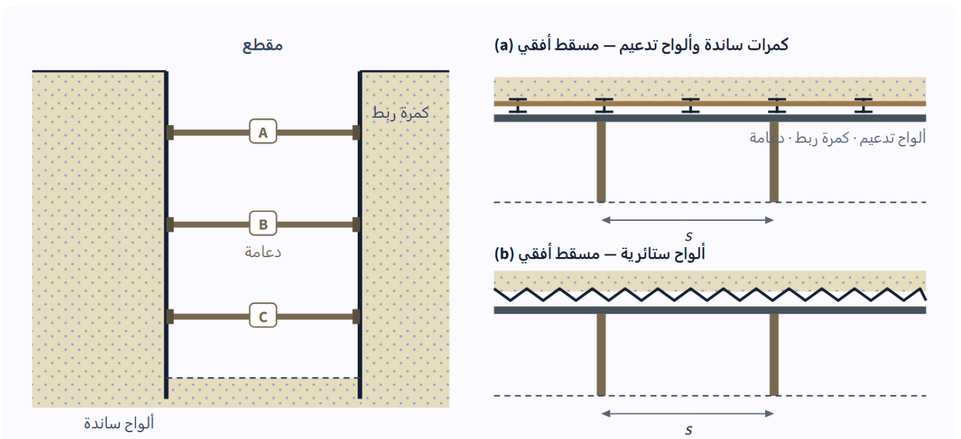


شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الجدران الستائرية والحفريات المدعمة

حفر مدعّم بدعامات في الرمل

المحاضرة: الحفر المدعّم (بالدعامات) في الرمل؛ ومغلف ضغط Peck، وأحمال الدعامات، وتحديد أبعاد الجدار الستائري وكمرة الربط، والتحقق من الفولاذ، والتآكل الأنبوبي عند القاع؛ ومثال محلول لكل موضوع.

دعم الحفر · مغلف Peck (الرمل) · الدعامة · كمرة الربط · الجدار الستائري · EN 1993 · AISC 360 · التآكل الأنبوبي عند القاع

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

سبب كون الضغط في الحفر المدعّم **ليس ضغط Rankine**، وكيفية إنشاء **المغلفات** من أحمال الدعامات المقاسة

مغلف Peck للرمل $\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$ وثلاث قواعد لحساب K_a في حالة طبقات رمل متعددة

إضافة **الماء** و**الحمل الإضافي** كمخططين منفصلين إلى جانب المغلف

من المُغلَّف إلى **أحمال الدعامات** (القطع المفصلية، ردود أفعال $P = R \cdot s$، A، B_1، B_2، C)

تحديد أبعاد **الجدار الستائري** (M_{max}، S) و **كمرة الربط الأفقية** ($M = R\,s^2/8$)؛ والتحقق من الفولاذ وفق **EN 1993-1-1** و **AISC 360-22**

تحقق من **التآكل الأنبوبي** عند قاعدة الرمل (تدرج الخروج، $FS = i_{cr}/i_{exit}$)

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

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

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

حفر المثال: رمل ($\gamma = 17.6$ kN/m³، $\varphi' = 32°$)، العمق $H = 8.00$ m، العرض $B = 6.00$ m؛ الدعامات على الأعماق $1.80 \cdot 4.60 \cdot 7.30$ m، والتباعد الأفقي $s = 3.00$ m. القوى لكل متر من الجدار (s أحمال الدعامات مضروبة في).

النظرية

منظومة التدعيم وعناصرها

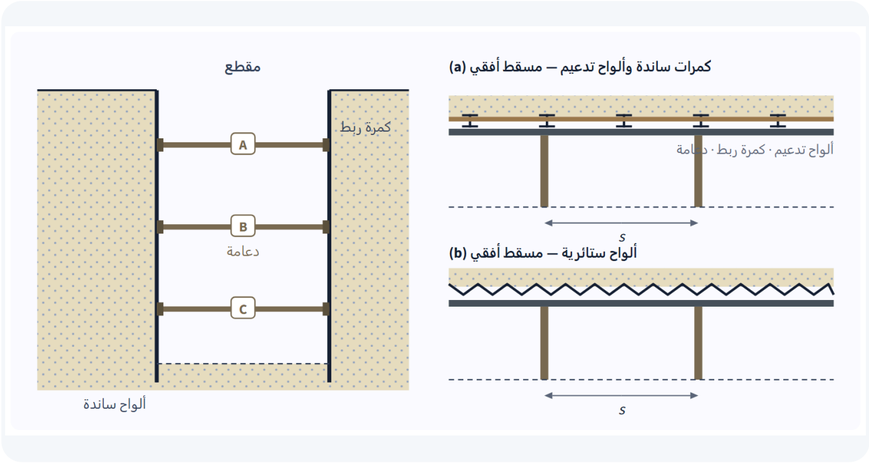
تبقى الحفريات العميقة ذات الجوانب الرأسية (الأقبية في المدن، الأنفاق المنفذة بالحفر والتغطية) مفتوحة بواسطة **نظام دعم** مؤقت. ويشيع ترتيبان: بين **الخوازيق الرأسية** (فولاذية أو خشبية) المدقوقة مسبقاً توضع ألواح تدعيم خشبية أفقية كلما تقدم الحفر؛ أو **ستائر** متشابكة تشكل جداراً مستمراً.

عند كل مستوى دعم، وبمجرد وصول الحفر إلى ذلك المستوى، تركب **كمرات الربط الأفقية** (wale)؛ أما **الدعامات** (strut) فهي عناصر فولاذية أفقية تقطع الحفر من كمرة ربط إلى أخرى وتتحمل قوى الضغط.

يتطلب اختيار العناصر معرفة الضغط الجانبي الذي سيتحمله نظام التدعيم. وتعطي النظرية الدفع الكلي ولا تعطي **توزيعه**: إذ يعتمد التوزيع على التربة وعلى تسلسل العمل وسرعته وعلى الطاقم والمعدات.

لذلك تكون ضغوط التصميم **مغلفات تجريبية**: ترسم حول الضغوط المحسوبة عكسياً من أحمال الدعامات المقاسة في حفريات فعلية.

يجب ألا تقل المسافة بين الدعامات أثناء التنفيذ عن 2.75 m تقريباً في الاتجاه الرأسي.



النظرية

يدور حول قمة الجدار

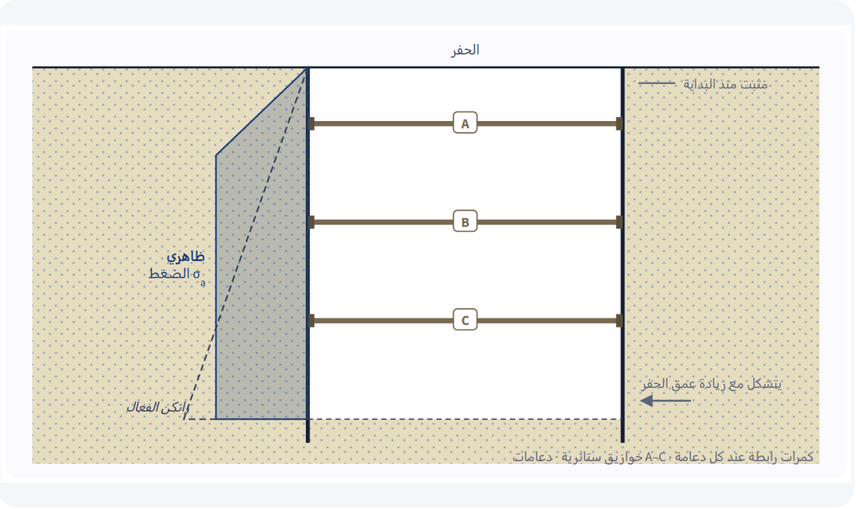
يدور الجدار الساند الكابولي حول قاعدته، ويصفه ضغط Rankine الفعال (صفر في الأعلى وأكبر ما يكون في الأسفل) وصفاً جيداً. **أما الجدار المدعّم فيتحرك في الاتجاه المعاكس**: توضع الدعامة الأولى والحفر ما زال ضحلاً، فلا يتحرك الجزء العلوي تقريباً؛ وتحفر كل مرحلة لاحقة قبل تركيب الدعامة، وتطول المدة الفاصلة مع العمق، فينثني الجدار تدريجياً من مواضع أدنى فأدنى: وعند اكتمال الحفر يكون قد **دار حول طرفه العلوي**.

يبقى الضغط في الأعلى قريباً من **قيمة السكون** (إذ تحركت التربة قليلاً جداً).

عند الأسفل قد ينخفض الضغط إلى ما دون قيمة Rankine الفعالة (فالتربة قد تجاوزت التوازن اللدن منذ زمن طويل).

تؤثر محصلة الدفع P_a **أعلى** من ثلث ارتفاع المثلث: على ارتفاع n_aH من القاعدة، حيث $n_a > 1/3$.

يوجد الدفع الكلي بإسفين الحلزون اللوغاريتمي ($r = r_o e^{\theta \tan \varphi}$)؛ وهو في التربة الحبيبية أعلى من قيمة Coulomb بنسبة 15–20%. غير أن توزيعه وقيمة n_a يتوقفان على التربة وعلى موقع الإنشاء، ولذلك تصمم الحفريات بواسطة **المغلفات**.



النظرية

كيف تم إنشاء المغلفات؟

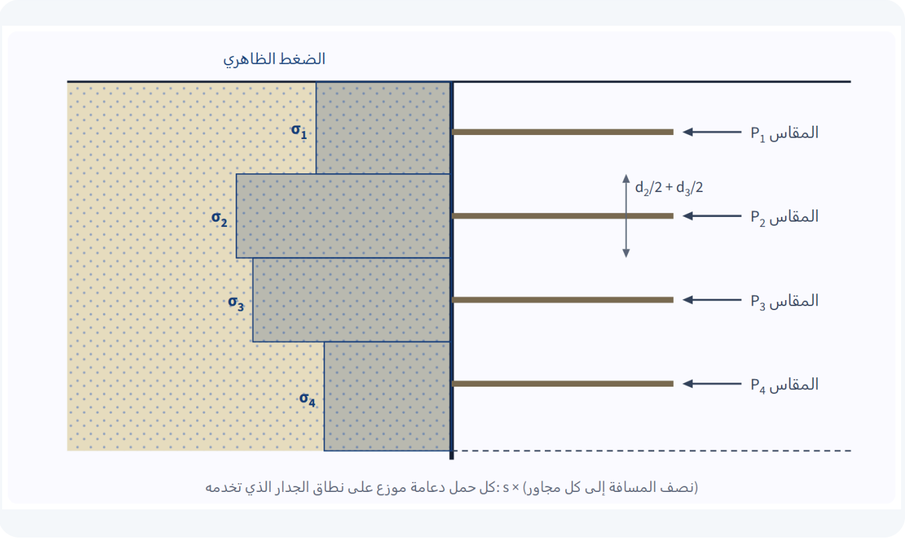
يتغير الضغط من نقطة إلى أخرى، ويجب أن تحسب أبعاد كل دعامة وفق **أكبر حمل** قد تتعرض له. وتبنى المغلفات لهذا الغرض: ففي حفر مجهز بأجهزة قياس يقاس حمل كل دعامة، ويقسم على شريط الجدار الذي تسنده الدعامة (التباعد الأفقي s × نصف المسافتين إلى الدعامة العليا والسفلى) ويحول على هذا الشريط إلى **ضغط ظاهري**:

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{s\left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right)} \qquad \sigma_i = \frac{P_i}{s\left(\frac{d_i}{2} + \frac{d_{i+1}}{2}\right)}$$

d_1 عمق الدعامة الأولى، و d_i المسافات بين الدعامات اللاحقة. ومحيط جميع المخططات المرسومة فوق بعضها هو **مغلف الضغط الظاهري**.

استمدت مغلفات Peck من أحمال الرمل المقاسة في حفريات مترو برلين وميونخ ونيويورك؛ وأنشأ مغلفات مماثلة بالطريقة نفسها للطين الطري–المتوسط والطين الصلب.

المغلف **ليس** الضغط المؤثر على الجدار في أي لحظة: فالحمل المأخوذ منه لدعامة معينة مرسوم بحيث يبقى في الجانب الآمن بالنسبة إلى الأحمال المقاسة.



$\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$، على كامل الارتفاع

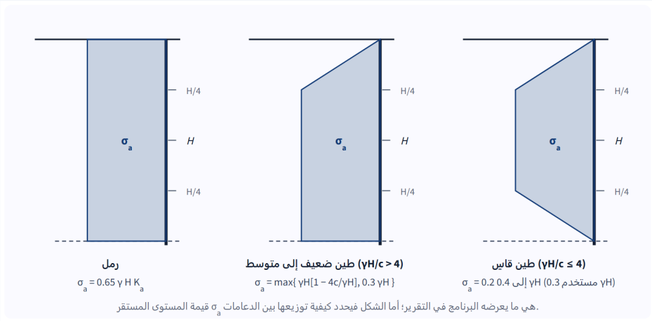
النظرية

مغلف Peck في الرمل **مستطيل**: ضغط واحد على كامل ارتفاع الحفر، يساوي 65% من أكبر إحداثية لمثلث Rankine الفعال:

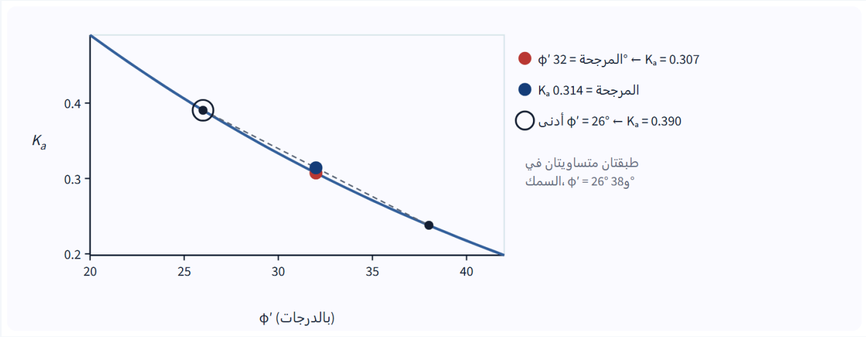
$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a \qquad K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

تنطبق المغلفات بالشروط التالية: عمق الحفر أكبر من نحو 6 m؛ و **المياه الجوفية تحت قاع الحفر**؛ والرمل مصّرف (ضغط ماء المسام يساوي صفراً).

يتطلب المغلف قيمة واحدة للمعامل K_a؛ ولا يعطي المصدر قاعدة لـ**الرمال المتعددة**. وتستخدم ثلاث قواعد ولا تتفق، لأن K_a دالة محدبة في φ' (المتوسط المأخوذ داخل المنحنى يبقى تحت المنحنى): $K_a(\bar{\varphi} = \Sigma\varphi H/H)$، ومتوسط $K_a = \Sigma K_{a,i} H/H$، و $K_a(\varphi'_{min})$.



هي ما يعرضه البرنامج في التقرير؛ أما الشكل فيحدد كيفية توزيعها بين الدعامات. σ_a قيمة المستوى المستقر



المسألة

مثال

المعطيات

الحفر

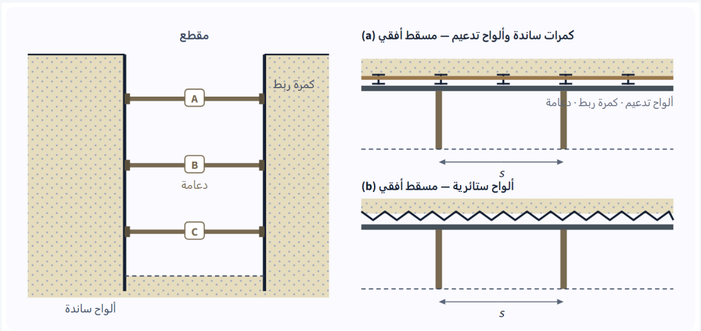
$H = 8.00$ m، رمل أحادي الطبقة $\gamma = 17.6$ kN/m³، $\varphi' = 32^\circ$

قطاع ثلاثي الطبقات

0–3 m: $\gamma = 17$، $\varphi' = 28^\circ$؛ **3–6 m:** 18، 38°؛ **أسفل 6 m:** 18.5، 33° **(الحفر نفسه)**

المطلوب

(a) K_a و σ_a؛ (b) قيم K_a و σ_a للقواعد الثلاث في قطاع ثلاثي الطبقات.



الحل

الحل

1 (a) رمل واحد

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0.3073}$$

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a = 0.65(17.6)(8.00)(0.3073) = \mathbf{28.12}\ \text{kPa}$$

2 (b) ثلاث طبقات: الوزن الحجمي المرجح $\bar{\gamma} = 17.75$ kN/m³ وفق ارتفاع الحفر (سماكات الطبقات 2 m + 3 + 3)

القاعدة	K_a	$\sigma_a = 0.65\,\bar{\gamma} H K_a$ (kPa)	P_{max} (kN)
$K_a(\bar{\varphi} = 33.0°)$	0.2948	27.21	308.5
متوسط $K_a = \Sigma K_{a,i} H_i / H$	0.2983	27.53	312.1
$K_a(\varphi'_{min} = 28°)$	0.3610	33.32	377.7

في الرمل الواحد يبلغ المغلف **28.12 kPa**. وتتراوح قيم K_a للضوابط الثلاثة بين 0.295 – 0.361: ويعطي الحساب بأقل قيمة لـ φ' ($\sigma_a = 33.3$ kPa) قيمة أكبر بنسبة 22% من المتوسطات؛ وتبقى الضوابط التي تأخذ المتوسط داخل المنحنى، و**الأكثر تحفظا هي φ'_{min}**.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

يضاف بجانب المغلف لا داخله

النظرية

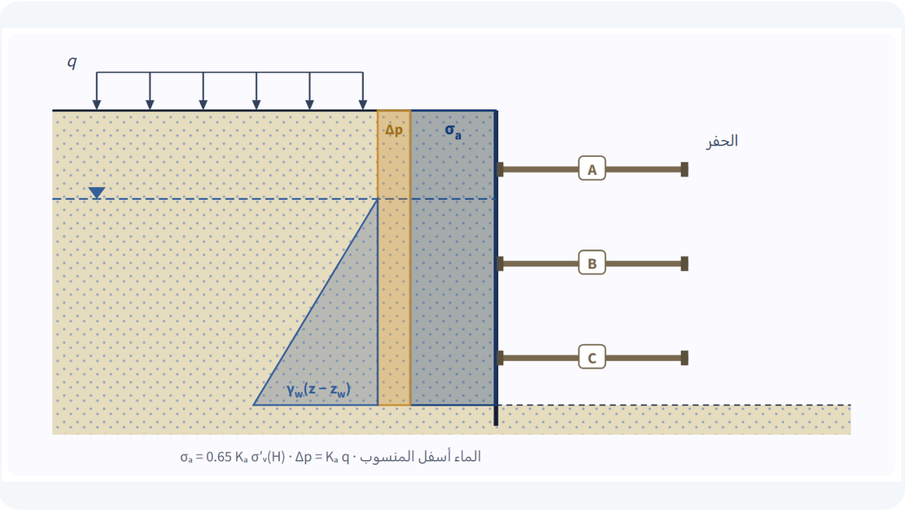
أُنشئت المغلفات من حفريات لا يوجد فيها ماء أسفل القاعدة ولا حمل بجوار الحفر. وتضيف الوحدة كليهما بجوار المغلف على هيئة **مخططات منفصلة**؛ ولا يُمدَّد المغلف خارج المدى الذي قيس فيه.

الماء: مغلف Peck للرمل هو مخطط للإجهاد الفعال. وإذا كان الماء داخل الحفر أخذ إجهاد الغطاء الترابي عند منسوب القاع فعالاً (الوزن الحجمي الطبيعي فوق الماء والمغمور تحته)؛ ويضغط الماء أيضاً على الجدار بكامل الارتفاع، وتحمل الدعامات الضغطين معاً.

الحمل الإضافي q لا يدخل في المغلف (إذ كان المعامل التجريبي 0.65 سيطبق عليه أيضاً)؛ بل يحمل ضغطاً منتظماً مستقلاً على كامل الارتفاع.

$$\sigma'_v(H) = \sum \gamma_i h_i + \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \sigma_a = 0.65 K_a \sigma'_v(H) \qquad u(z) = \gamma_w (z - z_w)$$

$$\Delta p_q = K_a q \qquad R = \sigma_a H + \Delta p_q H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2$$



المسألة

مثال

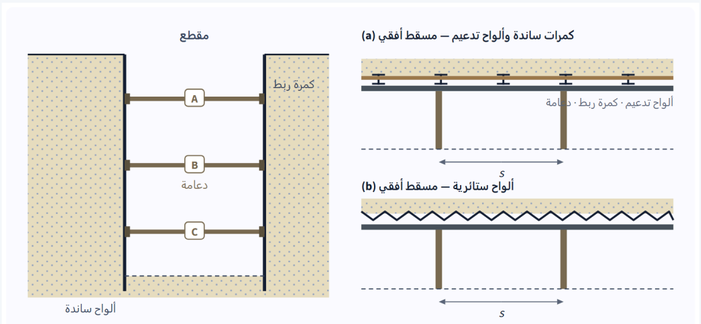
المعطيات

الحفر — **الحفر في المثال 1(a)** $H = 8$ m، $\gamma = 17.6$ **kN/m³**، $\gamma_{sat} = 20$ **kN/m³**، $\varphi' = 32^\circ$)

الحالات — **(أ) لا ماء ولا حمل إضافي؛ (ب) منسوب المياه الجوفية عند** $z_w = 3$ m**؛ (ج) حمل إضافي منتظم** $q = 10$ kPa

المطلوب

في كل حالة: σ_a والحمل الإضافي وضغط الماء؛ و**الحمل الكلي R** وأكبر حمل للدعامة.



الحل (1/2)

الحل

1 (b) المياه: إجهاد الغطاء الترابي الرأسي الفعال والمغلف؛ وتؤثر المياه أيضاً على كامل الارتفاع

$$\sigma'_v(H) = 17.6(3) + (20 - 9.81)(5) = 103.75 \text{ kPa}$$

$$\sigma_a = 0.65(0.3073)(103.75) = 20.72 \text{ kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2 = 20.72(8) + \tfrac{1}{2}(9.81)(5)^2 = \mathbf{288.41} \text{ kN/m}$$

تحت الماء يقل الغطاء الترابي الفعال (σ_a من 28.12 إلى 20.72 kPa) لكن الماء يضغط على الجدار الستائري بكامل الارتفاع: **R = 288.4 kN/m**.

الحل (2/2)

الحل

2 (ج) الحمل الإضافي: ضغط منتظم منفصل؛ خلاصة (أ)، (ب)، (ج)

$$\Delta p_q = K_a q = 0.3073(10) = 3.073 \text{ kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \Delta p_q H = 28.12(8) + 3.073(8) = 249.52 \text{ kN/m}$$

الحالة	σ_a (kPa)	Ek (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)	M_{max} للجدار الستائري (kN·m/m)
(a) لا يوجد ماء، q = 0	28.12	—	224.96	318.8	45.55
(b) الماء z_w = 3 m	20.72	u(H) = 49.05	288.38	376.7	37.09
(c) q = 10 kPa	28.12	Δp_q = 3.07	249.52	353.5	50.53

الماء **يصغّر** المغلف لكنه يضيف ضغط الماء: R من 225.0 → **288.4 kN/m**. أما الحمل الإضافي فلا يمس المغلف؛ بل يضيف Δp_q = 3.07 kPa (R = 249.5 kN/m).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

من المُغلَّف إلى أحمال الدعامات

الدعامات أعمدة أفقية: تحمل الضغط على امتداد محاورها وتنحني بوزنها الذاتي؛ وتتوقف سعتها على النحافة، وقد يلزم في الحفريات العريضة دعم إضافي. ويقدم المرجع طريقة بسيطة ومتحفظة لتقدير الحمل:

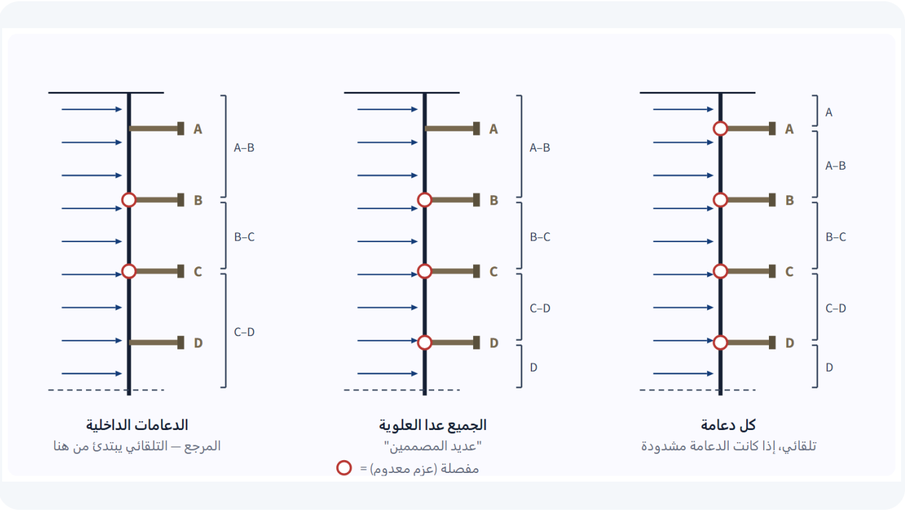
ارسم مغلف الضغط ومناسيب الدعامات. اعتبر الجدار الستائري **مفصليا عند كل منسوب دعامة** عدا الأعلى والأدنى (ويعتمد كثير من المصممين ذلك عند جميع المناسيب عدا الأعلى).

يقسم الجدار عند المفاصل إلى **كوابيل بسيطة عند الطرفين وكمرات بسيطة فيما بينهما**؛ وتحسب ردود أفعال كل جزء بالاستاتيكا (في حفر ذي أربع دعامات: A، B_1، B_2، C_1، C_2، D).

حمل الدعامة هو مجموع ردود الأفعال التي تستقبلها × التباعد الأفقي s.

$$P_A = A\,s \quad P_B = (B_1 + B_2)\,s \quad P_C = (C_1 + C_2)\,s \quad P_D = D\,s$$

كل جزء محدد استاتيكيا: يستند إلى مسندين؛ ويعطي اتزان العزوم والقوة الأفقية بالنسبة إلى أحد المسندين كلا رد الفعلين. ولأن الدعامة عند المفصل تنتمي إلى الجزأين معا فإنها تجمع **رد فعلين**. وتعطى ردود الفعل لوحدة طول الجدار (kN/m)؛ ويحولها s إلى حمل الدعامة.



المسألة

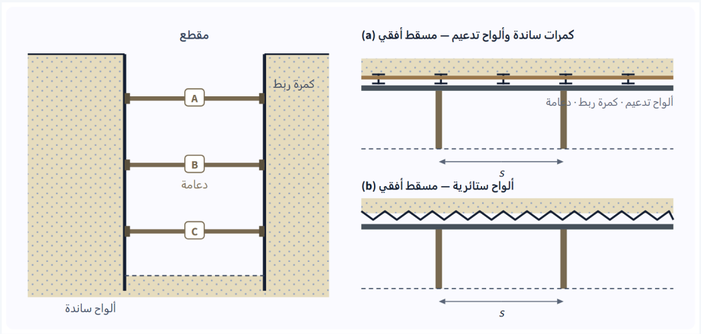
مثال

المعطيات

	الدعامات؛ $H = 8.00$ m؛ $B = 6$ m
الحفر	**التباعد الأفقي**؛ $z = 1.80, 4.60, 7.30$ m (A، B، C)؛ $s = 3.00$ m
الضغط	**المثال 1(a): مغلف مستطيل مستمر**؛ $\sigma_a = 28.12$ kPa؛ **الجدار الستائري مفصلي عند الدعامة B (عدا الطرفين العلوي والسفلي)**

المطلوب

المحصلة W للأجزاء وذراعها $\bar{z}$؛ ردود الأفعال **A، B_1، B_2، C**؛ أحمال الدعامات **P_A، P_B، P_C**.



الحل (1/2)

الحل

1 يقسم المغلف عند المفاصل إلى أجزاء؛ محصلة كل جزء وذراعها (العمق من السطح العلوي)

القطعة	المدى (m)	W (kN/m)	z̄ (m)	المساند
1	4.60 – 0.00	129.35	2.300	A (z = 1.80), B (z = 4.60)
2	8.00 – 4.60	95.61	6.300	B (z = 4.60), C (z = 7.30)

2 الجزء الأول: توازن العزوم حول المسند الأول

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{129.35(2.300 - 1.80)}{4.60 - 1.80} = \mathbf{23.10}$$

$$R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{106.25}\ \text{kN/m}$$

ينقل الجزء الأول إلى مسنديه الحملين 106.25 و 23.10 kN/m؛ ورد فعل الدعامة العليا (A) أكبر لأنه يتضمن أيضاً حمل الجزء الكابولي.

الحل (2/2)

الحل

3 الجزء الثاني

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{95.61(6.300 - 4.60)}{7.30 - 4.60} = \mathbf{60.20} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{35.41}\ \text{kN/m}$$

4 تجمع كل دعامة ردود الأفعال التي تستقبلها؛ الحمل = المجموع × s (s = 3.00 m)

المنسوب	z (m)	ردود الفعل التي يتلقاها (kN/m)	الإجمالي (kN/m)	P = R·s (kN)
A	1.80	106.25	106.25	**318.75**
B	4.60	35.41 + 23.10	58.51	**175.53**
C	7.30	60.20	60.20	**180.60**

أكبر حمل دعامة **P_A = 318.75 kN** (المنسوب A): وهذا الحمل هو الذي يحدد أبعاد الدعامة. ولأن الدعامة B تنتمي إلى جزأين فإنها تجمع رد فعلين.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

أقصى عزم انحناء ومعامل المقطع المطلوب

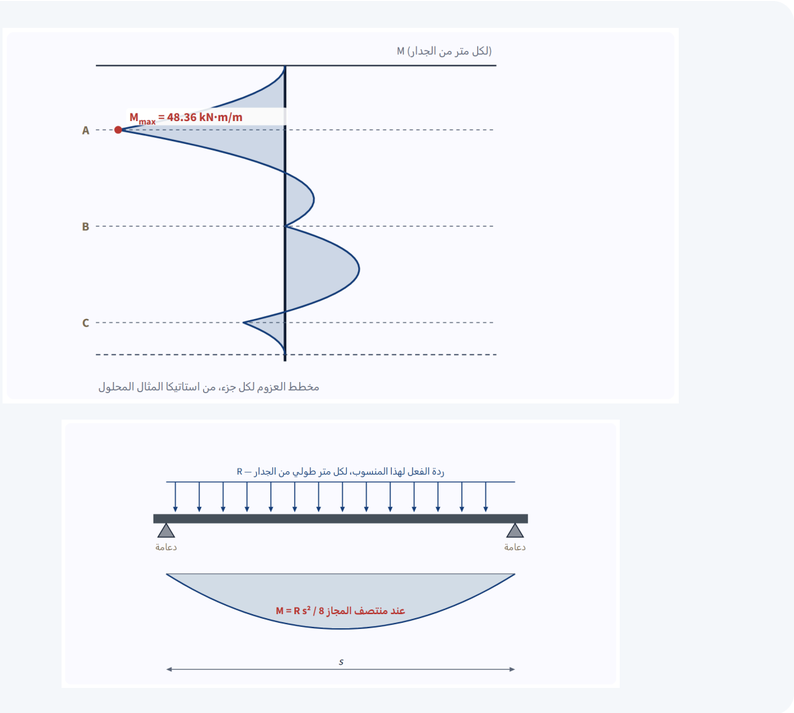
تصمم **الستارة** من الأجزاء نفسها: يوجد في كل جزء أكبر عزم انحناء (حيث تغير قوة القص إشارتها: داخل البحر أو عند الدعامة التي يلتقي فيها الجزء الكابولي بالمسند)؛ وأكبرها هو عزم التصميم لوحدة الطول من الجدار. ويستنتج معامل المقطع المطلوب من إجهاد الانحناء المسموح به، ويختار من الجدول مقطع لا تقل قيمته عن ذلك:

$$M_{max} = \max_{parts} |M| \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

يمكن عد **كمرات الربط الأفقية** مستمرة إذا وصلت وصلاً مناسباً؛ وحفاظاً على جانب الأمان تؤخذ **مفصلية** عند الدعامات: كمرة بسيطة الإسناد بحرها s، وردة فعل المستوى R (لوحدة الطول من الجدار) حمل موزع:

$$M_{max} = \frac{R\,s^2}{8} \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

المنسوب ذو أكبر رد فعل هو الحاكم. تربط كمرات الربط الأفقية أحياناً بالجدار الستائري عند النقاط التي توفر الدعم الجانبي الذي تحتاجه.



المسألة

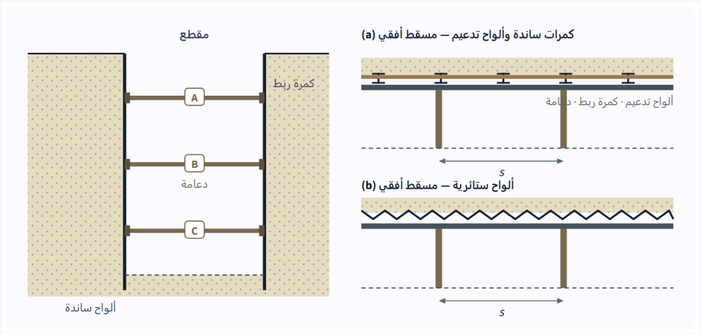
مثال

المعطيات

الحفر	**العمق $H = 27$ ft (8.23 m)، الرمل $\gamma = 17.59$ kN/m³، $\varphi' = 32^\circ$؛ الدعامات عند 6 و 15 و 24 ft (1.83 و 4.57 و 7.32 m)؛ التباعد الأفقي 12 ft (3.66 m)؛ مفصل عند B**
الفولاذ	**إجهاد الانحناء المسموح به $\sigma_{allow} = 165\,474$ kPa**

المطلوب

العزم $\mathbf{M_{max}}$ للجدار الستائري ومعامل المقطع المطلوب $\mathbf{S}$ (cm³/m)؛ والعزم $\mathbf{M_{max}}$ ومعامل المقطع $\mathbf{S}$ لكمرة الربط الأفقية (cm³) عند المنسوب الذي يتعرض لأكبر رد فعل.



الحل (1/2)

الحل

1 الجدار الستائري: أقصى عزم لكل جزء

القطعة	المدى (m)	M_{max} (kN·m/m)	الموضع z (m)
1	4.57 – 0.00	48.36	1.83
2	8.23 – 4.57	21.49	5.79

2 معامل المقطع المطلوب

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{48.36}{165{,}474} = 0.0002923 \text{ m}^3/\text{m} = \mathbf{292.3} \text{ cm}^3/\text{m}$$

في الجدار الستائري **M_{max} = 48.36 kN·m/m** (الجزء 1، z = 1.83 m): **S ≥ 292.3 cm³/m**.

الحل (2/2)

الحل

3 كمرة الربط الأفقية: كمرة بسيطة الارتكاز عند كل منسوب (s = 3.658 m)

المنسوب	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ$_{allow}$ (cm³)
A	110.18	184.25	1,113
B	57.30	95.82	579
C	70.52	117.93	713

تقع أكبر ردة فعل **عند المستوى** A (R = 110.18 kN/m): تحدد أبعاد كمرة الربط الأفقية بالقيمة **M_{max} = 184.25 kN·m** و **S ≥ 1,113 cm³**؛ وقد تكون كمرات الربط الأفقية عند المستويات الأخرى أصغر.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

تأثيرات التصميم، والصنف، والانحناء، والانبعاج

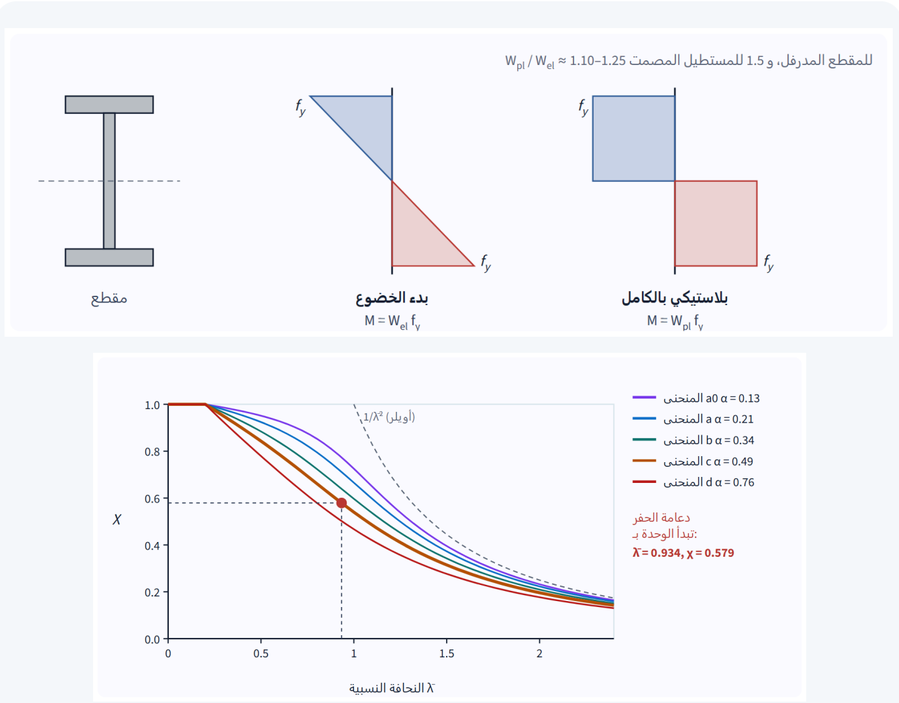
الأحمال الناتجة من المغلف هي **قيم الخدمة** (مغلف Peck حد أعلى للأحمال المقاسة)؛ وتحول مرة واحدة إلى قيمة التصميم: $E_d = \gamma_F E_k$. ويتحقق من كل عنصر بمقاومة الخضوع (f_y) لدرجة الفولاذ الخاصة به؛ ويعطى المقطع بـ**معامل المقطع** للعنصر (الجدار الستائري: W_{el} لكل متر؛ كمرة الربط الأفقية: W؛ الدعامة: A وI حول المحور الضعيف).

$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{الصنف 1–2}),\ W_{el}\ (\text{الصنف 3})$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \qquad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \qquad \Phi = 0.5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\right] \qquad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1 \qquad N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

تنبعج الدعامة حول محورها الضعيف: I عزم القصور الذاتي الأصغر، $L_{cr} = K\,L_b$ الطول الفعال (عرض الحفر، ما لم يمر بين الطرفين خازوق ساند أو تدعيم متقاطع). وتؤخذ α من منحنى الانبعاج (المنحنى c: 0.49).

في الجدار الستائري تنطبق المقاومة نفسها لكل وحدة عرض (EN 1993-5؛ انزلاق القفل β_B في المقاطع U، و1.0 في المقطع Z). ولأن شفة الضغط للكمرة الأفقية تستند إلى الجدار فإن الانبعاج الالتوائي الجانبي ليس حاكماً.



المسألة

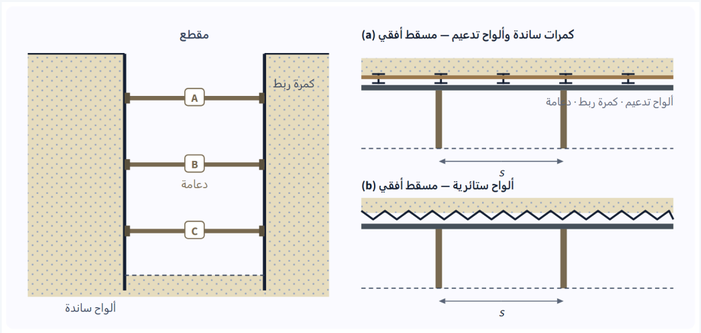
مثال

المعطيات

الحفر والأحمال	**الحفر في المثال 1(a) والأحمال في المثال 3:** $P_{max} = 318.75$ **kN (الدعامة A)**
العناصر	**S275** $(f_y = 275$ **MPa)**، $\gamma_F = 1.35$، $\gamma_{M0} =$ $\gamma_{M1} = 1.00$؛ **جدار ستائري:** $W_{el} = 600$ **cm³/m**؛ **كمرة ربط أفقية** $W_{el,y} = 1\,000$ **cm³**؛ **دعامة** $A =$ 65.7 **cm²**، $I = 3\,598$ **cm⁴**، **المنحنى c**، $L_{cr} = 6.00$ **m**

المطلوب

η لكل من الجدار الستائري وكمرة الربط الأفقية الأكثر تحميلاً والدعامة الأكثر تحميلاً (≥ 1).



الحل (1/2)

الحل

1 الجدار الستائري وكمرة الربط الأفقية (الانحناء): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(45.55)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{61.50}{165.0} = \mathbf{0.373}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(119.53)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{161.37}{275.0} = \mathbf{0.587}$$

الجدار الستائري $\eta = \mathbf{0.373}$، وكمرة الربط الأفقية $\eta = \mathbf{0.587}$: كلاهما كاف ($\eta \le 1$).

الحل (2/2)

الحل

2 الدعامة (التحنيب): $N_{Ed} = 1.35\,P_{max} = 1.35(318.75) = 430.31$ kN

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (210\,000\,000)(3\,598 \cdot 10^{-8})}{6.00^2} = 2{,}071.5 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,806.8}{2{,}071.5}} = 0.9339$$

$$\Phi = 0.5\left[1 + 0.49(0.9339 - 0.2) + 0.9339^2\right] = 1.1159$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.5791 \qquad N_{b,Rd} = \chi A f_y = 1{,}046.4 \text{ kN}$$

$\eta_{strut} = 430.3 / 1{,}046.4 =$ **0.411**. العناصر الثلاثة كافية جميعها ($\eta \le 1$)؛ ويحكم **الانبعاج** في الدعامة ($N_{c,Rd} =$ 1,806.8 kN، $N_{b,Rd} = 1{,}046.4$ kN).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

LRFD أو ASD؛ الأصناف، الانحناء، القص، منحنى العمود

النظرية

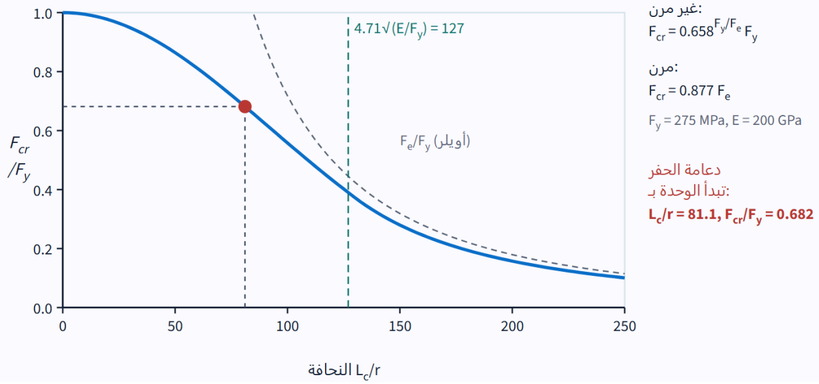
يتحقق من كل عنصر بواسطة **المقاومة الاسمية R_n** المستخرجة من أحكام الضغط والانحناء والقص. وفي طريقة LRFD تضرب الأحمال في معاملات التحميل وتخفض المقاومة بالمعامل φ؛ أما في طريقة ASD فيقارن حمل التشغيل بالمقاومة مقسومة على معامل الأمان Ω:

$$R_u \le \phi R_n \ \text{(LRFD)} \qquad R_a \le \frac{R_n}{\Omega} \ \text{(ASD)} \qquad P_u = \gamma_H P,\ M_u = \gamma_H M,\ \gamma_H = 1.6$$

الأحمال الناتجة من المغلف هي **ضغط التربة الجانبي H** بحسب ASCE 7-22: ففي توليفات LRFD يدخل بمعامل 1.6 حيثما أضيف إلى الحمل (وفي دعامات الحفر دائماً)، وبمعامل 1.0 في ASD. ويؤخذ الجدار الستائري وكمرة الربط الأفقية المعطيان مع الوحدة بالمقاومة التي تعتمدها الوحدة: F_yZ في المقطع المدمج، وF_yS عند الخضوع الأول. ولما كانت كمرة الربط مقيدة جانبياً بالجدار فإن $L_b = 0$ ولا يعد الانبعاج الالتوائي الجانبي حالة حدية.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} \qquad F_{cr} = 0.658^{F_y/F_e} F_y \ \left(\frac{L_c}{r} \le 4.71\sqrt{E/F_y}\right) \qquad 0.877 F_e \ \text{وإلا} \qquad P_n = F_{cr} A_g$$

يخدم **منحنى العمود الواحد** جميع المقاطع (فلا يوجد منحنى يختار كما في EN 1993-1-1)؛ r هو نصف قطر التدوير الصغير، و $L_c = K\,L_b$ الطول الفعال؛ ويوصى بالقيمة $L_c/r \le 200$. ولا تخفض AISC مقاومة الانحناء بسبب قوة القص، خلافا لـ EN 1993-1-1.



المسألة

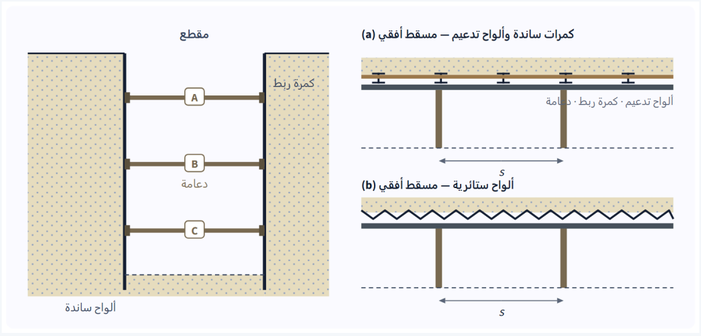
مثال

المعطيات

الحفر والأحمال	**الحفر في المثال 1(a) والأحمال في المثال 3:** **(الدعامة A)** $P_{max} = 318.75$ **kN**
العناصر	**عناصر المثال 5 (S275،** $F_y = 275$ **MPa؛** $E =$ 200 **GPa؛ LRFD** $\gamma_H = 1.6$**،** $\phi_c = \phi_b = 0.90$**؛** **ASD** $\Omega_c = 1.67$**،** $\Omega_b = 1.67$ $(M_n = F_y S)$

المطلوب

للدعامة الأكثر تحميلاً: L_c/r, F_e, F_{cr}, P_n؛ ونسب LRFD و ASD؛ ونسبة LRFD للجدار الستائري وكمرة الربط.



الحل (1/2)

الحل

1 الدعامة: منحنى العمود (A_g = 65.7 cm²، r = 7.40 cm، L_c = 6.00 m)

$$\frac{L_c}{r} = \frac{600}{7.40} = 81.1 \;\le 4.71\sqrt{E/F_y} = 127$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} = \frac{\pi^2(200\,000)}{(81.1)^2} = 300.3 \text{ MPa}$$

$$F_{cr} = 0.658^{275/300.3}(275) = 187.4 \text{ MPa}$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 187.4 \times 6\,570 \text{ mm}^2 = \mathbf{1{,}231.5} \text{ kN}$$

عند الدعامة: **المقاومة الاسمية P_n = 1,231.5 kN**؛ النحافة L_c/r = 81.1، في نطاق الانبعاج غير المرن (الحد 127).

الحل (2/2)

الحل

2 نسب LRFD وASD (P = 318.75 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(318.75) = 510.0 \text{ kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3 \text{ kN} \quad \eta = \mathbf{0.460}$$

$$\text{ASD: } P_a = 318.75 \text{ kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4 \text{ kN} \quad \eta = \mathbf{0.432}$$

الدعامة: ASD η = **0.432**، LRFD η = **0.460**. الجدار الستائري (LRFD) 0.491، وكمرة الربط الأفقية 0.773؛ وكانت القيم وفق EN 1993-1-1 هي 0.373 و 0.587 و 0.411.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

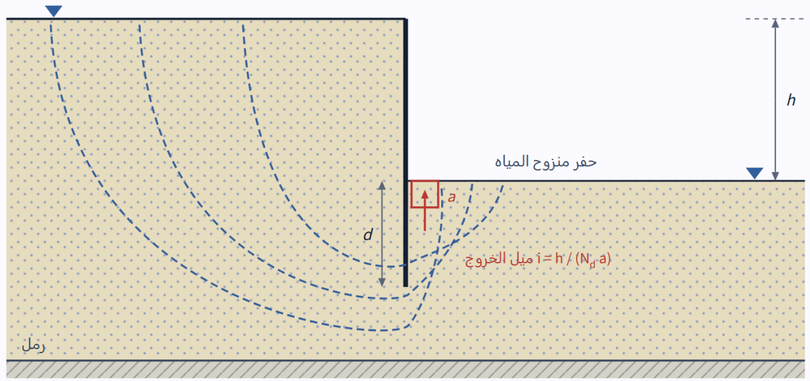
التدرج الهيدروليكي عند الخروج والتدرج الحرج

يكون قاع الحفر الرملي مستقراً عموماً ويبقى كذلك ما دام الماء داخل الحفر لا ينخفض عن منسوب المياه الجوفية خارجه. وعندما يجفف الحفر يمر الماء أسفل الجدار ويصعد عبر القاع؛ وقد يرفع الميل الهيدروليكي الصاعد المرتفع عند موضع الخروج الحبيبات: **يغلي القاع (التآكل الأنبوبي)**. ويقرأ أكبر ميل خروج بجوار الجدار من شبكة الانسياب:

$$i_{exit(max)} = \frac{h/N_d}{a} = \frac{h}{N_d\, a} \qquad FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} \qquad i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

h هو الفاقد في الضاغط الهيدروليكي في شبكة الجريان، و N_d عدد هبوطات الضاغط، و a طول عنصر الجريان الذي يخرج منه الماء من التربة بجوار الجدار. وتبلغ i_{cr} في معظم الترب 0.9–1.1 (المتوسط 1)؛ والمطلوب **FS ≈ 1.5**.

حل الميل الهيدروليكي عند الخروج نظرياً للحفر ذي الجدار الستائري في الرمل العميق: يستخرج من مخططين المعامل m (بالنسبتين $2L_2/B$ و $2L_1/B$) والقيمة $L_2 i_{exit}/h$؛ ثم $i = (L_2 i/h)_{nomograph} \cdot$ h/L_2. L_1 هو عمق الرمل الخارجي حتى منسوب القاع، و L_2 هو عمق دفن الجدار أسفل القاع.



المسألة

مثال

المعطيات

شبكة السريان (الحفر الابتدائي)

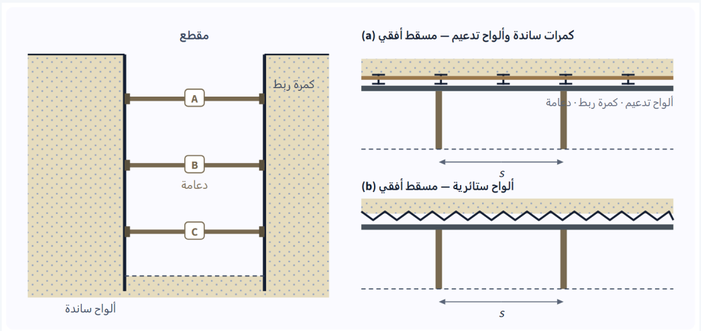
مثال المخطط (الكتاب)

فقد الشحنة $h = 3.0$ m، عدد الانخفاضات $N_d = 8$،
عنصر الخروج $a = 1.0$ m؛ $i_{cr} = 1.0$؛
$FS_{required} = 1.5$

$B = 5$ m, $L_2 = 4$ m, $L_1 = 5$ m, $h = 4.5$ m:
$2L_1/B = 2$, B/2L_2=0.625,m$
\approx0.033,L_2i_{exit}/h=0.54$

المطلوب

i_{exit} و FS بكلتا الطريقتين؛ القرار مقارنةً بالقيمة المطلوبة 1.5.



الحل

الحل

1 شبكة الانسياب: $i_{exit} = h/(N_d\, a)$

$$i_{exit(max)} = \frac{h}{N_d a} = \frac{3.0}{8(1.0)} = \mathbf{0.375}$$

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} = \frac{1.0}{0.375} = \mathbf{2.67} \;\geq 1.5 \;\checkmark$$

2 طريقة المخطط (رمل عميق)

$$i_{exit(max)} = \left(\frac{L_2 i_{exit}}{h}\right)_{nomograph} \frac{h}{L_2} = 0.54 \cdot \frac{4.5}{4} = 0.6075$$

$$FS = \frac{1.0}{0.6075} = \mathbf{1.646} \;\geq 1.5 \;\checkmark$$

في شبكة السريان يكون معامل الأمان ضد التآكل الأنبوبي **2.67**، ومن المخطط البياني **1.65**: كلاهما أعلى من القيمة المطلوبة 1.5.

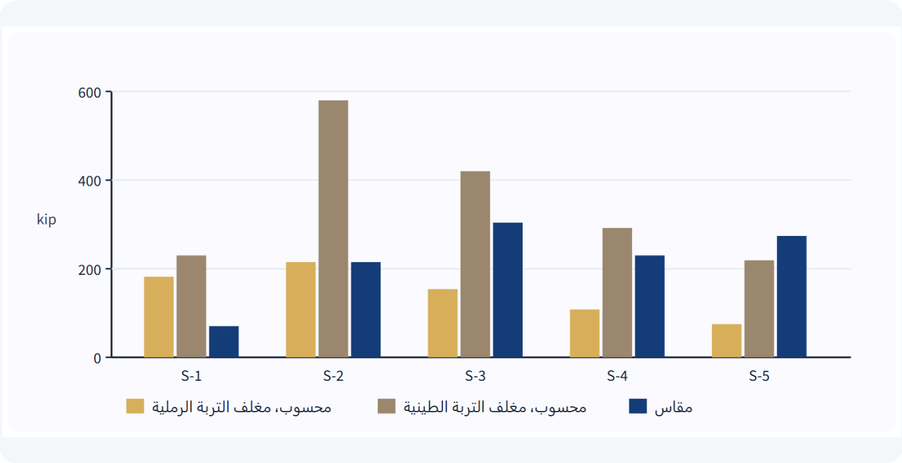
تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

دراسات حالة بوسطن وشيكاغو

Boston (مقطع الاختبار B): بعمق 17.7 m وخمس دعامات (بتباعد 3.66 m)؛ وحدد القطاع بمغلفين، أحدهما للرمل والآخر للطين: مغلف الرمل 53.5 kPa، ومغلف الطين اللين–المتوسط 146.1 kPa؛ وتبين أن الأحمال المقاسة تختلف كثيراً عن التقديرين كليهما (معاملات التربة غير مؤكدة)، وكانت الدعامات قد صممت لأحمال تفوق المقاسة بكثير. **Chicago, National Plaza**: بعمق 21.3 m وست دعامات، وطين تحت ردم رملي بسمك 13 ft؛ وحول القطاع إلى طين مكافئ: $\gamma H/c = 12.08 > 4$، $\gamma_{av} = 19.76$ kN/m³، $c_{av} = 34.91$ kPa، ومن ثم $\sigma_a = 282.0$ kPa.

وأعطى مغلف Peck ضغطاً يبلغ نحو **1.8 ضعف** المرصود: فالمغلف المرسوم حول كثير من الحفريات متحفظ بالنسبة إلى حفر واحد؛ وفي التربة نفسها يمكن للخبرة الميدانية أن تحد كثيراً من الإفراط في التصميم.



النظرية

ما تفترضه الطريقة

جمعت المغلفات من حفريات أعمق من نحو 6 m؛ والحفريات الأقل عمقاً خارج البيانات، وتشير الوحدة إلى ذلك. **المغلف ليس الضغط الفعلي المؤثر في الجدار في أي لحظة**: فهو يعطي حمل دعم آمناً، ولا يعطي انحراف الجدار.

المياه الجوفية تُفترض تحت القاع؛ وتُبقي الوحدة مغلَّف الرمل محسوباً على الغطاء الترابي الفعال، فإذا كان الماء أعلى من ذلك أضافت إليه الضغط الهيدروستاتيكي؛ ويُتحقق من تسرب الماء إلى الحفر عند القاع.

يعد **الجدار الستائري** سلسلة من الكمرات المفصلية المحددة استاتيكياً عند مناسيب الدعم المحددة؛ ولا تستخدم صلابته الذاتية ولا الغرس تحت قاع الحفر. أما **كمرات الربط الأفقية** فهي بحور بسيطة بين الدعامات (محافظة في حالة كمرة الربط المستمرة التي تعبر عدة دعامات).

يتم التحقق من الفولاذ وفق EN 1993-1-1؛ ولا تصمم المقاطع من الفئة 4، ولا يتحقق من الانبعاج الالتوائي الجانبي لكمرات الربط الأفقية. ويتوفر خيار AISC 360-22 LRFD/ASD.

يتوقع حدوث حركة جانبية ما للجدار: وتعتمد قيمتها على الزمن الفاصل بين حفر المرحلة وتركيب كمرات الربط الأفقية والدعامات. وتسبب الحركة **فقدان التربة** في الأرض المحيطة؛ ومن 150 حالة، يبلغ أقصى هبوط ≈ 1.1% من عمق الحفر في الطين اللين، و 0.2% في الطين الصلب، و 0.3% في التربة غير المتماسكة.

النقاط الرئيسية

المغلف: يدور حول أعلى الجدار المدعّم؛ والضغط ليس ضغط Rankine، بل مخطط تجريبي يرسم حول الأحمال المقاسة. **المستطيل في الرمل:** $\sigma_a = 0.65\ \gamma\ H\ K_a$ (مثال: 28.12 kPa)

رمال متعددة: لا تتطابق $K_a(\bar{\varphi})$ ومتوسط K_a و $K_a(\varphi'_{min})$ (الدالة محدبة)؛ والقيمة φ'_{min} متحفظة

الماء والحمل الإضافي منفصلان: يقلل الماء الإجهاد الفعال للغطاء الترابي لكنه يضيف الضغط الهيدروستاتيكي كاملاً (R: 225 → 288 kN/m)؛ ويضيف q ضغطاً $\Delta p = K_a q$

حمل الدعامة: يقسم المغلف عند المفاصل إلى أجزاء، وتوجد ردود الأفعال بالاستاتيكا، P = (مجموع ردود الأفعال)·s؛ وفي المثال $P_A = 318.75$ kN

تحديد الأبعاد: $S = M_{max}/\sigma_{allow}$ (الجدار الستائري)، وكمرة الربط الأفقية $M = R\ s^2/8$؛ وفي حفر المثال التعليمي يكون معامل مقطع الجدار الستائري 292 cm³/m وكمرة الربط 1 113 cm³

الفولاذ: 0.411 / 0.587 / 0.373 = η EN 1993-1-1 (الجدار الستائري / كمرة الربط / تحنيب الدعامة)؛ AISC LRFD للدعامة 0.460، و ASD 0.432

التآكل الأنبوبي: $FS = i_{cr}/i_{exit} \geq 1.5$؛ وفي المثال 2.67 (شبكة الانسياب) و 1.65 (المخطط)

المراجع

.Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning — Chapter 15, “Braced Cuts”; this page follows it

.Peck, R.B. (1943). Earth pressure measurements in open cuts, Chicago (Ill.) subway. Transactions, ASCE, 108, 1008–1058

Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation .Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Volume, 225–290

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

Lambe, T.W. (1970). Braced excavations. Proceedings, Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining .Structures, ASCE, 149–218

Swatek, E.P., Asrow, S.P. and Seitz, A. (1972). Performance of bracing for deep Chicago excavation. Proceedings, Specialty Conference on .Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 2, 1303–1322

.Harr, M.E. (1962). Groundwater and Seepage. McGraw-Hill, New York

.U.S. Department of the Navy (1971). Design Manual — Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, NAVFAC DM-7, Washington, D.C

Moormann, C. (2004). Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. Soils .and Foundations, 44(1), 87–98

.EN 1990:2002, Eurocode — Basis of structural design. CEN

.EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN

.EN 1993-5:2007, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 5: Piling. CEN

.ANSI/AISC 360-22, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2022

ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, .Reston, 2022

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية أنتجت بمحرك الحساب الخاص بالوحدة؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. والمثال المحلول في صفحة الوحدة هو أيضاً هذه الحفريات (حفر المثال التعليمي: 27 ft، γ = 112 pcf، φ′ = 32°؛ الحفر الابتدائي للوحدة: 8 m).

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل في GeoTerva قطاع الحفر الخاص بك، ومناسيب الدعم، والمياه الجوفية، والحمل الإضافي، وعناصرك الإنشائية؛ وتعطي الوحدة المغلف، وأحمال الدعم، وعزوم الجدار الستائري والكمرة الأفقية، والتحقق من الفولاذ، والتآكل الأنبوبي عند قاع الحفر.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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