

VLIV VELIKOSTI ZKUŠEBNÍ KRYCHLE PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI V TLAKU U VYSOKOPEVNOSTNÍCH DRÁTKOBETONŮ S HRUBOZRNNÝM KAMENIVEM ■ CUBE SIZE EFFECT ON COMPRESSIVE STRENGTH TESTS OF HIGH-STRENGTH FIBRE-REINFORCED CONCRETES WITH COARSE AGGREGATE

Josef Fládr, Petr Bílý

Velikost zkušební vzorku ovlivňuje hodnotu pevnosti v tlaku betonu stanovenou při zkoušce. Srovnání výsledků různých studií však ukazuje, že konkrétní míra vlivu se může pro různé typy betonů dosti lišit. Článek představuje výsledky rozsáhlé experimentální studie, která sledovala závislost mezi velikostí zkušební krychle a změřenou pevností v tlaku pro vysokopevnostní drátkobeton obsahující hrubozrnné kamenivo s maximální velikostí zrna 16 mm (dále jen HSFRC16). Zkoumáno bylo celkem šest různých směsí HSFRC16, jejichž předpokládaná střední hodnota pevnosti v tlaku stanovená na krychli o velikosti hrany 150 mm se pohybovala v rozmezí 100 až 175 MPa. Pro každou směs byly vyrobeny zkušební krychle čtyř velikostí: 40, 100, 150 a 200 mm. Výsledky ukázaly, že vliv velikosti vzorku na změřenou pevnost v tlaku klesá s rostoucí pevností betonu. Pro materiály s pevností větší než 140 MPa byly stanovené pevnosti v tlaku téměř nezávislé na velikosti zkušební krychle. Na základě výsledků měření byly pro zkoumaný typ betonu stanoveny koeficienty pro přepočítání pevnosti v tlaku mezi různými velikostmi zkušebních krychlí. ■ The size of the sample influences the values of compressive strength of concrete determined during the test. However, the comparison of various studies showed that the importance of this effect may vary significantly for different types of concrete. The paper presents the outcomes of an extensive experimental study focused on determination of relations between the size of the cube specimen and the results of compressive strength tests of high-strength fibre-reinforced concrete with coarse aggregate having the maximum aggregate size of 16 mm (referred to as HSFRC16). Six different HSFRC16 mixes, with the expected mean compressive strength measured on 150 mm cube in the range of 100–175 MPa, were investigated. For each mix, cube samples of four sizes – 40, 100, 150 and 200 mm – were examined. The results indicated that the size dependence of compressive strength diminishes with increasing strength of concrete. For very high strength materials (more than 140 MPa), the results were almost size independent. Based on the results, conversion factors for recalculation of compressive strength measured on cube specimens of different sizes were derived for the examined type of concrete.

Ve světě se pro zkoušení pevnosti v tlaku betonu používají dva hlavní typy vzorků – válec a krychle. V různých zemích jsou preferovány vzorky různých typů a velikostí. Tam, kde se používá systém evropských norem, se obvykle pracuje s krychlemi o velikosti hrany 150 mm nebo s válci o výšce 300 mm a průměru podstavy 150 mm.

Laboratořemi jsou obecně preferovány krychle před válci, zejména z důvodu eliminace procesu koncování vzorků. Menší vzorky jsou také celkově výhodnější z hlediska výroby a manipulace. V souvislosti s rozvojem vysokopevnostních betonů jsou klasické krychle často nahrazovány menšími o hraně 100 mm. Podle zkušeností autorů kapacita běžných zkušebních lisů většinou nepřekračuje 3 MN, což znamená, že na nich lze při použití krychlí s hranou 150 mm provádět zkoušky pro betony s pevností v tlaku maximálně 130 MPa. To je samozřejmě v naprosté většině případů vyhovující, nicméně pro vysokopevnostní betony s pevností větší než 140 MPa je to nedostačující. Použije-li se zkušební krychle o velikosti hrany 100 mm, sníží se teoretická síla nutná pro její porušení 2,25x, takže je na stejném zařízení možno provádět zkoušky téměř pro jakýkoliv známý beton.

V zásadě není sporu o tom, že výsledky zkoušek pevnosti v tlaku jsou do určité míry ovlivněny velikostí zkušební vzorku. Číselné vyjádření závislosti mezi změnou velikosti vzorku a změnou naměřené pevnosti však není jednoznačné. Jak bude předvedeno v jedné z následujících kapitol, různé výzkumné týmy dospěly pro různé typy betonů k značně rozdílným závěrům.

V článku se autoři zaměřili na vysokopevnostní drátkobeton obsahující hrubozrnné kamenivo s maximální velikostí zrna 16 mm (dále jen HSFRC16), které jsou dlouhodobě předmětem jejich výzkumu. Na základě výsledků rozsáhlé experimentální studie byly pro zkoumaný typ betonu stanoveny koeficienty pro přepočítání pevnosti v tlaku mezi různými velikostmi zkušebních krychlí.

VLIV VELIKOSTI VZORKU – TEORIE

Pro HSFRC16 nebyla v domácí ani zahraniční literatuře nalezena žádná ucelená práce věnující se vlivu velikosti vzorku na stanovenou pevnost v tlaku.

Studie, které provedl Bažant [2], [3], na teoretické úrovni vysvětlují, proč se naměřené hodnoty pevnosti liší v závislosti na velikosti zkušební vzorku. V zásadě definují dva důvody vlivu velikosti vzorku na výsledek zkoušky – statistický a deterministický (též energetický). První říká, že se zvětšující se velikostí vzorku roste pravděpodobnost, že se v něm objeví defekt, který sníží naměřenou pevnost. Podle druhého lze pro každý materiál definovat tloušťku lokalizačního pásu, která je materiálovou konstantou a odpovídá přibližně dvou- až třinásovkou průměru největšího zrna kameniva [3]. V této zóně se v průběhu zatěžování začínají lokalizovat první poruchy a materiál vykazuje plastické chování. Pokud je šířka lokalizačního pásu významná vzhledem k velikosti vzorku, má vzorek tendenci chovat se více podle teorie plasticity a je tak schopen pojmout relativně větší lomovou energii než větší vzorek, u kterého je velikost lokalizačního pásu v poměru k celkové velikosti vzorku zanedbatelná, takže se vzorek chová více podle zákonů lineární lomové mechaniky. To opět znamená, že na větším vzorku naměříme nižší pevnost.

Bažant [3] odvodil zákon pro vliv velikosti vzorku na pevnost materiálu v tahu. Kim a Yi [9] dále prokázali, že při správném nastavení koeficientů lze tento zákon aplikovat i na pevnost v tlaku. Nominální pevnost materiálu v tlaku σ_N lze podle nich stanovit ze vztahu:

$$\sigma_N = Bf_c \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d}{d_0}}} + \alpha f_c, \quad (1)$$

kde f_c je pevnost v tlaku stanovená na vzorku o charakteristickém rozměru d , d_0 šířka lokalizačního pásu, B konstanta vyjadřující vliv tvaru vzorku a α je ma-

teriálová konstanta, jejíž hodnota leží v rozmezí od nuly do jedné. Vztah má dvě části. První sčítanec vyjadřuje závislost pevnosti na velikosti vzorku (rozměrově závislá část pevnosti). Pokud by vzorec obsahoval pouze tuto část, pro velmi velké vzorky by dával nulovou pevnost materiálu, což je zjevně v rozporu se skutečností. Proto byl do vztahu přidán druhý sčítanec, který vyjadřuje rozměrově nezávislou část pevnosti materiálu.

VLIV VELIKOSTI VZORKU – PRAXE

V této kapitole je proveden souhrn literárních pramenů, které se věnují závislosti mezi velikostí zkušebních krychlí a pevností betonu v tlaku získanou přímo při konkrétních zkouškách. Zdrojů je celá řada, avšak práce věnující se přímo HSFRC16 nebyla nalezena. Do přehledu byly proto vybrány zdroje z posledních 20 let, které se zabývají betony vyšších pevností (alespoň 45 MPa). Z důvodu srovnatelnosti jsou veškeré výsledky vztaženy k pevnostem stanoveným pro krychle o velikos-

ti hrany 100 mm (označovaných jako $f_{c,100}$), která byla používána všemi výzkumnými týmy. Pevnost stanovená na krychli o velikosti hrany x je obecně značena $f_{c,x}$.

Graybeal a Davis [8] realizovali rozsáhlou studii tlakové pevnosti vysokopevnostních drátkobetonů (HSFRC). Srovnávali HSFRC o pevnosti 80 až 200 MPa, používali zkušební krychle o velikostech hrany 50, 70,7 a 100 mm. Beton, který zkoumali, byl vyroben z komerčně dodávané směsi jemnozrnné povahy s velikostí zrna do 0,6 mm. Z výsledků v tab. 1 je patrné, že pevnost v tlaku byla až do hranice $f_{c,100} = 155$ MPa prakticky nezávislá na velikosti vzorku. Pro vyšší pevnosti byl poměr mezi $f_{c,100}$ a $f_{c,70,7}$ nebo $f_{c,50}$ přibližně 0,9.

An et al. [1] se zaměřili na vliv velikosti vzorku na tlakovou pevnost betonu označovaného jako reactive powder concrete (RPC). Porovnávali krychle velikosti 50, 70,7, 100 a 150 mm. Jednotlivé směsi B1, B2 a B3 obsahovaly postupně 0, 1 a 2 % obj. drátků. Velikost největšího zrna kameniva

byla 1,25 mm. Z výsledků shrnutých v tab. 2 nelze vypozařovat, že by vliv velikosti vzorku jednoznačně rostl nebo klesal s pevností betonu, avšak je patrný nárůst stanovených pevností se zmenšující se velikostí vzorku.

Dehestani et al. [6] studovali vliv velikosti vzorku u samozhutnitelných betonů bez drátků (SCC). Použili tři různé směsi a krychle o velikosti hrany 50, 75, 100, 125 a 150 mm. Výsledky jsou shrnuty v tab. 3 a celkově je lze vyhodnotit stejně jako u předchozí studie.

Del Viso et al. [7] měřili tlakovou pevnost vysokopevnostního betonu bez drátků na krychlích o velikosti 33, 50, 67 a 100 mm. Pevnost betonu $f_{c,100}$ byla cca 100 MPa, největší zrno kameniva mělo 12 mm. Výsledky jsou v tab. 4, pevnost opět rostla s klesající velikostí vzorku.

Yi et al. [11] porovnávali čtyři směsi betonu normální až vysoké pevnosti (32 až 82 MPa) bez drátků na krychlích o velikosti 50, 100, 150 a 200 mm. Pevnost stanovená zkouškou vesměs rostla s klesající velikostí vzorku, ovšem poměry se pro jednotlivé směsi měni-

Tab. 1 Pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ podle Graybeala a Davise [8]

■ Tab. 1 Compressive strength relative to $f_{c,100}$ according to Graybeal and Davis [8]

Směs č. ($f_{c,100}$ [MPa])	Velikost krychle [mm]		
	50	70,7	100
A1 (198,1)	1,18	1,167	1
A2 (190,9)	1,132	1,132	1
A3 (189,1)	1,094	1,111	1
A4 (186,6)	1,103	1,095	1
A5 (170,8)	1,147	1,131	1
A6 (153,8)	1,026	1,016	1
A7 (141,5)	1,006	1,031	1
A8 (139)	1,005	1,021	1
A9 (120,2)	0,993	1,005	1
A10 (105)	1,026	1,043	1
A11 (84,2)	0,979	1,026	1

Tab. 2 Pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ podle Ana et al. [1]

■ Tab. 2 Compressive strength relative to $f_{c,100}$ according to An et al. [1]

Směs č. ($f_{c,100}$ [MPa])	Velikost krychle [mm]			
	50	70,7	100	150
B1 (91,8)	1,105	1,035	1	0,952
B2 (119,6)	1,155	1,052	1	0,932
B3 (137,1)	1,029	1,015	1	0,865

Tab. 3 Pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ podle Dehestaniho et al. [6]

■ Tab. 3 Compressive strength relative to $f_{c,100}$ according to Dehestani et al. [6]

Směs č. ($f_{c,100}$ [MPa])	Velikost krychle [mm]				
	50	70,7	100	125	150
C1 (61,2)	1,008	1,006	1	0,94	0,89
C2 (50)	1,074	1,044	1	0,912	0,896
C3 (44,2)	1,007	0,998	1	0,943	0,93

Tab. 4 Pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ podle Del Visa et al. [7]

■ Tab. 4 Compressive strength relative to $f_{c,100}$ according to del Viso et al. [7]

Směs č. ($f_{c,100}$ [MPa])	Velikost krychle [mm]			
	33	50	67	100
D1 (96,1)	1,144	1,085	1,066	1

Tab. 5 Pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ podle Yi et al. [11]

■ Tab. 5 Compressive strength relative to $f_{c,100}$ according to Yi et al. [11]

Směs č. ($f_{c,100}$ [MPa])	Velikost krychle [mm]			
	50	100	150	200
E1 (32,2)	1,124	1	1,041	0,955
E2 (49,5)	1,250	1	0,901	0,934
E3 (73,1)	1,099	1	0,931	0,9
E4 (82)	1,148	1	0,925	–

Tab. 6 Pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ podle Tokyaya a Özdemira [10]

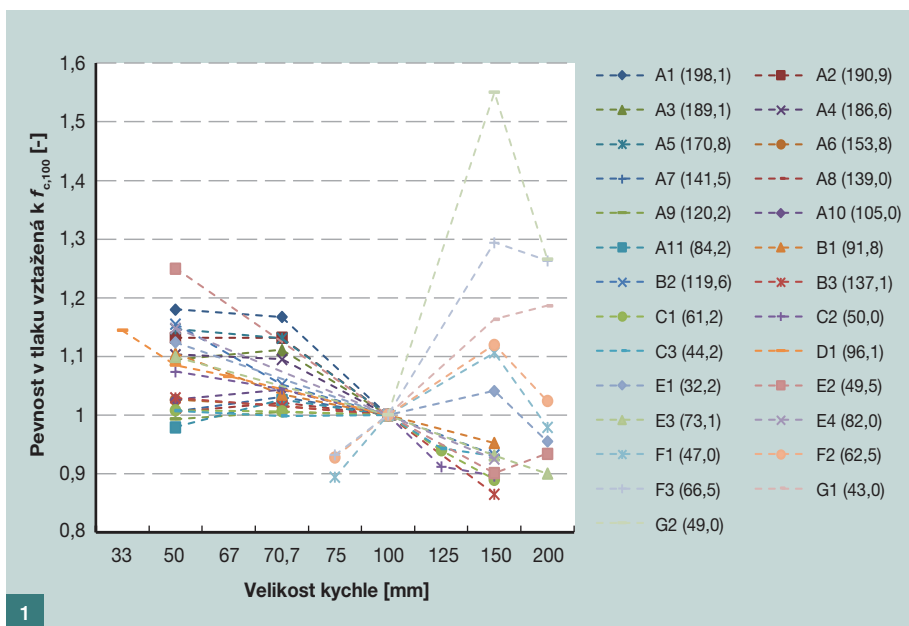
■ Tab. 6 Compressive strength relative to $f_{c,100}$ according to Tokyay and Özdemir [10]

Směs č. ($f_{c,100}$ [MPa])	Velikost krychle [mm]			
	75	100	150	200
F1 (47)	0,894	1	1,106	0,979
F2 (62,5)	0,928	1	1,12	1,024
F3 (66,5)	0,932	1	1,294	1,263

Tab. 7 Pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ podle Zabihho a Erena [12]

■ Tab. 7 Compressive strength relative to $f_{c,100}$ according to Zabihho and Eren [12]

Směs č. ($f_{c,100}$ [MPa])	Velikost krychle [mm]		
	100	150	200
G1 (43)	1	1,163	1,186
G2 (49)	1	1,55	1,266



ly bez jasné tendence vzhledem k pevnosti $f_{c,100}$ (tab. 5).

Tokyay and Özdemir [10] svou studii nepotvrdili nárůst pevnosti s klesající velikostí vzorku (tab. 6). Porovnávali tři směsi vyšších pevností bez drátků na krychlích o hraně 75, 100 a 200 mm a pozorovali pokles pevnosti u menších vzorků.

Zabihi a Eren [12] testovali dva betony normální pevnosti bez drátků, použili krychle o velikosti 100, 150 a 200 mm. Podobně jako Tokyay a Özdemir [10] pozorovali pokles pevnosti s klesající velikostí vzorků (tab. 7).

Graf na obr. 1 přehledně srovnává výsledky jednotlivých autorů shrnuté v tab. 1 až 7. Patrný je poměrně velký rozptyl výsledků. Většina studií si ce potvzuje obecně uznávanou hypotézu o nárůstu změřené pevnosti s klesající velikostí vzorku, ovšem některé výsledky vykazují opačnou tendenci. Vztah mezi absolutní hodnotou tlakové pevnosti daného materiálu a významností vlivu velikosti vzorku na naměřenou pevnost je rovněž nejednoznačný. Z toho lze vyvodit jediný rozumný závěr, a sice že vliv velikosti vzorku musí být experimentálně stanoven zvlášť pro každý typ betonu. Následující kapitoly prezentují rozsáhlou studii vlivu velikosti vzorku na pevnost v tlaku pro beton typu HSFRC16.

Experimentální program

Hlavním cílem stále probíhajícího výzkumu na Fakultě stavební ČVUT v Praze je vývoj vysokopevnostního drátkobetonu vyrobeného výhradně z lokálně dostupných surovin, jehož parametry dosahují parametrů běžných u komerčně dodá-

vaných jemnozrnných směsí ultra vysokohodnotných betonů (UHPC), přičemž jeho cena za 1 m³ je až čtyřikrát nižší. Popisovaný experimentální program probíhal po dobu tří let (2013 až 2015) paralelně s jinými výzkumnými úkoly, pro které byly používány různé varianty betonu typu HSFRC16.

Pro studii bylo vybráno celkem šest směsí HSFRC16, jejichž složení je uvedeno v tab. 8. Volba složení byla provedena tak, aby byl souvisle pokryt rozsah tlakových pevností od 100 do 175 MPa. Směsi jsou ve studii označeny C100 až C175, kde číselná hodnota značí předpokládanou pevnost v tlaku stanovenou na krychli o velikosti hrany 150 mm ($f_{c,150}$). Různorodost složení jednotlivých směsí měla zaručit použitelnost výsledků studie

Tab. 8 Složení zkoušených receptur HSFRC16 mixes

Složka [kg/m ³]	Směs					
	C100	C110	C120	C130	C145	C175
cement 42,5 R	500	750	650	800	650	750
voda	147	225	138	150	155	150
w/c [-]	0,29	0,30	0,21	0,19	0,24	0,2
kamenivo 0/4 mm	800	668	845	914	800	900
kamenivo 4/8 mm	250	848	425	500	436	461
kamenivo 8/16 mm	700	200	424	203	350	424
superplastifikátor (polykarboxylát)	5	11	33	32	34	38
mikrosilika	-	-	39	120	98	150
ocelové drátky 30/0,55/1500/P	60	-	-	-	-	-
ocelové drátky 13/0,20/2750/S	-	160	140	160	100	140
ocelové drátky 25/0,50/450/P	-	-	140	-	100	-
korové vlákno z pneumatik	-	-	-	-	-	140

pro co nejširší spektrum betonů typu HSFRC16.

U všech zkoušených receptur byl použit jednotný cement CEM I v pevnostní třídě 42,5 R. Všechny frakce kameniva byly z čedičového kamenolomu Bělčice a chemii do betonu dodávala firma Stachema.

Pevnost v tlaku byla měřena na zkušebních krychlích čtyř velikostí postupem podle ČSN EN 12390-3 Změna Z1 [5]. Velikosti hran krychlí byly:

- 40 mm – reprezentuje zbytky trámů velikosti 40×40×160 mm, které se používají pro zkoušky jemnozrnných směsí,
- 100 mm – reprezentuje krychle vhodnou pro zkoušení velmi vysokopevnostních betonů,
- 150 mm – reprezentuje standardní velikost zkušební krychle,
- 200 mm – reprezentuje velikost zkušebních krychlí používaných před zavedením evropských norem (podle ČSN 73 1317 [4]).

Pro výrobu zkušebních krychlí byly použity pouze ocelové formy, protože lépe zabezpečují rovinnost zatěžovacích stran.

Pro každou z šesti receptur bylo připraveno šest vzorků od každé velikosti (obr. 2), celkem bylo odzkoušeno 144 krychlí. Vzorky byly ošetřovány ponořením do vody na dobu 28 dní. Aplikována byla rychlost zatěžování 0,5 MPa/s. Byly použity dva zatěžovací přístroje (tab. 9). Pro menší vzorky postačil běžný zkušební přístroj s kapacitou 3 MN, pro větší vzorky bylo nutné použít unikátní zkušební přístroj s kapacitou 11 MN.

Tab. 8 Composition of tested HSFRC16

Tab. 9 Teoretické síly nutné pro porušení vzorků [kN] (vzorky podbarvené modře byly zkoušeny v přístroji s kapacitou 3 MN, vzorky podbarvené červeně v přístroji s kapacitou 11 MN)
 Tab. 9 Theoretical force required for crushing of the sample [kN]. Samples highlighted by blue colour were tested using 3 MN testing machine, 11 MN testing machine was exploited for the samples highlighted by red colour

Směs	Velikost krychle [mm]			
	40	100	150	200
C100	160	1 000	2 250	4 000
C110	176	1 100	2 475	4 400
C120	192	1 200	2 700	4 800
C130	208	1 300	2 925	5 200
C145	232	1 450	3 263	5 800
C175	280	1 750	3 938	7 000

Tab. 10 Přehled výsledků zkoušek pevnosti v tlaku [MPa]
 Tab. 10 Overview of results of compressive strength tests [MPa]

Směs	Velikost krychle [mm]			
	40	100	150	200
C100	138,3	116,3	98,5	75,2
C110	138,2	120,5	103,5	81,5
C120	138	123,8	114,5	95,3
C130	145	137,7	132,3	120,3
C145	153,5	144,2	142	144,5
C175	169,3	177,3	175,2	169,2

Tab. 11 Pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ [-]
 Tab. 11 Compressive strength relative to $f_{c,100}$ [-]

Směs	Velikost krychle [mm]			
	40	100	150	200
C100	1,186	1	0,847	0,646
C110	1,147	1	0,859	0,676
C120	1,115	1	0,925	0,77
C130	1,053	1	0,961	0,874
C145	1,064	1	0,985	1,002
C175	0,955	1	0,988	0,954

VÝSLEDKY A DISKUSE

Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku jsou uspořádány v tab. 10 a 11 a v grafech na obr. 3 a 4. Všechny hodnoty pevností byly spočteny jako aritmetické průměry z šesti měření. Relativní pevnosti na obr. 4 jsou vztaženy k pevnostem stanoveným na krychli o hraně 100 mm ($f_{c,100}$).

Výsledky lze vyhodnotit ze dvou úhlů pohledu. Prvním je významnost vlivu velikosti vzorku při různých úrovních pevnosti materiálu (P1) a druhým je samotný vliv velikosti vzorku na naměřenou pevnost (P2).

Ad (P1): Významnost vlivu velikosti vzorku se postupně snižovala s rostoucí tlakovou pevností materiálu. Pro směsi do C130 byly výsledky zkoušky závislé na velikosti vzorku, na menších vzorcích byly naměřeny vyšší pevnosti. Závislost byla u všech těchto směsí blízká lineární závislosti. Pro vysokopevnostní směsi C145 a C175 byly naměřené pevnosti prakticky nezávislé na velikosti zkušební krychle. Autoři to přičítají skutečnosti, že u směsí C145 a C175 byl použit nižší vodní součinitel a vyšší obsah drátek než u směsí C100 až

C130, což vedlo k eliminaci nehomogenit v cementové matici a redukci statistické části vlivu velikosti vzorků.

Výsledky stanovené pro HSFRC16 jsou v rozporu s výsledky stanovenými Graybealem a Davisem [8] pro jemnozrné HSFRC vyrobené z komerčně dodávané směsi (tab. 1). Tito autoři zjistili, že významnost vlivu velikosti vzorků roste s rostoucí pevností v tlaku. To ukazuje na fundamentální rozdíl mezi chováním vysokopevnostních drátkobetonů s jemnozrným a hrubozrným kamenivem – v prvním případě s pevností betonu vliv velikosti zkušebního vzorku roste, v druhém klesá. V snaze tento rozdíl objasnit byla formulována následující hypotéza.

Významnost statistické a deterministické části celkového vlivu velikosti vzorku je pro betony s různou zrnitostí kameniva odlišná. Při použití pouze jemnozrného kameniva je rozhodující část statistická. Materiál obsahující jemnozrné kamenivo je více homogenní díky rovnoměrnější zrnitosti všech složek směsi. Šířka lokalizačního pásu u tohoto materiálu je velmi malá, v případě materiálu zkoumaného Graybea-

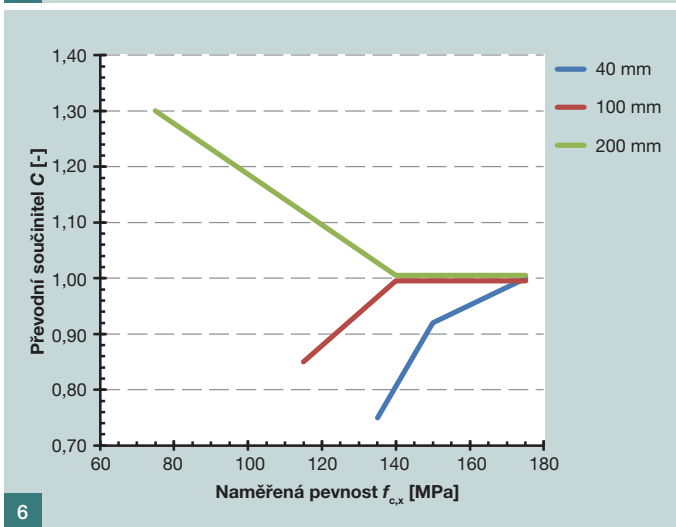
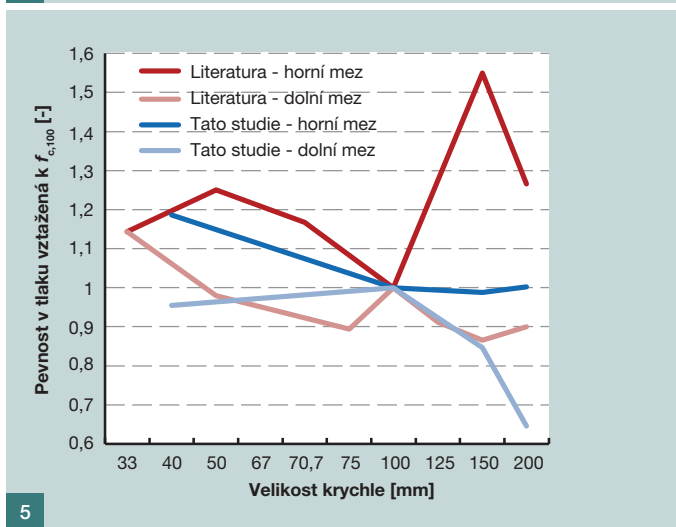
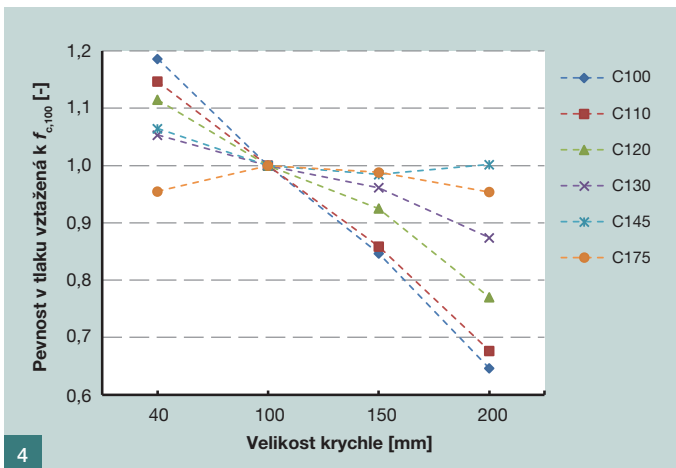
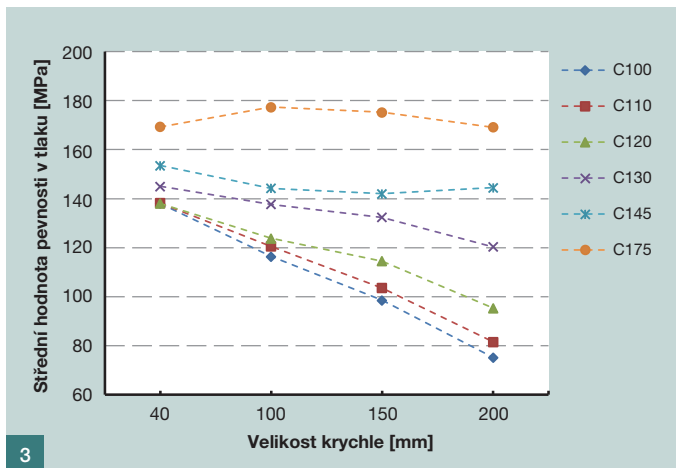
lem a Davisem by podle Bažanta [3] vycházelo cca 1,2 až 1,8 mm oproti 32 až 48 mm pro HSFRC16 sledované v této studii. To znamená, že plastické chování vykazuje při zatěžování jen velmi malá část vzorku. Materiál je více citlivý na mikroporuchy vznikající na rozhraní mezi cementovou maticí a zrny kameniva v důsledku lokálních koncentrací napětí, např. na hranách zrn kameniva. Špičkové hodnoty těchto lokálních koncentrací, a tedy i pravděpodobnost vzniku poruchy, se zvyšují se zvyšující se pevností materiálu. U pevnějšího materiálu je tedy vyšší pravděpodobnost, že vznikne porucha v stejné velké vzorku. O to větší je pak pravděpodobnost, že porucha vznikne ve vzorku větší velikosti. Vliv velikosti vzorku obsahujícího jemnozrné kamenivo tedy roste s rostoucí pevností materiálu.

Naproti tomu u betonu s hrubozrným kamenivem vykazuje před porušením plastické chování relativně větší část vzorku, což znamená, že vliv lokálních koncentrací napětí je upozaděn. Statistická část vlivu velikosti vzorku se stává méně významnou a převažuje část deterministická. S rostoucí pevností ma-



Obr. 1 Srovnání relativních pevností v tlaku (vztažených k $f_{c,100}$) stanovených různými autory
 Fig. 1 Comparison of compressive strength relative to $f_{c,100}$ determined by various authors

Obr. 2 Sada zkušební krychli pro jednu ze směsí
 Fig. 2 Set of cube specimens for one of the mixes



Obr. 3 Závislost mezi velikostí zkušební krychle a střední hodnotou změřené pevnosti v tlaku ■ Fig. 3 Relation between the size of the cube specimen and the mean value of measured compressive strength

Obr. 4 Závislost mezi velikostí zkušební krychle a pevností v tlaku vztaženou k $f_{c,100}$ ■ Fig. 4 Relation between the size of the cube specimen and the compressive strength relative to $f_{c,100}$

Obr. 5 Srovnání relativních pevností v tlaku stanovených jinými autory a autory této studie ■ Fig. 5 Comparison of values of relative compressive strength measured by other researchers and authors of this study

Obr. 6 Navržené grafy součinitele C pro převod pevnosti v tlaku HSFR16 pro různé velikosti hrany zkušební krychle x ■ Fig. 6 Proposed charts of C coefficient for conversion of compressive strength of HSFR16 for different sizes of the edge of the cube specimen x

terialu převažuje rozměrově nezávislá část rovnice (1) nad rozměrově závislou částí a vliv velikosti vzorku se snižuje.

Ad (P2): Zmíněné výsledky jiných prací nelze přímo srovnávat s výsledky této studie s ohledem na odlišnou povahu použitých betonů, přesto lze pozorovat obecnou shodu. Studie potvrdila, že pevnost v tlaku má tendenci

se zvyšovat s klesající velikostí vzorků. Dále pak pevnosti v tlaku vztažené k $f_{c,100}$ naměřené v této studii ve směr leží v rozsahu relativních pevností v tlaku pozorovaných jinými autory (graf na obr. 5). Jediný podstatný rozdíl lze pozorovat u krychlí o velikosti hrany 200 mm. To lze přisoudit skutečnosti, že ostatní výzkumníci používali tento typ vzorků pouze u betonů do pevnosti 70 MPa.

SOUČINITEL PRO PŘEVOD

Podle změřených hodnot pevností v tlaku autoři navrhli pro HSFR16 grafy součinitele pro převod pevností v tlaku C uvedené na obr. 6. Pevnost $f_{c,x}$ naměřenou při zkoušce na krychli o velikosti hrany x lze převést na pevnost krychle o velikosti hrany 150 mm $f_{c,150}$ podle vztahu:

$$f_{c,150} = C f_{c,x} \quad (2)$$

Křivku pro krychle o velikosti hrany 40 mm je nutné považovat pouze za orientační, neboť pro směsi C100 až C130 byly získány téměř shodné hodnoty $f_{c,40}$ a nebylo tedy možné jednoznačně stanovit počáteční hodnotu součinitele C.

ZÁVĚRY

Z provedené studie lze vyvodit následující závěry:

Z velké variability výsledků předcházejících studií zaměřených na různé typy betonů vyšších pevností lze usoudit, že pro každý typ betonu je nutné speciálně provést odvození součinitele pro převod pevností v tlaku stanovených na různě velkých zkušebních krychlích.

Pevnost v tlaku HSFR16 se obecně zvyšuje s klesající velikostí zkušebního vzorku, zároveň však platí, že s rostoucí pevností materiálu klesá významnost vlivu velikosti vzorku. Pro směsi s pevností větší než 140 MPa (C145 a C175) byly výsledky prakticky nezávislé na velikosti zkušební krychle, pravděpodobně díky vyšší homogenitě směsi a menší důležitosti statistické části vlivu velikosti vzorku.

Srovnání s výsledky Graybeala a Davise [8] ukázalo, že vztah mezi velikostí pevnosti v tlaku a významností vlivu velikosti vzorku má u vysokopevnostních drátkobetonů s hrubozrnným kamenivem opačnou tendenci než při použití pouze jemnozrnných složek. Důvodem je pravděpodobně rozdílný příspěvek

Literatura:

- [1] AN, M., ZHANG, L., YI, Q. Size effect on compressive strength of reactive powder concrete. *Journal of China University of Mining & Technology*. 2008, Vol. 18, pp. 279–282.
- [2] BAŽANT, Z. P. Size Effect. *International Journal of Solids and Structures*. 2000, Vol. 37, pp. 69–80.
- [3] Bažant, Z. P. Size effect on structural strength: a review. *Archive of Applied Mechanics*. 1999, Vol. 69, pp. 703–725.
- [4] ČSN 73 1317. *Stanovení pevnosti betonu v tlaku*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1986.
- [5] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení tvrdého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Změna Z1. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [6] DEHESTANI, M., NIKBIN, I. M., ASADOLLAHI, S. Effects of specimen shape and size on the compressive strength of self-consolidating concrete (SCC). *Construction and Building Materials*. 2014, Vol. 66, pp. 685–691.
- [7] DEL VISO, J. R., CARMONA, J. R., RUIZ, G. Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 2008, Vol. 38, pp. 386–395.
- [8] GRAYBEAL, B., DAVIS, M. Cylinder and Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*. November–December 2008, Vol. 105, pp. 603–609.
- [9] KIM, J.-K., YI, S.-T. Application of size effect to compressive strength of concrete members. *Sādhanā*. 2002, Vol. 27, pp. 467–484.
- [10] TOKYAY, M., ÖZDEMİR, M. Specimen shape and size effect on the compressive strength of higher strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 1997, Vol. 27, No. 8, pp. 1281–1289.
- [11] YI, S.-T., YANG, E.-I., CHOI, J.-C. Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete. *Nuclear Engineering and Design*. 2006, Vol. 236, No. 2, pp. 115–127.
- [12] ZABIHI, N., EREN, Ö. Compressive Strength Conversion Factors of Concrete as Affected by Specimen Shape and Size. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2014, Vol. 7, No. 20, pp. 4251–4257.

statistické a deterministické části celkového vlivu velikosti vzorku v důsledku odlišných šířek lokalizačních pásů.

Pro převod pevností v tlaku naměřených na zkušebních krychlích různých velikostí byly navrženy grafy koeficientů, které jsou díky rozsahu studie použitelné pro široké spektrum materiálů typu HSFRC16.

Výsledky studie jsou využitelné při výzkumu nebo aplikaci vysokopevnostních drátkobetonů s hrubozrnným kamenivem o maximální velikosti zrna 16 mm.

Článek byl připraven za podpory grantu GAČR č. 17-19463S „Analýza závislostí mezi mikrostrukturou a makroskopickými vlastnostmi ultravysokohodnotných betonů“.

Ing. Josef Fládr, Ph.D.
e-mail: josef.fladr@fsv.cvut.cz



Ing. Petr Bílý, Ph.D.
e-mail: petr.bily@fsv.cvut.cz



oba: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Text byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.

STAVBA ROKU 2017

ZÚČASTNĚTE SE I LETOS
PRESTIŽNÍ SOUTĚŽE O TITUL
STAVBA ROKU 2017!

PRO VÍCE INFORMACÍ O SOUTĚŽI NAVŠTIVTE STRÁNKU
WWW.STAVBAROKU.CZ NEBO NÁS KONTAKTUJTE
NA MISKEJOVA@ABF-NADACE.CZ

*Tunelový komplex Blanka v Praze soutěžil ve Stavbě roku 2016