



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Παθητική σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών:
Καταστατική και αριθμητική προσομοίωση**

Ισαβέλλα-Μαρία Μακρή

Περίληψη διπλωματικής εργασίας

Μία νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών έναντι σεισμικής ρευστοποίησης, είναι η **παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization)**, κατά την οποία ένας σταθεροποιητής (stabilizer) εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος. Η νέα αυτή τεχνική βελτίωσης του εδάφους βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο διεθνώς. Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο ενός μεγάλου ερευνητικού προγράμματος που βρίσκεται σε εξέλιξη στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Π.Θ.) την περίοδο αυτή, και στοχεύει στο να καταστεί η παθητική σταθεροποίηση μια πρακτικώς εφαρμόσιμη τεχνική βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου (colloidal silica) Ludox SM, που επιλέγεται ως βέλτιστος σταθεροποιητής προς χρήση στην παθητική σταθεροποίηση. Επιπλέον, γίνεται περιληπτική αναφορά στη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων άμμων σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις, όπως προκύπτει από αποσπασματικά έως τώρα πειράματα στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στη συνέχεια επιδιώκεται η προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων άμμων με ευφυή χρήση υπάρχοντος καταστατικού προσομοιώματος (NTUA-SAND, των Andrianopoulos et al. 2010). Η βασική υπόθεση εργασίας είναι ότι η συμπεριφορά μιας άμμου σταθεροποιημένης με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (colloidal silica) αντιστοιχεί στη συμπεριφορά της ίδιας φυσικής άμμου αλλά με σαφώς μεγαλύτερη σχετική πυκνότητα. Η θεώρηση αυτή ενσωματώνεται στην καταστατική προσομοίωση μέσω μιας ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας D_r , ή ισοδύναμα μιας ψευδο-μείωσης του δείκτη πόρων, χωρίς να χρειάζεται αλλαγή στις σταθερές του προσομοιώματος NTUA-SAND.

Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων σε σταθεροποιημένες άμμους με καταστατικές προσομοιώσεις όπου η επίδραση της σταθεροποίησης εισάγεται ως μια ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας υποδεικνύει ότι:

- Για μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις ($\gamma_c < 10^{-5}$), η επίδραση της σταθεροποίησης στην τιμή του μέγιστου μέτρου διάτμησης G_{max} είναι μικρή (της τάξης του 25%, με αρκετή διασπορά), και η ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας που μπορεί να την αποδώσει καταστατικά θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα μικρή (σαφώς μικρότερη από +20% στην τιμή της D_r).
- Για μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις ($10^{-5} \leq \gamma_c < 10^{-3}$), δεν υπάρχει ουσιώδης επίδραση της σταθεροποίησης στις καμπύλες απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης G/G_{max} και αύξησης της υστερητικής

απόσβεσης ξ με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ_c . Στην περίπτωση αυτή, οι καταστατικές προσομοιώσεις για τις καμπύλες $G/G_{max}-\gamma_c$ και $\xi-\gamma_c$ δεν υποδεικνύουν επίδραση της ψευδο-αύξησης της σχετικής πυκνότητας σε αυτές, και συνεπώς είναι ακριβείς

- Για μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις ($\gamma_c > 10^{-3}$), η επίδραση της σταθεροποίησης οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση, η οποία ποσοτικοποιείται αδρά ως αύξηση του ανακυκλικού λόγου τάσεων CSR μέχρι και 0.2 για τον ίδιο αριθμό κύκλων δοκιμών. Οι καταστατικές προσομοιώσεις υποδεικνύουν ότι η επίδραση αύξησης της σχετικής πυκνότητας οδηγεί σε σαφώς μικρότερη προσαύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση (σε όρους ΔCSR) συγκριτικά με πειραματικά αποτελέσματα σε φυσικές άμμους. Συνεπώς, προσομοίωση της αύξησης του CSR μέχρι και 0.2 με χρήση του NTUA-SAND χρειάζεται αντίστοιχα μεγάλη ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας ΔDr (έως και +60%).

Τέλος, διερευνάται η δυνατότητα αριθμητικής προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ενός εδάφους που έχει σταθεροποιηθεί. Για το σκοπό αυτό επελέγη ένα δυναμικό πείραμα σε φυγοκεντριστή (Gallagher et al. 2007) που αφορά στη 1Δ δυναμική απόκριση οριζόντιας ομοιόμορφης εδαφικής στρώσης άμμου Nevada ($Dr = 40\%$) πάχους 10m που έχει σταθεροποιηθεί με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου και υποβάλλεται σε 20 κύκλους ημιτονοειδούς φόρτισης, συχνότητας 2Hz με μέγιστη τιμή επιτάχυνσης 0.2g. Η προσομοίωση έγινε με το NTUA-SAND και με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC, και υπέδειξε ότι:

- Η σταθεροποίηση αποτρέπει τη σεισμική ρευστοποίηση, και μπορεί να οδηγήσει σε ενίσχυση της ταλάντωσης συγκριτικά με τη βάση της εδαφικής στρώσης και εν γένει μικρές καθιζήσεις.
- Η προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους με ψευδο-αύξηση της σχετικής πυκνότητας είναι ποιοτικώς ορθή, και σε επίπεδο προβλήματος συννοριακών τιμών. Παρόλα αυτά, μια προσαύξηση $\Delta Dr = 40\%$ αποδεικνύεται ποσοτικά ανεπαρκής (π.χ. δεν προσομοιώνεται η ενίσχυση της ταλάντωσης στην επιφάνεια).
- Εναλλακτικά, η προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης σταθεροποιημένου εδάφους με ψευδο-αύξηση της διαπερατότητας, αν και θεωρητικώς λανθασμένη (καθώς η διαπερατότητα πρακτικώς μηδενίζεται) είναι ποιοτικώς ορθή. Βέβαια, ακόμη και μια προσαύξηση της διαπερατότητας κατά 1000 φορές αποδεικνύεται ποσοτικά ανεπαρκής (π.χ. δεν προσομοιώνεται η ενίσχυση της ταλάντωσης στην επιφάνεια). Από την άλλη, μια τόσο μεγάλη προσαύξηση της διαπερατότητας μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικές καθιζήσεις, ένα πρόβλημα που πρέπει να είναι γνωστό στο χρήστη.

Επιβλέπων: Αχιλλέας Παπαδημητρίου, Επίκ. Καθηγητής
Ιούλιος 2013