



## DISKRÉTNÍ MODELOVÁNÍ ŽELEZNIČNÍHO ŠTŘKOVÉHO POKRYTÍ POMOCÍ KULOVITÝCH ZRN S VALIVÝM ODPOREM

Zpracovali: Ing. Jan Eliáš, Ph.D., Ing. Radek Dubina (Fakulta stavební VUT v Brně)

### Souhrn

Práce se zabývá modelováním železničního štrkového pokrytí s cílem poskytnout informace o jeho chování v kolejovém loži v interakci se zemním tělesem a pražci. Díky své struktuře je štrk obtížně popsatelný pomocí spojitých homogenních modelů. Proto se práce snaží o jeho popis pomocí diskrétního přístupu, kde je každé štrkové zrno modelováno samostatně. Přes mnoho zjednodušení (zrna štrku jsou v modelu nedeformovatelná a kulovitá, kontaktní konstitutivní zákony jsou zjednodušené, apod.) vykazuje model kvalitativně shodné chování s realitou. V letošním roce byla hlavním tématem snaha o nalezení také kvantitativní shody s experimenty. Cílem tedy bylo, aby model vykazoval stejné deformace a síly jako byly měřeny v experimentech. Za tímto účelem byla modelována sada experimentů a identifikovány vhodné materiálové parametry modelu.

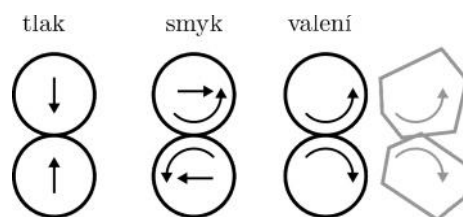
### Oblast použití

Hlavní oblasti použití modelu jsou tyto:

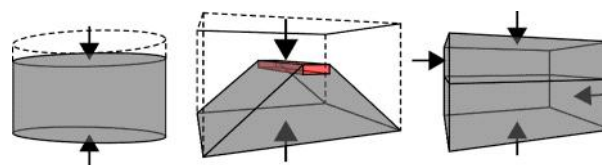
- studium chování železničního štrku pod cyklickým zatížením,
- studium podepření pražce v kolejovém loži.

### Metodika a postup řešení

Vyvíjený model je dynamický. Jeho hlavní výhodou je automatické zohlednění struktury štrkového materiálu. Zrna štrku jsou pro zrychlení výpočtu uvažována jako kulovitá a mohou spolu interagovat na společných kontaktech pomocí tří druhů soběpůsobení schematicky znázorněných na Obr. 1. V tlaku je působení nelineární a elastické a je popsáno pomocí standardní Hertzovy teorie. Stejně tak ve smyku je použita kontaktní teorie Mindlinova [4]. Ovšem smykové působení je dále ohraničeno Coulombovým třením, smyková síla tak nesmí přesáhnout daný násobek normalové síly. Limitní násobitel je určen úhlem vnitřního tření.



Obr. 1 Tři druhy interakce mezi kulovitými zrny.

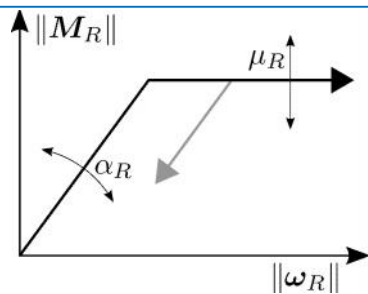


Obr. 2 Schématické znázornění simulovaných experimentů; zleva: oedometrický test, test kolejového lože a smykový test.

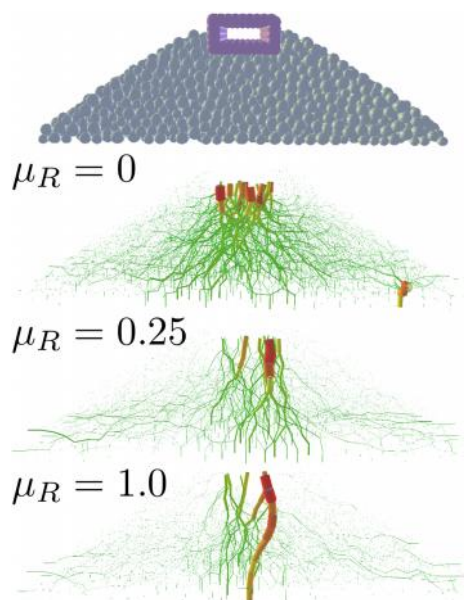
Tímto druhem působení je valivý odpor, který je předán pro kompenzaci tvarového zjednodušení. Skutečná zrna štrku mají složitý tvar a valivý odpor. Tento odpor je tak pro kulovité tvary fenomenologicky vložen. Zde již práce jsme měli poměrně dobrou představu o parametrech kontaktního působení ve smyku a v tlaku. V letošním roce jsme hledali hlavní parametry valivého odporu. K tomu jsme využili tyto experimenty, jejichž výsledky byly publikovány v literatuře. Jedná se o (i) oedometrický test [3], (ii) test zmenšeného kolejového lože [1] a (iii) dva nezávislé smykové testy s různými hodnotami vertikálního tlaku [2,6]. Schémata těchto testů jsou znázorněna na Obr. 2. Pro modelování byl využit software YADE [5].

### Výsledky

Valivý odpor má dva parametry,  $\mu_R$  a  $\mu_R$ . První ovlivňuje poáteční tuhost a druhý omezuje maximální hodnotu valivého odporu, Obr. 3. Jako zásadní se ukázal právě druhý z parametrů. V případě oedometrického testu se valivý odpor neprojevuje. Avšak v případě testu simulujícího kolejové lože a smykového testu byl vliv valivého odporu zcela zásadní.



Obr. 3 Konstitutivní zákon pro valivý odpor.

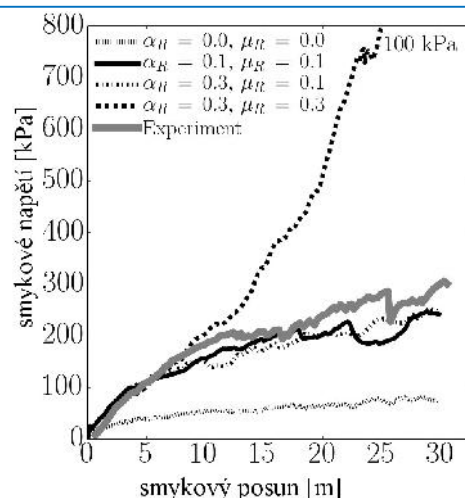


Obr. 4 Znáznornění přenosu sil v modelu kolejového lože pro různé parametry valivého odporu.

Pro vystižení experimentu kolejového lože byla vhodná hodnota parametru  $\mu_R$  v rozmezí 0,25-0,35. Zajímavé bylo, že pro hodnoty 0,1 a méně byl odpor šťrkového tělesa příliš malý a pražec se zanoval dovnitř. Kromě změny odezvy byla při změně  $\mu_R$  patrná také výrazná změna vzájemného působení zatížení. Zvýšený valivý odpor vedl ke vzniku zdánlivé ohybové tuhosti a vytvářel sloupce podepírající pražec, Obr. 4.

Při simulacích smykového testu se bohužel ukázalo, že vhodná hodnota parametru  $\mu_R$  je 0,1 nebo ještě méně. Při použití vyšších hodnot predikoval model příliš velké síly. Obr. 5 ukazuje tuto situaci pro tlak 100 kPa. Při změně vertikálního bylo pak nutné změnit i hodnotu parametru valivého odporu.

Popsaná skutečnost ukazuje na nepřijatelný fakt, že parametry modelu nyní nejsou přenositelné z jednoho experimentu na druhý a je nutno při každém novém experimentu hodnotu valivého odporu znovu identifikovat. Na druhou stranu dává model slibné výsledky a umožňuje nahlížet do procesů odehrávajících se uvnitř (Obr. 4).



Obr. 5 Srovnání odezvy modelu smykové zkoušky s různými parametry valivého odporu a experimentu [2].

## Závěr

V letošním roce se podařilo simulovat 4 různé experimentální série. Kulovitý model bylo nutno vylepšit přidáním valivého odporu, který fenomenologicky nahrazuje chybějící detailní popis tvaru zrn. Do budoucna plánujeme studovat simulace s polyhedrálními zrny, přidat drčení zrn (vyvinuté v předchozích letech) a simulaci experimentu na kolejovém loži skutečné velikosti.

## Literatura

- [1] Brown, S. F., J. Kwan a N. H. Thom. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. *Geotextiles and Geomembranes*. 2007, Vol. 25, pp. 326-335.
- [2] Indaratna, B., N. Ngo, C. Rujikiatkamjorn a J. S. Vinod. Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing. *Int. Journal of Geomechanics*. 2014, pp. 34-44.
- [3] Lim, W. L. a G. R. McDowell. Discrete element modelling of railway ballast. *Granular Matter*. 2005, Vol. 7, pp. 19-29.
- [4] Mindlin, R. D. Compliance of elastic bodies in contact. *ASME J Appl Mech*. 1949, Vol. 16, pp. 259-268.
- [5] Šmilauer, V. et al. *Yade Documentation*. The Yade Project, 2005.
- [6] Wang, X. L. and J. C. Li. Simulation of triaxial response of granular materials by modified DEM. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. 2014, Vol. 57, pp. 2297-2308.