

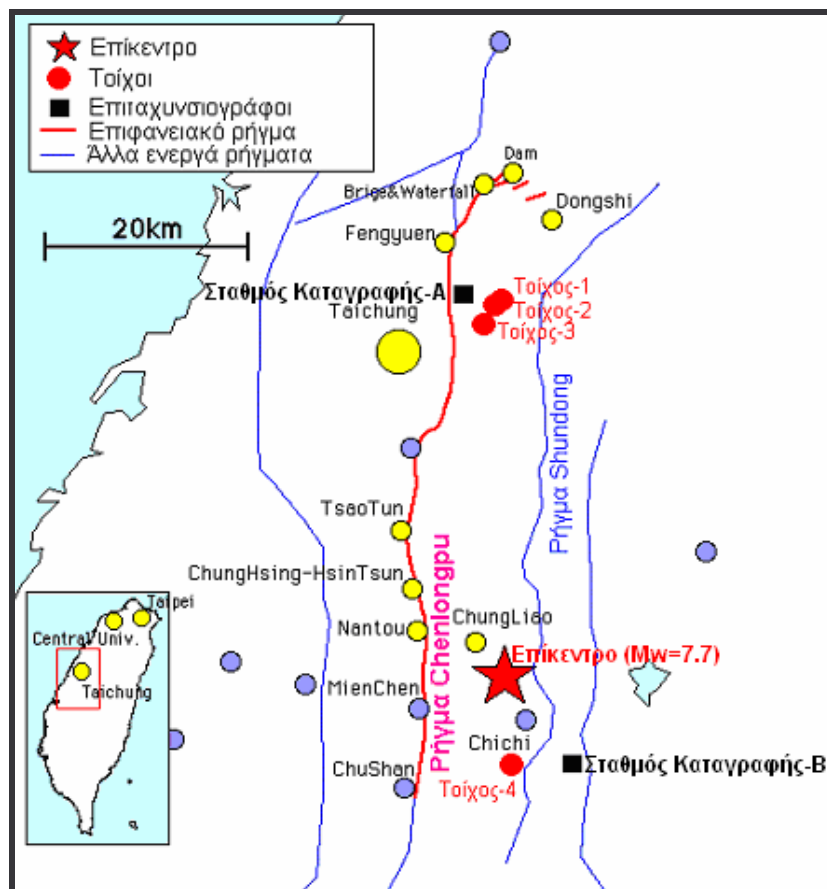
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΙΧΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ – Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΑΪΒΑΝ (1999)

Γ. Α. Αθανασόπουλος
Καθηγητής
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών

Δ. Α. Ράπτη
Πολιτικός Μηχανικός, Μ. Δ. Ε.
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών

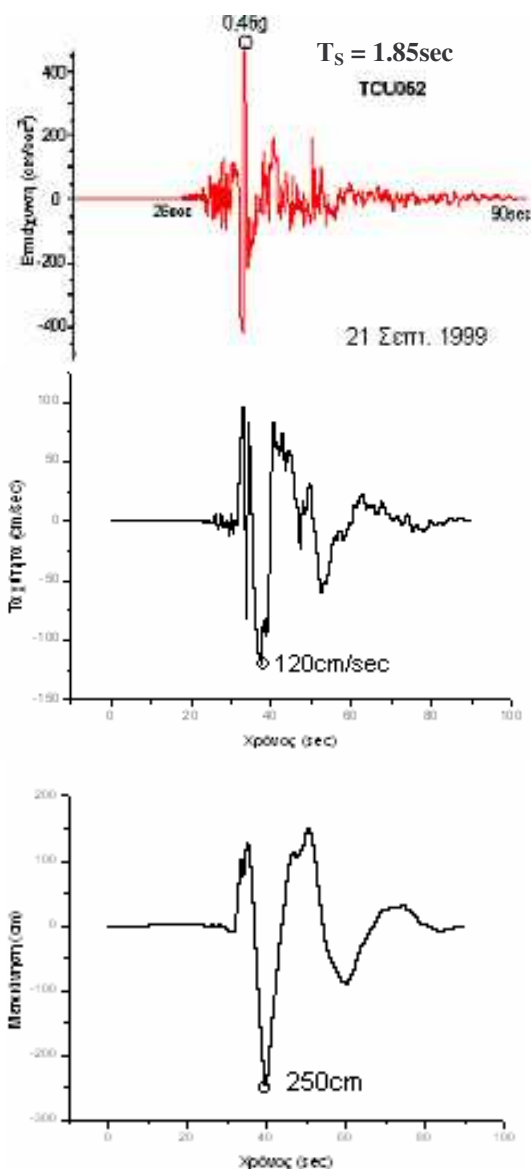
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμική απόκριση τεσσάρων τοίχων οπλισμένου εδάφους στην Ταϊβάν με πρόσοψη από κυβόλιθους μικρών διαστάσεων, γεωσυνθετικούς οπλισμούς και ύψος κυμαινόμενο από 3.20 m έως 5.60 m, αναλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η συμπεριφορά των συγκεκριμένων τοίχων κατά το σεισμό του Σεπτεμβρίου 1999 της Ταϊβάν ($M_w=7.7$) κυμάνθηκε από επιτυχής έως ανεπιτυχής: δύο από αυτούς οδηγήθηκαν στην κατάρρευση, ένας εμφάνισε πολύ μικρές βλάβες ενώ ο τέταρτος τοίχος παρέμεινε πρακτικά άθικτος. Στις θέσεις των τεσσάρων τοίχων πραγματοποιήθηκε γεωτεχνική έρευνα για τον προσδιορισμό των εδαφικών χαρακτηριστικών.

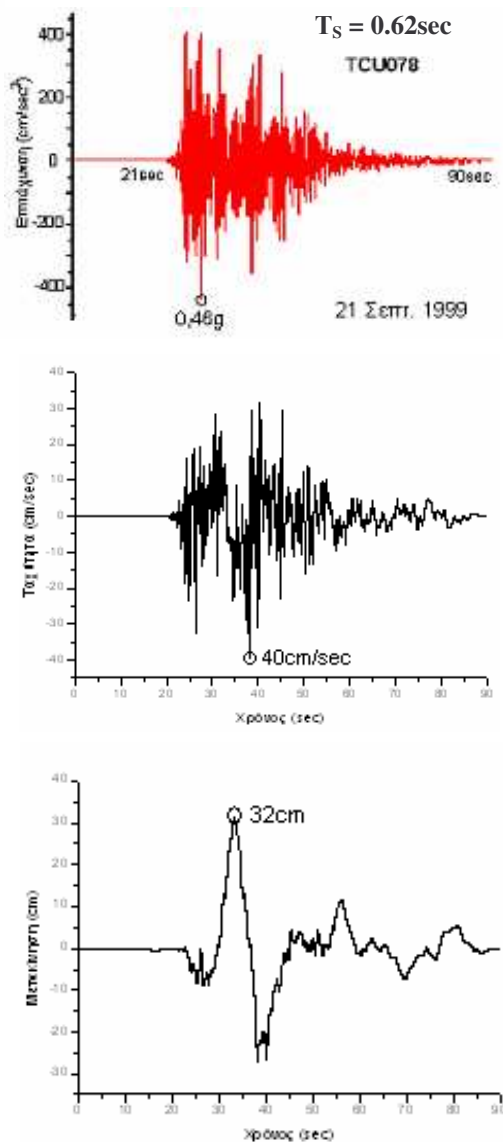


Σχήμα 1: Χάρτης της Ταϊβάν με τις θέσεις του επικέντρου του σεισμού, του ίχνους του ρήγματος, των τεσσάρων τοίχων οπλισμένου εδάφους και των δύο καταγραφών της επιφανειακής σεισμικής κίνησης

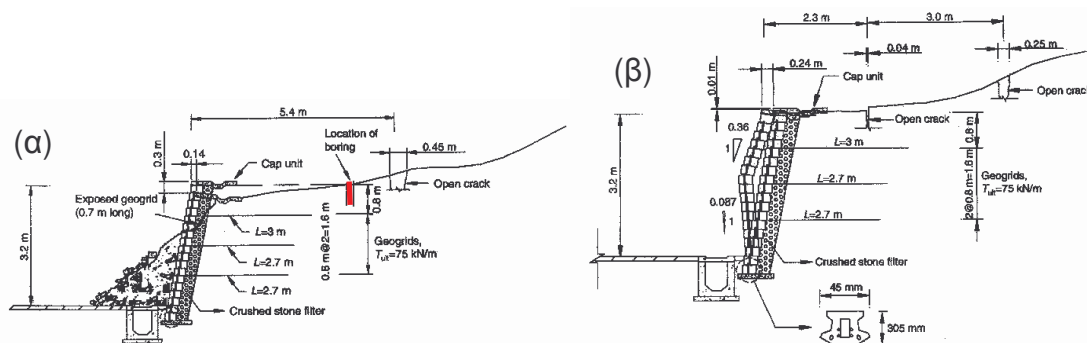
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ-Α



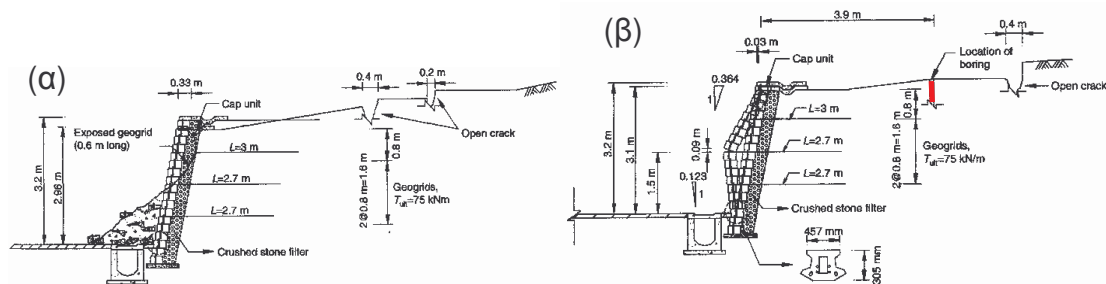
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ-Β



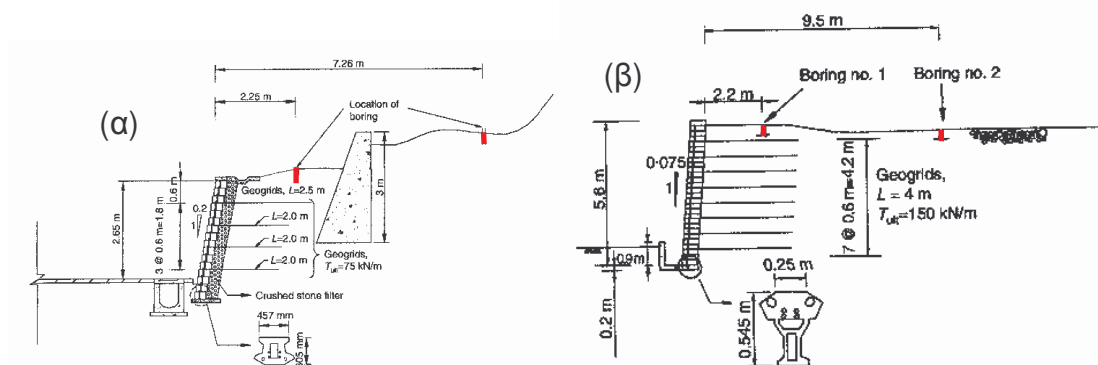
Σχήμα 2: Χρονικές ιστορίες εδαφικών επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετακινήσεων στις δύο θέσεις καταγραφής



Σχήμα 3: Τοίχος-1: (α) τμήμα που κατέρρευσε, (β) τμήμα με μεγάλες παραμορφώσεις



Σχήμα 4: Τοίχος-2: (α) τμήμα που κατέρρευσε, (β) τμήμα με μεγάλες παραμορφώσεις



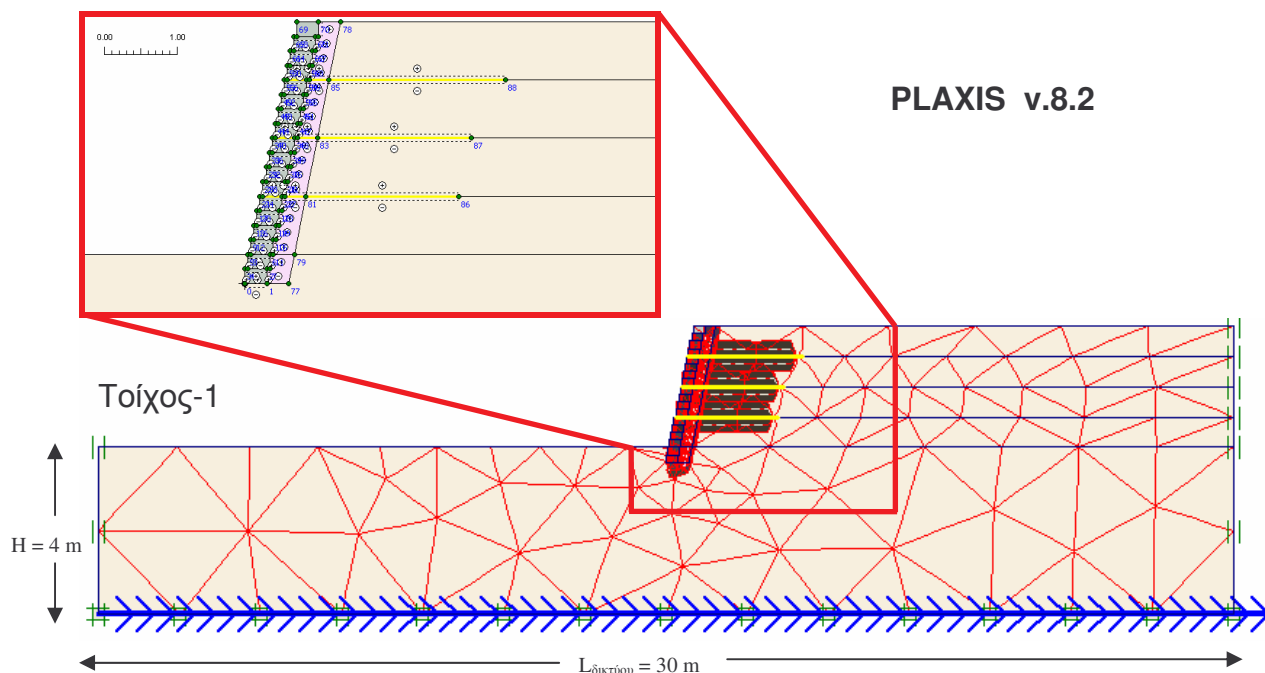
Σχήμα 5: (α) Τοίχος-3, (β) Τοίχος-4

Πίνακας 1: Εδαφικά χαρακτηριστικά στις θέσεις των τεσσάρων τοίχων με βάση τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας

Τοίχος	1	2	3	4
Ταξινόμηση εδάφους	ML, CL	SM, GM	SM, ML	GP-GM, GM
Ειδικό βάρος (kN/m^3)	21.3	19.1	18.9	22.7
Περιεκτικότητα σε νερό (%)	16.5	12.1	12.1	3.9
Συνοχή (kPa)	0	0	0	0
Γωνία τριβής ($^\circ$)	29.2-30.4	29.2-30.4	33.6-34.8	48.1-49.8
N_{SPT}	8-10	~10	6-7	≥ 100

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η σεισμική συμπεριφορά των τεσσάρων τοίχων αναλύθηκε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (κώδικας PLAXIS v.8.2). Οι μη-γραμμικές αναλύσεις βασίστηκαν στα γνωστά γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των τοίχων, στα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεωσυνθετικών οπλισμών και τις τιμές των εδαφικών παραμέτρων που προέκυψαν από γεωτεχνικές έρευνες στη θέση των τοίχων. Για τη συμπεριφορά των εδαφικών υλικών χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb ενώ ως διεγέρσεις βάσης χρησιμοποιήθηκαν τα επιταχυνσιογραφήματα που καταγράφηκαν σε μικρή απόσταση από τις θέσεις των τοίχων. Η σεισμική ευστάθεια των τοίχων (εσωτερική και εξωτερική) αναλύθηκε επίσης με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας (κώδικας MSEW).



	Εδαφικό Επίχωμα	Στραγγιστήριο
Συμπεριφορά	Ελαστοπλαστική (M-C)	Ελαστοπλαστική (M-C)
Ειδικό βάρος (kN/m ³)	21.3	22
Μέτρο Ελαστικότητας (υπολογισμένο από τις τιμές N _{SPT}) (kN/m ²)	19000	60000
Λόγος Poisson	0.3	0.3
Συνοχή (kN/m ²)	5 (≈0)	5 (≈0)
Γωνία τριβής (°)	30.4	40

Διεπιφάνειες

Είδος διεπιφάνειας	Συνάφεια (kN/m ²)	Γωνία τριβής (°)
Κυβόλιθος - κυβόλιθος	155 / 0	30.4 / 8
Κυβόλιθος – έδαφος	0	30.4
Κυβόλιθος – στραγγιστήριο	0	40
Κυβόλιθος – οπλισμός	180 / 0	21 / 8
Έδαφος – οπλισμός	0	25
Στραγγιστήριο - οπλισμός	0	40

Κυβόλιθοι Πρόσοψης

Συμπεριφορά	Γραμμικά ελαστική
Ειδικό βάρος (kN/m ³)	25
Μέτρο Ελαστικότητας (kN/m ²)	28x10 ⁶
Λόγος Poisson	0.2

Γεώπλεγμα Οπλισμών

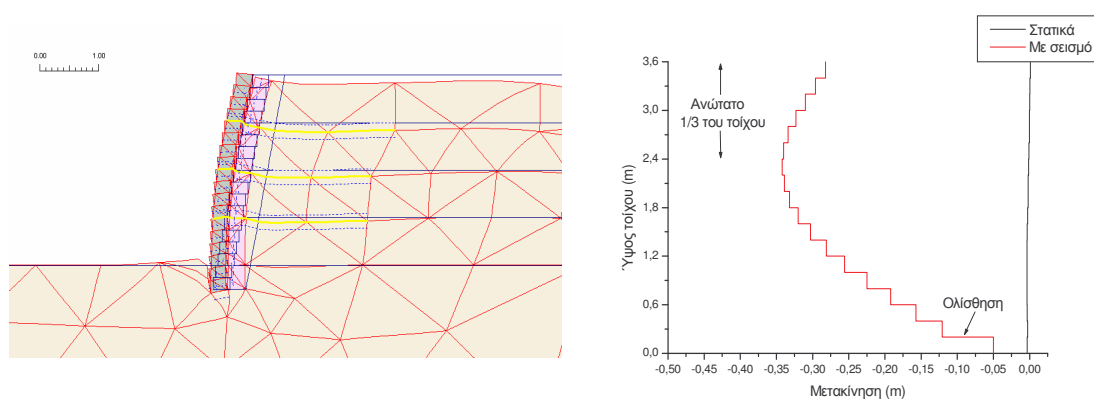
Συμπεριφορά	Ελαστοπλαστική
Εφελκυστική αντοχή (kN/m)	75

Σχήμα 6: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων και τιμές μηχανικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ευστάθειας του Τοίχου-1

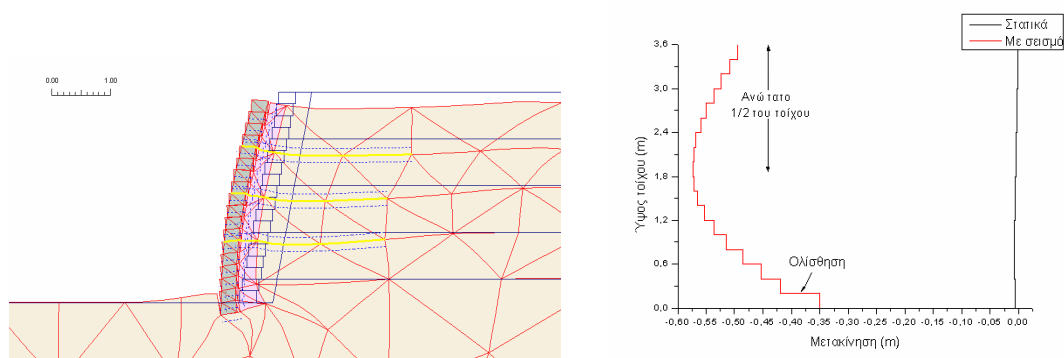
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

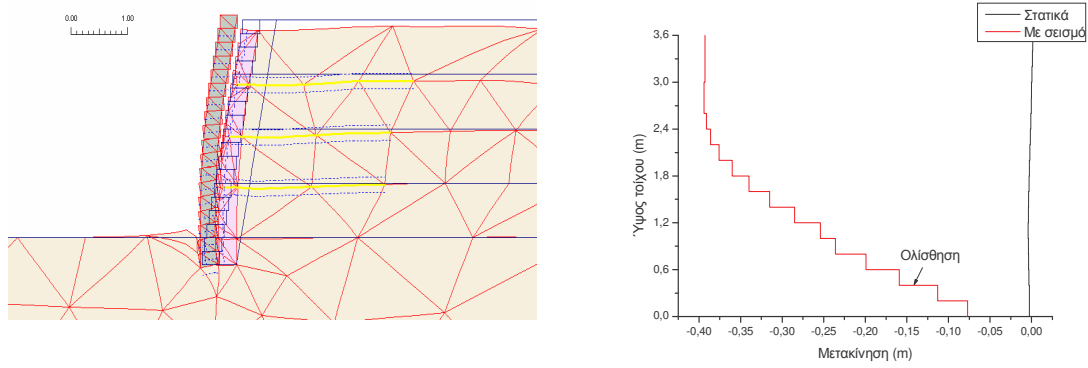
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, και ιδιαίτερα το τελικό παραμορφωμένο σχήμα των τοίχων, παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ομοιότητα με την παρατηρηθείσα συμπεριφορά των τοίχων. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων αναγνωρίστηκαν οι παράγοντες που θα μπορούσαν να δικαιολογήσουν την ανεπιτυχή συμπεριφορά των δύο τοίχων που κατέρρευσαν (μηχανισμός αστοχίας) καθώς και τη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των δύο ευσταθών τοίχων. Διεξήχθησαν επίσης αναλύσεις για τη διερεύνηση της επιρροής ορισμένων σημαντικών παραμέτρων όπως το βάθος θεμελίωσης του πόδα του τοίχου, η κατακόρυφη απόσταση των διαδοχικών στρώσεων οπλισμού (καθώς και το μήκος τους) και η συνεισφορά στην ευστάθεια των τοίχων των κατακόρυφων βλήτρων σύνδεσης διαδοχικών καθ' ύψος κυβόλιθων (στοιχείων) πρόσοψης καθώς και της αποσύνδεσης των οπλισμών από τα στοιχεία πρόσοψης.



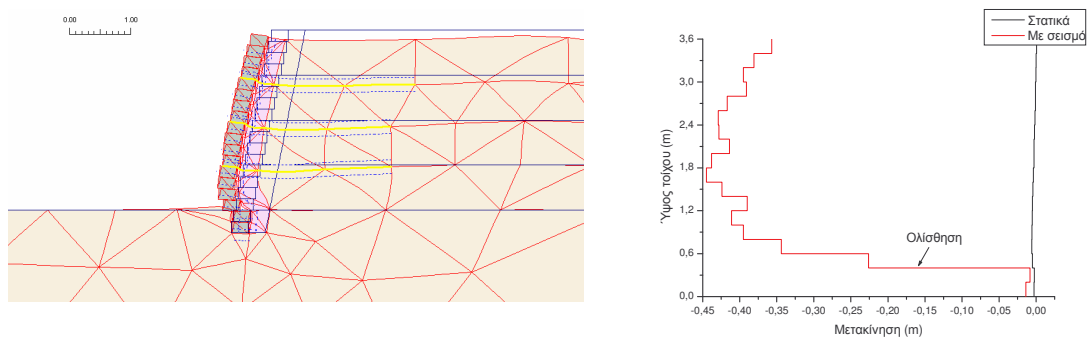
Σχήμα 7: Τοίχος-1: Αποτελέσματα ανάλυσης χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές διαμηκτικής αντίστασης στις διεπιφάνειες



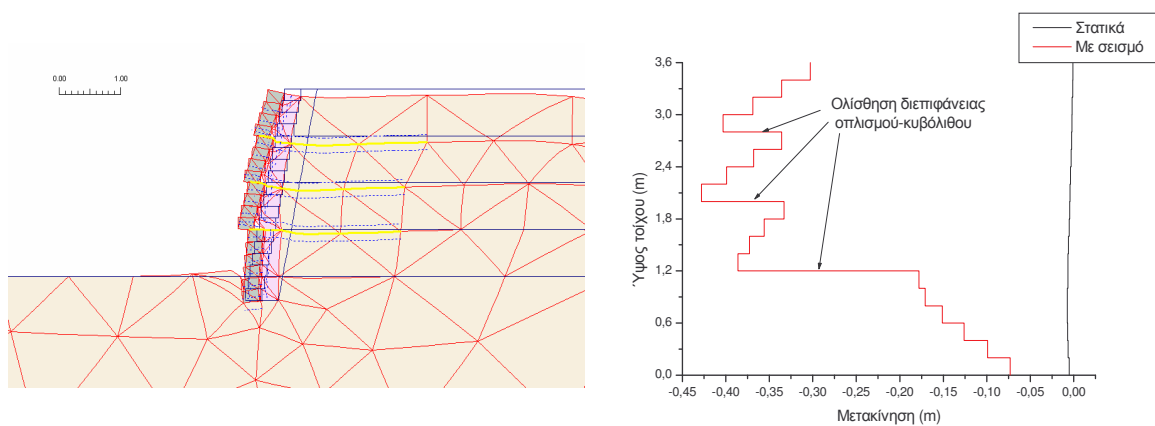
Σχήμα 8: Τοίχος-1: Αποτελέσματα ανάλυσης για την περίπτωση μηδενικού βάθους θεμελίωσης



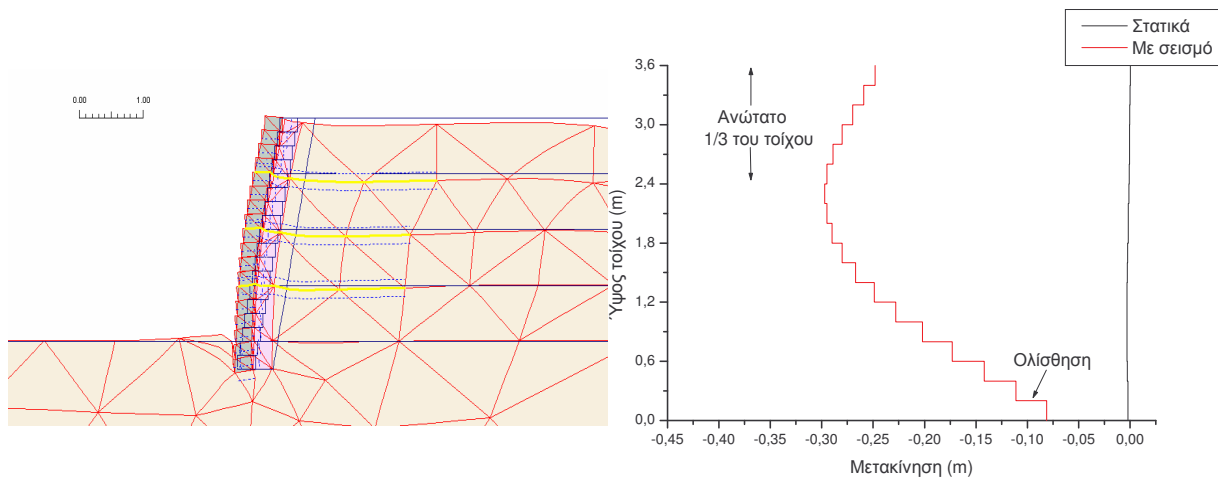
Σχήμα 9: Τοίχος-1: Αποτελέσματα ανάλυσης για την περίπτωση αποσύνδεσης των οπλισμών από την πρόσοψη



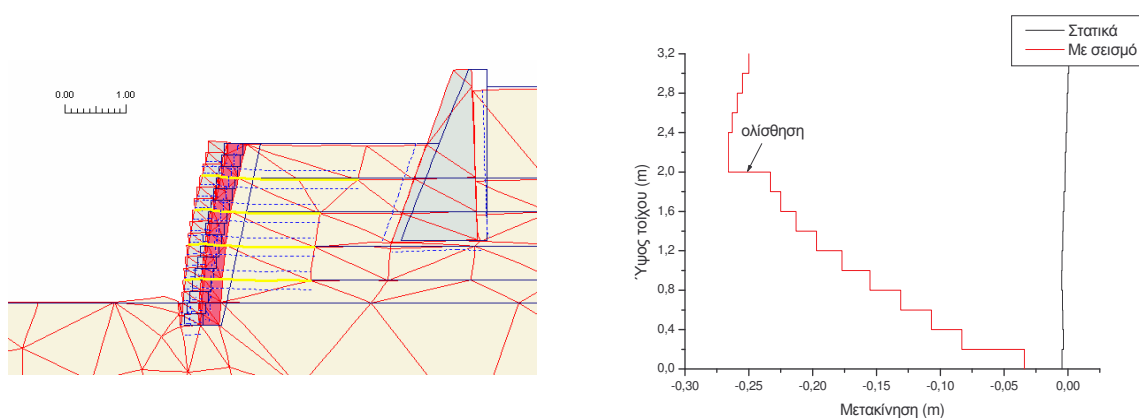
Σχήμα 10: Τοίχος-1: Αποτελέσματα ανάλυσης για την περίπτωση μειωμένης διατμητικής αντίστασης στις διεπιφάνειες μεταξύ κυβόλιθων



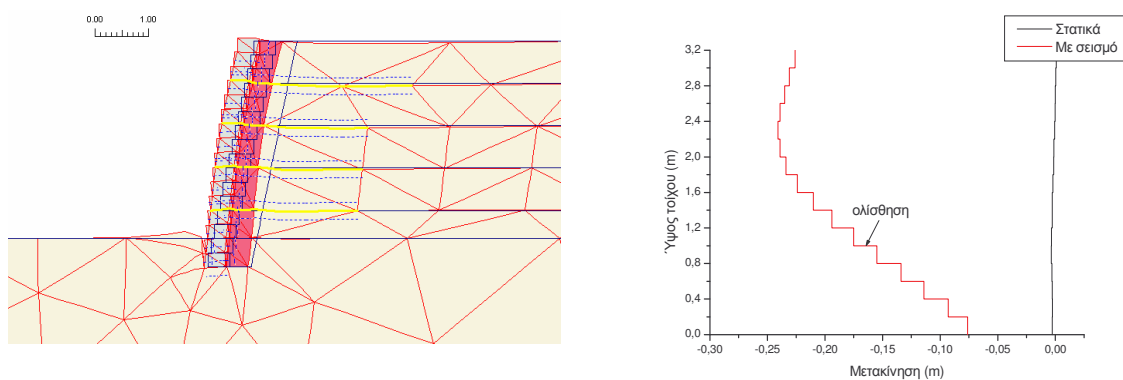
Σχήμα 11: Τοίχος-1: Αποτελέσματα ανάλυσης για την περίπτωση μειωμένης διατμητικής αντίστασης στις διεπιφάνειες μεταξύ κυβόλιθων και οπλισμών



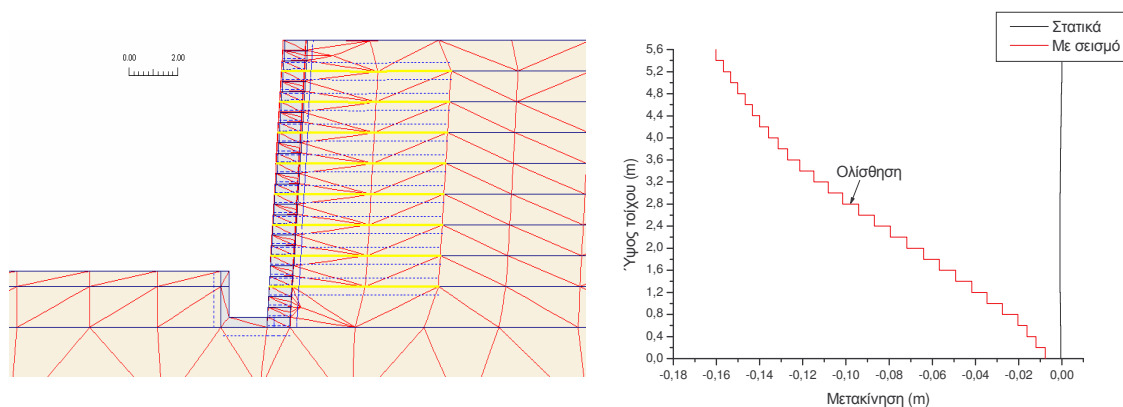
Σχήμα 12: Τοίχος-2: Αποτελέσματα ανάλυσης χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές διατμητικής αντίστασης στις διεπιφάνειες



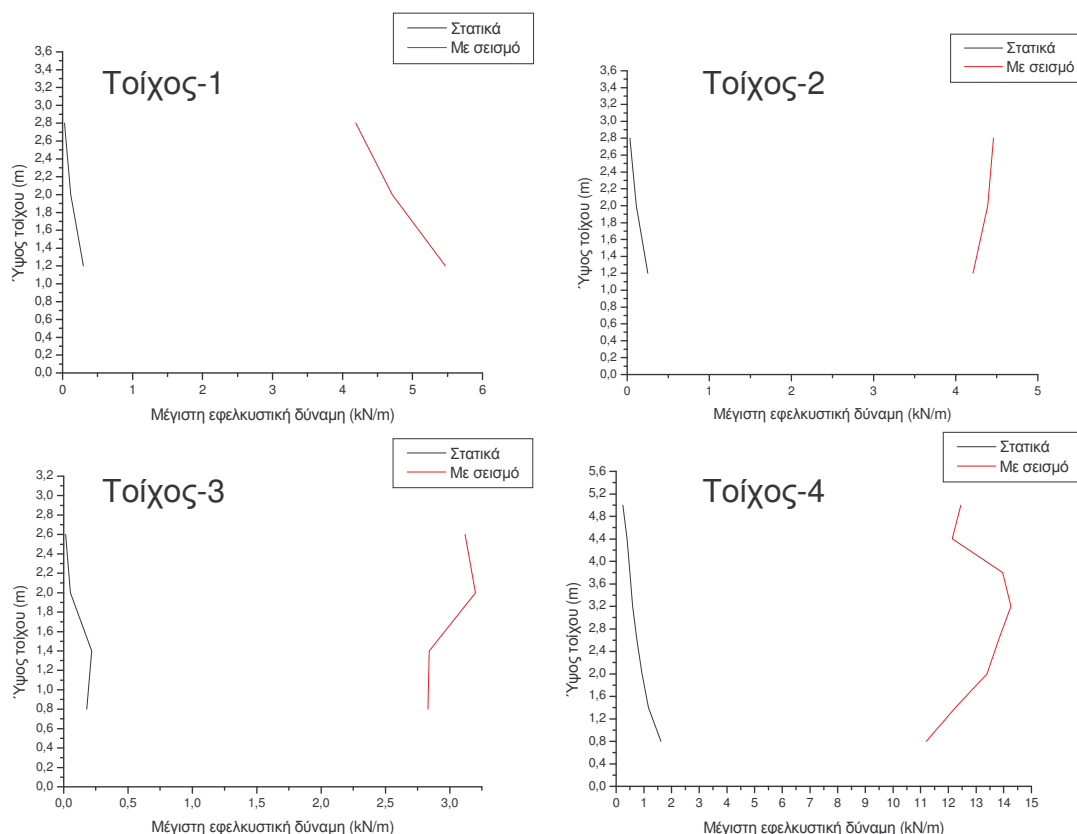
Σχήμα 13: Τοίχος-3: Αποτελέσματα ανάλυσης χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές διατμητικής αντίστασης στις διεπιφάνειες για την περίπτωση της παρουσίας του γειτονικού τοίχου βαρύτητας



Σχήμα 14: Τοίχος-3: Αποτελέσματα ανάλυσης χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές διατμητικής αντίστασης στις διεπιφάνειες για την περίπτωση της απουσίας του γειτονικού τοίχου βαρύτητας



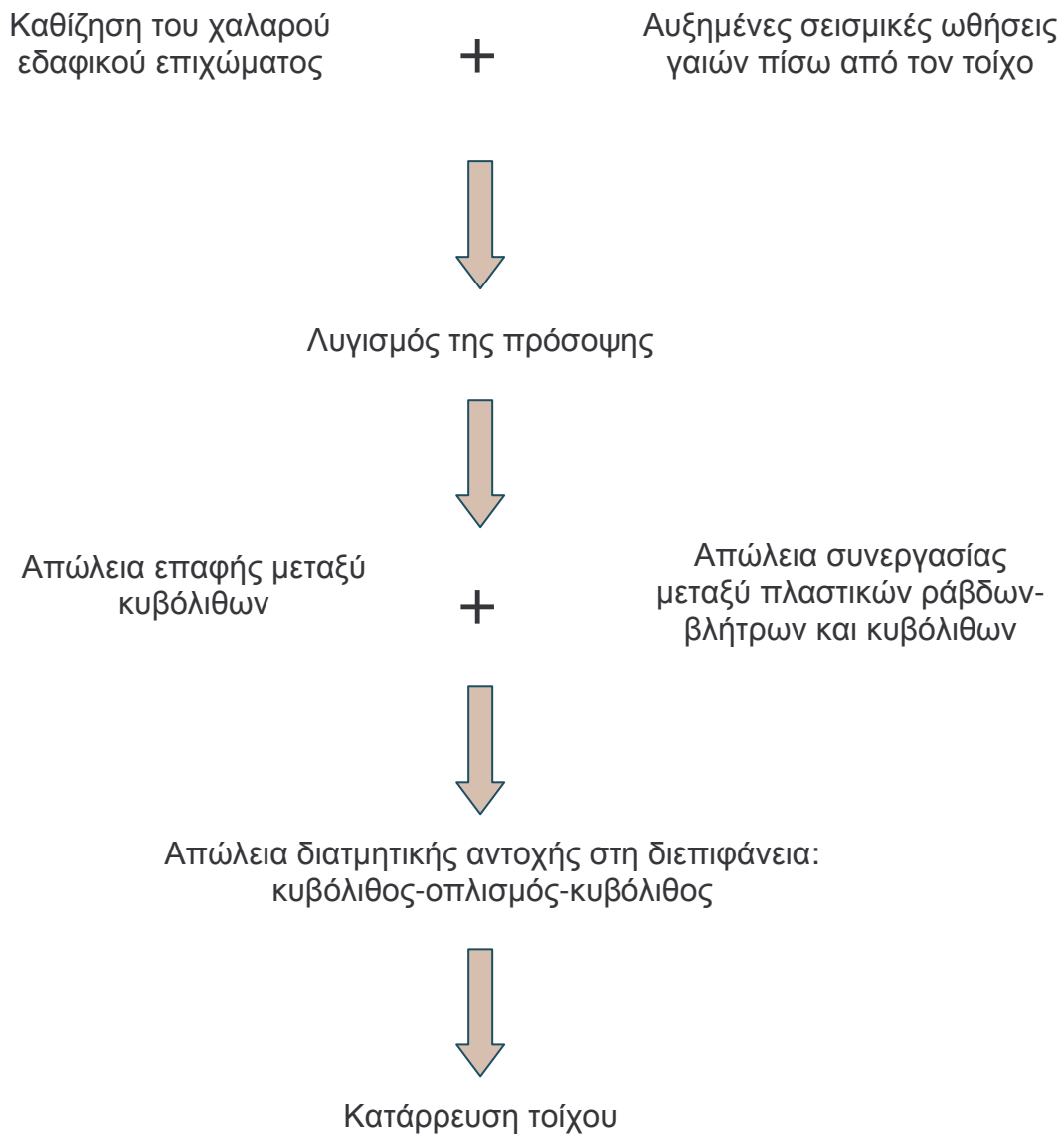
Σχήμα 15: Τοίχος-4: Αποτελέσματα ανάλυσης χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές διατμητικής αντίστασης στις διεπιφάνειες



Σχήμα 16: Κατανομή καθ' ύψος του τοίχου των εφελκυστικών δυνάμεων των στρώσεων οπλισμού

Πίνακας 2: Σύγκριση υπολογισθείσας και παρατηρηθείσας συμπεριφοράς των τεσσάρων τοίχων

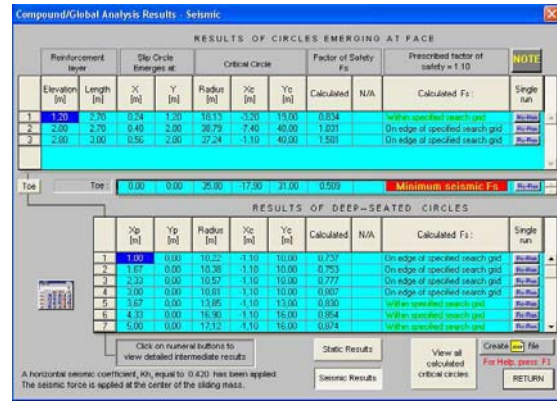
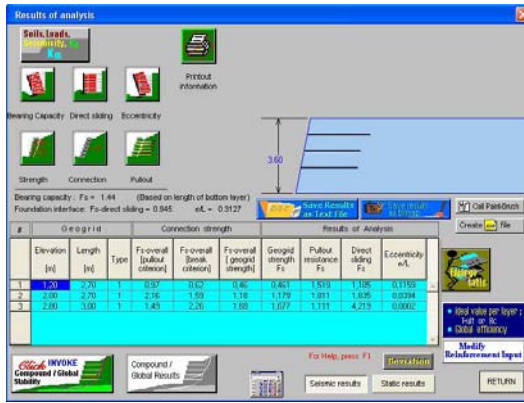
Τοίχος	Υπολογισθείσα δ _h (mm)	Υπολογισθείσα δ _n (mm)	Μετρηθείσα δ _h (mm)	Μετρηθείσα δ _n (mm)
1	340/580	140	470	100
2	340	140	480	100
3	250	50	0	0
4	80	50	0	0



Σχήμα 17: Πιθανός μηχανισμός αστοχίας των τοίχων οπλισμένου εδάφους

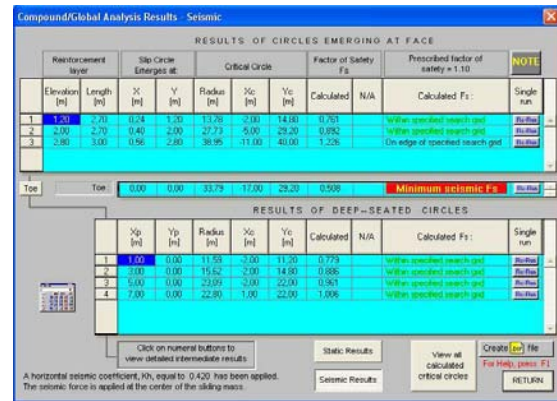
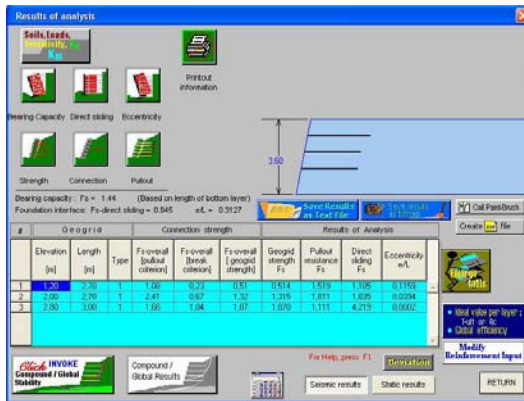
3.2 Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας (Κώδικας MSEW)

Η ευστάθεια των τοίχων αναλύθηκε επίσης με εμπορικά διαθέσιμο λογισμικό οριακής ισορροπίας (MSEW) το οποίο προέβλεψε με επιτυχία τη συμπεριφορά των τοίχων και επέτρεψε τη συσχέτιση μικρότερων της μονάδας συντελεστών ασφάλειας με τη σοβαρότητα των βλαβών που παρατηρήθηκαν στο συγκεκριμένο σεισμό.



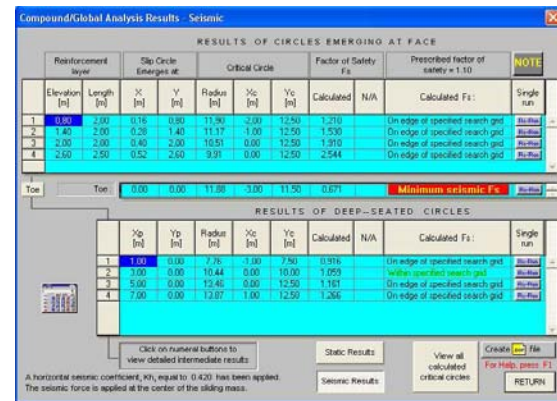
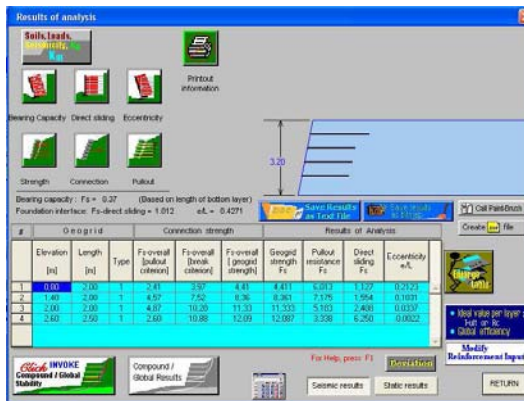
FS=0.5

Σχήμα 18: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας του Τοίχου-1 με τη Μέθοδο Οριακής Ισορροπίας (κώδικας MSEW)



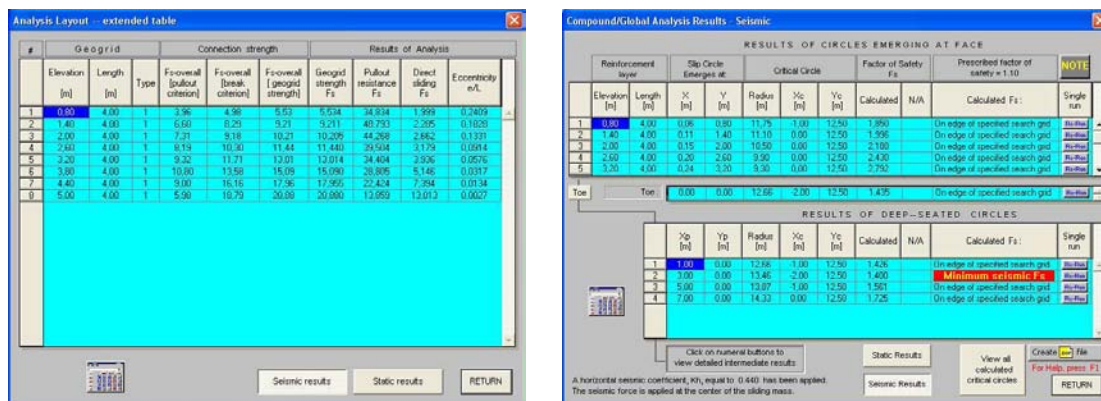
FS=0.5

Σχήμα 19: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας του Τοίχου-2 με τη Μέθοδο Οριακής Ισορροπίας (κώδικας MSEW)



FS=0.7

Σχήμα 20: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας του Τοίχου-3 με τη Μέθοδο Οριακής Ισορροπίας (κώδικας MSEW)



FS=1.4

Σχήμα 21: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας του Τοίχου-4 με τη Μέθοδο Οριακής Ισορροπίας (κώδικας MSEW)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ❖ Η σεισμική συμπεριφορά των τεσσάρων τοίχων οπλισμένου εδάφους προσομοιώθηκε ικανοποιητικά με το “dynamic module” του κώδικα PLAXIS και έγινε δυνατό να προβλεφθεί ο λυγισμός (κύρτωση) της πρόσοψης του τοίχου
- ❖ Ο μικρός αριθμός των στρώσεων οπλισμού (και επομένως η σχετικά μεγάλη μεταξύ τους καθ’ ύψος απόσταση) στον Τοίχο-1 και Τοίχο-2 φαίνεται να συνέβαλε στη σεισμική αστοχία των τοίχων αυτών
- ❖ Η αποσύνδεση των στρώσεων οπλισμού από τα στοιχεία πρόσοψης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των σεισμικών μετακινήσεων στο ανώτερο ήμισυ του τοίχου
- ❖ Η παρουσία των πλαστικών βλήτρων σύνδεσης/εμπλοκής μεταξύ των κυβόλιθων δεν επηρεάζει τη σεισμική συμπεριφορά των τοίχων
- ❖ Η αύξηση του βάθους θεμελίωσης του τοίχου επιφέρει σημαντική μείωση των σεισμικών μετακινήσεων
- ❖ Η δραστική μείωση της διατμητικής αντίστασης στις διεπιφάνειες κυβόλιθος-κυβόλιθος, κυβόλιθος-έδαφος και κυβόλιθος-οπλισμός αυξάνει σημαντικά τις σχετικές ολισθήσεις μεταξύ κυβόλιθων, οδηγώντας στην κατάρρευση του τοίχου
- ❖ Παρατηρήθηκε αρκετά ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ υπολογισθεισών και μετρηθεισών μονίμων παραμορφώσεων του τοίχου
- ❖ Η σύγκριση των συντελεστών ασφάλειας που προέκυψαν με τον κώδικα MSEW με τη συμπεριφορά που προκύπτει από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, υποδεικνύει ότι όταν FS=1 δεν αναμένονται βλάβες, όταν FS=0.7 αναμένονται περιορισμένες βλάβες και όταν FS=0.5 υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ράππη, Δ. Α. (2006), “Τοίχοι Οπλισμένου Εδάφους υπό Σεισμική Φόρτιση - Αριθμητική Ανάλυση Συμπεριφοράς”, Διατριβή για ΜΔΕ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σεπτέμβριος 2006.
- Huang, C. C., Chou, L. H. and Tatsuoka, F. (2003), “Seismic displacements of geosynthetic – reinforced soil modular block walls”, *Geosynthetics International*, Vol. 10, No. 1, pp. 2-23.