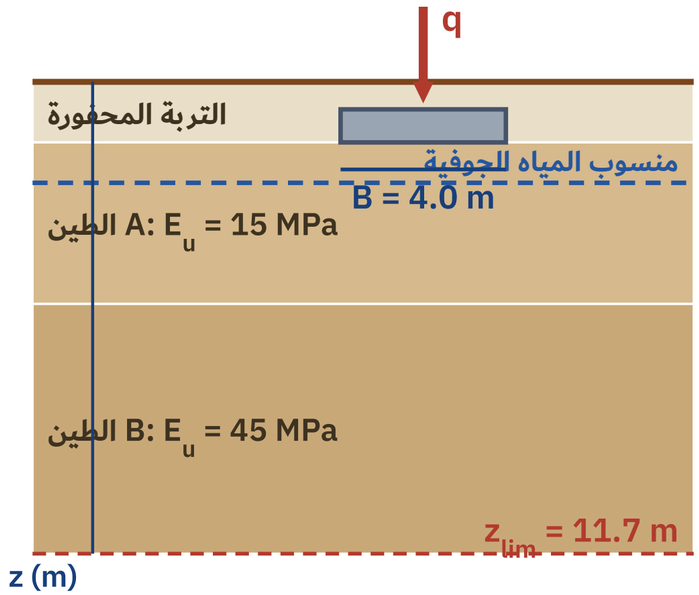
الهبوط المرن: تربة متماسكة

المحاضرة: من نظرية المرونة إلى معاملات Steinbrenner، ومن القطاع الطبقي إلى الأساس المرن والجاسئ؛ وتسلك طبقات الطين سلوكاً غير مصرف (E_u، $\nu = 0.5$)؛ مع مثال محلول لكل موضوع.

قانون Hooke | معاملات Steinbrenner | القطاع الطبقي

الضغط الصافي | القاعدة المرنة والجاسئة | أمثلة محلولة



ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

- من **قانون Hooke** إلى تكامل الهبوط: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$ و $S = \int \varepsilon_z \, dz$
- حساب **معاملات Steinbrenner** (F_1، F_2، I_s) وإيجاد هبوط **المركز** و**الركن** لقاعدة مستطيلة
- معالجة الطبقات المتماسكة باعتبارها **غير مصّرفة** ($\nu = 0.5$، $E_u = \beta \, c_u$)
- جمع **القطاع متعدد الطبقات** بالفرق $I_s(z_{lower}) - I_s(z_{upper})$
- تحديد **الضغط الصافي** (تأثير الحفر) و**عمق الحساب** (عمق التأثير)
- التمييز بين هبوط الأساس **المرن** و**الجاسئ** (الجاسئ ≈ 0.93 × مركز الأساس المرن)

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

1. **النظرية**: ما القاعدة، ولماذا هي كذلك؟
2. **المسألة**: المعطيات والمطلوب
3. **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

قاعدة المثال: قاعدة مستطيلة مرنة $4\ m \times 6\ m$، $q = 180$ kPa، عمق الحفر $1.5\ m$، منسوب المياه الجوفية $2.5\ m$؛ طبقة طين. الهبوطات مقدرة بوحدة mm.

ماذا تحسب هذه الوحدة؟

النظرية

تتناول هذه الوحدة الطبقات **المتماسكة فقط** (الطين والغرين) وتحسب **الهبوط الفوري (المرن)**: وهو الهبوط الذي يحدث بمجرد تطبيق الحمل دون تغير في الحجم.

من إجهادات **Boussinesq** في التربة المحملة يوجد الانفعال **بقانون Hooke**، وتكامل الانفعال هو الهبوط.

انضمام الطين (الهبوط الناتج عن خروج الماء) موجود في وحدة الانضمام؛ أما مجموع الهبوطين ففي وحدة الهبوط الكلي (2D).

الحل **تحليلي**: معاملات تأثير بصيغة مغلقة وجمع طبقة بعد طبقة؛ ولا يوجد تحليل بالعناصر المحدودة.

خارج النطاق: طريقة Schmertmann، ومخططات SPT/CPT، ومعامل المرونة المتزايد مع العمق (Mayne–Poulos)، وجساءة القاعدة، والتفاعل بين التربة والمنشأ.

نوع الطبقة

	متماسكة
السلوك	غير مصّرف
E	$E_u = \beta\, c_u$
ν	0.5

قانون Hooke وتكامل الهبوط

النظرية

تحت قاعدة **مرنة تماماً** تحمل الضغط الصافي q_{net} تكون التربة وسطاً مرناً متجانساً شبه لانهائي (إجهادات Boussinesq). يعطي قانون Hooke الانفعال الرأسي، ويعطي تكامله الهبوط:

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

تعتمد الإجهادات الجانبية على ν؛ ولذلك يتغير التشوه والهبوط **بكل من E و ν**.

كلما ازدادت ν **خفضت** الإجهادات الجانبية الانفعال الرأسي: فعند E نفسها تهبط التربة ذات ν = 0.5 هبوطاً أقل من التربة ذات ν = 0.3.

الهبوط **يتناسب عكسياً** مع E: مضاعفة المعامل تنصّف الهبوط.

الرموز

q_{net}: الضغط الصافي (المضاف بعد الحفر)

$\Delta\sigma_z$، $\Delta\sigma_x$، $\Delta\sigma_y$: الزيادات في الإجهاد

E، ν: الثوابت المرنة للطبقة

ε_z: الانفعال الرأسي (الانضغاط +)

المسألة

مثال

المعطيات

زيادة الإجهاد	$\Delta\sigma_z = 100$ kPa, $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 40$ kPa
التربة	$E_u = 25$ MPa, $\nu = 0.5$
الشريحة	**السماكة 1.0 m**

المطلوب

أوجد التشوه الرأسي وانضغاط الشريحة؛ وقارن مع فرض ν = 0 (أحادي البعد).

الحل

الحل

1 الانفعال الرأسي

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.50(40 + 40)}{25{,}000} = \frac{60.0}{25{,}000} = \mathbf{0.00240}$$

2 انضغاط الشريحة (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00240(1.0) = \mathbf{2.40}\ \text{mm}$$

3 مقارنة: ν = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{25{,}000} = 0.00400 \;\Rightarrow\; \Delta S = 4.00\ \text{mm}$$

تُخفِّض الإجهادات الجانبية (ν = 0.50) التشكل بنسبة **40%**: 2.40 mm مقابل 4.00 mm في الحالة أحادية البعد.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

الحل المغلق للركن

النظرية

يوجد للمكامل حل مغلق من أجل **زاوية** مستطيل محمّل بحمل منتظم (Steinbrenner):

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

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \qquad F_2 = \frac{n'}{2\pi}\tan^{-1} A_2$$

$m' = L'/B'$ و $n' = z/B$ (B' هو الضلع القصير للمستطيل الركني). يمثل **المركز** ركن أربعة مستطيلات ($B/2 \times L/2$): $\alpha = 4$ و $B' = B/2$. ويمثل **الركن** ركن المستطيل الكامل: $\alpha = 1$ و $B' = B$. وأي نقطة أخرى هي المجموع الجبري للمستطيلات الأربعة التي يقع ركنها عند تلك النقطة.

عند $(1 - 2\nu) = 0$: $\nu = 0.5$، فيكون $I_s = F_1$ و $(1 - \nu^2) = 0.75$.

الرموز

- α: عدد المستطيلات الركنية (4 عند المركز، 1 عند الركن)
- B': الضلع القصير للمستطيل الركني
- $m' = L'/B'$، $n' = z/B$
- z: العمق من منسوب القاعدة
- I_s: معامل الشكل

A_0، A_1، A_2 وحد الشريحة

النظرية

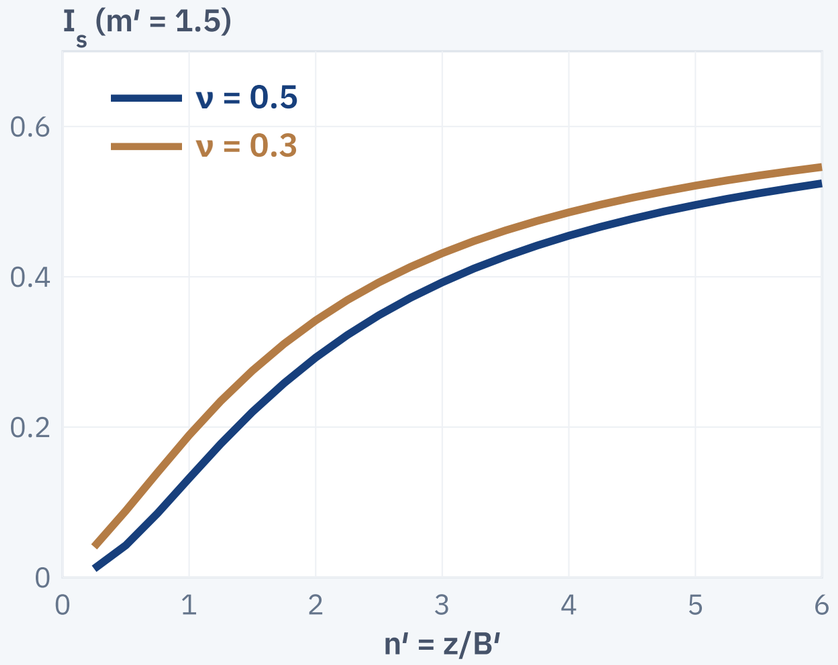
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{m'^2+n'^2}}{m'\left(1+\sqrt{m'^2+n'^2+1}\right)}$$

$$A_1 = \ln \frac{\left(m'+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{1+n'^2}}{m'+\sqrt{m'^2+n'^2+1}} \qquad A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2+n'^2+1}}$$

القاعدة الشريطية ($m' \to \infty$): $F_1 = \ln(1+n'^2)/2\pi$ و $F_2 = (n'/2\pi)\tan^{-1}(1/n')$؛ وعند حافتها $\alpha = \pi/2$، $B' = B$.

يحسب المحرك الصيغ مباشرة، ولا حاجة إلى المخططات البيانية أو الجداول المقرّبة.

يزداد I_s مع العمق و**يتشبع ببطء**: إسهام الطبقات العميقة محدود (على الجانب $m' = 1.5$).



المسألة

مثال

المعطيات

الأساس	$B \times L = 4 \times 6$ m، عند العمق $z' = 4$ m تحت المركز (من منسوب الأساس)
مستطيل الزاوية	$B/2 \times L/2 = 2 \times 3$ m $\Rightarrow B' = 2$ m, $m' = 1.5$, $n' = z'/B' = 2.0$
التربة	$\nu = 0.5$ (غير مصّرف)

المطلوب

أوجد قيم A_0, A_1, A_2, F_1, F_2 و I_s.

الحل

الحل

1 الجذور التربيعية: $\sqrt{(m'^2+1)}=1.8028$؛ $\sqrt{(m'^2+n'^2)}=2.5000$؛ $\sqrt{(m'^2+n'^2+1)}=2.6926$ — A_0, A_1, A_2

$$A_0 = 1.5\ln\frac{(1+1.8028)(2.5000)}{1.5(1+2.6926)} = \mathbf{0.3527} \qquad A_1 = \ln\frac{(1.5+1.8028)\sqrt{5}}{1.5+2.6926} = \mathbf{0.5662}$$

$$A_2 = \frac{1.5}{2(2.6926)} = \mathbf{0.2785}$$

2 F_1 و F_2 و I_s

$$F_1 = \frac{0.3527+0.5662}{\pi} = \mathbf{0.2925} \qquad F_2 = \frac{2}{2\pi}\tan^{-1}(0.2785) = \mathbf{0.0865}$$

$$I_s = F_1 + \frac{1-2(0.50)}{1-0.50}F_2 = \mathbf{0.2925}$$

بما أن $\nu = 0.5$ فإن $(2\nu - 1) = 0$ و**$I_s = F_1 = 0.2925$**؛ ولا يؤثر F_2 في النتيجة.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

معامل المرونة غير المصّرف E_u، $\nu = 0.5$

النظرية

الطين المشبع **لا يغير حجمه** عند تطبيق الحمل ($\nu = 0.5$): وهذا هو هبوطه الفوري. أما الهبوط الناتج عن خروج الماء فهو هبوط الانضمام ويحسب في وحدة أخرى. ويشتق معامل المرونة غير المصرف من مقاومة القص:

$$E_u = \beta\, c_u \qquad \nu = 0.5$$

يعتمد β على دليل اللدونة ونسبة الإفراط في الانضمام: فهو يتغير **من بضع مئات إلى نحو 1500**.

عند $\nu = 0.5$ يكون $I_s = F_1$ و $(\nu^2 - 1) = 0.75$.

الطين الذي تزداد جساءته مع العمق **يقسم إلى عدة طبقات**.

β للطين

E_u (c_u = 50 kPa)	β
15 MPa	300
25 MPa	500
50 MPa	1000
75 MPa	1500

المسألة

مثال

المعطيات

طين

$$c_u = 50 \text{ kPa};\ \beta = 300,\ 500,\ 1000,\ 1500$$

المرجع

من أجل β = 500، يكون هبوط الطبقة الواحدة في مثال متعدد الطبقات S = 18.1 mm (المثال 6)

المطلوب

لكل قيمة β: E_u ونسبة الهبوط إلى القيمة المرجعية.

الحل

الحل

1 معامل المرونة غير المصّرف (c_u = 50 kPa)

$$E_u = \beta c_u: \quad 300(50) = \mathbf{15}\ \text{MPa},\ \ 500(50) = \mathbf{25},\ \ 1000(50) = \mathbf{50},\ \ 1500(50) = \mathbf{75}\ \text{MPa}$$

$S / S_{\beta=500}$	S (mm)	E_u (MPa)	β
1.67	30.2	15	300
1.00	18.1	25	500
0.50	9.1	50	1000
0.33	6.0	75	1500

الهبوط **يتناسب عكسيا** مع E_u: فبين β = 300 و 1500 يتغير الهبوط **5 أضعاف** (30 → 6 mm). ومعامل مرونة الطين هو أكثر مدخلات الحساب عرضة لعدم اليقين.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

الحفر يزيل الحمل أولاً

النظرية

يزيل الحفر **إجهاد الغطاء الترابي الفعال** عند منسوب القاع (ولا يتغير منسوب المياه الجوفية). وعندما يستخدم معامل مرونة واحد للتفريغ وإعادة التحميل معاً يسترد الانتفاخ المرن للحفر عند إعادة التحميل؛ ويحدد الهبوط الفوري **الضغط الصافي**:

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

$\sigma'_{v0}(D_{exc})$: الإجهاد الفعال الأولي عند قاع الحفر (γ فوق منسوب المياه الجوفية، $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ تحته).

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

في حالة عدم وجود حفر: $q_{net} = q_{gross}$ (يؤثر الضغط عند سطح الأرض).

?NEDEN NET

الحمل المعادل لوزن التربة المزالة أثناء الحفر **يعاد** عند إنشاء الأساس. ولا ينشأ هبوط التربة إلا من الضغط **المضاف فوق** هذا الحمل.

المسألة

مثال

المعطيات

الحمل	$q_{gross} = 180$ kPa؛ **عمق الحفر** $D_{exc} = 1.5$ m
التربة	$\gamma = 19$ kN/m^3, $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3
منسوب المياه الجوفية	**2.5 m (a) (أسفل قاع الحفر) · 1.0 m (b) (أعلى قاع الحفر)**

المطلوب

في كل حالة، أوجد قيم $\sigma'_{v0}(D_{exc})$ وq_{net}.

الحل

الحل

1 (a) منسوب المياه الجوفية 2.5 m > 1.5 m: لا يوجد ماء عند قاع الحفر

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 19.0(1.5) = 28.50 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_{net} = 180 - 28.50 = \mathbf{151.50} \text{ kPa}$$

2 (ب) منسوب المياه الجوفية 1.0 m: قاع الحفر يقع 0.5 m تحت الماء ($\gamma' = 19.5 - 9.81 = 9.69$ kN/m³)

$$\sigma'_{v0} = 19.0(1.0) + 9.69(0.5) = 23.845 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_{net} = 180 - 23.845 = \mathbf{156.16} \text{ kPa}$$

إذا كان الماء فوق قاع الحفر انخفض الإجهاد الفعال المزال، و**ازداد** صافي الضغط (151.5 → 156.2 kPa): فارتفاع منسوب المياه الجوفية يضخم الهبوط الفوري.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

عمق التأثير: $\Delta\sigma = p \cdot q$

النظرية

تتناقص زيادة الإجهاد تحت الحمل مع العمق لكنها لا تنعدم؛ ولذلك يلزم حد سفلي لعملية الجمع: **عمق الحساب** z_{lim}. وتقدم الوحدة قاعدتين:

عمق التأثير: هو العمق تحت المركز الذي تنخفض عنده زيادة الإجهاد بحسب Boussinesq إلى النسبة **p** من الضغط المطبق (والشائع $p = 10\%$): $I(z') = p$ و $z_{lim} = D_f + z'$.

قاع القطاع: ينتهي الحساب عند الطبقة الأخيرة (قاع جاسئ مثل الصخر أو الحصى الكثيف؛ طبقة Steinbrenner ذات القاع الجاسئ).

إذا انتهى القطاع فوق z_{lim} تستمر الطبقة الأخيرة حتى z_{lim} بالخصائص نفسها.

$$I = \frac{\Delta\sigma_z}{q} = 4\, I_{corner}(m, n) \qquad m = \frac{B}{2z'},\ n = \frac{L}{2z'}$$

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

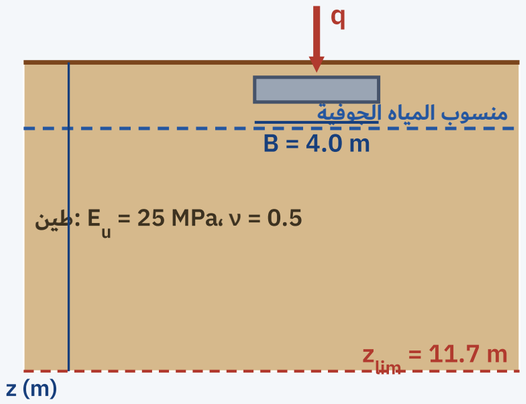
مثال

المعطيات

الأساس	$B \times L = 4 \times 6$ m ($L/B = 1.5$)، عند قاع الحفر؛ $D_f = 1.5$ m
القاعدة	عمق التأثير، $p = 10\%$ ($I = 0.10$)
المعادلة	$I = 4\, I_{corner}(m, n),\ m = B/2z',\ n = L/2z'$

المطلوب

z' و z_{lim}؛ قيمة I من أجل $z' = 4$ m و 10.19 m.



الحل

الحل

1 z′ = 4 m: m = 2/4 = 0.5; n = 3/4 = 0.75

$$I = 4\,I_{corner}(0.5;\ 0.75) = 4(0.1071) = \mathbf{0.4283}$$

2 الشرط I = 0.10: بطريقة التنصيف

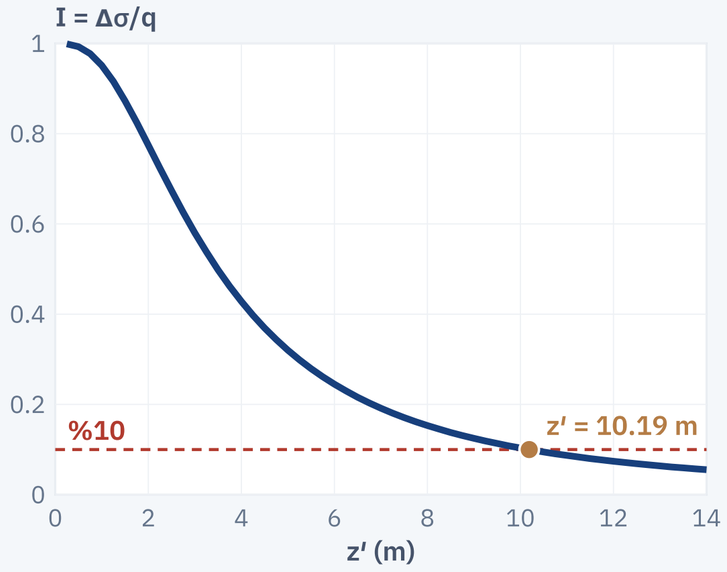
$$z' = \mathbf{10.19}\ \text{m} \quad (= 2.55\,B)$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \text{m}$$

3 تحقق: z′ = 10.19 m ⇒ m = 2/z′، n = 3/z

$$m = 0.1963,\ n = 0.2945$$

$$I = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$



يجمع حتى عمق (2.55 B) 10.19 m؛ وما بعده هو منطقة ضغط يقل عن 10%. وتبلغ 2.09 B في القاعدة المربعة و 6.34 B في الشريطية: **فالقاعدة العريضة يمتد تأثيرها أعمق.**

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

مساهمة الطبقة: فرق I_s

النظرية

تُسهم الطبقة الواقعة بين z_{top} و z_{bottom} (المقيسين من منسوب التأسيس) بما يساوي **الفرق بين قيمتي حل الوسط شبه اللانهائي عند العمقين**، وذلك بمعاملي E و ν الخاصين بها:

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

هذا هو تكامل انفعال Hooke على الطبقة (بإجهادات نصف الفضاء المتجانس): وهو **دقيق** بالنسبة إلى هذه الفرضية؛ ولا تتوقف النتيجة على سماكة الشريحة Δz (فالشرائح تخدم الجداول والمساحات الملونة فقط).

يحل محل **معامل المرونة المتوسط الموزون** في صيغة الطبقة الواحدة.

يجب تقسيم الطبقة التي تزداد جساءتها مع العمق إلى عدة طبقات.

المجموع

هبوط القطاع هو **مجموع** مساهمات الطبقات حتى z_{lim}: $S = \Sigma\,\Delta S_i$. ولا يحتسب من كل طبقة إلا الجزء الواقع بين منسوب التأسيس و z_{lim}.

المسألة

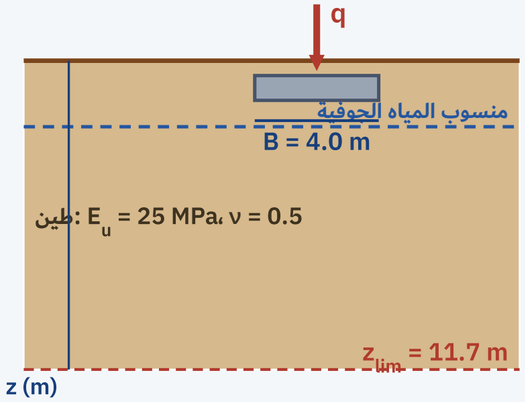
مثال

المعطيات

الأساس	مستطيلة، $B \times L = 4 \times 6$ m، عمق القاعدة $D_f = 1.5$ m (قاع الحفر)
الحمل	$q_{gross} = 180$ kPa (قاعدة مرنة، ضغط منتظم)
التربة	طبقة طين واحدة: $E_u = 25$ MPa, $\nu = 0.5$, $\gamma = 19$ kN/m^3؛ منسوب المياه الجوفية 2.5 m
عمق الحساب	عمق التأثير، $p = 10\%$ (المثال 5): $z' = 10.19$ m، $z_{lim} = 11.69$ m؛ تستمر الطبقة حتى هذا العمق

المطلوب

الهبوط **S** عند **مركز** القاعدة المرنة.



الحل (1/2)

الحل

1 الضغط الصافي (المثال 4a) والمعامل $k = q_{net}(1-\nu^2)/E$

$$q_{net} = 151.50 \text{ kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{151.50(0.75)}{25{,}000} = 0.004545 \text{ (دون أبعاد)}$$

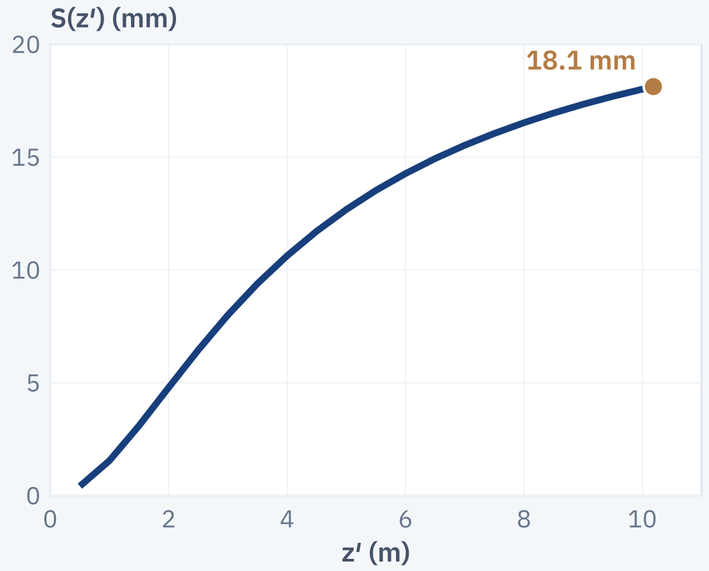
2 المركز: $\alpha = 4$، $B' = B/2 = 2$ m، $m' = 1.5$؛ $z' = 10.19$ m $\Rightarrow n' = z'/B' = 5.094$

$$A_0 = 0.6569,\ A_1 = 0.9097,\ A_2 = 0.0545$$

$$F_1 = 0.4986,\ F_2 = 0.0441 \ \Rightarrow\ I_s = \mathbf{0.4986}$$

الحل (2/2)

الحل



3 الهبوط: $S = k \cdot \alpha\, B' \cdot I_s$

$$S = 0.004545\,(4)(2)(0.4986) = 0.004545(3.9892)$$
$$= 0.01813 \text{ m} = \mathbf{18.1\ mm}$$

هبوط المركز **18.1 mm**. في الرسم البياني S(z′): يحدث معظم الهبوط ضمن العمق العلوي 2B (8 m)؛ وإسهام الطبقات العميقة صغير.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

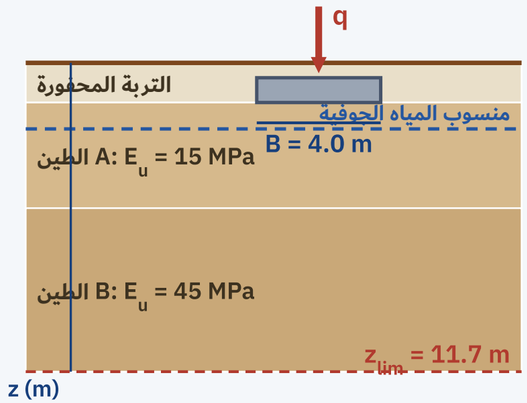
مثال

المعطيات

الأساس، الحمل	$B \times L = 4 \times 6$ m، $q_{gross} = 180$ kPa، $D_f = 1.5$ m $\Rightarrow q_{net} = 151.50$ kPa
الطبقة A	سماكة 4 m ابتداءً من منسوب التأسيس: $E_u = 15$ MPa
الطبقة B	أدناه، حتى z_{lim}: $E_u = 45$ MPa
عمق الحساب	$z'_{lim} = 10.19$ m

المطلوب

احسب هبوط **منتصف** كل طبقة والمجموع؛ وقارن ذلك بطبقة واحدة.



الحل (1/2)

الحل

1 معاملات الطبقة $k = q_{net}(1-\nu^2)/E$ و I_s و B' و α (المركز؛ المثالان 2 و6)

$$k_A = \frac{151.50(0.75)}{15{,}000} = 0.007575 \qquad k_B = \frac{151.50(0.75)}{45{,}000} = 0.002525$$

$$8\,I_s(z' = 4) = 8(0.2925) = 2.3398 \qquad 8\,I_s(z'_{lim}) = 3.9892$$

عند تقسيم القطاع إلى طبقتين تجمع مساهمة كل طبقة **بمعامل مرونتها الخاص** وبزيادة I_s في نطاقها.

الحل (2/2)

الحل

2 هبوط الطبقات والمجموع

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.007575(2.3398) = 17.7 \text{ mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002525(3.9892 - 2.3398) = 4.2 \text{ mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{21.9\ mm}$$

إجمالي الهبوط عند المركز **21.9 mm** (المحرك: 21.9 mm). وكانت الطبقة الواحدة (E = 25 MPa) تعطي 18.1 mm: ولأن الـ 4 m العليا **لينة** زاد الهبوط بنسبة **21%**؛ وتتحمل الطبقة A نسبة 81% من الإجمالي.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

الهبوط في المركز والزاوية والهبوط الجاسئ

النظرية

تعطي الصيغ هبوط قاعدة **مرنة تماماً**: **أكبر قيمة عند المركز** وأصغرها عند الزاوية؛ وفرقهما هو **الهبوط التفاضلي** للقاعدة المرنة. أما القاعدة الجاسئة فتهبط **بانتظام**: بنحو 0.93 مرة من قيمة المركز المرنة:

$$S_{rigid} \approx 0.93\, S_{center} \qquad S_{diff} = S_{center} - S_{köşe}$$

المركز: $B' = B/2$، $\alpha = 4$. الزاوية: $B' = B$، $\alpha = 1$ (زاوية المستطيل الكامل).

الدفن: يقلل معامل العمق I_f J Fox, (المعتمد على D_f/B و B/L و ν)، هبوط الأساس المدفون. وتأخذ الوحدة = I_f 1: أي لا تصحيح، وهذا **في جانب الأمان**.

ملاحظة

القاعدة الفعلية تقع بين المرنة والجاسئة. وتعطي الوحدة القيمتين الحديتين؛ أما الجساءة المتوسطة والتفاعل بين التربة والمنشأ فخارجان عن نطاقها.

المسألة

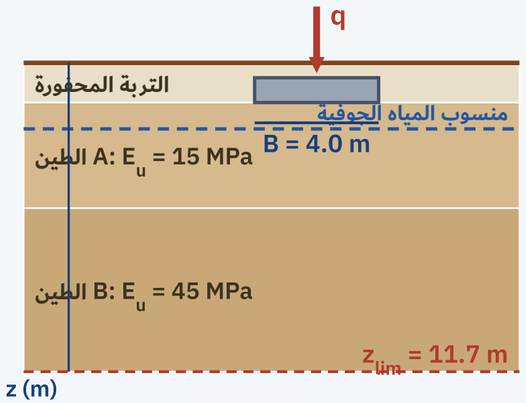
مثال

المعطيات

القطاع	مثال 7: الطبقة A (4 m) والطبقة B؛ z'_{lim} = 10.19 m
الأساس	مرنة، 6 m × 4
الركن	$\alpha = 1,\ B' = B = 4\ m \Rightarrow m' = L/B = 1.5;\ n' = z'/4$

المطلوب

هبوط **الزاوية**، وهبوط الأساس **الصلد**، والهبوط **التفاضلي** للأساس المرن.



الحل

الحل

1 قيم $4 \cdot I_s$ للركن ($n' = z'/4$)

$$z' = 4 \ (n' = 1): \ 4\,I_s = 0.5277$$
$$z'_{lim} = 10.19 \ (n' = 2.547): \ 4\,I_s = 1.4137$$

2 هبوط الزاوية

$$S_{köşe} = k_A(0.5277) + k_B(1.4137 - 0.5277) = 4.0 + 2.2 = \mathbf{6.2\ mm}$$

3 الجاسئ والتفاضلي

$$S_{rigid} = 0.93(21.9) = \mathbf{20.4\ mm} \qquad S_{diff} = 21.9 - 6.2 = \mathbf{15.7\ mm}$$

المركز 21.9 والركن 6.2 والقاعدة الجاسئة 20.4 mm؛ والهبوط التفاضلي للقاعدة المرنة **15.7 mm**. ويهبط الركن 28% فقط مما يهبطه المركز.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

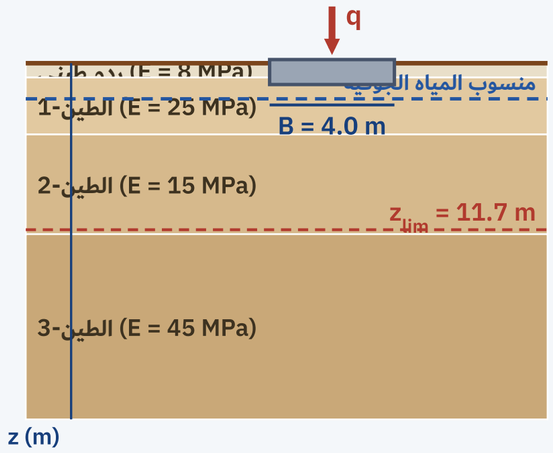
مثال

المعطيات

الأساس	$B \times L = 4 \times 6$ m، $q_{gross} = 180$ kPa، عمق الحفر 1.5 m، منسوب المياه الجوفية 2.5 m
القطاع	ردم طيني (0–1 m): $E_u = 8$ MPa؛ الطين 1 (1–5 m): $E_u = 25$ MPa؛ الطين 2 (5–12 m): $E_u = 15$ MPa؛ الطين 3 (12–25 m): $E_u = 45$ MPa
عمق الحساب	عمق التأثير، $p = 10\%$

المطلوب

هبوط **المركز** و**الزاوية** طبقةً بطبقة؛ والهبوط المرن عند المركز والزاوية، والهبوط الجاسئ والتفاضلي.



الحل (1/2)

الحل

1 الضغط الصافي (قاع الحفر 1.5 m)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.50 \text{ kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.50 = \mathbf{152.50} \text{ kPa}$$

2 عمق الحساب والطبقات

تزاح الطبقة الواقعة أعلى قاع الحفر $z_{lim} = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}$ m

قاع الحفر (1.5 m) يقع داخل طبقة الطين-1: ولا يحتسب من الطبقات إلا الجزء الواقع تحت 1.5 m. وبما أن z_{lim} = 11.69 m تقع داخل طبقة الطين-2 فإن تلك الطبقة تقتطع.

الحل (2/2)

الحل

الطبقة	z (m)	H (m)	E (MPa)	k (×10⁻³)	ΔS المركز (mm)	ΔS عند الزاوية (mm)
طين-1 (CL، قاس)	5.00 – 1.50	3.50	25	4.575	9.5	2.0
طين-2 (CH، صلد)	11.69 – 5.00	6.69	15	7.625	14.7	7.5
الإجمالي					**24.1**	**9.5**

المركز **24.1 mm**، الزاوية 9.5 mm، الجاسئ 22.4 mm، التفاضلي 14.7 mm. تعطي الوحدة القيم نفسها.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

نقاط يجب مراعاتها عند قراءة النتائج

النظرية

الفرضيات:

- منسوب التأسيس = قاع الحفر؛ ضغط منتظم على قاعدة مرنة تماماً.
- في كل طبقة، تُحسب الإجهادات باعتبار **نصف فضاء متجانس** (بنسبة بواسون ν الخاصة بتلك الطبقة).
- كل طبقة متماسكة وتهبط هبوطاً **غير مصّرف** (E_u، $\nu = 0.5$).
- لا يوجد تصحيح للتأسيس؛ قاعدة الأساس الصلبة ≈ 0.93 × قيمة المركز للقاعدة المرنة.
- الإشارة: الهبوط **موجب**؛ ومحدد الاختيار في الترويسة ينتقل إلى الاصطلاح الذي يكون فيه الهبوط نحو الأعلى موجباً.

خارج النطاق: انضمام الطين وانضغاطه الثانوي؛ الطبقات الحبيبية؛ طريقة Schmertmann ومخططات SPT/CPT، ومعامل المرونة المتزايد مع العمق، وجساءة القاعدة والتأثير المتبادل بين التربة والمنشأ، والعناصر المحدودة.

مناطق الألوان

تعرض عروض المقطع زيادة الإجهاد ومعامل المرونة والانفعال وهبوط $S(z)$ بنطاقات لونية؛ وقيمة المركز عند منسوب القاعدة هي الهبوط الناتج.

النقاط الرئيسية

Hooke: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$؛ يتناسب عكسياً مع E؛ **$S = \int \varepsilon_z \, dz$**

Steinbrenner: $S = q_{net}\,\alpha\,B'\,(1-\nu^2)/E \cdot I_s$؛ $I_s = F_1 + (1-2\nu)/(1-\nu)\,F_2$؛ المركز $\alpha = 4$، $B' = B/2$؛ الركن $\alpha = 1$، $B' = B$

الطين: $E_u = \beta\, c_u$ (β من بضع مئات إلى 1500)، $\nu = 0.5 \Rightarrow I_s = F_1$

الحالة الطبقية: $\Delta S = q_{net}\,\alpha\,B'\,(1-\nu^2)/E \cdot [I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{top})]$؛ ولا يتوقف على سماكة الشريحة

الضغط الصافي $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$؛ و **عمق الحساب** $I(z') = p$ (2.09 B للقاعدة المربعة، و 2.55 B عند $L = 1.5$ B، و 6.34 B للقاعدة الشريطية)

القاعدة المرنة: المركز > الركن (هبوط تفاضلي)؛ **الجاسئة** ≈ 0.93 × المركز؛ ولا يوجد تصحيح للدفن ($I_f = 1$)

المراجع

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

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

Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. Proc. 2nd .ICSMFE, Rotterdam, 1, 129–132

.Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill

.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 مولدة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة، والوحدة تعطي القيم نفسها.

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

احسب مشروع المثال الوارد في هذا العرض خطوة بخطوة في GeoTerva: تفتح الوحدة بهذا النموذج.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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