

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

8.1 Γενικά

Η άμεση υποστήριξη της σήραγγας συνήθως ακολουθείται από την κατασκευή της τελικής επένδυσης η οποία αναλαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη, δηλαδή αφού πρακτικώς μηδενισθούν οι ρυθμοί εξέλιξης των μετακινήσεων, εντάσεων κλπ.

Η τελική επένδυση σηράγγων συνήθως σχεδιάζεται για να αναλάβει τα εξής φορτία:

1. Το φορτίο που αρχικώς αναλαμβάνεται από τα αγκύρια, στην περίπτωση προσωρινών αγκυρίων ή στην περίπτωση βραχόμαζας με έντονα ερπυστική συμπεριφορά.
2. Μέρος του φορτίου που αναλαμβάνεται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ώστε το απομένον φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας μονίμου έργου (δεδομένου ότι κατά την άμεση υποστήριξη της σήραγγας το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργεί με μειωμένο συντελεστή ασφαλείας προσωρινού έργου).
3. Τυχόν αυξημένα φορτία της βραχώμαζας λόγω ερπυσμού. Με την πάροδο του χρόνου, η βραχώμαζα που περιβάλλει ένα υπόγειο έργο υπόκειται σε ερπυστικές παραμορφώσεις με αποτέλεσμα την αύξηση των φορτίων στην τελική επένδυση.
4. Τυχόν υδατικές πιέσεις λόγω πλημμέλους αποστράγγισης ή απρόβλεπτης απόφραξης του συστήματος αποστράγγισης.
5. Τυχόν φορτία από μελλοντικές κατασκευές που φορτίζουν τη σήραγγα.
6. Τυχόν σεισμική επιφόρτιση της σήραγγας.

8.2 Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχώμαζας

Με την πάροδο του χρόνου, η βραχώμαζα που περιβάλλει ένα υπόγειο έργο υπόκειται σε ερπυστικές παραμορφώσεις με συνέπεια:

1. Την αύξηση των παραμορφώσεων της βραχώμαζας (π.χ. σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας) εφόσον οι παραμορφώσεις δεν παρεμποδίζονται από έργα υποστήριξης.
2. Την αύξηση της φόρτισης των έργων υποστήριξης στις περιπτώσεις όπου οι παραμορφώσεις της βραχώμαζας παρεμποδίζονται (π.χ. στην περίπτωση σηράγγων μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης).

Ο βαθμός ερπυσμού της βραχώμαζας ποικίλει μεταξύ πρακτικώς μηδέν (για βραχώμαζες με μεγάλες τιμές του δείκτη RMR) και αρκετά υψηλών τιμών (για βραχώμαζες με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και εδαφικούς σχηματισμούς). Τυπικά, ο βαθμός ερπυσμού μπορεί να περιγραφεί μέσω του ερπυστικού συντελεστή (k) ο οποίος εκφράζει τον ρυθμό της ερπυστικής παραμόρφωσης της βραχώμαζας υπό μοναξονική θλίψη. Μια σχετικώς υψηλή τιμή του ερπυστικού συντελεστή (που

αφορά κυρίως στιφρές-σκληρές αργίλους) είναι $k = 0.10$, δηλαδή η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο του χρόνου είναι ίση με το 10% της ελαστικής (αρχικής) παραμόρφωσης. Έτσι, για παράδειγμα, εάν η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση είναι 2%, η παραμόρφωση θα γίνει 2.2% σε ένα έτος, 2.4% εντός δέκα ετών και 2.6% εντός εκατό ετών. Στην περίπτωση παρεμπόδισης ανάπτυξης της ανωτέρω παραμόρφωσης, είναι προφανές ότι θα αυξηθεί η φόρτιση στην επένδυση της σήραγγας.

Το παραπάνω μοντέλο ερπυσμού της βραχόμαζας μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$\varepsilon^t = k\varepsilon^e \log(t/t_0) \Rightarrow \varepsilon \equiv \varepsilon^e + \varepsilon^t = \varepsilon^e [1 + k \log(t/t_0)]$$

όπου k είναι ο ερπυστικός συντελεστής, ε^t είναι η ερπυστική παραμόρφωση τη χρονική στιγμή (t), ε^e είναι η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση, ε είναι η συνολική παραμόρφωση και (t_0) είναι ο χρόνος έναρξης των ερπυστικών παραμορφώσεων.

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι εάν ε_1 και ε_2 είναι οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 όπου $t_2 = 10xt_1$, τότε: $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = k\varepsilon^e$, δηλαδή η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο χρόνου είναι ένα ποσοστό (k) της ελαστικής παραμόρφωσης.

Εναλλακτικά, η ανάπτυξη ερπυστικών παραμορφώσεων μπορεί να προσομοιωθεί μέσω απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας σε σχέση με τη βραχυχρόνια τιμή του (βλέπε σχέση 1). Στην περίπτωση αυτή, εάν $E_0 \equiv \sigma/\varepsilon^e$ είναι η βραχυχρόνια τιμή του μέτρου ελαστικότητας (τη χρονική στιγμή t_0) και $E \equiv \sigma/\varepsilon$ είναι η μειωμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας τη χρονική στιγμή (t), τότε:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + k \log(t/t_0)}$$

Ειδικότερα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μετά από n -χρονικούς κύκλους ($t = 10^n \cdot t_0$), θεωρώντας ότι $t_0 = 1.2$ μήνες ($n = 1$ για 1 έτος, $n = 2$ για 10 έτη και $n = 3$ για 100 έτη) θα είναι:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + nk}$$

Τυπικές τιμές εφαρμογής της ανωτέρω σχέσης φαίνονται στο ακόλουθο πίνακα:

ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ E/E_0

Ερπυστικός συντελεστής k	Χρονική περίοδος		
	1 έτος	10 έτη	100 έτη
0.02	0.980	0.961	0.943
0.05	0.952	0.909	0.870
0.10	0.909	0.833	0.769
0.15	0.870	0.769	0.690

Από τον ανωτέρω πίνακα φαίνεται ότι η απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού μπορεί να φθάσει και το 30% στην περίπτωση εδαφών με έντονα ερπυστική συμπεριφορά.

8.3 Φορτία γαιών στην τελική επένδυση σηράγγων

8.3.1 Γενικά

Για την εκτίμηση των φορτίων που ασκούνται στην τελική επένδυση σηράγγων εφαρμόζονται οι εξής κατηγορίες μεθόδων:

1. Εμπειρικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές δίνουν το φορτίο (κατακόρυφο και οριζόντιο) που ασκείται στην επένδυση σηράγγων μέσω εμπειρικών τύπων που περιλαμβάνουν ως κύριες παραμέτρους την ποιότητα της βραχώμαζας και τις διαστάσεις της σήραγγας. Κάθε μία από τις εμπειρικές μεθόδους βασίζεται σε κάποιες παραδοχές, κυρίως σε σχέση με το βάθος της σήραγγας, την ενδοσιμότητα της επένδυσης και την ενεργοποίηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανάληψη φορτίων. Κατά συνέπεια, τα φορτία που δίνουν οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

2. Αναλυτικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην εκτίμηση των διαστάσεων μιας εδαφικής μάζας πάνω από τη στέψη της σήραγγας η οποία φορτίζει την επένδυση.

3. Αριθμητικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές προσομοιώνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της επένδυσης της σήραγγας και της περιβάλλουσας βραχώμαζας, δηλαδή λαμβάνουν υπόψη την εξάρτηση των φορτίων της επένδυσης της σήραγγας από το βαθμό ενεργοποίησης της αντοχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανάληψη των φορτίων των υπερκειμένων γαιών (μέσω της ανάπτυξης του λεγόμενου "εδαφικού τόξου"). Οι αριθμητικές μέθοδοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

(α) Τις *απλοποιημένες*, στις οποίες η βραχώμαζα που περιβάλλει την επένδυση της σήραγγας λαμβάνεται υπόψη μέσω μονοδιάστατων ελατηρίων τύπου Winkler τα οποία συνδέονται με την επένδυση της σήραγγας και ενεργοποιούνται κατά την παραμόρφωση της επένδυσης.

(β) Τις *σύνθετες*, στις οποίες η βραχώμαζα που περιβάλλει την επένδυση της σήραγγας λαμβάνεται υπόψη μέσω διδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων με ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

Σημειώνεται ότι οι ανωτέρω μέθοδοι αφορούν την εκτίμηση των φορτίων που ασκούνται στην τελική επένδυση των σηράγγων. Τα φορτία που ασκούνται στην προσωρινή υποστήριξη εξαρτώνται κυρίως από τον τρόπο διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας και συνήθως εκτιμώνται με αριθμητικές μεθόδους (κυρίως με πεπερασμένα στοιχεία) οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση της βραχώμαζας με τα στοιχεία της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας.

8.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές δίνουν το φορτίο (κατακόρυφο και οριζόντιο) που ασκείται στην επένδυση σηράγγων μέσω εμπειρικών τύπων που περιλαμβάνουν ως κύριες παραμέτρους την ποιότητα της βραχώμαζας και τις διαστάσεις της σήραγγας. Κάθε μία από τις εμπειρικές μεθόδους βασίζεται σε κάποιες παραδοχές, κυρίως σε σχέση με το βάθος της σήραγγας, την ενδοσιμότητα της επένδυσης και την ενεργοποίηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανάληψη φορτίων. Κατά συνέπεια, τα φορτία που δίνουν οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

8.3.2.1 Μέθοδος μέσω του δείκτη RMR

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Unal (1983) και δίνει την κατακόρυφη και οριζόντια πίεση στην επένδυση της σήραγγας μέσω του δείκτη RMR.

- Κατακόρυφη πίεση στη στέψη της σήραγγας:

$$p_v = \gamma H_t \quad \text{όπου} \quad H_t = \left(\frac{100 - RMR}{100} \right) B$$

και: B = εύρος της σήραγγας
 γ = ειδικό βάρος της βραχώμαζας
 RMR = δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας (κατά Bieniawski)

- Οριζόντια πίεση στις παρειές της σήραγγας: $p_h = \lambda p_v$
 όπου ο συντελεστής λ μπορεί να εκτιμηθεί όπως στη μέθοδο NGI (βλέπε κατωτέρω).

Οι ανωτέρω σχέσεις υπολογισμού των πιέσεων στην επένδυση της σήραγγας βασίζονται σε παρατηρήσεις της συμπεριφοράς σηράγγων εύρους 5-10 μέτρων, που διανοίχθηκαν με τη μέθοδο NATM σε βραχώμαζες με τιμές του δείκτη RMR > 50 και βάθη έως 100 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Στις περιπτώσεις αυτές, τα φορτία επί της τελικής επένδυσης της σήραγγας είναι γενικώς μικρά επειδή κατά τη διάνοιξη της σήραγγας ενεργοποιείται η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας και επιπλέον η αντοχή αυτή δεν μειώνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου λόγω του μικρού βαθμού ερπυσμού της βραχώμαζας με RMR > 50.

8.3.2.2 Μέθοδος NGI (μέσω του δείκτη Q)

Η μέθοδος βασίζεται στον εμπειρικό δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας (Q) που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

όπου: RQD = Rock Quality Designation (Δείκτης Ποιότητας Βραχώμαζας)

J_n = συντελεστής αριθμού ασυνεχειών

J_r = συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών

J_a = συντελεστής εξαλλοίωσης ασυνεχειών

J_w = συντελεστής παρουσίας νερού

SRF = συντελεστής τασικού πεδίου (Stress Relief Factor)

- Κατακόρυφη πίεση στην οροφή της σήραγγας (σε kg/cm²): $p_v = \left(\frac{2}{3J_r} \right) J_n^{1/2} Q^{-1/3}$
- Οριζόντια πίεση στις παρειές: $p_h = \lambda p_v$

όπου:

Q	λ
Q > 10	0.58
0.1 < Q < 10	0.74
Q < 10	1.0

Η μέθοδος αφορά την εκτίμηση των φορτίων που ασκούνται στην τελική επένδυση σηράγγων που έχουν διανοιχθεί με τη μέθοδο NATM και τα μέτρα υποστήριξης έχουν σχεδιασθεί σύμφωνα με την εμπειρική μέθοδο του NGI. Η μέθοδος έχει βαθμονομηθεί για βραχώμαζες σχετικώς καλής ποιότητας (Q > 0.05). Για τιμές του

$Q < 0.05$ προκύπτουν υπερβολικά μεγάλες τιμές της πίεσης στην επένδυση της σήραγγας.

8.3.2.3 Μέθοδος Terzaghi

Κατά τη μέθοδο αυτή, η κατακόρυφη πίεση γαιών στην οροφή της σήραγγας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_v = \gamma H_p$$

όπου οι τιμές του φορτίζοντος ύψους γαιών (H_p) δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ποιότητα βραχώμαζας	Ύψος H_p
Συμπαγής βράχος, πρακτικώς χωρίς διακλάσεις	0
Συμπαγής βραχώμαζα με μικρό αριθμό τυχαίων διακλάσεων	$0 \div 0.10 b$
Συμπαγής βραχώμαζα με τυχαίες κλειστές διακλάσεις	$0 \div 0.25 b$
Κερματισμένη βραχώμαζα σε επιμέρους συμπαγή τεμάχια με ανοικτές ή κλειστές διακλάσεις χωρίς υλικό πλήρωσης	$0.25 \div 0.35 (b+h)$
Βραχώμαζα ως άνω αλλά εντονότερα κερματισμένη	$0.35 \div 1.00 (b+h)$
Κατακερματισμένη βραχώμαζα με ικανοποιητική εμπλοκή μεταξύ των τεμαχίων	$1.0 \div 1.5 (b+h)$
Απόθεση πυκνής άμμου	$0.60 \div 1.40 (b+h)$
Απόθεση χαλαρής άμμου	$1.00 \div 1.40 (b+h)$
Συνθλίβοντα εδάφη, σήραγγες σε μικρά βάθη	$1.10 \div 2.10 (b+h)$
Συνθλίβοντα εδάφη, σήραγγες σε μεγάλα βάθη	$2.10 \div 4.50 (b+h)$

b = εύρος της σήραγγας, h = ύψος της σήραγγας

Η μέθοδος αναπτύχθηκε για σήραγγες όπου μπορεί να αναπτυχθεί πλήρως το φαινόμενο θόλου πάνω από τη στέψη της σήραγγας, δηλαδή για σήραγγες με πάχη υπερκειμένων $D > 1.5 (b+h)$. Η μέθοδος Terzaghi προτάθηκε στη δεκαετία του 1940 για σήραγγες εύρους έως 5 μέτρων και προσωρινή υποστήριξη με ξυλοδοκούς ή χαλύβδινα πλαίσια, δηλαδή πριν από την εφαρμογή των σύγχρονων μεθόδων υποστήριξης σήραγγων με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

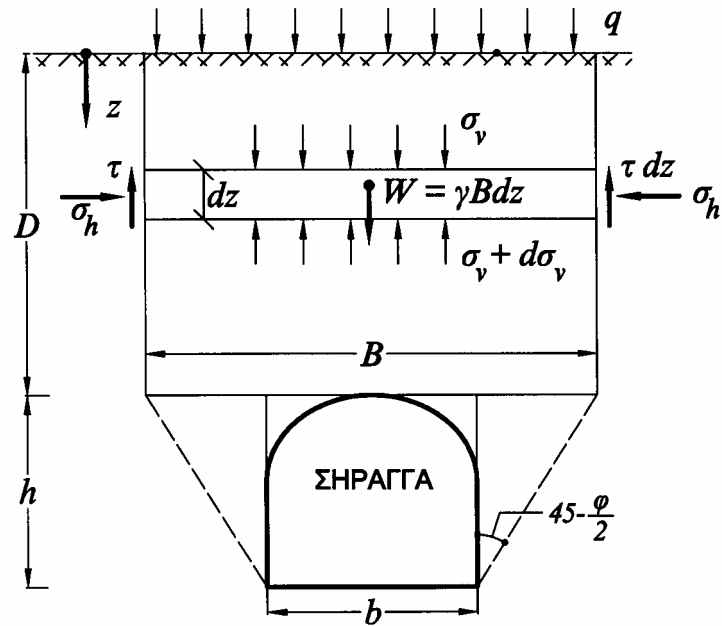
8.3.3 Αναλυτικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην εκτίμηση των διαστάσεων μιας εδαφικής μάζας πάνω από τη στέψη της σήραγγας η οποία φορτίζει την επένδυση.

8.3.3.1 Μέθοδος Terzaghi

8.3.3.1.1 Σήραγγες σε μικρά βάθη ($D < 2.5 B$)

Στην περίπτωση αυτή, η επιρροή της χαλάρωσης των υπερκειμένων γαιών φθάνει έως την επιφάνεια του εδάφους και συνεπώς δεν αναπτύσσεται πλήρως εδαφικό τόξο πάνω από τη στέψη της σήραγγας.



Σχήμα 1: Εκτίμηση φορτίων στην επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Terzaghi.

Ισορροπία εδαφικού στοιχείου πάχους dz (Σχήμα 1): $\gamma B dz = B d\sigma_v + 2\tau dz$

όπου: $\tau = c + \sigma_h \tan \varphi$ $\sigma_h = K \sigma_v$ $B = b + 2h \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$

Από τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτει: $\frac{d\sigma_v}{dz} + \left(\frac{2K}{B} \tan \varphi\right) \sigma_v = \left(\frac{\gamma B - 2c}{B}\right)$

Επίλυση της ανωτέρω διαφορικής εξίσωσης με συνοριακή συνθήκη: $\sigma_v(z=0) = q$ δίνει τις εξής τιμές της κατακόρυφης τάσης σε βάθος z από την επιφάνεια του εδάφους:

$$\sigma_v = qe^{-\Lambda z} + \frac{1}{\Lambda} \left(\gamma - \frac{2c}{B} \right) (1 - e^{-\Lambda z})$$

όπου $\Lambda = \frac{2K}{B} \tan \varphi$. Για το συντελεστή (K) ο Terzaghi συνέστησε τιμές περίπου ίσες με τη μονάδα ($K=1$). Οι τιμές της τάσης (σ_v) που προκύπτουν από την εφαρμογή της ανωτέρω σχέσης είναι μικρότερες από τις κατακόρυφες γεωστατικές τάσεις ($\sigma_v = q + \gamma z$).

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι η πίεση στην οροφή της σήραγγας είναι (για $z=D$):

$$p_v = qe^{-\Lambda D} + \frac{1}{\Lambda} \left(\gamma - \frac{2c}{B} \right) (1 - e^{-\Lambda D})$$

Θεωρώντας ότι στην παρειά της σήραγγας αναπτύσσεται ενεργητική κατάσταση τάσεων, η οριζόντια τάση σε βάθος (d) κάτω από τη στέψη της σήραγγας δίνεται από τη σχέση:

$$p_h = (p_v + \gamma d) \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

όπου (p_v) είναι η κατακόρυφη πίεση στη στέψη της σήραγγας.

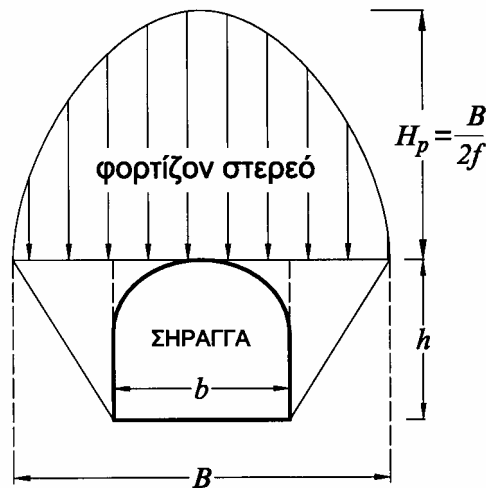
8.3.3.1.2 Σήραγγες σε μεγάλα βάθη ($D > 2.5 B$)

Στην περίπτωση αυτή, η κατασκευή της σήραγγας δεν επηρεάζει τις ανώτερες εδαφικές στρώσεις, οι οποίες απλώς φορτίζουν με το βάρος τους το υποκείμενο εδαφικό τόξο. Θεωρώντας ότι η επιρροή του φαινομένου θόλου (δηλαδή το εδαφικό τόξο) φθάνει μέχρι ύψος H πάνω από τη στέψη της σήραγγας ($H \approx 2.5 B$), ενώ οι ανώτερες εδαφικές στρώσεις ασκούν απλώς μια γεωστατική φόρτιση $q = \gamma (D - H)$, τότε η κατακόρυφη πίεση γαιών στη στέψη της σήραγγας είναι (κατά τα ανωτέρω):

$$p_v = \gamma (D - H) e^{-\Lambda H} + \frac{1}{\Lambda} \left(\gamma - \frac{2c}{B} \right) (1 - e^{-\Lambda H})$$

Η οριζόντια πίεση στην παρειά της σήραγγας μπορεί να εκτιμηθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και για σήραγγες σε μικρά βάθη.

8.3.3.2 Μέθοδος Protodyakonov (Ρωσική μέθοδος)



Σχήμα 2: Εκτίμηση φορτίων στην επένδυση σήραγγας κατά τη μέθοδο Protodyakonov

Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η εδαφική μάζα που φορτίζει τη στέψη της σήραγγας είναι παραβολική και έχει μέγιστο ύψος (πάνω από τη στέψη της σήραγγας) ίσο με:

$$H_p = \frac{B}{2f} \quad \text{με:} \quad B = b + 2h \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

όπου:

b, h = το εύρος και ύψος της σήραγγας, αντιστοίχως.

f = εμπειρικός συντελεστής που λαμβάνει τις εξής τιμές:

- Συνεκτικά εδαφικά υλικά: $f = \frac{c}{\sigma_c} + \tan \varphi$, όπου

σ_c = αντοχή του εδάφους σε ανεμπόδιστη θλίψη

- Βραχώδη υλικά: $f = \frac{\sigma_c}{100}$, όπου

σ_c (σε kg/cm^2) είναι η αντοχή της βραχώμαζας σε μοναξονική θλίψη

- Τυπικές τιμές του συντελεστή (f) δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Είδος βραχώμαζας - εδάφους	Τιμή του f
Ηφαιστειακά συμπαγή πετρώματα	10-20
Ασβεστόλιθοι, μάρμαρα	8
Ψαμμίτες, σκληροί ιλυόλιθοι	5-6
Φλύσχεις, ιλυόλιθοι, μάργες	2-5
Σκληρές άργιλοι	1.0-1.5*
Άργιλοι ιλείς, αμμοχάλικα	0.3-0.8*

* ο συντελεστής f υπολογίζεται από τη σχέση: $f = \tan\phi + c/\sigma_c$

Λόγω της παραδοχής πλήρους ανάπτυξης φαινομένου θόλου, η μέθοδος Protodyakonov ισχύει για πάχος υπερκειμένων πάνω από τη στέψη της σήραγγας (D) της τάξεως του $H_p \div 2H_p$. Για μεγαλύτερα πάχη υπερκειμένων η μέθοδος πιθανώς δίνει τιμές μικρότερες από τις πραγματικές.

Η κατακόρυφη πίεση γαιών στη στέψη της σήραγγας έχει παραβολική κατανομή με μέγιστη τιμή (στο μέσον της στέψης):

$$p_{v,\max} = \gamma H_p$$

και τιμές εκατέρωθεν του μέσου (σε απόσταση x) ίσες με:

$$p_v = p_{v,\max} \left[1 - \left(\frac{x}{B/2} \right)^2 \right]$$

Η μέση τιμή της κατακόρυφης πίεσης γαιών που ασκείται στη στέψη της σήραγγας είναι:

$$\bar{p}_v = \gamma H_p \left[1 - \frac{1}{3 \left(\frac{B}{b} \right)^2} \right]$$

Η οριζόντια πίεση στο τοίχωμα της σήραγγας μπορεί να υπολογισθεί με παραδοχή αντίστοιχη με την παραδοχή της μεθόδου Terzaghi (παραδοχή ενεργητικής κατάστασης τάσεων).

Για την εκτίμηση των φορτίων στην τελική επένδυση σήραγγων (μακροχρόνια φόρτιση), εφόσον αναμένεται προσαύξηση των φορτίων λόγω επιρροής ερπυστικών φαινομένων, συνιστάται η τροποποίηση των ανωτέρω πιέσεων με ένα συντελεστή που έχει τις εξής τιμές:

Πίεση	Συντελεστής τροποποίησης
p_v	1.50
p_h	0.2 ÷ 1.2

Η μέθοδος Protodyakonov αναπτύχθηκε για σήραγγες σε μικρά σχετικώς βάθη (για τις σήραγγες του Μετρό της Μόσχας) και βραχώμαζες σχετικώς καλής ποιότητας ($RMR > 40$). Η εφαρμογή της μεθόδου σε άλλες περιπτώσεις (ιδιαιτέρως για σήραγγες σε μεγαλύτερα βάθη) δίνει υπερβολικά μικρές τιμές της πίεσης στην επένδυση της σήραγγας.

8.3.4 Αριθμητικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές προσομοιώνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της επένδυσης της σήραγγας και της περιβάλλουσας βραχώμαζας, δηλαδή λαμβάνουν υπόψη την εξάρτηση των φορτίων της επένδυσης της σήραγγας από το βαθμό ενεργοποίησης της αντοχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανάληψη των φορτίων των υπερκειμένων γαιών (μέσω της ανάπτυξης του λεγόμενου "εδαφικού τόξου"). Οι αριθμητικές μέθοδοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- (α) Τις *απλοποιημένες*, στις οποίες η βραχώμαζα που περιβάλλει την επένδυση της σήραγγας λαμβάνεται υπόψη μέσω μονοδιάστατων ελατηρίων τύπου Winkler τα οποία συνδέονται με την επένδυση της σήραγγας και ενεργοποιούνται κατά την παραμόρφωση της επένδυσης.
- (β) Τις *σύνθετες*, στις οποίες η βραχώμαζα που περιβάλλει την επένδυση της σήραγγας λαμβάνεται υπόψη μέσω διδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων με ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

8.3.4.1 Μέθοδος ελατηρίων Winkler

Η επένδυση της σήραγγας προσομοιάζεται με καμπύλη δοκό η οποία εδράζεται επί συνεχώς κατανεμημένων ελατηρίων Winkler κατά την ακτινική (r) και την εφαπτομενική (θ) διεύθυνση με σταθερές:

$$k_r = \frac{E}{(1+\nu)R} \quad , \quad k_\theta = (0.3-0.5)k_r$$

όπου: E = μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας για μακροχρόνια φόρτιση

ν = λόγος Poisson της βραχώμαζας

R = ακτίνα καμπυλότητας της επένδυσης

Σημειώνεται ότι η ύπαρξη του εφαπτομενικού ελατηρίου προϋποθέτει καλή συνάφεια μεταξύ της προσωρινής και της τελικής επένδυσης της σήραγγας. Στην περίπτωση που μεταξύ των δύο επενδύσεων παρεμβάλλεται στεγανωτική μεμβράνη, δεν εξασφαλίζεται καλή συνάφεια και προτείνεται να αγνοηθεί το εφαπτομενικό ελατήριο.

Η επένδυση της σήραγγας φορτίζεται με κάποια από τις εμπειρικές φορτίσεις (τυπικά με τα φορτία της εμπειρικής μεθόδου Terzaghi ή RMR), οπότε με την παραμόρφωση της επένδυσης ενεργοποιούνται τα ελατήρια Winkler στις παρειές της σήραγγας και (συνήθως) προσασυζάνουν τις οριζόντιες πιέσεις μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την καμπτική επιπόνηση της επένδυσης.

8.3.4.2 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Κατά τη μέθοδο αυτή, προσομοιώνεται η πλήρης αλληλουχία των φάσεων διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας οπότε λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ της βραχώμαζας και της επένδυσης και προκύπτουν τα "πραγματικά" φορτία που η βραχώμαζα ασκεί στην επένδυση της σήραγγας. Ειδικότερα, το έδαφος που περιβάλλει τη σήραγγα προσομοιάζεται με διδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και η επένδυση της σήραγγας προσομοιάζεται με στοιχεία δοκού. Στη συνέχεια η ανάλυση γίνεται με την παρακολούθηση των διαδοχικών σταδίων εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας τα οποία είναι:

1. Αρχική κατάσταση του εδάφους (δηλαδή πριν τη διάνοιξη της σήραγγας). Υπολογίζονται οι τάσεις λόγω βαρύτητας (γεωστατικές τάσεις).

2. Εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τα εξής βήματα για κάθε μια από τις τμηματικές εκσκαφές-υποστηρίξεις της διατομής της σήραγγας.
- (α) Χαλάρωση του εδάφους στην περιοχή που πρόκειται να γίνει η εκσκαφή. Η χαλάρωση αυτή προσομοιάζει τις παραμορφώσεις του εδάφους εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας, δηλαδή την σύγκλιση του εδάφους στην περιοχή της διατομής που δεν έχει εκσκαφεί ακόμη (λόγω μερικής αποτόνωσης των γεωστατικών τάσεων) και μέχρι την κατασκευή της προσωρινής υποστήριξης της διατομής (αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα). Η προσομοίωση της χαλάρωσης γίνεται με κατάλληλη μείωση των εσωτερικών τάσεων στην περιοχή που πρόκειται να εκσκαφεί. Λόγω της μερικής απομείωσης των τάσεων (deconfinement) προκαλείται σύγκλιση του τοιχώματος της διατομής της σήραγγας (βύθιση της στέψης και ανύψωση του δαπέδου).
 - (β) Τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης της διατομής (αγκυρίων, εκτοξευόμενου σκυροδέματος, χαλύβδινων πλαισίων κλπ). Τα στοιχεία αυτά αρχικώς είναι αφόρτιστα και θα αναλάβουν φορτία στο επόμενο βήμα (βλέπε παρακάτω).
 - (γ) Ολοκλήρωση της εκσκαφής της συγκεκριμένης περιοχής της διατομής της σήραγγας. Το βήμα αυτό προσομοιώνεται με πλήρη αφαίρεση του εδαφικού υλικού στη συγκεκριμένη περιοχή της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό προκαλούνται περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας και ανάληψη φορτίων από την προσωρινή υποστήριξη της διατομής.

Τα ανωτέρω βήματα επαναλαμβάνονται για κάθε φάση εκσκαφής τμήματος της διατομής της σήραγγας. Η τελική κατάσταση αντιστοιχεί στο τέλος της εκσκαφής της σήραγγας, οπότε τα φορτία λόγω της εκσκαφής αναλαμβάνονται από:

- (α) Το έδαφος γύρω από τη σήραγγα μέσω του λεγομένου “φαινομένου θόλου”, δηλαδή τη δημιουργία ενός εδαφικού τόξου στο άνω μέρος της διατομής της σήραγγας το οποίο μεταφέρει μέρος των φορτίων του υπερκείμενου εδάφους στους εκατέρωθεν της σήραγγας πόδες του τόξου.
 - (β) Τα αγκύρια της προσωρινής επένδυσης.
 - (γ) Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τον τυχόν οπλισμό της προσωρινής υποστήριξης.
3. Κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας. Η τελική επένδυση της σήραγγας συνήθως κατασκευάζεται μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας της διατομής και την ολοκλήρωση πρακτικώς των συγκλίσεων του τοιχώματος, δηλαδή όταν τα φορτία των υπερκείμενων γαιών αναλαμβάνονται πλήρως από την προσωρινή υποστήριξη. Κατά συνέπεια, η τελική επένδυση είναι αρχικώς αφόρτιστη. Με την πάροδο του χρόνου, η τελική επένδυση θα αρχίσει βαθμιαία να αναλαμβάνει φορτία ως εξής:
- (α) Λόγω μείωσης των φορτίων που αρχικώς αναλαμβάνονται από τα αγκύρια. Το φορτίο των αγκυρίων μειώνεται και τελικώς μηδενίζεται λόγω της χαλάρωσης του εδάφους γύρω από τα αγκύρια. Ο ρυθμός της χαλάρωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ερπυσμού της βραχώμαζας.
 - (β) Λόγω μερικής απομείωσης της ακαμψίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της προσωρινής υποστήριξης κυρίως μέσω ερπυσμού. Ο βαθμός απομείωσης της ακαμψίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξαρτάται από τα μηχανικά του χαρακτηριστικά και την εντατική κατάσταση στην οποία αρχικώς βρίσκεται (όσον υψηλότερες είναι οι αρχικές τάσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της ακαμψίας του με την πάροδο του χρόνου

και τόσο μεγαλύτερη η μεταφορά φορτίων στην τελική επένδυση). Εκτός τούτου, η ένταση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της προσωρινής υποστήριξης θα πρέπει να απομειωθεί και υπολογιστικά, δεδομένου ότι στην τελική επένδυση το περιθώριο ασφάλειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι στην προσωρινή υποστήριξη (λόγω διαφοράς του επιθυμητού βαθμού ασφαλείας μεταξύ προσωρινών και μόνιμων στοιχείων υποστήριξης). Κατά συνέπεια, θα πρέπει μέρος των φορτίων της προσωρινής υποστήριξης που αναλαμβάνονται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα να μεταφερθούν στην τελική επένδυση.

- (γ) Λόγω χαλάρωσης/ερπυσμού του εδάφους που περιβάλλει τη σήραγγα. Συγκεκριμένα, με την πάροδο του χρόνου, το έδαφος που περιβάλλει τη σήραγγα υφίσταται ερπυστικές παραμορφώσεις με συνέπεια τη βαθμιαία απομείωση του "φαινομένου θόλου", δηλαδή τη μεταφορά μέρους των φορτίων τα οποία αρχικώς αναλαμβάνοντο από τον εδαφικό θόλο (γύρω από τη σήραγγα) στην τελική επένδυση. Το μέγεθος των ερπυστικών παραμορφώσεων εξαρτάται από το είδος του εδάφους που περιβάλλει τη σήραγγα. Σε βραχώμαζες καλής ποιότητας, ο ερπυσμός μπορεί να είναι αμελητέος, ενώ σε βραχώμαζες με πτωχά χαρακτηριστικά, η συνεισφορά του ερπυσμού στην φόρτιση της τελικής επένδυσης της σήραγγας μπορεί να είναι σημαντική.
- (δ) Λόγω υδατικών πιέσεων που πιθανόν να ασκηθούν στην τελική επένδυση της σήραγγας.

8.4 Συμπεριφορά της τελικής επένδυσης υπό σεισμικές δράσεις

8.4.1 Γενικά

Τα υπόγεια έργα γενικώς θεωρούνται ασφαλέστερα απ' ό,τι οι επιφανειακές κατασκευές έναντι σεισμικών δράσεων με εξαίρεση σήραγγες που διασχίζουν ενεργά ρήγματα και τις περιπτώσεις όπου το περιβάλλον έδαφος χάνει σημαντικό μέρος της αντοχής του κατά τη σεισμική διέγερση (π.χ. λόγω ρευστοποίησης).

Γενικώς, οι σεισμικές δράσεις στα υπόγεια έργα εκδηλώνονται ως εξής:

1. Δράσεις σε θέσεις ενεργών τεκτονικών ρηγμάτων. Η σεισμική κίνηση εντοπίζεται ως διατμητική παραμόρφωση σε μία μικρού εύρους εδαφική ζώνη (πάχους από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα). Γενικώς, τα υπόγεια έργα δεν είναι δυνατόν να περιορίσουν την ανάπτυξη των ανωτέρω διατμητικών παραμορφώσεων. Ετσι, ο συνήθης τρόπος αντιμετώπισής τους είναι είτε με παράκαμψη των ενεργών ρηγμάτων μέσω αλλαγής της χάραξης (πράγμα που δεν είναι πάντοτε εύκολο σε σήραγγες μεγάλου μήκους) είτε με κατασκευή κατάλληλων αρμών που να επιτρέπουν τις αναμενόμενες σεισμικές μετακινήσεις χωρίς σημαντικές βλάβες στην επένδυση της σήραγγας.
2. Επιβαλλόμενες παραμορφώσεις στην επένδυση λόγω της διάδοσης σεισμικών κυμάτων στο περιβάλλον έδαφος. Διατμητικά σεισμικά κύματα με δόνηση εκτός του επιπέδου της διατομής της σήραγγας δημιουργούν αξονική και καμπτική ένταση στην επένδυση της σήραγγας θεωρούμενης ως δοκού κατά τον διαμήκη άξονά της. Αντίθετα, διατμητικά κύματα με δόνηση στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας προκαλούν παραμόρφωση της διατομής και καμπτική επιπόνηση της επένδυσης στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας.

Το μέγεθος της επιπόνησης της επένδυσης σηράγγων λόγω της διάδοσης σεισμικών κυμάτων εξαρτάται από τη σχέση της διαμέτρου της σήραγγας προς το μήκος του σεισμικού κύματος. Στις συνήθεις περιπτώσεις, το τυπικό άνοιγμα της σήραγγας (10-15 μέτρα) είναι πολύ μικρότερο από τα χαρακτηριστικά μήκη κύματος των σεισμικών κινήσεων (100-500 μέτρα) και συνεπώς οι διαφορικές μετακινήσεις των εκατέρωθεν παρειών της σήραγγας είναι μικρές οπότε και η αναπτυσσόμενη πρόσθετη ένταση της επένδυσης είναι επίσης μικρή. Εξαιρέση στον ανωτέρω κανόνα αποτελούν:

1. Σήραγγες σε πολύ μαλακά εδάφη όπου τα χαρακτηριστικά μήκη των σεισμικών κυμάτων είναι αρκετά μικρότερα (30-100 μέτρα) και συνεπώς συγκρίσιμα με το άνοιγμα της σήραγγας.
2. Σήραγγες που διασχίζουν διεπιφάνειες μεταξύ εδαφικών σχηματισμών με σημαντική διαφορά μέτρων ελαστικότητας. Στις περιοχές αυτές παρατηρείται μεγέθυνση και εντοπισμός των σεισμικών παραμορφώσεων (μέσω ανακλάσεων των σεισμικών κυμάτων) με αποτέλεσμα την αυξημένη επιπόνηση της επένδυσης της σήραγγας.
3. Σήραγγες που διασχίζουν σεισμικώς ενεργά¹ ρήγματα υπό αρκετά οξεία γωνία, οπότε το μήκος της σήραγγας στο οποίο υφίσταται αλληλεπίδραση με το ρήγμα είναι μεγάλο και επιπλέον δεν είναι πολύ αποδοτική η κατασκευή εγκάρσιων αρμών στην επένδυση της σήραγγας. Στις περιπτώσεις αυτές, εάν δεν είναι δυνατόν να αποφευχθεί η διασταύρωση της σήραγγας με το ρήγμα (μέσω αλλαγής της χάραξης) μπορεί να προβλεφθεί κάποια διεύρυνση της διατομής της σήραγγας ώστε εάν συμβούν μόνιμες παραμορφώσεις λόγω ενεργοποίησης του ρήγματος και βλάβη της επένδυσης, η λειτουργία της σήραγγας να μπορεί να αποκατασταθεί μετά την επισκευή της επένδυσης.

8.4.2 Αρχές σχεδιασμού έναντι σεισμικών δράσεων

Κατά το σχεδιασμό υπογείων έργων έναντι σεισμικών δράσεων, συνήθως θεωρείται ότι το έδαφος που περιβάλλει το έργο είναι πολύ "άκαμπτο" σε σχέση με την επένδυση της σήραγγας και συνεπώς οι παραμορφώσεις του λόγω της διέλευσης σεισμικών κυμάτων επιβάλλονται αυτούσιες στο έργο χωρίς αξιόλογη τροποποίηση μέσω αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον έδαφος. Εξαιρέση στον κανόνα αυτόν αποτελούν σήραγγες σε πολύ μαλακούς σχηματισμούς καθώς και περιπτώσεις όπου το έδαφος χάνει σημαντικό ποσοστό της αντοχής του (π.χ. λόγω ρευστοποίησης). Με εξαίρεση τις ανωτέρω περιπτώσεις οι οποίες είναι αρκετά ασυνήθεις, κατά το σεισμικό σχεδιασμό των υπογείων έργων η αλληλεπίδραση μεταξύ σήραγγας και περιβάλλοντος εδάφους μπορεί να αμεληθεί και το έργο να σχεδιασθεί ώστε να δύναται να αναλάβει το σύνολο της σεισμικής παραμόρφωσης του περιβάλλοντος εδάφους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παραμόρφωση της επένδυσης της σήραγγας κατά τη διέλευση σεισμικών κυμάτων είναι δυο τύπων:

1. Αξονική και καμπτική παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα της σήραγγας (δηλαδή κάμψη με διάνυσμα της καμπτικής ροπής κάθετο ως προς τον άξονα της σήραγγας) λόγω της διάδοσης κυρίως διατμητικών (S) κυμάτων με δόνηση εκτός του επιπέδου της διατομής της σήραγγας.
2. Καμπτική παραμόρφωση εντός της διατομής της σήραγγας (δηλαδή κάμψη με διάνυσμα της καμπτικής ροπής παράλληλο προς τον άξονα της σήραγγας) λόγω της διάδοσης κυρίως διατμητικών (S) κυμάτων με δόνηση εντός του επιπέδου της διατομής της σήραγγας.

¹ ή συμπαθητικώς ενεργοποίησιμα

Ανεξαρτήτως του τύπου της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, ο σχεδιασμός της επένδυσης της σήραγγας θα πρέπει να γίνει μέσω της πρόβλεψης επαρκούς πλαστιμότητας ώστε να απορροφηθούν οι επιβαλλόμενες σεισμικές παραμορφώσεις (κινηματική φόρτιση) χωρίς απώλεια της ικανότητας της επένδυσης να φέρει τα στατικά επιβαλλόμενα φορτία εκ του περιβάλλοντος εδάφους, δεδομένου ότι είναι πρακτικώς αδύνατος ο σχεδιασμός της επένδυσης ώστε να φέρει τα αδρανειακά σεισμικά φορτία του περιβάλλοντος εδάφους (αδρανειακή φόρτιση).

Η εμπειρία έχει δείξει ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαστασιολόγηση των υπογείων έργων με βάση τις στατικές φορτίσεις και τις κατασκευαστικές απαιτήσεις (π.χ. διαμόρφωση εγκαρσίων αρμών ανά 10-15 μέτρα μήκους) είναι επαρκής για την ανάληψη των σεισμικών δράσεων. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός των υπογείων έργων συνήθως γίνεται έναντι των στατικών δράσεων και στη συνέχεια ελέγχεται έναντι των σεισμικών δράσεων.

8.4.3 Σχεδιασμός έναντι σεισμικών δράσεων

Στο εδάφιο αυτό περιγράφεται μια μέθοδος σχεδιασμού υπογείων έργων έναντι σεισμικών δράσεων που αναπτύχθηκε για το Μετρό του Σαν Φραντσίσκο (Καλιφόρνια) και περιγράφεται από τον T.R. Kuesel: *"Earthquake Design Criteria for Subways"*, *Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 95, No ST6, June 1969, pages 1213-1231.*

Ο σχεδιασμός γίνεται σε δυο στάδια:

1. Σχεδιασμός έναντι παραμορφώσεων κατά τον άξονα της σήραγγας.
2. Σχεδιασμός έναντι παραμορφώσεων στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας.

Στα επόμενα συνοψίζονται τα παραπάνω δυο στάδια του σχεδιασμού έναντι σεισμικών δράσεων.

8.4.3.1 Καταπόνηση κατά τον άξονα της σήραγγας

Η καταπόνηση αυτή οφείλεται σε παραμόρφωση του άξονα της σήραγγας (και συνεπώς ανάπτυξη καμπτικής επιπόνησης στην επένδυση θεωρούμενης ως δοκού με άξονα που ταυτίζεται με τον άξονα της σήραγγας) κυρίως λόγω της διάδοσης διατμητικών (S) κυμάτων με δόνηση εκτός του επιπέδου της διατομής της σήραγγας.

Εάν η διεύθυνση διάδοσης του διατμητικού σεισμικού κύματος σχηματίζει γωνία (ψ) ως προς τον άξονα της σήραγγας τότε οι μετακινήσεις του εδάφους είναι (βλέπε Σχήμα 3):

(α) Μετακίνηση κατά τον άξονα της σήραγγας:

$$u_x = A \sin \psi \sin \left(2\pi \frac{x}{\lambda} \cos \psi - \omega t \right)$$

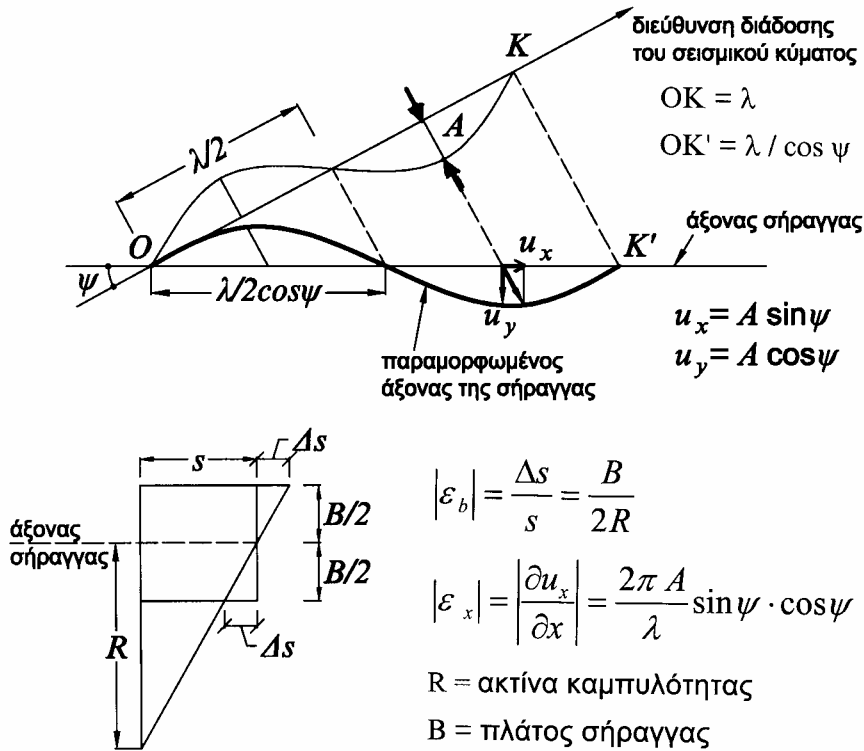
(β) Μετακίνηση καθέτως προς τον άξονα της σήραγγας:

$$u_y = A \cos \psi \sin \left(2\pi \frac{x}{\lambda} \cos \psi - \omega t \right)$$

όπου:

A = πλάτος της σεισμικής κίνησης κάθετα προς τον άξονα διάδοσης του διατμητικού κύματος

λ = μήκος του διατμητικού κύματος κατά τη διεύθυνση της διάδοσης



Σχήμα 3: Σεισμική καταπόνηση της επένδυσης κατά τον άξονα της σήραγγας

- $A \sin \psi$ = πλάτος της σεισμικής κίνησης κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας
- $A \cos \psi$ = πλάτος της σεισμικής κίνησης καθέτως προς τον άξονα της σήραγγας
- $\lambda / \cos \psi$ = μήκος του διαμηθικού κύματος κατά τον άξονα της σήραγγας
- $\omega = 2\pi f$ = η κυκλική συχνότητα του κύματος (f = συχνότητα)
- x = η διεύθυνση του άξονα της σήραγγας
- y = η διεύθυνση καθέτως προς τον άξονα της σήραγγας

Η αξονική παραμόρφωση του εδάφους (και συνεπώς της επένδυσης) λόγω της σεισμικής μετακίνησης κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας είναι:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{2\pi A}{\lambda} \sin \psi \cos \psi \cos \left(2\pi \frac{x}{\lambda} \cos \psi - \omega t \right)$$

με πλάτος:

$$|\varepsilon_x| = \frac{2\pi A}{\lambda} \sin \psi \cos \psi$$

Λόγω της σεισμικής μετακίνησης καθέτως προς τον άξονα της σήραγγας, ο άξονας της σήραγγας παραμορφώνεται (ημιτονοειδώς) με καμπυλότητα:

$$\frac{1}{R} = \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = -\frac{4\pi^2 \cos^2 \psi}{\lambda^2} u_y$$

Λόγω της καμπύλωσης του άξονα, η επένδυση της σήραγγας κάμπτεται (ως επιμήκης δοκός με άξονα που ταυτίζεται με τον άξονα της σήραγγας) και συνεπώς στις εκατέρωθεν παρειές της σήραγγας πλάτους (B) αναπτύσσονται οι εξής θλιπτικές και εφελκυστικές παραμορφώσεις:

$$\varepsilon_b = \pm \frac{B}{2} \left(\frac{1}{R} \right)$$

με πλάτος:

$$|\varepsilon_b| = \frac{B}{2} \left| \frac{1}{R} \right| = \frac{B}{2} \left(\frac{4\pi^2 \cos^2 \psi}{\lambda^2} \right) (A \cos \psi) = \frac{2\pi^2 AB \cos^3 \psi}{\lambda^2}$$

Συνεπώς, η μέγιστη αξονική παραμόρφωση της επένδυσης της σήραγγας είναι:

$$\varepsilon = |\varepsilon_x| + |\varepsilon_b| = \left(\frac{2\pi A}{\lambda} \right) \left(\sin \psi + \frac{\pi B}{\lambda} \cos^2 \psi \right) \cos \psi$$

Στην τελευταία σχέση φαίνεται ότι μέγιστες παραμορφώσεις προκαλούνται από μικρά μήκη κύματος. Θεωρώντας ότι το ελάχιστο μήκος κύματος που επηρεάζει τη συμπεριφορά της σήραγγας² είναι περίπου ίσο με έξι (6) φορές το πλάτος της (B), δηλαδή: $\lambda / \cos \psi = 6B$, προκύπτει:

$$\varepsilon = \left(\frac{2\pi A}{\lambda} \right) \left(\sin \psi + \frac{\pi}{6} \cos \psi \right) \cos \psi$$

Η ανωτέρω συνάρτηση γίνεται μέγιστη για τιμή της γωνίας $\psi = 32^\circ$, οπότε η μέγιστη τιμή της αξονικής παραμόρφωσης της επένδυσης της σήραγγας είναι:

$$\varepsilon_{\max} = 5.2 \frac{A}{\lambda}$$

και συμβαίνει για σεισμικό κύμα με διεύθυνση διάδοσης που σχηματίζει γωνία $\psi = 32^\circ$ ως προς τον άξονα της σήραγγας.

Το πλάτος (A) της σεισμικής κίνησης μπορεί να εκτιμηθεί μέσω των καμπύλων που προτάθηκαν από τον Kuesel (1969) και φαίνονται στο Σχήμα 4. Οι καμπύλες αυτές συσχετίζουν το πλάτος (A) της σεισμικής κίνησης με:

1. Το μήκος (λ) του σεισμικού κύματος
2. Τη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση εκφρασμένη ως προς την επιτάχυνση της βαρύτητας, δηλαδή:

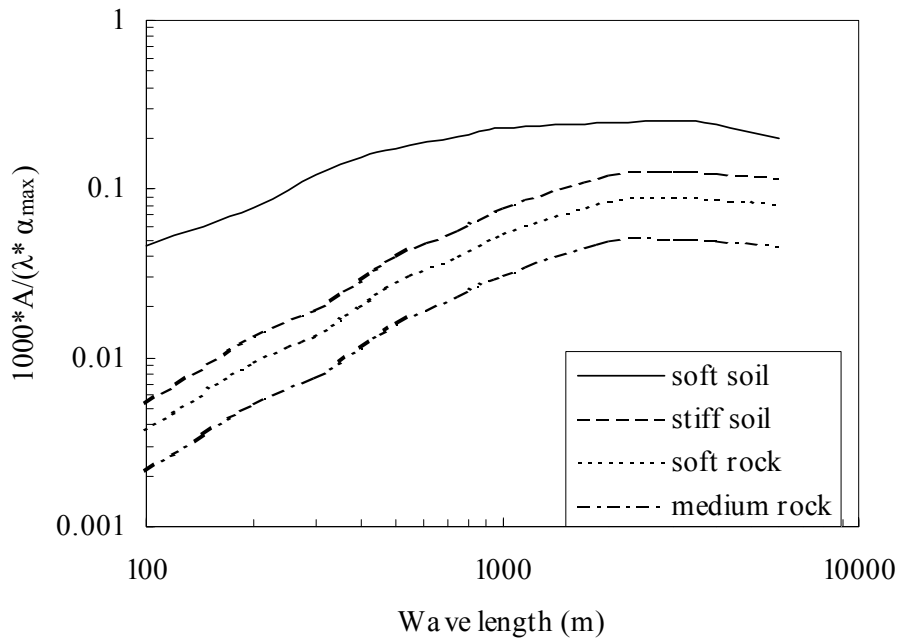
$$\alpha_{\max} = a_{\max} / g$$

Οι καμπύλες του Σχήματος 4 αναφέρονται σε διάφορες κατηγορίες εδαφών (μαλακά εδάφη, σφιχρά εδάφη, μαλακούς βράχους και βράχους μέσου μέτρου ελαστικότητας). Σημειώνεται ότι οι καμπύλες που προτάθηκαν από τον Kuesel (1969) αναφέρονται μόνον σε μαλακά και σφιχρά εδάφη. Οι υπόλοιπες δυο καμπύλες αποτελούν επέκταση των καμπύλων του Kuesel με αναλογική μείωση του πλάτους της σεισμικής κίνησης.

Η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση μπορεί να αναφέρεται είτε στην οριζόντια είτε στην κατακόρυφη συνιστώσα. Η οριζόντια συνιστώσα συνήθως προκύπτει από ειδικές μελέτες ή καθορίζεται από τους ισχύοντες κανονισμούς αναλόγως της σεισμικότητας της θέσης του έργου και του τύπου των εδαφικών σχηματισμών. Η κατακόρυφη συνιστώσα συχνά θεωρείται ίση με τα 2/3 της τιμής της οριζόντιας συνιστώσας.

Από το Σχήμα 4 προκύπτει ότι η μέγιστη αξονική παραμόρφωση της επένδυσης της σήραγγας ($\varepsilon_{\max} = 5.2 A/\lambda$) αυξάνει με την αύξηση του μήκους του σεισμικού κύματος. Κατά συνέπεια, η μέγιστη παραμόρφωση υπολογίζεται για το μέγιστο αναμενόμενο μήκος του σεισμικού κύματος. Το μήκος του σεισμικού κύματος μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση: $\lambda = V/f$, όπου (V) είναι η ταχύτητα διάδοσης και (f) είναι η συχνότητα

² για μικρότερα μήκη κύματος η σήραγγα συμπεριφέρεται πρακτικώς ως στερεό σώμα



Σχήμα 4: Εκτίμηση του πλάτους (A) της σεισμικής δόνησης συναρτήσει του μήκους κύματος (λ) και της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης (α_{max}) (Kuesel, 1969).

του κύματος. Στην περίπτωση σεισμικών κραδασμών³ μπορεί να επιλεγεί η ελάχιστη συχνότητα η οποία δίνει αξιόλογη συμμετοχή στο φάσμα του σεισμικού κραδασμού.

Μετά την εκτίμηση της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης της σήραγγας, το ελάχιστο απαιτούμενο εύρος των αρμών μεταξύ των στοιχείων της τελικής επένδυσης είναι:

$\delta = \varepsilon_{max} \cdot L$, όπου (L) είναι το μήκος των στοιχείων της τελικής επένδυσης.

Κατ' εξαίρεση, οι αρμοί μπορούν να αποφευχθούν, εάν η μέγιστη αξονική παραμόρφωση (ε_{max}) είναι αρκετά μικρή ώστε να μπορεί να αναληφθεί από το υλικό της επένδυσης της σήραγγας με ελαστική παραμόρφωση (π.χ. $\varepsilon_{max} < 10^{-4}$).

Παράδειγμα εφαρμογής:

- Ταχύτητα διατμητικού κύματος μετρηθείσα σε δοκιμή cross-hole: $V_o = 600$ m/sec
- Σεισμικός κραδασμός με ελάχιστη συχνότητα (που έχει αξιόλογη συμμετοχή στο φάσμα): $f = 0.5$ Hz, και μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.24$ g.
- Απομείωση της ταχύτητας του σεισμικού κύματος περίπου στο 50-75% του (V_o) λόγω διαφοράς του μεγέθους της προκαλούμενης διατμητικής παραμόρφωσης:

$$V = 0.67 \cdot 600 = 400 \text{ m/sec}$$

- Μέγιστη τιμή του μήκους κύματος:

$$\lambda = V / f = 400 / 0.5 = 800 \text{ m}$$

- Από τις καμπύλες Kuesel για σφιχτό έδαφος προκύπτει:

$$\frac{1000A}{\lambda \alpha_{max}} = 0.09 \Rightarrow \frac{A}{\lambda} = 0.09 \frac{\alpha_{max}}{1000} = \frac{0.09 \times 0.24}{1000} = 2.2 \times 10^{-5}$$

δηλαδή το πλάτος του σεισμικού κύματος είναι:

$$A = 2.2 \times 10^{-5} \times 80000 = 1.76 \text{ cm}$$

³ που περιέχουν ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος και συνεπώς συχνοτήτων

- Άρα: $\varepsilon_{max} = 5.2 \times 2.2 \times 10^{-5} = 1.1 \times 10^{-4}$
- Σε περίπτωση αρμών ανά 12 m, το ελάχιστο εύρος του αρμού είναι:

$$\delta = \varepsilon_{max} \cdot L = 1.1 \times 10^{-4} \times 12000 = 1.4 \text{ mm}$$

8.4.3.2 Καταπόνηση στο επίπεδο της διατομής

Η καταπόνηση της σήραγγας στο επίπεδο της διατομής οφείλεται στην καθ' ύψος ενίσχυση των κατακορύφως διαδιδόμενων διατμητικών κυμάτων (SV) και συνεπώς στην ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων στο έδαφος που περιβάλλει τη σήραγγα. Κατά τον Kuesel (1969) η μέση διατμητική παραμόρφωση (γ) του εδάφους είναι:

$$\gamma = 2.30 \left(\frac{H}{V^2} \right) \alpha_{max}$$

όπου:

- H (σε μέτρα) είναι το ύψος των εδαφικών υλικών που υπέρκεινται του βραχώδους υποβάθρου και προκαλούν ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού (η σήραγγα θεωρείται ότι βρίσκεται εντός των εδαφικών υλικών).
- V (σε m/sec) είναι η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στους εδαφικούς σχηματισμούς.

Η μέση οριζόντια μετακίνηση (u) σε βάθος (d) από την επιφάνεια του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$u = \gamma (H - d)$$

οπότε η τελική επένδυση της σήραγγας θα πρέπει να σχεδιασθεί ώστε να αναλάβει τις διαφορικές μετακινήσεις που προκύπτουν από την ανωτέρω σχέση.

