

Επίδραση των γεωσυνθετικών υλικών στη σεισμική απόκριση και ευστάθεια γεωκατασκευών

Effect of geosynthetic materials on the seismic response and the stability of geostructures

ZANIA, Β. Πολιτικός Μηχανικός, Υπ. Διδάκτωρ, Πολυτεχνείο Κρήτης
ΤΣΟΜΠΑΝΑΚΗΣ, Ι. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επίκουρος Καθηγητής, Πολυτεχνείο Κρήτης
ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ, Π.Ν. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επιστημονικός Συνεργάτης, Πολυτεχνείο Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Οι ισχυρές σεισμικές διεγέρσεις προκαλούν την ανάπτυξη δυναμικών διατμητικών παραμορφώσεων σε γεωκατασκευές, όπως για παράδειγμα τεχνητά επιχώματα, ή χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, με πιθανή εκδήλωση αστάθειας στα πρανή τους. Η τοποθέτηση γεωσυνθετικών υλικών στη βάση πολλών γεωκατασκευών δημιουργεί μια επιφάνεια μειωμένης διατμητικής αντοχής η οποία επηρεάζει με ένα σύνθετο τρόπο τη δυναμική συμπεριφορά τους, τόσο σε όρους αδρανειακών επιταχύνσεων όσο και σε όρους μετακινήσεων. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη δυναμική απόκριση και ευστάθεια γεωκατασκευών, διερευνώντας ταυτόχρονα τον σύνθετο ρόλο των γεωσυνθετικών υλικών.

ABSTRACT: Strong earthquake excitations induce large shear strains to geostructures resulting to slope instability in soil embankments or waste landfills and, subsequently, to sliding along these surfaces. Nevertheless, the aforementioned geostructures include geosynthetic layers along which the shear strength is generally reduced, and therefore can be considered as pre-existing potentially-sliding surfaces. These surfaces have a complicated impact on the dynamic response, in terms of developed either inertial accelerations or displacements. The current study aims to provide an insight into the dynamic response and stability of geostructures, investigating the complicated role of the geosynthetic liners.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφαρμογή γεωσυνθετικών υλικών σε γεωκατασκευές, όπως τεχνητά επιχώματα και χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), αποτελεί συνήθη πρακτική για λόγους στεγάνωσης και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό τους. Αυξημένες απαιτήσεις ισχύουν στις εν λόγω κατασκευές λόγω των συνεπειών (περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών) που συνδέονται με το ενδεχόμενο αστοχίας τους. Καθώς δεν είναι λίγες οι βλάβες λόγω σεισμών που έχουν παρατηρηθεί σε γεωκατασκευές κατά το παρελθόν, σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού των κατασκευών αυτών σε χώρες με υψηλή σεισμικότητα, όπως η Ελλάδα, αποτελεί και ο αντισεισμικός σχεδιασμός, ο οποίος συνήθως υλοποιείται μέσω

των ισχυουσών μεθοδολογιών για χωμάτινα φράγματα και πρανή.

Η δυναμική απόκριση των γεωκατασκευών αντιμετωπίζεται είτε μέσω αναλυτικών μεθόδων είτε μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Οι περισσότερες αναλυτικές μέθοδοι βασίζονται στη θεωρία της διατμητικής δοκού όπως αυτή διατυπώθηκε αρχικά από τον Ambraseys (1960) και επεκτάθηκε περαιτέρω από τον Gazetas (1987). Η μέθοδος αυτή τροποποιήθηκε από τους Gunturi & Elgamal (1998) προκειμένου να προσδιοριστεί η απόκριση ενός Χ.Υ.Τ.Α., θεωρώντας διατομή κωνικής μορφής. Συχνά για τον προσδιορισμό της δυναμικής απόκρισης των γεωκατασκευών χρησιμοποιούνται απλοποιητικά μονοδιάστατες αναλύσεις, οι οποίες βασίζονται στη θεωρία διάδοσης των διατμητικών κυμάτων σε στρωσιγε-

νείς σχηματισμούς. Η πιο ακριβής μέθοδος θεωρείται η δυναμική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων που έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει την πραγματική διδιάστατη (ή και τριδιάστατη) γεωμετρία και συμπεριφορά της γεωκατασκευής.

Οι βασικές κατηγορίες προσδιορισμού της δυναμικής ευστάθειας είναι η ψευδοστατική μέθοδος, η μέθοδος μονίμων παραμορφώσεων, και η μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων. Η ψευδοστατική είναι η πιο απλουστευτική από τις τρεις, αλλά και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη. Στη μέθοδο αυτή η δυναμική φόρτιση λαμβάνεται προσεγγιστικά ως η αδρανειακή φόρτιση που προκαλείται από μια σταθερή τιμή επιτάχυνσης στο πρηνές. Εντούτοις, η ακρίβειά της περιορίζεται, καθώς η ευστάθεια προσδιορίζεται σε όρους συντελεστή ασφαλείας, χωρίς να υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις.

Αυτή την αδυναμία καλύπτει η μέθοδος των μονίμων παραμορφώσεων, η οποία βασίζεται σε ένα απλό προσομοίωμα που διατύπωσε ο Newmark (1965). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η διαδικασία με την οποία αναπτύσσονται οι σεισμικές παραμορφώσεις κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης είναι ανάλογη με αυτήν των μετακινήσεων που προκαλούνται καθώς ένα άκαμπτο σώμα ολισθαίνει επί ενός κεκλιμένου επιπέδου. Ακριβέστερη όλων θεωρείται η μέθοδος των τάσεων-παραμορφώσεων. Η εφαρμογή της μεθόδου βασίζεται στην αριθμητική προσομοίωση (με πεπερασμένα στοιχεία ή πεπερασμένες διαφορές) του προβλήματος και η δυναμική μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώνεται με προηγμένα καταστατικά προσομοιώματα. Ο δυσχερής προσδιορισμός όλων των απαραίτητων παραμέτρων για τη χρήση των τελευταίων έχει καταστήσει τη μέθοδο σπανίως εφαρμόσιμη, ιδιαίτερα σε γεωκατασκευές οι οποίες χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια υλικών, όπως είναι οι Χ.Υ.Τ.Α.

Στην παρούσα εργασία προσδιορίζεται αρχικά η δυναμική απόκριση επιχωμάτων με αριθμητικές δυναμικές αναλύσεις διδιάστατων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Έπειτα εξετάζεται η ευστάθεια για δύο πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας, σε όρους αναπτυσσόμενων μετακινήσεων. Ακολούθως, εξετάζεται η δυναμική αλληλεπίδραση των γεωσυνθετικών υλικών και της γεωκατασκευής υπό το πρίσμα, αφενός των αναπτυσσόμενων επιταχύνσεων, και αφετέρου των αναπτυσσόμενων σεισμικών μετακινήσεων της γεωκατασκευής. Σημειώνεται ότι τα εξεταζόμενα επι-

χώματα είναι αντιπροσωπευτικά υπέργειων Χ.Υ.Τ.Α.

2. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ Χ.Υ.Τ.Α.

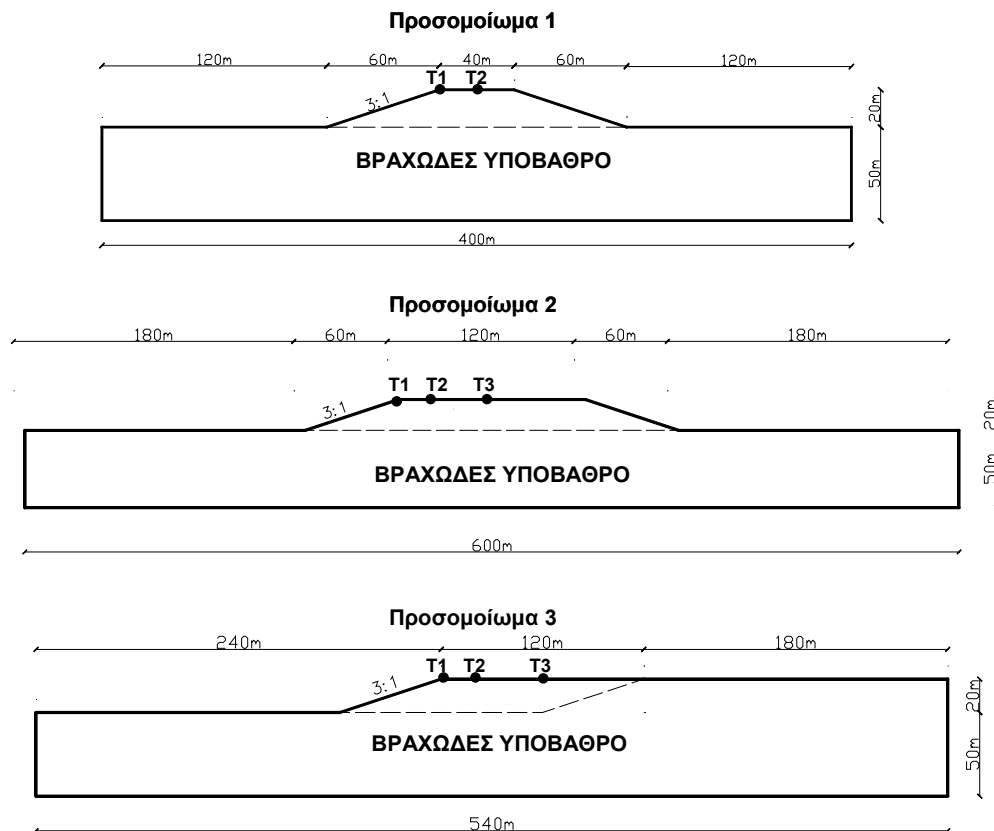
2.1 Παραδοχές αριθμητικών αναλύσεων

Στην παρούσα εργασία, για τη διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης Χ.Υ.Τ.Α πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις κατάλληλων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Για τις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας QUAD4M (Hudson et al., 1994). Πρόκειται για ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο η προσομοίωση γίνεται σε δύο διαστάσεις, προϋποθέτοντας συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Η μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού λαμβάνεται υπόψη μέσω μιας επαναληπτικής ισοδύναμα-γραμμικής προσέγγισης. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, εφαρμόζεται μια επαναληπτική διαδικασία ώσπου το μέτρο διάτμησης και η απόσβεση του υλικού να συγκλίνουν σε μια τιμή συμβατή με την ισοδύναμη διατμητική παραμόρφωση του υλικού σε όλο το εύρος του προσομοιώματος της κατασκευής.

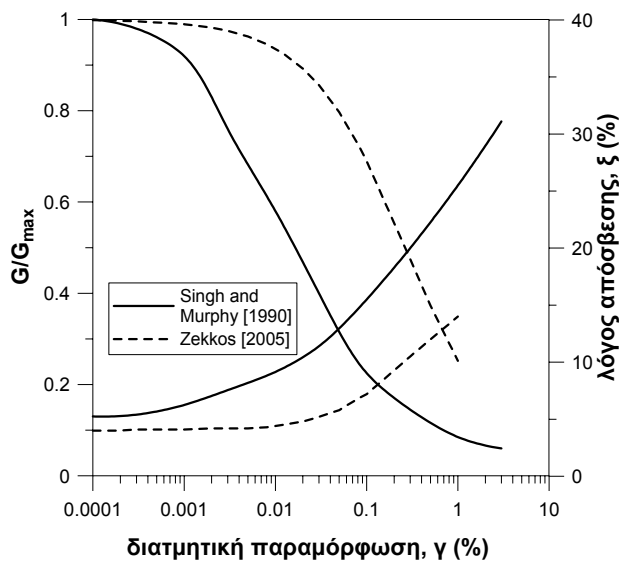
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, εξετάστηκαν τρία αντιπροσωπευτικά προσομοιώματα τυπικών διατομών Χ.Υ.Τ.Α. Το πρώτο προσομοίωμα αφορά έναν μικρό υπέργειο Χ.Υ.Τ.Α., το δεύτερο προσομοίωμα έναν υπέργειο μεγαλύτερης διατομής, και το τρίτο ένα Χ.Υ.Τ.Α. πλευρικής απόθεσης. Η κλίση των απορριμματικών πρηνών ήταν ίση με 3:1 για τα τρία προσομοιώματα διότι η κλίση αυτή θεωρείται αντιπροσωπευτική τιμή κλίσης για πρηνή Χ.Υ.Τ.Α..

Η διακριτοποίηση των προσομοιωμάτων αυτών πραγματοποιήθηκε με τριγωνικά τρικομβικά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης. Επίσης, το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων κάθε περιοχής επιλέχθηκε να είναι συμβατό με το αναμενόμενο μήκος κύματος της στρώσης, προκειμένου να αποφευχθούν ανακρίβειες στον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης του συστήματος. Για το λόγο αυτό το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων μειώνεται σημαντικά στο βραχώδες υπόβαθρο σε σχέση με την απορριμματική μάζα.

Όσον αφορά στις δυναμικές ιδιότητες του απορριμματικού υλικού η έμφαση δίνεται στην ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων, V_s , η οποία για την περίπτωση της ελαστικής απόκρισης μπορεί να λάβει τιμές από 130 έως 400m/sec (Houston et al., 1995 και Idriss et al., 1995).



Σχήμα 1. Οι τρεις τυπικές διατομές Χ.Υ.Τ.Α. που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.
Figure 1. Geometry of the three waste landfills examined in the current study.



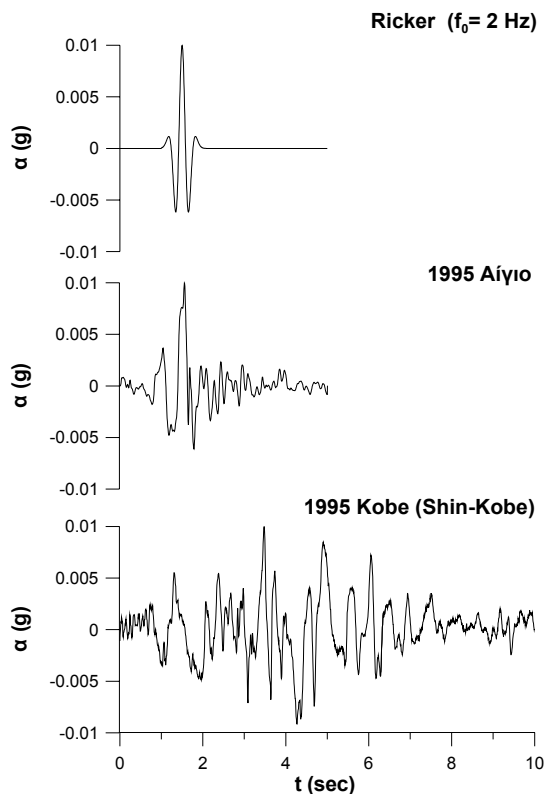
Σχήμα 2. Καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης και αύξησης του λόγου απόσβεσης.
Figure 2. Shear modulus reduction curves and damping variation curves for waste materials.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση αυτής της πιθανής διακύμανσης του V_s στη δυναμική απόκριση των Χ.Υ.Τ.Α. επιλέχθηκαν τρεις τιμές ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος, V_s : (α) Τύπος Α: $V_s = 160$ m/sec, (β) Τύπος Β: $V_s = 250$ m/sec και (γ) Τύπος Γ: $V_s =$

400 m/sec. Το ειδικό βάρος και στις τρεις περιπτώσεις ήταν ίσο με 10 kN/m³. Επίσης για τη καλύτερη διερεύνηση της ευαισθησίας της απόκρισης σε σχέση με τη μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού, χρησιμοποιήθηκαν δύο ζεύγη καμπύλων (Σχήμα 2) απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης: (α) οι καμπύλες των Singh & Murphy (1990) προερχόμενες από ανάστροφες αναλύσεις και (β) οι καμπύλες του Zekkos (2005) από εκτεταμένες εργαστηριακές δοκιμές.

Τέλος, για την εξέταση της επίδρασης των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης χρησιμοποιήθηκαν τρεις χρονοϊστορίες. Συγκεκριμένα, ένας παλμός Ricker με κεντρική συχνότητα στα 2Hz, μία καταγραφή από το σεισμό του Αιγίου (1995) και μία καταγραφή (Shin-Kobe) από το σεισμό του Kobe (1995). Οι διεγέρσεις που επιλέχθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των τριών διεγέρσεων, ανηγμένες σε μέγιστη επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration - PGA) ίση με $0.01g$ που αντιστοιχεί στις ελαστικές αναλύσεις, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της απόκρισης στην περίπτωση μικρής και εντονότερης μη-γραμμικής συμπεριφοράς του υλικού

πραγματοποιήθηκαν επίσης αναλύσεις με χρήση των ίδιων επιταχυνσιογραφημάτων ανηγμένα σε μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.1g και 0.36g, αντίστοιχα.



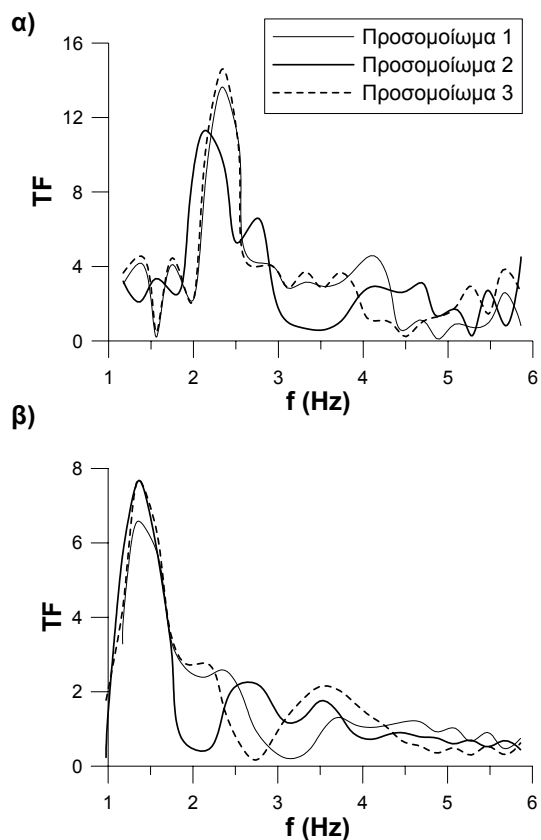
Σχήμα 3. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των τριών διεγέρσεων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις. Όλες έχουν υποστεί επικλιμάκια αναγωγή σε μέγιστη επιτάχυνση: PGA=0.01g. Figure 3 The acceleration time-histories of the three excitations used in the analyses; all scaled to the minimum PGA level: 0.01g.

2.2 Επίδραση της γεωμετρίας

Η δυναμική απόκριση των τριών προσομοιωμάτων εξετάζεται αρχικά μέσω συναρτήσεων μεταφοράς για τον απλό παλμό Ricker. Ως συνάρτηση μεταφοράς TF (Transfer Function) ορίζεται ο λόγος του μετασχηματισμού Fourier της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης του υπό εξέταση σημείου προς τον αντίστοιχο ενός σημείου της βάσης (δηλαδή, της διέγερσης). Η συνάρτηση μεταφοράς είναι σημαντική για την εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης γεωκατασκευών καθώς από αυτήν προσεγγίζονται, πέραν της μέγιστης ενίσχυσης, και τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της γεωκατασκευής. Υπό αυτό το πρίσμα υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις μεταφοράς των σημείων της δυσμενέστερης απόκρισης του καταστρώματος των τριών προσομοιωμάτων. Συγκεκριμένα, τα σημεία αυτά

είναι: το σημείο T2 για το πρώτο και τρίτο προσομοίωμα, ενώ για το δεύτερο το σημείο T3. Τα προαναφερθέντα σημεία φαίνονται στο Σχήμα 1.

Στο Σχήμα 4(α) παρουσιάζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς των προαναφερθέντων σημείων για την περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.01g σε Χ.Υ.Τ.Α. απορριμματικού υλικού Τύπου Α. Όσον αφορά τα συχνοτικά χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων, αποδεικνύεται ότι έχουν πρώτη ιδιοσυχνότητα ίση με 2.2Hz, 2Hz και 2.2 Hz, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, η μέγιστη τιμή της ενίσχυσης που παρατηρείται στην περιοχή της πρώτης ιδιοσυχνότητας αναφέρεται στο τρίτο προσομοίωμα (λίγο μεγαλύτερη από του πρώτου, περίπου ίση με 15), πιθανότατα λόγω των δύο συνόρων (ενός οριζοντίου στη βάση και ενός κεκλιμένου στα δεξιά) από τα οποία διαδίδονται τα σεισμικά κύματα. Είναι προφανές ότι η διαμόρφωση ιδιαίτερων «τοπογραφικών συνθηκών» επηρεάζει σημαντικά την απόκριση φυσικών ή τεχνητών πρηνών.



Σχήμα 4. Συναρτήσεις μεταφοράς (TF) των τριών προσομοιωμάτων για την περίπτωση του παλμού Ricker: (α) ελαστικής και (β) μη γραμμικής απόκρισης.

Figure 4. Transfer Functions (TF) of the three examined models for the Ricker pulse: (a) linear and (b) nonlinear response.

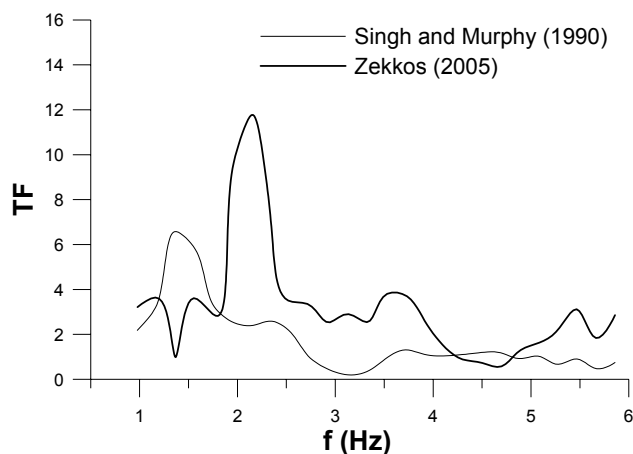
Στο Σχήμα 4(β) φαίνονται και οι αντίστοιχες συναρτήσεις για την περίπτωση (όχι ιδιαίτερα έντονης) μη-γραμμικής απόκρισης των εξεταζόμενων προσομοιωμάτων (μέγιστη επιτάχυνση 0.1g). Πρέπει να σημειωθεί ότι η δυσμενέστερη απόκριση παρατηρείται πάλι στα ίδια σημεία, όπως και στην περίπτωση της ελαστικής απόκρισης. Η μη-γραμμική συμπεριφορά προκαλεί αύξηση της ιδιοπεριόδου της γεωκατασκευής αλλά και μείωση των αναμενόμενων επιπέδων επιτάχυνσης. Καθώς το δεύτερο προσομοίωμα είχε μικρότερη ελαστική ιδιοσυχνότητα από τα άλλα προσομοιώματα και εν γένει μικρότερες τιμές ενίσχυσης, η απομείωση της ενίσχυσης είναι η λιγότερο έντονη. Συνεπώς, η δυναμική απόκριση του δεύτερου προσομοιώματος για τη μη-γραμμική περίπτωση πλησιάζει την αντίστοιχη των άλλων δύο προσομοιωμάτων.

2.3 Επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού

Η επίδραση των δυναμικών ιδιοτήτων του υλικού στην απόκριση εξετάζεται, αφενός σε όρους ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος (για την ελαστική περίπτωση), και αφετέρου ως προς τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης – αύξησης του λόγου απόσβεσης (για τις μη γραμμικές περιπτώσεις).

Στην ελαστική περίπτωση η αύξηση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος συνεπάγεται αύξηση της ιδιοσυχνότητας της γεωκατασκευής. Η επίδραση αυτή μπορεί να αποβεί δυσμενής στην περίπτωση που η ιδιοπερίοδος της κατασκευής πλησιάζει την αντίστοιχη της διέγερσης (περίπτωση συντονισμού), ενώ απεναντίας θα είναι ευμενής στην περίπτωση που απομακρύνεται από την αντίστοιχη της διέγερσης.

Για την μη-γραμμική περίπτωση συγκρίνεται η απόκριση του πρώτου προσομοιώματος, για την περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.1g σε απορριμματικό υλικό Τύπου Α, χρησιμοποιώντας τις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης-αύξησης του λόγου απόσβεσης των Singh & Murphy (1990) και Zekkos (2005) (Σχήμα 2). Στο Σχήμα 5 απεικονίζονται οι σχετικές συναρτήσεις μεταφοράς, από τις οποίες προκύπτει ότι η μη-γραμμική ιδιοσυχνότητα, αλλά και η ενίσχυση, μειώνονται πολύ πιο έντονα σύμφωνα με τις καμπύλες των Singh and Murphy (1990), σε σχέση με αυτές που προτείνει ο Zekkos (2005).



Σχήμα 5. Επίδραση των καμπύλων απομείωσης του μέτρου διάτμησης και αύξησης του λόγου απόσβεσης στην ανελαστική απόκριση για το προσομοίωμα 1 - Τύπο Α και διέγερση Ricker με PGA 0.1g.

Figure 5. Sensitivity of the nonlinear response to various proposed curves of modulus reduction and damping ratio increase. Model 1 – Type A under Ricker pulse with PGA 0.1g.

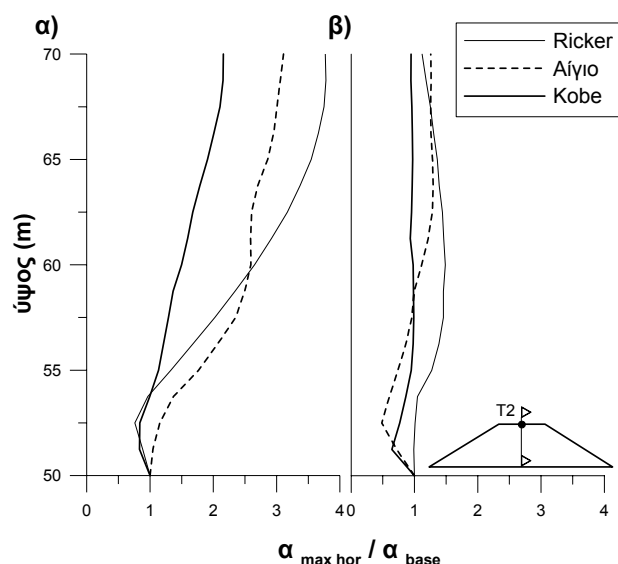
2.4 Επίδραση των χαρακτηριστικών του σεισμικού κραδασμού

Ο ρόλος της σεισμικής διέγερσης στην απόκριση της γεωκατασκευής εξαρτάται, αφενός από το συχνοτικό περιεχόμενο του επιταχυνσιογραφήματος, και αφετέρου από τα επίπεδα της μέγιστης επιτάχυνσης που καθορίζουν και το βαθμό της μη-γραμμικότητας του υλικού.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η κατανομή της κανονικοποιημένης επιτάχυνσης ως προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση για το πρώτο προσομοίωμα καθ' ύψος της διατομής που διέρχεται από το σημείο T2. Η ελαστική περίπτωση απόκρισης φαίνεται στο Σχήμα 6(α). Καθώς μειώνεται η κύρια συχνότητα της διέγερσης, αυξάνει η διαφορά της από την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής. Σημειώνεται ότι η καταγραφή του Kobe έχει την μικρότερη συχνότητα, ακολουθεί του Αιγίου, και τέλος η μεγαλύτερη αντιστοιχεί στον παλμό Ricker. Συνεπώς, η επίδραση του σεισμικού κραδασμού είναι σχετική, καθώς εξαρτάται άμεσα από την αρχική (υπό ελαστικές συνθήκες) συνάρτηση μεταφοράς της γεωκατασκευής.

Η μη-γραμμική περίπτωση απόκρισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6(β). Η μη-γραμμική συμπεριφορά έχει μεταβάλλει τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, και συνεπώς και τη συνάρτηση μεταφοράς. Η αλλαγή αυτή εξαρτάται τόσο από τις αρχικές ελαστικές τιμές όσο και από το επίπεδο της επιβαλλόμενης

επιτάχυνσης και το συχνοτικό περιεχόμενο της επιβαλλόμενης διέγερσης. Παρατηρείται δυσμενέστερη απόκριση για την καταγραφή του Αιγίου, σε σχέση με τις άλλες δύο ιστορίες, αποτέλεσμα του σύνθετου συσχετισμού των εμπλεκόμενων παραμέτρων.



Σχήμα 6. Κατανομή καθ' ύψος της μέγιστης οριζόντιας κανονικοποιημένης επιτάχυνσης, ως προς την μέγιστη τιμή της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης: (α) ελαστική και (β) μη-γραμμική απόκριση.

Figure 6. Variation of the maximum normalized horizontal acceleration along the height for the cases of (a) elastic and (b) nonlinear response.

3. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

3.1 Μεθοδολογία

Ο ρόλος των γεωσυνθετικών στρώσεων στην δυναμική ευστάθεια γεωκατασκευών είναι καθοριστικός. Κατά την ανάλυση της δυναμικής ευστάθειας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η δυνατότητα ανάπτυξης μετακινήσεων λόγω της επιβαλλόμενης διέγερσης. Για το λόγο αυτό, όσον αφορά στη δυναμική ευστάθεια των προαναφερθέντων τυπικών διατομών, εξετάζονται δύο περιπτώσεις: (α) ολίσθηση κατά μήκος της γεωσυνθετικής στεγανωτικής μεμβράνης (β) ολίσθηση κατά μήκος κυκλικής επιφάνειας αστοχίας. Οι κυκλικές επιφάνειες αστοχίας προσδιορίστηκαν με ψευδοστατικές αναλύσεις σύμφωνα με την μέθοδο της οριακής ισορροπίας.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται απαρτίζεται από δύο μέρη. Αρχικά προσδιορίζονται οι ισοδύναμες ιστορίες της επιτάχυνσης (σεισμικοί συντελεστές). Ο κώδικας QUAD4M

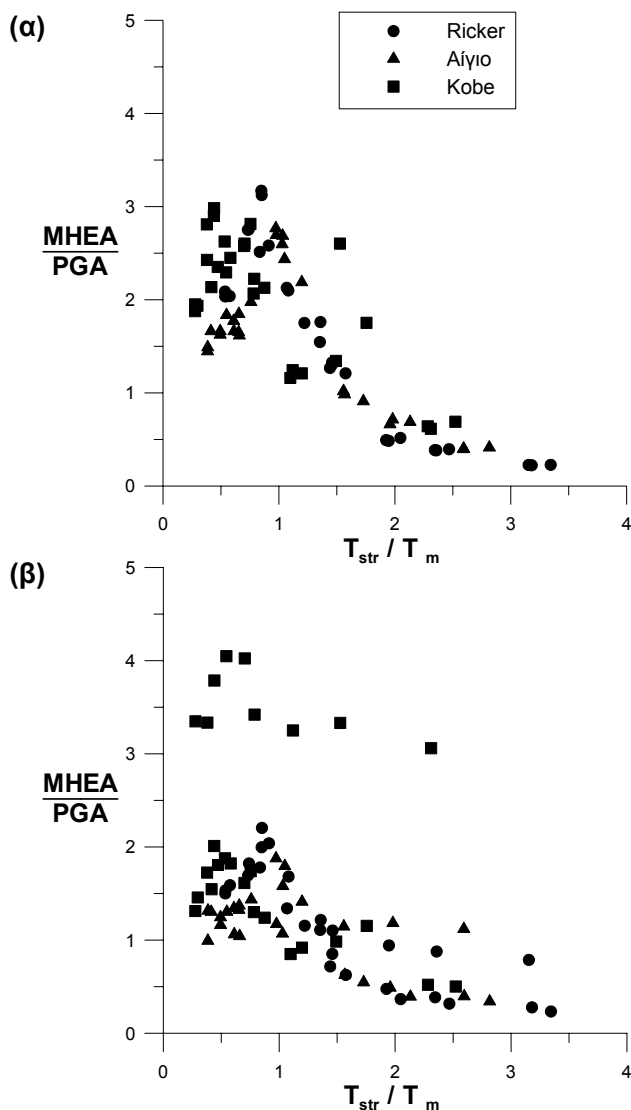
(Hudson et al., 1994) υπολογίζει τις προαναφερθείσες ιστορίες ως το λόγο της σεισμικής δύναμης που αναπτύσσεται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης προς το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας. Έπειτα, προσδιορίζονται οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις ως το διπλό ολοκλήρωμα της σχετικής επιτάχυνσης της ολισθαίνουσας μάζας. Η σχετική επιτάχυνση είναι η διαφορά μεταξύ της ισοδύναμης επιτάχυνσης και της κρίσιμης επιτάχυνσης. Σημειώνεται ότι, κρίσιμη θεωρείται η επιτάχυνση που αντιστοιχεί σε συντελεστή ασφαλείας της ίσο με τη μονάδα.

3.2 Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας

Η δυναμική ευστάθεια επηρεάζεται από τις παραμέτρους που έχουν ήδη αναφερθεί στην παρούσα διερεύνηση της απόκρισης των γεωκατασκευών (γεωμετρία, δυναμικές ιδιότητες υλικού και χαρακτηριστικά της διέγερσης). Συγκεκριμένα, στην ανάλυση δυναμικής ευστάθειας οι παράμετροι αυτοί συμπυκνώνονται στις εξής: (α) μέγιστη επιτάχυνση βάσης (PGA), (β) ιδιοπερίοδος της κατασκευής (T_{str}), και (γ) χαρακτηριστική περίοδος της καταγραφής (T_m).

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η μέγιστη ισοδύναμη οριζόντια επιτάχυνση κανονικοποιημένη ως προς τη μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (MHEA/PGA) συναρτήσει του λόγου της ιδιοπερίοδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης (T_{str}/T_m). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας όλων των εξεταζόμενων περιπτώσεων περιλαμβάνονται στο σχήμα αυτό. Η περίπτωση της κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης (Σχήμα 7α) παρουσιάζει εν γένει μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου αυτής σε σχέση με την περίπτωση ολίσθησης στη βάση (Σχήμα 7β). Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι, για την περίπτωση της κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης (Σχήμα 7α) και όταν η ιδιοπερίοδος της κατασκευής είναι μικρότερη της διπλάσιας τιμής της περιόδου της διέγερσης, ο σεισμικός συντελεστής είναι μεγαλύτερος από το 50% της μέγιστης επιτάχυνσης βάσης. Σημειώνεται ότι η τιμή αυτή προτείνεται για τον σχεδιασμό συναφών γεωτεχνικών έργων από τον ισχύοντα ελληνικό αντισεισμικό κανονισμό (ΕΑΚ 2000).

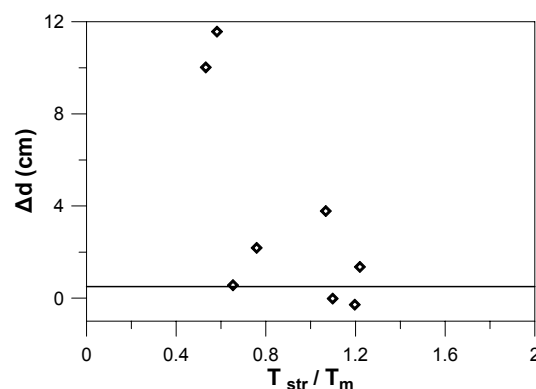
Εξαίρεση αποτελεί το τρίτο προσομοίωμα, όπου η ολίσθηση κατά μήκος των γεωσυνθετικών είναι πιο κρίσιμη, καθώς για την περίπτωση αυτή προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές τόσο για τον σεισμικό συντελεστή όσο και για τις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις.



Σχήμα 7. Συσχέτιση του λόγου της μέγιστης ισοδύναμης οριζόντιας επιτάχυνσης προς την μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση (MHEA/PGA) συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης (T_{str}/T_m): (α) κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης και (β) ολίσθησης στη βάση.
 Figure 7. Ratio of maximum horizontal equivalent acceleration (MHEA) to PGA is presented in variation to the ratio of the eigenperiod of the landfills to the mean period of the excitation for: (a) circular slip surface and (b) base sliding case.

Στο τρίτο προσομοίωμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την εξέταση της δυναμικής απόκρισης, οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις είναι εν γένει μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των προσομοιωμάτων 1 και 2, πιθανότατα λόγω των δύο συνόρων εκ των οποίων εισέρχονται τα σεισμικά κύματα εντός της γεωκατασκευής.

Επιπλέον, συγκρίθηκαν οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στις δύο εξεταζόμενες μορφές αστοχίας. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η διαφορά της σχετικής μετακίνησης κατά μήκος της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας από την σχετική μετακίνηση κατά μήκος των στεγανωτικών γεωσυνθετικών στρώσεων στη βάση για τα προσομοιώματα 1 και 2. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για την περίπτωση των υπεργείων Χ.Υ.Τ.Α. η κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι πιθανώς η κυκλική επιφάνεια που προκύπτει από την οριακή ισορροπία του πρηνούς, και όχι η ολίσθηση κατά μήκος των γεωσυνθετικών στρώσεων.



Σχήμα 8. Συσχέτιση της διαφοράς, (Δd), μεταξύ των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων στην περίπτωση κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης και ολίσθησης στη βάση συναρτήσει του λόγου της ιδιοπεριόδου της κατασκευής προς την περίοδο της διέγερσης (T_{str}/T_m).
 Figure 8. Difference of displacement, (Δd), between the circular slip surface case and the base sliding case, in variation to the ratio of eigenperiod to mean excitation's period (T_{str}/T_m).

4. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΩΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ

4.1 Παραδοχές αριθμητικών αναλύσεων

Η σεισμική συμπεριφορά των γεωκατασκευών ως τώρα εξετάστηκε με τη θεώρηση ότι τα δύο φαινόμενα (δηλαδή η απόκριση της κατασκευής, και η ολίσθηση των επιφανειών αστοχίας) δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους και το ένα έπεται του άλλου. Στην πραγματικότητα όμως, η ολίσθηση κατά μήκος των γεωσυνθετικών και η απόκριση της γεωκατασκευής είναι δύο φαινόμενα που συμβαίνουν ταυτόχρονα, και όπως έχει επισημανθεί και από άλλους ερευνητές (Rathje & Bray, 2000), τα δύο φαινόμενα αλληλεπιδρούν δυναμικά μεταξύ τους.

Προκειμένου να εξεταστεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης της ολίσθησης στη βάση της γεωκατασκευής και της απόκρισής της, μορφώθηκαν προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων στον κώδικα ABAQUS (2003). Εξετάστηκε το πρώτο προσομοίωμα του Σχήματος 1 και για τους τρεις τύπους απορριμματικού υλικού που έχουν αναφερθεί (Α, Β, και Γ). Η διακριτοποίηση έγινε πάλι με τριγωνικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, και η γεωσυνθετική στρώση προσομοιώθηκε ως επιφάνεια κατά μήκος της οποίας υπάρχει δυνατότητα ολίσθησης. Η συμπεριφορά της διεπιφάνειας χαρακτηρίζεται από τριβή τύπου Coulomb, ενώ η ελαστική παραμόρφωση στη διεπιφάνεια θεωρείται αμελητέα. Η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας θεωρήθηκε ότι χαρακτηρίζεται από γωνία τριβής ίση με 11° , γωνία η οποία αποτελεί χαρακτηριστική τιμή της δυναμικής γωνίας τριβής γεωσυνθετικών διεπιφανειών σύμφωνα με τους De & Zimmie (1998).

4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

Οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις (μέγιστες d_{max} , και μόνιμες d_{per}) στο μέσο της βάσης του πρώτου προσομοιώματος (προβολή του σημείου T2) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 για την περίπτωση επιβολής παλμού Ricker με μέγιστη επιτάχυνση ίση με 0.36g. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της μετακίνησης δεν συμπίπτει με τη μόνιμη παραμόρφωση μετά το πέρας της διέγερσης. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι τα δυναμικά χαρακτηριστικά της γεωκατασκευής και του κραδασμού (T_{str}/T_m) επηρεάζουν την ανάπτυξη των ολισθήσεων.

Πίνακας 1. Αναπτυσσόμενες μετακινήσεις κατά μήκος της επιφάνειας των γεωσυνθετικών υλικών για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

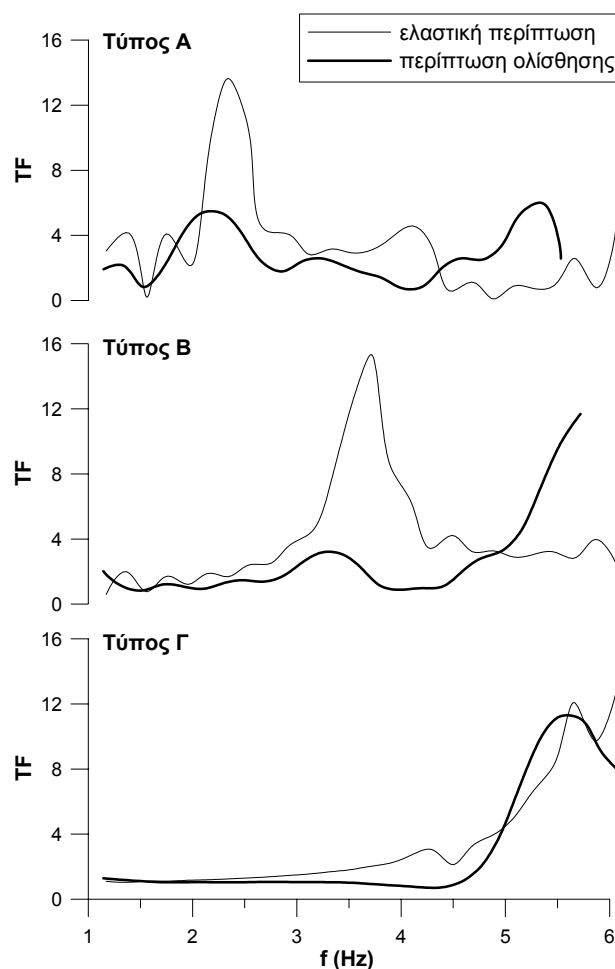
Table 1. Calculated displacements along the geosynthetic interface for the examined cases.

	Τύπος Α	Τύπος Β	Τύπος Γ
T_{str}/T_m	1.35	0.85	0.54
d_{perm} (mm)	11	14	10
d_{max} (mm)	18	18	15

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς του εξεταζόμενου προσομοιώματος για όλους τους τύπους υλικού (Α, Β και Γ). Οι συναρτήσεις μεταφοράς έχουν υπολογιστεί για το σημείο της δυσμενέστερης απόκρισης (T2), για την περίπτωση ελαστικής απόκρισης, και απόκρισης συζευγμένης με ολί-

σθηση στη βάση της γεωκατασκευής. Εν γένει, η πιο σημαντική επίδραση της ολίσθησης παρατηρείται στην απόκριση του υλικού Τύπου Β, όπου τα επίπεδα της ενίσχυσης μειώνονται σημαντικά για εύρος συχνοτήτων από 1 έως 5 Hz.

Σε αυτή τη περίπτωση αντιστοιχούν και τα μεγαλύτερα επίπεδα αναπτυσσόμενων μετακινήσεων. Μικρότερη είναι η επίδραση της ολίσθησης για την περίπτωση της απόκρισης του πρώτου προσομοιώματος με υλικό Τύπου Γ, καθώς και οι αναπτυσσόμενες μετακινήσεις είναι οι μικρότερες που παρατηρούνται. Τέλος, ένα σημαντικό στοιχείο της συζευγμένης απόκρισης με την ολίσθηση είναι ότι για την περίπτωση υλικού Τύπου Α και Β εμφανίζεται σημαντική ενίσχυση σε μία συχνότητα περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη από την ελαστική ιδιοσυχνότητα της κατασκευής.



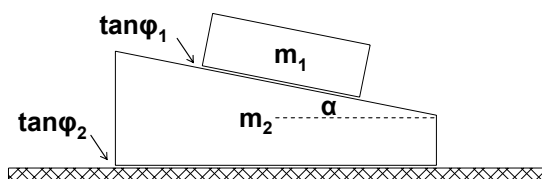
Σχήμα 9. Συναρτήσεις μεταφοράς για την περίπτωση της συζευγμένης απόκρισης με την ολίσθηση.

Figure 9. Transfer Functions (TF) of the coupled response of the geostructure.

5. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ

Από την προηγούμενη παράγραφο έγινε σαφές ότι η ανάπτυξη ολισθήσεων στη βάση της γεωκατασκευής δεν περιορίζει κατ' ανάγκη την απόκριση της κατασκευής. Επομένως, είναι πιθανή η ανάπτυξη ικανού επιπέδου επιταχύνσεων που θα προκαλούσε το ενδεχόμενο αστάθειας των πρανών. Προκειμένου να μελετηθεί η περίπτωση της διπλής ολίσθησης τόσο κατά μήκος πιθανής επιφάνειας ολίσθησης του πρανούς όσο και κατά μήκος της γεωσυνθετικής στρώσης της βάσης, μορφώθηκε ένα αναλυτικό προσομοίωμα βάσει των αρχών του αντίστοιχου απλού προσομοιώματος του Newmark (1965).

Το προσομοίωμα του Σχήματος 10 αποτελείται από δύο άκαμπτα σώματα με δυνατότητα ολίσθησης στη βάση του καθενός από αυτά. Τα δύο σώματα χαρακτηρίζονται από μάζες m_1 και m_2 αντίστοιχα, ενώ οι δύο διεπιφάνειες με γωνία τριβής φ_1 και φ_2 αντίστοιχα.

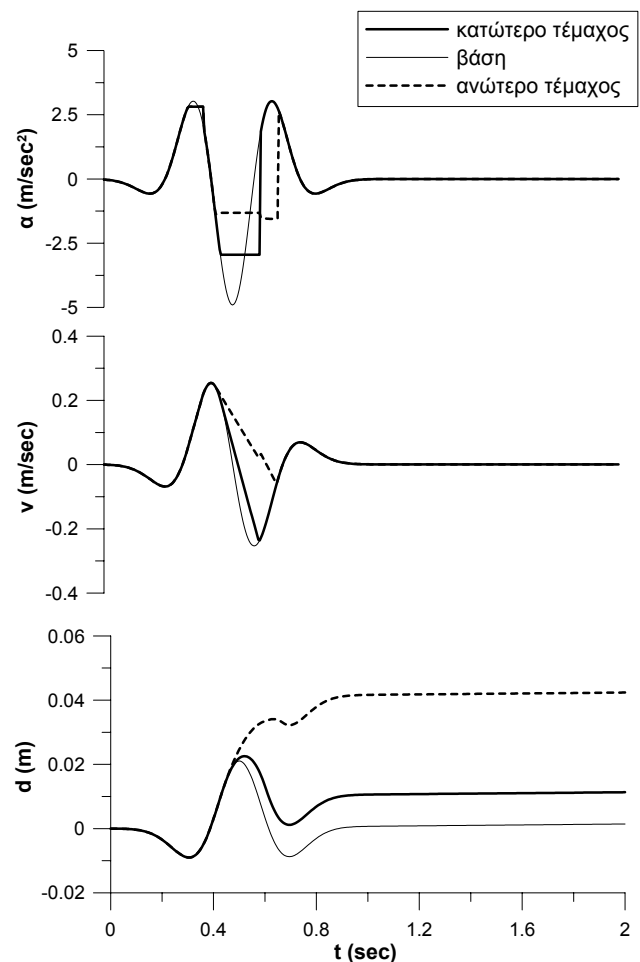


Σχήμα 10. Το απλό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της συμπεριφοράς διπλής επιφάνειας ολίσθησης.
Figure 10. The simple model developed to simulate analytically the double sliding phenomena.

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των αναπτυσσόμενων επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετακινήσεων των δύο ολισθαίνοντων τεμαχίων για την περίπτωση επιβαλλόμενης επιτάχυνσης Ricker με μέγιστη επιτάχυνση ίση με $0.5g$. Ο λόγος των μαζών των δύο τεμαχίων m_1/m_2 θεωρήθηκε ίσος με 0.1 , η γωνία του επιπέδου αστοχίας ίση με 15° , ενώ η γωνία τριβής της άνω διεπιφάνειας 23° και της κατώτερης διεπιφάνειας 16° . η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο σωμάτων είναι κεκλιμένη, ενώ η διεπιφάνεια στη βάση του δεύτερου σώματος είναι οριζόντια.

Η διπλή ολίσθηση συμβαίνει σε αυτή τη περίπτωση λίγο μετά τα 0.4sec . Η ολίσθηση του

άνωτερου σώματος αναπτύσσεται πρώτη, λόγω της μικρότερης κρίσιμης τιμής της επιτάχυνσης για την έναρξη της ολίσθησης. Παρόλο που η γωνία τριβής της άνωτερης διεπιφάνειας είναι μεγαλύτερη από την κατώτερη, η κρίσιμη τιμή της επιτάχυνσης είναι μικρότερη ως αποτέλεσμα δύο συνθηκών: (α) η άνωτερη επιφάνεια είναι κεκλιμένη, και (β) κατά την ολίσθηση του άνω τεμαχίου μέρος των δυνάμεων επαφής μεταβιβάζεται στο κατώτερο τέμαχος αυξάνοντας την κρίσιμη τιμή της επιτάχυνσής του. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά της ολίσθησης του άνω τεμαχίου επηρεάζουν την ολίσθηση του κατώτερου.



Σχήμα 11. Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης της επιβαλλόμενης διεγερσης, του κατώτερου και του άνωτερου τεμαχίου του προσομοιώματος.
Figure 11. Acceleration, velocity and displacement time histories of the base excitation, of the lower block, and of the upper block of the model.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε ο σημαντικός ρόλος των γεωσυνθετικών υλικών στην σεισμική απόκριση και ευστάθεια γεωκατασκευών. Αρχικά προσδιορίστηκε η επίδραση παραμέτρων όπως η γεωμετρία, οι ιδιότητες του υλικού, και τα χαρακτηριστικά του σεισμικού κραδασμού στη δυναμική απόκριση. Η επίδραση αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη και με τη δυναμική ευστάθεια. Το γεγονός αυτό έγινε εμφανές κατά τον υπολογισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων στην περίπτωση της ολίσθησης κατά μήκος της γεωσυνθετικής στεγανωτικής στρώσης βάσης και της κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης.

Επειδή τα δύο φαινόμενα (η απόκριση της γεωκατασκευής και η ανάπτυξη ολισθήσεων) δεν είναι μεταξύ τους ανεξάρτητα, εξετάστηκε και η αλληλεπίδρασή τους. Παρόλο που συνήθως θεωρείται ότι η ολίσθηση δρα ευεργετικά στη δυναμική απόκριση της κατασκευής, η ενίσχυση αποδείχθηκε ότι: (α) μπορεί να λάβει σημαντικές τιμές, και (β) εξαρτάται τόσο από το μέγεθος των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων όσο και από τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και της επιβαλλόμενης διέγερσης. Επιπλέον, η πιθανότητα ανάπτυξης δύο επιφανειών ολίσθησης ανέδειξε την επίδραση των γεωσυνθετικών στρώσεων και των ιδιοτήτων τους στις αναπτυσσόμενες σεισμικές μετακινήσεις στα πρηνή των γεωκατασκευών. Με δεδομένη τη σεισμική τρωτότητα των γεωκατασκευών και καθώς τα γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στην κατασκευή τους, το θέμα της επίδρασης των γεωσυνθετικών στη σεισμική συμπεριφορά γεωκατασκευών παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABAQUS (2003) Analysis User's Manual Version 6.4. ABAQUS Inc. USA.
- Ambraseys, N.N. (1960) "On the shear response of a two-dimensional truncated wedge subjected to an arbitrary disturbance," Bulletin of Seismological Society of America, Vol 50(1), pp. 45–56.
- De, A. and Zimmie T.F. (1998) "Estimation of dynamic interfacial properties of geosynthetics," Geosynthetics International, Vol. 5, pp. 17–39.
- EAK 2000, Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας.
- Gazetas, G. (1987) "Seismic response of earth dams: some recent developments," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 6(1), pp. 3–47.
- Gunturi, V.R. and Elgamal, A. M. (1998) "A class of inhomogeneous shear models for seismic analysis of landfills," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 17, pp. 197–209.
- Houston, W.N., Houston, S.L., Liu, J.W., Elsayed, A. and Sanders, C.O. (1995) "In-situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills," in Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills—Geotechnical special publication No54, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn (American Society of Civil Engineers, New York), pp. 73–82.
- 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.
- Idriss, I.M., Fiegel, G., Hudson, M.B., Mundy, P.K. and Herzig R. (1995) "Seismic response of the Operating Industries Landfill," in Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills—Geotechnical special publication No.54, ed. M.K. Yegian and W.D.L. Finn (American Society of Civil Engineers, New York), pp. 83–118.
- Newmark, N.M. (1965) "Effect of earthquakes on dams and embankments," Geotechnique, Vol.15 (2), pp.139–160.
- Rathje E.M. and Bray J.D. (2000) "Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126(11), pp. 1002-1013.
- Singh S. and Murphy B. (1990) "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills" in Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, eds. A. Landya and G.D. Knowles (Philadelphia: American Society for Testing and Materials) pp. 240-258,.
- Zekkos D.P. (2005) "Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid-waste." PhD Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA.