

ΣΤΑΤΙΚΗ & ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΤΟΙΧΩΝ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ ΠΑΡΕΜΒΛΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΑΦΡΟΥ EPS -

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΟ ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΑΠΕΖΑ

A. Athanasopoulos-Zekkos¹, K. Lamote² and G. Athanasopoulos³

Συντονισμός έργου - Επιμέλεια άρθρου: Παντελής Πατενιώτης⁴

Γενικός Διευθυντής Πανελληνίου Συνδέσμου EPS

Στο κέντρο γεωτεχνικής φυγοκέντρου της πολυτεχνικής σχολής RPI της Νέας Υόρκης (USA) ευρίσκεται σε εξέλιξη πειραματικό πρόγραμμα, που περιλαμβάνει δοκιμές φυγοκέντρωσης σε μοντέλα τοίχων αντιστήριξης υπό οριζόντια κυκλική δόνηση επί του παρόντος.

Οι τοίχοι εδαφικής αντιστήριξης είναι άκαμπτοι τυπικού ύψους 4μ. πλήρως εξοπλισμένοι με αισθητήρες μετρήσεων και φέρουν ψαθυρό επίχωμα. Στην μία ομάδα των δοκιμών είναι σεισμικά μονωμένοι με συμπιεστό παρέμβλημα γεωαφρού EPS, υπόκεινται σε οριζόντια ημιτονοειδή δόνηση αυξανόμενης έντασης. Κατά την διάρκεια του πειράματος υποβάλλονται σε οριζόντια ημιτονοειδή κίνηση αυξανόμενης έντασης και καταγράφονται οι οριζόντιες εδαφικές ωθήσεις στον κάθε τοίχο καθώς επίσης οι επιταχύνσεις σε όλη την επιφάνεια των μοντέλων.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και από τις περιπτώσεις, με μονωμένους και μη - μονωμένους τοίχους, αντιπαραβάλλονται για να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης του συμπιεστού παρεμβλήματος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συγκρίνονται επίσης με τα αποτελέσματα από προηγούμενες αριθμητικές αναλύσεις και πειράματα σε σεισμικές τράπεζες με σκοπό να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής.

¹ Assist. Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI USA

² Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI USA

³ Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Patras, GREECE

⁴ Civil Engineer, H.A.F.A. • CEN Technical Expert • DQS Lead Auditor

Εισαγωγή – Δεδομένα έρευνας

Οι κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης αποτελούν σημαντικό αντικείμενο των έργων πολιτικού μηχανικού. Τα έργα αυτά μπορεί να είναι διαφόρων τύπων (π.χ. τοίχοι αντιστήριξης με οπλισμένο σκυρόδεμα - βαρύτητας ή προβόλου, βάθρα γεφυρών ή τοίχοι υπογείων) και έχουν σχεδιαστεί για να αντισταθούν με ασφάλεια στις οριζόντιες πιέσεις που ασκούνται από τα εδαφικά υλικά.

Στις σεισμογενείς περιοχές μία κατασκευή εδαφικής αντιστήριξης θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να είναι σε θέση να αντέξει τη σεισμική επιφόρτιση σε συνδυασμό και πρόσθετα με την στατική.

Οι διατάξεις της τρέχουσας σεισμικής νομοθεσίας και των Ευρωκωδίκων για την εκτίμηση της εδαφικής ώθησης στο σεισμικό σχεδιασμό, βασίζονται κυρίως στη μέθοδο Mononobe-Okabe και στα αποτελέσματα από την χρήση τους με μια σημαντική αύξηση των εδαφικών πιέσεων κάτω από ισχυρή σεισμική δόνηση (Towhata, 2008).

Οι ελλιπείς μελέτες σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρές βλάβες ή ακόμα και κατάρρευση της αντιστήριξης, με καταστροφικές συνέπειες για σημαντικά έργα υποδομής. Από την άλλη πλευρά, ο κατάλληλος σχεδιασμός σύμφωνα με την πλευρική-στατική επιφόρτιση αυξημένη με τα δυναμικά αποτελέσματα οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κόστους κατασκευής.

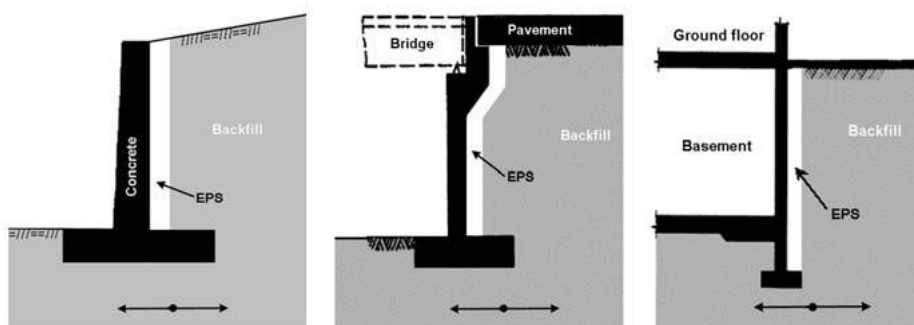
Παρά το γεγονός ότι το κύρος τρεχουσών διατάξεων του σεισμικού κώδικα, καθώς και η δυνατότητα εφαρμογής των παραδοχών που έγιναν με αναλυτικούς υπολογισμούς σε συνήθεις τοίχους αντιστήριξης είναι αποδεκτά, ετέθη πρόσφατα το ερώτημα (Lew et al, 2010; Nakamura 2006; Al Atik και Sitar, 2008), αν ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση αυτών των τοίχων θα γίνεται, και κατά πάσα πιθανότητα θα συνεχίσει να γίνεται για κάποιο χρονικό διάστημα στο μέλλον, με βάση τους υπάρχοντες κώδικες.

Επιπρόσθετα, πρόσφατα πειραματικά αποτελέσματα από σεισμικές τράπεζες μεγάλης κλίμακας δείχνουν ότι για μεγάλες εδαφικές επιταχύνσεις, καταγράφονται σημαντικές εδαφικές ωθήσεις στις κατασκευές αντιστήριξης (Wilson και Elgamal, 2010).

Για αυτούς τους λόγους, μία εφαρμογή μείωσης της σεισμικής ώθησης (ή σεισμικής μόνωσης) θα ήταν ευπρόσδεκτη από τους πολιτικούς μηχανικούς και την κατασκευαστική βιομηχανία (τόσο για τις υπάρχουσες όσο και για τις νέες κατασκευές).

Την τελευταία δεκαετία προτάθηκε μια νέα μέθοδος για την μόνωση των κατασκευών αντιστήριξης σε πλάγιες σεισμικές εδαφικές ωθήσεις (Horvath, 1995; Inglis et al., 1996; Pelekis et al. 2000; Hazarika and Okuzono, 2004; Hazarika, 2005, Athanasopoulos et al., 2007, Zarnani and Bathurst, 2009).

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ένα στρώμα γεωαφρού EPS (έχοντας τον ρόλο συμπιεστού παρεμβλήματος) τοποθετείται μεταξύ της πίσω πλευράς του τοίχου αντιστήριξης και του εδαφικού υλικού επίχωσης (Σχ.1).



Σχήμα 1: Μόνωση έναντι οριζόντιας σεισμικής ώθησης, σε κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης με συμπιεστό παρέμβλημα γεωαφρού EPS.

Κατά τη διάρκεια του σεισμού, οι σεισμικές ωθήσεις εφαρμόζονται αρχικά στο στρώμα του EPS. Το στρώμα αυτό λειτουργεί σαν αποσβεστήρας (εξ αιτίας της μεγάλης συμπιεστότητας του) απορροφώντας το μεγαλύτερο μέρος της πίεσης και μεταφέροντας μόνο ένα μέρος της στην κατασκευή.

Μέχρι σήμερα, η έρευνα σε αυτή την κατεύθυνση έχει εστιαστεί σε δοκιμές σεισμικής τράπεζας με δοκίμια μικρής κλίμακας (Zarnani and Bathurst 2009) και με αριθμητικές αναλυτικές μεθόδους (π.χ.. Inglis et al., 1996, Athanasopoulos et al., 2007). Οι δοκιμές μικρής κλίμακας σε σεισμική τράπεζα έχουν δεδομένους περιορισμούς εξ αιτίας των επιδράσεων ορίου και κλίμακας, ενώ οι αριθμητικές αναλύσεις είναι τυπικά περιορισμένες εξ αιτίας των παραδοχών για την απόκριση τάσης – παραμόρφωσης του εδάφους.

Για να αναπτυχθεί μία αξιόπιστη μεθοδολογία για την σεισμική μόνωση και/ή για τη αντισεισμική ανακατασκευή των έργων εδαφικής αντιστήριξης, πρέπει να επικυρωθούν τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης μέσω φυσικών ελέγχων, όπως οι δοκιμές σε φυγόκεντρο, επειδή οι συνθήκες κλίμακας και ορίων επιτρέπουν τη σωστή μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του εδάφους, καθώς επίσης είναι δυνατόν να εκτιμηθούν σωστά, οι οριζόντιες εδαφικές ωθήσεις.

Οι δοκιμές στη φυγόκεντρο προσαρμόζονται ιδανικά και παρουσιάζουν μία μεγάλη ευκαιρία για μοντελοποίηση των κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης, αφενός μεν επειδή οι συνθήκες κλίμακας και ορίων επιτρέπουν τη σωστή προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους, αφετέρου δε είναι δυνατόν να εκτιμηθούν σωστά οι οριζόντιες εδαφικές ωθήσεις. Οι

δοκιμές στην φυγόκεντρο είναι επίσης σχετικά οικονομικές και αναπαράξιμες και συνεπώς μία παραμετρική μελέτη μπορεί να προσαρμοστεί, ώστε να ορίσει τις παραμέτρους που επηρεάζουν περισσότερο την μονωτική αποτελεσματικότητα των παρεμβλημάτων EPS.

Αυτή η ερευνητική εργασία παρουσιάζει την πρώτη πρότυπη κλίμακα (πλήρης κλίμακα) αποτελεσμάτων με σεβασμό στη σεισμική μόνωση των κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης. Παρουσιάζει επίσης την ευκαιρία να επανακαθορίσουμε το ρόλο των φυσικών δοκιμών με την ανάπτυξη νέων αντιλήψεων των προβλημάτων της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής.

Ανασκόπηση βιβλιογραφίας/Δεδομένα

Προηγούμενες έρευνες με αντικείμενο την αποτελεσματικότητα του γεωαφρού EPS σαν σεισμικό μονωτικό έναντι οριζόντιων σεισμικών ωθήσεων, επικεντρώθηκαν σχεδόν εξ ολοκλήρου, σε τοίχους τύπου προβόλου. Η γενική ιδέα προτάθηκε αρχικά από τον Horvath (1995) και εξελίχθηκε κατ' επέκταση στη χρήση συμπιεστών παρεμβλημάτων για την μείωση των στατικών οριζόντιων εδαφικών ωθήσεων σε τοίχους αντιστήριξης τύπου προβόλου. (π.χ. Partos and Kazaniwsky, 1987; McGown et al., 1988; Karpurapu and Bathurst, 1992; Tsukamoto et al., 2002; Horvath, 2004).

Οι μελέτες για την αποτελεσματικότητα των συμπιεστών παρεμβλημάτων γεωαφρού EPS σαν σεισμικό μονωτικό έναντι οριζόντιων σεισμικών ωθήσεων, ακολούθησαν δύο κατευθύνσεις:

α) αριθμητικές αναλύσεις με χρήση της οριακής στατικής προσέγγισης και διάφορων προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων (Inglis et al., 1996, Athanasopoulos et al., 2007) και

β) δοκιμές σεισμικής τράπεζας σε φυσικά δοκίμια μικρής κλίμακας (Hazarika and Okuzono, 2004; Zarnani and Bathurst, 2009). Η συμπεριφορά του εδάφους στις αριθμητικές αναλύσεις θεωρήθηκε ότι είναι είτε ελαστοπλαστική, είτε ισοδύναμα γραμμική.

Ο γεωαφρός EPS, με βάση εργαστηριακά αποτελέσματα, θεωρήθηκε είτε σαν καθαρά συνεκτικό είτε σαν ισοδύναμα γραμμικό υλικό. Με βάση τα αποτελέσματα εκτεταμένων παραμετρικών αναλύσεων, η μονωτική αποτελεσματικότητα με σεβασμό στις εδαφικές ωθήσεις, Αρ, (δηλαδή η αναλογία της μείωσης των σεισμικών φορτίων λόγω της μόνωσης, ως προς την τιμή των σεισμικών φορτίων χωρίς την μόνωση) των συμπιεστών παρεμβλημάτων EPS στην περίπτωση τοίχων αντιστήριξης τύπου προβόλου ευρέθη να εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- 1) διατομή του συμπιεστού παρεμβλήματος,
- 2) πυκνότητα του γεωαφρού EPS,
- 3) κανονικοποιημένο πάχος του συμπιεστού παρεμβλήματος,
- 4) σχετική συχνότητα διέγερσης,
- 5) ένταση δόνησης και
- 6) ύψος και ελαστικότητα του τοίχου

Οι φυσικές δοκιμές μπορούν να βοηθήσουν στην επιβεβαίωση των αριθμητικών αναλύσεων και στην επικύρωση των αποτελεσμάτων. Ένας συνήθης περιορισμός στις φυσικές δοκιμές στις περισσότερες εφαρμογές της γεωτεχνικής μηχανικής είναι το μεγάλο μέγεθος των περισσότερων κατασκευών, συμπεριλαμβανομένων των τοίχων εδαφικής αντιστήριξης που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας έρευνας.

Οι δοκιμές σε φυγόκεντρο προσφέρουν την ανεκτίμητη ευκαιρία να εκτελούνται φυσικές δοκιμές σε μικρότερης κλίμακας προσομοιώματα χωρίς τα προβλήματα των οριακών επιδράσεων. Στις δοκιμές φυγόκεντρου το βάρος των φυσικών υλικών αυξάνεται τεχνικά (με την χρήση των φυγόκεντρων δυνάμεων), καθιστώντας έτσι την συμπεριφορά του προσομοιώματος μικρής κλίμακας, σε συμπεριφορά κανονικής κατασκευής. Τονίζεται δε ότι οι δοκιμές φυγόκεντρου, παρέχουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα πραγματικών συνθηκών, σε αντίθεση με τις δοκιμές μικρής κλίμακας (1 g) της σεισμικής

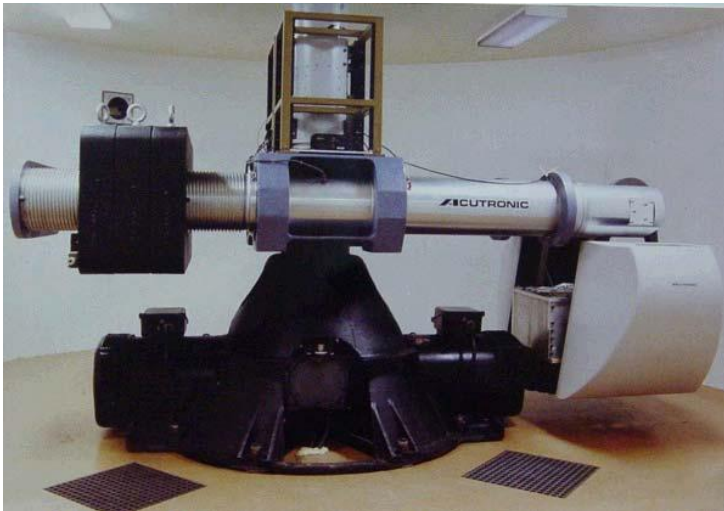
τράπεζας κατά την οποία η απόκριση εξαρτάται από την κλίμακα του προσομοιώματος. Η δυναμική δοκιμή φυγοκέντρησης έχει γίνει ένα πολύτιμο εργαλείο για την κατανόηση των γεωτεχνικών προβλημάτων της σεισμικής μηχανικής που είναι πολύ δύσκολο να μελετηθούν με άλλο τρόπο.

Τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης με δυναμική φυγοκέντρηση έχουν συζητηθεί από πολλούς ερευνητές όπως ο Kutter (1995) και οι Dobry and Liu (1994). Αυτά τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν:

- α) χρήση προσομοιωμάτων μικρής κλίμακας για την προσομοίωση με ακρίβεια των πρωτοτύπων με ρεαλιστική τάση θέσης και βάθους του εδάφους,
- β) επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων σε παρόμοια προσομοιώματα,
- γ) απευθείας παρατήρηση των μεθόδων, των αστοχιών και των παραμορφώσεων,
- δ) αποτελεσματική και οικονομική μεθοδολογία συγκρινόμενη με την σεισμική τράπεζα,
- ε) δυνατότητα εφαρμογής σεισμικών δονήσεων με ένα ευρύ φάσμα μεγεθών και συχνοτήτων και
- στ) επιβεβαίωση των εμπειρικών μεθόδων και επικύρωση των τεχνικών προσομοίωσης (Al-Atik και Sitar, 2008).

Δοκιμή φυγοκέντρου

Για να επικυρωθεί η αποτελεσματικότητα της σεισμικής μόνωσης του Γεωαφρού EPS ως συμπιεστού παρεμβλήματος σε τοίχους αντιστήριξης, διεξήχθησαν δύο πειράματα στη δυναμική φυγόκεντρο στο Κέντρο Προσομοίωσης Σεισμικής Μηχανικής (CEES) στο Πολυτεχνικό Ινστιτούτο RPI στο Troy, Νέα Υόρκη.



Η φυγόκεντρος έχει ονομαστική ακτίνα 2.7μ. μέγιστο ωφέλιμο φορτίο 1.5 τόνους και διαθέσιμη χωρητικότητα καλαθιού 1 m². Η ικανότητα φυγοκέντρησης, σε μέγιστη επιτάχυνση πολλαπλασιαζόμενη από το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο, είναι 150 g-tonne. Η μίας διάστασης (1D) σεισμική τράπεζα έχει μέγιστη

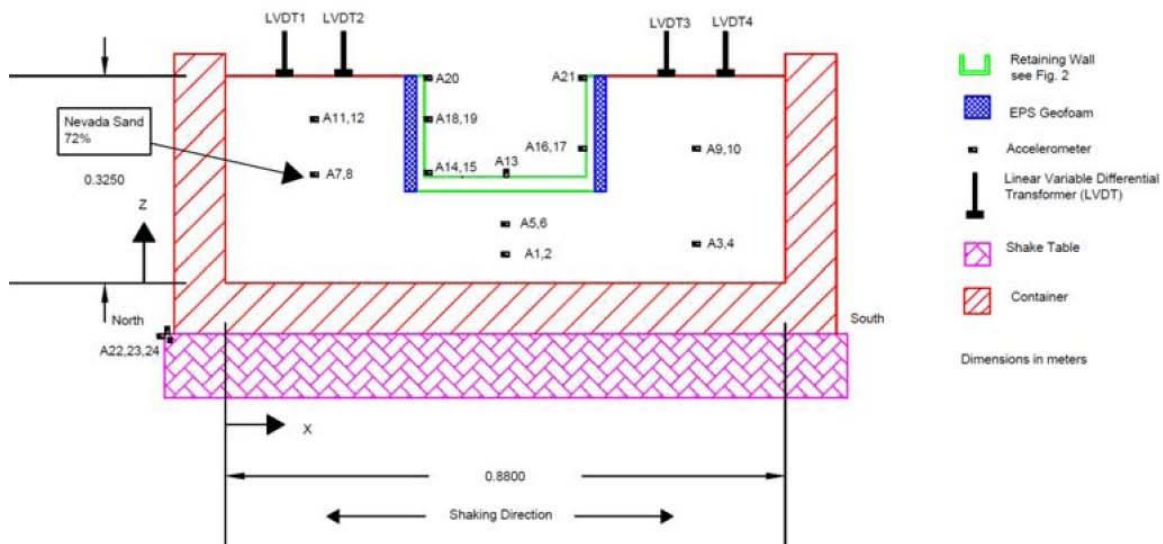
μάζα ωφέλιμου φορτίου 250kg και μέγιστη επιτάχυνση φυγοκέντρησης 100g.

Σχήμα 2: Διάταξη φυγοκέντρου RPI, NY (<http://nees.rpi.edu/equipment/centrifuge/>)

Κατασκευή Μοντέλου και Μετρητικός Εξοπλισμός

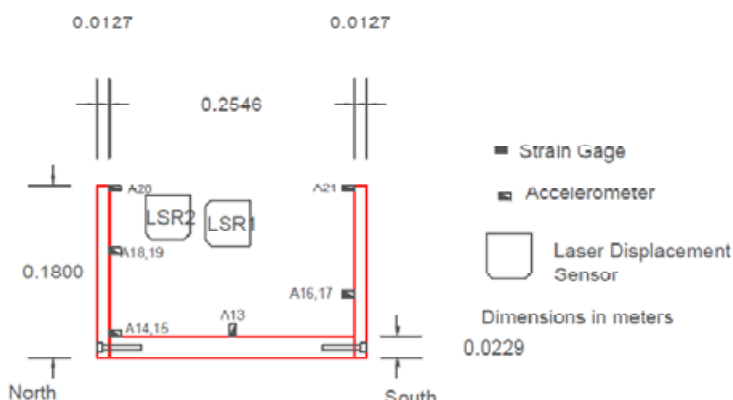
Τα δύο μοντέλα κατασκευάστηκαν μέσα σε ένα μεγάλο ορθογώνιο συμπαγή φορέα με εσωτερικές διαστάσεις 0.88m μήκος X 0.39m πλάτος X περίπου 0.36m βάθος. Είχε προταθεί να χρησιμοποιηθεί ένας συμπαγής φορέας για αυτό το πείραμα, διότι η σχετική πυκνότητα της άμμου, που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο, προτάθηκε να είναι 71%, η οποία είναι αρκετά πυκνή ώστε να αναμένεται πολύ μικρή μετακίνηση της. Εφόσον η άμμος δε θα μετακινηθεί, ένας μεταβλητός φορέας δεν είναι απαραίτητος για αυτό το πείραμα και η μετάβαση από ένα μεταβλητό φορέα σε ένα συμπαγή θα απλοποιήσει την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Ο συμπαγής φορέας είναι επίσης μεγαλύτερος από τον μεταβλητό, επιτρέποντας να υπάρχει μεγαλύτερος χώρος στο εσωτερικό του μοντέλου.

Το πρώτο πείραμα διεξήχθη σε ένα μοντέλο ομοιόμορφης πυκνότητας άμμου. Η διαμόρφωση του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 3. Σε πλήρη κλίμακα, το πρώτο μοντέλο αποτελείται από δύο ακρόβαθρα εύκαμπτων τοίχων αντιστήριξης ύψους περίπου 4m, που καλύπτουν το πλάτος του φορέα. Οι κατασκευές σχεδιάστηκαν να έχουν ακαμψία, μάζα και φυσική συχνότητα αντίστοιχη των τυπικών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Είναι τοποθετημένες πάνω σε περίπου 3.5m ξηρή άμμο μεσαίας πυκνότητας ($D_r = 71\%$) και το εδαφικό επίχωμα αποτελείται από ξηρή άμμο μεσαίας πυκνότητας $D_r = 71\%$). Και οι δύο κατασκευές έχουν άκαμπτη θεμελίωση.



Σχήμα 3: Τομή μοντέλου και διάταξη μετρητικού εξοπλισμού τοίχου με παρέμβλημα EPS.

Το δεύτερο πείραμα φυγοκέντρησης διεξήχθη χρησιμοποιώντας την ίδια σύνθεση, όπως περιγράφεται ανωτέρω. Η μόνη διαφορά είναι η παρουσία του συμπιεστού παρεμβλήματος γεωαφρού EPS μεταξύ των τοίχων αντιστήριξης και του εδαφικού επίχωματος. Το πάχος του παρεμβλήματος EPS είναι 10% του ύψους του τοίχου (σύνθεσης πάχος EPS $t_r = 10\%$) και ίσο με 4m σε πρότυπη κλίμακα.



Σχήμα 4: Τομή τοίχου αντιστήριξης και διάταξη μετρητικού εξοπλισμού.

πλάκες σε διαμόρφωση τύπου σήραγγας, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 4. Οι δύο κατακόρυφες πλάκες ήταν βιδωμένες στην πλάκα βάσης που κάλυπτε το πλάτος του φορέα.

Το μοντέλο κατασκευάστηκε με διάφορες στρώσεις από ξηρή άμμο Νεβάδας. Το μέγεθος των στρώσεων αντιστοιχούσε στην κάθετη απόσταση μεταξύ των οργάνων που έπρεπε να τοποθετηθούν και η άμμος διαστρώθηκε σε 71% σχετική πυκνότητα με ειδικό διάταξη διάστρωσης. Το RPI διαθέτει πολλά διαφορετικά μεγέθη διατάξεων διάστρωσης και με το κατάλληλο ύψος πτώσης, επιτεύχθηκε σχετική πυκνότητα 71%. Για την εξομάλυνση της επιφάνειας της κάθε στρώσης χρησιμοποιήθηκε συσκευή κενού, ώστε τα όργανα να τοποθετηθούν στη σωστή θέση. Η σειρά των εργασιών για την κατασκευή του μοντέλου

ξεκίνησε αρχικά με την τοποθέτηση της άμμου στα θεμέλια σε διάφορες στρώσεις, στη συνέχεια τοποθέτηση των τοίχων αντιστήριξης σε σχήμα U και τέλος τοποθέτηση της άμμου επίχωσης πίσω και από τους δύο τοίχους. Για να ελαχιστοποιηθεί η τριβή μεταξύ των τοίχων και του συμπαγούς φορέα και για να εμποδιστεί η διάχυση της άμμου, τοποθετήθηκε μία μεμβράνη από τεφλόν στο τέλος κάθε τοίχου αντιστήριξης. Στο Σχήμα 5(α) απεικονίζονται τα στάδια της κατασκευής.

Το δύο μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για να εκτελεστούν οι δύο δοκιμές φυγοκέντρησης, εξοπλίστηκαν με τον αναγκαίο μετρητικό εξοπλισμό, προκειμένου να



Σχήμα 5: Προετοιμασία μοντέλου. (α) Το υλικό επίχωσης τοποθετείται πίσω από τους τοίχους. (β) Οι επαφές των αισθητήρων πίεσης αφής έχουν ήδη τοποθετηθεί στους τοίχους.

συλλεχθούν οι απαραίτητες, ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις των επιταχύνσεων, μετατοπίσεων, πιέσεων και εδαφικών ωθήσεων. Τα επιταχυνσιόμετρα (κατασκευασμένα από την εταιρεία PCB Piezotronics) που χρησιμοποιήθηκαν για να καταγράφουν τις οριζόντιες επιταχύνσεις, διακριβώνονται από το RPI κάθε έξι μήνες. Η διάσταση των επιταχυνσιόμετρων είναι 0.28 in. X 0.49 in. και μετρούν την επιτάχυνση προς μία κατεύθυνση. Είχαν τοποθετηθεί πάνω στον τοίχο αντιστήριξης με κόλλα ή είχαν στερεωθεί στο εσωτερικό του μοντέλου και συγκρατούνταν από τη άμμο και από ένα μικρό κομμάτι κερί που περιέβαλε το επιταχυνσιόμετρο για να διασφαλιστεί ότι δε θα γλιστρήσει. Τρία επιταχυνσιόμετρα είχαν τοποθετηθεί στη σεισμική τράπεζα, στην οριζόντια, κατακόρυφη και εγκάρσια διεύθυνση, προκειμένου να καταγράφουν τα δεδομένα της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης.

Οι οριζόντιες ωθήσεις, που δρουν στους τοίχους αντιστήριξης, καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας αισθητήρες πίεσης αφής (Σχ.5). Οι αισθητήρες πίεσης που είναι συμβατοί με το λογισμικό του RPI κατασκευάζονται από την εταιρεία Tekscan. Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες πίεσης αφής υψηλής ταχύτητας με επαφές. Το σύστημα μέτρησης πίεσης αφής απαρτίζεται από έναν εξαιρετικά λεπτό (~0.1 mm) ευέλικτος ισχυρός αισθητήρας αφής, που τοποθετείται ανάμεσα σε δύο επιφάνειες σύζευξης, για τη μέτρηση της πίεσης επαφής (Palmer et al., 2009). Οι μετρούμενες δυνάμεις μπορούν να παρουσιαστούν είτε στατικά είτε δυναμικά και η πληροφορία μπορεί να οπτικοποιηθεί σαν ενημερωτική γραφική παράσταση σε δισδιάστατη (2D) ή τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση. Αυτοί οι αισθητήρες πίεσης αφής είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για τη μέτρηση της πλευρικής πίεσης στον τοίχο και αξιολογεί την πλευρική πίεση του συντελεστή πριν και μετά την δόνηση. Οι αισθητήρες είχαν διακριβωθεί πριν από τις δοκιμές για μία σειρά αναμενόμενων πιέσεων κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής της φυγόκεντρου. Οι μετρητές τάσης τοποθετήθηκαν σε κατακόρυφη σειρά και στους δύο τοίχους αντιστήριξης, για να μετρηθεί η πλευρική παραμόρφωση, κατά τη διάρκεια της δόνησης. Αυτό θα επιτρέψει έναν έμμεσο υπολογισμό της πίεσης που προκαλείται στον τοίχο αντιστήριξης, ο οποίος θα συγκριθεί με τις μετρήσεις από τους αισθητήρες πίεσης αφής. Οι μετρητές τάσης ήταν συνδεδεμένοι με τον τοίχο με κόλλα και καλώδια, που ήταν κολλημένα πάνω σε κάθε μετρητή.

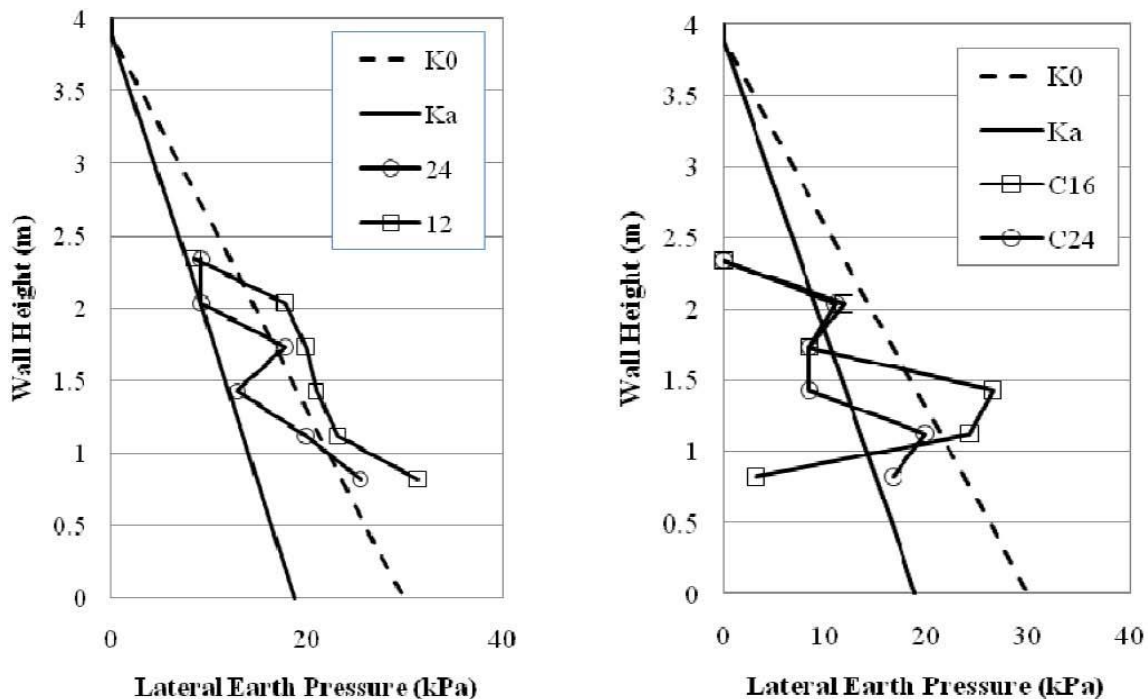
Χρησιμοποιήθηκαν επίσης αισθητήρες λέιζερ για τη μέτρηση των οριζόντιων και των κατακόρυφων κινήσεων των τοίχων αντιστήριξης. Οι αισθητήρες λέιζερ κατασκευάζονται από την εταιρεία Keyence και έχουν διαστάσεις 2 in. X 2 in. X 1/2 in. Διακριβώνονται από το RPI κάθε έξι μήνες. Οι αισθητήρες έχουν εύρος συν πλην 4 ίντσες και υπάρχει επίσης μία ελάχιστη απόσταση τοποθέτησης μεταξύ τους. Οι αισθητήρες λέιζερ τοποθετήθηκαν πάνω στον φορέα, όχι όμως στον τοίχο αντιστήριξης, προκειμένου να μετρηθεί η κίνηση του τοίχου αντιστήριξης. Στηρίγματα σχήματος L, στερεώθηκαν στον φορέα στα οποία τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες λέιζερ. Η διαμόρφωση της επιφάνειας της άμμου επίχωσης μετρήθηκε χρησιμοποιώντας LVDTs.

Μία κάμερα υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε επίσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής, για να παρακολουθείται το μοντέλο κατά τη διάρκεια της περιστροφής και της δόνησης και επιπλέον για να εξακριβωθεί ότι κανένα όργανο δεν μετακινήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ο πίνακας δείχνει τις καταγραφές των μετρητικών οργάνων. Η διάταξη των οργάνων φαίνεται στις Εικόνες 3 και 4. Για την καταγραφή των δεδομένων σε όλα τα στάδια των δοκιμών φυγοκέντρωσης, χρησιμοποιήθηκε η βάση καταγραφής δεδομένων (DAQ) του RPI.

Και οι δύο δοκιμές φυγοκέντρωσης (δηλ. χωρίς και με στρώμα EPS) διεξήχθησαν στα 22.21g και μετά δονήθηκαν με μία αρμονική, ημιτονοειδή κίνηση σε διάφορα εύρη και συχνότητες. Η δόνηση εφαρμόστηκε παράλληλα με τις μεγάλες πλευρές του φορέα και κάθετα στους τοίχους αντιστήριξης. Χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο 10 δονήσεων για το κάθε μοντέλο με εύρη 0.05g, 0.1g, 0.3g και 0.35g. σε συχνότητες 2Hz και 3Hz. Ο λόγος που το μοντέλο δεν δονήθηκε με μεγαλύτερη επιτάχυνση ήταν ότι ήταν πολύ βαρύ και ότι κατά τη διάρκεια της δόνησης του σε υψηλότερες εντάσεις, η ιδιοσυχνότητα της σεισμική τράπεζας θα αλληλεπιδρούσε με το εισερχόμενο σήμα.

Αποτελέσματα Δοκιμών Φυγοκέντρου

Κύριος στόχος για τη διενέργεια των δοκιμών στη φυγόκεντρο είναι η καλύτερη κατανόηση της αποτελεσματικότητας της σεισμικής μόνωσης σε τοίχους αντιστήριξης με συμπίεστο παρέμβλημα γεωαφρού EPS και η επικύρωση των προκαταρκτικών αποτελεσμάτων από τις αριθμητικές αναλύσεις.



Σχήμα 6: Στατικές οριζόντιες εδαφικές ωθήσεις στα δύο μοντέλα φυγοκέντρωσης: a) χωρίς EPS, b) με $t_r = 10\%EPS$.

Λόγω της περιορισμένης έκτασης στο παρόν έγγραφο, οι συγγραφείς επικεντρώνονται στα αποτελέσματα που βασίζονται στα δεδομένα που συλλέχθηκαν από

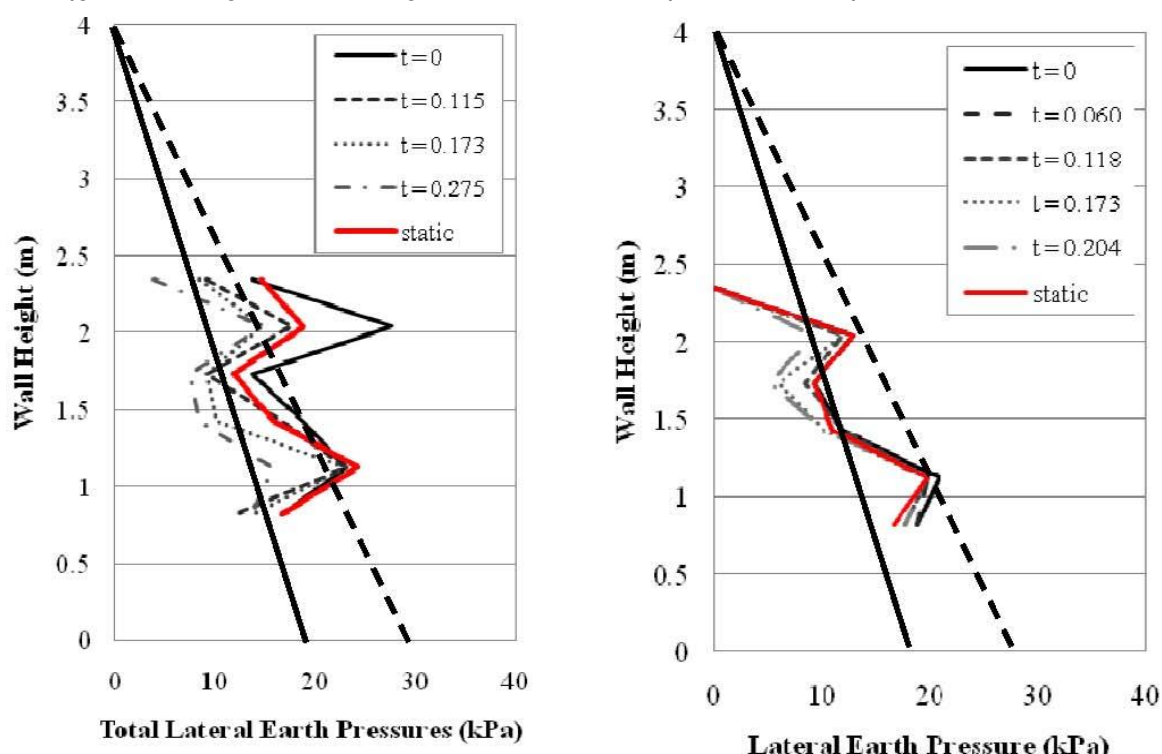
τους αισθητήρες πίεσης αφής.

Το Σχήμα 6(a) δείχνει τη στατική πλευρική κατανομή εδαφικής ώθησης, για το μοντέλο χωρίς παρέμβλημα EPS, όπως καταγράφηκε από τους αισθητήρες πίεσης αφής (εμφανίζονται δύο σημεία κατά μήκος των επαφών αφής, δηλ. 12 και 24) και όπως υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας κατά τα λοιπά πλήρως κινητοποιημένους δραστικούς πλευρικούς συντελεστές πίεσης Rankine (K_a και K_o αντίστοιχα). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών, με τις μετρούμενες τιμές να είναι πιο κοντά στις συνθήκες K_o , διότι οι τοίχοι δεν μετακινούνται αρκετά ώστε να κινητοποιηθούν πλήρως οι ενεργές συνθήκες. Οι αισθητήρες πίεσης αφής έχουν ύψος 2 μέτρα και επομένως καλύπτουν το μέσον του τοίχου αντιστήριξης.

Το Σχήμα 6(b) δείχνει επίσης τα ίδια αποτελέσματα για το μοντέλο με στρώμα EPS. Χάριν στην παρουσία του EPS, οι στατικές οριζόντιες ωθήσεις μειώθηκαν μερικώς, αφού το έδαφος είναι δυνατόν να παραμορφώσει περισσότερο το EPS και συνεπώς να κινητοποιήσει τις ενεργές ωθήσεις σε μεγαλύτερο βαθμό. **Η μείωση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 5% και 30%, καθ' ύψος του τοίχου.**

Τα αποτελέσματα αυτά και η ουσιαστική συμφωνία με τις αναλυτικές μεθόδους, αυξάνουν την εμπιστοσύνη μας στις μετρήσεις από τους αισθητήρες πίεσης αφής με επαφές. Ο αισθητήρας πίεσης στην άνω σειρά σταμάτησε να λειτουργεί κανονικά κατά τη διάρκεια της περιστροφής και αυτός είναι ο λόγος που η τιμή του είναι τόσο χαμηλή.

Το Σχήμα 7 δείχνει τη χρονική διακύμανση της συνολικής κατανομής των πλευρικών εδαφικών ωθήσεων για μισό κύκλο φόρτισης με εσωτερική επιτάχυνση 0.2g και σε συχνότητα 2Hz. Η συνολική εγκάρσια ώθηση, σε ορισμένες χρονικές περιόδους, γίνεται μεγαλύτερη από τη στατική, ιδιαίτερα κοντά στο μέσο ύψος του τοίχου. Στην περίπτωση που υπάρχει EPS, παρατηρείται μείωση του συνόλου των πλευρικών ωθήσεων καθώς επίσης μικρότερες διακυμάνσεις των εδαφικών ωθήσεων, κατά τη διάρκεια του μισού κύκλου



Σχήμα 7: Σύνολο πλευρικών ωθήσεων για εσωτερική επιτάχυνση 0.2g σε συχνότητα 2Hz: a) χωρίς EPS, b) με EPS.

φόρτισης.

Η μείωση κυμαίνεται καθ' ύψος του τοίχου από 5% μέχρι 50% (κοντά στο μέσο ύψος του τοίχου).

Όσον αφορά τη συνολική εδαφική ώθηση, P_{AE} , η μείωση που παρατηρήθηκε σε αυτές τις δοκιμές ήταν ίση με 27.7% κατά μέσο όρο για το σύνολο των επαφών.

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα, των αριθμητικών αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, σε παρόμοιους τοίχους αντιστήριξης μονωμένους με EPS, με πάχος ίσο με 10% (Αθανασόπουλος, et al., 2007).

Συμπεράσματα

Οι κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης αποτελούν σημαντική παράμετρο πολλών έργων πολιτικού μηχανικού. Αυτές οι κατασκευές σχεδιάστηκαν με σκοπό να αντισταθούν με ασφάλεια στις οριζόντιες ωθήσεις που ασκεί το έδαφος.

Λόγω της παρουσίας του EPS, **οι στατικές οριζόντιες ωθήσεις μειώθηκαν μερικώς**, αφού το έδαφος είναι δυνατόν να παραμορφώσει περισσότερο το EPS και συνεπώς να κινητοποιήσει τις ενεργές ωθήσεις σε μεγαλύτερο βαθμό.

Η μείωση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 5% και 30%, καθ' ύψος του τοίχου.

Σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, θα πρέπει να σχεδιάζονται κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης, ώστε να μπορέσουν να αντέξουν τις σεισμικές ωθήσεις, πέραν των στατικών φορτίων. Την τελευταία δεκαετία, έχει προταθεί μία νέα μέθοδος μόνωσης των κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης έναντι των οριζόντιων σεισμικών και στατικών ωθήσεων, όπου τοποθετείται ένα στρώμα γεωαφρού EPS (παίζοντας το ρόλο ενός συμπίεστου παρεμβλήματος) μεταξύ της πίσω όψης του τοίχου και του υλικού επίχωσης και δρα σαν αποσβεστήρας.

Οι δύο δοκιμές φυγοκέντρησης πραγματοποιήθηκαν σε μοντέλα τοίχων αντιστήριξης 4 μέτρων και επιχωματώθηκαν με ξηρή, μεσαίας πυκνότητας άμμο Νεβάδας. Τα μοντέλα δονήθηκαν με μία σειρά από ημιτονοειδείς δονήσεις. Αυτές οι δοκιμές έδωσαν το πρώτο σύνολο δεδομένων για τέτοιου είδους project. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα και η επεξεργασία των δεδομένων από τις δοκιμές φυγοκέντρησης, δείχνουν ότι το στρώμα γεωαφρού EPS, το οποίο συμπεριλήφθηκε στο δεύτερο μοντέλο, έδρασε σαν αποσβεστήρας και συνέβαλλε στη μείωση των σεισμικών ωθήσεων, οι οποίες εφαρμόστηκαν στον τοίχο αντιστήριξης.

Η μονωτική αποτελεσματικότητα του παρεμβλήματος EPS $t_r=10\%$, βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 10% και 50% καθ' ύψος του τοίχου, για επιτάχυνση 0.2g σε συχνότητα 2Hz.

Αυτά τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με τις προηγούμενες αριθμητικές αναλύσεις, που πραγματοποιήθηκαν σε παρόμοιους τοίχους και σε παρόμοιες συνθήκες εδάφους. Οι υπόψη δοκιμές φυγοκέντρησης μας δίνουν δεδομένα υψηλής ποιότητας, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη κατανόηση της σεισμικής απόκρισης και για την εκτέλεση έργων εδαφικής αντιστήριξης γενικά.

Σημείωση

Το project αυτό χρηματοδοτήθηκε αρχικά από τον Πανελλήνιο Σύνδεσμο EPS www.epshellas.com και από τον EUMEPS www.eumeps.org. Λόγω των πολύ σημαντικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα στο RPI <http://nees.rpi.edu> και της μεγάλης σπουδαιότητας που παρουσιάζει υιοθετήθηκε από το NEES(Network for Earthquake Engineering Simulation) www.nees.org που χρηματοδοτείται από το NSF(National Science Foundation) www.nsf.gov/index.jsp. Το δίκτυο περιλαμβάνει 14 ερευνητικά εργαστηριακά κέντρα στις Η.Π.Α. και εξετάζεται η περαιτέρω χρηματοδότηση του project με **1,2 εκατ. Δολάρια** για την διενέργεια 40 νέων δοκιμών τα επόμενα 3 χρόνια.

References

1. Al Atik, L., and Sitar, N. (2008) Dynamic centrifuge study of seismically induced lateral earth pressures on retaining structures. Proc. of the 4th Decennial Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference.
2. Athanasopoulos, G.A., Nikolopoulou, C.P., Xenaki, V.C. and Stathopoulou, V.D., (2007), "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.
3. Dobry, R, and Liu, L.(1994) "Centrifuge Modeling of Soil Liquefaction," Proceedings of the Tenth World Conference on earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, 6801-6809.
4. Hazarika, H. and Okuzono, S., (2004), "Modeling the Behavior of a Hybrid Interactive System Involving Soil, Structure and EPS Geofoam", Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, October 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 149-162
5. Horvath, J. S., (2004), "Geofoam Compressible Inclusions: The New Frontier in Earth Retaining Structures", Geotechnical Engineering for Transportation Projects, Proceedings of Geo-Trans 2004, ASCE Geotechnical Special Publication No. 126, July 27-31, 2004, Los Angeles, California, M. K. Yegian and E. Kavazanjian Eds., Vol. 2, pp. 1925-1934
6. Inglis, D., Macleod, G., Naesgaard, E. and Zergoun, M., (1996), "Basement Wall with Seismic Earth Pressure and Novel Expanded Polystyrene Foam Buffer Layer", Proceedings of 10th Annual Symposium of the Vancouver Geotechnical Society, Vancouver, B.C., 18p.
7. Kammerer, AM, Wu, J, Pestana, JM, Riemer, M, and Seed, RB. (2000) "Cyclic Simple Shear Testing of Nevada Sand for PEER Center Project 2051999," Geotechnical Engineering Report No. UCB/GT/00-01, University of California, Berkeley, CA.
8. Karpurapu, R. and Bathurst, R. J., (1992), "Numerical Investigation of Controlled Yielding of Soil-Retaining Wall Structures", Geotextiles and Geomembranes, Vol.11, No. 2, pp. 115-131
9. Kutter, BL. (1995) "Recent Advances in Centrifuge Modeling of Seismic Shaking," Proceedings., St. Louis, Vol. II, 927-941.
10. Lew, M., Sitar, N., and Atik, L. (2010) "Seismic Earth Pressures: Fact or Fiction?", Proc. Of the Earth retention Conf., Bellevue, Washington, August 2010, ASCE GSP 208, pp. 656-673
11. McGown, A., Andrawes, K. Z. and Murray, R. T., (1988), "Controlled Yielding of the Lateral Boundaries of Soil Retaining Structures", In Proceedings of the ASCE Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement,1988, ed. R.D. Holtz, Nashville, TN, USA, pp. 193-211
12. Nakamura, S. (2006) Re-examination of Mononobe-Okabe theory of gravity retaining walls using centrifuge model tests. Soils and Foundations 46 (2):135-146.
13. Ossa, A. and Romo, M.P. (2011) Dynamic characterization of EPS geofoam, Geotextiles and Geomembranes, No.29, pp. 40-50
14. Palmer, M.C., O'Rourke, T.D., Olson, N.A., Abdoun, T., and Ha, D. (2009), "*Tactile Pressure Sensors for Soil-Structure Interaction Assessment*", ASCE J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, Issue 11, November, pp. 1638-1645.
15. Partos, A. M. and Kazaniwsky, P. M., (1987), "Geoboard Reduces Lateral Earth Pressures", In Proceedings of Geosynthetics '87, New Orleans, USA, February 1987
16. 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", Proceedings of the 2nd European Geosynthetics Conference, EuroGeo 2000, Bologna, Italy, October 2000, A. Cancelli, D. Cazzuffi and C. Soccodato Eds., Vol. 2, pp. 843-846
17. Towhata, I. (2008) Geotechnical Earthquake Engineering, Springer ed.
18. Trandafir, A.C., Bartlett, S.F., and Lingwall, B.N. (2010) Behavior of EPSgeofoam in stress-controlled cyclic uniaxial tests" Geotextiles and Geomembranes, No. 28, pp. 514-524
19. Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Kon, H. and Masuo, T., (2002), "Use of Compressible Expanded Polystyrene Blocks and Geogrids for Retaining Wall Structures", Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol. 42, No. 4, August 2002, pp. 2
20. Wilson, P., and Elgamal, A. (2010) Large-Scale Passive Earth Pressure Load-Displacement Tests and Numerical Simulation, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,

Vol. 134, pp.1634-1643

21. Zarnani, S., and Bathurst, J. (2008), "Numerical Modeling of EPS Seismic Buffer Shaking Table Tests", *Geotextiles and Geomembranes* 26 (2008), 371-383.
22. Zarnani, S., and Bathurst, R. J. (2007), "Experimental Investigation of EPS Geofoam Seismic Buffers Using Shaking Table Tests", *Geosynthetics International*, 2007, 14, No. 3.
23. Zarnani, S., and Bathurst, R.J. (2009), "Numerical Parametric Study of Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam Seismic Buffers", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, pp. 318-338.