

Vrozená anizotropie tuhosti jílu a její užití v numerické zpětné analýze deformací v nevystrojené kaverně při stanovení K_0 v brněnském téglu

Josef Rott, David Mašín, Jan Boháč, Martin Krupička, Tomáš Mohyla

Stanovení parametrů vrozené anizotropní tuhosti v oboru velmi malých přetvoření vyžaduje provedení zkoušek s použitím snímačů malých deformací umístěných na vzorku v kombinaci s piezoelektrickými prvky vysílajícími a snímajícími seismické smykové vlny. U jílu se uvažuje křížová anizotropie determinovaná 5 nezávislými přetvárnými parametry, která vyplývá z představy o sedimentaci jílových částic. Implementace anizotropie pro účely hypoplastického modelu byla podmíněna tenzorovou formulací daného problému s ohledem na zvolený typ této anizotropie. Modifikace hypoplastického modelu byla využita v analýze součinitele bočního tlaku v klidu překonsolidované zeminy v rámci numerického 3D modelu reálného geotechnického problému s uplatněným geotechnickým monitoringem. Součinitel zemního tlaku v klidu K_0 jemnozrnných zemín se odhaduje často empiricky na základě stupně překonsolidace (OCR – Overconsolidation Ratio). Vztahy užití v těchto odhadech však předpokládají, že K_0 je způsobeno čistě mechanickým odlehčením a nezahrnují skutečnost, že podstatná část zdánlivého překonsolidačního tlaku může být zapříčiněna obecně stárnutím zeminy, zejména sekundárním stlačením. V této práci je pravděpodobný interval hodnot K_0 brněnského jílu („téglu“) tuhé až pevné konzistence (zdánlivá vertikální překonsolidační napětí 1800 kPa, tj. OCR 7) odhadnut na základě zpětné analýzy z konvergenčních měření v nevystrojené kruhové rozrážce a střední a mezní hodnoty tohoto rozmezí byly následně ověřeny prostřednictvím numerické analýzy úseku plného profilu tunelu. Výsledky simulace jsou ovlivněny především vrozenou anizotropií tuhosti zemín, která byla stanovena v rámci experimentálního programu. Poměr maximálních smykových modulů α_G činí 1,45, poměr vodorovného a svislého maximálního Youngova modulu α_E je 1,67 a hodnota Poissonova čísla ν_{tp} se pohybuje v těsné blízkosti 0. Zemina byla modelována jako hypoplastický materiál. Pro překonsolidovanou

Determination of a complete set of material parameters of inherent anisotropic stiffness in the very-small strain range requires realization of the laboratory tests using small sensors (Local Displacement Transducers – LDT) placed on the sample, in combination with piezo-elements sending and receiving the seismic longitudinal or shear waves. On the basis of clay particles sedimentation idea, the clays are considered a cross-anisotropic material with 5 independent parameters. For the purposes of implementation of anisotropy into hypoplastic model, the tensorial formulation had to be developed. The modification of the hypoplastic model was subsequently used in the analysis of the coefficient of lateral earth pressure at rest of overconsolidated clayey soil. The coefficient of earth pressure at rest K_0 of fine-grained soils is often being estimated empirically from the overconsolidation ratio (OCR). The relationships adopted in this estimation, however, assume that K_0 is caused by pure mechanical unloading and do not consider that a significant proportion of the apparent preconsolidation pressure may be caused by the effects ageing, in particular by secondary compression. In this work, K_0 of Brno Tegel, which is a clay of stiff to hard consistency (apparent vertical preconsolidation pressure of 1800 kPa, apparent OCR of 7), was estimated based on the back-analysis of convergence measurements of an unsupported cylindrical cavity. The values were subsequently verified by analysing a supported exploratory adit and a two-lane road tunnel. As the simulation results are primarily influenced by soil anisotropy, it was quantified in an experimental programme. The ratio of maximal shear moduli α_G was 1.45, the ratio of horizontal and vertical maximal Young moduli α_E was 1.67 and the value of Poisson ratio ν_{tp} was close to 0. The soil was described using a hypoplastic model considering small-strain stiffness anisotropy. For the given soil, the apparent OCR-based estimation yielded $K_0 = 1.3$, while the Jáky formula estimated

tégl činí odhad založený na OCR $K_0 = 1,3$, zatímco Jákyho vztah udává $K_0 = 0,63$ pro stav normální konsolidace. Hodnota stanovená zpětnou analýzou K_0 činí 0,75. Modelové predikce konvergencí jsou v dobré shodě s výsledky monitorování, což zvyšuje důvěryhodnost zvolené koncepce modelování. Rovnice založené na OCR pro výpočet K_0 musí být používány s opatrností, protože K_0 mnoha jílových masivů může být ve skutečnosti nižší.

$K_0 = 0.63$ for the state of normal consolidation. The back-analysed value of K_0 was 0.75. The predicted tunnel displacements agreed well with the monitoring data, giving additional confidence into the selected modelling approach. It was concluded that OCR-based equations should be used very carefully for K_0 estimation since K_0 of many clays may actually be lower than often assumed.

1. Úvod

Vrozená (inherentní) anizotropie tuhosti jílu zásadně ovlivňuje predikce numerických analýz. Její laboratorní zjišťování je však relativně náročné a výsledky mohou vykázat značný rozptyl, což platí i v případě prakticky nejjednodušší transversální izotropie (křížové anizotropie, aelotropie), která je v článku užitá pro brněnské tégly. Předpokládá se existence izotropní roviny, ve které je tuhost vyšší z důvodu uspořádání plochých jílových částic. Křížová anizotropie vyžaduje stanovení 5 nezávislých parametrů (Mašín a Rott /10/). Základní vztahy pochází prakticky z počátku 20. století (Love /6/). Pro účely použití v modelech pro zeminy bylo nicméně nutné vyjádřit anizotropii pomocí takových proměnných, které budou nejvýhodnější z hlediska měření a pomocí nichž bude možné ohodnotit pozdější úpravy anizotropních matic tuhosti a poddajnosti pro 3- a 4-parametrickou formulaci anizotropie (Graham a Houlsby /2/, Lings et al. /5/, Mašín a Rott /10/).

Definice křížové anizotropie v úpravě dle Mašína a Rotta /10/ vyžaduje znalost

a) hodnot součinitele anizotropie, který je dán poměrem smykového modulu v izotropní rovině a smykového modulu ve směru kolmém na izotropní rovinu:

$$\alpha_G = \frac{G_{pp}}{G_{tp}} \quad (1)$$

b) hodnoty Poissonova čísla vyjadřující poměr mezi přetvořením v rovině izotropie a přetvořením ve směru kolmém na rovinu izotropie (v tomto případě je Poissonovo číslo vztaženo k zatížení ve směru kolmém na rovinu izotropie):

$$\nu_{tp} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} \quad (2)$$

c) hodnot převodních exponentů, které figurují v převodních vztazích součinitelů anizotropie:

$$\alpha_E = \frac{E_p}{E_t} = \alpha_G^{1/x_{GE}} \quad (3)$$

$$\alpha_\nu = \frac{\nu_{pp}}{\nu_{tp}} = \alpha_G^{1/x_{G\nu}} \quad (4)$$

Zkušební program pro stanovení přetvárných parametrů předpokládal měření smykových modulů v hori-

zontálním i vertikálním směru pomocí piezoelektrických kmitajících „bender“-elementů na trojosých vzorcích izotropně namáhaných a použití snímačů velmi malých přetvoření na trojosých vzorcích smykově namáhaných. Velmi malá poměrná přetvoření jsou řádu 10^{-7} až 10^{-4} a zcela vratná, tj. chování zeminy v tomto oboru je ideálně pružné.

Formulace a vlastní implementace (Mašín /9/) anizotropie do hypoplastického konstitučního modelu pro jíly (Mašín /8/) byla užitá ve zpětné analýze součinitele bočního tlaku v klidu K_0 v překonsolidovaných, tj. erozí odlehčených jílech. O některých přímých a nepřímých metodách měření pojednává detailně Malát a Boháč /7/, popřípadě Rott et al. /14/, sumarizaci metod podává Boháč et al. /1/. Zcela obecně se K_0 vyjádří poměrem efektivního horizontálního a vertikálního napětí při podmínce vertikálního zatěžování při zanedbatelných horizontálních přetvořeních

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (5)$$

Intuitivně lze vyvodit, že součinitel bočního tlaku bude dále záviset na poměrném odlehčení, tj. na součiniteli překonsolidace OCR. Pro normálně konsolidované zeminy (OCR = 1) lze použít vztah Jákyho /3, 4/ $K_0 = 1 - \sin \varphi$, kde φ je úhel vnitřního tření v kritickém stavu. Na základě laboratorních a/nebo terénních zkoušek bylo odvozeno množství empirických rovnic definujících závislost K_0 na OCR, z nichž pravděpodobně nejkomplexnější jsou vztahy dle Mayne a Kulhawya /11/, popřípadě Shoheta /16/.

Z hlediska parametrů vrozené anizotropie a součinitele bočního tlaku byl podrobně analyzován brněnský spodno-bádenský marinní vápnnitý jíl, pro který se ustálilo označení „brněnský tégl“. V tomto masivu je ražena součást brněnského městského silničního okruhu - tunelový komplex Královo Pole, sestávající ze dvou dvoupruhových trub rozměrů 14 x 11 m většinou v osové vzdálenosti 70 m. Součástí komplexu jsou 3 průzkumné štoly Ia, IIa a IIb trojúhelníkového profilu se zakřivenými stranami rozměrů cca 4,5 * 4,8 m. V rámci průzkumu byla provedena konvergenční měření na nevystrojené kruhové rozrážce (průměru 1,9 m, půdorysného L-tvaru délky 5,4 m), která byla posléze využita v nepřímé metodě stanovení součinitele bočního tlaku v klidu K_0 po-

mocí numerické zpětné analýzy. Využil se hypoplastický konstituční model pro jíly, přičemž vstupní parametry byly jednak převzaty z rešerše (Mašín a Rott /10/), jednak zjištěny pomocí laboratorních zkoušek parametrů anizotropní tuhosti. Na následujících odstavcích jsou prezentovány laboratorní zkoušky i numerická zpětná analýza, včetně verifikačních výpočtů.

2. Laboratorní zkoušky anizotropní tuhosti téglu

Zkoušky anizotropie smykových modulů α_G

Z hlediska anizotropních převrácených parametrů byl laboratorním měřením podroben tégl z lokality Brno-Slatina (souřadnicemi JSTK X: 1164006,55 a Y:593044,02). Zkušební válečky pro trojosé zkoušky s rotační symetrií byly připraveny z neporušených vzorků odebíraných pomocí zatlačování tenkostěnných ocelových odběrných pouzder s upraveným břitem. V místě odběru vzorků je mocnost terciárního jílového souvrství přibližně 44 m, první zhruba 4 m tvoří kvartérní jílovitá hlína, pod úrovní 48 m narůstá podíl bádenských štěrků a písků. Vzorky byly odebírány vždy po 3 metrech od úrovně 4,5 m až do 57 m hloubky. V laboratorních podmínkách byly připraveny zkušební válečky průměru 38 mm.

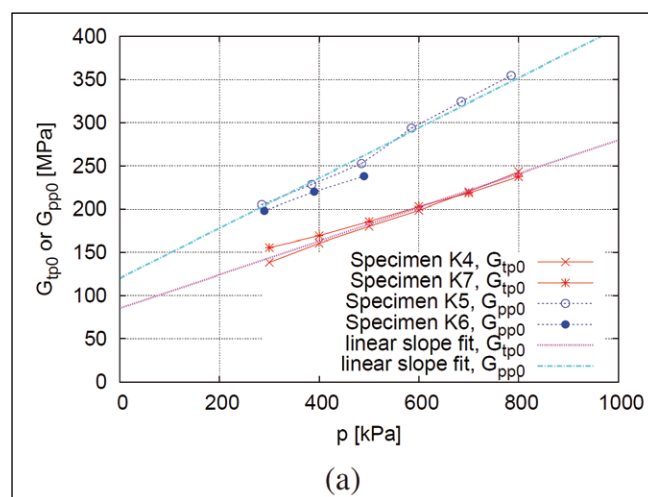
V první fázi byly zjišťovány smykové moduly G_{otp} a G_{opp} respektive jejich poměr α_G a to pomocí konvenčních



Obr. 1 Trojosý vzorek před měřením smykových modulů G_{tp0} a G_{pp0} pomocí bender elementů.

Fig. 1 Triaxial sample before bender element measurement of shear moduli G_{tp0} and G_{pp0}

měření piezokeramickými „bender“ elementy. Měření G_{otp} náleží vzorku vyřezaného ve vertikálním směru, měření G_{opp} vzorku vyřezanému ve směru horizontálním s příslušně natočenými snímači smykové vlny (obr. 1). Zkoušky se prováděly za izotropního stavu napjatosti, přičemž střední efektivní napětí odpovídalo předpokládaným hodnotám in-situ. Tato okrajová podmínka ovlivňuje výsledky pouze zanedbatelně, protože Mašín a Rott /10/ na základě rešerše ukázali, že pevné jíly vykazují pouze mírnou napětím indukovanou anizotropii. Výsledky měření dokumentuje obr. 2. Smykový modul G_{opp} je dle očekávání vyšší, než G_{otp} . Pro vyhodnocení poměrů smykových modulů, tj. součinitele anizotropie α_G , je vyhovující a dostačující lineární regrese naměřených dat. Z poměru smykových modulů vychází hodnota $\alpha_G = 1,45$, která se téměř nemění se změnou středního efektivního napětí.



Obr. 2 Výsledky měření smykových modulů G_{tp0} a G_{pp0} pomocí bender elementů.

Fig. 2 Results of bender element measurements of G_{tp0} and G_{pp0}

Zkoušky anizotropie Youngových modulů α_E a Poissonova čísla ν

Pro stanovení dalších anizotropních parametrů brněnského téglu se provedly trojosé zkoušky na vertikálně vyřezaných vzorcích, konsolidovaných opět při působení předpokládané hodnoty středního efektivního napětí in-situ. Pro měření velmi malých přetvoření se vzorky osadily LVDT snímači, a to jak pro měření osového přetvoření ϵ_r , tak pro zjištění přetvoření radiálních, ϵ_r . Pro porovnání se ϵ_r zjistila výpočtem ϵ_o na základě změny objemu vzorku a pórové vody. Detail vzorku připraveného ke zkoušce je na obr. 3. Při vyhodnocení dat byla pozornost věnována především vyhodnocení měřených přetvoření – porovnání staticky a dynamicky měřených modulů E_{t0} a E_{p0} a z rychlosti šíření smykových vln vypočtených smykových modulů G_{otp} a G_{opp} je problematické z důvodu limitní přesnosti snímačů malých přetvoření.

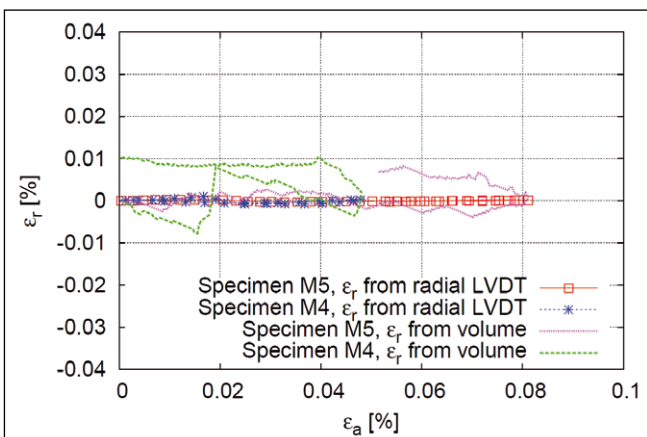
Výsledky jsou patrné z obr. 4 a obr. 5. Je možné říci, že měřená a vypočítaná radiální přetvoření ϵ_r jsou konzistentní a přibližně nulová (obr. 4). Výsledné hodnoty

přetvoření při izotropním zatěžování jsou uvedeny na obr. 5. Radiální přetvoření jsou nižší než axiální, což potvrzuje určitou míru anizotropie. Na základě lineární regrese je adekvátní vyhodnocení $\epsilon_r = 0,6\epsilon_a$.



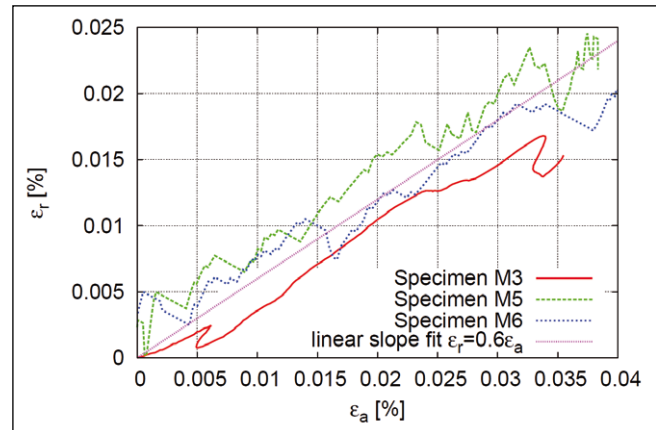
Obr. 3 Příprava pro měření radiálních a osových přetvoření (Snímače malých přetvoření pro přehlednost obrázku nejsou osazen).

Fig. 3 Setup for local LVDT measurements of radial and axial strain (LVDTs not mounted for clarity of the photograph).



Obr. 4 Vzájemná relace ϵ_r a ϵ_a při konstantním radiálním napětí.

Fig. 4 ϵ_r versus ϵ_a measured in constant radial stress probes.



Obr. 5 Vzájemná relace ϵ_r a ϵ_a při izotropní napjatosti.

Fig. 5 ϵ_r versus ϵ_a measured in isotropic stress probes (specimen M3: local LVDT ϵ_r measurement; specimens M5 and M6: ϵ_r calculated from volume).

Při zkouškách s konstantním komorovým napětím ($\Delta\sigma_p = 0$) byla vypočtena hodnota Youngova modulu v v transverzálním směru a rovněž Poissonovo číslo μ_{tp0} :

$$\frac{\Delta\sigma_t}{\Delta\epsilon_t} = -E_{t0} \tag{6}$$

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{\Delta\epsilon_t} = -\nu_{tp0} \tag{7}$$

Za předpokladu prakticky nulových radiálních přetvoření (pro svisle orientovaný vzorek $\Delta\epsilon_p = \Delta\epsilon_r$) má Poissonovo číslo hodnotu $\nu_{tp0} \approx 0$. Zkoušky jsou dále vyhodnoceny s využitím transverzálně izotropní matice poddajnosti (8)

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon_t \\ \Delta\epsilon_p \\ \Delta\epsilon_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{t0}} & -\frac{\nu_{tp0}}{E_{t0}} & -\frac{\nu_{tp0}}{E_{t0}} \\ -\frac{\nu_{tp0}}{E_{t0}} & \frac{1}{E_{t0}} & -\frac{\nu_{pp0}}{E_{t0}} \\ -\frac{\nu_{tp0}}{E_{t0}} & -\frac{\nu_{pp0}}{E_{t0}} & \frac{1}{E_{t0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\sigma_t \\ \Delta\sigma_p \\ \Delta\sigma_p \end{bmatrix} \tag{8}$$

Poměr přetvoření $\Delta\epsilon_p/\Delta\epsilon_t$ při zkoušce s izotropním stlačováním vzorku ($\Delta\sigma_n = \Delta\sigma_t$) se vypočítá z rovnice (9):

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{\Delta\epsilon_t} = \frac{-\nu_{tp0} + \frac{\alpha_E}{\alpha_E} \nu_{tp0}}{1 - 2\nu_{tp0}} \tag{9}$$

Jestliže na základě vyhodnocení zkoušek s podmínkou $\Delta\sigma_p = 0$ platí $\nu_{tp0} \approx 0$, rovnice (7) se zjednoduší

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{\Delta\epsilon_t} = \frac{1}{\alpha_E} \tag{10}$$

Experimentálně zjištěný poměr $\epsilon_r = 0,6\epsilon_a$ proto implikuje pro brněnský tégel součinitel anizotropie Youngových modulů $\alpha_E \approx 1,67$. Z kombinace se součinitelem anizotropie modulů smykových, který činí $\alpha_G \approx 1,45$, vyplývá vyjádřením z rovnice (3) hodnota exponentu anizotropie $\chi_{GE} \approx 0,73$. Tato hodnota je blízká hodnotě $\chi_{GE} \approx 0,80$, uvažované Mašínem a Rottem /10/ na základě rešerše literatury.

Z obdržených dat není možné kvantifikovat Poissonovo číslo v izotropní rovině ν_{pp0} ani součinitel anizotropie Poissonových čísel α_v . Na základě rešerše (Mašín a Rott /10/) lze přijmout $\alpha_v = \alpha_G$ a též $\nu_{tp0} = \nu_{pp0} = 0$. Avšak

v takovém případě nelze pro brněnský tégl α_v definovat a předpoklad $v_{tp0} = v_{pp0}$ nemá žádný fyzikální podklad. Nicméně Poissonovo číslo v izotropní rovině v_{pp0} má dle parametrické studie na základě rovnice (9) pouze malý vliv na hodnotu součinitele anizotropie Youngových modulů α_E .

Anizotropní součinitele pro brněnský tégl jsou uvedeny v následující tabulce 1. V závorkách jsou uvedeny předběžné hodnoty z rešerše či předběžných výpočtů. Je nutné doplnit, že předběžná hodnota anizotropie smykových modulů byla stanovena na jílů odebraném v blízkém okolí tunelu. Rozdíl vzdálenosti činí přibližně 8,5 km vzdušnou čarou a nelze vyloučit vliv tohoto aspektu na lokální změnu α_G či obecně pevnostních parametrů zkoumané zeminy.

Hodnota $\alpha_G = 1,45$ představuje výrazné a významné zpřesnění oproti předběžně uvažované hodnotě, která

α_G	α_E	α_{GE}	α_{Gv}	v_{tp0}
1,45	1,67	0,73	1,0	0,0
(1,35)	(1,46)	(0,80)	(1,0)	

Tab. 1 Bezrozměrné charakteristiky anizotropní tuhosti téglu.

Tab. 1

činila $\alpha_G = 1,35$ (Rott a Mašín /15/). Vzhledem k rozptylu hodnot anizotropie tuhosti různých zemín (Mašín a Rott /10/) je lokálně tato hodnota reálná.

3. Numerické 3D modely pro zpětnou analýzu K_0 a její ověření

V této práci je součinitel bočního tlaku v klidu K_0 prekonsolidovaného a kvartérními sedimenty opětovně zatíženého brněnského téglu odhadnut na základě zpětné analýzy z konvergenčních měření (Pavlík et al. /12/) v nevystrojené kruhové rozrážce R2. Hodnoty byly následně ověřeny prostřednictvím numerické analýzy úseku plného profilu tunelu.

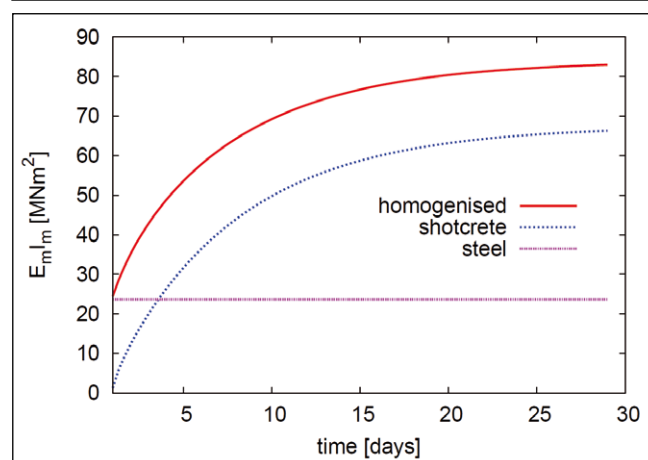
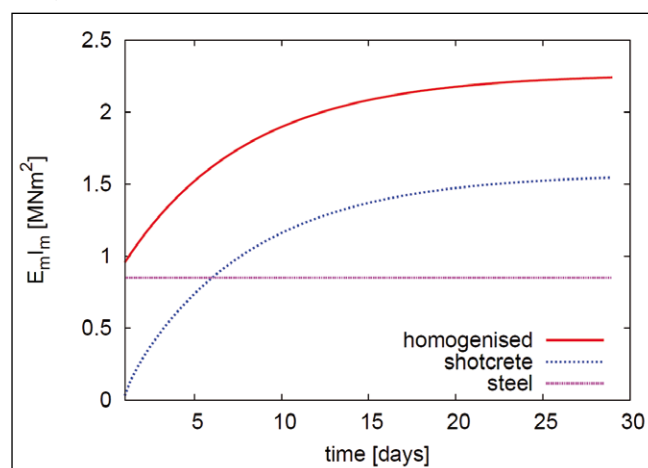
Nevystrojená kruhová rozrážka R2 náleží místu soustředěného geotechnického průřezu pro tunelový komplex Královo Pole, sestávající ze dvou dvoupruhových trub rozměrů 14 x 11 m většinou v osové vzdálenosti 70 m. Další součástí komplexu jsou 3 průzkumné štoly Ia, IIa a IIb trojúhelníkového profilu se zakřivenými stranami rozměrů cca 4,5 * 4,8 m, přičemž rozrážka R2 (průměru 1,9 m, půdorysného L-tvaru délky 5,4 m) navazuje na stolu IIb. Na této rozrážce byla v rámci průřezu pro tuto stavbu provedena konvergenční měření.

Dva 3D modely metodou konečných prvků byly vytvořeny v softwaru PLAXIS 3D. První model představuje průřez trojúhelníkové průzkumné štoly s válcovitou nevystrojenou boční kavernou (rozrážkou s označením R2), druhý model představuje kompletní tunel Královo Pole. Nestrukturovaná síť konečných prvků byla tvořena 10-ti uzlovými čtyřstěnnými elementy s interpolační

funkcí posunů 2. řádu. Hodnota objemového modulu vody byla zvolena $K_w = 2.1$ GPa.

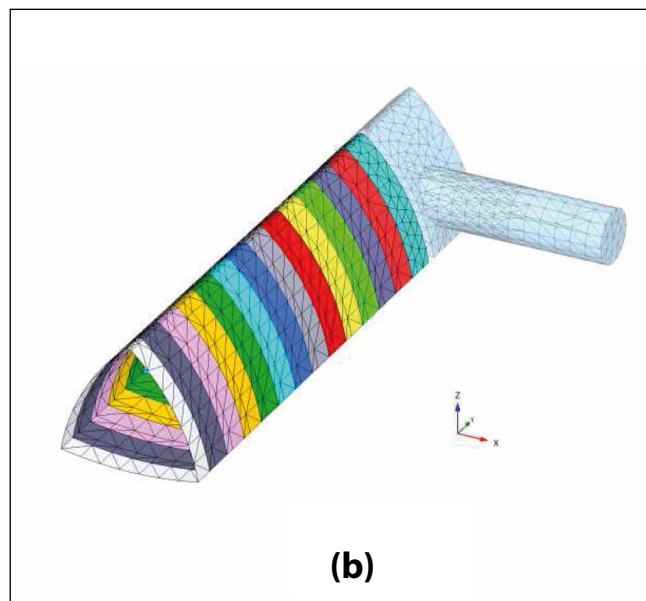
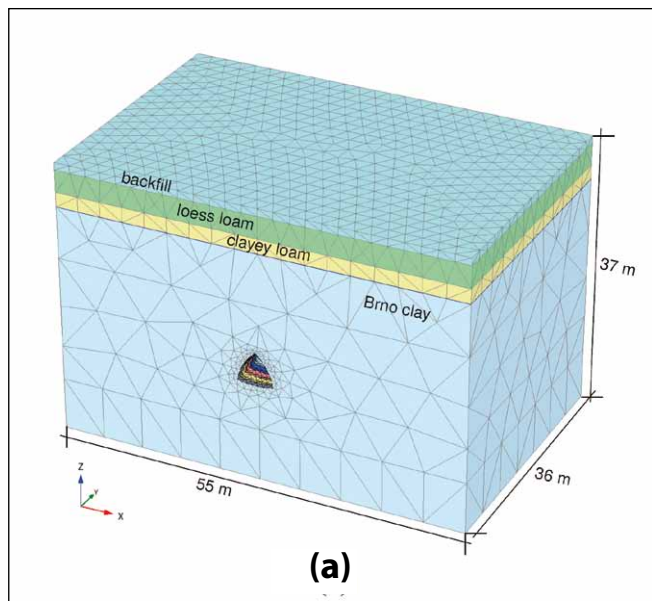
Homogenizace a modifikace ocelobetonového ostění s časově závislou tuhostí

Průzkumné rozrážky byly nevystrojené, podpůrný systém složený z kombinace důlních korýtkových profilů a ocelových sítí měl pouze záložní funkci proti kolapsu díla – odsazení výztuže od líce kaverny činilo přibližně 50 mm. Primární ostění bylo však aplikováno v hlavních průzkumných štolách a pochopitelně v hlavním tunelu. Primární ostění byla složena ze dvou částí: stříkaného betonu a masivních ocelových profilů. Jedná se tedy o kompozit s tuhostí závislou na čase. Stříkaný beton byl použit ve dvou vrstvách po 0,175 m pro hlavní tunel a v jedné vrstvě 0,1 m pro průzkumné štoly. Ocelové profily HEBREX 240 (HEB profil 240 x 240 mm se stojinou nahrazenou příhradovinou) byly aplikovány při ražbě hlavního tunelu, zatímco válcované důlní ocelové nosníky K24 (korýtkový profil šířky 125 mm, výška 107 mm) byly použity v průzkumných štolách. Výpočetní program PLAXIS modelování takto komplexního strukturního prvku neumožňuje, ostění byla proto modelována pomocí plošných prvků s charakteristikami tuhosti získanými pomocí homogenizačního procesu navrženého



Obr. 6a a 6b Časově závislá ohybová tuhost ostění průzkumné štoly IIB (6a) a hlavní tunelové trouby (6b).

Fig. 6a and 6b Time-dependent bending stiffness of primary lining of exploratory gallery IIB (6a) and of main tunnel (6b).



Obr. 7a a 7b Model konečných prvků a diskretizace v oblasti trojúhelníkové průzkumné štoly a kruhové kaverny (7a); detail fázi ražby (7b).

Fig. 7a and 7b Complete finite element model and the mesh of the triangular exploratory gallery and cylindrical cavity (7a); detail of the excavations (7b).

Rottem /13/. Závislost Youngova modulu a ohybové tuhosti ostění na čase pro trojúhelníkové průzkumné štoly a hlavní tunel je znázorněna na obr. 6a a 6b. Podrobný popis postupu je mimo rámec tohoto článku a čtenáře proto odkazujeme na /13/. Užitý výpočtový software neumožňuje pro stříkaný beton zohlednit závislost tuhosti na čase, tyto proto musely být upraveny ručně po každé fázi výpočtu.

Zpětná analýza K_0 na základě numerického modelu nevystrojené rozrážky

Zpětná analýza byla koncipována tak, aby se postupným dosazováním hodnoty součinitele bočního tlaku v klidu našla taková, pro niž je modelový poměr konvergenčí roven naměřenému $u_h/u_v = 1,248$. Vzhledem k určitému rozptylu hodnot součinitele anizotropie α_G a značnému vlivu této hodnoty na konvergence (Rott a Mašín /15/) jsme přitom uvažovali 3 varianty hodnoty součinitele anizotropie – $\alpha_G = 1,00; 1,35$ a $1,70$. Z výsledného grafu závislosti $K_0 - \alpha_G$ jsme poté interpolací pro $\alpha_G = 1,45$ stanovili výslednou hodnotu součinitele bočního tlaku v klidu. Podle /14/ je vliv exponentů anizotropie x_{GE} a x_{GV} relativně zanedbatelný.

Protože pole napětí v zemině je ovlivněno ražbou trojúhelníkové průzkumné štoly, musela být tato štola v numerické simulaci zohledněna rovněž. Modelovaný úsek trojúhelníkové průzkumné štoly byl 18 m dlouhý, model byl diskretizován do 36 000 čtyřstěnných konečných prvků, geometrie je patrna z obr. 7a a 7b.

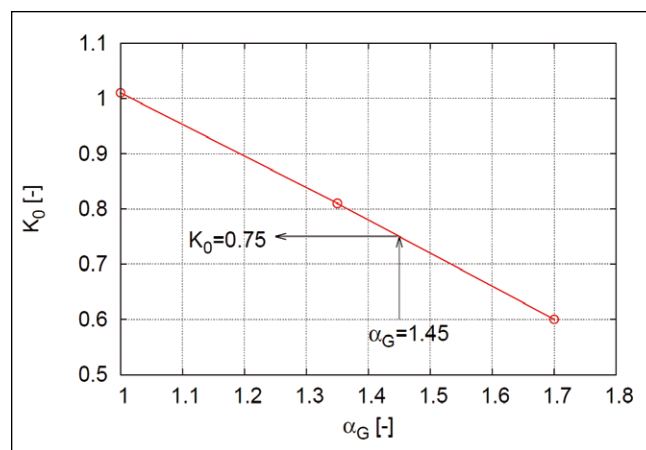
Kompletní numerická analýza byla složena z 28 fází, přičemž každá z fází představovala ražbu úseku délky 1,2 m. Celkové nadloží činilo 22,1 m nad korunou nevystrojené rozrážky R2 (20,4 m nad korunou trojúhelníkové průzkumné štoly), tégl z této hodnoty zaujímá přibližně 16 m. Ražba modelované části průzkumné

štoly a nevystrojené rozrážky proběhla relativně rychle (v modelu i in-situ cca 6 dnů), proto byla numerická analýza koncipována jako neodvodněná. Úroveň hladiny podzemní vody byla shodná sází kvartérních vrstev, jíl byl uvažován jako nasycený.

Výsledný graf závislosti $K_0 - \alpha_G$ je na obr. 8. Průběh je prakticky lineární, interpolací pro $\alpha_G = 1,45$ byla odvozena hodnota $K_0 = 0,75$. Toto zjištění naznačuje, že součinitel bočního tlaku v klidu bude blíže normálně konsolidované zemině, pro kterou dle vztahu Jákyho /3,4/ pro kritickou hodnotu úhlu vnitřního tření vychází $K_0 = 1 - \sin \varphi_c = 0,63$.

Ověření K_0 na základě numerického modelu ražby hlavní tunelové trouby a průzkumné štoly

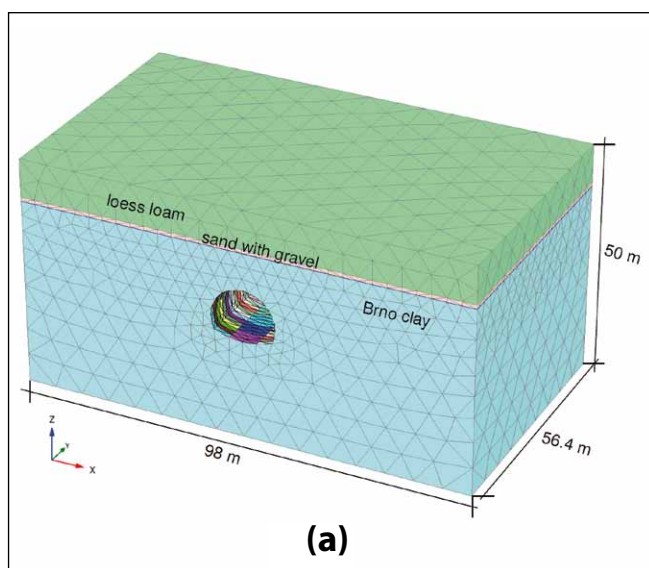
Zpětně analyzovaná hodnota K_0 byla ověřena na numerickém modelu části vlastního tunelu Královo Pole. Podobnou simulací se zabýval již Svoboda et al. /17/,



Obr. 8 Vliv α_G na zpětně vypočtenou hodnotu K_0 .

Fig. 8 The influence of the α_G on the back-calculated value of K_0 .

který prováděl tzv. „class A“ předpovědi, což znamená, že simulace probíhaly ve chvíli, kdy ještě nebyly známy výsledky monitoringu. Výsledky analýzy vykazaly dobrou shodu s geodetickým měřením sedání povrchu terénu, vzhledem k inklinometrickým měřením však byly nadhodnoceny vodorovné deformace. Svoboda et al. /17/ to připisují nezohlednění anizotropie tuhosti materiálu, která je již však pro účely hypoplastického modelu formulována (Mašín a Rott /10/), implementována (Mašín /9/) a ve zde popisovaných modelech použita. Pro zohlednění nárůstu tuhosti ostění byla zvolena exponenciální evoluční rovnice. V porovnání se Svobodou et al. /17/ jsme simulovali shodnou tunelovou troubu, avšak rozdílný úsek km 0,650 – 0,706. Výhodou zvolené simulované sekce je řídká zastavěnost oblasti v okolí tunelu, tj. bez nadměrných antropogenních zatížení téglu, dále jednodušší geometrie (není rozšiřování výrubu pro účely bezpečnostního zálivu, podpovrchové kompenzační injektáže nebo mikropilotové deštníky). Výška nadloží byla 17,2 m, z čehož na tégl připadá přibližně 8 m. Úroveň hladiny podzemní vody byla stejně jako u zpětné analýzy v místě rozrážky R2 shodná sází kvartérních vrstev, jílové prostředí bylo uvažováno jako nasycené. Ražba modelované části hlavního tunelu proběhla v řádu cca 20 – 25 dnů, proto byla analýza koncipována jako neodvodněná. Výsledky z numerické analýzy byly porovnány s měřeními daty z inklinometru v km 0,675 a geodetického profilu na povrchu terénu v km 0,740. Numerická analýza byla složena ze 76 fází; modelová ražba záběru 1,2 m trvala přibližně 8 hodin. Prvních 1,2 m výkopu zůstalo vždy z technologických důvodů nevystrojeno. Kompletní geometrie modelu a detail tunelové trouby ve fázi ražby shodné s časem měření poklesové kotliny, respektive inklinometrických měření horizontálních posunů, je znázorněna na obr. 9.



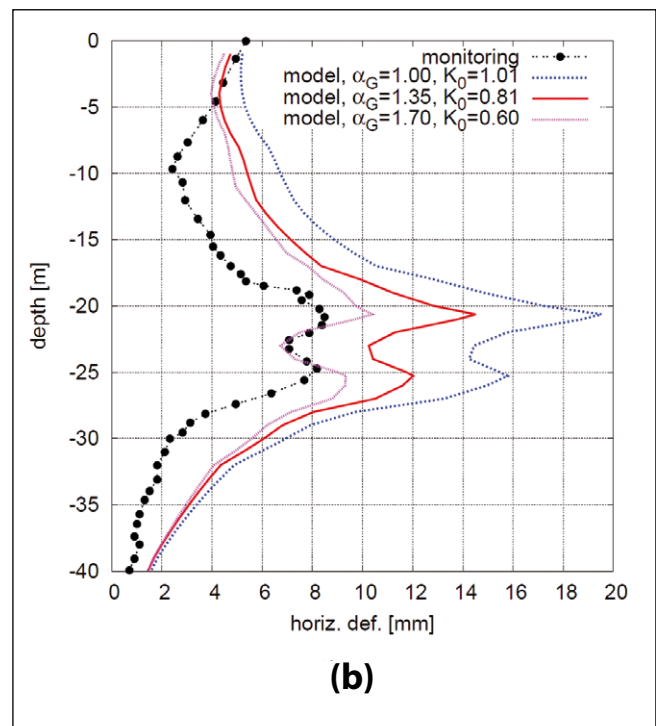
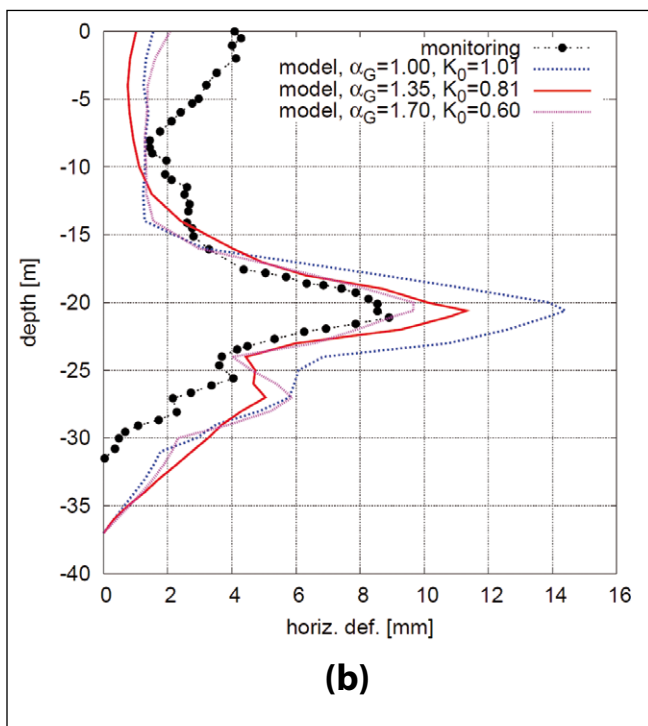
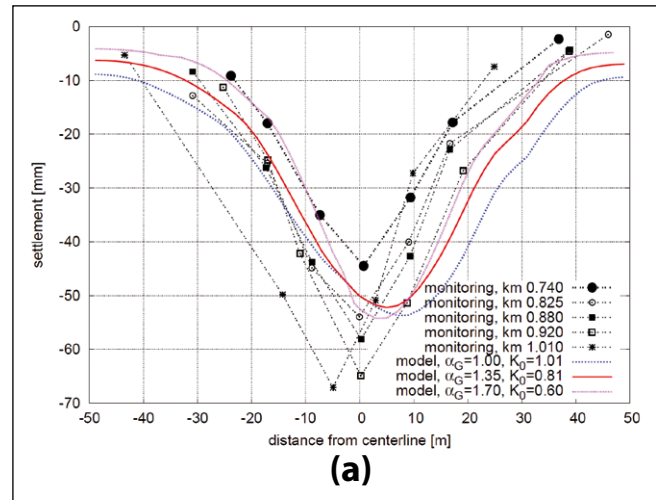
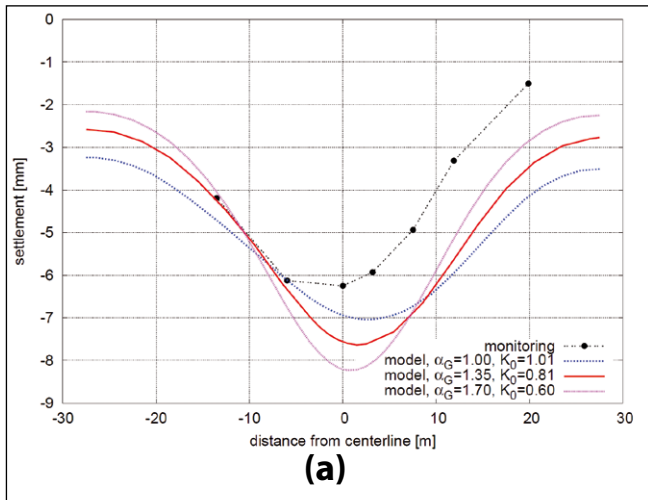
Data z monitoringu byla dostupná jak pro průzkumnou štolu, tak pro hlavní tunel. Zejména byly k dispozici geodetické údaje o měření sedání povrchu terénu a inklinometrická měření kvantifikující vodorovné posuny v okolí tunelu. V průzkumné štolu bylo provedeno měření konvergenčí světlého profilu a napětí v tunelovém ostění. Na obr. 10a je povrchová poklesová kotlina tunelu v několika staničních porovnávána s předpovědi pro různé kombinace α_G a K_0 , které vedly ke stejnému poměru konvergenčí $u_h/u_v = 1,248$ z nevystrojené rozrážky. Klíčové staničení se nachází v km 0,740, což je bezprostředně blízko modelovanému úseku (km 0,650 – 0,706). Simulace dobře vystihují měřická data, přičemž jednotlivé kombinace α_G - K_0 mají jen malý vliv. Podobné relativně přesné předpovědi povrchu poklesové kotliny bylo dosaženo v práci Svobody et al. /17/, která však výrazně nadhodnocuje horizontální posuny vzhledem k relevantnímu inklinometru. Současný model je z tohoto hlediska opět poměrně výstižný (obr. 10b), přičemž kombinace α_G - K_0 vedoucí k nejlepší předpovědi je $K_0 = 0,6$ vs. $\alpha_G = 1,7$. Je třeba zdůraznit, že užití kombinace α_G - K_0 vedou ke stejnému modelovému poměru u_h/u_v v případě simulace nevystrojené rozrážky, nicméně vedou k různé předpovědi pro hlavní tunel. Snížení K_0 spolu s nárůstem α_G vede ke snížení vodorovných posunů, jak lze intuitivně očekávat.

Obr. 11a a 11b dokumentují měřené a simulované sedání povrchu terénu a horizontální posunutí dle inklinometru cca 1,5 m od líce teoretického výrubu tunelu Královo Pole. Pro všechny kombinace α_G - K_0 jsou mode-



Obr. 9a a 9b Model konečných prvků a diskretizace v oblasti tunelu Královo Pole (9a); detail tunelové trouby s fázemi ražby (9b); kompletní ražba modelovaného úseku (spodní obrázek) a stav ražby v období inklinometrických měření.

Fig. 9a and 9b Complete finite element model and the mesh of the Královo Pole tunnel (9a); detail of the tunnel showing the excavation steps (9b); complete tunnel (bottom) and partial state at the time of the inclinometric measurements.



Obr. 10a a 10b Poklesová kotlina (10a) a horizontální posuny kolem trojúhelníkové průzkumné štoly predikované modely s různými kombinacemi α_G - K_0 porovnané s měřenými daty.

Fig. 10a and 10b Surface settlement trough (10a) and horizontal displacements (10b) of the triangular exploratory adit predicted by the models with different combinations of α_G - K_0 compared with monitoring data.

Obr. 11a a 11b Poklesová kotlina (11a) a horizontální posuny kolem trojúhelníkové průzkumné štoly predikované modely s různými kombinacemi α_G - K_0 porovnané s měřenými daty.

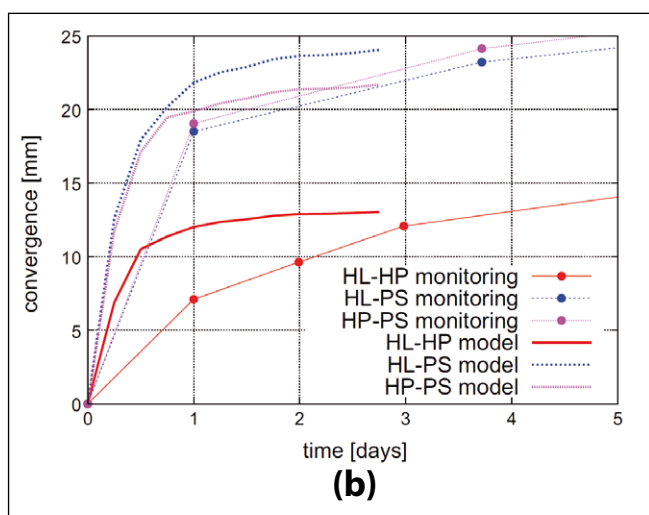
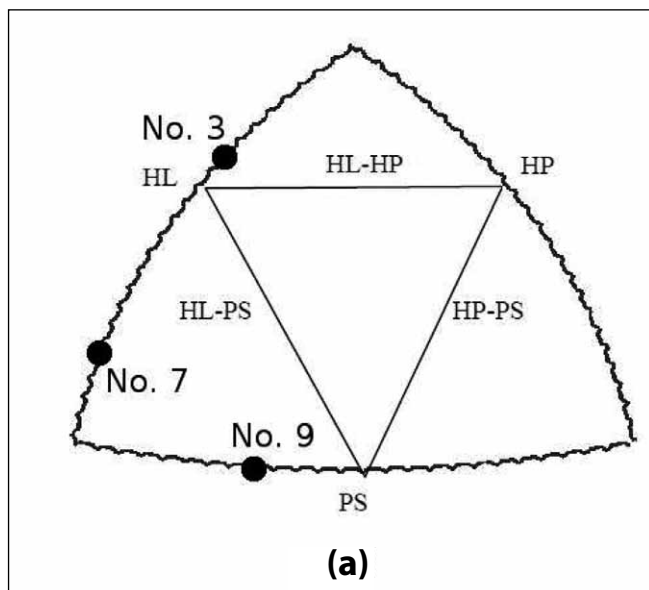
Fig. 11a and 11b Surface settlement trough (11a) and horizontal displacements (11b) of the Královo Pole tunnel predicted by the models with different combinations of α_G - K_0 compared with monitoring data.

lové predikce přijatelné, dvojice $K_0 = 0,6$ vs. $\alpha_G = 1,7$ vede k nejlepší předpovědi z hlediska vodorovných posunů, ale nadhodnocuje hloubku poklesové kotliny. V případě štoly mají kombinace α_G - K_0 poněkud významnější vliv na hloubku a tvar poklesové kotliny a menší vliv na vodorovné posuvy.

Konvergenční měření ve třech profilech na primárním ostění průzkumné štoly jsou na obr. 12a a 12b. Obr. 12a ukazuje schéma monitorovacího systému a obr. 12b dokumentuje vývoj posunů s časem. Přestože analýzy

byly provedeny jako neodvodněné (odezva zeminy tedy není závislá na čase) závislost veličin na čase je přesto přítomna díky 3D efektu v simulacích (postupná modelová ražba) a časově závislé tuhosti ostění. Počáteční nárůst konvergencí je nadhodnocen, nicméně konečné hodnoty jsou předpovězeny poměrně dobře.

Výsledky geodetického měření vývoje deformace ostění tunelu v čase v porovnání s numerickým modelem jsou uvedeny na obr. 13. Při hodnocení výsledků byly prekonvergence odečteny od celkových posunutí, tj. zo-

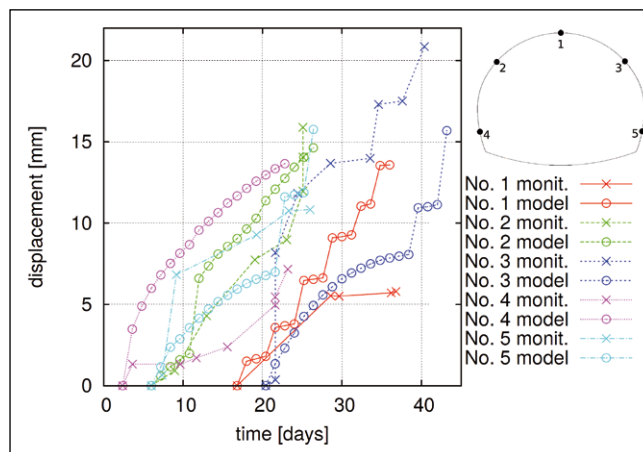


Obr. 12a a 12b Schéma monitoringu konvergenzí v trojúhelníkové štole (včetně umístění snímačů pro tangenciálního napětí v ostění, 12a); porovnání výsledků monitoringu se simulacemi při $K_0 = 0,81$ a $\alpha_c = 1,35$ (12b).

Fig. 12a and 12b The triangular adit convergence monitoring scheme (including location of lining tangential stress measurements, 12a); comparison of monitoring results with simulations with $K_0 = 0,81$ and $\alpha_c = 1,35$ (12b).

hlednili jsme předstih deformací v masivu za čelbou tunelu, aby bylo možné porovnat vypočtená a naměřená data. V porovnání nejsou modelové a měřené průběhy evidentně zcela shodné, modelová předpověď velikostí posunů v čase nicméně řádově souhlasí.

Rozvoj normálových napětí v primárním ostění průzkumné štoly (tj. tečných napětí v zemině) je zobrazen na obr. 14. Napětí byla měřena tensometry. Napětí v místě č. 7 (poloha měřících bodů je na obr. 12a) jsou poměrně dobře předpovězena. Mnohem nižší hodnoty byly naměřeny v místech č. 3 a č. 9. Vzhledem k poruše měřícího zařízení není možné posoudit věrohodnost modelových hodnot.

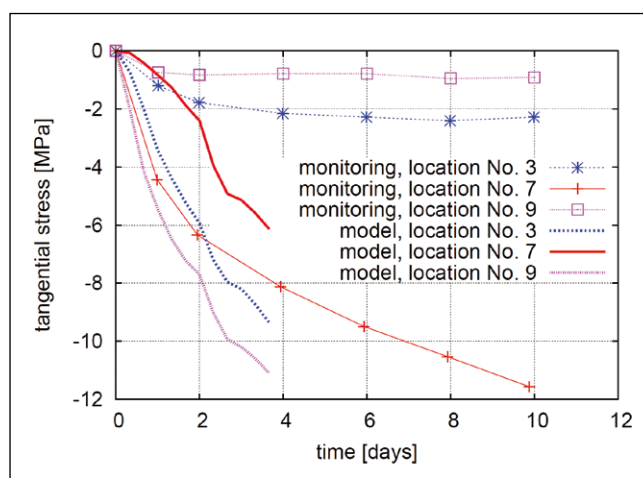


Obr. 13 Graf časové závislosti mezi měřenou a vypočítanou magnitudou posunů na pěti různých místech primárního ostění tunelu.

Fig. 13 A graph showing time evolution of monitored and calculated magnitude of lining displacements in five different locations along the tunnel.

4. Shrnutí a závěry

Článek se zabývá vrozenou anizotropií tuhosti neogenního Brněnského téglu (spodno-bádenského marinního vápenného jílu) v oboru velmi malých přetvoření



Obr. 13 Časový vývoj tangenciálního napětí v primárním ostění průzkumné štoly, od počátku ražby; data z monitoringu v porovnání s modelem.

Fig. 13 Development of tangential stress in the primary lining of exploratory adit with time, starting at the beginning of the excavation: monitoring data and the model.

a součinitelem zemního tlaku v klidu K_0 tohoto erodovaného a kvartérními vrstvami zpětně zatíženého masivu. Pro stanovení K_0 byla provedena 3D numerická zpětná analýza s využitím výsledků konvergenčních měření v nevystrojené kruhové rozrážce ražené v rámci průzkumu pro tunelový komplex Královo Pole v Brně. Výsledek byl ověřen pomocí numerického modelu trojúhelníkové průzkumné štoly a plného profilu vlastního tunelu. Laboratorní zkoušky pro zjištění vrozené křížové anizotropie tuhosti téglu, které byly pro tento model provede-

ny, prokázaly poměr maximálních smykových modulů $\alpha_G = G_{ppd}/G_{tp0} = 1,45$, poměr maximálních Youngových modulů $\alpha_E = E_{ppd}/E_{tp0} = 1,67$ a hodnotu svislého Poissonova čísla $\nu_{tp0} = 0$. V této míře detailní měření anizotropie tuhosti zemin není běžné, jak plyne z geotechnické literatury. Zpětnou analýzou obdržena hodnota $K_0 = 0,75$ je pozoruhodně nízká. Těgl je většinou pevné konzistence, zdánlivé překonsolidační napětí bylo odhadnuto na 1,8 MPa, zdánlivé OCR v hloubce cca 15 m pod povrchem činilo $OCR \approx 7$. Jákyho /3,4/ vzorec uvažující normálně konsolidovanou zeminu v tomto případě dává $K_0 = 0,63$, zatímco odhad založený na vzorci dle Mayne a Kulhawy /11/ činí $K_0 = 1.3$. Bez ohledu na složitost a nejistoty analýzy je hodnota K_0 relativně blízko K_0 normálně konsolidované zeminy. To by mohlo naznačovat, že významná část zdánlivé překonsolidace těglu je způsobena účinky stárnutí, blíže neurčený vliv může mít též zpětné přitížení jílu čtvrtohorními sedimenty. Podrobné diskuse o geologické historii těglu jsou však mimo rámec příspěvku. Závěry nelze zobecňovat na všechny jílové masivy, protože hodnota K_0 každé zeminy závisí na jejím geologickém vývoji. Ten určuje relativní vliv „stárnutí“ (zejména sekundárního stlačení) a mechanického odlehčení z důvodu eroze na K_0 . Lze konstatovat, že vzorce založené na OCR by neměly být užívány bez řádného uvážení, protože mohou potenciálně vést k nadhodnocení hodnoty K_0 .

Poděkování

Autor děkuje za finanční podporu výzkumným grantům 15-05935S a 14-32105S grantové agentury České Republiky.

LITERATURA

- /1/ Boháč J., Mašín, D., Malát, R., Novák, V. and Rott, J.: Methods of determination of K_0 in overconsolidated clay. In Proc. 18th Int. Conference ICSMGE; Delage, P., Desrues, J. Frank, R. Puech, A. and Schlosser, F. (Eds.), Paris, France; 2013, Vol. 1, s. 203-206.
- /2/ Graham, J., Houlsby, G. T.: Anisotropic elasticity of a natural clay. *Géotechnique*, 1983, roč. 33, č. 2, s. 165-180.
- /3/ Jáky, J.: The coefficient of earth pressure at rest (In Hungarian). *Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers*, 1944, 78, s. 355-357.
- /4/ Jáky, J.: Pressure in silos. *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1948, roč. 1, s. 103-107.
- /5/ Lings, M. L., Pennington, D. S. and Nash, D. F. T.: Anisotropic stiffness parameters and their measurement in a stiff natural clay. *Géotechnique*, 2000, roč. 50, č. 2, s. 109-125.
- /6/ Love, A. E. H.: A treatise on the mathematical theory of elasticity. 4th edn. Cambridge: Cambridge University Press, 1927.
- /7/ Malát, R. and Boháč, J.: Měření horizontálního napětí v překonsolidovaných jílech. *Geotechnika*, 2012, č. 4, s. 24-28.
- /8/ Mašín, D.: A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005, roč. 29, č. 4, 311-336.
- /9/ Mašín, D.: Clay hypoplasticity model including stiffness anisotropy. 2014, *Géotechnique*, roč. 64, č. 3, s. 232-238.
- /10/ Mašín, D. and Rott, J.: Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and a model. *Acta Geotechnica*, 2014, roč. 9, č. 2, s. 299-312.
- /11/ Mayne, P. W. and Kulhawy, F. H.: K_0 -OCR relationships in soil. In Proc. ASCE J. Geotech. Eng. Div. 1982, roč. 108, s. 851-872.
- /12/ Pavlík, J., Klímek, L. and Rupp, O. 2004.: Geotechnical exploration for the Dobrovského tunnel, the most significant structure on the large city ring road in Brno. *Tunel*, roč. 13, č. 2, s. 2-12.
- /13/ Rott, J.: Homogenisation and modification of composite steel-concrete lining, with the modulus of elasticity of sprayed concrete growing with time (In Czech). *Tunel* (www.ita-aites.cz/en/casopis), 2014, roč. 23, č. 3, s. 53-60.
- /14/ Rott, J., Mašín, D., Boháč, J., Krupička, M. and Mohyla, T.: Evaluation of K_0 in stiff clay by backanalysis of convergence measurements from unsupported cylindrical cavity. *Acta Geotechnica*, 2015, roč. 10, č. 6, s. 719-733.
- /15/ Rott, J. and Mašín, D.: Backanalysis of the earth pressure coefficient at rest in Brno clay on the basis of convergence measurements (in Czech). *Geotechnika*, 2013, č. 3-4, s. 16-21.
- /16/ Shohet, D. C.: Predictions of in situ horizontal stresses in clay soils from the measurement of undrained shear strength, plasticity index and vertical effective stress, *Proc. Instn Civ. Engrs, Geotech. Engng*, 1995, č. 113, s. 206-214.
- /17/ Svoboda, T., Mašín, D. and Boháč, J.: Class A predictions of a NATM tunnel in stiff clay. *Computers and Geotechnics*, 2010, roč. 37, č. 6, s. 817-825.

Ing. Josef Rott, Ph.D.,

Doc. RNDr. David Mašín, Ph.D., MPhil.,

Ing. Jan Boháč, CSc.,

Bc. Martin Krupička,

Mgr. Tomáš Mohyla;

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky,

Univerzita Karlova v Praze,

Přírodovědecká fakulta,

Albertov 6, Praha 2, 127 43,

Česká republika

Kontakt:

rottj@natur.cuni.cz,

masin@natur.cuni.cz,

bohac@natur.cuni.cz,

martinkrupicka@seznam.cz,

mohylat@seznam.cz.