

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εργαστηριακές δοκιμές δείχνουν ότι ευρύ φάσμα εδαφικών υλικών εμφανίζουν έντονα μη γραμμικές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων με αποτέλεσμα η δυσμησία τους να μειώνεται σημαντικά (τουλάχιστον κατά 10 φορές) στην περιοχή των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις πρακτικές εφαρμογές υπό στατικές ή δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Το γεγονός αυτό καθιστά ανακριβή οποιαδήποτε ανάλυση βασίζεται στο αρχικό μέτρο ελαστικότητας που προσδιορίζεται από επί τόπου δυναμικές δοκιμές. Οι αντίστοιχες καμπύλες **G-γ** εμφανίζουν μεγάλες διαφορές για τους διαφόρους τύπους εδαφών.

Στην παρούσα μελέτη οι καμπύλες **G-γ** προσδιορίστηκαν για χαρακτηριστικά Ελληνικά εδάφη από τον Ισθμό Κορίνθου, τον άξονα την Εγνατίας Οδού, το Μοσχάτο. Επίσης εξετάστηκαν μίγματα λεπτόκοκκων υλικών όπως μαρμαρυγίας, άργιλος και ιλύς, με δύο τυπικές διαβαθμίσεις άμμου τα οποία εμφανίζουν ασταθή συμπεριφορά και τάση για ρευστοποίηση. Άλλωστε και τα φυσικά υλικά που εξετάστηκαν αποτελούν μίγματα ιλύος με μικρά ποσοστά άμμου και αργίλου και φαίνεται να αποτελούν την πλειοψηφία των Ελληνικών εδαφών.

Οι καμπύλες **G-γ** καλύπτουν ένα εύρος παραμορφώσεων από 0.001%-1%, όπου παρατηρείται και η μέγιστη απομείωση από το αρχικό 'ελαστικό' μέτρο διάτμησης, και έχουν εφαρμογή στην περίπτωση ισχυρών σεισμικών δονήσεων. Ο βαθμός απομείωσης εξαρτάται από το εδαφικό υλικό και τον τύπο φόρτισης. Η εκτίμηση των 'ελαστικών' παραμέτρων, **G_{max}**, έγινε για τα περισσότερα υλικά μέσω πιεζοηλεκτρικών καμπτικών στοιχείων.

Οι καμπύλες **G-γ** μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε σχετικές μικροζωνικές μελέτες ώστε ανάλογα με τη φύση των εδαφικών υλικών να επιλέγονται για την αποτίμηση της εδαφικής δυσμησίας. Ταυτόχρονα εφιστάται η προσοχή στα μίγματα άμμων με λεπτόκοκκα υλικά τα οποία εμφάνισαν κατά τη φόρτιση μεγάλες παραμορφώσεις και μείωση της αντοχής τους (ολική ή μερική ρευστοποίηση) με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης του εδάφους στη διαμόρφωση των βλαβών σε τεχνικά έργα οδηγώντας σε μεγάλες μετατοπίσεις και αστοχία των θεμελιώσεων.

Επίσης οι καμπύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας έργων υποδομής όπου, όπως είναι γενικώς αποδεκτό, η παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς οδηγεί σε λάθη στις προβλεπόμενες παραμορφώσεις της τάξης του 40%.

2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Για τις ανάγκες του ερευνητικού προγράμματος χρησιμοποιήθηκε η Τριαξονική Συσκευή (Bishop & Wesley, 1975) για τον προσδιορισμό της **εδαφικής δυσστησίας** υπό συνθήκες μονοτονικής φόρτισης και η Συσκευή του Συμπιεσομέτρου (Dyvik & Madshus, 1985) εφοδιασμένη με ζεύγος πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διατμητικού κύματος μέσα στο δοκίμιο και κατά συνέπεια τον προσδιορισμό της τιμής G_{max} του μέτρου διάτμησης του δοκιμίου.

Η τριαξονική συσκευή έχει τη δυνατότητα αυτόματου ελέγχου της διαδρομής τάσεων την οποία ακολουθεί το δοκίμιο μέσω μονάδων ελέγχου του φορτίου, της πλευρικής πίεσης, της πίεσης του νερού των πόρων και του ρυθμού επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Επίσης, είναι εφοδιασμένη με ειδικούς μετρητές μέτρησης των παραμορφώσεων επί του δοκιμίου καθώς και της πίεσης του νερού των πόρων στο μέσο του δοκιμίου. Τα χαρακτηριστικά της συσκευής περιγράφονται στον **Πίνακα 1**.

Όσον αφορά την μέτρηση της εδαφικής συμπεριφοράς στο εργαστήριο η τριαξονική συσκευή είναι η πλέον χρήσιμη ιδιαίτερα με την ανάπτυξη που έχει πρόσφατα παρατηρηθεί τόσο στις μετρήσεις των τάσεων και των παραμορφώσεων όσο και στον έλεγχό τους (Sagazeta, 1992).

Τα ειδικά όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων επιτρέπουν τη μέτρηση της εδαφικής δυσστησίας με ακρίβεια για ένα μεγάλο εύρος διαδρομών φόρτισης στις οποίες μπορούν να υποβληθούν τα εδαφικά δοκίμια με αποτέλεσμα οι μετρήσεις της εδαφικής δυσστησίας στο εργαστήριο να είναι σχεδόν ταυτόσημες με τις τιμές που προκύπτουν από ανάστροφες αναλύσεις οι οποίες βασίζονται στις πραγματικές μετακινήσεις του εδάφους, για αντίστοιχες τιμές των παραμορφώσεων (Burland, 1989). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο κατηγορίες μετρητών παραμόρφωσης:

- ηλεκτρολυτικού τύπου μικροσκοπικά κλισίμετρα (Burland & Symes, 1982, Ackerley et al., 1987) και
- ηλεκτρομαγνητικού τύπου μετρητές LVDT_RDP (Ackerley, 2001).

Η εγκατάσταση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στη συσκευή του συμπιεσομέτρου έγινε στο Imperial College όπου κατά την εκεί παραμονή της επιστημονικώς υπευθύνου έγινε ειδικός σχεδιασμός και ανάπτυξη στοιχείων για εγκατάσταση στην τριαξονική συσκευή. Αν και η εγκατάστασή τους έχει γίνει σε τριαξονική συσκευή του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του Ε.Μ.Π., λόγω της πρόσφατης μεταφοράς του σε νέες εγκαταστάσεις δεν υπάρχουν διαθέσιμα αποτελέσματα για τα υλικά της παρούσας μελέτης. Η ηλεκτρονική υποδομή, απαραίτητη για τη λειτουργία και καταγραφή των μετρήσεων των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, περιλαμβάνει:

- γεννήτρια συναρτήσεων τύπου TG1304 της Thurlby Thandar Instruments (TTi).
- παλμογράφο τύπου HM 1507-3.02 της Hameg.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για όλα τα υλικά της παρούσας μελέτης η εδαφική δυσστησία προσδιορίστηκε σε **ανισότροπα στερεοποιημένα** δοκίμια με στόχο η διαδρομή τάσεων κατά τη φάση στερεοποίησης των δοκιμών να ακολουθεί την ιστορία φόρτισης κατά τη στερεοποίηση των εδαφών στη φύση η οποία είναι ανισότροπη.

Όσον αφορά τις διαδρομές τάσεων κατά τη φάση φόρτισης των δοκιμών σε διάτμηση, στα μεν αμμώδη υλικά επελέγη η κλασσική δοκιμή εμποδιζόμενης στράγγισης εφόσον υπ' αυτές τις συνθήκες παρατηρείται ασταθής συμπεριφορά των υλικών αυτών, στις δε μαργαϊκές και αργιλικές αποθέσεις τα δοκίμια υποβάλλονται σε διάτμηση υπό συνθήκες σταθερής μέσης ενεργού τάσης.

Η διαδρομή σταθερής μέσης ενεργού τάσης, p' , επελέγη διότι στόχος του προγράμματος είναι ο ακριβής προσδιορισμός της εδαφικής δυσστησίας για ένα εύρος παραμορφώσεων το οποίο ξεπερνά το όριο των δυναμικών δοκιμών. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να ορισθεί η εδαφική δυσστησία η οποία μπορεί να εκφρασθεί σαν μέτρο διάτμησης ή μέτρο ελαστικότητας και συγκεκριμένα σαν εφαπτομενικό ή τέμνον μέτρο το οποίο μετράται σε ορισμένα σημεία σε μια μη-γραμμική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων.

Έχοντας προσδιορίσει με ακρίβεια τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για τις δοκιμές $p'=ct$ προσδιορίζεται άμεσα το τέμνον μέτρο διάτμησης G από τον τύπο: $3 \cdot G = \Delta q / \Delta \epsilon_s$, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια.

Για τις δοκιμές **εμποδιζόμενης στράγγισης** υπολογίζεται το τέμνον μέτρο ελαστικότητας $E_u = \Delta q / \Delta \epsilon_a$ ενώ το μέτρο διάτμησης υπολογίζεται προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας την εξίσωση της ελαστικής θεωρίας για ισότροπο εδαφικό υλικό με λόγο Poisson, ν_u , ίσο με 0.5:

$$G = E_u / 2 \cdot (1 + \nu_u) = E_u / 3$$

Οι δοκιμές $p'=ct$ εξασφαλίζουν τον άμεσο προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης G , διότι η καταστατική εξίσωση που συνδέει τις τάσεις με τις παραμορφώσεις εδαφικού υλικού υπό συνθήκες αξονικής συμμετρίας είναι της μορφής:

$$\delta \epsilon_s = (1/3 \cdot G) \cdot \delta q + (1/J_1) \cdot \delta p' \quad (1)$$

$$\delta \epsilon_v = (1/J_2) \cdot \delta q + (1/K) \cdot \delta p' \quad (2)$$

όπου οι τάσεις και παραμορφώσεις εκφράζονται από τις παραμέτρους:

$$q = \sigma_a - \sigma_r, \quad p' = 1/3 \cdot (\sigma_a' + 2 \cdot \sigma_r') \quad \text{και} \quad \epsilon_s = 2/3 \cdot (\epsilon_a - \epsilon_r), \quad \epsilon_v = \epsilon_a + 2 \cdot \epsilon_r$$

αντίστοιχα και

G = μέτρο διάτμησης

K = μέτρο συμπίεσης

J_1 & J_2 = μέτρα αλληλεπίδρασης διάτμησης και συμπίεσης
(Graham & Houlsby, 1983)

Οι ανωτέρω παράμετροι δεν είναι απαραίτητα ελαστικές ή ελαστοπλαστικές απλώς περιγράφουν την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων.

Είναι φανερό ότι τα μέτρα εδαφικής δυστημσίας δεν μπορούν να προσδιορισθούν άμεσα από τις κλασσικές δοκιμές ελεύθερης ή εμποδιζόμενης στράγγισης στην τριαξονική συσκευή για τις οποίες η μέση ενεργός τάση p' δεν είναι σταθερή λόγω της αλληλεπίδρασης των εξισώσεων (1) και (2). Όμως για ένα πείραμα όπου η μέση ενεργός τάση διατηρείται σταθερή, $p' = \text{const}$, από την εξίσωση (1) προκύπτει: $3^*G = dq/de_s$. Συνεπώς το μέτρο διάτμησης προκύπτει άμεσα από την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του εδαφικού υλικού στη συγκεκριμένη δοκιμή.

4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Η μεταβολή του μέτρου διάτμησης G για τα εδαφικά υλικά της παρούσας μελέτης παρουσιάζεται ως προς τις διατμητικές παραμορφώσεις οι οποίες σχεδιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα για να δοθεί έμφαση στις μικρές παραμορφώσεις. Στις πολύ μικρές παραμορφώσεις ($<0.001\%$) μερικά υλικά εμφανίζουν περίπου σταθερή τιμή του μέτρου G συνεπώς υποδεικνύουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η γραμμική κλίμακα δείχνει πιο καθαρά την ύπαρξη ή μη γραμμικής συμπεριφοράς ενώ η λογαριθμική κλίμακα την υπερτονίζει. Στις καμπύλες $G-\gamma$ που προέρχονται από τη μονοτονική αύξηση των παραμορφώσεων έχουν προστεθεί οι τιμές G_{\max} από τις δυναμικές μετρήσεις που έγιναν στο συμπιεσόμετρο στα ίδια υλικά και για τις ίδιες τιμές ενεργών τάσεων. Οι λόγοι στους οποίους βασίστηκε αυτή η παρουσίαση καθώς και η επιλογή των παραμέτρων που μεταβλήθηκαν σε αυτή τη μελέτη περιγράφονται συνοπτικά ακολούθως:

- Η μη γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι κοινό χαρακτηριστικό για τα περισσότερα εδαφικά υλικά είτε υποβάλλονται σε μονοτονική είτε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για σφιχτά υλικά οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται γύρω από διάφορα γεωτεχνικά έργα είναι σχετικά μικρές (Burland, 1989). Είναι λοιπόν σημαντικό στις αναλύσεις μας να περιλαμβάνουμε τα μη γραμμικά και μη ελαστικά χαρακτηριστικά της εδαφικής δυσστησίας στις μικρές παραμορφώσεις ($\epsilon_s < 0.1\%$).
- Παρόμοιες μετρήσεις της εδαφικής δυσστησίας μεταξύ ανακυκλιζόμενης και δυναμικής (π.χ. ταχείας ανακυκλιζόμενης) φόρτισης υποδεικνύουν ότι 'ελαστική' συμπεριφορά μπορεί να παρατηρηθεί για πολύ μικρές παραμορφώσεις (Alarcon-Guzman et al., 1989, Bolton & Wilson, 1989, Tatsuoka & Shibuya, 1991).
- Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι μετρήσεις της εδαφικής δυσστησίας από μονοτονικές και δυναμικές δοκιμές είναι παρόμοιες, όταν χρησιμοποιούνται ανάλογες τιμές παραμορφώσεων (Georgiannou et al., 1991, Atkinson & Salfords, 1991).
- Με βάση τα ανωτέρω και εφόσον το μέτρο διάτμησης για 'ελαστικές'* πολύ μικρές παραμορφώσεις είναι ανεξάρτητο της μορφής φόρτισης (π.χ. μονοτονική, ανακυκλιζόμενη) τότε και το 'ελαστικό' μέτρο διάτμησης από επί τόπου δυναμικές δοκιμές είναι δυνατόν να συνδυασθεί με το αρχικό μέτρο διάτμησης (για παραμορφώσεις μικρότερες του 0.001%) στις αντίστοιχες μονοτονικές δοκιμές (Shibuya et al., 1997).
- Κατά συνέπεια με την εκτέλεση μιας μονοτονικής δοκιμής είναι δυνατός ο προσδιορισμός τόσο της αντοχής όσο και του αρχικού μέτρου διάτμησης αλλά και της μεταβολής του με την παραμόρφωση. Τα πειράματα αυτά πρέπει να εξασφαλίζουν την μέτρηση των πολύ μικρών παραμορφώσεων και δίνουν τη δυνατότητα της άμεσης

* Η τιμή G_{\max} δεν φαίνεται να επηρεάζεται από το ρυθμό της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης ή τον τύπο φόρτισης (μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη). Όμως η τιμή του λόγου υστέρησης που αντιστοιχεί στην G_{\max} δεν είναι ακριβώς μηδενική. Πλέον δόκιμος λοιπόν όρος είναι 'ψευδο-ελαστική' αν και οι παραμένουσες παραμορφώσεις στην περιοχή του G_{\max} είναι μηδενικές.

σύγκρισης δυναμικών μετρήσεων και μετρήσεων του G κατά τη διάρκεια συνεχούς μονοτονικής φόρτισης (Jončić & Coop, 1997).

- Η μέτρηση των πολύ μικρών παραμορφώσεων επιτυγχάνεται μόνο με τη χρήση ειδικών μετρητών που τοποθετούνται πάνω στα δοκίμια και συγκεκριμένα στο κεντρικό τμήμα τους και έχουν τη δυνατότητα της μέτρησης παραμορφώσεων της τάξεως του 0.0005%.
- Η εδαφική δυσστησία πέραν του εδαφικού υλικού εξαρτάται από την παρούσα εντατική κατάσταση και την ιστορία φόρτισής του. Όμως ακόμη και για το ίδιο υλικό, την ίδια εντατική κατάσταση και την ίδια ιστορία φόρτισης η μετρούμενη δυσστησία είναι διαφορετική για διαφορετικές διαδρομές φόρτισης (π.χ. θλίψη, εφελκυσμός, φόρτιση, αποφόρτιση). Η μέθοδος της διαδρομής τάσεων για τον υπολογισμό των εδαφικών μετακινήσεων (Davis & Poulos, 1968) προσπαθεί να λάβει υπόψη τον σημαντικό παράγοντα της διαδρομής φόρτισης επιβάλλοντας η διαδρομή τάσεων στο εργαστήριο να ακολουθεί τη διαδρομή τάσεων στη φύση. Για τον λόγο αυτόν ιδίως στα αμμώδη υλικά όπου οι διαφορές είναι και οι μεγαλύτερες έγιναν δοκιμές τόσο σε τριαξονική θλίψη όσο και σε εφελκυσμό και δίδονται διαφορετικές τιμές δυσστησίας για τις αντίστοιχες διαδρομές τάσεων.
- Όσον αφορά τέλος τη μεταβολή του μέτρου διάτμησης με την αύξηση των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια συνεχούς φόρτισης, μελέτες όπου γίνεται σύγκριση των διαφόρων δοκιμών (Georgiannou et al., 1991, Shibuya et al. 1992) δείχνουν ότι η εδαφική δυσστησία μειώνεται με την αύξηση των παραμορφώσεων με ταχύτερο ρυθμό όταν η φόρτιση συνίσταται σε μονοτονική στρεπτική διάτμηση. Ακολουθεί η τριαξονική δοκιμή, ενώ κατά τη δοκιμή συντονισμού δονούμενης εδαφικής στήλης, το μέγεθος διατμητικής παραμόρφωσης στο οποίο παρατηρείται απότομη μείωση του μέτρου διάτμησης είναι συνήθως γύρω στο 0.01% (Hardin & Drnevich, 1972, Isenhowe & Stokey, 1981, κ.λπ.).

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα εδάφη τα οποία επελέγησαν και αποτελούν τη βάση της πειραματικής έρευνας διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- I. αμμώδη εδάφη
- II. μαργαϊκές αποθέσεις
- III. αργιλικές αποθέσεις

Για τις ανωτέρω κατηγορίες εδαφών περιγράφονται αναλυτικά οι καμπύλες **G-γ** και συνοπτικά τα χαρακτηριστικά αντοχής τους ως ακολούθως:

5.1 Συμπεριφορά αμμωδών υλικών

Στην πρώτη κατηγορία εδαφών περιλαμβάνονται μίγματα άμμων με μικρά ποσοστά λεπτόκοκκων υλικών. Είναι γνωστό ότι στη φύση σπάνια απαντάται καθαρή άμμος. Συνήθως οι άμμοι απαντώνται ως μίγματα με διάφορα λεπτόκοκκα υλικά όπως άργιλος, μαρμαρυγία και ιλύς. Ο ελληνικός χώρος δεν αποτελεί εξαίρεση με μίγματα αμμοιλύων να απαντώνται σε περιοχές με έντονη σεισμική δράση όπως στο Αίγιο αλλά και μίγματα άμμων με μαρμαρυγία (κυρίως μοσχοβίτη), λόγω διάβρωσης μεταμορφικών βραχωδών σχηματισμών (Goodman, 1993), στις ακτές της ΒΑ Πελοποννήσου, στη Μακεδονία, στις Κυκλάδες - κυρίως στη Νάξο - και γενικότερα στις πρόσφατες παραθαλάσσιες και παραποτάμιες αποθέσεις με τις χαρακτηριστικές ασημένιες αντανάκλασες τους. Άλλωστε επειδή συνήθως οι αποθέσεις αυτές είναι χαλαρές είναι επιρρεπείς σε ασταθή συμπεριφορά, με εμφάνιση μεγάλων παραμορφώσεων και χαμηλής αντοχής και το κυριότερο όπως δείχνουν πρόσφατες μελέτες η παρουσία μικρού ποσοστού προσμίξεων στη «φιλοξενούσα» άμμο μπορεί να μειώσει την αντοχή της σε σχέση με την καθαρή άμμο. Πρόσφατο παράδειγμα αμμώδους υλικού εμφάνισε αστοχίες στο σεισμό της Τουρκίας (Γκαζέτας, 2002).

Η επίδραση των λεπτόκοκκων προσμίξεων στη σεισμική απόκριση εδαφών είναι σήμερα γενικώς αποδεκτή (Chameau & Sutterer, 1994, Vaid, 1994). Ιδιαίτερης σημασίας είναι η επίδραση του λεπτόκοκκου υλικού στην αντίσταση σε ρευστοποίηση κορεσμένων κοκκωδών εδαφών (άμμων και χαλίκων).

Θα πρέπει να τονισθεί ότι στη διεθνή βιβλιογραφία ο ρόλος των προσμίξεων στη συμπεριφορά της άμμου δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένος και φαίνεται ότι η ευμενής ή δυσμενής επιρροή τους εξαρτάται από το είδος του λεπτόκοκκου υλικού αλλά και την κοκκομετρική σύνθεση της άμμου. Για το λόγο αυτόν στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα εξετάστηκε η επίδραση του λεπτόκοκκου υλικού σε δύο τυπικές κατηγορίες άμμων: α) λεπτόκοκκη καλώς διαβαθμισμένη άμμο (JM) μέσης διαμέτρου $D_{50}=0.15\text{mm}$ και β) κακώς διαβαθμισμένη άμμο (HRS) με $D_{50}=0.30\text{mm}$. Οι προσμίξεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ιλύς (HPF4) και μαρμαρυγία (μοσχοβίτης) με μέγιστη διάσταση κόκκων μεγέθους άμμου (MF60) και μεγέθους ιλύος (SX),

αντίστοιχα. Η κοκκομετρική σύνθεση των υλικών αυτών φαίνεται στο **Σχήμα 1**.

Στόχος των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός των καμπυλών G-γ και της αντοχής των διαφόρων μιγμάτων καθώς και η συγκριτική τους παρουσίαση με στόχο τον προσδιορισμό της επίδρασης του είδους και του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού στην μετρούμενη δυσμησία και αντοχή. Επειδή το κύριο ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην εδαφική δυσμησία και αυτή επηρεάζεται άμεσα από την κατεύθυνση φόρτισης (Simpson, 1992) έγιναν στα αμώδη υλικά και πειράματα τριαξονικού εφελκυσμού και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες G-γ. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η φόρτιση έγινε σε χαλαρά δοκίμια διότι αυτά εμφανίζουν ασταθή συμπεριφορά σε σχέση με τα πυκνά δοκίμια και οι πρόσφατες αποθέσεις, τυπικές σε περιοχές λιμανιών, είναι χαλαρές. Όλα τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ανισότροπα στην τριαξονική συσκευή πριν την επιβολή της διατμητικής φόρτισης διότι οι καμπύλες G-γ διαφέρουν για ισότροπα και ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια και στη φύση η στερεοποίηση είναι ανισότροπη. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών περιγράφονται στον **Πίνακα 2**. Όλα τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν σε κατακόρυφη τάση 100 kPa εφόσον στη χαλαρή τους μορφή απαντώνται σε μικρά βάθη.

Στο **Σχήμα 2** φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά αντοχής μιγμάτων της λεπτόκοκκης άμμου JM με διαφορετικά ποσοστά μαρμαρυγία (MF60). Η μηχανική συμπεριφορά τους περιγράφεται λεπτομερέστερα από την Georgiannou, 2001. Στην περιοχή τριαξονικής θλίψης φαίνεται ότι μικρά ποσοστά μαρμαρυγία ($\leq 2.5\%$) επηρεάζουν λίγο και ευμενώς την συμπεριφορά της άμμου (μειώνουν την τάση για ανάπτυξη θετικής υπερπίεσης του νερού των πόρων). Με την αύξηση του ποσοστού του μαρμαρυγία στο 40% δεν παρατηρείται μείωση της διατμητικής αντοχής του μίγματος συνεπώς απαλείφεται η ασταθής συμπεριφορά της άμμου. Στην περιοχή τριαξονικού εφελκυσμού, όπου προστέθηκαν ποσοστά μαρμαρυγία μικρότερα του 40%, παρατηρείται ότι για ποσοστό μεγαλύτερο του 10% δεν παρατηρείται μείωση της αντοχής του μίγματος.

Οι καμπύλες E_u - ε_α για την τριαξονική θλίψη φαίνονται στο **Σχήμα 3**. η διαφορετική συμπεριφορά της άμμου με την αύξηση του ποσοστού μαρμαρυγία έως 40% αντανακλάται και στην εδαφική δυσμησία των υλικών.

Στο **Σχήμα 4** έχουν σχεδιασθεί για όλα τα μίγματα οι καμπύλες G-γ για τις οποίες όπως έχει προαναφερθεί ισχύουν οι σχέσεις $E=2(1+\nu)*G$ και $\gamma=(1+\nu)*\varepsilon_\alpha$ και για συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης $\nu_u=0.5$. Στο ίδιο σχήμα έχουν σημειωθεί οι τιμές G_{max} που προσδιορίστηκαν στην περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων με μετρήσεις της ταχύτητας του διατμητικού κύματος μέσα σε κάθε δοκίμιο με τη βοήθεια καμπτικών στοιχείων τα οποία επιβάλλουν παραμορφώσεις $\varepsilon_s < 0.0002\%$. Η μεταβολή στις καμπύλες G-γ που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της μονοτονικής φόρτισης φαίνεται να ισχύει και για τις τιμές G_{max} οι οποίες υποπενταπλασιάζονται για ποσοστό μαρμαρυγία ίσο με 40%, ενώ είναι σχετικά μικρές για ποσοστά μαρμαρυγία μέχρι 2.5%.

Στα **Σχήματα 5 & 6** έχουν σχεδιασθεί οι αντίστοιχες καμπύλες για την περίπτωση φόρτισης υπό συνθήκες τριαξονικού εφελκυσμού. Με την αύξηση του ποσοστού του μαρμαρυγία μειώνεται η δυστημήςία του δοκιμίου όπως παρατηρήθηκε και στο Σχήμα 3 για φόρτιση σε τριαξονική θλίψη.

Η έντονα ανισότροπη συμπεριφορά των μιγμάτων της άμμου με μαρμαρυγία είναι έκδηλη, με την αντοχή που προσδιορίζεται με τη δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού (σ_1 οριζόντια) να αποτελεί το κάτω όριο. Αντίθετα, όσον αφορά την εδαφική δυστημήςία το υλικό κατά τη φάση της αποφόρτισης από την τάση στερεοποίησης εμφανίζεται ως πλέον άκαμπτο. Συγκεκριμένα ο λόγος του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας E_u που προσδιορίζεται για $\varepsilon_a=0.01\%$ σε τριαξονικό εφελκυσμό και σε τριαξονική θλίψη αντίστοιχα είναι περίπου ίσος με 2 ανεξαρτήτως του ποσοστού μαρμαρυγία.

Στις καμπύλες G-γ των Σχημάτων 4 & 6 για την καθαρή άμμο παρατηρείται η πλέον έντονη μη-γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα μίγματα. Εάν θεωρήσουμε ως ένα μέτρο γραμμικής συμπεριφοράς το δείκτη μη γραμμικότητας, λ , ίσο προς τον λόγο των μέτρων διάτμησης για διατμητική παραμόρφωση ίση με 0.01% και 0.001%, τότε για την άμμο σε τριαξονική θλίψη ισχύει $\lambda = G_{(0.01\%)} / G_{(0.001\%)} = 0.45$. Ο αντίστοιχος δείκτης για μίγμα άμμου με 40% μαρμαρυγία για το οποίο εξαλείφονται τα χαρακτηριστικά της άμμου π.χ. η ασταθής συμπεριφορά, $\lambda=0.70$.

Είναι τυπικό οι άμμοι να δείχνουν την μέγιστη μη-γραμμικότητα, όπως είναι επίσης παρατηρημένο ότι όσο μειώνεται ο δείκτης πλασιμότητας PI τόσο αυξάνεται η μη-γραμμικότητα των καμπυλών G-γ.

Στην περίπτωση της άμμου Toyoura ο δείκτης μη γραμμικότητας $\lambda=0.6$ για καμπύλες G-γ οι οποίες ορίζονται από δοκιμές στρέψης. Στην περίπτωση της άμμου Hamoka υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης ο δείκτης μη γραμμικότητας $\lambda=0.55$ (Shibuya et al., 1992).

Ανάλογες μετρήσεις έχουν γίνει και σε φυσικά υλικά όπως π.χ. εδαφική στρώση πάχους 90μm χαρακτηριζόμενη ως αμμώδης άργιλος/αργιλώδης άμμος (Cavallaro et al., 2001) όπου για τριαξονικές δοκιμές ο δείκτης μη γραμμικότητας $\lambda=0.5$. Για τα υλικά Crag sand και Thanet clay που αποτελούν τα υλικά θεμελίωσης του πυρηνικού σταθμού Sizewell έγινε ενδελεχής μελέτη της δυστημήςίας τους με επί τόπου δυναμικές μετρήσεις και εργαστηριακές δοκιμές (Hight et al., 1997) παρατηρήθηκε λόγος $E_{u(0.01\%)} / E_{u(0.001\%)} = 0.4$ για τις άμμους και 0.5 για την άργιλο αντίστοιχα.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι στην παρούσα μελέτη τα μίγματα αναφέρονται στην πλέον χαλαρή τους μορφή. Για τριαξονικές δοκιμές στην άμμο Toyoura υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης για τα χαλαρά δοκίμια ο δείκτης $L = E_{u(0.01\%)} / E_{u(0.001\%)}$ ισούται με 0.56 ενώ για τα πυκνά δοκίμια $L=0.7$ (Jamashita et al., 2001).

Στο **Σχήμα 7** φαίνεται η επίδραση του είδους του λεπτόκοκκου υλικού στη συμπεριφορά του μίγματος για το ίδιο ποσοστό 2.5%. Όταν το μέγεθος του κόκκου του μαρμαρυγία είναι της τάξεως ιλύος (SX) η συμπεριφορά της

άμμου αλλάζει δραματικά και η αντοχή της υποδιπλασιάζεται ενώ η διαφορά είναι μόλις 15% όταν το μέγεθος των κόκκων μαρμαρυγία είναι της τάξεως άμμου (MF60). Η διαφορά των δύο μορφών μαρμαρυγία φαίνεται στο Σχήμα 1.

Στο **Σχήμα 8** φαίνονται οι καμπύλες $G-\gamma$ για τις ανωτέρω δοκιμές μαζί με τις τιμές G_{max} οι οποίες προσδιορίστηκαν μέσω των καμπυλικών στοιχείων. Οι καμπύλες του σχήματος φαίνεται να αντιστοιχούν σε παρόμοιες τιμές G για την ίδια τιμή παραμόρφωσης χωρίς να αντανakλούν την εικόνα του Σχήματος 7. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη μέγιστη τιμή αντοχής η αντίστοιχη τιμή αξονικής παραμόρφωσης είναι περίπου 0.1% (Σχήμα 2), συνεπώς οι καμπύλες του σχήματος αντιπροσωπεύουν τον κλάδο φόρτισης πριν την αστοχία. Συνεπώς, για μικρά ποσοστά προσμίξεων η δυστημής του υλικού στην περιοχή των μικρών παραμορφώσεων δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη φύση του υλικού πρόσμιξης αλλά για μεγαλύτερες παραμορφώσεις το μέγεθος των κόκκων του μαρμαρυγία αλλάζει δραστικά τη συμπεριφορά του μίγματος μεταβάλλοντάς την σε ασταθή.

Στο **Σχήμα 9** φαίνεται η επίδραση της ενεργού τάσης, η οποία δρα στο δοκίμιο, στο μετρούμενο μέτρο διάτμησης G_{max} . Οι μετρήσεις έγιναν με τα καμπυλικά στοιχεία σε δοκίμια που φορτίστηκαν σε διαδοχικά αυξανόμενη τάση στο συμπίεσόμετρο. Σε κάθε ενδιάμεση τάση μετά από χρόνο αναμονής $\frac{1}{2}$ ώρας μετά το πέρας της στερεοποίησης έγινε η μέτρηση του G_{max} με προσδιορισμό της ταχύτητας διατμητικού κύματος ημιτονοειδούς μορφής συχνότητας 40kHz με περίοδο επαναφοράς 50Hz. Η άφιξη του κύματος στο άλλο άκρο του δοκιμίου αναγνωρίζεται ως το σημείο της πρώτης αλλαγής στην κατεύθυνση του κύματος. Η δυστημής του υλικού αυξάνεται με την ενεργό τάση σ_v και συνεπώς και με τη μέση ενεργό τάση ρ . Επίσης, όσο αυξάνεται το ποσοστό του μαρμαρυγία τόσο μειώνεται το μέτρο G_{max} για όλο το εύρος των τάσεων που επιβλήθηκαν στα δοκίμια.

Στο **Σχήμα 10(α)** οι καμπύλες $G_{max}-\sigma_v$ έχουν σχεδιασθεί σε λογαριθμικούς άξονες. Όπως φαίνεται στο σχήμα το μετρούμενο G_{max} ακολουθεί τη σχέση $G_{max}=A^*(\rho)^n$, όπου ρ είναι η μέση ενεργός τάση, και A και n σταθερές εξαρτώμενες από το κάθε υλικό. Στο Σχήμα 10(β) το μέτρο διάτμησης έχει κανονικοποιηθεί ως προς το δείκτη πόρων. Η συνάρτηση του δείκτη πόρων η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι: $F(e)=(2.17-e)^2/(1+e)$, (Hardin & Richart, 1963). Πολλοί ερευνητές έχουν δείξει ότι για άμμους οι διαφορετικές καμπύλες $G_{max}-\sigma_v$ για χαλαρά και πυκνά δοκίμια ενοποιούνται μετά την κανονικοποίηση. Στο Σχήμα 10(β) φαίνεται ότι οι καμπύλες για ποσοστά μαρμαρυγία $\leq 5\%$ σχεδόν συμπίπτουν μετά την κανονικοποίηση. Για μεγαλύτερα όμως ποσοστά φαίνεται ότι οι διαφορές στο μετρούμενο G_{max} δεν οφείλονται στον διαφορετικό δείκτη πόρων αλλά στη διαφορετική δομή των μιγμάτων τα οποία παύουν να συμπεριφέρονται ως άμμοι.

Στα σχήματα που ακολουθούν εξετάζεται η συμπεριφορά μιγμάτων με ανάλογα ποσοστά κατά βάρος λεπτόκοκκου υλικού όταν αλλάζει η «φιλοξενούσα» άμμος. Στο **Σχήμα 11** φαίνεται η επίδραση διαφορετικών ποσοστών μαρμαρυγία στη συμπεριφορά της άμμου HRS. Η άμμος αυτή σε αντίθεση με την προηγούμενη δεν εμφανίζει πτώση στην αντοχή της ακόμη

και στη χαλαρή της μορφή. Αντίθετα η προσθήκη ελάχιστου ποσοστού μαρμαρυγία της τάξης του 1% της προσδίδει ασταθή συμπεριφορά και εμφανίζεται πτώση της αντοχής της κατά 30%.

Οι αντίστοιχες καμπύλες $E_u - \varepsilon_a$ φαίνονται στο **Σχήμα 12** όπου αν και η άμμος εμφανίζει μεγαλύτερη δυστημσία οι διαφορές μεταξύ των μιγμάτων φαίνεται να είναι μικρές. Ας σημειωθεί ότι το ποσοστό μαρμαρυγία δεν ξεπέρασε το 5%, εφόσον μικρότερα ποσοστά αλλάζουν τη συμπεριφορά της καθαρής άμμου, και ότι οι διαφορές στη μετρούμενη δυστημσία παρέμειναν μικρές για μικρά ποσοστά μαρμαρυγία και για την λεπτόκοκκη άμμο JM.

Στην περιοχή τριαξονικού εφελκυσμού τα δοκίμια με μικρά ποσοστά μαρμαρυγία δείχνουν μείωση της αντοχής τους έως και ρευστοποίηση. Οι καμπύλες $E_u - \varepsilon_a$ (**Σχήμα 13**) για τις δοκιμές τριαξονικού εφελκυσμού δείχνουν ότι όταν το ποσοστό του μαρμαρυγία αυξάνεται στο 10% το τέμνον μέτρο ελαστικότητας E_u μειώνεται κατά 65% για παραμόρφωση ίση με 0.01% σε σχέση με το αντίστοιχο μέτρο για την καθαρή άμμο. Επίσης, όπως παρατηρήθηκε και στην προηγούμενη άμμο η εδαφική δυστημσία κατά την αποφόρτιση είναι περίπου διπλάσια εκείνης κατά τη φόρτιση.

Στο **Σχήμα 14** σχεδιάστηκαν οι καμπύλες $G-\gamma$ μαζί με τις τιμές G_{max} που προσδιορίστηκαν από τις μετρήσεις με καμπυλικά στοιχεία στο συμπίεσόμετρο για αντίστοιχα μίγματα. Το μέτρο G_{max} κυμαίνεται από 95-120 MPa.

Στο **Σχήμα 15** παρατηρείται η εκ διαμέτρου αντίθετη συμπεριφορά της άμμου HRS κατά τη φόρτιση σε τριαξονική θλίψη όταν η πρόσμιξη γίνεται με μαρμαρυγία (ασταθής συμπεριφορά) και με ιλύ (HPF4) (διασταλτική συμπεριφορά). Η μηχανική συμπεριφορά των μιγμάτων περιγράφεται λεπτομερέστερα από τους Georgiannou & Hight, 2003.

Στα **Σχήματα 16 & 17** φαίνονται οι καμπύλες $E_u - \varepsilon_a$ για δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού αντίστοιχα, ενώ στο **Σχήμα 18** φαίνονται οι καμπύλες $G-\gamma$ για τα ανωτέρω πειράματα. Στις μικρές παραμορφώσεις ($\varepsilon_a \sim 0.002\%$) ο λόγος της δυστημσίας σε τριαξονική θλίψη προς τη δυστημσία σε τριαξονικό εφελκυσμό κυμαίνεται από 0.63 για την καθαρή άμμο σε 0.8 για την πρόσμιξη με ιλύ με την τελευταία να δείχνει την ελάχιστη ανισοτροπία ως προς τη δυστημσία.

Στο **Σχήμα 19** φαίνεται η μεταβολή του μέτρου G_{max} με την κατακόρυφη τάση σ_v' όπου παρατηρείται μείωση του G_{max} με την αύξηση του ποσοστού μαρμαρυγία ανεξαρτήτως της τιμής της τάσεως τουλάχιστον για το εύρος τάσεων που εξετάστηκε π.χ. για $\sigma_v' = 200 \text{ kPa}$ το G_{max} μειώνεται κατά 33% με την προσθήκη 10% μαρμαρυγία. Όπως προαναφέρθηκε στο Σχήμα 10(β) η κανονικοποίηση ως προς τον δείκτη πόρων δεν ήταν επιτυχής για ποσοστά μαρμαρυγία $>5\%$ σε αντίθεση με την κανονικοποίηση σε δοκίμια καθαρής άμμου με διαφορετικό αρχικό δείκτη πόρων όπως φαίνεται στο **Σχήμα 20**. Στον **Πίνακα 3** δίνονται οι τιμές του G_{max} για διάφορα ποσοστά προσμίξεων από καολινίτη και μαρμαρυγία.

Στο **Σχήμα 21** γίνεται σύγκριση του G_{max} για τα διαφορετικά μίγματα (διαφορετική άμμος και προσμίξεις) για το ίδιο ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού πρόσμιξης.

5.2 Μηχανική συμπεριφορά Μάργας του Ισθμού της Κορίνθου

Στην κατηγορία των Μαργαϊκών αποθέσεων, επελέγη ως τυπικό υλικό μάργα από τις εδαφικές αποθέσεις του Ισθμού της Κορίνθου. Το υλικό αυτό έχει μελετηθεί στο παρελθόν κυρίως ως προς τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφωσιμότητας (Anagnostopoulos et al. 1991, Burland et al. 1996). Όμως, η έλλειψη της ανάλογης τεχνολογικής υποδομής είναι εμφανής στις μετρήσεις της εδαφικής δυσστησίας.

Στην παρούσα μελέτη, για να ελαχιστοποιηθεί η διατάραξη του δείγματος που ενέχουν οι συνήθεις μέθοδοι δειγματοληψίας, τα δοκίμια της μάργας ήταν πρίσματα διαστάσεων 40cm*40cm*50cm τα οποία αποκόπηκαν προσεκτικά, μετά από την απομάκρυνση των επιφανειακών στρωμάτων, από βάθος 70μ. Στη συνέχεια καλύφθηκαν με παραφίνη και διατηρήθηκαν στο εργαστήριο σε υγραντήρα μέχρι να χρησιμοποιηθούν για την ετοιμασία των δοκιμίων που μελετήθηκαν. Η μόρφωση των δοκιμίων έγινε με σταδιακή αφαίρεση με κοπτική λεπίδα χειρός του υλικού που περιστρέφεται μέσα σε οδηγό ώστε να αποκτηθεί η κυλινδρική μορφή του δοκιμίου.

Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνται στην τριαξονική συσκευή. Στα δοκίμια προσαρτώνται:

- Μετρητής πίεσης του νερού των πόρων επί του δοκιμίου (στο μέσον του).
- Μετρητές αξονικής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (LVDTs_RDP)

Η αρχική ενεργός τάση των δοκιμίων προσδιορίστηκε σε $p_k'=60-80\text{kPa}$ και η αρχική τιμή της παραμέτρου Skempton $B=0.9-0.95$. Με την επιβολή πίεσης στο νερό των πόρων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε διάστημα 24^{ωρ} ωρών η μετρούμενη τιμή $B=0.95-0.98$ και κατά τη φάση αυτή η μέγιστη μεταβολή του όγκου του δοκιμίου ήταν $\Delta V \sim 0.3\text{cc}$ και του ύψους του $\Delta H=0.05\text{mm}$. Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ανισότροπη στερεοποίηση με $K_0=0.46$. Η ακριβής διαδρομή τάσεων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης φαίνεται στο **Σχήμα 22** ενώ στο **Σχήμα 23** έχει σχεδιασθεί η μεταβολή του δείκτη πόρων ως προς τη μέση ενεργό τάση κατά τη διάρκεια της ανισότροπης στερεοποίησης. Ο αρχικός δείκτης πόρων είναι $e=0.68-0.70$. Μετά την πάροδο 24ώρου ή εφόσον $\Delta e_v \leq 0.002\%$ ανά ημέρα, τα δοκίμια φορτίζονται σε διάτμηση υπό συνθήκες $p'=ct$ για του λόγους που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3, με ρυθμό επιβαλλόμενης παραμόρφωσης 4% ανά ημέρα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ταύτιση των μετρήσεων της πίεσης του νερού των πόρων στο μέσον και τα άκρα των δοκιμίων. Στράγγιση γίνεται και από τα δύο άκρα των δοκιμίων.

Στο **Σχήμα 24** φαίνονται οι διαδρομές τάσεων και οι σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων των δοκιμών. Περισσότερες λεπτομέρειες ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων και τα χαρακτηριστικά αντοχής τους σε σχέση με παλαιότερες μελέτες της μάργας του Ισθμού περιγράφονται από τους Kanvadas et al., 2002.

Όσον αφορά τις καμπύλες G-γ στο **Σχήμα 25** δίδονται οι καμπύλες για ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια σε μέση ενεργό τάση $p' \sim 100 \text{ kPa}$. Για $\varepsilon_s = 0.01\%$ η τιμή του μέτρου διάτμησης είναι $G \sim 50 \text{ MPa}$ ο δε δείκτης μη γραμμικότητας $\lambda \sim 0.7$ για $G_{(0.001\%)} \sim 70 \text{ MPa}$.

Στο **Σχήμα 26** έχουν σχεδιασθεί οι καμπύλες G-γ για τα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια μαζί με μία από τις προηγούμενες καμπύλες και παρατηρούνται τα εξής:

- το μέτρο διάτμησης εξαρτάται από τη μέση ενεργό τάση,
- ο βαθμός επαναληπτικότητας των μετρήσεων από τις καμπύλες για $p' \sim 400 \text{ kPa}$ οι οποίες αναφέρονται σε δοκίμια από διαφορετικά δείγματα,
- ο δείκτης $\lambda \sim 0.8-0.7$ για $p' = 570-240 \text{ kPa}$, θεωρώντας:

$G_{(0.001\%)} \sim 220 \text{ MPa}$	για	$p' \sim 400 \text{ kPa}$
$G_{(0.001\%)} \sim 270 \text{ MPa}$	για	$p' \sim 600 \text{ kPa}$
$G_{(0.001\%)} \sim 170 \text{ MPa}$	για	$p' \sim 200 \text{ kPa}$

Στο **Σχήμα 27** οι καμπύλες G-γ έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την ενεργό τάση p' . Για εύρος τάσεων 400-600 kPa φαίνεται να ενοποιούνται οι καμπύλες με $G_{(0.01\%)} / p' = 370$ ενώ για εύρος 100-200 kPa, $G_{(0.01\%)} / p' = 460$.

Στο **Σχήμα 28** έχουν σχεδιασθεί οι καμπύλες G-γ για τις ίδιες δοκιμές και τις ίδιες ενεργές τάσεις για δύο κατηγορίες υλικών από τον Ισθμό με ποσοστά αρχικής υγρασίας $w = 25\%$ και 21% αντίστοιχα. Τα δοκίμια με το μικρότερο ποσοστό υγρασίας προέρχονται από παλαιότερη μελέτη (Georgiannou & Burland, 2001), ήταν αρχικά ακόρεστα και ο κορεσμός τους έγινε στο εργαστήριο με $\Delta V \sim 10 \text{ cc}$. Το μέτρο διάτμησης αυτών των δοκιμών είναι 2-3 φορές υψηλότερο από εκείνο του υλικού με $w = 25\%$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και η δυσστησία τους είναι πολύ μεγαλύτερη, η περιβάλλουσα αστοχίας και για τα δύο υλικά παραμένει κοινή. Ανάλογα αποτελέσματα εμφανίζουν και οι επί τόπου δοκιμές σε μαργαϊκή άργιλο της Κορίνθου όπου για υλικό βάθους 12.5m με $w = 26.4\%$ οι μετρούμενες ταχύτητες V_s (**Πίνακας 4**, Αναστασιάδης, 2003) αντιστοιχούν σε $G = 180-200 \text{ MPa}$ σε σχέση με $G_{(0.0001\%)} \sim 170 \text{ MPa}$ των πειραματικών μετρήσεων για $\sigma_v = 200 \text{ kPa}$, ενώ για υλικό βάθους 21.5m με $w = 15.9\%$ $G \sim 340-470 \text{ MPa}$.

5.3 Συμπεριφορά αργιλικών αποθέσεων

Στην κατηγορία των αργιλικών αποθέσεων επελέγησαν άργιλοι του Δυτικού τομέα στον άξονα της Εγνατίας Οδού στο ύψος της Παραμυθιάς Ηπείρου. Η δειγματοληψία έγινε μετά από εκσκαφή πρανών από βάθη που ποικίλουν από

5m έως 10m με την απομάκρυνση πρισμάτων διαστάσεων 40cm*40cm*50cm. Σε αντίθεση με τη μάργα της Κορίνθου, τα φυσικά χαρακτηριστικά της οποίας έχουν μελετηθεί στο παρελθόν, για τις στιφρές αργίλους της Εγνατίας Οδού προσδιορίστηκαν στα πλαίσια αυτής της έρευνας τα φυσικά χαρακτηριστικά τους μαζί με προκαταρκτικές σειρές πειραμάτων στο συμπίεσόμετρο και στη συσκευή απευθείας διάτμησης στη φυσική και την αναζυμωμένη μορφή τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοψίζονται στον **Πίνακα 5**.

Στον **Πίνακα 5** έχει συμπεριληφθεί και φυσικό υλικό από το Μοσχάτο, Αττικής, διότι αν και όσον αφορά τη μηχανική συμπεριφορά τους τα υλικά είναι διαφορετικά έχουν περίπου το ίδιο ποσοστό αργίλου ~20% και ίδιο ποσοστό ιλύ ~60% και 70% αντίστοιχα. Το υπόλοιπο ποσοστό ανήκει στην περιοχή της άμμου. Όμως οι μεν άργιλοι της Εγνατίας είναι προστερεοποιημένες η δε αργιλοϊλύς του Μοσχάτου είναι κανονικώς στερεοποιημένη όπως φαίνεται από τις καμπύλες συμπίεσομέτρου του **Σχήματος 29**. Η δειγματοληψία του υλικού του Μοσχάτου έγινε από βάθος 5m μετά από εκσκαφή, με λήψη κύβων ακμής 50cm από τα δημιουργηθέντα πρανά με τη διαδικασία που περιγράφηκε για τα προηγούμενα φυσικά υλικά.

Για τον προσδιορισμό των καμπυλών G-γ οι άργιλοι της Εγνατίας στερεοποιήθηκαν ισότροπα ενώ το Μοσχάτο ανισότροπα ($K_0=0.55$) και υποβλήθηκαν σε διάτμηση υπό σταθερή μέση ενεργό τάση, σύμφωνα με τα προηγούμενα.

Στο **Σχήμα 30** φαίνονται οι καμπύλες G-γ για το Μοσχάτο. Η αντίστοιχη καμπύλη για την άργιλο της Εγνατίας (Δ3-1) φαίνεται στο **Σχήμα 31** όπου ταυτόχρονα έχουν σχεδιασθεί οι αντίστοιχες καμπύλες για τα δοκίμια της Μάργας και του Μοσχάτου για παρόμοια τιμή μέσης ενεργού τάσης. Το υλικό του Μοσχάτου αν και ευρίσκεται υπό μεγαλύτερη ενεργό τάση p' εμφανίζει πολύ μικρότερη εδαφική δυσστησία σε σχέση με τα λοιπά υλικά.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επίδραση του λεπτόκοκκου υλικού στη συμπεριφορά της 'φιλοξενούσας' άμμου φαίνεται να εξαρτάται από τη σχετική διαβάθμιση της άμμου και του λεπτόκοκκου υλικού. Για τη λεπτόκοκκη άμμο (JM) μόνο όταν το μέγεθος των πλακιδίων του μαρμαρυγία είναι της τάξεως ιλύος η συμπεριφορά της άμμου γίνεται ασταθής (Σχήμα 7). Αντίθετα, στην κακώς διαβαθμισμένη άμμο (HRS) η παρουσία μαρμαρυγία ανεξαρτήτως μεγέθους πλακιδίων μετατρέπει τη συμπεριφορά της σε ασταθή (Σχήμα 15) με μείωση της αντοχής του μίγματος της άμμου με 1-2.5% μαρμαρυγία στο μισό της αντοχής της καθαρής άμμου. Η ανάμιξη όμως με 2.5% ιλύ φαίνεται να αυξάνει την αντοχή των άμμων. Επίσης, ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού >10% σταθεροποιούν την απόκριση της άμμου μειώνοντας την τάση συστολής και ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων τόσο σε συνθήκες φόρτισης τριαξονικής θλίψης όσο και εφελκυσμού (Σχήματα 2 & 11).

Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων είναι έντονα μη γραμμικές με αποτέλεσμα η δυσστησία τους να μειώνεται σημαντικά (περίπου κατά 10 φορές) στην περιοχή των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις πρακτικές εφαρμογές υπό στατικές ή δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Η απομείωση του μέτρου διάτμησης με την αύξηση της παραμόρφωσης στις καμπύλες $G-\gamma$ είναι μέγιστη για τα αμμώδη υλικά με μικρά ποσοστά λεπτόκοκκων προσμίξεων ($\leq 5\%$) με τον δείκτη $\lambda = G_{(0.01\%)} / G_{(0.001\%)} \sim 0.5$.

Με την αύξηση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού μειώνεται η εδαφική δυσστησία. Οι μεταβολές είναι σχετικά μικρές για μικρά ποσοστά προσμίξεων <2.5% και μεγιστοποιούνται με την αύξηση του ποσοστού π.χ. για μίγμα άμμου με 40% μαρμαρυγία οι τιμές G μειώνονται στο 1/4 -1/3 της αντίστοιχης τιμής των μιγμάτων με ποσοστά <2.5% (Σχήματα 4 & 5).

Αντίστοιχη είναι η επιρροή του ποσοστού πρόσμιξης και στο 'ελαστικό' μέτρο διάτμησης G_{max} το οποίο προσδιορίζεται μέσω καμπτικών στοιχείων.

Στην περίπτωση της κακώς διαβαθμισμένης άμμου (HRS) οι μεταβολές είναι μικρότερες, διότι τα ποσοστά των προσμίξεων είναι $\leq 5\%$, με εξαίρεση τη φόρτιση σε τριαξονικό εφελκυσμό όπου για ποσοστό μαρμαρυγία 10% η τιμή $E_{u(0.01\%)}$ εμφανίζει μείωση κατά 35% ως προς την καθαρή άμμο.

Για μικρό ποσοστό πρόσμιξης 2.5% η εδαφική δυσστησία δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά ανεξαρτήτως υλικού πρόσμιξης και για τις δύο άμμους.

Η συμπεριφορά των ανωτέρω υλικών είναι έντονα ανισότροπη με το μέτρο δυσστησίας (E_u ή G) να είναι διπλάσιο κατά την αποφόρτιση στη δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού από το αντίστοιχο μέτρο κατά τη φόρτιση σε τριαξονική θλίψη.

Η μεταβολή του μέτρου G_{max} με την κατακόρυφη ενεργό τάση είναι εκθετικής μορφής $G_{max} \propto A (p')^n$ όπου p' η μέση ενεργός τάση (Σχήματα 9 & 19).

Για όλο το εύρος των ενεργών τάσεων που εξετάστηκε το G_{max} μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού της λεπτόκοκκης πρόσμιξης μαρμαρυγία μεγέθους άμμου, μαρμαρυγία μεγέθους ιλύος, ιλύος και καολινίτη (Σχήμα 21).

Οι καμπύλες $G-\gamma$ για τη Μάργα του Ισθμού Κορίνθου εξαρτώνται από τη μέση ενεργό τάση (Σχήμα 26). Ο δείκτης απομείωσης του μέτρου διάτμησης με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης $\lambda=0.7-0.8$ και είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο δείκτη των αμμωδών υλικών. Η κανονικοποίηση των καμπυλών $G-\gamma$ ως προς τη μέση ενεργό τάση p' , οδηγεί σε σύμπτωση των καμπυλών για $p' > 400 \text{ kPa}$ και $p' < 200 \text{ kPa}$ με χαρακτηριστικές τιμές $G_{(0.01\%)} / p' = 370$ και 460 αντίστοιχα.

Συγκρινόμενη με μάργα παλαιότερης μελέτης ($w=21\%$) η μάργα της παρούσας μελέτης ($w=25\%$) εμφανίζει τιμές δυστμησίας περί το ήμισυ εκείνης των δοκιμών του χαμηλού ποσοστού υγρασίας (Σχήμα 28).

Η στιφρή προστερεοποιημένη άργιλος της Εγνατίας έχει χαρακτηριστικά δυστμησίας παρόμοια με τη μάργα (Σχήμα 31).

Τέλος, η αργιλοίλος του Μοσχάτου η οποία είναι κανονικώς φορτισμένο υλικό εμφανίζει πολύ μικρότερη δυστμησία συγκρινόμενη με τα υπόλοιπα φυσικά υλικά (Σχήμα 31).

7. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΑΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

Όσον αφορά την προβολή του ερευνητικού προγράμματος και της παρουσίας των αποτελεσμάτων, έχουν ήδη πραγματοποιηθεί οι εξής δημοσιεύσεις στη διεθνή βιβλιογραφία: (1) τα αποτελέσματα των μιγμάτων άμμου με μαρμαρυγία έχουν δημοσιευθεί (Georgiannou, 2001) στο βιβλίο που εξέδωσε η διεθνής επιτροπή της ISSMFE, TC-29¹, με θέμα «Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials», Balkema, σελ. 330, (2) αποτελέσματα από την παρούσα μελέτη της Μάργας παρουσιάζονται στη δημοσίευση Kanvadas et al., 2002, όπου περιγράφεται η συμπεριφορά της μάργας με βάση τις παλαιότερες και κυρίως την παρούσα εργασία όσον αφορά την εδαφική δυστησία, (3) τα αποτελέσματα της πρώτης κατηγορίας των αμμοδών υλικών δηλαδή συγκεντρωτικά όλα τα μίγματα άμμων και λεπτόκοκκων υλικών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης έχουν κατατεθεί προς δημοσίευση στο έγκριτο περιοδικό *Geotechnique* από τους Georgiannou & Hight, 2003.

Ο βαθμός επιτυχίας του προγράμματος ως προς τους αρχικούς στόχους θεωρείται σημαντικός ιδιαίτερα όσον αφορά την ανάπτυξη και λειτουργία των ηλεκτρονικών οργάνων τα οποία απαιτούνται για τον «πρότυπο» υπολογισμό των παραμορφώσεων και κατά συνέπεια των καμπυλών *G-γ*. Για το σκοπό αυτό απαιτήθηκε η συνεργασία με το *Imperial College, London* και η φυσική παρουσία της επιστημονικώς υπευθύνου του προγράμματος στο Λονδίνο. Όλα τα είδη μετρητών που είχαν αναφερθεί στην 'Μεθοδολογία' της αρχικής πρότασης προς τον ΟΑΣΠ αναπτύχθηκαν και οι μετρήσεις τους εμφανίζονται στην έκθεση αυτή, και η επιτυχία ως προς τους αρχικούς στόχους θεωρείται πλήρης.

Δυστυχώς, ο θάνατος του αείμνηστου Χ. Γιάνναρου, μέλους της ομάδας εργασίας του προγράμματος δεν επέτρεψε την ανάπτυξη της συσκευής συντονισμού εδαφικής στήλης του ΚΕΔΕ για σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

Η συνεργασία με το ερευνητικό πρόγραμμα «Μελέτη της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών της γεωμορφολογίας και της δυναμικής αλληλεπίδρασης Εδάφους-Θεμελίωσης-Ανωδομής στις ενόργανες καταγραφές του εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων» (υπεύθυνος Α. Αναστασιάδης) σύμφωνα με την πρόταση της επιτροπής παρακολούθησης, εκτός από τη σύγκριση με επί τόπου δυναμικές μετρήσεις (υποκεφάλαιο 4.2) συνίσταται και σε εργαστηριακές μετρήσεις σε δείγματα από τη Ζάκυνθο και το ΚΕΔΕ Πειραιώς για τα οποία υπάρχουν επί τόπου μετρήσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5 (Αναστασιάδης, 2003). Δυστυχώς, στις περισσότερες περιπτώσεις η δειγματοληψία «φραγμού» έχει διαταράξει τα δείγματα και οι εργαστηριακές μετρήσεις δεν είναι αξιόπιστες. Μετρήσεις θα γίνουν στο

¹ Το αντικείμενο της επιτροπής TC-29 είναι η εργαστηριακή διερεύνηση της συμπεριφοράς εδαφικών υλικών.

αδιατάρακτο δείγμα της Ζακύνθου και πιθανώς σε νέο δείγμα από το ΚΕΔΕ και τα αποτελέσματα θα ανακοινωθούν από κοινού στον ΟΑΣΠ, στην αρχή του νέου ακαδημαϊκού έτους (Οκτώβριος 2003) οπότε θα είναι σε πλήρη λειτουργία το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ μετά την πρόσφατη μεταφορά του στα νέα κτήρια της Σχολής στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μετρήσεων έχει διευρύνει τα όριά τους σε εξαιρετικό βαθμό σε σχέση με την περασμένη δεκαετία. Η διάδοση της τεχνολογίας αφετέρου οδηγεί σε μία πληθώρα αποτελεσμάτων τα οποία εξαρτώνται όχι μόνο από τους μετρητές αλλά και από την κατάσταση του δείγματος και την πειραματική διαδικασία στην οποία υποβάλλεται κατά συνέπεια γίνεται επιτακτική η ανάγκη για τον έλεγχο της αξιοπιστίας και της αντιπροσωπευτικότητας των πειραμάτων. Με βάση τα ανωτέρω ο τρόπος αξιοποίησης των αποτελεσμάτων του παρόντος προγράμματος συνίσταται στη χρήση των καμπυλών $G-\gamma$, για τα εδάφη που εξετάστηκαν, σε μικροζωνικές μελέτες ‘πιλότους’ που θα αποτελέσουν τη βάση για την εκτέλεση αξιόπιστων τέτοιων μελετών σε ευρεία κλίμακα. Οι καμπύλες $G-\gamma$ θα πρέπει να συνδυάζονται με τις μετρήσεις του ‘ελαστικού’ μέτρου διάτμησης G_{max} από επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές με σκοπό να ορίζεται μία χαρακτηριστική καμπύλη «εφαρμογής» για χρήση στις μελέτες, η οποία καλύπτει την περιοχή των ελαστικών αλλά και των πλαστικών παραμορφώσεων οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων. Βεβαίως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η απομείωση του μέτρου διάτμησης των εδαφικών υλικών εξαρτάται από τη μορφή φόρτισης π.χ. διάτμηση (διαδρομή φόρτισης), στρεπτική διάτμηση, συνεπώς θα πρέπει να γίνεται σύγκριση των διαφορετικών δοκιμών ή να επιλέγεται η δοκιμή που προσομοιώνει το φυσικό πρόβλημα.

Οι πειραματικές καμπύλες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επίδρασης του εδάφους στην ένταση του σεισμικού κραδασμού καθώς και στις αναλυτικές μεθόδους αποτίμησης παραμορφώσεων των αντισεισμικών κανονισμών ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους ιδιαίτερα μετά από διεύρυνση της βάσης των πειραματικών δεδομένων.

Τέλος, η χρήση απομειωμένου μέτρου διάτμησης σε σχέση με την παραμόρφωση έχει άμεση εφαρμογή στον υπολογισμό της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναστασιάδης, Α. (2003). Προσωπική επικοινωνία.
- Γκαζέτας, Γ. (2003). Προσωπική επικοινωνία.
- Ackerley, S.K., Hellings, J.E. & Jardine, R.J. (1987). Discussion on A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens by C.R.I. Clayton & S.A. Khattrush, *Geotechnique* **37**, 413-417.
- Ackerley, S.K. (2001). Personal communication.
- Alarcon-Guzman, A., Chameau, J. L., Leonards, G. A. and Frost, J. D. (1989). Shear modulus and cyclic undrained behaviour of sands. *Soils and Foundations*, **29**, 105-119.
- Anagnostopoulos, A. G., Kalteziotis, N., Tsiambaos, G. K., and Kavvadas, M. (1991). Geotechnical properties of the Corinth canal marls. *Jour. Geotech. Geol. Engng* **9**, 1-26.
- Atkinson, J.H. & Sallfors, G. (1991). Experimental determination of soil properties. *Proc. 10th ECSMFE*, **3**, 915-956.
- Bolton, M. D. & Wilson, J.M.R. (1989). An experimental and theoretical comparison between static and dynamic torsional shear tests. *Geotechnique*, **39**, 585-599.
- Bishop, A.W. & Wesley, L. D. (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique* **25**, 657-670.
- Burland, J.B. & Symes, M. (1982). A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, **32**, No. 1, 62-65.
- Burland, J.B. (1989). The Ninth Bjerrum Mem. Lecture: Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains. *Can. Geot. J.* **26**, 499-516.
- Burland, J.B., Rampello, S., Georgiannou, V.N. and Calabresi, G. (1996). A laboratory study of the strength of four stiff clays. *Geotechnique*, **46**, No. 3, 491-514.
- Cavallaro, A., Fioravante, V., Lanzo, D., Lo Presti, D.C.F., Rampello, S., d'Onofrio, A., Santucci de Magistris & Silvestri, F. (2001). Report on the current situation of laboratory stress-strain testing of geomaterials in Italy and its use in practice. *Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials*, Eds. Tatsuoka F., Shibuya S. & Kuwano R., Balkema, pp. 330.
- Chameau, J. L. & Sutterer, K. (1994). Influence of fines in liquefaction potential and steady state considerations. *Proc. XIII ICSMFE*, New Delhi, India, **5**, 183-184.
- Davis, E. H. & Poulos, H. G. (1968). The use of elastic theory for settlement predictions under three-dimensional conditions. *Geotechnique* **18**, 67-91.
- Dyvik, R. & Madhus, C. (1985). Laboratory measurements of G_{max} using bender elements. *Proc. ASCE Annual convention: Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, Detroit, Michigan.
- Georgiannou, V.N., Rampello, S. and Silvestri, F. (1991). Static and Dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated clays. *Proc. 10th ECSMFE*, **1**, 91-96.
- Georgiannou, V. N. & Burland, J. B. (2001). A laboratory study of post-rupture strength. *Geotechnique* **51**, 665-675.
- Georgiannou, V.N. (2001). Micaceous sands: stress-strain behaviour and influence of initial fabric. *Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of*

- Geomaterials*, Eds. Tatsuoka F., Shibuya S. & Kuwano R., Balkema, pp. 330.
- Georgiannou, V.N. & Hight, D.W. (2003). The influence of fines type and content on the mechanical behaviour of sand. Submitted to *Geotechnique*.
- Goodman, E.R. (1993). Engineering Geology. Rock Engineering in Construction. Ed. John Wiley and sons Inc.
- Graham, J. & Houlsby, G.T. (1983). Anisotropic elasticity of a natural clay. *Geotechnique* **33**, 165-180.
- Hardin, B.O. & Richart, F. E. Jr. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Jour. ASCE* **89**, 33-65.
- Hardin, B.O. & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in sands: measurement and parameter effects. *Jour. SMF, ASCE*, 98, 603-624.
- Hight, D.W., Bennell, J.D., Chana, B., Davis, P.D., Jardine, J.R. and Porovic, E. (1997). Wave velocity and stiffness measurements of the Crag and Lower London Tertiaries at Sizewell. *Geotechnique* **47**, 451-474.
- Isenhower, W. M. & Stokoe, K. H. (1981). Strain-rate dependent shear modulus of San Francisco Bay mud. *Proc. Int. Conf. On Recent Advances in Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, **2**, 597-602.
- Jovicic, V. & Coop, M. R. (1997). Stiffness of coarse-grained soils at small strains. *Geotechnique* **47**, 545-561.
- Kavvasdas, M., Anagnostopoulos, A., Marinos, P., Georgiannou, V. N. and Bardanis, M. (2002). Characterisation and engineering properties of the Corinth Marl. *Symposium on soil Characterisation and engineering properties of natural soils*, **2**, 1435-1461.
- Sagazeta, C. (1992). Soil properties and their measurement. *Proc. Wroth Memorial Symposium: Predictive soil mechanics*, Oxford, Eds. Houlsby, G.T. & Schofield, A.N.
- Shibuya, S., Tatsuoka, F., Teachavorasinkun, S., Kong, X. J., Abe, F., Kim, Y-S. and Park, C-S. (1992). Elastic Deformation Properties of Geomaterials. *Soils and Foundations*, **32**, 26-46.
- Shibuya, S., Hwang, S.C. and Mitachi, T. (1997). Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement. *Geotechnique* **47**, 593-601.
- Simpson, B. (1992). Development and application of a new soil model for prediction of ground movements. . *Proc. Wroth Memorial Symposium: Predictive soil mechanics*, Oxford, Eds. Houlsby, G.T. & Schofield, A.N., 628-643.
- Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991). Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests. *Proc. 9th Asian Regional Conference on SMFE*, **2**, 101-170.
- Vaid, Y.P. (1994). Liquefaction of silty soils. Ground failures under seismic conditions. Geotechnical Special Publication N^o 44.
- Yamashita S., Kohata Y., Kawaguchi T. & Shibuya S. (2001). International round-robin test organized by TC-29. *Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials*, Eds. Tatsuoka F., Shibuya S. & Kuwano R., Balkema, pp. 330.

Τύπος δοκιμής		Τριαξονική δοκιμή		
Συσκευή	Τύπος	Bishop & Wesley (1975)		
	Κατασκευή κελιού	Εξωτερικές ράβδοι		
	Σύστημα φόρτισης	1) έλεγχος υδραυλικών πιέσεων μέσω μονάδων ελέγχου (Watson –Smith stepper motors) 2) έλεγχος παραμορφώσεων μέσω μονάδας CRSP_IC		
Δοκίμιο	Διάμετρος	38mm		
	Ύψος	76mm		
	Ακρίβεια μετρήσεων	0.1mm, 0.1gr		
	Παρασκευή δοκιμίων	Καθίζηση μέσω νερού ή αέρα (αμμώδη) Στερεοποίηση ανζυμωμένου υλικού για $w=1.5 \cdot w_L$ (αργιλικά)		
	Στερεοποίηση φυσικών δοκιμίων	1) ισότροπη 2) ανισότροπη, K_0		
	Χρόνος αναμονής πριν τη φόρτιση	$\epsilon_v<0.002\%$ ανά ημέρα		
Σύστημα ελέγχου	A/D (MSL), I/O πίνακας 12 μονάδων ελέγχου, PC			
Έλεγχος και ακρίβεια μετρήσεων	Έλεγχος ρυθμού παραμορφώσεων	$4 \cdot 10^{-5} - 1\text{mm/min}$		
	Διακριτότητα	A/D = 16bit,0.6μV (μετρήσεις<100mV) Μονάδες ελέγχου πίεσης: 0.07kPa		
Μέτρηση	Τύπος μετρητή	Θέση μετρητή	Διακριτότητα	Ακρίβεια συσκευής
Αξονικό φορτίο	Μετρητής φορτίου	εσωτερικός	0.1N	±0.2N
Πίεση νερού πόρων	Druck PDCR810 PDCR81	εξωτερικός εσωτερικός	0.03kPa 0.02kPa	±0.3kPa ±0.2kPa
Πίεση κυψέλης	Druck PDCR810	εξωτερικός	0.03kPa	±0.3kPa
Μεταβολή όγκου	IC μετρητής όγκου	εξωτερικός	0.0033cm^3	$\pm 0.005 \text{ cm}^3$
Αξονική παραμόρφωση	1*APEX μετρητής μετακίνησης (0-25mm) 2* miniature inclinometers 2* LVDTs_RDP	εξωτερικός	0.001mm	±0.001mm
		επί του δοκιμίου	1μm	±5 μm
		επί του δοκιμίου	0.1 μm	±0.5 μm

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών.

Test No.	Test type	Fine content (%)	Void ratio e
SM0	C*	0	0.792
SM1	C	1	0.829
MSM1 ¹	C	1	0.802
SM25	C	2.5	0.895
MSM25 ¹	C	2.5	0.859
SM40	C	40	1.714
SM0	E*	0	0.797
SM1e	E	1	0.828
SM25e	E	2.5	0.895
SM10e	E	10	1.074
SM20e	E	20	1.341
SM40e	E	40	1.772
SMSX	C	2.5	0.760
SMHPF4	C	2.5	0.798
HRS	C	0	0.772
HRS_m1	C	1	0.769
HRS_m25	C	2.5	0.804
HRS_m5	C	5	0.891
HRS_sxm	C	2.5	0.746
HRS_HPF4	C	2.5	0.761
HRS	E	0	0.761
HRS_m1	E	1	0.770
HRS_m5	E	5	0.849
HHRS_m10	E	10	0.859
SM0	BE*	0	0.740
SM1	BE	1	0.770
SM25	BE	2.5	0.840
SM5	BE	5	0.88
SM10	BE	10	1.100
SM20	BE	20	1.520
SM40	BE	40	2.190
HRS	BE	0	0.710
HRS_m1	BE	1	0.730
HRS_m25	BE	2.5	0.790
HRS_m5	BE	5	0.820
HRS_m10	BE	10	1.010
HRS_sxm	BE	2.5	0.740

C* = τριαξονική θλίψη, E*=τριαξονικός εφελκυσμός, BE*=καμπτικά στοιχεία
¹ επανάληψη πειραμάτων για ποσοστά 1 & 2.5%

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά δοκιμών αμμοδών υλικών.

Άμμος	Λεπτόκοκκο υλικό	0%	1%	2.5%	5%	10%	20%	40%
HRS	Καολινίτης	119.2	127.5	118.3	108.0	103.6	94.9	
	Μαρμαρυγίας (MF60)	119.2	114.5	110.5	93.98	74.22		
	Μαρμαρυγίας (SX)			92.4				
JS	Μαρμαρυγίας (MF60)	102.2	95.3	90.8	79.1	66.5	46.14	17.6
	Μαρμαρυγίας (SX)			71.8				

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές τιμές G_{max} για ενεργό τάση 100kPa.

Θέση	Βάθος	Σ.Υ.Ο.	Δειγ/ψία	Περιγραφή	LL	PL	W%	Vs(m/s) CH-DH
Κόρινθος	12.3-12.5	-3.2	Φ	Μαργαϊκή άργιλος	35.8	23	26.4	335-350
Κόρινθος	21.2-21.5	-3.2	Φ	Μαργαϊκή άργιλος	35.4	21	15.9	460-540
Ζάκυνθος	11.6-12.2	-5.7	A	Ιλυώδης άργιλος	37.2	18	23	150-180
Ζάκυνθος	24.2-24.6	-5.7	Φ	Αργιλική μάργα	35.4	19	18.1	360-380
ΚΕΔΕ-Πειραιώς	18.3-18.6	-3.6	Φ	Μάργα έως μαργόλιθος	47.4	23	14	630-690

Πίνακας 4: Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφών και προσδιορισμός ταχύτητας Vs με δοκιμές Cross-Hole ή/και Down-Hole στις θέσεις των γεωτρήσεων (Αναστασιάδης, 2003).

Εδαφικά υλικά	$W_0\%$	G_s	LL	PL
Δ3-4, Δ3-3 στιφρή φαιοπράσινη άργιλος	18.5	2.66	53.0	30.0
Δ3-5 στιφρή φαιοπράσινη άργιλος	21.9	2.66	53.0	30.0
Δ3-1, Δ3-2 μπλέ στιφρή άργιλος	18.1	2.66	40.5	22.5
Δ4-1, Δ4-2 μαλακή κόκκινη άργιλος	27.2	2.62	49.0	26.0
Αργιλοίλυσ Μοσχάτου	16-18	2.70	27.0	17.0
Μάργα Ισθμού Κορίνθου	21.1	2.73	27.5	21.7
	25-26	2.73	30.5	25.0

Πίνακας 5: Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών.