

Κεφάλαιο 8

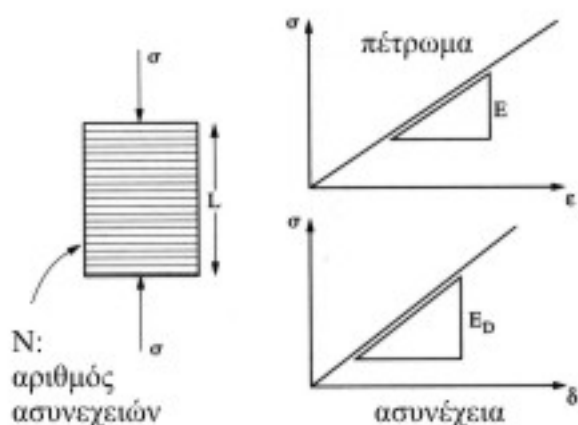
Ανισοτροπία

Την ανισοτροπία στη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων δυνάμεθα να διακρίνουμε σε σχέση με την παραμορφωσιμότητα και την αντοχή τους.

1 Ανισοτροπία της παραμορφωσιμότητας

1.1 Ένα σύνολο παράλληλων ασυνεχειών

Θεωρείστε δοκίμιο πετρώματος, το οποίο περιέχει ένα σύνολο παράλληλων ασυνεχειών, στο οποίο εφαρμόζεται μια ορθή τάση. Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων υποτίθεται ότι είναι γραμμική ελαστική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Το ολικό μέτρο παραμορφωσιμότητας είναι ο λόγος της ορθής τάσης προς τη συνολική παραμόρφωση. Υποθέτουμε ότι το πάχος των ασυνεχειών είναι αμελητέο σε σύγκριση με το ολικό μήκος L . Πρόσθετα, υποθέτουμε ότι η παραμόρφωση είναι το άθροισμα δύο επιμέρους παραμορφώσεων, αυτής που οφείλεται στην παραμόρφωση του άρρηκτου πετρώματος και αυτής που οφείλεται στην παραμόρφωση των ασυνεχειών.



Σχήμα 1. Μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας που περιέχει ένα παράλληλο σύστημα ασυνεχειών

Η συνεισφορά στην παραμόρφωση από το άρρηκτο πέτρωμα, δ_i , είναι $\sigma \cdot L/E$ (δηλ. παραμόρφωση που πολλαπλασιάζεται με το μήκος). Η συμβολή που γίνεται από μια ενιαία ασυνέχεια στην παραμόρφωση, δ_D είναι σ/E_D (που σχετίζει την πίεση άμεσα στη μετατόπιση). Υποθέτοντας μια συχνότητα ασυνεχειών λ , θα υπάρχουν $\lambda \cdot L$ ασυνέχειες στη μάζα του πετρώματος και η συνολική συμβολή τους στην παραμόρφωση θα είναι, ίση με $\sigma \cdot \lambda \cdot L/E_D$. Ως εκ τούτου, η συνολική μετατόπιση, δ_T , είναι:

$$\delta_T = \frac{\sigma \cdot L}{E} + \frac{\lambda \cdot \sigma \cdot L}{E_D} \quad (1)$$

και η ολική τροπή δίνεται από την:

$$\varepsilon = \frac{\delta_T}{L} = \frac{\sigma}{E} + \frac{\lambda \cdot \sigma}{E_D} \quad (2)$$

Τελικά, το ολικό μέτρο παραμορφωσιμότητας δίνεται από την:

$$E_{mass} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{E} \right) + \left(\frac{\lambda}{E_D} \right) \right]} \quad (3)$$

Οι καμπύλες που σχεδιάζονται με βάση την παραπάνω σχέση δίνουν τη μειούμενη τιμή του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας με τη συχνότητα των ασυνεχειών για διάφορες τιμές της παραμορφωσιμότητας του πετρώματος. Είναι απλό να επεκταθεί η παραπάνω σχέση για πολλαπλά άρρηκτα στρώματα βράχου με διαφορετικές ιδιότητες, συχνότητες ασυνεχειών και δυστροπίες, που διαμορφώνουν ένα διαστρωμένο πέτρωμα με τις ασυνέχειες παράλληλες στα επίπεδα στρώσης.

Η παραπάνω σχέση αφορά φόρτιση κάθετη στα επίπεδα των ασυνεχειών. Σαφώς, ακόμα και σε αυτές τις εξιδανικευμένες περιπτώσεις, χρειάζεται να επεκταθούν οι ιδέες σε φορτίσεις υπό οποιαδήποτε γωνία και η δυνατότητα ύπαρξης οποιουδήποτε αριθμού μη παράλληλων συνόλων. Με παρόμοιο τρόπο δύναται να παραχθεί η σχέση

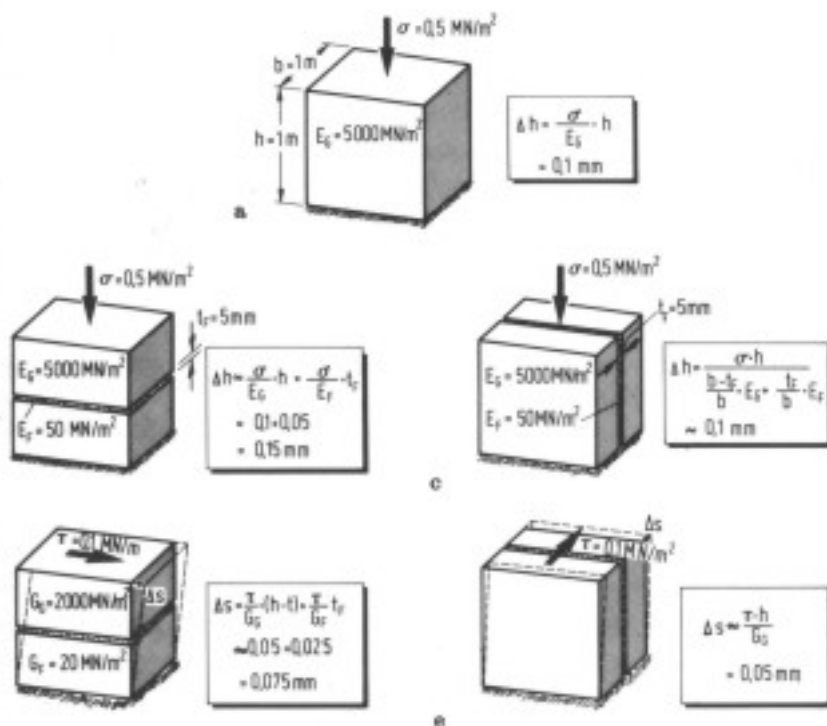
που δίνει το συνολικό μέτρο διάτμησης για εφαρμογή διατμητικής τάσης παράλληλα προς τις ασυνέχειες (Goodman, 1989).

$$G_{mass} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{G} \right) + \left(\frac{\lambda}{G_D} \right) \right]} \quad (4)$$

όπου G και G_D το μέτρο διάτμησης του πετρώματος και της ασυνέχειας αντίστοιχα.

1.1.1 Παράδειγμα

Στο Σχήμα 3 υπολογίζονται οι μετατοπίσεις για διάφορες διευθύνσεις του επιπέδου ασυνέχειας και διάφορες απλές φορτίσεις.



Σχήμα 2. Παράδειγμα (Wittke, 1984)

1.2 Περισσότερα σύνολα παράλληλων ασυνεχειών

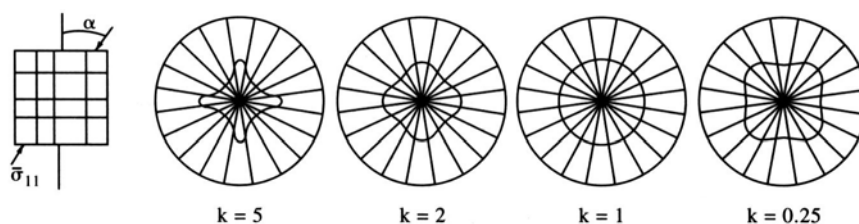
Μια πλήρης λύση έχει δοθεί από τον Wei (1988), που μπορεί να ενσωματώσει τις τέσσερις δυστροπίες μιας ασυνέχειας (ορθή, διατμητική και οι δύο μη διαγώνιοι όροι), οποιοδήποτε αριθμό συνόλων και μπορεί να προσεγγίσει την επίδραση ασυνεχούς επέκτασης των ασυνεχειών. Για τον υπολογισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας οι τριγωνομετρικοί όροι χρειάζεται να υψωθούν στην τετάρτη

προκειμένου να ληφθεί υπόψη ότι ο μετασχηματισμός του απαιτεί τη στροφή της δύναμης, του εμβαδού, της συχνότητας και της μετατόπισης. Για παράδειγμα, οι ρίζες της παρακάτω εξίσωσης από τη θεωρία του Wei, παρέχουν διευθύνσεις των ακραίων τιμών του μέτρου.

$$(A \tan^4 \alpha - B \tan^3 \alpha - C \tan^2 \alpha - D \tan \alpha - F) \cos^4 \alpha = 0 \quad (5)$$

όπου A , B , C , D , F είναι οι σταθερές που διαμορφώνονται από διάφορους συνδυασμούς των δυστροπιών της ασυνέχειας και α είναι η γωνία μεταξύ της εφαρμοσμένης τάσης και ενός από τους γενικούς καρτεσιανούς άξονες.

Η χρησιμότητα αυτού του τύπου ανάλυσης διευκρινίζεται στο Σχήμα 4 όπου για δύο σύνολα ασυνεχειών σε δύο διαστάσεις δίνεται σε πολικά διαγράμματα η μεταβολή του μέτρου. Εφόσον η τιμή του k είναι υψηλή, όπως στο αριστερό διάγραμμα, οι χαμηλότερες τιμές του μέτρου είναι σε διεύθυνση 45° ως προς τα σύνολα των ασυνεχειών, και οι υψηλότερες τιμές του μέτρου για διευθύνσεις κάθετες στα σύνολα. Αντιθέτως, όταν η τιμή του k είναι χαμηλή, ως στο δεξί διάγραμμα, η ελάχιστη τιμή του μέτρου είναι σε διεύθυνση κάθετη στα σύνολα, και η σε διεύθυνση 45° ως προς τα σύνολα. Όπως η συχνότητα των ασυνεχειών, έτσι και οι διευθύνσεις των μέγιστων και ελάχιστων μέτρων δεν είναι κάθετες μεταξύ τους.



Σχήμα 3. Μεταβολή του μέτρου παραμορφωσιμότητας για δύο ορθογώνια σύνολα ασυνεχειών με ίδιες πυκνότητες και δυστροπίες (Wei, 1988).

Ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση που $k = 1$, δηλ. η ορθή και διατμητική τάση είναι ίσες, και το μέτρο είναι ισότροπο. Η σημασία ακόμη και αυτής της πολύ απλής περίπτωσης παραμορφωσιμότητας βραχομάζας για επί τόπου δοκιμές και αριθμητική προσομοίωση, είναι προφανής.

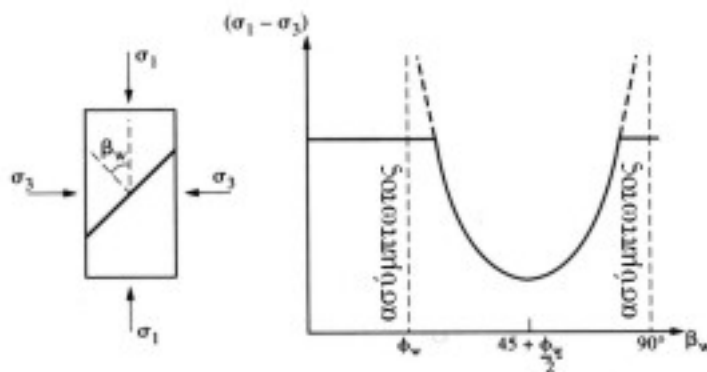
2 Ανισοτροπία της αντοχής

2.1 Ένα επίπεδο ασυνέχειας

Με τον ίδιο τρόπο που θεωρήσαμε την παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας, εκφράσεις μπορούν να αναπτυχθούν που να συσχετίζουν τη μεταβολή της αντοχή με την παρουσία των ασυνεχειών, αρχίζοντας με μια μοναδική ασυνέχεια και επεκτείνοντας σε οποιοδήποτε αριθμό ασυνεχειών. Η αρχική προσέγγιση επιτυγχάνεται με τη θεωρία «μεμονομένου επιπέδου ασυνέχειας» του Jaeger, με την οποία η αντοχή ενός δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος που περιέχει μια ασυνέχεια μπορεί να υπολογισθεί. Βασικά, η τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο αναλύεται στην ορθή και διατμητική τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας. Εν συνεχεία εφαρμόζεται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για να εξετάσει τη δυνατότητα ολίσθησης.

Η αντοχή του δοκιμίου εξαρτάται από τον προσανατολισμό της ασυνέχειας. Εάν η ασυνέχεια είναι, παραδείγματος χάριν, παράλληλη ή κάθετη στην εφαρμοσμένη φόρτιση, δεν θα έχει καμία επίδραση στη αντοχή των δοκιμίων. Σε μερικές γωνίες, εντούτοις, η ασυνέχεια θα μειώσει σημαντικά τη δύναμη του δοκιμίου. Στο Σχήμα 5, φαίνεται ότι η χαμηλότερη αντοχή εμφανίζεται όταν η κάθετος στην ασυνέχεια κλίνει $45^\circ + (\varphi^0/2)$ ως προς την εφαρμοσμένη μέγιστη κύρια τάση. Ο τύπος για τη μείωση της αντοχής βρίσκεται με τον καθορισμό της ορθής και διατμητικής τάσης στο επίπεδο που διαχωρίζει το δοκίμιο και αντικατάστασης στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Για τη γεωμετρία και τη φόρτιση που δίνεται στο Σχήμα 5,

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin 2\beta_w \quad (6)$$



Σχήμα 4. Επίδραση μιας ασυνέχειας στην αντοχή δοκιμίου

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos 2\beta_w \quad (7)$$

Η αντικατάσταση αυτών στο κριτήριο Mohr-Coulomb, δίνει:

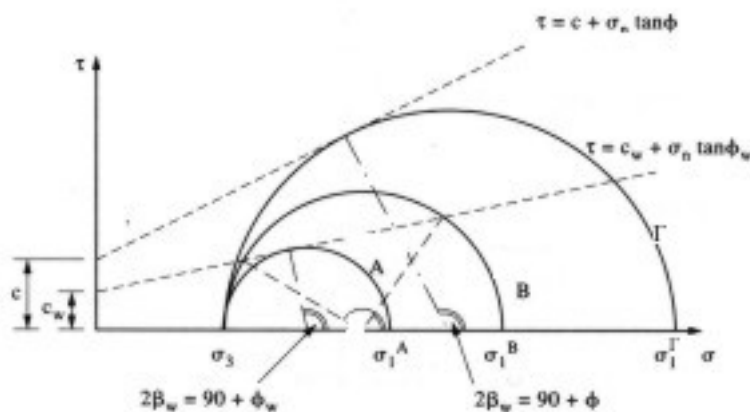
$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2(c_w + \sigma_3 \cdot \tan \phi_w)}{(1 - |\cot \beta_w| \cdot \tan \phi_w) \cdot |\sin 2\beta_w|} \geq 0 \quad (8)$$

όπου c_w και ϕ_w είναι η συνοχή και η γωνία της τριβής για την ασυνέχεια, και η γωνία β_w διευκρινίζεται στο Σχήμα 5. Η παραπάνω σχέση έχει ασύμπτωτες τις $\beta_w = \phi_w$ και $\beta_w = 90^\circ$. Η ελάχιστη τιμή της αντοχής παρουσιάζεται στο μέσο των ασύμπτωτων, δηλ. για $\beta_w = 45^\circ + \phi_w/2$. Το διάγραμμα της εξίσωσης στο Σχήμα 5 παρουσιάζει τη μεταβολή της αντοχής στην περιοχή των γωνιών που η αντοχή των δοκιμίων είναι μικρότερη από αυτή του άρρηκτου πετρώματος. Εναλλακτική παρουσίαση επιτυγχάνεται στο Σχήμα 6 μέσω των κύκλων Mohr. Στο σχήμα δίνονται οι περιβάλλοντες αστοχίας Mohr-Coulomb για το άρρηκτο πέτρωμα και την ασυνέχεια. Φαίνονται επίσης τρεις κύκλοι Mohr, A, B, C, που αντιπροσωπεύουν τη χαμηλότερη αντοχή, μια ενδιάμεση περίπτωση και την υψηλότερη αντοχή.

- Ο κύκλος A αντιπροσωπεύει την περίπτωση επαφής της περιβάλλουσα αστοχίας της ασυνέχειας, δηλ. για μια ασυνέχεια σε γωνία $2\beta_w = 90^\circ + \phi_w$.
- Ο κύκλος B αντιπροσωπεύει την περίπτωση που η αστοχία μπορεί να εμφανιστεί κατά μήκος της ασυνέχειας για μια σειρά των γωνιών.

• Ο κύκλος C αντιπροσωπεύει την περίπτωση όπου ο κύκλος αγγίζει την περιβάλλουσα αστοχίας του άρρηκτου πετρώματος, δηλ. που η αστοχία θα εμφανιστεί στο άρρηκτο πέτρωμα εάν δεν έχει ήδη εμφανιστεί κατά μήκος της ασυνέχειας.

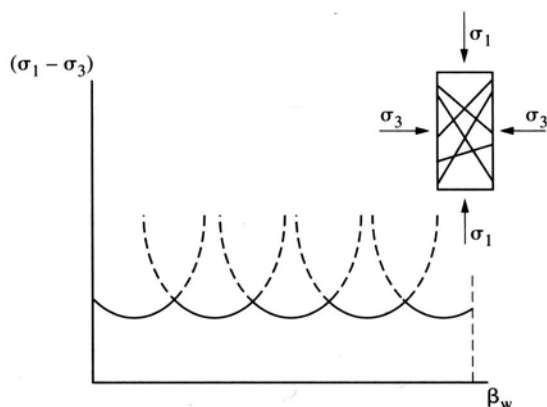
Ανάλογα με τις περιστάσεις, η αστοχία μπορεί να εμφανιστεί είτε κατά μήκος της ασυνέχειας είτε δια μέσου του άρρηκτου πετρώματος, σύμφωνα με τον σχετικό προσανατολισμό των κύριων τάσεων και της ασυνέχειας.



Σχήμα 5. Παρουσίαση με κύκλους Mohr των δυνατών τρόπων αστοχίας πετρώματος που εμπεριέχει ένα μοναδικό επίπεδο αδυναμίας.

2.2 Πολλές μη παράλληλες ασυνέχειες

Τη θεωρία ενός μοναδικού επιπέδου αδυναμίας μπορούμε να επεκτείνουμε για δύο ή περισσότερες ασυνέχειες με διαφορετικό προσανατολισμό στο δοκίμιο του πετρώματος. Κάθε ασυνέχεια θα αποδυναμώνει το δοκίμιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, αλλά η γωνιακή θέση των ελάχιστων αντοχής δεν θα συνέπιπτε. Κατά συνέπεια το πέτρωμα αποδυναμώνεται σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις ταυτόχρονα όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Το υλικό τείνει να γίνει ιστροπικό ως προς την αντοχή, όπως ένα κοκκώδες έδαφος. Κατά τη χάραξη των καμπυλών, θα πρέπει να δίνεται προσοχή στη σωστή εκτίμηση της γωνίας β_w για κάθε μία από τις ασυνέχειες που τέμνουν το δοκίμιο.



Σχήμα 6. Αντοχή πετρώματος που περιέχει πολλά συστήματα ασυνεχειών

Το βασικό πλεονέκτημα της θεωρίας του μοναδικού επιπέδου αδυναμίας είναι η απλότητα και η χρησιμότητά του στην ερμηνεία της αστοχίας της βραχομάζας. Η διδιάστατη περίπτωση (εφαρμόσιμη στην επίπεδη τάση) μπορεί εύκολα να επεκταθεί στη γενική τριδιάστατη περίπτωση φόρτισης. Στην πραγματικότητα, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη, επειδή οι τάσεις δεν διαβιβάζονται άμεσα μέσω της ασυνέχειας. Εντούτοις, παρά τις ανεπάρκειες αυτές, η κατανόηση τέτοιων εξιδανικευμένων μοντέλων βοηθά στην ερμηνεία της πιο σύνθετης συμπεριφοράς της πραγματικής βραχομάζας.

3 Βιβλιογραφία

- Brady BHG and Brown ET (1985). Rock mechanics for underground mining, George Allen & Unwin, London, 527pp.
- Hudson JA and Harrison JP (1997). Engineering rock mechanics, An introduction to the principles. Pergamon.
- Jaeger JC and Cook NGW (1979). Fundamentals of rock mechanics. Chapman and Hall, London, 593pp.
- Wei ZQ (1988). A fundamental study of the deformability of rock masses, PhD thesis, Imperial College, University of London, 268pp.
- Wittke W. (1984). Felsmechanik Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels, Springer Verlag, Berlin.