ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΟΛΗ: Πολιτικων

ΤΜΗΜΑ: Έργων Υποδομής

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Μαντάς Παναγιώτης

ΘΕΜΑ: «Υπολογισμός τών τάσεων που εμφανίζονται στη διατομή μιας σήραγγας, με χρήση της θεωρίας της ελαστικότητας».

Ο σπουδαστής
Τριχάς Εμμανουήλ

ΠΑΤΡΑ 1994

Η διπλωματικη αυτή εργασία, πραγματοποιήθηκε το ακαδημαικο ετος 1993 - 1994 κάτω από την επίβλεψη του καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Εργων Υποδομής, κυρίου Π.Ι.Μάντά, τον οποίο πρέπει να ευχαριστήσω για τη δυνατοτητα που μου έδωσε να αναλάβω την πολύ ενδιαφέρουσα αυτη διπλωματική εργασία καθώς και για την συνεργασία και βοήθειά του κατά την εκπόνηση της.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Ε Ι Σ Α Γ Ω Γ Η

Απο τα σημαντικώτερα υπόγεια τεχνικα έργα αρμοδιοτητας του πολιτικού μηχανικού, ειναι και οι σήραγγες.

Οι σήραγγες ορίζονται ως ανοίγματα υπόγεια, μεγαλου μηκους σε σχεση με τις διαστασεις της διατομης τους και με χαραξη σε (συνήθως) ευθύγραμμο οριζόντιο ή υπο μικρη κλίση, ως προς την οριζόντιο, αξονα.

Σήραγγες κατασκευάστηκαν και κατά την αρχαιοτητα ακομη, αλλα οι μεγαλύτερες και σημαντικωτερες στον κοσμο, ειναι έργα που εχουν πραγματοποιηθεί κατά τον 19ο και τον 20ο αιώνα.

Διανοίξεις σηραγγων πραγματοποιήθηκαν και πραγματοποιούνται, σαν κύρια η βοηθητικα τεχνικα εργα, για διαφορους σκοπους, οπως: συγκοινωνιακούς (οδικές ταχείας η μη κυκλοφοριας, σιδηροδρομικού δικτυου, METRO, υπογείων διαβασεων πεζών), σε υδροηλεκτρικα έργα, σε εργα ύδρευσης, σε ορυχεια, κ.λ.π. Ποικιλια συνανταμε επισης και στα ειδη των διατομων που χρησιμοποιούνται. Σε γενικές γραμμές ξεχωρίζουμε διατομές σηραγγων με ευθύγραμμες πλευρές, διατομες με τοξα κυκλου και διατομες με τοξα ελλείψεως (βλ.σχ. 1α.β.γ).

Η ανάγκη κατασκευης σηραγγων μεγαλου μήκους και σημαντικών διαστασεων διατομης, σε δυσμενεις συνθήκες μηχανικής συμπεριφοράς του μεσου (έδαφος) οπου διανοιγονται, οδήγησε τους ερευνητές, σε ορθολογικοτερη σχεδίαση και στη χρήση πιο εκλεπτυσμένων μεθόδων υπολογισμού, σε συνάρτηση με εκτεταμενη γεωλογική έρευνα.

Η ορθολογική σχεδίαση μιας σήραγγας εχει ιδιαίτερη σημασία, λόγω του μεγάλου όγκου και του μεγάλου κόστους ανά μονάδα μήκους του εργου. Η σχεδίαση επηρεάζεται επισης, από διάφορους γεωλογικούς παραγοντες (ασυνέχειες του εδάφους, υπογεια υδατα, κ.α.) και προυποθέτει χρήση γνώσεων από τη βραχομηχανική.

ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΜΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ – – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ.

Η διαταραχή του αρχικού πεδίου των τάσεων στο εσωτερικό του μέσου όπου διανοίγεται η σήραγγα, εξετάζεται με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας, θέτοντας τις ανάλογες, βέβαια παραδοχές για την συμπεριφορά του μέσου.

Η περίπτωση οπου, θα έχουμε υπέρβαση στην αντοχή του μεσου, στο οποίο έχει διανοιχθεί η σήραγγα, λόγω της συγκεντρώσεως των τάσεων – που έχει σαν συνέπεια την ανακατανομή των τάσεων – εξετάζεται με βάση τη θεωρία της πλαστικότητας.

Παρ'όλα αυτα, οι απλουστεύσεις και οι παραδοχές που συνοδεύουν τις διάφορες θεωρίες, συχνά απέχουν πολύ από τις επί τόπου συνθήκες και τότε οδηγούμαστε σε χρήση μεθόδων της μηχανικής των συνεχών μέσων,σε συνδυασμό με τα στοιχεία της γεωλογικής έρευνας και μετρήσεις της αντοχής των δειγμάτων του επί τόπου εδάφους.

Το πρόβλημα του υπολογισμού των τάσεων γύρω από μια σήραγγα,αντιμετωπίστηκε απο την έρευνα, με δύο κυρίως κατευθύνσεις – σε σχέση με τη συμπεριφορά του μέσου όπου διανοίγεται:

(Α) Με την παραδοχή του απολύτως ελαστικού και ισότροπου βράχου, όπου έχουμε απεριόριστη ισχύ του νόμου του HOOKE, και

(Β) Με συνεκτίμηση των πλαστικών καταστάσεων που δημιουργούνται όταν γίνει υπέρβαση της αντοχής του μέσου όπου διανοίγεται η σήραγγα, και που έχουν σαν αποτέλεσμα την ανακατανομή των τάσεων μέχρις οτου δημιουργηθεί μια νέα κατάσταση ισορροπίας.

Στην περίπτωση, ακόμη που τα μηχανικά χαρακτηριστικά του μεσου όπου γίνεται η διάνοιξη, είναι ανεπαρκή και έχουμε υπέρβαση της αντοχής του βράχου, η αστοχία εκδηλώνεται συνήθως με:

(Α) Απότομη απόσπαση τεμαχίων με τη μορφή ελασμάτων από τα τοιχώματα της διατομής, στην περίπτωση που έχουμε να αντιμετωπίσουμε άνεπαφο και ισότροπο βράχο.

(Β) απόσπαση τεμαχίων κατά μήκος των αρμών, όταν έχουμε να αντιμετωπίσουμε ρηγματωμένο βράχο.

Και στις δύο περιπτώσεις, η εκδήλωση της αστοχίας σταματά, όταν η διαμόρφωση της διατομής, με την απόσπαση των τεμαχίων, γίνει τέτοια,ώστε η σχέση των διαστάσεων της διατομής, δώσει νέα εντατική κατάσταση, συμβιβαστή προς την αντοχή του βράχου.

Η αλλαγη της εντατικης κατάστασης, κατά την εκσκαφή μιας σηραγγας, περιγραφεται από το συντελεστή συγκεντρώσεως των τάσεων σε καθε σημειο. Ο συντελεστής αυτος, ισούται με το λόγο της νέας πίεσης προς την αρχική – στο αντιστοιχο σημειο – και εξαρτάται από τους πιο κάτω παραγοντες:

(Α) Τη μορφή της διατομης
(Β) Τη σχέση των διαστάσεων της
(Γ) Την αρχική εντατική κατάσταση
(Δ) Γεωλογικούς παράγοντες, όπως: οι ασυνέχειες, οι ρηγματώσεις, η στρωσιγενεια κ.λ.π.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΠΟΥ ΑΣΚΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.

Οι μέθοδοι υπολογισμού των πιέσεων που ασκούνται στο περίβλημα των σηράγγων μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

α) σε μία κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι που βασίζονται στην υπόθεση κατά την οποία οι πιέσεις που ασκούνται στο περίβλημα εξαρτώνται από το βάθος της σήραγγας.

β) σε άλλη κατηγορία ανήκουν εκείνοι που οι μέθοδοι υπολογισμού των πιέσεων δεν λαμβάνουν υπόψη τον επηρεασμό του βάθους της σήραγγας αλλά υποθέτουν πως οι πιέσεις που ασκούνται στο περίβλημα αυτής εξαρτώνται κατά μεγάλο μέρος στο αποτέλεσμα του "Loosening".

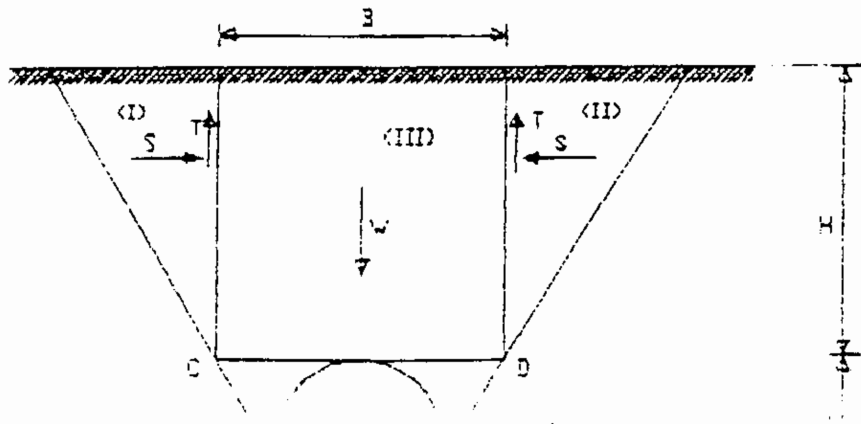
Έτσι αναπτύχθηκαν δύο ομάδες ομάδες θεωριών οι οποίες χαρακτηρίζονται από την λήψη ή όχι του παράγωντα βάθους της σήραγγας.

Μεταξύ των μεθόδων της πρώτης ομάδας των θεωριών που βασίζονται στο βάθος της σήραγγας για τον υπολογισμό των πιέσεων στο περίβλημα αυτής διακρίνονται των Bierbaumer, Terzaghi, Bella, Suquet.

Μέθοδος του Bierbaumer

Σύμφωνα με τη θεωρία του Bierbaumer το περίβλημα της σήραγγας υπόκειται σε ένα φορτίο που οφείλεται σε μάζα πετρώματος που ορίζεται από παραβολή ύψους H'=αH (δχ.) όπου α συντελεστής υπολογιζόμενος με δύο κύριες μεθόδους οι οποίες δίνουν τα ίδια σχεδόν αποτελέσματα.

Η θεωρία του Bierbaumer εφαρμόζεται θεωρώντας τη σήραγγα μέσα σε ένα σύστημα προστριβών. Υποθέτονται γι'αυτό δύο επίπεδα θραύσης κλίσης 45°+φ/2 με το οριζόντιο επίπεδο, που δημιουργούνται αρχίζοντας από την βάση της σήραγγας.



Στο πρίσμα του πετρώματος σχήματος σφήνας που δημιουργείται από τα δύο κεκλιμένα επίπεδα θραύσης και την εξωτερική επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζονται άλλα δύο επίπεδα κατακόρυφα θραύσης CF και DE. Επομέωνς το πρίσμα σχήματος σφήνας και αυτό που σχηματίζεται πάνω από την σήραγγα χωρίζεται σε τρία τμήματα (I), (II), (III). Το III τμήμα τείνει να ολισθήσει προς τα κάτω φορτίζοντας το περίβλημα (τοιχώματα) της σήραγγας μα αυτή η κίνηση εμποδίζεται από τις δυνάμεις τριβής T που αναπτύσσονται κατά μήκος των επιπέδων ολίσθησης DE και CF.
Βάση της θεωρίας του Rankine η οριζόντια S ενεργός ώθηση πάνω στα επίπεδα ολίσθησης είναι:

$$S=\frac{1}{2}\gamma H^2 tg^2(45°-\frac{\phi}{2})=\frac{1}{2}\gamma H^2\frac{1}{N_\phi}$$

όπου $N_\phi=tg^2(45°+\phi/2)$
Επομένως η δύναμη T είναι:

$$T=S\cdot tg\phi=\frac{1}{2}\gamma H^2 tg\phi\cdot tg^2(45°-\frac{\phi}{2})$$

γ = το ειδικό βάρος του πετρώματος
Υποθέτοντας ότι W είναι το βάρος του πετρώματος του τμήματος (III). Το φορτίο το κατακόρυφο Q στο επίπεδο CD

είναι: $Q=W-2T=\gamma\cdot HB-2T$

επειδή $B=b+2h\cdot tg(45°-\phi/2)$

είναι: $Q=\gamma H[b+2htg(45°-\phi/2)]-\gamma H^2 tg\phi\cdot tg^2(45°-\phi/2)$

και το φορτίο q ανά μονάδα επιφάνειας είναι:

$$q=\frac{Q}{B}=\gamma H-\frac{\gamma H^2 tg\phi\, tg^2(45°-\frac{\phi}{2})}{b+2htg(45°-\frac{\phi}{2})}$$

Το φορτίο p ανά μονάδα επιφανείας στο επίπεδο CD που προέρχεται από το συνολικό βάρος του πετρώματος άνωθεν του επιπέδου δίδεται από: $p=\gamma H$
Επομένως το φορτίο q εκφράζει ένα μέρος του φορτίου p

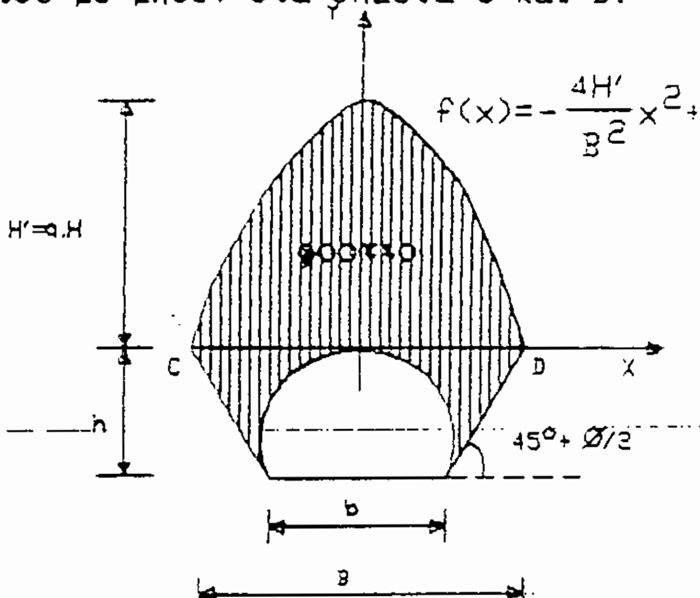
γι'αυτό είναι: $$q=p\cdot\alpha=\gamma H\alpha=\gamma H\left(1-\frac{Htg\phi\cdot tg^2(45°-\frac{\phi}{2})}{b+2htg(45°-\frac{\phi}{2})}\right)$$

όπου α :
$$\alpha=1-\frac{H tg\phi \cdot tg^{2}(45^{\circ}-\frac{\phi}{2})}{b+2h\,tg(45^{\circ}-\frac{\phi}{2})}$$

Επομένως το φορτίο στο επίπεδο CD είναι ίσο με το φορτίο που προέρχεται από το βάρος του πετρώματος μέχρι την εξωτερική επιφάνειά του πολλαπλασιασμένο με ένα συντελεστή μειωτικό που είναι ο α.

Για τον υπολογισμό του φορτίου που κατανέμεται στο επίπεδο CD αναλογικά ο Bierbaumer θεώρησε ότι η σήραγγα υπόκειται σε φορτίο που οφείλεται σε μάζα πετρώματος που ορίζεται από την παραβολή ύψους $H'=\alpha\cdot H$, επειδή παραλήφθηκε το αποτέλεσμα τύπου "τόξου" που αναπτύσσεται στο πέτρωμα πάνω από την σήραγγα. Γι'αυτό το φορτίο πάνω στο επίπεδο CD ασκείται κατά τρόπο παραβολικό με μέγιστο της τιμής q και ελάχιστο ίσο με μηδέν στα σημεία C και D.

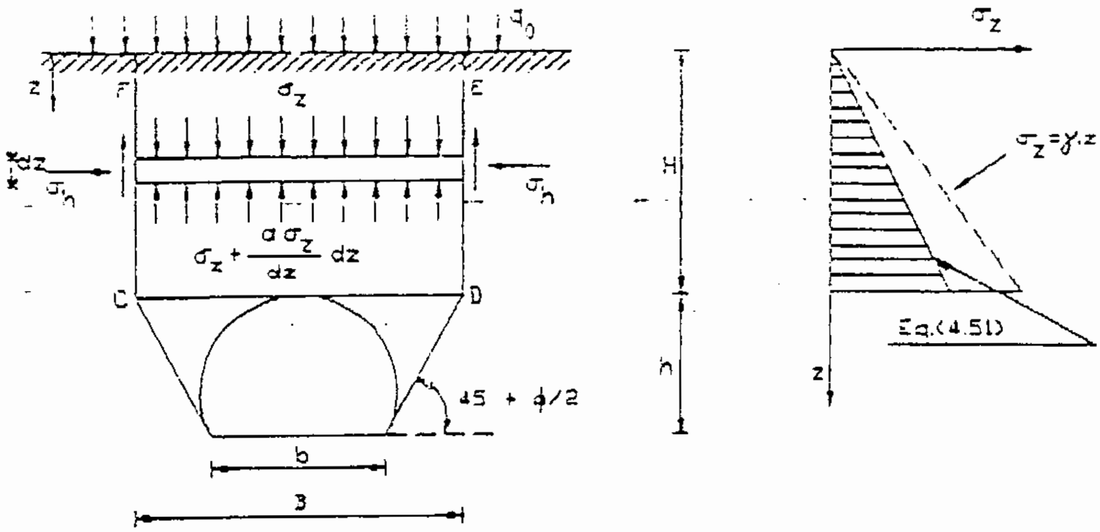
Επομένως τα τοιχώματα της σήραγγας πρέπει να φέρουν το φορτίο κατανεμημένο όπως στο σχήμα. Ο μειωτικός συντελεστής α έχει δύο οριακές τιμές. Για σήραγγες όχι σε μεγάλο βάθος (επιφανείας) η τιμή του α δεν μπορεί να είναι μικροτέρα του 1, ενώ για σήραγγες σε μεγάλο βάθος δηλαδή όταν H>5B, η τιμή του α προκύπτει από την $\alpha=tg^{4}(45^{\circ}-\varphi/2)$.



Η εφαρμογή της μεθόδου Bierbaumer δίνει τα καλύετρα αποτελέσματα στις περιπτώσεις που η σήραγγα είναι σε μεγάλο βάθος.

<u>Μέθοδος του Terzaghi</u>

Αυτή η μέθοδος βασίζεται κατά πολύ στη μέθοδο του Bierbaumer για τον υπολογισμό των τάσεων-πιέσεων στο περίβλημα της σήραγγας. Η διαφορά προκύπτει από τον διαφορετικό τρόπο καθορισμού των τιμών της διατμητικής δύναμης που ασκείται στα επίπεδα CF και DE.



Θεωρείται ότι η οριζόντια τάση σ_h συνδέεται με την κατακόρυφο τάση σ_z με ένα συντελεστή εμπειρικό k,

$$\sigma h=\sigma z\cdot k$$

και η διατμητική δύναμη στα επίπεδα CF και DE είναι:

$$\tau=c+\sigma_h tg\phi \quad (2)$$

Γιά την κατακόρυφη ισορροπία ενός στοιχείου dz του τμήματος πετρώματος ισχύει:

$$\sigma_z B+\gamma B\cdot dz-(\sigma_z+\frac{d\sigma_z}{d_z})B-2\tau\cdot dz=0 \quad (3)$$

αντικαθιστώντας την (1) και (2) στην (3) και απλοποιώντας αυτήν: $\frac{d\sigma_z}{dz}=\gamma-\frac{2c}{B}-\sigma_z\frac{2K}{B}tg\phi$ (4)

κάνοντας το ολοκλήρωμα της προηγούμενης εξίσωσης λαμβάνοντας $\sigma_z=q_0$ για z=0, έχουμε:

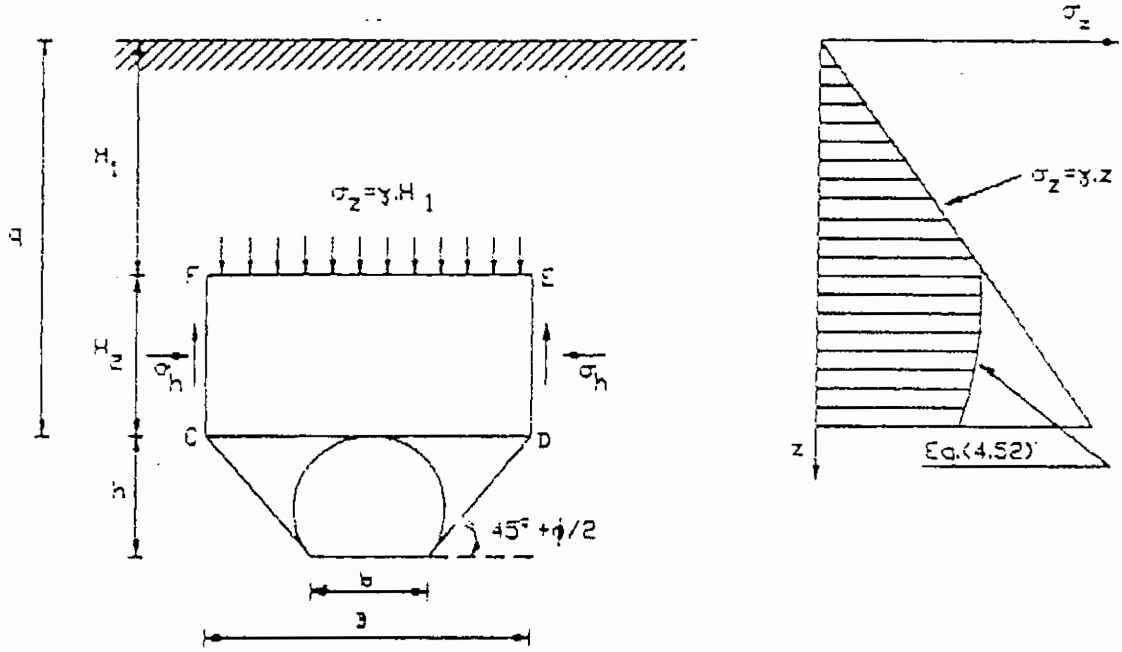
$$\sigma_z=\frac{B\gamma-2c}{2Ktg\phi}(1-e^{s})+q_0e^{s}$$

όπου: $s=-\frac{2Kz}{B}tg\phi$ $\quad B=b+2h\cdot tg(45^\circ-\frac{\phi}{2})$

στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει εξωτερικό φορτίο (q_0=0) η κατακόρυφος πίεση σ_z κάνοντας το ολοκλήρωμα της (4) η μεταβολή της πίεσης σ_z με το βάθος εξαρτάται από την παρακάτω εξίσωση: $\sigma_z=\frac{B\gamma}{2Ktg\phi}(1-e^{-\frac{2Kz}{B}tg\phi})$ (5)

στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο σχηματισμός των κατακορύφων τάσεων με εκείνο του γαιοστατικού.

Για σήραγγες μεγάλου βάθους θεωρόντας H_2 το ύψος του τμήματος του πετρώματος υπεράνω των τοιχωμάτων από όπου υπάρχει κίνηση φορτίων προς τα κάτω και H_1 το υπόλοιπο της μάζας του πετρώματος που ασκεί πίεση στα τοιχώματα της σήραγγας, η σχέση (4) γίνεται κάνοντας το ολοκλήρωμα αυτής και θεωρώντας $\sigma_z=\gamma H_1$ στο βάθος $z=H_1$



$$\sigma_z=\frac{\gamma B}{2Ktg\phi}(1-e^{\alpha})+\gamma H_1 e^{\alpha} \qquad (6)$$

όπου: $\alpha=-\frac{2K(z-H_1)}{B}tg\phi \qquad z>H_1$

αντικαθιστώντας το βάθος z με z=H από τις σχέσεις (5) και (6) υπολογίζεται η συνολική πίεση q που ασκείται στη στέψη της σήραγγας. Αυτή η πίεση q μπορεί να θεωρηθεί ότι κατανέμεται σε σχηματισμό παραβολικό ή ομοιόμορφο στη στέψη της σήραγγας.

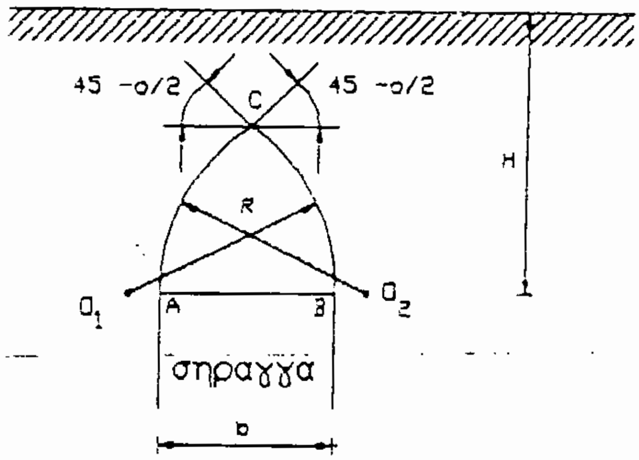
Στη περίπτωση που η σήραγγα είναι σε μέγαλο βάθος ούτως ώστε Η είναι τουλάχιστον ίσο με το 1/5 Η, ο δεύτερος όρος της θεωρείται αμελητέος, ενώ ο πρώτος όρος εντός παρενθέσεως είναι σχεδόν ίσος με 1. Η σχέση γιαυτό (6) στην απλουστευμένη μορφή της είναι: $q=\frac{\gamma B}{2Ktg\phi}$

αποδείχθει πως η μέθοδος Terzaghi παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για σήραγγες όπου H<3B δηλ. σχεδόν επιφανείας.

Μέθοδος του Balla

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση όπου στη μάζα του πετρώματος υπεράνω της στέψης της σήραγγας διαμορφώνεται μια ζώνη θραύσης ίδια με αυτήν που διαμορφώνεται κάτω από τις θεμελιώσεις επιφανείας.

Θεωρόντας την σήραγγα ορθογωνικής διατομής και υποθέτοντας πως οι επιφάνειες θραύσης είναι κυκλικής διατομής και περνούν από τις γωνίες της σήραγγας όπως στο παρακάτω σχήμα, η ακτίνα των κυκλικών διατομών είναι τέτοια ούτως ώστε η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των εφαπτομένων των κυκλικών διατομών με την οριζόντια στο σημείο όπου οι δύο κύκλοι τέμνονται είναι της τάξεως 45°-φ/2 (περίπτωση παθητικής ώθησης).



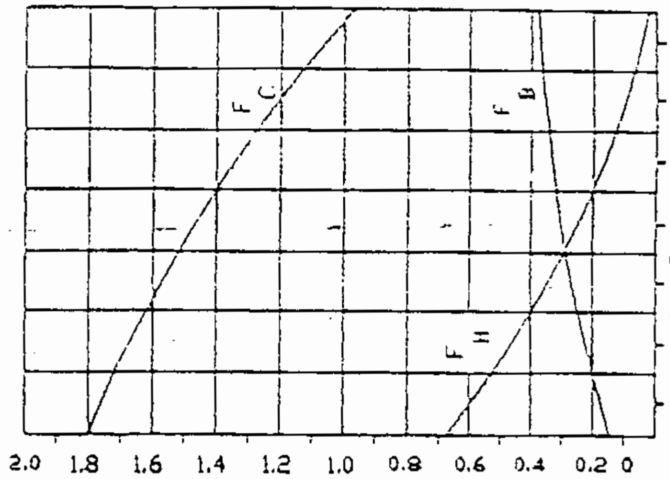
Το κέντρο των κύκλων βρίσκεται στο ύψος της στέψης ρης σήραγγας. Για τον υπολογισμό της πίεσης (του φορτίου) q που δέχεται η στέψη αυτής της σήραγγας λαμβάνεται υπόψη η σχέση ισορροπίας σε κατακόρυφο διεύθυνση της πρισματικής σφήνας ABC που υπόκειται στο ίδιο του το βάρος, του φορτίου που δέχεται η πλευρά AB και της συνισταμένης των δυνάμεων που ασκούνται στα τόξα των κύκλων AC και BC.

Το φορτίο q ομοιόμορφα κατανεμημένο στο τμήμα AB της σήραγγας δίδεται από την εμπειρική σχέση:

$$q=H\cdot\gamma F_H+b\gamma\cdot F_B-cF_c$$

όπου F_H, F_B και F_c συντελεστές αδιάστατοι υπολογισμένοι εμπειρικοί και εξαρτώνται από την γωνία εσωτερικής τριβής όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συντελεστών.

Για τον υπολογισμό του q με τον συντελεστή F_H λαμβάνεται υπόψη και το βάθος της σήραγγας, με τον συντελεστή F_B λαμβάνεται υπόψη το πλάτος της σήραγγας και με τον F_c η συνοχή του πετρώματος κατά μήκος των κύκλων θραύσης AC και BC.



Η μέθοδος του Balla όπως καθορίστηκε προηγουμένως δίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα προπάντως για τις πρακτικές εφαρμογές της έτσι ο υπολογισμός των φορτίων είναι πάντα υπεράνω της πραγματικότητας και αυτό χάριν της ασφάλειας των έργων.

Άλλη μέθοδος σ'αυτήν την περίπτωση για τον υπολογισμό του φορτίου q είναι αυτή του Suquet που η μελέτη αυτής προέκυψε από τις εμπειρικές παρατηρήσεις που έγιναν κατά την διάρκεια της κατασκευής της υπόγειας σήραγγας του μετρό στο Παρίσι.

Από τις μεθόδους που δεν λαμβάνουν υπόψη το αποτέλεσμα που μπορεί να προκύψει από το βάθος της σήραγγας και επομένως θεωρούν πως οι πιέσεις (φορτία) προέρχονται μόνο εξ'αιτίας της επίδρασης τύπου "loosening" διακρίνεται αυτή του Kommerell και αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των σηράγγων όταν τα πετρώματα είναι ασυνεχή και στις ασυνέχειες παρεμβάλλονται στρώσεις τσιμεντοποιημένες.

<u>Μέθοδος του Kommerell</u>

Αυτή η μέθοδος για τον υπολογισμό των φορτίων που ασκούνται στη στέψη της σήραγγας είναι από τις παλιές θεωρείες η πιό γνωστή.

Με την μέθοδο αυτή υποτίθεται ότι η πίεση που ασκείται στα τοιχώματα της σήραγγας είναι τόση όση δημιουργείται από την αποχώρηση μάζας εδάφους ή πετρώματος που προέκυψε από την ταυτόχρονη ακτινική υποχώρηση των τοιχωμάτων της σήραγγας αυτής.

Πράγματι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η μετακίνηση (υποχώρηση) τόσο μεγαλύτερη είναι η έκταση του πετρώματος που έχει ενοχληθεί από την κεφαλή και επομένως το φορτίο στα τοιχώματα της σήραγγας που προκύπτει από την επίδραση τύπου "loosening" είανι αυτό ης μεθόδου Kommerell.

Θεωρείται ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ του μεγέθους της ακτινικής μετακίνησης e και του ύψους $H'=\alpha H$ του πετρώματος ή του εδάφους που ασκεί πίεση στα τοιχώματα της σήραγγας.

$$H'=e/\delta$$

η τιμή του συντελεστή δ που ονομάζεται και συντελεστής "loosening" εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους ή του πετρώματος όπου η σήραγγα κατασκευάζεται.

<u>Τιμές του συντελεστή d, "loosening" δ συναρτήσει του τύπου του εδάφους ή πετρώματος.</u>

Τύπος εδάφους ή πετρώματος	δ
Αργιλοαμμώδες έδαφος	0.01+0.03
Συνεκτικό (ολίγον) έδαφος	0.03+0.05
Συνεκτικό (πολύ) έδαφος	0.05+0.08
Πετρώματα ισχνά	0.08+0.12
Πετρώματα σκληρά	0.12+0.15

Το σχήμα του τμήματος του πετρώματος που ασκεί πίεση στα τοιχώματα της σήραγγας είναι της μεθόδου Bierbaumer.

Ε Φ Α Ρ Μ Ο Γ Η

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ, ΣΕ ΜΕΓΑΛΟ ΒΑΘΟΣ, ΕΝΤΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΙΣΟΤΡΟΠΟΥ ΒΡΑΧΟΥ.

(Η σήραγγα προβλέπεται ανεπένδυτη).

1. Π α ρ α δ ο χ έ ς

— Γίνεται η παραδοχή ύπαρξης ελαστικού και ισότροπου βράχου. Έχουμε απεριόριστο ισχύ του νόμου του HOOKE .

— Οι θλιπτικές, εφελκυστικές και διατμητικές δυνάμεις, θεωρείται ότι μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε υψηλή τιμή, χωρίς να έχουμε διαρροή στο μέσο και υπέρβαση της αντοχής του βράχου.

— Δεχόμαστε επίσης ότι οι παραμορφώσεις γίνονται άμεσα, από τη στιγμή που θα έχουμε αλλαγή της εντατικής κατάστασης.

— Τέλος, κάνουμε την παραδοχή ότι οι αρχικές τάσεις, σVo = γ.h (κατακόρυφες, h:το βάθος του κέντρου της διατομής, από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους) και σho = K.σVo (οριζόντιες, K:συντελεστής ωθήσεως εν ηρεμία) , είναι ανεξάρτητες της διαφοράς του βάθους, που έχουμε από την οροφή έως το δάπεδο της σήραγγας, λόγω της μικρής διατομής της σήραγγας σε σχέση με το μεγάλο βάθος της εκσκαφής, στην παρούσα εφαρμογή. (Η παραδοχή αυτή είναι κοντά στην πραγματικότητα τις περισσότερες φορές, όπου το βάθος εκσκαφής h της σήραγγας είναι πολύ μεγάλο).

2. Ε π ί λ υ σ η κ υ κ λ ι κ ή ς σ ή ρ α γ γ α ς (KIRSH).

Στην περίπτωση της σήραγγας κυκλικής διατομής, θεωρήσαμε ότι διανοίγεται σε μεγάλο βάθος, ώστε η απόσταση του κέντρου της από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους να είναι αντιπροσωπευτική όλης της σήραγγας (βλ.σχ.3). Για οποιαδήποτε τιμή του συντελεστή ωθήσεως K,επιλύεται το πρόβλημα, με επαλληλία των εντατικών καταστάσεων που προκύπτουν, αφ'ενός λόγω της φόρτισης κατά τον κατακόρυφο άξονα, και κατά τον οριζόντιο αφ'ετέρου.

Η βασική επίλυση κυκλικής σήραγγας σε μεγάλο βάθος, φορτιζόμενης κατά ένα άξονα (π.χ. τον κατακόρυφο z) , δίνεται σε πολικές συντεταγμένες, κατά τον Kirsh, με τις παρακάτω σχέσεις (βλ.σχ.4) :

Α κ τ ι ν ι κ έ ς   τ ά σ ε ι ς

$$\sigma R = (\sigma z/2).\left[1 - \alpha^2/r^2\right] + (\sigma z/2).\left[1 + 3\alpha^4/r^4 - 4\alpha^2/r^2\right].\sigma\upsilon\nu(2\theta) \qquad (1)$$

Ε φ α π τ ο μ ε ν ι κ έ ς   τ ά σ ε ι ς

$$\sigma\theta = (\sigma z/2).\left[1 + \alpha^2/r^2\right] - (\sigma z/2).\left[1 + 3\alpha^4/r^4\right].\sigma\upsilon\nu(2\theta) \qquad (2)$$

Δ ι α τ μ η τ ι κ έ ς   τ ά σ ε ι ς

$$Tr.\theta = (\sigma z/2).\left[1 - 3\alpha^4/r^4 + 2\alpha^2/r^2\right].\eta\mu(2\theta) \qquad (3)$$

Όπου είναι:
- α : η ακτίνα της κυκλικής διατομής.
- r : η απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από το κέντρο O της διατομής.
- θ : η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα φορτίσης και της επιβατικής ακτίνας r. που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο σημείο.
- σz : η ομοιόμορφη πίεση κατά τον άξονα φορτίσεως Z (η σx = K.σz , για φόρτιση κατά τον άξονα X , αντίστοιχα).
- σr : η ακτινική τάση.
- $\sigma\theta$: η εφαπτομενική τάση.
- $Tr.\theta$: η διατμητική τάση στο επίπεδο (r,θ).

Στις παραπάνω σχέσεις, $\sigma z = \gamma.h$ γιατί το βάθος h είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τη διάμετρο 2α της διατομής, και επομένως μπορούμε να αναφερόμαστε, για το βάθος στο κέντρο της κυκλικής σήραγγας.

3. Κατανομή των εφαπτομενικών τάσεων σθ κατά μήκος των αξόνων Z και X, συναρτήσει του συντελεστή ουδετέρας ωθήσεως K.

(i) Κατανομή των εφαπτομενικών τάσεων σθ κατά τον αξονα X.

Για τις κατακορυφες πιεσεις σz, κατα την εξίσωση (2) και για θ = π/2 , προκύπτει:

$$σθ_z = (σz/2).\left[1 + α^2/r^2\right] + (σz/2).\left[1 + 3α^4/r^4\right] \quad (4)$$

Για τις οριζόντιες πιέσεις σχ, κατα την εξίσωση (2), για γωνία θχ = π/2 − θ , οπου για θ = π/2 έχουμε θχ = 0 και συν2θχ = 1 , προκύπτει:

$$σθ_x = (σχ/2).\left[1 + α^2/r^2\right] - (σχ/2).\left[1 + 3α^4/r^4\right]$$

και επειδη σχ = K.σz , είναι:

$$σθ_x = (K.σz/2).\left[1 + α^2/r^2\right] - (K.σz/2).\left[1 + 3α^4/r^4\right] \quad (5)$$

Ο συνδυασμός των δύο εντατικών καταστάσεων που περιγράφονται από τις εξισώσεις (4) και (5) , δίνει:

$$σθ = (σz/2).\left[(1 + α^2/r^2).(1+K) + (1 + 3α^4/r^4).(1-K)\right]$$

και επειδή σz = γ.h , είναι:

$$\sigma\theta = (\gamma.h/2).\left[(1+\alpha^2/r^2).(1+K) + (1+3\alpha^4/r^4).(1-K)\right] \quad (6)$$

(ii) Κατανομή των εφαπτομενικών τάσεων σθ κατά τον άξονα Z.

Ομοια, κατα την εξίσωση (2) , εξ'αιτίας των κατακορύφων πιε_σεων σz και για θ = 0 , έχουμε:

$$\sigma\theta_z = (\sigma z/2)\left[1+\alpha^2/r^2\right] - (\sigma z/2).\left[1+3\alpha^4/r^4\right] \quad (7)$$

και λόγω των οριζοντίων πιέσεων σχ , για γωνία θχ = π/2 − θ όπου για θ = 0 είναι θχ = π/2 , έχουμε:

$$\sigma\theta_x = (\sigma\chi/2).\left[1+\alpha^2/r^2\right] + (\sigma\chi/2).\left[1+3\alpha^4/r^4\right]$$

και επειδή σχ = K.σz , έχουμε:

$$\sigma\theta_x = (K.\sigma z)/2 \,.\left[1+\alpha^2/r^2\right] + (K.\sigma z)/2 \,.\left[1+3\alpha^4/r^4\right] \quad (8)$$

Με τον συνδυασμό των δύο εντατικών καταστάσεων που περιγράφονται α_πό τις εξισώσεις (7) και (8), έχουμε:

$$\sigma\theta = (\sigma z/2) \,.\left[(1+\alpha^2/r^2).(1+K) - (1+3\alpha^4/r^4).(1-K)\right]$$

και για $\sigma z = \gamma.h$, γίνεται:

$$\sigma\theta = (\gamma.h/2)\,.\left[(1 + \alpha^2/r^2).(1+K) - (1 + 3\alpha^4/r^4).(1-K)\right] \qquad (9)$$

Οι εξισώσεις (6) και (9) δίνουν την κατανομή των εφαπτομενικών τασεων κατα τους δύο άξονες X και Z αντοίστοιχα , συναρτησει του λόγου α/r και του συντελεστή ουδετέρας ωθήσεως K.

Οι τιμές της εφαπτομενικής τασης $\sigma\theta$ συναρτησει του K στα σημεία A και C επί της άντυγος της σηραγγας (βλ.σχ.3) , δίνονται από τις εξισωσεις (6) και (9) αντοιστοιχα , για $r = \alpha$.

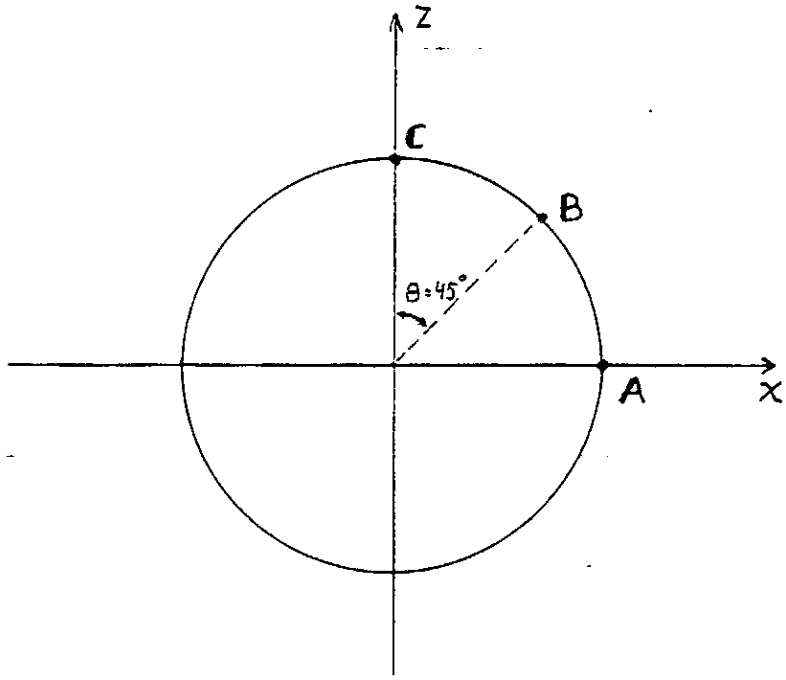
Για το σημείο A είναι:

$$\sigma\theta = (\gamma.h/2).\left[\,2(1+K) + 4(1-K)\,\right] \qquad \text{ή} \qquad \sigma\theta = \gamma.h.(3-K) \qquad (10)$$

Για το σημείο C είναι:

$$\sigma\theta = (\gamma.h/2).\left[\,2(1+K) - 4(1-K)\,\right] \qquad \text{ή} \qquad \sigma\theta = \gamma.h.(3K-1) \qquad (11)$$

Στο σχ.5 , δίδεται η γραφική παράσταση των εξισώσεων (10) και (11) για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδετέρας ωθήσεως K (επίλυση κατά Terzaghi και Richart ,1952).



Για τη θέση B $(a=r)$ έχουμε:

Για τις κατακόρυφες πιέσεις σ_z, κατά την εξίσωση (1) και γωνία $\theta = 45° = \pi/4$ και $συν(2\theta) = συν(\pi/2) = 0$, έχουμε:

$$\sigma_{\theta_z} = \sigma_z$$

Για τις οριζόντιες πιέσεις $\sigma_x = K.\sigma_z$ και γωνία $\theta_x = \pi/2 - \pi/4 = \pi/4$ και $συν(2\theta_x) = συν(\pi/2) = 0$ είναι:

$$\sigma_{\theta_x} = k \cdot \sigma_z$$

Ο συνδυασμός των δύο εντατικών καταστάσεων μας δίνει για την θέση B:

$$\sigma_\theta = \sigma_z + K \cdot \sigma_z \qquad \text{ή}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_z (K+1) \qquad (12)$$

Υπολογίζουμε την τάση σ_θ για τις θέσεις A, B και C $(a=r)$ για πέτρωμα με $\gamma = 2.5\ tn/m^3$ και για αργιλικό έδαφος με $\gamma = 1.8\ tn/m^3$ σε βάθος $h = 60m$ και για τιμές του **K**: 1, 2/3, 1/3 και 1/4. Για τις θέσεις A B και C εφαρμόζουμε τις εξισώσεις (10) (12) και (11) αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα $(\sigma_z = \gamma \cdot h)$:

	K	σ_θ (t_n/m^2)		
		A	B	C
Πέτρωμα $\gamma = 2.5\ t_n/m^3$	1	300,0	300,0	300,0
	2/3	350,0	250,0	150,0
	1/3	400,0	200,0	0,0
	1/4	412,5	187,5	−37,5
Αργιλλικό έδαφος $\gamma = 1.8\ t_n/m^3$	1	216,0	216,0	216,0
	2/3	252,0	180,0	108,0
	1/3	288,0	144,0	0,0
	1/4	297,0	135,0	−27,0

(βλ. σχ. 9)

4. Γραφικη παράσταση της κατανομης των εφαπτομενικών και ακτινικών τάσεων κατα τον άξονα φορτισης X.

(Ενδεικτικά . για την τιμη: K = 0.5) .

(i) Για τις εφαπτομενικές τάσεις , κατα τον άξονα X και για τιμη του συντελεστη ουδετερας ωθήσεως K = 0.5 , εφαρμόζουμε την εξίσωση (6) :

$$σθ = (γ.h/2).\left[(1 + α^2/r^2).(1+K) + (1 + 3α^4/r^4).(1-K)\right] \quad ή$$

$$σθ = (γ.h/2).\left[(1 + α^2/r^2).\ 1.50 + (1 + 3α^4/r^4).\ 0.50\right] \quad ή$$

$$σθ = (γ.h/2).\left[1 + 0.75.(α^2/r^2).(1 + α^2/r^2)\right] \qquad (13)$$

(ii) Για τις ακτινικές τάσεις σr , κατά τον άξονα X , εφαρμόζουμε την εξίσωση (1) για φόρτιση κατακόρυφη με σz = γ.h και οριζόντια με σx = K.σz = K.γ.h

α) Φόρτιση κατά τον άξονα Z :

$$σrz = (σz/2).\left[1 - α^2/r^2\right] + (σz/2).\left[1 + 3α^4/r^4 - 4α^2/r^2\right].συν(π)$$

$$σrz = (σz/2).\left[1 - α^2/r^2\right] - (σz/2).\left[1 + 3α^4/r^4 - 4α^2/r^2\right] \qquad (14)$$

β) Φόρτιση κατά τον άξονα X :

$$\sigma r_x = (K.\sigma z/2).\left[1 - \alpha^2/r^2\right] + (K.\sigma z/2).\left[1 + 3\alpha^4/r^4 - 4\alpha^2/r^2\right].συν(0)$$

$$\sigma r_x = (K.\sigma z/2).\left[1 - \alpha^2/r^2\right] + (K.\sigma z/2).\left[1 + 3\alpha^4/r^4 - 4\alpha^2/r^2\right] \qquad (15)$$

Απο το συνδυασμο των εξισωσεων (13) και (14) εχουμε:

$$\sigma r = (\sigma z/2).\left[(1 - \alpha^2/r^2).(K+1) + (1 + 3\alpha^4/r^4 - 4\alpha^2/r^2).(K-1)\right]$$

όπου για την ενδεικτική τιμή K = 0.5 , έχουμε :

$$\sigma r = (\sigma z/2).\left[1.50.(1 - \alpha^2/r^2) - 0.50.(1 + 3\alpha^4/r^4 - 4\alpha^2/r^2)\right] \quad ή$$

$$\sigma r = (\sigma z/2).\left[1 + 0.50.(\alpha^2/r^2) - 1.50.(\alpha^4/r^4)\right] \quad η$$

$$\sigma r = \gamma.h.\left[0.50 + 0.25.(\alpha^2/r^2).(1 - 3\alpha^2/r^2)\right] \qquad (16)$$

Για την κατασκευή της γραφικής παράστασης των κατανομών των τάσεων σθ και σr κατά τον άξονα X - εξισώσεις (13) και (16) αντίστοιχα (βλ. σχ. 6) - θεωρούμε, ενδεικτικά για το παράδειγμά μας, ότι η σήραγγα πρόκειται να διανοιχτεί σε βράχο με φαινόμενο ειδικό βάρος γ = 2.2 tn/m³ , με διατομή διαμέτρου 2α = 4.0 m , που το βάθος του κέντρου της από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους είναι h = 60 m .

-Οι τάσεις πριν την εκσκαφή είναι :

σθο = σVo = γ.h = 2.2 . 60 = 132 tn/m²

σRo = σho = K.γ.h = 0.50 . 2.2 . 60 = 66 tn/m²

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τη γραφική παράσταση, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

r/α	α/r	σθ (tn/m²)	σr (tn/m²)
1.00	1.000	330	0
1.05	0.952	303	15
1.10	0.909	281	26
1.20	0.833	249	41
1,40	0.714	208	57
1.70	0,588	178	65
2.00	0.500	163	68
3.00	0.333	144	59

(βλ.σχ. 4)

5. Ελεγχος για τυχόν υπέρβαση της διατμητικής αντοχής του βράχου σε ένα σημείο ή σε μια περιοχή.

Θεωρούμε για το έδαφος που διανοίγεται η σήραγγα στο παράδειγμά μας, τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής: C = 15 kgr/cm² = 150 tn/m² και Φ = 35°.

Οπως φαίνεται και από τη γραφική παράσταση της κατανομής των τάσεων, π.χ. για τον άξονα X , όταν ο λόγος r/α γίνεται μεγαλύτερος , δηλαδή για σημεία περισσότερο απομακρυσμένα από τη θέση A (άντυγα της σήραγγας – βλ.σχ.6), η μία κύρια τάση , η σθ , ελαττώνεται , πλησιάζοντας την τιμή που είχε πριν από την εκσκαφή σθο , ενώ η άλλη κύρια τάση , η σr , αυξάνεται, πλησιάζει και , σε μια περιοχή υπερβαίνει την αρχική τιμή που είχε πρίν την εκσκαφή σRo.

Δηλαδή. Βλέπουμε ότι όσο απομακρυνόμαστε από τα σημεία που βρίσκονται ε π ά ν ω στην περίμετρο της διατομής, η πιθανότητα υ_ πέρβασης της διατμητικής αντοχής ελαττώνεται.

Απο την άποψη υπέρβασης της διατμητικής αντοχης, περισσοτερο πιθανη είναι η περιοχή της άντυγος της σήραγγας, οπου ο λ ό γ ο ς τ ω ν κ υ ρ ί ω ν τ ά σ ε ω ν γίνεται μ έ γ ι σ τ ο ς οπως και η δ ι_ α φ ο ρ ά τους.

Στα σημεια που βρισκονται επανω στην περίμετρο της κυκλικης διατομης της σήραγγας η ακτινική τάση είναι $\sigma r = 0$ (βλ. Πιν. & διάγραμμα).

Πρεπει να υπολογιστει η θεση οπου η εφαπτομενικη τάση πέρνει τη μέ_ γιστη τιμη της $\sigma\theta(max)$.

Εφαρμοζουμε την εξίσωση (2). Για $a/r = 1$, έχουμε:

α) Φόρτιση κατά τον άξονα Z :

$$\sigma\theta z = (\sigma z/2).\left[1 + a^2/r^2\right] - (\sigma z/2).\left[1 + 3a^4/r^4\right].\sigma\upsilon\nu(2\theta)$$

$$\sigma\theta z = \sigma z - 2.\sigma z.\sigma\upsilon\nu(2\theta)$$

$$\sigma\theta z = \sigma z.\left[1 - 2.\sigma\upsilon\nu(2\theta)\right] \tag{17}$$

β) Φόρτιση κατά τον άξονα X :

$$\sigma\theta x = (K.\sigma z/2).\left[1 + a^2/r^2\right] - (K.\sigma z/2).\left[1 + 3a^4/r^4\right].\sigma\upsilon\nu\ 2(\pi/2 - \theta)$$

$$\sigma\theta x = (K.\sigma z).\left[1 + 2.\sigma\upsilon\nu(2\theta)\right] \tag{18}$$

Από την επαλληλία των εξισώσεων (16) και (17) έχουμε :

$$σθ = σz.\left[1 - 2.συν(2θ)\right] + (K.σz).\left[1 + 2.συν(2θ)\right]$$

$$σθ = σz.\left[(K+1) + 2.(K-1).συν(2θ)\right]$$

Για την τιμη K = 0,50 είναι :

$$σθ = σz.\left[\ 1.50 \quad - \quad 2\ .\ 0.50\ .\ συν(2θ)\ \right]$$

$$σθ = σz.\left[1.50 - συν(2θ)\right] \qquad (19)$$

Από την εξίσωση (19) βλέπουμε ότι η εφαπτομενική τάση σθ , παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν η ποσότητα συν(2θ) γίνει ελάχιστη. δηλαδή όταν είναι συν(2θ) = -1 , πράγμα που συμβαίνει όταν 2θ = π ή 2θ = 3π ή αλλιώς όταν :

$θ = π/2$ ή $θ = 3π/2$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η εφαπτομενική τάση σθ , γίνεται μέγιστη στα δύο αντιδιαμετρικά σημεία της διατομής της σήραγγας επάνω στον άξονα X.

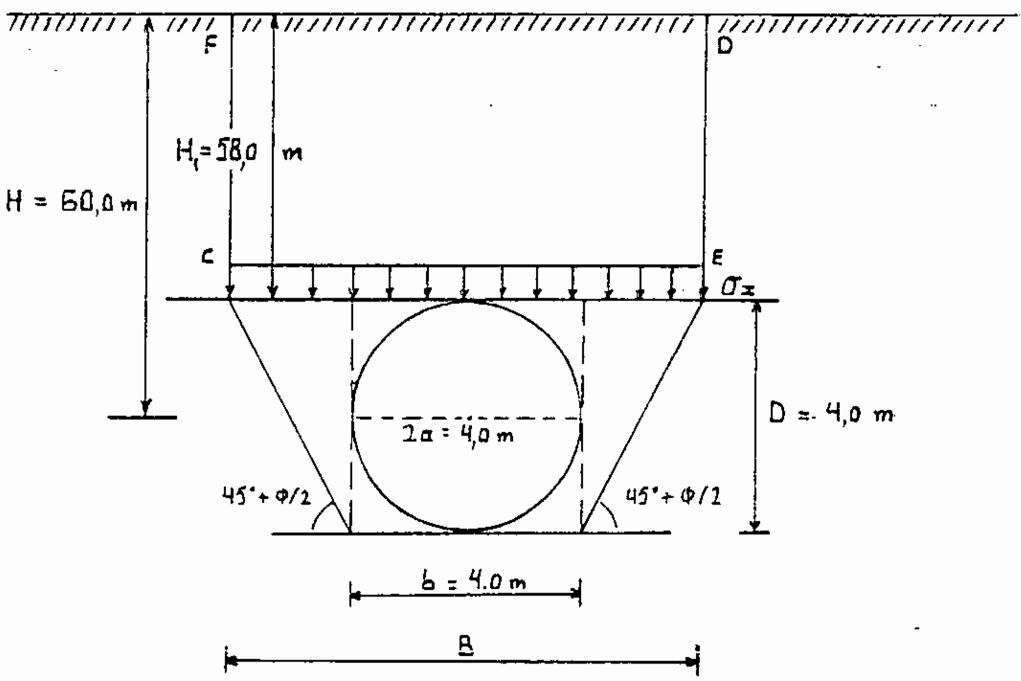
Από την εξίσωση (19) έχουμε :

$$σθ(max) = σz.\left[1.50 + 1\right] = 2.5.σz$$

Απο το διάγραμμα Mohr – Coulomb (βλ.σχ.7), και για τις δεδομέ_νες παραμέτρους διατμητικης αντοχης $C = 150\ tn/m^2$ και $\Phi = 35°$, φαί_νεται ότι η διατμητικη αντοχη, σε κάθε θέση, από το σημείο Α και πέρα υπερβαίνει την αντιστοιχη διατμητικη ταση.

Επίσης, σε κάθε σημείο, όπου είναι: $r/a > 1$ ο κύκλος Mohr έχει μικρότερη διαμετρο, απο αυτη του διαγραμματος (βλ.σχ.7), γιατι η δια_φορά $\sigma\theta(max) - \sigma r$ ελαττώνεται (αφου για τα σημεία αυτά είναι $\sigma r > 0$) και ταυτοχρονα μετατοπίζεται στον άξονα των σ, με αποτελεσμα την αύξηση του συντελεστη ασφάλειας έναντι της διατμητικης αστοχιας.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ Terzaghi.



Είναι: $b = 2a = D = \ ,0$ m

Σύμφωνα με τη θεωρία Terzaghi έχουμε:

$$B = b + 2 \cdot D \cdot \varepsilon\varphi(45° - \varphi/2) = 16,0 \text{ m}$$

Για $\varphi = 35°$, $\gamma = 2.2$ tn/m³, $H_1 = 58.0$ m και για $K = 0.5$, οι κατακόρυφες τάσεις σ_z στην οροφή της σήραγγας δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma_z = \frac{B \cdot \gamma}{2 \cdot K \cdot \varepsilon\varphi\varphi} \cdot \left(1 - e^{-2KH_1\varepsilon\varphi\varphi/B}\right)$$

Αντικαθιστώντας έχουμε:

$$\sigma_z = \frac{16.0 \cdot 2.2}{2 \cdot 0.5 \cdot \text{εφ}\, 35^\circ} \left(1 - 2.72^{-2 \cdot 0.5 \cdot 58\,\text{εφ} 35^\circ / 16.0}\right)$$

$$\sigma_z = 51.21 \ \underline{tn/m^2}$$

Παρατηρούμε ότι οι κατακόρυφες τάσεις σ_z που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Terzaghi είναι κατά πολύ μικρότερες από αυτές που υπολογίσαμε κατά την εφαρμογή της ελαστικής θεωρίας ($\sigma_z = \gamma \cdot H$). Αυτό όπως αναφέραμε και στην αρχή οφείλεται στη μείωση της ορθής δύναμης $\sigma_z = \gamma \cdot H$ εξ' αιτίας των δυνάμεων τριβής πού αναπτύσσονται στα επίπεδα ολίσθησης CF και DE.

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΣΥΝΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Η υπέρβαση της αντοχής του βράχου σε εφελκυσμό, ή υπέρβαση της διατμητικής αντοχής σε σημεία συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων κατά μία διεύθυνση, δημιουργούν πλαστικά φαινόμενα που μεταφέρονται σταδιακά προς το εσωτερικό της μάζας του βράχου, λόγω της αδυναμίας του καταστρεμένου υλικού να αναλάβει την υπάρχουσα εντατική κατάσταση.

Έτσι δημιουργείται μια "πλαστική ζώνη", στην οποία έχουμε κατάσταση οριακής ισορροπίας της αντοχής του υλικού. Η επέκταση της πλαστικής ζώνης συνεχίζεται μέχρι αποστάσεως από την περίμετρο της διατομής της σήραγγας τέτοια, που η νέα εντατική κατάσταση που δημιουργείται από την ανακατανομή των τάσεων, να είναι συμβιβαστή με την αντοχή του υλικού. (Η εξέλιξη της "πλαστικής ζώνης" στο εσωτερικό του βράχου, παρουσιάζεται στο σχ. 8α,β,γ).

Γενικά οι πρόσφατες έρευνες, συνδέουν την έκταση της πλαστικής ζώνης, όχι μόνο με την πλαστικότητα του βράχου λόγω της υψηλής συγκέντρωσης των τάσεων, αλλά και με την επίδοση του εκρηκτικού κύματος, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Σχετική με τα πλαστικά φαινόμενα που ακολουθούν τη διάνοιξη μιας σήραγγας, είναι και η έννοια της χ α λ ά ρ ω σ η ς και της π ί ε σ η ς χ α λ ά ρ ω σ η ς.

Η χ α λ ά ρ ω σ η είναι το φαινόμενο βαθμιαίας δημιουργίας της πλαστικής ζώνης, ασχέτως αν υπάρχει ή όχι επένδυση στη σήραγγα, προσωρινή ή μόνιμη, ώστε να δημιουργηθεί γύρω από τη διατομή της, μια περιοχή με αδυναμία ανάληψης τάσεων.

Την έκταση της πλαστικής ζώνης καθώς και τις πιέσεις που ασκούνται στο περίβλημα μιας σήραγγας, λόγω του ιδίου βάρους του βράχου, επηρεάζουν διάφοροι παράγοντες. Εκτός από τις διαστάσεις και το σχήμα της σήραγγας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του βράχου, ιδιαίτερη σημασία έχουν, ο τρόπος διανοίξεως και τα χρησιμοποιούμενα εκρηκτικά, γεωλογικοί παράγοντες (όπως π.χ. η ανισοτροπία), ακόμα και ο χρόνος κατασκευής της προσωρινής υποστήριξης και της επένδυσης.

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΑ ΟΠΟΙΑΣΔΗΠΟΤΕ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Ο προσδιορισμός του συντελεστή συγκεντρώσεως των τάσεων σε σήραγγα με διατομή που, ούτε κατά προσέγγιση, δεν μπορεί να θεωρηθεί κυκλική ή ελλειπτική ή ορθογωνική, γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή με τη φωτοηλεκτρική μέθοδο. Στην τελευταία περίπτωση, για τον πειραματικό προσδιορισμό των τάσεων, κατασκευάζεται ομοίωμα της σήραγγας, το οποίο υποβάλλεται σε μονοαξονικό πεδίο ομοιόμορφου πίεσης, διαδοχικά, κατά την κατακόρυφη και την οριζόντια διεύθυνση. Τα αποτελέσματα επιπροσθέτωνται, παίρνοντας υπ'όψη τον συντελεστή ώθησης Κ.

ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

(Α) Η εντατική κατασταση γύρω απο μια σηραγγα, ειναι ανεξάρτητη απο το μέτρο ελαστικοτητας Ε του βράχου και, τουλάχιστον άμεσα, ανεξάρτητη του λογου του Poisson μ.

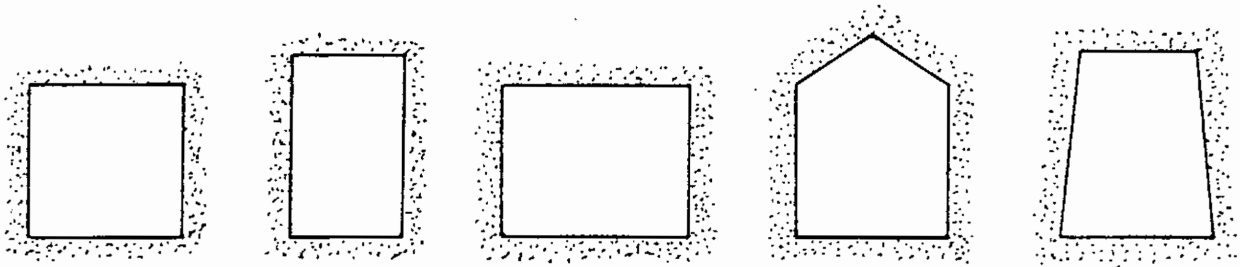
(Β) Η εντατική κατασταση εξαρταται αμεσα απο την τιμή του συντελεστη ωθήσεως εν ηρεμία Κ και απο τη σχέση των διαστασεων της διατομης.
Ο συντελεστής Κ, για πετρωμα με οριζόντια στρωσιγένεια και αμετάβλητες διαστασεις κατα την οριζόντια έννοια, εκφράζεται συναρτησει του μ : $K = \mu/(1-\mu)$. Η σχεση αυτη δεν εχει απολυτη εφαρμογη, καθως και η ιστορία των φορτίσεων του πετρωματος, και άλλοι γεωλογικοι παραγοντες επηρεαζουν την τιμή του. Για πολύ μεγαλα βάθη, η για πετρώματα με ισχυρη προφόρτιση, η τιμή του Κ πλησιαζει το 1 ενώ, κοντα στην επιφανεια του εδαφους, παιρνει τιμές που πλησιαζουν το 0.

(Γ) Οι αναλυτικές σχεσεις που δίνουν τις τασεις σε πολικες συντεταγμενες (κατά KIRSH, βλ. σχέσεις (1), (2), (3)), έχουν εξαχθεί με τη βοήθεια της μαθηματικής θεωρίας της ελαστικοτητας, έχοντας σαν μηχανικό προτυπο την εντατικη κατάσταση, γυρω απο την οπη ενός δίσκου, φορτιζόμενου ανάλογα. Η οριζόντια τάση, κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας, είναι : $\sigma H y = \mu.(\sigma v + \sigma H x)$, όπου μ: ο λόγος του Poisson, σΗχ: η οριζοντια και σv: η κατακορυφη τάση στο επίπεδο της διατομής.

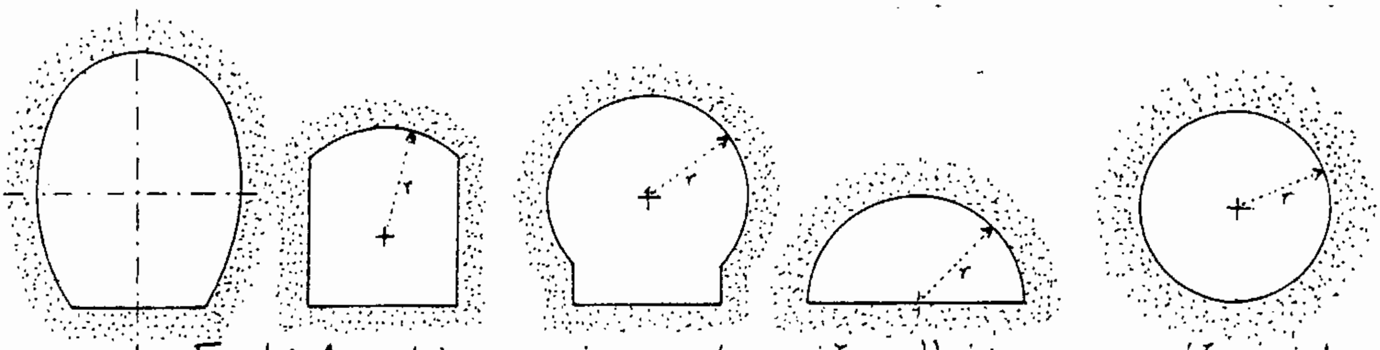
(Δ) Για την περίπτωση που η σηραγγα είναι επενδυμένη, η ακαμψία της επένδυσης, παίζει καθοριστικό ρόλο στις παραμορφώσεις, τόσο της ίδιας, όσο και του περιβάλλοντος βράχου, πράγμα που οδηγει στη διαφορετική κατανομή των τασεών. Για κυκλική σήραγγα με επένδυση, οι ακτινικές τάσεις γενικά αυξάνουν, ενώ οι εφαπτομενικες μειώνονται στην περιοχη της οροφής, γεγονος που είναι ευνοικό για την αντοχή του βράχου.
Για επένδυση μεσης ακαμψιας, η κατανομη των τάσεων είναι σχεδον ομοιόμορφη.

(Ε) Απο τη μελετη της κατανομής των τάσεων σε σήραγγες, με βάση την θεωρία της ελαστικοτητας, διαπιστώνουμε ότι στην οροφη της σήραγγας, για ορισμένες τιμές του συντελεστου Κ, εμφανίζονται εφελκυστικές τάσεις.

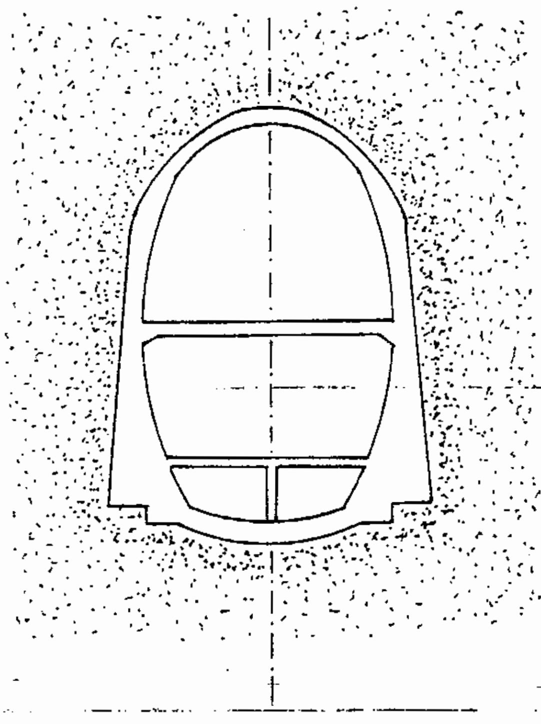
Σ Χ Ε Δ Ι Α - Δ Ι Α Γ Ρ Α Μ Μ Α Τ Α



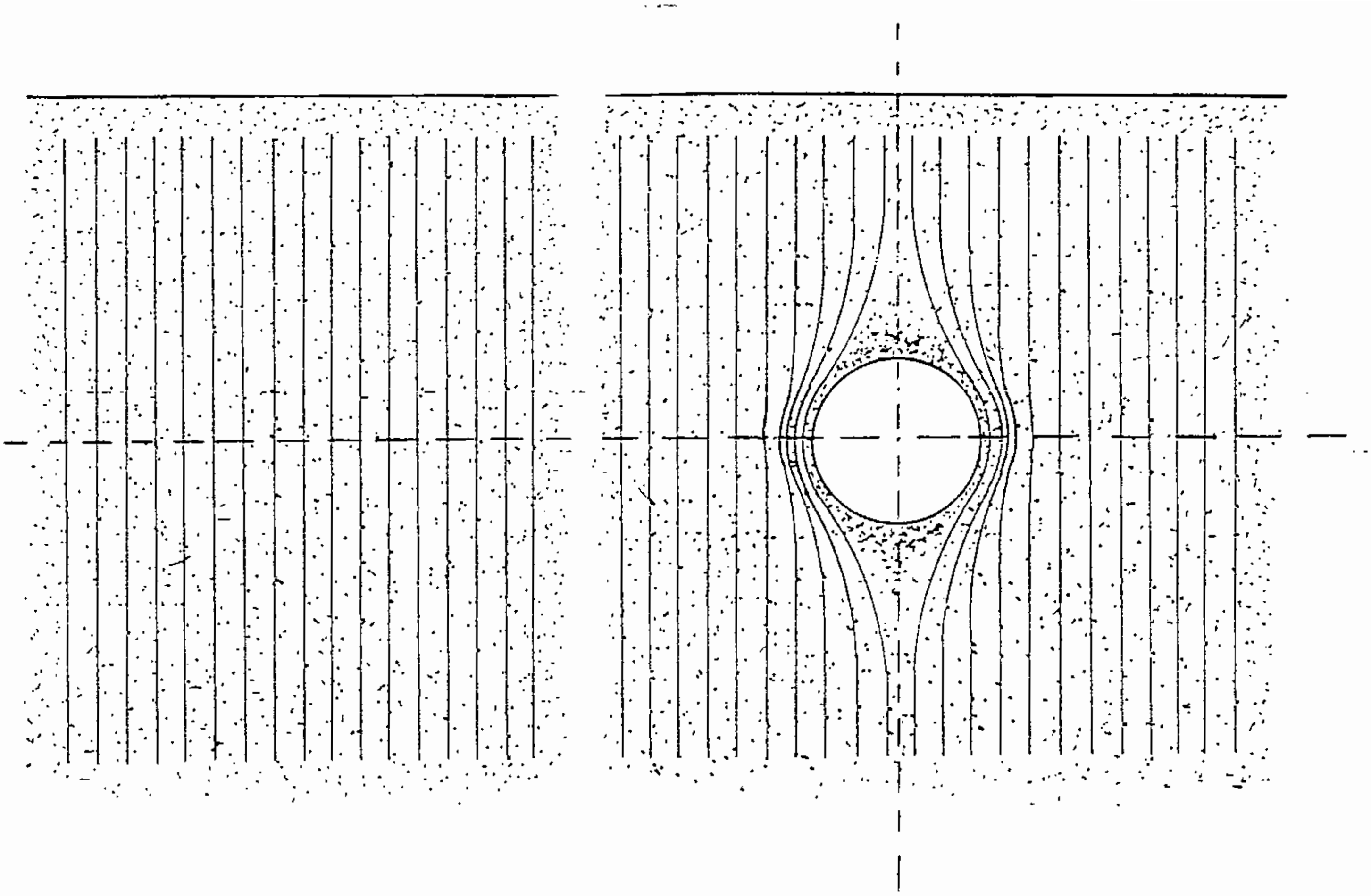
Σχ. 1α Διατομές σηρράγγων με ευθύγραμμες πλευρές



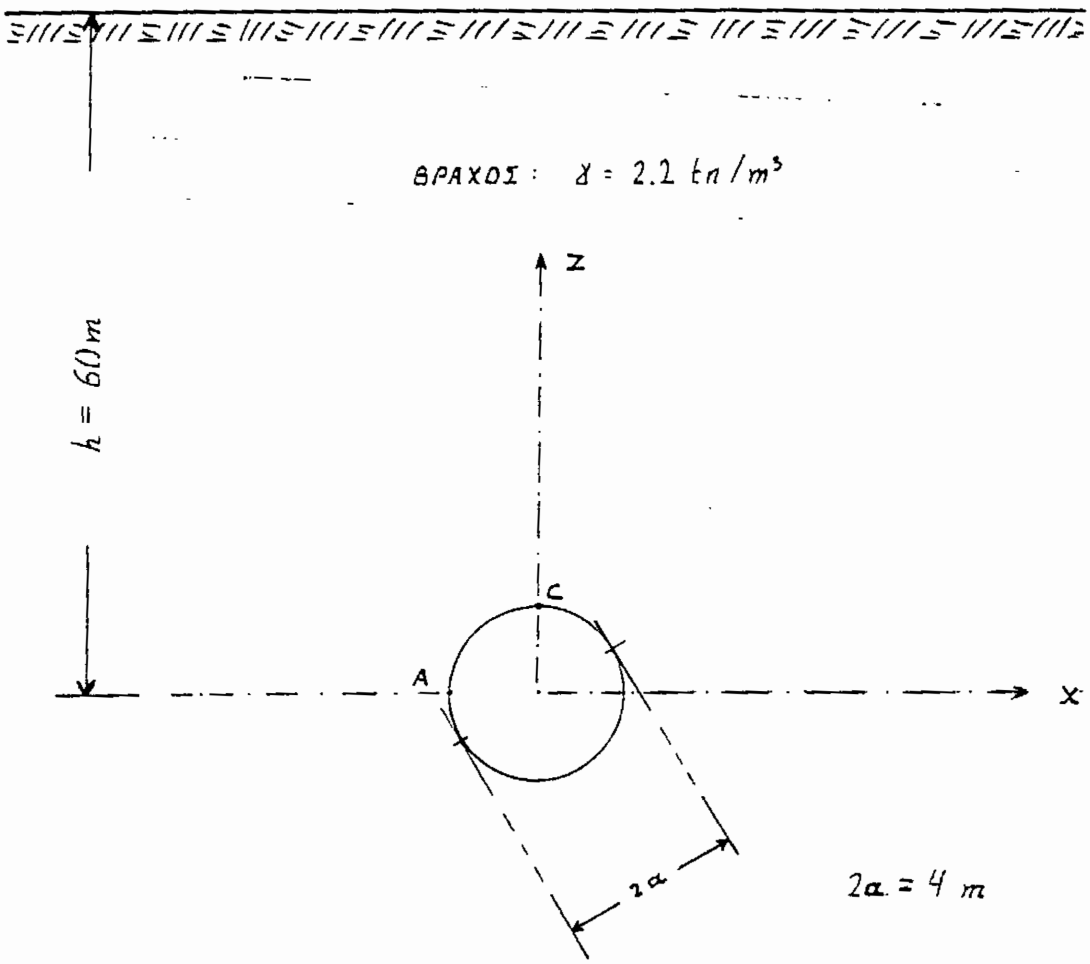
Σχ. 1β Διατομές σηρράγγων με τόξα ελλείψεως και τόξα κύκλου



Σχ. 1γ Ομοίωμα της σήραγγας Cisa Pass στην Ιταλία.



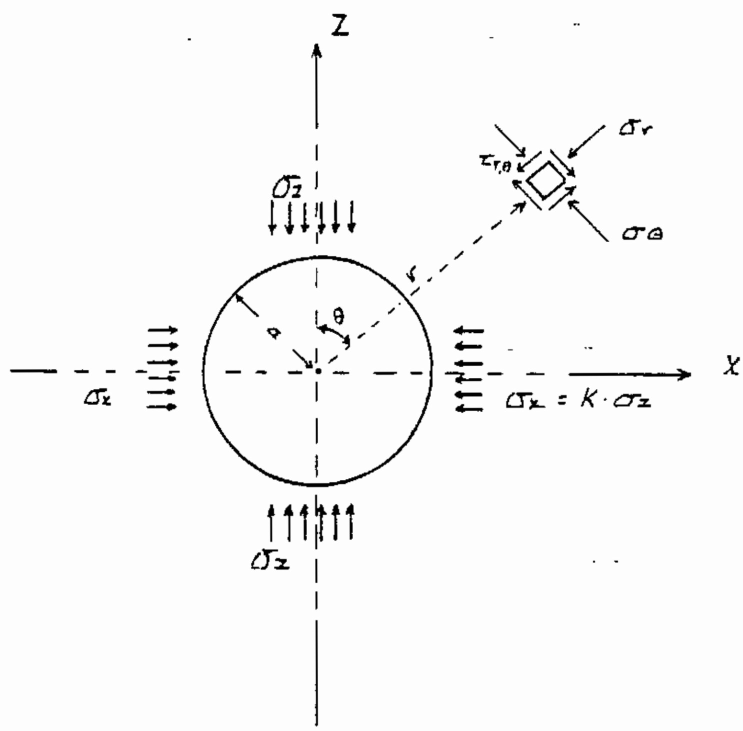
Σχ. 2 Σχηματική παράσταση των τροχιών των θλιπτικών τάσεων πρίν και μετά την εκσκαφή κυκλικής σήραγγας



Σχ. 3

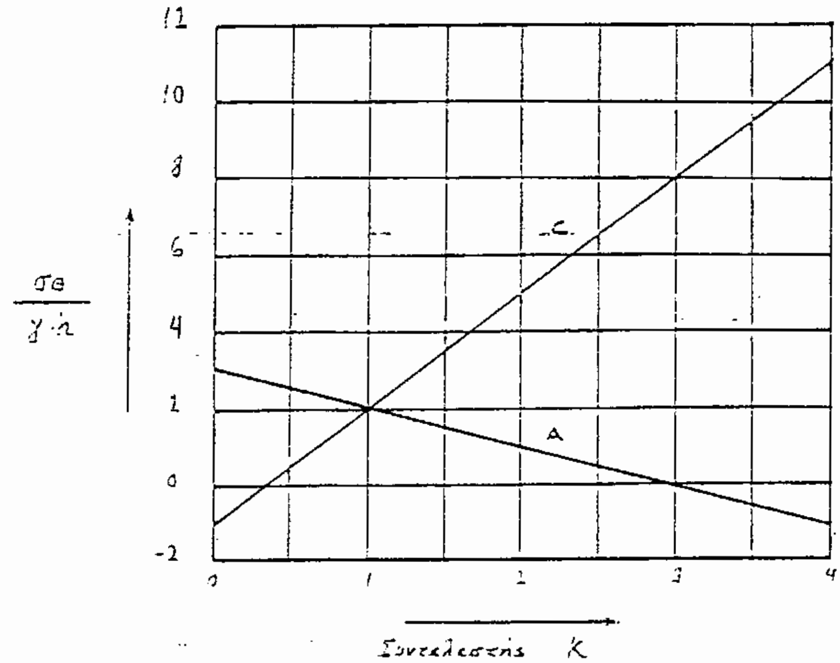
Εφαρμογή :

Διάνοιξη σήραγγας κυκλικής διατομής, σε μεγάλο βάθος, εντός ελαστικού και ισότροπου βράχου.

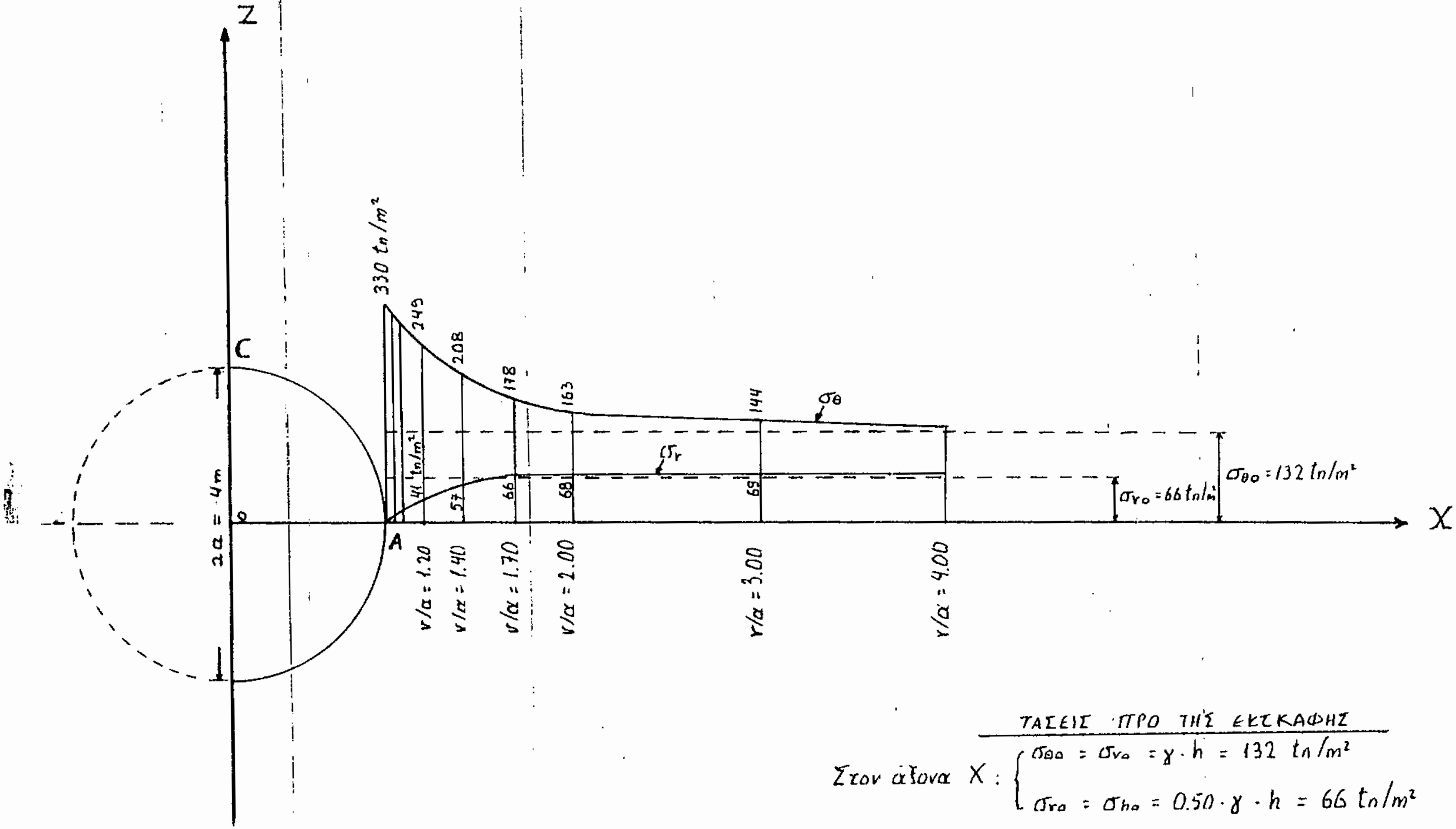


Σχ. 4

Τάσεις, γύρω από την κυκλική διατομή της σήραγγας, σε σύστημα πολικών συντεταγμένων r και θ, κατά KIRSH.



Σχ. 5 Επίλυση κατά Terzaghi και Richart, 1952:
Γραφική παράσταση των εξισώσεων (10) και (11)
για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδετέρας ωθήσεως K.

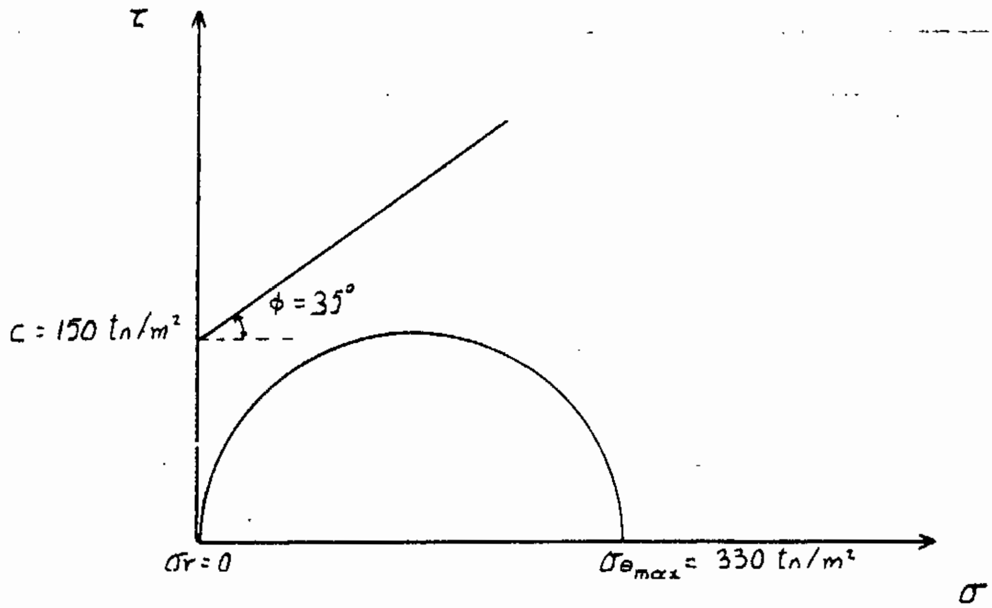


ΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Στον άξονα X : $\begin{cases} \sigma_{\theta o} = \sigma_{vo} = \gamma \cdot h = 132\ tn/m^2 \\ \sigma_{ro} = \sigma_{ho} = 0.50 \cdot \gamma \cdot h = 66\ tn/m^2 \end{cases}$

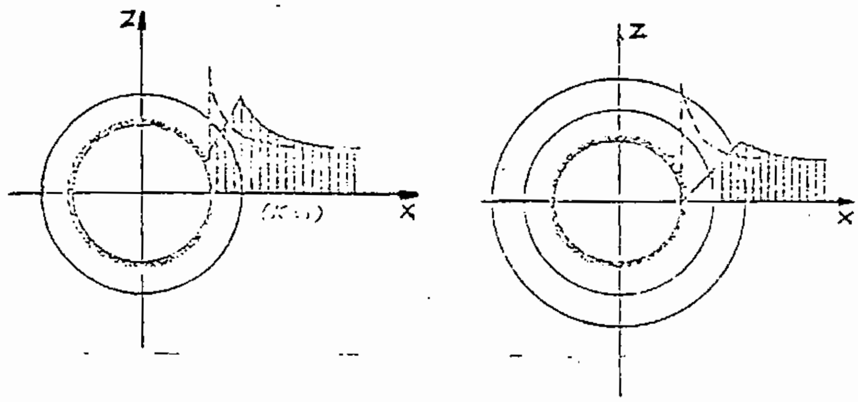
Σχ.6

Διάγραμμα της κατανομής των τάσεων σ_θ και σ_r, γύρω από την κυκλική διατομή κατά τον άξονα X (κατανομή κατά Kerisel)

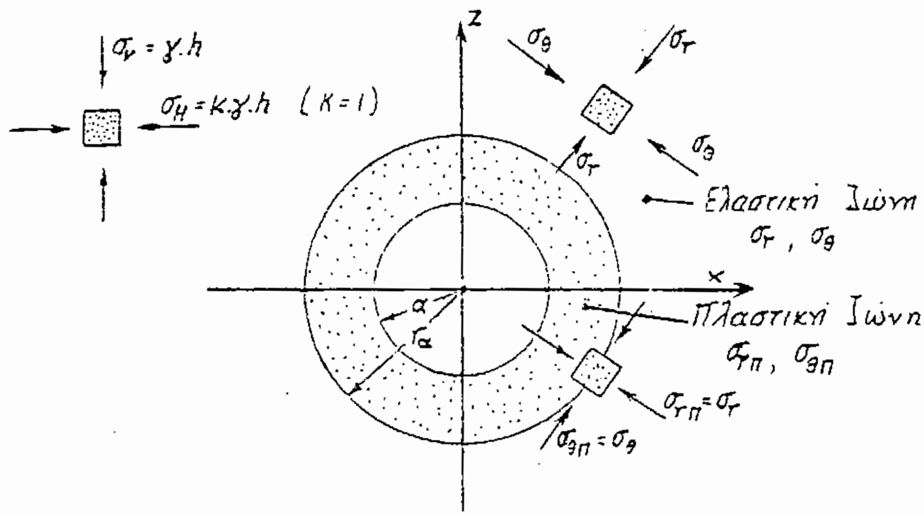


Σχ. 7

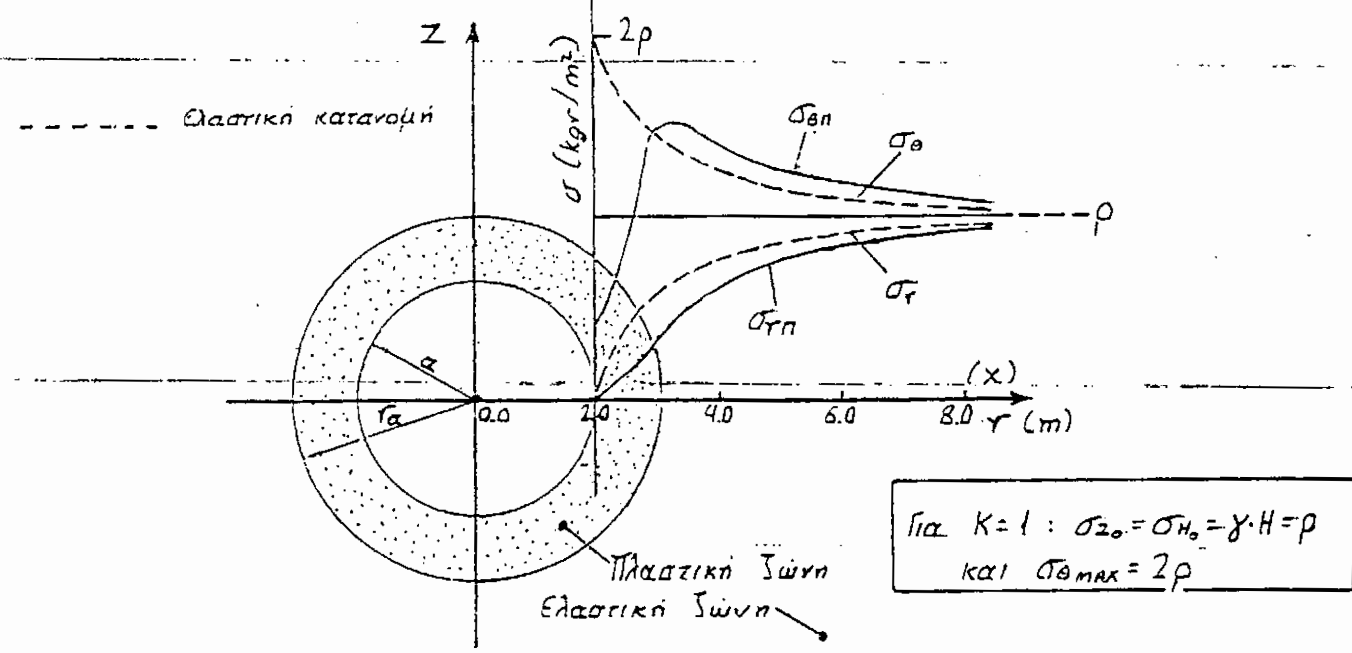
Διάγραμμα Mohr - Coulomb



Σχ. 8α Εξέλιξη της πλαστικής ζώνης στο εσωτερικό του βράχου



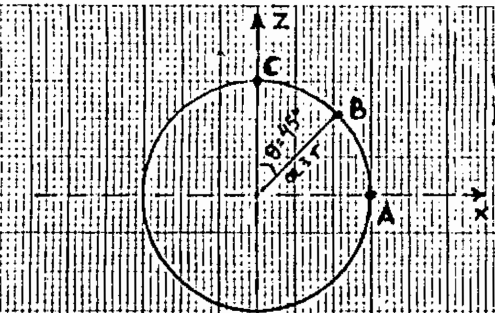
Σχ. 8β Διάκριση της ελαστικής από την πλαστική ζώνη γύρω από μία κυκλική διατομή



Σχ. 8γ Κατανομή των τάσεων στην πλαστική και

Σx.9

ΜΗΚΟΤΟΜΗ σήραγγας κυκλικής διατομής εντός πετρώματος και εντός αργιλλικού εδάφους



ΚΛΙΜΑΚΑ
Υψών 1/10
Μηκών 1/50

±0,0

Πέτρωμα $\gamma = 2{,}5$ tn/m³

Αργιλλικό έδαφος $\gamma = 1{,}8$ t

Για $a = r$

σημείο A $\sigma_\theta = \gamma \cdot H \cdot (3 - K)$

σημείο B $\sigma_\theta = \gamma \cdot H \cdot (K + 1)$

σημείο C $\sigma_\theta = \gamma \cdot H \cdot (3K - 1)$

−60,0

Βάθος $H = -80$ m

Αποστάσεις από αρχής (m)	0,00	100,0	200,0	300,0	400,0	500,0	600,0	700,0	800,0
Βάθος κέντρου διατομής από επ. επιφ. εδάφ. (m)	60,0 m								
Διατομή (α/α)		1	2	3	4	5	6	7	8
Φαινόμενο ειδικό βάρος πετρώμ./εδάφους		Πέτρωμα $\gamma = 2.5$ tn/m³				Αργιλλικό έδαφος $\gamma = 1.8$ tn/m³			
Συντελεστής ουδετέρας ωθήσεως K		1	2/3	1/3	1/4	1	2/3	1/3	1/4
Εφαπτομένη τάση σθ στη θέση A		300,0	350,0	400,0	412,5	216,0	252,0	288,0	297,0
» » » B		300,0	250,0	200,0	187,5	216,0	180,0	144,0	135,0
» » » C		300,0	150,0	00,0	−37,5	216,0	108,0	00,0	−27,0