

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2004**

USING THE COUPLED MODELLING METHOD TO STUDY STABILITY OF SLOPES

VYUŽITÍ SDRUŽENÉHO MODELOVÁNÍ PŘI STUDIU STABILITY SVAHŮ

Jiřina Trčková¹, Petr Procházka²

The coupled modelling method, which brings together advantages of as numerical computation, as experiments, is focused on parametric study of slopes stability. Stress changes under the slope abutment caused due to the external loading along slope ridge and deformation owing to waterlogging of slope abutment is studied. The tensometric sensors and trigonometric measurements are used in the experiments to measure deformations. The results obtained from physical models are used to formulate constitutive laws for numerical modelling. Finite element method and Method of apriori integration were applied.

Keywords *Physical models, stability of slopes, coupled modelling*

Úvod

V praxi nastávají situace, kdy na koruně stávajících svahů dochází k jejich přetížení. Může se jednat o výsypky, které jsou následně zatěžovány ukládáním dalších etáží, mohou to být přirozené, nebo umělé svahy kde na jejich koruně dochází k výstavbě nových objektů, což oboje vede k nutnosti ověření stability svahu. Dalším faktorem, který má nemalý vliv na stabilitu svahů a náspů je proměnlivá hladina spodní vody. Vliv těchto faktorů lze studovat na parametrických fyzikálních modelech z ekvivalentních materiálů a následně výsledky experimentálních modelových řešení využít pro formulaci konstitučních vztahů v numerickém řešení.

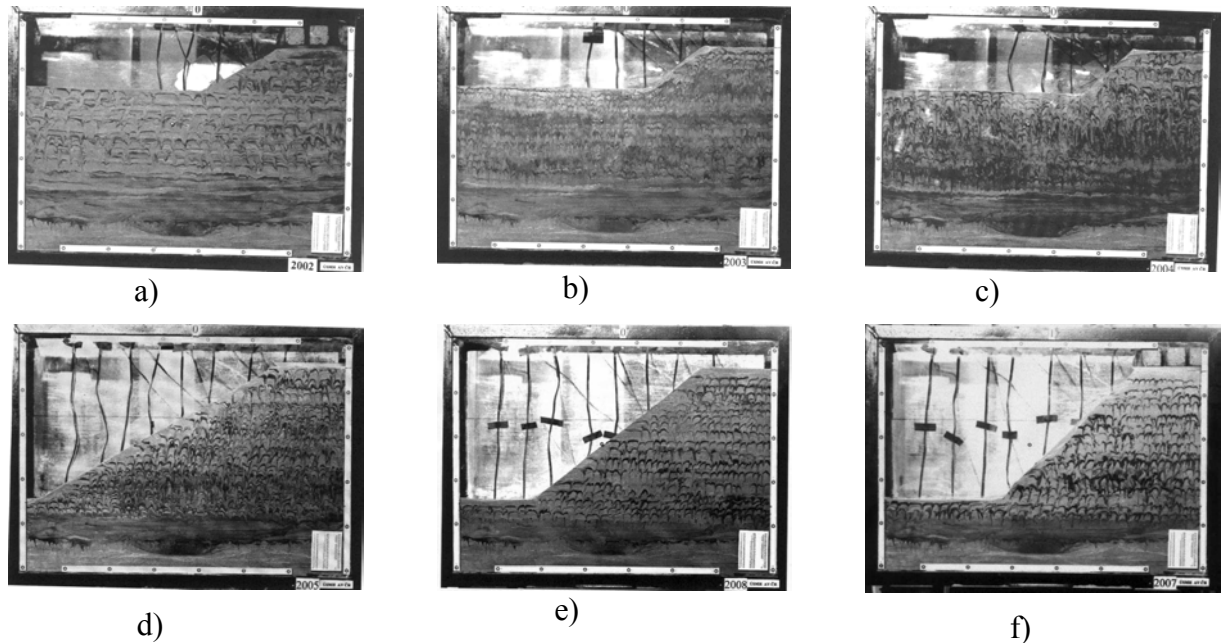
Změny napětí pod patou svahu (náspu) v závislosti na vzrůstajícím přetížení koruny svahu (náspu) následkem vnějšího přetížení

Na sérii parametrických fyzikálních modelů byly sledovány změny napětí pod patou a v tělese svahu následkem vnějšího přetížení v závislosti na sklonu svahu a jeho výšce [1]. V modelovacím stendu o rozměrech 770 x 192 x 580 mm (délka x šířka x výška) byly konstruovány modely se sklonem svahu 30°, 38° a 45° a výškou svahu 100 mm resp. 300 mm. Vlastnosti modelového materiálu (směs jemné balotiny, ferosilicia a tuku), v měřítku 1 : 500 odpovídaly vlastnostem zpevněných zemin. Na obrázku 1. jsou fotografie všech šesti modelů před začátkem pokusu [3]. Pro snímání změn napětí bylo v každém z modelů umístěno 6, resp. 9 polovodičových snímačů typu TM 440. Pro registraci byla využita měřicí ústředna UNILOG 2500. Snímače byly uloženy ve vodorovné rovině

¹ Ing. Jiřina Trčková, CSc.: Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR; V Holešovičkách 41, 160 00 Praha 6, Česká republika, tel.: +420224313520, e-mail: trckova@irsm.cas.cz

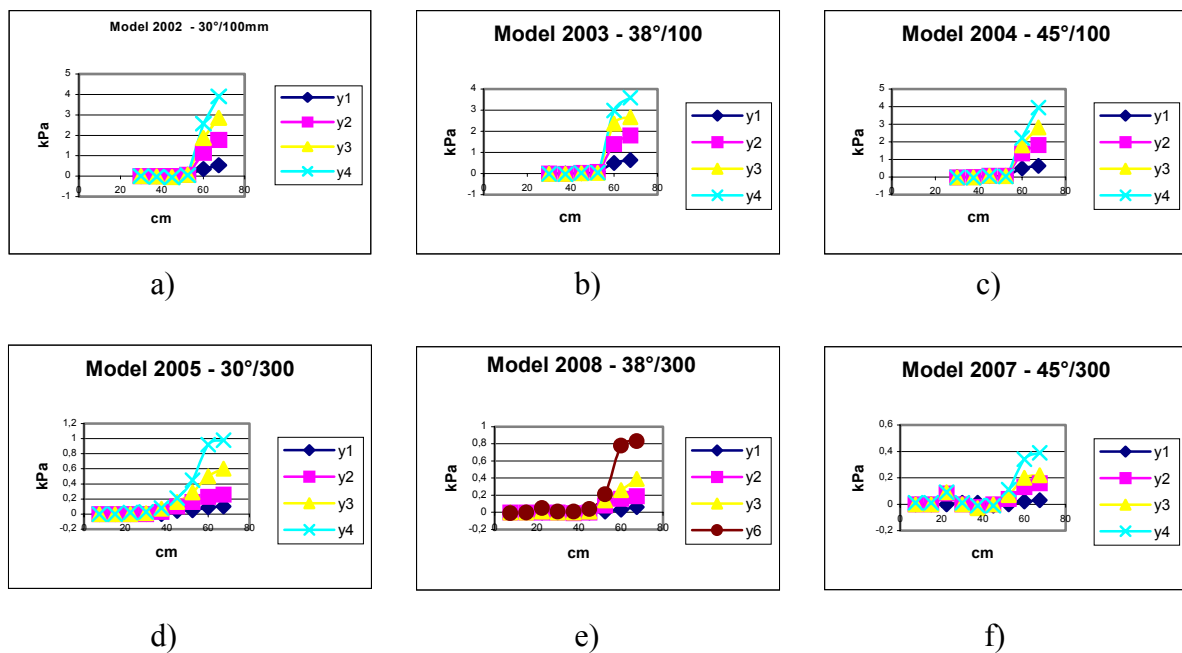
² Prof. Petr Procházka, DrSc.: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební; Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Česká republika, tel.: +420224354480; e-mail: petrp@fsv.cvut.cz

v hloubce 20 mm pod patou svahu v linii vedené středem stendu. Před uložením snímačů do modelu byla stanovena jejich citlivost, tj. hodnota čtení ústředny pro shodné zatížení snímače. Za předpokladu lineárního průběhu zatěžovacích křivek byl stanoven koeficient pro srovnání citlivostí jednotlivých snímačů. Tím bylo umožněno porovnání hodnot naměřených na jednotlivých snímačích v průběhu zatěžování modelu mezi sebou.



Obr.1. Série fyzikálních modelů svahů různých výšek a sklonů

Modely byly postupně zatěžovány kovovými závažími na koruně svahu v ploše 345.6 cm^2 . Po každém zatěžovacím kroku byly registrovány změny napjatosti na snímačích a také graficky zpracovány (Obr.2).



Obr.2. Změny napětí následkem vnějšího přitížení
 $(y_1 = 2.8 \text{ kPa}, y_2 = 6.3 \text{ kPa}, y_3 = 9.1 \text{ kPa}, y_4 = 12.0 \text{ kPa})$

Numerická řešení byla koncipována tak, aby byl proveden odhad stability modelovaných svahů a získány informace o bezpečnosti těchto svahů. Za tím účelem byla numerická řešení prováděna metodou apriorní integrace [2, 3]. Přitom na fyzikálních modelech zjištěné změny napjatosti v místech uložení snímačů byly využity pro formulaci konstitučních vztahů.

Deformace náspu následkem jeho podmáčení spodní vodou

Deformace náspu následkem zvyšování hladiny spodní vody až do výše paty jeho svahů, byly sledovány na fyzikálních modelech z ekvivalentních materiálů. Modely konstruované v měřítku 1 : 100 představovaly násep, jehož výška byla 10 m, šířka koruny 15 m a sklon svahů 30°. Na povrch náspu, kolmo k podélné ose namodelovaného náspu, byly umístěny měřické body (Obr.3). V každé etapě pokusu na modelu, dané změnou výšky hladiny vody, která byla do modelů přiváděna otvory ve dně stendu a postupně vystoupala až k patě svahů (Obr.4), byly na měřických bodech měřeny trigonometricky vektory posunů těchto bodů.

První z modelů byl postaven ze směsi velmi jemné balotiny 89,98%, ferrosilicia 10% a tuku A00 0,02%. Tento materiál pro měřítko modelu odpovídal písčitém zpevněným zeminám, které nejsou náchylné k bobtnání (součinitel objemové bobtnavosti 1,3% - málo bobtnavý). U druhého modelu byl horninový materiál pod náspem substituován křemenným pískem s převládající velikostí zrna 1- 4 mm, který byl na povrchu opatřen 20 mm silnou vrstvou jemného křemitého písku o zrnitosti 0.1 – 0.25 mm. Vlastní těleso náspu a část pod jeho patou (do hloubky 20 mm) byla postavena ze směsi jemného křemitého písku 80% a bentonitu 20% (součinitel objemové bobtnavosti 49.6 % - velmi silně bobtnavý).

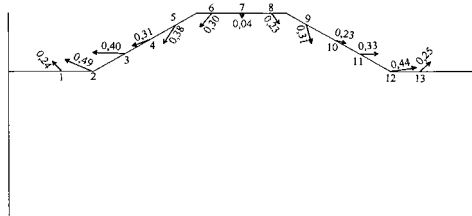


Obr. 3. Měřické body

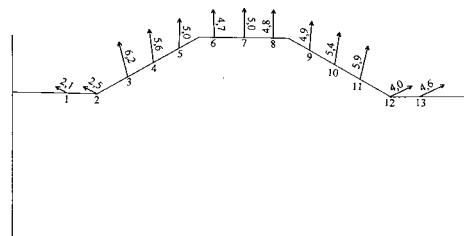


Obr.4. Fotografie modelu v jednotlivých fázích pokusu

Zatímco u prvního modelu došlo v důsledku působení vody, která podmáčela patu svahů k pozvolnému ujíždění svahů do stran řádově v desetinách milimetrů (Obr.5a), u druhého modelu v situaci, kdy hladina vody dosáhla paty vrstvy tvořené směsí bentonitu a písku, začal proces bobtnání. Došlo k výrazným posunům směrem vzhůru a to víc jak 10 x větším, než byly změřeny u modelu z málo bobtnavého materiálu (Obr.5b).



a)



b)

Obr.5. Vektory posunů zaznamenaných na měřících bodech;
a) materiál málo bobtnavý (zvětšeny 100 x),
b) materiál velmi silně bobtnavý (zvětšeny 10 x)

Aby v numerickém řešení bylo dosaženo rozumné shody mezi porovnávanými veličinami určenými z fyzikálních modelů a počítanými, byla využita speciální variační formulace vycházející z minima variance rozdílů měřených a vypočítaných hodnot. Numerická analýza vychází z analýzy transformačního pole (TFA) a konceptu odlišných stavů (DSC) [4]. Sdružené modelování vede ke zpřesnění materiálových parametrů matematického fyzikálně nelineárního modelu [5, 6]. Alternativně bylo k výpočtu použito diskretních elementů [7].

Závěr

Rozvoj metody sdruženého modelování přináší další možnosti pro rozšíření poznatků a základních informací v oblasti konstrukce podzemních děl. Sdružené modelování spojuje výhody obou, jak numerického výpočtu, tak experimentu. Navržené nové postupy vycházející z výpočtu vnitřních parametrů v matematickém fyzikálně nelineárním modelu s využitím částečných výsledků fyzikálního modelu, umožňují dosáhnout větší objektivizace řešení a prokazují řadu výhod při studiu podzemních konstrukcí. Uvedené příklady užití pro parametrické studie geotechnických problémů jsou začátkem rozvoje této metody, která by měla být dále propracovávána a tím přispívat k rozšíření možností jejího využití pro objasnění dějů probíhajících v horninovém masivu, k zpřesňování získávaných výsledků, které jsou nezbytným podkladem při projekci podzemního díla.

Poděkování

Autoři článku děkují Grantové agentuře Akademie věd České republiky za finanční pomoc při řešení grantu IAA2119402, v rámci kterého vznikl tento článek.

Literatura

- [1] Trčková J., Procházka P.: *Optimal material properties of slopes using coupled modelling* - Proc. GEOTECH–YEAR 2000, Developments in Geotechnical Engineering, Asian Inst. of Technology, ed.A.S.Balasubramaniam et al., Bangkok, Thailand, 439-448, 2000
- [2] Procházka P.: *Slope optimization by the Apriori Integration Method* – Acta Montana ÚSMH AV ČR, 82, 51-154, 1990 [3] Trčková J., Procházka P.: *Application of coupled modeling to slope stability assessment* - Proc. Computational methods and experimental measurements X, WIT Press, Alicante, 447-456, 2001
- [3] Trčková J., Procházka P.: *Application of coupled modelling to slope stability assessment* – Proc. Computational Methods and Experimental Measurements X, WIT Press, Alicante, 447-456, 2001
- [4] Desai Ch., Ma Y.: *Modelling of joints and interfaces using the disturbed state concept* - Int. J. Numer. & Anal. Methods in Geomechanics, Vol. 16, 623-653, 1995
- [5] Procházka P., Trčková J. (2002a), Material properties of tailings of open-pit mines using coupled modeling. Proc. 5th European Conf. on Numerical methods in geotechnical engineering NUMGE 2002, Mestat (ed.), Presses de l'ÉNPC/LCPC, Paris, 273-278
- [6] Procházka P., Trčková J. (2002b), Material properties of tailings of open-pit mines using coupled modeling. Environmental Studies IX, series: Environmental Studies Volume 7, 361-370
- [7] Procházka P., Trčková J., Kameníček I. (2003), Stability in geotechnics using the free hexagon method. Proc. 2nd Speciality Conference on the Conceptual Approach to Structural Desing, Ci Premier PTE LTD, 747-754