

NOVÉ MATERIÁLY - NOVÉ DRUHY A TECHNOLOGIE BETONU NEW MATERIALS - NEW TYPES AND TECHNOLOGIES OF CONCRETE

RUDOLF HELA,
LENKA BODNÁROVÁ,
JANA MARŠÁLOVÁ

V článku je uveden stručný přehled vývoje a trendů v používání nových druhů betonů v technicky vyspělých zemích, požadavky kladené na nové materiály, jejich skutečné vlastnosti a ukázky realizovaných konstrukcí.

This article gives a brief overview of the development and trends in the use of new types of concrete in industrially advanced countries. Further, it outlines requirements laid on new materials, describes their actual properties, and shows examples of completed structures.

Novým materiálům a druhům betonů byly na kongresu Concrete Structure in the 21st Century v Ósace věnovány zejména sekce 1, 3 a 9. Ve vyzvané přednášce Beton pro nové století (Concrete for a new century) poskytl autor profesor Walraven z TU Delft, Holandsko průřez historií betonu od klasického až po nové speciální, včetně vý-

hledů a tendencí v dalším vývoji technologie betonu. Dále zdůrazníme vybrané významné vlastnosti a odlišnosti užívaných nových typů betonů.

VYSOKOPEVNOSTNÍ BETON

Použití vysokopevnostního betonu při výstavbě mostu Second Stichtse Bridge, prvního mostu s velkým rozpětím (170 m) z vysokopevnostního betonu v Evropě, bylo analyzováno nejen z hlediska materiálových vlastností ale také ve vztahu k finanční náročnosti realizace stavby. Ze složení použitých betonů (průměrná dávka cementu 474 kg/m³, 25 kg/m³ mikrosilica, písek, drcené kamenivo 4 až 16 mm a superplastifikátor) lze předpokládat, že cena betonu je asi dvakrát vyšší než při použití normálního betonu třídy B45. Při celkovém zhodnocení realizace mostu se však ukázalo, že použití speciálních vysokopevnostních betonů přináší významné finální výhody. Protože beton měl vysoké pevnosti, bylo pro výstavbu mostu možné použít asi o 30 % menší objem betonu, což přineslo i snížení množství výztuže asi o 25 %. Nezanedbatelné je také hledisko ekologické. V návrhu složení vysokopevnostního betonu je použita vyšší dávka cementu na m³, ale protože je možné realizovat stavbu s menším objemem betonu, celková spotřeba cementu je srovnatelná a navíc byla dosažena výrazná úspora kameniva, a to o 30 %. Celková doba výstavby byla kratší (rychlejší nárůst pevnosti) při vyšší dosažené kvalitě díla a lepší trvanlivosti a odolnosti. V konečném výsledku přináší použití vysokopevnostních betonů mnoho výhod, proto je možné označovat tyto vysokopevnostní betony spíše jako „vysokoužitkové“ betony.

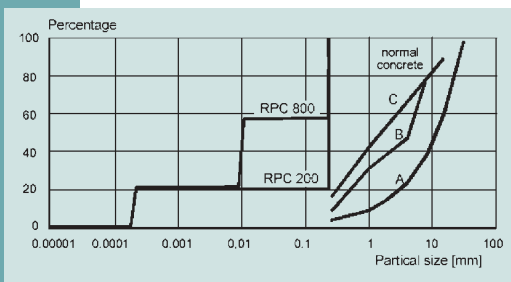
SAMOZHUTNITELNÝ BETON (SELF COMPACTING CONCRETE - SCC)

Pro návrh složení samozhutnitelného betonu je specifické, že malá změna vlastností složek nebo poměru složek výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti materiálu. Velkou výhodou použití SCC je odstranění namáhavé lidské práce při ukládání a zhutňování betonu a také odstranění vlivu lidského faktoru v této fázi betonáže. Použití SCC přináší zlepšení pracovních podmínek – snížení hluchosti, prašnosti, emisí, odstranění vibrací při zhutňování betonu. Velmi podstatné jsou výhody při použití SCC v prefabrikaci – snížení energetické náročnosti při ukládání a zhutňování betonu, dosažení velmi kvalitních povrchů a snížení nákladů na formy. Protože není třeba beton vibrovat, formy mohou být výrazně subtilnější, spoje nejsou namáhány a formy vydrží více cyklů. Výhodné je i použití SCC pro klasickou betonáž na staveništi, zejména pokud jde o provádění v zástavbě (nižší zatížení okolí hlukem). Autor také uvedl poznatky z vývoje samozhutnitelných betonů s přídatkem vláknové výztuže z ocelových drátků. Tento materiál si ponechává výhodné vlastnosti z hlediska zpracovatelnosti a samozhutnitelnosti při zajímavých přetvárných vlastnostech. Přídavkem vláknové výztuže je ovlivněn pracovní diagram a dochází k oddálení křehkého lomu.

ULTRAVYSOKOPEVNOSTNÍ BETON

Mezi nejdůležitější aspekty návrhu ultravysokopevnostního betonu (UHPC) patří:

- zlepšení homogenity betonu úpravou zrnitosti (obr. 1);
- přidání co nejmenšího množství vody – minimální vodní součinitel, zpracovatelnost se dosahuje přidáním vhodných superplastifikátorů, cement, který nezhydratuje, působí jako filler a zvyšuje hutnost betonu;



Obr. 1 Přetržitá křivka zrnitosti pro ultravysokopevnostní beton (> B200)

Fig. 1 Curve of gap sizing for UHPC



Obr. 2 Návrh skořepinového zastřešení elegantního tvaru mýtní brány před Millau viaduktem s použitím UHPC

Fig. 2 The toll-gate of the Millau Viaduct, which have an elegant roof based on a thin BSI shell

	Cement	Kamenivo	Voda	Voda celková	Vlákna	Superplastifikátor
Množství [kg/m ³]	774	1523	162	180	157	7 (pevná složka)

Tab. 1 Složení materiálu Ductal na m³
Tab. 1 Composition of material Ductal per m³

- přidavek výztuže z ocelových vláken – rozptýlená výztuž zvyšuje nejen pevnost, ale i houževnatost.

Obecně ultravysokopevnostní betony obsahují vysoký podíl cementu – více než 800 kg/m³, mikrosiliky – více než 200 kg/m³ a jemných ocelových vláken – cca 100 kg/m³. Pokud omezíme maximální zrna kameniva (na 0,5 až 4 mm), můžeme dosáhnout pevností 200 až 250 MPa. Pokud využijeme působení vysoké teploty při slinování kompozitu, lze dosáhnout pevností 300 až 350 MPa. Vlastnosti řadí získaný materiál mezi ocel a klasický beton. Samozřejmě, že se jedná o velice drahý materiál, který však má své použití při speciálních aplikacích, např. pro výstavbu protipovodňových stěn a zdymadel, mostů, mostních nosníků (obr. 2). Tyto konstrukce jsou běžně vyráběny z oceli. Pokud pro tyto aplikace použijeme ultravysokopevnostní beton, získáme výrazně pevnější, trvanlivější konstrukci s nižšími náklady na údržbu než u ocelových konstrukcí.

Na Technické univerzitě v Delftu bylo ověřováno použití vysokopevnostního SCC s výztuží z ocelových drátků třídy B100 a B200. I při použití ocelových drátků v množství 140 kg/m³ byla zachována samozhutnitelnost betonu (obr. 3).

POUŽITÍ REAKTIVNÍHO PRÁŠKOVÉHO BETONU

Využívání reaktivního práškového betonu (Reactive Power Concrete – RPC) známého pod názvem Ductal®. RPC, který má vynikající mechanické vlastnosti, odolnost a trvanlivost, se rozšiřuje.

Tab. 2 Vlastnosti použitých materiálů
Tab. 2 Properties of used materials

Materiál	Označení	Vlastnosti
Cement	Portlandský cement	C
	Jemně mletý vápenc	LF
	Expanzní přísada	EX
Přísady	Přísada omezující smršťování	SR
Jemné podíly	Mořský písek	S
Kamenivo	Drcené kamenivo	G
Chemické přísady	Superplastifikátor	SP
		Polycarboxil acid

Při jeho přípravě je třeba dodržovat hlavní zásady:

- pro vytvoření vysoce kompaktního materiálu s minimem defektů, mikrotrhlin a pórů je třeba použít extrémně nízký vodní součinitel,
- hutnost materiálu je zvyšována optimalizací zrnitosti vstupních materiálů,
- tažnost materiálu je zvyšována zakomponováním ocelových vláken.

Vysoké pevnosti tohoto materiálu dovolují realizaci mnohem subtilnějších konstrukcí ve srovnání s klasickým betonem.

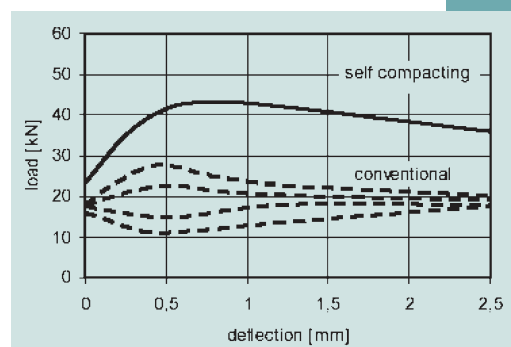
V současné době je ve světě provedeno asi 20 konstrukcí z Ductalu (obr. 4). Jednou z nich je i lávka pro pěší Sakata-Mirai v Japonsku. Jedná se o 50 m dlouhý a 2,4 m široký most. Konstrukční materiál byl navržen jako RPC 200, reaktivní práškový beton s pevností v tlaku 200 MPa (tab. 1). Vlákna byla ocelová, průměru 0,2 mm, délky 15 mm. Výsledná pevnost RPC byla 238 MPa.

Konstrukční řešení lávky pro pěší využilo vynikajících vlastností, které RPC poskytuje a které nemohou být dosaženy klasickým předpjatým betonem. Použití RPC umožnilo snížit nevyužitou vlastní hmotnost konstrukce na 1/4 v porovnání s klasickým betonem. Tím byl také snížen požadavek na velikost základů a celkové náklady na realizaci lávky byly, i přes samozřejmě vyšší cenu materiálu RPC, o 8 až 10 % nižší.

POUŽITÍ SCC S OBSAHEM EXPANZNÍCH PŘÍRAD

Další možnosti širokého uplatnění samozhutnitelných betonů se naskýtají při betonážích různých tunelových ostění. Přidáním expanzní přísady lze dosáhnout vhodné úpravy vlastností čerstvého i zatvrdlého SCC zejména vzhledem k smršťování a redukcí vzniku smršťovacích trhlin.

V Japonsku byl betonován 2 km dlouhý úsek tunelu, tloušťka ostění byla 200 mm a segmenty byly betonovány po 10,5 m.



Obr. 3 Pracovní diagram těles vyrobených z normálního betonu a SCC s vláknovou výztuží z ocelových drátků (B65 s 60 kg/m³ drátků)

Fig. 3 Stress-strain diagram of units produced from common concrete and SCC with filament reinforcement made of steel fibres (B65 with 60 kg/m³ steel fibres)

Expanzní přísada vnesla do ostění tunelu potřebné předpětí a efektivně eliminovala smršťování betonu (tab. 2). Vybetonované ostění bylo bez trhlin a dutých míst.

VYSOKOPEVNOSTNÍ SAMOZHUTNITELNÝ BARVENÝ BETON

Při výstavbě mostu Ritto (obr. 5) bylo využito barevného samozhutnitelného betonu. Vzhledem k tomu, že se most nachází v národním parku, bylo požadováno přizpůsobit vzhled mostu rázu krajiny. Přírodního vzhledu povrchu betonu bylo dosaženo přidáním anorganického běžového barviva.

Obr. 4 Lávka pro pěší v Soulu s obloukem délky 120 m, střední 60m část oblouku slouží přímo jako mostovka

Fig. 4 Seoul Peace footbridge, the span length of the arch 120 m, in the 60m central part with the pedestrian traffic directly on the arch





Obr. 5 Most Ritto jako součást krajiny
Fig. 5 Bridge Ritto as an integral part of the landscape



Obr. 6 Hustě armovaný segment mostu
Fig. 6 Densely reinforced bridge segment



Obr. 7 Pohled na povrch mostu
Fig. 7 View of the bridge surface

Barvivo bylo přidáno do míchačky zároveň s ostatními komponenty, aby došlo k dobrému rozmišení. Doba míchání byla 120 sekund. Beton byl transportován domíchávači na místo během 30 minut. Při betonáži byl beton čerpán pomocí čerpadla a rozdělen do čtyř směrů pomocí rozdělovací násypky umístěné navrchu

Tab. 4 Složení SCC na m³
Tab.4 Composition of SCC per m³

	Cement	Voda	Říční písek	Kamenivo		Superplastifikátor	Barvivo
				20 mm	13 mm		
Množství kg/m ³	470	155	868	505	336	6,11	14,1

Vodní součinitel byl 0,33.

lešení. Díky své dobré samozhutnitelnosti se beton rovnoměrně roztekl bez použití vibrace a vyplnil formu (obr. 6). Pro zamezení vysušování bylo nutné ošetřovat povrch betonu minimálně po dobu sedmi dnů, aby se na povrchu betonu neobjevovaly výkvěty a nedošlo k porušení rovnoměrnosti barevného povrchu. Jako ochrana povrchu proti vysušování a znečištění zůstala po sejmutí hlavní formy na povrchu odvětrávaná forma. V průběhu zrání betonu byl sledován průběh teploty. Teplota betonu dosáhla maxima po dvou a půl dnech (nárůst byl téměř 30 °C) a pak rychle klesala. K ochlazení betonu došlo během dalších sedmi dnů, přičemž během této doby nedošlo k popraskání povrchu (obr. 7). Pevnost v tlaku po sedmi dnech dosahovala průměrné hodnoty 43,8 MPa, průměrná 28denní pevnost byla 74,7 MPa.

SAMOZHUTNITELNÝ LEHKÝ BETON

Vysokopevnostní lehký samozhutnitelný beton (SCLC) je nový stavební materiál, který kombinuje známé výhody lehkého betonu a betonu samozhutnitelného. Základní požadavky týkající se samozhutnitelného betonu byly aplikovány na lehký SCC, přesto je však potřebné zmínit následující aspekty:

- tekutost a samozhutnitelnost se vyskytuje v omezené míře kvůli nízké objemové hmotnosti,
- lehké složky adsorbují část záměsové vody, což způsobuje předčasné tuhnutí,
- lehké složky vykazují zřetelnou tendenci k odlučování.

V první fázi byl výzkum těchto betonů prováděn na cementových pastách, kdy byly měřeny reologické vlastnosti, zejména viskozita a tečné napětí. V další etapě byly pro výrobu malt použity superplastifikátory na bázi polykarboxylátů. Výsledky výzkumu ukazují významný vliv obsahu pasty na reologické vlastnosti malt. S nárůstem obsahu pasty se snižuje viskozita a tečné napětí. Směs bez viskózního faktoru vykazuje zřetelné odlučování a krvácení.

Při návrhu betonů byly zkoumány betony s různými druhy a množstvím lehkého kameniva. Výsledky SLUMP testu se pohybovaly od 630 do 720 mm, což odpovídá obvyklým hodnotám SCC. Roztečení

Název zkoušky	Hodnoty
Čerstvý beton	
Roztečení – Slump test [mm]	650 ± 50
Roztečení na 500 mm [sec]	3 až 15
Obsah vzduchu [%]	4,5 ± 1,5
Obsah chloridových iontů [kg/m ³]	Max. 0,3
Zatvrdlý beton	
Pevnost v tlaku [MPa]	50

Tab. 3 Požadavky na vysokopevnostní SCC
Tab.3 Demands on high-strength SCC

Literatura

- [1] Proc. of the first fib Congress 2002 – Concrete Structure in the 21st Century, Ósaka 2002

na 500 mm bylo od 9 do 30 sekund. Objemová hmotnost čerstvých SCLC se pohybovala v rozmezí 1440 až 1880 kg/m³. S klesající objemovou hmotností výrazně narůstala doba rozlití. Průměrná sedmidenní pevnost v tlaku byla 29 až 38 MPa, dvacetiosmidenní pevnost v tlaku 39 až 48 MPa.

Nevýhodou SCLC je poměrně značná křehkost, kterou lze eliminovat přidávkem rozptýlené vláknové výtuzže. Maximální množství vláken, které může být použito v SCLC bez vlivu na tekutost a samozhutnitelnost, závisí na druhu vláken. Doporučuje se použít maximálně 0,5 % objemových ocelových vláken nebo 0,1 % objemových polypropylenových vláken.

Příspěvek vznikl s podporou MSM VV CEZ 261100008 a Grantové agentury ČR při řešení projektu č. 103/01/0814 Vztah mikrostruktury a vlastností extrémně ztekucených cementových kompozitů.

Ing. Rudolf Hela, CSc.

tel.: 541 147 508

e-mail: hela.r@fce.vutbr.cz

Ing. Lenka Bodnárová, PhD.

tel.: 541 147 511

e-mail: bodnarova.l@fce.vutbr.cz

Ing. Jana Maršálová

tel.: 541 147 516

e-mail: marsalova.j@fce.vutbr.cz

všichni: FAST VUT v Brně

Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Veveří 95, 662 37 Brno

fax: 541 147 502, www.fce.vutbr.cz