

Aproximace objemových změn těles z lehkých betonů v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí

Petr Frantík¹, Barbara Kucharczyková², Zbyněk Keršner¹

Brno University of Technology
Faculty of Civil Engineering, ¹Institute of Structural Mechanics, ²Institute of Building Testing
e-mail: kitnarf@centrum.cz, kucharczykova.b@fce.vutbr.cz, kersner.z@fce.vutbr.cz

Abstract

The paper is focused on definition of a model for approximation of volume changes of tested light-weight concrete specimens in early age. Model is composed from three parts: expansion of concrete, expansion caused by change of external temperature and influence of initial phenomena.

Key words: volume change, light-weight concrete, early age, temperature expansion

1 Úvod

Při tuhnutí a tvrdnutí lehkého betonu lze sledovat v různých proporcích řadu probíhajících jevů, především smršťování vlivem samovysychání (autogenní smrštění spolu s transportem vody do volných povrchových pórů kameniva) a nabývání vlivem postupného uvolňování vody z pórovitého kameniva. Příspěvek prezentuje numerický model objemových změn těles z lehkých betonů v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí. Definovaným modelem jsou aproximovány vybrané naměřené časové řady.

2 Složení čerstvého betonu

Pro výrobu čerstvého betonu bylo použito pórovité kamenivo Liapor CZ/4–8/600 (rok dodání 2008), drobné těžené kamenivo frakce 0–4 mm (písek Zaječí), cement CEM I – 42.5R, létavý elektrárenský popílek Třinec, plastifikátor Sika Viscocrete 1035, voda a stabilizátor Sika Control – 5 SVB. Voda, lehké pórovité kamenivo, plastifikátor a stabilizátor byly dávkovány objemově, všechny ostatní složky byly dávkovány hmotnostně. Celkem byly vyrobeny tři betonové směsi označené jako *LC1*, *LC2* a *LC3*. Vyrobené betony se liší pouze mírou nasycení pórovitého kameniva v okamžiku dávkování do mísícího zařízení. Kamenivo použité pro výrobu směsi *LC1* bylo předem vysušeno do ustálené hmotnosti v sušičce při

teplotě 105°C. Do betonové směsi LC3 bylo dávkováno kamenivo, které bylo nejdříve vysušeno v sušičce při 105°C do ustálené hmotnosti a poté bylo ponořeno ve vodě tak dlouho, dokud míra nasycení nedosáhla přibližně 30%. Betonová směs označená jako LC2 byla vyrobena z kameniva s „ložnou vlhkostí“ 13% – kamenivo nebylo před dávkováním nijak kondicionováno. Složení čerstvého betonu je uvedeno v Tab. 1. Upřesněné informace o vyrobených směsích uvádí Tab. 2. Zpracovatelnost čerstvého betonu byla určena jako hodnota „Rozlití kužele v mm“ a čas T_{500} v sekundách. Obě tyto zkoušky byly provedeny a vyhodnoceny v souladu s Evropskou směrnicí pro samozhutnitelný beton [1].

Tabulka 1: Obecně navržené složení čerstvého betonu

Složky	Množství na 1 m ³ č. b.	Jednotky
Liapor 4–8/600	0.36	m ³
DTK 0–4 mm Zaječí	700	kg/m ³
CEMI – 42.5 R	440	kg/m ³
Popílek Třinec	80	kg/m ³
Sika Viscocrete 1035	5	kg/m ³
Sika Control – 5 SVB	1.6	l
Záměsová voda	180	l
Předmáčecí voda	52	l

Tabulka 2: Upřesněné informace o vyrobených směsích

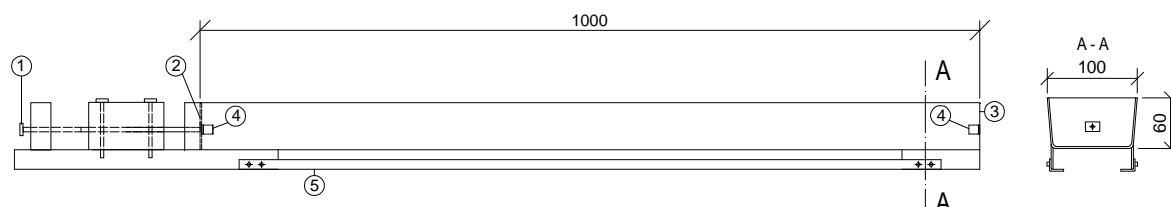
	LC1	LC2	LC3	Jednotky
Stupeň nasycení kameniva	0	13	29	%
Množství předmáčecí vody	52	37	0	l
Množství záměsově vody	180	179	184	l
Zpracovatelnost: T_{500} /rozlití kužele	5,8/600	3,6/660	7,6/480	s, mm
Klasifikace	VS2/SF1	VS2/SF2	VS2/–	–

3 Zkušební zařízení, příprava zkušebních těles, postup měření

Pro účely stanovení objemových změn v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí betonu bylo použito modifikované zkušební zařízení firmy *Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH*. Zkušební žlaby s délkou 1000 mm a příčným průřezem 60×100 mm byly použity pro záznam délkových změn měřených v podélné ose zkušebního tělesa. Vnitřní stěny žlabu byly opatřeny nenasákavou, hladkou, měkkou neoprenovou fólií (tl. cca 2 mm) za účelem minimalizace tření betonu o stěny formy. Schéma zařízení uvádí Obr. 1. Detailní postup přípravy zkušebního zařízení včetně způsobu ukládání a ošetřování betonu je popsán v SOP 01/09 [2].

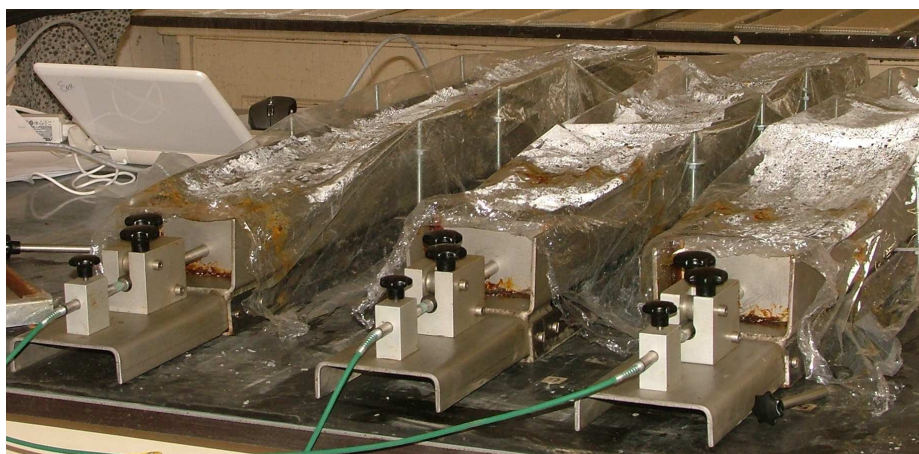
Všechny zkoumané betony byly vyrobeny v laboratorní míchačce s nuceným oběhem a ukládány do zkušebního žlabu vždy ve dvou vrstvách, přičemž každá z nich byla vždy řádně zhutněna. Doba hutnění byla stanovena dle konzistence čerstvého betonu. Po zhutnění betonu byly žlaby přemístěny na stabilní laboratorní stůl tak, aby následné měření nebylo

ovlivňováno případnými otřesy. Přibližně jednu hodinu po uložení betonu do žlabu byl jeho povrch přikryt plastovou fólií, s cílem zamezení nadměrného vysychání povrchu betonu v počáteční fázi jeho tuhnutí a tvrdnutí. Plastová fólie byla sejmuta přibližně po třech dnech. Samotné měření bylo ve všech případech zahájeno hodinu po uložení a zhutnění betonu ve zkušebních žlabech. Z každé směsi byla vyrobena vždy trojice zkušebních těles.



- 1 – Fixační kolík – zajišťuje polohu pohyblivého čela před zahájením měření
- 2 – Pohyblivé čelo
- 3 – Pevné čelo
- 4 – Odnímatelné kotevní háky
- 5 – Kovové lišty, umožňující fixaci měřícího zařízení k vibračnímu stolu během plnění

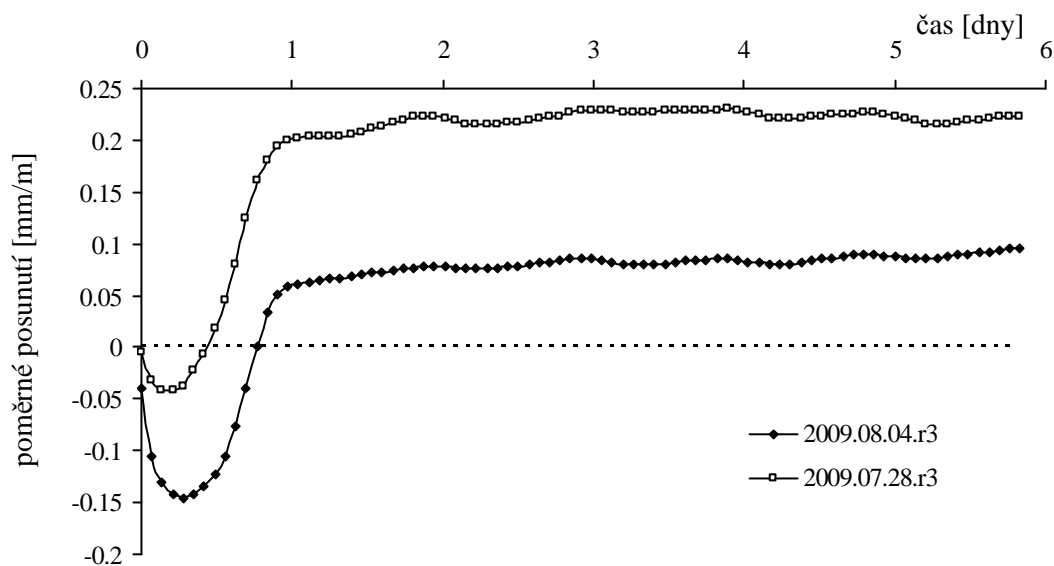
Obrázek 1: Schéma použitého měřícího zařízení – žlab Shleibinger



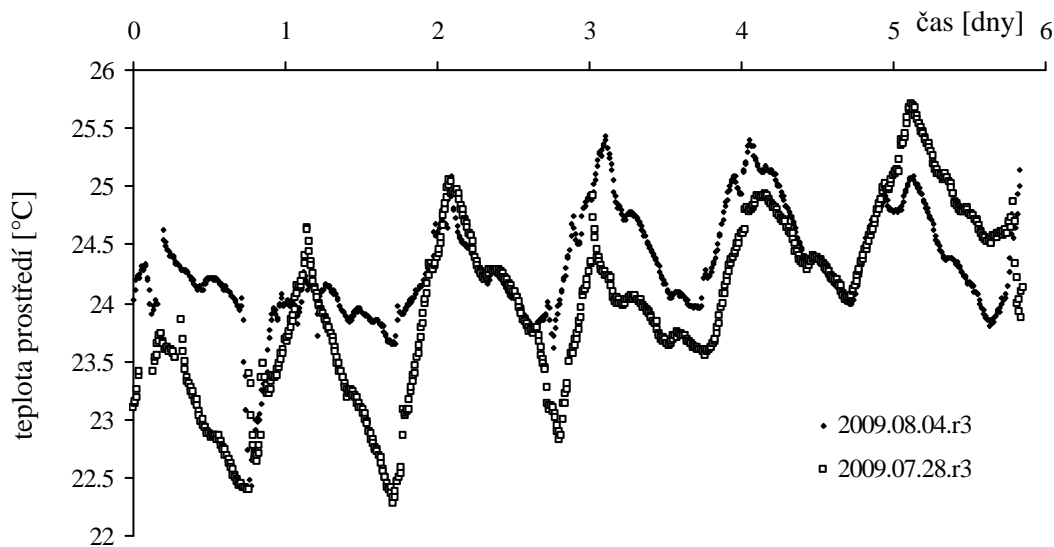
Obrázek 2: Měřící žlaby naplněné betonem

4 Vybrané výsledky měření

Na Obr. 3 jsou vyneseny vybrané časové řady vzájemného posunutí čel žlabu. Tyto řady s řádově stovkou hodnot vznikly transformací naměřených časových řad s řádově tisíci hodnotami z důvodu efektivity provádění aproximace, viz např. [3]. Obr. 4 uvádí časové řady teploty prostředí, v němž byly žlaby uloženy.



Obrázek 3: Časové řady naměřeného poměrného posunutí čel žlabu pro vzorky betonu LC2 (2009.08.04.r3) a LC3 (2009.07.28.r3) – kladné hodnoty znamenají vzdálení měřené základny



Obrázek 4: Časové řady teploty prostředí

5 Model

Z hlediska návržení modelu pro aproximaci jsou na časových řadách vzájemného posunutí, viz Obr. 3, patrné tři, zřejmě do jisté míry nezávislé, prvky: Počáteční zvlnění, dlouhodobé ustalování a určitá periodická porucha. Periodická porucha byla snadno identifikována jako zpožděný vliv teploty prostředí. Dlouhodobé ustalování a počáteční zvlnění má zřejmě původ

v objemových změnách kompozitu v důsledku jeho zrání. Odpovídajícím způsobem byl navržen numerický model se třemi nezávislými částmi:

- roztažnost vlivem teploty prostředí,
- nabývání (odpovídající dlouhodobému ustalování),
- smrštění vlivem počátečních jevů.

Modul roztažnosti vlivem teploty prostředí je definován pomocí efektivního koeficientu teplotní roztažnosti α_T , základní úrovně teploty T_0 , časového zpoždění Δt_d a průměrovacího času Δt_a :

$$\varepsilon_t(t) = \alpha_T (T_e - T_0), T_e = f_a(T(t), \Delta t_d, \Delta t_a), \quad (1)$$

kde ε_t představuje poměrné posunutí vlivem modulu roztažnosti vlivem teploty prostředí, T_e efektivní teplotu vzorku, $T(t)$ funkci teploty prostředí (viz Obr. 4) a f_a průměrovací funkci. Časové zpoždění Δt_d má význam prodlevy mezi oteplením prostředí a efektivním oteplením měřeného vzorku. Průměrovací čas Δt_a slouží k vyjádření teplotní setrvačnosti měřeného vzorku. Pomocí tohoto parametru se snižuje vliv rychlých výkyvů teploty prostředí. Poznamenejme, že vybraným parametrům je dáván přívlastek efektivní, pokud není jasné, zda-li dostatečně vystihují pouze vlastnost měřeného materiálu vzorku.

Modul nabývání je dán funkcí:

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_{s,l} (1 - e^{-t}), \quad (2)$$

kde ε_s značí poměrné posunutí vlivem modulu nabývání, $\varepsilon_{s,l}$ limitní poměrné posunutí, t rychlost nabývání a t čas.

K definici modulu smrštění vlivem počátečních jevů slouží funkce:

$$\varepsilon_i(t) = c_m f_i(t, c_g, c_s),$$

$$f_i = c_g t + \frac{1}{2t_d} (t_d c_s - 6c_g) t^2 + \frac{1}{t_d^2} (3c_g + t_d c_s) t^3 + \frac{1}{2t_d^3} (t_d c_s - 2c_g) t^4, \quad t \leq t_d, \quad (3)$$

$$f_i = 0, \quad t > t_d,$$

kde ε_i je poměrné posunutí vlivem počátečních jevů, f_i aproximační funkce počátečních jevů, t_d trvání počátečních jevů (čas kdy počáteční jevy vymizí), c_m koeficient vlivu počátečních jevů, c_g počáteční gradient aproximační funkce a c_s počáteční křivost aproximační funkce.

Výsledné poměrné posunutí (protažení či zkrácení tělesa) je dáno prostým součtem jednotlivých částí:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_t(t) + \varepsilon_s(t) + \varepsilon_i(t). \quad (4)$$

6 Výsledky aproximace

Výše definovaný model byl použit k aproximaci časových řad uvedených na Obr. 3 s použitím příslušných naměřených teplot vnějšího prostředí (Obr. 4). Aproximace byla

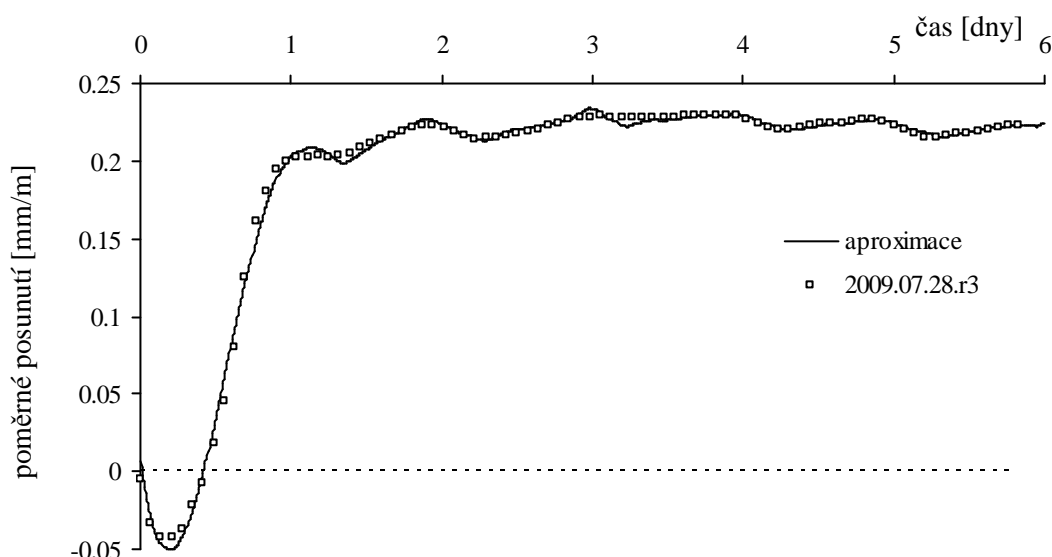
provedena pomocí genetických algoritmů – viz např. [4]. Byly získány hodnoty parametrů uvedené v Tab. 3. Porovnání měření a výsledku aproximace se pro dva vybrané betonové vzorky uvádí na Obr. 5 a 6.

Tabulka 3: Výsledné hodnoty parametrů aproximace vzorků

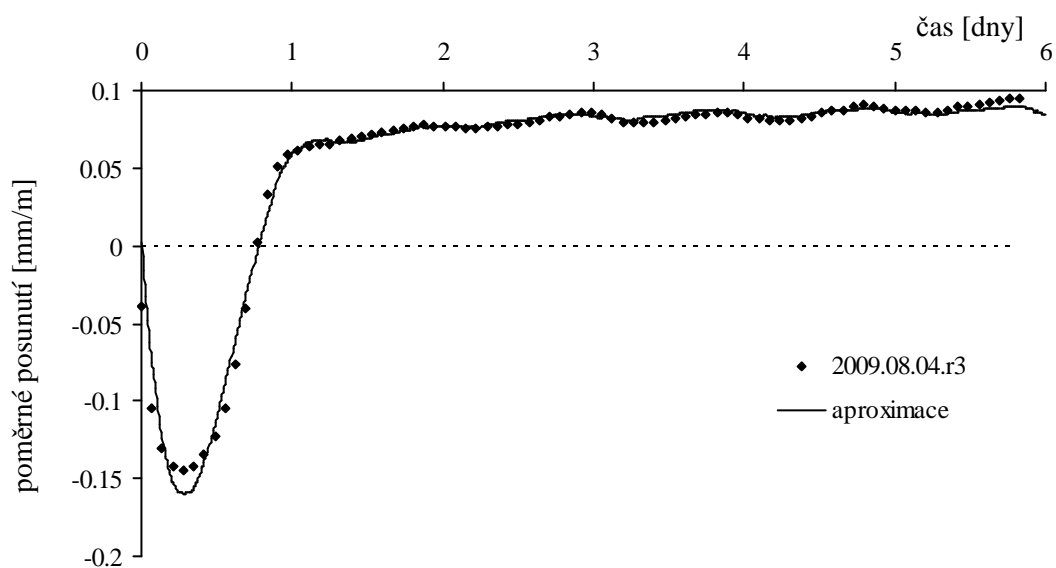
Parametr \ Vzorky	2009.07.28.r3	2009.08.04.r3	Jednotky
Koeficient vlivu počátečních jevů c_m	-0.195	-0.210	–
Počáteční křivost c_s	-4.953	-3.792	–
Počáteční gradient c_g	$5.262 \cdot 10^{-3}$	$6.673 \cdot 10^{-3}$	den ⁻¹
Koeficient teplotní roztažnosti α_T	$-0.768 \cdot 10^{-5}$	$-0.406 \cdot 10^{-5}$	°C ⁻¹
Základní úroveň teploty T_0	24	24	°C
Časové zpoždění Δt_d	0.15	0.15	den
Průměrovací čas Δt_a	0.075	0	den
Trvání počátečních jevů t_d	1.439	1.400	den
Limitní poměrné posunutí $\varepsilon_{s,l}$	$0.2275 \cdot 10^{-3}$	$0.0895 \cdot 10^{-3}$	–
Rychlost nabývání v	1.529	0.986	den ⁻¹

Z grafů na Obr. 5 a 6 je patrné, že navržený model dobře vystihuje vliv teploty prostředí a vliv nabývání. Poznamenejme, že záporné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti v Tab. 3 mají zřejmě relativní význam – změna teploty ovlivňuje jak zkušební vzorek, tak měřící zařízení. Problematictější je vystižení vlivu počátečních jevů. Navržená aproximační funkce evidentně nemá dostatečný počet stupňů volnosti a tento fakt negativně ovlivňuje také samotný aproximační proces.

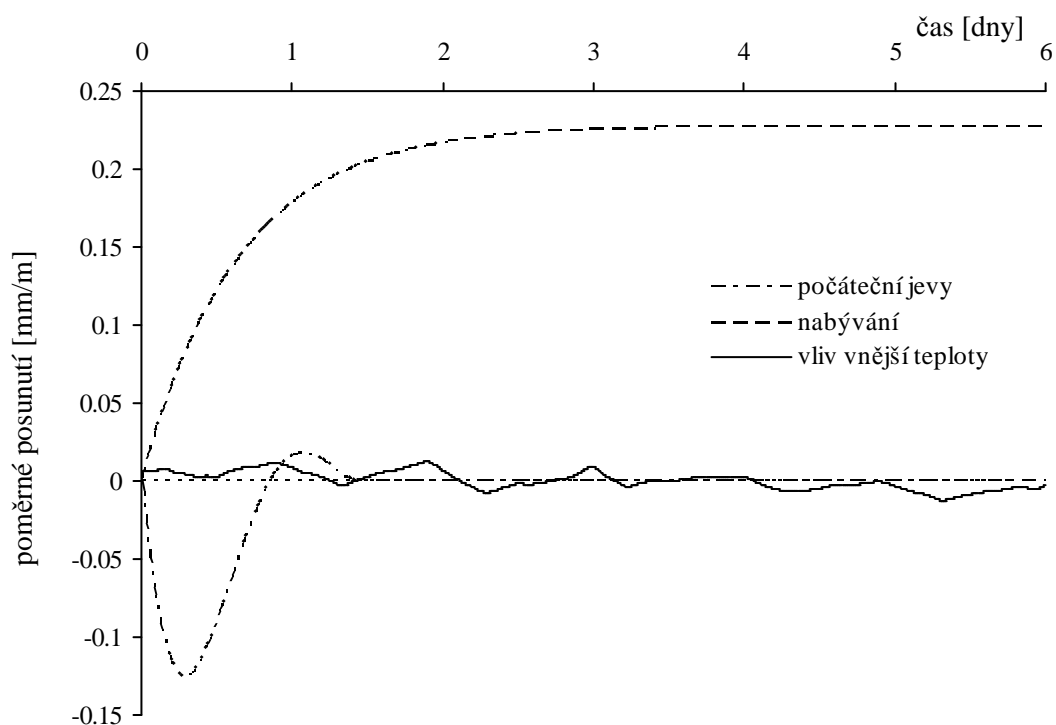
Pro ilustraci jsou na Obr. 7 uvedeny časové řady jednotlivých složek poměrných posunutí pro vzorek betonu LC3 2009.07.28.r3.



Obrázek 5: Porovnání výsledku aproximace naměřené časové řady poměrného vzájemného posunutí pro vzorek 2009.07.28.r3 (beton LC3)



Obrázek 6: Porovnání výsledku aproximace naměřené časové řady poměrného vzájemného posunutí pro vzorek 2009.08.04.r3 (beton LC2)



Obrázek 7: Graf rozkladu výsledku aproximace celkového poměrného posunutí na jednotlivé uvažované složky pro vzorek 2009.07.28.r3 (beton LC3)

7 Závěr

V článku byl prezentován numerický model objemových změn vybraných testovaných vzorků lehkých betonů, který může sloužit pro aproximace naměřených časových řad poměrných vzájemných posunutí. Z prezentovaných výsledků vyplývá, že navrženým modelem lze poměrně přesně vystihnout konkrétní naměřené hodnoty. Poznamenejme, že úroveň výstižnosti aproximace významně závisí na znalosti průběhu teploty prostředí, kde se vzorky v průběhu tuhnutí a tvrdnutí nacházely.

Poděkování

Prezentované výsledky byly získány za finanční podpory projektu GA ČR P104/10/2359 – Přetvárné vlastnosti betonů vyšších pevností – a podporovány projektem specifického vysokoškolského výzkumu na VUT v Brně registrovaným na VUT pod č. FAST-S-10-37. Experimentální měření bylo prováděno v rámci řešení postdoktorského grantového projektu GP103/09/P057 – Analýza mechanismu přetváření lehkých konstrukčních betonů.

Literatura

- [1] European guidelines for Self-Compacting Concrete. SCC European Project Group 2005.
- [2] Kucharczyková, B.; Vymazal, T.; Daněk, P.; Misák, P.; Pospíchal, O. SOP 01/09; Standardní operační postup pro stanovení smršťování a nabývání betonu. Ústav stavebního zkušebnictví Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.
- [3] Frantík, P.; Lehký, D.; Keršner, Z.; Vyhodnocení lomových experimentů: Efektivní náhrady zatěžovacích diagramů. Konference 70 roků SvF STU, Bratislava, 2008.
- [4] http://cs.wikipedia.org/wiki/Genetické_algoritmy