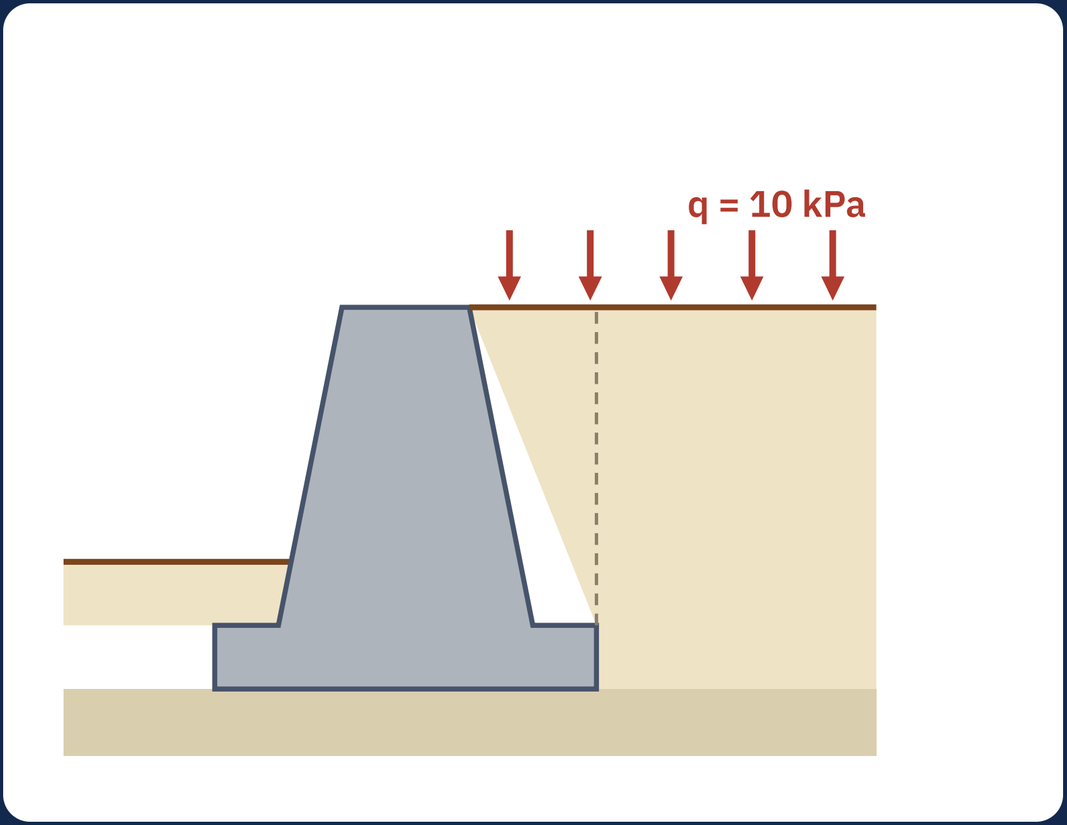


شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الجدران الاستنادية

جدار ساند تثاقلي

المحاضرة: الاستقرار الخارجي لجدار ساند تثاقلي من الحجر أو الخرسانة؛ الجدار والتربة المتحركة معه، وضغط التربة الفعال والمنفعل، والماء، والرفع، والزلزال؛ وتحققات الانزلاق والانقلاب وقدرة التحمل؛ ومثال محلول في كل موضوع.

الانزلاق · الانقلاب · قدرة التحمل

Rankine · Coulomb · Mononobe–Okabe

الماء وقوة الرفع

القصور الذاتي أثناء الزلزال

جدول القوى

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

حساب **الشكل الهندسي** للجدار التثاقلي ووزنه بتجزئته إلى أجزاء (المساحة، مركز الثقل، ذراع العزم)

كتلة التربة المتحركة مع الجدار و**مستوى الضغط الرأسي** المار من الحافة الخلفية لقاعدة الأساس

الضغط **الفعال** (Rankine = Coulomb على مستوٍ رأسي) والحمل الإضافي و**المقاومة الأمامية المنفعلة** (K_{mob}) وقوى **الماء + الرفع**

إجراء تحققات **الانزلاق والانقلاب وقدرة التحمل** باستخدام **جدول القوى** واصطلاح إشارات واحد ($M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$)

تضمين دفع **Mononobe–Okabe** والزيادة الزلزالية وعطالة الجدار عند الزلزال

قراءة النتائج: معاملات الأمان، اللامركزية، إجهادات القاع

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

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

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

كل القيم محسوبة لكل 1.00 m من طول الجدار (kN/m، kN·m/m)؛ والضغوط بوحدة kPa. جدار المثال: جدار من البناء الحجري بارتفاع $H = 3$ m (22 kN/m³).

ما الذي يتم حله وكيف يتم رسمه؟

النظرية

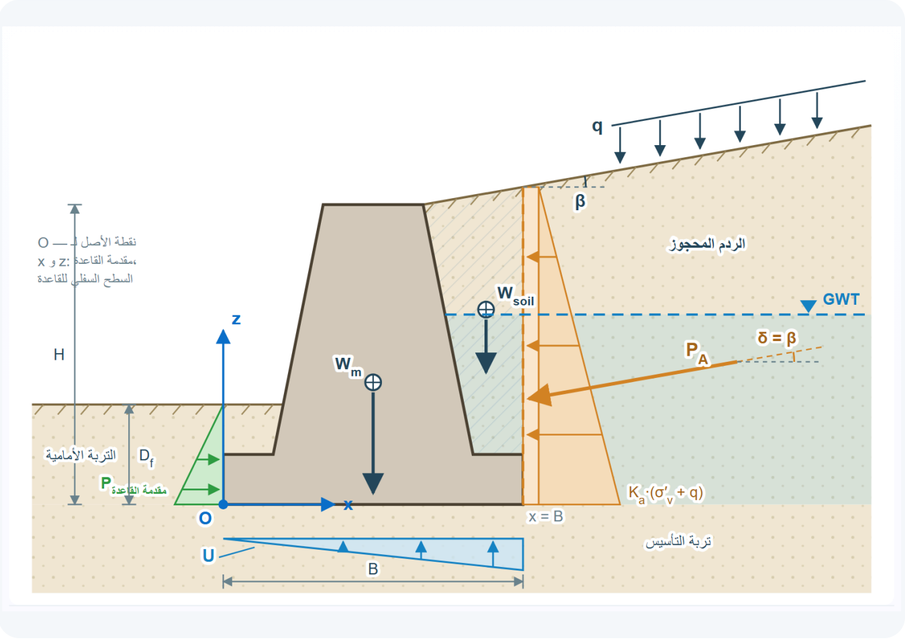
يقاوم الجدار التثاقلي الانزلاق والانقلاب **بوزنه الذاتي**. وتفحص الوحدة جداراً حجرياً أو من الخرسانة الكتلية ذا ساق مائلة شبه منحرفة، ومقدمة وكعب متدرجين على الجانبين:

$$B = W_{bl} + W_{dl} + W_u + W_{dr} + W_{br}$$

الجدار: H الارتفاع الكلي، W_u العرض العلوي، W_{dl} و W_{dr} إزاحتا الميل الأمامي والخلفي، W_{bl} و W_{br} بروزا القدم، H_{fl} و H_{fr} ارتفاعا القدم؛ الوزن الحجمي 22 للحجر و 24 kN/m³ للخرسانة.

التربة: ردم غير متماسك ($c' = 0$)، سطح مائل بزاوية β، حمل إضافي q، مياه جوفية، وتربة وماء بارتفاع D_f في الأمام.

ثلاث نظريات: Rankine و Coulomb (استاتيكية) و Mononobe–Okabe (زلزالية). **التحققات**: الانزلاق والانقلاب واللامركزية وقدرة التحمل.



الجسم الحر، جدول القوى، اصطلاح إشارات واحد

النظرية

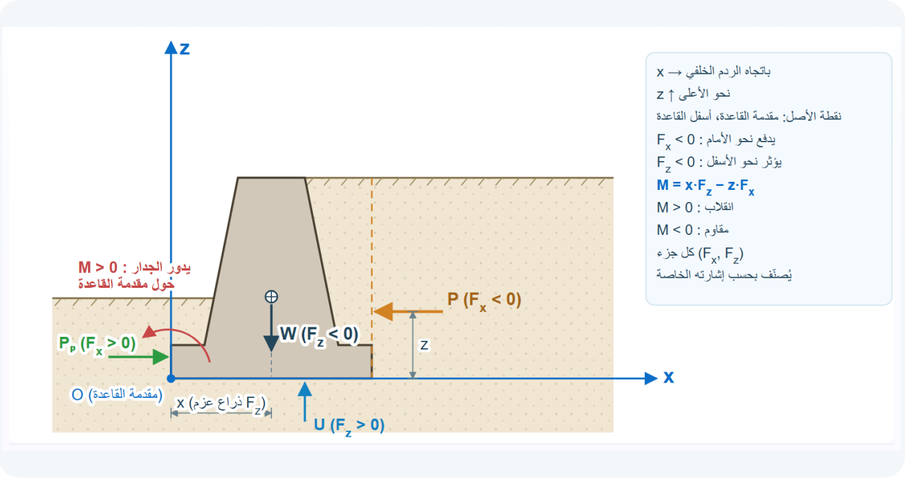
الاستقرار مسألة **اتزان**: يحدد أولا ما الذي يكون في حالة اتزان وكيف تحدد إشارات القوى. تقع نقطة الأصل O عند **مقدمة القاعدة** (الركن الأمامي السفلي)، ويتجه المحور x نحو الردم والمحور z إلى الأعلى. وتكتب القوة بمركبتيها (F_x، F_z) ونقطة تأثيرها؛ والعزم حول O:

$$M = x\,F_z - z\,F_x \qquad M > 0 : \text{الانقلاب}, \quad M < 0 : \text{التماسك}$$

بالنسبة إلى الوزن ($F_z = -W$، $x > 0$) يكون $M = -xW < 0$: أي أنه يمنع انقلاب الجدار. وبالنسبة إلى الدفع نحو الأمام ($F_x < 0$) يكون $M = -zF_x > 0$: أي أنه يقلب الجدار. والرفع ($F_z > 0$) يقلب الجدار، أما المقاومة الأمامية ($F_x > 0$) فتمنع انقلابه.

لا تصنف أي قوة مسبقاً بأنها «مقاومة»؛ وتحسب كل مركبة بإشارتها (فالمركبة الرأسية للدفع المائل مقاومة بحق).

الجسم الحر = الجدار + التربة التي تتحرك معه؛ وكل بند في **جدول القوى** يقرأ بالطريقة نفسها في التحققات الثلاثة جميعها: فلا يجوز إغفال أي قوة في أحدها واحتسابها في الآخر.



التقسيم إلى أجزاء ومراكز الثقل وأذرع العزم

النظرية

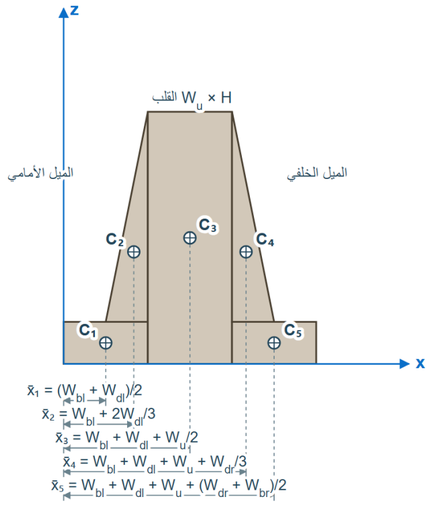
وزن الجدار وعزمه حول المقدمة هما أساس التحققين من الاستقرار كليهما. ويقسم المقطع إلى أشكال بسيطة معلومة المساحة ومركز الثقل (المقدمة، الميل الأمامي، القلب، الميل الخلفي، الكعب):

$$W_i = \gamma_m A_i \qquad W_m = \sum W_i \qquad \bar{x}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{x}_i}{W_m} \qquad \bar{z}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{z}_i}{W_m}$$

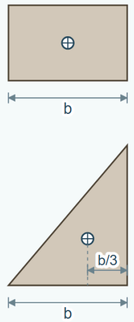
في جدول القوى يمثل الجدار بنداً واحداً: $F_z = -W_m$ عند $\bar{x}_m$؛ وعزمه $M = -W_m\bar{x}_m = -\Sigma M_i$.

لا يلزم الارتفاع $\bar{z}_m$ إلا من أجل قوة القصور الأفقية $k_h W_m$ (الزلزال).

تحسب الوحدة أيضاً المقطع كاملاً بوصفه مضلعاً واحداً؛ ويتطابق الحلان ضمن 10^{-9}.



مكتبة الأشكال



أي مضلع (صيغ رباط الحذاء):

$A = \tfrac{1}{2}\cdot\Sigma(x_i\cdot z_{i+1} - x_{i+1}\cdot z_i)$

$\bar{x} = \Sigma(x_i + x_{i+1})(x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i) / 6A$

$\bar{z} = \Sigma(z_i + z_{i+1})(x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i) / 6A$

المسألة

مثال

المعطيات

المقطع

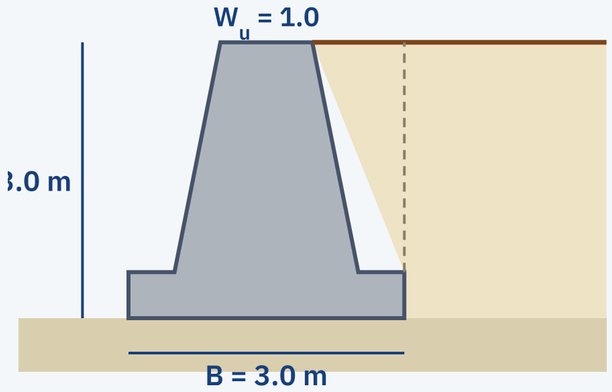
$$H = 3.0\ \text{m};\ W_u = 1.0\ \text{m};$$
$$W_{dl} = W_{dr} = 0.5\ \text{m};\ W_{bl} = W_{br} = 0.5\ \text{m};$$
$$H_{fl} = H_{fr} = 0.5\ \text{m}\ (\text{B} = 3.0\ \text{m})$$

المادة

جدار حجري: $\gamma_m = 22\ \text{kN/m}^3$

المطلوب

مساحة الأجزاء الخمسة ووزنها؛ W_m، $\bar{x}_m$، $\bar{z}_m$.



الحل

الحل

1 الأجزاء (مثلا المنحدر الأمامي: $A = \tfrac{1}{2}(0.5)(3.0 - 0.5) = 0.625$؛ $\bar{x} = W_{bl} + 2W_{dl}/3 = 0.833$؛ $\bar{z} = H_{fl} + (H - H_{fl})/3 = 1.333$)

القطعة	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 22A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
مقدمة القاعدة	0.500	0.500	0.250	11.00	5.50	2.75
المنحدر الأمامي	0.625	0.833	1.333	13.75	11.46	18.33
الجسم (النواة)	3.000	1.500	1.500	66.00	99.00	99.00
ميل الردم الخلفي	0.625	2.167	1.333	13.75	29.79	18.33
كعب القاعدة	0.500	2.500	0.250	11.00	27.50	2.75
الإجمالي	**5.250**			**115.50**	**173.25**	**141.17**

2 مركز ثقل الجدار

$$\bar{x}_m = \frac{173.25}{115.50} = \mathbf{1.500}\ \text{m} \qquad \bar{z}_m = \frac{141.17}{115.50} = \mathbf{1.222}\ \text{m}$$

وزن الجدار **$W_m = 115.50$ kN/m**، على بعد $\bar{x}_m = 1.50$ m من مقدمة القاعدة و $\bar{z}_m = 1.22$ m من قاع القاعدة؛ وعزمه $M = -173.25$ kN·m/m (مقاوم).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

مستوى الضغط الرأسي وكتلة التربة

لماذا يؤثر ضغط التربة على **الحافة الخلفية للقاعدة** لا على المنحدر الخلفي للجدار؟ لأن التربة الواقعة فوق الكعب لا تنزلق بالنسبة إلى الجدار: فإذا تحرك الجدار تحركت معه. وتبدأ مستويات الانهيار في الردم من **الحافة الخلفية للكعب** لا من المنحدر الخلفي. الجسم الحر المتسق: الجدار + كتلة التربة هذه؛ و**مستوى الضغط الخارجي** على وجهه الخارجي رأسي عند x = B:

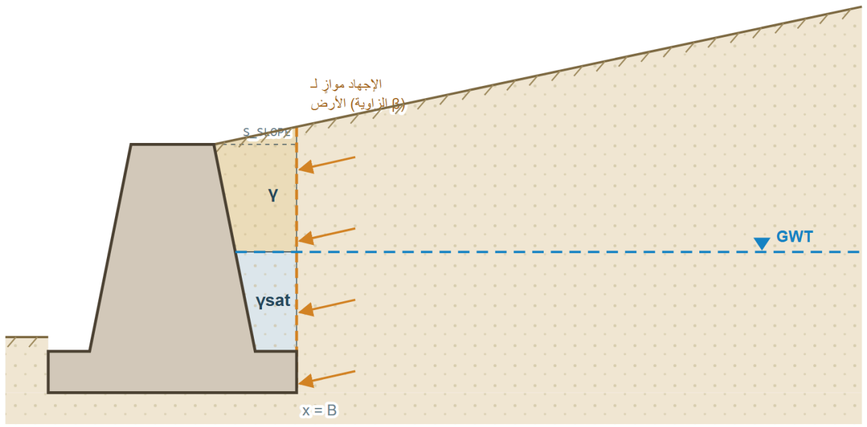
ينزل المستوى من السطح الواقع فوق الحافة الخلفية إلى ما تحت قاع القاعدة؛ وفي الردم المائل يشمل أيضاً ارتفاع السطح. وكل ما يقع بين المستوى وظهر الجدار هو **وزن**؛ والمستوى تربة في مواجهة تربة: فلا يحتسب احتكاك الجدار، ويؤثر الدفع بزاوية δ = β.

في الأمام يتحرك الردم الواقع فوق المقدمة أيضاً مع الجدار: حمل رأسي W_{toe}؛ وإذا أدخلت $D_f = 0$ فهذا يعني أنه يمكن احتساب التربة الأمامية.

الجزء الرأسي من **الحمل الإضافي** فوق الكعب (Q_{heel}) في صالح الأمان لكنه يعد حملاً قد يوجد وقد لا يوجد، ولذلك **لا يدخل في أي تحقق**؛ أما أثره الجانبي فيحتسب دائماً.

يجري الحساب بالإجهاد الكلي: توزن التربة المغمورة بالقيمة γ_{sat}، ويضاف الماء نفسه بوصفه قوة مستقلة (U_{rear}، قوة الرفع)؛ ولا تؤخذ γ′ وقوة الرفع معاً.

المستوى الرأسي المار بالحافة الخلفية للقاعدة (جميع الطرق)



المسألة

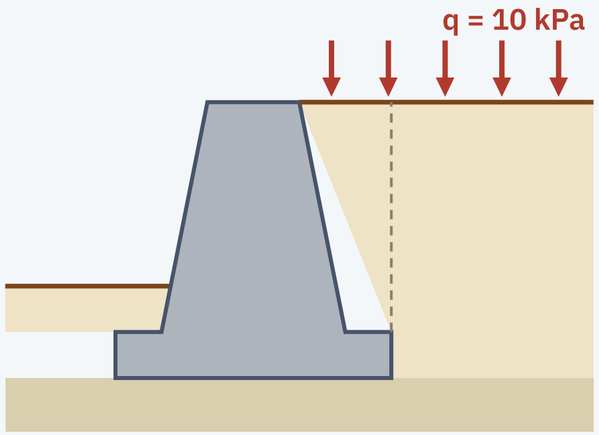
مثال

المعطيات

الجدار	**المقطع في المثال 1؛ ارتفاع التربة الأمامية** $D_f = 1.0$ **m**
التربة	**ردم جاف:** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$**؛ سطح أفقي**
الحمل الإضافي	$q = 10$ **kPa (عند السطح)**

المطلوب

وزن **كتلة التربة** المتحركة مع الجدار وموضعها؛
و**الردم الأمامي**؛ ولماذا لا تدخل Q_{heel} في التحققات؟



الحل (1/2)

الحل

1 المساحة المستطيلة فوق كعب القاعدة + المثلث بجانب المنحدر الخلفي (حتى المستوى x = B = 3.0)

$$A_r = W_{br}(H - H_{fr}) = 0.5(2.5) = 1.250\ \text{m}^2\ (\bar{x} = 2.75,\ \bar{z} = 1.75)$$

$$A_t = \tfrac{1}{2} W_{dr}(H - H_{fr}) = 0.625\ \text{m}^2\ (\bar{x} = 2.333,\ \bar{z} = 2.167)$$

$$W_s = \gamma(A_r + A_t) = 18(1.875) = \mathbf{33.75}\ \text{kN/m}$$

2 الموقع

$$\bar{x}_s = \frac{1.250(2.75) + 0.625(2.333)}{1.875} = \mathbf{2.611}\ \text{m} \qquad \bar{z}_s = \mathbf{1.889}\ \text{m}$$

الحل (2/2)

الحل

3 الردم الأمامي (فوق مقدمة القاعدة، $D_f = 1.0$ m) والحمل الإضافي

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(0.5 + 0.60)(0.5) = 0.275 \text{ m}^2 \quad W_{toe} = 18(0.275) = \mathbf{4.95} \text{ kN/m } (\bar{x} = 0.276)$$

$$Q_{heel} = q(B - x_{BT}) = 10(3 - 2) = \mathbf{10.0} \text{ kN/m}$$ (لا يدخل في أي تحقق)

الحمل الرأسي الكلي $N = W_m + W_s + W_{toe} = 115.50 + 33.75 + 4.95 =$ **154.20 kN/m**. أما Q_{heel} فهو البند «غير المستخدم» في الجدول.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

Rankine وCoulomb، في المستوى الرأسي

إذا كان سطح الردم مائلا بالزاوية β فإن الإجهاد المؤثر على المستوى الرأسي في حل Rankine للمنحدر نصف اللانهائي يكون **موازيا للسطح**: $\sigma'_a = K_{a\beta}\sigma'_v$:

$$K_{a\beta} = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}} \qquad K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'}\ (\beta = 0)$$

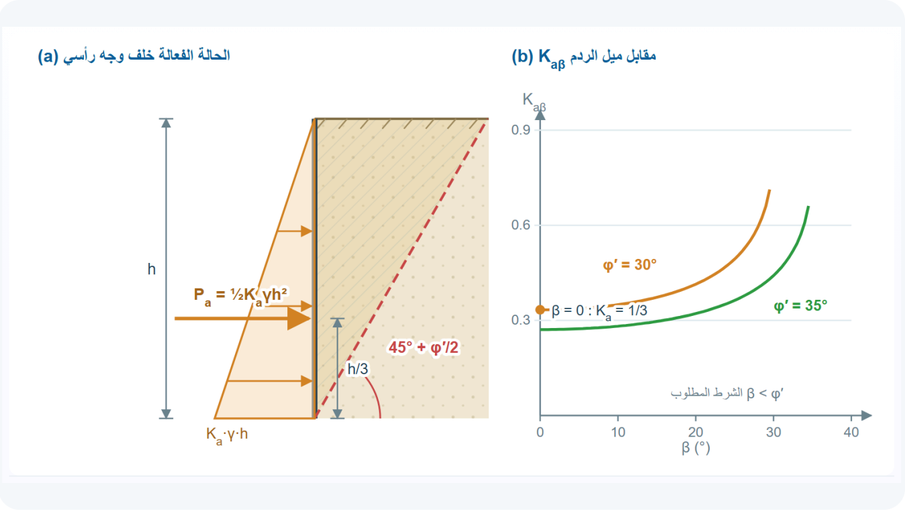
$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ \ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ \ (h/2)$$

الجذر التربيعي يتطلب $\varphi > \beta'$؛ فإذا كان $\beta' \geq \varphi$ كان المنحدر نفسه غير مستقر ويوقف الحساب.

Coulomb: من أجل مستوى رأسي ($\alpha = 90°$) و $\delta = \beta$ تكون K_a مساوية لقيمة $K_{a\beta}$ حسب Rankine **تماماً لأي قيمة β**؛ وتعطي الطريقتان الضغط نفسه على هذا المستوى. h = ارتفاع المستوى (بما في ذلك ارتفاع السطح).

المركبة الأفقية P cos β، والمركبة الرأسية P sin β (في المنحدر الصاعد تتجه إلى الأسفل: مقاومة).

يحسب الحمل الإضافي مرتين (مع q وبدون q)؛ و P_Q هو الفرق.



المسألة

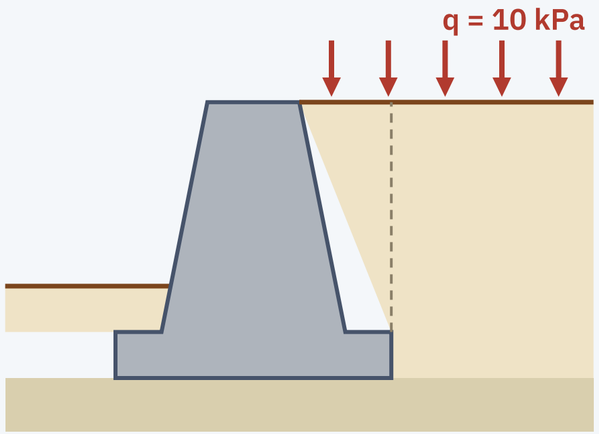
مثال

المعطيات

الجدار والتربة	**الجدار والردم في المثال 2:** $h = H = 3.0$ m؛ $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$؛ **سطح أفقي**
الحمل الإضافي	$q = 10$ kPa

المطلوب

بـ K_a، ودفع التربة P_A ودفع الحمل الإضافي P_Q وعزومها.



الحل

الحل

1 $K_a = (1 - \sin30°)/(1 + \sin30°) = 0.3333$؛ القوى الدافعة (في المستوى الرأسي، أفقية)

$$P_A = \tfrac{1}{2} K_a \gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18)(9) = \mathbf{27.00}\ \text{kN/m} \quad (z = 1.00\ \text{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0.3333(10)(3) = \mathbf{10.00}\ \text{kN/m} \quad (z = 1.50\ \text{m})$$

2 الدفع الأفقي الكلي وعزم الانقلاب (حول مقدمة القاعدة)

$$\Sigma H_{drive} = 27.0 + 10.0 = \mathbf{37.0}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 27.0(1.00) + 10.0(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN·m/m}$$

دفع التربة 27.00 ودفع الحمل الإضافي 10.00 kN/m: المجموع **37.00 kN/m**، وحول المقدمة **42.00 kN·m/m**.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

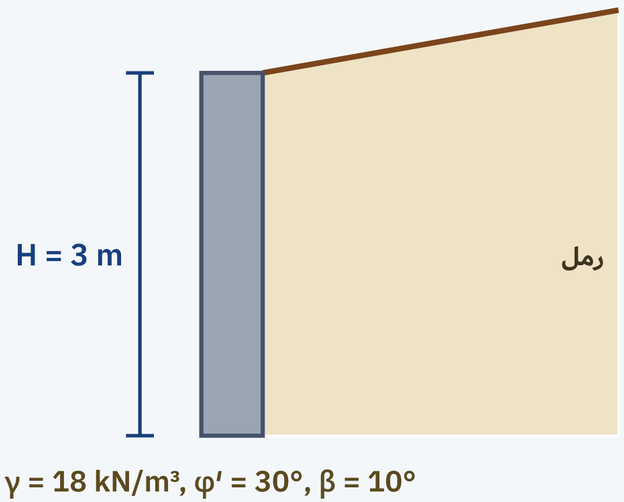
مثال

المعطيات

الجدار والتربة	**الجدار في المثال 2؛ الردم نفسه لكن السطح يرتفع** $\beta = 10^\circ$ **(كلما ابتعدنا عن الجدار)**
الحمل الإضافي	$q = 10$ **kPa**

المطلوب

$K_{a\beta}$، مكونات الدفع؛ تغير النتيجة بالنسبة إلى الردم الأفقي (الانزلاق، الانقلاب، اللامركزية).



الحل (1/2)

الحل

1 المعامل $K_{a\beta}$ ($\cos\beta = 0.9848$، $\sqrt{(\cos^2\beta - \cos^2\varphi')} = 0.4689$)

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - r}{\cos\beta + r} = 0.9848\,\frac{0.5159}{1.4537} = \mathbf{0.3495} \quad (\text{أفقياً } 0.3333)$$

2 قوى الدفع (h = ارتفاع المستوي = H + ارتفاع السطح؛ المحرك الحسابي)

$$P_A:\ F_x = 31.25,\ F_z = 5.51\ \text{kN/m} \quad (\text{أفقي ورأسي})$$

$$P_Q:\ F_x = 10.93,\ F_z = 1.93\ \text{kN/m}$$

الحل (2/2)

الحل

3 التحققات (المحرك)

$$\Sigma F_z = -N = -163.23 \text{ kN/m} \quad (\text{كتلة التربة } 35.34)$$

$$FS_s = 2.412 \qquad FS_o = 5.734 \qquad e = 0.037 \text{ m} \qquad q_{max} = 58.4 \text{ kPa}$$

يزيد الردم الخلفي المائل إلى الأعلى من الدفع ($K_{a\beta}$ 0.333 → 0.350)، لكن **المركبة الرأسية للدفع** وكتلة التربة الأثقل عاملان مقاومان: معامل الأمان FS ضد الانزلاق من 2.62 إلى 2.41، وضد الانقلاب من 6.26 إلى 5.73؛ واللامركزية من 0.068 إلى 0.037 m.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

معامل مختلط بين حالة السكون والحالة المنفعلة

النظرية

تُعرَّف التربة أمام الجدار ($c' = 0$) **بمزيج** من معامل Rankine المنفعل ومعامل Jaky في حالة السكون؛ لأن المقاومة المنفعلة الكاملة تتطلب إزاحة بمقدار لا يسمح به جدار يؤدي وظيفته:

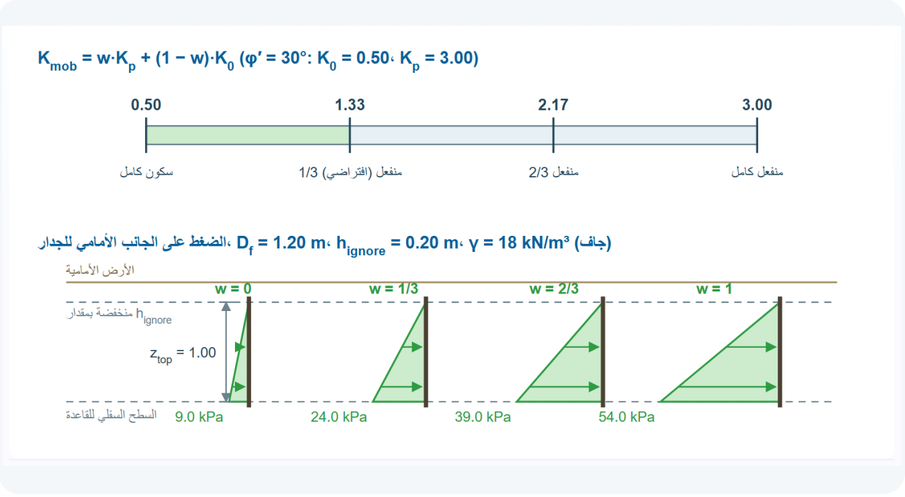
$$K_{mob} = w\,K_p + (1-w)\,K_0 \qquad K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi'/2) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

$$p(z) = K_{mob}\,\sigma'_v(z) \qquad P_P = \tfrac{1}{2}K_{mob}\gamma D_f^2 \;\; (D_f/3)$$

w = 0 حالة السكون الكاملة، 1/3 (القيمة الافتراضية)، 2/3، 1 الحالة المنفعلة الكاملة. ولا تؤخذ في الحساب السماكة العلوية **h_{ignore}** من التربة الأمامية (التي يمكن حفرها أو قد تلين).

تحتسب المقاومة الأمامية **في الانزلاق فقط** (كاملة في الحالة الاستاتيكية، وبالمعامل $\eta_{p,E}$ في الزلازل)؛ و**لا تستخدم إطلاقاً في الانقلاب أو في قدرة التحمل**.

دفع المياه الأمامية (h_{wf}) موجّه نحو الخلف ويقلل الدفع الصافي.



المسألة

مثال

المعطيات

التربة الأمامية

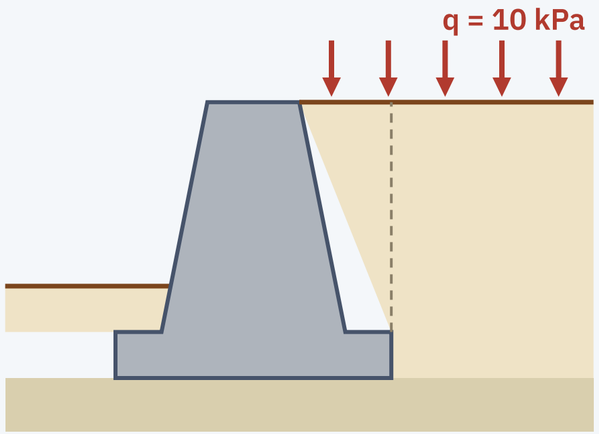
$$\gamma = 18\ \text{kN/m}^3,\ \varphi' = 30^\circ;\ D_f = 1.0\ \text{m};\ h_{ignore} = 0$$

الحالات

السكون الكامل، 1/3، 2/3، المنفعل الكامل؛ وفي حال عدم احتساب المقاومة الأمامية إطلاقاً

المطلوب

K_{mob} وP_P ومعامل الأمان ضد الانزلاق FS_S (للجدار في المثال 2).



الحل

الحل

1 K_{mob} والدفع (القيمة الافتراضية w = 1/3)

$$K_{mob} = \tfrac{1}{3}(3.000) + \tfrac{2}{3}(0.500) = \mathbf{1.333}$$

$$P_P = \tfrac{1}{2} K_{mob} \gamma D_f^2 = \tfrac{1}{2}(1.333)(18)(1)^2 = \mathbf{12.0}\ \text{kN/m} \quad (z = D_f/3 = 0.333\ \text{m})$$

2 الحالات الأربع ($FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive} = (84.81 + P_P)/37.0$)

الحالة	w	K_{mob}	P_P (kN/m)	FS_s
السكون الكامل	0	0.500	4.50	2.414
1/3 منفعل + 2/3 في حالة السكون (افتراضي)	1/3	1.333	12.00	2.616
2/3 من الضغط المنفعل + 1/3 من الضغط في حالة السكون	2/3	2.167	19.50	2.819
منفعل كلي	1	3.000	27.00	3.022
لا تؤخذ مقاومة الإرتكاز في الحسبان	–	–	0	2.292

يغيّر اعتماد المقاومة الأمامية FS_s بين 2.29 و 3.02 (القيمة الافتراضية **2.62**)؛ وإذا أمكن إزالة التربة الأمامية صُفّر هذا الاعتماد: ولذلك يجب اختيار D_f و h_{ignore} عن قصد.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

ثلاثة تحققات من جدول القوى نفسه

الانزلاق: تُثبَّت القاعدة بالاحتكاك؛ القص اللازم $\Sigma H_{drive} - \Sigma P_{resist}$، والقص المتاح $\mu_b N$ (دون التصاق؛ N هي القوة العمودية الفعالة بما فيها الرفع). وتُجمع المقاومة في المقام:

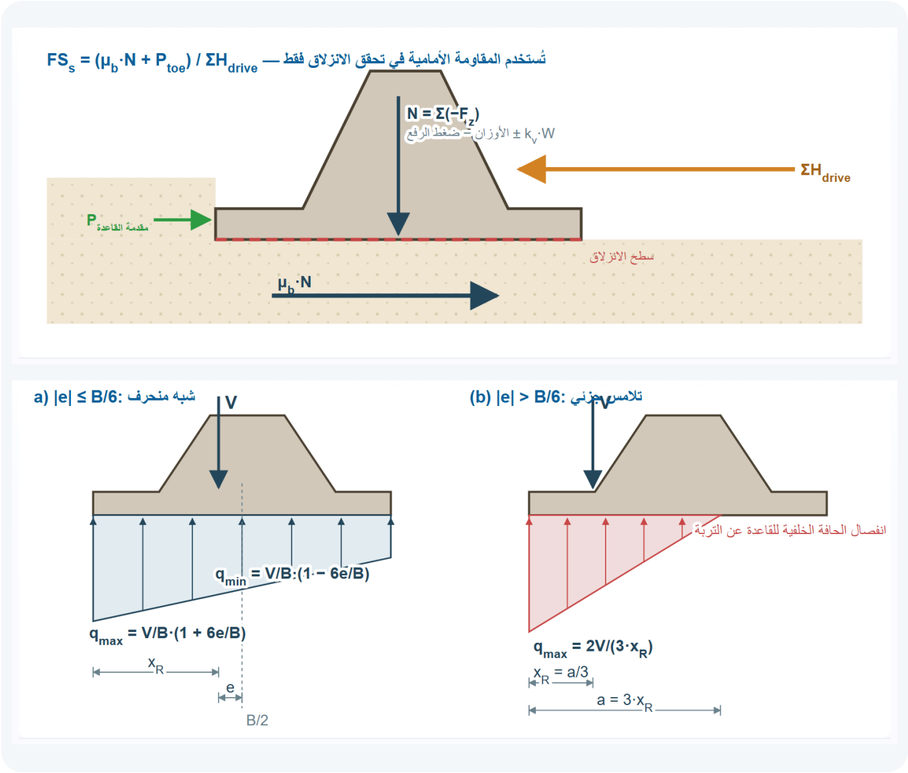
$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad \mu_b = \tan \delta_b$$

الانقلاب حول مقدمة القاعدة: يدخل مركبا $-zF_x$ و xF_z لكل بند في $\Sigma M_{overturning}$ أو $\Sigma M_{resisting}$ بحسب إشارته؛ ولا تدخل المقاومة الأمامية:

$$FS_o = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{ov}} \qquad x_R = -\frac{\Sigma M}{V} \qquad e = \frac{B}{2} - x_R$$

قدرة التحمل: إذا كان $|e| \le B/6$ كانت القاعدة في تماس كامل؛ وإلا فإن التربة لا تتحمل الشد ولا يتلامس إلا جزء من القاعدة:

$$q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}: \quad q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$



المسألة

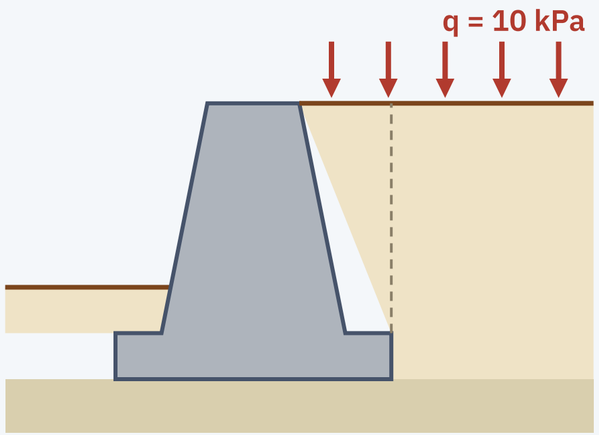
مثال

المعطيات

الجدار والأحمال	**الجدار في الأمثلة 1–5:** $B = 3.0$ m؛ $W_m =$ $115.5,\ W_s = 33.75,\ W_{toe} = 4.95$ kN/m؛ $P_A = 27.0,\ P_Q = 10.0$ kN/m
المقاومة	$\mu_b = 0.55$؛ **المقاومة الأمامية** $P_P = 12.0$ **kN/m**؛ $q_{all} = 200$ **kPa** **(w = 1/3)**
المطلوب	$FS_s \geq 1.5,\ \ FS_o \geq 2.0$؛ **يجب أن تكون القاعدة على تلامس كامل**

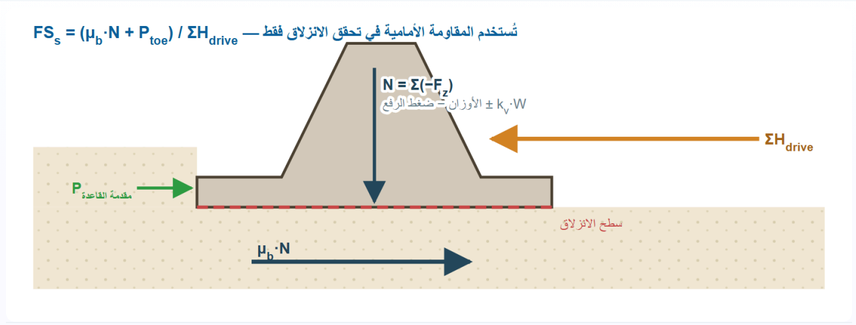
المطلوب

FS_s، FS_o، x_R، e، q_{max}، q_{min} ونتيجة كل تحقق.



الحل (1/3)

الحل



1 احتكاك القاعدة: $N = W_m + W_s + W_{toe}$ (باستثناء Q_{heel})

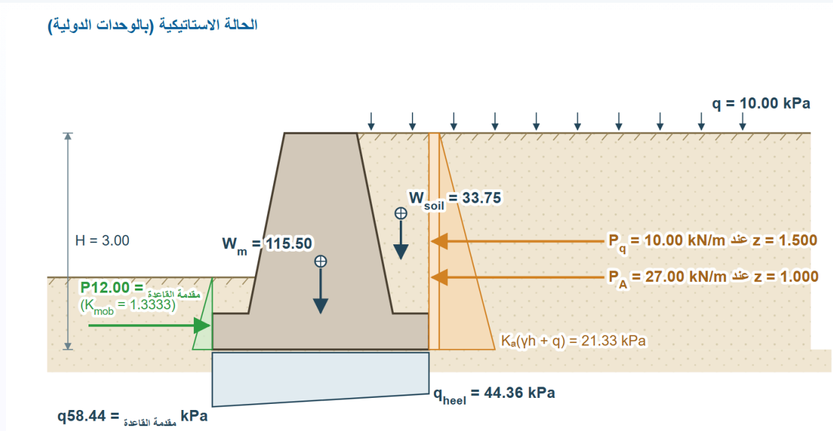
$$N = 115.50 + 33.75 + 4.95 = \mathbf{154.20}\ \text{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0.55(154.20) = 84.81\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{84.81 + 12.0}{37.0} = \mathbf{2.616}\ \geq 1.5\ \checkmark$$

الحل (2/3)

الحل



2 عزم الانقلاب (حول مقدمة القاعدة؛ القوى المسببة للحركة فقط)

$$M_o = P_A(1.00) + P_Q(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN·m/m}$$

3 العزم المقاوم: الجدار + كتلة التربة + الردم الأمامي

$$M_r = W_m\bar{x}_m + W_s\bar{x}_s + W_{toe}\bar{x}_{toe}$$

$$= 173.25 + 88.13 + 1.36 = \mathbf{262.74}$$

$$FS_o = \frac{262.74}{42.0} = \mathbf{6.256}\ \geq 2.0\ \checkmark$$

الحل (3/3)

الحل

4 موضع المحصلة واللامركزية

$$\Sigma M = M_o - M_r = 42.00 - 262.74 = -220.74$$

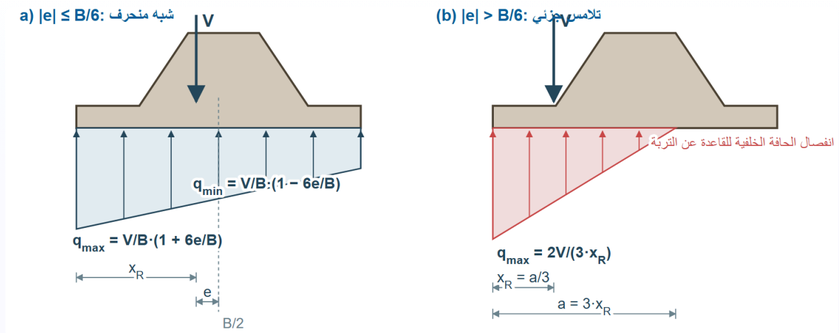
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{220.74}{154.2} = \mathbf{1.4315}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0.0685}\ \text{m} \ \le\ \frac{B}{6} = 0.500\ \checkmark$$

5 إجهادات القاعدة (تلامس كامل)

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.0685)}{3}\right) = \mathbf{58.44}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{44.36}\ \text{kPa}$$



FS_S = **2.62**، FS_O = **6.26**، e = 0.068 m، q_{max} = **58.4 kPa** ≤ 200، q_{min} = 44.4 kPa > 0: **تُستوفى جميع التحققات في الحالة الاستاتيكية.**

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

ماء هيدروستاتيكي على كلا الجانبين، وضغط رفع خطي عند القاعدة

النظرية

ضغط الماء متساوي الخواص ويؤثر عمودياً على كل سطح يلامسه. والجسم الحر محاط بالماء على ثلاثة من حدوده: مستوى الضغط الخلفي، والوجه الأمامي للجدار، والوجه السفلي للقاعدة. ويشكل كل منها بنداً مستقلاً في جدول القوى:

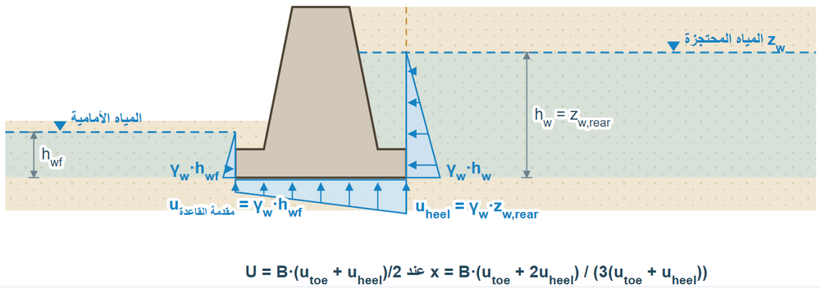
$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \quad (h_w/3) \qquad U_{front} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_{wf}^2 \quad (h_{wf}/3,\ \text{إلى الخلف})$$

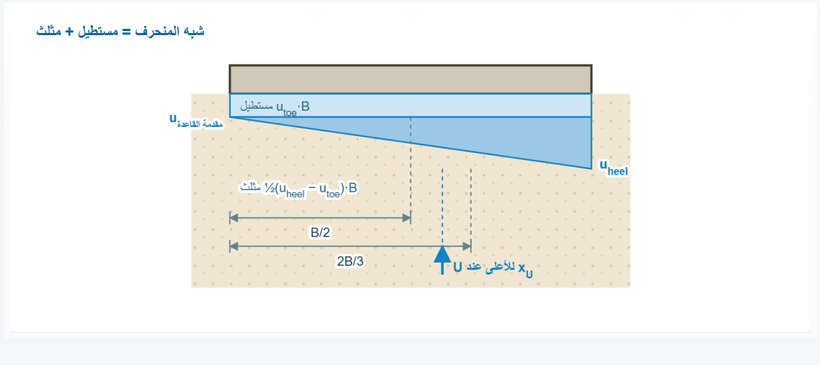
يتغير ضغط ماء المسام تحت القاعدة **خطياً** من الشحنة الهيدروليكية عند المقدمة إلى الشحنة عند الكعب (فقد الشحنة على خط مستقيم):

$$U = \frac{B\,(u_{toe} + u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B\,(u_{toe} + 2u_{heel})}{3\,(u_{toe} + u_{heel})}$$

يؤثر الرفع إلى الأعلى ($F_z = +U$): فيقلل N وبالتالي احتكاك القاعدة، ويضيف عزم انقلاب قدره $U \cdot x_U$.

$h_w = H - z_w$ (z_w: عمق المياه الجوفية من قمة الجدار)؛ ويؤثر ارتفاع الماء الأمامي h_{wf} نحو الخلف ويقلل الدفع الصافي. وإذا اختلف منسوبا الماء وجب النظر في الاستقرار الهيدروليكي (التسرب) على حدة.





المسألة

مثال

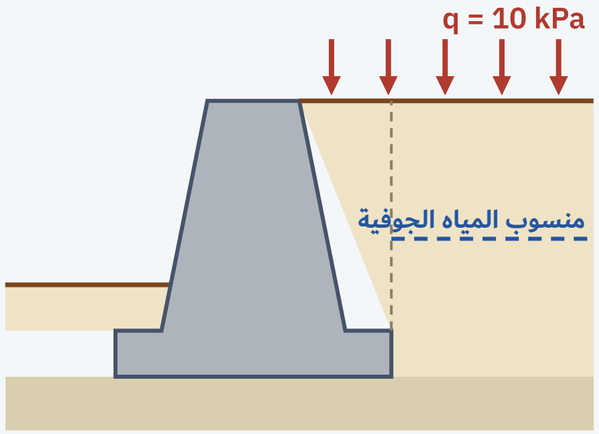
المعطيات

الجدار والتربة	**الجدار والردم في الأمثلة 1–5 (** $\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 20\ \text{kN/m}^3,\ \varphi' = 30^\circ,\ q = 10$ **kPa**
الماء	**في الردم، يقع منسوب المياه الجوفية على عمق 1.5 m أسفل قمة الجدار (**$h_w = 1.5\ \text{m}$**)؛ لا يوجد ماء في الجهة الأمامية؛ ضغط رفع خطي أسفل القاعدة**

)؛ الحالة الساكنة

المطلوب

تغير دفع التربة والماء؛ **الرفع** و **N**؛ e، FS_O، FS_S؛ q_{max}.



الحل (1/2)

الحل

1 دفع التربة (γ في الأعلى، 10.19 = 9.81 − 20 = γ′ في الأسفل) ودفع الماء

$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma d_1^2 + K_a\gamma d_1 d_2 + \tfrac{1}{2}K_a\gamma' d_2^2$$

$$= 6.75 + 13.50 + 3.82 = \mathbf{24.07}\ \text{kN/m} \quad (z = 1.061\ \text{m})$$

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}(9.81)(1.5)^2 = \mathbf{11.04}\ \text{kN/m} \quad (z = 0.50\ \text{m}) \qquad P_Q = 10.0$$

2 ضغط الرفع (u = 0 عند المقدمة، u = 9.81·1.5 = 14.72 kPa عند الحافة الخلفية؛ مثلثي)

$$U = \tfrac{1}{2}(14.72)(3.0) = \mathbf{22.07}\ \text{kN/m (إلى أعلى)} \quad \text{at } x_U = \tfrac{2B}{3} = 2.00\ \text{m}$$

الحل (2/2)

الحل

3 القوة العمودية الفعالة والاحتكاك (مع كتلة التربة $W_s = 34.95$:γ_{sat})

$$N = W_m + W_s + W_{toe} - U = 115.50 + 34.95 + 4.95 - 22.07 = \mathbf{133.33}\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{0.55(133.33) + 12.0}{24.07 + 10.0 + 11.04} = \frac{85.33}{45.11} = \mathbf{1.892}$$

4 الانقلاب والقاعدة

$$M_o = 25.54 + 15.00 + 5.52 + 44.14 = 90.20 \quad (P_A,\ P_Q,\ U_{rear},\ \text{(القلع)}\ \text{قوة الرفع}) \qquad M_r = 265.98$$

$$FS_o = \frac{265.98}{90.20} = \mathbf{2.949} \qquad x_R = \frac{175.78}{133.33} = 1.318\ \text{m} \qquad e = 0.182\ \text{m}$$

$$q_{max} = \mathbf{60.58} \qquad q_{min} = \mathbf{28.30}\ \text{kPa}$$

خفض الماء قيمة FS_s من 2.62 إلى **1.89**، وقيمة FS_o من 6.26 إلى **2.95**، وقيمة q_{min} من 44.4 إلى 28.3 kPa (قللت قوة الرفع N بمقدار 22.1 kN/m وأضافت عزم انقلاب قدره 44.1 kN·m/m)؛ وتظل التحققات محققة.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

قوة دفع Mononobe–Okabe والقصور الذاتي للجدار

في الطريقة شبه الاستاتيكية تؤثر على كل كتلة قوة أفقية $k_h mg$ وقوة رأسية $\pm k_v mg$؛ والاتجاه الحرج هو الذي يدفع فيه القصور الذاتي إلى الأمام (في اتجاه الدفع نفسه). ويشبه تأثير الجاذبية والقصور الذاتي معاً مجال جاذبية مدار بزاوية θ؛ ويحل إسفين Coulomb بقوى القصور الذاتي (Mononobe–Okabe). في المستوى الرأسي، وللردم الأفقي ($\delta = \beta = 0$):

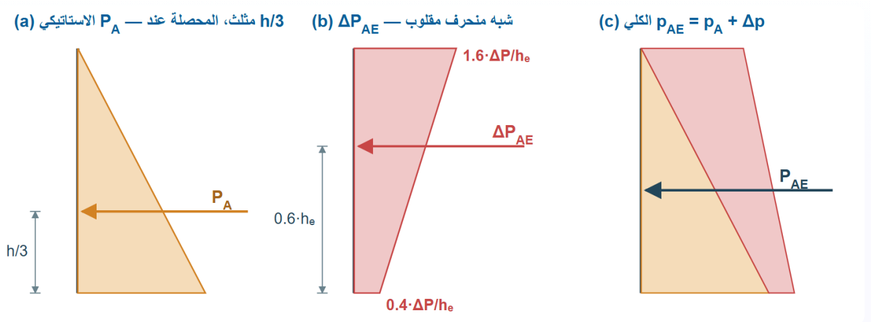
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2} \qquad P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right)K_{AE}$$

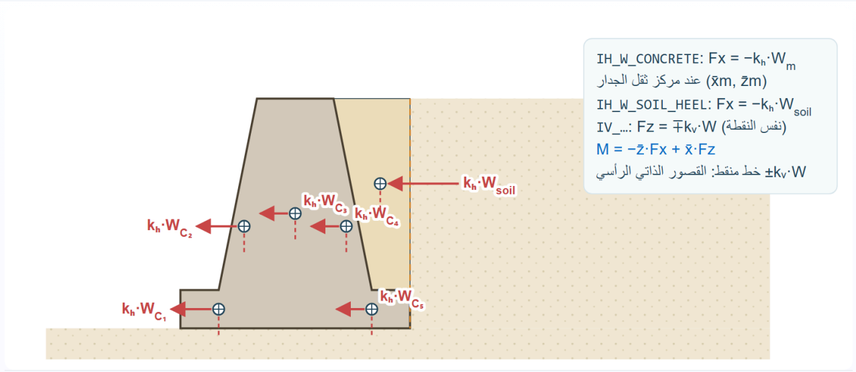
إذا كان $\varphi' - \theta < 0$ فلا يمكن لأي إسفين أن يبقى في حالة اتزان: «لا يوجد حل»، وتُعد التحققات غير محققة.

التوزيع: تعطي P_{AE} المقدار ولا تعطي موضعه. $\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_{A,static}$ على شكل شبه منحرف مقلوب ($1.6\Delta P/h$ في الأعلى و $0.4\Delta P/h$ في الأسفل؛ المحصلة عند **0.6h**)؛ ويحتفظ الجزء الاستاتيكي بشكله الاستاتيكي.

القصور الذاتي: تدفع القوة $k_h W$ الجدار وكتلة التربة والردم الأمامي إلى الأمام عند مركز ثقل كل منها؛ وإذا كان $k_v > 0$ فتدرس الحالتان بالعامل $(1 \pm k_v)$ ويكون أصغر FS هو الحاكم. ويضاف الضغط الهيدروديناميكي للماء $k_h\gamma_w h_w^2(7/12)$ (عند $0.4h_w$).

تضرب المقاومة المنفعلة الأمامية في $\eta_{p,E}$ عند الزلزال؛ والقيمة الافتراضية **0** (لا يعتد بها).





المسألة

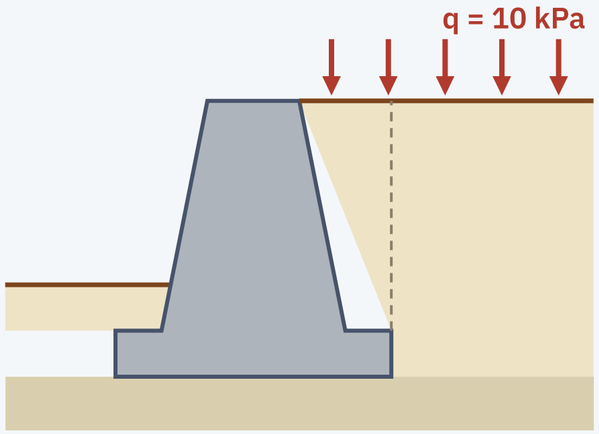
مثال

المعطيات

الجدار والتربة	**الجدار والردم في الأمثلة 1–6 (FS_s الاستاتيكي = 2.62؛ FS_o = 6.26)**
الزلزال	**المقاومة الأمامية المعتمدة؛** $k_h = 0.15$، $k_v = 0$ **المطلوب؛** $\eta_{p,E} = 0$ $FS_s,\ FS_o \geq 1.1$

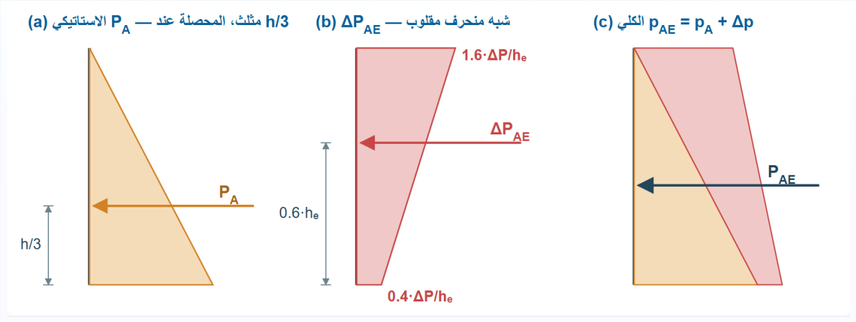
المطلوب

$\bar{z}$، ΔP_{AE}، P_{AE}، K_{AE}، **θ**؛ قوى القصور الذاتي؛ FS_s، q_{max}، e، FS_o.



الحل (1/3)

الحل



1 الزاوية الزلزالية والمعامل

$$\theta = \tan^{-1} 0.15 = 8.53^\circ$$

$$\sqrt{\sin 30^\circ \sin(30^\circ - 8.53^\circ)/\cos 8.53^\circ} = 0.4302$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(21.47^\circ)}{\cos^2 8.53^\circ\,(1+0.4302)^2} = \mathbf{0.4329}$$

2 الدفع الديناميكي والزيادة الزلزالية (الاستاتيكي $P_A + P_Q = 37.0$ kN/m)

$$P_{AE} = (81+30)(0.4329) = \mathbf{48.06}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 48.06 - 37.0 = \mathbf{11.06}\ \text{kN/m}\ \ (0.6h)$$

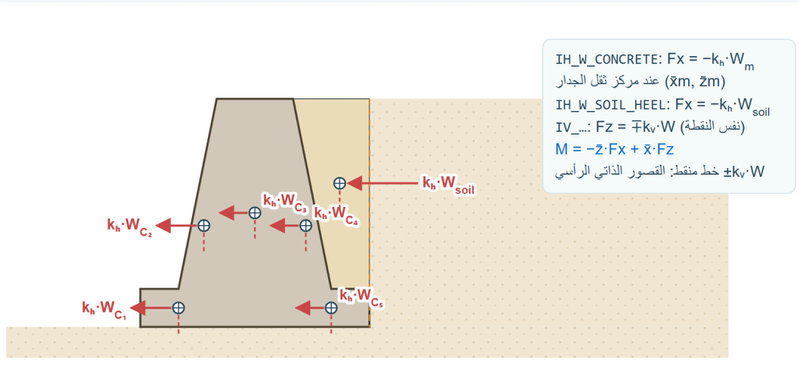
3 ارتفاع نقطة تأثير الحمل

$$\bar{z}_{AE} = [27.0(1.00) + 10.0(1.50) + 11.06(1.80)]/48.06$$

$$= 61.90/48.06 = \mathbf{1.288}\ \text{m}$$

الحل (2/3)

الحل



4 قوى القصور الذاتي $k_h W$ (عند مراكز الثقل، إلى الأمام)

$$IH_m = 0.15(115.50) = 17.325 \quad (z = 1.222\ \text{m})$$

$$IH_s = 0.15(33.75) = 5.062 \quad (z = 1.889\ \text{m})$$

$$IH_{toe} = 0.15(4.95) = 0.743 \quad (z = 0.758\ \text{m})$$

5 الانزلاق (دون احتساب المقاومة الأمامية)

$$\Sigma H_{drive} = 48.06 + 17.32 + 5.06 + 0.74 = 71.19$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{84.81}{71.19} = \mathbf{1.191} \ \geq 1.1 \ \checkmark$$

الحل (3/3)

الحل

6 الانقلاب وموضع المحصلة

$$M_{o,E} = P_{AE}\bar{z} + \Sigma IH\, z = 61.90 + 21.18 + 9.56 + 0.56 = 93.20$$

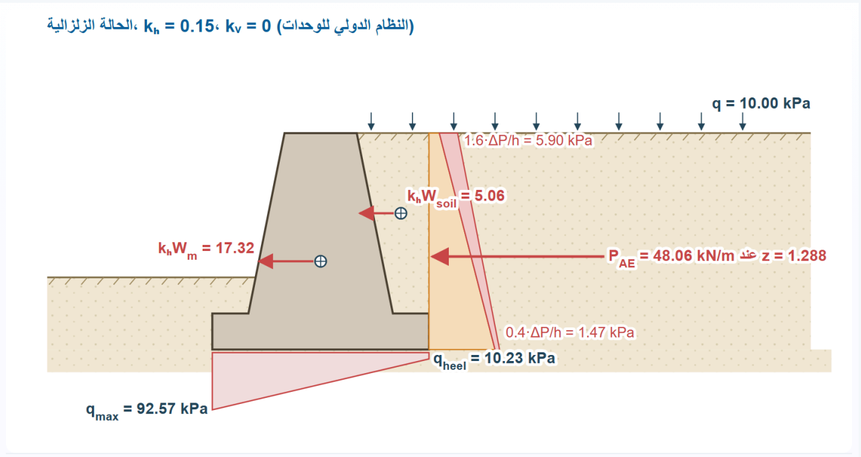
$$FS_{o,E} = \frac{262.74}{93.20} = \mathbf{2.819} \;\geq 1.1$$

$$x_R = \frac{262.74 - 93.20}{154.2} = 1.099 \text{ m} \qquad e = \mathbf{0.401} \text{ m}$$

7 إجهادات القاعدة (|e| = 0.401 m ≤ B/6 = 0.50 m: تلامس كامل)

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.401)}{3}\right) = \mathbf{92.57} \text{ kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{10.23} \text{ kPa}$$



في حالة الزلزال q_{max} = **92.6 kPa**، FS_s = **1.19**، FS_o = **2.82**، e = **0.401 m**؛ فقد غير الزلزال قيمة FS_s من 2.62 إلى 1.19 وقيمة e من 0.068 إلى 0.401 m: ويعد **الانزلاق** و**اللامركزية** التحققين الحاكمين.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

حيث تنتهي عمليات التحقق

النظرية

تعامل هذه الفحوص الجدار على أساسه **ككتلة صلبة واحدة**: أي **الاستقرار الخارجي** للجدار. وقد ينهار الجدار التثاقلي الحجري أو الخرساني الكتلي أيضاً **من الداخل** (ولا سيما في المقطع العالي أو النحيل، وفي الجدران الحجرية الجافة، وعند ضعف الملاط، وفي الزلزال)؛ وتجرى الفحوص الخاصة بذلك انطلاقاً من التأثيرات التي تعطيها هذه الوحدة.

ردم غير متماسك ($c' = 0$)؛ ولا تتضمن هذه الوحدة ردماً من تربتين أو ردماً متعدد الطبقات. سطح الردم أفقي أو ذو ميل واحد.

احتكاك القاعدة $\mu_b = \tan \delta_b$ (يكون عادة من $2/3\varphi'$ إلى φ' للجدران الحجرية/الخرسانية)؛ ولا يؤخذ الالتصاق في الحساب. وتضاف المقاومة المنفعلة الأمامية بكاملها إلى مساهمة الاحتكاك، ولا تستخدم في الانقلاب ولا في قدرة التحمل.

الحساب لكل 1.00 m من طول الجدار؛ وتضاف الضغوط الجانبية للحمل الإضافي الشريطي والنقطي بطريقة Boussinesq (جدار جاسئ).

التأثيرات المسببة للانزلاق (الاستقرار الهيدروليكي، والتسرب، والاستقرار الكلي، والهبوط) خارج نطاق هذه الوحدة.

النقاط الرئيسية

الجسم الحر = الجدار + التربة التي تتحرك معه؛ ويؤثر الضغط **على المستوى الرأسي عند الحافة الخلفية للقاعدة** ($\beta = \delta$)؛ وقاعدة إشارة واحدة: $M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$، والانقلاب موجب +

الوزن: $W_i = \gamma_m A_i$، $\bar{x} = \Sigma W_i \bar{x}_i / \Sigma W_i$؛ وتتحرك كتلة التربة والردم الأمامي أيضاً مع الجدار؛ أما الحمل الإضافي فوق كعب القاعدة الخلفي (Q_{heel}) فلا يدخل في أي تحقق

الفعال: $P_Q = K_a q h$ (h/2)، $P_A = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2$ (h/3)؛ وفي الردم المائل $K_{a\beta}$ (على المستوى الرأسي Rankine = Coulomb)؛ **المنفعل**: $K_{mob} = wK_p + (1 - w)K_0$، في حالة الانزلاق فقط

الانزلاق $FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive}$؛ **الانقلاب** $FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$ (حول مقدمة القاعدة)؛ **قدرة التحمل**: $q = V/B(1 \pm 6e/B)$، $e = B/2 - x_R$، $x_R = -\Sigma M/V$، وإذا كان $|e| > B/6$ فإن $q_{max} = 2V/(3x_R)$

الماء: الوزن بقيمة $U_{rear} + \gamma_{sat}$ كبند مستقل؛ وضغط الرفع u_{toe} عند المقدمة – u_{heel} عند الكعب، بتغير خطي: يخفض N′ ويضيف عزم انقلاب

الزلزال: $\theta = \tan^{-1} k_h/(1 - k_v)$؛ $P_{AE} = (\frac{1}{2}\gamma h^2 + qh)K_{AE}$؛ ΔP_{AE} عند 0.6h؛ $k_h W$ قوة القصور الذاتي؛ اعتماد المقاومة المنفعلة الأمامية $\eta_{p,E}$ (القيمة الافتراضية 0)

المراجع

النظريات الثلاث المستعملة في الأداة والمصدر الذي تم اتباع عرضه للصيغ المغلقة (Ka, Kp, KAE) في الدليل. كل ما لم يُشتق منها يُعد فرضية خاصة بهذه الوحدة ومُشار إليه كذلك في النص.

Coulomb C.A. (1776) Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 7, Paris.

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

Mononobe N., Matsuo H. (1929) On the determination of earth pressures during earthquakes. Proceedings of the World Engineering Congress, Tokyo, 9:177–185.

Okabe S. (1926) General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers 12(1).

Rankine W.J.M. (1857) On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 147:9–27.

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية مستخرجة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. والمثال خطوة بخطوة في صفحة الوحدة هو هذا الجدار أيضاً (جدار حجري H = 3 m، q = 10 kPa، k_h = 0.15).

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل في GeoTerva مقطع جدارك الخاص وردمه وحمله الإضافي ومياهه ومعاملاته الزلزالية؛ وتعطي الوحدة جدول القوى والتحققات الثلاثة وإجهادات القاعدة معاً.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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