργία τους, γεγονός που ενισχύει την αυξημένη απαίτηση σε επίπεδο σχεδιασμού. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται θέματα που άπτονται του αντισεισμικού σχεδιασμού των εν λόγω κατασκευών. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μία παραμετρική αριθμητική διερεύνηση η οποία αναδεικνύει σημαντικά χαρακτηριστικά της σεισμικής απόκρισης των γεωφραγμάτων. Στην ανάλυση των χαρακτηριστικών αυτών λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, καθώς και η επίδραση της τοπογραφίας. Επιπλέον, εξετάζεται η δυναμική ευστάθεια των πρανών. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την ανάγκη βελτίωσης των αντισεισμικών κανονισμών προκειμένου να ληφθούν ρεαλιστικά υπόψη τα σύνθετα αυτά φαινόμενα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε σεισμογενείς χώρες όπως είναι και η Ελλάδα, ο αντισεισμικός σχεδιασμός μεγάλων γεωκατασκευών όπως είναι τα χωμάτινα φράγματα είναι θέμα μείζονος σημασίας. Οι ανεπιθύμητες κοινωνικο-οικονομικές συνέπειες μιας ενδεχόμενης αστοχίας καθιστούν καίρια την ορθή εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας των εν λόγω γεωκατασκευών. Η σεισμική καταπόνηση ουσιαστικά απαρτίζεται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι η αδρανειακή καταπόνηση, η οποία ουσιαστικά οφείλεται στις σεισμικές (διατημητικές κυρίως) παραμορφώσεις που αναπτύσσονται λόγω της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων εντός του σώματος του φράγματος. Η δεύτερη συνιστώσα οφείλεται στην επιβολή μόνιμων παραμορφώσεων και ανάγεται στη μόνιμη μετακίνηση ενεργού ρήγματος στην περιοχή του έργου ή ακόμα και σε ρευστοποίηση του εδάφους θεμελίωσης του φράγματος. Στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί η συμπεριφορά των γεωφραγμάτων λόγω της πρώτης από τις προαναφερθείσες συνιστώσες.

1.1 Περιπτώσεις αστοχίας και είδη βλαβών

Η σεισμική τρωτότητα των χωμάτινων φραγμάτων έχει αποδειχθεί σε αρκετούς από τους πρόσφατους σεισμούς. Για παράδειγμα, στον σεισμό Bhuj (2001) στην Ινδία από τα είκοσι μεσαίου μεγέθους φράγματα, πέντε φράγματα έπαθαν σοβαρές βλάβες που έρχονταν επισκευής, ενώ σε έντεκα ακόμη φράγματα παρατηρήθηκαν ζημιές πιο ήπιας μορφής. Επιπλέον, δεκατέσσερα μικρού μεγέθους φράγματα είχαν υποστεί σοβαρές βλάβες έπειτα από το σεισμό, εκ των οποίων στα δώδεκα αναφέρεται ότι η αστοχία οφείλεται σε εκδήλωση της αστάθειας του πρανούς με ανάπτυξη σημαντικών μετακινήσεων {5}. Κατά τον σεισμό Tecoman (2003) στο Μεξικό σε δύο φράγματα παρατηρήθηκαν διαμήκεις ρωγμές στο κατάστρωμα του φράγματος και κατακόρυφη μετακίνηση μερικών εκατοστών {16}. Στις προαναφερθείσες περιπτώσεις τα γεωφράγματα που είχαν υποστεί βλάβες βρισκόντουσαν σε απόσταση μικρότερη από 100km από το επίκεντρο.

Τέλος, μελετώντας τη συμπεριφορά γεωφραγμάτων λόγω σεισμού στην Ιαπωνία, ο Tani {14} έδειξε ότι σοβαρές βλάβες εμφανίστηκαν κυρίως σε πρόσφατους σεισμούς (όπως του Κόμπε, 1995) σε κατασκευές που χρονολογούνται πριν το 1953. Εν γένει, σύμφωνα με τις προαναφερθείσες εργασίες δεν έχει σημειωθεί καθολική αστοχία η οποία να οφείλεται σε σεισμική αστάθεια των πρηνών φραγμάτων. Παρόλα αυτά, ο αντισεισμικός σχεδιασμός τους χρήζει ιδιαίτερης σημασίας, γιατί ακόμα και οι περιπτώσεις όπου απαιτείται επισκευή έπειτα από την σεισμική καταπόνηση θεωρούνται κρίσιμες, κυρίως λόγω του επιπρόσθετου κόστους που απαιτείται για να διατηρηθεί η ασφαλής λειτουργία ενός τέτοιου μεγάλου τεχνικού έργου.

1.2 Μεθοδολογίες ανάλυσης και ισχύουσα πρακτική

Η σεισμική απόκριση των χωμάτινων φραγμάτων μπορεί να προσδιοριστεί είτε με αναλυτικές μεθοδολογίες (Ambraseys {1} και Gazetas {8}) είτε με αριθμητικές αναλύσεις. Η αναλυτική μεθοδολογία που έχει προταθεί και αναπτυχθεί βασίζεται στη θεωρία της διατμητικής δοκού. Η μέθοδος αυτή έχει υποστεί πολλές τροποποιήσεις με σκοπό να ληφθούν υπόψη οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση των γεωφραγμάτων. Οι βασικές παραδοχές της μεθόδου, οι οποίες είναι κοινές και στις προτεινόμενες τροποποιήσεις, είναι ότι αρχικά αναπτύσσονται μόνο διατμητικές παραμορφώσεις και οριζόντιες μετατοπίσεις και επιπλέον ότι η κατανομή των μετακινήσεων και των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων είναι ομοιόμορφη κατά μήκος οριζόντιων επιπέδων. Απόρροια των ανωτέρω παραδοχών είναι ότι ουσιαστικά δεν λαμβάνεται υπόψη η διδιάστατη γεωμετρία στην απόκριση των γεωφραγμάτων. Η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων έχει αποδείξει ότι η εν λόγω αναλυτική μεθοδολογία υποεκτιμά την ιδιοπερίοδο της γεωκατασκευής περίπου κατά 10% λόγω της μη συνεκτίμησης της κατακόρυφης συνιστώσας των μετατοπίσεων {8}. Επιπλέον, σύγχρονες αριθμητικές εργασίες δείχνουν την επιρροή του φαινομένου της τοπογραφικής επιδείνωσης (Gazetas et al. {9}, Bouckovalas & Papadimitriou {2}) στην απόκριση των φυσικών πρηνών. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του φαινομένου είναι η ανάπτυξη κατακόρυφης παρασιτικής συνιστώσας της επιτάχυνσης λόγω φαινομένων ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων στα πρηνή. Ανάλογη συμπεριφορά αναμένεται και στα φράγματα λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους.

Η σεισμική ευστάθεια των πρηνών μπορεί να αναλυθεί με κάποια εκ των βασικών μεθοδολογιών, οι οποίες είναι η ψευδοστατική μέθοδος, η μέθοδος μονίμων παραμορφώσεων και η μέθοδος τάσεων- παραμορφώσεων. Καθώς η τελευταία βασίζεται στην εφαρμογή αριθμητικών μεθοδολογιών με την ταυτόχρονη χρήση προηγμένων αλλά δύσχρηστων καταστατικών προσομοιωμάτων, δεν πρόκειται να εξεταστεί στην παρούσα εργασία. Στα μειονεκτήματα της πρώτης μεθόδου συγκαταλέγεται η εκτίμηση της ευστάθειας μέσω ενός συντελεστή ασφαλείας, καθώς και όλα τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν τις μεθόδους οριακής ισορροπίας. Επίσης, ένα από τα βασικά θέματα στην εφαρμογή της είναι η επιλογή του σεισμικού συντελεστή. Η μέθοδος μονίμων παραμορφώσεων βασίζεται σε ένα απλό προσομοίωμα που προτάθηκε από τον Newmark {13}. Σύμφωνα με αυτό οι σεισμικές μετατοπίσεις μπορούν να προκύψουν έπειτα από διπλή ολοκλήρωση της διαφοράς της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης από την οριακή επιτάχυνση. Καθώς μία από τις βασικές αρχικές παραδοχές της μεθόδου είναι ότι η ολισθαίνουσα μάζα είναι απολύτως δύσκαμπτη, οι Makdisi & Seed {12} πρότειναν μία μεθοδολογία δύο βημάτων, προκειμένου να ληφθεί υπόψη και η ευκαμψία της ολισθαίνουσας μάζας. Αρχικά υπολογίζεται η απόκριση που τείνει να προκαλέσει αστάθεια της επιφάνειας ολίσθησης και έπειτα επί αυτής της χρονοϊστορίας υπολογίζονται οι μετακινήσεις. Επίσης, οι τελευταίοι έχουν προτείνει και απλοποιητικά νομογραφήματα για την εκτίμηση του σεισμικού συντελεστή και των σεισμικών μετακινήσεων.

Οι σύγχρονοι κανονισμοί βασίζονται στην παραδοχή μη εμφάνισης αστοχίας και για το λόγο αυτό προτείνουν κυρίως τη χρήση της ψευδοστατικής μεθόδου. Τόσο ο Ευρωκώδικας 8 {6} όσο και ο ΕΑΚ {4} προτείνουν ότι ο αντισεισμικός σχεδιασμός των μικρού ύψους φραγμάτων θα πρέπει να διενεργείται με την ψευδοστατική μέθοδο και την εφαρμογή ενός σεισμικού συντελεστή με απαίτηση συντελεστή ασφαλείας ίσου με τη μονάδα. Οι οδηγίες για τον αντισεισμικό σχεδιασμό φραγμάτων των ΗΠΑ (FEMA {7}) προτείνουν επιπλέον την εκτίμηση των σεισμικών

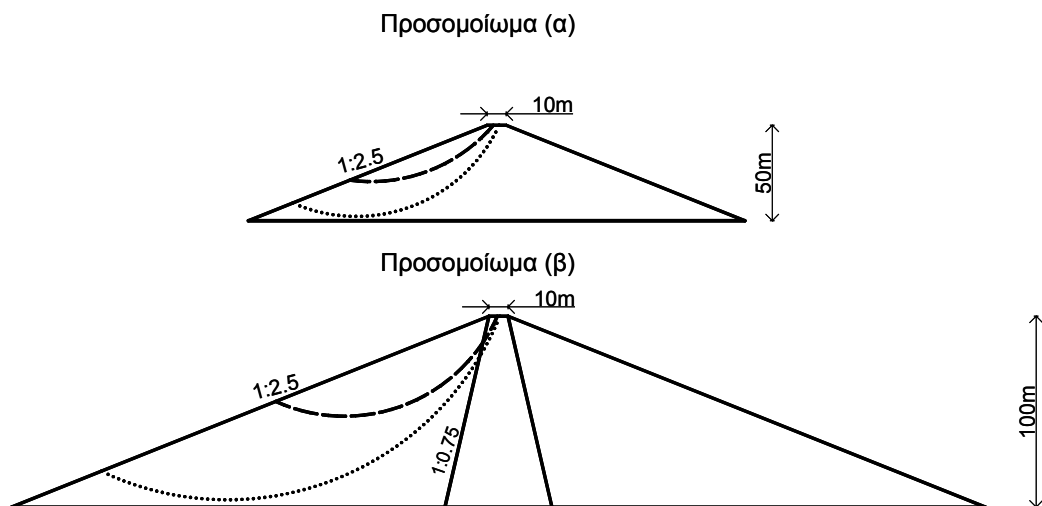
παραμορφώσεων με κάποια εκ των προαναφερθέντων μεθόδων, χωρίς να προδιαγράφουν παρόλα αυτά κάποιο ανεκτό επίπεδο παραμορφώσεων.

1.3 Στόχος και μεθοδολογία της παρούσας διερεύνησης

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται αρχικά η εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μία παραμετρική διερεύνηση δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης των σημαντικότερων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση τυπικών διατομών γεωφραγμάτων. Για το σκοπό αυτό αναλύθηκαν τόσο μικρού όσο και μεγάλου ύψους τυπικές διατομές, ομοιογενείς οι πρώτες και με αργλικό πυρήνα οι τελευταίες. Στη συνέχεια, εκτιμήθηκε ο σεισμικός συντελεστής και προσδιορίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας για πιθανές επιφάνειες ολίσθησης. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία των δύο βημάτων που εφαρμόστηκε από τους Makdisi & Seed {12} για την εκτίμηση των παραμορφώσεων των γεωκατασκευών. Παράλληλα, με την αποτίμηση της ευστάθειας (και με τις δύο μεθόδους) διαπιστώνεται και η επίδραση των βασικότερων παραμέτρων. Από τις σημαντικότερες παραμέτρους αναδεικνύεται η ανελαστική ιδιοπερίοδος των γεωφραγμάτων και η μέση περίοδος της διέγερσης. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι η επίδραση της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην ευστάθεια είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αυτή αυξάνει τις αναμενόμενες σεισμικές μετακινήσεις.

2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στην παρούσα εργασία, αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά χωμάτινων φραγμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών της. Υπό αυτό πρίσμα εξετάζονται δύο τυπικές διατομές. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, η πρώτη αναφέρεται σε μικρού ύψους (50m) ομοιογενές φράγμα, ενώ η δεύτερη αναφέρεται σε φράγμα με δύο ζώνες που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο ύψος (100m). Η κλίση των πρανών θεωρήθηκε ίση με 1:2.5 (V:H) η οποία θεωρείται αρκετά αντιπροσωπευτική και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η δυναμική απόκριση προσδιορίστηκε έπειτα από τη διενέργεια αριθμητικών αναλύσεων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και πιο συγκεκριμένα με τον κώδικα QUAD4M {10}.



Σχήμα 1. Τυπικές διατομές: (α) ενός ομοιογενούς γεωφράγματος μικρού ύψους, και (β) ενός φράγματος με αργλικό πυρήνα μεγάλου σχετικά ύψους. Με διακεκομμένες γραμμές σημειώνονται οι δύο εξεταζόμενοι κύκλοι ολίσθησης.

Η διακριτοποίηση και στα δύο προσομοιώματα έγινε με ίδιο τύπο και μέγεθος στοιχείων για την αποφυγή αποκλίσεων λόγω διαφορετικής αριθμητικής προσομοίωσης. Επίσης, η επιβαλλόμενη διέγερση εφαρμόστηκε στους κόμβους μίας στρώσης βραχώδους υπόβαθρου, στο οποίο θεωρήθηκε ότι θεμελιώνονται και οι δύο γεωκατασκευές, και το οποίο εκτείνεται πλευρικά σε ικανή απόσταση από τα όρια της εκάστοτε διατομής. Η μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους λαμβάνεται υπόψη μέσω της ισοδύναμη γραμμικής μεθόδου, η οποία θεωρείται αρκετά ακριβής για διατμητικές παραμορφώσεις έως και 1% {11}.

Η δυναμική ευστάθεια των πρηνών των γεωφραγμάτων εξετάστηκε τόσο μέσω ψευδοστατικών αναλύσεων, όσο και μέσω αναλύσεων με τη μέθοδο μόνιμων παραμορφώσεων. Για τον σκοπό αυτό αρχικά προσδιορίστηκαν οι κρίσιμοι κύκλοι ολίσθησης και επιπλέον εξετάστηκε η περίπτωση ενός κύκλου που εκτείνεται καθ' όλο το ύψος του φράγματος. Οι δύο κύκλοι ολίσθησης αποτυπώνονται στο Σχήμα 1. Οι σεισμικοί συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για τις ψευδοστατικές αναλύσεις με την μέθοδο οριακής ισορροπίας Bishop {2} προσδιορίστηκαν με τη διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε και από τους Makdisi & Seed. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, ολοκληρώνεται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης η δυναμική συνιστώσα της οριζόντιας και της κατακόρυφης δύναμης διαιρεμένη με το βάρος της επιφάνειας ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, οι σχέσεις που ορίζουν την οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμικού συντελεστή είναι οι ακόλουθες:

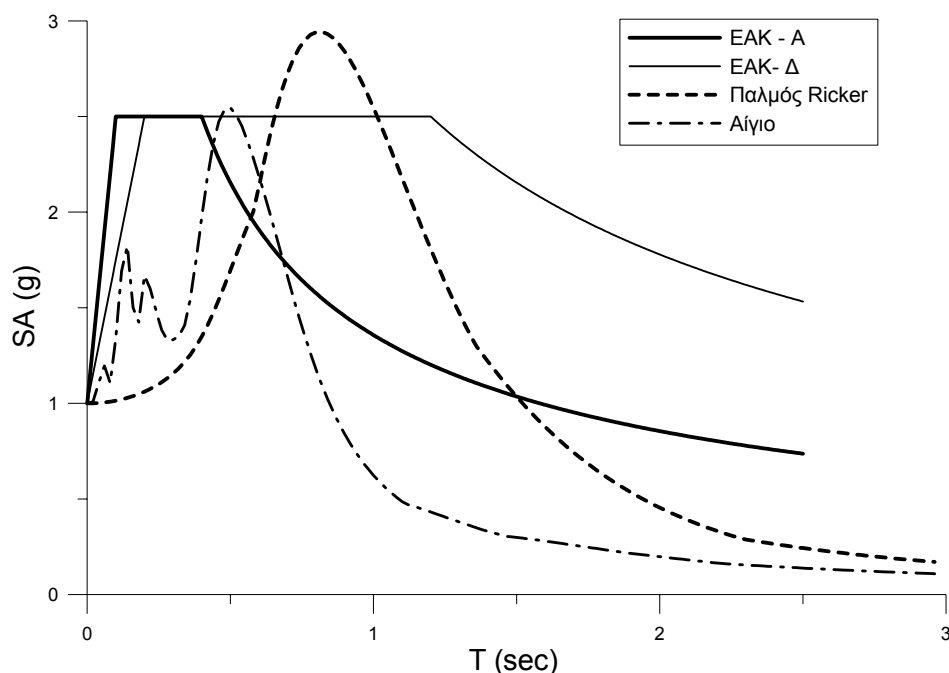
$$HEA = \frac{\sum \sigma_x d_y + \tau_{xy} d_x}{W} \quad (1)$$

$$VEA = \frac{\sum \sigma_y d_x + \tau_{xy} d_y}{W} \quad (2)$$

όπου HEA και VEA είναι η οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης, αντίστοιχα.

Επιπροσθέτως, η ευστάθεια των δύο εξεταζόμενων γεωφραγμάτων προσδιορίστηκε και σε όρους σεισμικών μετακινήσεων με τη μέθοδο Newmark, σύμφωνα με την οποία οι μετακινήσεις προκύπτουν έπειτα από διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης. Η τελευταία ισούται με την διαφορά του σεισμικού συντελεστή από την οριακή επιτάχυνση, δηλαδή την τιμή της επιτάχυνσης για την οποία ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με την μονάδα.

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων που διέπουν τη σεισμική συμπεριφορά των γεωφραγμάτων, κατά την ανάλυση τόσο της απόκρισης όσο και της ευστάθειας εξετάστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού, η μέση περίοδος της διέγερσης (T_m) και η μέγιστη επιτάχυνσή της (PGA). Η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος θεωρήθηκε για το ομοιογενές φράγμα ίση με 400m/sec ή 300 m/sec, ενώ για το φράγμα με τις δύο ζώνες ο αργιλικός πυρήνας χαρακτηρίζεται από ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος ίση προς 200 m/sec ή 100 m/sec και το υλικό πλήρωσης 400 m/sec. Η μη-γραμμική συμπεριφορά του εδαφικού υλικού θεωρείται ότι χαρακτηρίζεται από τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης – αύξησης του λόγου απόσβεσης που προτάθηκαν από τους Vucetic & Dobry {15} και πιο συγκεκριμένα θεωρήθηκε μηδενικός δείκτης πλαστιμότητας ($PI=0$) για το υλικό πλήρωσης και $PI=30$ για το εδαφικό υλικό του αργιλικού πυρήνα και του ομοιογενούς φράγματος. Σχετικά με τα χαρακτηριστικά της διέγερσης οι παράμετροι που διερευνώνται είναι η μέση περίοδος και η μέγιστη επιτάχυνση. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σεισμικές διεγέρσεις, ο σεισμός του Αιγίου με μέση περίοδο 0.47sec αλλά και ένας παλμός Ricker με μέση περίοδο 0.81sec. Οι διεγέρσεις αυτές θεωρείται ότι καλύπτουν το εύρος των συχνοτήτων του φάσματος του ΕΑΚ. Οι δύο διεγέρσεις ανάγονται επίσης σε μέγιστη επιτάχυνση 0.24g και 0.36g για να μελετηθεί η επίδραση της μη-γραμμικότητας του υλικού. Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται τα ελαστικά φάσματα των δύο διεγέρσεων, σε συνδυασμό με τα δύο ακραία φάσματα του ΕΑΚ {4}.



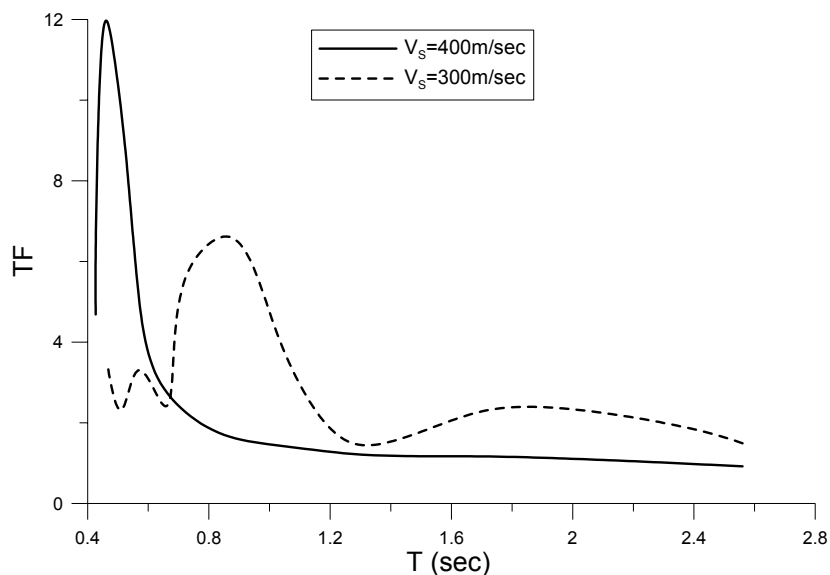
Σχήμα 2. Ελαστικά φάσματα απόκρισης ανηγμένα σε μοναδιαία επιτάχυνση για τον παλμό Ricker και την καταγραφή του σεισμού του Αιγίου, σε συνδυασμό με τα δύο ακραία φάσματα του ΕΑΚ για κατηγορίες εδαφών Α και Δ.

3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΩΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

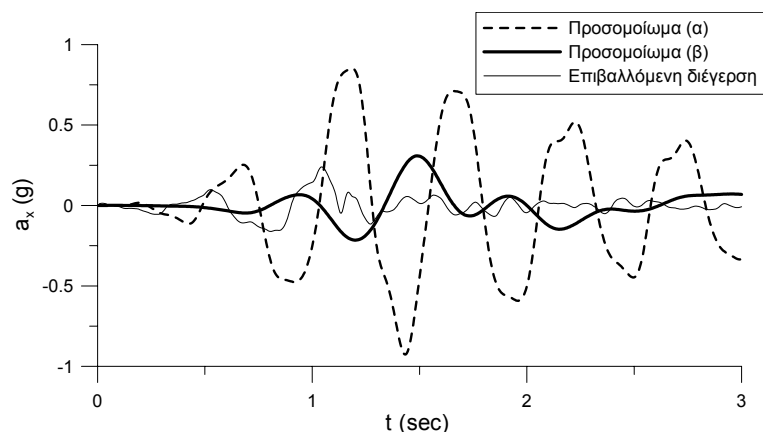
Η δυναμική απόκριση των γεωφραγμάτων εξαρτάται από κάποιες βασικές παραμέτρους, που επηρεάζουν την δυναμική απόκριση κάθε γεωκατασκευής. Αρχικά, αναλύεται η επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μόνο η επίδραση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος (ή αλλιώς του μέτρου διάτμησης για μικρές παραμορφώσεις) θεωρώντας ότι η μη-γραμμική συμπεριφορά προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τις προαναφερθείσες καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης – αύξησης του λόγου απόσβεσης. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς, δηλαδή ο λόγος του εύρους του μετασχηματισμού Fourier της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης στην κορυφή του πρώτου προσομοιώματος προς το εύρος του μετασχηματισμού Fourier της χρονοϊστορίας της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης για τις δύο τιμές ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος που εξετάστηκαν. Παρατηρείται ότι, η μείωση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος συνεπάγεται αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, αλλά ταυτόχρονα και μείωση της μέγιστης ενίσχυσης. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και για το δεύτερο προσομοίωμα του μεγαλύτερου φράγματος, υπό συνθήκες ίδιας διέγερσης και για ίδιο επίπεδο επιτάχυνσης.

Συγκρίνοντας περαιτέρω την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων, πρέπει αρχικά να σημειωθεί ότι η ελαστική ιδιοπερίοδος των δύο φραγμάτων διαφέρει σημαντικά. Το δεύτερο προσομοίωμα έχει μεγαλύτερη ιδιοπερίοδο ως συνέπεια δύο παραμέτρων, του μεγαλύτερου ύψους του και του μαλακότερου (με μικρότερη ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος) αργλικού πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντική διαφορά στην αδρανειακή απόκριση των δύο γεωκατασκευών για την ίδια διέγερση. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για τα δύο προσομοιώματα, στο επιταχυνσιογράφημα του σεισμού του Αιγίου. Το πρώτο προσομοίωμα παρουσιάζει ενίσχυση περίπου ίση με 4 ενώ το δεύτερο ίση με 1.2. Το μικρό επίπεδο των επιταχύνσεων που αναπτύσσεται στο δεύτερο προσομοίωμα πιθανώς οφείλεται και στην εντονότερη μη-γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή τον μεγαλύτερο ρυθμό απομείωσης του

μέτρου διάτμησης και παράλληλα της μεγαλύτερης αύξησης του λόγου απόσβεσης που χαρακτηρίζει το εδαφικό υλικό.



Σχήμα 3. Συναρτήσεις μεταφοράς για το πρώτο εξεταζόμενο προσομοίωμα στην περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση 0.24g. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις δύο τιμές της ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος.

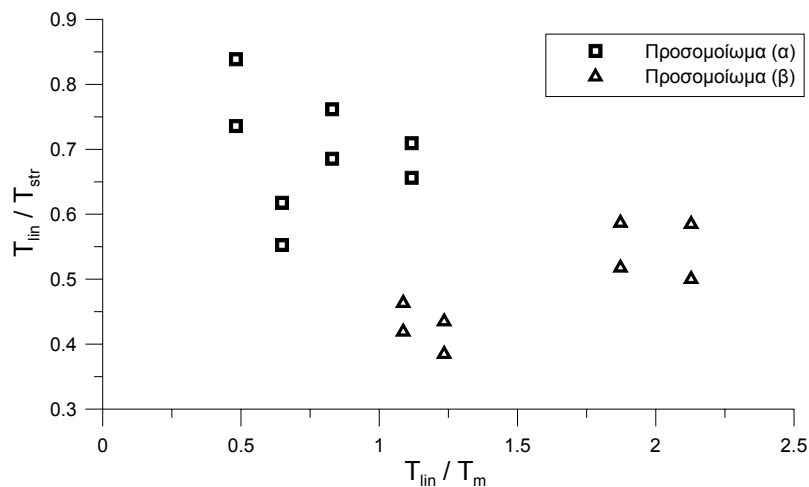


Σχήμα 4. Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για τα δύο εξεταζόμενα προσομοιώματα στην περίπτωση επιβολής του επιταχυνσιογραφήματος του σεισμού του Αιγίου με μέγιστη επιτάχυνση 0.24g.

Η επίδραση της επιβαλλόμενης διέγερσης μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: (α) το συχνοτικό περιεχόμενο που ποσοτικοποιείται είτε με την δεσπόζουσα περίοδο είτε με τη μέση περίοδο, και (β) τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Από το Σχήμα 2 είναι πρόδηλο ότι, ενώ η καταγραφή του σεισμού του Αιγίου χαρακτηρίζεται από μεγάλη φασματική επιτάχυνση για μικρό εύρος περιόδου, ενώ για τον παλμό Ricker το εύρος αυτό είναι μεγαλύτερο. Η επίδραση του χαρακτηριστικού αυτού στη δυναμική απόκριση είναι σημαντική. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η αύξηση της ιδιοπεριόδου της γεωκατασκευής συναρτήσει του λόγου της ελαστικής ιδιοπεριόδου της προς τη μέση περίοδο της διέγερσης. Είναι πρόδηλο ότι, η μη-γραμμική συμπεριφορά και κατ' επέκταση η αύξηση της ελαστικής ιδιοπεριόδου της κατασκευής εξαρτάται από την συσχέτιση της τελευταίας με τη μέση περίοδο της διέγερσης. Παρατηρείται ότι αρχικά για το πρώτο

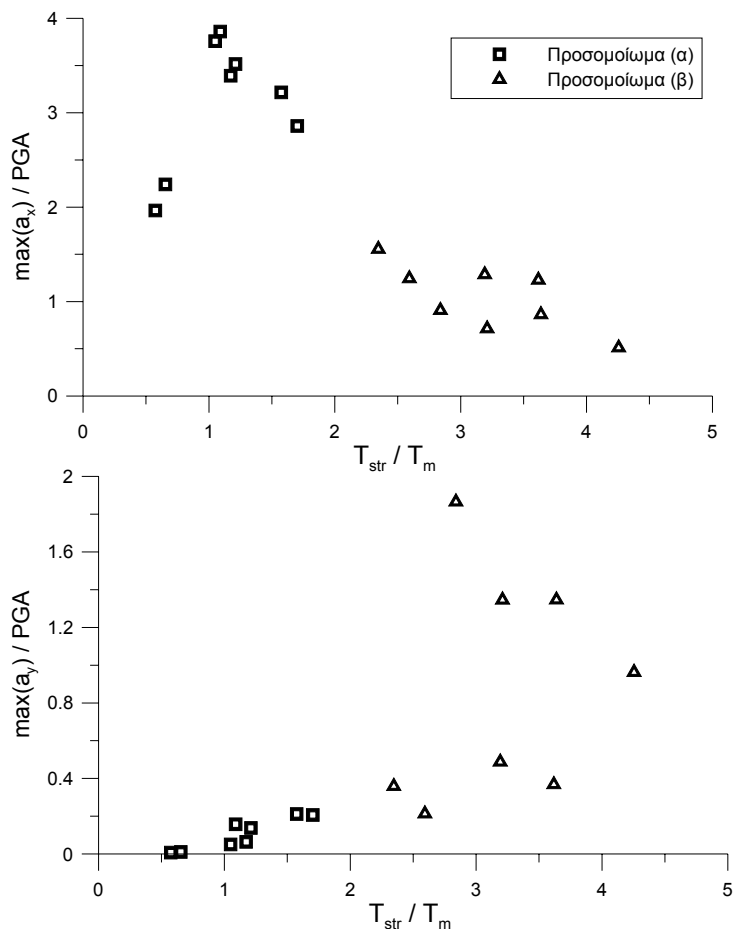
προσομοίωμα οι περιπτώσεις που ήταν επίφοβες για ανάπτυξη φαινομένων συντονισμού ($T_{lin}/T_m=1$) αναπτύσσουν λιγότερο μη-γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή μικρότερη σχετική αύξηση της ιδιοπεριόδου τους λόγω ανάπτυξης μικρότερων διατμητικών παραμορφώσεων, από ότι περιπτώσεις όπου η τιμή του λόγου T_{lin}/T_m ήταν μικρότερη της μονάδας (ίση περίπου με 0.65).

Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται αρχικά στο γεγονός ότι οι τελευταίες, όπου $T_{lin}/T_m=0.65$, αναφέρονται στην απόκριση λόγω του παλμού Ricker, όπου αναμένεται ισχυρή καταπόνηση για μεγαλύτερο εύρος περιόδων. Επιπλέον, η μικρότερη ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος μπορεί να οφείλεται στην μεγαλύτερη απομείωση του μέτρου διάτμησης που παρατηρήθηκε σε αυτήν την περίπτωση. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για το δεύτερο προσομοίωμα, δηλαδή όταν ο λόγος T_{lin}/T_m κυμαίνεται κοντά στη μονάδα η μη-γραμμική συμπεριφορά είναι πιο έντονη για περιπτώσεις που αναφέρονται σε απόκριση λόγω του παλμού Ricker. Τέλος, η αύξηση της μέγιστης επιτάχυνσης αυξάνει περαιτέρω τις αναπτυσσόμενες διατμητικές παραμορφώσεις και συντελεί στην αύξηση της μη-γραμμικής ιδιοπεριόδου.



Σχήμα 5. Συσχέτιση του λόγου της ελαστικής (T_{lin}) προς την ανελαστική ιδιοπερίοδο (T_{str}) ως προς το λόγο της ελαστικής ιδιοπεριόδου προς τη μέση περίοδο του σεισμού (T_{lin}/T_m).

Εκτός από την ιδιοπερίοδο της γεωκατασκευής, σημαντική παράμετρος της δυναμικής συμπεριφοράς είναι η αδρανειακή απόκριση σε όρους αναπτυσσόμενων επιταχύνσεων. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη οριζόντια και κατακόρυφη επιτάχυνση ως προς την μέγιστη επιβαλλόμενη οριζόντια επιτάχυνση. Παρατηρείται ότι ο λόγος T_{str}/T_m καθορίζει την απόκριση στην κορυφή του φράγματος. Η μέγιστη τιμή της ενίσχυσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στην περιοχή του συντονισμού ($T_{str}/T_m=1$) είναι μεγαλύτερη από 2.5 και φτάνει μέχρι και ίση με 4. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η διδιάστατη γεωμετρία των φραγμάτων όπως έχει ήδη αναφερθεί χαρακτηρίζεται από σύνθετα φαινόμενα κυματικής διάδοσης, τα οποία καταλήγουν στη δημιουργία παρασιτικής κατακόρυφης επιτάχυνσης. Παρόλο που επιβάλλεται μόνο οριζόντια επιτάχυνση, παρατηρείται από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων ότι στην κορυφή του πρώτου προσομοιώματος αναπτύσσεται κατακόρυφη επιτάχυνση ίση κατά μέγιστο με το 20% της μέγιστης επιβαλλόμενης οριζόντιας επιτάχυνσης. Στο δεύτερο προσομοίωμα παρατηρείται, κατακόρυφη παρασιτική επιτάχυνση που είναι μεγαλύτερη ακόμα και από τη μέγιστη επιβαλλόμενη οριζόντια επιτάχυνση, πιθανώς λόγω του αργίλικου πυρήνα ο οποίος χαρακτηρίζεται από σημαντικά μικρότερη ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος από το περιβάλλον υλικό.



Σχήμα 6. Συσχέτιση της κανονικοποιημένης οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης ως προς την μέγιστη τιμή της επιβαλλόμενης με τον λόγο της ανελαστικής ιδιοπερίοδου του φράγματος προς τη μέση περίοδο της διέγερσης (T_{str}/T_m).

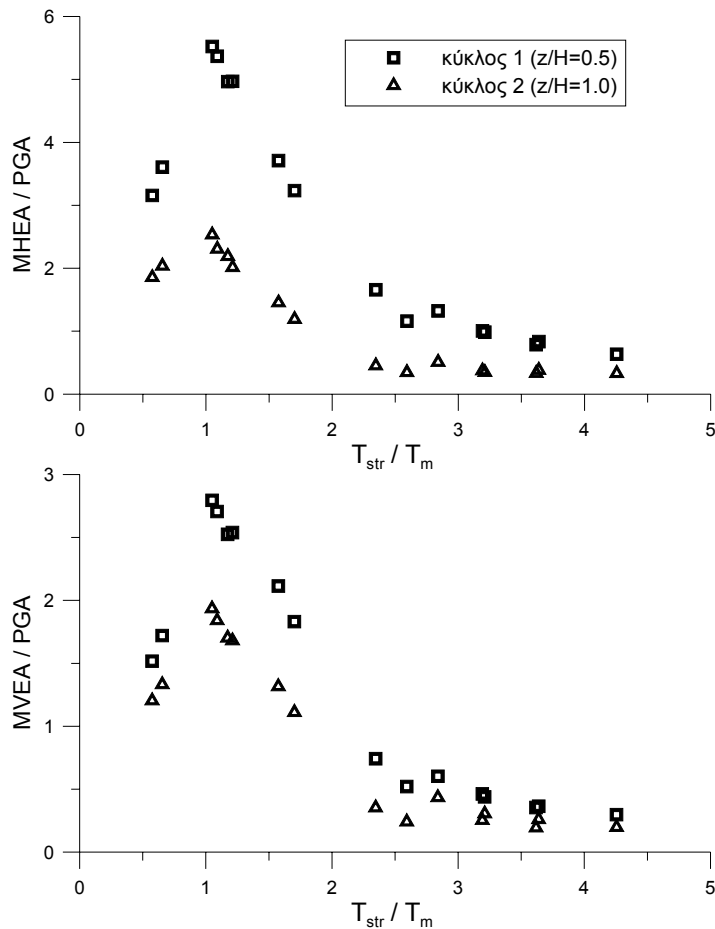
4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ ΓΕΩΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Η δυναμική ευστάθεια των πρηνών των φραγμάτων επηρεάζεται από όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους που αναλύθηκαν κατά τη διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης. Η επίδραση των παραμέτρων αυτών συμπυκνώνεται στη μη-γραμμική ιδιοπερίοδο της κατασκευής και τη μέση περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης. Αρχικά εξετάζονται οι μέγιστες τιμές της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης, δηλαδή του σεισμικού συντελεστή (MHEA και MVEA αντίστοιχα). Στο Σχήμα 7 παρατηρείται ότι το φαινόμενο του συντονισμού επηρεάζει όπως αναμενόταν και τον σεισμικό συντελεστή, λαμβάνοντας ο τελευταίος μέχρι και 5.5 φορές μεγαλύτερη τιμή από τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (PGA). Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι ο ΕΑΚ προτείνει την χρήση σεισμικού συντελεστή κατά μέγιστο ίσο με $0.875 \cdot \text{PGA}$ ($\{[0.5+2.5 \cdot 0.5]/2\} \text{PGA}$) στην περίπτωση του συντονισμού. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 7 μία τέτοια τιμή του σεισμικού συντελεστή αποτελεί ρεαλιστική προσέγγιση για λόγο ιδιοπερίοδου της κατασκευής προς τη μέση περίοδο της διέγερσης μεγαλύτερο από 2.5. Επιπλέον, από τα αποτελέσματα των αναλύσεων της παρούσας εργασίας συνάγεται το συμπέρασμα ότι σε πιο μεγάλους κύκλους ολίσθησης τα παραπάνω φαινόμενα παρουσιάζονται σε μικρότερη έκταση, καταλήγοντας στην περίπτωση του συντονισμού ο σεισμικός συντελεστής να λαμβάνει τιμή ίση με 3.5 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Επιπροσθέτως, στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται και οι μέγιστες τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης

κανονικοποιημένες ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (MVEA/ PGA). Όπως φαίνεται και από την Σχέση 2, η κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης δεν προκύπτει αποκλειστικά από την παρασιτική κατακόρυφη επιτάχυνση επομένως δεν αναμένεται η ίδια συμπεριφορά που παρατηρήθηκε στο Σχήμα 6.

Πίνακας 1. Οριακή επιτάχυνση για τις δύο εξεταζόμενες επιφάνειες ολίσθησης.

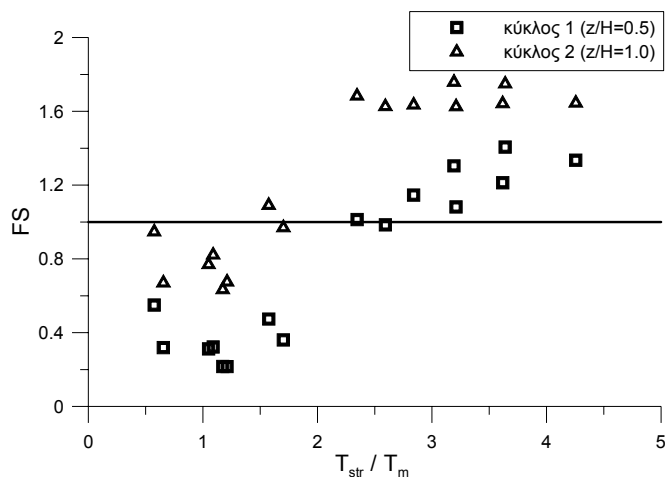
Επιφάνεια ολίσθησης	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	a_v (g)
1 ^η (z/H= 0.5)	18	10	32	0.32
2 ^η (z/H= 1.0)				0.40



Σχήμα 7. Κατανομή κανονικοποιημένης μέγιστης οριζόντιας και κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση, συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου του φράγματος προς τη μέση περίοδο της διέγερσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους δύο εξεταζόμενους κύκλους ολίσθησης.

Η ευστάθεια των εξεταζόμενων κύκλων ολίσθησης εξετάστηκε αρχικά, προσδιορίζοντας τον συντελεστή ασφαλείας χρησιμοποιώντας την απλοποιητική μέθοδο λωρίδων Bishop. Οι συντελεστές ασφαλείας προέκυψαν για τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής που αναγράφονται στον Πίνακα 1. Στο Σχήμα 8, δίδεται ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίστηκε για κάθε κύκλο ολίσθησης συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου της γεωκατασκευής προς τη μέση περίοδο της διέγερσης. Παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως κύκλου ολίσθησης, ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας για λόγο ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς τη μέση περίοδο της διέγερσης μικρότερο από 2.5. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις που ο συντελεστής ασφαλείας

προέκυψε μεγαλύτερος της μονάδας, στον μεγαλύτερο κύκλο ολίσθησης αντιστοιχούν μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή ασφαλείας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι ο επιλεγμένος κύκλος ολίσθησης ($z/H=1.0$) και ο κρίσιμος κύκλος ολίσθησης ($z/H=0.5$) έχουν συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο της μονάδας για τον μέγιστο σεισμικό συντελεστή κατά ΕΑΚ.

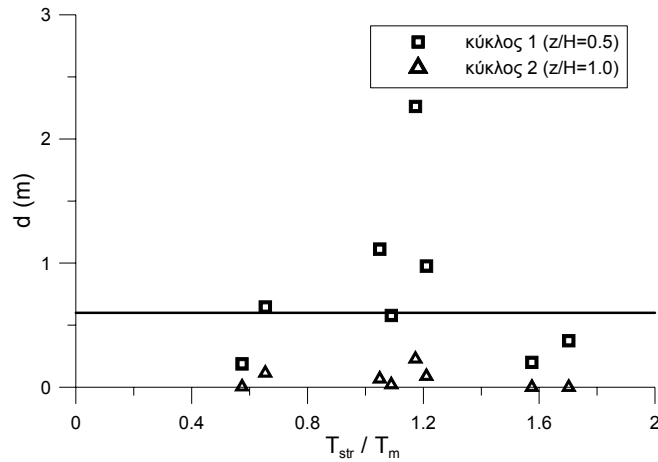


Σχήμα 8. Κατανομή του συντελεστή ασφαλείας ευστάθειας του πρηνούς (FS) συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου του φράγματος προς την μέση περίοδο της διέγερσης (T_{str}/T_m). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους δύο εξεταζόμενους κύκλους ολίσθησης.

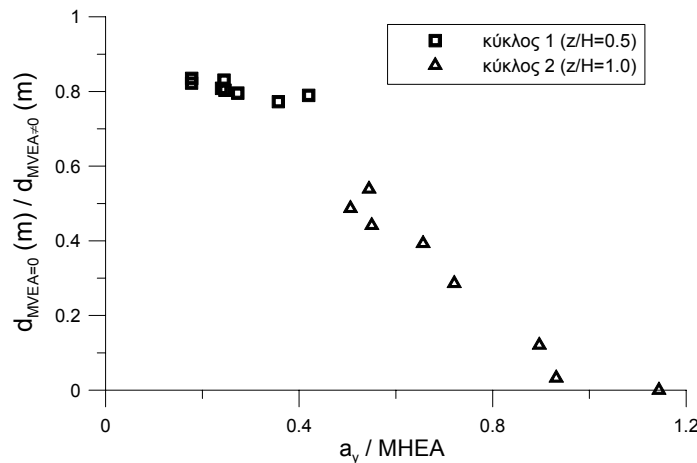
Για τις περιπτώσεις που ο συντελεστής ασφαλείας προέκυψε μικρότερος της μονάδας, εκτιμήθηκαν και οι σεισμικές μετακινήσεις εφαρμόζοντας την μέθοδο Newmark. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η κατανομή της παραμένουσας μετακίνησης, που στις εξεταζόμενες περιπτώσεις ταυτίζεται με τη μέγιστη, συναρτήσει του λόγου ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την μέση περίοδο της διέγερσης. Εν γένει, παρατηρείται ότι μικρότερες μετακινήσεις χαρακτηρίζουν τον μεγαλύτερο κύκλο ολίσθησης, ενώ οι μετακινήσεις που προκύπτουν για τον κρίσιμο κύκλο ολίσθησης είναι σημαντικές. Πρέπει να σημειωθεί ότι από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, μόνο όταν η μέγιστη ισοδύναμη οριζόντια επιτάχυνση ήταν τουλάχιστον πενταπλάσια της οριακής τιμής της επιτάχυνσης σημειώθηκαν μετακινήσεις μεγαλύτερες από 0.6m, τιμή που προτείνεται ως ανεκτή για τον σχεδιασμό ενός φράγματος από τις οδηγίες σχεδιασμού φραγμάτων των ΗΠΑ (FEMA {7}). Παρόλα αυτά, ακόμη και οι μικρότερες μετακινήσεις πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερη προσοχή ιδιαίτερα όταν σχετίζονται με μεγάλους κύκλους ολίσθησης, καθώς ενδέχεται να ευνοήσουν τη μετέπειτα ανάπτυξη υδραυλικού τύπου αστοχίας.

Τέλος, στην παρούσα εργασία εκτιμάται και ο ρόλος της κατακόρυφης συνιστώσας της ισοδύναμης επιτάχυνσης στην ανάπτυξη των σεισμικών μετακινήσεων. Για τον σκοπό αυτό προσδιορίστηκε αρχικά η χρονοϊστορία της οριακής επιτάχυνσης, λαμβάνοντας υπόψη την εκάστοτε τιμή της μέγιστης κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης. Πρόκειται ουσιαστικά για ανάστροφη ανάλυση της ευστάθειας του πρηνούς με την απλοποιητική μέθοδο λωρίδων Bishop. Ο υπολογισμός των μετακινήσεων προέκυψε από διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης, δηλαδή της διαφοράς της οριζόντιας ισοδύναμης επιτάχυνσης από την οριακή επιτάχυνση. Οι μετακινήσεις που υπολογίστηκαν με την μεθοδολογία αυτή, είναι οριζόντιες, όπως άλλωστε και στην περίπτωση όπου δεν ελήφθη υπόψη η κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται ο λόγος της μετακίνησης, θεωρώντας μόνο την οριζόντια συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης προς την μετακίνηση που προέκυψε έπειτα από τον συνυπολογισμό και της κατακόρυφης συνιστώσας. Για τις περιπτώσεις που οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις χωρίς τον συνυπολογισμό της κατακόρυφης συνιστώσας είναι σημαντικές (δηλαδή για λόγο της οριακής επιτάχυνσης προς τη μέγιστη οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση μικρότερο από 0.4), η αύξηση των μετακινήσεων λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας είναι περίπου 25%. Το γεγονός αυτό δεν ισχύει

στις περιπτώσεις που αναμένονται μικρότερες μετακινήσεις, όπου η επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας στην ευστάθεια φαίνεται να είναι σημαντικότερη.



Σχήμα 9. Κατανομή των παραμενουσών σεισμικών μετακινήσεων συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου του φράγματος προς τη μέση περίοδο της διέγερσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους δύο εξεταζόμενους κύκλους ολίσθησης.



Σχήμα 10. Κατανομή του λόγου των σεισμικών μετακινήσεων λαμβάνοντας υπόψη μόνο την οριζόντια συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης ($d_{MVEA=0}$) προς την αντίστοιχη λαμβάνοντας υπόψη και την κατακόρυφη συνιστώσα της ισοδύναμης επιτάχυνσης ($d_{MVEA \neq 0}$) συναρτήσει του λόγου της κρίσιμης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη οριζόντια ισοδύναμη επιτάχυνση ($a_y / MHEA$). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τους δύο εξεταζόμενους κύκλους ολίσθησης.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δυναμική απόκριση των γεωφραγμάτων όπως προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις που διεξήχθησαν στην παρούσα εργασία εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού, τη γεωμετρία της διατομής, και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα η ανελαστική ιδιοπερίοδος των γεωφραγμάτων, εξαρτάται τόσο από την ελαστική περίοδο (συνάρτηση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος και της γεωμετρίας) όσο και από τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της διέγερσης και από τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Η μη-γραμμική συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει μέχρι και σε διπλασιασμό της ιδιοπεριόδου της κατασκευής. Ακολούθως η απόκριση συσχετίζεται με το λόγο της ανελαστικής ιδιοπεριόδου προς

τη μέση περίοδο της διέγερσης, όπου σημαντική ενίσχυση της επιτάχυνσης μπορεί να παρατηρηθεί λόγω φαινομένων συντονισμού.

Οι παράμετροι που διέπουν τη δυναμική συμπεριφορά των γεωφραγμάτων επηρεάζουν αντιστοίχως και τη δυναμική τους ευστάθεια. Ο σεισμικός συντελεστής προκύπτει ότι εξαρτάται όχι μόνο από το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης, όπως προτείνεται από τους Makdisi & Seed αλλά και από τον λόγο της ανελαστικής ιδιοπεριόδου προς τη μέση περίοδο της διέγερσης λαμβάνοντας τιμές πολλαπλασιαστές της μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Επίσης προκύπτει ότι ο δυσμενέστερος σεισμικός συντελεστής κατά ΕΑΚ επαρκεί για λόγο της ανελαστικής ιδιοπεριόδου προς τη μέση περίοδο της διέγερσης μεγαλύτερο από 2.5. Τέλος, η εκτίμηση των σεισμικών μετακινήσεων δείχνει ότι μικρού μεγέθους μετακινήσεις μπορεί να προκύψουν και για πιο μεγάλους κύκλους ολίσθησης, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή για την αποφυγή υδραυλικής αστοχίας. Σε μικρότερες επιφάνειες ολίσθησης οι σεισμικές μετακινήσεις ενδέχεται να είναι μεγαλύτερες από τις ανεκτές. Ο συνυπολογισμός της κατακόρυφης ισοδύναμης επιτάχυνσης συντελεί στην αύξηση των σεισμικών μετακινήσεων. Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι ισχύοντες αντισεισμικοί κανονισμοί θα πρέπει να εφαρμόζονται με προσοχή και επιπλέον χρήζουν αναβαθμίσεως έτσι ώστε να ληφθεί ρεαλιστικά υπόψη η επίδραση των προαναφερθέντων παραμέτρων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Ambraseys, N.N. 1960. On the shear response of a two-dimensional truncated wedge subjected to an arbitrary disturbance. Bull. Seismological Soc. of America, 50(1): 45–56.
2. Bishop, A.W. 1954. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique 5(1): 7-17.
3. Bouckovalas, G.D. & Papadimitriou, A.G. 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. Soil Dyn. & Earthquake Engng 25: 547-558.
4. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ). 2000. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας.
5. Earthquake Engineering Research Institute (EERI). 2001. Bhuj, India Republic, January 26, 2001. Earthquake Reconnaissance Report.
6. Eurocode 8. 2003. Design of structures for earthquake resistance, Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. CEN-ENV, European Committee for Standardization, Brussels.
7. Federal Guidelines for Dam Safety (FEMA). 2005. Earthquake Analysis and Design of Dams.
8. Gazetas, G. 1987. Seismic response of earth dams: some recent developments. Soil Dyn. & Earthquake Engng 1(6): 3-47.
9. Gazetas, G., Kallou, P.V., & Psarropoulos, P.N. 2002. Topography and soil effects in the MS 5.9 Parnitha (Athens) earthquake: the case of Adames. Natural Hazards 27: 133-169.
10. Hudson, M., Idriss, I.M., & Beikae, M. 1994. User's Manual for QUAD4M. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, USA.
11. Ishihara, K. 1996. Soil behaviour in Earthquake Geotechnics. Oxford Science Publications.
12. Makdisi, F.I. & Seed, H.B. 1978. Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake induced deformations. ASCE J. of Geotech. Engng Div., 104: 849-867.
13. Newmark, N.M. 1965. Effect of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique. 15 (2): 139-160.
14. Tani, S. 2000. Behaviour of large fill dams during earthquake and earthquake damage. Soil Dyn. & Earthquake Engng, 20: 223-229.
15. Vucetic, M. & Dobry, R. 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. ASCE J. of Geotech. Engng, 117 (1): 89-107.
16. Wartman, J., Rodriguez-Marek, A., Macari, E.J., Deaton, S., Ramirez-Reynaga, M., Ochoa, C.N., Callan, S., Keefer, D., Repetto, P., & Ovando-Shelley, E. 2005. Geotechnical aspects of the 2003 Tecoman Mexico earthquake. Earthquake Spectra, 21(2): 493-538.

Seismic slope instability of earth dams

V. Zania

Doctoral Candidate, Division of Mechanics, Technical University of Crete

Y. Tsompanakis

Assistant Professor, Division of Mechanics, Technical University of Crete

P. N. Psarropoulos

Postdoctoral Researcher, Division of Mechanics, Technical University of Crete

Keywords: earth dams, dynamic response, slope stability, seismic displacements, soil nonlinearity.

ABSTRACT: Earth dams are geostructures of considerable engineering interest, mainly due to the socio-economical benefits obtained during their life time. In the current study the earthquake design of earth dams is investigated. Important aspects of the dynamic response of earth dams are evaluated by a numerical parametric study. Soil material nonlinearity and topographic aggravation are also considered in their dynamic behaviour, in accordance to the investigated parameters. Furthermore, seismic slope stability is estimated in terms of developed seismic displacements utilising the permanent deformation method. Results conclude that seismic norms should realistically consider the effect of these complicated phenomena.