

Διάνοιξη της Σήραγγας Διχαλορέματος της παράκαμψης Αγ. Κων/νου του ΠΑΘΕ.

Tunnelling the Dichalorema Tunnel of the Ag.Konstandinos Deviation of PATHE Highway.

ΑΛΕΞΑΝΔΡΗΣ Α.Π. Πολιτικός Μηχανικός MSc/DIC,
ΑΜΠΑΡΙΩΤΗ Μ.Θ. Μηχανικός Ορυκτών Πόρων,
ΚΑΤΣΙΠΗ ΓΡΙΒΑ Ι.Ε. Μεταλλειολόγος Μηχανικός MSc,
ΠΑΥΛΟΥ Α.Ν. Πολιτικός Μηχανικός

Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΑΤΕ
Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΑΤΕ
Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΑΤΕ
Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΑΤΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η σήραγγα Διχαλορέματος, είναι μια δίδυμη οδική σήραγγα που διανοίγεται σε μάργες και λατυποπαγή πλειο-πλειστοκαινικής ηλικίας. Στην εργασία παρουσιάζονται οι κύριες θεωρήσεις του σχεδιασμού του έργου, όπως επίσης η μέθοδος και τα αποτελέσματα των σχετικών αναλύσεων. Ο σχεδιασμός στοχεύει στην εξασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου σε έναν γεωλογικό σχηματισμό που οι συνθήκες ευστάθειας αναμένεται να αλλάζουν απότομα λόγω των εναλλαγών αδρομερών με συνεκτικούς ορίζοντες και ενδεχομένως της πιθανής υδροφορίας, αλλά επίσης σε ένα ισχυρό και δύσκαμπτο κελύφος για τον αποτελεσματικό έλεγχο των συγκλίσεων. Η ανάλυση, που επικεντρώθηκε στους ασθενέστερους μαργαίικούς σχηματισμούς, διερεύνησε την επίδραση των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας του σχηματισμού στην εκτίμηση των συγκλίσεων και της έντασης του κελύφους της προσωρινής επένδυσης.

ABSTRACT: The Dichalorema tunnel which is part of the Agios Konstandinos deviation of the PATHE highway, is a twin tube road tunnel, excavated in marl and breccia formations of plio-pleistocene age. In this paper, the main design objectives as well as the adopted analytical approach is presented. The design focused on safeguarding face stability on an abruptly changing geologic formation, and on providing a stiff and strong lining to limit ground deformation. The analysis presented, concentrated on the weaker marl formation, and investigated the influence of the prefailure deformation properties of the marl to the calculated tunnel deformations and tunnel lining distress.

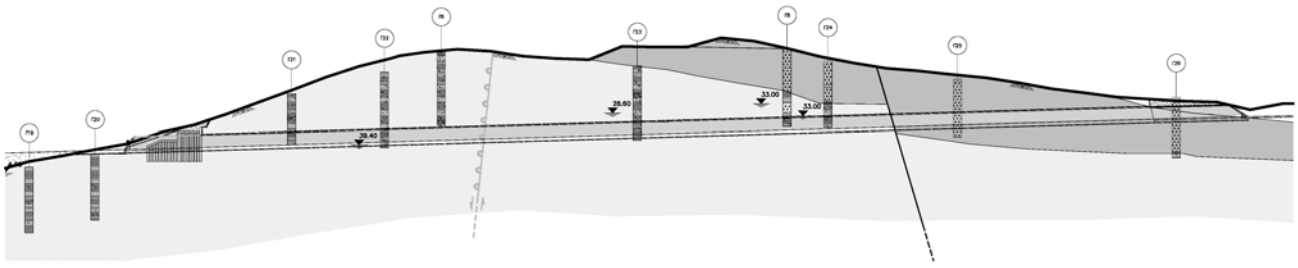
1. ΓΕΝΙΚΑ

Η σήραγγα Διχαλορέματος αποτελεί μέρος της παράκαμψης της πόλης του Αγίου Κωνσταντίνου του ΠΑΘΕ, έργο το οποίο έχει δημοπρατηθεί και κατασκευάζεται. Η νέα χάραξη του ΠΑΘΕ, που παρουσιάζεται στο σχήμα 1, ακολουθεί μια ημιορεινή οδευση η οποία περιλαμβάνει την διάνοιξη δύο σημαντικών σηράγγων. Η σήραγγα Διχαλορέματος είναι δίδυμη με μήκος 650 m περίπου, η οποία διασχίζει ένα λοφώδες ύψωμα που δομείται από μάργες και λατυποπαγή πλειο-πλειστοκαινικής ηλικίας, σε βάθος που κυμαίνεται από 6~60m.



Σχήμα 1. Η χάραξη της παράκαμψης Αγίου Κωνσταντίνου του ΠΑΘΕ.

Figure 1. The alignment of the Aghios Konstantinos deviation of PATHE highway.



Σχήμα 2 Γεωτεχνική μηκτομή των σηράγγων. Με ανοικτούς τόνους σημειώνονται οι Μάργες και με πιο σκούρους τα υπερκείμενα Λατυποπαγή.
Figure 2. Longitudinal section of the tunnels. Light color represents the marl formation while the darker color the breccia formation.

Η αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων είναι περίπου 30 m ενώ στο μέσον περίπου των δύο σηράγγων προβλέπεται η διάνοιξη μιας διασυνδετήριας στοάς, η οποία αποτελεί οδό διαφυγής σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η διατομή χρήσης των σηράγγων έχει το τυπικό πεταλοειδές ημικυκλικό σχήμα δίοχων οδικών σηράγγων, με ακτίνα εσωραχίου στο θόλο 5.25m και με αυξημένη ακτίνα καμπυλότητας στα τοιχώματα.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΓΕΩ-ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Οι γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες διάνοιξης διερευνήθηκαν στο στάδιο του σχεδιασμού του έργου με την εκτέλεση ενός ικανοποιητικού αριθμού δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που επέτρεψαν την διασάφηση της στρωματογραφίας. Με βάση τα ευρήματα της γεωτεχνικής διερεύνησης, η σήραγγα διανοίγεται στο μεγαλύτερο μήκος της σε αργιλομαργαϊκά υλικά πλειοκαινικής ηλικίας, ενώ στην περιοχή εξόδου ένα σχετικά μικρό τμήμα, μήκους περίπου 150 m, συναντά ένα σχηματισμό χαλαρά συγκολλημένων λατυποπαγών πλειστοκαινικής ηλικίας, ο οποίος υπέρκειται των μαργών (βλ. σχήμα 2). Το μεγαλύτερο μήκος της υπόγειας διάνοιξης πραγματοποιείται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ μόνο στο κεντρικό τμήμα αναμένεται η διάνοιξη να γίνει υπό τον υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος όμως είναι πιθανώς επικρεμάμενος και γενικά φαίνεται να έχει περιορισμένο δυναμικό.

Ο σχηματισμός των αργιλικών μαργών χαρακτηρίζεται από την παρουσία σποραδικών ενστρώσεων ή φακών άμμου ή χαλίκων. Οι αδρομερείς αυτές ενστρώσεις, σε πολλές θέσεις εμφανίζονται χωρίς λεπτομερές υλικό πλήρωσης, με αποτέλεσμα να αποτελούν

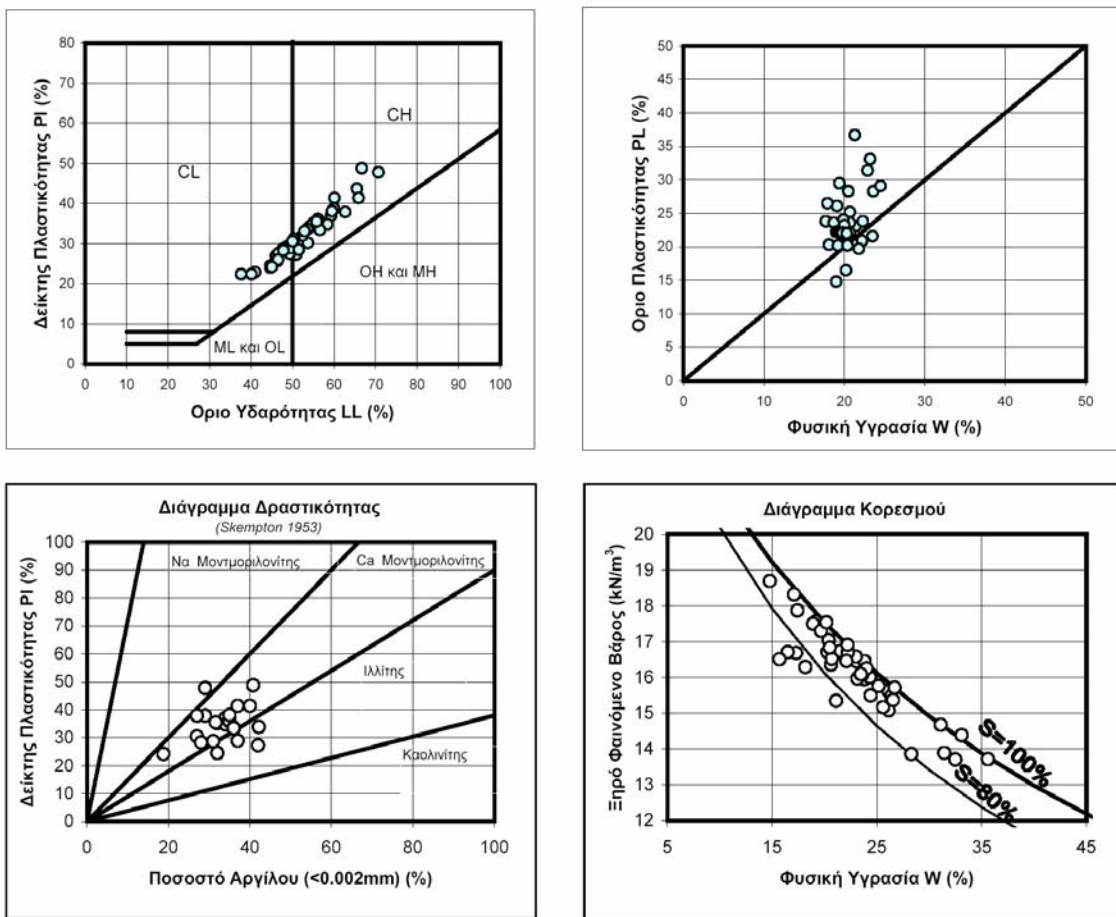
επιλεκτικές διόδους διήθησης των υπογείων υδάτων.

Το μαργαϊκό υλικό είναι μέσης έως υψηλής πλαστικότητας, με δείκτη πλαστικότητας PI που κυμαίνεται από 25-45% και χαρακτηρίζεται κατά το AUSCS ως CL-CH. Η φυσική υγρασία των δειγμάτων της μάργας βρέθηκε αρκετά χαμηλή (έως ~20%) και στις περισσότερες περιπτώσεις κοντά ή και κάτω από το όριο πλαστικότητας PL. Τα χαρακτηριστικά κατάταξης των μαργαϊκών υλικών συνοψίζονται στα διαγράμματα του σχήματος 3.

Το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) της αργιλικής μάργας, είναι χαμηλό και κυμαίνεται μεταξύ 20-40%. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των περισσότερων μαργαϊκών δειγμάτων χαρακτηρίζεται από ποσοστό άμμου μικρότερο του 20%. Το αργιλικό κλάσμα είναι αρκετά υψηλό, φθάνοντας το 40% σε ορισμένες περιπτώσεις, ενώ συνηθέστερα είναι υψηλότερο από 20%. Η μάργα είναι σφιγρή έως σκληρή λόγω της προστεροποίησης, της σιμέντωσης και της διαγένεσης του υλικού. Έτσι ο αριθμός κρούσεων της δοκιμής SPT είναι αρκετά υψηλός με μέση τιμή 41 (± 11) κρούσεις.

Ο σχηματισμός των λατυποπαγών χαρακτηρίζεται επίσης από σημαντική ετερογένεια, όσον αφορά την κοκκομετρία του αδρομερούς κλάσματος αλλά κυρίως όσο αφορά τον βαθμό συγκόλλησης. Με βάση τα αποτελέσματα του γεωερευνητικού προγράμματος φάνηκε ότι στις περισσότερες θέσεις τα λατυποπαγή ήταν ασθενώς συγκολλημένα ώστε να αποδιοργανώνονται από την ίδια την διαδικασία διάτρησης.

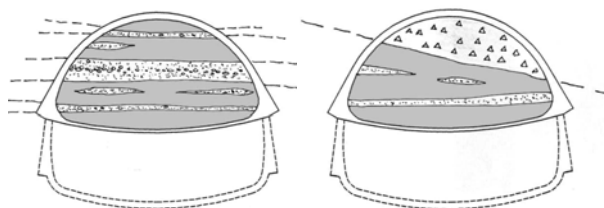
Ο σχεδιασμός των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στους σχηματισμούς αυτούς, έλαβε υπ' όψιν του την ανάγκη εξασφάλισης ικανοποιητικών συνθηκών ευστάθειας στην περιοχή του μετώπου προσβολής, όπου το υπόγειο άνοιγμα είναι ακόμα ανυποστήρικτο,



Σχήμα 3. Χαρακτηριστικά κατάταξης δειγμάτων των αργιλικών Μαργών.

Figure 3. Classification characteristics of marl samples.

και την ανάγκη δημιουργίας ενός ισχυρού και δύσκαμπτου κελύφους προσωρινής επένδυσης, το οποίο θα μπορεί να αναλάβει τα γεωστατικά φορτία και να ελέγξει τις συγκλίσεις του υπόγειου ανοίγματος.



Επικράτηση αδρομερών οριζόντων με παρουσία εισρών νερού
Μετάβαση από τις Μάργες στα Λατυποπαγή

Σχήμα 4. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής μέτρων προϋποστήριξης.

Figure 4. Characteristic cases of application of presupport measures.

Το μέτωπο διάνοιξης στους μαργαικούς σχηματισμούς εμφανίζει γενικά καλές συνθήκες ευστάθειας και δεν απαιτούνται ιδιαίτερα μέτρα υποστήριξης εκτός ίσως από τις θέσεις όπου διακόπτεται η προώθηση του μετώπου για την εκτέλεση άλλων εργασιών. Παρ' όλα αυτά σε θέσεις όπου επικρατούν αμμοχαλικώδεις

ενστρώσεις και ιδιαίτερα όταν ταυτόχρονα υπάρχει υπόγειο νερό οι συνθήκες ευστάθειας στην περιοχή του μετώπου επιδεινώνονται σημαντικά. Για την αντιμετώπιση τέτοιων συνθηκών, η διαδικασία διάνοιξης πρέπει να περιλαμβάνει αποστραγγιστικές οπές για την εκτόνωση των υδατικών πιέσεων, αγκύρια μετώπου και ενδεχομένως τοποθέτηση δοκών προπορείας. Παραπλήσια προβλήματα ασταθειών στην περιοχή του μετώπου αναμένονται και στη ζώνη μετάβασης από τις μάργες στα υπερκείμενα λατυποπαγή (βλ σχήμα 4).

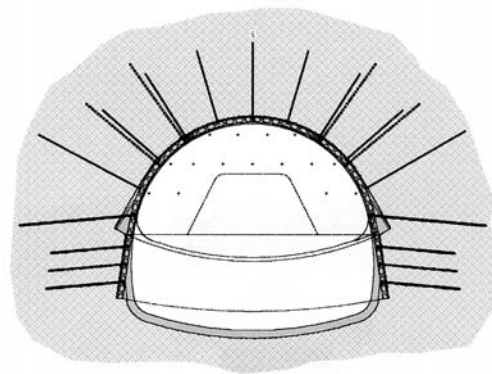
Κατά τη διάνοιξη στα λατυποπαγή, τα προβλήματα εντοπίζονται στις περιοχές χαλαρά συγκολλημένων ή ασύνδετων οριζόντων όπου οι τοπικές καταπτώσεις δεν είναι εύκολο να ελεγχθούν, ενώ ο κίνδυνος δημιουργίας αστοχιών μορφής καμινάδας είναι συνεχής. Αυτές οι περιπτώσεις αντιμετωπίζονται με την τοποθέτηση ράβδων προαγκύρωσης (spiling) και την εισπίεση τσιμεντενέματος τοπικά στην περιοχή του θόλου.

3. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

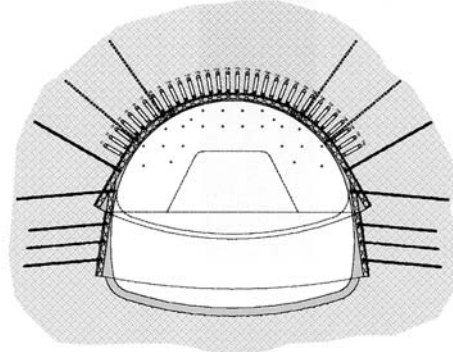
3.1 Κυρίως σήραγγα

Με βάση τις παραπάνω τεχνικογεωλογικές θεωρήσεις η διάνοιξη στον μαργαϊκό σχηματισμό σχεδιάστηκε σε δύο φάσεις διάνοιξης, θόλος πρώτα και βαθμίδα ακολούθως, με διαμόρφωση δαπέδου ανεστραμμένου θόλου επενδεδυμένου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στις δύο φάσεις εκσκαφής. Το βήμα προχώρησης της εκσκαφής είναι 1.0 m για τον θόλο και 3.0 m για την βαθμίδα. Η διατομή (σχήμα 5_α) επενδύεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με δικτυωτά πλαίσια (Lattice Girders). Όταν οι συνθήκες ευστάθειας του μετώπου το επιβάλλουν η διάνοιξη πραγματοποιείται υπό την προστασία δοκών προπορείας (σχήμα 5β και σχήμα 6), ενώ σε περίπτωση δυσμενέστερων συνθηκών (αναζυμωμένη άργιλος, ζώνες διάτμησης) η διατομή ενισχύεται με μικροπασσάλους βελτίωσης της έδρασης των πλαισίων του θόλου.

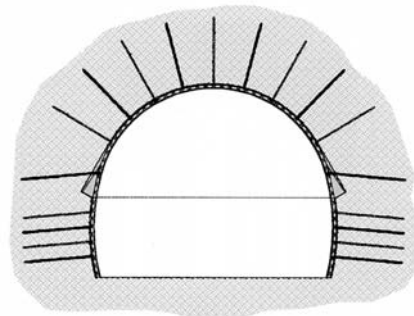
Στα λατυποπαγή η διάνοιξη σχεδιάστηκε επίσης σε δύο φάσεις με βήμα προχώρησης 1.50m για τον θόλο και 3.0m για την βαθμίδα. Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης συνίστανται σε αγκυρώσεις πλήρους πάκτωσης και ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με δικτυωτά πλαίσια (Σχήμα 5γ). Για τις θέσεις όπου τα λατυποπαγή είναι χαλαρά συγκολλημένα και προκύπτουν κατά την διάνοιξη προβλήματα καταπτώσεων στο ανυποστήρικτο τμήμα, προβλέπεται η εφαρμογή προαγκύρωσης ή/και ελαφρών δοκών προπορείας.



(α) Κατηγορία Μάργας M1

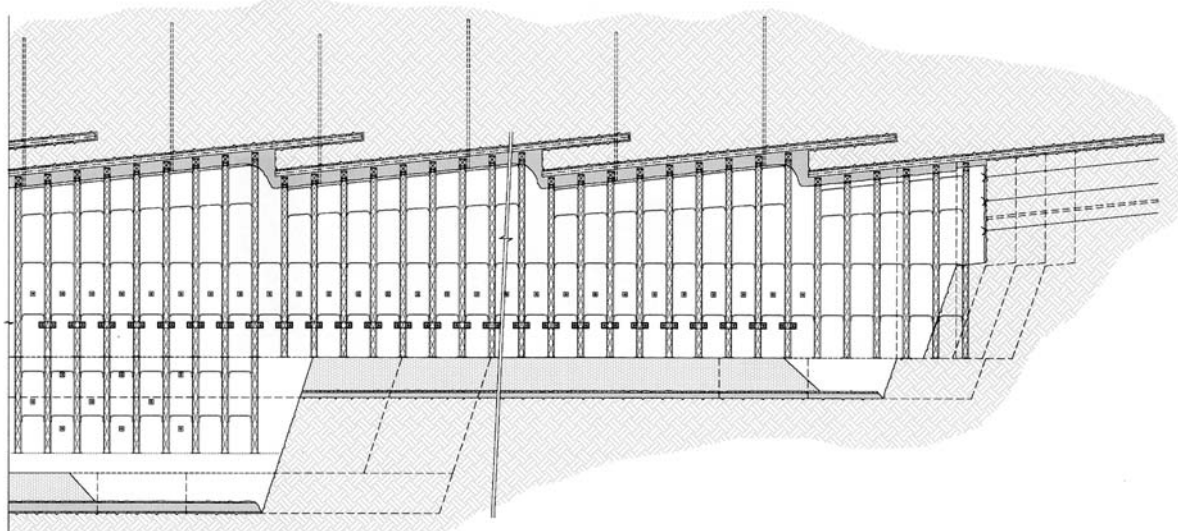


(β) Κατηγορία Μάργας με προυποστήριξη M2



(γ) Κατηγορία Λατυποπαγών

Σχήμα 5. Κύριες διατομές διάνοιξης και μέτρα προσωρινής υποστήριξης.
Figure 5. Main tunnel support classes.



Σχήμα 6. Διάνοιξη με προυποστήριξη (forepolling) κατηγορία M2.

Figure 6. Longitudinal section of the tunneling procedure and presupport measures (forepolling).

3.2 Διαμόρφωση στομίων

Τα έργα προσωρινής διαμόρφωσης του στομίου εισόδου της σήραγγας διαμορφώθηκαν εξ' ολοκλήρου στις αργιλικές μάργες σε φυσικά πρηνή με έντονες κλίσεις. Δεδομένου ότι στον σχηματισμό αυτό, σε γειτονική με το έργο εισόδου περιοχή, έχουν χαρτογραφηθεί ενεργές κατολισθήσεις, τα μέτωπα προσβολής διαμορφώθηκαν με πασσαλοαντιστηρίξεις, περιορίζοντας στο ελάχιστο την διατάραξη των συνθηκών ισορροπίας των φυσικών πρηνών. Αντίθετα το στόμιο εξόδου, που διαμορφώνεται στον ημιβραχώδη σχηματισμό των λατυποπαγών, το μέτωπο προσβολής διαμορφώθηκε με ελεύθερα πρηνή σταθεροποιημένα με αγκυρώσεις και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μία άποψη των στομίων της σήραγγας παρουσιάζεται στις φωτογραφίες του σχήματος 6.



Σχήμα 6. Στόμιο εισόδου (άνω) και εξόδου (κάτω) της σήραγγας
Figure 6. View of the entrance portal (upper figure) and the exit portal (lower figure).

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για την τεκμηρίωση της επάρκειας των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, αναφορικά με την δυνατότητα ανάληψης των γεωστατικών φορτίων και τον έλεγχο των συγκλίσεων του υπόγειου ανοίγματος, καταστρώθηκαν αριθμητικά προσομοιώματα πεπερασμένων διαφορών για κάθε κατηγορία διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης θεωρώντας τόσο τις θέσεις ελάχιστου (περιοχή στομίων) όσο και μέγιστου υπερκειμένου. Τα αριθμητικά προσομοιώματα ήταν διδιάστατα και αναλύθηκαν με τον κώδικα FLAC.

Οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας καθορίστηκαν με βάση τις εργα-

στηριακές και επί τόπου δοκιμές για τον μαργαϊκό σχηματισμό, και εμπειρικά με βάση τον γεωμηχανικό δείκτη αντοχής (GSI) για τον λατυποπαγή σχηματισμό.

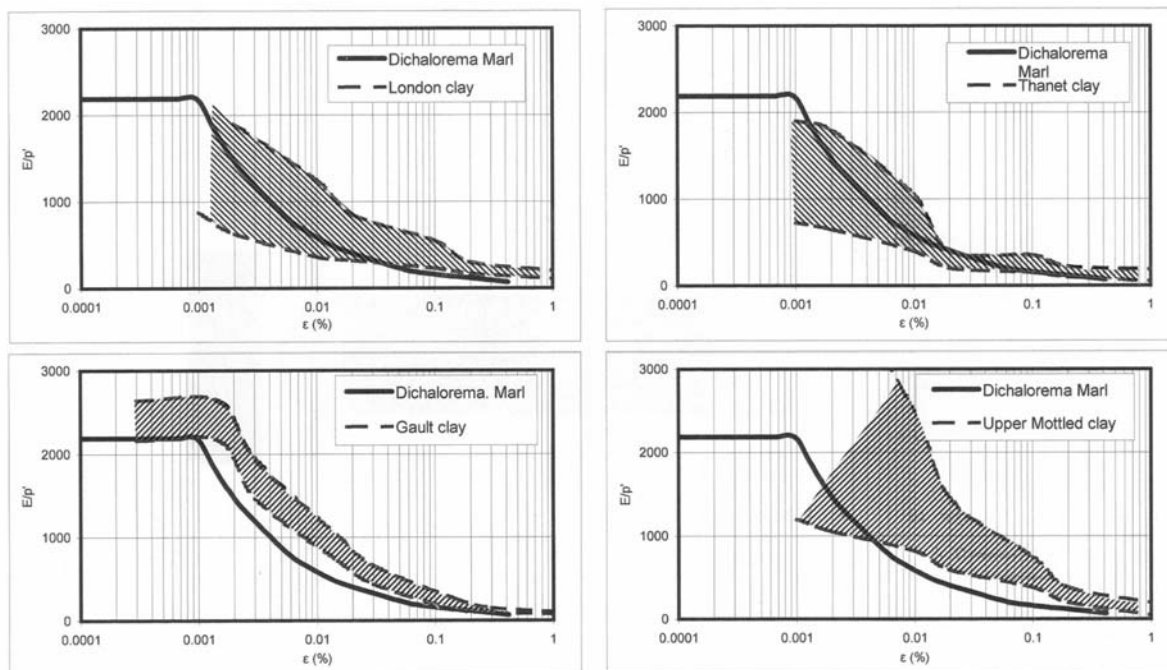
Οι ενεργές παράμετροι διατμητικής αντοχής του μαργαϊκού σχηματισμού προσδιορίστηκαν με βάση αργές δοκιμές άμεσης διάτμησης (CD) και αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές (με μέτρηση των πιέσεων πόρων) CUPP απ' όπου προέκυψαν οι μέσες τιμές παραμέτρων αντοχής:

$$c'=50 \text{ kPa } \varphi'=21.5^\circ$$

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας υπό αστράγγιστες συνθήκες E_u βασίστηκε στις τριαξονικές δοκιμές CUPP από τις οποίες προέκυψε ένα μέσο μέτρο ελαστικότητας $E_{50} = 85 \text{ MPa}$ που αντιστοιχεί σε διατμητική τάση ίση με το 50% της διατμητικής αντοχής. Παρ' όλα αυτά με βάση επί τόπου δοκιμές ντιλατομέτρου (πρέσα Goodman μαλακού βράχου), που επίσης εκτελέστηκαν στον σχηματισμό, προσδιορίστηκαν αρκετά υψηλότερα μέτρα ελαστικότητας μεταξύ 100-400 MPa.

Το μέτρο ελαστικότητας αποτελεί μία παράμετρο που εξαρτάται έντονα τόσο από την περιβάλλουσα τάση, όσο και από τη στάθμη παραμόρφωσης. Ιδιαίτερα στο πεδίο των μικρών παραμορφώσεων, το οποίο δεν προσεγγίζεται με τα συμβατικά συστήματα μέτρησης των παραμορφώσεων στην τριαξονική συσκευή, το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει σημαντικά υψηλότερες τιμές για μικρές διατμητικές παραμορφώσεις (Atkinson 2000).

Η επίδραση της μη γραμμικής ελαστικότητας σε προβλήματα διάνοιξης υπογείων έργων, έχει βρεθεί πώς είναι ιδιαίτερα σημαντική όσον αφορά το μέγεθος αλλά και το σχήμα της καμπύλης καθιζήσεων (settlement trough) που προκαλούν στην επιφάνεια ρηχές διανοίξεις (Addenbrooke et al 1997). Η επίδραση των παραμέτρων αντοχής του υλικού, είναι δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με τις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας του εδάφους. Η εξάρτηση της δυσκαμψίας από την περιβάλλουσα τάση και την στάθμη παραμόρφωσης εκτός από τις επιφανειακές καθιζήσεις επηρεάζει επίσης και τις συγκλίσεις στο εσωτερικό της σήραγγας, όπως επίσης και την κατανομή της έντασης στο κέλυφος της προσωρινής επένδυσης, που ενδιαφέρουν ιδιαίτερως εδώ.



Σχήμα 9. Υπολογιστική καμπύλη μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας με την παραμόρφωση (για $p_0=500$ kPa) σε σύγκριση με πειραματικές καμπύλες σκληρών αργίλων από την Μ.Βρετανία.

Figure 9. Modulus of elasticity degradation curve assumed in the numerical analyses ($p_0=500$ kPa) in comparison with experimental curves of hard clays from Great Britain

Παρά το γεγονός ότι στα πλαίσια του εργαστηριακού προγράμματος δεν έγιναν μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας στο πεδίο των μικρών παραμορφώσεων (με μέτρηση των παραμορφώσεων στην τριαξονική συσκευή τοπικά στο δείγμα), σε μια προσπάθεια βελτίωσης της ακρίβειας των προβλέψεων την αριθμητικών αναλύσεων της διάνοιξης, υιοθετήθηκε μια ημιεμπειρική μέθοδος προσδιορισμού μιας κατάλληλης σχέσης. Συγκεκριμένα θεωρήθηκε μια εκθετική εμπειρική σχέση της μορφής

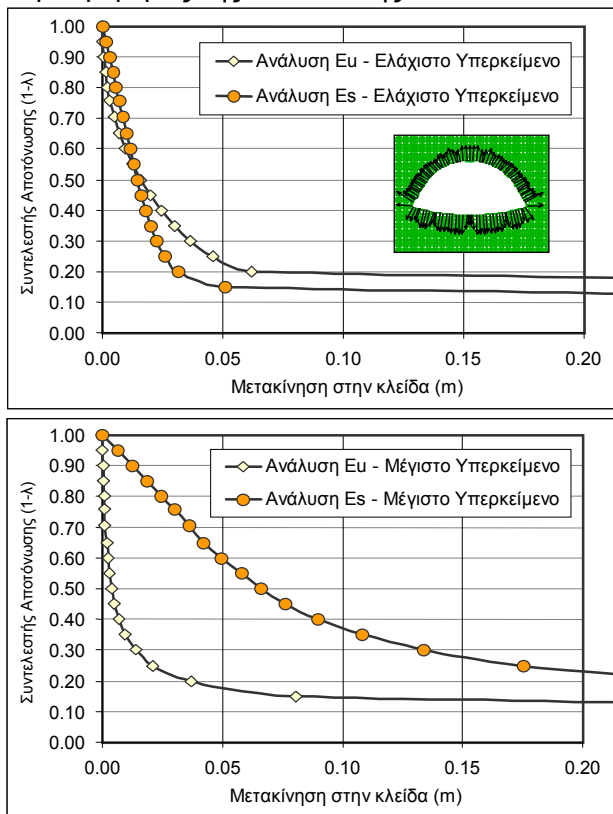
$$E=A f(P_0) \varepsilon^n$$

που συνδέει το μέτρο παραμορφωσιμότητας με την περιβάλλουσα τάση και την στάθμη παραμόρφωσης. Η σχέση προσαρμόστηκε με μια διαδικασία γραμμικής παρεμβολής στα εργαστηριακά αποτελέσματα και επεκτάθηκε στο πεδίο των μικρών παραμορφώσεων. Μια παρόμοια μορφής εκθετική σχέση για την προσομοίωση της μη γραμμικής ελαστικότητας έχει προταθεί και από τους Bolton & Whittle (1999). Δεδομένου ότι η εκθετική σχέση που υιοθετήθηκε, οδηγεί σε αφύσικα υψηλές τιμές του μέτρου ελαστικότητας για πάρα πολύ μικρές παραμορφώσεις, για παραμορφώσεις μικρότερες από $\varepsilon_0=0.001\%$ (very small strains) θεωρήθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι σταθερό και ανεξάρτητο των παραμορφώσεων.

Η σχέση μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας με την στάθμη παραμόρφωσης που προσδιορίστηκε με αυτή την διαδικασία συγκρίνεται στο σχήμα 9 με στοιχεία από αντίστοιχα εδαφικά υλικά από την βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα συγκρίνονται με καμπύλες μεταβολής του E_v/p_0' με την παραμόρφωση, που έχουν προσδιοριστεί για σκληρά αργιλικά υλικά από την Μεγάλη Βρετανία (London clay Upper Mottled clay, Thanet clay) (Hight and Jardine 1993), και (Gault clay) (Ng et. al 1997). Ο προσδιορισμός αυτών των καμπυλών έχει γίνει άμεσα στην τριαξονική συσκευή με μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων τοπικά στο δείγμα, μέθοδος που θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη.

Για μια πρώτη διερεύνηση της επίδρασης των παραπάνω παραδοχών στην συμπεριφορά του υπογείου ανοίγματος, εκτελέστηκαν για δύο στάθμες υπερκείμενου αριθμητικές αναλύσεις προοδευτικής αποτόνωσης της διατομής και χαράχθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα σύγκλισης-αποτόνωσης που συγκρίνονται μεταξύ τους στο σχήμα 10. Παρατηρείται ότι σε χαμηλά υπερκείμενα οι δύο προσεγγίσεις δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα, ενώ στα υψηλότερα υπερκείμενα οι αποκλίσεις είναι σημαντικές. Η αύξηση της δυσκαμψίας του εδάφους με την περιβάλλουσα τάση, που επίσης λαμβάνεται υπ' όψιν από την εμπειρική

σχέση που χρησιμοποιείται, έχει έναν εξίσου σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της συμπεριφοράς της κατασκευής.



Σχήμα 10. Διαγράμματα Σύγκλισης-αποτόνωσης στις Μάργες για σταθερό Eu και μεταβαλλόμενο Es μέτρο ελαστικότητας. Άνω περιοχή στομίου (ελάχιστο υπερκείμενο), Κάτω περιοχή μεγίστου υπερκείμενου.

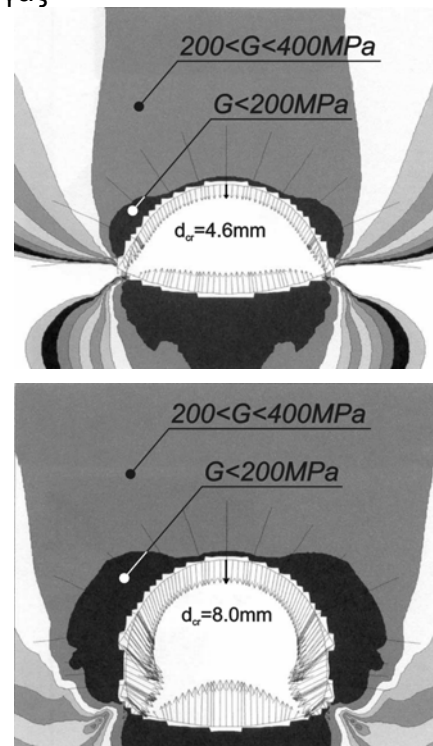
Figure 10. Convergence–confinement curves derived considering linear Eu and non linear elasticity Es for the marl formation. Upper figure portal area (low overburden), Lower figure max overburden.

Η ανάλυση όλων των διατομών διάνοιξης στις μάργες έγινε και με τις δύο παραδοχές, θεωρώντας λεπτομερώς όλα τα στάδια εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης. Στο σχήμα 11 παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες συγκλίσεις της προσωρινής υποστήριξης για το προσομοίωμα μεταβλητών ελαστικών σταθερών στην περιοχή του μεγίστου υπερκείμενου. Στο ίδιο σχήμα, παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου διάτμησης που αντιστοιχούν στην στάθμη παραμόρφωσης που προκύπτει μετά την διάνοιξη της εκάστοτε φάσης εκσκαφής. Παρατηρείται η δραστική μείωση της δυσκαμψίας στις περιοχές που αναπτύσσονται έντονες διατμητικές παραμορφώσεις και διατήρηση υψηλών τιμών εκεί που το κέλυφος μεταφέρει υψηλές θλιπτικές δυνάμεις στο περιβάλλον έδαφος και

αυξάνει κατ' αυτό τον τρόπο την μέση ενεργό τάση.

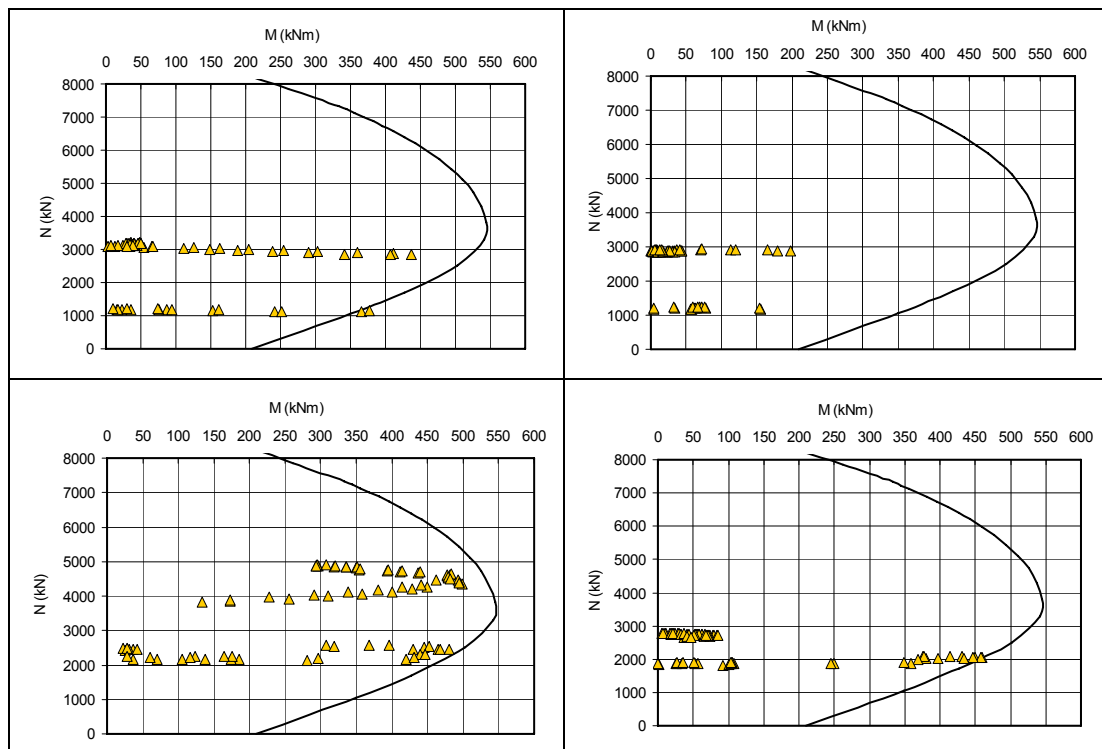
Στο σχήμα 12 συγκρίνονται τα εντατικά μεγέθη του κελύφους της προσωρινής επένδυσης στην περιοχή των μεγίστων υπερκείμενων (που οι διαφορές στην συμπεριφορά είναι εντονότερες) όπως αυτά προέκυψαν από τις δύο αναλύσεις. Στα ίδια διαγράμματα παρουσιάζεται η καμπύλη οριακής αντοχής του κελύφους. Παρατηρείται ότι η παραδοχή μη γραμμικής ελαστικότητας προβλέπει παραπλήσιες τιμές αξονικών δυνάμεων και σημαντικά μικρότερες τιμές ροπών κάμψης σε σχέση με την παραδοχή σταθερού μέτρου ελαστικότητας. Οι διαφοροποιήσεις είναι εντονότερες μετά την εκσκαφή της β' φάσης, όπου η καμπτική ένταση στα τοιχώματα (που έχει μεγάλη καμπυλότητα) είναι σημαντική.

Η διαφοροποίηση στις αναμενόμενες συγκλίσεις είναι επίσης μεγάλη και αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για την αξιολόγηση των μετρούμενων συγκλίσεων στο εσωτερικό της σήραγγας



Σχήμα 11. Μέγιστες μετακινήσεις κλειδας και υπολογιζόμενο μέτρο διάτμησης στο τέλος κάθε φάσης εκσκαφής (περιοχή υψηλών υπερκείμενων H=60 m).

Figure 11. Maximum crown displacements and shear moduli at the end of each excavation stage (maximum overburden H=60 m)



Σχήμα 12. Έλεγχος επάρκειας κελύφους εκτ. σκυροδέματος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής του Θόλου (άνω) και της Βαθμίδας (κάτω) θεωρώντας σταθερό μέτρο ελαστικότητας (αριστερά) και κυμαινόμενο (απομειούμενο με την στάθμη παραμόρφωσης) (δεξιά).

Figure 12. Structural check of the shotcrete lining after top heading (top) and bench (bottom) excavation considering a constant (left) and a degrading (right) modulus of elasticity.

5.0 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία παρουσιάστηκαν οι κύριες θεωρήσεις του σχεδιασμού της σήραγγας Διχαλορέματος που λαμβάνουν υπ' όψιν τις ιδιαιτερότητες του γεωλογικού σχηματισμού στον οποίο διανοίγονται.

Για την προσομοίωση της διάνοιξης με σκοπό την ρεαλιστική εκτίμηση των συγκλίσεων και της έντασης της προσωρινής επένδυσης δείχθηκε ότι είναι σημαντικό να ληφθεί υπ' όψιν η αυξημένη δυσκαμψία του αργιλομαργαϊκού υλικού σε μικρές παραμορφώσεις. Μια απλή εκθετική σχέση που προσαρμόστηκε στα στοιχεία των διαθέσιμων εργαστηριακών δοκιμών και στοιχείων από την βιβλιογραφία, απέτελεσε την βάση για μια ποσοτική διερεύνηση του θέματος. Η διάθεση στοιχείων συμπεριφοράς του υλικού στο πεδίο των μικρών παραμορφώσεων σε συνδυασμό με πιο ολοκληρωμένα καταστατικά προσομοιώματα μη γραμμικής ελαστικότητας, όπως αυτό των Jardine et al (1986) θα αποτελούσε το επόμενο βήμα προσέγγισης της πραγματικής συμπεριφοράς του υλικού.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- Hight D.W. and Jardine R.J. (1993) Small strain stiffness and strength characteristics of hard London tertiary clays. *Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks*. Anagnostopoulos et al (eds)
- Ng C.W.W., M.D.Bolton & G.R.Dasari (1994) The small strain stiffness of a carbonate stiff clay. *Soils and Foundations* 35, No4, 109-114.
- Addenbrooke T.I., D.M.Potts and A.M.Puzrin (1997) The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction. *Géotechnique* 47,(3),693-712.
- Atkinson, J. (2000) Non linear soil stiffness in routine design. *Géotechnique* 50,(5),487-508
- Bolton M.D. & Whittle R.W. (1999) A no-linear elastic/perfectly plastic analysis for plane strain undrained expansion tests. *Géotechnique* 49, No 1, 133-141.
- Jardine R.J., Potts D.M., Fourie A.B., and Burland J.B. (1986) Studies of the influence of non linear stress strain characteristics in soil-structure interaction. *Géotechnique* 36 No 3, pp 377-396.