

Η Επίδραση του Ποσοστού Ιλύος στην Απόκριση Άμμου

The Effect of Silt Content on the Response of Sand

ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Β.Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π.
ΣΑΚΚΗΣ, Β. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της ιλύος στη συμπεριφορά μίας λεπτόκοκκης και ομοιόμορφα διαβαθμισμένης άμμου. Τα ποσοστά ιλύος που εξετάζονται είναι έως 10% και οι αρχικές ενεργές τάσεις κυμαίνονται από 50kPa έως 300kPa. Σε δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης στη χαλαρή άμμο η παρουσία της ιλύος έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τάσης της άμμου για συστολική συμπεριφορά. Οι δοκιμές σε πυκνά δοκίμια δείχνουν διαφορετική συμπεριφορά π.χ. η προσθήκη ιλύος αυξάνει την τάση της άμμου για συστολική συμπεριφορά. Εκτός από την πυκνότητα, η απόκριση τόσο της καθαρής άμμου όσο και των μιγμάτων της με ιλύ φαίνεται να επηρεάζεται από το μέγεθος της αρχικής ενεργού τάσης.

ABSTRACT: The results from an experimental study in the triaxial apparatus on a fine and uniform sand with low silt content are presented. Silt contents lower than 10% are considered in this study and tests are performed at effective stress levels varying between 50kPa and 300kPa. Undrained triaxial compression tests indicate that the presence of silt appears to result in a decrease in the tendency for contractive response of the loose sand. However, undrained tests on dense sand indicate “reverse” behaviour i.e. the addition of silt results in more contractive response compared with clean sand. Moreover, the response of both the clean sand and its mixtures appears to depend on effective stress level.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίδραση λεπτόκοκκων υλικών στην απόκριση μιας άμμου αποτελεί αντικείμενο για το οποίο έχουν εκφρασθεί αντιφατικές απόψεις. Μικρές ποσότητες λεπτόκοκκου υλικού μπορεί να καταλαμβάνουν χώρο στους πόρους ανάμεσα στους κόκκους της άμμου που διαμορφώνουν τον ιστό μεταφοράς φορτίου έτσι ώστε να έχουν μικρή επίδραση στην απόκριση της άμμου (π.χ. Thevanayagam and Mohan, 2000) ή αντίθετα μπορεί να δημιουργήσουν ένα ασταθή ιστό παίρνοντας θέση κοντά ή ανάμεσα στα σημεία επαφής των μεγαλύτερων κόκκων (π.χ. Georgiannou et al. 1990, Yamamuro and Lade, 1997). Είναι προφανές ότι ο ρόλος λεπτόκοκκων υλικών πρέπει να διακριθεί από εκείνον των πλακιδίων διαφόρων μεγεθών

(π.χ. αργιλικών, μαρμαρυγία) (Georgiannou, 2006). Όμως, ακόμη και εάν επικεντρωθούμε στην παρουσία μικρών ποσοστών ιλύος σε μία άμμο οι απόψεις δίστανται όσον αφορά στην επίδραση της ιλύος στην απόκριση της άμμου π.χ. στην αντίσταση της άμμου σε ρευστοποίηση. Οι Kuerbis et al. (1988), Pitman et al. (1994), Georgiannou (2006) παρατήρησαν ότι αύξηση του ποσοστού ιλύος έως 20% είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της διαστολικότητας της άμμου. Άλλοι ερευνητές παρατήρησαν ότι η αύξηση του ποσοστού ιλύος αυξάνει την συστολικότητα της άμμου (π.χ. Verdugo and Ishihara, 1996, Yamamuro and Lade, 1997, 1998).

Επισημαίνεται ότι στις προαναφερθείσες μελέτες οι παρατηρήσεις αναφέρονται σε σχετικά χαμηλά ποσοστά ιλύος καθώς η συνεχής αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκου

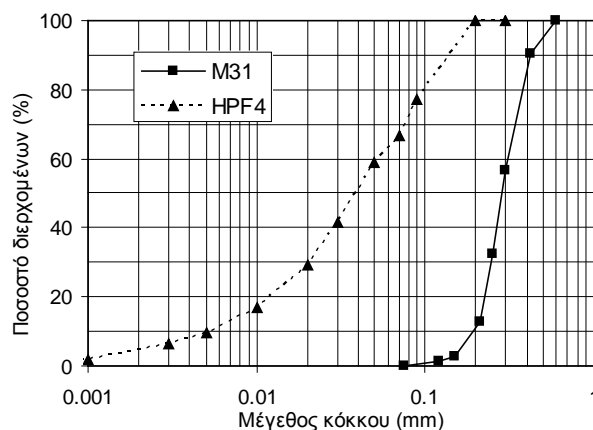
υλικού θα οδηγήσει τελικώς στη διασπορά των κόκκων της άμμου ανάμεσα στο λεπτόκοκκο υλικό έτσι ώστε να χάνονται οι επαφές μεταξύ τους. Οι Yamamuro and Kelly (2001) τονίζουν ότι για μεγάλα ποσοστά ιλύος η συμπεριφορά διαφέρει σημαντικά από εκείνη που είχε παρατηρηθεί για χαμηλά ποσοστά ιλύος. Ένας άλλος παράγοντας ο οποίος επισημαίνεται είναι η αλλαγή της συμπεριφοράς τόσο των καθαρών άμμων όσο και των μιγμάτων τους με ιλύ στις χαμηλές και υψηλές αρχικές ενεργές τάσεις (π.χ. Thevanayagam, 1998, Yamamuro and Kelly, 2001).

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της ιλύος στη συμπεριφορά μίας λεπτόκοκκης άμμου με ομοιόμορφη κοκκομετρική διαβάθμιση για μικρά ποσοστά ιλύος (0-10%). Οι αρχικές ενεργές τάσεις των δοκιμών διατηρούνται σχετικά χαμηλές (<300kPa) και ελέγχεται κατά πόσον η μεταβολή τους επιδρά στην απόκριση της άμμου. Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην επίδραση της ιλύος τόσο σε χαλαρά όσο και σε πυκνά δοκίμια μιγμάτων από τα ίδια υλικά και υποβαλλόμενα στις ίδιες εργαστηριακές συνθήκες. Αν και στη διεθνή βιβλιογραφία γίνεται αναφορά στην επίδραση της ιλύος είτε σε χαλαρά δοκίμια είτε σε πυκνότερα δοκίμια, με μέτρο σύγκρισης είτε τον ίδιο δείκτη πόρων (π.χ. Kuerbis et al., 1988, Pitman et al., 1994) ή την ίδια σχετική πυκνότητα (π.χ. Evans and Zhou, 2000) ή τον ίδιο δείκτη εδαφικού σκελετού (π.χ. Georgiannou et al., 1990, Thevanayagam, 1998) ή τον ίδιο 'φυσικό δείκτη πόρων' που απορρέει από την μέθοδο απόθεσης εν ξηρώ (π.χ. Lade and Yamamuro, 1997), δεν είμαστε ενήμεροι ανάλογης με την παρούσα ερευνητικής εργασίας που να επικεντρώνεται στην αποτίμηση της συμπεριφοράς άμμου με το ίδιο ποσοστό ιλύος στην χαλαρή και την πυκνή της δομή.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τριαξονικές συσκευές ελεγχόμενων διαδρομών τάσεων (Bishop and Wesley, 1975) εφοδιασμένες με μετρητές παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (Burland and Symes, 1982) και ακρίβεια στις μετρήσεις των τάσεων και πιέσεων του νερού των πόρων ± 0.1 kPa. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μια λεπτόκοκκη χαλαζιακή άμμος (M31) με ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s=2.65$ και ελάχιστο και μέγιστο δείκτη πόρων $e_{min}=0.528$

και $e_{max}=0.870$ και η ιλύς HPF4 (Zdravkovic, 1996), η κοκκομετρική διαβάθμιση των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου και ιλύος.

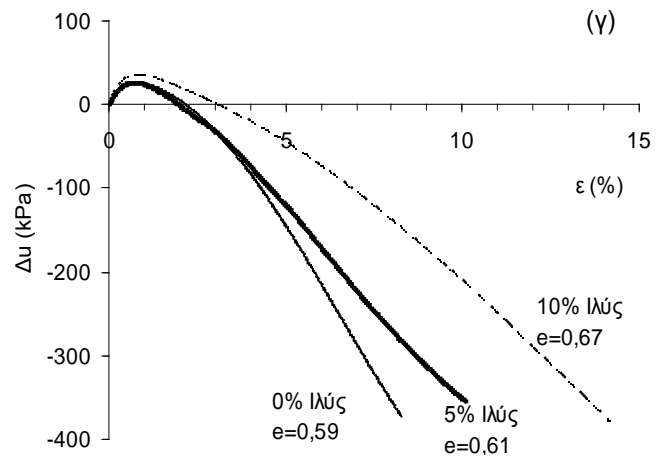
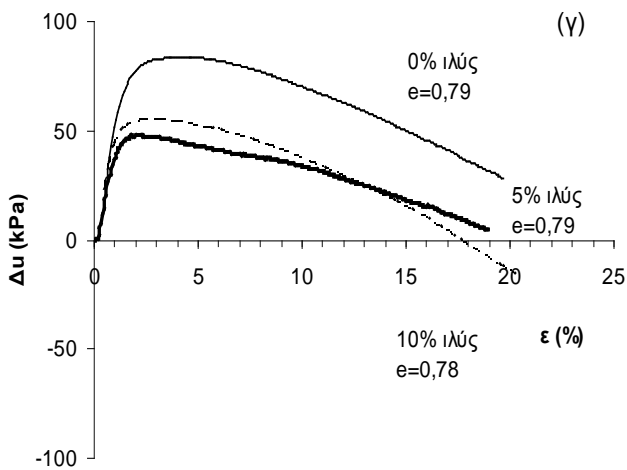
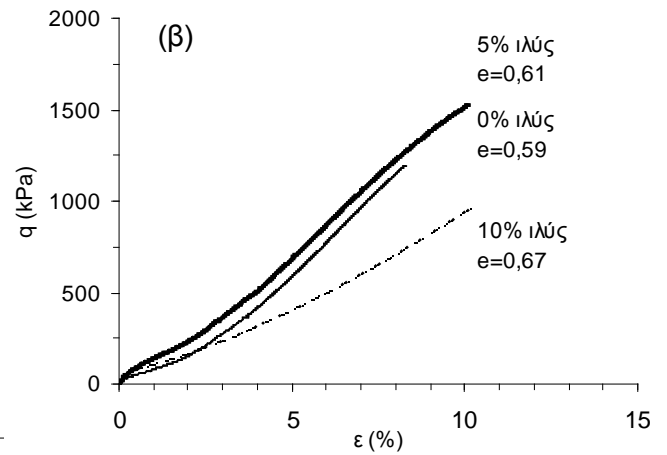
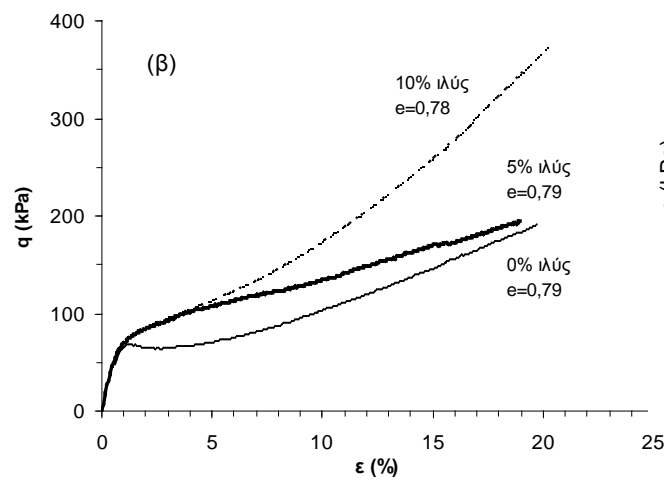
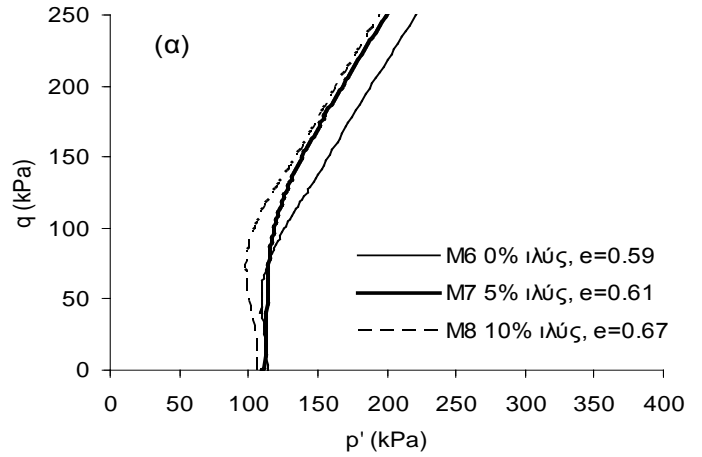
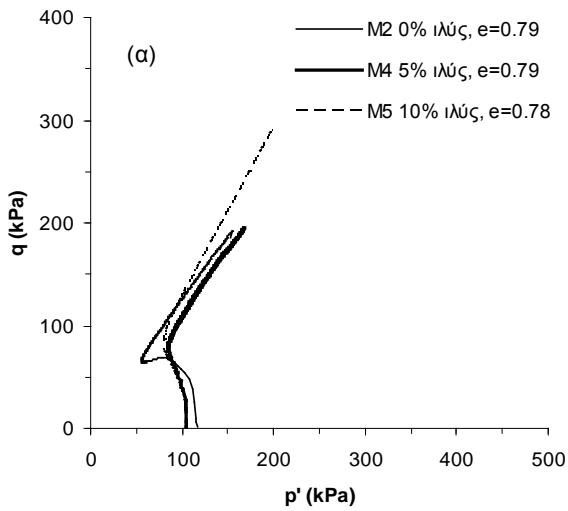
Figure 1. Grain size distribution curves for sand and silt.

Τα δοκίμια διαμέτρου 38mm και λόγου ύψους προς διάμετρο 2 προς 1 παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της ξηράς απόθεσης (dry deposition). Στα μίγματα προηγήθηκε ανάμιξη της άμμου με την ιλύ σε ογκομετρικό σωλήνα 1lt πριν την τοποθέτηση του μίγματος στο χωνί μέσα από το οποίο γίνεται η απόθεση στη μήτρα από σταθερό ύψος. Τα πυκνά δοκίμια παρασκευάστηκαν με δόνηση της μήτρας μέσω δέκα (10) ελαφρών κτυπημάτων μετά την απόθεση της άμμου ή του μίγματος. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά δοκιμών.
Table 1. Specimen characteristics.

Πείραμα	e_i	(%) ιλύος	p_c' (kPa)	Dr(%)
M1	0.77	0	50	29.2
M2	0.79	0	120	23.4
M3	0.77	0	270	29.2
M4	0.79	5	100	17.8
M5	0.78	10	100	13.4
M6	0.59	0	105	81.9
M7	0.61	5	110	65.7
M8	0.67	10	110	41.9
M9	0.77	5	290	23.1
M10	0.76	10	290	18.6

Ο κορεσμός του δοκιμίου επιτυγχάνεται με τη διοχέτευση διοξειδίου του άνθρακα για



Σχήμα 3. Χαλαρά δοκίμια, $p' \sim 100 \text{ kPa}$: (α) διαδρομές ενεργών τάσεων; (β) καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων; (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων.

Figure 3. Loose specimens, $p' \sim 100 \text{ kPa}$: (a) effective stress paths; (b) stress-strain curves; (c) excess pore water pressure against strain curves.

Σχήμα 4. Πυκνά δοκίμια, $p' \sim 100 \text{ kPa}$: (α) διαδρομές ενεργών τάσεων; (β) καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων; (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων.

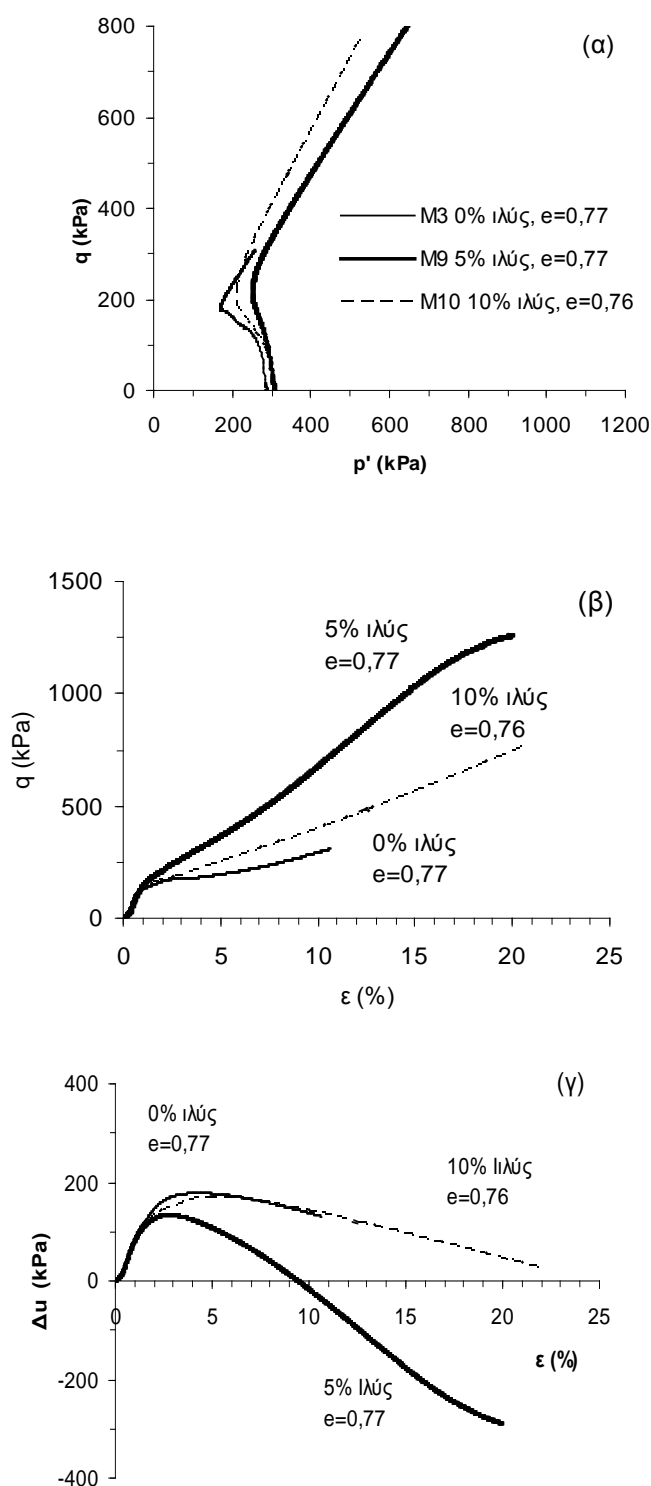
Figure 4. Dense specimens, $p' \sim 100 \text{ kPa}$: (a) effective stress paths; (b) stress-strain curves; (c) excess pore water pressure against strain curves.

τριάντα λεπτά περίπου και στη συνέχεια απαερωμένοι νερού μέσα από το δοκίμιο. Για τιμές της παραμέτρου B του Skempton μεγαλύτερες από 0.97 θεωρήθηκε ότι έχει επιτευχθεί πλήρης κορεσμός. Μετά τον κορεσμό τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα και ακολούθησε περίοδος ηρεμίας διάρκειας 12 ωρών πριν από τη φόρτιση σε τριαξονική θλίψη με επιβαλλόμενο ρυθμό παραμόρφωσης 4.5% ανά ώρα.

3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΙΛΥΟΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΑΛΑΡΗΣ ΚΑΙ ΠΥΚΝΗΣ ΑΜΜΟΥ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για χαλαρά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση 100kPa περίπου, ενώ οι δείκτες πόρων πριν την επιβολή της διατμητικής φόρτισης ήταν 0.79, 0.79 και 0.78 για την καθαρή άμμο και τα μίγματα της άμμου με 5% και 10% ιλύ αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών (M2,M4-5) φαίνονται στον Πίνακα 1. Στο Σχήμα 3(α) φαίνονται οι διαδρομές ενεργών τάσεων ενώ στα Σχήματα 3(β) και 3(γ) φαίνονται τα διαγράμματα αποκλινοσών τάσεων-παραμορφώσεων και υπερπιέσεων του νερού των πόρων ως προς τις παραμορφώσεις αντίστοιχα. Μεταξύ των χαλαρών δοκιμών μεγαλύτερη τάση για συστολή εμφανίζει η καθαρή άμμος ενώ η προσθήκη της ιλύος σταθεροποιεί την απόκριση της άμμου εφόσον δεν παρατηρείται πτώση της αποκλίνουσας τάσης αλλά συνεχής αύξησή της με την παραμόρφωση. Επιπλέον από τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 3(β) φαίνεται ότι η τάση για διαστολική συμπεριφορά αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού ιλύος. Στο Σχήμα 3(γ) στα διαγράμματα υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων η παρουσία της ιλύος εμποδίζει την ανάπτυξη υπερπιέσεων σε σχέση με την καθαρή άμμο.

Στα Σχήματα 4(α), 4(β) και 4(γ) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για πυκνά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση 100kPa, ενώ οι δείκτες πόρων πριν την επιβολή της διατμητικής φόρτισης ήταν 0.59, 0.61 και 0.67 για την καθαρή άμμο και τα μίγματα της άμμου με 5% και 10% ιλύ αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών (M6-8) φαίνονται στον Πίνακα 1. Λόγω της πυκνότητάς τους όλα τα δοκίμια εμφανίζουν συνεχή αύξηση της αποκλίνουσας τάσης τόσο στα διαγράμματα τάσεων του Σχή-



Σχήμα 5. Χαλαρά δοκίμια, $p' \sim 300 \text{kPa}$: (α) διαδρομές ενεργών τάσεων; (β) καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων; (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων.

Figure 5. Loose specimens, $p' \sim 300 \text{kPa}$: (a) effective stress paths; (b) stress-strain curves; (c) excess pore water pressure against strain curves.

ματος 4(α) όσο και στις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 4(β). Όμως, τα μίγματα της άμμου με ιλύ εμφανίζουν μικρότερη τάση για διαστολή από την καθαρή άμμο όπως φαίνεται και στα διαγράμματα υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων του Σχήματος 4 (γ). Η συμπεριφορά αυτή είναι αντίθετη με εκείνη που παρατηρήθηκε για τα χαλαρά δοκίμια όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 (γ) όπου η καθαρή άμμος εμφάνιζε τη μεγαλύτερη τάση για συστολή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο δείκτης πόρων του μίγματος της άμμου με 10% ιλύ είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τα άλλα δοκίμια γεγονός που μειώνει την τάση του για διαστολή όμως για παρόμοιο δείκτη πόρων με την καθαρή άμμο το μίγμα με 5% ιλύ εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με την άμμο σε αντίθεση με τα αντίστοιχα χαλαρά δοκίμια όπου η καθαρή άμμος εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη συστολικότητα και ελαφρώς ψαθυρή συμπεριφορά.

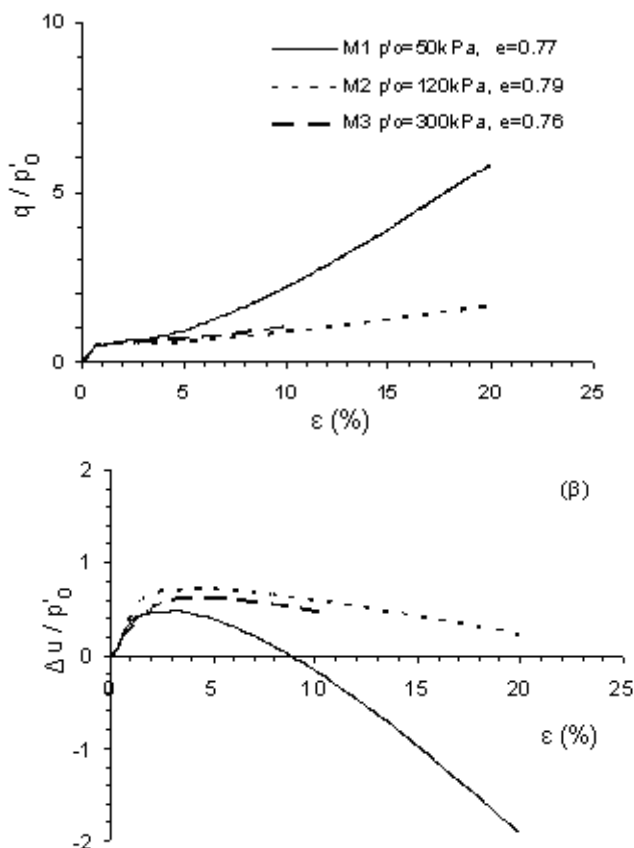
4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΤΑΣΗΣ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάστηκε η επίδραση της ιλύος στην απόκριση της άμμου που την 'φιλοξενεί' για χαλαρά δοκίμια υπό αρχική ενεργό τάση 100kPa περίπου. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για αρχική ενεργό τάση 300kPa περίπου.

Παρά το γεγονός ότι και στις δύο τιμές αρχικής ενεργού τάσης η επίδραση της ιλύος είναι ευεργετική στην απόκριση της άμμου, για ποσοστό ιλύος 10% η παρουσία της ιλύος στο μίγμα δεν αυξάνει σημαντικά την αντοχή της άμμου για αρχική ενεργό τάση 300kPa (Σχήμα 5) σε αντίθεση με την περίπτωση επιβολής αρχικής ενεργού τάσης 100kPa (Σχήμα 3).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκριση περιορίστηκε σε τάσεις >100kPa όπου η απόκριση της καθαρής άμμου κανονικοποιείται και όχι στην χαμηλή τάση των 50kPa όπου η καθαρή άμμος δείχνει περισσότερο διαστολική συμπεριφορά όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Στο Σχήμα 6(α) η αποκλίνουσα τάση έχει κανονικοποιηθεί σε σχέση με την αρχική ενεργό τάση της κάθε δοκιμής, (q/p'_0), έτσι ώστε να απαλειφθεί η επίδραση της αρχικής τάσης στερεοποίησης. Είναι προφανές ότι ενώ τα διαγράμματα για ενεργές τάσεις 120 και 300kPa κανονικοποιούνται αυτό δεν ισχύει για το διάγραμμα που αντιστοιχεί σε αρχική τάση 50kPa. Ομοίως, στα κανονικοποιημένα διαγράμματα της υπερπίεσης του νερού των πόρων, $\Delta u/p'_0$, του Σχήματος 6(β) το διάγραμμα που αντιστοιχεί σε αρχική ενεργό

τάση 50kPa αποκλίνει από εκείνα που αντιστοιχούν στις υψηλότερες τάσεις και τα οποία πρακτικώς συμπίπτουν.



Σχήμα 6. Κανονικοποίηση: (α) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων; (β) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων.

Figure 6. Normalisation: (a) stress-strain curves; (b) excess pore water pressure against strain curves.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διατηρήθηκαν σταθερές βασικές παράμετροι των οποίων η μεταβολή επηρεάζει την απόκριση των άμμων όπως η κοκκομετρία των υλικών και η μέθοδος παρασκευής και φόρτισης δοκιμίων. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο ρόλος της ιλύος όταν προστίθεται έστω και σε μικρά ποσοστά σε μία άμμο φαίνεται να εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα όσο και από την τάση η οποία μελετάται. Για την ίδια, λεπτόκοκκη και ομοιόμορφη, άμμο παρατηρείται διαφορετική απόκριση όταν το ίδιο ποσοστό ιλύος προστίθεται στη χαλαρή ή την πυκνή της δομή. Συγκεκριμένα:

- Ενώ στη χαλαρή άμμο η παρουσία της ιλύος δρα πάντοτε ευνοϊκά μειώνοντας την τάση της άμμου για συστολική

συμπεριφορά στην πυκνή άμμο η προσθήκη της ιλύος μπορεί να έχει τα αντίθετα αποτελέσματα.

- Η δράση της ιλύος φαίνεται να εξαρτάται και από το μέγεθος της αρχικής ενεργού τάσης.

Συνεπώς, η εκτίμηση της αντοχής μιας φυσικής άμμου που περιέχει σχετικώς μικρά ποσοστά ιλύος απαιτεί την συνεκτίμηση των ανωτέρω παραγόντων. Ο ρόλος της ιλύος πρέπει να συνδυάζεται με συγκεκριμένες συνθήκες γεγονός που δικαιολογεί τα φαινομενικά αντιφατικά συμπεράσματα της βιβλιογραφίας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bishop, A.W. & Wesley, L.D. (1975), "A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing", *Geotechnique* Vol. 25, No. 4, pp. 657-670.
- Burland, J.B. & Symes, M.J. (1982), "A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus", *Geotechnique* Vol. 32, No. 1, pp. 62-65.
- Evans, M.D. & Zhou, S. (1995), "Liquefaction behaviour of sand-gravel composites", *Journal of Geotechnical Engineering* Vol. 121, No. 3, pp. 287-298.
- Georgiannou, V.N., Burland, J. B. & Hight, D. W. (1990), "The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension", *Geotechnique* Vol. 41, No.3, pp. 383-393.
- Georgiannou, V.N. (2006), "The undrained response of sands with additions of particles of various shapes and sizes", *Geotechnique*, Vol. 56, No. 9, pp. 639-649.
- Kurbis, R. Negussey, D. and Vaid, Y.P. (1988), "Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand", *Hydraulic fill structures*, *Geotech. Spec. Publ. No 21*, D.J.A. Van Zyl and G. Vick, eds., ASCE, New York, pp. 330-345.
- Lade, P.V. & Yamamuro, J.A. (1997), "Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands", *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 34, pp. 918-928.
- Pitman, T.D., P.K. Robertson and D.C. Sego (1994), "Influence of fines on the collapse of loose sands", *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 31, pp. 728-739.
- Thevanayagam, S. and Mohan, S. (2000), "Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands", *Geotechnique* 50, No. 1, pp. 1-23.
- Thevanayagam, S. (1998), "Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands", *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol. 124, No. 6, pp. 479-491.
- Verdugo, R. and Ishihara, K. (1996), "The steady state of sandy soils", *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 2, pp. 81-91.
- Yamamuro, J.A. and Kelly, M.C. (2001), "Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content", *Journal of Geotech. And Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol. 127, No. 4, pp. 314-324.
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V. (1997), "Static liquefaction of very loose sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, No. 6, pp. 905-917.
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V. (1998), "Steady state concepts and static liquefaction of silty sands", *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 905-917.
- Zdravkovic, L. (1996), "The stress-strain-strength anisotropy of a granular medium under general stress conditions", Ph.D. thesis, Imperial College, University of London.