

UŽITÍ ZPĚTNĚ STANOVENÉHO SOUČINITELE BOČNÍHO TLAKU V KLIDU K_0 BRNĚNSKÉHO JÍLU V NUMERICKÉ SIMULACI POSTUPU RAŽBY TUNELU DOBROVSKÉHO

Ing. Josef Rott, Ph.D., Doc. RNDr. David Mašín, Ph.D., MPhil.

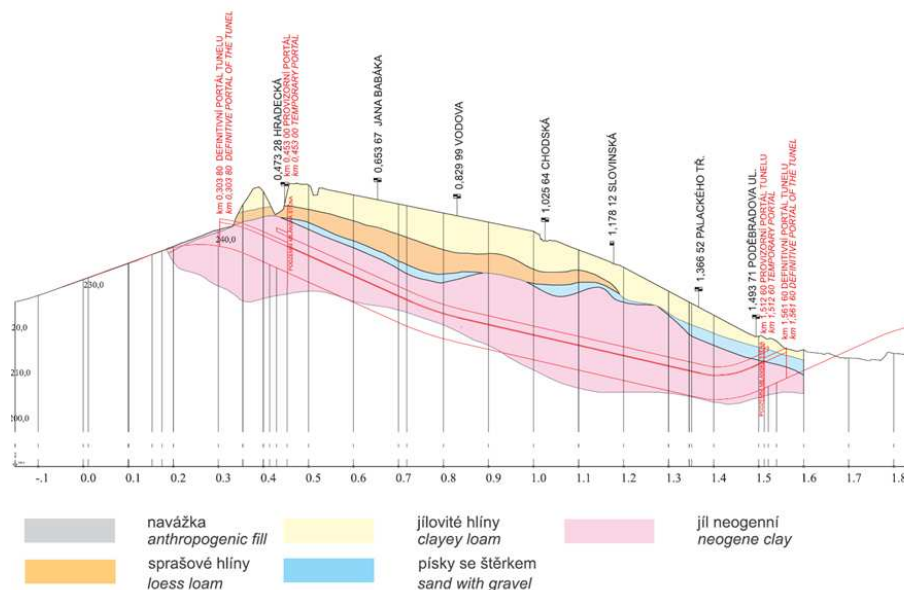
Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze

The usage of back-analyzed value of the coefficient of lateral earth pressure at rest K_0 in Brno clay in numerical simulation of Dobrovského tunnel excavation

In the article, we summarize the process of verification of back-analyzed value of the earth pressure coefficient at rest in overconsolidated Brno clay. It indicated $K_0 = 0,81$ in the depth of 23 m and in the given position. This value was subsequently used as initial condition in numerical 3D analysis of a particular portion of Dobrovského tunnel. The measurements of horizontal deformation by inclinometer and surface settlement trough agree well with the results obtained from the back-analysis.

1. ÚVOD

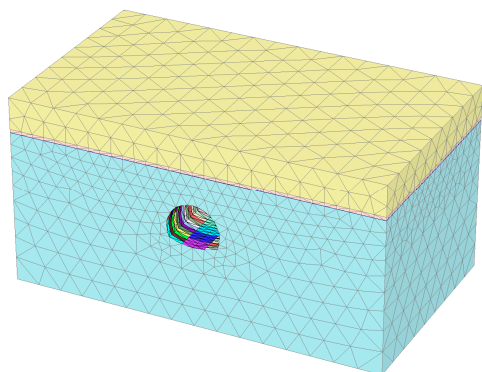
V tomto článku popisujeme proces verifikace součinitele bočního tlaku v klidu K_0 , který jsme v předchozím výzkumu (Rott a Mašín, 2013) zjistili na základě zpětné analýzy konvergenčních měření v rozrážce kruhového průřezu. Konkrétní strategie poté spočívala v porovnání výsledků numerické analýzy tunelové trouby T1 tunelu Dobrovského v Brně raženého téměř v celé své délce v Brněnských jílech (obr. 1) a dat z geotechnického monitoringu. Jako počáteční podmínka byla zadána hodnota součinitele bočního tlaku v klidu $K_0 = 0,81$, kterou stanovili Rott a Mašín, (2013), a která se váže k součiniteli anizotropie $\alpha_G = 1,35$ změřenému laboratorně na Brněnském jílu. Tato relace $K_0 - \alpha_G$ vyhovuje podmínce poměru konvergencí $u_y/u_z = 1,25$ z analýzy nevystrojené rozrážky. Dále jsme zohlednili případnou nejistotu v měření α_G . Provedli jsme další zpětné analýzy s různými hodnotami α_G (vedoucí k různým hodnotám K_0) a výsledky opět porovnali s monitoringem.



Obr. 1: Podélný geologický profil tunelovou troubou T1 tunelu Dobrovského (Pavlík et al., 2004).

2. POPIS KONSTRUKCE TUNELU A NUMERICKÉHO MODELU

Geometrické proporce tunelu a další detailní informace jsou popsány například v disertační práci Svobody (2010). 3D numerický model tunelové trouby T1 byl vytvořen v programu PLAXIS 3D 2012, přičemž sestával z 31464 elementů. Modelovaná a diskretizovaná oblast (Obr. 2) má

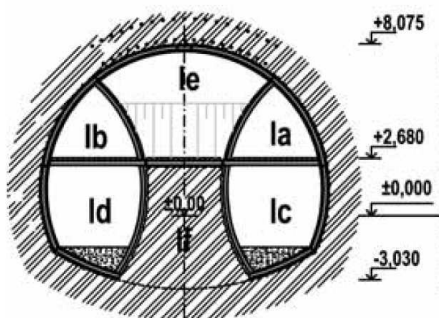


Obr. 2: Geometrie modelované oblasti.

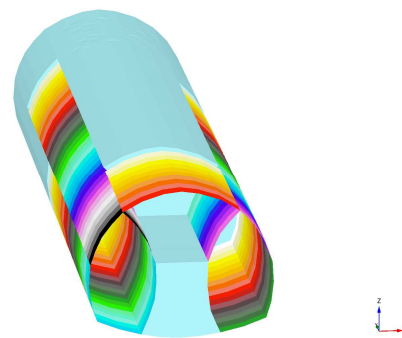
rozměry 98 m (šířka) x 50 m (výška) x 56,4 m (délka). Z důvodu absence průzkumných štol a rozrážek, mikropilotových deštníků a kompenzačních injektáží jsme simulovali úsek ve staničení km 0,6504 – km 0,7068. Výška vrstvy jílu nad kalotou tunelu činí 7,9 m, celková výška nadloží včetně kvartérního pokryvu dosahuje v zájmovém úseku 17,2 m. Brněnskému jílu byl přiřazen hypoplastický model s implementovanou anizotropií tuhosti v oboru malých přetvoření. Kvartérní sedimenty (tvořené písčítým štěrskem, sprašemi a antropogenními navážkami) byly modelovány jako ideálně pružně-plastické materiály. Primární ostění bylo podrobno homogenizaci (Rott, 2014), o které je pojednáno v následující kapitole. Celý modelovaný proces sestává ze 76 fází, kdy každá fáze značí postup o 1,2 m v těžbě či modifikaci ostění. Model přibližně respektuje skutečný postup provádění. Modelová průměrná rychlost ražby činí 1,2 m/8 hod a odstupy 6 dílčích čeleb (Obr. 3) vyjma čelby invertu je 8,4 m. Poslední fáze 76 je klíčová pro odečet svislých deformací, fáze 39 (Obr. 4) je v časové shodě s posledním měřením inklinometru INK 17, který je umístěn v km 0,675 ve vzdálenosti 1,5 m od projektovaného líce výrubu. Společně se scénářem skutečného postupu činnosti bylo tudíž možné porovnat deformace měřené a vypočtené.

rozměry 98 m (šířka) x 50 m (výška) x 56,4 m (délka). Z důvodu absence průzkumných štol a rozrážek, mikropilotových deštníků a kompenzačních injektáží jsme simulovali úsek ve staničení km 0,6504 – km 0,7068. Výška vrstvy jílu nad kalotou tunelu činí 7,9 m, celková výška nadloží včetně kvartérního pokryvu dosahuje v zájmovém úseku 17,2 m. Brněnskému jílu byl přiřazen hypoplastický model s implementovanou anizotropií tuhosti v oboru malých přetvoření. Kvartérní sedimenty (tvořené písčítým štěrskem, sprašemi a antropogenními navážkami) byly

modelovány jako ideálně pružně-plastické materiály. Primární ostění bylo podrobno homogenizaci (Rott, 2014), o které je pojednáno v následující kapitole. Celý modelovaný proces sestává ze 76 fází, kdy každá fáze značí postup o 1,2 m v těžbě či modifikaci ostění. Model přibližně respektuje skutečný postup provádění. Modelová průměrná rychlost ražby činí 1,2 m/8 hod a odstupy 6 dílčích čeleb (Obr. 3) vyjma čelby invertu je 8,4 m. Poslední fáze 76 je klíčová pro odečet svislých deformací, fáze 39 (Obr. 4) je v časové shodě s posledním měřením inklinometru INK 17, který je umístěn v km 0,675 ve vzdálenosti 1,5 m od projektovaného líce výrubu. Společně se scénářem skutečného postupu činnosti bylo tudíž možné porovnat deformace měřené a vypočtené.



Obr. 3: Členění čelby (Horák, 2009).



Obr. 4: Fáze 39 modelového postupu ražby – odečet u_x .

3. HYPOPLASTICITA BRNĚNSKÉHO JÍLU S ANIZOTROPIÍ TUHOSTI V OBORU VELMI MALÝCH PŘETVOŘENÍ

Chování Brněnského jílu je popsáno pomocí hypoplastického modelu pro jíly zahrnující anizotropii tuhosti, vyvinutý Mašínem (2014). Model je založen na teorii hypoplasticity, která je řízena následující primární rovnicí:

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

kde $\dot{\sigma}$ a $\dot{\epsilon}$ reprezentují objektivní (Zaremba-Jaumannovu) rychlost napětí respektive Eulerův tenzor přetvoření, \mathcal{L} a \mathbf{N} jsou konstituční tenzory čtvrtého, respektive druhého řádu, f_s a f_d jsou skalární faktory. Modelové parametry korespondují s parametry původního modelu (Mašín, 2005) a taktéž s parametry modifikovaného Cam-clay modelu. Model vyžaduje parametr $\phi_c = 22^\circ$ (úhel vnitřního tření v kritickém stavu), parametr $N = 1,51$ (pozice linie izotropního stlačení v prostoru $\ln p$ vs. $\ln(1+e)$), parametr $\lambda^* = 0,128$ (sklon linie izotropního stlačení v prostoru $\ln p$ vs. $\ln(1+e)$), parametr $\kappa^* = 0,015$ (parametr popisující objemovou odezvu při izotropním nebo oedometrickém odlehčení), a parametr $\nu = 0,33$ (parametr kontrolující smykovou tuhost). Pro predikci tuhosti v oboru malých a velmi malých přetvoření byl model zdokonalen zavedením konceptu intergranulárních přetvoření (Niemunis a Herle, 1997). Koncept vyžaduje zadání dalších parametrů. Smykový modul v oboru velmi malých přetvoření G_{tp0} (teoretický při nulovém přetvoření) je dán vztahem

$$G_{tp0} = p_r A_g \left(\frac{p}{p_r} \right)^{n_g} \quad (2)$$

přičemž A_g a n_g jsou bezrozměrné součinitele a referenční tlak p_r má hodnotu 1 kPa. V přímé návaznosti v modelu vystupují parametry definující rychlost a průběh degradace tuhosti při přetváření $R = 0,0001$; $m_{rat} = 0,5$; $\beta_r = 0,2$; $\chi = 0,8$. Model dále umožňuje zohlednit anizotropii tuhosti v oboru velmi malých přetvoření (Mašín a Rott, 2014). Klíčovým parametrem je zde součinitel anizotropie α_G daný poměrem horizontálního a vertikálního smykového modulu:

$$\alpha_G = \frac{G_{pp}}{G_{tp}} \quad (3)$$

Dva doplňující parametry charakterizují hodnoty součinitelů anizotropie Youngových modulů α_E a Poissonových čísel α_ν :

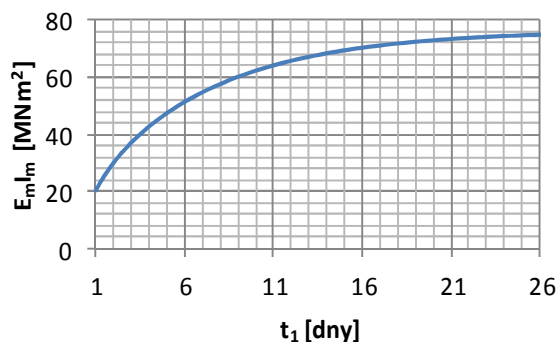
$$\alpha_E = \alpha_G^{(1/x_{GE})} \quad (4)$$

$$\alpha_\nu = \alpha_G^{(1/x_{G\nu})} \quad (5)$$

Na základě rešerše výsledků laboratorních zkoušek Mašín a Rott (2014) doporučují hodnoty $x_{GE} = 0,8$ a $x_{G\nu} = 1,0$.

4. HOMOGENIZACE A MODIFIKACE PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ

Homogenizaci (a následnou modifikaci) ostění jsme použili z důvodu nutnosti zahrnutí vlivu masivního profilu „HEBREX“ a postupného zrání stříkaného betonu na komplexní tuhost primární obezdívky. Homogenizace ocelobetonového ostění spočívá v převedení příčného řezu ostění, složeného ze dvou komponent o dvou (v případě nástřiku dvou vrstev betonu o třech) různých modulech pružnosti, na náhradní homogenizovaný příčný řez s jediným modulem pružnosti stříkaného



Obr. 5: Graf vývoje ohybové tuhosti v čase.

betonu. Homogenizace je v podstatě totožná s homogenizací používanou v technické mechanice. Používá však časově závislé převodní koeficienty a je následována modifikací vlivem pevné délky záběru (Rott, 2014). Jako první jsou instalovány ocelové nosníky, které začínají působit v čase $t_{tech,1}$ svojí plnou tuhostí. Poté, s prodlevou $t_{tech,2} - t_{tech,1}$ je aplikován stříkaný beton, jehož modul pružnosti (a proto i tuhost) je funkcí času. Časy t_1, t_2 jsou doby zrání první, respektive druhé vrstvy stříkaného betonu (dále jen SB). Modifikací přiřadíme tuhosti ostění homogennímu obdélníkovému průřezu, jehož délka je pevně stanovena délkou záběru b_z . Obdélníkový průřez bude mít výšku h_m a jeho modul pružnosti bude E_m . Pro časovou závislost tuhosti stříkaného betonu použijeme následující empirický vztah, který vychází z práce Oresteho (2003) a který publikuje ve své disertační práci Svoboda (2010).

$$E_B = E_f(1 - e^{-at/t_r}) \quad (6)$$

Převodní koeficient oceli na starší SB je řízen poměrem

$$n(t_1) = \frac{E_O}{E_f \left(1 - e^{-\frac{at_1}{t_r}}\right)}, \quad (7)$$

zatímco převod mladší druhé vrstvy SB na starší vrstvu SB poměrem

$$m(t_1, t_2) = \frac{E_f \left(1 - e^{-\frac{at_2}{t_r}}\right)}{E_f \left(1 - e^{-\frac{at_1}{t_r}}\right)} = \frac{1 - e^{-\frac{at_2}{t_r}}}{1 - e^{-\frac{at_1}{t_r}}} \quad (8)$$

Platí tedy

$$E_m(t_1, t_2) = \sqrt{\frac{E_f^2 \left(1 - e^{-\frac{at_1}{t_r}}\right)^2 A_{NP}^3(t_1, t_2)}{12I_{NP}(t_1, t_2)b_z^2}} \quad (9)$$

$$h_m(t_1, t_2) = \frac{2\sqrt{3I_{NP}(t_1, t_2)}}{\sqrt{A_{NP}(t_1, t_2)}} \quad (10)$$

Obr. 5 dokumentuje průběh celkové ohybové tuhosti ostění v čase.

5. VÝSLEDKY VERIFIKAČNÍ NUMERICKÉ ANALÝZY

Výstavba tunelové trouby T1 byla o několik týdnů až měsíců opožděna oproti tunelové troubě T2. Vzhledem k osové vzdálenosti trub v úseku km 0,6504 – 0,7068, která činí asi 70 m, byl vzájemný vliv zanedbán (simulována byla pouze trouba T2).

Jak již bylo avizováno v úvodu, byla provedena numerická analýza s výchozí dvojicí hodnot $\alpha_G = 1.35$ and $K_0 = 0.81$, a výsledky poté porovnány s výsledky výpočtu při zadání alternativních zpětně analyzovaných dvojic $\alpha_G - K_0$ (konkrétně $K_0 = 1,01$; $\alpha_G = 1,00$ a $K_0 = 0,60$; $\alpha_G = 1,70$). Výsledky jsou uvedeny v tab. 1 a průběh výsledných hodnot v porovnání s naměřenými je na Obr. 7a a 7b.

Tab. 1: Výsledné maximální hodnoty horizontální deformace pro uvažované dvojice $\alpha_G - K_0$.

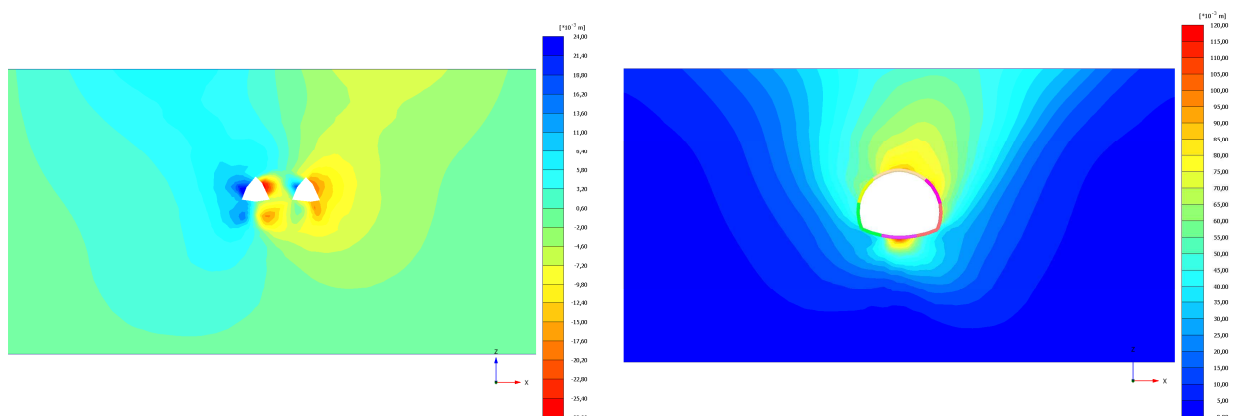
Kombinace	α_G [-]	K_0 [-]	$u_{x,max}$ [mm]
1	1.35	0,81	14,5
2	1.00	1,01	19,5
3	1.70	0,60	10,5

Shodná úroveň lokálních extrémů u horizontálních posunů měřených a vypočítaných je důkaz správného hloubkového umístění konstrukcí. Velikost amplitudy poklesové kotliny je variabilitou $\alpha_G - K_0$ prakticky neovlivněna a pohybuje se v rozmezí 50 – 54 mm. Vypočítané hodnoty jsou realistické v porovnání s výsledky monitoringu, tj. měřením poklesové kotliny ve staničení km 0,740, který dosahuje 44 mm. Poklesová kotlina pro kombinaci $K_0 = 0,60$; $\alpha_G = 1,70$ je užší než u kombinací ostatních, což je typické pro anizotropii tuhosti, přičemž efekt je dále zesílen nízkou hodnotou K_0 . Poklesová kotlina je vzhledem k ose tunelu mírně asymetrická. Asymetrie je způsobena částečně odstupem dílčích tunelových čelb a také skutečností, že tunelová trouba T1 byla oproti T2 ražena se zpožděním cca 2 měsíce.

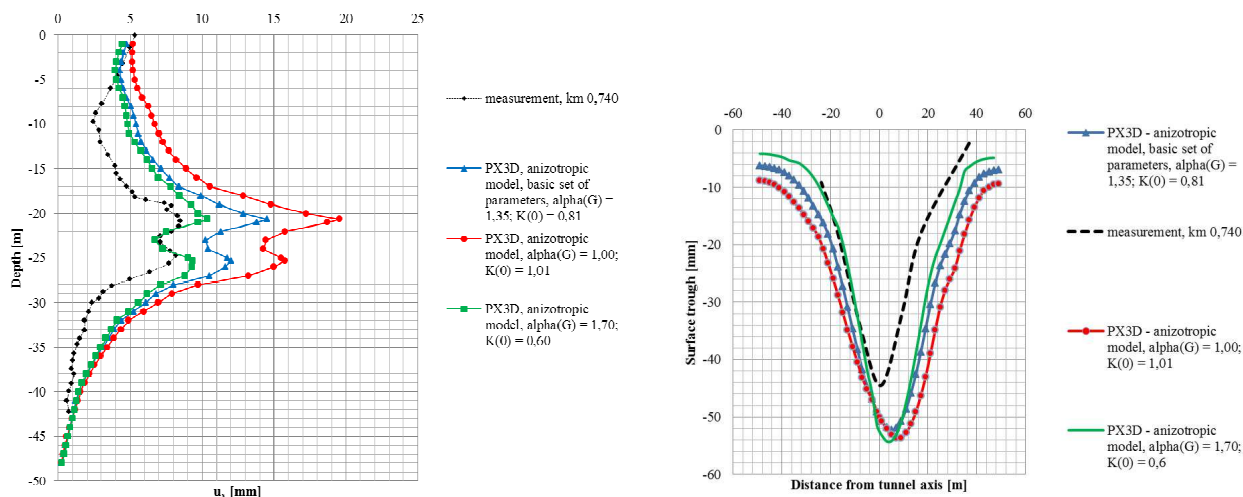
V kontrastu s poklesovou kotlinou, horizontální přetvoření se mění při změně hodnot $\alpha_G - K_0$ poměrně výrazně. Důvod spočívá v přístupu ke stanovení smykových modulů anizotropního jílu v oboru velmi malých přetvoření. Teoretická hodnota smykového modulu v horizontálním směru při nulovém přetvoření je vypočítána na základě smykového modulu ve svislém směru a součinitele anizotropie ze vztahu

$$G_{pp} = G_{tp}\alpha_G \quad (11)$$

což znamená změnu tuhosti pouze v horizontálním směru. Pro “defaultní” kombinaci $K_0 = 0,81$; $\alpha_G = 1,35$ stanovenou na základě původní zpětné analýzy, činí maximální hodnota horizontálního posunu 14,5 mm. Data z monitoringu indikují 8,5 mm. Ostatní výsledky 19,5 mm a 10,5 mm náleží kombinaci $K_0 = 1,01$; $\alpha_G = 1,00$, respective $K_0 = 0,60$; $\alpha_G = 1,70$. Je možné říci, že modelové výsledky jsou logické, protože nárůst α_G vede k poklesu posunů a naopak, zvyšování K_0 vede k jejich snížení. Výstupy vodorovných a svislých deformací z numerického modelu jsou označeny jako Obr. 6a a 6b.



Obr.6a a 6b: Výsledné hodnoty horizontálních a svislých posunů v odpovídajících fázích modelové ražby tunelu Dobrovského. Horizontální deformace jsou odečteny v místě inklinometru INK 17 v km 0,675 a odpovídají datu 16. 11. 2009 a modelové fázi 39 (Obr. 6a). Vertikální deformace klíčové pro znázornění poklesové kotliny jsou porovnány s měřením v km 0,740 (Obr. 6b).



Obr.7a a 7b: Výsledné horizontální posuny v místě INK 17 pro různé dvojice $\alpha_G - K_0$ porovnané s měřením ze dne 16. 11. 2009 (Obr. 7a). Výsledné poklesové kotliny porovnané s nejbližším měřením v km 0,740 (Obr. 7b).

6. ZÁVĚR

Příspěvek se věnuje ověření hodnoty součinitele bočního tlaku v klidu Brněnského jílu $K_0 = 0,81$ pomocí numerické analýzy tunelové trouby T1 tunelu Dobrovského a porovnáním výsledků s monitoringem. Jílu byl přiřazen hypoplastický model s anizotropií tuhosti v oboru velmi malých přetvoření a primární ostění bylo podrobena materiálové homogenizaci. Výsledné hodnoty z numerické analýzy jsou v dobré shodě s měřeními. Považujeme proto výše uvedenou hodnotu K_0 za věrohodnou pro danou hloubku a pozici.

7. PODĚKOVÁNÍ

Výzkum byl umožněn díky podpoře grantů GAČR P105/12/1705 a GAUK 243-253-370.

8. LITERATURA

- Horák, V. (2009). Královopolský tunel v Brně z pohledu projektanta, *Tunel*, 18(1): 67–72.
- 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. (2014). Clay hypoplasticity model including stiffness anisotropy. *Géotechnique*, 64, No. 3, 232-238.
- Mašín, D., Rott, J. (2014). Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and a model. *Acta Geotechnica*, 9, No. 2, 299-312.
- Niemunis, A., Herle, I. (1997). Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials 2*, 279–299.
- Oreste, P. P. (2003). A procedure for determining the reaction curve of shotcrete lining considering transient conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(3): 209–236.
- Pavlík, J., Klímek, L. a Rupp, O. (2004). Geotechnical exploration for the Dobrovského tunnel, the most significant structure on the large city ring road in Brno. *Tunel* 13(2): 2-12.
- Rott, J. (2014): Homogenizace ocelobetonového ostění s časovým nárůstem tuhosti stříkaného betonu, *Tunel*, (in print).
- Rott, J., Mašín, D. (2013). Zpětný výpočet součinitele bočního tlaku v klidu v brněnském jílu na základě konvergenčních měření *Geotechnika*, No. 3-4, 16-21.
- Svoboda, T. (2010). Numerický model NRTM tunelu v tuhém jílu. Dizertační práce, Přírodovědecká fakulta UK..

Titul, jméno, příjmení autora: Ing. Josef Rott, Ph.D., Doc. RNDr. David Mašín, Ph.D., MPhil.

Adresa pracoviště: Albertov 6, Praha 2, 128 43

E-mail: rottj@natur.cuni.cz, masin@natur.cuni.cz

Telefon: 602 610 507