

Η Επίδραση του Σχήματος των Κόκκων στην Απόκριση Άμμου σε Μονοτονική Φόρτιση σε Στρέψη

The Effect of Grain Shape on the Response of Sand under Monotonic Torsional Loading

ΤΣΟΜΩΚΟΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π.
ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Β.Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης που έχει το σχήμα των κόκκων δύο λεπτόκοκκων και ομοιόμορφων άμμων στην απόκρισή τους κατά την μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η άμμος που αποτελείται από στρογγυλεμένους κόκκους παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά με απότομη μείωση της διατμητικής της αντοχής αφού αποκτήσει μία μέγιστη τιμή. Αντίθετα, για παρόμοιους δείκτες πόρων και επίπεδα αρχικών μέσων ενεργών τάσεων, η άμμος που αποτελείται από γωνιώδεις κόκκους δεν εμφανίζει αστάθεια στη συμπεριφορά της και η διατμητική της αντοχή αυξάνεται συνεχώς με την παραμόρφωση.

ABSTRACT: The objective of this paper is to look at the effect of grain shape on the undrained behaviour of two fine and uniform sands under monotonic torsional loading. The results of the torsional hollow cylinder tests showed that the rounded sand undergoes systematic weakening with shear stress reduction after a transient peak deviator stress. However, for similar void ratios and initial mean effective stresses, the angular sand shows stable response with continuous increase in strength after a transient peak.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού παραγόντων που επηρεάζουν την απόκριση της άμμου, το σχήμα των κόκκων της αναδύεται ως μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους της οποίας ο ρόλος πρέπει να διασαφηνιστεί πλήρως (π.χ. Cho et al., 2006, Georgiannou, 2006, Guo and Su, 2007, Georgiannou and Tsomokos, 2008). Η κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου θεωρείται παραδοσιακά η σπουδαιότερη από τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της. Παρόλα αυτά, για υλικά με παρόμοια κοκκομετρική διαβάθμιση το σχήμα των κόκκων της άμμου είναι εκείνο που φαίνεται να αλλάζει δραματικά την απόκρισή της. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι η συστηματική αποτίμηση, μέσω κατάλληλων πειραματικών δοκιμών, της επίδρασης του σχήματος των κόκκων μπορεί να οδηγήσει

στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της άμμου.

Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί κατά το παρελθόν με την επίδραση που έχει το σχήμα των κόκκων στην αντοχή των κοκκωδών υλικών. Οι Shahu and Yudhbir (1998) σε σειρά πειραμάτων απευθείας διάτμησης σε τρεις άμμους με γωνιώδεις κόκκους και μία άμμο με στρογγυλεμένους κόκκους διαπίστωσαν ότι για δεδομένη σχετική πυκνότητα η γωνία διατμητικής αντοχής είναι σημαντικά υψηλότερη στις γωνιώδεις άμμους. Οι Guo and Su (2007) πραγματοποίησαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δύο άμμους υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης με διαφορετικές ενεργές τάσεις στερεοποίησης και αρχικούς δείκτες πόρων και έδειξαν ότι αυξάνοντας το γωνιώδες των κόκκων της άμμου επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά διασταλτικότητάς της και αυξάνεται η μέγιστη γωνία τριβής της. Σε παρόμοια

συμπεράσματα, όσον αφορά την αύξηση της διατμητικής αντοχής της άμμου με την αύξηση του γωνιώδους των κόκκων, κατέληξαν και οι Koerner (1970), Alshibli and Sture (2000), Shinohara et al. (2000), Sukumaran and Ashmaway (2001), Mair et al. (2002), Liu and Matsuoka (2003), Rouse et al. (2008).

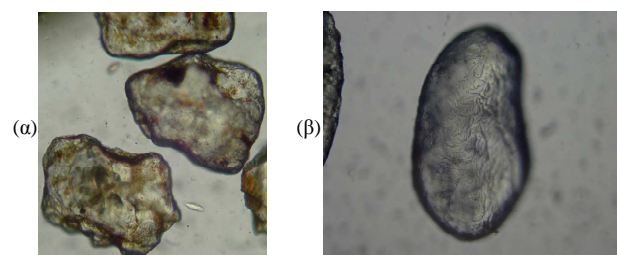
Στις περισσότερες από τις προαναφερθείσες μελέτες δεν έγινε κάποια προσπάθεια να απομονωθεί η επιρροή του σχήματος των κόκκων από την επιρροή άλλων παραγόντων όπως το μέγεθος του κόκκου και η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού. Επιπροσθέτως, πολλές φορές έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία (π.χ. Vaid and Chern, 1985, Lade and Yamamoto, 1997) ότι ακόμα και μικρές διαφορές στην κοκκομετρική διαβάθμιση επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση της άμμου π.χ. η παρουσία λεπτόκοκκων σε άμμους που έχουν παρόμοια διαβάθμιση και ίδιο δείκτη πόρων ή σχετική πυκνότητα δείχνει να αλλάζει σημαντικά την απόκριση τους κατά τη φόρτιση.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση που έχει το σχήμα των κόκκων της άμμου στην απόκρισή της κατά την μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η απόκριση δύο λεπτόκοκκων και ομοιόμορφων άμμων οι οποίες διαθέτουν παρόμοια κοκκομετρική διαβάθμιση, αλλά διαφέρουν ως προς το σχήμα των κόκκων με τη μία άμμο να διαθέτει στρογγυλεμένους κόκκους και την άλλη γωνιώδεις. Χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο παρασκευής, πυκνότητα, τάση στερεοποίησης και πειραματική διαδικασία για κάθε δοκίμιο, εξετάζεται ξεχωριστά η επίδραση του σχήματος των κόκκων στην μονοτονική συμπεριφορά της άμμου. Τέλος, στην εργασία αυτή παρουσιάζονται με τη μορφή αναλυτικών διαγραμμάτων τα χαρακτηριστικά ακαμψίας των δύο εξεταζόμενων άμμων.

2. ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – 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 $b = \sin^2 \alpha$. 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).

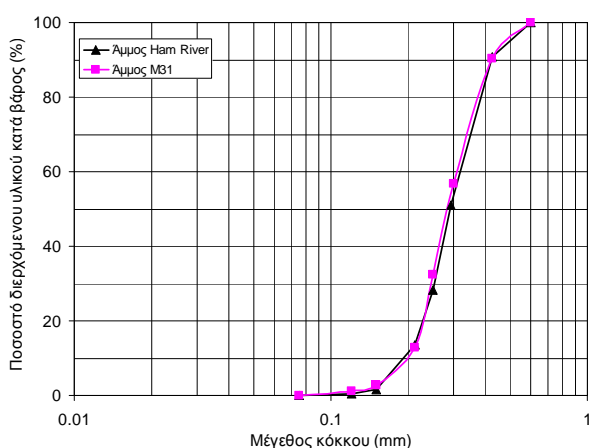


Σχήμα 1.Εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (συντελεστής μεγέθυνσης x100); (α) Άμμος Ham River; (β) Άμμος M31.

Figure 1. Visual inspection under the electron scanning microscope (magnification factor x100); (a) Ham River sand; (b) M31 sand.

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν δύο λεπτόκοκκες και ομοιόμορφες άμμοι, η άμμος Ham River (HRS) και η άμμος M31 (M31). Με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διαπιστώθηκε ότι η άμμος HRS αποτελείται από κόκκους υπογωνιώδεις έως γωνιώδεις (Σχήμα 1α) με ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s = 2.66$. Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων της άμμου είναι ίσος με $e_{min} = 0.526$ και $e_{max} = 0.870$, αντίστοιχα, ενώ η κοκκομετρική της διαβάθμιση διακρίνεται στο Σχήμα 2. Η άμμος M31 αποτελείται από στρογγυλεμένους κόκκους (Σχήμα 1β) με ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s = 2.65$, ενώ ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων της άμμου είναι ίσος με $e_{min} = 0.528$ και $e_{max} = 0.870$. Όλα τα δοκίμια των άμμων 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.



Σχήμα 2. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμων HRS και M31.

Figure 2. Grain size distribution curves for Ham River and M31 sand.

3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΜΜΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Οι άμμοι HRS και M31 έχουν παρόμοιες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις (Σχήμα 2), αλλά διαφέρουν ως προς το σχήμα των κόκκων τους (Σχήμα 1), έτσι ώστε μία απευθείας σύγκριση της μονοτονικής συμπεριφοράς των δύο άμμων θα ξεκαθαρίσει το ρόλο που διαδραματίζει το σχήμα των κόκκων. Η απόκριση των άμμων κατά τη μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης διακρίνεται στο Σχήμα 3. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3(α) έχουν σχεδιασθεί οι διαδρομές ενεργών τάσεων των δοκιμών της άμμου HRS, ενώ στα Σχήματα 3(γ) και 3(δ) οι καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμόρφωσης και τάσης-παραμόρφωσης αντίστοιχα. Οι δείκτες πόρων, e_i , των δοκιμών μετά από την ισότροπη στερεοποίηση σε διάφορες μέσες ενεργές τάσεις p_c' (75, 130, 215 και 300kPa) και πριν από τη διάτμηση έλαβαν τιμές από 0.729 έως 0.735 με αντίστοιχες σχετικές πυκνότητες $D_r=39.2-41.3\%$ (δοκίμια HRS_1 έως HRS_4 στον Πίνακα 1). Τα δοκίμια όταν υποβάλλονται σε φόρτιση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης εμφανίζουν καταρχήν τάση για συστολή μέχρι μία τιμή διατμητικής παραμόρφωσης (περίπου 2%) και από το σημείο αυτό και έπειτα (τα σημεία σημειώνονται με συνεχή βέλη στο Σχήμα 3γ), παρουσιάζουν συνεχή τάση για διαστολή με ταυτόχρονη αύξηση της διατμητικής τους

αντοχής (Σχήμα 3δ). Τα σημεία αλλαγής φάσης ορίζουν τη γραμμή αλλαγής φάσης (phase transformation line - PTL, Ishihara et al., 1975) που περνάει από την αρχή των αξόνων και χαρακτηρίζεται από τη γωνία αλλαγής φάσης $\phi'_{PTL}=30^\circ$. Στο Σχήμα 3(α) εκτός από τη γραμμή αλλαγής φάσης έχει σχεδιασθεί και η γραμμή αστοχίας των δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης που αντιστοιχεί σε γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=36^\circ$.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Δοκιμών.
Table 1. Specimen Characteristics.

Πείραμα	e_i	D_r (%)	p_c' (kPa)
HRS_1	0.729	41.0	75
HRS_2	0.735	39.2	130
HRS_3	0.734	39.5	215
HRS_4	0.728	41.3	300
M31_1	0.733	40.1	75
M31_2	0.731	40.6	130
M31_3	0.733	40.1	215

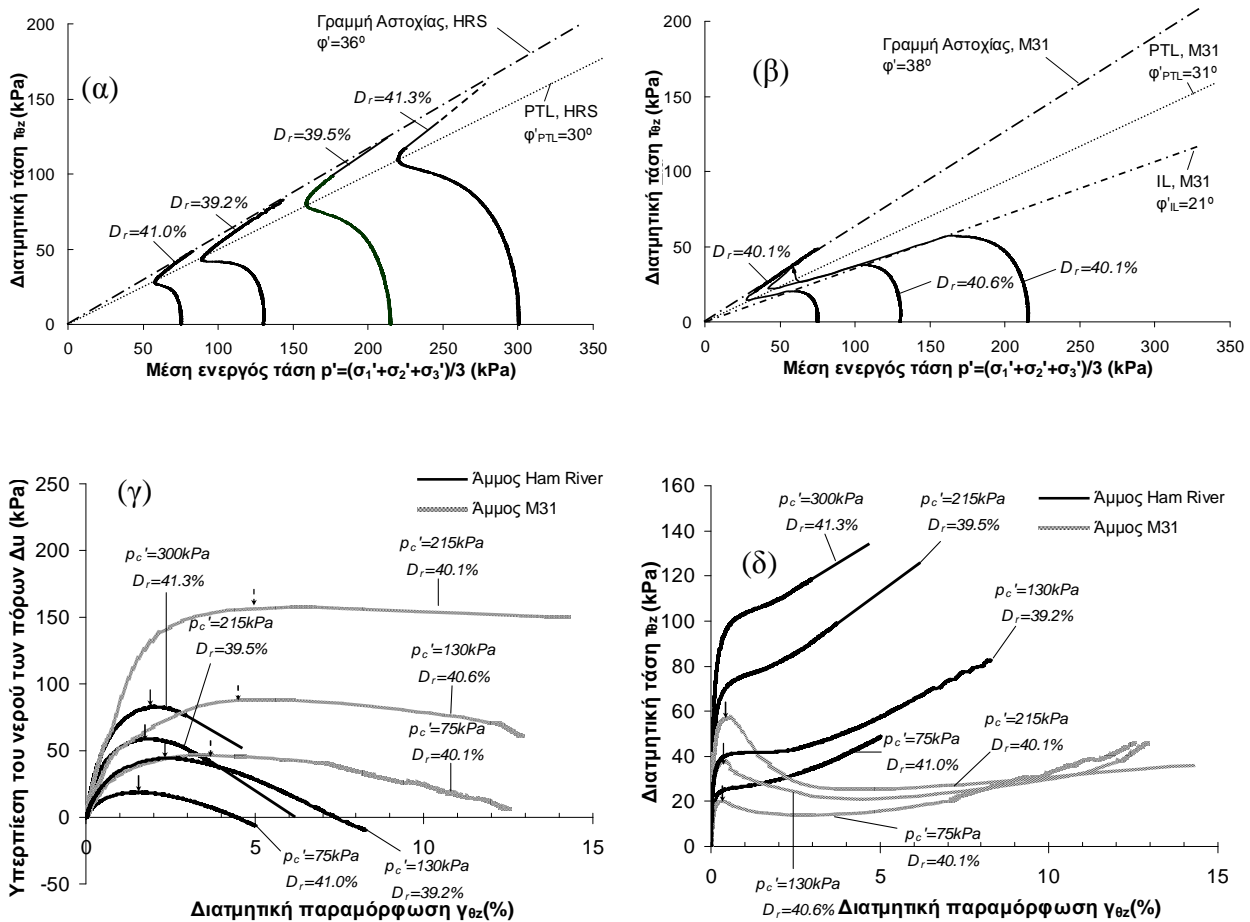
Στα Σχήματα 3(β), 3(γ) και 3(δ) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την άμμο M31. Τα δοκίμια της άμμου στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε τρεις μέσες ενεργές τάσεις, 75, 130 και 215kPa, ενώ οι δείκτες πόρων πριν από τη διάτμηση έλαβαν τιμές από 0.731 έως 0.733 με αντίστοιχες σχετικές πυκνότητες $D_r=40.1-40.6\%$ (δοκίμια M31_1 έως M31_3 στον Πίνακα 1). Σε αντίθεση με την άμμο HRS, τα δοκίμια της άμμου M31 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 και σημειώνονται με συμπαγή βέλη στο Σχήμα 3(δ). Αν ενωθούν τα σημεία που συνδέουν τη μέγιστη διατμητική αντοχή κατά τη διάρκεια συστολικής συμπεριφοράς των δοκιμών υπό μονοτονική φόρτιση για διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις και παρόμοιο δείκτη πόρων ορίζουν μια ευθεία γραμμή στο διάγραμμα $t_{\theta z}-p'$, γνωστή ως γραμμή αστάθειας (Instability Line - IL, Lade, 1993). Αξίζει να σημειωθεί ότι αστάθεια συμβαίνει στα δοκίμια της άμμου M31 για μικρές διατμητικές παραμορφώσεις της τάξεως του 0.5%, ενώ αντιστοιχεί σε γωνία τριβής $\phi'_{IL}=21^\circ$. Η αστάθεια συνοδεύεται από απότομη πτώση της διατμητικής τάσης (Σχήμα

3δ) ακολουθούμενη από μία ημι-σταθερή κατάσταση (Ishihara 1993), ενώ ταυτόχρονα η υπερπίεση του νερού των πόρων αυξάνει στη μέγιστη τιμή της (Σχήμα 3γ). Κατόπιν, τα δοκίμια ανακτούν την αντοχή τους, συναντούν τη γραμμή αλλαγής φάσης ($\phi'_{PTL}=31^\circ$, διακεκομμένα βέλη στο Σχήμα 3γ) για τιμές διατμητικής παραμόρφωσης από 3.6% ($p_c'=75$ kPa) έως 5% ($p_c'=215$ kPa) και τελικά οδηγούνται στην αστοχία με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=38^\circ$.

Η προσεκτική μελέτη των Σχημάτων 3(α) έως 3(δ) δείχνει ότι για παρόμοιες τιμές σχετικής πυκνότητας (HRS_1-4, $D_r=39.2\text{--}41.3\%$ και M31_1-3, $D_r=40.1\text{--}40.6\%$) και παρότι οι δύο άμμοι έχουν σχεδόν την ίδια

κοκκομετρική διαβάθμιση, η άμμος M31 η οποία διαθέτει στρογγυλεμένους κόκκους παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά με απότομη μείωση της διατμητικής της αντοχής αφού αποκτήσει μία μέγιστη τιμή, ενώ η άμμος HRS που αποτελείται από γωνιώδεις κόκκους δεν εμφανίζει αστάθεια στη συμπεριφορά της και η διατμητική της αντοχή αυξάνεται συνεχώς με την παραμόρφωση.

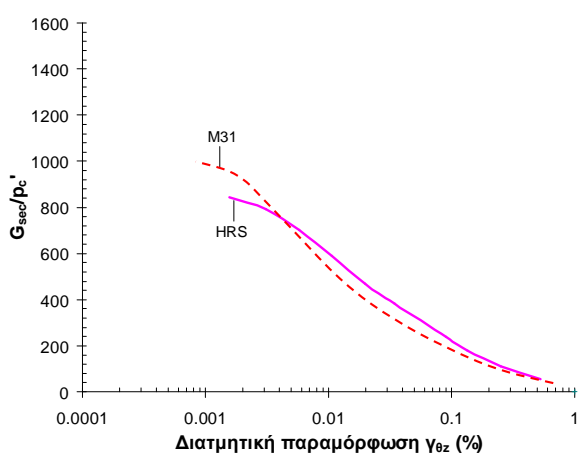
Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ακαμψίας των δύο εξεταζόμενων άμμων. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4 δίνονται οι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική ενεργό τάση στερεοποίησης τιμές ακαμψίας των δύο υλικών. Κατά την



Σχήμα 3. Δοκίμες μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης: (α) διαδρομές ενεργών τάσεων άμμου Ham River (β) διαδρομές ενεργών τάσεων άμμου M31 (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων ως προς την διατμητική παραμόρφωση (δ) καμπύλες διατμητικής τάσης ως προς την διατμητική παραμόρφωση.

Figure 3. Monotonic torsional hollow cylinder tests: (a) effective stress paths of Ham River sand; (b) effective stress paths of M31 sand; (c) excess pore water pressure against shear strain curves; (d) shear stress against shear strain curves.

μονοτονική στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης οι τιμές ακαμψίας των δύο άμμων είναι παρόμοιες με την ακαμψία της άμμου M31 να είναι αρχικά υψηλότερη από εκείνη της HRS κατά περίπου 16%. Εν συνεχεία, για τιμές διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma_{\theta z}$ μεγαλύτερες από 0.004% το μοτίβο αυτό αλλάζει, οπότε η καμπύλη εδαφικής ακαμψίας της άμμου M31 αποτελεί το κάτω όριο του διαγράμματος και η καμπύλη της άμμου HRS το άνω όριο. Παρόλα αυτά, για τιμές διατμητικής παραμόρφωσης μεγαλύτερες από 0.1% οι δύο καμπύλες πρακτικά συνενώνονται και για $\gamma_{\theta z}=1\%$ το κανονικοποιημένο μέτρο ακαμψίας πρακτικά μηδενίζεται.



Σχήμα 4. Κανονικοποιημένες καμπύλες ακαμψίας των άμμων Ham River και M31.

Figure 4. Normalized stiffness curves of Ham River and M31 sand.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόκριση δύο λεπτόκοκκων και ομοιόμορφων άμμων οι οποίες διαθέτουν παρόμοια κοκκομετρική διαβάθμιση, αλλά διαφέρουν ως προς το σχήμα των κόκκων. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε ότι:

- Η άμμος που αποτελείται από στρογγυλεμένους κόκκους παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά με απότομη μείωση της διατμητικής της αντοχής αφού αποκτήσει μία μέγιστη τιμή. Αντίθετα, για παρόμοιους δείκτες πόρων και επίπεδα αρχικών μέσων ενεργών τάσεων, η άμμος που αποτελείται από γωνιώδεις κόκκους δεν εμφανίζει αστάθεια στη συμπεριφορά

της και η διατμητική της αντοχή αυξάνεται συνεχώς με την παραμόρφωση.

- Τα χαρακτηριστικά ακαμψίας των δύο εξεταζόμενων άμμων είναι παρόμοια.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alshibli, K.A., and Sture, S. (2000), "Shear band formation in plane strain experiments of sand". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 6, pp. 495–503.
- Bishop, A. W., and Henkel, D. J. (1957), "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test", Edward Arnold, Ltd., London, p. 190.
- Cho, G., Dodds, J., and Santamarina, J. C. (2006), "Particle shape effects on packing density, stiffness and strength: natural and crushed sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 5, pp. 591–602.
- 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.
- Georgiannou, V.N., and Tsomokos, A. (2008), "Comparison of two fine sands under torsional loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 12, pp. 1659-1672.
- Guo, P., and Su, X. (2007), "Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 579-591.
- 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*, Vol. 33, No. 4, pp. 355-384.
- Ishihara, K. (1993), "Liquefaction and flow failure during earthquake", *Geotechnique*, Vol. 43, No. 3, pp. 351-415.
- 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, No. 6, pp. 895-904.
- Koerner, R.M. (1970), "Effect of particle characteristics on soil strength", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation*

- Engineering Division, ASCE, Vol. 96, No. SM4, pp. 1221-1234.
- Lade, P.V., and Yamamuro, J.A. (1997), "Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, No. 6, pp. 918-928.
- Liu, S., and Matsuoka, H. (2003), "Microscopic interpretation on a stress-dilatancy relationship of granular materials", *Soils and Foundations*, Vol. 43, No. 3, pp. 73-84.
- Mair, K., Frye, K.M., and Maronez, C. (2002), "Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B10, pp. 4-1 – 4-9.
- Rouse, P.C., Fannin, R.J., and Shuttle, D.A. (2008), "Influence of roundness on the void ratio and strength of uniform sand", *Geotechnique*, Vol. 58, No. 3, pp. 227-231.
- Shinohara, K., Oida, M., and Golman, B. (2000), "Effect of particle shape on angle of internal friction by triaxial compression test", *Powder Technology*, Vol. 107, No. 1-2, pp. 131-136.
- Skempton, A. W. (1954), "The Pore Pressure Coefficients A and B", *Geotechnique*, Vol.4, pp. 143-147.
- Sukumaran, B., and Ashmawy, A. K. (2001), "Quantitative characterization of the geometry of discrete particles", *Geotechnique*, Vol. 51, No. 7, pp. 171–179.
- 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.