

Samozhutnitelný beton

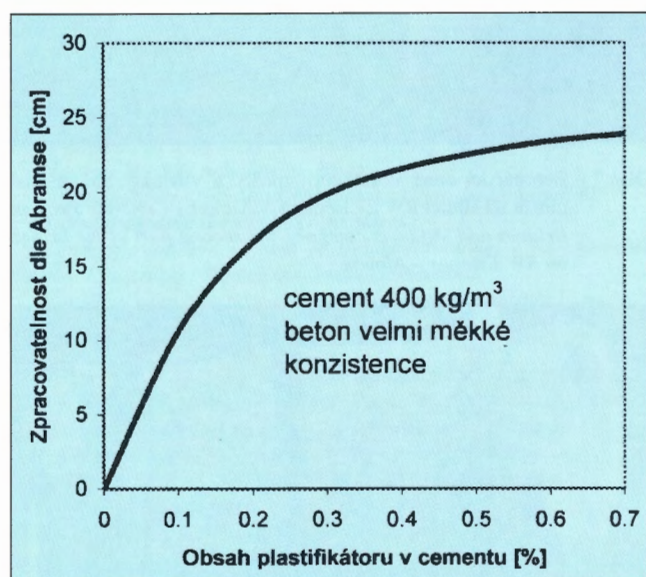
Self-Compacting Concrete

Jiří Hošek, Karel Kolář

Článek popisuje vývojové etapy na cestě k výrobě samozhutnitelného betonu. Představuje superplastifikátor nové generace na bázi modifikovaného polykarboxyleteru, který posunul naše poznatky o technologickém chování a jehož přísadou bylo dosaženo podstatného zlepšení technologických parametrů při zpracování čerstvé betonové směsi. Jsou uvedeny výsledky zkoušek provedených na základě studia materiálů z prvního RILEM symposia o samozhutnitelném betonu konaném v roce 1999 ve Stockholmu zaměřené na zásady výběru surovin dostupných u nás, především na výběr vhodného typu mikroplniv. V závěru jsou publikovány první výsledky studie o smršťování samozhutnitelného betonu v průběhu počátečního tvrdnutí.

The paper specifies the behaviour and properties of normal and self-compacting concretes. The effect of a new type of superplasticizer on the base of polycarboxylic ethers on workability of fresh concrete is described. Experimental research conducted in the laboratories of the Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague was concentrated on the problem of exploitation of Czech industry raw materials for SCC preparation. The final chapter of the paper is devoted to autogenous shrinkage of self-compacting concrete using the method of rubber wavy-line mould. The achieved results are also discussed.

Beton, nejrozšířenější a nejdůležitější stavební hmota, si udržel své dominantní postavení, i když se po celých 100 let od vynálezu vyztuženého betonu (Monier a Lambot 1852, Coignet



Obr. 1 – Vliv plastifikátoru SILFIX na zpracovatelnost čerstvé betonové směsi / Effect of SILFIX plasticizer on the workability of concrete mix

1852) prakticky nezměnil. Soustředění se na problém zdokonalování vlastností cementu (za díleci avšak diskutabilní úspěch lze považovat pouze vynález a výrobu cementu na bázi hlinitanového slínku) a na chování a změny vlastností při různých poměrech základních neměnných složek – kameniva, cementu a vody, bylo hlavní příčinou stagnace ve vývoji první umělé stavební hmoty.

Za zlom a nastoupení nové vývojové etapy je možno považovat poznání, že k vyšším metám vede cesta pouze přes snížení porozity betonu. Práce Američana T. C. Powerse provedené v polovině století [1] prokázaly, že nejen pevnostní charakteristiky betonu, ale i jeho trvanlivost, mrazuvzdornost a vodopropustnost jsou funkcí porozity a struktury zatvrdlého cementového pojiva, přičemž při běžném vodním součiniteli betonu $v/c = 0,5$ tj. 25 až 30% objemu pórů ve struktuře zatvrdlého cementového tmelu není možné zajistit zvyšující se požadavky konstruktérů na vlastnosti betonu [2]. Další vývoj se pak rychle zaměřil na technologické problémy, na snížení dotace vody a na způsoby zpracování čerstvé betonové směsi.

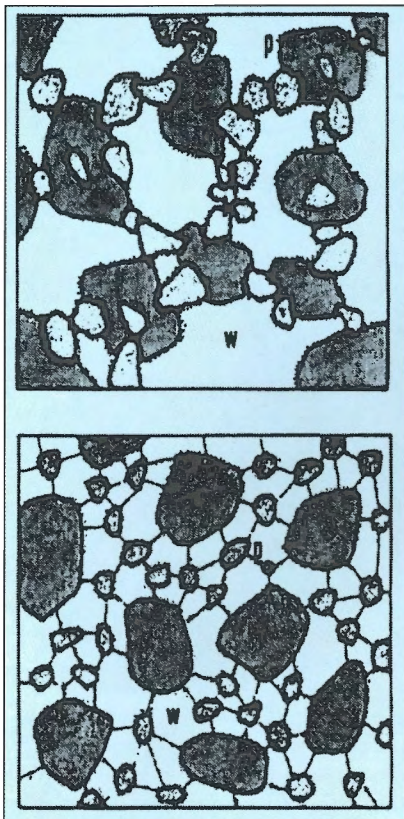
Vývojové etapy na cestě k výrobě samozhutnitelného betonu

První etapou ve vývoji samozhutnitelného betonu byl návrh a výroba vysokopevnostního betonu „High Strength Concrete” (HSC). Přísadou plastifikátorů, kterými byly lignosulfonát a směsné kondenzační produkty formaldehydu s melaminsulfonátem nebo naftalensulfonátovými deriváty (u nás Umaform a Silfix), byl vyroben beton vykazující podstatně lepší zpracovatelnost (obr. 1), zvýšenou pevnost a trvanlivost [3]. Je důležité poznamenat, že těchto zlepšení bylo dosaženo aniž by se prakticky zvýšila cena betonové směsi. Limitní pevnost v tlaku betonu jako ukazatele kvality HSC při zapojení vibrace čerstvé směsi byla až 60 MPa.

Zkoumání struktury betonu [2] prokázalo, že hlavním důvodem zlepšení kvality bylo snížení kapilární porozity zhydratovaného cementového tmelu. Zásadní faktor rozhodující o pevnosti betonu – stav zóny na rozhraní cementového pojiva a kameniva zůstal nezměněn. Schematické vyjádření představ o struktuře zhydratovaného cementového pojiva bez a s plastifikátorem ukazuje obr. 2a a obr. 2b. Porozitu p reprezentovanou jednak póry o velikosti několika nanometrů mezi C-S-H fází, jednak kapilárními póry mezi hydratačními krystaly, vzduchovými bublinami a trhlinkami o velikosti 100 nm až několik mm znázorňuje obr. 2a, homogenní strukturní uspořádání hydratačních krystalů umožněné deflokulací cementových zrn c vody v suspenzi w na počátku výroby udává obr. 2b.

Dalším krokem na cestě ke zvyšování kvality betonu je vysokohodnotný beton „High Performance Concrete” (HPC) vy-

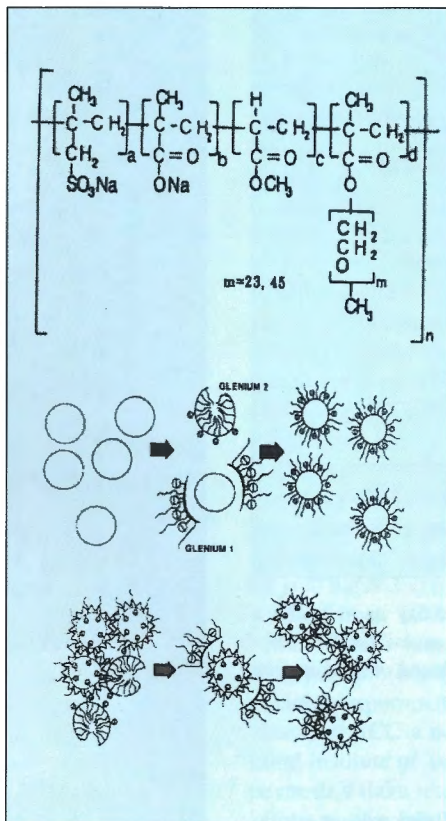
Při psaní článku byly využity poznatky získané na prvním RILEM Symposiu konaném ve Stockholmu v září 1999 pod názvem „Self-Compacting Concrete” a výsledky experimentálních prací vykonaných v technologických laboratořích Stavební fakulty ČVUT v Praze.



Obr. 2a, 2b – Struktura cementového pojiva v normálním betonu (2a) a v betonu se superplastifikátorem (2b) podle [2] / Structure of cement binder in ordinary concrete (2a) and in concrete with superplasticizer (2b)

nikající svou jednorodostí struktury, u které porušení na mezi pevnosti již nenastává v nejslabším místě struktury zóně mezi pojivem a plnivem, ale ve hmotě betonu, kdy iniciace porušení nastává v zrnech kameniva. Tohoto zlepšení bylo dosaženo aplikací velmi jemného materiálu, který vyplnil kapilární póry a zároveň absorboval přebytek výrobní vody nutné pro zpracování čerstvé betonové směsi, z hlediska hydratace přebytečné. Bylo zamezeno odměšování vody (bleeding) a vznik transportní zóny na rozmezí cementového pojiva a kameniva snižující adhezi obou složek. První publikované práce [4,5] uvádějí jako ideální mikroplnivo křemičitý úlet „silica fume“. Beton s rovnoměrně rozptýlenými ultrajemnými částicemi plniva „Densified System containing homogenously arranged ultrafine Particles“ (DSP) umožnil zvýšit pevnost v tlaku betonu až na hodnotu 110 MPa při poměru složek: Portlandský cement 400 kg, silica fume 80 kg, $v/c = 0,18$ na 1 m^3 čerstvé betonové směsi [6].

Po systematickém výzkumu zaměřeném na problémy zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi byly uvedeny na trh nové typy plastifikátorů poněkud nadneseně nazvané *superplastifikátory*. Svým složením i účinností se podstatně liší od prvotních typů výše uvedených plastifikátorů. Z chemického hlediska se jedná o modifikované polykarboxylétery s rozvětvenou molekulou obsahující na základním řetězci pobočné kratší řetězce o různé délce (obr. 3). Po aplikaci do cementové suspenze (kaše) bezprostředně sféricky obklopují cementová zrna a zajišťují jejich dokonalé rozptýlení v záměsové vodě. Výsledkem je podstatné zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu a z toho vyplývající možnosti snížení množství záměsové vody z obvyk-



Obr. 3 – Strukturální vzorec a schematické znázornění disperzního efektu superplastifikátoru modifikovaného polykarboxyleteru zn. Glenium [7] / Chemical formula and scheme of the disperse superplasticizer (modified polycarboxylether – Glenium)

lých $v/c = 0,50$ až na $v/c = 0,33$. Účinnost tohoto superplastifikátoru umožňuje snížit jeho dávky ve srovnání s dosud užívanými typy na bázi směsných kondenzátů formaldehydu s naftalemem nebo melamin sulfonáty. Dalším významným přínosem pro technologii zpracování je 2 až 5 násobné prodloužení doby zpracovatelnosti.

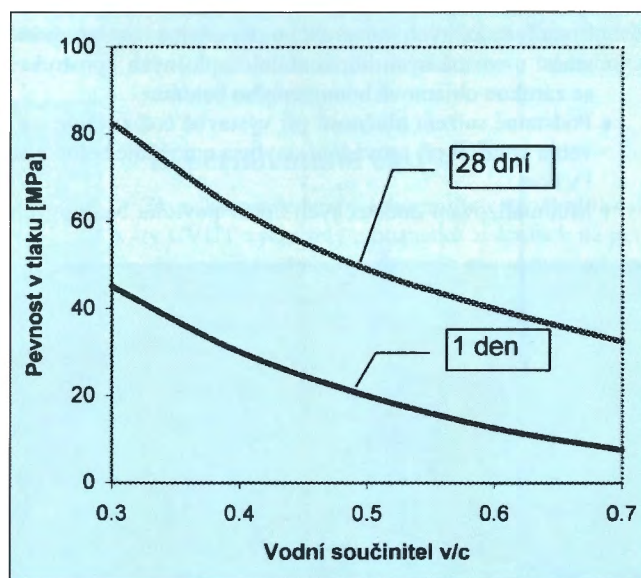
Význam superplastifikátorů pro zvýšení pevnosti betonu ilustruje srovnání vlivu záměsové vody do čerstvé betonové směsi (obr. 4). Nelze opomenout ani fakt, že tato látka je z hygienického hlediska naprosto nezávadná.

Následné vývojové práce pod pracovním názvem „Non Vibrating Self Consolidating Concrete“ byly zaměřeny na návrh racionálního způsobu zpracování čerstvé betonové směsi, který by vyloučil náročné techniky hutnění, především vibraci [8]. Přísadou jemných kamenných podílů a látky na bázi glukosy bylo dosaženo významného ovlivnění viskózních charakteristik a vysoké odolnosti proti odměšování vody v počátečním stadiu tuhnutí betonu, když obě substance se ve svých účincích doplňují (obr. 5).

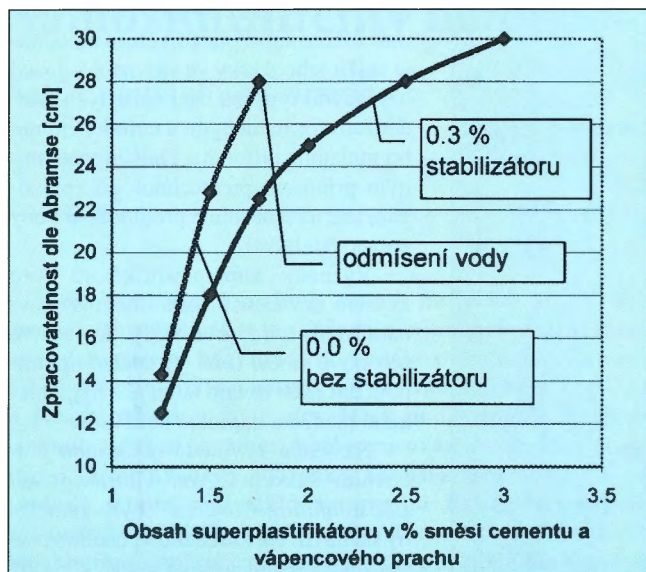
Složení výsledné betonové směsi bylo poprvé publikováno výzkumným kolektivem japonských pracovníků v roce 1989 pod názvem „Self Compacting Concrete“ (SCC) v českém překladu *samozhutnitelný beton* [9].

Lze tedy samozhutnitelný beton definovat jako vícesložkový kompozitní silikátový systém, ve kterém hlavní

složky tvoří portlandský cement, písek a kamenivo o vysoké pevnosti a vhodné distribuce velikosti částic a vedlejší modifikující složky jsou superplastifikátory, jemná plniva o vysokém



Obr. 4 – Vliv vodního součinitele na pevnost betonu podle [7] / Effect of the water/cement ratio on concrete strength (after [7])



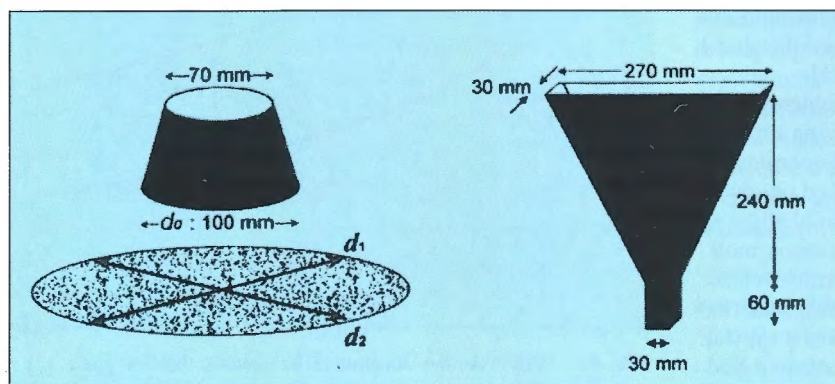
Obr. 5 – Vliv stabilizační přísady na bázi glukózy na viskozitu a odměšování vody čerstvé betonové směsi (podle [8]) / Effect of the stabilizing admixture (based on glucose) on viscosity and bleeding (after [8])

specifickém povrchu částic, látky upravující viskozitu a odměšování vody a odpěňovače. Nelze přesně vymezit druhy a poměry jednotlivých složek směsi. Dnes již široký soubor vhodných hmot se stále rozšiřuje a je odvislý od specifických materiálů v různých státech, kde je samozhutnitelný beton v současné době uváděn do stavební praxe.

Význam a vlastnosti samozhutnitelného betonu

Význam SCC pro stavební praxi leží především v technologické oblasti. Přednosti, které jsou obvykle uváděny lze formulovat takto:

- ♦ Odstranění vibrace čerstvé betonové směsi a tím rozšíření aplikace čerpaného betonu i pro složité konstrukce.
- ♦ Dokonalé vyplnění bednění čerstvou betonovou směsí i tvarově složitých konstrukcí a pravidelné rozvrstvení směsi u rozměrných horizontálních plošných konstrukcí se zárukou objemově homogenního betonu.
- ♦ Podstatné snížení hlučnosti při výstavbě což zvyšuje stavební komfort při provádění stavby a umožňuje betonovat i v noci.
- ♦ Minimalizování dodatečných úprav povrchu betonových



Obr. 6 – Metody měření zpracovatelnosti / Slump flow test and funnel test



Obr. 7 – Zkouška rozliti čerstvé betonové směsi / Slum flow test

konstrukcí dané dokonalou povrchovou hladkostí a stejnorodostí.

Z ekonomického hlediska je výsledný zisk založen především na :

- ♦ Minimalizaci stavebních aktivit při betonáži včetně snížení počtu pracovníků na stavbě.
- ♦ Zvýšení produktivity práce a tím urychlení výstavby.
- ♦ Snížení energetické náročnosti stavby dané nízkou viskozitou čerpané betonové směsi obsahující optimální množství superplastifikátoru a přísady zlepšující tokové charakteristiky.
- ♦ Snížení náročnosti úprav u tvarově složitých stavebních prvků nebo lokálních míst konstrukce s možností zjednodušit vyztužení detailů.

Základní podmínkou pro dosažení zmíněných výhod je splnění co nejpříznivějších technologických parametrů při výrobě, dopravě a ukládání čerstvé betonové směsi. Tím se rozumí optimalizace tokových charakteristik (viskozity a thixotropního chování), odstranění sklonu k odměšování přebytečné záměšové vody a prodloužení počátku tuhnutí. To musí zajistit zvolené typy přísad tak, aby fyzikální i chemická interakce mezi nimi nezpůsobila negativní důsledky ve ztvrdlém betonu. Požadavek kompatibility hmot ve složitém kompozitním systému SCC je nezbytný.

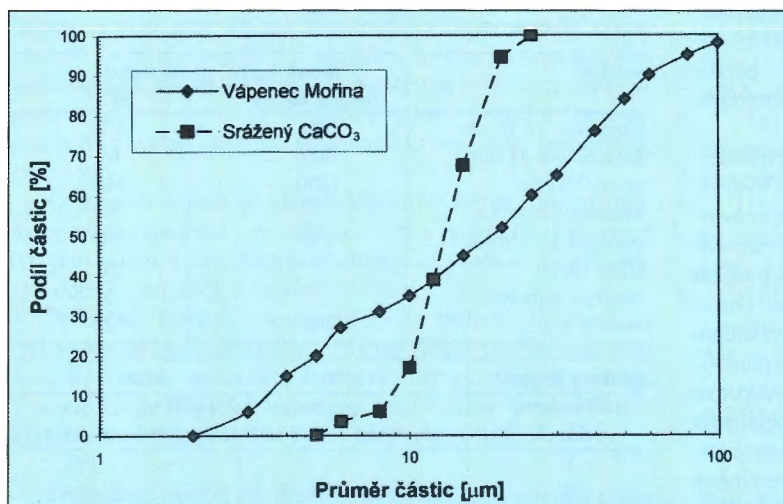
Proces ověřování vlastností čerstvé betonové směsi musí být snadno proveditelný v provozních podmínkách v krátkém čase a při tom dostatečně spolehlivý tak, aby to umožňovalo průběžné sledování chování směsi. Hodnoty reprezentující optimálně zpracovatelnou čerstvou směs samozhutnitelného betonu jsou mez toku (yield stress)



Obr. 8 – Zařízení pro L-box-test / L-box test

mezi 20 – 50 Pa a plastická viskozita mezi 6 – 12 Pa.s [10]. Čerstvá směs SCC by měla mít minimální rozliti 300 mm a doba do vyprázdnění trychtýře by se měla pohybovat mezi 2 až 10 s (obr. 6) [11]. Tyto metodiky jsou však více vhodné pro měření jemnozrnných betonů. Ve stavební praxi jsou ovšem měření s reometrem nedostupná a zpracovatelnost se posuzuje jednoduššími postupy dříve známými a běžnými v betonářském zkušebnictví. Jsou to zkoušky rozliti čerstvé betonové směsi podle ČSN 73 1312 (obr. 7) a tzv. L-box-test, který byl vyvinut k prokázání důležité informace, zda čerstvá betonová směs protéká mezi výztuží a nedochází k blokaci (obr. 8).

Seznam hmot uplatňujících se při výrobě SCC není konečný. Stále se rozšiřuje sortiment všech přísad modifikujících slo-



Obr. 9 – Sedimentační rozbor mikroplniv podle [15] / Sedimentation analysis of microfillers [15]

žení čerstvého betonu. Za konstantní můžeme považovat používání hlavního pojiva portlandského cementu nejvyšší kvality PC-CEM I, křemenného písku a kameniva o vysoké pevnosti (téměř výhradně se v recepturách objevuje žula). Ultrajemná minerální plniva o vysokém specifickém povrchu (přibližně 500 m².kg⁻¹) ovlivňují dosti podstatně cenu SCC. Původní mikroplnivo použité při vývojových pracích křemičitý úlet (silica fume) ustupuje právě z důvodů vyšší ceny popílku, jemně mleté strusce, případně skelnému prachu. Používán je i pískový kal získaný jako odpad při těžení a praní písku. Nejrozšířenější, zřejmě z technicko-ekonomických důvodů, je dnes mikromletý vápenec. Superplastifikátory jsou zastoupeny řadou prostředků odlišných obchodních názvů, ale společnou chemickou podstatou, kterou jsou sulfonované melaminové polymery. Ovšem poslední typy na bázi polykarboxylových kyselin se považují za kvalitativně lepší po všech stránkách s výjimkou cenové. Sloučeniny upravující tokové vlastnosti („viskozity agents“) jsou v recepturách zastoupeny tradiční metylcelulosou a deriváty polysacharidů. Nelze pominout ani stále více aplikované přísady zamezující vznik trhlin v průběhu tvrdnutí čerstvé směsi, jakými jsou například polypropylenová vlákna.

Vlastnosti SCC betonů jsou funkcí složení a ošetření v průběhu tvrdnutí (zásady správného ošetření jsou vhodné jako u normálního betonu). Z řady publikovaných výsledků široce pojatých experimentálních prací lze uvést jako příklad srovnání vlastností SCC a normálního betonu provedené v laboratořích Lund Institute of Technology ve Švédsku [12]. Vysoké hodnoty pevnosti v tlaku ukazují na mimořádnou účinnost superplastifikátoru na bázi modifikovaného polykarboxyleteru Glenium.

Čerstvá směs SCC obsahuje značný podíl jemných práškových složek. Celkový úhrn kombinace cementu, vápencového prachu, případně popílku, silica fume, které propadnou sítem 0,125 mm, se odhaduje až o 30 % vyšší, než u normálního betonu. Přísada účinných superplastifikátorů a substancí upravujících viskozitu tak, aby nedošlo k odmísení výrobní vody, přiznivě ovlivňuje reologické vlastnosti betonové směsi i přes podstatně vyšší podíl objemu modifikované cementové kaše, který je rozhodujícím faktorem objemových změn v průběhu tuhnutí betonu.

Problematika **objemových změn** samozhutnitelného betonu není dosud dostatečně objasněna. Zatím udávaný přibližně dvojnásobný nárůst počátečního smrštění [12] navíc nezahrnuje fázi autogenního smrštění reprezentujícího chemické změny při přechodu soustavy z quazikapalné na pevnou hmotu. Tato skutečnost ukazuje, že se tímto problémem bude nutno seriózně zabývat.

Experimentální část

Zkoušky provedené v laboratořích stavební fakulty ČVUT vycházely z poznatků získaných na prvním mezinárodním sympoziu o samozhutnitelném betonu konaném ve Stockholmu v roce 1999. Byly zaměřeny na výrobu SCC z tuzemských surovin (s výjimkou superplastifikátoru).

Chemické složení cementu:

Složka	% hmotnosti
CaO	61,50
SiO ₂	21,76
Al ₂ O ₃	6,08
Fe ₂ O ₃	2,22
MgO	2,10
SO ₃	3,48
Na ₂ O	0,14
K ₂ O	1,20

Cementy vyšších tříd CEM I vyráběné v České republice jsou jednoznačně vhodné, stejně tak písky a žulová drť mají uspokojivé parametry kvality. Zásadním problémem se ukázal výběr mikroplniv. Vzhledem k vyšší ceně byl vyloučen křemičitý úlet a na základě publikovaných výsledků s popílkem a mletou struskou prokazujících menší vhodnost těchto látek byla pozornost zaměřena na mikroplniva na bázi uhličitánu vápenatého.

Výběr mikroplniva na bázi CaCO_3 ovlivnil fakt, že uhličitánu vápenatý je latentním pojivem, když se v kladném smyslu zúčastňuje hydratačního procesu reakcí s trikalciumaluminátem C_3A za tvorby $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaCO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [13]. Tato sloučenina má vysokou pojivou schopnost a po vytvrzení je o dva řády pevnější než hydrát trikalcium aluminátu [14]. Proto bylo možno předpokládat, že mikroplniva tohoto typu zvýší pevnostní parametry betonu nejen vyplněním mikropórů v hydratovaném cementovém pojivu, ale i díky zpevnění krystalické struktury.

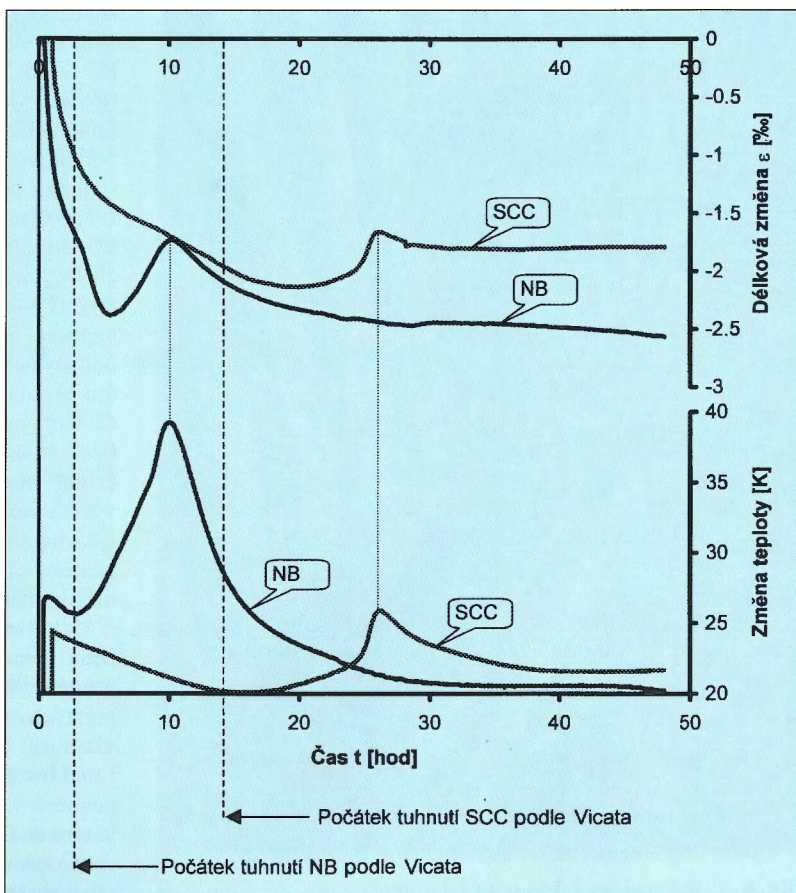
Vzhledem k dostupnosti na našem trhu byl vybrán srážený uhličitánu vápenatý (kalcit) a mikroemletý vápenec z přírodních zdrojů. Jejich vybrané fyzikální parametry udává *tab. 2* a *obr. 9*.

Na základě řady zkoušek byla navržena a ověřena receptura samozhutnitelného betonu (*tab. 3*).

Dosažené výsledky ukazují, že pevnosti v tlaku SCC ve srovnání s normálním betonem vykazují podstatný nárůst hodnot. Je třeba však poznamenat, že zkoušky nebyly zaměřeny na dosažení co nejvyšších pevnostních parametrů, ale především na zpracovatelnost betonové směsi. Proto byl sledován vliv superplastifikátoru a množství použité ve směsi jemnozrnného betonu SCC I lze považovat za mezní obsah na horní hranici (2 % z obsahu cementu a mikroplniva). Prodloužení intervalu zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi bylo podstatné. Počátek a konec tuhnutí je měřen Vicatovou jehlou po odseparování hrubých částí kameniva nad 2 mm.

Vzhledem k uvedeným změnám chování i změnám fyzikálně-mechanických vlastností bylo zřejmé, že je rovněž ovlivněn proces hydratace a to především v počátečním období tvrdnutí, kdy dochází ke změně objemu při fázovém přechodu z quazikapalné na pevnou formu hmoty. Proto byly souběžně měřeny objemové změny při počátečním autogenním smršťování v pryžové vlnovcové formě [16]. Dosažené výsledky, které je nutno považovat za orientační ukazuje *obr. 10*.

Po smíchání cementu s vodou dojde k rychlé reakci trikalciumaluminátu provázené silným exotermickým efektem. Výsledkem této reakce je vznik tenké blány na dispergovaných cementových zrnech tvořené drobnými krystalky ettringitu. V důsledku toho se další hydratace utlumí, teplota poklesne – probíhá inkubační perioda během které se betonová směs nadále chová jako quazikapalina [17]. Dochází k sedání směsi vyvolanému větší či menší segregací v soustavě cement-voda-superplastifikátor. Nárůst teploty signalizuje počátek přeměny suspenze v krystalickou formu. Exotermická hydratační reakce znamená prudký nárůst teploty v systému i objemovou změnu časově kopírující oteplení systému. Tím jsou ovlivněny objemové změny odpovídající chemickým přeměnám při hydrataci. Smrštění se zřejmě odehrává uvnitř změnou pórového systému.



Obr. 10 – Porovnání autogenního smršťování normálního a samozhutnitelného betonu / Comparison of autogenous shrinkage of ordinary concrete and that of self-compacting concrete

Diskuse výsledků a závěr

Cílem zkoušek provedených v souladu se současným trendem vývoje samozhutnitelného betonu bylo především ověřit možnost výroby betonu v našich podmínkách s využitím tuzemských surovin. Dosažené výsledky prokázaly, že portlandské cementy vyšších tříd CEM I a vápencová mikroplniva svou kvalitou vyhovují technologickým požadavkům. Prodloužení doby zpraco-

Tab. 1 – Srovnání vlastností samozhutnitelného a normálního betonu [12] / Comparison of massive and self-compacting concretes

složka	obsah kg/m^3 suché směsi			
	normal beton		SCC	
kamenivo 11-16 mm	600		800	
kamenivo 8-11 mm	300		60	
písek 0-8 mm	1000		880	
křemenná moučka			50	
portlandský cement	250		500	
silica fume			50	
superplastifikátor			5	
voda	200		133	
hustota [kg/m^3]	2350		2478	
stáří betonu	pevnost v tlaku [MPa]			
ve dnech	20°, 60% RH		95% RH	
1			20°, 60% RH	95% RH
1			63	19
7	14	14	103	63
28	24	24	124	110
90	30	28	134	141
	26	32		158

Tab. 2 – Vlastnosti mikropřiliv a cementu / *Properties of line-stone powders and portland cement*

typ mikropřiliva	měrný povrch podle Blaina ($m^2 \cdot kg^{-1}$)	měrná hmotnost ($kg \cdot m^{-3}$)	velikost částic v rozmezí (μm)
srážený $CaCO_3$	333	2760	6-20
mikromletý vápenec Mořina	544	2770	4-90
portlandský cement CEM I 52,5 R	372	3040	

Tab. 3 – Složení a vlastnosti normálního a samozhutitelného betonu vyrobených v laboratoři Stavební fakulty ČVUT / *Mix proportions and properties of massive and self-compacting concretes produced in Civil Engineering faculty laboratories*

složka	Obsah kg/m^3 suché směsi		
	n. beton	SCCI	SCCII
šterkopísek drť 8 - 16 mm			600
šterkopísek drť 4 - 8 mm	759	660	400
šterkopísek drť 0 - 4 mm	932	870	760
mikromletý vápenec Mořina		170	80
silica fume			20
superplastifikátor Glenium		11,3	7,5
odpěňovač	0,13	0,6	
voda	262	174	155
portlandský cement 52,5 R	430	400	360

roztříť kužele po 30 min	210 x 210 mm	660 x 660 mm	380 x 390 mm
počátek tuhnutí	4 h.	14 h. 20 min	
konec tuhnutí	5 h. 30 min	15 h. 10 min	
objemová hmotnost $kg \cdot m^{-3}$	2250	2360	2400
pevnost v tlaku v MPa za:			
1 den	11,2	26,7	29,5
7 dní	25,5	50,2	58,7
28 dní	38,1	72,8	86,7

vatelnosti i dosažení dobrých pevnostních parametrů byly při využití superplastifikátoru na bázi polykarboxyleteru zn. Glenium srovnatelné s hodnotami uváděnými v zahraničních pramenech.

Původním příspěvkem k problematice výzkumu SCC byly zkoušky zaměřené na smršťování čerstvé směsi SCC při tvrdnutí. Očekávaný rozdílný průběh první fáze tzv. autogenního smrštění, které odráží změny od hydratační chemické přeměny se nepotvrdil. Prodloužení doby zpracovatelnosti díky dokonalé segregaci cementových zrn v suspenzi vlivem přísady superplastifikátoru při uspořádání zkoušky, kdy je systém uzavřen a ztráta vody odpovídá pouze hydratačním potřebám nemá na průběh změn rozměru zkušebních vzorků v průběhu fázového přechodu z vodné suspenze na pevnou krystalickou hmotu podstatný vliv.

Objemová změna se odehrává uvnitř systému formou změny pórového systému a rozdíly se mohou projevit v další etapě tvrdnutí betonu v závislosti na podmínkách tvrdnutí, kdy dochází k odpařování vody z kapilár.

Problémy, které se v současné době v technologické oblasti řeší se soustřeďují na využití cementů, které při tvrdnutí mají nižší hydratační teplo (low-heat cement) a expanzní přísady. V tomto smyslu budou pokračovat i další práce v technologických laboratořích ČVUT v Praze fakulty stavební.

Provedené zkoušky a předložená publikace výsledků práce byly vypracovány v rámci grantového úkolu GAČR 103/99/0767 a výzkumného záměru CEZ J 04/98.

Literatura:

- [1] Powers, T.C.: Structure and physical properties of hardened cement paste. J. Amer. Ceram. Soc., 41, 1958, 1, 1 – 6.
- [2] Moranville – Regourd, M.: Microstructure of high performance concrete. In: *High Performance Concrete*. E & FN Spon., 1992, London, 542 s.
- [3] Sebök, T.: Přísady a přídavky do malt a betonů. 1. ed. Praha, Nakl. tech. lit. 1985, 160s.
- [4] Kendal, K. – Howard, A.J. – Birchall, J.D.: Relation between porosity, microstructure and strength and the approach of advanced cement-based materials. Phil. Trans. R. Soc., 310, 1983, 139 – 153.
- [5] Regourd, M.: Microstructure of high strength cement paste. Mater. Res. Soc., 42, 1985, 3 – 17.
- [6] Bache, H.H.: Densified cement-ultrafine particle based materials. In: *Proceed. of Int. Conf. about superplasticizers in concrete*. Ottawa, 1981, 1 – 39.
- [7] SKW-MBT Construction chemicals, Zürich: Glenium – the new generation superplasticiser, 1996.
- [8] Yuragi, M. – Sakata, N. – Iwai, M. Skai, G.: Mix proportion for highly workable concrete. In: *Concrete 2000*, E & FN spon. England, 1993, Vol. 1, 579 - 589.
- [9] Ozawa, K. – Maekawa, K. – Kunishima, M. – Okamura, H.: High performance concrete based on the durability design of concrete structures. In: *Proceed. of second East-Asia and Pacific Conf. on Struct. Engineer. and Costr.* 1989, 1, 445 – 450.
- [10] Fujiwara, H. – Nagataki, S. – Otsuki, S. – Endo, E.: Study on reducing unit powder content of high-fluidity concrete by controlling powder particle size distribution. In: *Conc. Lib. of Japan Soc. of Civil. Eng.*, 1996, 117 – 128.
- [11] Chai, H.: Design and testing of self-compacting concrete. Ph. D. thesis, Univ. of London, 1998.
- [12] Person, B.: Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete. In: *Proceed. of First Int. Symp. On Self-Compacting Concrete*. Stockholm, 1999, 239 – 250.
- [13] Fierens, P. – Verhaegen, J. – Verhaegen J.P.: Etude de la Formation de l' Hydrocarboaluminate de Calcium. *Cement and Concrete Research*, 4, 1974, 5, 695 – 707.
- [14] Jambor: Vplyv karbonátov na hydratáciu trikalciama-luminátu – $3 CaOAl_2O_3$ a vytváranie štruktúry cementovej kaše. *Stavebnícky časopis* 28, 1980, 11, 793.
- [15] Klečka, T.: Kompozitní materiály na bázi portlandského cementu s karbonátovou příměsí. (Habilitation práce), Praha 1999. 118s.
- [16] Hošek, J. – Litoš, J. – Kuklík, P. – Krejčířik, A.: Objemové změny cementového pojiva v počátečním stádiu tvrdnutí betonu. *Stavební obzor*, 9, 2000, 3.
- [17] Dohnálek, J. – Bálek, V.: Sledování mikrostrukturních změn při hydrataci cementu. *Silikáty*, 1982, 3.

Prof. Ing. Jiří Hošek, DrSc., Stavební fakulta ČVUT, Katedra stavebních hmot, Thákurova 7, 166 29 Praha 6
Ing. Karel Kolář, CSc., Experimentální centrum stavební fakulty, Thákurova 7, 166 29 Praha 6