

Smyková pevnost zemin

25. ledna 2022

Vymezení pojmů

Smyková pevnost zemin - maximální vnitřní únosnost zeminy proti působícímu smykovému napětí

Efektivní úhel vnitřního tření - část smykové pevnosti zeminy vznikající v důsledku tření mezi zrny zeminy

Soudržnost (koheze) - část smykové pevnosti zeminy plynoucí z cementace (stmelení) skeletu zeminy

Neodvodněná smyková pevnost - smyková pevnost při smýkání s konstantním objemem

Dilatance - změna (nárůst) objemu zeminy v průběhu smýkání materiálu

Kritický stav - stav zeminy, při kterém nedochází v důsledku smýkání materiálu k objemovým změnám

Odezva materiálu v průběhu smýkání

- **TYP I** - kypré písky, normálně a mírně překonsolidované jíly ($OCR \leq 2$)

Zeminy tohoto typu vykazují postupný nárůst smykového napětí (zpevnňování) až do tzv. kritické smykové pevnosti (τ_{cs}). V průběhu smýkání dochází ke snižování objemu do stavu, kdy je objem vzorku (číslo pórovitosti) konstantní - je dosaženo kritické číslo pórovitosti (e_{cs}).

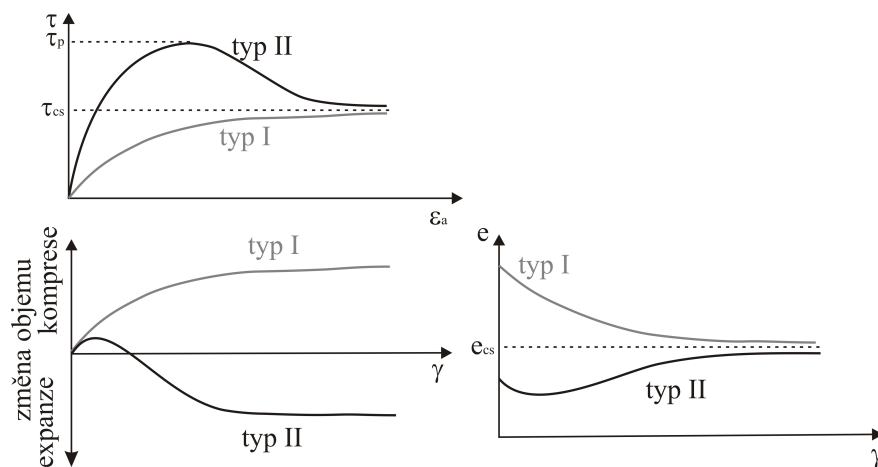
- **TYP II** - ulehle písky, vysoce překonsolidované jíly ($OCR > 2$)

Rychlý nárůst smykového napětí do vrcholové smykové pevnosti (τ_p) je následován poklesem smykového napětí do kritické smykové pevnosti (τ_{cs}). Po počátečním snížení dochází k nárůstu objemu vzorku. Objemové změny se opět ustálí v kritickém stavu, kterému odpovídá kritické číslo pórovitosti.

Coulombův zákon

Coulombův zákon lze vysvětlit na jednoduchém fyzikálním příkladu (obr. 2). Síla (H) potřebná pro posun dřevěného bloku je přímo úměrná vlastní tíze W bloku ("přítlak na smykové ploše") a součiniteli tření f na rozhraní blok - smyková plocha.

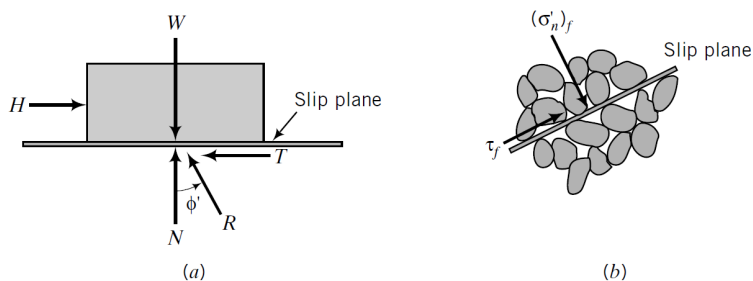
$$H = W f \quad (1)$$



Obrázek 1: Odezva materiálu typu I a II na smykové zatížení

Úhel mezi výslednicí sil na smykové ploše R a normálovou silou N budeme nazývat úhel vnitřního tření. Poměr normálové a tečné síly lze přepsat do poměru normálového $(\sigma_n)_f$ a smykového τ_f napětí, kde index f značí dosažení limitního smykového napětí - smykové pevnosti.

$$f = \tan \varphi' = \frac{H}{W} = \frac{\tau_f}{(\sigma'_n)_f} \quad (2)$$



Obrázek 2: Idealizace dosažení smykové pevnosti (převzato z *Budhu, 2007*)

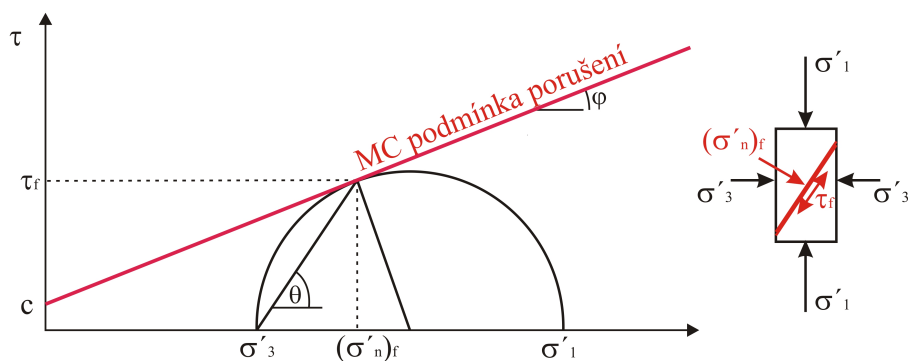
Mohr-Coulombova podmínka porušení

Spojením Coulombova modelu (výpočet limitního smykového napětí) a Mohrovy kružnice (stanovení stavu napjatosti na rovinách s různým sklonem) můžeme definovat limitní smykové napětí (smykovou pevnost) zeminy - tzv. Mohr-Coulombovu podmínku porušení. Pozice a sklon Mohr-Coulombovy čáry porušení (dále jen MC podmínka) je definována dvěma parametry smykové pevnosti:

- **Soudržnost c :** definuje vertikální pozici MC podmínky, je to smyková pevnost zeminy při nulovém normálovém napětí

- **Úhel vnitřního tření** φ : definuje sklon MC podmínky

$$\tau_f = c' + (\sigma'_n)_f \tan \varphi' \quad (3)$$



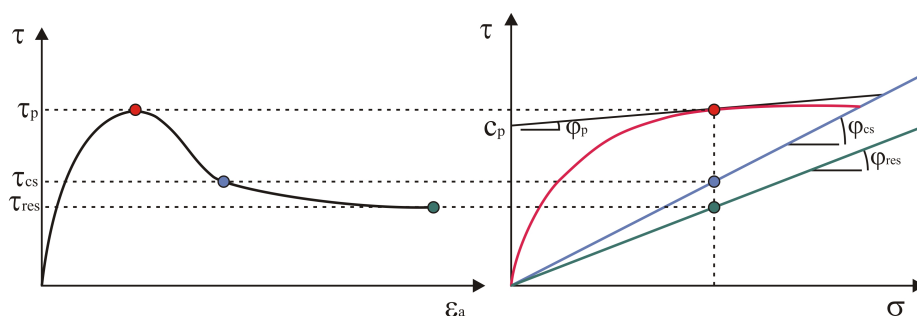
Obrázek 3: Mohr-Coulombova podmínka porušení

Parametry smykové pevnosti

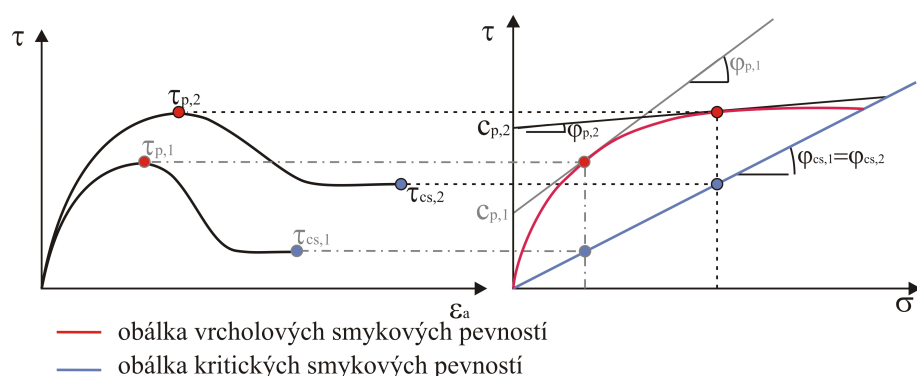
Rozdělení z hlediska míry mobilizovaného smykového napětí:

- **Vrcholová soudržnost** c_p , **vrcholový úhel vnitřního tření** φ_p odpovídají dosažení vrcholové smykové pevnosti. Čára vrcholových smykových pevností není v zobrazení σ - τ přímkou. Parametry c_p a φ_p nejsou materiálové parametry, protože jejich hodnota pro stejnou zeminu závisí na zvolené hodnotě normálového napětí.
- **Kritický úhel vnitřního tření** φ_{cs} : Ve stavu, kdy je dosažena kritická smyková pevnost již nedochází k objemovým změnám (změnám pórového tlaku) v důsledku smýkání. Kritický úhel vnitřního tření je materiálovým parametrem a nezávisí na velikosti normálového napětí. V zobrazení σ - τ tvoří obálka kritických smykových pevností linii se sklonem φ_{cs} .
- **Residuální úhel vnitřního tření** φ_{res} : V případě velkých přetvoření (sesuvné pásma) může v soudržných zeminách docházet k poklesu smykového napětí z kritické hodnoty τ_{cs} až na residuální smykovou pevnost τ_{res} . Pokles smykové pevnosti je způsoben reorientací částic skeletu zeminy do směru smykové plochy.

Nejednoznačnost vrcholových parametrů smykové pevnosti zemin je schematicky znázorněna na obr. 5. Byly provedeny dvě zkoušky pro stanovení parametrů smykové pevnosti pro různé počáteční napjatosti (různé normálové napětí $\sigma_{n,1}$, $\sigma_{n,2}$). Chování zemin je vrcholové - odpovídá typu II. Obálka vrcholových smykových pevností je nelineární. Každé zkoušce odpovídají jiné hodnoty parametrů vrcholové smykové pevnosti c_p , φ_p navzdory faktu, že se jedná o stejnou zeminu. Obálka kritických smykových pevností je již lineární, pro celý rozsah



Obrázek 4: Vrcholová, kritická a residuální smyková pevnost



Obrázek 5: Parametry smykové pevnosti

normálových napětí platí jedna hodnota parametru smykové pevnosti - kritický úhel vnitřního tření φ_{cs} .

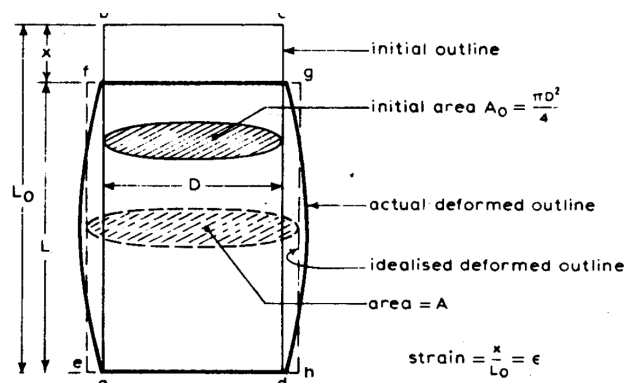
Rozdělení z hlediska odvodněného a neodvodněného chování zemin:

- **Efektivní parametry smykové pevnosti** c' , φ' : jsou relevantní pro odvodněné dlouhodobé podmínky ($\Delta u=0$), kdy již došlo k disipaci zvýšených pórových tlaků v důsledku zatížení geomateriálu.
- **Totální parametry smykové pevnosti** c_u , (φ_u) : jsou relevantní pro neodvodněné krátkodobé podmínky ($\Delta u \neq 0$), kdy je smyková pevnost zeminy významně ovlivněna velikostí zvýšených pórových tlaků. Pro plně nasycené zeminy ($S_r=1.0$) musí platit $\varphi_u=0$. Časté nenulové hodnoty φ_u jsou způsobeny neúplnou saturací vzorku ($S_r \neq 1.0$). V takovém případě ale hodnota φ_u závisí na stupni nasycení resp. velikosti negativního pórového tlaku a není materiálovou charakteristikou zeminy.

Podrobné vyhodnocení triaxiální zkoušky CU

Ve druhé části příkladu jsou k dispozici detailní údaje o triaxiální zkoušce CU s měřením pórového tlaku provedené při komorovém napětí $\sigma_3=450\text{kPa}$. Je potřebné provést následující vyhodnocení:

- Závislost mezi deviátorem napětí q a osovým přetvořením vzorku, ϵ_1



Obrázek 6: Změna tvaru (průřezové plochy) vzorku (převzato z *Head, 1994*)

- Závislost mezi pórovým tlakem u generovaným v průběhu neodvodněného smýkání a osovým přetvořením vzorku ϵ_1 ,
- Efektivní dráhu napětí ESP (effective stress path) - závislost mezi efektivním středním napětím p' a deviátorem napětí q ,
- Totální dráhu napětí TSP (total stress path) - závislost mezi totálním středním napětím p a deviátorem napětí q .

Pro stanovení uvedených závislostí jsou důležité následující skutečnosti:

- Před smýkáním je vzorek zkonsolidován. Pórový tlak je tedy nulový, efektivní napětí je totožné s totálním.
- Smýkání je rychlé (neodvodněné) - dochází ke změně pórového tlaku v důsledku kontraktance/dilatance, objem vzorku ale zůstává konstantní.
- Objem vzorku se sice nemění, mění se ale jeho tvar - zvětšuje se průřezová plocha vzorku (obr. 6).

Vyhodnocení veličin:

- **Poměrné osově přetvoření** ϵ_1 , kde Δz je změna výšky vzorku, H_0 je původní výška vzorku.

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_0} \quad (4)$$

- **Aktuální průřezová plocha vzorku** A , kde A_0 je počáteční plocha vzorku, ϵ_v je poměrné objemové přetvoření a ϵ_1 je poměrné osově přetvoření. Pro zkoušky typu CU je poměrné objemové přetvoření ϵ_v v průběhu smýkání nulové.

$$A = \frac{A_0(1 - \epsilon_v)}{1 - \epsilon_1} \quad (5)$$

- **Deviátor napětí** q , kde P_z je vertikální síla a A je aktuální plocha vzorku.

$$q = \frac{P_z}{A} \quad q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad q = q' \quad (6)$$

- **Hlavní totální napětí** σ_1 .

$$\sigma_1 = q + \sigma_3 \quad (7)$$

- **Totální střední napětí** p je funkcí totálních hlavních napětí

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (8)$$

- **Efektivní střední napětí** p' je funkcí efektivních hlavních napětí. Pro střední napětí platí princip efektivních napětí.

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad p = p' + u \quad (9)$$