

Κεφάλαιο 13

ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Κατά τη διάνοιξη υπογείων έργων απαιτείται γενικά η εκτέλεση γεωτεχνικών δοκιμών προκειμένου να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά της βραχομάζας. Οι μετρήσεις από τις δοκιμές αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ήτοι: (α) προσδιορισμού παραμέτρων σχεδιασμού, όπως παραμορφωσιμότητας και αντοχής, που πραγματοποιούνται συνήθως πριν από την κατασκευή του έργου, και (β) παρακολούθησης, όπως μετατοπίσεων και τάσεων, που πραγματοποιούνται κατά ή μετά την κατασκευή του έργου. Οι μετρήσεις εντατικού πεδίου ανήκουν στις μετρήσεις παραμέτρων σχεδιασμού, αναπτύχθηκαν εν τούτοις σε ξεχωριστό κεφάλαιο, λόγω του μεγάλου αντικειμένου τους.

1 Μετρήσεις παραμέτρων σχεδιασμού

1.1 Δοκιμή φόρτισης πλάκας (Plate bearing test)

Η μάζα του πετρώματος αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα μεγάλων δομημάτων, επί της οποίας θεμελιώνονται ή εντός της οποίας κατασκευάζονται, όπως π.χ. τα φράγματα και οι υπόγειοι θάλαμοι υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ισχύος, αντίστοιχα. Η παραμόρφωση της μάζας του πετρώματος υπό τα φορτία που επιβάλλονται από αυτά τα δομήματα έχει σημαντικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό τους. Για την πρόβλεψη της δυστροπίας ή της αντοχής της μάζας του πετρώματος δεν υπάρχει δοκιμή σε εργαστηριακά δείγματα που να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Η δοκιμή φόρτισης του επί τόπου πετρώματος με πλάκα παρέχει ένα κατάλληλο τρόπο για τον καθορισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητάς του (Rocha *et al.*, 1955). Η δοκιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την αξιολόγηση της αντοχής του επί τόπου πετρώματος (Serafim, 1964; Coates and Gyenge, 1966).

1.1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Κατά τη δοκιμή φόρτισης με πλάκα, μέρος αποκαλυμμένης επιφάνειας του πετρώματος φορτίζεται με ορθή δύναμη και μετρούνται οι αντίστοιχες επιφανειακές μετατοπίσεις. Οι τάσεις και οι μετατοπίσεις μέσα στο πέτρωμα συσχετίζονται με το εφαρμοζόμενο φορτίο με τη λύση Boussinesq (1883) για επιφανειακή φόρτιση ελαστικού ημιχώρου.

Το φορτίο εφαρμόζεται με υδραυλικά έμβολα (Σχήμα 1). Οι δοκιμές πραγματοποιούνται γενικά σε σήραγγες ή στοές, στις οποίες η αντίδραση των γρύλων

εξασφαλίζεται από τα εκατέρωθεν τοιχώματα. Για να είναι τα αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά της μάζας του πετρώματος, είναι απαραίτητο ο όγκος που επηρεάζεται από τη δοκιμή να είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να συμπεριλαμβάνει αρκετά από τα δομικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τη βραχομάζα από ένα δοκίμιο πετρώματος. Η ικανότητα των γρύλων που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή φόρτισης πλάκας περιορίζεται στην πράξη σε λίγα MN, και το μέγεθος της φορτιζόμενης επιφάνειας περιορίζεται σε ένα κλάσμα της ακτίνας της σήραγγας στην οποία εκτελείται η δοκιμή. Οι διαστάσεις της φορτιζόμενης περιοχής κυμαίνονται γενικά από μερικά dm έως ένα m, και οι ασκούμενες πιέσεις σπάνια υπερβαίνουν λίγες δεκάδες MPa.



Σχήμα 1. Δοκιμή φόρτισης πλάκας (φωτογραφία της Sabir Co)

Στην πράξη, οι συνοριακές συνθήκες κάτω από την πλάκα φόρτισης είναι μεταξύ των ακραίων συνθηκών ομοιόμορφης μετατόπισης (άκαμπτη πλάκα) και ομοιόμορφης πίεσης. Η τάση στην περίμετρο μίας απολύτως άκαμπτης πλάκας θα ήταν άπειρη, και το πέτρωμα στην περίπτωση αυτή αστοχεί. Εξαιτίας αυτής της δυσκολίας και άλλων που προκύπτουν από την ευκαμψία των πραγματικών πλακών φόρτισης, επιδιώκονται συνήθως συνθήκες ομοιόμορφης πίεσης με την παρεμβολή μεταξύ πλάκας και πετρώματος είτε ενός στρώματος εύκαμπτου υλικού, όπως π.χ. κάποιο ελαστικό, είτε ενός υδραυλικού μαξιλαριού, όπως π.χ. ένας επίπεδος γρύλος,. Σε συνθήκες ομοιόμορφης πίεσης και προκειμένου για κυκλική πλάκα φόρτισης

ακτίνας a , η σχέση μεταξύ της μέσης μετατόπισης W_{av} , και της πίεσης p , δίνεται από τη σχέση:

$$W_{av} = 0.54\pi pa(1 - \nu^2) / E \quad (1)$$

Γενικά η παρακάτω σχέση συνδέει τη μέση μετατόπιση κάτω από την πλάκα με τη φόρτιση για πλάκες διαφόρων σχημάτων (Timoshenko και Goodier, 1951):

$$W_{av} = mP(1 - \nu^2)A^{1/2} / E \quad (2)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της περιοχής φόρτισης και m αριθμητικός συντελεστής εξαρτάται από το σχήμα της διατομής της πλάκας (0.96 για κυκλική πλάκα, 0.95 για τετράγωνη πλάκα, 0.71 για ορθογώνια πλάκα με λόγο μήκους προς πλάτος ίσο με 10).

Οι τάσεις παράλληλα και ακτινικά προς τον άξονα της φόρτισης δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_z = p(1 - b^3) \quad (3)$$

$$\sigma_r = \sigma_\theta = p[(1 + 2\nu) + b^3 - 2(1 + \nu)b] / 2 \quad (4)$$

$$b = z^2 / (a^2 + z^2)^{1/2}$$

Υποθέτοντας για την αντοχή της βραχομάζας μία γραμμική σχέση της μορφής

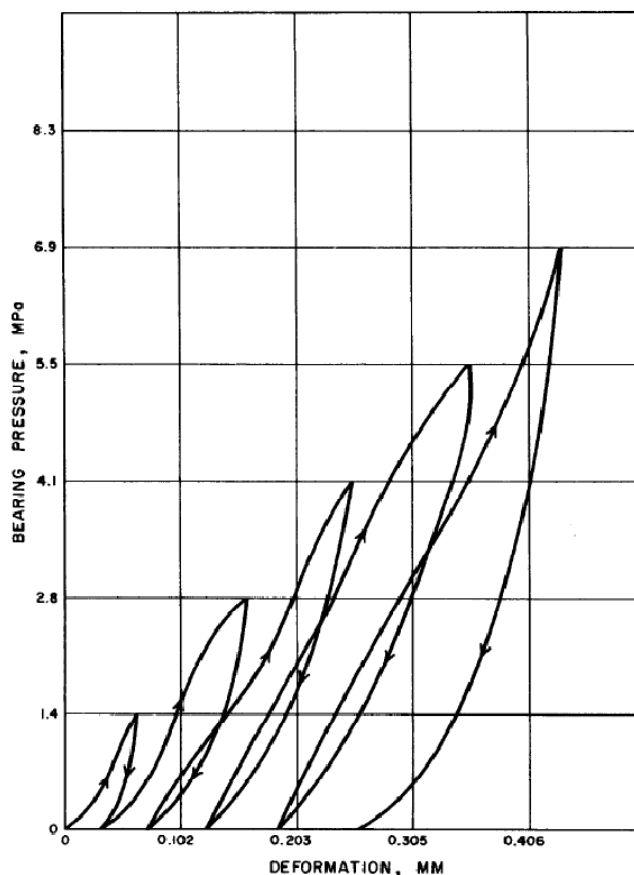
$$\sigma_z = C_0 + q\sigma_r \quad (5)$$

το πέτρωμα κάτω από την πλάκα αστοχεί όταν:

$$p = 2C_0 / [2(1 - b^3) - q(1 + 2\nu) - qb^3 + 2q(1 + \nu)b] \quad (6)$$

Ο παρονομαστής στη σχέση (6) γίνεται μέγιστος για $b = [2(1 + \nu)q / 3(q + 2)]^{1/2}$. Έτσι, η ελάχιστη τιμή της τάσης p προκύπτει ίση με μία έως δύο φορές την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη C_0 . Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του b πιθανόν κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 1, που σημαίνει ότι η αστοχία εμφανίζεται σε βάθος της τάξης της ακτίνας της πλάκας φόρτισης.

Για την εκτέλεση δοκιμών φόρτισης με πλάκα στην επιφάνεια, οι Zienkiewicz & Stagg (1967) προτείνουν να εξασφαλίζεται η αντίδραση στην δύναμη των γρύλων από καλώδια στερεωμένα σε διατρήματα στο πέτρωμα κάτω από την πλάκα. Το βάθος του διατρήματος αγκύρωσης πρέπει να είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερο από τη διάσταση της πλάκας.



Σχήμα 3. Μετατόπιση στην επιφάνεια του πετρώματος συναρτήσει της πίεσης

Για τον υπολογισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας του πετρώματος χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της θεωρίας ελαστικότητας. Στην περίπτωση ομοιόμορφης πίεσης σε κυκλική επιφάνεια, η μετατόπιση σε οποιοδήποτε σημείο κάτω από το κέντρο της κυκλικής επιφάνειας δίνεται από τη σχέση

$$w_z = \frac{2q(1-\nu^2)}{E}[(a^2 + z^2)^{1/2} - z] - \frac{qz(1+\nu)}{E}[z(a^2 + z^2)^{-1/2} - 1] \quad (7)$$

όπου:

w_z = Μετατόπιση στην κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης πίεσης

z = Απόσταση του σημείου από τη φορτιζόμενη επιφάνεια

q = Πίεση

a = Ακτίνα φορτιζόμενης επιφάνειας

ν = Λόγος Poisson

E = Μέτρο ελαστικότητας

Για $z=0$, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$w_{z=0} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} qa \quad (8)$$

Όταν η φόρτιση εφαρμόζεται σε κυκλική επιφάνεια με εσωτερική οπή στο κέντρο της, η επίδραση της αφόρτιστης οπής πρέπει να αφαιρεθεί. Συμβολίζοντας με a_1 και a_2 την εξωτερική και εσωτερική ακτίνα αντίστοιχα της φορτιζόμενης επιφάνειας προκύπτει:

$$w_z = \frac{2q(1-\nu^2)}{E} [(a^2 + z^2)^{1/2} (a_1^2 + z^2)^{1/2}] + \frac{z^2 q(1+\nu)}{E} [(a_1^2 + z^2)^{-1/2} - (a_2^2 + z^2)^{-1/2}] \quad (9)$$

Με αντικατάσταση των τιμών των a_1 , a_2 , ν και z η σχέση (9) γίνεται:

$$w_z = \frac{q}{E} (K_z) \quad (10)$$

Εάν σε δύο σημεία σε βάθος z_1 και z_2 μετρηθούν οι τιμές της μετατόπισης, το μέτρο παραμόρφωσης του πετρώματος μεταξύ των σημείων αυτών μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$E_d = q \left[\frac{K_{z1} - K_{z2}}{W_{z1} - W_{z2}} \right] \quad (11)$$

1.1.3 Ειδικές δοκιμές

A. Δοκιμή φόρτισης πλάκας σε γεώτρηση

Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης της βραχομάζας επί τόπου. Διαδοχικά αυξανόμενες πιέσεις, σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης, εφαρμόζονται στον επίπεδο πυθμένα μιας γεώτρησης και καταγράφονται οι προκύπτουσες μετατοπίσεις του πετρώματος. Τα μέτρα ελαστικότητας και παραμόρφωσης μπορούν να βρεθούν από τις γραφικές παραστάσεις της πίεσης ως προς τη μετατόπιση. Οι χρονικά εξαρτώμενες ιδιότητες (ερπυσμός) μπορούν να καθοριστούν από τις γραφικές παραστάσεις της μετατόπισης συναρτήσει του χρόνου.

Η μέθοδος επιτρέπει την εκτέλεση της δοκιμής σε αρκετά βάθη, με ελάχιστη δαπάνη για την πρόσβαση σε κάθε ορίζοντα δοκιμής. Στο τέλος είναι δυνατόν να ληφθεί μία ημι-συνεχής καταγραφή του μέτρου παραμορφωσιμότητας σε συνάρτηση του βάθους.

Η κατεύθυνση της φόρτισης συμπίπτει με τον άξονα της γεώτρησης, που συνήθως είναι κατακόρυφος, και γι' αυτό καμία πληροφορία δεν μπορεί να ληφθεί σχετικά με την ανισοτροπία του πετρώματος. Το μέγεθος της φορτιζόμενης περιοχής περιορίζεται από τις

δυνατότητες του διαθέσιμου εξοπλισμού διάτρησης και είναι συνήθως μικρότερο από άλλους τύπους δοκιμών φόρτισης πλάκας.

Η μέθοδος υιοθετείται συνήθως για την παροχή πληροφοριών για το σχεδιασμό θεμελιώσεων, ως εναλλακτική της δοκιμής φόρτισης πλάκας όταν η πρόσβαση στο επίπεδο θεμελίωσης δεν μπορεί εύκολα να εξασφαλισθεί από μια ερευνητική τάφρο ή στοιά.

B. Δοκιμή ακτινικής φόρτισης με γρύλους

Με τη δοκιμή αυτή μετρείται η παραμορφωσιμότητα μιας βραχόμαζας με την υποβολή ενός ερευνητικού θαλάμου κυκλικής διατομής σε ομοιόμορφα διανεμημένη ακτινική φόρτιση και καταγραφή των μετατοπίσεων του πετρώματος, από τις οποίες μπορούν να υπολογιστεί το μέτρο παραμορφωσιμότητας του πετρώματος.

Με τη δοκιμή φορτίζεται ένας σημαντικός όγκο πετρώματος, ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά των ιδιοτήτων της βραχομάζας, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση των ασυνεχειών. Η επίδραση της ανισοτροπίας στην παραμορφωσιμότητα του πετρώματος μπορεί επίσης να μετρηθεί.

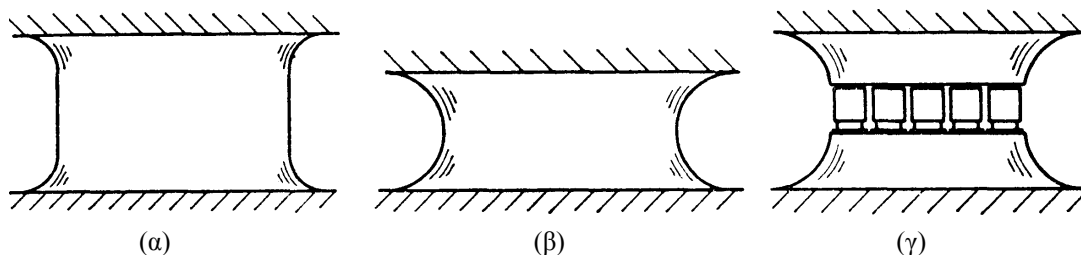
Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται συνήθως στο σχεδιασμό θεμελιώσεων φραγμάτων και της επένδυσης φρεάτων ή σιράγγων υπό πίεση.

1.2 Μεγάλης κλίμακας δοκιμές θλίψης

Η πρόβλεψη της αντοχής μεγάλων στύλων πετρώματος επί τόπου, με την ακρίβεια που απαιτείται για οικονομικό σχεδιασμό, είναι δύσκολη εάν όχι αδύνατη. Έτσι είναι συχνά απαραίτητο να μετρηθεί η αντοχή τους, η οποία εξαρτάται από το πέτρωμα, τη γεωμετρία του στύλου, και το μέγεθός του. Η γεωμετρία και η γεωλογική δομή καθορίζουν τους περιορισμούς στα άκρα του στύλου λόγω των στρωμάτων που τον συμπιέζουν. Αυτοί οι περιορισμοί ασκούν σημαντική επίδραση στη θλιπτική αντοχή των στύλων.

Εάν τα στρώματα στα άκρα του στύλου είναι παρόμοια η παραμόρφωση του είναι συμμετρική ως ένα επίπεδο που διέρχεται από το μέσο του κάθετα στον άξονά του. Ένα τέτοιο επίπεδο παραμένει επίπεδο κατά τη διάρκεια της θλίψης του στύλου λόγω της σύγκλισης, και υπόκειται μόνο σε ορθή τάση. Εάν ο στύλος βραχύνεται κατά Δh , η απόσταση μεταξύ αυτού του κεντρικού επιπέδου και των στρωμάτων στα άκρα του στύλου μειώνεται ομοιόμορφα κατά $\Delta h/2$. Σε μία δοκιμή, η θλίψη αυτού του στύλου μπορεί να προσομοιωθεί με την απομάκρυνση των δύο επιφανειών του επιπέδου συμμετρίας κατά $\Delta h/2$ με την εφαρμογή ομοιόμορφων ορθών δυνάμεων, όπως δείχνεται στο Σχήμα 4 (γ). Εφόσον απαιτούνται μόνο ορθές δυνάμεις, σχετικά απλά υδραυλικά έμβολα μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για τη δοκιμή. Τα έμβολα αυτά πρέπει να επιτρέπουν την ελεύθερη πλευρική διόγκωση του στύλου κατά τη θλίψη και να τοποθετούνται έτσι ώστε να επεκτείνονται κατά σταθερό μήκος.



Σχήμα 4. (α) Στύλος πριν από τη θλίψη, (β) Στύλος συμπιεσμένος από τη σύγκλιση της εκσκαφής, (γ) Στύλος κάθε μισό του οποίου θλίβεται από γρύλους εγκατεστημένους στο επίπεδο του μέσου του.

Τοποθετώντας τα έμβολα φόρτισης σε εγκοπή στο επίπεδο συμμετρίας ουσιαστικά εκτελούνται δύο δοκιμές (μία σε κάθε μισό του στύλου). Διευκολύνεται έτσι η μέτρηση της βράχυνσης του στύλου, η οποία πρέπει να είναι ίδια με την έκταση των γρύλων κατά τη φόρτιση. Το πείραμα θα μπορούσε να γίνει στο μισό του στύλου μόνο. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιώντας μόνο κατακόρυφα φορτία, το ύψος ενός πειραματικού στύλου είναι μόνο το μισό αυτού του πραγματικού στύλου που προσομοιώνεται, λόγω της μεταβολής των περιορισμών στο άκρο των εμβόλων φόρτισης.

Η ικανότητα φόρτισης των εμβόλων για μία τέτοια δοκιμή θλίψης πρέπει να αντιστοιχεί σε πίεση τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερη από τη μέση αντοχή του στύλου. Εάν θεωρηθεί ότι κάθε έμβολο μπορεί να εκταθεί κατά το $1/3$ του πάχους του w_j , το απαραίτητο πάχος για την προσαρμογή των εμβόλων της δοκιμής σχετίζεται με το ύψος του στύλου h_t και την οριακή παραμόρφωση του, ε_u ως εξής: $w_j/h_t = 3 \varepsilon_u$.

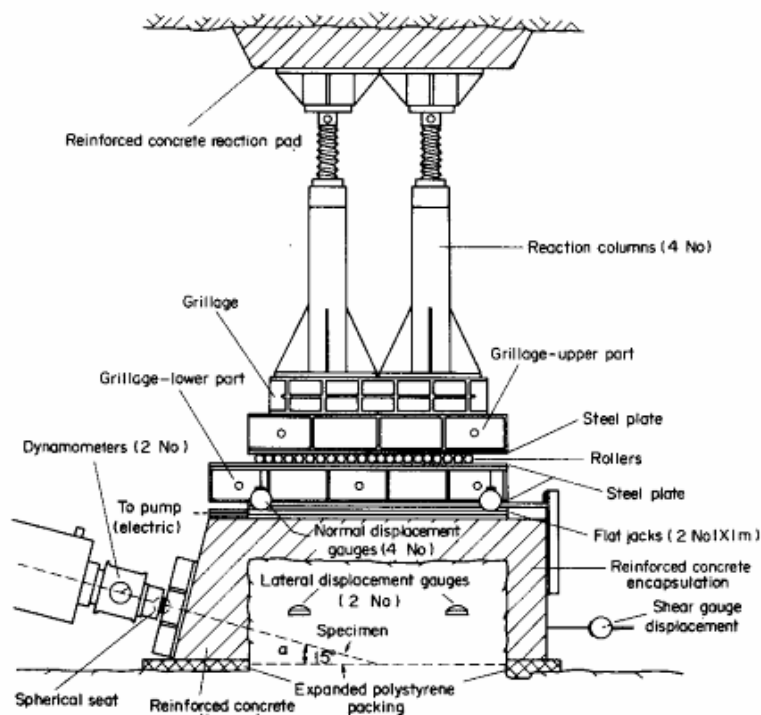
Τριαξονικές δοκιμές σε μεγάλα δοκίμια πετρώματος αναφέρονται από τον Nose (1964). Η πλευρική παρεμπόδιση επιτυγχάνεται με επίπεδους γρύλους και η φόρτιση κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου με υδραυλικά έμβολα. Τα αποτελέσματα τέτοιων δοκιμών επηρεάζονται από τους καταναγκασμούς των άκρων, όπως στις εργαστηριακές δοκιμές, που είναι πιθανώς λιγότερο σημαντικοί στα άκρα του δοκιμίου σε επαφή με τους γρύλους από ότι στο άκρο που βρίσκεται σε επαφή με το πέτρωμα.

1.3 Μεγάλης κλίμακας δοκιμές διάτμησης

Με τις μεγάλης κλίμακας δοκιμές διάτμησης μετρείται η μέγιστη και παραμένουσα διατμητική αντοχή ενός επιπέδου διάτμησης συναρτήσει της ορθής τάσης στο επίπεδο αυτό. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται συνήθως σε αναλύσεις οριακής ισορροπίας

προβλημάτων ευστάθειας πρανών ή για την ανάλυση των θεμελιώσεων φραγμάτων, αλλά και για τη συμπεριφορά κρίσιμων ασυνεχειών σε υπόγεια ανοίγματα.

Τυπική διάταξη εκτέλεσης μίας δοκιμής διάτμησης μεγάλης κλίμακας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5α. Η ορθή δύναμη εφαρμόζεται μέσω επίπεδων γρύλων, υδραυλικών εμβόλων ή νεκρού φορτίου.



(α)



(β)

Σχήμα 5. (α) Τυπική διάταξη δοκιμής διάτμησης σε σήραγγα σύμφωνα με την ISRM (1974), (β) φωτογραφία επί τόπου δοκιμής διάτμησης (φωτογραφία της Sabir Co).

Για τη διατήρηση της ορθής τάσης στα επιθυμητά επίπεδα χρησιμοποιείται υδραυλική αντλία ικανή να διατηρήσει το κάθετο φορτίο με ανοχή $\pm 2\%$ της επιθυμητής τιμής σε όλη τη δοκιμή. Η μεταφορά των φορτίων στο πέτρωμα γίνεται με κατάλληλο σύστημα αντίδρασης (στύλους αντίδρασης και οπλισμένο σκυρόδεμα). Για την εφαρμογή της διατμητικής δύναμης χρησιμοποιούνται υδραυλικά έμβολα ή επίπεδοι γρύλοι. Η συνισταμένη της εφαρμοζόμενης διατμητικής δύναμης πρέπει να διέρχεται από το κέντρο της βάσης του δοκιμίου με ανοχή $\pm 5\%$. Η μέτρηση των εφαρμοζόμενων δυνάμεων γίνεται με υδραυλικά κελιά φορτίου ή με μετρητές τάσης που προσαρμόζονται στους επίπεδους γρύλους.

Η κλίση του πρισματικού δοκιμίου και του συστήματος των εφαρμοζόμενων φορτίων επιλέγεται συνήθως έτσι, ώστε το επίπεδο διάτμησης να συμπίπτει με ένα επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος, όπως για παράδειγμα με μία ασυνέχεια, ή με το επίπεδο της στρώσης, ή το επίπεδο σχιστότητας ή σχισμού, ή με τη διεπιφάνεια μεταξύ εδάφους και πετρώματος ή πετρώματος και σκυροδέματος.

Για τη διενέργεια της δοκιμής το δοκίμιο διαμορφώνεται σε κατάλληλες διαστάσεις, συνήθως 700 x 700 x 650 mm, με τη βάση του να συμπίπτει με το επίπεδο διάτμησης. Το δοκίμιο και ιδιαίτερα το επίπεδο διάτμησης πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν περισσότερο στη φυσική κανονική περιεκτικότητα τους σε νερό κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας και της δοκιμής.

Η δοκιμή αρχίζει με το στάδιο της στερεοποίησης ώστε να αποτονωθούν οι πιέσεις πόρων στο πέτρωμα και στο υλικό πλήρωσης του επιπέδου διάτμησης πριν από την έναρξη της διάτμησης. Η ορθή τάση αυξάνεται σταδιακά μέχρι την τελική της τιμή και καταγράφονται οι ορθές μετατοπίσεις συναρτήσει του χρόνου και των εφαρμοζόμενων φορτίων. Το στάδιο της στερεοποίησης ολοκληρώνεται όταν το ποσοστό μεταβολής της ορθής μετατόπισης γίνεται μικρότερο από 0.05 mm σε 10 λεπτά.

Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου στερεοποίησης ακολουθεί το στάδιο της διάτμησης. Η διατμητική φόρτιση επιβάλλεται είτε σταδιακά είτε συνεχώς με τρόπο ώστε να ελέγχεται ο ρυθμός της διατμητικής μετατόπισης. Δέκα (10) αναγνώσεις απαιτούνται πριν από την επίτευξη της μέγιστης διατμητικής αντοχής. Οι μετρήσεις σε κάθε διατμητική τάση λαμβάνονται όταν ο ρυθμός μεταβολής της διατμητικής μετατόπισης είναι μικρότερος από 0.1 mm/min. Μετά τη μέγιστη διατμητική αντοχή λαμβάνονται μετρήσεις καθορισμού της πλήρους καμπύλης δύναμης-μετατόπισης σε διαστήματα διατμητικής μετατόπισης μεταξύ 0.5 και 5 mm. Η παραμένουσα διατμητική αντοχή λαμβάνεται όταν τέσσερις τουλάχιστο

διαδοχικές αναγνώσεις δείχνουν μεταβολή της διατμητικής τάσης μικρότερη του 5 % για διατμητική μετακίνηση 1 cm.

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών διάτμησης μεγάλης κλίμακας λαμβάνεται αρχικά η μέση τιμή των διατμητικών Δs και ορθών Δn μετατοπίσεων σε κάθε βαθμίδα πίεσης. Οι ορθές και διατμητικές τάσεις υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \text{Διατμητική τάση} \quad \tau &= \frac{P_s}{A} = \frac{P_{sa} \cos \alpha}{A} \\ \text{Ορθή τάση} \quad \sigma_n &= \frac{P_n}{A} = \frac{P_{na} + P_{sa} \sin \alpha}{A} \end{aligned} \quad (12)$$

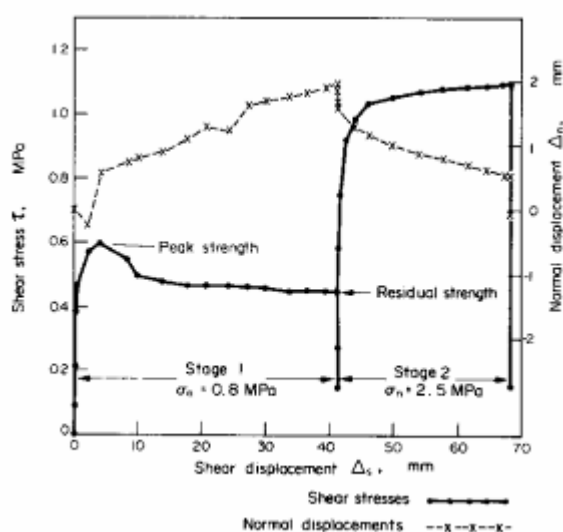
όπου:

P_s, P_n : Συνισταμένη διατμητική και ορθή δύναμη αντίστοιχα στο επίπεδο διάτμησης

P_{sa}, P_{na} : Εφαρμοζόμενη διατμητική και ορθή δύναμη αντίστοιχα

α : Κλίση εφαρμοζόμενης διατμητικής δύναμης ως προς το επίπεδο διάτμησης

A : Επιφάνεια διάτμησης



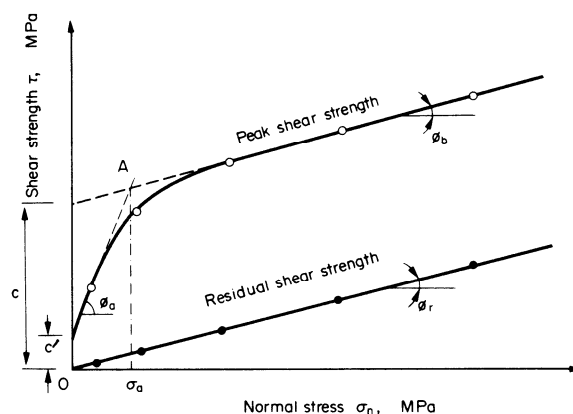
Σχήμα 6. Διαγράμματα διατμητικής τάσης και ορθής μετατόπισης ως προς τη διατμητική μετατόπιση υπό σταθερή ορθή τάση στο επίπεδο διάτμησης.

Όταν η γωνία α είναι μεγαλύτερη από μηδέν μοίρες, η εφαρμοζόμενη ορθή δύναμη πρέπει να μειώνεται κατά $P_{sa} \sin \alpha$ μετά από κάθε αύξηση της διατμητικής δύναμης, ώστε η ορθή τάση στην διατμητική επιφάνεια να διατηρείται σταθερή.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής σχεδιάζονται σε διάγραμμα διατμητικής δύναμης-διατμητικής μετατόπισης, όπως αυτό στο Σχήμα 6, από το οποίο λαμβάνονται η μέγιστη και

παραμένονσα διατμητική αντοχή του επιπέδου διάτμησης. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάζεται η καμπύλη ορθής μετατόπισης ως προς τη διατμητική μετατόπιση.

Τέλος, τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών διάτμησης σχεδιάζονται σε διάγραμμα διατμητικής αντοχής – ορθής τάσης, από το οποίο λαμβάνονται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής ϕ_a , ϕ_b , ϕ_r , c' και c , όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Καμπύλες μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής ως προς την ορθή τάση.

Το κόστος των δοκιμών μεγάλης κλίμακας καθιστά επιτακτική την προσεκτική επιλογή της θέσης της δοκιμής, λαμβάνοντας υπόψη τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής, και τη συνοδεία τους από πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια του ίδιου πετρώματος. Τα μεγάλης κλίμακας δοκίμια πρέπει να προετοιμάζονται με προσοχή, όπως με αποκοπή τους από το περιβάλλον πέτρωμα με μηχανικά μέσα, ώστε να ελαχιστοποιείται η διαταραχή τους.

1.4 Εφαρμογή έντασης στο εσωτερικό μιας γεώτρησης

Στη μέθοδο αυτή, τάσεις εφαρμόζονται στο εσωτερικό γεωτρήσεων για να παραγάγουν παραμορφώσεις προκειμένου να καθοριστεί το μέτρο παραμορφωσιμότητας του πετρώματος. Εφαρμόζεται συνήθως μία ομοιόμορφη πίεση ρευστού μέσω μιας στεγανής μεμβράνης σε ένα μήκος της γεώτρησης μεταξύ δύο παρεμβυσμάτων. Η διάμετρος των οπών κυμαίνεται από μερικές ίντσες, στην περίπτωση των γεωτρήσεων, ως μερικά πόδια, στην περίπτωση δοκιμών σε θαλάμους πίεσης, Oberti (1960). Η ακτινική μετατόπιση u_R , στην περιφέρεια της κυκλικής οπής ακτίνας R , που προκαλείται από εσωτερική πίεση p , είναι:

$$u_R = -pR / 2G \quad (13)$$

Οι μετρήσεις της διαμετρικής διαστολής, $2u_R$ και της πίεσης p παρέχουν ένα τρόπο προσδιορισμού του μέτρου διάτμησης, G , του πετρώματος γύρω από μια γεώτρηση ή μια σήραγγα (Talobre, 1957). Οι μετατοπίσεις που προκαλούνται από μια ομοιόμορφη ακτινική

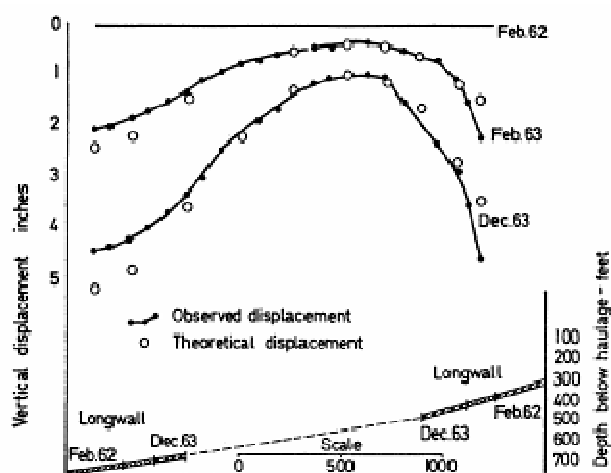
πίεση εφαρμοζόμενη σε αντικρινά τόξα της οπής εξαρτώνται από το λόγο Poisson, έτσι ώστε δύο διαφορετικές μετρήσεις θα παρέχουν τον τρόπο για τον προσδιορισμό του λόγου αυτού και του G . Εάν η πίεση εφαρμόζεται πάνω σε αντικρινά τεταρτοκύκλια η ακτινική μετατόπιση μετρούμενη στην άκρη αυτών εξαρτάται μόνο από το G , όπως στην περίπτωση (13). Με την πίεση τεταρτοκύκλιου η επίδραση του λόγου Poisson στις μετατοπίσεις είναι μέγιστη κατά μήκος και κάθετα στη διάμετρο που διέρχεται από το μέσο των τεταρτοκυκλίων.

2 Μετρήσεις παρακολούθησης

2.1 Ακριβής χωροστάθμιση της βραχομάζας

Οι υπόγειες τοπογραφικές χωροσταθμίσεις παρέχουν ένα μέσο παρακολούθησης των κατακόρυφων μετατοπίσεων σε σημεία της εκσκαφής. Τα τοπογραφικά σημεία είναι συνήθως κοντά βλήτρα αγκυρωμένα στην οροφή εξοπλισμένα ώστε να δέχονται αναρτημένες σταδίες.

Οι θερμοκρασιακές συνθήκες στους υπόγειους χώρους είναι γενικά πιο σταθερές απ' ό,τι στην επιφάνεια, και τα σφάλματα λόγω διαφορικής μήκυνσης και διάθλασης είναι μικρότερα. Χρησιμοποιώντας οπτικές αποστάσεις περίπου 30 m, μπορούν να αναμένονται μέσα τετραγωνικά σφάλματα της τάξης των 2 mm ανά χιλιόμετρο, εάν οι γραμμές παρατηρούνται προς τα εμπρός και πίσω.



Σχήμα 8. Κατακόρυφες μετατοπίσεις τοπογραφικών σημείων που μετρούνται με τοπογραφική υψομετρία ακριβείας σε μια στοά επάνω από δύο συγκλίνοντα επιμήκη μέτωπα (Ortlepp και Nicoll, 1964).

Στο Σχήμα 8 φαίνονται τα αποτελέσματα χωροστάθμισης κατά μήκος στοάς σε βάθος περίπου 2.5 χιλιομέτρων από την επιφάνεια, επάνω από δύο συγκλίνοντα επιμήκη μέτωπα (Ortlepp και Nicoll, 1964). Στο ίδιο διάγραμμα δείχνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που υπολογίζονται από τη θεωρία της ελαστικότητας. Οι μετρούμενες μετατοπίσεις, που

προκαλούνται από την επέκταση των μετώπων, είναι συγκρίσιμες με τις μετατοπίσεις που υπολογίζονται από τη θεωρία της ελαστικότητας για $E=76$ GPa, που καθορίστηκε από εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα του πετρώματος, και κατακόρυφη συνιστώσα του φυσικού εντατικού πεδίου πριν από την εκσκαφή ίση με το βάρος των υπερκειμένων.

2.2 Μετρητικά αγκύρια

Τα μετρητικά αγκύρια είναι συνήθως κοίλα αγκύρια πετρώματος που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των επιμηκύνσεων στο πέτρωμα κατά μήκος του αγκυρίου μεταξύ του σημείου αγκύρωσης και του περικοχλίου. Δύνανται να είναι σημειακής ή ολόσωμης πάκτωσης. Εντός του κοίλου σωλήνα, βρίσκεται ελεύθερη λεπτή ράβδος αναφοράς, μεταξύ του περικοχλίου και της αγκύρωσης στην οποία είναι στερεωμένη.

2.3 Εκτασιόμετρα και συγκλισιόμετρα

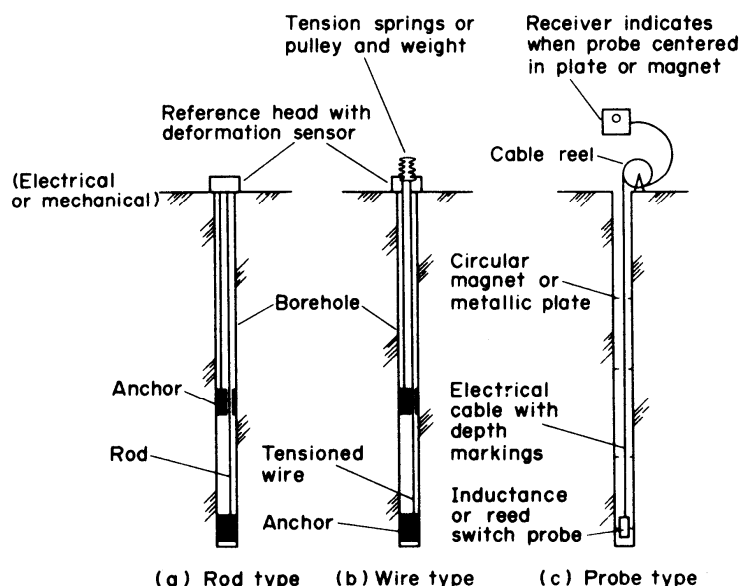
Τα εκτασιόμετρα διατρήματος χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των μετακινήσεων του πετρώματος σε βάθος. Οδηγίες για την επιλογή και χρήση του περιγράφονται από την ISRM (1978).

Ένα εκτασιόμετρο διατρήματος αποτελείται από μία ή περισσότερες αγκυρώσεις αναφοράς σε διάφορα βάθη στο διάτρημα και μία κεφαλή αναφοράς στο περιλαίμιο του διατρήματος. Τα περισσότερα εκτασιόμετρα έχουν ράβδους ή καλώδια που εκτείνονται μεταξύ των αγκυρώσεων και της κεφαλής αναφοράς. Οι σχετικές μετατοπίσεις του πετρώματος, όπως διαβιβάζονται στις ράβδους ή τα καλώδια, μετρούνται με μηχανικά ή ηλεκτρικά μέσα, ως μεταβολή τη απόστασης μεταξύ του σημείου αγκύρωσης ή αναφοράς μέσα στο διάτρημα και την κεφαλή αναφοράς στο περιλαίμιο του διατρήματος.

Ένα εκτασιόμετρο διατρήματος αποτελούμενο από μία ράβδο ή ένα καλώδιο που εκτείνεται μεταξύ του σημείου αγκύρωσης και της κεφαλής αναφοράς καλείται "εκτασιόμετρο διατρήματος ενός σημείου". Ομοίως, εκτασιόμετρα με δύο σημεία αγκύρωσης μέσα στο πέτρωμα καλούνται "εκτασιόμετρα διατρήματος δύο σημείων". Εκτασιόμετρο με περισσότερα από δύο σημεία αγκύρωσης καλείται "εκτασιόμετρο διατρήματος πολλαπλών σημείων". Γενικά, η καλύτερη μέθοδος για τη μέτρηση των μετακινήσεων του πετρώματος είναι με τα εκτασιόμετρα δύο ή περισσότερων σημείων δεδομένου ότι καταγράφεται και η μεταβολή της μετατόπισης με το βάθος. Μέτρηση πολλαπλών σημείων μπορεί ληφθεί από την τοποθέτηση εκτασιόμετρων ενός ή δύο σημείων σε εγγύτητα μεταξύ τους.

Τα κύρια μέρη ενός εκτασιόμετρου περιλαμβάνουν τον αισθητήρα μέτρησης μετατόπισης, τις αγκυρώσεις και στις περισσότερες περιπτώσεις τις ράβδους ή τα καλώδια που συνδέουν την αγκύρωση και τον αισθητήρα μέτρησης μετατοπίσεων. Οι γενικές

διατάξεις και οι βασικοί τύποι εκτασιόμετρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 9. Ο αισθητήρας μέτρησης μετατοπίσεων βρίσκεται συνήθως στο περιλαίμιο του διατρήματος και μπορεί να σχεδιαστεί είτε για ηλεκτρική είτε μηχανική ανάγνωση. Οι ράβδοι ή τα καλώδια διαβιβάζουν συνήθως τη μετατόπιση της αγκύρωσης στον αισθητήρα μετατοπίσεων.



Σχήμα 9. Βασικοί τύποι εκτασιόμετρων διατρήματος.

Η θέση, ο προσανατολισμός, το μήκος, και ο αριθμός των αγκυρώσεων για κάθε εκτασιόμετρο πρέπει να επιλέγονται βάσει λεπτομερούς επισκόπησης τόσο των χαρακτηριστικών της κατασκευής όσο και των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του έργου. Μεταξύ των στοιχείων που πρέπει να εξετάζονται είναι: η κατεύθυνση και το μέγεθος των αναμενόμενων μετακινήσεων του πετρώματος, η θέση και το είδος των άλλων οργάνων που πρόκειται να εγκατασταθούν, και οι διαδικασίες και ο συγχρονισμός των δραστηριοτήτων κατασκευής πριν, κατά τη διάρκεια, και μετά από την εγκατάσταση του οργάνου. Εάν το εκτασιόμετρο τοποθετείται σε περιοχή όπου υποστηρίζεται με ηλώσεις, η βαθύτερη αγκύρωση του στο πέτρωμα πρέπει να εκτείνεται πέρα από τους ήλους. Για την επιλογή του μήκους του εκτασιόμετρου πρέπει επίσης να εξετάζεται ο αναμενόμενος όγκος πετρώματος που θα επηρεαστεί από την εκσκαφή, που εκφράζεται για παράδειγμα σε σχέση με τη διάμετρο της σήραγγας ή το ύψος ενός πρανούς.

Οι μετρήσεις των μετατοπίσεων είναι πολυτιμότερες όταν τα εκτασιόμετρα εγκαθίστανται κατά την έναρξη της εκσκαφής και όταν οι μετρήσεις λαμβάνονται τακτικά καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής σε διάφορες θέσεις έτσι ώστε να καταγράφεται μια πλήρης χρονοϊστορία των μετατοπίσεων. Η τεκμηρίωση των γεωλογικών συνθηκών και των

γεγονότων κατασκευής κοντά στις θέσεις μετρήσεων συμβάλει ουσιαστικά στην κατάλληλη ερμηνεία των στοιχείων πεδίου.

Η εγκατάσταση του εκτασιόμετρου πρέπει να εκτελείται από κατάλληλα καταρτισμένο και εξειδικευμένο προσωπικό. Η θέση των αγκυρώσεων πρέπει να ρυθμίζεται για την μεγιστοποίηση των πληροφοριών που λαμβάνονται από τα εκτασιόμετρα. Για παράδειγμα, είναι επιθυμητό να εγκαθίσταται αγκύρωση σε κάθε πλευρά μιας διατμητικής ζώνης ή μιας ασυνέχειας με υλικό πλήρωσης. Για τις πακτωμένες αγκυρώσεις, πρέπει να εξασφαλίζεται αρκετός χρόνος για τη σκλήρυνση του ρευστοκονιάματος πριν από την εγκατάσταση του εκτασιόμετρου. Το εγκαθιστούμενο όργανο πρέπει να διαθέτει κατάλληλη προστατευτική κάλυψη που να παρέχει πλήρη προστασία από τις διενεργούμενες εργασίες κατασκευής και από εκτοξευόμενους λίθους λόγω των ανατινάξεων. Για εγκατάσταση σε περιοχές ανατινάξεων είναι προτιμότερο να εγκαθίσταται αρχικά το όργανο μόνο με μηχανικό αισθητήρα. Με την προχώρηση της εκσκαφής και εφόσον έχει μειωθεί ο κίνδυνος πρόκλησης ζημίας λόγω των ανατινάξεων μπορεί να εγκατασταθεί ηλεκτρικός αισθητήρας στη θέση του μηχανικού. Τα καλώδια των ηλεκτρικών εκτασιόμετρων πρέπει να προστατεύονται κατάλληλα.

Τα στοιχεία των μετρήσεων πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία το συντομότερο δυνατό και εντός 24 ωρών από το χρόνο της ανάγνωσης. Τυπικό φύλλο καταγραφής των αναγνώσεων ενός εκτασιόμετρου δύο σημείων δίνεται στο Σχήμα 10. Η μέθοδος υπολογισμού των μετατοπίσεων από τα στοιχεία των αναγνώσεων εξαρτάται από το είδος του οργάνου. Συνήθως ακολουθείται η διαδικασία που προτείνεται από τον κατασκευαστή εκτός αν μια εναλλακτική μέθοδος αποδεικνύεται αποδεκτή.

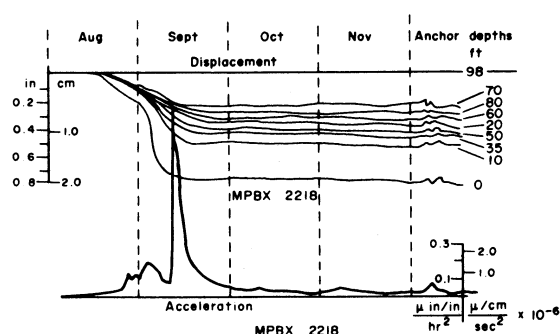
Για την καλύτερη παρουσίαση των στοιχείων οι μετρήσεις σχεδιάζονται σε διάγραμμα μετατόπισης ως προς το χρόνο. Η ερμηνεία των μετρήσεων εξαρτάται όχι μόνο από τη μετατόπιση, αλλά και από το ρυθμό μετατόπισης και το ρυθμό μεταβολής της μετατόπισης με το χρόνο. Σχετικό είναι το διάγραμμα στο Σχήμα 11 στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέτρησης των μετατοπίσεων σε ένα πρανές, με το ρυθμό μεταβολής των μετατοπίσεων με το χρόνο σχεδιασμένο στο κάτω μέρος του διαγράμματος.

DOUBLE - POSITION MECHANICAL EXTENSOMETER

Extensometer No. DX4 Station 66+03 Location Crown

DATE	TIME	DEPTH 30 FT.		DEPTH 6 FT.		COMMENTS
		Reading 0.001 Inches	Displacement Inches	Reading 0.001 Inches	Displacement Inches	
7/11/72	10:30	2.252	-	2.460	-	Initial Reading
10/24	11:00	2.264	+ .012	2.459	- .001	Stage 1 - 65+66
10/27	15:30	2.270	+ .018	2.464	+ .004	Stage 1 - 65+76
10/31	21:30	2.283	+ .031	2.471	+ .011	Stage 1 - 65+86
11/3	18:20	2.240		2.374		New Zero Stage 1 - 66+06
11/6	13:52	2.281	+ .072	2.392	+ .029	Stage 1 - 66+11
11/6	22:00	2.353	+ .094	2.398	+ .035	Stage 1 - 66+16
11/7	22:00	2.323	+ .114	2.400	+ .037	Stage 1 - 66+21
11/8	10:00	2.329	+ .120	2.400	+ .037	Stage 1 - 66+21
11/9	9:45	2.349	+ .140	2.402	+ .039	Stage 1 - 66+26
11/10	10:30	2.366	+ .157	2.406	+ .043	Stage 1 - 66+31
11/13	17:00	-	-	2.408	+ .045	Stage 1 - 66+36
11/14	10:00	2.381	+ .172	2.409	+ .046	Stage 1 - 66+36
11/14	18:00	2.388	+ .179	2.409	+ .046	Stage 1 - 66+41 2b-65+32

Σχήμα 10. Τυπικό φύλλο καταγραφής αναγνώσεων ενός εκτασιομέτρου δύο σημείων.



Σχήμα 11. Διάγραμμα μετατοπίσεων ως προς το χρόνο με διάγραμμα μεταβολής του ρυθμού της μετατόπισης.

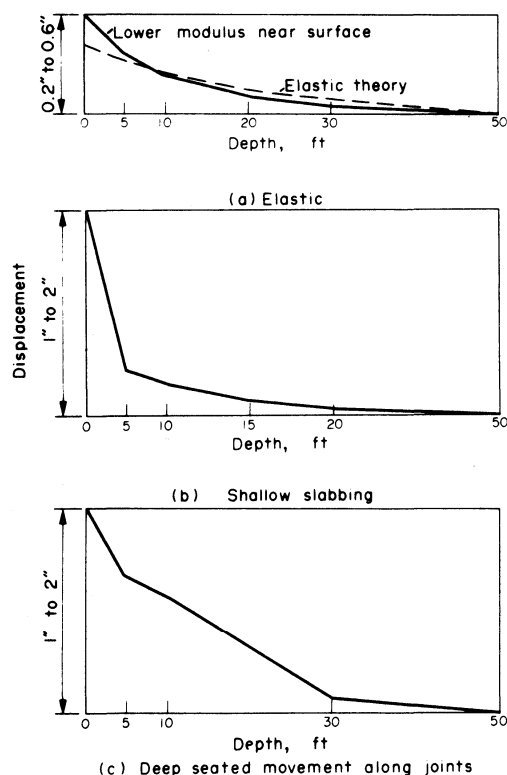
Η έκθεση υποβολής των αποτελεσμάτων πρέπει να περιλαμβάνει τόσο τα στοιχεία της εγκαταστάσεων του οργάνου όσο και τα αποτελέσματα της παρακολούθησης. Η έκθεση των στοιχείων εγκατάστασης πρέπει να περιλαμβάνει την περιγραφή και διαγράμματα των μερών του εκτασιομέτρου (είδος αγκύρωσης, τύπος αισθητήρα, εξοπλισμός ανάγνωσης, προδιαγραφές απόδοσης του οργάνου), τις λεπτομέρειες της διάτρησης, τις λεπτομέρειες της μεθόδου εγκατάστασης του οργάνου, διάγραμμα της θέσης του οργάνου σε σχέση με το υπόλοιπο σύστημα παρακολούθησης του έργου και τομή της θέσης εγκατάστασης μαζί με τις υπάρχουσες και μελλοντικές κατασκευές και τη γεωλογία. Η έκθεση παρακολούθησης πρέπει να περιλαμβάνει πίνακες με τις αναγνώσεις του οργάνου, ενημερωμένα διαγράμματα της μετατόπισης όλων των μεμονωμένων σημείων, διάγραμμα της μετατόπισης ως προς το βάθος για διάφορες χρονικές στιγμές συσχετισμένες με τις δραστηριότητες κατασκευής και

συνοπτική περίληψη των σημαντικότερων μετατοπίσεων και όλων των δυσλειτουργιών του οργάνου μετά την προηγούμενη έκθεση.

Κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οι μετατοπίσεις που δεικνύουν μία τοπική αστάθεια, διακρίνονται από εκείνες που δεικνύουν μία πιο διαδεδομένη κατάσταση που έχει επιπτώσεις στη σταθερότητα ολόκληρης της σήραγγας. Στις περισσότερες περιπτώσεις ένα μόνο κριτήριο δεν είναι επαρκές για την αξιολόγηση της ευστάθειας. Για παράδειγμα, ένα κριτήριο ευστάθειας δεν πρέπει να βασίζεται απλώς στην υπέρβαση μίας προκαθορισμένης τιμής ασφαλείας της μετατόπισης, πάνω από την οποία θεωρείται ότι προκαλείται αστάθεια.

Ένα κριτήριο αποτελεί η σύγκριση του μεγέθους των μετρούμενων μετατοπίσεων σε σχέση με τη μετατόπιση που προβλέπεται από ελαστικές ή ελαστοπλαστικές αναλύσεις. Οι αναλύσεις αυτές είναι αρκετά χρήσιμες για τη σύγκριση με τις παρατηρούμενες μετατοπίσεις σε μια σήραγγα ή ένα υπόγειο θάλαμο, ακόμα κι αν η μάζα του πετρώματος μπορεί να υποστεί μεγάλες μετατοπίσεις κατά μήκος των επιφανειών των ασυνεχειών. Η χρησιμότητα της σύγκρισης έγκειται στο γεγονός ότι παρέχει μια εκτίμηση των μετατοπίσεων που η μάζα του πετρώματος θα υποβαλλόταν, εάν η χαλάρωση κατά μήκος των ασυνεχειών ελαχιστοποιούταν. Μεγάλες τιμές μετατοπίσεων σε σχέση με αυτές που προβλέπονται από τις αναλύσεις μπορεί να είναι ένδειξη ασταθών συνθηκών.

Για παράδειγμα οι Cording et al. (1977) παρουσιάζουν μια περίληψη των μετατοπίσεων του πετρώματος σε 13 μεγάλους υπόγειους θαλάμους. Στις περιπτώσεις που δεν παρατηρήθηκε εκτενής χαλάρωση της μάζας του πετρώματος, οι μετατοπίσεις κυμάνθηκαν από 1 έως 2 φορές της ελαστικής μετατόπισης που υπολογίστηκε. Μετακίνηση και χαλάρωση κατά μήκος των ασυνεχειών συνοδευόταν συνήθως από παρατηρηθείσες μετατοπίσεις 3 φορές μεγαλύτερες των ελαστικών μετατοπίσεων. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, οι μεγάλες μετατοπίσεις σχετίζονταν με συγκεκριμένα γεωλογικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως διατμητικές ζώνες, επίπεδα στρώσεως ή συστήματα ασυνεχειών. Σε πολλές περιπτώσεις, όπου οι μετατοπίσεις υπερέβησαν τις υπολογιζόμενες ελαστικές μετατοπίσεις κατά 5 έως 10 φορές, οι διαδικασίες εκσκαφής και υποστήριξης τροποποιήθηκαν για να αποτρέψουν περαιτέρω μεγάλες μετακινήσεις. Το Σχήμα 12 δείχνει χαρακτηριστικές μετατοπίσεις που παρατηρήθηκαν σε μια μεγάλη βαθιά υπόγεια αίθουσα.



Σχήμα 12. Τυπικές μετρήσεις μετατοπίσεων σε μεγάλο υπόγειο θάλαμο σε βάθος

Σε μερικές περιπτώσεις, οι χαρακτηριστικές μετατοπίσεις μίας σήραγγας μπορεί να υπερβαίνουν τις υπολογιζόμενες ελαστικές μετατοπίσεις, αλλά να μην είναι ενδεικτικές ενός προβλήματος ευστάθειας. Οι μετρήσεις μετατοπίσεων, που λαμβάνονται σε διάφορες θέσεις σε μια σήραγγα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής συμπεριφορά της σήραγγας για το δεδομένο μέγεθος, τις γεωλογικές συνθήκες και το σύστημα υποστήριξης. Μετατοπίσεις σημαντικά μεγαλύτερες από εκείνες που παρατηρήθηκαν προηγούμενα μπορούν να είναι ενδεικτικές υπερβολικής χαλάρωσης του περιβάλλοντος πετρώματος και πιθανών προβλημάτων ευστάθειας.

Ο ρυθμός των μετατοπίσεων πρέπει να εξετάζεται πολύ προσεκτικά κατά την αξιολόγηση της ευστάθειας των κατασκευών στα πετρώματα. Διαγράμματα του ρυθμού μετατοπίσεων ως προς το χρόνο αλλά και της επιτάχυνσης των μετατοπίσεων ως προς το χρόνο διευκολύνουν τέτοιες αναλύσεις. Ξαφνικές αυξήσεις του ρυθμού των μετατοπίσεων μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες κατά τη διεύρυνση της εκσκαφής κοντά στο εκτασιόμετρο μπορεί να παρέχουν μια έγκαιρη ένδειξη αστάθειας. Υψηλοί ρυθμοί μετατόπισης που είναι ανεξάρτητοι από την εκσκαφή ή που συνεχίζονται αφότου έχει προωθήσει αρκετά η κατασκευή πέρα από τη θέση του εκτασιόμετρου μπορεί επίσης να δείχνουν μια συνθήκη αστάθειας. Ένα από τα καλύτερα μέσα για την εκτίμηση τέτοιων ρυθμών μετακίνησης είναι η

σύγκριση με τους ρυθμούς που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενα στάδια κατασκευής της σήραγγας μετά την τοποθέτηση της υποστήριξης όταν οι μετακινήσεις είχαν τελικά σταθεροποιηθεί.

Για τον καθορισμό της δριμύτητας ενός προβλήματος ευστάθειας και των απαραίτητων διορθωτικών μέτρων που πρέπει να ληφθούν πρέπει να εξετάζεται τόσο το βάθος στο οποίο η μάζα του πετρώματος χαλαρώνει όσο και η επιφάνεια της χαλάρωσης. Οι παρατηρούμενες μετατοπίσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τις μετατοπίσεις που θα προκαλέσουν επικίνδυνη κατάσταση ή αστοχία του συστήματος υποστήριξης. Οι μετατοπίσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν την ικανότητα της μάζας του πετρώματος να διατηρεί την αντοχή της και τη συνοχή της, εκτός αν το σύστημα υποστήριξης είναι σε θέση να αναλάβει τα αυξημένα φορτία του πετρώματος. Σημειώνεται επίσης ότι η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών του πετρώματος μειώνεται με τη μετατόπιση.

2.4 Αποκλισιόμετρα και Κλισίμετρα

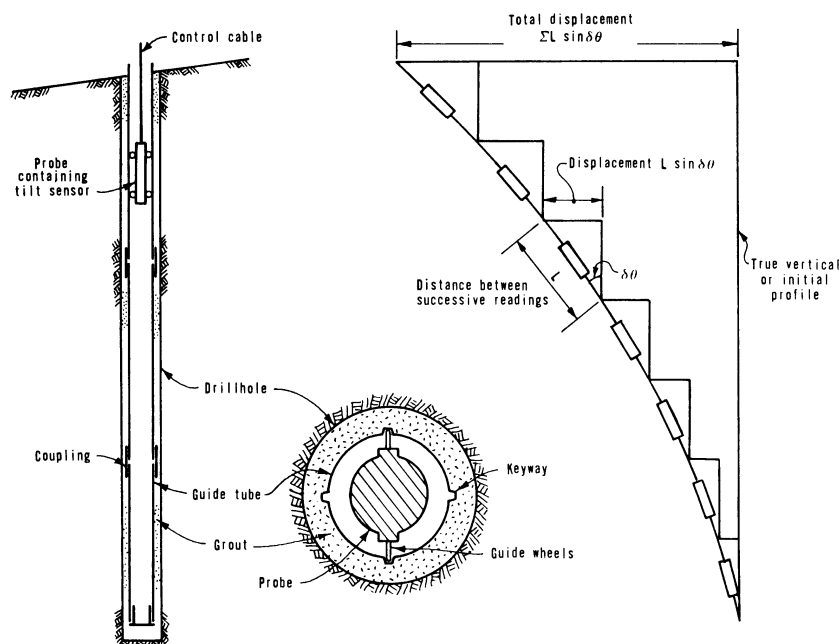
2.4.1 Αποκλισιόμετρα βολίδας (*probe inclinometer*)

Ένα αποκλισιόμετρο βολίδας αποτελείται από μία βολίδα ή τορπίλη με προσαρμοσμένες καθοδηγητικές ρόδες και αισθητήρα κλίσης, που λειτουργεί οδηγούμενος από τη βαρύτητα και παράγει ηλεκτρικό σήμα. Η βολίδα συνδέεται με πηγή ενέργειας και με συσκευή ανάγνωσης για την καταγραφή της γωνίας θ μεταξύ του άξονα της βολίδας και της κατακόρυφου (Σχήμα 13 και Σχήμα 14) ή την επαυξητική μετατόπιση. Η βολίδα μετακινείται μέσα σε καθοδηγητικό σωλήνα πακτωμένο στη γεώτρηση, και προωθείται προς το βάθος του διατρήματος σε στάδια μετρώντας την κλίση σε κάθε στάδιο. Όπως δείχνεται στο Σχήμα 13, οι μετρήσεις της κλίσης και του βάθους της βολίδας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της οριζόντιας απόκλισης του καθοδηγητικού σωλήνα από την κατακόρυφο. Οι διαφορές μεταξύ των διαδοχικών συνόλων μετρήσεων καταγράφουν την οριζόντια μετακίνηση κατά μήκος του καθοδηγητικού σωλήνα.

Με το όργανο αυτό μετρούνται οι μετακινήσεις του εδάφους μόνο κάθετα στον άξονα της γεώτρησης. Τα περισσότερα από τα διαθέσιμα όργανα είναι σχεδιασμένα για λειτουργία μόνο σε κατακόρυφες ή σχεδόν κατακόρυφες γεωτρήσεις, καταγράφοντας στην περίπτωση αυτή μόνο τις οριζόντιες μετακινήσεις.

Τα αποκλισιόμετρα βολίδας, σε αντίθεση με τα όργανα σταθερής θέσης που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο, παρέχουν το πλήρες και λεπτομερές σχεδιάγραμμα των μετατοπίσεων κατά μήκος της γεώτρησης και μπορούν έτσι να εντοπιστούν οι μετακινήσεις του εδάφους οπουδήποτε εμφανίζονται. Σύνολα αναγνώσεων που λαμβάνονται

για μια χρονική περίοδο επιτρέπουν τον καθορισμό του μεγέθους, της κατεύθυνσης και του ρυθμού μετακίνησης. Ένα όργανο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αναγνώσεων σε οποιοδήποτε αριθμό γεωτρήσεων.



Σχήμα 13. Αρχή λειτουργίας αποκλισιομέτρου βολίδας

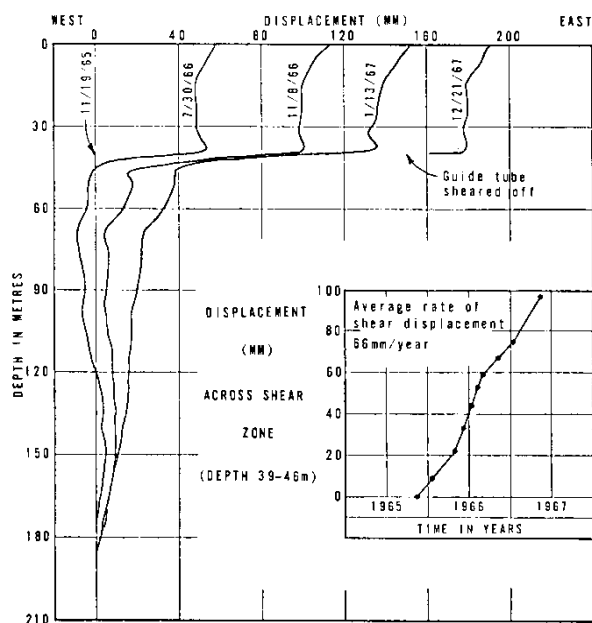


Σχήμα 14. Τυπικός εξοπλισμός αποκλισιομέτρου βολίδας, που δείχνει τον καθοδηγητικό σωλήνα, την βολίδα, το καλώδιο και τη συσκευή ανάγνωσης των μετρήσεων.

Τα αποκλισιόμετρα βολίδας δεν είναι κατάλληλα για συνεχείς ή εξ αποστάσεως αναγνώσεις. Εάν απαιτούνται τέτοιου είδους αναγνώσεις θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένα αποκλισιόμετρο σταθερής θέσης. Οι αναγνώσεις που λαμβάνονται από το αποκλισιόμετρο μετά τη διόρθωσή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των οριζοντίων επαυξητικών (διαφορικών) μετατοπίσεων σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta = L \sin \delta\theta \quad (14)$$

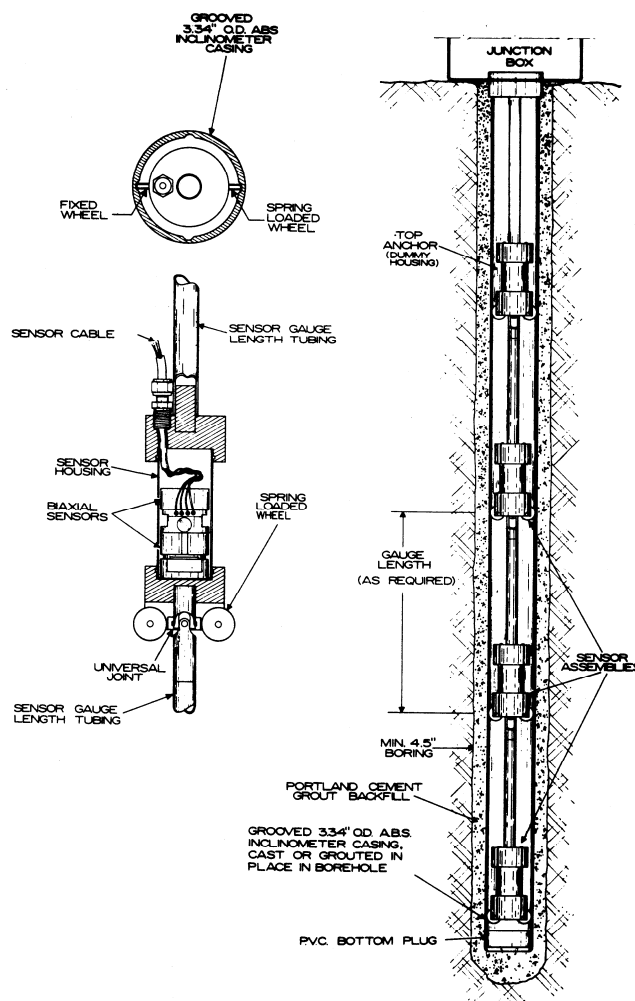
όπου Δ οι επαυξητικές μετατοπίσεις (σε mm), L η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σημείων μέτρησης (σε mm) και $\delta\theta$ οι επαυξητικές μεταβολές της γωνίας θ (σε μοίρες). Οι επαυξητικές μεταβολές της γωνίας θ ή της μετατόπισης σχεδιάζονται σε διάγραμμα με κατακόρυφο άξονα το βάθος του διατρήματος. Από διαδοχικές μετρήσεις σε διαφορετικό χρόνο σχεδιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της κλίσης ή της μετακίνησης ως προς το χρόνο, όπως δείχνεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15. Διάγραμμα μετατόπισης-βάθους γεώτρησης για αποκλισίμετρο σε πρανές πετρώματος, με φανερή ένδειξη διάτμησης του σωλήνα σε βάθος 39 έως 46 m.

2.4.2 Αποκλισίόμετρα σταθερής θέσης σε γεώτρηση

Ένα αποκλισίμετρο σταθερής θέσης αποτελείται από μία σειρά αισθητήρων με προσαρμοσμένες καθοδηγητικές ρόδες. Κάθε αισθητήρας περιέχει ένα μονοαξονικό ή διαξονικό αισθητήρα κλίσης που λειτουργεί με τη βαρύτητα και παράγει ηλεκτρικά σήματα. Οι αισθητήρες ενώνονται με αρθρωμένες ράβδους, αναρτώνται από ένα καθοδηγητικό σωλήνα πακτωμένο στη γεώτρηση (Σχήμα 16) και μετρούν τις γωνιακές αποκλίσεις του άξονα της γεώτρησης. Ηλεκτρικά καλώδια συνδέουν κάθε αισθητήρα με την επιφάνεια του εδάφους. Το όργανο αυτό μετρά τις μετακινήσεις του εδάφους μόνο σε κατευθύνσεις κάθετα στον άξονα της γεώτρησης. Τα περισσότερα από τα διαθέσιμα όργανα σχεδιάζονται για να λειτουργήσουν σε κατακόρυφες ή σχεδόν κατακόρυφες γεωτρήσεις, στις οποίες περιπτώσεις μόνο οι οριζόντιες μετακινήσεις μπορούν να καταγραφούν.



Σχήμα 16. Λεπτομέρειες εγκατάστασης αποκλισιομέτρου σταθερής θέσης.

Μια κεντρική κονσόλα στην επιφάνεια ελέγχει τη δειγματοληψία των σημάτων κάθε αισθητήρα σε τακτά χρονικά διαστήματα και μπορεί να ενεργοποιήσει ένα σύστημα συναγερμού εάν μετρούνται γωνιακές μετακινήσεις που υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο όριο. Η κονσόλα αυτή μπορεί να συνδεθεί με κατάλληλα συστήματα τηλεμετρίας για την εξ' αποστάσεων μετάδοση των στοιχείων. Οι μετρήσεις των αισθητήρων μπορούν επίσης να ληφθούν χωριστά με μια φορητή μονάδα ανάγνωσης, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και της αρχικής προετοιμασίας για λειτουργία.

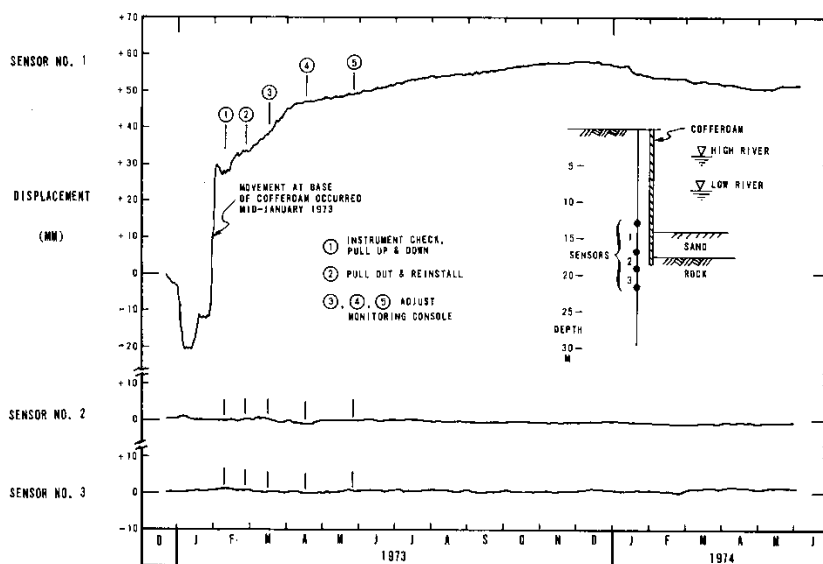
Το αποκλισιόμετρο σταθερής θέσης, σε αντίθεση με το αποκλισιόμετρο βολίδας, που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή, αυτόματη και εξ αποστάσεως ανίχνευση των μετακινήσεων του εδάφους. Δεν θα παράσχει ένα λεπτομερές σχεδιάγραμμα των μετακινήσεων του εδάφους ως προς το βάθος, εκτός αν οι αισθητήρες τοποθετούνται σε κοντινά διαστήματα που είναι γενικά αντισυμβατικά. Οι αισθητήρες στον καθοδηγητικό σωλήνα ενδέχεται να μπορούν να ανακτηθούν στο τέλος του έργου ή του προγράμματος παρακολούθησης. Εάν απαιτείται ένα λεπτομερές σχεδιάγραμμα

των οριζόντιων μετακινήσεων ως προς το βάθος της γεώτρησης, εγκαθίσταται ένας ξεχωριστός παρακείμενος καθοδηγητικός σωλήνας για χρήση από αποκλισιόμετρο βολίδας, ή μπορεί να αφαιρεθούν οι αισθητήρες του αποκλισιόμετρου σταθερής θέσης και να χρησιμοποιηθεί ο σωλήνας από το αποκλισιόμετρο βολίδας.

Οι αναγνώσεις που λαμβάνονται από το αποκλισιόμετρο μετά τη διόρθωσή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των οριζοντίων επαυξητικών μετατοπίσεων σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta = L \sin \delta\theta \quad (15)$$

όπου Δ οι επαυξητικές μετατοπίσεις (σε mm), L η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σημείων μέτρησης (σε mm) και $\delta\theta$ οι επαυξητικές μεταβολές της γωνίας θ (σε μοίρες). Τα διαγράμματα των επαυξητικών μεταβολών της γωνίας θ ή της μετατόπισης ως προς το βάθος του διατρήματος μπορούν να αποτελέσουν μόνο ένα ενδεικτικό οδηγό για τη συμπλήρωση του πλήρους διαγράμματος, ανάλογα και με την απόσταση των αισθητήρων. Ένα διάγραμμα μεταβολής της κλίσης ή της μετακίνησης ως προς το χρόνο για κάθε αισθητήρα μπορεί να είναι πιο κατάλληλο, όπως δείχνεται στο Σχήμα 17.



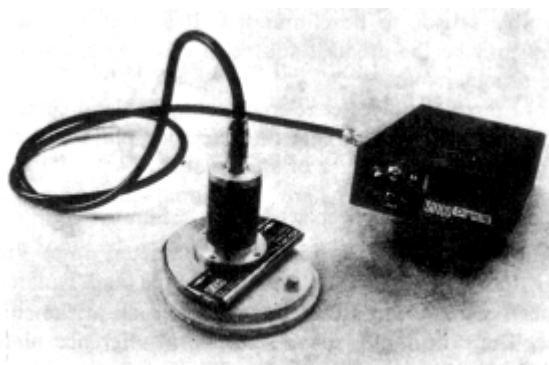
Σχήμα 17. Καταγραφή αποκλισιομέτρου σταθερού σημείου από υδατοστεγής υποβρύχια κατασκευή

2.4.3 Κλισίμετρα

Ένα κλισίμετρο αποτελείται από περίβλημα που περιέχει ένα αισθητήρα ανίχνευσης των στατικών ή δυναμικών γωνιακών μετακινήσεων ενός σημείου, που λειτουργεί με τη βοήθεια της βαρύτητας. Συνήθως, ένα φορητό κλισίμετρο εγκαθίσταται προσωρινά σε πλάκα αναφοράς (Σχήμα 18) πακτωμένη ή αγκυρωμένη στο άθικτο πέτρωμα της επιφάνειας ή της

σήραγγας ή της στοάς. Η περιοδική μέτρηση της κλίσης της επιφάνειας κάθε πλάκας επιτρέπει τον προσδιορισμό του μεγέθους και του ποσοστού γωνιακής παραμόρφωσης.

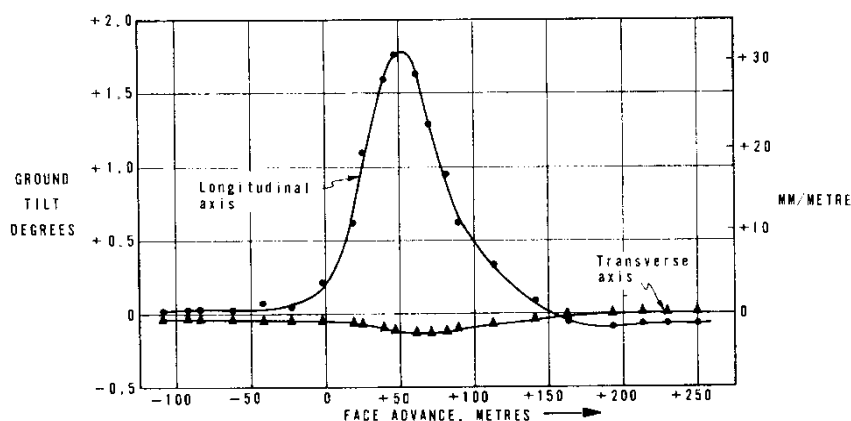
Μη-φορητά κλισίμετρα είναι επίσης διαθέσιμα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατική ή δυναμική μέτρηση των γωνιακών παραμορφώσεων και μπορούν να παράσχουν συνεχή παρακολούθηση. Αυτοί οι αισθητήρες εσωκλείονται σε αδιάβροχο περίβλημα πακτωμένο ή αγκυρωμένο άμεσα στην επιφάνεια του πετρώματος.



Σχήμα 18. Φορητό κλισίμετρο, πλάκα αναφοράς και συσκευή ανάγνωσης.

Το κλισίμετρο, σε αντίθεση με το αποκλισιόμετρο βολίδας ή σταθερού σημείου, μετράει μόνο την κλίση μία θέση. Δεν λειτουργεί σε βάθος κατά μήκος μιας γεώτρησης αν και σε ορισμένες καταστάσεις μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στο πέτρωμα μόνιμα. Η πλάκα αναφοράς πρέπει να αγκυρώνεται σε μια επιφάνεια πετρώματος. Εάν τα πρώτα μέτρα από την επιφάνεια είναι εξαστοιωμένα τότε μπορούν να αποφευχθούν με την τοποθέτηση της πλάκας αναφοράς σε έναν σωλήνα ή σε στυλοβάτη από σκυρόδεμα θεμελιωμένο στο άθικτο πέτρωμα 1 έως 2 μέτρα κάτω από την επιφάνεια. Η θέση εγκατάστασης πρέπει να είναι απαλλαγμένη από επαφή με τα ανώτερα 1 έως 2 μέτρα του πετρώματος. Αποτυχία στην προστασία της λαμαρίνας αναφοράς από τις επιδράσεις των επιφανειακών μεταβολών θερμοκρασίας και υγρασίας μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες αναγνώσεις.

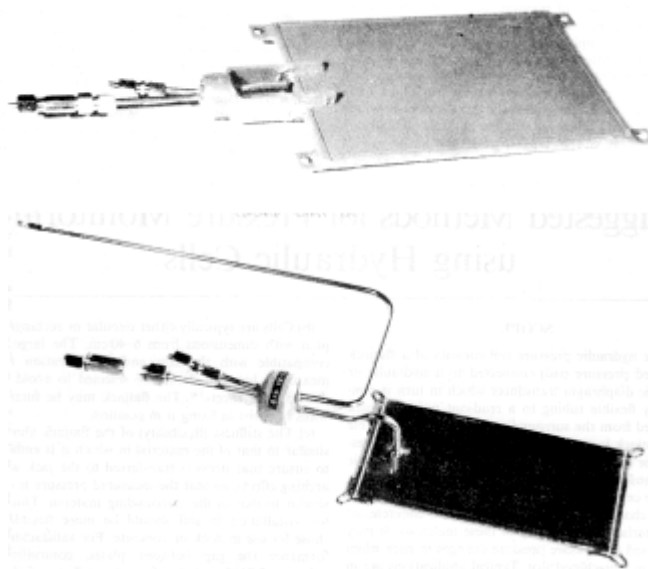
Οι αναγνώσεις του κλισιμέτρου, μετά τη διόρθωσή τους, συγκρίνονται με τις αρχικές αναγνώσεις στην ίδια θέση για το προσδιορισμό της επαυξητικής μεταβολής στη γωνία ή στη μετατόπιση. Διαγράμματα (Σχήμα 19) της γωνιακής μεταβολής ή της μετατόπισης ως προς το χρόνο σχεδιάζονται για κάθε θέση μέτρησης.



Σχήμα 19. Κλίση της επιφάνειας του εδάφους λόγω της προχώρησης επιμήκους μεταλλευτικού μετώπου στο βάθος.

2.5 Υδραυλικά κελιά

Το υδραυλικό κελί πίεσης αποτελείται από ένα επίπεδο γρύλο (μαξιλάρι πίεσης γεμάτο με ρευστό) συνδεδεμένο με υδραυλικό ή πνευματικό μορφοτροπέα διαφράγματος που είναι συνδεδεμένος με τη μονάδα ανάγνωσης μέσω εύκαμπτης σωλήνωσης. Η πίεση που μεταφέρεται από το περιβάλλον έδαφος, πέτρωμα ή το σκυρόδεμα στον επίπεδο γρύλο μετρείται με την εξισορρόπηση της πίεσης ρευστού στο κελί από μια πίεση που εφαρμόζεται στην αντίστροφη πλευρά του μετατροπέα διαφράγματος. Τυπικά παραδείγματα εναλλακτικών σχεδιασμών υδραυλικών κελιών πίεσης δίνονται στο Σχήμα 20.



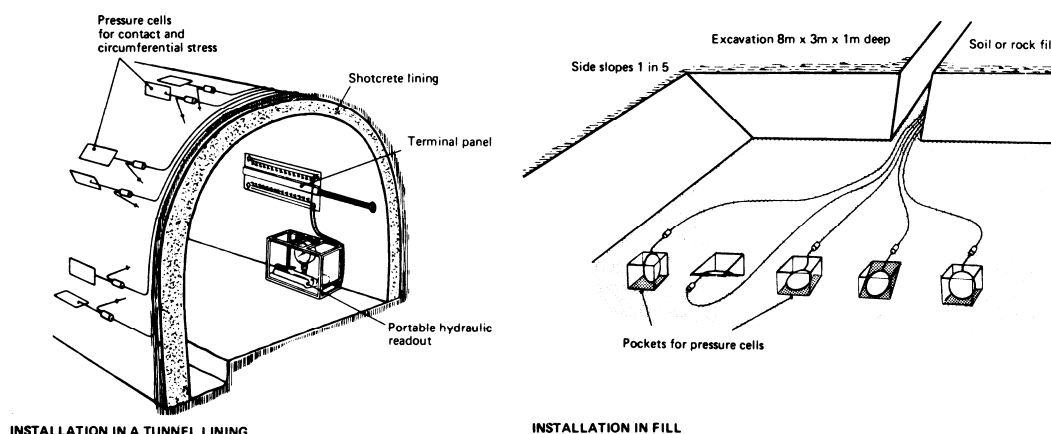
Σχήμα 20. Παραδείγματα εναλλακτικών σχεδιασμών υδραυλικών κελιών πίεσης.

Το κελί φορτίου χρησιμοποιείται ως μέσο μέτρησης των μεταβολών της ολικής πίεσης στο έδαφος, στα επιχώματα ή στις λιθογομώσεις, στο σκυρόδεμα ή στη διεπιφάνεια μεταξύ οποιωνδήποτε από αυτά τα υλικά. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση των

μεταβολών πίεσης στο πέτρωμα όταν εγκαθίσταται σε μηχανικά διανοιγμένη εγκοπή. Χαρακτηριστικές εφαρμογές βρίσκουν: στα αναχώματα, τα φράγματα και τις θεμελιώσεις φραγμάτων, στους τοίχους αντιστήριξης και πίσω από ή μέσα στις επενδύσεις σιράγγων.

Η ολική πίεση σε μια δεδομένη θέση ορίζεται ως το άθροισμα της ενεργού πίεσης του εδάφους ή του πετρώματος και της πίεσης του υπόγειου νερού ή της πίεσης του αέρα.. Η μεταβολή της πίεσης ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ολικής πίεσης οποιαδήποτε στιγμή και της τιμής της ολικής πίεσης κατά την διάρκεια της εγκατάστασης του κελιού. Μετρήσεις της απόλυτης τιμής της πίεσης, δηλ. της πίεσης του εδάφους πριν από την εγκατάσταση του κελιού, δεν μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας αυτό το κελί. Τέτοιες μετρήσεις απαιτούν, για παράδειγμα τη χρήση μιας από τις προτεινόμενες μεθόδους της ISRM για τον προσδιορισμό της τάσης. Ο υδραυλικός μορφοτροπέας, που αποτελεί μέρος του κελιού πίεσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές, παραδείγματος χάριν για την μέτρηση της πίεσης νερού ή τις καθιζήσεις.

Τα υδραυλικά κελιά εγκαθίστανται γενικά σε ζεύγη ή σε συστοιχίες για τη μέτρηση της πίεσης σε διαφορετικές κατευθύνσεις στην ίδια θέση. Γειτονικά κελιά πρέπει να διαχωρίζονται από μια απόσταση τουλάχιστον 1 φορά τη διάμετρο τους, ώστε να αποτρέπεται η επίδραση της παρουσίας ενός κελιού στις αναγνώσεις των παρακείμενων κελιών. Χαρακτηριστικά σκαριφήματα τοποθέτησης κελιών πίεσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 21.

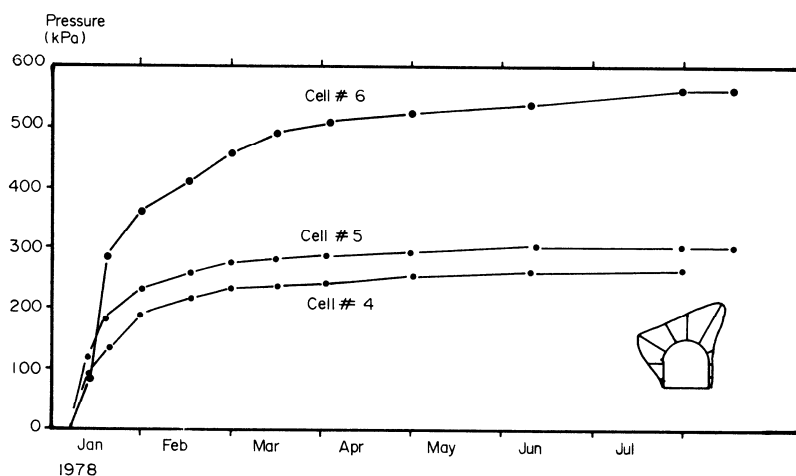


Σχήμα 21. Παραδείγματα εγκατάστασης υδραυλικών κελιών πίεσης και τερματικών συνδέσεων.

Η θέση του κελιού ή της συστοιχίας των κελιών καθορίζεται ανάλογα με τους συγκεκριμένους στόχους των μετρήσεων. Το κελί πρέπει να είναι σε ομοιόμορφη και πλήρη επαφή με το περιβάλλον υλικό. Το έδαφος ή το πέτρωμα δίπλα στο κελί πρέπει να είναι απαλλαγμένο από προεξοχές ή μη αντιπροσωπευτικό υλικό που θα οδηγούσαν σε εντατικές ανωμαλίες. Τα υδραυλικά κελιά δεν πρέπει να εκτίθενται σε αισθητές μεταβολές

θερμοκρασίας, για παράδειγμα λόγω της δράσης του άμεσου φωτός του ήλιου ή ψυχρών ανέμων σε εκτεθειμένες επιφάνειες. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί μόνωση. Τα αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων με υδραυλικά κελιά καταγράφονται σε φύλλο δεδομένων όπως αυτό στο Σχήμα 22, που σχεδιάστηκε για τη διευκόλυνση της σύγκρισης μεταξύ ενός συνόλου αναγνώσεων με τις προηγούμενες.

FIELD DATA: HYDRAULIC PRESSURE CELLS													
SITE LOCATION		VILLE STE MARIE TUNNEL								STATION #		14	
DATE INSTALLED		28 Dec 1977				STATION LOCATION		6+42					
DATE 1978	TIME	TEMP °C	cell #		READINGS (kPa)								REMARKS
			1	2	3	4	5	6	7	8	9		
3 Jan	2210	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Pressure compensation
10 Jan	1750	13	6	35	75	84	111	84	1	2	2		
15 Jan	1730	9	11	72	198	136	191	293	9	3	3		
1 Feb	0835	15	15	91	253	193	235	354	16	4	3		
15 Feb	0915	17	17	105	310	215	252	402	21	5	4		
1 Mar	2350	19	20	128	335	235	273	460	28	5	6	Supplementary bolts	
15 Mar	2100	19	23	151	342	240	281	481	35	8	8		
3 Apr	1230	21	25	164	353	246	289	502	45	11	10		
1 May	2100	19	27	175	362	251	294	520	53	15	15	Inner liner placed	
10 Jun	1835	23	29	184	368	255	298	541	58	18	19		
30 Jul	2200	21	30	190	370	260	300	560	60	20	20		



Σχήμα 22. Παράδειγμα παρουσίασης των αποτελεσμάτων μέτρησης των υδραυλικών κελιών πίεσης.

Η πίεση P του κελιού λαμβάνεται από την ανάγνωση P_r κάνοντας διορθώσεις ως εξής:

$$P = (P_r - P_i - P_h - P_f) \times E \quad (16)$$

Όπου

P_r η πίεση που αναγνώσθηκε στο κελί

P_i η αρχική πίεση του κελιού, που εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης κατασκευής και στη συνέχεια ρυθμίστηκε για την αντιστάθμιση π.χ. της συρρίκνωσης στο σκυρόδεμα.

P_h η διόρθωση στατικού υδραυλικού ύψους, λόγω της διαφοράς υψομέτρου μεταξύ του κελιού και της συσκευής ανάγνωσης (μόνο για υγρό, για αέριο, $P_h = 0$)

P_f διόρθωση για απώλειες τριβής στην γραμμή παροχής του υδραυλικού ρευστού

E πολλαπλασιαστικός συντελεστής (μικρότερος από 1.0) για την αντιστάθμιση της επίδρασης των πλευρών του κελιού

Στις περισσότερες εφαρμογές, μόνο οι μεταβολές της πίεσης είναι που ενδιαφέρουν. Σε αυτές τις περιπτώσεις λαμβάνεται μια αρχική ανάγνωση P_i μετά από την ολοκλήρωση της εγκατάστασης και περιλαμβάνει τις επιδράσεις P_h και P_f , που παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του προγράμματος παρακολούθησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις ισχύει:

$$P = (P_r - P_i) \times E \quad (17)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ελάχιστη μεταβολή πίεσης που μπορεί να καταγραφεί χρησιμοποιώντας αυτό το κελί είναι $(P_i + P_h + P_f)$, συνεπώς εάν πρόκειται να μετρηθούν μικρές τιμές της πίεσης προτιμάται ένα αέριο σαν μετρητικό μέσο.

3 Αναφορές

- Alexander LG (1960). “*Field and laboratory tests in rock mechanics*”, 3rd Aust.-N.Z. Conf. on Soil Mech., 161-8.
- Boussinesq J (1883). “*Applications des Potentiels a l' Etude de l' Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques*”, Gauthier-Villars, Paris.
- Coates DF and Gyenge M (1966). “*Plate load testing on rock for deformation and strength properties*”, Testing Techniques for Rock Mechanics, ASTM, STP 402, 19-35.
- Cording EJ, Mahar JW & Brierley GS (1977). “*Observations for shallow chambers in rock*”. In: Field Measurements in Rock Mechanics, International Symposium, Zurich (1977).
- ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Committee on Field Tests (1979). “*Suggested method for determining in situ deformability of rock*”, Int Jnl Rock Mech Min Sci Geomch Abstr. Vol, 16, pp. 195 to 214
- ISRM (1981), “*Suggested methods for determining shear strength: Part 1 suggested method for in situ determination of direct shear strength*”, In: ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, E.T. Brown (Ed.) Pergamon, Oxford, pp. 191-135.
- ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Committee on Field Tests (1978). “*Suggested methods for monitoring rock movements using borehole extensometers*”, Int Jnl Rock Mech Min Sci Geomch Abstr. Vol, 15, pp. 305 to 317

- ISRM (1981), “*Suggested methods for monitoring rock movements using inclinometers and tiltmeters*”, In: ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, E.T. Brown (Ed.) Pergamon, Oxford, pp. 187-199.
- ISRM (1981), “*Suggested methods for pressure monitoring using hydraulic cells*”, In: ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, E.T. Brown (Ed.) Pergamon, Oxford, pp. 119-127.
- Jaeger JC and Cook NGW (1976). “*Fundamentals of Rock Mechanics*”, Chapman and Hall, 2d edition.
- Nose M (1964). “*Rock test in situ, conventional tests on rock properties and design of Kurobegawa No.4 dam based thereon*”, 8th International Congress on Large Dams, Trans., Edinburgh, 1, 219-52.
- Oberti G. (1960). “*Experimentelle Untersuchungen uber die Charakteristika der Verformbarkeit der Felsen*”, Geologie Bauwes., 25, 95-113.
- Ortlepp WD and Nicoll A (1964). “*The elastic analysis of observed strata movement by means of an electrical analogue*”, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 65, 214-35.
- Rocha M, Serafim JL and Da Siveira AF (1955). “*Deformability of foundation rocks*”, Proc. 5th Internat. Congress on Large Dams, Paris, 3, 531-61.
- Rocha M (1964). “*Mechanical behaviour of rock foundations in concrete dams*”, Trans. 8th Congress on Large Dams, Edinburgh, 785-831.
- Serafim JL (1964). “*Rock mechanics considerations in the design of concrete dams*”, in State of Stress in the Earth's Crust, WR Judd (Ed.), New York, Elsevier, 611-45.
- Talobre J (1957). “*La mecanique des roches*”, Paris, Dunod.
- Timoshenko SP and Goodier JN (1951). “*Theory of Elasticity*”, New York, McGraw-Hill.
- Zienkiewicz OC and Stagg KG (1967). “*Cable method of in situ rock testing*”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 4, 273-300.