

ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

« ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ »

7ο ΕΞ. ΠΟΛ-ΜΗΧ. ΕΜΠ - Ακαδ. Έτος 2005 - 06

ΔΙΑΛΕΞΗ 5

Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων :
Υπολογισμός καθιζήσεων σε αργιλικά εδάφη

02.11.2005

Υπολογισμός καθιζήσεων σε αργιλικά εδάφη

Συνολική καθίζηση : $\rho = \rho_i + \rho_c + \rho_s$

ρ_i = άμεση καθίζηση

ρ_c = καθίζηση εκ στερεοποίησης

ρ_s = ερπυστική (δευτερεύουσα) καθίζηση

Άμεση (αστράγγιστη) καθίζηση αργιλικών εδαφών :

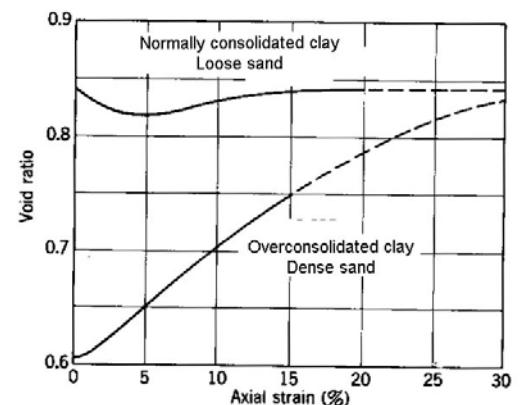
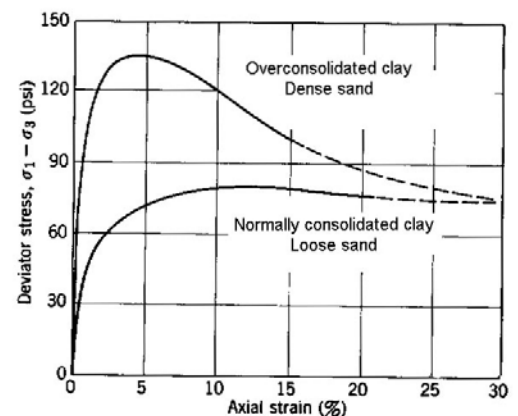
- Για φόρτιση αρκετά μακριά από την κατάσταση αστοχίας, η συμπεριφορά των αργιλικών εδαφών είναι κατά προσέγγιση γραμμική. Στις υπερστερεοποιημένες αργίλους, η συμπεριφορά παραμένει γραμμική μέχρι αρκετά κοντά στην αστοχία.

Συνεπώς, αρκετά μακριά από την αστοχία, οι άμεσες καθιζήσεις συνήθως υπολογίζονται με σχέσεις ελαστικής μορφής :

- Κανονικά στερεοποιημένες αργίλοι : μέθοδος Butler
- Υπερστερεοποιημένες αργίλοι : μέθοδοι Steinbrenner, Milovic, Janbu με $E = E_u$ και $\nu_u = 0.5$.

- Για φόρτιση κοντά στην κατάσταση αστοχίας, η συμπεριφορά των αργιλικών εδαφών είναι έντονα μή-γραμμική (ιδίως σε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους).

Συνεπώς, κοντά στην κατάσταση αστοχίας, οι άμεσες καθιζήσεις συνήθως υπολογίζονται με αριθμητικές μεθόδους (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία)



Στη διάλεξη αυτή εξετάζονται οι καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης και οι ερπυστικές καθιζήσεις κορεσμένων αργιλικών εδαφών.

Υπολογισμός καθιζήσεων σε αργιλικά εδάφη

Καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης (ρ_c):

Χρονικά εξελισσόμενες καθιζήσεις λόγω εκτόνωσης των υπερπλίσεων πόρων κατά τη φόρτιση κορεσμένων εδαφών (κυρίως αργιλικών).

Καθιζήσεις στερεοποίησης σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη :

- Συνήθως αποτελούν σημαντικό ποσοστό της συνολικής καθίζησης (εάν η φόρτιση δεν πλησιάζει την κατάσταση αστοχίας). Όταν η φόρτιση πλησιάζει την αστοχία, οι άμεσες καθιζήσεις είναι επίσης πολύ σημαντικές.
- Συνήθως το μέγεθος και η χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης υπολογίζονται με χρήση της **θεωρίας στερεοποίησης Terzaghi**

Καθιζήσεις στερεοποίησης σε μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη :

- Συνήθως αποτελούν αμελητέο ποσοστό της συνολικής καθίζησης, επειδή ενσωματώνονται στην άμεση καθίζηση (λόγω της πολύ ταχείας αποτόνωσης των υπερπλίσεων πόρων στα αμμώδη εδάφη, που έχουν μεγάλη διαπερατότητα).
- Συνεπώς, στα επόμενα εξετάζονται μόνον οι καθιζήσεις στερεοποίησης κορεσμένων συνεκτικών (αργιλικών) εδαφών

Υπολογισμός καθιζήσεων
στερεοποίησης (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη

B = εύρος της επιφάνειας φόρτισης

H = πάχος συμπιεστή στρώσης

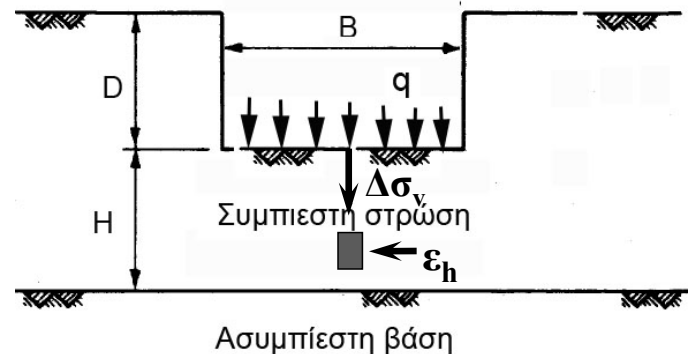
Περίπτωση 1 : $B > (3 \div 4) H$

Μπορεί να θεωρηθεί ότι :

- Οι συνθήκες φόρτισης αντιστοιχούν στη μονοδιάστατη συμπίεση (δηλαδή $\epsilon_h = 0$)
- Η πρόσθετη κατακόρυφη ενεργός τάση ($\Delta\sigma_v$) είναι σταθερή με το βάθος, δηλαδή $\Delta\sigma_v = q$

Αρα : Η καθίζηση (ρ_c) υπολογίζεται θεωρώντας συνθήκες συμπίεσομέτρου (1-D)

$$\rho_c = \rho_{c1}$$



Περίπτωση 2 : $B < (3 \div 4) H$

Πρέπει :

- Να γίνει απομείωση του $\Delta\sigma_v$ με το βάθος ($\Delta\sigma_v < q$)
- Να ληφθεί υπόψη ότι η φόρτιση κάτω από το πέδιλο δεν αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη συμπίεση (τριδιάστατες συνθήκες : $\epsilon_h \neq 0$)

Αρα : Η καθίζηση είναι μικρότερη από την αντιστοιχούσα σε συνθήκες συμπίεσομέτρου

$$\rho_c = \lambda \rho_{c1} \quad (\lambda < 1)$$

1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη υπό συνθήκες συμπίεσομέτρου (1-D) :

1.1. Με παραδοχή γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους :

$$\Delta\sigma'_v = E_s \Delta\varepsilon_v \quad \text{όπου :} \quad E_s = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

E_s = μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης

Για $\nu = 1/3$: $E_s \approx 1.5 E$ (συνήθης περίπτωση)

Για $\nu = 0$: $E_s = E$ (πλασματική περίπτωση)

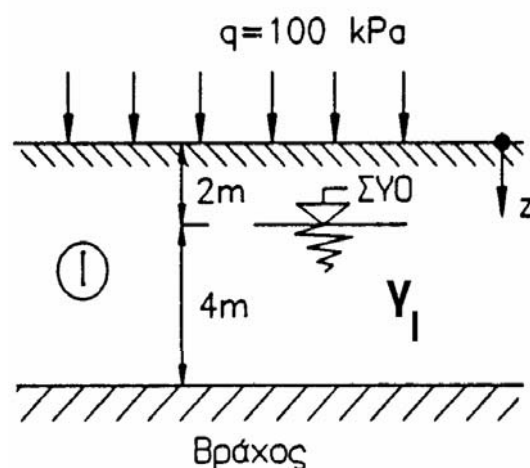
Παράδειγμα εφαρμογής :

Συμπίεση του εδάφους (πάχος συμπίεστης ζώνης 6m) λόγω εκτεταμένης επιφόρτισης $q = 100 \text{ kPa}$. Ιδιότητες εδάφους : $E = 10 \text{ MPa}$, $\nu = 1/3$

$$E_s = 1.5 * E = 15 \text{ MPa}$$

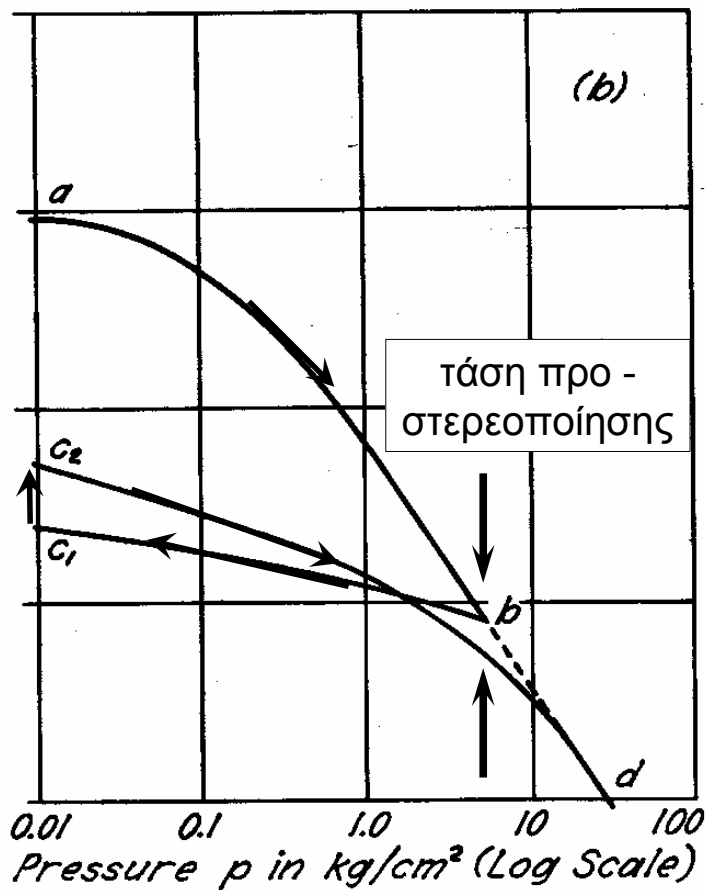
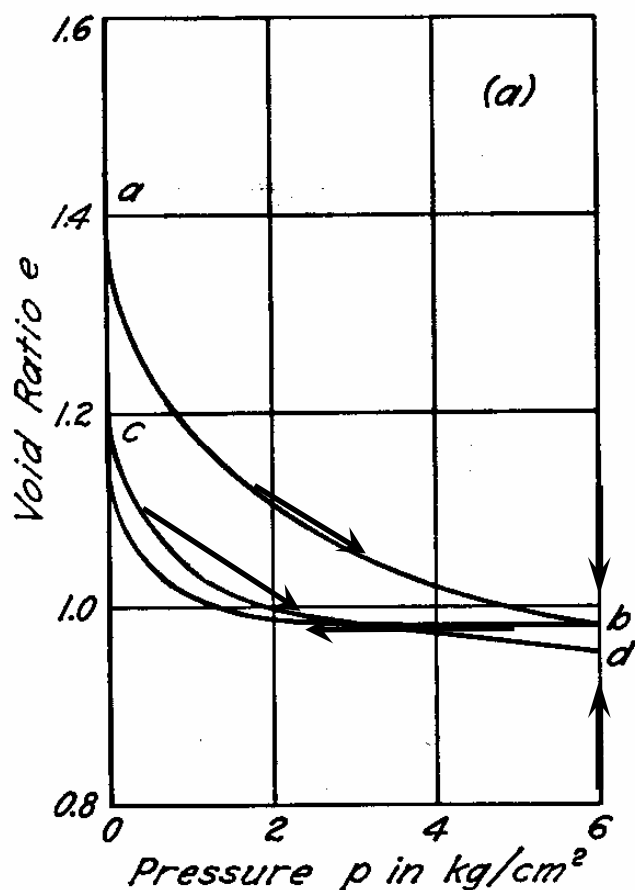
Συμπίεση του εδαφικού στρώματος :

$$\rho_{c1} = \Delta\varepsilon_v \cdot H = \frac{\Delta\sigma'_v}{E_s} \cdot H = \frac{100}{15000} \cdot 600 = 4 \text{ cm}$$



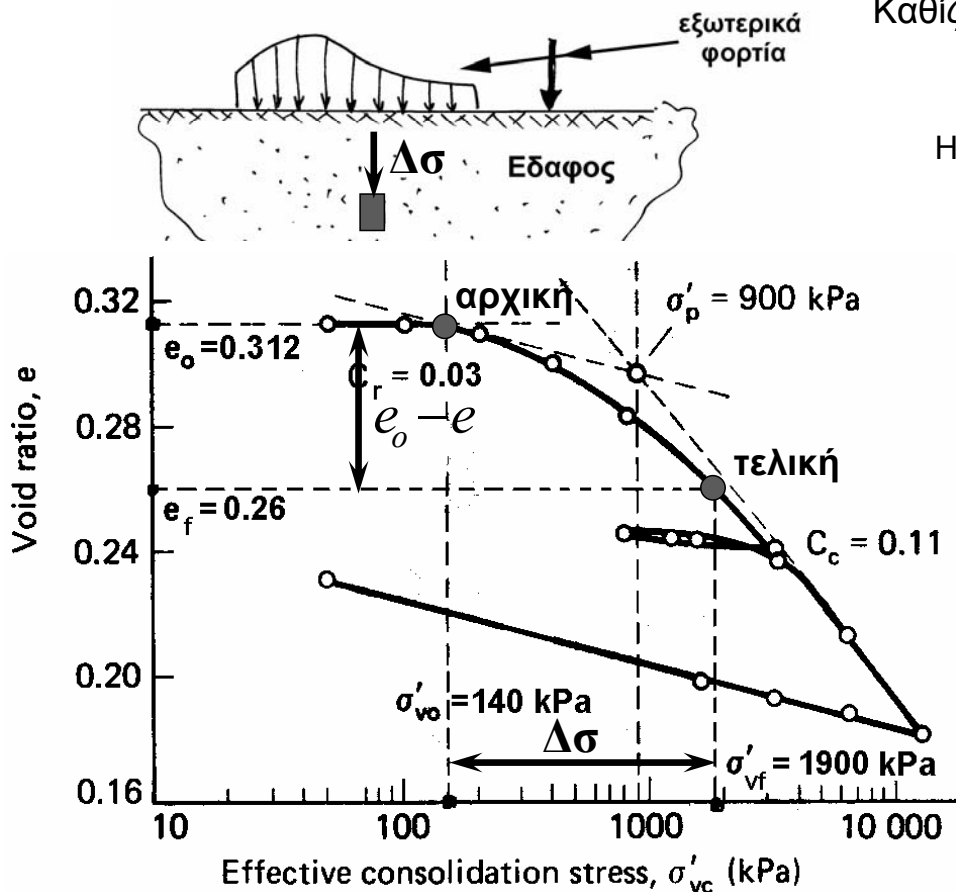
1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D)

Ανάπτυξη προστερεοποίησης στα εδάφη λόγω προφόρτισης



1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D) :

1.2. Με χρήση της καμπύλης τάσης – συμπίεσης του εδάφους (καμπύλη συμπίεσης από τη δοκιμή του συμπίεσομέτρου) :



Καθίζηση στερεοποιήσεως :

$$\rho_{c1} = H \Delta \varepsilon_v$$

H = πάχος συμπίεστης στρώσης

$$\Delta \varepsilon_v = \frac{e_o - e}{1 + e_o}$$

e_o = αρχική τιμή του δείκτη πόρων

e = τελική τιμή του δείκτη πόρων (λόγω αύξησης της κατακόρυφης ενεργού τάσης κατά $\Delta\sigma$)

Παράδειγμα :

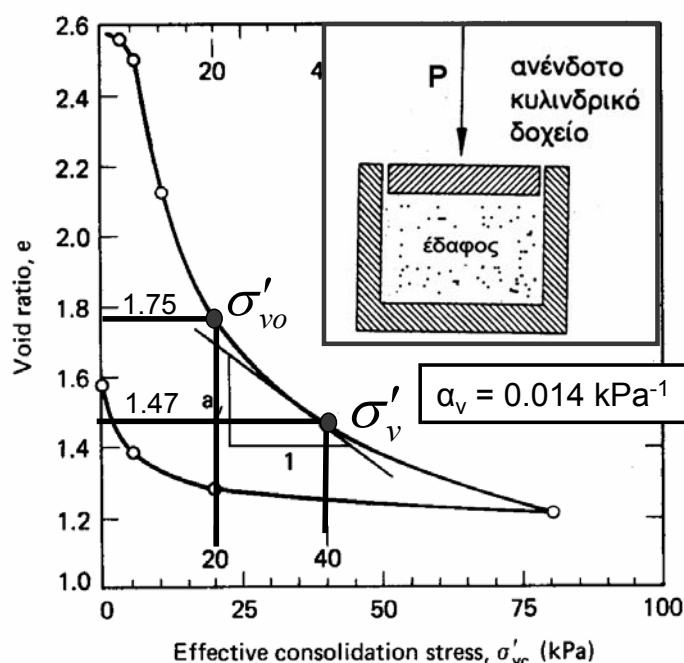
$$\begin{aligned} H &= 6\text{m}, \Delta\sigma = 1900 - 140 = 1760 \text{ kPa} \\ \rho_{c1} &= 6 \times (0.312 - 0.26) / (1 + 0.312) = \\ &= 6 \times 0.0396 = 0.238\text{m} \\ &= 23.8 \text{ cm} \end{aligned}$$

1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D) :

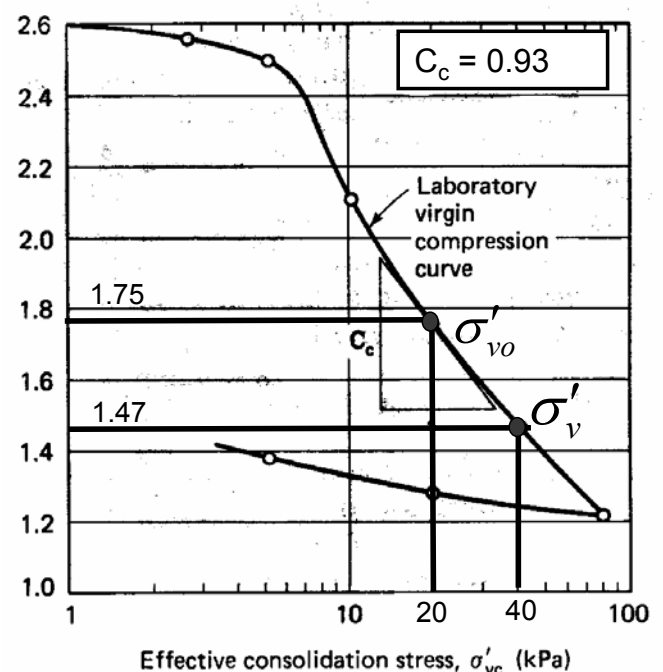
1.3. Με παραδοχή «λογαριθμικής» συμπεριφοράς του εδάφους

Η συμπεριφορά των εδαφών κατά την μονοδιάστατη παραμόρφωση δεν είναι γραμμική

Λόγος στερεοποίησης : $a_v = \frac{e_o - e}{\sigma'_v - \sigma'_{vo}}$ (μεταβλητός)



Δείκτης στερεοποίησης : $C_c = \frac{e_o - e}{\log(\sigma'_v / \sigma'_{vo})}$



1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D) :
 Καμπύλες συμπίεσης ως προς την παραμόρφωση (αντί του δείκτη πόρων)

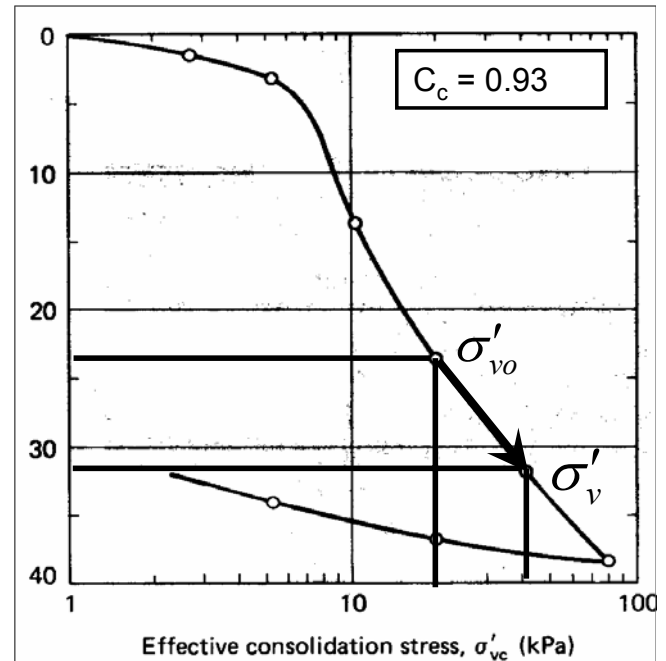
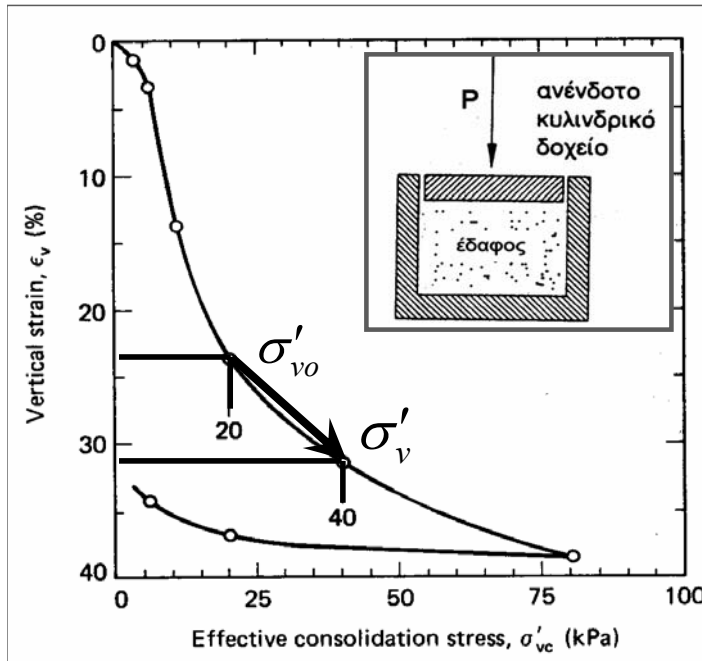
Καθίζηση στερεοποιήσεως :

$$\rho_{c1} = H \Delta \varepsilon_v$$

$$\Delta \varepsilon_v = \frac{e_o - e}{1 + e_o} \Rightarrow \Delta \varepsilon_v = \frac{C_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vo}} \right)$$

$$\Delta \varepsilon_v = \frac{e_o - e}{1 + e_o} = \frac{1.75 - 1.47}{1 + 1.75} = 0.102 = 10.2\%$$

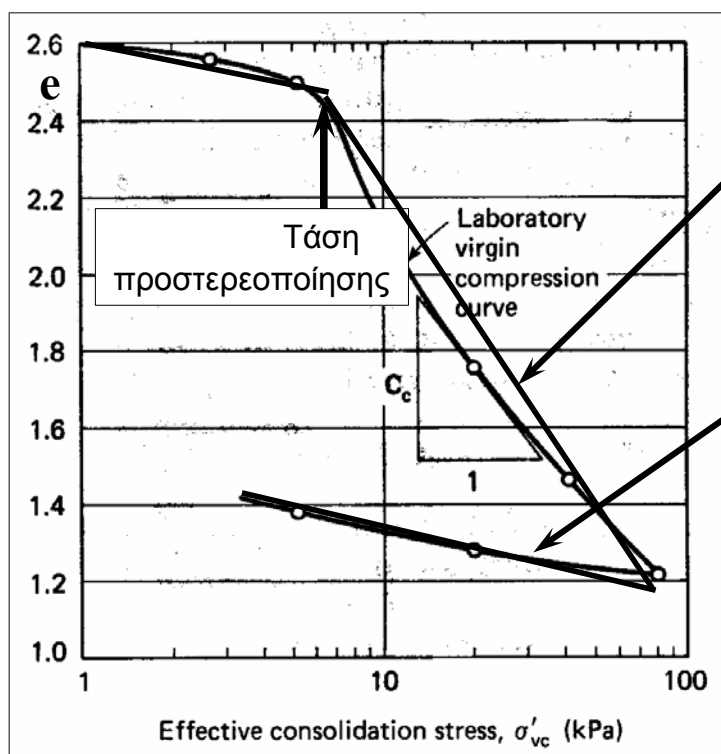
$$\Delta \varepsilon_v = \frac{0.93}{1 + 1.75} \log \left(\frac{40}{20} \right) = 0.102 = 10.2\%$$



1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D) :

- Απότομη αλλαγή κλίσης στην τάση προστερεοποίησης
- Πολύ μικρή κλίση κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε σχέση με την κανονική φόρτιση

Δείκτης στερεοποίησης κατά την κανονική φόρτιση :



$$C_c = \frac{e_o - e}{\log(\sigma'_v / \sigma'_{vo})}$$

Δείκτης στερεοποίησης κατά την επαναφόρτιση :

$$C_r = \frac{e_o - e}{\log(\sigma'_v / \sigma'_{vo})}$$

Αρχική φόρτιση :

$$C_c = (2.47 - 1.18) / \log(80/7) = 1.219$$

Επαναφόρτιση :

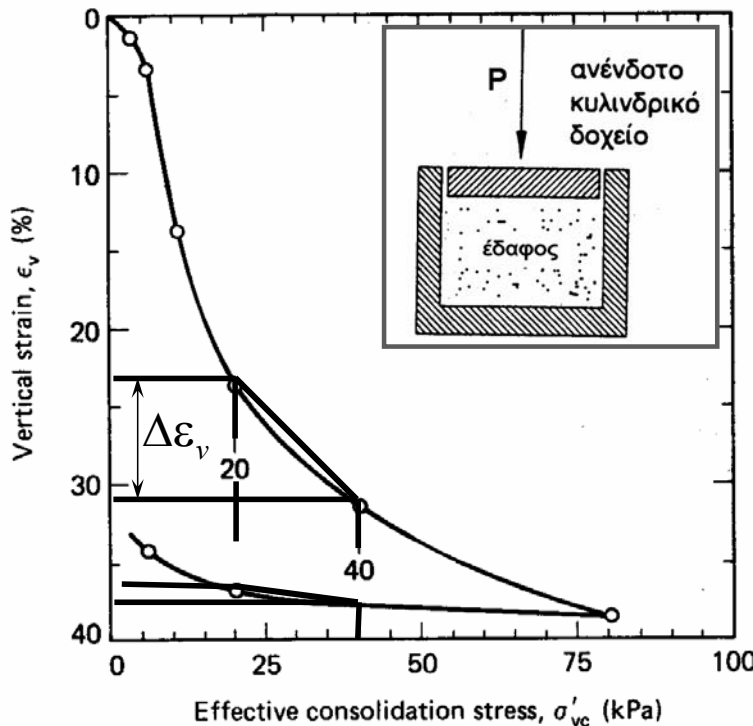
$$C_r = (1.40 - 1.18) / \log(80/5) = 0.183$$

1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D) :

Πολύ μικρή κλίση της καμπύλης $\sigma - \epsilon$ κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε σχέση με την κανονική φόρτιση

Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης :

$$E_s = \frac{\sigma'_v - \sigma'_{vo}}{\Delta \epsilon_v}$$



Η τιμή του E_s κατά την επαναφόρτιση είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό τι κατά την αρχική φόρτιση

Αρχική φόρτιση :

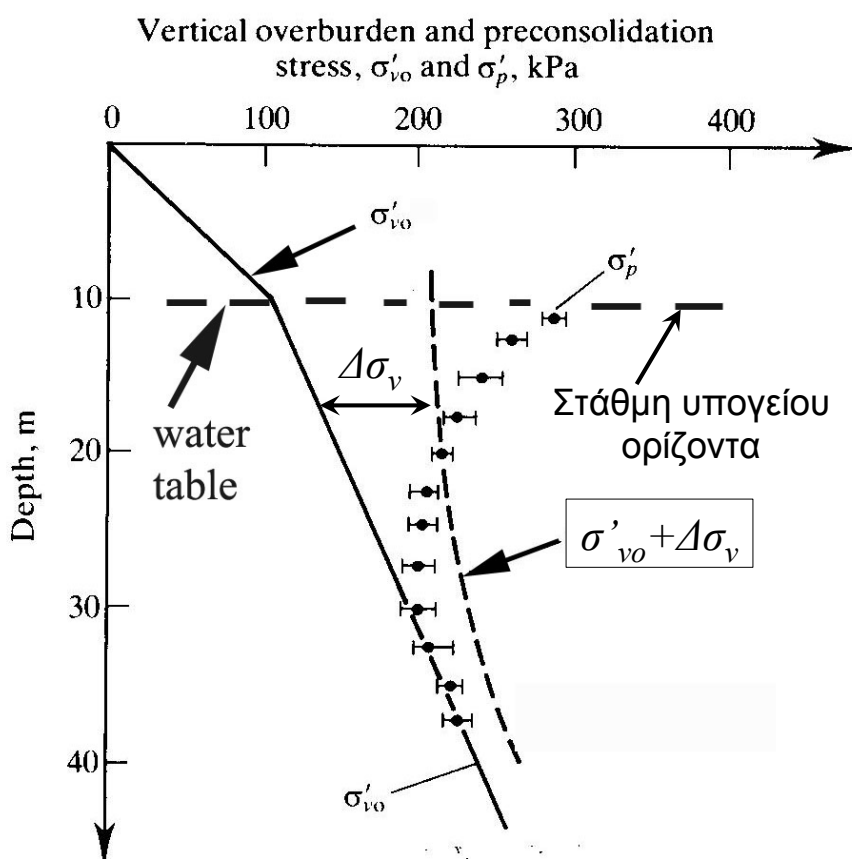
$$E_s = (40-20)/(0.32-0.23)=222 \text{ kPa}$$

Επαναφόρτιση :

$$E_s = (40-20)/(0.38-0.37)=2000 \text{ kPa}$$

1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D) :

Εκτίμηση της καθίζησης (ρ_{c1}) εδαφικού στρώματος πάχους (H) λόγω αύξησης της κατακόρυφης ενεργού τάσης από σ'_{vo} σε $\sigma'_{vo} + \Delta \sigma_v$



σ'_p = τάση προφόρτισης

Η άργιλος είναι υπερ-στερεοποιημένη μέχρι βάθους 35m περίπου.

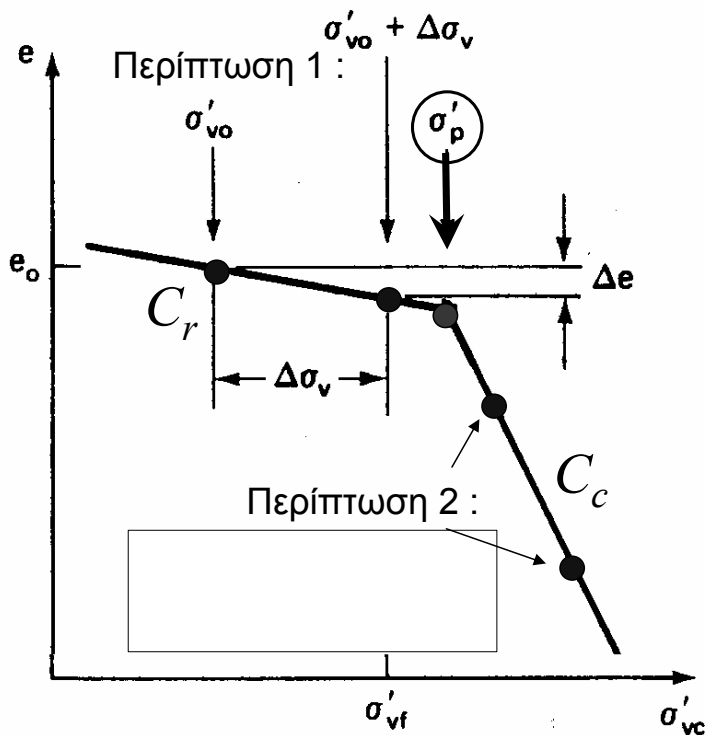
Ο συντελεστής υπερ-στερεοποίησης

$$OCR = \sigma'_p / \sigma'_{vo}$$

είναι μεγαλύτερος στις ανώτερες στάθμες

1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D) :

Εκτίμηση της καθίζησης (ρ_{c1}) εδαφικού στρώματος πάχους (H) λόγω αύξησης της κατακόρυφης ενεργού τάσης από σ'_{vo} σε $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v$



Περίπτωση 1 : $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v < \sigma'_p$

$$\rho_{c1} = H \frac{C_r}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{vo}} \right)$$

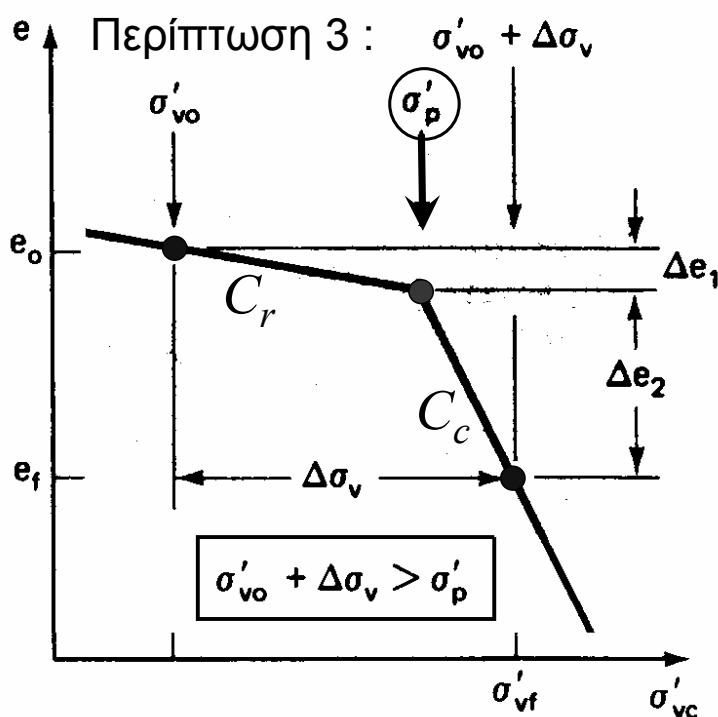
Περίπτωση 2 : $\sigma'_p \leq \sigma'_{vo}$

$$\rho_{c1} = H \frac{C_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{vo}} \right)$$

σ'_p = τάση προφόρτισης

1. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_{c1}) σε συνεκτικά εδάφη (1-D) :

Εκτίμηση της καθίζησης (ρ_{c1}) εδαφικού στρώματος πάχους (H) λόγω αύξησης της κατακόρυφης ενεργού τάσης από σ'_{vo} σε $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v$



Περίπτωση 3 :

$\sigma'_{vo} < \sigma'_p < \sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v$

$$\rho_{c1,1} = H \frac{C_r}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \right)$$

$$\rho_{c1,2} = H \frac{C_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_p} \right)$$

$$\rho_{c1} = \rho_{c1,1} + \rho_{c1,2}$$

σ'_p = τάση προφόρτισης

Επιρροή του πλάτους της επιφάνειας φόρτισης στο μέγεθος των καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη :

Η ανωτέρω αντιμετώπιση του μεγέθους των καθιζήσεων στερεοποιήσεως θεωρεί ότι το εύρος (B) της θεμελίωσης είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το πάχος (H) του συμπιεστού στρώματος, π.χ. $B > (3 \div 4)H$. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι :

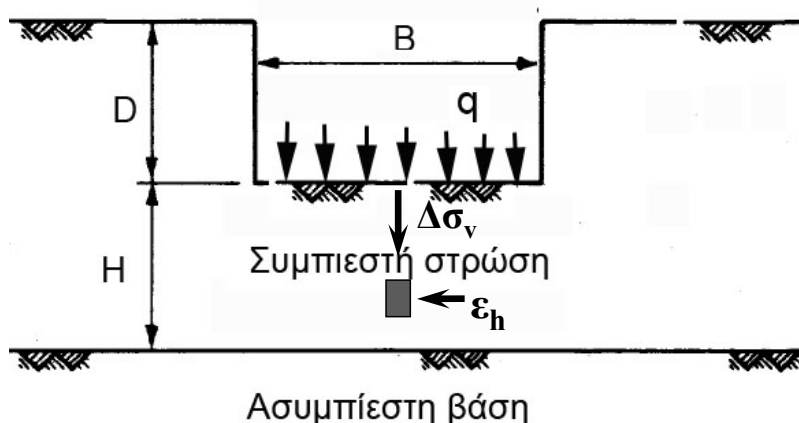
- Η πρόσθετη κατακόρυφη ενεργός τάση ($\Delta\sigma_v$) είναι σταθερή με το βάθος, δηλαδή $\Delta\sigma_v = q$
- οι συνθήκες φόρτισης αντιστοιχούν στη μονοδιάστατη συμπίεση (δηλαδή $\varepsilon_h = 0$)

Στην περίπτωση πολύστρωτου εδάφους (πολλές στρώσεις i), η συνολική καθίζηση στερεοποιήσεως ισούται με το άθροισμα των καθιζήσεων των επιμέρους στρώσεων :

$$\rho_{c1} = \sum_i \rho_{c1,i} = \sum_i f(C_{ci}, e_i, \Delta\sigma_{vi} = q)$$

Εάν $B < (3 \div 4)H$ τότε πρέπει :

1. Να γίνει απομείωση του $\Delta\sigma_v$ με το βάθος
2. Να ληφθεί υπόψη ότι η φόρτιση κάτω από το πέδιλο δεν αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη συμπίεση (τριδιάστατες συνθήκες $\varepsilon_h \neq 0$)



2. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη (3-D) :

Η συνολική καθίζηση είναι το άθροισμα των καθιζήσεων πολλών στρώσεων :

$$\rho_c = \sum_i \rho_{c,i} = \sum_i f(C_{ci}, e_i, \Delta\sigma_{vi})$$

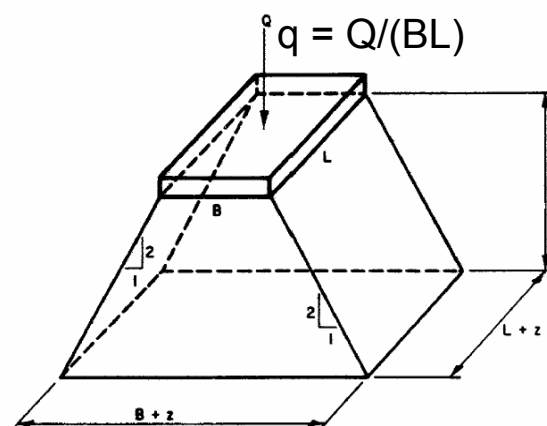
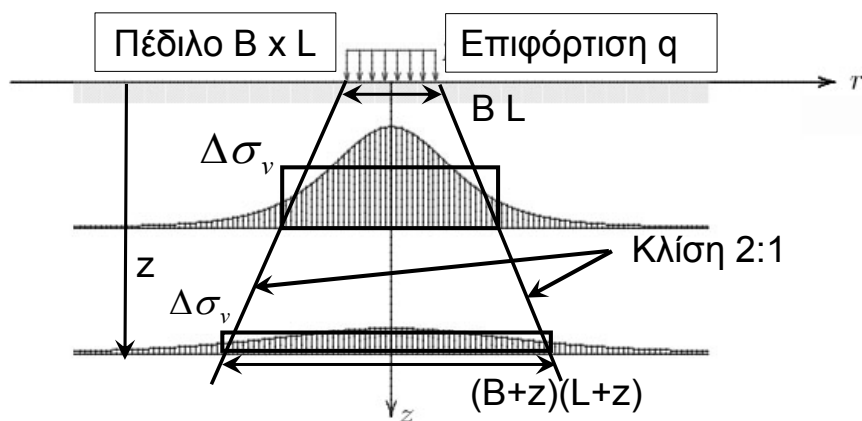
Η απομείωση της πρόσθετης κατακόρυφης ενεργού τάσης ($\Delta\sigma_v$) με το βάθος μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους :

2.1 Παραδοχή κατανομής των τάσεων με το βάθος με κλίση 2:1 (≈ 60 μοίρες)

Πρόσθετη τάση σε βάθος z :

$$\Delta\sigma_v = \frac{q}{\left(1 + \frac{z}{B}\right)\left(1 + \frac{z}{L}\right)}$$

$$\Delta\sigma_v(z=0) = q$$



2. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη (3-D) :
 Η απομείωση της πρόσθετης κατακόρυφης ενεργού τάσης ($\Delta\sigma_v$) με το βάθος μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους :

2.2 Με παραδοχή ελαστικών κατανομών τάσεων για διάφορα σχήματα εύκαμπτων πεδίων :

Αξονοσυμμετρικές φορτίσεις :

1. Κατακόρυφη δύναμη στην επιφάνεια οριζόντιου εδάφους
2. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε κυκλική επιφάνεια

Δι-διάστατες φορτίσεις (επίπεδη παραμόρφωση) :

3. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε απειρομήκη γραμμή
4. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε απειρομήκη λωρίδα

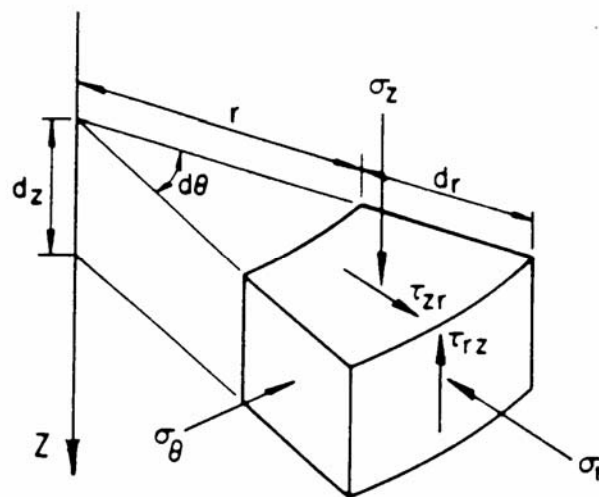
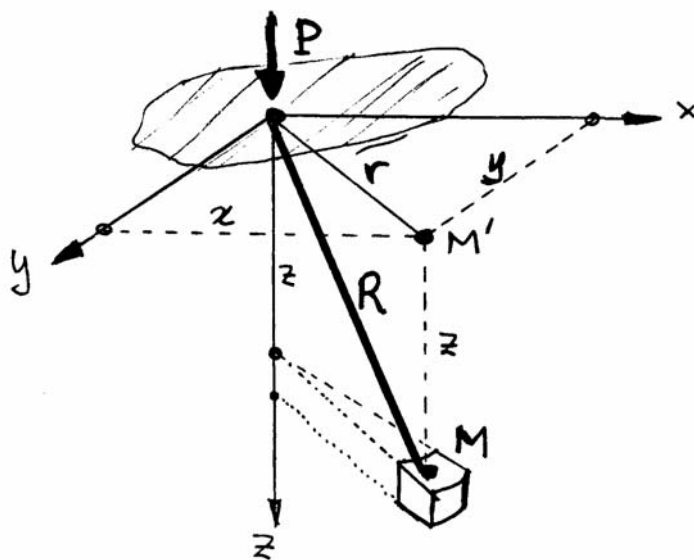
Λοιπές φορτίσεις :

5. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε ορθογωνική επιφάνεια

Από τις ανωτέρω βασικές επιλύσεις, μπορούν να προκύψουν λύσεις σε χρήσιμα προβλήματα με την αρχή της επαλληλίας

Αξονοσυμμετρικές φορτίσεις :

1. Κατακόρυφη δύναμη στην επιφάνεια οριζόντιου εδάφους



$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{R^5}$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi R^2} \left[\frac{3r^2 z}{R^3} - \frac{(1-2\nu)R}{R+z} \right]$$

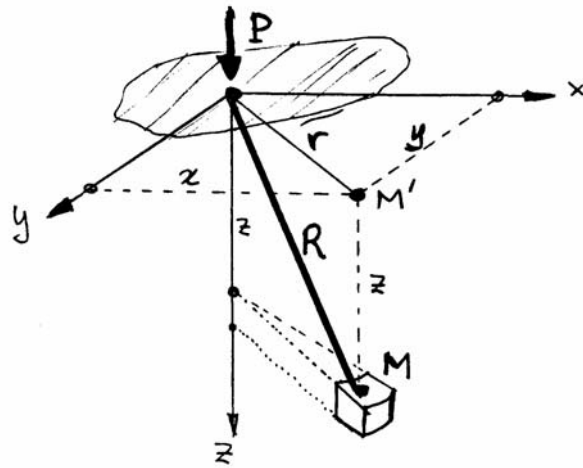
Η κατακόρυφη τάση είναι ανεξάρτητη των ελαστικών σταθερών (E , ν).

Ομως, η σχέση ισχύει με την παραδοχή ομοιογενούς γραμμικώς ελαστικού και ισότροπου εδάφους

Αξονοσυμμετρικές φορτίσεις :

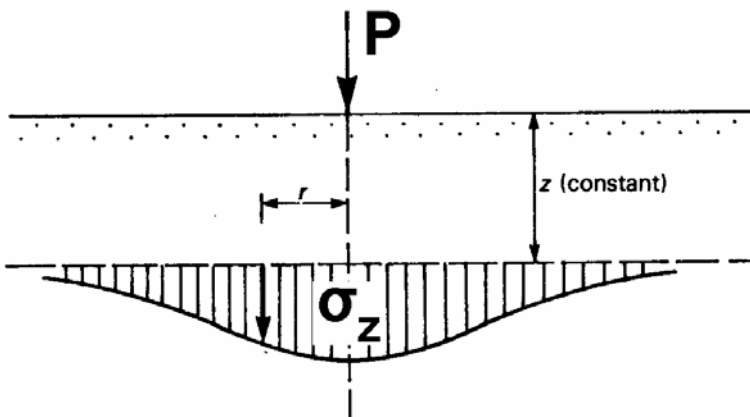
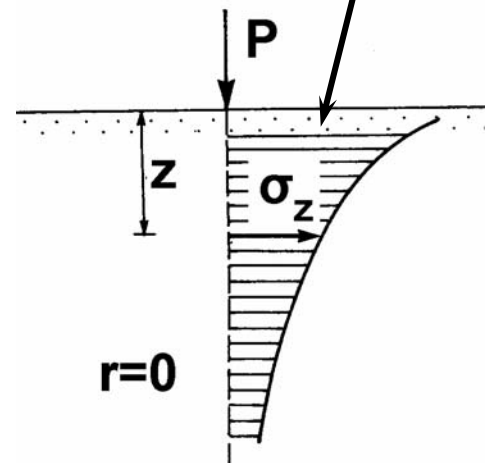
1. Κατακόρυφη δύναμη στην επιφάνεια οριζόντιου εδάφους

Κατανομές της κατακόρυφης τάσης



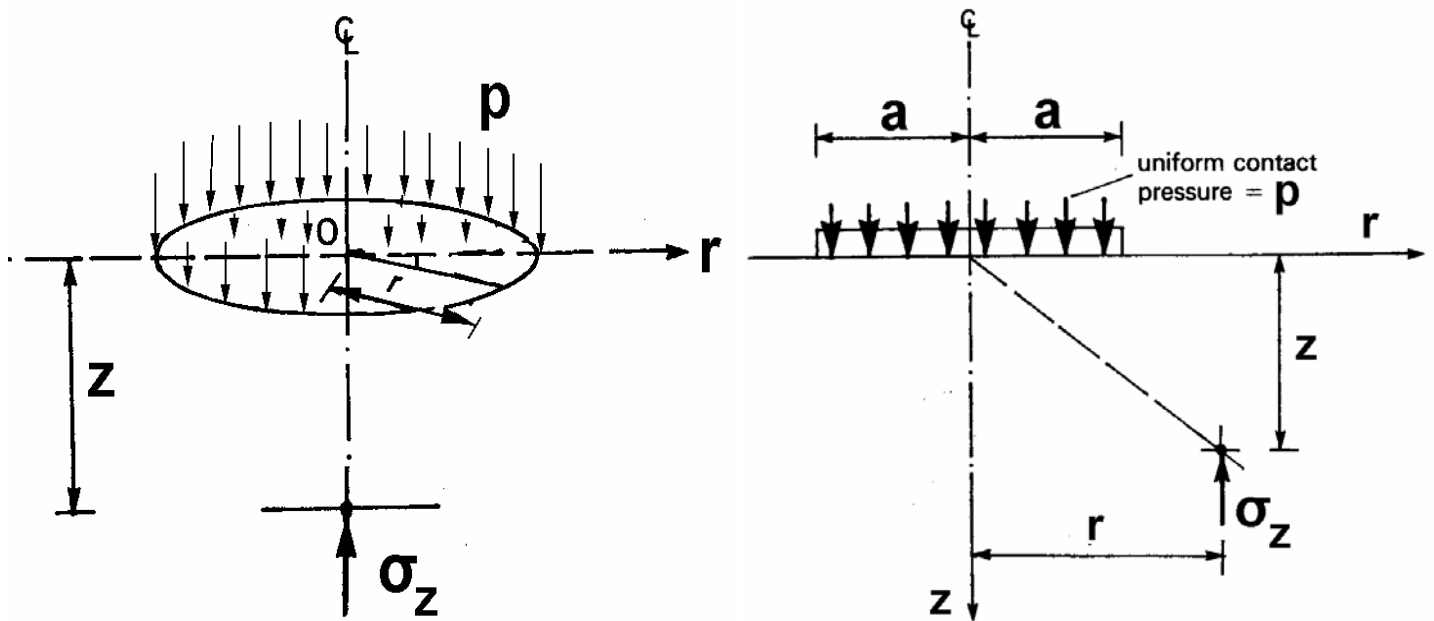
$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{R^5}$$

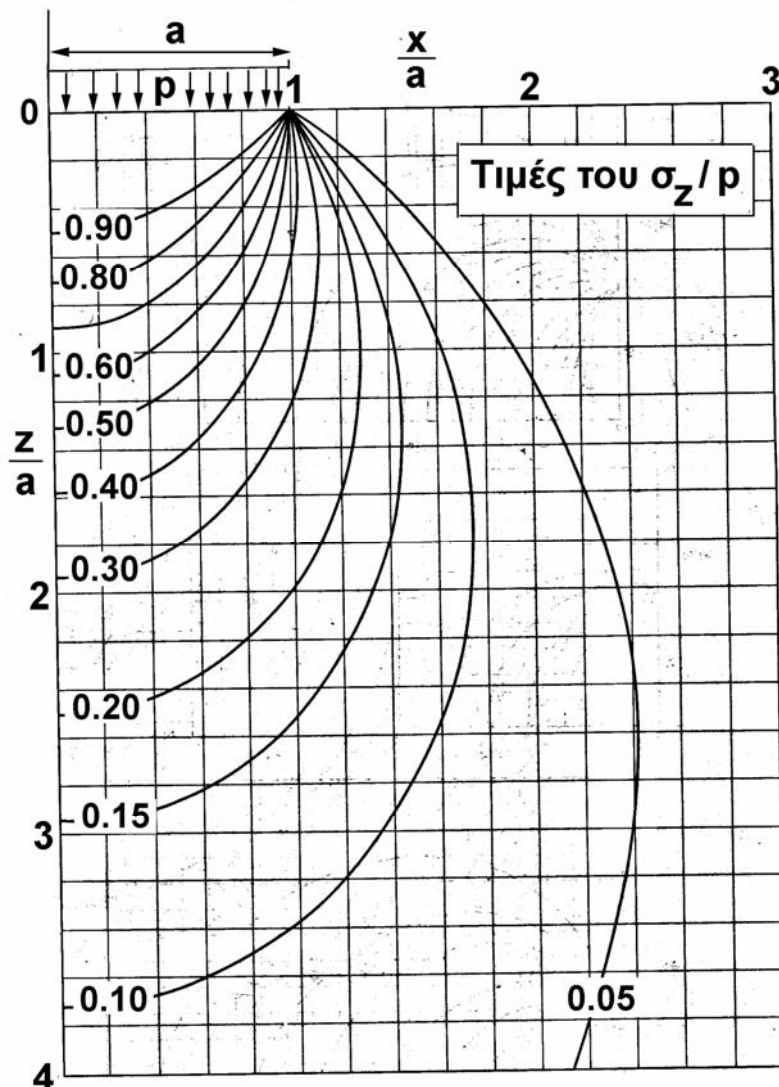
$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{1}{z^2}$$



Αξονοσυμμετρικές φορτίσεις :

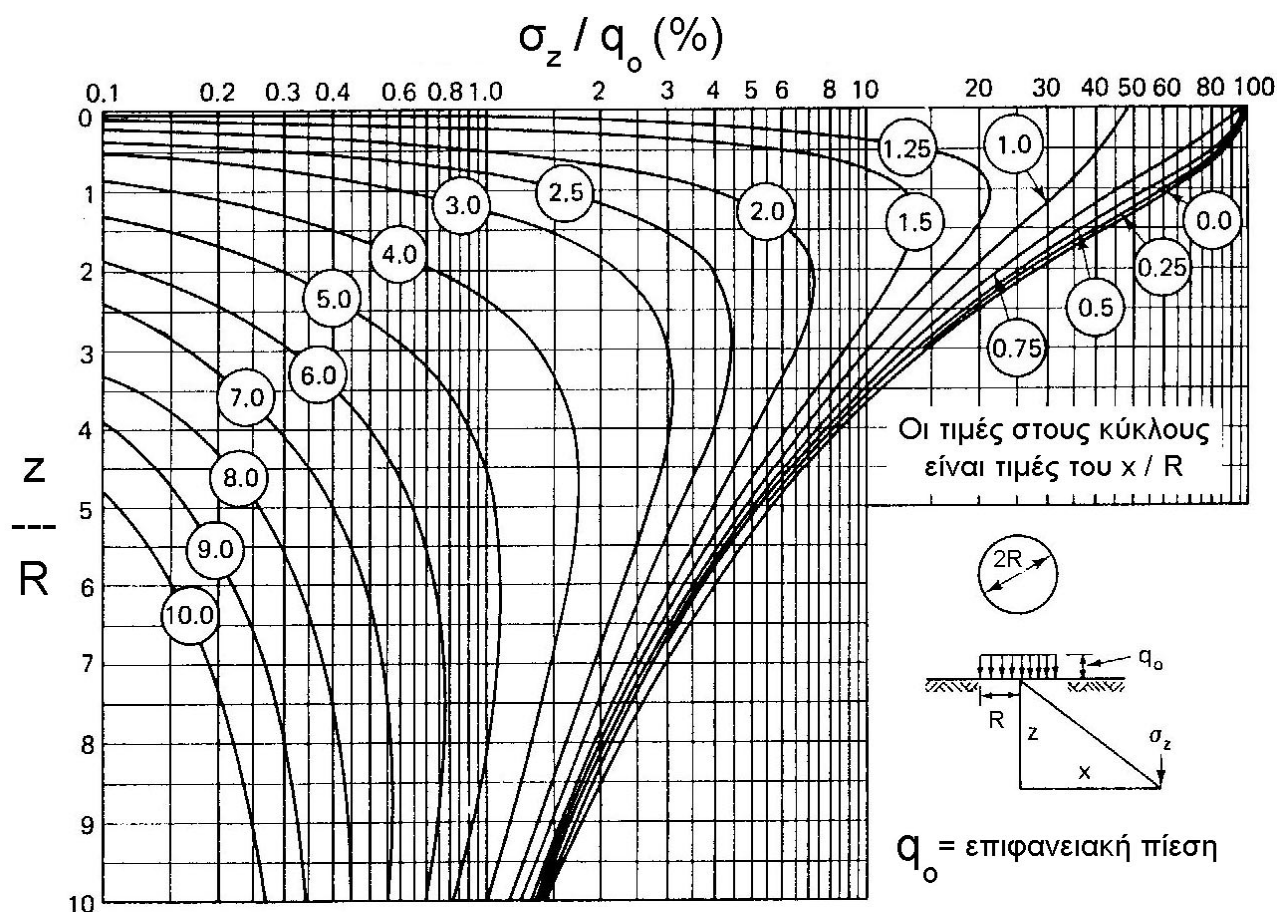
2. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε κυκλική επιφάνεια





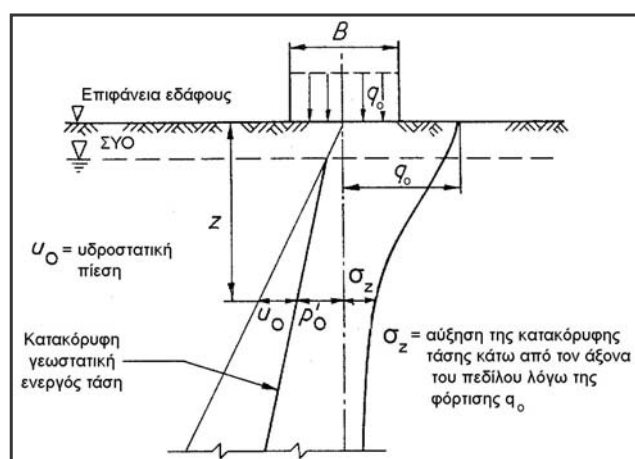
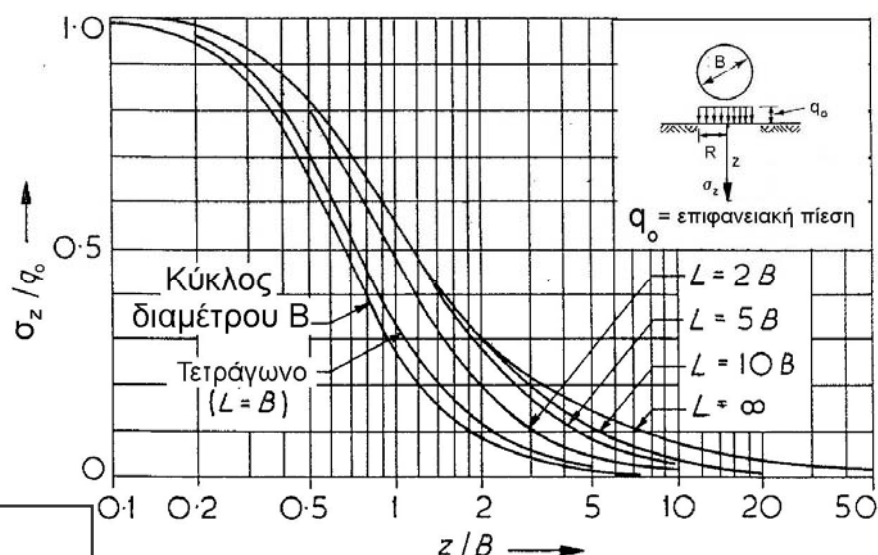
Ταχεία μείωση της κατακόρυφης τάσης με το βάθος

2. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση (q_0) σε κυκλική επιφάνεια με ακτίνα (R)

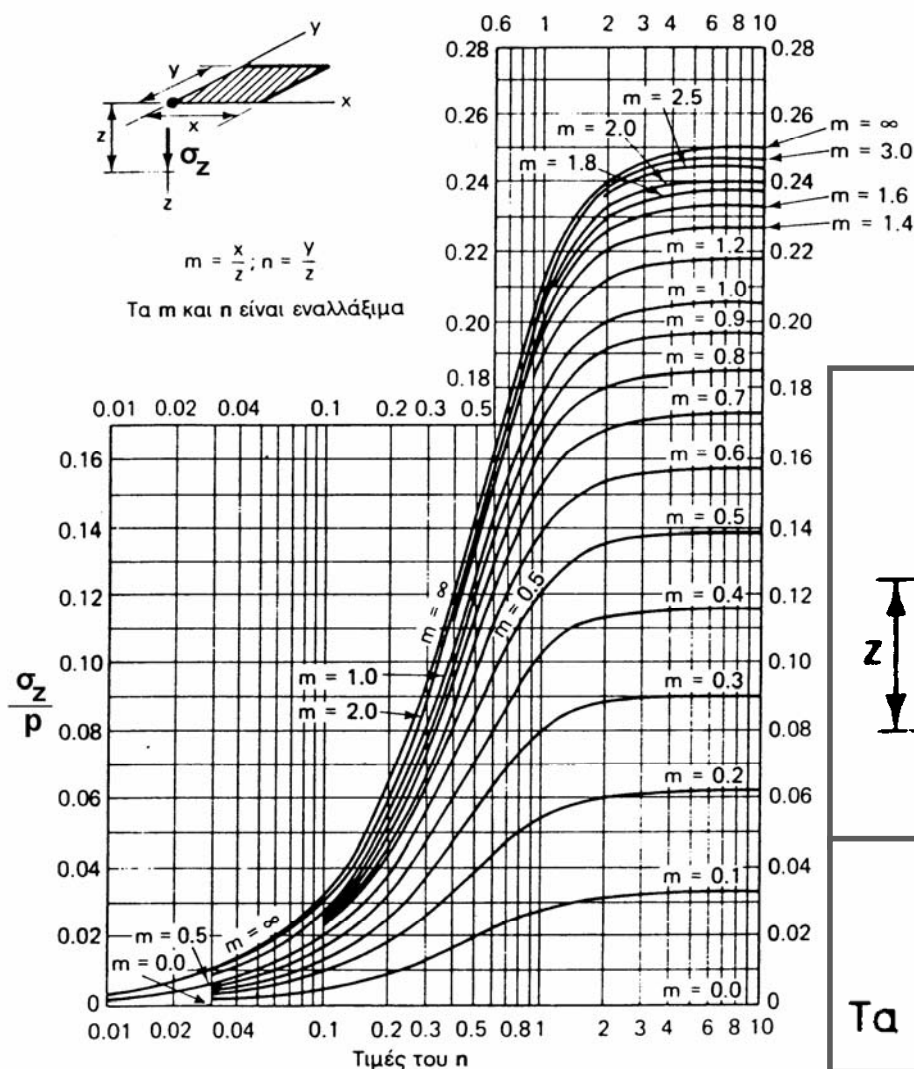


Κατανομή της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης σ_z σε διάφορες θέσεις (x, z)

2α. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση (q_0) σε κυκλική επιφάνεια με διάμετρο (B) και ορθογώνιο διαστάσεων B x L ($L > B$)

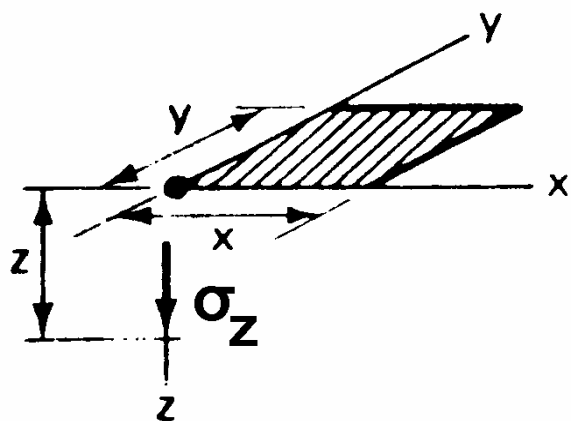


Κατανομή της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης σ_z σε βάθος (z) κάτω από το κέντρο του πεδίου (κατά Janbu et al, 1956)



Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε ορθογωνική επιφάνεια

Τιμές της κατακόρυφης τάσης κάτω από τη γωνία του ορθογωνίου

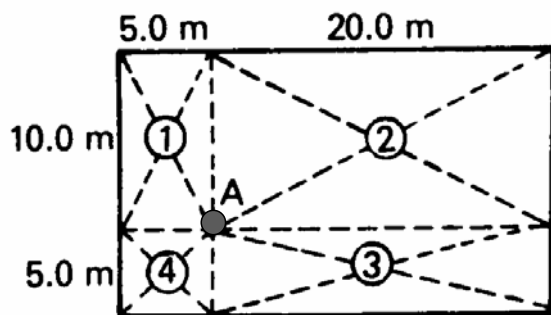
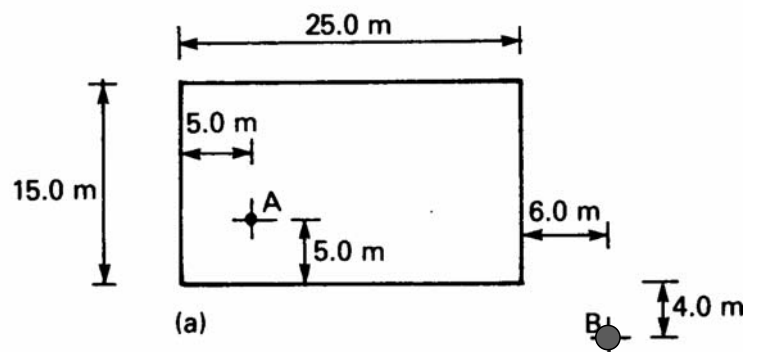
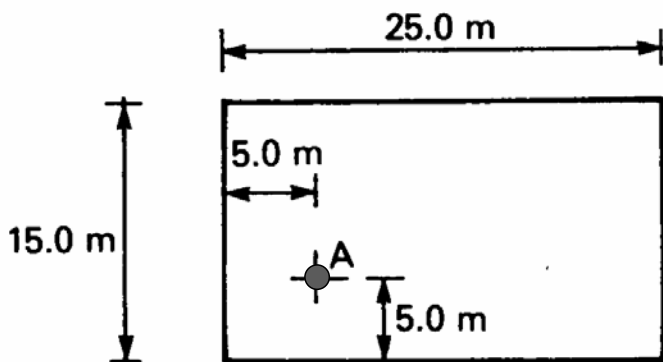


$$m = \frac{x}{z}; n = \frac{y}{z}$$

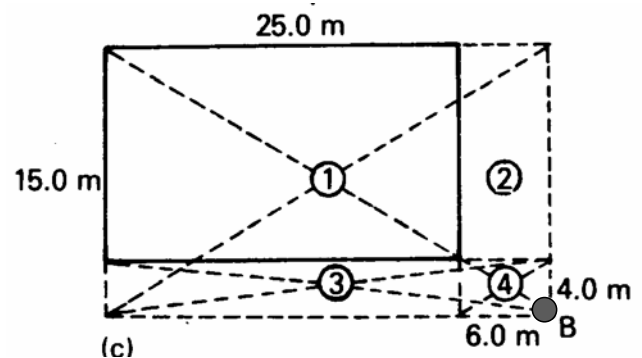
Τα m και n είναι εναλλάξιμα

Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε ορθογωνική επιφάνεια

Προσδιορισμός της κατακόρυφης τάσης κάτω από οποιοδήποτε σημείο ορθογωνίου με ανάλυση σε τέσσερα μικρότερα ορθογώνια



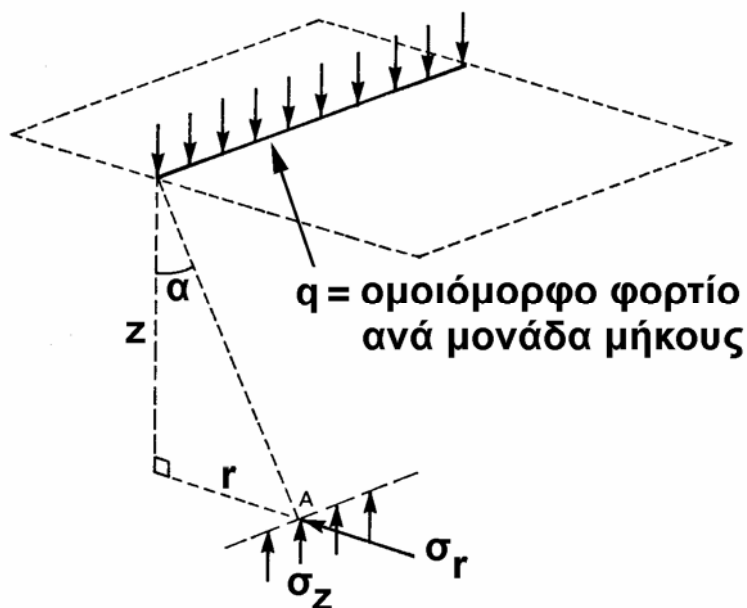
$$A = (1) + (2) + (3) + (4)$$



$$B = (1) - (2) - (3) + (4)$$

Δι-διάστατες φορτίσεις (επίπεδη παραμόρφωση) :

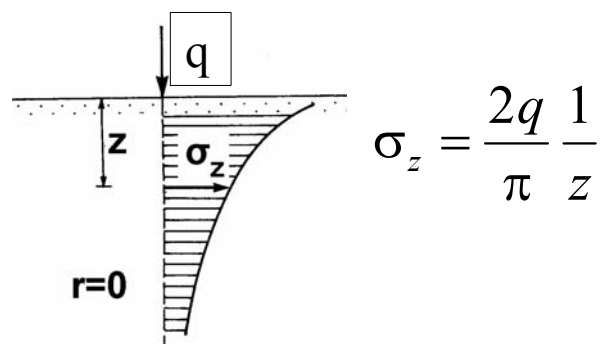
3. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε απειρομήκη γραμμή



$$\sigma_r = \frac{2q}{\pi} \frac{r^2 z}{(r^2 + z^2)^2}$$

$$\sigma_z = \frac{2q}{\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^2}$$

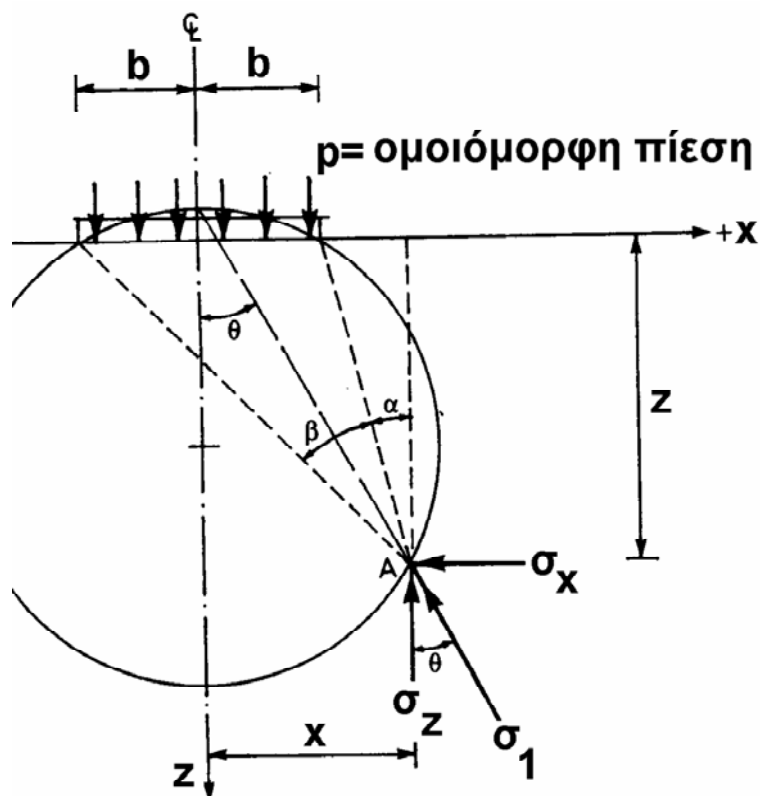
Κάτω από τον άξονα ($r=0$) :



$$\sigma_z = \frac{2q}{\pi} \frac{1}{z}$$

Δι-διάστατες φορτίσεις (επίπεδη παραμόρφωση) :

3. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε απειρομήκη λωρίδα



$$\tan \alpha = \frac{x - b}{z}$$

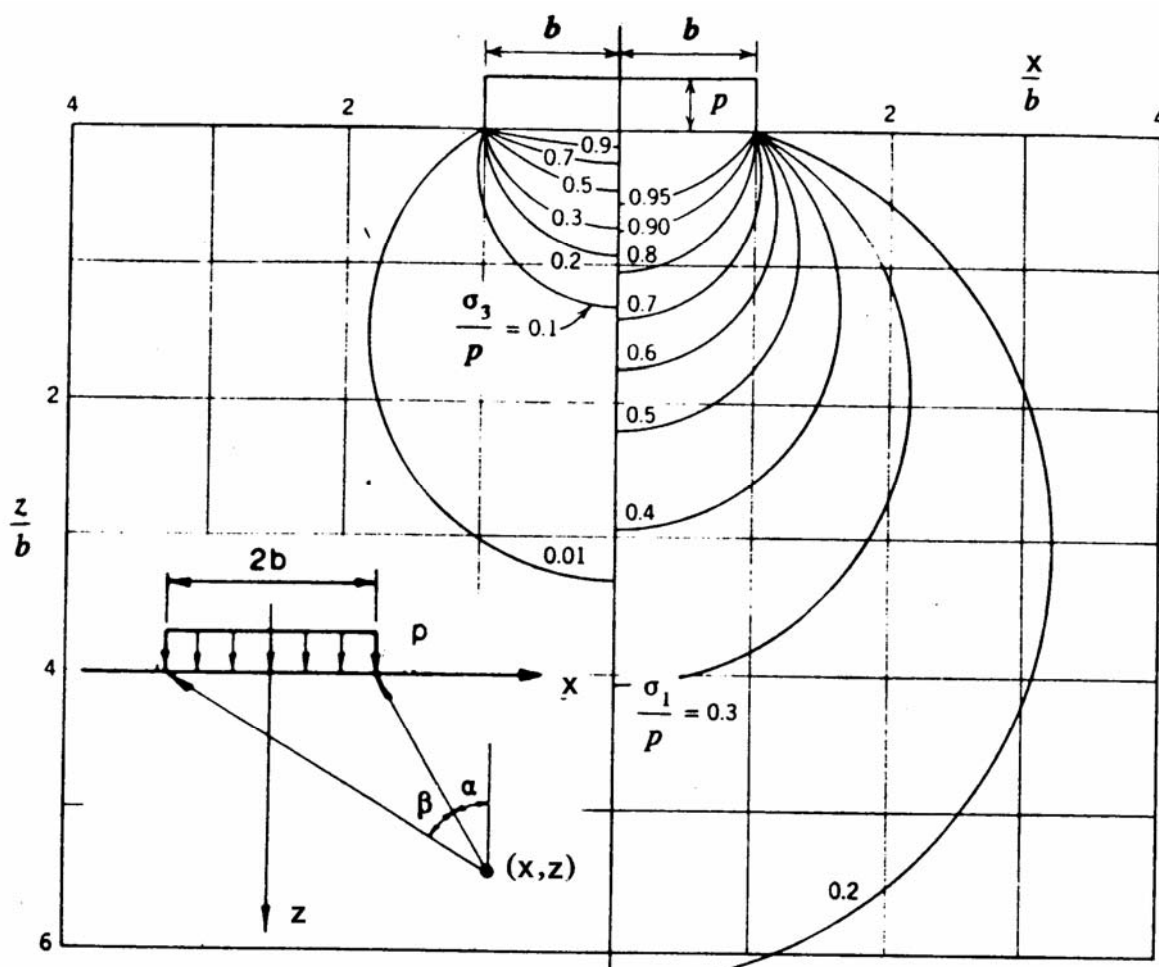
$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{x + b}{z}$$

$$\sigma_z = p \left[\frac{\beta}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin \beta \cos(2\alpha + \beta) \right]$$

$$\sigma_x = p \left[\frac{\beta}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin \beta \cos(2\alpha + \beta) \right]$$

$$\tau_{xz} = \frac{p}{\pi} \sin \beta \sin(2\alpha + \beta)$$

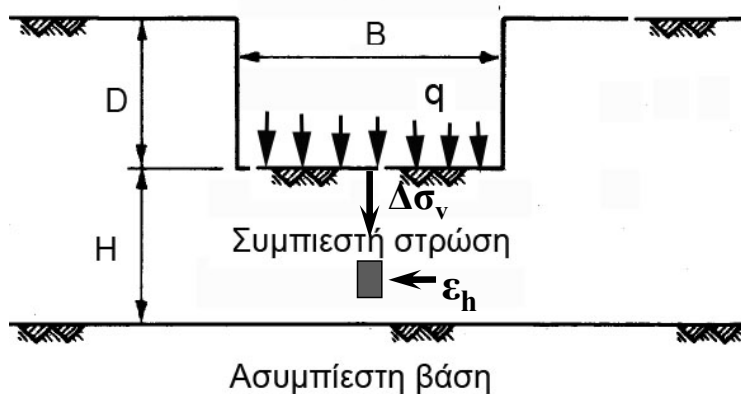
3. Κατακόρυφη ομοιόμορφη πίεση σε απειρομήκη λωρίδα Προσδιορισμός κυρίων τάσεων



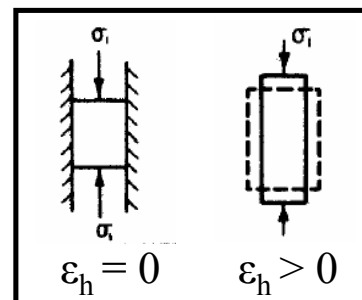
2. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη (3-D) : Συνθήκες «τριδιάστατης» φόρτισης κάτω από το πέδιλο

Εάν $B < (3 \div 4)H$ τότε πρέπει :

1. Να γίνει απομείωση του $\Delta\sigma_v$ με το βάθος
2. Να ληφθεί υπόψη ότι η φόρτιση κάτω από το πέδιλο δεν αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη συμπίεση (τριδιάστατες συνθήκες : $\varepsilon_h \neq 0$)



Λόγω των «τριδιάστατων» συνθηκών : $\varepsilon_h > 0$ (πλευρική διόγκωση), οπότε η αναπτυσσόμενη υπερπίεση πόρων (Δu) είναι μικρότερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη συμπίεση (όπου $\Delta u_1 = \Delta\sigma_v$). Ετσι, η καθίζηση λόγω στερεοποιήσεως (ρ_c) προκαλείται από μικρότερη πίεση πόρων και συνεπώς είναι μικρότερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη συμπίεση (ρ_{c1}).



$$\text{Αρα : } \rho_c = \lambda \rho_{c1}$$

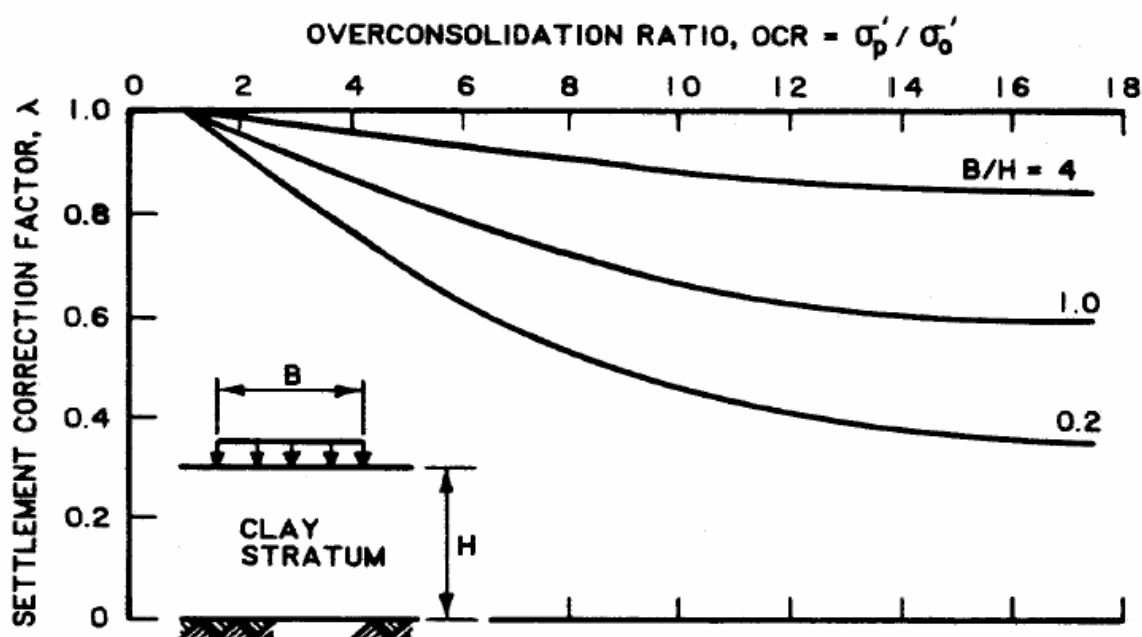
$$\lambda \leq 1$$

ρ_c = πραγματική καθίζηση λόγω στερεοποιήσεως
 ρ_{c1} = καθίζηση λόγω στερεοποιήσεως που αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη συμπίεση (συμπιεσόμετρο)

2. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη (3-D) : Συνθήκες «τριδιάστατης» φόρτισης κάτω από το πέδιλο

$$\rho_c = \lambda \rho_{c1}$$

Τιμές του συντελεστή διορθώσεως (λ) για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερ-στερεοποιήσεως (OCR) της αργίλου



ρ_{c1} = καθίζηση λόγω στερεοποιήσεως που αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη συμπίεση (συμπιεσόμετρο)

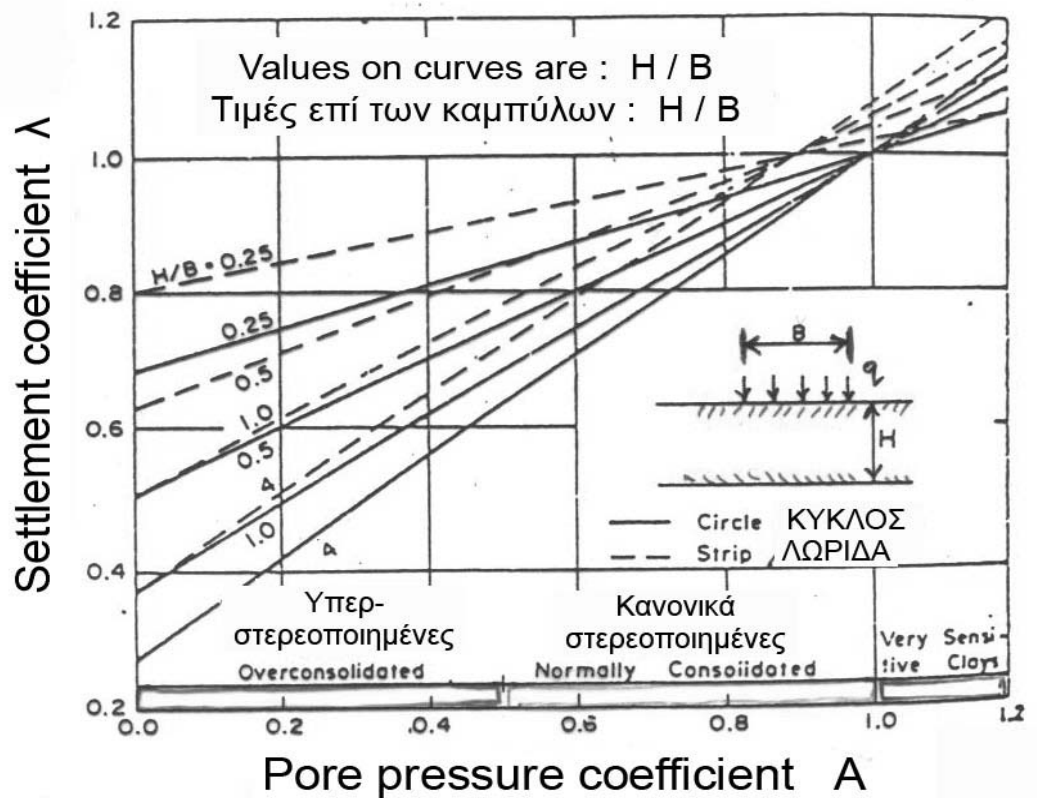
2. Υπολογισμός καθιζήσεων στερεοποίησης (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη (3-D) :

Συνθήκες «τριδιάστατης» φόρτισης κάτω από το πέδιλο

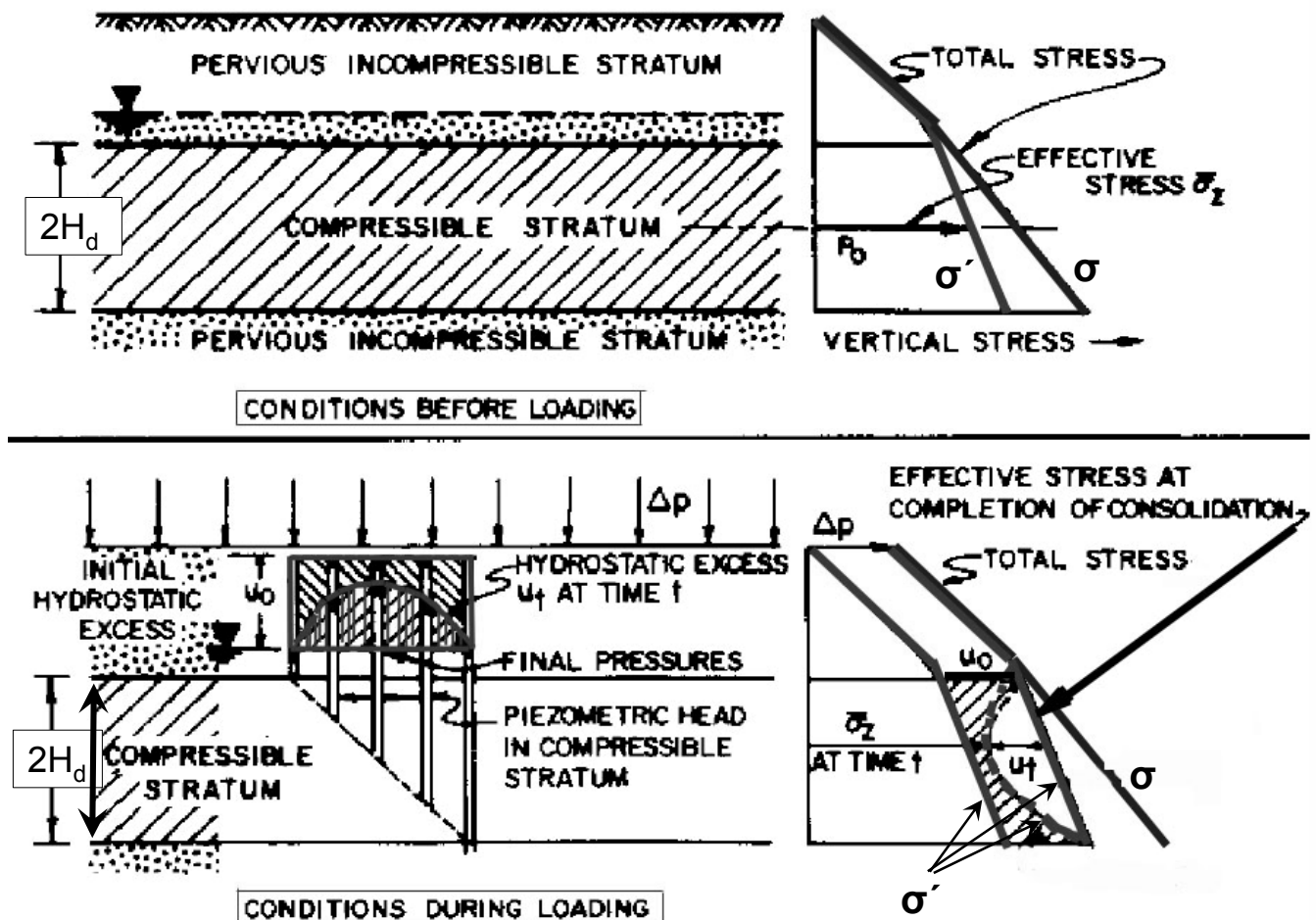
Τιμές του συντελεστή διορθώσεως (λ) για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερ-στερεοποίησης (OCR) της αργίλου

$$\rho_c = \lambda \rho_{c1}$$

ρ_{c1} = καθίζηση λόγω στερεοποίησης που αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη συμπίεση (συμπιεσόμετρο)



3. Υπολογισμός της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων στερεοποίησης (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη :



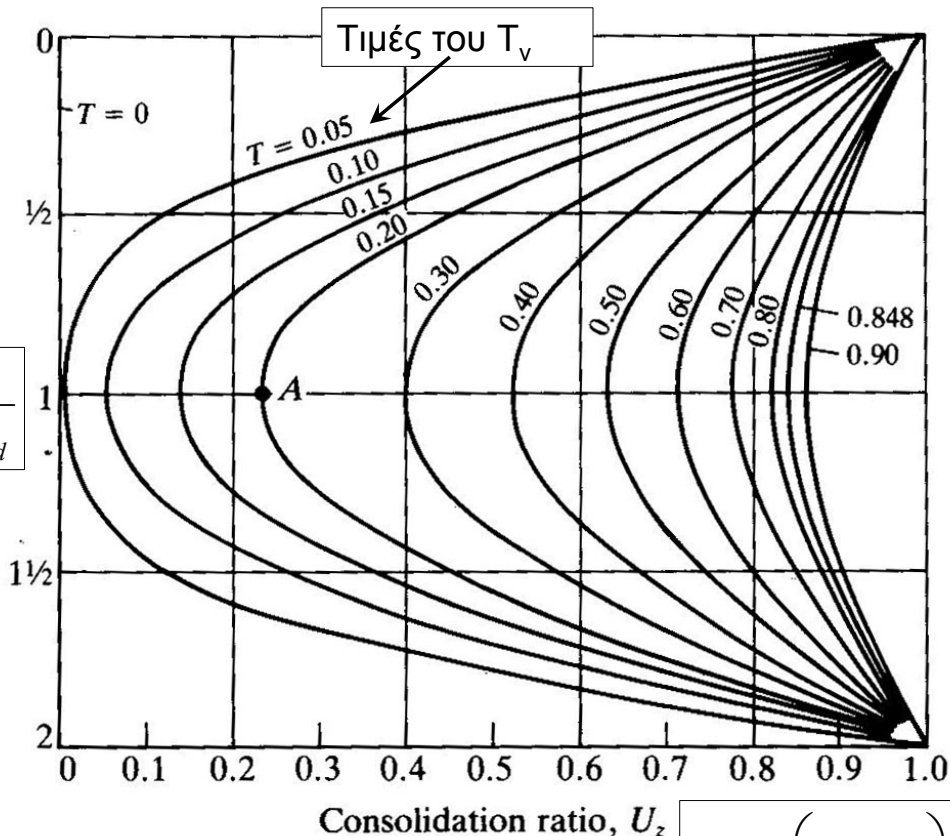
Υπερπίεσεις πόρων (u_e) καθ' ύψος της συμπιεστής στρώσης (πάχος $H = 2 H_d$) σε χρόνους (t) :

Χρονικός παράγων :

$$T_v = \frac{c_v t}{H_d^2}$$

$$Z = \frac{z}{H_d}$$

$u_o = \Delta p =$ σταθερή αρχική ($t=0$) τιμή της υπερπίεσης πόρων σε όλο το πάχος της συμπιεστής στρώσης



$c_v =$ συντελεστής στερεοποιήσεως

$H_d =$ μήκος στραγγίσης

$u_e =$ υπερπίεση πόρων (t)

$u_o =$ αρχική υπερπίεση πόρων ($t=0$)

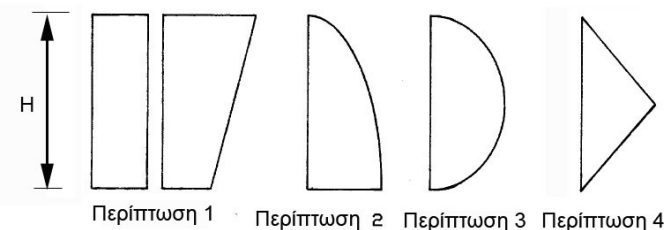
$$U_z = \left(1 - \frac{u_e}{u_o} \right)$$

3. Υπολογισμός της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων στερεοποιήσεως (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη :

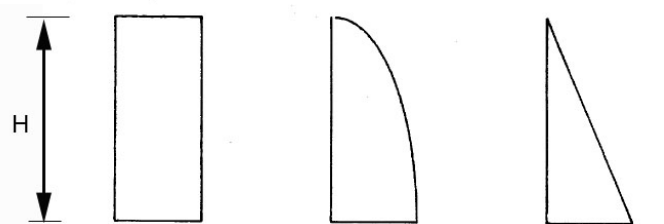
$\rho_c(t) =$ καθίζηση την χρονική στιγμή t

$$\rho_c(t) = U(t) \rho_c(t = \infty) \quad \rho_c(t = \infty) = \text{συνολική καθίζηση στερεοποιήσεως}$$

$U(t) =$ συντελεστής στερεοποιήσεως



ΔΙΠΛΗ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ (άνω και κάτω) : $H_d = H / 2$

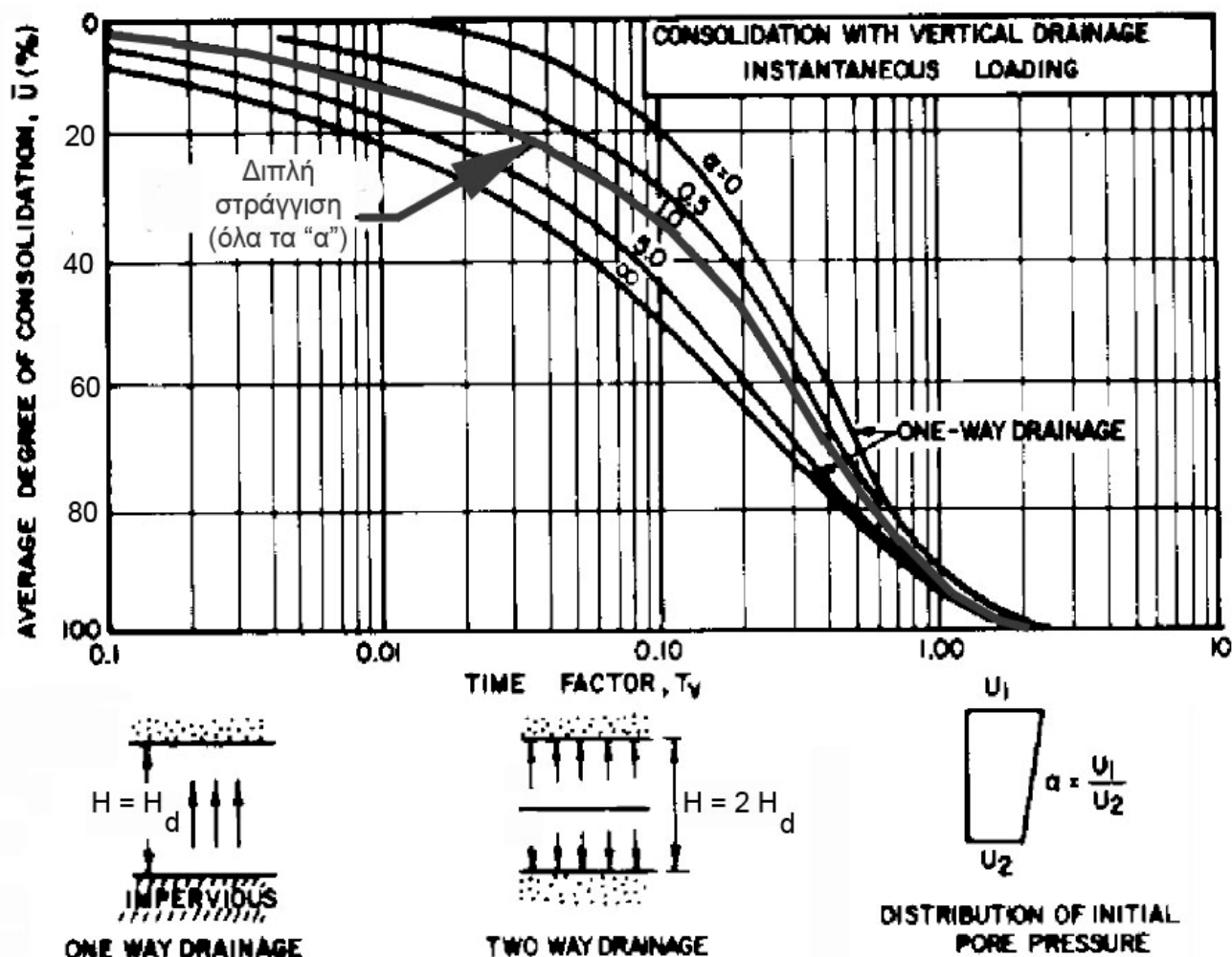


ΑΠΛΗ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ (προς τα άνω) : $H_d = H$

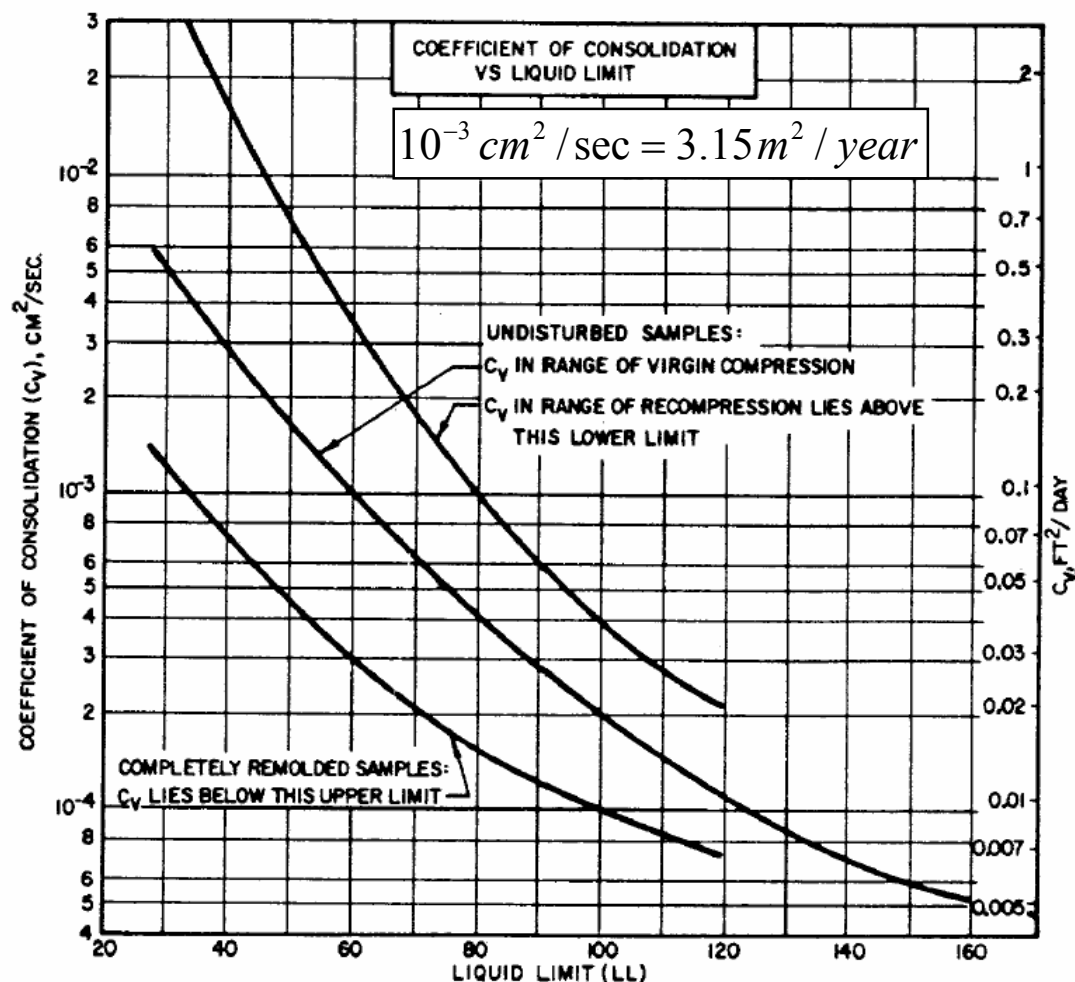
Συντελεστής στερεοποιήσεως (U) συναρτήσει του T_v

Χρονικός παράγων T_v	Τιμές του μέσου συντελεστή στερεοποιήσεως U (%)			
	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4
0.004	7.14	6.49	0.98	0.80
0.008	10.09	8.62	1.95	1.60
0.012	12.36	10.49	2.92	2.40
0.020	15.96	13.67	4.81	4.00
0.028	18.88	16.38	6.67	5.60
0.036	21.40	18.76	8.50	7.20
0.048	24.72	21.96	11.17	9.69
0.060	27.64	24.81	13.76	11.99
0.072	30.28	27.43	16.28	14.36
0.083	32.51	29.67	18.52	16.51
0.100	35.68	32.88	21.87	19.77
0.125	39.89	36.54	26.54	24.42
0.150	43.70	41.12	30.93	28.86
0.175	47.18	44.73	35.07	33.06
0.200	50.41	48.09	38.95	37.04
0.250	56.22	54.17	46.03	44.32
0.300	61.32	59.50	52.30	50.78
0.350	65.82	64.21	57.83	56.49
0.400	69.79	68.36	62.73	61.54
0.500	76.40	76.28	70.88	69.95
0.600	81.56	80.69	77.25	76.52
0.800	88.74	88.21	86.11	85.66
1.000	93.13	92.80	91.52	91.25
1.500	98.00	97.90	97.53	97.45
2.000	99.42	99.39	99.28	99.26

Τιμές του συντελεστή στερεοποίησης (U) συναρτήσει του χρονικού παράγοντα (T_v)

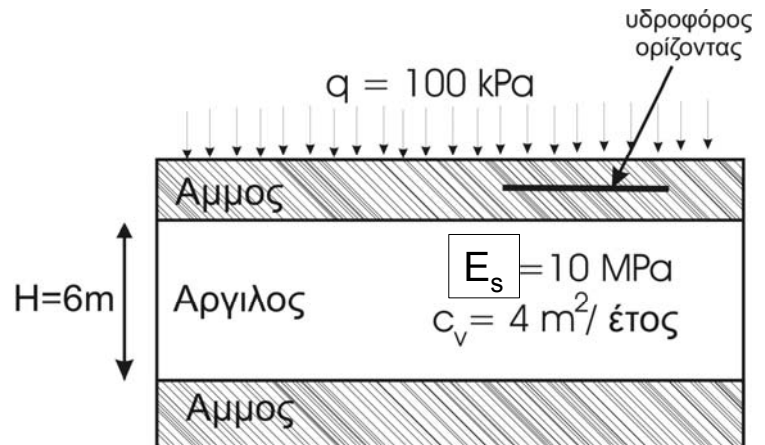


Εκτίμηση του συντελεστή στερεοποίησης (c_v) συναρτήσει του ορίου υδαρότητας (LL)



Παράδειγμα εφαρμογής :

Αργιλική στρώση πάχους $H=6\text{m}$ έχει μέτρο συμπίεσεως $E_s = 10 \text{ MPa}$ και συντελεστή στερεοποίησης $c_v = 4 \text{ m}^2/\text{έτος}$. Η στρώση περιβάλλεται από πάνω και κάτω από αμμώδεις στρώσεις. Άρα : $H_d = H/2 = 3\text{m}$
Η επιφόρτιση είναι $q=100 \text{ kPa}$.



1. Υπολογισμός της συνολικής καθίζησης λόγω στερεοποίησης :

$$\rho_{\infty} = H q / E_s = 600 \times 100 / 10000 = 6 \text{ cm}$$

2. Υπολογισμός της καθίζησης αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης :

$$\rho(t=0) = U(t=0) \rho_{\infty} = 0 \times 6 = 0$$

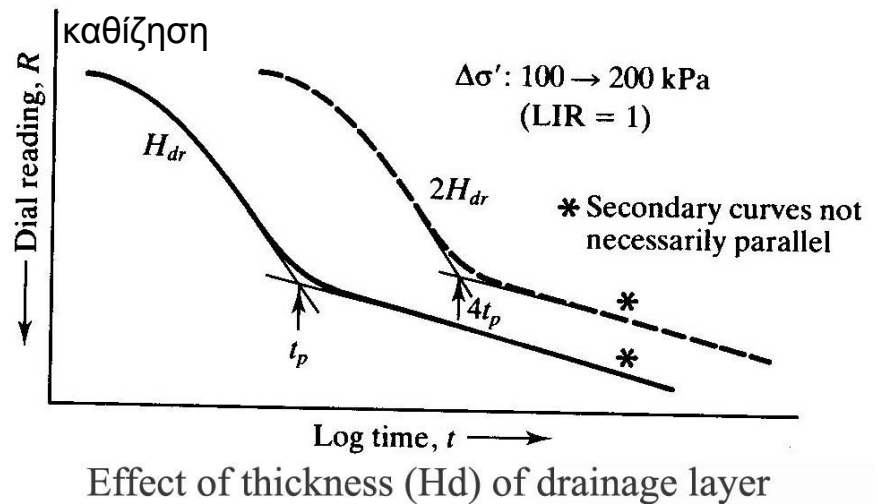
3. Υπολογισμός της καθίζησης ένα έτος μετά την επιβολή της φόρτισης :

$$T_v = c_v t / (H_d)^2 = 4 \times 1 / (3)^2 = 0.444$$

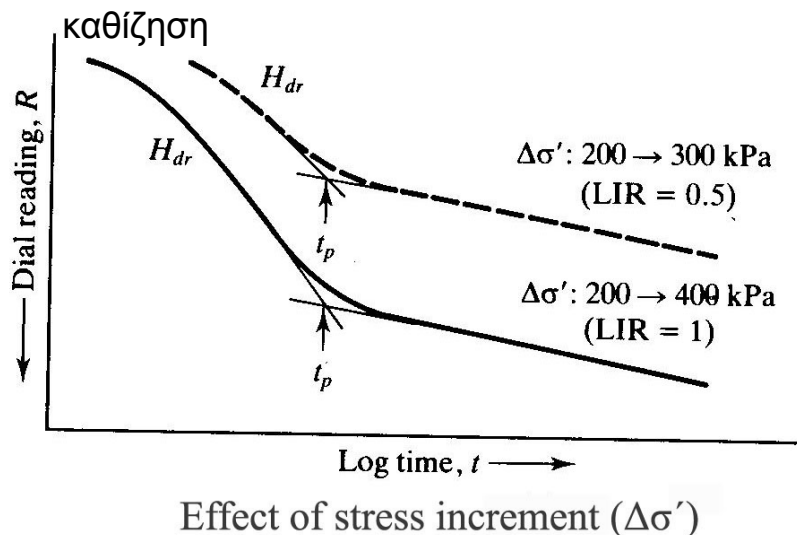
$$\text{Για } T_v = 0.444 \Rightarrow U = 0.73 \Rightarrow \rho(t) = U(t) \rho_{\infty} = 0.73 \times 6 = 4.4 \text{ cm}$$

3. Υπολογισμός της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων στερεοποίησης (ρ_c) σε συνεκτικά εδάφη :

1. Για διπλάσιο ύψος στράγγισης (H_d), ο χρόνος στερεοποίησης είναι τετραπλάσιος, αλλά το μέγεθος της καθίζησης παραμένει το ίδιο (για ίδιο H)



2. Με αύξηση της φόρτισης ($\Delta\sigma'$) χωρίς μεταβολή του H_d , ο χρόνος στερεοποίησης δεν μεταβάλλεται, αλλά το μέγεθος της καθίζησης αυξάνει (λόγω αύξησης του $\Delta\sigma'$)



4. Υπολογισμός ερπυστικών (δευτερευουσών) καθιζήσεων (ρ_s) :

Ερπυστικές (δευτερεύουσες) καθιζήσεις : Χρονικά εξελισσόμενες καθιζήσεις λόγω ερπυστικής συμπεριφοράς των εδαφών (υπό πρακτικώς σταθερές ενεργές τάσεις). Συνήθως είναι σημαντικές σε οργανικά εδάφη και μαλακές αργίλους υψηλής πλαστικότητας.

Ερπυστικές καθιζήσεις σε μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη :

- Συνήθως αποτελούν αμελητέο ποσοστό της συνολικής καθίζησης. Εξάιρεση αποτελούν οι καθιζήσεις λιθόρριπτων επιχωμάτων/φραγμάτων (θραύση αιχμών)

Ερπυστικές καθιζήσεις σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη :

- Αποτελούν αξιόλογο ποσοστό της συνολικής καθίζησης σε οργανικά εδάφη και μαλακές αργίλους υψηλής πλαστικότητας
- Συνήθως οι καθιζήσεις υπολογίζονται με χρήση της θεωρίας δευτερευουσών καθιζήσεων

$$e_t = e_p - C_a \log \frac{t}{t_p} \Rightarrow \Delta \varepsilon_t = \frac{C_a}{1 + e_p} \log \frac{t}{t_p}$$

$$\rho_s(t) = H \Delta \varepsilon_t = H \frac{C_a}{1 + e_p} \log \frac{t}{t_p}$$

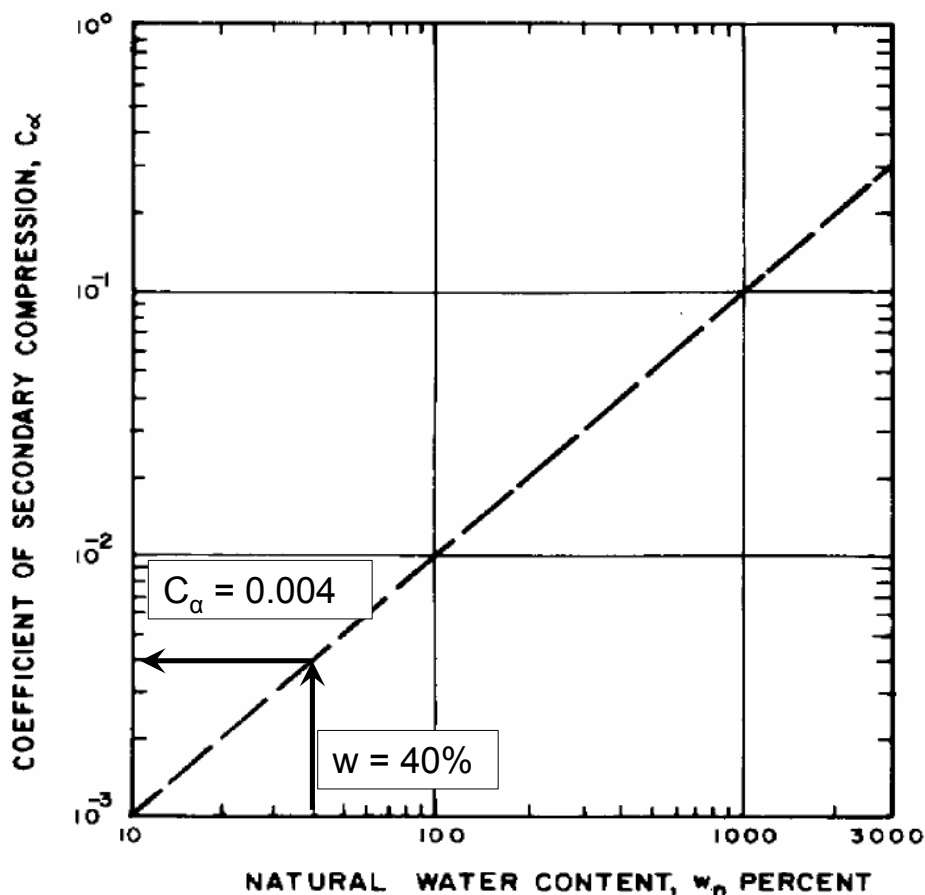
H = πάχος συμπιεστής στρώσης

C_a = συντελεστής δευτερεύουσας στερεοποίησης

t_p = χρόνος πρωτεύουσας στερεοποίησης (π.χ. για $U=90\%$)

e_p = δείκτης πόρων στο τέλος της πρωτεύουσας στερεοποίησης

Συσχέτιση του συντελεστή στερεοποίησης C_a με τη φυσική υγρασία (%)



Υπολογισμός ερπυστικών καθιζήσεων - Παράδειγμα εφαρμογής

Αργιλική στρώση πάχους $H=6\text{m}$ έχει μέτρο συμπίεσεως $E_s = 10 \text{ MPa}$, συντελεστή στερεοποίησης $c_v = 4\text{m}^2/\text{έτος}$ και συντελεστή δευτερεύουσας στερεοποίησης $C_\alpha = 0.004$. Ο δείκτης πόρων πριν την επιβολή της επιφόρτισης είναι $e_o = 0.75$. Η στρώση περιβάλλεται από πάνω και κάτω από αμμώδεις στρώσεις.

Αρα : $H_d = H/2 = 3\text{m}$. Η επιφόρτιση είναι $q=100 \text{ kPa}$.

Να υπολογισθεί η καθίζηση λόγω δευτερεύουσας στερεοποίησης σε χρονικό διάστημα 50 ετών.

Λύση :

Παραμόρφωση λόγω στερεοποίησης : $\Delta\varepsilon_v = \Delta\sigma / E_s = q / D = 100 / 10000 = 0.01$

$\Delta e = -\Delta\varepsilon_v (1+e_o) = -0.01 \times 1.75 = -0.0175$ Αρα : $e_p = 0.75 - 0.0175 = 0.7325$

Για $U=90\% \Rightarrow T_v = 0.90 \Rightarrow t_p = T_v (H_d)^2 / c_v = 0.90 \times (3)^2 / 4 = 2 \text{ έτη}$

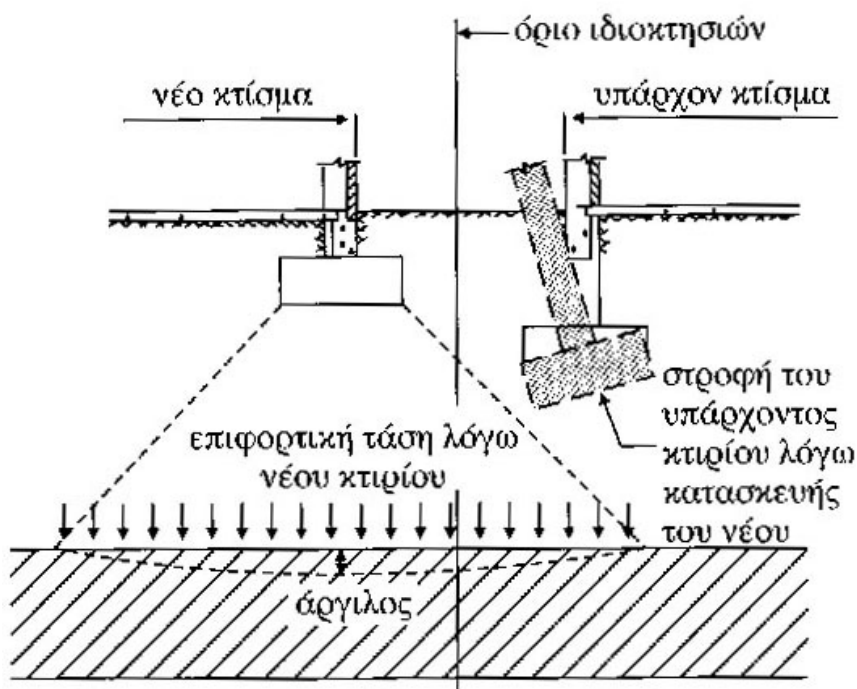
$$\rho_s(t) = H \Delta\varepsilon_t = H \frac{C_\alpha}{1+e_p} \log \frac{t}{t_p} = 600 \times \frac{0.004}{1+0.7325} \times \log \frac{50}{2} = 1.94 \text{ cm}$$

Υπολογισμός της συνολικής καθίζησης λόγω στερεοποίησης :

$$\rho_\infty = H q / D = 600 \times 100 / 10000 = 6 \text{ cm}$$

Αρα, η δευτερεύουσα καθίζηση είναι $1.94 / 6 = 32\%$ της καθίζησης στερεοποίησης

Αλληλεπίδραση επιφανειακών θεμελιώσεων γειτονικών κτισμάτων



Καθίζηση (στροφή) του υπάρχοντος κτίσματος λόγω συμπίεσης της αργιλικής στρώσης εκ του νέου κτίσματος

Σύνοψη μεθόδων υπολογισμού καθιζήσεων σε αργιλικά εδάφη

1. Υπολογισμός άμεσης καθίζησης :

- Εάν η φόρτιση απέχει αρκετά από την κατάσταση αστοχίας, η άμεση καθίζηση (ρ_i) είναι κατά προσέγγιση γραμμική συνάρτηση της φόρτισης και μπορεί να εκτιμηθεί με σχέσεις ελαστικής μορφής με χρήση των «αστράγγιστων» τιμών των ελαστικών παραμέτρων ($E = E_u$, $\nu=0.5$).
 - Κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι (E_u αυξάνει με το βάθος) :
 - Μέθοδος Butler (τυχόν σημείο εύκαμπτου ορθογωνικού πεδύλου)
Ακαμπτο ορθογωνικό πέδιλο : $2/3 - 3/4$ της καθίζησης του κέντρου εύκαμπτου
Κυκλικό πέδιλο $\approx$ ισοδύναμο τετραγωνικό
 - Υπερστερεοποιημένες άργιλοι ($E_u =$ σταθερό)
 - Μέθοδος Steinbrenner : εύκαμπτο ορθογωνικό πέδιλο
 - Μέθοδος Milovic : εύκαμπτο κυκλικό πέδιλο
Ακαμπτο ορθογωνικό πέδιλο : $2/3 - 3/4$ της καθίζησης του κέντρου εύκαμπτου
 - Μέθοδος Janbu : άκαμπτο ορθογωνικό πέδιλο
Κυκλικό πέδιλο $\approx$ ισοδύναμο τετραγωνικό
- Κοντά στην κατάσταση αστοχίας, η άμεση καθίζηση είναι μή-γραμμική συνάρτηση της φόρτισης.
Δεν συνιστάται η εκτίμησή της με σχέσεις ελαστικής μορφής.
Απαιτείται χρήση κατάλληλων εμπειρικών μεθόδων ή μή-γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Σύνοψη μεθόδων υπολογισμού καθιζήσεων σε αργιλικά εδάφη

2. Υπολογισμός καθίζησης λόγω στερεοποίησης (ρ_c) :

2.1. Πέδιλα «μεγάλων» διαστάσεων ($B > 3 \div 4 H$) :

Η καθίζηση είναι ίση με την καθίζηση υπό μονοδιάστατη συμπίεση : $\rho_c = \rho_{c1}$

Η καθίζηση υπό μονοδιάστατη συμπίεση μπορεί να υπολογισθεί με τρεις τρόπους, θεωρώντας ότι η επιφόρτιση ($\Delta\sigma_z$) είναι σταθερή με το βάθος :

(1) Μέσω του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης (E_s), θεωρούμενου ως σταθερού.
Η παραδοχή σταθερού E_s ισχύει κυρίως σε υπερστερεοποιημένες άργιλους.
Σε ανομοιογενή εδάφη, μπορεί να γίνει χωρισμός σε στρώσεις.

(2) Με χρήση της καμπύλης τάσης – συμπίεσης του συμπιεσομέτρου

(3) Με χρήση των παραμέτρων συμπιεστότητας C_c και C_r (λογαριθμική σχέση τάσης – συμπίεσης)

Για το ρ_{c1} , μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι εμπειρικές σχέσεις Kany και Leonhardt

2.2. Πέδιλα «μικρών» διαστάσεων ($B < 3 \div 4 H$) :

Η καθίζηση είναι μικρότερη από την καθίζηση υπό μονοδιάστατη συμπίεση :

$$\rho_c = \lambda \rho_{c1} \quad \text{όπου :} \quad \lambda < 1$$

Η καθίζηση (ρ_{c1}) υπολογίζεται με τις παραπάνω τρεις μεθόδους, θεωρώντας ότι η επιφόρτιση ($\Delta\sigma_z$) απομειούται με το βάθος (διάφορες μέθοδοι απομείωσης).