

ZÁVISLOST MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ REKONSTITUOVANÉ JEMNOZRNÉ ZEMINY NA STUPNI PŘEKONSOLIDACE

Václav Hájek

Univerzita Karlova v Praze

Mgr. David Mašín, MPhil.

Univerzita Karlova v Praze

Ing. Jan Boháč, CSc.

Univerzita Karlova v Praze

The influence of the degree of overconsolidation on the mechanical behaviour of a fine-grained soil

Results of a series of drained shear tests on a reconstituted fine-grained soil at different overconsolidation ratios (OCR) are presented in the paper. Six tests have been performed, at OCR=1; 1,5; 2; 4; 8; 10. Results fit into the critical state soil mechanics framework with increasing peak friction angles and increasing tendency to dilatancy for increasing OCR, their interpretation is however complicated by localization of deformation into shear zones. The data will be used for evaluation of predictive capabilities of different constitutive models.

1. ÚVOD

Pokročilé konstituční modely pro jemnozrné zeminy uvažují číslo pórovitosti (nebo, ekvivalentně, stupeň překonsolidace), jako stavovou proměnnou. Jejich výhoda potom tkví v tom, že je možno použít jednu sadu materiálových parametrů pro modelování různě ulehlých zemín, což usnadňuje praktické využití těchto modelů. Kvalitativně korektní odezva modelů, založená na jedné sadě parametrů, ovšem nemusí nutně implikovat správnou odezvu vyjádřenou kvantitativně.

Hájek a Mašín (2006) porovnávali předpovědi tří konstitučních modelů různé komplexity (konkrétně model Cam clay, kinematický model 3-SKH a hypoplastický model pro jíly) s výsledky triaxiálních smykových zkoušek na rekonstituovaném kaolinu při stupních překonsolidace (OCR) 1 až 50 (Hattab a Hicher, 2004). Pokročilejší modely vedly k mnohem přesnějším předpovědím, ovšem ani pro hypoplastický model nebylo možno využít jednu sadu materiálových parametrů pro celý rozsah OCR.

Protože Hájek a Mašín (2006) využili jen jednu sadu experimentálních dat na jedné zemině, nebylo možno provést obecné závěry. V laboratoři PŘFUK se proto provedla obdobná sada experimentů na rekonstituovaném třetihorním jílu ze severočeské hnědouhelné pánve. Její výsledky jsou prezentovány v předkládaném příspěvku.

2. VYBRANÁ LOKALITA, ZKOUŠENÁ ZEMINA

Jako vhodná lokalita byla zvolena rekultivovaná výsypka bývalého dolu 5. května poblíž obce Trmice u Ústí nad Labem. Odebraly se neporušené vzorky ze tří jádrových vrtů v trase dálnice D8 (Herbstová et al., 2004). V celém profilu vrtu (20 m) měla výsypka charakter střípků jílovce s prachovitým jílem, s občasnými úlomky porcelanitu, kameny krystalinika a uhelné drtě. Pro popis lze použít označení kaolinicko-illitický jíl s malou příměsí písčitých zrn (CH, $I_p = 29-34\%$, $w_L = 58-62\%$, F7-F8 podle ČSN 731001). Hladina podzemní vody byla zastižena pouze v jednom z vrtů a ustálila se na úrovni dvou metrů pod terénem.

3. POUŽITÉ PŘÍSTROJE, METODIKA ZKOUŠEK

Při přípravě rekonstituovaných vzorků se zemina nejdříve rozdružila a poté rozmíchala s pitnou vodou do homogenní pasty. Ta byla následně protlačována přes síto s velikostí ok 0,5 mm. Vlhkost pasty byla vyšší než vlhkost na mezi tekutosti.

Po počáteční jednoosé konsolidaci (ve vysokém oedometru průměru 38 mm a svislém napětí cca 70 kPa) se v trojosém přístroji vzorky nejprve zcela nasatily vodou na minimální hodnotu $S_r = 95\%$ a poté stlačovaly izotropně. Všechny vzorky byly plynule stlačovány na velikost komorového tlaku $p' = 600$ kPa a následně odlehčovány až na hodnotu komorového tlaku $p' = 600/OCR$, kde OCR představuje stupeň překonsolidace. Vzorky byly na plášti opatřeny drény z filtračního papíru pro urychlení konsolidace.

Po ukončení konsolidace a odlehčovací fáze byly vzorky podrobeny standardní smykové zkoušce CID. Smykové přetváření pokračovalo až do velikosti vertikálního přetvoření cca 40%. Proces smykání probíhal rychlostí 0,001 mm/min. Tato rychlost měla být dostatečně pomalá na to, aby ve vzorku stihly během zkoušky disipovat vzniklé pórové tlaky.



Obr. 1. Vzorek $OCR=2$ po zkoušce, jasně zřetelná je lokalizace deformace ve smykové zóně

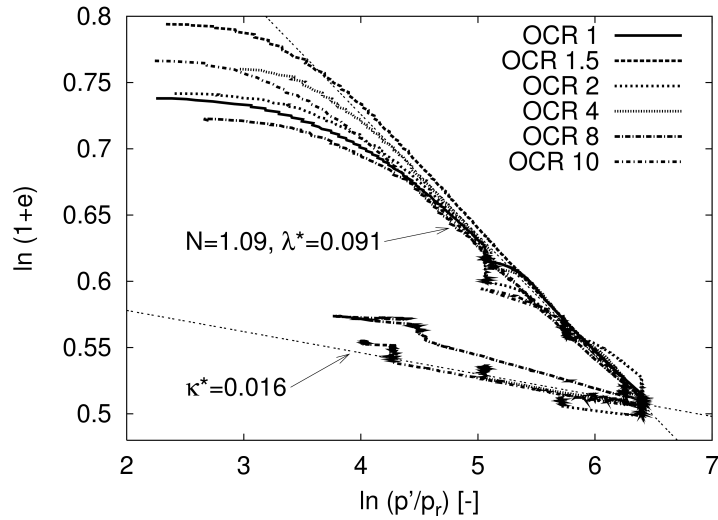
V průběhu smykové fáze se na všech vzorcích během zkoušky vytvořila jasně lokalizovaná smyková plocha charakteristická pro chování překonsolidovaných jílu (obr. 1). Smyková plocha se vytvořila i u zkoušky při $OCR=1$, což je pravděpodobně způsobeno okrajovými podmínkami v triaxiálním přístroji (jako např. hrubé drenážní destičky).

4. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Dosud bylo provedeno a vyhodnoceno šest drénovaných smykových zkoušek na zemině se stupněm překonsolidace $OCR = 1; 1,5; 2; 4; 8; 10$.

Obrázek 2 ukazuje průběh izotropní stlačitelnosti v zobrazení $v = 1+e$ (specifický objem) vs. $\ln p'/p_r$ (p' efektivní střední napětí, p_r referenční napětí 1 kPa.). Je vidět jasný rozptyl v počáteční pórovitosti zkoušené zeminy, ale jinak je průběh všech křivek obdobný a směrnice přitěžovací i odlehčovací větve shodná. Vzhledem k nepřesnostem v měření pórovitosti vzorků byla pro snadnější porovnání výsledků počáteční pórovitost na obr. 2 a pro účely normalizace (viz dále) upravena tak, aby všechny vzorky dosahovaly stejného čísla pórovitosti při maximálním konsolidačním napětí $p'=600$ kPa. Výsledky izotropní konsolidace posloužily k vyhodnocení parametrů stlačitelnosti N , λ^* a κ^* (viz obr. 2). Čára normální konsolidace je charakterizována rovnicí (podle Butterfielda, 1979)

$$\ln(1+e) = N - \lambda^* \ln(p'/p_r) \quad (1)$$

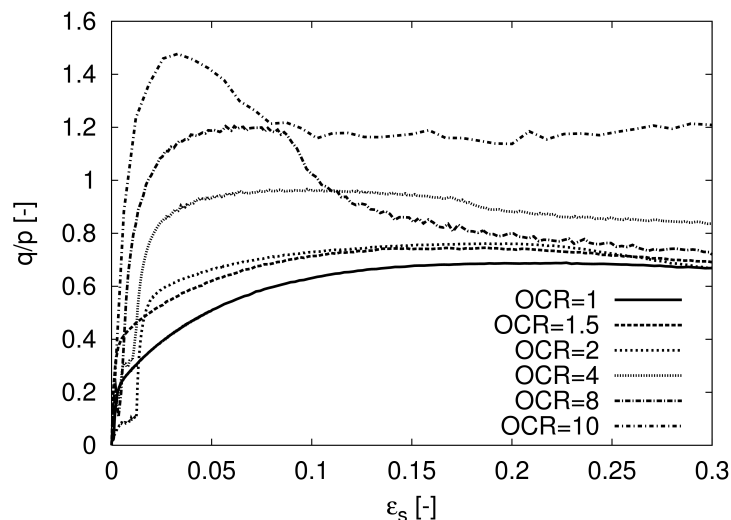


Obr. 2. Izotropní konsolidace zkoušených vzorků

Na obrázku 3 jsou pracovní diagramy normalizované středním napětím pro jednotlivé zkoušky. Je zřetelné, že s rostoucím stupněm překonsolidace se zároveň zvyšuje vrcholová pevnost vzorku - vrcholový úhel vnitřního tření φ'_p je pro triaxiální stlačování možno vypočítat z invariantů napětí p' a q (deviátorové napětí) pomocí rovnice.

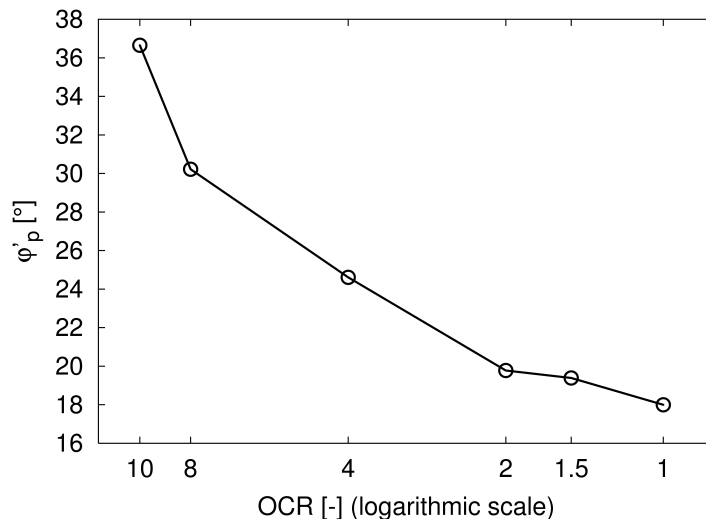
$$\varphi'_p = \sin^{-1} \frac{3(q/p')_{max}}{6 + (q/p')_{max}} \quad (2)$$

Výrazný povrchový pokles pevnosti u překonsolidovaných vzorků je způsoben lokalizací deformace, naměřené povrchové charakteristiky nereprezentují mechanické chování materiálu ve smykové zóně.



Obr. 3. Normalizované pracovní diagramy provedených zkoušek

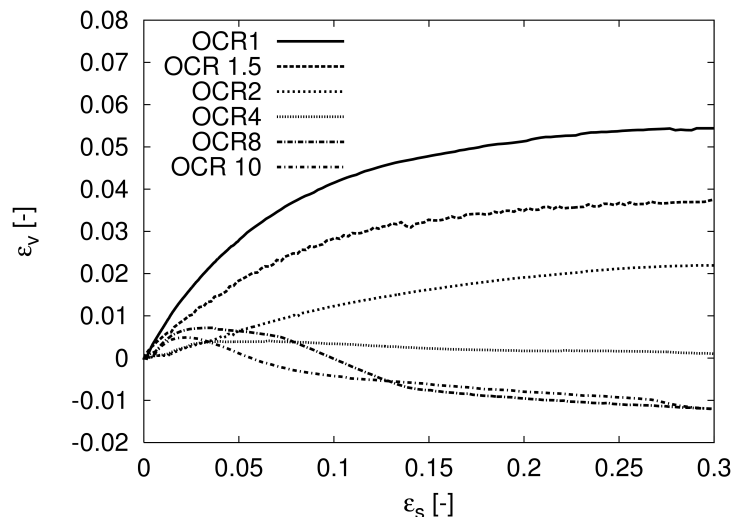
Skoková změna tuhosti materiálu na začátku smyku u vzorků se stupněm překonsolidace $OCR = 2$ a 4 je způsobena špatným počátečním kontaktem mezi vzorkem a zatěžovacím pístem.



Obr. 4. Závislost vrcholového úhlu vnitřního tření ϕ'_p na počátečním stupni překonsolidace

Vrcholové úhly vnitřního tření ϕ'_p jsou na obrázku 4 vyneseny vzhledem k počátečnímu stupni překonsolidace vzorků. Naměřený ϕ'_p je obdobný u mírně překonsolidovaných vzorků (OCR=1;1,5 a 2), což odpovídá teorii kritických stavů (Schofield and Wroth, 1968). Je ovšem nutné zdůraznit, že díky lokalizaci deformace (i u vzorků s $OCR \leq 2$) je naměřený ϕ'_p u mírně překonsolidovaných vzorků nižší než kritický úhel vnitřního tření dosažený na smykové ploše. U silně překonsolidovaných vzorků ($OCR = 4; 8$ a 10) vrcholový úhel výrazně roste s rostoucím stupněm překonsolidace, což opět odpovídá teorii.

Objemové změny jsou vyneseny na obrázku 5. Normálně konsolidovaná zemina a mírně překonsolidované vzorky (do $OCR \leq 2$) vykazují kontraktantní chování. Naopak vzorky silně překonsolidované po počátečním stlačení dilatují. Nejlépe je tato vlastnost zřetelná u nejvíce překonsolidovaných vzorků ($OCR = 8$ a 10).

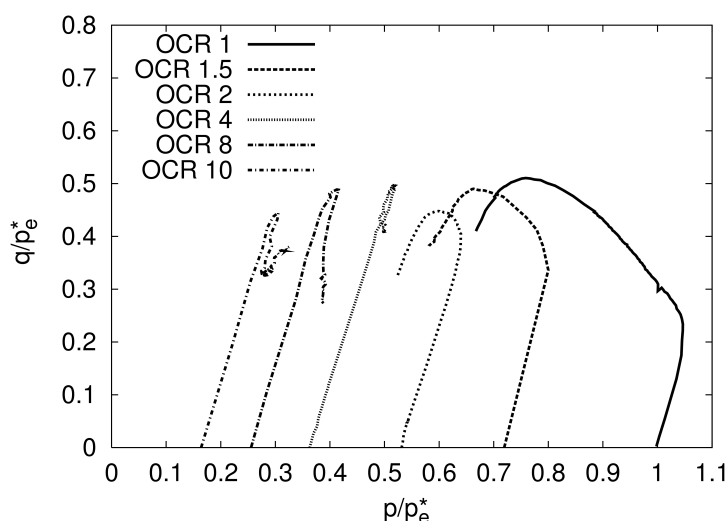


Obr. 5. Objemové změny

Obrázek 6 zobrazuje dráhy napětí jednotlivých zkoušek normalizované vzhledem k tzv. Hvorslevovu ekvivalentnímu napětí p_e^* . Jedná se o střední napětí p' na čáře izotropní normální konsolidace odpovídající aktuálnímu číslu pórovitosti e , tedy

$$p_e^* = p_r \exp\left(\frac{N - \ln(1+e)}{\lambda^*}\right) \quad (3)$$

Normalizace vzhledem k p_e^* umožňuje dvojrozměrné zobrazení tzv. *mezní plochy stavu* v prostoru $p'-q-e$ jež ohraničuje všechny přípustné stavy zeminy. Existence mezní plochy je z Obr. 6 zřejmá. Počáteční sklon normalizované dráhy napětí odpovídá sklonu dráhy napětí drénované triaxiální zkoušky, což zejména u zkoušek s nízkým OCR neodpovídá teoreticky předpokládanému chování. Je tedy možné, že zvolená rychlost smykání 0,001 mm/min nebyla dostatečně pomalá pro plnou disipaci pórových tlaků v počátečních fázích zkoušky, přestože smyková fáze zkoušek trvala přibližně 20 dní.



Obr. 6. Dráhy napětí normalizované vzhledem k Hvorslevovu ekvivalentnímu napětí p_e^*

Koncové body normalizovaných drah napětí by měly odpovídat kritickému stavu. Z obr. 6 je tedy zřejmé, že jednotný kritický stav dosažen nebyl. Stejně jako v případě pracovních diagramů je tento jev způsoben lokalizací deformace po dosažení vrcholové pevnosti. Globálně měřená napětí a pórovitosti tedy neodpovídají stavu na smykové ploše.

Počáteční a konečná čísla pórovitosti smykových zkoušek jsou zobrazena v grafu $\ln(1+e)$ vs. $\ln(p'/p_r)$ na obr. 7. Ve stejném grafu je zobrazena čára izotropní normální konsolidace s parametry získanými pomocí obr. 1 a dále teoretická čára kritických stavů o rovnici

$$\ln(1+e) = N - \lambda^* \ln 2 - \lambda^* \ln(p'/p_r) \quad (4)$$

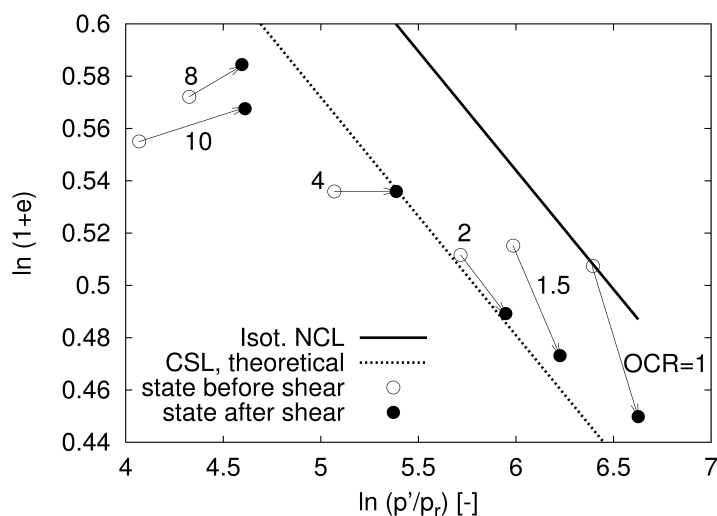
Rovnice (4) vyplývá z teorie kritických stavů a je explicitně obsažena v konstitučních modelech na této teorii založených, jako např. v hypoplastickém modelu pro jíly (Mašín, 2005). Z obr. 7 je zřejmé, že i přes to, že dochází k lokalizaci deformace na smykové zóně, čára kritických stavů vyplývající z teorie dobře aproximuje experimentálně zjištěná data.

5. ZÁVĚR

V příspěvku byly shrnuty výsledky laboratorních zkoušek na rekonstituované jemnozrné zemině. Příprava vzorků a metodika zkoušek byly u všech vzorků shodné, rozdíl byl pouze v různém stupni překonsolidace jednotlivých vzorků. Výsledky demonstrují platnost teorie kritických stavů – nárůst vrcholové pevnosti materiálu s rostoucím stupněm překonsolidace,

existenci čáry izotropní normální konsolidace a čáry kritických stavů v prostoru $\ln(1+e)$ vs. $\ln(p'/p_r)$ a z ní vyplývající tendenci ke kontraktanci u mírně překonsolidovaných vzorků a tendenci k dilatanci u silně překonsolidovaných vzorků. V neposlední řadě byla také demonstrována existence mezní plochy v prostoru $p'-q-e$. Interpretace výsledků zkoušek je nicméně komplikována lokalizací deformace ve smykové zóně.

V příspěvku bylo ukázáno, že získaná experimentální data souhlasí s teorií kritických stavů, na jejímž základě jsou založeny i konstituční modely studované Hájkem a Mašínem (2006). I bez detailního porovnání experimentů a předpovědí modelů lze tedy předpokládat kvalitativně dobrou odezvu modelů. Kvantitativní vyhodnocení předpovědí bude součástí dalšího výzkumu.



Obr. 7. Počáteční a konečný stav smykových zkoušek, spolu s čárou izotropní normální konsolidace a teoretickou čárou kritických stavů.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují za finanční podporu projektu grantům GAUK 331/2004/B-GEO/PřF a GAUK 6/2006/R.

LITERATURA

- Butterfield, R. (1979) A natural compression law for soils. *Geotechnique* 29, No. 4, 469-480.
- Hájek, V. a Mašín, D. (2006) An evaluation of constitutive models to predict the behaviour of fine-grained soils with different degrees of overconsolidation. In *Proc. 6th European Conf. on Numerical Methods in Geomechanics (NUMGE06)*, Graz, Austria (in print).
- Hattab, M. a Hicher, P.-Y. (2004) Dilating behaviour of overconsolidated clay. *Soils and Foundations* 44, No. 4, 27-40.
- Herbstová, V., Mašín, D. a Boháč, J. (2004) Parameters for non-engineered colliery clayfills. In *Proc. Int. Conf. on Problematic Soils (GEOPROB)*. Bilsel, H. and Nalbantoglu, Z. (Eds.), Famagusta, Cyprus; Vol. 1, 335-342.
- Mašín, D. (2005) A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 29, No. 4, 311-336.
- Schofield, A. N. and Wroth, C. P (1968) *Critical State Soil Mechanics*. McGraw Hill, London, England.