

# MODELOVÁNÍ NELINEÁRNÍ MECHANICKÉ ODEZVY VLÁKNOBETONU V PROGRAMU ATENA

Miroslav Vořechovský<sup>1</sup>, Jan Eliáš<sup>2</sup>

## Abstract

The article belongs to a series of articles by the present authors [3–5] focused on possibilities of virtual simulation of FRC. In particular, the motivation is to identify model material laws for a nonlinear finite element (FEM) code based on available test data and to use the model for prediction of material behavior in various contexts. The software at hand is ATENA program and the data are represented by a test series previously obtained by the authors. The present paper is focused on the effect of nonzero stiffness of the sliding support of simply supported beam (a three-point bent beam made of concrete). In the remainder of the paper, a strong effect of default convergence criteria in ATENA software is documented in the context of presented simulations.

## Abstrakt

Príspevek navazuje na sérii článků autorů [3–5], která je zaměřena na virtuální simulování vláknocementových kompozitů. Motivací je identifikovat materiálový zákon pro nelineární konečněprvkostní model založený na experimentálních datech. Tento model má být následně využit pro odhad chování materiálu v různých kontextech, tedy pro různé geometrie prvků a jejich zatěžovací stavy. Využívaný software je program Atena a data jsou získána z autory dříve provedené sady experimentů. Tento článek je zaměřen na efekt nekluzných podpor prostě podepřeného nosníku (tříbodový ohyb trámce z betonu). Na konci článku je zmíněn (a v kontextu předkládaných modelů dokumentován) silný vliv konvergenčních kritérií na vypočtenou odezvu nosníku v softwaru Atena.

## 1 Podepření ve vodorovném směru

Podpory při zkoušce ve tříbodovém ohybu (prostě podepřený nosník) se většinou uvažují jako dokonale kluzné. Takto jsou také modelovány při virtuálních simulacích

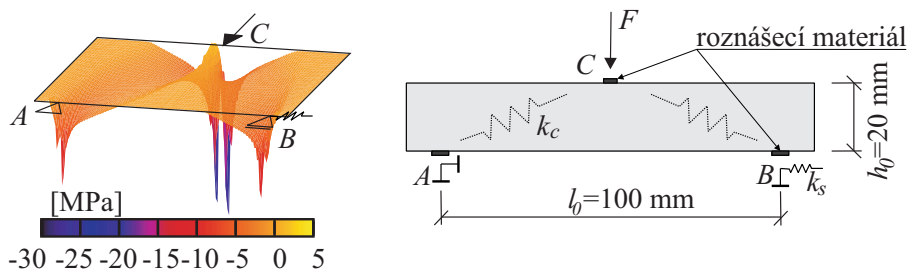
---

<sup>1</sup>Miroslav Vořechovský, Ing., Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel. 05/4114 7370, e-mail: vorechovsky.m@fce.vutbr.cz

<sup>2</sup>Jan Eliáš, Ing., doktorand<sup>2</sup>, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel. 05/4114 7371, e-mail: elias.j@fce.vutbr.cz

pomocí metody konečných prvků (MKP). Otázkou řešenou v tomto článku je zda kluznost podpory odpovídá realitě a jaký by byl případný efekt zamezení pokluzu pro různé geometrie a materiály. Odpověď je nalezena skrze numerické simulace pomocí MKP. Následující část textu studuje vliv horizontální pružiny, vložené do kluzné podpory, při současném pevném podepření druhé podpory.

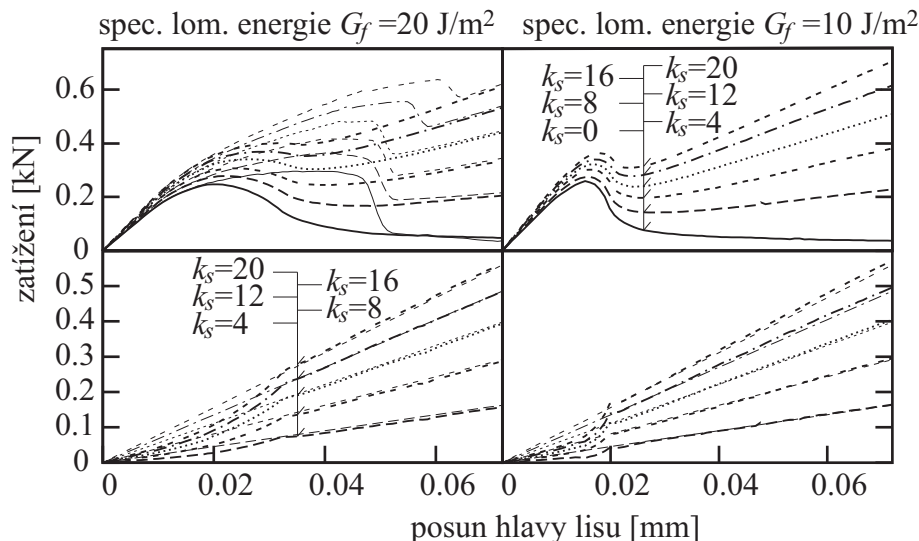
Studie je zpracována na vzorku délky 120 mm, výšky  $h_0=20$  mm, šířky 20 mm, vzdálenost podpor je  $l_0=100$  mm. Nosník je zatěžován deformací, materiálový model je S-Beta s defaultními parametry. V místech podepření jsou modelovány destičky z isotropního lineárního materiálu, sloužící k roznosu zatížení. Modul pružnosti roznašecího materiálu je v článku značen  $E$ . Levá podpora je v horizontálním směru dokonale tuhá, pravá je fixována pružinou proměnné tuhosti  $k_s$ . Celá konfigurace je vykreslena na obrázku 1 vpravo.



Obrázek 1: Vlevo: Hlavní tlakové napětí daleko za vrcholem zatěžovacího diagramu při tuhosti horizontální pružiny  $k_s=10$  kN/mm. Z obrázku je patrná motivace použití vzpěradla (obr. 3 vpravo). Vpravo: Studovaná konfigurace.

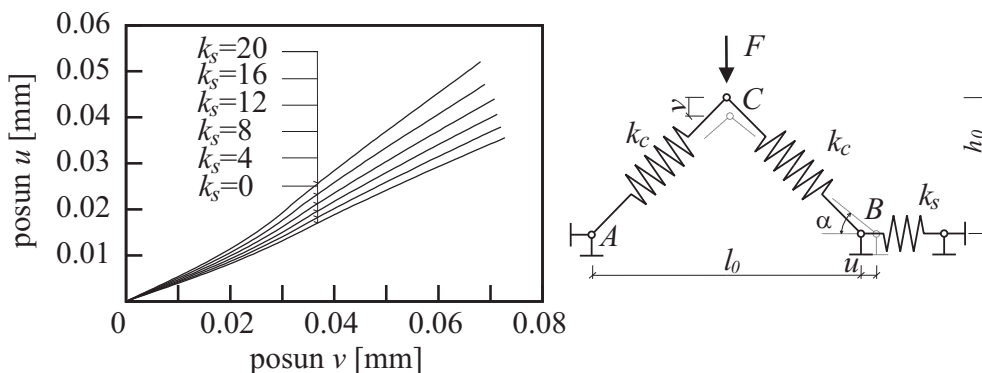
Bylo provedeno několik výpočtů odezvy modelu pro proměnnou tuhost pružiny  $k_s$ . Výsledné křivky jsou vykresleny na obrázku 2. Z výsledků je zřejmé, že horizontální tuhost podpor má velký vliv na celkovou odezvu už na vzestupné větvi. Je otázkou, zdali je opodstatněné uvažovat tuhost pružiny lineární po celou dobu. Nejspíše ne, zvláště na sestupné větvi bude situace úplně jiná.

Vykreslit vliv interakce pružiny s nosníkem na odezvu konstrukce v porovnání s referenčním případem (pružina nulové tuhosti) lze jednoduše odečtením křivky (zatěžovací dráhy), získané při  $k_s=0$  kN/mm od ostatních křivek. Motivací je snaha vysvětlit křivky nějakým jednoduchým modelem. Nejprve bylo zkoumáno vzpěradlo (von-Misesovo) podobné tomu na obr. 3 vpravo, ovšem bez „betonových“ pružin ( $k_c = \infty$ ). Tento model se ovšem ukázal jako nedostatečný, pružiny s tuhostí  $k_c$  tedy byly zohledněny. Problém je nalezení správné hodnoty této tuhosti. Pro zkoumaný model byla jako optimální stanovena hodnota  $k_c=0.5$  kN/mm. Odůvodněním je shoda podstatné části analytického řešení vzpěradla s odchylkou patřičné odezvy MKP modelu od referenční ( $k_s=0$  kN/mm) pro všechny studované tuhosti  $k_s$ . Tato částečná shoda je zachycena na obrázku 2 dole, kdy je analytické řešení vzpěradla zakresleno tenkou čarou odpovídající barvy. Tuhost  $k_c$  by zřejmě vyžadovala další rozbor, je ale pravděpodobné, že ji nebude příliš ovlivňovat délka „betono-



Obrázek 2: Nahoře: Odezvy modelu pro různé tuhosti horizontální pružiny  $k_s$ . Tenkými čarami odezvy při mírnějších konvergenčních kritériích (část 3). Dole: Odchytky křivek od referenční  $k_s = 0 \text{ kN/mm}$ . Tenkou čarou vykresleno řešení vzpěradla z obrázku 3. Řešeno pro dva různé materiálové modely, lišící se hodnotou lomové energie  $G_f = 10$  (resp.  $20$ )  $\text{J/m}^2$ .

vých vzpěr“. Spíše bude záviset na velikosti modelovaných roznášecích prvků a tuhosti jejich materiálu. Oporou pro takovéto předpoklady je obrázek 1 vlevo, kde je zachyceno hlavní tlakové napětí daleko za vrcholem zatěžovacího diagramu na modelu s pružinou  $k_s = 10 \text{ kN/mm}$ . Z něj je patrné, že největší napětí a tedy i největší přetvoření vznikají v oblasti roznášecích prvků. Patrný je ale také vzpěradlový efekt (klenba). Protože ke shodě odezvy vzpěradlového modelu s odezvou modelu z programu Atena nedochází před dosažením maximální síly, je vzpěradlový model nejspíše nevyužitelný.

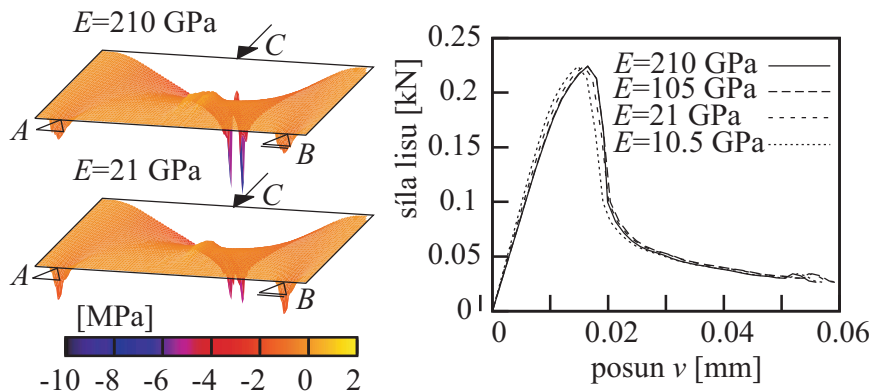


Obrázek 3: Vlevo: Závislost vodorovného posunu  $u$  na svislém posunu  $v$  pro různé tuhosti  $k_s$  [ $\text{kN/mm}$ ]. Vpravo: Uvažovaný model vzpěradla.

Podle názoru autorů žádná zkouška pro zjištění reálného chování podpor prozatím realizována nebyla. Nejspíše by byla poměrně složitá. Jako zajímavá alternativa by mohlo být využito měření vodorovného posunu vzorku v podporách. Očekávané výsledky pro různé tuhosti  $k_s$  jsou vyneseny v grafu na obr. 3 vlevo. Vodorovné posuvy jsou přibližně polovinou svislých, měly by tedy být snadno měřitelné. Podstatné ale je, že vodorovný posun kluzné podpory je řádově srovnatelný se svislým průhybem nosníku, a to téměř nezávisle na tuhosti pružiny v podpoře  $k_s$ .

## 2 Tuhost roznášecího materiálu

V další části se článek zabývá vlivem tuhosti roznášecího materiálu na celkovou odezvu. Byl použit stejný model jako v předchozí části (obr. 1), pružina v pravé podpoře byla odstraněna ( $k_s=0$  kN/mm). Je-li materiál velmi tuhý, vznikají pod hranami zatěžovacího prvku napěťové extrémy, známé z teorie pružného poloprostoru (zatlačování dokonalé tuhé desky do podloží apod.). S klesající tuhostí klesají i extrémy (obr. 4 vlevo). Graf na obrázku 4 vpravo ale ukazuje, že tuhost roznášecího materiálu nemá na celkovou odezvu téměř žádný vliv.

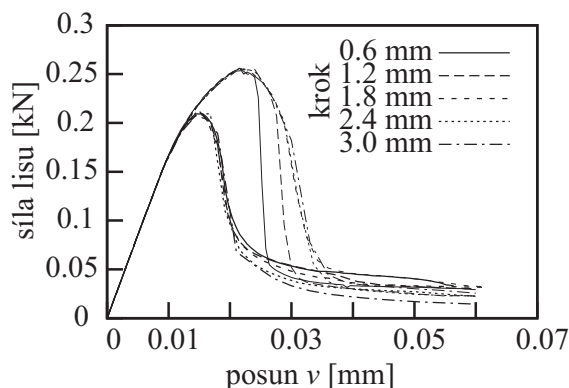


Obrázek 4: Vlevo: Hlavní tlaková napětí na vzorku blízko vrcholu zatěžovacího diagramu. Vpravo: Vliv tuhosti roznášecího materiálu na celkovou odezvu.

## 3 Parametry řešení

Posledním studií, provedenou na popsaném modelu, je závislost řešení na parametrech výpočtu a délce kroku vynucené deformace. Výsledky studie jsou shrnuty v obrázku 5. Tenkými čarami je zobrazena odezva modelů při použití přednastavených konvergenčních kritérií v programu ATENA, tlustými pak odezva při použití kritérií přísnějších (přípustné chyby byly upraveny na desetiny původní hodnoty). Z grafu lze tedy učinit závěr, že pro nalezení věrohodné odezvy vyjadřující dostatečně přesně rovnováhu a minimum potenciální energie pro všechny fáze zatěžování

(a to nezávisle na velikosti zatěžovacího kroku) je v tomto případě nutné zpřisnit výrobcem nastavené parametry výpočtu.



Obrázek 5: Vliv parametrů řešení a délky kroku na odezvu.

Podobný graf jako na obrázku 5 je i na obrázku 2 vlevo nahoře, kde jsou tenkými čarami vykresleny odpovídající odezvy modelů s přednastavenými výpočetními parametry. Viditelné je drastické snížení disipované energie jakož i maximálního zatížení při zpřesnění řešení (viz obrázky 2 a 5). V kontextu motivace celého projektu stručně shrnuté v abstraktu poznamenáváme, že je třeba brát ohled na zmíněné problémy při automatizované zpětné identifikaci materiálových parametrů z experimentálních testů.

## 4 Závěry

Byla představena parametrická studie pro nenulový odpor proti posunu v podpoře při tříbodovém ohybu betonu. Byl navržen jednoduchý mechanický model pro popis vzniklých odchylek a byl srovnán s výsledky ze simulace metodou konečných prvků.

Byla provedena studie vlivu tuhosti roznášecího materiálu na odezvu modelu.

Na závěr článek demonstroval míru možné chyby řešení odezvy nosníku bez zpřisnění implicitních konvergenčních kritérií při simulaci v programu Atena.

## Poděkování

*Příspěvek vznikl v rámci projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky č.1M06005, výzkumné centrum CIVAK - Centrum integrovaného výzkumu anorganických kompozitů.*

## Reference

- [1] Červenka, V., Jendele, L., Červenka, J., Atena program documentation, Part 1: Theory, 2005, Červenka Consulting, Předvoje 22, Praha, 162 00, Czech Republic
- [2] Stibor, M., Lomové parametry betonu a jejich určování, disertační práce, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2004
- [3] Eliáš, J., Chování křehkých vláken v kompozitech s křehkou a kvazikřehkou maticí, diplomová práce, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2006
- [4] Vořechovský, M., Korekce zatěžovacích drah na netuhých lisech, In Jana Pejchalová, Jiří Kala, and Zbyněk Keršner, editors, Směrování kateder/ústavů STM stavebních fakult ČR a SR 2005/2006, pages 93-97, Mikulov, Czech Republic, 2006. Brno University of Technology, Fac. of Civil Engrg., Institute of Struct. Mech.
- [5] Vořechovský, M., Eliáš, J., K modelování experimentů s vláknobetonem v programu Atena, 4th International Conference Fibre Concrete 2007, Prague, Czech Republic, in print