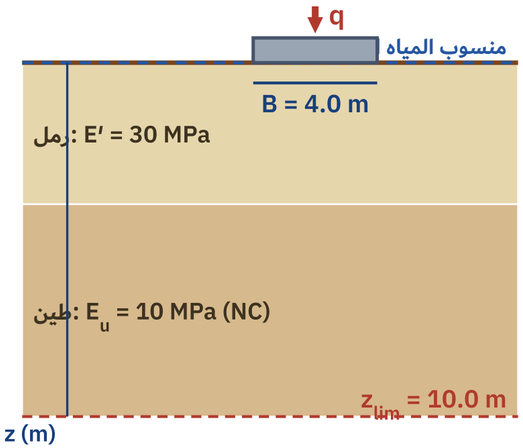
GeoTerva

شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الهبوط

الهبوط الكلي: طبقتي الطين والرمل

المحاضرة: جمع الهبوط الفوري (المرن) وانضمام الطين في قطاع مكوّن من طبقات طين ورمل، والهبوط عند المركز وعند الركن وللقاعدة الجاسئة، والهبوط الكلي المعتمد على الزمن؛ مع مثال محلول لكل موضوع.



$S = S_e + S_c$ · طبقات الطين والرمل · Steinbrenner · مسار الإجهاد

المركز · الزاوية · الجاسئة · منحنى الهبوط–الزمن

يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

فصل الهبوط بحسب نوع الطبقة: طبقة **متماسكة** = هبوط فوري + انضمام، وطبقة **حبيبية** = هبوط مرن فقط

الجمع بين حسابات **Steinbrenner** (الفوري) و**مسار الإجهاد** (الانضمام) في الشرائح نفسها

رؤية أثر الحفر: **الضغط الصافي** يحكم الهبوط الفوري، بينما يحكم **الانتفاخ وإعادة الانضغاط** الانضمام

تحديد هبوط **المركز** و**الزاوية** لقاعدة مرنة، والقاعدة الجاسئة والهبوط التفاضلي من الهبوط الكلي

إنشاء منحنى الهبوط مع الزمن $S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}$

التحقق من أن نتيجة الوحدة تساوي مجموع نتائج الوحدات أحادية النوع (المرن + الانضمام)

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

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

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

القطاع المثال: 6 m من طين عادي الانضمام فوق 4 m من الرمل؛ قاعدة 4 × 6 m، q = 150 kPa. الهبوطات بالمليمتر.

الهبوط الكلي = الهبوط الفوري + الانضمام

النظرية

طبقة حبيبية (مصّرف): S_e — طبقة متماسكة (غير مصّرف): $S_e + S_c$ — $S = S_e + S_c$

تحسب المركبتان **في الشرائح نفسها** وبزيادة إجهاد Boussinesq نفسها وبالحفر نفسه وبعمق الحساب نفسه. والحل **تحليلي**: معاملات تأثير بصيغة مغلقة، ومسار الإجهاد شريحة بشريحة، ونظرية Terzaghi؛ ولا توجد عناصر محدودة.

الطين المشبع لا يغير حجمه أثناء تطبيق الحمل (ν = 0.5): وهذا هو هبوطه الفوري. ثم يخرج الماء ببطء وينضغط الطين على امتداد مسار الإجهاد: وهذا هو الانضمام. أما الرمل فهبوطه مرن بالكامل لأنه يفقد ماءه فوراً.

في قطاع من نوع واحد تعطي الوحدة **النتيجة نفسها** التي تعطيها وحدة الهبوط المرن أو وحدة الانضمام (المثال 6).

يُختار نوع كل طبقة في جدول قطاع التربة، وهو ما يحدد المعاملات التي تحتاجها الطبقة.

نوع الطبقة

الطبقة	الهبوط الفوري	الانضمام
متماسكة	E_u غير المصّرف، $\nu = 0.5$	المتاحة: C_c، C_r، C_s، وe_0، C_v و(m_v أو σ'_p)
حبيبية	E' و ν' للحالة المصّرفة	لا يوجد

قانون Hooke ومعاملات Steinbrenner

النظرية

الهبوط تحت قاعدة مرنة تماما تحمل ضغطا صافيا q_{net} هو تكامل الانفعال الرأسي (إجهادات Boussinesq، نصف فضاء متجانس):

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

حل مغلق لزاوية مستطيل (Steinbrenner):

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

$m' = L'/B',\ n' = z/B$. **المركز**: $\alpha = 4,\ B' = B/2$؛ **الركن**: $\alpha = 1,\ B' = B$.

لما كانت $\nu = 0.5$ في الطبقة المتماسكة فإن $I_s = F_1$ و $(1-\nu^2) = 0.75$.

معاملات الهبوط المرن

صيغ F_1 و F_2 و A_0 و A_1 و A_2 والأمثلة التفصيلية موجودة في العروض التقديمية للهبوط المرن؛ ولا تستخدم هنا إلا نتائجها لأغراض الجمع.

قطاع طبقي والضغط الصافي

النظرية

تضيف طبقة تقع بين العمقين z_{top} و z_{bottom} من منسوب التأسيس فرق I_s محسوباً بمعاملي E و ν الخاصين بها:

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

يزيل الحفر إجهاد الغطاء الترابي الفعال عند منسوب القاع؛ وفي التربة المرنة ذات معامل المرونة الواحد يُستعاد أثر التفريغ عند إعادة التحميل، ويتحكم في الهبوط الفوري **الضغط الصافي**:

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

إذا كان $q_{net} \le 0$ فلا يحدث هبوط فوري (القيمة السالبة هي انتفاخ مرن).

لا تعتمد النتيجة على سمك الشريحة؛ إذ تخدم الشرائح الجداول ومناطق الألوان فقط.

NEDEN FARKLI?

يحسب الهبوط الفوري باستخدام **الإجهاد الصافي**، ويحسب هبوط الانضمام باستخدام **زيادة الإجهاد الفعال** على مسار الإجهاد؛ ويؤثر الحفر في كليهما بطريقتين مختلفتين.

مسار الإجهاد وانضغاط الشريحة

النظرية

في الشرائح المتماسكة يحسب الانضمام لا في خطوة واحدة من الإجهاد الابتدائي إلى الإجهاد النهائي، بل **على امتداد مسار الإجهاد**: الانتفاخ الناتج عن الحفر (C_s)، ثم عند إعادة التحميل يلغى أولاً ما حدث من انتفاخ، ثم إعادة الانضغاط بدليل C_r حتى σ'_p، ثم الانضغاط البكر بدليل C_c بعد ذلك:

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

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

في الطين عادي الانضمام (OCR = 1): $S = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$ (دون حفر).

الانتفاخ سالب؛ $S_{net} = S_c + S_{heave}$. في خيار **الإبقاء** يقاس الهبوط من الأرض الأصلية، وفي خيار **التصفير** من القاع المنتفخ.

عمق الحساب: $I_z(z') = p$ (الشائع 10%) أو قاع القطاع؛ وطريقة m_v خيار خطي.

التفاصيل

يرد العرض الكامل لمسار الإجهاد وأنظمة الانضمام والحفر ومنحنى الزمن في محاضرة الانضمام.

المسألة

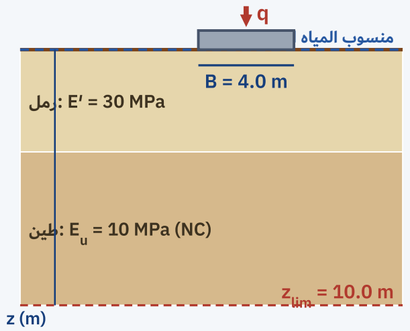
مثال

المعطيات

القطاع	**رمل 0–4 m:** $E' = 30$ MPa, $\nu' = 0.30$، $\gamma_{sat} = 19$ kN/m³ · **طين 4–10 m (NC):** $E_u = 10$ MPa, $\nu = 0.5$، $e_0 = 1.0$، $C_c = 0.30$، $C_v = 2$ m²/سنة، $\gamma_{sat} = 18$ kN/m³
الأساس	**مستطيل مرن 4 m × 6 m**، $q = 150$ kPa، **عند سطح الأرض؛ منسوب المياه الجوفية عند السطح؛ عمق الحساب 10 m (قاع القطاع)**
الحفر	**لا يوجد (q_{net} = 150 kPa)**

المطلوب

الهبوط الفوري S_e عند **مركز** و**زاوية** كل طبقة.



الحل

الحل

1 الرمل (0–4 m): $k = q(1 - \nu'^2)/E' = 150(0.91)/30\,000 = 0.004550$؛ $I_s(4) = 2.7351$؛ 8

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

2 طين (4–10 m): $k = 150(0.75)/10{,}000 = 0.011250$؛ $I_s(4) = 2.3398$؛ 8؛ $I_s(10) = 3.9643$؛ 8

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

عند المركز $S_e = 12.4 + 18.3 = \mathbf{30.7\ mm}$؛ وعند الزاوية $3.4 + 9.8 = \mathbf{13.2\ mm}$ (عند الزاوية $\alpha = 1$، $B' = B$).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

Boussinesq، عمق التأثير وطريقة m_V

النظرية

تحت مركز القاعدة، لمستطيل L × B بمعامل زاوية Newmark، ولشريط بالحل المغلق α:

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

عمق التأثير: $I_z(z') = p$ (الشائع 10%)؛ القاعدة المربعة 2.09 B، و 2.55 B عندما L = 1.5 B، والشريطية 6.34 B. وإذا اختير قاع القطاع ينتهي الحساب عند الطبقة الأخيرة (في الصخر أو الحصى الكثيف).

إذا انتهى القطاع فوق z_{lim} امتدت الطبقة الأخيرة حتى z_{lim}.

طريقة m_V: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$؛ خطية، ولا تُدمج $C_c/C_r/C_s$.

في هذا القطاع

عمق الحساب هو قاع القطاع (10 m)؛ ويفترض أن القاع جاسئ. شريحة الطين عند z = 7 m، $I_z(z' = 7) = 0.1916$.

المسألة

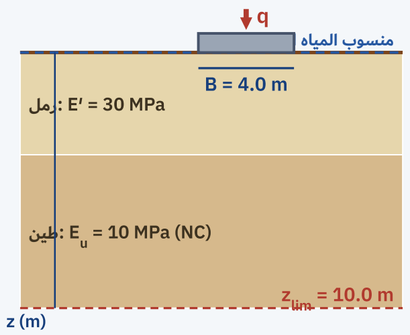
مثال

المعطيات

القطاع	**رمل 0–4 m:** $E' = 30$ MPa, $\nu' = 0.30$، $\gamma_{sat} = 19$ · **طين 4–10 m (NC):** $E_u = 10$ MPa, $\nu = 0.5$، $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_v = 2$ m²/سنة، $\gamma_{sat} = 18$
الأساس	**مستطيل مرن 4 m × 6 m**، $q = 150$ kPa، **عند سطح الأرض؛ منسوب المياه الجوفية عند السطح؛ عمق الحساب 10 m (قاع القطاع)**
الشريحة	**طين: شريحة واحدة،** $H = 6$ m، **نقطة المنتصف** $z = 7$ m؛ $f = H/(1+e_0) = 3$ m
الإجهادات	$\sigma'_{v0} = 9.19(4) + 8.19(3) = 61.33$ kPa

المطلوب

S_c و I_z، $\Delta\sigma$، σ'_{final}.



الحل

الحل

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 الإجهاد النهائي والانضغاط (NC: $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$)

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

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

هبوط الانضمام للطين **150.2 mm**: أي نحو **4.9 أمثال** الهبوط الفوري (30.7 mm). وفي الطين الطري عادي الانضمام (NC) يأتي الهبوط الرئيسي من الانضمام.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المركز والركن والقاعدة الصلبة

النظرية

تجمع لكل شريحة المركبتان الفورية و(في الطبقة المتماسكة) مركبة الانضمام؛ ويعطي المجموع على الطبقات حتى z_{lim} هبوط **المركز** للقاعدة المرنة:

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

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

بالنسبة إلى الركن، **يأخذ الهبوط الفوري وحده** القيمة الخاصة بمستطيل الركن؛ أما هبوط الانضمام فيُستمد من مسار الإجهاد على خط المنتصف ويُفترض أنه نفسه عند الركن.

تهبط قاعدة الأساس الجاسئة هبوطاً منتظماً: الجزء الفوري يساوي نحو 0.93 مرة من قيمة المركز المرن، وجزء الانضمام يساوي قيمة المركز.

الحفر: يحسب الجزء الفوري باستخدام q_{net}، كما يحسب انتفاخ الطين وإعادة انضغاطه؛ وفي خيار «محتفظ به» يكون $S = S_e + S_c + S_{heave}$.

عند غلبة الطين

لما كان الانضمام متساوياً عند المركز وعند الركن، ففي القطاعات التي يغلب عليها الطين لا يساوي **الهبوط التفاضلي** إلا فرق المركبة الفورية.

المسألة

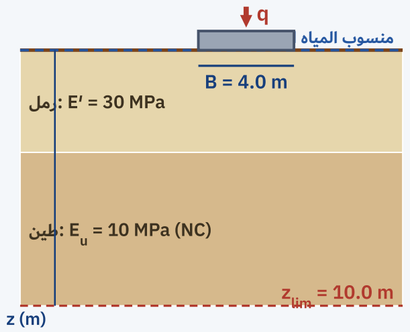
مثال

المعطيات

القطاع	**رمل 0–4 m:** $E' = 30$ MPa, $\nu' = 0.30$، $\gamma_{sat} = 19$ · **طين 4–10 m (NC):** $E_u = 10$ MPa, $\nu = 0.5$، $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_v = 2$ m²/سنة، $\gamma_{sat} = 18$
الأساس	**مستطيل مرن 4 m × 6 m**، $q = 150$ kPa، **عند سطح الأرض؛ منسوب المياه الجوفية عند السطح؛ عمق الحساب 10 m (قاع القطاع)**
الأمثلة السابقة	S_e: **المركز 30.7، الركن 13.2 mm؛** S_c **= 150.2 mm (المثالان 1 و 2)**

المطلوب

الهبوط الكلي عند **المركز والركن والأساس الجاسئ**؛ الهبوط التفاضلي؛ حصة المركبة الفورية.



الحل

الحل

1 المجاميع

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

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

	S_e (mm)	S_c (mm)	الكلي (mm)
المركز (مرن)	30.7	150.2	**181.0**
الركن (مرن)	13.2	150.2	**163.4**
صلب	28.6	150.2	**178.8**

لا يشكل الهبوط الفوري سوى **17%** من الهبوط الكلي؛ والهبوط التفاضلي 17.5 mm. ولأن انضمام الطين متساو في المركز والركن فإن الركن يهبط بما يعادل 90% من هبوط المركز.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

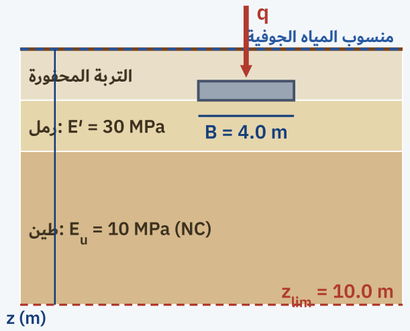
مثال

المعطيات

القطاع	رمل 0–4 m ($E' = 30,\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$) · طين 4–14 m (NC)؛ $E_u = 10,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_s = C_r = 0.06,\ \gamma_{sat} = 18$)؛ منسوب المياه الجوفية عند السطح
الحفر	حفر واسع ($I_{exc} = 1$)، العمق 2 m؛ القاعدة عند قاع الحفر
الأساس	4 m × 6 m، $q_{gross} = 150$ kPa؛ عمق الحساب 10 m
الشرائح	رمل 2 m (H = 2 m)–4 m، طين 4–10 m (z = 7 m، f = 3 m)

المطلوب

q_{net} و S_e؛ وانتفاخ الطين و S_c؛ والهبوط الكلي (يحتفظ به ويعاد تصفيره).



الحل (1/3)

الحل

1 ضغط الرفع الصافي: $q_{uplift} = \sigma'_{v0}(2\text{ m}) = 9.19(2) = 18.38$ kPa

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

2 الهبوط الفوري: رمل (z' 0–2 m) $k = 0.003992$؛ طين (z' 2–8 m) $k = 0.009872$ ($k = q_{net}(1-\nu^2)/E$)

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

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

خفض الحفر الضغط الصافي من 150 إلى 131.6 kPa؛ وتغير الهبوط الفوري من 30.7 إلى **31.5 mm** (حفر أعلى 2 m من الرمل فتعرض الطين لحمل أقل).

الحل (2/3)

الحل

3 الطين: مسار الإجهاد ($z' = 5$ m: $I_z = 0.3204$)

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

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

4 طين عادي الانضمام (NC) ($\sigma'_p = \sigma'_{v0}$): يسترد S_b الانتفاخ، و S_v هو الانضغاط البكر

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

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

الحل (3/3)

الحل

	S_e (mm)	S_c (mm)	الانتفاخ (mm)	الكلي (mm)
دون حفر (المثال 3)	30.7	150.2	0	**181.0**
محفور، **محفوظ** (من الأرض الأصلية)	31.5	182.1	27.8-	**185.8**
محفور، **يؤخذ صفراً** (من القاع المنتفخ)	31.5	182.1	—	**213.6**

الهبوط الكلي المقيس من سطح الأرض الأصلي **185.8 mm** ($S_c + S_e$ + الانتفاخ)؛ والمقيس من القاع المنتفخ **213.6 mm**. ويساوي الفرق الانتفاخ (27.8 mm).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

يحدث الهبوط الفوري في الحال، ويتطور هبوط الانضمام مع الزمن

النظرية

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

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

يوجد S_e **فوراً** ($t = 0^+$)؛ ويتقدم الانضمام في كل طبقة متماسكة بقيمتي C_v و H_{dr} الخاصتين بها: $H_{dr} = H$ (تصريف في اتجاه واحد) أو $H/2$ (تصريف في اتجاهين).

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

المنحنى هو مجموع منحنيات الطبقات؛ وتقرأ قيمتا t_{50} و t_{90} للمنظومة من هذا المجموع. وفي القطاع الخالي من طبقة متماسكة لا يوجد منحنى زمني: الهبوط كله فوري.

في خيار «محفوظ» يبدأ المنحنى من الانتفاخ وينتهي عند التشكل الصافي.

رمل + طين

الرمل يهبط فوراً؛ **والطين هو الذي يحدد شكل منحنى الهبوط مع الزمن.**

المسألة

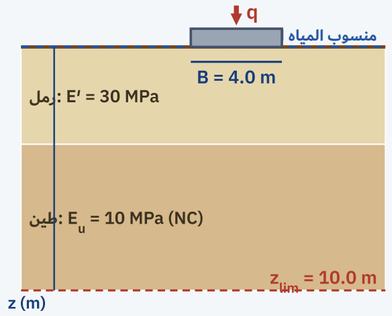
مثال

المعطيات

القطاع	رمل 0–4 m: $E' = 30$ MPa، $\nu' = 0.30$، $\gamma_{sat} = 19$ · طين 4–10 m (NC): $E_u = 10$ MPa، $\nu = 0.5$، $e_0 = 1.0$، $C_c = 0.30$، $C_v = 2$ m²/سنة، $\gamma_{sat} = 18$
الأساس	مستطيل مرن 4 m × 6 m، $q = 150$ kPa، عند سطح الأرض؛ منسوب المياه الجوفية عند السطح؛ عمق الحساب 10 m (قاع القطاع)
الأمثلة السابقة	$S_e = 30.7$ mm (المثال 1)؛ $S_c = 150.2$ mm (المثال 2)؛ لا يوجد حفر
التصريف	يتصرف الطين من الأعلى (الرمل) ومن الأسفل (القاعدة الصلبة): تصريف مزدوج، H = 6 m
الأزمنة	t = 0.25؛ 0.5؛ 1؛ 2؛ 4؛ 8 سنوات

المطلوب

H_{dr}، t_{50}، t_{90} و S(t)؛ الهبوط عند $t = 0^+$.



الحل (1/2)

الحل

1 مسار التصريف والمدد الزمنية (C_v = 2 m²/year)

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

2 الهبوط الابتدائي والنهائي

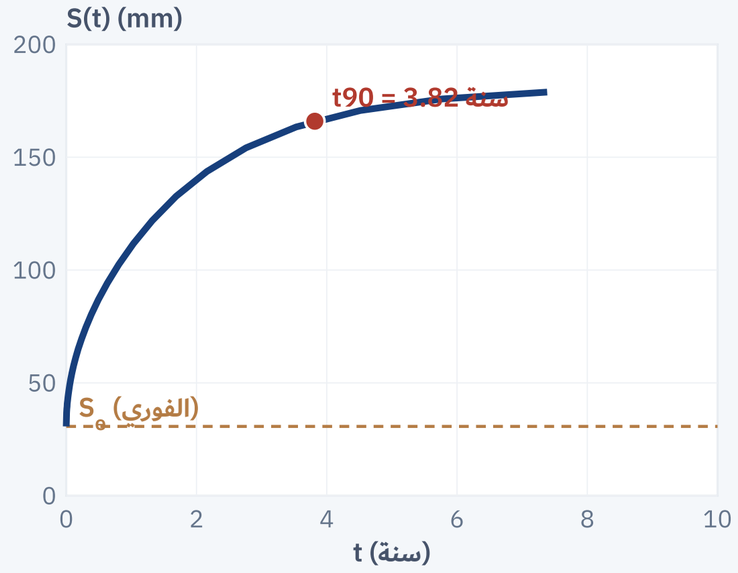
$$S(0^+) = S_e = 30.7 \text{ mm} \qquad S(\infty) = S_e + S_c = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0 \text{ mm}}$$

بمجرد تطبيق الحمل يكون الهبوط 30.7 mm (17% من الهبوط الكلي)؛ ويكتمل 90% من انضمام الطين خلال **3.82 سنة**.

الحل (2/2)

الحل

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



يبلغ الهبوط الكلي 110 mm بعد سنة واحدة (61% من القيمة النهائية) و 167 mm بعد 4 سنوات (92%). يبدأ المنحنى بالهبوط الفوري ثم يرتفع مع انضمام الطين.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

القطاع	**الطين فقط، 0–6 m (NC):** $E_u = 10$ MPa، $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30$، $\gamma_{sat} = 18$ **؛ منسوب المياه الجوفية عند السطح**
الأساس	**6 m × 4، $q = 150$ kPa، دون حفر؛ عمق الحساب 6 m (قاع القطاع)**
المقارنة	**وحدات الهبوط المرن (التربة المتماسكة) + الانضمام**

المطلوب

قارن S_e و S_c والمجموع من وحدة الهبوط الكلي مع نتائج وحدتي النوع الواحد.

الحل

الحل

الوحدة	S_e (mm)	S_c (mm)	الكلي (mm)
الهبوط المرن: تربة متماسكة	35.3	—	—
الانضمام	—	591.6	—
مجموع الوحدتين	35.3	591.6	**626.9**
الهبوط الكلي (ثنائي الأبعاد)	35.3	591.6	**626.9**

وحدة الهبوط الكلي **مطابقة تماماً** لمجموع الوحدتين في القطاع ذي النوع الواحد (626.9 mm). ومجموع الركن 601.5 mm ($S_{e,corner} = 9.9 + S_c$)، وللقاعدة الجاسئة 624.4 mm.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

القطاع	ردم رملي 0–2 m (E = 12 MPa) · طين-1 2–7 m (E_u = 8 MPa؛ C_c = 0.25؛ OCR = 1.6) · رمل 7–11 m (E = 35 MPa) · طين-2 11–20 m (E_u = 15 MPa؛ C_c = 0.30؛ OCR = 1.3) · رمل حصوي 20–30 m (E = 70 MPa)
القاعدة، الحفر	10 × 15 m، q_{gross} = 120 kPa؛ عمق الحفر 2 m (مسقط الحفر = القاعدة)؛ منسوب المياه الجوفية 2 m
عمق الحساب	عمق التأثير، p = 10%
النتيجة	مشروع المثال لوحدة الهبوط الكلي

المطلوب

S_e وS_c طبقة طبقة، والانتفاخ؛ والهبوط الكلي للمركز والزاوية والجسم الصلب؛ وt_{50} وt_{90}.

الحل (1/2)

الحل

1 عمق الحفر وعمق الحساب

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

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

يُزال الردم (0–2 m) بالحفر؛ ويشمل الحساب أربع طبقات من 2 m حتى z_{lim} = 27.5 m. وتُقطع الطبقة الأخيرة (رمل حصوي) عند z_{lim}؛ ومساهمة الطبقات العميقة صغيرة.

الحل (2/2)

الحل

الطبقة	z (m)	S_e (mm)	S_c (mm)	الانتفاخ (mm)	الإجمالي = S_e + S_c + الانتفاخ (mm)
طين-1 (CL، لين)	7.0 – 2.0	20.8	198.4	62.6-	156.6
رمل (SM، متوسط الكثافة)	11.0 – 7.0	5.6	—	—	5.6
طين-2 (CH، صلد)	20.0 – 11.0	14.1	27.0	6.5-	34.6
رمل حصوي (كثيف)	27.5 – 20.0	1.2	—	—	1.2
الإجمالي (المركز)		**41.7**	**225.4**	**69.1-**	**198.0**

المركز S_e 41.7 + S_c 225.4 = **198.0 mm** – الانتفاخ 69.1 (محتفظ به)؛ الركن 168.7 mm، والقاعدة الجاسئة 195.1 mm. الزمن: t_{50} = 0.72 سنة، t_{90} = 3.71 سنة. وتعطي الوحدة القيم نفسها.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

نقاط يجب مراعاتها عند قراءة النتائج

منسوب الأساس = قاع الحفر؛ ضغط منتظم تحت قاعدة مرنة تماماً؛ قاعدة صلبة ≈ 0.93 × قيمة القاعدة المرنة عند المركز في الجزء المفاجئ.

الهبوط الفوري: إجهادات نصف الفضاء المتجانس في كل طبقة (بنسبة بواسون ν الخاصة بها)؛ الطبقة المتماسكة غير مصرفة (ν = 0.5)، والطبقة الحبيبية مصرفة؛ ولا يوجد تصحيح للدفن ($I_f = 1$).

الانضمام: نظرية Terzaghi أحادية البعد؛ ضغط ماء المسام هيدروستاتيكي، ولا يتأثر منسوب المياه الجوفية بالحفر؛ σ'_p هو أكبر إجهاد في الماضي ولا ينقص بالحفر؛ وتؤخذ الزيادة في الإجهاد على الخط الرأسي تحت المركز.

الهبوط موجب والانتفاخ سالب؛ ويقلب المحدد في الترويسة الإشارة (ويبقى المحرك كلاسيكياً).

خارج النطاق: الانضغاط الثانوي، وانضمام الطبقات الحبيبية، ومخططات Schmertmann و SPT/CPT، ومعامل المرونة المتزايد مع العمق داخل الطبقة الواحدة (تجزأ الطبقة)، وجساءة الأساس والتفاعل بين التربة والمنشأ، والانضمام ثنائي/ثلاثي الأبعاد، والعناصر المحدودة، وقدرة التحمل، وتميع التربة.

النقاط الرئيسية

$S = S_e + S_c$: الطبقة المتماسكة = هبوط فوري غير مصّرف + هبوط الانضمام؛ والطبقة الحبيبية = هبوط مرن مصّرف فقط

الهبوط الفوري (Steinbrenner): $\Delta S_e = q_{net}\,\alpha\,B'\,(1-\nu^2)/E \cdot [I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{top})]$؛ $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$

الانضمام: مسار الإجهاد $(C_s، C_r، C_c)$ $\sigma'_{v0} \to \sigma'_{exc} \to \sigma'_{v0} \to \sigma'_p \to \sigma'_{final}$؛ وفي الطين عادي الانضمام (NC) $S_c = C_c\,f\,\log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$

المركز $S_e + S_c$؛ **الركن** $S_{e,corner} + S_c$؛ **الجاسئة** $0.93\,S_e + S_c$؛ الهبوط التفاضلي = فرق المركبات الفورية

الحفر: الجزء الفوري بالحمل q_{net}، والطين بالانتفاخ + إعادة الانضغاط؛ في خيار «الإبقاء» $S = S_e + S_c + S_{swelling}$، وفي خيار «التصفير» $S_e + S_c$

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

في حالة نوع تربة واحد تكون النتيجة **مطابقة تماماً** لنتيجة وحدة الهبوط المرن أو وحدة الانضمام

المراجع

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

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage — Ch. 10–11 (stress increase, consolidation .settlement, time rate)

.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

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

أنشئ في GeoTerva قطاعك الخاص من طبقات الطين والرمل؛ وتعطي الوحدة الهبوط ومنحنى الزمن معاً.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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