

ZPĚTNÁ ANALÝZA PRŮZKUMNÝCH ŠTOL TUNELU DOBROVSKÉHO – VLIV KONSTITUČNÍHO MODELU

Mgr. Tomáš Svoboda

Univerzita Karlova v Praze

RNDr. David Mašín, Ph.D.

Univerzita Karlova v Praze

Ing. Jan Boháč, CSc.

Univerzita Karlova v Praze

Inverse analysis of exploratory adits of Dobrovského tunnel-the influence of a constitutive model

The paper demonstrates the influence of soil constitutive model on predictions of a NATM tunnel in overconsolidated clays (Dobrovského tunnel, Brno, Czech Republic). Two constitutive models are compared: standard Mohr-Coulomb model and advanced hypoplastic model. The models have been calibrated using laboratory experimental data. Their parameters have subsequently been optimised by means of inverse analysis using monitoring data from exploratory adit, excavated inside the profile of the future tunnel. The hypoplastic model gives reasonable predictions of the adit behaviour even with parameter set calibrated using experiments. The Mohr-Coulomb model requires unrealistic parameters to predict the adit behaviour correctly.

1. Úvod

Dlouhodobě se zhoršující dopravní situace v Brně vedla k rozhodnutí odlehčit historickému centru města realizací severní části Velkého městského okruhu, jehož jsou tunely Dobrovského součástí. Tunely Dobrovského jsou tvořeny dvěma tunelovými trubami o délkách 1237m (tunel I) a 1258m (tunel II), se světlou výškou výrubu přibližně 12m a šířkou 14m. Tunely jsou raženy NRTM s vertikálním členěním výrubu do šesti čeleb. Nadloží tunelů se pohybuje od 6 do 20m. Pro účely průzkumu byly vyraženy tři průzkumné štoly trojúhelníkového profilu, které jsou situovány v patách kalot tunelových trub a následně budou využity při konstrukci finálního profilu díla.

V předkládaném příspěvku jsou prezentovány numerické analýzy tunelu Dobrovského. Byly srovnány předpovědi dvou různých konstitučních modelů, standardní Mohr – Coulombův model a hypoplastický model pro jíly s intergranulárním přetvořením. Průběh analýzy odpovídá tomuto pořadí: (1) kalibrace konstitučních modelů na data z laboratorních experimentů provedených na brněnském jílu, (2) simulace chování průzkumné štoly a optimalizace sady parametrů ve smyslu zpětné analýzy průzkumné štoly (3) předpověď chování profilu tunelu s originálními a optimalizovanými parametry. Příspěvek prezentuje výsledky bodů (1) a (2) a poukazuje na výhody pokročilých konstitučních modelů při předpovědi chování geotechnického díla.

2. Geologické podmínky

Ze stratigrafického hlediska náleží zájmové území do období spodnobádenského marinního miocénu karpatské předhlubně, který zde dosahuje mocnosti několika stovek metrů. Samotné tunely jsou vedeny v zastavěném území, proto je převážná část pokryvných útvarů reprezentována antropogenními materiály. Přirozené pokryvné útvary jsou zastoupeny sprašovými hlínami a jílovitými hlínami. Báze kvarterního pokryvu je tvořena fluviálními štěrkopísčitémi sedimenty, často s příměsí hlíny či zajiřovanými. Předkvartení podklad je zde budován vápnatým, prachovitým jílem “téglem” výše

zmíněného stáří. Zdravé jíly mají zelenošedou barvu, v přípovrchové zóně jsou zbarveny rezavohnědě. Konzistence neogenních jílu je tuhá až pevná, plasticita vysoká. Mají blokovitý až drobně úlomkovitý rozpad, hlavní tektonické plochy jsou ohlazené a nerovné. Hladina podzemní vody je vázána na štěrkopísčité sedimenty.

3. Laboratorní experimenty

Pro stanovení mechanického chování brněnských jílu byla provedena řada laboratorních zkoušek na neporušených a rekonstituovaných vzorcích. Neporušené vzorky byly odebrány ze dvou jádrových vrtů z hloubek 15.5 a 19.5m tenkostěnnými ocelovými odběráky.

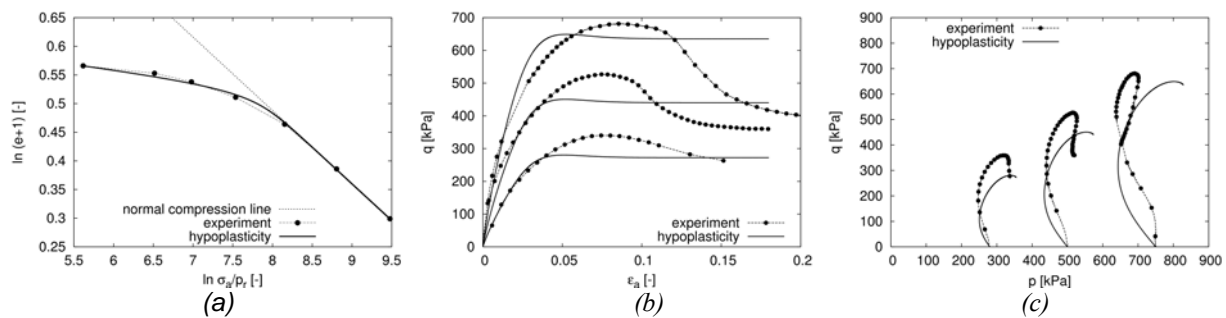
Z každé hloubkové úrovně byly připraveny tři neporušené vzorky pro nedrénované triaxiální zkoušky (CIUP). Vzorky průměru 38mm, opatřené radiální drenáží a standardními destičkami byly osazeny lokálními snímači LVDT pro stanovení tuhosti při velmi malých přetvořeních. Jeden ze vzorků byl vybaven "bender elementy", piezokeramickými snímači používanými pro měření tuhosti zeminy při velmi malých přetvořeních, které je založeno na principu propagace smykových vln. Neporušené vzorky byly izotropně konsolidovány na tři různé úrovně napětí (250, 500 a 750kPa) a následně usmyknuty řízenou deformací. Dále byly realizovány edometrické zkoušky na neporušených a rekonstituovaných vzorcích do axiálního napětí 13MPa. Výsledky umožnily stanovení pozice čáry normální konsolidace a vyhodnocení stupně překonsolidace. Sada zkoušek v rotačním smykovém přístroji na rekonstituovaných vzorcích byla provedena za účelem vyhodnocení úhlu vnitřního tření v kritickém stavu. (Najser a Boháč, 2005). Pro dodatečné ověření kritické pevnosti proběhla triaxiální zkouška CIUP na rekonstituovaném, izotropně konsolidovaném vzorku při napětí 2,6MPa.

4. Konstituční modely a jejich kalibrace

V příspěvku jsou porovnány predikce dvou konstitučních modelů, které měly za úkol charakterizovat chování brněnského jílu. Prvním modelem je Mohr-Coulombův model, neboť v České republice představuje stále nejpoužívanější model v geotechnické praxi.

Druhým modelem je hypoplastický model pro jíly (Mašín, 2005, Mašín 2008b) s konceptem intergranulárního přetvoření (Niemunis a Herle, 1997). Tento model byl vybrán jako zástupce pokročilých konstitučních modelů, které jsou schopny postihnout komplexní chování zeminy. Nelinearita chování, vysoká tuhost při velmi malých přetvořeních, pokles tuhosti s rostoucím přetvořením jsou důležité vlastnosti zeminy, které bere model v úvahu a jsou nezbytné pro získání důvěryhodných výsledků.

Základní verze hypoplastického modelu vyžaduje pět parametrů zeminy, které odpovídají parametrům Modifikovaného Cam clay modelu: N , λ^* , κ^* , φ_c , r . Parametry N a λ^* definují pozici a sklon NCL v zobrazení $\ln p$ vs. $\ln (1+e)$, kde p je střední napětí a e číslo porovitosti. Parametr κ^* definuje směrnici čáry izotropního odlečnění ve stejném zobrazení. Kalibrace těchto tří parametrů na výsledcích edometrické zkoušky neporušeného vzorku brněnského jílu je na obr. 1a. Parametr φ_c je úhel vnitřního tření v kritickém stavu, který byl kalibrován na výsledky zkoušek v rotačním smykovém přístroji a ověřen triaxiální zkouškou rekonstituovaného vzorku. Parametr r , řídící smykovou tuhost zeminy, je stanoven z triaxiálních zkoušek CIUP na neporušených vzorcích (obr. 1b, c). Obr. 1b znázorňuje deviatorové napětí vůči smykovému přetvoření, obr. 1c představuje neodvodněné dráhy napětí.



Obr.1 Kalibrace parametrů N , λ^* a κ^* hypoplastického modelu na data edometrické zkoušky neporušeného vzorku (a), kalibrace parametru r hyp. modelu (b) a simulace nedrénovaných drah neporušených vzorků (c)

Základní hypoplastický model predikuje chování zeminy pro střední až velká přetvoření. Abychom byli schopni predikovat vysokou tuhost a pokles tuhosti při velmi malých přetvořeních je zaveden koncept intergranulárního přetvoření, který vyžaduje dalších pět parametrů (m_R , m_T , R , β_r a χ). Tyto parametry byly odvozeny z měření smykové tuhosti prostřednictvím snímačů LVDT a “bender elementů”. V Tab.1 jsou uvedeny parametry hypoplastického modelu získané kalibrací experimentálních dat. Kalibrace MC modelu není vzhledem k rozsahu příspěvku uvedena, nicméně parametry jsou uvedeny v Tab.2.

Tab.1 Parametry brněnského jílu pro hypoplastický model kalibrované na laboratorních zkouškách

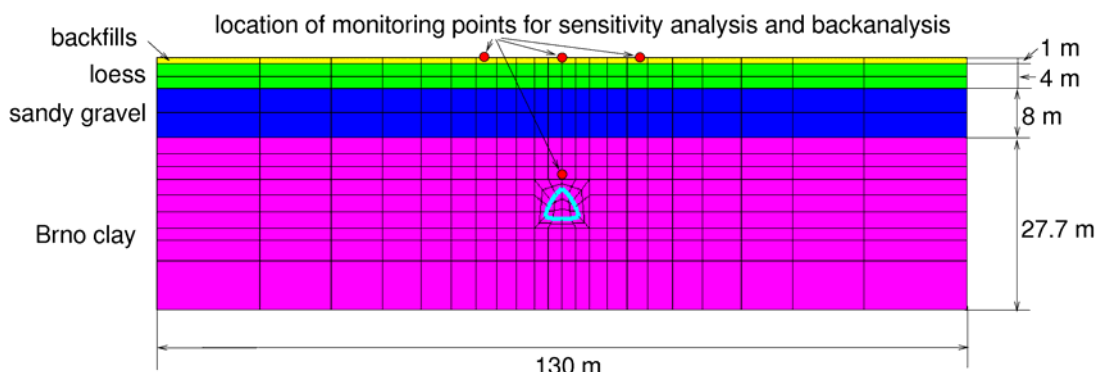
φ_c	λ^*	κ^*	N	r	m_R	m_T	R	β_r	χ
19.9°	0.128	0.01	1.506	0.45	16.75	16.75	0.0001	0.2	0.8

Tab.2 Parametry brněnského jílu pro Mohr-Coulombův model kalibrované na laboratorních zkouškách

Φ	C	ψ	E	ν
28.5°	0 MPa	3°	8 Mpa	0.4

5. Simulace průzkumné štoly

Simulace průzkumné štoly proběhla v MKP programu Tochnog Professional ve 2D. Geometrie, síť a zjednodušený geologický řez jsou předmětem obr. 2 a odpovídají staničení tunelu T2 0.840m.



Obr.2 Geometrie a síť použitá pro simulaci průzkumné štoly

Štola s délkou strany přibližně 5m je situována 21.2m pod úrovní terénu a hladina podzemní vody je vázána na bázi štěrkokopísků. Realizovaná konsolidační analýza zohlednila 3D efekty ve 2D pomocí β -metody (Karakus, 2007) kde faktor β je roven 0.55.

Vrstvy nasedající na brněnský jíl byly simulovány Mohr-Coulombovým modelem a jejich parametry zvoleny dle výsledků komerčních zkoušek ve smykové krabici (Pavlík et al., 2003) a ČSN 731001 (Tab.3.). Ostění bylo modelováno jako lineárně elastické s $E = 24.6\text{GPa}$ a $\nu = 0.1$.

Tab.3 Parametry geologických vrstev nad brněnským jílem

Soil	$\varphi [^\circ]$	$c [\text{MPa}]$	$\psi [^\circ]$	$E [\text{Mpa}]$	N
Backfill	20	10	4	10	0.35
Loess	28	2	2	45	0.4
Sandy gravel	30	5	8	60	0.35

Počáteční podmínky simulace představovaly vertikální napětí, číslo pórovitosti a K_0 . $e=0.83$ bylo změřeno při zkouškách na neporušených vzorcích a K_0 odvozeno ze vztahu Mayne a Kulhawya [7]:

$$K_0 = (1 - \sin \varphi) OCR^{\sin \varphi} \quad (1)$$

Z edometrických zkoušek na neporušených vzorcích jílu bylo stanoveno překonsolidační napětí hodnoty 1800kPa (obr. 1a), jemuž odpovídá stupeň překonsolidace OCR roven 6.5, který vede ke $K_0=1.25$.

6. Analýza sensitivity

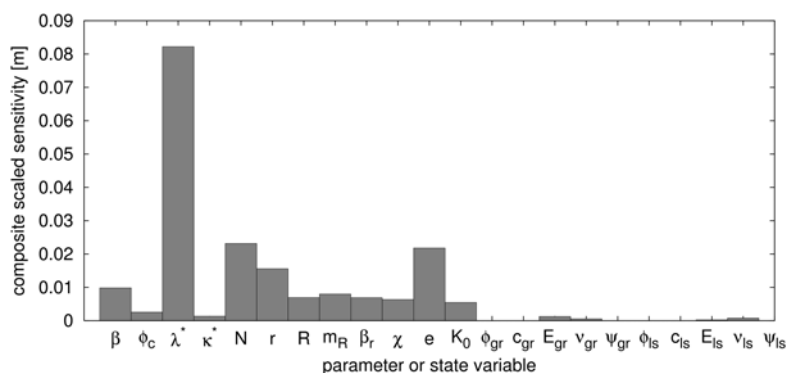
Abychom objasnili vliv jednotlivých geologických vrstev na výsledky simulací byla provedena analýza sensitivity pomocí programu UCODE (Poeter a Hill, 1997). Předmětem analýzy je porovnání výsledků simulací s měřením vertikálních deformací ve čtyřech zvolených bodech vyznačených na obr. 2. Rozdíl mezi daty ze simulací a z monitoringu je vyjádřen pomocí "objective function S(b)" (Finno & Calvello, 2005):

$$S(b) = [y - y'(b)]^T \omega [y - y'(b)] \quad (2)$$

kde b je vektor parametrů, y vektor observačních hodnot, $y'(b)$ vektor vypočtených hodnot odpovídajících observačním hodnotám a ω je váhová matice. Sensitivita výsledků na změnu každého parametru je vyjádřena ve smyslu "composite scaled sensitivity css_j " definované jako:

$$css_j = \left[\frac{1}{ND} \sum_{i=1}^{ND} \left(\left(\frac{\partial y'_i}{\partial b_j} \right) b_j \omega_{ii}^{1/2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

kde b_j je j -tý studovaný parametr, y'_i je i -tá vypočtená hodnota, $\partial y'_i / \partial b_j$ je sensitivita i -té vypočtené hodnoty vzhledem k j -tému parametru, ω_{ii} je váha i -té observační hodnoty a ND je počet observačních hodnot.



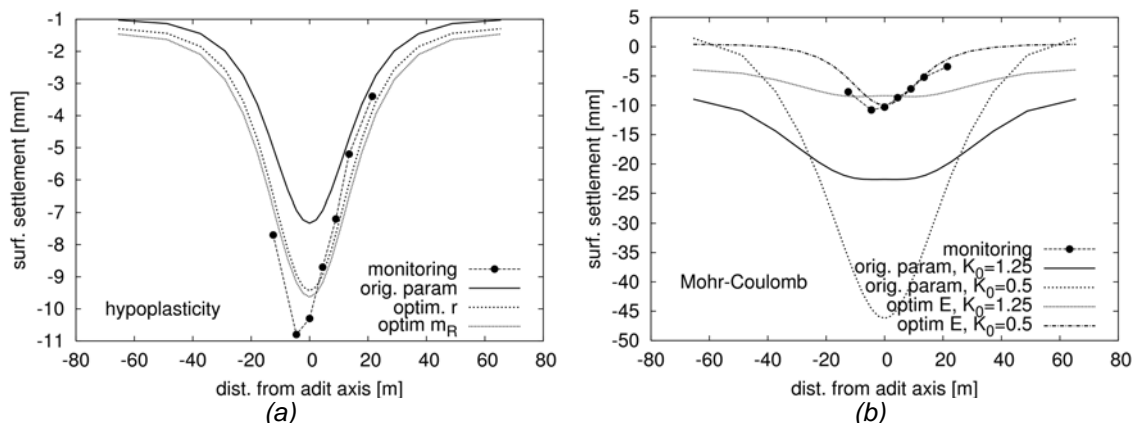
Obr.3. "Composite scaled sensitivities" pro simulaci průzkumné štoly

Na obr. 3 jsou zobrazeny výsledné “composite scaled sensitivities” pro simulaci průzkumné štoly využívající hodnoty z monitoringu ve zvolených bodech (obr. 2). Parametry bez dolního indexu odkazují na hypoplastické parametry brněnského jílu, ls index na vrstvu spraši, gr vrstvu štěrkopísků. Doplněna je i sensitivita výpočtu pro stavové proměnné e , K_0 a faktor β . Ze sloupcového grafu je zřejmé, že výsledky simulace jsou citlivé především na změnu parametrů vrstvy jílu. Parametry ostatních vrstev výrazně neovlivňují výsledky simulace, proto nebyly jejich mechanické vlastnosti předmětem důkladného studia.

7. Inverzní analýza parametrů s využitím dat z průzkumné štoly

Běžným problémem geotechnické praxe při studiu chování zemin je, že laboratorní výsledky nereprezentují dobře chování horninového masivu vzhledem k velikosti vzorku. Proto jsme přistoupili k inverzní analýze průzkumné štoly a vybrané parametry kalibrované na laboratorních zkouškách jsme optimalizovali. Pro inverzní analýzu byl použit program UCODE. Principem analýzy je korekce parametrů a dalších aspektů modelu, dokud se vypočtené výsledky simulace co nejlépe neshodují s chováním geotechnického díla. UCODE provádí optimalizaci na základě minimalizace „objective function $S(b)$ “ (rovnice (2)) využitím modifikované Gauss-Newtonovy metody. Pro složení „objective function $S(b)$ “ byly použity hodnoty vertikálních deformací ve čtyřech bodech (obr. 2)

Při realizaci tunelů NRTM v jemnozrnných zeminách jsou deformace způsobené ražbou ovlivněny především tuhostí zeminy a její nelinearitou (Mašín, 2008a). Z tohoto důvodu byly optimalizovány parametry kontrolující smykovou tuhost, u hypoplastického modelu r a m_T , u MC modelu Youngův modul E . Na obr. 4a je porovnána poklesová kotlina způsobená ražbou štoly s výsledky hypoplastického modelu. Je patrné, že hypoplastický model s parametry kalibrovanými na laboratorních zkouškách podhodnocuje velikost sednutí přibližně o 30% a tvar kotliny predikuje správně. Obr. 4b obdobně porovnáva Mohr-Coulombův model a je zjevné, že sednutí přehodnocuje přibližně o 100% a predikovaný tvar kotliny je nereálně široký. Jelikož výsledky MC modelu jsou citlivé na velikost hodnoty K_0 , je graf doplněn o predikce pro nereálně nízké $K_0=0.5$ se shodnými parametry. Výsledné hodnoty sednutí pro nízké K_0 jsou přehodnoceny o 450%, nicméně tvar kotliny je přijatelný.



Obr.4. Predikce poklesové kotliny způsobené ražbou štoly s originálními a optimalizovanými parametry

V obr. 7 jsou dále zobrazeny poklesové kotliny predikované oběma modely pro optimalizované parametry (Tab. 4 a Tab. 5). Optimalizace hypoplastických parametrů r a m_T má shodný vliv na výsledky, rozložení a velikost sednutí odpovídá datům z monitoringu. Poklesová kotlina MC modelu pro reálné K_0 je opět příliš široká. Pouze s nereálně nízkým $K_0=0.5$ a nereálně vysokým E (Tab. 5) predikuje správný tvar a velikost kotliny. Mohr-Coulombův model tedy nemůže být použit pro predikce sednutí způsobených ražbou, pokud by vycházely výhradně z dat laboratorních experimentů.

Tab.4 Počáteční a optimalizované hodnoty parametrů r a m_R hypoplastického modelu (a), počáteční a optimalizovaný parametr E Mohr-Coulombova modelu pro různé hodnoty K_0 (b)

parameter set	r	m_R
original param.	0.45	16.75
optimised r	0.515	16.75
optimised m_R	0.45	12.42

parameter set	E [MPa]
original param.	8
Opt. E , $K_0=1.25$	24.2
opt. E , $K_0=0.5$	148.9

Optimalizované a původní parametry byly v další fázi výzkumu využity k simulaci budoucího tunelu (Svoboda a Mašín, 2008). Výsledky zde nejsou prezentovány z důvodu omezeného rozsahu příspěvku.

8. Shrnutí poznatků

V příspěvku jsme demonstrovali, že výběr konstitučního modelu pro numerickou analýzu významně ovlivňuje pedikce modelu. Srovnány byly dva modely – standardní Mohr-Coulombův model a pokročilý hypoplastický model. Na simulaci průzkumné štolky tunelu Dobrovského v Brně jsme ukázali, že hypoplastický model předpovídá rozumný tvar poklesové kotliny i s parametry kalibrovanými na laboratorní výsledky. Je tedy vhodný i pro predikce založené výhradně na laboratorním výzkumu. Mohr-Coulombův model předpovídá správně deformace způsobené štolou pouze s nereálnými parametry z inverzní analýzy.

Poděkování

Autoři děkují za finanční podporu výzkumným grantům GAČR 205/08/0732, GAUK 137907 a MŠM 0021620855. Firmě Geotest Brno a.s. za spolupráci a poskytnutou dokumentaci.

Reference

- Finno, R. J. and Calvello, M. (2005) Supported Excavations: Observational Method and Inverse Modeling. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, Vol. 131, No. 7, 826-836.
- Karakus, M. (2007). Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, 47–56.
- Mašín, D. (2005) A hypoplastic constitutive model for clays. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 29, No. 4, 311-336.
- Mašín, D. (2008a) 3D modelling of a NATM tunnel in high K_0 clay using different constitutive models. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering (submitted).
- Mašín, D. (2008b) Vývoj a aplikace hypoplastických konstitučních modelů. Geotechnika, No.2, 3-9.
- Mayne, P. W. and Kulhawy, F. H. (1982) K_0 -OCR relationships in soil. Proc. ASCE J. Geotech. Eng. Div., Vol. 108, pp 851–872.
- Najser, J. a Boháč, J. (2005) Measurement of critical state strength in the ring shear apparatus (in Czech). In proc. 33rd conf. Zakládání staveb, Brno, 37-42.
- Niemunis, A. and Herle, I. (1997) Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, Vol. 2, 279–299.
- Pavlík, J. a Rupp, D. (2003) Silnice I/42 Brno – VMO Dobrovského A, průzkumné štolky, Podrobný geotechnický průzkum, Závěrečná zpráva
- Poeter, E. P. and Hill, M. C. (1998) Documentation of UCODE, a computer code for universal inverse modelling. US Geological Survey Water Resources Investigations Report 98-4080;116pp.
- Svoboda, T. and Mašín, D. (2008) Impact of a constitutive model on inverse analysis of a NATM tunnel in stiff clays. In proc. ITA-AITES WTC 2008 Agra, India