

Υλικά Κατασκευής Χωμάτων Φραγμάτων και Προσομοίωση της Ελαστοπλαστικής Συμπεριφοράς τους – Εφαρμογή στο Φράγμα Σφηκιάς

Κ. Λουπασάκης

Ph.D., M.Sc. Γεωλόγος – Πολιτικός Μηχανικός, Διεύθυνση Τεχνικής Γεωλογίας, Ι.Γ.Μ.Ε.

Β. Χρηστάρας & Γ. Δημόπουλος

Καθηγητές, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Θ. Χατζηγώγος

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Λέξεις κλειδιά: λιθόρριπτο φράγμα, υπολογιστική γεωτεχνική μηχανική, πεπερασμένα στοιχεία, ελαστοπλαστικοί καταστατικοί νόμοι.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η μελέτη της εντατικής και κινηματικής κατάστασης ενός φράγματος, με τη χρήση των μεθόδων της Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής, απαιτεί τη γνώση των καταστατικών νόμων που αναπαράγουν την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών. Η επάρκεια των εργαστηριακών δεδομένων και η μεγάλη ποικιλία στην κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του φράγματος της Σφηκιάς κατέστησαν εφικτή την πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης, που αποσκοπεί στην αξιολόγηση του ελαστικού – τέλεια πλαστικού μοντέλου Mohr-Coulomb (M-C) και του ισότροπα κρατυνόμενου μοντέλου τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας M-C για τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς τυπικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χωμάτων φραγμάτων. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μπορούν να επεκταθούν και στη μελέτη της απόκρισης άλλων φραγμάτων και γενικότερα άλλων αντίστοιχων γεωκατασκευών.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υλικά κατασκευής των χωμάτων και των λιθόρριπτων φραγμάτων χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη ποικιλία στην κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Από τις αμμώδεις αργίλους του πυρήνα μεταβαίνουν σταδιακά στις λιθορριπές του εξωτερικού κελύφους δημιουργώντας αλληπάλληλες ζώνες με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η μελέτη της εντατικής και κινηματικής κατάστασης ενός φράγματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αλλά και κατά την κατασκευή του σώματος και πλήρωση της λεκάνης κατάκλυσης είναι απαραίτητη η χρήση των μεθόδων της Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής. Η πολυσταδιακή κατασκευή του αναχώματος, η σταδιακά αυξανόμενη μονόπλευρη φόρτισή του από τον υδάτινο όγκο του ταμιευτήρα, η μη γραμμική απόκριση των υλικών και η σύζευξη των μηχανικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών των σωμάτων στήριξης και του πυρήνα είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να μελετηθούν με τις κλασικές αναλυτικές μεθόδους.

Οι μέθοδοι της Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής υπερέχουν των αναλυτικών μεθόδων, έχοντας όμως ταυτόχρονα πολύ μεγαλύτερες απαιτήσεις σε δεδομένα μηχανικών παραμέτρων των υπό προσομοίωση υλικών. Η λεπτομερής γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των επιμέρους υλικών είναι καθοριστικής σημασίας καθώς επιτρέπει την επιλογή των βέλτιστων καταστατικών νόμων και των μηχανικών παραμέτρων που αναπαράγουν τις πραγματικές σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεών τους. Οι απλοποιήσεις και οι παραδοχές που γίνονται σε περιπτώσεις έλλειψης των απαραίτητων μηχανικών παραμέτρων πολλές φορές οδηγούν στη λανθασμένη επιλογή ή και εφαρμογή των βέλτιστων καταστατικών νόμων και κατά συνέπεια στη λήψη αποτελεσμάτων που

αποκλίνουν κατά πολύ από την πραγματικότητα, οδηγώντας σε λανθασμένα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα των υπολογιστικών μεθόδων.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζεται κατά την προσομοίωση των χωμάτινων φραγμάτων είναι η ελλιπής γνώση των μηχανικών παραμέτρων των αδρόκοκκων υλικών που δομούν τις ζώνες του σώματος στήριξης. Τα υλικά αυτά είναι αδύνατο να μελετηθούν με τη χρήση των συμβατικών δοκιμών εδαφομηχανικής λόγω του μεγάλου μεγέθους των κόκκων - τεμαχίων από τα οποία αποτελούνται. Το συγκεκριμένο πρόβλημα υπερκεράστηκε για τα υλικά των ζωνών του σώματος στήριξης του φράγματος της Σφηκιάς, που χρησιμοποιήθηκε για τη διενέργεια της παρούσας μελέτης, καθώς για αυτά διαθέτονταν δεδομένα από ειδικές εργαστηριακές δοκιμές σε υπερμεγέθη δείγματα.

Για τη διενέργεια της παρούσας μελέτης, εκτός από τις ειδικές εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τα υλικά του σώματος στήριξης, διατέθηκαν από τη ΔΕΗ δεδομένα που αφορούσαν τις τεχνικές λεπτομέρειες των τομών του σώματος, το δίκτυο των οργάνων που είναι εγκατεστημένα στο εσωτερικό του, τα πρωτογενή δεδομένα όλων των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα υλικά κατασκευής του και τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα όργανα από την έναρξη λειτουργίας τους.

Η πληθώρα και η ακρίβεια των προαναφερόμενων δεδομένων προσφέρθηκε για τη λεπτομερή διερεύνηση των μηχανικών παραμέτρων και τον προσδιορισμό των καταστατικών νόμων που αναπαράγουν τη συμπεριφορά των συνόλου των υλικών του φράγματος. Οι υπολογιστικές δυνατότητες του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis κατέστησαν εφικτή τη διεξαγωγή πληθώρας απευθείας και ανάστροφων αναλύσεων οι οποίες σε συνδυασμό με τα δεδομένα των οργάνων που είναι εγκατεστημένα στο εσωτερικό του σώματος συνέβαλαν στην τεκμηρίωση της ορθής επιλογής των καταστατικών νόμων και των μηχανικών παραμέτρων. Η μεγάλη ποικιλία στην κοκκομετρική διαβαθμίση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του φράγματος της Σφηκιάς καθιστούν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης χρήσιμα και κατά τη μελέτη της εντατικής και κινηματικής απόκρισης άλλων φραγμάτων και γενικότερα άλλων αντίστοιχων γεωκατασκευών.

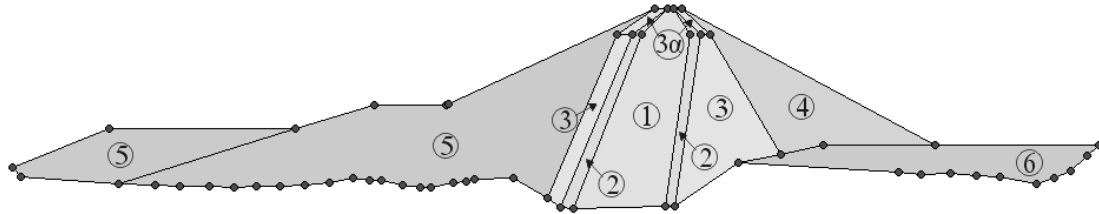
2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΥΗΕ ΣΦΗΚΙΑΣ

Το φράγμα του υδροηλεκτρικού εργοστασίου (ΥΗΕ) Σφηκιάς αποτελεί τη δεύτερη από τα κατάντι βαθμίδα των υδροηλεκτρικών εργοστασίων του Αλιάκμονα ποταμού και τέθηκε σε λειτουργία το 1985. Το συγκεκριμένο φράγμα ανήκει στην κατηγορία των λιθόρριπτων φραγμάτων με κεκλιμένο κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Το μέγιστο ύψος του σώματος είναι 82 m και η στέψη του έχει μήκος 220 m (Δ. Λιάκουρης, 1995). Το σύνολο των επιφανειακών και υπόγειων έργων του ΥΗΕ είναι θεμελιωμένα στους αμφιβολιτικούς γενέσιους, τους μετα-ανδεσίτες και τους μαζώδεις αμφιβολίτες της ζώνης της Αλμωπίας.

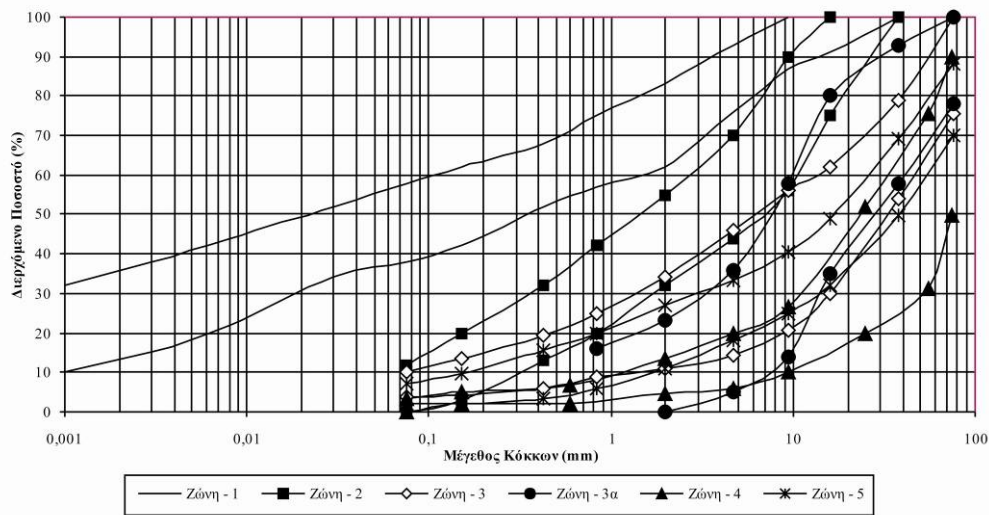
Όπως φαίνεται και στην τομή της εικόνας 1 στο σώμα του φράγματος διακρίνονται επτά διαφορετικής σύστασης ζώνες. Από τις ζώνες αυτές, η ζώνη 1 αποτελεί τον αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα, η ζώνη 2 το φίλτρο που περιβάλλει τον πυρήνα και οι υπόλοιπες το σώμα στήριξης του φράγματος. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή όλων των ζωνών του φράγματος παρουσιάζονται επακριβώς με τις αθροιστικές κοκκομετρικές καμπύλες του σχήματος 2.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής του φράγματος εγκαταστάθηκαν όργανα που αποσκοπούσαν στην καταγραφή των παραμορφώσεων, στην παρακολούθηση των ροών αλλά και στη μελέτη της απόκρισης του έργου στις σεισμικές δονήσεις (Dunnicliff & Gordon, 1988). Τα σημαντικότερα από αυτά είναι: το δίκτυο των τριγωνομετρικών σημείων ελέγχου επιφανειακής καθίζησης, τα οριζόντια επιμηκυνσιόμετρα, τα κατακόρυφα επιμηκυνσιόμετρα, τα πιεζόμετρα παρατήρησης των διαρροών, τα πιεζομετρικά κύτταρα σώματος και θεμελίωσης και οι επιταχυνσιογράφοι. Εκτός από το δίκτυο των τριγωνομετρικών σημείων και τους επιταχυνσιογράφους που είναι

κατανεμημένα στην επιφάνεια του σώματος, τα υπόλοιπα όργανα είναι διατεταγμένα στο εσωτερικό του φράγματος, κατά μήκος μιας διαμήκουσ και δύο εγκάρσιων τομών. Η διαμήκουσ τομή αναπτύσσεται κατά μήκος του άξονα του φράγματος, ενώ οι εγκάρσιες (A-A (Σχήμα 1) και F-F) διέρχονται από τις βάσεις των δύο αντερείσμάτων.



Σχήμα 1. Εγκάρσια τομή στο υψηλότερο τμήμα του φράγματος, στη βάση του αριστερού αντερείσματος (τομή A-A).



Σχήμα 2. Αθροιστικές κοκκομετρικές καμπύλες που απεικονίζουν τα όρια διακύμανσης της κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των επιμέρους ζωνών του φράγματος.

3 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΝΟΜΩΝ

Οι καταστατικοί νόμοι που αξιολογήθηκαν για τη δυνατότητά τους να αναπαράγουν την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών κατασκευής του φράγματος είναι το ελαστικό – τέλεια πλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb (M-C) και το ισότροπο κρατυνόμενο μοντέλο τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας M-C.

Οι ελαστικοί – τέλεια πλαστικοί καταστατικοί νόμοι αποτελούν την πιο απλοποιημένη έκφραση της ελαστοπλαστικής θεωρίας (Chen, W.F., 1982, 1984, Chen, W.F. et al., 1986, Desai, C.S. et al., 1972, 1984, Desai, C.S., 1979, 1980, Roland et al, 1987, Hinton, E., et al, 1979, Oden J.T., 1972, Owen, D.R.J., et al, 1980, Smith, I.M., 1982, Zienkiewicz, O.C., 1984). Σύμφωνα με τη βασική αρχή των νόμων αυτών το σημείο διαρροής του εδαφικού υλικού ταυτίζεται με το σημείο θραύσης με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εκδήλωση του φαινομένου της κράτυνσης. Το γεγονός αυτό ανάγει την καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σε τεθλασμένη γραμμή η οποία αποτελείται από

δύο μέλη. Το πρώτο μέλος αντιστοιχεί στο τμήμα της καμπύλης με τις ελαστικές παραμορφώσεις, ενώ το δεύτερο αντιστοιχεί στο τμήμα με τις ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις.

Η επιφάνεια διαρροής του κριτηρίου αστοχίας M-C απεικονίζεται στο χώρο των κύριων τάσεων με τη μορφή μη κανονικής εξαγωνικής πυραμίδας. Επειδή οι καταστατικές εξισώσεις της τέλει ελαστοπλαστικής θεωρίας περιορίζονται στις ομαλές επιφάνειες διαρροής και δεν καλύπτουν το περίγραμμα των πολλαπλών επιφανειών διαρροής που παρουσιάζονται στο μοντέλο M-C, η θεωρία επεκτάθηκε από τον Koiter (1960) έτσι ώστε να περιγράφει και τις λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα στις ακμές σύγκλισης των επιφανειών της εξαγωνικής πυραμίδας. Έτσι, η σχέση που περιγράφει την επιφάνεια διαρροής του κριτηρίου M-C, αποτελείται από τρεις προσθετούς, και διατυπώνεται ως εξής (Smith et al., 1982; Brinkgreve et al., 1998):

$$f_1 = \frac{1}{2}|\sigma_2 - \sigma_3| + \frac{1}{2}|\sigma_2 - \sigma_3|\sin\phi - c\cos\phi \leq 0 \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{1}{2}|\sigma_3 - \sigma_1| + \frac{1}{2}|\sigma_3 - \sigma_1|\sin\phi - c\cos\phi \leq 0 \quad (2)$$

$$f_3 = \frac{1}{2}|\sigma_1 - \sigma_2| + \frac{1}{2}|\sigma_1 - \sigma_2|\sin\phi - c\cos\phi \leq 0 \quad (3)$$

Όπου: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 =$ οι κύριες τάσεις, $\phi =$ η γωνία τριβής και $c =$ η συνοχή.

Οι τιμές της γωνίας τριβής, ϕ , της συνοχής, c , και της γωνίας διαστολής, ψ , απαιτούνται για τον ορισμό της πλαστικής συμπεριφοράς της καμπύλης τάσεων - παραμορφώσεων. Ενώ, για τον ορισμό του κλάδου των ελαστικών παραμορφώσεων απαιτείται η γνώση των τιμών του μέτρου Ελαστικότητας, E_0 ή E_{50} , και του λόγου του Poisson, ν .

Οι κρατυνόμενοι ελαστοπλαστικοί καταστατικοί νόμοι παρέχουν τη δυνατότητα προσομοίωσης της κρατυνόμενης συμπεριφοράς. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται στα εδαφικά υλικά των οποίων το όριο διαρροής διαφέρει από το όριο θραύσης.

Το ισότροπο κρατυνόμενο μοντέλο τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας M-C είναι ένα προηγμένο μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς μαλακών αλλά και σκληρών εδαφών (Schanz, 1998, Schanz et al, 1999, Sandler et al, 1976,1979,1984). Τα εδάφη όταν υπόκεινται σε αρχική εκτροπική φόρτιση παρουσιάζουν μείωση της δυσκαμψίας και ταυτόχρονα αναπτύσσουν μη αντιστρέψιμη πλαστική παραμόρφωση. Στην ειδική περίπτωση της αποστραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής η παρατηρούμενη σχέση μεταξύ της αξονικής παραμόρφωσης και του εκτροπέα τάσεων μπορεί να προσομοιωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό από μια υπερβολή. Αυτής της μορφής η σχέση διατυπώθηκε αρχικά από τον Kondner (1963) και αργότερα χρησιμοποιήθηκε στο γνωστό υπερβολικό μοντέλο (hyperbolic model) (Duncan & Chang, 1970). Το συγκεκριμένο κρατυνόμενο μοντέλο υπερέχει των υπερβολικών μοντέλων στα ακόλουθα σημεία: Πρώτον, χρησιμοποιεί τη θεωρία της πλαστικότητας αντί της θεωρίας της ελαστικότητας. Δεύτερον, συνυπολογίζει τη διαστολή του εδάφους και τρίτον, περιλαμβάνει επιφάνεια διαρροής με τη μορφή CAP.

Όπως αναφέρθηκε, η βασική ιδέα για το σχηματισμό του συγκεκριμένου μοντέλου κράτυνσης είναι η υπερβολική σχέση που υπάρχει μεταξύ της αξονικής παραμόρφωσης, ε_1 , και της εκτροπικής φόρτισης, $q = \sigma_1 - \sigma_3$, στην πρότυπη αποστραγγιζόμενη τριαξονική δοκιμή. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει η τάση σχηματισμού καμπυλών οι οποίες περιγράφονται με την εξίσωση:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} \quad (4)$$

Όπου: $E_{50} =$ Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας η οποία ορίζεται από τον τύπο (5) και $q_a =$ η ασύμπτωτη τιμή της διατμητικής αντοχής η οποία ορίζεται από τον τύπο (6). Η εξίσωση (4) ισχύει για $q < q_a$, ενώ το αρνητικό πρόσημο περιγράφει τη συμπιεστική φόρτιση που ασκείται στο δείγμα.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cot \phi - \sigma_3'}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (5)$$

Όπου $P_{ref} = H$ τάση αναφοράς, $E_{50}^{ref} = T_0$ μέτρο ελαστικότητας αναφοράς το οποίο ανταποκρίνεται στην τάση αναφοράς P^{ref} και m : Παράμετρος, η οποία εκφράζεται με τη μορφή εκθέτη και ορίζει το μέτρο της εξάρτησης που υπάρχει μεταξύ της P^{ref} και της κύριας ενεργής τάσης σ_3' .

Η τιμή της ασύμπτωτης της διατμητικής αντοχής, q_a , ορίζεται ως (6):

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (6)$$

Όπου $R_f = 0$ λόγος αστοχίας και $q_f = \eta$ τιμή της εκτροπικής - αποκλίνουσας τάσης.

Για τις καταστάσεις τάσης - παραμόρφωσης που παρατηρούνται στο οιδήμετρο το μοντέλο χρησιμοποιεί τη σχέση (7). Η σχέση αυτή ορίζει το οιδημετρικό μέτρο ελαστικότητας το οποίο χρησιμοποιείται για την περιγραφή διαδρομών τάσεων μονοδιάστατης στερεοποίησης.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} (\sigma' / p^{ref})^m \quad (7)$$

Όπου: $E_{oed}^{ref} = T_0$ οιδημετρικό μέτρο ελαστικότητας αναφοράς, το οποίο ανταποκρίνεται στην τάση προστερεοποίησης αναφοράς P^{ref} .

Όπως προαναφέρθηκε, το συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφει τις συνθήκες κράτυνσης με τη χρήση μιας επιφάνειας διαρροής τύπου CAP. Από τα δύο βασικά μέτρα ελαστικότητας, E_{50}^{ref} και E_{oed}^{ref} , που απαιτούνται για τον ορισμό του συγκεκριμένου μοντέλου, το τριαξονικό μέτρο, σε μεγάλο μέρος ελέγχει τη διατμητική επιφάνεια διαρροής, ενώ το οιδημετρικό μέτρο το κάλυμμα. Στην ουσία, το E_{50}^{ref} ελέγχει το μέγεθος των πλαστικών παραμορφώσεων που σχετίζονται με τη διατμητική επιφάνεια αστοχίας. Ενώ, το E_{oed}^{ref} χρησιμοποιείται για να ελέγχει το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης που προέρχεται από την επιφάνεια διαρροής - CAP.

4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥ ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

Ο αδιαπέρατος αργιλικός πυρήνας, λόγω της καθοριστικής σημασίας του στη στεγανότητα του φράγματος της Σφηκιάς, αποτέλεσε αντικείμενο πληθώρας εργαστηριακών δοκιμών. Για την επιλογή του καταστατικού νόμου που αναπαράγει την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών αυτών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης - CD καθώς και δεδομένα από δοκιμές οιδημέτρου που πραγματοποιήθηκαν σε αδιατάρακτα δείγματα προερχόμενα από ομοιόμορφα κατανεμημένες θέσεις του πυρήνα. Προκειμένου να διαπιστωθεί ποιος από τους δύο καταστατικούς νόμους προσεγγίζει καλύτερα τις καμπύλες των τριαξονικών δοκιμών CD πραγματοποιήθηκε παράλληλη σχεδίαση των πειραματικών και των θεωρητικών καμπυλών. Για κάθε πειραματική καμπύλη σχεδιάστηκαν δύο (2) θεωρητικές καμπύλες σύμφωνα με το ελαστικό - τέλεια πλαστικό καταστατικό νόμο και δεκαέξι (16) σύμφωνα με το κρατυνόμο μοντέλο (Λουπασάκης, 2002, 2007, Loupasakis et.al., 2008).

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3, στην περίπτωση του ελαστικού - τέλεια πλαστικού καταστατικού νόμου M-C το πρώτο σκέλος της καμπύλης - τεθλασμένης γραμμής τάσεων - παραμορφώσεων ορίζεται από το μέτρο ελαστικότητας E_0 ή E_{50} , ενώ το δεύτερο σκέλος της γραμμής ορίζεται από τις μηχανικές παραμέτρους του σημείου θραύσης. Επομένως, από τις δύο θεωρητικές καμπύλες που σχεδιάστηκαν για κάθε πειραματική, στην πρώτη η κλίση του ελαστικού κλάδου ορίζεται από την τιμή του μέτρου ελαστικότητας E_0 , ενώ στη δεύτερη από την τιμή του μέτρου ελαστικότητας E_{50} .

Στο ισότροπο κρατυνόμο μοντέλο τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας M-C η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων ορίζεται από τη εξίσωση 4. Από την ανάλυση της προαναφερόμενης εξίσωσης, καθώς και του συνόλου των εξισώσεων που παραθέτονται στην παράγραφο 3 προκύπτει ότι, οι

θεωρητικές καμπύλες που προκύπτουν για την κάθε πειραματική εξαρτώνται από τρεις βασικές παραμέτρους: α) από το λόγο αστοχίας R_f (που κυμαίνεται μεταξύ του 0,9 και του 0,95), β) Από την τάση αναφοράς, P^{ref} και γ) από την παράμετρο m (που κυμαίνεται μεταξύ $0,5 < m < 1,0$). Σύμφωνα με τις αρχές του συγκεκριμένου καταστατικού νόμου, ως τάση αναφοράς, P^{ref} , ορίζεται η ελάχιστη κύρια ενεργή τάση, σ_3' , για την οποία διαθέτονται πειραματικά δεδομένα και η τιμή της καθορίζει και την τιμή του μέτρου ελαστικότητας αναφοράς, E_{30}^{ref} .

Από τα προαναφερόμενα προκύπτει ότι, για κάθε πειραματική καμπύλη και για μία συγκεκριμένη τάση αναφοράς P^{ref} ορίζονται το ελάχιστο τέσσερις διαφορετικές θεωρητικές καμπύλες. Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν από το συνδυασμό των ακραίων τιμών που μπορούν να πάρουν οι παράμετροι R_f και m . Φυσικά, ο αριθμός των θεωρητικών καμπυλών που μπορούν να σχεδιαστούν είναι άπειρος αν επιλεγούν τυχαίες τιμές μεταξύ των προαναφερόμενων ακραίων ορίων. Επίσης, ο ελάχιστος αριθμός των θεωρητικών καμπυλών που μπορούν να σχεδιαστούν για κάθε πειραματική πολλαπλασιάζεται κάθε φορά που επιλέγεται και μια διαφορετική τάση αναφοράς P^{ref} . Από τη διαδικασία αυτή, και λαμβάνοντας υπόψη ότι στα δείγματα κάθε θέσης πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές με διαφορετικές ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις, σ_3' , για κάθε πειραματική καμπύλη σχεδιάστηκαν το ελάχιστο 16 θεωρητικές.

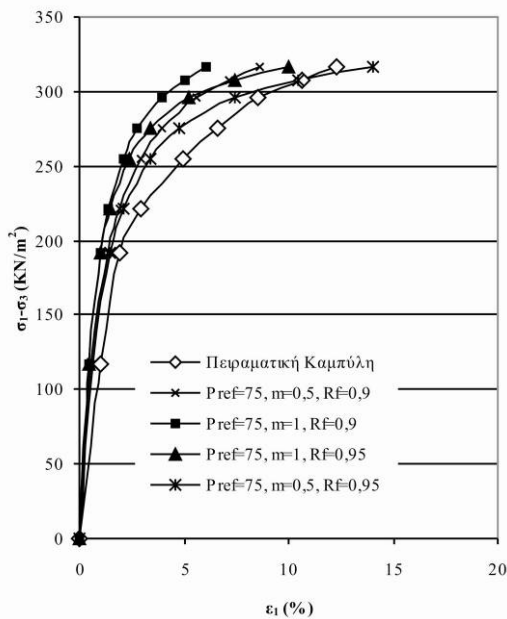
Με το ισότροπο κρατυνόμο μοντέλο τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας M-C παρέχεται και η δυνατότητα προσέγγισης των σχέσεων τάσεων – παραμορφώσεων που παρατηρούνται στις δοκιμές οιδιμέτρου. Η προσέγγιση αυτή γίνεται με τον υπολογισμό ενός θεωρητικού οιδιμετρικού μέτρου ελαστικότητας E_{oed} για κάθε βαθμίδα φόρτισης. Σύμφωνα με την εξίσωση (7) το μέτρο ελαστικότητας E_{oed} εξαρτάται από το συνδυασμό των παραμέτρων E_{oed}^{ref} και P^{ref} αλλά και από την παράμετρο m . Η ορθή επιλογή των προαναφερόμενων παραμέτρων επιβεβαιώνεται όταν οι θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση (7) προσεγγίζουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις αντίστοιχες πειραματικές. Επισημαίνεται ότι, η τάση αναφοράς που επιλέγεται για τη δοκιμή οιδιμέτρου, είναι η ίδια με την P^{ref} που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων της τριαξονικής δοκιμής. Επομένως, κατά την επιλογή της συγκεκριμένης παραμέτρου, πρέπει να ελέγχεται η ακρίβεια της προσέγγισης που παρέχει στα πειραματικά αποτελέσματα και των δύο δοκιμών.

Για τη σαφέστερη παρουσίαση της διαδικασίας επιλογής του βέλτιστου καταστατικού νόμου, στις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 3 και 4, παρουσιάζονται ορισμένες από τις θεωρητικές καμπύλες που κατασκευάστηκαν για την πειραματική καμπύλη δοκιμής τριαξονικής φόρτισης CD που πραγματοποιήθηκε με ισότροπη φόρτιση $\sigma_3' = 450 \text{ KN/m}^2$ σε αδιατάρακτο δείγμα προερχόμενο από τη στάθμη των 75 m. Από τη σύγκριση των πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών του συγκεκριμένου δείγματος προέκυψε ότι η καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών συνθηκών τάσης - παραμόρφωσης εξασφαλίζεται από τον ισότροπο κρατυνόμο καταστατικό νόμο τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας Mohr – Coulomb. Μάλιστα, οι θεωρητικές καμπύλες που εξασφαλίζουν την καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών καμπυλών των τριαξονικών δοκιμών CD είναι αυτές που κατασκευάζονται για την τάση αναφοράς $P^{ref} = 300 \text{ KN/m}^2$ και για τις τιμές των παραμέτρων $m=0,5$ και $R_f=0,9$ (Σχήμα 4). Παρόλο που για ορισμένες πειραματικές καμπύλες υπάρχουν και άλλοι συνδυασμοί των παραμέτρων P^{ref} - m - R_f που παρείχαν ικανοποιητική ταύτιση, ο προαναφερόμενος συνδυασμός παρέχει τα υψηλότερα ποσοστά ταύτισης στο σύνολο σχεδόν των δεδομένων των τριαξονικών δοκιμών CD.

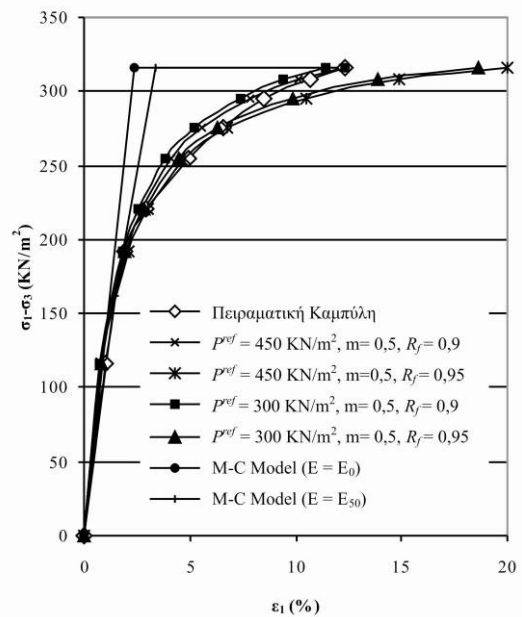
Ανάλογο συμπέρασμα προκύπτει και από τον έλεγχο της δυνατότητας προσομοίωσης των πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν από τις δοκιμές οιδιμέτρου. Δηλαδή, οι πειραματικές τιμές του οιδιμετρικού μέτρου ελαστικότητας προσεγγίζονται κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο από τις αντίστοιχες θεωρητικές του κρατυνόμου καταστατικού νόμου που προκύπτουν για τις τιμές των παραμέτρων $P^{ref} = 300 \text{ KN/m}^2$ και $m = 0,5$.

Όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με τον κρατυνόμο καταστατικό νόμο Mohr – Coulomb, ως τάση αναφοράς P^{ref} ορίζεται η εκάστοτε ελάχιστη κύρια ενεργή τάση σ_3' ή μία αυθαίρετα ορισμένη ελάχιστη ενεργή τάση π.χ. $\sigma_3' = 100 \text{ KN/m}^2$ για την οποία, με τη χρήση του τυπολογίου που

παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3, υπολογίζονται έμμεσα οι τιμές των απαραίτητων μέτρων ελαστικότητας. Στην περίπτωση των τριαξονικών δοκιμών CD που πραγματοποιήθηκαν στα υλικά του πυρήνα η ελάχιστη κύρια ενεργή τάση σ_3' είναι, ανάλογα με το δείγμα, τα 75 KN/m^2 ή τα 150 KN/m^2 . Όμως, οι καμπύλες που κατασκευάστηκαν με τις συγκεκριμένες τιμές δεν παρουσίασαν την επιθυμητή ταύτιση με τις αντίστοιχες πειραματικές. Όπως προαναφέρεται, η καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών καμπυλών εξασφαλίζεται με την τάση αναφοράς $P^{ref} = 300 \text{ KN/m}^2$. Παράλληλα, από τις δοκιμές οιδημέτρου προέκυψε ότι η μέση τάση προστεροποίησης των δειγμάτων είναι τα 254 KN/m^2 . Συνοψίζοντας τα προαναφερόμενα προκύπτει ως συμπέρασμα ότι, η τάση αναφοράς πρέπει να είναι η ελάχιστη κύρια ενεργή τάση που υπερβαίνει την τάση προστεροποίησης του υλικού, και όχι η ελάχιστη σ_3' που παρέχεται από τις εκάστοτε εργαστηριακές δοκιμές.



Σχήμα 3. Συσχέτιση πειραματικής καμπύλης με τις θεωρητικές που προκύπτουν σύμφωνα με τον κρατυνόμο καταστατικό νόμο για $P^{ref} = 75 \text{ KN/m}^2$.



Σχήμα 4. Η πειραματική καμπύλη ($\sigma_3' = 450 \text{ KN/m}^2$), οι θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου M-C και οι βέλτιστες θεωρητικές σύμφωνα με τον κρατυνόμο καταστατικό νόμο.

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Για την κατασκευή των φίλτρων και του σώματος στήριξης του φράγματος της Σφηκιάς χρησιμοποιήθηκαν ποτάμιες αποθέσεις της κοίτης του Αλιάκμονα και προϊόντα εκσκαφής βράχου. Τα υλικά αυτά προέρχονταν από προεπιλεγμένους δανειοθαλάμους και από τις εκσκαφές που πραγματοποιήθηκαν κατά την κατασκευή των υπόγειων και επιφανειακών έργων. Στα προαναφερόμενα υλικά πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες εργαστηριακών δοκιμών. Η πρώτη ομάδα δοκιμών πραγματοποιήθηκε πριν από την κατασκευή του έργου, το 1976, στο Ινστιτούτο Εδαφομηχανικής και Βραχομηχανικής του Πανεπιστημίου της Karlsruhe, με απώτερο στόχο την επιλογή δανειοθαλάμων για την κατασκευή των επιμέρους ζωνών (Leiter & Gudehus, 1977). Ενώ, η δεύτερη ομάδα εργαστηριακών δοκιμών πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου την περίοδο 1982 – 1985 από τη ΔΕΗ, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα της κατασκευής του και η τήρηση των προδιαγραφών (ΔΕΗ, 1986)(ΔΕΗ, 1983-1984).

Από το σύνολο των προαναφερόμενων δοκιμών ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασαν οι ειδικές εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα μεγάλου μεγέθους. Δηλαδή, τριαξονικές δοκιμές σε δείγματα διαμέτρου 100 cm και ύψους 180 cm και δοκιμές οιδημέτρου σε δείγματα διαμέτρου 50 cm. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα διαφόρων κοκκομετρικών διαβαθμίσεων τα οποία προέκυπταν από τα αρχικά δείγματα με την απομάκρυνση επιλεγμένων διαμέτρων από τις κοκκομετρικές τους συστάσεις. Τα δείγματα ήταν ελαφρώς ή και έντονα συμπυκνωμένα ενώ η φόρτισή τους ήταν απλή ή περιλάμβανε αποφόρτιση και επαναφόρτιση.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επιλογή των καταστατικών νόμων που αναπαράγουν τη συμπεριφορά των υλικών του σώματος στήριξης και των φίλτρων είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τα υλικά του πυρήνα (Λουπασάκης, 2002, 2007, Loupasakis et.al., 2008). Δηλαδή, για κάθε μία από τις πειραματικές καμπύλες κατασκευάστηκαν οι θεωρητικές καμπύλες που προκύπτουν σύμφωνα με το τέλεια ελαστοπλαστικό μοντέλο M-C και το ισότροπα κρατυνόμενο καταστατικό νόμο τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας M-C.

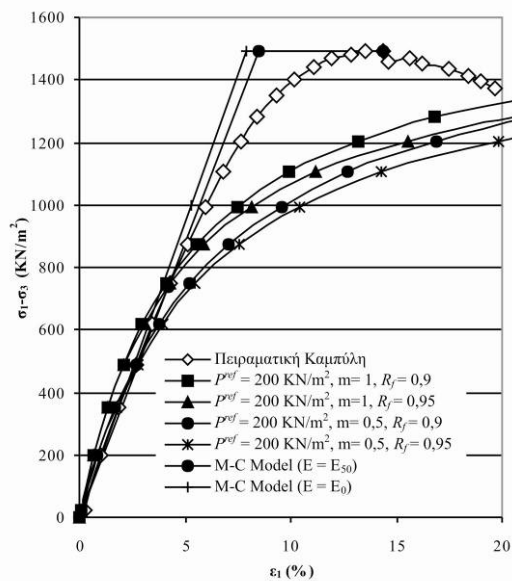
Σύμφωνα με όσα αναφέρονται και στην παράγραφο 4, οι θεωρητικές καμπύλες που προκύπτουν με βάση τον τέλεια ελαστοπλαστικό καταστατικό νόμο M-C είναι δύο. Η μία από αυτές ορίζεται από το E_0 ενώ η άλλη από το E_{50} . Αντίστοιχα, οι θεωρητικές καμπύλες που προκύπτουν από τον κρατυνόμενο καταστατικό νόμο είναι το ελάχιστο τέσσερις για κάθε τάση αναφοράς, P^{ref} . Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν από το συνδυασμό των ακραίων τιμών που μπορούν να πάρουν οι παράμετροι R_f και m . Δηλαδή από το συνδυασμό των τιμών $R_f = 0,95$ ή $R_f = 0,9$ και $m = 0,5$ ή $m = 1$.

Ενδεικτικά, στη γραφική παράσταση του σχήματος 5, παρουσιάζονται οι θεωρητικές καμπύλες που κατασκευάστηκαν προκειμένου να συγκριθούν με την πειραματική καμπύλη της ειδικής δοκιμής τριαξονικής φόρτισης UU που πραγματοποιήθηκε με ισότροπη φόρτιση $\sigma_3' = 200 \text{ KN/m}^2$ σε συμπυκνωμένο δείγμα υλικού των φίλτρων (ζώνη 2). Από τη σύγκριση των καμπυλών προκύπτει ότι οι θεωρητικές που κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τον κρατυνόμενο ελαστοπλαστικό καταστατικό νόμο ταυτίζονται με την πειραματική μόνο στο αρχικό τμήμα της περιοχής των ελαστικών παραμορφώσεων, ενώ στη συνέχεια επεκτείνονται στην περιοχή των πλαστικών παραμορφώσεων παρουσιάζοντας μεγάλες αποκλίσεις. Αντιθέτως, οι θεωρητικές καμπύλες που κατασκευάστηκαν με βάση τον ελαστικό - τέλεια πλαστικό καταστατικό νόμο αποκλίνουν από την πειραματική μόνο στην περιοχή της κράτυνσης. Μάλιστα, από τις δύο καμπύλες που κατασκευάζονται σύμφωνα με τον προαναφερόμενο καταστατικό νόμο καλύτερη ταύτιση επιτυγχάνεται με αυτήν που προκύπτει για το μέτρο ελαστικότητας E_{50} .

Από την αξιοποίηση του συνόλου των εργαστηριακών δοκιμών προέκυψε ότι όλες οι ζώνες των φίλτρων και του σώματος στήριξης προσομοιώνονται καλύτερα από τον ελαστικό - τέλεια πλαστικό καταστατικό νόμο M-C. Μάλιστα οι θεωρητικές καμπύλες που αναπαράγουν με τη μεγαλύτερη πιστότητα τις αντίστοιχες πειραματικές είναι αυτές που προκύπτουν για μέτρο ελαστικότητας E_{50} .

6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΝΟΜΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΦΗΚΙΑΣ

Η μελέτη της αποτελεσματικότητας των καταστατικών νόμων στην προσομοίωση της απόκρισης του φράγματος της Σφηκιάς πραγματοποιήθηκε με την ανάλυση των δύο εγκάρσιων τομών του σώματος στις οποίες έχουν τοποθετηθεί τα όργανα επιτόπια παρακολούθησης των μετακινήσεων και της πιεζομετρίας (Λουπασάκης, 2002, 2007). Η προσομοίωση έγινε, σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης, με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis (Brinkgreve et al., 1998).



Σχήμα 5. Συσχέτιση πειραματικής καμπύλης των υλικών των φίλτρων (Ζώνη-2) με τις θεωρητικές που προκύπτουν σύμφωνα με τον κρατυνόμο καταστατικό νόμο και τον ελαστικό τέλεια πλαστικό M-C.

Η ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των τομών, A-A και F-F, πραγματοποιήθηκε με κύριο γνώμονα την ακριβή απεικόνιση των πραγματικών γεωμετρικών στοιχείων του σώματος. Το βραχύδες υπόβαθρο θεμελίωσης του φράγματος δε συμπεριλήφθηκε στη γεωμετρία των τομών καθώς η μεγάλη διαφορά της δυσκαμψίας του από αυτή των υλικών του φράγματος επέτρεψε τον ορισμό οριακών συνθηκών που εξασφάλιζαν πλήρη αμεταθετότητα κατά μήκος όλης της επιφάνειας θεμελίωσης. Για την αυτόματη διακριτοποίηση των τομών επιλέχθηκε ο λεπτός κανάβος.

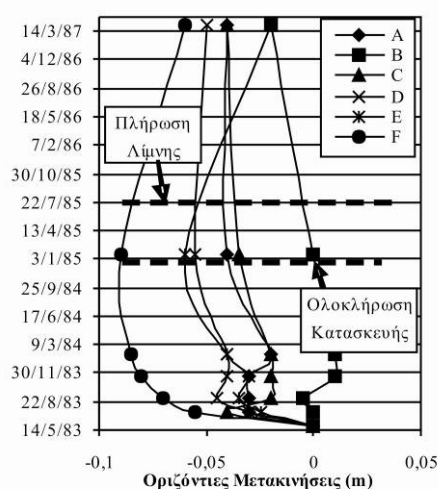
Η προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής του σώματος και πλήρωσης της λεκάνης κατάκλισης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της διαδικασίας "σταδιακής κατασκευής" (stage construction) σε τρεις ή τέσσερις κατασκευαστικές φάσεις. Οι επιλογές που έγιναν σχετικά με τον αριθμό των φάσεων, με το εύρος των τμημάτων που κατασκευάστηκαν σε κάθε φάση καθώς και με τη σκοπιμότητα ύπαρξης "πλαστικών μηδενικών βημάτων" (Plastic Nil - Steps) - για την εξισορρόπηση των τασικών πεδίων - είναι αποτελέσματα διερευνήσεων. Για όλες τις υπολογιστικές φάσεις της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ο "πλαστικός (ελαστοπλαστικός) υπολογισμός" (Plastic Calculation) και δε θεωρήθηκαν συνθήκες που να επιτρέπουν την ανάπτυξη φαινομένων στερεοποίησης. Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από την αξιολόγηση του συνόλου των διαθέσιμων εργαστηριακών δεδομένων, σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις των καταστατικών νόμων που επιλέχθηκαν από την αναλυόμενη διαδικασία.

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα δεδομένα των οργάνων επιτόπιας παρακολούθησης, κατά την ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των τομών, λήφθηκε ιδιαίτερη μέριμνα προκειμένου να κατασκευαστούν κόμβοι στις θέσεις τοποθέτησης των οργάνων. Η ύπαρξη κόμβων στα συγκεκριμένα σημεία εξασφάλισε τον ακριβή υπολογισμό των σχέσεων τάσεων - παραμορφώσεων, ενώ ταυτόχρονα έδωσε και τη δυνατότητα απεικόνισής τους σε γραφικές παραστάσεις.

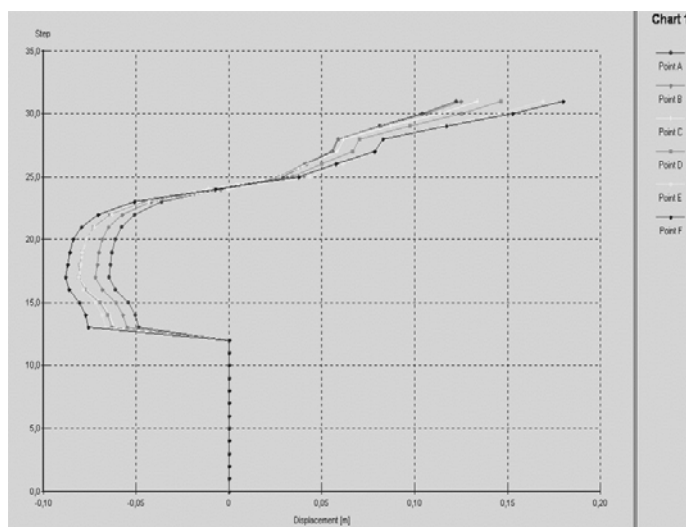
Από τη σύγκριση των ενόργανων μετρήσεων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι τα ποιοτικά συμπεράσματα που σχετίζονται με τον τρόπο εκδήλωσης των πραγματικών οριζόντιων μετακινήσεων αναπαράγονται με μεγάλη πιστότητα από τη διαδικασία προσομοίωσης. Δηλαδή, η αρχική φορά των μετακινήσεων και οι μετέπειτα αλλαγές τους, όπως αυτές καταγράφονται στις θέσεις των οριζοντίων μηκυσιομέτρων και στα γεωδαιτικά σημεία της στέγης, ταυτίζονται

απόλυτα με τις κατανομές των μετακινήσεων που προκύπτουν στα επιμέρους στάδια της διαδικασίας προσομοίωσης.

Παρόλη την ταύτιση που παρατηρείται μεταξύ των πραγματικών και των θεωρητικών χωρικών κατανομών των μετακινήσεων, η συσχέτιση μεταξύ των τιμών τους παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Οι διαφορές μεταξύ του χρόνου έναρξης των παραμορφώσεων και του χρόνου έναρξης των πραγματικών μετρήσεων, η αδυναμία πρόβλεψης των αλλοιώσεων που υπεισέρχονται στις πραγματικές τιμές των μετακινήσεων λόγω της διαρκούς επανεπίχωσης αλλά και οι αστοχίες των οργάνων είναι οι βασικότεροι λόγοι για τους οποίους δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές των μετακινήσεων. Παρόλα αυτά, από τη μελέτη της απόκρισης του φράγματος της Σφηκιάς προέκυψε ότι οι τιμές των μετακινήσεων που υπολογίζονται μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης δίνουν μια πολύ σαφή εικόνα για την τάξη μεγέθους των πραγματικών τιμών των μετακινήσεων.



(α)



(β)

Σχήμα 6. (α) Καταγραφές οριζόντιου επιμηκυνσιομέτρου (HI-4) που είναι εγκατεστημένο στο κατάντι πρανές του φράγματος εντός της τομής F-F. (β) Γραφικές παραστάσεις των οριζόντιων μετακινήσεων σε συνάρτηση με τα υπολογιστικά βήματα για τους κόμβους που αντιστοιχούν στις πραγματικές θέσεις των μαγνητικών πλακών του HI-4.

Ενδεικτικά στο σχήμα 6 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις των μαγνητικών πλακών του οριζόντιου επιμηκυνσιομέτρου (HI-4) που είναι εγκατεστημένο στο κατάντι πρανές του σώματος στήριξης, κατά μήκος της τομής F-F, καθώς και οι μετακινήσεις στις αντίστοιχες θέσεις όπως υπολογίστηκαν μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης. Από τη σύγκριση των γραφικών παραστάσεων γίνεται σαφές ότι οι επιλεγμένοι καταστατικοί νόμοι καθώς και η τυποποιημένη διαδικασία προσομοίωσης παρέχουν αποτελέσματα που αναπαράγουν το μηχανισμό εκδήλωσης των μετακινήσεων και εκτιμούν την τάξη μεγέθους τους με ικανοποιητική ακρίβεια.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας επιλογής των βέλτιστων καταστατικών νόμων που αναπαράγουν την απόκριση των γεωυλικών, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του φράγματος της Σφηκιάς, καθώς και μετά την επιβεβαίωση της ορθής επιλογής τους μέσω της διαδικασίας που αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών – πραγματικών συνθηκών τάσης – παραμόρφωσης των αμμωδών αργίλων του πυρήνα εξασφαλίζεται από τον ισότροπο κρατυνόμο καταστατικό νόμο τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας M-C (Hardening Model).
- Σύμφωνα με τον κρατυνόμο καταστατικό νόμο Mohr – Coulomb, ως τάση αναφοράς P^{ref} ορίζεται η εκάστοτε ελάχιστη κύρια ενεργή τάση σ_3' ή μία αυθαίρετα ορισμένη ελάχιστη ενεργή τάση π.χ. $\sigma_3'=100 \text{ KN/m}^2$ για την οποία, με τη χρήση του τυπολογίου που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3, υπολογίζονται έμμεσα οι τιμές των απαραίτητων μέτρων ελαστικότητας. Από τη διαδικασία σύγκρισης των πειραματικών και των θεωρητικών καμπυλών που παρουσιάστηκε εκτενώς στην παράγραφο 4 προέκυψε ότι, η τάση αναφοράς πρέπει να είναι η ελάχιστη κύρια ενεργή τάση που υπερβαίνει την τάση προστερεοποίησης του υλικού, και όχι η ελάχιστη σ_3' που παρέχεται από τις εκάστοτε εργαστηριακές δοκιμές.
- Από την αξιοποίηση των ειδικών εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα υλικά των φίλτρων και του σώματος στήριξης προέκυψε ότι η συμπεριφορά τους προσομοιώνονται καλύτερα από τον ελαστικό – τέλεια πλαστικό καταστατικό νόμο M-C. Μάλιστα, οι θεωρητικές καμπύλες που αναπαράγουν με τη μεγαλύτερη πιστότητα τις αντίστοιχες πειραματικές είναι αυτές που προκύπτουν για τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας E_{50} .

Η χρησιμότητα των προαναφερόμενων συμπερασμάτων είναι αξιόλογη καθώς η πολυπλοκότητα της κατασκευής και η πληθώρα των γεωυλικών που χρησιμοποιήθηκαν καθιστούν δυνατή την επέκτασή τους και σε άλλες αντίστοιχες γεωκατασκευές.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Brinkgreve R.B.J., Vermeer P.A., Bakker K.J., Bonnier P.G., Brand P.J.W., Burd H.J., Termaat R.J. 1998. Plaxis, Fine Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 7, Reference Manual. A.A. Balkema, Rotterdam Brookfield
2. Brinkgreve R.B.J., Vermeer P.A., Bakker K.J., Bonnier P.G., Brand P.J.W., Burd H.J., Termaat R.J. 1998. Plaxis, Fine Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 7, Material Models Manual. A.A. Balkema, Rotterdam Brookfield
3. Chen W. F. 1982. Plasticity in Reinforced Concrete. McGraw-Hill Book Co., New York
4. Chen W. F. 1984. Constitutive Modeling in Soil Mechanics. In: Desai C S, Gallagher R H (eds) Mechanics of Engineering Materials, John Wiley, London, p 91-120
5. Chen W.F., Baladi G.Y. 1986. Soil Plasticity- Theory and Implementation. Elsevier, New York
6. ΔΕΗ – Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων, 1986), Υδροηλεκτρικό Έργο Σφηκιάς – Ποιοτικός Έλεγχος Χωματοργικών, Δημοσίευτη Τεχνική Έκθεση.
7. ΔΕΗ – ΥΠΕ Σφηκιάς – Ασωμάτων, Εργαστήριο 1983 - 1984), Εργαστηριακός Έλεγχος επί Αδιατάρακτων Δειγμάτων του Αδιαπέρατου Πυρήνος Φράγματος Σφηκιάς (Υψόμετρα 75, 80, 85, 90, 95, 105, 115, 125, 135, 146), Δημοσίευτη Τεχνική Έκθεση.
8. Desai C.S. 1979. Some Aspects of Constitutive Laws of Geologic Media. In: Wittke W (ed) Proceedings of the 3rd Int. Conf. Numer. Methods Geomech., 1979, Vol. 1, Balkema Press, Rotterdam, p 299
9. Desai C.S. 1980. A General Basis for Yield, Failure and Potential Functions in Plasticity. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., p. 361-375
10. Desai C.S., Abel F.J. 1972. Introduction to the Finite Element Method. A Numerical Method for Engineering Analysis. Van Nostrand Reinhold Company, New York
11. Desai C.S., Siriwardane H.J. 1984. Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geological Materials. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
12. Duncan J.M., Chang C.Y. 1970. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil. ASCE J. of the Soil Mech. and Found., p 1629-1653
13. Dunicliff J., Gordon G. 1988. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Willey – Interscience Publication, New York, pp. 577.
14. Hinton E., Owen D.R.J. 1979. An Introduction to the Finite Element Computations. Pineridge Press Ltd, Swansea, U.K.
15. Koiter W.T. 1960. General Theorems for Elastic-Plastic Solids. In: Sneddon I N, Hill R (eds) Progress in Solid Mechanics, Vol 1. North-Holland, Amsterdam, p 165-221.

16. Kondner R.L. 1963. A Hyperbolic Stress Strain Formulation for Sands. In: Abstracts of the 2nd Pan. Am. ICOSFE Vol 1. Brazil, p 289-324.
17. Leiter O., Gudehus G. 1977. Report of the Laboratory Tests for Dam Rockfill - Aliakmon River hydroelectric Project – Sfikia Embankment Dam (order No. 97) Αδημοσίευτη Τεχνική Έκθεση, Karlsruhe.
18. Λιάκουρης, Δ. 1995. Η γεωλογία και τα φράγματα της ΔΕΗ, Αθήνα, ΔΕΗ, Διεύθυνση Εκπαίδευσης.
19. Λουπασάκης Κ., (2002), Μελέτη της Συμπεριφοράς του Σώματος Χωμάτων Φραγμάτων με τη Χρήση Μεθόδων Αριθμητικής Ανάλυσης, Διδακτορική Διατριβή, αριθμός 59 του παραρτήματος της επιστημονικής επετηρίδας του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 334.
20. Λουπασάκης Κ., (2007), Μελέτη της Συμπεριφοράς του Σώματος Χωμάτων Φραγμάτων με τη Χρήση Μεθόδων Αριθμητικής Ανάλυσης, Τεχνικά Χρονικά – Ηλεκτρονική Διμηνιαία Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, ΤΕΕ, Τεύχος 3ο Μαιος – Ιούνιος 2007, σελ. 40.
21. Loupasakis C., Chararas B., Dimopoulos G., Hatzigogos T., (2008), Evaluation of Plasticity Models' Ability to Analyze Typical Earth Dams' Soil Materials, Geotechnical and Geological Engineering, Springer (Published online).
22. Oden J.T. 1972. Finite Elements of Continua. McGraw-Hill Co., New York
23. Owen D.R.J., Hinton E. 1980. Finite Elements in Plasticity, Theory and Practice. Pineridge Press Ltd, Swansea, U.K.
24. Roland W.L., Bernard A.S. 1987. The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media. John Wiley & Sons Ltd, Manchester
25. Sandler, I.S., DiMaggio, F.L. and Baladi, G.Y. 1976. Generalized Cap Models for Geologic Materials, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 102. No EM6, 1973, pp. 1181-1200.
26. Sandler, L.S., Baron, M.L. 1979. Recent Developments on the Constitutive Modeling of Geological Materials, Proc. Erd Int. Conf. Numer. Methods Geomech. Vol. 1, Aachen, W. Germany, W. Wittke (Ed.) Balkema Press, Rotterdam, pp. 363-376.
27. Sandler, L.S., DiMaggio, F.L. and Baron, M.L. 1984. An Extension of the Cap Model- Inclusion of Pore Pressure Effects and Kinematic Hardening to Represent an Anisotropic Wet Clay, In Mechanics of Engineering Materials, Desai, C.S. and Gallagher, R.H., (Editors), John Wiley, London, pp. 547-578.
28. Schanz T. 1998. Zur Modellierung des Mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien. Habilitation, Stuttgart Universität
29. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. 1999. Formulation and verification of the Hardening – Soil Model. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., in press.
30. Smith I.M. 1982. Programming the Finite Element Method with Applications to Geomechanics. John Wiley & Sons Ltd, Manchester
31. Smith I.M., Griffith D.V. 1982. Programming the Finite Element Method, Second Edition. John Wiley & Sons, Chisester, U.K.
32. Zienkiewich O.C., Morz Z. 1984. Generalized Plasticity Formulation and Applications to Geomechanics. In: Desai C S, Gallagher R H (eds) Mechanics of Engineering Materials. John Wiley, London, p 655-680.

Construction Materials of Earth Dams and Simulation of their Elastoplastic behavior – Example from Sfikia Dam

C. Loupasakis

Ph.D., M.Sc. Geologist – Civil Engineer, Engineering Geology Department, I.G.M.E.

B. Christaras & G. Dimopoulos

Professors, Department of Geology, A.U.Th.

Th. Hatzigogos

Professor, Department of Civil Engineering, A.U.Th.

ABSTRACT: The availability of the data as well as the variety of the geomaterials used for the construction of the earth dam of Sfikia allowed the evaluation of models based on the perfect and hardening plasticity theory for their ability to analyze these geostructures by means of the computational geotechnical methods. The evaluated constitutive laws were the elastic – perfect plastic model based on the Mohr – Coulomb failure criterion and the isotropic hardening CAP model based on the same criterion. The earth dam of Sfikia was considered suitable for the study because of the availability of specialized laboratory tests' data coming from the materials of every zone. The conclusions of this study can be applied in the studies of other similar geostructures.