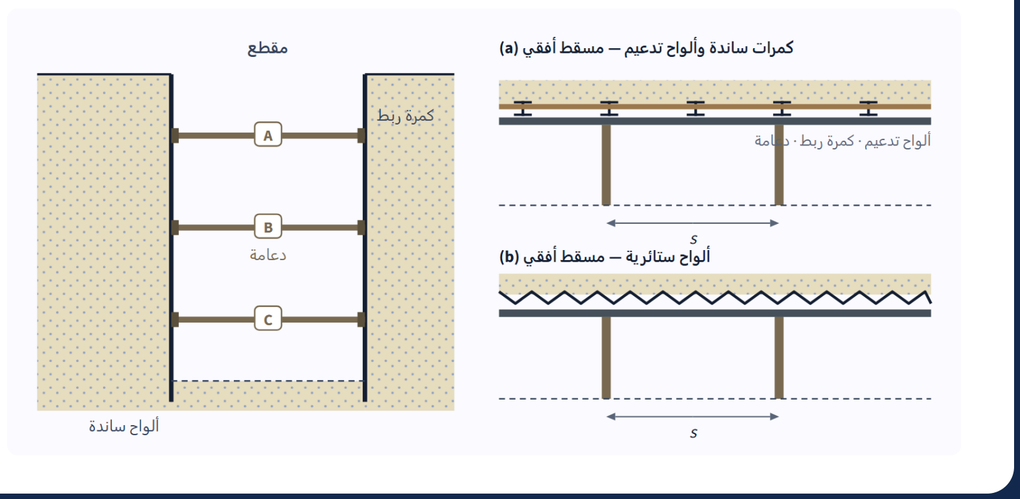


شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الجدران الستائرية والحفريات المدعمة

حفر مدعّم بدعامات في الطين

المحاضرة: الحفر المدعّم (بالدعامات) في الطين؛ مغلفات الطين، وشق الشد، وأحمال الدعامات، وتحديد أبعاد الجدار الستائري وكمرات الربط الأفقية، والتحقق من الفولاذ، وانتفاخ قاع الحفر؛ مع مثال محلول لكل موضوع.

- تدعيم الحفر
- مغلف Peck (الطين)
- شق الشد · الدعامة الأولى
- الدعامة · كمرة الربط · الجدار الستائري
- انتفاخ قاع الحفر

يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

لماذا لا يكون الضغط في الحفر المدعّم **وفق نظرية Rankine**، وكيف تُبنى **المغلفات** من الأحمال المقيسة

مغلفا الطين وفقاً **لرقم الاستقرار γH/c**: الطين الطري–المتوسط (γH/c > 4) والطين الصلب (≥ 4)

إضافة **الحمل الإضافي** بوصفه ضغطاً مستقلاً، وكون الماء في الطين لا يغير إلا الوزن الحجمي؛ و **شق الشد** $z_c = 2c/\gamma$ والدعامة الأولى

من المغلف: **أحمال الدعامات** (الأجزاء المفصلية) وتحديد أبعاد **الجدار الستائري** و**كمرة الربط الأفقية**

التحقق من الفولاذ وفق **EN 1993-1-1** و**AISC 360-22**

تحقق **انتفاخ قاع** الحفر في الطين (عمود Terzaghi، تصحيح Chang)

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: طين ($\gamma = 18\ kN/m^3$، $c = 35\ kPa$، $\varphi = 0$)، العمق $H = 7.00\ m$، العرض $B = 6.00\ m$؛ الدعامات على الأعماق 1.00 · 3.50 · 6.00 m، والتباعد الأفقي $s = 3.00\ m$. القوى لكل متر من الجدار (أحمال الدعامات مضروبة في s).

النظرية

منظومة التدعيم وعناصرها

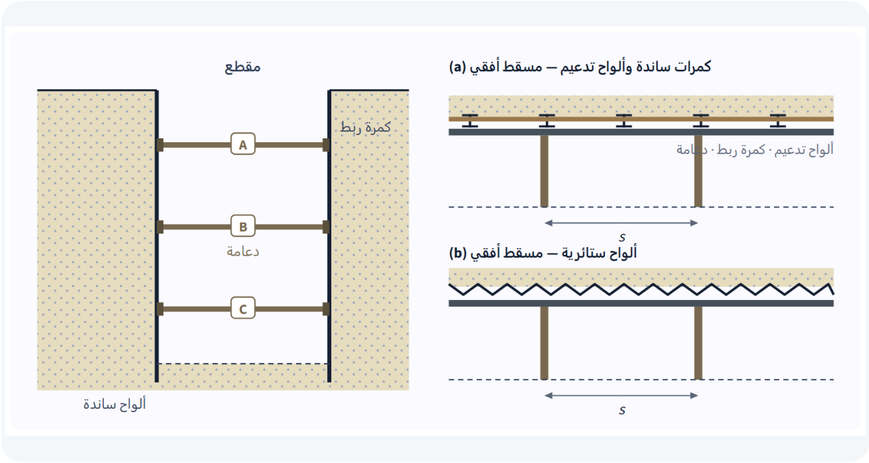
تبقى الحفريات العميقة ذات الجوانب الرأسية (الأقبية في المدن، الأنفاق المنفذة بالحفر والتغطية) مفتوحة بواسطة **نظام دعم** مؤقت. ويشيع ترتيبان: بين **الخوازيق الرأسية** (فولاذية أو خشبية) المدقوقة مسبقاً توضع ألواح تدعيم خشبية أفقية كلما تقدم الحفر؛ أو **ستائر** متشابكة تشكل جداراً مستمراً.

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

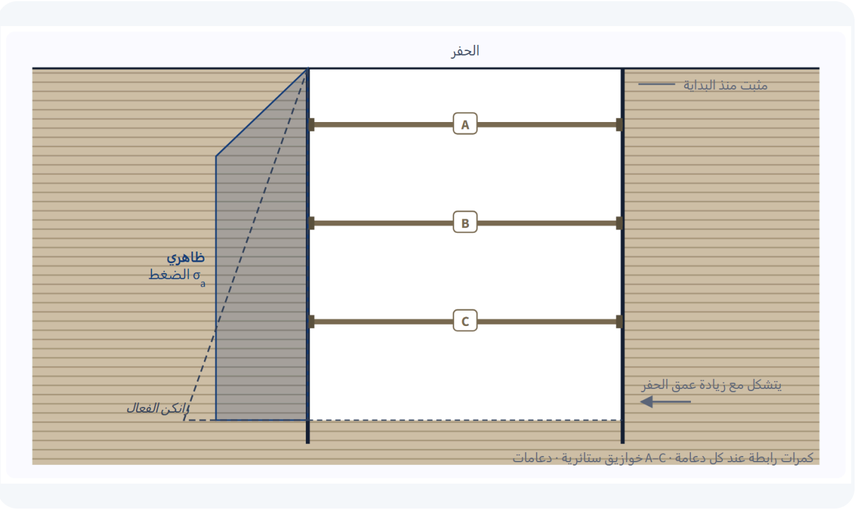
يدور الجدار الساند الكابولي حول قاعدته، ويصفه ضغط Rankine الفعال (صفر في الأعلى وأكبر ما يكون في الأسفل) وصفاً جيداً. **أما الجدار المدعّم فيتحرك في الاتجاه المعاكس**: توضع الدعامة الأولى والحفر ما زال ضحلاً، فلا يتحرك الجزء العلوي تقريباً؛ وتحفر كل مرحلة لاحقة قبل تركيب الدعامة، وتطول المدة الفاصلة 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؟

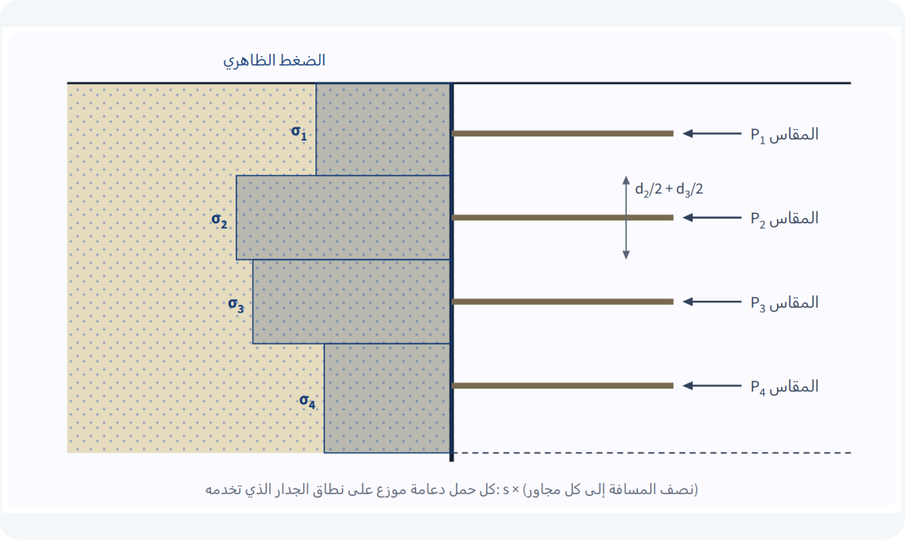
يتغير الضغط من نقطة إلى أخرى، ويجب أن تحسب أبعاد كل دعامة وفق **أكبر حمل** قد تتعرض له. وتبنى المغلفات لهذا الغرض: ففي حفر مجهز بأجهزة قياس يقاس حمل كل دعامة، ويقسم على شريط الجدار الذي تسنده الدعامة (التباعد الأفقي s × نصف المسافتين إلى الدعامة العليا والسفلى) ويحول على هذا الشريط إلى **ضغط ظاهري**:

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

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.



النظرية

من لينة إلى متوسطة أو صلبة: γH/c

في الطين يتحدد شكل المغلف بحسب **عدد الاستقرار γH/c** (c التماسك غير المصّرف، φ = 0). أما **الطين الطري إلى المتوسط** الذي تكون فيه γH/c > 4 فيحمل بالحفر إلى ما يتجاوز مقاومته بكثير:

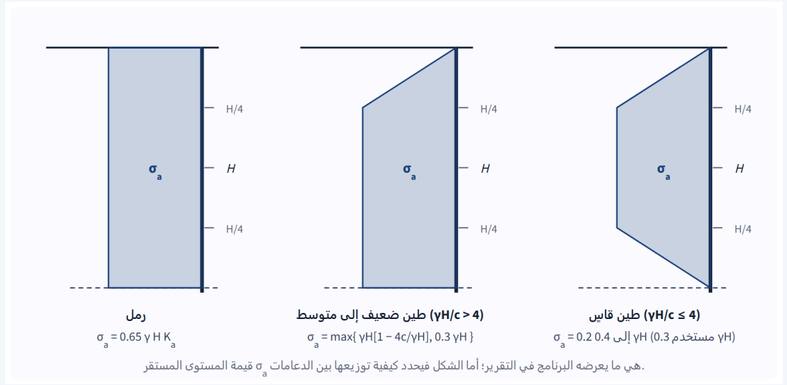
$$\frac{\gamma H}{c} > 4: \quad \sigma_a = \max\left(\gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right],\ 0.3\gamma H\right)$$

المغلف يساوي صفراً عند السطح، ويزداد خطياً في الربع العلوي، ويبقى ثابتاً حتى القاع؛ والأكبر من العبارتين هو الحاكم. و **الطين الصلب** أقرب إلى مجاله المرن:

$$\frac{\gamma H}{c} \le 4: \quad \sigma_a = 0.2\gamma H\ 0.4 \text{مع} \gamma H\ \ (0.3 \text{متوسط} \gamma H)$$

في الطين الصلب يزداد المغلَّف في الربع العلوي، ويثبت في النصف الأوسط، ويعود إلى الصفر في الربع السفلي. والشروط هي نفسها المطبقة على مغلَّف الرمل (عمق ≲ 6 m، والماء تحت القاع، والطين غير المصرف).

إذا مر الحفر بعدة طبقات طينية فإن المرجع يأخذ متوسطها مرجّحاً بالسماكة: $c_{av} = \Sigma c_i H_i / H$، $\gamma_{av} = \Sigma \gamma_i H_i / H$، ثم تُستخدم مغلفات الطين بالقيم المتوسطة.



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

المسألة

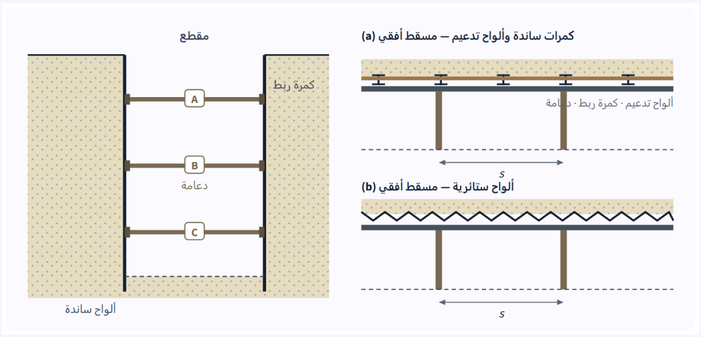
مثال

المعطيات

الحفر الابتدائي	$H = 7.0$ m, $\gamma = 18$ kN/m³, $c = 35$ kPa
طين أكثر ليونة	**نفس الحفر،** $c = 20$ kPa

المطلوب

لكل من الطينين **γH/c**، ونوع المغلف و **σ_a**.



الحل

الحل

1 الطين الابتدائي (c = 35 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{18(7)}{35} = \mathbf{3.60} \leq 4 \Rightarrow \text{الطين الصلب}$$

$$\sigma_a = 0.3\gamma H = 0.3(18)(7) = \mathbf{37.80}\ \text{kPa}$$

2 طين أكثر ليونة (c = 20 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{126}{20} = \mathbf{6.30} > 4 \Rightarrow \text{طين طري–متوسط}$$

$$\sigma_a = \gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right] = 126(1 - 0.635) = \mathbf{46.00}\ \text{kPa} \geq 0.3\gamma H = 37.8$$

يعد الطين الابتدائي صلباً: σ_a = **37.80 kPa** (أكبر حمل دعامة P = 271.3 kN). وعندما ينخفض التماسك إلى 20 kPa ينتقل الحفر إلى سلوك الطين اللين–المتوسط: σ_a = **46.0 kPa** ويصبح الجزء السفلي من المغلف هضبة ثابتة (P = 338.1 kN).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

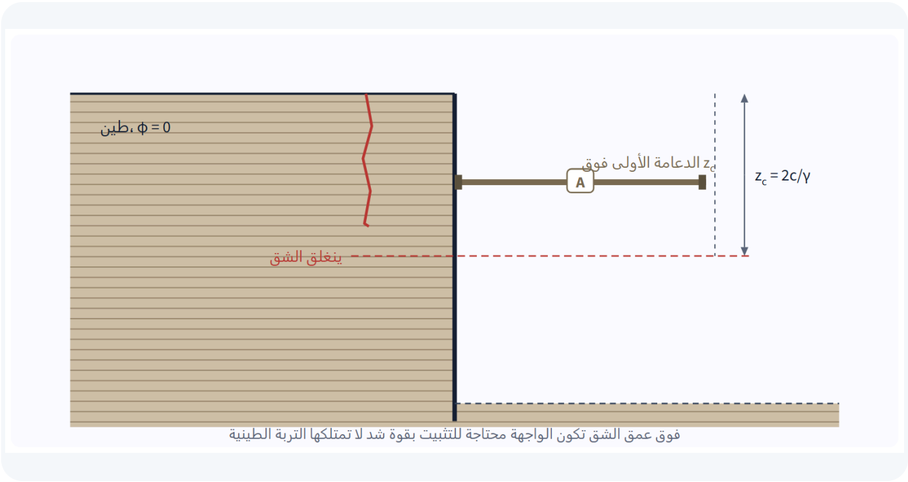
إلى جانب المغلف؛ بالوزن الحجمي؛ موضع الدعامة الأولى

الحمل الإضافي q لا يدخل في المغلف (إذ كانت المعاملات التجريبية ستطبق عليه أيضاً)؛ وإنما يؤخذ بضغطه المنتظم الخاص على الارتفاع كله، وفي الطين غير المصرف **$\Delta p_q = q$**: $K_a = 1$.

الماء: مغلفات الطين صيغ غير مصرفة تعتمد الإجهاد الكلي؛ وماء الطين داخل أصلاً في الوزن الحجمي وفي المقاومة غير المصرفة. ويرسم الماء الواقع فوق قاع الحفر ويدون، ولا يضاف حملاً مستقلاً؛ وكل ما يغيره هو وزن التربة: تحت الماء يؤخذ الوزن الحجمي المشبع، وفي الطبقة التي يقطعها الماء يؤخذ المتوسط الموزون بالسماكة للقيمتين $\gamma = (\gamma\, z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$.

شق الشد: يمكن أن يبقى وجه الطين قائماً بلا دعم حتى العمق الذي يغلق عنده شق الشد (العمق الذي ينعدم عنده ضغط Rankine الفعال للتربة المتماسكة). وعند $\varphi = 0$ تكون $K_a = 1$؛ ويجب وضع الدعامة الأولى **فوق** هذا العمق، كي لا يستند الجدار إلى وجه مكشوف لا يستطيع الطين إمساكه.

$$\Delta p_q = q \qquad z_c = \frac{2c}{\gamma}\ (q = 0), \qquad z_c = \frac{2c - q}{\gamma}\ \text{(الحمل الإضافي q)}$$



فوق عمق الشق تكون الواجهة محتاجة للتثبيت بقوة شد لا تمتلكها التربة الطينية

المسألة

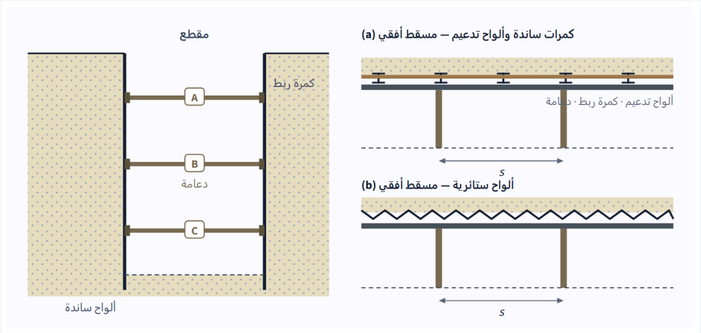
مثال

المعطيات

الحفر	**الحفر الابتدائي في المثال 1 (**$H = 7$ m، $\gamma = 18$ kN/m³، $\gamma_{sat} = 19$ kN/m³، $c = 35$ kPa**)؛ الدعامة الأولى عند** $z = 1.0$ m
الحالات	**(a) q = 0، لا يوجد ماء؛ (b) حمل إضافي** $q = 10$ kPa**؛ (c) مياه جوفية** $z_w = 3$ m

المطلوب

z_c، وما إذا كان موضع الدعامة الأولى مناسباً؛ وفي (c) $\bar{\gamma}$ و$\bar{\gamma}H/c$؛ وفي كل حالة الحمل الكلي R وأكبر حمل للدعامة.



الحل (1/2)

الحل

1 شق الشد والدعامة الأولى

$$z_c = \frac{2c}{\gamma} = \frac{2(35)}{18} = \mathbf{3.889}\ \text{m} \ > 1.00\ \text{m}\ \checkmark$$

$$z_c = \frac{2c - q}{\gamma} = \frac{70 - 10}{18} = 3.333\ \text{m} \quad (q = 10\ \text{kPa})$$

الدعامة الأولى (z = 1.0 m) أعلى بكثير من عمق الشق (3.89 m): مناسب. ومع الحمل الإضافي ينخفض الشق إلى عمق 3.33 m.

الحل (2/2)

الحل

2 الماء (c): $\bar{\gamma} = (\gamma\, z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$؛ ملخص الحالات الثلاث

$$\bar{\gamma} = \frac{18(3) + 19(4)}{7} = 18.571 \text{ kN/m}^3 \qquad \frac{\bar{\gamma}H}{c} = \frac{18.571(7)}{35} = 3.714$$

$$\sigma_a = 0.3\bar{\gamma}H = 39.00 \text{ kPa}$$

الحالة	$\gamma H/c$	σ_a (kPa)	z_c (m)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
(a) $q = 0$، لا يوجد ماء	3.60	37.80	3.89	198.4	271.3
(b) $q = 10$ kPa	3.60	37.80	3.33	268.4	334.3
(c) الماء $z_w = 3$ m	3.71	39.00	—	204.8	279.8

يضيف الحمل الإضافي $\Delta p_q = q = 10$ kPa فقط (R: 198.4 → 268.4 kN/m)؛ ويرفع الماء $\bar{\gamma}$ فقط إلى 18.57 kN/m³ (σ_a: 37.8 → 39.0 kPa).

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:

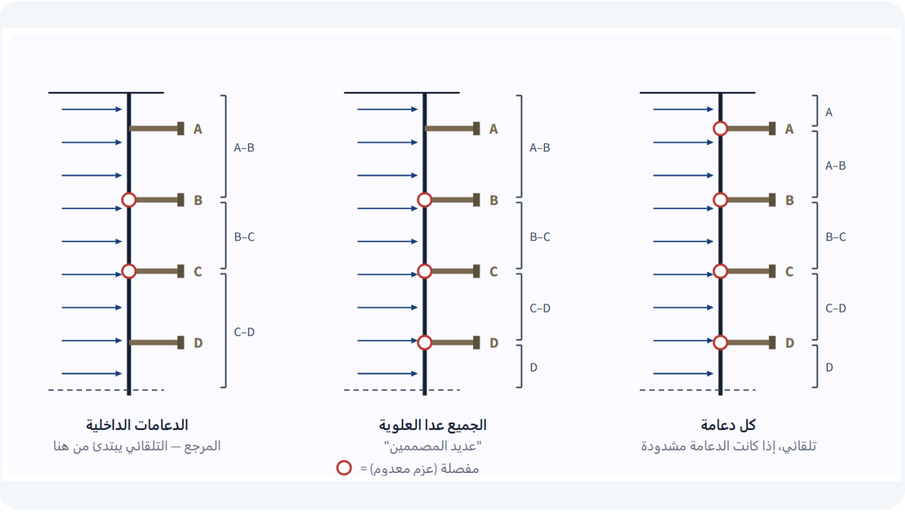
ارسم مغلف الضغط ومناسيب الدعامات. اعتبر الجدار الستائري **مفصليا عند كل منسوب دعامة** عدا الأعلى والأدنى (ويعتمد كثير من المصممين ذلك عند جميع المناسيب عدا الأعلى).

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

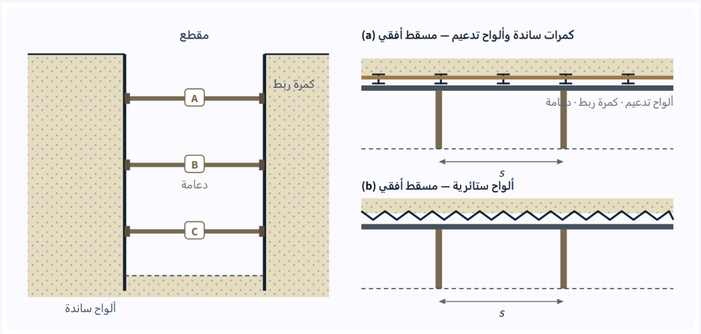
مثال

المعطيات

الحفر	$H = 7.00$ m؛ $B = 6$ m؛ الدعامات **A، B، C**؛ التباعد الأفقي $z = 1.00, 3.50, 6.00$ m (A، B، C)؛ $s = 3.00$ m
الضغط	**مثال 1: طين صلب ($\gamma H/c = 3.6$): مغلف شبه منحرف $\sigma_a = 0.3\gamma H = 37.8$ kPa (يزداد في الربع العلوي وينخفض إلى الصفر في الربع السفلي)؛ والجدار الستائري موصول بمفصل عند الدعامة B (باستثناء أعلاه وأسفله تماماً)**

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	3.50 – 0.00	99.23	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	7.00 – 3.50	99.23	4.861	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

2 الجزء الأول: توازن العزوم حول المسند الأول

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.23(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.20}$$

$$R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{54.02}\ \text{kN/m}$$

ينقل الجزء الأول إلى مسنديه الحملين 54.02 و 45.21 kN/m؛ ورد فعل الدعامة العليا (A) أكبر لأنه يتضمن أيضاً حمل الجزء الكابولي.

الحل (2/2)

الحل

3 الجزء الثاني

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{99.23(4.861 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{54.02} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{45.20}\ \text{kN/m}$$

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	1.00	54.02	54.02	**162.06**
B	3.50	45.21 + 45.21	90.42	**271.26**
C	6.00	54.02	54.02	**162.06**

أكبر حمل دعامة **P_B = 271.26 kN** (المنسوب B): 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

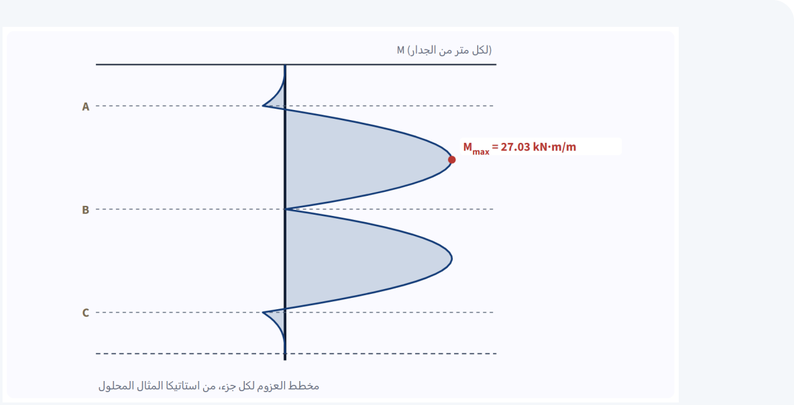
تصمم **الستارة** من الأجزاء نفسها: يوجد في كل جزء أكبر عزم انحناء (حيث تغير قوة القص إشارتها: داخل البحر أو عند الدعامة التي يلتقي فيها الجزء الكابولي بالمسند)؛ وأكبرها هو عزم التصميم لوحدة الطول من الجدار. ويستنتج معامل المقطع المطلوب من إجهاد الانحناء المسموح به، ويختار من الجدول مقطع لا تقل قيمته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

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

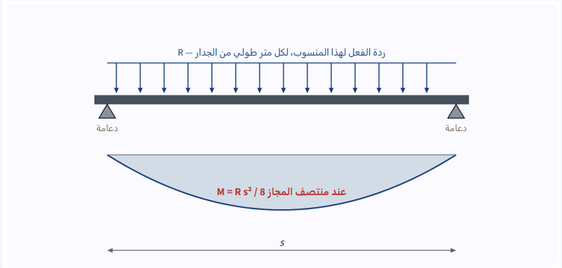
يمكن عد **كمرات الربط الأفقية** مستمرة إذا وصلت وصلاً مناسباً؛ وحفاظاً على جانب الأمان تؤخذ **مفصلية** عند الدعامات: كمرة بسيطة الإسناد بحرها s، وردة فعل المستوى R (لوحدة الطول من الجدار) حمل موزع:

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

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



مخطط العزوم لكل جزء، من استاتيكا المثال المحلول



المسألة

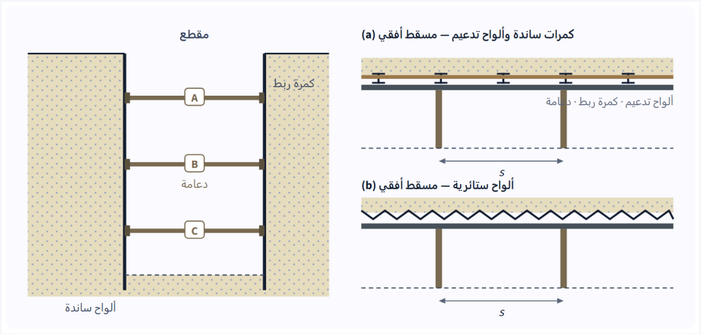
مثال

المعطيات

الحفر	الحفر في المثال 1 ($H = 7$ m)، طين صلب، ($\sigma_a = 37.8$ kPa)؛ الدعامات عند 1.0 · 3.5 · 6.0 m؛ التباعد الأفقي $s = 3.0$ m؛ مفصل عند B
الفولاذ	إجهاد الانحناء المسموح به $\sigma_{allow} = 170\,000$ 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	3.50 – 0.00	27.03	2.30
2	7.00 – 3.50	27.03	4.70

2 معامل المقطع المطلوب

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{27.03}{170{,}000} = 0.0001590\ \text{m}^3/\text{m} = \mathbf{159.0}\ \text{cm}^3/\text{m}$$

في الجدار الستائري **M_{max} = 27.03 kN·m/m** (الجزء 1، z = 2.30 m): **S ≥ 159.0 cm³/m**.

الحل (2/2)

الحل

3 كمرة الربط الأفقية: كمرة بسيطة الارتكاز عند كل منسوب (s = 3.000 m)

المنسوب	R (kN/m)	$M = R\,s^2/8$ (kN·m)	$S = M/\sigma_{allow}$ (cm³)
A	54.02	60.77	357
B	90.42	101.72	598
C	54.02	60.77	357

تقع أكبر ردة فعل **عند المستوى B** (R = 90.42 kN/m): تحدد أبعاد كمرة الربط الأفقية بالقيمة M_{max} **= 101.72 kN·m** و **S ≥ 598 cm³**؛ وقد تكون كمرات الربط الأفقية عند المستويات الأخرى أصغر.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

تأثيرات التصميم، والصنف، والانحناء، والانبعاج

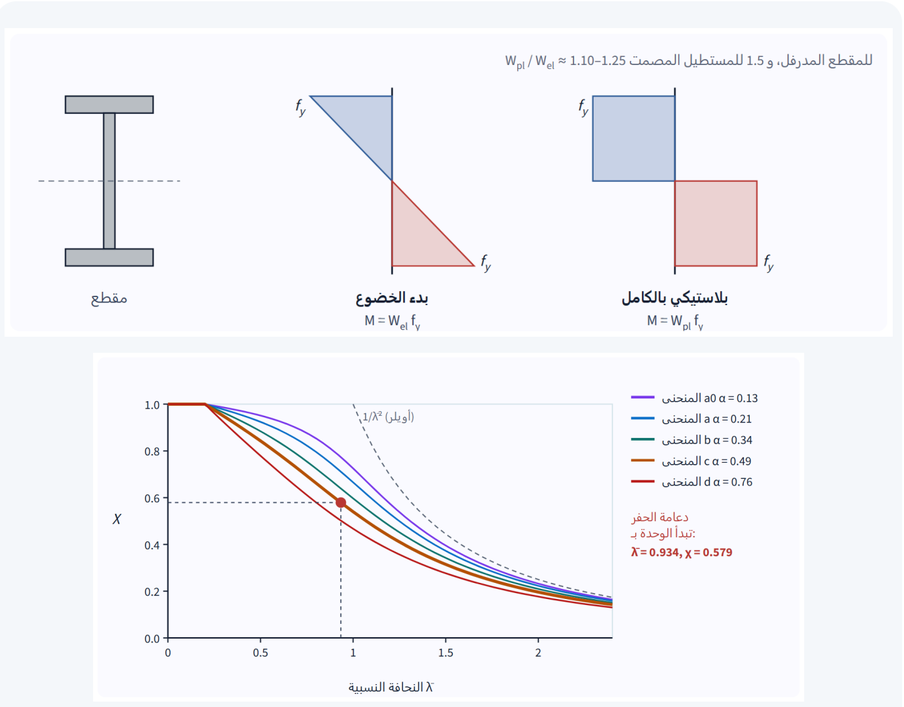
الأحمال الناتجة من المغلف هي **قيم الخدمة** (مغلف Peck حد أعلى للأحمال المقاسة)؛ وتحول مرة واحدة إلى قيمة التصميم: $E_d = \gamma_F E_k$. ويتحقق من كل عنصر بمقاومة الخضوع (f_y) لدرجة الفولاذ الخاصة به؛ ويعطى المقطع بـ**معامل المقطع** للعنصر (الجدار الستائري: W_{el} لكل متر؛ كمرة الربط الأفقية: W؛ الدعامة: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

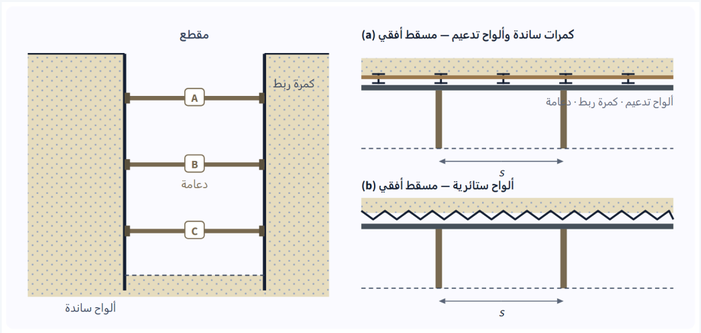
مثال

المعطيات

الحفر والأحمال	**الحفر في المثال 1 والأحمال في المثال 3:** $P_{max} = 271.26$ **kN (الدعامة B)**
العناصر	**S275 (**$f_y = 275$ **MPa)**، $\gamma_F = 1.35$، $\gamma_{M0} =$ 1.00 $\gamma_{M1} =$: **جدار ستائري** $W_{el} = 600$ **cm³/m؛** **كمرة ربط أفقية** $W_{el,y} = 1\,000$ **cm³؛ دعامة** $A =$ 65.7 **cm²، المنحنى c،** $I = 3\,598$ **cm⁴** $L_{cr} = 6.00$ **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): $\eta = \gamma_F M/(W\, f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(27.03)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.49}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(101.72)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{137.33}{275.0} = \mathbf{0.499}$$

الجدار الستائري η = **0.221**، وكمرة الربط الأفقية η = **0.499**: كلاهما كاف ($\eta \le 1$).

الحل (2/2)

الحل

2 الدعامة (التحنيب): $N_{Ed} = 1.35\,P_{max} = 1.35(271.26) = 366.20$ kN

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

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

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

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

$\eta_{strut} = 366.2 / 1{,}046.4 =$ **0.350**. 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

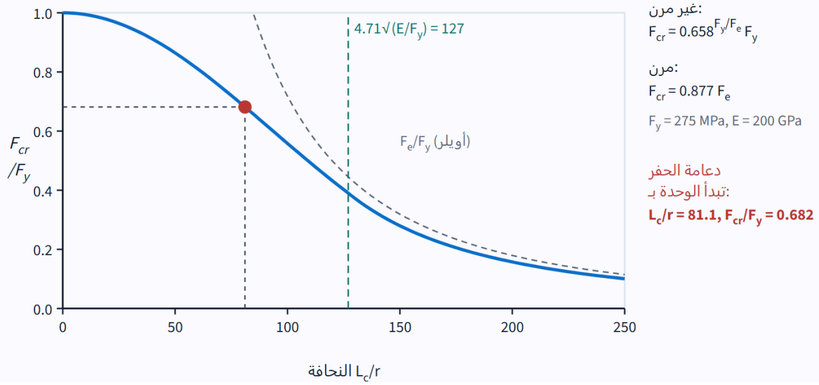
يتحقق من كل عنصر بواسطة **المقاومة الاسمية** R_n المستخرجة من أحكام الضغط والانحناء والقص. وفي طريقة LRFD تضرب الأحمال في معاملات التحميل وتخفض المقاومة بالمعامل φ؛ أما في طريقة ASD فيقارن حمل التشغيل بالمقاومة مقسومة على معامل الأمان Ω:

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

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

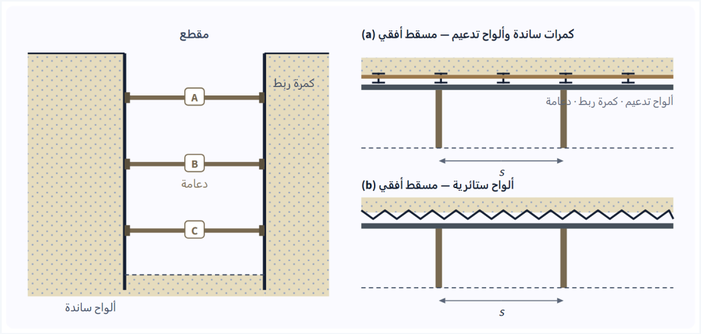
مثال

المعطيات

الحفر والأحمال	**الحفر في المثال 1 والأحمال في المثال 3:** $P_{max} = 271.26$ **kN (الدعامة B)**
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 = 271.26 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(271.26) = 434.0 \text{ kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3 \text{ kN} \quad \eta = \mathbf{0.392}$$

$$\text{ASD: } P_a = 271.26 \text{ kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4 \text{ kN} \quad \eta = \mathbf{0.368}$$

الدعامة: ASD η = **0.368**، LRFD η = **0.392**. الجدار الستائري (LRFD) 0.291، وكمرة الربط الأفقية 0.658؛ وكانت القيم وفق EN 1993-1-1 هي 0.221 و 0.499 و 0.350.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

عمود Terzaghi، تصحيح Chang

قد ينهار الحفر المدعّم حتى دون انهيار الدعامات: فوزن التربة المجاورة للحفر ووزن الحمل الإضافي يضغطان الطين الواقع أسفل القاع إلى الداخل وإلى أعلى. ويضغط عمود التربة ذو العرض B′ على الطين عند منسوب القاع، وقدرة تحمل الطين = cN_c (N_c = 5.7)؛ وتخفف مقاومة القص cH على الوجه الجانبي من هذا الحمل:

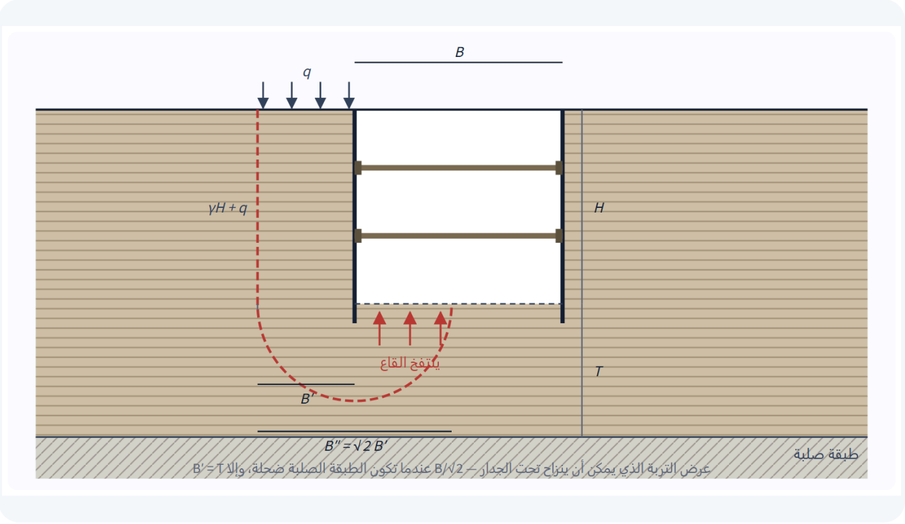
$$FS = \frac{cN_c}{\gamma H + q - cH/B'}$$

صححت المعادلة **في ثلاثة جوانب**: فالقص الجانبي لا يخفض الحمل بل **يضيف مقاومة**؛ وشريط القاع بعرض B″ يعمل كأساس محمل إلى أعلى؛ ولأن قاع الحفر غير محدود فإن N_c = 5.14 (أساس أملس):

$$FS = \frac{5.14\,c\left(1 + 0.2\dfrac{B''}{L}\right) + \dfrac{cH}{B'}}{\gamma H + q} \qquad B' = \min\left(T, \frac{B}{\sqrt{2}}\right),\ B'' = \sqrt{2}\,B'$$

B عرض الحفر، و L طول المسقط، و T سماكة الطين أسفل القاعدة؛ و q الحمل الإضافي بجوار الحفر. وفي الحفريات المنهارة كلياً تكون FS ≈ 1، وفي الحفريات المنهارة جزئياً/بقدر قليل تكون أعلى منها قليلاً؛ والمطلوب **FS ≈ 1.5**.

في الطين المتجانس إذا كان FS < 1.5 تُدق الألواح الستائرية إلى عمق أكبر (عادةً لا يزيد على B/2 تحت القاع)؛ ويتحمل الطول المدفون قوة تؤخذ من مخططات التصميم المنشورة.



المسألة

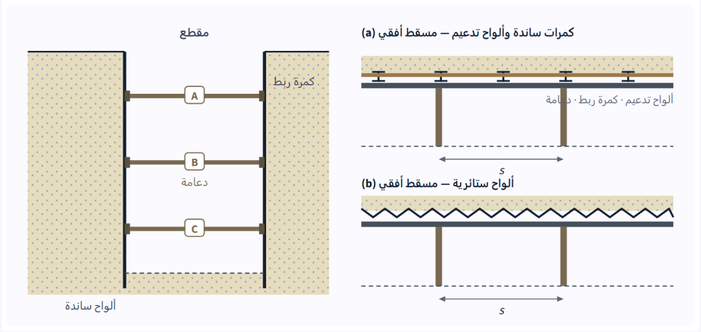
مثال

المعطيات

الحفر الابتدائي	$H = 7$ m، $B = 6$ m، $L = 20$ m؛ طين، $\gamma = 18$ kN/m³، $c = 35$ kPa، سماكة الطين تحت القاعدة $T = 4$ m؛ لا حمل إضافي
حفر المثال التعليمي	عرض 4 m وطول 15 m وعمق 6 m؛ $\gamma = 17$ kN/m³، $c = 40$ kPa؛ الطبقة الصلبة تحت القاع بمقدار 2 m

المطلوب

لكلا الحفرين: **B′** و**B″** و**FS** (≥ 1.5؟)؛ وفي الحفر الابتدائي، إذا لم توجد طبقة صلبة وكان العرض 10 m؟



الحل

الحل

1 الحفر الابتدائي: B/√2 = 4.24 m > T = 4 m، لذلك B′ = T

$$B' = T = 4.00\ \text{m} \qquad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{35(7)}{4.00}}{18(7)} = \frac{190.1 + 61.2}{126} = \mathbf{1.99} \ \geq 1.5\ \checkmark$$

2 حفر المثال التعليمي (T = 2 m ≤ B/√2 = 2.83 m: B′ = T = 2.00 m، B″ = 2.83 m)

$$FS = \frac{5.14(40)\left(1 + 0.2\frac{2.83}{15}\right) + \frac{40(6)}{2.00}}{17(6)} = \mathbf{3.27}$$

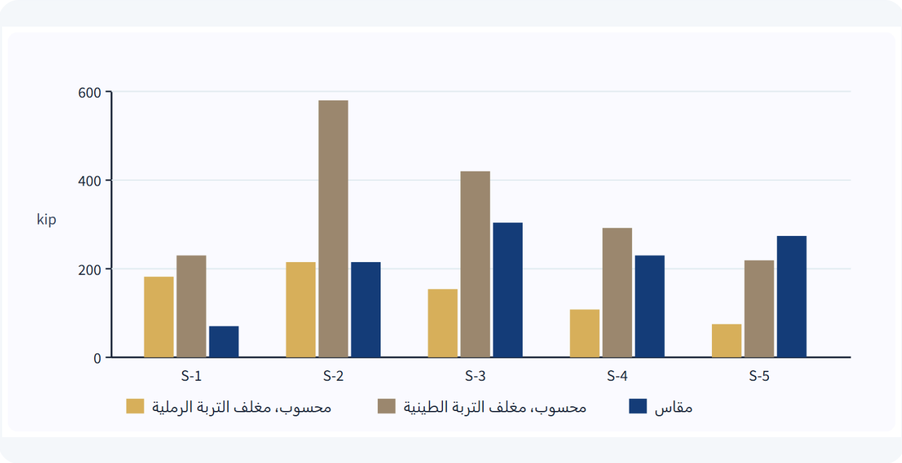
يعطي الحفر الابتدائي **FS = 1.99**، وحفر المثال التعليمي **3.27**: وكلاهما ≥ 1.5. وإذا لم تدخل الطبقة الصلبة (= B′ = B/√2) ينخفض FS في حفر المثال التعليمي إلى 2.96؛ وينخفض في الحفر الابتدائي إلى 1.80 عند عرض 10 m ودون الطبقة الصلبة (ينخفض في الاتجاه المحافظ): فيسوء انتفاخ القاع بزيادة العرض وبغياب الطبقة الصلبة.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

دراسات حالة بوسطن وشيكاغو

Boston (مقطع الاختبار B): بعمق 17.7 m وخمس دعامات؛ 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؛ وحول القطاع إلى طين مكافئ ($\gamma H/c = 12.08$، $\gamma_{av} = 19.76$ kN/m³، $c_{av} = 34.91$ kPa، $\sigma_a = 282.0$ kPa، > 4). 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.



ما تفترضه الطريقة

النظرية

جمعت المغلفات من حفريات يزيد عمقها على نحو 6 m؛ **المغلف لا يمثل الضغط الفعلي المؤثر على الجدار في أي لحظة:** فهو يعطي حمل دعامة آمناً ولا يعطي انحراف الجدار. الطين **غير مصّرف**؛ ولا يؤخذ ضغط ماء المسام في الحساب بصورة منفصلة.

تحسب متوسطات الطينات المتعددة بحسب السماكة (c_{av}، γ_{av})؛ ويختار $\gamma H/c$ بهذه المتوسطات. ويضاف الحمل الإضافي إلى جانب المغلف ($\Delta p = q$)، ولا يغير الماء سوى الوزن الحجمي.

يعد **الجدار الستائري** سلسلة من المفصلات المحددة؛ ولا تستخدم صلابته الذاتية ولا الغرس تحت قاع الحفر. أما **كمرات الربط الأفقية** فهي بحور بسيطة بين الدعامات (محافظة). ويتحقق من الفولاذ وفق EN 1993-1-1 (ولا يصمم الصنف 4) أو وفق AISC 360-22.

يتحقق من انتفاخ القاع بمعادلة Chang المصححة؛ ولا يحتسب غرس الجدار الستائري تحت القاع (في جانب الأمان). وفي حالة الطبقات المتعددة تستخدم الصيغة مع الامتداد الطبقي الخاص بـ GeoTerva.

يتوقع أثناء الإنشاء حدوث حركة جانبية وفقدان للتربة في المحيط؛ وإذا وجدت طبقة صلبة فإن الجدران الستائرية تغرس فيها. وفي الطين الرخو عند $\gamma H/c \approx 8$ قد تحدث إزاحات كبيرة وانهيار للدعامات.

النقاط الرئيسية

المغلف: $\gamma H/c > 4$ طري إلى متوسط ($\sigma_a = \max(\gamma H[1 - 4c/\gamma H], 0.3\gamma H)$)؛ ≥ 4 صلب (≈ $0.3\gamma H$). مثال: $\gamma H/c = 3.6$، $\sigma_a = 37.8$ kPa

الحمل الإضافي والماء: يضاف $\Delta p = q$ بصورة مستقلة؛ ولا يغير الماء إلا γ. **شق الشد** $z_c = 2c/\gamma = 3.89$ m؛ والدعامة الأولى (1.0 m) تقع فوقه

حمل الدعامة: يقسم المغلف إلى أجزاء عند المفصلات، وتوجد ردود الفعل بالاستاتيكا؛ وفي المثال $P_B = 271.26$ kN (مجموع رد فعلين)

تحديد الأبعاد: الجدار الستائري ($S = 159$ cm³/m) $M_{max} = 27.03$ kN·m/m، وكمرة الربط الأفقية $M = R\,s^2/8 = 101.72$ kN·m ($S = 598$ cm³؛ $\sigma_{allow} = 170$ MPa)

الفولاذ: $\eta = 0.221 / 0.499 / 0.350$ EN 1993-1-1 (الجدار الستائري / كمرة الربط الأفقية / الدعامة)؛ AISC LRFD الدعامة 0.392، ASD 0.368

انتفاخ القاعدة: $FS = (5.14c(1 + 0.2B''/L) + cH/B')/(\gamma H + q) \geq 1.5$؛ وفي الحفر الابتدائي 2.00، وفي حفر المثال التعليمي 3.27

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

.Bjerrum, L. and Eide, O. (1956). Stability of strutted excavations in clay. Géotechnique, 6(1), 32–47

Chang, M.F. (2000). Basal stability analysis of braced cuts in clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126(3), .276–279

.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 مستخرجة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة نفسها؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. والمثال المحلول في صفحة الوحدة هو هذا الحفر أيضاً ($H = 7$ m، $\gamma = 18$ kN/m³، $c = 35$ kPa، الدعامات عند 1 · 3.5 · 6 m).

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل في GeoTerva قطاع الطين في الحفر الخاص بك ومناسيب الدعامات والحمل الإضافي ومنسوب الماء وعناصرك؛ وتعطي الوحدة معاً المغلف وشق الشد وأحمال الدعامات وعزوم الجدار الستائري وكمرات الربط الأفقية والتحقق من الفولاذ وانتفاخ قاع الحفر.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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