شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الجدران الستائرية والحفريات المدعمة

طين فوق الرمل: حفر مدعّم

المحاضرة: الرمل والطين في الحفر نفسه (التماسك المكافئ عند Peck)؛ والمغلف وأحمال الدعامات وتحديد أبعاد الجدار الستائري وكمرة الربط والتحقق من الفولاذ وانتفاخ قاع الحفر؛ ومثال محلول لكل موضوع.

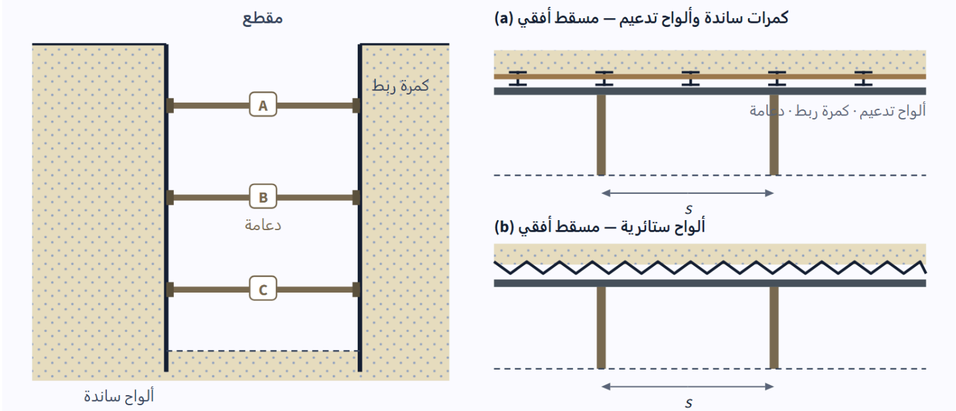
تدعيم الحفر

الطين المكافئ (رمل + طين)

الدعامة · كمرة الربط · الجدار الستائري

EN 1993 · AISC 360

انتفاخ قاع الحفر



يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

لماذا لا يكون الضغط في الحفر المدعّم **وفق Rankine**، وكيف تُنشأ المغلفات؛ مغلفات الطين (بدلالة $\gamma H/c$)

عندما يمر الحفر عبر الرمل والطين يستخدم **التماسك المكافئ** c_{av} عند Peck و γ_a؛ ويختار المغلف بحسب النسبة $\gamma_a H/c_{av}$

كيف يقوم حفر National Plaza (شيكاغو) أولاً بمتوسط **عدة أنواع من الطين** مرجحاً بالسمك ثم بدمجها مع الرمل

إضافة الحمل الإضافي إلى جانب المغلف؛ وتحديد **أحمال الدعامات** ومقاطع **الجدار الستائري** و **كمرة الربط الأفقية** انطلاقاً من المغلف

التحقق من الفولاذ وفق **EN 1993-1-1 و AISC 360-22**؛ وفحص **انتفاخ القاعدة** في قطاع طبقي

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

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

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

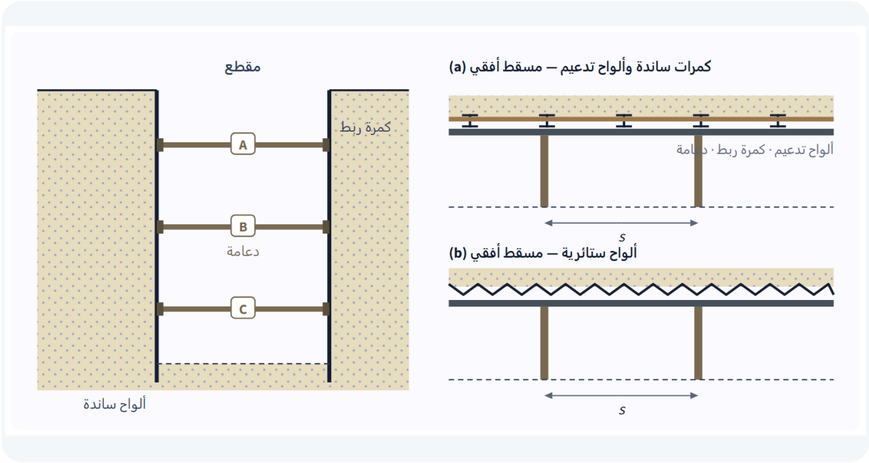
3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

حفر المثال: 3 m من الرمل في الأعلى ($\gamma = 17$ kN/m³، $\varphi' = 30°$) فوق الطين ($\gamma = 18$ kN/m³، $c = 35$ kPa)؛ $H = 7.00$ m و $B = 6.00$ m؛ والدعامات على أعماق 1.00 · 3.50 · 6.00 m، والتباعد الأفقي $s = 3.00$ m. والقوى 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

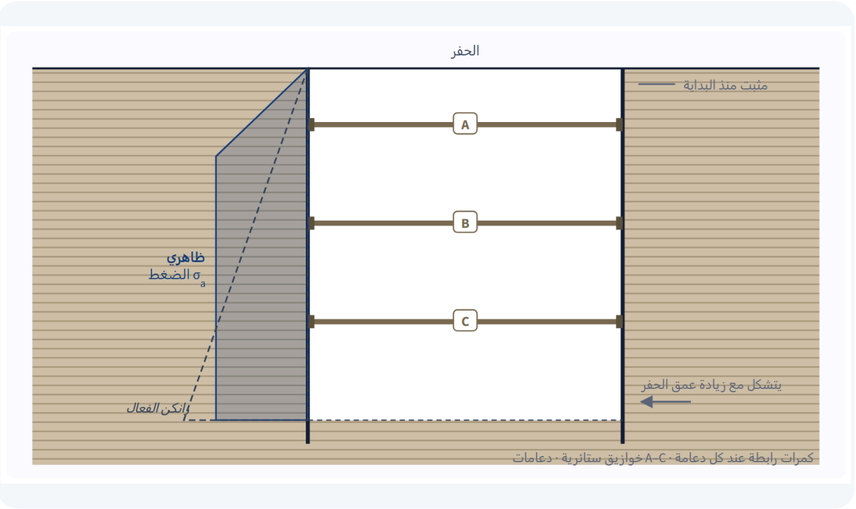
يدور الجدار الساند الكابولي حول قاعدته، ويصفه ضغط Rankine الفعال (صفر في الأعلى وأكبر ما يكون في الأسفل) وصفاً جيداً. **أما الجدار المدعّم فيتحرك في الاتجاه المعاكس**: توضع الدعامة الأولى والحفر ما زال ضحلاً، فلا يتحرك الجزء العلوي تقريباً؛ وتحفر كل مرحلة لاحقة قبل تركيب الدعامة، وتطول المدة الفاصلة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

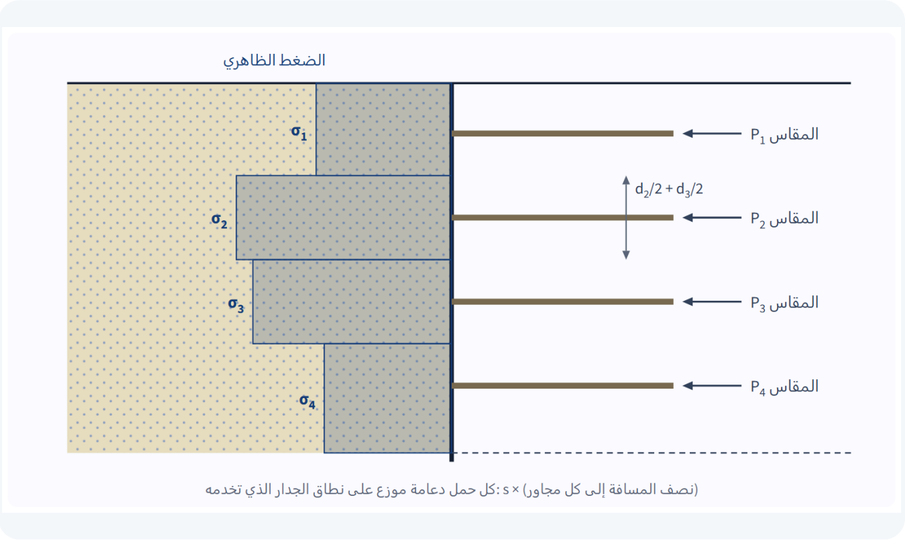
يتغير الضغط من نقطة إلى أخرى، ويجب أن تحسب أبعاد كل دعامة وفق **أكبر حمل** قد تتعرض له. وتبنى المغلفات لهذا الغرض: ففي حفر مجهز بأجهزة قياس يقاس حمل كل دعامة، ويقسم على شريط الجدار الذي تسنده الدعامة (التباعد الأفقي s × نصف المسافتين إلى الدعامة العليا والسفلى) ويحول على هذا الشريط إلى **ضغط ظاهري**:

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

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

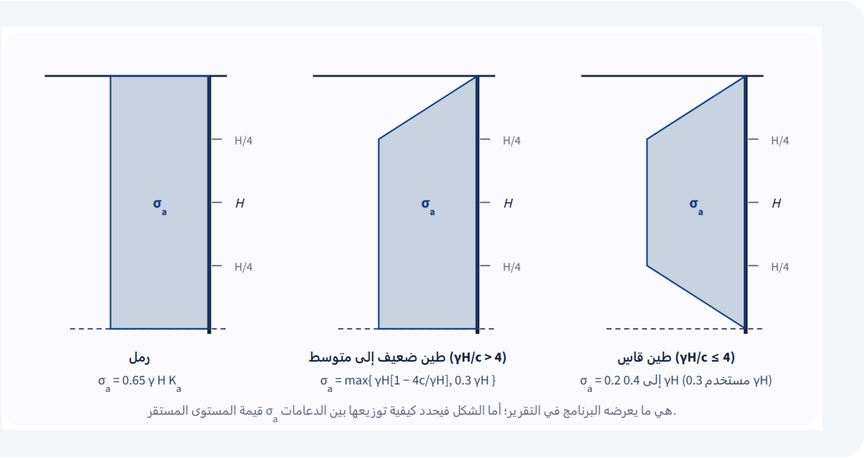
من لينة إلى متوسطة أو صلبة: γH/c

يتحدد شكل المغلف في الطين بـ **عدد الاستقرار γH/c** (c التماسك غير المصرف، φ = 0). أما **الطين الرخو إلى المتوسط** الذي يبلغ فيه γH/c > 4 فيدفع بالحفر إلى ما يتجاوز مقاومته بكثير؛ بينما يكون **الطين الجاسئ** أقرب إلى نطاقه المرن:

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

يبدأ مغلف الطين اللين–المتوسط من الصفر عند السطح، ويزداد في الربع العلوي، ثم يثبت عند قيمة ثابتة حتى القاعدة؛ أما مغلف الطين الصلب فيزداد في الربع العلوي، ويثبت في النصف الأوسط، ويعود إلى الصفر في الربع السفلي. ويحكم الأكبر من العبارتين.

الشروط: عمق الحفر ≲ 6 m؛ الماء تحت القاع؛ الطين غير مصّرف (لا يؤخذ ضغط ماء المسام في الحساب).



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

تماسك Peck المكافئ

النظرية

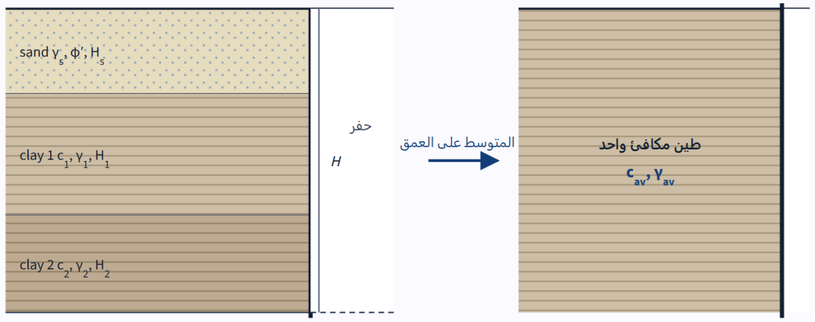
إذا اشتمل الحفر على الرمل والطين معاً حل محل قطاع Peck **طين واحد**: إذ يؤخذ متوسط المقاومة التي تستطيع التربة تعبئتها على امتداد الارتفاع. ويسهم الرمل باحتكاك وزنه الذاتي، ويسهم الطين بمقاومة الانضغاط غير المحصور (مخفضة للانهيار التدريجي):

$$c_{av} = \frac{1}{2H}\left[\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + (H - H_s)\, n' q_u\right] \qquad \gamma_a = \frac{1}{H}\left[\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c\right]$$

H_s، γ_s، φ'_s: ارتفاع الرمل ووزنه الحجمي وزاوية الاحتكاك الفعالة له؛ K_s معامل الضغط الجانبي للرمل (≈ 1)؛ $q_u = 2c$ مقاومة الانضغاط غير المحصور للطين، γ_c وزنه الحجمي المشبع؛ n' معامل الانهيار التدريجي، 0.5–1.0 (المتوسط 0.75).

تطبق مغلفات الطين بالقيمتين c_{av} و γ_a على كامل الارتفاع؛ ويختار المغلف بحسب $\gamma_a H/c_{av}$.

إذا وجد أسفل الرمل عدة طبقات من الطين فإن المصدر يحسب أولاً متوسطها بحسب السماكة ($c_{av} = \Sigma c_i H_i/\Sigma H_i$، γ_{av})، ثم يجمع هذا الطين المكافئ مع الرمل (كما في حالة National Plaza).



يُجمع كلاهما على كامل الارتفاع، ثم تُطبق قاعدة الطين · الطين: $n' q_u H$ · الرمل: احتكاك الوزن الذاتي $\gamma K_s H_s^2 \tan\varphi'$

المسألة

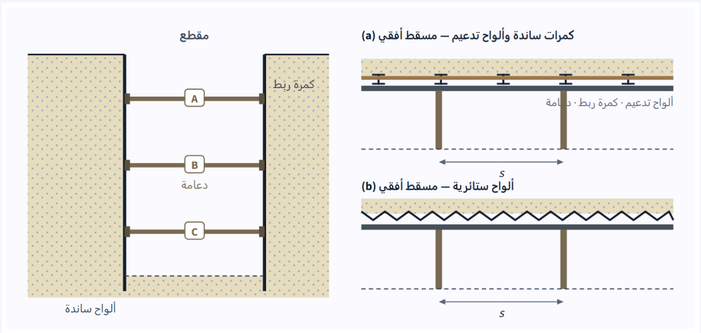
مثال

المعطيات

القطاع	في الأعلى رمل بسمك $H_s = 3$ m ($\gamma_s = 17$ kN/m³، $\varphi'_s = 30^\circ$، $K_s = 1$)، وتحته طين ($\gamma_c = 18$ kN/m³، $c = 35$ kPa)
الحفر والمعامل	$H = 7.0$ m؛ $n' = 0.75$ (المتوسط)؛ كذلك n' = 0.5 و1.0

المطلوب

$\gamma_a H/c_{av}$، γ_a، c_{av}، ونوع المغلف و σ_a؛ والنتيجة مع تغير n'.



الحل (1/2)

الحل

1 التماسك المكافئ والوزن الحجمي (n′ = 0.75)

$$c_{av} = \frac{1}{2(7)}\left[17(1)(3)^2\tan 30^\circ + (7-3)(0.75)(2\cdot 35)\right] = \frac{88.33+210.0}{14} = \mathbf{21.31}\ \text{kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(3)+(7-3)18}{7} = \mathbf{17.57}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}} \qquad \frac{\gamma_a H}{c_{av}} = \frac{17.57(7)}{21.31} = \mathbf{5.77}\ > 4$$

الطين المكافئ: γ_a = 17.57 kN/m³، c_{av} = **21.31 kPa**؛ $\gamma_a H/c_{av}$ = **5.77** > 4 ← مغلف الطين الطري إلى المتوسط.

الحل (2/2)

الحل

2 مغلف الطين اللين–المتوسط وحساسية n′

$$\sigma_a = \gamma_a H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_a H}\right] = 17.57(7) - 4(21.31) = \mathbf{37.75}\ \text{kPa}$$

P_{max} (kN)	σ_a (kPa)	$\gamma_a H/c_{av}$	c_{av} (kPa)	n′
424.5	57.75	7.54	16.31	0.50
277.5	37.75	5.77	21.31	**0.75**
271.2	36.90	4.67	26.31	1.00

الطين المكافئ: $\gamma_a H/c_{av} = 5.77 > 4$، c_{av} = **21.31 kPa**: مغلف الطين اللين إلى المتوسط، **σ_a = 37.75 kPa**.
وإذا أخذ $n' = 0.5$ تنخفض c_{av} إلى 16.31 وترتفع σ_a إلى 57.8 kPa: فمعامل الانهيار التدريجي يؤثر كثيرا في النتيجة.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

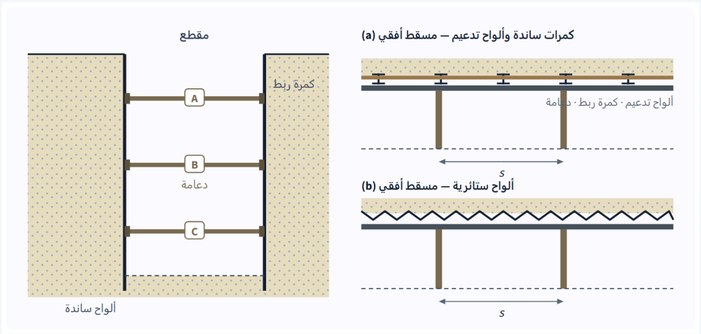
مثال

المعطيات

الحفر	$H = 70$ ft $= 21.34$ m عمق، تحته ست دعامات؛ 13 ft من الرمل أسفل الردم، وأربعة طين (الجدول أدناه، النظام الدولي)
المعاملات	$K_s = 1$,$\varphi'_s = 30^\circ$,$n' = 0.75$

المطلوب

متوسط الطين الموزون بالسماكة $c_{av,clay}$؛ وc_{av} وγ_{av} و $\gamma H/c$ وσ_a.



الحل (1/2)

الحل

1 القطاع (SI) ومتوسط الطين على امتداد السماكة

الطبقة	السماكة (m)	γ (kN/m³)	c (kPa)	حد المساهمة (kN/m)
ردم رملي	3.96	17.28	—	156.6
طين 1	10.06	19.95	19.2	289.0
طين 2	3.35	20.42	33.5	168.6
طين 3	1.83	21.21	95.8	262.7
طين 4	2.13	21.21	191.5	612.9

$$c_{av,clay} = \frac{\Sigma c_i H_i}{\Sigma H_i} = \mathbf{51.16}\ \text{kPa}$$

المتوسط الموزون بالسماكة للطبقات الطينية الأربع **51.16 kPa**؛ وحد الرمل $\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s = 156.6$، وحد الطين $n' q_u \Sigma H_i = 1{,}333.2$ kN/m.

الحل (2/2)

الحل

2 التماسك المكافئ والوزن الحجمي والمغلف

$$c_{av} = \frac{\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + n' q_u \Sigma H_i}{2H} = \frac{156.6 + 1{,}333.2}{2(21.34)} = \mathbf{34.91}\ \text{kPa}$$

$$\gamma_{av} = \frac{\Sigma \gamma_i H_i}{H} = \mathbf{19.76}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}} \qquad \frac{\gamma_{av} H}{c_{av}} = \frac{19.76(21.34)}{34.91} = \mathbf{12.08}\ > 4$$

$$\sigma_a = \gamma_{av} H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_{av} H}\right] = \mathbf{282.0}\ \text{kPa}$$

يطبق مغلف الطين اللين إلى المتوسط: $\gamma_{av}H/c_{av}$ = 12.08). وتوجد مقارنة هذا المغلف بأحمال كمرات الربط الأفقية المرصودة في القسم «المغلفات في الحفريات الفعلية» (مغلف Peck يعادل ≈ 1.8 مرة).

σ_a = 282.0 kPa (c_{av} = 34.91 kPa، γ_{av} = 19.76 kN/m³،

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

يضاف إلى جانب المغلف

النظرية

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 $\mathbf{\Delta p_q}$: $K_a = 1$ **q =.**

الماء: مغلفات الطين غير مصرفة، وهي نماذج بدلالة الإجهاد الكلي؛ فماء الطين محتسب أصلاً في الوزن الحجمي وفي مقاومة القص غير المصرفة. ويرسم الماء الواقع فوق قاع الحفر ويدون، ولا يضاف كحمل منفصل؛ وإنما يغير وزن التربة فقط: الوزن الحجمي المشبع تحت الماء، وفي الطبقة التي يقطعها الماء المتوسط الموزون بالسمك للقيمتين.

بما أن سماكة طبقة الرمل تحدد الطين المكافئ، فإن **ترتيب الطبقات** في القطاع يؤثر مباشرة في النتيجة: إذ تتغير c_{av} كلما ازدادت سماكة الرمل (المثال أدناه).

$$\Delta p_q = K_a q = q \;\; (\varphi = 0 \Rightarrow K_a = 1)$$

$$\gamma = \frac{\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w)}{H}$$

المسألة

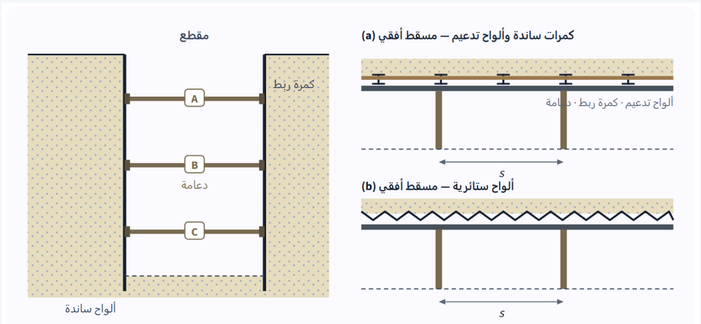
مثال

المعطيات

الحفر	**الحفر في المثال 1 ($H = 7$ m، $n' = 0.75$): رمل 3 m (الحفر الابتدائي)**
التغييرات	**(أ) رمل بسماكة 5 m (طين 2 m)؛ (ب) حمل إضافي سطحي $q = 10$ kPa**

المطلوب

في كل حالة: c_{av} و$\gamma_a H/c_{av}$ وσ_a والحمل الكلي R وأكبر حمل للدعامة.



الحل (1/2)

الحل

1 (a) رمل 5 m: الطين المكافئ بعد إعادة الانضمام

$$c_{av} = \frac{1}{14}\left[17(5)^2 \tan 30^\circ + (2)(0.75)(70)\right] = 25.03 \text{ kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(5) + 2(18)}{7} = 17.29 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_a = \max\left(\gamma_a H - 4c_{av},\ 0.3\gamma_a H\right) = \max(20.91, 36.31) = \mathbf{36.31} \text{ kPa}$$

عندما يبلغ سمك الرمل 5 m يصبح التماسك المكافئ 21.3 → **25.0 kPa**، ويحدد المُغلَّف القيمة **$0.3\gamma_a H = 36.3$ kPa**.

الحل (2/2)

الحل

2 (b) الحمل الإضافي: $\Delta p_q = q = 10$ kPa منفصلاً؛ خلاصة الحالات الثلاث

الحالة	c_{av} (kPa)	γ_a (kN/m³)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
الحفر الابتدائي (رمل 3 m)	21.31	17.57	5.77	37.75	231.2	277.5
(a) رمل 5 m	25.03	17.29	4.84	36.31	222.4	266.9
q = 10 kPa (b)	21.31	17.57	5.77	37.75	301.2	351.0

عندما تزداد سماكة الرمل تتغير c_{av} من 21.3 إلى 25.0 kPa، ويهبط المغلف من 37.8 إلى **36.3 kPa** (فالرمل الاحتكاكي يضيف مقاومة أكبر من الطين؛ وأصبح الحد $0.3\gamma_a H$ هو الحاكم). ولا يؤثر الحمل الإضافي في المغلف، بل يضيف $\Delta p_q = 10$ kPa فقط (R من 231.2 إلى 301.2 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:

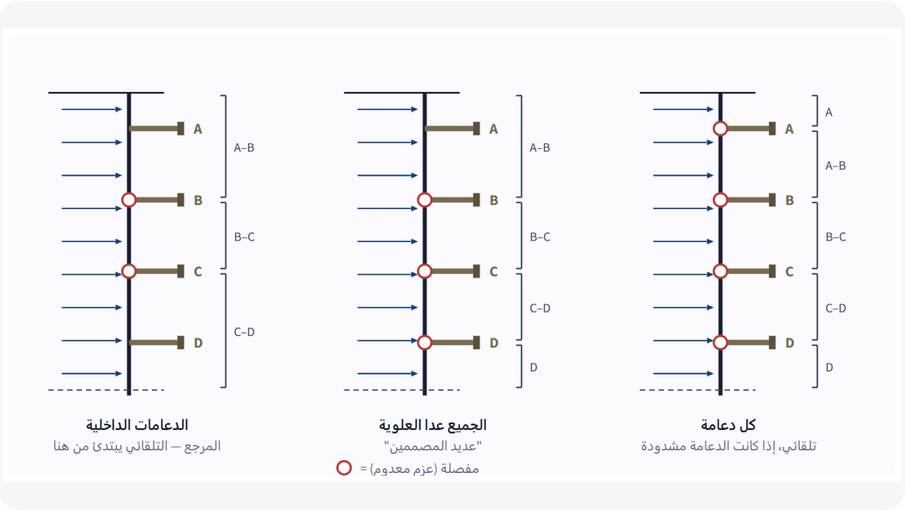
ارسم مغلف الضغط ومناسيب الدعامات. اعتبر الجدار الستائري **مفصليا عند كل منسوب دعامة** عدا الأعلى والأدنى (ويعتمد كثير من المصممين ذلك عند جميع المناسيب عدا الأعلى).

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

الحفر

الدعامات؛ $H = 7.00$ m؛ $B = 6$ m

التباعد الأفقي؛ (A، B، C) $z = 1.00, 3.50, 6.00$ m

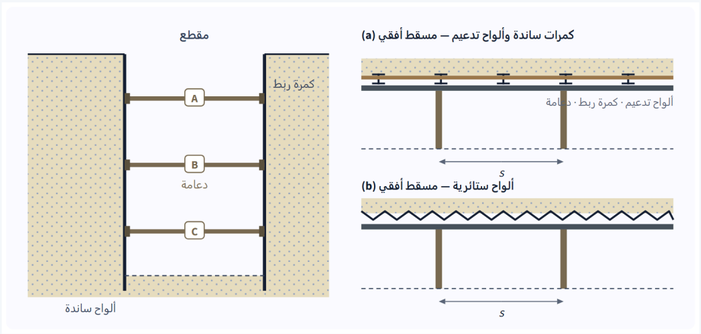
$s = 3.00$ m

الضغط

المثال 1: طين مكافئ، مغلف طري إلى متوسط $\sigma_a = 37.75$ kPa **(يزداد في الربع العلوي ويثبت حتى القاعدة)؛ الجدار الستائري مفصلي عند الدعامة B (عدا الأعلى والأسفل)**

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	99.09	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	7.00 – 3.50	132.12	5.250	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

2 الجزء الأول: توازن العزوم حول المسند الأول

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.09(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.14}$$

$$R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{53.95}\ \text{kN/m}$$

ينقل الجزء الأول إلى مسنديه الحملين 53.95 و 45.14 kN/m؛ ورد فعل الدعامة العليا (A) أكبر لأنه يتضمن أيضاً حمل الجزء الكابولي.

الحل (2/2)

الحل

3 الجزء الثاني

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{132.12(5.250 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{92.49} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{39.64}\ \text{kN/m}$$

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	53.95	53.95	**161.85**
B	3.50	39.64 + 45.14	84.78	**254.34**
C	6.00	92.49	92.49	**277.47**

أكبر حمل دعامة **P_C = 277.47 kN** (المنسوب C): 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:

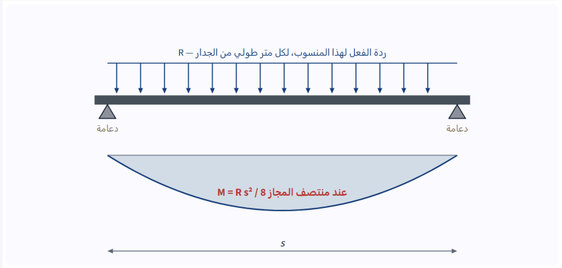
$$M_{max} = \max_{parts} |M| \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

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

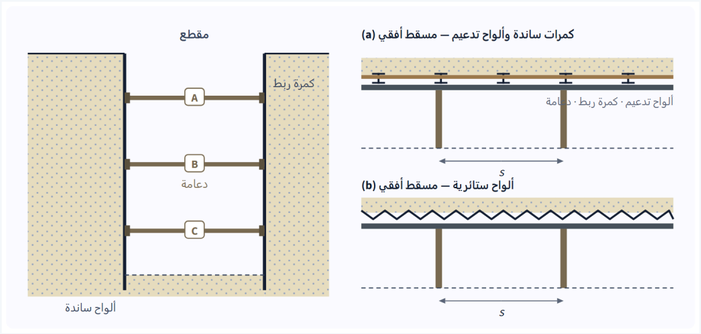
مثال

المعطيات

الحفر	**الحفر في المثال 1 ($H = 7$ m)، طين مكافئ، ($\sigma_a = 37.75$ kPa)؛ الدعامات عند 1.0 · 3.5 · 6.0 m؛ $s = 3.0$ m؛ مفصلة 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	26.99	2.30
2	7.00 – 3.50	20.81	4.55

2 معامل المقطع المطلوب

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{26.99}{170{,}000} = 0.0001588\ \text{m}^3/\text{m} = \mathbf{158.8}\ \text{cm}^3/\text{m}$$

في الجدار الستائري **M_{max} = 26.99 kN·m/m** (الجزء 1، عند z = 2.30 m): **S ≥ 158.8 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 s²/8 (kN·m)	S = M/σ$_{allow}$ (cm³)
A	53.95	60.69	357
B	84.78	95.38	561
C	92.49	104.05	612

تقع أكبر ردة فعل **عند المستوى C** (R = 92.49 kN/m): تحدد أبعاد كمرة الربط الأفقية بالقيمة **M_{max} = 104.05 kN·m** و **S ≥ 612 cm³**؛ وقد تكون كمرات الربط الأفقية عند المستويات الأخرى أصغر.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

تأثيرات التصميم، والصنف، والانحناء، والانبعاج

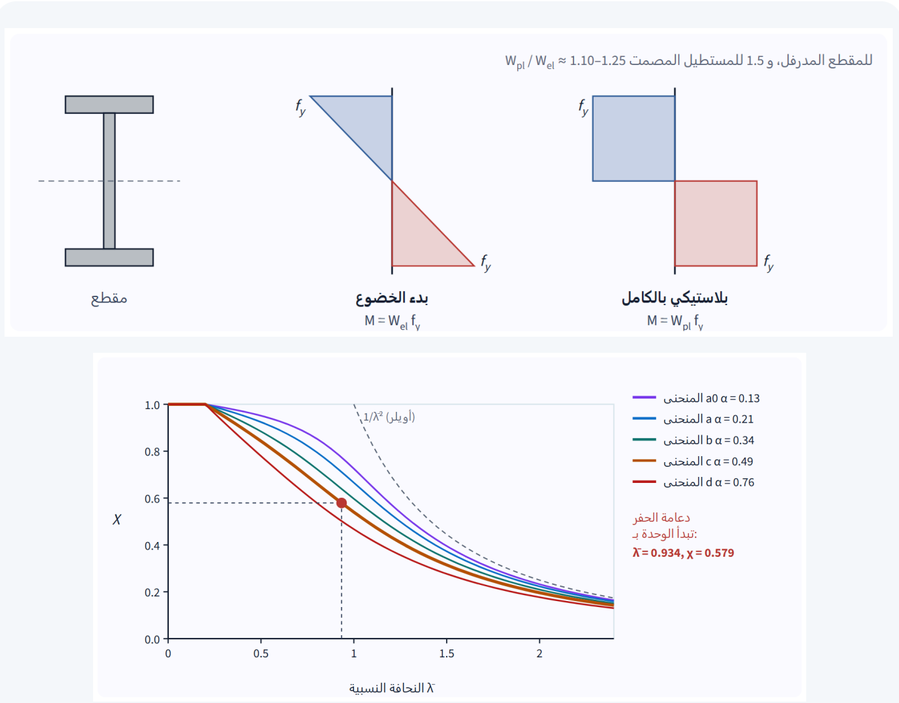
الأحمال الناتجة من المغلف هي **قيم الخدمة** (مغلف Peck حد أعلى للأحمال المقاسة)؛ وتحول مرة واحدة إلى قيمة التصميم: $E_d = \gamma_F E_k$. ويتحقق من كل عنصر بمقاومة الخضوع (f_y) لدرجة الفولاذ الخاصة به؛ ويعطى المقطع بـ**معامل المقطع** للعنصر (الجدار الستائري: W_{el} لكل متر؛ كمرة الربط الأفقية: W؛ الدعامة: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

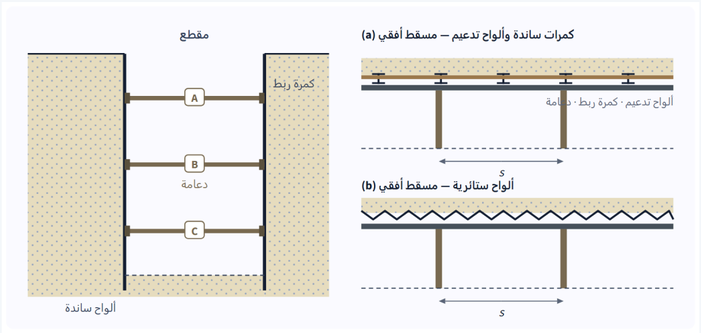
مثال

المعطيات

الحفر والأحمال	**الحفر في المثال 1 والأحمال في المثال 4:** $P_{max} = 277.47$ **kN**
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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(26.99)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.44}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(104.05)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{140.47}{275.0} = \mathbf{0.511}$$

الجدار الستائري $\eta = \mathbf{0.221}$، وكمرة الربط الأفقية $\eta = \mathbf{0.511}$: كلاهما كاف ($\eta \le 1$).

الحل (2/2)

الحل

2 الدعامة (التحنيب): $N_{Ed} = 1.35\,P_{max} = 1.35(277.47) = 374.58$ kN

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

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

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

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

$\eta_{strut} = 374.6 / 1{,}046.4 =$ **0.358**. 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 ↗

النظرية

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

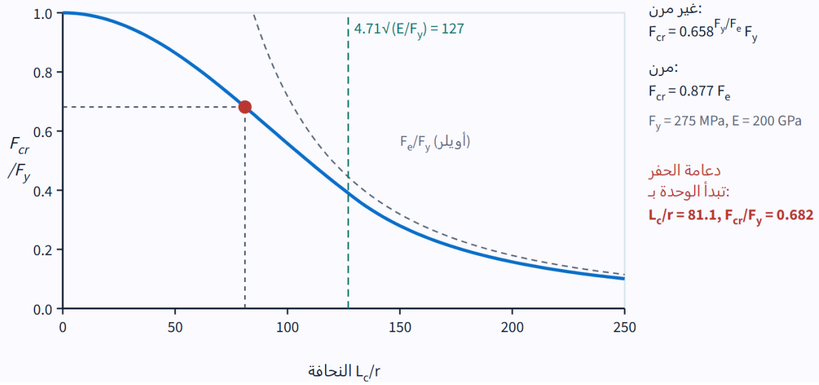
يتحقق من كل عنصر بواسطة **المقاومة الاسمية** R_n المستخرجة من أحكام الضغط والانحناء والقص. وفي طريقة LRFD تضرب الأحمال في معاملات التحميل وتخفض المقاومة بالمعامل φ؛ أما في طريقة ASD فيقارن حمل التشغيل بالمقاومة مقسومة على معامل الأمان Ω:

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

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

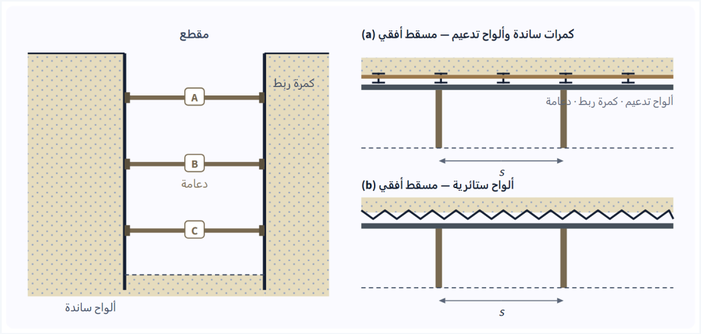
مثال

المعطيات

الحفر والأحمال	**الحفر في المثال 1 والأحمال في المثال 4:** $P_{max} = 277.47$ **kN**
العناصر	**عناصر المثال 6 (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 = 277.47 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(277.47) = 444.0 \text{ kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3 \text{ kN} \quad \eta = \mathbf{0.401}$$

$$\text{ASD: } P_a = 277.47 \text{ kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4 \text{ kN} \quad \eta = \mathbf{0.376}$$

الدعامة: ASD η = **0.376**، LRFD η = **0.401**. الجدار الستائري (LRFD) 0.291، وكمرة الربط الأفقية 0.673؛ وكانت القيم وفق EN 1993-1-1 هي 0.221 و 0.511 و 0.358.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

الطين الموجود أدناه يحمل، والطبقات المجاورة تُحدث قصاً وتحمل أحمالاً

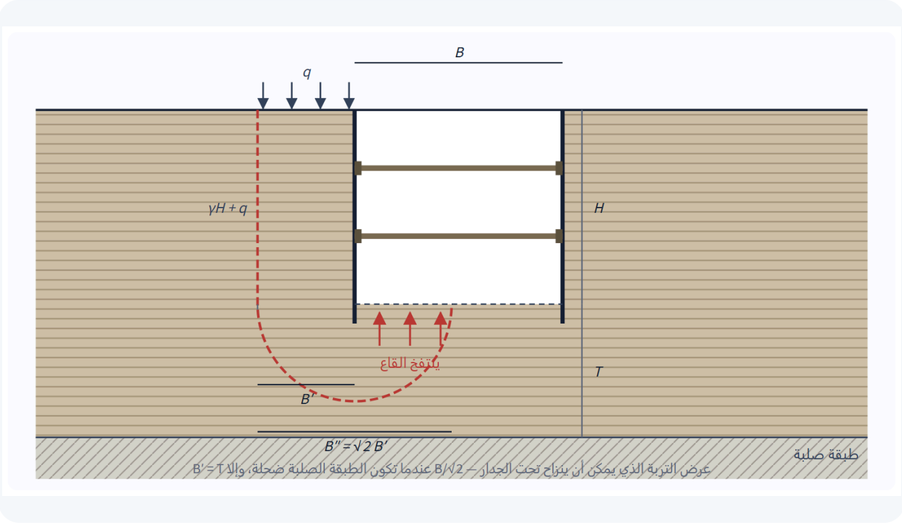
النظرية

قد ينتفخ قاع الحفر في الطين إلى الأعلى بتأثير وزن التربة المجاورة (عمود Terzaghi وتصحيح Chang). اشتقت الصيغة للطين المتجانس؛ وتستخدمها الوحدة **في القطاع الطبقي باستخدام امتداد GeoTerva**:

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

c: الطين تحت القاع (حد قدرة التحمل)؛ **c_{side}**: متوسط التماسك على الارتفاع المسنود (يؤخذ الرمل بقيمة صفر؛ حد القص الجانبي)؛ **$\sigma_v(H)$**: إجهاد الغطاء الترابي الكلي عند منسوب القاع على حافة الحفر ($\Sigma\gamma_i H_i$).

B عرض الحفر، L طول المسقط، T الطبقة الصلبة تحت القاع؛ ولا يحتسب غرس الجدار الستائري (في جانب الأمان). ومعامل الأمان المطلوب **1.5** ≈ FS.



المسألة

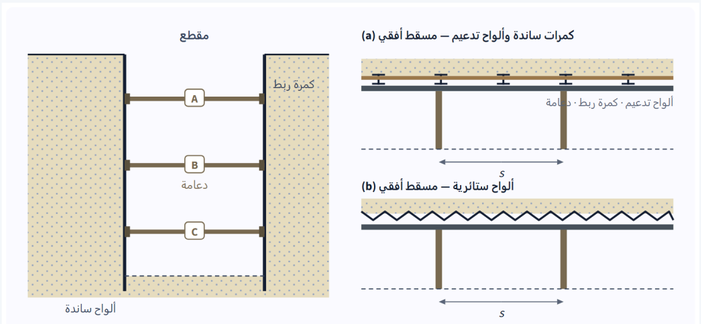
مثال

المعطيات

الحفر الابتدائي	$H = 7$ m، $B = 6$ m، $L = 20$ m، طين $T = 4$ m **تحت القاع؛ في الأعلى 3 m رمل ($\gamma = 17$)، وتحته طين ($\gamma = 18$، $c = 35$ kPa)**
المقارنة	**لو كان سمك الرمل 5 m (الطين 2 m)**

المطلوب

c_{side} و $\sigma_v(H)$ و B' و FS (≤ 1.5؟)؛ وماذا عن FS عندما يزداد سمك الرمل؟



الحل

الحل

1 من الطبقات المجاورة: متوسط التماسك وإجهاد الغطاء الترابي

$$c_{side} = \frac{0\,(3) + 35\,(4)}{7} = \mathbf{20.0}\ \text{kPa}\ \ (\text{الرمل صفر}) \qquad \sigma_v(H) = 17(3) + 18(4) = \mathbf{123}\ \text{kPa}$$

$$B/\sqrt{2} = 4.24\ \text{m} > T = 4\ \text{m} \ \Rightarrow\ B' = 4.00\ \text{m}, \quad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

2 معامل الأمان (حد قدرة التحمل: الطين تحت القاعدة c = 35 kPa)

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{20(7)}{4.00}}{123} = \frac{190.1 + 35.0}{123} = \mathbf{1.83}\ \geq 1.5\ \checkmark$$

معامل الأمان ضد انتفاخ القاع **1.83** (≥ 1.5). وعندما تصبح سماكة الرمل 5 m ينخفض التماسك الجانبي إلى 10 kPa، ويهبط إجهاد الغطاء الترابي إلى 121 kPa، وينخفض FS إلى **1.72**: فكلما زادت سماكة طبقة الرمل قلّت حصة القص الجانبي.

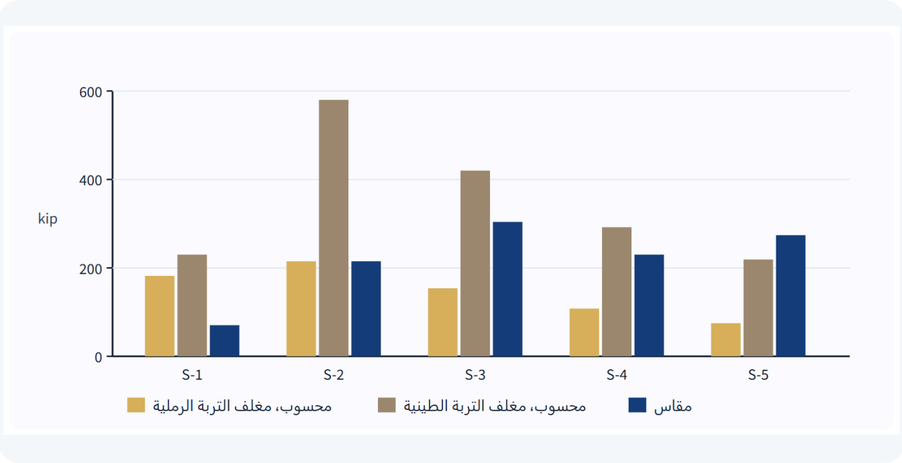
تحقق من الحل في GeoTerva ↗

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، وكانت الدعامات قد صممت لأحمال تفوق المقاسة بكثير. **Chicago, National Plaza**: بعمق 21.3 m وست دعامات؛ وحول القطاع إلى طين مكافئ (σ_a = 282.0 kPa، $\gamma H/c$ = 12.08، γ_{av} = 19.76 kN/m³، c_{av} = 34.91 kPa).

وأعطى مغلف Peck نحو **1.8 ضعف** الضغط 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

جُمعت المغلفات من حفريات يزيد عمقها على نحو 6 m؛ و**المغلف ليس هو الضغط الفعلي على الجدار في أي لحظة**: فهو يعطي حمل الدعامة الآمن ولا يعطي انحراف الجدار. الطين غير مصرف والرمل مصرف.

يحول قطاع الرمل + الطين إلى **طين مكافئ واحد** (c_{av}، γ_a)؛ ويختار المغلف بالنسبة $\gamma_a H/c_{av}$. وإذا وجدت عدة طبقات طينية جرى أولا حساب متوسطها بحسب السماكة. والقيمتان $K_s \approx 1$ و $n' = 0.75$ قيمتان متوسطتان؛ ويؤثر تغير n' بين 0.5 و 1.0 تأثيرا كبيرا في النتيجة.

يضاف الحمل الإضافي على حدة ($\Delta p = q$)؛ ولا يغير الماء سوى الوزن الحجمي. أما **الجدار الستائري** فهو سلسلة من الكمرات المفصلية المحددة استاتيكياً؛ وأما **كمرات الربط الأفقية** فهي بحور بسيطة بين الدعامات. ويتحقق من الفولاذ وفق EN 1993-1-1 (ولا يصمم الصنف 4) أو وفق AISC 360-22.

يتحقق من انتفاخ قاع الحفر بامتداد GeoTerva متعدد الطبقات للصيغة المشتقة للطين المتجانس؛ ولا يحتسب غرس الجدار الستائري.

يتوقع أثناء الحفر حدوث حركة جانبية وفقدان للتربة في المنطقة المحيطة؛ وإذا وجدت طبقة صلبة فتغرس فيها الجدران الستائرية.

النقاط الرئيسية

الطين المكافئ: $\gamma_a = [\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c]/H$، $c_{av} = [\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s + (H - H_s)n'q_u]/(2H)$؛ وفي المثال 21.31 kPa و 17.57 kN/m³

المغلف: $\gamma_a H/c_{av} = 5.77 > 4$ → مغلف الطين الطري إلى المتوسط $\sigma_a = \gamma_a H[1 - 4c_{av}/\gamma_a H] = 37.75$ kPa؛ $n' = 0.5 \rightarrow 57.75$ kPa

National Plaza: $c_{av,clay} = 51.16$، $c_{av} = 34.91$ kPa، $\gamma_{av} = 19.76$ kN/m³، $\gamma H/c = 12.08 \rightarrow \sigma_a = 282.0$ kPa (≈ 1.8 ضعف القيمة المرصودة)

حمل الدعامة وتحديد المقاطع: $P_{max} = 277.47$ kN؛ الجدار الستائري $M_{max} = 26.99$ kN·m/m؛ كمرة الربط $M = 104.05$ kN·m

الصلب: $\eta = 0.221 / 0.511 / 0.358$ EN 1993-1-1؛ AISC LRFD الدعامة 0.401، ASD 0.376

انتفاخ القاع (متعدد الطبقات): $c_{side} = 20$ kPa، $\sigma_v(H) = 123$ kPa، $FS = 1.83 \geq 1.5$

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. والمثالان المحلولان في صفحة الوحدة هما حالة National Plaza (Chicago) والحفر الابتدائي للوحدة (H = 7 m، رمل 3 m + طين).

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل في GeoTerva طبقات الرمل والطين في الحفر الخاص بك ومناسيب الدعامات والحمل الإضافي وعناصرك الإنشائية؛ وتعطي الوحدة معاً الطين المكافئ والمغلف 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.