

## Ασταθής Συμπεριφορά Άμμου σε Μονοτονική και Ανακυκλική Στρεπτική Διάτμηση Unstable Behaviour of a Sand Under Monotonic and Cyclic Torsional Loading

Αργύρης ΤΣΟΜΩΚΟΣ<sup>1</sup>, Βασιλική ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ<sup>2</sup>

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ** : Στην παρούσα εργασία ερευνάται η απόκριση μίας λεπτόκοκκης άμμου σε μονοτονική και ανακυκλική στρεπτική διάτμηση. Κατά την ανακυκλική φόρτιση τα δοκίμια της άμμου εμφανίζουν απώλεια αντοχής όταν η διαδρομή ενεργών τάσεων που ακολουθούν πλησιάζει τη γραμμή αστάθειας των μονοτονικών δοκιμών. Η ασταθής συμπεριφορά εκδηλώνεται με την απότομη συσσώρευση υπερπίεσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων. Ο ρυθμός ανάπτυξης υδατικών υπερπίεσεων πόρων κατά την ανακυκλική φόρτιση μέχρι την εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς μπορεί να προβλεφθεί από εμπειρική σχέση, ενώ οι καμπύλες ρευστοποίησης των χαλαρών και πυκνών δοκιμίων της άμμου μπορούν να κανονικοποιηθούν ως προς το δείκτη πόρων.

**ABSTRACT** : The behaviour of a fine sand under monotonic and cyclic torsional loading is investigated in the hollow cylinder apparatus. During cyclic loading unstable response is initiated along the instability line defined under monotonic loading. Unstable response is associated with a sudden increase in the rate of shear strain and excess pore water pressure accumulation. The influence of the number of cycles on the development of excess pore water pressure up to the initiation of unstable response can be described by empirical equations. The liquefaction characteristics of loose and dense sand can be normalized with respect to the void ratio function.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφωσιμότητας των αμμωδών εδαφικών υλικών έχουν αποτελέσει το αντικείμενο πολλών μελετών κατά το παρελθόν. Κύριο χαρακτηριστικό των μελετών αυτών είναι η χρησιμοποίηση τριαξονικών δοκιμών για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του εδάφους. Η επιβολή γενικευμένων εντατικών καταστάσεων σε ένα εδαφικό υλικό, οι οποίες θα οδηγήσουν στην ακριβή πρόβλεψη της απόκρισής του σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση, απαιτεί τη χρήση σύνθετων συσκευών, όπως είναι η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (Hight et al., 1983, Yoshimine et al., 1999).

Στην παρούσα μελέτη ερευνάται η απόκριση της άμμου Fontainebleau σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η άμμος Fontainebleau είναι μια λεπτόκοκκη, ομοιόμορφη άμμος η

<sup>1</sup> Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [atsomokos@yahoo.com](mailto:atsomokos@yahoo.com)

<sup>2</sup> Αναπλ. Καθηγήτρια, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [vngeor@civil.ntua.gr](mailto:vngeor@civil.ntua.gr)

οποία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την προσομοίωση γεωτεχνικών προβλημάτων (Clouterre Project, 1991, Bolton et al., 1999, Garnier, 2001, Gaudin et al., 2002), ενώ στο εργαστήριο έχει εκτελεστεί μεγάλος αριθμός τριαξονικών δοκιμών με σκοπό τη διερεύνηση και στη συνέχεια την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς της (Touati, 1982, Bardet, 1990, Gaudin et al., 2003).

Σε αυτή την εργασία εξετάζεται η απόκριση κοίλων δοκιμίων άμμου Fontainebleau, με διαφορετικές πυκνότητες και μέσες ενεργές τάσεις, τα οποία υποβάλλονται σε μονοτονική και ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Έμφαση δίνεται στη συσχέτιση της απόκρισης της άμμου σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση και κυρίως στον προσδιορισμό των συνθηκών που οδηγούν στην εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς της άμμου κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης. Η ασταθής συμπεριφορά εκδηλώνεται με απότομη πτώση της αντοχής των δοκιμίων, με ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού συσσώρευσης υπερπίεσεων του νερού των πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων.

## ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ – ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα κοίλα δοκίμια που εξετάστηκαν είχαν εξωτερική διάμετρο ίση με 70mm, εσωτερική διάμετρο ίση με 40mm και ύψος ίσο με 140mm. Οι δοκιμές της παρούσας μελέτης εκτελέστηκαν διατηρώντας την ίδια πίεση μέσα ( $p_i$ ) και έξω ( $p_o$ ) από τα τοιχώματα του κοίλου δοκιμίου με αποτέλεσμα η γωνία  $\alpha$ , η οποία αντιπροσωπεύει την κλίση της μέγιστης κύριας τάσης ( $\sigma_1$ ) ως προς την κατακόρυφο, να συνδέεται με την παράμετρο  $b$ , η οποία αντιπροσωπεύει το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης ( $\sigma_2$ ), με τη σχέση  $b = \sin^2 \alpha$ . Η συχνότητα της ανακυκλικής φόρτισης ήταν ίση με 0.1Hz.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων σύμφωνα με τις εξισώσεις που προτείνουν οι Hight et al. (1983). Κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση το εύρος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής διατμητικής τάσης ορίζεται ως:

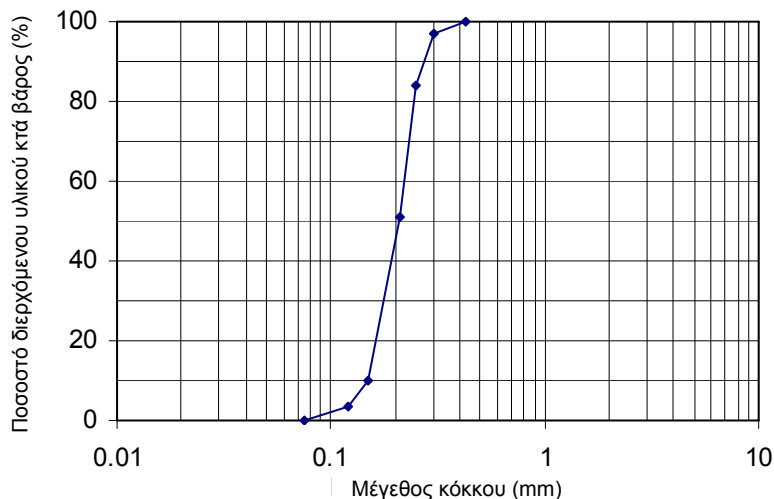
$$\tau_{SA} = \frac{M_{T,R} + M_{T,L}}{2\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \quad (1)$$

όπου  $M_{T,R}$  και  $M_{T,L}$  είναι το εύρος της στρεπτικής ροπής κατά την ωρολογιακή και την αντιωρολογιακή κατεύθυνση αντίστοιχα, με θετικό πρόσημο και οι δύο, και  $r_o$ ,  $r_i$  είναι η εξωτερική και η εσωτερική ακτίνα του δοκιμίου κατά την έναρξη της ανακυκλικής φόρτισης. Το εύρος της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης ορίζεται ως:

$$\gamma_{SA} = \frac{\Delta\theta(r_o + r_i)}{4H_n} \quad (2)$$

όπου  $\Delta\theta$  είναι η συνολική γωνία περιστροφής σε rad και  $H_n$  είναι το ύψος του δοκιμίου κατά την έναρξη της ανακυκλικής φόρτισης.

Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι μία ομοιόμορφη, λεπτόκοκκη άμμος, η άμμος Fontainebleau, με ανηγμένο ειδικό βάρος στερεάς φάσης  $G_s=2.64$ . Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων της άμμου είναι ίσος με  $e_{min}=0.540$  και  $e_{max}=0.865$  αντίστοιχα, ενώ η κοκκομετρική της διαβάθμιση διακρίνεται στο Σχήμα 1. Όλα τα δοκίμια της άμμου Fontainebleau παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της “εμβάπτισης σε νερό” σύμφωνα με τη διαδικασία που προτείνουν οι Bishop and Henkel (1957). Για τον έλεγχο του βαθμού κορεσμού των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος B του Skempton (1954) για τιμές της οποίας μεγαλύτερες από 0.97 θεωρήθηκε ότι έχει επιτευχθεί πλήρης κορεσμός. Μετά τον κορεσμό τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις,  $p_i'=(\sigma_1'+\sigma_2'+\sigma_3')/3$ , και ακολούθησε περίοδος ηρεμίας διάρκειας 12 ωρών πριν από τη φόρτιση σε στρεπτική διάτμηση.



Σχήμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου Fontainebleau.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά δοκιμίων.

Δοκίμιο	Τύπος φόρτισης	$e_i$	$p_i'$ (kPa)	$\tau_{SA}/ p_i'$	CSR	$N_{IL}$
F1	*M	0.743	75	-	-	-
F2	M	0.731	130	-	-	-
F3	M	0.743	215	-	-	-
F10	*C	0.713	130	0.239	0.97	2
F11	C	0.714	130	0.208	0.86	4
F12	C	0.736	130	0.182	0.74	7
F13	C	0.732	130	0.161	0.66	24
F14	C	0.721	130	0.144	0.58	48
F15	C	0.743	130	0.121	0.50	68
F16	C	0.734	130	0.105	0.44	150
F20-F24	C	0.665-0.700	130	0.139-0.220	0.46-0.71	195-13

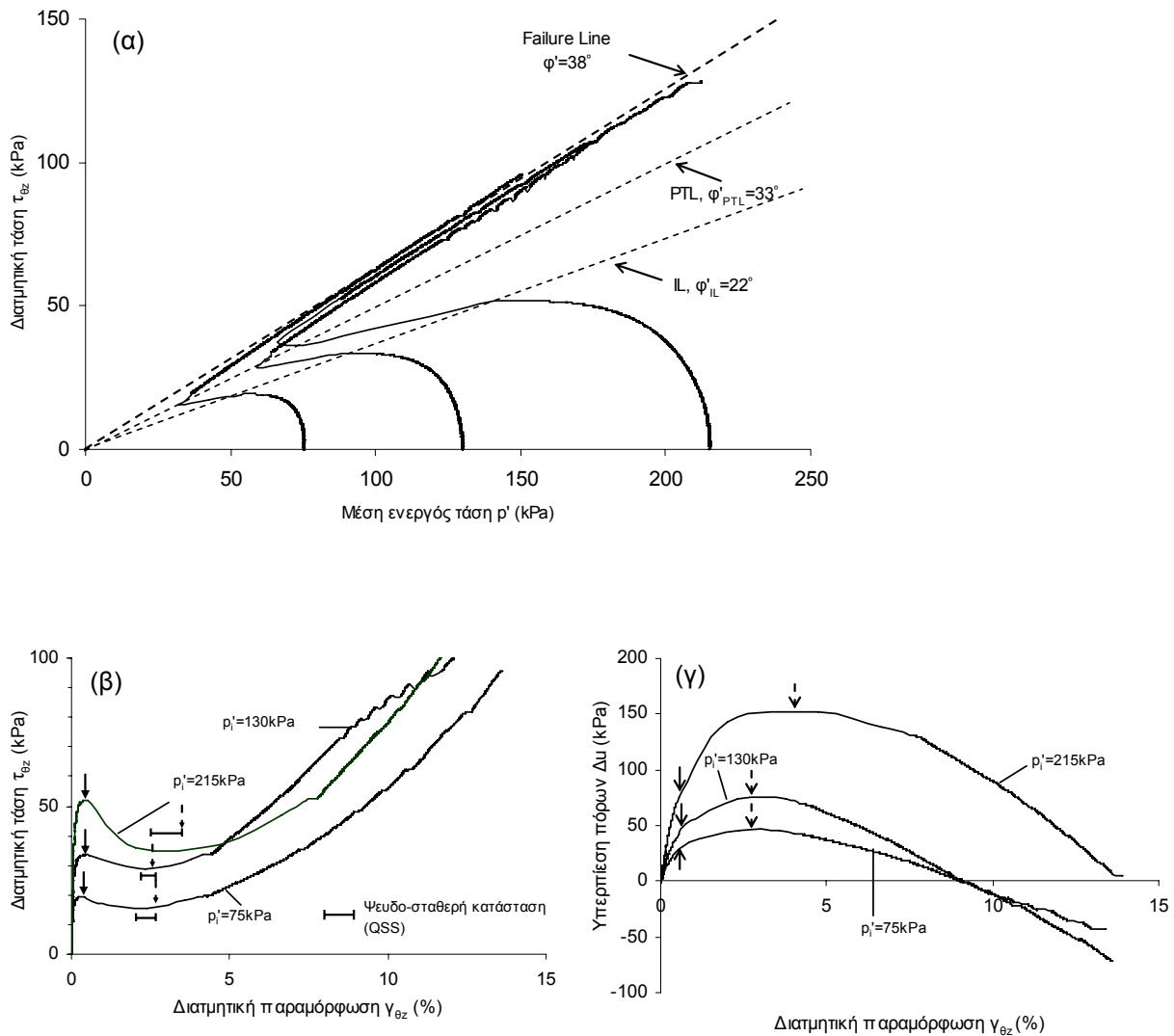
\*M, C = μονοτονική, ανακυκλική φόρτιση

## ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

### Μονοτονική Στρεπτική Διάτμηση

Στο Σχήμα 2(α) έχουν σχεδιασθεί με συνεχή γραμμή οι διαδρομές ενεργών τάσεων εδαφικών δοκιμίων άμμου Fontainebleau ισότροπα στερεοποιημένων σε τρεις διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις  $p_i'$  (75kPa, 130 και 215kPa, δοκίμια F1, F2 και F3 στον Πίνακα 1), με δείκτες πόρων  $e_i=0.731$  έως 0.743, τα οποία υποβάλλονται σε μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Όλα τα δοκίμια εμφανίζουν καταρχήν συστολική συμπεριφορά και η διατμητική τους αντοχή μετά την απόκτηση μίας μέγιστης τιμής μειώνεται συνεχώς. Η συμπεριφορά των δοκιμίων αλλάζει και από τάση για συστολή παρουσιάζουν τάση για διαστολή με ταυτόχρονη αύξηση της διατμητικής τους αντοχής (Σχήμα 2α) στα σημεία αλλαγής φάσης (phase transformation point - PTP, Ishihara et al., 1975). Τα σημεία στις τρεις διαφορετικές τάσεις  $p_i'$  ορίζουν την γραμμή αλλαγής φάσης (Phase Transformation Line-PTL) που περνάει από την αρχή των αξόνων και έχει κλίση  $\phi'_{PTL}=33^\circ$ . Το σημεία που αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές διατμητικής αντοχής κατά τη διάρκεια της συστολικής συμπεριφοράς ονομάζονται σημεία αστάθειας. Αν ενωθούν τα σημεία που συνδέουν τη μέγιστη διατμητική αντοχή κατά τη διάρκεια συστολικής συμπεριφοράς των δοκιμίων υπό μονοτονική φόρτιση για διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις και παρόμοιο δείκτη πόρων ορίζουν μια ευθεία γραμμή στο διάγραμμα  $\tau_{\theta z}-p'$ , γνωστή ως γραμμή αστάθειας (Instability Line - IL, Lade, 1993) με κλίση  $\phi'_{IL}=22^\circ$ . Η γραμμή αστάθειας φαίνεται να ορίζεται μοναδικά για το δείκτη πόρων των δοκιμίων της παρούσας εργασίας, ενώ είναι ανεξάρτητη από την αρχική τιμή της ενεργού τάσης  $p_i'$ .

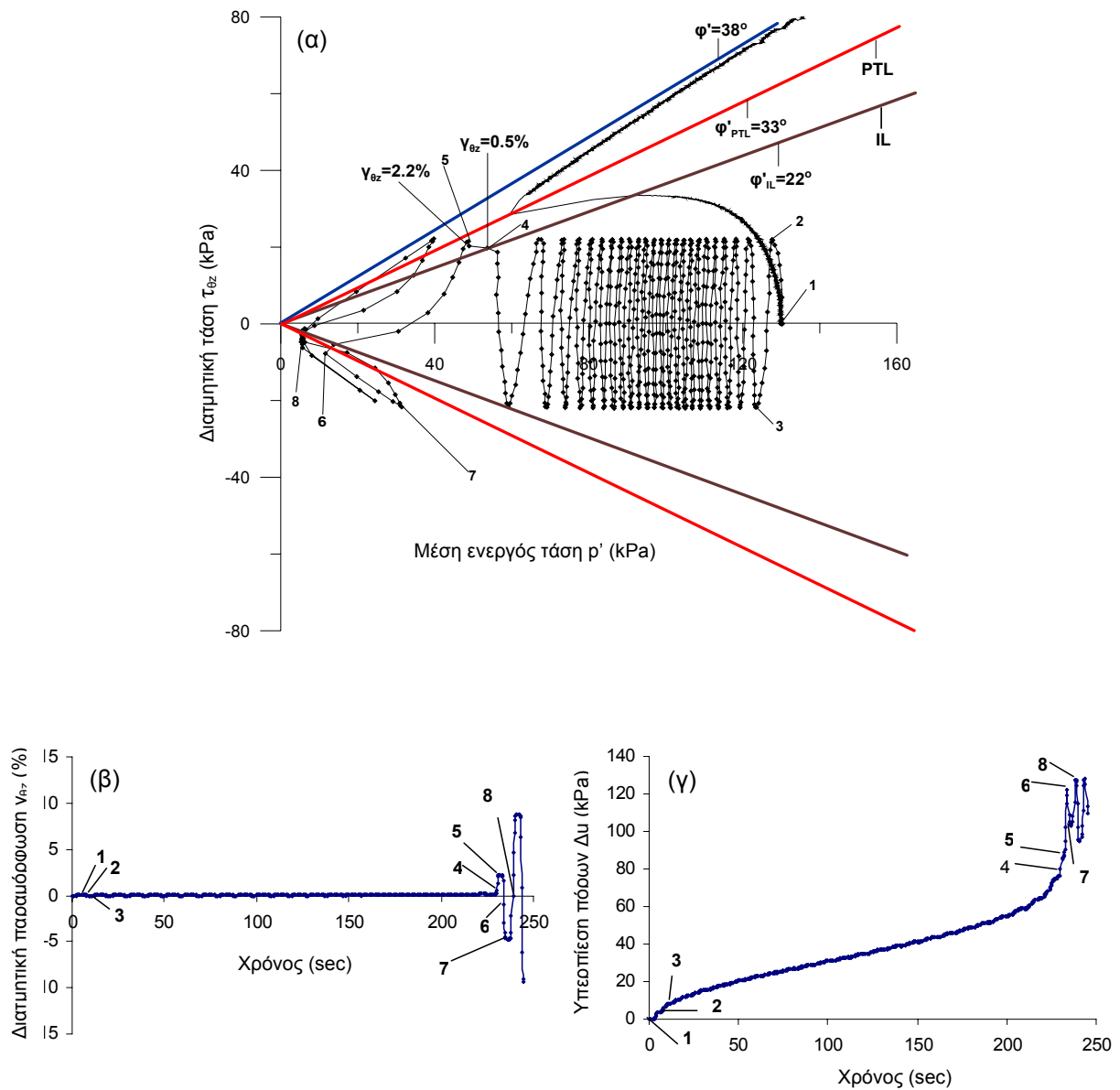
Τα σημεία αστάθειας έχουν σημειωθεί με συνεχή βέλη στα σχήματα υπερπίεσης πόρων – διατμητικής παραμόρφωσης και διατμητικής τάσης – διατμητικής παραμόρφωσης (Σχήματα 2(γ) και 2(β)), όπου παρατηρείται ότι μέχρι την τιμή  $\gamma_{\theta z}=0.5\%$  οι υπερπίεσεις πόρων είναι θετικές, συσσωρεύονται με σταθερό ρυθμό και η διατμητική αντοχή αποκτά τη μέγιστη τιμή της. Στη συνέχεια κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η οποία γίνεται με έλεγχο των τάσεων, η συμπεριφορά των δοκιμίων αλλάζει δραματικά, καθώς η διατμητική αντοχή ελαττώνεται και ο ρυθμός συσσώρευσης θετικών υπερπίεσεων πόρων μεγαλώνει. Η πτώση της διατμητικής αντοχής είναι μεγαλύτερη για το δοκίμιο που έχει στερεοποιηθεί στην τάση των 215kPa, χωρίς, όμως, το δοκίμιο να οδηγείται τελικώς σε ρευστοποίηση. Παρόμοιες παρατηρήσεις όσον αφορά το μέγεθος των διατμητικών παραμορφώσεων πριν από την εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς έχουν κάνει και άλλοι ερευνητές (π.χ. Vaid and Chern, 1985, Alarcon-Guzman et al., 1988, Ishihara, 1993, Georgiannou, 2006). Μετά το στάδιο της ασταθούς (ψαθυρής) συμπεριφοράς, τα τρία δοκίμια εμφανίζουν ένα στάδιο ψευδο-σταθερής κατάστασης (QSS, Ishihara, 1993), έως ότου εμφανίσουν αλλαγή φάσης, δηλαδή η συμπεριφορά τους αλλάζει και από τάση για συστολή εμφανίζουν τάση για διαστολή (Σχήματα 2(α) και 2(β)). Τα σημεία αλλαγής φάσης αντιστοιχούν σε τιμές διατμητικής παραμόρφωσης από 3% έως 4% και έχουν σημειωθεί με διακεκομμένα βέλη στα Σχήματα 2(β) και 2(γ). Τελικά, η συνεχής τάση για διαστολή των δοκιμίων οδηγεί τις υπερπίεσεις πόρων σε αρνητικές τιμές μέχρι και το τέλος των πειραμάτων, ενώ η διατμητική τάση  $\tau_{\theta z}$  αυξάνεται συνεχώς (Σχήματα 2(γ) και 2(β)).



**Σχήμα 2.** Δοκιμές μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στην άμμο Fontainebleau: (α) διαδρομές ενεργών τάσεων; (β) καμπύλες τάσεων –παραμορφώσεων; (γ) καμπύλες υπερπίεσεων πόρων –παραμορφώσεων.

### Ανακυκλική Στρεπτική Διάτμηση

Τυπική απόκριση της άμμου Fontainebleau σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης εμφανίζεται στο Σχήμα 3. Το δοκίμιο στερεοποιήθηκε ισότροπα σε μέση ενεργή τάση  $p_i' = 130 \text{ kPa}$  και δείκτη πόρων  $e_i = 0.732$  όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 (δοκίμιο F13). Στη συνέχεια φορτίστηκε ανακυκλικά με διατμητική τάση  $\Delta \tau_{bz}$  η οποία αντιστοιχεί σε λόγο  $CSR = 0.66$ , όπου  $CSR$  είναι ο λόγος του μεγέθους της εφαρμοζόμενης ανακυκλικής τάσης προς την μέγιστη διατμητική αντοχή δοκιμίου που φορτίζεται μονοτονικά υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στην ίδια αρχική μέση ενεργή τάση. Στο Σχήμα 3(α) απεικονίζεται η διαδρομή ενεργών τάσεων του δοκιμίου που υποβλήθηκε σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με  $CSR = 0.66$  μαζί με την διαδρομή ενεργών τάσεων δοκιμίου που διαθέτει παρόμοιο δείκτη πόρων και την ίδια αρχική μέση ενεργή τάση με το προηγούμενο, αλλά υποβάλλεται σε μονοτονική στρεπτική διάτμηση (δοκίμιο F2). Επιλεγμένα σημεία



**Σχήμα 3.** Ανακυκλική (CSR=0.66) και μονοτονική στρεπτική διάτμηση ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου Fontainebleau υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (α) Διαδρομές ενεργών τάσεων; (β) διατμητική παραμόρφωση ως προς το χρόνο; (γ) υπερπίεση πόρων ως προς το χρόνο.

σημειώνονται κατά μήκος της διαδρομής τάσεων που ακολούθησε το δοκίμιο F13 (Σχήμα 3(α)), παράλληλα με τα αντίστοιχά τους στις καμπύλες υπερπίεσης πόρων – χρόνου (Σχήμα 3(γ)) και διατμητικής παραμόρφωσης - χρόνου (Σχήμα 3(β)). Κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης (τμήμα 1-2, Σχήμα 3(α)) παρατηρείται μία απόκλιση της διαδρομής τάσεων κατά την ανακυκλική από εκείνη κατά την μονοτονική φόρτιση πιθανώς λόγω του διαφορετικού ρυθμού φόρτισης των δύο δοκιμίων. Ο ρυθμός συσσώρευσης υπερπίεσεων πόρων που σχετίζεται με τον πρώτο κύκλο φόρτισης είναι υψηλός (τμήμα 1-2-3, Σχήμα 3(γ)) και ακολουθείται από μία φάση κατά την οποία η υπερπίεση πόρων αυξάνεται με χαμηλότερο και περίπου σταθερό ρυθμό καθώς η διαδρομή ενεργών τάσεων κατευθύνεται προς την

αρχή των αξόνων. Ασταθής συμπεριφορά εμφανίζεται για πρώτη φορά τη στιγμή που η διαδρομή ενεργών τάσεων προσεγγίζει τη γραμμή αστάθειας των μονοτονικών δοκιμών (σημείο 4 στο Σχήμα 3(α)). Στο σημείο 4 η διατμητική παραμόρφωση είναι μικρή της τάξεως του 0.5%, αλλά πολύ γρήγορα φτάνει την τιμή 2.2% (σημείο 5 Σχήματα 3(α) και 3(β)). Η αλλαγή στην κατεύθυνση της φόρτισης, με την αποφόρτιση από το σημείο 5 (διαδρομή τάσεων από το σημείο 5 στο σημείο 6), οδηγεί σε συσσώρευση υπερπίεσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων (Σχήματα 3(γ) και 3(β) αντίστοιχα) και η ανακυκλική διαδρομή τάσεων μετακινείται προς την αρχή των αξόνων. Το σημείο 6 είναι σημείο αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια ανακυκλικής φόρτισης όπως ορίστηκε από τους Ishihara et al. (1975) και αντιστοιχεί σε περίπου μηδενική παραμόρφωση. Ρευστοποίηση του δοκιμίου (σημείο 8) παρατηρείται κατά την αποφόρτιση από το σημείο 7, όπου ο λόγος των τάσεων είναι μεγαλύτερος από το λόγο των τάσεων στη γραμμή αλλαγής φάσης, όπως είχε παρατηρηθεί και από τους Ishihara et al. (1975) σε ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές. Την «αρχική ρευστοποίηση» ακολουθεί ανακυκλική κινητικότητα (Seed and Lee, 1966) και το δοκίμιο με την περαιτέρω φόρτιση ανακτά αντοχή ακολουθώντας την περιβάλλουσα αστοχίας υποβαλλόμενο σε μεγάλες παραμορφώσεις (≈9%).

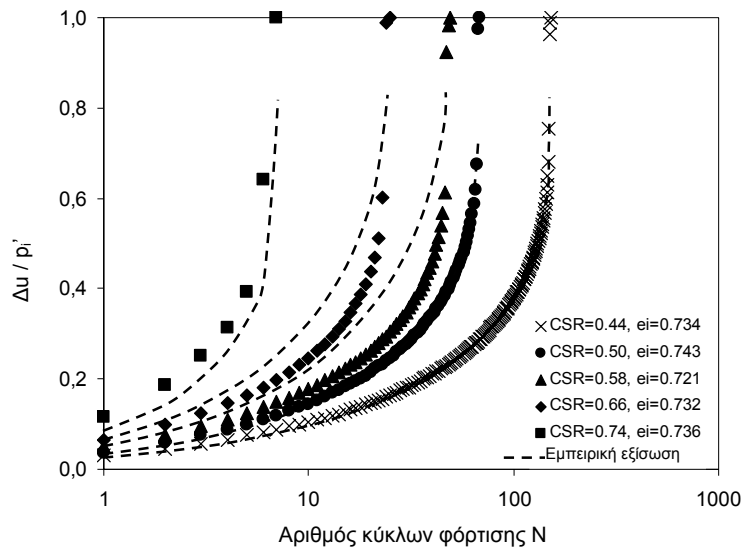
Πίνακας 2. Τιμές σταθερών

<b>Άμμος Fontainebleau</b>	<b>c<sub>1</sub></b>	<b>c<sub>2</sub></b>	<b>c<sub>3</sub></b>	<b>c<sub>4</sub></b>	<b>c<sub>5</sub></b>
Χαλαρή	-0.5	3.80	1.66	-0.21	2.40
Πυκνή	-0.8	1.65	1.66	-0.55	2.40

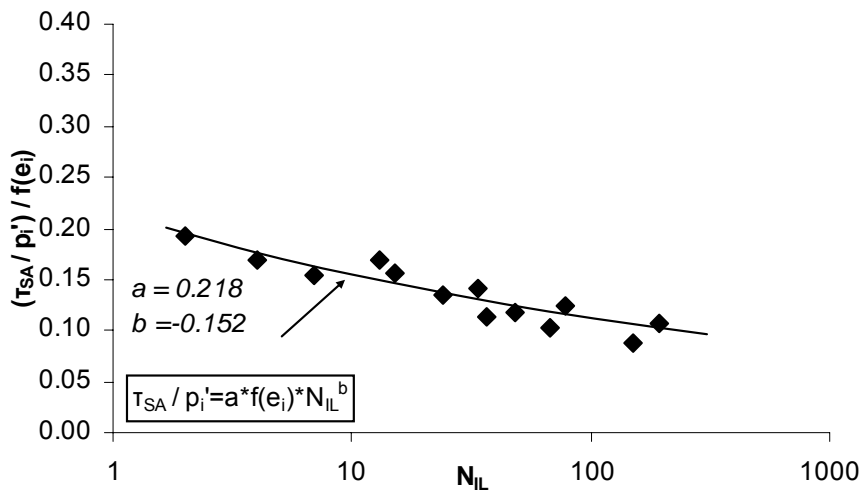
Η ασταθής συμπεριφορά εκδηλώνεται με την απότομη συσσώρευση υπερπίεσεων του νερού των πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων. Η επίδραση του αριθμού των κύκλων φόρτισης στο ρυθμό ανάπτυξης υδατικών υπερπίεσεων διακρίνεται στο Σχήμα 4 για πέντε χαλαρά δοκίμια άμμου Fontainebleau με λόγους CSR=0.44-0.74 (δοκίμια F12–F16, Πίνακας 1). Τα σημεία από τα οποία αποτελείται κάθε καμπύλη του Σχήματος 4 αντιπροσωπεύουν την υπερπίεση του νερού των πόρων που έχει το δοκίμιο στο τέλος του αντίστοιχου κύκλου φόρτισης. Παρόμοια απόκριση παρατηρήθηκε και σε άλλες λεπτόκοκκες άμμους (Georgiannou and Tsomokos, 2008). Η Εξίσωση 3 που ακολουθεί, η οποία είναι ελαφρώς διαφοροποιημένη από την εξίσωση που προτάθηκε από τους Ishibashi et al. (1977), φαίνεται να προσομοιώνει ικανοποιητικά τις πειραματικές καμπύλες μέχρι την εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς (διακεκομμένες καμπύλες του Σχήματος 4).

$$\frac{\Delta u_{(N)}}{p'_i} = \left(1 - \frac{u_{(N-1)}}{p'_i}\right) c_1 \cdot \left(\frac{c_2 \cdot N}{N^3 + c_4}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{SA(N)}}{p'_{(N-1)}}\right) c_5 \quad (3)$$

Στην Εξίσωση 3, N είναι ο τρέχων αριθμός των κύκλων φόρτισης,  $u_{(N)}$  και  $p'_{(N)}$  η υπερπίεση πόρων και η μέση ενεργός τάση στο τέλος του κύκλου φόρτισης N,  $\Delta u_{(N)} = u_{(N)} - u_{(N-1)}$ ,  $\tau_{SA(N)}$  το εύρος της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης στο Νιοστό κύκλο φόρτισης,  $p'_i$  είναι η αρχική μέση ενεργός τάση,  $p'_{(N-1)}$  είναι η τιμή της μέσης ενεργού τάσης μετά από (N-1) κύκλους φόρτισης και  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  είναι σταθερές των οποίων το μέγεθος εξαρτάται από την άμμο, την πυκνότητά της και το εάν η δοκιμή πραγματοποιείται με σταθερή την  $\tau_{SA}$  ή όχι.



**Σχήμα 4.** Υπερπίεση του νερού των πόρων ως προς τον αριθμό των κύκλων φόρτισης για χαλαρά δοκίμια άμμου Fontainebleau.



**Σχήμα 5.** Καμπύλη ρευστοποίησης για την άμμο Fontainebleau.

Για τα δοκίμια της παρούσας μελέτης οι τιμές των παραμέτρων  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ,  $c_5$  δίνονται στον Πίνακα 2.

Στο Σχήμα 5 έχει σχεδιαστεί ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να οδηγηθούν τα δοκίμια της άμμου Fontainebleau σε «αρχική ρευστοποίηση» ως προς το λόγο των ανακυκλικών τάσεων  $(\tau_{SA}/p_i')$ . Δοκίμια δύο διαφορετικών πυκνοτήτων ( $D_r=56\pm 5\%$  και  $42\pm 5\%$ ) στερεοποιήθηκαν ισότροπα στην ίδια μέση ενεργό τάση ( $p_i'=130\text{kPa}$ ) και ακολούθως υποβλήθηκαν σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με λόγους  $CSR=0.44-0.97$ . Στο Σχήμα 5 τα αποτελέσματα των δοκιμών έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την συνάρτηση  $f(e_i)=(2.17-e_i)^2/(1+e_i)$ , όπου  $e_i$  είναι ο δείκτης πόρων των δοκιμίων πριν από τη διάτμηση, που έχει



προταθεί από τους Hardin and Richart (1963). Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνεται να περιγράφονται ικανοποιητικά από μία εξίσωση της μορφής:

$$\frac{\tau_{SA}}{p'_i} = a \cdot f(e_i) \cdot N_{IL}^b \quad (4)$$

όπου  $\tau_{SA}$  είναι το εύρος της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης,  $p'_i$  είναι η αρχική μέση ενεργός τάση,  $N_{IL}$  είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση,  $f(e_i)$  είναι η συνάρτηση του δείκτη πόρων και  $a$ ,  $b$  είναι σταθερές.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

- Κατά την μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης η άμμος Fontainebleau εμφανίζει πτώση της διατμητικής της αντοχής μετά την απόκτηση μίας μέγιστης τιμής η οποία βρίσκεται στη γραμμή αστάθειας (IL).
- Κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης αστάθεια εμφανίζεται όταν η ανακυκλική διαδρομή τάσεων προσεγγίζει τη γραμμή αστάθειας που ορίζεται από τις μονοτονικές δοκιμές και για τιμές διατμητικής παραμόρφωσης της τάξεως του 0.5%.
- Ο ρυθμός ανάπτυξης υδατικών υπερπλίσεων πόρων κατά την ανακυκλική φόρτιση μέχρι την εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς μπορεί να προβλεφθεί από εμπειρική σχέση.
- Οι καμπύλες ρευστοποίησης των χαλαρών και πυκνών δοκιμών της άμμου Fontainebleau μπορούν να κανονικοποιηθούν ως προς το δείκτη πόρων.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα πειράματα της παρούσας ερευνητικής εργασίας έγιναν με χρηματοδότηση του προγράμματος Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου «Λεύκιππος».

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Alarcon-Guzman A., Leonards G.A., and Chameau J.L., (1988), "Undrained monotonic and cyclic strength of sands", *J. Geotech. Engrg*, ASCE, 114(10), pp. 1089-1109.
- Bardet J.P., (1990), "Hypoplastic model for sands", *J. Engrg Mechanics*, ASCE, 116(9), pp. 1973-1994.
- Bishop A.W., and Henkel D.J., (1957), "The measurement of soil properties in the triaxial test", London: Edward Arnold.
- Bolton M.D., Gui M.W., Garnier J., Corte J.F., Bagge G., Laue J., and Renzi R., (1999), "Centrifuge cone penetration tests in sand", *Geotechnique*, 49(4), pp. 543-552.
- Clouterre Project, (1991), French National Research Project on Soil Nailed Walls, *English translation by the Federal Highway Administration*, FHWA-SA-93-026.

- Garnier J., (2001), "Physical models in Geotechnics: state of the art and recent advances", First Coulomb Lecture, *Proceedings of the Caquot Conference*, Paris, pp. 1-59.
- Gaudin C., Riou Y., Popa J., and Garnier J., (2002), "Numerical modelling of centrifuge tests on embedded wall", *Proceedings of the 5th European Conf. on Numerical Methods in Geotech. Engng*, Paris.
- Gaudin C., Serratrice J.F., Thorel L., and Garnier J., (2003), "Modelling in triaxial cells of the behaviour of a soil of a retaining structure", *Proceedings of the 3rd Int. Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Lyon.
- Georgiannou V.N. (2006), "The undrained response of sands with additions of particles of various shapes and sizes", *Geotechnique*, 56(9), pp. 639-649.
- Georgiannou V.N., and Tsomokos A. (2008), "Comparison of two fine sands under torsional loading", Submitted to the *Canadian Geotechnical Journal*.
- Hardin B.O., and Richart F.E., (1963), "Elastic wave velocities in granular sands: measurements and parameter effects", *J. SMFD*, ASCE, 89(1), pp. 33-65.
- Hight D.W., Gens A., Symes M.J., (1983), "The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils", *Geotechnique*, 33(4), pp. 355-383.
- Ishibashi I., Sherif M.A., and Tsuchiya C., (1977), "Pore-pressure rise mechanism and soil liquefaction", *Soils and Foundations*, 17(2), pp. 17-27.
- Ishihara K., (1993), "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique*, 43(3), pp. 351-415.
- Ishihara K., Tatsuoka F., and Yasuda S., (1975), "Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses", *Soils and Foundations*, 15(1), pp. 29-44.
- Lade P.V., (1993), "Initiation of static instability in the submarine Nerlerk berm", *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), pp. 895-904.
- Seed H.B., and Lee K.L., (1966), "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading", *J. Soil Mech. Fdn Div.*, ASCE, 92(6), pp. 105-134.
- Skempton A.W., (1954), "The pore pressure coefficients A and B", *Geotechnique*, 4, pp. 143-147.
- Touati M.A., (1982), "Comportement mécanique des sols pulvérulents sous fortes contraintes", *PhD thesis*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Vaid Y.P., and Chern J.C., (1985), "Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands", *Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, ASCE Annual Convention, Detroit, Michigan, pp. 120-147.
- Yoshimine M., Robertson P.K., and Wride C.E., (1999), "Undrained shear strength of clean sands to trigger flow liquefaction", *Canadian Geotechnical Journal*, 36(5), pp. 891-906.