

PARAMETRY HYPOPLASTICKÉHO MODELU PRO NUMERICKÝ MODEL TUNELU BŘEZNO

Zdeněk Brunát

Univerzita Karlova v Praze

RNDr. David Mašín, MPhil., PhD.

Univerzita Karlova v Praze

Ing. Jan Boháč, CSc.

Univerzita Karlova v Praze

Parameters of a hypoplastic model for a numerical model of Březno tunnel.

The paper is a part of a research project aimed at improvement of geophysical (gravimetric) methods. In the project, gravimetric measurements above a cavity of a known size and depth (namely, Březno tunnel near Chomutov) were compared with the results of a gravimetric model. The model was based on a geotechnical model of the deformation zone around the cavity. In the geotechnical model, the material behaviour is described by a hypoplastic constitutive model for clays. The paper presents the calibration of this model based on laboratory testing of reconstituted and undisturbed clay samples.

1. ÚVOD

Tento příspěvek je součástí výsledků výzkumného projektu jenž si klade za cíl vývoj ve vyhodnocování geofyzikálních (gravimetrických) metod, používaných pro indikaci podzemních kaveren. Ve standardně používaném postupu se uvažuje vznik rozvolněné zóny nad kavernou, která znamená snížení objemové hmotnosti horniny nad kavernou a tím ovlivňuje výsledky gravimetrických měření. Náplní výzkumného projektu je provedení gravimetrických měření nad kavernou o známé velikosti a hloubce a porovnání těchto měření s výsledky geofyzikálního modelu. Vstupem do geofyzikálního modelu je průběh objemové hmotnosti horniny v okolí výrubu simulovaný geotechnickými metodami.

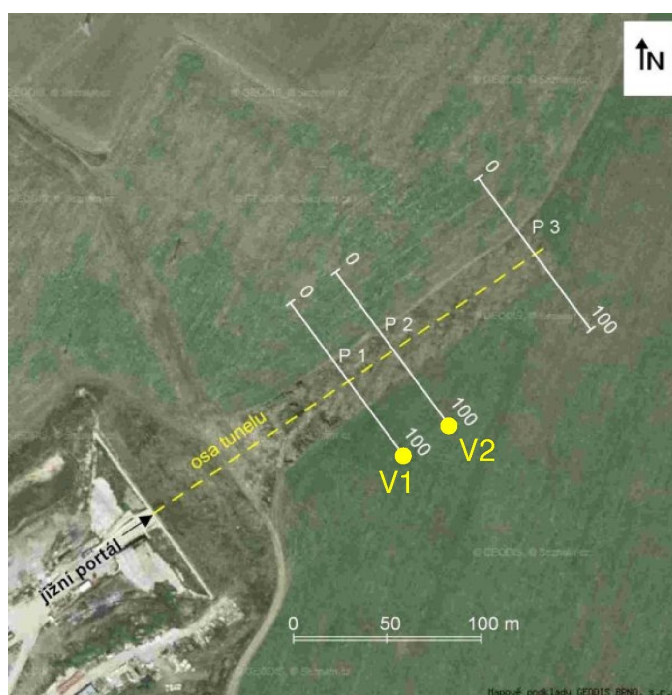
Jako vhodná kaverna o známé velikosti a hloubce byl vybrán tunel Březno u Chomutova, a to jeho část poblíž jižního portálu, která nebyla ovlivněna závaly. Tato lokalita je vhodná ze dvou důvodů. Byla na ní provedena geofyzikální měření a tunel je situován v jemnozrnných zeminách, jejichž chování je možno relativně přesně popsat pokročilými konstitučními modely, které uvažují pórovitost jako stavovou proměnnou. Průběh pórovitosti (a tedy hustoty) v okolí výrubu je přitom hlavním vstupem vyžadovaným pro gravimetrický model.

Pro popis mechanického chování jílu byl vybrán hypoplastický konstituční model pro jemnozrnné zeminy (Mašín, 2005, 2008). Pro sestavení numerického modelu tunelového výrubu bylo nutno konstituční model kalibrovat (najít jeho parametry). Z toho důvodu byla provedena řada laboratorních zkoušek v laboratoři mechaniky zemin PřFUK. Výsledky těchto zkoušek a kalibrace hypoplastického modelu jsou obsahem tohoto příspěvku.

2. ZKOUŠENÝ MATERIÁL

Nadloží tunelu Březno je tvořeno monotónním sledem jílovců náležících libkovickým vrstvám neogenní teplicko-mostecko-chomutovské pánve. Z hlediska klasifikace mechaniky zemin se jedná o zeminu F8 CH pevné konzistence. Pro studium mechanických vlastností tohoto materiálu byly provedeny dva jádrové vrty V1 a V2. Vrty byly situovány asi 50 m JV od osy tunelu. Jejich pozice, stejně jako pozice gravimetrických profilů P1, P2 a P3, je zobrazena na Obr. 1. Vrty byly hluboké 22m, zasahovaly tedy k počvě tunelu, uhelná sloj náležící svrchní části Holešických vrstev, která probíhá pod počvou tunelu, ovšem již zastižena nebyla.

Vzorky zeminy byly odebrány pomocí tenkostěnného zatlačovaného odběráku, který umožňuje pouze minimální porušení původní struktury zeminy při odběru. Tímto způsobem bylo získáno celkem 13 neporušených vzorků. Dále byly s krokem 1m odebrány porušené vzorky pro zjištění průběhu vlhkosti zeminy s hloubkou.



Obr. 1: Lokalizace geofyzikálních profilů a vrtů V1 a V2

3. PŘÍPRAVA VZORKŮ

Laboratorní experimenty byly prováděny na dvou typech vzorků – na vzorcích neporušených a vzorcích rekonstituovaných. Neporušené vzorky pro triaxiální zkoušky byly připraveny standardním způsobem na žádané rozměry. Materiál pro rekonstituované vzorky se připravil hnětením za vlhkosti odpovídající přibližně 1,5 násobku vlhkosti na mezi tekutosti (Obr. 2 vlevo). Hnětení probíhalo tak dlouho až vznikla homogenní pasta (přibližně 4 – 5 hodin). Tou pak byly naplněny lisy pro výrobu rekonstituovaných vzorků (Obr. 2 vpravo). Pomocí závaží bylo vyvozeno zatížení přibližně 100 kPa. Konsolidace vzorku trvala přibližně 14 dní.

Vzorky pro oedometrické zkoušky a zkoušky v smykových krabicích byly připraveny obdobným způsobem jako vzorky pro zkoušky triaxiální.



Obr. 2: Příprava rekonstituovaných vzorků pro trojosou zkoušku

4. PROVEDENÉ LABORATORNÍ EXPERIMENTY

V rámci řešení projektu byla provedena řada laboratorních zkoušek. Jednalo se o čtyři nedrénované triaxiální zkoušky na neporušených vzorcích CIUP a dvě zkoušky izotropní stlačitelnosti na rekonstituovaných vzorcích. Dále se jednalo o pět krabicových smykových zkoušek na neporušených vzorcích v translačním krabicovém přístroji, tři smykové zkoušky na rekonstituovaných vzorcích provedené v rotačním smykovém přístroji, dvě odeometrické zkoušky na neporušených vzorcích a jedna odeometrická zkouška na rekonstituovaném vzorku.

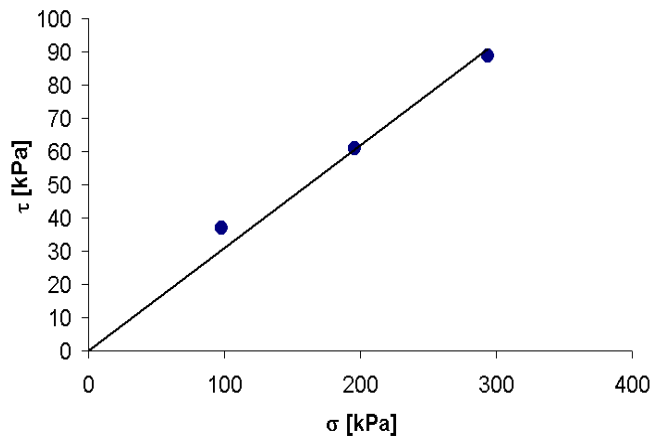
5. VÝSLEDKY ZKOUŠEK A KALIBRACE KONSTITUČNÍHO MODELU

Laboratorní zkoušky byly zvoleny tak, aby jejich výsledky posloužily pro kalibraci hypoplastického i Mohr-Coulombova modelu. V této části příspěvku budou prezentovány výsledky zkoušek využité pro kalibraci jednotlivých parametrů hypoplastického modelu a výsledné parametry hypoplastického a Mohr-Coulombova modelu.

Ve vyhodnocení experimentů jsou všechna napětí efektivní.

5.1 Úhel vnitřního tření v kritickém stavu φ_c

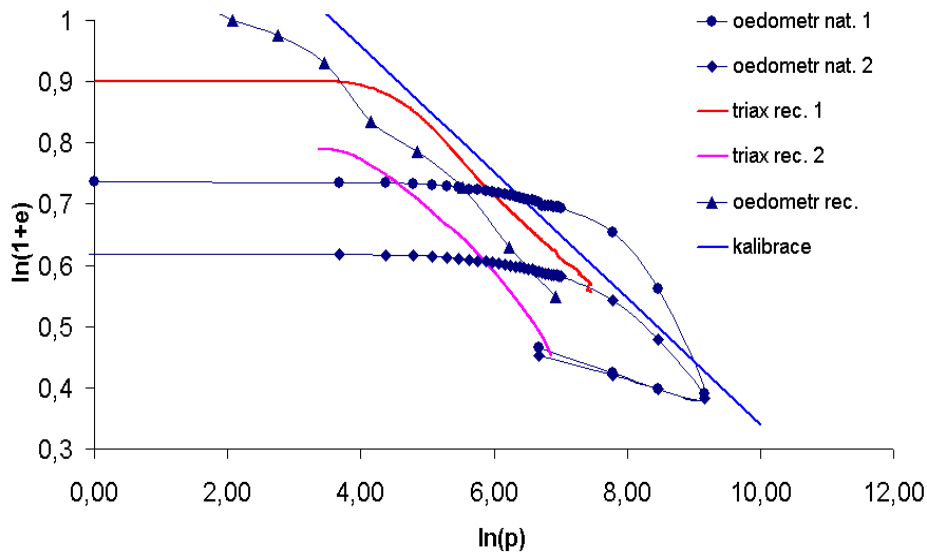
Úhel vnitřního tření v kritickém stavu φ_c byl kalibrován na základě výsledků rotačních smykových zkoušek s využitím postupu publikovaného Najserem a Boháčem (2005). Ti na základě provedených laboratorních zkoušek navrhli, že „vrcholová pevnost“ zjištěná v rotačním smykovém přístroji na rekonstituovaném vzorku zeminy odpovídá kritické pevnosti zemin. Proložení obáły pevnosti vedlo k $\varphi_c = 18,0^\circ$, viz obr. 3.



Obr. 3: Vyhodnocení kritického úhlu vnitřního tření na základě obálky pevnosti zjištěné na rekonstituovaných vzorcích v kruhovém smykovém přístroji.

5.2 Parametry N a λ^*

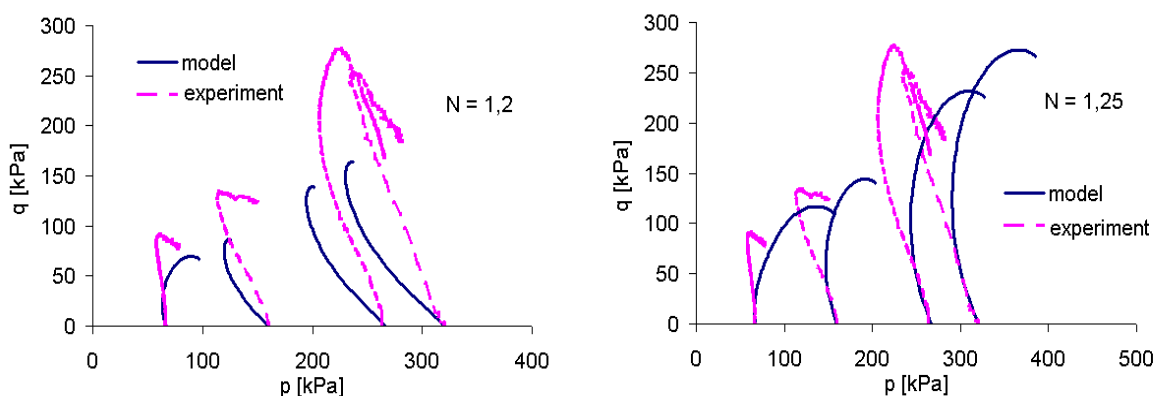
Parametr λ^* vyjadřuje směrnici čáry normálního stlačení jak jednoosého (z oedometrických zkoušek), tak izotropního (v trojosém přístroji) v zobrazení $\ln(1+e)$ vs. $\ln p'$. Obr. 4 ukazuje čáry normálního stlačení (NCL) získané z jednotlivých zkoušek (v případě oedometrických zkoušek se uvažovalo $K_0=1-\sin \varphi_c$ pro výpočet p ze známého vertikálního napětí). Je zřejmé, že i přes vertikální posunutí jednotlivých čar, způsobené nepřesnostmi v měření počáteční vlhkosti, jež byla využita pro výpočet čísla pórovitosti, mají všechny čáry NCL přibližně shodný sklon, který lze vyjádřit pomocí parametru $\lambda^*=0,103$.



Obr. 4: Vyhodnocení parametru λ^* na základě zkoušek izotropní a oedometrické stlačitelnosti.

Stanovení parametru N bylo problematictější, než stanovení parametru λ^* . Parametr N vyjadřuje vertikální pozici čáry normální konsolidace v zobrazení $\ln(1+e)$ vs. $\ln p$. Kalibrace parametru N na základě zkoušek stlačitelnosti je proto často nejednoznačná vzhledem k nepřesnostem při stanovení počátečního čísla pórovitosti laboratorních vzorků. Potvrdilo se to i v tomto případě, jak ukazuje obr. 5. Z toho důvodu se přistoupilo k jinému způsobu kalibrace parametru N .

Vycházelo se ze skutečnosti, že N pro dané číslo pórovitosti a dané střední napětí vyjadřuje stupeň překonsolidace materiálu. Tento parametr byl proto kalibrován na základě simulací nedrénovaných triaxiálních zkoušek na neporušených vzorcích zeminy tak, aby model správně předpovídal stupeň překonsolidace materiálu, který se projevuje směrem dráhy napětí a vrcholovou pevností. Obr. 5 ukazuje experimentálně zjištěné a předpovídané dráhy napětí pro dvě různé hodnoty parametru N . Hodnota $N=1,25$ se uvažovala jako hodnota nejlépe vystihující experimentální data, přestože shoda modelu s experimentem není dokonalá.



Obr. 5: Kalibrace parametru N pomocí simulace nedrénovaných zkoušek na neporušených vzorcích. Vlevo $N=1,2$, vpravo zvolená hodnota $N=1,25$

5.3 Parametr κ^*

Parametr κ^* vyjadřuje směrnici čáry izotropního i oedometrického odlehčení v zobrazení $\ln(1+e)$ vs. $\ln p'$. Byl nalezen na základě čáry oedometrického odlehčení pro zkoušky na neporušených vzorcích (obr. 5). Výslednou hodnotou je $\kappa^*=0,032$.

5.4 Parametr r

Posledním parametrem základní verze hypoplastického modelu je parametr r . Ten kontroluje předpovídanou smykovou tuhost zeminy. Kalibrován byl na základě simulací nedrénovaných triaxiálních zkoušek na neporušených vzorcích. Ukázka pracovního diagramu zkoušky s počátečním komorovým napětím 160 kPa je na obr. 6. Experimentálním datům nejlépe odpovídá hodnota $r=0,5$.

Výsledné hodnoty parametrů základní verze hypoplastického modelu jsou shrnuty v tabulce 1.

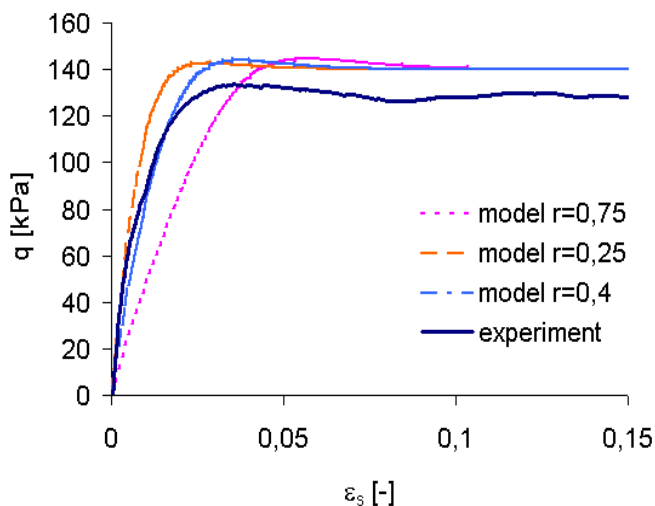
Tab.1 Parametry jílu tunelu Březno pro hypoplastický model kalibrované na základě provedených laboratorních zkoušek

φ_c	λ^*	κ^*	N	r
18,0°	0,103	0,032	1,25	0,4

Pro porovnání předpovědi hypoplastického modelu byl na základě provedených zkoušek kalibrován i model Mohr-Coulombův. Úhel vnitřního tření odpovídá vrcholovému stavu. Parametry Mohr-Coulombova modelu jsou v tabulce 2.

Tab.2 Parametry jílu tunelu Březno pro Mohr-Coulombův model kalibrované na základě provedených laboratorních zkoušek

E	ν	φ_p	c	ψ
5,5 Mpa	0,2	26°	11,8 kPa	3°



Obr. 6: Kalibrace parametru r na základě triaxiální neodrénované zkoušky na neporušeném vzorku.

6. ZÁVĚR

Výpočet deformační zóny a změny hustoty materiálu kolem tunelového výrubu, který je nutný pro sestavení gravimetrického modelu, jež bude porovnán s gravimetrickými měřeními a poslouží k dalšímu vývoji této geofyzikální metody, vyžaduje adekvátní popis mechanického chování materiálu v němž je výrub situován. Článek shrnul laboratorní experimenty, jež byly provedeny na materiálu třetihorních jílovců mostecké pánve, které posloužily ke kalibraci hypoplastického modelu pro jíly. Dále byla podrobně popsána kalibrace tohoto modelu a uvedeny získané parametry hypoplastického a Mohr-Coulombova modelu.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují za finanční podporu grantům GAČR 205/07/0574, GAČR 205/08/0732 a MSM0021620855.

LITERATURA

- Mašín, D. (2005) A hypoplastic constitutive model for clays. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 29, No. 4, 311-336.
- Mašín, D. (2008). Vývoj a aplikace hypoplastických konstitučních modelů. Geotechnika, No. 2, 3-9.
- Najser, J. a Boháč, J. (2005) Pevnost zemin v kritickém stavu v torzním krabicovém přístroji. In. Proc. 33rd Conf . Zakládání staveb, Brno, 37-42.