اصول مهندسی تونل

Principles of Tunnel Engineering

جلسه هشتم:

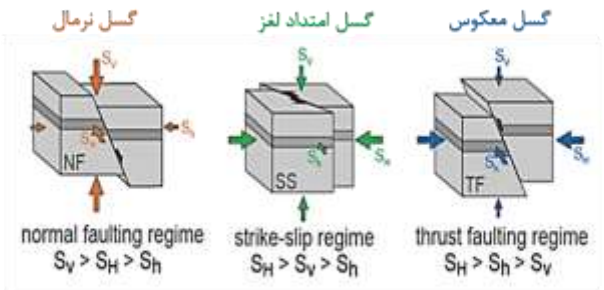
تنش برجا، تنش القایی و معیار شکست

تنش برجا (*in situ stress*)

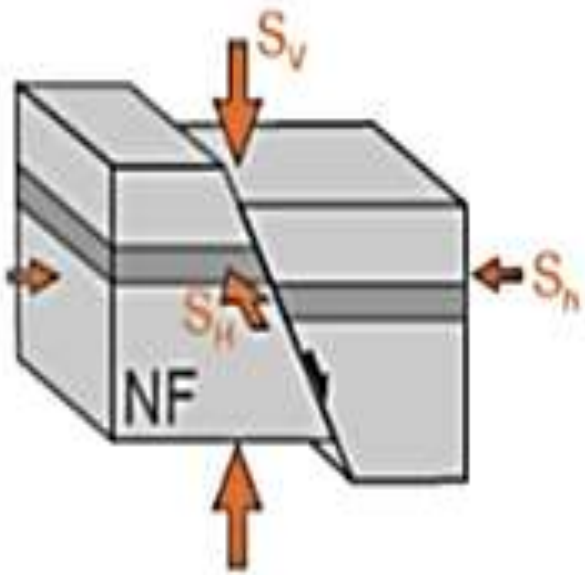
تنشی است که قبل از رخ دادن هرگونه آشفتگی مصنوعی (فعالیت‌های انسانی) در سنگ وجود داشته و نتیجه‌ی رویدادهای مختلف وقوع یافته در تاریخ زمین شناسی توده سنگ است. واژه‌های مترادف آن شامل تنش‌های بکر(*virgin stress*)، تنش‌های فعال (*active stress*)و تنش‌های اولیه (*initial stress*) است.

- فرض شده است تنش‌های موجود در زمین در سه راستای عمود برهم قرار دارند که یک مولفه‌ی تنش در راستای قائم و دو مولفه‌ی دیگر تنش در راستای افقی اثر می‌کنند.

- نحوه‌ی جهت‌گیری تنش حداکثر(σ_1) و تنش متوسط(σ_2) و تنش حداقل(σ_3)، با استفاده از رویداد انواع گسل‌های موجود قابل تخمین است.



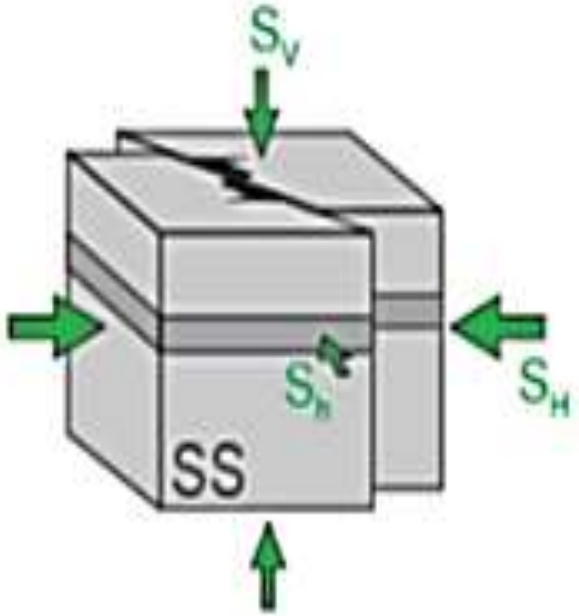
گسل نرمال



normal faulting regime

$S_V > S_H > S_h$

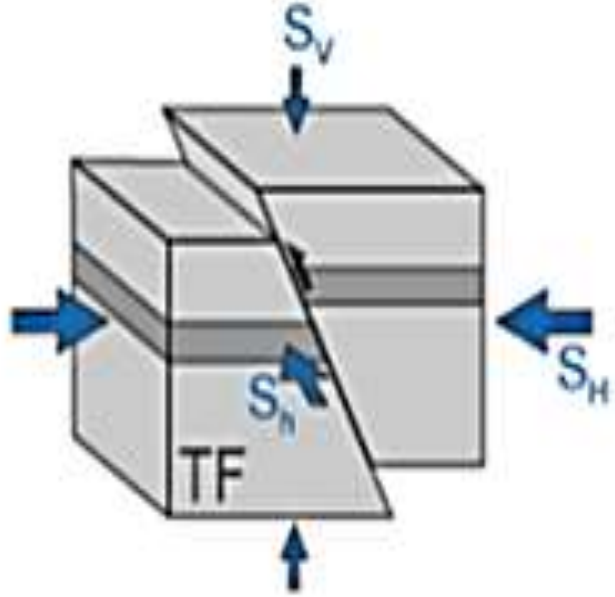
گسل امتداد لغز



strike-slip regime

$S_H > S_V > S_h$

گسل معکوس



thrust faulting regime

$S_H > S_h > S_V$

تنش های برجا (*in situ stress*)

تنش قائم (σ_v):

با افزایش عمق، به علت افزایش وزن لایه‌های زمین، مولفه قائم تنش افزایش می‌یابد، پس فرض می‌شود تنش عمودی یا قائم، برابر با وزن سنگ‌های روباره بوده و به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\sigma_v = \gamma . h$$

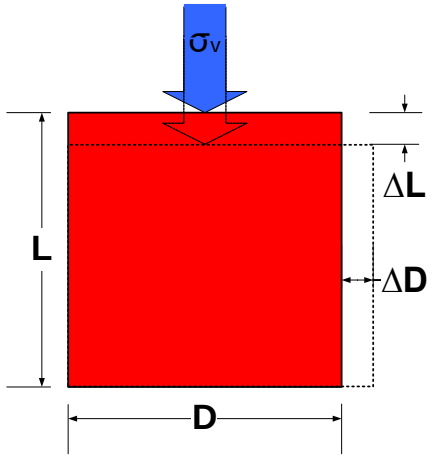
که در آن γ وزن مخصوص سنگ‌های روباره بوده و بر حسب مگانیوتن بر مترمکعب بیان می‌شود (مثلاً برای بعضی انواع زغال سنگ، $\gamma = 0.01 \ MN/m^3$، برای بعضی شیل ها $\gamma = 0.023 \ MN/m^3$ و برای گابرو $\gamma = 0.03 \ MN/m^3$ و به طور متوسط برای انواع سنگ‌ها $\gamma = 0.027 \ MN/m^3$).

h نیز عمق مورد نظر و یا ارتفاع سنگ‌های روباره است که بر حسب متر بیان می‌شود. بدین ترتیب تنش قائم بر حسب MPa از رابطه بالا بدست می‌آید.

تنش های برجا (*in situ stress*)

تنش افقی (σ_h):

تنش افقی یا ناشی از تنش قائم بوده و یا ناشی از نیروهای تکتونیکی است. تنها راه برآورد مقدار تنشهای افقی ناشی از فعالیت های تکتونیکی، اندازه گیری آن به کمک آزمایش های برجا است. اما مقدار تنش افقی ناشی از وزن روباره را می توان با کمک برخی روابط تئوری برآورد کرد. برای این منظور نیاز است مقدمه‌ای از روابط الاستیسیته بیان شود.



- تنش برابر است با $\sigma = {}^{P}/_{A}$ و کرنش ها نیز در اجسام الاستیک برابراند با:

  $\varepsilon_l = {}^{\Delta L}/_{L}$ (کرنش محوری) و $\varepsilon_d = {}^{\Delta D}/_{D}$ (کرنش عرضی).

- مدول الاستیسیته یا مدول یانگ نیز با نسبت، $E =$ تنش محوری/ کرنش محوری، بیان می‌شود.

$$E = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_l}$$

- ثابت الاستیک دیگری که بایدتعریف شود ضریب پواسون نام دارد و برابر است با نسبت $\upsilon =$ کرنش عرضی/کرنش محوری.

$$\upsilon = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l}$$

تنش های برجا (*in situ stress*)

تنش افقی (σ_h):

بنابر رابطه‌ی هوک در الاستیسیته برای محاسبه‌ی کرنش‌های قائم و کرنش افقی در دستگاه سه بعدی داریم:

$$\varepsilon_v = \frac{1}{E}[\sigma_v - \nu(\sigma_{h1} + \sigma_{h2})]$$

$$\varepsilon_{h1} = \frac{1}{E}[\sigma_{h1} - \upsilon(\sigma_v + \sigma_{h2})]$$

$$\varepsilon_{h2} = \frac{1}{E}[\sigma_{h2} - \upsilon(\sigma_v + \sigma_{h1})]$$

حال برای داشتن حدس و تخمین اولیه از مقدارتنش‌های افقی، این فرض در نظر گرفته می شود که دو تنش افقی برابر هستند. بنابراین فرض، کرنش افقی‌ای وجود ندارد یعنی عبارات ε_{h1} و ε_{h2} صفر هستند. پس داریم:

$$\varepsilon_{h1} = \frac{1}{E}[\sigma_{h1} - \upsilon(\sigma_v + \sigma_{h2})]$$

$$\rightarrow \varepsilon_{h1} = 0 \rightarrow \sigma_{h1} - \upsilon(\sigma_v + \sigma_{h2}) = 0$$

$$\sigma_{h1} = \sigma_{h2} = \sigma_h \rightarrow -\upsilon\sigma_v + \sigma_h(1 - \upsilon) = 0 \rightarrow \boldsymbol{\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\nu}{(1-\nu)}}$$

بدین ترتیب مشاهده شد که تنش افقی می‌تواند با تنش قائم رابطه داشته باشد.

نسبت مقدارتنش افقی بر مقدار تنش قائم را با K نشان داده و به آن نسبت تنش می‌گویند.

$$\boldsymbol{K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}}$$

تنش های برجا (*in situ stress*)

مثال: تنش موثر افقی و قائم طبق تئوری الاستیسیته در نقطه A که طبقات فوقانی آن از لایه‌های مختلف سنگی تشکیل شده، چقدر است؟

$$\sigma_v = \gamma h \qquad \rightarrow \qquad \sigma_v = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3$$

$$\sigma_v = 0.026 \times 100 + 0.028 \times 65 + 0.03 \times 220$$

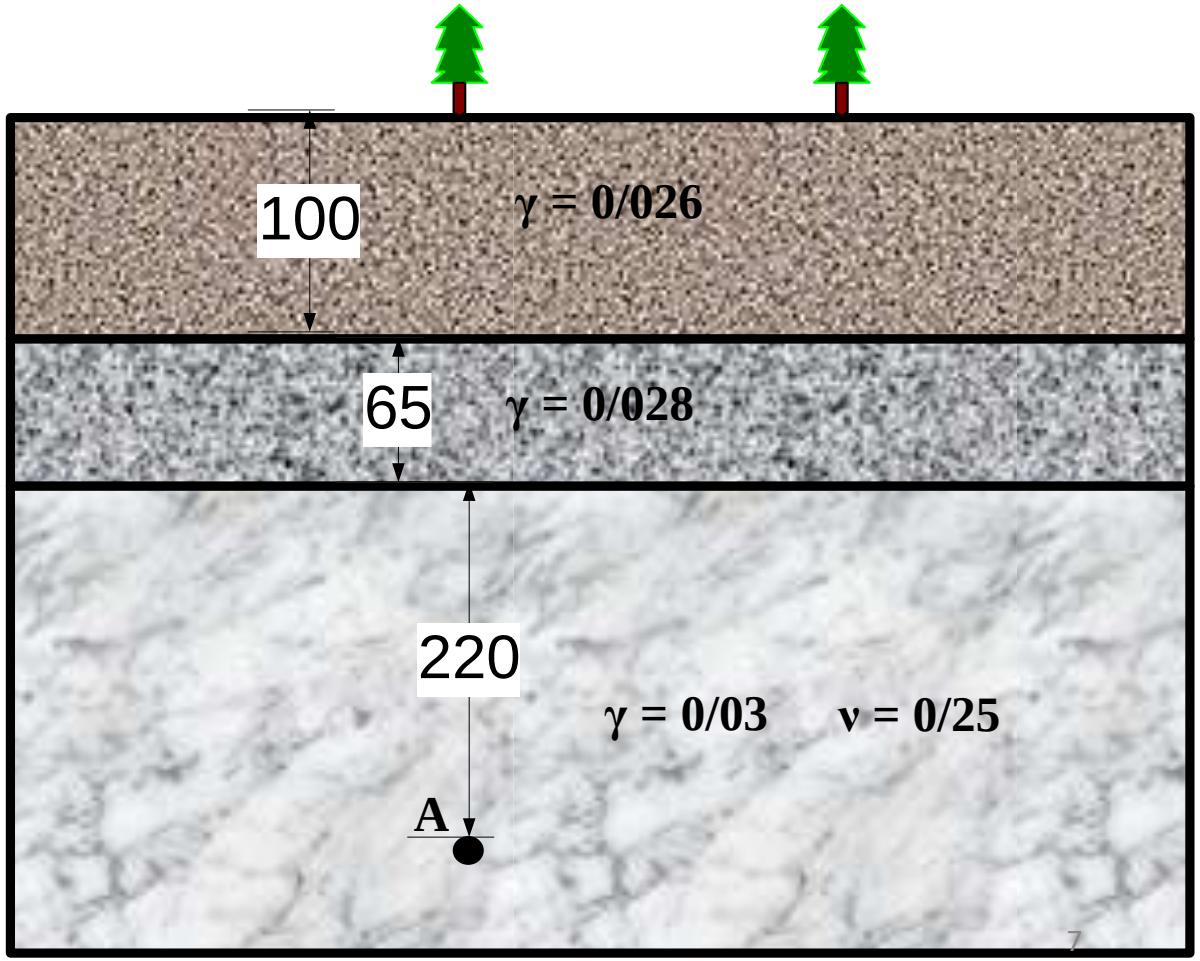
$$\sigma_v = 2.6 + 1.82 + 6.6$$

$$\sigma_v = 11.02 \left(MPa \right)$$

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \,\&\, K = \frac{\upsilon}{1-\upsilon} \quad \rightarrow \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\upsilon}{1-\upsilon} \quad \rightarrow \qquad \sigma_h = \sigma_v \left(\frac{\upsilon}{1-\upsilon} \right)$$

$$\sigma_h = 11.02 \times \left(\frac{0.25}{1-0.25} \right) = 3.67 \left(MPa \right)$$

$$\sigma_h = 3.64 \left(MPa \right)$$



تنش القایی (*induced stress*)

تعیین تنش های القایی:

تنش های القایی به تنش هایی گفته می شود که پس از حفر فضای زیر زمینی در اطراف حفریه القا می شوند.

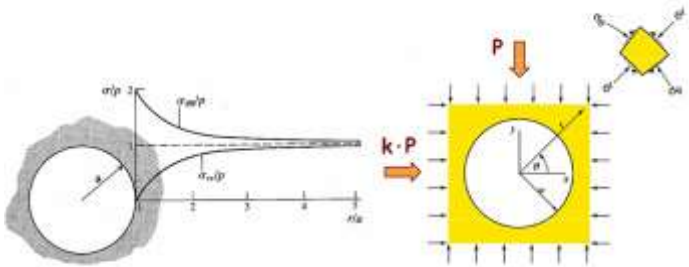
بهترین راه ارزیابی تنش های القایی، اندازه گیری مستقیم آنها توسط آزمایش های برجا است.

چنانچه از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توده سنگ در بر گیرندهٔ حفریه اطلاعات کافی در دست باشد، می توان به کمک برخی روش های تئوری، تجربی و عددی میزان تمرکز تنش های القایی را برآورد کرد.

- اولین معادله‌ی تئوری ارائه شده برای تعیین تنش‌های القاء شده در اطراف یک فضای دایره‌ای شکل با فرض الاستیک و همسانگرد بودن محیط توسط آقای کرش (*Kirsch* 1898) ارائه شده است.

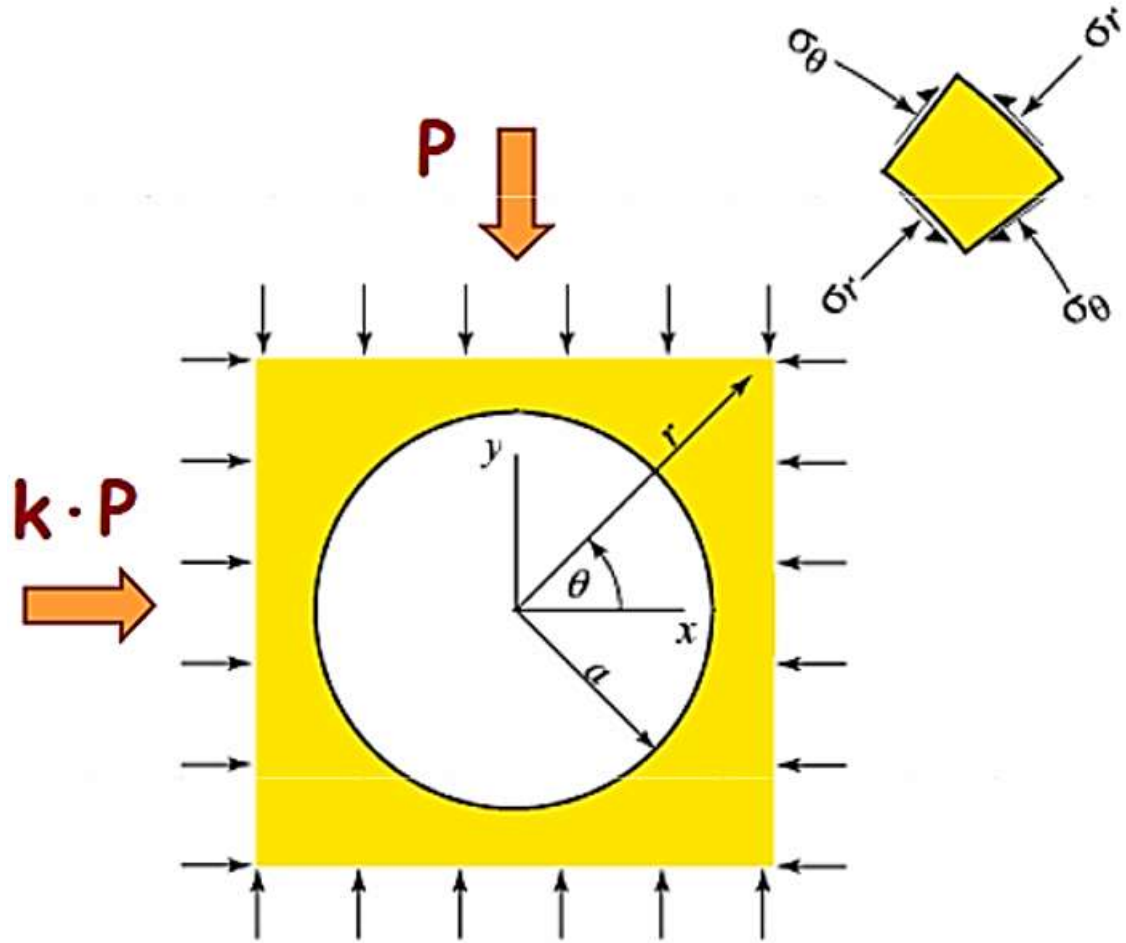
تنش القایی (*induced stress*)

معادلات کرش: در این معادله‌ها این‌گونه فرض شده که محور تونل، موازی یکی از تنش‌های اصلی است. به طور کلی معادلات کرش برای به دست آوردن تنش‌های اصلی در مختصات (r, θ)، با توجه به شکل ۱ صفحه بعد، در اطراف دیواره تونل به صورت زیر است که در آن σ_r، σ_θ و $\tau_{r\theta}$ به ترتیب تنش‌های شعاعی، مماسی و برشی می‌باشند. a شعاع تونل، r فاصله نقطه از مرکز تونل، K نسبت تنش قائم به تنش افقی و θ زاویه‌ی بین تنش افقی و راستای خط r است. تغییرات تنش‌های القائی نسبت به فاصله از دیواره تونل در شکل ۲ صفحه بعد نشان داده شده است.

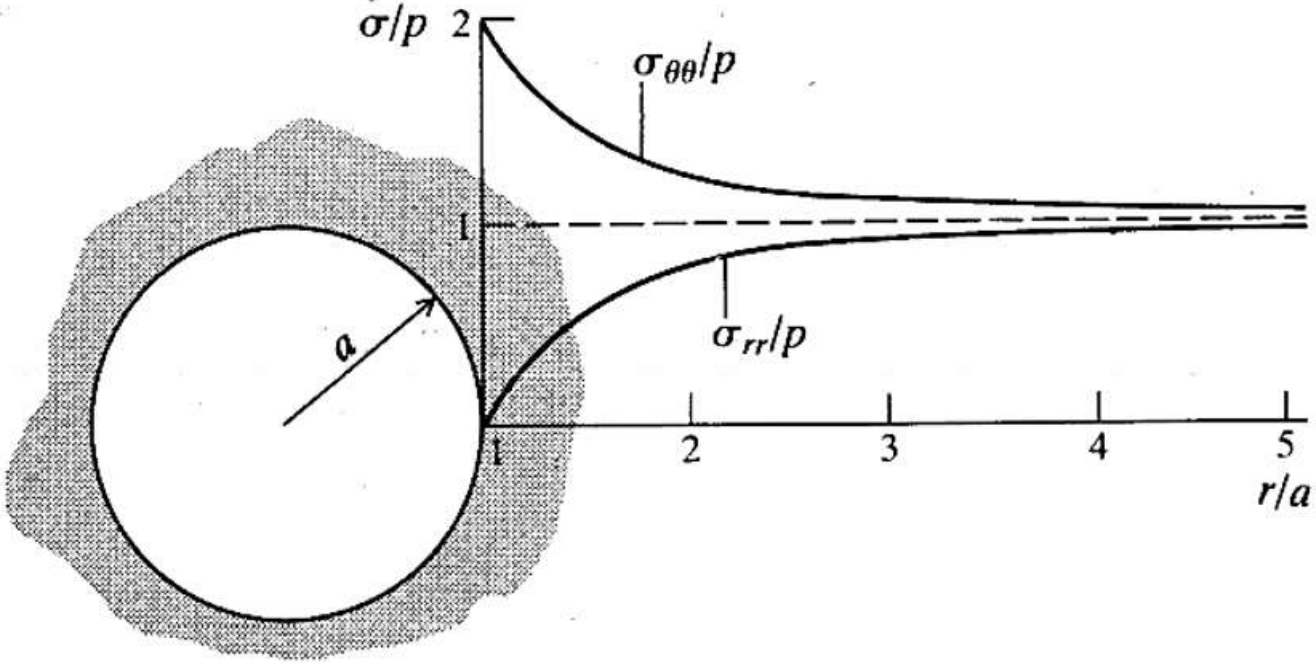


شکل ۲- روند تغییرات تنش‌های القائی در اطراف تونل دایره‌ای شکل

شکل ۱- تنش‌های شعاعی، برشی و مماسی در اطراف یک تونل

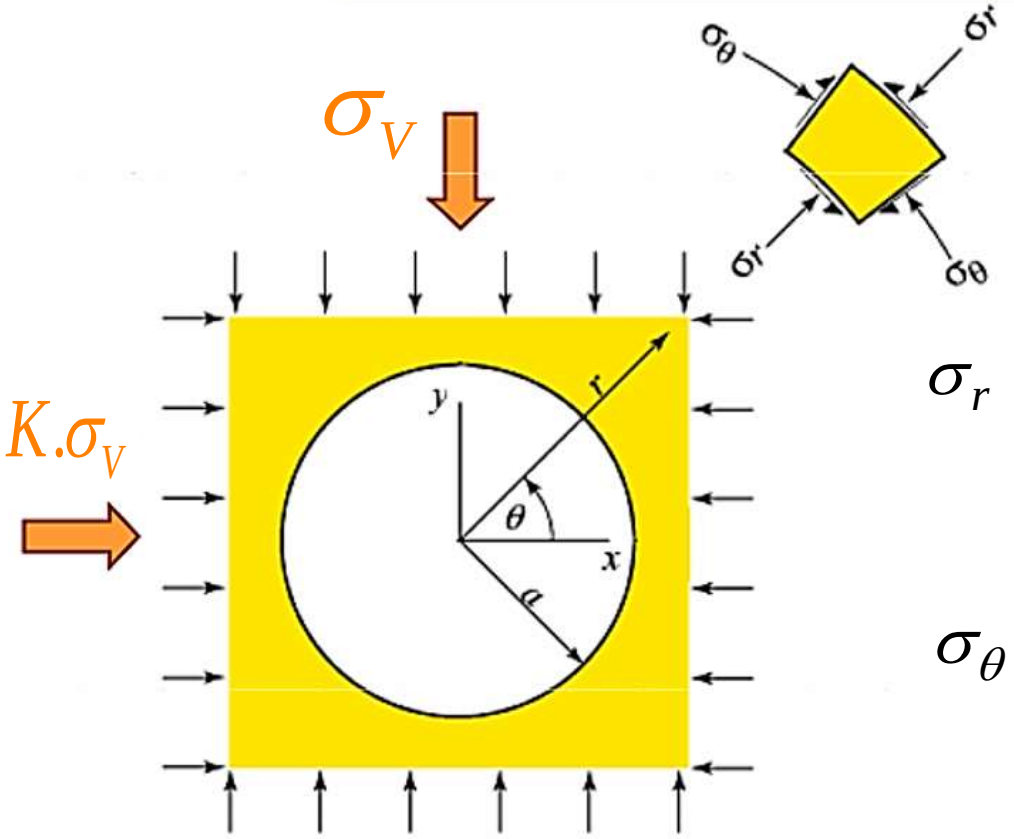


شکل ۱- تنش‌های شعاعی، برشی و مماسی در اطراف یک تونل.



شکل ۲- روند تغییرات تنش‌های القائی در اطراف تونل دایره‌ای شکل.

تنش القایی (*induced stress*)



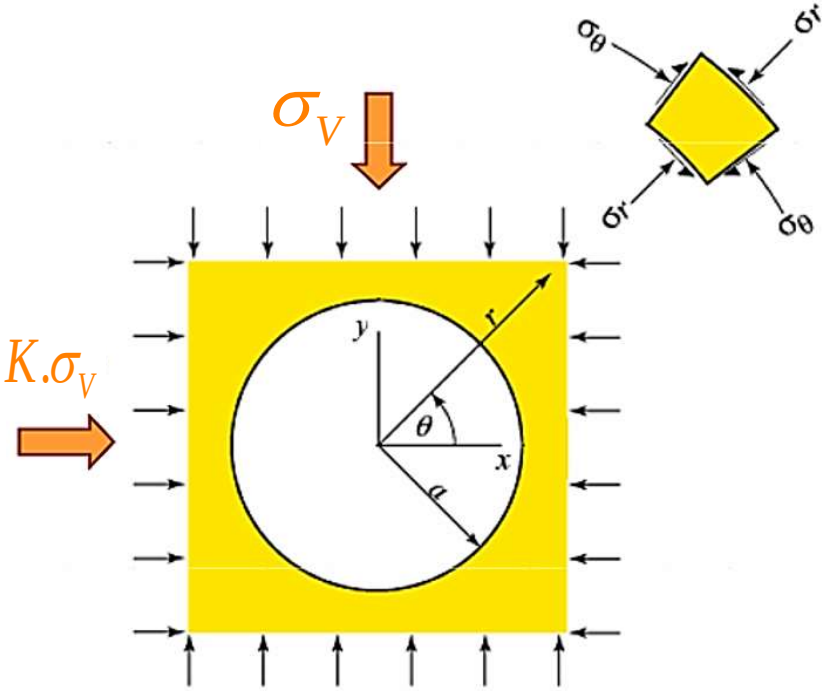
معادلات کرش:

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

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

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}\sigma_V\left[(1-K)\left(1+\frac{2a^2}{r^2}-\frac{3a^4}{r^4}\right)\sin 2\theta\right]$$

تنش القایی (*induced stress*)



معادلات کرش:

لازم به توضیح است که توزیع تنش‌ها مستقل از مدول کشسانی (E) و ضریب پواسون (ν) است. با قرار دادن $r=a$ در روابط صفحه قبل، تنش‌های موجود در مرزهای حفاری به دست می‌آید که به صورت زیر هستند.

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_\theta = \sigma_V\left[(1+K)+2(1-k)\cos 2\theta\right]$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

در شرایط وجود میدان هیدرواستاتیک ($k=1$) روابط به این صورت در خواهند آمد:

$$\sigma_\theta = 2\sigma_v$$

این حالت معرف توزیع بهینه‌ی تنش القائی است زیرا نواحی مرزی در تمام جوانب حفاری به صورت یکنواخت تحت فشار هستند.

معیار شکست (*failure criteria*)

معیار شکست یعنی بیان جبری شرایطی که در آن شکست رخ می‌دهد. مثلاً می‌گوییم اگر جسمی تحت تنش بیشتر از مقاومت فشاری یک محوره خود قرار گیرد می‌شکند (**رانکین**) یا مثلاً می‌گوییم اگر در داخل جسمی، تنش برشی، بیشتر از مقاومت برشی آن ایجاد شود، جسم گسسته می‌شود (**ترسکا**). بیان دیگر این است که مثلاً می‌گوییم اگر در جسمی در اثر تنش‌های انحرافی فلان مقدار انرژی اعوجاجی ذخیره شود، می‌شکند (**فون میسز**) یا مثلاً می‌شود گفت که اگر جسمی فلان مقدار کرنش پیدا کند، شکسته می‌شود (**سینت ونانت**).

انواع معیارهای شکست :

- معیارهای تئوری (یا نظری)
- معیارهای تجربی

معیار شکست (*failure criteria*)

معیارهای پرکاربرد تئوری:

۱- معیار رانکاین (Rankine): این معیار بیان می‌کند که شکست زمانی رخ می‌دهد که تنش فشاری وارده بر نمونه از مقاومت فشاری تک محوره‌ی آن تجاوز کند. $\sigma_1 > \sigma_c$

۲- معیار ترسکا (Tresca): این معیار می‌گوید شکست زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی حداکثر ایجاد شده در جسم به تنش برشی حداکثر ایجاد شده در جسم در موقع شکست در بارگذاری تک محوره برسد. تنش برشی حداکثر در کل از این رابطه بدست می‌آید: $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$

در آزمایش تک محوره تنش برشی حداکثر بوجود آمده در جسم برابر است با: $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - 0}{2} = \frac{\sigma_c - 0}{2}$

بنابراین اگر در هرحالت تنشی از σ_1 و σ_3، رابطه‌ی زیر برقرار باشد، جسم شکسته می‌شود:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{\sigma_c}{2} \quad \rightarrow \quad \sigma_1 - \sigma_3 \geq \sigma_c$$

۳- معیار خطی کولومب .....

معیار شکست (*failure criteria*)

معیارهای پرکاربرد تئوری:

۳- معیار خطی کولومب (Coulomb): این معیار پیشتر برای محاسبه‌ی مقاومت برشی معرفی شده است. رابطه‌ی شکست به صورت زیر است:

$$\tau = C + \sigma_n . tan(\phi)$$

صورت دیگری از رابطه‌ی کولمب:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 . tan(\psi)$$

همچنین معادله‌ی معیار شکست کولمب براساس τ_m (تنش برشی ماکزیمم) و σ_m (تنش عمودی متوسط)، بدین صورت نیز می‌باشد:

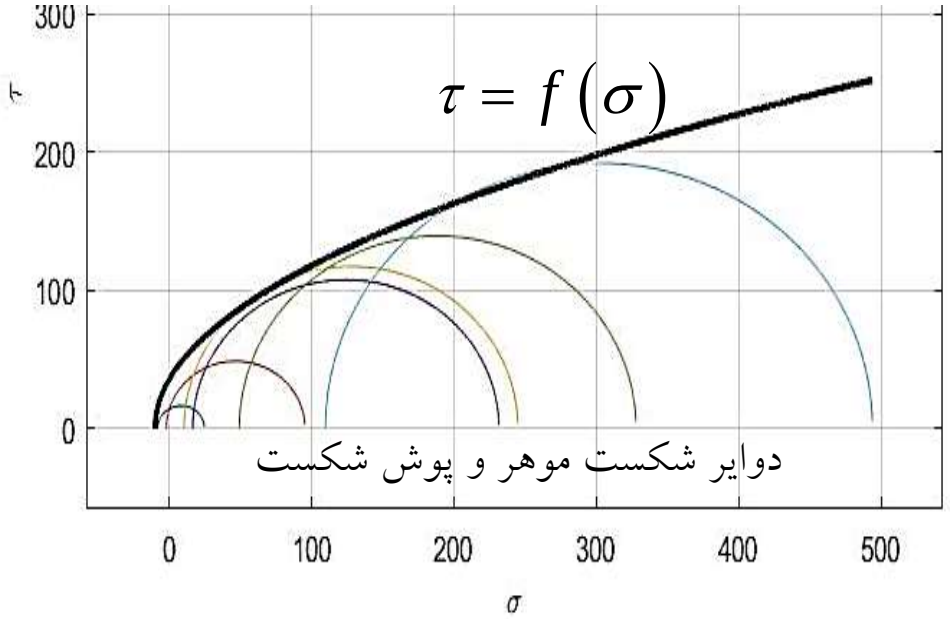
$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad , \quad \tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad , \quad \sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 . tan(\psi)$$

$$\rightarrow \quad \sigma_1 = \frac{2C\, cos\, \phi}{1 - sin\, \phi} + \sigma_3 . \frac{1 + sin\phi}{1 - sin\phi} \quad \rightarrow \quad \tau_m = c\, cos\, \phi + \sigma_m\, sin\, \phi$$

معیار شکست (*failure criteria*)

معیارهای پرکاربرد تجربی:

۱- معیار موهر-کولومب (Mohr-Coulomb): این معیار تابعی غیرخطی از تنش اصلی حداکثر σ_1 و تنش اصلی حداقل σ_3 و یا تابعی غیر خطی از تنش عمودی σ_n و تنش برشی τ_n وارده بر صفحه‌ی شکست است.



دوایر شکست موهر و پوش شکست

۲- معیار هوک-براون (Hoek-Brown): این معیار شکست پرکاربردترین رابطه‌ی تجربی در برآورد شرایط شکست سنگ است که ایدهٔ اصلی آن از تغییر معیار شکست تئوری گریفیث به منظور کاربرد در ارزیابی شکست سنگ ها برگرفته شده است.

معیار شکست (*failure criteria*)

معیارهای پرکاربرد تجربی:

... معیار هوک-براون (Hoek-Brown)... رابطهٔ این ضابطه به صورت زیر است که در آن ارتباط بین تنش-های اصلی در لحظه‌ی شکست در سنگ بکر با استفاده از عوامل مقاومت فشاری تک محوره‌ی σ_c و ثابت های a، S و m تعیین می‌شود.

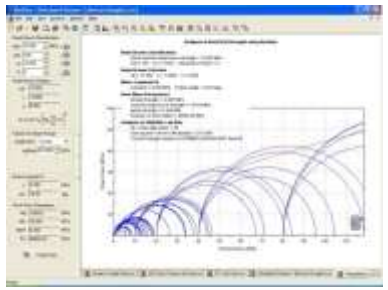
سنگ بکر

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5}$$

توده سنگ

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \mathrm{S} \right)^{\mathrm{a}}$$

برای تعیین مقادیر ثابت های مورد نیاز در این معیار از نتایج آزمایش های برجا و آزمایشگاهی و همچنین از روش های رده بندی توده سنگ استفاده می شود.



معرفی نرمافزار RockData

معیار شکست (*failure criteria*)

مثال: با استفاده از ملاک شکست هوک براون تعیین کنید که آیا توده سنگی همگن ایزوتروپ و بدون درزه و شکاف، تحت شرایط تنش‌های اصلی $\sigma_1 = 60MPa$ ، $\sigma_3 = 35MPa$ خواهد شکست یا نه؟ مقاومت فشاری تک محوری سنگ $\sigma_c = 30MPA$ و $S=1$ ، $m=0.8$ مقاومت کششی این سنگ با استفاده از معیار هوک براون چقدر برآورد می‌شود؟

جواب:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(0.8 * \ 30 * \sigma_3 + 1 * 30^2)} = \sigma_3 + \sqrt{(24\sigma_3 + 900)}$$

$$\sigma_1 = 35 + \sqrt{(24 * 35 + 900)} = 76.71\ MPa \ \rightarrow \ \ 76.71 > 60$$

با توجه به معیار شکست هوک براون مشاهده می‌شود نمونه تحت این بارگذاری نمی‌شکند.

اگر داشته باشیم $\sigma_1=0$ معیار هوک به صورت زیر در می‌آید که از این رابطه می‌توان مقاومت کششی سنگ را بدست آورد:

$$\sigma_t = \frac{1}{2}\sigma_c \left[m - \sqrt{m^2 + 4S}\right] = \sigma_t = 0.5 * 30 \left[0.8 - \sqrt{0.8^2 + 4}\right] = -20.31\ MPa$$

تونل معدن مس مزرعه، اهر
پاییز ۱۳۸۴