

## ■ Laboratorní a konstituční model cementovaného jílu

Zpevněné vzorky jílu byly připraveny ze směsi kaolínu a portlandského cementu. Provedly se laboratorní zkoušky pevnosti, jednoosé a izotropní stlačitelnosti zpevněného i čistého kaolínu. Pomocí vývoje smykové tuhosti, měření seismickým prozařováním a měřením deformací a napětí trojosých vzorků, bylo sledováno porušování cementačních vazeb. Laboratorní data umožnila kalibraci a zdokonalení hypoplastického konstitučního modelu.

Studium přírodních jíílů s neporušenou strukturou (kombinace stavby a vazeb) prokázalo vliv struktury na zvýšení pevnosti a snížení stlačitelnosti [1], [7], [4], [2]. V praxi je však odběr neporušených vzorků se zachovanou strukturou značně obtížný. Vhodnou alternativou pro zkoumání vlivu cementačních vazeb na mechanické chování jíílů, použitou v této práci, je simulace neporušených vzorků pomocí příměsi pojiva. Na základě srovnání zkoušek přírodních neporušených jíílů a jíílů s portlandským cementem [5], [6], [11] byl jako vhodné pojivo vybrán portlandský cement.

### EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### Příprava vzorků

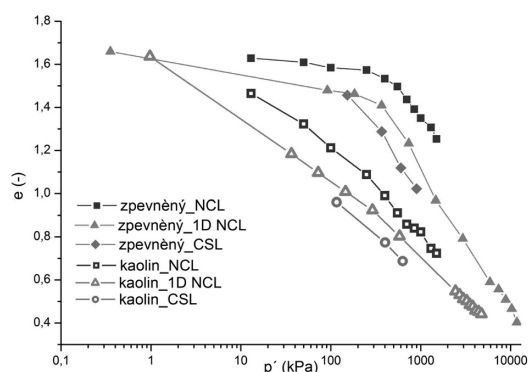
Pro přípravu modelového materiálu se použil průmyslově vyráběný kaolín z Kaznějova, typ KKA KA (obsah zrn o velikosti 0,2 mm max. 0,005 %, o velikosti 2  $\mu\text{m}$  min. 20 %, vlhkost na mezi tekutosti 60–70 %). Práškový kaolín byl smíchán s destilovanou vodou na vlhkost odpovídající vlhkosti na 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.

#### 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 osové napětí u čistého kaolínu bylo 7 MPa. Pro určení izotropní stlačitelnosti byly trojosé vzorky postupně konsolidovány ve stupních, v případě cementovaného jílu plynule přitěžovány až do maximálního napětí 1 500 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 roz-

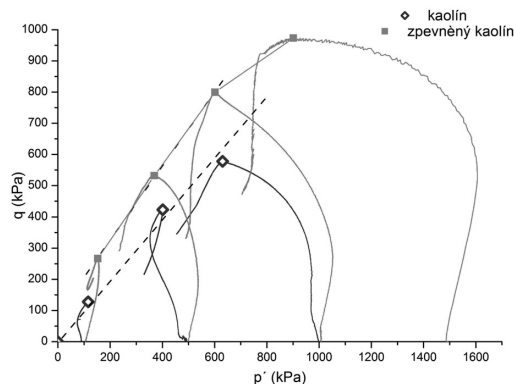


Obr. 1 – Průběh stlačování a čáry kritických stavů zpevněných vzorků a čistého kaolínu

toucímu 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).

#### Smyková pevnost

Smyková pevnost obou materiálů byla stanovena trojosými CIUP zkouškami (izotropně konsolidovaná neodvodněná zkouška s měřením pórového tlaku). 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.



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

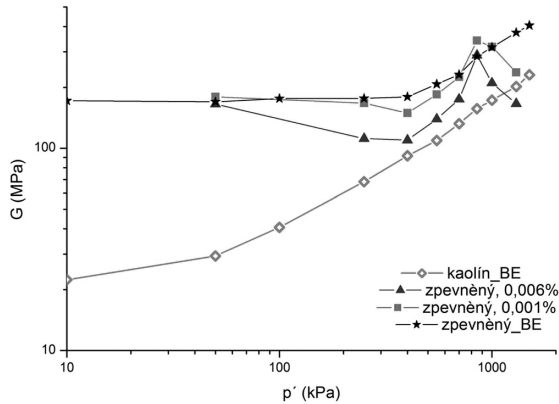
#### Tuhost při malých přetvořeních

Zplastizování a porušování cementačních vazeb se identifikovalo 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 (Linear Variable Differential Transformer). Přírůstky deviatorového napětí byly limitovány hodnotou 20 kPa.

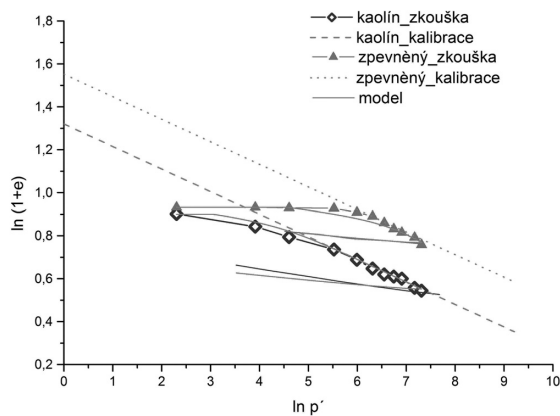
Výsledky měření smykové tuhosti čistého i zpevněného jílu jsou na obr. 3. Zjištěná smyková tuhost rekonstituovaného čistého jílu v oblasti velmi malých přetvoření závisí na velikosti středního efektivního napětí. Smyková tuhost zpevněného jílu při velmi malých přetvořeních je vyšší a nezávislá na napětí 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 jílu, měřeno metodou BE a metodou lokálního měření deformací při smykových sondách (při 0,001 a 0,006 % přetvoření)



Obr. 4 – Kalibrace modelu na základě výsledků izotropní stlačitelnosti

## KONSTITUČNÍ MODEL

### Kalibrace modelu

Jako vhodný model pro popis mechanického chování jílu s cementačními vazbami byl vybrán hypoplastický konstituční model pro jílu s nestabilní strukturou [9], založený na základním hypoplastickém modelu pro jemnozrnné zeminy [8]. V první fázi byl kalibrován referenční model pro rekonstituovaný čistý jílu s využitím experimentálně stanoveného průběhu izotropní stlačitelnosti (obr. 4) a smykových zkoušek. Na základě výsledků zkoušky izotropní stlačitelnosti byly kalibrovány parametry  $N$ ,  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$ . Parametry  $N$  a  $\lambda^*$  charakterizují pozici a sklon čáry prvotního izotropního přitížení. Parametr  $\kappa^*$  charakterizuje sklon čáry prvotního odlehčení. Pomocí smykových zkoušek byly určeny parametry  $\varphi_c$  a  $r$ ,  $\varphi_c$  je kritický úhel vnitřního tření, parametr  $r$  má vliv na smykový modul. Parametry  $N$ ,  $\lambda^*$ ,  $\kappa^*$ ,  $\varphi_c$  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 zemín na základě koncepce senzitivity [3]. 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. Povrho-

lová část pracovního diagramu není modelem věrně reprodukována z důvodu lokalizace deformace do smykové zóny.

Dalším zpřesněním výpočtů modelu pro oba typy zemín bylo využití koncepce intergranulárního přetvoření [10]. Intergranulární přetvoření zdokonaluje předpověď nelineárního chování zemín v oboru velmi malých přetvoření. Koncepce zahrnuje v originální verzi dalších pět parametrů,  $R$ ,  $m_R$ ,  $m_T$ ,  $\beta_r$  a  $\chi$ . Parametry  $R$ ,  $\beta_r$  a  $\chi$  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  $A_G$ ,  $n$ ,  $m$  a  $l$ . Modifikace modelu je detailněji popsána v následujícím odstavci. Hodnoty všech ostatních parametrů získaných z kalibrace jsou uvedeny v tabulce 1.

### Předpověď tuhosti při velmi malých přetvořeních

Vyhodnocení výsledků umožnilo navržení vztahu závislosti tuhosti na napětí a struktuře zeminy.

Viggiani a Atkinson [12] prokázali možnost výpočtu smykového modulu jílu pomocí rovnice:

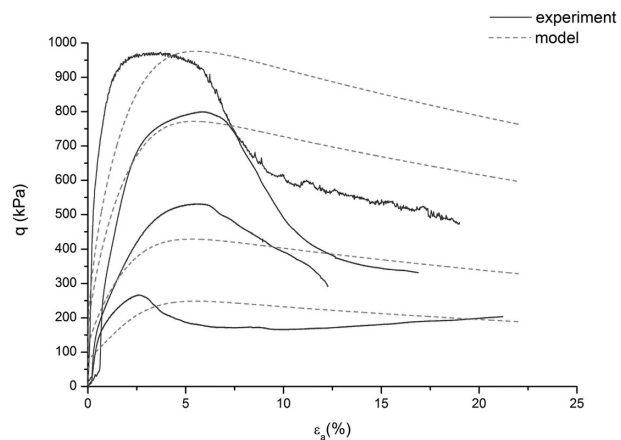
$$\frac{G_0}{p_r} = A_G \left( \frac{p'}{p_r} \right)^n \left( \frac{p'_b}{p'} \right)^m \quad (1)$$

kde  $G$  je smykový modul,  $p'$  je střední efektivní napětí,  $p_r$  je referenční napětí (obvykle 1 kPa) a  $p'_b$  je překonsolidační napětí. Poměr  $p'_b/p'$  tedy představuje stupeň překonsolidace. Bezrozměrné parametry  $A_G$ ,  $n$  a  $m$  jsou závislé na vlastnostech zeminy.

Čára konsolidace jílu se strukturou se nachází nad křivkou normální konsolidace (NCL) rekonstituované zeminy (obr. 4). Zdálnivý 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:

$$\frac{G_0}{p_r} = A_G \left( \frac{p'}{p_r} \right)^n \left( \frac{p'_c}{p'} \right)^m \left( \frac{s}{s_f} \right)^l \quad (2)$$

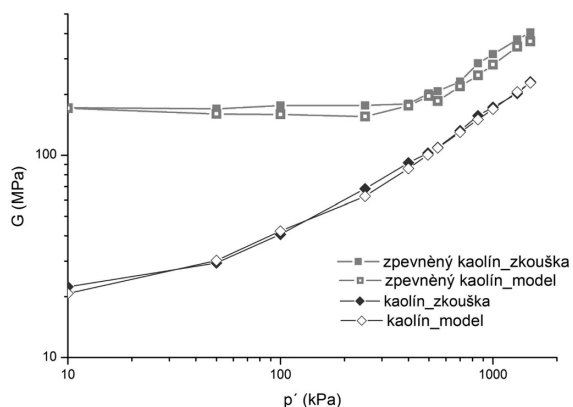
kde  $s_f$  je konečná senzitivity a odpovídá plné degradaci cementačních vazeb.



Obr. 5 – Kalibrace modelu na základě smykových zkoušek pro zpevněný jílu

Tab. 1 – Parametry hypoplastického konstitučního modelu pro jílu s cementačními vazbami

$N$	$\lambda^*$	$\kappa^*$	$\varphi_c$	$r$	$k$	$A$	$s_f$	$R$	$\beta_r$	$\chi$
1,32	0,105	0,014	27,5	0,45	0,25	0,4	1	0,00012	1,05	3



Obr. 6 – Tuhost (BE) – experiment a simulace

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

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

$A_G$	$n$	$m$	$l$
1020	0,73	0,65	0,24

Rovnice (2) byla včleněna do hypoplastického modelu, parametry  $A_G$ ,  $n$ ,  $m$  a  $l$  tak nahradily původní parametry definující počáteční tuhost,  $m_R$  a  $m_T$ . Mašín [8] odvodil vzorec pro výpočet počátečního smykového modulu  $G_0$  hypoplastickým modelem:

$$G_0 = \frac{m_R}{r\lambda^*} p \quad (3)$$

Využitím rovnice (3) v kombinaci s rovnicí (2) můžeme vyjádřit původní parametr modelu  $m_R$  jako proměnnou:

$$m_R = r\lambda^* A_G \left(\frac{p'}{p_r}\right)^{(n-1)} \left(\frac{p'}{p_r}\right)^m \left(\frac{s}{s_f}\right)^l \quad (4)$$

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).

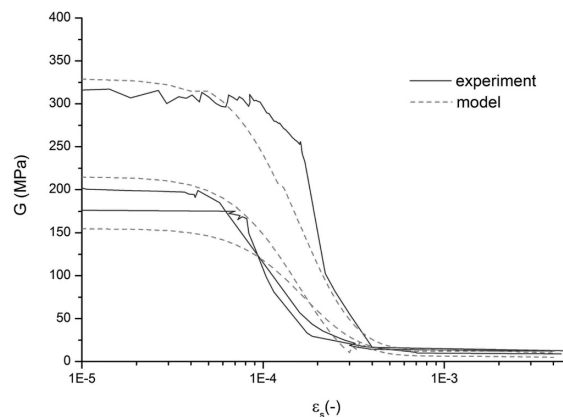
## ZÁVĚR

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.

### Laboratory and constitutive model for cemented clay

*Kaolin clay and Portland cement were used to create artificial cementation bonds in laboratory specimens. The research consisted of K0 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 further develop the hypoplastic constitutive model.*



Obr. 7 – Pokles tuhosti s přetvořením

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.

Autoři děkují za finanční podporu výzkumu grantem GAUK 43-203422, GAAV IAA201110802 a VZ MSM0021620855.

Mgr. Jana Trhlíková,  
jana.trhlikova@email.cz,  
Ing. Jan Boháč, CSc.,  
bohac@natur.cuni.cz,  
RNDr. David Mašín, PhD.,  
masin@natur.cuni.cz,  
Přírodovědecká fakulta,  
Univerzita Karlova v Praze

## LITERATURA:

- [1] Burland, J. B. (1990): On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40(3), 329–378
- [2] Cotecchia, F. & Chandler, R. J. (1997): The influence of structure on the pre-failure behaviour of a natural clay. *Géotechnique*, 47(3), 523–544
- [3] Cotecchia, F. & Chandler, R. J. (2000): A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Géotechnique*, 50(4), 431–447
- [4] Feda, J. (1995): Behaviour of a cemented clay. *Can. Geotech. J.*, 32, 899–904
- [5] Feda, J. (2002): Simulace chování neporušených vzorků zemin. *Geotechnika*, 1, 3–5
- [6] Horpibulsuk, S., Bergado, D. T. & Lorenzo, G. A. (2004): Compressibility of cement-admixed clays at high water content. *Géotechnique*, 54(2), 151–154
- [7] Leroueil, S. & Vaughan, P. R. (1990): The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40(3), 467–488
- [8] Mašín, D. (2005): A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(4), 311–336
- [9] Mašín, D. (2007): A hypoplastic constitutive model for clays with meta-stable structure. *Can. Geotech. J.*, 44, 363–375
- [10] Niemunis, A., Herle, I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mech. of Cohes.-Fric. Mater.*, 2, 279–299
- [11] 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
- [12] Viggiani, G. & Atkinson, J. H. (1995): Stiffness of fine-grained soil at very small strains. *Géotechnique*, 45(2), 249–265