

LABORATORNÍ A KONSTITUČNÍ MODEL PRO JÍLY S CEMENTAČNÍMI VAZBAMI

Mgr. Jana Trhlíková

Univerzita Karlova v Praze

Ing. Jan Boháč, CSc.

Univerzita Karlova v Praze

RNDr. David Mašín, PhD.

Univerzita Karlova v Praze

Laboratory and constitutive model for a cemented clay

Kaolin clay and Portland cement were used to create artificial cementation bonds in laboratory specimens. The research consisted of K_0 and isotropic compression and strength testing (CIUP triaxial) of both pure and cemented kaolin. Debonding was identified from the development of shear stiffness measured by axial LVDTs during triaxial compression probes, and by shear wave propagation in the specimens. The data obtained from the laboratory study made it possible to calibrate and develop the hypoplastic constitutive model.

1. ÚVOD

Mechanické chování přírodních jíly je významně ovlivněno existencí struktury (kombinace stavby a vazeb), vytvořené v průběhu a po skončení sedimentace. Testováním přírodních jíly s neporušenou strukturou byl prokázán její vliv na zvýšení pevnosti a snížení stlačitelnosti (viz např. Burland, 1990; Leroueil & Vaughan, 1990; Feda, 1995; Cotecchia & Chandler, 1997).

V praxi je odběr neporušených vzorků jílovitých zemin se zachovanou strukturou značně obtížný. Jinou možností pro zkoumání vlivu cementačních vazeb na mechanické chování jíly je simulace neporušených vzorků pomocí zemin s příměsí pojiva. Na základě srovnání zkoušek přírodních neporušených jíly a jíly s portlandským cementem (Feda, 2002; Horpibulsuk et al., 2004; Puppala et al., 2006) byl jako vhodné pojivo vybrán portlandský cement.

Pomocí laboratorních zkoušek na uměle zpevněném a čistém jílu byla provedena kalibrace hypoplastického konstitučního modelu pro jíly s nestabilní strukturou (Mašín, 2007) s využitím koncepce intergranulárního přetvoření (Niemunis & Herle, 1997). Výsledky zkoušek umožnily zdokonalení hypoplastického modelu nově navrženým vztahem závislosti tuhosti na napětí a sensitivitě.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Příprava vzorků

Pro přípravu modelového materiálu se použil průmyslově vyráběný kaolín z Kaznějova, typ KKA KA (obsah zrn o velikosti 0,2 mm max. 0,005%, o velikosti 2 μ m min. 20%, vlhkost na mezi tekutosti 60 – 70%). Práškový kaolín byl smíchán s destilovanou vodou na vlhkost odpovídající vlhkosti na mezi tekutosti (cca 70%). Po homogenizaci (24 hodin) byla přimíchána

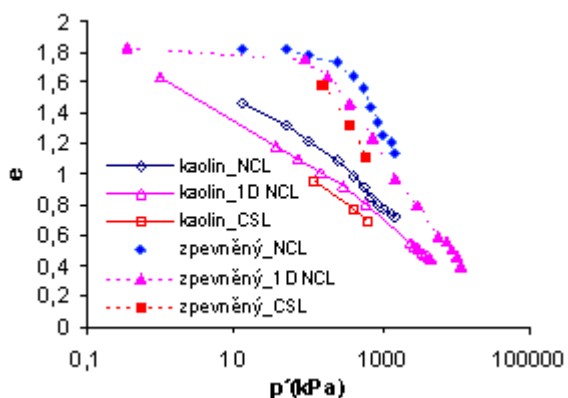
4% portlandského cementu (vzhledem k suchým hmotnostem). Směs byla důkladně promíchána (v hnětači po dobu 10 minut) a pasta vložena přímo do edometrických prstenců, v případě trojosých zkoušek do vysokého lisu pro přípravu rekonstituovaných trojosých vzorků (rovněž za K_0 napjatosti).

Po zalití destilovanou vodou byly edometrické vzorky zatíženy hmotností zatěžovacího pístu (svislé napětí přibližně 0,5 kPa) po dobu 14 dnů, trojosé vzorky svislým napětím 5 kPa po dobu 3 dnů. Po vyjmutí z lisu byly trojosé vzorky osazeny do trojosého přístroje, nasyceny a konsolidovány. Celková příprava trojosých vzorků před samotnými zkouškami trvala minimálně 14 dnů.

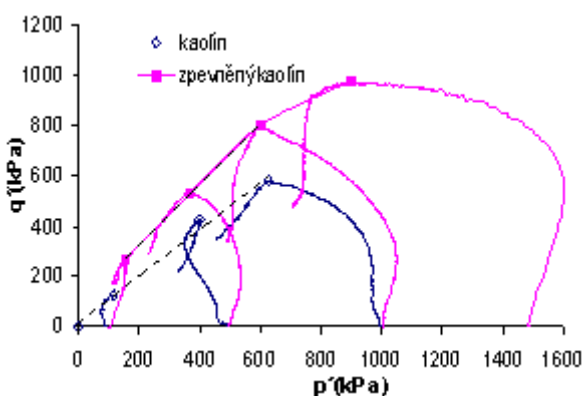
2.2 Stlačitelnost

Laboratorní studie se zabývala jednoosou a izotropní stlačitelností čistého a cementovaného (zpevněného) rekonstituovaného jílu (obr. 1). Zkoušky jednoosé stlačitelnosti zpevněného jílu byly provedeny v edometrickém přístroji s maximálním osovým napětím 16 MPa. Maximální aplikované osově napětí u čistého kaolínu bylo 7 MPa. Pro určení izotropní stlačitelnosti byly trojosé vzorky postupně konsolidovány až do maximálního napětí 1500 kPa.

Vliv cementačních vazeb se projevuje především nepatrným stlačováním zpevněného vzorku při jednoosém i izotropním stlačování až do dosažení určitého prahového středního efektivního napětí. S dalším růstem středního efektivního napětí dochází k rostoucímu stlačování vzorku v závislosti na porušování cementačních vazeb, křivka stlačitelnosti se přibližuje ke křivce stlačitelnosti čistého kaolínu. Aplikovaná napětí nebyla dostatečně vysoká, lze však očekávat, že po úplném porušení vazeb je průběh křivky stlačitelnosti stejný jako u nezpevněného vzorku (obr. 1).



Obr. 1 Průběh stlačování a čáry kritických stavů zpevněných vzorků a čistého kaolínu



Obr. 2 Dráhy napětí a obálka pevnosti pro zpevněné i nezpevněné vzorky kaolínu

2.3 Smyková pevnost

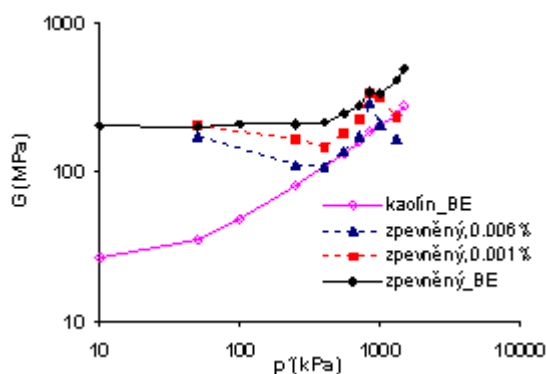
Smyková pevnost obou materiálů byla stanovena trojosými CIUP zkouškami. Vzorky zpevněného i čistého kaolínu byly před smykovými zkouškami nasyceny a jednostupňově konsolidovány při napětí 100, 500, 1000 kPa a 1500 kPa. Dráhy napětí pro smykové zkoušky jsou na obr. 2. Zpevněný materiál vykazuje vyšší smykové pevnosti v celém měřeném rozsahu napětí a vykazuje soudržnost 48,5 kPa pro linearizaci obálky vrcholové pevnosti v rozsahu 100 až 600 kPa. Při zvyšování středního efektivního napětí se materiál stává křehkým v důsledku progresivního porušování vazeb a obálka pevnosti je nelineární.

2.4 Tuhost při malých přetvořeních

Zplastizování a porušování cementačních vazeb se identifikovaly pomocí vývoje smykové tuhosti v závislosti na deformaci vzorků (lokální měření deformací na trojosých vzorcích) i jejich seismickým prozařováním („bender elements“ – BE). Měření probíhala v trojosém přístroji. Vzorky se izotropně stlačovaly a v několika úrovních p' se stlačování přerušilo a aplikovaly se neodvodněné smykové sondy při standardní totální smykové dráze $\Delta q/\Delta p=3$, při níž se měřila smyková tuhost pomocí ponorných LVDT. Přírůstky deviátorového napětí byly limitovány hodnotou 20 kPa.

Výsledky měření smykové tuhosti čistého i zpevněného jílu jsou na obr. 3. Zjištěná smyková tuhost rekonstituovaného čistého jílu v oblasti velmi malých přetvoření závisí na velikosti středního efektivního napětí. Smyková tuhost zpevněného jílu při velmi malých přetvořeních je vyšší a nezávislá na napětí až do dosažení prahové hodnoty středního efektivního napětí. Vlivem porušení cementačních vazeb při dalším zvyšování středního efektivního napětí se smyková tuhost vyvíjí podobně jako u nezpevněného jílu.

Z obr. 3 je také patrné, že smyková tuhost závisí na velikosti přetvoření. Naměřené hodnoty pomocí lokálního měření deformací (LVDT) při přetvoření vzorku o velikosti 0,006% jsou nižší než při přetvoření o velikosti 0,001%. Při velmi malém přetvoření (méně než 0,001%) jsou hodnoty smykové tuhosti, naměřené pomocí seismického prozařování, nejvyšší.



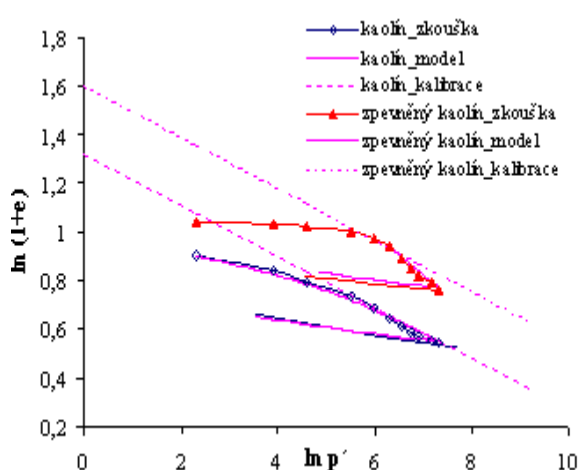
Obr. 3 Vývoj smykového modulu s rostoucím středním efektivním napětím pro čistý a zpevněný jíl, měřeno metodou BE a metodou lokálního měření deformací při smykových sondách (při 0,001 a 0,006% přetvoření)

3. KONSTITUČNÍ MODEL

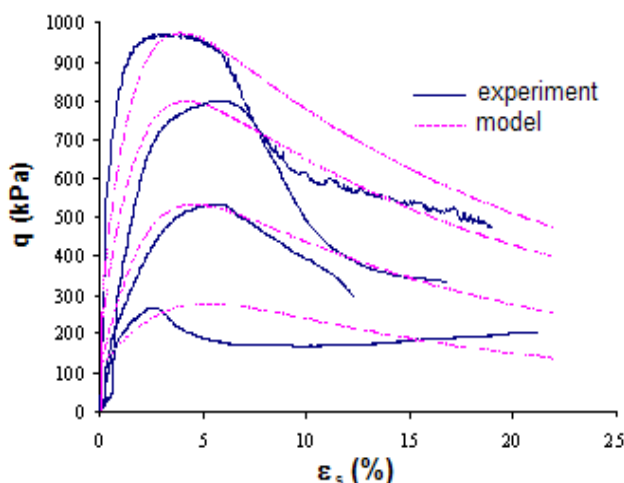
3.1 Kalibrace modelu

Jako vhodný model pro popis mechanického chování jílu s cementačními vazbami byl vybrán hypoplastický konstituční model pro jíly s nestabilní strukturou (Mašín, 2007), založený na základním hypoplastickém modelu pro jemnozrnné zeminy (Mašín, 2005). V první fázi byl kalibrován referenční model pro rekonstituovaný čistý jíl s využitím experimentálně stanoveného průběhu izotropní stlačitelnosti (obr. 4) a smykových zkoušek. Na základě výsledků zkoušky izotropní stlačitelnosti byly nakalibrovány parametry N , λ^* a κ^* . Parametry N a λ^* charakterizují pozici a sklon čáry prvotního izotropního přitížení. Parametr κ^* charakterizuje sklon čáry prvotního odlehčení. Pomocí smykových zkoušek byly určeny parametry φ_c a r , φ_c je kritický úhel vnitřního tření, parametr r má vliv na smykový modul. Parametry N , λ^* , κ^* , φ_c a r , kalibrované na základě zkoušek na rekonstituovaném jílu, jsou vhodné i pro modelování zpevněného jílu.

Pro zpevněnou zeminu byly dále kalibrovány parametry k , A a s_f , umožňující modelování cementovaných zemin na základě koncepce senzitivity (Cotecchia & Chandler, 2000). Pomocí těchto parametrů lze vyjádřit průběh porušování struktury s rostoucím přetvořením, od počátečního odolávání struktury vůči stlačování a smykovému namáhání až po její progresivní porušování. Předpovědi zkoušek izotropní stlačitelnosti jsou na obr. 4, pracovní diagramy smykových zkoušek na obr. 5. Povrcholová část pracovního diagramu není modelem věrně reprodukována z důvodu lokalizace deformace do smykové zóny.



Obr. 4 Kalibrace modelu na základě výsledků izotropní stlačitelnosti



Obr. 5 Kalibrace modelu na základě smykových zkoušek pro zpevněný jíl

Dalším zpřesněním výpočtů modelu pro oba typy zemin bylo využití koncepce intergranulárního přetvoření (Niemunis & Herle, 1997). Intergranulární přetvoření zdokonaluje předpověď nelineárního chování zemin v oboru velmi malých přetvoření. Koncepce zahrnuje v originální verzi dalších pět parametrů, R , m_R , m_T , β_r a χ . Parametry R , β_r a χ charakterizují pokles tuhosti s přetvořením, parametry m_R a m_T specifikují počáteční tuhost. Pro předpověď závislosti počáteční tuhosti na napětí, překonsolidaci a struktuře byl model modifikován a parametry m_R a m_T byly nahrazeny parametry A , n , m a l . Modifikace modelu je detailněji popsána v následujícím odstavci. Hodnoty všech ostatních parametrů získaných z kalibrace jsou uvedeny v tab.1.

Tab. 1 Parametry hypoplastického konstitučního modelu pro jíl s cementačními vazbami

N	λ^*	κ^*	ϕ_c	r	k	A	s_f	R	β_r	χ
1,32	0,105	0,02	27,5	0,45	0,41	0,7	1	0,00012	1,05	3

3.2 Předpověď tuhosti při velmi malých přetvořeních

Vyhodnocení výsledků umožnilo navržení vztahu závislosti tuhosti na napětí a struktuře zeminy. Wroth a Houslyby (1985) navrhli pro písek vztah:

$$G/p_r = A (p'/p_r)^n \quad (1)$$

kde G je smykový modul tuhosti, p' je střední efektivní napětí, p_r je referenční napětí (obvykle 1 kPa) a bezrozměrné parametry A a n jsou závislé na vlastnostech zeminy.

Viggiani a Atkinson (1995) prokázali možnost využití rovnice (1) také pro normálně konsolidované jíly, přičemž parametry A a n závisí na indexu plasticity. Pro překonsolidované jíly rozšířili původní rovnici na:

$$G_0/p_r = A (p' / p_r)^n (p_p' / p')^m \quad (2)$$

kde p_p' je překonsolidační napětí, poměr p_p' / p' tedy představuje stupeň překonsolidace.

Čára konsolidace jílu se strukturou se nachází nad křivkou normální konsolidace (NCL) rekonstituované zeminy (obr. 4). Zdánlivý stupeň překonsolidace strukturované zeminy lze určit z poměru p_e' / p' , kde p_e' je Hvorslevovo ekvivalentní napětí na čáře NCL strukturované zeminy, odpovídající danému číslu pórovitosti e . Na základě laboratorních zkoušek z první části příspěvku byla rovnice (2) dále rozšířena tak, aby umožnila předpověď tuhosti jílu s nestabilní strukturou. Vliv struktury byl zahrnut pomocí senzitivity s , která je stavovou proměnnou modelu, a je definována jako poměr Hvorslevových ekvivalentních napětí na čáře NCL zpevněného a čistého jílu. Výsledná rovnice je:

$$G_0/p_r = A (p' / p_r)^n (p_e' / p')^m (s / s_f)^l \quad (3)$$

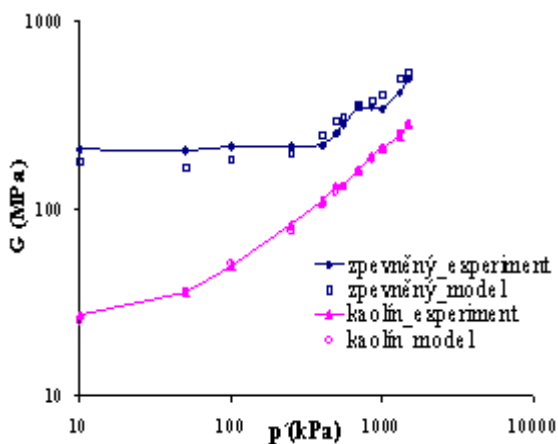
kde s_f je konečná senzitivita a odpovídá plné degradaci cementačních vazeb.

Rovnice byla ověřena na výsledcích měření tuhosti metodou seismického prozařování (obr. 6). Je zřejmé, že při využití shodných parametrů A, n a m pro čistou a zpevněnou zeminu rovnice věrně vystihuje počáteční tuhost obou materiálů. Získané parametry A, n, m a l jsou uvedeny v Tab. 2.

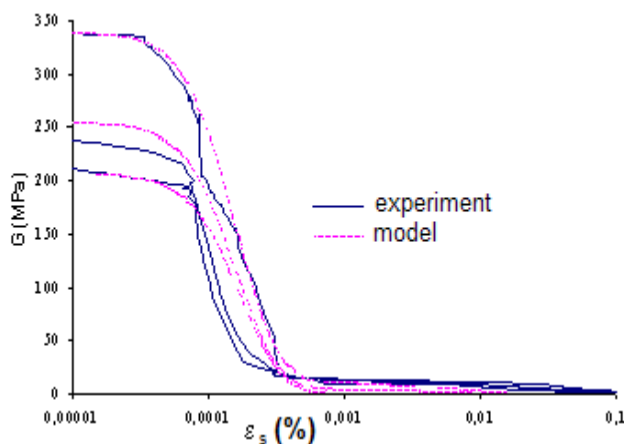
Tab. 2 Parametry hypoplastického konstitučního modelu pro jíl s cementačními vazbami kontrolující tuhost při velmi malých přetvořeních

A	n	m	l
1150	0,75	0,6	0,24

Rovnice (3) byla včleněna do hypoplastického modelu, parametry A, n, m a l tak nahradily původní parametry definující počáteční tuhost, m_R a m_T . Výsledný model tak umožňuje věrně reprodukovat tuhost při velmi malých přetvořeních (obr. 6), pokles tuhosti s přetvořením (obr. 7) i chování v oboru velkých přetvoření (obr. 4, 5).



Obr. 6 Tuhost (BE) – experiment a simulace



Obr. 7 Pokles tuhosti s přetvořením

4. ZÁVĚR

Kaolín se 4% portlandského cementu je vhodným materiálem pro laboratorní simulaci cementačních vazeb v jemnozrnné zemině.

Degradace smykového modulu, měřeného při smykových sondách i seismickým prozařováním trojosých vzorků, je vhodným indikátorem zániku cementačních vazeb.

Pro popis mechanického chování cementovaného jílu byl navržen a kalibrován hypoplastický model pro nestabilní (degradující) cementaci. Model velmi dobře simuluje mechanické chování cementovaného jílu při izotropní a jednoosé stlačitelnosti a trojosém smyku.

5. PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují za finanční podporu výzkumu grantem GAAV IAA201110802 a VZ MSM0021620855.

LITERATURA

- Burland, J.B. (1990): On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, **40**(3), 329-378.
- Cotecchia, F. & Chandler, R.J. (1997): The influence of structure on the pre-failure behaviour of a natural clay. *Géotechnique*, **47**(3), 523-544.
- Cotecchia, F. & Chandler, R.J. (2000): A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Géotechnique*, **50**(4), 431-447.
- Feda, J. (1995): Behaviour of a cemented clay. *Can. Geotech. J.*, **32**, 899-904.
- Feda, J. (2002): Simulace chování neporušených vzorků zemin. *Geotechnika*, **1**, 3-5.
- Horpibulsuk, S., Bergado, D.T. & Lorenzo, G.A. (2004): Compressibility of cement-admixed clays at high water content. *Géotechnique*, **54**(2), 151-154.
- Leroueil, S. & Vaughan, P.R. (1990): The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, **40**(3), 467-488.
- Mašín, D. (2005): A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **29**(4), 311-336.
- Mašín, D. (2007): A hypoplastic constitutive model for clays with meta-stable structure. *Can. Geotech. J.*, **44**, 363-375.
- Niemunis, A., Herle, I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mech. of Cohes.-Frict. Mater.*, **2**, 279 – 299.
- Puppala, A.J., Kadam, R., Madhyannapu, R.S. & Hoyos, L.R. (2006): Small-strain shear moduli of chemically stabilized sulfate-bearing cohesive soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **132**(3), 322-336.
- Viggiani, G. & Atkinson, J.H. (1995): Stiffness of fine-grained soil at very small strains. *Géotechnique*, **45**(2), 249-265.
- Wroth, C.P. & Houlsby, G.T. (1985): Soil mechanics – property characterisation, and analysis procedures. *Proc 11th Conf. Soil Mech.*, San Francisco, **1**, 1-55.