

TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY VÝVOJE A APLIKACE VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY – ČÁST II. VLASTNOSTI VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU A JEJICH ZKOUŠENÍ ■ HIGH-STRENGTH CONCRETE – TECHNOLOGY, DEVELOPMENT AND APPLICATION IN CONDITIONS OF THE CZECH REPUBLIC – PART II. PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETES AND THEIR TESTING

Ivailo Terzijski

Tento článek je druhou částí souboru aktuálních poznatků získaných při vývoji vysokopevnostního betonu v podmínkách ČR. První část byla publikována v čísle 1/2011 tohoto periodika. Podobně jako u první části nejde i v tomto případě o práci vyčerpávající celou šíři problematiky. Naopak, článek si všímá jen některých aspektů, přičemž vedle získaných poznatků upozorňuje i na některé nesrovnalosti a logické rozpory v oblasti vlastností vysokopevnostních betonů a jejich zkoušení. ■ This article represents second part of actual findings reached in the development of high-strength concrete in conditions of the Czech Republic territory. First part was published in the vol. 1/2011 of this journal. Similarly to the first part the actual article does not cover the whole scope of knowledge. The article is focused on some actual topics, only. In parallel with technical facts, the article points out some inconsistencies and logical conflicts in the area of properties of high-strength concretes and their testing.

VLASTNOSTI ČERSTVÉHO BETONU

Objemová hmotnost

Objemová hmotnost čerstvého betonu a betonu vůbec je často považována za tak „triviální“ vlastnost, že jí není někdy věnována dostatečná pozornost. Přitom objemová hmotnost čerstvého betonu je prvním parametrem (z hlediska posloupnosti získávání), podle něhož můžeme kontrolovat dodržení teoretického složení betonu, a tedy s velkou mírou spolehlivosti i predikovat jeho další důležité vlastnosti.

Jaká je tedy objemová hmotnost vysokopevnostního betonu (HSC)? Obvykle je vyšší než u betonu běžných pevností (NSC). Ve vysoce specializované publikaci [3] se uvádí, že hlavní příčinou vyšší objemové hmotnosti HSC je vyšší dávka cementu a nižší dávka vody oproti NSC. To je sice pravda, ovšem jen z části. HSC skutečně obvykle obsahují více cementu, obvykle se však taky zvětšuje obsah cementového tmele (objem cement + voda). Jelikož objemová hmotnost cementového tmele je téměř vždy nižší než objemová hmotnost kameniva a výsledného betonu, není dříve uvedený vliv dominantní. Ještě menší dopad můžeme očekávat v případě, že nahradíme/doplníme část cementu mikroplnivem typu mikrosiliky, jejíž obvyklá objemová hmotnost je 2 200 kg/m³. Pro ilustraci tohoto faktu uvádíme v tab. 1 objemové hmotnosti cementového tmele při různých vodních součinitelích.

Daleko větší dopad na objemovou hmotnost betonu má mineralogický druh použitého kameniva. U běžně používaných hornin typu droby, žuly, vápence apod. se obvykle objemová hmotnost pohybuje okolo 2 600 až 2 700 kg/m³. Použije-li se však vysokopevnostní kamenivo typu čediče s objemovou hmotností kolem 3 000 kg/m³, je, jak ukazuje tab. 2, dopad na výslednou objemovou hmotnost betonu daleko výraznější.

Tab. 1 Vliv složení cementového tmele na jeho objemovou hmotnost ■ Tab. 1 Influence of cement paste composition on its density

Vodní součinitel	0,5	0,4	0,3	0,25
Objemová hmotnost tmele [kg/m ³]	1 812	1 923	2 070	2 163
Objemová hmotnost tmele s 10% MSi [kg/m ³]	1 785	1 891	2 030	2 117

Tab. 2 Vliv složení betonu na jeho objemovou hmotnost ■ Tab. 2 Influence of concrete mix composition on its density

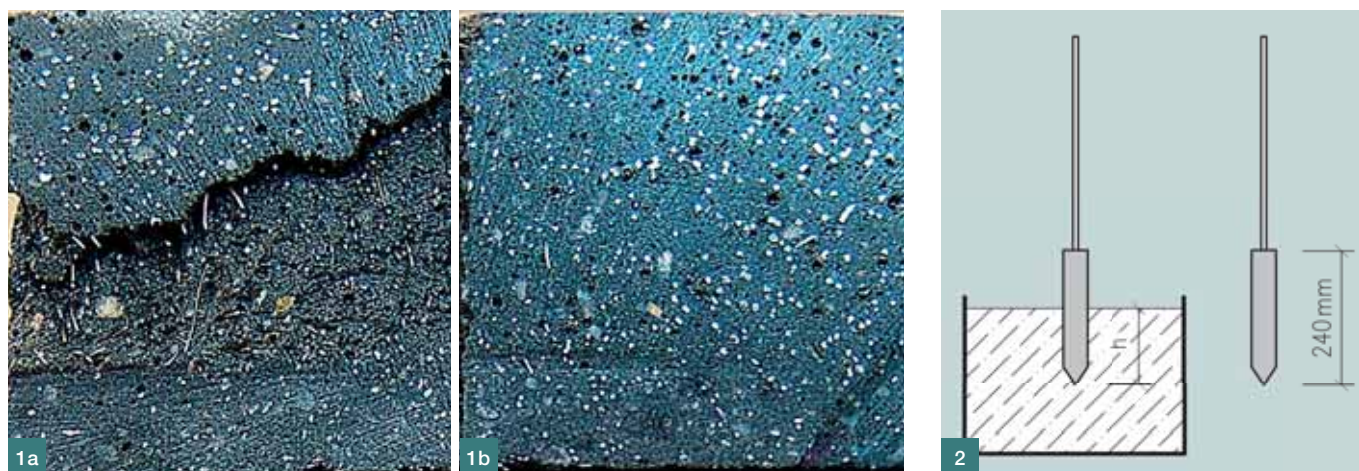
Vodní součinitel	0,5	0,3	0,3
Dávka cementu [kg/m ³]	300	450	450
Dávka mikrosiliky (MSi) [kg/m ³]	–	–	45
Objemová hmotnost s běžným kamenivem [kg/m ³]	2 405	2 450	2 420
Objemová hmotnost s 45 % čediče [kg/m ³]		2 580	2 545

Objemová hmotnost betonu má dále význam při stanovení zatížení od vlastní hmotnosti nosné konstrukce. U běžného hutného železobetonu se při výpočtu zatížení konstrukcí podle platné normy Eurokód 1 uvažuje charakteristická (tj. nepřekročená v 95 % případů) měrná tíha 25 kN/m³. Z již uvedeného je zřejmé, že při návrhu konstrukce z HSC musí výrobce betonu úzce spolupracovat s projektantem a uvedenou charakteristickou hodnotu objemové hmotnosti eventuelně upřesnit.

Zpracovatelnost

Zpracovatelnost (konzistence) je další důležitou vlastností čerstvého betonu. Na rozdíl od uvedené objemové hmotnosti existuje při reálné aplikaci u tohoto parametru přirozená silná zpětná vazba z oblasti transportu a ukládání čerstvého betonu. Pokud navrhnete či vyrobíte beton hůře zpracovatelný, můžete si být jisti, že si někdo začne okamžitě stěžovat. Opačně (tj. pro beton příliš pohyblivý až nestabilní) to bohužel obvykle neplatí. Má-li být zajištěna dobrá zpracovatelnost HSC, je nutné jej obvykle navrhnout se stupněm konzistence alespoň S4 v případě transportbetonu, respektive F4 až F5 v případě betonu aplikovaného při prefabrikaci. Pro požadavek velmi dobré zpracovatelnosti hovoří u HSC vedle běžných důvodů často navíc i následující další dva:

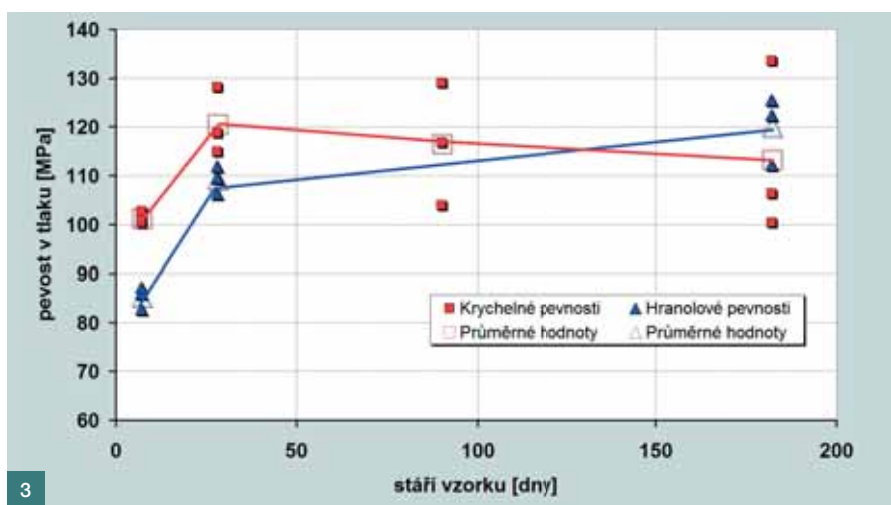
- Reologické chování HSC (zejména s některými polykarboxylátovými přísadami) je odlišné od betonů běžných pevností, a to i v případě, že stupeň konzistence stanovený běžným postupem je srovnatelný (viz též dále). Zatímco u běžné pevnosti lze obvykle čerpat betony S3, u HSC to většinou není možné a je nutné (jak bylo zmíněno) navrh-



Obr. 1 a) Řez vzorkem lepkavého UHPC obsahujícím obtížně odstranitelné dutiny, b) řez vzorkem srovnatelného UHPC s optimalizovanou – nelepivou přísadou | Fig. 1 a) Cross-section of “sticky” UHPC containing hardly removable air voids, b) cross-section of comparable UHPC with optimized – not sticky additive

Obr. 2 Schéma penetrační jehly pro měření konzistence HPC | Fig. 2 Scheme of penetration needle for measurement of HPC consistency

Obr. 3 Porovnání vývoje pevnosti v tlaku na vzorcích ve tvaru krychle a hranolu | Fig. 3 Comparison of compressive strength development for cubic and prismatic specimens



nout stupeň konzistence S4, nejlépe u horní hranice povoleného rozpětí, případně rovnou S5.

• Čerstvé HSC betony s vyšším stupněm konzistence si obvykle lépe udržují potřebnou zpracovatelnost v čase.

Častým problémem ovlivňujícím zpracovatelnost vysokopevnostních betonů je **lepivost** čerstvého betonu. Tento jev souvisí s HSC jen nepřímo, je totiž primárně způsoben dnes již běžným použitím plastifikačních či polyfunkčních přísad typu polykarboxylátů. Lepivost (někdy též popisovaná jako **medovitost**) může být závažným problémem při zpracování čerstvého betonu. Ten se v tomto případě chová jako silně viskózní kapalina bez tixotropie. V některých případech je chování čerstvého betonu až reopexní (*dochází k růstu viskozity během míchání, pozn. redakce*). Negativním důsledkem tohoto jevu jsou podstatně vyšší tlaky při čerpání takového betonu či nechtěně vysoký obsah vzduchu v betonu, který se při hutnění jen obtížně uvolňuje.

Nejúčinnějším řešením je v tomto případě použití vhodných, pro aktuální beton optimalizovaných přísad (poslední generace polykarboxylátů tímto neduhem již obvykle netrpí). Na obr. 1 je příklad důsledku lepivosti na strukturu betonu (zde UHPC). Na obr. 1a) je řez vzorkem vzniklým uložením lepkavého betonu. Naproti tomu na obr. 1b) je řez vzorkem stejného složení, ovšem s optimalizovanou (nelepivou) polykarboxylátovou přísadou. Další možností jak snížit lepivost (ekonomicky i technicky obvykle méně výhodnou) je zvýšení dávky cementového tmele a tomu úměrné snížení dávkování přísady.

Určitým problémem při sledování vlastností čerstvého HSC je vzhledem k výše uvedenému i nalezení vhodného způsobu měření konzistence. Nejjednodušší a nejčastěji po-

užívaný způsob měření pomocí sednutí kužele (Abrams) není často výstižný. Klasifikace podle míry rozlití je již obvykle výstižnější, ale nikoli dokonalá. Proto se stále hledají jiné, vhodnější způsoby. Na VUT v Brně byla vyvinuta „penetrační jehla“ (obr. 2, podrobněji v [6]), jejíž užití je velmi nenáročná a poměrně výstižná.

VLASTNOSTI ZTVRDLÉHO BETONU

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je základní – profilující vlastností HSC. V poslední době se ukazuje, že není až takový problém této vysoké pevnosti obecně, či v podmínkách ČR dosáhnout [1 až 4] aj., jako ji reprezentativně změřit. V ČR se pro stanovení pevnosti betonu v tlaku stále používají převážně vzorky ve tvaru krychle o hraně 150 mm. Při vývoji různých variant HSC autor, podobně jako i jiní [3], zjistil, že použití těchto klasických vzorků někdy přináší až absurdní výsledky. Například v několika případech se ukázalo, že pevnost v tlaku HSC se v čase (v horizontu 7, 28 a 90 dní) snižuje. Další souběžně prováděné zkoušky korelovaných veličin (např. dynamický a statický modul pružnosti) však prokázaly, že reálná pevnost v tlaku ve skutečnosti stoupá.

Zajímavé výsledky v tomto směru poskytuje obr. 3, který znázorňuje vývoj pevnosti v tlaku stejného betonu třídy C90/105, testovaného v čase 7, 28, 90 a 180 dní. Zkoušky byly provedeny na klasických vzorcích ve tvaru krychle o hraně 150 mm a souběžně i na hranolech 400 x 100 x 100 mm (součást stanovení statického modulu pružnosti betonu). Výsledky ukazují, že krychelná pevnost zjištěná po 7 a 28



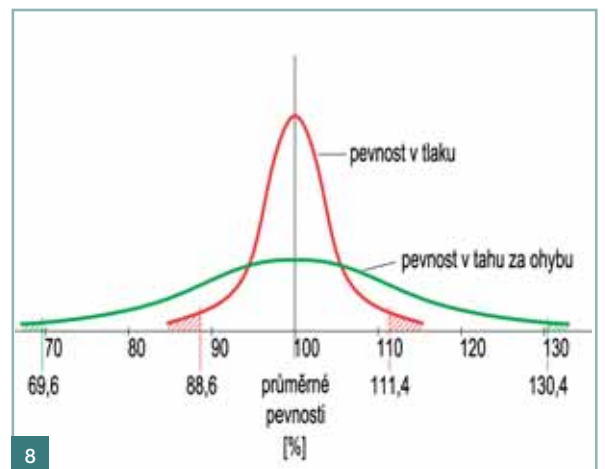
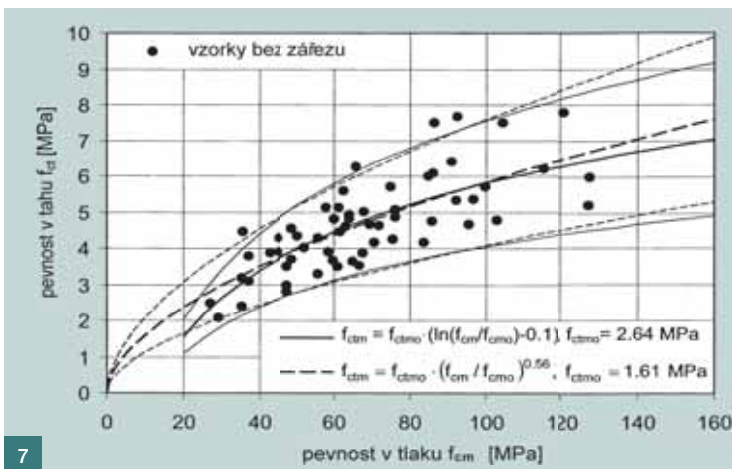
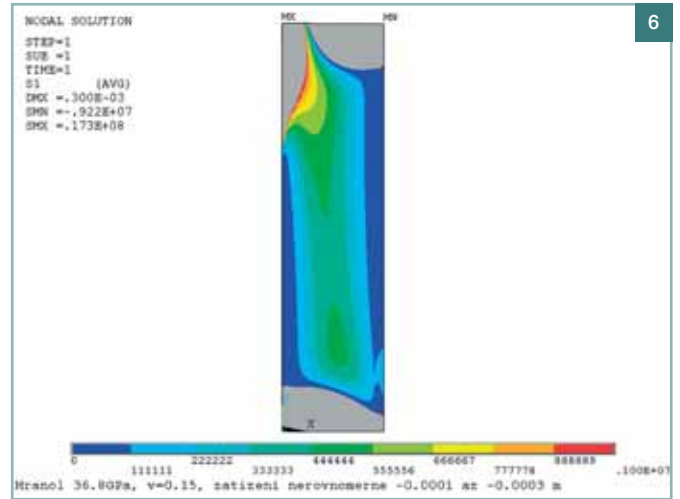
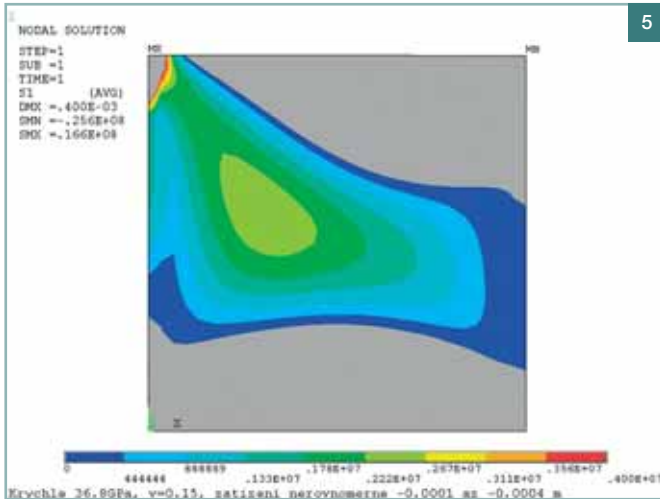
Obr. 4 Vzorek ve tvaru krychle nepravidelně porušený v důsledku tvarové nedokonalosti ■ Fig. 4 Irregularly destroyed cubic specimen due to imperfection in its shape

Obr. 5 Vnitřní napjatost vzorku krychle při osovém namáhání a zkosení tlačných ploch ■ Fig. 5 Internal stresses of cubic specimen with sloping surface due to axial load

Obr. 6 Vnitřní napjatost vzorku hranolu při osovém namáhání a srovnatelném zkosení tlačných ploch ■ Fig. 6 Internal stresses of prismatic specimen with equally sloping surface and equal axial load

Obr. 7 Závislost na pevnosti v tahu (za ohybu) na pevnosti v tlaku betonu podle [3] ■ Fig. 7 Relation between tensile (by flexure) and compressive strength of concrete according to [3]

Obr. 8 Porovnání standardního rozptýlení výsledků pevnosti v tahu a pevnosti v tlaku betonu ■ Fig. 8 Comparison of standard result spread of compressive and tensile strength of concrete



dnech zrání HSC je zřetelně vyšší než hranolová (což je v souladu s běžnou teorií), po 90 dnech se poměr zhruba vyrovnává a po 180 dnech již vycházela hranolová pevnost výrazně vyšší, než krychelná! Pokud si na obr. 3 všimneme rozptýlení naměřených hodnot okolo aritmetického průměru, je zcela zřejmé, že rozptýlení se s vzrůstajícím stářím vzorků zvyšuje, přičemž hranolové pevnosti jsou vždy zřetelně méně rozptýleny.

Z uvedených faktů je patrné, že se vzrůstající pevností v tlaku betonu roste citlivost příslušného stanovení na podmínky zkoušky. Přitom u zkušebních vzorků různých tvarů je tento vliv různě výrazný. Je zřejmé, že klasické zkušební vzorky tvaru krychle o hraně 150 mm jsou u HSC použitelné jen obtížně. I malá odchylka v rovnoběžnosti tlačných ploch vzorku či malá nerovnost dosedací plochy má za následek výrazné snížení zjištěné pevnosti betonu vzorku. V některých

případech je tento problém signalizován způsobem porušení vzorku (obr. 4), jindy to tak zřejmě není.

Ukazuje se dále, že vzorky s vyšším poměrem výška/šířka jsou vůči těmto vlivům více odolné, než vzorky ve tvaru krychle. Z analýzy změn napjatosti zkušebních vzorků vlivem tvarových odchylek [7] a obr. 5 a 6 vyplynulo, že stejná změna míry zkosení tlačných ploch vzorku při zkoušce tlakem vede u vzorků typu hranolu 400 x 100 x 100 mm jen asi k 60% nárůstu příčných napětí ve srovnání se vzorky ve tvaru krychle o hraně 150 mm. I když byla zmíněná analýza udělána prozatím jen v oblasti pružného chování testovaného materiálu, ukazuje jednoznačně na zvýšený význam tvaru vzorku při zkoušení HSC.

Souhrnně lze konstatovat, že při zkoušení vzorků HSC na pevnost v tlaku je nutné mimo běžných dodržovat zejména následující zásady:

- Používat maximálně přesné vzorkovnice. (Kovové jsou obvykle lepší než plastové, ale ani ty nejsou všechny stejné).
- Dát pokud možno přednost válcovým vzorkům \varnothing 150 a výšky 300 mm.
- Dbát na dobrou pohyblivost kloubu tlačných ploch lisu.
- Dbát na čistotu tlačných ploch. (Neodstraněné i drobné úlomky či prach mohou negativně ovlivnit výsledek zkoušky dalšího vzorku.)

Pevnost v tahu

Pevnost v tahu je další důležitou vlastností HSC související pochopitelně s pevností v tlaku. Pevnost v tahu se obvykle stanovuje na trémci čtyřbodovým ohybem (pevnost v tahu za ohybu). V případě HSC považujeme za nutné upozornit na dvě důležité skutečnosti:

- Pevnost v tahu neroste úměrně pevností v tlaku, ale pomaleji (obr. 7). Například u NSC s pevností v tlaku 50 MPa lze podle [3] očekávat pevnost v tahu okolo 4 MPa, což je podíl 1/12,5. Naproti tomu u HSC s pevností v tlaku 120 MPa lze podle téhož zdroje očekávat pevnost v tahu jen okolo 6 MPa, což je podíl 1/20.
- Standardní rozptýlení jednotlivých výsledků měření pevnosti v tahu (zde v tahu za ohybu) je podstatně větší než u pevnosti v tlaku. Pro ilustraci uvádíme na obr. 8 pro obě tyto veličiny rozdíl mezi kvantily 0,05 a 0,95 vyjádřený v % střední hodnoty. Jde o hodnoty převzaté z ČSN EN 1992-1-1, pouze odpovídajícím způsobem graficky znázorněné.

Poznámka: Dovolujeme si na tomto místě zdůraznit skutečnost, že různé vlastnosti betonu (obecně i různé sledované veličiny) mají i různá „standardní rozptýlení“ kolem své střední hodnoty. Možnost jak vyjádřit toto „standardní rozptýlení“ je poměrně mnoho a v tomto příspěvku není prostor pro jejich hlubší rozbor. Proto upozorňujeme na tuto skutečnost, kterou je nutné mít na paměti např. při hledání souvislostí mezi složením betonu a jeho fyzikálně-mechanickými parametry či mezi jednotlivými parametry navzájem. Těžko lze totiž hledat nějaké souvislosti tam, kde variabilita zaznamenaných výsledků nějakého parametru v důsledku změny parametru jiného je srovnatelná se standardní variabilitou měření sledovaného parametru jako takového.

Modul pružnosti

Modul pružnosti betonu je významný parametr, který udává, do jaké míry se bude beton pod zatížením v konstrukci deformovat. Klasický Youngův modul pružnosti v tahu a tlaku E_c je poměr mezi osovým napětím v betonu σ a odpovídajícím poměrným přetvořením ε . Platí tedy:

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Při návrhu stavebních konstrukcí se modul pružnosti uplatňuje ve statických výpočtech vnitřních sil, dále při výpočtu průhybů a deformací vůbec. U konstrukcí z předpjatého betonu je modul důležitý pro stanovení ztrát předpětí. Modul pružnosti v tlaku lze zjistit jako „statický“ při kvazi statickém namáhání dle platné ČSN ISO 6874 [21] a dále nedestruktivními dynamickými metodami (ultrazvuková impulsní metoda a rezonanční metoda). Vzhledem k výše uvedenému uplatnění je prvořadá znalost statického modulu pružnosti, výsledky nedestruktivních metod jsou obvykle využívány pro korelaci se statickým modulem.

V poslední době se modulu pružnosti betonu přikládá stále větší význam, což ovšem v některých případech vede až k neuváženým požadavkům projektantů. Autor se například setkal s požadavkem na dosažení modulu pružnosti HSC s přesností na 0,5 GPa. Takovéto přesnosti opravdu reálně

nelze dosáhnout, zvláště pokud si uvědomíme dříve uvedenou poznámku o standardním rozptýlení jednotlivých veličin (to je u modulu pružnosti přibližně stejné jako u pevnosti v tlaku) a dále uvedené souvislosti. Lze však udělat poměrně dost proto, aby byl modul vyšší nebo naopak nižší, než je např. standardní hodnota pro danou třídu betonu dle [20].

Zjišťování a uplatnění statického modulu pružnosti betonu je v současné době doprovázeno esenciálními rozpory.

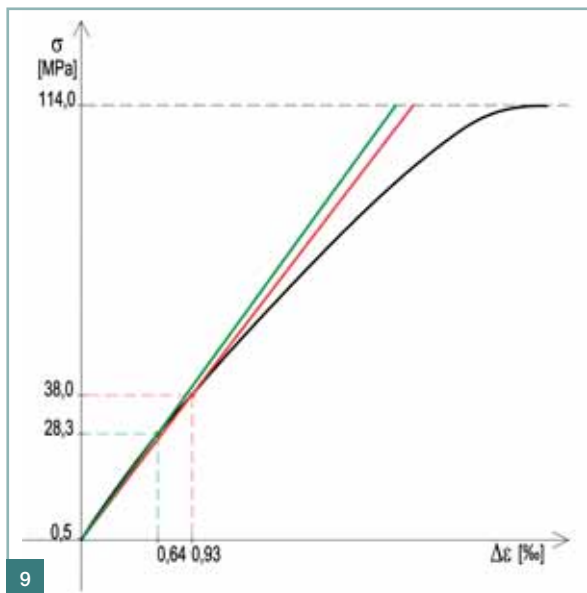
Rozpor 1: Při navrhování betonových konstrukcí se nyní postupuje podle jediné platné soustavy norem ČSN EN 1992 – X (Eurokódy). Zde se výslovně předpokládá, že uvažovaný statický modul pružnosti je stanoven při zatížení betonu na hodnotu $0,4 f_c$, tj. pevnosti betonu v tlaku. Pokud se však statický modul pružnosti betonu skutečně zjišťuje, je nutno postupovat podle platné ČSN ISO 6784 [21], kde se naopak používá mezní zatížení odpovídající $1/3 f_c$.

Rozpor 2: Norma ČSN ISO 6784 doporučuje pro stanovení statického modulu pružnosti použít vzorky ve tvaru válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Je však možné použít i zkušební tělesa dle ISO 1920 s poměrem délky L a průměru d v rozmezí $2 \leq L/d \leq 4$. Toho se v ČR obvykle využívá a modul pružnosti betonu se běžně zkouší na hranolech $400 \times 100 \times 100$ mm. Přitom bylo zjištěno, že změřená hodnota modulu pružnosti závisí výrazně na tvaru a velikosti vzorku. Autoři [8] například zjistili, že moduly pružnosti stanovené na hranolech jsou o 6 až 20 % vyšší, než moduly ze stejného a stejně ošetřovaného betonu, stanovené na válkách. Přitom obě tato stanovení jsou v souladu s uvedenou zkušební normou.

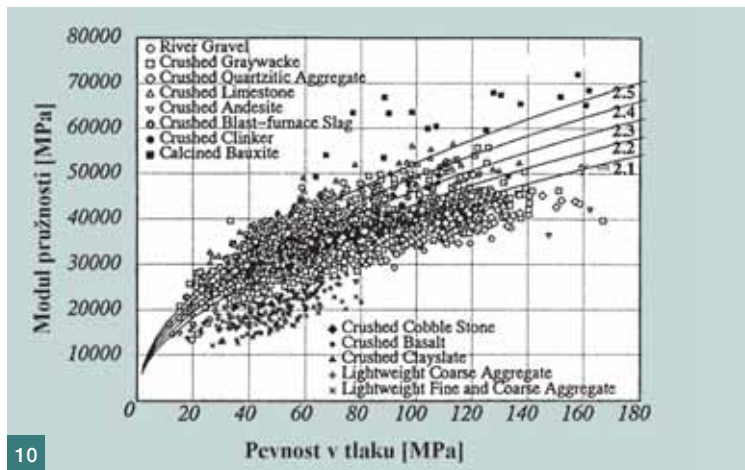
Rozpor 3 (pevnostní paradoxon): Zkoušení modulu pružnosti betonu pomocí zatížení vyvolujícího osově napětí, které je standardním podílem skutečné pevnosti betonu, je jistě správný postup z hlediska hodnocení betonu jako obecného materiálu. Při uplatnění v reálných konstrukcích však tento přístup poněkud zkresluje skutečné chování betonu v nich. Je totiž všeobecně známé (viz též dále), že beton není ideálně pružný materiál. Jeho deformační (pracovní) diagram proto není přímka, ale křivka odchylovající se od přímky ve smyslu vyšších deformací (obr. 9). Pokud tedy zvýšíme pevnost betonu, zvýší se automaticky i mezní napětí, na které bude beton při zkoušce dle [21] zatěžován. Toto zvýšení napětí při zkoušce modulu pak automaticky neguje nezanedbatelnou část zlepšení reálných deformačních vlastností betonu v konstrukci, která je obvykle navrhována za předpokladu standardizovaných pevnostních parametrů pro zvolenou pevnostní třídu betonu (tj. nikoli podle skutečných pevností).

Naznačený princip je nejlépe pochopitelný z následujícího případu, který jsme zaznamenali při zkoušení HSC: U vysokopevnostního betonu třídy C70/85 byla zjištěna skutečná pevnost v tlaku $f_{c,cube} = 114$ MPa. (Poznámka: krychelnou pevnost uvádíme pro zjednodušení výkladu). Hladina zatížení při zkoušce dle [21] je pak $114/3 = 38$ [MPa] a $\Delta\sigma = 38 - 0,5 = 37,5$ [MPa]. Při tomto napětí byla změřena odpovídající poměrná deformace $\Delta\varepsilon = 0,00093$. Modul pružnosti betonu stanovený dle [21] lze pak vyčíslit jako $E_c = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon = 37,5/0,00093 = 40,3$ [GPa].

Když jsme stejný beton zatěžovali při stanovení E_c jen na $1/3$ charakteristické (tj. nikoli skutečné) pevnosti v tlaku pro beton dané třídy, obdrželi jsme následující hodnoty: $E_c = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon = 27,8/0,00064 = 43,5$ [GPa]. Modul pružnosti tak vychází přibližně o 8 % vyšší, než při zatížení odvozeném od skutečné pevnosti. To se na první pohled může



9

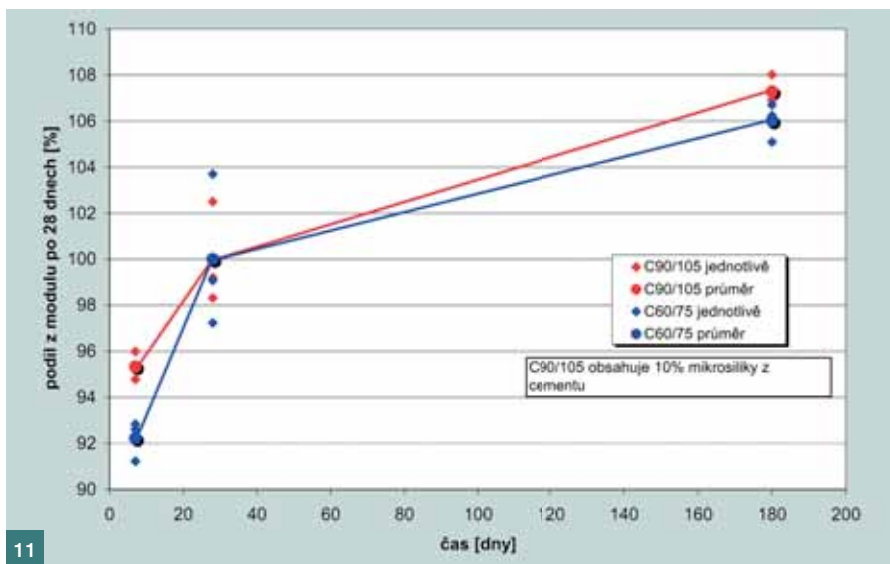


10

Obr. 9 Změna modulu pružnosti betonu v závislosti na různých hladinách zatížení ■ Fig. 9 Change of concrete modulus of elasticity due to different loading levels

Obr. 10 Závislost modulu pružnosti betonu na jeho pevnosti v tlaku ■ Fig. 10 Dependence of concrete modulus of elasticity on its compressive strength

Obr. 11 Porovnání rychlosti nárůstu modulu pružnosti betonů s/bez obsahu mikroplnivá ■ Fig. 11 Comparison of increase rate of modulus of elasticity of concrete with/without micro-filler



11

zdat nepřilíš významné, při pohledu do tab. 3 však snadno zjistíme, že jde o rozdíl odpovídající zvýšení pevnosti betonu o dvě třídy!

Domníváme se, že pro vyjádření reálného přetvárného chování betonu v reálné konstrukci by bylo vhodnější zatěžovat beton při statické zkoušce modulu pružnosti na úroveň zatížení odvozeného např. od charakteristické pevnosti dané třídy betonu (z té se při navrhování konstrukce opravdu vychází) a nikoli od skutečné pevnosti betonu. Takto vyjádřený modul pružnosti by pak lépe vystihoval chování betonu v konstrukci a změny dosažené např. záměrným zvýšením skutečné pevnosti betonu nad uvažovanou třídu.

Je ovšem zřejmé, že se v tomto smyslu asi nepodaří změnit užívanou ISO normu [21], naznačený princip by však mohl být využíván na bázi smluvního dodatku všude tam, kde se klade velký důraz na reálné deformační vlastnosti konstrukce.

Modul pružnosti u HSC je i bez zohlednění výše uvedené obvykle vyšší než u NSC. Jak již bylo mnohými autory potvrzeno [8 až 11], roste i standardně testovaný modul pružnosti s pevnostní třídou betonu. Pokud se výrazně nezmění skladba betonu, roste hodnota modulu se vzrůstající pevností v tlaku jen nepřilíš strmě. Podle [3] roste hodnota modulu pružnosti HSC po 28 dnech zrání úměrně tře-

tí odmocnině pevnosti v tlaku. To lze zjednodušeně vyjádřit vztahem $E_c \equiv (f_c)^b$ kde $b = 1/3$. K podobnému závěru dospěli autoři [11], když zjistili, že u HSC se hodnota exponentu b pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,4, zatímco u NSC je to okolo 0,5. (Konkrétní regresní vztahy pro zachování čitelnosti článku záměrně neuvádíme, lze je pochopitelně nalézt v citované literatuře.)

Použití některých složek betonu typických pro HSC však může uvedené obecné pravidlo značně modifikovat. Například při použití vysokopevnostního čedičového kameniva lze očekávat výrazně vyšší modul pružnosti betonu. V literatuře [3], stejně tak jako v Eurokódu [20] se uvádí zvýšení modulu v důsledku použití čedičového kameniva místo křemenného o 20 %. Šafrata a Stuchlíková [10] zjistili navýšení oproti kamenivu na bázi moravské droby až 32 %. Naše zkušenosti jsou sice poněkud skromnější, nicméně můžeme potvrdit, že použití kameniva (zejména hrubého) s vysokým vlastním modulem pružnosti je jedním ze základních způsobů, jak zvýšit modul pružnosti výsledného betonu.

Přehled nejčastěji používaných kameniv a jejich modulů pružnosti převzatý z [10] je v tab. 4. Vliv druhu kameniva na závislost modulu pružnosti na pevnosti betonu podle [11] lze nalézt na převzatém obr. 10.

Důvodem, proč neroste modul pružnosti u HSC srovnatel-

Tab. 3 Základní mechanické parametry vysokopevnostního betonu ■
Tab. 3 Basic mechanical parameters of high-strength concrete

Základní charakteristiky HSC		C 55/67	C 60/75	C 70/85	C 80/95	C 90/105	C 100/115
Pevnost v tlaku	f_{ck} [MPa]	55	60	70	80	90	není definováno ČSN EN 1992-1-1
	$f_{ck,cube}$ [MPa]	67	75	85	95	105	
	f_{cm} [MPa]	63	68	78	88	98	
Pevnost v tahu	f_{ctm} [MPa]	4,2	4,4	4,6	4,8	5	
	$f_{ctk;0,05}$ [MPa]	3	3,1	3,2	3,4	3,5	
	$f_{ctk;0,95}$ [MPa]	5,5	5,7	6	6,3	6,6	
E_{cm} [GPa]	38	39	41	42	44		

Tab. 4 Pevnosti v tlaku a moduly pružnosti různých hornin ■
Tab. 4 Compressive strength and modulus of elasticity of different rocks

Hornina	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti [GPa]
žula, syenit	160 – 280	40 – 75
diorit, gabro	170 – 300	50 – 100
křemenný porfyr, andezit	180 – 300	25 – 65
čedič, melafyr	290 – 400	55 – 115
diabas	180 – 250	70 – 90
křemenec, droby	150 – 300	60 – 75
křemenný pískovec	120 – 200	10 – 45
vápence, dolomity	80 – 180	20 – 85
rula	160 – 280	10 – 30
amfibolit	170 – 280	45 – 50

né materiálové báze se vzrůstající pevností výrazněji, je rovněž fakt, že HSC obvykle disponují nadbytkem cementového tmele. Zrna hrubého kameniva, které se obvykle podílí nejvýrazněji na určení velikosti E_c , se tak těsně nedotýkají, což snižuje potenciální nárůst modulu pružnosti v důsledku sníženého vodního součinitele tmele.

Zajímavý je i vliv aktivních mikroplniv (mikrosilika, metakaoлин), která jsou častou složkou HSC, na výsledný modul pružnosti betonu. Většina autorů [1, 4 aj.] se shoduje v tom, že uvedená mikroplniva se uplatňují ve ztvrdlém HSC zejména dvojitým způsobem:

- zvyšují celkovou hutnost (*packing density*) struktury betonu,
- vykazují výraznou pucolanickou reakci.

Výše uvedené ve svých důsledcích znamená, že HSC s těmito mikroplnivými mají zpravidla pomalejší nárůst pevnosti, než betony srovnatelné 28denní pevnosti a s pojivem pouze na bázi Portlandského cementu. U modulu pružnosti je to poněkud složitější: pevnost HSC díky pucolanické reakci části pojiva nabíhá pomaleji, efekt zvýšení hutnosti se projevuje prakticky okamžitě. Proto (též vzhledem k vlivu pevnosti betonu na E_c – viz „rozpor 3“) se u těchto betonů dá pozorovat relativně rychlejší nárůst modulu pružnosti.

Na obr. 11 je znázorněno porovnání vývoje modulu pružnosti betonu třídy C60/75 (čedičové kamenivo, bez mikroplniva) a betonu třídy C90/105 (čedičové kamenivo, 10 % mikrosiliky) z výsledků získaných na VUT v Brně. Patrný je vyšší poměr modulu pružnosti 7/28 dní u betonu s mikrosilikou oproti betonu bez ní. Zjištěný rozdíl a četnost měření však nejsou natolik výrazné, abychom zmíněný jev mohli považovat za prokázaný. Domníváme se, že v některých případech může naopak převážít efekt snížení modulu díky zvětšení nadbytku cementového tmele v důsledku použití aktivních mikroplniv.

Závěrem můžeme na základě publikovaných faktů i vlastních zkušeností konstatovat, že hlavními faktory zvyšujícími hodnotu modulu pružnosti betonu jsou:

- použití kameniva (zejména hrubého) s vysokým vlastním modulem pružnosti,
- relativně vyšší podíl hrubého kameniva,
- vysoká pevnost betonu v tlaku,
- maximálně hutná struktura betonu s co nejnižším obsahem vzduchu,
- nízký vodní součinitel (poměr v/c) cementového tmele betonu.

Naopak modul pružnosti klesá:

- při použití kameniva s nízkým vlastním modulem pružnosti (tab. 4),

- při vyšší dávce písku a jemných plniv (zejména popílků),
- při vyšším obsahu vzduchu v betonu (modul pružnosti zde klesá výrazněji než pevnost).

Smršťování

Smršťování betonu je jeho jednou z „nejméně příjemných“ vlastností. Bylo, a stále proto je předmětem rozsáhlé výzkumné činnosti. To se projevuje mj. různorodou kategorizací smršťování a zavedením velkého množství pojmů s tímto jevem souvisejících. Protože se v tomto článku pochopitelně nemůžeme věnovat problematice smršťování HSC v celé její šíři, uvádíme úvodem alespoň základní dělení typů smršťování, s vymezením těch oblastí, které jsou pro chování betonu v konstrukci rozhodující.

Souhrnně lze konstatovat, že smršťování betonu je způsobeno především kapilárními silami v jeho pórovém systému. Tyto kapilární síly se zvětšují v důsledku vytváření většího množství rozhraní voda – vzduch (menisky) a v důsledku případné deformace těchto menisků. Podle toho, kdy, proč a jak tyto menisky vznikají, jsou obvykle definovány různé typy smršťování. Podle [12], [13] aj. můžeme u betonu pozorovat:

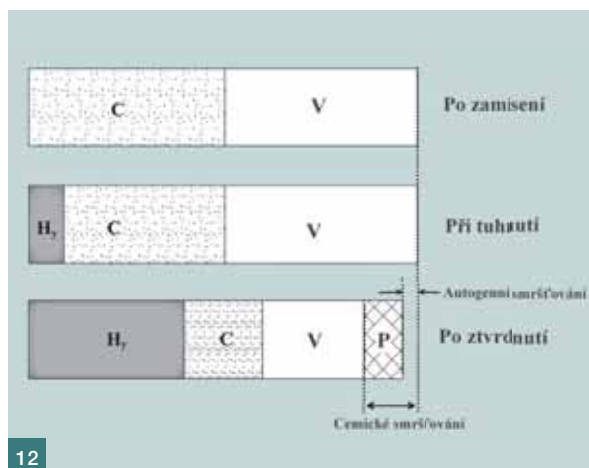
Plastické smršťování

To může probíhat v čerstvém betonu před jeho ztvrdnutím, pokud je rychlost odparu vody z povrchu betonu větší, než je rychlost transportu vody z hlubších vrstev uložené hmoty. Z uvedeného je zřejmé, že plastické smršťování souvisí spíše s technologií betonáže a s následným ošetřováním uloženého betonu, než s jeho složením. Z logiky věci je ovšem zřejmé, že vysokopevnostní betony s typicky nižším obsahem volné vody budou vůči tomuto jevu citlivější. Vhodným ošetřováním jej však lze zcela eliminovat. Lze tedy na tomto místě i konstatovat, že způsob a kvalita ošetřování HSC má pro jeho vlastnosti i vlastnosti finální konstrukce ještě větší význam, než je tomu u betonů běžné pevnosti.

Chemické a autogenní smršťování

„Chemické“ smršťování vzniká v důsledku skutečnosti, že objem hydratačních produktů reakce cementu s vodou je obecně menší, než objem komponent do reakce vstupujících (cement + voda + případně latentně hydraulické příměsi). Tento rozdíl objemu se pohybuje v rozmezí 6 až 10 %, záleží přitom na chemickém složení cementu, poměru voda/cement a na způsobu zjišťování objemových změn [12, 13]. Chemické smršťování se též někdy označuje jako „samovysychání“.

V praxi se jen část chemického smrštění projeví změnou



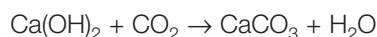
vnějšího objemu betonu, tato část se nazývá „autogenní smrštění“. Zbylá část objemových změn se realizuje v pórové struktuře betonu. Grafické vysvětlení tohoto jevu a terminologie je na obr. 12. (V některých případech se ovšem chemické a autogenní smrštění považuje za totéž.)

Smrštění od vysychání

Je způsobeno ztrátou vody odparem do okolního prostředí, a co do velikosti se obvykle jedná o nejvýraznější smršťovací projev.

Karbonatační smršťování

Při reakci hydratačních produktů cementu se vzdušným oxidem uhličitým vznikají soli kyseliny uhličitě. Zjednodušeně:



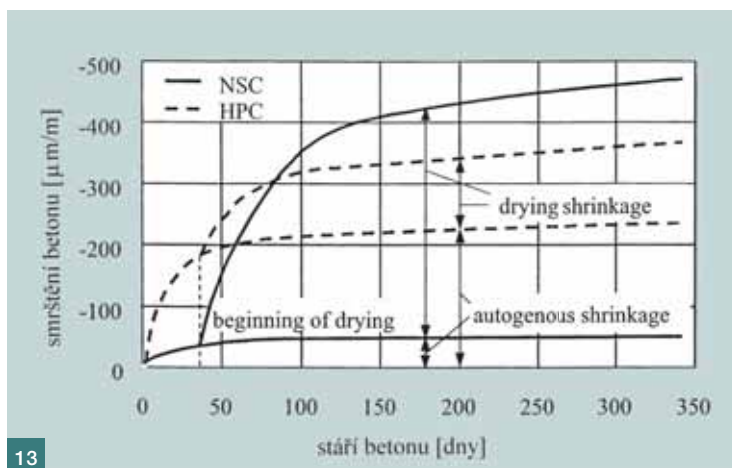
Podobně jako v případě chemického a autogenního smršťování je objem vzniklých reakčních produktů o něco menší, než objem látek do reakce vstupujících. Rozdíl je jen malý a navíc ke karbonataci dochází primárně v povrchových vrstvách betonu, a proto se tento jev obvykle nesleduje, pokud ano, tak spíše jako koroze betonu.

Jakkoli je teoretické rozdělení druhů smršťování více-méně jasné, v praxi je situace daleko složitější. Záleží totiž nejen na složení betonu, ale velmi výrazně i na podmínkách, ve kterých smršťování probíhá (vlhkost prostředí obklopujícího beton, velikost a povrchový modul vzorku, poměr plochy vystavené vysychání k celkovému povrchu vzorku apod.). Může docházet (zejména v rané fázi) i k interferenci s teplotními objemovými změnami.

Dále je velmi důležité, jak se smrštění měří a projevuje. I zde se uplatňuje více hledisek, za základní lze považovat následující dělení:

- **Smršťování volné**, kdy není vzorku, prvku či konstrukci nijak z vnějšku bráněno v objemových změnách. Veškeré smrštění nezachycené vlastní pevností betonu se v tomto případě projeví změnami objemu. Příkladem je volné uložení vzorku na kluzných podporách.
- **Smršťování vázané**, kdy vzorku, prvku či konstrukci naopak je z vnějšku částečně či plně bráněno v objemových změnách (např. soudržností s formou). Smrštění se pak projeví nejen změnami objemu (často nerovnoměrnými), ale obvykle i vznikem a rozvojem trhlin. Typickým příkladem je „korýtková“ metoda pro sledování smrštění sádkových malt.

V dalším textu se budeme věnovat sledování volného



smrštění, které obvykle lépe vystihuje „smršťovací potenciál“ betonu jako hmoty, a navíc je i lépe reprodukovatelné.

Obvykle se uvádí, že HSC má v porovnání s NSC zřetelně vyšší autogenní smrštění a naopak nižší smrštění od vysychání [4, 5, 14 aj.]. Všeobecnou představu o poměrech mezi jednotlivými typy smršťování ukazuje obr. 13 převzatý z [3]. Naše zkušenosti však ukazují přinejmenším na jiné poměry.

V minulých letech jsme se v souvislosti s vývojem HSC pro mostní konstrukce [1] na VUT v Brně věnovali intenzivně sledování procesu smršťování těchto betonů. Základní zkušební postup byl založen na kontinuálním sledování objemových změn vzorků 400 x 100 x 100 mm volně uložených v klimatizované místnosti (obr. 14) s definovanou teplotou (20 ± 2 °C) a relativní vlhkostí vzduchu (60 %). Objemové změny byly snímány pomocí dvou navzájem kompenzovaných strunových tenzometrů. Takto získané výsledky vývoje smrštění u HSC různých pevnostních tříd jsou uvedeny na obr. 15. Z tohoto obrázku i z dalších srovnatelných měření vyplývá, že smrštění od vysychání klesá se vzrůstající pevností třídou HSC.

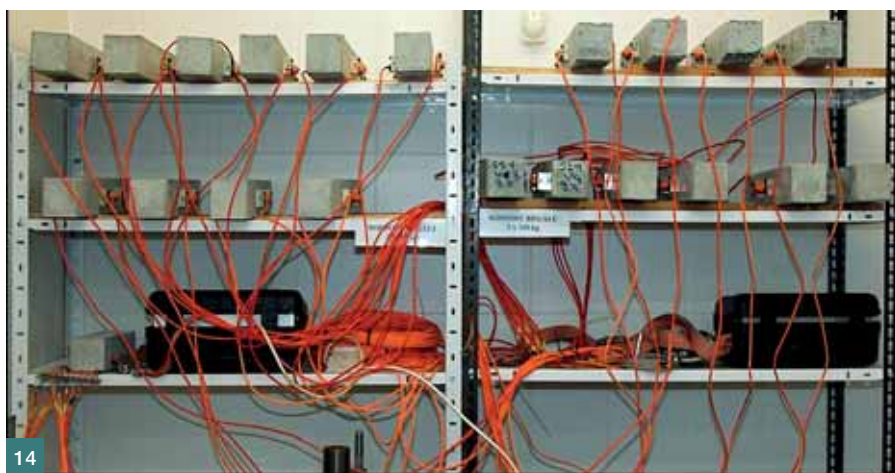
V obr. 15 jsou též vyneseny hranice smršťování běžných konstrukčních betonů, převzaté z [5]. To společně se zjištěnými hodnotami potvrzuje všeobecně uváděný fakt, že HSC mají nižší smrštění od vysychání. Lze předpokládat, že se zde příznivě uplatňuje vyšší hutnost cementového tmele a betonu, která omezuje ztráty vody vysycháním, a současně i vyšší pevnost betonu umožňující lépe zachytit napětí vznikající v jeho struktuře.

V případě autogenního smršťování (na rozdíl od vysychání) nepotvrzují naše dosavadní výsledky všeobecně uznávané skutečnosti. V prvé řadě se nám obvykle nepodařilo nějaké zřetelné autogenní smrštění vůbec změřit! To je skutečnost natolik závažná, že ji musíme před finálním publikováním důsledně verifikovat. V současné době proto testujeme různé přístroje a postupy pro měření smršťování [15] a po vyhodnocení všech dat odbornou veřejnost se získanými poznatky seznámíme.

Dotvarování

Dotvarování betonu lze jednoduše popsat jako proces, při němž dochází v čase k růstu deformace při konstantním napětí. V konstrukcích dochází k uvedenému jen tehdy, pokud se může zmíněná deformace plně realizovat. Nemůže-li se deformace plně či vůbec realizovat, dochází k poklesu, případně k přerozdělení napětí v konstrukci.

Z uvedeného stručného úvodu je patrné, že problemati-

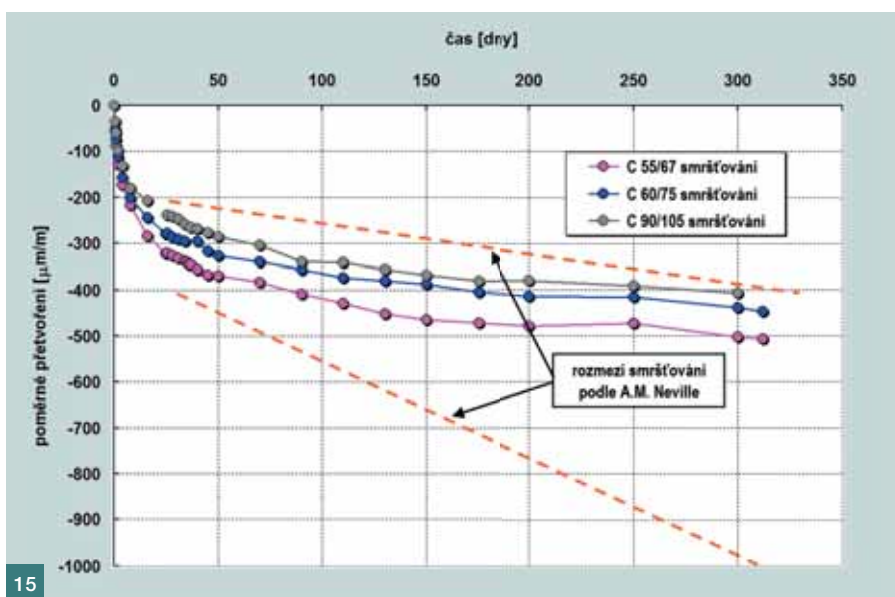


Obr. 12 Znárodnění podstaty chemického a autogenního smrštění betonu ■ Fig. 12 Illustration of the nature of chemical and autogenous shrinkage of concrete

Obr. 13 Porovnání velikostí autogenního smrštění a smrštění od vysychání u NSC a HSC ■ Fig. 13 Magnitude comparison of autogenous and drying shrinkage of NSC and HSC

Obr. 14 Vzorky při sledování smršťování od vysychání v klimatizované komoře ■ Fig. 14 Specimens during measurement of drying shrinkage in the air-conditioned chamber

Obr. 15 Smršťování od vysychání HSC různých pevnostních tříd ■ Fig. 15 Drying shrinkage of HSC of different strength classes



15

ka dotvarování konstrukcí či konstrukčních prvků je rozsáhlejší a komplikovanější, než problematika dotvarování betonu chápaná jen z hlediska materiálu [16]. Podobné je to i u smršťování betonu. Vzhledem k zaměření článku a jeho možného rozsahu uvedeme na tomto místě jen základní poznatky týkající se především vysokopevnostního betonu jako takového.

V případě HSC se prakticky všichni autoři shodují na tom, že jeho dotvarování je za srovnatelných podmínek menší, než u NSC. Z vnějších podmínek (tj. mimo skladbu betonu) má na velikost dotvarování vliv zejména vlhkost prostředí, ve kterém je dotvarující se beton uložen, a hladina zatížení betonu (poměr vyvozeného napětí k pevnosti betonu).

V rámci vývoje HSC betonů pro mostní konstrukce jsme na VUT v Brně zkoumali i míru dotvarování různých pevnostních tříd vysokopevnostních betonů. Na obr. 16 jsou uvedeny zjištěné hodnoty přetvoření v čase pro betony tříd C55/67, C60/75 a C90/105. Prezentovaný experiment probíhal souběžně se sledováním smršťování stejných betonů (viz kapitola o smršťování). Podmínky zkoušky byly následující:

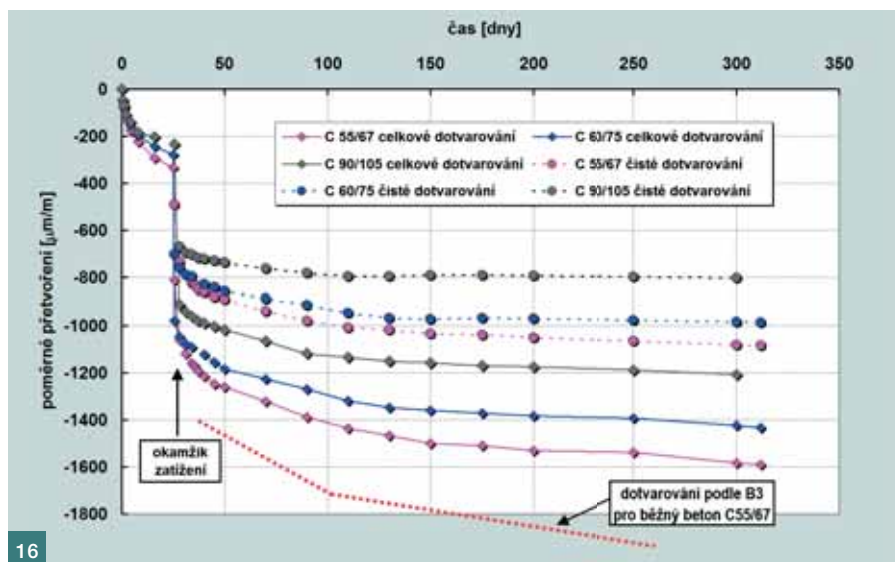
- vzorky ve tvaru hranolu 100 x 100 x 400 mm byly vyrobeny a osazeny tenzometry stejně jako vzorky pro sledování smršťování,
- do stáří 28 dní byly tyto vzorky spolu se vzorky, u nichž bylo měřeno jen smršťování, uloženy v klimatizované místnosti při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti 60 %,

- po 28 dnech byly vzorky určené pro sledování dotvarování umístěny do speciálních lisů a zatíženy osově tlakovou silou tak, aby napětí v nich odpovídalo třetině 28denní pevnosti v tlaku téhož betonu.

Na obr. 16 jsou uvedena jednak přímo změřená přetvoření – označeno jako „celkové dotvarování“, jednak hodnoty označené jako „čisté dotvarování“, které byly získány (pro daný čas) odečtením hodnoty smrštění paralelně uložených nezatížených vzorků od celkového přetvoření. Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že míra dotvarování skutečně klesá s vzrůstající pevností betonu v tlaku, a je tedy u HSC nižší. Na obr. 16 je rovněž uveden teoretický průběh dotvarování vypočtený podle Bažantova modelu B3 pomocí interaktivní aplikace, která je nyní dostupná na: http://concrete.fsv.cvut.cz/veda/konstrukce_theorie/konstrukce.php. Vypočteny mohly být hodnoty pouze pro beton C55/67, jehož složení bylo na hranici mezních vstupních hodnot složení betonu u modelu B3. I tak jsou teoretické hodnoty výrazně vyšší než změřené, což je mj. způsobeno zřejmě i tím, že skutečné testované betony obsahovaly hrubé čedičové kamenivo.

Lomové vlastnosti

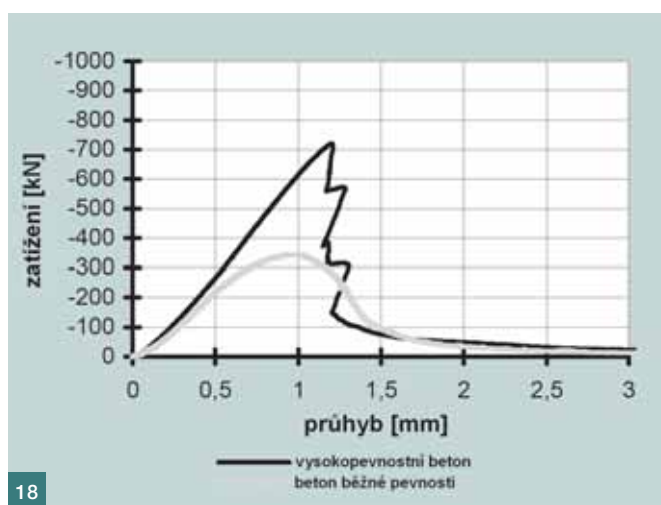
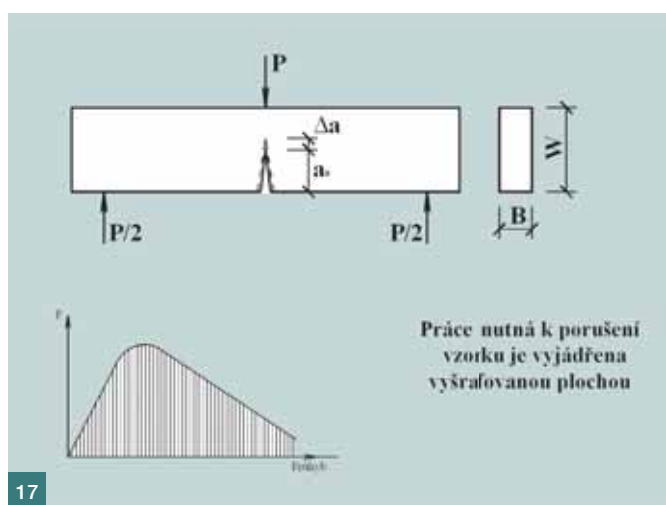
Každý, kdo byl někdy přítomen zkoušce pevnosti HSC v tlaku, si jistě uvědomil, jaké rány se při této zkoušce ozývají. Příčinou je náhlé porušení vzorku z HSC a prudký pokles napjatosti. Vysokopevnostní beton se zde chová více-



Obr. 16 Dotvarování různých pevnostních tříd HSC ■ Fig. 16 Creep of different strength classes of HSC

Obr. 17 Schéma zkoušky trojbodovým ohybem ■ Fig. 17 Scheme of the three-point bending test

Obr. 18 Typické křivky zatížení-průhyb pro HSC a NSC ■ Fig. 18 Typical load-deflection curves of HSC and NSC



méně jako křehký materiál. Toto křehké chování neboli nízká duktilita je další nepříjemnou vlastností HSC. Náhlé porušení konstrukcí z takového materiálu je těžko předvídatelné. Není totiž obvykle předcházeno zřetelnou plastickou fází, při níž dochází k postupnému drcení betonu v tlakové zóně.

Při dimenzování železobetonových konstrukcí jsou výše uvedené skutečnosti v normách zohledněny pomocí různých bezpečnostních součinitelů, které bohužel snižují celkovou efektivitu aplikace HSC. V případě mostních konstrukcí je „strach z křehkého porušení“ takový, že vedl v Národní příloze až k omezení maximální přípustné pevnostní třídy betonu na C70/85.

Vědeckou disciplínou, která se křehkým porušováním materiálů zabývá, je **lomová mechanika**, jež je teoreticky velmi náročná. Její nástroje byly původně odvozeny pro jiné materiály než beton, pro něž byly dodatečně upraveny. Při extrémním zjednodušení lze uvést následující:

- Při hodnocení lomových vlastností betonu se vychází obvykle ze zkoušky vzorku trojbodovým ohybem, když základní změřenou charakteristikou je závislost mezi zatížením (Load) a průhybem (Deflection) vzorku, tj. $L - D$ křivka (obr. 17). Výchozí číselnou charakteristikou odvozenou z této křivky je lomová práce, odpovídající ploše pod křivkou.
- Následuje velké množství dalších veličin, přičemž jen jejich výčet a základní definice přesahují rámec tohoto článku.

- Rozdíl mezi chováním HSC a NSC dobře ukazuje $L - D$ křivka na obr. 18, kdy u vysokopevnostního betonu dochází při porušení na vrcholu křivky k výraznému poklesu přenášeného zatížení. U betonu běžné pevnosti je tento přechod mnohem plynulejší.

Jakkoli jsou uvedené rozdíly zcela zřejmé, potýkáme se při hodnocení betonů prostředky lomové mechaniky s některými esenciálními problémy. K nejzávažnějším patří:

- Velký rozptyl naměřených hodnot kolem střední hodnoty, který často překryje technologické vlivy, které chceme zkoumat. (To je typické pro charakteristiky vycházející z úzce lokalizované poruchy – viz též pevnost v tahu za ohybu.)
- Základní zkoušky příliš nevystihují chování betonu v železobetonových konstrukcích, kde v tažené části prvku/konstrukce přenáší namáhání výztuž a v tlačené beton. Jsou však vhodné pro sledování konstrukcí z prostého betonu (to není u HSC častý případ) a konstrukcí s rozptýlenou výztuží.

Souhrnně lze konstatovat, že efektivnímu využití principů a nástrojů lomové mechaniky při vývoji betonů a betonových konstrukcí je třeba se ještě intenzivně věnovat.

Trvanlivost, korozní odolnost

Trvanlivost se obvykle chápe jako schopnost sledovaného objektu (konstrukce, materiálu) plnit svou funkci po požadovanou dobu – dobu trvanlivosti. V praxi je trvanlivost

betonových a železobetonových konstrukcí limitována destrukčními procesy (chemickými či fyzikálními), které jsou obvykle souhrnně označovány jako „**koroze**“. U stavebních konstrukcí ke korozním procesům patří: působení vzdušného CO_2 a SO_3 , střídavé působení mrazu a tání, působení solí, případně jiných chemických individuí.

V případě HSC lze souhrnně konstatovat, že je odolnější vůči většině korozních procesů než NSC, a je tedy i trvanlivější. Hlavním důvodem je vysoká hutnost HSC, která vzhledem k obecnému pravidlu o rychlosti korozních procesů vede obvykle ke zpomalení korozí.

Poznámka: Obecné pravidlo o rychlosti korozí uvádí, že tato je dána minimem rychlosti tří procesů – rychlosti přísunu agresivních látek do oblasti probíhající korozí, rychlosti korozní reakce samotné a rychlosti odstraňování produktů korozní reakce.

U HSC je minimálně přísun a odstraňování produktů korozní reakce pomalejší než u NSC. HSC proto obvykle bez problémů splňuje normové či rezortní požadavky na vodotěsnost, mrazuvzdornost či odolnost proti působení CHRL. Komplikace může být ovšem v tom, že platná norma nebo předpis vyžadují pro dané podmínky např. záměrné provzdušnění. To pochopitelně degraduje vysokou pevnost HSC a jeho modul pružnosti. Technicky i ekonomicky výhodnějším řešením je v takovém případě spíše experimentální prokázání splnění požadovaného kritéria, než snaha vyhovět ustanovením předpisu, který aplikaci HSC obvykle nepředpokládá.

I když je HSC obvykle trvanlivější než NSC, nesmíme dopad této skutečnosti přecenit. Je třeba zvážit souhrnně všechny relevantní skutečnosti, neboť rozhodující není trvanlivost betonu, ale trvanlivost celé konstrukce! Například: konstrukční prvky z vysokopevnostního betonu často vycházejí subtilnější, než při použití NSC, což je jistě faktor, který trvanlivost konstrukce přinejmenším nezvyšuje. Navíc Eurokód 2 [20] umožňuje projektantovi při použití betonu vyšších pevnostních tříd snížit krycí vrstvu výztuže betonem, což opět může snížit trvanlivost konstrukce.

Odolnost proti vysokým teplotám

Jednou z mála oblastí, kde je HSC horší než betony běžných pevností je odolnost proti vysokým teplotám (požáru). Vinou své vysoké hutnosti a nízké propustnosti má HSC vyšší difuzní odpor proti průniku páry a plynů vznikajících v jeho struktuře v důsledku vysokých teplot. Při požáru pak dochází k explozivnímu odštěpování vrstev HSC (spalling), obnažení výztuže a poměrně rychlé destrukci nosného prvku. HSC ovšem lze navrhnout tak, aby byla tato negativní vlastnost eliminována (obvykle pomocí přísadky spalitelných a nespalitelných vláken). Autor nemá s naznačenou problematikou vlastní zkušenosti. Této problematice se naopak obvykle intenzivně věnují v zemích, kde mají dlouhé podzemní tunely a obdobné konstrukce extrémně ohrožené požárem (Rakousko, Švýcarsko aj.).

ZÁVĚR

V tomto a v předcházejících příspěvcích [1], [2] jsme se pokusili shrnout základní poznatky z navrhování vysokopevnostních betonů a jejich uplatnění v reálných konstrukcích v podmínkách ČR. Na některé problémy máme vyhraněný názor, který jsme zde prezentovali, jindy je nutno stávající znalosti doplnit – na tyto případy jsme se snažili alespoň upozornit.

Literatura:

- [1] Terzijski I.: Mosty z vysokopevnostního betonu v České republice, Beton TKS 4/2010, s. 4-13
- [2] Terzijski I.: Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České republiky – část I. Úvod a složky vysokopevnostního betonu, Beton TKS 1/2011, s. 54-63
- [3] Constitutive modeling of high strength/high performance concrete, *fib bulletin* 42. 2008
- [4] Aitcin P.-C.: Vysokohodnotný beton. IC-ČKAIT, 2005
- [5] Neville A. M.: Properties of concrete. Longman, Harlow. Essex. 1995
- [6] Zach J., Hela R., Halas V.: Stanovení konzistence u vysokohodnotných betonů pomocí penetrační jehly. In 16. Betonářské dny 2009, Sb. konf., Hradec Králové, ČBS Servis, s. r. o., 2009, s. 481-486
- [7] Kratochvíl M.: Analýza vlivu tvarových odchylek zkušebních vzorků na rozložení ploch napětí při tlakové zkoušce, *Interní studie*. VUT v Brně, 2011
- [8] Huňka P., Kolísko J.: Studium vlivu tvaru, velikosti a způsobu přípravy zkušebního tělesa na výsledek zkoušky statického modulu pružnosti betonu v tlaku, Beton TKS 1/2011, s. 69-71
- [9] Cikrle P., Bílek V.: Modul pružnosti vysokopevných betonů různého složení, Beton TKS 5/2010, s. 40-44
- [10] Šafra J.: Modul pružnosti a kamenivo. In. *Seminář z oblasti technologie betonu 2011*, Stachema, Skalský dvůr 2011
- [11] Fuminori T., Takafumi N.: Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete, Proc. of the 3rd Inter. Symp. on Utilization of High-Strength Concrete, V. 2, Lillehammer, Norway, 1993, pp. 1247-1254
- [12] Holt E. E.: Early autogenous shrinkage of concrete, VTT publication 446, ESPO, Finland, 2001
- [13] Person B., Bentz D., Nilsson L.-O.: Self-desiccation and its importance in concrete technology. Report TVBM-3126, Proc of the 4th Inter. Research Seminar, Gaithersburg, Maryland, USA, 2005
- [14] Morin R., Haddad G., Aitcin P.-C.: Crack-free High-performance Concrete Structures. *Concrete International*. No 9. 2002
- [15] Kucharczyková B.; Vymazal T.; Daněk P.; Misák P.; Pospíchal O.: SOP 01/09; Standardní operační postup pro stanovení smršťování a nabývání betonu, Ústav stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně, 2010
- [16] Šmerda Z., Křístek V.: Creep and Shrinkage of Concrete Elements and Structures, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 1988
- [17] Veselý V., Keršner Z., Kněsl Z.: Fracture of advanced building materials: aspects of modelling, In: Proc. of *Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Cape Town, South Africa, 2007
- [18] Anderson T. L.: Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications, CRC Press Inc., 1995
- [19] ČSN EN 206-1. Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ČSNi, Praha, 2001
- [20] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006
- [21] ČSN ISO 6784 Beton – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, 1992

Teoretické podklady pro prezentované výsledky byly získány za finančního přispění MŠMT ČR, v rámci výzkumného záměru MSM 0021630519 „Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce“ a za finančního přispění MPO ČR, v rámci projektu FI-IM5/128 „Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu“.

Doc. Ing. Ivailo Terzijski, CSc.
Ústav betonových a zděných konstrukcí
Fakulta stavební VUT v Brně
Veveří 95, 602 00 Brno
e-mail: terzijski.i@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 850

