



## STOCHASTICKÝ MODEL INTERAKCE MEZI RAŽENÝM TUNELEM A POZEMNÍ VÝSTAVBOU

Zpracovali: Prof. Ing. Jiří Šejnoha, DrSc., Ing. Tomáš Janda, Ph.D. (Fakulta stavební VUT v Praze)

### Souhrn

Technický list shrnuje principy stochastického modelu pro predikci tvaru a rozsahu poklesové kotliny vznikající nad raženým tunelem a souvisejících deformací a pravd podobných poruch dotyčných pozemních staveb. Klíčovými prvky stochastického modelu jsou dva provázané deterministické modely pro výpočet deformací podloží a pro výpočet deformací budovy doplněné o pravd podobnostní popis nejistoty týkající se vstupních (především materiálových) parametrů a nejistoty spojené s nepresným měřením. Pravd podobnostní rozdíl vstupních parametrů tohoto hierarchického stochastického modelu je zprůměrováno metodou bayesovské inference na základě dat z monitoringu ražby.

### Oblast použití

Typickým scénářem použití stochastického modelu interakce mezi raženým tunelem a pozemní výstavbou zahrnuje zhodnocení rizika nadměrných deformací terénu a souvisejícího porušení zasažené budovy. Samotný stochastický model je použitelný pro zhodnocení rizika v době návrhu (například s použitím metody Monte Carlo). Výhoda bayesovského přístupu však spočívá v tom, že veškerá data získaná prostřednictvím monitoringu lze okamžitě použít pro zprůměrování po zátěži (typicky poměrně široce definovaného) rozdíl vstupních parametrů a tím významně zprůměrovat výpočet pravd podobnosti nepříznivé události (poruchy).

### Metodika a postup řešení

Metodika řešení spočívá ve formulaci deterministického modelu interakce ražby a budovy, která zahrnuje:

- redukovaný model podloží, v němž se razí tunel,
- modelu přetváření budovy zatížené poklesy podloží v úrovni základové spáry,
- sloučení těchto dvou modelů pomocí interakčních prvků.

Dále pak metodika obsahuje formulaci stochastického modelu interakce, která zahrnuje:

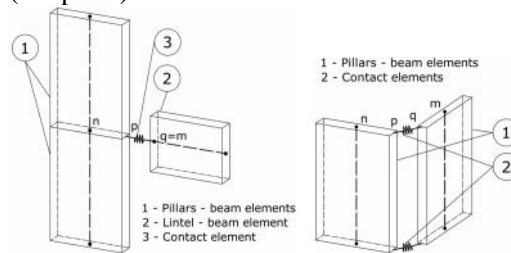
- výše uvedený deterministický model,
- zohlednění modelových nejistot (princiálních nepřesností modelu),
- zohlednění nejistot (apriorního pravd podobnostního rozdíl) modelových parametrů (nepřesné určení materiálových parametrů),
- zohlednění nepřesností měření a monitoringu.

### Redukovaný model podloží

Redukovaný model podloží zavádí speciální funkce vycházející předpokládané kinematiky deformovaného podloží a využívá principu virtuálních prací pro výpočet deformací.

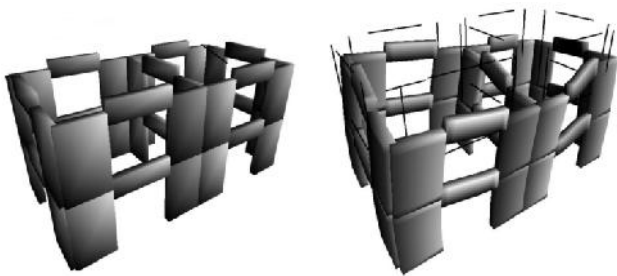
### Model budovy

Budova je modelována pomocí nosíkových prvků reprezentujících svislé konstrukční části (sloupy, pilíře) a vodorovné konstrukční části tvořící stropy (nadpraží).



Obr. 1 Zavedení kontaktních prvků mezi sloupy a nadpražím do modelu budovy.

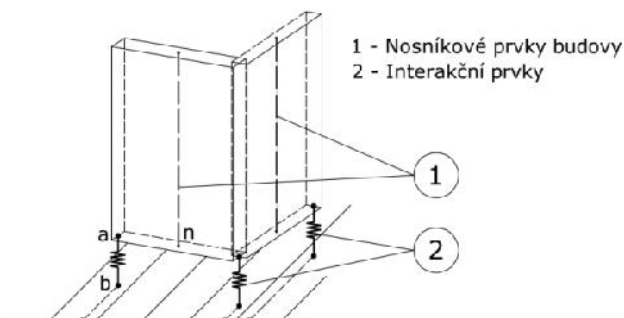
Ohybová tuhost desek tvořících stropní konstrukce je zanedbána, zatímco nová tuhost stropních desek je uvažována jako nekonečná. Napojení pilířů a nadpraží je řešeno pomocí pružných kontaktních prvků, viz Obr. 1. Příklad deformované budovy je zobrazen na Obr. 2.



Obr. 2 Ukázka deformace modelu budovy vyvolaná poklesy v míst základové spáry. Úseky ukazují polohu os prvků. Zobrazené deformace jsou zvětšeny 100×.

### Model interakce

Interakci mezi podložím a budovou v úrovni základové spáry zajišťují interakční prvky, viz Obr. 3. Poloha interakčních prvků je dána geometrií budovy, jejím relativním umístěním v i ose raženého tunelu a polohou elby. Formulace interakčních prvků aplikována na FEM model podloží je popsána v [1].



Obr. 3 Interakční prvky mezi modelem podloží a modelem budovy.

### Stochastický model

Výše popsaný model je deterministický – pro konkrétní hodnoty vstupních parametrů (materiálových parametrů vrstev zeminy v podloží a parametrů materiálu stěn budovy) model určí jednoznačný tvar poklesové kotliny a související deformaci budovy. Z tohoto pohledu lze na model nahlížet jako na vektorovou funkci

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

kde vektor  $\mathbf{x}$  reprezentuje všechny vstupní parametry modelu, zatímco vektor  $\tilde{\mathbf{y}}$  zahrnuje vypočtené deformace podloží i budovy ve všech předem definovaných zájmových bodech. Nejistoty vstupních parametrů a chyby měření zohledňuje hierarchický stochastický model [2], pro který s pomocí Bayesova teorému

$$\pi(\theta|\mathbf{y}) = \frac{\pi(\mathbf{y}|\theta)\pi(\theta)}{\pi(\mathbf{y})} \propto \pi(\mathbf{y}|\theta)\pi(\theta)$$

získáme aposteriorní rozdělení vstupních parametrů ve tvaru

$$f(\boldsymbol{\theta}, \sigma_y | \mathbf{y}) \propto \prod_{i=1}^m f_N(y_i, \tilde{y}_i, \sigma_y) \times f_U(\sigma_y, \sigma_{y,min}, \sigma_{y,max}) \times \prod_{j=1}^n f_N(\theta_j, \mu_{\theta_j}, \sigma_{\theta_j})$$

Funkce  $f_U(x, a, b)$  označuje hustotu rovnoměrného rozdělení veličiny  $x$  na intervalu  $\langle a, b \rangle$  a funkce  $f_N(x, \mu, \sigma)$  označuje hustotu normálního rozdělení veličiny  $x$  se střední hodnotou  $\mu$  a směrodatnou odchylkou  $\sigma$ . Nejprve tedy předpokládáme, že všechny parametry modelu mají normální apriorní rozdělení a chyba měření deformací v kterémkoliv monitorovaném bodě má stejnou směrodatnou odchylku  $\sigma_y$  v rozmezí  $\langle \sigma_{y,min}, \sigma_{y,max} \rangle$ . Hodnoty  $\tilde{y}_i$  jsou teoretické hodnoty deformací predikované pomocí deterministického modelu  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ , zatímco hodnoty  $y_i$  jsou skutečná data získaná monitoringem. Rozdělení parametrů v etně jejich vzájemné statistické závislosti je dáno aposteriorním rozdělením  $f(\boldsymbol{\theta}, \sigma_y | \mathbf{y})$ .

### Závěr

Formulováním aposteriorního rozdělení modelových parametrů jsme získali nástroj pro odhad pravděpodobnosti poruchy, který umožňuje zohlednit postupně se vyvíjející monitorované chování konstrukce. Vzhledem k tomu, že aposteriorní rozdělení je vícedimenzionální (model má více parametrů) je nutné pro generování vzorků parametrů použít metodu Markov Chain Monte Carlo, například Gibbsův generátor implementovaný v programu JAGS [3]. Pro testování modelu budou v následujícím roce použita data z některého z realizovaných tunelů a výsledky budou prezentovány na konferenci BESTInfra 2017.

### Literatura

- [1] Janda, T., Šejnoha, M., Šejnoha, J. Modeling of soil structure interaction during tunnel excavation: An engineering approach, *Advances in Engineering Software*, Vol. 62-63, p. 51-60, 2013.
- [2] Kruschke, J. K. *Doing Bayesian Data Analysis*, 2nd ed.; Elsevier Ltd, 2014.
- [3] Plummer, M. JAGS: A Program for Analysis of Bayesian Graphical Models Using Gibbs Sampling. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Distributed Statistical Computing*, DSC 2003; Hornik, K., Leisch, F., Zeileis, A.; et al., Eds.; 2003.