

Vývoj a aplikace hypoplastických konstitučních modelů

David Mašín, UK v Praze, PřF, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

V článku jsou formou přístupnou pro prakticky zaměřenou odbornou veřejnost shrnuty výsledky výzkumu autora na téma hypoplasticita. Základem je popis nově vyvinutého hypoplastického modelu pro jemnozrnné zeminy. Model je založen na mechanice kritických stavů a jeho parametry mají fyzikálně shodný význam s parametry modelu Cam jílu. V článku je demonstrováno, že pokročilejší hypoplastický model vede k přesnějším předpovědím než model Cam jílu, a to zejména díky svému nelineárnímu charakteru. Hypoplastický model je přitom vhodný pro využití v geotechnické praxi. Jeho parametry mohou být kalibrovány na základě standardních laboratorních experimentů. Praktické využití hypoplastického modelu je v článku ukázáno na příkladu 3D MKP analýzy zkušební tunelu pro Heathrow express v Londýně.

The paper presents results of the author's research focused on development of hypoplastic constitutive models. The paper is conceived for practitioners. The main part of the paper describes a recently developed hypoplastic model for clays. The model is based on the critical state soil mechanics and its parameters have the same physical interpretation as parameters of the Modified Cam clay model. It is demonstrated that the hypoplastic model leads to more accurate predictions than the Cam clay model, mainly thanks to its non-linear character. Still, the hypoplastic model is applicable in the engineering practice. Its parameters may be calibrated using standard laboratory experiments. Practical application of the model is demonstrated by 3D FE analysis of a Heathrow express trial tunnel.

Úvod

Konstituční (materiálové) modely patří k nejdůležitějším a zároveň často nejproblematictějších článkům analýzy každé geotechnické konstrukce. Následující odstavec shrnuje některé problémy, jimž musí geotechnik čelit. Na rozdíl od mnohých jiných materiálů používaných ve stavebnictví, chování zemin je závislé na napětí a dalších stavových proměnných (pórovitost, stupeň překonsolidace) a chování zemin je značně nelineární (tuhost zeminy je závislá na přetvoření). Konstituční modely by měly vystihovat toto chování, předpovědi jednoduchých a v praxi často využívaných modelů jsou ovšem často nedostačující. Dalším problémem souvisejícím s využitím konstitučních modelů je jejich kalibrace, tedy identifikace materiálových parametrů. Některé složité konstituční modely totiž pro svou kalibraci vyžadují laboratorní experimenty, jež nejsou standardně prováděny v komerčních geotechnických laboratořích. Takové modely mohou být jen těžko využívány v běžné geotechnické praxi. Geotechnik se dále musí potýkat s přirozenou variabilitou

geomateriálů a s efektem měřítka. Laboratorní vzorky s velikostí v řádu centimetrů často nereprezentují chování celého zemního masivu. Pro výpočet chování geotechnické konstrukce se pak často musí přikročit ke zpětné analýze, při níž jsou parametry zjištěné na základě laboratorních experimentů korigovány na základě skutečných měření. Platí ovšem, že aby bylo možno výpočet úspěšně optimalizovat, musí použitý konstituční model předpovídat základní aspekty mechanického chování zemin důležité pro daný problém.

Tento příspěvek si klade za cíl popsat vývoj hypoplastického konstitučního modelu pro jemnozrnné zeminy. Model byl vyvíjen s cílem, aby byl využitelný v geotechnické praxi. Model má tedy minimální množství materiálových parametrů, které lze kalibrovat na základě standardních laboratorních zkoušek. Základní model lze navíc hierarchicky modifikovat, a tak zohlednit aspekty chování zemin, jež jsou významné pro některé geotechnické problémy a specifické typy zemin. Jedná se o zohlednění chování zeminy v oboru velmi malých přetvoření, zohlednění vlivu struktury zemin (např. cementace) a její degradace, vlivu sání v nenasyčených zeminách a podobně.

Hypoplastické konstituční modely

Prezentovaný konstituční model je založen na teorii hypoplasticity. Jedná se o relativně nový přístup ke konstitučnímu modelování geomateriálů, vyvíjený nezávisle od osmdesátých let minulého století na univerzitách v Karlsruhe (např., Kolymbas, 1991 /11/, von Wolfersdorff, 1996 /24/) a Grenoble (např., Chambon et al., 1994 /1/). Model prezentovaný v tomto článku je založen na prvním přístupu, který je z pohledu využití v praxi přijatelnější. Vývoj modelů francouzské školy se soustředil na některé teoretické aspekty a výsledné modely nejsou pro většinu praktických problémů vhodné. Obě větve hypoplastických modelů se soustředily na studium hrubozrnných materiálů (písek, štěrk). Chování jemnozrnných zemin bylo dlouho opomíjeno, hypoplasticita tedy představovala dosud neprozkoumaný perspektivní přístup k modelování mechanického chování jemnozrnných zemin.

Hypoplastické modely se svou povahou zásadně odlišují od modelů elasto-plastických, tedy od většiny existujících konstitučních modelů pro zeminy. V první řadě, přetvoření není děleno na vratnou (elastickou) a nevratnou (plastickou) část. Dále není nutné zavádět klasické předpoklady elasto-plasticity, jako plocha plasticity, plastický potenciál, podmínka konzistence apod. Hypoplastické modely ale i přesto předpovídají základní aspekty chování zemin, což je dáno nelineárním charakterem hypoplastické rovnice. Pro zjednodušenou představu, rovnice (1) ukazuje formulaci hypoplastického modelu pro jednorozměrný případ (Herle, 2003 /8/):

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

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 bylo využito dvou různých rovnic jako v případě elasto-plasticity.

Hypoplastické modely pro zeminy jsou samozřejmě na rozdíl od rovnice (1) definovány v třírozměrném prostoru, σ a ϵ představují tenzory napětí a přetvoření, L a N jsou tenzory čtvrtého

(L) a druhého (M) 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.

Mechanika kritických stavů a model Cam jílu

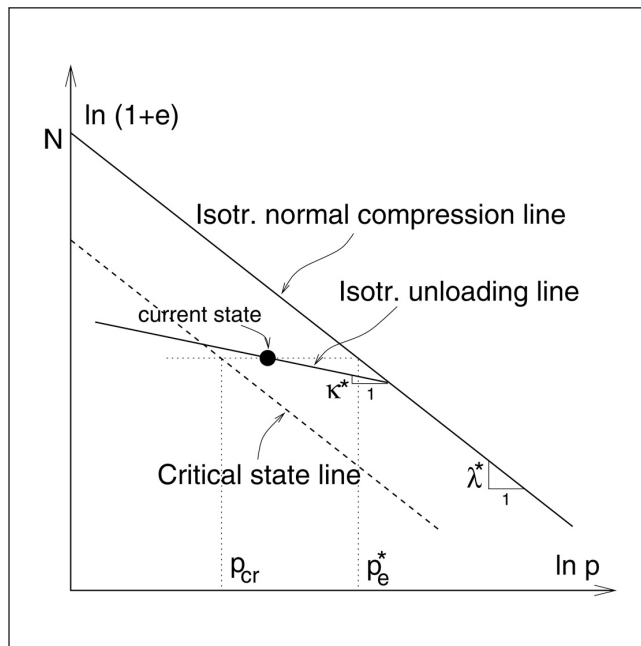
Před popisem vlastního nově vyvíjeného hypoplastického modelu budou popsány základní myšlenky mechaniky kritických stavů, na níž je model založen. Mechanika kritických stavů byla vyvíjena od padesátých let minulého století v Anglii (Cambridge). Základní konstituční model založený na této teorii, Modifikovaný model Cam jílu (Roscoe a Burland, 1968 /21/), představuje mezník vedoucí k modernímu pojetí modelování chování zemín.

Teorie kritických stavů je založena na pozorování, že zemina nezávisle na svém počátečním stavu dospěje při dostatečně dlouhém smykovém namáhání do tzv. kritického stavu, při němž se dále nemění efektivní napětí ani číslo pórovitosti. Přínos mechaniky kritických stavů tkívá v tom, že byla do materiálových modelů poprvé včleněna pórovitost jako stavová proměnná. Chování kyprých zemín a ulehlých zemín tedy bylo možno charakterizovat pomocí sjednocujícího konceptu, který kvalitativně správně charakterizoval rozdíl v chování ulehlých a kyprých zemín. Ulehlá zemina (zemina s číslem pórovitosti nižším než je číslo pórovitosti v kritickém stavu) při smykání zvětšuje objem – dilatuje, a její vrcholová pevnost (charakterizovaná vrcholovým úhlem vnitřního tření φ_p) je vyšší, než pevnost v kritickém stavu (charakterizovaná úhlem vnitřního tření v kritickém stavu φ_c). Na druhou stranu kyprá zemina při smykání objem zmenšuje, a její vrcholový úhel vnitřního tření odpovídá kritickému.

Obálka kritických stavů zobrazená v prostoru napětí (smykové napětí vs. normálové napětí) definuje již zmíněný úhel vnitřního tření v kritickém stavu φ_c . Stejně tak je možno obálku kritických stavů zobrazit v prostoru střední napětí p (všechna napětí jsou v tomto článku uvažována jako efektivní, není tedy použito standardního rozlišení efektivních a totálních napětí pomocí ') vs. číslo pórovitosti e . Její směrnice definuje v logaritmickém zobrazení další materiálový parametr λ^* , jak vyplývá z obrázku 1.

Obr. 1 dále ukazuje čaru isotropní normální konsolidace. Je zřejmé, že tato čára má v zobrazení $\ln p$ vs. $\ln(1+e)$ stejnou směrnici, jako čára kritických stavů. Její pozice (tedy hodnota $\ln(1+e)$ pro $\ln p = 0$) je dána materiálovým parametrem N . Model Cam jílu (lépe řečeno jeho modifikace popisovaná v tomto příspěvku) dále vyžaduje dva materiálové parametry, a to parametr κ^* jež definuje směrnici isotropního odlehčení v zobrazení $\ln p$ vs. $\ln(1+e)$ (viz obr. 1), a parametr G definující smykovou tuhost zeminy.

Z předchozího je zřejmé, že model Cam jílu splňuje předpoklady praktického využití – má pouze pět materiálových parametrů (φ_c , λ^* , κ^* , N a G), jež je možno v principu stanovit na pouze dvou laboratorních zkouškách – zkoušce isotropní konsolidace a odlehčení a drénované triaxiální zkoušce. Jeho využití je ovšem bohužel limitováno jeho nevýhodami. Ukazuje se totiž, že přestože model dává kvalitativně správné předpovědi, jeho předpovědi jsou nepřesné z kvantitativního hlediska. Model správně předpovídá zvýšení vrcholového úhlu vnitřního tření se zvyšující se ulehlostí zeminy, vrcholový úhel vnitřního tření je ovšem výrazně nadhodnocen. Ještě významnějším faktorem limitujícím využití tohoto modelu je fakt, že model



Obr. 1 Čára kritických stavů (critical state line), čára isotropní normální konsolidace (isotr. normal compression line) a čára isotropního odlehčení (isotr. unloading line) v zobrazení $\ln p$ vs. $\ln(1+e)$. Z obrázku dále vyplývá definice materiálových parametrů N , λ^* a κ^* (převzato z Mašína, 2005 /12/).

Fig. 1 Critical state line, isotropic normal compression line and isotropic unloading line in the $\ln p$ vs. $\ln(1+e)$ plane. Definition of material parameters N , λ^* and κ^* (from Mašín, 2005 /12/).

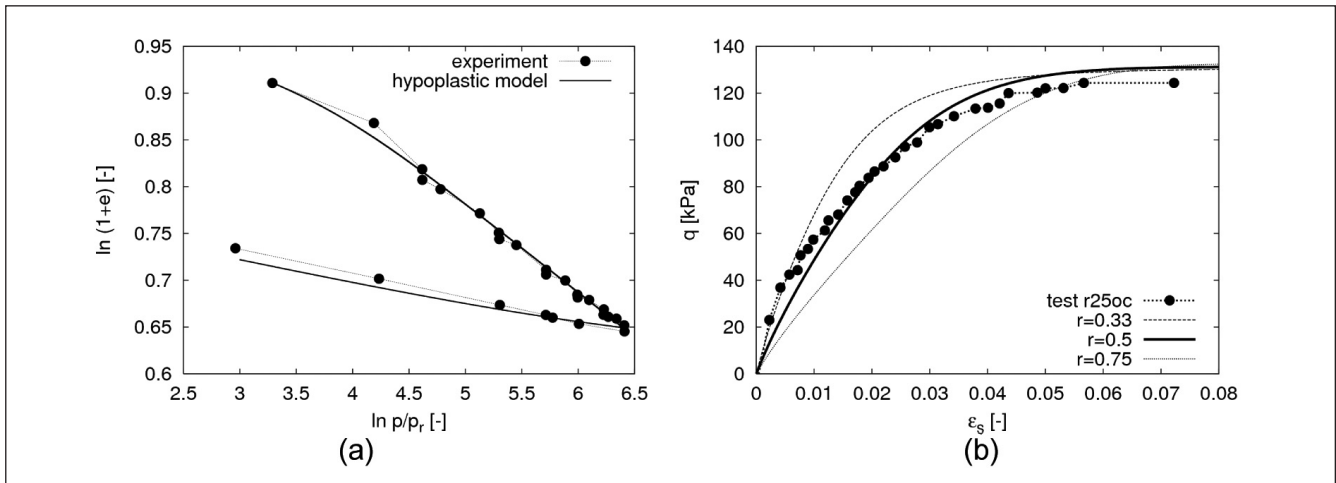
předpovídá lineární chování uvnitř plochy plasticity. Nepředpokládá tedy pokles tuhosti s přetvořením, jež je v případě mnoha geotechnických konstrukcí nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím předpovědi.

Tyto nevýhody modelu Cam jílu jsou dlouho známé. V průběhu minulých desetiletí byla vyvinuta řada modifikací, jež tyto nevýhody odstraňuje. Mezi nejúspěšnější patří elasto-plastické modely s kinematickým zpevněním (např. Stallebrass a Taylor, 1997 /23/). Nevýhodou těchto modelů je ovšem jejich složitost, jak matematická, tak z pohledu identifikace materiálových parametrů. Další možností pro eliminaci nevýhod modelu Cam jílu se ukázala být teorie hypoplasticity. Nově vyvinutý model je popsán v následujícím odstavci.

Hypoplastický model pro jíly

Hypoplastický model pro jíly publikovaný Mašínem (2005) /12/ a dále studovaný Mašínem a Herlem (2005) /16/ představuje kombinaci fyzikálních principů, na jejichž základě je vyvinut model Cam jílu (viz Gudehus a Mašín, 2008, /25/), s matematickou formulací hypoplastických modelů německé školy (konkrétně modelů von Wolffersdorffa (1996) /24/ a Herleho a Kolymbase (2004) /9/). Model vyžaduje pět materiálových parametrů, jež odpovídají parametrům modelu Cam jílu. Parametry φ_c , λ^* , κ^* a N byly definovány v minulém odstavci; poslední parametr r kontroluje smykovou tuhost zeminy a nahrazuje tak parametr G modelu Cam jílu.

Kalibrace hypoplastického modelu je demonstrována na obr. 2. Obr. 2a demonstrovuje kalibraci parametrů λ^* , κ^* a N na základě zkoušky isotropního stlačení a odlehčení, obr. 2b ukazuje kalibraci parametru r na základě smykové zkoušky. Parametr φ_c byl vyhodnocen standardním způsobem.



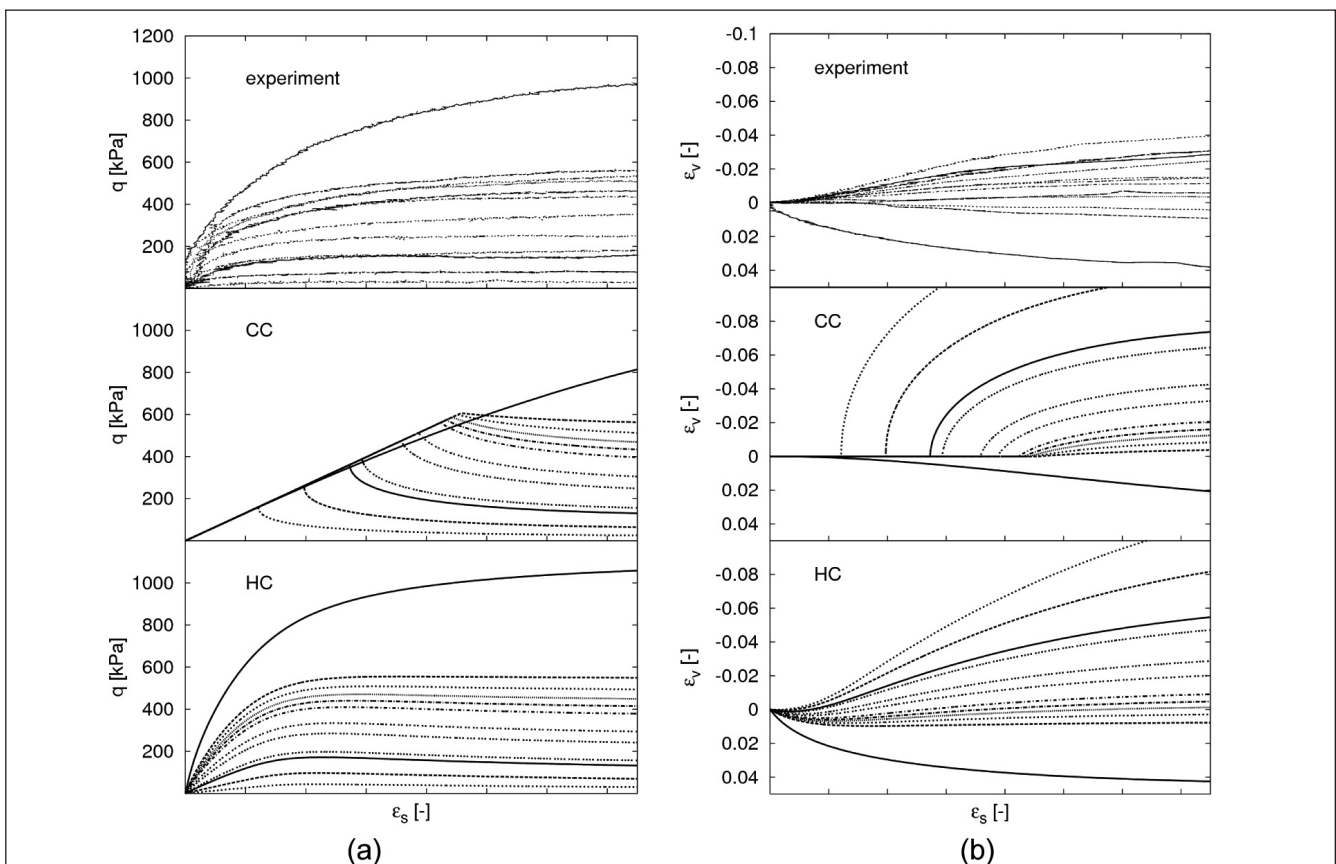
Obr. 2 Kalibrace hypoplastického modelu pro jíly. (a) kalibrace parametrů λ^* , κ^* a N na základě zkoušky isotropního stlačení a odlehčení, (b) kalibrace parametru r na základě smykové zkoušky. Obrázky převzaty z Mašína (2008) /14/, experimentální data na Londýnském jílu z Gasparre (2005) /4/.

Fig. 2 Calibration of a hypoplastic model for clays. (a) calibration of parameters N , λ^* and κ^* using isotropic loading and unloading test; (b) calibration of parameter r using triaxial shear test. Graphs from Mašína (2008) /14/, experimental data on London clay from Gasparre (2005) /4/.

Pro demonstraci popisovaných vlastností hypoplastického modelu jsou na obr. 3 jeho předpovědi porovnány s předpovědi modelu Cam jílu. Jedná se o smykové zkoušky na kaolinu s různým stupněm překonsolidace (všechny vzorky mají shodné překonsolidační napětí 1 000 kPa a různé počáteční napětí).

Z obrázku 3a je zřejmá nejdůležitější nevýhoda modelu Cam jílu, a to konstantní smykový modul neměící se s přetvořením

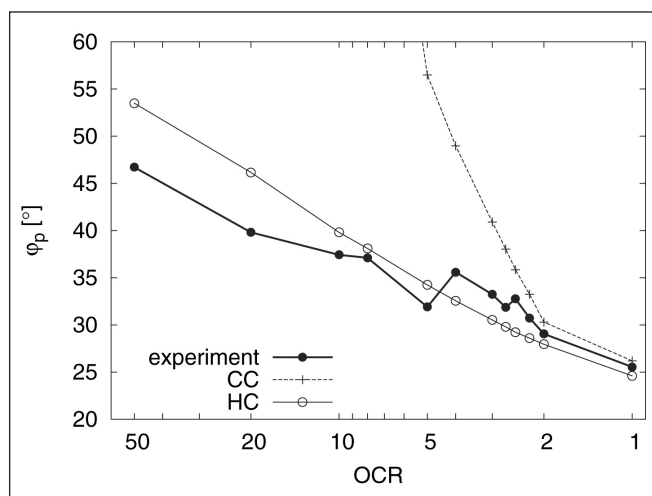
u zkušek na překonsolidované zemině. Hypoplastický model oproti tomu věrně vystihuje měřené nelineární chování zeminy. Obdobné závěry platí pro objemové změny na obr. 3b. Další z diskutovaných nevýhod modelu Cam jílu je nadhodnocení vrcholového úhlu vnitřního tření pro překonsolidovanou (ulehlou) zeminu. Obr. 4. ukazuje závislost φ_p na stupni překonsolidace OCR pro zkoušky z obr. 3. Evidentně, hypoplastický model vede



Obr. 3 Předpovědi smykových zkoušek na kaolinu pomocí modelu Cam jílu (CC) a hypoplastického modelu pro jíly (HC). (a) pracovní diagram, (b) objemové změny. Obrázky převzaty z Hájk a Mašína (2006) /6/, experimentální data z Hattab a Hicher (2004) /7/.

Fig. 3 Simulations of shear tests on kaolin using Modified Cam clay model (CC) and a hypoplastic model for clays (HC). (a) stress-strain curve, (b) volumetric strains. From Hájek and Mašína (2006) /6/, experimental data from Hattab and Hicher (2004) /7/.

k výrazně přesnějším předpovědím, než model Cam jílu. Podrobné porovnání předpovědí hypoplastického modelu s jinými konstitučními modely přináší Mašín et al. /19/ (2006).



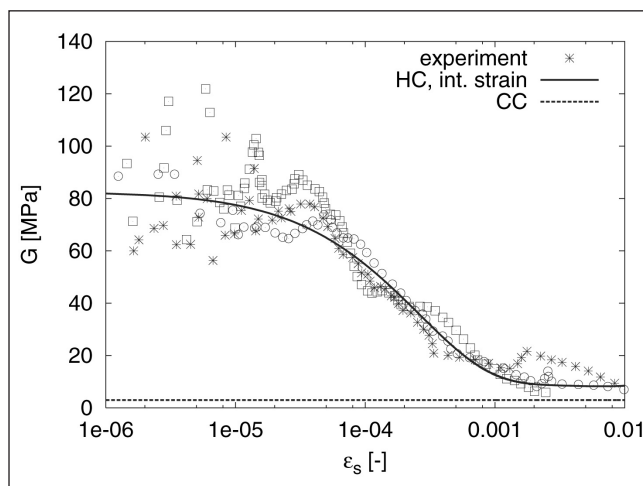
Obr. 4 Předpověď vrcholového úhlu vnitřního tření φ_p v závislosti na stupni překonsolidace OCR pomocí modelu Cam jílu (CC) a hypoplastického modelu pro jíly (HC). Obrázek převzat z Hájka a Mašína (2006) /19/, experimentální data z Hattab a Hicher (2004) /7/.

Fig. 4 Predictions of peak friction angle φ_p in relation to overconsolidation ratio (OCR) using Modified Cam clay model (CC) and a hypoplastic model for clays (HC). From Hájek and Mašín (2006) /19/, experimental data from Hattab and Hicher (2004) /7/.

Modifikace hypoplastického modelu

Hypoplastický model prezentovaný v minulé kapitole je vhodný pro předpověď chování nasycených jílu, které nevykazují známky nestabilní struktury. Zároveň, základní model je vhodný pro předpověď nelineárního chování zemin v oboru středních a velkých přetvoření, nepředpovídá však experimentálně zjištěnou vysokou tuhost v oboru velmi malých přetvoření.

Druhý zmiňovaný problém lze odstranit pomocí tzv. konceptu intergranulárních přetvoření, jež vypracovali Niemunis a Herle (1997) /20/. Tento koncept byl sice původně vyvinut

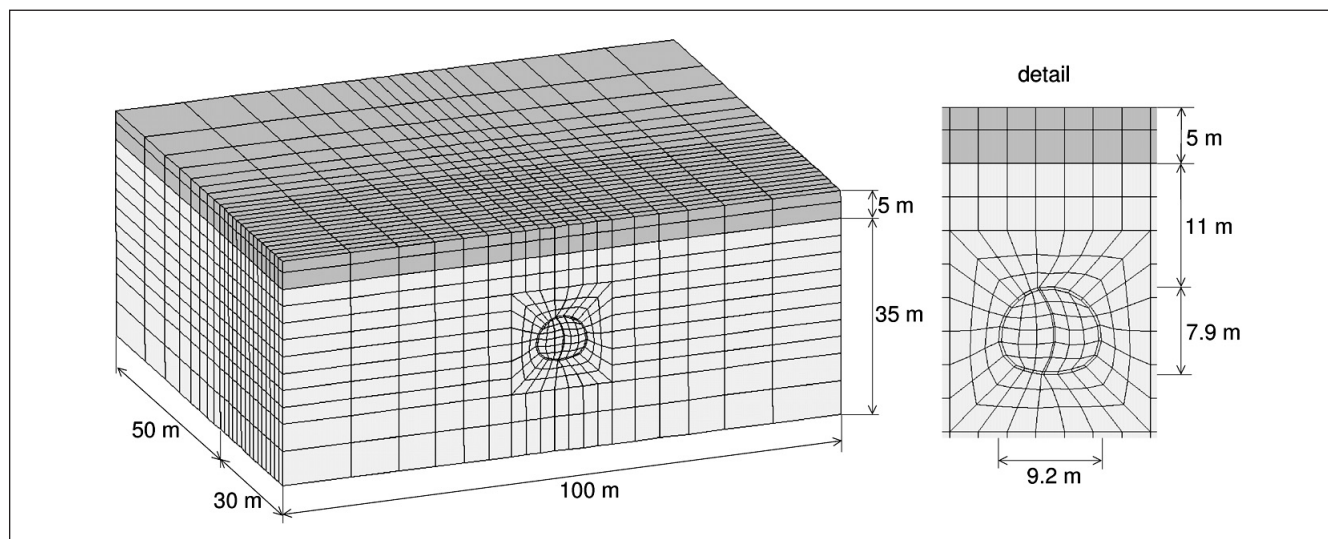


Obr. 5 Předpověď poklesu smykové tuhosti s přetvořením, porovnání hypoplastického modelu obohaceného konceptem intergranulárních přetvoření (HC, int. strain) s předpovědí modelu Cam jílu (CC). Obrázky převzaty z Mašína (2008) /14/, experimentální data na Londýnském jílu z Gasparre (2005) /4/.

Fig. 5 Predictions of shear stiffness decrease with strain, comparison of a hypoplastic model enhanced by the intergranular strain concept (HC, int. strain) with the Modified Cam clay model (CC). From Mašín (2008) /14/, experimental data on London clay from Gasparre (2005) /4/.

jako obohacení hypoplastického modelu pro hrubozrnné materiály, je však přímo aplikovatelný i na prezentovaný hypoplastický model pro jíly. Obohacený model věrně předpovídá závislost tuhosti na přetvoření, jak je demonstrováno na obr. 5. Nevýhoda tohoto konceptu z pohledu praktického využití je ta, že pro kalibraci parametrů jsou nutné méně standardní laboratorní zkoušky s měřením tuhosti pomocí průchodu smykových vln a s lokálními snímači axiální deformace. V případě nedostupnosti takových zkoušek mohou být ovšem parametry konceptu intergranulárních přetvoření odhadnuty na základě zkušenosti nebo pomocí zpětné analýzy.

Další modifikace hypoplastického modelu budou pouze zmíněny a nebudou detailněji popisovány, čtenář je odkázán na citovanou literaturu. Mašín (2007) /13/ ukázal způsob, jakým může být hypoplastický model obohacen o efekty meta-stabilní struktury způsobené např. degradací cementačních



Obr. 6 MKP síť a geometrie použitá pro výpočet zkušební tunelu pro Heathrow express. Převzato z Mašína (2008) /14/.

Fig. 6 FE mesh and geometry used in simulations of the Heathrow express trial tunnel. From Mašín (2008) /14/.

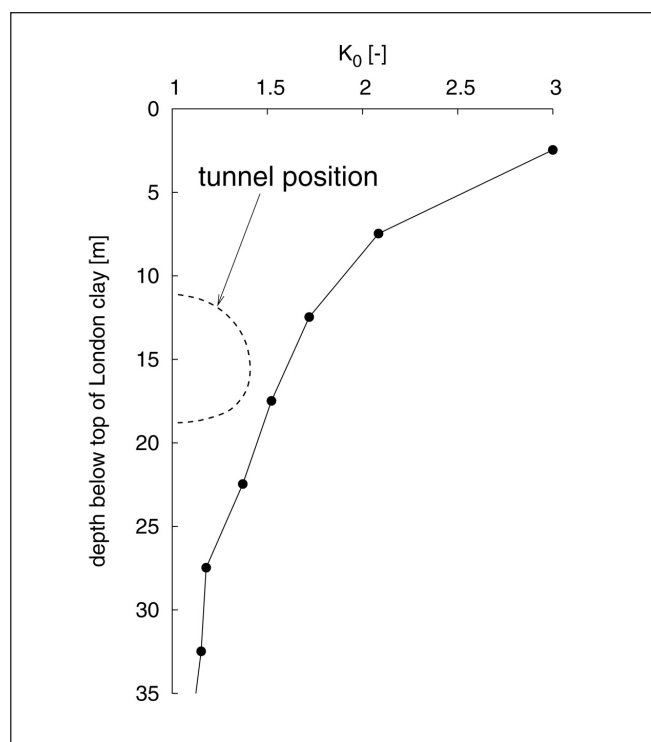
vazeb mezi částicemi zeminy (viz Cotecchia a Chandler, 2000 /2/; Stallebrass et al., 2007 /22/). Tento model, s využitím konceptu prezentovaného Mašínem et al. (2005) /15/, může být dále použit pro predikci chování materiálů s dvojitou pórovitostí (např. materiál výsypek hnědouhelných dolů). Mašín a Khalili (2008) /18/ rozšířili obor aplikace hypoplastického modelu na nenasycené zeminy. Mašín a Herle (2007) /17/ jej modifikovali, aby přesněji předpovídal chování normálně konsolidované zeminy při nedrénovaném zatížení.

Aplikace

Na závěr článku bude prezentováno využití hypoplastického modelu pro predikci chování skutečné geotechnické konstrukce pomocí metody konečných prvků (MKP) ve 3D. Výpočty byly provedeny pomocí software Tochnog Professional, hypoplastický model byl implementován pomocí uživatelské subroutine. Tato implementace je v současné době podporována MKP programy Tochnog a Abaqus, v brzké době by měla být dostupná verze pro rozšířený MKP program PLAXIS. Implementace je volně dostupná na internetu na adrese www.soilmodels.info, viz Gudehus et al. (2008) /5/.

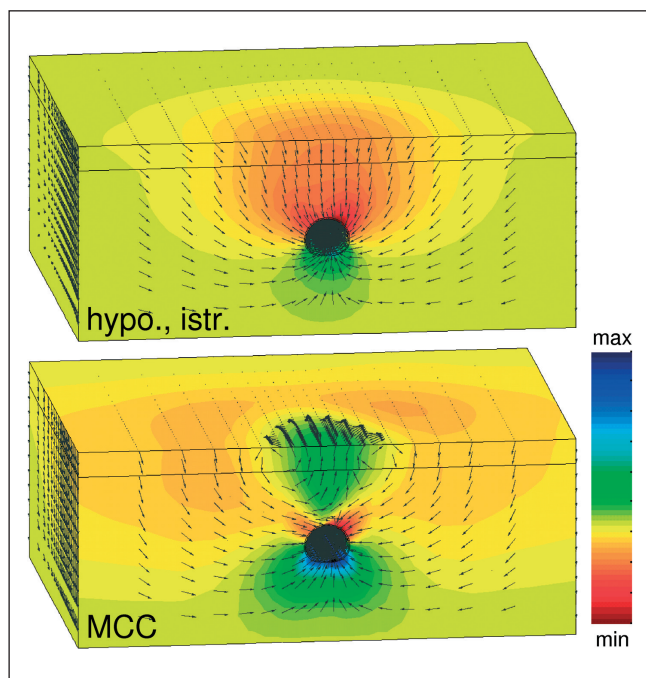
Simulovaným problémem je zkušební tunel pro Heathrow express (Deane a Basset, 1995) /3/. Detaily výpočtů přináší Mašín (2008) /14/. Jedná se o tunel ražený metodou stříkaného betonu v Londýnském jílu. Geometrie tunelu a použitá MKP síť je zobrazena na obr. 6. Z obrázku je zřejmá vrchní 5 metrů mocná poloha kvartérních štěrků Temže, pod níž následuje samotný masiv Londýnského jílu. Výrub byl dělen na dvě části, levá část byla ražena v předstihu před pravou.

Počáteční podmínky sestávají z předepsání počátečního čísla pórovitosti, vertikálního napětí a hodnoty součinitele bočního tlaku v klidu K_0 . Zejména co se týče součinitele K_0 je



Obr. 7 Hodnoty K_0 měřené v Londýnském jílu Hightem et al. (2007) /10/. Převzato z Mašína (2008) /14/.

Fig. 7 K_0 values measured in London clay by Hight et al. (2007) /10/. From Mašín (2008) /14/.



Obr. 8 Vertikální deformace v okolí výrubu předpovězeny pomocí hypoplastického modelu s intergranulárními přetvořeními (hypo., istr.) a modelu Cam jílu (MCC). Převzato z Mašína (2008) /14/.

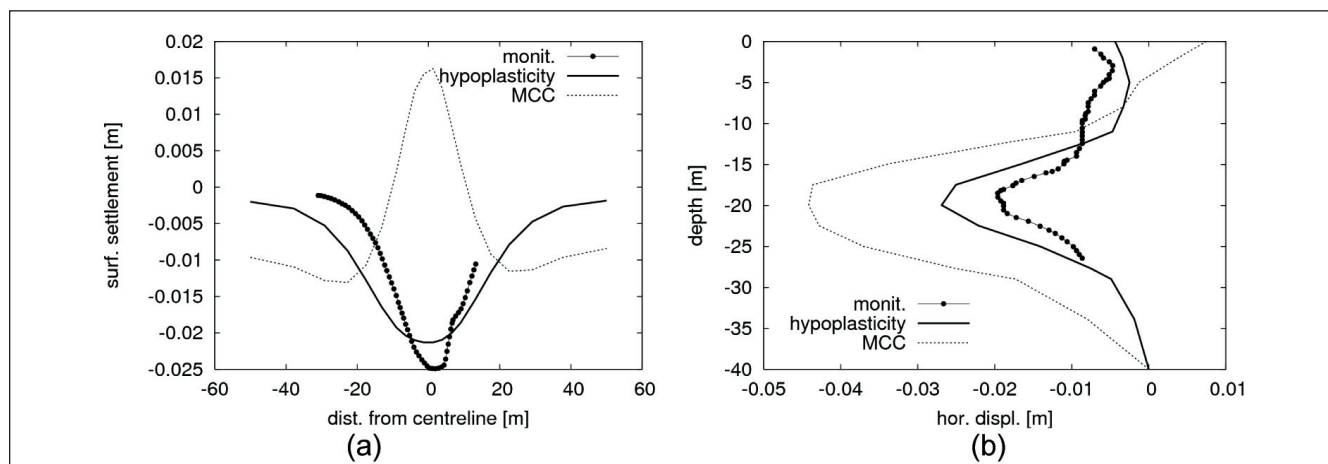
Fig. 8 Vertical deformations around the tunnel predicted using hypoplastic model with intergranular strain concept (hypo., istr.) and the Modified Cam clay model (MCC). From Mašín (2008) /14/.

Londýnský jíl díky vysokému stupni překonsolidace specifický, K_0 dosahuje hodnot vyšších než 1,5. Obr. 7 ukazuje hodnoty K_0 měřené Hightem et al. (2007) /10/, jež byly uvažovány ve výpočtu.

Výpočet byl proveden s využitím dvou konstitučních modelů pro Londýnský jíl – hypoplastického modelu obohaceného o koncept intergranulárních přetvoření a modelu Cam jílu. Oba modely byly kalibrovány na základě shodných dat na Londýnském jílu (Gasparre, 2005) /4/. Kalibrace hypoplastického modelu pro daný problém je prezentována na obrázcích 2 a 5. Při výpočtu byla dále zohledněna časová závislost nárůstu tuhosti stříkaného betonu s časem.

Výpočty jsou porovnány z kvalitativního hlediska na obr. 8, který znázorňuje kontury vertikálních deformací a vektory deformací. Z obrázku je zřejmé, že hypoplastický model (hypo., istr.) dává realistický tvar poklesové kotliny v okolí výrubu. Oproti tomu model Cam jílu predikuje nerealistický zdvih masivu nad osou tunelu a pokles povrchu až v určité vzdálenosti od osy tunelu. Tento evidentně chybný výsledek je způsoben nízkou hodnotou počáteční tuhosti zeminy (viz obr. 5) a vysokou hodnotou K_0 , díky níž působí na ostění vysoké boční tlaky a relativně tuhé ostění nadzvedává masiv nad výrubem. Hypoplastický model, jež predikuje vysokou počáteční tuhost a její pokles s přetvořením (viz obr. 5) tento efekt potlačuje.

Předpovědi obou modelů jsou dále porovnány z kvantitativního hlediska na obr. 9. Obr. 9a ukazuje poklesovou kotlinu, obr. 9b horizontální deformace ve vzdálenosti 7,7 m od osy tunelu měřené pomocí inklinometrů. Je zřejmé, že hypoplastický model predikuje relativně přesně velikost deformací povrchu, přestože je šířka poklesové kotliny nadhodnocena. Model Cam jílu dává na rozdíl od hypoplasticity nerealistický tvar poklesové kotliny a horizontální deformace nadhodnocuje více, než



Obr. 9 Predikce zkušebního tunelu pro Heathrow express pomocí hypoplastického modelu s intergranulárními přetvořeními (hypoplasticity) a modelu Cam jílu (MCC). Poklesová kotlina (a) a průběh horizontálních deformací s hloubkou (b). Převzato z Mašina (2008) /14/.

Fig. 9 Predictions of the Heathrow express trial tunnel using hypoplastic model with intergranular strain (hypoplasticity) and Modified Cam clay model (MCC). Surface settlement trough (a) and change of horizontal displacements with depth (b). From Mašín (2008) /14/.

model hypoplastický. Předpovědi s využitím hypoplasticity by byly dále zpřesněny zohledněním anisotropie Londýnského jílu (vyšší tuhost v horizontálním, než ve vertikálním směru).

Závěry

V článku byly popsány základní vlastnosti nově vyvinutého hypoplastického modelu pro jemnozrnné zeminy a popsána kalibrace jednotlivých materiálových parametrů. Bylo demonstrováno, že pokročilý konstituční model nemusí být nutně složitější z pohledu praktického uživatele. Nově vyvinutý hypoplastický model vyžaduje pět materiálových parametrů, jež je možno v principu kalibrovat na základě dvou standardních laboratorních experimentů. Počet parametrů je tedy shodný jako počet parametrů v praxi nejčastěji využívaného Mohr-Coulombova modelu. I přes to je možno jednoznačně ukázat, že pokročilý model vede k výrazně přesnějším předpovědím, než jednodušší materiálové modely. V tomto článku byly předpovědi hypoplastického modelu porovnány s předpovědi klasického modelu mechaniky kritických stavů – modelu Cam jílu. Výhody hypoplastického modelu byly demonstrovány jak na základě simulace laboratorních experimentů, tak na základě předpovědi skutečné geotechnické konstrukce pomocí 3D MKP.

Poděkování

Autor děkuje Prof. I. Herlemu a Dr. J. Boháčovi za cenné rady a podporu v průběhu výzkumu. Předkládaná práce vznikla za finanční podpory grantů GAČR 205/08/0732 a GAAV IAA200710605.

Literatura

/1/ CHAMBON, R. – DESRUES, J. – HAMMAD, W. – CHARLIER, R., 1994: CLoE, a new rate-type constitutive model for geomaterials, theoretical basis and implementation. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 18: 253–278.
 /2/ COTECCHIA, F. – CHANDLER, J., 2000: A general framework for the mechanical behaviour of clays. Géotechnique, 50(4): 431–447.
 /3/ DEANE, A. P. – BASSET, R. H., 1995: The Heathrow express trial tunnel. Proc. Instn. Civil Engineers, 113: 144–156.

/4/ GASPARRE, A., 2005: Advanced laboratory investigation of London clay. Ph. D. thesis, University of London, Imperial College of Science, Technology and Medicine.
 /5/ GUDEHUS, G. – AMOROSI, A. – GENS, A. – HERLE, I. – KOLYMBAS, D. – MAŠÍN, D. – MUIR WOOD, D. – NOVA, R. – NIEMUNIS, A. – PASTOR, M. – TAMAGNINI, C. – VIGGIANI, G., 2008: The soilmodels.info project. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 32(12): 1571–1572.
 /6/ HÁJEK, V. – MAŠÍN, D., 2006: An evaluation of constitutive models to predict the behaviour of fine-grained soils with different degrees of overconsolidation. In: H. F. Schweiger (Ed.), Proc. 6th European Conference on Numerical Methods in Geomechanics (NUMGE06), Graz, Austria, pp. 49–55. Taylor & Francis Group, London.
 /7/ HATTAB, M. – HICHER, P.-Y., 2004: Dilating behaviour of overconsolidated clay. Soils and Foundations, 44(4): 27–40.
 /8/ HERLE, I., 2003: Introduction to the mathematical modelling in geomechanics (in Czech). Charles University, Prague.
 /9/ HERLE, I. – KOLYMBAS, D., 2004: Hypoplasticity for soils with low friction angles. Computers and Geotechnics, 31(5): 365–373.
 /10/ HIGHT, D. W. – GASPARRE, A. – NISHIMURA, S. – MINH, N. A. – JARDINE, R. J. – COOP, M. R., 2007: Characteristics of the London clay from the Terminal 5 site at Heathrow airport. Géotechnique, 57(1): 3–18.
 /11/ KOLYMBAS, D., 1991: Computer-aided design of constitutive laws. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 15: 593–604.
 /12/ MAŠÍN, D., 2005: A hypoplastic constitutive model for clays. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 29(4): 311–336.
 /13/ MAŠÍN, D., 2007: A hypoplastic constitutive model for clays with meta-stable structure. Canadian Geotechnical Journal, 44(3): 363–375.
 /14/ MAŠÍN, D., 2008: 3D modelling of a NATM tunnel in high K_0 clay using different constitutive models. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE (submitted).
 /15/ MAŠÍN, D. – HERBSTOVÁ, V. – BOHÁČ, J., 2005: Properties of double porosity clayfills and suitable constitutive models. In Proc. 16th Int. Conference ICSMGE, Volume 2, pp. 827–830. Osaka, Japan.
 /16/ MAŠÍN, D. – HERLE, I., 2005: State boundary surface of a hypoplastic model for clays. Computers and Geotechnics, 32(6): 400–410.

- /17/ MAŠÍN, D. – HERLE, I., 2007: Improvement of a hypoplastic model to predict clay behaviour under undrained conditions. *Acta Geotechnica*, 2(4): 261–268.
- /18/ MAŠÍN, D. – KHALILI, N., 2008: A hypoplastic model for mechanical response of unsaturated soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (in print).
- /19/ MAŠÍN, D. – TAMAGNINI, C. – VIGGIANI, G. – COSTANZO, D., 2006: Directional response of a reconstituted fine grained soil. Part II: performance of different constitutive models. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(13): 1303–1336.
- /20/ NIEMUNIS, A. – HERLE, I., 1997: Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2: 279–299.
- /21/ ROSCOE, K. H. – BURLAND, J. B., 1968: On the generalised stress-strain behaviour of wet clay. In: J. Heyman and F. A. Leckie (Eds.), *Engineering Plasticity*, pp. 535–609. Cambridge: Cambridge University Press.
- /22/ STALLEBRASS, S. E. – ATKINSON, J. H., – MAŠÍN, D., 2007: Manufacture of samples of overconsolidated clay by laboratory sedimentation. *Géotechnique*, 52(2): 249–253.
- /23/ STALLEBRASS, S. E. – TAYLOR, R. N., 1997: Prediction of ground movements in overconsolidated clay. *Géotechnique*, 47(2): 235–253.
- /24/ von WOLFFERSDORFF, P. A., 1996: A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1: 251–271.
- /25/ *in print*: GUDEHUS, G. – MAŠÍN, D. (2008). Graphical representation of constitutive equations. *Géotechnique*.

Svahová deformace Ruines de Séchilienne ve Francii – hrozba s velkým dosahem

Tereza Botlíková, UK v Praze, PČF

Na lokalitě Ruines de Séchilienne ve francouzských Alpách jihovýchodně od Grenoble hrozí zřícení části svahu hory Mont Sec do údolí řeky Romanche. Rizikový objem horninového materiálu je v řádu milionů m³. Došlo by k přehrazení údolí a vzniku jezera, jehož voda by po protržení nepevněné hráze způsobila značné škody na majetku i životech v obcích a městech ležících po proudu. Může také dojít ke kontaminaci zvodní v údolních nivách produkty chemického průmyslu a následně k problémům se zásobováním obyvatelstva pitnou vodou. Údolím řeky Romanche rovněž vede významná dopravní osa, silnice 1. třídy RN 91 spojující Grenoble s horskou oblastí Oisans, kde leží známá lyžařská střediska. Přerušení dopravy na RN 91 by mělo značně nepříznivé dopady na ekonomiku celé oblasti. V tomto článku budou rozebrány jednak případné následky hrozícího zhroucení Ruines de Séchilienne, jednak také opatření navržená expertní komisí k minimalizaci škod a k ochraně obyvatelstva.

The article deals with the impacts of a potential large rock fall in French Alps southeast of Grenoble. A natural dam on the Romanche river would be created and the populations downstream would be threatened with flooding in case of its failure. The geology and history of the site as well as the risks involved and safety measures taken are presented.

Úvod

Svahové pohyby velkého rozsahu nejsou v Alpách nijak vzácné. Málokdy ale hrozí tak významnými následky, jako je tomu u Ruines de Séchilienne. Lokalita je známá po celé Francii, právě kvůli ní byl v roce 1995 přijat kontroverzní vyvlastňovací „Barnierův“ zákon. Již samotná existence této hrozby působí nepříznivě na ekonomiku a rozvoj přilehlých oblastí a náklady vynaložené na ochranu obyvatel stále rostou.

Geologický a geotechnický aspekt problému jsou v porovnání s ostatními hledisky spíše okrajové, ve středu dění jsou především nejrůznější střety zájmů lokálních i státních institucí, snaha udržet v rovnováze náklady na ochranná opatření a teoretické ušlé zisky, dopady na každodenní život obyvatel dnes i po očekávané katastrofě.

Geologie a historie

Lokalita (obr. 1) se nachází na svahu hory Mont Sec v údolí řeky Romanche, jež dále protéká městem Vizille a zhruba deset kilometrů severozápadně od Ruines de Séchilienne se vlévá do řeky Drac, která dále teče na sever do Grenoble. Směrem proti