

OD LOMOVÝCH EXPERIMENTŮ KE STOCHASTICKÉMU MODELOVÁNÍ SMYKEM PORUŠOVANÝCH PŘEDPJTÝCH STŘEŠNÍCH NOSNÍKŮ

FROM FRACTURE EXPERIMENTS TO STOCHASTIC MODELLING OF PRESTRESSED ROOF GIRDERS FAILING IN SHEAR

Ondřej Slowik, Drahomír Novák

Článek je věnován popisu numerického modelování prefabrikovaných střešních konstrukčních prvků. V první fázi rozsáhlého komplexního výzkumného projektu proběhly lomové experimenty, identifikace parametrů materiálových modelů a destruktivní zkoušky předpjatých nosníků. Následovalo numerické a stochastické modelování odezvy zkoumaných konstrukcí. **The aim of the paper is to describe advanced numerical modelling of precast roof structural members. Fracture experiments, inverse analysis and shear destructive experiments have been performed within the first phase of a large complex research project forming the base for numerical and stochastic modelling of shear structural response.**

Článek shrnuje výsledky dlouhodobého vývoje postupů numerického modelování produktů firmy Franz Oberndorfer GmbH & Co KG (Rakousko) zabývající se výrobou prefabrikovaných betonových konstrukčních prvků. Cílem tohoto výzkumu je co nejlepší postžení chování těchto prvků jak na deterministické, tak na stochastické úrovni a v poslední fázi pak jejich efektivní spolehlivostní optimalizace.

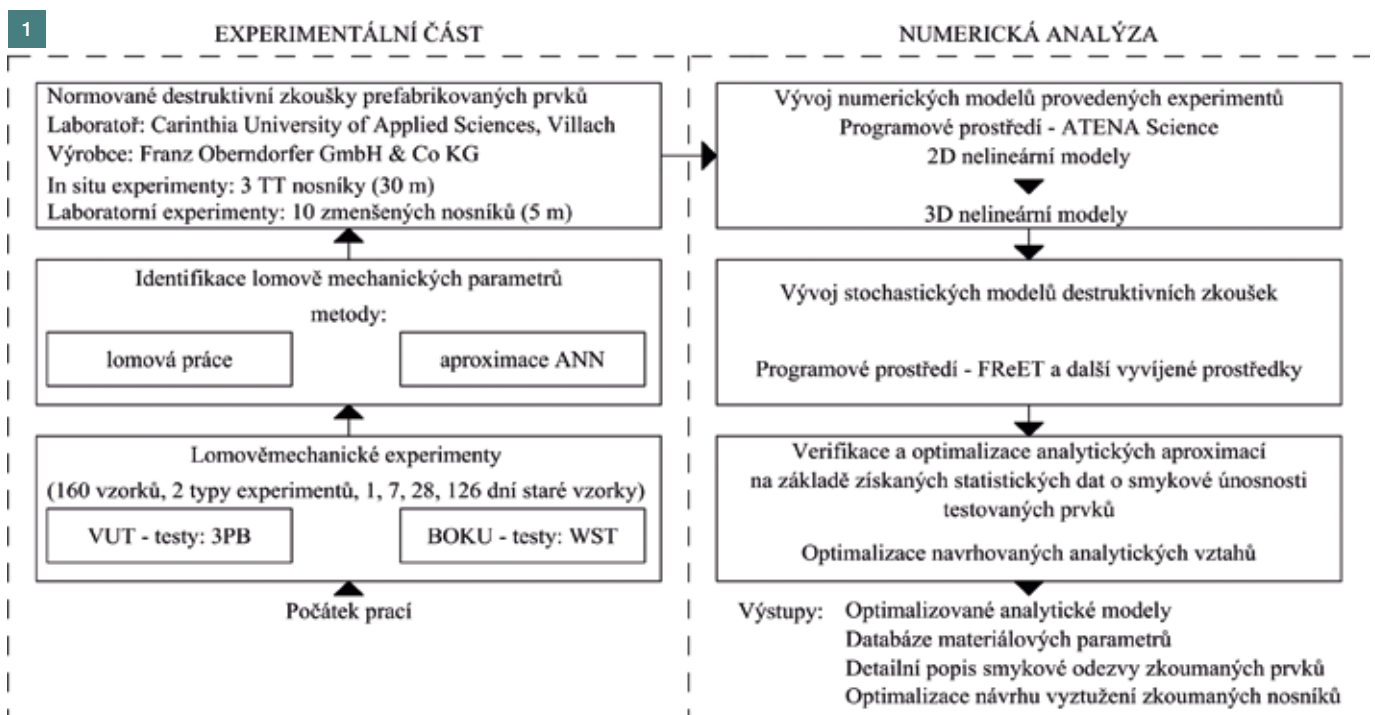
V první fázi výzkumu byly provedeny lomové experimenty na dvou betono-

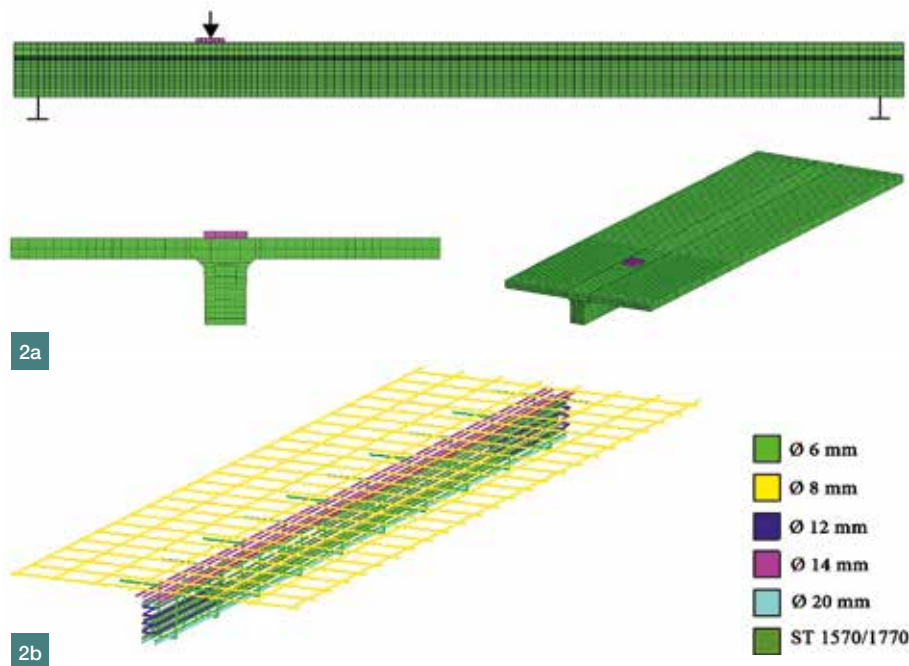
vých směsích běžně používaných pro výrobu prefabrikátů. Lomověmechanické experimenty byly realizovány ve spolupráci dvou laboratoří. Testy třibodovým ohybem byly provedeny na VUT v Brně týmem pod vedením prof. Keršnera [1]. Testy vtláčováním klínu do zářezu zkušební vzorku byly provedeny na University of Natural Resources and Life Sciences ve Vídni týmem prof. Strausse [2]. Výsledky experimentů byly následně použity k identifikaci materiálových parametrů betonu [3] užívaných v rámci numerických modelů betonu dostupných v souboru programů ATENA [4].

V laboratoři Carinthia University of Applied Sciences (Rakousko) byly následně provedeny a vyhodnoceny smykové destruktivní zkoušky deseti zmenšených modelů předpjatých střešních nosníků vyráběných firmou Franz Oberndorfer GmbH & Co KG [5]. Testy byly doplněny in situ zatěžovacími zkouškami předpjatých TT nosníků skutečné velikosti. Následovalo podrobné numerické modelování provedených experimentů [6]. S pomocí vytvořených deterministických modelů a na základě znalosti stochastických vlastností materiálových parametrů používaných beto-

nových směsí byly vytvořeny stochastické modely smykové odezvy testovaných nosníků [7]. Celý proces bude zakončen spolehlivostní optimalizací konstrukce předpjatého střešního nosníku LDE7. Schéma celého postupu je zachyceno na obr. 1. V rámci popsaného procesu byly vytvořeny rovněž podkladové materiály sloužící jako návod pro deterministické a stochastické modelování produktů partnerské firmy. Vytvořené numerické modely rovněž slouží výuko-

1 Postup prací při modelování a optimalizaci předpjatých prefabrikovaných prvků vyráběných firmou Franz Oberndorfer GmbH & Co KG (zdroj: [6]) **2** Geometrie nosníku T30 150V2, numerický model: a) beton, b) výztuž **3** a) Výsledné LD křivky: (F) – zatěžování silou; (D) – zatěžování deformací vs. experiment, b) srovnání skutečných a modelovaných trhlin **1** Workflow of modelling and optimization of precast concrete girders produced by Franz Oberndorfer GmbH & Co KG company (source: [6]) **2** Geometry of T30 150V2 girders, numerical model: a) concrete bod, b) reinforcement **3** a) Resulting LD curves: (F) – loading by force; (D) – loading by deformation vs. experimental result, b) comparison of real and modelled crack pattern





vým a výzkumným účelům a jsou dnes využívány pro účely parametrických studií prováděných na University of Natural Resources and Life Sciences ve Vídni.

Nelineární modelování metodou konečných prvků (NMMKP) lze dnes s výhodou používat v oblastech, kde získá plynoucí z opakované výroby optimálně navržených (detailně analyzovaných) prvků vyváží nemalé náklady na provedení potřebných experimentů a numerických analýz. Ideální aplikační oblastí pro NMMKP je vývoj prefabrikátů ve velkých betonárnách. NMMKP ve spojení se znalostí stochastických atributů vstupních parametrů pak může sloužit k virtuálnímu rozšíře-

ní množiny reálně provedených (nákladných) experimentů. Stochastické NMMKP může poskytnout informace nejen o konkrétních hodnotách sledovaných výstupů odezvy konstrukce spojených s jednotlivými realizacemi, ale i o jejich statistických parametrech [7]. Další oblastí využití pokročilých modelů pak může být spolehlivostní optimalizace konstrukce předpjatých prvků. Data získaná stochastickým NMMKP lze rovněž využít ke kalibraci analytických aproximací pro výpočet smykové únosnosti používaných ve stavební praxi. Dlouhodobý vývoj v oblasti výpočetní techniky, softwaru, metodiky modelování a v neposled-

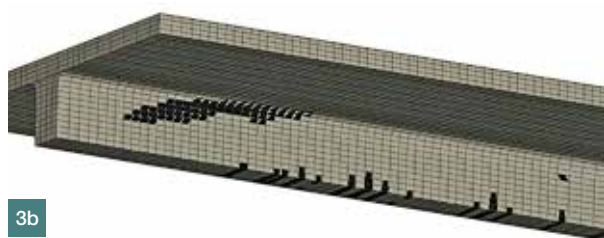
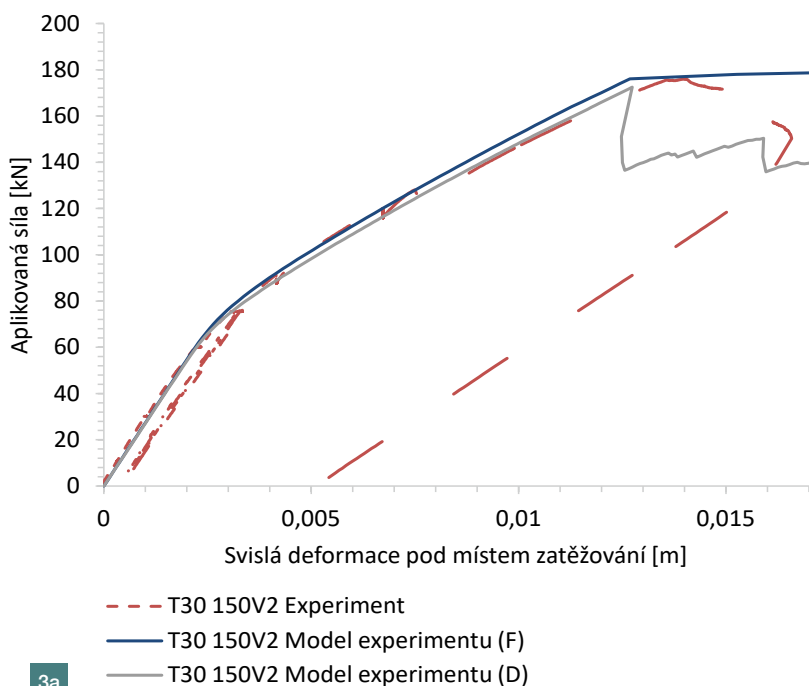
ní řadě normového rámce [8] pomalu posouvá NMMKP směrem k rutinnímu využití ve stavební praxi.

EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Přesné numerické modelování chování reálných konstrukčních prvků vyžaduje co nejúplnější znalost lomověmechanických parametrů použitých materiálových modelů betonu. Podrobné informace o těchto materiálových parametrech a jejich statistických vlastnostech lze získat pouze provedením lomověmechanických experimentů na betonové směsi použité pro výrobu modelovaného prvku.

V rámci provedeného experimentálního programu byly testovány dvě betonové směsi standardně využívané k výrobě prefabrikovaných předpjatých prvků C50/60 a C40/50. Provedené lomové experimenty byly sestaveny v souladu s normou ÖNORM EN 206:2014 [9]. Podrobné informace o této části poměrně rozsáhlého experimentálního programu jsou k dispozici v [1], [2] a jsou unikátní především tím, že obsahují popis lomověmechanických parametrů pomocí náhodných veličin včetně statistických závislostí.

Během práce na deterministickém modelování destruktivních experimentů popsaných v [5] bylo využíváno programové prostředí ATENA Science [4]. Pro samotné modelování betonu byl v rámci zmíněného prostředí použit materiálový model CC3DNonLinCementitious2. Na základě citlivostní analýzy byly určeny klíčové parametry tohoto modelu: tlako-



Tab. 1 Materiálové parametry identifikované pomocí ANN (zdroj: [1]) ■**Tab. 1** Material parameters of concrete identified by ANN (source: [1])

Parametr	Střední hodnota	COV	PDF
tlaková pevnost	77 MPa	6,4 %	GMB min. EV1
tahová pevnost	3,9 MPa	10,6 %	GMB max. EV 1
modul pružnosti	34,8 GPa	10,6 %	WBL min. (3par)
lomová energie	219,8 Jm ⁻²	12,8 %	GMB max. EV 1

vá pevnost f_c , tahová pevnost f_{ct} , lomová energie G_f a Youngův modul pružnosti E_c . Pro identifikaci uvedených lomově-mechanických parametrů byla využita inverzní analýza lomových experimentů pomocí umělých neuronových sítí (ANN) [3], [10]. Materiálové parametry identifikované tímto způsobem, jejich střední hodnoty, variační koeficienty (COV) a nejhodnější rozdělení hustoty pravděpodobnosti (PDF) jsou uvedeny v tab. 1.

Jedním z hlavních cílů prováděných studií je podrobný výzkum vzájemné interakce smykového a normálového zatížení předpjatých střešních nosníku LDE7 průřezu TT. Tyto nosníky jsou vyráběny z betonu třídy C50/60, jejich délka je 30 m, nad podporami jsou vysoké 0,5 m a výška jejich průřezu plynule narůstá až na 0,9 m ve středu rozpětí. Obě stojiny mají tloušťku 0,14 m. Šířka horní pásnice prvku je 3 m při tloušťce 0,07 m.

Ve druhé fázi experimentálního programu proto byly na těchto nosnicích provedeny in situ zatěžovací zkoušky v souladu s CEB-FIP Model Code 2010 (MC 2010) [11].

Poslední částí experimentálního programu bylo provedení deseti destruktivních experimentů se zmenšenými modely střešních nosníků. Cílem návrhu experimentů se zmenšenými nosníky bylo docílit módu smykového porušení a obdobných stavů napjatosti vlivem předpjetí a vlastní tíhy jako v případě nosníků LDE7 plné velikosti. Zmenšené modely střešních nosníků měly shodnou délku 5 m, obdélníkové průřezy výšek 0,3, 0,45 a 0,6 m

a shodnou tloušťku 0,14 m, alternativně pak průřez tvaru T s výškou 0,3 m, šířkou pásnice 1,5 m, tloušťkou pásnice 0,07 m a tloušťkou stojiny 0,14 m. Nosníky byly předepnuty 4 až 8 předpínacími kabely St 1570/1770. Celý experimentální program deseti provedených destruktivních zkoušek je podrobně popsán v práci [6]. Destruktivní zkoušky byly monitorovány čtyřmi monitorovacími systémy [5]. Všechny provedené destruktivní experimenty byly modelovány nelineárně metodou konečných prvků. Provedené experimenty sloužily k přesné kalibraci modelovacích postupů. Podrobný popis všech testovaných nosníků a vytvořených nelineárních modelů jde nad rámec tohoto textu. Stručný popis hlavních atributů numerických modelů je uveden na příkladu nosníku T30 150V2 [6], jehož geometrii a způsob předpětí lze považovat za nejkomplicovanější.

NELINEÁRNÍ STOCHASTICKÉ NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ DESTRUKTIVNÍHO TESTU

Geometrický model nosníku T30 150V2 měl co nejpřesněji vystihnout reálnou geometrii provedených experimentů. Geometrie nosníku i vyztužení (obr. 2a a 2b) byly modelovány dle výkresů poskytnutých výrobcem prvku. Vytvořený model pracuje s následujícími zjednodušujícími předpoklady:

- oblý přechod mezi stojinou a pásnicí nosníku byl nahrazen polygonální aproximací při zachování shodné průřezové plochy nosníku. Toto zjednodušení bylo

přijato s ohledem na využití šestistěnných konečných prvků, jejichž poměr stran neměl pro zajištění korektní funkce přesáhnout hodnotu 3:1,

- byla uvažována dokonalá soudržnost betonu a výztuže (Bond),
- konvenční a předpínací výztuže byly modelovány pomocí 1D reinforcement [4] materiálu dostupného v prostředí software ATENA Science pro modelování prutů výztuže. Tento materiál je aplikován na 1D liniové konečné prvky. Vlastnosti materiálu výztuže jsou definovány multilineárním pracovním diagramem a průměrem dané výztuže.

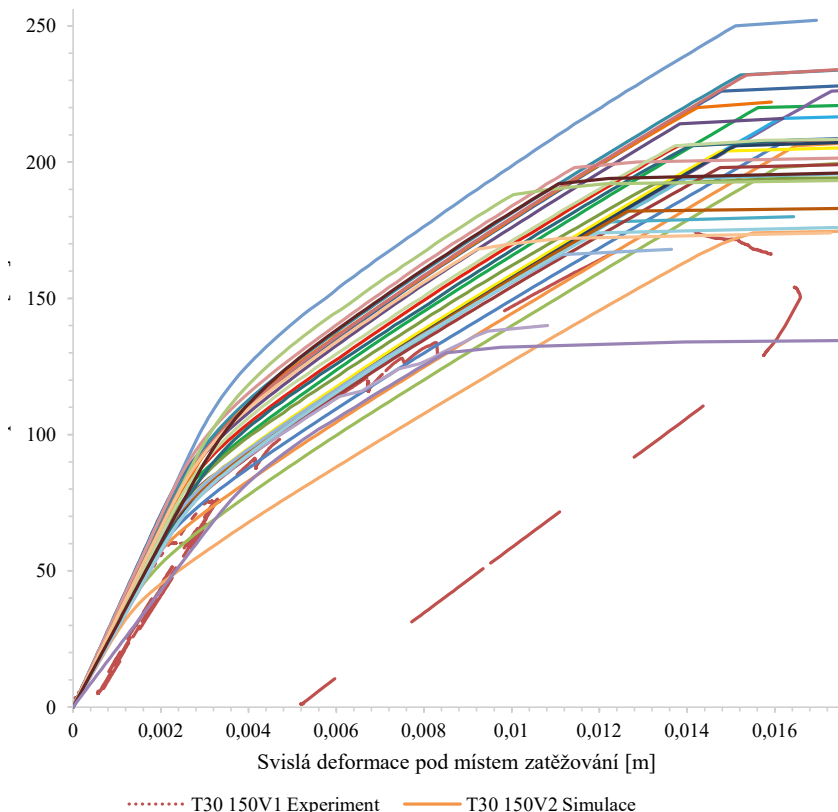
Pro modelování betonu byl použit materiálový model CC3DNonLinCementitious2 (blíže popsán v [4]). Tento materiál je charakterizován Rankine-Hordijkovým přístupem k popisu tahových porušení a Collins-Vecchioovým přístupem k popisu blokace šíření existujících trhlin zrnny agregátu. V rámci popisované materiálové aproximace je použit Rankinův model pro popis porušování betonu a Hordijkův model tahového změkčení. Pro modelování plastického chování materiálu je použit Menétry-Williamův a Van Mayerův přístup [4]. Na základě dříve provedené citlivostní analýzy byly identifikovány klíčové parametry popsaného materiálového modelu betonu. Pro přesné modelování výsledků konkrétního experimentu je nutné identifikovat danou realizaci vektoru vstupních parametrů použitého materiálového modelu. K identifikaci použité sady materiálových parametrů [6] byl využit stochastický model materiálu CC3DNonLinCementitious2 získaný pomocí inverzní analýzy s využitím ANN [10] (tab. 1). Postup identifikace parametrů na základě stochastického modelu je popsán v [6].

Detailní popis vytvořeného numerického modelu je nad rámec tohoto textu. Finální podoba numerického modelu je výsledkem iterativního procesu vývoje a postupného zpřesňování jednotlivých detailů modelu. Během práce na nume-

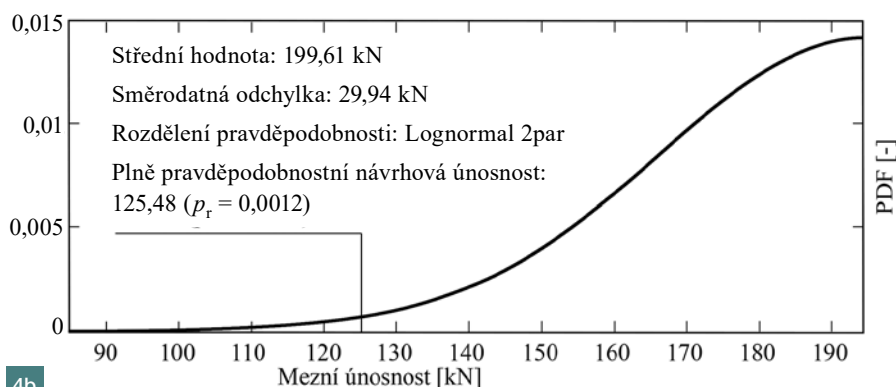
PROFESIONÁLNÍ ŘEŠENÍ
výzkum ■ vývoj ■ výroba ■ obchod ■ poradenství
pro sanace betonových konstrukcí

Redrock Construction s.r.o.
Újezd 40/450, Michnův palác
Praha 1, Malá Strana
Telefon: +420 283 893 533
Fax: +420 284 816 112
E-mail: info@redrock-cz.com
www.redrock-cz.com

REDROCK
CONSTRUCTION



4a



4b

4 Výstupy stochastického modelování destruktivního testu nosníku T30 150V2: a) LD křivky jednotlivých realizací, b) funkce hustoty pravděpodobnosti mezní únosnosti (zdroj: [7]) ■ 4 Output of stochastic modelling of destructive experiment at T30 150V2 girder: a) LD curves of calculated realizations, b) estimated distribution function of ultimate capacity (source: [7])

rickém modelu byl kontrolován soulad modelovaných výstupů s experimentálně získanými daty. Výsledný model podrobně vystihuje výstupy všech senzorických zařízení nasazených během destruktivního testu [6]. Srovnání výstupu senzoru svislého posunutí (LVDT) pod místem aplikace zatížení s ekvivalentním výstupem numerického modelu v podobě křivek zatížení vs. přetvoření je zachyceno na obr. 3 spolu se srovnáním numericky modelovaného a experimentálně pozorovaného obrazce trhlin.

Vytvořené deterministické modely byly následně využity pro stochastické modelování smykové únosnosti jednot-

livých nosníků. Užitý stochastický model betonu vycházel z identifikovaných statistických vlastností materiálových parametrů numerického modelu (tab. 1). Podrobný popis stochastického modelu je k dispozici v [7]. Obr. 4 zachycuje výstupy stochastického modelování provedeného destruktivního testu. Představuje vliv nejistot – materiálových parametrů dle tab. 1 na křivku zatížení-deformace. Následným vyhodnocením maximálních únosností bylo možno stanovit rozdělení pravděpodobnosti mezní smykové únosnosti a určit návrhovou únosnost plně pravděpodobnostním přístupem (pro prav-

děpodobnost 0,0012 – hodnota definovaná v [12]).

Pro simulaci realizací v rámci definovaného návrhového prostoru úlohy byla využita metoda Latin Hypercube Sampling (LHS) ve své modifikaci „mean“ [15]. Pro zavedení požadované korelace mezi jednotlivými parametry stochastického modelu byla využita metoda popsaná v [16] implementovaná v rámci softwaru pro spolehlivostní analýzu FReET [17]. Popsaný proces numerického a stochastického modelování byl aplikován při modelování všech deseti destruktivních experimentů provedených na zmenšených modelech střešních nosníků v rámci popsáného experimentálního programu a rovněž při finálním modelování nosníku LDE7 skutečné velikosti. Získané výsledky byly podkladem pro podrobnou analýzu citlivosti provedenou v rámci [13]. Data byla rovněž použita pro srovnání výsledků plně pravděpodobnostního přístupu s výsledky spolehlivostních analýz prováděných vybranými polopravděpodobnostními přístupy [14].

ZÁVĚR

Rozsáhlé experimenty provedené na počátku výzkumu umožnily verifikaci účinného postupu numerického modelování předpjatých konstrukčních prvků. Byla provedena citlivostní analýza a identifikace materiálových parametrů pomocí ANN, jež umožnily velmi přesnou definici stochastického modelu. Provedené destruktivní experimenty poskytly vzory pro kalibraci obecného výpočtového postupu, který byl následně aplikován i při modelování reálného nosníku LDE7.

Dalším cílem výzkumu je využití zavedených postupů a získaných informací ke spolehlivostní optimalizaci konstrukce nosníku LDE7.

Poděkování autorů patří spolupracujícím výzkumným partnerům a Grantové agentuře České republiky za finanční podporu projektu číslo 17-02862S („PROMOSS“).

Ing. Ondřej Slowik
slowik.o@fce.vutbr.cz



prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
novak.d@fce.vutbr.cz



oba: Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav stavební mechaniky

Článek byl posouzen odborným lektorem.
The article was reviewed.

- [1] ŘOUIL, L., LEHKÝ, D., ŠIMONOVÁ, H., KUCHARCZYKOVÁ, B., KERŠNER, Z., NOVÁK, D., ZIMMERMANN, T., STRAUSS, A., KRUG, B. Experimental-computational determination of mechanical fracture parameters of concrete for probabilistic life-cycle assessment. In: *Fourth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering IALCCE 2014*. Tokyo, Japan: Taylor and Francis, 2014.
- [2] STRAUSS, A., ZIMMERMANN, T., LEHKÝ, D., NOVÁK, D., KERŠNER, Z. Stochastic fracture-mechanical parameters for the performance-based design of concrete structures. *Structural Concrete*. 2014, Vol. 15, No. 3, p. 380-394. ISSN 1464-4177.
- [3] NOVÁK, D., LEHKÝ, D. ANN inverse analysis based on stochastic small-sample training set simulation. *Engineering Application of Artificial Intelligence*. 2006, Vol. 19, p. 731-740.
- [4] ČERVENKA, V., JENDELE, L., ČERVENKA, J. *ATENA program documentation – Part I: theory*. Prague, Czech Republic: Cervenka Consulting, 2007.
- [5] STOERZEL, J., RANDL, N., STRAUSS, A. Monitoring shear degradation of reinforced and pre-tensioned concrete members. In: *IABSE Conference 2015: Structural Engineering*. Geneva: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2015.
- [6] STRAUSS, A., KRUG, B., SLOWIK, O., NOVÁK, D. Combined shear and flexure performance of prestressing concrete T-shaped beams: Experiment and deterministic modeling. *Structural Concrete*. 2017, p. 1-20. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/suco.201700079>
- [7] STRAUSS, A., KRUG, B., SLOWIK, O., NOVÁK, D. Prestressed concrete roof girders: Part I: deterministic and stochastic model. In: *Proceedings of The sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering IALCCE 2018*. Ghent, Belgium, 2018. p. 481.
- [8] JCSS 2001. *JCSS Probabilistic Model Code*. Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. ISBN 978-3-909386-79-6
- [9] ÖNORM EN 206. *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Vienna: Austrian Standards, 2014.
- [10] LEHKÝ, D., KERŠNER, Z., NOVÁK, D. FraMePID-3PB Software for Material Parameters Identification Using Fracture Test and Inverse Analysis [online]. *Advances in Engineering Software*. 2013. 29 October 2013. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.10.001>
- [11] fib MC2010. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn, 2013. ISBN 9783433030615
- [12] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: ČNI, 2004.
- [13] LEHKÝ, D., NOVÁK, D., NOVÁK, L., ŠOMODÍKOVÁ, M. Prestressed concrete roof girders: Part II: surrogate modeling and sensitivity analysis. In: *Proceedings of The sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering IALCCE 2018*. Ghent, Belgium, 2018. p. 482.
- [14] NOVÁK, D., NOVÁK, L., STRAUSS, A., SLOWIK, O. Prestressed concrete roof girders: Part III: semi-probabilistic design. In: *Proceedings of The sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering IALCCE 2018*. Ghent, Belgium, 2018. p. 483.
- [15] MCKAY, M. D., CONOVER, W. J., BECKMAN, R. J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*. 1979, Vol. 21, p. 239-245.
- [16] VOŘECHOVSKÝ, M., NOVÁK, D. Correlation control in small sample Monte Carlo type simulations I: A Simulated Annealing approach. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2009, Vol. 24, No. 3, p. 452-462.
- [17] NOVÁK, D., VOŘECHOVSKÝ, M., TEPLÝ, B. FRrET software for reliability and durability assessment of infrastructure. In: *Proceedings of the first international conference on infrastructure failures and consequences*. Melbourne, Australia, 2014. p. 229-240. ISBN 978-0-9925570-1-0

INZERCE PRO VÁS!

EDIČNÍ PLÁN BETON TKS NA ROK 2019

Číslo	Téma čísla	Termín objednání inzerce	Termín dodání podkladů pro inzerci	Číslo vyjde
1/2019	Pozemní stavby	14.1.2019	25.1.2019	15.2.2019
2/2019	Technologie (postupy a materiály)	14.3.2019	25.3.2019	15.4.2019
3/2019	Sanace a rekonstrukce	14.5.2019	24.5.2019	14.6.2019
4/2019	Mosty	15.7.2019	25.7.2019	15.8.2019
Speciální výtisk		1.5.2019	15.5.2019	15.8.2019
5/2019	Beton a architektura	13.9.2019	25.9.2019	15.10.2019
6/2019	Technologie (stroje, bednění, výtěž a příslušensví)	14.11.2019	25.11.2019	16.12.2019

CENÍK

Formát	Umístění	Běžný výtisk	Speciální výtisk
A4	4. strana obálky	80 000,-	140 000,-
A4	3. strana obálky	50 000,-	90 000,-
A4	vnitřní strana	35 000,-	65 000,-
1/2 A4	vnitřní polovina strany	20 000,-	40 000,-
1/3 A4	vnitřní třetina strany	15 000,-	30 000,-
1/4 A4	vnitřní čtvrtstrana	12 000,-	24 000,-
1/6 A4	inzerát nebo tisková zpráva	8 000,-	16 000,-
1/8 A4	inzerát nebo tisková zpráva	6 000,-	12 000,-
	propagační článek – za každou celou stranu	30 000,-	60 000,-
	vklad vlastních propagačních materiálů	8 000,-	16 000,-

Ceny jsou bez DPH

Způsob placení: inzercie a PR články jsou placeny na základě faktury vystavené po jejich výtiskování v časopise. Klient obdrží současně s fakturou dva výtisky časopisu, v případě zájmu lze přiblížit větší množství

SLEVY:

při opakování inzerátu v rámci ročníku -10 %
pro členy SVC ČR, SVB ČR, ČBS ČSSI a SSBK -15 %
při objednání inzerce do konce ledna -10 %
při objednání celoroční inzerce (6ks) -5 %
jiné možnosti či kombinace po dohodě s redakcí.

PŘÍRÁŽKY:

přesné umístění +10 %
grafické zpracování +10 %

PŘÍJEM INZERCE

Beton TKS, s. r. o.

Na Zámecké 9, 140 00 Praha 4

tel.: 602 839 429, e-mail: redakce@betontks.cz

www.betontks.cz

