

Πολιτιστικό Κέντρο Σ. Νιάρχου: Σεισμική Ανάλυση Υψηλού Τοίχου Ωπλισμένης Γης επί Προβληματικού Εδάφους

Stavros Niarchos Cultural Center: Seismic Analysis of Tall Reinforced Earth Wall on Precarious Soil

ΤΑΣΙΟΠΟΥΛΟΥ, Π. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.
ΖΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.
ΓΚΑΖΕΤΑΣ, Γ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθεγε της Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Αναλύονται η σεισμική ευστάθεια και οι παραμορφώσεις αντιστηρίξεως ωπλισμένης γής ύψους 15m εδραζόμενης επί εδάφους περιέχοντος στρώσεις ρευστοποιήσιμου υλικού. Η ανάλυση γίνεται σε όρους "ενεργών τάσεων", με υπολογισμό των εδακικών παραμορφώσεων και της ταυτόχρονης δημιουργίας και αποτόνωσης υδατικών υπερπιέσεων. Στο φυσικό έδαφος η αποτόνωση αυτή οφείλεται στην κατακόρυφη ροή προς πιο διαπερατές στρώσεις και στην οριζόντια ροή προς το κατάντη του τοίχου έδαφος. Τοποθέτηση τριγωνικού δικτύου χαλικοπασσάλων επιταχύνει την αποτόνωση μέσω ακτινικής ροής και οδηγεί σε σημαντική βελτίωση ως προς τις μετατοπίσεις και την ευστάθεια του έργου.

ABSTRACT : The seismic response of a 15 m high reinforced-earth retaining wall on top of a soil deposit containing liquefiable soil layers is explored with effective stress dynamic time history analyses. The simultaneous generation and dissipation of seismic excess pore-water pressures (epwp) is reproduced in the analysis. The need for, and effectiveness of, soil improvement with 60cm stone columns placed in a triangular configuration is demonstrated with a series of graphs. This improvement results from both the increased rate of epwp dissipation and the increased stiffness/strength of the system.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΤΟ ΜΕΙΖΟΝ ΕΡΓΟ

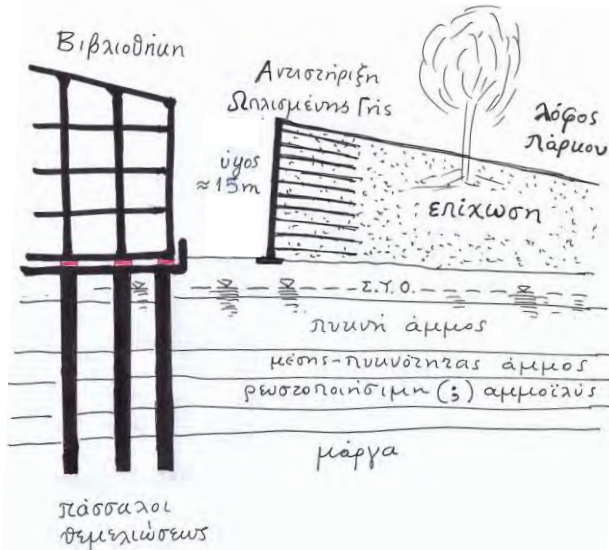
Ένα σημαντικό έργο βρίσκεται στο τελικό στάδιο της Μελέτης – αρχιτεκτονικής, στατικής, γεωτεχνικής, υδραυλικής, ηλεκτρομηχανολογικής: το πολιτιστικό κέντρο του Ιδρύματος Σταύρου Νιάρχου. Θα περιλαμβάνει δύο αλληλεμπλεκόμενα κτίρια, την "Όπερα" και την "(Εθνική) Βιβλιοθήκη", και ένα μεγάλης έκτασης θεματικό πάρκο. Το πάρκο αυτό θα διαμορφωθεί επί ενός ηπίου τεχνητού λόφου (επιχώσεως) ο οποίος θα καταλήγει σε σχεδόν κατακόρυφη παρειά ύψους 15m, σε μικρή απόσταση από το κτίριο της Βιβλιοθήκης. Το Σχήμα 1 δίδει σε τομή τον λόφο, την κατακόρυφη παρειά του, και τα δύο κτίρια. Σύλληψη του αρχιτέκτονα Renzo Piano, τό όλο έργο θα είναι έξοχα προσαρμοσμένο στον αναβαθμισσεσόμενο περιβάλλοντα χώρο,

θα αποτελέσει δε υπόδειγμα ενεργειακής αυτάρκειας και οικονομίας στην χρήση υδατικών πόρων. Εξίσου σημαντική από την σκοπιά του μηχανικού θα είναι και η αντισεισμική θωράκιση των δομημάτων, η οποία θα περιλαμβάνει σύστημα σεισμικής μόνωσης.

Η αντιστήριξη του κατακόρυφου πρηνούς υπήρξε ένα από τα πιο ενδιαφέροντα και δυσχερή γεωτεχνικά προβλήματα. Όχι μόνον λόγω του σημαντικού ύψους του (15m), αλλά και λόγω του "προβληματικού" εδάφους θεμελιώθεις το οποίο περιλαμβάνει αμμολιωδείς στρώσεις αρκετά χαλαρές ώστε ο κίνδυνος ρευστοποιήσεως εκ πρώτης όψεως να μην αποκλείεται. Επιπλέον, λόγω της γεινιάσεως του τοίχου αυτού με την Βιβλιοθήκη, μέσω ζώνης δαιφυγής πλάτους 15m, η σεισμική διέγερση σχεδιασμού του

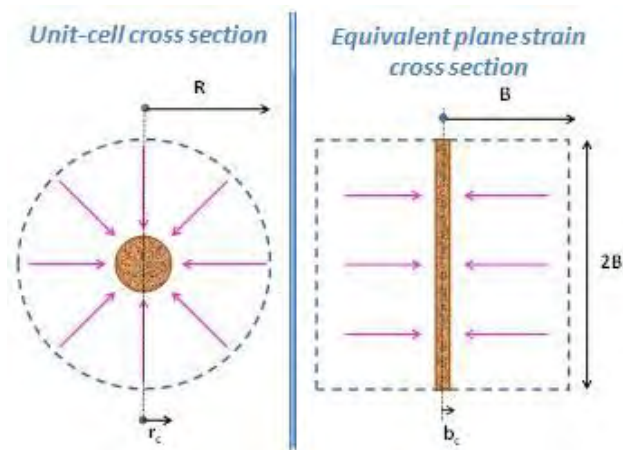
τοίχου επηλέγη αρκετά υψηλή, αντισοιοχούσα σε περίοδο επαναφοράς 1000-2000 ετών — όπως ακριβώς και των δύο δομημάτων.

Το παρόν άρθρο σκιαγραφεί τα κυριότερα συμπεράσματα ως προς την σεισμική ευστάθεια και της παραμορφώσεις του συστήματος επιχώσεως - αντιστήριξης - υπεδάφους, μέσω δυναμικών αναλύσεων σε όρου ενεργών τάσεων.



Σχήμα 1. Σκαριφηματική τομή της αντιστήριξης στην γεινιάσή της με το κτίριο της Βιβλιοθήκης.

Figure 1. Sketch of the section of the retaining wall at the proximity with the Library.



Σχήμα 2. Ισοδυναμία αξονοσυμμετρικού και διδιάστατου κελιού επιρροής χαλικοπασσάλου.

2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ

2.1 Διδιάσταση προσομοίωση χαλικοπασσάλων

Στα πλαίσια της παρούσα μελέτες, η αριθμητική προσομοίωση των χαλικοπασσάλων πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία που να μετατρέπουν το αξονοσυμμετρικό μοναδιαίο κελί επιρροής στο ισοδύναμο διδιάστατο ανάλογό του σε όρους στράγγισης (διαπερατότητα) και φέρουσας ικανότητας (δυσκαμψία χαλικοπασσάλου). Η μέθοδος που υιοθετήθηκε εδώ έχει προταθεί από τους Indraratna και Redana (1997) και έχει ελεγχθεί από τους Tan et al. (2008).

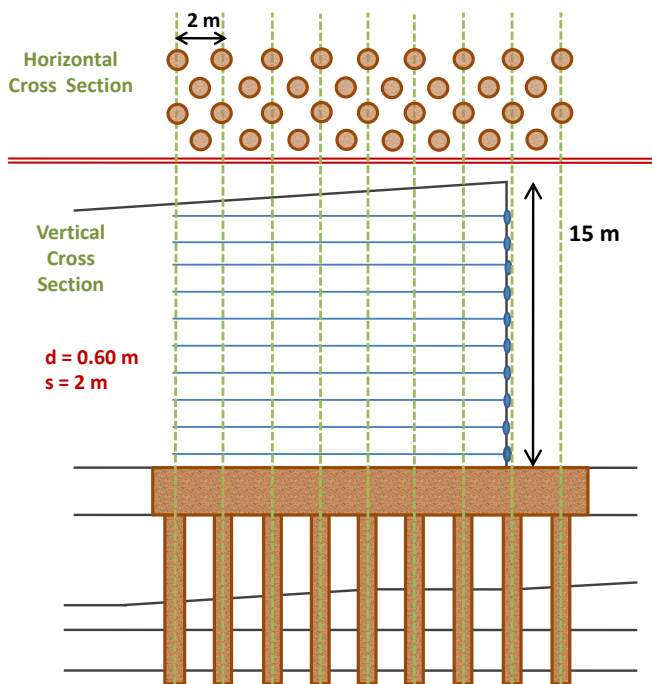
Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η συνολική επιφάνεια της εγκάρσιας τομής ενός χαλικοπασσάλου και της ζώνης επιρροής αυτού διατηρείται και στις δύο περιπτώσεις (Σχήμα 2).

Δεδομένου ότι οι λόγοι αντικατάστασης και το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους είναι ίσα για αξονοσυμμετρικές συνθήκες και συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, η δυσκαμψία του χαλικοπασσάλου σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης παραμένει επίσης η ίδια. Το ίδιο συμβαίνει και με την διαπερατότητα. Η ισχύς των παραδοχών αυτών έχει ελεγχθεί από τους Tan et al. (2008) σε δύο στάδια: σύγκριση προσομοιώσεων κελιών επιρροής σε αξονοσυμμετρικές και διδιάστατες συνθήκες και σύγκριση διδιάστατων προσομοιώσεων καννάβου χαλικοπασσάλων με πραγματικές μετρήσεις ιστορικού περιστατικού. Αποδείχθηκε ότι η υπό εξέταση μέθοδος μπορεί να αναπαράγει ικανοποιητικά την τριδιάστατη συμπεριφορά των χαλικοπασσάλων.

2.2 Δυναμικές Αριθμητικές αναλύσεις

Στόχος της μελέτες είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του τοίχου αντιστήριξης υπό δυναμικές συνθήκες με και χωρίς χαλικοπασσάλους. Προκαταρκτικές μελέτες υπέδειξαν χρήση τριγωνικού καννάβου χαλικοπασσάλων διαμέτρου 0.60m σε απόσταση 2m. Ο κάνναβος καταλαμβάνει μία περιοχή 15m κάτω από τον τοίχο ωπλισμένης γης (Σχήμα 3).

Η διδιάστατη προσομοίωση των χαλικοπασσάλων βασίστηκε στην προαναφερθείσα μέθοδο. Η απόσταση s διατηρήθηκε ίση με 2m στο διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα ενώ η αντίστοιχη διάμετρος των χαλικοπασσάλων (υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) προέκυψε ίση με 0.14m.

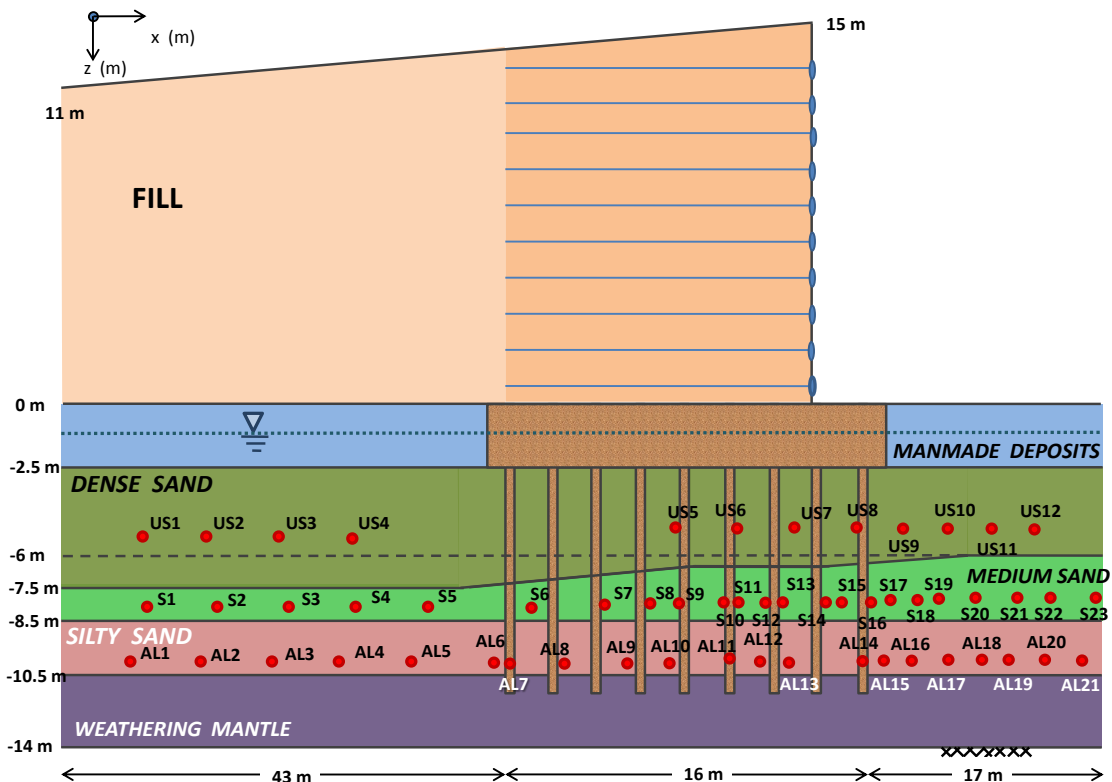


Σχήμα 3. Διάταξη χαλικοπασσάλων κάτω από τον τοίχο ωπλισμένης γης.
Figure 3. Stone column configuration below the reinforced earth-wall.

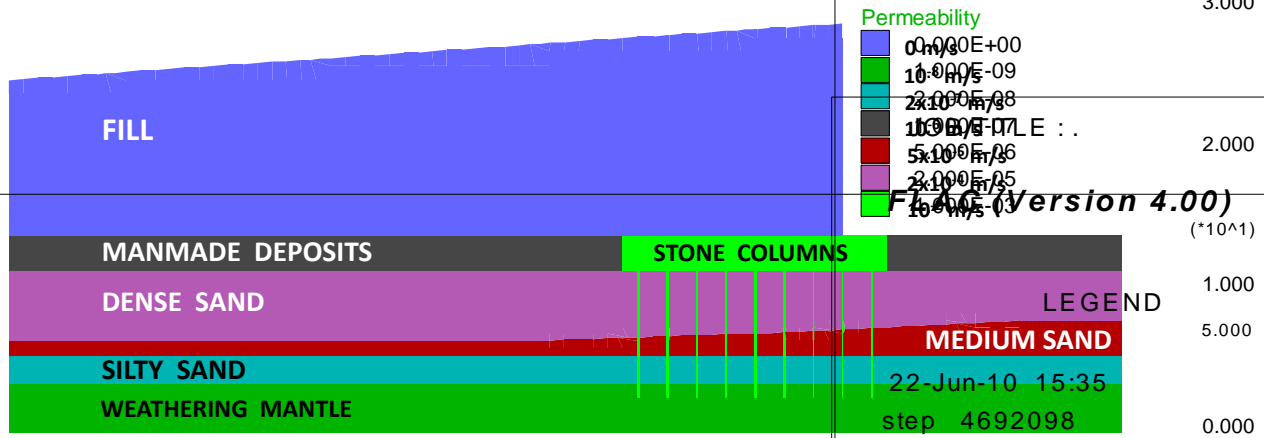
Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 2 κατηγορίες δυναμικών αριθμητικών αναλύσεων σε όρους ενεργών τάσεων:

- με χαλικοπασσάλους (Σχήμα 4)
- χωρίς χαλικοπασσάλους

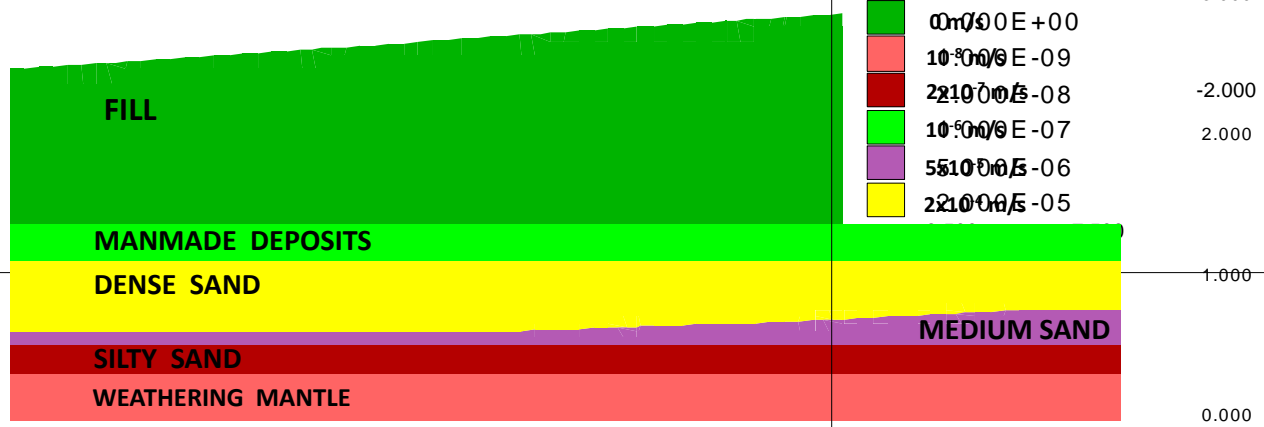
Συγκεκριμένα το Σχήμα 4 απεικονίζει το εδακικό προφίλ φαθώς και τα σημεία στα οποία καταγράφησαν οι χρονοϊστορίες των υδατικών υπερπίεσεων. Τα σημεία αυτά παραμένουν ίδια και για την ανάλυση χωρίς χαλικοπασσάλους. Τα Σχήματα 5 και 6 παρουσιάζουν τις διαπερατότητες των εδακικών υλικών που δόθηκαν στα αριθμητικά προσομοιώματα με και χωρίς χαλικοπασσάλους αντίστοιχα. Η επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση στη βάση των προσομοιωμάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 7 και είναι κοινή και για τις δύο κατηγορίες αναλύσεων.



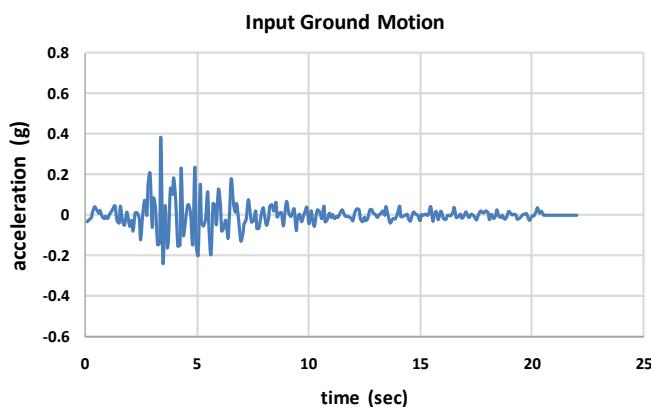
Σχήμα 4. Σκαριφηματική απεικόνιση του εδακικού προφίλ με χαλικοπασσάλους και αναφορά των σημείων καταγραφής υπερπίεσεων πόρων.
Figure 4. Sketch of the soil profile with stone columns and illustration of the points of recording of excess pore pressures.



Σχήμα 5. Απεικόνιση των διαπερατοτήτων των εδακικών υλικών του αριθμητικού προσομοιώματος με χαλικοπασσάλους.
 Figure 5. Illustration of the permeabilities of the soils of the numerical model with stone columns.



Σχήμα 6. Απεικόνιση των διαπερατοτήτων των εδακικών υλικών του αριθμητικού προσομοιώματος χωρίς χαλικοπασσάλους.
 Figure 6. Illustration of the permeabilities of the soils of the numerical model without stone columns.



Σχήμα 7. Η επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση στη βάση των αριθμητικών προσομοιωμάτων.
 Figure 7. Input ground motion at the base of the numerical models.

3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ

Ο τρόπος με τον οποίο τείνει να παραμορφωθεί το σύστημα τοίχου ωπλισμένης γης - εδάφους είναι παρόμοιος και στις δύο περιπτώσεις (με και χωρίς χαλικοπασσάλους). Ωστόσο, το μέγεθος των μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση απουσίας των χαλικοπασσάλων (Σχήμα 8). Συγκεκριμένα, η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση στην κορυφή του τοίχου είναι 23cm για την περίπτωση ύπαρξης χαλικοπασσάλων και 37cm για την περίπτωση απουσίας αυτών (Σχήμα 9).

Είναι εμφανές ότι τόσο η πυκνή όσο και η μέσης πυκνότητας άμμος εκδηλώνουν παρόμοια συμπεριφορά και στις δύο περιπτώσεις. Οι υδατικές υπερπίεσεις

αποτονώνονται με τον ίδιο ρυθμό μέσα σιεν κρίσιμη ζώνη (κάτω από τον τοίχο ωπλισμένης γης) εξαιτίας της ροής του νερού προς τα κατάντη της επίχωσης η οποία λαμβάνη χώραν λόγω της μεγάλης διαφοράς υπερπιέσεων, και είναι ανεξάρτητη από την παρουσία ή μη χαλικοπασσάλων (Σχήματα 10 και 11). Η ροή προς τα κατάντη της αντιστήριξης (Σχήμα 12) προκαλείται λόγω της διαφοράς του υπερκειμένου φορτίου μεταξύ του εδάφους κάτω από το επίχωμα και του κατάντη εδάφους στο ελεύθερο πεδίο. Συνεπώς οι υπερπιέσεις πόρων κάτω από τον τοίχο είναι σημανικά μεγαλύτερες από αυτές που αναπτύσσονται στο ελεύθερο πεδίο. Η διαφορά αυτή που είναι πολύ έντονη στο σύνορο του τοίχου προκαλεί την προαναφερθείσα διεύθυνση της ροής προς τον πόδα του τοίχου.

Η απόκριση της αμμοιλύος, μακριά από την κρίσιμη ζώνη, παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά σε όρους ανάπτυξης υδατικών υπερπιέσεων και στις δύο εξετασθείτες περιπτώσεις. Ωστόσο, ο ρυθμός αποτόνωσης είναι ταχύτερος παρουσία χαλικοπασσάλων (Σχήματα 13 και 14). Είναι προφανής ο ευεργετικός ρόλος των χαλικοπασσάλων στην ταχύτερη στράγγιση του συστήματος. Επιπλέον, η αυξημένη δυσκαμψία μειώνει σημανικά τις μετατοπίσεις της αντιστήριξης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ύπαρξη μαλακών και ρευστοποιήσιμων εδακικών στρώσεων καθώς και το μεγάλο ύψος της αντιστήριξης σε γειτονία με το κτίριο της Βιβλιοθήκης καθιστούν αναγκαία την βελτίωση του εδάφους θεμελιώθεις. Οι χαλικοπάσσαλοι αναδεικνύονται ως η πιθανότερη λύση με στόχο την αύξηση της δυσκαμψίας/αντοχής του εδάφους θεμελιώθεις και την επιτάχυνση της αποτόνωσης των σεισμικών υδατικών υπερπιέσεων. Ο στόχος της παρούσης μελέτης είναι η αριθμητική διερεύνηση της αποδοτικότητας μίας συγκεκριμένης διάταξης χαλικοπασσάλων.

Για τον στόχο αυτόν πραγματοποιήθηκαν διδιάστατες δυναμικές αναλύσεις του συστήματος αντιστήριξης-εδάφους *μέ* και *χωρίς* χαλικοπασσάλους. Το κυριότερο συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι εξαιτίας της σχετικάς υψηλής διαπερατότητας των αμμοδών στρωμάτων η αποτόνωση των υδατικών υπερπιέσεων κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης είναι σημαντική. Η παρουσία χαλικοπασσάλων στην θεμελιώθη ωπλισμένης γης επιταχύνει ακόμα περισσότερο το ρυθμό αποτόνωσης ενώ ταυτόχρονα οδηγεί και σε σημαντική βελτίωση της απόκρισης της αντιστήριξης.

4.00)

ND

0E+01

017E+01

690E+01

distortion

00E+00

E-01

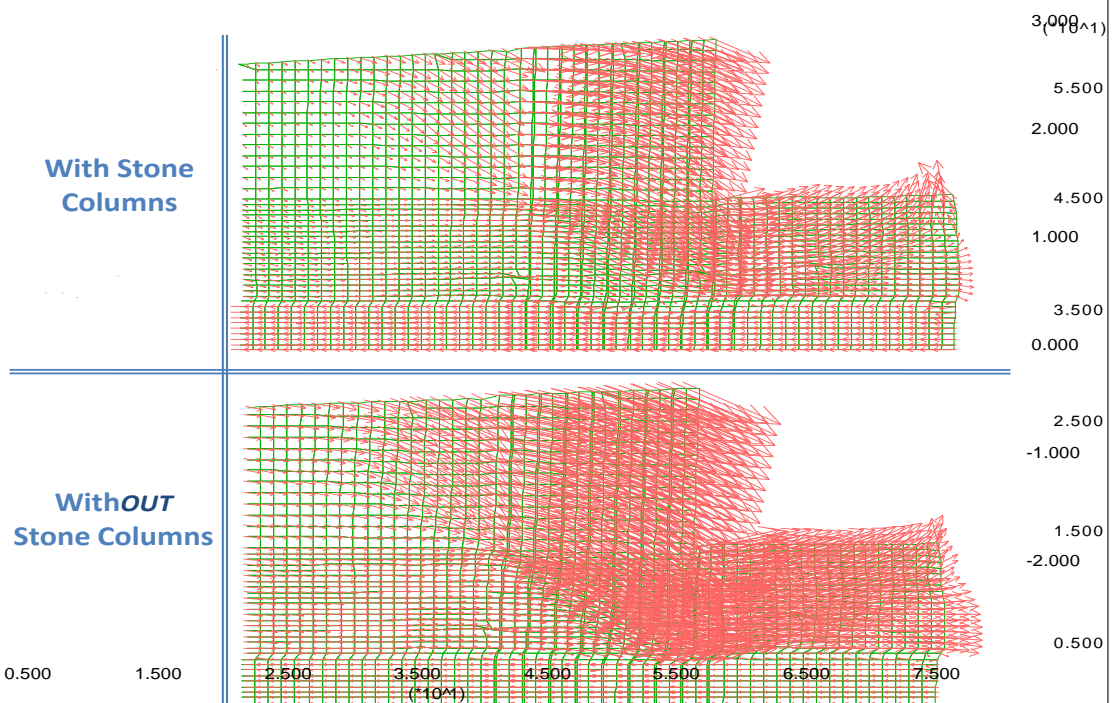
s

5E-01

2E 0

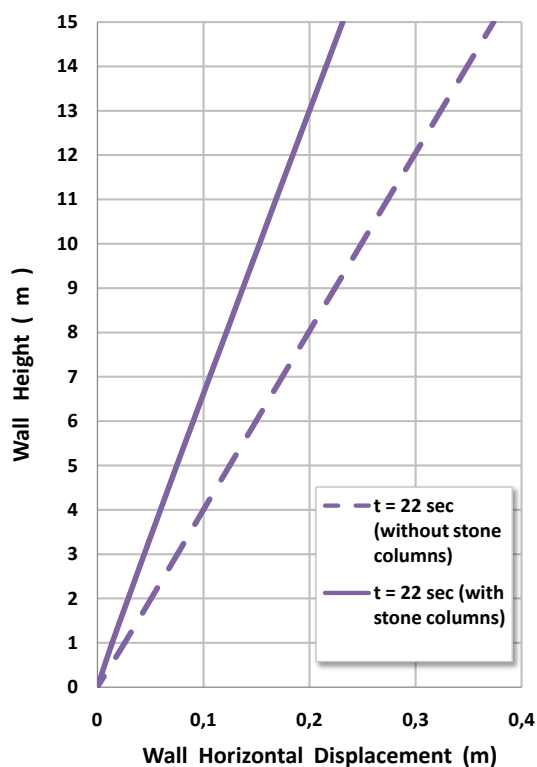
oup, Inc.

ota USA



Σχήμα 8. Διανύσματα μετατοπίσεων αμέσως μετά το πέρας της σεισμικής διέγερσης για τις περιπτώσεις *μέ* και *χωρίς* χαλικοπασσάλους.

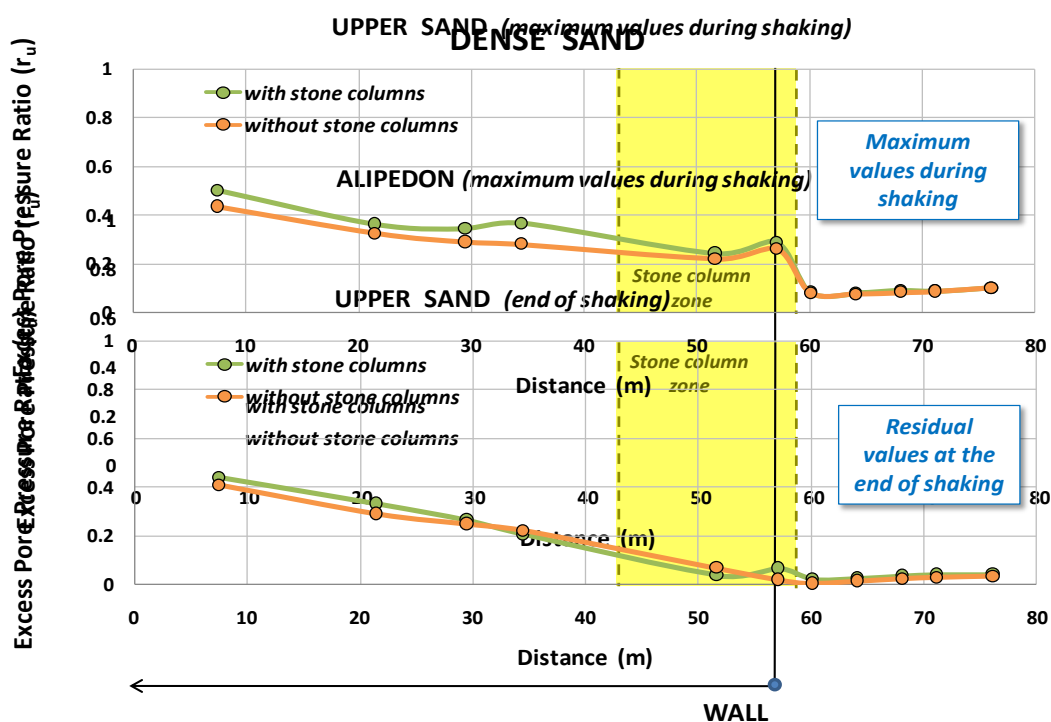
Figure 8. Displacement vectors at the end of shaking *with* and *without* stone columns.



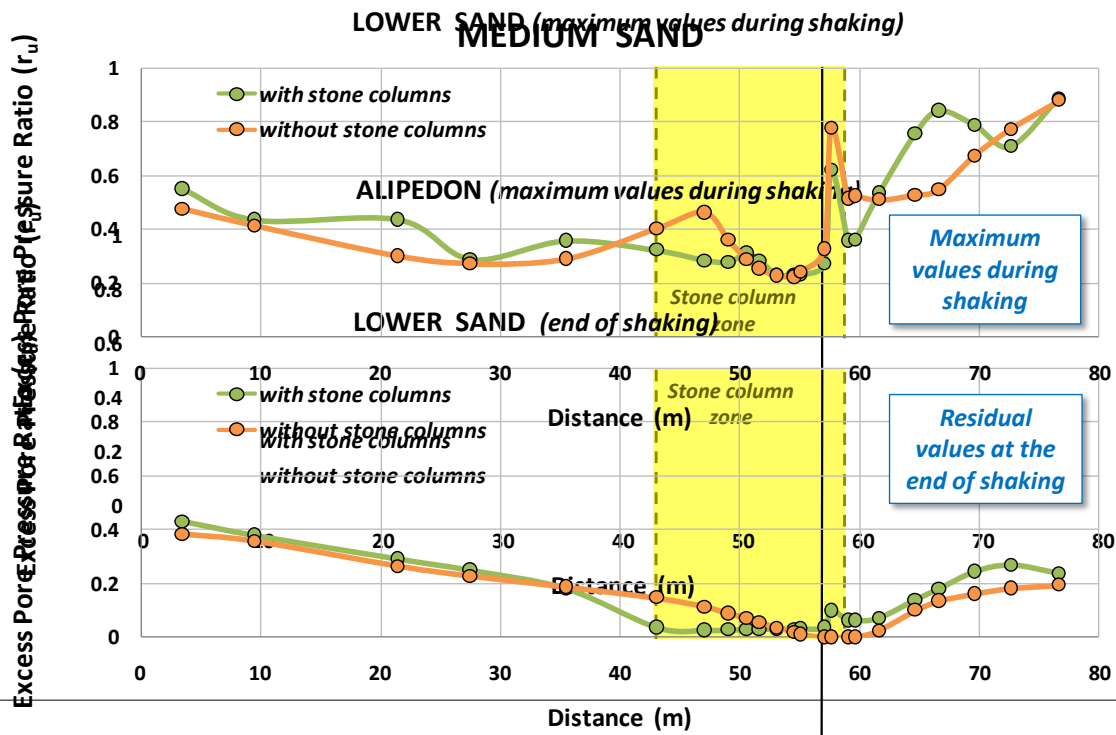
Σχήμα 9. Κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων της αντιστήριξης στο τέλος του σεισμού με και χωρίς χαλικοπασσάλους.
Figure 9. Distribution of horizontal displacements of the wall at the end of shaking with and without stone columns.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 113, Paper No. 2346, 718-742.
- Byrne, P. M. (1991), "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand", in Proceeding: Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics (St. Louis, Missouri, March 1991), Paper No.1.24, 47-55.
- Indraratna, B. and Redana, I. W. (1997), "Plane-strain modeling of smear effects associated with vertical drains", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(5), pp. 474-478.
- Martin, G. R., W. D. L. Finn and H. B. Seed (1975), "Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading", J. Geotech., Div. ASCE, 101(GT5), 423-438.
- Tan, S. A., Tjahon, S. and Oo, K. K. (2008) "Simplified Plane-Strain Modeling of Stone-Column Reinforced Ground", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, February 2008, pp. 185-194.



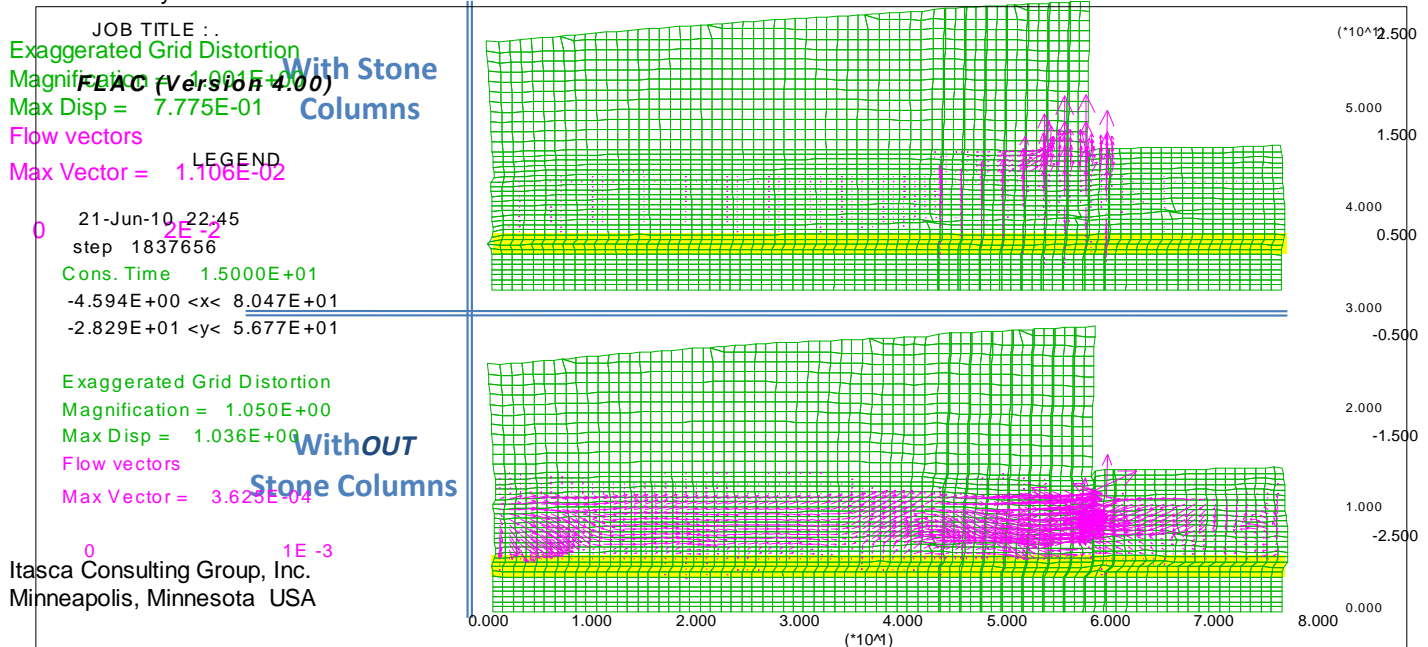
Σχήμα 10. Κατανομή των μέγιστων και παραμείνοντων λόγων υπερπίεσεως κατά μήκος του στρώματος πυκνής άμμου (Σχήμα 4) με και χωρίς χαλικοπασσάλους.
Figure 10. Distribution of maximum and residual excess pore pressure ratios along the dense sand layer (Figure 4) with and without stone columns.



JOB TITLE : (*10^1)
FLAC (Version 4.00) 5.500

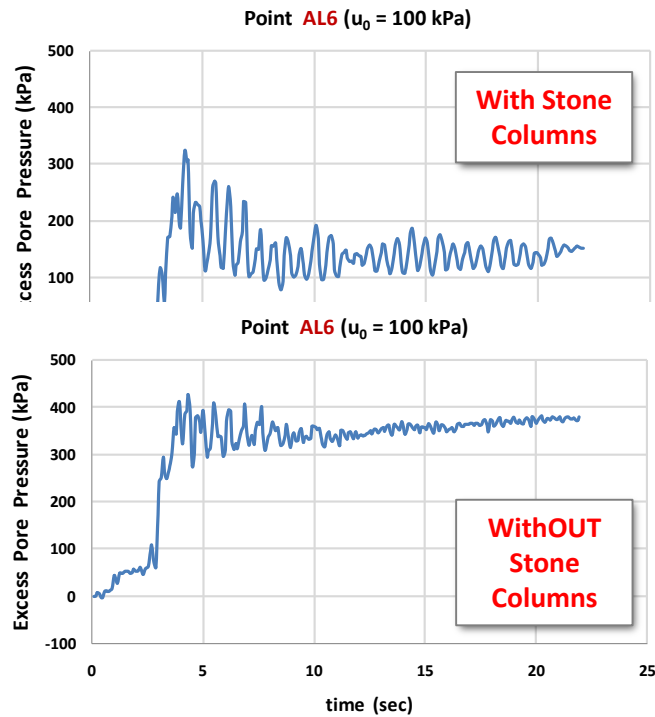
Σχήμα 11. Κατανομή των μέγιστων και παραμείνοντων λόγων υπερπίεσεως κατά μήκος του στρώματος μέσης πυκνότητας άμμου (Σχήμα 4) με και χωρίς χαλικοπασσάλους.

Figure 11. Distribution of maximum and residual excess pore pressure ratios along the medium sand layer (Figure 4) with and without stone columns.
 19-Jun-10 12:22:45 step 2666289
 Cons. Time 2.2000E+01 3.500
 -7.185E+00 <x< 8.332E+01
 -3.075E+01 <y< 5.975E+01

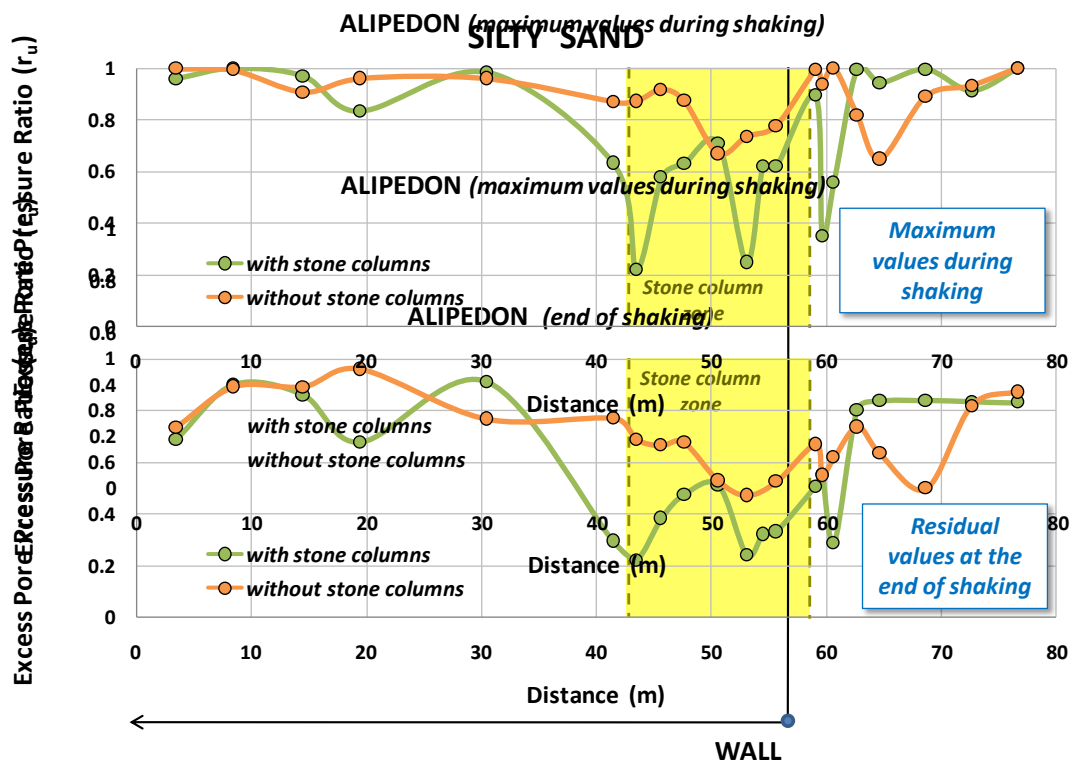


Σχήμα 12. Διανύσματα ροής του νερού των πόρων κατά την διάρκεια του σεισμού με (πάνω) και χωρίς (κάτω) χαλικοπασσάλους. Το στρώμα της αμμοίλου έχει σκιαγραφηθεί με κίτρινο χρώμα.

Figure 12. Flow vectors during shaking with (above) and without (below) stone columns. The silty sand layer has been colored yellow.
 21-Jun-10 22:45 step 1837656
 Cons. Time 1.5000E+01
 -4.594E+00 <x< 8.047E+01
 -2.829E+01 <y< 5.677E+01
 Exaggerated Grid Distortion Magnification = 1.050E+00
 Max Disp = 1.036E+00
 Flow vectors
 Max Vector = 3.623E-04
 Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minnesota USA
 (*10^1)
 0.500 1.500 2.500 3.500 4.500 5.500 6.500 7.500



Σχήμα 13. Χρονοϊστορίες υδατικών υπερπίεσεων σε επιλεγμένο σημείο μέσα στο στρώμα αμμοιίλους (Σχήμα 4) με χαλικοπασσάλους (πάνω) και χωρίς χαλικοπασσάλους (κάτω).
 Figure 13. Time histories of excess pore-water pressures at a selected point within the silty sand layer (Figure 4) *with* stone columns (above) and *without* stone columns (below).



Σχήμα 14. Κατανομή των μέγιστων και παραμεινοντων λόγων υπερπίεσεως κατά μήκος του στρώματος αμμοιίλους (Σχήμα 4) με και χωρίς χαλικοπασσάλους.
 Figure 14. Distribution of maximum and residual excess pore pressure ratios along the silty sand layer (Figure 4) *with* and *without* stone columns.