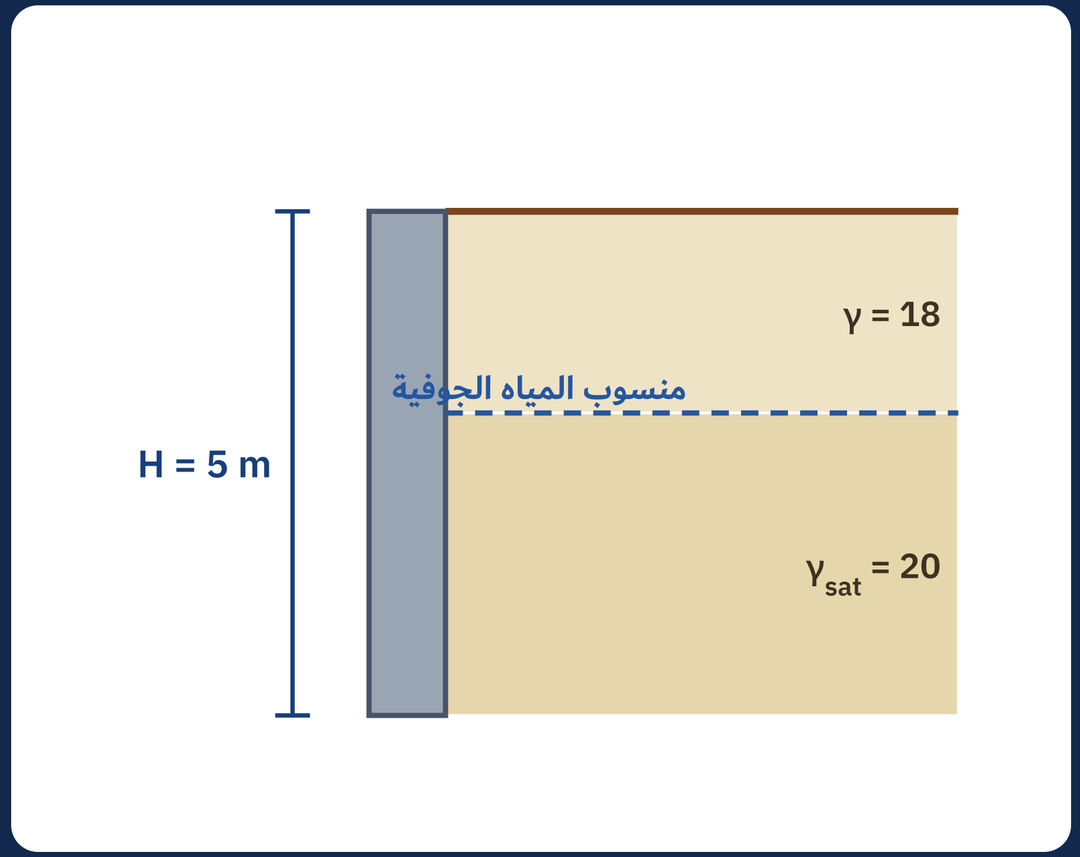


شرائح محاضرات الجيوتكنيك · ضغط التربة الجانبي

ضغط التربة في حالة السكون

المحاضرة: ضغط السكون خلف جدار لا يستطيع التحرك (جدار بدروم، دعامة قوس، عبّارة)؛ علاقات المعامل K_0، والردم الجاف والمغمور بالماء، والتربة الطبقية؛ مثال محلول في كل موضوع.

$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_o$ · Jaky · Mayne–Kulhawy · Massarsch · Sherif

ردم طبقي · المياه الجوفية

يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

- متى ينشأ **ضغط التربة في حالة السكون** وعلاقته بالحالتين الفعالة / المنفعلة
- حساب **معامل K_0** في الرمل (Jaky، Sherif)، وفي التربة مفرطة الانضمام (Mayne–Kulhawy)، وفي الطين (Massarsch)
- القوة $P_0 = \frac{1}{2}K_0\gamma H^2$ وارتفاع نقطة تأثيرها $H/3$ في الردم الجاف
- **كيف يضيف منسوب المياه الجوفية** ضغطاً؛ وقفزة K_0 عند حد الطبقة في الردم المتطبق
- مقارنة حالات الضغط الفعال والسكون والمنفعل وحركة الجدار المطلوبة

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات:**

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

2 · **المسألة:** المعطيات والمطلوب

3 · **الحل:** خطوة بخطوة، بالأرقام

القوى لكل وحدة طول من الجدار (kN/m)؛ الضغوط بوحدة kPa، والإجهادات فعالة.

جدار غير قابل للحركة

النظرية

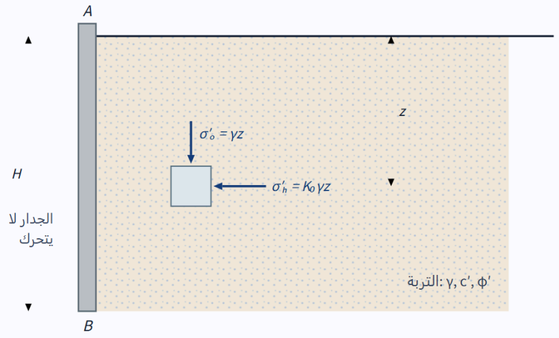
الجدار المثبت بأرضيات الطوابق السفلية (القبو)، أو ركيزة القوس المرتكزة على خوازيق، أو جدار العبارة **لا يستطيع التحرك**؛ فتحتفظ التربة خلفه بحالة الإجهاد التي كانت عليها في موقعها الطبيعي. ونسبة الإجهاد الأفقي الفعال إلى الإجهاد الرأسي الفعال هي **معامل ضغط التربة في حالة السكون**:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} \qquad \sigma'_o = \gamma z \qquad \sigma'_h = K_0 \gamma z$$

إذا ابتعد الجدار عن التربة **ينخفض** الضغط إلى القيمة الفعالة، وإذا دفع نحو التربة **يرتفع** إلى القيمة المنفعلة؛ $K_a < K_0 < K_p$.

تكون الحركات المطلوبة صغيرة في حالة الضغط الفعال وكبيرة في حالة الضغط المنفعل (النظرية: الحركة المطلوبة).

يؤخذ K_0 من الاختبار (مقياس الضغط، مقياس التمدد) أو من علاقة تجريبية؛ ويستخدم البرنامج إحدى الطريقتين لكل طبقة.



النظرية

الرمل والتربة مفرطة الانضمام والطين

$$K_0 = 1 - \sin\varphi' \qquad \text{(Jaky 1944، رمل، NC)}$$

$$K_0 = (1 - \sin\varphi') + \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(min)}} - 1\right) 5.5 \qquad \text{(Sherif وآخرون 1984، رمل مدموك)}$$

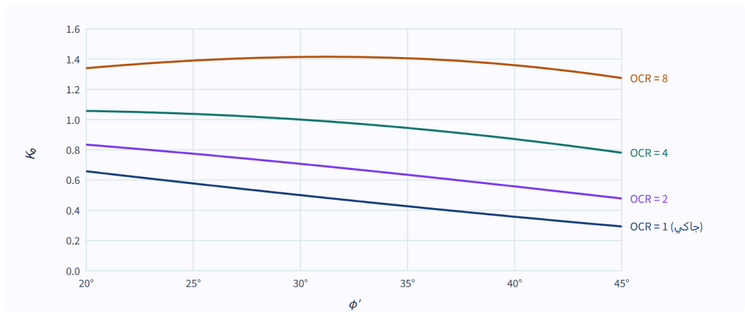
$$K_0 = (1 - \sin\varphi')\, OCR^{\sin\varphi'} \qquad \text{(Mayne–Kulhawy 1982)}$$

$$K_{0(NC)} = 0.44 + 0.42\frac{PI(\%)}{100} \qquad K_{0(OC)} = K_{0(NC)}\sqrt{OCR} \qquad \text{(Massarsch 1979، طين)}$$

تعطي علاقة Jaky ضغطاً **أقل** من الواقع في الرمل المدموك: إذ يجعل الدمك الردم مفرط الانضمام؛ ويصحح Sherif ذلك بالنسبة $\gamma_d/\gamma_{d,min}$.

OCR = نسبة أكبر إجهاد فعال سابق إلى الإجهاد الفعال الحالي. وعند OCR = 4 و $\varphi' = 30°$ يكون $K_0 = 1$: أي أن الإجهادين الأفقي والرأسي متساويان.

K_0 – φ′ (منحنيات OCR)



المسألة

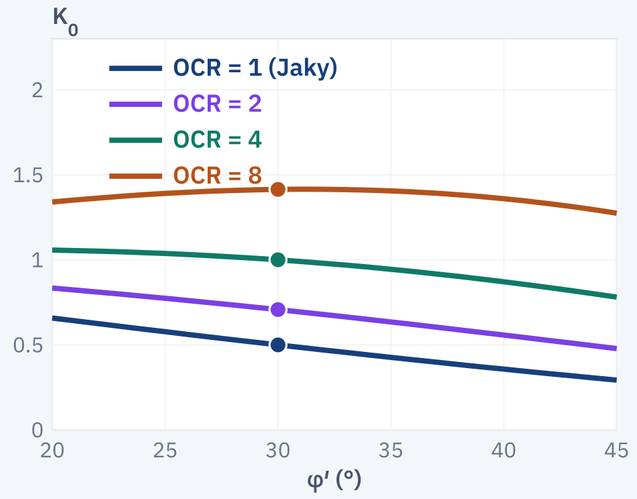
مثال

المعطيات

التربة	**رمل غير متماسك،** $\varphi' = 30^\circ$
الحالات	$OCR = 1,\ 2,\ 4,\ 8$ **(وكذلك** $\varphi' =$ $25^\circ,\ 35^\circ,\ 40^\circ$ **من أجل** $OCR = 1$**)**

المطلوب

K_0 لكل حالة؛ وقيمة OCR التي يكون عندها $K_0 = 1$؛ والمقارنة مع K_a و K_p حسب Rankine.



الحل

الحل

1 رمل عادي الانضمام (Jaky)

$$\varphi' = 30^\circ: \; K_0 = 1 - \sin 30^\circ = \mathbf{0.5000}$$

$$\varphi' = 25^\circ: \; 0.577 \qquad 35^\circ: \; 0.426 \qquad 40^\circ: \; 0.357$$

2 مفرط الانضمام (أس OCR يساوي sin φ′ = 0.5)

OCR	1	2	4	8
$K_0 = 0.5 \cdot OCR^{0.5}$	0.500	0.707	1.000	1.414

تزداد K_0 بزيادة OCR: فعند OCR = 4 تكون **$K_0 = 1$** (إجهاد هيدروستاتيكي)، وعند OCR = 8 تبلغ 1.41. أما قيمتا Rankine $K_a = 0.333$ و $K_p = 3.0$ فتقعان خارج مدى جميع قيم OCR: ويتحقق دائما $K_a < K_0 < K_p$.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

التربة

ردم رملي مدموك: $\varphi' = 34^\circ$، **الوزن الحجمي الجاف** $\gamma_d = 16.0\ \text{kN/m}^3$؛ **في أكثر حالاته تخلخلاً** $\gamma_{d(min)} = 14.5\ \text{kN/m}^3$

المطلوب

$\mathbf{K_0}$ (Sherif) والمقارنة مع Jaky.

الحل

الحل

1 Jaky (دون دمك)

$$K_0 = 1 - \sin 34^\circ = \mathbf{0.4408}$$

2 Sherif: بدل الانضغاط

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(min)}} - 1 = \frac{16.0}{14.5} - 1 = 0.1034$$

$$K_0 = 0.4408 + (0.1034)(5.5) = \mathbf{1.010}$$

رفع الدمك قيمة K_0 من 0.44 إلى **1.01** (أي 2.3 مرة): ولذلك يجب أن يتحمل الجدار خلف الردم المدموك ضغطاً أكبر بكثير مما يعطيه الحساب لحالة عادي الانضمام.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

التربة: **الطين: مؤشر اللدونة** $PI = 25\%$

الحالات: $OCR = 1$ **و** $OCR = 2$**؛ وكذلك** $PI = 10,\ 40,\ 60\%$

المطلوب

K_0 للطين عادي الانضمام ومفرط الانضمام.

الحل

الحل

1 % PI = 25

$$K_{0(NC)} = 0.44 + 0.42\frac{25}{100} = \mathbf{0.5450}$$

$$K_{0(OC)} = K_{0(NC)}\sqrt{OCR} = 0.5450\sqrt{2} = \mathbf{0.7707}$$

2 الزيادة مع اللدونة

(%) PI	$K_{0(NC)}$	OCR = 2	OCR = 4
10	0.482	0.682	0.964
25	0.545	0.771	1.090
40	0.608	0.860	1.216
60	0.692	0.979	1.384

في الطين تزداد K_0 بزيادة اللدونة؛ وعند OCR = 2 و PI = 25% تساوي **0.771**. وفي الطين مفرط الانضمام تضرب K_0 في $\sqrt{OCR}$ (وهذا المعامل ليس جزءاً من علاقة Massarsch، بل تقريب شائع).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

مثلث الضغط والقوة

النظرية

في ردم جاف وزنه الحجمي γ يزداد الإجهاد الأفقي الفعال خطياً مع العمق؛ والقوة المؤثرة على وحدة الطول من الجدار هي مساحة المثلث، وتؤثر على ارتفاع H/3 فوق القاعدة:

$$\sigma'_h = K_0 \gamma z \qquad P_0 = \tfrac{1}{2} K_0 \gamma H^2 \qquad \bar{z} = \tfrac{H}{3}$$

في الردم الطبقي يُجمع σ'_o طبقة بعد طبقة وتأخذ كل طبقة قيمة K_0 الخاصة بها: وعند كل حد تتغير فيه K_0 **تقفز σ'_h ولا تقفز σ'_o**.

تنمو القوة مع H^2؛ ويؤدي OCR والانضغاط إلى زيادة القوة بالتناسب الطردي مع K_0.

المسألة

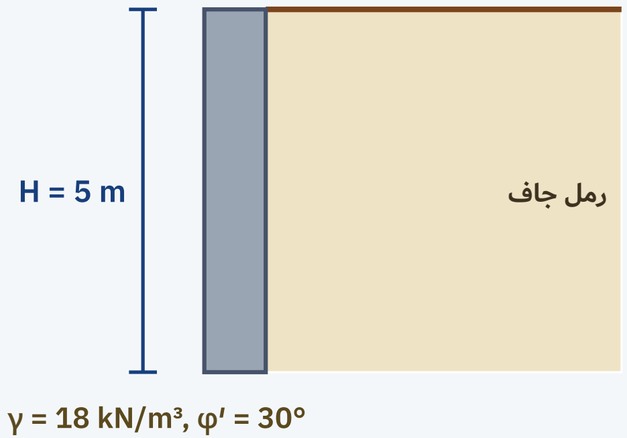
مثال

المعطيات

الجدار	$H = 5$ m، **غير قابل للحركة**
التربة	**رمل جاف:** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$
الحالات	$OCR = 1$ و $OCR = 2$

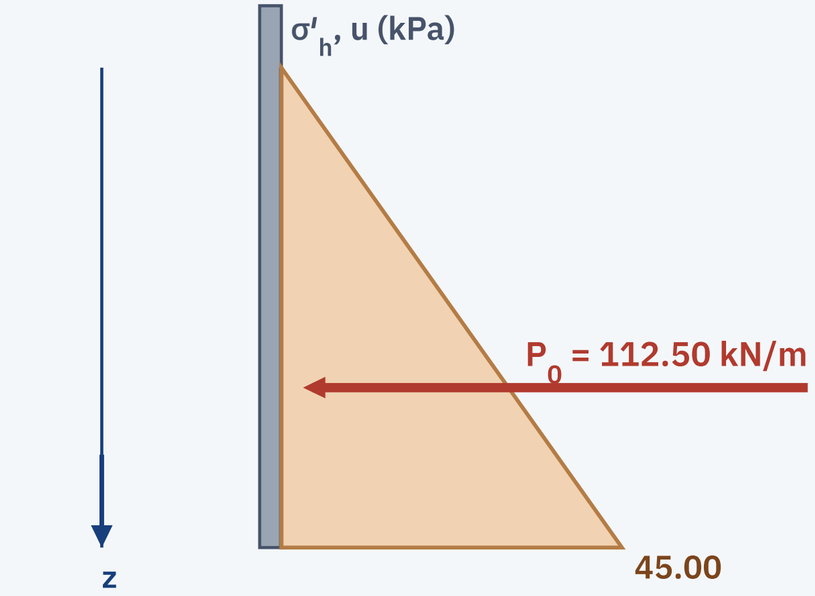
المطلوب

$\sigma'_h(H)$ و P_0 وارتفاع نقطة التأثير لكل حالة.



الحل

الحل



1 OCR = 1 (حسب Jaky: $K_0 = 0.5$)

$$\sigma'_h(5) = K_0\gamma H = 0.5(18)(5) = \mathbf{45.00}\ \text{kPa}$$

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(45.00)(5) = \mathbf{112.50}\ \text{kN/m} \qquad \bar{z} = \tfrac{5}{3} = 1.67\ \text{m}$$

2 OCR = 2 (Mayne–Kulhawy: $K_0 = 0.7071$)

$$\sigma'_h(5) = 0.7071(18)(5) = \mathbf{63.64}\ \text{kPa}$$

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(63.64)(5) = \mathbf{159.10}\ \text{kN/m}$$

OCR = 1) P_0 = **112.50 kN/m**، و OCR = 2) **159.10 kN/m**، وكلتاهما على ارتفاع 1.67 m فوق القاعدة؛ وقد زاد الإفراط في الانضمام القوة بنسبة 41%.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

الإجهاد الفعال + ضغط الماء

النظرية

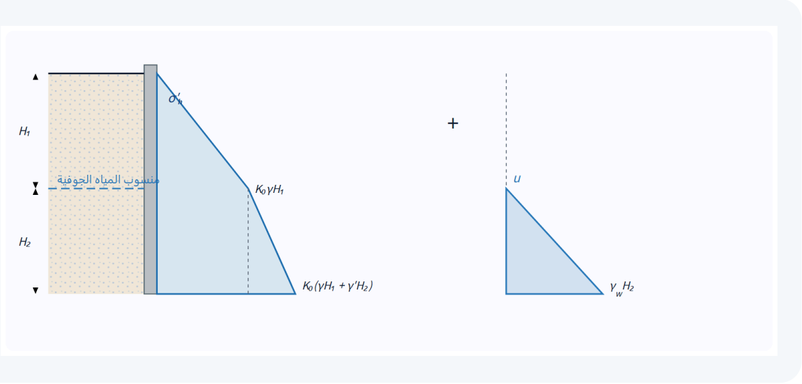
إذا كانت المياه الجوفية على عمق H_1 (دون وجود ماء أمام الجدار) فإن $\sigma'_h = K_0\gamma z$ فوقها؛ وتحتها يوجد الإجهاد الفعال بالوزن $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$، ويضاف ضغط الماء كاملاً **بصورة مستقلة** عن K_0:

$$\sigma'_h = K_0\left[\gamma H_1 + \gamma'(z - H_1)\right] \qquad u = \gamma_w(z - H_1) \qquad \sigma_h = \sigma'_h + u$$

$$P_0 = \tfrac{1}{2}K_0\gamma H_1^2 + K_0\gamma H_1 H_2 + \tfrac{1}{2}\left(K_0\gamma' + \gamma_w\right)H_2^2$$

يحسب ارتفاع نقطة التأثير من عزم المساحات حول نقطة القاعدة.

$\gamma_w = 9.81$، $K_0\gamma' \approx 0.5\cdot 10 = 5$: **كثيراً ما تكون حصة الماء أكبر من حصة التربة.**



المسألة

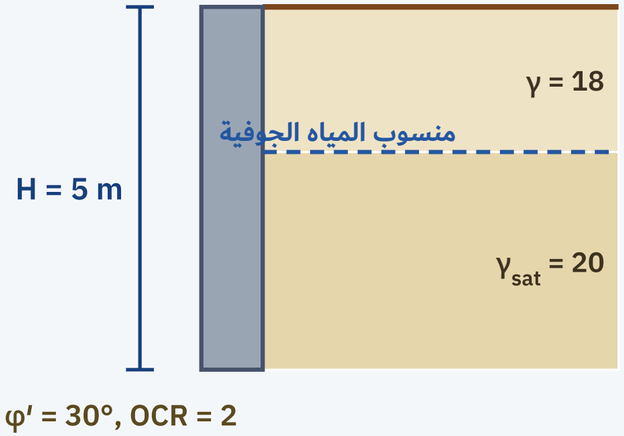
مثال

المعطيات

الجدار	$H = 5$ m، **غير قابل للحركة**
التربة	**رمل:** $c' = 0,\ \varphi' = 30^\circ,\ OCR = 2$؛ $\gamma =$ 18 kN/m^3 **(أعلى)**، $\gamma_{sat} = 20$ kN/m^3 **(أسفل)**
المياه الجوفية	**عند عمق 2 m؛ لا يوجد ماء أمام الجدار**

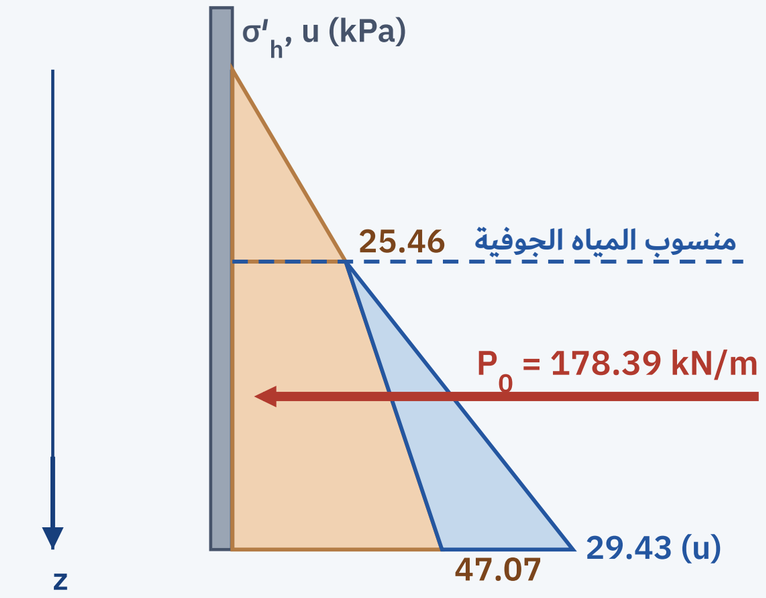
المطلوب

مخطط الضغط، والمحصلة الكلية P_0 (التربة + الماء) وارتفاع خط التأثير. تبدأ الوحدة بهذا الجدار.



الحل (1/2)

الحل



1 K_0 والإجهادات

$$K_0 = (1 - \sin 30^\circ)\, 2^{\sin 30^\circ} = \mathbf{0.7071}$$

$$z = 2: \ \sigma'_o = 36 \ \rightarrow \ \sigma'_h = 0.7071(36) = 25.46 \text{ kPa}$$

$$z = 5: \ \sigma'_o = 36 + 3(20 - 9.81) = 66.57 \ \rightarrow \ \sigma'_h = \mathbf{47.07} \text{ kPa}$$

$$u = 9.81(3) = \mathbf{29.43} \text{ kPa}$$

الحل (2/2)

الحل

2 المساحات: المثلث العلوي · المستطيل السفلي · المثلث السفلي · مثلث الماء

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(2)(25.46) + 3(25.46) + \tfrac{1}{2}(3)(21.62) + \tfrac{1}{2}(3)(29.43)$$
$$= 25.46 + 76.37 + 32.42 + 44.14 = \mathbf{178.39}\ \text{kN/m}$$

3 ارتفاع نقطة التأثير (أذرع العزم 3.67؛ 1.50؛ 1.00؛ 1.00 m)

$$\bar{z} = \frac{25.46(3.67) + 76.37(1.50) + 32.42(1.00) + 44.14(1.00)}{178.39} = \mathbf{1.59}\ \text{m}$$

P_0 = 178.39 kN/m، على ارتفاع **1.59 m** فوق القاعدة؛ التربة 134.25، الماء 44.14 kN/m (نصيب الماء 25%).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

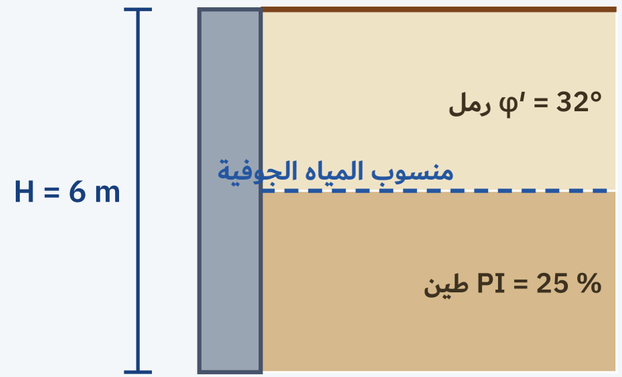
مثال

المعطيات

الجدار	$H = 6$ m، **غير قابل للحركة**
الطبقة العلوية (3 m–0)	**رمل:** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 32°$, $OCR = 1$
الطبقة السفلية (6 m–3)	**طين:** $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3, $PI = 25\%$, $OCR = 2$
المياه الجوفية	**فوق الطين (3 m)**

المطلوب

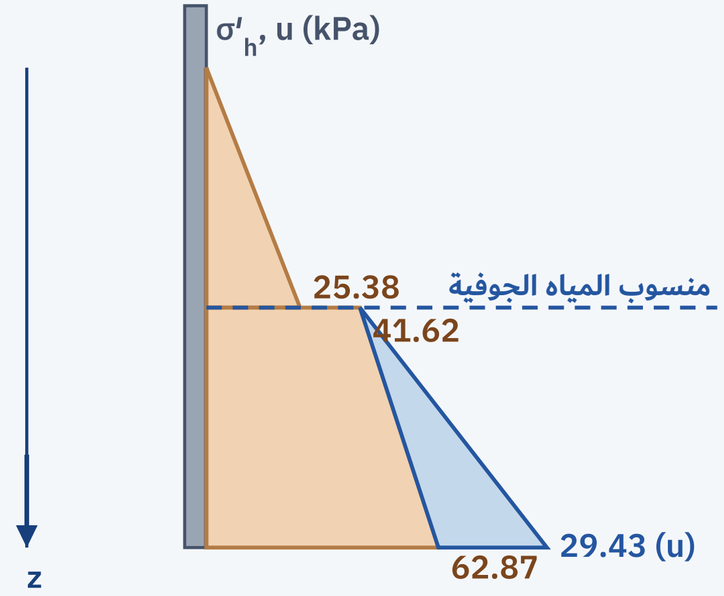
قفزة الضغط عند الحد، P_0 و $\bar{z}$.



$\gamma = 18 \cdot \gamma_{sat} = 19$ kN/m³, OCR = 1 | 2

الحل (1/2)

الحل



1 قيم K_0: الرمل Jaky، الطين Massarsch

$$K_{0(kum)} = 1 - \sin 32^\circ = \mathbf{0.4701}$$

$$K_{0(kil)} = \left[0.44 + 0.42\frac{25}{100}\right]\sqrt{2} = 0.5450\sqrt{2} = \mathbf{0.7707}$$

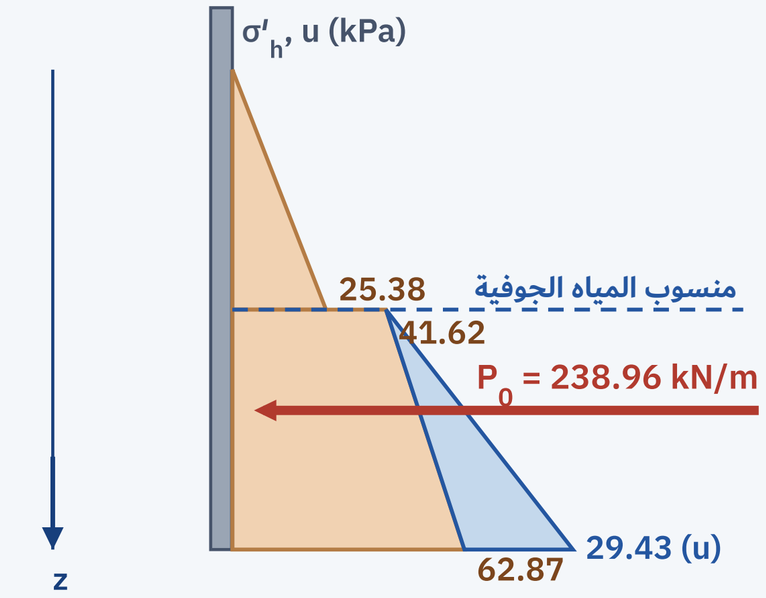
2 الإجهادات ($\sigma'_o(3) = 54$؛ $\sigma'_o(6) = 54 + 3(19 - 9.81) = 81.57$)

$$z = 3:\ \sigma'_h = 0.4701(54) = 25.38 \text{ (رمل)};\quad 41.62 = (54)0.7707 \text{ (طين)}$$

$$z = 6:\ \sigma'_h = 0.7707(81.57) = \mathbf{62.87}\ \text{kPa};\quad u = \mathbf{29.43}\ \text{kPa}$$

الحل (2/2)

الحل



3 القوى

$$P_0 = \tfrac{1}{2}(3)(25.38) + 3(41.62) + \tfrac{1}{2}(3)(21.25) + \tfrac{1}{2}(3)(29.43)$$
$$= 38.08 + 124.86 + 31.87 + 44.14 = \mathbf{238.96}\ \text{kN/m}$$

4 ارتفاع نقطة التأثير (أذرع العزم 4.00؛ 1.50؛ 1.00؛ 1.00 m)

$$\bar{z} = \frac{38.08(4) + 124.86(1.5) + 31.87(1) + 44.14(1)}{238.96} = \mathbf{1.74}\ \text{m}$$

P_0 = **238.96 kN/m**، $\bar{z}$ = **1.74 m**. يقفز σ'_h عند قمة طبقة الطين من 25.38 → 41.62 kPa (إذ تتغير K_0)؛ و σ'_o = 54 kPa هو نفسه على الجانبين.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

الحركات التي تصل إلى الحالة الفعالة والمنفعلة

النظرية

إذا تعذرت حركة الجدار نشأ ضغط التربة في حالة السكون. وإذا ابتعد الجدار عن التربة انخفض الضغط من K_0 إلى K_a، وإذا اقترب منها ارتفع إلى K_p؛ والحركة اللازمة نسبة إلى الارتفاع (صغيرة جداً في الحالة الفعالة وأكبر بعشرة أضعاف في الحالة المنفعلة):

التربة	الفعال $\Delta L_a/H$	المنفعل $\Delta L_p/H$
رمل مفكك	0.002–0.001	0.01
رمل كثيف	0.001–0.0005	0.005
طين طري	0.02	0.04
الطين الصلب	0.01	0.02

لماذا هذا مهم؟

لا يستطيع جدار الطابق السفلي، أو مسند القوس المتصل بغطاء الخوازيق، أو جدار العبارة، أن يتحرك: فضغط التصميم هو قيمة **حالة السكون وليس الفعال**، ولا يعتمد إلا على علاقة K_0.

المسألة

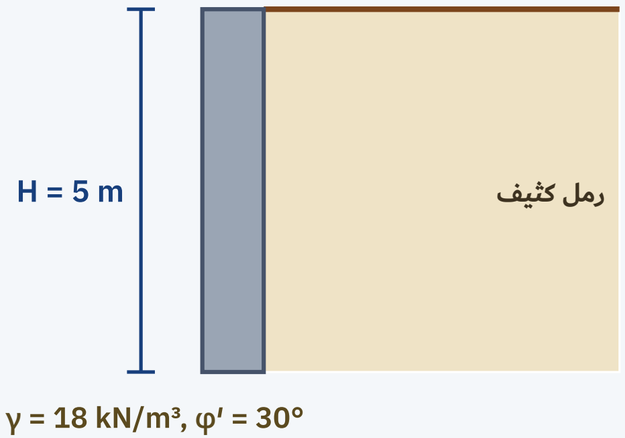
مثال

المطلوب

القوة الفعالة وقوة السكون والمنفعلة؛ والحركة اللازمة للجدار لكل منها (رمل كثيف).

المعطيات

الجدار	**ردم من الرمل الكثيف**، $H = 5$ m
التربة	**جاف:** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$، **NC (Jaky)**



الحل

الحل

1 $P = \frac{1}{2}K\gamma H^2 = \frac{1}{2}K(18)(25) = 225\ K$

الحالة	K	P (kN/m)	الحركة (رمل كثيف، H = 5 m)
الفعال	0.3333	75.0	5 mm−2.5 = 5·0.001−0.0005
السكون	0.50	112.5	0 (الجدار لا يتحرك)
المنفعل	3.00	675.0	25 mm = 5·0.005

القوة الفعالة **75.0** < قوة السكون **112.5** < القوة المنفعلة **675.0 kN/m**؛ وقوة السكون تساوي 1.5 ضعف القوة الفعالة. فإذا أمكن للجدار أن يتحرك 5 mm−2.5 اعتمد الضغط الفعال، وإذا لم يتمكن من الحركة إطلاقا اعتمد ضغط السكون؛ أما المقاومة المنفعلة فتتطلب حركة لا تقل عن 25 mm.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

نطاق الحل

النظرية

يفترض أن **الجدار عديم الاحتكاك ورأسي**؛ ويؤثر ضغط السكون أفقياً ($\delta' = 0$).

السطح أفقي؛ وللسطح المائل والجدار المائل انظر وحدتي Rankine (الردم المائل) و Coulomb.

K_0 منفصل وثابت لكل طبقة: Jaky أو Sherif أو Mayne–Kulhawy أو Massarsch أو قيمة مدخلة من الاختبار.

الماء هيدروستاتيكي، ولا يوجد ماء أمام الجدار؛ وضغط الماء لا يعتمد على K_0.

الحمل الإضافي وإجهاد الدمك والزلزال غير مدرجة في هذه الوحدة؛ ويعبر عن أثر الدمك بقيمة K_0 (Sherif) أو بقيمة OCR.

النقاط الرئيسية

ضغط السكون: في الجدار غير القابل للحركة $\sigma'_h = K_0\sigma'_o$؛ $K_a < K_0 < K_p$

K_0: Jaky $1 - \sin\varphi$؛ Mayne–Kulhawy $\times\ OCR^{\sin\varphi}$؛ Massarsch $0.44 + 0.42\ PI/100$ $(\times \sqrt{OCR}$ عند الإفراط في الانضمام)؛ Sherif للرمل المدموك $+ (\gamma_d/5.5\cdot(\gamma_{d,min} - 1$

ردم جاف: $P_0 = \frac{1}{2}K_0\gamma H^2$، على ارتفاع $H/3$ من القاع

الماء: الإجهاد الفعال بـ γ'، ويُضاف $u = \gamma_w(z - H_1)$ بالكامل؛ وإسهام الماء غالباً كبير

في الردم **المتعدد الطبقات** يكون σ'_o مستمراً، بينما يقفز σ'_h عند الحد الذي تتغير عنده K_0؛ ويوجد $\bar{z}$ من عزوم المساحات

الحركة: $\Delta L/H \sim 0.001$ للحالة الفعالة؛ و ~ 0.01 للحالة المنفعلة (نصف ذلك في الرمل الكثيف)؛ وإذا تعذرت حركة الجدار فحالة السكون هي الأساس

المراجع

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

Mayne, P.W. and Kulhawy, F.H. (1982). K_0–OCR relationships in soil. J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 108(GT6), 851–872.

Massarsch, K.R. (1979). Lateral earth pressure in normally consolidated clay. Proc. 7th European Conf. SMFE, Brighton, 2, 245–250.

Sherif, M.A., Fang, Y.S. and Sherif, R.I. (1984). KA and K0 behind rotating and non-yielding walls. J. Geotech. Eng., ASCE, 110(GT1), 41–56.

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية مستخرجة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. وتُفتح الوحدة على الجدار الوارد في المثال 5 (طبقة واحدة؛ ولطبقتين انظر المثال 6).

GeoTerva

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل طبقات جدارك الخاص وطريقة K_0 وقيمة OCR والمياه الجوفية في GeoTerva؛
وتعطي الوحدة مخطط الضغط والقوة وارتفاع موضع تأثير القوة معاً.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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