

OŠETROVANIE ČERSTVÉHO BETÓNU – 5. NÁVRH RECEPTÚRY ČERSTVÉHO BETÓNU S VNÚTORNÝM OŠETROVANÍM ■ CONCRETE CURING – 5. DESIGN OF COMPOSITION OF FRESH CONCRETE WITH INTERNAL CURING

Peter Briatka

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 sa SLWA pridáva počas dávkovania základných zložiek betónu, sa z typického pomocného stavebného procesu stáva významný dôležitý 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. Táto práca sa venuje návrhu receptúry čerstvého betónu s vnútorným ošetrovaním. Primárnym cieľom bolo vytvoriť nástroj, pomocou ktorého by bolo možné navrhnuť receptúru betónu zohľadňujúcu vplyv prostredia, spôsob straty vlhkosti z betónu a aj spôsob, účinnosť a dobu aplikácie konvenčného a/alebo progresívneho ošetrovania betónu. ■ 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. This article is devoted to design of composition of fresh concrete with internal curing. The essential aim was to make up a tool through which it would be possible to design such composition of fresh concrete with respect to influence of the environment, means water loss from concrete and technique, efficiency and time period of application either conventional or progressive curing.

EXISTUJÚCI PRÍSTUP K NÁVRHU VNÚTORNÉHO OŠETROVANIA

V súčasnosti sa IC navrhuje podľa postupu popísaného v [9]. Existujúci a často citovaný model návrhu vnútorného ošetrovania betónu prostredníctvom výpočtu množstva vody potrebného na dosiahnutie maximálneho stupňa hydratácie $\alpha_{\max} = 1$ vychádza z Powersovho fázového modelu hydratácie [17]. Podľa neho je možné dosiahnutie $\alpha_{\max} = 1$ len vtedy, ak vodný súčiniteľ w/c je prinajmenšom 0,36 a vodný súčiniteľ upravený o vodu pre vnútorné ošetrovanie je minimálne 0,42. Hodnota 0,42 vychádza z fázového rozdelenia vody v cementovom tmele, kedy 0,23 g vody na 1 g cementu sa počas hydratácie chemicky naviaže na cement a 0,19 g vody na 1 g cementu predstavuje fyzikálne viazanú vodu (na povrchu pevných častíc cementu). Zvyšná voda (pri $w/c > 0,42$) je tzv. voľná, a teda schopná migrácie.

V stručnosti možno tento prístup charakterizovať ako nekomplexný, pretože je výrazne obmedzený len na stratu vlhkosti na vlastnú hydratáciu cementu. Takýto systém bez straty vlhkosti do prostredia sa nazýva aj utesnený, uzavretý alebo aj „sealed“. Je nevyhnutné poznamenať, že je to len idealizovaný stav a v praktických aplikáciách je nerealizovateľný.

Betónové konštrukcie, obzvlášť tie s vysokým povrchovým modulom, sú často vystavené nepriaznivému pôsobeniu okolitého prostredia v čerstvom stave a aj v mladom veku. Dôsledkom vplyvu prostredia a nedokonalému ošetrovaniu dochádza ku strate vlhkosti do prostredia. Tým dochádza nielen k úbytku vody potrebnej na hydratáciu (nízke w/c), ale aj k priamemu alebo nepriamemu zintenzívneniu prejavov zmršťovania (či už chemického, autogénneho alebo vysychaním).

NOVÝ – KOMPLEXNEJŠÍ PRÍSTUP K NÁVRHU VNÚTORNÉHO OŠETROVANIA

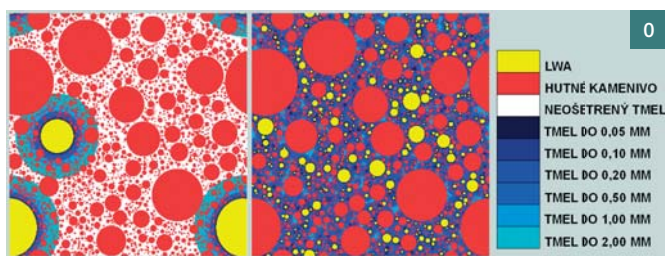
Návrh receptúry sa vykonal pre laboratórne overenie metód ošetrovania čerstvého a mladého betónu, no zohľadňuje i praktické požiadavky kladené na betón podľa jeho určenia a expozície rôznym stupňom vplyvu prostredia. Cieľom nebolo vytvoriť nástroj pre návrh zloženia betónu podľa požadovanej pevnosti. Princíp návrhu však nevyklučuje rozšírenie aj o tento parameter, i keď nepriamo ho zahŕňa ako jednu z požiadaviek na zatvrdnutý betón podľa predpokladaných stupňov vplyvu prostredia. Skutočným primárnym cieľom bolo vytvoriť nástroj, pomocou ktorého by bolo možné navrhnuť receptúru betónu zohľadňujúcu vplyv prostredia, spôsob straty vlhkosti z betónu a aj spôsob, účinnosť a dobu aplikácie konvenčného a/alebo progresívneho ošetrovania betónu.

Návrh receptúry čerstvého betónu venuje špeciálnu pozornosť tzv. vnútornému ošetrovaniu betónu (IC) použitím saturovaného ľahkého kameniva (SLWA). Návrh receptúry čerstvého betónu je priamym pokračovaním skúšok zložiek betónu, ktoré sa za týmto účelom vykonali. Pozostáva z viacerých krokov, ktoré sú v nasledovných bodoch bližšie popísané a vysvetlené.

Materiál

Návrh zloženia a ošetrovania betónu je flexibilný aj z hľadiska použitých materiálov (zložiek betónu). Ak sú známe potrebné vlastnosti akéhokoľvek materiálu, je možné ho zahrnúť do návrhu receptúry. V ďalšom popise návrhu receptúry sa však pracuje s materiálmi, ktorých vlastnosti sa už zistili (overili) a ktoré boli použité v súvisiacich skúškach v širšom kontexte celej práce.

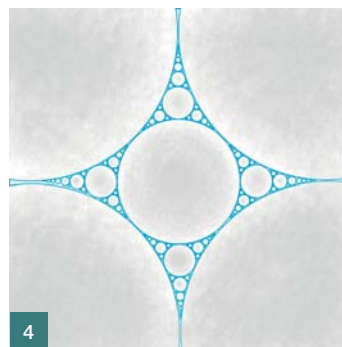
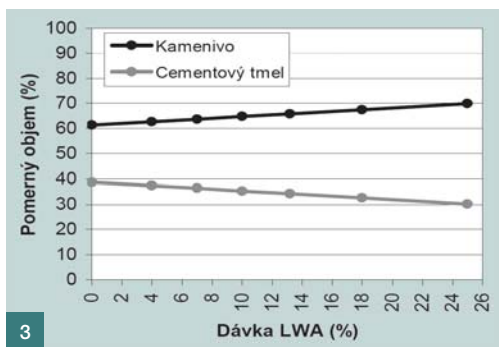
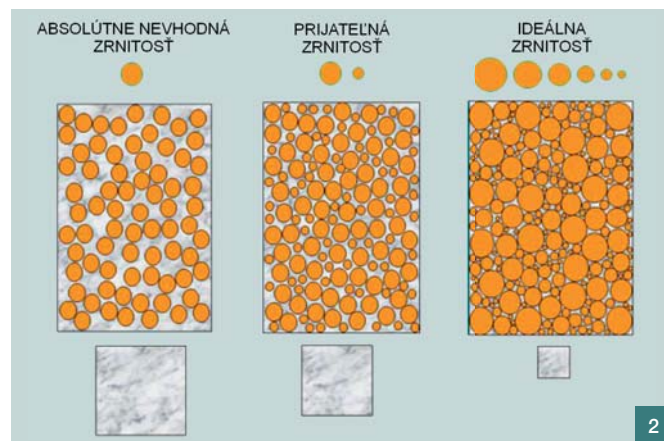
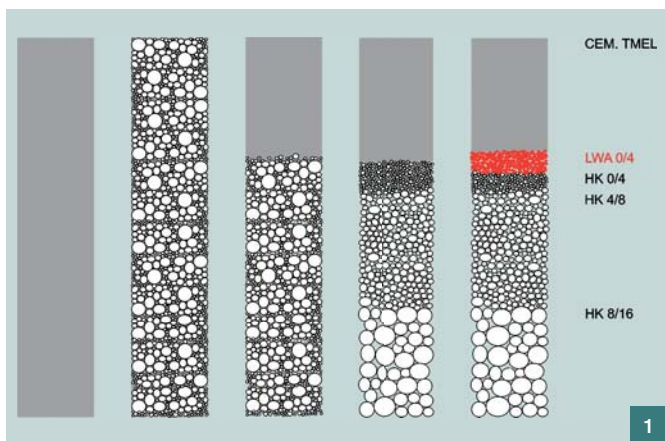
Cement sa použil CEM I 42,5 N s mernou hmotnosťou 3 077 kg/m³, chemickým zmršťovaním zaokrúhleným na 7 % a merným povrchom 344,77 m²/kg. Voda (zámesová i ošetrovacia) sa používala vždy pitná teploty 20 ± 2 °C bez zisťovania jej vlastností. Hutné kamenivo bolo použité prírodné, ťažené, triedené do štyroch frakcií – 0/4; 4/8; 8/16 a 16/32. Ľahké kamenivo LWA sa použilo Liapor s frakciami 0/1, 0/4 a 1/4.



Obr. 0 Titulný obrázok – dosah IC ■ Fig. 0 Illustrative – reach of IC

Obr. 1 Schéma návrhu receptúry čerstvého betónu na základe pomerných objemov ■ Obr. 1 Scheme of concrete mix design according to relative volume portions

Fig. 2 Zmena relatívneho objemu cementového tmelu a kameniva ■ Fig. 2 Change of relative volume portion of cement paste and aggregate



Obr. 3 Zrnitosť kameniva a jej vplyv na množstvo cementového tmelu (upravené z [12]) ■ Fig. 3 Grading curve and its impact on amount of cement paste (modified from [12])

Obr. 4 Plošný model ideálneho usporiadania kameniva s ideálnou čiarou zrnitosti ■ Fig. 4 2D model of the ideal arrangement of the aggregate with optimal grading curve

Pre tieto frakcie sa overili ich merné a sypané hmotnosti, nasiakavosti a medzerovitosti. Plastifikačná prísada (WRA) sa použila Berament HT2 na báze polykarboxylátov.

Princípy návrhu

Princíp návrhu receptúry vychádza z pomerných objemov kameniva a cementového tmelu v objemovej jednotke hotového čerstvého betónu (obr. 1). Vhodným návrhom čiar zrnitosti kameniva sa redukuje medzerovitosť kameniva M_b a tým aj pomerné množstvo cementového tmelu V_{CP} , za splnenia neskôr uvedených požiadaviek na množstvo cementu a vodný súčiniteľ w/c . Následne, podľa stanoveného množstva vody potrebnej na obmedzenie chemického zmršťovania a/alebo zmršťovania vonkajším vysychaním, sa časť hutného kameniva frakcie 0/4 nahradí určitou dávkou LWA. LWA, vďaka inej medzerovitosti $M_{b,LWA}$ spôsobí zmenu celkovej medzerovitosti systému $M_{b,SYS}$ (obr. 2), čo si vyžiada ďalšiu modifikáciu.

$$V_{CP} + V_{HK} + V_{LWA} = 1 \quad [\%] \quad (1)$$

$$V_{CP} = M_{b,SYS} \quad [\%] \quad (2)$$

Zadávanie vstupných informácií

Automatizovaný návrh, ak zanedbáme výber zložiek betónu, vychádza zo zadania okrajových podmienok – požiadaviek na čerstvý betón, z konštrukčných a technologických pod-

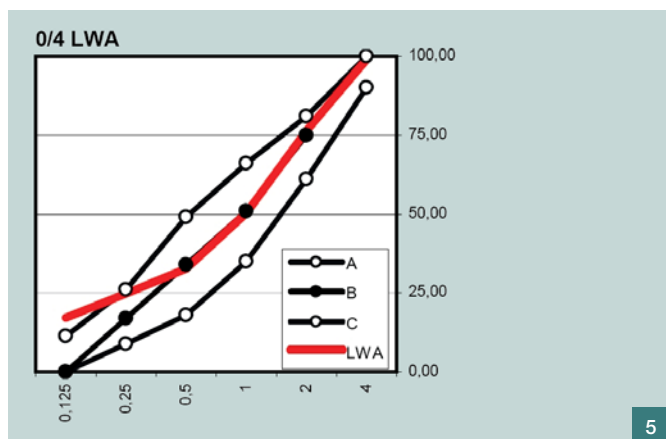
mienok, z predpokladaných podmienok expozície konštrukcie (mladého betónu) prostrediu a z požiadaviek na zatvrdnutý betón a jeho odolnosti voči vplyvom prostredia.

Pomer miešania frakcií kameniva

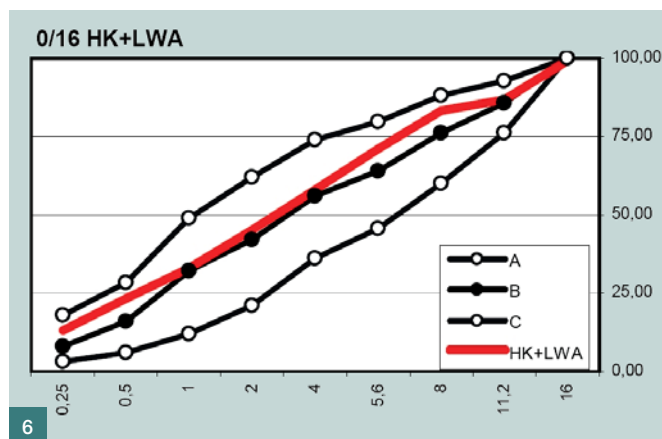
Ako prvé je potrebné zvoliť pomer miešania (0/4:4/8:8/16:16/32) štyroch frakcií hutného kameniva. Každá frakcia i je charakterizovaná individuálnou čiarou zrnitosti v danom intervale dolného d_i a horného sita D_i . S ohľadom na požadovanú veľkosť maximálneho zrna kameniva D_{max} sa navrhne pomerné hmotnostné zastúpenie jednotlivých frakcií.

Z pohľadu hospodárnosti výroby, ale aj dosahovaných mechanických vlastností je potrebné, aby kamenivo v betóne zaberalo (pokiaľ možno) čo najväčší objem (nízka medzerovitosť). Vhodné je aj, aby zrná kameniva mali rôznu veľkosť a zaoblený tvar s čo možno najnižším tvarovým indexom. Splnením týchto kritérií sa predíde vysokej spotrebe cementu (obr. 3 a 4) a potrebe zvýšenia vodného súčiniteľa w/c z titulu nedostatočnej spracovateľnosti vplyvom ostrohranosti zrn alebo ich nevhodnému tvaru.

V prípade LWA sa zohľadňujú nielen parametre zrnitosti. Pri voľbe pomerného zastúpenia jednotlivých frakcií LWA je omnoho dôležitejším faktorom ich nasiakavosť, neskôr v betóne ich desorpčná schopnosť, veľkosť pórov a v neposlednom rade zrnitosť – no z dôvodu rovnomernosti distribúcie a zvýšenia účinného dosahu IC. S rastúcou jemnosťou LWA



5



6

rastie aj absolútne množstvo zŕn LWA v konštantnom objeme betónu, čo logicky spôsobuje zmenšenie vzdialenosti medzi dvomi najbližšími susednými zrnami LWA [13].

Vplyv zrnitosti LWA na účinok vnútorného ošetrovania na cementový tmel prezentuje titulný obrázok zostrojený numerickým modelom podľa [14,15,16]. Navrhnutý pomer miešania frakcií LWA (0/1 a 0/4) sa informatívne overí vizuálnou kontrolou čiary zrnitosti na grafe zodpovedajúcom maximálnemu zrnmu D_{max} (obr. 5). Čiara zrnitosti LWA nemusí nutne ležať v oblasti použiteľnosti, čo je dané požadovaným vyšším podielom jemných častí. Neskôr, na základe voliteľnej informácie o množstve dávky LWA zostrojí zložená (kumulatívna) čiara zrnitosti hutného a ľahkého kameniva (obr. 6) zodpovedajúca skutočnej dávke hutného kameniva a podielu LWA (so zvoleným pomerom miešania) podľa preferencií ošetrovania (podrobne popísané ďalej).

Voľba zvyšných zložiek betónu a okrajových podmienok

Kamenivo a LWA je v zásade už navrhnuté. V návrhu sa pokračuje voľbou zvyšných zložiek betónu. Vyberie sa cement a plastifikačná prísada (WRA). Plastifikačná prísada je definovaná účinnosťou a maximálnou prípustnou dávkou. Medzi účinnosťou e_{WRA} a dávkou m_{WRA} možno v úzkej oblasti predpokladať lineárnu závislosť, a preto sa dávka WRA odhadne s ohľadom na potrebnú účinnosť vzťahnutú na (potrebný) vodný súčiniteľ. Vzhľadom na to, že voda sa štandardne používa pitná, nie je potrebné špecifikovať a výber zložiek betónu je kompletný.

Následne sa pristúpi ku špecifikácii vplyvu prostredia za definovaním predpokladaných stupňov vplyvu prostredia (X0; XC1; XC2; XC3; XC4; XD1; XD2; XD3; XS1; XS2; XS3; XF1; XF2; XF3; XF4; XA1; XA2; XA3), ktoré môžu byť požadované alebo odhadované podľa charakteru konštrukcie, na ktorú má byť betón použitý. So zadefinovaním stupňov vplyvu prostredia súvisia (podľa Tab. F.1 STN EN 206-1) isté požiadavky na pevnostné triedy (C.../.) zatvrdnutého betónu, minimálne množstvo cementu $m_{C,min}$, maximálny vodný súčiniteľ w/c_{max} a prípadne minimálne prevzdušnenie.

Zadávanie vstupov pre návrh receptúry referenčného betónu (bez ošetrovania) sa ukončí zadáním tzv. koeficientu vyplnenia ψ [%], ktorý určuje koľko percent objemu medzi zrnami kameniva má zapĺňať cementový tmel. Koeficient vyplnenia sa štandardne volí v intervale 100 až 105 %.

Medzi zadávanými vstupnými informáciami sú aj informácie o podmienkach expozície konštrukcie prostrediu a o konštrukčných a technologických podmienkach. K nim sa dostaneme neskôr, pri popise výpočtu ošetrovania.

Referenčný betón

Na základe zadaných vstupných informácií sa metódou pomerných objemov vygeneruje receptúra čerstvého betónu bez IC. Pri návrhu receptúry referenčného betónu sa postupuje podľa nasledovných krokov. Štruktúrou je návrh rozdelený do štyroch častí.

V prvej sa vykoná prvotný návrh receptúry, ktorý sa následne v iteračnom procese upravuje. Úpravy sa týkajú dávky vody, ktorá môže byť znížená. Množstvo vody, ktoré možno z receptúry odobrať je dané účinnosťou WRA a jej navrhnutého dávkovania a množstvom vody obsiahnutej vo WRA. Odoberatím určitého množstva vody sa zmení aj množstvo cementu, výsledný objem cementového tmelu a celkový jednotkový objem čerstvého betónu. Chýbajúci objem je potrebné doplniť. Vychádza sa z pomerného zastúpenia kameniva voči cementovému tmelu a následne zo vstupných informácií o pomere miešania frakcií kameniva a vodnom súčiniteli.

V tretej časti sa dopočíta výsledná receptúra referenčného betónu.

Výsledná receptúra sa vo štvrtnej časti posúdi z hľadiska požiadaviek stupňov vplyvu prostredia, maximálnej dávky WRA. Vyhodnotí sa aj redukcia dávky vody prostredníctvom WRA, absolútny získaný jednotkový objem a odchýlka receptúry a aj získaný vodný súčiniteľ a jeho odchýlka od požadovaného.

Do výpočtu vstupujú najmä informácie o w/c a pomere miešania frakcií (0/4:4/8:8/16:16/32) hutného kameniva. Pomer miešania frakcií determinuje prostredníctvom medzerovitosti M_b frakcií pomerný objem kameniva V_{KAM} v jednotkovom objeme čerstvého betónu. Zvyšný objem (po ideálnom zhutnení) vyplňa cementový tmel V_{CP} .

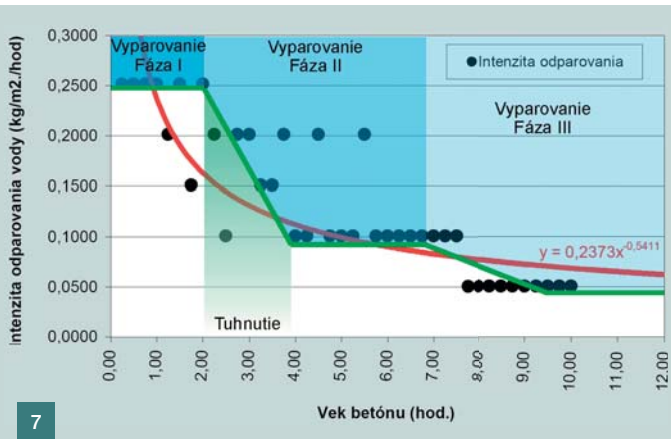
$$V_{KAM} + V_{CP} = 1 \quad V_{KAM} = 1 - V_{CP} \quad [-] \quad (3)$$

Výpočet množstva vody na ošetrovanie a návrh dávky LWA

Štruktúra samotného výpočtu množstva vody na ošetrovanie a návrhu množstva LWA sa člení do troch častí:

- výpočet dávky vody podľa teórie chemického zmršťovania (tzv. sealed system),
- výpočet podľa teórie vonkajšieho vysychania (tzv. unsealed system),
- stanovenie dávky LWA pre pokrytie potreby ošetrovacej vody podľa zvolenej teórie.

Do výpočtu vstupujú už zadané vstupné informácie. Okrem už popísaných sa zadávajú aj očakávané pravdepodobné parametre expozície betónu prostrediu s teplotou prostredia T_{AMB} [°C], s povrchovou teplotou betónu T_C [°C], s relatívnou



7

vlhkosťou prostredia RH [%] a rýchlosťou vetra v_w [km/h]. Pre výpočet sú dôležité aj vstupné konštrukčné a technologické informácie o hrúbke konštrukcie h [mm], dobe pôsobenia ošetrovania n [h] a účinnosti iného aplikovaného ošetrovania η [-].

Výpočet dávky vody podľa teórie chemického zmršťovania je vhodný prednostne pre konštrukcie, z ktorých bude znemožnená akákoľvek strata vlhkosti do prostredia alebo pre betónové konštrukcie, ktoré budú intenzívne ošetrované inou metódou ošetrovania pre úplné pokrytie strát vlhkosti vonkajším vysychaním. Z uvedeného vyplýva, že výpočet vychádza z nutnej rovnosti medzi stratou vlhkosti samovysychaním resp. na chemické zmršťovanie V_{CS} (-) a vodou dodanou ošetrovaním $V_{EW,i}$. V prvom rade (podľa teórie rozdelenia vody v čerstvom betóne) sa stanoví počiatočný pomerný objem kapilárnej vody $V_{W,i}$ [-], ktorý súčasne reprezentuje pórovitosť resp. pomerný objem kapilárnych pórov v cementovom tmele ρ [-] – vzťah (4). Vo vzťahu (4) vystupuje aj vodný súčiniteľ w/c [-], merná hmotnosť cementu $\rho_{d,CEM}$ [kg/m³] a hustota vody ρ_w (1 000 kg/m³ pri 20 °C).

$$V_{W,i} = \rho = \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c} + \frac{\rho_w}{\rho_{d,CEM}}\right)} \quad [-] \quad (4)$$

Pokračuje sa výpočtom maximálneho stupňa hydratácie α_{max} [-] dosiahnuteľného pri zadanom w/c , vzťah (5). Následne se tento vzťah pre α_{max} použije na odvodenie vzťahu (6) pre pomerný objem ošetrovacej vody $V_{EW,i}$ [-]. Vzťah (6) udáva pomer medzi objemom ošetrovacej vody $V_{EW,i}$ a objemom počiatočnej kapilárnej vody $V_{W,i}$ (resp. počiatočnej pórovitosti). Ak má mať IC účinnosť 100 % z hľadiska eliminovania CS, potom pri maximálnom stupni hydratácie musí platiť $V_{EW,i} = V_{CS}$.

$$\alpha_{max} = \frac{V_{W,i}}{1,12 \cdot (1 - V_{W,i})} = \frac{\rho}{1,12 \cdot (1 - \rho)} \quad [-] \quad (5)$$

$$V_{EW,i} = 0,20 \cdot (1 - \rho) \cdot \frac{\rho}{1,12 \cdot (1 - \rho)} \equiv \equiv 0,18 \cdot \rho \equiv 0,18 \cdot V_{W,i} \quad [-] \quad (6)$$

V poslednom kroku tejto časti sa vypočíta dávka vody potrebná na eliminovanie chemického zmršťovania $m_{W,CS}$ [kg/m³]. Do výpočtu podľa vzťahu (7) vstupuje počiatočný pomerný objem kapilárnej vody $V_{W,i}$ [-], pomerný objem ošetrovacej vody $V_{EW,i}$ [-], navrhnutá dávka vody pre referenčný betón m_w [kg/m³] a hustota vody ρ_w (1 000 kg/m³).

Obr. 5 Kontrola čiary zrnitosti LWA s D_{max} 4 mm ■ Fig. 5 Check of grading curve of LWA with D_{max} 4 mm

Obr. 6 Kontrola čiary zrnitosti hutného kameniva s čiastočnou náhradou LWA ■ Fig. 6 Check of grading curve of aggregate with partial replacement of LWA

Obr. 7 Model intenzity odparovania vody z betónu ■ Fig. 7 Model of intensity of evaporation water from concrete

$$m_{W,CS} = \frac{V_{EW,i}}{V_{W,i}} \cdot m_w \cdot \rho_w$$

$$= \frac{0,2}{1,12} \cdot V_{W,i} \cdot m_w \cdot \rho_w \quad [\text{kg/m}^3 \text{ resp. kg}] \quad (7)$$

Z predchádzajúceho je jasné, že výpočet ošetrovacej vody a návrh LWA rozlišuje stratu vody autogénnym vysychaním (CS resp. AS) a stratu vody do prostredia vonkajším vysychaním (DS). Zatiaľ čo výpočet vody pre pokrytie chemického zmršťovania (CS) neuvažuje a nezahŕňa podmienky prostredia a konštrukcie, tieto priamo vstupujú do výpočtu straty vody podľa teórie vonkajšieho vysychania. Táto teória kumuluje oba spôsoby straty vlhkosti – na hydratáciu aj do okolitého prostredia. Vhodná je pre plošné konštrukcie, u ktorých je v praxi obtiažne alebo nemožné zabezpečiť dokonalé ošetrovanie počas celej požadovanej doby alebo aspoň počas časti tejto doby.

Ako sa preukázalo pri hodnotení vhodnosti LWA Liapor na IC, LWA je kvôli distribučnej krivke pórov v LWA a v cementovom tmele vhodnejšie na neskoršie ošetrovanie betónu, t.j. vo veku nad cca. 24 h. Toto zistenie zohľadňuje aj výpočtový model ošetrovacej vody a LWA podľa teórie vonkajšieho vysychania pre tzv. unsealed system. Vychádza sa preto z predpokladu, že vo veľmi skorom veku betónu sa používa iná ošetrovacia metóda s určitou účinnosťou. S ohľadom na metódu (iné ako IC) ošetrovania sa uvažuje aj s obdobím, kedy je ošetrovanie technologicky nemožné, a teda jeho účinnosť je nulová.

Výpočet straty vlhkosti (vody) z betónu je z hľadiska požadovanej doby ošetrovania rozdelený do dvoch častí. V prvej časti sa uvažuje s intenzívnou a rovnomernou stratou vlhkosti odparovaním z povrchu betónovej konštrukcie. Z vykonaných meraní pri expozícii prostrediu s rôznymi okrajovými podmienkami ($T = 20$ až 35 °C; $RH = 30$ až 70 % a $v_w = 3$ až 12 km/h) sa zistilo, že v počiatočnom veku betónu (rádovo 6 h) možno odparovanie vody aproximovať na konštantné a korelujúce s Menzelovým modelom. V druhej fáze dochádza vplyvom synergického pôsobenia útlmu hydratácie (uvolňovania hydratačného tepla) a intenzívneho formovania pevných štruktúr k radikálnemu poklesu straty vlhkosti do okolitého prostredia s tým, že do 24 h klesne prakticky na $0,25$ kg/m²h a limitne sa blíži nule.

Samotný výpočet podľa teórie vonkajšieho vysychania začína od modelu (obr. 7) pre určenie intenzity straty vlhkosti odparovaním $E_{E,I}(t)$ a $E_{E,II}(t)$ [kg/m²h] v určitom čase t . Po

drobnejšie sa aproximovanému modelu bude venovať šieste pokračovanie tohto cyklu o ošetrovaní betónu.

Samotný výpočet podľa teórie vonkajšieho vysychania po dobu n hodín začína od modelu intenzity straty vlhkosti $E_{E,I}(t)$ a $E_{E,II}(t)$. Zadaná požadovaná doba ošetrovania sa rozdelí na dva časové úseky (fázy) reprezentujúce rôznu stratu vlhkosti z betónu.

Prvý úsek je pevne stanovený (6 h) a druhý úsek sa automaticky dopočíta. Následne sa vypočíta strata vlhkosti (vody) z betónu pre oba časové úseky samostatne. Strata vody za prvých 6 h $V_{L,I}$ [kg/m²] sa určí podľa vzťahu (8), kde E_E [kg/m²h] je intenzita straty vlhkosti v čase t [h].

$$V_{L,I} = \sum_{t=1}^6 E_{E,I}(t) \quad [\text{kg/m}^2] \quad (8)$$

Strata vody počas druhého úseku $V_{L,II}$ [kg/m²] sa stanoví integráciou časovo závislej intenzity straty vlhkosti z betónu v druhej fáze $E_{E,II}$ [kg/m²h] podľa vzťahu (9). Vo vzťahu (9) vystupuje doba ošetrovania n .

$$V_{L,II} = \int_{t=7}^n E_{E,II}(t) \quad [\text{kg/m}^2] \quad (9)$$

Vzťahmi (8) a (9) sa stanovila strata vody na jednotku plochy betónu. Pre návrh vnútorného ošetrovania a teda receptúru čerstvého betónu je potrebné poznať stratu vody na jednotku objemu betónu. Tu do výpočtu nepriamo vstupuje povrchový modul M_A [-] konštrukcie, ktorý hovorí o pomere plochy konštrukcie a jej objemu. S rastúcim povrchovým modulom rastie význam ošetrovania. Významným činiteľom determinujúcim povrchový modul je hrúbka konštrukcie h [mm], ktorá je aj priamym parametrom prepočtu plošnej straty vody z betónu na objemovú V_V podľa vzťahov (10) a (11).

$${}^vV_{L,I} = \frac{V_{L,I}}{h} \quad [(\text{kg/m}^3)] \quad (10)$$

$${}^vV_{L,II} = \frac{V_{L,II}}{h} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (11)$$

Vychádzajúc zo snahy o zovšeobecnenie návrhu sú výsledkom výpočtu dve rôzne potreby vody.

Prvá je potreba vody na vonkajšie vysychanie $m_{W,DS}$ [kg/m³], ktorá sa určí podľa vzťahu (12). Tento výpočet berie do úvahy určité obdobie (50 % z trvania n_I), kedy nie je technologicky možné doplnkové resp. iné ošetrovanie betónu. V praktickej aplikácii to znamená cca 3 h. Počas zvyšných 50 % trvania n_I sa betón ošetruje iným ošetrovaním s účinnosťou η . Počas celej doby trvania n_{II} sa betón ošetruje iným ošetrovaním s účinnosťou η . Vzťah (12) preto udáva množstvo vody $m_{W,DS}$ potrebné na úplné pokrytie vonkajšieho vysychania v prvých cca 3 h a čiastočné pokrytie vysychania (podľa η) počas zvyšnej požadovanej doby ošetrovania n .

$$m_{W,DS} = V_{L,I} \cdot 0,25 + \\ + V_{L,I} \cdot 0,75 \cdot (1 - \eta) + \\ + V_{L,II} \cdot (1 - \eta) \quad [\text{kg/m}^3 \text{ resp. kg}] \quad (12)$$

Druhá je potreba vody na iné ošetrovanie $C_{mW,DS}$ [kg/m³], ktorá sa podľa vzťahu (13) stanoví ako rozdiel množstva vody potrebnej pre pokrytie strát ($v n_I$ a n_{II}) a množstva vody na vonkajšie vysychanie $m_{W,DS}$.

$$C_{mW,DS} = ({}^vV_{L,I} + {}^vV_{L,II}) - m_{W,DS} \quad [\text{kg/m}^3 \text{ resp. kg}] \quad (13)$$

Tretia, posledná, časť výpočtu potreby množstva vody na IC je zameraná na návrh dávky LWA. Tento návrh vychádza z potrebného množstva vody na elimináciu CS a/alebo DS a z návrhu pomeru miešania frakcií LWA c0/1:c0/4:c1/4 navrhnutého na základe výsledkov desorpcie a rovnomernosti distribúcie LWA v cementovom tmele. Tým, že sa LWA mieša z rôznych frakcií, z ktorých každá má svoje parametre, sa mení nielen čiara zrnitosti LWA, ale aj iné významné vlastnosti tejto zložky betónu. Merná hmotnosť LWA $\rho_{d,LWA}$ (kg/m³) sa stanoví podľa pomerného zastúpenia jednotlivých frakcií c_i [-] – vzťah (14). Obdobným spôsobom, na základe pomerných dávok frakcií LWA sa stanoví aj sypná hmotnosť $\rho_{b,LWA}$ [kg/m³], nasiakavosť A_{LWA} [%] a medzerovitosť $M_{b,LWA}$ [%].

$$\rho_{d,LWA} = \rho_{d,0/1} \cdot c_{0/1} + \rho_{d,0/4} \cdot c_{0/4} + \\ + \rho_{d,1/4} \cdot c_{1/4} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (14)$$

Z vypočítaných potrebných množstiev vody $m_{W,CS}$ [kg/m³] alebo $m_{W,CS+DS}$ [kg/m³], sa stanoví dávka LWA na elimináciu CS $m_{LWA,CS}$ [kg/m³] podľa vzťahu (15) alebo DS $m_{LWA,CS+DS}$ [kg/m³] podľa vzťahu (16).

$$m_{LWA,CS} = \frac{m_{W,CS}}{\frac{A_{LWA}}{100}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (15)$$

$$m_{LWA,CS+DS} = \frac{m_{W,CS} + m_{W,DS}}{\frac{A_{LWA}}{100}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (16)$$

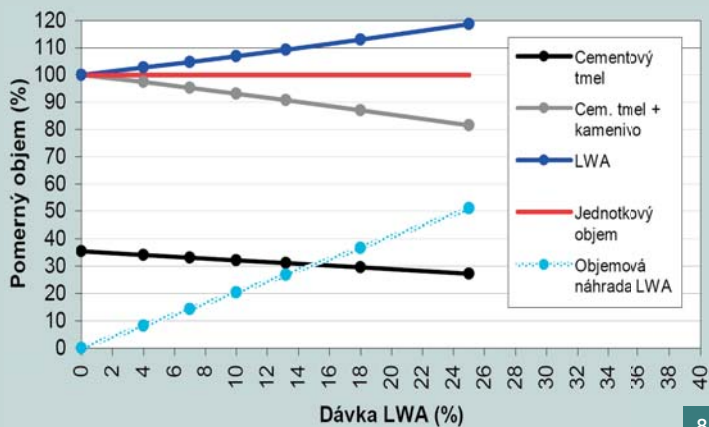
Keďže LWA, ako bolo uvedené, je (alebo môže byť) zmesou rôznych frakcií, príslušnú hmotnostnú dávku je potrebné rozpočítať pre každú frakciu zvlášť. V princípe sa postupuje podľa vzťahu (17), kde $m_{LWA,i}$ [kg/m³] je dávka frakcie i , c_i [-] je pomerné zastúpenie frakcie i a m_{LWA} [kg/m³] je celková vypočítaná dávka LWA pre daný typ zmršťovania.

$$m_{LWA,i} = c_i \cdot m_{LWA} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (17)$$

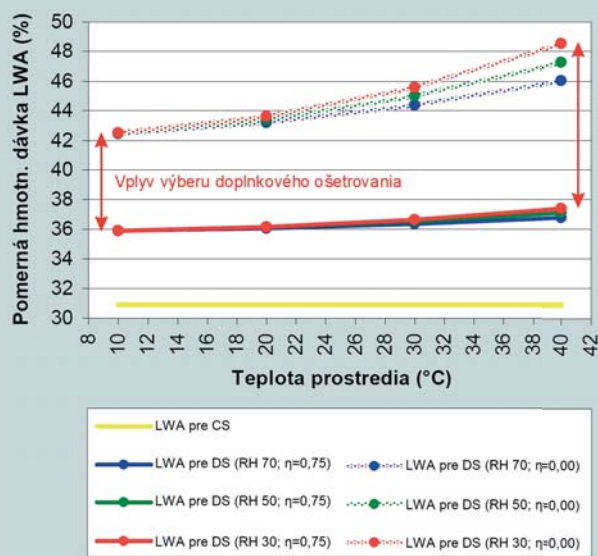
Ako posledný výstup z návrhu dávky LWA je prepočet tejto absolútnej hmotnostnej dávky na relatívnu hmotnostnú a relatívnu objemovú, keďže v skutočnosti sa LWA pridáva do betónu ako určitá náhrada hutného kameniva frakcie 0/4. Z tohto dôvodu sa určí, o akú veľkú náhradu pôjde – o koľko objemových alebo hmotnostných percent sa zníži dávka frakcie 0/4 hutného kameniva. Pri výpočte hmotnostnej náhrady Γ_M [%] sa postupuje podľa vzťahu (18), m_{LWA} [kg/m³] je celková dávka LWA a $m_{KAM,0/4}$ [kg/m³] je celková dávka hutného kameniva frakcie 0/4. Objemová náhrada Γ_V [%] sa vypočíta zo vzťahu (19), kde vystupuje aj merná hmotnosť LWA $\rho_{d,LWA}$ [kg/m³] a absolútny objem hutného kameniva frakcie 0/4 $V_{KAM,0/4}$ [-].

$$\Gamma_M = \frac{m_{LWA}}{m_{KAM,0/4}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (18)$$

$$\Gamma_V = \frac{\rho_{d,LWA}}{V_{KAM,0/4}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (19)$$



8



9

Výstup z návrhu je zároveň vstupom pre úpravu receptúry čerstvého betónu s IC pomocou LWA, a to zvlášť pre CS a DS.

Návrh receptúry betónu s IC podľa vypočítaných dávok LWA

Návrh vychádza sa z vypočítaného zloženia referenčného (REF) betónu a stanovenej dávky LWA pre pokrytie potreby vody na eliminovanie CS alebo DS (Sealed vs. Unsealed system). Priamymi vstupmi sú receptúra REF betónu a vypočítaná dávka LWA, ktorá nahrádza určitú časť frakcie 0/4 hutného kameniva.

Štruktúrou je návrh rozdelený do siedmich častí. V prvej sa vykoná primárny návrh receptúry, ktorý sa následne v iteráčnom procese upravuje. Úpravy sa týkajú dávky vody, ktorá môže byť znížená a súvisiacich zmien pomerných objemov ďalších zložiek betónu tak, ako tomu bolo pri návrhu referenčného betónu. V tretej časti sa dopočíta receptúra betónu s LWA, ktorá sa následne, vo štvrtjej časti posúdi. Pri overovaní alfa verzie návrhu sa zistilo, že i napriek vyhovujúcim výsledkom posúdenia novej navrhutej receptúry dochádza k výraznej odchýlke vo vodnom súčiniteli. Z tohto dôvodu sa automaticky pokračuje piatou časťou – iteráciou podľa w/c . Na základe výsledkov tejto iterácie sa v šiestej časti prepočítavajú dávky jednotlivých zložiek betónu. Na záver sa navrhnutá receptúra opäť posúdi, rovnako ako v referenčný betón.

Do výpočtu vstupujú najmä informácie o w/c a pomere

Obr. 8 Pomerné objemy zložiek betónu s IC ako funkcia hmotnostnej náhrady LWA za kamenivo fr. 0/4 ■ Fig. 8 Relative volume of concrete components with IC as a function of mass replacement of aggregate (0/4) by LWA

Obr. 9 Pomerné hmotnostné dávky LWA pre CS a DS v závislosti od okrajových podmienok ($w/c=0,36$; $T_{AMB}=os$ x; $T_C=T_{AMB}+5$ °C; RH = 70/50/30 %; $v_W=12$ km/h; $h=200$ mm; $t=24$ hod; $\eta=0,75$ a 0,00) ■ Fig. 9 Relative mass dosages of LWA for CS and DS depending upon boundary conditions ($w/c=0,36$; $T_{AMB}=x$ axle; $T_C=T_{AMB}+5$ °C; RH = 70/50/30 %; $v_W=12$ km/h; $h=200$ mm; $t=24$ hod; $\eta=0,75$ and 0,00)

Literatura:

- [1] STN 72 1510/A:1990 Kamenivo na stavebné účely. Názvoslovie a klasifikácia
- [2] STN EN 12620+A1: 2008 Kamenivo do betónu
- [3] DIN 1045 Beton und Stahlbeton
- [4] STN EN 13055-1:2004 Lhké kamenivo, Časť 1: Lhké kamenivo do betónu, malty a injektážnej malty
- [5] Bajza A., Rouseková I.: Technológia betónu, Jaga group, Bratislava, 2006, p. 190
- [6] Stork J.: Navrhovanie betónových zmesí, Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Bratislava, 1965, p. 316
- [7] Bechyně S.: Technologie betonu, SNTL, Praha, 1957, p. 738
- [8] Henkensiefken R.: Internal Curing in Cementitious Systems Made Using Saturated Lightweight Aggregate, Master Thesis, Purdue University, West Lafayette, 2008
- [9] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 4. Konvenčný návrh ošetrovania pomocou ľahkého kameniva, Beton TKS, Vol. 10, No. 6, Beton TKS, Praha, 2010, pp. 40–43
- [10] Bentz D., Lura P., Roberts J.: Mixture Proportioning for Internal Curing, Concrete International, Vol. 27, No. 2, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2005
- [11] Jensen O., Hansen P.: Water-Entrained Cement-Based Materials, 1. Principles and Theoretical Background, Cement and Concrete Research, Vol. 31, USA, 2001, pp. 647–654
- [12] D'Ambrosia M., Mohler N.: Early-Age Cracking, http://www.cement.org/tech/cct_cracking.asp
- [13] Bentz D.: Internal Curing Lightweight Aggregates – Part I, Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [14] Bentz D., Garbozi E., et al.: A Hard Core/Soft Shell Microstructural Model for Studying Percolation and Transport in Three-Dimensional Composite Media, NIST, 1999
- [15] Lu B., Torquato S.: Nearest-Surface Distribution Functions for Polydispersed Particle Systems, – Physical Review A, Vol. 45, No. 8, 1992
- [16] Maekawa K., Chaube R., et al.: Modelling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure and Mass Transport, Taylor and Francis, London, 1999
- [17] Powers T. C.: Physical Properties of Cement Paste, Proceedings of Fourth International Symposium on Chemistry of Cement held in Washington in 1960, pp. 577–609
- [18] Lura P.: Power's Model, Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [19] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – Strata vody z betónu, Stavebnícka ročenka 2010, Jaga group, Bratislava, 2009, pp. 31–35
- [20] Briatka P.: Eliminácia vzniku trhlin z dôvodu plastického zmršťovania, Beton TKS, Vol. 10, No. 2, Beton TKS, Praha, 2010, pp. 56–61
- [21] Lura P., Pease B., Mazzotta G., Rajabipour F., Weiss J.: Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Development of Plastic Shrinkage Cracks, ACI Materials Journal, Vol. 104, No. 2, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2007, pp. 187–194
- [22] Hover, Kenneth C.: Evaporation of Water from Concrete Surfaces, ACI Materials Journal, Vol. 103, No. 5, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2006, pp. 128-133
- [23] SP-15(05): Field Reference Manual: Standard Specifications for Structural Concrete ACI 301-05, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2005, p. 660
- [24] ACI 308R-01: Guide to Curing Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2003, p. 31
- [25] Menzel C. A.: Causes and Prevention of Crack Development in Plastic Concrete, in Proceedings, Portland Cement Association Annual Meeting, 1954, pp. 130–136

miešania frakcií (c0/4:c4/8:c8/16:c16/32) hutného kameniva a pomere miešania frakcií LWA (c0/1:c0/4:c1/4).

Doplnením vzťahu pre výpočet pomerného objemu kameniva V_{KAM} v betóne, o LWA nahrádzajúce frakciu 0/4 hutného kameniva sa získa vzťah (20) platný pre betón s IC LWA.

$$V_{KAM} = \dots \quad [\%] \quad (20)$$

$$V_{KAM} = \left(1 - \left(c_{0/4} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma_V}{100} \right) \cdot M_{b,0/4} \right) + \sum_{i=0/4}^{16/32} (c_i \cdot M_{b,i}) + \sum_{i=0/4}^{16/32} (c_i \cdot M_{b,i}) + \sum_{j=0/1}^{1/4} \left(c_j \cdot M_{b,j} \cdot \frac{\Gamma_V}{100} \right) \right) \cdot 100$$

Vo vzťahu (20) vystupuje aj: Γ_V objemová náhrada hutného kameniva frakcie 0/4 za LWA (%), M_b , medzerovitost príslušnej frakcie i hutného kameniva alebo j LWA [-] a c pomerné zastúpenie frakcie i v dávke kameniva alebo frakcie j v dávke LWA (-).

V praxi sa zámena časti hutného kameniva frakcie 0/4 za LWA (s pomerom miešania frakcií 0/1; 0/4 a 1/4 (25:75:0) %) prejavuje zmenou pomeru objemu kameniva a cementového tmelu (obr. 8).

Podľa zadefinovaného pomeru miešania jednotlivých frakcií a celkového percentuálneho objemu kameniva v betóne sa vypočíta pomerný objem $V_{KAM,i}$ [dm³] každej frakcie i okrem 0/4, ktorej dávka sa modifikuje podľa vzťahu (21), kde V_{KAM} [%] je pomerný objem kameniva v betóne s IC, Γ_V [%] je celková objemová náhrada LWA a $c_{0/4}$ [-] je pôvodné pomerné zastúpenie frakcie 0/4 v hutnom kamenive.

$$V_{KAM,0/4} = \frac{V_{KAM}}{100} \cdot \left(c_{0/4} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma_V}{100} \right) \right) \cdot 1000 \quad [\text{dm}^3 \text{ resp. } \text{dm}^3/\text{m}^3] \quad (21)$$

Ďalej sa pokračuje výpočtom hmotnostných dávok všetkých zložiek betónu a obdobným iteračným postupom ako v prípade referenčného betónu.

ZÁVER

Prezentovaný a vysvetlený model výpočtu množstva ošetrovacej vody a návrhu receptúry referenčného betónu i betónu s IC poskytuje pružný nástroj pri technologickom návrhu betonáže a spája prvky technologické s prvkami materiálového inžinierstva. Platnosť a presnosť modelu je založená na presnosti odhadu vstupných parametrov, čo dokumentuje aj obr. 9, kedy sa výrazná odchýlka výsledkov dosiahla zmenou predpokladanej účinnosti iného ošetrovania po dobu 24 h.

Z uvedeného vyplýva, že v súčasnej podobe si vyžaduje pokračovanie vo výskume účinnosti partikulárnych doplnkových ošetrovacích metód, ktoré sa považujú za konvenčné. Model je potrebné doplniť o databázy metód ošetrovania a ich účinnosti pre jednotlivé typy konštrukcií a okrajové podmienky expozície. Po doplnení je možné využívať model aj bez špecializácie na technológiu betónu alebo ošetrovanie kompozitov na báze cementu.

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

