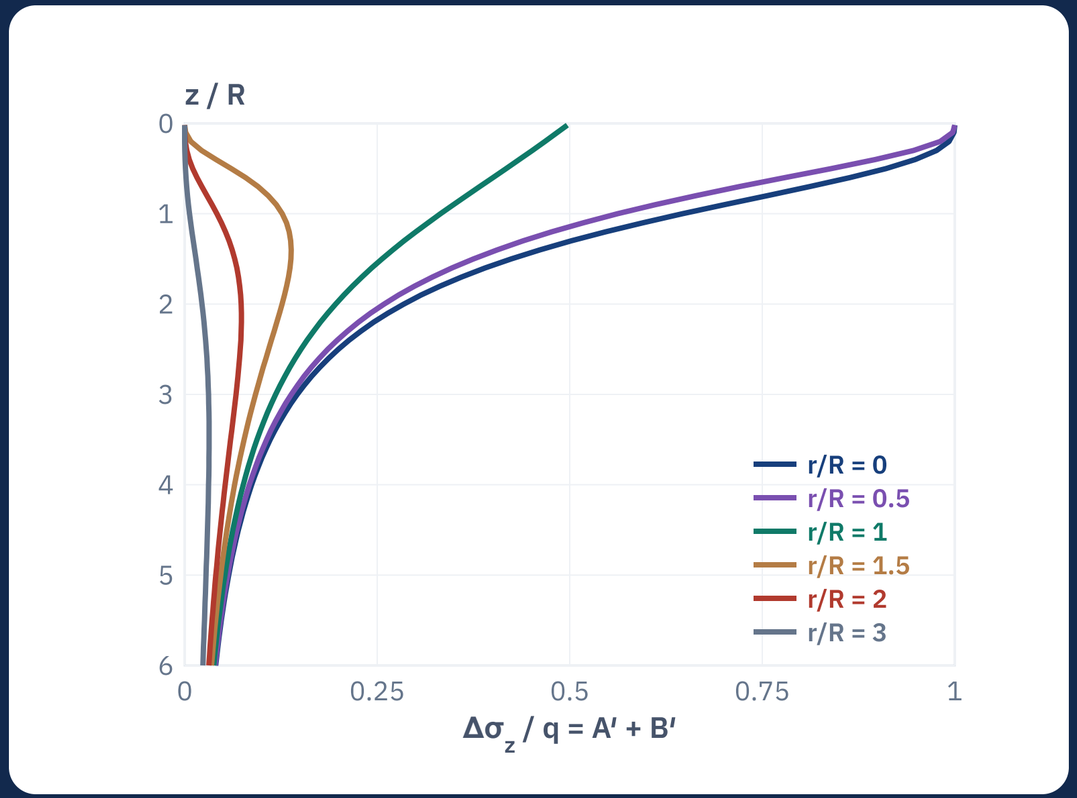
Presentazione della lezione di geotecnica · Tensioni nel mezzo terreno

Tensione sotto un carico circolare

Lezione: tensione verticale sotto un carico circolare; espressione in forma chiusa sull'asse, A′ + B′ fuori dall'asse; esempi di calcolo risolti a mano.

Sull'asse | A′ + B′ | Integrale polare | All'esterno del carico | Cerchi multipli



Introduzione

Che cosa si impara in questa lezione?

L'incremento di tensione verticale al di sotto di un'**area circolare** con carico uniformemente distribuito (serbatoio, silo, fondazione circolare): $\Delta\sigma_z$

Sull'asse del cerchio espressione in forma chiusa: $\Delta\sigma_z = q\{1 - 1/[(R/z)^2 + 1]^{3/2}\}$

In posizione eccentrica, al di sotto del bordo e lateralmente: $\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$; $A' + B'$ dipende solo da z/R e r/R

La valutazione dell'integrale di Boussinesq **in coordinate polari nel punto A**: l'integrale su ρ in forma chiusa, l'integrale su φ per via numerica

Che all'esterno del carico la tensione **prima aumenta e poi diminuisce**; che le tensioni di più cerchi si **sommano**

SVOLGIMENTO DELLA LEZIONE

Ogni argomento è trattato in **tre passaggi**:

1 · **Teoria**: formula e relativa motivazione

2 · **Traccia**: dati e richiesto

3 · **Soluzione**: passo per passo, con i numeri

Cerchio di esempio: R = 3 m, q = 100 kN/m²; il punto A si trova a una distanza r = 4.5 m dall'asse del cerchio e a una profondità z = 3 m (all'esterno dell'area caricata).

Area circolare con carico uniformemente distribuito

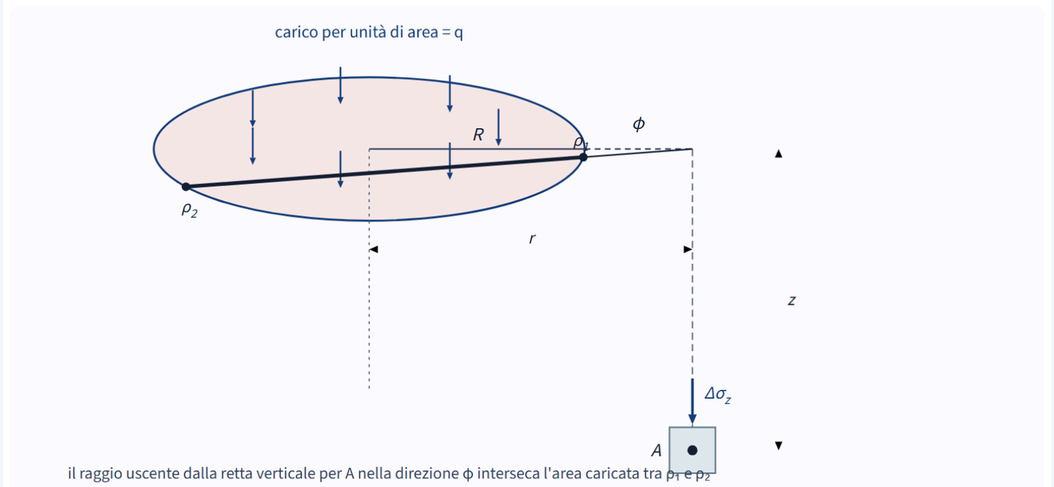
TEORIA

Area circolare flessibile di raggio **R** soggetta a una pressione uniforme **q** (serbatoio, silo, fondazione circolare)

Il terreno è un semispazio **omogeneo, isotropo e linearmente elastico**; $\Delta\sigma_z$ è solo l'incremento prodotto dal carico

Il problema è **a simmetria assiale**: la tensione dipende solo dalla distanza orizzontale dal centro **r** e dalla profondità **z**, non dalla direzione

Al centro (r = 0) esiste una **espressione in forma chiusa**; fuori dall'asse, sotto e a lato del bordo, Ahlvin e Ulery (1962) hanno valutato l'integrale e lo hanno tabulato come **A′ e B′**



Al di sotto del centro del cerchio: soluzione in forma chiusa

TEORIA

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

In superficie ($z \to 0$) $\Delta\sigma_z = q$; con la profondità **decresce monotonicamente** e tende a zero a grande profondità

La tensione dipende unicamente dal rapporto **R/z**: per lo stesso z/R una circonferenza grande e una piccola forniscono lo stesso valore di $\Delta\sigma_z/q$

PROFONDITÀ DI INFLUENZA

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

Alla profondità di 3.7R la tensione si riduce a un decimo soltanto del valore in superficie.

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

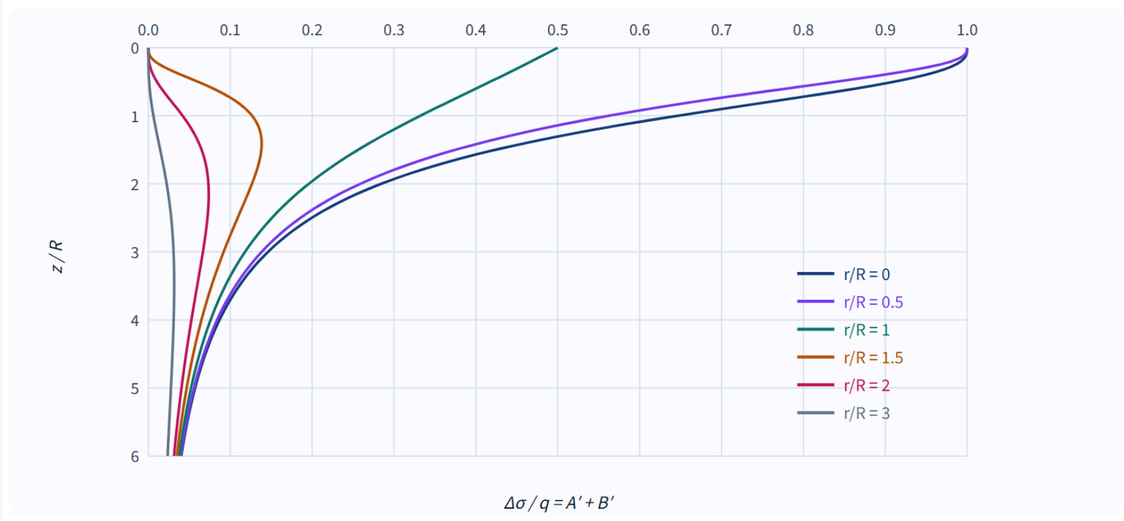
TEORIA

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

A′ e B′ sono due parti che dipendono dai rapporti **z/R** e **r/R**; derivano dalla scomposizione dell'integrale e per $\Delta\sigma_z$ è necessaria solo la loro **somma**

Sull'asse (r = 0) si riduce a un'espressione chiusa totale; **sotto il bordo** (r/R = 1) parte da 0.5 in superficie

Accanto al carico il valore parte da zero, prima aumenta, poi diminuisce



Integrale polare rispetto al punto

TEORIA

Non si interpola tra le tabelle: la soluzione di Boussinesq è integrata direttamente sul cerchio nelle coordinate polari **ρ, φ** centrate nel punto sottostante il punto A

In ciascuna direzione φ il raggio interseca il cerchio caricato tra **ρ_1** e **ρ_2** (ρ_1 = 0 se A è sotto il carico); l'elemento di carico è 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′ e somma numerica

TEORIA

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

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

L'integranda dell'integrale residuo in φ è continua e viene sommata numericamente su **2880 direzioni**; per r = 0 si ha $\rho_1 = 0$ e $\rho_2 = R$, e l'espressione ritorna alla **soluzione in forma chiusa**

VALORI DI 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

Sovrapposizione

TEORIA

Ogni cerchio è definito dai propri **q, R** e dal centro sulla superficie del terreno (x_L, y_L) (nel modulo al massimo otto cerchi)

I due cerchi **possono essere tangenti ma non sovrapporsi**: la distanza tra i centri è almeno $R_1 + R_2$

Poiché il terreno è elastico, la tensione di ciascun cerchio si ricava con **la propria distanza radiale r dal punto A al centro di quel cerchio**, e le tensioni si sommano

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

Traccia

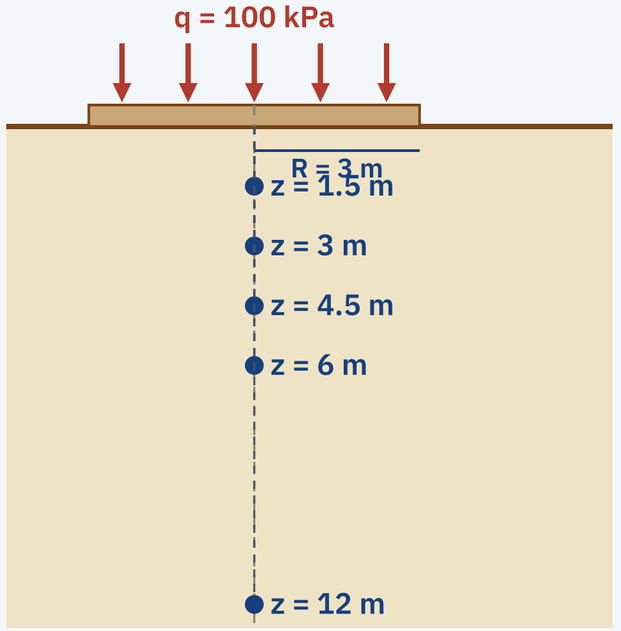
ESEMPIO

Dati

Cerchio	**flessibile, $R = 3$ m, $q = 100$ kN/m²**
Punti	**sull'asse del cerchio ($r = 0$): $z = 1.5; 3; 4.5; 6; 12$ m**

RICHIESTO

$\Delta\sigma_z$ con espressione chiusa (prima in dettaglio per z = 1.5 m), **A′ + B′**; la profondità alla quale $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$.



Soluzione (1/3)

SOLUZIONE

1 Rapporti

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

2 Esponente e valore inverso

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

3 Tensione verticale

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

A z = 1.5 m di profondità **A′ + B′ = 0.91056** e **$\Delta\sigma_z$ = 91.06 kPa**: il 91.1% del carico superficiale si trasmette.

Soluzione (2/3)

SOLUZIONE

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**

Sull'asse la tensione diminuisce in una sola direzione: **91.1 → 8.7 kPa** (z = 1.5 m → 12 m). La riga z = 1.5 m corrisponde al calcolo svolto a mano; ogni riga si ottiene con la stessa espressione. A z = 3 m la tensione è circa il 65% del carico superficiale, a z = 12 m è il 9%.

Soluzione (3/3)

SOLUZIONE

4 Profondità alla quale $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$

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

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

La profondità alla quale $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$ è **11.12 m** (z/R = 3.707): a questa profondità la tensione sull'asse si è ridotta a un decimo del carico superficiale. Il valore dimezzato (0.50 q) si ha per z/R = 1.305, cioè a 3.91 m.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

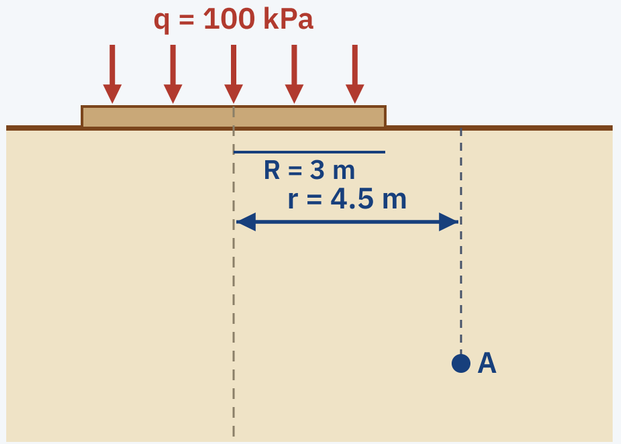
ESEMPIO

Dati

Cerchio	**flessibile, $R = 3$ m, $q = 100$ kN/m²**
Punto A	**$r = 4.5$ m dal centro ($r/R = 1.5$; all'esterno del carico), $z = 3$ m ($z/R = 1$)**
Metodo	**integrale polare: dapprima a mano, la direzione $N = 36$; poi le 2880 direzioni del modulo**

RICHIESTO

A′ + B′ e **$\Delta\sigma_z$**; l'effetto del numero di direzioni sul risultato.



Soluzione (1/3)

SOLUZIONE

1 Distanze in cui il raggio interseca il cerchio

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

2 In quali direzioni i raggi colpiscono il cerchio?

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

Poiché A è esterno al cerchio, contribuiscono solo le direzioni rivolte verso il cerchio: **138.19° < φ < 221.81°**.

Il raggio colpisce il cerchio solo nell'intervallo **138.19° < φ < 221.81°**. Se si assumono **N = 36** direzioni, si ha φ_i = 5°, 15°, 25°, ...; di queste solo **8** ricadono in tale intervallo: 145°, 155°, 165°, 175° e le rispettive simmetriche 185°, 195°, 205°, 215°.

Soluzione (2/3)

SOLUZIONE

3 Contributo di un raggio e media

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

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

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**

I raggi a 185°, 195°, 205°, 215° sono i simmetrici di 175°, 165°, 155°, 145°: forniscono gli stessi valori di g. g(145°) = 0.4112 e g(175°) = 0.6611.

Soluzione (3/3)

SOLUZIONE

4 Totale (N = 36)

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

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

5 Il risultato converge all'aumentare del numero di direzioni

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

Il modulo utilizza **2880 direzioni**: **A′ + B′ = 0.12664**, **$\Delta\sigma_z$ = 12.664 kPa**. Il valore tabellato per lo stesso punto è 0.12663; il risultato manuale con 36 direzioni (12.62) differisce da questo solo dello 0.4%.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

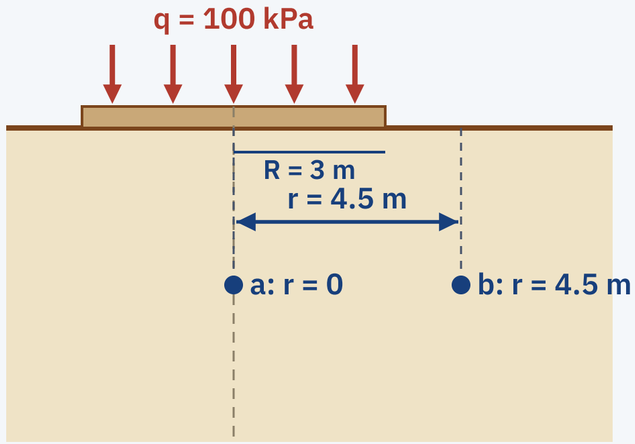
ESEMPIO

Dati

Cerchio	**flessibile,** $R = 3$ **m,** $q = 100$ **kN/m²**
Punti	**(a) asse,** $r = 0$**; (b)** $r = 4.5$ **m** $(r/R = 1.5)$
Profondità	$z = 1.5; 3; 4.5; 6; 12$ **m**

RICHIESTO

$\Delta\sigma_z$ su entrambe le linee; sulla linea (b) la **tensione massima** e la sua profondità.



Soluzione (1/3)

SOLUZIONE

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**

Asse: 91.1 → 8.7 kPa, con diminuzione in un'unica direzione. **All'esterno del carico (r = 4.5 m):** 6.04 → 13.79 → 6.49 kPa; dapprima **aumenta**, poi diminuisce: il carico si diffonde lateralmente con la profondità.

Ogni riga è un valore A′ + B′ per la direzione 2880; la riga z = 3 m della colonna (b) è il risultato dell'Esempio 2.

Soluzione (2/3)

SOLUZIONE

1 $A' + B'$ sulla linea r/R = 1.5, in funzione della profondità

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**

Lungo la linea r/R = 1.5 la **tensione massima si ha alla profondità z ≈ 4.23 m** (z/R = 1.41) ed è pari a **13.83 kPa**: all'esterno dell'area caricata la tensione raggiunge il valore massimo in profondità e poi diminuisce.

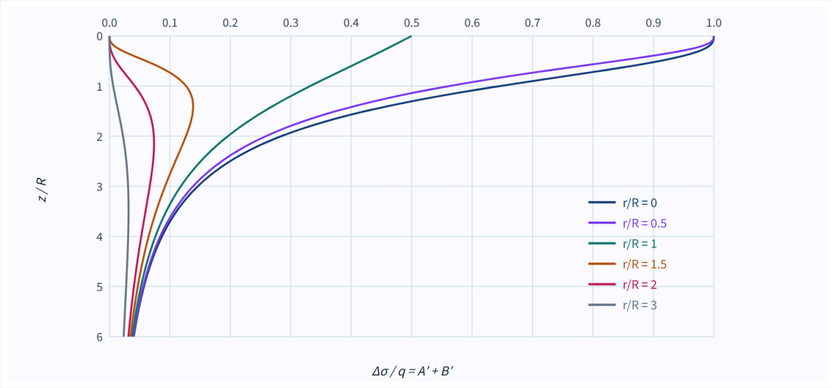
Soluzione (3/3)

SOLUZIONE

2 Valore massimo verso l'esterno

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

Allontanandosi il punto dalla circonferenza, la tensione massima è **più profonda e minore**: per r/R = 1.5, z/R = 1.41; per r/R = 3, z/R = 3.48.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

ESEMPIO

Dati

Tabella	**Valori di $A' + B'$: $z/R = 0.25$ … 6; $r/R = 0$ … 3**
Altro cerchio	$R = 5$ **m,** $q = 120$ **kN/m²; punto** $r = 7.5$ **m,** $z = 5$ **m**

RICHIESTO

Tabella A′ + B′; nel secondo cerchio **$\Delta\sigma_z$** (dalla tabella) e con il calcolo diretto.

Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

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

La colonna **r/R = 0** è la soluzione in forma chiusa; per **r/R = 1** il valore tende a 0.5 in prossimità della superficie (0.4596 per z/R = 0.25); nelle colonne **r/R ≥ 1.5** il valore prima aumenta e poi diminuisce. Ogni numero della tabella è un integrale su 2880 direzioni.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

1 Rapporti

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

2 Coefficiente e tensione dalla tabella

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

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

$\Delta\sigma_z/q$ dipende solo da **z/R** e **r/R**: per R = 5 m nel cerchio, gli stessi rapporti forniscono il coefficiente del cerchio con R = 3 m dell'Esempio 2 (**0.12664**); la tensione scala solo con q (15.20 kPa).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

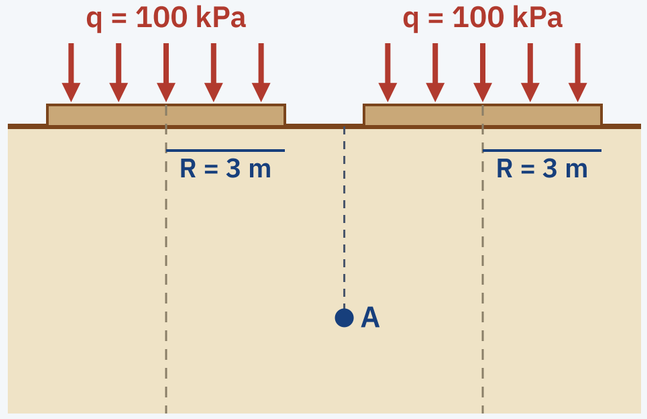
ESEMPIO

Dati

Cerchio 1	$R = 3$ **m,** $q = 100$ **kN/m², centro** $x = 0$
Cerchio 2	$R = 3$ **m,** $q = 100$ **kN/m², centro** $x = 8$ **m**
Punto A	$x = 4.5$ **m,** $y = 0$**;** $z = 3$ **m (inoltre** 1.5**;** 4.5**;** 6 **;** 12 **m)**

RICHIESTO

$\Delta\sigma_z$ dei due cerchi separatamente e in combinazione; profilo con la profondità.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Verifica di sovrapposizione (i cerchi non si sovrappongono; 2 m tra di essi) e interassi

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

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

2 Fattore di influenza e tensione per ciascun cerchio (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 Sovrapposizione

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

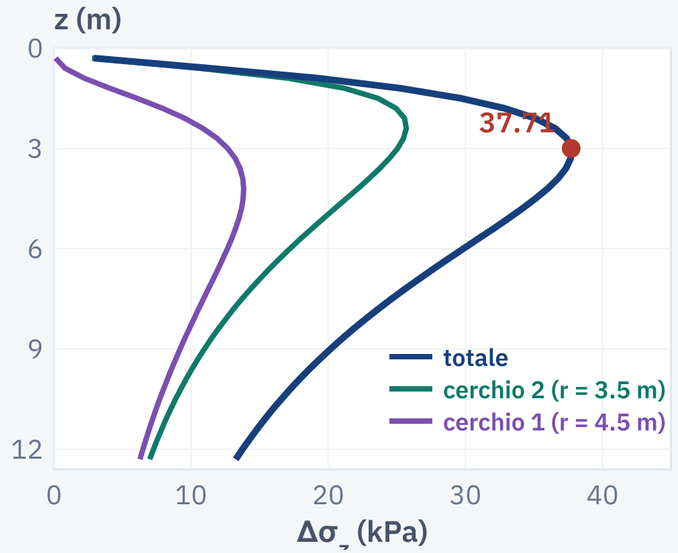
A è più vicino al secondo cerchio (3.5 m e 4.5 m): **il cerchio 2 fornisce il 66% del totale**.
Totale $\Delta\sigma_z$ = **37.71 kPa**; il valore del singolo cerchio era 12.66 kPa.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

z (m)	z/R	$r_1/R = 1.5$	$r_2/R = 1{,}167$	$\Delta\sigma_{z(1)}$	$\Delta\sigma_{z(2)}$	Totale
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**

La tensione totale a z = 3 m è **37.71 kPa**; il contributo del cerchio 2 diminuisce con la profondità mentre quello del cerchio 1 aumenta fino a 4.5 m. Il risultato è la somma dei valori ottenuti con la distanza r propria di ciascun cerchio.



Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

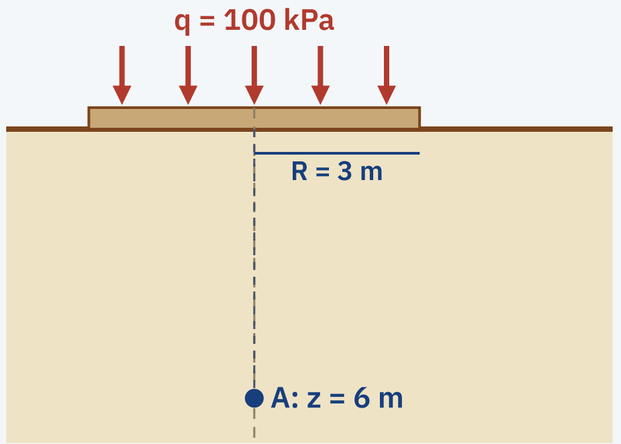
ESEMPIO

Dati

Cerchio	$R = 3$ **m,** $q = 100$ **kN/m²; carico totale** $Q = q\pi R^2 = 2827.4$ **kN**
Carico concentrato	**al centro dello stesso cerchio** Q**:** $\Delta\sigma_z = Q\, I_1/z^2$**,** $I_1 = \frac{3}{2\pi}[(r/z)^2 + 1]^{-5/2}$
Punti	**sull'asse in** $(r = 0)$ **e in** $r = 2R$**;** $z/R = 1$**;** 2**;** 3**;** 5**;** 10

RICHIESTO

Rapporto tra le due soluzioni; oltre quale profondità è accettabile l'approccio del carico concentrato?



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Carico totale

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

2 carico concentrato (Boussinesq), sull'asse r = 0

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

3 Cerchio (espressione in forma chiusa, z = 6 m)

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

A profondità z = 2R l'approccio del carico concentrato fornisce una tensione **1.318 volte** maggiore (31.8%): 28.4 kPa anziché 37.5 kPa.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

r/R	z/R	Cerchio $\Delta\sigma_z$ (kPa)	Carico concentrato $\Delta\sigma_z$ (kPa)	Carico concentrato / area circolare
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**

Sull'asse, a z/R = 1, il carico concentrato sovrastima la tensione di un fattore **2.32**; a z = 5R la differenza è del 5.0%, a z = 10R scende all'1.3%. A r = 2R l'approssimazione risulta **per difetto** in prossimità della superficie (0.64), mentre per z ≥ 3R la differenza non supera il 3%.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Sintesi

Punti chiave

Sull'asse: $\Delta\sigma_z = q\{1 - 1/[(R/z)^2 + 1]^{3/2}\}$; per z = 1.5 m, 91.06 kPa (A′ + B′ = 0.91056); la profondità alla quale $\Delta\sigma_z$ = 0.10 q è **3.71R** (11.12 m)

Punto generico: $\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$; A′ + B′ dipende solo da z/R e r/R. **Esempio (r = 4.5 m; z = 3 m):** A′ + B′ = 0.12664, **$\Delta\sigma_z$ = 12.664 kPa**

Calcolo: integrale di Boussinesq nel punto A in coordinate polari; ρ in forma chiusa, φ numerico (2880 direzioni). A mano con 36 direzioni: 12.62 kPa

All'esterno del carico (r/R = 1.5) la tensione prima aumenta: valore massimo 13.83 kPa a z ≈ 4.23 m; sotto il bordo, 0.5 q in superficie

Due cerchi: le tensioni si determinano con la distanza r propria di ciascun cerchio e si sommano: 12.66 + 25.05 = 37.71 kPa. L'approssimazione con **carico concentrato** è errata in prossimità del carico (×1.32 a z = 2R) ed è accettabile per z ≥ 5R

Bibliografia

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.

NOTA

Tutti gli esempi numerici sono stati prodotti con il motore di calcolo del modulo stesso; il modulo restituisce gli stessi valori. Il modulo si apre con il carico circolare R = 3 m, q = 100 kN/m² e il punto A (r = 4.5 m; z = 3 m).

GeoTerva

Calcoli geotecnici online

Dalla teoria alla pratica

Inserire in GeoTerva i cerchi (q, R, centro), il punto A e la profondità; il modulo fornisce insieme A′ + B′, il valore di $\Delta\sigma_z$, le isobare, il profilo con la profondità, la soluzione passo per passo e la relazione.

Aprire il modulo →

Pagina di teoria →

Aprire dallo smartphone

I moduli di prova non richiedono registrazione.

Se si desidera utilizzarli nelle proprie lezioni: info@geoterva.com