

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΩΣ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ****Α. Βράννα^{1*}, Θ. Τίκα¹, Ε. Ζέρβας²**¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα²Σχολή Θετικών Εφαρμογών, ΕΑΠ, Πάτρα, Ελλάδα(*avranna@civil.auth.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η εργαστηριακή διερεύνηση της παθητικής σταθεροποίησης, μιας νέας τεχνικής βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών, έναντι ρευστοποίησης. Ο σταθεροποιητής που μελετήθηκε είναι η κολλοειδής πυριτία (CS), η οποία είναι υδατικό διάλυμα νανοσωματιδίων οξειδίου του πυριτίου και θεωρείται ως μη τοξική και περιβαλλοντικά ασφαλής. Διερευνώνται οι ρεολογικές ιδιότητες της CS, καθώς και η καταλληλότητά της ως σταθεροποιητικό μέσο για τη βελτίωση ρευστοποιήσιμων άμμων. Για το σκοπό αυτό, παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών μέτρησης ιξώδους και συμπιεστότητας διαλυμάτων CS σε διάφορες συγκεντρώσεις. Η αποτελεσματικότητα της CS επιβεβαιώνεται από αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας και αντοχής σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρευστοποίηση είναι το φαινόμενο εκείνο κατά τη διάρκεια του οποίου κορεσμένα κοκκώδη εδάφη υφίστανται σημαντική απομείωση της διατμητικής αντοχής και της δυσκαμψίας τους, υπό αστράγγιστες συνθήκες στατικής και ανακυκλικής φόρτισης^[1]. Η συνηθέστερη μορφή της τελευταίας είναι η σεισμική δράση, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη και συχνή στη χώρα μας. Το αποτέλεσμα της εμφάνισης ρευστοποίησης είναι η πρόκληση σημαντικών αστοχιών των γεωκατασκευών και των θεμελιώσεων των τεχνικών έργων, οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις συνοδεύονται από απώλειες ανθρώπινων ζωών και έχουν σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις.

Κατά το σχεδιασμό των τεχνικών έργων, πολλές φορές απαιτείται βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των ρευστοποιήσιμων εδαφών. Καθώς η διαθεσιμότητα κατάλληλων θέσεων κατασκευής μειώνεται συνεχώς, η ανάγκη βελτίωσης των εδαφικών συνθηκών διαρκώς αυξάνεται. Οι συνήθεις τεχνικές βελτίωσης, όπως η βαθιά δονητική ή δυναμική συμπίκνωση, η αντικατάσταση και η βαθιά εδαφική ανάμειξη, θεωρούνται ακατάλληλες στην περίπτωση των υφιστάμενων κατασκευών, καθώς επίσης και σε θέσεις εντός του αστικού ιστού, καθώς έχουν συνέπειες στη λειτουργικότητα των κατασκευών και πιθανά προκαλούν δομικές αστοχίες. Για το λόγο αυτό, κατά τη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών γίνεται συνήθως εφαρμογή μεθόδων όπως η τοποθέτηση μικροπασάλων, η εισπίεση ενεμάτων μεγάλου ιξώδους μέσω γεωτρήσεων και η χρήση στραγγιστηρίων για την εκτόνωση της υπερπίεσης του ύδατος των πόρων. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, η χρήση των παραπάνω τεχνικών απαιτεί υψηλό κόστος και οδηγεί σε τοπική μόνον βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης, ενώ παρεμποδίζεται η κανονική λειτουργία της κατασκευής κατά τη διάρκεια των εργασιών.

Ανάμεσα στις πρόσφατα αναπτυχθείσες μεθόδους βελτίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς ρευστοποιήσιμων εδαφών στην περίπτωση υφιστάμενων κατασκευών, εντάσσεται η παθητική σταθεροποίηση. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, εισάγεται ένας σταθεροποιητής, μέσω διήθησης με χαμηλή υδραυλική κλίση, στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης μιας υφιστάμενης κατασκευής. Ο σταθεροποιητής διαθέτει αρχικά χαμηλό ιξώδες, το οποίο μετά την πάροδο ελεγχόμενου χρόνου αυξάνεται ραγδαία και τελικά σταθεροποιείται με την ολοκλήρωση της διήθησης εντός του εδάφους. Με αυτό τον τρόπο η βελτίωση του εδάφους δεν έχει τοπικό χαρακτήρα, ενώ ταυτόχρονα δεν οδηγεί σε όχληση της λειτουργίας της υπάρχουσας κατασκευής. Ο εμπλουτισμός του ύδατος των πόρων του ρευστοποιήσιμου εδάφους με τον σταθεροποιητή

έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της μηχανικής συμπεριφοράς του συστήματος εδαφικού σκελετού - ύδατος των πόρων του εδάφους, καθιστώντας το περισσότερο ανθεκτικό στη ρευστοποίηση.

Βασική προϋπόθεση για την επιλογή του σταθεροποιητή είναι να διαθέτει αρχικά χαμηλό ιξώδες, ώστε να δύναται να μεταφερθεί με χαμηλή υδραυλική κλίση στο υπό βελτίωση έδαφος και συνεπώς χωρίς να διαταράξει τη δομή του. Ο χρόνος γέλης ενός σταθεροποιητή, δηλαδή το χρονικό διάστημα από τη στιγμή της δημιουργίας και ανάμειξής του με το έδαφος μέχρι τη μετατροπή του σε γέλη, πρέπει να είναι ελεγχόμενος και να παρουσιάζει μεγάλη επαναληψιμότητα. Η γέλη πρέπει να παραμένει χημικά και μηχανικά σταθερή για το χρόνο ζωής του έργου. Επιπλέον, ο σταθεροποιητής πρέπει να είναι μη-τοξικός και περιβαλλοντικώς ασφαλής. Τέλος, το κόστος του πρέπει να είναι ανταγωνιστικό, σε σύγκριση με τις άλλες διαθέσιμες μεθόδους βελτίωσης. Πιθανοί σταθεροποιητές θεωρούνται τα ενέματα τσιμέντου και τα αργιλικά πλακίδια νανο-διαστάσεων^[2], τα χημικά ενέματα όπως το πυριτικό νάτριο^[3], τα βιολογικά υλικά^[4] και το κολλοειδές οξειδίου του πυριτίου, ή εν συντομία κολλοειδής πυριτία (colloidal silica, CS).

Η CS είναι μικροσκοπικά σωματίδια ένυδρης μορφής οξειδίου του πυριτίου, H_4SiO_4 ^[5]. Το μέγεθος των σωματιδίων κυμαίνεται από 2 έως 100nm και παραμένει σταθερό σε δεδομένο διάλυμα. Ένα αραιωμένο διάλυμα CS διαθέτει αρχικά πυκνότητα και ιξώδες παρόμοια με αυτά του νερού και μπορεί να μετατραπεί σε γέλη μεταβάλλοντας την ιοντική ισχύ, την τιμή pH ή τη συγκέντρωση πυριτίας του διαλύματος. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει τη διήθηση ή την ανάμειξη του διαλύματος με το έδαφος, όπου μετά τη μετατροπή του σε σταθερή γέλη, η CS φράσσει του πόρους του εδάφους και δημιουργεί ένα πρακτικά αδιαπέρατο όριο στη ροή του υπόγειου νερού ή άλλων πιθανώς μολυσμένων ρευστών.

Η χρήση σταθεροποιημένης CS μελετήθηκε αρχικά από τη βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου για τον έλεγχο της ροής ρευστών^[6] και αργότερα για την προστασία της ποιότητας του υδροφόρου ορίζοντα^[7]. Η χρήση CS ως σταθεροποιητή για την εφαρμογή της μεθόδου της παθητικής σταθεροποίησης μελετήθηκε αρχικά από την Gallagher (2000)^[8]. Τα πλεονεκτήματα της CS έναντι άλλων σταθεροποιητών είναι η μεγάλη ανθεκτικότητά της στο χρόνο, η ικανότητα επίτευξης χαμηλής διαπερατότητας σε σταθεροποιημένα εδάφη, το αρχικά χαμηλό ιξώδες, καθώς και ο πλήρης έλεγχος και η επαναληψιμότητα των χρόνων γέλης. Επιπλέον, είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη και άφλεκτη, ενώ δεν απαιτούνται ειδικές προφυλάξεις κατά τη διάρκεια ή μετά τη χρήση της^[9]. Σε αντίθεση με τα περισσότερα χημικά ενέματα, η CS μετά τη μετατροπή της σε γέλη δεν παρουσιάζει φαινόμενα συναίρεσης (συστολή της γέλης και κατά συνέπεια αποβολή μέρους του συκρατούμενου νερού από τους πόρους της)^[10].

Η τεχνική της παθητικής σταθεροποίησης βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο διεθνώς. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εργαστηριακή διακρίβωση της καταλληλότητας της CS ως σταθεροποιητή για την εφαρμογή της μεθόδου σε ρευστοποιήσιμες άμμους. Ως εκ τούτου, παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών μέτρησης ιξώδους και συμπίεστότητας για δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις CS, καθώς και αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας και αντοχής σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής (Ε.Ε.Θ.Γ.Σ.Μ.) του Α.Π.Θ., στα πλαίσια της μελέτης της μονοτονικής και ανακυκλικής συμπεριφοράς φυσικών και βελτιωμένων ρευστοποιήσιμων εδαφών^[11].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Επιλογή σταθεροποιητή

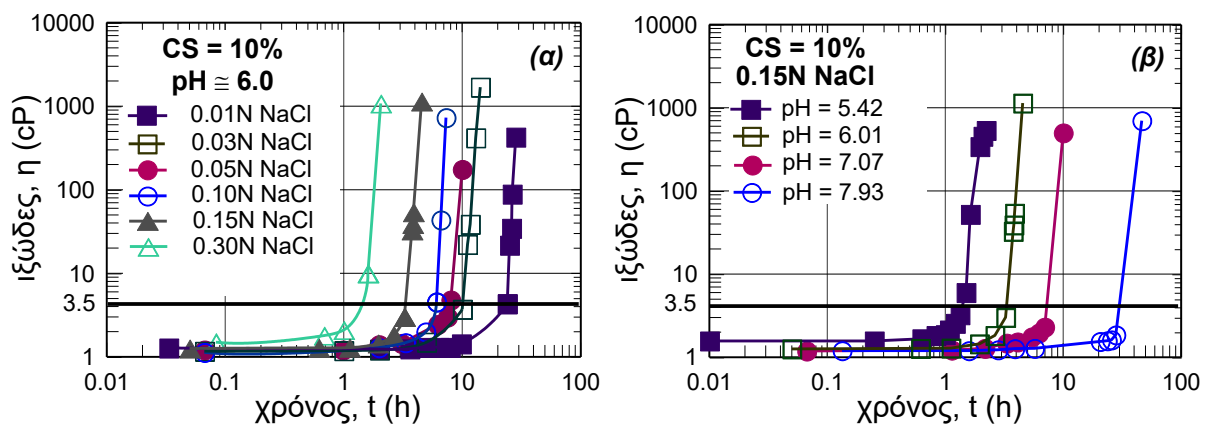
Ο τύπος CS που μελετήθηκε είναι ο Ludox-SM 30. Πρόκειται για υδατικό διάλυμα με κατά βάρος συγκέντρωση CS, CS = 30%, αρχική τιμή pH = 10 και ιξώδες, $\eta = 5.5\text{cP}$. Προσθέτοντας απεσταγμένο νερό στο αρχικό διάλυμα, προκύπτει διάλυμα με συγκέντρωση CS μικρότερη από

30% και ιξώδες παρόμοιο με αυτό του νερού ($n \approx 2cP$). Οι χρόνοι γέλης του διαλύματος καθορίστηκαν ρυθμίζοντας το pH και την ιοντική ισχύ, δηλαδή τη N περιεκτικότητα του αρχικού διαλύματος σε χλωριούχο νάτριο, NaCl.

Ρεολογικές ιδιότητες CS

Οι ρεολογικές ιδιότητες του σταθεροποιητή διερευνήθηκαν εκτελώντας δοκιμές μέτρησης ιξώδους με περιστροφικό ιξωδόμετρο του οίκου Brookfield, για διαλύματα με συγκεντρώσεις CS από 0% έως και 30%, τιμή pH από 4.0 έως και 10.0 και περιεκτικότητα σε NaCl από 0N έως 0.30N. Ενδεικτικά αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 1α παρουσιάζεται η μεταβολή του ιξώδους με το χρόνο για διαλύματα με CS = 10%, pH = 6 και συγκεντρώσεις σε NaCl που κυμαίνονται από 0.01N έως και 0.3N. Οι χρόνοι γέλης που προέκυψαν, κυμαίνονται από 1.2 έως 21 ώρες. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 1β παρουσιάζεται η μεταβολή του ιξώδους με το χρόνο για διαλύματα με CS = 10% και δεδομένη συγκέντρωση NaCl, για διαφορετικές τιμές pH. Προκύπτει ότι για τιμές pH > 6, ο χρόνος γέλης του διαλύματος αυξάνεται σημαντικά.

Σημειώνεται ότι ο χρόνος γέλης ορίστηκε ως ο χρόνος κατά τον οποίο το ιξώδες του διαλύματος έλαβε την τιμή ιξώδους, $n = 3.5cP$. Πέραν του χρόνου αυτού, η αύξηση του n είναι ραγδαία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1 και τελικά μετά την πάροδο ελάχιστου επιπλέον χρονικού διαστήματος το διάλυμα μετατρέπεται σε σταθερή γέλη, με αποτέλεσμα να σταματά η διήθησή του μέσα στο έδαφος.



Σχήμα 1. Μεταβολή του ιξώδους, η , με το χρόνο, t για διαλύματα CS = 10% με (α) pH = 6.0 και διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl και (β) 0.15N NaCl και διαφορετικές τιμές pH.

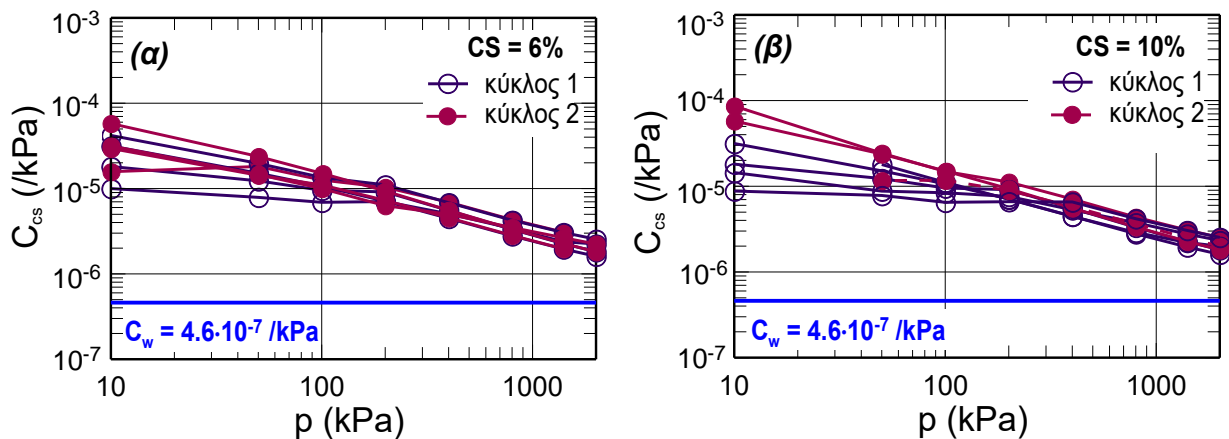
Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέχθηκε η μελέτη δύο διαλυμάτων με CS = 6% και 10% και χρόνους γέλης ίσους με 11 και 10 ώρες αντίστοιχα. Για να επιτευχθούν αυτοί οι χρόνοι, υπολογίστηκε ότι απαιτείται συνδυασμός της τιμής pH = 6 και 0.18N NaCl για CS = 6% και pH = 6 και 0.03N NaCl για CS = 10%. Οι χρόνοι γέλης των μελετηθέντων διαλυμάτων επιλέχθηκαν ώστε να επαρκούν για τον εμπλουτισμό του εδάφους στο εργαστήριο αλλά και in situ. Επιπλέον, το κόστος της εφαρμογής της σταθεροποίησης σε αυτές τις συγκεντρώσεις θεωρείται συγκρίσιμο ή και μειωμένο από το κόστος εναλλακτικών τεχνικών βελτίωσης^[8].

Για τα διαλύματα με CS = 6% και 10%, πριν αυτά μετατραπούν σε σταθερή γέλη, εκτελέστηκαν δοκιμές ισότροπης συμπίεσότητας στην τριαξονική συσκευή του Ε.Ε.Θ.Γ.Σ.Μ. με χρήση ψηφιακού υδραυλικού ελεγκτή GDS, σε ένα εύρος πιέσεων, $p = 0-200kPa$. Σύμφωνα με το Σχήμα 2, για ένα εύρος $p = 100-300kPa$, που αφορά σε προβλήματα ρευστοποίησης, η μετρηθείσα συμπίεσότητα, C_{CS} , και των δύο διαλυμάτων, είναι 17 έως 22 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη συμπίεσότητα απεσταγμένου νερού, C_w , η οποία μετρήθηκε ίση με $4.6 \cdot 10^{-7} kPa^{-1}$.

Φυσικές ιδιότητες σταθεροποιημένων άμμων

Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση εδαφικών δοκιμών σταθεροποιημένων με CS είναι μία καθαρή φυσική χαλαζιακή άμμος (M31), με κόκκους

μεταβλητής στρωγγυλότητας και σφαιρικότητας. Οι φυσικές ιδιότητες της άμμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 2. Μεταβολή της συμπίεστος διαλύματος CS , C_{cs} , με την πίεση, p , για (α) $CS = 6\%$ και (β) $CS = 10\%$.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες μελετηθείσας άμμου.

e_{min}	e_{max}	γ_{dmin} (kN/m^3)	γ_{dmax} (kN/m^3)	G_s	C_u	d_{50} (mm)	k (m/s)
0.558	0.805	14.43	16.71	2.655	1.50	0.31	$5.2 \cdot 10^{-4}$

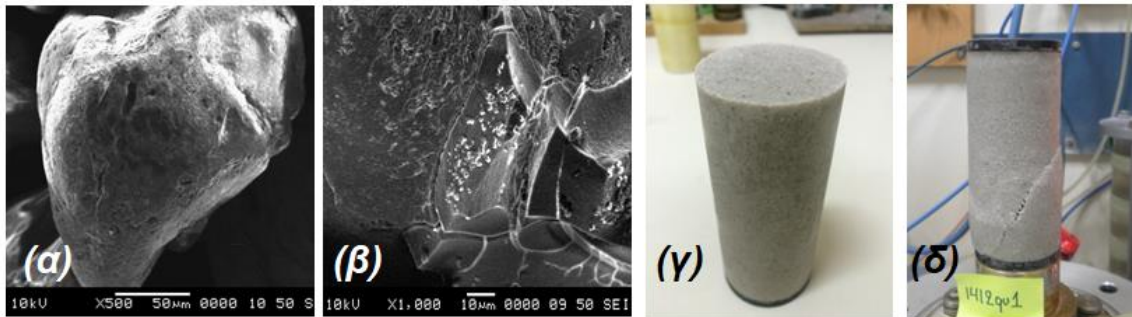
Τα δοκίμια άμμου διαμορφώθηκαν με τη μέθοδο της υγρής υποσυμπύκνωσης, όπως περιγράφεται από την Βράννα (2016)^[11]. Μετά τη διαμόρφωσή τους, διοχετεύτηκε διάλυμα CS στα δοκίμια, μέχρις ότου πληρωθούν τα κενά των πόρων του εδάφους με αυτό. Η παροχή θεωρήθηκε ότι έχει ολοκληρωθεί όταν έχει εξέλθει από την κορυφή του δοκιμίου όγκος διαλύματος τετραπλάσιος του όγκου των κενών του δοκιμίου. Σημειώνεται ότι κατά την παροχή διαλύματος CS , το ιξώδες του διαλύματος παρέμεινε χαμηλό ($n < 3.5cP$). Τα δοκίμια, μετά την ολοκλήρωση του χρόνου γέλης της CS , τοποθετήθηκαν για ωρίμανση σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας και υγρασίας. Ο χρόνος ωρίμανσης ορίστηκε ίσος με 5 φορές τον χρόνο γέλης της CS (48 έως 55 ώρες από τη στιγμή της μετατροπής του διαλύματος CS σε γέλη). Ωστόσο, δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και σε μεγαλύτερους χρόνους ωρίμανσης των δοκιμίων, έως 876 φορές επί τον χρόνο γέλης της CS (1 χρόνος). Τέλος, μετρήθηκαν οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου πριν την έναρξη της δοκιμής.

Στα Σχήματα 3α και 3β παρουσιάζονται αντίστοιχα η όψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, SEM, ενός κόκκου από μία καθαρή άμμο και μία σταθεροποιημένη με CS άμμο. Παρατηρείται ότι καθώς η CS εισάγεται στα κενά των πόρων της άμμου και μετατρέπεται σε σταθερή γέλη, οδηγεί στη δημιουργία ρηγματωμένων πλακών και επικλινών κορυφογραμμών γέλης στην επιφάνεια κάθε κόκκου, οι οποίες συντελούν στην αυξημένη αντοχή και δυσκαμψία της σταθεροποιημένης άμμου, όπως αναφέρεται και από τους Moradi & Seyedi (2015)^[12]. Στα Σχήματα 3γ και 3δ, παρουσιάζονται δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου πριν και μετά τη φόρτιση. Είναι εμφανές ότι το σταθεροποιημένο δοκίμιο αποτελεί ένα «νέο» ψαθυρό υλικό, με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από την αρχική καθαρή (μη συνεκτική) άμμο.

Η διαπερατότητα των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου σε σχετική πυκνότητα, $D_r = 40\%$, μετά την ωρίμανση και πριν τη φόρτιση, προσδιορίστηκε με τριαξονικές δοκιμές διαπερατότητας. Οι τιμές διαπερατότητας, k , που προέκυψαν, κυμαίνονται στα επίπεδα των αργιλικών εδαφών και συγκεκριμένα είναι $k = 2.3 \cdot 10^{-9} m/sec$ και $2.2 \cdot 10^{-11} m/sec$ για $CS = 6\%$ and 10% αντίστοιχα. Η μικρή αυτή διαπερατότητα αποδίδεται κατά κύριο λόγο στο δίκτυο των ρηγματωμένων πλακών γέλης, όπως διαμορφώθηκαν στους πόρους των σταθεροποιημένων δοκιμίων.

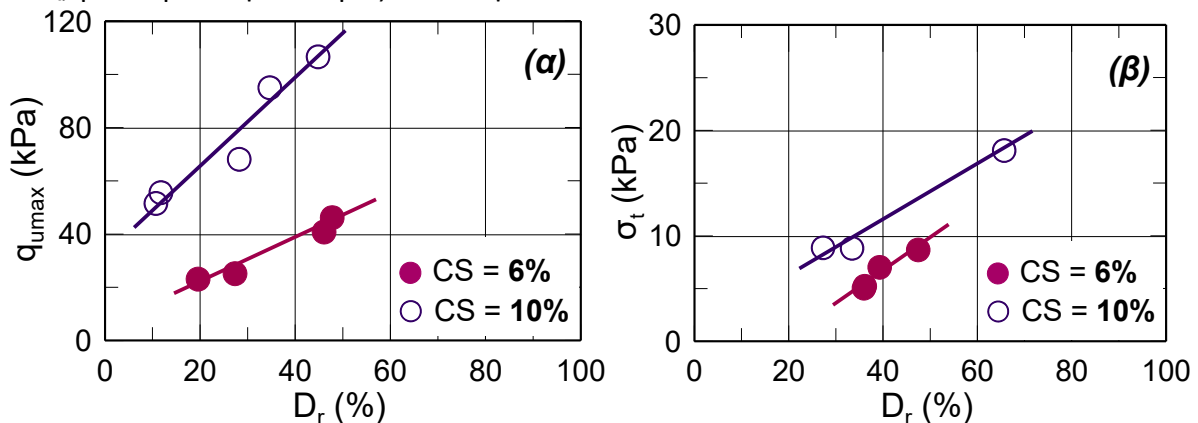
Μηχανικές ιδιότητες σταθεροποιημένων άμμων

Η μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων με CS = 6% και 10% διερευνήθηκε με δοκιμές ανεμπόδιστης (μονοαξονικής) θλίψης^[13], καθώς και με δοκιμές εφελκυστικής αντοχής^[14], με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης 0.5%/min. Η αστοχία όλων των σταθεροποιημένων δοκιμίων, ανεξαρτήτως CS και πυκνότητας, ήταν ψαθυρού τύπου (Σχήμα 3δ), με την ψαθυρότητα να αυξάνεται με αυξανόμενη πυκνότητα.



Σχήμα 3. Όψη κόκκου (α) καθαρής και (β) σταθεροποιημένης με CS = 10% άμμου M31 από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM. Δοκίμιο σταθεροποιημένης άμμου με CS = 10%, μετά τη σταθεροποίηση και (γ) πριν τη φόρτιση και (δ) μετά την μονοαξονική φόρτιση.

Το Σχήμα 4α παρουσιάζει αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου με CS = 6% και 10%, σε χαλαρή έως μετρίως πυκνή κατάσταση. Ομοίως, το Σχήμα 4β παρουσιάζει αποτελέσματα δοκιμών εφελκυστικής αντοχής σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου με CS = 6% και 10%, σε χαλαρή έως πυκνή κατάσταση. Από τα σχήματα αυτά, είναι εμφανές ότι η σταθεροποίηση με CS εισάγει μία σημαντική αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, καθώς και μία μετρήσιμη εφελκυστική αντοχή στα δοκίμια, σε σύγκριση με τις μηδενικές τιμές που αντιστοιχούν στην καθνή, μη σταθεροποιημένη άμμο. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, q_{umax} , καθώς και η εφελκυστική αντοχή, σ_t των σταθεροποιημένων δοκιμίων, προκύπτει ότι αυξάνονται με αυξανόμενη πυκνότητα, για το μελετηθέν εύρος σχετικών πυκνοτήτων ($D_r = 11-66\%$). Ειδικά στην περίπτωση του q_{umax} , η αύξηση στην συγκέντρωση CS οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής των δοκιμίων. Επιπλέον, προκύπτει ότι οι τιμές q_{umax} είναι 5 και 6 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές σ_t για δοκίμια με CS = 6%, σε πυκνή ($D_r = 50\%$) και σε χαλαρή ($D_r = 30\%$) κατάσταση αντίστοιχα. Για τα δοκίμια με CS = 10%, οι τιμές q_{umax} είναι περίπου εφταπλάσιες των τιμών σ_t , για το μελετηθέν εύρος πυκνοτήτων.



Σχήμα 4. Μεταβολή (α) της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, q_{umax} και (β) της εφελκυστικής αντοχής, σ_t , με τη σχετική πυκνότητα, D_r , για δοκίμια άμμου σταθεροποιημένα με CS = 6% και 10%.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν αποτελούν μέρος μίας εκτεταμένης έρευνας για τη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων με CS εδαφών^[10], στην οποία καταδεικνύεται η

σημαντική αύξηση της αντοχής σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση, καθώς και της δυσκαμψίας σταθεροποιημένων με CS καθαρών και ιλυωδών άμμων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, η σταθεροποίηση καθαρών άμμων με κολλοειδή πυριτία, CS, μετατρέπει τα φυσικά κοκκώδη εδάφη σε βελτιωμένα ψαθυρά εδάφη χαμηλής διαπερατότητας, της τάξης των αργιλικών εδαφών, στα οποία το νερό των πόρων έχει πρακτικά αντικατασταθεί από σταθεροποιημένη CS. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής αποδεικνύουν ότι η σταθεροποίηση με CS ακόμη και στη χαμηλότερη μελετηθείσα συγκέντρωση, CS = 6%, επιδρά θετικά στη μελετηθείσα άμμο και συγκεκριμένα της προσδίδει σημαντική αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, καθώς και εφελκυστική αντοχή, τόσο σε χαλαρή όσο και σε μετρίως πυκνή κατάσταση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΘΑΛΗΣ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Jefferies, K. Been. Soil Liquefaction: A critical state approach, Second Edition (2015) CRC Press.
- [2] C.S. El Mohtar, J. Clarke, A. Bobet, M. Santagata, V. Drnevich, C. Johnston. Cyclic response of a sand with thixotropic pore fluid, Geot. Earthq. Eng. & Soil Dynamics IV (2008) 1-10.
- [3] Ata, C. Vipulanandan. Factors affecting mechanical and creep properties of silicate-grouted sands, J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE (1999) 125 (10) 868-876.
- [4] J. Mitchell, J. Santamarina. Biological considerations in geotechnical engineering, J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE (2005) 131 (10) 1222-1233.
- [5] R.K. Iler. The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry, John Wiley & Sons (1979) New York, NY.
- [6] J.J. Jurinak, L.E. Summers. Oilfield applications of colloidal silica gel, J. of SPE Production Engineering (1991) 6 (4) 406-412, Nov.
- [7] M.R. Noll, C. Bartlett, T.M. Dochat. In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica, Proc. 6th Nat. Outdoor Conf. on Aquifer Restoration, Las Vegas, NV (1992) May 11-13.
- [8] P.M. Gallagher. Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk, Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University (2000) Blacksborough, Virginia.
- [9] DuPont. Ludox Colloidal Silica: Properties, Uses, Storage, and Handling. Product information (1997).
- [10] R. Yonekura, M. Miwa. Fundamental properties of sodium silicate based grout. Proc., 11th Southeast Asia Geot. Conf., Singapore (1993) 439-44.
- [11] Α. Βράννα. Εργαστηριακή μελέτη της μονοτονικής και ανακυκλικής συμπεριφοράς βελτιωμένων ρευστοποιήσιμων εδαφών, Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (2016).
- [12] G. Moradi, S. Seyedi. Evaluation of uniform delivery of colloidal nano-silica stabilizer to liquefiable silty sands, Int. J. Nano Dimension (2015) 6(5), 501-508.
- [13] British Standards 1377: Part 7: 1990 Standard methods of test for soils for civil engineering purposes, British Standards Institution, Test 12, Shear strength tests, 1-48.
- [14] ASTM D3967-08 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.