

IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ MODELŮ REOLOGICKÉHO CHOVÁNÍ PŘEDPJATÉHO PRAŽCE

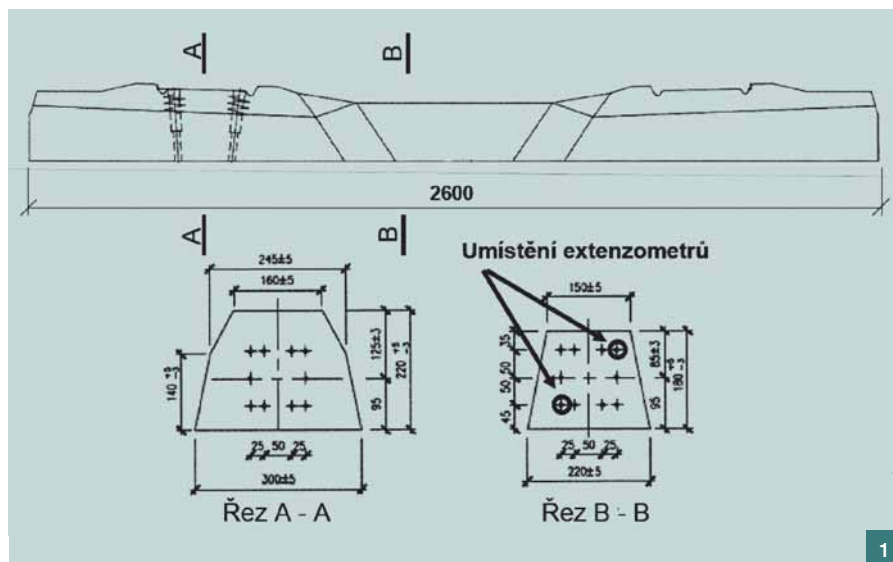
IDENTIFICATION OF MATERIAL MODEL PARAMETERS OF RHEOLOGICAL BEHAVIOUR OF A PRESTRESSED SLEEPER

David Lehký, Rostislav Zídek,
Zbyněk Keršner, Miroslav Vokáč,
Petr Bouška

Príspevek se zabývá simulací reologického chování předpjatého železničního pražce navazující na podobně zaměřený experimentální program. Testování bylo provedeno jednak na vybraném pražci (uplatnil se vliv smršťování a dotvarování betonu spolu s relaxací předpínavací výztuže) a dále na doplňkových tělesech z betonu pražce (smršťování). K simulaci průběhu reologických změn byly zvoleny modely podle Eurokódu 2 a použita metoda časové diskretizace. Požadované hodnoty materiálových parametrů byly identifikovány ve dvou krocích pomocí inverzní analýzy metodou neuronových sítí na základě experimentálních dat. Korigované výsledky simulací vykazaly velmi dobrou shodu s testy. ■ This paper deals with a simulation of rheological behaviour of a prestressed railway sleeper as a continuation of a similarly focused experimental program. First, testing was performed using selected sleeper (effects of shrinkage and creep of concrete along with relaxation of prestressing reinforcement). Second, additional specimens made of the same concrete as sleepers were tested (concrete shrinkage). To simulate the time dependent rheological behaviour models according to Eurocode 2 together with the time discretization numerical method were used. Required values of material parameters were identified in two steps using the inverse analysis based on an artificial neural network using experimental data. Corrected simulation results showed very good agreement with the tests.

Reologické chování betonových konstrukcí a konstrukčních prvků patří k důležitým aspektům jejich hodnocení i v případě použití betonů s vyššími hodnotami pevností. Kvalitu předpovědi dlouhodobého chování těchto konstrukcí ovlivňuje relevance měřených dat na realizovaném prvku či zkušebním tělese, rozbor a aproximace modely dílčích jevů smršťování a dotvarování, jakož i efektivní identifikace hodnot parametrů reologických modelů.

Príspevek je zaměřen na chování významného prvku železničního stavitelství – předem předpjatého přič-



ného pražce. Problematika chování pražců zahrnuje obecně celou řadu aspektů:

- výroba na předpínavacích drahách – předepnutí výztuže, betonáž, částečné zatvrdnutí betonu, přeřezání předpínavacích drátů, vyjmutí pražců z formy;
- objemové změny betonu pražce – smršťování a dotvarování;
- relaxace výztuže; změny předpínavací síly, tudíž i napjatosti betonu v čase ovlivňující zpětně míru dotvarování betonu.

Autoři využívají vlastních dlouhodobých laboratorních měření reologického chování těles z betonu pro pražce a vybraného pražce. Tato měření zde poslouží k identifikaci hodnot parametrů použitých numerických modelů.

VÝPOČET CHOVÁNÍ PŘEDPJATÉHO ŽELEZNIČNÍHO PRAŽCE V ČASE

Reologické změny byly zkoušeny a detailně hodnoceny na vybraném předpjatém železničním pražci B91 S (výrobce ŽPSV, a. s.). Obr. 1. uvádí schéma vyšetřovaného pražce s vyznačením polohy zabudovaných optovláknových extenzometrů (odměrná délka pro měření deformace byla 0,5 m).

Souběžně byl samostatně sledován průběh smršťování betonu na zkušebních tělesech s rozměry 100 × 100 × 500 mm vyrobených ze stejného be-

Obr. 1 Schéma pražce s polohou extenzometrů ■ Fig. 1 Scheme of the prestressed sleeper, location of extensionmeters

tonu jako pražec. Průměrná krychelná tlaková pevnost betonu po 28 dnech byla 89,5 MPa. Detaily obou měření lze nalézt v [1, 2].

Pro numerické řešení reologického chování pražce byl problém zjednodušen uvažováním přibližně centrického namáhání průřezu (pouze normálové síly). Přetvoření betonu od dotvarování závisí na napětí, a to – jak bylo naznačeno výše – na míře dotvarování. Kromě dotvarování ovlivňuje napjatost i smršťování betonu, změna vlastností betonu vlivem stárnutí a relaxace předpínavací výztuže.

Problematický analytický výpočet byl v tomto případě nahrazen numerickou metodou časové diskretizace [3]. Jde o přibližný způsob výpočtu, který respektuje změnu napjatosti v čase. Sledovaný časový úsek se rozdělí na intervaly, v nichž se napětí v betonu i oceli považuje za konstantní – integrál vyjadřující objemovou změnu betonu od dotvarování nahradí sumace a dotvarování betonu je tak možno vyjádřit při libovolné zatěžovací historii. Výpočet probíhá na hranicích časových intervalů – v časových uzlech, kde se ze změn napětí v předchozích časových uzlech vyjádří přetvoření dotvarováním

Obr. 2 Diagram poměrné přetvoření vs. čas: zkušební betonové těleso ■ Fig. 2 Strain vs. time diagram: concrete test specimen

Obr. 3 Diagram poměrné přetvoření vs. čas: předpjatý pražec ■ Fig. 3 Strain vs. time diagram: prestressed sleeper

Tab. 1 Vstupní parametry modelů ■ Tab. 1 Input model parameters

Parametr	Hodnota
Střední pevnost betonu (v čase 28 dní) f_{cm} [MPa]	89,5; 88,36 ²⁾
Charakteristická pevnost betonu (v čase 28 dní) f_{ck} [MPa]	$f_{cm} - 8$
Relativní vlhkost prostředí RH [%]	60; 66,341 6 ¹⁾
Ekvivalentní tloušťka H_0 [mm]	90
Konec ošetřování betonu t_s [d]	1
Modul pružnosti předpínacích drátů E_p [MPa]	200 000
Napětí v předpínací výztuži po proběhnutí okamžitých ztrát σ_p [MPa]	1238
Čas napnutí předpínací výztuže T_{predp} [d]	0
Čas inicializace předpínací výztuže T_{ini} [d]	1
Charakteristická pevnost předpínací výztuže f_{pk} [MPa]	1670
Ztráty relaxací 1 000 hodin po napnutí výztuže ρ_{1000} [%]	2,5
Třída předpínací výztuže vzhledem k relaxaci P_{class} [-]	2
Průřezová plocha předpínací výztuže A_p [mm ²]	283
Průřezová plocha betonové části průřezu A_c [mm ²]	33 300
Modul pružnosti betonu (v čase 28 dní) E_c [MPa]	41 000; 40 610 ²⁾
Počet časových intervalů N_{per} [-]	20
Poměr délky i-tého a i-1 časového intervalu M [-]	1,5
Zájmový čas – od inicializace předpětí po konec sledování T_s [d]	proměnná
Součinitel cementu (smršťování) α_{s1} [-]	4; 6,213 3 ¹⁾
Součinitel cementu (smršťování) α_{s2} [-]	0,12; 0,114 ¹⁾
Součinitel cementu (dotvarování) α [-]	1
Součinitel cementu (stárnutí betonu) s [-]	0,2; 0,252 2 ²⁾

Pozn.: ¹⁾ Hodnoty z testu smršťování zkušebního tělesa z 1. fáze identifikace,

²⁾ Hodnoty z dlouhodobého testu vybraného pražce z 2. fáze identifikace.

betonu a dále přetvoření smršťováním betonu a přetvoření způsobené relaxací výztuže. Smršťování betonu a relaxace výztuže nezávisí na napjatosti, mají aditivní povahu a jejich vyjádření nečiní potíže.

Následuje statická analýza, do které se objemové změny závadějí prostřednictvím primárních zatížení. Výpočet se provádí pouze pro změny zatížení a používají se vždy aktuální materiálové vlastnosti betonu – v čase se zvyšující hodnoty tlakové pevnosti a modulu pružnosti. Na konci analýzy každého časového uzlu se uloží aktuální napjatost a změny napjatosti výztuže a betonu, které jsou nutné pro výpočet součinitele dotvarování v dalších časových uzlech.

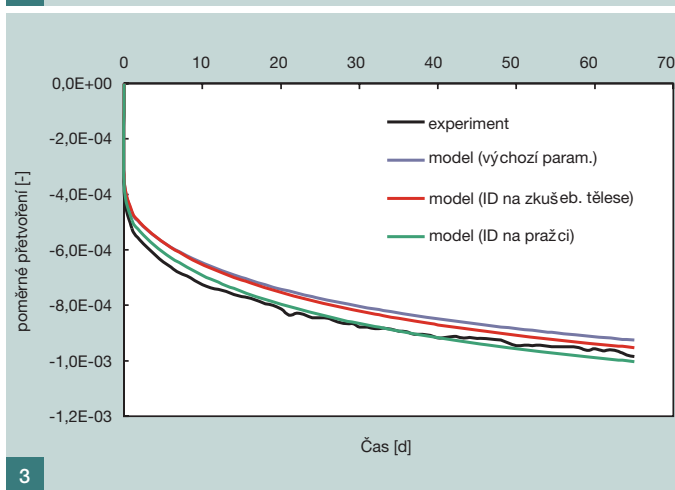
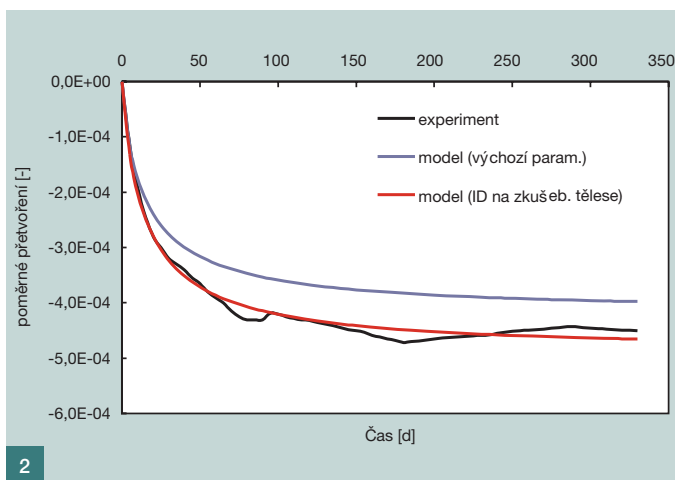
Zmíněná metoda časové diskretizace je tedy univerzální, není závislá na zvoleném předpisu dotvarování, ani na zatěžovací historii. Kvalita řešení však závisí na délce časových intervalů; metoda konverguje k přesnému řešení a prakticky bývá pro většinu případů přesnější než analytické řešení.

Při analýze předpjatého pražce byly vždy prováděny testy přesnosti a bylo voleno takové dělení na časové intervaly, jehož zjemňováním se už do-

sahovalo pouze nevýznamného zlepšení výsledků. Délky časových intervalů byly podle zkušeností autorů voleny tak, aby následující interval měl délku jeden a půl až dvakrát delší než předchozí. Kromě toho, časové uzly musejí být voleny v těch časech, kdy dochází k změně vnějšího zatížení či statického schématu konstrukce, což byl v tomto případě pouze okamžik vnesení předpětí.

Pro výpočet objemových změn betonu (smršťování a dotvarování), stárnutí betonu a relaxace výztuže byl použit Eurokód 2 [4], který předpokládá konstantní vzdušnou vlhkost.

Pro nastíněnou analýzu byl sestaven počítačový program – knihovna dll v jazyku C. Výsledkem simulací je poměrné přetvoření prvku v čase. Po provedení parametrické studie závislosti výsledků na hustotě dělení na časové uzly bylo použito rozdělení sledovaného času – cca 67 dní – na cca dvacet časových uzlů. Délku časových intervalů tvořila geometrická řada. V tab. 1 lze nalézt seznam výchozích vstupních parametrů modelů, které odpovídají provedeným experimentům a doporučeným normovým hodnotám.



IDENTIFIKACE PARAMETRŮ MODELŮ REOLOGICKÝCH ZMĚN

V souladu s experimenty byly provedeny simulace obou výše zmíněných zkoušek reologických změn – předpjatého pražce, kde se do výsledného průběhu poměrného přetvoření promítají všechny vlivy, tedy dotvarování a smršťování betonu i relaxace předpínací výztuže, dále pak vybraného hranolu z doplňkových zkušebních těles, na kterých bylo sledováno pouze smršťování betonu. Z porovnání s experimentálními křivkami je patrné (obr. 2 a 3), že při použití výchozí sady hodnot parametrů modelů není dosaženo shody a je vhodné provést identifikaci parametrů na základě změřených dat.

K identifikaci byla použita metoda inverzní analýzy založená na kombinaci umělé neuronové sítě se stochastickou analýzou [5, 6]. Součástí této metodiky je i citlivostní analýza jednotlivých vstupních parametrů použitých modelů na výslednou odezvu. S její pomocí bylo ze sady parametrů uvedených v tab. 1 vybráno šest „dominantních“ parametrů, jejichž proměnlivost má nejvyšší vliv na průběh jednotlivých reologických změn. Jednalo se o modul pružnosti betonu E_c , střední tlako-

Literatura:

- [1] Jiroutová D., Vokáč M., Bouška P., Kolísko J.: Sledování dlouhodobého přetvoření předpjatých železobetonových konstrukcí optovláknovými extenzometry. In: Sb. konf. Zkoušení a jakost ve stavebnictví, 2012, 179–186, VUT Brno, 2012
- [2] Jiroutová D.: Aplikace optovláknových měřících systémů v materiálovém inženýrství a monitorování konstrukcí. Disert. pr., ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Praha, 2012
- [3] Zídek R.: Analýza reologie betonových konstrukcí s uvažováním geometrické nelinearity. Sb. konf. Betonářské dny, ČBS, Hradec Králové, 2004
- [4] EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI, 2006
- [5] Novák D., Lehký D.: ANN Inverse Analysis Based on Stochastic Small-Sample Training Set Simulation. Engineering Application of Artificial Intelligence, 19, 2006, 731–740
- [6] Lehký, D., Novák, D.: Artificial Intelligence: New Research, chapter 7: ANN Inverse Analysis in Stochastic Computational Mechanics. Randal B. Bernstein & Wesley N. Curtis (eds.), Nova Science Publ., Hauppauge NY, USA, 2009, 323–350

vou pevnost betonu f_{cm} , součinitele s , α_{ds1} a α_{ds2} závisující na třídě cementu a průměrnou relativní vlhkost RH . Identifikace hodnot vybraných parametrů byla provedena ve dvou fázích:

- V první fázi byla na základě vybraných výsledků experimentů smršťování, testovaných na doplňkových zkušebních tělesech, provedena identifikace parametrů α_{ds1} , α_{ds2} a RH .
- V druhé fázi byla provedena identifikace zbývajících parametrů, tedy E_c , f_{cm} a s , na základě měření průběhu reologických změn, zkušebních na předpjatém pražci.

Díky oddělené identifikaci parametrů smršťování byly zpřesněny jejich hodnoty. Pokud by bylo identifikováno všech šest parametrů pouze na základě výsledků zkoušek reologických změn pražce, které jsou vedle smršťování betonu ovlivněny i jeho dotvarováním a relaxací předpínací výztuže, lze předpokládat, že by parametry smršťování byly potlačeny a jejich vliv na získanou odezvu by mohl být částečně nahrazen hodnotami jiných parametrů. Výsledné hodnoty všech identifikovaných parametrů jsou uvedeny v tab. 1 a indikovány indexem odpovídajícím fázi identifikace.

PRŮBĚHY REOLOGICKÝCH ZMĚN – POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTŮ A SIMULACÍ

Výsledky měření a numerických simulací reologických změn jsou prezentovány v grafech poměrného přetvoření vs. čas. Na obr. 2 lze vedle experimentálních výsledků přetvárného chování zkušebního tělesa $100 \times 100 \times 500$ mm z betonu pražce nalézt i dva výsledky simulace:

- po dosazení výchozích hodnot vstupních parametrů,
- po dosazení hodnot parametrů α_{ds1} , α_{ds2} a RH získaných z první fáze identifikace.

Na obr. 3 jsou obdobně vedle experimentálních výsledků přetvárného chování vybraného pražce B91 S zobrazeny tři výsledky simulace:

- po dosazení výchozích hodnot vstupních parametrů,
- po dosazení hodnot parametrů α_{ds1} , α_{ds2} a RH získaných z první fáze identifikace,
- po dosazení hodnot parametrů E_c , f_{cm} a s , získaných z druhé fáze identifikace.

Z obr. 2 je patrné, že identifikací hodnot parametrů smršťování bylo dosaženo dobré shody mezi průběhem smršťování zkušebního tělesa z experimentu (černá křivka) a simulace (červená křivka). Střední procentuální chyba vychází 0,2 %, kdežto pro odezvu získanou s výchozí sadou parametrů (modrá křivka) byla chyba 14,5 %.

Při použití tří identifikovaných parametrů při simulaci průběhu reologických změn předpjatého pražce došlo k mírnému přiblížení simulovaných hodnot k experimentálním výsledkům (obr. 3, červená křivka). Zde se střední procentuální chyba snížila ze 7,7 % pro výchozí parametry na 5,9 %. Míra vystižení experimentálního průběhu simulací odpovídá míře vlivu smršťování na celkový průběh poměrné deformace u pražce.

K dalšímu zpřesnění došlo identifikací zbývajících parametrů, ovlivňujících dotvarování a relaxaci výztuže (obr. 3, zelená křivka). Hodnota chyby pro výslednou křivku činí 0,6 %.

Lze konstatovat, že se podařilo dosáhnout velmi dobré shody mezi experimentem a simulací.

ZÁVĚR

Příspěvek ilustruje účinný postup identifikace hodnot parametrů modelů reologického chování předpjatého želez-

ničního pražce, využívající experimentálních výsledků smrštění tělesa z betonu pražce a následně dlouhodobého měření přetvárného chování pražce. Jako efektivní se pro numerickou simulaci ukázalo použití metody časové diskretizace, respektující změnu napjatosti v čase, a tím přesnější vystižení jejího vlivu na dotvarování betonu a relaxaci předpínací výztuže. Díky provedení doplňkových experimentů, vedoucích k získání podrobnější informace o průběhu reologických změn sledovaného betonu, bylo možné realizovat identifikaci vybraných parametrů numerických modelů nezásle na ostatních veličinách, a tím získat jejich vstřížnější hodnoty. Následné simulace reologického chování pražce vykázaly velmi dobrou shodu s experimentálními výsledky.

Výsledky byly získány za finanční podpory ze státních prostředků Grantové agentury České republiky, registrační číslo projektu P104/10/2359.

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Ing. David Lehký, Ph.D.
e-mail: lehky.d@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 363



Ing. Rostislav Zídek, Ph.D.
e-mail: zidek.r@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 368



Prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
e-mail: kersner.z@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 362



všichni: Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav stavební mechaniky
Veveří 331/95, 602 00 Brno
www.fce.vutbr.cz

Ing. Miroslav Vokáč, Ph.D.
e-mail: miroslav.vokac@klok.cvut.cz
tel.: 224 353 509



Doc. Ing. Petr Bouška, CSc.
e-mail: bouska@klok.cvut.cz
tel.: 224 353 561



oba: Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
www.klok.cvut.cz