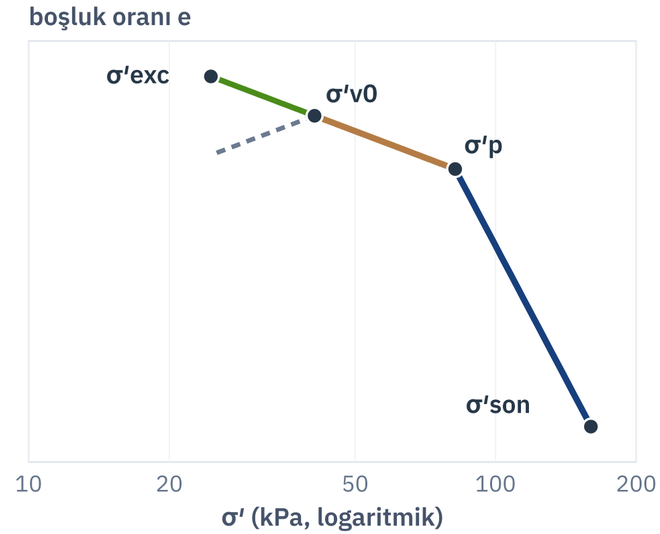
Geoteknik ders sunumu · Oturma

Konsolidasyon oturması

Ders anlatımı: kil tabakasının bir boyutlu konsolidasyon oturması; gerilme yolu, ön konsolidasyon, kazı ve kabarma, Boussinesq gerilmeleri, mv yöntemi ve zaman; her konuda çözümlü örnek.

- Gerilme yolu
- $C_c \cdot C_r \cdot C_s$
- Kazı ve kabarma
- Boussinesq
- m_v yöntemi
- Zamana bağlı oturma



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- Kilin **gerilme yolunu** izlemeyi: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{son}$ (C_s, C_r, C_c)
- Başlangıç gerilmelerini (σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}) ve **ön konsolidasyon gerilmesini** ($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$) bulmayı
- **Kazının** boşaltma ve kabarma etkisini ve oturmanın **hangi referanstan** ölçüldüğünü ayırt etmeyi
- **Boussinesq** gerilme artışını ve **etki derinliğini** hesaplamayı
- Dilim sıkışmasının **dört rejimini** (yeniden sıkışma, bakir sıkışma) uygulamayı; **m_v** yöntemiyle karşılaştırmayı
- **Zamana bağlı** konsolidasyonu (T_v, U, t_{50}, t_{90}) ve tabakalı profilin oturma–zaman eğrisini çizmeyi

DERS AKIŞI

Her konu **üç adımda** işlenir:

1 · **Kuram**: kural nedir, neden öyle?

2 · **Soru**: verilenler ve istenen

3 · **Çözüm**: adım adım, sayılarla

Örnek zemin: 6 m kalınlığında kil, YASS zemin yüzeyinde ($\sigma'_{v0} = 8{,}19\ z$), $e_0 = 1{,}0$, $C_c = 0{,}30$, $C_r = 0{,}06$; 4 × 6 m temel, q = 150 kPa. Oturmalar mm cinsindendir.

Bu modül neyi hesaplar?

KURAM

Profildeki **her tabaka kildir**; başka zemin girilemez. Modül kilin **birincil konsolidasyonunu** hesaplar: yük uygulanınca su yavaşça çıkar ve kil, gerilme yolu boyunca sıkışır.

Ani (elastik) oturma Elastik Oturma modüllerindedir; ikisinin toplamı Toplam Oturma (2B) modülündedir.

Çözüm **analitiktir**: Boussinesq gerilme artışı, dilim dilim gerilme yolu ve Terzaghi kuramı; hidrostatik boşluk suyu basıncı; sonlu eleman yoktur.

Kapsam dışı: granüler tabakalar, ikincil sıkışma (C_α), kumların SPT/CPT oturması, kaya oturması, 2B/3B konsolidasyon, taşıma gücü, sıvılaşma.

İŞARET KURALI

Oturma **pozitif**, kabarma **negatif**. Net deformasyon $S_{net} = S_c + S_{kabarma}$.

Başlangıçtan son gerilmeye tek adımda değil

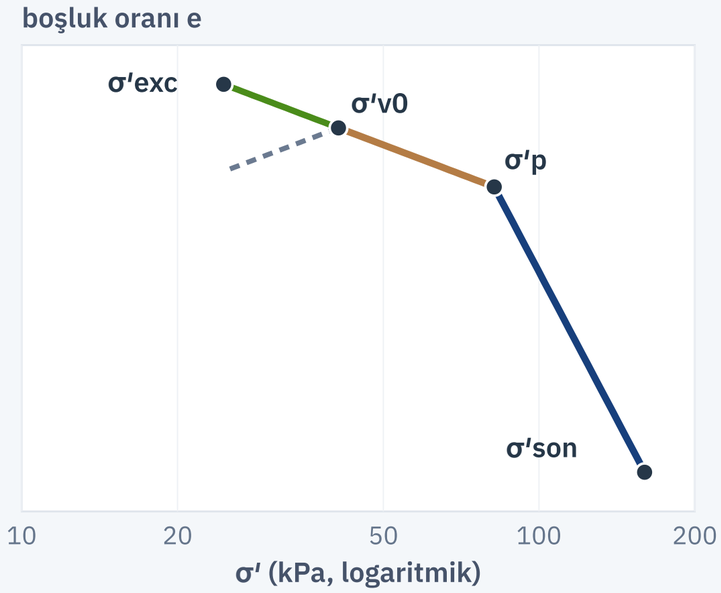
KURAM

Hesap hiçbir zaman başlangıç gerilmesinden son gerilmeye **tek adımda** gitmez. Kazı etkin gerilmeyi azaltır ve kil boşaltma doğrusu (C_s) boyunca **şişer**. Yapı onu yeniden yükleyince kil önce aynı doğruyu izleyip σ'_{v0}'a döner (kabarma geri alınır); sonra C_r ile σ'_p'ye kadar yeniden sıkışır, son gerilme σ'_p'yi aşarsa bakir doğru (C_c) boyunca sıkışır:

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_{p} \xrightarrow{C_c} \sigma'_{son}$$

σ'_p geçmişteki en büyük gerilmedir; **kazıyla azaltılmaz**.

Yükleme–boşaltma çevrimi σ'_{v0}'da **kapanır**: kaldırılan örtüyü yalnızca geri veren bir yük, başlangıç durumuna göre oturma doğurmaz; C_s ve C_r ne olursa olsun.



Şematik: kesik çizgi boşaltma, yeşil çizgi geri yükleme (C_s), turuncu yeniden sıkışma (C_r), mavi bakir sıkışma (C_c).

Her dilimin orta noktasında

KURAM

Temel seviyesi ile hesap derinliği z_{lim} arasındaki her tabaka, kalınlığı en çok Δz olan **dilimlere** bölünür (YASS'ta kesilir); her gerilme dilimin orta noktasında hesaplanır:

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \qquad u_0 = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

γ YASS'ın üstünde, γ_{sat} altında kullanılır; γ_W = 9,81 kN/m³.

Başlangıç zeminin gerilmeleri sonraki her evre için **referanstır**.

Dilim ne kadar ince olursa sonuç o kadar doğru olur; elle hesapta tek dilim yaklaşık sonuç verir.

YASS ZEMİN YÜZEYİNDE

γ_{sat} = 18 için γ′ = 18 − 9,81 = 8,19 kN/m³ ve σ'_{v0} = 8,19 z. Sonraki örneklerin hepsi bu zemini kullanır.

Soru

SORU

Verilenler

Zemin	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$ **(YASS üstünde),** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(altında)**
YASS	**zemin yüzeyinden 1,5 m**
Derinlikler	**z = 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 m**

İSTENEN

Her derinlikte **σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}** değerlerini bulunuz.

Çözüm

ÇÖZÜM

1 z = 3,0 m (YASS 1,5 m)

$$\sigma_{v0} = 17(1{,}5) + 18(1{,}5) = 52{,}50\ \text{kPa}$$

$$u_0 = 9{,}81(3{,}0 - 1{,}5) = 14{,}715\ \text{kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52{,}50 - 14{,}715 = \mathbf{37{,}785}\ \text{kPa}$$

z (m)	σ_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1,5	25,50	0,00	**25,50**
3,0	52,50	14,71	**37,78**
4,5	79,50	29,43	**50,07**
6,0	106,50	44,15	**62,35**

YASS'ın altında σ'_{v0} daha **yavaş** artar (eğim γ' = 8,19 kN/m³): z = 6 m'de toplam gerilme 106,5, etkin gerilme yalnızca 62,4 kPa.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$ ya da laboratuvar değeri

KURAM

Her model için **tek tanım** kullanılır: ya aşırı konsolidasyon oranı OCR ya da laboratuvar σ'_p değeri:

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0} \qquad \text{ya da} \qquad \sigma'_p = \sigma'_{p,lab} \ \ (\geq \sigma'_{v0})$$

OCR = 1: normal konsolide kil; $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$ ve başlangıç gerilmesinin ötesindeki her yükleme bakir sıkışmadır.

Laboratuvar σ'_p değeri σ'_{v0}'ın altındaysa uyarıyla σ'_{v0}'a yükseltilir: **az konsolide kil kapsam dışıdır**.

σ'_p, geçmişteki en büyük gerilmeyi gösterir ve kazıyla düşmez.

OCR NEYİ SÖYLER?

OCR = σ'_p/σ'_{v0}. Büyük OCR, kilin yük altında önce **küçük C_r** ile sıkışacağı geniş bir yeniden sıkışma bölgesi demektir.

Soru

SORU

Verilenler

Dilim	**orta nokta $z = 3\ \mathrm{m}$: $\sigma'_{v0} = 24{,}57\ \mathrm{kPa}$ (YASS yüzeyde, $\gamma_{sat} = 18$)**
Durumlar	**(a) $OCR = 3$ · (b) laboratuvar $\sigma'_p = 60\ \mathrm{kPa}$ · (c) laboratuvar $\sigma'_p = 20\ \mathrm{kPa}$**

İSTENEN

Her durumda **σ′p** ve **OCR**; durumu yorumlayınız.

Çözüm

ÇÖZÜM

1 (a) OCR verilmiş ve (b) laboratuvar değeri

$$(\text{a}):\ \sigma'_p = 3(24{,}57) = \mathbf{73{,}71}\ \text{kPa} \qquad (\text{b}):\ OCR = \frac{60}{24{,}57} = \mathbf{2{,}44}$$

2 (c) laboratuvar değeri σ′v0'ın altında

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow\ \sigma'_p = \mathbf{24{,}57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a) ve (b) aşırı konsolide kil (σ′p > σ′v0); (c) için modül uyarı verir ve kili **normal konsolide** sayar (σ′p = σ′v0 = 24,57 kPa): az konsolide kil kapsam dışıdır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Boşaltma ve kabarma

KURAM

Kaldırılan yük, kazı tabanındaki **başlangıç etkin örtü gerilmesidir** (YASS değişmez; suyun altında kaldırılan ağırlık γ′ ile hesaplanır). Boşaltma, kazı planının Boussinesq etkisi I_{exc} ile dağılır (geniş kazıda $I_{exc} = 1$):

$$q_{kald} = \sigma'_{v0}(D_{exc}) \qquad \Delta\sigma_{exc} = -q_{kald}\, I_{exc}(z') \qquad \sigma'_{exc} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_{exc}$$

$$\Delta H_{kabarma} = -\frac{C_s\, \Delta H}{1 + e_0}\, \log_{10} \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{exc}}$$

Kabarma **negatiftir** (oturma +, kabarma −). C_s verilmemişse $C_s = C_r$ alınır ve raporda belirtilir.

Net basınç $q_{net} = q_{brüt} - q_{kald}$ yalnızca raporlanır; hesap tek adımda net basınçla yapılmaz, gerilme yolu izlenir.

NEDEN KABARMA?

Kazıyla etkin gerilme düşer ve kil şişer. Yapı yeniden yükleyince kabarma geri alınır: bu, kabaran zeminin **yeniden sıkışmasıdır**.

Temelin merkezi altındaki Δσ

KURAM

$$\Delta\sigma_{yük} = q_{brüt}\, I_z(z') \qquad z' = z - D_f$$

Dikdörtgen B × L, merkezinin altında: Newmark köşe katsayısıyla $I_z = 4 \cdot I_{köşe}$(m = B/2z′, n = L/2z′):

$$I_{köşe} = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2}\cdot\frac{V+1}{V} + \tan^{-1}\frac{2mn\sqrt{V}}{V - m^2n^2}\right] \qquad V = m^2 + n^2 + 1$$

($V < m^2n^2$ ise arktanjant terimi π kadar artırılır). **Şerit** (genişlik B), orta çizgisinin altında: $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$, $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. z′ = 0'da $I_z = 1$.

$$\sigma'_{son} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{yük}$$

NOT

Gerilme artışı temel merkezinin altındaki düşey boyunca alınır (dilimler ve zaman analizi); renk bandı alanlarında temel dışındaki noktalar için köşe dikdörtgenlerine bölünür.

Soru

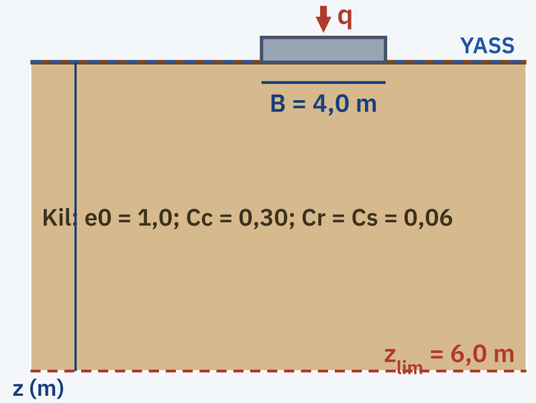
SORU

Verilenler

Temel	**4 × 6 m dikdörtgen, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, zemin yüzeyinde ($D_f = 0$)**
Nokta	**dilimin orta noktası z′ = 3 m, merkezin altında**
Karşılaştırma	**B = 4 m genişliğinde şerit**

İSTENEN

I_z ve **Δσ**; şerit için aynı değerler.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Dikdörtgen: m = B/2z′ = 2/3 = 0,667; n = L/2z′ = 1,0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2{,}4444, \quad m^2n^2 = 0{,}4444, \quad \sqrt{V} = 1{,}5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2{,}0846}{2{,}8889} \cdot \frac{3{,}4444}{2{,}4444} = 1{,}0168$$

$$T_2 = \tan^{-1}\frac{2{,}0846}{2{,}0000} = 0{,}8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0{,}1451$$

2 Dikdörtgen ve şerit

$$\text{dikdörtgen} : I_z = 4(0{,}1451) = \mathbf{0{,}5803} \;\Rightarrow\; \Delta\sigma = 150(0{,}5803) = \mathbf{87{,}04}\ \text{kPa}$$

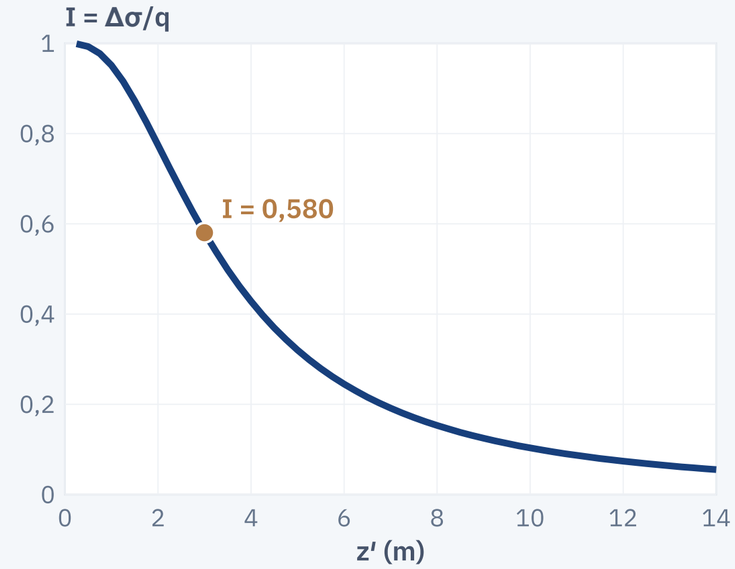
$$\text{şerit} : \alpha = 2\tan^{-1}\tfrac{4}{6} = 1{,}1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1{,}1760 + 0{,}9231}{\pi} = 0{,}6682$$

$$\Delta\sigma = 150(0{,}6682) = \mathbf{100{,}22}\ \text{kPa}$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

z′ (m)	I_z	Δσ (kPa)
0,5	0,9927	148,9
1,0	0,9513	142,7
2,0	0,7746	116,2
3,0	0,5803	87,0
4,0	0,4283	64,2
6,0	0,2449	36,7
8,0	0,1532	23,0
10,0	0,1034	15,5



Dilimin ortasında Δσ = **87,0 kPa** (q'nun %58'i); dar bir şerit (aynı B) 100,2 kPa verir: **uzun temel daha derine etki eder**. Gerilme artışı z′ = 10 m'de bile %10.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Etki derinliği: I(z′) = p

KURAM

Gerilme artışı derinlikle azalır ama hiç sıfır olmaz; dilim sıkışmalarının toplamına bir alt uç gerekir: **hesap derinliği z_{lim}**. Etki derinliği kuralında kil, merkezin altındaki Boussinesq artışı uygulanan basıncın **p** kadarına inene kadar sıkışır (yaygın p = %10):

$$I_z(z') = p \;\Rightarrow\; z_{lim} = D_f + z'$$

Aynı etki katsayısı aynı planlı kazının boşaltmasını da yönetir; bu yüzden derinlik $q_{brüt}$ ya da q_{net} üzerinden okunsa da aynıdır.

Profil z_{lim}'in üstünde biterse son tabaka z_{lim}'e kadar aynı özelliklerle devam eder; altındaysa z_{lim} altındaki zemin sıkışmaz.

Alternatif kural **profilin tabanı**: sert bir taban varsayılır. (Δσ = 0,2 σ'_{v0} ölçütü derindeki küçük temelde daha derine iner; modülün kuralı yalnızca geometriye bağlıdır.)

z′/B (p = %10 | %20)

L/B	p = %10	p = %20
1,0	2,09 B	1,40 B
1,5	2,55 B	1,70 B
2,0	2,92 B	1,94 B
5,0	4,33 B	2,68 B
şerit	6,34 B	3,13 B

Soru

SORU

Verilenler

Temeller	**(a) 4 × 6 m, p = %10 ve %20 · (b) 20 × 30 m radye, p = %10 ve %20**
Kural	**etki derinliği; $D_f = 0$**

İSTENEN

Her durumda **z'** ve **z_{lim}**; 4 × 6 m için I(z′) kontrolü.

Çözüm

ÇÖZÜM

1 Kontrol: 4 × 6 m, p = %10 ⇒ z′ = 10,19 m

$$m = \frac{2}{10{,}19} = 0{,}1963,\ n = \frac{3}{10{,}19} = 0{,}2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0{,}0250) = \mathbf{0{,}1000}$$

Temel	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
4 × 6 m (L/B = 1,5)	10,19 (2,55 B)	6,82 (1,70 B)
20 × 30 m radye	50,9 (2,55 B)	34,1 (1,70 B)

z′ **temelin boyutuyla orantılıdır**: 4 × 6 m temelde z_{lim} = 10,19 m, 20 × 30 m radyede **50,9 m**. Radye, yaklaşık 51 m derinliğe kadar sıkışan kili hesaba katar.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Yeniden yüklemede dilim sıkışması

KURAM

$f = \Delta H/(1 + e_0)$ dilim için; $\sigma'_{exc} \le \sigma'_{v0} \le \sigma'_p$ olmak üzere son gerilmenin yerine göre dilimin sıkışması:

Koşul	Yeniden yüklemede dilim sıkışması
$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{son} \le \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_{exc})$: kabarmanın bir kısmı geri alınır
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{son} \le \sigma'_p$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{son}$	$S_b + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{son}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{son} < \sigma'_{exc}$	C_s ile ek şişme (negatif)

KAZI YOKSA

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ ve $S_b = 0$: klasik yeniden sıkışma ve bakir sıkışma, başlangıç gerilmesinden.

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v) \qquad S_{net} = S_c + S_{kabarma}$$

Soru

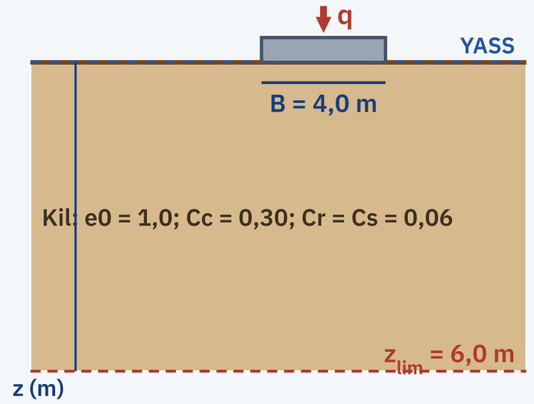
SORU

Verilenler

Zemin	**tek kil tabakası, 6 m kalınlık;** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$**; YASS zemin yüzeyinde;** $e_0 = 1{,}0,\ C_c = 0{,}30,\ C_r = C_s = 0{,}06$
Temel	**4 × 6 m dikdörtgen,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, zemin yüzeyinde (kazı yok)**
Dilim	**tek dilim, H = 6 m, orta noktası** $z = 3\ \mathrm{m}$**:** $\sigma'_{v0} = 8{,}19\,z = 24{,}57\ \mathrm{kPa}$
Aşırı konsolidasyon	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
Gerilme artışı	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87{,}04\ \mathrm{kPa}$ **(Örnek 3)** ⇒ $\sigma'_{son} = 111{,}61\ \mathrm{kPa}$

İSTENEN

Her kil için **rejimi** ve konsolidasyon oturması $\mathbf{S_c}$.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Ortak: f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m; log($\sigma'_{son}/\sigma'_{v0}$) = log(111,61/24,57) = 0,6573

$$(\mathrm{a})\ \mathrm{NC}: \quad S_v = C_c f \log \frac{\sigma'_{son}}{\sigma'_{v0}} = 0{,}30(3)(0{,}6573) = \mathbf{591{,}6\ mm}$$

2 (b) OCR = 6: σ'_p = 6(24,57) = 147,4 kPa > σ'_{son} ⇒ yalnızca yeniden sıkışma

$$S_r = C_r f \log \frac{\sigma'_{son}}{\sigma'_{v0}} = 0{,}06(3)(0{,}6573) = \mathbf{118{,}3\ mm}$$

Aynı kil, aynı yük: normal konsolide kil **591,6 mm**, OCR = 6 olan **118,3 mm** oturur; fark C_c/C_r = 5 oranından gelir.

Çözüm (2/2)

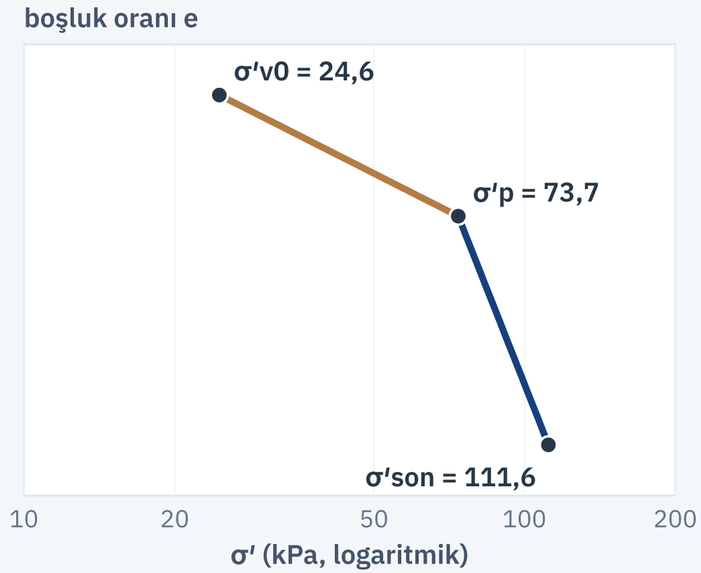
ÇÖZÜM

3 (c) OCR = 3: $\sigma'_p = 3(24{,}57) = 73{,}71$ kPa < $\sigma'_{son} = 111{,}61 \Rightarrow$ yeniden + bakir sıkışma

$$S_r = 0{,}06(3)\log\frac{73{,}71}{24{,}57} = 85{,}9\ \text{mm}$$

$$S_v = 0{,}30(3)\log\frac{111{,}61}{73{,}71} = 162{,}2\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{248{,}0\ mm}$$

OCR	σ'_p (kPa)	rejim	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24,6	bakir	0	591,6	**591,6**
6	147,4	yeniden sıkışma	118,3	0	**118,3**
3	73,7	yeniden + bakir	85,9	162,2	**248,0**



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Orijinal zeminden mi, kabarmış tabandan mı?

KURAM

Kazıdan sonra temel gelir: oturma, yer değiştirmelerin **hangi referanstan** ölçüldüğüne bağlıdır (kazı aşamasındaki *kazıdan sonra yer değiştirmeler* seçimi):

Korunur — orijinal zeminden (varsayılan): kabarma ayrıca gösterilir; temelin oturması yükleme sonundaki net deformasyondur: **$S = S_c + S_{kabarma}$** = σ'_{v0}'ın ötesindeki toplam sıkışma. Kaldırılan örtüden büyük olmayan bir yük $S = 0$ verir; küçükse zemin orijinal seviyenin üstünde kalır (rapor edilir, oturma 0).

Yüklemeden önce sıfırlanır: kazı aşamasının yer değiştirmeleri sıfırlanır; oturma kabarmış kazı tabanından ölçülür: **$S = S_c = S_b + S_r + S_v$**. Kabarmanın yeniden sıkışması oturma sayılır: tam dengelenmiş bir temel, tabanın kabardığı kadar oturur. Kazı, yapı yapılana kadar açık kalıp kabarma geliştiyse doğru yanıt budur.

İki ölçü de her zaman yazdırılır; seçim, temelin oturması olarak raporlananı, zaman eğrisini ve sonucu belirler.

ÖZET

Korunur: $S = S_c + S_{kabarma}$ (küçük).
Sıfırlanır: $S = S_c$ (büyük).

Soru

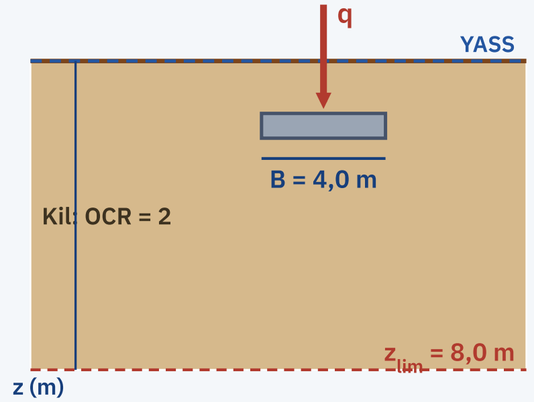
SORU

Verilenler

Zemin	**kil 0–8 m,** $\gamma_{sat} = 18$**, YASS yüzeyde;** $e_0 = 1{,}0,\ C_c = 0{,}30,\ C_r = C_s = 0{,}06$**;** $OCR = 2$
Kazı	**geniş kazı (**$I_{exc} = 1$**), derinlik 2 m; temel kazı tabanında**
Temel	**4 × 6 m,** $q_{brüt} = 100\ \mathrm{kPa}$
Dilim	**tek dilim 2–8 m,** $H = 6$ **m,** $z = 5$ **m,** $f = 3$ **m:** $\sigma'_{v0} = 8{,}19(5) = 40{,}95\ \mathrm{kPa}$

İSTENEN

σ'_{exc}, kabarma, S_b, S_r, S_v, S_c; temelin oturması (orijinal zeminden ve sıfırlanmış).



Çözüm (1/3)

ÇÖZÜM

1 Kazı: kaldırılan yük, boşaltma ve kabarma

$$q_{kald} = \sigma'_{v0}(2) = 8{,}19(2) = 16{,}38\ \text{kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40{,}95 - 16{,}38 = \mathbf{24{,}57}\ \text{kPa}$$

$$\Delta H_{kabarma} = -0{,}06(3)\log\frac{40{,}95}{24{,}57} = -0{,}06(3)(0{,}2218) = \mathbf{-39{,}9\ mm}$$

2 Yükleme: $I_z(z' = 3) = 0{,}5803$ (Örnek 3); $\sigma'_p = 2(40{,}95) = 81{,}9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0{,}5803) = 58{,}03\ \text{kPa} \quad \sigma'_{son} = 24{,}57 + 58{,}03 = \mathbf{82{,}60}\ \text{kPa}$$

Çözüm (2/3)

ÇÖZÜM

3 Rejim: $\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81{,}9 < \sigma'_{son} = 82{,}60$

$$S_b = 0{,}06(3)\log\frac{40{,}95}{24{,}57} = 39{,}9\ \text{mm} \qquad S_r = 0{,}06(3)\log\frac{81{,}9}{40{,}95} = 54{,}2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0{,}30(3)\log\frac{82{,}60}{81{,}9} = 3{,}3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97{,}4\ mm}$$

Yeniden yüklemede önce kabarma geri alınır (S_b = 39,9 mm = kabarmanın tamamı), sonra C_r ile 54,2 mm yeniden sıkışma ve σ'_p'yi hafifçe aşan 3,3 mm bakir sıkışma gelir.

Çözüm (3/3)

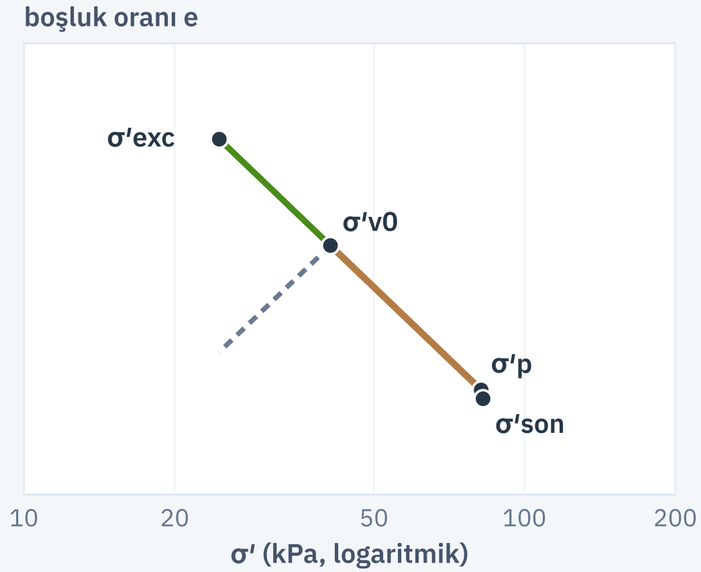
ÇÖZÜM

4 Temelin oturması

$$\text{korunur}: \quad S = S_c + S_{kabarma} = 97{,}4 - 39{,}9 = \mathbf{57{,}5\ mm}$$

$$\text{sıfırlanır}: \quad S = S_c = \mathbf{97{,}4\ mm}$$

Orijinal zeminden ölçülen oturma **57,5 mm**; kabarmış tabandan ölçülen **97,4 mm**. Fark, kabarma kadardır (39,9 mm): referans seçimi sonucu %69 değiştirir.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Doğrusal yol: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$

KURAM

Ayrı ve **doğrusal** bir hesap yoludur: aynı m_v hem boşaltmada hem yeniden yüklemede kullanılır; C_c, C_r, C_s ve e_0 karışmaz:

$$\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H_{dilim}$$

$$\text{kabarma} = -m_v\,(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\,H \qquad S_c = m_v\,(\sigma'_{son} - \sigma'_{exc})\,H$$

S_c'nin σ'_{v0}'a kadar olan kısmı geri alınan kabarmadır (S_b).

Doğrusal olduğu için çevrimi kendiliğinden kapanır.

m_v birimi 1/kPa (hacimsel sıkışma katsayısı); gerilme aralığına göre seçilmelidir.

e – log σ′ İLE FARKI

m_v yöntemi gerilme düzeyine bakmaz (σ'_p yok): her gerilme artışı aynı sıkışmayı verir.

Soru

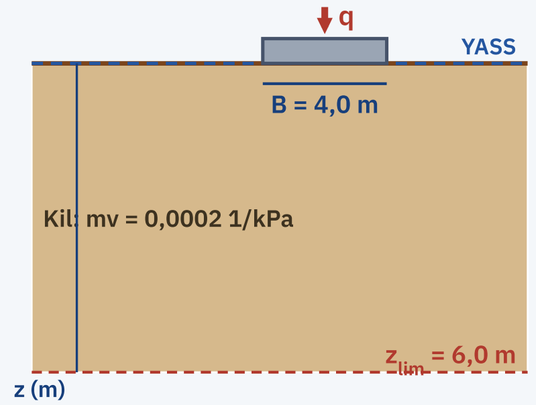
SORU

Verilenler

Zemin	**6 m kil, $m_v = 0{,}0002\ 1/\mathrm{kPa}$, YASS yüzeyde**
Durum (a)	**kazısız: 4×6 m, $q = 150$ kPa, $\Delta\sigma = 87{,}04$ kPa (Örnek 3)**
Durum (b)	**Örnek 6'daki kazı ve temel (2 m kazı, $q = 100$ kPa, 2–8 m dilim)**

İSTENEN

Her durumda **S_c**; (b) için kabarma, S_b ve net oturma.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 (a) Kazısız

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0{,}0002(87{,}04)(6) = \mathbf{104{,}4\ mm}$$

2 (b) Kazılı: σ'_{v0} = 40,95; σ'_{exc} = 24,57; $\Delta\sigma_{yük}$ = 58,03; σ'_{son} = 82,60 kPa

$$\text{kabarma} = -0{,}0002(40{,}95 - 24{,}57)(6) = -19{,}7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0{,}0002(82{,}60 - 40{,}95)(6) = 50{,}0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69{,}6\ mm}$$

Net oturma (orijinal zeminden) S = S_c + kabarma = **50,0 mm**; yalnızca σ'_{v0}'ı aşan 41,65 kPa'lık artış oturma doğurur. Doğrusal yolda e – log σ′ yönteminin σ'_p etkisi yoktur.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Terzaghi: T_v, U ve t

KURAM

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

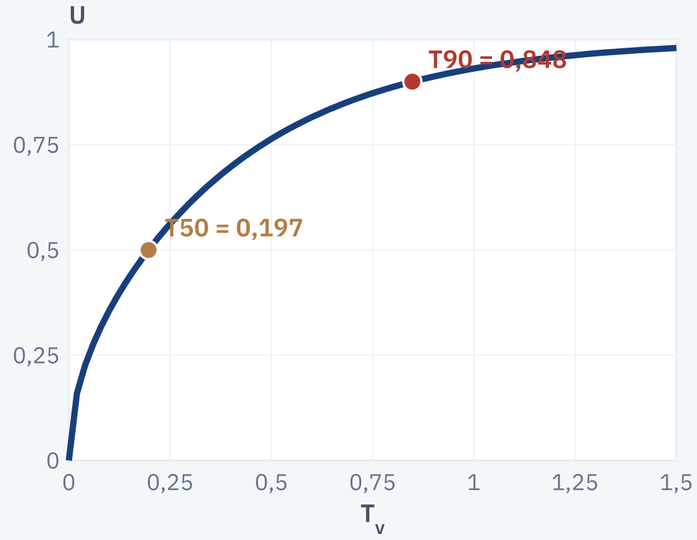
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H (tek yönlü drenaj) ya da H/2 (çift yönlü); H temel seviyesinin altındaki tabaka kalınlığı (profil dışına taşan son tabaka için z_{lim}'e kadar).

$T_{v,50}$ = 0,197; $T_{v,90}$ = 0,848. T_v < 0,05'te erken zaman çözümü U = 2√(T_v/π) kullanılır.

Farklı C_v ve H_{dr} değerli tabakalar farklı hızda konsolide olur: profilin eğrisi **tabaka eğrilerinin toplamıdır**; kendi t_{50} ve t_{90} değeri bu toplamdan okunur.

Eğri yükleme oturması S_c'ye aittir; kabarmanın yükleme öncesi tamamlandığı varsayılır.



Soru

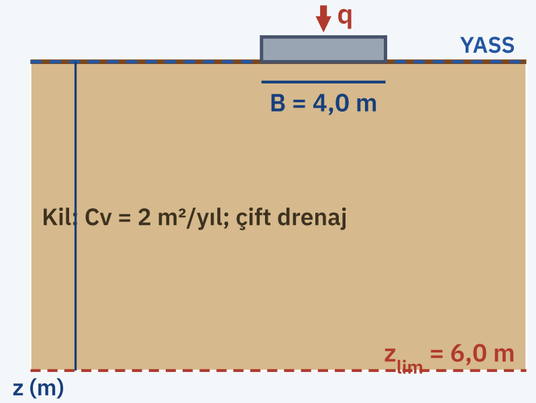
SORU

Verilenler

Kil	**6 m, normal konsolide (Örnek 5a): $S_c = 591{,}6$ mm**
Konsolidasyon	**$C_v = 2\ \mathrm{m^2/yıl}$; üstte ve altta drenaj (çift yönlü)**
Zamanlar	**t = 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8 yıl**

İSTENEN

H_{dr}, t_{50}, t_{90} ve S(t); tek yönlü drenajla t_{90}.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Drenaj yolu ve karakteristik süreler

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0{,}197(3^2)}{2} = \mathbf{0{,}89}\ \text{yıl} \qquad t_{90} = \frac{0{,}848(3^2)}{2} = \mathbf{3{,}82}\ \text{yıl}$$

2 Tek yönlü drenaj (H_{dr} = 6 m)

$$t_{90} = \frac{0{,}848(6^2)}{2} = \mathbf{15{,}3}\ \text{yıl}$$

Çift yönlü drenajda su yolu yarıya iner ve süre **dörtte birine** düşer: t_{90} = 3,82 yıl, tek yönlü 15,3 yıl.

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

t (yıl)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	U	$S(t) = U\,S_c$ (mm)
0,25	0,056	0,266	**157**
0,50	0,111	0,376	**222**
1,00	0,222	0,531	**314**
2,00	0,444	0,729	**431**
4,00	0,889	0,910	**538**
8,00	1,778	0,990	**586**

1 yılda oturmanın yalnızca %53'i, 4 yılda %91'i tamamlanır (S_c = 592 mm); 8 yılda U = 0,990. Küçük T_v değerlerinde (< 0,05) $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$ kullanılır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

SORU

Verilenler

Temel	**4 × 6 m, q = 150 kPa, zemin yüzeyinde; YASS yüzeyde (γ_{sat} = 18)**
A tabakası (0–4 m)	**yumuşak, NC: $e_0 = 1{,}10,\ C_c = 0{,}35,\ C_r = 0{,}07$; $C_v = 1$; çift drenaj**
B tabakası (4–8 m)	**sert, $OCR = 2$: $e_0 = 0{,}80,\ C_c = 0{,}20,\ C_r = 0{,}04$; $C_v = 3$; tek yönlü drenaj**
Hesap	**profilin tabanı (8 m); her tabaka tek dilim (A: z = 2 m, B: z = 6 m)**

İSTENEN

Her tabakanın **S_c** değeri, t_{50} ve t_{90}; sistemin S(t) eğrisi.

Çözüm (1/3)

ÇÖZÜM

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16,38; $I_z(2)$ = 0,7746 ⇒ Δσ = 116,19; σ'_{son} = 132,57; f = 4/2,10 = 1,9048 m; NC

$$S_{c,A} = C_c f \log \frac{\sigma'_{son}}{\sigma'_{v0}} = 0{,}35(1{,}9048) \log \frac{132{,}57}{16{,}38} = \mathbf{605{,}4\ mm}$$

2 B: z = 6 m, σ'_{v0} = 49,14; σ'_{p} = 98,28; $I_z(6)$ = 0,2449 ⇒ Δσ = 36,74; σ'_{son} = 85,88 < σ'_{p}; f = 4/1,80 = 2,2222 m

$$S_{c,B} = C_r f \log \frac{\sigma'_{son}}{\sigma'_{v0}} = 0{,}04(2{,}2222) \log \frac{85{,}88}{49{,}14} = \mathbf{21{,}6\ mm}$$

Toplam konsolidasyon oturması **627,0 mm**: yumuşak NC üst tabaka toplamın %97'ini taşır; sert, aşırı konsolide alt tabaka yalnızca 21,6 mm.

Çözüm (2/3)

ÇÖZÜM

3 Drenaj yolu ve süreler ($t = 0{,}197\ H_{dr}^2/C_v$; $0{,}848\ H_{dr}^2/C_v$)

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0{,}197(4)}{1} = 0{,}788,\ t_{90} = \frac{0{,}848(4)}{1} = 3{,}39\ \text{yıl}$$

$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0{,}197(16)}{3} = 1{,}051,\ t_{90} = \frac{0{,}848(16)}{3} = 4{,}52\ \text{yıl}$$

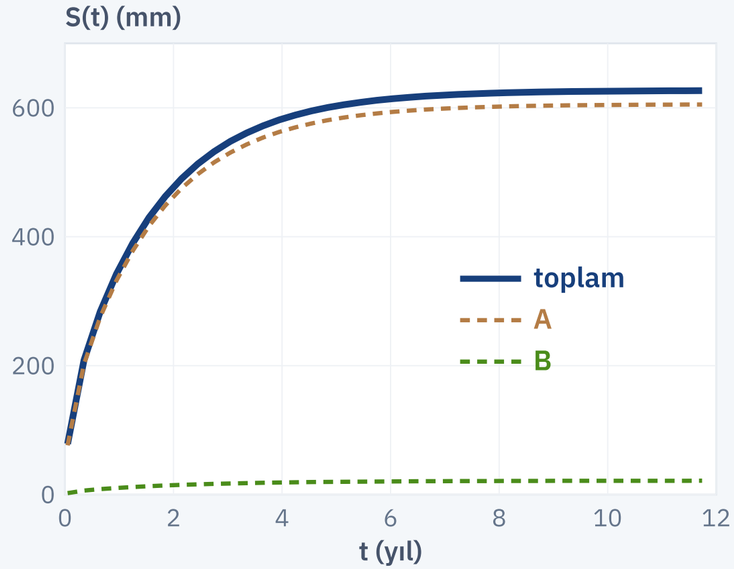
Sistemin eğrisi $S(t) = U_A(t)\,S_A + U_B(t)\,S_B$ toplamıdır; kendi süreleri bu toplamdan okunur: **t_{50} = 0,794 yıl, t_{90} = 3,43 yıl** (baskın A tabakasına yakın).

Çözüm (3/3)

ÇÖZÜM

t (yıl)	S_A (mm)	S_B (mm)	S(t) (mm)	U
0,5	242	7,4	**249**	0,397
1,0	340	10,5	**351**	0,560
2,0	463	14,6	**477**	0,761
5,0	583	19,8	**603**	0,961
10,0	604	21,4	**626**	0,998
20,0	605	21,6	**627**	1,000

1 yılda oturmanın %56'i, 5 yılda %96'i tamamlanır; yaklaşık 10 yılda biter (627 mm). Eğri, **yumuşak A tabakası** tarafından belirlenir.



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Sonuçları okurken akılda tutulacaklar

KURAM

Temel seviyesi = kazı tabanı (kazı yoksa zemin yüzeyi); **hidrostatik** boşluk suyu basıncı; YASS kazıdan etkilenmez.

Gerilme artışı **temel merkezinin altındaki düşeyde** alınır (dilimler ve zaman analizi); renk alanları aynı gerilme yolunu her noktada izler.

e_0 her evrede başlangıç boşluk oranıdır; **ikincil sıkışma (C_α) yoktur**.

Oturma pozitif, kabarma negatif; başlıktaki seçici işareti ters çevirip yukarı pozitif gösterime geçer (motor klasik kalır).

Renk bantları: oturma, kabarma ve şekil değiştirme gibi derinlikle hızla azalan alanlar $1 \cdot 1{,}5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^{n}$ sınıflarıyla boyanır; eşit bantlar alt bölgeyi tek renge sıkıştırırdı.

Özet

Akılda kalacak noktalar

Gerilme yolu: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0}$ (C_s) $\rightarrow \sigma'_p$ (C_r) $\rightarrow \sigma'_{son}$ (C_c); $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$, kazıyla azalmaz

Dilim sıkışması $f = \Delta H/(1 + e_0)$: NC: $C_c\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_{v0})$; OC ve $\sigma'_{son} \le \sigma'_p$: $C_r\, f \log(\ldots)$; $\sigma'_{son} > \sigma'_p$: $C_r + C_c$ parçaları

Kazı: $q_{kald} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$, kabarma $= -C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$; $S = S_c + S_{kabarma}$ (orijinal zemin) ya da S_c (sıfırlanmış)

Boussinesq: $\Delta\sigma = q\, I_z(z')$; dikdörtgen merkezi 4 $I_{köşe}$, şerit $(\alpha + \sin\alpha)/\pi$; $\mathbf{z_{lim}}$: $I(z') = p$ (kare 2,09 B, L = 1,5 B 2,55 B, şerit 6,34 B)

m_v yöntemi: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$, doğrusal; kabarma $= -m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\, H$

Zaman: $T_v = C_v\, t/H_{dr}^2$; $T_{v,50} = 0{,}197$, $T_{v,90} = 0{,}848$; $H_{dr} = H$ (tek) ya da $H/2$ (çift); $S(t) = \Sigma\, U_i\, S_{c,i}$

Kaynaklar

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

Newmark, N.M. (1935). Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. Univ. of Illinois Bulletin 429.

Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd ed. Pearson.

Craig, R.F., Knappett, J.A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, 8th ed. Spon.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap motoruyla üretilmiştir, modül aynı değerleri verir (örnek dilimler: dz = tabaka kalınlığı).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Bu sunumdaki örnekleri GeoTerva'da adım adım hesaplayın; modülde tabaka sayısı ve kazı serbestçe girilir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.

Derslerinizde kullanmak isterseniz: info@geoterva.com