

Απόκριση Άμμου Σε Μονοτονική Και Ανακυκλική Φόρτιση Σε Στρέψη

The Response of a Sand Under Monotonic and Cyclic Torsional Loading

ΣΤΑΥΡΟΥ, Κ. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π.
ΤΣΟΜΩΚΟΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π.
ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Β.Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Επικ. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία ερευνάται η απόκριση μίας άμμου μέσης διαβάθμισης σε μονοτονική και ανακυκλική στρεπτική διάτμηση. Κατά την μονοτονική φόρτιση η άμμος δείχνει αστάθεια για ένα σημαντικό εύρος δείκτη πόρων. 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 γραμμή αστάθειας έχει χρησιμοποιηθεί και από άλλους ερευνητές για την ανάλυση συμπεριφοράς άμμων υπό τριαξονικές συνθήκες φόρτισης, στην παρούσα εργασία, όμως εφαρμόζεται σε δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλων δοκιμίων.

ABSTRACT: In this study the response of a fine-medium sand under monotonic and cyclic torsional loading is investigated. During monotonic loading the sand behaves in a brittle manner for a wide range of void ratios. Under cyclic loading the specimens of the sand become unstable when the undrained cyclic stress path approaches the instability line defined under monotonic loading. The instability line has been used in the past by various researchers in order to analyze sand behaviour under triaxial loading conditions. However, in this study it is used to examine the response of a sand to hollow cylinder torsional shear tests.

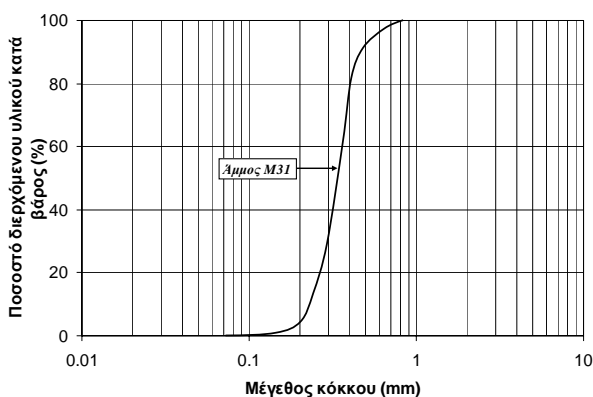
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι τα χαρακτηριστικά παραμορφωσιμότητας και αντοχής των εδαφικών υλικών μεταβάλλονται με τη διεύθυνση της φόρτισης. Για να επιβληθούν γενικευμένες εντατικές καταστάσεις σε ένα εδαφικό υλικό και να προβλεφθεί με ακρίβεια η απόκρισή του σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση απαιτείται η χρήση συσκευών, όπως είναι η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (Hight et al., 1983, Yoshimine et al., 1999). Στην παρούσα εργασία ερευνάται η απόκριση μίας άμμου μέσης διαβάθμισης με $D_{50}=0.33\text{mm}$ σε μονοτονικές και ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Έμφαση δίνεται στη συσχέτιση της απόκρισης της άμμου μεταξύ μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης και κυρίως στις συνθήκες που

οδηγούν στην εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς της άμμου κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση.

Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν (π.χ. Symes et al., 1984, Sladen et al., 1985, Vaid and Chern, 1985, Alarcon-Guzman et al., 1988, Georgiannou et al., 1991, Sasitharan et al., 1993, Hyodo et al., 1994, De Gennaro et al., 2004) με στόχο τη συσχέτιση της συμπεριφοράς της άμμου σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση. Τα αποτελέσματα των μελετών είναι ποικίλα. Οι Alarcon-Guzman et al. (1988) πραγματοποιώντας πειράματα στρεπτικής διάτμησης σε συμπαγή δοκίμια άμμου Ottawa κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση του υλικού αστοχία επέρχεται όταν η ενεργός τασική διαδρομή πλησιάζει τον φθίνοντα κλάδο της αντίστοιχης μονοτονικής διαδρομής τάσεων.

Ας σημειωθεί ότι το ίδιο υλικό κατά τη μονοτονική φόρτιση επιδεικνύει ψαθυρή συμπεριφορά. Παρόμοια απόκριση κατά την ανακυκλική τριαξονική φόρτιση επέδειξαν ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου Ham river με ποσοστό καολίνη 7-8% (Georgiannou et al., 1991). Οι De Gennaro et al. (2004) ανέφεραν ότι η αστοχία της άμμου Hostun υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, τόσο κατά τη μονοτονική όσο και κατά την ανακυκλική τριαξονική φόρτιση, ελέγχεται από τις ίδιες χαρακτηριστικές γραμμές: τη γραμμή αλλαγής φάσης (PT-line, Ishihara et al., 1975), τη γραμμή αστάθειας (I-line, Lade, 1993) και τη γραμμή αστοχίας (F-line). Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ οι περισσότερες από τις μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας βασίζονται στα αποτελέσματα της τριαξονικής συσκευής για την ανάλυση της συμπεριφοράς των άμμων, στην παρούσα εργασία εκτελέστηκαν αποκλειστικά δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου.



Σχήμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31.

Figure 1. Grain size distribution curve for M31 sand.

2. 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 α

που αντιπροσωπεύει την κλίση της μέγιστης κύρια τάσης, σ_1 , ως προς την κατακόρυφο να συνδέεται με την παράμετρο b που αντιπροσωπεύει το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , σύμφωνα με τη σχέση $b = \sin^2 \alpha$. Η συχνότητα της ανακυκλικής φόρτισης ήταν ίση με 0.1Hz. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων θα παρουσιαστούν χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων σύμφωνα με τις εξισώσεις που προτείνουν οι Hight et al. (1983).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Δοκιμίων.

Table 1. Specimen Characteristics.

Πείραμα	Είδος Δοκιμής	CSR	e_i	p_i' (kPa)
M31-1	Μονοτονική	-	0.720	50
M31-2	Μονοτονική	-	0.670	50
M31-3	Μονοτονική	-	0.630	100
M31-4	Ανακυκλική	0.73	0.650	100

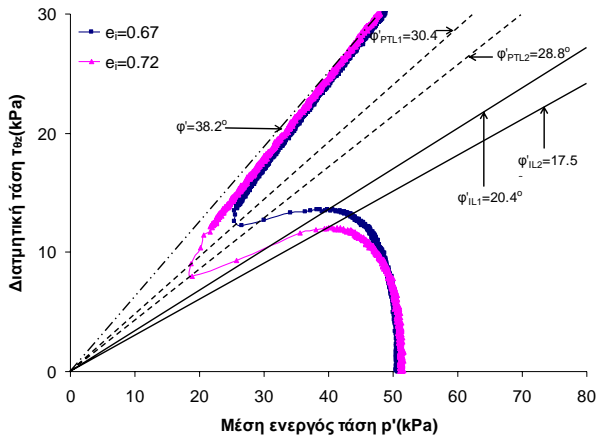
Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι μία άμμος μέσης διαβάθμισης, η άμμος M31, με ειδικό βάρος στερεών $G_s=2.65$. Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων (ή λόγος κενών) της άμμου είναι ίσος με $e_{min}=0.537$ και $e_{max}=0.862$, αντίστοιχα, ενώ η κοκκομετρική της διαβάθμιση διακρίνεται στο Σχήμα 1. Όλα τα δοκίμια της άμμου M31 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 και ακολούθησε περίοδος ηρεμίας διάρκειας 12 ωρών πριν από τη φόρτιση.

3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ M31 ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

3.1 Μονοτονική Στρεπτική Διάτμηση

Στο Σχήμα 2 έχει σχεδιασθεί η διαδρομή ενεργών τάσεων ενός εδαφικού δοκιμίου άμμου M31 ισότροπα στερεοποιημένου σε μέση ενεργό τάση $p_i' (= \frac{\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'}{3}) = 50 \text{ kPa}$ και με δείκτη πόρων πριν από τη διάτμηση $e_i=0.72$ (δοκίμιο M31-1, Πίνακας 1). Η διαδρομή ενεργών τάσεων του δοκιμίου συγκρίνεται με τη διαδρομή ενεργών τάσεων

που ακολούθησε πυκνότερο δοκίμιο άμμου M31 (δοκίμιο M31-2, Πίνακας 1) ισότροπα στερεοποιημένο σε μέση ενεργό τάση $p'_i=50\text{kPa}$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 τα δύο δοκίμια εμφανίζουν καταρχήν συστολική συμπεριφορά και η διατμητική τους αντοχή μετά την απόκτηση μίας μέγιστης τιμής μειώνεται συνεχώς. Το σημεία που αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές διατμητικής αντοχής κατά τη διάρκεια της συστολικής συμπεριφοράς ονομάζονται σημεία αστάθειας.



Σχήμα 2. Μονοτονική στρεπτική διάτμηση άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: Διαδρομές ενεργών τάσεων δοκιμίων με διαφορετικό δείκτη πόρων.

Figure 2. Undrained monotonic torsional shear of M31 sand: Effective stress paths of specimens with different void ratio.

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). Η γραμμή αστάθειας δεν είναι μοναδική, αλλά εξαρτάται από τον δείκτη πόρων της άμμου και το μέγεθος της εφαρμοζόμενης ενεργού τάσης. Επιπλέον, όπως έχουν παρατηρήσει και άλλοι ερευνητές (π.χ. Chu et al., 2003) και φαίνεται στο Σχήμα 2 όσο μικρότερος είναι ο δείκτης πόρων τόσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της γραμμής αστάθειας ($\phi'_{IL1}=20.4^\circ$ για το δοκίμιο M31-2 και $\phi'_{IL2}=17.5^\circ$ για το δοκίμιο M31-1). Η συμπεριφορά των δύο δοκιμίων αλλάζει όταν πλησιάζουν τη γραμμή αλλαγής φάσης (Phase Transformation Line - PTL, Ishihara et al.,

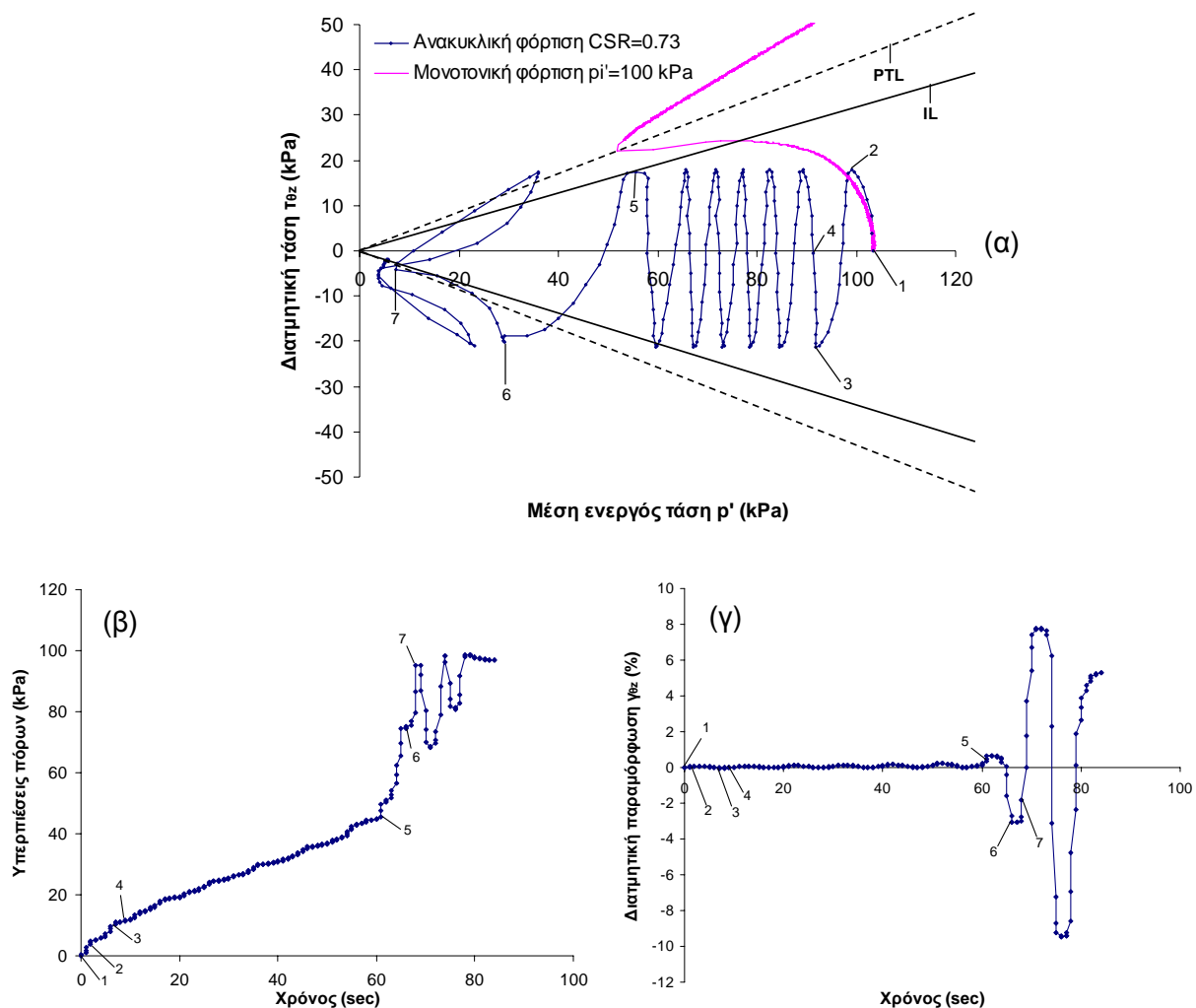
1975), οπότε από τάση για συστολή παρουσιάζουν συνεχή τάση για διαστολή. Οι γωνίες αλλαγής φάσης είναι ίσες με $\phi'_{PTL1}=30.4^\circ$ και $\phi'_{PTL2}=28.8^\circ$ για τα δοκίμια M31-2 και M31-1 αντίστοιχα. Τελικά και τα δύο δοκίμια οδηγούνται στην αστοχία ακολουθώντας την ίδια γραμμή αστοχίας με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=38.2^\circ$.

3.2 Ανακυκλική Στρεπτική Διάτμηση

Η απόκριση της άμμου M31 σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση εξετάζεται για ένα δοκίμιο με δείκτη πόρων $e_i=0.65$ όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 (δοκίμιο M31-4). Το δοκίμιο στερεοποιήθηκε ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=100\text{kPa}$ και στη συνέχεια φορτίστηκε ανακυκλικά με διατμητική τάση $\Delta\tau_{\theta z}$ η οποία αντιστοιχεί σε λόγο $CSR=0.73$, όπου CSR είναι ο λόγος του μεγέθους της εφαρμοζόμενης ανακυκλικής τάσης προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή δοκιμίου που φορτίζεται μονοτονικά στην ίδια αρχική μέση ενεργό τάση. Στο Σχήμα 3(α) απεικονίζεται η διαδρομή ενεργών τάσεων του δοκιμίου που υποβλήθηκε σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.73$ μαζί με την διαδρομή ενεργών τάσεων δοκιμίου που διαθέτει παρόμοιο δείκτη πόρων και την ίδια αρχική μέση ενεργό τάση με το προηγούμενο, αλλά υποβάλλεται σε μονοτονική στρεπτική διάτμηση (δοκίμιο M31-3). Επιλεγμένα σημεία απεικονίζονται στην διαδρομή τάσεων που ακολούθησε το δοκίμιο M31-4 (Σχήμα 3α), καθώς και στις αντίστοιχες καμπύλες υπερπίεσης πόρων - χρόνου (Σχήμα 3β) και διατμητικής παραμόρφωσης - χρόνου (Σχήμα 3γ). Στον πρώτο κύκλο φόρτισης παρατηρείται μία μικρή απόκλιση των δύο διαδρομών τάσεων (τμήμα 1-2) πιθανώς λόγω του διαφορετικού ρυθμού φόρτισης των δύο δοκιμίων. Ο ρυθμός συσσώρευσης υπερπίεσεων πόρων που σχετίζεται με τον πρώτο κύκλο φόρτισης (τμήμα 1-2-3-4 στο Σχήμα 3) είναι υψηλός και ακολουθείται από μία φάση στην οποία η υπερπίεση πόρων αυξάνεται με χαμηλότερο και σταθερό ρυθμό καθώς η διαδρομή ενεργών τάσεων προσεγγίζει 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 5 στο Σχήμα 3). Στο σημείο 5 η διατμητική παραμόρφωση είναι μικρή της τάξεως του 0.5% όπως φαίνεται στο Σχήμα 3γ. 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 3β και 3γ αντίστοιχα) και η ανακυκλική διαδρομή τάσεων μετακινείται προς την αρχή των αξόνων. Παρόλο που το

σημείο 5 συνδέεται με την εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς, το δοκίμιο ρευστοποιείται μετά την αλλαγή στη φορά της φόρτισης, στο σημείο 6, όπου ο λόγος των τάσεων είναι μεγαλύτερος από τον λόγο των τάσεων στη γραμμή αστάθειας, αλλά και στη γραμμή αλλαγής φάσης.



Σχήμα 3. Ανακυκλική (CSR=0.73) και μονοτονική στρεπτική διάτμηση ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (α) Διαδρομές ενεργών τάσεων; (β) υπερπίεση πόρων ως προς το χρόνο; (γ) διατμητική παραμόρφωση ως προς το χρόνο.

Figure 3. Undrained cyclic (CSR=0.73) and monotonic torsional shear tests on isotropically consolidated M31 sand: (a) effective stress paths; (b) excess pore water pressure against time; (c) shear strain against time.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόκριση μίας άμμου μέσης διαβάθμισης όταν υποβάλλεται σε μονοτονική και ανακυκλική στρεπτική διάτμηση κοίλου δοκιμίου υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε ότι:

- ♦ Όταν η άμμος υποβάλλεται σε μονοτονική φόρτιση εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά και προσωρινή αστάθεια, χωρίς, όμως, να οδηγείται σε πλήρη ρευστοποίηση.
- ♦ Όσο μικρότερος είναι ο δείκτης πόρων τόσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της γραμμής αστάθειας.

- ♦ Η γραμμή αστάθειας που ορίστηκε στη μονοτονική φόρτιση φαίνεται να χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά της άμμου υπό ανακυκλική φόρτιση εφόσον αποτελεί το όριο στο διάγραμμα τάσεων το οποίο σηματοδοτεί την ανάπτυξη ασταθούς συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A., and Chameau, J. L. (1988), "Undrained Monotonic and Cyclic Strength of Sands", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 10, pp. 1089-1109.
- Bishop, A. W., and Henkel, D. J. (1957), "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test", Edward Arnold, Ltd., London, p. 190.
- Chu, J., Leroueil, S., and Leong, W. K. (2003), "Unstable Behaviour of Sand and its Implication for Slope Instability", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, pp. 873-885.
- De Gennaro, V., Canou, J., Dupla, J.C., and Benahmed, N. (2004), "Influence of Loading Path on the Undrained Behaviour of a Medium Loose Sand", *Canadian Geotechnical Journal* 41, 166-180.
- Georgiannou, V. N., Hight, D. W., Burland, J. B. (1991), "Behaviour of Clayey Sands Under Undrained Cyclic Triaxial Loading", *Geotechnique*, Vol. 40, No. 3, pp. 383-393.
- Hight, D. W., Gens, A. and Symes, M. J. (1983), "The Development of a New Hollow Cylinder Apparatus for Investigating the Effects of Principal Stress Rotation in Soils", *Geotechnique*, Vol. 33, No. 4, pp. 355-383.
- Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N. and Murata, H. (1994), "Undrained Cyclic and Monotonic Triaxial Behavior of Saturated Loose Sand", *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 1, pp. 19-32.
- Ishihara, K., Tatsuoka, F. and Yasuda, S. (1975), "Undrained Deformation and Liquefaction of Sand Under Cyclic Stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 1, pp. 29-44.
- Lade P. V. (1993), "Initiation of Static Instability in the Submarine Nerlerk Berm", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, pp. 895-904.
- Sasitharan, S., Robertson, P. K., Sego, D. C., and Morgenstern, N. R. (1993), "Collapse Behavior of Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, pp. 569-577.
- Skempton, A. W. (1954), "The Pore Pressure Coefficients A and B", *Geotechnique*, Vol.4, pp. 143-147.
- Sladen J. A., D'Hollander, R. D., and Krahn J. (1985), "The Liquefaction of Sands, a Collapse Surface Approach", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 564-578.
- Symes, M. J. P. R., Gens, A., and Hight, D. W. (1984), "Undrained Anisotropy and Principal Stress Rotation in Saturated Sand", *Geotechnique*, Vol. 34, No. 1, pp. 11-27.
- 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., Ozay, R., Sezen, A. and Ansal, A. (1999), "Undrained Plane Strain Shear Tests on Saturated Sand Using a Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus", *Soils and Foundations*, Vol. 39, No. 2, pp. 131-136.