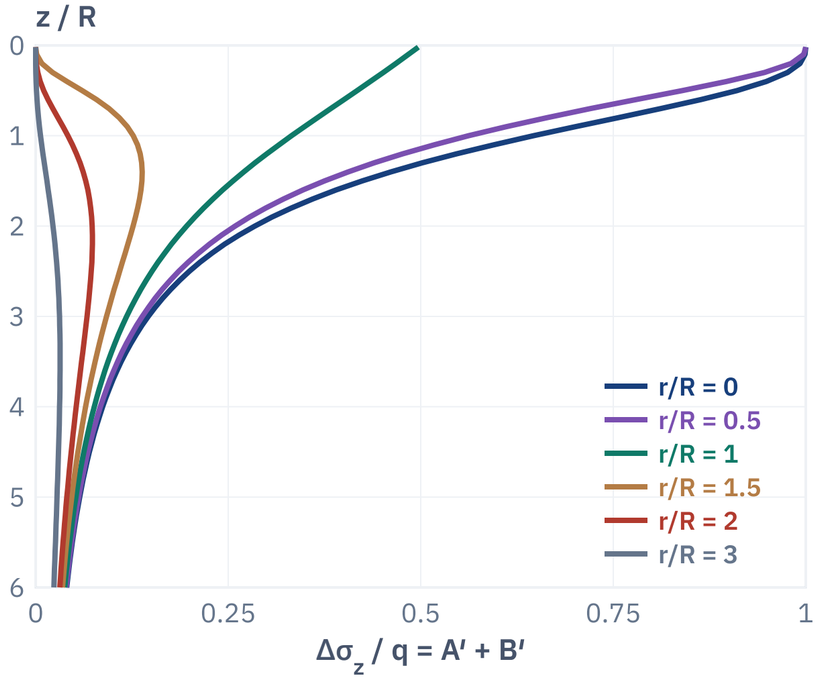
Презентация к лекции по геотехнике · Напряжения в грунтовом массиве

Напряжение под круговой нагрузкой

Лекция: вертикальное напряжение под круговой нагрузкой; замкнутое выражение на оси, A′ + B′ вне оси; примеры, решаемые вручную.

На оси | A′ + B′ | Полярный интеграл | Вне нагрузки | Несколько кругов



Что мы изучим на этой лекции?

Приращение вертикального напряжения под **круговой площадью** с равномерно распределённой нагрузкой (резервуар, силос, круглый фундамент): **$\Delta\sigma_z$**

На оси круга замкнутое выражение: $\Delta\sigma_z = q\{1 - 1/[(R/z)^2 + 1]^{3/2}\}$

Вне оси, под краем и рядом с ним: **$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$**; $A' + B'$ зависит только от z/R и r/R

Вычисление интеграла Boussinesq **в полярных координатах с началом в точке A**: интеграл по ρ — в замкнутом виде, интеграл по φ — численно

Что за пределами нагрузки напряжение **сначала возрастает, а затем убывает**; что напряжения от нескольких круглых площадей **суммируются**

ХОД ЛЕКЦИИ

Каждая тема излагается **в три шага**:

1 · **Теория**: формула и обоснование

2 · **Условие**: дано и требуется определить

3 · **Решение**: пошагово, с числами

Пример круга: R = 3 m, q = 100 kN/m²; точка A находится на расстоянии r = 4.5 m от оси круга, на глубине z = 3 m (вне нагрузки).

Круглая площадь с равномерно распределённой нагрузкой

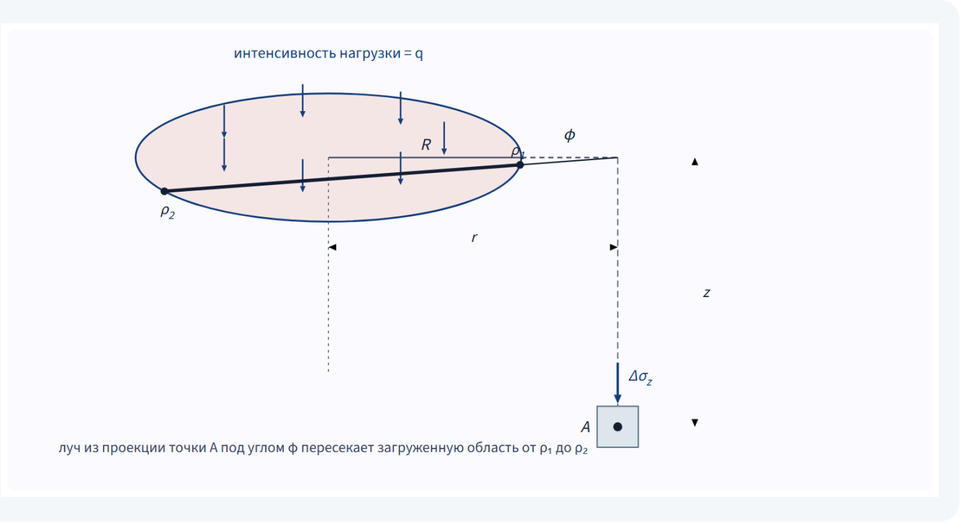
ТЕОРИЯ

Гибкая круглая площадь радиуса **R**, несущая равномерное давление **q** (резервуар, силос, круглый фундамент)

Грунт — **однородная, изотропная и линейно упругая** полубесконечная среда; $\Delta\sigma_z$ — только приращение, создаваемое нагрузкой

Задача **осесимметрична**: напряжение зависит только от горизонтального расстояния **r** до центра и от глубины **z**, но не от направления

Под центром (r = 0) существует **выражение в замкнутой форме**; вне оси, под краем и рядом с ним Ahlvin и Ulery (1962) вычислили интеграл и свели его в таблицы в виде **A′ и B′**



Под центром круга: решение в замкнутом виде

ТЕОРИЯ

$$\Delta\sigma_z = q\left\{1 - \frac{1}{\left[(R/z)^2 + 1\right]^{3/2}}\right\}$$

На поверхности ($z \to 0$) $\Delta\sigma_z = q$; с глубиной **монотонно убывает** и на большой глубине стремится к нулю

Напряжение зависит только от отношения **R/z**: при одинаковом z/R большой и малый круг дают одно и то же значение $\Delta\sigma_z/q$

ГЛУБИНА ВЛИЯНИЯ

$\Delta\sigma_z/q$	z/R
0.50	1.30
0.20	2.50
0.10	3.71
0.05	5.36

Напряжение на глубине 3.7R снижается лишь до одной десятой значения на поверхности.

$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$

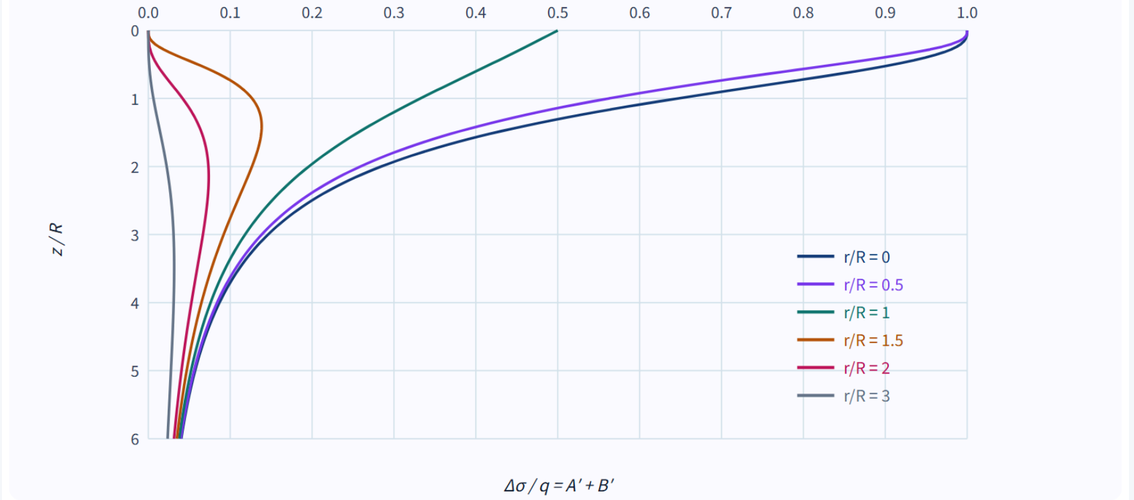
ТЕОРИЯ

$$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$$

A′ и B′ — две части, зависящие от отношений **z/R** и **r/R**; они возникают при разложении интеграла, а для $\Delta\sigma_z$ нужна только их **сумма**

На оси (r = 0) выражение сводится к полному замкнутому виду; **под краем** (r/R = 1) на поверхности оно начинается с 0.5

Рядом с нагрузкой значение начинается с нуля, сначала возрастает, затем убывает



Полярный интеграл относительно точки

ТЕОРИЯ

Интерполяция между таблицами не выполняется: решение Boussinesq интегрируется непосредственно по кругу в полярных координатах **ρ, φ** с центром в точке под точкой A

В каждом направлении φ луч пересекает нагруженный круг между $\boldsymbol{\rho_1}$ и $\boldsymbol{\rho_2}$ (если A находится под нагрузкой, $\rho_1 = 0$); элемент нагрузки равен q ρ dρ dφ

$$d\sigma_z = \frac{3q}{2\pi}\,\frac{z^3\,\rho}{(\rho^2+z^2)^{5/2}}\,d\rho\,d\varphi$$

$$\int_{\rho_1}^{\rho_2}\frac{3z^3\rho\,d\rho}{(\rho^2+z^2)^{5/2}} = \frac{z^3}{(\rho_1^2+z^2)^{3/2}} - \frac{z^3}{(\rho_2^2+z^2)^{3/2}}$$

A′ + B′ и численная сумма

ТЕОРИЯ

$$A' + B' = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{z^3}{(\rho_1^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{z^3}{(\rho_2^2 + z^2)^{3/2}} \right] d\varphi$$

$$\rho_{1,2} = -r \cos\varphi \mp \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2\varphi}$$

Подынтегральная функция оставшегося интеграла по φ непрерывна и суммируется численно по **2880 направлениям**; при r = 0 получаем $\rho_1 = 0$, $\rho_2 = R$, и выражение возвращается к **решению в замкнутой форме**

ЗНАЧЕНИЯ A′ + B′

z/R	r/R	A′ + B′
1.0	1.0	0.33224
1.0	1.5	0.12664
2.0	0.4	0.26781
2.0	2.0	0.07334
0.5	0.8	0.64625
4.0	1.5	0.06487

Суперпозиция

ТЕОРИЯ

Каждый круг задаётся собственными **q, R** и положением центра на поверхности грунта (x_L, y_L) (в модуле — не более восьми кругов)

Две окружности **могут касаться друг друга, но не могут перекрываться**: расстояние между центрами не менее $R_1 + R_2$

Так как грунт упруг, напряжение от каждого круга находится по **собственному расстоянию r от точки A до центра этого круга**, после чего напряжения суммируются

$$\Delta\sigma_z = \sum_k q_k \left(A' + B'\right)_k \qquad r_k = \sqrt{(x - x_{L,k})^2 + (y - y_{L,k})^2}$$

Условие

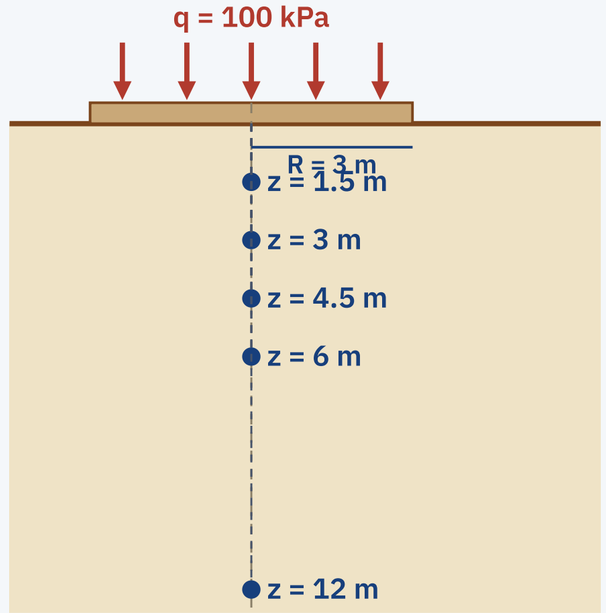
ПРИМЕР

Дано

Круг	**гибкий,** $R = 3$ **m,** $q = 100$ **kN/m²**
Точки	**на оси круга (**$r = 0$**):** $z = 1.5; 3; 4.5; 6; 12$ **m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

$\Delta\sigma_z$ по замкнутому выражению (сначала подробно при z = 1.5 m), **A′ + B′**; глубина, на которой $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$.



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 Отношения

$$R/z = 3/1.5 = 2 \qquad (R/z)^2 + 1 = 4 + 1 = \mathbf{5}$$

2 Показатель степени и обратная величина

$$5^{3/2} = 11.1803 \qquad 1/11.1803 = 0.08944$$

3 Вертикальное напряжение

$$\Delta\sigma_z = q\,(1 - 0.08944) = 100\,(0.91056) = \mathbf{91.06}\ \text{kPa}$$

На глубине z = 1.5 m **A′ + B′ = 0.91056** и **$\Delta\sigma_z$ = 91.06 kPa**: передаётся 91.1% нагрузки на поверхности.

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

z (m)	z/R	$(R/z)^2 + 1$	$[\ldots]^{3/2}$	$1 - 1/[\ldots]^{3/2}$	$\Delta\sigma_z$ (kPa)
1.5	0.50	5.000	11.1803	0.91056	**91.06**
3.0	1.00	2.000	2.8284	0.64645	**64.64**
4.5	1.50	1.444	1.7360	0.42397	**42.40**
6.0	2.00	1.250	1.3975	0.28446	**28.45**
12.0	4.00	1.062	1.0952	0.08692	**8.69**

По оси напряжение монотонно убывает: **91.1 → 8.7 kPa** (z = 1.5 m → 12 m). Строка z = 1.5 m — расчёт, выполненный вручную; каждая строка получается по тому же выражению. При z = 3 m напряжение составляет около 65% нагрузки на поверхности, при z = 12 m — 9%.

Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

4 Глубина, на которой $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$

$$\left[(R/z)^2 + 1\right]^{3/2} = 1/0.90 \;\Rightarrow\; (R/z)^2 = 1.0728 - 1 = 0.0728$$

$$z/R = 1/\sqrt{0.0728} = \mathbf{3.707} \;\Rightarrow\; z = 3\,(3.707) = \mathbf{11.12}\ \text{m}$$

Глубина, на которой $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$, составляет **11.12 m** (z/R = 3.707): на этой глубине напряжение на оси снижается до одной десятой нагрузки на поверхности. Половинное значение (0.50 q) соответствует z/R = 1.305, т. е. 3.91 m.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

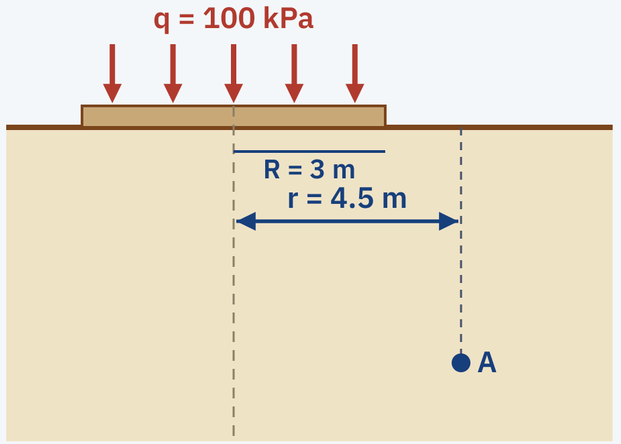
ПРИМЕР

Дано

Круг	**гибкий, $R = 3$ m, $q = 100$ kN/m²**
Точка A	**$r = 4.5$ m от центра ($r/R = 1.5$; вне нагрузки), $z = 3$ m ($z/R = 1$)**
Метод	**интеграл в полярных координатах: сначала вручную, по $N = 36$ направлениям; затем по 2880 направлениям модуля**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

A′ + B′ и **$\Delta\sigma_z$**; влияние числа направлений на результат.



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 Расстояния, на которых луч пересекает окружность

$$\rho_{1,2} = -r\cos\varphi \mp \sqrt{R^2 - r^2\sin^2\varphi} = -4.5\cos\varphi \mp \sqrt{9 - 20.25\sin^2\varphi}$$

2 В каких направлениях луч попадает на круг?

$$R^2 - r^2\sin^2\varphi \geq 0 \;\Rightarrow\; |\sin\varphi| \leq R/r = 0.6667 \;\text{ и }\; \rho > 0 \;\Rightarrow\; \cos\varphi < 0$$

Поскольку точка A лежит вне круга, вклад дают только направления, обращённые к кругу: **138.19° < φ < 221.81°**.

Луч попадает в окружность только при **138.19° < φ < 221.81°**. Если принять **N = 36** направлений, то φ_i = 5°, 15°, 25°, …; из них лишь **8** попадают в этот диапазон: 145°, 155°, 165°, 175° и симметричные им 185°, 195°, 205°, 215°.

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

3 Вклад одного луча и среднее значение

$$F(\rho) = \frac{z^3}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{27}{(\rho^2 + 9)^{3/2}} \qquad g(\varphi) = F(\rho_1) - F(\rho_2)$$

$$A' + B' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} g(\varphi_i) \qquad \varphi_i = \left(i - \tfrac{1}{2}\right) \frac{360^\circ}{N}$$

φ (°)	cos φ	$R^2 - r^2 \sin^2\varphi$	ρ_1	ρ_2	$F(\rho_1)$	$F(\rho_2)$	$g = F(\rho_1) - F(\rho_2)$
145	−0.8192	2.3380	2.1571	5.2152	0.5352	0.1240	**0.4112**
155	−0.9063	5.3832	1.7582	6.3986	0.6422	0.0765	**0.5657**
165	−0.9659	7.6435	1.5820	7.1114	0.6921	0.0587	**0.6334**
175	−0.9962	8.8462	1.5086	7.4571	0.7131	0.0520	**0.6611**

Лучи 185°, 195°, 205°, 215° симметричны лучам 175°, 165°, 155°, 145° и дают те же значения g. g(145°) = 0.4112 и g(175°) = 0.6611.

Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

4 Итого (N = 36)

$$\sum g = 2\,(0.4112 + 0.5657 + 0.6334 + 0.6611) = 4.5427$$

$$A' + B' \approx \frac{4.5427}{36} = 0.12619 \quad \Rightarrow \quad \Delta\sigma_z \approx 100\,(0.12619) = \mathbf{12.62}\ \text{kPa}$$

5 Результат сходится по мере увеличения числа направлений

N	6	12	24	36	72	180	720	2880
$\Delta\sigma_z$ (kPa)	16.856	10.556	13.200	12.619	12.541	12.688	12.667	12.664

Модуль использует **2880 направлений**: **A′ + B′ = 0.12664**, **$\Delta\sigma_z$ = 12.664 kPa**. Табличное значение для той же точки — 0.12663; результат ручного расчёта по 36 направлениям (12.62) отличается от него лишь на 0.4%.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

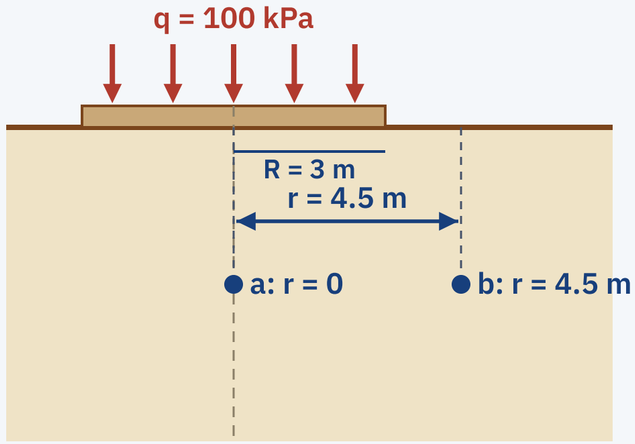
ПРИМЕР

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

$\Delta\sigma_z$ по обеим линиям; **максимальное напряжение** на линии (b) и его глубина.

Дано

Круг	**гибкий,** $R = 3$ **m,** $q = 100$ **kN/m²**
Точки	**(a) ось,** $r = 0$**; (b)** $r = 4.5$ **m** $(r/R = 1.5)$
Глубины	$z = 1.5; 3; 4.5; 6; 12$ **m**



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

z (m)	z/R	(a) A′ + B′	(a) $\Delta\sigma_z$ (kPa)	(b) A′ + B′	(b) $\Delta\sigma_z$ (kPa)
1.5	0.50	0.91056	91.06	0.06044	**6.04**
3.0	1.00	0.64645	64.64	0.12664	**12.66**
4.5	1.50	0.42397	42.40	0.13793	**13.79**
6.0	2.00	0.28446	28.45	0.12646	**12.65**
12.0	4.00	0.08692	8.69	0.06487	**6.49**

Ось: 91.1 → 8.7 kPa, монотонно убывает. **Вне нагрузки (r = 4.5 m):** 6.04 → 13.79 → 6.49 kPa; сначала **возрастает**, затем убывает: с глубиной нагрузка распространяется в стороны.

Каждая строка — значение A′ + B′, полученное по 2880 направлениям; строка z = 3 m в столбце (b) является результатом Примера 2.

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

1 A′ + B′ по линии r/R = 1.5 в зависимости от глубины

z/R	z (m)	A′ + B′	$\Delta\sigma_z$ (kPa)
1.00	3.00	0.12664	**12.66**
1.20	3.60	0.13569	**13.57**
1.41	4.23	0.13833	**13.83**
1.60	4.80	0.13670	**13.67**
1.80	5.40	0.13238	**13.24**
2.00	6.00	0.12646	**12.65**

На линии r/R = 1.5 **наибольшее напряжение достигается на глубине z ≈ 4.23 m** (z/R = 1.41) и равно **13.83 kPa**: за пределами загруженной области напряжение достигает максимального значения на глубине, а затем убывает.

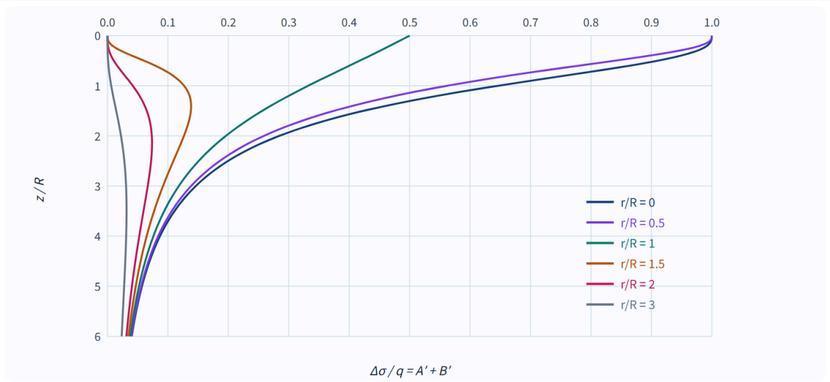
Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

2 Наибольшее значение, направленное наружу

r/R	наибольшее A′ + B′	глубина z/R
1.5	0.1383	1.41
2.0	0.0737	2.15
3.0	0.0317	3.48

По мере удаления точки от круга наибольшее напряжение находится **глубже и меньше по величине**: при r/R = 1.5 — z/R = 1.41, при r/R = 3 — z/R = 3.48.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Таблица	**Значения** $A' + B'$**:** $z/R = 0.25$ **...** 6**;** $r/R = 0$ **...** 3
Другая окружность	$R = 5$ **m,** $q = 120$ **kN/m²; точка** $r = 7.5$ **m,** $z = 5$ **m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Таблица A′ + B′; для второго круга $\Delta\sigma_z$ (по таблице) и прямым расчётом.

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

z/R \ r/R	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
0.25	0.9857	0.9658	0.4596	0.0142	0.0016	0.0001
0.50	0.9106	0.8396	0.4175	0.0604	0.0105	0.0010
1.00	0.6464	0.5622	0.3322	0.1266	0.0418	0.0062
1.50	0.4240	0.3750	0.2562	0.1379	0.0650	0.0146
2.00	0.2845	0.2589	0.1960	0.1265	0.0733	0.0225
3.00	0.1462	0.1384	0.1181	0.0919	0.0666	0.0309
4.00	0.0869	0.0840	0.0761	0.0649	0.0526	0.0311
6.00	0.0403	0.0396	0.0377	0.0349	0.0314	0.0236

Столбец **r/R = 0** — замкнутое решение; при **r/R = 1** значение по мере приближения к поверхности стремится к 0.5 (0.4596 при z/R = 0.25); в столбцах **r/R ≥ 1.5** значение сначала растёт, затем убывает. Каждое число в таблице — интеграл по 2880 направлениям.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

1 Отношения

$$\frac{z}{R} = \frac{5}{5} = 1.0 \qquad \frac{r}{R} = \frac{7.5}{5} = 1.5$$

2 Коэффициент и напряжение по таблице

$$A' + B'\,(z/R = 1;\ r/R = 1.5) = 0.12664$$

$$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B') = 120\,(0.12664) = \mathbf{15.20}\ \text{kPa}$$

$\Delta\sigma_z/q$ зависит только от **z/R** и **r/R**: для круга с R = 5 m те же отношения дают коэффициент круга с R = 3 m из Примера 2 (**0.12664**); напряжение масштабируется только с q (15.20 kPa).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

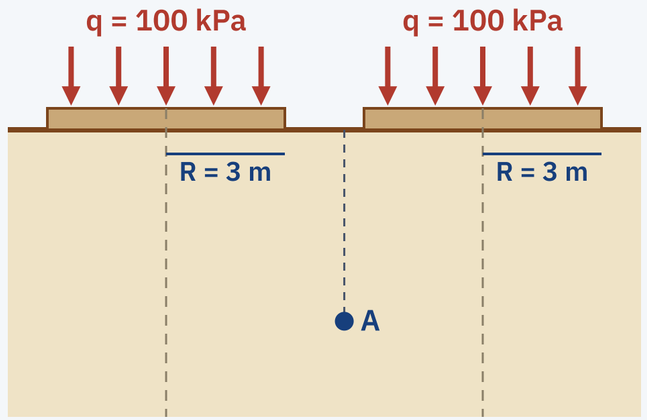
ПРИМЕР

Дано

Круг 1	$R = 3$ m, $q = 100$ kN/m², центр $x = 0$
Круг 2	$R = 3$ m, $q = 100$ kN/m², центр $x = 8$ m
Точка A	$x = 4.5$ m, $y = 0$; $z = 3$ m (а также 1.5; 4.5; 6; 12 m)

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

$\Delta\sigma_z$ от двух кругов по отдельности и совместно; профиль по глубине.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Проверка перекрытия (круги не перекрываются; между ними 2 m) и расстояния

$$d = 8 \text{ m} \ \geq R_1 + R_2 = 6 \text{ m}$$

$$r_1 = 4.5 \text{ m} \ (r_1/R = 1.5) \qquad r_2 = 8 - 4.5 = 3.5 \text{ m} \ (r_2/R = 1.1667)$$

2 Коэффициент влияния и напряжение для каждой окружности (z/R = 1)

$$A' + B'_{(1)} = 0.12664 \ \Rightarrow \ \Delta\sigma_{z(1)} = 100\,(0.12664) = 12.664 \text{ kPa}$$

$$A' + B'_{(2)} = 0.25049 \ \Rightarrow \ \Delta\sigma_{z(2)} = 100\,(0.25049) = 25.049 \text{ kPa}$$

3 Суперпозиция

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z(1)} + \Delta\sigma_{z(2)} = 12.664 + 25.049 = \mathbf{37.714} \text{ kPa}$$

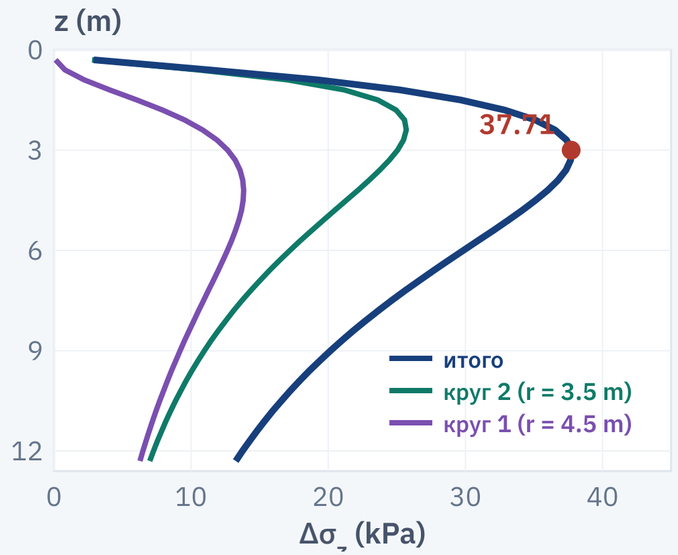
Точка A ближе ко второму кругу (3.5 m и 4.5 m): **круг 2 даёт 66% суммы**. Суммарное $\Delta\sigma_z$ = **37.71 kPa**; значение для одного круга составляло 12.66 kPa.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

z (m)	z/R	r_1/R = 1.5	r_2/R = 1,167	$\Delta\sigma_{z(1)}$	$\Delta\sigma_{z(2)}$	**Итого**
1.5	0.50	0.06044	0.23608	6.04	23.61	**29.65**
3.0	1.00	0.12664	0.25049	12.66	25.05	**37.71**
4.5	1.50	0.13793	0.21324	13.79	21.32	**35.12**
6.0	2.00	0.12646	0.17204	12.65	17.20	**29.85**
12.0	4.00	0.06487	0.07258	6.49	7.26	**13.75**

Суммарное напряжение на z = 3 m равно **37.71 kPa**; вклад круга 2 с глубиной уменьшается, а вклад круга 1 возрастает до 4.5 m. Результат есть сумма значений, найденных при собственном расстоянии r каждого круга.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

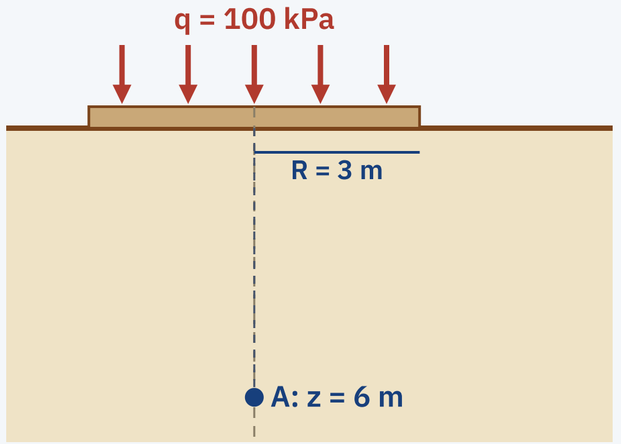
ПРИМЕР

Дано

Круг	$R = 3$ m, $q = 100$ kN/m²; суммарная нагрузка $Q = q\pi R^2 = 2827.4$ kN
Сосредоточенная нагрузка	в центре того же круга Q: $\Delta\sigma_z = Q\, I_1/z^2$, $I_1 = \frac{3}{2\pi}\left[(r/z)^2 + 1\right]^{-5/2}$
Точки	на оси ($r = 0$) и в точке $r = 2R$; $z/R = 1;\ 2;\ 3;\ 5;\ 10$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Отношение двух решений; начиная с какой глубины приближение сосредоточенной нагрузкой приемлемо?



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Суммарная нагрузка

$$Q = q\pi R^2 = 100\,\pi\,(3)^2 = \mathbf{2{,}827.4}\ \text{kN}$$

2 Сосредоточенная нагрузка (Boussinesq), на оси r = 0

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2}\,\frac{3}{2\pi} = \frac{2{,}827.4}{36}\,(0.4775) = \mathbf{37.50}\ \text{kPa}$$

3 Круг (замкнутое выражение, z = 6 m)

$$\Delta\sigma_z = 100\left(1 - \frac{1}{(0.25+1)^{3/2}}\right) = \mathbf{28.45}\ \text{kPa}$$

На глубине z = 2R приближение сосредоточенной силой даёт напряжение в **1.318 раза** (на 31.8%) больше: 28.4 kPa вместо 37.5 kPa.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

r/R	z/R	Круг $\Delta\sigma_z$ (kPa)	Сосредоточенная нагрузка $\Delta\sigma_z$ (kPa)	Сосредоточенная нагрузка / круговая
0	1	64.645	150.000	**2.320**
0	2	28.446	37.500	**1.318**
0	3	14.619	16.667	**1.140**
0	5	5.713	6.000	**1.050**
0	10	1.481	1.500	**1.013**
2	1	4.181	2.683	**0.642**
2	2	7.334	6.629	**0.904**
2	3	6.663	6.647	**0.997**
2	5	4.048	4.140	**1.023**
2	10	1.346	1.360	**1.010**

На оси при z/R = 1 сосредоточенная нагрузка завышает напряжение в **2.32 раза**; при z = 5R разница составляет 5.0%, при z = 10R — 1.3%. При r = 2R приближение вблизи поверхности даёт **заниженное** значение (0.64), а при z ≥ 3R разница не превышает 3%.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Резюме

Главное

На оси: $\Delta\sigma_z = q\{1 - 1/[(R/z)^2 + 1]^{3/2}\}$; при z = 1.5 m — 91.06 kPa (A′ + B′ = 0.91056); глубина, на которой $\Delta\sigma_z = 0.10$ q, равна **3.71R** (11.12 m)

Произвольная точка: $\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$; A′ + B′ зависит только от z/R и r/R. **Пример (r = 4.5 m; z = 3 m):** A′ + B′ = 0.12664, **$\Delta\sigma_z$ = 12.664 kPa**

Расчёт: интеграл Boussinesq в точке A в полярных координатах; ρ — в замкнутом виде, φ — численно (2880 направлений). Вручную по 36 направлениям — 12.62 kPa

Вне нагрузки (r/R = 1.5) напряжение сначала возрастает: наибольшее значение 13.83 kPa при z ≈ 4.23 m; под краем на поверхности 0.5 q

Два круга: напряжения находятся при собственном расстоянии r каждого круга и суммируются: 12.66 + 25.05 = 37.71 kPa. Приближение **сосредоточенной нагрузкой** вблизи нагрузки неточно (при z = 2R — ×1.32), при z ≥ 5R оно пригодно

Список литературы

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

Ahlvin, R.G. and Ulery, H.H. (1962). Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains, and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space. Highway Research Bulletin 342, 1–13.

ПРИМЕЧАНИЕ

Все числовые примеры получены с помощью собственного расчётного ядра модуля; модуль даёт те же значения. Модуль открывается с круговой нагрузкой R = 3 m, q = 100 kN/m² и точкой A (r = 4.5 m; z = 3 m).

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Ввести свои круги (q, R, центр), точку A и глубину в GeoTerva; модуль одновременно выдаёт A′ + B′, значение $\Delta\sigma_z$, изолинии напряжений, профиль по глубине, пошаговое решение и отчёт.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.