

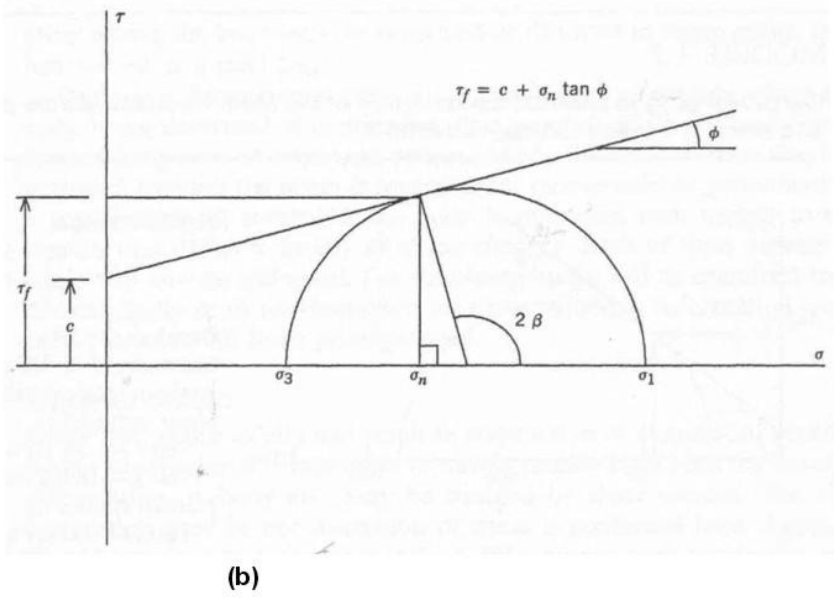
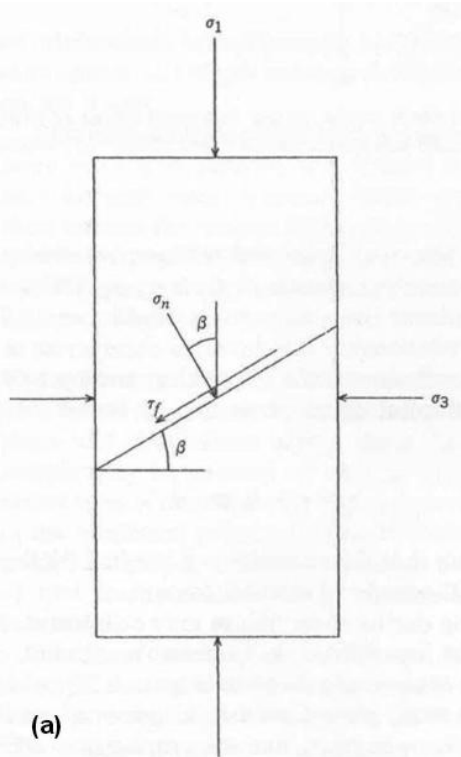
3 DEFORMACIJA

MOHR-COULOMBOVA ANVELOPA SLOMA

U tlu ili stijeni dolazi do **planarnog posmičnog sloma** zbog interakcije normalnog naprezanja komitog na plohu sloma i posmičnog naprezanja po plohi sloma. Stanje naprezanja na uzorku može biti jednoosno ili troosno. Na

slici 8 dan je dvodimenzionalni prikaz troosnog naprezanja, u kojemu je σ_1 maksimalno glavno naprezanje, a σ_3 minimalno glavno naprezanje (ovdje je zanemareno σ_2 – srednje glavno naprezanje). U praksi je najčešće kod troosnog ispitivanja tla/stijena $\sigma_2 = \sigma_3$.

Slika 5 (a) Posmična ploha sloma na uzorku, nastala uslijed normalnih naprezanja; (b) Komponente Mohr-Coulombove plohe sloma.



Ploha posmičnog sloma na slici 8a zatvara s ravninom glavnih naprezanja kut β . Isti kut zatvaraju i os najvećeg glavnog naprezanja σ_1 i naprezanje okomito na plohu sloma σ_n . Ovdje se kut β koristi za označavanje kuta između najvećeg glavnog naprezanja i normalnog naprezanja.

Kriterij planarnog sloma uveo je Coulomb. Ovaj kriterij predstavlja linearni odnos u kojemu su sadržani posmično naprezanje koje je za vrijeme sloma djelovalo po plohi sloma, τ_f , kohezija materijala, c , i konstanta $\tan\phi$, pomnožena normalnim naprezanjem, σ_n , prema sljedećoj jednadžbi:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan\phi$$

Izraz $\sigma_n \tan\phi$ je **koeficijent unutarnjeg trenja materijala**; kut ϕ je **kut unutarnjeg trenja**.

Naprezanja koja djeluju za vrijeme posmičnog sloma mogu se prikazati Mohrovom kružnicom. Linija na Mohrovom kružnom dijagramu definirana Coulombovim kriterijem (jednadžba 15) naziva se **Mohr-Coulombova anvelopa sloma**. Budući da su i Mohrova kružnica i linija sloma simetrične u odnosu na os normalnih naprezanja, uobičajeno se prikazuje samo gornja polovica kružnice i gornji dio linije. Suprotno očekivanjima, slom materijala se ne događa kod maksimalnih posmičnog (τ_f) ili normalnih naprezanja (σ_n). Kut 2β jednak je $90^\circ + \theta$ ili $\beta = 45^\circ + \theta/2$, što povezuje Mohrov dijagram s idealnom orijentacijom posmične plohe sloma dobivene na uzorku. Posmični slom uzoraka iste kohezije i kuta unutarnjeg trenja dogodit će se pri različitim kombinacijama σ_1 , σ_3 i σ_n , što odgovara različitim kružnicama, koje tangira jedinstvena linija sloma. Vrijednosti kohezije (c), normalnog naprezanja (σ_n) i kuta unutarnjeg trenja (ϕ), neophodne u Coulombovoj jednadžbi

dobivaju se iz sljedećih pokusa: jednoosna i/ili troosna testiranja uzoraka. U primjeru 2 (slika 9) konstruirana je Mohrova kružnica na osnovi tipičnih podataka koji se dobivaju jednoosnim i troosnim pokusima na granitu: vrijednosti σ_1 i σ_3 izmjerene u trenutku sloma (2 pokusa). Linija koja tangira dvije Mohrove kružnice je Mohrova anvelopa sloma ispitivanog uzorka granita. Treba obratiti pažnju na to da se, iako je kohezija materijala konstanta, vrijednosti tlačnih normalnih i posmičnih naprezanja povećavaju s povećanjem σ_3 . Kut ϕ definira odnos između tlačne čvrstoće σ_1 i posmične čvrstoće τ_f za različite vrijednosti σ_3 .

DEFORMACIJA (15)

Kada se analizira naprezanje u točki, deformacija se definira kao promjena relativnog položaja čestica tijela. Stoga se prilikom definiranja deformacije koristi pomak. Deformacija tijela određuje se s obzirom na vrstu deformacije. Radi pojednostavljenja ovdje se obrađuje dvodimenzionalna deformacija, iako je ona trodimenzionalna.

VRSTE DEFORMACIJE

Deformacija se može dogoditi duž jedne osi (aksijalno) pri čemu će rezultirati kontrakcijom ili produljenjem, ovisno o tome nastaje li zbog tlačnih ili vlačnih naprezanja. Tijelo se također može deformirati zbog posmičnih naprezanja.

Na slici 10a dolazi do kontrakcije ili skraćivanja duljine kao rezultat primjene naprezanja okomitog na donju i gornju ravnu plohu tijela. Uobičajen naziv za ovu vrstu deformacije je **normalna deformacija**, jer nastaje kao posljedica normalnog naprezanja; a koriste se i nazivi 'prirodna deformacija' (eng. natural deformation) ili 'produljenje' (eng.

elongation). Prema konvenciji koja se ovdje koristi, prikazana deformacija je pozitivna i nastala je kao rezultat primjene tlačnog napreznja. Deformacija prikazana na slici 10a je bezdimenzionalna vrijednost definirana izrazom:

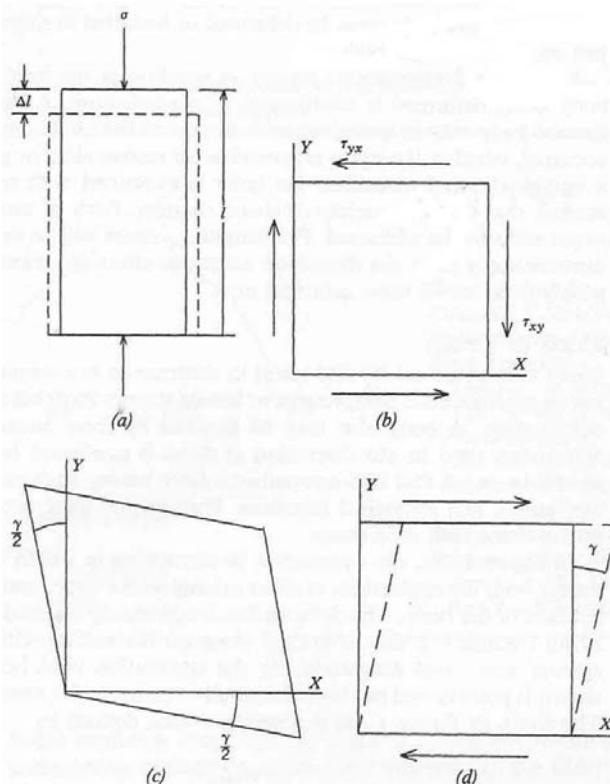
$$\varepsilon = \Delta l / l \quad (16)$$

gdje je l =duljina

Bočna deformacija ne ulazi u kalkulaciju normalne deformacije, ali se može numerički izraziti kao Poissonov odnos, koji je elastična konstanta (vidi poglavlje 'Elastične konstante').

Posmično naprezanje prikazano na slici 10c je produkt posmičnog napreznja prikazanog na slici 10b. Posmično naprezanje je rezultiralo povećanjem kuta između osi X i Y, koji je tada $>90^\circ$ (pozitivna posmična deformacija, prema ovdje prihvaćenoj konvenciji). Suprotan smjer posmičnog napreznja rezultirao bi negativnom posmičnom deformacijom i kutom $<90^\circ$. Kut između osi X i Y deformirane stranice tijela je $1/2\gamma$, a kut između osi X i Y posmično deformiranog tijela je $90^\circ + \gamma$. Posmična deformacija prikazana na slici 10c često se naziva čistim smicanjem (eng. pure shear), a nastala je kao rezultat čistog posmičnog napreznja (prikazanog na slici 7c) – kada su normalna napreznja na plohi sloma jednaka nuli, a posmična napreznja po plohi su maksimalna. Na slici 10d prikazano je jednostavno smicanje.

Slika 6 Tipovi deformacije: (a) aksijalna; (b) posmično naprezanje koje djeluje na način da uzrokuje čisto smicanje (eng. pure shear); (c) čisto smicanje; (d) jednostavno smicanje (eng. simple shear) s prikazanim posmičnim napreznjima



POSTOJANOST DEFORMACIJE

Deformacija čestica tijela može ovisiti o trajanju nanijetog napreznja. Ukoliko se s uklanjanjem deformacijskih napreznja tijelo vrati na originalne dimenzije, deformacija se smatra elastičnom. U tom se slučaju deformacija ponaša prema Hookeovom zakonu, prema kojemu je normalno naprezanje proporcionalno ekstenzijskoj ili aksijalnoj deformaciji. Tijelo se smatra čisto elastičnim tijelom ukoliko se deformacija potpuno poništi s prestankom nanošenja opterećenja (slika 12a).

Permanentna (nepovratna) deformacija nastaje kada nanijeto normalno naprezanje premaši točku popuštanja materijala. Točka popuštanja je razina napreznja koja je veća od onoga koje se može podnijeti elastično. Ako se materijal deformira na ovoj točki bez sloma, deformacija je plastična ili duktilna. Savršeno plastičan materijal je prikazan na slici 12b. Većina prirodnih materijala tla i stijena iskazuje elastično i plastično ponašanje.

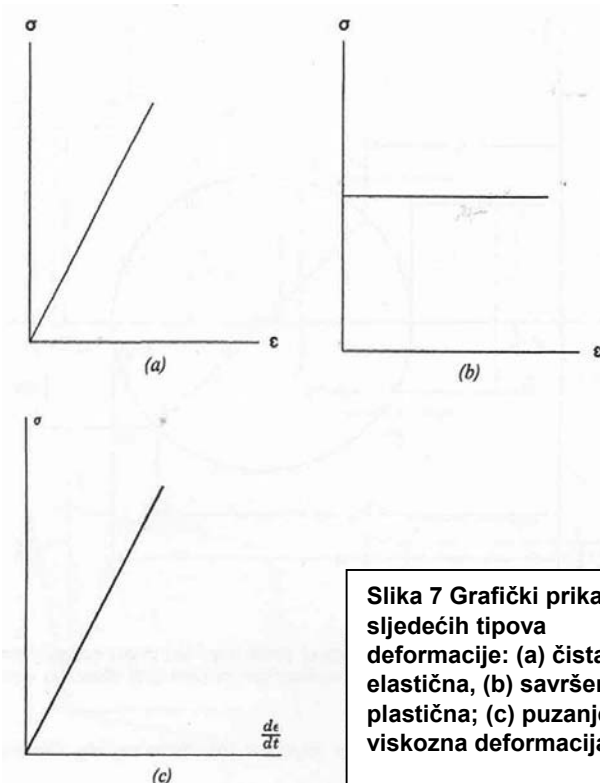
Puzanje ili viskozna deformacija se događa onda kada deformacija ovisi o vremenu: razvoj plastične deformacije tijekom vremenskog perioda na napreznjima koja bi uzrokovala elastičnu deformaciju u kraćem periodu. U tom slučaju deformacija se ilustrira krivuljom omjera napreznja i deformacije kao na slici 12c.

ELASTIČNE KONSTANTE

Različite kombinacije deformacija i napreznja, koja su ih prouzročila, čine konstante ili module kojima se karakteriziraju elastično-deformacijski odgovori materijala na primijenjena napreznja. Budući da one nisu konstante za različita stanja napreznja, bolje ih je nazivati modulima. **Youngov modul elastičnosti ili modul elastičnosti** definira elastičnu normalnu deformaciju tijela sljedećim odnosom: $E = \sigma_n / \varepsilon$. Bočna deformacija koja se događa prilikom aksijalne kontrakcije ili produljenja iskazuje se bezdimenzionalnim **Poissonovim koeficijentom**, prema izrazu: $\nu = \Delta l / \Delta d$.

Modul smicanja ili krutosti (G) je mjera posmične deformacije nastale kao posljedica posmičnog napreznja (mjerna jedinica psi ili Pa). Izraz za modul smicanja G (ili μ) je sljedeći: G (ili μ) = τ / γ .

Volumetrijska deformacija ili dilatacija, do koje dolazi kada je tijelo podvrgnuto hidrostatskim napreznjima, naziva se **modul stišljivosti K**, definiran sljedećim izrazom:



Slika 7 Grafički prikaz sljedećih tipova deformacije: (a) čista elastična, (b) savršeno plastična; (c) puzanje ili viskozna deformacija.

$K = \sigma_0 / \varepsilon_v$, gdje je: σ_0 -hidrostatski pritisak; ε_v -volumetrijska deformacija. Hidrostatski pritisak je je $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.

Značenje različitih elastičnih konstanti u inženjerskoj geologiji je veliko jer se pomoću njih karakteriziraju značajke materijala stijena/tala i pritisci koji nastaju tijekom i kao posljedica građenja tunela, brana i ostalih objekata.