

Σεισμική Συμπεριφορά Αντιστηρίξεων Μονωμένων με Γεωαφρό

Seismic Response of Geof foam-Isolated Retaining Walls

Ιωάννης ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ¹, Χαρά ΠΡΑΣΣΑ², Σπύρος ΓΙΑΝΝΑΚΟΣ³,
και Γιώργος ΓΚΑΖΕΤΑΣ⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στο άρθρο ετούτο αναλύεται με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων η σεισμική απόκριση τοίχων αντιστηρίξεως βαρύτητας εδραζομένων επί παραμορφωτού εδαφικού στρώματος, μονωμένων από το αντιστηριζόμενο έδαφος με χρήση γεωαφρού. Διερευνάται η αποτελεσματικότητα του υλικού αυτού στην μείωση των αναπτυσσόμενων δυναμικών ωθήσεων, και της παραμένουσας μετακίνησης και στροφής στην κορυφή του τοίχου. Διεξάγονται ελαστικές και ελαστοπλαστικές δυναμικές εν χρόνω αναλύσεις, με απλές ημιτονικές διεγέρσεις και πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα ως σεισμική εξαίτηση. Η μέθοδος ανάλυσης επαληθεύεται μέσω προσομοίωσης πειραμάτων σεισμικής τράπεζας (από την βιβλιογραφία). Διερευνάται παραμετρικά η επιρροή της δυσμηνσίας του εδάφους θεμελιώσεως, του πάχους του γεωαφρού, και της διεγείρουσας επιτάχυνσης. Δείχνεται ότι η αποτελεσματικότητα αυξάνει με την αύξηση του πάχους του γεωαφρού. Σε όρους ωθήσεων, η αποτελεσματικότητα εξαρτάται κατά μείζονα λόγο από την συχνότητα της διέγερσης και το γεωτεχνικό προφίλ. Δείχνεται ότι η παρεμβολή γεωαφρού δεν είναι πάντα αποτελεσματική : σε αρκετές περιπτώσεις οι ωθήσεις αυξάνονται. Αντιθέτως, σε όρους μετακινήσεων και στροφών, η προσθήκη γεωαφρού είναι αποτελεσματική για όλο σχεδόν το εύρος των συχνοτήτων διεγέρσεως και για όλα τα εξετασθέντα γεωτεχνικά προφίλ.

ABSTRACT : This paper investigates the seismic response of geof foam-isolated gravity retaining walls lying on a deformable soil layer. A parametric finite element analysis is conducted to investigate the effectiveness of the isolating material on the reduction of the dynamic earth pressures, and the residual displacement and rotation of the wall. For this purpose, linear and non-linear dynamic time history analyses are conducted, using sinusoidal and real records as excitation. The analysis method is verified through comparison with shake-table tests (from the literature). The effectiveness of the isolation is shown to increase with the thickness of the geof foam layer. In terms of dynamic earth pressures, the isolation is not always effective. In stark contrast, (at least for the investigated soil profiles and ground excitations) the isolation is always effective in terms of the residual wall displacement and rotation.

¹ Λέκτορας ΠΔ407/80, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: ianast@civil.ntua.gr

² Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: chprassa@gmail.com

³ Υποψ. Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: spigian@hotmail.com

⁴ Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: gazetas@ath.forthnet.gr

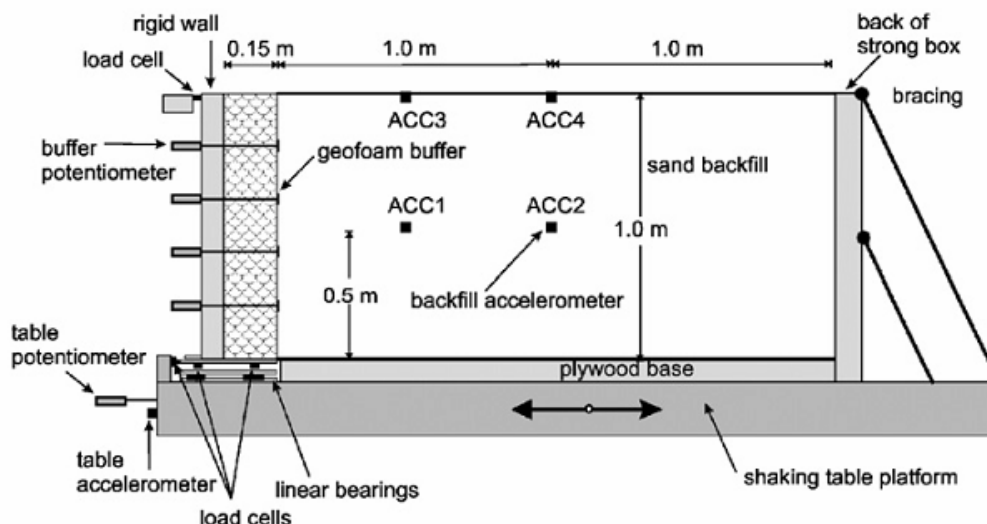
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μια εναλλακτική μέθοδος μείωσης των σεισμικών εδαφικών ωθήσεων που ασκούνται σε τοίχους αντιστήριξης. Η μέθοδος συνίσταται στην τοποθέτηση στρώσης συμπιεστού υλικού ανάμεσα στον τοίχο αντιστηρίξεως και το αντιστηριζόμενο έδαφος. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτήν, κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, το μεγαλύτερο μέρος των αναπτυσσόμενων δυναμικών ωθήσεων “απορροφάται” από το παραμορφώσιμο υλικό, και μόνον ένα μικρό μέρος τους μεταφέρεται τελικά στον τοίχο αντιστήριξης [Partos & Kazaniwsky, 1987; Pelekis et al., 2000; Xenaki & Athanasopoulos, 2001 ; Zarnani et al., 2005 ; Bathurst et al., 2006 ; 2007 ; Athanasopoulos et al., 2007]. Με άλλα λόγια, το συμπιεστό παρέμβλημα λειτουργεί ως σεισμική μόνωση των δυναμικών ωθήσεων που ασκούνται στην κατασκευή. Ως συμπιεστό υλικό χρησιμοποιείται ο Γεωαφρός Διογκωμένης Πολυστερίνης (ΓΔΠ), πλαστικό συνθετικό υλικό με κυψελώδη δομή, το οποίο παράγεται βιομηχανικά με πρώτη ύλη το πολυστυρένιο. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι η μεγάλη συμπιεστότητά του (μικρό μέτρο ελαστικότητας) σε σχέση με το έδαφος.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΕΣΩ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

Το πρόβλημα αναλύεται με εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, με χρήση του κώδικα ABAQUS. Η ανάλυση διεξάγεται σε δύο διαστάσεις, θεωρώντας συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Για την περίπτωση τοίχων αντιστηρίξεως χωρίς μόνωση, η μεθοδολογία αριθμητικής ανάλυσης έχει επαληθευτεί [Psarropoulos et al., 2004 ; Gazetas et al., 2004] μέσω σύγκρισης με τις αναλυτικές λύσεις των Veletsos & Younan [1994; 1994b; 1997]. Προτού προχωρήσουμε στην παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος, θεωρήσαμε σκόπιμο να ελέγξουμε την εγκυρότητα της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας καί για την περίπτωση τοίχων μονωμένων με συμπιεστό παρέμβυσμα. Προς τούτο, προσομοιώσαμε αριθμητικά μια σειρά δημοσιευμένων πειραμάτων σεισμικής τράπεζας τοίχου αντιστηρίξεως μονωμένου με γεωαφρό [Zarnani & Barthurst, 2005 ; Bathurst et al., 2007].

Όπως δείχνεται στο **Σχήμα 1**, η πειραματική διάταξη αποτελείται από άκαμπτο τοίχο αλουμινίου ύψους 1 m, ο οποίος αντιστηρίζει άμμο πυκνότητας 1.6 Mg/m^3 . Ανάμεσα στον τοίχο και το έδαφος παρεμβάλλεται στρώση γεωαφρού πάχους 15 cm. Στην βάση του εργαστηριακού ομοιώματος επεβλήθη ημιτονική διέγερση σταδιακώς αυξανόμενου πλάτους. Προκειμένου να μετρηθεί η συνολική στατική και δυναμική ώθηση επί του συστήματος αντιστηρίξεως, τοποθετήθηκαν μετρητές πίεσεως (load cells) στην κορυφή και στη βάση του τοίχου. Προκειμένου να είναι δυνατή η οριζόντια μετατόπιση του τοίχου, η έδρασή του στην σεισμική τράπεζα έγινε μέσω εφεδράνων ολισθήσεως χαμηλού συντελεστή τριβής. Σημειώνεται ότι η τοποθέτηση των μετρητών πίεσεως καθιστά το σύστημα αντιστηρίξεως ιδεωδώς άστρεπτο, άκαμπτο, και αμετακίνητο : προκειμένου να μετρήσουν τα *load cells* τις δυνάμεις (ωθήσεις), πρέπει να τις παραλάβουν. Αυτό σημαίνει ότι το φυσικό προσομοίωμα των εν λόγω πειραμάτων αντιστοιχεί σε έναν άκαμπτο τοίχο, αντιστηριζόμενο με μια αντηρίδα στην κορυφή και μια στη βάση του.



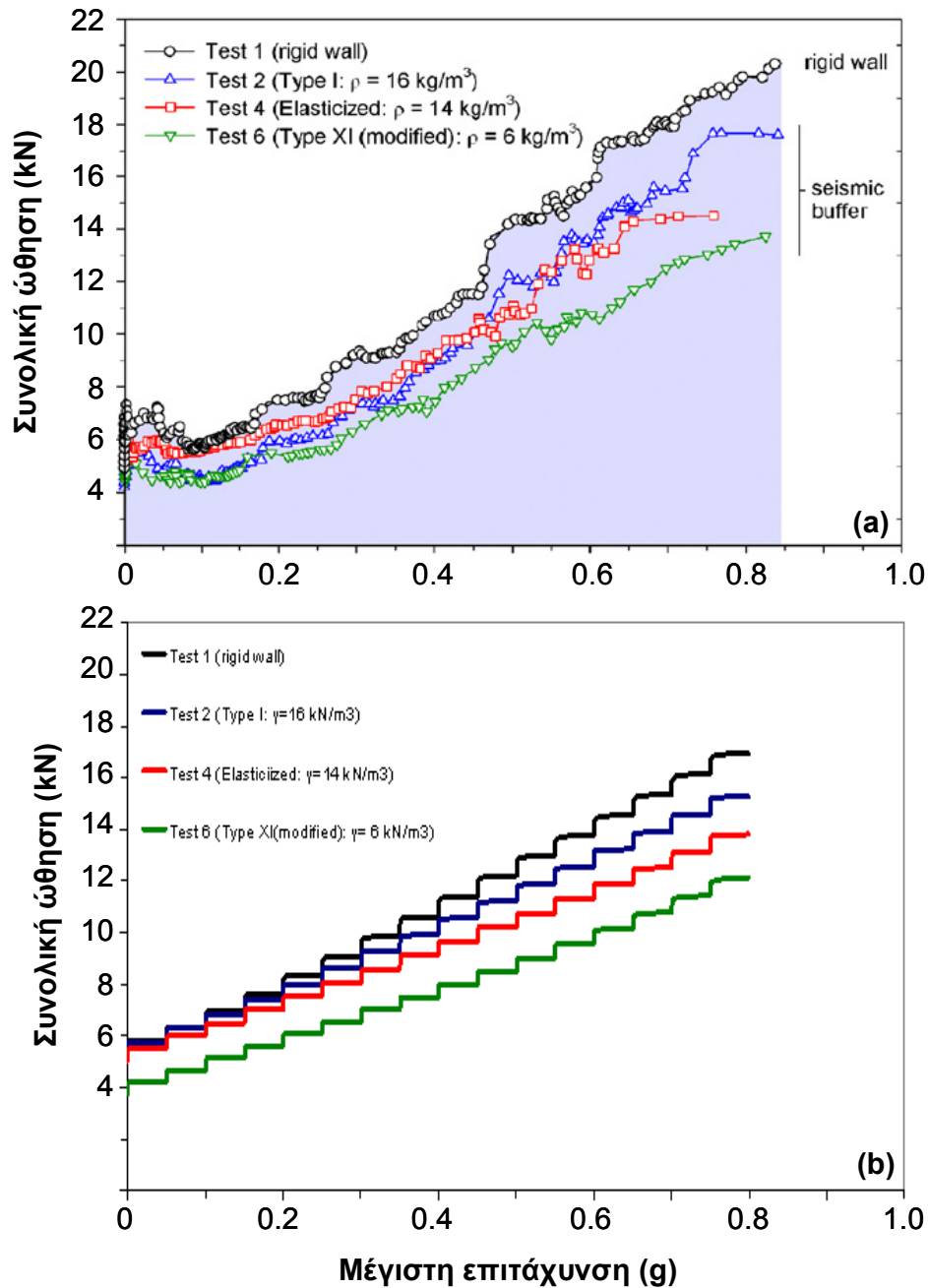
Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη του πειράματος σεισμικής τράπεζας των Barthurst et al. [2007].

Προκειμένου να προσομοιωθεί κατά το δυνατόν ρεαλιστικά η απόκριση του συστήματος εδάφους-κατασκευής, διεξήχθη μή-γραμμική εν χρόνω ανάλυση, με χρήση ελαστο-πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος με κριτήριο διαρροής Mohr-Coulomb. Τόσο το έδαφος, όσο και ο γεωαφρός προσομοιώθηκαν με 2-διάστατα τετρακομβικά στοιχεία, ο δε τοίχος αντιστηρίξεως μέσω στοιχείων δοκού. Τα *load cells* προσομοιώθηκαν με δύο οριζόντια ελατήρια μεγάλης δυσκαμψίας, ένα στην κορυφή και ένα στη βάση του τοίχου.

Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζονται οι μέγιστες συνολικές ωθήσεις (δηλαδή το άθροισμα των μετρούμενων δυνάμεων στα *load cells*) συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Οι πειραματικές μετρήσεις (**Σχήμα 2a**) συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των διενεργηθεισών αριθμητικών αναλύσεων (**Σχήμα 2b**). Παρότι το χρησιμοποιηθέν μή-γραμμικό καταστατικό προσομοίωμα δεν είναι ιδιαίτερος σοφιστευμένο (βλ. Mohr Coulomb), η σύγκριση είναι αρκετά ικανοποιητική, τόσο *ποιοτικά* όσο και *ποσοτικά*. Πέρα από την επιτυχία της αριθμητικής προσομοίωσης, το κυριότερο συμπέρασμα έγκειται στην αποτελεσματικότητα της μόνωσης : οι δυναμικές ωθήσεις μειώνονται αισθητά με την προσθήκη του γεωαφρού. Όπως θα αναμένονταν, η αποτελεσματικότητα του γεωαφρού αυξάνεται με την μείωση της πυκνότητας του (και άρα του μέτρου ελαστικότητας).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

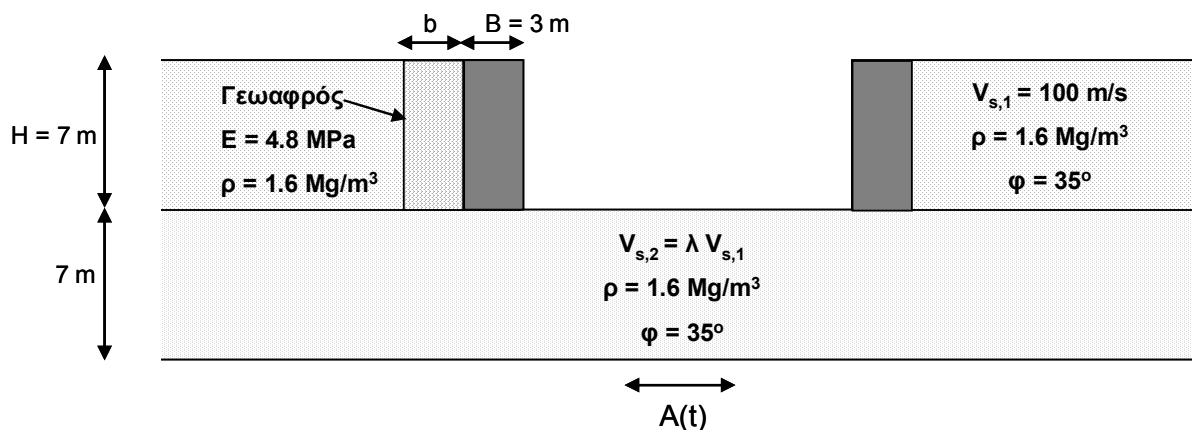
Έχοντας επαληθεύσει την αξιοπιστία της μεθοδολογίας αριθμητικής ανάλυσης, προχωρούμε στην παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος. Μελετάται άκαμπτος τοίχος βαρύτητας ύψους $H = 7$ m και πλάτους $B = 3$ m, ο οποίος αντιστηρίζει εδαφικό υλικό ταχύτητας διατμητικού κύματος $V_{s,1} = 100$ m/s και πυκνότητας $\rho = 1.6$ Mgr/m³. Ανάμεσα στον τοίχο και το αντιστηριζόμενο έδαφος τοποθετείται στρώση γεωαφρού πάχους t , μέτρου ελαστικότητας $E = 4.8$ MN/m² και πυκνότητας $\rho = 1.6$ Mgr/m³ (τυπικές τιμές με βάση την βιβλιογραφία). Ο τοίχος εδράζεται επί εδαφικής στρώσεως πάχους 7 m, και ταχύτητας διατμητικού κύματος $V_{s,2}$. Για τις μή-γραμμικές αναλύσεις θεωρούμε $\varphi = 35^\circ$ και για τις δύο εδαφικές στρώσεις. Ως σεισμική εξαίτηση χρησιμοποιείται ημιτονική διέγερση 15 κύκλων μέγιστου πλάτους A_0 .



Σχήμα 2. Μέγιστη συνολική ώθηση συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης : (a) πειραματικές μετρήσεις [Barthurst et al., 2007], (b) αποτελέσματα αναλύσεως.

Όπως δείχνεται σχηματικά στο **Σχήμα 3**, εξετάστηκαν παραμετρικά :

- Το αδιάστατο πάχος της μόνωσης : $t_r = b / H = 0.13, 0.21, \text{ και } 0.43$.
- Ο λόγος των ταχυτήτων διατμητικού κύματος : $V_{s,2} / V_{s,1} = 0.5, 1, 2, \text{ και } 5$
- Ο λόγος της συχνότητας διέγερσης ω προς την δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα ω_1 του δίστρωτου εδαφικού σχηματισμού : $\omega / \omega_1 = 1/6, 1/2, 1, \text{ και } 2$.
- Το μέγιστο πλάτος της ημιτονικής διέγερσης $A_0 = 0.1 \text{ g}, 0.2 \text{ g}, \text{ και } 0.4 \text{ g}$.



Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση του εξεταζόμενου προβλήματος: γεωμετρία και βασικές παράμετροι της παραμετρικής διερεύνησης.

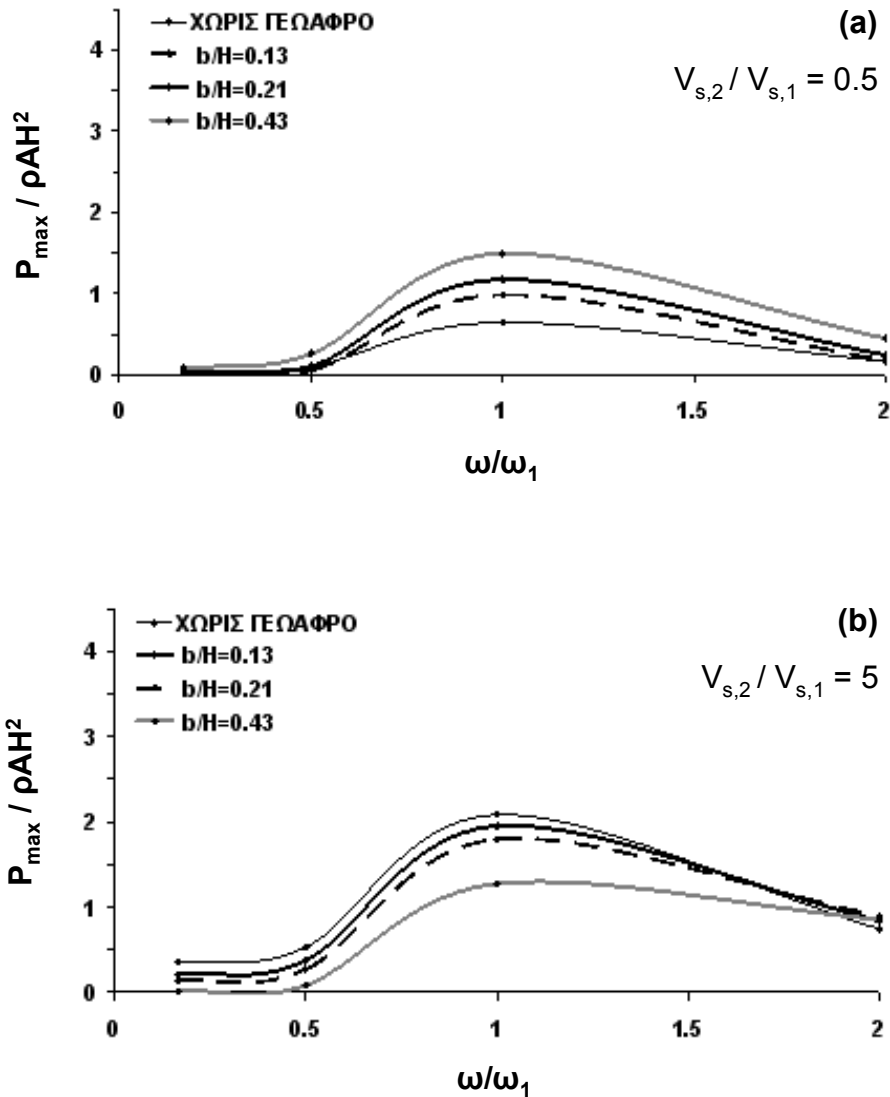
Η πλήρης παράθεση όλων των αποτελεσμάτων της παραμετρικής διερευνήσεως ξεφεύγει από τους στόχους του παρόντος άρθρου. Ως εκ τούτου, στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα των διενεργηθεισών αναλύσεων.

Ελαστική Ανάλυση

Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζεται τα διαγράμματα της αδιαστατοποιημένης μέγιστης ώθησης $P_{max}/\rho AH^2$ που ασκείται στον τοίχο συναρτήσει της κανονικοποιημένης συχνότητας της διέγερσης ω/ω_1 , για $V_{s,2}/V_{s,1} = 0.5$ και 5 (δηλαδή για “μαλακό” και “σκληρό” έδαφος θεμελίωσης).

Στην περίπτωση του “σκληρού” εδάφους θεμελίωσης, $V_{s,2}/V_{s,1} = 5$, οι δυναμικές εδαφικές ωθήσεις μειώνονται με την προσθήκη του συμπιεστού παρεμβύσματος, η δε αύξηση του πάχους του γεωαφρού οδηγεί σε μείωση των ωθήσεων. Η μέγιστη μείωση των ωθήσεων παρατηρείται για $\omega/\omega_1 = 1/6$, δηλαδή για οιονεί στατικές συνθήκες. Παρατηρείστε ότι για την παχύτερη στρώση γεωαφρού, $b/H = 0.43$, η αδιάστατη συνολική ώθηση σχεδόν μηδενίζεται: μέγιστη αποδοτικότητα της μόνωσης. Παρόμοια είναι η κατάσταση καί στον συντονισμό ($\omega/\omega_1 = 1$), με μικρότερη όμως αποδοτικότητα. Σε μεγαλύτερες συχνότητες, $\omega/\omega_1 = 2$, η προσθήκη γεωαφρού παύει να είναι ευνοϊκή (δεν παρατηρείται μείωση των ωθήσεων).

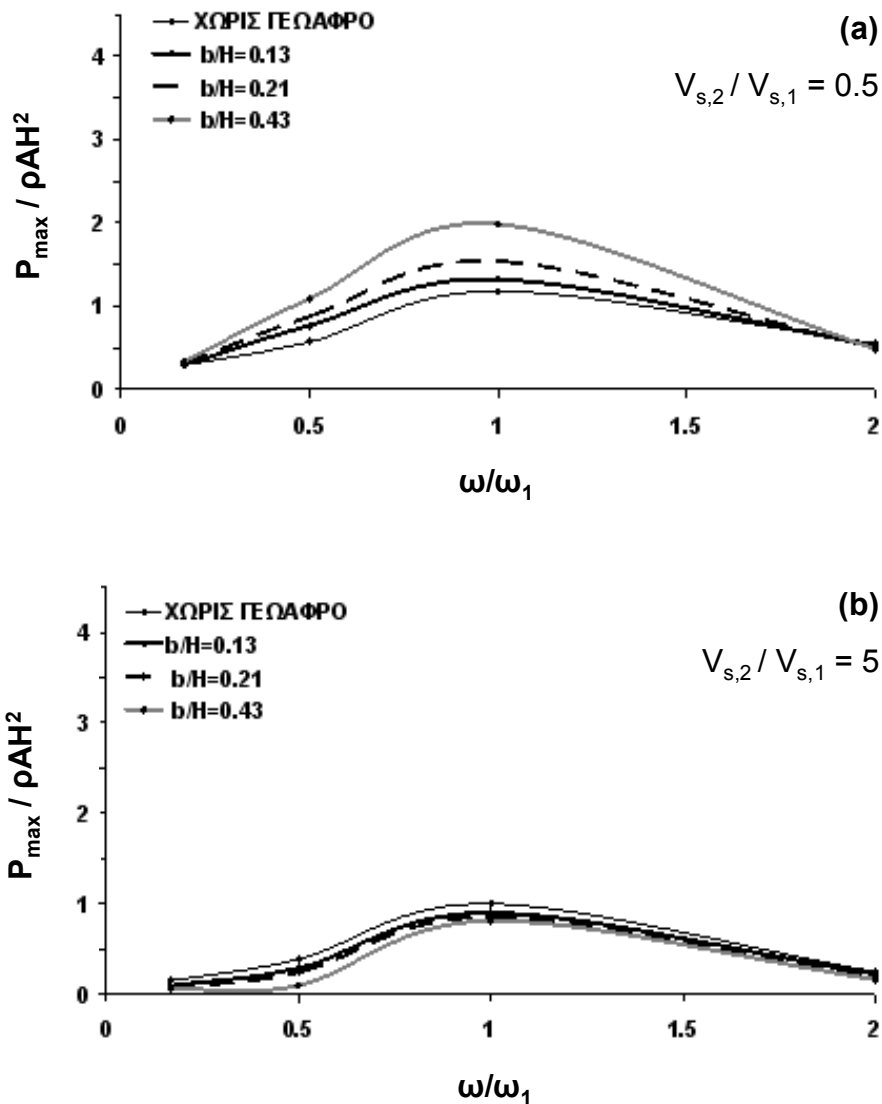
Στην περίπτωση του μαλακού εδάφους θεμελίωσης, $V_{s,2}/V_{s,1} = 0.5$, η κατάσταση *αντιστρέφεται πλήρως*: η προσθήκη του γεωαφρού όχι μόνον δεν μειώνει τις δυναμικές εδαφικές ωθήσεις, αλλά σε ορισμένες συχνότητες προκαλεί ακόμη και επαύξησή τους. Η μέγιστη ποσοστιαία αύξηση των ωθήσεων παρατηρείται για $\omega/\omega_1 = 1/6$, δηλαδή για οιονεί στατικές συνθήκες. Παρόμοια είναι η κατάσταση καί στον συντονισμό ($\omega/\omega_1 = 1$). Σε μεγαλύτερες συχνότητες, $\omega/\omega_1 = 2$, η προσθήκη γεωαφρού εξακολουθεί να αυξάνει τις ωθήσεις.



Σχήμα 4. Ελαστική ανάλυση – επιρροή του πάχους του γεωαφρού b/H στις αναπτυσσόμενες δυναμικές ωθήσεις. Κανονικοποιημένη ώθηση $P_{max}/\rho A H^2$ συναρτήσει της αδιάστατης συχνότητας ω/ω_1 : (a) $V_{s,2}/V_{s,1} = 0.5$, και (b) $V_{s,2}/V_{s,1} = 5$.

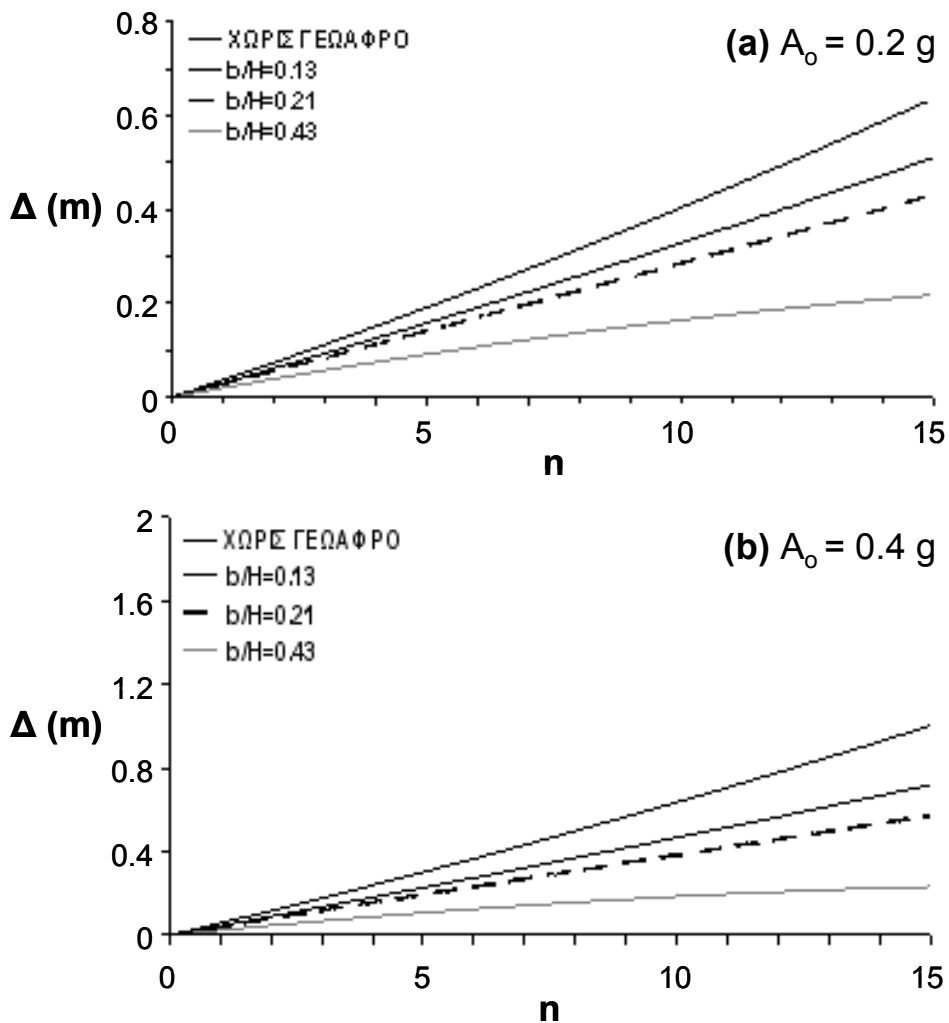
Μή-γραμμική Ανάλυση

Ενδεικτικά αποτελέσματα της μή-γραμμικής ανάλυσης δείχνονται στο **Σχήμα 5**, για την περίπτωση ημιτονικής διέγερσης με πλάτος $A_0 = 0.2$ g. Κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα αποτελέσματα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της αδιαστατοποιημένης μέγιστης ώθησης $P_{max}/\rho A H^2$ συναρτήσει της κανονικοποιημένης συχνότητας ω/ω_1 , για $V_{s,2}/V_{s,1} = 0.5$ και 5. Τα βασικά συμπεράσματα δεν διαφοροποιούνται. Όπως και στις ελαστικές αναλύσεις, η παρεμβολή του γεωαφρού προκαλεί μείωση των ωθήσεων στην περίπτωση του ανένδοτου (σκληρού) έδαφους θεμελιώσεως, και αύξηση στην περίπτωση του ενδόσιμου (μαλακού) εδάφους θεμελιώσεως. Στην περίπτωση αυτήν, ο γεωαφρός ακολουθεί τον λικνιζόμενο τοίχο, με αποτέλεσμα το σύστημα τοίχου-γεωαφρού να συμπεριφέρεται ως ένα σώμα, πλάτους ίσου με το άθροισμα των δύο ($B + b$). Η αύξηση αυτή του πλάτους οδηγεί σε μείωση της δυναμικής στροφής του συστήματος και άρα σε αύξηση των ωθήσεων.



Σχήμα 5. Μή-γραμμική ανάλυση, $A_0 = 0.2 \text{ g}$ – επιρροή του πάχους του γεωαφρού b/H στις αναπτυσσόμενες δυναμικές ώθησεις. Κανονικοποιημένη ώθηση $P_{max}/\rho A H^2$ συναρτήσεως της αδιάστατης συχνότητας ω/ω_1 : (a) $V_{s,2}/V_{s,1} = 0.5$, και (b) $V_{s,2}/V_{s,1} = 5$.

Όμως το πραγματικό κριτήριο επιτελεσματικότητας ενός συστήματος αντιστηρίξεως δεν είναι η αναπτυσσόμενη ώθηση, αλλά η παραμένουσα παραμορφώσεις μετά από τον σεισμό σχεδιασμού. Στο **Σχήμα 6** δείχνονται οι παραμένουσες μετακινήσεις στην κορυφή του τοίχου συναρτήσεως του αριθμού των κύκλων της διέγερσης. Τα αποτελέσματα δείχνονται για την περίπτωση του συντονισμού, $\omega/\omega_1 = 1$, για $V_{s,2}/V_{s,1} = 2$, και για πλάτη διεγέρσεως 0.2 και 0.4 g. Η παρεμβολή της στρώσης γεωαφρού μειώνει αισθητά την παραμένουσα μετακίνηση και στροφή του τοίχου σε όλες τις περιπτώσεις. Η αύξηση του πάχους της μόνωσης οδηγεί σε μείωση της παραμένουσας παραμόρφωσης του τοίχου. Άρα, σε όρους μετακινήσεων η μόνωση γεωαφρού είναι σε όλες τις περιπτώσεις αποδοτική.

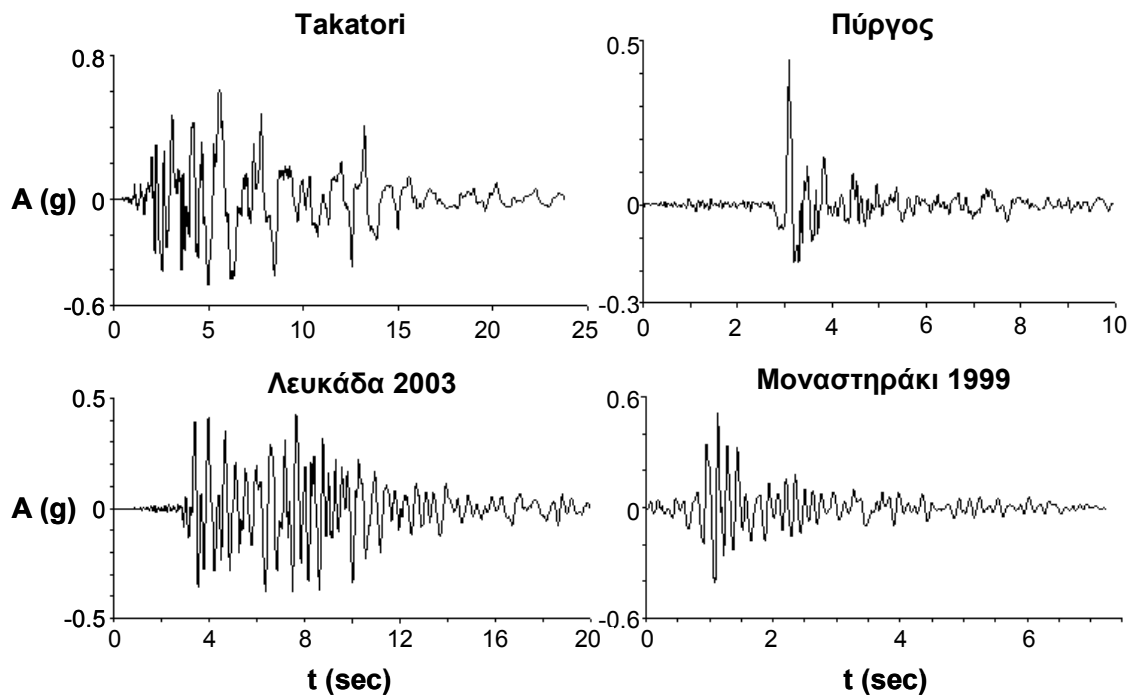


Σχήμα 6. Μή-γραμμική ανάλυση – επιρροή του πάχους του γεωαφρού b/H στις παραμένουσες μετατοπίσεις Δ στην κορυφή του τοίχου, συναρτήσει του αριθμού των κύκλων n : (a) $A_0 = 0.2 \text{ g}$, (b) $A_0 = 0.4 \text{ g}$,

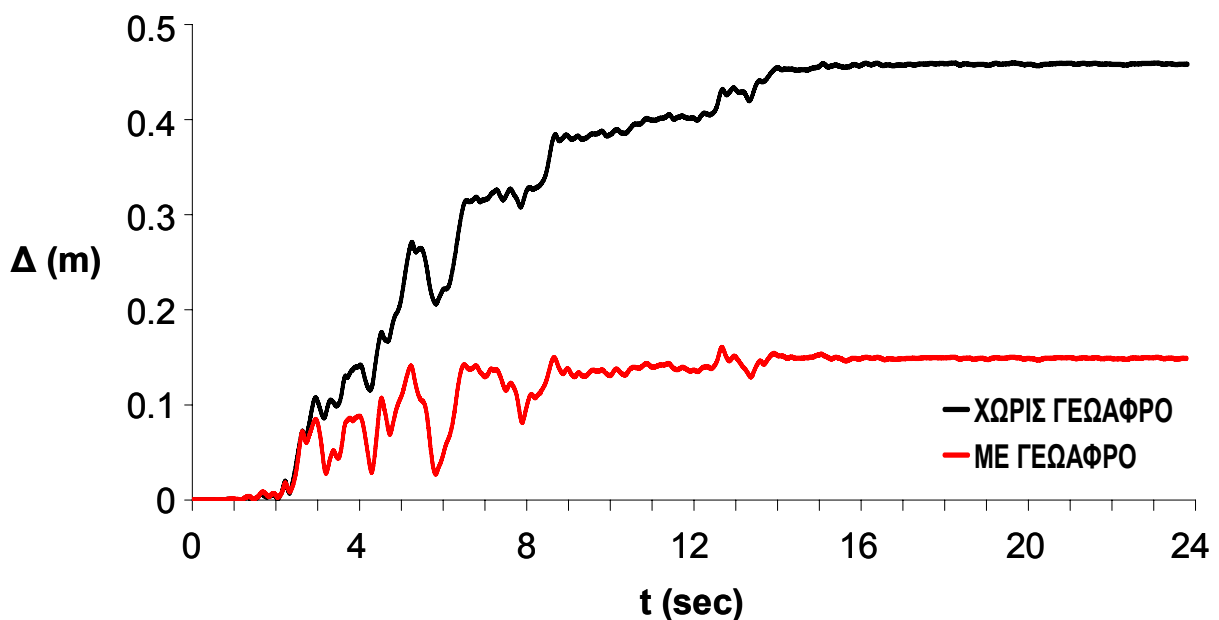
Πραγματικές Διεγέρσεις

Πραγματοποιήθηκαν μή-γραμμικές αναλύσεις και με τις καταγραφές του **Σχήματος 7**. Ως προς το πάχος του γεωαφρού, η παραμετρική διερεύνηση περιορίστηκε στις δυο ακραίες περιπτώσεις : χωρίς καθόλου γεωαφρό, $b/H = 0.43$.

Ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 8** : χρονοϊστορία της μετακίνησης στην κορυφή του τοίχου για $V_{s,2} / V_{s,1} = 5$, με διέγερση το επιταχυνσιογράφημα Takatori του σεισμού του Κόμπτε (1995). Η παρεμβολή του γεωαφρού έχει σαφώς ευνοϊκή επιρροή. Και σε όλες τις άλλες περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η παραμένουσα μετακίνηση και στροφή του τοίχου μειώνονται αισθητά με την προσθήκη της στρώσης γεωαφρού.



Σχήμα 7. Πραγματικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.



Σχήμα 8. Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης Δ στην κορυφή του τοίχου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΓΕΩΑΦΡΟΥ

Σε όρους ωθήσεων, η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης, A_r , ορίζεται ως το επί τοις εκατό ποσοστό της μείωσης της σεισμικής προσαύξησης της ώθησης, $dP = P - P_{MON}$ ως προς την τιμή της σεισμικής προσαύξησης χωρίς την ύπαρξη της μόνωσης, P [βλ. Athanasopoulos et al., 2007] :

$$A_r = (dP/P) \times 100 (\%)$$

(1)

Ο υπολογισμός του συντελεστή αποτελεσματικότητας έγινε μόνο για $V_{s,2} / V_{s,1} = 5$, καθώς μόνο σ'αυτή την περίπτωση έχει νόημα (παρατηρείται μείωση των ωθήσεων).

Αντιστοίχως, σε όρους μετακινήσεων η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης, A_d , ορίζεται ως το επί τοις εκατό ποσοστό της μείωσης της παραμένουσας μετακίνησης, $d\Delta = \Delta - \Delta_{MON}$ ως προς την τιμή της παραμένουσας μετακίνησης χωρίς της μόνωσης, Δ :

$$A_d = (d\Delta / \Delta) \times 100 (\%)$$

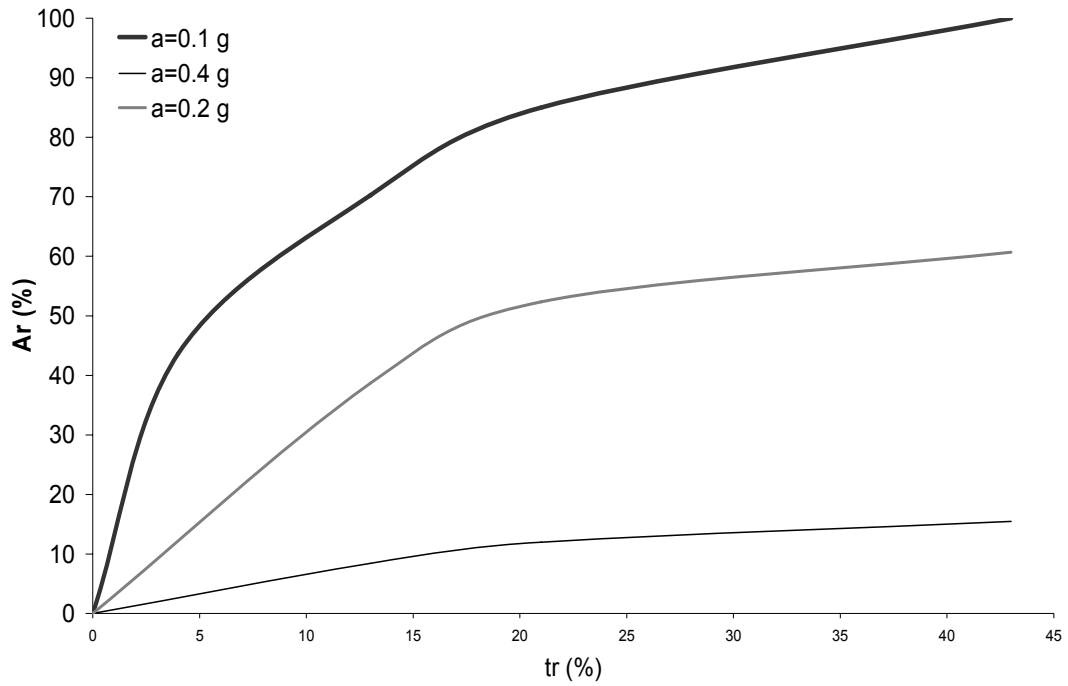
(2)

Στα **Σχήματα 9 έως 12** παρουσιάζονται τα διαγράμματα της αποτελεσματικότητας στην απομείωση των δυναμικών ωθήσεων συναρτήσει του σχετικού πάχους του γεωαφρού ως προς τον τοίχο για όλους τους λόγους ω/ω_1 .

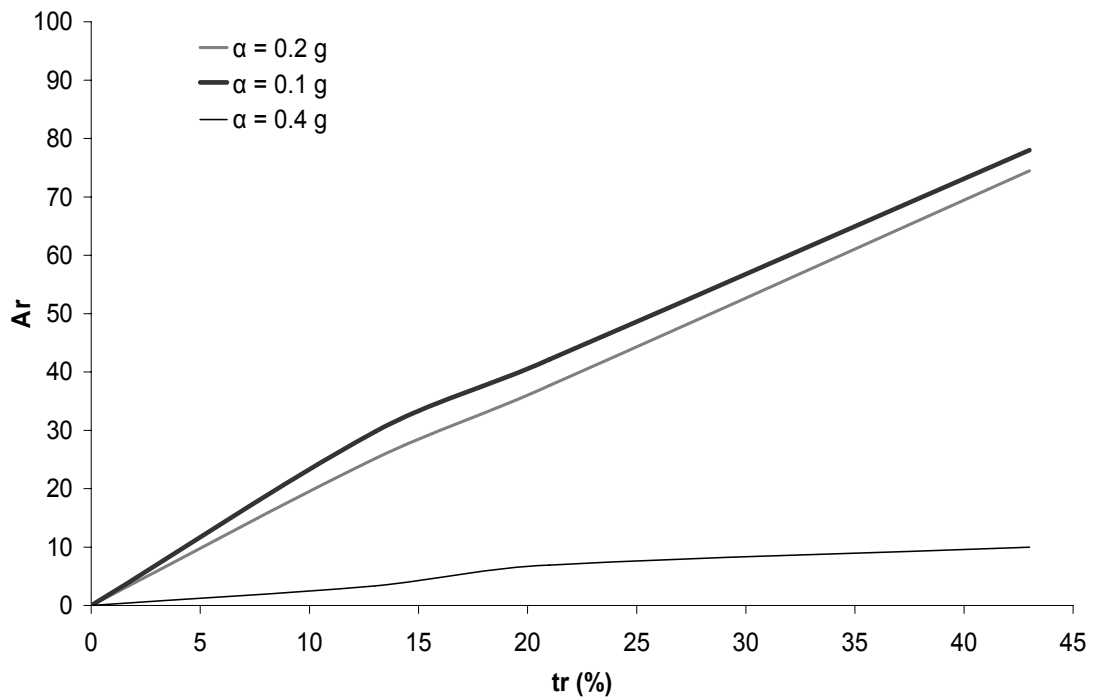
Στα **Σχήματα 15 και 16** παρουσιάζονται δυο ενδεικτικά διαγράμματα της αποτελεσματικότητας στην απομείωση των μετακινήσεων συναρτήσει του σχετικού πάχους του γεωαφρού. Το διάγραμμα του **Σχήματος 15** παρουσιάζει την επιρροή του γεωαφρού, ενώ το διάγραμμα του **Σχήματος 16** παρουσιάζει την επιρροή του μεγέθους της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης.

Με βάση τα σχήματα αυτά εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα :

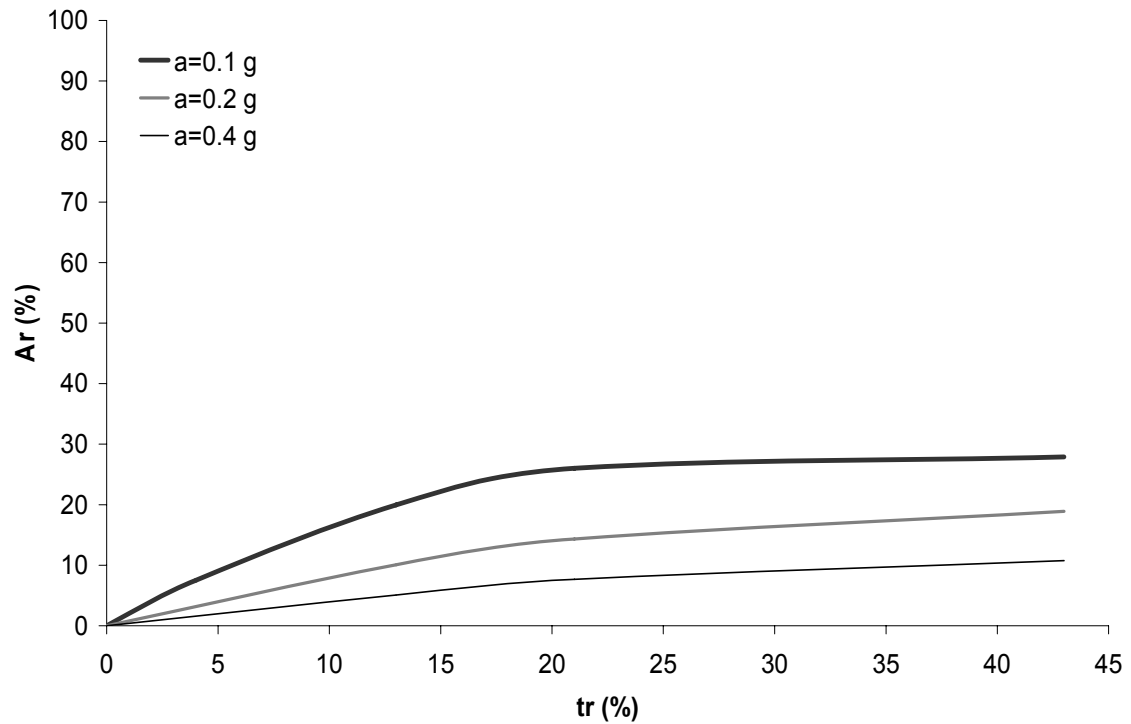
- (a) Σε όρους δυναμικών ωθήσεων, η αποδοτικότητα A_r της μόνωσης αυξάνεται με την αύξηση του πάχους $t_r = b/H$ του γεωαφρού. Για οιονεί στατική φόρτιση ($\omega/\omega_1 = 1/6$), μπορεί να φτάσει ακόμη και το 100%. Για υψίσυχνες διεγέρσεις, $\omega > \omega_1$, η αποτελεσματικότητα A_r μειώνεται δραματικά.
- (b) Τα παραπάνω ισχύουν μόνον για την περίπτωση του σχετικώς άκαμπτου εδάφους θεμελιώσεως : $V_{s,2} / V_{s,1} = 5$. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις (ενδόσιμου εδάφους θεμελιώσεως), η μόνωση μέσω γεωαφρού όχι μόνο δεν είναι αποδοτική, αλλά μπορεί να γίνει και επιβλαβής.
- (c) Σε όρους παραμενουσών μετατοπίσεων, η μόνωση μέσω γεωαφρού είναι αποτελεσματική για όλους τους λόγους $V_{s,2} / V_{s,1}$ και για όλο το εύρος συχνοτήτων. Η μέγιστη αποδοτικότητα A_d επιτυγχάνεται για $V_{s,2} / V_{s,1} = 5$.
- (d) Η αποτελεσματικότητα του γεωαφρού μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους της επιβαλλόμενης φόρτισης.



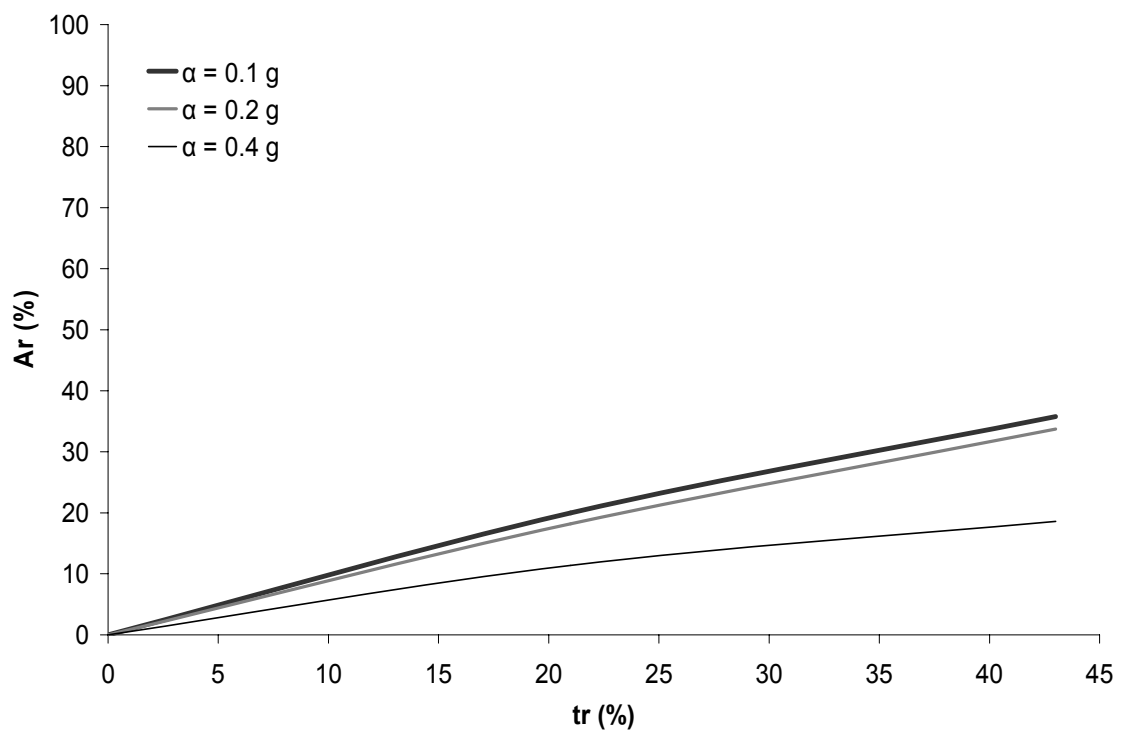
Σχήμα 9. Αποτελεσματικότητα A_r της μόνωσης σε όρους δυναμικών ωθήσεων συναρτήσει του πάχους του γεωαφρού και του μέγιστου πλάτους της διέγερσης, για $\omega/\omega_1 = 1/6$.



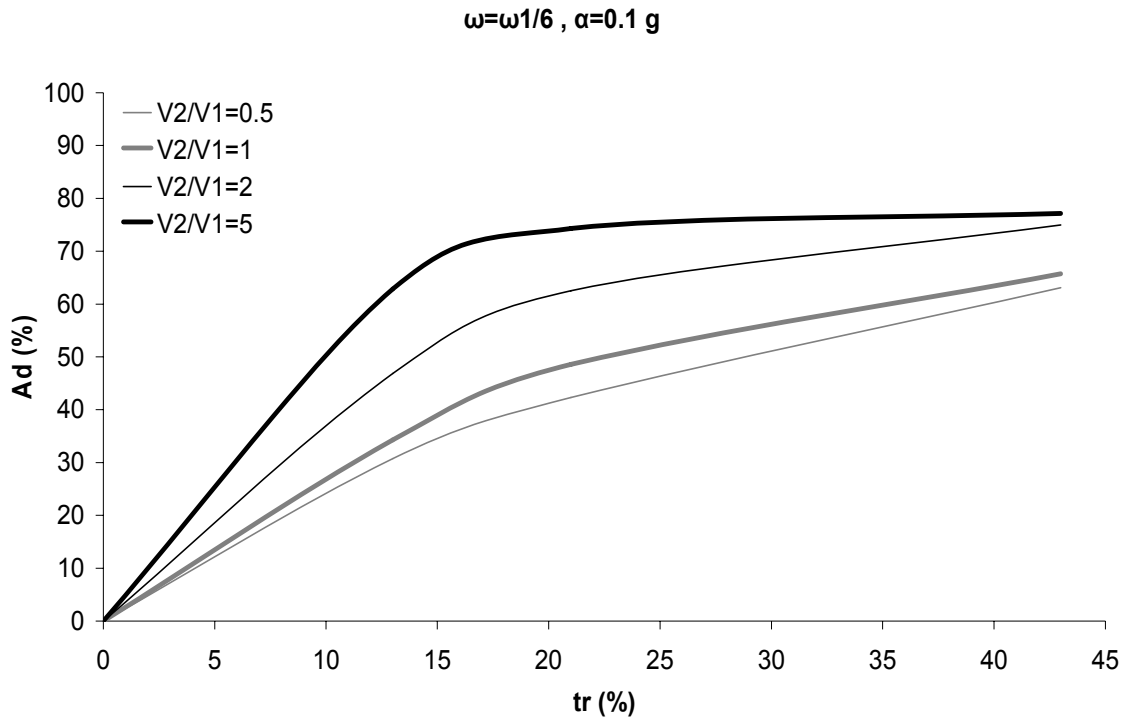
Σχήμα 10. Αποτελεσματικότητα A_r της μόνωσης σε όρους δυναμικών ωθήσεων συναρτήσει του πάχους του γεωαφρού και του μέγιστου πλάτους της διέγερσης, για $\omega/\omega_1 = 0.5$.



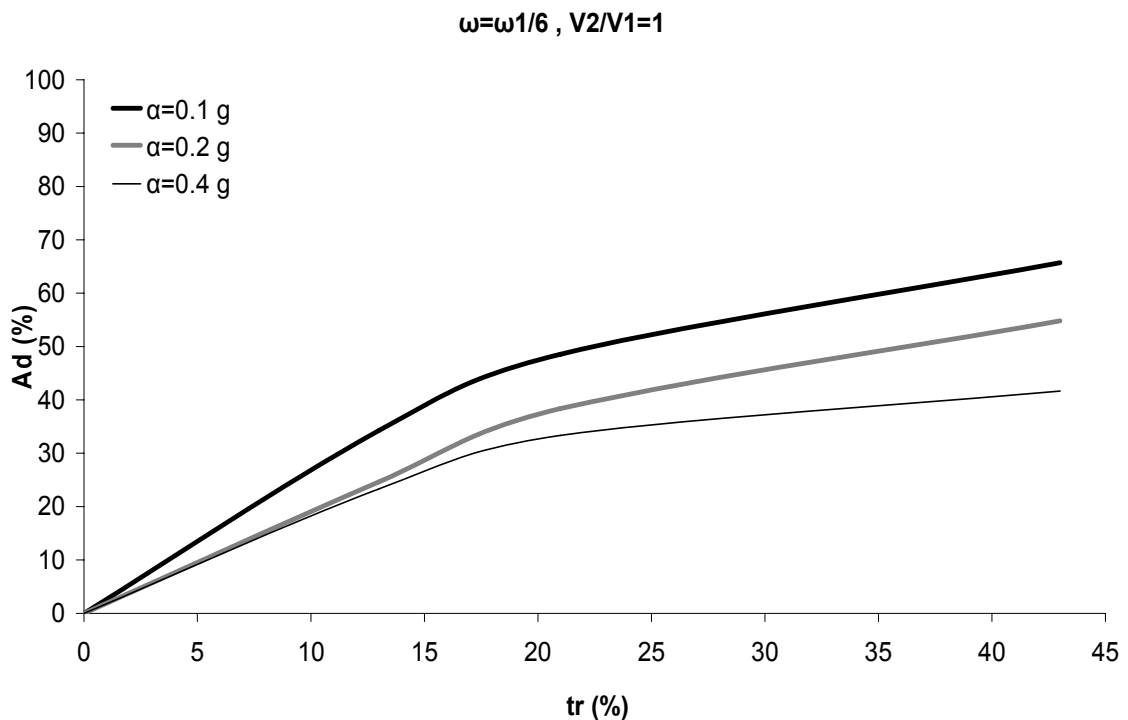
Σχήμα 11. Αποτελεσματικότητα A_r της μόνωσης σε όρους δυναμικών ωθήσεων συναρτήσει του πάχους του γεωαφρού και του μέγιστου πλάτους της διέγερσης, για $\omega/\omega_1 = 1$ (συντονισμός).



Σχήμα 12. Αποτελεσματικότητα A_r της μόνωσης σε όρους δυναμικών ωθήσεων συναρτήσει του πάχους του γεωαφρού και του μέγιστου πλάτους της διέγερσης, για $\omega/\omega_1 = 2$.



Σχήμα 13. Αποτελεσματικότητα A_d της μόνωσης σε όρους παραμένουσας μετακίνησης συναρτήσει του πάχους του γεωαφρού : επιρροή του λόγου $V_{s,2} / V_{s,1}$.



Σχήμα 14. Αποτελεσματικότητα A_d της μόνωσης σε όρους παραμένουσας μετακίνησης συναρτήσει του πάχους του γεωαφρού : επιρροή του πλάτους της ημιτονικής διέγερσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας αυτής έχουν ως εξής :

- [1] Η μόνωση με παρεμβολή στρώσης γεωαφρού ανάμεσα στον τοίχο και το αντιστηριζόμενο έδαφος είναι πολύ αποτελεσματική για την περίπτωση θεμελίωσης σε αρκετά δύσκαμπτο έδαφος.
- [2] Στην περίπτωση αυτήν, επιτυγχάνεται υψηλή αποδοτικότητα τόσο σε όρους ωθήσεων όσο και σε όρους παραμενουσών μετακινήσεων.
- [3] Στην περίπτωση θεμελίωσης σε ενδόσιμο έδαφος, η παρεμβολή του γεωαφρού ενδέχεται ακόμη και ν' αυξήσει τις εδαφικές ωθήσεις, καθιστώντας την μόνωση έως και επιβλαβή.
- [4] Σε όρους όμως παραμενουσών μετατοπίσεων, η μόνωση μέσω γεωαφρού είναι πάντα αποτελεσματική, για όλους τους λόγους $V_{s,2} / V_{s,1}$ και για όλο το εύρος συχνοτήτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Al-Homoud A.S. & Whitman R.V. (1995), Comparison between the prediction and results from dynamic centrifuge tests on titling gravity walls, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 14, pp. 259 - 268.
- Al-Homoud A.S. & Whitman R.V. (1999), Seismic analysis and design of rigid bridge abutments considering rotation and sliding incorporating non-linear soil behavior, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, pp. 247 - 277.
- Athanasopoulos G., Nikolopoulou Ch., Xenaki V. (2007), Seismic isolation of earth-retaining structures by EPS geofoam compressible inclusions-dynamic finite element analyses, *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper No.1676.
- Bathurst R., Keshavarz A., Zarnani S. (2006), A simple displacement model for response analysis of EPS geofoam seismic buffers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, pp. 344 - 353.
- Bathurst R., Zarnani S., Gaskin A. (2007), Shaking table testing of geofoam seismic buffers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, pp. 324 - 332.
- Chin Jian Leo, M.Kumruzzaman, Henry Wong, Jin H Yin. (2007), Comparison of EPS geofoam in true triaxial compression tests, *Geotextiles and Geomembranes*.
- Dakoulas P. & Gazetas G. (2005), Seismic effective-stress analysis of caisson quay walls: application to Kobe", *Soils and Foundations*, Vol.45, No.4
- Gazetas G, Psarropoulos PN, Anastasopoulos I, Gerolymos N. (2004), Seismic behaviour flexible retaining systems subjected to short duration moderately-strong excitation, *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol. 24, pp. 537–550.
- Nadim & Whitman R.V.(1983), Seismically induced movement of retaining walls, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.109, No.7, pp. 915 - 931.
- Nakamura S. (2006), Reexamination of Mononobe–Okabe theory of gravity retaining walls using centrifuge model tests, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.2, pp. 135 - 146.

- Partos, A. M. and Kazaniwsky, P. M. (1987), Geoboard Reduces Lateral Earth Pressures, *Proc. of Geosynthetics '87*, New Orleans. Industrial Fabrics Association International, pp. 628-639.
- Pelekis, P. C., Xenaki, V. C. and Athanasopoulos, G. A. (2000), Use of EPS Geofoam for Seismic Isolation of Earth Retaining Structures: Results of a FEM Study," *Proc. of the Second European Geosynthetics Conference*, Bologna, Italy, pp. 843-846.
- Psarropoulos P.N., Klonaris G., Gazetas G. (2004), Seismic earth pressures on rigid and flexible retaining walls, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, pp. 795 - 806.
- Veletsos A.S., Younan A.H. (1994), Dynamic soil pressures on rigid vertical walls, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.23, pp. 275–301.
- Veletsos A.S., Younan A.H. (1994), Dynamic modeling and response of soil-wall systems, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, pp. 2155–2179.
- Veletsos A.S., Younan A.H. (1997), Dynamic response of cantilever retaining walls, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engng*, ASCE, Vol. 123, pp. 161–172.
- Xenaki, V. C. and Athanasopoulos, G. A. (2001), Experimental Investigation of the Interaction Mechanism at the EPS Geofoam-Sand Interface by Direct Shear Testing, *Geosynthetics International*, Vol. 8, No. 6, pp. 471-499.
- Zarnani, S., Bathurst, R. J. and Gaskin, A. (2005), Experimental Investigation of Geofoam Seismic Buffers using a Shaking Table, *Proc. of the North American Geosynthetics Society (NAGS)/GRI19 Conference*, 2005, Las Vegas, NV, USA, 11 p.