

# OŠETROVANIE ČERSTVÉHO BETÓNU – 3. NASIAKNUTÉ ĽAHKÉ KAMENIVO ■ FRESH CONCRETE CURING – 3. SATURATED LIGHTWEIGHT AGGREGATE

Peter Briatka, Peter Makýš

Jednou z progresívnych a v súčasnosti sa prudko rozvíjajúcich metód ošetrovania betónu je vnútorné ošetrovanie. Pod pojmom vnútorné ošetrovanie si môžeme predstaviť dodávanie „ošetrovacej“ vody priamo z vnútra betónu, kde je zabudovaná už počas jeho miešania a to v hmote určitého nosiča tak, aby nezvyšovala vodný súčiniteľ čerstvého betónu a zároveň aby bola k dispozícii k náhrade stratenej vody či už odparovaním alebo autogénnym vysychaním. V predchádzajúcom článku (Beton TKS 2/2010, str. 35) bola popísaná metóda vnútorného ošetrovania pomocou superabsorbčných polymérov. Druhou možnosťou ako zabudovať ošetrovaciu vodu do betónu je náhrada určitej časti normálneho kameniva nasiaknutým ľahkým kamenivom (SLWA – saturated lightweight aggregate), ktorému sa venuje tento článok. Najširšie uplatnenie vnútorného ošetrovania a tým aj SLWA sa javí v betónových konštrukciách s vysokým povrchovým modulom (pomer plochy vystavenej prostrediu a objemu konštrukcie) a zvlášť v tzv. vysokohodnotných betónoch, kde sa vonkajšie ošetrovanie dodávaním vody stáva neúčinným z dôvodu veľmi malej permeability betónu. ■ One of the progressive and nowadays intensively developing methods of concrete curing is internal curing. Under the notion of internal curing we can imagine supply of „curing“ water directly from inside of concrete where it's incorporated even during mixing and it's bound in the mass of certain carrier in order to avoid raising of water to cement ration of fresh concrete and simultaneously it would be available for replacement of lost water either by evaporation or self-dessication. In previous paper, there was described a method of internal curing through the use of superabsorbent polymers. The second mean how to get curing water into concrete is replacement of certain part of regular aggregate with saturated lightweight aggregate (SLWA) to which this paper is devoted. The most wide usage of internal curing and thus either SLWA appears to be in concrete structures with high surface modulus (ratio of

surface area exposed to the environment to volume of the structure) and particularly in so called high performance concrete where external curing by supplying additional water on the surface becomes ineffective by reason of very low permeability.

## ĽAHKÉ KAMENIVO A JEHO HISTÓRIA

Vôbec prvá zmienka o ľahkom kamenive (LWA) v spojitosti s vodou a jej uvoľňovaním počas hydratácie pochádza z roku 1957. Myšlienka však zrejme nezaujala natoľko aby sa okolo nej rozprúdila diskusia a výskum. Približne tridsať rokov zostala nepovšimnutá až napokon v roku 1991 bola opätovne prednesená v kontexte ošetrovania betónu. Začiatkom deväťdesiatych rokov sa začal výskum a vývoj v tejto oblasti pretrvávajúci dodnes. Z ľahkého kameniva predurčeného na výrobu ľahkých betónov sa pomaly stáva materiál význačný z hľadiska vnútorného ošetrovania i keď sa stále najväčšia časť produkcie LWA používa na výrobu betónov s nižšou objemovou hmotnosťou.

## ĽAHKÉ KAMENIVO

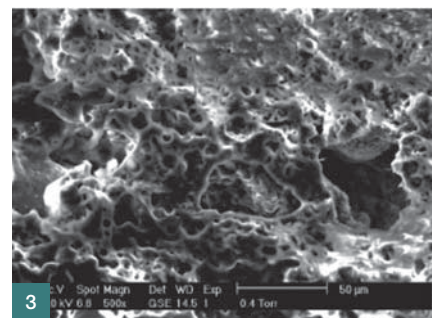
Ľahké kamenivo uvažované pre účely ošetrovania betónu je priemyselne vyrábané kamenivo. Základnou surovinou sú horniny s vysokým obsahom ílov a ílovitých bridlíc, ktorých výpalom pri teplote cca 1 090 °C a vyvolanou expanziou sa získava zrnitý pórovitý materiál so slinutým povrchom. Pórovitá štruktúra je dôsledkom vyhorievania organických zložiek základnej suroviny. Z hľadiska granulometrie zŕn sa rozlišujú dva druhy LWA – s nepravidelnými ostrohrannými zrnami (USA) a naopak s pravidelnými guľovitými zrnami (EU). Za ľahké kamenivo však možno považovať akýkoľvek zrnitý materiál, ktorý vyhovuje charakteristike kameniva. Z pohľadu pórovej

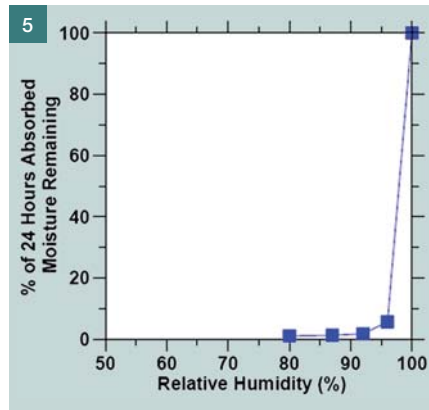
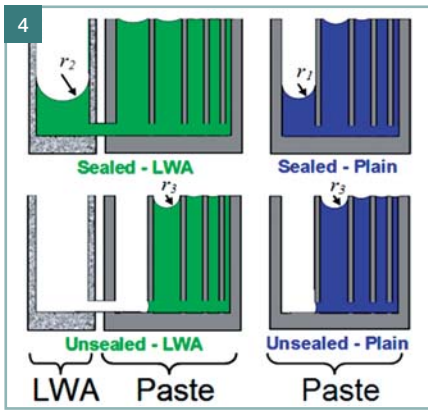
štruktúry by sa ako LWA do betónov dala použiť aj vysokopecná troska.

## VNÚTORNÉ OŠETROVANIE POUŽITÍM NASIAKNUTÉHO ĽAHKÉHO KAMENIVA

Ak má LWA pôsobiť ako činiteľ vnútorného ošetrovania betónu (tzv. samo-ošetrovanie), potom musí byť schopné absorpcie značného množstva vody do svojej štruktúry. Týmto sa ale požiadavky naň nekončia. Voda z vnútra LWA sa musí dostať do tuhého a tvrdého cementového tmelu postupujúceho samovysychanie. V predchádzajúcom článku o superabsorbčných polyméroch bola uvedená rovnica podľa Young-Laplace, ktorej úpravou sa získa vzťah (1) dôležitý pre pochopenie uvoľňovania vody z SLWA. Počas vonkajšieho vysychania a/alebo samovysychania je voda postupne vyprázdňovaná z pórovej štruktúry SLWA a dopĺňaná do cementového tmelu. Z princípu zachovania minimálnej vnútornej energie systému vyplýva, že pri strate vlhkosti z cementového tmelu vznikajú spočiatku relatívne malé napätia, ktoré nie sú schopné prekonať väzbové sily vody v malých póroch cementového tmelu a preto sa ako prvé vyprázdňujú najväčšie póry SLWA, čím sa systém dostáva do elementárnej rovnováhy v diskretnom časovom okamihu. Polomer vyprázdňovaných pórov  $r_{CAP}$  je nepriamo úmerný napätiu v pórovom roztoku cementového tmelu (funkcia  $RH$ ). Keď cementový tmel stráca vlhkosť, narastajú v ňom napätia  $P_{CAP}$ . Dosadením narastajúcich  $P_{CAP}$  do vzťahu (1) je zřejmé, že sa postupne znižuje polomer pórov SLWA, z ktorých je cementový tmel schopný čerpať vodu.

$$r_{CAP} = -\frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{P_{CAP}} [m], \quad (1)$$





kde  $\gamma$  je povrchové napätie pórového roztoku [N/m] a  $\theta$  stykový uhol pórového roztoku a steny kapiláry, (uvažuje sa dokonalé zmáčanie a teda  $\theta = 0$  rad)

Aby mohla byť voda z nasýteného LWA (SLWA) jednoducho vytiahnutá, musia byť vyvolané ťahové napätia v cementovom tmele vyššie ako napätia zadržávajúce vodu v SLWA. Posledná podmienka bude splnená, ak aj tie najmenšie póry LWA budú mať veľkosť väčšiu ako póry v cementovom tmele. Keď má ľahké kamenivo dostatočne veľké póry a navyše sú jednotlivé veľkosti pórov vhodne zastúpené, potom zabudovanie SLWA do betónu môže pôsobiť ako vnútorné ošetrovanie (IC) a voda na IC bude vyťahovaná z SLWA podľa schémy uvedenej v obr. 4.

Vychádzajúc z požiadavky na veľkosť pórov SLWA sa jednoduchou úvahou zohľadňujúcou závislosť veľkosti vyprázdňovaných pórov od kapilárneho napätia (vzťah 1) dostaneme ku vzťahu vyjadrujúcemu relatívnu vlhkosť (RH) cementového tmele, pri ktorej dochádza k vyprázdňovaniu pórov určitého rozmeru ( $r_{CAP}$ ) (vzťah 2) a k informácii, že skoro všetka voda viazaná v SLWA sa uvoľní pri poklese RH na 80 % (obr. 5).

$$RH = e^{\left( \frac{-2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta \cdot V_{mol,f}}{r_{CAP} \cdot R \cdot T} \right)} [-], \quad (2)$$

kde  $R$  je univerzálna plynová konštanta = 8,3114 J/mol/K,  $T$  absolútna teplota [K] a  $V_{mol,f}$  molový objem pórového roztoku,  $V_{mol,f} \approx 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$ .

Keďže najväčšie úbytky ošetrovacej vody z SLWA sa vyskytujú už pri nepatrnom poklese RH na úroveň cca 95 % a zodpovedajúcim napätím cca 10 MPa ( $r_{CAP} \geq$  cca 20 nm) je zrejmé, že IC pôsobí len v počiatkoch veku betónu. Doba pôsobenia IC je závislá najmä od dávky SLWA (množstva ošetrovacej vody) a podmienok za akých betón tuhne a tvrdne.

**OŠETROVANIE TZV. UZAVRETÉHO SYSTÉMU**

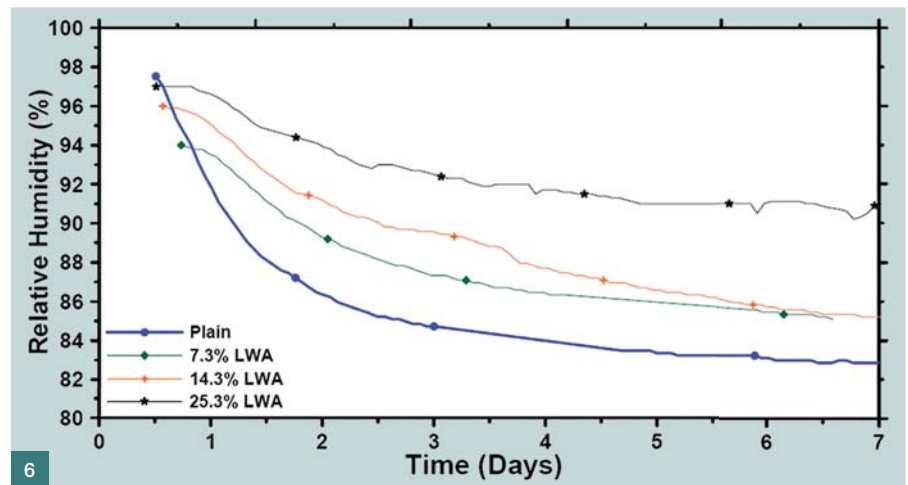
Betón utesnený (sealed) reprezentuje uzavretý systém, v ktorom dochádza ku strate vlhkosti iba spotrebou vody na hydratáciu (tzv. samovysychanie). Dôsledkom samovysychania je chemické zmršťovanie a jeho vonkajší prejav autogénne zmršťovanie. IC je v tomto prípade navrhnuté na poskytnutie takého množstva vody, z vnútra betónu, aby mohla hydratácia prebehnúť úplne (maximálny stupeň hydratácie  $\alpha_{max} = 1$ ) a aby sa obmedzilo prípadne úplne eliminovalo autogénne zmršťovanie. Voda spotrebovaná na hydratáciu spôsobuje pokles RH a tým napätie v pórovom roztoku ktoré sa kompenzuje vyprázdňovaním pórov SLWA. Týmto princípom sa systém udržiava v rovnováhe. Čím viac vody je SLWA schopné uvoľniť pri danej RH, tým dlhšie sys-

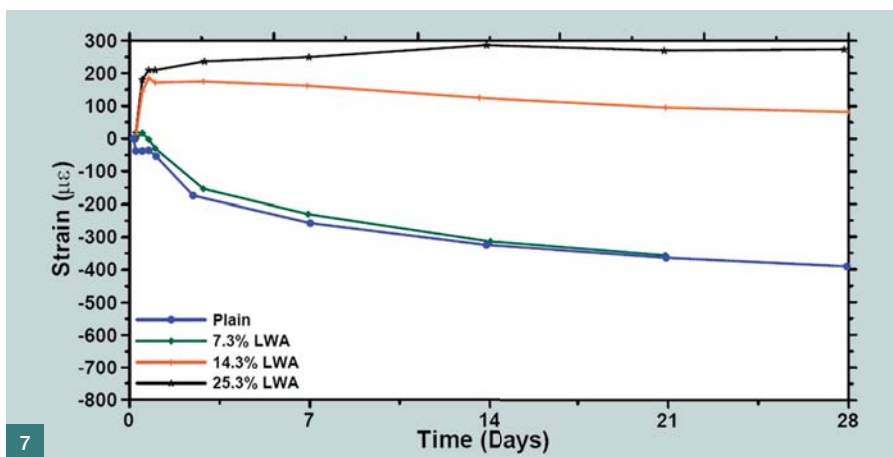
tém zostane v rovnováhe (obr. 6), čo je výhodné z dôvodu oddialenia prechodu na nižšiu úroveň RH (vyššie napätie), zatiaľ čo narastá pevnosť materiálu. Takto možno jednoducho interpretovať spojitý priebeh procesu jeho zdiskrétnením.

Merania voľného aj obmedzeného autogénneho zmršťovania malty (w/c = 0,3) s rôznymi podielmi SLWA dokazujú funkčnosť IC v uzavretom systéme. Obr. 7 zachytáva voľné autogénne zmršťovanie. Je vidno, že už náhrada 7,3 % hutného kameniva za SLWA sa prejavuje počas prvých 21 dní veku vzorky aj keď priebeh pomerných pretvorení je veľmi podobný vzorky bez IC. Oveľa výraznejšie sú ale vyššie dávky SLWA, kedy aj po 28 dňoch nenastali záporné výsledné objemové zmeny.

Pohľad na realistickejšie podmienky, t.j. obmedzené autogénne zmršťovanie (ASTM C 1581-04) poskytuje obr. 8. Priebeh pomerných pretvorení dokumentuje hlavne dobu vzniku trhliny. Zatiaľ čo vzorka bez IC pukla po šiestich dňoch, vzorka s dávkou 7,3 % SLWA zostala neporušená takmer dvojnásobnú dobu. Vzhľadom na výsledky voľného zmršťovania by sa neočakával taký dramatický posun, no možno ho vysvetliť znížením modulu pružnosti, zvýšením dotvarovania a zvýšením tuhosti spôsobenými prítomnosťou SLWA [2].

- Obr. 1 LWA známe v Európe ako Liapor | Fig. 1 LWA, in Europe, known as Liapor
- Obr. 2 Rez LWA | Fig. 2 Cut through LWA
- Obr. 3 Pórová štruktúra LWA [1] | Fig. 3 Porous structure of LWA [1]
- Obr. 4 Vyprázdňovanie saturovaných pórov v betóne bez/s vonkajším vysychaním [2] | Fig. 4 Evacuation of saturated pores in concrete without/with external drying [2]
- Obr. 5 Strata vlhkosti SLWA v závislosti od vlhkosti okolitého prostredia [2] | Fig. 5 Moisture loss of SLWA in dependence on relative humidity of ambient environment [2]
- Obr. 6 Merané vlhkosti betónu s rôznymi podielmi SLWA a obsiahnutej vody [2] | Fig. 6 Measured moistures of concrete with various portions of SLWA and contained water [2]





Obr. 7 Voľné autogénne zmršťovanie (za nulu sa považuje začiatok tuhnutia) [2]  
 ■ Fig. 7 Free autogenous shrinkage (zeroed at time of setting) [2]

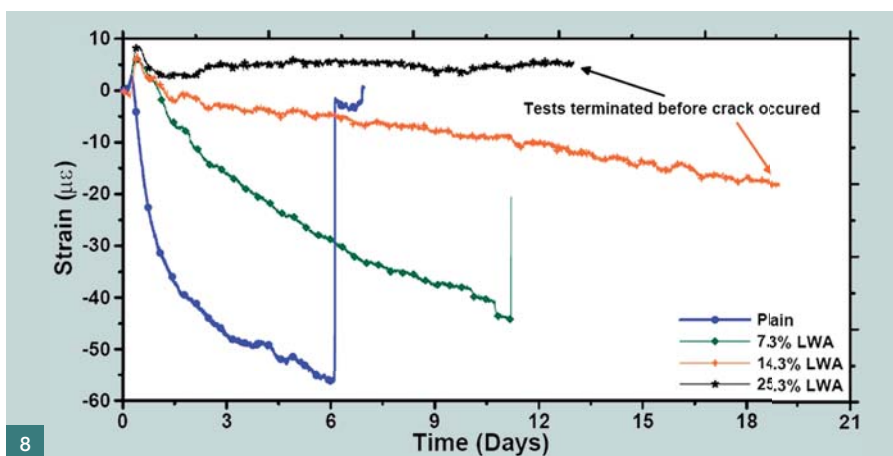
Obr. 8 Obmedzené autogénne zmršťovanie [2] ■ Fig.8 Restrained autogenous shrinkage [2]

Obr. 9 Ilustrácia vysychania v utesnených a neutesnených vzorkách (zľava utesnená s vnútorným vysychaním; neutesnená len s vonkajším vysychaním; neutesnená s vnútorným aj vonkajším vysychaním) [4] ■ Fig. 9 Illustration of drying out in sealed and unsealed specimens (from the left – sealed undergoing self-dessication; unsealed with external drying only; unsealed with self-dessication and external drying) [4]

Obr. 10 Strata vlhkosti do okolitého prostredia (A – počiatočný stav vyššej RH betónu; B – postupná strata vlhkosti odparovaním; C – konečný, rovnovážny stav) ■ Fig. 10 Moisture loss into ambient environment (A – initial state of concrete with higher RH; B – gradual lost of moisture through evaporation; C – final equilibrium state)

Obr. 11 Strata vody z otvoreného systému pri voľnom zmršťovaní [2] ■ Fig. 11 Water loss from unsealed system within free shrinkage [2]

Obr. 12 Voľné zmršťovanie s vonkajším vysychaním (za nulu sa považuje začiatok tuhnutia) [2] ■ Fig. 12 Free shrinkage with external drying (zeroed at time of setting) [2]



Obr. 6 až 8 dokazujú účinnosť IC použitím SLWA. Malty (veľmi podobne aj betóny) s nižším vodným súčiniteľom podliehajú samovysychaniu, ktoré je možné účinne obmedzovať používaním IC s vyššími náhradami SLWA za bežné hutné kamenivo. Preukázala sa účinnosť SLWA v zmysle spomaľovania tempa a aj absolútnej hodnoty zmršťovania udržiavaním vyššej RH v cementovom tmele. Pri nízkych dávkach (7,3 %) SLWA sa zistil veľmi podobný priebeh voľného zmršťovania ako u referenčnej vzorky bez IC. Tento jav je zrejme dôsledkom veľkej vzdialenosti medzi zrnami SLWA, čím sa účinnosť metódy výrazne znižuje.

Koncept uzavretého systému je síce výhodný, no z technologického hľadiska betonáže doskových telies prakticky nerealizovateľný a navyše nevýhodný. Preto sa pozornosť v oblasti IC venuje otvorenému systému.

### OŠETROVANIE TZV. OTVORENÉHO SYSTÉMU

Otvorený systém (unsealed) je charakteristický stratou vlhkosti dvomi spôsobmi. Jedným je už popísané samovysychanie a druhým je strata vlhkosti do okolitého prostredia pričom sa uvažuje len s hornou exponovanou plochou. Stra-

ta vlhkosti zvyšnými plochami sa zanebáva, pretože bočné steny konštrukcie sú neporovnateľne menšie ako plocha hornej a dolnej podstavy dosky a popritom sú (aj keď nedokonale) utesnené pomocnými alebo finálnymi príťahými konštrukciami. Spodná plocha dosky sa rovnako považuje za utesnenú lebo je možné zamedziť strate vody jednoduchými a finančne nenáročnými operáciami alebo konštrukčnými vrstvami membránového typu.

Tým, že otvorený systém podstupuje stratu vody samovysychaním a okrem toho aj vonkajším vysychaním, celkové zmršťovanie bude tvorené zložkou autogénneho zmršťovania (AS) ako aj zložkou zmršťovania z vonkajšieho vysychania (DS). Ak chceme byť presnejší a zahrnúť aj vertikálne objemové zmeny prejavujúce sa pred zatumnutím betónu, musíme doplniť aj zložku chemického zmršťovania (CS), čím sa dostaneme ku vzťahu 3. CS sa v makroskopickom pozorovaní prejavuje ako sadanie betónu a vedie k plastickému zmršťovaniu (PS), ktoré, ako bolo dokázané, je tiež možné obmedziť alebo odstrániť použitím IC.

$$\epsilon_{SHR,U} = \epsilon_{DS} + \epsilon_{AS} + \epsilon_{CS} [-], \quad (3)$$

kde  $\epsilon_{SHR,U}$  je celkové pomerčné pretvorenie od zmršťovania [-],  $\epsilon_{DS}$  pomerčné pretvorenie od zmršťovania z vysychania [-],  $\epsilon_{AS}$  pomerčné pretvorenie od autogénneho zmršťovania [-] a  $\epsilon_{CS}$  pomerčné pretvorenie od chemického zmršťovania [-].

Vysvetleniu princípov vonkajšieho vysychania betónu sa podrobne venuje prvá časť tejto série článkov o ošetrovaní betónu. Je potrebné si uvedomiť, že samovysychanie a vonkajšie vysychanie nie sú úplne nezávislé mechanizmy objemových zmien betónu. Práve naopak, oba pôsobia spoločne (obr. 9).

Ich interakcia je dobre badateľná vtedy, keď sa porovnávajú RH na povrchu betónu a vo vnútri vzduchových dutiniek v cementovom tmele. Akonáhle sa systém približuje rovnovážnemu stavu s RH okolitého prostredia, všetky póry v betóne (na povrchu aj v jadrovej časti) sa musia limitne blížiť RH okolitého prostredia (obr. 10). Vonkajšie vysychanie tak nespôsobuje len vznik kapilárnych meniskov na povrchu cementového tmele, ale riadi aj RH vo vzduchových dutinkách hlbšie v cementovom tmele [4]. Táto časť ďalej nadväzuje na už uvedené informácie a rozširuje ich o poznatky z IC prostredníctvom SLWA.

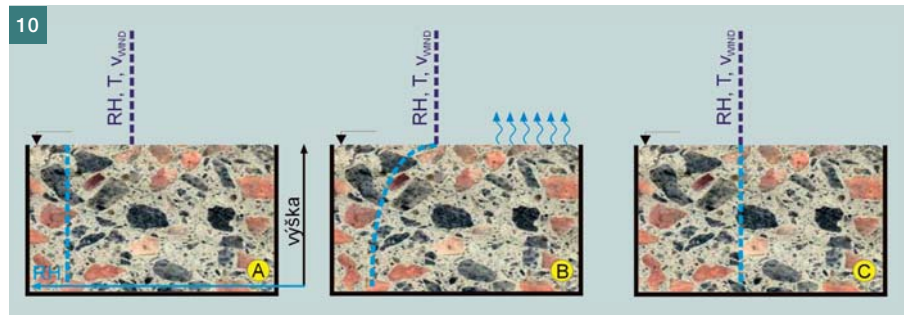
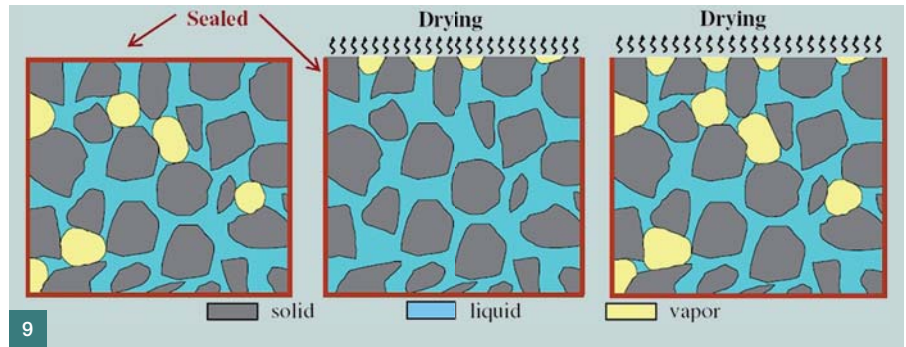


Prítomnosť SLWA v otvorenom systéme poskytuje prebytočnú vlhkosť, ktorá môže byť spotrebovaná na odparovanie. Keď sa začne odparovať voda z povrchu betónu (nie vypotená voda), SLWA začína vplyvom narastajúceho kapilárneho napätia strácať pôvodnú vlhkosť udržiujúc malé póry cementového tmelu saturované. Betón takto vysychá, znižuje sa jeho RH. Prítomnosť a pôsobenie SLWA však riadia (spomaľujú) vysychanie tým, že pôsobia ako zásobníky vody, ktorú podľa aktuálnej potreby (RH resp. napätia) uvoľňujú do cementového tmelu. Spomaľovaním tempa znižovania RH spomaľujú priebeh zmršťovania, ale nie jeho konečnú veľkosť. Toto tvrdenie je podložené skutočnosťou, že SLWA oddialuje dosiahnutie rovnovážneho stavu medzi vlhkosťou betónu a vlhkosťou okolia, no RH prostredia býva väčšinou nižšie ako cca 80 % (hodnota kedy SLWA stráca všetku vodu – podľa obr. 5) a preto strata vlhkosti z betónu pokračuje. Rovnovážny stav RH sa dosiahne za dlhší čas, ale pri ustálenej vlhkosti budú v cementovom tmele pôsobiť rovnaké napätia ako by pôsobili bez prítomnosti SLWA.

Obr. 11 zachytáva stratu vody zo systému vystaveného vonkajšiemu vysychaniu. Ako sa predpokladalo, malty s určitým obsahom SLWA vykazujú väčšie straty vody ako referenčná vzorka. Dôvodom je väčšie množstvo voľnej vody poskytnuté z pórovej štruktúry SLWA.

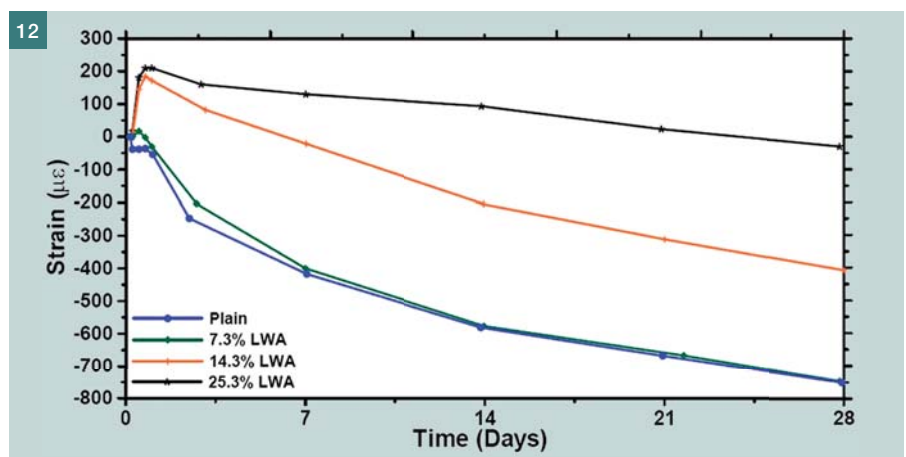
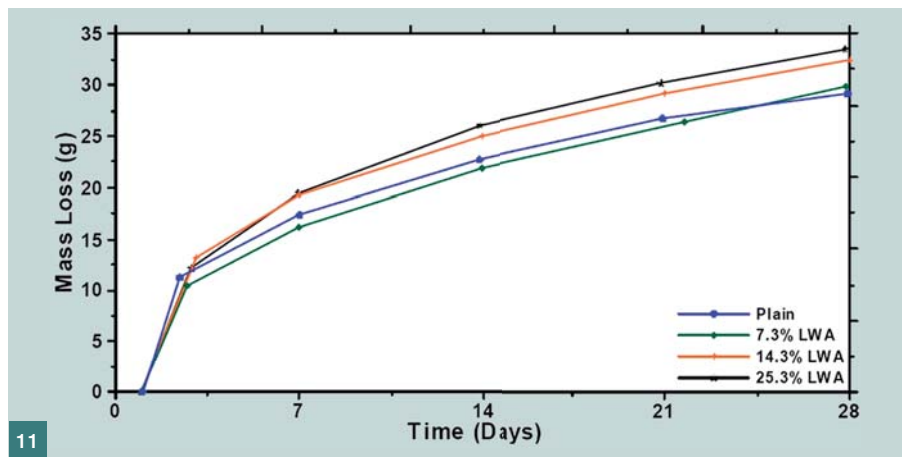
Voľné zmršťovanie otvoreného systému prezentuje obr. 12. Rovnako ako tomu bolo aj v prípade uzavretého systému, referenčná vzorka a vzorka so 7,3% náhradou SLWA vykazujú veľmi podobné správanie. Je vidno, že v prvých 24 h sa pomerné pretvorenie vzoriek vyvíjalo rovnako ako u uzavretého systému, čo je dôsledkom meracej metódy (ASTM C 157), kedy vzorky zostávajú prvých 24 h utesnené vo forme a podstupujú len samovysychanie. Po 24 h sa odformujú a od tohto času sú vystavené vonkajšiemu vysychaniu. Zvyšujúca sa dávka SLWA a v ňom obsiahnutej ošetrovacej vody spôsobuje spomalenie zmršťovania. Malta s náhradou 14,3 % kameniva za SLWA dosiahla po 28 dňoch približne polovičné pomerné pretvorenie v porovnaní s referenčnou maltou. Čo je však zaujímavejšie, pomerné pretvorenie malty s 25,3 % SLWA sa po rovnakom čase pohybuje okolo nuly.

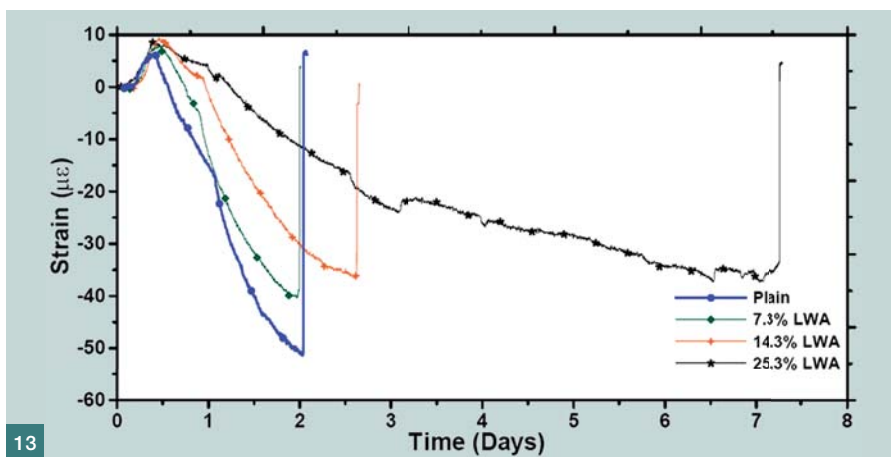
Obmedzené zmršťovanie podľa obr. 13 dokumentuje rovnaký charakter pre-



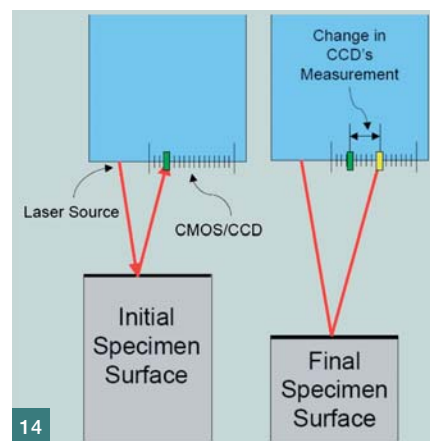
tvorení ako v prípade uzavretého systému, ale keďže otvorený systém stráca vlhkosť oveľa intenzívnejšie ako uzavretý (obr. 8), časy vzniku trhlin sa dramaticky skrátili. Vo vzorkách bez SLWA a s dávkou SLWA 7,3 a 14,3 % vznikla trhlinka približne po dvoch dňoch. Je potrebné si uvedomiť, že vzorky boli opäť jeden deň vystavené iba vnú-

tornému vysychaniu. Odformovanie je z obrázku čitateľné ako zrýchlenie objemových zmien po prvom dni. Každopádne sa aj pri otvorenom systéme potvrdilo, že IC použitím SLWA predlžuje čas kedy dôjde ku dosiahnutiu kritického bodu – rovnováhy medzi aktuálnym napätím a pevnosťou materiálu v ťahu.

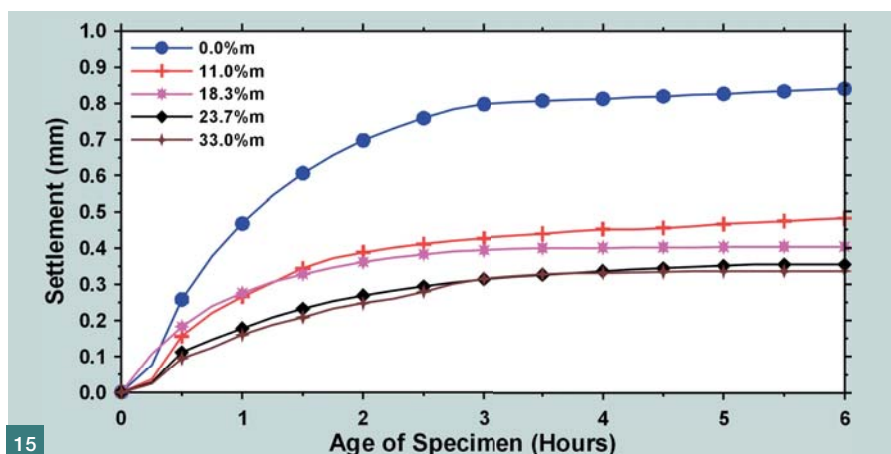




13



14



15

Obr. 13 Obmedzené zmršťovanie s vonkajším vysychaním [2] ■ Fig. 13 Restrained shrinkage with external drying [2]

Obr. 14 Princíp merania sadania laserom [6] ■ Fig. 14 Method of setting measurement by laser device [6]

Obr. 15 Priebeh sadania vzoriek mált s rôznymi náhradami kameniva za SLWA [6] ■ Fig. 15 Curves of setting of mortars made with various replacements of regular aggregate with SLWA [6]

Obr. 16 Kumulatívne rozdelenie pravdepodobnosti výskytu trhlin určitej šírky v betónoch s rôznymi dávkami SLWA [6] ■ Fig. 16 Cumulative probability of occurrence of cracks of certain width in concretes with various SLWA dosages [6]

Obr. 17 Výrez simulačného modelu maltovej vzorky rozmerov 30x30mm (červená – zrná piesku, žltá – SLWA, tmavomodrá až svetlomodrá – stupne saturácie cementového tmeľu) [8] ■ Fig. 17 Cut-out of simulation model of mortar specimen with dimensions 30x30mm (red – sand grains, yellow – SLWA, from dark blue to light blue – degrees of saturation of cement paste) [8]

Obr. 18 Snímka RTG mikrotomografie cementového tmeľu s hranou výrezu vzorky 4,6mm (červené miesta predstavujú oblasti s rapidným vysychaním – SLWA) [9] ■ Fig. 18 RTG microtomography picture of cement paste sample with edge 4,6mm in length (red fields represent areas with rapid drying-out – SLWA) [9]

IC použitím metódy SLWA, ako už bolo povedané (viď obr. 11 a tab. 1), výrazne zvyšuje stratu vody odparovaním do okolitého prostredia. Dá sa preto predpokladať, že určite bude ovplyvňovať aj sadanie (konsolidáciu) a vyvolané plastické zmršťovanie betónu.

Obr. 15 ukazuje priebeh sadania vzoriek malty ( $w/c=0,3$ ) s rôznymi dávkami SLWA počas šiestich hodín. Výsledky reprezentujú sadanie valcových vzoriek s priemerom 75 mm a výškou 100 mm uložených

(10 min po zamiešaní) v klimatizačnej komore pri podmienkach prostredia  $23,0 \pm 0,1$  °C;  $50 \pm 0,1$  % s rýchlosťou prúdenia vzduchu  $24 \pm 2$  km/h. Meranie sadania bolo realizované kontinuálnym snímaním výšky povrchu laserovým lúčom (obr. 14) umožňujúcim dosiahnuť presnosť merania 1  $\mu$ m.

Z priebehu sadania jednotlivých vzoriek je vidieť, že už najmenšia dávka SLWA 11 % znižuje sadanie na polovičné hodnoty. S rastúcou dávkou SLWA sa znižuje sadanie. Vysvetlenie je ukryté v druhej fáze odparova-

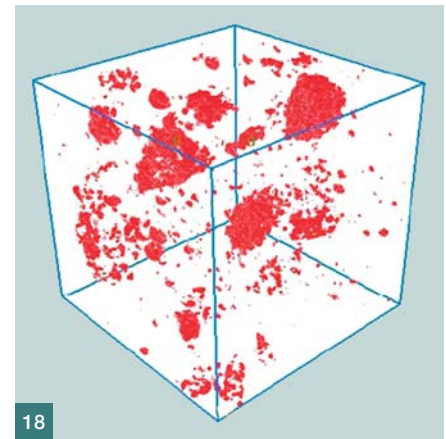
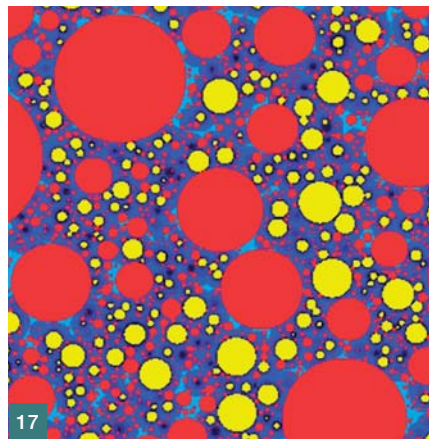
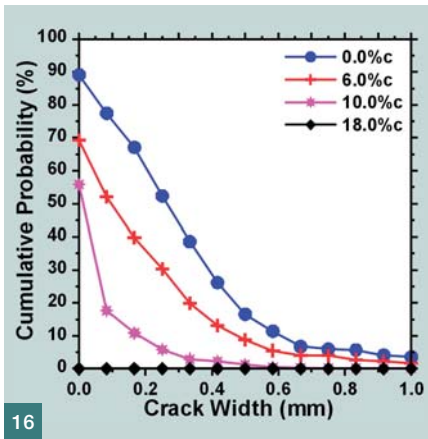
nia vody (prvá časť tejto série článkov), kedy sa narastajúcimi kapilárnymi napätiami uvoľňuje voda z SLWA, ktorá ich obmedzuje.

Vplyv SLWA na plastické zmršťovanie bol hodnotený použitím normového postupu podľa ASTM C 1579-06. Výsledky plastického zmršťovania (tab. 2; obr. 16) korešpondujú s výsledkami sadania maltových vzoriek. Zatiaľ čo vzorka bez SLWA dosahuje najväčšie šírky trhlin a aj pravdepodobnosti ich vzniku, u vzoriek s rastúcim podielom SLWA sa dosahujú oba parametre nižšie.

Preukázalo sa, že IC použitím SLWA je (od dávky cca 18 objemových %) účinná metóda ako eliminovať plastické zmršťovanie. Musí sa ale zdôrazniť, že ak sa voda obsiahnutá v SLWA uvoľní pri obmedzovaní plastického zmršťovania, nemôže sa ďalej uvažovať so samošetrením betónu v štádiu AS a DS.

Vnútrné ošetrovanie použitím SLWA má svoje pozitíva i negatíva. Negatíva sa týkajú obmedzenej doby účinnosti, ktorá je daná mechanizmom zmršťovania (podmienkami prostredia), dobou expozície týmto podmienkam, navrhovaným zložením betónu a hlavne množstvom ošetrovacej vody dodanej do betónu. Jedným z negatív metódy je aj postupne sa znižujúci dosah účinku súvisiaci so zvyšujúcou sa hutnosťou cementového tmeľu v čase a znižovaním jeho permeability. Tým je vode bránené voľne difundovať do vzdialenejších miest. Zatiaľ čo v prvom dni veku betónu je častica SLWA schopná zásobovať vodou cementový tmeľ do vzdialenosti cca 20mm, v treťom dni je to už len max. 5mm a po týždni už nemožno počítať s dosahom väčším ako 1mm. Z tohto hľadiska je veľký význam pripisovaný rovnomernému rozmiestneniu zŕn SLWA v betóne. Na hodnotenie dosahu pôsobenia





IC boli vypracované rôzne simulačné modely. Jeden z nich je prezentovaný na obr. 17. Rovnomernosť distribúcie SLWA v hmote betónu je značne závislá od zvolenej čiary zrnitosti kameniva. Pre skúmanie homogénnosti distribúcie SLWA a jej účinnosti boli tiež vypracované rôzne metodiky a jednu z nich prezentuje obr. 18.

Medzi pozitíva patrí zvyšovanie pevnosti obzvlášť u betónov s nízkym vodným súčiniteľom (pod 0,36). Tým, že takto nízky vodný súčiniteľ neumožní kompletnú hydratáciu cementu, nemožno dosiahnuť plné využitie pevnostných predpokladov, ktoré zložky betónu poskytujú. Klasické povrchové ošetrovanie sa stáva neúčinné lebo ošetrojúca voda z povrchu konštrukcie nemôže penetrovať hlbšie ako

rádovo 2 cm. Jadrová oblasť betónu tým pádom podlieha samovysychaniu. Na prvý pohľad je tvrdenie o zlepšovaní pevnosti zvlášť vzhľadom na nízku objemovú hmotnosť LWA a jeho nízke pevnosti. V prospech tvrdenia však hovoria výsledky experimentov a fakt, že LWA nahrádza len nepatrnú časť celkovej dávky kameniva a aj to v jemnejších frakciách, čiže absolútna hodnota redukcie pevnosti ľahkým kamenivom je menšia ako prírastok ktorý možno dosiahnuť. Samostatnou kapitolou výhod vnútorného ošetrovania by mohla byť trvanlivosť, ktorá je ovplyvňovaná veľkým množstvom parametrov a hodnotená podľa rôznych vplyvov prostredia. Veľmi stručne a všeobecne ale možno tvrdiť, že vnútorným ošetrovaním SLWA sa preukázala zvý-

šená odolnosť voči vzniku trhlin výrazne znižujúcej životnosť konštrukcie obzvlášť ak je vystavená agresívnemu prostrediu. Rovnako pozitívne pôsobí aj nízka permeabilita betónov s nízkym vodným súčiniteľom, ktoré je možné vyrábať aj za pomoci SLWA.

Tab. 1 Porovnanie parametrov zmršťovania betónov bez IC a s IC (metódou SLWA) [4] | Tab. 1 Comparison of shrinkage parameters of concretes without and with IC (using SLWA) [4]

Autogénne zmršťovanie	
Objem vody spotrebovanej na hydratáciu	↔
Polomer meniskov	↑
Kapilárny tlak	↓
Vnútorá relatívna vlhkosť	↑
Voľné zmrštenie tmelu	↓
Strata hmotnosti vyparovaním	0
Zmršťovanie vonkajším vysychaním	
Saturácia tmelu	↔
Polomer meniskov	↔
Kapilárny tlak	↔
Vnútorá relatívna vlhkosť	RH prostredia
Celkové voľné zmrštenie tmelu	↔
Celková strata hmotnosti vyparovaním	↑
Tempo zmršťovania pred rovnovážnym stavom	↓

Tab. 2 Pomerná redukcia vzniku trhlin (CRR) v betónoch s rôznymi dávkami SLWA [6] | Tab. 2 Crack reducing ratio (CRR) in concretes with various SLWA dosages [6]

Volume of SLWA	Average Crack Width (mm)	CRR (%)
0,0 %c	0,487 %c	0,0 %c
6,0 %c	0,199 %c	64,8 %c
10,0 %c	0,054 %c	88,9 %c
18,0 %c	0,000 %c	100,0 %c

Ing. Peter Briatka  
Technický a skúšobný ústav  
stavebný  
Studená 3, 821 04 Bratislava  
e-mail: briatka.p@gmail.com



Doc. Ing. Peter Makýš, PhD.  
Stavebná fakulta STU  
Katedra technológie stavieb  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava



Literatúra:

- [1] Lura P.: Superabsorbent polymer in concrete, Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [2] Henkiesiefken R., Nantung T., Weiss W. J.: Reducing Restrained Shrinkage in Concrete: Examining the Behaviour of Self-Curing Concrete Made using Different Volumes of Saturated Lightweight Aggregate, proceedings of Concrete Bridge Conference held in May 2008 in St. Louis, USA, 2008
- [3] ASTM C 1581-04 Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage.
- [4] Radlinska et al.: Shrinkage Mitigation Strategies in Cementitious Systems: a Closer Look at Differences in Sealed and Unsealed Behavior, accepted by Transportation and Research Board for publication, Purdue University, West Lafayette, 2007
- [5] ASTM C 157 Standard test method for length change for hardened hydraulic-cement, mortar and concrete.
- [6] Henkiesiefken R., Briatka P., Bentz D., Nantung T., Weiss J.: Plastic shrinkage cracking in internally cured mixtures made with pre-wetted lightweight aggregate, accepted by Concrete International, will be published in November 2009, USA, 2009
- [7] ASTM C 1579-06 Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (Using a steel form insert).
- [8] Bentz D. P.: Internal Curing Lightweight Aggregates – Part I, Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [9] Bentz D. P., Halleck P. M., Grader A. S., Roberts J. W.: Four-Dimensional X-ray Microtomography Study of Water Movement during Internal Curing, Proceedings of the International RILEM Conference – Volume Changes of Hardening Concrete, Bagneux, France, 2006