

# Smyková pevnost zemin

31. ledna 2019

## 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 (zpevnování) až do tzv. kritické smykové pevnosti ( $\tau_{cs}$ ). V průběhu smýkání dochází ke snižování objemu do stavu, kdy je objem vzorku (číslo pórovitosti) konstantní - je dosaženo kritické číslo pórovitosti ( $e_{cs}$ ).

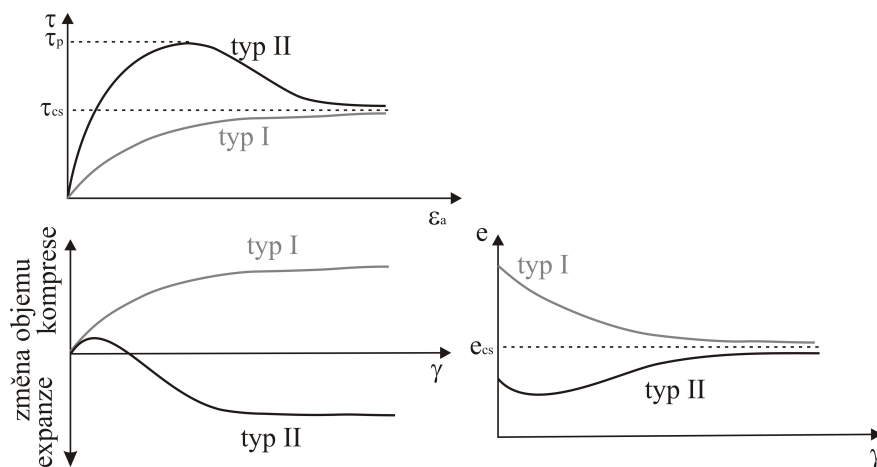
- **TYP II - ulehle písky, vysoce překonsolidované jíly ( $OCR > 2$ )**

Rychlý nárůst smykového napětí do vrcholové smykové pevnosti ( $\tau_p$ ) je následován poklesem smykového napětí do kritické smykové pevnosti ( $\tau_{cs}$ ). 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.

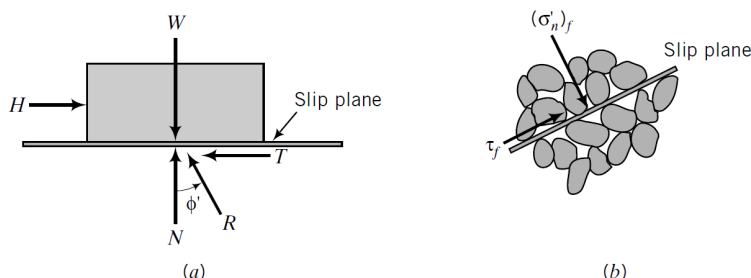
$$H = W f \quad (1)$$



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  $\tau_f$  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*)

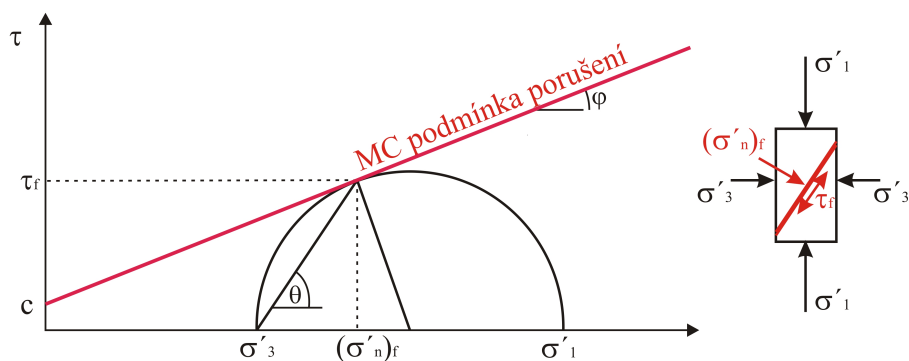
## Mohr-Coulombova podmínka porušení

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**  $\varphi$ : definuje sklon MC podmínky

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



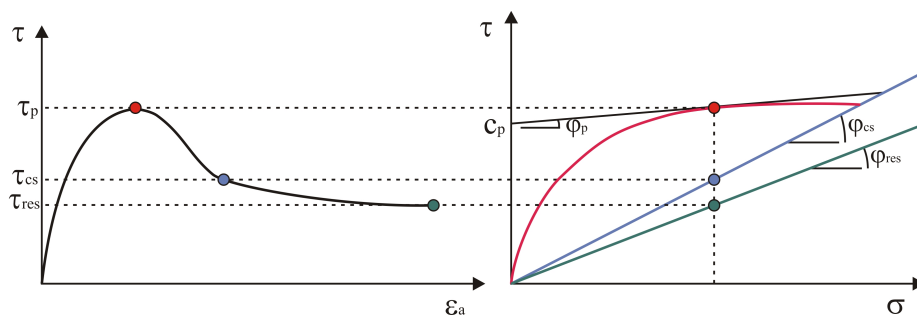
**Obrázek 3:** Mohr-Coulombova podmínka porušení

## Parametry smykové pevnosti

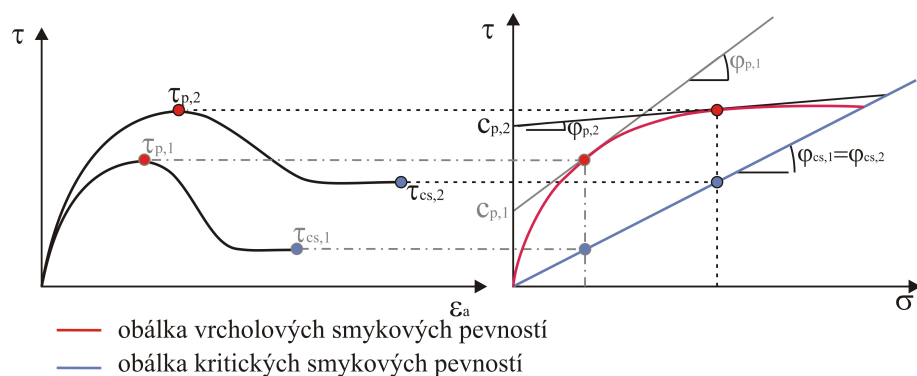
Rozdělení z hlediska míry mobilizovaného smykového napětí:

- **Vrcholová soudržnost**  $c_p$ , **vrcholový úhel vnitřního tření**  $\varphi_p$  odpovídají dosažení vrcholové smykové pevnosti. Čára vrcholových smykových pevností není v zobrazení  $\sigma$ - $\tau$  přímkou. Parametry  $c_p$  a  $\varphi_p$  nejsou materiálové parametry, protože jejich hodnota pro stejnou zeminu závisí na zvolené hodnotě normálového napětí.
- **Kritický úhel vnitřního tření**  $\varphi_{cs}$ : 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  $\sigma$ - $\tau$  tvoří obálka kritických smykových pevností linii se sklonem  $\varphi_{cs}$ .
- **Residuální úhel vnitřního tření**  $\varphi_{res}$ : V případě velkých přetvoření (sesuvné pásma) může v soudržných zeminách docházet k poklesu smykového napětí z kritické hodnoty  $\tau_{cs}$  až na residuální smykovou pevnost  $\tau_{res}$ . 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  $c_p$ ,  $\varphi_p$  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

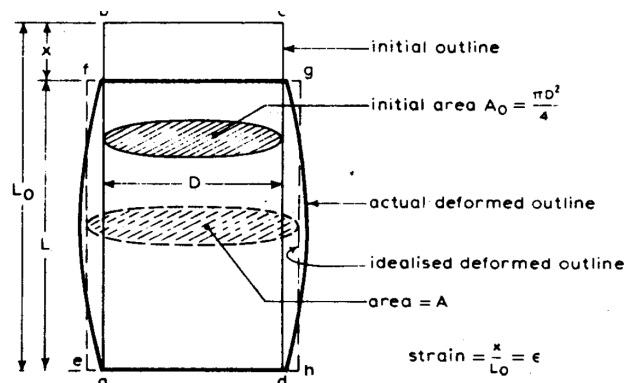
normálových napětí platí jedna hodnota parametru smykové pevnosti - kritický úhel vnitřního tření  $\varphi_{cs}$ .

Rozdělení z hlediska odvodněného a neodvodněného chování zemín:

- **Efektivní parametry smykové pevnosti**  $c'$ ,  $\varphi'$ : 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**  $c_u$ ,  $(\varphi_u)$ : 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  $\varphi_u$  jsou způsobeny neúplnou saturací vzorku ( $S_r \neq 1.0$ ). V takovém případě ale hodnota  $\varphi_u$  závisí na stupni nasycení resp. velikosti negativního pórového tlaku a není materiálovou charakteristikou zeminy.

## Podrobné vyhodnocení triaxiální zkoušky CU (příklad č. 4.2)

Ve druhé části příkladu č. 4.2 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:



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

- Závislost mezi deviatorem napětí  $q$  a osovým přetvořením vzorku,  $\epsilon_1$
- Závislost mezi pórovým tlakem  $u$  generovaným v průběhu neodvodněného smýkání a osovým přetvořením vzorku  $\epsilon_1$ ,
- Efektivní dráhu napětí ESP (effective stress path) - závislost mezi efektivním středním napětím  $p'$  a deviatorem napětí  $q$ ,
- Totální dráhu napětí TSP (total stress path) - závislost mezi totálním středním napětím  $p$  a deviatorem 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 osové přetvoření**  $\epsilon_1$ , kde  $\Delta z$  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,  $\epsilon_v$  je poměrné objemové přetvoření a  $\epsilon_1$  je poměrné osové přetvoření. Pro zkoušky typu CU je poměrné objemové přetvoření  $\epsilon_v$  v průběhu smýkání nulové.

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

- **Devíátor 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**  $\sigma_1$ .

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

- **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.

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