

Ανάλυση πειραματικών δεδομένων σεισμικής απόκρισης και ρευστοποίησης αμμοχάλικων

Analyses of laboratory data for the seismic response and liquefaction of sand and gravel mixtures

ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Καθηγητής ΕΜΠ
ΦΑΝΟΥΡΑΚΗ, Ν. Πολιτικός Μηχανικός
ΒΑΛΣΑΜΗΣ Α. Πολιτικός Μηχανικός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Παρουσιάζονται και αξιολογούνται πειραματικά αποτελέσματα από εξηνταπέντε (65) συνολικά δημοσιευμένες μελέτες της σεισμικής απόκρισης και της αντίστασης σε ρευστοποίηση άμμων (27 μελέτες) και αμμοχάλικων (38 μελέτες). Η αξιολόγηση γίνεται με δύο θεωρήσεις, μία βάσει του απόλυτου δείκτη πόρων του εδαφικού μίγματος και η άλλη βάσει του δείκτη πόρων του αδρομερούς σκελετού (από χάλικες). Οι διαφορές που προκύπτουν εντοπίζονται στην αρχική τιμή του μέτρου διάτμησης G_0 και στην αντίσταση σε ρευστοποίηση CRR. Η εξάρτηση του μέτρου διάτμησης και του λόγου κρίσιμης υστερητικής απόσβεσης των δύο τύπων εδαφών είναι παρόμοια.

ABSTRACT : Experimental results are presented and evaluated from sixty five (65) published studies on the seismic response and the liquefaction resistance of sands (27 studies) and sand-gravel mixtures (38 studies). The evaluation is performed with two different approaches, one based on the nominal void ratio and the other based on the void ratio of the coarse grained (gravel) skeleton. Observed differences concern the initial value at the shear modulus G_0 and the liquefaction resistance. On the contrary the inelastic variation of shear modulus and hysteretic damping ratio for the two soil types appears similar.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γεγονός ότι η πλειονότητα των δημοσιευμένων πειραματικών δεδομένων και μελετών αφορούν την μηχανική συμπεριφορά υπό σεισμική φόρτιση άμμων και ιλύων. Οι αντίστοιχες προσπάθειες για αμμοχάλικα είναι ιδιαίτερα περιορισμένες λόγω κυρίως των αντικειμενικών δυσκολιών που προέρχονται από το μεγάλο σχετικά μέγεθος των κόκκων τους και τις επακόλουθες απαιτήσεις για εξειδικευμένο εργαστηριακό εξοπλισμό (π.χ. Kokusho and Yoshida 1997).

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης συγκεντρώθηκαν και αξιολογήθηκαν πειραματικά δεδομένα από εξήντα πέντε (65) συνολικά δημοσιευμένες μελέτες της σεισμικής απόκρισης και της αντίστασης σε ρευστοποίηση άμμων (27 μελέτες) και αμμοχάλικων (38 μελέτες). Η αξιολόγηση γίνεται με δύο θεωρήσεις, μία κατά την οποία

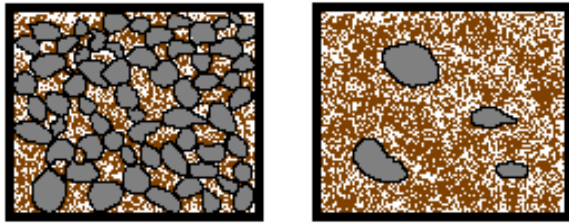
τα αμμοχάλικα εκλαμβάνονται ως ομοιόμορφα υλικά με μικρό δείκτη πόρων (θεώρηση «πυκνής άμμου») και η άλλη σύμφωνα με την οποία αποτελούν μίγμα όπου ο εδαφικός σκελετός αποτελείται από χάλικες και το υλικό πλήρωσης αποτελείται από άμμο (θεώρηση «μίγματος»).

2. ΘΕΩΡΗΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ – ΟΡΙΣΜΟΙ

Ο δείκτης πόρων e ενός δείγματος από ομοιόμορφο πρακτικά έδαφος (π.χ. άμμος ή χάλικες) προσδιορίζει έμμεσα την πυκνότητα επαφής των κόκκων και κατά συνέπεια αποτελεί δείκτη της μηχανικής του συμπεριφοράς. Αυτό όμως δεν ισχύει για μίγματα δύο εδαφικών υλικών με σαφώς διαφορετική κοκκομετρική σύσταση. Για παράδειγμα, σε ένα αμμοχάλικο με κύριο συστατικό τους χάλικες (Σχήμα 1α), οι χάλικες διαμορφώνουν έναν σκελετό ο οποίος παραλαμβάνει τα εξωτερικά φορτία, ενώ απλά

η άμμος αποτελεί το υλικό πλήρωσης των κενών του ανωτέρω σκελετού. Στην περίπτωση αυτή, είναι λογικό να εξαρτηθεί η μηχανική συμπεριφορά από τον δείκτη πόρων των χαλίκων μόνον (e_x) και όχι από τον κατά πολύ μικρότερο ονομαστικό δείκτη πόρων άμμου και χαλίκων (e).

Αντίθετα, αν η άμμος είναι το κύριο συστατικό του μίγματος (Σχήμα 1β), αυτή είναι που σχηματίζει τον σκελετό του μίγματος και οι χάλικες φαίνονται σαν να «πλέουν» μέσα σε αυτήν. Σε αυτή την περίπτωση, η μηχανική συμπεριφορά θα πρέπει αντίστοιχα να εξαρτηθεί από τον δείκτη πόρων της άμμου (e_A).



(α) (β)

Σχήμα 1. Εδαφικό μίγμα με (α) σκελετός από χάλικες, και (β) σκελετός από άμμο.
Figure 1. Soil mixture with (a) gravel skeleton and (b) sand skeleton

Η ανωτέρω υπόθεση, δηλαδή ότι το υλικό που μορφώνει τον σκελετό ελέγχει και τη μηχανική συμπεριφορά του μίγματος, βρίσκει τελευταία εφαρμογή τόσο για μίγματα άμμου και χαλίκων (π.χ. Thevanayagam and Liang 2001, Nagase et al. 1999) όσο και για μίγματα άμμου και ιλύος (π.χ. Thevanayagam et al. 2002, Thevanayagam and Liang 2001).

Ας θεωρήσουμε λοιπόν ένα δοχείο το οποίο περιέχει χάλικες μάζας W_x , όγκου στερεών κόκκων $V_{s,x}$, όγκου κενών $V_{v,x}$, και πυκνότητας στερεών κόκκων $\rho_{s,x}$. Στο δοχείο προστίθεται τώρα ξηρή άμμος μάζας W_A , όγκου στερεών κόκκων $V_{s,A}$ και πυκνότητας στερεών κόκκων $\rho_{s,A}$, με $\rho_{s,A} \approx \rho_{s,x} = \rho_s$. Για την συνολική μάζα και τον συνολικό όγκο των κενών του μίγματος ισχύει:

$$W = W_x + W_A \quad (1)$$

$$V_{v,ολ} = V_{v,x} + V_{v,A} \quad (2)$$

Για την περίπτωση σκελετού από χάλικες, ο ονομαστικός δείκτης πόρων του μίγματος e , ο δείκτης πόρων του σκελετού από χάλικες e_x και ο δείκτης πόρων της άμμου πλήρωσης e_A υπολογίζονται ως εξής:

$$e = \frac{V_{v,ολ}}{V_{s,ολ}} = \frac{V_{v,A} + V_{v,x}}{V_{s,x} + V_{s,A}} \quad (3)$$

$$e_x = \frac{V_{v,x}}{V_{s,x}} = \dots = \frac{K + e}{1 - K} \quad (4)$$

$$e_A = \frac{V_{v,A}}{V_{s,A}} = \frac{\alpha \cdot e}{K} \quad (5)$$

όπου V_v είναι ο όγκος των κενών εκτός των κενών της άμμου και K είναι το περιεχόμενο άμμου ορισμένο ως ποσοστό κατά βάρος του μίγματος:

$$K \equiv \frac{W_A}{W_{ολ}} = \frac{W_A}{W_x + W_A} \quad (6)$$

και α είναι ο λόγος του κενού όγκου της άμμου προς τον συνολικό όγκο κενών του μίγματος:

$$\alpha \equiv \frac{V_{v,A}}{V_{v,ολ}} \quad (7)$$

Για τον λόγο α ισχύει ότι $0 \leq \alpha \leq 1$, με $\alpha=0$ όταν το μίγμα δεν περιέχει άμμο και $\alpha=1$ όταν όλος ο όγκος κενών του σκελετού από χάλικες $V_{v,x}$ έχει γεμίσει με άμμο.

Όσο αυξάνεται η άμμος στο μίγμα, τόσο το K και το α αυξάνουν, μέχρι τη στιγμή που $\alpha=1$. Η κατάσταση αυτή είναι οριακή και η περαιτέρω προσθήκη άμμου σημαίνει πως η άμμος, μην έχοντας άλλον κενό χώρο να πληρώσει, φέρει η ίδια τα φορτία, μορφώνοντας πλέον αυτή τον σκελετό του μίγματος.

Έτσι, η κατάταξη ενός μίγματος σε χαλκώδη άμμο ή αμμώδεις χάλικες είναι δυνατόν να γίνει με βάση την τιμή του α , η οποία υπολογίζεται από την Εξ. 5 λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη ότι: (α) Η τιμή του K αντιστοιχεί στο διερχόμενο κλάσμα (κατά βάρος) από κόσκινο διαμέτρου οπής μικρότερης αυτής των χαλίκων και προκύπτει από την κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος. Στο παρόν άρθρο η διάμετρος χαλίκων ορίζεται σε $D=2mm$, σύμφωνα με τις Ιαπωνικές προδιαγραφές. (β) Στην περίπτωση των αμμωδών χαλίκων η δομή της άμμου που βρίσκεται στα κενά μεταξύ των χαλίκων είναι χαλαρή και μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί ότι $e_A \approx 0.80 \div 0.90$.

Ακολουθως, όταν:

- $\alpha < 1.0$, το μίγμα κατατάσσεται στους αμμώδεις χάλικες, με τον δείκτη πόρων

σκελετού $e_{sk}=e_x$ να υπολογίζεται από τη Εξ. (4),

- $\alpha > 1.0$, το μίγμα κατατάσσεται στις χαλικώδεις άμμους, με τον δείκτη πόρων σκελετού $e_{sk}=e_A$ να υπολογίζεται από την Εξ. (5) για $\alpha=1$,

Για την οριακή περίπτωση που $\alpha \approx 1.0$ ($0.90 \leq \alpha \leq 1.10$), θα πρέπει να υπολογίζονται οι e_x , e_A από τις Εξ. (4) και (5) για $\alpha=1.0$ και ακολούθως να εξετάζεται το ενδεχόμενο κατάταξης των μιγμάτων πρώτα στην μία και μετά στην άλλη κατηγορία.

Στην παρουσίαση που ακολουθεί η θεώρηση του εδαφικού «μίγματος» επικεντρώνεται στα δεδομένα και τα ευρήματα για αμμώδεις χάλικες. Αντίθετα, η θεώρηση «πυκνής άμμου» καλύπτει όλους τους τύπους αμμοχάλικων.

3. Η ΒΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, για την διερεύνηση της ανακυκλικής συμπεριφοράς των αμμοχάλικων δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων από δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα και εμπειρικές σχέσεις. Η έμφαση δόθηκε στις τρεις συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες παραμέτρους, συγκεκριμένα: το ελαστικό μέτρο διάτμησης G_o , την μεταβολή του λόγου G/G_o και του λόγου υστερητικής απόσβεσης ξ συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ και την αντίσταση σε ρευστοποίηση CRR . Συγκεντρωτικά τα στοιχεία σχετικά με την σύνθεση της βάσης δεδομένων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Επισημαίνεται ότι, στην παρούσα εργασία, αξιοποιούνται τα δεδομένα που αφορούν εργαστηριακά πειράματα, ανάστροφες αναλύσεις και αναλυτικές σχέσεις. Δεν αξιοποιούνται δηλαδή δεδομένα από επιτόπου δοκιμές.

Πίνακας 1. Στοιχεία βάσης δεδομένων

Table 1. Contents of database

	Αναλυτικές σχέσεις	Πειραματικά δεδομένα
G_o	6 (άμμους) 6 (αμμοχάλικα)	19 επιτόπου μετρήσεις V_s
G/G_o - γ	5 (άμμους) 4 (αμμοχάλικα)	1000 εργ.δοκιμές 40 Ανάστροφες αναλύσεις
ξ - γ	5 (άμμους) 4 (αμμοχάλικα)	300 εργ.δοκιμές 40 Ανάστροφες αναλύσεις
CRR	11 (άμμους) 24 (αμμοχάλικα)	19 επιτόπου μετρήσεις V_s

Το εύρος διακύμανσης του ονομαστικού δείκτη πόρων στην βάση δεδομένων είναι $e=0.40 \div 1.00$ για τις άμμους και $e=0.20 \div 0.70$ για τα αμμοχάλικα. Το εύρος διακύμανσης για τον δείκτη πόρων σκελετού είναι $e_A=0.43 \div 0.73$ και $e_x=0.35 \div 1.39$ και έχει υπολογιστεί για κλάσμα άμμου $K=0.38 \div 0.85$ και $K=0.07 \div 0.40$ αντίστοιχα. Για τα εδαφικά μίγματα που κατατάσσονται στη μεταβατική ζώνη με $\alpha \approx 1.0$, τα αντίστοιχα στοιχεία είναι $e_A = 0.75 \div 0.97$ και $e_x = 0.75 \div 1.61$ με $K=0.28 \div 0.48$. Θα μπορούσε δηλαδή να υποστηριχθεί ότι υπάρχει μία κρίσιμη περιοχή $K=0.30 \div 0.40$ για την οποία τα μίγματα φαίνεται να μεταπίπτουν από αμμώδεις χάλικες σε χαλικώδεις άμμους.

4. ΑΡΧΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Η αρχική τιμή του μέτρου διάτμησης G_o ορίζεται για μια πολύ μικρή τιμή του εύρους της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης μεταξύ $\gamma=10^{-5} \div 10^{-6}$. Μια από τις πρώτες προσπάθειες διατύπωσης καταστατικής σχέσης υπολογισμού του G_o έγινε από τους Hardin and Richart (1963), οι οποίοι πρότειναν, για άμμους, μια σχέση της μορφής:

$$G_o = A p_a F(e) \left(\frac{\sigma'_o}{p_a} \right)^n \quad (8)$$

όπου το p_a εκφράζει την ατμοσφαιρική πίεση ($p_a=100kPa$) και κατ' επέκταση τις μονάδες υπολογισμού των G_o και σ'_{vo} , ενώ τα A και n αποτελούν εδαφικές σταθερές.

Ακολούθησε πληθώρα πειραματικών εργασιών σχετικά με τις τιμές των σταθερών A και n καθώς και την μορφή της συνάρτησης $F(e)$. Αρχικά οι εργασίες αυτές αφορούσαν αποκλειστικά άμμους (π.χ. Shibata and Soelarno 1975, Iwasaki et al. 1978), αλλά αργότερα επεκτάθηκαν και σε αμμοχάλικα (π.χ. Kokusho and Esashi 1981, Nishio et al. 1985, Tanaka et al. 1987 και Goto et al. 1987) πάντοτε όμως με την θεώρηση της «πυκνής άμμου», με αναφορά δηλαδή στον ονομαστικό δείκτη πόρων e του μίγματος.

Επικαλούμενοι την σύνοψη των σχέσεων για το G_o του Ishihara (1996) προκύπτει ότι:

(α) Ο συντελεστής n κυμαίνεται περί το 0.50 για άμμους και μεταξύ 0.40 και 0.60 για τα αμμοχάλικα

(β) Η συνάρτηση $F(e)$ μπορεί να θεωρηθεί, με μικρό λάθος, ενιαία για άμμους και αμμοχάλικα:

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (9)$$

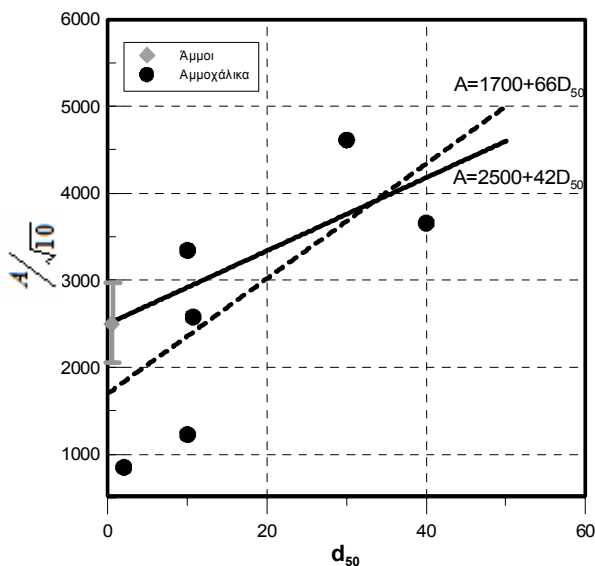
(γ) Ο συντελεστής A παρουσιάζει εμφανή συσχέτιση προς το μέσο μέγεθος των κόκκων (Σχήμα 2) η οποία εκφράζεται κατά προσέγγιση ως:

$$A \approx 1700 + 66 d_{50} (mm) \quad (10)$$

εάν ληφθούν υπόψη όλα τα δεδομένα και

$$A \approx 2500 + 42 d_{50} (mm) \quad (11)$$

εάν εξαιρεθούν οι δύο, ασυνήθιστα χαμηλές, τιμές αμμοχάλικων.



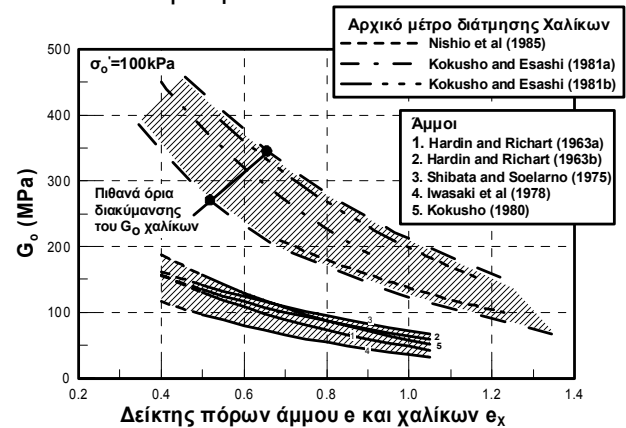
Σχήμα 2. Επίδραση της μέσης διάστασης κόκκου στον συντελεστή A .

Figure 2. Average grain size effect on factor A .

Στο Σχήμα 3 συγκρίνονται οι προαναφερθείσες σχέσεις για την εκτίμηση του G_o , για μέση ενεργό τάση 100kPa, υπό το πρίσμα της θεώρησης «μίγματος». Συγκεκριμένα, ο οριζόντιος άξονας του σχήματος αντιστοιχεί στον ονομαστικό δείκτη πόρων e όταν πρόκειται για άμμους και στον δείκτη πόρων του σκελετού e_x όταν πρόκειται για αμμώδεις χάλικες.

Κατά μέση τιμή, οι καμπύλες στο Σχήμα 3 μπορούν να προσεγγισθούν από τις Εξ. 8 και 9, με τις κατάλληλες τιμές του δείκτη πόρων (e για άμμους και e_x για αμμώδεις χάλικες). Στην περίπτωση αυτή η μέση τιμή του A προκύπτει ίση περίπου με 7500 για άμμους και 20000 για τους αμμώδεις χάλικες. Προκύπτει δηλαδή ότι,

υπό την ίδια ενεργό τάση, οι αμμώδεις χάλικες έχουν 2÷3 φορές μεγαλύτερο G_o από μία άμμο του ίδιου δείκτη πόρων.



Σχήμα 3. Σχέσεις G_o - e για την θεώρηση «μίγματος»

Figure 3. G_o - e relations for the «soil mixture» approach

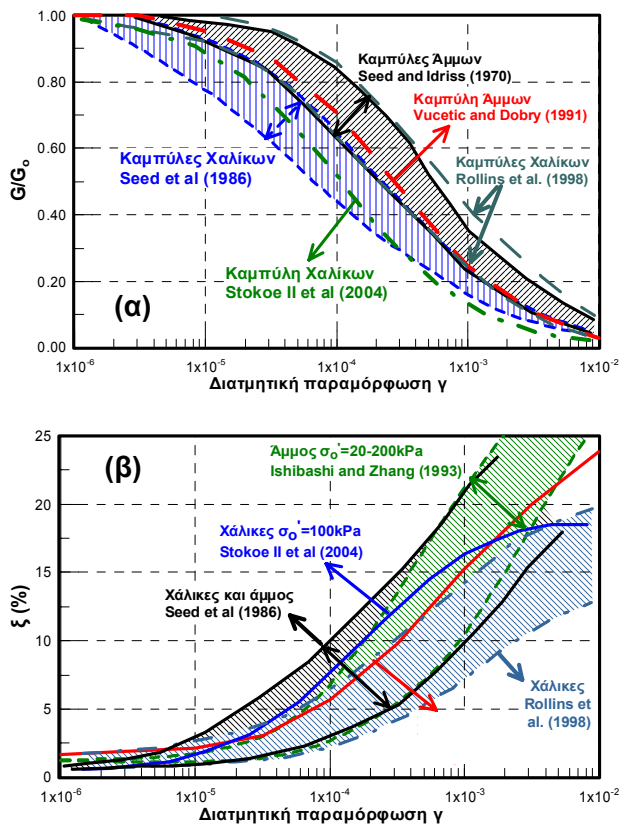
5. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

Είναι γνωστό ότι το μέτρο διάτμησης G και ο λόγος υστερητικής απόσβεσης ξ των εδαφικών υλικών εμφανίζουν έντονη εξάρτηση από το μέγεθος της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, το G μειώνεται ενώ το ξ αυξάνει με το εύρος της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης γ , όταν $\gamma > 10^{-5}$. Να σημειωθεί ότι για δεδομένο τύπο εδάφους, ενώ οι καμπύλες G - γ μπορεί να εμφανίζουν μεγάλο εύρος διακύμανσης, οι καμπύλες G/G_o - γ που προκύπτουν μετά την κανονικοποίηση του G ως προς την αρχική τιμή G_o μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά ενιαίες.

Για τις άμμους, ευρύτερα αποδεκτές είναι οι καμπύλες των Ishibashi & Zhang (1993), Vucetic & Dobry (1991) και Seed & Idriss (1970). Για αμμοχάλικα, αντίστοιχες καμπύλες έχουν προταθεί από τους Stokoe II et al. (2004), Rollins et al. (1998) και Seed et al. (1984, 1986). Επισημαίνεται ότι από τις ανωτέρω μελέτες για αμμοχάλικα αυτή των Rollins et al. (1998) υπερτερεί σε πληρότητα (αξιολογεί 1000 νέα και παλαιότερα αποτελέσματα για τις καμπύλες G/G_o - γ και 300 για τις καμπύλες ξ - γ) και αξίζει να της δοθεί κάποια μεγαλύτερη βαρύτητα.

Οι διάφορες καμπύλες G/G_o - γ και ξ - γ που είναι διαθέσιμες για άμμους και αμμοχάλικα συγκρίνονται στα Σχ. 4α και 4β αντίστοιχα. Με βάση αυτά τα δεδομένα, θα μπορούσε ίσως να υποστηριχθεί ότι οι χάλικες παρουσιάζουν ελαφρώς πιο ελαστική συμπεριφορά από τις

άμμους. Και στα δύο σχήματα όμως η διασπορά των δεδομένων είναι σχετικά μεγάλη, της ίδιας τάξης μεγέθους με τις όποιες διαφορές, και δεν επιτρέπει την εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων. Για τον λόγο αυτό, και δεδομένου του μικρού ομολογουμένως εύρους των παρατηρούμενων αποκλίσεων, μπορεί επί του παρόντος να θεωρηθεί ότι η συμπεριφορά άμμων και αμμοχάλικων δεν διαφοροποιείται ως προς τον παράγοντα αυτό. Επισημαίνεται ότι προς το συμπέρασμα αυτό συνηγορούν και 40 καμπύλες $G/G_o - \gamma$ και $\xi - \gamma$ Kokusho and Matsumoto 1998 που έχουν προκύψει από ανάστροφες αναλύσεις ιστορικών περιστατικών (Φανουράκη, 2002).



Σχήμα 4. Σύγκριση σχέσεων $G/G_o - \gamma$ (Σχ. 4α) και $\xi - \gamma$ (Σχ. 4β) για άμμους και αμμοχάλικα

Figure 4. Comparison of $G/G_o - \gamma$ (Fig. 4a) and $\xi - \gamma$ (Fig. 4b) relationships for sand and sand-gravel mixtures.

6. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Για τον προσδιορισμό της αντοχής του εδάφους έναντι ρευστοποίησης έχουν καθιερωθεί τα διαγράμματα $CRR - N_L$, όπου N_L είναι το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτείται για να φτάσει το δοκίμιο σε κατάσταση ρευστοποίησης και CRR είναι ο

λόγος της αντίστοιχης δυναμικής διατμητικής τάσης προς την κατακόρυφη ενεργό τάση στερεοποίησης ($CRR = \sigma_{dc} / 2\sigma'_{3c}$ για 3-αξονική φόρτιση και $CRR = \tau_{dc} / \sigma'_{vc}$ για απλή διάτμηση).

Για άμμους και ιλύες η σχέση $CRR - N_L$ προσδιορίζεται ευχερώς στο εργαστήριο με τις γνωστές δοκιμές. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για χάλικες, λόγω του μεγάλου σχετικά μεγέθους των κόκκων το οποίο δημιουργεί απαιτήσεις ειδικού εξοπλισμού. Σαν αποτέλεσμα, οι δημοσιευμένες εργαστηριακές μελέτες για αυτού του είδους τα εδάφη είναι εξαιρετικά περιορισμένες.

Επί του παρόντος, στην βάση δεδομένων περιλαμβάνονται 24 καμπύλες $CRR - N_L$ για αμμοχάλικα, καθώς και 11 καμπύλες αναφοράς για άμμους. Επισημαίνεται ότι από τα σχετικά βιβλιογραφικά δεδομένα επελέγησαν μόνον εκείνα για τα οποία δίνονταν τουλάχιστον 3 ζεύγη τιμών (CRR, N_L), καθώς και οι βασικές πληροφορίες (e ή D_r , σ_o' και K) που απαιτούνται για τον χαρακτηρισμό του μίγματος ως *αμμώδεις χάλικες* ή *χαλικώδης άμμος*.

Η απευθείας σύγκριση των καμπυλών φαίνεται στο Σχήμα 5α. Για λόγους ομοιομορφίας, οι καμπύλες $CRR - N_L$ στο σχήμα αυτό έχουν αναχθεί σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης σύμφωνα με την Σχέση 12 (De Alba et al., 1976) και σε μέση ενεργό τάση 100 kPa σύμφωνα με την Σχέση 13 (Παπαδημητρίου, 1999).

$$CRR_{SS} = 0.60 CRR_{TX} \quad (12)$$

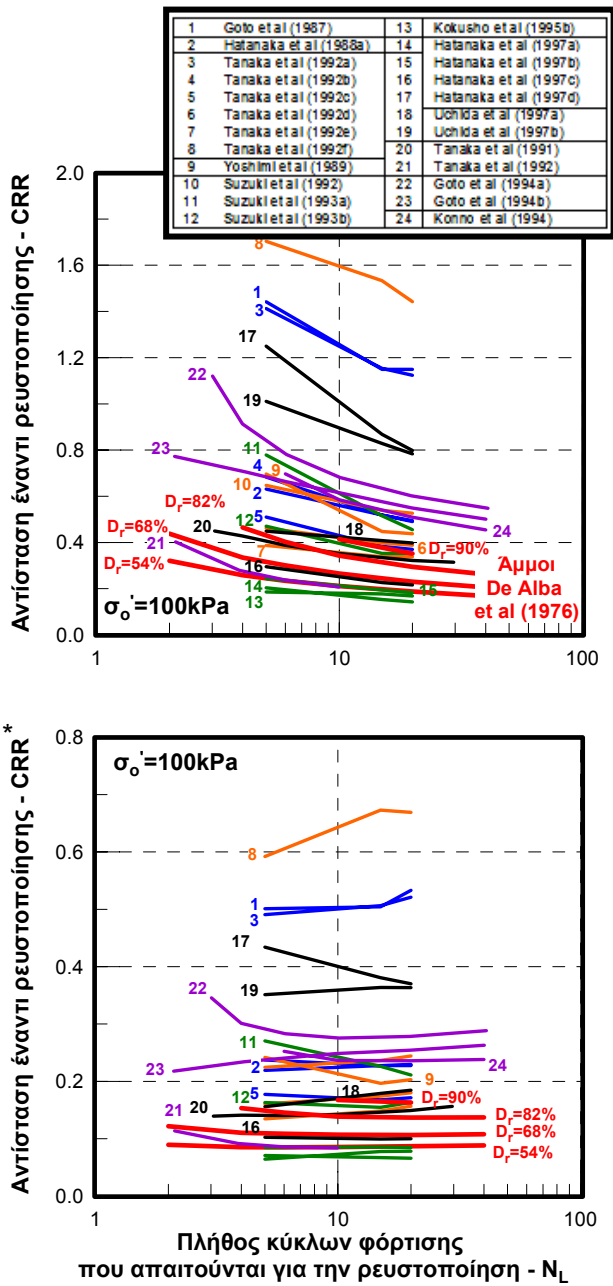
$$h(\sigma_o') = \frac{CRR(\sigma_o')}{CRR(p_a)} = 1 - 0,266 \cdot \ln \left(\frac{\sigma_o'}{p_a} \right) \quad (13)$$

Παρά τις ανωτέρω αναγωγές, η διασπορά των καμπυλών παραμένει μεγάλη, γεγονός που αποδίδεται λογικά στις διαφορετικές συνθήκες πυκνότητας και κοκκομετρικής διαβάθμισης (άμμοι, χάλικες, κλπ.) των αντίστοιχων εδαφικών δειγμάτων. Για να μπορέσουμε ακολούθως να επικεντρωθούμε στην επίδραση των δύο αυτών επίμαχων παραμέτρων, οι λόγοι CRR διαιρέθηκαν με την παρακάτω συνάρτηση:

$$g(N_L) = 1 + 3.30 N_L^{-0.35} \quad (14)$$

η οποία εκτιμάται ότι αποδίδει με ικανοποιητική ακρίβεια την επίδραση του αριθμού κύκλων φόρτισης N_L , ανεξαρτήτως πυκνότητας και κοκκομετρικής σύνθεσης. Η υπόθεση αυτή

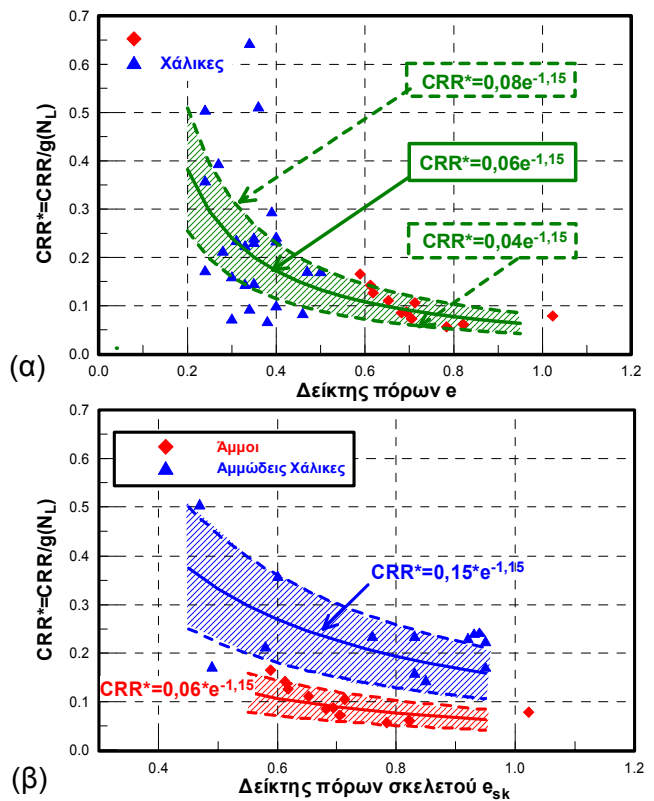
τεκμηριώνεται στο Σχήμα 5β όπου παρουσιάζονται πλέον οι καμπύλες CRR^*-N_L [$CRR^*=CRR/g(N_L)$] και διαπιστώνεται ότι είναι πρακτικά ανεξάρτητες από τον αριθμό κύκλων N_L .



Σχήμα 5. Σύγκριση αντοχής σε ρευστοποίηση αμμοχάλικων και άμμων
Figure 5. Comparison of liquefaction resistance of sand-gravel mixtures and sands
(α) $CRR-N_L$ (β) CRR^*-N_L

Στα πλαίσια της αξιολόγησης των δεδομένων με την θεώρηση *πυκνής άμμου*, στο Σχήμα 6α παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του λόγου CRR^* για άμμους και αμμοχάλικα (κοινή θεώρηση) συναρτήσει του ονομαστικού δείκτη

πόρων e . Η αντίστοιχη αξιολόγηση με την θεώρηση *μίγματος* πραγματοποιείται στο Σχήμα 6β, όπου οι λόγοι CRR^* συσχετίζονται με τον δείκτη πόρων του σκελετού, $e_{sk}=e$ για άμμους και $e_{sk}=e_x$ για χαλικώδεις άμμους.



Σχήμα 6. Σχέση κανονικοποιημένης αντοχής σε ρευστοποίηση με δείκτη πόρων (α) θεώρηση «πυκνής άμμου» (β) Θεώρηση μίγματος
Figure 6. Correlation of normalized liquefaction resistance to void ratio (α) dense sand approach (β) soil mixture approach

Είναι ενδιαφέρον ότι η μέση καμπύλη για το Σχήμα 6α ταυτίζεται με την μέση καμπύλη για άμμους στο Σχήμα 6β. Αντίθετα, η μέση καμπύλη για αμμώδεις χάλικες, στο Σχήμα 6β, είναι σαφώς μετατοπισμένη προς τα άνω σε σχέση με την μέση καμπύλη για άμμους. Κατά προσέγγιση, οι ανωτέρω μέσες καμπύλες εκφράζονται ως:

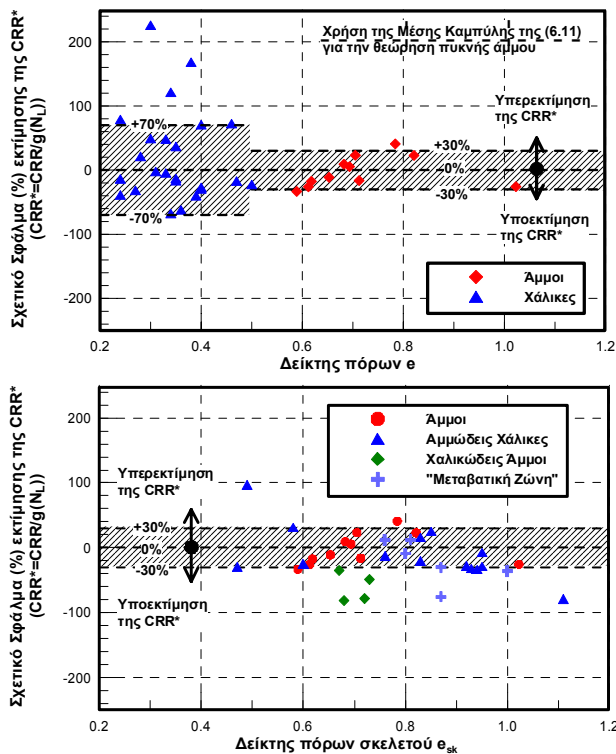
$$CRR^* = 0.06e^{-1.15} \quad (15)$$

$$CRR^* = 0.15e_{sk}^{-1.15} \quad (16)$$

Δηλαδή, όπως και στην περίπτωση του ελαστικού μέτρου διάτμησης G_o , η αντίσταση σε ρευστοποίηση αμμοδών χάλικων

παρουσιάζεται περί τις 2.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση άμμων με την ίδια πυκνότητα σκελετού.

Τέλος, στα Σχήματα 7α και 7β παρουσιάζονται τα σχετικά σφάλματα εκτίμησης του CRR^* αμμωδών χαλικίων με τις Σχέσεις 15 (θεώρηση *πυκνής άμμου*) και 16 (θεώρηση *μίγματος*). Παρατηρείται ότι η θεώρηση μίγματος οδηγεί σε σημαντική μείωση της διασποράς των πειραματικών δεδομένων, από 70% στο Σχήμα 7α σε 30% περίπου στο Σχήμα 7β.



Σχήμα 7. Σχετικό σφάλμα εκτίμησης CRR (α) θεώρηση «πυκνής άμμου» (β) θεώρηση μίγματος

Figure 7. Relative error CRR estimation (α) dense sand approach (β) soil mixture approach

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε και την ανάλυση που ακολούθησε προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

(α) Η δυναμική συμπεριφορά και η αντίσταση σε ρευστοποίηση των αμμωδών χαλικίων μπορεί να προσεγγισθεί τόσο με την θεώρηση της *πυκνής άμμου* όσο και με την θεώρηση λειτουργίας *μίγματος*.

(β) Όταν τα διαθέσιμα στοιχεία επιτρέπουν την εφαρμογή της, η θεώρηση *μίγματος* οδηγεί σε μικρότερο εν γένει σφάλμα.

(γ) Οι αμμώδεις χαλικές εμφανίζουν 2÷3 φορές μεγαλύτερο αρχικό μέτρο διάτμησης G_0 και αντίσταση σε ρευστοποίηση CRR από άμμους με την ίδια πυκνότητα εδαφικού σκελετού (δηλαδή όταν $e_A = e_X$).

(δ) Αντίθετα, σε αδρή προσέγγιση, οι καμπύλες G/G_0 - γ και ξ - γ για άμμους και αμμοχάλικα είναι παρόμοιες.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

De Alba, P., Seed, H., B., Chan, K., C. (1976), "Sand Liquefaction in Large - Scale Simple Shear Tests", J. Geot. Engng Div., 102(GT9), pp. 909 - 927.

Goto, S., Nishio, S., Yoshimi, Y. (1994), "Dynamic Properties of Gravel Sampled by Ground Freezing", Ground Failures Under Seismic Conditions, ASCE Geotechnical Special Publication No. 44, pp. 141 - 157.

Goto, S., Suzuki, Y., Nishio, S., Oh-Oka, H. (1994), "Mechanical Properties of Undisturbed Tone River Gravel Obtained by In-situ Freezing Method", Soils and Foundations, 32(3), pp. 15 - 25.

Goto, S., Shamoto, Y., Tamaoki, K. (1987), "Dynamic Properties of Undisturbed Gravel Sample by In-situ frozens", Proc. 8th Asian Reg. Conf. on Soil Mech and Foundation Engng, Vol. 1, pp. 233 - 236.

Hardin, B.O. and Richart, F.E. (1963), "Elastic wave velocity in granular soils", J. Soil Mech and Foundations Div, ASCE, 89(1), 33-65.

Hatanaka, M., Uchida, A., Suzuki, Y. (1997), "Correlation Between Undrained Cyclic Shear Strength and Shear Wave Velocity for Gravelly Soils", Soils and Foundations, 37(4), pp. 85 - 92.

Hatanaka, M., Suzuki, Y., Kawasaki T., Endo, M. (1988), "Cyclic Undrained Shear Properties of High Quality Undisturbed Tokyo Gravel", Soils and Foundations, 28(4), 57 - 68.

Imai, T. and Tonouchi, K. (1982). "Correlation of N-Value with S-Wave Velocity and Shear Modulus," Proc. 2nd European Symp. on Penetration Testing, Amsterdam, pp. 57-72

Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H., Inatomi, T. (1996), "Performance of Caisson Type Quay Walls at Kobe Port", Special Issue of Soils and Foundations, No. 1, pp. 119 - 136.

- Ishihara, K. (1996), "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics", Clarendon Press, Oxford.
- Ishibashi, I., Zhang, X. (1993), "Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay", *Soils and Foundations*, 33(1), pp. 182 – 191.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., Yasuda, S. (1978), "A Practical Method For Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies in Various Sites in Japan", *Proc. 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction – Research and Application*, Vol. 2, pp. 885 – 896.
- Kokusho, T., Matsumoto, M. (1998), "Nonlinearity in Site Amplification and Soil Properties During the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake", *Special Issue of Soils and Foundations*, No. 2, pp. 1 – 9.
- Kokusho, T., Yoshida, Y. (1997), "SPT N-Value and S-Wave Velocity for Gravelly Soils with Different Grain Size Distribution", *Soils and Foundations*, 37(4), pp. 105 – 113.
- Kokusho, T., Esashi, Y. (1981), "Cyclic Triaxial Test on Sands and Coarse Materials", *Proc. 10th Int Conf on Soil Mech and Foundation Engng*, Stockholm, Vol. 1.
- Konno, T., Hatanaka, M., Ishihara, K., Ibe, Y., Iizuka, S. (1994), "Gravelly Soil Properties Evaluation by Large Scale In-situ Cyclic Shear Tests", *Ground Failures Under Seismic Conditions*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 44, pp. 177 – 200.
- Nagase, H., Hiro-oka, A., Kuriya, Y. (1999), "A Study on Liquefaction Strength Characteristics of Sand Mixed with Gravel", *2nd Int Conf on Recent Advances in Geot Earthquake Engng and Soil Dynamics*, Lisboa, Portugal.
- Nishio, S., Baba, K. and Tamaoki, K. (1986), "Method of measuring volume change in large scale triaxial test apparatus", *Proceedings of Symposium on Deformation/Strength Characteristics of Coarse Materials and Related Testing Methods*, pp. 33-36 (in Japanese)
- Ohta, Y. & Goto, N (1978) "Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristics Soil Indices" *Earthquake Eng. and Struc. Dyn.*, (6), 167-187
- Rollins, M. K., Evans, D. M., Diehl, B. N., Daily III, D. W. (1998a), "Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels", *J. Geot. & Geoenviron. Engng*, 124(5), pp. 396 – 405.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., Tokimatsu, K. (1986), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils", *J. Geot. Engng*, 112(11), pp. 1016 – 1032.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., Tokimatsu, K. (1984), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils", Rep. No. EERC 84 – 14, Earthquake Engng Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970), "Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis" EERC Rep. 70-10, Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Shibata, T., Soelarno, D.S. (1975), "Stress-strain characteristics of sands under cyclic loading", *Proc. Jpn. Soc. Civil Engng* 239, 57-65
- Stokoe II, H. K., Darendeli, B. M., Menq, F.-Y., Choi, K., W. (2004), "Comparison of the Linear and Nonlinear Properties of Gravels, Sands, Silts and Clays", *11th ICSDEE / 3rd ICEGE Proc*, pp. 1 - 4, Berkeley.
- Suzuki, Y., Goto, S., Hatanaka, M., Tokimatsu, K. (1993), "Correlation Between Strengths and Penetration Resistances for Gravelly Soils", *Soils and Foundations*, 33(1), pp. 92 – 101.
- Suzuki, Y., Hatanaka, M., Konno, T., Ishihara, K., Akino, K. (1992), "Engineering Properties of Undisturbed Gravel Sample", *Proc of the 10th World Conf on Earthquake Engng*, Vol. 3, pp. 1281 – 1286.
- Tanaka, Y., Kudo, K., Yoshida, Y., Kokusho, T. (1992), "Undrained Cyclic Strength of Gravelly Soil and Its Evaluation by Penetration Resistance and Shear Modulus", *Soils and Foundations*, 32(4), pp. 128 – 142.
- Tanaka, Y., Kokusho, T., Kudo, K., Yoshida, Y. (1991), "Dynamic Strength of Gravelly Soils and its Relation to the Penetration Resistance", *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geot. Earthquake Engng and Soil Dynamics*, St Louis, Vol. 1, pp. 399 – 406.
- Tanaka, Y., Kudo, K., Yoshida, Y., Ikemi, M. (1987), "A Study on the Mechanical Properties of Sandy Gravel – Dynamic Properties of Reconstituted Sample", Report U87019, Central Research Institute of Electric Power Industry, (in Japanese).
- Thevanayagam, S., Shenthnan, T., Mohan, S. Liang, J. (2002), "Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands and Sandy Silts",

- J. Geot. Geoenv. Engng, 128(10), pp. 849 – 859.
- Thevanayagam, S., Liang, J. (2001), “Shear Wave Velocity Relations for Silty and Gravelly Soils”, 4th Int Conf on Recent Advances in Geot Earthquake Engng and Soil Dynamics, San Diego, California.
- Uchida, A., Hatanaka, M., Iizuka, S. (1997), “Undrained Cyclic Shear Strength and Post Undrained Cyclic Shear Volumetric Strain Behavior of High-quality Undisturbed Gravel”, Trans. 14th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lyon, France, Vol 7, pp. 135 – 142.
- Vucetic, M., Dobry, R. (1991), “Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response”, J. Geot Engng, 117(1), pp. 89 – 107.
- Wong, T. R., Seed H. B., Chan, K. C. (1975), “Cyclic Loading Liquefaction of Gravelly Soils”, J. Geot Engng Division, 101(GT6), pp. 571 – 583.
- Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Hosaka, Y., (1989), “Evaluation of Liquefaction Resistance of Clean Sands Based on High-quality Undisturbed Samples”, Soils and Foundations, 29(1), pp. 93 – 104.
- Παπαδημητρίου, Α. (1999), “Ελαστοπλαστική Προσομοίωση της Μονοτονικής και Δυναμικής Συμπεριφοράς Εδαφών”, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.