

## **LABORATORNÍ MODEL CHOVÁNÍ VÝPLNÍ PORUCH PRACHOVITÝCH BŘIDLIC**

**Jan Boháč a David Mašín**

**LABORATORY MODELLING OF SOIL FROM FAULTS IN SILTY SHALES.** In a tunnelling project in silty shales, tectonic joints were found, which significantly influenced tunnel deformations. The joints were filled by rock fragments in silty matrix. The material was laboratory modelled using mixtures of crushed rock with clayey soil. With the increasing content of fines (FC), the critical state friction angle changes at about FC of 28-45%, remaining constant for lower and higher FC. Other studied properties, that are influenced by soil structure, change continuously with increasing FC. Results were used in numerical modelling of tunnel deformations.

### **1. Úvod**

Při ražbě průzkumné štoly a západního tunelu Mrázovka v jílovitých až prachovitých břidlicích libeňského souvrství se narazilo na několik poruchových zón, které jsou vyplněny směsí jemnozrné zeminy a ostrohranných úlomků horniny s různým procentním zastoupením. Mechanické chování výplně se zkoušelo v laboratoři nejen na vzorcích odebraných při ražbě tunelu a štoly (Mašín, 2001; Boháč et al., 2002), ale podrobilo se i studiu na vzorcích připravených ze směsí jemnozrné frakce (prachovitých a jílovitých zrn do 0,125 mm) a ostrohranné hrubozrné frakce (drceného kameniva většího než 0,125 mm).

Pevností směsí jílu s pískem se zabývali např. Boháč et al. (1998). Vzájemnou interakci struktury jemnozrné a hrubozrné zeminy modelovali v laboratoři na směsi písčítých zrn a jílových částic. Předpokládali, že chování směsi jílu a písku odpovídá chování písku, jsou-li zrna písku ve vzájemném kontaktu. Naopak, plavou-li zrna písku v jílové matrici, lze očekávat, že výsledná směs se bude chovat jako jemnozrná zemina. Přechodový práh mezi těmito dvěma typy chování směsi při této zjednodušené strukturní představě odpovídá takovému poměru míšení, při němž bude pórovitost pískové frakce stejná jako maximální pórovitost čistého písku. Chování v blízkosti přechodového práhu kolísá mezi chováním jemnozrné a hrubozrné zeminy a lze očekávat odchylky od standardního chování. Struktura zeminy se bude nacházet na prahu pouze při určité kombinaci celkové pórovitosti, pórovitosti příměsi a poměru zastoupení jemnozrné a hrubozrné frakce.

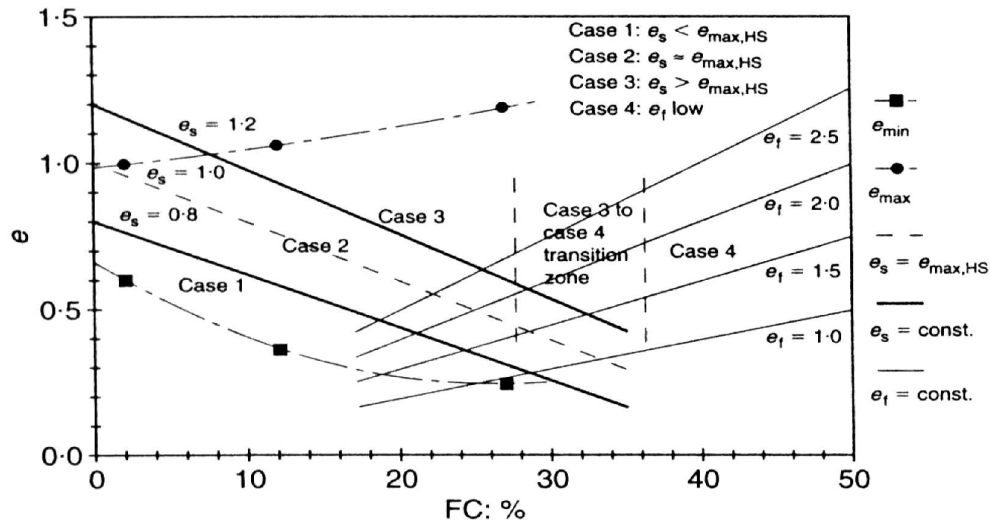
Podle Thevanayagama a Mohana (2000) při zanedbání rozdílu v objemových hmotnostech frakcí platí pro číslo pórovitosti  $e_s$  samotné hrubozrné frakce

$$e_s = \frac{e_t + FC / 100}{1 - FC / 100},$$

kde  $e_t$  je celková pórovitost zeminy a FC je procentní zastoupení jemnozrné frakce. Pokud ve směsi převládá jemnozrná frakce a její chování je dominantní, protože hrubá zrna plavou v jemnozrné matici, ve fázovém diagramu může být hrubozrná frakce zcela zanedbána, takže pro číslo pórovitosti jemnozrné frakce  $e_f$  platí

$$e_f = \frac{e}{FC / 100}$$

Thevanayagam a Mohan (2000) uvádějí čtyři základní případy chování směsi v závislosti na stavu zeminy (čísla pórovitosti) a na obsahu jemnozrné frakce. Na obr. 1 je příklad fázového diagramu pro konkrétní písek o maximálním čísle pórovitosti  $e_{\max,HS} = 1,0$ .



Obr. 1. Diagram základních 4 případů chování směsí zemín v závislosti na obsahu jemnozrné frakce a stavu (pro písek s  $e_{\max,HS} = 1,0$ ; Thevanayagam a Mohan, 2000)

Fig. 1 Intergranular matrix phase diagram, cases 1 to 4 (Thevanayagam a Mohan, 2000)

Případ 1 je relevantní pro směsi s nízkou pórovitostí, kde číslo pórovitosti hrubozrné frakce  $e_s$  je menší než její maximální číslo pórovitosti  $e_{\max,HS}$ . Vzhledem k relativně velké stlačitelnosti jemnozrné frakce, jejíž  $e_f$  je při malém procentním zastoupení vysoké, většina jemných částic bude pravděpodobně soustředěna v pórech hrubé frakce a jen malá část bude případně oddělovat hrubá zrna a ovlivňovat chování hrubozrného skeletu.

Případ 2 nastane při střední ulehlosti, kdy  $e_s$  bude blízké  $e_{\max,HS}$  a stlačitelnost středně ulehlého hrubozrného skeletu se nebude příliš lišit od stlačitelnosti jemnozrné frakce. Jemné částice mohou pouze zaplňovat prostor pórů hrubozrného skeletu, ale mohou ve velké míře působit i mezi zrny. Chování zeminy může oscilovat mezi hrubozrnou zeminou a zeminou jemnozrnou, takže se může projevit vyšší závislost na úrovni napětí apod.

Případ 3 je charakterizován  $e_s > e_{\max,HS}$ , hrubá zrna začínají plavat v matici jemnozrné zeminy. Zemina se chová jako jemnozrná.

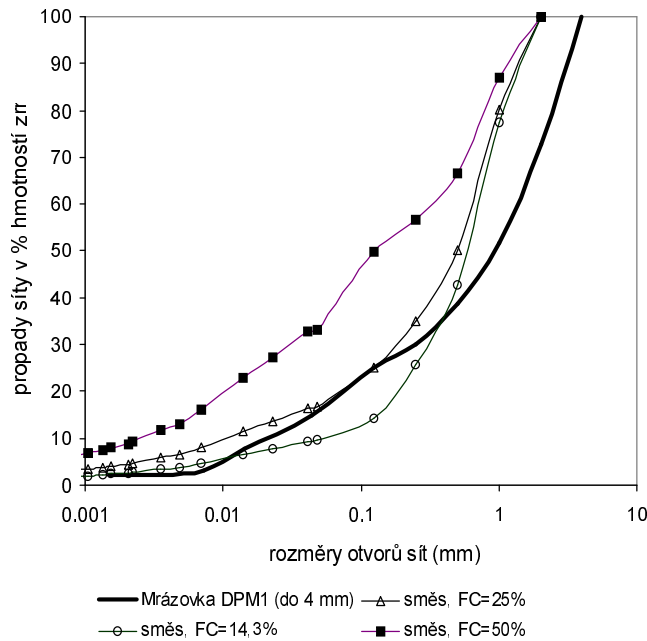
Případ 4 nastane při dalším zvýšení obsahu jemnozrné frakce. Hrubé částice plavou v jemnozrné matici a z hlediska chování zeminy jsou zanedbatelné. Stav zeminy lze charakterizovat číslem pórovitosti samotné jemné frakce  $e_f$  a polohou vzhledem k čáře kritických stavů jemnozrné zeminy.

Obr. 1 je příkladem zjednodušující strukturální představy, která vysvětluje chování

směsí zemin složených z jemnozrnné a hrubozrnné frakce, tedy i chování běžných zemin vyskytujících se v přírodě, např. zahliněných písků. Obdobným případem je i materiál poruch v pražských libeňských břidlicích.

## 2. Materiál, příprava vzorků a postup zkoušek

Na obr. 2 je typická zrnitost materiálu odebraného z poruchy v libeňské břidlici a srovnání s křivkami zrnitosti náhradních modelových materiálů použitých pro zkoušky směsí. Jako hrubozrnná frakce modelového materiálu se použilo drcené kamenivo, jehož zrnitost se



Obr. 2. Křivky zrnitosti materiálu poruchy a laboratorních modelů

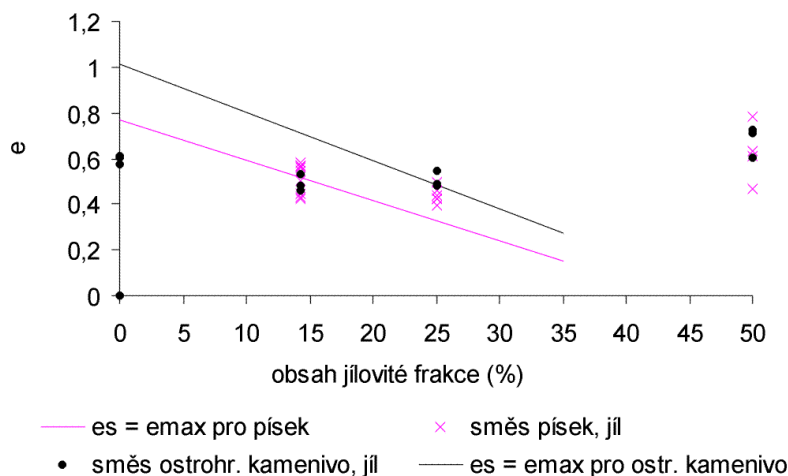
Fig. 2 Grain size distributions of the material of the fault and of laboratory models

upravila tak, aby odpovídala zrnitosti písku (0,125 až 2 (4) mm), jenž se používal při dříve provedených zkouškách směsí (Boháč et al., 1998). Tím se umožnilo srovnání výsledků obou serií zkoušek.

Vzorky průměru 38 mm a výšky 76 mm se rekonstituovaly ze suché směsi promíchané při potřebném váhovém poměru (kamenivo : jíl = 6:1, 3:1, 1:1). Provedly se i zkoušky s kamenivem bez jemnozrnné příměsi. Připravená směs se ukládala do běžné trojdílné formy a mírně se hutnila. Po přípravě se vzorky sytily vodou. Při všech zkouškách se aplikoval sytící tlak 300 kPa. Po izotropní konsolidaci se vzorky podrobily neodvodněnému smyku při měření pórového tlaku. Celkem se provedlo 14 zkoušek na směsích s ostrohranným kamenivem, z toho jedna s maximální velikostí zrn 4 mm, ostatní se zrny do 2 mm.

Pro vyhodnocení zkoušek v rámci teorie popsané úvodu je třeba určit maximální pórovitost hrubozrnné frakce. U písku byla 43,3%, u ostrohranného kameniva do 4 mm 49,8% a u ostrohranného kameniva do 2 mm 50,4%.

Provedené zkoušky ukázaly, např. srovnáním drah napětí in Mašín (2001), že rozdílná zrnitost hrubozrnné frakce nemá významný vliv na vlastnosti zeminy. Směsi s frakcí do 2 mm se chovají stejně jako směs s frakcí do 4mm. Toto zjištění je v souladu s prací Pitmana et al. (1994).



Obr. 3. Fázový diagram - pórovitost vzorků po konsolidaci vs. obsah jemnozrné frakce  
 Fig. 3 Phase diagram - voids ratios of triaxial specimens vs FC

### 3. Chování směsí

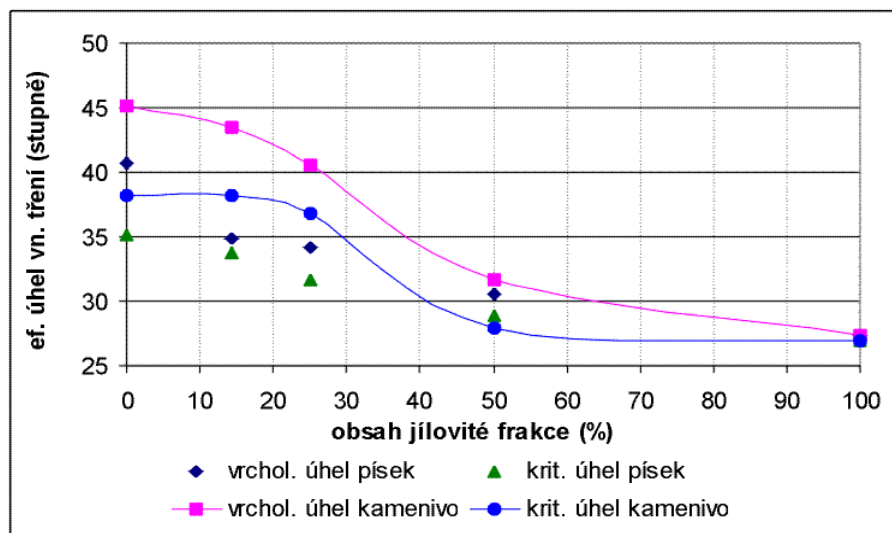
Na obr. 3 jsou shrnuty výsledky všech zkoušek směsí s ostrohranným kamenivem i dřívějších zkoušek směsí s pískem. Podle strukturální představy popsané v úvodu by přechodové chování vzorků s ostrohranným kamenivem mělo nastat při vyšších zastoupeních jemnozrné frakce než u vzorků s pískem. Pro číslo pórovitosti 0,5, které reprezentuje dobře stav zkoušených laboratorních vzorků v blízkosti přechodové oblasti, vychází z obr. 3 obsah jemné frakce pro přechodové chování o cca 10% nižší než pro ostrohranné kamenivo (cca 15%, resp. 25%). Zhruba lze odhadnout, že zkoušené vzorky směsí s pískem by měly vykazovat přechodové chování při obsahu jemné frakce cca 15 až 20%, zatímco směsí s ostrohranným kamenivem při cca 22% až 27% jemné frakce.

V Tab. 1 jsou shrnuty výsledky smykových zkoušek. Vrcholové a kritické úhly vnitřního tření se získaly proložením bodů napětí v rovině  $t:s'$  ( $t=1/2(\sigma_a-\sigma_r)$ ;  $s=1/2(\sigma_a+\sigma_r)$ ;  $\sigma_a$  a  $\sigma_r$  jsou osová a radiální napětí) přímkovými obálkami, které procházely počátkem. Velikosti úhlu vnitřního tření  $\phi'$  jsou znázorněny na obr. 4, z něhož je patrné, že k výrazné změně  $\phi'$  dochází v relativně úzké zóně změny obsahu jílovité frakce. Přechodová zóna, v níž klesá pevnost na hodnotu jemnozrné zeminy, je však poměrně široká a vyskytuje se při vyšším obsahu jemné frakce než předpokládá teorie. Obr. 4 umožňuje odhad pevnosti výplňového materiálu na základě zastoupení jemnozrné a hrubozrné frakce.

Tab. 1 Výsledky trojosých smykových zkoušek směsí jílu s ostrohranným kamenivem – Mohr-Coulombovy obálky proložené počátkem roviny  $t:s'$

Tab. 1 Mixtures of different FC – Mohr-Coulomb envelopes through the origin

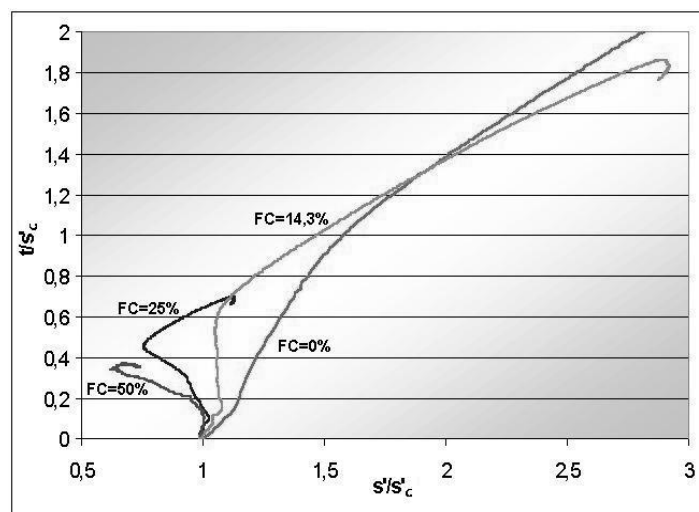
obsah jemnozrné frakce (%)	$\phi'_{max}$ (°)	$c'_{max}$ (kPa)	koeficient determinace	$\phi'_{cr}$ (°)	$c'_{cr}$ (kPa)	koeficient determinace
0,00	45,1	0,00	0,9988	38,2	0,00	0,9972
14,29	43,5	0,00	0,9997	38,3	0,00	0,9998
25,00	40,5	0,00	0,9996	36,8	0,00	0,9998
50,00	31,7	0,00	0,9895	28,0	0,00	0,9975
100,00	27,3	0,00	-	27,0	0,00	-



Obr. 4. Závislost úhlu vnitřního tření (vrcholového i v kritickém stavu) na obsahu jílovité frakce

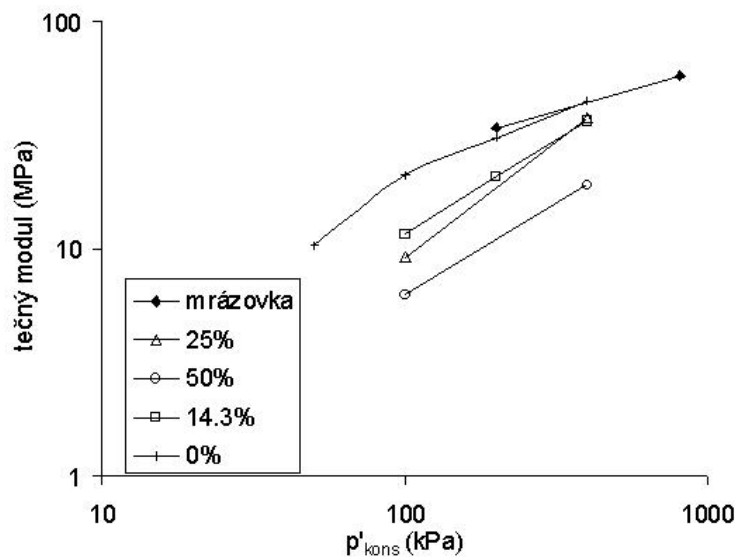
Fig. 4 Dependence of the peak and critical state friction angles on the content of fines

Na obr. 5 je závislost normalizovaných drah napětí na obsahu jemnozrné frakce. Je z něj zřejmé, že i relativně malý obsah jemnozrné frakce ovlivní sklon k dilatanci materiálu a tedy i dráhy napětí a pracovní diagramy. Z obr. 4 je patrné, že ovlivní i vrcholovou pevnost. I při malém obsahu jemné frakce dochází k jejímu poklesu. Vrcholová pevnost i dilatance jsou závislé na struktuře zeminy, resp. na jejím stavu. Jemnozrná příměs i v malém množství ovlivní strukturu zeminy při přípravě vzorku a při izotropní konsolidaci. Na rozdíl od teoretických předpokladů (případ 1 v úvodu) jemné částice nezaujímají při přípravě a konsolidaci polohu pouze uvnitř pórů hrubozrného skeletu a uplatňují se i mezi kontakty hrubých částic. Podílejí se tudíž na distribuci sil a významně ovlivňují mechanické chování. Teprve v povrcholovém stádiu smykového namáhání zřejmě dochází k jejich postupnému přemísťování. Proto při menších zastoupeních jemné frakce nedochází k poklesu kritické pevnosti s postupným vzrůstem FC, narozdíl od pevnosti vrcholové.



Obr. 5 Závislost normalizovaných drah napětí na obsahu jílovité frakce

Fig. 5 Dependence of normalized stress paths on FC

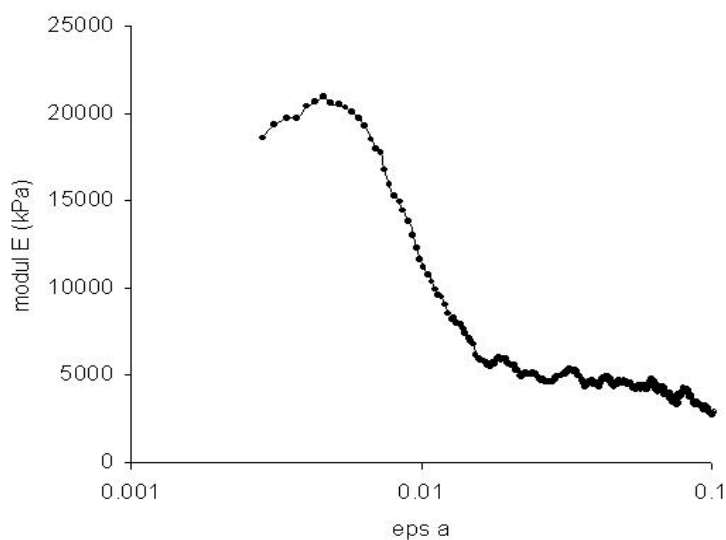


Obr.6. Tečné Youngovy moduly jednotlivých zkoušených materiálů

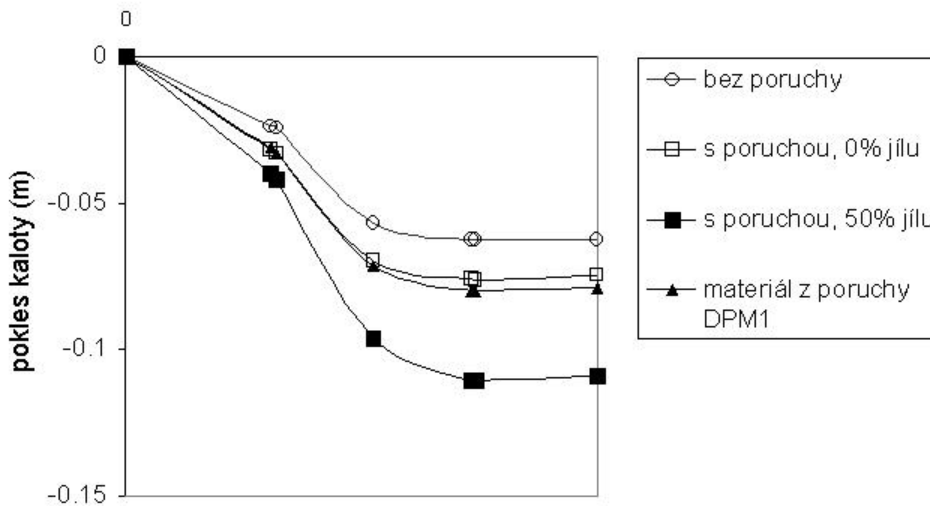
Fig. 6 Dependence of the tangent Young's moduli on mean effective stress for tested materials

Maximální tečné Youngovy moduly, které byly spočteny z pracovních diagramů zkoušek, jsou souhrnně uvedeny na obr. 6. Příklad tuhosti na obr. 7 ukazuje, že nejde o pružné Youngovy moduly měřené při velmi malých přetvořeních, menších než  $\epsilon_a = 0,00001$ . Zkoušky se prováděly ve standardně instrumentovaném trojosém přístroji, s měřením osové deformace vně komory. Při tomto uspořádání nelze měřit menší osová přetvoření než cca 0,01. Případná měření při nižších hodnotách přetvoření jsou zkreslena ložným efektem, který způsobuje počáteční nárůst modulu po zahájení smykové fáze zkoušky – viz obr. 7.

Závislost Youngova modulu na napětí v semilogaritmickém zobrazení  $\log E_t : \log p'$  ( $p'$  je efektivní střední hlavní napětí) u materiálu z poruchy i u směsi 14,3% je lineární (obr. 6). Obrázek dokumentuje pokles Youngova modulu se zvyšujícím se obsahem jemnozrné frakce. Hodnoty pro obsah 14% a 25 % se liší od hodnot pro čisté kamenivo, což dokládá, že i nízký obsah jemnozrné frakce pod přechodovým prahem má vliv na tuhost zeminy.



Obr. 7. Závislost tečného Youngova modulu na osovém přetvoření (14% jemnozrné frakce)  
Fig. 7 Dependence of tangent Young's modulus on axial strain (14% of fines)



Obr. 8. Vliv materiálu na pokles kaloty idealizovaného tunelového výrubu (vodorovná osa vyjadřuje postup ražby)

Fig. 8 Settlement of the crown of an idealized tunnel (settlement on vertical axis, horizontally the building sequence)

Obr. 8 ukazuje výsledek numerické parametrické studie vlivu materiálu poruchy na deformace idealizovaného tunelového výrubu. Použila se MKP, program Tochnog (Mašín, 2001). Na svislé ose je svislá deformace kaloty, na vodorovné ose je vyjádřen postup ražby, který byl pro všechny uvedené případy stejný (horizontální členění ražby) a není pro zde uvedené úvahy podstatný.

Za srovnávací hodnotu pro deformaci slouží případ, kdy v masivu není porucha a numerický model dává nejmenší deformaci. Hodnoty deformací při poruše vyplněné skutečným materiálem a při simulaci poruchy drceným kamenivem s nulovým obsahem jemnozrné frakce jsou obdobné. Vyplývá to z náhodné koincidence - tuhosti obou materiálů jsou stejné, jak ukazuje obr. 6. Smyková pevnost, která je pochopitelně u obou materiálů zcela odlišná, nemá v numerickém modelu na výslednou deformaci podstatný vliv. Směs 1:1 však má tuhost (i pevnost) odlišnou a numericky stanovená deformace je o cca 50% větší než u čistého kameniva.

Závěry strukturního laboratorního modelování chování výplňového materiálu nelze přímo aplikovat při analýze deformací tunelového výrubu, neboť hodnoty tuhosti materiálu tak odvodit nelze. Na pevnost výplně však je možné ze strukturní analýzy usuzovat.

#### 4. Závěr

Studie potvrdila, že směs jemnozrné a hrubozrné zeminy má vyšší pevnost při ostrohranné příměsi než při příměsi se zaoblenými zrny. Zrnitost vlastní ostrohranné příměsi hraje podružnou roli.

Z pórovitosti zeminy, obsahu jemnozrné frakce a maximální pórovitosti hrubozrné frakce je možno stanovit prahové zastoupení jemné frakce, při němž by mělo docházet k přechodovému chování zeminy. Pro směsi zkoušeného ostrohranného kameniva s jemnozrnou frakcí je limitní hodnotou cca 25% jemnozrné zeminy.

Rozbor prokázal, že jednoduchá strukturní teorie platí pouze pro pevnost v kritickém stavu, která není závislá na počátečním stavu zeminy. K přechodovému chování ale dochází až při vyšším obsahu jemnozrnné frakce než podle zjednodušené teorie, pro zkoušené směsi při cca 30% až 40% jemné frakce. Částice hrubozrnné příměsi tudíž mají vliv i při pórovitosti  $e_s$  překračující maximální pórovitost hrubé frakce  $e_{max,s}$ .

Prokázal se velký vliv i malé příměsi jemnozrnné frakce na ostatní parametry, které jsou závislé na počáteční struktuře zeminy – na vrcholový úhel vnitřního tření, rozvoj pórových tlaků, resp. tendenci ke kontraktanci, i na tvar pracovních diagramů. Se změnou tvaru pracovních diagramů se zastoupením jemné frakce se tudíž mění i tuhost zeminy.

Ze zastoupení jemné frakce ve směsi lze kvantitativně odhadnout pevnost zeminy. Odhad tuhosti je pouze kvalitativní.

## **Poděkování**

Práce byla podporována projekty COST OC C7.30 a GAČR 103/00/1043. Dr.-Ing. Ivovi Herlemu autoři děkují za pomoc při numerickém modelování a za připomínky k textu příspěvku.

## **Literatura**

- Boháč, J., Kárník, J., Kořán, P. a Záleský, J. (1998) Chování mechanicky stabilizovaných zemin. 26. konf. Zakládání staveb, Brno, 96 – 97.
- Boháč, J., Herle, I. and Mašín, D. (2002) Stress and strain dependent stiffness in a numerical model of a tunnel. 2nd Int. Conf. COST C7, Zurich, 7-8 March 2002 – připravuje se.
- Mašín, D. (2001) Vliv výplně tektonických poruch na deformace tunelu. Diplomová práce, PřF UK, odd. inž geologie – připravuje se.
- Pitman, T. D., Robertson, P. K. and Sego, D. C. (1994) Influence of fines on the collapse of loose sands. Canadian Geotech. J., 31, (5), 728-739.
- Thevanayagam, S. a Mohan, S. (2000) Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands. Géotechnique 50 (1), 1-23.