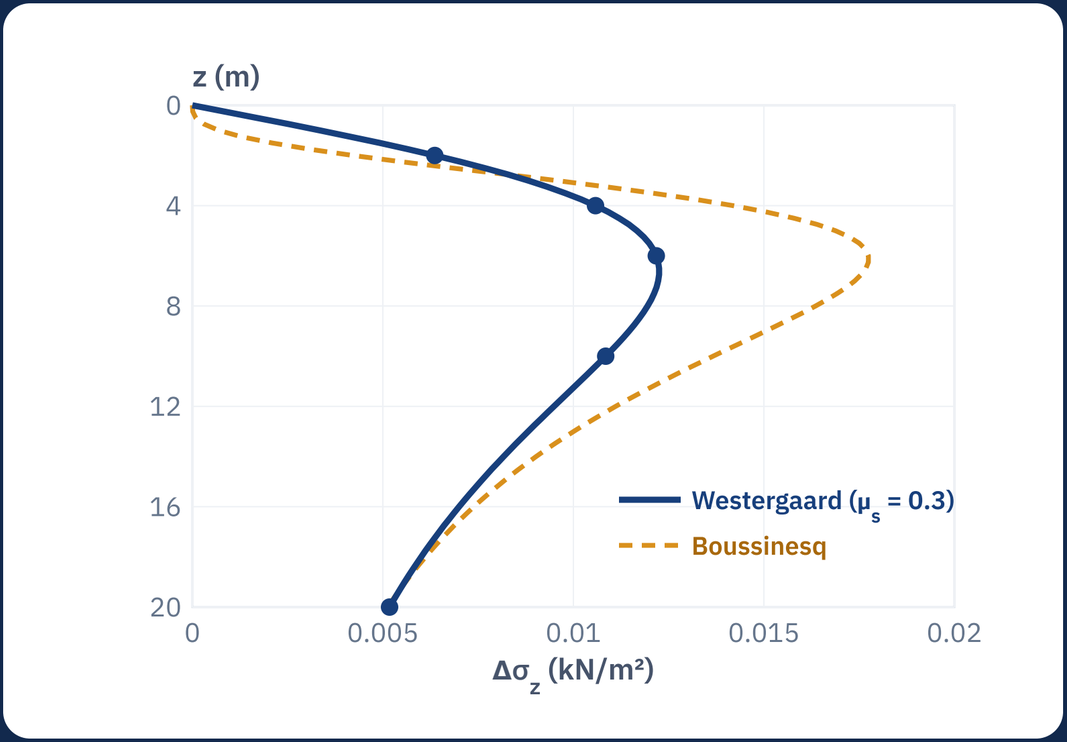


شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الإجهادات في التربة

Westergaard: الإجهاد تحت حمل نقطي

المحاضرة: الإجهاد تحت حمل نقطي في تربة طبقية تكون تشوهاتها الجانبية مقيدة بألواح صلبة؛ وتحل نقطة واحدة يدوياً من البداية إلى النهاية.

- وسط Westergaard
- η و I_5
- تأثير μ_s
- المقارنة مع Boussinesq
- مبدأ التراكب

يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

- **وسط Westergaard**: تمثيل مثالي للتربة المرنة يحتوي على صفائح أفقية رقيقة جاسئة لا تسمح بالتشوه الجانبي
- زيادة الإجهاد الرأسي تحت الحمل النقطي: **η** و**قيمة التأثير** I_5 و$\Delta\sigma_z = (P/z^2)\, I_5$
- مواضع كون إجهاد Westergaard أصغر من إجهاد **Boussinesq** ومواضع كونه أكبر منه؛ ودور نسبة بواسون μ_s
- التغير مع العمق والمسافة الأفقية، وعمق الإجهاد الأقصى
- تراكب **عدة أحمال نقطية**

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

1 · **النظرية**: المعادلة ومبرراتها

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

مثال: $P = 5$ kN، والنقطة A على بعد $r = 5$ m من الحمل وعلى عمق $z = 4$ m؛ وفي التربة بين اللوحين $\mu_s = 0.3$.

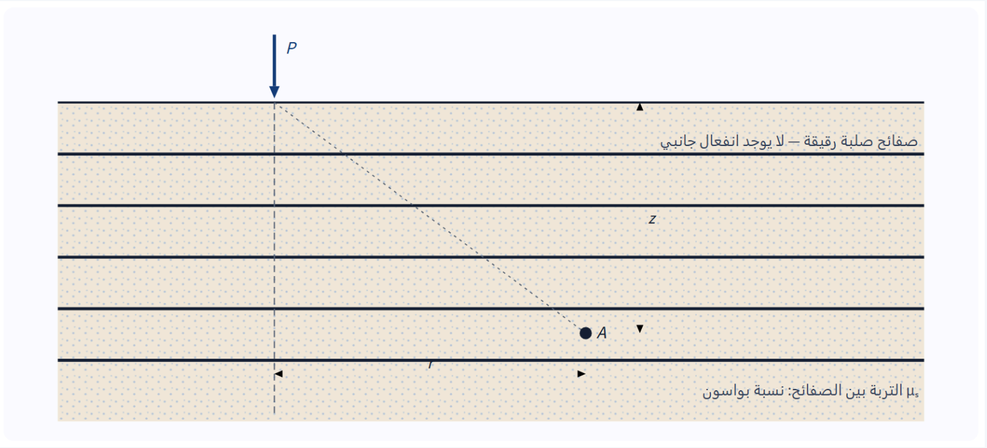
النظرية

تربة ذات صفيحة أفقية صلبة

تعتمد الحلول المبنية على Boussinesq على تكامل حل الحمل المنفرد في نصف فضاء **متجانس ومتماثل الخواص**. أما كثير من الترب فهي **طبقية**

مثال: طين يحتوي على عروق رمل ناعم وتتقيد تشوهاته الأفقية بطبقات أشد جساءة

نمذج **Westergaard (1938)** هذه التربة على النحو الآتي: وسط مرن يحتوي على عدد كبير من **الصفائح الأفقية الرقيقة الصلبة** التي لا تسمح بالانفعال الجانبي



النظرية

زيادة الإجهاد الرأسي و η

الزيادة في الإجهاد الرأسي الناتجة عن الحمل المركز **P** على السطح عند النقطة A التي تبعد أفقياً بمقدار **r** وعمقها **z**؛ حيث μ_s نسبة بواسون للتربة الواقعة بين الألواح الجاسئة، $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$

يُعاد كتابة الحل باستخدام **قيمة تأثير** كما في Boussinesq I_1

$$\Delta\sigma_z = \frac{P\,\eta}{2\pi z^2}\left[\frac{1}{\eta^2 + (r/z)^2}\right]^{3/2}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{1-2\mu_s}{2-2\mu_s}}$$

النظرية

$\Delta\sigma_z = (P/z^2)\, I_5$

يكتب حل Westergaard، كما في Boussinesq، بالصيغة **$\Delta\sigma_z = (P/z^2)\, I_5$**؛ وتعتمد I_5 على **$r/(\eta z)$** و **η** فقط

للمقارنة، حل Boussinesq: $\Delta\sigma_z = (P/z^2)\, I_1$، حيث تعتمد I_1 على r/z فقط (الإجهاد الرأسي مستقل عن نسبة بواسون)

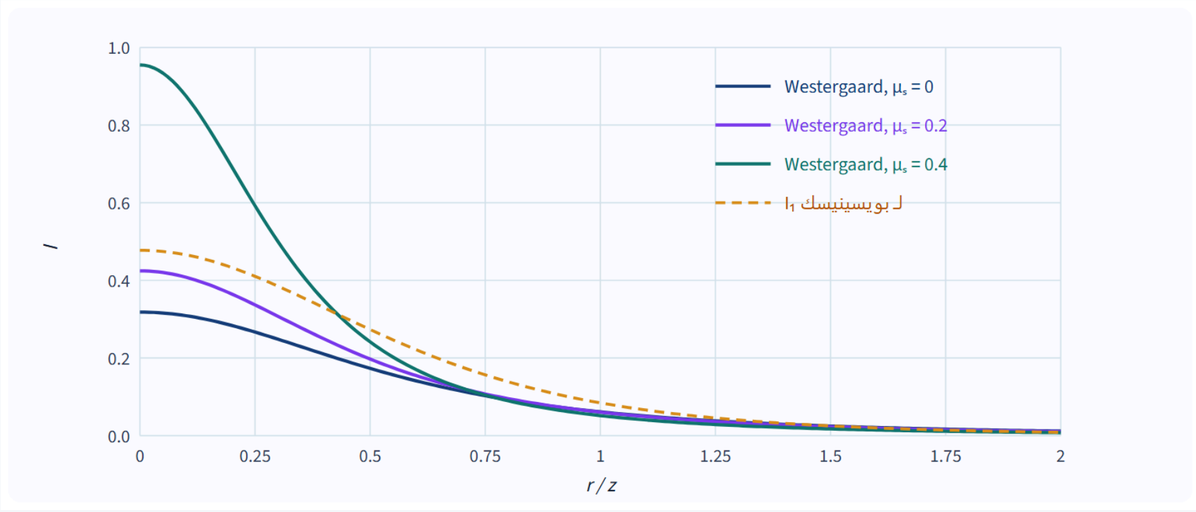
$$\Delta\sigma_z = \left(\frac{P}{z^2}\right) I_5 \qquad I_5 = \frac{1}{2\pi\eta^2}\left[\left(\frac{r}{\eta z}\right)^2 + 1\right]^{-3/2}$$

$$\text{Boussinesq:} \quad I_1 = \frac{3}{2\pi}\left[\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1\right]^{-5/2}$$

النظرية

تغير قيمة التأثير مع r/z

5	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	r/z
0.0009	0.0038	0.0118	0.0247	0.0613	0.0925	0.1411	0.1733	0.2099	0.2483	0.2836	0.3090	0.3183	$\mu_s = 0$
0.0008	0.0034	0.0107	0.0229	0.0604	0.0953	0.1547	0.1972	0.2491	0.3074	0.3646	0.4080	0.4244	$\mu_s = 0.2$
0.0005	0.0023	0.0076	0.0173	0.0516	0.0897	0.1700	0.2416	0.3480	0.4997	0.6916	0.8750	0.9549	$\mu_s = 0.4$
0.0001	0.0015	0.0085	0.0251	0.0844	0.1386	0.2214	0.2733	0.3295	0.3849	0.4329	0.4657	0.4775	Boussinesq I_1



النظرية

Westergaard و Boussinesq أسفل الحمل

تحت الحمل مباشرة ($r = 0$) يكون إجهاد Westergaard **أقل** من إجهاد Boussinesq عندما $\mu_s = 0$: $I_5 = 1/\pi = 0.3183$؛ أما في Boussinesq فإن $I_1 = 3/2\pi = 0.4775$. وتوزع الألواح الجاسئة الحمل جانبياً

أسفل الحمل **يزداد الإجهاد بزيادة μ_s**؛ وعند القيمة $\mu_s = 0.5$ تصبح $\eta = 0$ و**يفقد الحل صلاحيته**. وتقبل الوحدة قيمة μ_s بين 0 و 0.49

μ_s	0.00	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.45	0.49
η	0.7071	0.6667	0.6124	0.5774	0.5345	0.4082	0.3015	0.1400
η^2	0.5000	0.4444	0.3750	0.3333	0.2857	0.1667	0.0909	0.0196
$I_5\ (r = 0) = 1/(2\pi\eta^2)$	0.3183	0.3581	0.4244	0.4775	0.5570	0.9549	1.7507	8.1169

التراكب

النظرية

لما كان وسط Westergaard **مرناً**، فإن إجهاد كل حمل يوجد باستخدام **بعده r الخاص** عن النقطة A، ثم **تجمع** الإجهادات

توجد الأحمال على سطح الأرض في مواضعها الخاصة؛ ويمكن إدخال ثمانية أحمال كحد أقصى، ولا يجوز أن يكون أي حملين في الموضع نفسه

تُجمع قيمة المقارنة وفق Boussinesq بالطريقة نفسها

$$\Delta\sigma_z = \sum_k \frac{P_k}{z^2}\, I_{5,k} \qquad r_k = \sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} \qquad I_{5,k} = I_5\left(\frac{r_k}{\eta z}\right)$$

المسألة

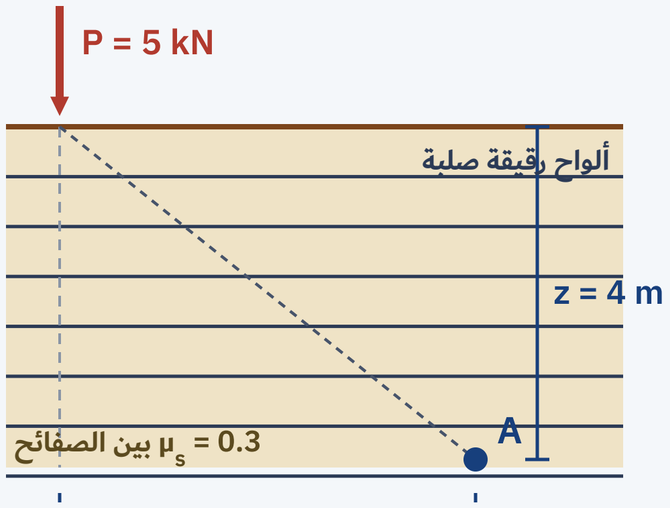
مثال

المعطيات

الحمل	$P = 5$ kN على السطح، $(x_L;\ y_L) = (0;\ 0)$
النقطة A	$x = 3$ m, $y = 4$ m, $z = 4$ m
التربة	$\mu_s = 0.3$ بين الألواح

المطلوب

η و **r/(ηz)** وقيمة التأثير **I_5** و **$\Delta\sigma_z$**؛ والمقارنة مع إجهاد Boussinesq.



الحل (1/3)

الحل

1 ثابت Westergaard η

$$\eta = \sqrt{\frac{1-2\mu_s}{2-2\mu_s}} = \sqrt{\frac{1-0.6}{2-0.6}} = \sqrt{0.2857} = \mathbf{0.5345}$$

2 المسافة الأفقية و r/(ηz)

$$r = \sqrt{x^2+y^2} = \sqrt{3^2+4^2} = \mathbf{5.00}\ \text{m}$$

$$\frac{r}{\eta z} = \frac{5}{0.5345\,(4)} = \mathbf{2.3385}$$

($\eta^2 = 0.2857$) $\eta = \mathbf{0.5345}$. تبعد النقطة A عن الحمل مسافة **r = 5 m**؛ وفي حل Boussinesq كانت هذه المسافة تدخل بالنسبة r/z = 1.25، أما في حل Westergaard فتدخل بالنسبة **2.3385** = r/(ηz).

الحل (2/3)

الحل

3 قيمة التأثير I_5

$$I_5 = \frac{1}{2\pi\eta^2}\left[\left(\frac{r}{\eta z}\right)^2 + 1\right]^{-3/2} = \frac{1}{2\pi\,(0.2857)}\left[2.3385^2 + 1\right]^{-3/2}$$

$$= 0.5570 \times [6.4687]^{-3/2} = 0.5570 \times 0.06078 = \mathbf{0.03386}$$

4 زيادة الإجهاد الرأسي

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{z^2}\,I_5 = \frac{5}{4^2}\,(0.03386) = 0.3125 \times 0.03386 = \mathbf{0.01058}\ \text{kN/m}^2$$

يولد الحمل النقطي 5 kN على السطح عند النقطة A في وسط Westergaard زيادة قدرها **$\Delta\sigma_z$ = 0.01058** (I_5 = 0.03386) **kN/m²**.

الحل (3/3)

الحل

5 التحقق بالصيغة الأولى للمعادلة

$$\Delta\sigma_z = \frac{P\eta}{2\pi z^2}\left[\frac{1}{\eta^2+(r/z)^2}\right]^{3/2} = \frac{5\,(0.5345)}{2\pi\,(16)}\left[\frac{1}{0.2857+1.5625}\right]^{3/2} = \mathbf{0.01058}$$

6 Boussinesq (للمقارنة)

$$I_1 = \frac{3}{2\pi}\left[\left(\frac{r}{z}\right)^2+1\right]^{-5/2} = \frac{3}{2\pi}\,[2.5625]^{-5/2} = \mathbf{0.04542}$$

$$\Delta\sigma_{z,B} = \frac{5}{4^2}\,(0.04542) = \mathbf{0.01419}\ \text{kN/m}^2 \qquad \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\sigma_{z,B}} = 0.745$$

تعطي الصياغتان النتيجة نفسها. وعند هذه النقطة يبلغ إجهاد Westergaard نحو **%74.5** من إجهاد Boussinesq: فلأن الصفائح الجاسئة تنشر الحمل جانبياً يكون الإجهاد أصغر عند العمق المتوسط.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

الحمل والنقطة	**$P = 5$ kN؛ النقطة A تبعد $r = 5$ m عن الحمل؛ $\mu_s = 0.3$**
الأعماق	**$z = 2,\ 4,\ 6 \ldots 20$ m (جدول القطاع في الوحدة)**

المطلوب

عند كل عمق: **I_5 و $r/(\eta z)$** وإجهادات Westergaard و Boussinesq؛ و **عمق أكبر إجهاد**.

الحل (1/2)

الحل

z (m)	r/(ηz)	I_5	$\Delta\sigma_z$ Westergaard	$\Delta\sigma_z$ Boussinesq	نسبة W/B
2	4.677	0.0051	**0.00636**	0.00422	1.509
4	2.339	0.0339	**0.01058**	0.01419	0.745
6	1.559	0.0877	**0.01218**	0.01774	0.686
8	1.169	0.1529	**0.01195**	0.01636	0.731
10	0.935	0.2170	**0.01085**	0.01367	0.794
12	0.780	0.2733	**0.00949**	0.01111	0.854
14	0.668	0.3202	**0.00817**	0.00902	0.905
16	0.585	0.3584	**0.00700**	0.00739	0.948
18	0.520	0.3892	**0.00601**	0.00612	0.982
20	0.468	0.4140	**0.00518**	0.00513	1.009

عند **z = 2 m** يكون إجهاد Westergaard أكبر (0.00636 مقابل 0.00422)؛ وعند **الأعماق المتوسطة يكون أصغر** (z = 6 m: 0.01218 مقابل 0.01774)؛ وعند **z = 20 m** يقترب الحلان من بعضهما (0.00518 مقابل 0.00513).

الحل (2/2)

الحل

1 يدوياً من أجل z = 10 m

$$\frac{r}{\eta z} = \frac{5}{0.5345\,(10)} = 0.9354$$

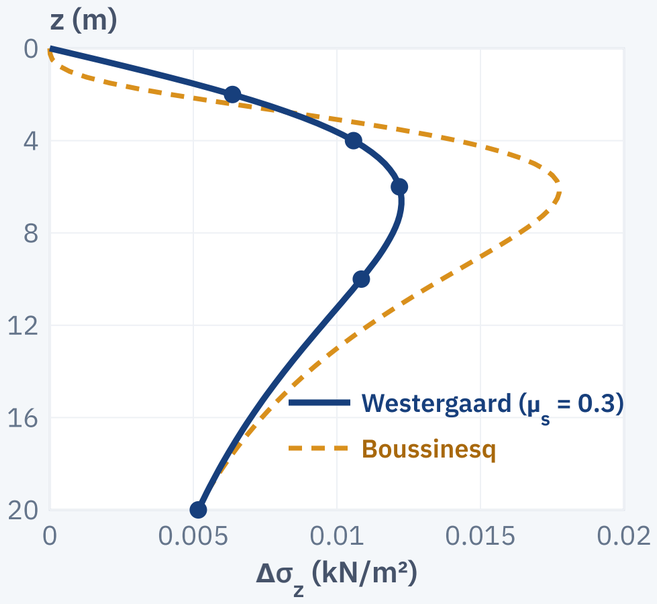
$$I_5 = 0.5570\,[1.8750]^{-3/2} = 0.2170$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{5}{10^2}\,(0.2170) = \mathbf{0.01085}\ \text{kN/m}^2$$

2 عمق الإجهاد الأكبر ($d\Delta\sigma_z/dz = 0$)

$$\Delta\sigma_z = \frac{P\eta}{2\pi}\,z\,(r^2 + \eta^2 z^2)^{-3/2}$$

$$z^* = \frac{r}{\sqrt{2}\,\eta} = \frac{5}{1.4142\,(0.5345)} = \mathbf{6.61}\ \text{m}$$



أكبر إجهاد: Westergaard عند (0.01225) **z = 6.61 m**، و
Boussinesq ($z^* = r\sqrt{1.5}$) عند (0.01775 kN/m²) **z = 6.12 m**.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

الحمل والنقطة	$P = 5$ kN، $r = 5$ m، $z = 4$ m **(النقطة في المثال 1)**
المتغير	$\mu_s = 0;\ 0.1;\ 0.2;\ 0.3;\ 0.4;\ 0.45;\ 0.49$

المطلوب

لكل قيمة μ_s والنسبة إلى **$\Delta\sigma_z$، I_5، r/(ηz)، η**: Boussinesq.

الحل (1/3)

الحل

$\Delta\sigma_z$ / Boussinesq	$\Delta\sigma_z$ (kN/m²)	I_5	r/(ηz)	η	μ_s
0.836	**0.01187**	0.03799	1.768	0.7071	0.00
0.822	**0.01166**	0.03732	1.875	0.6667	0.10
0.796	**0.01129**	0.03614	2.041	0.6124	0.20
0.745	**0.01058**	0.03386	2.339	0.5345	0.30
0.629	**0.00893**	0.02858	3.062	0.4082	0.40
0.497	**0.00705**	0.02257	4.146	0.3015	0.45
0.247	**0.00350**	0.01120	8.927	0.1400	0.49

عند هذه النقطة (r/z = 1.25) **يقل إجهاد Westergaard كلما زادت μ_s**: 0.01187 عند $\mu_s = 0$ و 0.00350 kN/m² عند $\mu_s = 0.49$. أما على محور الحمل فيحدث العكس (المثال 4): إذ يتوقف اتجاه التأثير على موضع النقطة.

الحل (2/3)

الحل

1 $\mu_s = 0$

$$\eta^2 = \frac{1}{2} = 0.5000\,, \quad \eta = 0.7071\,, \quad \frac{r}{\eta z} = \frac{5}{0.7071(4)} = 1.7678$$

$$I_5 = \frac{1}{\pi}\left[4.1250\right]^{-3/2} = 0.3183 \times 0.11936 = 0.03799$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{5}{16}\,(0.03799) = \mathbf{0.01187}$$

عندما تكون نسبة بواسون صفراً يكون $\eta = 1/\sqrt{2} = 0.7071$؛ ونحصل عند هذه النقطة على $\mathbf{\Delta\sigma_z = 0.01187}$ **kN/m²** (83.6% من قيمة Boussinesq).

الحل (3/3)

الحل

2 $\mu_s = 0.4$

$$\eta^2 = \frac{1 - 0.8}{2 - 0.8} = 0.1667\,, \quad \eta = 0.4082\,, \quad \frac{r}{\eta z} = \frac{5}{0.4082(4)} = 3.0619$$

$$I_5 = 0.9549\,[10.3750]^{-3/2} = 0.9549 \times 0.02992 = 0.02858$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{5}{16}\,(0.02858) = \mathbf{0.00893}$$

كلما زادت نسبة بواسون للتربة الواقعة بين الصفائح صغرت η؛ وتكبر r/(ηz) فتنخفض I_5 عند هذه النقطة: **0.00893 kN/m²** ($\mu_s = 0 \rightarrow 0.4$) ← **0.01187**.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

الحمل	$P = 5$ kN, $\mu_s = 0.3$
العمق	$z = 4$ m؛ **المسافة الأفقية** $r = 0,\ 1,\ 2 \ldots 10$ m
المسألة	**كيف تقارن إجهادات Westergaard و Boussinesq على محور الحمل؛ ولأي قيمة من μ_s يتساوى الحلان؟**

المطلوب

$\Delta\sigma_z$ تحت الحمل (r = 0)، والقيمة نفسها من أجل $\mu_s = 0$، و**جدول المقطع الأفقي**.

الحل (1/3)

الحل

1 عند $\mu_s = 0.3$ تكون $r = 0$

$$I_5(0) = \frac{1}{2\pi\eta^2} = \frac{1}{2\pi\,(0.2857)} = 0.5570 \qquad \Delta\sigma_z = \frac{5}{16}\,(0.5570) = \mathbf{0.1741}$$

$$\text{Boussinesq: } I_1(0) = \frac{3}{2\pi} = 0.4775 \;\Rightarrow\; \Delta\sigma_{z,B} = \frac{5}{16}\,(0.4775) = \mathbf{0.1492}$$

2 عند $\mu_s = 0$ يكون $r = 0$

$$I_5(0) = \frac{1}{\pi} = 0.3183 \;\Rightarrow\; \Delta\sigma_z = \frac{5}{16}\,(0.3183) = \mathbf{0.0995} \qquad \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\sigma_{z,B}} = \frac{1/\pi}{3/2\pi} = \frac{2}{3}$$

$\mu_s = 0$: يساوي **2/3** Westergaard من Boussinesq (0.0995 و 0.1492)؛ **$\mu_s = 0.3$**: يكون أكبر منه (0.1741)؛ ويتساوى الحلان عند **$\mu_s = 0.25$**.

الحل (2/3)

الحل

3 μ_s التي يتساوى عندها الحلان على المحور

$$\frac{1}{2\pi\eta^2} = \frac{3}{2\pi} \Rightarrow \eta^2 = \frac{1}{3} = \frac{1-2\mu_s}{2-2\mu_s} \Rightarrow \mu_s = \mathbf{0.25}$$

4 النسبة على المحور: Westergaard / Boussinesq = $(1/2\pi\eta^2) / (3/2\pi) = 1/(3\eta^2)$

μ_s	0.00	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.45	0.49
η^2	0.5000	0.4444	0.3750	0.3333	0.2857	0.1667	0.0909	0.0196
$\Delta\sigma_z$ Westergaard / Boussinesq	0.667	0.750	0.889	1.000	1.167	2.000	3.667	17.000

على محور الحمل تزداد النسبة بسرعة مع 2/3 :μ_s عند $\mu_s = 0$، و 1 عند $\mu_s = 0.25$، و 3.67 عند $\mu_s = 0.45$؛ وعندما تقترب μ_s من 0.5 فإن $\eta \to 0$ وتزداد النسبة بلا حد.

الحل (3/3)

الحل

r (m)	r/z	r/(ηz)	I_5	$\Delta\sigma_z$ Westergaard	$\Delta\sigma_z$ Boussinesq	نسبة W/B
0	0.00	0.000	0.5570	**0.17408**	0.14921	1.167
1	0.25	0.468	0.4140	**0.12938**	0.12822	1.009
2	0.50	0.935	0.2170	**0.06780**	0.08541	0.794
3	0.75	1.403	0.1089	**0.03403**	0.04889	0.696
4	1.00	1.871	0.0584	**0.01824**	0.02638	0.691
5	1.25	2.339	0.0339	**0.01058**	0.01419	0.745
6	1.50	2.806	0.0211	**0.00658**	0.00784	0.840
8	2.00	3.742	0.0096	**0.00300**	0.00267	1.123
10	2.50	4.677	0.0051	**0.00159**	0.00105	1.509

يكون إجهاد Westergaard على المحور أعلى من إجهاد Boussinesq؛ وبعد **r/z ≈ 0.26** ينخفض إلى ما دونه (عند r = 2 m: 0.06780 و 0.08541)، وبعد (r ≈ 7.2 m) **r/z ≈ 1.81** يتجاوزه من جديد (عند r = 10 m: 0.00159 و 0.00105): ففي المسافات البعيدة يتناقص إجهاد Westergaard ببطء أكبر.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

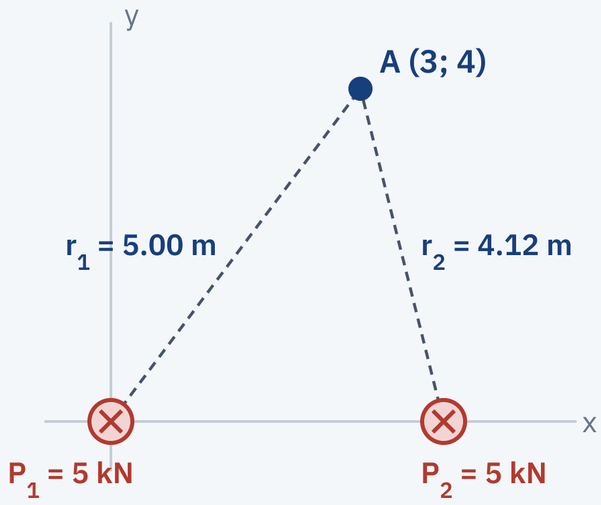
مثال

المعطيات

الأحمال	$P_1 = 5$ kN عند $(0;\ 0)$، $P_2 = 5$ kN عند $(4;\ 0)$
النقطة A	$x = 3$ m، $y = 4$ m، $z = 4$ m
التربة	$\mu_s = 0.3$

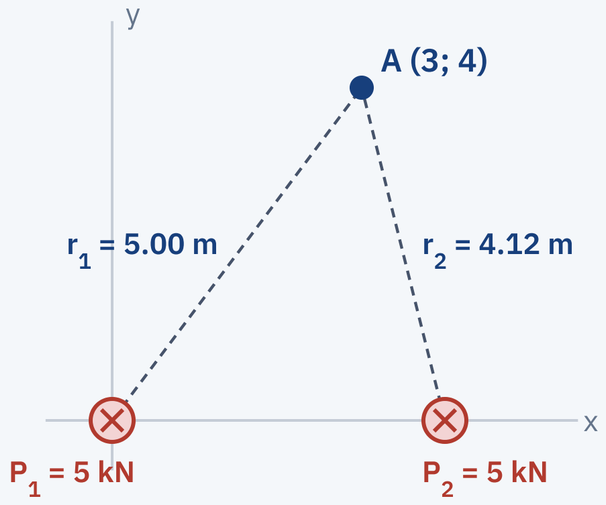
المطلوب

قيم r وI_5 و$\Delta\sigma_z$ لكل حمل؛ الإجهاد الكلي ومجموع Boussinesq.



الحل (1/2)

الحل



1 P_1 (0; 0)

$$r_1 = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5.000 \text{ m}$$

$$\frac{r_1}{\eta z} = \frac{5.000}{0.5345(4)} = 2.3385\,, \quad I_5 = 0.03386$$

$$\Delta\sigma_{z(1)} = \frac{5}{16}\,(0.03386) = \mathbf{0.01058}\ \text{kN/m}^2$$

2 P_2 (4; 0)

$$r_2 = \sqrt{(3-4)^2 + 4^2} = 4.123 \text{ m}$$

$$\frac{r_2}{\eta z} = \frac{4.123}{0.5345(4)} = 1.9284\,, \quad I_5 = 0.05434$$

$$\Delta\sigma_{z(2)} = \frac{5}{16}\,(0.05434) = \mathbf{0.01698}\ \text{kN/m}^2$$

الحمل 2 أقرب: **0.01698**؛ الحمل 1: **0.01058 kN/m²**.

الحل (2/2)

الحل

1 تُجمع الإجهادات

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z(1)} + \Delta\sigma_{z(2)} = 0.01058 + 0.01698 = \mathbf{0.02756}\ \text{kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_{z,B} = 0.01419 + 0.02442 = 0.03862\ \text{kN/m}^2$$

2 مقطع العمق عند النقطة نفسها (مجموع الحملين)

z (m)	2	4	6	8	10	12	16	20
$\Delta\sigma_z$ Westergaard	0.0174	0.0276	0.0301	0.0282	0.0247	0.0210	0.0150	0.0108
$\Delta\sigma_z$ Boussinesq	0.0137	0.0386	0.0430	0.0371	0.0298	0.0237	0.0153	0.0105

عند النقطة A (z = 4 m) يولد الحملان معاً **$\Delta\sigma_z$ = 0.02756 kN/m²**؛ ومجموع Boussinesq يساوي 0.03862 kN/m². والمجموع هو مجموع القيم المحسوبة لكل حمل على حدة؛ وقيمة الحمل المفرد (المثال 1) جزء من هذا المجموع.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النقاط الرئيسية

وسط Westergaard: تمنع الصفائح الأفقية الجاسئة الرقيقة التشوه الجانبي؛ $\eta = \sqrt{[(1 - 2\mu_s)/(2 - 2\mu_s)]}$، $I_5 = [1/(2\pi\eta^2)]\,[(r/\eta z)^2 + 1]^{-3/2}$، $\Delta\sigma_z = (P/z^2)\,I_5$

مثال ($P = 5$ kN، $r = 5$ m، $z = 4$ m، $\mu_s = 0.3$): η 0.5345؛ $r/(\eta z)$ 2.339؛ I_5 0.03386 ← $\Delta\sigma_z = 0.01058$ kN/m²؛ Boussinesq 0.01419

على محور الحمل ($I_5 = 1/(2\pi\eta^2)$): وعند $\mu_s = 0$ تكون $1/(2\pi) = 0.3183$ (Boussinesq $3/2\pi = 0.4775$)؛ ويزداد الإجهاد مع μ_s، وعند $\mu_s = 0.5$ يفقد الحل صلاحيته

العمق: عند الأعماق المتوسطة يكون إجهاد Westergaard أصغر، وعند الأعماق الكبيرة يقترب الحلان من بعضهما؛ ويقع أكبر إجهاد عند $z = r/(\sqrt{2}\,\eta) = 6.61$ m (Boussinesq: $r\sqrt{1.5} = 6.12$ m)

التراكب: يؤخذ كل حمل بالمسافة r الخاصة به، وتجمع الإجهادات (حملان في المثال: 0.02756 kN/m²)

المراجع

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

Westergaard, H.M. (1938). A problem of elasticity suggested by a problem in soil mechanics: soft material reinforced by numerous strong horizontal sheets. In Contributions to the Mechanics of Solids, Stephen Timoshenko 60th Anniversary Volume. Macmillan, New York, 268–277.

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية مستخرجة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. والمثال الابتدائي للوحدة هو $P = 5\ \text{kN}$ و $r = 5\ \text{m}$ و $\mu_s = 0.3$ و $z = 4\ \text{m}$.

GeoTerva

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل في GeoTerva الأحمال النقطية الخاصة بك والنقطة A وقيمة μ_s؛ وتعطي الوحدة معاً η وقيمة التأثير I_5 ومساهمة كل حمل والمقارنة مع Boussinesq ومخطط العمق والحل خطوة بخطوة والتقرير.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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