

NEPRIAME MERANIE ÚČINNOSTI VNÚTORNÉHO OŠETROVANIA

INDIRECT MEASUREMENT OF INTERNAL CURING EFFICIENCY

Peter Briatka¹, Peter Makýš²

Abstract

The internal curing (IC) of concrete raises in significance mainly in structures with high surface modulus, low water cement ratio and high design strengths. Usually it deals with flat constructions where upon objective reasons is difficult to ensure proper curing. The typical representatives are e.g. pavements or bridge decks. IC supply the setting or hardening concrete with “curing” water from inside. For assessment of IC efficiency there exist many accurate and sophisticated methods or techniques they, however, are not employable in field. We assume that technically feasible in-field method of IC efficiency evaluation could be measurement of electrical characteristics of setting and hardening concrete, as they relates with quantity (volume) and chemical composition of cement paste’s pore solution.

Key words: concrete, internal curing, pore solution, ion, electrical conductivity, hydration

1 Úvod

Vnútorne ošetrovanie (IC) betónu nadobúda svoj význam hlavne v konštrukciách s vysokým povrchovým modulom, nízkym vodným súčiniteľom a vysokými návrhovými pevnosťami. Obvykle sú to plošné konštrukcie, kde je z objektívnych príčin obtiažne zabezpečiť technologicky správne ošetrovanie betónu. Typickým predstaviteľom sú napríklad vozovky alebo mostovky. Vnútorne ošetrovanie poskytuje tuhúcemu a tvrdúcemu betónu „ošetrovaciu“ vodu z vnútra. Na hodnotenie účinnosti IC existuje celá škála presných a sofistikovaných metód, ktoré sú však ťažko použiteľné v priamo na stavenisku. Usudzuje sa, že technicky prijateľnou metódou hodnotenia účinnosti IC in situ by mohlo byť merania a vyhodnocovania elektrických charakteristík tuhúceho a tvrdúceho betónu, keďže tieto sú závislé od množstva a chemického zloženia pórového roztoku cementového tmelu.

Nepriame meranie účinnosti vnútorného ošetrovania (IC) metódou merania elektrických charakteristík tuhúceho a tvrdúceho systému na báze cementu sa navrhlo ako alternatívna metóda k známym a sofistikovaným laboratórnym metódam (MIP; mTG; XRD). Predpokladalo sa, že metóda je vhodná aj na pre hodnotenie aktuálneho stavu konkrétnej betónovej konštrukcie s alebo bez IC priamo in situ.

¹ Ing. Peter Briatka, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 81368 Bratislava, briatka.p@gmail.com, +421-908-701238

² doc. Ing. Peter Makýš, PhD., Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 81368 Bratislava, peter.makys@stuba.sk, +421-905-595824

Známymi elektrickými charakteristikami, ktorých vzťah k dynamickému systému cementu reagujúceho s vodou je kvalitatívne popísaný sú merný elektrický odpor (rezistivita) ρ (Ωm) a jeho obrátená hodnota, merná elektrická vodivosť (konduktivita) σ (S/m). Tieto charakteristiky možno za istých okolností, ak sa dodržia presné postupy skúšok a skúšky tak budú reprodukovateľné (s postačujúcou mierou spoľahlivosti), pretransformovať do absolútneho vyjadrenia napríklad elektrického odporu R (Ω).

Teóriou elektrických charakteristík cementového tmelu, ich meraním a vyhodnocovaním sa v rôznych výskumných úlohách a vedeckých článkoch venovalo viacero autorov. Aj ich pričinením je dnes známe, že s rastúcim vekom cementového tmelu (rastúcim stupňom hydratácie α) dochádza ku znižovaniu pórovitosti, a tým k poklesu elektrickej vodivosti [5].

2 Teória

Princíp merania elektrickej vodivosti, tak ako sa vykonal, spočíva v meraní prechádzajúceho prúdu I (A) cez cementový tmel, do ktorého sú umiestnené dve kovové elektródy pripojené na zdroj konštantného napätia U (V). Dve elektródy prúťového tvaru (vždy rovnakej dĺžky) sú umiestnené vždy v rovnakej vzájomnej vzdialenosti. Prechádzajúci elektrický prúd sa v čase mení, čo indikuje zmenu vodivosti (konduktivity) cementového tmelu. Aktuálna konduktivita σ (S/m) cementového tmelu sa vypočíta podľa vzťahu 1, kde l (m) je vzdialenosť elektród a A (m^2) je plocha, cez ktorú medzi elektródami preteká elektrický prúd. Vzhľadom na to, že elektródy majú tvar líniových vodičov a stanovenie plochy efektívnej plochy A sa potýka s problémami nerovnomernej intenzity elektrického toku a rozmernosti prostredia, pristupuje sa ku zjednodušeniu vzťahu. Zjednodušením je nahradenie prvého zlomku konštantou. Táto konštanta G (m) sa získa kalibrovaním meracej sústavy na prostredí (látke) so známou konduktivitou. Takouto látkou je napríklad voda s teplotou $18\text{ }^\circ\text{C}$, ktorej konduktivitu je možné jednoducho odvodiť (podľa vzťahu 2) zo známej rezistivity $2,27.105\ \Omega\text{m}$ [11]. Dosadením σ_w a nameraných hodnôt napätia U 14,04 V a priemerného prúdu I 8,23 mA do vzťahu 1 sa získa konštanta G $7,51.10^{-3}$ m.

$$s = \frac{l}{A} \cdot \frac{I}{U} = G \cdot \frac{I}{U} = 7,51.10^{-3} \cdot \frac{I}{U} \quad (\text{S/m}) \quad (1)$$

$$s_w = \frac{1}{r_w} = 4,405.10^{-6} \quad (\text{S/m}) \quad (2)$$

Vo vzorke je z hľadiska konduktivity rozhodujúca zložka cementový tmel (kamenivo sa v čase nemení). Rozhodujúci je preto práve tuhnúci a tvrdnúci cementový tmel. V cementovom tmele prispieva k toku elektrického prúdu zásadne len pórový roztok [5]. Elektrický prúd sa v cementovom tmele prenáša prostredníctvom iónov. Je preto zřejmé, že

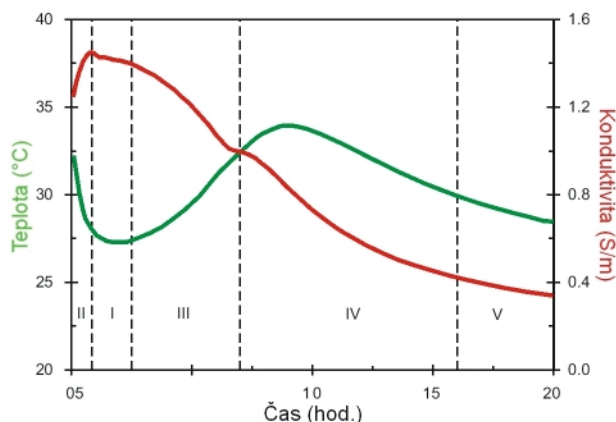
vodivosť cementového tmelu je funkciou koncentrácie iónov c , ich nábojom z a ekvivalentnou iónovou vodivosťou λ , podľa vzťahu 3 [5].

$$s = f \sum_j (c_j, |z_j|, I_j) \quad (3)$$

Ekvivalentná iónová vodivosť λ je funkciou teploty a narastá o cca 1,5-2,5 % s každým kladným 1 °C teploty pórového roztoku, čo s najväčšou pravdepodobnosťou súvisí s klesajúcou viskozitou [12]. Ióny prítomné v pórovom roztoku sa dajú predpokladať z chemického zloženia portlandského cementu ($6C_3S$, $2C_2S$, $2C_3A$ a C_4AF) a reakcií prebiehajúcich počas hydratácie – vzniku CSH gélu (vzťah 4 a 5), kde H označuje H_2O a CH značí $Ca(OH)_2$.



Hydratácia cementu sa môže rozdeliť do piatich fáz (obr. 1) – predindukcia (II), indukcia (I), akcelerácia (III), spomalenie (IV) a difúzia (V) [13,14]. Predindukcia sa začína prakticky ihneď po zmiešaní cementu s vodou a trvá niekoľko málo desiatok minút pokiaľ sa vápenaté (Ca) a hydroxidové ióny rozpúšťajú v roztoku. V indukčnej (latentnej) fáze dochádza k pozvoľnému vyzrážaniu CSH gélu, zatiaľ čo koncentrácia Ca^{2+} a OH^- pomaly rastie. Na začiatku akceleračnej fázy dosiahne Ca^{2+} úplnú saturáciu a začínajú prvé reakcie hydratácie – kryštalizácia $Ca(OH)_2$ a ukladanie CSH gélu v póroch. Počas formovania štruktúry sa znižuje pórovitosť a klesá množstvo dostupnej vody, čo vedie k spomaleniu hydratácie (fáza IV), a ktoré za určitých okolností môže viesť až k jej zastaveniu. V bežných podmienkach fáza III začína cca 3 hodiny po zamiešaní a fáza V nastupuje cca po 24 hodinách. Identifikovateľnosť rozhrania medzi fázou III a IV je závislá od vodného súčiniteľa.



Obr. 1 – Teplotné a vodivostné správanie cementového tmelu pri teplote 25 °C [5].

Z uvedeného je zrejmé, že pre vodivosť cementového tmelu sú rozhodujúce ióny Ca^{2+} a OH^- . V pórovom roztoku však možno nájsť aj ióny Na^+ , K^+ a SO_4^{2-} . Koncentrácia iónov Ca^{2+} a SO_4^{2-} so začiatkom hydratácie pomaly klesajú, zatiaľ čo koncentrácie Na^+ , K^+ a OH^- pomaly stúpajú [15,16,17]. Nie je preto možné predpokladať, že vodivosť pórového roztoku je konštantná.

3 Experimentálna časť

3.1 Použité materiály

Pre skúšky sa použil portlandský cement CEM I 42,5 N s mernou hmotnosťou 3077 kg/m³. Chemické zmrašťovanie použitého cementu bolo 7% a jemnosť stanovená podľa Blaina 344,77 m²/kg. Začiatok tuhnutia sa podľa spracovateľnosti metódou podľa STN EN 1015-9 stanovil 185,3 min, pričom koniec tuhnutia sa zistil v 254,6 min. Ako hutné kamenivo sa použilo prírodné ťažené kamenivo frakcie 0/4 s mernou hmotnosťou a ostatnými vlastnosťami podľa tab. 1. Ako ľahké kamenivo (LWA) sa s ohľadom na predchádzajúce výskumné úlohy a skúšky použilo LWA s obchodným názvom Liapor, a to vo frakciách 0/4 (M) a 0/1 (D). Všetky podstatné vlastnosti LWA sú uvedené v tab. 1. Plastifikačná prísada (WRA) sa použil superplastifikátor Berament HT2 s účinnou látkou na báze polykarboxylátu.

Vlastnosť (jednotka)	Hutné kam.	Ľahké kamenivo LWA	
	0/4	0/4 (M)	0/1 (D)
Nasiakavosť (%)	1,8	7,73	4,8
Merná hmotnosť (kg/m ³)	2510	1070	1700
Sypná hmotnosť (kg/m ³)	1630	410	610
Medzerovitosť (%)	35,06	61,68	64,12

Tab. 1 – Vlastnosti použitého hutného a ľahkého kameniva.

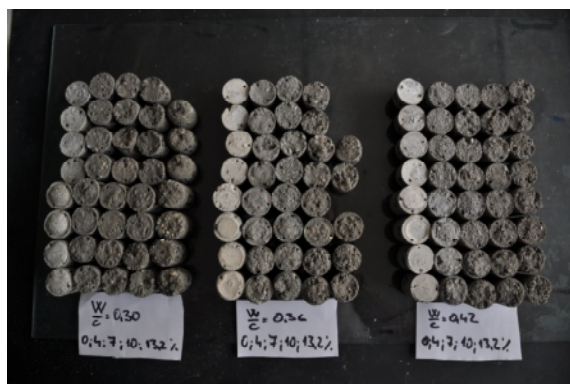
3.2 Použité receptúry

Vzorky na meranie elektrických charakteristík tuhnúceho a tvrdnúceho cementového tmelu sa vyrobili s a bez (IC). Vzorky bez IC sa označili ako referenčné a obsahovali 0 % LWA. Vzorky s IC sa líšili hmotnostnou dávkou LWA (4,0; 7,0; 10,0 a 13,2 %). Horná medzná dávka 13,2 % sa stanovila na základe návrhu vnútorného ošetrovania ako dávka postačujúca na dokonalé IC tzv. uzavretého systému (sealed system) pri $w/c=0,36$, ktorý podstupuje len samovysychanie. Vzorky sa navzájom líšili aj vodným súčiniteľom w/c (0,30; 0,36 a 0,42) zabezpečujúcimi dosiahnutie stupňa hydratácie α (0,83; 1,00 a 1,00). V každom variante w/c sa použili všetky uvedené dávky LWA, čiže každý variant obsahoval 5 vzoriek. Presná receptúra pre každú zmes je uvedená v tab. 2.

Vodný súčiniteľ (w/c)	Zložka	Použitá receptúra (kg/m ³)				
		REFERENČNÝ	4,0 % LWA	7,0 % LWA	10,0 % LWA	13,2 % LWA
0,30	CEMENT	492,782	452,522	422,404	392,352	360,369
	VODA	184,191	163,549	153,454	143,26	132,276
	Kamenivo 0/4	1705,792	1628,372	1562,750	1490,71	1406,857
	WRA	1,891	1,739	1,625	1,511	1,389
	LWA 0/4 (M)	0,000	46,376	83,464	122,508	166,293
	LWA 0/ (D)	0,000	24,561	44,202	64,88	88,068
0,36	CEMENT	449,014	412,321	384,872	357,484	328,337
	VODA	198,643	176,341	165,394	154,439	142,461
	Kamenivo 0/4	1706,850	1629,304	1563,588	1491,455	1407,505
	WRA	1,725	1,587	1,483	1,379	1,268
	LWA 0/4 (M)	0,000	46,403	83,509	122,57	166,370
	LWA 0/ (D)	0,000	24,575	44,226	64,912	88,108
0,42	CEMENT	412,459	378,746	353,528	328,366	301,589
	VODA	210,770	187,072	175,411	163,653	151,005
	Kamenivo 0/4	1707,637	1629,997	1564,211	1492,01	1407,988
	WRA	1,586	1,459	1,363	1,268	1,166
	LWA 0/4 (M)	0,000	46,423	83,542	122,615	166,427
	LWA 0/ (D)	0,000	24,585	44,243	64,936	88,139

Tab. 2 – Použité receptúry.

Každá samostatná vzorka pozostávala z 8 skúšobných telies. Pre 3 sady (varianty w/c) a 5 možných dávok LWA to činí 15 vzoriek, z ktorých každá je reprezentovaná 8 skúšobnými telesami. Celkovo sa teda vyrobilo 120 skúšobných telies (obr. 2).



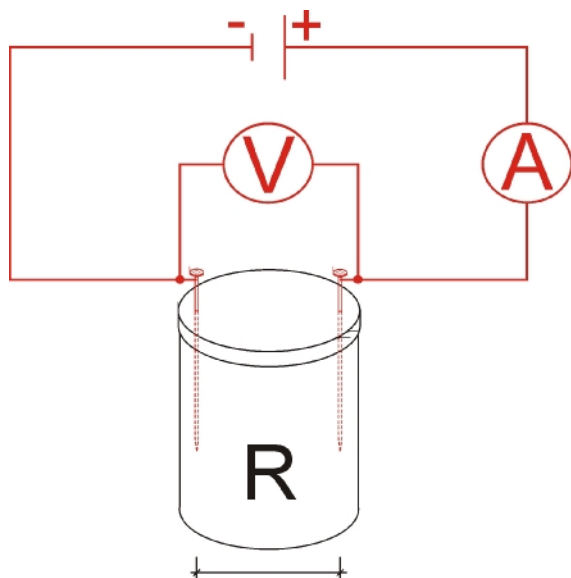
Obr. 2 – Skúšobné telesá po skúškach.

3.3 Použité postupy prípravy vzoriek

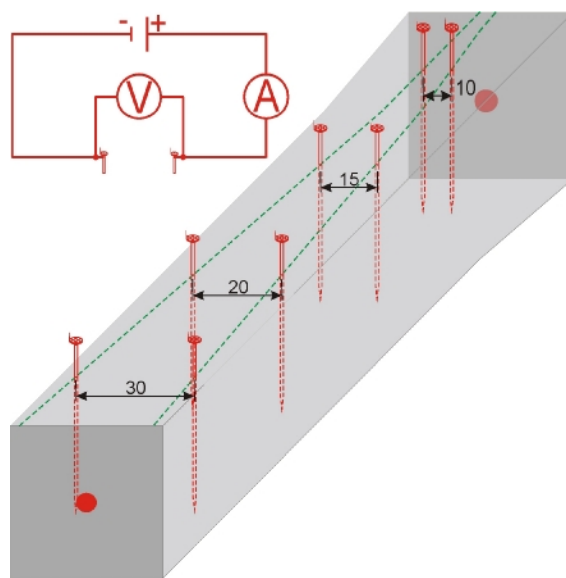
Vysušené hutné kamenivo (24 ± 2 hod. pri teplote 110 ± 5 °C) sa uložilo v plastových uzatvárateľných nádobách tak, aby nedošlo k absorpcii vzdušnej vlhkosti. V prípade výroby vzoriek s IC sa 24 ± 2 hod. pred miešaním sa do uzatvárateľnej plastovej nádoby pripravila dávka LWA (v danom pomere) spolu s celkovou dávkou zámesovej a ošetrovacej vody.

Miešanie sa vykonávalo v počítačom riadenej maltárskej miešačke (STN EN 196-1) s užitočným objemom 2 dm³. Zložky sa dávkovali vždy v rovnakom poradí. Ako prvé sa nadávali voda a cement. V prípade nenulovej dávky LWA sa namiesto zámesovej vody pridalo SLWA aj s dekantovanou vodou, do ktorej sa pridala WRA. Po 30 sekundách miešania sa pridalo hutné kamenivo.

Zámes sa po miešaní naplnila do pripravených uzatvárateľných valcových foriem (objemu 33,20 cm³) a v závislosti od konzistencie (vyplývajúcej z pomeru objemu kameniva a cementového tmelu) sa zhutnila buď poklepom o podložku alebo ubíjaním. Po zhutnení sa formy uzavreli (sealed system) a cez uzáver sa do cementového tmelu zaviedli (do hĺbky 30 mm) kovové elektródy vo vzájomnej vzdialenosti 23 mm (obr. 3).



Obr. 3 – Schéma zapojenia a meranie elektrických charakteristík cem. tmelu.



Obr. 4 – Schéma zapojenia a merania pri overení vplyvu vzdialenosti elektród.

3.4 Postup merania

Vzorky sa po dobu 72 hodín uchovávali v prostredí s teplotou 20 ± 2 °C, pričom sa priebežne vykonávalo meranie elektrických charakteristík (pretekajúceho el. prúdu I). Dôležitou podmienkou merania bolo použitie striedavého prúdu, aby sa predišlo elektrolýze pórového roztoku na elektródach. Prístup použitím striedavého prúdu sa nahradil použitím usmerneneného prúdu, no pretekajúceho iba v krátkom čase počas merania. Ako zdroj napätia cca 14 V sa použil transformátor. Prúd pretekajúci vzorkami sa v čase výrazne menil a hodnoty sa rádovo pohybovali v mA.

Intervaly medzi meraniami sa menili. Počas prvých 10-12 hodín veku boli približne 30 minút. Vo veku 12-16 hodín sa používali intervaly merania 60 minút a ďalej sa predlžovali. Meranie vo veku nad 24 hodín sa vykonávalo v intervaloch 4-6 hodín.

Počas 3 dní (72 hod) sa vykonalo cca 30 meraní, čo pre celkovo 8 skúšobných telies v 5 vzorkách v 3 sadách činí cca (30x8x5x3) 3600 dátových bodov.

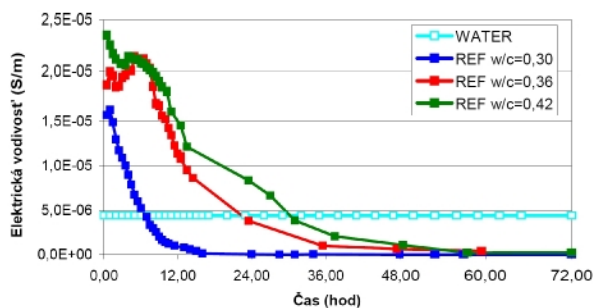
Elektrický odpor R (Ω) cementového tmelu sa stanovil numericky (podľa vzťahu 6) z meranej veličiny – jednosmerného elektrického prúdu I (mA) prechádzajúceho vzorkou medzi dvomi susednými elektródami vzdialenými d (mm) pri zapojení obvodu s konštantným svorkovým napätím U_S v čase t . Princíp merania elektrického prúdu prechádzajúceho vzorkou zachytáva obr. 4. Meranie sa uskutočňovalo na troch skúšobných telesách, ktoré sa používali aj na meranie objemových zmien, so zabudovanými elektródami. Elektrický odpor

cementového tmelu sa stanovoval vždy v tom istom veku ako objemové zmeny, t.j. vo veku 1; 2; 3; 5; 7; 14 a 28 dní.

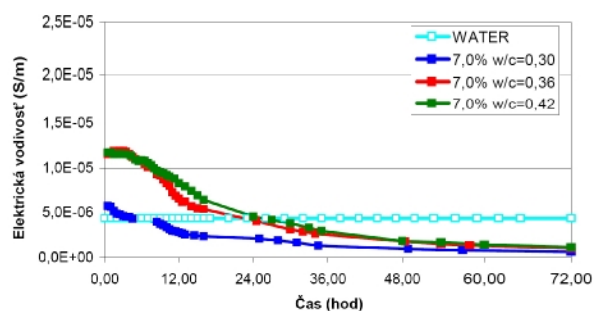
$$R(d, t) = \frac{\sum_{i=1}^{n=3} \left(\frac{U_s}{I_i(d, t) \cdot 10^3} \right)}{n} \quad (\Omega) \quad (6)$$

4 Interpretácia výsledkov

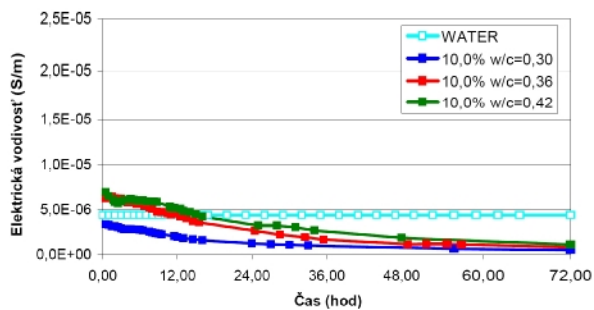
Z výsledkov, ako sú prezentované v obr. 5-8, možno kvalitatívne zhodnotiť účinnosť vnútorného ošetrovania. Priebeh vodivosti vzoriek (obzvlášť vzoriek s nižšou dávkou LWA) výrazne koreluje s priebehom vodivosti podľa obr. 1. IC má poskytovať vodu z vnútra cementového tmelu pri poklese jeho vlhkosti. Má tak udržiavať množstvo pórového roztoku (počas určitej doby) vyššie ako by bolo bez IC. Výsledky skúšok desorpcie skúšaného LWA [18] indikovali účinnosť IC až pri výraznejšom poklese relatívnej vlhkosti (RH). Doba výrazného poklesu RH je determinovaná aj pôvodným množstvom voľnej vody (w/c). U vzoriek s nižším w/c (obr. 6) je jasne vidno nástup účinku IC rádovo po 6 hodinách, zatiaľ čo v prípade w/c 0,36 a 0,42 (kde nehrozí nedostatok vody na hydratáciu) sa pozoruje nástup účinku IC až po cca 18 hodinách (w/c=0,36) resp. 30 hodinách (w/c=0,42). Efektívnosť IC pomocou LWA je nepriamo úmerná vodnému súčiniteľu. Meraný elektrický prúd a odvodená elektrická vodivosť sú priamo úmerné množstvu pórového roztoku, cementového tmelu (determinované aj čiarou zrnitosti kameniva). V receptúrach s vyššou dávkou LWA dochádza k zníženiu objemovej hmotnosti (aj vplyvom granulometrie). Účinnosť IC sa touto metódou potvrdila. Najmarkantnejšie pôsobenie LWA ako IC sa ukazuje v receptúrach s dávkou LWA do 10 %.



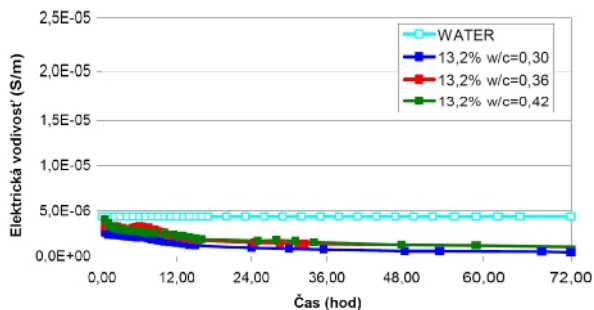
Obr. 5 – Elektrická vodivosť referenčných vzoriek pri rôznom w/c.



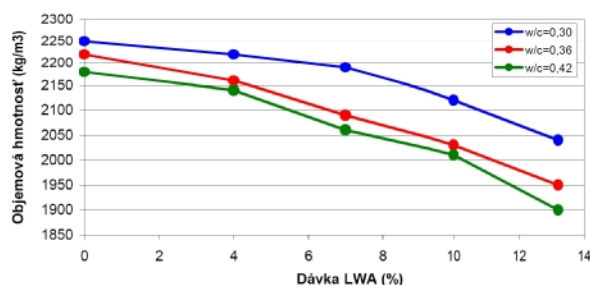
Obr. 6 – Elektrická vodivosť vzoriek s 7,0% náhradou LWA pri rôznom w/c.



Obr. 7 – Elektrická vodivosť vzoriek s 10,0% náhradou LWA pri rôznom w/c.

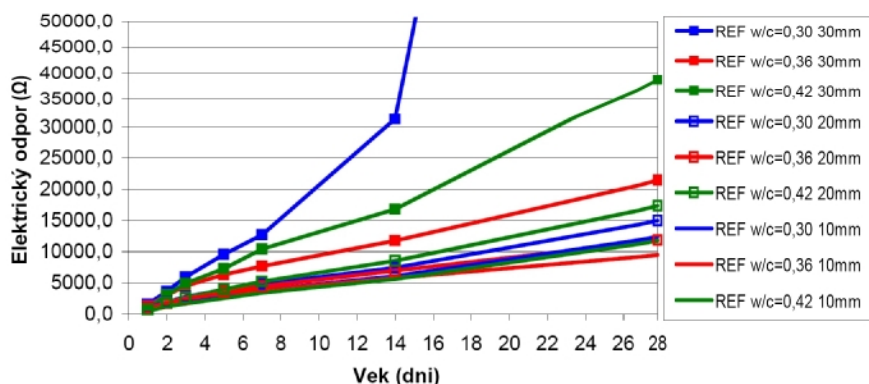


Obr. 8 – Elektrická vodivosť vzoriek s 13,2% náhradou LWA pri rôznom w/c.

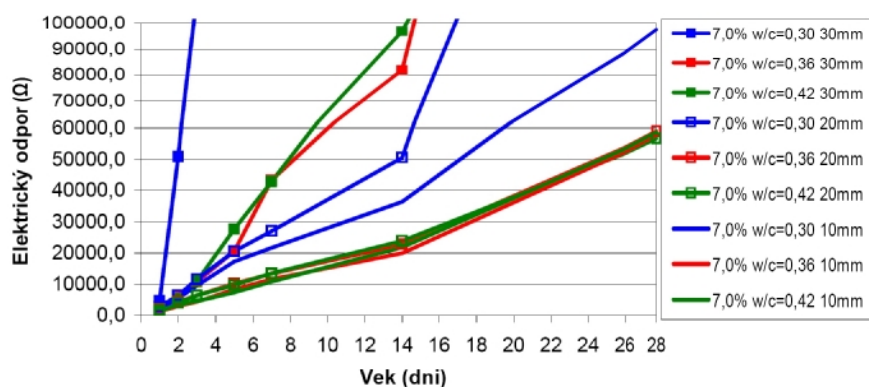


Obr. 9 – Objemové hmotnosti receptúr vs. dávka LWA.

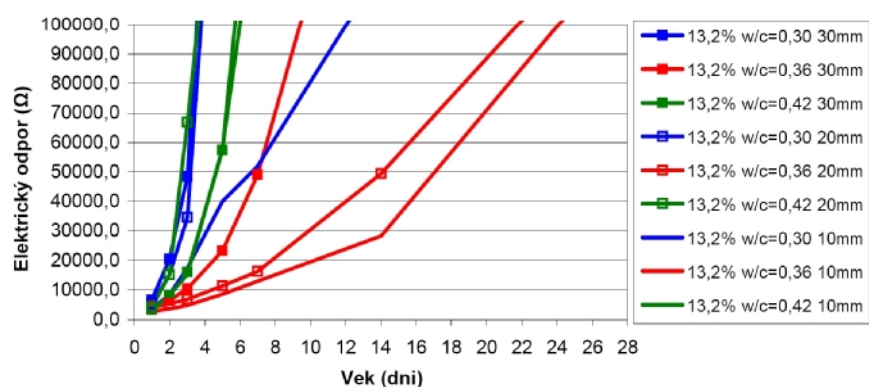
Obrázky 10-12 prezentujú výsledky skúšok vplyvu vzdialenosti elektród na (merateľný) elektrický odpor. Merania a hodnotenie stavu hydratácie betónu v skorom veku (do cca 2-3 dní) je možné. Za predpokladu využívania na dlhodobé monitorovanie stavu betónovej konštrukcie (vek 0 –28 dní) je možné výsledky interpretovať nasledovne. Metóda nie je vhodná pre receptúry s vysokou dávkou LWA, kde výsledky (obr. 12) dosahujú neprimeranú variabilitu a reprodukovateľnosť skúšok prakticky neexistuje. Receptúry s nižšími dávkami LWA (do 10 %) poskytujú možnosť reprodukovateľného merania. Významnú úlohu zohráva vodný súčiniteľ. S vyšším vodným súčiniteľom sa znižuje variabilita výsledkov. Optimálna vzdialenosť elektród je závislá od dávky LWA. V zásade platí, že s rastúcou dávkou LWA by sa mala zvýšiť vzdialenosť elektród (obzvlášť v receptúrach s w/c vyšším ako 0,36).



Obr. 10 – Meraný el. odpor referenčného betónu vo vzťahu k w/c a vzdialenosti elektród.



Obr. 11 – Meraný el. odpor betónu s LWA 7 % vo vzťahu k w/c a vzdialenosti elektród.



Obr. 12 – Meraný el. odpor betónu s LWA 13,2 % vo vzťahu k w/c a vzdialenosti elektród.

5 Záver

Riešením úlohy sa zistilo, že vnútorné ošetrovanie betónu pomocou saturovaného LWA je účinné. Efektívne je najmä pre betóny s veľmi nízkym a nízkym vodným súčiniteľom. Optimálne dávky, aj s ohľadom na hutnosť betónu a súvisiace úžitkové vlastnosti, sa odporúčajú do max. 10 % z hmotnosti jemnejších frakcií kameniva. Typom a pôvodom LWA

je možné regulovať časový horizont pôsobenia IC. Metóda merania elektrických charakteristík pre široké použitie na hodnotenie aktuálneho stavu hydratácie konkrétnej konštrukcie in situ môže byť výhodná ak sa v laboratórnych podmienkach spresní rozsah použitia resp. hraničné hodnoty w/c, hutnosť (resp. objemová hmotnosť) betónu, dávka LWA atď. Pre uplatnenie v praxi by bolo vhodné zvoliť iné tvarové a priestorové usporiadanie elektród jednak s ohľadom na zjednodušenie napr. fyzikálneho výpočtu intenzity el. poľa podľa tvaru elektród, ale aj s ohľadom na zloženie betónu.

Pod'akovanie

Experimentálne overenie a laboratórne skúšky sa vykonalo aj vďaka technickej podpore TSÚS a materiálovej podpore spoločnosťami Lias Vintřov a Cementáreň Ladce.

Literatúra

- [1] STN EN 196-3+A1:2009 Metódy skúšania cementu. Časť 3: Stanovenie času tuhnutia a objemovej stálosti.
- [2] STN EN 197-1/A3:2007 Cement. Časť 1: Zloženie, špecifikácie a kritériá na preukazovanie zhody cementov na všeobecné použitie.
- [3] STN EN 13139+AC:2004 Kamenivo do malty.
- [4] Snyder, K., Feng, X., Keen, B., Mason, T.: Estimating the Electrical Conductivity of Cement Paste Pore Solutions from OH-, K+ and Na+ Concentrations, Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 6., 2003, pp:793-798.
- [5] Backe, K., Lile, O., Lymov, S.: Characterizing Curing Cement Slurries by Electrical Conductivity, Society of Petroleum Engineers, Drilling & Completion, 2001, pp:201-207. available at: www.1insaat.com/uploads/.../pdfs.../42228_1236193542_673.pdf
- [6] Ridha, S., Irawan, S., Ariwahjoedi, B., Jasamai, M: Conductivity Dispersion Characteristic of Oilwell Cement Slurry during Early Hydration, International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, Vol. 10, No. 6, 2010, pp:129-132.
- [7] Rajabipour, F., Sant, G., Weiss, J.: Development of Electrical Conductivity-Based Sensors for Health Monitoring of Concrete Materials, in: TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM, Transportation Research Board, Indianapolis, 2007, p:16.
- [8] Kusák, I., Luňák, M., Topolář, L., Pazdera, L., Bílek, V.: Sledování hydratace betonu impedanční spektroskopii, Proceedings: 37. mezinárodní konference: Defektoskopie 7.-9.11. 2007, Praha, 2007, pp:123-128.

- [9] Bentz, D.: Influence of water-to-cement on hydration kinetics: Simple models based on spatial considerations.” *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 2, 2006, pp:238-244.
- [10] Sant, G., Rajabipour, F., Fishman, P., Lura, P., Weiss, J.: Electrical Conductivity Measurements in Cement Paste at Early Ages. In *International Conference on Advanced Testing of Fresh Cementitious Materials*, Stuttgart, Germany, 2006.
- [11] Mikulčák, J., Klimeš, B., Široký, J., Šůla, V., Zemánek, F.: *Matematicko fyzikálne a chemické tabuľky pre stredné školy*, Slovenské pedagogické nakladateľstvo, Bratislava, 1989, p:232.
- [12] Prentice, G.: *Electrochemical Engineering Principles*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991, p:21.
- [13] Perez-Pena, M., Roy, D., Tamás, F.: Influence of Chemical Composition and inorganic Admixtures on the Electrical Conductivity of Hydrating Cement Pastes, *Journal of Materials Research*, Vol. 4, No. 1, 1989, p. 215.
- [14] Michaux, M., Nelson, E., Vidick, B.: *Chemistry and Characterization of Portland Cement*, Well Cementing, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 1990.
- [15] Christensen, B. et al.: Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation, and Application, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 77, No. 11, 1994.
- [16] Michaux, M., Fletcher, P., Vidick, B.: Evolution at Early Hydration Times of the Chemical Composition of Liquid Phase of Oil-Well Cement Pastes With and Without Additives, Part I, Additive Free Cement Pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, No. 3, 1989, p: 443.
- [17] Vidick, B., Fletcher, P., Michaux, M.: Evolution at Early Hydration Times of the Chemical Composition of Liquid Phase of Oil-Well Cement Pastes With and Without Additives, Part II, Cement Pastes Containing Additives, *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, No. 4, 1989, p: 567.
- [18] Briatka, P., Makýš, P.: Možnosti použitia európskeho ľahkého kameniva na vnútorné ošetrovanie betónu, *Materiály pro stavbu*, Vol. XVI, No. 7, Business Media CZ, Praha, 2010, pp:22-25.