

Konstituční modely pro zeminy s dvojí pórovitostí

Vladislava Herbstová, David Mašín a Jan Boháč
Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta
Albertov 6, 128 43, Praha 2, Česká republika

Summary: The paper presents laboratory tests on the material of clayey colliery clayfills. Data of oedometer and triaxial tests carried out on water saturated specimens are used to calibrate the parameters for a constitutive model based on the Modified Cam Clay. The applicability of the model using the derived parameters is demonstrated by modelling other laboratory tests.

Abstrakt: V příspěvku se prezentují laboratorní zkoušky provedené na materiálu jílovité výsypky. Data oedometrických a trojosých zkoušek na vodou nasycených vzorcích se použila pro stanovení parametrů pro konstituční model typu Cam-Clay. Demonstruje se dobrá shoda numerického modelu s chováním vzorků dalších provedených laboratorních zkoušek.

Úvod

Zeminy s dvojí pórovitostí se řadí ke geomateriálům se složitým mechanickým chováním. Významným rysem je vysoká celková pórovitost, která zpravidla bývá spojena s kolapsibilním chováním. Typickým příkladem zeminy s dvojí pórovitostí je například materiál výsypek hnědouhelných dolů. Výsypky v severních Čechách jsou tvořeny převážně třetihorními jíly, které však během procesu odtěžení a uložení na výsypku změnily svůj charakter. Hornina byla rozdrůžena na úlomky a bloky velikosti centimetrů až několika desítek centimetrů a tento materiál byl ukládán bez současného hutnění. K pórovitosti jílovce se tedy přidává mezerovitost mezi jednotlivými úlomky a hrudkami (dvojí pórovitost). Povrch sypaniny rychle větrá a tvoří se vrstva mocnosti několika desítek centimetrů se střípkovitou texturou. Vlastnosti sypaniny se dále postupně měnily vlivem klimatických vlivů, postupně rostoucího nadloží a případným vlivem podzemní vody. Po několika desítkách let, kdy se zpravidla uvažuje o dalším využití a zastavování, se materiál výsypek opět svým charakterem blíží jemnozrnné zemině s různou úrovní homogenity, spíše než počáteční granulární sypanině složené z "pseudozrn". Povrchová vrstva výsypky je zpravidla tvořena nenasyceným materiálem. Svrchních cca 15 až 20 metrů však bývá často považováno za průvzdušnou zónu (např. in Herštus et al., 2003), takže mechanický popis nenasycené zeminy se zjednodušuje.

Popisem chování a výzkumem vlastností materiálů výsypek se věnovaly četné práce, které shrnuje např. Dykast (1993). Studium chování výsypkového materiálu v laboratoři i v poli se zabývali např. Feda (1998) a Boháč et al. (2003), avšak bez použití v numerických metodách. Polními metodami průzkumu, srovnáním polních a laboratorních zkoušek i využitím velkorozměrových polních zkoušek se zabývali např. Kurka (2001) a Škopek a Boháč (2004). Přehled průzkumných metod, vlastností výsypek a stavebních aktivit v některých lokalitách podávají např. Herštus et al. (2003). Z dostupné literatury

však vyplývá, že v současné době není k dispozici vhodný konstituční model pro numerickou analýzu jílovitých výsypek. Tento příspěvek popisuje probíhající laboratorní výzkum a odvození parametrů pro pružnoplastický konstituční model typu Cam-Clay pro vodou nasycený výsypkový materiál. Kapilárním sáním, jeho měřením in-situ a vlivem na vlastnosti výsypkového materiálu se popisovaný výzkumný projekt rovněž zabývá, v dalším textu se však nenasyčenost výsypky neuvažuje.

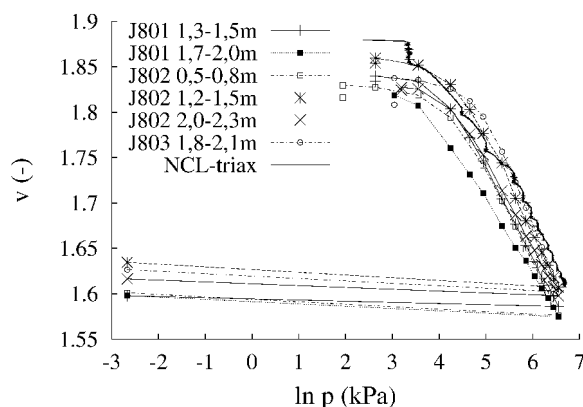
Vybraná lokalita, zkoušená zemina

Pro studium mechanických vlastností výsypkového materiálu byla zvolena rekultivovaná výsypka bývalého dolu 5. května nedaleko Ústí nad Labem. Neporušené vzorky se odebraly ze tří jádrových vrtů. Po celém vrtném profilu do hloubky cca 20 m byly zastiženy výsypky charakteru střípků jílovce s prachovitým jílem, s občasnými úlomky porcelanitu, kameny krystalinika a uhelné drtě. Zeminu lze charakterizovat jako kaolinicko-illitický jíl s malou příměsí písčítých zrn (CH, $I_p = 29-34\%$, $w_L = 58-62\%$; F7-F8 podle ČSN 731001). Ustálená hladina podzemní vody byla zastižena pouze v jednom z vrtů, v hloubce 2 m.

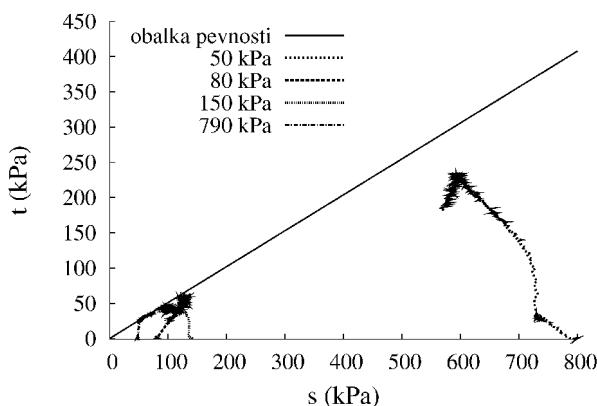
Laboratorní zkoušky se prováděly na neporušených vzorcích odebraných zatlačováním standardního odběrného přístroje s plastovými pouzdry průměru cca 100 mm. Byly provedeny nedrénované trojosé smykové zkoušky, trojosé zkoušky pro zjištění čáry izotropní stlačitelnosti a oedometrické zkoušky, při nichž se stanovovaly vstupní parametry pro numerické modelování výsypky pomocí modelu Cam – Clay.

Čáry izotropní a K_0 stlačitelnosti

Výsledky zkoušek izotropní stlačitelnosti (NCL) byly parametrizovány a porovnávány s čarami jednorozměrné stlačitelnosti (1D-NCL) získanými z oedometrických zkoušek. Obr. 1 prezentuje výsledky v zobrazení v (v je specifický objem) vs. $\ln p$ (p je efektivní střední hlavní napětí). Při srovnání čáry izotropní stlačitelnosti získané zkouškou v trojosém přístroji na vzorku z hloubky 2,5-2,8m (NCL-triax na obr. 1) a 1D-NCL získané z oedometrů (ostatní křivky na obr. 1) je zřejmé, že výsledky zkoušek z oedometrů vykazují rozptyl v počáteční pórovitosti. Ten může být způsoben buďto kvalitou zkoušených vzorků (porušení), nebo skutečným rozptylem pórovitosti materiálu výsypky. Nicméně sklon přitěžovacích větví z obou typů zatěžování je při vyšších efektivních napětích shodný.



Obr. 1 Čáry izotropní a 1-D stlačitelnosti



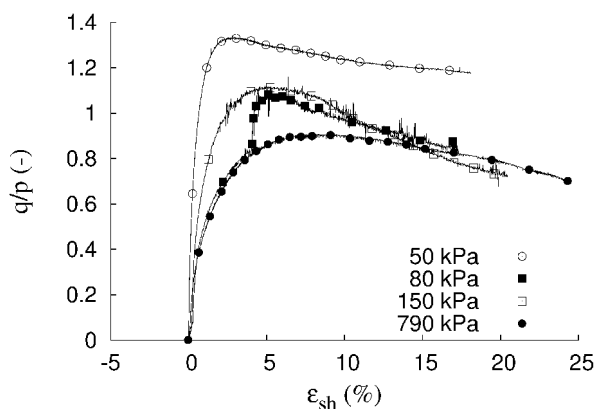
Obr. 2 Obálka pevnosti v s-t zobrazení

Dráhy napětí a zakřivenost obálky pevnosti

Dosud byly provedeny a vyhodnoceny 4 nedrénované smykové zkoušky na neporušených vzorcích výsypkového materiálu z hloubek 2,5-2,8 m (zkoušky jsou značně náročné na čas: izotropní stlačitelnost do napětí cca 1MPa vyžaduje dva až tři měsíce, smyková fáze zkoušky cca 10 dní). Vzorky byly izotropně zkonsolidovány na různá efektivní napětí a podrobeny smyku za neodvodněných podmínek. Pro nižší úroveň napětí se získala obálka pevnosti s parametry $\varphi' = 27^\circ$ a $c' = 0$ kPa (obr. 2). Smyková zkouška provedená při počátečním efektivním konsolidačním napětí $s = 790$ kPa neodpovídá proložené obálce pevnosti, neboť při vysokých efektivních napětích se projevuje zakřivenost obálky. Dráha napětí zkoušky při počátečním efektivním napětí 80 kPa je ovlivněna tím, že smyk probíhal nestandardně, nejdříve jako odvodněný, před porušením byly podmínky změněny na neodvodněné.

Pracovní diagramy jednotlivých zkoušek

Pro lepší srovnatelnost pracovních diagramů jednotlivých zkoušek jsou na obr 3. uvedena deviátorová napětí normovaná efektivním středním hlavním napětím (q/p ; ε_{sh} je smykové napětí). Obrázek ukazuje relativně nízkou vrcholovou pevnost vzorku při vysoké počáteční napjatosti (790 kPa) a vyšší pevnost vzorku při nízké napjatosti (50 kPa), tj. zakřivení obálky pevnosti. Je také zřetelné ovlivnění pracovního diagramu zkoušky při počátečním napětí 80 kPa nestandardními podmínkami.



Obr. 3 Pracovní diagramy smykových zkoušek

Ze zkoušek, při nichž byly přímo na vzorcích osazeny lokální snímače deformace LVDT, byla stanovena tuhost při malých přetvořeních a ověřována nelinearita tuhosti s rostoucím přetvořením. Výsledky těchto měření jsou prezentovány v jiné práci (Herbstová a Boháč, 2004).

Parametry konstitučního modelu

Na základě provedených laboratorních zkoušek byl kalibrován konstituční model zvolený pro numerické modelování materiálu výsypek. Konstituční model je variantou Modifikovaného Cam-Clay modelu (Roscoe a Burland, 1968). Jeho základní verze, jež je v této práci kalibrována, umožňuje modelovat chování materiálu hrud sypaniny a chování výsypky ve větších hloubkách, kde již není patrná dvojitá pórovitost materiálu. Pro modelování mezerovitého materiálu je nutné model obohatit konceptem sensitivity (Cotecchia a Chandler, 2000), jak je podrobně diskutováno Mašínem (2004). Konstituční model byl implementovaný do programu pro simulaci laboratorních zkoušek *Triax*, vyvíjeného na PŘF UK.

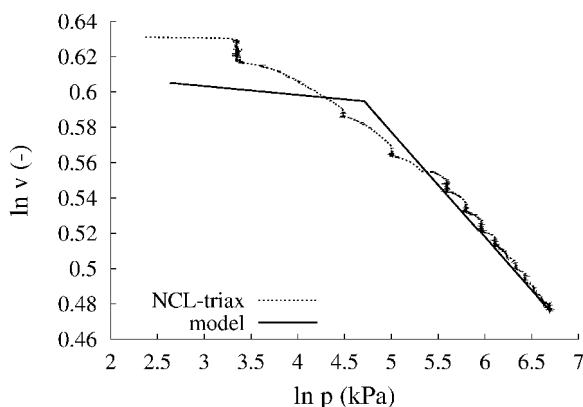
Tři parametry modelu popisují chování materiálu při zkoušce izotropního stlačení a odlehčení. Parametr λ^* popisuje sklon čáry prvotního přetížení v zobrazení $\ln v - \ln p$, parametr N charakterizuje její pozici a κ^* značí sklon čáry odlehčení v zobrazení $\ln v - \ln p$. Predikce modelu pro zkoušku izotropní stlačitelnosti je na obr. 4, shrnutí parametrů je v Tab. 1.

Tab. Number range Table Parametry Modifikovaného Cam-Clay modelu

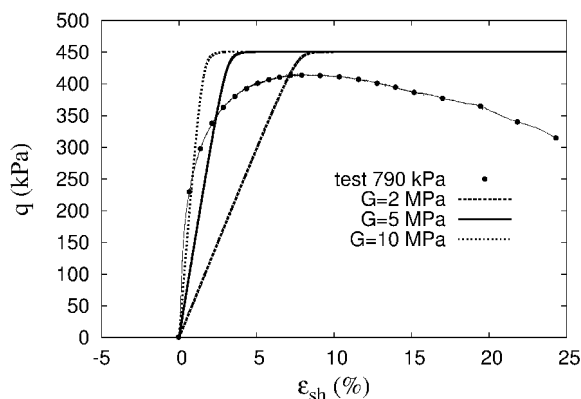
G [MPa]	M	λ^*	κ^*	N
5	1,07	0,0596	0,005	0,875

Parametr M vyjadřuje sklon obálky kritických stavů ve zobrazení p-q. Hodnotě efektivního kritického úhlu vnitřního tření $\varphi_c = 27^\circ$, která byla stanovena dosavadními trojosými zkouškami, odpovídá $M=1,07$.

Posledním paramerem je smykový modul G. Jeho kalibrace je do jisté míry subjektivní, vzhledem k tomu, že Modifikovaný Cam-Clay model neuvažuje závislost G na napětí a predikce změny smykového modulu s přetvořením je limitována pouze na normálně



Obr. 4 Čára izotropní stlačitelnosti a predikce Cam-clay modelu

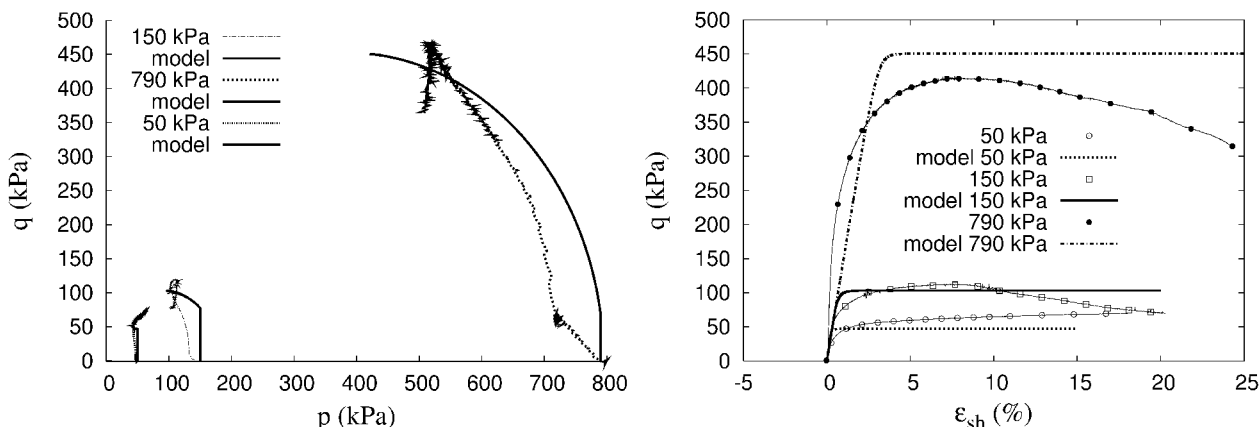


Obr. 5 Parametrická studie provedená pro kalibraci parametru G

konsolidované zeminy. Z tohoto důvodu je při použití modelu Cam-Clay nutné respektovat, že není vhodný pro modelování geotechnických problémů u nichž dochází pouze k malým deformacím, je však vhodným základním modelem pro studium degradace mezerovitosti spojené s kolapsibilním chováním výsypkového materiálu (Mašín, 2004). Parametr G byl kalibrován na základě parametrické studie s použitím zkoušky při počátečním napětí 790 kPa (obr. 5). Zvolena byla hodnota $G = 5$ MPa (Tab. 1).

Předpověď laboratorních zkoušek

Modifikovaný Cam-Clay model s parametry identifikovanými v předchozím odstavci byl použit k předpovědi jednotlivých provedených laboratorních zkoušek. Velikost překonsolidačního napětí p_c byla pro jednotlivé zkoušky počítána z počátečního čísla pórovitosti a pozice čáry prvotního izotropního přitížení, definované parametry N a λ^* . Dráhy napětí jednotlivých zkoušek v grafu p - q jsou zobrazeny na obr. 6 (kromě zkoušky 80 kPa, jež probíhala nestandardním způsobem). Je zřejmé, že model korektně předpovídá vývoj pórových tlaků v závislosti na překonsolidaci jednotlivých vzorků. Na obr. 6 jsou rovněž znázorněny pracovní diagramy. I přes drobný rozptyl měření a simulace, způsobený zakřiveností obálky pevnosti a konstantním smykovým modulem, je soulad mezi experimentem a simulací uspokojivý.



Obr. 6 Dráhy napětí (vlevo) a pracovní diagramy (vpravo) laboratorních zkoušek porovnané s předpovědí Cam-Clay modelu

Závěr

Provedené laboratorní zkoušky byly využity pro kalibraci konstitučního modelu, který byl vybrán pro modelování materiálu výsypek ze dvou důvodů. Jednak pro svou vhodnost k simulaci chování jemnozrnných zemin v oboru větších přetvoření, za druhé pro možnost aplikace konceptu sensitivity. Ta je navrhována pro modelování strukturních změn spjatých s degradací intergranulární pórovitosti výsypkového materiálu (Mašín, 2004). Byl demonstrován relativně dobrý soulad experimentálních dat s predikcí modelu i pro zkoušky, které nebyly využity k jeho kalibraci.

Poděkování

Prezentované práce jsou podporovány grantem GAUK 331/B-GEO/PřF a grantem GAČR 205/03/1467.

Literatura

- Boháč, J., Herbstová, V., Kořán, P. and Vogel, T. (2003) Properties of unsaturated colliery clayfills in North-Western Bohemia. Proc. 13ECSMGE, Prague, Vol. 1, 33-36.
- Cotecchia a Chandler (2000) A general framework for the mechanical behaviour of clays. Geotechnique 50, No. 4, 431-447
- Dykast (1993) Vlastnosti výsypek SHR z hlediska jejich zástavby. KDP, FSv ČVUT Praha.
- Feda (1998) Fragmentary clay – a difficult waste material. Eng. Geology 51, 77-88.
- Herbstová a Boháč (2004) Mechanické vlastnosti výsypkového materiálu. Sborník 32. konference Zakládání staveb Brno 2004, připravuje se.
- Herštus et al. (2003) Sanace a revitalizace oblastí a staveb s negativními relikty energetické činnosti, etapa I-1/03: Výzkum deformačních parametrů odvalů, odkališť a výsypek, zak. č. 103391, AGE Praha, prosinec 2003.
- Kurka (2001) Zatěžovací velkopokus základové půdy tvořené důlními výsypkami zlepšené štěrkovými pilíři. Sborník Polní geotechnické metody 2001, Ústí nad Labem, str. 42-47.
- Mašín (2004) Koncept senzitivity - nástroj pro konstituční modelování materiálu výsypek hnědouhelných dolů. Sborník 32. konference Zakládání staveb Brno 2004, připravuje se.
- Roscoe a Burland (1968) On the generalised stress-strain behaviour of wet clay. J. Heyman a F. A. Leckie (eds.), Engineering plasticity, pp 535-609. Cambridge, CUP.
- Škopek a Boháč (2004) Site investigation by trial embankments. Proc. ISC-2, Porto 2004, v tisku.