

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

$\Delta.\Pi.M.\Sigma.$

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Συντονίζουσα Σχολή : Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών (ΜΜΜ) Συμμετέχουσα Σχολή : Πολιτικών Μηχανικών (ΠΜ)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΜΙΛΤΙΑΔΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού ΑΠΘ (2011)

Επιβλέπουσα: Β.Ν.ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Ν.ΓΕΡΟΛΥΜΟΣ Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2014

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

 $\Delta.\Pi.M.\Sigma.$



ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Συντονίζουσα Σχολή : **Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών (ΜΜΜ)** Συμμετέχουσα Σχολή : **Πολιτικών Μηχανικών (ΠΜ)**

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΜΙΛΤΙΑΔΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού ΑΠΘ (2011)

Επιβλέπουσα: Β.Ν.ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Ν.ΓΕΡΟΛΥΜΟΣ Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26/08/2014

.....

Β.Ν.ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ Ν.ΓΕΡΟΛΥΜΟΣ Γ.ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2014

•••••

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΜΙΛΤΙΑΔΗΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κάτοχος

© 2014 - Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος - All rights reserved

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με συμμετέχουσες σχολές τη σχολή Πολιτικών Μηχανικών και τη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών.

Η ευρεία επέκταση της χρήσης οπλισμένης γης βασίζεται στα συγκριτικά τεχνικά και οικονομικά οφέλη που προσφέρει έναντι των άλλων κάθε φορά εναλλακτικών λύσεων. Τα οπλισμένα επιχώματα αποτέλεσαν αντικείμενο επιστημονικού ενδιαφέροντος τόσο του συγγραφέα όσο και της επιβλέπουσας καθηγήτριας Δρ.Β.Γρωργιάννου. Έτσι, επιχειρήθηκε μια προσπάθεια συνολικής διερεύνησης αυτής της εφαρμογής της γεωτεχνικής μηχανικής με ιδιαίτερη εστίαση στη σεισμική τους απόκριση, έχοντας υπόψη ότι λίγες εργασίες παραμετρικής ανάλυσης οπλισμένων επιχωμάτων υπό σεισμική φόρτιση με πεπερασμένα στοιχεία έχουν γίνει διεθνώς λόγω του σημαντικού υπολογιστικού κόστους τους.

Σε αυτό το σημείο θέλω να εκφράσω την μεγάλη μου ευγνωμοσύνη στην Δρ.Β.Ν.Γεωργιάννου που άμεσα ανταποκρίθηκε στο αίτημα μου για συνεργασία σε επίπεδο μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, βοηθώντας με ουσιαστικά σε όλα τα στάδια της. Επίσης, πρέπει να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον Δρ.Ν.Γερόλυμο που δέχθηκε να γίνει συνεπιβλέπων καθηγητής της παρούσας διπλωματικής εργασίας και οι συμβουλές του ήταν ζωτικής σημασίας για την περάτωση της.

Τέλος, τις εγκάρδιες ευχαριστίες προς τον Δρ.Δ.Ραπτάκη, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ, για τη συνολική του καθοδήγηση και συμπαράσταση σε όλα τα στάδια της φοιτητικής μου ζωής.

[vi]

Αύγουστος 1936. Αίγινα, οικία Φλώρου

Όσο προχωρεί ο καιρός και τα γεγονότα, ζω ολοένα με το εντονότατο συναίσθημα πως δεν είμαστε στην Ελλάδα, πως αυτό το κατασκεύασμα που τόσο σπουδαίοι και ποικίλοι απεικονίζουν καθημερινά δεν είναι ο τόπος μας αλλά ένας εφιάλτης με ελάχιστα φωτεινά διαλείμματα, γεμάτα μια πολύ βαριά νοσταλγία. Να νοσταλγείς τον τόπο σου, ζώντας στον τόπο σου, τίποτα δεν είναι πιο πικρό. Ωστόσο νομίζω πως αυτό το συναίσθημα, συνειδητό ή όχι — αδιάφορο, χαραχτηρίζει όσους από τους ανθρώπους μας των εκατό τόσων τελευταίων χρόνων αξίζει να τους λογαριάσει κανείς. Οι μεγάλοι κολυμπητάδες, που αγωνίστηκαν, όσο κρατούσαν τα μπράτσα τους, να φτάσουν και να ιδούνε από πιο κοντά αυτό το σκληρό νησί του Αιόλου, την άλλη Ελλάδα.

[πηγή: Γιώργος Σεφέρης, Μέρες Γ΄. 16 Απρίλη 1934 - 14 Δεκέμβρη 1940, Ίκαρος, Αθήνα 1984, σ. 33]

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των οπλισμένων επιχωμάτων υπό στατικές και δυναμικές συνθήκες φόρτισης και η ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς των στοιχείων όπλισης ανά περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, εξετάσθηκαν όλες οι παράμετροι που αφορούν την επίδραση των στοιχείων όπλισης (γεωπλέγματα στην προκειμένη περίπτωση) στη στατική και σεισμική συμπεριφορά των τεχνητών πρανών που μελετήθηκαν. Οι παράμετροι αυτές ήταν η δυστένεια των γεωπλεγμάτων εκφρασμένη ως Ε·Α (KN/m), το μήκος τους (L: Length) και η κατακόρυφη μεταξύ τους απόσταση(S: Spacing). Όλες οι προσπάθειες επικεντρώθηκαν στην ανάδειξη κάθε φορά των πιο κρίσιμων παραπάνω παραμέτρων στη συνολική απόκριση του εκάστοτε γεωτεχνικού έργου και η πρόταση της βέλτιστης λύση από οικονομική και τεχνική σκοπιά.

Για την εκπόνηση της εργασίας πραγματοποιηθήκαν αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο υπολογιστικό περιβάλλον του PLAXIS. Τα επιχώματα που μελετήθηκαν ήταν δύο στον αριθμό και φορτίστηκαν στατικά και σεισμικά.

Αναλυτικότερα, κατά τις στατικές αναλύσεις διερευνήθηκε η επίδραση των διαφόρων τρόπων όπλισης του εδάφους στον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς. Κατά τις δυναμικές αναλύσεις μελετήθηκε κύρια η συνεισφορά των διαφόρων τρόπων όπλισης του εδάφους στις προκύπτουσες μετατοπίσεις και με αυτό τον τρόπο η συνολική βελτίωση της σεισμικής απόκρισης των επιχωμάτων.

Τέλος, έχοντας πλήθος αποτελεσμάτων από τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα ως προς τα χαρακτηριστικά των γεωπλεγμάτων που είναι μεγάλης ή ήσσονος σημασίας στη στατική και σεισμική ευστάθεια των επιχωμάτων.

Λέξεις - κλειδιά: οπλισμένο επίχωμα, γεωπλέγματα, PLAXIS, FEM, συντελεστής ασφαλείας, σεισμική απόκριση

[viii]

Abstract

The present work aims to find out and quantify the impact of the various characteristics of geogrids on the behavior of two specific embankment under both static and dynamic loading. As regards the geogrids' parameters that have been studied, those were their axial stiffness, expressed as $E \cdot A$ (KN/m), as well as their length (L) and their vertical spacing (s). In any case, all the work done focused on the understanding of the most critical geogrids' characteristics and the conclusions concerning the the optimal solution on the reinforcement scheme.

For the analyses the Plaxis software was employed, which is based on the Finite Element Method (FEM).

More specifically, for the static loading conditions the influence of the various reinforcement schemes on the embankment's Factor of Safety (FS) was examined, while for the various seismic analyses the parametric study focused mainly on the horizontal and vertical displacements.

Finally, after a remarkable number of parametric analyses the results show those geogrids' characteristics that are of great or low importance to the static and seismic stability respectively.

Keywords: reinforced embankment, geogrids, PLAXIS, FEM, safety factor, seismic response

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| Πρόλογος | vi |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Περίληψη | viii |
| Abstract | ix |
| 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1.1 Εισαγωγικό σημείωμα | 1 |
| 1.2 Βασικές έννοιες | 1 |
| 1.3 Ορισμός των Οπλισμένων επιχωμάτων | 2 |
| 1.4 Δομή της εργασίας | 3 |
| Η χρήση των γεωσυνθετικών υλικών για την όπλιση του εδάφους και οι διάφορες γεωτεχνικές εφαρμογές της | 5 |
| 2.1 Ιστορική Αναδρομή | 5 |
| 2.2 Είδη Οπλισμένου Εδάφους | 6 |
| 2.3 Γεωσυνθετικά Υλικά | 8 |
| 2.4 Χαρακτηριστικές εφαρμογές των γεωσυνθετικών υλικών σε έργα της γεωτεχνικής μηγανικής | |
| 2.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα | 14 |
| 3. Θεωρητικό υπόβαθρο | 16 |
| 3.1 Μηχανισμοί μεταφοράς φορτίων στην οπλισμένη γη | 16 |
| 3.2 Η έννοια της ανισότροπης συνοχής (Anisotropic Cohesion Concept) | 17 |
| 3.3 Η έννοια της βελτιωμένης συνοχής (Enhanced Cohesion Concept) | 17 |
| 3.4 Συμπεριφορά των τοίχων οπλισμένης γης | |
| 3.4.1 Κατανομή των κατακόρυφων και οριζόντιων τάσεων του εδάφους | 19 |
| 3.4.2 Οι δυνάμεις των οπλισμών | 20 |
| 3.4.3 Οριζόντιες μετατοπίσεις | 21 |
| 3.4.4 Τα στοιχεία πρόσοψης | 21 |
| 3.5 Ανάλυση Ευστάθειας Τοίχου οπλισμένης Γης | 23 |
| 3.5.1 Τρόποι αστοχίας (εξωτερική αστάθεια) | 24 |
| 3.5.2 Τρόποι αστοχίας (εσωτερική αστάθεια) | 25 |
| 3.6 Αριθμητική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία οπλισμένης γης | 25 |
| 3.6.1 Αριθμητικές αναλύσεις διαφόρων ερευνητών | 26 |
| 3.8 Κύριες ιδιότητες υλικών οπλισμένης γης | |
| 3.8.1 Ιδιότητες Εδάφους | 27 |

| 3.8.2 Ιδιότητες Διεπιφανειών | 27 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.9 Καταγεγραμμένη Σεισμική απόκριση Τοίχων και Πρανών Οπλισμένης | 29 |
| γης | 29 |
| 3.10 Ιδιαίτερη αναφορά στην εργασία 'Σεισμική Συμπεριφορά Τοίχων Ωπλισμένης Γης στην Νέα Δονητική Τράπεζα του Ε.Μ.Π.' | 30 |
| 4. Μελέτη της συμπεριφοράς των οπλισμένων υπό στατικές συνθήκες φόρτισης | 36 |
| 4.1 Εισαγωγή | 36 |
| 4.2 Επίχωμα μελέτης Α | 36 |
| 4.2.1 Ορισμός Επιχώματος Α | 36 |
| 4.2.2 Αποτελέσματα | 37 |
| 4.3 Επίχωμα μελέτης Β | 45 |
| 4.3.1 Ορισμός Επιχώματος Β | 45 |
| 4.3.2 Αποτελέσματα | 46 |
| 5. Μελέτη της σεισμικής απόκρισης των οπλισμένων επιχωμάτων (Δυναμικές συνθήκες φόρτισης) | 54 |
| 5.1 Εισαγωγικό σημείωμα | 54 |
| 5.2 Επιταχυνσιογραφήματα σεισμικής φόρτισης των οπλισμένων επιχωμάτων | 54 |
| 5.3 Απόσβεση | 57 |
| 5.3.1 Ιξωδοπλαστική απόσβεση γεωυλικών | 57 |
| 5.3.2 Απορροφητικά όρια και πεπλάτυνση της γεωμετρίας | 59 |
| 5.4 Ορισμός των συντελεστών Βελτίωσης της Σεισμικής Απόκρισης των Οπλισμένων Επιχωμάτων, ISR | 59 |
| 5.5 Παραμετρική μελέτη της σεισμικής απόκρισης του επιχώματος Α | 60 |
| 5.5.1 Προσομοίωση | 60 |
| 5.5.2 Αποτελέσματα | 61 |
| 5.5.2.1 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό της Καλαμάτας61 | |
| 5.5.2.1.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων61 | |
| 5.5.2.1.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης66 | |
| 5.5.2.1.3 Αποτελέσματα της σεισμική φόρτισης του επιχώματος Α υπό τη διέγερση της Καλαμάτας στο προγραμματιστικό περιβάλλον του PLAXIS | |
| 5.5.2.2.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων | |
| 5.5.2.2.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης | |
| 5.6 Παραμετρική μελέτη της σεισμικής απόκρισης του επιχώματος Β | 84 |
| 5.6.1 Προσομοίωση | 84 |
| 5.6.2.1 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό της Καλαμάτας | |
| 5.6.2.1.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων | |
| 5.6.2.1.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης | |

| 5.6.2.2 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό του El-Centro | 4 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 5.6.2.2.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων | 4 |
| 5.6.2.2.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης9 | 8 |
| 5.6.2.3 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό του Kobe (JMA)10 | 2 |
| 5.6.2.3.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων | 2 |
| 5.6.2.3.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης10 | 6 |
| 5.6.2.3.3 Αποτελέσματα της σεισμική φόρτισης του επιχώματος Β υπό τη διέγερσι του JMA στο προγραμματιστικό περιβάλλον του PLAXIS | 1 0 |
| 6. Συμπεράσματα – Προτάσεις | 125 |
| 6.1 Συμπεράσματα | 125 |
| 6.2 Προτάσεις | 127 |
| Βιβλιογραφία | 128 |

Κατάλογος Εικόνων

| Εικόνα 1. Σχηματικά παραδείγματα οπλισμένων επιχωμάτων. (Νάσκος, 2007) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Εικονα 2. Διαγραμματική απεικονισή της σχέσης μετάξυ έφελκυστικής τάσης και |
| (1987) |
| Εικόνα 3. Διάφοροι τύποι γεωϋφασμάτων (πηγή: Wikipedia)10 |
| Εικόνα 4. Διάφοροι τύποι γεωπλεγμάτων (πηγή: Wikipedia) |
| Εικόνα 5. Τυπικές εφαρμογές γεωπλεγμάτων στο πεδίο των γεωτεχνικής μηχανικής. (πηγή: agriculture solutions) |
| Εικόνα 6. Συνδυασμός οπλισμένης γης με συρματοκιβώτια πληρωμένα με λιθοσύντριμμα |
| Εικόνα 7 Συνδυασμός γεωπλεγμάτων με στοιχεία πρόσοψης προκατασκευασμένες πλάκες |
| σκυροδεματος (Πηγη: Snapedge)13 Εικόνα 8. Δύσκαμπτες επενδύσεις (stiff papels) τοίνων οπλισμένης νης (Πηγή: Οδοτεγγική) |
| 13 |
| Εικόνα 9. Οπλισμένα επιχώματα στην Εγνατία οδό στο ύψος του Μετσόβου (Πηγή: Γεωγνώση) |
| Εικόνα 10. Μηχανισμοί μεταφοράς φορτίων μεταξύ του οπλισμού και των γαιών (πηγή: Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεξη) |
| Εικόνα 11. Στο αριστερό σγήμα αποτυπώνονται τριαξονικές δοκιμές σε οπλισμένα και άοπλα |
| εδαφικά δείγματα, ενώ στο δεξιό σχήμα γίνεται αντιληπτή η διάκριση των εννοιών της |
| βελτιωμένης (Enhanced Cohesion Concept) και ανισότροπης συνοχής (Anisotropic Cohesion |
| Concept) |
| Εικόνα 12. Κατακόρυφη και οριζόντια κατανομή εδαφικών τάσεων στην πρόσοψη (αριστερό |
| σχήμα) και όπισθεν του οπλισμένου εδάφους (δεξιό σχήμα), όπως προέκυψαν από |
| αριθμητικές αναλύσεις |
| Εικόνα 13. Κατανομή της εφελκυστικής δύναμης φόρτισης κατά μήκος των στοιχείων |
| όπλισης ανά θέση |
| Εικόνα 14. Τυπικά στοιχεία πρόσοψης οπλισμένων γεωκατασκευών (Jones, 1994)22 |
| Εικόνα 15. Δυνητικοί τρόποι αστοχίας οπλισμένων γεωκατασκευών λόγω εξωτερικής |
| αστάθειας (πηγή: Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεξη) |
| Εικόνα 16. Δυνητικοί τρόποι αστοχίας οπλισμένων γεωκατασκευών λόγω εσωτερικής |
| αστάθειας (πηγή: Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεξη)25 |
| Εικόνα 17. Ενδεικτικές τιμές για τον μειωτικό συντελεστή των ιδιότητων της διεπιφάνειας |
| (λόγω αλληλεπίδρασης) μεταξύ διαφόρων υλικών (πηγή: Waterman, PLAXIS)28 |
| Εικόνα 18. Προσομοίωμα διεπιφάνειας ολίσθησης κατά Goodman et al |
| Εικόνα 19. Φωτογραφική σύγκριση του εργαστηριακού προσομοιώματος (a)πριν, και (b) |
| μετά το πέρας του πειράματος |
| Εικόνα 20. Οι χρονοιστορίες των μετακινήσεων όπως καταγράφηκαν α) εύκαμπτος τοίχος β) |
| δύσκαμπτος τοίχος |
| Εικόνα 21. Συνολική απεικόνιση των γεωλογικών-γεωτεχνικών συνοριακών συνθηκών, όπως |
| και της γεωμετρίας του επιχώματος Α |
| Εικόνα 22. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m ² για μήκος |
| γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια ΕΑ=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των |
| γεωπλεγμάτων S=1m |
| Εικόνα 23. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m ² για μήκος |
| γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια ΕΑ=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των |
| γεωπλεγμάτων S=2m |
| Εικόνα 24. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m ² για μήκος |

| γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια ΕΑ=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| γ εωπλεγμάτων S=1m |
| Εικόνα 25. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m ² για μήκος |
| γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των |
| γεωπλεγμάτων S=2m |
| Εικόνα 26. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m² για μήκος |
| γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια ΕΑ=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των |
| γεωπλεγμάτων S=1m |
| Εικόνα 27. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m ² για μήκος |
| γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των |
| γεωπλεγμάτων S=2m |
| Εικόνα 28. Συνολική απεικόνιση των γεωλογικών-γεωτεχνικών συνοριακών συνθηκών, όπως |
| και της γεωμετρίας του επιχώματος Β45 |
| Εικόνα 29. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο q=30KN/m ² για άοπλο επίχωμα 50 |
| Εικόνα 30. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο q=30KN/m ² για μήκος γεωπλεγμάτων |
| L=0.5h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων |
| S=1m51 |
| Εικόνα 31. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο q=30KN/m ² για μήκος γεωπλεγμάτων |
| L=0.5h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων |
| S=0.5m |
| Εικόνα 32. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο q=30KN/m ² για μήκος γεωπλεγμάτων |
| L=1.0h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων |
| S=1m |
| Εικόνα 33 Αυνητική επιφάνεια αστογίας υπό φορτίο α=30KN/m ² για μήκος γεωπλεγμάτων |
| L=1.0h. δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των νεωπλενμάτων |
| S=0.5m |
| Ξεικόνα 34 Δυνητική επιφάνεια αστογίας υπό φορτίο α=30KN/m ² νια μήκος γεωπλεγιμάτων |
| L=1.5h δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόουωη απόσταση μεταξύ των νεωπλεγμάτων |
| S=1m |
| Εικόνα 35. Δυνητική επιφάνεια αστογίας υπό φορτίο α=30KN/m ² νια μήκος γεωπλεγιμάτων |
| I = 1.5h δυστένειας $FA = 1000 K N/m$ και κατακόρυση απόσταση μεταξύ των νεωπλεγμάτων |
| S=0.5m |
| S=0.5 III Εικόνα 36. Επιτανανιστονοάζαρτμα (με μονάδα επιτάνανιστης cm/s ²), όπως εισήνθη στο PI ΔXIS |
| Encover 50. Extra χ_0 voto γ_0 approximation χ_0 and χ_0 |
| $F_{\rm Lic}$ μαι αντιστοιχεί στο σεισμο της Καλαματάς |
| EKOVU 57. Exituziovoloj puoli puolu (μ e μ ovuou exituziovolic cin/s), okuc etolizoi oto FLAAIS, |
| Kui uvitotoizei oto oetopo too El-Centro |
| Εικονά 38. Επιτάχυνσιογραφημά (με μονάδα επιτάχυνσης cm/s), όπως εισηχθή στο PLAXIS |
| και αντιστοιχει, στο σεισμο του Kobe(JMA) |
| Εικονα 39. Προτεινομενη αποσβεση κατα Rayleigh για τα εδαφικα υλικα. |
| Εικονα 40. Προτεινομενή αποσβεσή κατα Rayleigh για τη συμπαγή βραχομαζα |
| Εικονα 41. Ιροπος προσομοιωσης του επιχωματος Α κατά τη δυναμική του αναλυση |
| Εικονα 42. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του |
| σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και |
| κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά |
| όπλιση) |
| Εικόνα 43. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του |
| σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια ΕΑ=1000KN/m και |
| κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά |
| όπλιση) |

Εικόνα 44. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά όπλιση)......71 Εικόνα 45. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά όπλιση).......72 Εικόνα 46. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας,, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=10000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικά όπλιση)......72 Εικόνα 47. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας., με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=10000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικά όπλιση)......73 Εικόνα 48. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=10000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη Εικόνα 49. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=10000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικά όπλιση)......74 Εικόνα 50. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=100KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2.0m (γείριστη όπλιση)......74 Εικόνα 51.Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=100KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2.0m (χείριστη όπλιση)......75 Εικόνα 52. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίγωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=100KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2.0m (χείριστη Εικόνα 53. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=100KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2.0m (γείριστη όπλιση)......76 Εικόνα 54. Τρόπος προσομοίωσης του μελετώμενου επιγώματος Β κατά τη δυναμική του Εικόνα 55. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, Εικόνα 56. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, χωρίς Εικόνα 57.Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα B, υπό τη Εικόνα 58. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, χωρίς στοιχεία Εικόνα 59. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ

Εικόνα 60. Διανύσματα μετατόπισης για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ Εικόνα 61.Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και Εικόνα 62. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των Εικόνα 63. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ Εικόνα 64. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ Εικόνα 65. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m..... Εικόνα 66. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των Εικόνα 67. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ Εικόνα 68. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ Εικόνα 69. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και Εικόνα 70. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των Εικόνα 71. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m. Εικόνα 72. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m. Εικόνα 73. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και Εικόνα 75. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ Εικόνα 74. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m..... Εικόνα 76. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ Εικόνα 77 Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταζύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m..... Εικόνα 78. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των Εικόνα 79. Παραμορφωμένος κάνναβος για τη σεισμική διέγερση JMA για το επίγωμα Β με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ Εικόνα 80. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m. Εικόνα 81. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και Εικόνα 82. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίγωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των

Κατάλογος Πινάκων

| Πίνακας 1. Λειτουργίες κάθε τύπου γεωσυνθετικού υλικού (πηγή: Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεξη) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Πίνακας 2. Μηγανικά γαρακτηριστικά των υλικών του επιγώματος Α |
| Πίνακας 3. Πινακοποιημένη παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του |
| επιγώματος Α (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης 37 |
| Πίνακας 4. Πινακοποιημένη παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του |
| επιγώματος Α με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου α= 20 KN/m ² για τους διάφορους |
| συνδυασμούς όπλισης |
| Πίνακας 5. Μηγανικά γαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού του επιγώματος Β |
| Πίνακας 6. Πινακοποιημένη παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του |
| επιχώματος Β (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης46 |
| Πίνακας 7. Πινακοποιημένη παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του |
| επιχωματός B με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φορτού $q = 50$ KN/m για τους διαφορούς |
| |
| Π(vakaς 8) $Π(zavika zapaktipiotika two oktow too επιχωματός Α$ |
| Πινακας 9. Γελικες ολικες (Τοιαι), οριζοντιες (Ποιτζοπιαι) και κατακοροφες (Vertical) |
| $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}$ |
| για τη οδιομική φορτισή του οδιομού της Καλαματάς |
| |
| α α α β α |
| $\nabla \varphi$ |
| $\mu_{cratorization}$ (1) replacements) and tone $\delta_{i\alpha}$ (nonzonital) kut kutukopoweg (ventical) |
| $r_{\rm restructure}$ (Displacements) for tool of $\alpha \phi $ |
| Π varianti Π |
| (10 m) μετατοπίσεις (Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος B |
| γ_{μ} |
| για τη σεισμική φυρτισή του σεισμου της καναματάς. |
| απόκοισης για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος Β και για τη σεισμική |
| (a) |
| φορτισή του οδιομού της παλαματάς |
| μετατοπίσεις (Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος B |
| γ_{10} th denotes (26) sphere intensity γ_{10} $\gamma_$ |
| για τη σεισμική φυρτιση του σεισμου του Ει σειπιο |
| απόκοιστις για τους διάφορους συνδυασμούς όπλιστις του επιγώματος Β και για τη σεισμική |
| ωάοτιση του σεισμού του El-Centro |
| Π (varge 16 Telikée olikée (Total) on (óvrise (Horizontal) kai karakónyose (Vertical) |
| μετατοπίσεις (Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος B |
| για τη σεισιμκή φόρτιση του σεισμού ΙΜΑ |
| Πίνακας 17 Πινακοποιημένη παροιοσίαση των συντελεστών βελτίωσης της σεισμικής |
| απόκρισης για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος Β και για τη σεισμική |
| φόρτιση του σεισμού JMA |
| |

Κατάλογος Διαγραμμάτων

```
Διάγραμμα 1. Διαγραμματική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του
επιχώματος Α (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης...... 38
Διάγραμμα 2. Λογαριθμική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος
Διάγραμμα 3. Διαγραμματική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του
επιγώματος Α με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 20 \text{ KN/m}^2 για τους διάφορους
Διάγραμμα 4. Λογαριθμική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος
Α με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 20 \text{ KN/m}^2 για τους διάφορους συνδυασμούς
Διάγραμμα 5. Διαγραμματική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του
επιχώματος Β (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης......47
Διάγραμμα 6. Λογαριθμική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος
Διάγραμμα 7. Διαγραμματική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του
επιχώματος B με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 30 \text{ KN/m}^2 για τους διάφορους
Διάγραμμα 8. Λογαριθμική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος
Β με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 30 \text{ KN/m}^2 για τους διάφορους συνδυασμούς
Διάγραμμα 9. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους
συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της
Διάγραμμα 10. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) σε λογαριθμική
οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη
σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.....62
Διάγραμμα 11. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους
διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της
Καλαμάτας......63
Διάγραμμα 12. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια
κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική
φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας......63
Διάγραμμα 13. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις(Horizontal Displacements) σε λογαριθμική
οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη
σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας......64
Διάγραμμα 14. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική
οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη
σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας......64
Διάγραμμα 15. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο
τη μείωση των τελικών ολικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του
Διάγραμμα 16. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο
τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης
Διάγραμμα 17. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο
τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς
```

| όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Διάγραμμα 19. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε οριζόντια λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας |
| Διάγραμμα 20. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε οριζόντια λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας |
| Διάγραμμα 21. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro. |
| Διάγραμμα 22. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| Διάγραμμα 23. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| Διάγραμμα 24. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική |
| Διάγραμμα 25. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη |
| Διάγραμμα 26. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη |
| σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού |
| του Ει-Centro |

λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του Διάγραμμα 33. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Διάγραμμα 34. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Διάγραμμα 35. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας Διάγραμμα 36. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική Διάγραμμα 37. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις(Horizontal Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος Β για τη Διάγραμμα 38. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη Διάγραμμα 40. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης Διάγραμμα 39. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των τελικών ολικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας..... Διάγραμμα 42. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας......91 Διάγραμμα 41. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των τελικών ολικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας Διάγραμμα 43. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του Διάγραμμα 44. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro. Διάγραμμα 45. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του Διάγραμμα 46. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του Διάγραμμα 47. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια

| κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| Διάγραμμα 48. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) σε λογαριθμική |
| οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη |
| σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro96 |
| Διάγραμμα 49. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική |
| οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος Β για τη |
| σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| Διάνραμμα 50. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο |
| τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του |
| επιγώματος Β και νια τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro |
| Δ ιάνοαμμα 51. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκοισης με κοιτήριο |
| τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης |
| του επιγώματος B και για τη σεισμική φόστιση του σεισμού του El-Centro |
| Διάνοαμμα 52 Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκοισης με κοιτήσιο |
| τη μείωση των κατακόουφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς |
| όπλισης του επινώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro 99 |
| Δ_1 avonu u 53 Meta Bolt $\dot{\tau}$ ou suvteles the Beltimer of the set of t |
| λογαριθιμκή κλίμακα με κοιτήριο τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων για τους |
| διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επινώματος Β και νια τη σεισμική φόρτιση του σεισμού |
| τ_{OD} Fl-Centro |
| Διάνοαμμα 54 Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκοισης σε |
| λογαριθιμκή κλίμακα με κοιτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων για τους |
| λόγαρισμική κλημακά με κριτηρίο τη μείωση των οριζοντίων τελικών μετατολισεών, για τους δ_{10} |
| τ_{00} Fl-Centro |
| Διάνοαμμα 55. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκοισης σε |
| λογαριθιμκή κλίμακα με κοιτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων για |
| τους διάφορους συνδυασμούς όπλησης του επινώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του |
| σεισμού του El-Centro |
| Διάνοαμμα 56. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους |
| Δ μεταγραμμα 50. Τεπικές όλικες μεταγολιστίς (Τοται Displacements) για τους όταφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού IMA 102 |
| Δ_1 άνοαμμα 57 Τελικές οδιζώντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) για τους |
| διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επινώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού |
| |
| Διάνοαμμα 58 Τελικές κατακόουωες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους |
| διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επινώματος Β για τη σεισιμκή φόρτιση του σεισιού |
| |
| Διάνοαμμα 59. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λοναοιθιμκή οσιζόντια |
| Δ ίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος B για τη σεισμική |
| $(\alpha \alpha \beta \alpha \beta \alpha \beta \beta$ |
| Δ_1 άνοαμμα 60. Τελικές οδιζόντιςς μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) σε λογαριθιική |
| οιζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος Β για τη |
| σεισμική φόρτιση του σεισμού ΙΜΔ |
| Δ_1 άνοαμμα 61. Τελικές κατακόρυμος μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθιμκή |
| $\Delta (\alpha) = \Delta (\alpha$ |
| |
| Διάνοαμμα 62 Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκοισης με κοιτήσιο |
| πιμείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του |
| $r_{\rm II}$ μείωση των σλικών τελικών μετατολισεών, για τους σιαφορούς συνουασμούς σλικισης του επιγώματος B και για τη σεισιμκή φόρτιση του σεισιμού του IMA |
| $c_{\rm m}$ |

| λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλησης του επιγώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιγώματος \mathbf{B} και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού |
| oradopood obvooronood on holy too chiland b kar far th ociopiki dop hol too ociopoo |
| του JMA |
| Διάγραμμα 64. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε |
| λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για |
| τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του |
| σεισμού του JMA107 |
| Διάγραμμα 65. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε |
| λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων, για τους |
| διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού |
| του JMA107 |
| Διάγραμμα 66. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε |
| λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους |
| διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού |
| του JMA |
| Διάγραμμα 67. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε |
| λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για |
| τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του |
| σεισμού του JMA |

Κατάλογος Συμβόλων

| φ: | γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|
| c: | συνοχή του εδάφους |
| ψ: | γωνία διασταλτικότητας |
| ν: | λόγος Poisson |
| E: | μέτρο ελαστικότητας |
| γ_{sat} : | ειδικό βάρος του κορεσμένου εδαφικού υλικού |
| γ_{unsat} : | ειδικό βάρος του ακόρεστου εδαφικού υλικού |
| H : | ύψος επιχώματος |
| L : | μήκος γεωπλέγματος |
| FS : | συντελεστής ασφαλείας |
| q : | εξωτερικό γραμμικό φορτίο |
| R : | μειωτικός συντελεστής αλληλεπίδρασης στοιχείου διεπιφάνειας |
| EA: | αξονική δυσκαμψία (δυστένεια) γεωπλέγματος |
| f: | συχνότητα σεισμική διέγερσης |
| ζ: | ποσοστό απόσβεσης |
| [C] : | Μητρώο Απόσβεσης |
| [M] : | Μητρώο Μάζας |
| [K] : | Μητρώο Δυσκαμψίας |
| α: | συντελεστής Rayleigh |
| β: | συντελεστής Rayleigh |
| ISR: | συντελεστής βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης |
| T: | ολικές μετατοπίσεις |
| H: | οριζόντιες μετατοπίσεις |
| V: | κατακόρυφες μετατοπίσεις |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγικό σημείωμα

Η ευρεία επέκταση της χρήσης οπλισμένης γης βασίζεται στα συγκριτικά τεχνικά και οικονομικά οφέλη που προσφέρει έναντι των άλλων κάθε φορά εναλλακτικών λύσεων. Τα οπλισμένα επιχώματα αποτέλεσαν αντικείμενο επιστημονικού ενδιαφέροντος τόσο του συγγραφέα όσο και της επιβλέπουσας καθηγήτριας Δρ.Β.Γρωργιάννου. Έτσι, επιχειρήθηκε μια προσπάθεια συνολικής διερεύνησης αυτής της εφαρμογής της γεωτεχνικής μηχανικής με ιδιαίτερη εστίαση στη σεισμική τους απόκριση, έχοντας υπόψη ότι λίγες εργασίες παραμετρικής ανάλυσης οπλισμένων επιχωμάτων υπό σεισμική φόρτιση με πεπερασμένα στοιχεία έχουν γίνει διεθνώς λόγω του σημαντικού υπολογιστικού κόστους τους.

1.2 Βασικές έννοιες

Το έδαφος είναι ένα φυσικό κατασκευαστικό υλικό, το οποίο διαθέτει σχετικά υψηλή θλιπτική αντοχή, αλλά σχεδόν καθόλου εφελκυστική. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η αδυναμία, αναπτύχτηκε η τεχνική της όπλισης του με διάφορα στοιχεία όπλισης. Τα εν λόγω στοιχεία οπλισμού είναι ικανά να παραλάβουν εφελκυστικά φορτία τα οποία το έδαφος δε μπορεί να παραλάβει όντας άοπλο. Υπάρχει δηλαδή η ίδια ακριβώς λογική με την όπλιση του σκυροδέματος με ράβδους χάλυβα με μόνη διαφορά ότι στο οπλισμένο σκυρόδεμα ο οπλισμός μεταφέρει τις εφελκυστικές τάσεις στα δομικά στοιχεία, ενώ στην οπλισμένη γη το έδαφος εξακολουθεί να βρίσκεται υπό θλίψη και οι οπλισμοί παραλαμβάνουν τα εφελκυστικά φορτία και μέσω διατμητικών τάσεων τα μεταβιβάζουν στο έδαφος.

Τα πλέον συνηθισμένα στοιχεία όπλισης του εδάφους είναι οι λωρίδες, οι ράβδοι και τα πλέγματα από μέταλλο, συνθετικό πλαστικό ή και φυσικά υλικά. Το οπλισμένο έδαφος που προκύπτει διαθέτει ταυτόχρονα σημαντική θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, καθώς και αυξημένη διατμητική αντοχή κι έτσι, παρουσιάζει αισθητά μειωμένες παραμορφώσεις κατά τις διάφορες φορτίσεις του. Το γεγονός αυτό έδωσε ώθηση στην εφαρμογή της τεχνικής σε διάφορα πεδία και τη σπουδαία διάδοση της στην απότομων ή/και ψηλότερων πρανών,

αναχωμάτων και τοίχων αντιστήριξης. Τέλος, να σημειωθεί ότι είναι από τις κατασκευές του μηχανικού που συνδυάζουν τα βέλτιστα οικονομικά και τεχνικά αποτελέσματα.

1.3 Ορισμός των Οπλισμένων επιχωμάτων

Ως οπλισμένα επιχώματα, καλούνται όλα τα επιχώματα τα οποία περιλαμβάνουν οποιονδήποτε τύπου οπλισμό (χαλύβδινες λωρίδες, πλέγματα, γεωυφάσματα), είτε στο σύνολο του ύψους αυτών, είτε τοπικά στην βάση ή την στέψη. Διακρίνονται σε (Νάσκος, 2007):

οπλισμένα επιχώματα με απότομες έως και κατακόρυφες κλίσεις πρανών, η ευστάθεια των οποίων δεν θα μπορούσε να εξασφαλισθεί χωρίς όπλιση. Ως εκ τούτου, πρόκειται για οπλισμένα επιχώματα αντιστήριξης (retaining structures). (Σχήμα 2-1a)

επιχώματα ήπιας κλίσης πρανών που περιλαμβάνουν όπλιση είτε στην θεμελίωση αυτών,
 είτε στην στέψη, για λόγους π.χ. ενίσχυσης της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους ή και
 αντιμετώπισης διαφορικών καθιζήσεων σε ειδικές περιπτώσεις. (Σχήμα 2-1b)



Εικόνα 1. Σχηματικά παραδείγματα οπλισμένων επιχωμάτων. (Νάσκος, 2007).

1.4 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία διαιρείται σε 6 κεφάλαια. Πιο αναλυτικά το κάθε κεφάλαιο πραγματεύεται τα εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η απαραίτητη εισαγωγή για την υπενθύμιση βασικών εννοιών και ορισμών της όπλισης του εδάφους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο επιχειρείται μια ιστορική αναδρομή της οπλισμένης γης και γίνεται λεπτομερής αναφορά στα στοιχεία όπλισης καθώς και η χρήση τους στις εφαρμογές της γεωτεχνικής μηχανικής.

Στο τρίτο κεφάλαιο υποβάλλεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η όπλιση του εδάφους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δύο μελετώμενα επιχώματα, όπως και τα αποτελέσματα της παραμετρικής τους ανάλυσης υπό στατικές συνθήκες φόρτισης μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα επιχώματα όπως προσομοιώθηκαν για τη δυναμική ανάλυση στο PLAXIS υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης και φυσικά, αποδίδονται σε πίνακες και διαγράμματα τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο υπογραμμίζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας εργασίας συνοδευόμενα από προτάσεις για μελλοντικές εργασίες στο αντικείμενο των οπλισμένων επιχωμάτων.

2. Η χρήση των γεωσυνθετικών υλικών για την όπλιση του εδάφους και οι διάφορες γεωτεχνικές εφαρμογές της

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η έννοια της όπλισης του εδάφους με στοιχεία παραλαβής εφελκυσμού δεν είναι καινούρια. Οι Ρωμαίοι εφάρμοζαν την τεχνική του οπλισμένου εδάφους με καλάμια σε αναχώματα στις όχθες του Τίβερη. Επίσης, στην Κίνα, τμήματα του Σινικού Τείχους κατασκευάστηκαν με κλαδιά δέντρων εντός αργιλικού εδάφους.

Οι κύριοι σταθμοί της χρήσης της οπλισμένης γης στη γεωτεχνική μηχανική σημειώνονται παρακάτω:

- ο πρώτος τοίχος οπλισμένης γης κατασκευάσθηκε στη Γαλλία το 1965

εκτεταμένη κατασκευή τοίχων οπλισμένη γης, πάλι στη Γαλλία, με δέκα συνολικά τοίχους
 για την αποτελεσματική σταθεροποίηση ασταθών πρανών στον αυτοκινητόδρομο
 Roquebrune-Menton highway το 1969

- η χρήση των γεωπλεγμάτων στην ενίσχυση του εδάφους πρωτοξεκίνησε κι αυτή στη Γαλλία
 το 1971, ενώ αναπτύχθηκε ιδιαίτερα τη δεκαετία του 1980

Δύο επιτεύγματα της ερευνητικής εργασίας που καθόρισαν την εξέλιξη της οπλισμένης γης ήταν :

- η εφεύρεση προσόψεων στοιχείων σκυροδέματος (concrete panels) το 1971.

 - η ανάπτυξη και κατασκευή το 1975 μεταλλικών λωρίδων ενίσχυσης υψηλής συνάφειας (ribbed reinforcement strips for high adherence) που επέτρεψε την αυξημένη τριβή μεταξύ οπλισμού και εδάφους.

Έτσι, κατόπιν της ανάπτυξης και της βελτίωσης της τεχνολογίας του οπλισμένου εδάφους σημειώθηκε η ραγδαία ανάπτυξη της ως μεθόδου σταθεροποίησης ασταθούς εδαφικής μάζας,

καθώς τις περισσότερες φορές συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες εναλλακτικές λύσεις προκρίνεται ως η βέλτιστη οικονομικά και τεχνικά.

Από τη δεκαετία του 70 άρχισε η όπλιση του εδάφους με μεταλλικά στοιχεία λωρίδων και με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα γεωσυνθετικά εισήλθαν στο χώρο καταλαμβάνοντας σταδιακά το μεγαλύτερος μέρος στην ενίσχυση του εδάφους λόγω των συγκριτικών τους πλεονεκτημάτων. Η συστηματική ανάλυση και σχεδιασμός τοίχων οπλισμένης γης αναπτύχτηκε από τον γάλλο μηχανικό H.Vidal το 1966 και αργότερα σημαντικό ερευνητικό έργο έγινε από τους Darbin, Schlosser, Long και άλλους.

Στις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες έχουν κατασκευασθεί στις Η.Π.Α. περισσότεροι από 8000 τοίχοι αντιστήριξης με οπλισμένη γη καθώς αποδείχθηκε ως η πλέον βέλτιστη λύση από οικονομική και τεχνική σκοπιά σε πολλές περιπτώσεις.

2.2 Είδη Οπλισμένου Εδάφους

Όσον αφορά τα είδη του οπλισμού που χρησιμοποιούνται για την όπλιση του εδάφους υπάρχουν δύο κατηγοριοποιήσεις. Η μία αφορά το είδος του υλικού από το οποίο κατασκευάζεται ο οπλισμός και η άλλη τον τρόπο λειτουργίας του. Σχετικά με την πρώτη κατηγοριοποίηση διακρίνονται δύο τύποι οπλισμού, οι μεταλλικοί και οι μη μεταλλικοί.

Οι μεταλλικοί οπλισμοί είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα με διάφορες επικαλύψεις και ποικίλουν ως προς τη μορφή (ράβδοι, λωρίδες, πλέγματα κ.ά.).

Οι μη-μεταλλικοί οπλισμοί αφορούν πολυμερή υλικά όπως πολυαιθυλενίου και πολυπροπυλενίου ή φυσικά υλικά (κυρίως παλαιότερα). Ο κύριος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας οπλισμού είναι τα γεωσυνθετικά υλικά και κυρίως τα γεωυφάσματα και γεωπλέγματα.

Τα γεωυφάσματα αποτελούνται από συνθετικές ίνες και ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, διακρίνονται σε υφαντά, πλεκτά και μη-υφαντά. Τα γεωυφάσματα είναι ιδιαίτερα εύκαμπτα και δεν έχουν μεγάλες δυνατότητες ενίσχυσης όπως τα γεωπλέγματα που αναλύονται παρακάτω. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται εξαιτίας της ικανότητας τους για στράγγιση και φιλτράρισμα.

Τα γεωπλέγματα είναι πλαστικά πλέγματα από πολυμερή και η κύρια λειτουργία τους είναι η ενίσχυση των εδαφικών μαζών. Τα γεωπλέγματα έχουν σημαντική δυστένεια και λειτουργούν μονοαξονικά αναλαμβάνοντας εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται διαμέσου της τριβής στη διεπιφάνεια τους με το έδαφος. Επίσης, ως προς τον τρόπο μεταφοράς των τάσεων στα γεωπλέγματα να σημειωθεί ότι τα εγκάρσια μέλη τους βοηθούν προσθέτως στην ανάπτυξη παθητικών αντιστάσεων. Οι πλέον διαδεδομένοι τύποι γεωπλέγματος είναι το HDPE, γεώπλεγμα από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, και το PET, γεώπλεγμα από πολυεστέρα καλυμμένο με PVC.

Σε σχέση με τη δεύτερη κατηγοριοποίηση, δηλαδή τον τρόπο λειτουργίας του οπλισμού στο εκάστοτε εντατικό πεδίο εδαφικής μάζας, ο διαχωρισμός γίνεται ως εξής:

A) Μη-επιμηκύνσιμοι οπλισμοί (Inextensible reinforcement). Στους οπλισμούς αυτούς η εφελκυστική παραμόρφωση κατά την ανάπτυξη της ζώνης αστοχίας είναι μικρότερη από την οριζόντια παραμόρφωση του εδάφους. Τέτοιου είδους οπλισμούς συνιστούν οι μεταλλικοί οπλισμοί και τα υψηλής δυστένειας γεωπλέγματα.

B) Επιμηκύνσιμοι οπλισμοί (Extensible reinforcement). Στους οπλισμούς αυτούς η εφελκυστική παραμόρφωση κατά την ανάπτυξη της ζώνης αστοχίας είναι ίση ή μεγαλύτερη από την οριζόντια παραμόρφωση του εδάφους. Τέτοιου είδους οπλισμούς συνιστούν όλα τα γεωσυνθετικά υλικά πλην των υψηλής δυστένειας γεωπλεγμάτων.

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω οπλισμοί αναλαμβάνουν εφελκυστικά κατά κύριο λόγο φορτία (οι μεταλλικοί αναλαμβάνουν ένα μικρό ποσοστό διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών) όταν επέλθει μετακίνηση των εδαφικών κόκκων. Έχουν δηλαδή παθητική λειτουργία. Με άλλα λόγια, αν δε μετακινηθεί το έδαφος οι οπλισμοί είναι αδρανείς με μηδενικό φορτίο λειτουργίας. Επιπλέον, το αν θα είναι επιμηκύνσιμοι ή όχι, έχει μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό. Ο μη-επιμηκύνσιμος οπλισμός προσδίδει στην γεωκατασκεύη ψαθυρότητα, ενώ ο επιμηκύνσισμος οπλισμός ολκιμότητα. Τα γεωσυνθετικά υλικά έχουν ένα μεγάλο φάσμα μέτρου ελαστικότητας και αυτό καθορίζει τη δυστένεια τους που είναι ένα καθοριστικό μέγεθος κατά το σχεδιασμό.

[7]



Εικόνα 2. Διαγραμματική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ εφελκυστικής τάσης και επιμήκυνσης για τα διάφορα στοιχεία όπλισης του εδάφους από τους Schlosser and Delage (1987).

2.3 Γεωσυνθετικά Υλικά

Τα γεωσυνθετικά είναι "γεωπολυμερή" έχοντας ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο από το οποίο προκύπτει ρητίνη σε μορφή νιφάδων, το οποίο αναμιγνύεται με τα κατάλληλα κάθε φορά πρόσθετα ώστε να παραχθεί το ανάλογο γεωσυνθετικό υλικό.

Τα κυριότερα γεωσυνθετικά (GS) υλικά είναι: τα γεωυφάσματα (geotextiles), τα γεωπλέγματα (geogrids) τα γεωδίκτυα, οι γεωμεμβράνες, οι γεωσυνθετικοί αργιλικοί φραγμοί, οι γεωσωλήνες και ο γεωαφρός. Από τα παραπάνω στην όπλιση της γης χρησιμοποιούνται πρωτευόντως τα γεωπλέγματα, και δευτερευόντως τα γεωυφάσματα.

Τα γεωσυνθετικά υλικά ανάλογα τον τύπο τους μπορούν να επιτελέσουν διάφορες λειτουργίες και να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα πεδία, όπως φαίνεται και παρακάτω.

Οι κύριες λειτουργίες που τα γεωσυνθετικά υλικά, ανάλογα τον τύπο τους, μπορούν επιτελέσουν είναι:

- Διαχωρισμός: διαχωρίζουν ανόμοια υλικά προκειμένου αυτά να λειτουργούν όπως
 σχεδιάστηκαν.
- Οπλισμός: προσδίδουν εφελκυστική αντοχή στα εδάφη.

- Διήθηση Λειτουργία Φίλτρου: επιτρέπουν την ροή κάθετα στην επιφάνειά τους, ενώ ταυτόχρονα δεν επιτρέπουν την διείσδυση κόκκων από το ανώτερο προς το κατώτερο εδαφικό στρώμα.
- Λειτουργία ως Στραγγιστήρια: επιτρέπουν την ροή παράλληλα προς το επίπεδό τους,
 ενώ ταυτόχρονα δεν επιτρέπουν την διείσδυση κόκκων από το ανώτερο προς το κατώτερο εδαφικό στρώμα.
- Λειτουργία Φραγμού: Εμποδίζουν την διαφυγή υγρών, αερίων ή στερεών.

Λειτουργία Τύπων Γεωσυνθετικών

| Τύπος Γεωσυνθετικού | Διαχωρισμός | Οπλισμός | Διήθηση | Στράγγιση | Φραγμός |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Γεωύφασμα | \checkmark | \checkmark | \checkmark | 1 | |
| Γεωπλέγμα | | \checkmark | | | |
| Γεωδίκτυο | | | | 1 | |
| Γεωμεμβράνη | | | | | \checkmark |
| Γεωσυνθετικοί Αργιλικοί Φραγμοί | | | | | V |
| Γεωσωλήνας | | | | \checkmark | |
| Γεωαφρός | \checkmark | | | | |
| Γεωσύνθετο | \checkmark | \checkmark | \checkmark | 7 | \checkmark |

Πίνακας 1. Λειτουργίες κάθε τύπου γεωσυνθετικού υλικού (πηγή: Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεζη).



Εικόνα 3. Διάφοροι τύποι γεωϋφασμάτων (πηγή: Wikipedia).



Εικόνα 4. Διάφοροι τύποι γεωπλεγμάτων (πηγή:Wikipedia).

Συγκεκριμένα γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται εξαιτίας των στεγανωτικών τους ιδιοτήτων σε φράγματα, ταμιευτήρες, σήραγγες, διαφραγματικούς τοίχους, XYTA, τεχνητές λίμνες κ.α. Επίσης, χρησιμοποιούνται και σε άλλα υδραυλικά έργα για την κατασκευή γεωσωλήνων. Όσον αφορά τα γεωτεχνικά έργα που είναι και το αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, τα γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται σε τοίχους οπλισμένης γης στην ενίσχυση πρανών όπως και ως φίλτρα, στραγγιστήρια, συστήματα ελέγχου διάβρωσης κ.ά. οι γεωτεχνικές τους χρήσεις αποτυπώνονται στην παρακάτω εικόνα.

2.4 Χαρακτηριστικές εφαρμογές των γεωσυνθετικών υλικών σε έργα της γεωτεχνικής μηχανικής.

Στις παρακάτω εικόνες αποδίδονται τα πιο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα εφαρμογής της όπλισης του εδάφους με γεωσυνθετικά υλικά και διάφορα ανά περίπτωση στοιχεία πρόσοψης στο πεδίο της γεωτεχνικής μηχανικής.



Εικόνα 5. Τυπικές εφαρμογές γεωπλεγμάτων στο πεδίο των γεωτεχνικής μηχανικής. (πηγή: agriculture solutions).



Εικόνα 6. Συνδυασμός οπλισμένης γης με συρματοκιβώτια πληρωμένα με λιθοσύντριμμα (Πηγή: Archiexpo).


Εικόνα 7 Συνδυασμός γεωπλεγμάτων με στοιχεία πρόσοψης προκατασκευασμένες πλάκες σκυροδέματος (Πηγή: Snapedge).



Εικόνα 8. Δύσκαμπτες επενδύσεις (stiff panels) τοίχων οπλισμένης γης (Πηγή: Οδοτεχνική).



Εικόνα 9. Οπλισμένα επιχώματα στην Εγνατία οδό στο ύψος του Μετσόβου (Πηγή: Γεωγνώση).

2.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Όπως συγκεντρωτικά σημειώνει ο κ.Τζατζανύφος (ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε.), τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά των τοίχων αντιστήριξης οπλισμένης γης είναι τα παρακάτω:

'<u>Πλεονεκτήματα Τοίχων Αντιστήριξης οπλισμένης Γης</u>

- Οικονομικότερη λύση.
- Εύκολη και γρήγορη κατασκευή.
- Δεν απαιτείται προσωρινή στήριξη του επιχώματος κατά την διάρκεια της κατασκευής.

- Σχετικά εύκαμπτη κατασκευή με μεγάλες ανοχές σε οριζόντιες και κατακόρυφες (διαφορικές) μετατοπίσεις.
- Καταλληλότερες κατασκευές έναντι σεισμικής φόρτισης.
- Το υλικό της επίχωσης μπορεί να περιέχει και σημαντικό ποσοστό λεπτοκόκκων υλικών.
- Είναι εύκολη η αποστράγγιση.
- Ικανοποιούν αισθητικές απαιτήσεις σχεδιασμού.

Μειονεκτήματα Τοίχων Αντιστήριξης οπλισμένης Γης

- Πιθανή διάβρωση των μεταλλικών οπλισμών.
- Πιθανή μείωση της αντοχής των γεωσυνθετικών οπλισμών λόγω φθοράς τους κατά την διάρκεια της κατασκευής.
- Πιθανή μείωση της αντοχής των γεωσυνθετικών οπλισμών με το χρόνο (ερπυστικές παραμορφώσεις).
- Η κατασκευή οπλισμένων επιχωμάτων σε περιοχές ορυγμάτων απαιτεί εκσκαφή μεγαλύτερου πλάτους.
- Οι δυνατότητες περαιτέρω εκσκαφής όπισθεν του οπλισμένου επιχώματος είναι περιορισμένες.
- Η τρέχουσα μέθοδος σχεδιασμού είναι αρκετά συντηρητική και χρήζει τροποποιήσεων.'

3. Θεωρητικό υπόβαθρο

3.1 Μηχανισμοί μεταφοράς φορτίων στην οπλισμένη γη

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, τα οπλισμένα εδάφη λειτουργούν ως σύνθετες γεωκατασκευές με το έδαφος να αναλαμβάνει τα θλιπτικά φορτία και τον οπλισμό να λειτουργεί σε εφελκυσμό. Πιο συγκεκριμένα όμως, οι μηχανισμοί μεταφοράς φορτίων μεταξύ του οπλισμού και των γαιών είναι:

α. Η τριβή μεταξύ των επιφανειών επαφής δύναμη

β. Η παθητική αντίσταση στις ωθήσεις γαιών σε επιφάνειες του οπλισμού που τοποθετείται εγκάρσια στην διεύθυνση της κίνησης της εξόλκευσής του από την μάζα των γαιών.

Ο μηχανισμός (α) δρα σε οπλισμό τύπου λωρίδων, φύλλων και ράβδων, ενώ ο μηχανισμός (β) σε οπλισμό πλεγμάτων (στην περίπτωση αυτή η συνολική αντίσταση προέρχεται και από τους δύο μηχανισμούς).



Εικόνα 10. Μηχανισμοί μεταφοράς φορτίων μεταξύ του οπλισμού και των γαιών (πηγή: Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεξη).

3.2 Η έννοια της ανισότροπης συνοχής (Anisotropic Cohesion Concept)

Διάφορες πειραματικές και θεωρητικές έρευνες έγιναν για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των τοίχων οπλισμένης γης. Οι Schlosser and Long (1972) απέδειξαν ότι τα δοκίμια οπλισμένης άμμου που εξέτασαν είχαν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή από τα αντίστοιχα άοπλα. Ο Haussmann (1976) independently postulated a more unified anisotropic cohesion theory. Δείχθηκε ότι τα εν λόγω δοκίμια είναι δυνατό να εμφανίσουν δύο τρόπους αστοχίας:

(a) Αστοχία από ολίσθηση του οπλισμού σε χαμηλής έντασης τασικό πεδίο αναπτύσσοντας
καμπύλη επιφάνεια αστοχίας

(β) Αστοχία από θραύση του οπλισμού σε υψηλής έντασης τασικό πεδίο αναπτύσσοντας γραμμική επιφάνεια αστοχίας που δείχνει ότι η άμμος συμπεριφέρεται ως συνεκτικό γεωυλικό έχοντας την κανονική της γωνία τριβής αλλά και μια ανισοτροπη ψευδό-συνοχή που οφείλεται στα στοιχεία οπλισμού της. Αυτή η ψευδό-συνοχή αναπτύσσεται πολύ γρήγορα και για μικρές παραμορφώσεις.

3.3 Η έννοια της βελτιωμένης συνοχής (Enhanced Cohesion Concept)

Ο Chapius (1972) βασίστηκε στην παραδοχή ότι οι κύριες τάσεις δεν έχουν πλέον κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση αλλά εκτρέπονται εξαιτίας των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται μεταξύ οπλισμού και εδάφους. Έτσι, οι τασικοί κύκλοι του Mohr μεταβάλλονται, ενώ η επιφάνεια αστοχίας παραμένει η ίδια τόσο για τα οπλισμένα όσο και για τα άοπλα δοκίμια.





Figure 2.8a: Reinforced and Unreinforced Samples Triaxial Tests (Schlosser et al., 1972)

Figure 2.8b: Anisotropic Cohesion and Enhanced Cohesion Concepts (Ingold, 1982)

Εικόνα 11. Στο αριστερό σχήμα αποτυπώνονται τριαζονικές δοκιμές σε οπλισμένα και άοπλα εδαφικά δείγματα, ενώ στο δεζιό σχήμα γίνεται αντιληπτή η διάκριση των εννοιών της βελτιωμένης (Enhanced Cohesion Concept) και ανισότροπης συνοχής (Anisotropic Cohesion Concept).

3.4 Συμπεριφορά των τοίχων οπλισμένης γης

Οι Rowe and Ho (1993) σημείωσαν για να γίνει πλήρως κατανοητή η συνολική συμπεριφορά μιας οπλισμένης γεωκατασκευής πρέπει να είναι γνωστά τα εξής μεγέθη:

- το εντατικό πεδίο της οπλισμένης εδαφικής μάζας

- το καθεστώς των παραμορφώσεων τόσο στο έδαφος όσο και στον οπλισμό
- η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στους οπλισμούς
- οι οριζόντιες τάσεις που ασκούνται όριο της οπλισμένης εδαφικής μάζας και τις κατακόρυφες στη βάση της
- οι κατακόρυφες τάσεις σε κάθε επίπεδο ενίσχυσης
- οι οριζόντιες τάσεις που δρούνε στην πρόσοψη
- οι κατακόρυφες και οριζόντιες δυνάμεις που φορτίζουν την πρόσοψη
- οι οριζόντιες παραμορφώσεις της οπλισμένης εδαφικής μάζας

 - την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων (λ.χ. τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, τη δυστένεια, το μήκος και τις αποστάσεις των οπλισμών, τα στάδια της κατασκευής) στη συνολική συμπεριφορά της γεωκατασκευής.

3.4.1 Κατανομή των κατακόρυφων και οριζόντιων τάσεων του εδάφους

Στις διάφορες αναλύσεις που έχουν κατά καιρούς γίνει έχουν θεωρηθεί διάφορες κατανομές κατακόρυφων τάσεων, όπως ομοιόμορφες, τραπεζοειδείς κ.ά. Οι μέγιστες τάσεις βρίσκονται εντός της περιοχής του εδάφους που οπλίζεται, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτή οι τάσεις μειώνονται και στην άοπλη περιοχή λαμβάνουν την ελάχιστη τιμή τους. Σύμφωνα με τον Tatsuoka (1992) η κατακόρυφη εδαφική τάση κοντά στην πρόσοψη εξαρτάται από την δυσκαμψία της πρόσοψης. Οι δύσκαμπτες προσόψεις αναλαμβάνουν εδαφικό φορτίο κι έτσι, οι κατακόρυφη εδαφική τάση κοντά τους μειώνεται με τελικό αποτέλεσμα οι οπλισμοί να αναλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο. Οι οριζόντιες εδαφικές τάσεις εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τον αριθμό των στοιχείων όπλισης, τη δυστένεια τους και τον πιθανό ερπυσμό τους. Η πύκνωση των στοιχείων όπλισης οδηγεί σε μεγαλύτερες οριζόντιες τάσεις. Οι Rowe και Ho (1993) με βάση μετρηθείσες τιμές απεικόνισαν γραφικά την κατανομή των τάσεων σε διάφορα επίπεδα της οπλισμένης γης.





Εικόνα 12. Κατακόρυφη και οριζόντια κατανομή εδαφικών τάσεων στην πρόσοψη (αριστερό σχήμα) και όπισθεν του οπλισμένου εδάφους (δεζιό σχήμα), όπως προέκυψαν από αριθμητικές αναλύσεις.

3.4.2 Οι δυνάμεις των οπλισμών

Το μέγεθος των δυνάμεων που αναλαμβάνουν τα στοιχεία όπλισης του εδάφους εξαρτάται κυρίως από τη δυστένεια και τον πιθανό ερπυσμό τους και από τις ασκούμενες οριζόντιες τάσεις. Η μέγιστη αξονική εφελκυστική δύναμη κοντά στον πόδα είναι μικρότερη από ότι η ενεργητική κατάσταση του Rankine προβλέπει.

Οι Jewel (1988) and Ho-Rowe (1992) απέδειξαν ότι η μέγιστη δύναμη στα στοιχεία οπλισμού γίνεται ομοιόμορφη με τη μείωση της δυστένειας και μειώνεται κοντά στη βάση της γεωκατασκευής εξαιτίας της επίδρασης της θεμελίωσης. Μεταβολές στις εδαφικές παραμέτρους και στις κατασκευαστικές μεθόδους μεταβάλλουν τη θέση της μέγιστης αξονικής δύναμης μακριά από το επίπεδο αστοχίας.Η μέγιστη αξονική δύναμη μετατοπίζεται προς την πρόσοψη στην περίπτωση μικρού μήκους στοιχείων όπλισης. Η αξονική κατανομή της εφελκυστικής δύναμης επηρεάζεται κυρίως από την εφαρμοζόμενη κατασκευαστική μέθοδο, την ύπαρξη πρόσοψης και τον τρόπο σύνδεσης πρόσοψης και οπλισμού.

Υπάρχουν δύο τύπου αξονικής κατανομής των εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος των στοιχείων όπλισης που απεικονίζονται παρακάτω.



Εικόνα 13. Κατανομή της εφελκυστικής δύναμης φόρτισης κατά μήκος των στοιχείων όπλισης ανά θέση.

Τύπος Α: αυτή η κατανομή παρατηρείται όταν η πλευρική παραμόρφωση της πρόσοψης του τοίχου περιορίζεται σε όλα τα στάδια τα κατασκευής. Σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη αξονική δύναμη εφελκυσμού βρίσκεται κοντά στην πρόσοψη και παραμένει σχεδόν σταθερή κατά μήκος της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας και μηδενίζεται στο εσωτερικό άκρο του στοιχείου όπλισης.

Τύπος Β: η εικονιζόμενη παραβολική κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης καθ' ύψος παρατηρείται όταν δεν υπάρχει πρόσοψη ή υπάρχει και διαθέτει μικρή αντίσταση έναντι πλευρικών παραμορφώσεων (π.χ. wrapped back facing).

3.4.3 Οριζόντιες μετατοπίσεις

Το μέγεθος της οριζόντιας μετατόπισης εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των διάφορων στοιχείων που συνθέτουν την οπλισμένη γεωκατασκευή και από της κατασκευαστικές μεθόδους που εφαρμόζονται. Πύκνωση των στοιχείων όπλισης και αύξηση της δυστένειας τους οδηγεί σε μικρότερες παραμορφώσεις του συνόλου της κατασκευής.

3.4.4 Τα στοιχεία πρόσοψης

Τα στοιχεία πρόσοψης ποικίλουν ως προς το σχήμα και τη μορφή, το υλικό και τις διαστάσεις με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα δυσκαμψίας που αλλάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του συνόλου της οπλισμένης εδαφικής μάζας.

Ο Tatsuoka (1992) ταξινόμησε τα στοιχεία προσόψεων σε διάφορους τύπους με βάση τη δυσκαμψία τους. Τα στοιχεία πρόσοψης εξαιτίας της δυσκαμψίας τους βελτιώνουν τη συνολική ευστάθεια της γεωκατασκευής με τους παρακάτω τρόπους:

1. Τα δύσκαμπτα στοιχεία πρόσοψης (τύποι D and E) παραλαμβάνουν μερίδιο των αναπτυσσόμενων εδαφικών τάσεων μειώνοντας μερικώς και τις αναλαμβανόμενες δυνάμεις των στοιχείων όπλισης.

2. Μέρος του βάρους της εδαφικής μάζας μεταφέρεται ως φορτίο στο στοιχείο πρόσοψης εξαιτίας της αναπτυσσόμενης τριβής στην διεπιφάνεια τους.

[21]

3. Εξαιτίας της υψηλής τάσης που αναπτύσσεται πίσω από ένα δύσκαμπτο στοιχείο πρόσοψης, η θέση της συνολικής δύναμης αντίστασης πλησιάζει την πρόσοψη.

Παρακάτω αποδίδονται τυπικά στοιχεία πρόσοψης οπλισμένων γεωκατασκευών:



(a) Concrete Panel Facing (Reinforced Earth system)





(c) York Wall Facing (Jones, 1994)

(d) L-shaped Concrete Facing (Broms, 1988)

backtill soil

(b) Wrapped around Facing

geotextile



(e) Reinforced Concrete Panel (Japanese System)



(f) Full Height Reinforced Concrete Facing



Εκτός από τη στατική λειτουργία των στοιχείων πρόσοψης, υπάρχει και ο ενεργός τους ρόλος στην προστασία έναντι διάβρωσης του εδάφους και μερικές φορές στην αποστράγγιση. Το είδος των στοιχείων πρόσοψης που θα χρησιμοποιηθεί σε κάποιο σύστημα οπλισμένου εδάφους καθορίζει την αισθητική του, αφού είναι το μόνο ορατό σημείο της κατασκευής όταν αυτή ολοκληρωθεί.

Τα συνηθέστερα στοιχεία πρόσοψης είναι προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος, προκατασκευασμένοι κυβόλιθοι, λιθοπληρωμένα συρματοκιβώτια, διάφορα μεταλλικά στοιχεία ή ακόμη και γεωπλέγματα ή γεωυφάσματα που αναδιπλώνονται στην εξωτερική επιφάνεια.

3.5 Ανάλυση Ευστάθειας Τοίχου οπλισμένης Γης

Η ευστάθεια κατασκευών ωπλισμένης γης γίνεται είτε με μεθόδους οριακής ισορροπίας (κυρίως), είτε και με αριθμητικές μεθόδους (μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων).

Ο British Standard BS 8006 : 2010 προβλέπει δύο οριακές καταστάσεις:

 Τελική Οριακή Κατάσταση (Ultimate Limit State): το έδαφος ή η κατασκευή καταρρέουν ή οι μετακινήσεις της κατασκευής αντιστήριξης οδηγούν σε σοβαρές βλάβες άλλων τμημάτων της κατασκευής ή παρακειμένων κατασκευών.

Οριακή Κατάσταση Εξυπηρέτησης (Serviceability Limit State): οι μετακινήσεις της κατασκευής είναι τέτοιες που επηρεάζουν μόνο την εμφάνιση ή την ικανοποιητική χρήση της κατασκευής ή παρακειμένων κατασκευών.

3.5.1 Τρόποι αστοχίας (εξωτερική αστάθεια)

Παρακάτω αποδίδονται γραφικά οι τρόποι αστοχίας τοίχου οπλισμένης γης εξαιτίας εξωτερικής ανισορροπίας.



Εικόνα 15. Δυνητικοί τρόποι αστοχίας οπλισμένων γεωκατασκευών λόγω εξωτερικής αστάθειας (πηγή: Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεξη).

3.5.2 Τρόποι αστοχίας (εσωτερική αστάθεια)

Παρακάτω αποδίδονται γραφικά οι τρόποι αστοχίας τοίχου οπλισμένης γης εξαιτίας εσωτερικής ανισορροπίας.







Θραύση οπλισμού Ολίσθηση οπλισμού Εσωτερική ολίσθηση







Αστοχία σύνδεσης

Διατμητική αστοχία Ανατροπή

Εικόνα 16. Δυνητικοί τρόποι αστοχίας οπλισμένων γεωκατασκευών λόγω εσωτερικής αστάθειας (πηγή: Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεξη).

3.6 Αριθμητική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία οπλισμένης γης

Η χρήση της αριθμητικής ανάλυσης και της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε γεωτεχνικά θέματα και κατά προέκταση στα οπλισμένα επιχώματα δε συνηθίζεται στην πράξη κατά το στάδιο του σχεδιασμού τέτοιων έργων. Χρησιμοποιούνται μέθοδοι οριακής ισορροπίας, καθώς έχουν αποδειχθεί ότι τα αποτελέσματα τους είναι βάσιμα. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται χρήση πεπερασμένων στοιχείων και του προγράμματος γιατί στόχος είναι η διερεύνηση του της επίδρασης των χαρακτηριστικών των στοιχείων όπλισης τόσο υπό στατικές όσο και υπό δυναμικές συνθήκες.

Αναλυτικότερα, τα πεπερασμένα στοιχεία με μεγάλη ακρίβεια αποδίδουν το καθεστώς των παραμορφώσεων που προκύπτει από την εκάστοτε φόρτιση. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο έγινε η χρήση τους ώστε να εξετασθεί η η επίδραση της δυστένειας, του μήκους και της διάταξης των στοιχείων όπλισης στη συνολική συμπεριφορά των των οπλισμένων επιχωμάτων που μελετήθηκαν.

Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι το μεγάλο υπολογιστικό κόστος το οποίο στις δυναμικές αναλύσεις ήταν ιδιαίτερα σημαντικό φτάνοντας μέχρι και τις 15 ώρες για μία ανάλυση και κάνοντας παραμετρική ανάλυση το εργασιακό φορτίο ήταν βαρύ και χρονοβόρο. Ωστόσο, αυτό δεν αναιρεί το πλεονέκτημα της ακρίβειας και της πλήρους γνώσης της συμπεριφοράς όλως των μελών του εξεταζόμενου κάθε φορά συστήματος.

Το πρόγραμμα PLAXIS που χρησιμοποιήθηκε, αναπτύχθηκε στο Ντελφτ της Ολλανδίας και είναι το πιο διαδεδομένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων στη γεωτεχνική μηχανική.

3.6.1 Αριθμητικές αναλύσεις διαφόρων ερευνητών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη

διερεύνηση της συμπεριφοράς τοίχων και πρανών οπλισμένου εδάφους υπό σεισμική φόρτιση. Οι Cai and Bathurst (1998a, 1998b) έκαναν αριθμητική ανάλυση σε τοίχους αντιστήριξης οπλισμένου εδάφους υπό αρμονική ταλάντωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας πρόγραμμα FLAC για να διερευνήσουν συνολικά την επίδραση του οπλισμού.

Τα κύρια συμπεράσματα ήταν ότι δυστένεια και όχι το μήκος των στοιχείων όπλισης καθόριζε κατά κύριο λόγο την κατανομή της δύναμης οπλισμού καθ' ύψος του τοίχου. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η δύναμη οπλισμού αυξάνεται με την αύξηση της δυστένειας των στοιχείων όπλισης. Όσον αφορά την γεωμετρία της ολισθαίνουσας μάζας προέκυψε ότι αποτελείται (κυρίως σε σημαντικές τιμές οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης) από δύο πρίσματα, Αυτό επαληθεύτηκε και από πειράματα σε σεισμική τράπεζα από τους Tatsuoka et al. (1998).

Σε παρόμοιο αντικείμενο σημαντική δουλειά έκανε στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας (Master Thesis) στο NTNU ο Martin Holst (2012) έχοντας υπόψη τις διάφορες ερευνητικές εργασίες των El-Emam καθώς και του Bathurst. Ο M.Holst χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS απέδειξε τα εξής:

[26]

- Αυξάνοντας το μήκος και τη δυστένεια των στοιχείων όπλισης το μέγεθος των μετακινήσεων στα στοιχεία πρόσοψης μειώνεται.
- Μειώνοντας τη δυστένεια ή/και το μήκος των στοιχείων όπλισης το δυνητικό πρίσμα ολίσθησης αναπτύσσεται υπό χαμηλότερης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης, γίνεται μεγαλύτερο ως προς τις διαστάσεις του και αποκτά τη μορφή διπλής σφήνας (twowedge).

3.8 Κύριες ιδιότητες υλικών οπλισμένης γης

3.8.1 Ιδιότητες Εδάφους

Στην οπλισμένη γη τον σπουδαιότερο ρόλο στη συνολική συμπεριφορά της διαδραματίζει η γωνία τριβής φ. Οι Schimming and Saxe (1964), εκτελώντας στατικές και δυναμικές δοκιμές άμεσης διάτμησης δεν παρατήρησαν αξιόλογη διαφοροποίηση της γωνίας εσωτερικής τριβής, κι έτσι, και στις στατικές και στις δυναμικές αναλύσεις χρησιμοποιείται η ίδια τιμή.

3.8.2 Ιδιότητες Διεπιφανειών

Η αστοχία στη διεπιφάνεια οπλισμού και εδάφους μπορεί να γίνει είτε με ολίσθηση είτε με εξόλκευση. Η αντοχή της διεπιφάνειας προσεγγίζεται μέσω του μειωτικού συντελεστή αλληλεπίδρασης R(Reduction factor), που ορίζεται ως ο λόγος της εφαπτομένης της γωνίας τριβής της διεπιφάνειας προς την εφαπτομένη της γωνίας τριβής του εδάφους (**R** =tanφ_{interface} / tanφ_{soil}). Με το ίδιο συντελεστή απομειώνεται και η συνοχή του εδάφους ώστε να προκύψει η συνοχή του στοιχείου διεπιφάνειας(αν φυσικά υπάρχει) και είναι c_{interface} =**R**·c_{soil}. Ωστόσο, ο συντελεστής αλληλεπίδρασης γίνεται να εκτιμηθεί πειραματικά με δοκιμές άμεσης διάτμησης και εξόλκευσης.

Ο Waterman (chief programme developer του PLAXIS) αποδίδει τους παρακάτω συντελεστές μείωσης των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών εξαιτίας της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης.



Εικόνα 17. Ενδεικτικές τιμές για τον μειωτικό συντελεστή των ιδιότητων της διεπιφάνειας (λόγω αλληλεπίδρασης) μεταξύ διαφόρων υλικών (πηγή: Waterman, PLAXIS).

Επίσης, ο Τζατζανύφος στη σχετική του διάλεξη αναφέρει ως ενδεικτικές τιμές του συντελεστή αλληλεπίδρασης για γεωπλέγματα και διάφορα εδαφικά υλικά τα εξής:

- 0.9÷1.0 για χάλικες και θραυστά αδρανή
- 0.85÷0.95 για άμμους
- 0.6÷0.7 για αργίλους.

Όπως σημειώνει και η Δ.Ράπτη στην μεταπτυχιακή διπλωματική της εργασία στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πατρών με τίτλο 'ΤΟΙΧΟΙ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ', οι Bachus et al. (1993) εκτέλεσαν στατικά πειράματα εξόλκευσης γεωπλεγμάτων σε άμμους βρίσκοντας τον συντελεστή αλληλεπίδρασης ίσο περίπου με τη μονάδα. Νωρίτερα, οι Cancelli et al. (1992) βρήκαν διακυμαινόμενες τις τιμές του συντελεστή αλληλεπίδρασης μεταξύ 1.04-1.12 για διάφορα HDPE γεωπλέγματα σε άμμους και χαλίκια.

Οι Goodman et al. (1968) πρότειναν η μεταφορά διατμητικών δυνάμεων στις διεπιφάνειες μεταξύ οπλισμού και εδάφους, μεταξύ εδάφους και πρόσοψης και μεταξύ κυβολίθων να προσομοιώνεται μέσω ενός στοιχείου ολίσθησης που ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr– Coulomb κατά τη χρήση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφόρων.



Εικόνα 18. Προσομοίωμα διεπιφάνειας ολίσθησης κατά Goodman et al.

3.9 Καταγεγραμμένη Σεισμική απόκριση Τοίχων και Πρανών Οπλισμένης

γης

Η σεισμική απόκριση έντεκα τοίχων αντιστήριξης οπλισμένου εδάφους στην ευρύτερη περιοχή Los Angeles μελετήθηκε από τον Sandri κατά το σεισμό του Northridge. Σε εννιά από τις έντεκα κατασκευές που εξετάσθηκαν δεν παρατηρήθηκαν ζημιές παρόλο που κατά τόπους η οριζόντια επιτάχυνση του εδάφους έφθασε το 0.5g. Αντίστοιχά αποτελέσματα ικανοποιητικής σεισμικής απόκρισης παρατήρησαν οι Stewart et al. (1994) σε οπλισμένο πρανές με γεωπλέγματα που παρουσίασε μηδενική μετακίνηση σε σεισμική διέγερση με οριζόντια εδαφική επιτάχυνση 0.2g. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξήχθησαν και από τους Ιάπωνες ερευνητές που κατέγραψαν τη συμπεριφορά τόσο άοπλων όσο και οπλισμένων τοίχων αντιστήριξης με γεωσυνθετικά. Πιο συγκεκριμένα, κατά το σεισμό του Kobe (οριζόντια εδαφική επιτάχυνση της τάξης του 0,7g) το 1995, άοπλοι τοίχοι αντιστήριξης αστόχησαν, ενώ οι αντίστοιχοι οπλισμένοι μετακινήθηκαν σημαντικά χωρίς όμως να αστοχήσουν. Αναλυτικότερα, οι Tatsuoka et al. (1995) σημειώνουν ότι τοίχος αντιστήριξης ύψους 6,2 m οπλισμένος με γεωσυνθετικά μετακινήθηκε κατά 260 mm στην κορυφή και 100 mm στη βάση, χωρίς να αστοχήσει.

3.10 Ιδιαίτερη αναφορά στην εργασία 'Σεισμική Συμπεριφορά Τοίχων Ωπλισμένης Γης στην Νέα Δονητική Τράπεζα του Ε.Μ.Π.'

Οι Γ. Γκαζέτας, Ι. Αναστασόπουλος, Β. Δρόσος, Τ. Γεωργαράκος, Ρ. Κουρκουλής στα πλαίσια της Ερευνητικής Ενότητας 11 (Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών Ωπλισμένης Γής) του Ερευνητικού Προγράμματος Χ-SOILS (Θεμελίωση Τεχνικών Έργων σε Σεισμικώς «Προβληματικά» Εδάφη υπό Ισχυρή Σεισμική Δόνηση) της Γ.Γ.Ε.Τ. πραγματοποίησαν πείραμα δυναμικής φόρτισης σε οπλισμένο έδαφος με τη βοήθεια σεισμικής τράπεζας. Πιο συγκεκριμένα, σε μεταλλική δονητική τράπεζα τύπου ANCO R-51, με έναν βαθμό ελευθερίας κινήσεως (οποιονδήποτε από τους x, y, z), διαστάσεις της τράπεζας εδράσεως των δοκιμίων 1.3 m x 1.3 m και με δυνατότητα μέγιστης επιβαλλόμενης επιτάχυνσης έως 1.6 g και συχνότητων έως 50 Hz. Για την δημιουργία δοκιμίων άμμου της επιθυμητής πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε σύστημα ελεγχόμενης ρήψης άμμου (sand raining system)

<u>Αμμοκιβώτιο σεισμικής προσομοίωσης</u>

Το αμμοκιβώτιο που χρησιμοποιήθηκε για την τοποθέτηση των εδαφικών δοκιμίων επί της σεισμικής τράπεζας ήταν άκαμπτο εξωτερικών διαστάσεων 1.60 m x 0.90 m x 0.75 m (μήκος x πλάτος x ύψος), κατασκευασμένο από βιομηχανικά προφίλ αλουμινίου και φύλλα Plexiglas. Η δυναμική απόκριση του αμμοκιβωτίου διερευνήθηκε με αριθμητική προσομοίωση, με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η ιδιοταλάντωση του δεν επηρεάζει την απόκριση του εδαφικού δοκιμίου.

Προσομοίωμα τοίχου αντιστήριζης

Το πείραμα διεξήχθη σε κλίμακα 1 : 20, έχοντας ως φυσικό πρότυπο δύο τοίχους οπλισμένης γης ύψους 7.5 m, με 13 στάθμες οπλισμού καθ' ύψος και μήκος οπλισμών ίσο με 70 % του ύψους. Για την κατασκευή του εργαστηριακού προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκε φύλλο Plexiglas πάχους 2 mm για τον τοίχο επικάλυψης και μεταλλικό πλέγμα για τον οπλισμό. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι πλεγμάτων: ένα εύκαμπτο πλέγμα με ράβδους διαμέτρου 0.4 mm σε κάνναβο 12 x 12 mm, και ένα πιο δύσκαμπτο με ράβδους διαμέτρου 1 mm, και τον ίδιο κάνναβο.

Προκειμένου να προσομοιωθεί με ρεαλισμό η κατασκευαστική ακολουθία και η σύνδεση των επιμέρους τεμαχών του τοίχου αντιστηρίξεως μεταξύ τους, ο τοίχος επικαλύψεως κατασκευάστηκε τμηματικά σε λωρίδες μήκους 90 cm και ύψους 3 cm η κάθε μία. Στην μέση του ύψους της κάθε λωρίδας συνδέθηκε το πλέγμα του οπλισμού. Ο κάθε τοίχος αποτελείται από 14 τέτοιες λωρίδες, οι οποίες τοποθετήθηκαν σταδιακά κατά την διάρκεια της διάστρωσης του εδαφικού υλικού, προσομοιώνοντας ρεαλιστικά την πραγματική κατασκευαστική ακολουθία. Η σύνδεση των τεμαχών μεταξύ τους πραγματοποιείται με διατμητική κλείδα, με κατάλληλη δηλαδή διαμόρφωση ώστε να επιτρέπεται μεν η σχετική στροφή μεταξύ διαδοχικών τεμαχών, αλλά όχι και η οριζόντια σχετική μετατόπιση.

<u>Εδαφικό υλικό</u>

Ως εδαφικό υλικό χρησιμοποιήθηκε φουρνισμένη χαλαζιακή ομοιόμορφη λεπτόκοκκη άμμος μέσης διαμέτρου κόκκου $d_{50} = 0.16$ mm με γωνία εσωτερικής τριβής (στην κρίσιμη κατάσταση) $\varphi_{cs} = 29.5^{\circ}$.

Προετοιμασία του δοκιμίου

Όπως προαναφέρθηκε, το δοκίμιο περιλαμβάνει δύο τοίχους αντιστηρίξεως όμοιους σε όλα τα χαρακτηριστικά τους εκτός της δυσκαμψίας του οπλισμού, οι οποίοι τοποθετούνται εντός του αμμοκιβωτίου σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση

κατά την διάρκεια του πειράματος. Η απόσταση μεταξύ των δύο τοίχων είναι 107 cm. Η τοποθέτηση του τοίχου και των οργάνων παρακολούθησης και η διάστρωση της άμμου πραγματοποιούνται σε 38 στάδια.

Στο πρώτο στάδιο, διαστρώνεται το κατώτερο στρώμα της άμμου πάχους 7 cm. Στο επίπεδο αυτό εδράζεται το πρώτο τέμαχος του κάθε τοίχου και ο αντίστοιχος οπλισμός. Στο επόμενο στάδιο διαστρώνεται το επόμενο στρώμα εδαφικού υλικού πάχους 3 cm. Η διάστρωση πραγματοποιείται έτσι ώστε να προσομοιώνονται οι συνθήκες πεδίου. Ο τοίχος αντιστήριξης αφορούσε εδάφη κατηγορίας "X", έτσι η άμμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά χαλαρή με σχετική πυκνότητα $Dr \leq 50$ %. Στα πλαϊνά όρια του κιβωτίου τοποθετήθηκε χρωματισμένη άμμος ώστε να είναι εφικτή η παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδάφους κατά την διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.

<u>Αποτελέσματα</u>

Κατά την δοκιμή, επεβλήθησαν περίπου 60 κύκλοι ημιτόνου με μέση μέγιστη επιτάχυνση στα πρώτα 2 sec ίση με 0.5 g, και με σταθερό πλάτος 0.9 g στην συνέχεια.

Παρακάτω παρουσιάζονται η αρχική και τελική εικόνα του εργαστηριακού προσομοιώματος όπου παρατηρείται ότι:

 - οι τοίχοι αντιστηρίξεως μετακινήθηκαν, ενώ το αντιστηριζόμενο εδαφικό υλικό υπέστη καθίζηση λόγω δυναμικής συνίζησης στο κεντρικό του τμήμα.

 - ο πιο εύκαμπτος, τοίχος μετακινήθηκε ελαφρώς περισσότερο σε σχέση με τον δύσκαμπτο τοίχο.

στο τέλος της φόρτισης, πίσω από τον τοίχο έχει σχηματιστεί τριγωνικό πρίσμα
ολισθήσεως, σε πλήρη συμφωνία με το θεωρητικώς αναμενόμενο.

 - ο τοίχος με τον οπλισμό και το περιβάλλον έδαφος μετακινούνται ως στερεό σώμα, κατά παρόμοιο δηλαδή τρόπο με την μετακίνηση ενός τοίχου βαρύτητας πάχους ίσου με το πάχος των οπλισμών.



Εικόνα 19. Φωτογραφική σύγκριση του εργαστηριακού προσομοιώματος (a)πριν, και (b) μετά το πέρας του πειράματος.



Εικόνα 20. Οι χρονοιστορίες των μετακινήσεων όπως καταγράφηκαν α) εύκαμπτος τοίχος β) δύσκαμπτος τοίχος.

<u>Συμπεράσματα</u>

Οι ερευνητές στην εργασία τους καταλήγουν ως εξής:

'Τα κυριότερα "πρώτα" συμπεράσματα από την εργαστηριακή προσομοίωση τοίχων οπλισμένης γης στην Νέα Δονητική Τράπεζα του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του Ε.Μ.Π., συνδυαζόμενα με προγενέστερες πειραματικές και αριθμητικές μελέτες έχουν ως εξής :

- [1] Ένας καλώς οπλισμένος τοίχος με μεταλλικά πλέγματα μήκους οπλισμού L = 0.7H και με απόσταση μεταξύ διαδοχικών πλεγμάτων $s \approx 0.50$ m, συμπεριφέρεται άκρως ικανοποιητικά ακόμη και σε πολύ ισχυρή σεισμική διέγερση με ενεργό επιτάχυνση $A \approx 0.70$ g, μεγάλου αριθμού κύκλων.
- [2] Οι οριζόντιες μετακινήσεις ενός τέτοιου τοίχου είναι συνάρτηση της σχετικής πυκνότητας του αντιστηριζόμενου υλικού, λαμβάνουν δε την τοπικώς μέγιστη τιμή τους στο μέσον περίπου του τοίχου.
- [3] Από τις συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις θεωρητικές αριθμητικές αναλύσεις συμπεραίνουμε ότι η ακριβής πρόβλεψη της σεισμικής απόκρισης δεν είναι

εύκολη υπόθεση. Απαιτείται ορθή προσομοίωση όχι μόνον της μη-γραμμικής ανακυκλικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού, αλλά και της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας οπλισμών – εδάφους.

Ως γενικό πρακτικό συμπέρασμα :

Τα συμπεράσματα από το πρώτο αυτό πείραμα είναι ιδιαιτέρως ενθαρρυντικά για την σεισμική απόκριση τοίχων αντιστήριξης από οπλισμένη γη : παρά την δυσμενέστατη επιβληθείσα σεισμική διέγερση – 60 κύκλοι ημιτόνου με μέγιστη επιτάχυνση 0.9 g και δεσπόζουσα περίοδο 0.5 sec (σε κλίμακα πρωτοτύπου) – δεν παρατηρήθηκε οιαδήποτε δραματική αστοχία. Και οι δύο τοίχοι βέβαια υπέστησαν σημαντική οριζόντια μετατόπιση (έως 1.2 m), η δε καθίζηση του εδάφους έφτασε το 1.5 m περίπου (εν μέρει οφειλόμενη σε δυναμική συνίζηση της χαλαρής άμμου), χωρίς όμως να πλησιάσει κανένας από τους δύο τοίχους την κατάρρευση.

4. Μελέτη της συμπεριφοράς των οπλισμένων υπό στατικές συνθήκες φόρτισης

4.1 Εισαγωγή

Υπό στατικές συνθήκες φόρτισης το κύριο αντικείμενο διερεύνησης ήταν η επίδραση των διαφόρων χαρακτηριστικών των γεωπλεγμάτων στον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας του οπλισμένου επιχώματος.

4.2 Επίχωμα μελέτης Α

4.2.1 Ορισμός Επιχώματος Α

Στην παρακάτω εικόνα αποδίδεται το οπλισμένο επίχωμα Α. Διακρίνονται τα γεωπλέγματα, τα συρμπατοκιβώτια με τα λιθοσυντρίμματα, η εξυγιαντική στρώση (πράσινο), το υλικό της επίχωσης (καφέ), όπως και η πλευρική συμπαγής βραχόμαζα και το βραχώδες υπόβαθρο.



Εικόνα 21. Συνολική απεικόνιση των γεωλογικών-γεωτεχνικών συνοριακών συνθηκών, όπως και της γεωμετρίας του επιχώματος Α.

Οι ιδιότητες των υλικών που συνθέτουν το οπλισμένο επίχωμα Α παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, ενώ οποιαδήποτε ύδατα αγνοήθηκαν (ξηρές συνθήκες).

| Υλικό | γ _{sat} (kN/m2) | γ _{unsat} (kN/m2) | E(Kpa) | ν | φ(°) | c(kPa) | ψ(°) | condition | criterion |
|----------------|--------------------------|----------------------------|--------|------|------|--------|------|-----------|-----------|
| Υλικό επίχωσης | 19 | 18 | 25000 | 0.3 | 30 | 20 | 0 | drained | МС |
| Υλικό | | | | | | | | | |
| Εξυγίανσης | 19 | 17 | 75000 | 0.3 | 35 | 5 | 3 | drained | MC |
| Συρματοκιβώτια | 19.6 | 17.1 | 100000 | 0.25 | - | - | - | drained | LE |

Πίνακας 2. Μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών του επιχώματος Α.

Στο παραπάνω επίχωμα και με τις συνοριακές συνθήκες που φαίνονται, πραγματοποιήθηκε μια σειρά από αναλύσεις υπό στατικά φορτία και στο επόμενο κεφάλαιο παρατίθενται τα σχετικά αποτελέσματα.

4.2.2 Αποτελέσματα

Α) Πινακοποιημένη παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

| S=1m | L= 0.25H, S=1m | S=2m | L= 0.25H, S=2m |
|----------|----------------|----------|----------------|
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.17 | 0 | 1.17 |
| 100 | 1.2 | 100 | 1.19 |
| 1000 | 1.3 | 1000 | 1.27 |
| 10000 | 1.35 | 10000 | 1.34 |
| | | | |
| S=1m | L= 0.5H, S=1m | S=2m | L= 0.5H, S=2m |
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.17 | 0 | 1.17 |
| 100 | 1.2 | 100 | 1.19 |
| 1000 | 1.42 | 1000 | 1.31 |
| 10000 | 1.67 | 10000 | 1.65 |
| | | | |
| S=1m | L= 0.75H, S=1m | S=2m | L= 0.75H, S=2m |
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.17 | 0 | 1.17 |
| 100 | 1.2 | 100 | 1.19 |
| 1000 | 1.46 | 1000 | 1.33 |
| 10000 | 1.87 | 10000 | 1.83 |

Πίνακας 3. Πινακοποιημένη παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος Α (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.



Β) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Διάγραμμα 1. Διαγραμματική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος Α (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.



Διάγραμμα 2. Λογαριθμική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος Α (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.

| S=1m | L= 0.25H, S=1m | S=2m | L= 0.25H, S=2m |
|----------|----------------|----------|----------------|
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.14 | 0 | 1.14 |
| 100 | 1.19 | 100 | 1.18 |
| 1000 | 1.23 | 1000 | 1.22 |
| 10000 | 1.3 | 10000 | 1.29 |
| | | | |
| S=1m | L= 0.5H, S=1m | S=2m | L= 0.5H, S=2m |
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.14 | 0 | 1.14 |
| 100 | 1.19 | 100 | 1.18 |
| 1000 | 1.35 | 1000 | 1.27 |
| 10000 | 1.61 | 10000 | 1.58 |
| | | | |
| S=1m | L= 0.75H, S=1m | S=2m | L= 0.75H, S=2m |
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.14 | 0 | 1.14 |
| 100 | 1.19 | 100 | 1.18 |
| 1000 | 1.39 | 1000 | 1.27 |
| 10000 | 1.8 | 10000 | 1.71 |

Α) Πινακοποιημένη παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Πίνακας 4. Πινακοποιημένη παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος A με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 20 KN/m² για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.

Β) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης



Διάγραμμα 3. Διαγραμματική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος A με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 20 KN/m² για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.



Διάγραμμα 4. Λογαριθμική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος A με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 20 KN/m² για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.

Παρακάτω, ενδεικτικά, παρατίθενται κάποια αποτελέσματα από τις αναλύσεις του συγκεκριμένου επιχώματος, άοπλου και οπλισμένου με γεωπλέγματα δυστένειας ΕΑ=1000KN/m και επιφορτιζόμενο με το φορτίο λειτουργίας λόγω κυκλοφορίας q=20 KN/m².



Εικόνα 22. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m² για μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1m.



Εικόνα 23. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m² για μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2m.



Εικόνα 24. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m² για μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1m.



Εικόνα 25. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m² για μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2m.



Εικόνα 26. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m² για μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1m.



Εικόνα 27. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό στατικό φορτίο q=20 KN/m² για μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2m.

4.3 Επίχωμα μελέτης Β

4.3.1 Ορισμός Επιχώματος Β

Ως επίχωμα Β ορίσθηκε το παρακάτω επίχωμα και χρησίμευσε στη διερεύνηση του ρόλου των γεωπλεγμάτων στη στατική καταρχήν και στη συνέχεια συνολική συμπεριφορά του. Είναι:



Εικόνα 28. Συνολική απεικόνιση των γεωλογικών-γεωτεχνικών συνοριακών συνθηκών, όπως και της γεωμετρίας του επιχώματος B.

Όπως φαίνεται και από τη σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του επιχώματος B, πρόκειται για μια επιφανειακή στρώση χαλαρής άμμου με μικρό σχετικά ποσοστό λεπτόκοκκου συνεκτικού υλικού που υπέρκειται σχεδόν άρρηκτης βραχομάζας, ενώ για την κατασκευή του επιχώματος χρησιμοποιήθηκε η ίδια επιφανειακή χαλαρή άμμος. Παρακάτω αποδίδονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης εδαφικής στρώσης, τα οποία είναι και οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη, την ανάλυση και το σχεδιασμό.

| Υλικό | $\gamma_{\kappa o \rho} (kN/m^2)$ | $\gamma_{\xi}(kN/m^2)$ | E(kPa) | v | φ(°) | c(kPa) | ψ(°) | Συνθήκες | Κριτήριο |
|---------|-----------------------------------|------------------------|--------|-----|------|--------|------|---------------|----------|
| άμμος | 21.3 | 21.3 | 19000 | 0.3 | 30 | 5 | 0 | Στραγγισμένες | MC |
| | 5.16 | , | 1 6 | | r 1 | , | , | ת | |

Πίνακας 5. Μηχανικά χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού του επιχώματος Β.

Όπως φαίνεται, η άμμος έχει μικρή γωνία εσωτερικής τριβής (χαλαρή) και φυσικά αναφερόμαστε στην κρίσιμη κατάσταση του υλικού (critical state - φ_{cs}). Επίσης, είναι ξηρή(δε σχετίζεται με τον υδροφόρο ορίζοντα ή αλλιώς γίνεται η παραδοχή ξηρών συνθηκών), και με λογική συνέπεια μπορεί να υποτεθεί ότι τόσο στη στατική όσο και στη δυναμική ανάλυση ακολουθεί τον καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb.

4.3.2 Αποτελέσματα

| S=1m | L= 0.5H= 2m | S=0.5m | L= 0.5H= 2m | |
|-----------|-------------|-----------|-------------|--|
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS | |
| 0 (άοπλο) | 1.2 | 0 (άοπλο) | 1.2 | |
| 100 | 1.35 | 100 | 1.4 | |
| 1000 | 1.35 | 1000 | 1.4 | |
| 10000 | 1.35 | 10000 | 1.4 | |
| | | | | |
| S=1m | L= 1H= 4m | S=0.5m | L= 1H= 4m | |
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS | |
| 0 (άοπλο) | 1.2 | 0 (άοπλο) | 1.2 | |
| 100 | 1.83 | 100 | 1.88 | |
| 1000 | 1.84 | 1000 | 1.88 | |
| 10000 | 1.84 | 10000 | 1.88 | |
| | | | | |
| S=1m | L= 1.5H= 6m | S=0.5m | L= 1.5H= 6m | |
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS | |
| 0 (άοπλο) | 1.2 | 0 (άοπλο) | 1.2 | |
| 100 | 2.19 | 100 | 2.22 | |
| 1000 | 2.23 | 1000 | 2.23 | |
| 10000 | 2.23 | 10000 | 2.23 | |

Α) Πινακοποιημένη παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Πίνακας 6. Πινακοποιημένη παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος B (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.



Β) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Διάγραμμα 5. Διαγραμματική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος B (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.



Διάγραμμα 6. Λογαριθμική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος B (φόρτιση υπό το ίδιον βάρος) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.

| Α) Πινακοποιημένη παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης | |
|--------------------------------------------------------|--|
| | |

| S=1m | L= 0.5H, S=1m | S=0.5m | L= 0.5H, S=0.5m |
|----------|---------------|----------|-----------------|
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.12 | 0 | 1.12 |
| 100 | 1.19 | 100 | 1.22 |
| 1000 | 1.19 | 1000 | 1.22 |
| 10000 | 1.19 | 10000 | 1.22 |
| | | | |
| S=1m | L= 1H, S=1m | S=0.5m | L= 1H, S=0.5m |
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.12 | 0 | 1.12 |
| 100 | 1.49 | 100 | 1.54 |
| 1000 | 1.5 | 1000 | 1.54 |
| 10000 | 1.5 | 10000 | 1.54 |
| | | | |
| S=1m | L= 1.5H, S=1m | S=0.5m | L= 1.5H, S=0.5m |
| EA(KN/m) | FS | EA(KN/m) | FS |
| 0 | 1.12 | 0 | 1.12 |
| 100 | 1.6 | 100 | 1.71 |
| 1000 | 1.83 | 1000 | 1.85 |
| 10000 | 1.83 | 10000 | 1.85 |

Πίνακας 7. Πινακοποιημένη παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος B με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q=30 KN/m² για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.


Β) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Διάγραμμα 7. Διαγραμματική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος B με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 30 KN/m² για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.



Διάγραμμα 8. Λογαριθμική παρουσίαση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος B με φορτίο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου q = 30 KN/m² για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης.

Παρακάτω ενδεικτικά παρατίθενται κάποια αποτελέσματα από τις αναλύσεις του συγκεκριμένου επιχώματος άοπλου και οπλισμένου με γεωπλέγματα δυστένειας EA=1000KN/m και επιφορτιζόμενο με το φορτίο λειτουργίας λόγω κυκλοφορίας q=30KN/m².



Εικόνα 29. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο $q=30KN/m^2$ για άοπλο επίχωμα.



Εικόνα 30. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο $q=30KN/m^2$ για μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1m.



Εικόνα 31. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο $q=30KN/m^2$ για μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 32. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο $q=30KN/m^2$ για μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1m.



Εικόνα 33. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο $q=30KN/m^2$ για μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 34. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο $q=30KN/m^2$ για μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1m



Εικόνα 35. Δυνητική επιφάνεια αστοχίας υπό φορτίο $q=30KN/m^2$ για μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένειας EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m

5. Μελέτη της σεισμικής απόκρισης των οπλισμένων επιχωμάτων (Δυναμικές συνθήκες φόρτισης)

5.1 Εισαγωγικό σημείωμα

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, τα στοιχεία όπλισης βελτιώνουν σημαντικά τη σεισμική απόκριση των οπλισμένων επιχωμάτων. Σε αυτό το κεφάλαια επιχειρήθηκε η ποσοτικοποίηση αυτής της θετικής επίδρασης στη συνολική σεισμική απόκριση. Αναλυτικότερα, έγινε παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων των γεωπλεγμάτων όπλισης των μελετώμενων επιχωμάτων στις μέγιστες μετατοπίσεις κατά τις διάφορες σεισμικές διεγέρσεις που επιβλήθηκαν μέσω του PLAXIS.

5.2 Επιταχυνσιογραφήματα σεισμικής φόρτισης των οπλισμένων επιχωμάτων

Τα επιταχυνσιογραφήματα που εισήχθησαν κατά τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης των οπλισμένων επιχωμάτων της εργασίας ήταν τρία και προέρχονται από τους γνωστούς μεγάλους σεισμούς της Καλαμάτας(1985), El-Centro και Kobe(1995). Να σημειωθεί ότι για να εισαχθούν τα επιταχυνσιογραφήματα γίνεται χρήση της εντολής Prescribed displacements και στη φάση της ανάλυσης. Προσοχή πρέπει να δοθεί στις μονάδες, δηλαδή αν είναι 0,01, τότε και το επιταχυνσιογράφημα πρέπει να έχει στον κατακόρυφο άξονα τις μονάδες σε εκατοστά (cm).

Οι σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης των μελετώμενων επιχωμάτων ήταν οι:

i) Σεισμός της Καλαμάτας

-στο άνω όριο σχεδιασμού της Β' ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας κατά Ε.Α.Κ.

ii) Σεισμός του El-Centro

-κοντά στο άνω όριο σχεδιασμού της Γ' ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας κατά Ε.Α.Κ.

iii) Σεισμός του JMA (Kobe, Ιαπωνία, 1995)

-υπέρβαση ορίων σχεδιασμού κατά Ε.Α.Κ



Εικόνα 36. Επιταχυνσιογράφημα (με μονάδα επιτάχυνσης cm/s²), όπως εισήχθη στο PLAXIS, και αντιστοιχεί στο σεισμό της Καλαμάτας.



Εικόνα 37. Επιταχυνσιογράφημα (με μονάδα επιτάχυνσης cm/s²), όπως εισήχθη στο PLAXIS, και αντιστοιχεί στο σεισμό του El-Centro.



Εικόνα 38. Επιταχυνσιογράφημα (με μονάδα επιτάχυνσης cm/s²), όπως εισήχθη στο PLAXIS και αντιστοιχεί, στο σεισμό του Kobe(JMA).

5.3 Απόσβεση

5.3.1 Ιξωδοπλαστική απόσβεση γεωυλικών

Σημαντικό στοιχείο κατά τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης είναι απόσβεση των εδαφικών υλικών που οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά του εδάφους και έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος της ελαστικής ενέργειας κατά τη διάδοση των κυμάτων να μετατρέπεται σε θερμότητα. Η απόσβεση αυτή στο γίνεται με χρήση του μητρώου απόσβεσης [C] που υπολογίζεται με βάση τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας των υλικών καθώς και τους συντελεστές απόσβεσης α και β του Rayleigh.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \qquad (1.1)$$

Όπως φαίνεται, ο συντελεστής α καθορίζει την επίδραση της μάζας στην απόσβεση του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο ευκολότερα αποσβένονται οι χαμηλότερες συχνότητες. Ο συντελεστής β την επίδραση της ακαμψίας στην απόσβεση του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του β τόσο ευκολότερα αποσβένονται οι μεγαλύτερες συχνότητες.

Το μητρώο απόσβεσης όπως φαίνεται διατύπωση εξαρτάται από το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης και από τον καταστατικό νόμο συμπεριφοράς των υλικών. Για τις περιπτώσεις και για τα υλικά (εδαφικά υλικά) που ακολουθούν το γραμμικό κριτήριο συμπεριφοράς Mohr-Coulomb το μητρώο απόσβεσης είχε την παρακάτω μορφή και προσαρμοζόταν ανάλογα με το συχνοτικό περιεχόμενο του κάθε σεισμού.



Εικόνα 39. Προτεινόμενη απόσβεση κατά Rayleigh για τα εδαφικά υλικά.

Αντίστοιχα, για τα υλικά (άρρηκτος βράχος) που η συμπεριφορά τους ήταν γραμμικήελαστική(Linear-elastic model).



Εικόνα 40. Προτεινόμενη απόσβεση κατά Rayleigh για τη συμπαγή βραχόμαζα.

Οι παραπάνω οι καμπύλες απόσβεσης προσαρμόζονται ανάλογα με το συχνοτικό περιεχόμενο κάθε σεισμού και προκύπτουν οι εκάστοτε συντελεστές απόσβεσης Rayleigh α και β. για τα υλικά που συμπεριφέρονται σύμφωνα με τον καταστατικό νόμο των Mohr-Coulomb οι συντελεστές α και β κυμαίνονται γύρω από τις τιμές α= 0.2827, β=0.0053 ,ενώ τα υλικά που ακολουθούν τον γραμμικό ελαστικό νόμο συμπεριφοράς οι συντελεστές α και β κυμαίνονται γύρω από τις τιμές α=0.1060 , β=0.0020 .

5.3.2 Απορροφητικά όρια και πεπλάτυνση της γεωμετρίας

Το παρέχει στους χρήστες του τη δυνατότητα πλευρικής απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας με την εφαρμογή στα πλευρικά όρια της γεωμετρίας του κάθε προβλήματος απορροφητικών ορίων. Αυτό απαγορεύει την ανάκλαση των διατμητικών κυμάτων και συνδυάζεται συνήθως με μια πεπλάτυνση της γεωμετρίας του μελετώμενου προβλήματος. Παρακάτω διασαφηνίζονται τα παραπάνω με την απεικόνιση του τρόπου που χρησιμοποιήθηκαν στα μελετώμενα οπλισμένα επιχώματα.

5.4 Ορισμός των συντελεστών Βελτίωσης της Σεισμικής Απόκρισης των Οπλισμένων Επιχωμάτων, ISR

Για την καλύτερη εποπτεία της συνεισφοράς των γεωπλεγμάτων στη σεισμική απόκριση των επιχωμάτων μελέτης, κρίθηκε εύλογος ο ορισμός κατάλληλων συντελεστών βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, οι συντελεστές βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης ISR (Coefficient of Improvement of Seismic Response)μπορούν να οριστούν ως ο λόγος της μέγιστης μετατόπισης του άοπλου επιχώματος προς τη μέγιστη μετατόπιση του οπλισμένου και έχει ως:

$$ISR_{t} = \frac{M \acute{\epsilon} \gamma ι \sigma \tau \eta \, O \lambda ι \kappa \eta \, M \varepsilon \tau \alpha \tau \circ \sigma \pi i \sigma \eta \, O \pi \lambda i \sigma \mu \acute{\epsilon} v \circ \upsilon \, E \pi i \chi \acute{\omega} \mu \alpha \tau \circ \varsigma}{M \acute{\epsilon} \gamma i \sigma \tau \eta \, O \lambda ι \kappa \eta \, M \varepsilon \tau \alpha \tau \circ \sigma \pi i \sigma \eta \, A \circ \sigma \lambda \circ \upsilon \, E \pi i \chi \acute{\omega} \mu \alpha \tau \circ \varsigma}$$

ή αλλιώς,

$$ISR_{t} = \frac{Maximum Total Dispacement of Reinforced Embnkment}{Maximum Total Dispacement of Unreinforced Embnkment}$$

και όσον αφορά το οριζόντιο επίπεδο είναι:

$$\mathbf{ISR_h} = \frac{M \acute{\epsilon} \gamma \iota \sigma \tau \eta \, O \rho \iota ζ \acute{o} ν \tau \iota \alpha \, M \epsilon \tau \alpha \tau \acute{o} \pi \iota \sigma \eta \, O \pi \lambda \iota \sigma \mu \acute{e} \nu o \upsilon \, E \pi \iota \chi \acute{\omega} \mu \alpha \tau o \varsigma}{M \acute{\epsilon} \gamma \iota \sigma \tau \eta \, O \rho \iota ζ \acute{o} \nu \tau \iota \alpha \, M \epsilon \tau \alpha \tau \acute{o} \pi \iota \sigma \eta \, A o \pi \lambda o \upsilon \, E \pi \iota \chi \acute{\omega} \mu \alpha \tau o \varsigma}$$

ή αλλιώς,

 $ISR_{h} = \frac{Maximum \ Horizontal \ Dispacement \ of \ Reinforced \ Embnkment}{Maximum \ Horizontal \ Dispacement \ of \ Unreinforced \ Embnkment}$

ενώ, όσον αφορά το κατακόρυφο επίπεδο(καθίζηση/δυναμική συνίζηση) είναι:

ή αλλιώς,

$$\mathbf{ISR_v} = \frac{Maximum \, \textit{Vertical Dispacement of Reinforced Embnkment}}{Maximum \, \textit{Vertical Dispacement of Unreinforced Embnkment}}$$

Με άλλα λόγια, όπως γίνεται αντιληπτό και από τον τρόπο ορισμού των παραπάνω συντελεστών, όσο μικρότερη είναι η τιμή του εν λόγω συντελεστή τόσο καλύτερη είναι η σεισμική απόκριση του οπλισμένου επιχώματος, δηλαδή, τόσο μικρότερες είναι οι παραμορφώσεις εξαιτίας της εκάστοτε σεισμικής διέγερσης.

5.5 Παραμετρική μελέτη της σεισμικής απόκρισης του επιχώματος Α

5.5.1 Προσομοίωση

Κατά την προσομοίωση του επιχώματος Α υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης είναι απαραίτητη η εισαγωγή της γειτονικής και υποκείμενης συμπαγούς βραχόμαζας. Επίσης, εισάγονται τα κατάλληλα απορροφητικά όρια όπως αναλύθηκε προηγουμένως στο υποκεφάλαιο 5.3.2.



Εικόνα 41. Τρόπος προσομοίωσης του επιχώματος Α κατά τη δυναμική του ανάλυση.

Οι ιδιότητες των υλικών παρατίθενται παρακάτω:

| Material | γsat(kN/m2) | γunsat(kN/m²) | E(Kpa) | v | φ(°) | c(kPa) | ψ(°) | condition | criterion |
|----------------|-------------|---------------|---------|------|------|--------|------|-----------|-----------|
| Υλικό επίχωσης | 19 | 18 | 25000 | 0.3 | 30 | 20 | 0 | drained | MC |
| Υλικό | | | | | | | | | |
| Εξυγίανσης | 19 | 17 | 75000 | 0.3 | 35 | 5 | 0 | drained | МС |
| Συρματοκιβώτια | 19.6 | 17.1 | 100000 | 0.25 | - | - | - | drained | LE |
| | | | | | | | | Non - | |
| Βραχόμαζα | - | 25 | 5500000 | 0.2 | - | - | - | porous | LE |

Πίνακας 8. Μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών του επιχώματος Α.

5.5.2 Αποτελέσματα

5.5.2.1 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό της Καλαμάτας

5.5.2.1.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων

Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης



Διάγραμμα 9. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 10. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 11. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 12. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 13. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις(Horizontal Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 14. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.

| S=2m | L= 0.25H, S=2m | | | S=1m | L= 0.25H, S=1m | | |
|----------|-------------------|-------|-------|----------|-------------------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 130 | 130 | 80 | 0 | 130 | 130 | 80 |
| 100 | 125 | 124 | 80 | 100 | 124 | 124 | 80 |
| 1000 | 106 | 105 | 72 | 1000 | 99 | 96 | 68 |
| 10000 | 83 | 66 | 60 | 10000 | 80 | 61 | 58 |

B) Πινακοποιημένη παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

| S=2m | L= 0.5H, S=2m | | | S=1m | | L= 0.5H, S=1m | |
|----------|------------------|-------|-------|----------|-------|------------------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 130 | 130 | 80 | 0 | 130 | 130 | 80 |
| 100 | 123 | 123 | 80 | 100 | 121 | 121 | 75 |
| 1000 | 93 | 93 | 65 | 1000 | 87 | 81 | 61 |
| 10000 | 71 | 56 | 53 | 10000 | 67 | 52 | 51 |

| S=2m | L= 0.75H, S=2m | | | S=1m | L= 0.75H, S=1m | | |
|----------|-------------------|-------|-------|----------|-------------------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 130 | 130 | 80 | 0 | 130 | 130 | 80 |
| 100 | 126 | 126 | 78 | 100 | 122 | 122 | 75 |
| 1000 | 92 | 91 | 62 | 1000 | 79 | 76 | 55 |
| 10000 | 65 | 46 | 48 | 10000 | 64 | 42 | 48 |

Πίνακας 9. Τελικές ολικές (Total), οριζόντιες (Horizontal) και κατακόρυφες (Vertical) μετατοπίσεις (Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Διάγραμμα 15. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των τελικών ολικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 16. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 17. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 18. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε οριζόντια λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των τελικών ολικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 19. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε οριζόντια λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 20. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε οριζόντια λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.

| S=2m | L=0.25H | | | S=1m | L=0.25H | | |
|----------|---------|------|------|----------|---------|------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.96 | 0.95 | 1 | 100 | 0.95 | 0.95 | 1.00 |
| 1000 | 0.82 | 0.81 | 0.9 | 1000 | 0.76 | 0.74 | 0.85 |
| 10000 | 0.64 | 0.51 | 0.75 | 10000 | 0.62 | 0.47 | 0.73 |

B) Πινακοποιημένη παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

| S=2m | L= 0.5H | | | S=1m | L= 0.5H | | |
|----------|---------|------|------|----------|---------|------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.95 | 0.95 | 1.00 | 100 | 0.93 | 0.93 | 0.94 |
| 1000 | 0.72 | 0.72 | 0.81 | 1000 | 0.67 | 0.62 | 0.76 |
| 10000 | 0.55 | 0.43 | 0.66 | 10000 | 0.52 | 0.40 | 0.64 |

| S=2m | L=0.75H | | | S=1m | L=0.75H | | |
|----------|---------|------|------|----------|---------|------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 100 | 0.94 | 0.94 | 0.94 |
| 1000 | 0.71 | 0.70 | 0.78 | 1000 | 0.61 | 0.58 | 0.69 |
| 10000 | 0.50 | 0.35 | 0.60 | 10000 | 0.49 | 0.32 | 0.60 |

Πίνακας 10. Πινακοποιημένη παρουσίαση των συντελεστών βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.

5.5.2.1.3 Αποτελέσματα της σεισμική φόρτισης του επιχώματος Α υπό τη διέγερση της Καλαμάτας στο προγραμματιστικό περιβάλλον του PLAXIS



Εικόνα 42. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά όπλιση).



Εικόνα 43. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά όπλιση).



Εικόνα 44. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά όπλιση).



Εικόνα 45. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά όπλιση).



Εικόνα 46. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας,, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=10000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικά όπλιση).



Εικόνα 47. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας,, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=10000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικά όπλιση).



Εικόνα 48. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=10000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικά όπλιση).



Εικόνα 49. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.75h, δυστένεια EA=10000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταζύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m (βέλτιστη τεχνικά όπλιση).



Εικόνα 50. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια ΕΑ=100KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2.0m (χείριστη όπλιση).



Εικόνα 51.Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=100KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2.0m (χείριστη όπλιση).



Εικόνα 52. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=100KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2.0m (χείριστη όπλιση).



Εικόνα 53. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Α, υπό τη σεισμική διέγερση του σεισμού της Καλαμάτας, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.25h, δυστένεια EA=100KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=2.0m (χείριστη όπλιση).

5.5.2.2 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό του El-Centro

5.5.2.2.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων

Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης



Διάγραμμα 21. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 22. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 23. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 24. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 25. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 26. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.

B) Πινακοποιημένη παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

| S=2m | L=0.25H | | | S=1m | L=0.25H | | |
|----------|---------|-------|-------|----------|---------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 481 | 479 | 297 | 0 | 481 | 479 | 297 |
| 100 | 438 | 437 | 277 | 100 | 427 | 426 | 271 |
| 1000 | 332 | 330 | 229 | 1000 | 304 | 303 | 215 |
| 10000 | 253 | 218 | 178 | 10000 | 238 | 205 | 168 |

| S=2m | L= 0.5H | | | S=1m | L= 0.5H | | |
|----------|---------|-------|-------|----------|---------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 481 | 479 | 297 | 0 | 481 | 479 | 297 |
| 100 | 426 | 424 | 262 | 100 | 398 | 396 | 244 |
| 1000 | 265 | 264 | 181 | 1000 | 236 | 227 | 163 |
| 10000 | 163 | 128 | 117 | 10000 | 144 | 111 | 107 |

| S=2m | L=0.75H | | | S=1m | L=0.75H | | |
|----------|---------|-------|-------|----------|---------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 481 | 479 | 297 | 0 | 481 | 479 | 297 |
| 100 | 421 | 423 | 258 | 100 | 392 | 390 | 237 |
| 1000 | 244 | 242 | 160 | 1000 | 200 | 199 | 132 |
| 10000 | 136 | 107 | 97 | 10000 | 128 | 90 | 92 |

Πίνακας 11. Τελικές ολικές (Total), οριζόντιες (Horizontal) και κατακόρυφες (Vertical) μετατοπίσεις(Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.

5.5.2.2.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης



Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Διάγραμμα 27. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 28. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 29. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 30. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 31. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 32. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Α και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.

5.6 Παραμετρική μελέτη της σεισμικής απόκρισης του επιχώματος Β

5.6.1 Προσομοίωση

Κατά τη δυναμική προσομοίωση του επιχώματος, όπως σημειώθηκε παραπάνω στο κεφάλαιο 5.3.2, γίνεται πεπλάτυνση των ορίων της γεωμετρίας και εισαγωγή απορροφητικών ορίων.



Εικόνα 54. Τρόπος προσομοίωσης του μελετώμενου επιχώματος Β κατά τη δυναμική του ανάλυση.
5.6.2 Αποτελέσματα

5.6.2.1 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό της Καλαμάτας

5.6.2.1.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων

Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης



Διάγραμμα 33. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 34. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 35. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας



Διάγραμμα 36. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 37. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις(Horizontal Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 38. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.

| s=1m | L=0.5h=2m | | | s=0.5m | L=0.5h=2m | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 (άοπλο) | 141 | 139 | 95 | 0 (άοπλο) | 141 | 139 | 95 |
| 100 | 127 | 125 | 80 | 100 | 109 | 108 | 74 |
| 1000 | 117 | 115 | 70 | 1000 | 87 | 86 | 62 |
| 10000 | 110 | 108 | 68 | 10000 | 79 | 78 | 61 |

| s=1m | L=1h=4m | | | s=0.5m | L= 1h=4m | | |
|-----------|---------|-------|-------|-----------|----------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 (άοπλο) | 141 | 139 | 95 | 0 (άοπλο) | 141 | 139 | 95 |
| 100 | 120 | 117 | 72 | 100 | 104 | 100 | 65 |
| 1000 | 105 | 102 | 42 | 1000 | 68 | 64 | 33 |
| 10000 | 93 | 92 | 37 | 10000 | 50 | 46 | 29 |

| s=1m | L=1.5h=6m | | | s=0.5m | L=1.5h=6m | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|--|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | |
| 0 (άοπλο) | 141 | 139 | 95 | 0 (άοπλο) | 141 | 139 | 95 | |
| 100 | 116 | 115 | 74 | 100 | 101 | 101 | 64 | |
| 1000 | 103 | 102 | 41 | 1000 | 64 | 59 | 32 | |
| 10000 | 73 | 72 | 20 | 10000 | 46 | 39 | 25 | |

Πίνακας 12. Τελικές ολικές (Total), οριζόντιες (Horizontal) και κατακόρυφες (Vertical) μετατοπίσεις (Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.

5.6.2.1.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης



Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Διάγραμμα 39. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των τελικών ολικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 40. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 41. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των τελικών ολικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας



Διάγραμμα 42. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.



Διάγραμμα 43. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.

| s=1m | | L=0.5h, S=1m | | s=0.5m | | L= 0.5h, S=0.5m | |
|----------|------|-----------------|------|-----------|------|--------------------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 (άοπλο) | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.90 | 0.90 | 0.84 | 100 | 0.77 | 0.78 | 0.78 |
| 1000 | 0.83 | 0.83 | 0.74 | 1000 | 0.62 | 0.62 | 0.65 |
| 10000 | 0.78 | 0.78 | 0.72 | 10000 | 0.56 | 0.56 | 0.64 |

| s=1m | L=1h, S=1m | | s=0.5m | L= 1h, S=0.5m | | | |
|----------|------------|------|--------|------------------|------|------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 (άοπλο) | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.85 | 0.84 | 0.76 | 100 | 0.74 | 0.72 | 0.68 |
| 1000 | 0.74 | 0.73 | 0.44 | 1000 | 0.48 | 0.46 | 0.35 |
| 10000 | 0.66 | 0.66 | 0.39 | 10000 | 0.35 | 0.33 | 0.31 |

| s=1m | L=1.5h, S=1m | | s=0.5m | | L=1.5h, S=0.5m | | |
|-----------|-----------------|------|--------|-----------|-------------------|------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 (άοπλο) | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 (άοπλο) | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.82 | 0.83 | 0.78 | 100 | 0.72 | 0.73 | 0.67 |
| 1000 | 0.73 | 0.73 | 0.43 | 1000 | 0.45 | 0.42 | 0.34 |
| 10000 | 0.52 | 0.52 | 0.26 | 10000 | 0.33 | 0.28 | 0.21 |

Πίνακας 13. Πινακοποιημένη παρουσίαση των συντελεστών βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού της Καλαμάτας.

5.6.2.2 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό του El-Centro

5.6.2.2.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων

Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης



Διάγραμμα 44. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 45. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 46. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 47. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 48. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 49. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.

| S=1m | L=0.5h=2m | | | S=0.5m | | L=0.5h=2m | |
|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 (άοπλο) | 334 | 328 | 207 | 0 (άοπλο) | 334 | 328 | 207 |
| 100 | 290 | 287 | 155 | 100 | 221 | 218 | 136 |
| 1000 | 279 | 276 | 140 | 1000 | 180 | 180 | 113 |
| 10000 | 260 | 258 | 138 | 10000 | 184 | 184 | 115 |

| S=1m | L=1h=4m | | | S=0.5m | L=1h=4m | | |
|-----------|---------|-------|-------|-----------|---------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 (άοπλο) | 334 | 328 | 207 | 0 (άοπλο) | 334 | 328 | 207 |
| 100 | 272 | 269 | 119 | 100 | 184 | 176 | 93 |
| 1000 | 240 | 235 | 52 | 1000 | 135 | 120 | 41 |
| 10000 | 194 | 189 | 44 | 10000 | 112 | 89 | 40 |

| S=1m | L=1.5h=6m | | | S=0.5m | L=1.5h=6m | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 (άοπλο) | 334 | 328 | 207 | 0 (άοπλο) | 334 | 328 | 207 |
| 100 | 270 | 267 | 122 | 100 | 183 | 173 | 95 |
| 1000 | 237 | 232 | 52 | 1000 | 127 | 122 | 38 |
| 10000 | 192 | 187 | 34 | 10000 | 90 | 87 | 23 |

Πίνακας 14. Τελικές ολικές (Total), οριζόντιες (Horizontal) και κατακόρυφες (Vertical) μετατοπίσεις (Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.

5.6.2.2.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης



Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Διάγραμμα 50. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 51. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 52. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 53. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 54. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.



Διάγραμμα 55. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro

| s=1m | L=0.5h=2m | | | s=0.5m | | L=0.5h=2m | |
|----------|-----------|------|------|----------|------|-----------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.87 | 0.88 | 0.75 | 100 | 0.66 | 0.66 | 0.66 |
| 1000 | 0.84 | 0.84 | 0.68 | 1000 | 0.54 | 0.55 | 0.55 |
| 10000 | 0.78 | 0.79 | 0.67 | 10000 | 0.55 | 0.56 | 0.56 |

| s=1m | L=1h=4m | | | s=0.5m | L= 1h=4m | | |
|----------|---------|------|------|----------|----------|------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.81 | 0.82 | 0.57 | 100 | 0.55 | 0.54 | 0.45 |
| 1000 | 0.72 | 0.72 | 0.25 | 1000 | 0.40 | 0.37 | 0.20 |
| 10000 | 0.58 | 0.58 | 0.21 | 10000 | 0.34 | 0.27 | 0.19 |

| s=1m | | L=1.5h=6m | | s=0.5m | | | |
|----------|------|-----------|------|----------|------|------|------|
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.81 | 0.81 | 0.59 | 100 | 0.55 | 0.53 | 0.46 |
| 1000 | 0.71 | 0.71 | 0.25 | 1000 | 0.38 | 0.37 | 0.18 |
| 10000 | 0.57 | 0.57 | 0.16 | 10000 | 0.27 | 0.27 | 0.11 |

Πίνακας 15. Πινακοποιημένη παρουσίαση των συντελεστών βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του El-Centro.

5.6.2.3 Δυναμική ανάλυση για το σεισμό του Kobe (JMA)

5.6.2.3.1 Αποτελέσματα των τελικών μετατοπίσεων

Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης



Διάγραμμα 56. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού JMA.



Διάγραμμα 57. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού JMA



Διάγραμμα 58. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού JMA.



Διάγραμμα 59. Τελικές ολικές μετατοπίσεις (Total Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού JMA.



Διάγραμμα 60. Τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Horizontal Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού JMA.



Διάγραμμα 61. Τελικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (Vertical Displacements) σε λογαριθμική οριζόντια κλίμακα για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού JMA.

| s=1m | L=0.5h,s=1m | | | s=0.5m | | | |
|----------|-------------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 1250 | 1240 | 520 | 0 | 1250 | 1240 | 520 |
| 100 | 1020 | 1020 | 425 | 100 | 1010 | 1000 | 410 |
| 1000 | 996 | 995 | 400 | 1000 | 987 | 987 | 390 |
| 10000 | 991 | 990 | 395 | 10000 | 991 | 990 | 390 |

| s=1m | L=1h,s=1m | | | s=0.5m | L= 1h, s=0.5m | | |
|----------|-----------|-------|-------|----------|---------------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 1250 | 1240 | 520 | 0 | 1250 | 1240 | 520 |
| 100 | 1020 | 1020 | 307 | 100 | 900 | 900 | 250 |
| 1000 | 881 | 879 | 245 | 1000 | 713 | 713 | 220 |
| 10000 | 863 | 863 | 220 | 10000 | 704 | 704 | 212 |

| s=1m | L=1.5h,s=1m | | | s=0.5m | L=1.5h,s=0.5m | | |
|----------|-------------|-------|-------|----------|---------------|-------|-------|
| EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) | EA(KN/m) | T(mm) | H(mm) | V(mm) |
| 0 | 1250 | 1240 | 520 | 0 | 1250 | 1240 | 520 |
| 100 | 1010 | 1010 | 311 | 100 | 887 | 887 | 240 |
| 1000 | 848 | 838 | 223 | 1000 | 684 | 684 | 149 |
| 10000 | 778 | 779 | 190 | 10000 | 664 | 664 | 120 |

Πίνακας 16. Τελικές ολικές (Total), οριζόντιες (Horizontal) και κατακόρυφες (Vertical) μετατοπίσεις (Displacements) για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού JMA.

5.6.2.3.2 Αποτελέσματα της βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης



Α) Διαγραμματική παρουσίαση της παραμετρικής ανάλυσης

Διάγραμμα 62. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης με κριτήριο τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του JMA.



Διάγραμμα 63. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του JMA



Διάγραμμα 64. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του JMA.



Διάγραμμα 65. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των ολικών τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του JMA.



Διάγραμμα 66. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των οριζόντιων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του JMA



Διάγραμμα 67. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης σε λογαριθμική κλίμακα με κριτήριο τη μείωση των κατακόρυφων τελικών μετατοπίσεων, για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος B και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού του JMA.

| | | L=0.5h, | | | | L=0.5h, | |
|----------|------|---------|------|----------|------|---------|------|
| s=1m | | s=1m | | s=0.5m | | s=0.5m | |
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 100 | 0.81 | 0.81 | 0.79 |
| 1000 | 0.80 | 0.80 | 0.77 | 1000 | 0.79 | 0.80 | 0.75 |
| 10000 | 0.79 | 0.80 | 0.76 | 10000 | 0.79 | 0.80 | 0.75 |

| | | L=1h, | | | | L= 1h, | | |
|----------|------|-------|------|----------|--------|--------|------|--|
| s=1m | s=1m | | | s=0.5m | s=0.5m | | | |
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| 100 | 0.82 | 0.82 | 0.59 | 100 | 0.72 | 0.73 | 0.48 | |
| 1000 | 0.70 | 0.71 | 0.47 | 1000 | 0.57 | 0.58 | 0.42 | |
| 10000 | 0.69 | 0.70 | 0.42 | 10000 | 0.56 | 0.57 | 0.41 | |

| | | L=1.5h, | | | | L=1.5h, | |
|----------|------|---------|------|----------|------|---------|------|
| s=1m | | s=1m | | s=0.5m | | s=0.5m | |
| EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv | EA(KN/m) | ISRt | ISRh | ISRv |
| 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.81 | 0.81 | 0.60 | 100 | 0.71 | 0.72 | 0.46 |
| 1000 | 0.68 | 0.68 | 0.43 | 1000 | 0.55 | 0.55 | 0.29 |
| 10000 | 0.62 | 0.63 | 0.37 | 10000 | 0.53 | 0.54 | 0.23 |

Πίνακας 17. Πινακοποιημένη παρουσίαση των συντελεστών βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης για τους διάφορους συνδυασμούς όπλισης του επιχώματος Β και για τη σεισμική φόρτιση του σεισμού JMA.

5.6.2.3.3 Αποτελέσματα της σεισμική φόρτισης του επιχώματος Β υπό τη διέγερση του JMA στο προγραμματιστικό περιβάλλον του PLAXIS

Παρακάτω ενδεικτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα του συνόλου των δυναμικών αναλύσεων υπό τη σεισμική φόρτιση JMA, για άοπλο και οπλισμένο επίχωμα, με γεωπλέγματα δυστένειας ΕΑ=1000KN/m και για διάφορα μήκη l και κατακόρυφες μεταξύ τους αποστάσεις S.



Εικόνα 55. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, χωρίς στοιχεία όπλισης.



Εικόνα 56. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, χωρίς στοιχεία όπλισης.



Εικόνα 57. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, χωρίς στοιχεία όπλισης.



Εικόνα 58. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, χωρίς στοιχεία όπλισης.



Εικόνα 59. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 60. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 61.Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταζύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 62. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 63. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 64. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 65. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταζύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 66. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=0.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 67. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 68. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 69. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταζύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 70. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 71. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 72. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 73. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταζύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 74. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα Β, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.0h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 75. Παραμορφωμένος κάνναβος για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1m.


Εικόνα 76. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 77 Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 78. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=1.0m.



Εικόνα 79. Παραμορφωμένος κάνναβος για τη σεισμική διέγερση JMA για το επίχωμα B με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 80. Διανύσματα μετατόπισης για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 81. Αποτύπωση του πεδίου των ολικών μετατοπίσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταζύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.



Εικόνα 82. Αποτύπωση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μέσω του διαγράμματος σχετικών αποκλίνουσων τάσεων για το επίχωμα B, υπό τη σεισμική διέγερση JMA, με μήκος γεωπλεγμάτων L=1.5h, δυστένεια EA=1000KN/m και κατακόρυφη απόσταση μεταζύ των γεωπλεγμάτων S=0.5m.

6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

[1] Υπό στατικές συνθήκες φόρτισης επιτεύχθηκε, με κατάλληλη όπλιση, αύξηση του συντελεστή ασφαλείας κατά 30%. Η πιο κρίσιμη παράμετρος για την σταθερότητα του επιχώματος Β αναδείχθηκε το μήκος των γεωπλεγμάτων, ενώ όλες οι παράμετροι στο επίχωμα Α συμμετείχαν σημαντικά στην μεταβολή του FS.

[2] Όπως αναμενόταν, η αύξηση του μήκους των γεωπλεγμάτων οδηγεί σε βαθύτερες και μεγαλύτερες επιφάνειες δυνητικής αστοχίας.

[3] Η συνεισφορά των γεωπλεγμάτων, όπως αποδείχθηκε, είναι καθοριστική στη βελτίωση της σεισμικής απόκρισης των οπλισμένων επιχωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τα σχετικά δυστενή γεωπλέγματα (EA=1000KN/m) οι συντελεστές βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης ISR κυμαίνονται ως εξής :

- για το επίχωμα Α

ISR_h : μεταξύ 0.4 και 0.8, δηλαδή μια μείωση της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης έως 60% μπορεί να επιτευχθεί. Η τελική μείωση εξαρτάται όπως αποδείχθηκε από την εκάστοτε σεισμική διέγερση όπως και από τον τρόπο όπλισης (δυστένεια, μήκος και διάταξη γεωπλεγμάτων).

ISR_v: μεταξύ 0.4 και 0.9, δηλαδή μια μείωση της μέγιστης κατακόρυφης μετατόπισης έως 60% μπορεί να επιτευχθεί. Η τελική μείωση εξαρτάται όπως αποδείχθηκε από την εκάστοτε σεισμική διέγερση όπως και από τον τρόπο όπλισης (δυστένεια, μήκος και διάταξη γεωπλεγμάτων).

- για το επίχωμα Β

ISR_h : μεταξύ 0.4 και 0.8, δηλαδή μια μείωση της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης έως 60% μπορεί να επιτευχθεί. Η τελική μείωση εξαρτάται όπως αποδείχθηκε από την εκάστοτε σεισμική διέγερση όπως και από τον τρόπο όπλισης (δυστένεια, μήκος και διάταξη γεωπλεγμάτων).

ISR_v: μεταξύ 0.2 και 0.75, δηλαδή μια μείωση της μέγιστης κατακόρυφης μετατόπισης έως 80% μπορεί να επιτευχθεί. Η τελική μείωση εξαρτάται όπως αποδείχθηκε από την εκάστοτε σεισμική διέγερση όπως και από τον τρόπο όπλισης (δυστένεια, μήκος και διάταξη γεωπλεγμάτων).

[4] Όσον αφορά την αξονική δυκαμψία (δυστένεια) των γεωπλεγμάτων, είναι ξεκάθαρο ότι τα σχετικά δυστενή γεωπλέγματα με μια τιμή Ε·Α περί τα 1000KN/m προσφέρουν ως και 30% μικρότερες ολικές μετατοπίσεις σε σχέση με τα ευτενή γεωπλέγματα των 100KN/m. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι γεωπλέγματα με αξονική δυσκαμψία μεγαλύτερη των 2000KN/m συναντώνται σπάνια και η μελέτη τους έγινε για αμιγώς ακαδημαϊκούς λόγους. Επιπλέον, από τις αναλύσεις φαίνεται ότι τα γεωπλέγματα με δυστένεια Ε·Α μεγαλύτερη των 2000KN/m δεν προσφέρουν αξιοσημείωτη βελτίωση, ενώ αυξάνουν φυσικά το κόστος του οπλισμού.

[5] Όπως αποδείχθηκε στις αναλύσεις για το επίχωμα Β το μήκος των γεωπλεγμάτων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και κατά τη σεισμική φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, τα γεωπλέγματα με μήκος 1.0h ή 1.5h προσφέρουν ως 45% μικρότερες κατακόρυφες μετατοπίσεις.

[6] Υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης, η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων είναι καθοριστικής επίσης σημασίας για τη σεισμική απόκριση του επιχώματος. Αναλυτικότερα, μέθοδοι όπλισης στις οποίες τα γεωπλέγματα απέχουν μεταξύ τους s=0.5m προσφέρουν έως 30% μικρότερες ολικές μετατοπίσεις.

[7] Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης η δυστένεια ΕΑ των γεωπλεγμάτων αφορά τόσο τις κατακόρυφες και όσο τις οριζόντιες μετατοπίσεις, ενώ το μήκος τους L και η κατακόρυφη μεταξύ τους απόσταση S αφορούν κύρια τη μείωση των κατακόρυφων και των οριζόντιων μετατοπίσεων αντιστοίχως.

[8] Λαμβάνοντας όλα τα αποτελέσματα υπόψη, όπως και το γεγονός ότι το τελικό κόστος της όπλισης του επιχώματος εξαρτάται από την ποσότητα, το μήκος και την αξονική δυσκαμψία των γεωπλεγμάτων, προκύπτει ότι:

για το επίχωμα Α, η βέλτιση τεχνικο-οικονομικά λύση περιλαμβάνει την όπλιση του με γεωπλέγματα δυστενειας Ε·A=1000 KN/m, μήκους και L=0.75Hκαι κατακόρυφης απόστασης s=1.0m.

για το επίχωμα Β, η βέλτιση τεχνικο-οικονομικά λύση περιλαμβάνει την όπλιση του με γεωπλέγματα δυστενειας Ε·A=1000 KN/m, μήκους και L=1.0H=4m και κατακόρυφης απόστασης s=0.5m.

6.2 Προτάσεις

[1] Προτείνεται κατά την εκπόνηση αντίστοιχων εργασιών να χρησιμοποιηθούν κατά τη δυναμική ανάλυση μη γραμμικά κριτήρια συμπεριφοράς των υλικών, όπως το μοντέλο Hardening Soil Small Strain, που υποστηρίζεται από τις νεώτερες εκδόσεις του PLAXIS.

[2] Επιπρόσθετα, να χρησιμοποιηθούν στοιχεία διεπιφάνειας με απομειωμένες τις ιδιότητες των υλικών για να διερευνηθεί το μέγεθος της μεταβολής των αποτελεσμάτων σε σχέση με την πλήρη επαφή στοιχείων όπλισης και εδάφους.

Βιβλιογραφία

Martin Holst (2012), "Numerical and Analytical Analysis of Geogrid Reinforced Soil Wall Subjected to Dynamic Loading", Master Thesis in Civil and Trasport Engineering, Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology

Brian Oluwatobi Oyegbile (2011), "Parametric Studies on the Behaviour of Reinforced Soil Retaining Walls under Static and Dynamic Loadings", Master Thesis in Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures, Department of Civil Engineering, The National Technical University, Athens

Γ. Γκαζέτας, Ι. Αναστασόπουλος, Β. Δρόσος, Τ. Γεωργαράκος, Ρ. Κουρκουλή (2007),
"Σεισμική Συμπεριφορά Τοίχων Ωπλισμένης Γης στην Νέα Δονητική Τράπεζα του Ε.Μ.Π.",
Γεωτεχνικές εφαρμογές γεωσυνθετικών υλικών, ΤΕΕ, Αθήνα

Δ.Α.Ράπτη (2006), "Τοίχοι οπλισμένου εδάφους υπό σεισμική φόρτιση – Αριθμητική ανάλυση συμπεριφοράς", Διατριβή για το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης, Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

M. Miraboutalebi1, F. Askari, O. Farzaneh, "Effect of bedrock inclination on seismic slope stability according to Iran seismically data", International Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 4, December 2011

Brinkgreve, R.B.J., Broere, W, and Waterman, D. 2006. *PLAXIS Version 8 Manual*. The Netherlands.

Koohyar Faizi, Danial Jahed Armaghani, Azman Kassim, Mahshid Lonbani, "Evaluation of Geotextiles on Embankment Displacement under Seismic Load", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 18 [2013], Bund. C

Γιαννουσάκης, Μ,. (2013). " Ανάλυση ευστάθειας επιχωμάτων έργων οδοποιίας οπλισμένων με συρματοκιβώτια", Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ

Πανταζής Ε., (2011). "Στατική και δυναμική επίλυση πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων" Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Χ.Τζατζανύφος, ΠΑΝΓΑΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., διάλεξη

Νάσκος Ν. (2007), "Οπλισμένα επιχώματα-Στοιχεία σχεδιασμού κατασκευής και ελέγχων ευστάθειας", Γεωτεχνικές Εφαρμογές Γεωσυνθετικών Υλικών, Τ.Ε.Ε., Αθήνα

Bathurst, R. J. and Hatami, K. (1998), "Seismic response analysis of a geosynthetic – reinforced soil retaining wall", Geosythetics International, Vol. 5, pp. 127-166.

Bathurst, R. J. and Hatami, K. (1998), "Influence of reinforcement stiffness, length and base condition on seismic response of geosynthetic reinforced retaining walls", Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, (eds. R. K. Rowe), Atlanda, Georgia, USA, Vol. II, pp. 613-616

Tatsuoka, F., Tateyama, M., Uchimura, T. and Koseki, J. (1997), "Geosynthetic – reinforced soil retaining walls as important permanent structures", ASCE, Geosynthetics International, Vol. 4, pp. 81-135.

Tatsuoka, F., Koseki, J., Tateyama, M., Munaf, Y. and Horii, K. (1998), "Seismic stability against high seismic loads of geosynthetic - reinforced retaining structures", Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, (eds. R. K. Rowe), Atlanda, Georgia, USA, Vol. I, pp. 103-142

Tatsuoka, F., Tateyama, M., Uchimura, T. and Koseki, J. (1997), "Geosynthetic – reinforced soil retaining walls as important permanent structures", ASCE, Geosynthetics International, Vol. 4, pp. 81-135

Tatsuoka, F., Koseki, J. and Tateyama, M. (1997), "Performance of reinforced soil structures during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake", Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, (eds. H. Ochiai, N. Yasufuku and K. Omine) Fukuoka, Kyushu, Japan, Balkema, Vol. II, pp. 973-1011

Sandri, D. (1994), "Retaining walls stand up to the Northridge earthquake", ASCE, Geotechnical Fabrics Report, pp. 30-33

Bonaparte, R. and Schmertmann, G.R. (1987) "Reinforcement Extensibility in Reinforced Soil Wall Design" The Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures, pp. 409–457

Goodman, R.E., R.L. Taylor and T. L. Berkke (1968) "A model for the Mechanics of Jointed Rock" J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 94(3), pp. 637-659

Jones, C.J.F.P. (1994) "Economic Construction of Reinforced Soil Structures" Proc. of the Intl. Symp. on Recent Case Histories of Permanent Geosynthetic - Reinforced soil Retaining Wall, Tokyo, Nov. 6-7, 1992 (Editors: Tatsuoka, H. Leshchinsky, D.); A.A. Balkema, pp. 103-106

J. Huang, A. Bhandari, and X. Yang, (2011) "Numerical Modelling of Geosynthetic -Reinforced Earth Structures and Geosynthetic-Soil Interactions", Geotechnical Engineering Journal of the SEGS & AGSSEA Vol. 42

Rowe, R.K. and Ho, S.K (1992) "Finite Element Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Walls" Geosynthetic 1993 Conference, Vancouver, Canada.

Rowe, R. K. and Skinner, G.D. (2001) "Numerical Analysis of Geosynthetic Reinforced Retaining Wall Constructed on a Layered Soil Foundation" Geotextiles and Geomembranes, 19, pp. 387–412

Schlosser, F. and N.T. Long (1972) "Comport de la Terre Armee dans les Ouvrages de Soutenement" Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 299-306, Madrid, 1972

Schlosser, F. and Long, N.T. (1974) "Recent Results in French Research on Reinforced Earth", Journal of ASCE.

Schlosser, F. and I. Juran (1979) "Parameteres de Calcul des Sols Artificiellement Ameliores: Raport General Séance 8", Proc. of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 1-29

Schlosser, F., Juran, I, Jacobsen, H. M., "Soil Reinforcement", General Report, 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Finland, 1983.

El-Emam, M. M. and Bathurst R. J. (2004), "Experimental design, instrumentation and interpretation of reinforced soil wall response using a shaking table", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics 4, 2004, pp. 13-32

Long, P. V., Bergado, D. T. and Balasubramaniam, A. S. (1996), "Stability analysis of reinforced and unreinforced embankments on soft ground", Geosynthetics International, Vol. 3, No. 5, pp. 583-604

Rowe, R. K. and Ho, S. K. P. (1996), "Some insights into reinforced wall behaviour based on finite element analysis", Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, (Ochiai H., Yasufuku N. and Omine K., editors), Fukuoka, Kyushu, Japan, Vol. I, November 1996, pp. 485-490

<u>Ιστότοποι</u>

www.geognosi.gr

www.panmetal.gr

www.egnatia.gr

www.agriculturesolutions.com

www.odotechniki.com

www.archiexpo.com

www.odotechniki.com

www.plaxis.com

www.wikipedia.com