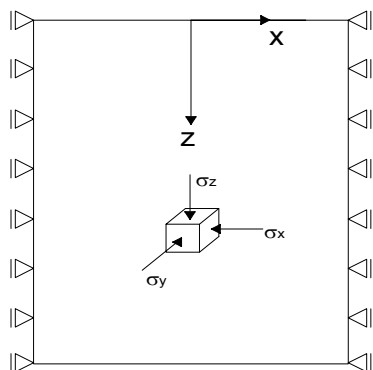


ТУНЕЛИ И ПОДЗЕМНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

ФОРМУЛЕ

Примарно напонско стање



$$P_v = \sigma_z = \sigma_1 = \bar{\gamma}z$$

$$P_h = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_2 = \sigma_3 = \lambda P_v$$

z - дубина уочене тачке

γ - просјечна јединична тежина стијенске масе

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}, 0 < \mu < 0.50$$

μ - Пуасонов коефицијент

За реалну стијенску масу

$$0.30 < \lambda < 3.50$$

$$12 \text{ kN/m}^3 < \gamma < 30 \text{ kN/m}^3$$

(За рудна тијела $30 \text{ kN/m}^3 < \gamma < 80 \text{ kN/m}^3$)

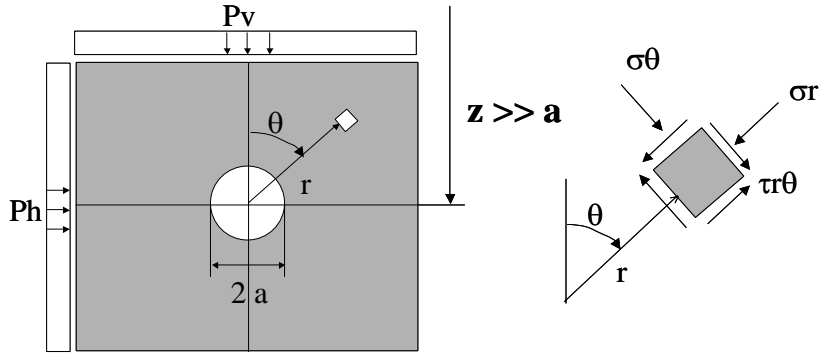
Примарно стање напона у цилиндричним координатама

$$\sigma_r^0 = \frac{P_v}{2} [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos 2\theta]$$

$$\sigma_\theta^0 = \frac{P_v}{2} [(1 + \lambda) - (1 - \lambda) \cos 2\theta]$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P_v}{2} (1 - \lambda) \sin 2\theta$$

Секундарно напонско стање око кружног отвора ($z \gg a$)



Радијални напон

$$\sigma_r = \frac{P_v}{2} \left[(1 + \lambda) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + (1 - \lambda) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right]$$

Тангентни напон

$$\sigma_\theta = \frac{P_v}{2} \left[(1 + \lambda) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - (1 - \lambda) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

Смичући напон

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P_v}{2} (1 - \lambda) \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta$$

Напон управан на раван тунела

$$\sigma_1 = P_v \left[\lambda - 2\mu(1 - \lambda) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta \right]$$

Фактор сигурности

$$a) \quad F_s = \frac{2tg\bar{\phi}' \sqrt{(\sigma_1 + \bar{c}'ctg\bar{\phi}')(\sigma_3 + \bar{c}'ctg\bar{\phi}')}}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

Главни напони

$$\sigma_{1,3} = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_r) \pm \frac{1}{2} \sqrt{4\tau_{r\theta}^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2}$$

б)

$$F_s = \frac{\sin \bar{\phi}' \left[\bar{c}'ctg\bar{\phi}' + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3') \right]}{\frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3')}$$

Еластична помјерања изазвана секундарним напонским стањем

Радијално помјерање

$$u_r = \frac{1-\mu^2}{E} \frac{P_v a}{2} \left\{ (1+\lambda) \left(1 + \frac{\mu}{1-\mu} \right) \frac{a}{r} + (1-\lambda) \left[4 \frac{a}{r} - \left(1 + \frac{\mu}{1-\mu} \right) \frac{a^3}{r^3} \right] \cos 2\theta \right\}$$

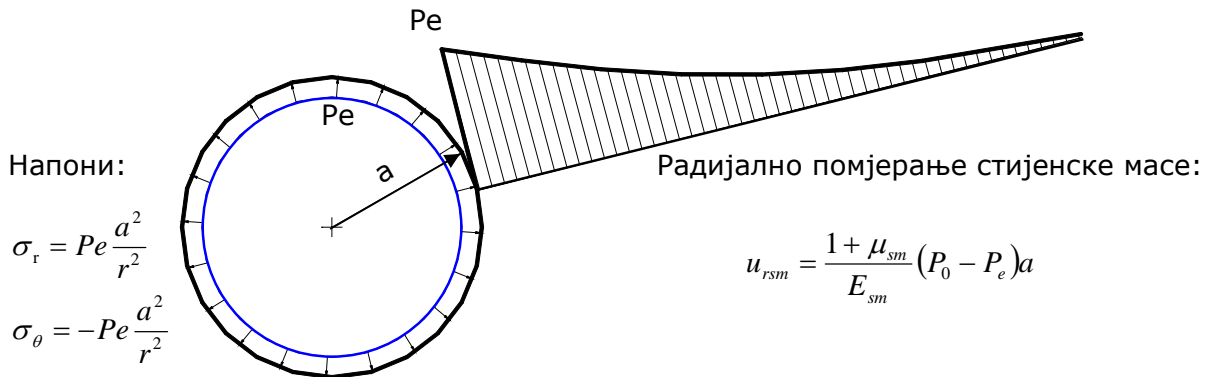
Позитивно помјерање усмјерено ка оси отвора

Тангентно помјерање

$$u_\theta = -\frac{1-\mu^2}{E} \frac{P_v a}{2} (1-\lambda) \left[2 \left(1 - \frac{\mu}{1-\mu} \right) \frac{a}{r} + \left(1 + \frac{\mu}{1-\mu} \right) \frac{a^3}{r^3} \right] \sin 2\theta$$

Позитивно помјерање у смјеру кретања казаљке на сату

Напонско стање у стијенској маси услијед равномјерног радијалног притиска P_e на контури ископа (Терцијарно напонско стање)



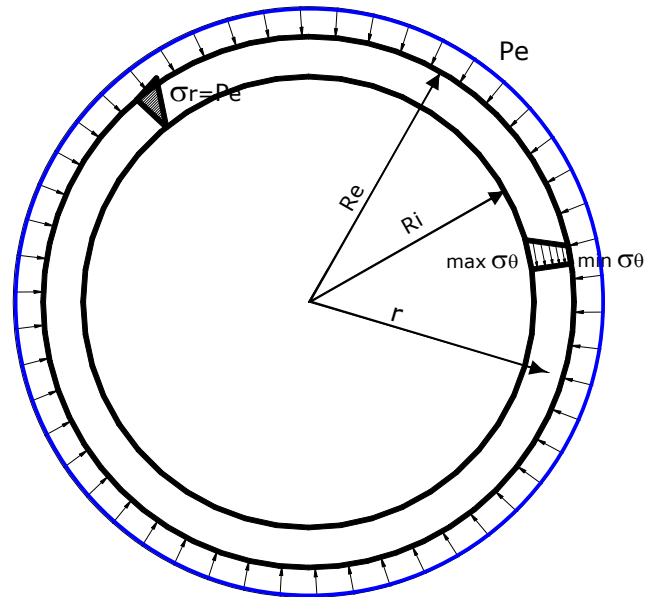
Напонско стање монолитне бетонске облоге оптерећене радијалним притиском P_e на контури кружног ископа

Радијални напон у облози

$$\sigma_r = \frac{P_e}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e} \right)^2} - \frac{P_e}{r^2} \frac{R_i^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e} \right)^2}$$

Тангентни напон

$$\sigma_\theta = \frac{P_e}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e} \right)^2} + \frac{P_e}{r^2} \frac{R_i^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e} \right)^2}$$



Максимални тангентни напон се јавља на унутрашњој ивици цијеви ($r=R_i$):

$$\max \sigma_{\theta} = \frac{2P_e}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}$$

Уколико се ради о равном стању деформација ($\varepsilon_1 = 0$) онда постоји и напон управан на раван облоге:

$$\sigma_l = \mu_B (\sigma_{\theta} + \sigma_r) = \mu_B \frac{2P_e}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}$$

Радијална помјерања облоге

За равном стање деформација ($\varepsilon_1 = 0$)

$$u_r = \frac{P_e}{E_b} \frac{1 + \mu_b}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} r \left[1 - 2\mu_b + \left(\frac{R_i}{r}\right)^2 \right]$$

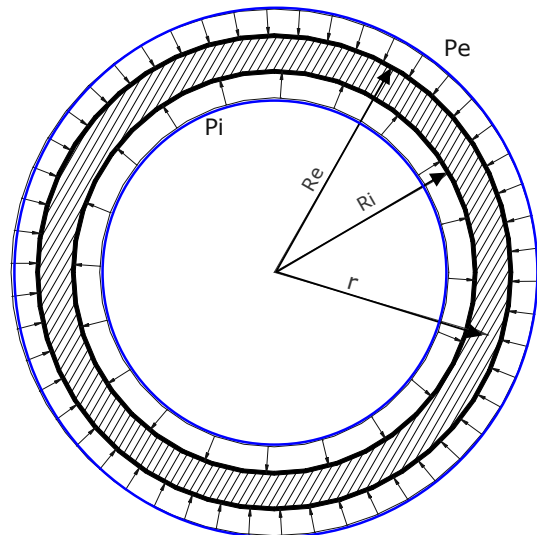
За равном стање напона ($\sigma_1=0$)

$$u_r = \frac{rP_e}{E_b \left(1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2\right)} \left[1 + \mu_b + \left(\frac{R_i}{r}\right)^2 (1 + \mu_b) \right]$$

Напонско стање монолитне бетонске облоге са унутрашњим радијалним притиском P_i и спољним радијалним притиском P_e

$$\sigma_r = \frac{P_e - P_i \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} - \frac{P_e - P_i}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} \frac{R_i^2}{r^2}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_e - P_i \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} + \frac{P_e - P_i}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} \frac{R_i^2}{r^2}$$



Радијална помјерања облоге

За равно стање деформација ($\varepsilon_1 = 0$)

$$u_r = (P_e - P_i) \frac{1 + \mu_b}{E_b} \frac{1}{1 - \frac{R_i^2}{R_e^2}} \left[(1 - 2\mu_b)r + \frac{R_i^2}{r} \right]$$

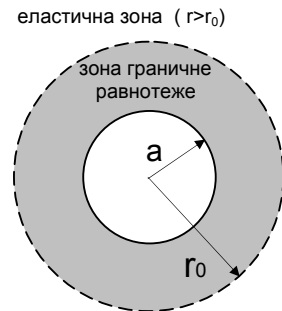
Секундарно равно стање напона око неоптерећеног кружног отвора са ободном зоном у стању граничне равнотеже (према решењу Kastner-a)

$$\sigma_r = \frac{\sigma_c}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{r}{a} \right)^{\kappa - 1} - 1 \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_c}{\kappa - 1} \left[\kappa \left(\frac{r}{a} \right)^{\kappa - 1} - 1 \right]$$

$$r_0 = a \left[\frac{2(p_0(\kappa - 1) + \sigma_c)}{(\kappa + 1)\sigma_c} \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}}$$

$$\sigma_c = 2 \frac{c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad \kappa = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad p_0 = \gamma H$$



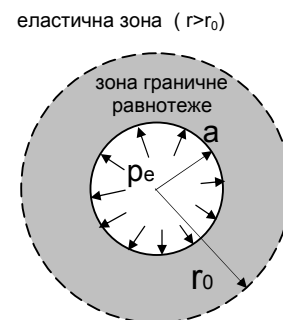
Секундарно равно стање напона око кружног отвора оптерећеног радијалним притиском (P_e) са ободном зоном у стању граничне равнотеже (према решењу Kastner-a)

$$\sigma_r = P_e \left(\frac{r}{a} \right)^{\kappa - 1}$$

$$\sigma_\theta = \kappa P_e \left(\frac{r}{a} \right)^{\kappa - 1}$$

$$r_0 = a \left[\frac{2p_0 - \sigma_c}{(1 + \kappa)p_e} \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}}$$

$$\sigma_c = 2 \frac{c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad \kappa = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad p_0 = \gamma H$$



Ове формуле дају напоне у зони граничне равнотеже ($a < r < r_0$)

Носивост НАТМ подграде (Sattler-Rabcewicz)

Носивост бетонске облоге на m' облоге

$$P_h = P_{cb} \frac{b}{2} = \frac{d \times 100}{\sin \alpha} \tau_b$$

$$\alpha \cong 45 - \frac{\phi}{2} \quad \sin 2\alpha = \cos \phi$$

$$20^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$$

$$\frac{b}{2} = a \cos \alpha$$

$$P_{cb} = \frac{\tau_b \times d_b \times 100}{a \cos \alpha \sin \alpha}$$

$$\underline{\underline{P_{cb} = 2\tau_b \frac{d_b}{a} \frac{1}{\cos \phi}}}$$

Носивост арматуре на m' облоге

$$\tau_a = \tau_b \frac{E_a}{E_b}$$

$$P_{ea} \times \frac{b}{2} = \frac{f_a \tau_a}{\sin \alpha} = \frac{f_a}{\sin \alpha} \tau_b \frac{E_a}{E_b}$$

$$P_{ea} = \frac{f_a \tau_b E_a / E_b}{a \cos \alpha \sin \alpha} = \frac{f_a \tau_b E_a / E_b}{\frac{1}{2} a \sin 2\alpha}$$

$$\underline{\underline{P_{ea} = \frac{2f_a \tau_b E_a / E_b}{a \cos \phi}}}$$

Носивост сидара на m' облоге

$$\underline{\underline{P_{es} = \frac{S}{e_r \times e_l}}}$$

S- сила у сидру

e_r - радијално растојање сидара

e_l - подужно растојање сидара

Слободна дужина сидра:

$$l_s = d_b + r_0 - a + e_r \frac{r_0}{a} \frac{1}{2}$$

Укупна носивост "прстена стијенске масе" у стању граничне равнотеже око кружног отвора

$$p_e(\tau_{\text{mob}}) = \frac{w}{a} \cos \phi \times \frac{2 - \sin \phi}{1 - \sin \phi} \times c \times \cos\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4}\right)$$

Фактор сигурности НАТМ подграде:

$$F_s = \frac{p_{eb} + p_{ea} + p_{es}}{p_e(\tau_{\text{mob}})}$$