

ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΥΠΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

(Περιλαμβάνει 4 Σχήματα, τα οποία, αν προκαλούν δυσκολίες,
είναι δυνατόν να παραλειφθούν)

ΚΥΡΙΟΙ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ

ΠΑΝΟΣ ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ
Επιστημονικός Υπεύθυνος
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ
ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
ΚΩΣΤΑΣ ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΙΟΥΛΙΟΣ 2003

ΒΟΛΟΣ

Περίληψη και Συμπεράσματα

Η παρούσα ερευνητική εργασία αποτιμά την επίδραση της ανάπτυξης υψηλών υπερπιέσεων ή της ρευστοποίησης χαλαρού κοκκώδους εδάφους θεμελιώσεως στην σεισμική απόκριση δύο τύπων κατασκευών: (α) των λιμενικών κρηπιδοτοιχών και (β) των επιφανειακών θεμελιώσεων. Η περίληψη και τα βασικότερα συμπεράσματα της ερευνητικής εργασίας για τα δύο είδη κατασκευών δίδονται κατωτέρω.

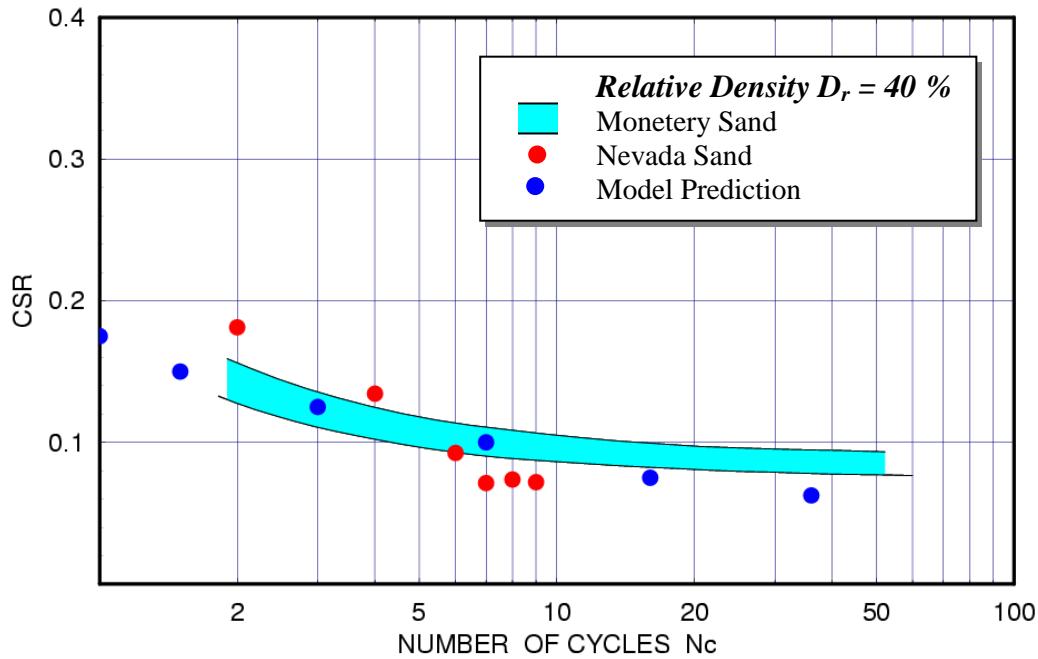
Λιμενικοί Κρηπιδότοιχοι

Το πρώτο τμήμα της ερευνητικής εργασίας έχει ως στόχο την δημιουργία μίας αξιόπιστης, προχωρημένης μεθόδου υπολογισμού μονίμων σεισμικών παραμορφώσεων για τον επιτελεστικό σχεδιασμό λιμενικών κρηπιδοτοιχών. Εν συνεχεία, η μέθοδος εφαρμόζεται σε παραμετρικές αναλύσεις για την δημιουργία διαγραμμάτων σχεδιασμού, τα οποία χρησιμοποιούνται σε μία απλουστευμένη και ιδιαίτερα πρακτική μέθοδο ελέγχου της επιτελεστικότητας υπαρχόντων και σχεδιαζόμενων λιμενικών κρηπιδοτοιχών.

Η δημιουργία ενός αξιόπιστου καταστατικού προσομοιώματος της συμπεριφοράς κοκκώδους εδάφους αποτέλεσε το σημαντικότερο και δυσκολότερο βήμα ανάπτυξης της μεθόδου, γεγονός που αντανακλάται στην κατανομή του χρόνου που αναλώθηκε για την ολοκλήρωσή του προγράμματος: περίπου το 65% του χρόνου διατέθηκε για την δημιουργία και επιβεβαίωση του καταστατικού προσομοιώματος, το 15% για την αντιμετώπιση προβλημάτων αριθμητικής αστάθειας, και το υπόλοιπο 20% για την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων και την ολοκλήρωση της μεθόδου. Το καταστατικό προσομοίωμα αναπτύχθηκε με τροποποίηση του προσομοιώματος των Pastor *et al.* (1990) στο πλαίσιο της θεωρίας της γενικευμένης πλαστικότητας. Το προσομοίωμα βασίζεται στις αρχές της κρίσιμης κατάστασης και χρησιμοποιεί μη-συσχετιζόμενο νόμο πλαστικής ροής. Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων δεν απαιτεί τον ακριβή μαθηματικό προσδιορισμό των επιφανειών διαρροής και πλαστικού δυναμικού, παρά μόνον των διευθύνσεων των καθέτων επί των επιφανειών αυτών. Για τον καθορισμό των παραμέτρων του προσομοιώματος, λαμβάνοντας υπόψη τις νέες βελτιώσεις, έγινε μία συστηματική βαθμονόμηση με βάση δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα. Η επαλήθευση και βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος απαιτεί την επιτυχή προσομοίωση μίας μακράς σειράς εργαστηριακών δοκιμών, οι οποίες περιλαμβάνουν (α) την ισοτροπική θλίψη, τριαξονική θλίψη/εφελκυσμό, απλή διάτμηση για διάφορες τιμές της περιβάλλουσας ενεργού τάσης, υπό συνθήκες στράγγισης και

μονοτονικής φόρτισης (β) την ανακυκλική τριαξονική δοκιμή και δοκιμή απλής διάτμησης για διάφορες τιμές της περιβάλλουσας ενεργού τάσης υπό συνθήκες στράγγισης (γ) την τριαξονική θλίψη-εφελκυσμό, απλή διάτμηση για διάφορες τιμές της περιβάλλουσας ενεργού τάσης υπό αστράγγιστες συνθήκες για μονοτονική φόρτιση (δ) την ανακυκλική τριαξονική δοκιμή, απλή διάτμηση για διάφορες τιμές της περιβάλλουσας ενεργού τάσης υπό αστράγγιστες συνθήκες. Επιπλέον, για την δημιουργία ενός ρεαλιστικού «υπολογιστικού» εδάφους (virtual soil) απαιτείται βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος μέσω της ανωτέρω διαδικασίας σε ένα ευρύ και πυκνό φάσμα σχετικών πυκνοτήτων D_r , όπως π.χ. από 20% ως 100%. Για μία τυχούσα σχετική πυκνότητα D_r , οι παράμετροι του προσομοιώματος προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή μεταξύ των παραμέτρων ήδη βαθμονομημένων πυκνοτήτων. Στην παρούσα εργασία έγινε βαθμονόμηση με βάση τις δοκιμές των κατηγοριών (α), (γ) και (δ), αλλά η μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στην μονοτονική και ανακυκλική συμπεριφορά υπό αστράγγιστες συνθήκες (κατηγορίες (γ) και (δ)), διότι η συμπεριφορά στις δοκιμές αυτές καθορίζει την απόκριση του συστήματος εδάφους – κατασκευής κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης.

Στην έκθεση αυτή παρουσιάζονται μόνον αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα της βαθμονόμησης, ενώ περισσότερα αποτελέσματα περιέχονται στην εργασία του Ντακούλα (2003). Για την συμπεριφορά στην μονοτονική φόρτιση, παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές συγκρίσεις με αποτελέσματα από τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια άμμου Banding (Castro 1969) σε τέσσερις σχετικές πυκνότητες της άμμου, $D_r = 29\%$, 44% , 47% , και 64% . Για την συμπεριφορά σε ανακυκλική φόρτιση παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα μιας τριαξονικής δοκιμής υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια άμμου Banding σχετικής πυκνότητας $D_r = 30\%$ (Castro 1969). Επίσης γίνεται σύγκριση της ανακυκλικής συμπεριφοράς σε δοκιμές απλής διάτμησης και τριαξονικές δοκιμές με δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα της άμμου Nevada (Velacs 1993) και της άμμου Monterey (DeAlba 1976). Η σύγκριση των προβλέψεων του προσομοιώματος με τα πειραματικά δεδομένα για τις τρεις άμμους δείχνει μία καλή συμφωνία.



Σχήμα Α1. Λόγος ανακυκλικής αντοχής $CSR = \tau_c / \sigma'_{v0}$ άμμου σχετικής πυκνότητας $D_r=40\%$ σε δοκιμή απλής διάτμησης. Σύγκριση των αριθμητικών προβλέψεων με πειραματικά δεδομένα (α) άμμου Monterey των DeAlba et al. (1976) τροποποιημένα κατά Seed & Harder (1990) και (β) άμμου Nevada (Velacs 1993).

Η σχετική πυκνότητα D_r , η οποία είναι το πιο βασικό δεδομένο του καταστατικού προσομοιώματος, εκτιμάται προσεγγιστικά ως συνάρτηση $D_r = f(N_1, e_{max} - e_{min})$ των τιμών N_1 της δοκιμής κρουστικής διεύθυνσης SPT και της διαφοράς $e_{max} - e_{min}$ του δείκτη πόρων, ή εναλλακτικά, ως συνάρτηση $D_r = f(N_1, D_{50})$ του N_1 και της διαμέτρου D_{50} (Cubrinovski and Ishihara 2001, Kulhawy and Mayne 1990). Προφανώς, η ύπαρξη εργαστηριακών δεδομένων για την ανακυκλική αντοχή ενός συγκεκριμένου εδάφους είναι δυνατόν να οδηγήσει σε περισσότερο ακριβή προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς του.

Πέραν των εργαστηριακών δοκιμών, το καταστατικό προσομοίωμα και η μέθοδος ανάλυσης εφαρμόζονται για την ανάλυση δύο καταγραμμένων ιστορικών περιστατικών, καθώς επίσης και δύο στενά συνδεδεμένων περιπτώσεων λιμενικών κρηπιδοτοιχών. Σκοπός είναι (α) η επιβεβαίωση της μεθόδου μέσω συγκρίσεων με την καταγραφείσα συμπεριφορά παρόμοιων τοίχων στο λιμάνι του Kobe κατά τον σεισμό του Hyogoken-Nambu του 1995 (β) η μελέτη της επίδρασης της βελτίωσης της ποιότητας του εδάφους θεμελίωσης και του

αντιστηριζόμενου εδάφους στη μείωση των μονίμων μετατοπίσεων και την επιτελεστικότητα του κρηπιδοτοίχου. Η Περίπτωση 1 αντιστοιχεί σε μία τυπική διατομή του κρηπιδοτοίχου στο Rokko Island του λιμένα του Kobe, στην οποία τόσο το έδαφος θεμελίωσης και το αντιστηριζόμενο έδαφος αποτελούνται από ρευστοποιήσιμα χαλαρά αμμώδη εδάφη. Η Περίπτωση 2 αντιστοιχεί σε ένα κρηπιδότοιχο, στο οποίο το έδαφος θεμελίωσης και το αντιστηριζόμενο έδαφος αποτελούνται από βελτιωμένα εδάφη με υψηλή σχετική πυκνότητα. Η Περίπτωση 3 προσομοιώνει τις διατομές PC14 και PC15 του Port Island στις οποίες το έδαφος θεμελίωσης αποτελείται από βελτιωμένα εδάφη με υψηλή σχετική πυκνότητα, ενώ το αντιστηριζόμενο έδαφος αποτελείται από ρευστοποιήσιμα εδάφη. Τέλος, η Περίπτωση 4 αντιστοιχεί σε ένα κρηπιδότοιχο στον οποίο το έδαφος θεμελίωσης αποτελείται από ρευστοποιήσιμα εδάφη, ενώ το αντιστηριζόμενο έδαφος αποτελείται από βελτιωμένα εδάφη με υψηλή σχετική πυκνότητα.

Για τον κρηπιδότοιχο του Rokko Island η υπολογιζόμενη μόνιμη μετατόπιση και η καθίζηση είναι σε συμφωνία με τις μετατοπίσεις και καθιζήσεις που παρατηρήθηκαν μετά τον σεισμό. Επίσης, τα αποτελέσματα της Περίπτωσης 3 προσεγγίζουν αρκετά εύλογα την απόκριση στις διατομές PC-14 και PC-15 στο Port Island. Τα αποτελέσματα δείχνουν καθαρά ότι το προσομοίωμα είναι δυνατόν να αναπαραγάγει την συστολική ή διαστολική συμπεριφορά του εδάφους της θεμελίωσης και του αντιστηριζόμενου εδάφους, και ότι επιτρέπει μία ρεαλιστική πρόβλεψη των οριζοντίων μετατοπίσεων και καθιζήσεων του κρηπιδοτοίχου. Για τις Περιπτώσεις 1 και 4, όπου το έδαφος θεμελιώσεως είναι ρευστοποιήσιμο, οι αναλύσεις έδειξαν σημαντική διάτμηση, ενώ για τις περιπτώσεις 2 και 3 το βελτιωμένο έδαφος θεμελιώσεως υφίσταται διάτμηση σε πολύ μικρότερο βαθμό. Η υπερπίεση μακριά από τον κρηπιδότοιχο λαμβάνει τις τιμές που αναμένονται στο ελεύθερο πεδίο με αποτέλεσμα την ρευστοποίηση στην περίπτωση χαλαρής άμμου ή σημαντική ανακυκλική παραμόρφωση στην περίπτωση πυκνής άμμου ως αντιστηριζόμενου υλικού. Σε συμφωνία με τις επιτόπου παρατηρήσεις, δεν παρουσιάστηκε ρευστοποίηση σε μία ζώνη 30 m από τον τοίχο, λόγω της μείωσης των τάσεων και της διασταλτικότητας του εδάφους κατά τη μετατόπιση του τοίχου προς τη θάλασσα. Τέλος, οι προβλέψεις όλων των αναλύσεων είναι σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα από αντίστοιχες αναλύσεις των Iai et al. (1998), στις οποίες χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό καταστατικό προσομοίωμα και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος ενεργών τάσεων εφαρμόζεται για την παραμετρική σεισμική ανάλυση ενός λιμενικού κρηπιδοτοίχου με στόχο (α) την διερεύνηση των σημαντικών παραμέτρων που

επηρεάζουν το μέγεθος των μονίμων μετατοπίσεων και καθιζήσεων του τοίχου και (β) την δημιουργία μιας απλουστευμένης μεθόδου υπολογισμού των μονίμων μετατοπίσεων και καθιζήσεων μέσω διαγραμμάτων. Λόγω της μεγάλης διάρκειας των παραμετρικών αναλύσεων, ορισμένα αποτελέσματα της έκθεσης αυτής συμπληρώνονται από αποτελέσματα των Iai et al. (2001).

Πιο συγκεκριμένα, διερευνώνται οι εξής παράγοντες:

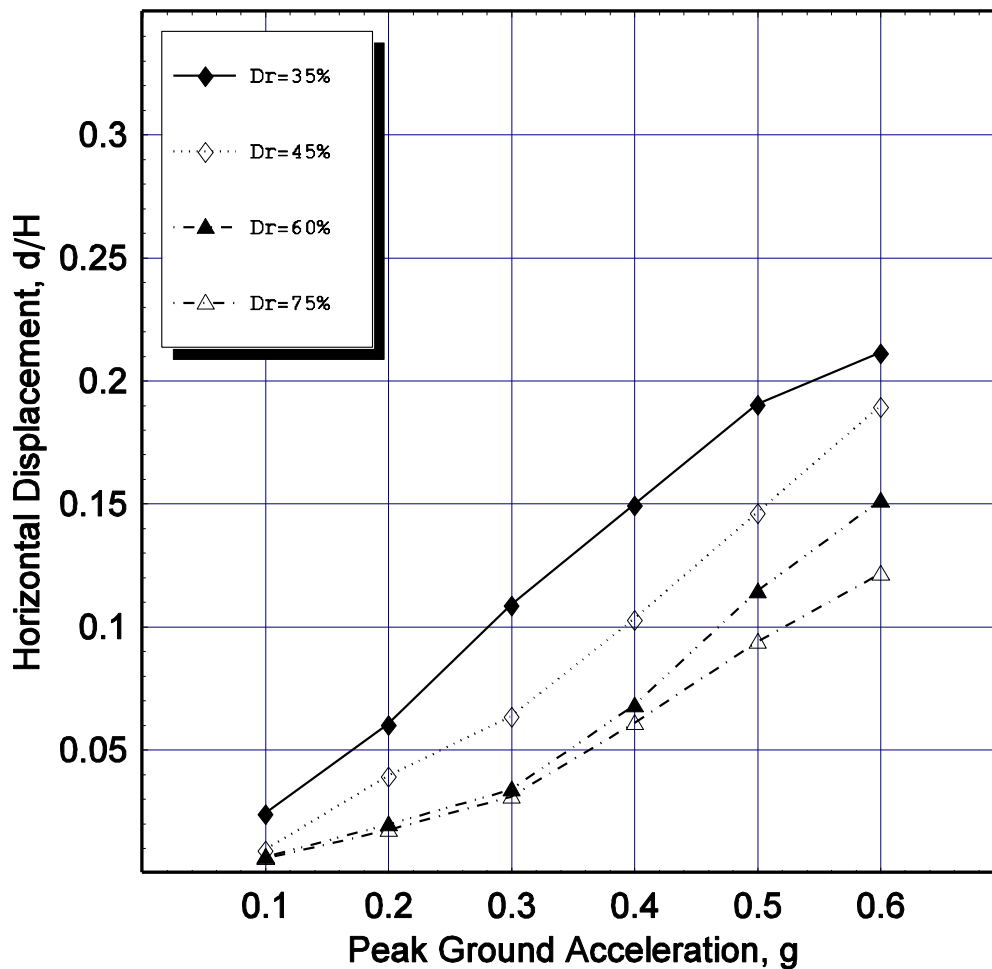
Ποκνότητα εδάφους θεμελιώσεως: Το έδαφος θεμελίωσης χαρακτηρίζεται από τη σχετική πυκνότητα D_r , η οποία λαμβάνει τιμές από 35% ως 75%.

Ποκνότητα αντιστηριζόμενου εδάφους: Το αντιστηριζόμενο έδαφος χαρακτηρίζεται από τη σχετική πυκνότητα D_r , η οποία λαμβάνει τιμές από 35% ως 75%.

Ένταση της σεισμικής δόνησης: Χρησιμοποιούνται έξι βαθμίδες έντασης $a_{g,max}$ από 0.1g ως 0.6g.

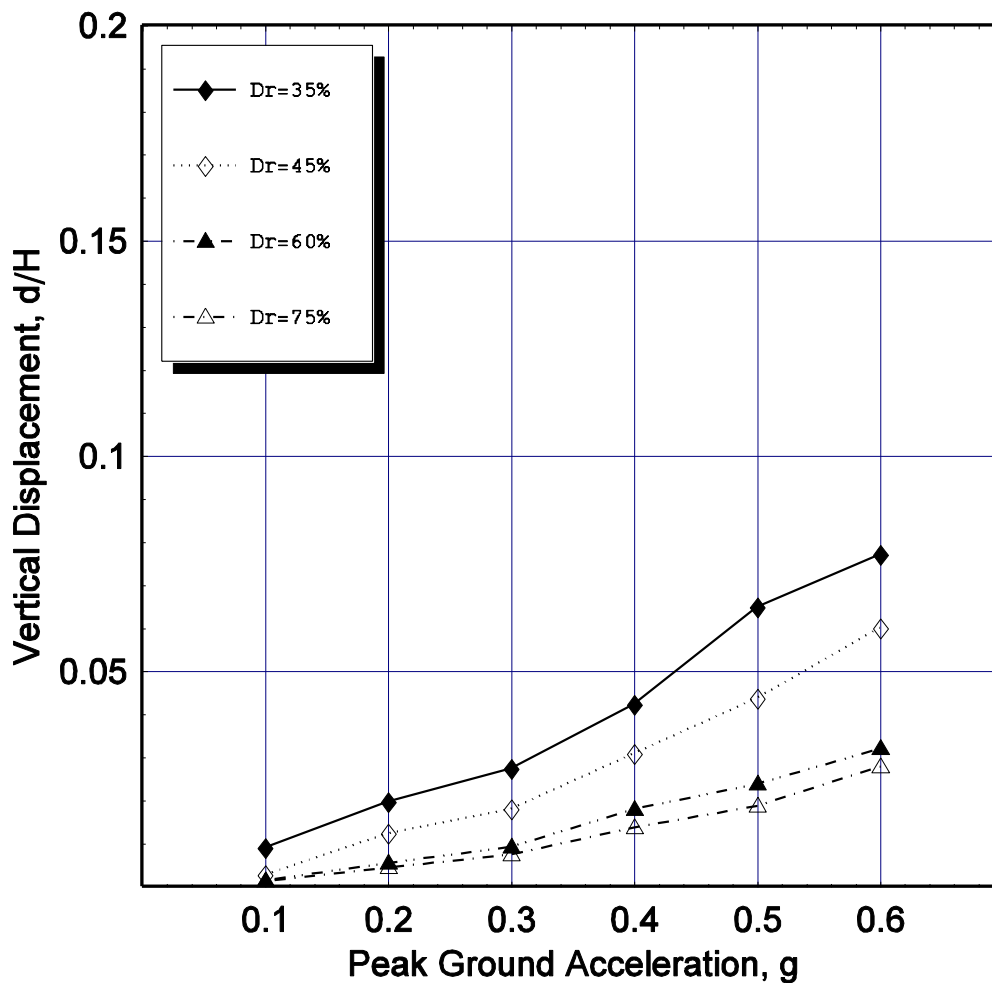
Λόγος του πλάτους προς το ύψος του τοίχου (W/H): Ο λόγος W/H λαμβάνει τιμές από 0.6 ως 1.1

Λόγος του πάχους θεμελιώσεως προς το ύψος του τοίχου (D₁/H): Ο λόγος D_1/H λαμβάνει τιμές από 0 ως 1.15.



Σχήμα Α2. Κανονικοποιημένη οριζόντια παραμένουσα μετατόπιση d/H του κρηπιδοτοίχου για μέγιστη επιτάχυνση εδάφους $a_{g,max}$ και σχετική πυκνότητα του εδάφους θεμελίωσης και του αντιστηριζομένου εδάφους D_r .

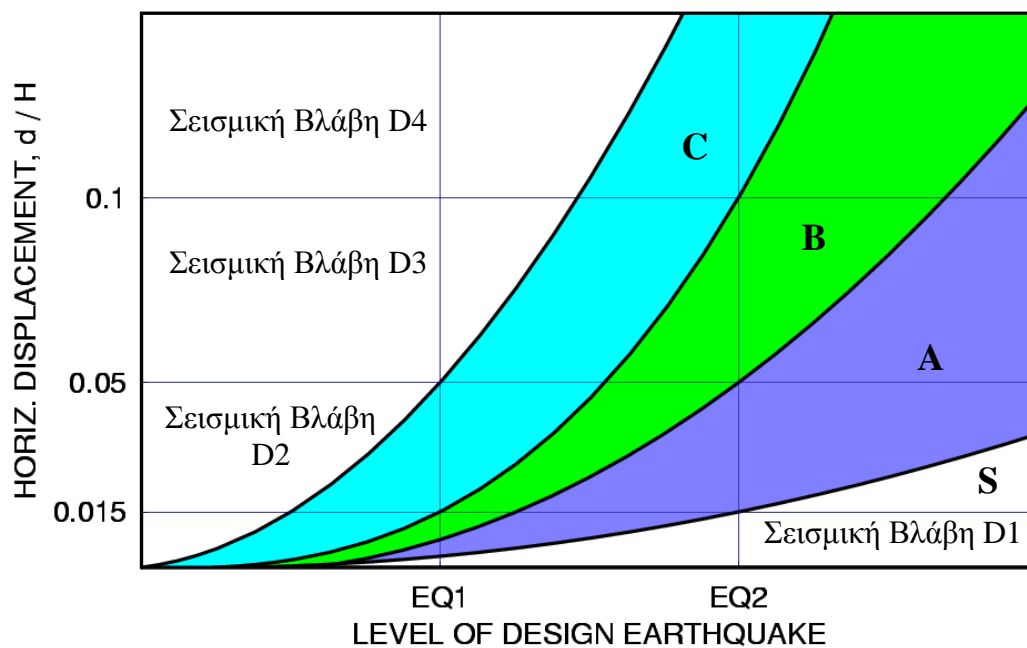
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται ως κανονικοποιημένες οριζόντιες και κατακόρυφες παραμένουσες μετατοπίσεις του κρηπιδοτοίχου, d/H , όπου H είναι το ύψος του τοίχου, για διάφορες τιμές του $a_{g,max}$ και της σχετικής πυκνότητας D_r . Επίσης δίδεται η επίδραση του λόγου του πάχους θεμελίωσης προς ύψος D_1/H και του λόγου πλάτους προς ύψος τοίχου W/H . Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης συμπληρώνονται από αντίστοιχα αποτελέσματα των Iai et al. (1998) και χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μια απλουστευμένης μεθόδου σχεδιασμού.



Σχήμα A3 Κανονικοποιημένη καθίζηση του κρηπιδοτοίχου d/H για μέγιστη επιτάχυνση εδάφους $a_{g,max}$ και σχετική πυκνότητα του εδάφους θεμελίωσης και του αντιστηριζομένου εδάφους D_r .

Η σύγχρονη φιλοσοφία αντισεισμικού σχεδιασμού λιμενικών κατασκευών βασίζεται στην αντίληψη ότι οι μετατοπίσεις του εδάφους και των λιμενικών κατασκευών αποτελούν το κατεξοχήν σημαντικό κριτήριο σχεδιασμού και ότι μία περιορισμένη τιμή μόνιμης παραμόρφωσης είναι αποδεκτή με βάση προκαθορισμένα κριτήρια συμπεριφοράς. Στην εργασία αυτή υιοθετείται προσωρινά η φιλοσοφία του Ιαπωνικού κανονισμού αντισεισμικού σχεδιασμού λιμενικών κατασκευών (PIANC 2001), μέχρις ότου ωριμάσουν οι συνθήκες για την δημιουργία ενός ελληνικού κανονισμού. Δύο επίπεδα σεισμικής δόνησης χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό, ονομαστικά το επίπεδο EQ1 και το επίπεδο EQ2, με σκοπό να εξασφαλισθεί ένα καθορισμένο επίπεδο ασφάλειας και λειτουργικότητας για την κατηγορία EQ1 και να προσδιορισθεί ο βαθμός και ο τύπος των σεισμικών βλαβών για την

κατηγορία EQ2. Η ταυτόχρονη εφαρμογή των δύο κριτηρίων σχεδιασμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για περιοχές μέτριας ή υψηλής σεισμικότητας. Το αποδεκτό επίπεδο σεισμικών βλαβών καθορίζεται ανάλογα με τις ειδικές ανάγκες χρήσης της κατασκευής και είναι δυνατόν να προσδιορισθεί από άποψη δομικών βλαβών και λειτουργικότητας. Τα κριτήρια σεισμικής βλάβης για λιμενικούς κρηπιδότοιχους δίδονται υπό μορφή παραμένουσας οριζόντιας μετατόπισης και καθίζησης ή στροφής του τοίχου, για διαφορετικά επίπεδα σεισμικής βλάβης (D1, D2, D3 και D4) και διαφορετικές βαθμίδες επιτελεστικότητας (S, A, B και C).



Σχήμα A4 . Διάγραμμα επιτελεστικότητας του λιμενικού κρηπιδοτοίχου στις βαθμίδες S, A , B και C με κριτήριο την οριζόντια μετατόπιση.

Τα συμπεράσματα της ερευνητικής εργασίας για την σεισμική απόκριση λιμενικών κρηπιδοτοιχών είναι τα εξής:

1. Οι προβλέψεις του βελτιωμένου καταστατικού προσομοιώματος είναι σε καλή συμφωνία με τα δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης τριών άμμων με τις οποίες συγκρίθηκαν.
2. Η μέθοδος ανάλυσης που βασίζεται στην χρήση ενεργών τάσεων και το βελτιωμένο καταστατικό προσομοίωμα επαληθεύει την συμπεριφορά δύο τύπων κρηπιδοτοιχών στο λιμάνι του Kobe κατά τον σεισμό του 1995. Περαιτέρω αναλύσεις ιστορικών περιστατικών θα βελτιώσουν την αξιοπιστία της μεθόδου κάτω από διαφορετικές συνθήκες γεωμετρίας, σχετικής πυκνότητας των εδαφών και σεισμικής έντασης.
3. Η μέθοδος εκτίμησης της σχετικής πυκνότητας D_r με χρήση του αριθμού N της δοκιμής κρουστικής διείσδυσης SPT και της διαφοράς $e_{\max} - e_{\min}$ του δείκτη πόρων ή της διαμέτρου D_{50} επιτρέπει τον προσδιορισμό των παραμέτρων του καταστατικού προσομοιώματος με βάση συνήθεις επιτόπου και εργαστηριακές μετρήσεις.
4. Η διερεύνηση της επίδρασης της σχετικής πυκνότητας D_r , της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους $a_{g,\max}$, του λόγου του πάχους της θεμελίωσης προς το ύψος του τοίχου D_1/H και του λόγου του πλάτους προς το ύψος του τοίχου W/H , κατέδειξε με ακρίβεια την σπουδαιότητα των παραμέτρων αυτών στην απόκριση του κρηπιδοτοιχού.
5. Η απλουστευμένη μέθοδος εκτίμησης των μονίμων μετατοπίσεων του κρηπιδοτοιχού στον σεισμό σχεδιασμού μέσω των αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης και η υιοθέτηση του Ιαπωνικού κανονισμού για τον σχεδιασμό λιμενικών κρηπιδοτοιχών οδηγεί σε μία ορθολογική και απόλυτα πρακτική μέθοδο αποτίμησης της επιτελεστικότητας της κατασκευής.
6. Η μέθοδος ενεργών τάσεων που βασίζεται στο βελτιωμένο καταστατικό προσομοίωμα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε περαιτέρω παραμετρικές αναλύσεις για την διερεύνηση (α) του φασματικού περιεχομένου της σεισμικής δόνησης με την χρήση και άλλων ιστορικών επιταχυνσιογραφημάτων (β) της διάρκειας της σεισμικής δόνησης και (γ) της έκτασης μιας πιθανής ζώνης βελτίωσης του εδάφους πίσω από τον τοίχο, κ.λ.π. Οι επιπλέον αναλύσεις θα εμπλουτίσουν τα

κανονικοποιημένα διαγράμματα σχεδιασμού και θα αυξήσουν την χρησιμότητα της μεθόδου.

Επιφανειακές θεμελιώσεις

Στο δεύτερο τμήμα της ερευνητικής εργασίας έγινε προσπάθεια να αποτιμηθεί η επίδραση της ρευστοποίησης στην φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων, στην ειδική περίπτωση πρακτικού ενδιαφέροντος όπου η ρευστοποιήσιμη στρώση της άμμου υπόκειται επιφανειακής αργιλικής στρώσης. Στην περίπτωση αυτή συχνά γεννιέται το ερώτημα κατά πόσον τυχόν ρευστοποίηση της άμμου θα επηρεάσει την φέρουσα ικανότητα του θεμελίου και, εάν ναι, πόση θα είναι η επιρροή αυτή.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η θεώρηση των Cascone & Bouckovalas (1998) σύμφωνα με την οποία αποτιμάται η φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης μετά το πέρας της δόνησης, υπό στατικές δηλαδή συνθήκες, όταν η υπερπίεση των πόρων στο ρευστοποιήσιμο στρώμα της άμμου δεν έχει ακόμη εκτονωθεί. Κατά την θεώρηση αυτή η διατμητική αντοχή της άμμου μειώνεται μέσω ισοδύναμης μείωσης της γωνίας τριβής ϕ , όπως προτείνεται στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό ΕΑΚ2000 και στον Ευρωκώδικα EC-8. Για τον υπολογισμό της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας του θεμελίου θεωρείται ακολούθως ένας σύνθετος (“punch through”) μηχανισμός αστοχίας, ο οποίος αποτελείται από κατακόρυφες επιφάνειες θραύσης εντός της αργίλου και τις συνήθεις λογαριθμικές σπείρες εντός της υποκείμενης άμμου. Έτσι, προκύπτουν αναλυτικές λύσεις και διαγράμματα για δύο βασικές παραμέτρους σχεδιασμού:

- Τον κρίσιμο λόγο του πάχους της αργίλου προς το πλάτος του θεμελίου $(H/B)_{CR}$ πάνω από τον οποίο δεν υφίσταται θέμα επίδρασης από ενδεχόμενη ρευστοποίηση της υποκείμενης άμμου.
- Τον συντελεστή απομείωσης της φέρουσας ικανότητας (ζ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της απομειωμένης φέρουσας ικανότητας προς την φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης στο στρώμα της αργίλου (εάν δεν υπήρχε δηλαδή η υποκείμενη στρώση της άμμου).

Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος, η ανωτέρω θεώρηση **διερευνήθηκε** λεπτομερώς, **βελτιώθηκε** και τελικώς **ελέγχθηκε** με την βοήθεια αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα από την βελτιωμένη θεώρηση συνοψίζονται στα συνημμένα **Διαγράμματα Σχεδιασμού**, για τετραγωνική θεμελίωση και για πεδילוδοκό.

Παράλληλα με τα εν λόγω διαγράμματα προέκυψαν και τα ακόλουθα συμπεράσματα γενικότερου ενδιαφέροντος:

(α) Η αρχικές λύσεις των Cascone & Bouckovalas βελτιώνονται οριακά μόνον με θεώρηση πιο ρεαλιστικής επιφάνειας αστοχίας εντός της αργίλου και με προσθήκη συντελεστού επίδρασης του βάθους στην συνιστώσα της φέρουσας ικανότητας που αντιστοιχεί στην άμμο. Η δεύτερη από τις δύο αυτές βελτιώσεις έχει ληφθεί υπόψη στα συνημμένα διαγράμματα σχεδιασμού, αντίθετα με την πρώτη η οποία είναι αρκετά σύνθετη και δεν λαμβάνεται υπόψη.

(β) Τα αποτελέσματα των υπολογισμών διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τον τρόπο που προσομοιώνεται η απομείωση της διατμητικής αντοχής της άμμου λόγω ανάπτυξης υδατικών υπερπίεσεων και τελικώς ρευστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, αποδεικνύεται ότι η απομείωση της γωνίας τριβής σύμφωνα με την σχέση των κανονισμών, η οποία υιοθετήθηκε επίσης από τους Cascone & Bouckovalas:

$$\tan \varphi^* = (1 - \Delta u / \sigma'_{v0}) \tan \varphi$$

είναι σημαντικά πιο συντηρητική από την απομείωση της ενεργού τάσης ή ισοδύναμα του φαινομένου (υπό άνωση) ειδικού βάρους σύμφωνα με τη σχέση:

$$\gamma'^* = (1 - \Delta u / \sigma'_{v0}) \gamma'$$

(γ) Ανεξαρτήτως της θεώρησης που χρησιμοποιείται για την απομείωση της διατμητικής αντοχής (φ^* ή γ'^*), θα πρέπει απαραίτητα να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς η παραμένουσα, μη μηδενική αντοχή της άμμου μετά την ρευστοποίηση. Η βελτίωση αυτή, η οποία έχει ληφθεί υπόψη στα διαγράμματα σχεδιασμού, προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική επιτόπου συμπεριφορά ρευστοποιήσιμων εδαφών και έχει επιπλέον σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα των υπολογισμών.

(δ) Η προσομοίωση του φαινομένου, με συζευγμένες ελαστοπλαστικές δυναμικές αναλύσεις, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την ανομοιόμορφη ανάπτυξη πίεσης πόρων κάτω από το θεμέλιο και στο ελεύθερο πεδίο, υποδεικνύουν ότι:

- Ο προσεγγιστικός υπολογισμός της μειωμένης φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης θα πρέπει να γίνεται με μείωση της γωνίας τριβής της άμμου, σε συνδυασμό με συντηρητικό υπολογισμό των υδατικών υπερπίεσεων λόγω σεισμού.
- Σε περίπτωση αστοχίας του θεμελίου, οι καθιζήσεις θα είναι σχετικά μεγάλες και θα αναπτυχθούν σταδιακά, κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης.

- Για πιο λεπτομερή υπολογισμό της επίδρασης της ρευστοποίησης θα πρέπει χρησιμοποιούνται συζευγμένες ελαστοπλαστικές δυναμικές αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης του εδάφους, της θεμελίωσης και της ανωδομής.