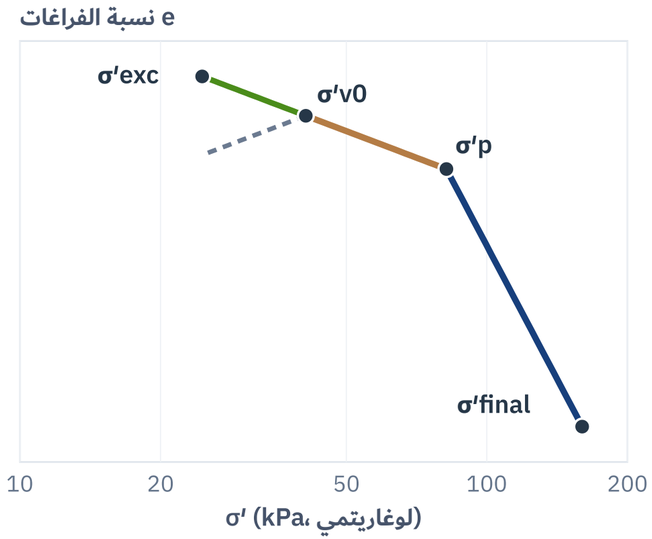


شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الهبوط

هبوط الانضمام

المحاضرة: هبوط الانضمام أحادي البعد لطبقة الطين؛ مسار الإجهاد، والانضمام المسبق، والحفر والانتفاخ، وإجهادات Boussinesq، وطريقة mv، والزمن؛ مع مثال محلول لكل موضوع.

- مسار الإجهاد
- $C_c \cdot C_r \cdot C_s$
- الحفر والانتفاخ
- Boussinesq
- طريقة m_v
- الهبوط المعتمد على الزمن

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

- تتبع **مسار الإجهاد** في الطين: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{final}$ (C_s، C_r، C_c)
- إيجاد الإجهادات الأولية (σ_{v0}، u_0، σ'_{v0}) و**الإجهاد مسبق الانضمام** ($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$)
- التمييز بين أثر التفريغ والانتفاخ الناتج عن **الحفر** و**المرجع** الذي يقاس منه الهبوط
- حساب زيادة الإجهاد وفق **Boussinesq** و**عمق التأثير**
- تطبيق **الحالات الأربع** لانضغاط الشريحة (إعادة الانضغاط، والانضغاط البكر)؛ ومقارنتها مع طريقة m_v
- الانضمام **المعتمد على الزمن** (T_v و U و t_{50} و t_{90}) ورسم منحنى الهبوط–الزمن للقطاع الطبقي

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

1 · **النظرية**: ما القاعدة، ولماذا هي كذلك؟

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

التربة المثال: طين سماكته 6 m، ومنسوب المياه الجوفية عند سطح الأرض ($\sigma'_{v0} = 8.19\ z$)، $e_0 = 1.0$، $C_c = 0.30$، $C_r = 0.06$؛ قاعدة 4 × 6 m، $q = 150$ kPa. والهبوط بوحدة mm.

ماذا تحسب هذه الوحدة؟

النظرية

جميع الطبقات في القطاع من الطين؛ ولا يمكن إدخال تربة أخرى. تحسب الوحدة **الانضمام الأولي** للطين: عند تطبيق الحمل يخرج الماء ببطء وينضغط الطين على امتداد مسار الإجهاد.

الهبوط الفوري (المرن) في وحدات الهبوط المرن؛ ومجموع الاثنين في وحدة الهبوط الكلي (2D).

الحل **تحليلي**: زيادة الإجهاد حسب Boussinesq، ومسار الإجهاد شريحة بعد شريحة، ونظرية Terzaghi؛ وضغط ماء المسام الهيدروستاتيكي؛ ولا توجد عناصر محدودة.

خارج النطاق: الطبقات الحبيبية، والانضغاط الثانوي (C_α)، وهبوط الرمال المحسوب من SPT/CPT، وهبوط الصخور، والانضمام ثنائي/ثلاثي الأبعاد، وقدرة التحمل، وتميّع التربة.

قاعدة الإشارات

الهبوط **موجب**، والانتفاخ **سالب**. التشوه الصافي $S_{net} = S_c + S_{heave}$.

النظرية

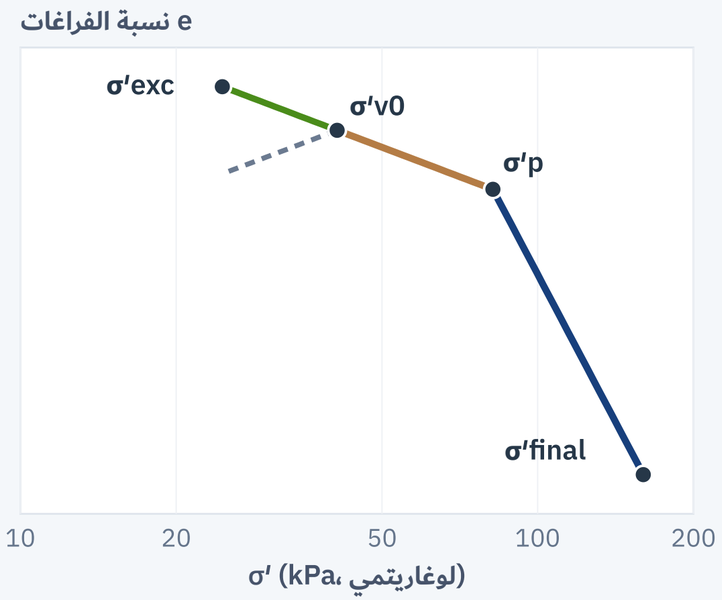
لا في خطوة واحدة من الإجهاد الابتدائي إلى الإجهاد النهائي

لا ينتقل الحساب أبداً من الإجهاد الأولي إلى الإجهاد النهائي **في خطوة واحدة**. فالحفر يخفض الإجهاد الفعال، و**ينتفخ** الطين على امتداد خط التفريغ (C_s). وعندما يعيد المنشأ تحميله يتبع الطين أولاً الخط نفسه عائداً إلى σ'_{v0} (يسترد الانتفاخ)؛ ثم يعاود الانضغاط وفق C_r حتى σ'_p، وإذا تجاوز الإجهاد النهائي σ'_p انضغط على امتداد الخط البكر (C_c):

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final}$$

σ'_p هو أكبر إجهاد تعرضت له التربة في الماضي؛ **ولا ينخفض بالحفر**.

تُغلق دورة التحميل–التفريغ عند σ'_{v0}: فالحمل الذي يعيد فقط الغطاء الترابي المزال لا يولّد هبوطاً قياساً بالحالة الأولية، أياً كانت قيمتا C_s و C_r.



رسم تخطيطي: الخط المتقطع للتفريغ، والخط الأخضر لإعادة التحميل (C_s)، والبرتقالي لإعادة الانضغاط (C_r)، والأزرق للانضغاط البكر (C_c).

عند منتصف كل شريحة

النظرية

تقسم كل طبقة بين منسوب التأسيس وعمق الحساب z_{lim} إلى **شرائح** سماكة كل منها Δz كحد أقصى (وتقطع عند منسوب المياه الجوفية)؛ ويحسب كل إجهاد عند منتصف الشريحة:

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

يستخدم γ فوق منسوب المياه الجوفية، و γ_{sat} تحته؛ $\gamma_w = 9.81$ kN/m³.

إجهادات الأرض الابتدائية هي **المرجع** لكل مرحلة لاحقة.

كلما كانت الشريحة أنحف كان الناتج أدق؛ وفي الحساب اليدوي تعطي الشريحة الواحدة نتيجة تقريبية.

منسوب المياه الجوفية عند سطح الأرض

عند $\gamma_{sat} = 18$ يكون $\gamma' = 18 - 9.81 = 8.19$ kN/m³ و $\sigma'_{v0} = 8.19\ z$. وتستخدم جميع الأمثلة التالية هذه التربة.

المسألة

مثال

المعطيات

التربة	$\gamma = 17$ kN/m^3 **(أعلى منسوب المياه الجوفية)**، $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(أدناه)**
منسوب المياه الجوفية	**1.5 m من سطح الأرض**
الأعماق	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

المطلوب

أوجد قيم **σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}** عند كل عمق.

الحل

الحل

1 z = 3.0 m (منسوب المياه الجوفية 1.5 m)

$$\sigma_{v0} = 17(1.5) + 18(1.5) = 52.50 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 9.81(3.0 - 1.5) = 14.715 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52.50 - 14.715 = \mathbf{37.785} \text{ kPa}$$

σ'_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ_{v0} (kPa)	z (m)
25.50	0.00	25.50	1.5
37.78	14.71	52.50	3.0
50.07	29.43	79.50	4.5
62.35	44.15	106.50	6.0

تحت منسوب المياه الجوفية يزداد σ'_{v0} **ببطء أكبر** (الميل $\gamma' = 8.19$ kN/m³): عند z = 6 m يبلغ الإجهاد الكلي 106.5 والإجهاد الفعال 62.4 kPa فقط.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$ أو القيمة المخبرية

النظرية

يُستخدم **تعريف واحد** لكل نموذج: إما نسبة الإفراط في الانضمام OCR أو قيمة σ'_p المخبرية:

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

OCR = 1: طين عادي الانضمام؛ $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$، وكل تحميل يتجاوز الإجهاد الابتدائي هو انضغاط بكر.

إذا كانت قيمة σ'_p المخبرية دون σ'_{v0} رفعت إلى σ'_{v0} مع تحذير: **الطين ناقص الانضمام خارج النطاق**.

يمثل σ'_p أكبر إجهاد تعرضت له التربة في الماضي ولا ينخفض بالحفر.

ماذا تبين نسبة OCR؟

$OCR = \sigma'_p/\sigma'_{v0}$. وتعني قيمة OCR الكبيرة وجود منطقة واسعة لإعادة الانضغاط ينضغط فيها الطين تحت الحمل أولا وفق **قيمة صغيرة للدليل C_r**.

المسألة

مثال

المعطيات

الشريحة

النقطة الوسطى $z = 3$ m: $\sigma'_{v0} = 24.57$ kPa

(منسوب المياه الجوفية عند السطح، $\gamma_{sat} = 18$)

الحالات

(أ) $OCR = 3$ · **(ب) المعمل** $\sigma'_p = 60$ kPa · **(ج)**

المعمل $\sigma'_p = 20$ kPa

المطلوب

σ'_p و **OCR** في كل حالة؛ فسر الحالة.

الحل

الحل

1 (أ) قيمة OCR المعطاة و(ب) القيمة المخبرية

$$\text{(a)}: \ \sigma'_p = 3(24.57) = \mathbf{73.71}\ \text{kPa} \qquad \text{(b)}: \ OCR = \frac{60}{24.57} = \mathbf{2.44}$$

2 (c) القيمة المخبرية أقل من σ'_{v0}

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow \ \sigma'_p = \mathbf{24.57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a) و (b) طين مفرط الانضمام ($\sigma'_p > \sigma'_{v0}$)؛ وفي الحالة (c) تصدر الوحدة تحذيراً وتعد الطين **عادي الانضمام** (= σ'_p = σ'_{v0} = 24.57 kPa): فالطين ناقص الانضمام خارج نطاق الوحدة.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

التفريغ والانتفاخ

الحمل المزال هو **إجهاد الغطاء الترابي الفعال الأولي** عند قاع الحفر (لا يتغير منسوب المياه الجوفية؛ وتحت الماء يحسب الوزن المزال بالوزن γ′). ويتوزع التفريغ وفق تأثير Boussinesq لمسقط الحفر I_{exc} (وفي الحفر الواسع $I_{exc} = 1$):

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

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

الانتفاخ **سالب** (الهبوط +، الانتفاخ −). وإذا لم تعط C_s أخذت $C_s = C_r$ وذكر ذلك في التقرير.

صافي الضغط $q_{net} = q_{gross} - q_{uplift}$ يسجل في التقرير فقط؛ ولا يجرى الحساب في خطوة واحدة بصافي الضغط، بل يتتبع مسار الإجهاد.

NEDEN KABARMA?

يقل الإجهاد الفعال بالحفر فينتفخ الطين. وعندما يعيد المنشأ التحميل يسترد الانتفاخ: وهذا هو **إعادة انضغاط التربة المنتفخة**.

Δσ تحت مركز قاعدة الأساس

النظرية

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

مستطيل L × B، تحت مركزه: بمعامل الركن حسب Newmark يكون $I_z = 4 \cdot I_{corner}(m = B/2z',\ n = L/2z')$:

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

(إذا كان $V < m^2n^2$ يزاد حد الظل العكسي بمقدار π). **الشريط** (العرض B)، تحت خط منتصفه: $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$، $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. عند $z' = 0$ تكون $I_z = 1$.

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

ملاحظة

تؤخذ زيادة الإجهاد على الخط الرأسي المار تحت مركز القاعدة (الشرائح وتحليل الزمن)؛ أما في مناطق الأشرطة اللونية فتقسم، بالنسبة إلى النقاط الواقعة خارج القاعدة، إلى مستطيلات ركنية.

المسألة

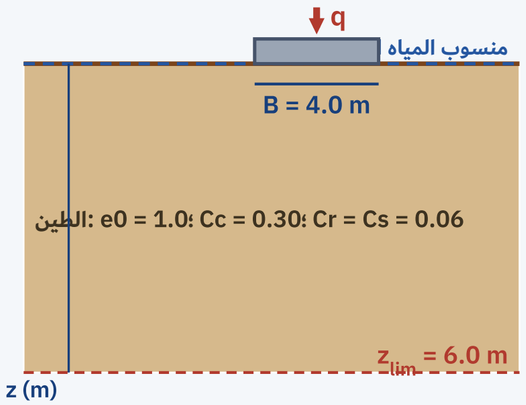
مثال

المعطيات

الأساس	مستطيل 4 m × 6 m، $q = 150$ kPa، على سطح الأرض ($D_f = 0$)
النقطة	نقطة منتصف الشريحة $z' = 3$ m، أسفل المركز
المقارنة	شريط بعرض B = 4 m

المطلوب

I_z و $\Delta\sigma$؛ القيم نفسها بالنسبة إلى الشريط.



الحل (1/2)

الحل

1 مستطيل: m = B/2z′ = 2/3 = 0.667؛ n = L/2z′ = 1.0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2.4444, \quad m^2 n^2 = 0.4444, \quad \sqrt{V} = 1.5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2 n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2.0846}{2.8889} \cdot \frac{3.4444}{2.4444} = 1.0168$$

$$T_2 = \tan^{-1}\frac{2.0846}{2.0000} = 0.8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0.1451$$

2 المستطيلة والشريطية

مستطيل : $I_{;z} = 4(0.1451) = \mathbf{0.5803} \Rightarrow \Delta\sigma = 150(0.5803) = \mathbf{87.04}$ kPa

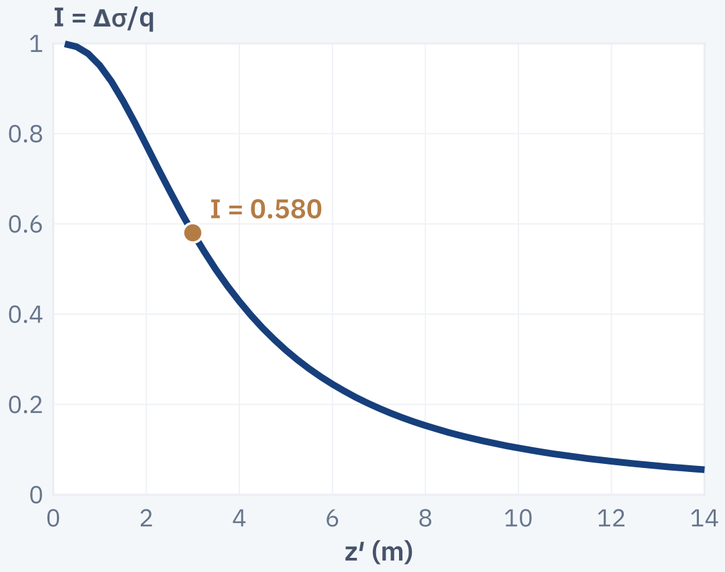
شريطية : $\alpha = 2\tan^{-1}\frac{4}{6} = 1.1760 \Rightarrow I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$

$$\Delta\sigma = 150(0.6682) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

الحل (2/2)

الحل

Δσ (kPa)	I_z	z′ (m)
148.9	0.9927	0.5
142.7	0.9513	1.0
116.2	0.7746	2.0
87.0	0.5803	3.0
64.2	0.4283	4.0
36.7	0.2449	6.0
23.0	0.1532	8.0
15.5	0.1034	10.0



في منتصف الشريحة Δσ = **87.0 kPa** (58% من q)؛ وشريط ضيق (بالعرض B نفسه) يعطي 100.2 kPa: **فالقاعدة الطويلة يمتد تأثيرها إلى عمق أكبر**. وتبقى زيادة الإجهاد 10% حتى عند $z' = 10$ m.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

عمق التأثير: $I(z') = p$

النظرية

تتناقص زيادة الإجهاد مع العمق لكنها لا تنعدم أبدا؛ ويتطلب مجموع انضغاطات الشرائح حدا سفليا: **عمق الحساب** z_{lim}. وفي قاعدة عمق التأثير ينضغط الطين إلى أن تهبط زيادة Boussinesq تحت المركز إلى نسبة **p** من الضغط المطبق (والشائع p = 10%):

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

يحكم معامل التأثير نفسه أيضاً تفريغ الأحمال الناتج عن حفر له المسقط الأفقي نفسه؛ ولذلك يكون العمق نفسه سواء قرئ بدلالة q_{gross} أم q_{net}.

إذا انتهى القطاع فوق z_{lim} استمرت الطبقة الأخيرة بالخصائص نفسها حتى z_{lim}؛ وإذا انتهى تحتها فإن التربة الواقعة تحت z_{lim} غير قابلة للانضغاط.

الضابط البديل هو **قاع القطاع**: يفترض وجود قاع صلب. (يمتد معيار $\Delta\sigma = 0.2\,\sigma'_{v0}$ إلى عمق أكبر في القاعدة الصغيرة المدفونة على عمق كبير؛ أما ضابط الوحدة فيعتمد على الهندسة وحدها.)

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
شريطية	6.34 B	3.13 B

المسألة

مثال

المعطيات

الأساسات	**(a) 6 m، 4 × 4 m، p = 10% و 20% · (b) لبشة 30 × 20 m، p = 10% و 20%**
القاعدة	**عمق التأثير؛ $D_f = 0$**

المطلوب

في كل حالة z' وz_{lim}؛ تحقق من $I(z')$ من أجل 4 × 4 m.

الحل

الحل

1 تحقق: 6 m، p = 10% ⇒ z′ = 10.19 m × 4

$$m = \frac{2}{10.19} = 0.1963,\ n = \frac{3}{10.19} = 0.2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

الأساس	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
6 m (L/B = 1.5) × 4	(2.55 B) 10.19	(1.70 B) 6.82
لبشة 30 m × 20	(2.55 B) 50.9	(1.70 B) 34.1

z′ يتناسب مع أبعاد القاعدة: ففي قاعدة 6 m × 4 تبلغ z_{lim} = 10.19 m، وفي لبشة 30 m × 20 تبلغ **50.9 m**. وتأخذ اللبشة في الحسبان الطين المنضغط حتى عمق نحو 51 m.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

انضغاط الشريحة عند إعادة التحميل

النظرية

$f = \Delta H/(1 + e_0)$ للشريحة؛ ومع $\sigma'_p \geq \sigma'_{v0} \geq \sigma'_{exc}$ يكون انضغاط الشريحة بحسب موضع الإجهاد النهائي:

الشرط	انضغاط الشريحة عند إعادة التحميل
$\sigma'_{exc} \leq \sigma'_{final} \leq \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{exc})$: يسترد جزء من الانتفاخ
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{final} \leq \sigma'_p$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{final}$	$S_b + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{final}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{final} < \sigma'_{exc}$	الانتفاخ الإضافي باستخدام C_s (سالب)

عند عدم وجود حفر

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ و $S_b = 0$: إعادة الانضغاط الكلاسيكية والانضغاط البكر، انطلاقاً من الإجهاد الابتدائي.

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

المسألة

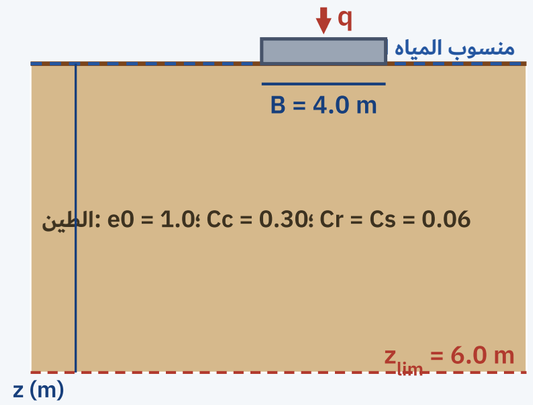
مثال

المعطيات

التربة	**طبقة طين واحدة، سماكتها 6 m؛** $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3؛ **منسوب المياه الجوفية عند سطح الأرض؛** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$
الأساس	**مستطيل 4 m × 6 m،** $q = 150$ kPa**، عند سطح الأرض (دون حفر)**
الشريحة	**شريحة واحدة، H = 6 m، نقطة منتصفها** $z = 3$ m**:** $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57$ kPa
الإفراط في الانضمام	**OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3 (a)**
زيادة الإجهاد	$\Rightarrow$ **(المثال 3)** $\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04$ kPa، $\sigma'_{final} = 111.61$ kPa

المطلوب

لكل طبقة طين **نظام** وهبوط الانضمام S_c.



الحل (1/2)

الحل

1 المشترك: $f = H/(1+e_0) = 6/2 = 3$ m؛ $\log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0}) = \log(111.61/24.57) = 0.6573$

$$\text{(a) NC}: \quad S_v = C_c f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)(0.6573) = \mathbf{591.6\ mm}$$

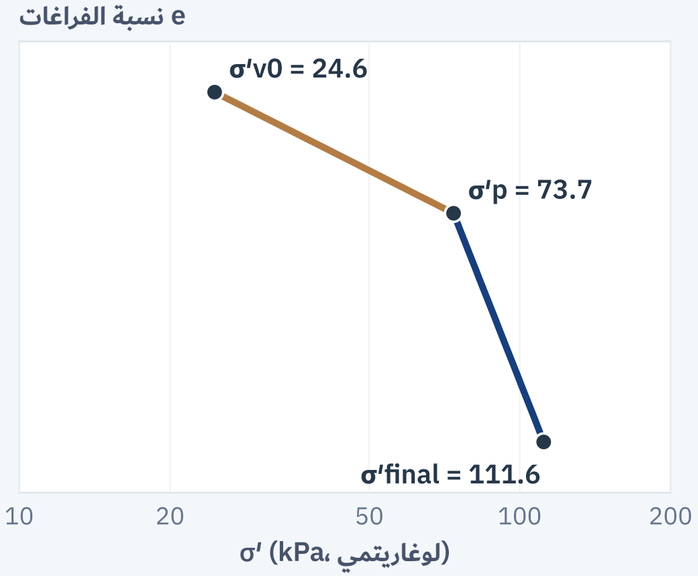
2 (b) $\sigma'_p = 6(24.57) = 147.4$ kPa $> \sigma'_{final}$ ⇒ إعادة الانضغاط فقط: OCR = 6

$$S_r = C_r f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.06(3)(0.6573) = \mathbf{118.3\ mm}$$

الطين نفسه والحمل نفسه: يهبط الطين عادي الانضمام بمقدار **591.6 mm**، بينما يهبط الطين ذو OCR = 6 بمقدار **118.3 mm**؛ ويأتي الفرق من النسبة $C_c/C_r = 5$.

الحل (2/2)

الحل



3 (c) إعادة الانضغاط + الانضغاط البكر ⇒ OCR = 3: $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa < $\sigma'_{final} = 111.61$

$$S_r = 0.06(3)\log\frac{73.71}{24.57} = 85.9 \text{ mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{111.61}{73.71} = 162.2 \text{ mm} \qquad S_c = \mathbf{248.0\ mm}$$

S_c (mm)	S_v (mm)	S_r (mm)	نظام	σ'_p (kPa)	OCR
591.6	591.6	0	بكر	24.6	1
118.3	0	118.3	إعادة الانضغاط	147.4	6
248.0	162.2	85.9	إعادة الانضغاط + الانضغاط البكر	73.7	3

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

من الأرض الأصلية أم من القاع المنتفخ؟

النظرية

بعد الحفر يُنشأ الأساس: ويتوقف الهبوط على **المرجع** الذي تُقاس منه الإزاحات (خيار *الإزاحات بعد الحفر* في مرحلة الحفر):

يحفظ — من التربة الأصلية (الافتراضي): يعرض الانتفاخ على حدة؛ وهبوط الأساس هو التشوه الصافي في نهاية التحميل: $S = S_c + S_{heave}$ = إجمالي الانضغاط فيما يتجاوز σ'_{v0}. والحمل الذي لا يزيد على الغطاء المزال يعطي $S = 0$؛ وإذا كان أصغر منه بقيت التربة فوق المنسوب الأصلي (ويبلغ عن ذلك، والهبوط 0).

يعاد الضبط إلى الصفر قبل التحميل: تعاد إزاحات مرحلة الحفر إلى الصفر؛ ويقاس الهبوط من قاع الحفر بعد انتفاخه: $S = S_c = S_b + S_r + S_v$. وتحتسب إعادة انضغاط الانتفاخ هبوطاً: فالأساس المعوض تعويضاً كاملاً يهبط بمقدار ما انتفخ به القاع. وإذا بقي الحفر مفتوحاً إلى أن أنشئ المنشأ وتطور الانتفاخ فهذه هي الإجابة الصحيحة.

تُطبع كلتا القيمتين دائماً؛ ويحدد الاختيار القيمةَ التي تُعرض كهبوط الأساس، ومنحنى الزمن، والنتيجة.

الخلاصة

يُحتفظ بـ: $S = S_c + S_{heave}$ (صغير). يُصفَّر: $S = S_c$ (كبير).

المسألة

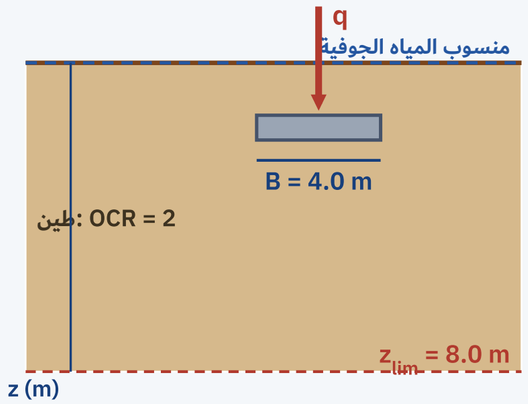
مثال

المعطيات

التربة	**طين 0–8 m، $\gamma_{sat} = 18$، منسوب المياه الجوفية عند السطح؛** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$؛ $OCR = 2$
الحفر	**حفر واسع ($I_{exc} = 1$)، العمق 2 m؛ القاعدة عند قاع الحفر**
الأساس	**4 m × 6 m،** $q_{gross} = 100$ kPa
الشريحة	**شريحة واحدة 2–8 m،** $H = 6$ m، $z = 5$ m، $f = 3$ m: $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95$ kPa

المطلوب

σ'_{exc}، الانتفاخ، S_c، S_v، S_r، S_b؛ هبوط الأساس (من التربة الأصلية وبعد إعادة التصفير).



الحل (1/3)

الحل

1 الحفر: الحمل المزال والتفريغ والانتفاخ

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 8.19(2) = 16.38 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40.95 - 16.38 = \mathbf{24.57} \text{ kPa}$$

$$\Delta H_{heave} = -0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = -0.06(3)(0.2218) = \mathbf{-39.9\ mm}$$

2 التحميل: $I_z(z' = 3) = 0.5803$ (المثال 3)؛ $\sigma'_p = 2(40.95) = 81.9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0.5803) = 58.03 \text{ kPa} \quad \sigma'_{final} = 24.57 + 58.03 = \mathbf{82.60} \text{ kPa}$$

الحل (2/3)

الحل

3 النظام: $\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{final} = 82.60$

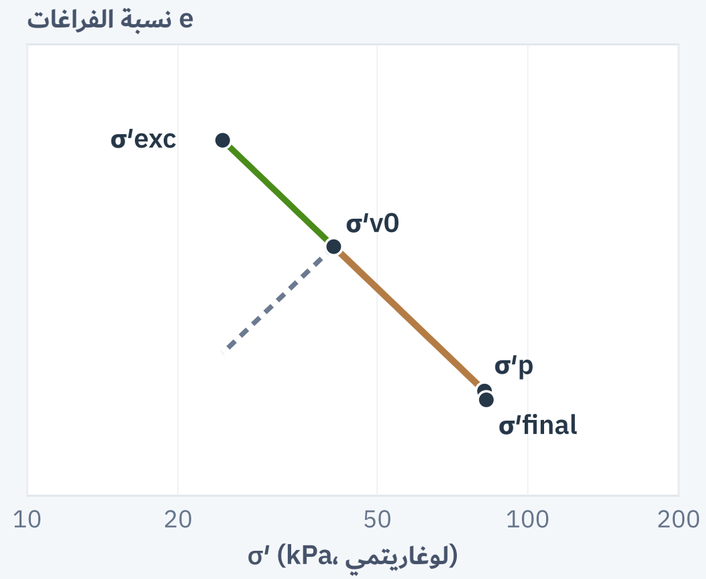
$$S_b = 0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = 39.9\ \text{mm} \qquad S_r = 0.06(3)\log\frac{81.9}{40.95} = 54.2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{82.60}{81.9} = 3.3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

عند إعادة التحميل يُستعاد الانتفاخ أولاً (S_b = 39.9 mm = الانتفاخ كله)، ثم يأتي إعادة انضغاط بمقدار 54.2 mm بحسب C_r، ثم 3.3 mm من الانضغاط البكر الذي يتجاوز σ'_p قليلاً.

الحل (3/3)

الحل



4 هبوط القاعدة

تُحفظ : $S = S_c + S_{heave} = 97.4 - 39.9 = \mathbf{57.5\ mm}$

تصبح صفراً : $S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$

الهبوط المقاس من سطح الأرض الأصلي **57.5 mm**؛ والمقاس من القاع المنتفخ **97.4 mm**. ويساوي الفرق مقدار الانتفاخ (39.9 mm): فاختيار المرجع يغير النتيجة بنسبة 69%.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسار الخطي: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$

النظرية

مسار حساب مستقل **وخطي**: تستخدم القيمة m_v نفسها في التفريغ وإعادة التحميل معاً؛ ولا تدخل C_c و C_r و C_s و e_0 في الحساب:

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

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

الجزء من S_c حتى σ'_{v0} هو الانتفاخ المستعاد (S_b).

لكونه خطياً، تنغلق الحلقة من تلقاء نفسها.

وحدة m_v هي kPa/1 (معامل الانضغاط الحجمي)؛ ويجب اختياره وفق مجال الإجهاد.

الفرق عن e – log σ′

لا تراعي طريقة m_v مستوى الإجهاد (لا يوجد σ'_p):
فكل زيادة في الإجهاد تعطي الانضغاط نفسه.

المسألة

مثال

المعطيات

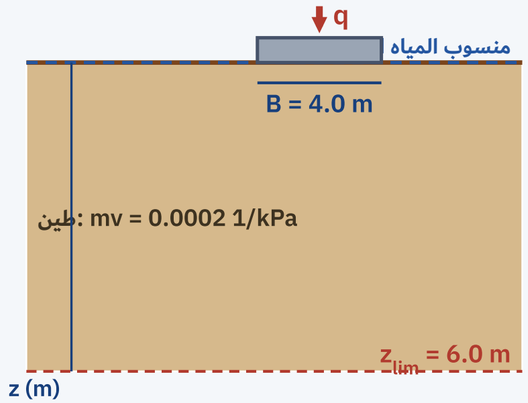
التربة: **6 m طين، $m_v = 0.0002$ 1/kPa، منسوب المياه الجوفية عند السطح**

الحالة (a): **بدون حفر: 4×6 m، $q = 150$ kPa، $\Delta\sigma = 87.04$ kPa (المثال 3)**

الحالة (b): **الحفر والقاعدة في المثال 6 (حفر بعمق 2 m، $q = 100$ kPa، الشريحة 2–8 m)**

المطلوب

S_c في كل حالة؛ وللحالة (b): الانتفاخ و S_b والهبوط الصافي.



الحل

الحل

1 (a) بدون حفر

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0.0002(87.04)(6) = \mathbf{104.4\ mm}$$

2 (b) بعد الحفر: $\sigma'_{v0} = 40.95$؛ $\sigma'_{exc} = 24.57$؛ $\Delta\sigma_{load} = 58.03$؛ $\sigma'_{final} = 82.60$ kPa

$$\text{الانتفاخ} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0.0002(82.60 - 40.95)(6) = 50.0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69.6\ mm}$$

الهبوط الصافي (مقيساً من الأرض الأصلية) $S = S_c$ = الانتفاخ + **50.0 mm**؛ والزيادة البالغة 41.65 kPa التي تتجاوز σ'_{v0} هي وحدها التي تولد هبوطاً. وفي المسار الخطي لا يظهر أثر للإجهاد σ'_p في طريقة $e - \log \sigma'$.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

Terzaghi: T_v و U و t

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

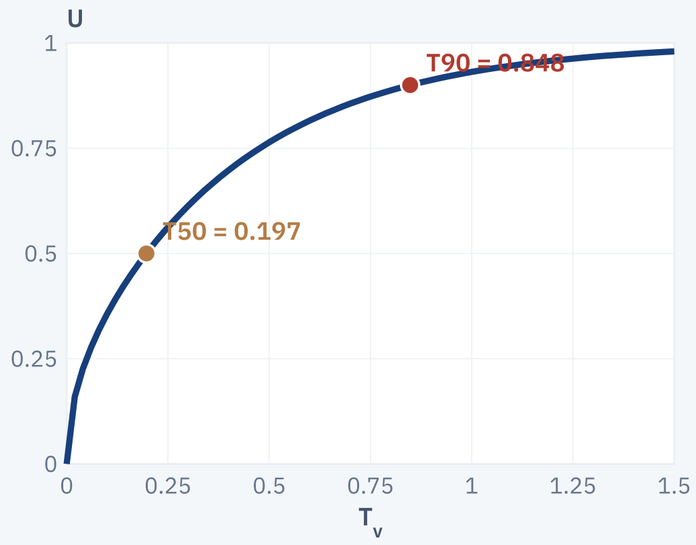
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

$H_{dr} = H$ (تصريف في اتجاه واحد) أو $H/2$ (تصريف في اتجاهين)؛ و H هي سماكة الطبقة تحت منسوب التأسيس (وبالنسبة إلى الطبقة الأخيرة الممتدة خارج القطاع تُؤخذ حتى z_{lim}).

$T_{v,50} = 0.197$؛ $T_{v,90} = 0.848$. وعندما $T_v < 0.05$ يستخدم حل الزمن المبكر $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

تنضم الطبقات ذات القيم المختلفة لـ C_v و H_{dr} بسرعات مختلفة: ومنحنى القطاع هو **مجموع منحنيات الطبقات**؛ وتقرأ قيمتا t_{50} و t_{90} الخاصتان به من هذا المجموع.

المنحنى يخص هبوط التحميل S_c؛ ويُفترض أن الانتفاخ قد اكتمل قبل التحميل.



المسألة

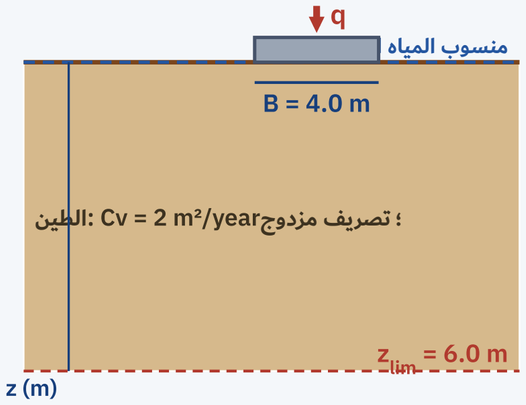
مثال

المعطيات

طين	**6 m، عادي الانضمام (المثال 5a):** $S_c = 591.6$ **mm**
الانضمام	$C_v = 2\ \mathrm{m^2/}$سنة؛ **تصريف من الأعلى والأسفل (باتجاهين)**
الأزمنة	**t = 0.25؛ 0.5؛ 1؛ 2؛ 4؛ 8 سنوات**

المطلوب

H_{dr}, t_{50}, t_{90} و $S(t)$؛ t_{90} مع التصريف أحادي الاتجاه.



الحل (1/2)

الحل

1 مسار التصريف والأزمنة المميزة

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

2 تصريف في اتجاه واحد (H_{dr} = 6 m)

$$t_{90} = \frac{0.848(6^2)}{2} = \mathbf{15.3} \text{ سنة}$$

في التصريف المزدوج الاتجاه ينخفض مسار التصريف إلى النصف وتنخفض المدة إلى **الربع**: t_{90} = 3.82 سنة، مقابل 15.3 سنة في التصريف أحادي الاتجاه.

الحل (2/2)

الحل

t (سنة)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	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**

في 1 سنة يكتمل 53% فقط من الهبوط، وفي 4 سنوات 91% (S_c = 592 mm)؛ وفي 8 سنوات $U = 0.990$. وعند قيم T_v الصغيرة (< 0.05) تستخدم $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

الأساس	**4 × 4 m، q = 150 kPa، على سطح الأرض؛ منسوب المياه الجوفية عند السطح (γ_{sat} = 18)**
الطبقة A (0–4 m)	**لين، NC:** $e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$؛ $C_v = 1$؛ **تصريف مزدوج**
الطبقة B (4–8 m)	**صلب،** $OCR = 2$: $e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$؛ $C_v = 3$؛ **تصريف في اتجاه واحد**
الحساب	**قاع القطاع (8 m)؛ كل طبقة شريحة واحدة (A: z = 2 m، B: z = 6 m)**

المطلوب

قيمة S_c لكل طبقة، وt_{50} وt_{90}؛ ومنحنى S(t) للمنظومة.

الحل (1/3)

الحل

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 116.19; σ'_{final} = 132.57; f = 4/2.10 = 1.9048 m; NC

$$S_{c,A} = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.35(1.9048) \log \frac{132.57}{16.38} = \mathbf{605.4\ mm}$$

2 B: z = 6 m، σ'_{v0} = 49.14 m؛ σ'_p = 98.28؛ $I_z(6)$ = 0.2449 ⇒ Δσ = 36.74؛ σ'_{final} = 85.88 < σ'_p؛ f = 4/1.80 = 2.2222

$$S_{c,B} = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.04(2.2222) \log \frac{85.88}{49.14} = \mathbf{21.6\ mm}$$

إجمالي هبوط الانضمام **627.0 mm**: تحمل الطبقة العليا الطرية عادية الانضمام (NC) 97% من المجموع؛ أما الطبقة السفلى الصلبة مفرطة الانضمام فلا تسهم إلا بـ 21.6 mm.

الحل (2/3)

الحل

3 مسار التصريف والأزمنة ($t = 0.197\ H_{dr}^2/C_v$؛ $0.848\ H_{dr}^2/C_v$)

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(4)}{1} = 0.788,\ t_{90} = \frac{0.848(4)}{1} = 3.39\ \text{سنة}$$

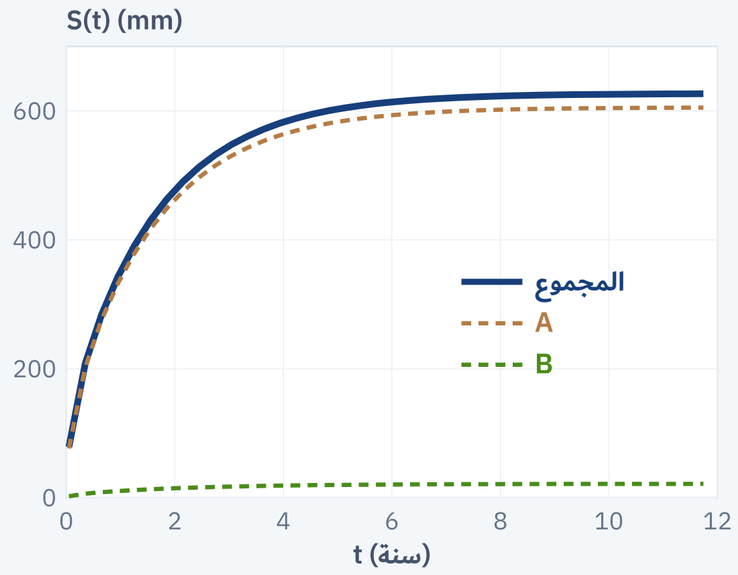
$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(16)}{3} = 1.051,\ t_{90} = \frac{0.848(16)}{3} = 4.52\ \text{سنة}$$

منحنى النظام هو المجموع $S(t) = U_A(t)\ S_A + U_B(t)\ S_B$؛ وتقرأ أزمنته الخاصة من هذا المجموع: **t_{50} = 0.794 سنة، t_{90} = 3.43 سنة** (قريبة من الطبقة A المهيمنة).

الحل (3/3)

الحل

U	S(t) (mm)	S_B (mm)	S_A (mm)	t (سنة)
0.397	**249**	7.4	242	0.5
0.560	**351**	10.5	340	1.0
0.761	**477**	14.6	463	2.0
0.961	**603**	19.8	583	5.0
0.998	**626**	21.4	604	10.0
1.000	**627**	21.6	605	20.0



يكتمل 56% من الهبوط في 1 سنة و 96% في 5 سنوات؛ وينتهي في نحو 10 سنوات (627 mm). ويتحدد المنحنى بـ **الطبقة الطرية A**.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

نقاط يجب مراعاتها عند قراءة النتائج

منسوب القاعدة = قاع الحفر (أو سطح التربة إن لم يوجد حفر)؛ ضغط ماء المسام **هيدروستاتيكي**؛ ولا يتأثر منسوب المياه الجوفية بالحفر.

تؤخذ زيادة الإجهاد **على الخط الرأسي تحت مركز القاعدة** (الشرائح والتحليل الزمني)؛ وتتبع مناطق الألوان مسار الإجهاد نفسه عند كل نقطة.

e_0 هي نسبة الفراغات الابتدائية في كل مرحلة؛ **لا يوجد انضغاط ثانوي (C_α)**.

الهبوط موجب والانتفاخ سالب؛ ويقلب المفتاح الموجود في رأس الصفحة هذه الإشارة فينتقل إلى العرض الذي تكون فيه الإشارة الموجبة نحو الأعلى (ويبقى المحرك الحسابي كلاسيكياً).

النطاقات اللونية: تُلوَّن المناطق التي تتناقص سريعاً مع العمق، مثل الهبوط والانتفاخ والتشوه، بالفئات $1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^n$؛ ولو استُخدمت نطاقات متساوية لانضغطت المنطقة السفلية في لون واحد.

النقاط الرئيسية

مسار الإجهاد: σ'_{final} (C_c) ← σ'_p (C_r) ← σ'_{v0} (C_s) ← σ'_{exc} ← σ'_{v0}؛ $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$، ولا ينقص بالحفر

انضغاط الشريحة (σ'_{final}): NC: C_c f log($\sigma'_{final}/\sigma'_{v0}$)؛ $f = \Delta H/(1 + e_0)$ و OC: C_r f log($\sigma'_{final}/\sigma'_p$) ≤ σ'_p؛ $\sigma'_{final} > \sigma'_p$: الجزءان $C_r + C_c$

الحفر: $q_{unload} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$، الانتفاخ = $-C_s$ f log($\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}$)؛ $S = S_c + S_{heave}$ (الأرض الأصلية) أو S_c (بعد إعادة التصفير)

Boussinesq: $\Delta\sigma = q\ I_z(z')$؛ مركز المستطيل $4\ I_{corner}$، والشريط $\pi/(\alpha + \sin\alpha)$؛ $I(z') = p$: $\mathbf{z_{lim}}$ (المربع 2.09 B، و $L = 1.5\ B$: 2.55 B، والشريط 6.34 B)

طريقة $\mathbf{m_v}$: $\Delta H = m_v\ \Delta\sigma'\ H$، خطية؛ والانتفاخ = $-m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\ H$

الزمن: $T_v = C_v\ t/H_{dr}^2$؛ $T_{v,90} = 0.848$، $T_{v,50} = 0.197$؛ $H_{dr} = H$ (تصريف أحادي) أو $H/2$ (تصريف ثنائي)؛ $S(t) = \Sigma\ U_i\ S_{c,i}$

المراجع

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.

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية مستخرجة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة، وتعطي الوحدة القيم نفسها (شرائح المثال: dz = سماكة الطبقة).

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

احسب أمثلة هذا العرض خطوة بخطوة في GeoTerva؛ ويدخل عدد الطبقات والحفر في الوحدة بحرية.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

إذا رغبت في استخدامها في محاضراتك: info@geoterva.com