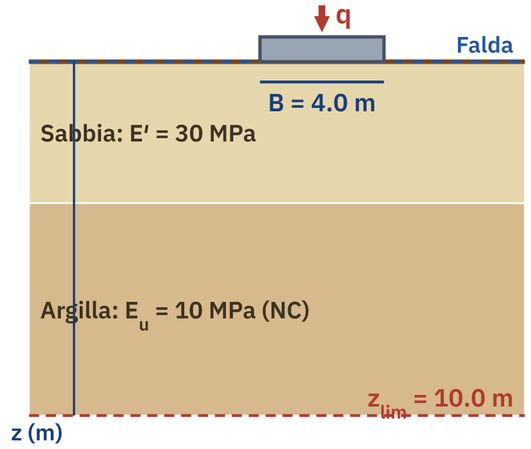
Presentazione della lezione di geotecnica · Cedimenti

Cedimento totale: strati di argilla e sabbia

Lezione: combinazione del cedimento immediato (elastico) e della consolidazione dell'argilla in un profilo costituito da strati di argilla e sabbia, fondazione al centro, allo spigolo e rigida, cedimento totale nel tempo; esempi di calcolo per ogni argomento.

- $S = S_e + S_c$
- Strati di argilla e sabbia
- Steinbrenner
- Percorso di tensione
- Centro · spigolo · rigido
- Curva cedimento–tempo



Introduzione

Che cosa si impara in questa lezione?

Separare il cedimento in base al tipo di strato: strato **coesivo** = cedimento immediato + consolidazione, strato **granulare** = solo cedimento elastico

Combinare i calcoli di **Steinbrenner** (immediato) e lungo il **percorso di tensione** (consolidazione) negli stessi conci

Vedere l'effetto dello scavo: la **pressione netta** governa il cedimento immediato, il **rigonfiamento e la ricompressione** governano la consolidazione

La determinazione del cedimento **al centro** e **allo spigolo** di una fondazione flessibile, della fondazione rigida e del cedimento differenziale a partire dal cedimento totale

$S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}$ costruire la curva cedimento–tempo

Verificare che il risultato del modulo coincida con la somma dei moduli di singolo tipo (Elastico + Consolidazione)

SVOLGIMENTO DELLA LEZIONE

Ogni argomento è trattato in **tre passaggi**:

1 · **Teoria**: qual è la regola e perché è così?

2 · **Traccia**: dati e richiesto

3 · **Soluzione**: passo per passo, con i numeri

Profilo di esempio: 6 m di argilla normalconsolidata su 4 m di sabbia; fondazione 4 × 6 m, q = 150 kPa. I cedimenti sono in mm.

Cedimento totale = cedimento immediato + consolidazione

TEORIA

$$S = S_e + S_c \qquad \text{strato coesivo: } S_e(\text{non drenato}) + S_c \qquad \text{strato granulare: } S_e(\text{drenato})$$

Le due componenti sono calcolate **negli stessi conci**, con lo stesso incremento di tensione di Boussinesq, lo stesso scavo e la stessa profondità di calcolo. La soluzione è **analitica**: fattori di influenza in forma chiusa, percorso delle tensioni concio per concio e teoria di Terzaghi; non si utilizzano elementi finiti.

L'argilla satura non varia di volume durante l'applicazione del carico (v = 0.5): è il suo cedimento immediato. L'acqua drena lentamente e l'argilla si comprime lungo il percorso di tensione: questa è la consolidazione. Poiché la sabbia rilascia immediatamente l'acqua, il suo cedimento è interamente elastico.

> In un profilo di un solo tipo il modulo fornisce **lo stesso risultato** del modulo Cedimento elastico o Consolidazione (Esempio 6).

> Il tipo di ciascuno strato si seleziona nella tabella del profilo stratigrafico e determina quali parametri richiederà lo strato.

TIPO DI STRATO

Strato	Cedimento immediato	Consolidazione
Coesivo	E_u non drenato, v = 0.5	disponibili: C_c, C_r, C_s, e_0, σ'_p (oppure m_v), C_v
Granulare	drenato E′, v′	nessuno

Legge di Hooke e coefficienti di Steinbrenner

TEORIA

Il cedimento sotto una fondazione completamente flessibile che trasmette la pressione netta q_{net} è l'integrale della deformazione verticale (tensioni di Boussinesq, semispazio omogeneo):

$$S = \int \varepsilon_z \, dz = \int \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} \, dz$$

Soluzione in forma chiusa per lo spigolo del rettangolo (Steinbrenner):

$$S = q_{net}\, \alpha\, B' \, \frac{1-\nu^2}{E}\, I_s \qquad I_s = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} F_2$$

m′ = L′/B′, n′ = z/B′. **Centro**: α = 4, B′ = B/2; **angolo**: α = 1, B′ = B.

Poiché nello strato coesivo v = 0.5, si ha $I_s = F_1$ e $(1 - v^2) = 0.75$.

MODULI DI CEDIMENTO ELASTICO

Le formule di F_1, F_2, A_0, A_1, A_2 e gli esempi dettagliati sono nelle presentazioni sul cedimento elastico; in questa sede se ne utilizzano soltanto i risultati per la somma.

Profilo stratificato e pressione netta

TEORIA

Uno strato compreso tra le profondità z_{top} e z_{alt} del piano di posa della fondazione fornisce il proprio contributo alla differenza di I_s con il proprio E e v:

$$\Delta S_e = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,[I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{üst})]$$

Lo scavo rimuove la tensione geostatica verticale efficace al livello del fondo; in un terreno elastico con un solo modulo lo scarico viene recuperato al ricarico, e il cedimento immediato è governato dalla **pressione netta**:

$$q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$$

Se $q_{net} \le 0$ non si ha cedimento immediato (un valore negativo è un rigonfiamento elastico).

Il risultato non dipende dallo spessore dei conci; i conci servono solo alle tabelle e alle zone colorate.

NEDEN FARKLI?

Il cedimento immediato si calcola con la **pressione netta** e la consolidazione con l'**incremento di tensione efficace** lungo il percorso tensionale; lo scavo influenza i due in modi diversi.

Percorso tensionale e compressione del concio

TEORIA

Nei conci coesivi la consolidazione si calcola lungo il **percorso tensionale**, non in un unico passaggio dalla tensione iniziale a quella finale: rigonfiamento dovuto allo scavo (C_s), al ricarico prima l'annullamento del rigonfiamento, poi la ricompressione con C_r fino a σ'_p e, oltre, la compressione vergine con C_c:

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final} \qquad \sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$$

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v)\,, \quad f = \frac{\Delta H}{1 + e_0} \qquad \Delta\sigma_{load} = q\, I_z(z') \qquad \sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

In argilla NC (OCR = 1): $S = C_c\, f \log(\sigma'_{finale}/\sigma'_{v0})$ (senza scavo).

Il rigonfiamento è negativo; $S_{net} = S_c + S_{rigonfiamento}$. Nell'opzione **conservato** il cedimento è misurato dal piano di campagna originario, nell'opzione **azzerato** dalla base rigonfiata.

Profondità di calcolo: $I_z(z') = p$ (comunemente 10%) oppure la base del profilo; il metodo m_v è un'opzione lineare.

DETTAGLIO

La trattazione completa del percorso di tensione, dei regimi, dello scavo e della curva nel tempo è riportata nella presentazione sulla consolidazione.

Traccia

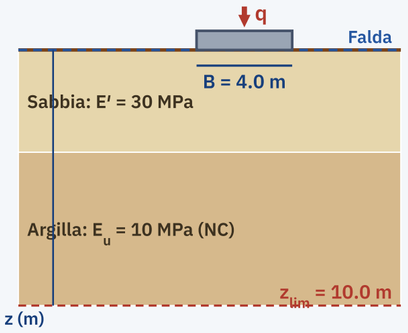
ESEMPIO

Dati

Profilo	**sabbia 0–4 m:** $E' = 30\ \text{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **argilla 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \text{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \text{m}^2/\text{anno},\ \gamma_{sat} = 18$
Fondazione	**Rettangolo flessibile 4 × 6 m, $q = 150\ \text{kPa}$, alla superficie del terreno; falda freatica in superficie; profondità di calcolo 10 m (base del profilo)**
Scavo	**nessuno (q_{net} = 150 kPa)**

RICHIESTO

Cedimento immediato S_e al **centro** e allo **spigolo** di ciascuno strato.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Sabbia (0–4 m): k = q(1 – ν′²)/E′ = 150(0.91)/30 000 = 0.004550; 8 $I_s(4)$ = 2.7351

$$\Delta S_e = k\,[(\alpha B' I_s)_4 - 0] = 0.004550(2.7351) = \mathbf{12.4\ mm}$$

2 Argilla (4–10 m): k = 150(0.75)/10 000 = 0.011250; 8 $I_s(4)$ = 2.3398; 8 $I_s(10)$ = 3.9643

$$\Delta S_e = 0.011250(3.9643 - 2.3398) = \mathbf{18.3\ mm}$$

Al centro S_e = 12.4 + 18.3 = **30.7 mm**; all'angolo 3.4 + 9.8 = **13.2 mm** (all'angolo α = 1, B′ = B).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Boussinesq, profondità di influenza e metodo m_V

TEORIA

Per una fondazione rettangolare B × L sotto il centro del plinto con il coefficiente d'angolo di Newmark, e per una fondazione continua con la soluzione in forma chiusa α:

$$\Delta\sigma = q\, I_z(z') \qquad I_z = 4\, I_{köşe}(m,n)\ \ (m = \tfrac{B}{2z'},\ n = \tfrac{L}{2z'}) \qquad I_{z,\text{striscia}} = \frac{\alpha + \sin\alpha}{\pi}$$

Profondità di influenza: $I_z(z')$ = p (comunemente 10%); quadrata 2.09 B, 2.55 B per L = 1.5 B, continua 6.34 B. Se si seleziona la base del profilo, il calcolo termina all'ultimo strato (in roccia o ghiaia addensata).

Se il profilo termina sopra z_{lim}, l'ultimo strato prosegue fino a z_{lim}.

Metodo m_V: $\Delta H = m_V\, \Delta\sigma'\, H$; lineare, $C_c/C_r/C_s$ non si combinano.

IN QUESTO PROFILO

La profondità di calcolo è la base del profilo (10 m); si assume un substrato rigido. Per lo strato di argilla a z = 7 m, $I_z(z' = 7) = 0.1916$.

Traccia

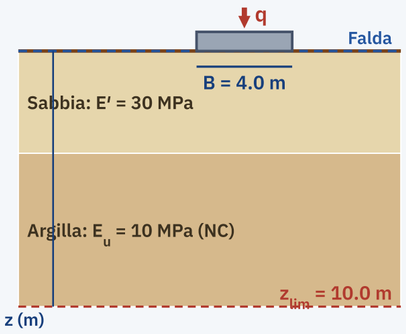
ESEMPIO

Dati

Profilo	**sabbia 0–4 m:** $E' = 30\ \text{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **argilla 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \text{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \text{m}^2/\text{anno},\ \gamma_{sat} = 18$
Fondazione	**Rettangolo flessibile 4 × 6 m,** $q = 150\ \text{kPa}$**, alla superficie del terreno; falda freatica in superficie; profondità di calcolo 10 m (base del profilo)**
Concio	**argilla con concio unico,** $H = 6$ **m, punto medio** $z = 7$ **m;** $f = H/(1 + e_0) = 3$ **m**
Tensioni	$\sigma'_{v0} = 9.19(4) + 8.19(3) = 61.33\ \text{kPa}$

RICHIESTO

I_z, $\Delta\sigma$, σ'_{finale} e S_c.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Boussinesq (z′ = 7 m): m = 2/7 = 0.2857; n = 3/7 = 0.4286

$$I_z = 4\,I_{köşe}(0.2857;\,0.4286) = 4(0.0479) = \mathbf{0.1916} \qquad \Delta\sigma = 150(0.1916) = 28.75\ \text{kPa}$$

2 Tensione finale e compressione (NC: $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$)

$$\sigma'_{final} = 61.33 + 28.75 = 90.08\ \text{kPa}$$

$$S_c = C_c f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)\log\frac{90.08}{61.33} = \mathbf{150.2\ mm}$$

Il cedimento di consolidazione dell'argilla è pari a **150.2 mm**: circa **4.9 volte** il cedimento immediato (30.7 mm). Nell'argilla NC tenera il cedimento principale deriva dalla consolidazione.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Centro, spigolo e fondazione rigida

TEORIA

Per ogni concio si sommano le componenti immediata e (nello strato coesivo) di consolidazione; il totale sugli strati fino a z_{lim} fornisce il cedimento al **centro** della fondazione flessibile:

$$S = \sum \Delta S_e + \sum (\Delta S_b + \Delta S_r + \Delta S_v) \quad [+ S_{heave}]$$

$$S_{köşe} = S_{e,köşe} + S_c \qquad S_{rigid} = 0.93\, S_e + S_c \qquad S_{diff} = S_e - S_{e,köşe}$$

Per lo spigolo **solo il cedimento immediato** assume il valore proprio del rettangolo di spigolo; la consolidazione deriva dal percorso tensionale sull'asse e si assume uguale anche allo spigolo.

La fondazione rigida si abbassa uniformemente: la componente immediata è pari a circa 0.93 volte quella del centro flessibile, quella di consolidazione a quella del centro.

Scavo: la parte immediata è calcolata con q_{net}, così come il rigonfiamento e la ricompressione dell'argilla; nell'opzione "mantenuto" $S = S_e + S_c + S_{rigonfiamento}$.

SE PREVALE L'ARGILLA

Poiché la consolidazione è la stessa al centro e allo spigolo, nei profili in cui l'argilla è dominante il **cedimento differenziale** è solo la differenza della componente immediata.

Traccia

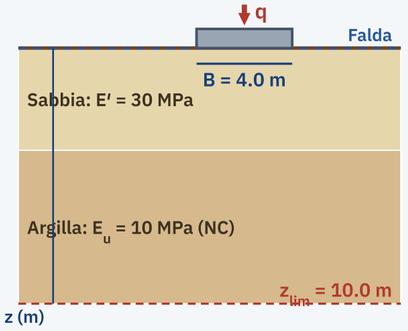
ESEMPIO

Dati

Profilo	**sabbia 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **argilla 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/anno},\ \gamma_{sat} = 18$
Fondazione	**Rettangolo flessibile 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, alla superficie del terreno; falda freatica in superficie; profondità di calcolo 10 m (base del profilo)**
Esempi precedenti	**S_e: centro 30.7, spigolo 13.2 mm; S_c = 150.2 mm (Esempi 1 e 2)**

RICHIESTO

Cedimento totale **al centro, all'angolo, con fondazione rigida**; cedimento differenziale; incidenza della componente immediata.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Totali

$$S_{center} = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm} \qquad S_{köşe} = 13.2 + 150.2 = \mathbf{163.4\ mm}$$

$$S_{rigid} = 0.93(30.7) + 150.2 = \mathbf{178.8\ mm} \qquad S_{diff} = 30.7 - 13.2 = \mathbf{17.5\ mm}$$

	S_e (mm)	S_c (mm)	totale (mm)
centro (flessibile)	30.7	150.2	**181.0**
spigolo (flessibile)	13.2	150.2	**163.4**
rigido	28.6	150.2	**178.8**

Il cedimento immediato è solo il **17%** del totale; il cedimento differenziale è 17.5 mm. Poiché la consolidazione dell'argilla è la stessa al centro e allo spigolo, lo spigolo cedette per il 90% del centro.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

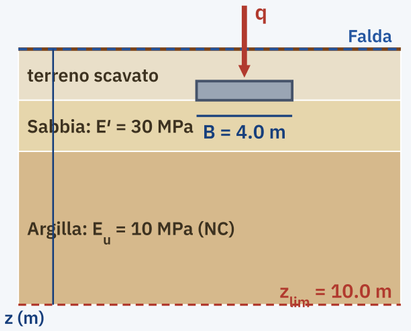
ESEMPIO

Dati

Profilo	**sabbia 0–4 m ($E' = 30,\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$) · argilla 4–10 m (NC; $E_u = 10,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_s = C_r = 0.06,\ \gamma_{sat} = 18$); falda freatica in superficie**
Scavo	**scavo ampio (I_{exc} = 1), profondità 2 m; al fondo dello scavo di fondazione**
Fondazione	**4 × 6 m, $q_{gross} = 150\ \mathrm{kPa}$; profondità di calcolo 10 m**
Conci	**sabbia 2–4 m (H = 2 m), argilla 4–10 m (z = 7 m, f = 3 m)**

RICHIESTO

q_{net}, S_e; rigonfiamento dell'argilla e S_c; cedimento totale (memorizzato e azzerato).



Soluzione (1/3)

SOLUZIONE

1 Pressione netta: $q_{sottospinta} = \sigma'_{v0}(2\text{ m}) = 9.19(2) = 18.38$ kPa

$$q_{net} = 150 - 18.38 = \mathbf{131.62}\ \text{kPa}$$

2 Cedimento immediato: sabbia (z′ 0–2 m) k = 0.003992; argilla (z′ 2–8 m) k = 0.009872 ($k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$)

$$\text{sabbia} : \Delta S_e = 0.003992(1.5131 - 0) = 6.0\ \text{mm}$$

$$\text{argilla} : \Delta S_e = 0.009872(3.6370 - 1.0554) = 25.5\ \text{mm}$$

La pressione netta dello scavo è scesa da 150 a 131.6 kPa; il cedimento immediato da 30.7 a **31.5 mm** (sono stati scavati i primi 2 m di sabbia, l'argilla risulta meno caricata).

Soluzione (2/3)

SOLUZIONE

3 Argilla: percorso tensionale (z′ = 5 m: I_z = 0.3204)

$$\sigma'_{exc} = 61.33 - 18.38 = 42.95\ \text{kPa} \qquad \Delta\sigma = 150(0.3204) = 48.05\ \text{kPa}$$

$$\text{sollevamento} = -0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = -27.8\ \text{mm} \qquad \sigma'_{final} = 42.95 + 48.05 = 91.00\ \text{kPa}$$

4 Argilla NC ($\sigma'_p = \sigma'_{v0}$): S_b recupera il rigonfiamento, S_v è la compressione vergine

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = 27.8\ \text{mm} \qquad S_v = 0.30(3)\log\frac{91.00}{61.33} = 154.2\ \text{mm}$$

$$S_c = S_b + S_v = \mathbf{182.1\ mm}$$

Soluzione (3/3)

SOLUZIONE

	S_e (mm)	S_c (mm)	sollevamento (mm)	totale (mm)
senza scavo (Esempio 3)	30.7	150.2	0	**181.0**
scavato, **conservato** (dal piano di campagna originario)	31.5	182.1	-27.8	**185.8**
scavato, **azzerato** (dal fondo sollevato)	31.5	182.1	—	**213.6**

Il cedimento totale misurato dal piano di campagna originario è **185.8 mm** (S_e + S_c + rigonfiamento); misurato dalla base rigonfiata è **213.6 mm**. La differenza è pari al rigonfiamento (27.8 mm).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Cedimento immediato subito, consolidazione nel tempo

TEORIA

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

$$S(t) = S_e + \sum_i U_i(t)\, S_{c,i} \;\; [+ S_{heave}] \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

S_e è presente **immediatamente** ($t = 0^+$); la consolidazione procede in ogni strato coesivo con il proprio C_v e H_{dr}: $H_{dr} = H$ (drenaggio monolatero) oppure $H/2$ (drenaggio bilaterale).

$T_{v,50} = 0.197$; $T_{v,90} = 0.848$; $T_v < 0.05$'te $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

La curva è la somma delle curve dei singoli strati; i valori t_{50} e t_{90} del sistema si leggono da questa somma. In un profilo privo di strati coesivi non vi è curva temporale: l'intero cedimento è immediato.

Con l'opzione "conservata" la curva parte da rigonfiamento nullo e termina alla deformazione netta.

SABBIA + ARGILLA

La sabbia si consolida immediatamente; **è l'argilla a determinare la forma della curva tempo-cedimento**.

Traccia

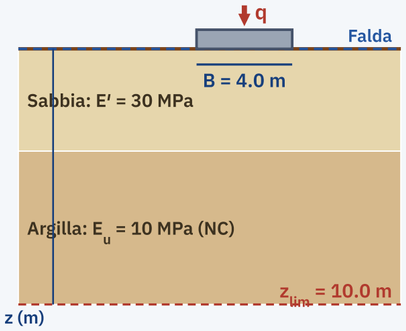
ESEMPIO

Dati

Profilo	**sabbia 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **argilla 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/anno},\ \gamma_{sat} = 18$
Fondazione	**Rettangolo flessibile 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, alla superficie del terreno; falda freatica in superficie; profondità di calcolo 10 m (base del profilo)**
Esempi precedenti	**S_e = 30.7 mm (Esempio 1); S_c = 150.2 mm (Esempio 2); nessuno scavo**
Drenaggio	**l'argilla drena in alto (sabbia) e in basso (substrato rigido): drenaggio doppio, H = 6 m**
Tempi	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 anni**

RICHIESTO

H_{dr}, t_{50}, t_{90} e S(t); cedimento a $t = 0^+$.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Percorso di drenaggio e durate (C_v = 2 m²/anno)

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89}\ \text{anno} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82}\ \text{anno}$$

2 Cedimento iniziale e finale

$$S(0^+) = S_e = 30.7\ \text{mm} \qquad S(\infty) = S_e + S_c = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm}$$

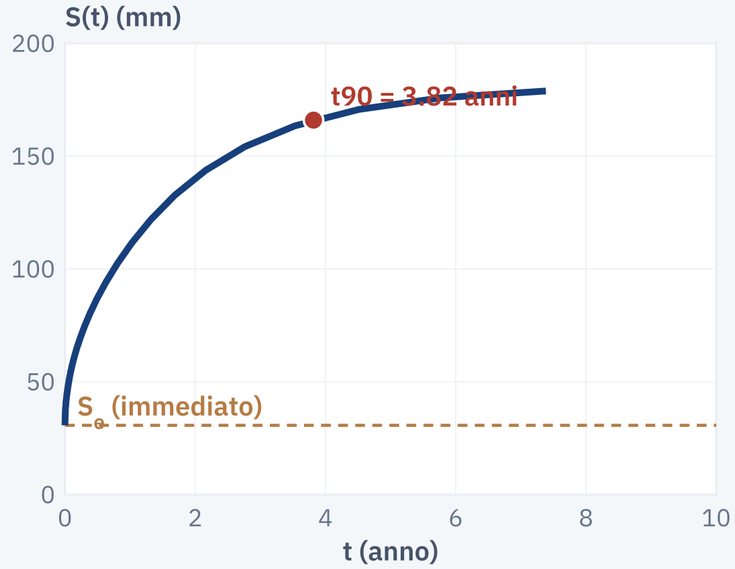
All'atto dell'applicazione del carico il cedimento è di 30.7 mm (17% del totale); il 90% della consolidazione dell'argilla si completa in **3.82 anni**.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

t (anno)	U	$S_c(t)$ (mm)	$S(t) = S_e + S_c(t)$ (mm)
0.25	0.266	40.0	**71**
0.50	0.376	56.5	**87**
1.00	0.531	79.8	**110**
2.00	0.729	109.6	**140**
4.00	0.910	136.7	**167**
8.00	0.990	148.7	**179**

Il cedimento totale in 1 anno è 110 mm (61% del valore finale), e 167 mm in 4 anni (92%). La curva inizia con il cedimento immediato e cresce con la consolidazione dell'argilla.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

ESEMPIO

Dati

Profilo	**solo argilla, 0–6 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa}$, $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $\gamma_{sat} = 18$**; falda freatica in superficie**
Fondazione	**4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, nessuno scavo; profondità di calcolo 6 m (base del profilo)**
Confronto	**Moduli Cedimento elastico (terreni coesivi) + Consolidazione**

RICHIESTO

Confrontare S_e, S_c e il cedimento totale del modulo Cedimenti totali con i risultati dei due moduli per singolo tipo di cedimento.

Soluzione

SOLUZIONE

Modulo	S_e (mm)	S_c (mm)	totale (mm)
Cedimento elastico: terreno coesivo	35.3	—	—
Consolidazione	—	591.6	—
somma dei due moduli	35.3	591.6	**626.9**
Cedimento totale (2D)	35.3	591.6	**626.9**

Il modulo Cedimento totale è **esattamente identico** alla somma dei due moduli per un profilo di un solo tipo (626.9 mm). La somma agli spigoli è 601.5 mm ($S_{e,spigolo}$ = 9.9 + S_c), la fondazione rigida 624.4 mm.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

ESEMPIO

Dati

Profilo	**Riporto, sabbioso 0–2 m (E = 12 MPa) · Argilla-1 2–7 m (E_u = 8 MPa; C_c = 0.25; OCR = 1.6) · Sabbia 7–11 m (E = 35 MPa) · Argilla-2 11–20 m (E_u = 15 MPa; C_c = 0.30; OCR = 1.3) · Sabbia ghiaiosa 20–30 m (E = 70 MPa)**
Fondazione, scavo	**10 × 15 m, q_{lorda} = 120 kPa; profondità di scavo 2 m (piano di scavo = fondazione); falda freatica 2 m**
Profondità di calcolo	**profondità di influenza, p = 10%**
Risultato	**Progetto di esempio del modulo Cedimenti totali**

RICHIESTO

S_e e S_c strato per strato, rigonfiamento; totale al centro, allo spigolo, rigido; t_{50} e t_{90}.

Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Profondità di scavo e di calcolo

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 18(2) = 36.0\ \text{kPa} \qquad q_{net} = 120 - 36.0 = \mathbf{84.0}\ \text{kPa}$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 2 + 25.47 = \mathbf{27.47}\ \text{m}$$

Il terreno di riporto (0–2 m) viene rimosso con lo scavo; il calcolo comprende quattro strati da 2 m fino a z_{lim} = 27.5 m. L'ultimo strato (sabbia ghiaiosa) è tagliato da z_{lim}; il contributo degli strati più profondi è modesto.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

Strato	z (m)	S_e (mm)	S_c (mm)	sollevamento (mm)	totale = S_e + S_c + rigonfiamento (mm)
Argilla-1 (CL, molle)	2.0 – 7.0	20.8	198.4	-62.6	156.6
Sabbia (SM, mediamente addensata)	7.0 – 11.0	5.6	—	—	5.6
Argilla-2 (CH, dura)	11.0 – 20.0	14.1	27.0	-6.5	34.6
Sabbia ghiaiosa (addensata)	20.0 – 27.5	1.2	—	—	1.2
Totale (centro)		**41.7**	**225.4**	**-69.1**	**198.0**

Centro **198.0 mm** = S_e 41.7 + S_c 225.4 − rigonfiamento 69.1 (mantenuto); spigolo 168.7 mm, rigido 195.1 mm. Tempi: t_{50} = 0.72 anni, t_{90} = 3.71 anni. Il modulo restituisce gli stessi valori.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Punti da tenere presenti nella lettura dei risultati

TEORIA

Piano di posa della fondazione = fondo scavo; pressione uniforme in una fondazione perfettamente flessibile; fondazione rigida ≈ 0.93 × centro della fondazione flessibile nella parte brusca.

Cedimento immediato: in ogni strato si adottano le tensioni del semispazio omogeneo (con il proprio v); lo strato coesivo è non drenato (v = 0.5), lo strato granulare è drenato; non si applica correzione per l'approfondimento del piano di posa (I_f = 1).

Consolidazione: Terzaghi monodimensionale; pressione interstiziale idrostatica, la falda freatica non è influenzata dallo scavo; σ'_p è la massima tensione storico, non si riduce con lo scavo; l'incremento di tensione è valutato lungo la verticale al di sotto del centro.

Cedimento positivo, sollevamento negativo; il selettore nell'intestazione ne inverte il segno (il motore resta classico).

Escluso dall'ambito: compressione secondaria, consolidazione degli strati granulari, abachi di Schmertmann e SPT/CPT, modulo crescente con la profondità all'interno dello strato (suddividere lo strato), rigidezza della fondazione e interazione terreno–struttura, consolidazione 2D/3D, elementi finiti, capacità portante, liquefazione.

Sintesi

Punti chiave

$S = S_e + S_c$: strato coesivo = cedimento immediato non drenato + consolidazione; strato granulare = solo cedimento elastico drenato

Cedimento immediato (Steinbrenner): $\Delta S_e = q_{netta}\ \alpha\ B'\ (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{inferiore}) - I_s(z_{superiore})]$; $q_{netta} = q_{lorda} - \sigma'_{v0}(D_{scavo})$

Consolidazione: percorso tensionale $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{finale}$ (C_s, C_r, C_c); in argilla NC $S_c = C_c\ f\ \log(\sigma'_{finale}/\sigma'_{v0})$

Centro $S_e + S_c$; **spigolo** $S_{e,spigolo} + S_c$; **rigida** $0.93\ S_e + S_c$; cedimento differenziale = differenza delle componenti immediate

Scavo: la parte immediata con q_{net}, l'argilla con rigonfiamento + ricompressione; "conservato" $S = S_e + S_c + S_{rigonfiamento}$, "azzerato" $S_e + S_c$

Tempo: $S(t) = S_e + \Sigma\ U_i(t)\ S_{c,i}$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (singolo) oppure $H/2$ (doppio)

Per un profilo con un solo tipo di terreno il risultato è **esattamente identico** a quello del modulo Cedimento elastico o Consolidazione

Bibliografia

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage.

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage — Cap. 10–11 (incremento di tensione, cedimento di consolidazione, decorso temporale).

Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, 1, 121–124.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976). An engineering manual for settlement studies. University of California, Berkeley.

Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800.

NOTA

Tutti gli esempi numerici sono stati prodotti con il motore di calcolo del modulo; il modulo restituisce gli stessi valori (conci di esempio: dz = spessore dello strato).

GeoTerva

Calcoli geotecnici online

Dalla teoria alla pratica

Costruire in GeoTerva il proprio profilo stratificato di argilla e sabbia; il modulo fornisce insieme il cedimento e la curva tempo-cedimento.

Aprire il modulo →

Pagina di teoria →

Aprire dallo smartphone

I moduli di prova non richiedono registrazione.

Se si desidera utilizzarli nelle proprie lezioni: info@geoterva.com