

betónu použitím polypropylénových vlákien (ďalej len PP vlákna), samotné skúšky boli vykonané v rámci výskumu oddelenia stavebných materiálov na Stavebnej fakulte Univerzity Purdue,

- mechanické vlastnosti zatvrdnutého VB úzko späté napríklad s typom, tvarom, rozmermi, množstvom a dispergovaním vlákien počas miešania.

V skúškach boli použité ocelové a PP vlákna. Pre jednotlivé vlákna bolo zavedené značenie - viz obr. 1.

KONZISTENCIA

Konzistencia ČB predstavuje označenie (stupeň) získaný na základe merania určitej veličiny (podľa jednej zo štyroch metód jej stanovenia – pre bežné betóny). V tejto práci sú použité časy merané metódou Vebe [5]. Metódou Vebe sa meria čas vibrácie potrebný na úplné pretvorenie ČB tvare zrezaného kužela na valec (ohraničený nádobou a zhora sklenenou doskou) priemeru 240 mm. Vibrácia je vnášaná prostredníctvom vibračného stolíka.

Keďže výsledky skúšok boli zbierané z viacerých zákaziek počas dlhšieho obdobia, získané konzistencie referenčného

Obr. 1 Značenie vlákien

Obr. 1 Značenie vlákien

Obr. 1 Ocelové vlákna a konzistencie ČB

Obr. 1 Ocelové vlákna a konzistencie ČB

Obr. 2 PP vlákna a konzistencie ČB

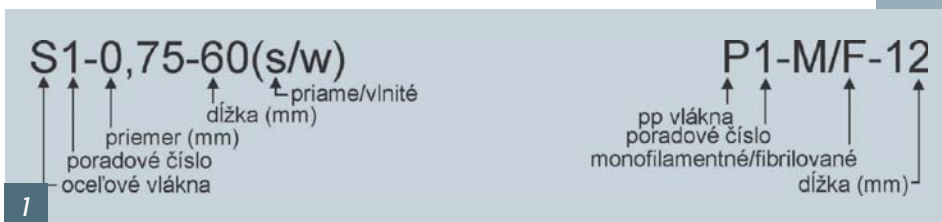
Obr. 2 PP vlákna a konzistencie ČB

Obr. 3 Vplyv dĺžky PP vlákien na zmenu konzistencie pri dávke 0,9 kg/m³

Obr. 3 Vplyv dĺžky PP vlákien na zmenu konzistencie pri dávke 0,9 kg/m³

Obr. 4 Nelineárny vplyv dávky vlákien na konzistenciu

Obr. 4 Nelineárny vplyv dávky vlákien na konzistenciu



betónu neboli rovnaké a z toho dôvodu zavádzame pojem relatívna zmena konzistencie vyjadrený podľa vzťahu 1, kde ΔV je zmena konzistencie, t_F je čas Vebe pre betón s vlákнами a t_R je čas Vebe pre betón referenčný.

$$\Delta V = \frac{t_F - t_R}{t_R} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Čo ovplyvňuje konzistenciu?

Zloženie betónu

Zloženie betónu, teda jeho receptúra (hlavne zrnitosť kameniva, dávka a jem-

nosť cementu, dávka vody, prísad či prímies) prvotne ovplyvňuje konzistenciu. O tejto problematike sa však už toho veľa popísalo a nie je účelom tejto práce ďalej to rozvádzať. Pre zisťovanie vplyvu vlákien na konzistenciu sme preto vychádzali z jednej receptúry ČB (Tab. 1) s vodným súčiniteľom (w/c) rovným 0,55.

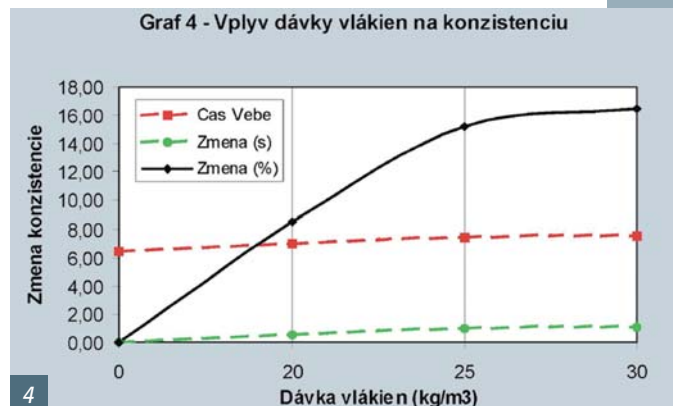
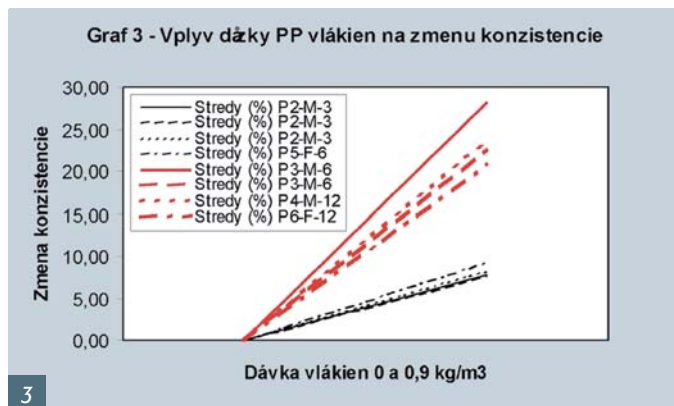
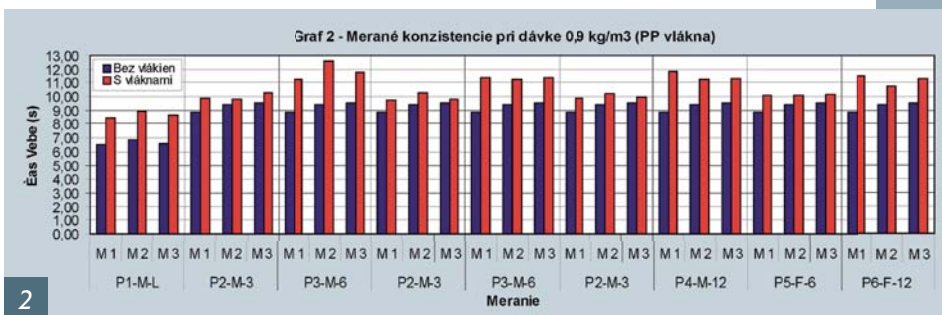
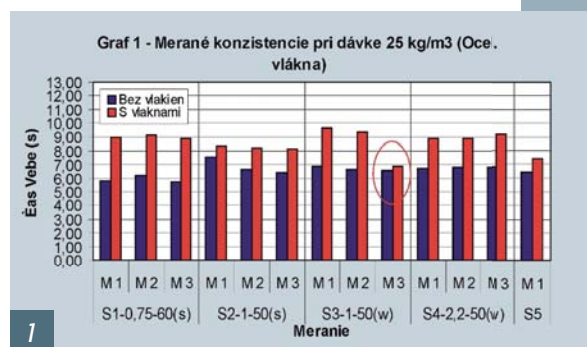
Prítomnosť vlákien

Nesporný vplyv pridávania vlákien do betónu na jeho konzistenciu a teda spracovateľnosť je zobrazený v grafoch na obrázkoch 1 a 2.

Tab. 1 Použitá receptúra

Tab. 1 Použitá receptúra

Zložka	Dávka [kg/m ³]
Kamenivo fr. 0/4	770,0
Kamenivo fr. 0/4	320,0
Kamenivo fr. 0/4	740,0
CEM I 42,5R	350,0
Voda	192,5



Štíhlosť vlákien (L/d)

Štíhlosť vlákien (L/d) má vplyv na zmenu konzistenciu ČB po ich pridaní. So zvyšujúcou sa štíhlosťou vlákien pri ich konštantnej dávke sa znižuje spracovateľnosť ČB (zvyšuje sa čas Vebe) [6]. Vlákno-betón sa teda stáva tuhším, čo má dopad na segregáciu zrn kameniva a „potenie betónu“ počas zhutňovania. Táto skutočnosť bola overená na skúškach konzistencie pre VB s dávkou oceľových vlákien 25 kg/m³. Vyhodnotením výsledkov sa preukázalo, že použitím vlákien S1-0,75-60(s) ($L/d = 80$) došlo ku $\Delta V = 51\%$ a použitím vlákien S2-1-50(s) ($L/d = 50$) $\Delta V = 21\%$, čo potvrdilo uvádzanú súvislosť medzi štíhlosťou vlákien a konzistenciou VB. Obdobnú závislosť konzistencie od dĺžky vlákien (a teda L/d) sme získali aj pri skúškach vlákien v dávkach 0,9 kg/m³ radu P-M-3, ktoré vyvolali $\Delta V = 8\%$ a radu P-M-6, ktoré vyvolali $\Delta V = 22\%$ (obr. 3).

Dávka vlákien

Dávka vlákien má nelineárny vplyv na zmenu konzistencie – ako to prezentuje graf na obrázku 4, ktorý vychádza zo skúšok vlákien S5 pri $w/c = 0,53$, po zvážení čoho je možné predpokladať mierne vyšší vplyv na zmenu konzistencie, ak by boli skúšky vykonané na ČB so štandardne používaným $w/c = 0,55$.

Tvar vlákien

Pod pojmom „tvar vlákien“ sa rozumie priečny rez ale najmä tvar pozdĺžnej osi

vlákien. Závislosť bola zisťovaná na výsledkoch skúšok priamych vlákien S2-1-50(s) a vlnitých vlákien S3-1-50(w) a S4-2,2-50(w), všetky pri dávkach 25 kg/m³. Porovnaním výsledkov relatívnych zmien konzistencie ΔV sme dospeli k záveru, že vlnitý tvar vlákien spôsobuje o cca. 15 % vyššie ΔV ako priamy tvar. V tomto bode však boli porovnávané priame vlákna s vlnitými, ktoré ale mali rôzne štíhlosti (L/d), a preto je dôležité podotknúť, že štíhlosť vlnitých vlákien spôsobila rozdiel ΔV , medzi týmito dvoma vzorkami, vo výške 8 %.

Dôsledky zmeny konzistencie pre stavebnú prax

Ako bolo preukázané, pridávanie vlákien do betónov mení ich konzistenciu (spracovateľnosť). Podľa STN EN 206-1 môže byť požadovaná konzistencia betónu vyjadrená stupňom konzistencie, alebo presne určenou hodnotou (podľa jednej z metód). Tu je dôležité uvedomiť si, že skúšky konzistencie sa majú vykonávať v dobe ukladania betónu, alebo v dobe jeho dodania, ak sa jedná o transportbetón. Ak sú však do betónu pridané vlákna (zväčša až tesne pred ukladáním), betón sa stáva tuhším, čo v závislosti od vyššie uvedených parametrov vlákien môže viesť ku zmene stupňa konzistencie alebo nedodržaniu určenej hodnoty konzistencie vrátane tolerančného intervalu obzvlášť vtedy, keď receptúra betónu nebola navrhovaná s ohľadom na prítomnosť vlákien (Tab.2 a 3).

Analyzovaný súbor dát umožňuje formulovať jedine všeobecné doporučenie pre výrobu vlákno-betónu. Pri návrhu receptúry betónu by sa mali tým dôslednejšie zohľadňovať zmeny konzistencie vlákna, čím je výsledná konzistencia betónu mäkkšia. To znamená: návrh receptúry samotného betónu by mal počítať s tým, že vlákna zvýšia čas Vebe. Špeciálne pri V4 a V3 (obzvlášť ak je čas Vebe blízky hornej hranici intervalu) môže po pridaní vlákien ľahko dôjsť ku takej zmene konzistencie, ktorá bude znamenať preklasifikovanie konzistencie, a tým zabudovanie iného betónu, ako bol špecifikovaný. Keby takýto betón aj bol prevzatý a zabudovaný, určite by tým bola poznačená technológia spracovania vlákno-betónu veľmi citlivá na konzistenciu, čím by pravdepodobne došlo aj k zmene výsledných parametrov konštrukcie.

PLASTICKÉ ZMRAŠŤOVANIE

Plastické zmršťovanie je jav súvisiaci s tuhnutím a tvrdnutím betónu resp. cementového tmelu, a teda s hydratáciou, kedy dochádza k významnému odparovaniu vody. Najskôr sa odparuje „vypotená“ voda z povrchu betónu (Phase I, obr. 5), čo v zásade nespôsobuje problémy. Keď však nastane stav, že povrchová voda už nie je k dispozícii, oblasť odparovania sa začne presúvať nižšie do štruktúry betónu (prechod z Phase II do Phase III), čím vyvoláva kapilárne napätia pôsobiace v kapilárnych meniskoch na cementové zrná záporným kapilárnym tlakom podľa vzťahu 2 (Young-Laplace). Z tohto vzťahu je jasné, že vznikajúce ťahové napätia sú priamo úmerné povrchovému napätiu pórového roztoku (γ) a nepriamo úmerné zmršťujúcim sa polomerom (r) meniskov.

$$P_{CAP} = \frac{-2\gamma \cdot \cos\theta}{r} \quad (2)$$

S formovaním meniskov počas odparovania vody z cementového tmelu súvisí aj konsolidácia cementových zrn a tzv. sadanie betónu, čo môže vyvolať lokálne extrémne ťahové napätia v miestach, kde je tomuto sadaniu bránené (napr. oblasť nad vloženou betonárskou výstužou). Na týchto princípoch je založený postup hodnotenia plastického zmršťovania podľa ASTM C 1579 (bližšie popísaný neskôr).

Uvedená metodika bola použitá aj

Tab. 2 Stupne konzistencie [21]

Tab. 2 Stupne konzistencie [21]

Stupeň	Vebe čas [s]
V0	≥ 31
V1	30 – 21
V2	20 – 11
V3	10 – 6
V4	5 – 3

Tab. 3 Tolerancie hodnôt konzistencie [21]

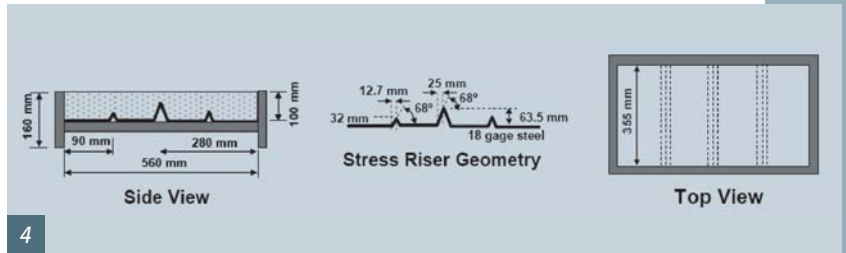
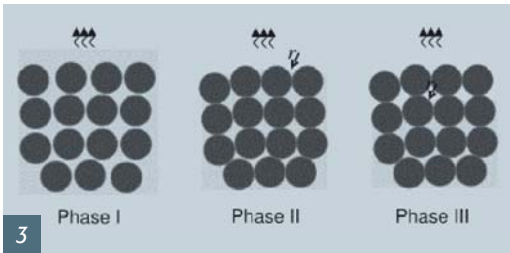
Tab. 3 Tolerancie hodnôt konzistencie [21]

Určená hodnota [s]	≥ 11	10 - 6	≤ 5
Tolerancia [s]	± 3	± 2	± 1

Tab. 4 Použité receptúry

Tab. 4 Použité receptúry

Zmes [mm·kg/m ³]	Mixture [in·lbs/ft ³]	W/C	Cement	Voda	Jemné k.	Hrubé k.	Vlákna
PLAIN	PLAIN		[kg/m ³]				
M12,7-0,455	M0,5"-0,75	0,55	461,12	253,61	780,00	780,00	0,0000
M12,7-0,593	M0,5"-1,00						0,4450
M19,1-0,297	M0,75"-0,50						0,4450
M19,1-0,890	M0,75"-1,50						0,4450
M25,4-0,593	M1,0"-1,50						0,4450
M25,4-0,890	M1,0"-1,50						0,4450
							0,4450



v tomto prípade hodnotenia účinku pridávania polymérových vlákien do betónu na elimináciu plastického zmršťovania.

Skúmané vlákna a použité receptúry

Vplyv polymérových vlákien na obmedzenie plastického zmršťovania bol posudzovaný na celkovo šesti sadách vzoriek vyrobených s použitím PP vlákien a to vzhľadom na referenčný betón (PLAIN). Jednotlivé zmesi vzoriek boli vyrobené podľa receptúry uvedenej v Tab. 4, kde označenie M alebo F znamená „Monofilamentné“ alebo „Fibrilované“ nasledované dĺžkou vlákien [mm] a ich dávkou v kg/m³. V druhom stĺpci je značenie v anglosaských jednotkách (Tab. 4).

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.

Použité boli hrubé ťažené kamenivo (frakcia 4/8) a piesok s jemnosťou 3,13. Obe zložky plniva boli dávkované v pomere 30 % z objemu výslednej zámesi a celkovo ich objem predstavoval 60 % objemu ČB. Kamenivo bolo pred použitím vysušené pri teplote 143 °C (290 °F) 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 vláknotbetónu je často podceňované, čo môže viesť ku chybám merania spôsobených napr. nevhodným množstvom vzduchu v betóne či neželanou aktiváciou hydratácie cementových zŕn (v prípade vysokých otáčok). Nakoľko sa jedná o veľmi citlivé merania, miešanie bolo striktné dodržované presne tak, ako je uvedené.

Ako prvé bolo do horizontálnej miešačky s núteným obehom nadávkované celé množstvo hrubého kameniva. Po začatí miešania sa v rýchlom 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 dvojminútová 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 oceľovou tyčou s (obdĺžnikovým prierezom) a upravený hladením.

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 tele-

Obr. 5 Fázy odparovania vody [18]

Obr. 5 Fázy odparovania vody [18]

Obr. 6 Tvar formy podľa ASTM C 1579

Obr. 6 Tvar formy podľa ASTM C 1579

sa mapujúce oblasti nad „stress riser-om (obr. 6)“. Snímky boli následne skompilované a analyzované pomocou softwaru „ImagePro“, ktorý umožňuje približne tri sto meraní pre každé teleso, čím poskytuje štatisticky podložené informácie o šírkach trhlín v určitom rastru a ich variabilite [19].

Výsledkom analýzy šírky trhlín je distribučná funkcia pravdepodobnosti výskytu trhlín s určitou šírkou (násobok 1 pixelu) a kumulatívna funkcia pravdepodobnosti toho istého javu, ako aj koeficient obmedzenia trhlín (Crack Reducing Ratio) vypočítané podľa vzťahu 3 [15].

$$CRR = \left[1 - \frac{\text{Average Crack Width of Modified Concrete}}{\text{Average Crack Width of Reference Concrete}} \right] \cdot 100\% \quad [3]$$

Získané výsledky a ich interpretácia

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. 5 a grafoch na obrázkoch 7 až 11.

Tab. 5 pomocou „CRR“ jasne dokazuje, že ako najúčinnnejšie (na tento účel použitia) sú kratšie vlákna, napr. M12,7

Tab. 5 CRR, priemerná šírka trhliny a pravdepodobnosť výskytu trhlín do šírky 0,25 mm

Tab. 5 CRR, priemerná šírka trhliny a pravdepodobnosť výskytu trhlín do šírky 0,25 mm

Zmes [mm·kg/m ³]	Mixture [in·lbs/ft ³]	CRR [%]	Vlákna [kg/m ³]	Šírka trhliny [mm]		P, 0–0,25 mm [%]
				Priemer.	Max.	
PLAIN	PLAIN	0,00	0,0000	0,5958	2,9996	25,56
M12,7–0,455	MO,5"–0,75	90,70	0,4450	0,0554	0,8332	92,06
M12,7–0,593	MO,5"–1,00	93,38	0,4450	0,0394	0,8332	92,40
M19,1–0,297	MO,75"–0,50	64,20	0,4450	0,2133	1,9164	57,86
M19,1–0,890	MO,75"–1,50	90,46	0,4450	0,0568	0,8332	89,98
M25,4–0,593	M1,0"–1,50	44,66	0,4450	0,3297	2,7496	42,14
M25,4–0,890	M1,0"–1,50	63,86	0,4450	0,2153	1,3331	57,34

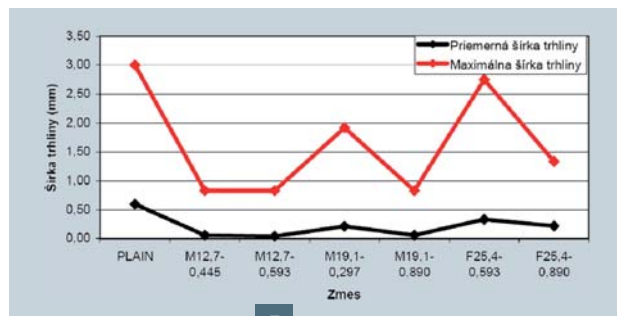
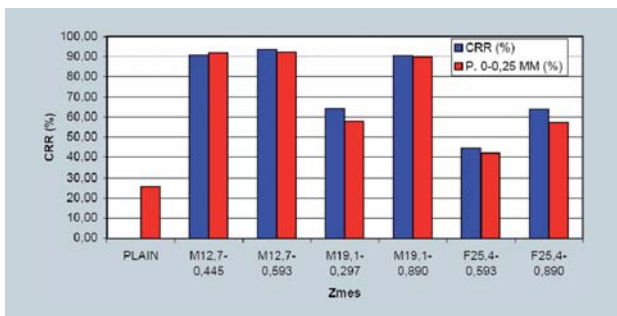
(0,5 in) pri dávke 0,445 kg/m³ (0,75 lb/yd³) sú rovnako účinné ako vlákna M19,1 (0,75 in) pri dvojnásobnej dávke. Z tabuľky je podľa CRR zrejmé aj nižšia účinnosť fibrilovaných vlákien súvisaca do určitej miery aj s ich tendenciou zhlukovať sa, a tým nedosiahnuť rovnomernú dispergáciu. Druhým veľmi dôležitým parametrom je pravdepodobnosť výskytu trhlín šírky do 0,25 mm, čo sa vo všeobecnosti považuje za krajinú šírku trhlín, kedy sa stráca možnosť ich uzavretia vlastnou hydratáciou doposiaľ nezhydratovaných zŕn cementu. Nie je prekvapivé, že údaj výrazne koreluje s CRR, no je dôležité si všimnúť vysoké hodnoty, ktoré boli dosiahnuté pri dávkach krátkych „M“ vlákien na hranici 2/3 štandardne výrobcom odporúčanej dávky (Obr. 7 a 8).

Z grafu na obr. 9 je možné vyčí-

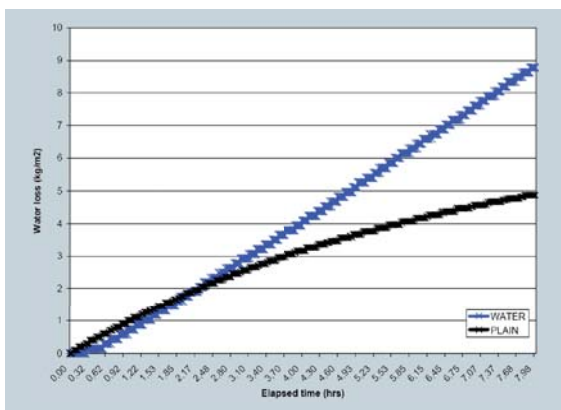
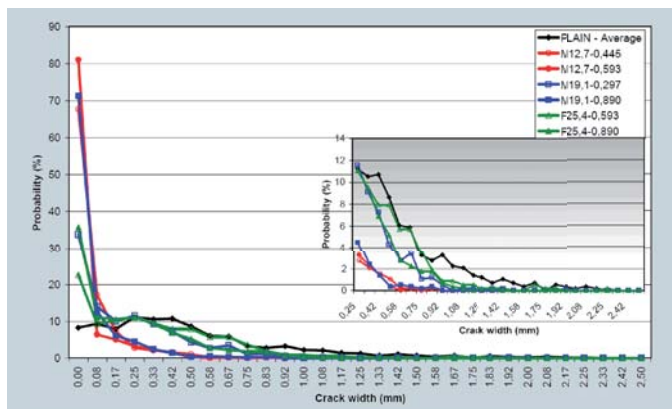
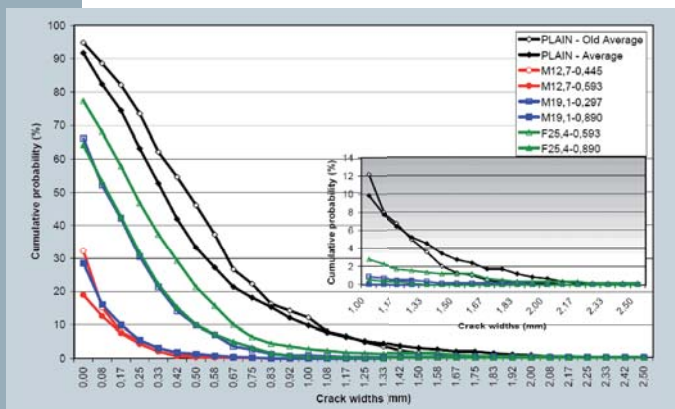
tať, v akom percentuálnom pomere sa vyskytli pri skúškach trhliny napr. užšie ako 1 mm, čo môže byť zaujímavý údaj pri návrhu receptúry betónu tak, aby bola dosiahnutá potrebná životnosť konštrukcie. Všetky vzorky sa správali podľa očakávaní, čo je však zaujímavé, prejav účinku vlákien badateľný pri 5% kvantile je veľmi výrazný. V tomto prípade je medzi vzorkou PLAIN a M12,7 rozdiel v šírke trhlín cca. 1 mm (Obr. 9).

V grafe na obr. 10 sú zobrazené pravdepodobnosti výskytu trhlín jednotlivých šírok. Všetky vzorky (okrem referenčnej „PLAIN“) vykazujú pri začiatku súradnicovej sústavy strmé sklony, čo len dokumentuje účinnosť vlákien v tom zmysle, že v betóne nevznikajú nijaké trhliny, alebo ak vznikajú, tak sú takmer nepozorovateľné (Obr. 10).

Graf na obr. 11 zobrazuje priebeh odparovania vody z referenčnej betónovej vzorky (PLAIN) a etalónu pre porovnanie odparovania. Ako etalónová vzorka slúžila obdĺžniková nádoba s vodou, tvaru a rozmerov podobných, ako mali skúšobné telesá. Mierny rozdiel v ploche vystavenej odparovaniu bol odstránený jednoduchým prepočtom odparovania vody na jednotku plochy. V grafe 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 etalónovej vzorky a nelineárne (predpokladané) odparovanie vody zo vzorky „PLAIN“, jednoducho vysvetlené v obr. 2. Do doby cca. 180 min



3



Obr. 7 CRR a podiel trhlín šírky do 0,25 mm

Obr. 8 Priemerné a maximálne šírky trhlín

Obr. 9 Kumulatívna funkcia pravdepodobnosti vzniku trhlín určitéj šírky na analyzovanom úseku

Obr. 10 Funkcia rozdelenia pravdepodobnosti vzniku trhlín určitéj šírky na analyzovanom úseku

Obr. 11 Priebeh odparovania vody z referenčnej betónovej vzorky (PLAIN) a etalónu pre porovnanie odparovania.

Obr. 12 Mierny rozdiel v ploche vystavenej odparovaniu bol odstránený jednoduchým prepočtom odparovania vody na jednotku plochy.

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 (Obr. 11).

**MECHANICKÉ VLASTNOSTI
ZATVRDNUTÉHO VLÁKNOBETÓNU**

Vzhľadom na účel používania vlákien sa pod týmto pojmom rozumie reziduálna pevnosť v ťahu za ohybu f_R (po vzniku trhliny v celom priereze) pri jednotlivých deformačných stupňoch tzv. CMOD (Crack Mouth Opening Displacement). Zintegrováním výsledného spojitého pracovného diagramu (obr. 12) sekundárne získavame obraz o schopnosti telesa absorbovať zaťažovaciu energiu, čo vyjadruje tuhosť kompozitu [6] (Obr. 12 a 13).

Zvyšková pevnosť v ťahu za ohybu f_R sa skúša na vzorke 12 skúšobných telies o rozmeroch 150 x 550 x 150 mm s 25 mm hlbokou drážkou vyrezanou v strede rozpätia. Skúšobné teleso sa plynulo zaťažuje podľa zaťažovacej schémy (obr. 13) a zaznamenáva sa napätie σ [7] spolu s jeho deformáciou δ ($\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04$), prípadne priamo roztvorením trhliny (CMOD). V prípade, že sa pri skúške zaznamenáva zaťažovacia sila F_E namiesto napätia σ , toto sa počíta podľa vzťahu (4) [7], kde FE je

aplikované zaťaženie, l je rozpätie podpier, b je šírka telesa a h_{sp} je účinná výška prierezu v mieste drážky. Zaťažovanie je riadené postupným roztváraním štrbiny konštantnou rýchlosťou 0,05 mm min⁻¹. Po dosiahnutí CMOD = 0,1 mm sa rýchlosť zaťažovania zvýši na 0,2 mm min⁻¹.

$$\sigma = \frac{F_E \cdot l}{b h_{sp}^2} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Vyhodnocovaný súbor dát bol zostavený ako z výsledkov skúšok vykonaných samotným TSÚS, tak aj zo skúšok, na ktorých sa TSÚS zúčastnil v rámci tzv. „witness testing“.

Čo ovplyvňuje reziduálnu pevnosť betónu v ťahu?

Dávka vlákien

Dávkou vlákien sa rozumie množstvo pridaných vlákien vyjadrené zvyčajne pomerom hmotnosti vlákien na objemovú jednotku ČB [kg/m³]. V zásade platí jednoduchá úvaha, že čím je dávka vlákien vyššia, tým viac ich je vhodne orientovaných na prenos zaťaženia, a teda pôsobia ako výstužné elementy umožňujúce znížiť hrúbku VB konštrukcie [1]. Vplyv dávky vlákien sme hodnotili pre dávky 20 a 25 kg/m³ veľmi podobných vlákien (nie však úplne totožných). Výsledky sú zobrazené v grafe na obr. 14.

Porovnaním vzoriek s rovnakými znač-

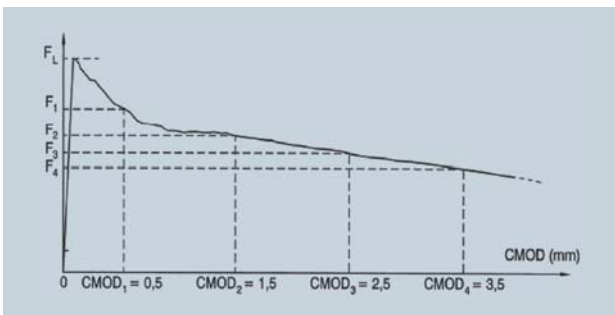
kami sme zistili zvýšenie reziduálnej pevnosti v ťahu pri CMOD 3,5 mm o 0,26 až 0,39 MPa, čo predstavuje relatívnu zmenu o 14 až 30 %. V grafe je zobrazená aj reziduálna pevnosť vzoriek S14 v dávkach 20 a 30 kg/m³, kde tiež pozorujeme nárast pri CMOD 3,5 mm o 0,80 MPa (relatívna zmena 49 %).

Z výsledkov vyplýva preukázateľná závislosť reziduálnej pevnosti vzorky od dávky vlákien. Navyše všetky dávky všetkých typov vlákien bezpečne splnili normové požiadavky na f_R pri CMOD 0,5 minimálne 1,5 MPa a pri CMOD 3,5 mm minimálne 1 MPa (Obr. 14).

Dĺžka resp. štíhlosť vlákien (L/d)

Podľa viacerých autorov [6], [8] je práve rastúca štíhlosť vlákien tým činiteľom, ktorý zvyšuje reziduálnu pevnosť v ťahu pri ohybe f_R . Podľa zistení Meda [9] rastie s dĺžkou vlákien aj f_R . Toto tvrdenie bolo formulované na základe pozorovania mikro a makro vlákien, kedy sa kratšie vlákna jednoduchšie vytrhávali z cementového tmelu, čím oslabovali tuhosť kompozitu.

Na základe vyhodnotenia dostupných výsledkov skúšok tvrdíme, že hypotéza o vplyve samotnej štíhlosti vlákien na f_R nie je všeobecná a má význam sa ňou zaoberať iba v prípade hodnotenia rovnakých vlákien s premennou dĺžkou. Porovnali sme výsledky skúšok priamych



Obr. 11 Priebeh straty vody (odparovanie)

Obr. 11 Priebeh straty vody (odparovanie)

Obr. 12 Príklad pracovného diagramu [7]

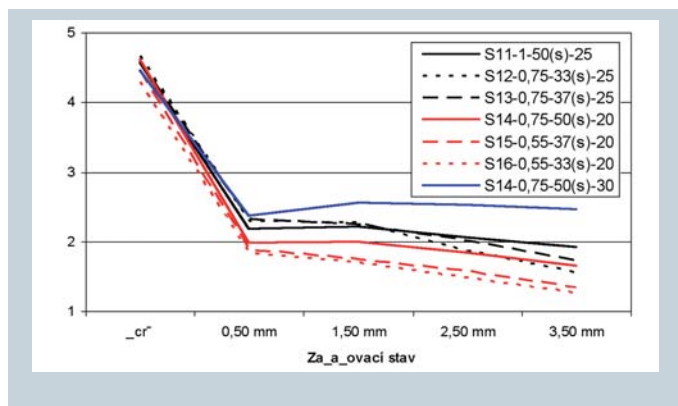
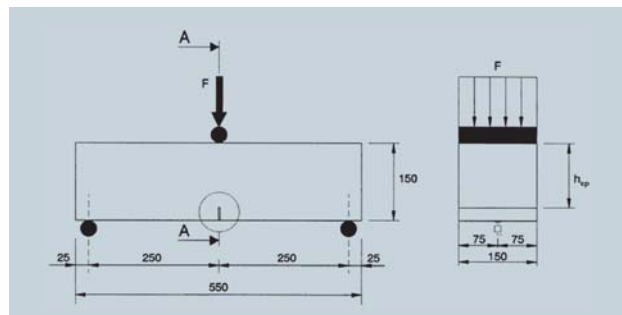
Obr. 12 Príklad pracovného diagramu [7]

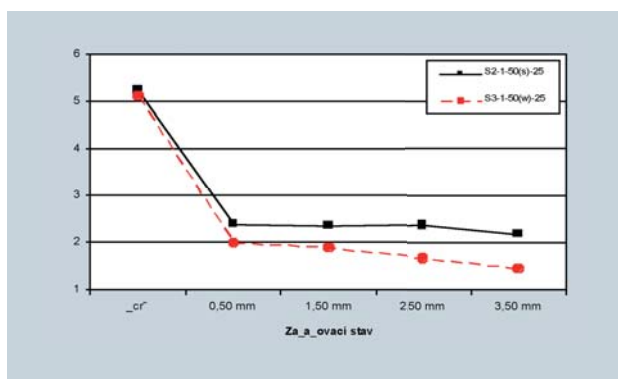
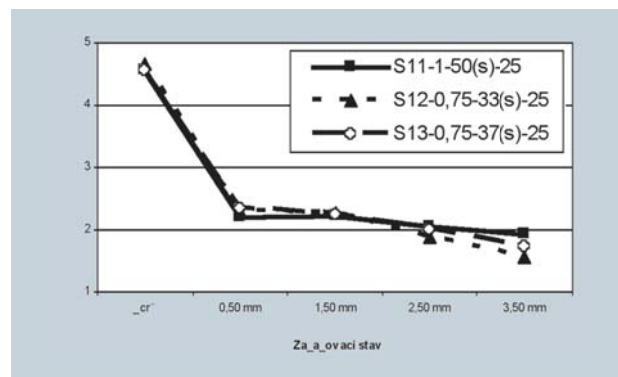
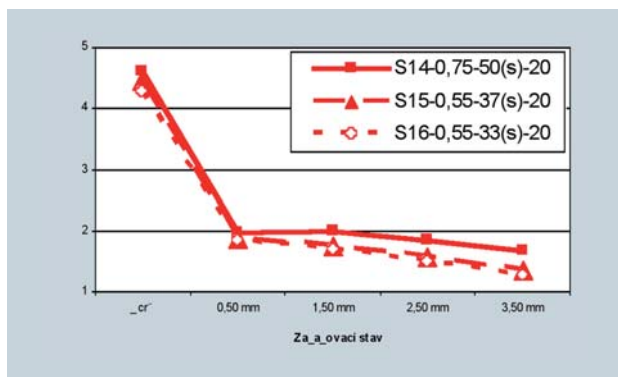
Obr. 13 Zaťažovacia schéma [7]

Obr. 13 Zaťažovacia schéma [7]

Obr. 14 Vplyv dávky vlákien na reziduálnu pevnosť v ťahu za ohybu

Obr. 14 Vplyv dávky vlákien na reziduálnu pevnosť v ťahu za ohybu





Obr. 15 f_R vs. L/d pri dávke 20 kg/m^3
Obr. 15 f_R vs. L/d pri dávke 20 kg/m^3

Obr. 16 f_R vs. L/d pri dávke 25 kg/m^3
Obr. 16 f_R vs. L/d pri dávke 25 kg/m^3

Obr. 17 f_R vs. tvar pozdĺžnej osi vlákien
Obr. 17 f_R vs. tvar pozdĺžnej osi vlákien

ocelových vlákien pri dávkach 20 kg/m^3 (obr. 15) a 25 kg/m^3 (obr. 16).

Pri dávke 25 kg/m^3 sa chovanie prierezu u všetkých vlákien nieslo v rovnakom duchu až do CMOD 2,5 mm, no najväčšie rozdiely v f_R boli badateľné pri CMOD 3,5 mm, čo je v zhode so závermi podľa Meda, kedy sa rozdiel v dĺžkach vlákien výraznejšie prejavuje pri väčších deformáciách. Pri CMOD 3,5 mm sme zistili následovné f_R (S11;S12;S13) 2,06; 2,01; a 1,87 MPa. Percentuálne zníženie f_R (S12 a S13) v porovnaní s S11 predstavuje 10 a 20 %, to však nezodpovedá zmene štihlosti vlákien.

Pri dávke 20 kg/m^3 sú počas celej doby

skúšky badateľné výrazne vyššie f_R u S14 ($L/d = 67$) ako u zvyšných dvoch typov vlákien i keď S15 má rovnaký štihlostný koeficient. Za všetko hovorí aj rozdiel v f_R pri CMOD 3,5 mm medzi S14 (1,84 MPa) a S15 (1,58 MPa), po percentuálnom vyjadrení, rovný 19 %. Preukázaná bola len priama závislosť od priemeru vlákien (predpokladá sa za každých okolností) a dĺžky vlákien.

Tvar vlákien

Vychádzali sme z predpokladu, že zložitejší tvar vlákien zabezpečuje ich lepšie zakotvenie v cementovom tmeli, a tým vyššie výsledné f_R . Očakávali sme vyššie

reziduálne pevnosti pri vlnkovkovaných vláknach ako u priamych s prostými háčikmi na koncoch. Porovnaním výsledkov skúšok na vláknach S2(s) S3(w) v dávkach 25 kg/m^3 podľa grafov na obr. 17 sme dospeli k prekvapivému záveru. Vlnkovkové vlákna S3 vykazovali počas celej skúšky pevnosti o 17 až 34 % nižšie reziduálne pevnosti ako priame vlákna s háčikmi S2 a s rastúcim CMOD sa f_R (S3) znižovalo čoraz rýchlejšie. Predpokladáme, že výsledok možno vysvetliť vyrovnávaním zvlhneného tvaru vlákien, no pre zatiaľ je to len domnienka.

ZÁVER

V oblasti vplyvu parametrov vlákien na konzistenciu VB sa potvrdili určité známe závislosti s tým, že boli aj kvantifikované pre určité okrajové podmienky. Sledovanie vplyvu jednotlivých druhov a typov vlákien na konzistenciu VB je len v počiatočnom štádiu a s rozrastajúcim sa súborom vstupných dát sa bude pracovať na odvodení určitých empirických závislostí.

V oblasti sledovania vplyvu vlákien na obmedzenie plastického zmrašťovania betónu boli zistené niektoré pozoruhodné skutočnosti a závislosti, ktoré však nebolo možné kvantifikovať. Minimálne sa však podarilo zistiť vplyv rôznych PP vlákien na tento jav a praxi poskyt-

Tab. 6 Sumarizácia výsledkov

Tab. 6 Sumarizácia výsledkov

	Parameter	Materiál	Podmienka	Efekt	Pozn. (výsledky)
Konzistencia	Štihlosť (L/d)	Oceľ	↑ štihlosť	↑ □V	20 až 50 %
		PP	↑ dĺžka	↑ □V	8 až 22 %
	Dávka	-	↑ dávka	↑ □V	Nelineárny vplyv
	Tvar prierezu	-	↑ priemer	↓ □V	8 %
	Tvar pozdĺž. osi	-	↑ tvarovanie	↑ □V	15 až 18 %
Plastické zmršťovanie	Dávka	PP	↑ dávka	↑ CRR	Nekvantifikované
	Dĺžka		↑ dĺžka	↑ CRR	
	Charakter vlákien		monofilamentné	↓ □CRR	
			fibrilované	↓ □CRR	
Mechanické vlastnosti	Dávka	-	↑ dávka	↑ f_t	14 až 30 %
	Štihlosť a dĺžka	-	↑ štihlosť	↑ f_t	nevšeobecné
		-	↑ dĺžka	↑ f_t	19 %
	Tvar pozd. osi	-	↑ tvarovanie	↓ f_t	17 až 34 %

Literatúra:

- [1] *Labib W., Eden N.*: An Investigation into the Use of Fibres in Concrete Industrial Ground-Floor Slabs, Liverpool John Moores University, Liverpool, 2006
- [2] *Lambrechts A.*: The Technical Performance of Steel and Polymer Based Fibre Concrete, Annual Technical Symposium „Concrete for a New World“, 2005
- [4] *Hela R., Klablana P., Krátký J., Procházka J., Štěpánek P., Vácha J.*: Betonové průmyslové podlahy, Informační centrum ČKAIT, Praha, 2006
- [5] STN EN 12350-3 Skúšanie čerstvého betónu. Časť 3: Skúška Vebe.
- [6] *Chanh N.*: Steel Fibre Reinforced Concrete, Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam
- [7] STN EN 14651 Skúšobné metódy na betón vystužený kovovými vláknami. Meranie pevnosti v ťahu pri ohybe (medza úmernosti (LOP), zostatková pevnosť)
- [8] *Žiogas V., Juočūnas S.*: Design and Installation Peculiarities of Monolithic Concrete Floor, Kaunas University of Technology, Kaunas – Lithuania, 2005
- [9] *Meda A., Plizzari G., Sorelli L.*: Fracture Properties of Concrete Reinforced with Hybrid Fibres, University of Bergamo – Italy, 2003
- [10] STN EN 14889-1 Vlákná do betónu. Časť 1: Oceľové vlákna. Definície, špecifikácie a zhoda
- [11] STN EN 14889-2 Vlákná do betónu. Časť 2: Polymérové vlákna. Definície, špecifikácie a zhoda
- [12] STN EN 14845-1 Skúšobné metódy pre vlákna v betóne. Časť 1: Referenčný betón
- [13] STN EN 14845-2 Skúšobné metódy pre vlákna v betóne. Časť 2: Účinnok na betón
- [14] STN EN 14721+A1 Skúšobné metódy na betón vystužený kovovými vláknami, Meranie obsahu vlákien v čerstvom a zatvrdnutom betóne
- [15] ASTM C 1579 Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)
- [16] Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- [17] *Qi C., Weiss J., Olek J.*: 'Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using semi-automated image analysis', Concrete Science and Engineering, 36 (260), 2003
- [18] *Lura P., Pease B., Mazzotta G. B., Rajabipour F. and Weiss J.*: Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Development of Plastic Shrinkage Fracka, ACI Materials 194 als Journal/ March-April 2007
- [19] *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
- [20] ASTM C 192 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- [21] STN EN 206-1 Betón. Časť 1: Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda

nút aspoň orientačné hodnoty sledovaných parametrov dosahované či už pri štandardne odporúčanom dávkovaní vlákien (cca. 0,9 kg/m³) alebo napr. polovičnom.

Pre mechanické vlastnosti sa z dostupných výsledkov skúšok nepodarilo odvodiť všeobecne platné vzťahy a závislosti, čo je dôsledkom veľkého množstva determinujúcich okrajových podmienok vstupujúcich do výpočtu a absenciou skúšok porovnateľných vlákien, keďže boli použité výsledky bežných komerčných skúšok. Avšak v skúšaní a vyhodnocovaní výsledkov sa bude pokračovať, keďže sa často stretávame s absenciou konfrontácie návrhových postupov so skutočne dosahovanými parametrami.

Táto práca vznikla aj vďaka výraznej podpore Technického a skúšobného ústavu stavebného, n. o., Bratislava, najmä v oblasti testovania konzistencie a mechanických vlastností vláknobetónu. Vďaka patrí aj Purdue University, West Lafayette, IN, kde sme vykonali skúšky vplyvu PP vlákien na plastické zmršťovanie.

Ing. Peter Briatka
Stavebná fakulta STU v Bratislave
e-mail: briatka@tsus.sk

Ing. Patrik Ševčík
e-mail: sevcik@tsus.sk

oba: TSÚS, n. o., Bratislava
Text článku byl posouzen odborným lektorem