

Zložky a vlastnosti vysokohodnotných betónov

Juraj Bilčík, Igor Hudoba

Pre veľmi pevný a zároveň trvanlivý betón bolo zavedené pomenovanie vysokohodnotný betón. Vysokohodnotný betón pozostáva minimálne z piatich zložiek: cementu, kameniva, vody, superplastifikátora a kremičitého úletu. Na sérii skúšok bol sledovaný časový priebeh pevnosti v tlaku a priepustnosti betónov vyrobených zo zložiek dobre dostupných na Slovensku, s rôznym obsahom kremičitého úletu (0, 5, 10 a 15 %).

Concrete is described as a high-performance concrete when it can satisfy especially high demands with respect to durability and strength. High-performance concrete in the fresh state consists at least of five components: cement, aggregate, water, superplasticizer, silica fume. An investigation was carried out to evaluate the compressive strength and permeability of concrete with various contents of silica fume (0, 5, 10, 15 %) made from components easily available in Slovakia.

Nové inžinierske diela s veľkými výškami a rozpätiami, resp. diela vystavené agresívnemu prostrediu si vyžadujú zvýšené nároky na kvalitu stavebných materiálov. Na betón, ako najrozšírenejší materiál, sú v súčasnosti kladené najmä požiadavky na zvýšenie jeho pevnosti a nepriepustnosti. Obidvom požiadavkám je možné vyhovieť ak použijeme vysokohodnotný betón.

Po roku 1980 možno pozorovať v niektorých vyspelých krajinách Európy a sveta prudký nárast záujmu o vysokohodnotný betón (VHB) zo strany vedcov, výskumníkov, ale aj stavebnej praxe. Vysokohodnotný betón ako kvalitatívne lepší konštrukčný materiál v porovnaní s obyčajným betónom (OB) láka inžinierov využiť ho v praxi, nakoľko ponúka nové, doteraz nepoznané a nevyužitú možnosti. Využitie VHB pre prax je podmienené dôkladným oboznámením sa s vlastnosťami tohto kvalitatívne nového materiálu, ako aj prijatím potrebných technických noriem a pravidiel.

Materiály pre VHB

Zlepšenie vlastností OB sa spája s výberom vhodných zložiek na výrobu betónovej zmesi, to znamená kameniva, piesku, cementu a vody. Zistilo sa však, že výraznejšie zlepšenie kvality betónu súvisí s lepším vyplnením medzier medzi jednotlivými zrnami v mikroštruktúre zatvrdnutého betónu. Vstup chémie a možnosti využitia nových vysokoúčinných plastifikátorov pri výrobe betónovej zmesi, a tým výrazné zmenšenie objemu pórov v štruktúre betónu, umožnili výrobu betónov vysokých pevností.

Kamenivo

Pre správny návrh betónovej zmesi OB býva spravidla rozhodujúca krivka zrnitosti použitého kameniva. Výsledky výskumu, ako aj príklady využitia VHB v praxi dokazujú, že veľkosť zrn plniva je kľúčovým problémom. V snahe dosiahnuť homogénnejšiu štruktúru sa pre návrh betónovej zmesi VHB používa spravidla vysoko-kvalitné kamenivo menších frakcií (do 16 mm).

V prípade VHB je aj pevnosť kameniva určujúca pre pevnosť zatvrdnutého VHB. Svedčí o tom pohľad na lomovú plochu vzorky VHB po jej porušení - lomová plocha prechádza cez kamenivo.

V uplynulých rokoch sa docielili vo svete (Nórsko, Japonsko, Francúzsko a USA) veľmi dobré výsledky aj pri použití ľahkého kameniva pre VHB.

Cement

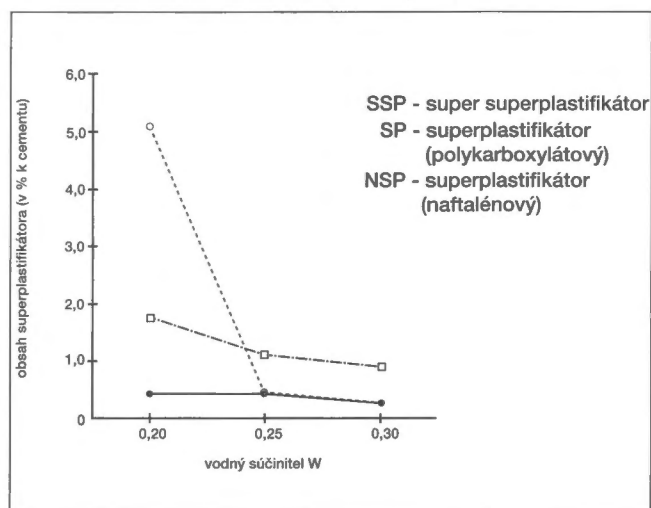
Okrem bežne vyrábaných cementov vyšších značiek, najmä portlandských cementov, sa v niektorých krajinách (napr. Francúzsko) vyvinuli nové, tzv. energeticky modifikované cementy (EMC). Princíp týchto nových cementov je založený na tom, že obsahujú asi 10 % kremičitého úletu, alebo iných modifikátorov. Rovnako obsahujú superplastifikátor vo forme prášku a jemného filera, ktoré sa spracúvajú spolu s portlandským cementom vo vibračnom mlyne v procese výroby. Výhodou EMC v porovnaní s cementom portlandským je vyššia pevnosť cementového kameňa približne o 30 %.

Prímеси

Okrem tradičných prímеси do betónovej zmesi pre VHB, ako sú kremičitý úlet (KÚ) dodávaný v rôznej podobe (nezahustený, zahustený alebo suspenzia) sa dosiahli dobré výsledky s použitím lietajúceho popolčeka, jemnomletej granulovanej vysokopepnej trosky a vápencového prášku.

Prísady

Novovyvinuté stekucovacie prísady vyrábané na báze melamínu alebo naftalénu, označované ako superplastifikátory (SP) a super superplastifikátory (SSP) majú vynikajúcu schopnosť disperzie cementu v betónovej zmesi aj pri hodnote vodného súčiniteľa nižšej ako $w = 0,25$. Zároveň zabezpečujú vysokú pohyblivosť betónovej zmesi pre VHB počas betonáže. Na obr. 1 vidieť závislosť medzi množstvom stekucovacej prísady a hodnotou vodného súčiniteľa pre konkrétnu betónovú zmes, obsahujúcu 10 % KÚ a s priemerom roztečenia kužeľa pri skúške spracovateľnosti $\varnothing 550$ mm.



Obr. 1 – Vzťah medzi množstvom stekucovacej prísady a hodnotou vodného súčiniteľa ($\varnothing 550$ mm, obsah KÚ 10 %) / Relationship between the amount of plasticizer and the w/c ratio

Zjemnenie štruktúry cementového kameňa je možné dosiahnuť použitím ultra jemných častíc veľkosti 0,1 až 0,015 μm . Takýto VHB dosahuje extrémne vysoké hodnoty pevnosti v tlaku 150 až 400 MPa, za čo dostal pomenovanie ultra vysokopevnostný betón (UVPB).

Klasifikácia vysokohodnotných betónov

Posúvanie hranice pevnosti betónu v tlaku na úroveň niekoľkonásobne vyššiu v porovnaní s najvyššími triedami OB vyvoláva potrebu zavedenia novej klasifikácie betónov. Aj keď neexistujú presné deliace hranice medzi skupinami OB, VPB a UVPB, navrhla sa *rámčová klasifikácia betónov podľa pevnosti v tlaku*. Skupinu betónov s pevnosťou v tlaku vyššou, ako je pevnosť najvyššej triedy uvedenej v normách, možno označiť ako vysokohodnotné betóny. V *tab. 1* je uvedená klasifikácia betónov podľa pevnosti v tlaku a iných charakteristík.

Pevnosť v tlaku a priepustnosť VHB z domácich surovín

Možnosti využitia kremičitého úletu na zlepšenie vlastností cementových zmesí boli témou viacerých výskumných úloh a odborných prác aj na Slovensku [8] až [13]. Možnosť výroby betónov s vysokou pevnosťou v tlaku a zníženou priepustnosťou pre plyny a kvapaliny z domácich zložiek sme overovali v rámci grantovej úlohy. Na sérii skúšok normových vzoriek sme sledovali časový priebeh pevnosti v tlaku, dynamického a statického modulu pružnosti, plyno a vodopriepustnosti a karbonatácie betónu.

Tab. 1 – Klasifikácia betónov / Classification of concrete

Charakteristika	Druh betonu		
	obyčajný (konvenčný) OB	vysokohodnotový betón VHB vysokopevnostný VPB	ultra vysokopevnostný UVPB
pevnosť betónu v tlaku [MPa]	< 50 (60)	od 50 do 200	> 200
vodný súčiniteľ $w = \frac{V}{c}$	0,5 (0,35)	0,35 – 0,2	< 0,2
chemické prísady	bežne používané	potrebné	zásadne nutné
prímеси minerálneho alebo organického povôdu	nie sú potrebné	sú potrebné - kremičitý úlet - lietajúci popolček	zásadne potrebné - kremičitý úlet - jemný prach
vláknová výstuž	pridáva sa zriedkavo	je užitočné pridať	zásadne je potrebné pridať
spôsob výroby a ošetrovania betónu	klasický (tradičný)	klasický	potrebný účinok tepla a tlaku
stály stav difúzie chloridov	1	0,6	0,02

Zloženie betónov

Výber zložiek vysokohodnotného betónu sa orientoval na *materiály dobre dostupné v západnej časti Slovenska*. Išlo o ťažené dunajské kamenivo vo frakciách 0-4, 4-8 a 8-16, cement CEM I 42,5 z Rohožníka, kremičitý úlet z OFZ Itebné, závod Široká a plastifikačnú prísadu Sikament FF na báze melamínového koncentrátu. Po zmiešaní kameniva a cementu sa do miešačky pridal kremičitý úlet vo forme vodnej suspenzie v pomere úlet: (voda + základné množstvo plastifikátora) = 1 : 1. Po 90 sekundách miešania sa urobili skúšky konzistencie betónovej zmesi metódou roztečenia podľa STN 73 1312. Požadované bolo vyrobiť betónové zmesi s roztečením 450 mm. Zloženie zmesí je zrejme z *tab. 2*. Obsah

cementu bol vo všetkých zmesiach 450 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, obsah vody bol tiež konštantný (120 $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$), s výnimkou referenčnej zmesi bez prísad, označenej ako zmes A. Obsah kremičitého úletu bol 0, 5, 10 a 15 % hmotnosti cementu. Plastifikátor sa pridával nad základné množstvo 15 $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$, podľa potreby pre dosiahnutie požadovanej konzistencie.

Pevnosť v tlaku

Skúšky pevnosti v tlaku betónových kociek s hranou 150 mm sa robili podľa STN 73 1317 po 7, 14, 28, 91 a 412 dňoch. Vývoj pevnosti betónov v čase je znázornený na *obr. 2*.

Z priebehu vykreslených pevností je možné konštatovať:

- zníženie vodného súčiniteľa pri súčasnom použití plastifikátora malo za následok očakávané zvýšenie pevnosti - betón B oproti referenčnému betónu A;
- narastajúci obsah prímеси kremičitého úletu spôsobil postupné narastanie pevnosti;
- pri betónoch B, D a E došlo v období medzi 91 dňom a 412 dňom k zvýšeniu pevnosti o 14, 17, resp. 12 %; pokles pevnosti betónu C o približne 3 % je netypický a zdôvodniteľný rozptylom meraných hodnôt.

Plynopriepustnosť

Merania plynopriepustnosti betónov sme urobili podľa metodiky vypracovanej Výskumným ústavom pozemných stavieb Praha a Katedrou betónových konštrukcií a mostov SvF STU. Pri tejto metóde sa stanovuje špecifická plynopriepustnosť betónu za predpokladu laminárneho prúdenia vzduchu cez betónovú vzorku pri rozdieloch tlakov na protilahlých stranách skúšobnej vzorky. Skúšobné vzorky – valce priemeru 100 mm, výšky 30 mm boli vyrezané z kociek s hranou 200 mm a vystavené tlaku vzduchu 0,1 MPa. Merania plynopriepustnosti sledovaných betónov sme robili po 28, 91 a 427 dňoch.

Tab. 2 – Zloženie betónov / Concrete mix composition

Zložky betónovej zmesi	Označenie zmesi				
	A	B	C	D	E
cement CEM I 42,5 Rohožník	450	450	450	450	450
voda [l]	225	120	120	120	120
kamenivo 0 - 4 40%	652	740	736	720	704
4 - 8 20%	326	370	368	360	352
8 - 16 40%	652	740	736	720	704
plastifikátor [l]	---	15	15	20	22,5
kremičitý úlet [kg]	---	---	22,5	45	67,5
v/c	0,5	0,27	0,27	0,27	0,27
objem [m ³]	0,997	0,992	0,999	0,999	0,998
v + p/c + s	0,5	0,3	0,29	0,28	0,27
% kremičitý úlet	0	0	5	10	15
Σ kameniva	1630	1850	1840	1800	1760

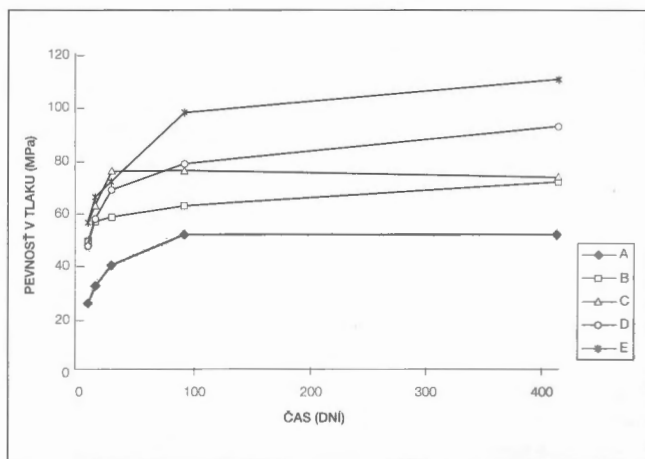
Z nameraných hodnôt, ktoré sú vynesené na *obr. 3*, možno urobiť tieto závery:

- zníženie vodného súčiniteľa a narastanie obsahu kremičitého úletu mali za následok zníženie plynopriepustnosti betónov;
- medzi 28 a 91 dňom tvrdenia došlo k zníženiu plynopriepustnosti, výraznejšiemu pri priepustnejších betónoch; prí-

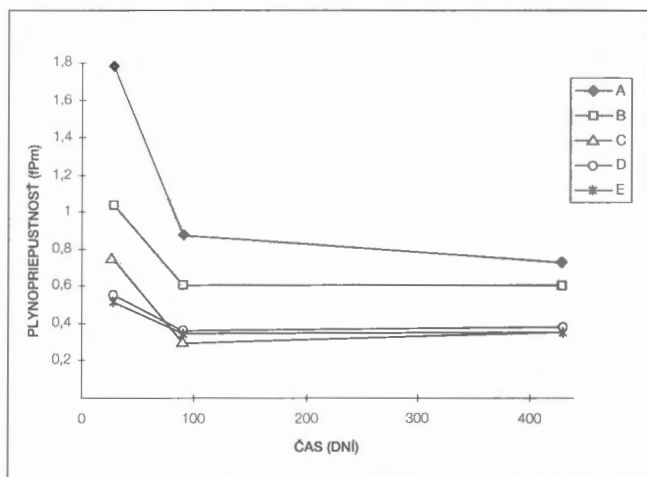
tomnosť kremičitého úletu má výrazný vplyv na zmenšenie plynopriepustnosti; po 91 dňoch však množstvo kremičitého úletu nemalo signifikantný vplyv na hodnotu plynopriepustnosti;

- medzi 91 a 412 dňom tvrdenia došlo k miernemu poklesu plynopriepustnosti u najpriepustnejšieho betónu A; ostatné betóny neznamenali zmenu oproti 91 dňovým hodnotám.

Na informatívne stanovenie hĺbky karbonatácie betónov sme použili fenolftaleínový acidobázický indikátor, ktorým sa potierali čerstvé lomové plochy. Vzorky boli uložené v suchom prostredí pri 20 °C. Po 412 dňoch uloženia bola hĺbka karbonatácie taká malá, že ju nebolo možné vyhodnotiť. Ďalšie plánované merania hĺbky karbonatácie sú po 3, 5 a 10 rokoch uloženia vzoriek.



Obr. 2 – Vývoj tlakových pevností betónov v čase / Change in compressive strength with time



Obr. 3 – Vývoj plynopriepustnosti betónov v čase / Change in gas permeability with time

Záver

Vývoj v oblasti konštrukčných materiálov sa výrazne prejavuje aj v najpoužívanejšom stavebnom materiáli - betóne. Posúvanie hranice pevnosti betónu vyvoláva potrebu zavedenia novej klasifikácie.

V Čechách aj na Slovensku sú dobre dostupné zložky potrebné na výrobu vysokohodnotných betónov. Sme presvedčení, že ak stavebná prax predloží objednávku na výrobu VHB, najdu sa aj tuzejší dodavatelia.

Výsledky skúšok preukazujú možnosť výroby betónov z domácich surovín s vysokou pevnosťou (okolo 100 MPa) a výrazne zníženou priepustnosťou. Vyššie pevnosti umožňujú budovanie subtilnejších betónových konštrukcií, resp. vyššie budovy a mosty väčších rozpätí. Zmenšená priepustnosť predlžuje životnosť betónových stavieb a ich využitie pre objekty na ochranu životného prostredia. Ďalšie výsledky dlhodobých skúšok vysokohodnotných betónov budú uverejnené po ich vyhodnotení.

Literatúra

[1] Breitenbücher, R., Wörner J. D.: Ein neuer Hochleistungsbeton, SIFCON - Slurry Infiltrated Fibre Concrete. *Beton* 12/95, s. 861-866.

[2] Berchold, R., Wagner, P.: Verwendung von Silikazusätzen im Beton. *Beton* 46 (1996), H. 4, s. 216-221.

[3] Bilčík, J., Hudoba, I.: Vysokohodnotný betón, *Inžinierske stavby*, roč. 42(1994), č. 9-10, s. 343-346.

[4] König, G., Grimm, R.: Hochleistungsbeton, *Beton-Kalender* 1996, s. 441-541.

[5] Wagner, J. P., Hauck, H. G.: Nanosilica - ein Zusatz für dauerhaften Beton. 12. IBAUSIL, Weimar, 1994.

[6] *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Utilisation of High Strength/High Performance Concrete*, May 1996, Paris.

[7] Hudoba, I., Bilčík, J.: Nové trendy vo vývoji a využití vysokohodnotného betónu. *Zborník prednášok Betonárske dni 1996*, str. 30-35.

[8] Slanička, Š.: Možnosti využitia produktov na báze amorfného SiO₂ na zlepšenie vlastností cementových zmesí. *Staviteľstvo*, 1987, č. 2, s. 60-67.

[9] Slanička, Š.: Použitie kremičitých úletov na zvýšenie kvality betónov. *Inžinierske stavby*, roč. 36 (1988), č. 7, s. 379-385.

[10] Rouseková, I., Bajza, A., Šváral, J.: Použitie kremičitých úletov na výrobu mostných segmentov, *Inžinierske stavby*, roč. 40 (1992), č. 11, s. 393-397.

[11] Madej, J., Števula, L., Krajčí, L.: Význam chemického a mineralogického zloženia pri posudzovaní vhodnosti odpadov ako zložiek betónov. In: *Zborník z konferencie „Beton 93“, Košice 1993*, s. 24-29.

[12] Rigan, J., Bilík, P., Vajner, J.: Možnosti výroby vysokohodnotných betónov na Slovensku. *Inžinierske stavby*, roč. 42 (1994), č. 9-10, s. 340-343.

[13] Živica, V., Bágel, L.: Vplyv kremičitého úletu na vlastnosti cementových kompozitov. *Stavebnícky časopis*, roč. 41 (1993), č. 6, s. 189-231.

Doc. Ing. Juraj Bilčík, CSc., Doc. Ing. Igor Hudoba, CSc., Stavebná fakulta STU, katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 813 68 Bratislava