Αριθμητική Ανάλυση Σεισμικής Συμπεριφοράς Ευμετακίνητων Τοίχων Αντιστήριξης Σεισμικά Μονωμένων με Παρέμβλημα Γεωαφρού EPS

Numerical Analysis of Seismic Behavior of Free to Move Earth Retaining Walls Isolated with EPS Geofoam

ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ Γ.Α. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Παν. Πατρών.
ΒΛΑΧΑΚΗΣ, Β.Σ. Πολιτικός Μηχανικός, Μ.Δ.Ε., Μεταπτ. Φοιτητής Παν. Πατρών.
ΖΗΣΙΜΑΤΟΥ, Ε.Π. Πολιτικός Μηχανικός, Μ.Δ.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Διερευνάται, με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, η μονωτική αποτελεσματικότητα συμπιεστού παρεμβλήματος γεωαφρού EPS σε άκαμπτο και ευμετακίνητο τοίχο αντιστήριξης, ύψους 4m, έναντι των αναπτυσσόμενων σεισμικών ωθήσεων και μετακινήσεων. Η μονωτική αποτελεσματικότητα εξετάζεται ως συνάρτηση του ανηγμένου πάχους του παρεμβλήματος EPS και της έντασης της σεισμικής διέγερσης. Διαπιστώνεται ότι είναι δυνατή η επίτευξη αξιόλογης μείωσης τόσο των σεισμικών ωθήσεων όσο και των αντίστοιχων μετακινήσεων για πάχος παρεμβλήματος κυμαινόμενο από 10% έως 20% του ύψους του τοίχου. Η αποτελεσματικότητα της μόνωσης μειώνεται όσο αυξάνεται η ένταση της διέγερσης.

ABSTRACT : Finite element analyses are performed to study the isolation efficiency of EPS geofoam compressible inclusion behind a rigid, 4m high, free to move, retaining wall, against the seismic earth pressures and displacements. The isolation efficiency is examined as a function of normalized thickness of inclusion and intensity of shaking. The results indicate the possibility of a significant reduction of earth pressures and wall displacement for inclusion thickness ranging from 10% to 20% of wall height. The isolation efficiency is reduced with increasing intensity of shaking.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

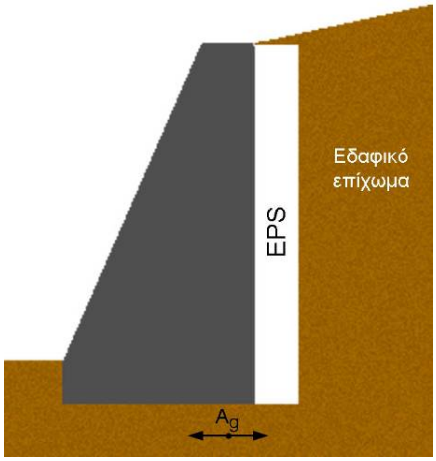
Οι κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης αποτελούν συχνά δευτερεύον αλλά αναπόσπαστο τμήμα των μεγάλων έργων υποδομής, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν το κύριο τμήμα των έργων ενίσχυσης της ευστάθειας των εδαφικών μαζών. Οι τοίχοι αντιστήριξης από σκυρόδεμα (βαρύτητας ή πρόβολοι) αποτελούν τον πλέον συνήθη τύπο μόνιμης κατασκευής εδαφικής αντιστήριξης και χρησιμοποιούνται σε ποικιλία εφαρμογών. Ανάλογα με τους περιορισμούς που αφορούν τη δυνατότητα μετακίνησης και στροφής των τοίχων αντιστήριξης, αυτοί διακρίνονται σε ευμετακίνητους και δυσμετακίνητους (ή αμετακίνητους) τοίχους αντιστήριξης.

Κατά το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των τοίχων αντιστήριξης επιδιώκεται η επίτευξη ασφαλών συνθηκών έναντι ολίσθησης και ανατροπής του τοίχου καθώς και έναντι υπέρβασης της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης. Στην περίπτωση ισχυρής σεισμικής φόρτισης οι εδαφικές ωθήσεις που ασκούνται στις κατασκευές αυξάνονται σημαντικά και είναι δυνατόν - όταν ο σχεδιασμός ενός τοίχου αντιστήριξης είναι ανεπαρκής - να προκύψει αστοχία του τοίχου (μη-επιτρεπόμενες μετακινήσεις και στροφές). Από την άλλη πλευρά ο αντισεισμικός σχεδιασμός των τοίχων αντιστήριξης με βάση τις μεθοδολογίες των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών (π.χ. ΕΑΚ 2003) οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κόστους κατασκευής του έργου. Γίνεται έτσι φανερό ότι η ανάπτυξη μεθόδων σεισμικής μόνωσης των τοίχων εδαφικής αντιστήριξης θα ήταν ιδιαίτερα επιθυμητή και θα είχε αντίκτυπο τόσο στην αύξηση της

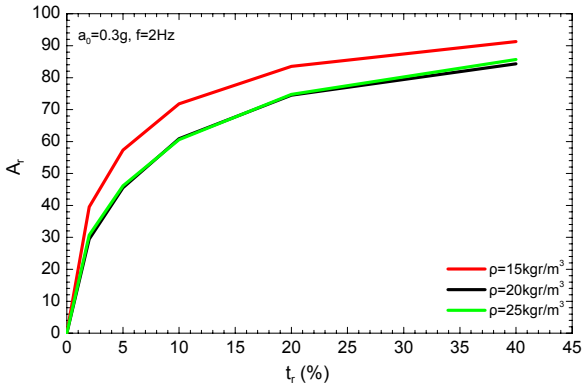
ασφάλειας των έργων όσο και στην οικονομικότητά τους.

Κατά την τελευταία δεκαετία διεξάγεται έρευνα για την τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας της χρήσης συμπιεστού παρεμβλήματος γεωαφρού EPS ως μέσου σεισμικής μόνωσης τοίχων εδαφικής αντιστήριξης, Σχήμα 1 (Ξενάκη, 2005; Σταθοπούλου, 2005; Νικολοπούλου, 2006, Horvarth, 2008; Zarnani and Bathurst, 2007, 2008, 2009). Η επίδραση του κανονικοποιημένου (ως προς το ύψος του τοίχου) πάχους του συμπιεστού παρεμβλήματος, t_r, στην αποτελεσματικότητα σεισμικής μόνωσης, A_r, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2, (Νικολοπούλου, 2006) για την περίπτωση άκαμπτου και αμετακίνητου τοίχου, ύψους 4.0m και για τρείς διαφορετικές πυκνότητες συμπιεστού παρεμβλήματος EPS. Η ένταση της κίνησης στη βάση του τοίχου είναι a_g=0.3g. Παρατηρείται ότι η αύξηση του ποσοστιαίου πάχους του παρεμβλήματος EPS αυξάνει την αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται μείωση της συνολικής σεισμικής ώθησης από 30% έως 66%, περίπου, εφόσον χρησιμοποιείται παρέμβλημα EPS ποσοστιαίου πάχους t_r=5% και πυκνότητας 15kg/m^3 έως 25kg/m^3, ανεξάρτητα από την ένταση της κίνησης της βάσης έδρασης του τοίχου.

Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα των ανωτέρω ερευνητικών δραστηριοτήτων είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά και υποδεικνύουν ότι στην περίπτωση αμετακίνητων (δηλ. χωρίς δυνατότητα ολίσθησης ή στροφής) τοίχων είναι



Σχήμα 1. Τοίχος αντιστήριξης τύπου βαρύτητας, σεισμικά μονωμένος με παρέμβλημα γεωαφρού EPS.
Figure 1. Gravity type retaining wall, seismically isolated with a compressible inclusion of EPS geofoam.



Σχήμα 2. Επίδραση του ποσοστιαίου πάχους, t_r και της πυκνότητας του παρεμβλήματος EPS στην προκύπτουσα αποτελεσματικότητα σεισμικής μόνωσης, A_r.
Figure 2. Effect of t_r and EPS density on the isolation efficiency, A_r.

δυνατή η μείωση των σεισμικών ωθήσεων σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% με αντίστοιχες μειώσεις κόστους που αγγίζουν το 40% (Athanasopoulos et al., 2007a, Athanasopoulos et al., 2007b).

Αντικείμενο του παρόντος άρθρου αποτελεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διερεύνησης της σεισμικής συμπεριφοράς ευμετακίνητων (δηλαδή χωρίς περιορισμούς μετακινήσεων και στροφών) τοίχων αντιστήριξης τύπου βαρύτητας, μονωμένων με συμπιεστό παρέμβλημα γεωαφρού EPS, (Ζησιμάτου, 2009). Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη ελαστοπλαστική συμπεριφορά εδάφους σε συνδυασμό με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης αναφορικά με τη μείωση τόσο των σεισμικών ωθήσεων όσο και των αντίστοιχων σεισμικών μετακινήσεων και στροφών του τοίχου. Η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης εξετάζεται ως συνάρτηση του πάχους του συμπιεστού παρεμβλήματος και της έντασης της οριζόντιας εδαφικής κίνησης στη βάση του τοίχου.

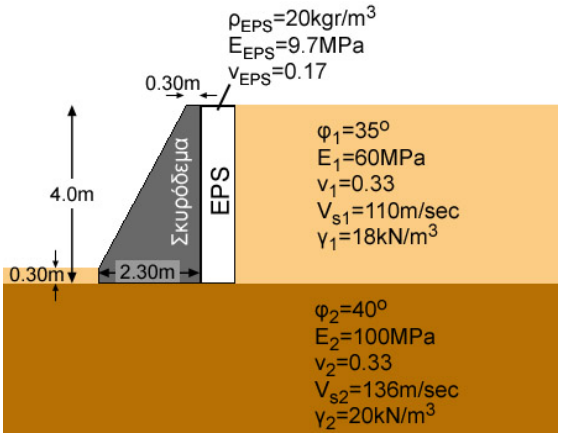
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς σεισμικά μονωμένων τοίχων αντιστήριξης πραγματοποιήθηκε με τη διεξαγωγή διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (PLAXIS v.8.1, 2006) και οι αναλύσεις βασίσθηκαν στη συμπεριφορά του

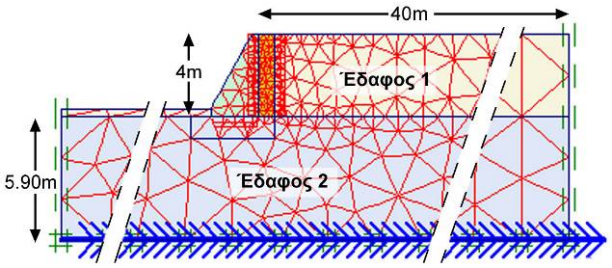
απλοποιημένου προσομοιώματος του φυσικού προβλήματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Αναλύθηκε η περίπτωση τοίχου σκυροδέματος (γ_b=24kN/m^3) ύψους H=4.0m και λοιπές διαστάσεις B=2.30m, b=0.30m. Η συμπεριφορά των εδαφικών υλικών προσομοιώνεται ως ελαστοπλαστική με τις ακόλουθες τιμές παραμέτρων: φ_1=35°, v_1=0.33, V_{S1}=110m/sec, E_1=60MPa και φ_2=40°, v_2=0.33, V_{S2}=136m/sec, E_2=100MPa. Η συμπεριφορά του γεωαφρού EPS (ρ=20kgr/m^3) θεωρείται γραμμική για την περιοχή τιμών των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις σχετικές εφαρμογές (Ξενάκη, 2005).

Η οριζόντια διέγερση του συστήματος επιτεύχθηκε με την εφαρμογή αρμονικής κίνησης συχνότητας f=3Hz (η οποία θεωρείται γενικά δυσμενέστερη φόρτιση έναντι πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων) και έντασης κυμαινόμενης από a=0.1g έως 0.3g, στη βάση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων. Η συχνότητα διέγερσης f=3Hz θεωρείται ως αντιπροσωπευτική πολλών καταγεγραμμένων εδαφικών κραδασμών. Διευκρινίζεται ότι στις αναλύσεις που ακολουθούν ως ένταση της σεισμικής διέγερσης λαμβάνεται η τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση του τοίχου αντιστήριξης, η οποία κυμάνθηκε από a_g= 0.3g έως 0.6g.

Σύμφωνα με την Νικολοπούλου (2006) η απόκριση της κατασκευής αντιστήριξης είναι απαλλαγμένη των ανεπιθύμητων επιπτώσεων του συντονισμού όταν f/f_1<0.3 ή f/f_1>2 (όπου f_1 η ιδιοσυχνότητα του συστήματος αντιστήριξης). Στην περίπτωση τοίχου με H=4.0m, προκύπτει



Σχήμα 3. Απλοποιημένο προσομοίωμα του εξεταζόμενου φυσικού προβλήματος.
Figure 3. Simplified model of the physical problem.



Σχήμα 4. Το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στις παραμετρικές αναλύσεις.
Figure 4. Finite element mesh used in the parametric analyses.

ότι f_1=7.5Hz, οπότε το ανωτέρω κριτήριο τηρείται προσεγγιστικά (f/f_1=0.4). Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που εφαρμόστηκε στη βάση του δικτύου ήταν ίσος με 17 και επιλέχθηκε έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σταθεροποίηση της απόκρισης χωρίς να αυξάνεται σημαντικά η διάρκεια επίλυσης κάθε περίπτωσης (η οποία κυμάνθηκε περίπου στα 100min). Τέλος, για την κατά το δυνατόν ρεαλιστική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης τοίχου και εδαφικών υλικών, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας μεταξύ της θεμελίωσης του τοίχου και του υποκείμενου εδάφους και του κορμού του τοίχου ή του συμπιεστού παρεμβλήματος EPS και του εδαφικού επιχώματος. Ο συντελεστής διεπιφάνειας τέθηκε R=tanφ_i/tanφ_s=0.6, όπου tanφ_i η εφαπτομένη της γωνίας τριβής του στοιχείου διεπιφάνειας. Τα χρησιμοποιούμενα πάχη συμπιεστού παρεμβλήματος, t_r, κυμάνθηκαν από 0% έως 40%.

Παράδειγμα του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση τοίχου ύψους H=4.0m, με συμπιεστό παρέμβλημα EPS πάχους 0.40m (t_r=10%) φαίνεται στο Σχήμα 4. Οι διαστάσεις του δικτύου είναι σχετικά αυξημένες για την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων των ορίων του δικτύου, ενώ επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν και οι συνθήκες απορροφητικών ορίων που διαθέτει ο κώδικας PLAXIS.

Για την ποσοτική περιγραφή της αποτελεσματικότητας χρησιμοποιήθηκε ο ορισμός που έχει υιοθετηθεί σε προηγούμενες έρευνες (Σταθοπούλου 2005, Νικολοπούλου 2006) και χρησιμοποιείται ήδη από άλλους ερευνητές. (Αναστασόπουλος κ.α., 2008). Αποτελεσματικότητα, A:

$$\frac{\textit{μείωση εξεταζόμενου μεγέθους με χρηση παρεμβλήματος}}{\textit{τιμή μεγεθους χωρις χρηση παρεμβλήματος}}$$

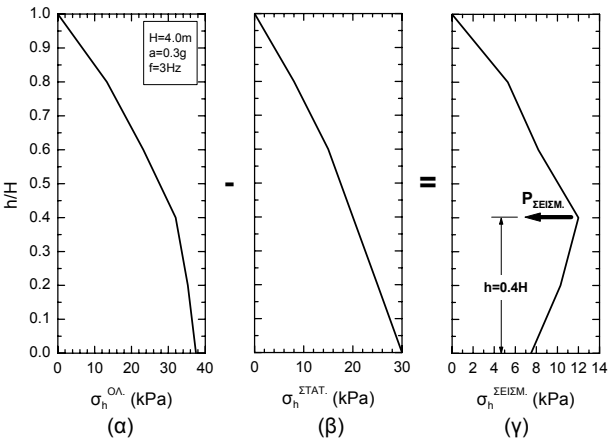
Η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης εκφράζεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους που αντιστοιχούν σε τρία συγκεκριμένα μεγέθη απόκρισης του συστήματος αντιστήριξης: (α) την μέγιστη σεισμική ώθηση που ασκείται στον τοίχο αντιστήριξης, $P_{ΣΕΙΣΜ}$, (β)τη μόνιμη οριζόντια μετατόπιση του θεμελίου του τοίχου σε σχέση με το έδαφος θεμελίωσης, $d_{ΣΕΙΣΜ}$ και (γ) τη μόνιμη στροφή του θεμελίου του τοίχου περί οριζόντιο άξονα, $ψ_{ΣΕΙΣΜ}$. Η αποτελεσματικότητα για τις τρεις ανωτέρω περιπτώσεις συμβολίζεται ως A_p, A_d και $A_ψ$, αντίστοιχα.

Η αποτελεσματικότητα A_p για συγκεκριμένο πάχος συμπιεστού περιβλήματος, και συγκεκριμένη ένταση οριζόντιας διέγερσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές της σεισμικής ώθησης, $P_{ΣΕΙΣΜ}$, για τον μη-μονωμένο τοίχο και τη μείωση της σεισμικής ώθησης, $ΔP_{ΜΟΝ}$, λόγω της ύπαρξης του μονωτικού παρεμβλήματος, όπου: $ΔP_{ΜΟΝ} = P_{ΣΕΙΣΜ} - P_{ΣΕΙΣΜ,ΜΟΝ}$.

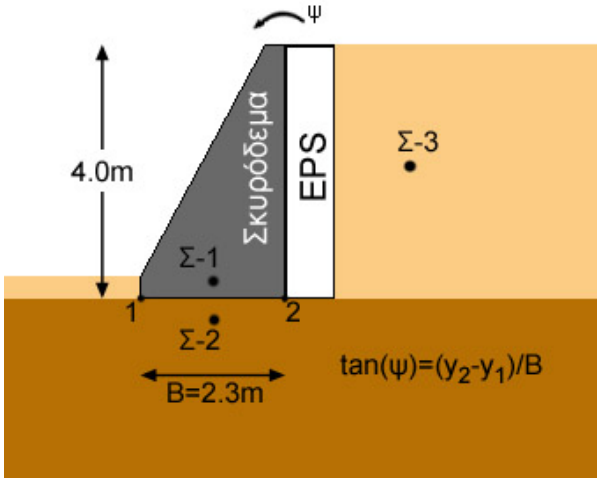
$$A_P = \frac{P_{ΣΕΙΣΜ} - P_{ΣΕΙΣΜ,ΜΟΝ}}{P_{ΣΕΙΣΜ}} \qquad (2\text{-}1)$$

Διευκρινίζεται ότι ο όρος σεισμική ώθηση χρησιμοποιείται για να δηλώσει την σεισμική προσαύξηση της ώθησης, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της συνολικής ώθησης που προκύπτει από τη δυναμική ανάλυση και της αρχικής στατικής ώθησης λόγω του ίδιου βάρους του εδάφους. Οι τιμές των ανωτέρω ωθήσεων υπολογίζονται με την ολοκλήρωση του διαγράμματος κατανομής των ορθών τάσεων που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση με τον κώδικα PLAXIS. Στα διαγράμματα του Σχήματος 5 παρουσιάζεται παράδειγμα της κατανομής των τάσεων της σεισμικής προσαύξησης για την περίπτωση μη μονωμένου τοίχου ύψους 4m, υπό οριζόντια αρμονική διέγερση πλάτους a_g=0.6g και συχνότητας f=3Hz. Από το διάγραμμα κατανομής των ορθών τάσεων υπολογίζεται επίσης το ύψος εφαρμογής της συνισταμένης ώθησης από τη βάση του τοίχου, h_p.

Οι τιμές αποτελεσματικότητας A_d και $A_ψ$ υπολογίζονται με τρόπο ανάλογο αυτού που περιγράφηκε ανωτέρω. Η μόνιμη μετατόπιση του τοίχου προκύπτει ως η τιμή της μετακίνησης του σημείου Σ-1 ενώ η διαφορά της μετατόπισης του σημείου Σ-1 ως προς το σημείο Σ-2 (Σχήμα 6) οφείλεται τόσο σε ενδεχόμενη ολίσθηση στη διεπιφάνεια έδρασης όσο και σε πλαστική παραμόρφωση του εδάφους έδρασης. Τέλος, η στροφή του



Σχήμα 5. Διαγράμματα κατανομής ορθών τάσεων καθ' ύψος του τοίχου (α)ολική δυναμική φόρτιση, (β)στατική φόρτιση, (γ)σεισμική προσαύξηση.
Figure 5. Distribution of normal stresses along the height of the wall (α)total stress, (β)static stress, (γ)seismic component of normal stress.



Σχήμα 6. Σημεία καταγραφής μετακινήσεων.
Figure 6. Points of measured displacements.

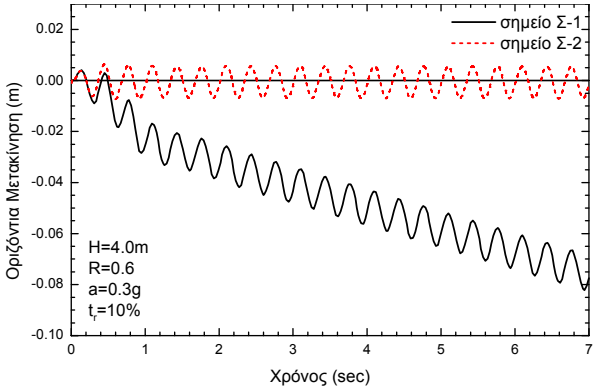
θεμελίου ως προς οριζόντιο άξονα προκύπτει ως το πηλίκο της διαφοράς των κατακόρυφων μετακινήσεων των σημείων 1 και 2 (Σχήμα 6) προς το πλάτος του θεμελίου του τοίχου, B.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 7 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των μετατοπίσεων των σημείων Σ-1 και Σ-2 για την περίπτωση τοίχου ύψους 4.0m, έντασης σεισμικού κραδασμού a_g=0.3g και ποσοστιαίου πάχους παρεμβλήματος ίσου με 0%, 10%, 20% ,40%, R=0.6 (17κύκλοι). Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η τελική θέση τοίχου ύψους 4.0m μετά τη δράση 17 κύκλων οριζόντιου σεισμικού κραδασμού a_g=0.6g.

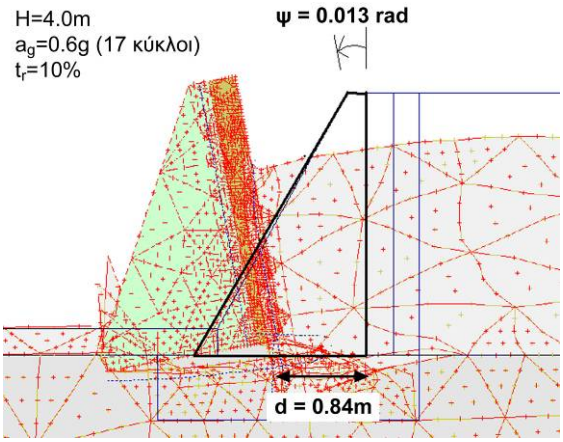
3. ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Η διερεύνηση της αξιοπιστίας της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα βασίσθηκε στον έλεγχο των αποτελεσμάτων δοκιμαστικών εφαρμογών σε μη-μονωμένους και μονωμένους τοίχους αντιστήριξης κάτω από συνθήκες τόσο στατικής όσο και σεισμικής φόρτισης.

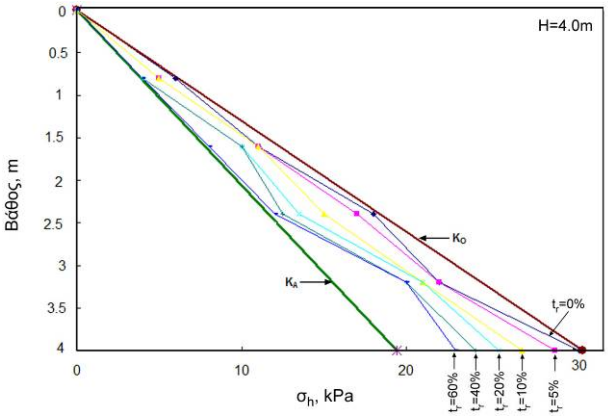
Στο διάγραμμα του Σχήματος 9 παρουσιάζεται η υπολογισθείσα κατανομή των στατικών εδαφικών ωθήσεων σε τοίχο ύψους H=4.0m σεισμικά μονωμένο με αυξανόμενα πάχη συμπιεστού παρεμβλήματος και γίνεται σύγκριση με τις κατανομές K_a και K_0. Παρατηρείται ότι η αριθμητική ανάλυση προβλέπει τη μείωση των στατικών εδαφικών ωθήσεων (από την τιμή K_0 στην τιμή K_a) όσο



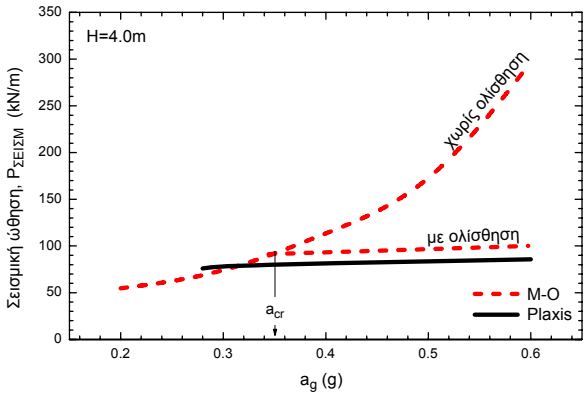
Σχήμα 7. Χρονική εξέλιξη των μετατοπίσεων των σημείων Σ-1 και Σ-2.
Figure 7. Time histories of displacement at points Σ-1 and Σ-2.



Σχήμα 8. Τελική θέση του τοίχου μετά από 17 κύκλους οριζόντιας σεισμικής φόρτισης, a_g=0.6g.
Figure 8. Final position of wall after 17 cycles of horizontal shaking, a_g=0.6g.



Σχήμα 9. Επίδραση του πάχους συμπιεστού παρεμβλήματος στην κατανομή των ορθών στατικών τάσεων.
Figure 9. Effect of compressible inclusion thickness on the distribution of normal static stresses.



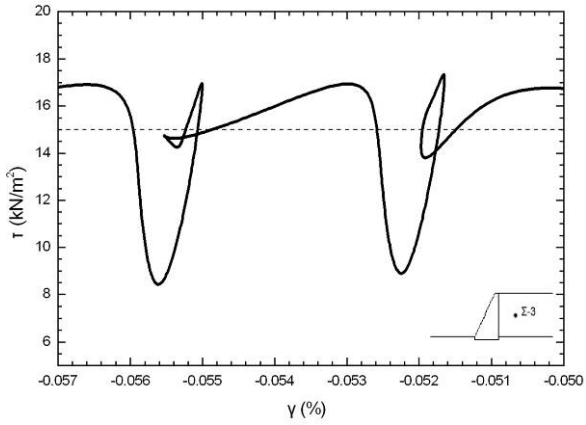
Σχήμα 10. Συγκριτικό διάγραμμα σεισμικών εδαφικών ωθήσεων (PLAXIS – M.O.).
Figure 10. Comparison of seismic earth pressures (PLAXIS vs M.O.).

αυξάνεται το πάχος του συμπιεστού παρεμβλήματος EPS. Όπως είναι γνωστό στον μηχανισμό αυτό βασίζεται η χρήση συμπιεστού παρεμβλήματος γεωαφρού EPS για τη μείωση των στατικών εδαφικών ωθήσεων σε δύσκαμπτες κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 10 παρουσιάζεται η εξάρτηση της τιμής της συνολικής σεισμικής ώθησης, $P_{σεισμ.}$, σε τοίχο ύψους H=4.0m από την τιμή της διέγερσης βάσης, όπως προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις και από την εξίσωση των Mononobe-Okabe (M-O), (EAK, 2003). Παρατηρείται ότι, εφόσον ληφθεί υπόψη η δυνατότητα ολίσθησης του τοίχου αντιστήριξης, η συμφωνία μεταξύ των

αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων υπολογισμού, είναι πολύ ικανοποιητική.

Τέλος, η αξιοπιστία των δυναμικών αριθμητικών αναλύσεων που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από τη μορφή της καμπύλης διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης ενός εδαφικού στοιχείου που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης. Στο διάγραμμα του Σχήμα 11 παρουσιάζεται ο βρόχος υστέρησης διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων στο σημείο Σ-3 του επιχώματος του τοίχου αντιστήριξης ύψους H=4.0m, με χρήση του προγράμματος PLAXIS, για διέγερση στη βάση του τοίχου a_g=0.3g. Παρατηρείται ότι η υπολογισθείσα συμπεριφορά του εδαφικού στοιχείου παρουσιάζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά μιας ρεαλιστικής απόκρισης, δηλαδή: (α)μη-γραμμική συμπεριφορά υλικού, (β)δημιουργία βρόχων υστέρησης (κατανάλωση ενέργειας) και (γ) ανάπτυξη πλαστικής (παραμένουσας) παραμόρφωσης ανά κύκλο φόρτισης.



Σχήμα 11. Καμπύλες διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης (Σημείο Σ-3).
Figure 11. Shear stress-strain curve (Point Σ-3).

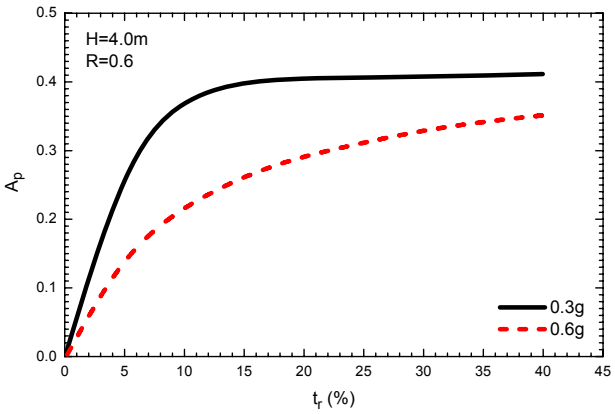
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων που δείχνουν την εξάρτηση της αποτελεσματικότητας της σεισμικής μόνωσης, A, από το ανηγμένο πάχος παρεμβλήματος EPS, t_r και την ένταση της οριζόντιας διέγερσης, a_g. Σε αντιστοιχία με το εξεταζόμενο μέγεθος απόκρισης (ωθήσεις, μετακινήσεις, στροφές) η αποτελεσματικότητα συμβολίζεται ως A_p, A_d, A_ψ.

4.1 Αποτελεσματικότητα A_p

Στο διάγραμμα του Σχήματος 12 παρουσιάζεται η εξάρτηση της αποτελεσματικότητας, A_p, έναντι σεισμικών ωθήσεων, από το ανηγμένο πάχος παρεμβλήματος, t_r και την ένταση της διέγερσης, a_g, για τοίχο ύψους 4.0m. Παρατηρείται ότι η τιμή της αποτελεσματικότητας, A_p, αυξάνεται με το πάχος μόνωσης, t_r, δεν μπορεί όμως να γίνει μεγαλύτερη από 40% έως 50%. Η αποτελεσματικότητα μειώνεται επίσης με την αύξηση της έντασης της διέγερσης βάσης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων υποδεικνύουν ότι η βέλτιστη τιμή του t_r, κυμαίνεται από 10% έως 20%. Η σύγκριση με τα αποτελέσματα αναλύσεων για αμετακίνητους τοίχους (Σχήμα 2), υποδεικνύει την ακόλουθη διαφοροποίηση συμπεριφοράς: στους αμετακίνητους τοίχους η αποτελεσματικότητα, A_p, συνεχίζει να αυξάνεται (έστω και με μειωμένο ρυθμό) όσο αυξάνεται το πάχος του παρεμβλήματος, ενώ στους ευμετακίνητους τοίχους, είναι αδύνατη η επίτευξη τιμών A_p>50% ανεξάρτητα από την αύξηση του πάχους του παρεμβλήματος.

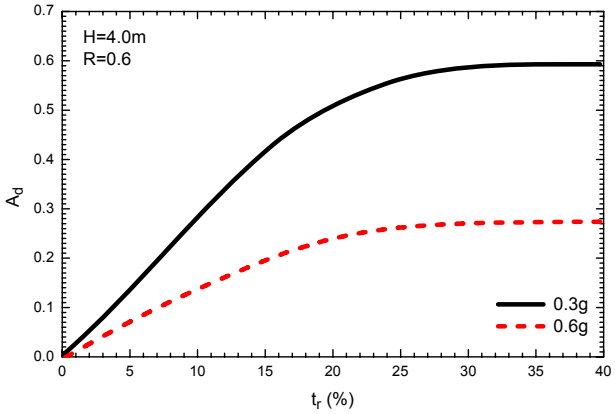
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων υποδεικνύουν επίσης ότι το ύψος εφαρμογής της σεισμικής προσαύξησης της ώθησης δεν επηρεάζεται από το πάχος του παρεμβλήματος, t_r και την ένταση της κίνησης βάσης (κυμαίνεται από h/H ≈ 0.40 έως 0.50).



Σχήμα 12. Εξάρτηση της αποτελεσματικότητας, A_p, από το πάχος παρεμβλήματος, t_r και την ένταση του κραδασμού.
Figure 12. Isolation efficiency, A_p, as a function of EPS thickness, t_r, and shaking intensity.

4.2 Αποτελεσματικότητα A_d

Ένα από τα πλέον ενδιαφέροντα θέματα της τρέχουσας γεωτεχνικής έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη μεθόδων σχεδιασμού με βάση



Σχήμα 13. Εξάρτηση της αποτελεσματικότητας, A_d, από το πάχος παρεμβλήματος, t_r και την ένταση του κραδασμού.
Figure 13. Isolation efficiency, A_d, as a function of EPS thickness, t_r, and shaking intensity.

κριτήρια συμπεριφοράς (που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι οι μετακινήσεις) της μελετώμενης κατασκευής (Kokusho, 2009, Kokusho et al., 2009). Αποκτάει, επομένως ιδιαίτερο ενδιαφέρον η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της εξεταζόμενης σεισμικής μόνωσης αναφορικά με τη μείωση των σεισμικών μετακινήσεων των κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 13 παρατηρείται ότι για τοίχο ύψους 4.0m και a_g=0.3g, η αποτελεσματικότητα της μόνωσης αυξάνεται περίπου γραμμικά με το πάχος του παρεμβλήματος και μπορεί να φθάσει την τιμή $A_d \approx$ 50%, για πάχος παρεμβλήματος t_r=20%. Περαιτέρω αύξηση του πάχους του παρεμβλήματος δεν αυξάνει την αποτελεσματικότητα της μόνωσης. Για μεγαλύτερες εντάσεις της διέγερσης βάσης η μονωτική αποτελεσματικότητα μειώνεται σημαντικά και δεν υπερβαίνει την τιμή $A_d \approx$25%.

4.3 Αποτελεσματικότητα A_ψ

Η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης έναντι της παραμένουσας στροφής του τοίχου, A_ψ, παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 14. Παρατηρείται ότι η αποτελεσματικότητα αυξάνεται γενικά με το πάχος του παρεμβλήματος και με την ένταση της διέγερσης βάσης και μπορεί να λάβει τιμή ίση με 100% (δηλαδή επιτυγχάνεται η πλήρης παρεμπόδιση της στροφής του τοίχου).

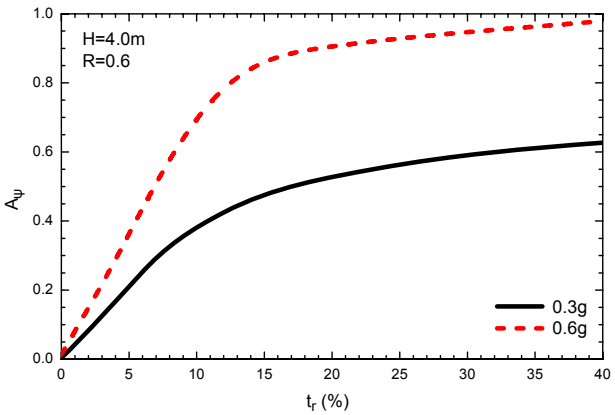
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η χρήση συμπιεστού παρεμβλήματος γεωαφρού EPS σε ευμετακίνητους τοίχους εδαφικής αντιστήριξης επιτρέπει τη σεισμική μόνωση των κατασκευών αυτών, τόσο έναντι των σεισμικών ωθήσεων όσο και έναντι μετακίνησης και στροφής.
2. Η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης αυξάνεται, γενικά, με το πάχος του παρεμβλήματος και μειώνεται με την αύξηση της έντασης της διέγερσης βάσης. Σε πολλές περιπτώσεις η περαιτέρω αύξηση της μονωτικής αποτελεσματικότητας, με το πάχος του παρεμβλήματος, προσεγγίζει μίαν οριακή τιμή.
3. Η αποτελεσματικότητα μόνωσης έναντι σεισμικών ωθήσεων στην περίπτωση ευμετακίνητων τοίχων είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση των αμετακίνητων (ή δυσμετακίνητων) τοίχων.

Με βάση τα ανωτέρω συμπεράσματα τα οποία αναμένεται να επιβεβαιωθούν με περαιτέρω αναλύσεις τοίχων μεταβλητού ύψους και δοκιμές φυσικών ομοιωμάτων, προτείνεται η ακόλουθη μεθοδολογία σχεδιασμού:

- Καθορισμός της σεισμικής δράσης σχεδιασμού και του αριθμού των αναμενόμενων κύκλων ισχυρής κίνησης.
- Εκτίμηση της μετακίνησης μη-μονωμένου τοίχου, επιλογή της επιτρεπόμενης τιμής μετακίνησης και υπολογισμός της απαιτούμενης αποτελεσματικότητας σεισμικής μόνωσης, A_d.

Με βάση την απαιτούμενη αποτελεσματικότητα σεισμικής μόνωσης, A_d, και την σεισμική δράση σχεδιασμού, προσδιορίζεται το απαιτούμενο πάχος παρεμβλήματος EPS,



Σχήμα 14. Εξάρτηση της αποτελεσματικότητας, A_ψ, από το πάχος παρεμβλήματος, t_r και την ένταση του κραδασμού.
Figure 14. Isolation efficiency, A_ψ, as a function of EPS thickness, t_r, and shaking intensity.

t_r (πυκνότητας ρ=20kgr/m^3) από διαγράμματα όπως αυτό του Σχήματος 13.

- Για το επιλεγμένο πάχος παρεμβλήματος EPS και τη σεισμική δράση σχεδιασμού, προσδιορίζεται η προκύπτουσα μονωτική αποτελεσματικότητα έναντι σεισμικών εδαφικών ωθήσεων, A_p, από διαγράμματα όπως αυτό του Σχήματος 12. Η τελική διαστασιολόγηση του τοίχου γίνεται με χρήση της μειωμένης σεισμικής προσαύξησης των σεισμικών ωθήσεων, όπως αυτή υπολογίζεται με βάση την τιμή του A_p.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Athanasopoulos, G.A., Nikolopoulou, C.P., Xenaki, V.C. and Stathopoulou, V.D., (2007a), "Reducing the Seismic Earth Pressure on Retaining Walls by EPS Geofoam Buffers – Numerical Parametric Study", Proceedings of 2007 Geosynthetics Conference (in CD), Washington D.C., USA, 15pp.

Athanasopoulos, G.A., Nikolopoulou, C.P. and Xenaki, V.C., (2007b), "Seismic Isolation of Earth Retaining Structures by EPS Geofoam Compressible Inclusions – Dynamic F.E. Analyses", Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, June 2007, Paper No. 1678.

Horvath, J. S. (2008),"Seismic Lateral Earth Pressure Reduction on Earth–Retaining Structures Using Geofoams", ASCE, GSP 181, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, Sacramento, CA, May 2008.

Kokusho, T., Ed. (2009), "Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance – Based Design", Taylor & Francis Group, London, 450p.

Kokusho, T., Tsukamoto, T. and Yoshimine, M., Eds. (2009), "Performance – Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from Case History to Practice", Proceedings of the International Conference on Performance – Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, IS-TOKYO 2009. CRS Press/Balkema.

Plaxis bv, (2006), "A Finite Element Code for Soil and Rock Analysis", Brinkgreve, R.B.J., Broere, W. and Waterman, D., Professional Version 8.1, 2002, Balkema ,Lisse.

Zarnani, S., and Bathurst, R. J. (2007), "Experimental Investigation of EPS Geofoam Seismic Buffers Using Shaking Table Tests", Geosynthetics International, 2007, 14, No. 3.

Zarnani, S., and Bathurst, J. (2008), "Numerical Modeling of EPS Seismic Buffer Shaking Table Tests", Geotextiles and Geomembranes 26 (2008), 371-383.

Zarnani, S., and Bathurst, R. J. (2009), "Influence of Constitutive Model on Numerical Simulation of EPS Seismic Buffer Shaking Table Tests", Geotextiles and Geomembranes 27 (2009), 308-312.

Αναστασόπουλος, Ι., Πρασσά, Χ., Γιαννακός, Σ., Γκαζέτας, Γ., (2008), "Σεισμική Συμπεριφορά Αντιστηρίξεων Μονωμένων με Γεωαφρό", 3° Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Άρθρο 2063, 5-7 Νοεμβρίου, Αθήνα, 2008.

Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, Ε.Α.Κ. 2000/ τροποποίηση 2003.

Ζησιμάτου Ε., Π., (2009), "Σεισμική Μόνωση Τοίχων Εδαφικής Αντιστήριξης με Παρέμβλημα Γεωαφρού EPS–Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων", Διατριβή για Μ.Δ.Ε., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Αύγουστος 2009.

Νικολοπούλου, Χ.Π., (2006), ''Μόνωση Κατάσκευών Εδαφικής Αντιστήριξης Έναντι Σεισμικών Πλευρικών Ωθήσεων με Χρήση Γεωαφρού EPS – Επίδραση της μη-Γραμμικής Συμπεριφοράς των Υλικών'', Διατριβή για Μ.Δ.Ε., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Οκτώβριος 2006.

Ξενάκη, Β.Κ., (2005), "Πειραματική Διερεύνηση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Γεωαφρών Διογκωμένης Πολυστερίνης υπό Συνθήκες Στατικής και Δυναμικής/Κυκλικής Φόρτισης", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Μάρτιος 2005, 334 σελίδες.

Σταθοπούλου, Β.Δ., (2005), ''Σεισμική Μόνωση Τοίχων Εδαφικής Αντιστήριξης με Γεωαφρό Διογκωμένης Πολυστερίνης – Παραμετρική Αριθμητική Ανάλυση'', Διατριβή για Μ.Δ.Ε., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ιούλιος 2005.