
ΜΙΑ ΨΕΥΔΟΠΟΣΟΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΟΛΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Θ.Π. Τάσιος

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μεγάλη η φιλοδοξία-μας να τα βάλουμε με τον Πλούτο-να: Καί θεός είναι, καί σκοτεινός, καί εκδικητικός. Έτσι εξηγείται γιατί η Μηχανική των Σηράγγων δέν έχει ακόμη αρτιωθεί σε «ακριβή» επιστήμη. Παρα ταύτα, ο ωραίος αγώνας του Μηχανικού «ενάντια στο βάθος και στο νερό», βρίσκει τρόπους να παλεύει με τον θεό και να κατασκευάζει σήραγγες – και μόνον οι γραφειοκράτες των Βρυξελλών γκρινιάζουν «*διατί αι μελέται δέν ήσαν ακριβείς;*».

Μια πρώτη ένδειξη της ποικιλίας και της πολυπλοκότητας του αντικειμένου αυτής εδώ της Ημερίδας, είναι κι ο κατάλογος μερικών απ' τις οριακές καταστάσεις σχεδιασμού σηράγγων:

- (i) «**Ολική -αστοχία** Διατομής» (δυσανάλογα μεγάλες συγκλίσεις, εκτεταμένες αστάθειες), συνήθως για πολύ μικρές τιμές f_{cm} : p_o (όπου $f_{cm} = \eta$ θλιπτική αντοχή της βραχομάζας, και $p_o = \eta$ πίεση των υπερκειμένων εδαφών).

- (ii) «Αστοχία **Μετώπου**» (Όταν $f_{cm} : \rho_o$, ή με μορφή χοάνης, σε περίπτωση μικρών βαθών).
- (iii) «**Τοπική Αστοχία**» (**στέψεως** συνήθως), με συνέπειες επι της ασφαλείας προσωπικού και της λειτουργίας.
- (iv) «Μή-ανεκτή **καθίζηση**» επιφανείας εδάφους, λόγω της εκσκαφής (ρηχής, συνήθως) σήραγγας.
- (v) «**Αποφλοίωση** - εκτίναξη λεπίδων βράχου απ' τα τοιχώματα της σήραγγας (υπο υψηλές πιέσεις περιβάλλοντος).
- (vi) «**Λειτουργικές**» οριακές καταστάσεις, αναλόγως χρήσεως (λ.χ. στεγανότητα, κ.λπ.).

Απ' όλες αυτές τις οριακές καταστάσεις, η παρούσα ανακοίνωση θα ασχοληθεί μόνον με την πρώτη – εκείνη δηλαδή που αντιστοιχεί σε ολική αστοχία της διατομής και κατάπτωση. Είναι ίσως η συνηθέστερη στην Ελλάδα μορφή αστοχίας.

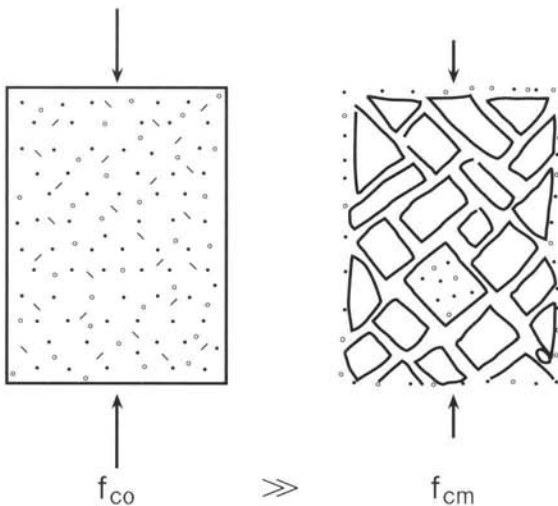
Για τη διερεύνηση του θέματος, πάντως, θα χρειασθεί να υπομνήσομε μερικά δεδομένα της Τεχνικής Γεωλογίας, και να εισαγάγομε μερικές απλές παραδοχές στην Μηχανική του προβλήματος.

2. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

α) Στο Σχ. 1 φαίνεται η γνωστή ριζική διαφορά ανάμεσα στην αντοχή f_{co} ακέραιου «τεμάχους» πετρώματος, αφενός, και «βραχομάζας» f_{cm} , αφετέρου, της οποίας η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη θα εξαρτάται:

- απ' την αντοχή (f_{co}) του καθενός απ' τα τεμάχια πετρώματος που την απαρτίζουν,

- απ' τον βαθμό κατάτμησης της βραχομάζας (την ιδιότητα αυτήν θα την περιγράφομε με έναν δείκτη « β_b » > 0 , < 1) και
- απ' τη διατμητική αντίσταση κατα μήκος των διεπιφανειών των τεμαχίων πετρώματος τα οποία απαρτίζουν τη βραχομάζα (την ιδιότητα αυτήν θα την περιγράφομε με έναν δείκτη « k_s » > 0 , < 1).



Σχ. 1: Αντοχή ακέραίου τεμάχους πετρώματος και αντοχή κατατμημένης βραχομάζας.

Θα δεχθούμε δηλαδή ότι

$$f_{cm} = \psi(\beta_b, k_s) \cdot f_{co} \quad (1)$$

όπου η εμπειρική συνάρτηση $\psi(\beta_b, k_s)$ θα λαμβάνει συνήθως τιμές πολύ μικρότερες της μονάδας.

6) Χάρης στην εκτεταμένη, πολυετή και πολλαπλώς βαθμονομημένη (μέσω αναδραστικών αναλύσεων) μεθοδολογία

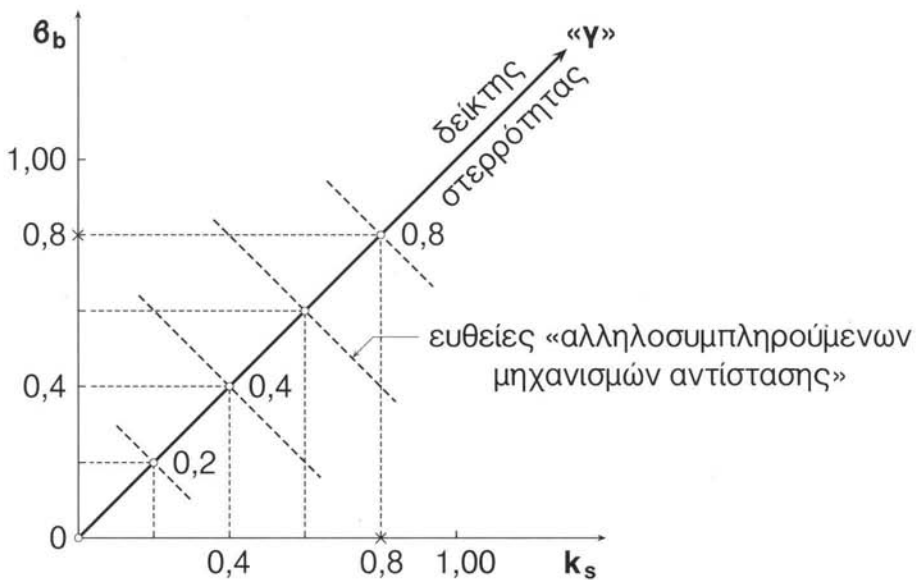
των Hoek, Brown, Marinos, φαίνεται ότι είναι εφικτή μια ομοιόμορφη γραμμική **αλληλοσυμπλήρωση** των δύο αυτών μηχανισμών αντίστασης της βραχομάζας («κατάτμηση» και «αντίσταση διεπιφανειών»), της μορφής

$$\frac{\beta_b}{(\beta_b)_0} + \frac{k_s}{(k_s)_0} = 1 \quad (2)$$

και μάλιστα, ακόμη απλούστερα, υπο την μορφήν

$$\beta_b + k_s \approx 2\gamma \quad (3)$$

όπου γ = «δείκτης στερρότητας» της βραχομάζας, όπως παριστάνεται στο Σχ. 2.



Σχ. 2: Εμπειρική εξάρτηση των αλληλοσυμπληρούμενων δεικτών β_b και k_s , προς τον ενιαίο «δείκτη στερρότητας» γ .

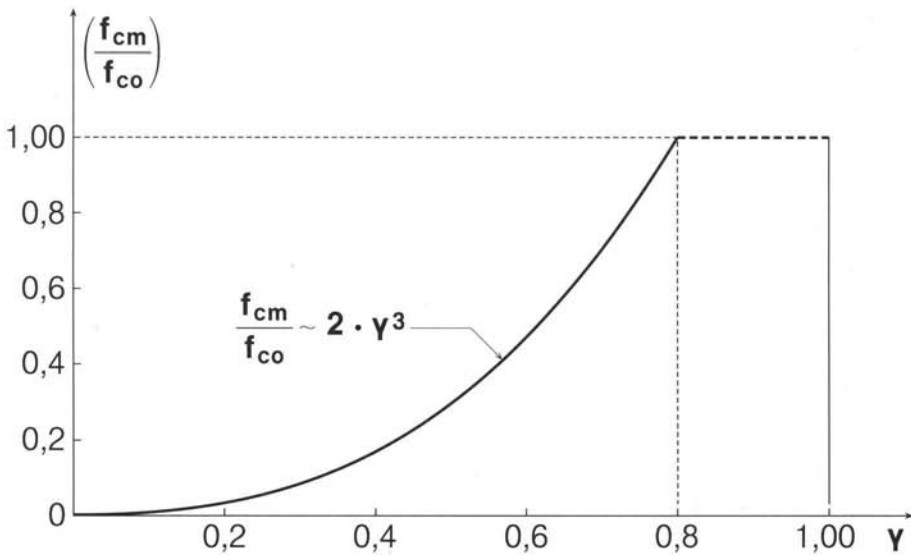
Ουσιαστικώς, ο δείκτης στερρότητας εκφράζει αδρομερώς τον δείκτη GSI (geological strength index) της μεθοδολογίας Hoek, Brown, Marinos (Σχ. 4)

$$\gamma \sim \frac{\text{GSI}}{100} \quad (4)$$







γ) Τελικώς, για κάμποσες πρακτικές εφαρμογές, η μειωτική συνάρτηση $\psi(\beta_b, k_s)$ της Εξ. 1 μπορεί να ληφθεί ίση με

$$\psi = 2\gamma^3 \triangleright 1 \quad (5)$$

όπως φαίνεται στο Σχ. 3.



Σχ. 3: Εμπειρική εξάρτηση της αντοχής βραχομάζας f_{cm} απ' τον δείκτη στερρότητας « γ » του Σχ. 2.

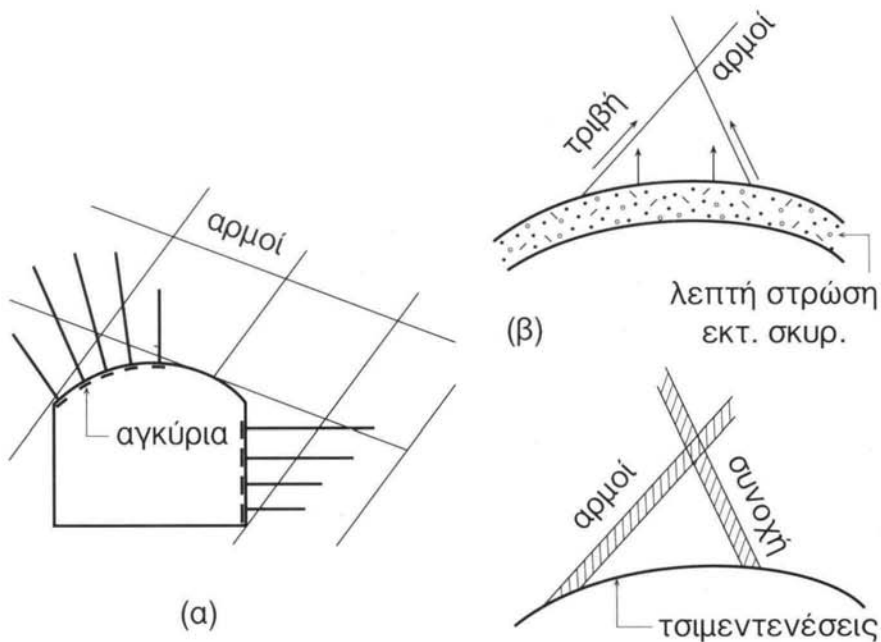
<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθένειες επίπεδες επιφάνειές έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>	<p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ πραχείες, μη αποσπασθείσες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Πραχείες, ελαφρά αποσπασθείσες και σφαιρούμενες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μέτριως αποσπασθείσες και εφελκυσμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΟΧΗ Επιφάνειες ολισθήσης, πολύ αποσπασθείσες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΟΧΗ Επιφάνειες ολισθήσης, πολύ αποσπασθείσες με μαλακό σφηνικό υλικό πλήρωσης</p>			
	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →</p>			
<p> INTACT OR MASSIVE - Αρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90			N/A
<p> BLOCKY - Αδιάταρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	80	70		
<p> VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>	70	60		
<p> BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτωχόμενη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>	60	50	40	
<p> DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p>	50	40	30	
<p> LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	40	30	20	10

Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI

Σχ. 4: Ακριβής γεωλογική εκτίμηση της εξάρτησης του δείκτη στερεότητας «γ» (δείκτη γεωλογικής αντοχής $GSI/100$), απ' την «εμπλοκή» των βραχοτεμαχίων ($\sim \beta_b$) και τις «ιδιότητες διεπιφανειών» ($\sim k_s$), [Hoek, Brown, Marinos].

3. ΤΕΧΝΗΤΗ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Στην Τεχνολογία κατασκευής των σηράγγων, διατίθενται ως γνωστόν δύο βασικές τεχνικές για την επιτόπου βελτίωση της αντοχής της βραχομάζας (Σχ. 5):



Σχ. 5: α) Τα αγκύρια μειώνουν τον βαθμό κατάτμησης (αύξηση β_b). β) Το εκτοξευόμενο σκυροδέμα και οι τσιμεντενέσεις αυξάνουν τη διατμητική αντίσταση διεπιφανειών (αύξηση k_s).

- α) Με τη χρήση βλήτρων και αγκυρίων, «συνδέονται» τα τεμάχια πετρώματος, και επομένως μειώνεται ο βαθμός κατάτμησης ή, άλλως, αυξάνεται η τιμή του δείκτη « β_b ».
- β) Με τη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος συγκροτούνται τα τεμάχια πετρώματος εν επαφή, ενώ με τη χρήση τσιμεντενέσεων αυξάνεται η συνοχή στις διεπιφάνειες.

νειές τους. Αμφότερα τα μέτρα διασφαλίζουν μια καλύτερη διατμητική αντίσταση διεπιφανειών – και επομένως οδηγούν σε αύξηση της τιμής του δείκτη « k_s ».

- γ) Όλα τούτα, πάντως, υπο την προϋπόθεση ότι δέν καταπίπτει το μέτωπο της σήραγγας – άρα έχουν ληφθεί καί εκεί τα τυχόν απαραίτητα πρόσθετα μέτρα (ενέσεις, αγκύρια, δοκίδες προπορείας).

Επομένως, η τελική επιτόπου αντοχή της βραχομάζας f_{cm} θα εξαρτάται καί απο τα πιοπάνω κατασκευαστικά μέτρα, έστω και άν δέν διαθέτομε ακόμη μιαν απλή μέθοδο για την ποσοτικοποίηση του αγαθού-των αποτελέσματος.

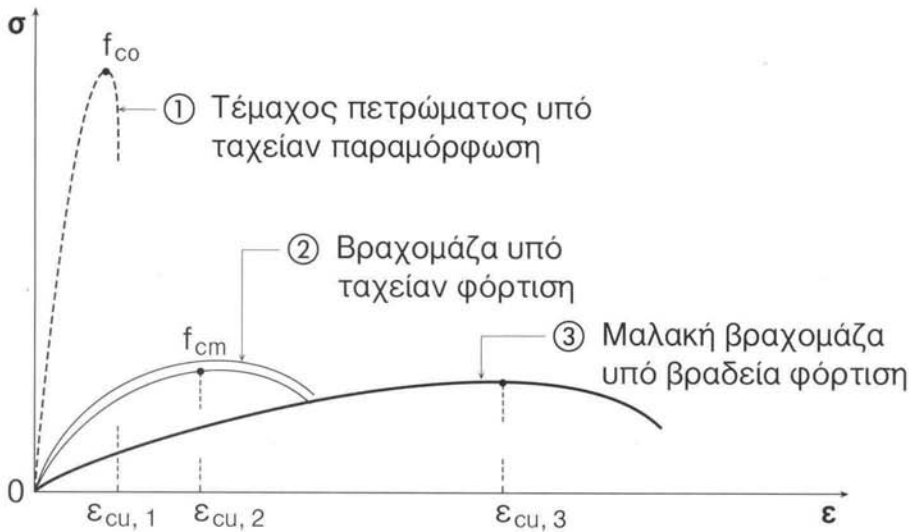
4. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

α) Για την ανάλυση του θέματος της ολικής αστοχίας της σήραγγας, εκτός απ' την αντοχή της βραχομάζας, μας χρειάζεται και μια ρεαλιστική γνώση της παραμορφωσιμότητάς της. Εδώ, δυστυχώς, η διαθέσιμη βιβλιογραφία είναι φτωχότερη.

Γι' αυτό θα χρειασθεί να εισαγάγομε ορισμένες (αδρομερείς, μάλλον) παραδοχές, οι οποίες δέν υποστηρίζονται απευθείας απο σχετικά πειραματικά αποτελέσματα – υπαγορεύονται όμως απο ορθές αρχές της Μηχανικής (Σχ. 6).

Η κρίσιμη παραμόρφωση ϵ_{cu} της βραχομάζας υπο *βραδείαν* φόρτιση:

- Μεταβάλλεται κατ' αντίστροφο τρόπον απ' ό,τι η αντοχή f_{cm} . Έτσι, για μονολιθικούς βράχους θα είναι $\epsilon_{cu} \sim 1.10^{-3}$, ενώ για μαλακά συμφύρματα η παραμόρφωση αυτή τείνει προς την τιμή $\epsilon_{cu} \sim 10.10^{-3}$.
- Εξαρτάται απ' την τριαξονικότητα του επιτόπου πεδίου των τάσεων, δηλαδή απ' την τιμή p_o/f_{cm} , όπου p_o είναι η πίεση των υπερκειμένων εδαφών (η οποία εκδηλώνεται και οριζοντίως, σε σημαντικόν βαθμό).



Σχ. 6: Η παραμόρφωση θραύσεως βραχομάζας αυξάνεται με την βραδύτητα της φόρτισης και με την ενδοτικότητα της μάζας.

Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, εισάγουμε τώρα μιαν αδρομερή εμπειρική γενίκευση, δεχόμενοι χοντρικά (πάντως δέ για $0.05 \leq (f_{cm} / p_o) \leq 1.00$)

$$\varepsilon_{cu} \sim 10^{-3} \left/ \left(\frac{f_{cm}}{p_o} \right) \right. \quad (5)$$

Η ποσοτική αξία αυτής της σχέσεως είναι αμφίβολη. Θα είναι όμως επαρκής για την ψευδοποσοτική ανάλυση για την οποία την προορίζομε.

6) Στην πρακτική εφαρμογή που θ' ακολουθήσει, θα έχουμε ανάγκη κι απ' το επιβατικό μέτρο παραμορφωσιμότητας E_o του υλικού της βραχομάζας, κοντά στην εξάντληση της αντοχής της.

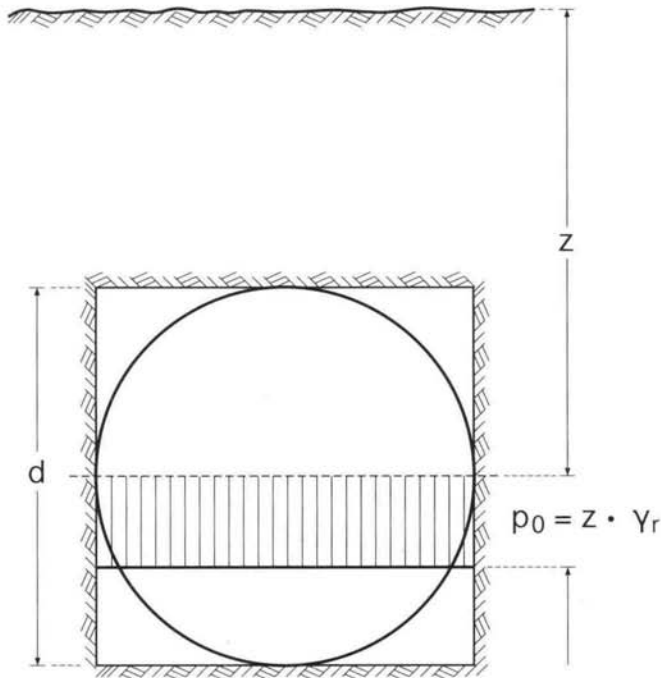
Έτσι (με τη βοήθεια της Εξ. 5).

$$E_o = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_{cu}} = 1000 \left(\frac{f_{cm}}{p_o} \right) \cdot f_{cm} \quad (6)$$

Ας σημειωθεί ότι η έκφραση αυτή, υπο τις οριακές προϋποθέσεις της Εξ. 5, δέν εκφράζει το μέτρο ελαστικότητας βραχομάζας υπο ανεμπόδιση θλίψη, αλλά την πλαστική παραμορφωσιμότητα υπο τριαξονικές συνθήκες.

5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Στο Σχ. 7 φαίνεται ενα υπόγειο κυλινδρικό άνοιγμα «διαμέτρου» d , σε **μεγάλο** βάθος « z » (άρα, πίεση υπερκειμένων $p_0 = z \cdot \gamma_r$, όπου « γ_r » το ειδικόν βάρος της βραχομάζας).

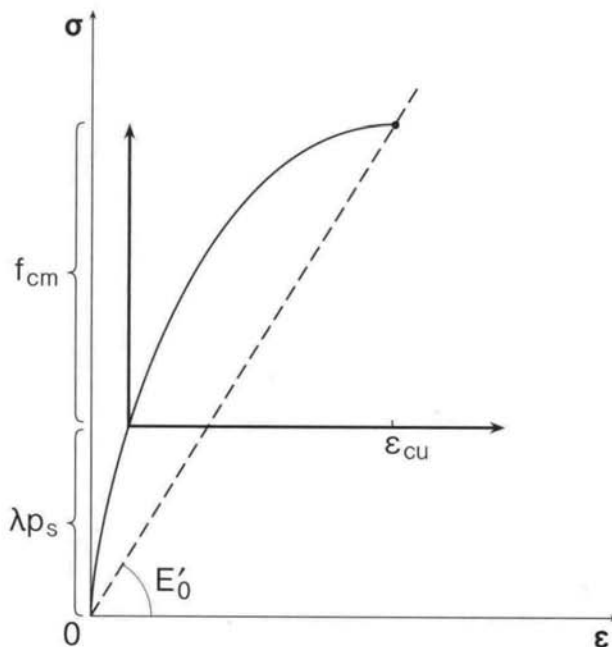


Σχ. 7: Το υπόγειο κυλινδρικό άνοιγμα και η ασκούμενη πίεση p_0 των υπερκειμένων εδαφικών μαζών.

Σε βαθμό προσέγγισης εξίσου αδρομερή με τις προσεγγίσεις που έχουν ήδη εισαχθεί, θεωρούμε ότι η συνολική σύγκλιση « δ » ισούται με την αναίρεση της αρχικής παραμόρφωσης εντός ύψους « d »:

$$\delta \approx d \cdot \frac{\rho_o}{E'_o} \cdot \zeta \quad (7)$$

όπου E'_o είναι το επιβατικό μέτρο παραμορφωσιμότητας του συστήματος «βραχομάζα + υποστήριξη», όπως φαίνεται στο Σχ. 8, ο δε συντελεστής « ζ » ο οποίος εκφράζει το πεδίο των τάσεων ($\zeta = 1$ έως 2), θα ληφθεί στα επόμενα ίσος με τη μονάδα (μή-συντηρητική παραδοχή).



Σχ. 8: Το επιβατικό μέτρο παραμορφωσιμότητας E'_o κοντά στη θραύση, για το σύστημα «βραχομάζα + φορέας υποστήριξης».

Στο σύστημα αυτό, θα προσπαθήσουμε να λάβουμε (έστω και κατα προσέγγιση) υπόψη τον ρόλο όλων των μέτρων «υποστήριξης» που χρησιμοποιούνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Προς τούτο, θα εισαγάγομε την έννοια «αντοχή της υποστήριξης» p_s υπο την πίεση των υπερκειμένων εδαφικών μαζών. Και θα θεωρήσουμε ότι η τιμή « p_s » ασκείται ως οιονεί *πρόθλιψη* στο εσωράχιο του ανοίγματος – αυξημένη μ' έναν συντελεστή «λ» (εξαιτίας της σταδιακότητας εφαρμογής της, ήδη απ' την έναρξη της εκσκαφής). Για τις πρακτικές ανάγκες αυτής εδώ της εργασίας, θα λάβομε $\lambda \sim 1.5$.

Έτσι (βλ. Σχ. 8):

$$E'_o = \frac{1}{\epsilon_{cu}} (f_{cm} + 1.5p_s) \quad (8)$$

ή, με τη βοήθεια της Εξ. 5

$$E'_o = 1000 \left[\left(\frac{f_{cm}}{p_o} \right) \cdot f_{cm} + 1.5 \left(\frac{f_{cm}}{p_o} \right) \cdot p_s \right] \quad (9)$$

Επομένως, η Εξ. 7 γράφεται τώρα

$$\frac{\delta}{d} = \left[\left(\frac{f_{cm}}{p_o} \right)^2 + 1.5 \left(\frac{f_{cm}}{p_o} \right) \left(\frac{p_s}{p_o} \right) \right]^{-1} \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

Υπενθυμίζεται, πάντως, ότι οι τιμές αυτές θα μπορούσαν επι το δυσμενέστερον να διπλασιασθούν, εάν στην Εξ. 7 είχαμε λάβει $\zeta = 2$.

6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

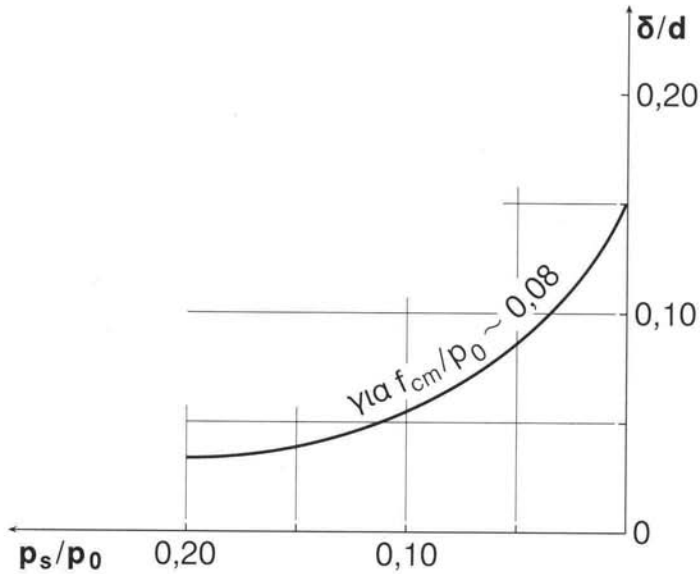
α) Η Εξ. 10 εκφράζει ψευδοποσοτικώς την εντός μεγάλου χρονικού διαστήματος σύγκλιση « δ », μιας σήραγγας διαμέτρου « d », αντοχής βραχομάζας « f_{cm} », σε μεγάλο βάθος « z » (όπου ασκείται πίεση υπερκειμένων $p_o = \gamma_r \cdot z$), και με υποστήριξη σήραγγας η οποία αντέχει οιονεί - ελαστικά μian πίεση ίση με « p_s ».

Η ακριβής ποσοτική αξία της Εξ. 10 είναι εξ ίσου αμφίβολη με τις απλοποιητικές παραδοχές οι οποίες οδήγησαν σ' αυτήν. Υποστηρίζω όμως ότι οποιαδήποτε φιλοδοξία μεγάλης «ακριβείας» σ' αυτόν εδώ τον τομέα της Εφαρμοσμένης Μηχανικής, θα ήταν επιστημολογικώς υπερφίαλη -δοθείσης της εξαιρετικά μεγάλης αβεβαιότητας των βασικών μεταβλητών που διέπουν το φαινόμενο: Αβεβαιότητας κατα την αδυναμία μετρήσεως, και αβεβαιότητας κατα την εν τόπω και χρόνω μεταβλητότητα των μεγεθών αυτών, γύρω απ' την σήραγγα.

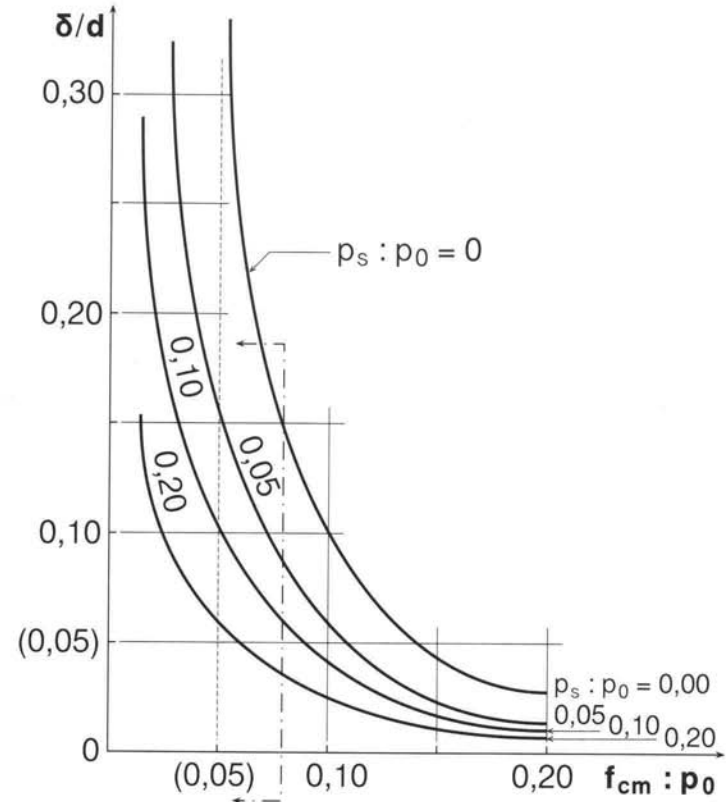
Απ' αυτήν λοιπόν την άποψη, η αξία της Εξ. 10 (καθώς και όλων των συναφών προβλέψεων της βιβλιογραφίας), έγκειται κυρίως στην εντόπιση, τον συσχετισμό και την αξιολόγηση των **κρισίμων παραμέτρων** του προβλήματος. Σ' αυτό ακριβώς σκοπεύει και η σύντομη διερεύνηση που ακολουθεί.

β) Στο Σχ. 9α φαίνεται ο δυσανάλογα σημαντικός ρόλος της αντοχής της βραχομάζας στην σύγκλιση της σήραγγας: Κάπου μεταξύ των τιμών 0.05 και 0.10 του λόγου f_{cm}/p_o , διακρίνομε μια αποφασιστική μεταβολή στις τιμές της ανηγμένης σύγκλισης δ/d . Χοντρικά, μάλιστα, μπορεί να δεχθούμε ότι οι αντίστοιχες τιμές αυτής της σύγκλισης (γύρω στο 5%), υποδεικνύουν κάποιαν «κρισιμότητα». Έτσι, με εναν συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερον του 2, (προκειμένου να καλυφθούν οι μεγάλες αβεβαιότητες του όλου προσομοιώματος), μπορούμε να πούμε ότι η τιμή 2% των ανηγμένων συγκλίσεων πρέπει να θεωρείται κρίσιμη.

$$\left(\frac{\delta}{d}\right)\% \cong \left[10\left(\frac{f_{cm}}{p_0}\right)^2 + 15\left(\frac{f_{cm}}{p_0}\right)\left(\frac{f_{cm}}{p_0}\right)\right]^{-1}$$



Σχ. 96: Πόσο γρήγορα μειώνεται η σύγκλιση συναρτήσεως της αντοχής της υποστήριξης.



Σχ. 9α: Πόσο γρήγορα μειώνεται η σύγκλιση συναρτήσεως της αντοχής της βραχομάζας.

Στο ίδιο Σχ. 9α παρατηρούμε τον εξαιρετικά ευμενή ρόλο που παίζει η «αντοχή» της υποστήριξης: Εάν λ.χ. $f_{cm}/p_o = 0.08$, τότε μια υποστήριξη που αντιστοιχεί σε $p_s/p_o = 0.10$, μπορεί να υποδιπλασιάσει την τιμή της σύγκλισης μιας ανυποστήρικτης σήραγγας (βλ. Σχ. 9β).

γ) Η Εξ. 10 μπορεί, εξ άλλου, να μας προσφέρει και μια εκτίμηση της σημασίας την οποίαν υπο ορισμένες συνθήκες έχει μια *καθυστέρηση* εφαρμογής της μόνιμης στήριξης. Ας πάρουμε το Σχ. 9β, με στραμμένους τους άξονές-του ώστε να έχουμε τη συνήθη εποπτεία των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων (Σχ. 10).

Η καμπύλη A-A (για δεδομένον λόγο $f_{cm}/p_o = 0.08$), εκφράζει τη σύγκλιση της «ελεύθερης» σήραγγας, ανάλογα με την ελαστική αντοχή $p_{s,el}$ της μόνιμης υποστήριξης την οποία διαθέτομε.

Είναι δε φανερό πως όσο αφήνομε να εκδηλώνονται ελεύθερα οι συγκλίσεις, τόσο μειώνεται η απαιτούμενη ελαστική αντοχή της μόνιμης υποστήριξης που θα τοποθετήσομε με κάποιαν καθυστέρηση.

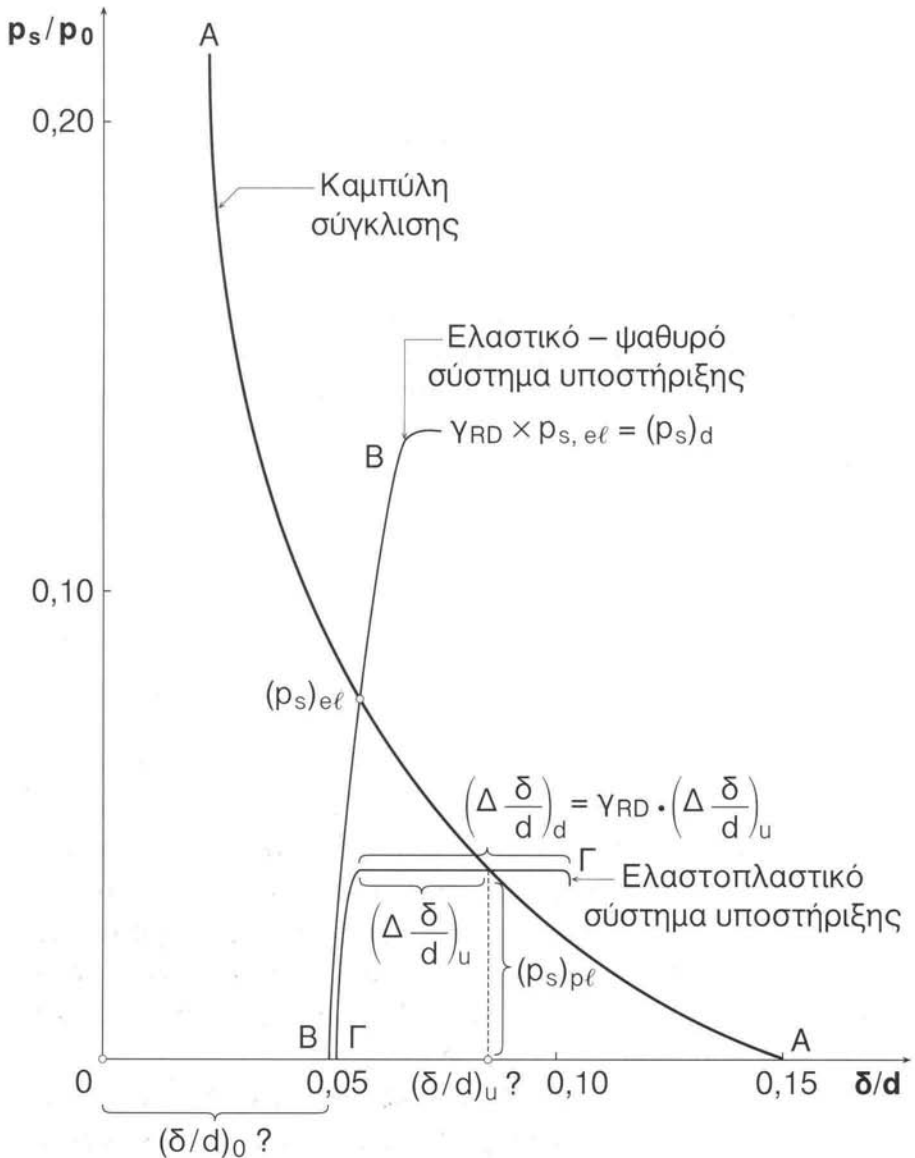
Αλλά τίθεται αμέσως το ερώτημα, πόση είναι η «ανεκτή» αρχική σύγκλιση $(\delta/d)_o$ ΠΡΙΝ να σφηνώσουμε την μόνιμη υποστήριξη;

Εάν λ.χ. υποθέσομε οτι μπορούμε να ανεχθούμε μια ανηγμένη σύγκλιση ίση με 5% (ήδη πολύ μεγάλη), θα μπορούσαμε να καθυστερήσομε την εφαρμογή της μόνιμης υποστήριξης μέχρι τη στιγμή εκείνη – οπότε η καμπύλη A-A στο Σχ. 10 θα μας υπαγορεύσει την τιμή $(p_s)_{el}$ ως απαιτούμενη ελαστική αντοχή της υποστήριξης. (Βλ. αλληλοτομία της καμπύλης A-A με την καμπύλη δυνάμεων/παραμορφώσεων B-B του φορέα της υποστήριξης).

Φυσικά, λόγω των ποικίλων αβεβαιοτήτων για τις οποίες έγινε λόγος προηγουμένως, απαιτείται καί εδώ η εφαρμογή ενός συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{Rd} = 2$, προκειμένου να εκτι-

μήσουμε την αναγκαία αντοχή σχεδιασμού p_{sd} της υποστήριξης

$$p_{sd} = \gamma_{Rd} \cdot p_{s,el} \quad (11)$$



Σχ. 10: Καμπύλη σύγκλισης για $f_{cm} : p_o = 0.08$ (απ' το Σχ. 9β).

δ) Υπάρχει όμως και μια άλλη, πολύ ενδιαφέρουσα, έστω και κάπως ακραία, δυνατότητα: Άν τυχόν μπορούσαμε να ανεχθούμε και μια περαιτέρω εξέλιξη των συγκλίσεων, θα μπορούσαμε να εγκαταστήσουμε μια υποστήριξη μικρότερης αντοχής, η οποία όμως να ενδίδει σταδιακά (καμπύλη συμπεριφοράς Γ-Γ στο Σχ.10), μέχρις ότου η διαθέσιμη αντοχή-της « $p_{s,el}$ » να σταθεροποιήσει τη σύγκλιση σε μια τιμή $(\delta/d)_u$, η οποία πάντως θα είχε κριθεί αρχικώς ως ανεκτή.

Μ' αυτόν τον τρόπο, θα κάναμε οικονομία στα μέσα υποστήριξης –θα έπρεπε όμως να μπορούμε να ανεχθούμε αυτήν την ακόμα μεγαλύτερη σύγκλιση (ενδεικτικά ίση με 0.08 στο Σχ. 10). Καί εδώ, αυτό το «ελαστοπλαστικό» σύστημα υποστήριξης θα έπρεπε να μελετηθεί για πλαστιμότητα επαρκώς μεγαλύτερη απο εκείνην που δείχνει η Εξ. 10 και το Σχ. 10. Έτσι η διαθέσιμη «ενδοτικότητα» του συστήματος θα έπρεπε να είναι

$$\left(\Delta \frac{\delta}{d}\right)_d = \gamma_{Rd} \cdot \left(\Delta \frac{\delta}{d}\right)_u \quad (12)$$

όπου $\gamma_{Rd} = 1.5 - 2.0$.

Η ενδοτικότητα αυτή, στην περίπτωση των σιδηρών πλαισίων αντιστήριξης, μπορεί να επιτευχθεί μέσω καταλλήλων *ολισθαινόντων* τμημάτων του πλαισίου στο εξωράχιο.

ε) Άς σημειωθεί, πάντως, ότι οι αριθμητικές τιμές του παραδείγματος που χρησιμοποιήθηκε στο Σχ. 10, είναι μόνον ενδεικτικές. Στην πραγματικότητα, η εμπειρία υποδεικνύει τους ακόλουθους κανόνες:

- Ασφαλείς τιμές σύγκλισης: $\delta/d < 1.5\%$
- Οριακές τιμές «αναμονής» προκειμένου να μειωθεί η απαιτούμενη αντοχή της υποστήριξης: $(\delta/d)_o < 4\%$ (υπο τον όρον, πάντως ότι η σύγκλιση αυτή είναι ανεκτή απ' το περιτύπωμα λειτουργίας της σήραγγας).

- Στην ακραία περίπτωση κατα την οποία θα χρησιμοποιηθεί ενδοτική μόνιμη υποστήριξη, η τελικώς ανεκτή τιμή $(\delta/d)_u$ οφείλει να εκτιμηθεί λαμβάνοντας συγχρόνως υπόψη και τους συντρέχοντες κινδύνους χαλάρωσης της βραχομάζας (δηλαδή της εντωμεταξύ μείωσης της ενεργού τιμής f_{cm} – οπότε θα άλλαζαν στο χειρότερο και τ' αποτελέσματα της Εξ. 10).

7. ΑΚΡΙΒΕΣΤΕΡΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Όπως αναφέραμε και στην §6α, η αριθμητική ακρίβεια της Εξ. 10 είναι μάλλον αμφίβολη – η δε ανάπτυξη που προηγήθηκε, είχε κύριο σκοπό την εποπτική κατανόηση της σημασίας των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πρόβλημα.

Απ' αυτή λοιπόν την άποψη, όταν εφαρμόζεται αυτή η λογική προσέγγισης του προβλήματος της ολικής αστοχίας, συνιστάται η απευθείας εφαρμογή της μεθοδολογίας Hoek, Brown.

a) Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B.: «Hoek - Brown failure criterion - 2002 Edition», Proceedings of NARMS - TAC 2002, Toronto.

b) Marinos P., Hoek E.: «GSI, a geologically friendly tool for rock mass strength estimation», Int. Conf. on Geotech. and Geol. Engng., Technomic Inc., Melbourne, Australia, 2000.