

OŠETROVANIE ČERSTVÉHO BETÓNU – 4. KONVENČNÝ NÁVRH OŠETROVANIA POMOCOU ĽAHKÉHO KAMENIVA ■ FRESH CONCRETE CURING – 4. CONVENTIONAL DESIGN OF CURING USING SATURATED LIGHTWEIGHT AGGREGATE

Peter Briatka, Peter Makýš

Na viacerých parametroch mladého i zrelého betónu sa podarilo preukázať, že metóda vnútorného ošetrovania je účinná a zmenou určitých parametrov vedie ku dosiahnutiu vyššej životnosti. Keď je už jasné, že vnútorné ošetrovanie pomocou nasýteného ľahkého kameniva (SLWA) je účinné a teda vhodné pre betonársku prax, musíme si položiť a zodpovedať otázku: „Ako navrhnuť vnútorné ošetrovanie použitím SLWA?“ Význam správneho návrhu podčiarkuje aj skutočnosť, že proces ošetrovania je jednorázový a realizovaný počas výroby čerstvého betónu. Tým, že SLWA sa pridáva počas dávkovania základných zložiek betónu, sa z typického pomocného stavebného procesu stáva významný dielčik krok v návrhu čerstvého betónu. To znamená, že z doposiaľ podceňovaného procesu sa stáva operácia vyžadujúca hlboké znalosti technológie betónu a materiálového inžinierstva obzvlášť z oblasti materiálov na báze cementu. ■ On several parameters of pre-mature and mature concrete, it has successfully been proved that internal curing (IC) method is effective and by modification of certain characteristics leads to improvement of durability. Now, when it's been clarified that IC by saturated lightweight aggregate (SLWA) is effective and thus convenient to concrete producers and contractors we have to raise and answer the question: "How to design the SLWA IC?". The importance of accurate design is highlighted by a fact that curing is one-shot process realized within fresh concrete production. By adding of SLWA within batching of essential concrete components, the typical auxiliary construction process becomes to be a notable step in fresh concrete design. Briefly, by now undervalued process is getting to be an operation requiring in depth knowledge on concrete technology and material science particularly in field of cementitious materials.

VNÚTORNÉ OŠETROVANIE ĽAHKÝM KAMENIVOM A OBJEMOVÉ ZMENY V ČÍSLACH

Preukázalo sa, že vnútorné ošetrovanie (IC) použitím SLWA je (od dávky cca 18 objemových %) účinný spôsob ako eliminovať plastické zmršťovanie. Musí sa ale zdôrazniť, že ak sa voda obsiahnutá v SLWA uvoľní pri obmedzení plastického zmršťovania, nemôže sa ďalej uvažovať so samoošetrovaním betónu v štádiu autogénneho zmršťovania (AS) a zmršťovania vonkajším vysychaním (DS).

Doterajší výskum bol zameraný na účinnosť metódy v partikulárnych chemických a fyzikálnych dejoch. Komplexnému vyhodnoteniu poznatkov a zostrojeniu modelu chronologickej popisujúceho správanie sa betónov s IC v ktoromkoľvek okamihu veku (v ktoromkoľvek štádiu straty vody a mechanizme zmršťovania) sa doteraz nevenovala pozornosť alebo aspoň neboli publikované výsledky takejto práce. Rovnako nebol dodnes zostrojený ani model ako navrhovať IC použitím SLWA tak, aby bol použiteľný v praxi a zohľadňoval nadväzujúce alebo simultánne mechanizmy zmršťovania.

Rozsiahlejšiu prácu venovanú teoretickej podstate chemického zmršťovania a návrhu IC na jeho elimináciu publikoval v roku 2001 Jensen & Hansen [1]. Ich model je založený na teoretických základoch chemického zmršťovania, ktoré definoval už Powers modelom fázového rozdelenia cementového tmelu (pozri časť o superabsorbčných polyméroch v BETON TKS 2/2010). Bolo dokázané, že približne 0,23 g vody sa v priebehu hydratácie chemicky viaže na 1 g ce-

mentu. V cementovom géle (na povrchu jeho pevných častíc) je fyzikálne viazané asi 0,19 g vody na 1 g cementu. Zvyšná voda je v kapilárnych póroch cementového tmelu, odkiaľ je schopná migrácie (voľná voda). Na základe týchto troch „typov vody“ v betóne odvodil Powers objemové vzťahy pre hydratujúci cementový tmel. Súčet individuálnych fázových komponentov cementového tmelu doplnený o chemické zmršťovanie (CS) vedie ku vzťahu 1.

$$V_{GS} + V_{GW} + V_C + V_W + V_{CS} = 1 \quad [-], \quad (1)$$

kde V_{GS} značí pomerný objem hydratačných produktov [-], V_{GW} pomerný objem chemicky viazanej vody [-], V_C pomerný objem nezhydratovaného cementu [-], V_W pomerný objem voľnej vody v kapilárnych póroch [-] a V_{CS} pomerný objem vyprázdnených pórov – chemické zmršťovanie [-].

Jednotlivé zložky fázových komponentov v čase možno vyjadriť zjednodušenými vzťahmi (2) až (6), kde α je stupeň hydratácie (podľa vzťahu 7), p je pôvodná pórovitosť (podľa vzťahu 8) a je rovná pôvodnému množstvu kapilárnej vody $V_{W,i}$, ρ_C je hustota cementu (3 150 kg/m³), ρ_W je hustota vody (1 000 kg/m³). Jednotlivé koeficienty vo vzťahoch predstavujú pomery hustoty cementu a vody a objemového zastúpenia vody.

$$V_{CS} = 0,20 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad [-] \quad (2)$$

$$V_W = p - 1,32 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad [-] \quad (3)$$

$$V_{GW} = 0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad [-] \quad (4)$$

$$V_{GS} = 1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad [-] \quad (5)$$

$$V_C = (1 - p) \cdot (1 - \alpha) \quad [-] \quad (6)$$

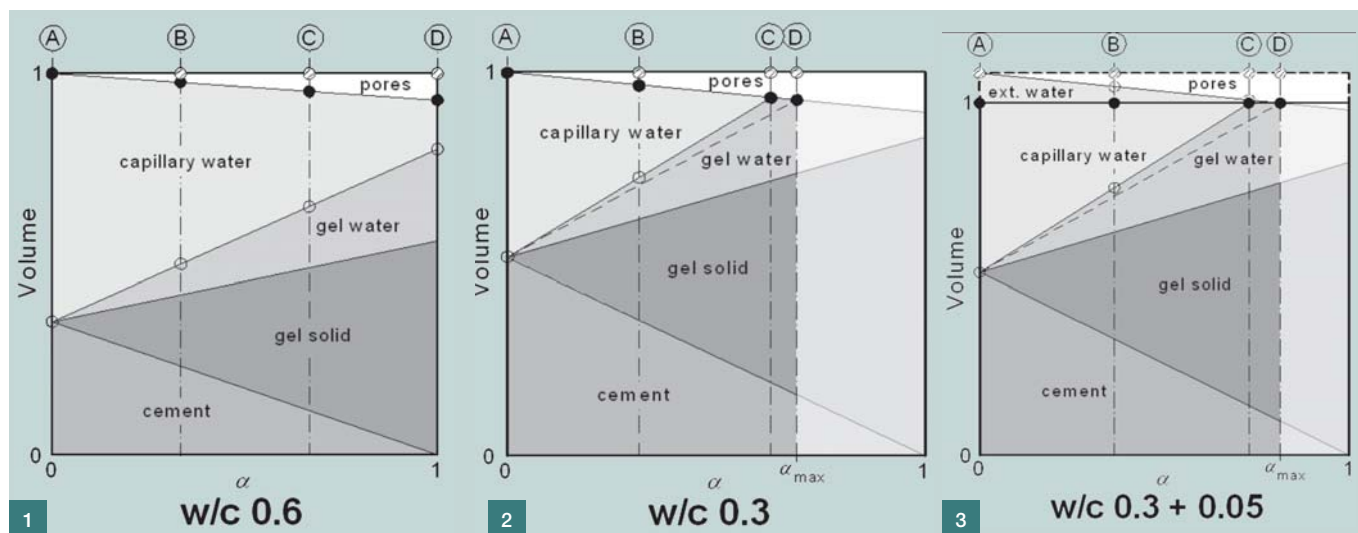
$$\alpha = \frac{C_H}{C} = \frac{w_{NON-E}}{w_{NON-E,i}} \quad [-], \quad (7)$$

kde α je stupeň hydratácie [-], C_H množstvo zhydratovaného cementu [g], C celkové množstvo cementu [g], w_{NON-E} množstvo chemicky viazanej vody v cementovom géle [g] a $w_{NON-E,i}$ pôvodné množstvo vody viazanej v cementovom géle [g].

$$p = V_{W,i} = \left(\frac{\frac{w}{C}}{\frac{w}{C} + \frac{\rho_W}{\rho_C}} \right) \quad [-] \quad (8)$$

Grafická interpretácia vzťahov (1) až (6) je uvedená na obr. 1 až 3. Ako už bolo uvedené, v cementovom tmele je asi 0,23 g vody na 1 g cementu viazaných chemicky a 0,19 g vody na 1 g cementu viazaných fyzikálne v cementovom géle. Podľa Powersa sa fyzikálne viazaná voda v cementovom tmele nezúčastňuje na hydratácii, ale aby mohla hydratácia kompletne prebehnúť, je potrebné dosiahnuť vodný súčiniteľ minimálne 0,42 (= 0,23 + 0,19), v opačnom prípade sa hydratácia zastaví.

Návrh zloženia betónu s vyšším vodným súčiniteľom (≥ 0,42) je jedným z riešení, ako predísť samovysychaniu. Tým,



že v čerstvom cementovom tmele je viac vody (viac kapilárnych pórov), sa po zhydratovaní cementu dosiahne väčšie množstvo vzduchových pórov. Vlastnosti betónu ako napríklad pevnosť, vodotesnosť a trvanlivosť sa tak znižujú. Preto je výhodnejšie dodávať vodu spotrebovanú na hydratáciu vo forme ošetrovacej vody.

$$V_C + V_{GS} + V_{GW} = 1 \quad [-] \quad (9)$$

Z rovnice (9) môžeme dosadením vzťahov (4) až (6) vyjadriť maximálny stupeň hydratácie α_{\max} cementového tmele s určitým vodným súčiniteľom.

$$\alpha_{\max} = \frac{\rho}{1,12 \cdot (1 - \rho)} \quad [-] \quad (10)$$

Pomerný objem ošetrovacej vody pridanej pri miešaní do systému $V_{EW,i}$ by sa mal rovnať chemickému zmrasteniu pri maximálnom stupni hydratácie α_{\max} (obr. 2). Keďže pôvodná pórovitosť ρ sa rovná pomernému objemu pôvodnej kapilárnej vody $V_{W,i}$, môžeme dosadením vzťahu (10) do vzťahu (2) získať $V_{EW,i}$ (vzťah 11).

$$\begin{aligned} V_{EW,i} &= V_{CS} \\ V_{EW,i} &= 0,20 \cdot (1 - \rho) \cdot \frac{\rho}{1,12 \cdot (1 - \rho)} = [-] \\ &= 0,18 \cdot \rho = 0,18 \cdot V_{W,i} \end{aligned} \quad (11)$$

Ak vyjadríme množstvo ošetrovacej vody a kapilárnej vody ako vodné súčinitele (vzťahy 12 a 13), potom potrebné množstvo ošetrovacej vody pre dosiahnutie α_{\max} (podľa vzťahu 10) môžeme vyjadriť vzťahom (14).

$$\left(\frac{w}{c}\right)_E = \frac{V_{EW,i} \cdot \rho_W}{V_{C,i} \cdot \rho_C} \quad [-], \quad (12)$$

kde $(w/c)_E$ značí dieľčí vodný súčiniteľ ošetrovacej vody [-].

$$\left(\frac{w}{c}\right) = \frac{V_{W,i} \cdot \rho_W}{V_{C,i} \cdot \rho_C} \quad [-] \quad (13)$$

$$\left(\frac{w}{c}\right)_E = 0,18 \cdot \left(\frac{w}{c}\right) \quad [-] \quad (14)$$

Vzťah 14 je platný len pre $w/c \leq 0,36$. Pre betóny s vyšším vodným súčiniteľom je pre dosiahnutie $\alpha_{\max} = 1$ potrebné menšie množstvo ošetrovacej vody. Powersov model stanovuje interval vodného súčiniteľa, kedy je možné dosiahnuť kompletnú hydratáciu $\alpha_{\max} = 1$, ako $0,36 \leq w/c \leq 0,42$

Obr. 1 Model chemického zmrastovania a zmeny fáz zložiek cementového tmele pri vysokom vodnom súčiniteľi (0,6) [2]

Fig. 1 Model of chemical shrinkage and changes in state of cement paste components with high water cement ratio (0,6) [2]

Obr. 2 Model chemického zmrastovania a zmeny fáz zložiek cementového tmele pri nízkom vodnom súčiniteľi (0,3) [2]

Fig. 2 Model of chemical shrinkage and changes in state of cement paste components with low water cement ratio (0,3) [2]

Obr. 3 Model chemického zmrastovania a zmeny fáz zložiek cementového tmele pri nízkom vodnom súčiniteľi (0,3) a ošetrovaní 0,05 [2]

Fig. 3 Model of chemical shrinkage and changes in state of cement paste components with low water cement ratio (0,3) and with curing 0,05 [2]

ak platí, že sumárny vodný súčiniteľ zahŕňajúci kapilárnu vodu a pôvodnú ošetrovaciu vodu je minimálne 0,42 (vzťah 15). Preto, potrebný dieľčí vodný súčiniteľ ošetrovacej vody $(w/c)_E$ sa počíta zo vzťahu 16 a schematicky je princíp výpočtu zobrazený na obr. 4.

$$\left(\frac{w}{c}\right) + \left(\frac{w}{c}\right)_E \geq 0,42 \quad [-] \quad (15)$$

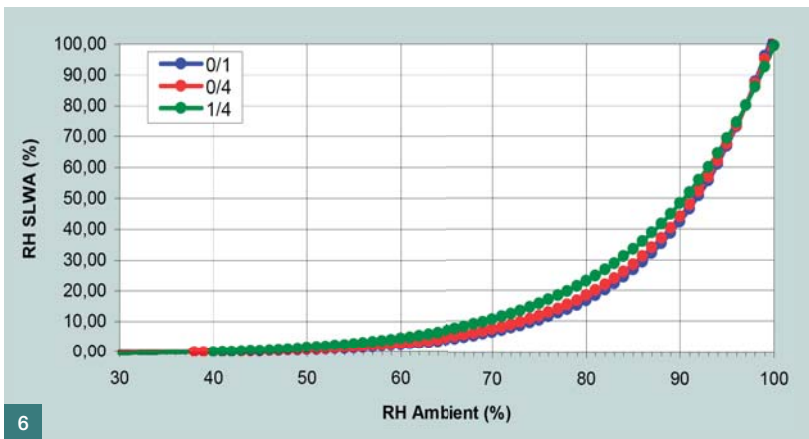
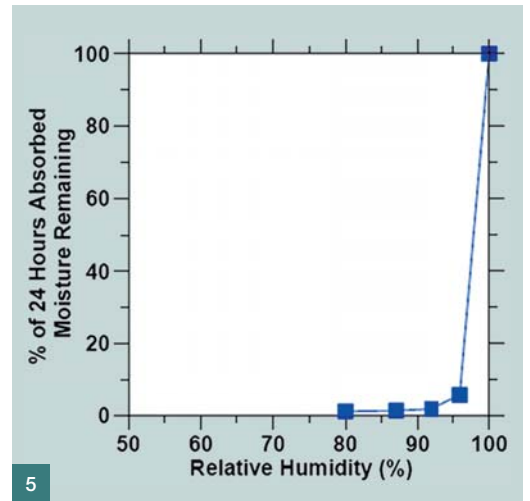
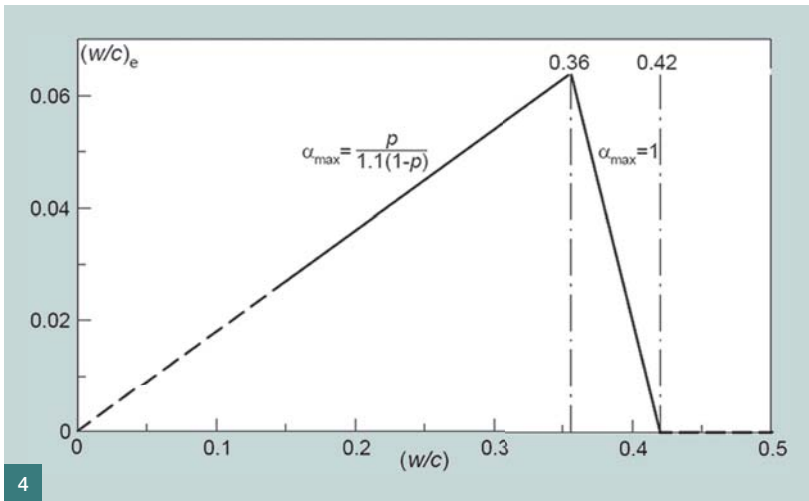
$$\left(\frac{w}{c}\right)_E \geq 0,42 - \left(\frac{w}{c}\right) \quad [-] \quad (16)$$

OD VODY KU KAMENIVU

Tým, že sa zistí množstvo vody $V_{EW,i}$ na vnútorné ošetrovanie, sa výpočet ešte nekončí. Musíme navrhnuť množstvo LWA, pomocou ktorého sa toto množstvo vody do betónu zabuduje. V prvom rade musíme poznať nasiakavosť W_A ľahkého kameniva stanovenú podľa STN EN 1097-6 alebo ASTM C 128-07. Nasiakavosť LWA použitého v štúdiu vplyvu IC na plastické zmrastovanie bola zistená 10,5 % [3]. LWA bežne dostupné na európskom trhu dosahuje nasiakavosť (po 2 h) cca 5 až 7 %. Za predpokladu, že LWA je schopné uvoľniť všetku absorbovanú vodu pri $RH \geq 80\%$ (obr. 5), možno hmotnostnú dávku LWA vypočítať podľa základného vzťahu (17), ktorého úpravou na doposiaľ používané veličiny sa získa reálne použiteľný výpočtový vzťah 18.

$$M_{LWA} = \frac{M_{EW,i}}{\frac{W_A}{100}} \quad [\text{kg}], \quad (17)$$

kde M_{LWA} je hmotnostná dávka ľahkého kameniva na IC [kg], $M_{EW,i}$ hmotnosť potrebnej dávky vody na IC [kg] a W_A nasiakavosť kameniva (v tomto prípade ľahkého kameniva) [%].



Obr. 4 Minimálne množstvo dodanej ošetrovacej vody pre dosiahnutie kompletnej hydratácie [1]

Fig. 4 Minimum of supplied external curing water to reach complete hydration [1]

Obr. 5 Strata vlhkosti SLWA v závislosti od vlhkosti okolitého prostredia (USA) [3]

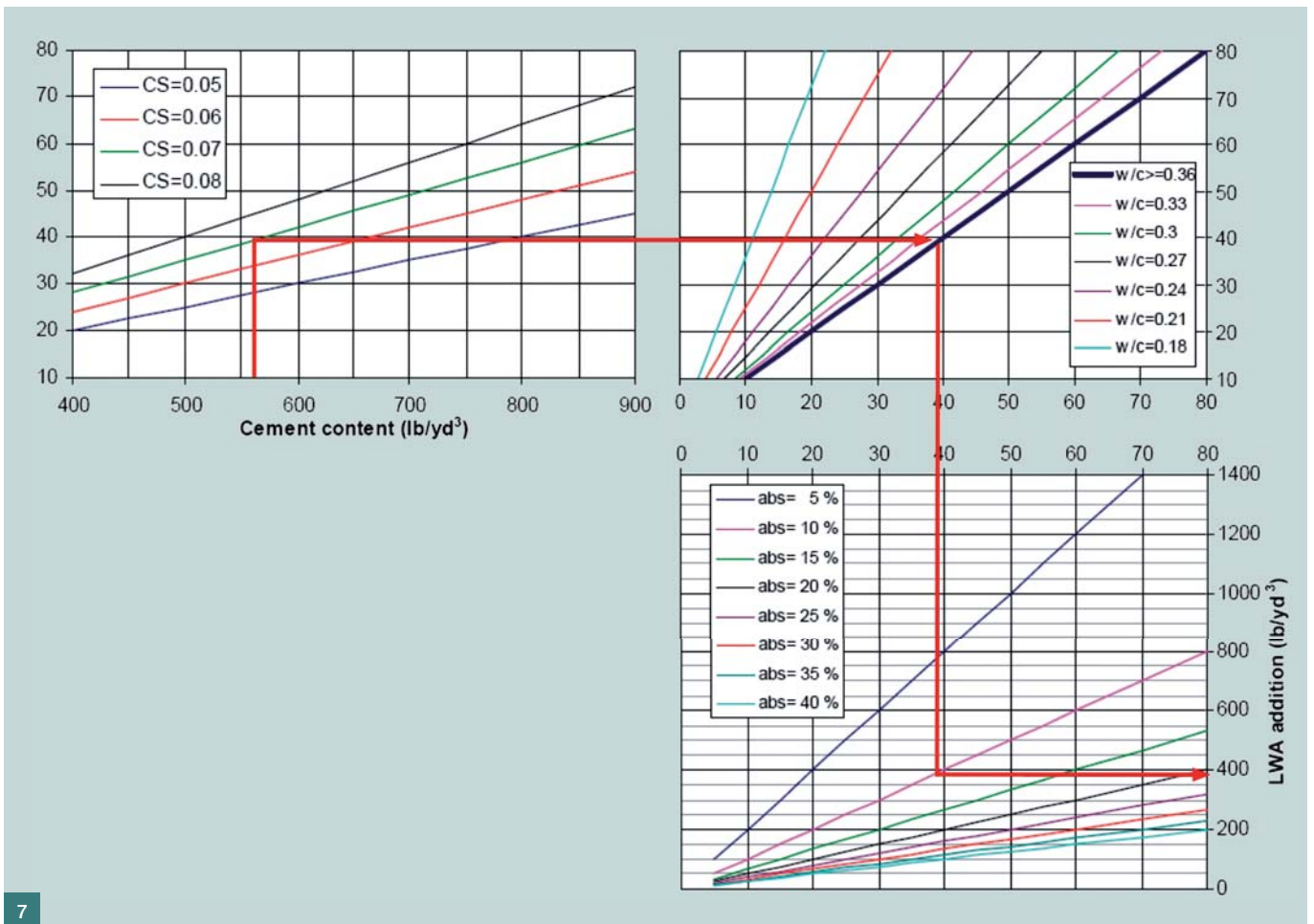
Fig. 5 Moisture loss of SLWA in dependence on ambient relative humidity (USA) [3]

Obr. 6 Strata vlhkosti SLWA v závislosti od vlhkosti okolitého prostredia (Európa) [3]

Fig. 6 Moisture loss of SLWA in dependence on ambient relative humidity (Europe) [3]

Obr. 7 Nomogram návrhu množstva LWA na vnútorné ošetrovanie betónu [5]

Fig. 7 Nomograph of design of LWA amount for internal curing of concrete [5]



$$M_{LWA} = \frac{\left(\frac{w}{C}\right)_E \cdot V_{C,i} \cdot \rho_{C,i}}{\frac{W_A}{100}} \quad [\text{kg}] \quad (18)$$

Iný výpočtový vzťah pre určenie hmotnostnej dávky LWA stanovil Bentz [4] (vzťah 19), ktorý sa vo viacerých prácach zaoberal vnútorným ošetrovaním betónu a vlastnosťami betónov s IC. Grafické riešenie vzťahu 19 ponúka obr. 6.

$$M_{LWA} \geq \frac{C \cdot V_{CS} \cdot \alpha_{\max}}{S \cdot \Phi_{LWA}} \quad [\text{kg}], \quad (19)$$

kde C značí dávku cementu [kg/m^3], V_{CS} chemické zmráštenie cementu [g vody/1g cementu], α_{\max} maximálny očakávaný stupeň hydratácie [-], S stupeň nasiaknutia LWA v čase pridania do betónu (0-1) a Φ_{LWA} meranou stratou vody z LWA [-].

ZÁVER

Na základe prezentovaných informácií a výsledkov dlhoročného výskumu v oblasti betónu a materiálov na báze cementu je dnes možné spoľahlivo využívať metódu vnútorného ošetrovania pomocou SLWA. Ako už bolo uvedené, metóda je jednorázová a ireverzibilná. Zvýšená pozornosť preto musí byť venovaná správne a presnému návrhu ošetrovania resp. LWA a výpočtu dávok. Uvedený postup prezentuje akýsi zjednodušený výpočtový manuál pre vnútorné ošetrovanie betónu nasiaknutým ľahkým kamenivom. V súčasnej dobe sa za spolupráce Stavebnej fakulty STU a TSÚS v Bratislave overuje komplexnejší návrhový model vnútorného ošetrovania použitím SLWA.

Ing. Peter Briatka

Technický a skúšobný ústav stavebný

Studená 3, 821 04 Bratislava

Slovensko

e-mail: briatka.p@gmail.com



Doc. Ing. Peter Makýš, PhD.

Stavebná fakulta STU

Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Slovensko



Literatúra:

- [1] Jensen O. M., Hansen P. F.: Water-entrained cement-based materials, 1. Principles and theoretical background, Cement and Concrete Research, Vol. 31, USA, 2001, pp. 647–654
- [2] Lura P.: Power's Model, Workshop Reducing Early Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [3] Henkenseifken R., Briatka P., Bentz D., Nantung T., Weiss J.: Plastic shrinkage cracking in internally cured mixtures made with pre-wetted lightweight aggregate, Concrete International, Vol. 32, No. 2, American Concrete Institute, Farmingtonhills, 2010
- [4] Bentz D. P., Lura P., Roberts J. W.: Mixture Proportioning for Internal Curing, Concrete International, Vol. 27, No. 2, American Concrete Institute, Farmingtonhills, 2005
- [5] Bentz D. P.: Internal Curing Lightweight Aggregates – Part I, Workshop Reducing Early Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [6] STN EN 1097-6+A1 Skúšky na stanovenie mechanických a fyzikálnych vlastností kameniva. Časť 6: Stanovenie objemovej hmotnosti zŕn a nasiakavosti. Zmena A1
- [7] ASTM C 128-07 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate