



ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Καθιζήσεις

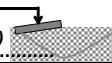
Επιφανειακών Θεμελιώσεων

Διδάσκων: Κίρτας Εμμανουήλ

Σέρρες, Σεπτέμβριος 2010

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Ένα σημαντικό θέμα που εμπλέκεται στην μελέτη και διαστασιολόγηση των θεμελιώσεων αφορά τις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις στο έδαφος κατά τη διάρκεια λειτουργίας του τεχνικού έργου
- Οι αναπτυσσόμενες εδαφικές καθιζήσεις αποτελούν συνάρτηση τόσο της επιβαλλόμενης φόρτισης όσο και των χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης
- Η γενικότερη διαδικασία υπολογισμού των καθιζήσεων αφορά τον προσδιορισμό των τάσεων στο έδαφος λόγω της υπερκείμενης φόρτισης, και στη συνέχεια (βάσει και των εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών) χρήση της κατάλληλης μεθοδολογίας προσδιορισμού των τιμών της καθίζησης
- Με βάση τα παραπάνω ο μηχανισμός ανάπτυξης των καθιζήσεων και η τιμή τους είναι διαφορετικά στα αμμώδη σε σχέση με τα συνεκτικά εδάφη



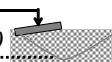
Καθιζήσεις στο έδαφος

• Καθιζήσεις σε αμμώδη εδάφη (Αναγνωστόπουλος κ.α. 1994) :

- Τα αμμώδη εδάφη παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα
- Η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων γίνεται αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης
- Το φορτίο παραλαμβάνεται πρακτικά άμεσα από τον εδαφικό σκελετό
- Συνεπώς οι καθιζήσεις στα αμμώδη εδάφη είναι άμεσες και ελαστικές

• Καθιζήσεις σε συνεκτικά εδάφη (Αναγνωστόπουλος κ.α. 1994) :

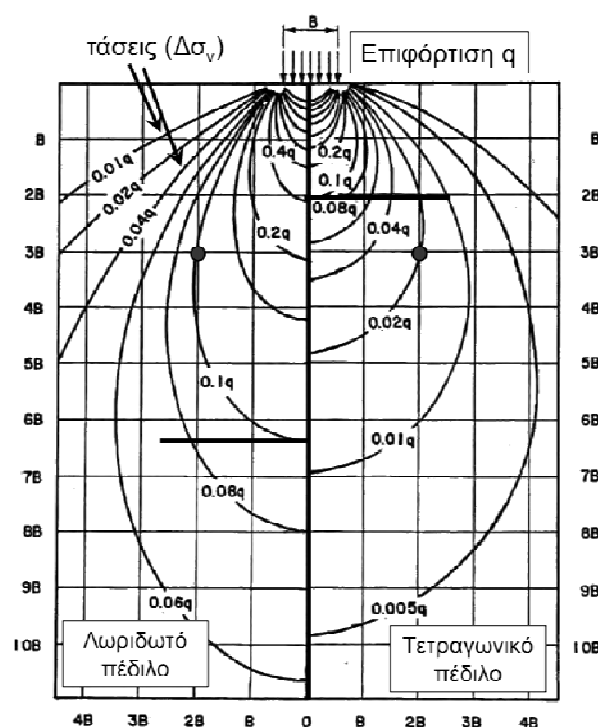
- Τα συνεκτικά εδάφη παρουσιάζουν πολύ μικρή διαπερατότητα
- Η αναπτυσσόμενη λόγω των φορτίων υπερπίεση του νερού των πόρων αργεί πολύ να εκτονωθεί
- Η διαδικασία ανάληψης του φορτίου από τον εδαφικό σκελετό εξελίσσεται με αργό ρυθμό
- Συνεπώς οι καθιζήσεις στα συνεκτικά (λεπτόκκοκα) εδάφη εξελίσσονται στο χρόνο με αργό ρυθμό



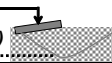
Καθιζήσεις στο έδαφος

• Βάθος ανάπτυξης καθιζήσεων:

- Οι αναπτυσσόμενες τάσεις με το βάθος φαίνονται στο διπλανό σχήμα
- Το βάθος επιρροής σε θεμελιολωρίδα ($L \gg B$) είναι μεγαλύτερο από ότι σε τετράγωνο πέδιλο
- Εκτιμάται βάθος επιρροής φόρτισης:
 Θεμελιολωρίδα $z_{max} \approx 5B \sim 6B$
 Τετράγωνικό $z_{max} \approx 2B$



(Σχήμα: Καββαδάς, 2005)



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Υπολογισμός τάσεων επιφόρτισης :

- Υπενθυμίζεται ότι οι πρόσθετες τάσεις ($\Delta\sigma$) στο έδαφος (εύκαμπτο πέδιλο) λόγω της επιφόρτισης μπορούν να υπολογιστούν με το βάθος με τη σχέση:

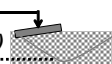
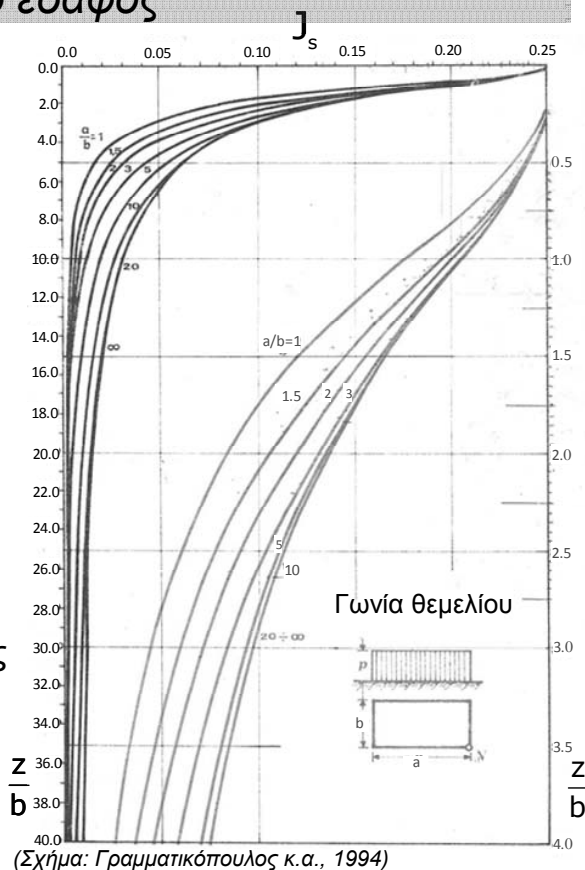
$$\Delta\sigma = J_s \cdot q_o$$

όπου:

J_s τασικός συντελεστής στη γωνία του θεμελίου (σχήμα) συνάρτηση των λόγων z/b και a/b (ή L/B) – το z από τη στάθμη θεμελίωσης και προς τα κάτω

$q_o = q_\theta - \sigma'_{v,Df}$ η τιμή της πρόσθετης τάσης (με επίχωση $q_o = q_\theta$) στη στάθμη θεμελίωσης

Για την εύρεση της $\Delta\sigma$ στο κέντρο του θεμελίου, αυτό χωρίζεται νοητά σε 4 ίσα ορθογώνια και προστίθενται οι επιμέρους $\Delta\sigma$



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Υπολογισμός τάσεων επιφόρτισης :

- Οι πρόσθετες τάσεις ($\Delta\sigma$) στο έδαφος (δύσκαμπτο πέδιλο) λόγω επιφόρτισης ισούνται με αυτές στο χαρακτηριστικό σημείο C εύκαμπτου πεδίου :

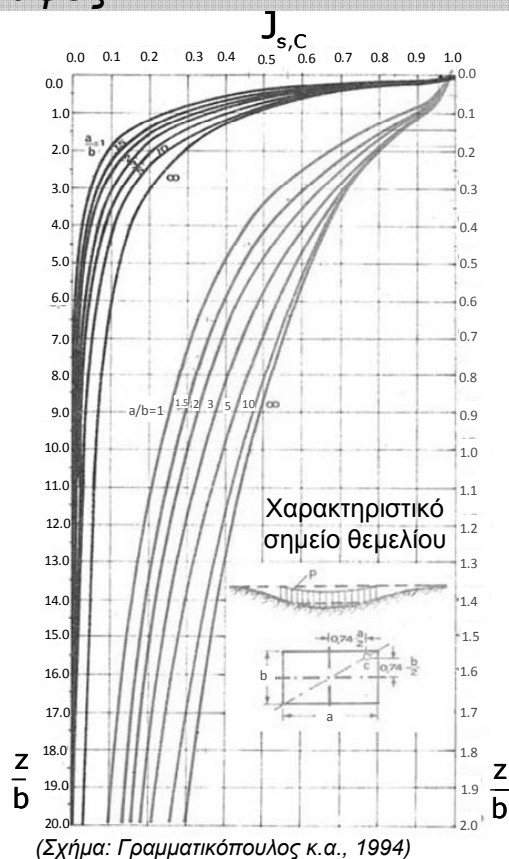
$$\Delta\sigma = J_{s,C} \cdot q_o$$

όπου:

$J_{s,C}$ τασικός συντελεστής στο χαρακτηριστικό σημείο C θεμελίου (σχήμα) συνάρτηση των λόγων z/b και a/b (ή L/B) – το z από τη στάθμη θεμελίωσης και προς τα κάτω

$q_o = q_\theta - \sigma'_{v,Df}$ η τιμή της πρόσθετης τάσης (με επίχωση $q_o = q_\theta$) στη στάθμη θεμελίωσης

Η τιμή αυτή της $\Delta\sigma$ στο χαρακτηριστικό σημείο C χρησιμοποιείται συχνά για τον υπολογισμό της καθίζησης δύσκαμπτου πεδίου (Τσότσος 1991)



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Αναπτυσσόμενες καθιζήσεις (γενική σχέση)

$$\Delta H_{ολ} = \Delta H_i + \Delta H_c + \Delta H_s$$

αμμώδη
αργιλικά

ΔH_i

άμεσες-αρχικές (immediate) ελαστικές καθιζήσεις: αναπτύσσονται άμεσα κατά την επιβολή του φορτίου (δηλαδή από τη φάση της κατασκευής του έργου). Στα κορεσμένα αργιλικά εδάφη συμβαίνουν δίχως μεταβολή του όγκου και αναιρούνται όταν αφαιρεθεί το φορτίο

κορεσμένα
αργιλικά

ΔH_c

καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης (consolidation): αναπτύσσονται λόγω της απομάκρυνσης του νερού των πόρων σε σημαντικό χρόνο μετά την επιβολή του φορτίου, λόγω της μικρής διαπερατότητας του εδάφους

κορεσμένα
αργιλικά

ΔH_s

δευτερεύουσες (secondary) ερπυστικές καθιζήσεις : μικρές σε τιμή καθιζήσεις που αναπτύσσονται μετά την ολοκλήρωση της πρωτογενούς στερεοποίησης

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις σε αμμώδη εδάφη :

- Αναπτύσσονται μόνο άμεσες καθιζήσεις (δηλαδή $\Delta H_c = \Delta H_s = 0$)

- Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες προσδιορισμού καθιζήσεων σε αμμώδη εδάφη (ελαστικές σχέσεις και εμπειρικές μέθοδοι). Επειδή το μέτρο ελαστικότητας E δεν είναι σταθερό με το βάθος δεν ενδείκνυνται πάντα οι σχέσεις ελαστικής μορφής και προτιμώνται οι εμπειρικές σχέσεις.

- Όταν χρησιμοποιούνται σχέσεις ελαστικής μορφής δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή κατάλληλων τιμών E και ν («στραγγισμένες» τιμές).

- Στις επόμενες διαφάνειες παρουσιάζονται ενδεικτικά δυο μέθοδοι με εμπειρικές και με ελαστικές σχέσεις. Λόγω της φύσης και της πολυπλοκότητας της εδαφικής συμπεριφοράς συνίσταται η χρήση περισσότερων της μιας σχέσης για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων. Περισσότερες προσεγγίσεις περιγράφονται από τους Bowles (1997), Barnes (2000), Das (1999), Τσότσος (1991), Καββαδάς (2005), Day (2006).

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις σε αμμώδη εδάφη (εμπειρική σχέση, μέθοδος Schmertmann) :

- Η μέθοδος προτάθηκε από τους Schmertmann et al. (1978) για άκαμπτα θεμέλια σε αμμώδη εδάφη :

$$\Delta H_i = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{I_{z,i} \cdot \Delta z_i}{E_{s,i}} \quad C_1 = 1 - 0.5 \cdot \frac{\sigma'_{v,Df}}{\Delta q} \geq 0.5 \quad C_2 = 1 + 0.2 \cdot \log(10t) \text{ (άμεση καθίζηση } C_2=1)$$

Γίνεται διαχωρισμός του εδάφους σε στρώσεις πάχους Δz κάτω από το θεμέλιο και για κάθε στρώση χρησιμοποιείται το E_s και υπολογίζεται το I_z

είναι:

$\sigma'_{v,Df} = \gamma' \cdot D_f$ ενεργός τάση στη στάθμη θεμελίωσης D_f

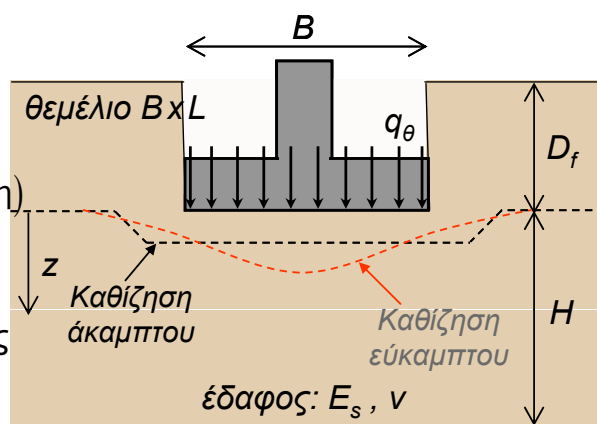
q_θ τάση φορτίου θεμελίου ($\Delta q = q_\theta - \sigma'_{v,Df}$)
($\Delta q = q_\theta$ με επιχώση)

t ο χρόνος t σε έτη (>0.1)

Δz_i πάχος στρώσης που επιλέγεται

E_s μέτρο ελαστικότητας (συμπίεσης) εδάφους

I_z συντελεστής επιρροής στρώσης



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις σε αμμώδη εδάφη (εμπειρική σχέση, μέθοδος Schmertmann) :

- Η μέθοδος προτάθηκε από τους Schmertmann et al. (1978) για άκαμπτα θεμέλια σε αμμώδη εδάφη :

$$\Delta H_i = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{I_{z,i} \cdot \Delta z_i}{E_{s,i}} \quad C_1 = 1 - 0.5 \cdot \frac{\sigma'_{v,Df}}{\Delta q} \geq 0.5 \quad C_2 = 1 + 0.2 \cdot \log(10t) \text{ (άμεση καθίζηση } C_2=1)$$

Γίνεται διαχωρισμός του εδάφους σε στρώσεις πάχους Δz κάτω από το θεμέλιο και για κάθε στρώση χρησιμοποιείται το E_s και υπολογίζεται το I_z

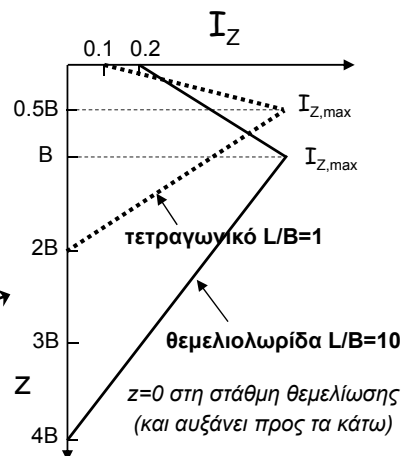
Διαδικασία υπολογισμού I_z

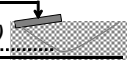
Υπολογίζεται το $I_{z,max} = 0.5 + 0.1 \sqrt{\frac{\Delta q}{\sigma'_v}}$

σ'_v σε βάθος $B/2$ για τετραγωνικό και B για θεμελιολωρίδα (κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης)

Σχεδιάζεται σε γράφημα η μεταβολή του I_z με το βάθος ανάλογα με το σχήμα του θεμελίου

Τέλος επιλέγεται η τιμή $I_{z,i}$ στο μέσο κάθε στρώσης





Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Εφαρμογή :

Άκαμπτο πέδιλο διαστάσεων 2.2x2.2m με κατακόρυφο φορτίο 500kN θεμελιώνεται σε βάθος 2.0m (δίχως επίχωση) σε χαλαρή άμμο με $\nu=0.28$, $E_s=20 \text{ MPa}$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$.
Να υπολογιστεί η καθίζηση με τη μέθοδο Schmertmann et al. (α) άμεση (β) σε 20 έτη

Επίλυση :

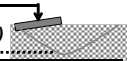
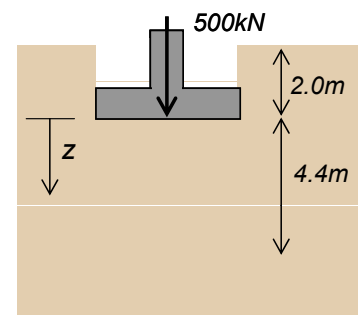
(i) Το ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο λόγω του φορτίου του θεμελίου είναι:

$$q_0 = \frac{N}{B \cdot L} = \frac{500}{2.2 \cdot 2.2} = 103.31 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Το πέδιλο είναι τετραγωνικό συνεπώς λαμβάνεται η σχέση I_z για $L/B=1$, οπότε από το σχετικό σχήμα προκύπτει πως απαιτείται ο υπολογισμός της καθίζησης λαμβάνοντας υπόψη βάθος $2B=4.4\text{m}$ κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης.

(ii) Υπολογίζεται το $I_{z,\max}$ (για $L/B=1$ υπολογ. σε $z=B/2=1.1\text{m}$)

$$I_{z,\max} = 0.5 + 0.1 \sqrt{\frac{\Delta q}{\sigma'_v}} \begin{cases} \sigma'_{v,Df} = \gamma \cdot D_f = 16 \cdot 2 = 32 \text{ kPa} \\ \Delta q = q_0 - \sigma'_{v,Df} = 103.31 - 32 = 71.31 \text{ kPa} \\ \sigma'_v = \gamma \cdot (D_f + 1.1) = 16 \cdot 3.1 = 49.6 \text{ kPa} \end{cases}$$



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

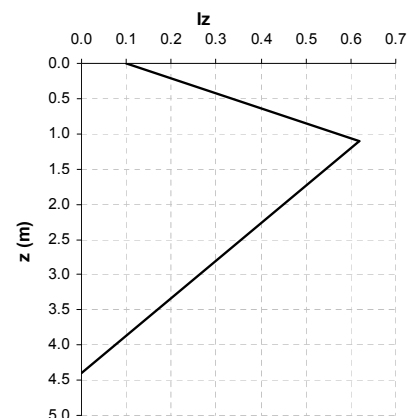
$$I_{z,\max} = 0.5 + 0.1 \sqrt{\frac{\Delta q}{\sigma'_v}} = 0.5 + 0.1 \sqrt{\frac{71.31}{49.6}} = 0.62$$

(iii) Με βάση την τιμή του $I_{z,\max}$ σχεδιάζεται το γράφημα με το βάθος ως εξής:

$$z = 0\text{m} \rightarrow I_z = 0.10$$

$$z = 1.1\text{m} \rightarrow I_z = I_{z,\max} = 0.62$$

$$z = 4.4\text{m} \rightarrow I_z = 0$$



(iv) Υπολογίζεται το C_1

$$C_1 = 1 - 0.5 \cdot \frac{\sigma'_{v,Df}}{\Delta q} \geq 0.5 \rightarrow C_1 = 1 - 0.5 \cdot \frac{32}{71.31} = 0.776 \geq 0.5$$

(v) Υπολογίζεται το C_2

$$(α) \text{ Άμεση καθίζηση} \rightarrow C_2 = 1$$

$$(β) T=20 \text{ χρόνια} \rightarrow C_2 = 1 + 0.2 \cdot \log(10 \cdot 20) = 1.46$$

Καθιζήσεις στο έδαφος

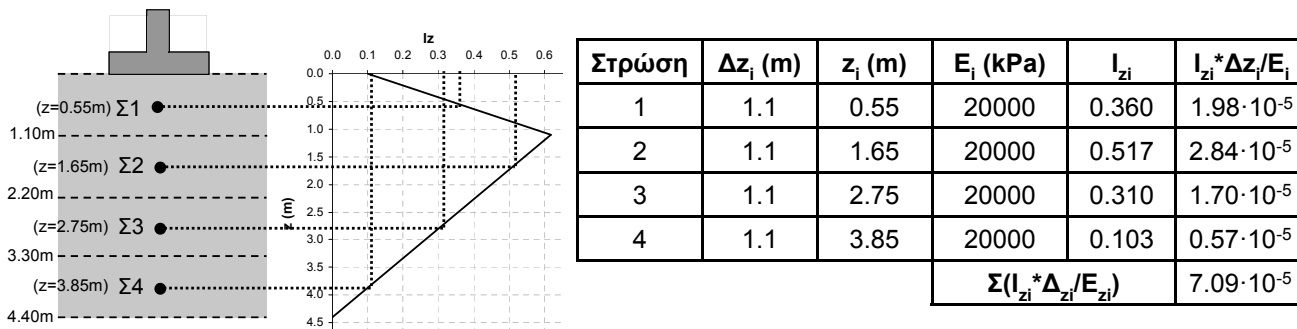


❖ Συνέχεια εφαρμογής :

(vi) Το βάθος υπολογισμού χωρίζεται σε στρώσεις:

Το συνολικό βάθος των 4.4m που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των καθιζήσεων χωρίζεται σε 4 στρώσεις του 1.1m.

Στο μέσο κάθε στρώσης υπολογίζεται από το προηγούμενο διάγραμμα το I_z



(vii) Υπολογίζεται η καθίζηση κατά Schmertmann:

(α) Άμεση καθίζηση $\Delta H_i = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{I_{z,i} \cdot \Delta z_i}{E_{s,i}} = 0.776 \cdot 1 \cdot 71.31 \cdot 7.09 \cdot 10^{-5} = 0.00393 \text{ m}$

(β) σε $t=20$ χρόνια $\Delta H_i = 0.776 \cdot 1.46 \cdot 71.31 \cdot 7.09 \cdot 10^{-5} = 0.00573 \text{ m}$

Καθιζήσεις στο έδαφος

• Καθιζήσεις από ελαστικές σχέσεις - Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι-άργιλοι) :

Οι συγκεκριμένες ελαστικές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

(α) Για τον υπολογισμό των συνολικών καθιζήσεων σε **αμμώδη και ξηρά αργιλικά εδάφη** καθώς σε αυτά οι καθιζήσεις στερεοποίησης και οι ερπυστικές αποτελούν αμελητέες ποσότητες

- καθώς το E μεταβάλλεται με το βάθος απαιτείται προσεκτική επιλογή των τιμών που θα χρησιμοποιηθούν (E' και ν')

- οι καθιζήσεις δεν είναι πλήρως αντιστρεπτές αν αφαιρεθεί το φορτίο

(β) Για τον υπολογισμό της άμεσης καθιζήσης ΔH_i σε **κορεσμένα συνεκτικά - αργιλικά εδάφη** ($\Delta H_i < \Delta H_{o\lambda}$)

- Θεωρούνται αστράγγιστες συνθήκες $E=E_u$ και $\nu=\nu_u=0.5$ (δίχως μεταβολή όγκου, βλ. σελ. 6.47)

- Οι καθιζήσεις που υπολογίζονται με τις παραπάνω τιμές θεωρούνται αντιστρεπτές μετά από την αφαίρεση του φορτίου

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις από ελαστικές σχέσεις - Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι-άργιλοι) :
 - Θεωρώντας το έδαφος ως ελαστικό μπορεί να υπολογιστεί η καθίζηση εύκαμπτου θεμελίου με τη γενική σχέση (Bowles 1997, Das 2007) :

$$\Delta H_i = q_o \cdot a \cdot B^* \cdot \frac{1 - \nu^2}{E_s} \cdot I_s \cdot I_F \quad I_s = F_1 + \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \cdot F_2 \quad I_F, F_1, F_2 \text{ (από πίνακες)}$$

όπου:

q_o η πρόσθετη τάση λόγω επιφόρτισης (σελ. 6.5)

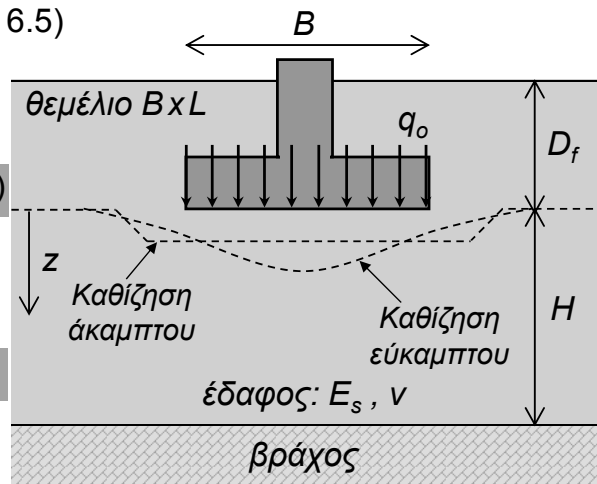
B το πλάτος του θεμελίου

L το μήκος του θεμελίου ($L \geq B$)

E_s για κορεσμένα αργιλικά $E_s \rightarrow E_u$ (σελ. 6.47)
 σταθμισμένο μέτρο ελαστικότητας
 εδάφους από τη στάθμη θεμελίωσης έως
 βάθος $4B$ κάτω από αυτή

ν δείκτης Poisson (ν_u για κορεσμ. αργιλικά 6.47)

I_s, I_F συντελεστές σχήματος και βάθους
 θεμελίωσης



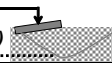
Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις από ελαστικές σχέσεις - Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι-άργιλοι) :
 - Θεωρώντας το έδαφος ως ελαστικό μπορεί να υπολογιστεί η καθίζηση εύκαμπτου θεμελίου με τη γενική σχέση (Bowles 1997, Das 2007) :

$$\Delta H_i = q_o \cdot a \cdot B^* \cdot \frac{1 - \nu^2}{E_s} \cdot I_s \cdot I_F \quad I_s = F_1 + \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \cdot F_2 \quad I_F, F_1, F_2 \text{ (από πίνακες)}$$

όπου:

Τιμές παραμέτρων για τους υπολογισμούς		
Παράμετρος	Κέντρο	Γωνία
a	4	1
B^*	$\frac{B}{2}$	B
m	$\frac{L}{B}$	$\frac{L}{B}$
n	$\frac{2H}{B}$	$\frac{H}{B}$



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις από ελαστικές σχέσεις - Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι-άργιλοι) :
- Θεωρώντας το έδαφος ως ελαστικό μπορεί να υπολογιστεί η καθίζηση εύκαμπτου θεμελίου με τη γενική σχέση (Bowles 1997, Das 2007) :

$$\Delta H_i = q_o \cdot a \cdot B^* \cdot \frac{1 - \nu^2}{E_s} \cdot I_s \cdot I_F \quad I_s = F_1 + \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \cdot F_2 \quad I_F, F_1, F_2 \text{ (από πίνακες)}$$

όπου:

Καθίζηση άκαμπτου θεμελίου

$$\Delta H_{\text{ακ}} = 0.93 \cdot \Delta H_{\text{κεντρο}}^{\text{ευκαμ}} \quad (\text{Bowles 1997})$$

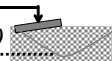
$$\Delta H_{\text{ακ}} = 0.67 \sim 0.75 \cdot \Delta H_{\text{κεντρο}}^{\text{ευκαμ}} \quad (\text{Καββαδάς 2005})$$

Υπολογισμός σταθμισμένου E_s (Bowles)

$$E_s = \frac{E_1 \Delta z_1 + E_2 \Delta z_2 + \dots + E_n \Delta z_n}{\bar{z}} \quad (\text{Bowles 1997})$$

E_i μέτρο ελαστικότητας στη στρώση Δz_i

$$\bar{z} = \min \{ H, 5B \}$$

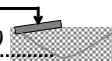


Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις από ελαστικές σχέσεις - Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι-άργιλοι) :

Συντελεστές F_1 και F_2 για τον υπολογισμό του I_s

n	m (συνεχίζεται)																						
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	25.0	50.0	100.0	
0.25	$F_1 =$	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
	$F_2 =$	0.049	0.049	0.050	0.050	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.052	0.052	0.052	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.50	$F_1 =$	0.049	0.047	0.046	0.045	0.044	0.043	0.042	0.041	0.041	0.040	0.040	0.038	0.037	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
	$F_2 =$	0.074	0.076	0.077	0.079	0.080	0.081	0.081	0.082	0.083	0.083	0.084	0.086	0.087	0.087	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088
0.75	$F_1 =$	0.095	0.092	0.090	0.088	0.087	0.085	0.084	0.083	0.082	0.081	0.080	0.078	0.074	0.073	0.072	0.072	0.072	0.072	0.071	0.071	0.071	0.071
	$F_2 =$	0.083	0.086	0.089	0.091	0.093	0.095	0.097	0.098	0.099	0.100	0.101	0.106	0.108	0.109	0.109	0.110	0.110	0.110	0.110	0.111	0.111	0.111
1.00	$F_1 =$	0.142	0.140	0.138	0.136	0.134	0.132	0.130	0.129	0.127	0.126	0.125	0.118	0.115	0.113	0.112	0.112	0.112	0.111	0.111	0.110	0.110	0.110
	$F_2 =$	0.083	0.088	0.091	0.095	0.098	0.100	0.102	0.104	0.106	0.108	0.109	0.117	0.120	0.122	0.123	0.123	0.124	0.124	0.124	0.125	0.125	0.125
1.25	$F_1 =$	0.186	0.184	0.183	0.181	0.179	0.178	0.176	0.174	0.173	0.171	0.170	0.161	0.157	0.154	0.153	0.152	0.152	0.151	0.151	0.150	0.150	0.150
	$F_2 =$	0.080	0.085	0.089	0.093	0.096	0.100	0.102	0.105	0.107	0.109	0.111	0.122	0.127	0.130	0.131	0.132	0.132	0.133	0.133	0.134	0.134	0.134
1.50	$F_1 =$	0.224	0.224	0.224	0.223	0.222	0.220	0.219	0.217	0.216	0.214	0.213	0.203	0.197	0.194	0.192	0.191	0.190	0.190	0.109	0.100	0.100	0.100
	$F_2 =$	0.075	0.080	0.084	0.089	0.093	0.096	0.099	0.102	0.105	0.108	0.110	0.124	0.130	0.134	0.136	0.137	0.138	0.138	0.139	0.140	0.140	0.140
1.75	$F_1 =$	0.257	0.259	0.259	0.260	0.259	0.258	0.258	0.256	0.255	0.254	0.253	0.242	0.235	0.232	0.229	0.228	0.227	0.226	0.225	0.223	0.223	0.223
	$F_2 =$	0.069	0.074	0.079	0.084	0.088	0.092	0.095	0.098	0.101	0.104	0.107	0.123	0.131	0.136	0.138	0.140	0.141	0.142	0.142	0.144	0.144	0.145
2.00	$F_1 =$	0.205	0.200	0.200	0.202	0.202	0.202	0.202	0.202	0.201	0.200	0.200	0.209	0.209	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.205	0.205	0.206	0.206
	$F_2 =$	0.064	0.069	0.074	0.078	0.083	0.086	0.090	0.094	0.097	0.100	0.102	0.121	0.131	0.136	0.139	0.141	0.143	0.144	0.145	0.147	0.147	0.148
2.25	$F_1 =$	0.309	0.314	0.317	0.320	0.321	0.322	0.323	0.323	0.323	0.322	0.322	0.313	0.305	0.300	0.296	0.294	0.293	0.291	0.291	0.287	0.287	0.287
	$F_2 =$	0.059	0.064	0.069	0.073	0.077	0.081	0.085	0.089	0.092	0.095	0.098	0.119	0.130	0.136	0.140	0.142	0.144	0.145	0.146	0.149	0.150	0.150
2.50	$F_1 =$	0.330	0.336	0.341	0.344	0.347	0.349	0.350	0.351	0.351	0.351	0.344	0.336	0.331	0.327	0.324	0.322	0.321	0.320	0.320	0.316	0.315	0.315
	$F_2 =$	0.055	0.060	0.064	0.069	0.073	0.076	0.080	0.084	0.087	0.090	0.093	0.115	0.127	0.135	0.139	0.142	0.144	0.146	0.147	0.151	0.151	0.151
2.75	$F_1 =$	0.348	0.355	0.361	0.366	0.369	0.372	0.374	0.376	0.377	0.377	0.378	0.373	0.365	0.359	0.355	0.352	0.350	0.348	0.347	0.343	0.342	0.342
	$F_2 =$	0.051	0.056	0.060	0.064	0.069	0.072	0.076	0.079	0.082	0.086	0.089	0.111	0.125	0.133	0.130	0.142	0.144	0.146	0.147	0.152	0.152	0.153
3.00	$F_1 =$	0.363	0.372	0.379	0.384	0.389	0.393	0.396	0.398	0.400	0.401	0.402	0.400	0.392	0.386	0.382	0.378	0.376	0.374	0.373	0.368	0.367	0.367
	$F_2 =$	0.048	0.052	0.056	0.060	0.064	0.068	0.071	0.075	0.078	0.081	0.084	0.108	0.122	0.131	0.137	0.141	0.144	0.145	0.147	0.152	0.153	0.154
3.25	$F_1 =$	0.376	0.386	0.394	0.401	0.406	0.411	0.415	0.417	0.420	0.422	0.423	0.424	0.418	0.412	0.407	0.403	0.401	0.399	0.397	0.391	0.390	0.390
	$F_2 =$	0.045	0.049	0.053	0.057	0.060	0.064	0.067	0.071	0.074	0.077	0.080	0.104	0.119	0.129	0.135	0.140	0.143	0.145	0.147	0.153	0.154	0.154

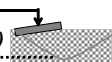


Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις από ελαστικές σχέσεις - Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι-άργιλοι) :

Συντελεστές F_1 και F_2 για τον υπολογισμό του I_S

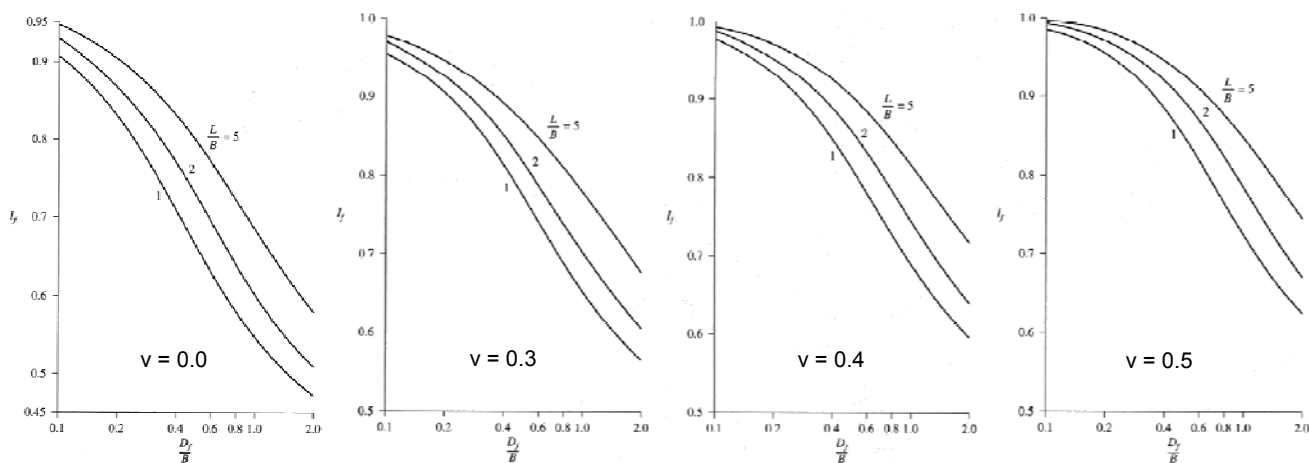
n	m (συνέχεια από προηγούμενη σελίδα)																						
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	25.0	50.0	100.0	
3.50	$F_1 =$	0.388	0.399	0.408	0.416	0.422	0.427	0.431	0.435	0.438	0.440	0.442	0.447	0.441	0.435	0.430	0.427	0.424	0.421	0.420	0.413	0.412	0.411
	$F_2 =$	0.042	0.046	0.050	0.053	0.057	0.060	0.064	0.067	0.070	0.073	0.076	0.100	0.116	0.126	0.133	0.138	0.142	0.144	0.146	0.153	0.155	0.155
3.75	$F_1 =$	0.399	0.410	0.420	0.429	0.436	0.442	0.447	0.451	0.454	0.457	0.460	0.468	0.464	0.458	0.453	0.449	0.446	0.443	0.441	0.433	0.432	0.432
	$F_2 =$	0.040	0.043	0.047	0.050	0.054	0.057	0.060	0.064	0.067	0.070	0.073	0.096	0.113	0.124	0.131	0.137	0.141	0.143	0.145	0.154	0.155	0.155
4.00	$F_1 =$	0.408	0.421	0.431	0.440	0.448	0.455	0.460	0.465	0.469	0.473	0.478	0.487	0.484	0.479	0.474	0.470	0.468	0.464	0.462	0.453	0.451	0.451
	$F_2 =$	0.037	0.041	0.044	0.048	0.051	0.054	0.057	0.060	0.063	0.066	0.069	0.093	0.110	0.121	0.129	0.135	0.139	0.142	0.145	0.154	0.155	0.156
5.00	$F_1 =$	0.437	0.452	0.465	0.477	0.487	0.496	0.503	0.510	0.516	0.522	0.526	0.551	0.554	0.552	0.548	0.543	0.540	0.536	0.534	0.522	0.519	0.519
	$F_2 =$	0.031	0.034	0.036	0.039	0.042	0.045	0.048	0.050	0.053	0.055	0.058	0.080	0.098	0.111	0.120	0.128	0.133	0.137	0.140	0.154	0.156	0.157
6.00	$F_1 =$	0.457	0.474	0.489	0.502	0.514	0.524	0.534	0.542	0.550	0.557	0.563	0.598	0.609	0.610	0.608	0.604	0.601	0.598	0.595	0.579	0.576	0.575
	$F_2 =$	0.026	0.028	0.031	0.033	0.036	0.038	0.040	0.043	0.045	0.047	0.050	0.070	0.087	0.101	0.111	0.120	0.126	0.131	0.135	0.153	0.157	0.157
7.00	$F_1 =$	0.471	0.490	0.506	0.520	0.533	0.545	0.556	0.566	0.575	0.583	0.590	0.635	0.653	0.658	0.658	0.656	0.653	0.650	0.647	0.628	0.624	0.623
	$F_2 =$	0.022	0.024	0.027	0.029	0.031	0.033	0.035	0.037	0.039	0.041	0.043	0.062	0.070	0.092	0.103	0.112	0.119	0.125	0.129	0.152	0.157	0.150
8.00	$F_1 =$	0.482	0.502	0.519	0.534	0.549	0.561	0.573	0.584	0.594	0.602	0.611	0.664	0.688	0.697	0.700	0.700	0.698	0.695	0.692	0.672	0.666	0.665
	$F_2 =$	0.020	0.022	0.023	0.025	0.027	0.029	0.031	0.033	0.035	0.036	0.036	0.055	0.071	0.094	0.095	0.104	0.112	0.110	0.110	0.124	0.151	0.150
9.00	$F_1 =$	0.491	0.511	0.529	0.545	0.560	0.574	0.587	0.598	0.609	0.618	0.627	0.687	0.716	0.730	0.736	0.737	0.736	0.735	0.732	0.710	0.704	0.702
	$F_2 =$	0.017	0.019	0.021	0.023	0.024	0.026	0.028	0.029	0.031	0.033	0.034	0.050	0.064	0.077	0.088	0.097	0.105	0.112	0.118	0.149	0.156	0.158
10.00	$F_1 =$	0.498	0.519	0.537	0.554	0.570	0.584	0.597	0.610	0.621	0.631	0.641	0.707	0.740	0.758	0.766	0.770	0.770	0.768	0.745	0.738	0.735	0.735
	$F_2 =$	0.016	0.017	0.019	0.020	0.022	0.023	0.025	0.027	0.028	0.030	0.031	0.048	0.059	0.071	0.087	0.091	0.099	0.106	0.112	0.147	0.158	0.158
20.00	$F_1 =$	0.529	0.553	0.575	0.595	0.614	0.631	0.647	0.662	0.677	0.690	0.702	0.797	0.856	0.896	0.925	0.945	0.959	0.969	0.977	0.982	0.965	0.957
	$F_2 =$	0.008	0.009	0.010	0.010	0.011	0.012	0.013	0.013	0.014	0.015	0.016	0.024	0.031	0.039	0.046	0.053	0.059	0.065	0.071	0.124	0.148	0.156
50.00	$F_1 =$	0.548	0.574	0.598	0.620	0.640	0.660	0.678	0.695	0.711	0.726	0.740	0.853	0.931	0.989	1.034	1.070	1.100	1.125	1.146	1.268	1.279	1.261
	$F_2 =$	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006	0.010	0.013	0.016	0.019	0.022	0.025	0.028	0.031	0.071	0.113	0.142
100.00	$F_1 =$	0.555	0.581	0.605	0.628	0.649	0.669	0.688	0.706	0.722	0.738	0.753	0.872	0.956	1.020	1.072	1.114	1.150	1.182	1.209	1.408	1.489	1.499
	$F_2 =$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.005	0.006	0.008	0.010	0.011	0.013	0.014	0.016	0.039	0.071



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις από ελαστικές σχέσεις - Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι-άργιλοι) :

Νομογραφήματα για τον υπολογισμό του I_F

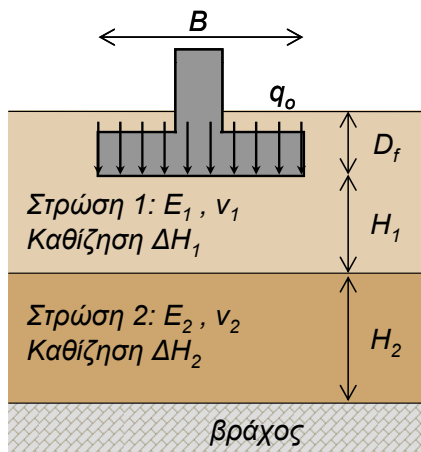


(Σχήμα: Das, 2007)

Σημείωση: Για $D_f = 0$ ισχύει πάντα $I_F = 1.0$

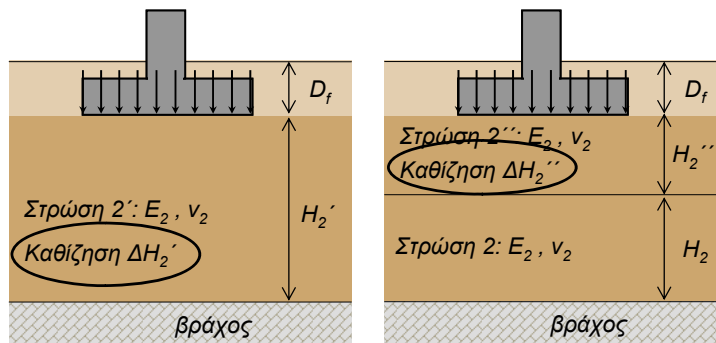
Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις από ελαστικές σχέσεις - Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι-άργιλοι) :
- Εφαρμογή ελαστικής σχέσης σε πολυστρωματικό έδαφος :



Καθίζηση στρώσης 1: ΔH_1

Καθίζηση στρώσης 2: $\Delta H_2 = \Delta H_2' - \Delta H_2''$



Τελική καθίζηση
 $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$

Για τον υπολογισμό της καθίζησης της στρώσης 2:

- Υπολογίζεται η καθίζηση της «υποθετικής» στρώσης 2'
- Υπολογίζεται η καθίζηση της «υποθετικής» στρώσης 2'' και αφαιρείται από την προηγούμενη

Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Εφαρμογή :

Άκαμπτο πέδιλο διαστάσεων 2.2x2.2m με κατακόρυφο φορτίο 500kN θεμελιώνεται σε βάθος 2.0m (δίχως επίχωση) σε χαλαρή άμμο με $\nu=0.28$, $E_s=20$ MPa, $\gamma=16$ kN/m³.
Να υπολογιστεί η άμεση καθίζηση με τη μέθοδο Steinbrenner και την Schmertmann

Επίλυση :

Η μέθοδος Steinbrenner αφορά εύκαμπτα θεμέλια. Θα γίνει αρχικά ο υπολογισμός για εύκαμπτο θεμέλιο και μετά η σχετική τροποποίηση για άκαμπτο:

$$\Delta H_i = q_0 \cdot a \cdot B^* \cdot \frac{1 - \nu^2}{E_s} \cdot I_s \cdot I_F \quad \Delta H_{\text{ακ}} = 0.93 \cdot \Delta H_{\text{ΚΕΝΤΡΟ}}^{\text{ΕΥΚΑΜΠ}} \quad \text{ή} \quad \Delta H_{\text{ακ}} = 0.67 \sim 0.75 \cdot \Delta H_{\text{ΚΕΝΤΡΟ}}^{\text{ΕΥΚΑΜΠ}}$$

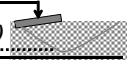
(i) Η ομοιόμορφη κατανομημένη τάση λόγω του φορτίου του θεμελίου είναι:

$$q_\theta = \frac{N}{B \cdot L} = \frac{500}{2.2 \cdot 2.2} = 103.31 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Καθώς δεν υπάρχει επίχωση, για τον υπολογισμό της πρόσθετης τάσης q_θ στη στάθμη θεμελίωσης πρέπει να αφαιρεθεί η τάση του εδάφους που προϋπήρχε και αφαιρέθηκε:

$$\left. \begin{aligned} q_\theta &= q_\theta - \sigma'_{\nu, D_f} \\ \sigma'_{\nu, D_f} &= \gamma \cdot D_f = 16 \cdot 2 = 32 \text{ kPa} \end{aligned} \right\} q_\theta = 103.31 - 32 = 71.31 \text{ kPa}$$

Αν υπήρχε επίχωση θα ήταν $q_0 = q_\theta = 103.31 \text{ kPa}$



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

(ii) Υπολογίζονται οι διάφορες παράμετροι για κέντρο πεδίου:

$$a = 4$$

$$m = L / B = 1$$

$$B^* = B / 2 = 1.1\text{m}$$

$$n = 2H / B \rightarrow \infty \text{ (ημίχωρος } H \gg B)$$

Τιμές παραμέτρων για τους υπολογισμούς		
Παράμετρος	Κέντρο	Γωνία
a	4	1
B*	$\frac{B}{2}$	B
m	$\frac{L}{B}$	$\frac{L}{B}$
n	$\frac{2H}{B}$	$\frac{H}{B}$

(iii) Υπολογίζεται το I_S

$$I_S = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \cdot F_2 \quad F_1, F_2 \text{ (από πίνακες για } m=1 \text{ και } n=100)$$

$$\text{Προκύπτει: } I_S = 0.555 + \frac{1-2 \cdot 0.28}{1-0.28} \cdot 0.002 = 0.556$$

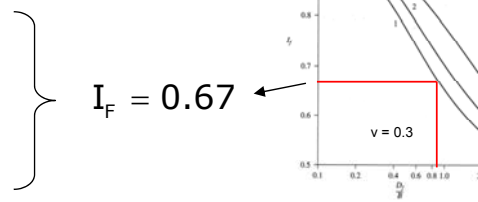
n	$\frac{m}{1.0}$
100.00	$F_1 = 0.555$
	$F_2 = 0.002$

(iv) Υπολογίζεται το I_F

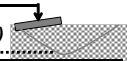
Από το σχετικό διάγραμμα:

$$\nu = 0.3 \text{ (κοντά στο } 0.28)$$

$$\frac{L}{B} = 1 \text{ και } \frac{D_f}{B} = \frac{2}{2.2} = 0.91$$



$$I_F = 0.67$$



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

(v) Υπολογίζεται η καθίζηση στο κέντρο εύκαμπτου πεδίου:

$$\Delta H_i = q_0 \cdot a \cdot B^* \cdot \frac{1-\nu^2}{E_s} \cdot I_S \cdot I_F = 71.31 \cdot 4 \cdot 1.1 \cdot \frac{1-0.28^2}{20000} \cdot 0.556 \cdot 0.67 = 0.00539 \text{ m}$$

$$\text{Μονάδες} \rightarrow 71.31 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 4 \cdot 1.1\text{m} \cdot \frac{1-0.28^2}{20000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} \cdot 0.556 \cdot 0.67 = \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \text{m} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kN}} = \text{m}$$

(vi) Υπολογίζεται η καθίζηση σε άκαμπτο πέδιλο:

$$\text{(Bowles 1997)} \quad \Delta H_{\text{ακ}} = 0.93 \cdot \Delta H_{\text{ΚΕΝΤΡΟ}}^{\text{ΕΥΚΑΜ}} = 0.93 \cdot 0.00539 = 0.00501 \text{ m}$$

$$\text{(Καβαδάς 2005)} \quad \Delta H_{\text{ακ}} = 0.67 \sim 0.75 \cdot \Delta H_{\text{ΚΕΝΤΡΟ}}^{\text{ΕΥΚΑΜ}} = 0.00361 \text{ m} \sim 0.00404 \text{ m}$$

(vii) Σύγκριση με μέθοδο Schmertmann (επιλύθηκε σε προηγούμενες διαφάνειες):

$$\text{Schmertmann: } (\alpha) \text{ Άμεση καθίζηση} \quad (\beta) \text{ σε } t=20 \text{ χρόνια}$$

$$\Delta H_i = 0.00393 \text{ m} \quad \Delta H_i = 0.00573 \text{ m}$$

Οι δυο μέθοδοι δίνουν πολύ κοντινά αποτελέσματα. Συχνά όμως παρατηρούνται σημαντικές διαφορές.

Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Εφαρμογή :

Να υπολογιστεί πόση θα είναι η καθίζηση στο θεμέλιο της προηγούμενης εφαρμογής εφόσον το πάχος του εδαφικού στρώματος από τη στάθμη θεμελίωσης έως το βράχο είναι ίσο με 5m (μέθοδος Steinbrenner).

Επίλυση :

Αυτό που αλλάζει στην εφαρμογή της μεθόδου Steinbrenner λόγω του περιορισμένου πάχους εδάφους, αφορά την τιμή του n και συνεπώς και του συντελεστή I_s

(i) Νέος υπολογισμός I_s :

$n = \frac{2H}{B} = \frac{2 \cdot 5}{2.2} = 4.55$ $m = L/B = 1$	<table style="margin: auto;"> <tr> <td style="border: none;"></td> <td style="border: none; text-align: center;">$\frac{m}{1.0}$</td> <td style="border: none;"></td> </tr> <tr> <td style="border: none; text-align: center;">4.00</td> <td style="border: none; text-align: center;">$F_1 = 0.408$</td> <td style="border: none;"></td> </tr> <tr> <td style="border: none;"></td> <td style="border: none; text-align: center;">$F_2 = 0.037$</td> <td style="border: none;"></td> </tr> <tr> <td style="border: none; text-align: center;">5.00</td> <td style="border: none; text-align: center;">$F_1 = 0.437$</td> <td style="border: none;"></td> </tr> <tr> <td style="border: none;"></td> <td style="border: none; text-align: center;">$F_2 = 0.031$</td> <td style="border: none;"></td> </tr> </table>		$\frac{m}{1.0}$		4.00	$F_1 = 0.408$			$F_2 = 0.037$		5.00	$F_1 = 0.437$			$F_2 = 0.031$		<p style="text-align: center;"><u>Με γραμμική παρεμβολή:</u></p> $F_1 = 0.408 + \frac{(4.55 - 4.00)}{(5.00 - 4.00)} \cdot (0.437 - 0.408) = 0.424$ $F_2 = 0.037 + \frac{(4.55 - 4.00)}{(5.00 - 4.00)} \cdot (0.031 - 0.037) = 0.034$
		$\frac{m}{1.0}$															
4.00	$F_1 = 0.408$																
	$F_2 = 0.037$																
5.00	$F_1 = 0.437$																
	$F_2 = 0.031$																

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \cdot F_2 = 0.424 + \frac{1 - 2 \cdot 0.28}{1 - 0.28} \cdot 0.034 = 0.445$$

Τελικά: $\Delta H_i = q_0 \cdot a \cdot B^* \cdot \frac{1 - \nu^2}{E_s} \cdot I_s \cdot I_f = 71.31 \cdot 4 \cdot 1.1 \cdot \frac{1 - 0.28^2}{20000} \cdot 0.445 \cdot 0.67 = 0.00431 \text{ m}$

Η καθίζηση για εύκαμπτο πέδιλο σε στρώση πάχους 5m είναι $4.31 \text{ mm} < 5.39 \text{ mm}$

Καθιζήσεις στο έδαφος

• Καθιζήσεις σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη :

- Αναπτύσσονται και οι τρεις μορφές καθίζησης

(α) άμεσες καθιζήσεις ΔH_i : μπορούν να υπολογιστούν με μια ελαστική σχέση (π.χ. Steinbrenner στις προηγούμενες διαφάνειες) ή με άλλες σχέσεις που περιγράφονται στη βιβλιογραφία (π.χ. Janbu et al. 1956)

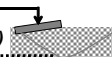
(β) καθιζήσεις στερεοποίησης ΔH_c : ο τρόπος υπολογισμού δίνεται στις επόμενες διαφάνειες

(γ) καθιζήσεις ερπυστικού τύπου ΔH_s : συνήθως δεν έχουν μεγάλη τιμή, ο τρόπος υπολογισμού δίνεται στις επόμενες διαφάνειες

- Όταν χρησιμοποιούνται σχέσεις ελαστικής μορφής δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή κατάλληλων τιμών E και ν

A) «στραγγισμένες» τιμές για ολικές καθιζήσεις μη-κορεσμένων αργιλικών εδαφών.

B) «αστραγγιστες» τιμές για τις άμεσες καθιζήσεις κορεσμένων αργίλων



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Άμεσες καθιζήσεις σε αργιλικά εδάφη (Janbu et al):

- Για εδαφική απόθεση πάχους H η τιμή της άμεσης καθίζησης άκαμπτου θεμελίου σε κορεσμένες αργίλους δίνεται από τους Janbu et al. (1956) :

$$\Delta H_i = \mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \frac{q_0 \cdot B}{E_u}$$

μ_0 συντελεστής βάθους θεμελίωσης

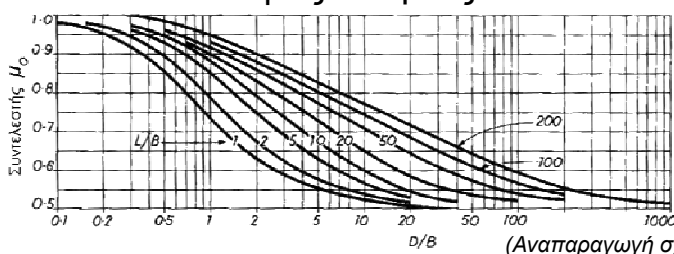
μ_1 συντελεστής πάχους εδαφικής στρώσης

όπου:

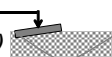
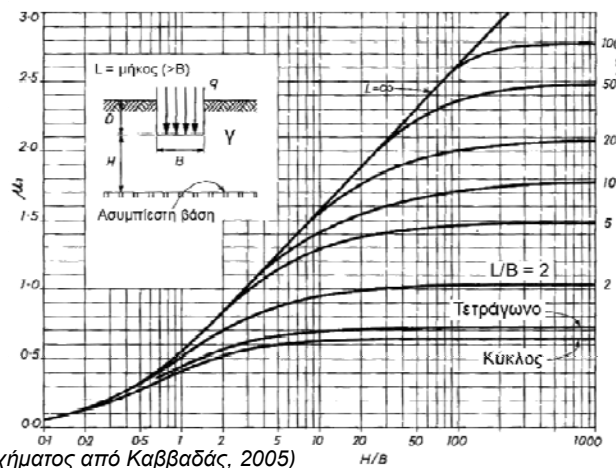
q_0 η καθαρή τάση θεμελίου (σελ. 6.5)

B το πλάτος του θεμελίου

E_u «αστράγγιστο» μέτρο ελαστικότητας εδάφους



(Αναπαραγωγή σχήματος από Καβαδάς, 2005)



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Εφαρμογή :

Άκαμπτο πέδιλο διαστάσεων $2.2 \times 2.2 \text{ m}$ με κατακόρυφο φορτίο 500 kN θεμελιώνεται σε βάθος 2.0 m (δίχως επίχωση) σε κορεσμένο αργιλικό έδαφος με $E_u = 20 \text{ MPa}$, $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$. Να υπολογιστεί η άμεση καθίζηση με τη μέθοδο Janbu et al.

Επίλυση :

Ο υπολογισμός για άκαμπτο θεμέλιο σε άργιλο κατά Janbu et al. γίνεται με τη σχέση:

$$\Delta H_i = \mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \frac{q_0 \cdot B}{E_u}$$

(i) Η ομοιόμορφη κατανεμημένη τάση λόγω του φορτίου του θεμελίου είναι:

$$q_0 = \frac{N}{B \cdot L} = \frac{500}{2.2 \cdot 2.2} = 103.31 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Καθώς δεν υπάρχει επίχωση, για τον υπολογισμό της πρόσθετης τάσης q_0 στη στάθμη θεμελίωσης πρέπει να αφαιρεθεί η τάση του εδάφους που προϋπήρχε και αφαιρέθηκε:

$$q_0 = q_0 - \sigma'_{v, D_f}$$

$$\sigma'_{v, D_f} = \gamma \cdot D_f = 16 \cdot 2 = 32 \text{ kPa}$$

$$q_0 = 103.31 - 32 = 71.31 \text{ kPa}$$

Αν υπήρχε επίχωση θα ήταν $q_0 = q_0 = 103.31 \text{ kPa}$

Καθιζήσεις στο έδαφος

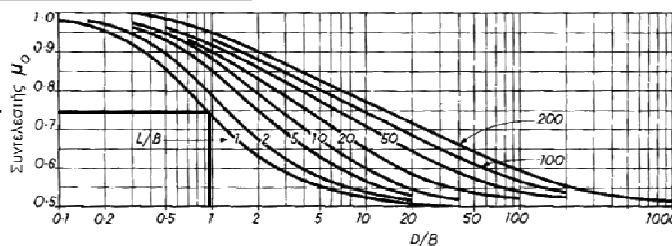


❖ Συνέχεια εφαρμογής :

(ii) Υπολογίζονται από τα διαγράμματα το μ_0 και το μ_1 :

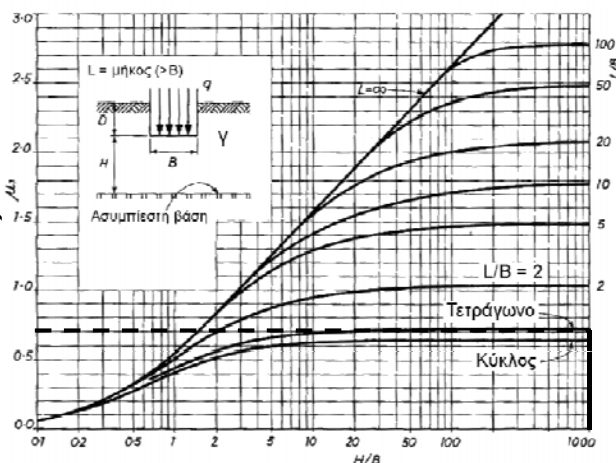
$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{B} &= 1 \\ \frac{D_f}{B} &= \frac{2}{2.2} = 0.91 \end{aligned} \right\}$$

$$\mu_0 = 0.75$$



$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{B} &= 1 \text{ (τετράγωνο)} \\ H \gg B \Rightarrow \frac{H}{B} &\rightarrow \infty \end{aligned} \right\}$$

$$\mu_1 = 0.70$$



(iii) Υπολογίζεται η καθίζηση:

$$\Delta H_i = \mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \frac{q_0 \cdot B}{E_u} \Rightarrow$$

$$\Delta H_i = 0.75 \cdot 0.70 \cdot \frac{71.31 \cdot 2.2}{20000} = 0.0041 \text{ m}$$

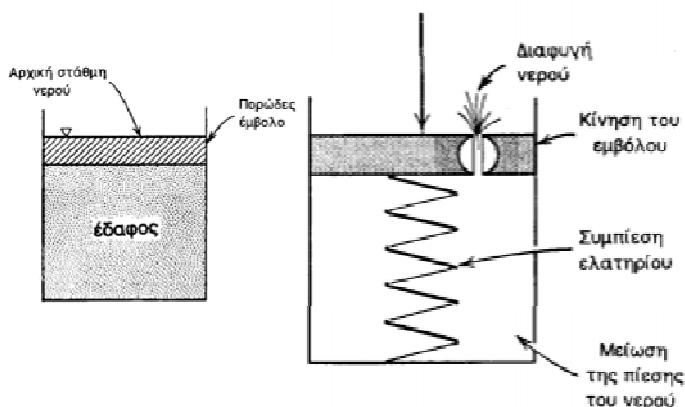
Καθιζήσεις στο έδαφος

• Καθιζήσεις στερεοποίησης σε αργιλικά εδάφη:

- Οι καθιζήσεις στερεοποίησης οφείλονται στην αργή απομάκρυνση του νερού των πόρων και την προοδευτική μείωση του πορώδους των αργιλικών εδαφών.

- Ο υπολογισμός της καθίζησης στερεοποίησης γίνεται με χρήση των παραμέτρων συμπιεστότητας C_c , C_r (από τη λογαριθμική σχέση τάσης-συμπίεσης στη δοκιμή οιδημέτρου)

- Είναι επίσης δυνατή η εκτίμηση της χρονικής εξέλιξης της καθίζησης λόγω στερεοποίησης, δηλαδή ο υπολογισμός της μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από την έναρξη της στερεοποίησης.



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις στερεοποίησης σε αργιλικά εδάφη:

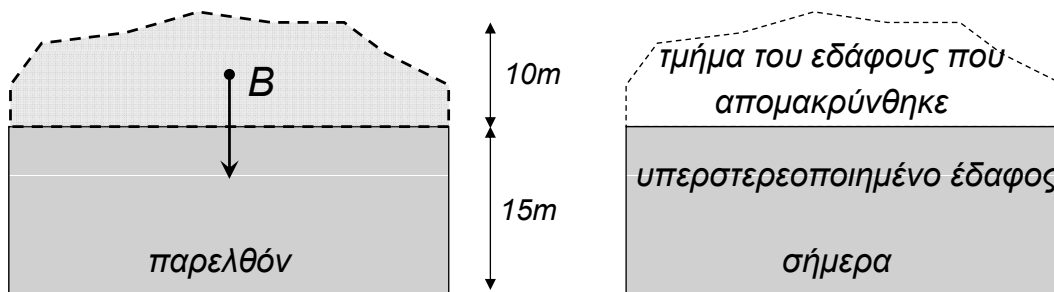
- Μια σημαντική διάκριση μεταξύ των αργιλικών εδαφών που επηρεάζει τον υπολογισμό των καθιζήσεων είναι σε:

(α) κανονικά στερεοποιημένες αργίλους

είναι εδάφη τα οποία δεν έχουν δεχτεί στο παρελθόν φορτία μεγαλύτερα από αυτά που τώρα δρουν πάνω τους

(β) υπερστερεοποιημένες αργίλους

είναι εδάφη στα οποία η κατακόρυφη ενεργός τάση που αναπτύχθηκε στο παρελθόν υπήρξε μεγαλύτερη από αυτήν που παρατηρείται σήμερα



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις στερεοποίησης σε αργιλικά εδάφη:

(α) κανονικά στερεοποιημένα ($\sigma'_c = \sigma'_{vo}$)

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \cdot \frac{C_{c,i}}{1 + e_{o,i}} \cdot \log \frac{\sigma'_{vo,i} + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_{vo,i}} \right)$$

Οι σχέσεις δίνονται θεωρώντας το έδαφος χωρισμένο σε στρώσεις (συστήνεται $H_i \leq B/3$)

(β) υπερστερεοποιημένα με $\sigma'_{vo} < \sigma'_c < \sigma'_{vo} + \Delta \sigma'$

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \cdot \frac{C_{r,i}}{1 + e_{o,i}} \cdot \log \frac{\sigma'_{c,i}}{\sigma'_{vo,i}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(H_i \cdot \frac{C_{c,i}}{1 + e_{o,i}} \cdot \log \frac{\sigma'_{vo,i} + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_{c,i}} \right)$$

(γ) υπερστερεοποιημένα με $\sigma'_{vo} + \Delta \sigma' < \sigma'_c$

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \cdot \frac{C_{r,i}}{1 + e_{o,i}} \cdot \log \frac{\sigma'_{vo,i} + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_{vo,i}} \right)$$

Η καθίζηση αφορά εύκαμπτο πέδιλο όταν το $\Delta \sigma'$ υπολογίζεται στο κέντρο του πεδίου και άκαμπτο πέδιλο όταν το $\Delta \sigma'$ υπολογίζεται στο χαρακτηριστικό σημείο

C_c, C_r δείκτες συμπίεσότητας και επανασυμπίεσότητας

$H_i, e_{o,i}$ πάχος και δείκτης πόρων της εξεταζόμενης στρώσης i

$\sigma'_{vo,i}, \sigma'_{c,i}$ αρχική ενεργός τάση και τάση προστερεοποίησης στρώσης i

$\Delta \sigma'_i$ αύξηση τάσης λόγω επιφόρτισης στη στρώση i

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις στερεοποίησης σε αργιλικά εδάφη:

(α) κανονικά στερεοποιημένα ($\sigma'_c = \sigma'_{vo}$)

(β) υπερστερεοποιημένα με $\sigma'_{vo} < \sigma'_c < \sigma'_{vo} + \Delta\sigma'$

(γ) υπερστερεοποιημένα με $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma' < \sigma'_c$

$$C_c = 0.009 (W_L - 10)$$

Terzaghi and Peck (1967)

$$C_c = 0.54 (e_o - 0.35)$$

Nishida (1956)

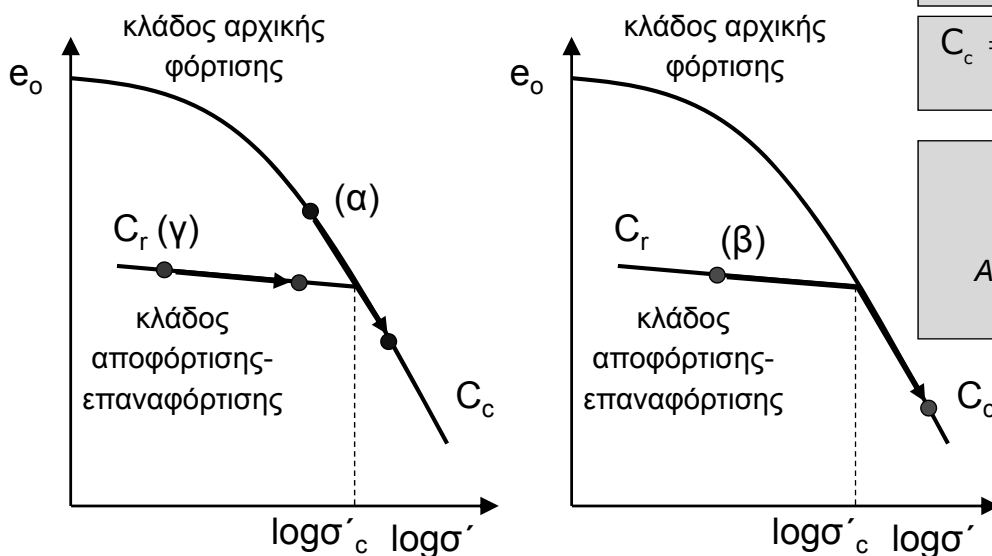
$$C_c = 0.014 (w - 13.4)$$

Nishida

Συχνά λαμβάνεται:

$$C_r = 0.10 \cdot C_c$$

Αναγνωστόπουλος κ.α. (1994)



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις στερεοποίησης σε αργιλικά εδάφη (χρονική εξέλιξη):

- Είναι δυνατό να εκτιμηθεί η χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων στερεοποίησης με τη χρήση της σχέσης:

$$\Delta H_{c,t} = U \cdot \Delta H_{c,\infty}$$

το U προσδιορίζεται μέσω του

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_s^2}$$

U βαθμός στερεοποίησης

$\Delta H_{c,\infty}$ η τελική τιμή της καθίζησης στερεοποίησης

C_v συντελεστής στερεοποίησης (cm^2/s)

t χρόνος στερεοποίησης (sec^*)

H_s μήκος αποστράγγισης (cm^*)

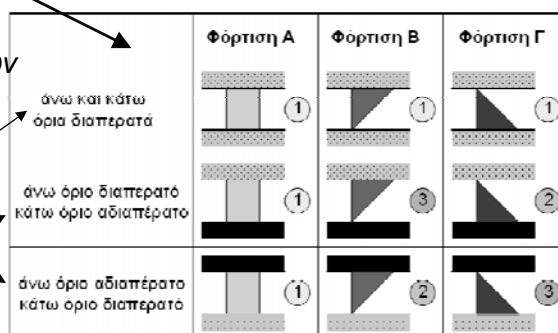
(*ανάλογα με τις μονάδες του C_v)

Προσδιορίζεται η περίπτωση στερεοποίησης (1 ή 2 ή 3) βάση των διαπερατών ορίων και του τύπου φόρτισης

$$H_s = \frac{H}{2}$$

$$H_s = H$$

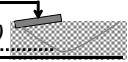
(Αναπαραγωγή σχήματος: Μαργαγκός, 2009)



Φόρτιση Α: Οι τάσεις επιφόρτισης δεν μειώνονται με το βάθος. Περίπτωση εκτεταμένης φόρτισης σε σχέση με το πάχος της εδαφικής στρώσης. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις φόρτισης επιχώματος ή γενικής πτώσης υδροφόρου ορίζοντα

Φόρτιση Β: Οι τάσεις επιφόρτισης μειώνονται με το βάθος. Περίπτωση φόρτισης σε μικρή έκταση όπως για παράδειγμα θεμελίωση σε πέδιλα.

Φόρτιση Γ: Οι τάσεις επιφόρτισης αυξάνονται με το βάθος. Περίπτωση στράγγισης επιχώματος (στερεοποίηση από το ίδιο βάρος του).



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Καθιζήσεις στερεοποίησης σε αργιλικά εδάφη (χρονική εξέλιξη) :

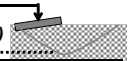
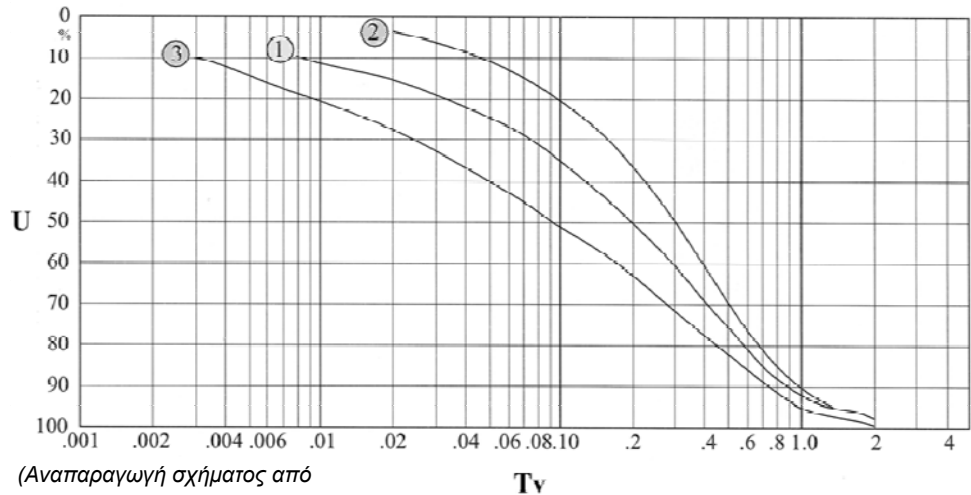
- Είναι δυνατό να εκτιμηθεί η χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων στερεοποίησης με τη χρήση της σχέσης:

$$\Delta H_{c,t} = U \cdot \Delta H_{c,\infty}$$

το U προσδιορίζεται μέσω του

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_s^2}$$

Βάση της καμπύλης που προέκυψε (1 ή 2 ή 3) προσδιορίζεται το U από την τιμή του T_v



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Εφαρμογή :

Άκαμπτο πέδιλο διαστάσεων 3.0x3.0m με κατακόρυφο φορτίο 900kN θεμελιώνεται σε βάθος 2.0m (δίχως επίχωση) πάνω σε κορεσμένο αργιλικό έδαφος πάχους 6m, με $e_o=0.80$, $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, $W_L=24\%$. Αν το έδαφος είναι κανονικά στερεοποιημένο ($OCR=1$) να υπολογιστεί η καθίζηση στερεοποίησης μετά από 1 χρόνο (δίνεται $C_v=10 \text{ m}^2/\text{έτος}$).

Επίλυση :

Η καθίζηση στερεοποίησης για κανονικά στερεοποιημένη άργιλο υπολογίζεται ως:

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \cdot \frac{C_{c,i}}{1 + e_{o,i}} \cdot \log \frac{\sigma'_{vo,i} + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_{vo,i}} \right)$$

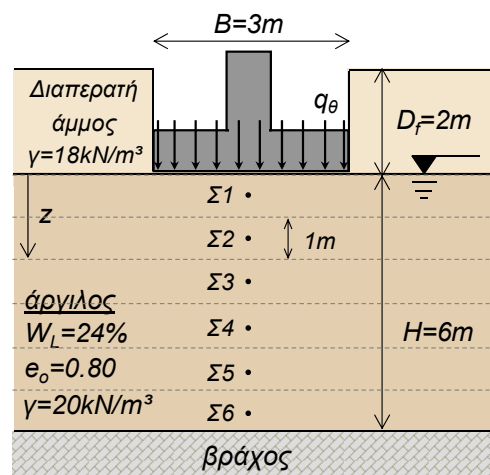
(i) Υπολογισμός τιμής C_c :

Terzaghi and Peck (1967)

$$C_c = 0.009 (W_L - 10) = 0.126$$

(ii) Διαχωρισμός αργιλικού στρώματος σε στρώσεις:

Συστήνεται ο χωρισμός του αργιλικού στρώματος σε στρώσεις πάχους $B/3=1\text{m}$, συνεπώς σε 6 στρώσεις



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

(iii) Υπολογίζονται τα σ'_{vo} , $\Delta\sigma'$ στο μέσον κάθε στρώσης (βλ. Κεφάλαιο 3):

Ενεργός τάση (λόγω ιδίου βάρους εδάφους)

$$\sigma_{vo} = \sum (\gamma_i \cdot h_i) \text{ (ολικές τάσεις). Ενδεικτικά: } \sigma_{vo,\Sigma 3} = 18 \text{ kN/m}^3 \cdot 2\text{m} + 20 \text{ kN/m}^3 \cdot 2.5\text{m} = 86 \text{ kPa}$$

$$u = \gamma_w \cdot z_w \text{ (πίεση του νερού των πόρων - το } z_w \text{ από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα)}$$

$$u_{\Sigma 3} = 10 \text{ kN/m}^3 \cdot 2.5\text{m} = 25 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u \text{ (ενεργές τάσεις)} \quad \sigma'_{vo,\Sigma 3} = 86 - 25 = 61 \text{ kPa}$$

Υπολογισμός $\Delta\sigma'$ (λόγω φορτίου θεμελίου)

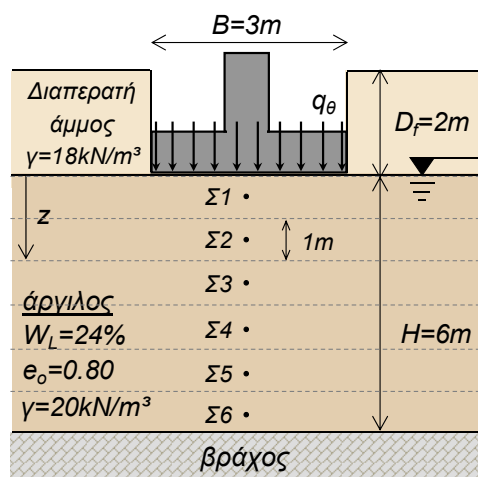
Για άκαμπτο πέδιλο \rightarrow χαρακτηριστικό σημείο C

$$\Delta\sigma' = J_{sc} \cdot q_0$$

$$q_0 = \frac{900}{3 \cdot 3} = 100 \text{ kPa}$$

$$q_0 = q_\theta - \sigma'_{v,Df} = 100 - 2 \cdot 18 = 64 \text{ kPa}$$

$$a = b = 3.0 \text{ m} \rightarrow \frac{a}{b} = 1 \quad (\text{Σχημα } J_{sc} \rightarrow a = L, b = B)$$



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Συνέχεια εφαρμογής :

(iv) Καθίζηση στερεοποίησης $\Delta H_{c,i}$ της κάθε στρώσης: $\Delta H_{c,i} = 1\text{m} \cdot \frac{0.126}{1 + 0.8} \cdot \log \frac{\sigma'_{vo,i} + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_{vo,i}}$

Στρώση	H_i (m)	σ_{vo} (kPa)	u (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	z/b	$J_{s,c}$	$\Delta\sigma'$ (kPa)	$\Delta H_{c,i}$ (m)
Σ1	1.00	46.00	5.00	41.00	0.17	0.72	46.08	0.0229
Σ2	1.00	66.00	15.00	51.00	0.50	0.39	24.96	0.0121
Σ3	1.00	86.00	25.00	61.00	0.83	0.26	16.64	0.0073
Σ4	1.00	106.00	35.00	71.00	1.17	0.19	12.16	0.0048
Σ5	1.00	126.00	45.00	81.00	1.50	0.13	8.32	0.0030
Σ6	1.00	146.00	55.00	91.00	1.83	0.10	6.40	0.0021
Συνολική καθίζηση στερεοποίησης ΔH_c								0.0522

Η παραπάνω τιμή 5.22cm αναφέρεται σε χρονική στιγμή μετά το πέρας της στερεοποίησης

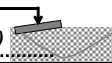
(v) Υπολογίζεται η καθίζηση στερεοποίησης στον 1 χρόνο (μετά την επιφόρτιση):

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_s^2} = \frac{10 \frac{\text{m}^2}{\text{ετος}} \cdot 1 \text{ ετος}}{6^2 \text{m}^2} = 0.278$$

$H_s = 6\text{m}$ καθώς η στερεοποίηση γίνεται μόνο προς τα πάνω (το κάτω όριο δεν είναι διαπερατό)

$$\Delta H_{c,t} = U \cdot \Delta H_{c,\infty} = 0.68 \cdot 0.0522 = 0.0355 \text{ m}$$

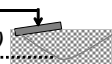
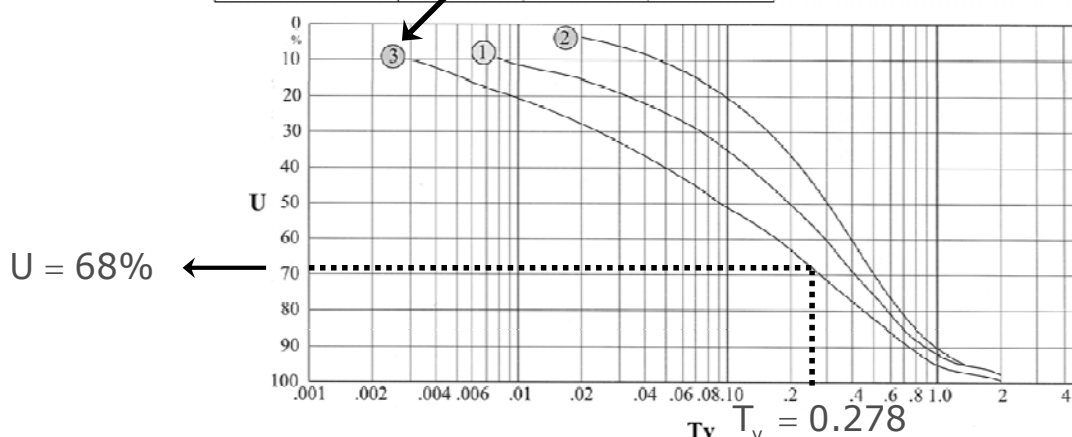
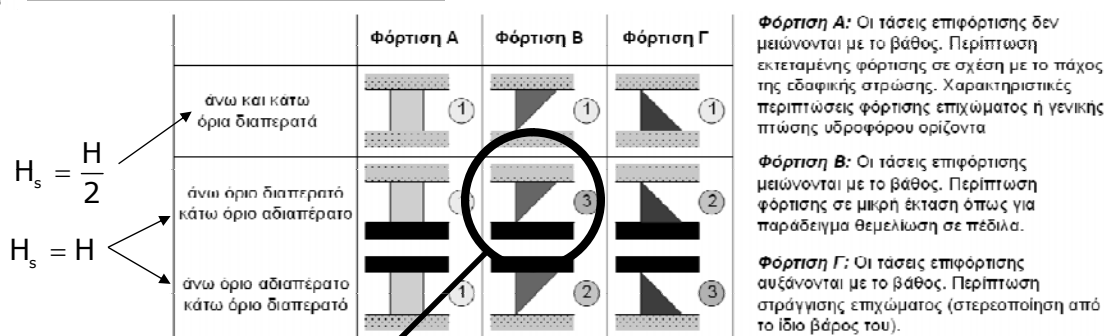
$$\Delta H_{c,t=1\text{ετος}} = 3.55 \text{ cm}$$



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Συνέχεια εφαρμογής :



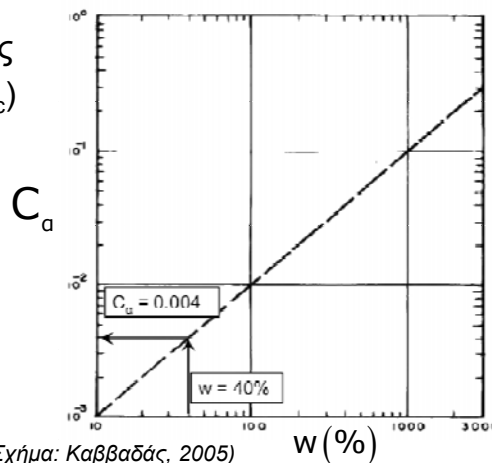
Καθιζήσεις στο έδαφος

• Δευτερεύουσες καθιζήσεις ερπυστικού τύπου σε αργιλικά εδάφη:

- Οι δευτερεύουσες καθιζήσεις (δευτερεύουσα συμπίεση) λαμβάνουν χώρα μετά την ολοκλήρωση της καθίζησης από στερεοποίηση και μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση:

$$\Delta H_s(t) = \sum_{i=1}^n \Delta H_i(t) = \sum_{i=1}^n \left(H_i \cdot \frac{C_{a,i}}{1 + e_{c,i}} \cdot \log \frac{t}{t_{c,i}} \right)$$

- $C_{a,i}$ συντελεστής δευτερεύουσας στερεοποίησης στη στρώση i (Τσότσος $\rightarrow C_a = 0.025 \sim 0.06 C_c$)
- H_i πάχος της στρώσης i
- $e_{c,i}$ δείκτης πόρων μετά το πέρας της στερεοποίησης της στρώσης i
- $t_{c,i}$ ο χρόνος της πρωτεύουσας στερεοποίησης της στρώσης i
- t ο χρόνος που υπολογίζουμε τη δευτερεύουσα στερεοποίηση



Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Εφαρμογή :

Αν ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της πρωτεύουσας στερεοποίησης σε αργιλικό έδαφος είναι 3 έτη, να υπολογιστεί η καθίζηση από δευτερεύουσα στερεοποίηση μετά από 40 έτη. Δίνονται πάχος αργιλικού στρώματος 10m, με $e_c=0.70$, $C_c=0.12$.

Επίλυση :

Η καθίζηση από δευτερεύουσα στερεοποίηση υπολογίζεται ως:

$$\Delta H_s(t) = \sum_{i=1}^n \left(H_i \cdot \frac{C_{\alpha,i}}{1 + e_{c,i}} \cdot \log \frac{t}{t_{c,i}} \right) \xrightarrow[\text{ενιαία χαρακτηριστικά}]{\text{εδαφική στρώση με}} \Delta H_s(t) = H \cdot \frac{C_\alpha}{1 + e_c} \cdot \log \frac{t}{t_c}$$

(i) Υπολογισμός τιμής C_α :

Τσότσος (1991) $\rightarrow C_\alpha = (0.025 \sim 0.06) C_c = 0.003 \sim 0.0072$

Επιλέγεται μέση τιμή $C_\alpha = 0.005$

(ii) Υπολογισμός καθίζησης από δευτερεύουσα στερεοποίηση:

$$\Delta H_s(t) = H \cdot \frac{C_\alpha}{1 + e_c} \cdot \log \frac{t}{t_c} = 10 \cdot \frac{0.005}{1 + 0.70} \cdot \log \frac{40}{3} = 0.0331 \text{ m}$$

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Ανακεφαλαίωση μεθόδων υπολογισμού καθιζήσεων που παρουσιάστηκαν:

(α) Αμμώδη εδάφη (μη συνεκτικά)

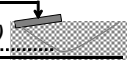
- Το σύνολο πρακτικά της καθίζησης είναι άμεση καθίζηση η οποία μπορεί να υπολογιστεί με την εμπειρική μέθοδο Schmertmann ή με την ελαστική μέθοδο Steinbrenner

(β) Αργιλικά εδάφη (συνεκτικά)

β1) Η άμεση καθίζηση μπορεί να υπολογιστεί με την ελαστική μέθοδο Steinbrenner ή με τη μέθοδο Janbu et al.

β2) Η καθίζηση από στερεοποίηση μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση των συντελεστών C_c , C_r της δοκιμής οιδημέτρου, ενώ είναι δυνατό να βρεθεί η εξέλιξη της καθίζησης στερεοποίησης με το χρόνο

β3) Η δευτερεύουσα ερπυστική καθίζηση μπορεί να υπολογιστεί με χρήση του συντελεστή δευτερεύουσας συμπίεσης C_α



Καθιζήσεις στο έδαφος

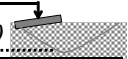
- Τιμές ιδιοτήτων εδαφικού υλικού για υπολογισμό καθιζήσεων:

- Η επιλογή της κατάλληλης τιμής ιδιοτήτων για τον υπολογισμό των καθιζήσεων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς οι εδαφικές παράμετροι πρέπει να ανταποκρίνονται στις συνθήκες που αντιστοιχούν σε κάθε σχέση υπολογισμού.

- Οι τιμές παραμέτρων όπως C_c , C_r κ.τ.λ. θα πρέπει να προσδιορίζονται από τις αντίστοιχες δοκιμές (π.χ. οιδημέτρου)

- Για τις τιμές E και ν απαιτείται συχνά κάποια «λογική» επιλογή, ιδίως όταν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία. Σε αυτή την περίπτωση είναι θεμιτή και μια απλοποιημένη ανάλυση ευαισθησίας όπου η καθίζηση υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη ένα πιθανό εύρος διακύμανσης του E .

- Ειδικότερα για το E υπενθυμίζεται ότι λαμβάνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με τις συνθήκες προσδιορισμού του (E_{oed} μονοδιάστατης συμπίεσης-οιδημετρικό, E_{tr} τριαξονικής δοκιμής, $E_{uniaxial}$ μονοαξονικής θλίψης αλλά και συνθήκες CD-CU-UU)

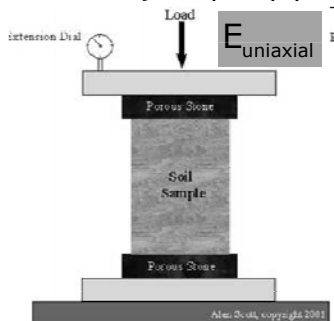


Καθιζήσεις στο έδαφος

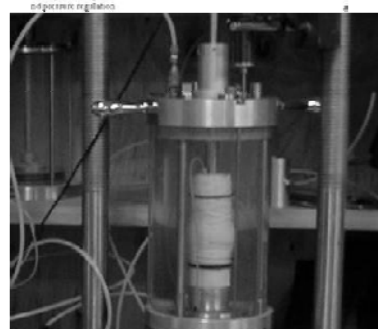
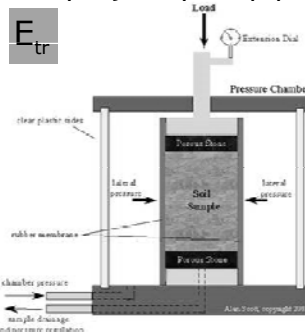
- Τιμές ιδιοτήτων εδαφικού υλικού για υπολογισμό καθιζήσεων:

$$E_{uniaxial} < E_{tr} < E_{oed}$$

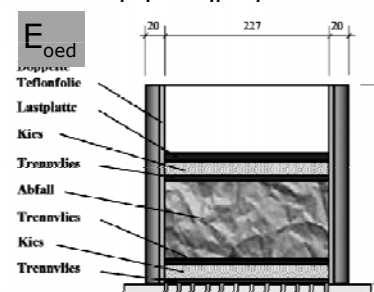
Μονοαξονική θλίψη

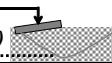


Τριαξονική δοκιμή



Δοκιμή οιδημέτρου





Καθιζήσεις στο έδαφος

- Τιμές ιδιοτήτων εδαφικού υλικού για υπολογισμό καθιζήσεων:

(α) Άμεσες καθιζήσεις **αμμωδών** εδαφών (μέθοδοι Schmertmann, Steinbrenner). Η τιμή των παραμέτρων μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

Στις άμεσες καθιζήσεις αμμωδών εδαφών τα E_s , ν πρέπει να αφορούν **στραγγισμένες συνθήκες**

α1) Συσχέτιση με αριθμό χτύπων N_{SPT}

Schmertmann (1970)

$$E_s \left(\frac{kN}{m^2} \right) = 766 \cdot N$$

Tassios &
Anagnostopoulos (1974)

$$E_s \text{ (MPa)} = \alpha + C(N \pm 6)$$

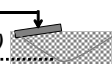
N	α
$N < 15$	$\alpha = 0$
$N > 15$	$\alpha = 40$

Είδος εδάφους	C
Ιλυώδης άμμος	3
Λεπτόκοκκη άμμος	3.5
Μεσόκοκκη άμμος	4.5
Χονδρόκοκκη άμμος	7
Χαλικώδης άμμος	10
Αμμώδεις χάλικες	12

α2) Συσχέτιση με δοκιμή διείσδυσης κώνου q_c

$$E_s = 2 \cdot q_c \quad \text{Schmertmann (1970)}$$

$$\left. \begin{aligned} E_s &= 2.5 \cdot q_c && \text{τετραγωνικά-κυκλικά θεμέλια} \\ E_s &= 3.5 \cdot q_c && \text{θεμελιολωρίδες} \end{aligned} \right\} \text{Schmertmann et al. (1978)}$$



Καθιζήσεις στο έδαφος

- Τιμές ιδιοτήτων εδαφικού υλικού για υπολογισμό καθιζήσεων:

(α) Άμεσες καθιζήσεις **αμμωδών** εδαφών (μέθοδοι Schmertmann, Steinbrenner). Η τιμή των παραμέτρων μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

α3) Πίνακες συσχέτισης παραμέτρων

Ελαστικές παράμετροι αμμωδών εδαφών		
Είδος εδάφους	Μέτρο ελαστικότητας E_s (kN/m ²)	Δείκτης Poisson
Χαλαρή άμμος	10500 - 24000	0.20 - 0.40
Μέτριας πυκνότητας άμμος	17250 - 27600	0.25 - 0.40
Πυκνή άμμος	34500 - 55200	0.30 - 0.45
Ιλυώδης άμμος	10350 - 17250	0.20 - 0.40
Αμμοχάλικο	69000 - 172500	0.15 - 0.35

(Πηγή: Das, 2007)

Ελαστικές παράμετροι αμμωδών εδαφών		
Είδος εδάφους	Μέτρο ελαστικότητας E_s (kN/m ²)	Δείκτης Poisson
Χονδρόκοκκη και μέτρια άμμος		0.15 - 0.25
Χαλαρή	25000 - 35000	
Μέτριας πυκνότητας	30000 - 40000	
Πυκνή	40000 - 45000	
Λεπτόκοκκη άμμος		0.25 - 0.30
Χαλαρή	20000 - 25000	
Μέτριας πυκνότητας	25000 - 35000	
Πυκνή	35000 - 40000	
Αμμοίλυς		0.30 - 0.35
Χαλαρή	8000 - 12000	
Μέτριας πυκνότητας	10000 - 12000	
Πυκνή	12000 - 15000	

(Πηγή: Das, 1999)

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Τιμές ιδιοτήτων εδαφικού υλικού για υπολογισμό καθιζήσεων:

(β) Άμεσες καθιζήσεις **αργιλικών** εδαφών (μέθοδοι Steinbrenner, Janbu et al.). Η τιμή των παραμέτρων μπορεί να εκτιμηθεί:

Στις άμεσες καθιζήσεις κορεσμένων αργιλικών εδαφών τα E , ν πρέπει να αφορούν αστράγγιστες συνθήκες $E=E_u$, $\nu=\nu_u=0.5$

Το μέτρο ελαστικότητας E υπό στραγγισμένες συνθήκες συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας E_u υπό αστράγγιστες συνθήκες με τη σχέση (Καββαδάς 2005):

$$E_u = \frac{3}{2(1 + \nu)} E$$

Το ν στην παραπάνω σχέση είναι στην στραγγισμένη του τιμή.

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Τιμές ιδιοτήτων εδαφικού υλικού για υπολογισμό καθιζήσεων:

(β) Άμεσες καθιζήσεις **αργιλικών** εδαφών (μέθοδοι Steinbrenner, Janbu et al.). Η τιμή των παραμέτρων μπορεί να εκτιμηθεί:

β1) Συσχέτιση με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους c_u

Das (2007)

$$E_s = 250 \sim 500 \cdot c_u \quad \begin{array}{l} \text{κανονικά} \\ \text{στερεοποιημένες άργιλοι} \end{array}$$
$$E_s = 750 \sim 1000 \cdot c_u \quad \begin{array}{l} \text{υπερστερεοποιημένες} \\ \text{άργιλοι} \end{array}$$

Bowles (1997)

$$E_s = 200 \sim 500 \cdot c_u \quad \begin{array}{l} \text{κανονικά} \\ \text{στερεοποιημένες άργιλοι} \end{array}$$
$$E_s = 750 \sim 1200 \cdot c_u \quad \begin{array}{l} \text{Ελαφρώς} \\ \text{υπερστερεοποιημένες} \end{array}$$
$$E_s = 1500 \sim 2000 \cdot c_u \quad \begin{array}{l} \text{Έντονα} \\ \text{υπερστερεοποιημένες} \end{array}$$

Καθιζήσεις στο έδαφος

- Τιμές ιδιοτήτων εδαφικού υλικού για υπολογισμό καθιζήσεων:

(β) Άμεσες καθιζήσεις **αργιλικών** εδαφών (μέθοδοι Steinbrenner, Janbu et al.). Η τιμή των παραμέτρων μπορεί να εκτιμηθεί:

β2) Πίνακες συσχέτισης παραμέτρων

Ελαστικές παράμετροι αργιλικών εδαφών		
Είδος εδάφους	Μέτρο ελαστικότητας E_s (kN/m ²)	Δείκτης Poisson
Μαλακή άργιλος	4100 - 20700	0.20 - 0.50
Μέτριας σφιφρότητας άργιλος	20700 - 41400	0.20 - 0.50
Στιφρή άργιλος	41400 - 96600	0.20 - 0.50

* $\nu=0.50$ για αστράγγιστες συνθήκες

Συνήθως $\nu=0.4-0.5$ για αργιλικά εδάφη (Bowles, 1997)

(Πηγή πίνακα: Das, 2007)

Ελαστικές παράμετροι αργιλικών εδαφών	
Είδος εδάφους	Μέτρο ελαστικότητας E_s (kN/m ²)
Πολύ μαλακή άργιλος	2000 - 15000
Μαλακή άργιλος	5000 - 25000
Μέτριας σφιφρότητας άργιλος	15000 - 50000
Στιφρή άργιλος	50000 - 100000
Αμμώδης άργιλος	25000 - 250000

(Πηγή πίνακα: Bowles, 1997)

Καθιζήσεις στο έδαφος



❖ Εφαρμογή :

(α) Να εκτιμηθεί η τιμή του δείκτη Poisson και του μέτρου ελαστικότητας για χαλαρό λεπτόκοκκο αμμώδες έδαφος.

(β) Ποιες θα είναι οι τιμές ν και E αν δίνεται από δοκιμή N_{SPT} αριθμός χτύπων $N=14$?

Επίλυση :

(α) Με βάση πίνακες με τιμές παραμέτρων προκύπτουν οι παρακάτω τιμές:

$$E_s = 10500 \sim 24000 \text{ kPa} \quad \nu = 0.20 \sim 0.40 \quad (\text{γενικά όρια χαλαρής άμμου})$$

$$E_s = 20000 \sim 25000 \text{ kPa} \quad \nu = 0.25 \sim 0.30 \quad (\text{λεπτόκοκκη χαλαρή άμμος})$$

(β) Με βάση τους χτύπους της δοκιμής N_{SPT} προκύπτει :

$$\text{Schmertmann (1970)} \quad E_s \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 766 \cdot N = 766 \cdot 14 = 10724 \text{ kPa} = 10.72 \text{ MPa}$$

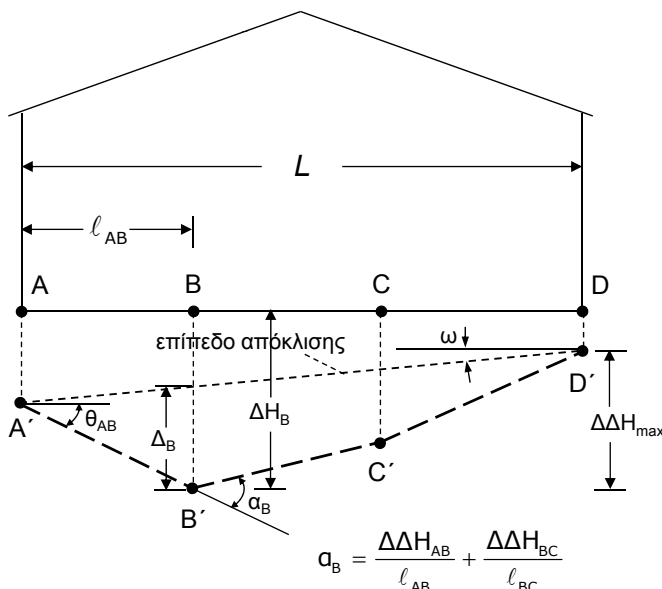
$$\text{Tassios \& Anagnostopoulos (1974)} \quad E_s \text{ (MPa)} = a + C(N \pm 6) = 0 + 3.5(14 \pm 6) \begin{cases} E_s = 28 \text{ MPa} \\ E_s = 70 \text{ MPa} \end{cases}$$

Γενικότερα οι εκτιμήσεις που προκύπτουν από συσχέτιση με δοκιμές είναι πιο αξιόπιστες από πινακοποιημένες τιμές. Απαιτείται μεγάλη προσοχή όμως στην χρήση των διαφόρων σχέσεων υπολογισμού (π.χ. στην τελευταία σχέση το $N=14$ είναι στο όριο των τιμών α).

Καθιζήσεις στο έδαφος

Αποδεκτά όρια καθιζήσεων:

Στο σχήμα φαίνονται τα σημαντικότερα μεγέθη που σχετίζονται με τις καθιζήσεις και ο τρόπος συμβολισμού τους:



(Ορισμοί: Burland et al. 1977)

Επανασχεδίαση σχήματος από Das, 1999)

• ΔH : καθίζηση ενός σημείου (π.χ. ΔH_B)

• $\Delta \Delta H$: διαφορική καθίζηση μεταξύ σημείων. Ενδιαφέρει συνήθως μεταξύ διαδοχικών σημείων, όπως και το αντίστοιχο $\Delta \Delta H / \ell$

• θ : γωνιακή στροφή (η κλίση ως προς την οριζόντιο της ευθείας που ενώνει τις καθιζήσεις διαδοχικών σημείων)

• Δ : σχετική απόκλιση (μετατόπιση σημείου ως προς το επίπεδο απόκλισης που ορίζεται από δυο σημεία αναφοράς)

• Δ / ℓ : λόγος σχετικής απόκλισης (προς της απόσταση των δυο σημείων αναφοράς)

• ω : η στροφή όλης της κατασκευής ή τμήματος θεωρούμενη ως άκαμπτο στερεό

• α : γωνιακή παραμόρφωση (γωνία μεταξύ των ευθειών που συνδέουν διαδοχικά σημεία καθιζήσεως)

Καθιζήσεις στο έδαφος

Αποδεκτά όρια καθιζήσεων:

Στη συνέχεια εμφανίζονται πινακοποιημένες οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές μεγεθών που σχετίζονται με την καθίζηση. Ενδιαφέρουν περισσότερο η μέγιστη καθίζηση και η μέγιστη διαφορική καθίζηση $\Delta H / \ell$ ιδιαίτερα μεταξύ γειτονικών θεμελίων:

Βαθμός βλάβης με τον λόγο διαφορικής καθιζήσεως $\Delta \Delta H / \ell$	
Περιγραφή βλάβης	Όριο $\Delta \Delta H / \ell$
Όριο για μηχανολογικό εξοπλισμό ευαίσθητο σε καθιζήσεις	1/750
Όριο για πλαίσια με διαγώνιους συνδέσμους	1/600
Ασφαλές όριο για κτίρια που δεν επιτρέπεται η εμφάνιση ρηγματώσεων	1/500
Όριο εμφάνισης πρώτων ρωγμών σε τοίχους πλήρωσης	1/300
Όριο για εμφάνιση απόκλισης από την κατακόρυφο ψηλών και δύσκαμπτων κτιρίων	1/250
Σημαντικές ρηγματώσεις σε οπτοπλινθοδομές	1/150
Ασφαλές όριο για εύκαμπτες οπτοπλινθοδομές με $H/L < 1/4$	
Όριο για εμφάνιση δομικών αστοχιών γενικά σε κτίρια	

(Πηγή στοιχείων πίνακα: Bjerrum, 1963)

Καθίζηση	Όρια επιτρεπτών καθιζήσεων		
	Άμμος		Άργιλος
	Terzaghi and Peck (1948)	Skempton and MacDonald (1956)	Skempton and MacDonald (1956)
Μέγιστη διαφορική καθίζηση $\Delta \Delta H$	2.0 cm	2.5 cm	4.0 cm
Μέγιστη καθίζηση ΔH (μεμονωμένα πέδιλα)	2.5 cm	4.0 cm	6.5 cm
Μέγιστη καθίζηση ΔH (κοιτόστρωση)	5.0 cm	4.0 - 6.5 cm	6.5 - 10 cm

(Πηγή στοιχείων πίνακα: Barnes, 2000)