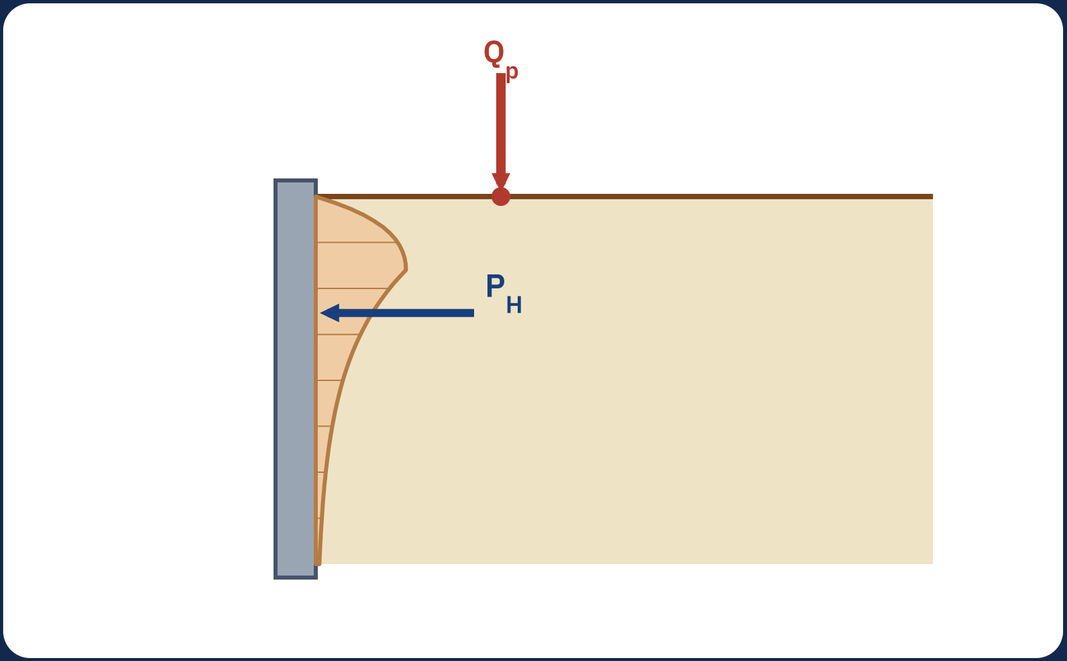


شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الأحمال الإضافية

الحمل الإضافي النقطي

المحاضرة: الضغط الجانبي الذي يولده حمل نقطي على السطح في الجدار؛ طريقتان، والمحصلة، والتوزيع في المسقط الأفقي، وتعدد الأحمال، وأمثلة محلولة.

$\sigma_H = (3Q_p/\pi)\, x^2 z/R^5$

$m = x/H \cdot n = z/H$

مخطط Terzaghi–NAVFAC

P_H و L

التوزيع في المسقط

يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

هندسة الحمل النقطي: **x** و **y** و **z** و **R** والمقدارين عديمي الأبعاد $m = x/H$ و $n = z/H$

الحل المرن (الجدار الصلب): ضعف إجهاد Boussinesq، وأكبر ضغط عند $z = x/2$؛ $x_{min} = 0.30\ m$

مخطط Terzaghi–NAVFAC: الحالة 1 ($m \le 0.4$) والحالة 2 ($m > 0.4$)

المحصلة $P_H = (Q_p/H)\cdot I_0$ والارتفاع $L = H\cdot I_1/I_0$؛ والصيغتان المغلقتان للمقدارين I_0 و I_1

في المسقط الأفقي التوزيع على طول الجدار ($\cos^2(1.1\theta)$) و**ثلاثة أحمال كحد أقصى على الخط المستقيم نفسه**

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

1 · **النظرية**: المعادلة ومبرراتها

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

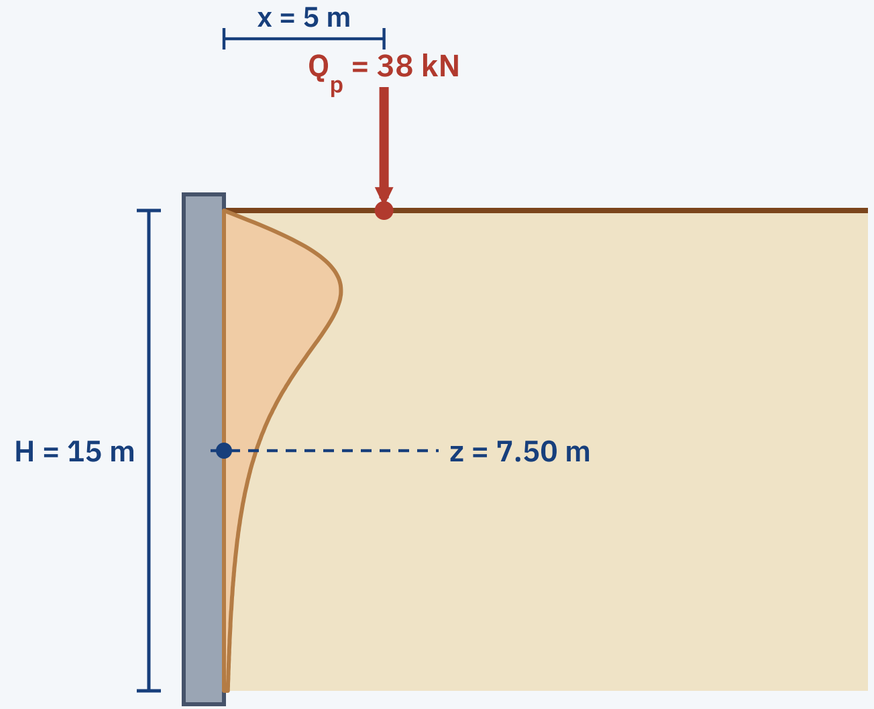
جدار المثال: $H = 15\ m$، وحمل نقطي $Q_p = 38\ kN$ على بعد $x = 5\ m$ من الجدار. وتمثل P_H القوة لكل وحدة طول من الجدار عند مقطع الحمل (kN/m).

النظرية

حمل نقطي مؤثر على الجدار

يولّد الحمل النقطي Q_p على السطح مجال إجهادات ثلاثي الأبعاد في التربة؛ فإذا وقع الحمل ضمن منطقة تأثير جدار رأسي انتقل جزء من زيادة الإجهاد إلى الجدار على هيئة **ضغط جانبي**

تعطي الوحدة تغير الضغط مع العمق على امتداد الخط العمودي على الجدار المار بالحمل، و**محصلته** و**خط عمله**، وكذلك توزيعه على امتداد الجدار في المسقط الأفقي



$$m = \frac{x}{H}, \qquad n = \frac{z}{H}$$

H — ارتفاع الجدار؛ **x** — المسافة الأفقية من الجدار إلى الحمل؛ **z** — العمق من السطح

y — المسافة على امتداد الجدار من الخط العمودي على الجدار المار بالحمل؛ $R = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$

σ_H — الضغط الجانبي على الخط المحوري؛ σ'_H — في المسقط الأفقي؛ P_H — المحصلة؛ **L** — المسافة من القاعدة إلى خط العمل

θ — زاوية المسقط الأفقي في المخطط البياني؛ x_{min} — أصغر مسافة حسابية في الطريقة المرنة (0.30 m)

الحل المرن ومخطط Terzaghi–NAVFAC

النظرية

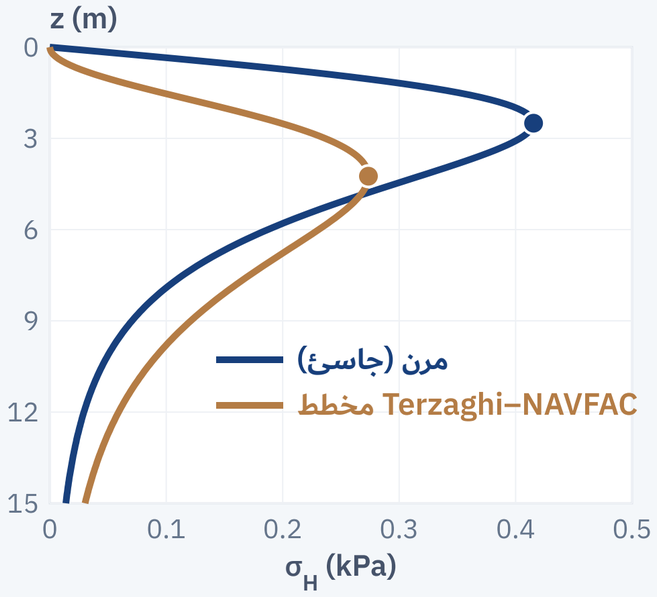
يصف كلاهما **الجدار غير المتحرك**؛ ويختلفان أكثر ما يختلفان **تحت حمل قريب من الجدار**

الحل المرن: ضعف إجهاد Boussinesq: فحمل صورة المرآة على الجانب المقابل من الجدار يلغي الحركة الجانبية عند الوجه (Mindlin 1936)؛ ونسبة بواسون 0.5

المخطط (Terzaghi 1954): يتوقف أثر المسافة عند **m = 0.4**؛ ويرسم الحمل الواقع ضمن 0.4H كما لو كان على بعد 0.4H

في حالة حمل يقع ضمن 0.4H يركز الحل المرن **ضغطاً متزايداً** قرب الجزء العلوي من الجدار، بينما يحتفظ المخطط بشكل توزيع واحد؛ وعلى مسافة أبعد يعطيان رتبة القيم نفسها

المخطط (H = 15 m، x = 5 m، Q_p = 38 kN)



الجدار الجاسئ: الضغط، القيمة العظمى، والمحصلة بالصيغة المغلقة

النظرية

على الخط العمودي على الجدار المار بالحمل (y = 0): $\sigma_H = (3Q_p/\pi)\, x^2 z/R^5$؛ وتقع الذروة عند $z = x/2$، حيث $\sigma_{H,max} = 0.2733\, Q_p/x^2$

كلما اقترب الحمل من الجدار أصبح الحل **شاذاً**: إذ تزداد P_H بنحو $Q_p/(\pi x)$؛ ولذلك عندما $x < x_{min} = 0.30\ m$ يُحسب الحمل على بعد 0.30 m

داخل المسافة الحرجة التي تبلغ نحو **0.4H** لا تعود المعادلات المرنة موثوقة: فيلزم الحكم الهندسي، وتوفر المخططات البيانية مقارنة

$$\sigma_H = \frac{3}{\pi}\,\frac{Q_p}{H^2}\,\frac{m^2\, n}{\left(m^2+n^2\right)^{5/2}}$$

$$I_0 = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{m} - \frac{m^2}{\left(1+m^2\right)^{3/2}}\right] \qquad I_1 = I_0 - \frac{1}{\pi\left(1+m^2\right)^{3/2}}$$

Terzaghi–NAVFAC: الحالة 1 والحالة 2

النظرية

يحسب **n = z/H** عند كل عمق، وتختار المعادلة وفقاً لـ **m**

لا تحتوي معادلة الحالة 1 على m: فهي قيمة الحالة 2 عند m = 0.4 (0.2832 = 0.16 × 1.77، وقد كتبت **0.28**)؛ والحمل الواقع ضمن المسافة 0.4H يعطي، أينما كان موضعه، **المخطط نفسه وقيمتي P_H و L نفسيهما**

بسبب التقريب تشكل P_H درجة صغيرة عند الحد (≈ 1.1%) m = 0.4؛ وتبقى L مستمرة

$$\sigma_H = 0.28\,\frac{Q_p}{H^2}\,\frac{n^2}{(0.16+n^2)^3} \qquad m \le 0.4 \text{ (الحالة 1)}$$

$$\sigma_H = 1.77\,\frac{Q_p}{H^2}\,\frac{m^2\,n^2}{(m^2+n^2)^3} \qquad m > 0.4 \text{ (الحالة 2)}$$

P_H و L و I_0 و I_1

النظرية

P_H هي مساحة مخطط الضغط؛ و**L** هو ارتفاع مركز ثقل المخطط فوق قاع الجدار: وتؤثر المحصلة على عمق **H − L** من السطح

P_H قوة في مقطع الحمل نفسه (y = 0)؛ ولما كان الضغط يتناقص على طول الجدار فإنها **لا تضرب في طول الجدار**

عند كتابة $\sigma_H = (Q_p/H^2)\cdot f(n)$ يبقى عددان لا بعديان؛ وهما في نظرية المرونة صيغة مغلقة، وفي المخطط تكامل عددي (أو مغلق). وثوابت المخطط هي قيمة هذا التكامل مقروءة عند قيمة واحدة لـ m: عند **m = 0.4**: $P_H = 0.787\ Q_p/H$، $L = 0.587$ H؛ وعند **m = 0.6**: Q_p/H و 0.476 H

$$P_H = \frac{Q_p}{H}\, I_0 \qquad L = H\,\frac{I_1}{I_0}$$

$$I_0 = \int_0^1 f(n)\, dn \qquad I_1 = \int_0^1 f(n)\,(1-n)\, dn$$

الضغط على امتداد الجدار والأحمال المتعددة

النظرية

الحل المرن: تصح صيغة σ_H عند كل نقطة من الجدار ($R^2 = x^2 + y^2 + z^2$)؛ وعند عمق ثابت يتناقص الضغط على امتداد الجدار وفق $(R_0/R)^5$، وتقع القمة عند $z = \sqrt{(x^2 + y^2)/2}$

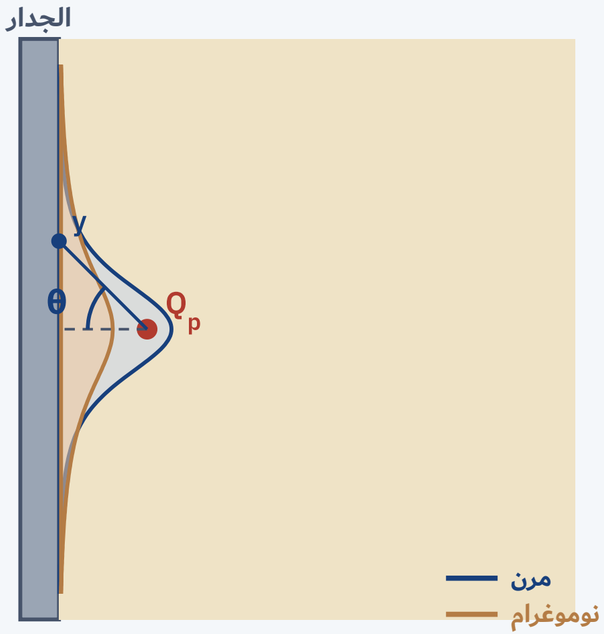
المخطط البياني: يخفض ضغط الخط المحوري بالزاوية في المسقط الأفقي؛ وعندما تبلغ الزاوية 1.1θ القيمة $90°$ (**$\theta \approx 81.8°$**) يثبت التخفيض عند الصفر

أحمال متعددة (3 كحد أقصى): لكل منها قيمتان خاصتان به هما x_i و $Q_{p,i}$؛ ولما كانت الضغوط زيادات في الإجهاد فإنها **تجمع**؛ وتؤثر المحصلة عند النقطة التي تتوازن عندها العزوم بالنسبة إلى القاعدة

$$\sigma'_H = \sigma_H \cos^2(1.1\,\theta) \qquad \theta = \tan^{-1}\frac{y}{x} \quad \text{(مخطط بياني)}$$

$$\sigma_H = \sum_i \sigma_{H,i} \qquad P_H = \sum_i \frac{Q_{p,i}}{H} I_{0,i} \qquad L = \frac{\sum_i P_{H,i}\, L_i}{P_H}$$

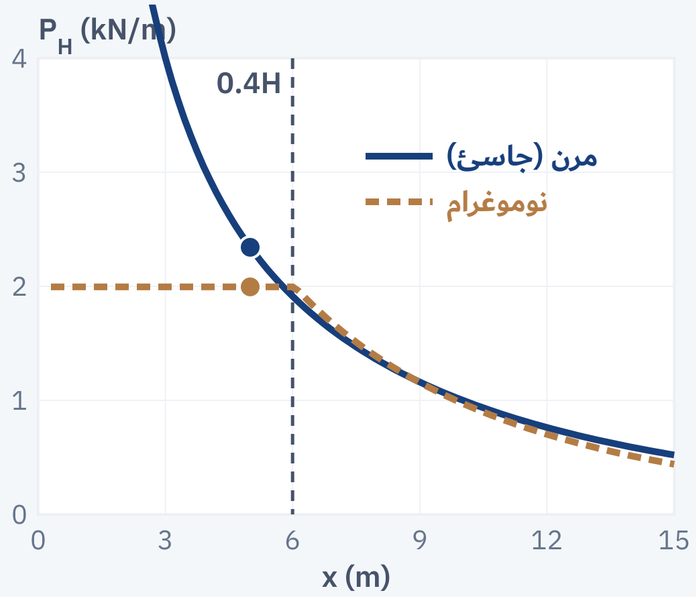
المسقط الأفقي: عند العمق $z = 2.5$ m



المحصلة وموقعها بدلالة مسافة الحمل

النظرية

الحالة	نوموغرام L	مخطط P_H	المرن L	المرن P_H	m	x (m)
الحالة 1	8.81	1.99	14.70	40.32	0.020	0.30
الحالة 1	8.81	1.99	14.01	12.09	0.067	1.00
الحالة 1	8.81	1.99	13.05	6.03	0.133	2.00
الحالة 1	8.81	1.99	12.15	4.00	0.200	3.00
الحالة 1	8.81	1.99	11.33	2.97	0.267	4.00
الحالة 1	8.81	1.99	10.59	2.34	0.333	5.00
الحالة 1	8.81	1.99	9.94	1.91	0.400	6.00
الحالة 2	7.61	1.38	8.87	1.35	0.533	8.00
الحالة 2	6.74	0.9755	8.05	1.00	0.667	10.00
الحالة 2	5.45	0.4402	6.80	0.5213	1.000	15.00



(x ≤ 6 m) **m ≤ 0.4**: يعطي المخطط نفس P_H والـL؛ ويزداد P_H المرن بسرعة كلما اقترب الحمل

m > 0.4: تؤثر المحصلة المرنة على ارتفاع أكبر قليلاً (L أكبر)

المسألة

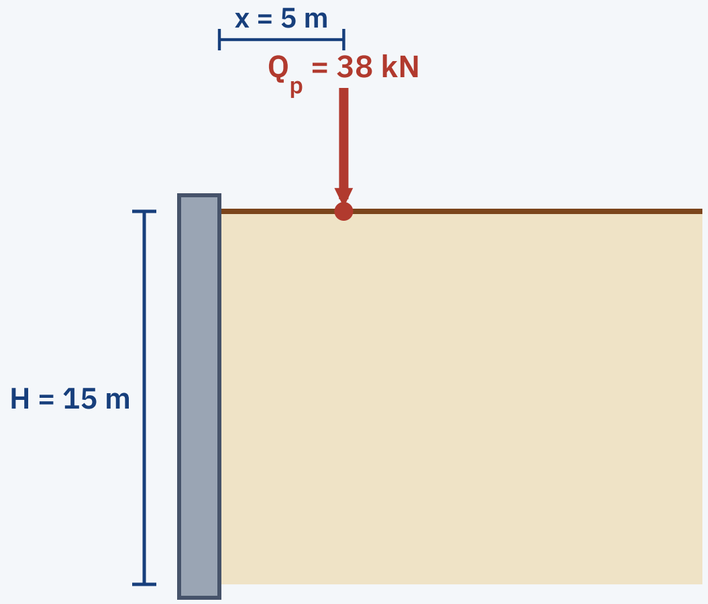
مثال

المعطيات

الجدار	$H = 15.00$ m
الحمل	$Q_p = 38.0$ kN، على مسافة $x = 5.00$ m من الجدار
الطريقة	مرن (جدار صلب)؛ $x \geq x_{min}$

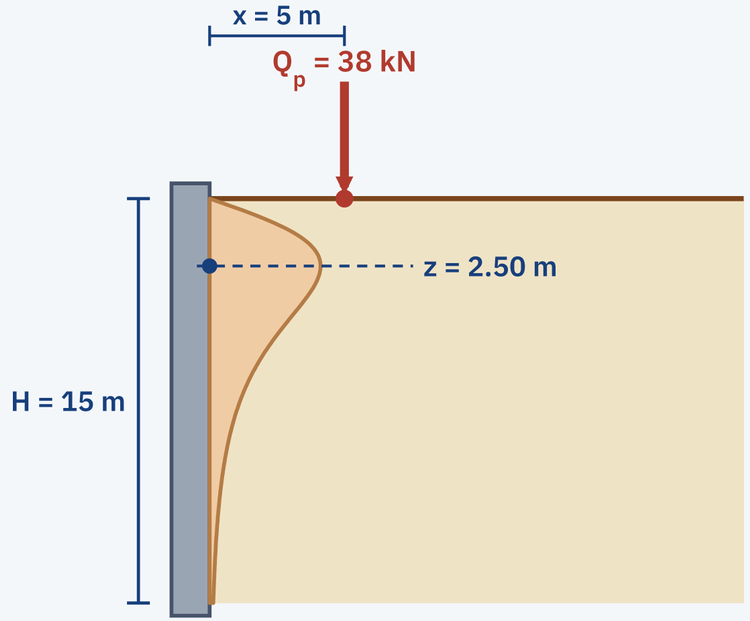
المطلوب

m، وأكبر ضغط $\sigma_{H,max}$ $(z = x/2)$، و I_0، و I_1، و P_H، و L، وعمق المحصلة تحت السطح.



الحل (1/3)

الحل



1 نسبة المسافة

$$m = \frac{x}{H} = \frac{5}{15} = \frac{1}{3} = \mathbf{0.333} \quad (x \geq x_{min} = 0.30 \text{ m})$$

2 عمق الذروة

$$z = \frac{x}{2} = \mathbf{2.50} \text{ m}$$

$$R = \sqrt{x^2 + z^2} = \sqrt{25.00 + 6.25} = \mathbf{5.5902} \text{ m}$$

3 الضغط عند الذروة

$$\sigma_{H,max} = \frac{3 \times 38}{\pi} \cdot \frac{5.00^2 \times 2.50}{5.5902^5}$$

$$\sigma_{H,max} = 36.287 \times 0.011449 = \mathbf{0.4154} \text{ kPa}$$

القمة المرنة **0.4154 kPa** عند العمق z = 2.50 m: وهي تساوي $0.2733\ Q_p/x^2 = 0.4154$ kPa.

الحل (2/3)

الحل

4 القيمة عديمة الأبعاد للمساحة I_0

$$I_0 = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{m} - \frac{m^2}{(1+m^2)^{3/2}}\right] = \frac{1}{\pi}\left[3 - \frac{1/9}{(10/9)^{3/2}}\right] = \frac{1}{\pi}[3 - 0.09487] = \mathbf{0.92473}$$

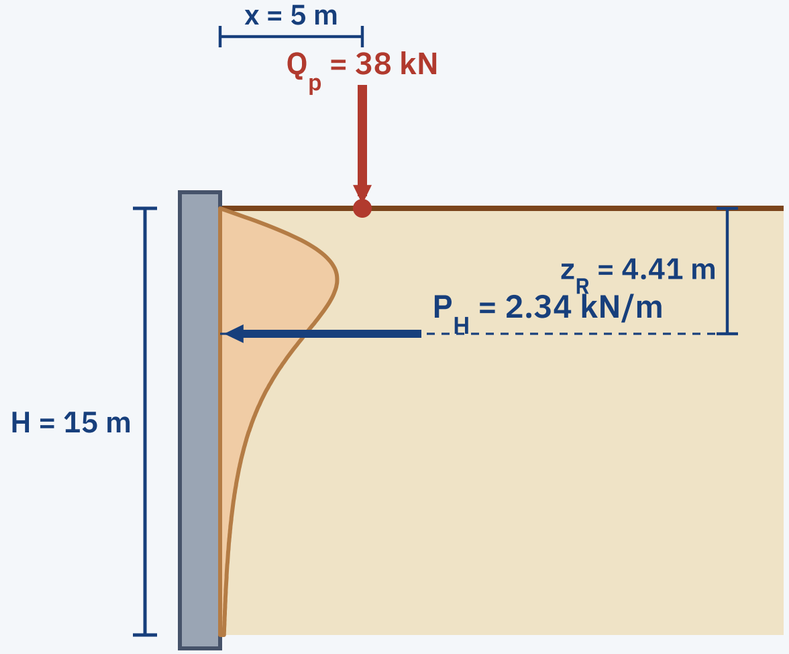
5 القيمة عديمة الأبعاد للعزم I_1

$$I_1 = I_0 - \frac{1}{\pi(1+m^2)^{3/2}} = 0.92473 - \frac{1}{\pi(10/9)^{3/2}} = 0.92473 - 0.27178 = \mathbf{0.65295}$$

I_0 = 0.92473 و **I_1 = 0.65295**: عددان يعتمدان على m فقط؛ أما الحمل والارتفاع فيقعان خارجهما.

الحل (3/3)

الحل



6 المحصلة

$$P_H = \frac{Q_p}{H} I_0 = \frac{38}{15} \times 0.92473 = \mathbf{2.34}\ \text{kN/m}$$

7 خط التأثير (من القاعدة)

$$L = H \frac{I_1}{I_0} = 15 \times \frac{0.65295}{0.92473} = \mathbf{10.59}\ \text{m}$$

8 العمق من السطح

$$H - L = 15.00 - 10.59 = \mathbf{4.41}\ \text{m}$$

P_H = 2.34 kN/m، عند **4.41 m** تحت السطح (10.59 m من القاعدة). تؤثر القوة في مقطع الحمل: ولا تضرب في طول الجدار.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

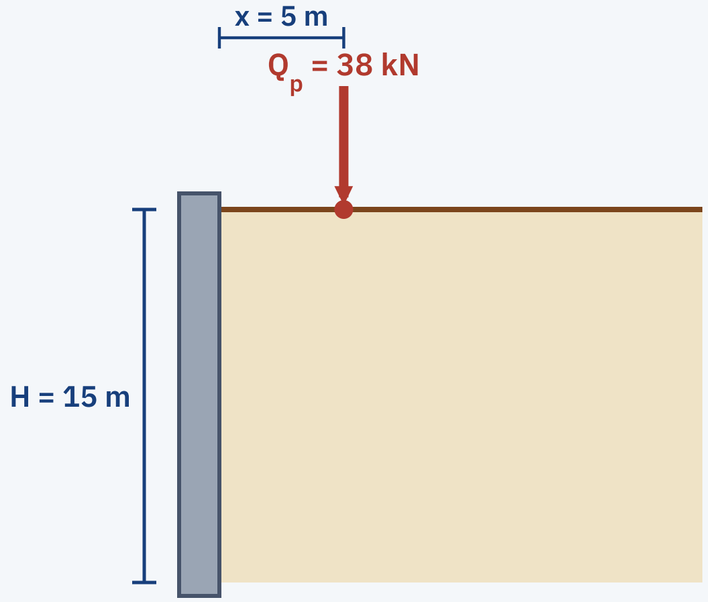
مثال

المعطيات

الجدار والحمل	$H = 15.00\ \text{m}$,$Q_p = 38.0\ \text{kN}$,$x = 5.00\ \text{m}$
الطريقة	**مخطط Terzaghi–NAVFAC؛ الضغط عند** $z = 2.50\ \text{m}$

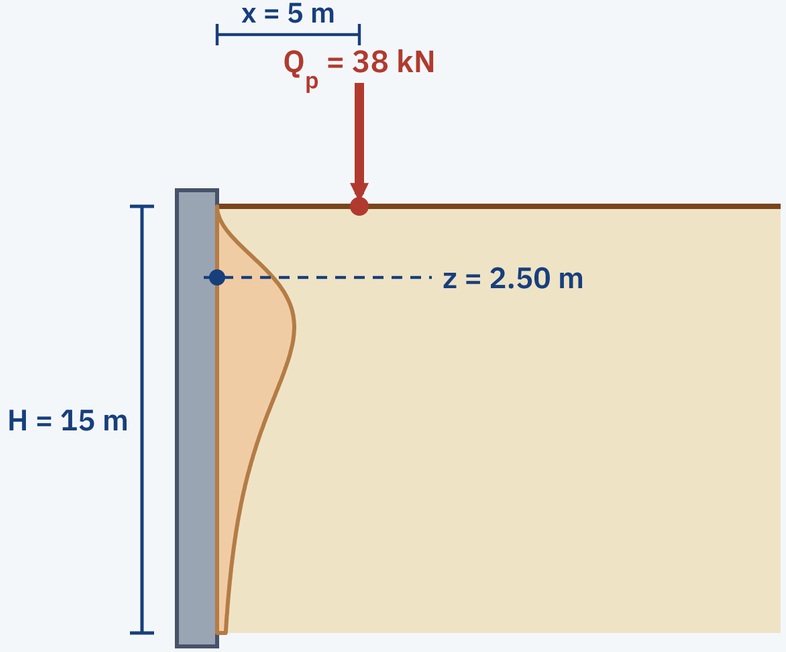
المطلوب

اختيار الحالة، و σ_H (z = 2.5 m) و I_0 و I_1 و P_H و L.



الحل (1/3)

الحل



1 اختيار الحالة

$$m = \frac{1}{3} = 0.333 \le 0.4 \;\Rightarrow\; \text{الحالة 1: مخطط ثابت} \; m = 0.4$$

2 نسبة العمق

$$n = \frac{z}{H} = \frac{2.50}{15} = \mathbf{0.1667}$$

3 الضغط

$$\sigma_H = 0.28\,\frac{38}{15^2}\cdot\frac{n^2}{(0.16+n^2)^3} = 0.04729 \times \frac{0.02778}{0.006621}$$

$$\sigma_H = 0.04729 \times 4.1953 = \mathbf{0.1984}\ \text{kPa}$$

عند z = 2.5 m يبلغ ضغط المخطط **0.1984 kPa**؛ وعند العمق نفسه يعطي الحل المرن 0.4154 kPa (القمة).

الحل (2/3)

الحل

4 التكامل (صيغة مغلقة، a = 0.16)

$$I_0 = \int_0^1 0.28\,\frac{n^2}{(a+n^2)^3}\,dn = 0.28\left[\frac{1}{8a(1+a)} - \frac{1}{4(1+a)^2} + \frac{\tan^{-1}(1/\sqrt{a})}{8a^{3/2}}\right]$$

5 الأعداد

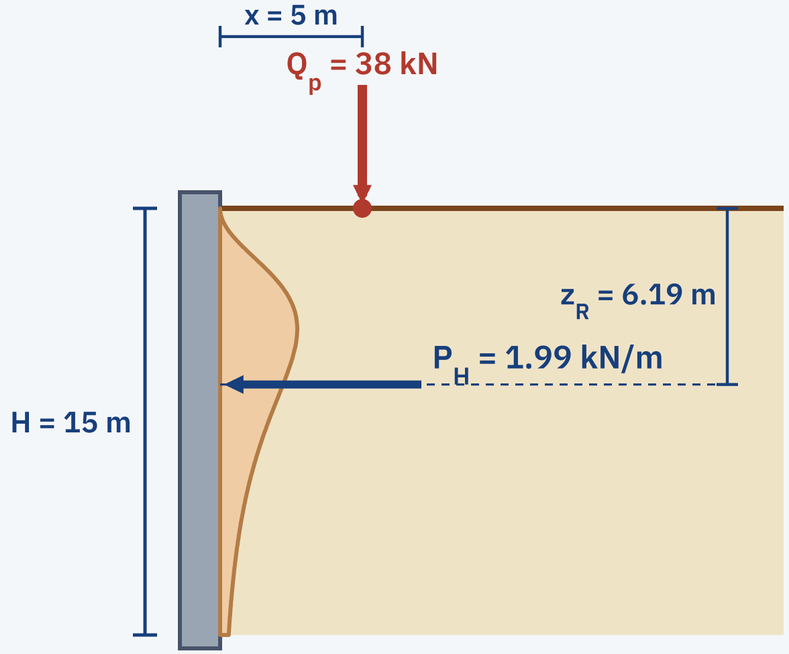
$$\frac{1}{8(0.16)(1.16)} = 0.6735 \qquad \frac{1}{4(1.16)^2} = 0.1858 \qquad \frac{\tan^{-1}2.5}{8(0.16)^{3/2}} = 2.3248$$

$$I_0 = 0.28\,[0.6735 - 0.1858 + 2.3248] = 0.28 \times 2.8125 = \mathbf{0.7875}$$

I_0 = 0.7875: وهي تطابق الثابت 0.787 Q_p/H الذي يعطيه المخطط عند m = 0.4. وتحسب الوحدة هذا التكامل عددياً (Simpson).

الحل (3/3)

الحل



6 $I_1 = I_0 - \int n\,f\,dn$ (صيغة مغلقة، a = 0.16)

$$\int_0^1 nf\,dn = 0.28 \cdot \tfrac{1}{2}\left[\frac{1}{2a} - \frac{1}{1+a} + \frac{a}{2(1+a)^2}\right]$$

$$= 0.28 \times 1.1612 = 0.3251 \;\Rightarrow\; I_1 = 0.7875 - 0.3251 = \mathbf{0.4624}$$

7 المحصلة وخط تأثيرها

$$P_H = \frac{38}{15} \times 0.7875 = \mathbf{1.99}\ \text{kN/m}$$

$$L = 15 \times \frac{0.4624}{0.7875} = \mathbf{8.81}\ \text{m}$$

المخطط البياني: L = **8.81 m**، **P_H = 1.99 kN/m** (من 6.19 m السطح). وبالمقارنة مع الحل المرن تقل المحصلة بنسبة 15%، ويقع خط عملها أخفض بمقدار 1.78 m.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

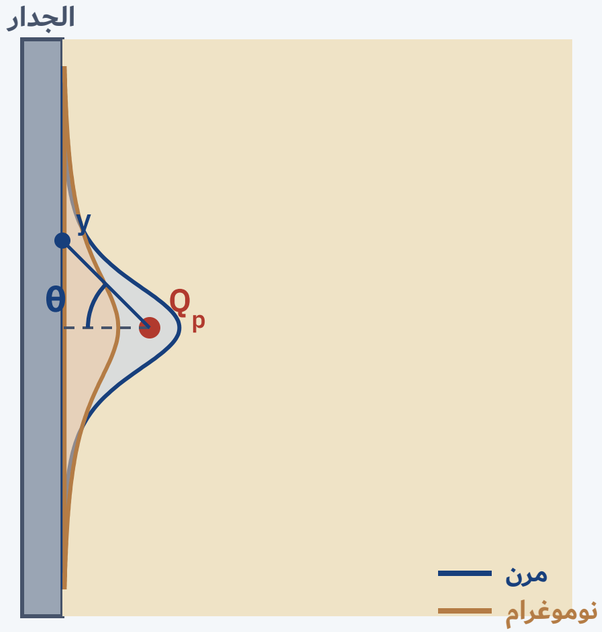
مثال

المعطيات

الجدار والحمل	$H = 15.00$ m, $Q_p = 38.0$ kN, $x = 5.00$ m
العمق	$z = 2.50$ m
الموضع	**على مسافة $y = 5.00$ m من العمودي على الحمل ($\theta = 45°$)**

المطلوب

في كلتا الطريقتين ($y = 5$ m) σ'_H؛ التوزيع من أجل $y = 0$ – 15 m.



الحل (1/2)

الحل

1 مرن: التناقص وفق $(R_0/R)^5$

$$R_0^2 = x^2 + z^2 = 31.25 \qquad R^2 = x^2 + y^2 + z^2 = 56.25$$

$$\sigma'_H = \sigma_H \left(\frac{R_0}{R}\right)^5 = 0.4154 \times \left(\frac{31.25}{56.25}\right)^{5/2} = 0.4154 \times 0.2300 = \mathbf{0.0956}\ \text{kPa}$$

2 المخطط: التناقص وفق $\cos^2(1.1\theta)$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{y}{x} = \tan^{-1}\frac{5}{5} = 45^\circ$$

$$\sigma'_H = \sigma_H \cos^2(1.1\theta) = 0.1984 \times \cos^2(49.5^\circ) = 0.1984 \times 0.4218 = \mathbf{0.0837}\ \text{kPa}$$

عند y = 5 m يبلغ الضغط المرن 0.23 من قيمة المحور (0.0956 kPa)، بينما يبلغ ضغط المخطط 0.42 منها (0.0837 kPa): أي أن المخطط يتناقص ببطء أكبر على طول الجدار، ولكن من قيمة ابتدائية أصغر.

الحل (2/2)

الحل

y (m)	θ (°)	σ'_H المرن (kPa)	نسبة	σ'_H من المخطط (kPa)	نسبة	القمة المرنة z (m)	ضغط القمة (kPa)
0.0	0.0	0.4154	1.00	0.1984	1.00	2.50	0.4154
2.5	26.6	0.2634	0.63	0.1511	0.76	2.80	0.2659
5.0	45.0	0.0956	0.23	0.0837	0.42	3.54	0.1039
7.5	56.3	0.0317	0.08	0.0439	0.22	4.51	0.0393
10.0	63.4	0.0115	0.03	0.0237	0.12	5.59	0.0166
15.0	71.6	0.0022	0.01	0.0076	0.04	7.91	0.0042

يبلغ الضغط أقصاه على المستقيم العمودي على الحمل ويتلاشى بسرعة على امتداد الجدار؛ وفي الحل المرن ينخفض عمق القمة إلى $2/(x^2 + y^2)\sqrt{}$ كلما ازدادت y. وفي المخطط البياني يبقى التخفيض مساوياً للصفر بعد $\theta \approx 81.8°$.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

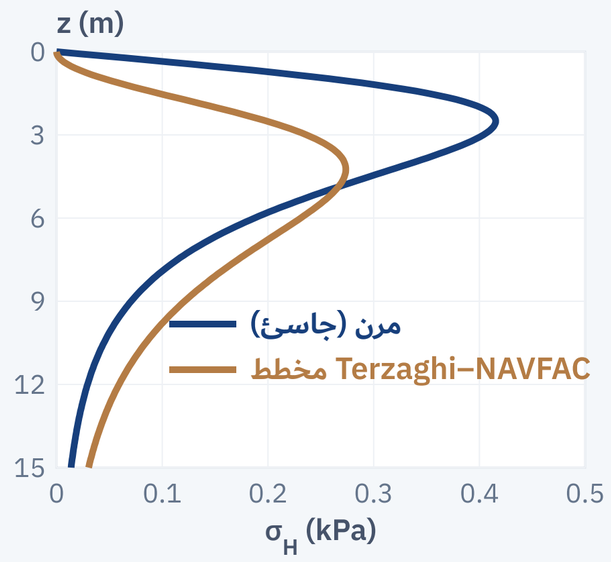
مثال

المعطيات

الجدار والحمل	$x = 5.00$ m ,$Q_p = 38.0$ kN ,$H = 15.00$ m
الأعماق	$z = 0$ – 15 m، كل 1.5 m

المطلوب

توزيع σ_H للطريقتين؛ **قمة** المخطط (الحالة 1) يدوياً.



الحل (1/2)

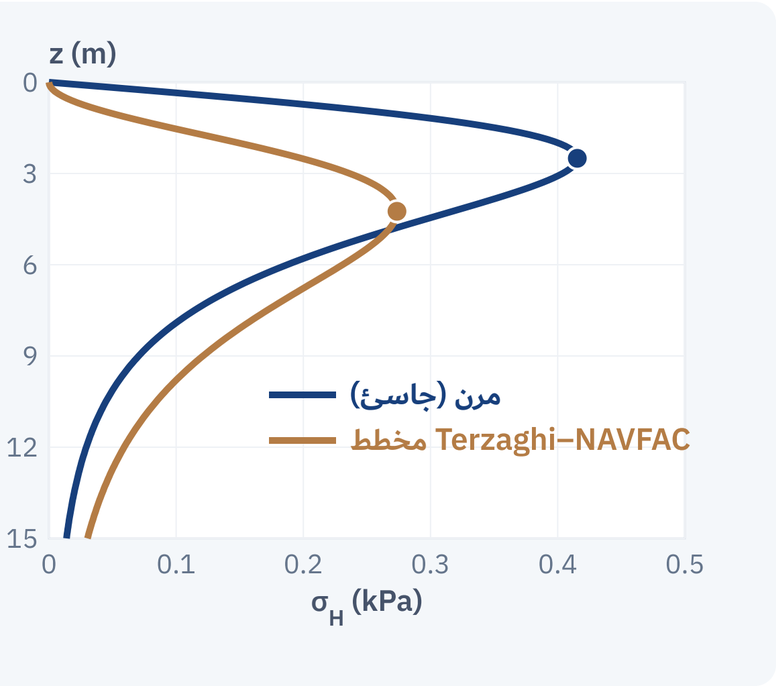
الحل

z (m)	n = z/H	σ_H المرن (kPa)	σ_H مخطط (kPa)
0.00	0.00	0.0000	0.0000
1.50	0.10	0.3511	0.0963
3.00	0.20	0.4038	0.2364
4.50	0.30	0.2964	0.2724
6.00	0.40	0.1873	0.2309
7.50	0.50	0.1143	0.1715
9.00	0.60	0.0706	0.1211
10.50	0.70	0.0448	0.0844
12.00	0.80	0.0293	0.0591
13.50	0.90	0.0198	0.0420
15.00	1.00	0.0138	0.0303

يبلغ الضغط المرن ذروته 0.4154 kPa عند عمق قريب من السطح (2.5 m) ثم يضمحل بسرعة؛ أما المخطط البياني فيعطي توزيعاً أكثر انتظاماً، وتقع ذروته على عمق أكبر وبقيمة أصغر.

الحل (2/2)

الحل



1 المشتقة تساوي صفراً: d/dn [n²/(0.16 + n²)³] = 0

$$2n(0.16+n^2)-6n^3=0 \;\Rightarrow\; n^2=\frac{0.16}{3}=0.0533$$

$$n=\mathbf{0.2828} \;\Rightarrow\; z=nH=\mathbf{4.243}\ \text{m}$$

2 ضغط الذروة (n² = 0.08)

$$\sigma_{H,max}=0.28\,\frac{38}{15^2}\cdot\frac{0.08}{(0.16+0.08)^3}$$

$$\sigma_{H,max}=0.04729\times 5.787=\mathbf{0.2737}\ \text{kPa}$$

ذروة المخطط البياني (z = 4.24 m) **0.2737 kPa**؛ والذروة المرنة (z = 2.50 m) **0.4154 kPa**: ينقل المخطط البياني الذروة إلى الأسفل ويخفضها إلى ثلثيها.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

الجدار والحمل	$Q_p = 38.0$ **kN** ,$H = 15.00$ **m**
المسافات	$x = 0.3;\ 1;\ 2;\ 3;\ 4;\ 5;\ 6;\ 8;\ 10;\ 15$ **m**
Ek	$x < 0.30$ **m** وحد $0.4H = 6$ **m** **للمخطط**

المطلوب

P_H و**L** للطريقتين؛ وتحقق يدوي من أجل **x = 10 m**؛ و x_{min} والحد.

الحل (1/3)

الحل

x (m)	m	P_H المرن (kN/m)	L المرن (m)	P_H من المخطط (kN/m)	L من المخطط (m)	الحالة
0.30	0.020	40.32	14.70	1.99	8.81	الحالة 1
1.00	0.067	12.09	14.01	1.99	8.81	الحالة 1
2.00	0.133	6.03	13.05	1.99	8.81	الحالة 1
3.00	0.200	4.00	12.15	1.99	8.81	الحالة 1
4.00	0.267	2.97	11.33	1.99	8.81	الحالة 1
5.00	**0.333**	**2.34**	**10.59**	**1.99**	**8.81**	**الحالة 1**
6.00	0.400	1.91	9.94	1.99	8.81	الحالة 1
8.00	0.533	1.35	8.87	1.38	7.61	الحالة 2
10.00	0.667	1.00	8.05	0.9755	6.74	الحالة 2
15.00	1.000	0.5213	6.80	0.4402	5.45	الحالة 2

$x \le 6$ m: يعطي المخطط البياني 1.99 kN/m و $L = 8.81$ m، ولا يؤثر البعد في النتيجة؛ أما P_H المرن فيزداد بسرعة كلما اقترب الحمل (40.32 kN/m عند $x = 0.3$ m). **$x > 6$ m**: تتقارب الطريقتان، وتؤثر المحصلة المرنة عند منسوب أعلى.

الحل (2/3)

الحل

1 m = 10/15 = 0.667 > 0.4 :مخطط الحالة 2. المرن: I_0, I_1, P_H, L

$$I_0 = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{m} - \frac{m^2}{(1+m^2)^{3/2}}\right] = 0.3960 \qquad I_1 = I_0 - \frac{1}{\pi(1+m^2)^{3/2}} = 0.2126$$

$$P_H = \frac{38}{15} \times 0.3960 = \mathbf{1.00}\ \text{kN/m} \qquad L = 15 \times \frac{0.2126}{0.3960} = \mathbf{8.05}\ \text{m}$$

2 المخطط (الحالة 2): نفس التعابير المغلقة كما في المثال 2، حيث m^2 = a والمعامل 1.77 m^2

$$I_0 = \int_0^1 f\, dn = 0.3851 \qquad I_1 = \int_0^1 f\,(1-n)\, dn = 0.1730$$

$$P_H = \frac{38}{15} \times 0.3851 = \mathbf{0.9755}\ \text{kN/m} \qquad L = 15 \times \frac{0.1730}{0.3851} = \mathbf{6.74}\ \text{m}$$

x = 10 m: المرن L = 8.05 m، **1.00 kN/m**؛ المخطط L = 6.74 m، **0.9755 kN/m** (الصف في الجدول).

الحل (3/3)

الحل

x (m)	x للحساب (m)	P_H المرن (kN/m)	L (m)	$\sigma_{H,max}$ المرن (kPa)	P_H من المخطط (kN/m)
0.05	**0.30**	40.32	14.70	115.4	1.995
0.10	**0.30**	40.32	14.70	115.4	1.995
0.20	**0.30**	40.32	14.70	115.4	1.995
0.30	0.30	40.32	14.70	115.4	1.995
0.50	0.50	24.19	14.50	41.5	1.995

x < 0.30 m: يحسب الحمل عند 0.30 m؛ وتبلغ الذروة 115.4 kPa حتى عند هذه المسافة.

x (m)	m	الحالة	P_H من المخطط (kN/m)	L من المخطط (m)
5.99	0.3993	الحالة 1	1.9950	8.8069
6.00	0.4000	الحالة 1	1.9950	8.8069
6.000001	0.400000	الحالة 2	2.0178	8.8069
6.01	0.4007	الحالة 2	2.0137	8.8000

يزيد المخطط قيمة P_H بنسبة 1.14% عند تجاوز الحد **m = 0.4**؛ وتبقى L متصلة.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

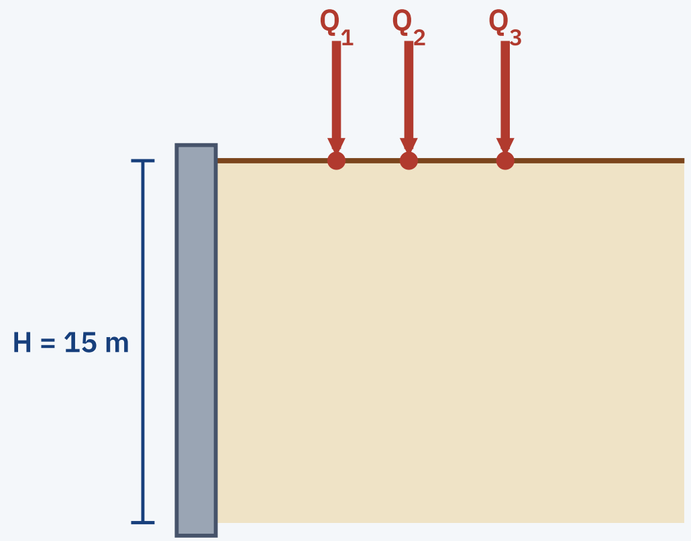
مثال

المعطيات

الجدار	$H = 15.00$ m
الأحمال	$Q_1 = 38$ kN عند $x_1 = 5$ m، $Q_2 = 60$ kN عند $x_2 = 8$ m، $Q_3 = 25$ kN عند $x_3 = 12$ m؛ **وجميعها على خط مستقيم واحد عمودي على الجدار**
الطريقة	**مرن (جدار جاسئ)؛ المخطط للمقارنة**

المطلوب

قيمتا $P_{H,i}$ وL_i لكل حمل؛ والمجموع P_H وL وذروة الضغط الكلي.



الحل (1/3)

الحل

الحمل	x (m)	Q_p (kN)	m	I_0	I_1	$P_{H,i}$ (kN/m)	L_i (m)
Q_1	5	38	0.3333	0.92473	0.65295	2.3427	10.592
Q_2	8	60	0.5333	0.53463	0.31597	2.1385	8.865
Q_3	12	25	0.8000	0.30089	0.14933	0.5015	7.444

1 كل حمل عند قيمة m الخاصة به (مرن)

$$P_{H,i} = \frac{Q_{p,i}}{H}\, I_{0,i} \qquad L_i = H\,\frac{I_{1,i}}{I_{0,i}} \qquad \text{مثلاً } P_{H,2} = \frac{60}{15} \times 0.53463 = \mathbf{2.1385}\ \text{kN/m}$$

يقع كل حمل على بعد x_i الخاص به؛ وجميعها تقابل المقطع نفسه من الجدار، ولذلك يمكن جمع المحصلات.

الحل (2/3)

الحل

2 المحصلة الكلية (المرنة)

$$P_H = \sum P_{H,i} = 2.3427 + 2.1385 + 0.5015 = \mathbf{4.9827}\ \text{kN/m}$$

3 خط التأثير: توازن العزوم حول القاعدة

$$L = \frac{\sum P_{H,i} L_i}{P_H} = \frac{2.343(10.592) + 2.139(8.865) + 0.501(7.444)}{4.983} = \mathbf{9.534}\ \text{m}$$

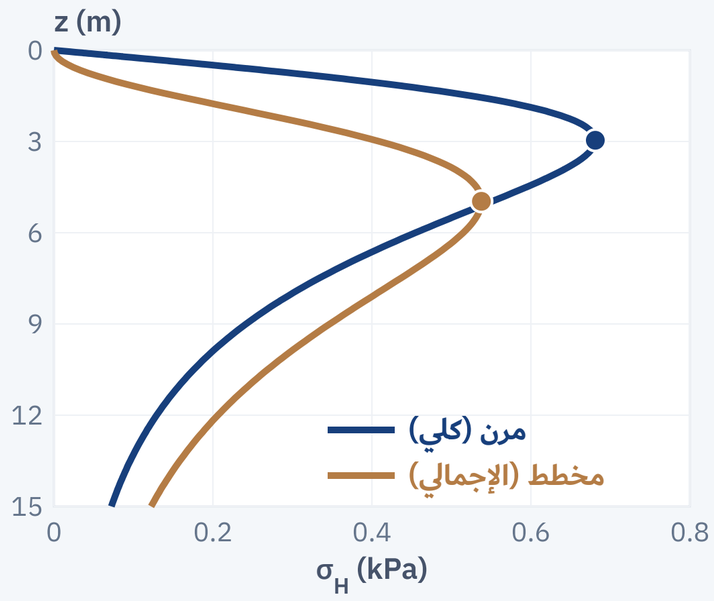
الطريقة	$P_{H,1}$	$P_{H,2}$	$P_{H,3}$	P_H الكلي (kN/m)	L الكلي (m)	من السطح (m)
مرن	2.3427	2.1385	0.5015	**4.9827**	**9.534**	5.466
النوموغرام	1.9950	2.1774	0.4624	**4.6347**	**7.975**	7.025

المحصلة الكلية للأحمال الثلاثة **4.98 kN/m** بالحل المرن، و **4.63 kN/m** من المخطط؛ وخط التأثير على ارتفاع 9.53 m و 7.97 m فوق القاعدة على الترتيب.

الحل (3/3)

الحل

σ_H الكلي (kPa)	$\sigma_{H,3}$ (kPa)	$\sigma_{H,2}$ (kPa)	$\sigma_{H,1}$ (kPa)	z (m)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0
0.5250	0.0199	0.1540	0.3511	1.5
0.6810	0.0356	0.2416	0.4038	3.0
0.5944	0.0447	0.2533	0.2964	4.5
0.4548	0.0475	0.2200	0.1873	6.0
0.2417	0.0407	0.1304	0.0706	9.0
0.1291	0.0293	0.0705	0.0293	12.0
0.0722	0.0197	0.0387	0.0138	15.0



تُجمع الضغوط (زيادة الإجهاد): قمة المجموع المرن **0.6811 kPa** عند z = 2.96 m؛ وعلى المخطط 0.5377 kPa عند z = 4.97 m. وتتكون القمة عند العمق الذي تبرز عنده حصة أكبر الأحمال (Q_2).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النقاط الرئيسية

$m = x/H$، $n = z/H$؛ الحل المرن (جدار جاسئ): $\sigma_H = (3Q_p/\pi)\, x^2z/R^5$، القمة عند $\sigma_{H,max} = 0.2733\, Q_p/x^2$، $z = x/2$؛ $x_{min} = 0.30$ m

المخطط البياني: الحالة 1 ($m \le 0.4$): $\sigma_H = 0.28\,(Q_p/H^2)\, n^2/(0.16 + n^2)^3$؛ الحالة 2: $1.77\,(Q_p/H^2)\, m^2n^2/(m^2 + n^2)^3$؛ ضمن المسافة $0.4H$ لا يكون للبعد أي تأثير

مثال ($H = 15$ m، $x = 5$ m، $Q_p = 38$ kN): الذروة المرنة L، $P_H = 2.34$ kN/m، $I_1 = 0.6530$، $I_0 = 0.9247$، 0.4154 kPa ($z = 2.5$ m)؛ والمخطط البياني $P_H = 1.99$ kN/m، $L = 8.81$ m؛ 10.59 m

في المسقط الأفقي: الحل المرن $(R_0/R)^5$، والمخطط البياني $\cos^2(1.1\theta)$ (حتى $\theta \approx 81.8°$)؛ **عدة أحمال** (3 كحد أقصى): تجمع الضغوط و $P_{H,i}$، ويحسب L من توازن العزوم

المقارنة: المخطط ثابت عند $m \le 0.4$؛ وتزداد P_H المرنة كلما اقترب الحمل؛ وتحسب P_H في مقطع الحمل ولا تضرب في طول الجدار

المراجع

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning؛ تتبع هذه الصفحة هذا المرجع.

Terzaghi, K. (1954). Anchored bulkheads. Transactions of the ASCE, 119, 1243–1280.

NAVFAC DM-7.02 (1986). Foundations and Earth Structures. Naval Facilities Engineering Command.

Boussinesq, J. (1883). Application des Potentiels à l’Étude de l’Équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques. Gauthier-Villars, Paris.

Mindlin, R.D. (1936). Discussion: Pressure distribution on retaining walls. Proc. 1st Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard, Vol. III, 155–156.

Spangler, M.G. and Mickle, J.L. (1956). Lateral pressures on retaining walls due to backfill surface loads. Highway Research Board Bulletin 141.

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

Frazee, G. (2021). New formulations of Boussinesq solution for vertical and lateral stresses in soil. ASCE Practice Periodical on Structural Design and Construction, 26(2).

USS Steel Sheet Piling Design Manual (1984); California Department of Transportation, Trenching and Shoring Manual — طريقة المخطط.

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية مولدة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. الجدار الابتدائي في الوحدة: $H = 15\ m$ و $x = 5\ m$ و $Q_p = 38\ kN$ (الطريقة المرنة).

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل الجدار الخاص بك وأحمالك النقطية (ثلاثة كحد أقصى) والطريقة في GeoTerva؛ وتعطي الوحدة مخطط الضغط وتوزعه في المسقط الأفقي والمحصلة وخط العمل، مع الحل خطوة بخطوة والتقرير معاً.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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