

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΛΟΓΩ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ

Η εκτίμηση του μεγέθους της υποχώρησης της επιφάνειας του εδάφους αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της κατασκευής υπογείων έργων σε αστικές περιοχές λόγω των πιθανών βλαβών στις υπερκείμενες κατασκευές και στα δίκτυα κοινής ωφέλειας.

Οι υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους λόγω της κατασκευής υπογείων εκσκαφών εξαρτώνται από:

1. Το είδος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους
2. Το βάθος του υπογείου έργου από την επιφάνεια του εδάφους
3. Το μέγεθος της εκσκαφής
4. Τον τρόπο εκσκαφής, δηλαδή τον αριθμό και τις διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής, τη χρήση TBM ή NATM κλπ.
5. Το είδος, την πυκνότητα και τον τρόπο εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης (π.χ. την απόσταση κατασκευής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής)
6. Τον τρόπο υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, π.χ. με δοκούς προπορείας (forepoling), με αγκύρια βράχου κατά τον άξονα της σήραγγας κλπ.
7. Τη λήψη άλλων μέτρων βελτίωσης του εδάφους, όπως την κατασκευή πιλοτικής σήραγγας, τσιμεντενέσεων κλπ.

Από τους ανωτέρω παράγοντες, οι πρώτοι τρεις μπορούν να αναλυθούν ποσοτικά μέσω εμπειρικών ή ημι-αναλυτικών σχέσεων. Οι υπόλοιποι τέσσερις παράγοντες εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη περίπτωση κατασκευής και συνεπώς δεν μπορούν να εκτιμηθούν εκ των προτέρων. Πάντως, με τη λήψη κατάλληλων μέτρων βελτίωσης του εδάφους και την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων κατασκευής είναι δυνατόν οι υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους να περιορισθούν σημαντικά, ακόμη και σε πρακτικώς μηδενικές τιμές.

Στα επόμενα παρουσιάζονται ορισμένες εμπειρικές σχέσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους σε συνθήκες συνθήκες κατασκευής σηράγγων.

Η κατανομή της υποχώρησης (s) της επιφάνειας του εδάφους κατά τη διατομή της σήραγγας¹ μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας καμπύλης τύπου Gauss (settlement trough), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1:

$$s = s_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

όπου:

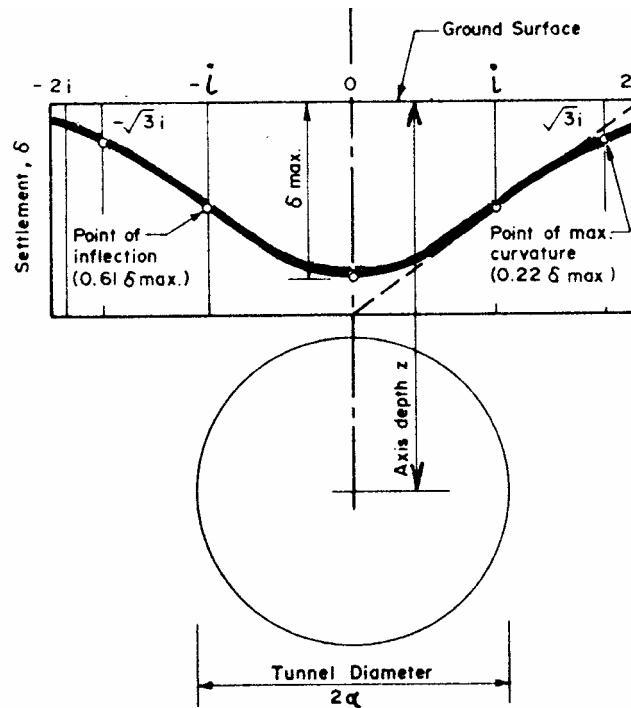
x = η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας

s_{\max} = η μέγιστη υποχώρηση που συμβαίνει στον άξονα της σήραγγας ($x = 0$)

i = η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας όπου η καμπύλη της

υποχώρησης παρουσιάζει τη μέγιστη κλίση $\left(\frac{d^2s}{dx^2} = 0\right)$.

¹ δηλαδή κάθετα στον άξονα της σήραγγας



Σχήμα 1: Καμπύλη υποχώρησης της επιφάνειας του εδάφους

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι η κλίση της καμπύλης υποχώρησης σε κάποια θέση (x) είναι:

$$\frac{ds}{dx} = \frac{x s}{i^2} \quad (2)$$

Η μέγιστη κλίση της καμπύλης συμβαίνει για $x = i$ και είναι:

$$\left(\frac{ds}{dx}\right)_{\max} = 0.61 \frac{s_{\max}}{i} \quad \text{για } x = i \quad (3)$$

Το ολικό εύρος της καμπύλης υποχώρησης είναι περίπου $6i$, αφού $s/s_{\max} = 0.01$ για $x = \pm 3i$.

Το εμβαδόν (δηλαδή ο όγκος ανά μονάδα μήκους της σήραγγας) της καμπύλης υποχώρησης είναι:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s dx = \sqrt{2\pi} i s_{\max} \quad (4)$$

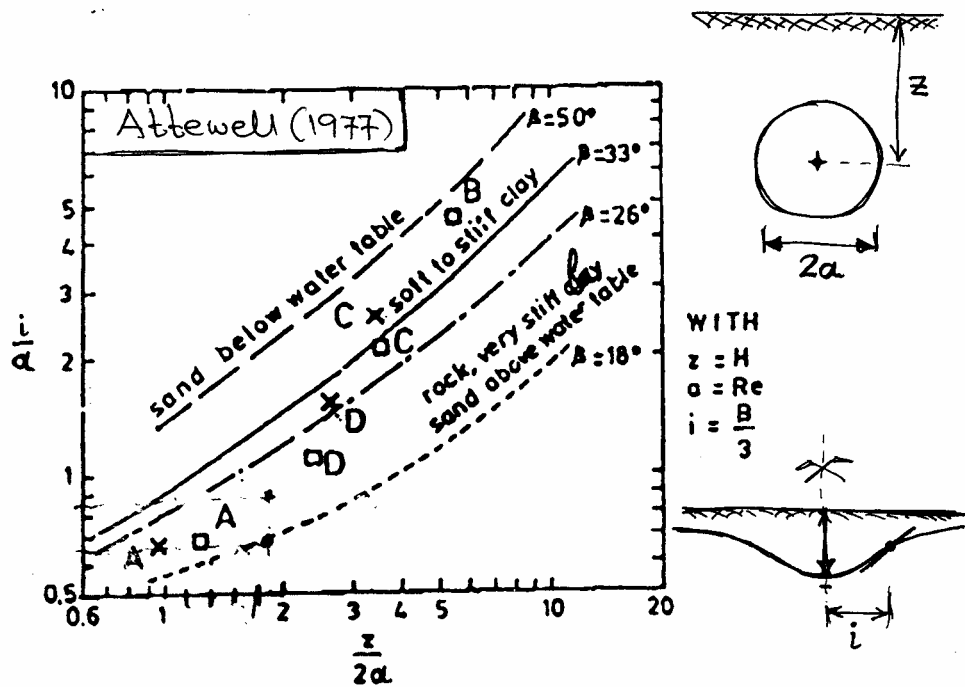
Τέλος, ορίζεται ο συντελεστής εδαφικής απώλειας (ground loss factor) ως ο λόγος του (V_s) προς το εμβαδόν της διατομής της σήραγγας (V_o). Για κυκλική σήραγγα ακτίνας (α) προκύπτει:

$$\left(\frac{V_s}{V_o}\right) = 0.80 \left(\frac{i}{\alpha}\right) \left(\frac{s_{\max}}{\alpha}\right) \quad (5)$$

Το εύρος της καμπύλης της υποχώρησης καθορίζεται από το μέγεθος (i) και εξαρτάται (εκτός από το είδος του εδάφους) από το βάθος (z) του άξονα της σήραγγας κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Από τις εργασίες των Peck et al (1969) και του Attewell (1977) μπορούν να διατυπωθούν οι εξής εμπειρικές σχέσεις για κυκλική σήραγγα ακτίνας (α) (βλέπε Σχήμα 2):

(α) Σε μαλακές έως στιφρές αργίλους:

$$\left(\frac{i}{\alpha}\right) = \left(\frac{z}{2\alpha}\right)^{0.8} \quad (6a)$$



Σχήμα 2: Καμπύλες Attewell (1977)

(β) Σε σκληρές αργίλους, μαλακούς βράχους και μη-συνεκτικά εδάφη (άμμους) πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα:

$$\left(\frac{i}{\alpha}\right) = 0.6 \left(\frac{z}{2a}\right)^{0.5} \quad (6\beta)$$

Ο συντελεστής εδαφικής απώλειας (V_s / V_o) εξαρτάται κυρίως από τον συντελεστή υπερφόρτισης (overload factor):

$$N_s = \frac{\sigma_v - p_\alpha}{(\sigma_c/2)} \quad (7)$$

όπου: σ_v = κατακόρυφη αρχική γεωστατική τάση στον άξονα της σήραγγας

p_α = η πίεση που ασκείται στο μέτωπο της εκσκαφής π.χ. στην περίπτωση εκσκαφής με TBM

σ_c = η αντοχή της βραχώμαζας/εδάφους σε μοναξονική θλίψη. Στην περίπτωση αστοχίας κατά Mohr-Coulomb:

$$\sigma_c = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (8)$$

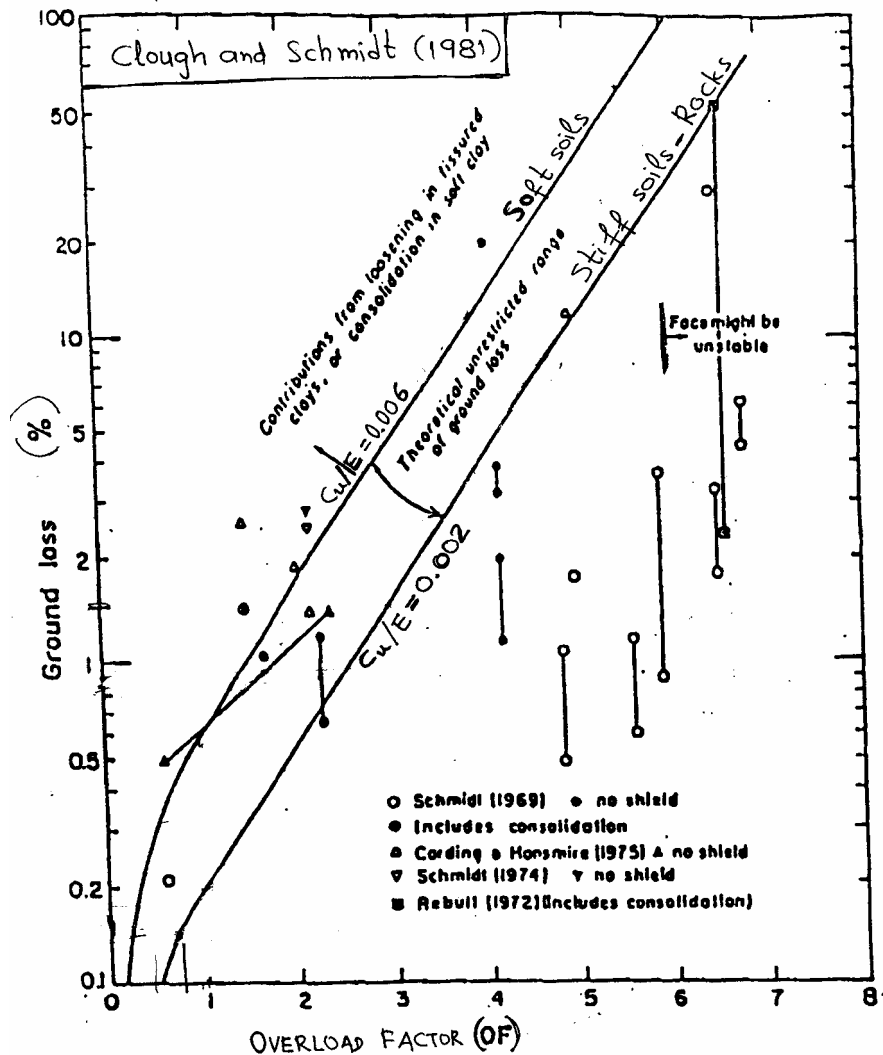
Από την εργασία των Clough and Schmidt (1981) μπορεί να διατυπωθούν οι εξής εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση του συντελεστή εδαφικής απώλειας (βλέπε Σχήμα 3):

(α) Για προσεκτική κατασκευή του έργου:

$$\left(\frac{V_s}{V_o}\right) = 0.002 \exp(N_s - 1) \quad (9\alpha)$$

(β) Για συνήθη επιμέλεια κατασκευής του έργου:

$$\left(\frac{V_s}{V_o}\right) = 0.004 \exp(N_s - 1) \quad (9\beta)$$



Σχήμα 3: Εκτίμηση του συντελεστή εδαφικής απώλειας

Σημειώνεται ότι για τιμές του $N_s < 1$, η βραχώμαζα γύρω από τη σήραγγα παραμένει στην ελαστική περιοχή ενώ για τιμές του $N_s > 6$ συνήθως παρουσιάζονται προβλήματα λόγω αστάθειας (κατάρρευσης) του μετώπου εκσκαφής.

Παράδειγμα εφαρμογής:

Διάνοξη σήραγγας ακτίνας $\alpha = 5\text{m}$, σε βάθος $z = 20\text{m}$, σε μαλακό βράχο με ειδικό βάρος $\gamma = 24\text{ kN/m}^3$, γωνία τριβής $\varphi = 30^\circ$ και συνοχή $c = 200\text{ kPa}$.

Από τη σχέση (8): $\sigma_c = 693\text{ kPa}$,

$\sigma_v = \gamma z = 24 \times 20 = 480\text{ kPa}$

Από τη σχέση (7): $N_s = 1.39$

Από τη σχέση (9α): $V_s/V_o = 0.0029$

Από τη σχέση (6β): $i/\alpha = 0.8485$

Από τη σχέση (5): $s_{max}/\alpha = 0.0043$

δηλαδή $s_{max} = 2.14\text{ cm}$ και $i = 4.24\text{ m}$. Η μέγιστη κλίση της καμπύλης της υποχώρησης συμβαίνει σε απόσταση $i = 4.24\text{ m}$ από τον άξονα και ισούται με $(ds/dx)_{max} = 0.0031 = 1/325$.