

Μελέτη της ενίσχυσης προβληματικών θεμελιώσεων με τη χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Study of the strengthening of problematic foundations using the Finite Element Method

ΚΑΡΑΟΥΛΑΝΗΣ, Φ.
ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ, Θ.
ΤΣΟΤΣΟΣ, Σ.

Πολ. Μηχανικός, MSc TUM, Διδ. Φοιτ. Α.Π.Θ., Υπότροφος Ι.Κ.Υ.
Πολ. Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.
Πολ. Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η παρούσα εργασία αποτελείται από τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται μια σύντομη αναφορά στις προβληματικές θεμελιώσεις, στη μορφή των καθιζήσεων που εμφανίζουν σε σχέση με το χρόνο αλλά και σε θέματα ενισχύσεων προβληματικών θεμελιώσεων. Για να περιγραφεί το πολύπλοκο και χρονικά εξαρτώμενο πρόβλημα αλληλεπίδρασης εδάφους–θεμελίωσης–ενίσχυσης, παρουσιάζεται συνοπτικά στο δεύτερο μέρος ένα ιξωδοπλαστικό μοντέλο και αναπτύσσεται ο τρόπος με τον οποίο το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, στο τρίτο μέρος εξετάζεται ένα παράδειγμα επίλυσης μιας προβληματικής θεμελίωσης με τη χρήση του περιγραφόμενου μοντέλου.

ABSTRACT : This article consists of three parts. In the first part, a short introduction concerning problematic foundations, their time dependent settlements and issues of foundations' strengthening is presented. In order to simulate the complicated, time-dependent interaction problem of soil–structure–strengthening, a brief description of a viscoplastic model and the way that this model can be included in the Finite Element Method, is given in the second part. Finally, in the third part, an analysis case of a problematic foundation using the above described model is examined.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το θέμα της ενίσχυσης των θεμελιώσεων των κατασκευών παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια αυξημένο ενδιαφέρον, καθώς παρατηρείται ολοένα και εντονότερη η ανάγκη για τη διατήρηση, στερέωση, ανάδειξη και επανάχρηση παλιών κατασκευών. Στη σχετική όμως αρθρογραφία δεν φαίνεται να υπάρχουν ούτε γενικώς αποδεκτά κριτήρια για την αναγκαιότητα της ενίσχυσης μιας θεμελίωσης, αλλά ούτε και μια κοινά αποδεκτή μέθοδος υπολογισμού.

Στόχος της παρούσης εργασίας είναι η πρόταση και εφαρμογή μιας μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των μετακινήσεων των προβληματικών θεμελιώσεων αλλά και της συνεισφοράς της ενίσχυσης, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μεθοδολογία

αυτή βασίζεται στη χρήση ιξωδοπλαστικών μοντέλων για την περιγραφή της ερπυστικής εξέλιξης των μετακινήσεων στο σύνθετο και εξαρτώμενο από το χρόνο πρόβλημα αλληλεπίδρασης της θεμελίωσης–εδάφους–ενίσχυσης.

2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΑ ΘΕΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΟΥΣ

2.1 Προβληματικές θεμελιώσεις

Η αστοχία μιας θεμελίωσης και η επακόλουθη πρόκληση βλαβών στην ανωδομή, συνήθως προκαλούνται από:

- (α) Την υπέρβαση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.

(β) Την ανάπτυξη μεγάλων καθιζήσεων, (και ειδικότερα διαφορικών καθιζήσεων) εξαιτίας της στερεοποίησης μαλακών και συμπιεστών αργιλικών στρώσεων ικανού πάχους.

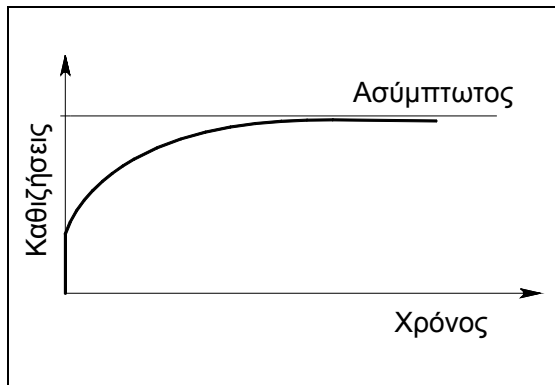
(γ) Μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις κοντά σε φυσικά πρηνή ή στο μέτωπο εκσκαφών.

Πέρα των κλασικών αυτών περιπτώσεων, συναντάται στην πράξη μια πολύ μεγάλη ποικιλία αιτίων που προκαλούν μετακινήσεις ή ακόμα και την αστοχία της θεμελίωσης, όπως η διάνοιξη υπογείων έργων, η γήρανση και εξασθένηση των θεμελίων ή και η συμπύκνωση χαλαρών επιχωματώσεων (π.χ. προσφάτων και ικανού πάχους ανθρωπογενών αποθέσεων).

Ανεξαρτήτως όμως των αιτίων στα οποία οφείλονται οι μετακινήσεις των θεμελιώσεων, έχει παρατηρηθεί (Bond, 1983) ότι αποτελούν τη συχνότερη αιτία πρόκλησης βλαβών σε κτιριακά και άλλα τεχνικά έργα.

2.2 Μορφή των καθιζήσεων προβληματικών θεμελιώσεων

Η τυπική μορφή των καθιζήσεων που παρουσιάζουν οι προβληματικές θεμελιώσεις σε σχέση με το χρόνο, δίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Διάγραμμα χρόνου-καθίξεως για την περίπτωση που η θεμελίωση εδράζεται σε εδαφικό προφίλ στο οποίο κυριαρχούν στρώσεις συμπιεστών εδαφών.

Figure 1. Time-settlement diagram for the case that the foundation rests on compressible strata.

Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη του παραπάνω σχήματος αντιστοιχεί στην περίπτωση που η θεμελίωση εδράζεται σε εδαφικό προφίλ, στο οποίο κυριαρχούν στρώσεις συμπιεστών εδαφών χαμηλής διαπερατότητας με αποτέλεσμα οι καθιζήσεις να εξελίσσονται εξαιτίας της μακρόχρονης

στερεοποίησης με έναν φθίνοντα ρυθμό. Η μορφή αυτή παρουσιάζει ομοιότητες με την κλασική μορφή εξέλιξης του ερπυσμού σε υλικά με ιξώδοπλαστική συμπεριφορά (Lemaitre, Chaboche, 1990).

2.3 Κριτήριο επιβολής ενίσχυσης των θεμελιώσεων

Στη σχετική αρθρογραφία δεν υπάρχει ένα γενικά αποδεκτό κριτήριο και στην πράξη συνήθως διαπιστώνεται μια δυσκολία για την απόφαση ενίσχυσης μιας κατά τα φαινόμενα προβληματικής θεμελίωσης. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί το περιγραφικό αλλά σαφές κριτήριο (Τσότσος, 2000), κατά το οποίο προτείνεται ενίσχυση της θεμελίωσης ενός έργου όταν:

(α) Το έργο παρουσιάζει σοβαρές βλάβες οφειλόμενες σε μετακινήσεις των θεμελίων οι οποίες συνεχίζονται.

(β) Οι βλάβες δεν είναι ακόμα σοβαρές αλλά ο ρυθμός των καθιζήσεων αυξάνεται ή είναι υψηλός.

(γ) Οι καθιζήσεις έχουν μεν περιοριστεί, αλλά η κατάσταση της θεμελίωσης δικαιολογεί σοβαρή ανησυχία στην περίπτωση πρόσθετων επιπονήσεων.

2.4 Ενίσχυση των θεμελιώσεων

Οι εφαρμοζόμενες τεχνικές ενίσχυσης των θεμελίων είναι πολλές, σε γενικές γραμμές όμως μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

(α) Αβαθής υποθεμελίωση.

(β) Βαθεία υποθεμελίωση με την κατασκευή μικροπασσάλων.

(γ) Βελτίωση και ενίσχυση του εδάφους με ενέσεις.

Όσον αφορά το θέμα του υπολογισμού των ενισχύσεων προβληματικών θεμελιώσεων, δεν υπάρχει μια κοινά αποδεκτή μεθοδολογία στη βιβλιογραφία, με τις περισσότερες των σχετικών αναφορών να αποτελούν εξειδικευμένες εφαρμογές σε συγκεκριμένες περιπτώσεις έργων. Οι (Τσότσος κ.α., 1992) παρουσίασαν μια μεθοδολογία, η οποία στηρίζεται στην ελατηριακή θεώρηση του εδάφους, με τους περιορισμούς, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που συνεπάγεται μια τέτοια προσέγγιση.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της συνεισφοράς της ενίσχυσης σε προβληματικές θεμελιώσεις στηρίζεται στην εφαρμογή της

μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η χρονική εξέλιξη των μετακινήσεων λαμβάνεται υπόψη υιοθετώντας ένα ιξωδοπλαστικό μοντέλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού.

Σε σύγκριση με τις μεθόδους που προσεγγίζουν ελατηριακά το έδαφος, η προτεινόμενη μέθοδος εμφανίζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- (α) Προσομοιώνει καλύτερα τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού όταν αυτό βρίσκεται σε οριακή εντατική κατάσταση τέτοια που να επιφέρει τη διαρροή ή την αστοχία του, καθώς και τη συμπεριφορά του μετά τη διαρροή.
- (β) Επιτρέπει με πιο φυσικό και ρεαλιστικό τρόπο την αναδιανομή των τάσεων στο εσωτερικό του εδάφους όταν εφαρμόζεται η ενίσχυση.
- (γ) Θεωρητικά δεν παρουσιάζει κανένα περιορισμό ως προς τη γεωμετρία της κατασκευής και το εδαφικό προφίλ και παρέχει ευελιξία στην προσομοίωση της ενίσχυσης.

Σαν μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου αλλά και του τρόπου εφαρμογής της στην παρούσα εργασία, θα μπορούσαν να αναφερθούν τα εξής:

- (α) Δε λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της στερεοποίησης σύμφωνα με τις κλασσικές προσεγγίσεις, αλλά το προσεγγίζει φαινομενολογικά, μέσω της ιξωδοπλαστικής εξέλιξης των μετακινήσεων και κατ' επέκταση μέσω του συντελεστή ιξώδους η . Στη σωστή εκτίμηση του ιξώδους, έγκειται και η μεγαλύτερη δυσκολία κατά τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου.
- (β) Λόγω έλλειψης στοιχείων διεπιφάνειας στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, θεωρείται ότι αναπτύσσεται πλήρως η τριβή μεταξύ των στοιχείων δοκών και του εδάφους, γεγονός που συνήθως δεν ισχύει.

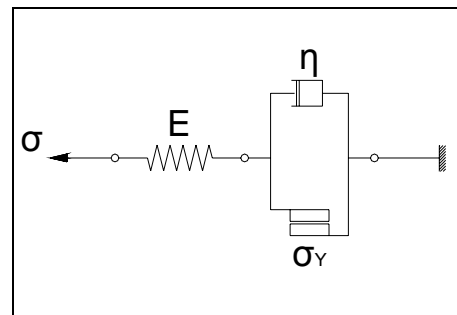
3. ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται η μελέτη της συμπεριφοράς υλικών με την εισαγωγή του παράγοντα χρόνου στις καταστατικές τους εξισώσεις. Με τη βοήθεια ρεολογικών μοντέλων εξετάζεται η κατηγορία των υλικών εκείνων που χαρακτηρίζονται από

ιξωδοπλαστική συμπεριφορά, και στη συνέχεια αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο αυτά χρησιμοποιούνται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, παρουσιάζεται το λογισμικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων, με το οποίο εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία.

3.1. Περιγραφή της ιξωδοπλαστικής συμπεριφοράς με τη βοήθεια ρεολογικών μοντέλων

Για να γίνει κατανοητή η έννοια ενός ελαστικού, ιξώδους-πλαστικού μοντέλου συχνά χρησιμοποιούνται μονοδιάστατα ρεολογικά μοντέλα (Lemaitre, Chaboche, 1990). Αυτή η λογική υιοθετείται και στην παρούσα εργασία. Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται το μοντέλο που επιλέγεται για να περιγράψει την ελαστική ιξωδοπλαστική συμπεριφορά. Το μοντέλο αυτό, που θεωρείται ότι καταλαμβάνει μοναδιαίο μήκος και εμβαδό, αποτελείται από ένα ελατήριο με ελατηριακή σταθερά E , το οποίο είναι συνδεδεμένο με ένα αποσβεστήρα που περιγράφεται από την τιμή του ιξώδους η και ένα μηχανισμό τριβής *Coulomb*, τοποθετημένο παράλληλα με τον αποσβεστήρα, που χαρακτηρίζεται από την τάση διαρροής σ_Y .



Σχήμα 2. Μονοδιάστατο ρεολογικό μοντέλο κατάλληλο για την περιγραφή ενός μονοδιάστατου ιξωδοπλαστικού υλικού.

Figure 2. One dimensional rheological model capable of illustrating the response of a one dimensional viscoplastic solid.

Η εφαρμοζόμενη τάση στο μηχανισμό τριβής δεν μπορεί να ξεπεράσει κατ' απόλυτη τιμή την τάση διαρροής $\sigma_Y > 0$ οριοθετώντας αυτό που αποκαλείται ελαστική περιοχή \mathbb{E}_σ , η οποία μπορεί να οριστεί σαν το παρακάτω κλειστό σύνολο:

$$\mathbb{E}_\sigma = \{ \tau \in \mathbb{R} \mid f(\tau) := |\tau| - \sigma_Y \leq 0 \}, \quad (1)$$

όπου η $f(t)$ αναφέρεται συχνά και ως συνάρτηση διαρροής.

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στον αποσβεστήρα δίνονται από τη γνωστή σχέση της ρευστομηχανικής

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon}^{vp} \quad (2)$$

όπου $\dot{\varepsilon}^{vp}$ είναι ο ρυθμός των παραμορφώσεων και το ιξώδες η έχει διαστάσεις [χρόνος×δύναμη / επιφάνεια].

Αν η εφαρμοζόμενη τάση είναι $\bar{\sigma}$ και η συνολική παραμόρφωση είναι ε , τότε μπορούμε να θεωρήσουμε την αθροιστική διάσπαση,

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp} \quad (3)$$

όπου ε^e είναι η παραμόρφωση στο ελατήριο, έτσι ώστε

$$\bar{\sigma} = E \varepsilon^e = E (\varepsilon - \varepsilon^{vp}). \quad (4)$$

Αν η εφαρμοζόμενη τάση $\bar{\sigma} \notin \mathbb{E}_\sigma$, δηλαδή $f(\bar{\sigma}) := |\bar{\sigma}| - \sigma_Y > 0$, τότε η τάση στο μηχανισμό τριβής παραμένει σ_Y , ενώ στον αποσβεστήρα αναπτύσσεται μια τάση σ_{ex} που είναι ίση με:

$$\sigma_{ex} = \begin{cases} \bar{\sigma} - \sigma_Y, & \text{αν } \bar{\sigma} \geq \sigma_Y \\ \bar{\sigma} + \sigma_Y, & \text{αν } \bar{\sigma} \leq -\sigma_Y \end{cases} \quad (5)$$

Γνωρίζοντας ότι οι τάσεις στον αποσβεστήρα συνδέονται με τις παραμορφώσεις μέσω της σχέσης (2), από την (5) μπορεί να αποδεχθεί (Simo, 1998) ότι ο ρυθμός των ιξωδοπλαστικών παραμορφώσεων δίνεται από τη σχέση:

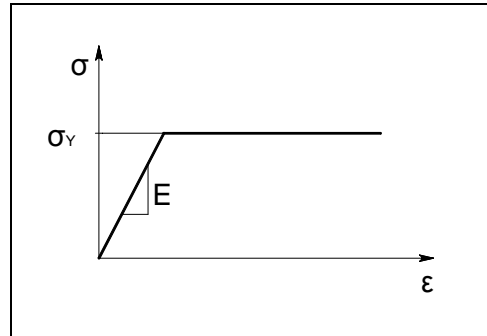
$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{\langle f(\sigma) \rangle}{\eta} \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma}, \quad (6)$$

όπου $\langle x \rangle$ ορίζεται ως $\langle x \rangle := \frac{x + |x|}{2}$.

Η (6) είναι γνωστή και ως ιξωδοπλαστική καταστατική εξίσωση του Perzyna (Perzyna, 1966). Η εξίσωση αυτή μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά για το μονοδιάστατο μοντέλο (Owen *et al.*, 1980), θεωρώντας ότι τη χρονική στιγμή t_0 εφαρμόζεται μια τάση $\bar{\sigma} > \sigma_Y$, δίνοντας σαν λύση:

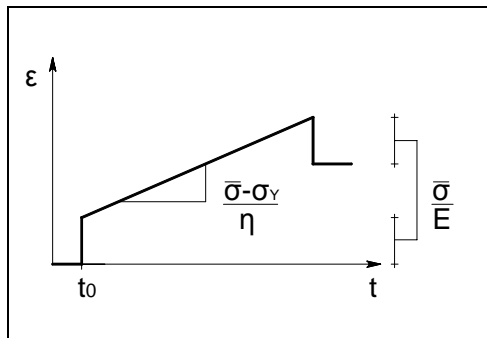
$$\varepsilon^{vp}(t) = \frac{\bar{\sigma} - \sigma_Y}{\eta} (t - t_0), \text{ για } t \in (t_0, \infty). \quad (7)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στο Σχήμα 3 δίνεται η σχέση τάσεων–παραμορφώσεων και στο Σχήμα 4 η σχέση παραμορφώσεων–χρόνου για το μονοδιάστατο ρεολογικό μοντέλο του Σχήματος 2.



Σχήμα 3. Σχέση τάσεων–παραμορφώσεων για το ελαστικό ιδεατά ιξωδοπλαστικό μοντέλο του Σχήματος 2.

Figure 3. Stress–strain relationship for the elastic perfectly viscoplastic model of Figure 2.



Σχήμα 4. Σχέση παραμορφώσεων–χρόνου για το ελαστικά ιδεατά ιξωδοπλαστικό μοντέλο του Σχήματος 2. Στο σχήμα αυτό συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση της ολικής αποφόρτισης κατά την οποία έχουμε την αφαίρεση ολόκληρου του ελαστικού τμήματος των παραμορφώσεων, ενώ παραμένει το πλαστικό, μη αντιστρέψιμο, τμήμα.

Figure 4. Strain–time relationship for the elastic perfectly viscoplastic model of Figure 2. Also included in this figure is the response of the model when the load is removed, leading to the removal of the elastic strains, whereas the plastic, irreversible strains, remain.

3.2. Εισαγωγή της καταστατικής εξίσωσης στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η εξίσωση (6) μπορεί να γενικευτεί άμεσα στις δύο ή τρεις διαστάσεις με τη χρήση τανυστικών μεγεθών στη θέση των αντίστοιχων βαθμωτών. Η εισαγωγή της (6) στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ελάχιστα διαφέρει από την αντίστοιχη περίπτωση ενός ελαστοπλαστικού μοντέλου. Οι κλάσεις των αλγόριθμων (Crisfield, 1991) που χρησιμοποιούνται για την αριθμητική ολοκλήρωση της (6) στοχεύουν μέσα από μία αυξητική διαδικασία, στο προσδιορισμό των τάσεων σε διακριτά σημεία του συνεχούς μέσου, που συνήθως είναι τα σημεία ολοκλήρωσης του στοιχείου, γνωρίζοντας (α) τις τάσεις σ_n , τις παραμορφώσεις ε_n^{vp} και τυχόν άλλες εσωτερικές μεταβλητές q_n κατά το προηγούμενο βήμα και (β) την αύξηση των παραμορφώσεων $\delta\varepsilon_{n+1}$. Οι αλγόριθμοι αυτοί αποτελούνται από δύο κυρίως βήματα. Στο πρώτο χρησιμοποιείται μια ελαστική σχέση για τον υπολογισμό της δοκιμαστικής εντατικής κατάστασης σ_{n+1}^{trial} . Αν οι τάσεις βρεθούν εντός της ελαστικής περιοχής, δεν υπάρχει λόγος να ολοκληρωθεί η (6). Αν όμως η εντατική κατάσταση βρεθεί εκτός της περιοχής αυτής, τότε χρειάζεται να υιοθετηθεί ένα σχήμα για την επιστροφή τους στην επιφάνεια διαρροής. Η διαφορά ανάμεσα στις καταστατικές εξισώσεις ελαστοπλαστικού και ελαστικού ιξώδους-πλαστικού τύπου είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση η επιστροφή μπορεί να γίνει σταδιακά, εξαρτώμενη από το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης.

Στην παρούσα εργασία για την ολοκλήρωση της (6), χρησιμοποιήθηκε η backward (implicit) Euler μέθοδος, η οποία οδηγεί σε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων για την επίλυση του οποίου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newton – Raphson. Αυτή η διαδικασία, που αναφέρεται στα περισσότερα σύγχρονα συγγράμματα (Simo, 1998, Belytschko 2000), εγγυάται σύγκλιση ασχέτως χρονικού βήματος, αλλά η ακρίβεια της εξαρτάται από το βήμα ολοκλήρωσης. Για περισσότερες πληροφορίες για τον αλγόριθμο και τον τρόπο με τον οποίο αυτός μπορεί να εισαχθεί μέσα στον κώδικα ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στο (Karaoulanis, 2001).

3.3 Κριτήριο διαρροής Drucker– Prager

Για την πληρότητα ενός μη γραμμικού καταστατικού νόμου πρέπει να οριστεί και ένα κριτήριο διαρροής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το κριτήριο που αποδίδεται στους Drucker και Prager, το οποίο χρησιμοποιεί τη συνοχή c και τη γωνία τριβής φ του εδαφικού υλικού για να περιγράψει την επιφάνεια διαρροής και στην ουσία αποτελεί μια προσέγγιση του κριτηρίου Mohr–Coulomb, που χρησιμοποιείται ευρέως στη γεωτεχνική μηχανική.

3.4. Χρήση ιξωδοπλαστικών καταστατικών νόμων σε εμπορικά πακέτα λογισμικού

Ο καταστατικός νόμος που περιγράφηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια υλοποιήθηκε από τον πρώτο συγγραφέα κατά τη συνεργασία του με την εταιρία SOFiSTiK AG και πλέον αποτελεί κομμάτι του εμπορικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων SOFiSTiK (SOFiSTiK, 2005). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και αξονοσυμμετρίας, είναι δηλαδή κατάλληλος για τα πλέον συνήθη προβλήματα της γεωτεχνικής μηχανικής, και μπορεί να συνεργαστεί με όλα τα στοιχεία και τις μεθόδους μη γραμμικής ανάλυσης που παρέχει το λογισμικό της SOFiSTiK.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ ΙΞΩΔΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΥ ΝΟΜΟΥ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζεται η μεθοδολογία που προτείνεται σ' αυτήν την εργασία για τη μελέτη προβληματικών θεμελιώσεων.

4.1 Περιγραφή του προβλήματος

Εξετάζεται ένα παράδειγμα θεμελίωσης πλάτους $B=2.0\text{m}$, στατικού ύψους $h=0.60\text{m}$, και σχετικά μεγάλου μήκους. Το ρόλο της ενίσχυσης αναλαμβάνουν δύο στοιχεία δοκού διατομής $0.15\text{m}\times 0.15\text{m}$ ανά τρέχον μέτρο της θεμελίωσης.

Το έδαφος είναι ομογενές και χαρακτηρίζεται από συνοχή $c=100\text{kN/m}^2$ και γωνία τριβής $\varphi=20^\circ$, μέτρο ελαστικότητας $E=100000\text{kN/m}^2$, και λόγο του Poisson $\nu=0.3$. Το βραχώδες υπόβαθρο βρίσκεται στα 12.0m από τη στάθμη της θεμελίωσης.

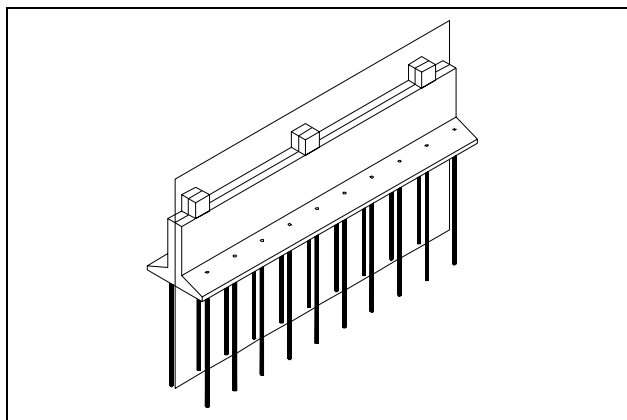
Όσον αφορά το ιξώδες η του εδάφους, πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά ο εργαστηριακός υπολογισμός του είναι δύσκολος και δεν γνωρίζουμε να υπάρχει μια πρότυπη δοκιμή υπολογισμού (Fedra, 1992). Στο συγκεκριμένο πρόβλημα η επιρροή του ιξώδους η περιορίζεται στο χρόνο ολοκλήρωσης του φαινομένου. Λόγω της μακροσκοπικής προσέγγισης που επιχειρείται, η τιμή του μπορεί να εκτιμηθεί από υπάρχουσες μετρήσεις των μετακινήσεων στην προβληματική θεμελίωση, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την κατασκευή της. Στην παρούσα εργασία η τιμή του λαμβάνεται ίση με $10^{10} \text{s} \cdot \text{kN/m}^2$ ($\approx 116 \cdot 10^3 \text{days} \cdot \text{kN/m}^2$).

Η θεμελίωση φορτίζεται με ένα φορτίο ίσο με 2000kN/m^2 το οποίο είναι μικρότερο από το φορτίο αστοχίας, είναι όμως ικανό να επιφέρει πλαστικοποιήσεις σε μια μεγάλη περιοχή του εδάφους που προσομοιώνεται.

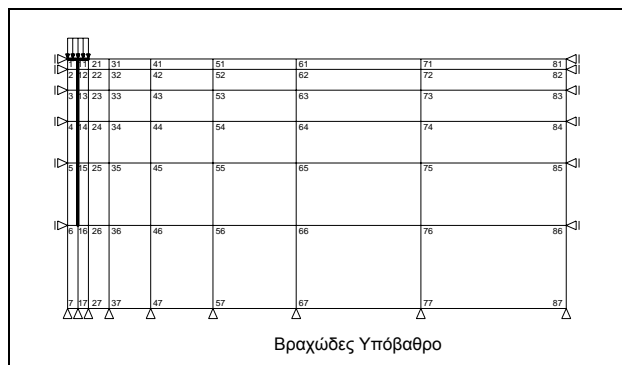
4.2 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία

Η επίλυση γίνεται θεωρώντας ότι η επικρατούσα εντατική κατάσταση προσεγγίζει αυτήν της επίπεδης παραμόρφωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία του φορέα (Σχήμα 5) και το βραχώδες υπόβαθρο, διακριτοποιείται μια περιοχή διαστάσεων $12.0\text{m} \times 24.0\text{m}$ (Σχήμα 6).

Οι συνοριακές συνθήκες επιλέγονται έτσι ώστε να επιτρέπουν τις κατακόρυφες μετακινήσεις στα κατακόρυφα σύνορα και να απαγορεύουν τις οριζόντιες σε όλα τα σύνορα.



Σχήμα 5. Σκαρίφημα της θεμελίωσης, της ενίσχυσης και του επιπέδου συμμετρίας.
Figure 5. The foundation, the strengthening and the plane of symmetry.



Σχήμα 6. Η διακριτοποίηση του φορέα.
Figure 6. The discretized structure.

Τόσο το θεμέλιο όσο και η ενίσχυση προσομοιώνονται με στοιχεία δοκού, ενώ το έδαφος προσομοιώνεται με τετράκομβρα στοιχεία.

4.3 Βήματα επίλυσης

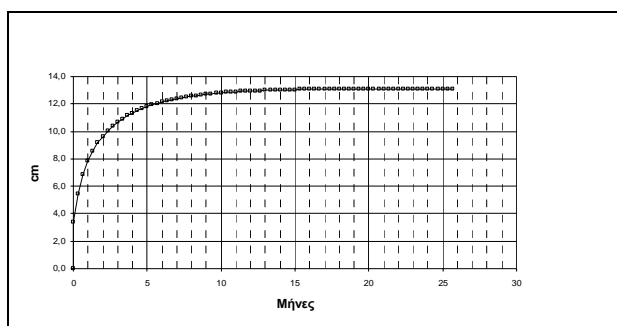
Η διαδικασία επίλυσης ακολουθεί τα επόμενα τρία βήματα:

- 1) Υπολογίζεται η αρχική εντατική κατάσταση. Στις επιλύσεις που ακολουθούν η τιμή του K_0 λαμβάνεται από τη σχέση $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$, όπου ν ο λόγος του Poisson.
- 2) Το εδαφικό υλικό θεωρείται ότι υπακούει στον προαναφερθέντα ελαστικό ιξώδη-πλαστικό νόμο. Εφαρμόζεται το φορτίο της θεμελίωσης και υπολογίζονται οι μετακινήσεις και η εξέλιξή τους με το χρόνο στο μέσο του θεμελίου.
- 3) Σε κάποια χρονική στιγμή, εφαρμόζεται η ενίσχυση και στη συνέχεια υπολογίζεται η επιρροή της στην εξέλιξη των μετακινήσεων. Ο χρόνος αυξάνεται μέχρι ο ρυθμός των μετακινήσεων πρακτικά να μηδενιστεί, οπότε και θεωρείται ότι το φαινόμενο έχει ολοκληρωθεί. Σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου είναι γνωστά τα εντατικά μεγέθη στα στοιχεία της ενίσχυσης, γεγονός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαστασιολόγησή τους.

4.4 Επίλυση χωρίς τη χρήση της ενίσχυσης

Αρχικά επιλύεται το προσομοίωμα χωρίς να χρησιμοποιηθούν στοιχεία ενίσχυσης και το αποτέλεσμα της επίλυσης δίνεται στο Σχήμα 7. Παρατηρείται ότι:

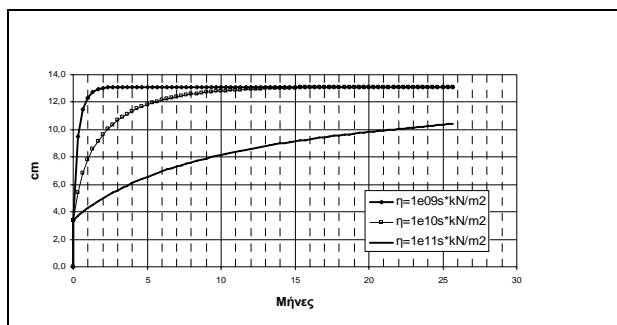
- 1) Η καμπύλη καθιζήσεων-χρόνου που προέκυψε από την ανάλυση ταυτίζεται ποιοτικά με αυτήν του Σχήματος 1.
- 2) Η τελική τιμή των καθιζήσεων στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ίση με 13.1cm και πραγματοποιείται μετά από περίπου 26 μήνες. Η άμεση καθίζηση είναι 3.4cm, δηλαδή ίση με το 26% της τελικής, ενώ μετά το πέρας 1, 2 και 6 μηνών η τιμή της καθίζησης είναι ίση με το 60%, 73% και 93% της τελικής καθίζησης αντίστοιχα, γεγονός καθοριστικό για την επιλογή του χρόνου της ενίσχυσης.



Σχήμα 7. Επίλυση χωρίς τη χρήση ενίσχυσης.
Figure 7. Analysis without strengthening.

4.5 Επιρροή του ιξώδους η

Στη συνέχεια επιλύεται το προσομοίωμα για τρεις τιμές του ιξώδους που κυμαίνονται από $10^9 \text{s}\cdot\text{kN}/\text{m}^2$ έως και $10^{11} \text{s}\cdot\text{kN}/\text{m}^2$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 8.



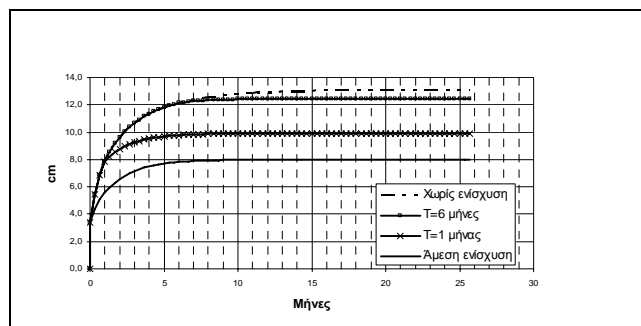
Σχήμα 8. Αποτελέσματα επιλύσεων για διάφορες τιμές του ιξώδους η .
Figure 8. Results of analyses for different values of the viscosity η .

Στις συγκεκριμένες επιλύσεις παρατηρείται η άμεση επιρροή του ιξώδους στο χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση του φαινομένου. Είναι φανερό ότι το ιξώδες δεν επηρεάζει την τελική τιμή των καθιζήσεων,

αλλά μόνο το χρόνο που απαιτείται για να φτάσουμε στην τιμή αυτή.

4.6 Ενίσχυση με στοιχεία που λειτουργούν με την τριβή τους με το έδαφος

Ακολουθεί μια σειρά επιλύσεων που αφορούν την ενίσχυση με στοιχεία μήκους 8.0m, τα οποία θεωρούνται ότι μεταφέρουν τα φορτία στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα μέσω της τριβής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9. Αποτελέσματα επιλύσεων για διάφορες χρονικές στιγμές εφαρμογής της ενίσχυσης, η οποία αποτελείται από πασσάλους τριβής.
Figure 9. Results of analyses for different starting times of applying the strengthening, which consists of friction piles.

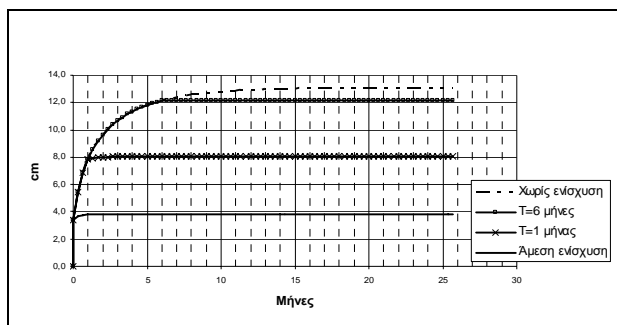
Στη σειρά αυτή των επιλύσεων παρατηρείται ότι όταν η ενίσχυση εφαρμοστεί άμεσα, τότε οι μετακινήσεις μειώνονται κατά περίπου 40%, συγκριτικά με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται καμία ενίσχυση. Αν η ενίσχυση εφαρμοστεί μετά από 1 μήνα τότε η μείωση αγγίζει το 23%, ενώ μετά τους 6 μήνες η συνεισφορά της ενίσχυσης είναι αμελητέα. Μπορεί ακόμα να παρατηρηθεί ότι η εφαρμογή της ενίσχυσης έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού αύξησης των καθιζήσεων αλλά και του χρόνου που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί το φαινόμενο.

4.7 Ενίσχυση με στοιχεία που εδράζονται στο βραχώδες υπόβαθρο

Τέλος εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία τα στοιχεία ενίσχυσης έχουν μήκος 12.0m και η αιχμή τους εδράζεται στο βραχώδες υπόβαθρο. Τα αποτελέσματα των επιλύσεων αυτών φαίνονται στο Σχήμα 10.

Συγκριτικά με τα αποτελέσματα της προηγούμενης περίπτωσης μπορεί να

παρατηρηθεί ότι και σ' αυτήν την περίπτωση η συνεισφορά της ενίσχυσης είναι αμελητέα, αν η ενίσχυση εφαρμοστεί μετά τον 6^ο μήνα. Η διαφορά όμως με την προηγούμενη περίπτωση είναι ότι τώρα ο ρυθμός αύξησης των καθιζήσεων μηδενίζεται σχεδόν άμεσα, το φαινόμενο πρακτικά σταματά τη στιγμή που ενεργοποιούνται τα στοιχεία της ενίσχυσης και η τελική τιμή της καθίζησης είναι περίπου ίση με την τιμή της καθίζησης τη χρονική στιγμή που εφαρμόζεται η ενίσχυση.



Σχήμα 10. Αποτελέσματα επιλύσεων για διάφορες χρονικές στιγμές εφαρμογής της ενίσχυσης, η οποία αποτελείται από πασσάλους αιχμής.

Figure 10. Results of analyses for different starting times of applying the strengthening, which consists of end bearing piles.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας την παρούσα εργασία μπορούμε να σταθούμε στα εξής σημεία:

- (α) Οι προβληματικές θεμελιώσεις αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους λόγους αστοχίας των κατασκευών.
- (β) Δεν υπάρχει στη σύγχρονη αρθρογραφία ένα κοινά αποδεκτό κριτήριο ανάγκης εφαρμογής ενίσχυσης μιας θεμελίωσης, αλλά ούτε και μια κοινά αποδεκτή μεθοδολογία υπολογισμού της.
- (γ) Το πρόβλημα επίλυσης ενός συστήματος θεμελίωσης-εδάφους-ενίσχυσης, είναι ένα σύνθετο, χρονικά εξαρτώμενο πρόβλημα αλληλεπίδρασης.
- (δ) Τα ιξωδοπλαστικά μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών είναι ικανά να περιγράψουν συμπεριφορές παρόμοιες με αυτές που παρατηρούνται στις προβληματικές θεμελιώσεις.
- (ε) Η παράλληλη χρήση ιξωδοπλαστικών μοντέλων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να

εφαρμοστεί στη μελέτη προβληματικών θεμελιώσεων με ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Ιδιαίτερη έμφαση τέλος θα πρέπει να δοθεί στην επιλογή της παραμέτρου του ιξώδους η που εισάγουν τα ιξωδοπλαστικά μοντέλα, καθώς από αυτήν την παράμετρο εξαρτάται η εξέλιξη του φαινομένου των καθιζήσεων με το χρόνο.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Belytschko T., Liu W. K. and Moran B. (2000), "Nonlinear Finite Element Analysis in Continua and Structures", John Wiley & Sons.
- Bond, L. K. (1983), "Remedial work to 20th century buildings", Repair & Renewal of Buildings: proceedings of a conference, T. Telford, London.
- Crisfield M. A. (1991), "Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures", Vol. 1 & 2. John Wiley & Sons.
- Feda J. (1992), "Creep of Soils and Related Phenomena", Developments in Geotechnical Engineering, 68, Elsevier.
- Karaoulanis F. (2001), "Viscoplastic Material Modelling", Master Thesis, Technische Universität München, Germany.
- Lemaitre J. and Chaboche J. L. (1990) "Mechanics of Solid Materials", Cambridge University Press.
- Owen, D. R. J and Hinton, E. (1980), "Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice", Pineridge Press Limited.
- Perzyna P. (1966), "Fundamental problems in viscoplasticity". Adv. Appl. Mech, Vol. 9, pp. 246-377.
- Simo J. C. and Hughes T. J. R. (1998), "Computational Inelasticity", Interdisciplinary Applied Mathematics, New York.
- SOFiSTiK (2005), "Talpa, Statics of Plane or Axissymmetric Geomechanical Structures", SOFiSTiK AG.
- Τσότσος Σ. (2000), "Ειδικές Θεμελιώσεις", Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.
- Τσότσος Σ., Χατζηγώγος Θ., Λιώλιος Α. (1992), "Μέθοδος υπολογισμού της ενίσχυσης προβληματικών θεμελιώσεων", 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής.