

ELIMINÁCIA VZNIKU TRHLÍN BETÓNU Z DÔVODU PLASTICKÉHO ZMRAŠŤOVANIA ■ ELIMINATION OF CONCRETE CRACKING OWING TO PLASTIC SHRINKAGE

Peter Briatka

Plastické zmršťovanie je jedna z foriem všeobecne akceptovaných objemových zmien betónu. Ak je objemovým zmenám bránené, generujú v materiále napätia. Ak tieto napätia prekročia aktuálnu pevnosť materiálu vzniká trhlinka. V závislosti od účelu použitia betónovej konštrukcie a šírky samotnej trhliny sa vzniknutý stav klasifikuje ako vada alebo až porucha (ak je trhlinou zhoršená jedna z funkčných vlastností). I keď trhlinka neznižuje priamo úžitkovú hodnotu konštrukcie, u trhlín spôsobených plastickým zmršťovaním sa ich existencia zásadne podpisuje na životnosti betónovej konštrukcie, čo vyplýva zo samotného mechanizmu vzniku týchto trhlín. Existujú viaceré prístupy ako obmedziť prejavy plastického zmršťovania alebo plastické zmršťovanie ako také. Azda jedným z najbežnejších a v súčasnosti zaznamenávajúcich veľký rozmach je vystužovanie betónu jemnými polymérnymi vláknami. Ako každá technológia aj táto si vyžaduje dôkladné zvládnutie teórie a jej rozvážne aplikovanie v praktických riešeniach. Praktickej aplikácii polymérnej rozptýlenej výstuže v betóne sa venuje aj táto práca. Pomocou laboratórnych pokusov sa hodnotí účinnosť jednotlivých typov vlákien samozrejme v súvislosti so stupňom takéhoto vystuženia charakterizovaného dávkou vlákien. ■ The plastic shrinkage is one of the means of commonly accepted volume changes of concrete. If the volume changes are being restricted this state generates stresses in material. If these stresses exceed actual strength of the material a crack is being formed. In dependence on purpose of a concrete structure and width of crack itself, arose state is being classified as a fault or damage (if at least one of the performances is being deteriorated because of a crack). Even though the crack doesn't directly decrease utility value of the structure, in cracks caused by plastic shrinkage, their presence does substantially affect the durability of the concrete structure what results from the mechanism of their generation. There exist various approaches how to reduce either visible signs of plastic shrinkage or plastic shrinkage as such. May be, one of the most common, and nowadays recording big growth, is reinforcing of concrete with fine polymer fibers. As every technology even this one requires thorough encompassment of the theory and its delicate application in practical solutions. Even this work is devoted to practical application of spread polymer reinforcement. Through the laboratory tests the effectiveness of individual fiber types is being evaluated, of course, with relation to degree of reinforcement defined by fiber dosage per volume unit.

PLASTICKÉ ZMRAŠŤOVANIE NA TEORETICKEJ ÚROVNI

Plastické zmršťovanie je jednou z objemových zmien čerstvého betónu. Zo samotného názvu je zrejmé, že plastické zmršťovanie vzniká a prejavuje sa v čase, keď je betón v plastickom (tekutom) stave, čiže pred začiatkom tuhnutia. V tomto období ešte nie sú vytvorené väzby medzi hydratujúcimi zrnkami cementu resp. pevné väzby medzi spojivom a plnivom.

Objemové zmeny vznikajúce v čase do začiatku tuhnutia (v tekutom stave) cementového tmelu sa nemôžu prejavovať v horizontálnom smere lebo, ako už bolo uvedené, ešte neexistujú väzby medzi hydratujúcimi zrnkami cementu. Tým, že systém v tomto štádiu kolabuje vznikajú objemové zmeny, ktorých prejavom je konsolidácia cementového tmelu. Zrná, zatiaľ bez väzieb, podliehajú pôsobeniu gravitácie ako samostatné častice, a preto sa výsledná objemová

zámena v plastickom stave tmelu vyznačuje len vertikálnou zložkou zmeny rozmeru pôvodného telesa. Chemické a autogénne zmršťovanie až do začiatku tuhnutia je jednou z hnacích síl tzv. plastického zmršťovania.

Druhým mechanizmom plastického zmršťovania je strata vody z betónu do okolitého prostredia (odparovanie). Bez určenia konkrétnych podmienok (zloženia betónu a okolitého prostredia) nie je možné jednoznačne určiť, ktorý z mechanizmov má na plastické zmršťovanie majoritný účinok. Ak sa však zaoberáme betónom v bežnej stavebnej praxi (nedokonalé alebo žiadne ošetrovanie), môžeme tvrdiť, že rozhodujúca zložka bude vyvolaná práve transportom vlhkosti z prostredia s vyššou relatívnou vlhkosťou (betón) do prostredia s nižšou relatívnou vlhkosťou (okolité prostredie). Uvedená strata vlhkosti je ovplyvnená tromi činiteľmi:

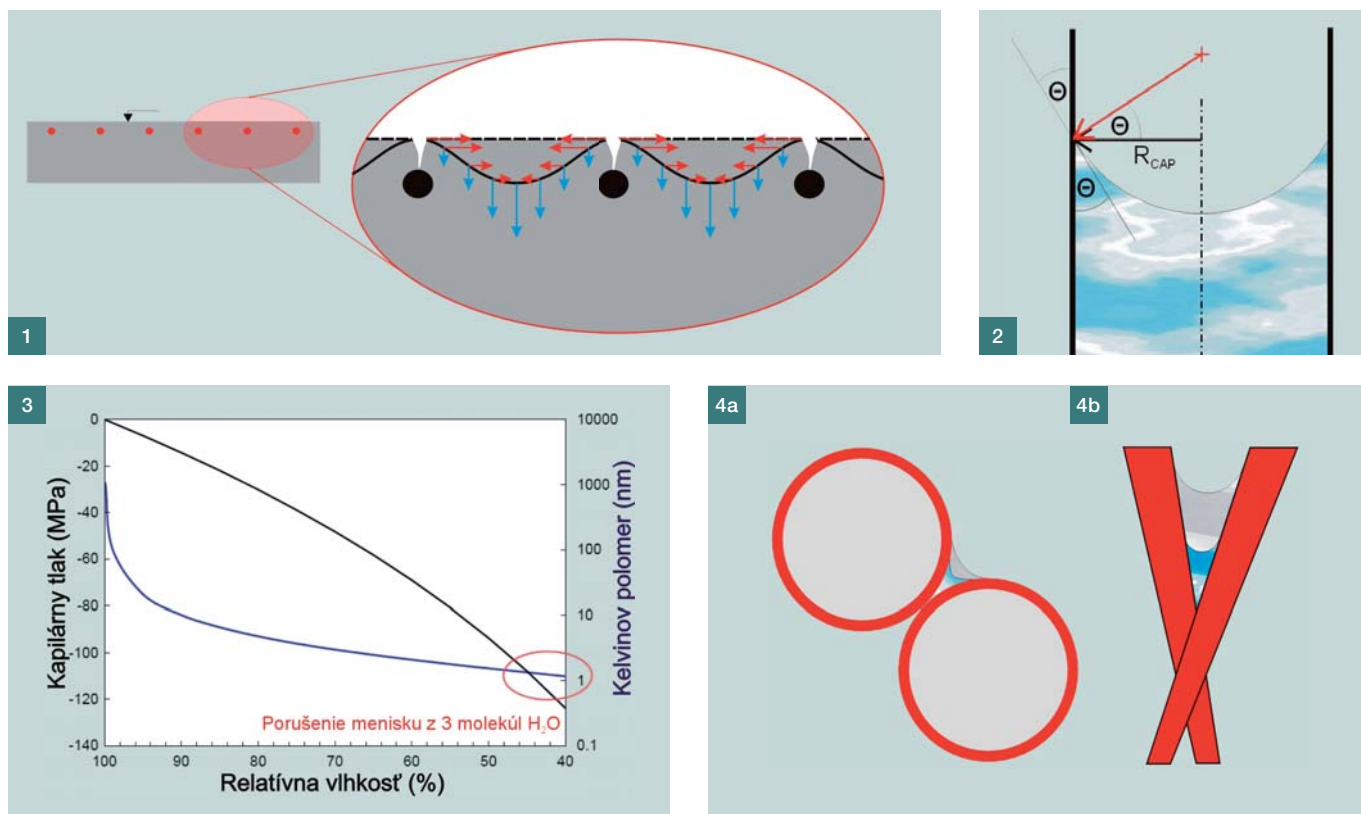
- samotným rozdielom tlakov vodných pár v betóne a v okolitom prostredí,
- teplotou betónu (funkcia teploty okolitého prostredia a intenzity slnečného žiarenia),
- rýchlosťou prúdenia vzduchu (znižuje relatívnu vlhkosť vzduchu nad povrchom betónu nízku).

Prejavom plastického zmršťovania je sadanie cementového tmelu (konsolidácia vplyvom straty vody) resp. betónu. Vonkajšie, voľným okom badateľné, prejavy plastického zmršťovania vo forme trhlín sa pôsobením rozdielneho sadania vyskytujú v ??? s menším sadaním. Typickým príkladom takejto oblasti sadania je betón nad vloženou betonárskou výstužou (obr. 1). Cementový tmel nad vloženou výstužou disponuje nižším potenciálom k sadaniu, lebo ho vo vertikálnej konsolidácii obmedzuje výstužný prvok. Vplyvom väčšieho absolútneho sadania okolitého tmelu sa vo formujúcich štruktúrach generujú horizontálne a šmykové napätia vyúsťujúce do vzniku trhliny v cementovom tmele práve nad výstužným prvkom.

Ako už bolo povedané, za konsolidáciou cementového tmelu stojí hlavne odparovanie vody z povrchu betónu. Týmto sa kapilárne póry cementového tmelu (pôvodne nasatované pórovým roztokom) vyprázdňujú – hladina roztoku v nich klesá. S vyprázdňovaním kapilárnych pórov súvisí vznik ťahových síl, ktoré vyvolávajú kolaps a konsolidáciu systému. S postupujúcou hydratáciou rastie odpor cementového tmelu (systém ďalej nekolabuje) voči ťahovým kapilárnym silám a vznikajú ťahové napätia. Vyvolané ťahové napätia PCAP popisuje vzťah 1 (rovnica podľa Young-Laplace), ktorý popisuje ich priamu závislosť od povrchového napätia pórového roztoku γ [N/m], stykového uhla pórového roztoku a steny kapiláry θ (uvažuje sa $\theta = 0$ rad; dokonalé zmáčanie) a nepriamu závislosť od polomeru kapilárneho póru r_{CAP} [m].

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

Ak vezmeme do úvahy, že ako prvé sa vyprázdňujú väčšie póry (nižšia energia potrebná na uvoľnenie vody) a že póry sa smerom do vnútra kompozitu (i v kompozite, obr. 3) zužujú, potom zohľadnenie oboch faktov vedie k záveru, že s pokračujúcim odparovaním vody sa v kapilárach generujú



Obr. 1 Napätia vznikajúce od nerovnomernej konsolidácie cementového tmelu ■ Fig. 1 Stresses developing due to non-uniform consolidation of cement paste

Obr. 2 Schéma menisku v kapiláre cementového tmelu ■ Fig. 2 Sketch of meniscus in capillary of cement paste

Obr. 3 Vyprázdňovanie pórov v začiatkoch tvoriacej sa pevnej štruktúry (A – cementové zrná; B – väzby hydratačných produktov) ■ Fig. 3 Emptying of pores during early state of formed solid structure (A – cement particles; B – hydration products' ties)

Obr. 4 Vzťah medzi relatívnou vlhkosťou – kapilárnym tlakom a polomerom pórov [4] ■ Fig. 4 Relation between relative humidity – capillary pressure and pores radius [4]

Obr. 5 Schématické vyjadrenie vzniku trhliny (A – vznik trhliny; B – zvýšenie pevnosti; C – zníženie napätia) ■ Fig. 5 Scheme of crack formation and development (A – crack formation; B – strength increasing; C – stress decreasing)

čoraz väčšie ťahové napätia (obr. 4) podľa vzťahu 1 resp. 2, kde RH je relatívna vlhkosť cementového tmelu [%], $V_{mol,f}$ je molový objem pórového roztoku ($V_{mol,f} \approx 18.10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$), R je univerzálna plynová konštanta ($R = 8,3114 \text{ J/mol/K}$) a T je absolútna teplota [K].

$$r_{CAP} = -2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta \cdot \frac{V_{mol,f}}{R \cdot T \cdot \ln(RH)} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

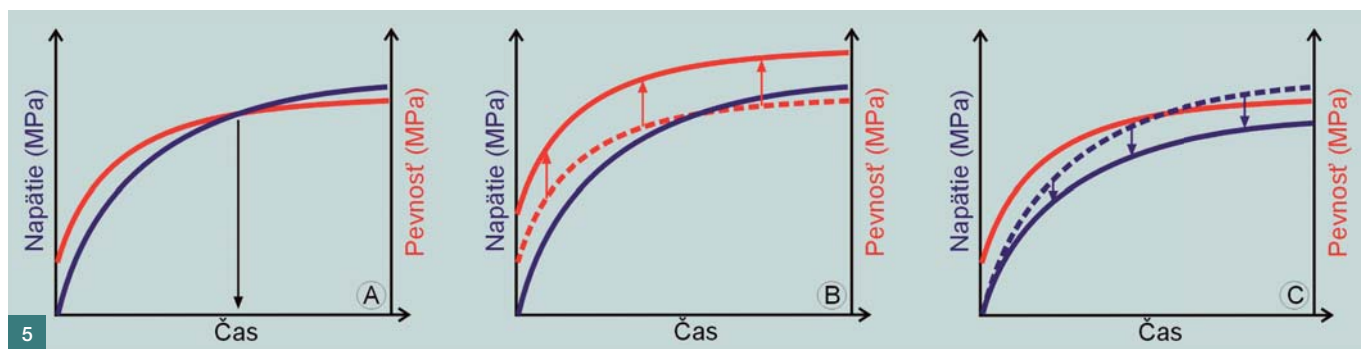
$$P_{CAP} = -\frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{r_{CAP}} = \frac{R \cdot T \cdot \ln(RH)}{V_{mol,f}} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Ťahové napätia, vo všeobecnosti, spôsobujú vznik trhlín, keďže pevnosť betónu v ťahu je veľmi nízka a materiál nie je schopný im odolávať. Ako to prezentuje obr. 4, už pri poklese relatívnej vlhkosti cementového tmelu na 95 % vznikajú,

podľa vzťahu 3, na rozhraní pórového roztoku a cementového gélu ťahové napätia o veľkosti približne 10 MPa.

Ak sa na problematiku vzniku trhlín pozeráme komplexne – existujú dve principiálne možnosti ako zabrániť ich vzniku (obr. 5). Prvým je zvýšenie pevnosti materiálu (napr. použitie syntetickej rozptýlenej výstuže) a druhým je zníženie napätia v materiálu (napr. zvýšenie dotvarovania alebo dokonalé ošetrovanie betónu).

V praxi sa stretávame s nevedenou kombináciou oboch princípov. To znamená k ošetrovaniu betónu (ak nejaké vôbec je) pribúda modifikácia betónu ešte pred jeho ukladaním a to vo forme prídavku rozptýlenej výstuže – v lepšom prípade jemnej výstuže na báze PE alebo PP, ktorá je určená predovšetkým k obmedzeniu prejavov plastického zmršťovania. Použitie týchto vlákien na daný účel sa



preukázalo ako vhodné, i keď, tak ako každá dostatočne nepochopená technológia, aj táto sa potýka s problémami a zavádzajúcimi informáciami, ktorých osvojenie môže viesť ku nedosiahnutiu požadovaného účinku alebo naopak zbytočnému predimenzovaniu (predraženiu) konštrukcie.

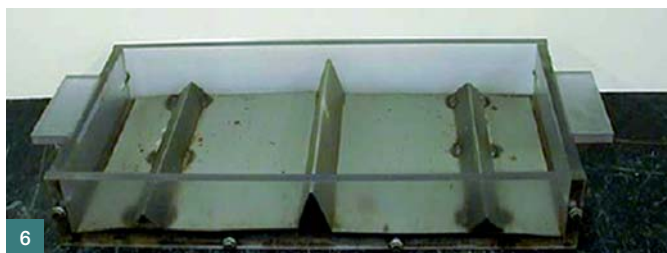
Polymérové vlákna (monofilamentné i fibrilované) sú dostatočne jemné (majú veľký štihlostný pomer i vysoký špecifický povrch) a disponujú vysokou pevnosťou v ťahu. To ich predurčuje na obmedzenie prejavov ťahových napätí vznikajúcich v počiatočných hodinách veku betónu tým, že svojou jemnosťou a hustotou výskytu v betóne dokážu v tuhnutom kompozite preniesť generované napätia a udržať kompozit vcelku bez diskontinuit materiálu. V nasledovnej práci bola overovaná účinnosť rôznych typov polymérových vlákien v rôznych dĺžkových variáciách a pomeroch dávkovania.

SKÚMANÉ VLÁKNA, POUŽITÉ MATERIÁLY A RECEPTÚRY

Vplyv polymérových vlákien na obmedzenie vzniku trhlin z titulu plastického zmrašťovania bol posudzovaný na celkovo šiestich sadách vzoriek (v každej tri skúšobné telesá) vyrobených s použitím PP vlákien a to vzhľadom na referenčný betón (PLAIN). Jednotlivé zmesi vzoriek boli vyrobené podľa receptúry uvedenej v tab. 1. Označenie M alebo F znamená „Monofilamentné“ alebo „Fibrilované“. V značení vlákien sa vyskytuje ich dĺžka [mm] a dávka [kg/m³].

Tab. 1 Použité receptúry ■ Tab. 1 Used mixture proportions

ZMES	W/C	CEMENT	VODA	JEMNÉ K.	HRUBÉ K.	VLÁKNA
(KG/M3)						
PLAIN						0,0000
M12,7-0,445						0,4450
M12,7-0,593						0,5933
M19,1-0,297	0,55	461,12	253,61	780,00	780,00	0,2966
M19,1-0,890						0,8899
F25,4-0,593						0,5933
F25,4-0,890						0,8899



Do betónu bol použitý bežný Portlandský cement (PC) Typ I (v súlade s ASTM C150) so špecifickým povrchom 370 m²/kg a zložením 50 % C₃S; 16 % C₂S; 12 % C₃A; 7 % C₄AF a 0,68 % Na₂O. Cement bol pred použitím odvážený a skladovaný v plastových kontajneroch pri teplote 22 ± 1 °C.

Vodný súčiniteľ bol zvolený na hodnotu 0,55. Vysoká dávka vody mala zabezpečiť štandardizovaný priebeh straty vlhkosti odparovaním, pokryť potrebu vody na hydratáciu cementu a zároveň aj zamedziť autogénnemu zmrašťovaniu betónu.

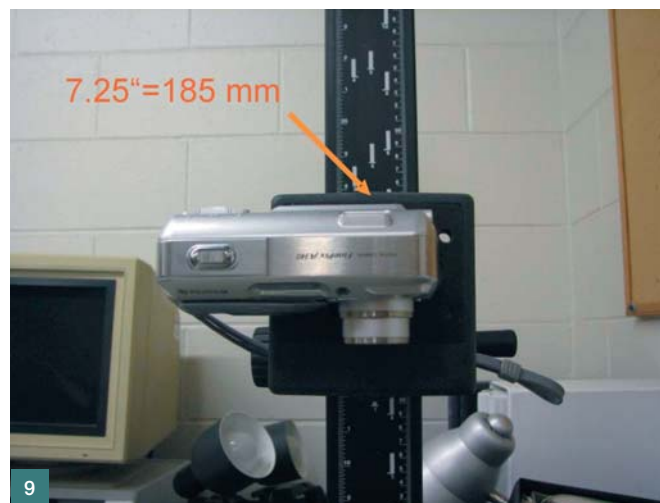
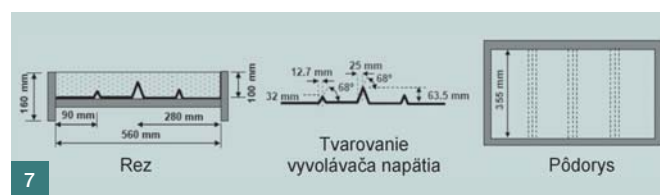
Použité bolo hrubé ťažené kamenivo (frakcia 4/8) a piesok s jemnosťou 3,13. Obe zložky plniva boli dávkované v pomere 30 % z objemu výslednej zmesi a celkovo ich objem predstavoval 60 % objemu ČB. Kamenivo bolo pred použitím vysušené pri teplote 143,34 °C po dobu 24 ± 1 h, následne bolo vychladené na teplotu 22 ± 3 °C, odvážené a až do použitia skladované v plastových kontajneroch.

MIEŠANIE

Miešanie ako významný činiteľ ovplyvňujúci výsledné vlastnosti betónu a obzvlášť vláknobetónu je často podceňované, čo môže viesť ku chybám merania spôsobených napríklad nevhodným množstvom vzduchu v betóne či neželanou aktiváciou hydratácie cementových zŕn (v prípade vysokých otáčok). Nakoľko sa jedná o veľmi citlivé merania, miešanie bolo striktno dodržiavané presne tak ako je uvedené.

Tab. 2 CRR, priemerná šírka trhliny a pravdepodobnosť výskytu trhlin so šírkou do 0,25 mm ■ Tab. 2 CRR, average crack width and probability of occurrence of cracks maximum 0,25 mm in width

ZMES	CRR (%)	VLÁKNA (KG/M3)	ŠÍRKA TRHLINY (MM)		PRAVDEP. TRHLÍN ŠÍRKY 0-0,25 MM (%)
			PRÍEMER.	MAX.	
PLAIN	0,00	0,0000	0,5958	2,9996	25,56
M12,7-0,445	90,70	0,4450	0,0554	0,8332	92,06
M12,7-0,593	93,38	0,5933	0,0394	0,8332	92,4
M19,1-0,297	64,20	0,2966	0,2133	1,9164	57,86
M19,1-0,890	90,46	0,8899	0,0568	0,8332	89,98
F25,4-0,593	44,66	0,5933	0,3297	2,7496	42,14
F25,4-0,890	63,86	0,8899	0,2153	1,3331	57,34



Ako prvé bolo do horizontálnej miešačky s núteným obehom nadávkované celé množstvo hrubého kameniva. Po začatí miešania sa v rýchлом slede (bez prestávok) nadávkovala 1/3 zámesovej vody, celá dávka jemného kameniva, druhá tretina vody, cement, zvyšná dávka vody a PP vlákna. Zmes sa nechala 3 min miešať, po čom nasledovala dvojinútová prestávka v miešaní a opätovné miešanie po dobu 3 min.

PRÍPRAVA VZORIEK

Po ukončení miešania bola zmes ručne ukladaná do troch pripravených foriem (obr. 6) opatrených odformovacím olejom. Po ich naplnení bol povrch betónu zrezaný ocelovou tyčou s (obdĺžnikovým prierezom) a upravený hladným.

POSTUP SKÚŠKY A OKRAJOVÉ PODMIENKY

Po 25 min od pridania vody do zmesi boli všetky tri skúšobné telesá umiestnené do klimatizačnej komory, kde boli vystavené nasledovnému prostrediu: teplota 36 ± 3 °C, relatívna vlhkosť 30 ± 10 % a vzduchu prúdiacemu rýchlosťou 24 ± 2 km/h tesne nad povrchom telies. U každého telesa bola v minútových intervaloch zaznamenávaná zmena hmotnosti (odparovanie vody) s presnosťou na 20 g vzhľadom na referenčnú nádobu s voľnou vodnou hladinou. Po 6 h boli odstavené ventilátory a zvyšných 18 h neboli telesá vystavené významnému prúdeniu vzduchu. Skúška bola ukončená po 24 ± 2 h, kedy boli vyhotovené digitálne snímky povrchu každého telesa (obr. 8 a 9) mapujúce oblasť nad „vyvoľávačom napätia“.

Snímky povrchu telies boli následne skompilované a zbavené nezaujímavých oblastí (bez trhlín). Takto upravené snímky predstavovali akési vstupné dáta pre analýzu pomocou software-u „ImagePro“ (obr. 10). Preň existuje makro, ktoré zo vstupných dát odseparuje len „absolútne čierne“ oblasti (trhliny). Naprieč celou kompozitnou snímkou trhliny sa následne preloží raster cca 300 čiar širokých 1 pixel a pomocou spomínaného makra sa zistí šírka trhliny (v pixloch) v každej línii rastra. Takáto analýza (cca 300 meraní)



Obr. 6 Forma na výrobu skúšobných telies ■ Fig. 6 Form for test specimen making

Obr. 7 Tvar formy pre skúšky plastického zmršťovania podľa ASTM C 1579-06

■ Fig. 7 Form design used for plastic shrinkage tests according to ASTM C 1579-06

Obr. 8 Digitálne snímanie povrchu vzorky ■ Fig. 8 Digital scanning of specimen's surface

Obr. 9 Konštantná výška snímkovania ■ Fig. 9 Constant height of scanning

Obr. 10 Metodické kroky analýzy trhliny plastického zmršťovania ■ Fig. 10 Methodical operations which the analysis of plastic shrinkage crack consists of

Obr. 11 CRR a podiel trhlín šírky 0 až 0,25 mm ■ Fig. 11 CRR and portion of cracks of 0 až 0,25 mm in widths

Obr. 12 Priemerné a maximálne šírky trhlín ■ Fig. 12 Average and maximum crack widths

poskytuje štatisticky podložené informácie o šírkach trhlín v určitom rastru a ich variabilite [5].

Výsledkom analýzy šírky trhlín je distribučná funkcia pravdepodobnosti výskytu trhlín s určitou šírkou (náso- bok 1 pixelu) a kumulatívna funkcia pravdepodobnosti toho istého javu, ako aj koeficient redukcie vzniku trhlín (Crack Reducing Ratio) vypočítaný podľa vzťahu (4) [2], kde $w_{MOD,C}$ je priemerná šírka trhlín v betóne s upraveným zložením a $w_{REF,C}$ je priemerná šírka trhlín v referenčnom betóne.

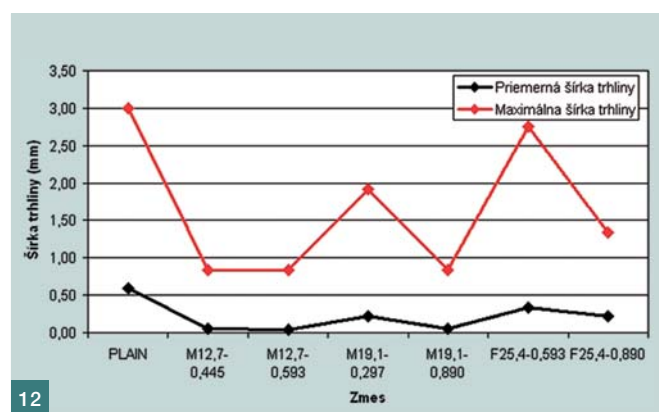
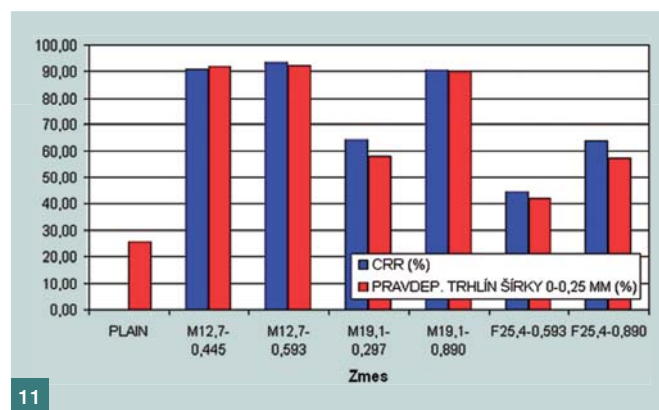
$$CRR = \left(1 - \frac{\overline{w}_{MOD,C}}{\overline{w}_{REF,C}} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

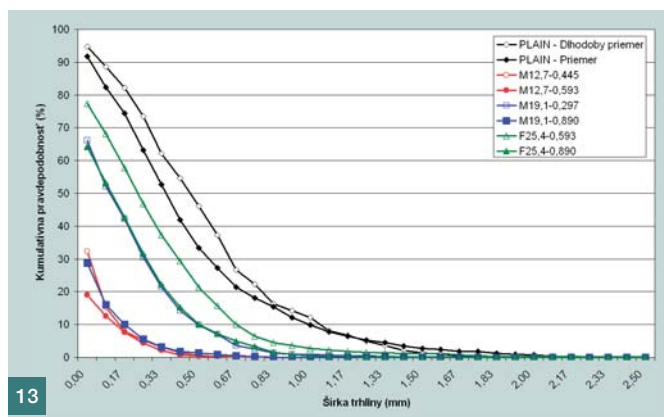
VÝSLEDKY

Pri zisťovaní vplyvu jemných PP vlákien na elimináciu plastického zmršťovania pomocou metódy podľa ASTM C 1579 sme získali súbor výsledkov, ktorý je stručne prezentovaný v tab. 2 a obrázkoch 11 až 15.

Tab. 2 pomocou „CRR“ jasne dokazuje, že ako najúčinnnejšie (na obmedzenie prejavov plastického zmršťovania) sú kratšie vlákna – napríklad M12,7 pri dávke $0,445 \text{ kg/m}^3$ sú rovnako účinné ako vlákna M19,1 pri dvojnásobnej dávke. Z tabuľky je podľa CRR zrejma aj nižšia účinnosť fibrilovaných vlákien súvisiaca do určitej miery aj s ich menším špecifickým povrchom i tendenciou zhlukovať sa, a tým nedosiahnuť rovnomernú dispergáciu.

Druhým veľmi dôležitým parametrom je pravdepodobnosť výskytu trhlín šírky do 0,25 mm, čo sa vo všeobecnosti považuje za krajnú šírku trhlín, kedy sa stráca možnosť ich uzavretia vlastnou hydratáciou doposiaľ nezhydratovaných zŕn cementu (hrubšie mleté cementy). Nie je prekvapivé, že údaj výrazne koreluje s CRR (obr. 11), no je dôležité si všimnúť vysoké hodnoty, ktoré boli dosiahnuté pri dávkach krátkych „M“ vlákien na hranici 2/3 štandardne výrobcom odporúčanej dávky.



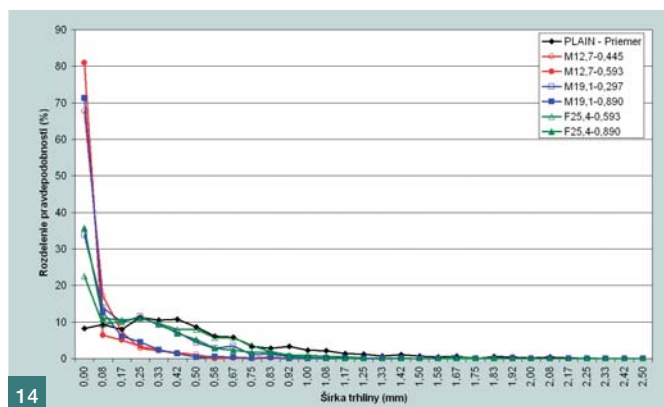


Obr. 13 Kumulatívna funkcia pravdepodobnosti vzniku trhliny na analyzovanom úseku

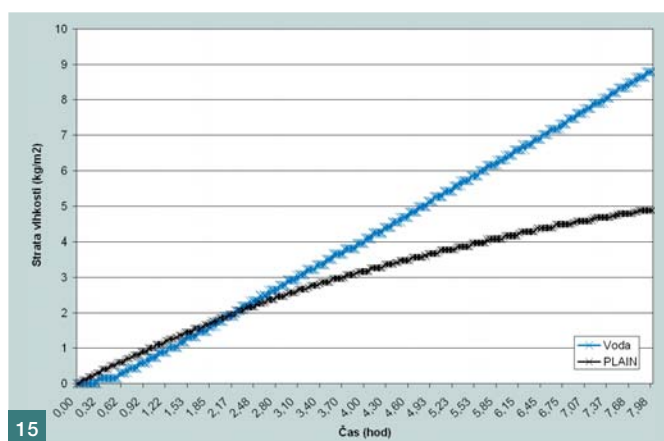
Fig. 13 Cumulative probability function of crack formation in analysed section

Obr. 14 Funkcia pravdepodobnosti vzniku trhliny určitej šírky na analyzovanom úseku

Obr. 15 Priebeh straty vody (odparovanie)



14



15

Obrázok 12 (v nadväznosti na obr. 11) dokumentuje súvislosť účinnosti vlákien (CRR) a maximálnej šírky trhliny. So zvyšujúcou sa účinnosťou vlákien sa prudko znižuje maximálna šírka trhliny, a tým sa prudko znižuje i pravdepodobnosť výskytu trhlín v určitom intervale šírky.

Z obr. 13 je možné vyčítať v akom percentuálnom pomere sa vyskytli pri skúškach trhliny napr. užšie ako 1 mm, čo môže byť zaujímavý údaj pri návrhu receptúry betónu, tak aby bola dosiahnutá potrebná životnosť konštrukcie. Všetky vzorky sa správajú podľa očakávaní, čo je však zaujímavé, prejav účinku vlákien badateľný pri 5% kvantile je veľmi výrazný. V tomto prípade je medzi vzorkou PLAIN a M12,7 rozdiel v šírke trhliny cca 1 mm. Z obrázka je zrejma aj malá účinnosť fibrilovaných vlákien, keďže pre dosiahnutie rovnakého rozloženia pravdepodobnosti vzniku trhliny, ako mala vzorka M19,1-0,297, je potrebné použiť zhruba trojnásobnú dávku fibrilovaných vlákien.

V obr. 14 sú zobrazené pravdepodobnosti výskytu trhlín jednotlivých šírok. Všetky vzorky (okrem referenčnej „PLAIN“) vykazujú pri začiatku súradnicovej sústavy strmé sklony, čo

Fig. 15 Curve of water loss (evaporation)

Literatúra:

- [1] Briatka P., Ševčík P.: Hodnotenie vplyvu rozptýlenej výstuže na vlastnosti betónu, Beton TKS 2/2009, Praha, 2009, str. 28–35
- [2] ASTM C 1579-06 Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (Using a steel form insert)
- [3] ASTM C 192-06 Standard practise for making and curing concrete test specimens in the laboratory
- [4] Lura P.: Shrinkage Mechanisms, Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [5] Qi C., Weiss W. J. and Olek J.: The Statistical Significance of the Restrained Slab Test to Quantify Plastic Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete, ASTM Int. J. 2 (7), 2005
- [6] Uno P. J.: Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas, Technical paper, ACI Materials Journal, July-August, ACI, USA, 1998, pp. 365–375
- [7] Almusallam A. A.: Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete, Cement & Concrete Composites, 23, USA, 2001, pp. 353-361
- [8] Wylie K.: Cold-Weather Concreting, NMRMCAA meeting in Albuquerque, USA, November 7, 2007

len dokumentuje účinnosť vlákien v tom zmysle, že v betóne nevznikajú nijaké trhliny, alebo ak vznikajú, tak sú takmer nepozorovateľné.

Obr. 15 zachytáva priebeh odparovania vody z referenčnej betónovej vzorky (PLAIN) a porovnávacej vzorky. Ako porovnávacia vzorka slúžila obdĺžniková nádoba s voľnou vodnou hladinou, tvaru a rozmerov podobných ako mali skúšobné telesá. Mierny rozdiel v ploche vystavenej odparovaniu bol odstránený jednoduchým prepočtom odparovania vody na jednotku plochy. V obr. 15 nie sú zobrazené krivky straty vody u zmesí s vláknami, no tieto nemajú vplyv na rýchlosť odparovania a môžeme teda predpokladať ich chovanie veľmi podobné so vzorkou „PLAIN“. Ďalej môžeme pozorovať očakávané lineárne odparovanie vody z porovnávacej vzorky a nelineárne (predpokladané) odparovanie vody zo vzorky „PLAIN“. Do doby cca. 180 min vidíme vyššie tempo odparovania vody z betónovej vzorky „PLAIN“. Tento fakt možno pripísať vysokej hydratačnej aktivite cementového tmelu (exotermický proces), čím k rýchlejšiemu odparovaniu prispievala aj vyššia teplota vzorky. Neskôr, po odpa-

rení tzv. „vypotenej vody“ sa oblasť odparovania presúva do štruktúry cementového tmelu a výrazne sa znižuje tempo straty vlhkosti.

Absolútne tempo odparovania vody $1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$ však nekorrešponduje s očakávanými hodnotami ($2,05 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$) stanovenými približným výpočtom na základe okrajových podmienok skúšky. Strate vlhkosti a jej matematickému vyjadreniu by sa mala venovať pozornosť v nasledovnej práci týkajúcej sa ošetrovania betónu a eliminácie objemových zmien (vrátane plastického zmrašťovania).

ZÁVER

Z výsledkov skúšok vyplýva jednoznačná účinnosť vlákien v obmedzení vzniku trhlin v betóne počas plastického zmrašťovania. Predpoklady majoritného vplyvu dávky a jemnosti vlákien na efektívnosť ich pôsobenia sa potvrdili. Presnejšie určenie závislostí si však vyžaduje pokračovanie vo výskume. Z doterajších zistení vyplýva, že (výrobcami polymérových vlákien) štandardne odporúčaná minimálna dávka $0,9 \text{ kg}/\text{m}^3$ je hodnota, ktorá bezpečne postačuje na zamedzenie vzniku trhlin z dôvodu plastického zmrašťovania.

Dokonca sa dá predpokladať, že dostatočná dávka polymérových vlákien pre bežnú letnú betonáž konštrukcií zo štandardných betónov sa môže pohybovať v intervale $0,6$ až $0,7 \text{ kg}/\text{m}^3$. Odhadovaný interval, pre zatiaľ, nie je laboratórne overený. Odvodený je na základe účinnosti monofilamentných vlákien dĺžky $12,7 \text{ mm}$ (tab. 2) a zohľadnenia veľmi nepriaznivých okrajových podmienok skúšky ($36 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, relatívna vlhkosť $30 \pm 10 \%$ a rýchlosť vetra $24 \pm 2 \text{ km/h}$), ktoré sa v našich podmienkach vyskytujú, ale v menších ročných početnostiach.

Počas skúšky sa zistili výrazné odchýlky v tempe straty vody z betónu medzi skutočne nameranými a predpokladanými hodnotami (cca 100%). Vyparovanie vody je elementárnou hnacou silou zmrašťovania v plastickom a neskôr i zatvrdnutom stave betónu. Na túto prácu bude nadväzovať práca so zameraním sa na stratu vody z betónu, jeho metódy jeho ošetrovania.

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

