

# NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ JÍLOVÉHO MASIVU

## ČÁST 1: KONSTITUČNÍ VZTAH A STANOVENÍ PARAMETRŮ

*Současné programy pro numerickou analýzu geotechnických konstrukcí v zeminách zpravidla nabízejí několik pružnoplástických konstitučních modelů. V geotechnické praxi je však nejčastěji využíván model nejjednodušší, Mohr-Coulombův (M-C model). V článku se stručně shrnují hlavní nevýhody M-C modelu, který je pro popis mechanického chování zemin (jemnozrnných i hrubozrnných) velmi málo vhodný, a stručně je charakterizován nový hypoplastický model pro jíly jako reprezentativní zástupce pokročilých modelů pro zeminy jemnozrnné. Pokročilý konstituční model má ve své základní verzi stejný počet parametrů jako M-C model, přičemž jejich stanovení je jednodušší. Pokročilý model navíc umožňuje zohlednění nelineárního chování zemin v oboru velmi malých přetvoření a jeho parametry jsou nezávislé na stavu zeminy, což M-C model neumožňuje. Konkrétní použití pro analýzu okrajové úlohy a ukázky výhod pokročilých modelů budou, vzhledem k omezenému prostoru, prezentovány v navazujícím článku v dalším čísle časopisu Zakládání.*

### Úvod

Ačkoli zeminy patří k nejstarším stavebním materiálům a rovněž počátky mechaniky zemin jako samostatné disciplíny lze datovat již do počátku dvacátého století, některé aspekty mechanického chování zemin stále nejsou v inženýrské praxi odpovídajícím způsobem zohledněny. Je patrný značný pokrok numerických metod pro geotechnické analýzy, jejichž limitujícím faktorem však jsou materiálové – konstituční – vztahy, které často nevyužívají poznatky mechaniky zemin, ale ani výpočetní možnosti soudobých programů.

Je dobře známo, že chování zemin je závislé na stavových proměnných, jako jsou napětí, pórovitost nebo stupeň překonsolidace. Dalším významným faktorem je značná nelinearita chování zemin. Oba aspekty se však při praktických řešeních velmi často ignorují. Tím lze také patrně vysvětlit, že většina numerických analýz v ČR je stále prováděna M-C modelem, ačkoli je to model pro zeminy obecně nevhodný, protože stavovou závislost a nelinearitu nezohledňuje. Využití M-C modelu je zjevně podporováno praxí ostatních stavebních disciplín, v nichž stav nehraje prvořadou úlohu v chování materiálů, pro zeminy je to však přístup nevhodný.

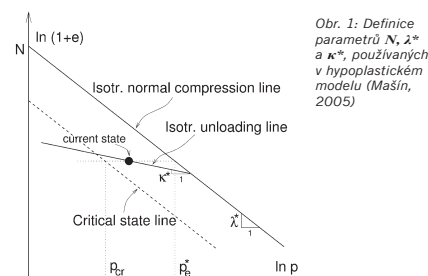
V tomto textu seznamujeme s hypoplastickým konstitučním modelem pro jíly, jenž ve své základní verzi potřebuje pět parametrů, stejně jako M-C model. Na rozdíl od něj však lépe vystihuje chování zemin a při obohacení o další – poměrně dobře fyzikálně interpretovatelné – konstituční parametry modeluje podstatné rysy chování zeminy – závislost tuhosti na přetvoření, překonsolidaci apod. Díky své hierarchické povaze navíc umožňuje další rozšíření, např. modelovat cementaci, vliv kapilárního sání nenasycených zemin, dvojitou pórovitost atd. Parametry modelu jsou fyzikálně definovány a lze je stanovit pomocí laboratorních experimentů, z nichž některé se mohou zdát až triviální, např. stanovení pevnosti v kritickém stavu. Jejich oprávněnost je však bohatě dokumentována experimentálními poznatky mechaniky zemin a podložena ucelenou teorií kritických stavů, která je vyvíjena od poloviny dvacátého století (Schofield and Wroth, 1968; Wood, 1990). Model umí korektně modelovat také nelinearitu smykového modulu a vstupní data lze v podmínkách soudobé laboratoře zemin získat poměrně jednoduše, jak v článku ukazujeme. Ve druhé části, v navazujícím článku, budeme prezentovat využití zpětné analýzy

založené na datech o chování skutečné stavby (prototypu). Článek se soustředí právě na tyto tři okolnosti numerického modelování: výstižnost konstitučního modelu, kalibraci parametrů a porovnání numerického modelu s chováním prototypu. Numerická implementace popisovaného konstitučního modelu je volně dostupná na internetu na webově adrese [www.soilmodels.info](http://www.soilmodels.info). Na stránce je jednak dostupný „single element program“ vhodný pro simulaci laboratorních zkoušek, ale zejména implementace pro programy metody konečných prvků, jako jsou PLAXIS, ABAQUS a Tochnog Professional. Model je tedy k dispozici odborné veřejnosti pro řešení praktických úloh v jílovitých zeminách, jako jsou tunely, stavební jámy a podobně.

### Parametry a stavové proměnné; nelineární charakter zemin

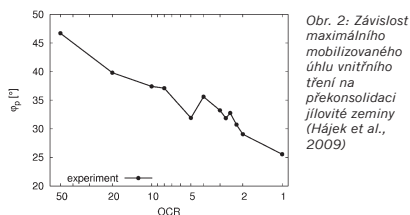
V geotechnice je třeba respektovat existenci dvou základních skupin veličin pro popis mechanického chování zemin. První skupinu tvoří veličiny, které nejsou závislé na stavu zeminy, a které je možno považovat za skutečné parametry, tj. za konstanty. Druhou skupinu tvoří veličiny, které jsou na stavu zeminy závislé. Před popisem veličin charakterizujícím mechanické chování zemin je nutno vysvětlit, jak popisujeme stav zeminy. Stav zeminy popisujeme pomocí stavových veličin. Nejdůležitější stavová veličina je efektivní napětí. Pro popis napjatosti se v mechanice zemin nejčastěji využívají invarianty efektivního napětí  $p'$  (střední napětí) a  $q$  (deviatorové napětí). V následujícím textu představují všechna napětí napětí efektivní. Dále je pro popis napjatosti zemního masivu často využívána hodnota zemního tlaku v klidu  $K_0$ , definovaná jako poměr horizontálního a vertikálního efektivního napětí. Další důležitou skupinou stavových proměnných jsou proměnné popisující relativní objem pórů zeminy vzhledem k celkovému objemu zeminy. V následujícím textu budou využívány dvě základní veličiny: číslo pórovitosti  $e$  a stupeň překonsolidace OCR. Číslo pórovitosti  $e$  je definováno jako poměr objemu pórů zeminy a objemu pevné fáze (zrn). Hodnota OCR je definována jako poměr maximální hodnoty středního efektivního napětí  $p'_c$ , kterému byla zemina v minulosti vystavena ( $p'_c$ ), a aktuální hodnoty  $p'$ . Vzhledem k fixní pozici čáry normálního stlačení (NCL) (obr. 1) je popis stavu zeminy pomocí čísla pórovitosti  $e$  a pomocí hodnoty stupně překonsolidace OCR ekvivalentní, protože každé kombinaci  $e$  a  $p'$  odpovídá jediná hodnota  $p'_c$ .

Jako příklad veličin popisujících mechanické vlastnosti zeminy, které nejsou závislé na stavu zeminy, můžeme uvést index stlačitelnosti  $C_c$ , tj. směrnici NCL v rovině  $(1+e)$  vs logaritmus středního napětí  $p'$ . Dále úhel vnitřního tření v kritickém stavu  $\varphi_c'$ , tj. směrnici čáry kritických stavů CSL v rovině smykové napětí  $\tau$  vs normálové napětí  $\sigma_n'$ . Skutečnými parametry jsou i ostatní veličiny popisující NCL a čáru kritických stavů CSL. Pro hypoplastický model se využívá logaritmické zobrazení čar NCL i CSL v rovině  $\ln(1+e)$  vs  $\ln p'$  místo zobrazení semilogaritmického. NCL je potom charakterizována směrnici  $\lambda^*$  a hodnotou  $\ln(1+e)$  pro jednotkové napětí  $N$ ,  $\kappa^*$  je směrnice přímký odlehčení a znovupřítížení. V případě CSL se jedná o směrnici  $\lambda^*$  v rovině  $\ln(1+e)$  vs  $\ln p'$  (obr. 1)



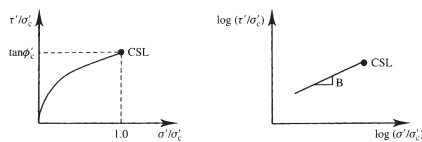
a úhel vnitřního tření  $\varphi_c'$  v rovině  $\tau$  vs  $\sigma_n'$ . Kromě výše uvedených veličin lze ke skutečným materiálovým konstantám jemnozrnných zemin řadit ještě konzistenční meze  $w_L$  a  $w_p$ . Konzistenční meze jsou závislé pouze na mineralogii a reprezentují pro danou zeminu neodvodněnou pevnost při přechodu z tekutého (kašovitého) do plastického a z plastického do pevného stavu zeminy. Definují plasticitu zemin ( $I_p$ ). Zeminy, jež mají různou plasticitu, mají různý sklon čar NCL a CSL, tj. různý parametr  $\lambda^*$ . Schofield a Wroth (1968) definovali poslední stavově nezávislý parametr zemin  $\Omega$ , o němž předpokládali, že je průsečíkem čar NCL všech zemin o různé plasticitě. Podrobnosti o začlenění konzistenčních mezí do teorie kritických stavů jsou nad rámec tohoto článku, lze je nalézt např. v publikacích Schofield a Wroth (1968), Schofield (2005) nebo Wood (1990). Je patrné, že další „parametry“ užívané v praxi skutečnými parametry nejsou, že jsou stavově závislými veličinami. Pozoruhodným důsledkem povahy výše uvedených parametrů zemin je, že lze všechny stanovit na rekonstituovaných vzorcích zeminy. Zjednodušeně řečeno jde o vzorky, které mají zrušenou původní strukturu a jejich chování (a parametry) je závislé pouze na mineralogii a charakteru zrn. V zahraniční literatuře se pro ně užívá pojem „intrinsic properties / parameters“. Postup přípravy rekonstituovaných vzorků je popsán v následující kapitole. V současné geotechnické praxi jsou často bohužel za parametry (konstanty) zeminy považovány i veličiny závislé na stavu zeminy, např. vrcholová pevnost ( $\varphi_p'$ ,  $c_p'$ ) nebo moduly (v dalším textu se

pro Youngův modul  $E$ , smykový modul  $G$  i objemový modul  $K$  užívá termín „tuhost“). Zásadní význam správného rozlišení mezi parametry a stavově závislými veličinami lze dobře demonstrovat na koncepci (odvodněné) vrcholové pevnosti, resp. její Mohr-Coulombově obálce. Ač je to zjevně nesprávné, standardně jsou v praxi „parametry“ vrcholové pevnosti  $\phi_p'$  a  $c_p'$  stanoveny tak, že vrcholovými stavy několika vzorků je proložena přímka. Vzorky jsou sice před zkouškou „identické“, ale před smykovou fází zkoušky jsou konsolidovány při různých normálových napětích. Získané „parametry“ nemožou být konstantami, protože i vrcholové stavy jednotlivých vzorků obecně odpovídají různým pórovitostem a  $\phi_p'$  i  $c_p'$  jsou zjevně funkcí pórovitosti (resp. čísla pórovitosti  $e$ ). Lineární Mohr-Coulombova obálka pevnosti je nevhodným způsobem prezentace výsledků zkoušek vrcholové pevnosti zemín. Příklad vlivu překonsolidace (stavu) na vrcholovou pevnost (resp. na mobilizovaný úhel vnitřního tření ve vrcholovém stavu) ukazuje obr. 2.



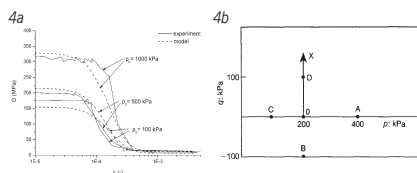
Obr. 2: Závislost maximálního mobilizovaného úhlu vnitřního tření na překonsolidaci jílovité zeminy (Hájek et al., 2009)

Pro vyjádření vrcholové pevnosti je vhodná mocninná nebo jiná nelineární funkce. Pokud je použita po vhodné normalizaci smykového a normálového napětí, např. normalizaci vzhledem k čáře CSL nebo NCL (jak ukazuje obr. 3),

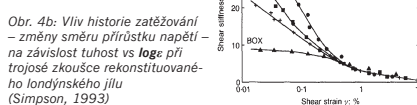


Obr. 3: Vyjádření vrcholové pevnosti mocninnou funkcí, tj. pomocí materiálových konstant  $\tan\phi_c'$  a  $B$  (Atkinson, 2007)

poskytuje skutečné parametry pro vrcholovou pevnost zeminy, nezávislé na stavu (pórovitosti, napětí). Pokročilé modely respektují tyto skutečnosti a např. v hypoplastickém modelu není třeba obálku vrcholové pevnosti specifikovat. Model je nelineární a vrcholové stavy spočítá ze zadaných parametrů. Dalším významným aspektem chování zemín je nelinearita tuhosti. Tuhost je závislá na úrovni přetvoření (obr. 4a), na úrovni napětí a na historii zatěžování (obr. 4b).

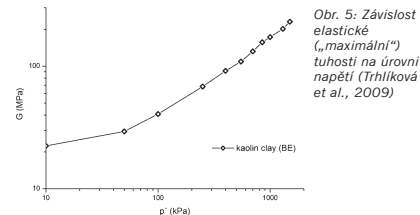


Obr. 4a: Typický průběh křivky vyjadřující závislost smykové tuhosti na logaritmu smykového přetvoření (Trhliková et al., 2009)



Obr. 4b: Vliv historie zatěžování – změny směru přírůstku napětí na závislost tuhosti vs loge při trojosé zkoušce rekonstituovaného londýnského jílu (Simpson, 1993)

Maximální (elastické) hodnoty nabývá tuhost pouze při velmi malých přetvořeních, tj. při poměrném přetvoření menším než cca  $10^{-3}$  %. Lze ji proto stanovit zpravidla pouze „dynamickými“ metodami, např. z rychlosti šíření vln zemínou, pouze výjimečně ji lze měřit např. při plynulém zatěžování pomocí ponorných LVDT na trojosém vzorku. Ani tato maximální elastická tuhost však není konstantou, ač je za ni často považována. Je závislá na úrovni efektivního napětí (obr. 5)



Obr. 5: Závislost elastické („maximální“) tuhosti na úrovni napětí (Trhliková et al., 2009)

a na stupni překonsolidace OCR. Lze tedy konstatovat, že tuhost, resp. ani jeden z modulů  $E$ ,  $G$ ,  $K$ , není skutečným parametrem zeminy. Numerické simulace musejí tuto skutečnost zohlednit. Nelinearitu a stavovou závislost zemín je třeba respektovat i při jednoduchých analytických postupech, tj. při ideálně pružných a ideálně plastických analýzách. Znamená to volit vstupní hodnoty („parametry“) podle intervalu „pracovních“ napětí. Je proto zřejmé, že používání např. tabulek hodnot vrcholové pevnosti, tuhosti a dalších stavově závislých veličin není správné, pokud není dobře specifikován stav zeminy. Naopak teoreticky zdůvodněné korelace mezi skutečnými zkouškami, doporučit. Úhel vnitřního tření jílu v kritickém stavu lze poměrně spolehlivě odhadnout z mineralogie, zrnitosti a konzistenčních mezí a podobně lze korelovat ostatní skutečné parametry zemín.

#### Postup přípravy rekonstituovaných vzorků zeminy

Rekonstituovaný vzorek jemnozrné zeminy je připraven z pasty, která byla zbavena předchozích důsledků přetvárné a napjatostní historie. Je sice pro stanovení parametrů opět z pasty jednoose zkonsolidován, ale za nízké úrovně napětí a projevy přetvárné a napjatostní historie jsou u něj omezeny na minimum. Před „rekonstituováním“ je pasta důkladně utřena při vlhkosti vyšší než  $w_L$ , zpravidla se požaduje vlhkost  $1,5 w_L$  (Burland, 1990). Na PŘF UK užíváme pro přípravu rekonstituovaného jílu hnětač na těsto. Důležité je, aby se před přípravou pasty zemina nesusila při zvýšených teplotách, např. při  $105^\circ\text{C}$ , kdy dochází ke změně zrnitosti, konzistenčních mezí a samozřejmě i dalších vlastností, např. pevnosti v kritickém stavu, jak pro brněnský jíl (těl) demonstroval Boháč (1999). Pro laboratorní stanovení parametrů („intrinsic properties“) zeminy se použijí běžné přístroje: v našem případě navrhuje trojosý přístroj, krabicový přístroj a oedometr. Pro zkoušky v krabici (rotační i translační) i v oedometru lze zpravidla „zkušební tělesa“ připravit z pasty přímo v přístroji, neboť přístroje mají pevnou stěnu a svislou deformaci při konsolidaci pasty lze vhodným opatřením

korigovat. Pro trojosou zkoušku takový postup použit nelze a nevhodnější metodou je příprava těles požadovaného průměru a výšky jednorozměrnou konsolidací pasty ve vysokém lisu (obr. 6).



Obr. 6: Příprava rekonstituovaného jílu pro trojosou zkoušku

Pro konsolidaci v lisu se užije malé vertikální zatížení, aby se omezila tvorba kompresní struktury, ale aby válečky bylo možné vyjmout a instalovat do trojosého přístroje. U zemín s vyšším obsahem siltu (např. spraš) lze použít svislé napětí cca  $20\text{ kPa}$ , u jílu s vysokou plasticitou zpravidla na PŘF UK používáme svislé napětí cca  $40$  až  $50\text{ kPa}$ .

Z popisu přípravy rekonstituovaného vzorku plyne zjevná výhoda pokročilého konstitučního modelu z hlediska geotechnického průzkumu. Model založený na skutečných („intrinsic“) parametrech zemín umožňuje redukovat počet potřebných neporušených vzorků a zkušební postupy jsou jednodušší, jak konkrétně ukazujeme i v dalším textu. Pochopitelně je pro simulaci praktických úloh nutné stanovit i další materiálové charakteristiky, pro něž je třeba odzkoušet i neporušené vzorky. Podrobnostem se věnujeme v kapitole o stanovení parametrů hypoplastického modelu.

#### Konstituční model

Hypoplastický model pro jílu (Mašin, 2005) je založen na teorii hypoplasticity. Jedná se o relativně nový přístup ke konstitučnímu modelování geomateriálů, vyvíjený nezávisle od osmdesátých let dvacátého století na univerzitách v Karlsruhe (např. Kolymbas, 1991; von Wolffersdorff, 1996) a Grenoble (např. Chambon et al., 1994). Model pro jemnozrné zeminy je založen na prvním přístupu, který je z pohledu využití v praxi vhodnější díky jasnému fyzikálnímu významu parametrů. Hypoplastické modely se svou povahou zásadně odlišují od modelů elasto-plastických, tedy od většiny existujících konstitučních modelů pro zeminy. V prvé řadě přetvoření není děleno na vratnou (elastickou) a nevratnou (plastickou) část. Dále není nutné zavádět klasické předpoklady elasto-plasticity jako plochu plasticity, plastický potenciál, podmínku konzistence apod. Hypoplastické modely ale i přesto předpovídají základní aspekty chování zemín, což je dáno nelineárním charakterem hypoplastické rovnice. Pro zjednodušenou představu, rovnice (1) ukazuje formulaci hypoplastického modelu pro jednorozměrný případ

$$\dot{\sigma} = L \dot{\epsilon} + N |\dot{\epsilon}| \quad (1)$$

V rovnici (1)  $\dot{\sigma}$  představuje rychlost napětí,  $\dot{\epsilon}$  představuje rychlost přetvoření a  $L$  a  $N$  představují moduly, pro něž platí  $L > N > 0$ . Je zřejmé, že díky absolutní hodnotě  $\dot{\epsilon}$  pro přitížení ( $\dot{\epsilon} < 0$ ) využívá se

znaménková konvence mechaniky kontinua při níž jsou stlačení záporná) rovnice předpovídá tuhost  $L - N$ , kdežto pro odlehčení tuhost  $L + N$ . Model tedy předpovídá nižší tuhost pro přitížení než pro odlehčení, aniž by byly potřebné dvě různé rovnice jako v případě elasto-plasticity. Hypoplastické modely pro zeminy jsou samozřejmě na rozdíl od rovnice (1) definovány v třírozměrném prostoru,  $\sigma$  a  $\varepsilon$  představují tenzory napětí a přetvoření,  $L$  a  $N$  jsou tenzory čtvrtého ( $L$ ) a druhého ( $N$ ) řádu a absolutní hodnota je nahrazena euklidovskou normou. Detaily matematické formulace hypoplastických modelů jsou mimo zaměření tohoto článku a zájemci jsou odkázáni na citovanou literaturu. Hypoplastický model pro jílu může být použit ve dvou verzích. Základní verze modelu umožňuje modelovat nelineární chování materiálů v oboru větších přetvoření a závislost chování na stavových proměnných (napětí a číslo pórovitosti). Neumožňuje však modelovat maximální (elastickou) tuhost v oboru velmi malých přetvoření. Základní model má pět parametrů. Parametry  $\varphi_c^*$ ,  $\lambda^*$ ,  $\kappa^*$  a  $N$  byly definovány v předchozí kapitole. Pátý parametr  $r$  kontroluje smykovou tuhost zeminy. Stanovení parametrů je popsáno v následujícím textu. Pro předpovědi maximální (elastické) tuhosti v oboru velmi malých přetvoření lze hypoplastický model obohatit o tzv. koncepci intergranulárních přetvoření, již vypracovali Niemunis a Herle (1997). Tato modifikace modelu vyžaduje dalších pět materiálových parametrů  $m_R$ ,  $m_P$ ,  $R$ ,  $\beta_r$  a  $\chi$ . Jejich kalibrace je také popsána dále.

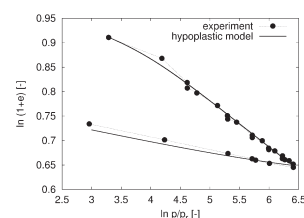
### Stanovení parametrů hypoplastického modelu Úhel vnitřního tření v kritickém stavu $\varphi_c^*$

Určení pevnosti v kritickém stavu, jež je základním parametrem řady moderních konstitučních modelů a také modelu hypoplastického, je poměrně snadné. Poslouží zkoušky rekonstituovaného materiálu. V případě sypkých hrubozrnných zemin, jež však nejsou předmětem tohoto článku, by byla metoda ještě jednodušší – změření úhlu přirozené sklonitosti. Nejvhodnější zkouškou pro stanovení pevnosti rekonstituovaného jílu je neodvodněná trojosá zkouška CIUP. Podmínkou zdárného zkoušení je homogenní přetváření při smyku, bez vzniku smykové plochy, což se nejlépe zajistí použitím tzv. kluzných destiček. Taková zkouška je ale nejen časově náročná (kvůli nízké hydraulické vodivosti rekonstituovaného jílu), kluzné podstavy představují i vyšší nároky technologické pro provoz komerční laboratoře. Trojosé zkoušky proto lze kombinovat se zkouškou rekonstituovaného jílu ve smykové krabici. Výhodnější než standardní translační krabicový přístroj je krabice rotační. Její výhodou je smyk bližší prostému smyku než u standardní smykové krabice a podstatně rychlejší průběh zkoušek než v trojosém přístroji (Najser a Boháč, 2005). Lze doporučit smyk jednoho rekonstituovaného válečku v trojosém přístroji a jednoduché a rychlé doplnění obálky ve smykové krabici.

### Parametry $N$ , $\lambda^*$ , $\kappa^*$

Parametry  $N$ ,  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$  je v principu možné stanovit na základě zkoušky triaxiální či oedometrické stlačitelnosti neporušeného vzorku. Stanovení všech parametrů  $N$ ,  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$  na neporušeném vzorku je ovšem často zkomplikováno vysokým překonsolidačním napětím vzorku, takže čáry normální konsolidace lze dosáhnout až v oborech napětí mimo rozsah běžných přístrojů. Většinou se tedy ve standardních laboratorních podmínkách využívá toho, že rekonstituované a neporušené vzorky mají stejnou hodnotu parametrů  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$ , a tyto parametry jsou určeny na základě zkoušek na rekonstituovaných vzorcích. Parametr  $N$  je závislý na struktuře zeminy, která je odlišná v neporušeném a rekonstituovaném stavu. Jeho hodnota by tedy měla být stanovena na základě zkoušky na neporušeném vzorku zeminy, jak je uvedeno dále.

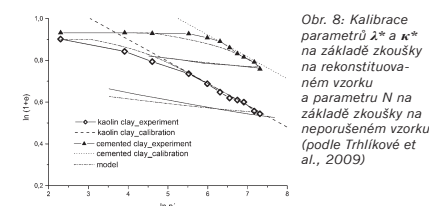
Parametry  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$  na rekonstituovaném vzorku lze stanovit v trojosém přístroji nebo v oedometru. Pokud se v trojosém přístroji zkouší alespoň jeden váleček pro úhel vnitřního tření v kritickém stavu, pak je před CIUP smykem vhodné provést plynulé izotropní přitěžování, jež poskytne směrnici  $\lambda^*$  a polohu  $N_{rec}$  izotropní NCL rekonstituovaného vzorku v rovině  $\ln(1+e)$  vs  $\ln p$ . Směrnici  $\kappa^*$  zjistíme izotropním odlehčením v trojosém přístroji. Příklad předpovědi zkoušky izotropního stlačení a odlehčení pomocí hypoplastického modelu je na obr. 7.



Obr. 7: Zkouška izotropního stlačení a odlehčení simulovaná hypoplastickým modelem (Mašin, 2005)

Směrnici NCL  $\lambda^*$  lze stanovit i z oedometrického stlačení rekonstituovaného vzorku a směrnici  $\kappa^*$  z oedometrického odlehčení. Stanovení  $\lambda^*$  z oedometrické zkoušky v zobrazení  $\ln(1+e)$  vs  $\ln \sigma_v^*$  a z triaxiální zkoušky v zobrazení  $\ln(1+e)$  vs  $\ln p^*$  je ekvivalentní. Oedometrickou zkoušku v zobrazení  $\ln(1+e)$  vs  $\ln \sigma_v^*$  lze použít i pro přibližný odhad parametrů  $N_{rec}$  a  $\kappa^*$ , tato kalibrace ovšem není zcela přesná, kvůli odlišné pozici oedometrické a izotropní čáry NCL a kvůli neznalosti hodnoty  $K_0$ . Jak již bylo zdůrazněno, hodnotu parametru  $N$  bychom měli zjišťovat na základě zkoušky stlačitelnosti na neporušeném vzorku zeminy. Stanovení jeho hodnoty je v případě pevných jílu komplikované vysokým překonsolidačním napětím vzorku. Pro jeho stanovení je tedy vhodnější oedometrická zkouška, která zpravidla v běžné laboratoři umožňuje dosažení vyšších napětí než zkouška triaxiální. V případě nižšího překonsolidačního napětí je ovšem možno využít i zkoušku triaxiální, která je vhodnější vzhledem ke znalosti středního normálového napětí a vzhledem k přímému měření NCL v izotropním stavu.

Stanovení parametrů  $N$ ,  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$  na základě zkoušek izotropní stlačitelnosti rekonstituovaného a neporušeného vzorku je demonstrováno na obr. 8. Neporušený vzorek byl v tomto případě laboratorně modelován pomocí umělého zpevnění zeminy cementací („kaolin“ v obr. 8 představuje rekonstituovaný vzorek a „zpevněný vzorek“ představuje neporušený vzorek).

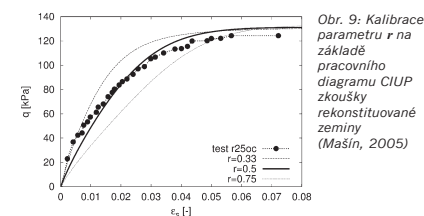


Obr. 8: Kalibrace parametrů  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$  na základě zkoušky na rekonstituovaném vzorku a parametru  $N$  na základě zkoušky na neporušeném vzorku (podle Trhlikové et al., 2009)

Obrázek ukazuje kalibraci parametrů  $\lambda^*$  a  $\kappa^*$  na základě zkoušky na rekonstituovaném vzorku a následně „posunutí“ čáry normální konsolidace (a tedy kalibraci parametru  $N$ , jež charakterizuje pozici NCL) na základě zkoušky na neporušeném vzorku. Obr. 8 dále ukazuje obě zkoušky simulované pomocí hypoplastického modelu.

### Parametr $r$ – smyková tuhost zeminy v oboru větších přetvoření

Parametr  $r$  můžeme stanovit na základě triaxiální smykové zkoušky (jak drénované CID, tak nedrénované CIUP), a to na rekonstituovaném i neporušeném vzorku. Pro jeho kalibraci je vhodné využít buď pracovní diagram smykové zkoušky rekonstituovaného vzorku, prováděné pro určení kritického úhlu vnitřního tření (viz výše), nebo pracovní diagram smykové zkoušky na neporušeném vzorku, pokud se pro zjištění tuhosti v oboru velmi malých přetvoření provádí (viz dále). Vzhledem k nelineárnímu chování zeminy (tedy postupnému poklesu tuhosti s přetvořením) není možné vyhodnotit parametr  $r$  přímo z experimentálních dat, ale je nutné provést simulaci smykové zkoušky pomocí hypoplastického modelu (buď pomocí MKP programu, který se využije pro řešení okrajové úlohy, nebo pomocí single element programu, jež je dostupný na adrese [www.soilmodels.info](http://www.soilmodels.info)). Parametr  $r$  ovlivňuje pracovní diagram smykové zkoušky tím způsobem, že pro jeho vyšší hodnoty dochází k pomalejšímu nárůstu deviatorového napětí s přetvořením (vyšší hodnota  $r$  tedy implikuje nižší tuhost materiálu). Příklad kalibrace parametru  $r$  na základě triaxiální nedrénované zkoušky CIUP je na obr. 9.



Obr. 9: Kalibrace parametru  $r$  na základě pracovního diagramu CIUP zkoušky rekonstituované zeminy (Mašin, 2005)

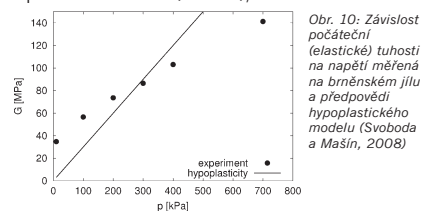
### Parametry smykové tuhosti v oboru velmi malých přetvoření $m_R$ , $m_P$ , $R$ , $\beta_r$ a $\chi$

Smyková tuhost v oboru malých a velmi malých přetvoření je závislá na struktuře zeminy. Kalibrace

parametrů, které ji popisují, musí být tedy provedena na základě zkoušek na neporušené zemině. Hypoplastický model obohacený o koncepci intergranulárních přetvoření popisuje jak závislost počáteční (elastické) tuhosti na napětí, tak pokles tuhosti s přetvořením. Velikost počáteční tuhosti, kterou měříme např. pomocí prozařování vzorku smykovými vlnami, určuje parametr  $m_R$  (a parametr  $m_T$ , jehož hodnota se v praktických aplikacích uvažuje shodná s parametrem  $m_R$ ). Její velikost je dána vztahem

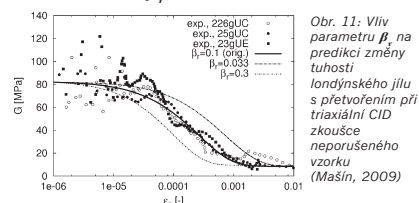
$$G_0 = \frac{m_R}{r\lambda^*} p' \quad (2)$$

Je tedy zřejmé, že model předpovídá lineární závislost elastické tuhosti na středním napětí. Z tohoto důvodu rovnice (2) nevystihuje přesně experimentální data (obr. 10),



její výhodou však je, že počáteční tuhost je kontrolována pomocí jediného nového parametru. Parametr  $m_T$  určuje velikost počáteční tuhosti při jiné změně směru dráhy přetvoření než parametr  $m_R$ , a jak bylo řečeno, v praktických aplikacích se většinou uvažuje  $m_T = m_R$ .

Další parametr  $R$  určuje velikost elastické oblasti v prostoru přetvoření a parametry  $\beta_T$  a  $\chi$  udávají rychlost změny tuhosti s přetvořením (příklad vlivu parametru  $\beta_T$  je na obr. 11).



Hodnoty parametrů  $R$ ,  $\beta_T$  a  $\chi$  je třeba, podobně jako parametr  $r$ , stanovit na základě parametrické studie simulováním laboratorních experimentů, při nichž je deformace vzorků měřena pomocí lokálních snímačů deformace, umístěných přímo na vzorku zeminy. V případě nedostupnosti takovýchto experimentů lze ovšem využít toho, že se velikost těchto parametrů pro různé zeminy příliš neliší, a pro výpočet pak lze využít „standardní hodnoty“. Pro modelování neporušených pevných jílu lze přibližně doporučit

$$R = 1e - 4, \beta_T = 0,2 \text{ a } \chi = 1.$$

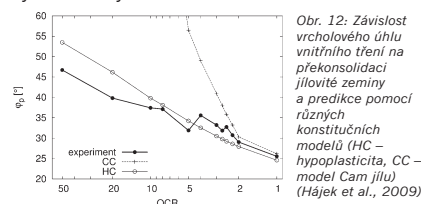
#### Příklad predikcí laboratorních experimentů pomocí hypoplastického modelu

Hypoplastický model není jediným pokročilým materiálovým modelem pro jemnozrnné zeminy. Při posuzování jeho kvality Hájek et al. (2009) porovnávali předpovědi hypoplastického modelu s předpověďmi jiného konstitučního modelu pro

jemnozrnné zeminy. Jednalo se o základní model, založený na koncepci mechaniky kritických stavů – model Cam jílu (Roscoe a Burland, 1968).

Předpovědi Mohr-Coulombova modelu jsme nestudovali. Jak bylo řečeno, tento model neumožňuje zohlednit závislost chování zeminy na jejím stavu (stupni překonsolidace), což byl fenomén, jenž se studoval v laboratorních experimentech. Jejich simulace pomocí M-C modelu je tedy bezpředmětná.

Obr. 12 ukazuje předpovědi závislosti vrcholového úhlu vnitřního tření na stupni překonsolidace OCR. Z obrázku je zřejmé, že hypoplastický model je i s jedinou sadou materiálových parametrů schopný věrně predikce závislosti vrcholového úhlu vnitřního tření na stupni překonsolidace. Totéž se nedá říci o modelu Cam jílu, který výrazně nadhodnocuje vrcholový úhel vnitřního tření pro vyšší hodnoty OCR.



Obr. 13a ukazuje předpovědi nelineárního chování zemín pomocí hypoplastického modelu. Zobrazeny jsou pracovní diagramy drénovaných triaxiálních zkoušek na rekonstituované zemině o různém stupni překonsolidace. Hypoplastický model, na rozdíl od modelu Cam jílu, věrně predikuje pokles tuhosti s přetvořením. Na obr. 13b se demonstruje závislost předpovědi objemových změn vzorku na stupni překonsolidace. Hypoplastický model dává opět mnohem přesnější předpovědi než model Cam jílu.

#### Závěry

V článku jsme demonstrovali rozdíl mezi skutečnými parametry zeminy, které nezávisí na jejím stavu, a veličinami stavově závislými. Ukázali jsme výhody konstitučních modelů založených na přístupu se stavově nezávislými parametry. Jedním z takových pokročilých modelů je hypoplastický

model pro jíly. Ten má ve své základní verzi stejný počet parametrů jako model Mohr-Coulombův. Jejich stanovení je přitom z hlediska geotechnického průzkumu jednodušší, neboť postačí menší počet neporušených vzorků. Díky stavově nezávislým parametrům se například hypoplastický model vyhýbá vyjádření vrcholové pevnosti pomocí lineární Mohr-Coulombovy obálky, které je nekorektní. Model předpovídá vrcholovou pevnost, aniž by bylo třeba ji studovat explicitně pomocí experimentů. Hypoplastický model dále automaticky předpovídá závislost tuhosti na úrovni napětí a přetvoření, což je opět fenomén, který Mohr-Coulombův model nevystihuje.

Hypoplastický model lze rozšířit o možnost modelovat elastickou tuhost v oblasti velmi malých přetvoření a její pokles s rostoucím přetvořením. Taková úprava vyžaduje dalších pět parametrů, jejich stanovení pomocí laboratorní trojosé zkoušky neporušeného vzorku je však poměrně jednoduché a fyzikálně podložené.

Numerická implementace konstitučního modelu pro programy MKP i „single element“ program pro kalibraci parametrů jsou volně dostupné odborné veřejnosti pro využití v praktických aplikacích. Příklady řešení okrajových úloh budou předmětem navazující druhé části článku.

#### Poděkování

Autoři děkují za finanční podporu grantům GAAV IAA201110802, GAČR 205/08/0732 a VZ MSM0021620855.

#### Literatura:

<http://labmz1.natur.cuni.cz/~bhc/s/zakladani>

Jan Boháč a David Mašín,

Univerzita Karlova v Praze,

Přírodovědecká fakulta, Albertov 6, 128 43 Praha 2

