

3. Fizikalno mehanička svojstva stijena i metode njihova određivanja

- Gustoća, poroznost i vlažnost
- Tvrdća i abrazivnost
- Jednoosna tlačna i vlačna čvrstoća
- Deformabilnost materijala
- Čvrstoća u troosnom stanju naprezanja
- Posmična čvrstoća
- Dinamička svojstva
- Indeksne značajke
- Kriteriji čvrstoće
- Reološka svojstva
- Homogenost i izotropija



Gustoća, poroznost i vlažnost (ISRM, 1977)

- Osnovna fizikalna svojstva koja se određuju na pravilnim i nepravilnim uzorcima mase veće od 50 g
- Postupak se sastoji od određivanja ukupnog volumena i mase uzorka, volumena i mase čvrstih čestica, mase vode te volumena pora
- Mase se određuju vaganjem s minimalnom točnošću od 0,1 g
- Volumen uzorka se može određivati na više načina: mjerenjem dimenzija s točnošću 0,1 mm kod pravilnih uzoraka, a kod nepravilnih mjerenjem volumena istisnute tekućine ili određivanjem mase uronjenog uzorka u tekućini

Gustoća, poroznost i vlažnost (ISRM, 1977)

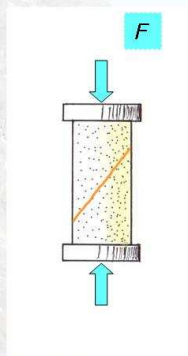
- Volumna gustoća $\rho = M/V$ (kg/m^3)
($M = M_s + M_w$, $V = V_s + V_v$, $V_v = V_a + V_w$)
- Gustoća u suhom stanju $\rho_d = M_s/V$
- Sadržaj vode $w = M_w/M_s \times 100 \%$
($M_w = M - M_s$)
- Volumen pora $V_v = (M_{\text{sat}} - M_s) / \rho_w$
- Poroznost $n = V_v/V \times 100 \%$
- Stupanj saturiranosti pora $S_r = V_w/V_v \times 100 \%$
- Specifična gustoća ili gustoća čvrstih čestica
 $\rho_s = M_s/V_s$ (kg/m^3)

Tvrdoća i abrazivnost

- Tvrdoća – otpor koji tijelo pruža pri prodiranju drugog tijela u njegovu površinu
 - Standardni postupak (Knoop, Vickers; utiskivanjem dijamantnog šiljka)
 - Dinamički način (Schmidtov čekić, skleroskop)
 - Mohsova ljestvica
- Abrazivnost – otpornost kamena na habanje
 - Los Angeles postupak

Jednoosna tlačna čvrstoća (ISRM, 1979)

- Provodi se na valjkastim ili prizmatičnim uzorcima pravilnih dimenzija
- Uzorci moraju biti najmanjeg promjera od 54 (50) mm s odnosom visine i promjera 2,5-3 : 1
- Površine uzorka moraju biti bez neravnina većih od 0,02 mm na bazama i 0,3 mm na plaštu, a odstupanje od okomitosti do 0,001 rad
- Kontinuirani prirast opterećenja od 0,5 do 1 MPa do sloma

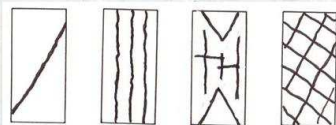


Jednoosna tlačna čvrstoća (ISRM, 1979)

- Najveće ostvareno tlačno naprezanje pri ispitivanju neposredno prije sloma uz dozvoljeno bočno širenje

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (\text{N/m}^2, \text{Pa}, \text{MPa})$$

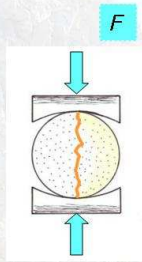
- Karakteristični modeli sloma: smični, vlačni, smično vlačni i plastični slom



Vlačna čvrstoća (ISRM, 1979)

- Direktni postupak
- Indirektni postupak (Brazilski test)

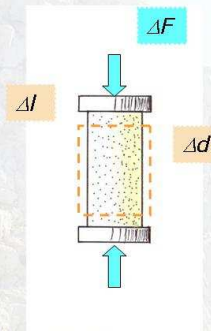
- Provodi se primjenom tlačnog opterećenja na uzorak u obliku diska
- Uzorci moraju biti najmanjeg promjera od 54 (50) mm s debljinom od $D/2$
- Površine uzorka moraju biti bez neravnina većih od 0,025 mm po plaštu i 0,25 mm na bazama
- Kontinuirani prirast opterećenja od 200 N/s



$$\sigma_t = \frac{0,636 \cdot F}{D \cdot t} \quad (\text{Pa, MPa})$$

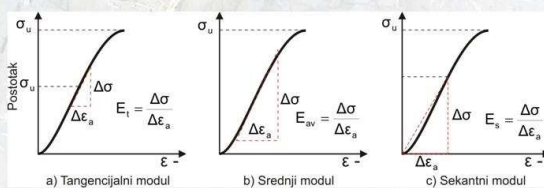
Deformabilnost materijala (ISRM, 1979)

- Provodi se u postupku jednoosnog ispitivanja uz mjerenja osnih i poprečnih deformacija
- Konstante elastičnosti
 - Youngov modul elastičnosti E
 - Poissonov koeficijent (omjer) ν
- Principi mjerenja deformacija (mikroure, Strain gauge, LVDT, optički,...)



Deformabilnost materijala (ISRM, 1979)

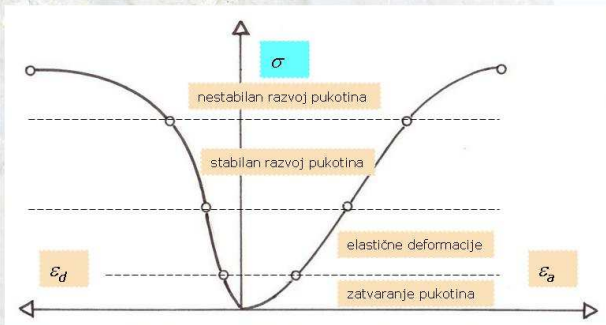
- Određivanje relativne osne ε_a i relativne poprečne deformacije ε_d
- Način određivanja modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta



$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0} \quad \nu = -\frac{\frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_d}}{\frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_a}} = -\frac{E}{\frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_a}} = -\frac{\Delta \varepsilon_d}{\Delta \varepsilon_a}$$

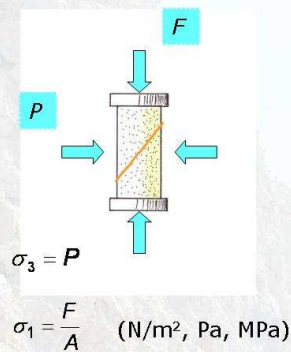
Deformabilnost materijala

- Razvoj deformacija materijala pri ispitivanju



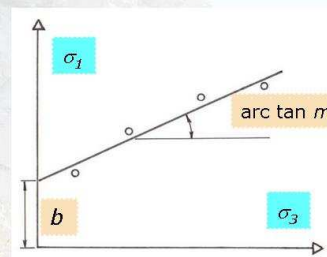
Čvrstoća u troosnom stanju naprezanja (ISRM, 1978)

- Provodi se na valjkastim ili prizmatičnim uzorcima pravilnih dimenzija, najmanjeg promjera od 54 (50) mm s odnosom visine i promjera 2-3 : 1
- Zahtjevi obrade površina i uvjeta okomitosti isti kao kod jednoosnog ispitivanja
- Ispitivanje se provodi uz prirast opterećenja od 0,5 do 1 MPa/s pri čemu se u prvom dijelu uzorak vodi hidrostatski do zadanog bočnog naprezanja



Čvrstoća u troosnom stanju naprezanja (ISRM, 1978)

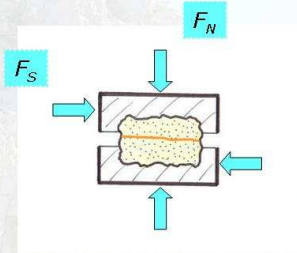
- Za isti materijal ispitivanja se ponavljaju uz različite vrijednosti bočnog naprezanja na temelju kojih se konstruira zakon čvrstoće
- Linearni zakon čvrstoće izražen u $\sigma_3 - \sigma_1$ dijagramu s veličinama b i m
- Izračun veličina kohezije i kuta unutarnjeg trenja



$$\phi = \arcsin \frac{m-1}{m+1} \quad c = b \frac{1-\sin \phi}{2 \cos \phi}$$

Posmična čvrstoća (ISRM, 1974)

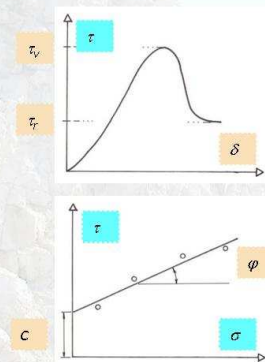
- ❑ Ispitivanje se provodi direktnom primjenom posmičnog naprezanja na uzorak u smjeru ravnine sloma na koju djeluje konstantno normalno naprezanje
- ❑ Uzorci nepravilnih oblika se cementiraju u kalupe za ispitivanje
- ❑ Mogućnost odabira plohe sloma što predstavlja osnovnu prednost kod ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta



$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad \tau = \frac{F_S}{A} \quad (\text{MPa})$$

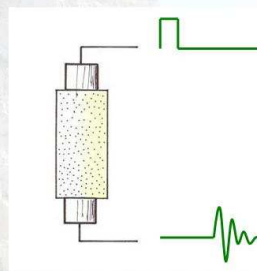
Posmična čvrstoća (ISRM, 1974)

- ❑ Mogućnost određivanja vršnih i rezidualnih (postlomnih) vrijednosti veličina posmične čvrstoće; kohezije i kuta unutarnjeg trenja
- ❑ Za isti materijal ispitivanja se ponavljaju uz različite vrijednosti normalnog naprezanja na temelju kojih se konstruira zakon čvrstoće



Dinamička svojstva (Brzina prolaza ultrazvučnih elastičnih valova)

- ❑ Određivanje brzine prolaza primarnih (longitudinalnih) i sekundarnih (transverzalnih) valova
- ❑ Ultrazvučna metoda (primarna metoda 100 kHz – 2 MHz)
- ❑ Dinamički modul elastičnosti
- ❑ Dinamički Poissonov koeficijent



$$E_{\text{din}} = \frac{\rho \cdot V_s^2 \cdot (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad \nu_{\text{din}} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

Indeksne značajke

- ❑ Tlačna čvrstoća (tvrdoća) određivana Schmidtovim čekićem na temelju odskoka udarajućeg čeličnog predmeta (Rebounda)
- ❑ Indeks čvrstoće određivan postupkom opterećenja u točki (PLT – Point Load Test)

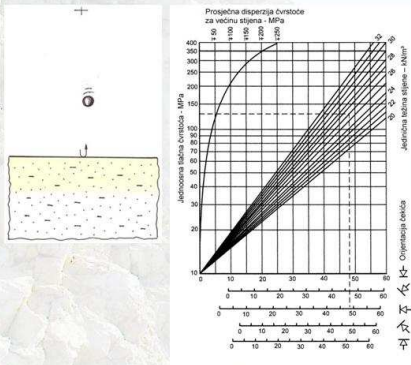
Tlačna čvrstoća određivana Schmidtovim čekićem

- ❑ Za područje $R < 50$

$$\sigma_c = 4(R - 25)$$

- ❑ Za područje $R > 50$

$$\sigma_c = 20(R - 45)$$



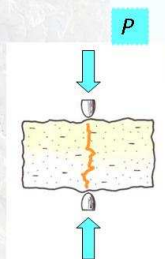
Indeks čvrstoće određivan postupkom opterećenja u točki - PLT test (ISRM, 1985)

- ❑ Provodi se na pravilnim i nepravilnim uzorcima primjenom koncentriranog opterećenja
- ❑ Određivanje indeksa čvrstoće $I_{S(50)}$

$$I_{S(50)} = F \frac{P}{D_e^2}$$

- ❑ Određivanje indeksa anizotropije I_a

- ❑ Procjena jednoosne tlačne čvrstoće materijala



$$\sigma_c = 22 \cdot I_{S(50)} \quad (\text{MPa})$$

Indeks čvrstoće određivan postupkom opterećenja u točki - PLT test (ISRM, 1985)

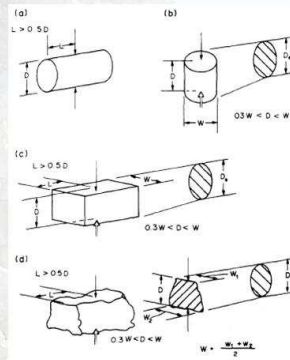
- Tipovi ispitivanja: poprečno, osno te ispitivanje na blokovima pravilnih i nepravilnih oblika

- Korekcijski faktor

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45}$$

- Efektivni promjer

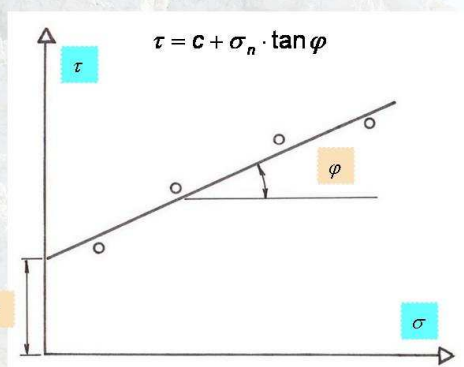
$$D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}}$$



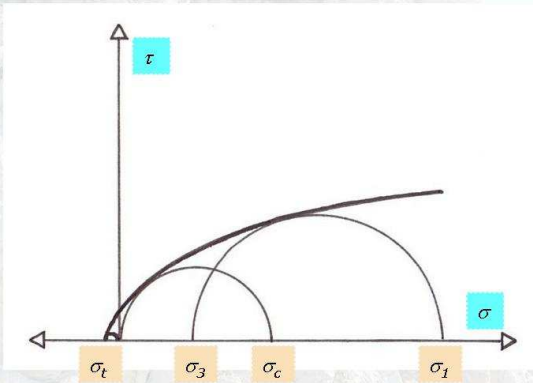
Kriteriji čvrstoće

- Coulombov kriterij čvrstoće
- Mohrov kriterij čvrstoće
- Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće
- Hoek-Brownov kriterij čvrstoće

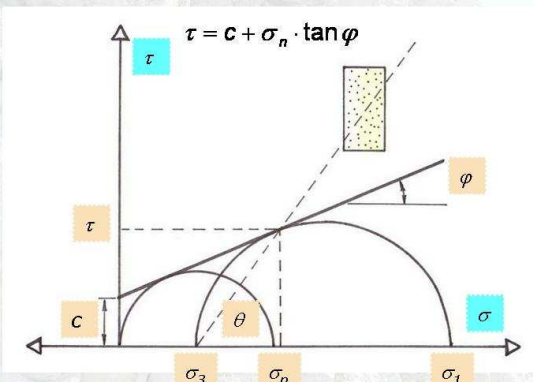
Coulombov kriterij čvrstoće



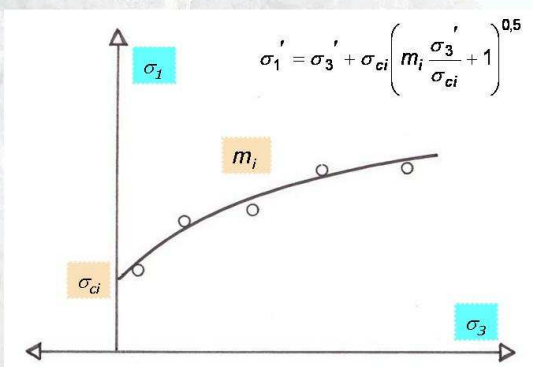
Mohrov kriterij čvrstoće



Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće



Hoek-Brownov kriterij čvrstoće

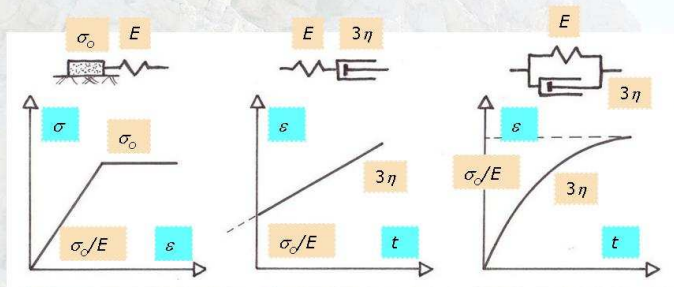


Reološka svojstva

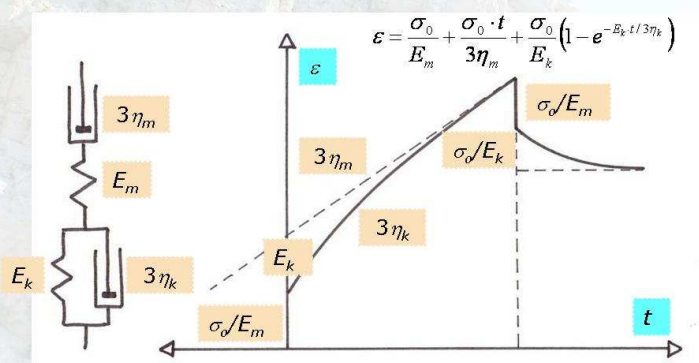
- ❑ Svojstva koja se odnose na deformacije materijala koje nisu uzrokovane trenutnom promjenom napreznja
- ❑ Osnovni modeli materijala (idealno elastičan, viskozni, idealno plastičan)
- ❑ Jednostavni modeli materijala (elasto-plastičan, visko-elastičan, kelvinov)
- ❑ Složeni modeli materijala (Burgerov materijal, ...)

Jednostavni modeli materijala

- ❑ Elasto plastičan
- ❑ Viskozno elastičan
- ❑ Kelvinov Maxwelov



Burgerov materijal



Homogenost i izotropija

- ❑ Homogenost – slučaj kad su fizička svojstva i sastav materijala u svim točkama jednaka
- ❑ Izotropija – slučaj kad su mehanička svojstva u svim smjerovima jednaka
- ❑ Stijene su u većini slučajeva heterogene i anizotropne