

NAVRHOVANIE ZLOŽENIA VYSOKOHODNOTNÝCH BETÓNŮV THE DESIGN COMPOUND OF THE HIGH PERFORMANCE CONCRETES

JACEK ŚLIWIŃSKI, TOMASZ TRACZ, TIBOR ĎURICA

Používanie vysokohodnotných betónov (HPC) nadobúda v celosvetovom rozsahu stále väčšieho významu a výroba HPC nadobúda stále väčších objemov. V príspevku je uvádzaná metóda navrhovania zloženia zmesi čerstvého betónu pre HPC, prostredníctvom ktorej je možné zabezpečiť splnenie požiadaviek zákazníka na kvalitu HPC.

Application of the High Performance Concretes (HPC) constantly acquires higher importance in the global scale and production of HPC acquires higher extent. The method of the design compound of fresh mixes of concrete for the HPC, by means of it is possible to ensure fulfilment of claims of the customer for quality of HPC is presented in this paper.

VŠEOBECNÁ CHARAKTERISTIKA VYSOKOHODNOTNÝCH BETÓNŮV A ICH PONÍMANIE

Úvodom je treba podčiarknuť, že popisovaná skupina novodobých cementových kompozitov vychádza z tradičného obyčajného hutného betónu. Stanovuje jeden z efektov konzekventnej a už desiatky rokov vykonávanej modifikácie tradičného obyčajného hutného betónu. Cieľom modifikácie bolo redukovať „prirodzených“ nedokonalostí tohto materiálu. Popisované vysokohodnotné betóny ukazujú príklad, ako postupne eliminujú nedostatky tradičného materiálu, možno získať materiál o nových a v naprosté väčšine hodnotnejších vlastností.

Poňatie vysokohodnotného betónu nie je do týchto čias jednotne definované, dôkazom čoho je pretrvávajúca diskusia, napr. na konferencii [1], [2]. Bola prijatá dohoda, že betóny o pevnosti vyše C40/50 sa budú nazývať vysokohodnotné betóny (HPC – High Performance Concrete), ktoré však okrem vysokej pevnosti v tlaku sú charakteristické aj inými technicky významnými vlastnosťami na vyššej úrovni. Rozhodujúca je tu trvanlivosť betónu v konkrétnych korozívnych podmienkach, nízka permeabilita plynov a pár, vysoká odolnosť proti opotrebovaniu a pod.

Vzhľadom na rýchly pokrok v technológii vysokohodnotných cementových betónov – vo väzbe na pokroky v technológii cementu, prísad a minerálnych prímiesí – sa postupne objavili spresňujúce ponímania týchto betónov: VHPC (Very High Performance Concrete), kde sa vyžadujú pevnosti v tlaku od 100 do 150 MPa, a taktiež betóny UHPC (Ultra High Performance Concrete), kde sa dosahujú pevnosti v tlaku vyše 150 MPa. Do tejto skupiny je možné zaradiť aj betóny z reaktívnych práškových materiálov RPC (Reactive Powder Concrete), kde hodnota reálne dosahovanej maximálnej pevnosti v tlaku (v laboratórnych podmienkach) sa očakáva okolo 350 MPa [3].

V súčasnosti širšieho praktického použitia dosiahli hlavne vysokohodnotné betóny HPC, tj. betóny tried od C60/75 až C100/115, ktoré sa použili pri zhotovovaní vysokých budov zo železobetónu, mostných konštrukcií alebo vozoviek [4]. V prípade praktického použitia betónov VHPC a UHPC ide zatiaľ skôr o experimentálne objekty. Príkladom takýchto experimentálnych objektov zhotovených z cementového kompozitu z reaktívnych

práškov (RPC) je lávka pre peších a pre cyklistov v Sherbrooke (Kanada), podrobne popísaná v [3], alebo viadukt v Saint-Pierre-la Cour (Francúzsko) [16].

Hlavným dôvodom, prečo projektanti siahajú po využívaní vysokohodnotných betónov (HPC), je možnosť zmenšenia prierezov konštrukčných prvkov a vďaka tomu určité zníženie vlastnej hmotnosti konštrukcie, ako aj získanie prvkov železobetónovej konštrukcie o vysokej trvanlivosti a tým zvýšenie životnosti stavby.

VYSOKOHODNOTNÝ BETÓN – HPC – AKO DVOJZLOŽKOVÝ ZRNITÝ KOMPOZIT

Aby bolo možné porozumieť takému materiálu, ako je zatvrdnutý cementový betón a teda aj betón HPC, je potrebné ozrejmiť hlavné faktory, ktoré vplyvujú na jeho jednotlivé vlastnosti. Najlepšie je použiť najjednoduchší model betónu, akým je model dvojzložkového kompozitu so zrnitým plnivom. V tomto modeli (obr. 1) jednou z fáz sú zrná kameniva, druhou zase zatvrdnutý cementový kameň.

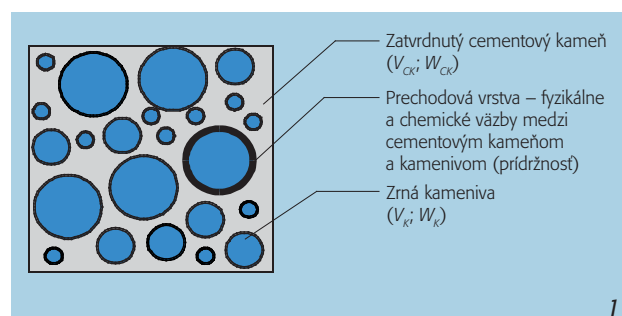
Predkladaný model vychádza z určitých predpokladov, ktoré nie sú vždy príliš zreteľné a nemajú vždy rovnakú vypovedaciu hodnotu, pretože ani materiál zrn kameniva, ani zatvrdnutý cementový kameň nie sú rovnorodými, homogénnymi fázami. Takže aj oni by mohli byť predstavené ako materiály viaczložkové. Napriek tomu predkladaný model úplne vyhovuje pre ďalšie úvahy.

Je zrejmé, že jednotkový objem výsledného materiálu/betónu zodpovedá objemu jednotlivých zložiek: zatvrdnutého cementového kameňa (V_{ck}) a kameniva (V_k). Pretože materiál/betón pozostáva iba z týchto dvoch zložiek, súčet ich objemov sa musí rovnať jednotke objemu ($V_{ck} + V_k = 1$). Každá z týchto zložiek je charakterizovaná svojimi vlastnosťami (W_{ck}) i (W_k), napr. pevnosťou v tlaku, pórovitosťou apod. Hľadajúc úlohu objemov zložiek a ich vlastností je možné ohodnotiť vlastnosť materiálu z nich zloženého, tj. betónu (W_b) nasledovne:

$$W_b = V_{ck} W_{ck} + V_k W_k \quad (1)$$

Rovnica (1) jednoduchým spôsobom popisuje vplyv objemu a vlastností jednotlivých zložiek na vlastnosti z nich zhotoveného materiálu/betónu. Z rovnice jasne vyplýva, že čím

Obr. 1 Model zatvrdnutého betónu ako dvojzložkového kompozitu
Fig. 1 The hardening concrete model as a two components composi-



viac je danej zložky alebo ona obsahuje užitočnejšie, vhodnejšie vlastnosti, tým intenzívnejšie, užitočnejšie a dôkladnejšie vplyva na vlastnosti kompozitu. Je zrejmé, že rovnica (1) neuvádza vplyv dôležitého faktora, ktorým v betóne (a iných betónoch podobným materiálom) je prídržnosť na fázovom rozhraní medzi zatvrdnutým cementovým kameňom a povrchom zrn kameniva.

Predstavený jednoduchý model vedie ku istým výsledkom, dotýkajúcich sa zásad navrhovania zloženia čerstvého betónu z pohľadu možnosti získania jeho najdôležitejších technicky významných vlastností. Pozornosť bude venovaná jeho rozhodujúcim vlastnostiam: pevnosť a pórovitosť (priepustnosť).

Ako je známe, v prípade obvyčajného betónu materiál kameniva má zvyčajne lepšie vlastnosti ako sú vlastnosti zatvrdnutého cementového kameňa. Pevnosť materiálu kameniva (f_k) je značne väčšia ako je pevnosť zatvrdnutého cementového kameňa (f_{ck}), naproti tomu pórovitosť je značne nižšia. Z rovnice (1) vyplýva záver, že aby bolo možné získať čo najväčšiu pevnosť, je treba z jednej strany ohraničiť v betóne objem zatvrdnutého cementového kameňa na úkor objemu kameniva, z druhej strany využiť dostupné prostriedky s cieľom priblíženia jeho pevnosti ku pevnosti materiálu kameniva.

Pokiaľ ide o získanie betónu o čo možno najnižšej priepustnosti, je zrejmé, že zložkou najväčšej pórovitosti (a to pórovitosti otvorenej) je cementový kameň, druhá v poradí pre migrujúce médium je prechodová vrstva na fázovom rozhraní „cementový kameň – povrch zrna kameniva“. Táto úvaha by poukázala na cieľené ohraničenia obsahu cementového kameňa a na redukovanie jeho pórozity a priepustnosti“. Z toho istého dôvodu musí byť redukovaná aj veľkosť plochy prechodovej vrstvy na fázovom rozhraní a musí byť zodpovedajúco zabezpečená aj jej kvalita.

Samozrejme, že problém nie je taký jednoduchý a jednoznačný, ako je uvedené, pretože okrem pevnosti či pórovej štruktúry a priepustnosti sú ešte ďalšie pohľady, ktoré rozhodujú o nevyhnutnom obsahu cementovej pasty v čerstvom betóne, resp. objeme zatvrdnutého cementového kameňa v betóne, a to predovšetkým spracovateľnosť čerstvého betónu.

Z uvedených úvah vyplýva, že vlastnosti betónu môžu byť vo všeobecnosti formulované cez:

- zodpovedajúcu špecifikáciu požiadaviek na vlastnosti, ako aj zodpovedajúci výber objemu cementovej pasty,
- zodpovedajúcu špecifikáciu požiadaviek na vlastnosti, ako aj zodpovedajúci výber objemu zmesi kameniva,
- zodpovedajúce vytváranie kvalitnej väzby (súdržnosti) a hrúbky prechodovej vrstvy na fázovom rozhraní, na ktorej ona vystupuje.

Navrhovanie zloženia každého betónu, a teda aj betónu vysokohodnotného, vo všeobecnosti vychádza z požiadavky na zabezpečenie vyžadovaných vlastností a potrebného množstva týchto troch faktorov.

Žiada sa podčiarknuť, že obidve najdôležitejšie požiadavky kladené na HPC (vysoká pevnosť v tlaku a vysoká trvanlivosť) sú synergické, nakoľko činitele, ktoré umožňujú získanie vysokých pevností, zároveň zabezpečia aj vysokú trvanlivosť a **vice versa**.

Úloha, ako získať betón čo možno najvyššej pevnosti a najnižšej porozity a priepustnosti, je v konečnom dôsledku funkciou:

- maximalizácie pevnosti a hutnosti zatvrdnutého cementového kameňa, čo súvisí hlavne s minimalizáciou vodného súčiniteľa, ako aj použitím vhodných minerálnych prímiesí,
 - maximalizácie pevnosti a minimalizácie medzerovitosti zmesi kameniva, čo súvisí s výberom horniny, zrnitosťou kameniva a jeho tvarovým indexom,
 - maximalizácie väzbových síl, ktorými sú spájané tieto dva komponenty, ako aj hutnosti prechodovej vrstvy na fázovom rozhraní, čo je spojené s obidvomi vyššie uvedenými faktormi.
- Nie je tu možné zabudnúť na dôležitosť ďalších technologických faktorov, ako je dobrá spracovateľnosť, efektívnosť zhutňovania a ošetrovanie čerstvého betónu atď.

Základné požiadavky dotýkajúce sa zložiek vysokohodnotných betónov HPC

Pre výrobu vysokohodnotného betónu podľa doterajších charakteristík je potrebné zabezpečiť zložky zodpovedajúcich vlastností, tj. cementu, kameniva, plastifikačnej a vodu redukujúcej prísady, ako aj minerálnych prímiesí.

Ako spojivo sa najčastejšie používa **cement** o skutočnej pevnosti v tlaku nad 45 MPa, ktorého mineralogické zloženie a jemnosť mletia umožňuje získať hutnú mikroštruktúru vzniknutého zatvrdnutého cementového kameňa. Pretože vysokohodnotný betón HPC sa spravidla vyrába za použitia superplastifikátorov odporúča sa, aby použitý cement obsahoval málo (< 10 %) hlinitanu trojvápenatého (C_3A). Obsah C_3A totiž vplyva na efekt stekutenia čerstvého betónu a na jeho stabilitu v závislosti od času [5]. Podrobnejšie poznatky dotýkajúce sa možnosti použitia rôznych druhov cementov sú uvedené v práci [6].

Ako plnivo sa používa **kamenivo** z hornín, ktorých vlastnosti sú vždy lepšie, ako zatvrdnutého cementového kameňa. Kamenivo musí byť dobrej kvality, z hornín vysokej pevnosti, zrnitosť kameniva, tvar a povrch zrn musí umožniť vysokú prídržnosť s cementovým kameňom na fázovom rozhraní a minimálny obsah cementového tmelu. Odporúčaná veľkosť zrn hrubého kameniva d_{max} nemá byť nad 10 až 15 mm [7] (v Európe 8 až 16 mm). Používanie väčších zrn spôsobuje väčšiu nerovnorodnosť betónu, ako aj koncentráciu napätí v zaťaženom materiáli a v konečnom dôsledku zníženie jeho pevnosti.

Ako už bolo uvedené, dosiahnutie nízkych hodnôt vodného súčiniteľa w/c nie je možné bez použitia vysokoefektívnych superplastifikátorov, ktoré na strane jednej umožnia získať tekutú konzistenciu čerstvého betónu pri veľmi nízkom vodnom súčiniteli, na druhej strane zase spôsobia dezagregáciu zhluku zrn cementu, umožňujú lepšie využitie spojiva v dôsledku zväčšenia jeho merného povrchu. Treba tu však upozorniť, že efektívnosť superplastifikačnej prísady závisí od druhu použitého cementu, ako aj od druhu minerálnych prímiesí [6]. Z tohto dôvodu musí byť táto efektívnosť vždy experimentálne preukázaná pre konkrétnu prísadu a pre konkrétny cement – ich vzájomná kompatibilita.

Ďalšou zložkou vysokohodnotného betónu HPC sú jemnozrnné minerálne prímеси. Najčastejšie sa do HPC používa **kremitý úlet** [17], ktorý vďaka amorfnej štruktúre SiO_2 , veľmi veľkej jemnosti (častice $\leq 1 \mu m$), veľmi veľkému špecifickému povrchu (okolo $20 m^2/g$) a s tým súvisiacej chemickej aktivite, úspešne modifikuje tvrdnuci cementový tmel, a tým aj cementový tmel v prechodovej vrstve na fázovom rozhraní povrchu zrn kameniva. Kremitý úlet tu môže vystupovať v stave „naturál-

nom", tj. v stave v akom bol získaný pri výrobe ferrosilícia, alebo v stave granulovanom. Chemické zloženia a fyzikálne vlastnosti kremičitého úletu sú garantované výrobcom. Jednou z rozhodujúcich vlastností granulovaného kremičitého úletu musí byť jeho schopnosť ľahko dispergovať vo vode počas miešania čerstvého betónu a teda návrat do vysokého stupňa jemnosti. Perspektívnou prídavkou vhodnou ku výrobe HPC sa javí aj metakaolín [19].

Vysokohodnotné betóny HPC nižších tried (do okolo C60/75) je možné bežne v praxi vyrobiť ak sa použije cement minimálne triedy CEM I 42,5; bežné kvalitné prírodné ťažené alebo drevené kamenivo a kvalitná plastifikačná prísada. Ak chceme vyrobiť HPC triedy nad C70/85, musí byť kamenivo vyrobené z hornín vysokej pevnosti a kvalite „A“. Ukazuje sa, že rovnako je nevyhnutné aj použitie kremičitého úletu, resp. inej minerálnej prímеси a superplastifikátora.

VÝPOČET HMOTNOSTNÉHO ZLOŽENIA HPC

Ohraničenia doteraz používaných metód a vybrané súčasné závislosti medzi zložením a vlastnosťami betónu

Zloženia čerstvého betónu HPC sa navrhuje predovšetkým experimentálnymi metódami [8]. Vyplyva to najmä z toho, že čerstvý betón nie je jednoduchou trojzložkovou zmesou. V dôsledku použitia superplastifikátorov, ako aj minerálnej prímеси sa zmes stáva minimálne päťzložkovou, vlastnosti ktorej sú veľmi závislé od kvalitatívnych a kvantitatívnych zmien jej zloženia. Známe sú tiež práce, kde autori pri navrhovaní zloženia čerstvého betónu používajú čiastočne analytické metódy [9], [10].

Známe a všeobecne používané metódy navrhovania zloženia zmesi čerstvého betónu obyčajných betónov vychádzajú zo závislosti pevnosti v tlaku od zloženia zmesi (rovnice Bolomey'a, Abrams'a atď.), ktoré v prípade HPC nie sú aktuálne. Je to v dôsledku toho, že v prípade HPC sa používajú nízke, resp. veľmi nízke hodnoty vodného súčiniteľa v/c , obvykle pod hodnotu 0,35 ($c/v = 2,8$), čo určuje hranice použitia rovnice Bolomey'a.

Podobne, avšak z dôvodu použitia plastifikačných prísad sa neaktuálnym stáva tradičný vzťah konzistencie čerstvého betónu, stanovujúci potrebnú dávku zámesovej vody od množstva cementu a kameniva.

Jednou z troch základných rovníc, ktoré zo zrejmých dôvodov si aj naďalej zachovali svoju dôležitosť, je nižšie uvedená rovnica (2), kde súčet absolútnych objemov všetkých zložiek sa má rovnáť objemu zhrnutného čerstvého betónu.

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{P}{\rho_p} + \frac{K_{hr}}{\rho_{khr}} + \frac{Ps}{\rho_{ps}} + \frac{Pr}{\rho_{pr}} + \frac{V}{\rho_v} = 1,000 \text{ resp. } 1000, \quad (2)$$

kde C, P, K_{hr}, Ps, Pr, V je obsah použitého cementu, piesku, hrubého kameniva, prímеси, prísad a vody [kg/m^3], $\rho_c, \rho_p, \rho_{khr}, \rho_{ps}, \rho_{pr}, \rho_v$ jsou objemové hmotnosti jednotlivých zložiek [kg/m^3] alebo [kg/dm^3].

Výsledky najnovších výskumov dotýkajúcich sa relácii medzi zložením a vlastnosťami HPC pomaly túto medzeru vyplňujú. Rovnicu typu Bolomey'a je možné vo všeobecnosti nahraďiť napr. overeným vzťahom podľa Larrard'a [11], podľa ktorého pevnosť v tlaku HPC s prídavkami (najlepšie s kremičitým úletom) tvrdnúceho 28 dní v normálnych podmienkach je:

Obr. 2 Krivky závislosti 28 dňovej pevnosti v tlaku vysokohodnotného betónu HPC od vodného súčiniteľa a obsahu kremičitého úletu vo väzbe na množstvo cementu k_u/c (uvažované $k_k = 4,9$ a skutočná pevnosť cementu $k_c = 45$ MPa)

Fig. 2 The current curve of 28 days compressive strength of the high performance concrete (HPC) to water cement ratio and content silica fume in the linkage to cement content (k_u/c) (considering $k_k = 4.9$ and real cement compressive strength $k_c = 45$ MPa)

Obr. 3 Krivky závislosti 28 dňovej pevnosti v tlaku vysokohodnotného betónu HPC bez kremičitého úletu od vodného súčiniteľa w/c podľa de Larrard'a (plná čiara) a podľa Bolomey'a (prerušovaná čiara). Podobne ako na obr. 2, aj tu je uvažované $k_k = 4,9$ a skutočná pevnosť cementu $k_c = 45$ MPa

Fig. 3 The current curve of 28 days compressive strength of the high performance concrete (HPC) without silica fume to water cement ratio w/c according to de Larrard (full line) and to Bolomey (dash line). Analogous to the Fig. 2, also here is considering $k_k = 4.9$ and real cement compressive strength $k_c = 45$ MPa).

Obr. 4 Vývojový diagram popisujúci spôsob postupu navrhovania zloženia HPC

Fig. 4 The development chart interpreting the approach of order proposing compound of the HPC

Obr. 5 Krivky závislosti 28 dňovej pevnosti v tlaku HPC od vodného súčiniteľa v/c pri stálych hodnotách $k_g = 4,9$; $k_c = 50$ MPa a $k_u/c = 0,10$

Fig. 5 The current curve of 28 days compressive strength of the high performance concrete (HPC) to water cement ratio w/c by constant values $k_g=4,9$; $k_c=50$ MPa a $k_u/c=0,10$

$$f_{c28} = \frac{k_k k_c}{\left[\frac{1 + 3,1v/c}{1,4 - 0,4 \exp(-11 k_u/c)} \right]^2}, \quad (3)$$

kde k_k je súčiniteľ vyjadrujúci vplyv druhu použitého kameniva [-] (pre väčšinu kamenív používaných do HPC je v rozmedzí od 4,9 do 5,2), k_c skutočná pevnosť cementu [MPa], v/c vodný súčiniteľ [-], k_u/c obsah kremičitého úletu v prepočte na hmotnosť cementu [kg/kg].

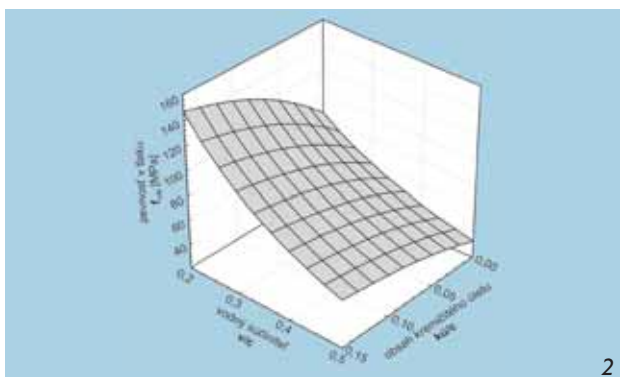
Na obr. 2 je uvedená závislosť vypočítaná podľa rovnice (3) pri použití kameniva $k_k = 4,9$ a skutočnej pevnosti použitého cementu $k_c = 45$ MPa.

V prípade, keď nie je použitý kremičitý úlet ($k_u/c = 0$), rovnica (3) sa zmení na:

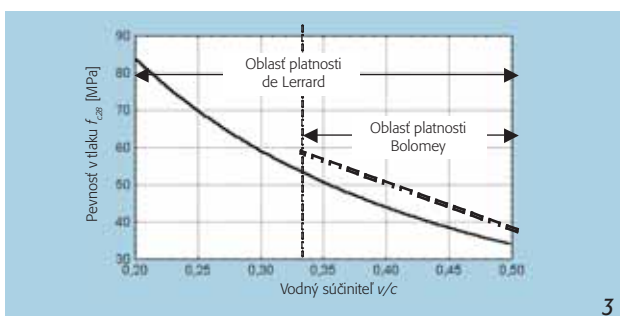
$$f_{c28} = \frac{k_k k_c}{[1 + 3,1v/c]^2}, \quad (4)$$

výsledkom ktorej je krivka v tvare paraboly (obr. 3), veľmi pripomínajúca priebeh lineárnej závislosti Bolomey'a.

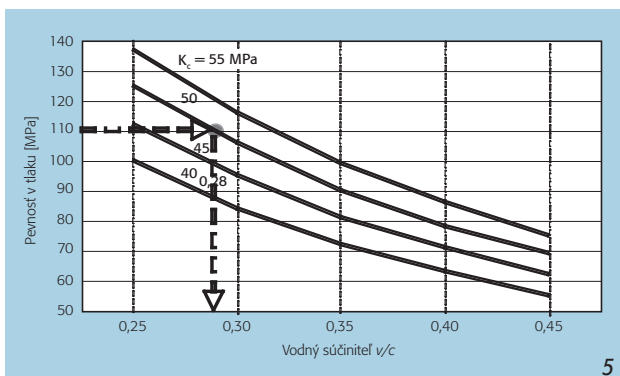
Ďalšie informácie dotýkajúce sa všeobecných, experimentálnych a analytických závislostí medzi kvantitou a kvalitou skladby čerstvého betónu a vlastnosťami čerstvého a zatvrdnutého betónu sú uvedené napr. v práci [10].



2



3



5

Proces navrhovania hmotnostného zloženia HPC

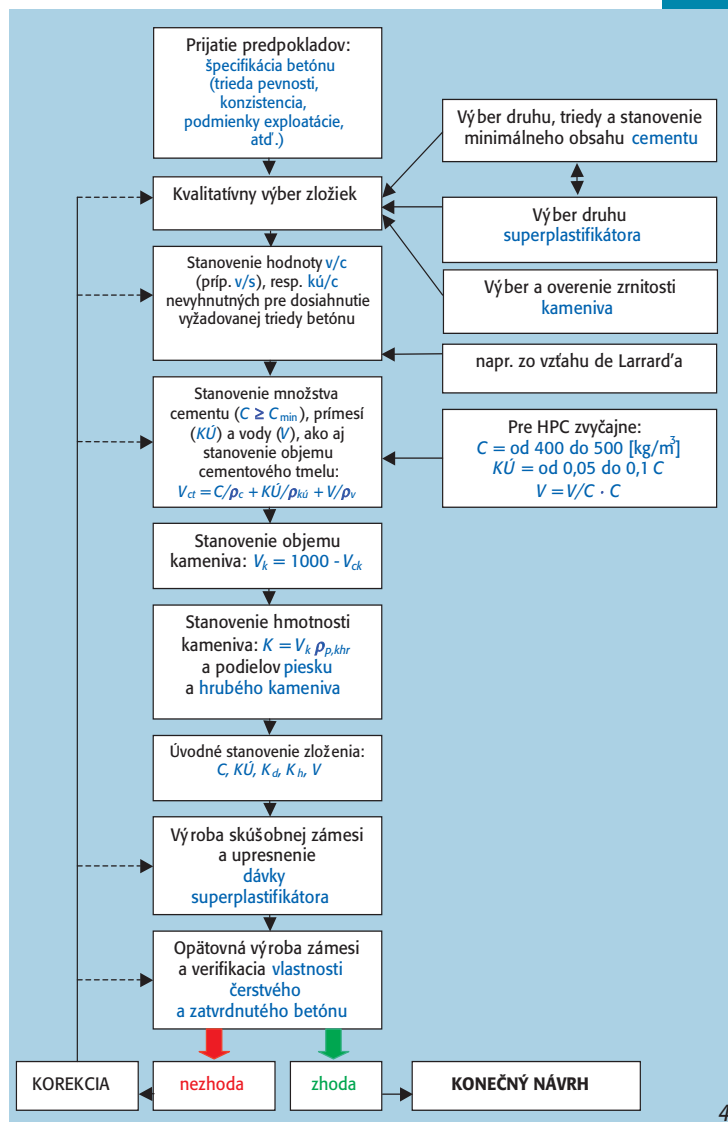
Proces navrhovania hmotnostného zloženia HPC musí prebiehať podľa schémy na obr. 4.

Príklad

Je potrebné navrhnuť a vyrobiť betón o pevnosti v tlaku $f_{c28} = 110$ MPa pri dosiahnutí konzistencie čerstvého betónu 200 mm sadnutie kužela podľa Abramsa.

Na výrobu takto špecifikovaného betónu sa navrhuje použiť tieto zložky:

- cement CEM I 42,5 o skutočnej pevnosti tlaku $k_c = 49,5$ MPa a hustoty $\rho_c = 3,1$ kg/dm³,
- kamenivo suché pozostávajúce z:
 - kremičitého riečneho piesku 0/2 o objemovej hmotnosti zrn $\rho_p = 2,65$ kg/dm³ v množstve 35 %,
 - drveného čadičového kameniva o objemovej hmotnosti zrn $\rho_{\text{čadič}} = 2,9$ kg/dm³: frakcia 2/8 mm v množstve 30 %, frakcia 8/16 mm v množstve 35 %, (dávkovanie týchto troch frakcií kamenív je stanovené osobitne, využívajúc kritérium minimálnej medzerovitosti, uvedené napr. v [12]; pri takejto skladbe zrnitosti kameniva jeho medzerovitost v stave zhrnutenom dosiahla 28 %),



4

- superplastifikátor na báze éteru polykarboxylátu o hustote 1,15 kg/dm³, zloženia: 40 % živice a 60 % vody,
- kremičitý úlet Silimic (huta Ľaziska) v „prirodzenom“ stave o hustote $\rho_{kú} = 2,2$ kg/dm³,
- voda z vodovodu o hustote $\rho_w = 1,0$ kg/dm³.

Dávka kremičitého úletu (KÚ) sa navrhuje 10 % z hmotnosti cementu (C), tj. najčastejšie používané množstvo; na základe známeho súčiniteľa čadičového kameniva $k_g = 4,9$ a známej skutočnej pevnosti cementu $k_c = 49,5$ MPa sa na základe uvedenej rovnice de Larrard'a vypočíta vodný súčiniteľ w/c . Možné je ho tiež získať na základe závislosti od skutočnej pevnosti cementu podľa kriviek uvedených na obr. 4, ktoré ukazujú závislosti tejto rovnice s ohľadom na w/c pri dodržaní rovnakého obsahu pomeru kremičitý úlet/cement $kú/c = 0,10$ a súčiniteľov charakterizujúcich vplyv kameniva a cementu na pevnosť betónu ($k_g = 4,9$; $k_c = 50$ MPa).

V uvádzanom príklade z vyžadovanej pevnosti v tlaku 110 MPa vyplýva $w/c = 0,28$ (obr. 5).

Ak dávka cementu v betóne bude 480 kg/m³ (v betónoch HPC sa obsah cementu pohybuje v rozmedzí od cca 400 do cca 500 kg/m³), je možné stanoviť zloženie cementového tmelu:

- cement CEM I 42,5 = 480 [kg/m³],
- voda 480 · 0,28 = 135 [dm³/m³],
- kremičitý úlet 480 · 0,10 = 48 [kg/m³].

Za týchto podmienok absolútny objem cementového tmelu (V_{ct}) je:

$$V_{ct} = C/\rho_c + V/\rho_v + KÚ/\rho_{kú} = 480/3,1 + 135/1,0 + 48/2,2 = 311,6 \text{ [dm}^3\text{]}$$

Porovnávajúc medzerovitosť kameniva (28 % objemu, teda 280 dm³/m³), z objemu cementového tmelu je vidieť, že určité budú preplnené medzery v kamenive a zrná kameniva budú dostatočne obalené cementovým tmeľom. Objem cementového tmelu je o cca 12 % väčší ako je objem medzier v kamenive.

Aby bolo vyrobené 1 m³ zmesi čerstvého betónu, je potrebné do vypočítaného množstva cementového tmelu dodať zodpovedajúci objem kameniva (V_k), ktorý sa vypočíta z rovnice:

$$V_k = 1000 - V_{ct} = 1000 - 311,6 = 688,4 \text{ [dm}^3\text{]}.$$

Priemerná hodnota objemovej hmotnosti zŕn piesku ρ_p a hrubého kameniva ρ_k vyššie uvedenej zrnitosti má hodnotu:

$$\rho_k = 0,35 \rho_p + 0,65 \rho_{\text{čadič}} = 0,35 \cdot 2,65 + 0,65 \cdot 2,9 = 2,813 \text{ [kg/dm}^3\text{]},$$

z čoho vyplýva hmotnosť použitého kameniva (K_g):

$$K_g = V_k \rho_k = 688,4 \cdot 2,813 = 1936 \text{ [kg]}$$

a objem jeho zložiek:

- riečny kremičitý piesok $P = 1936 \cdot 0,35 = 678 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
 - drvené čadičové kamenivo 2/8 mm $HK_{2/8} = 1936 \cdot 0,30 = 581 \text{ kg/m}^3$
 - drvené čadičové kamenivo 8/16 mm $HK_{8/16} = 1936 \cdot 0,35 = 678 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- Z uvedeného vyplýva počiatočné zloženie čerstvého betónu:
- cement CEM I 42,5 480 [kg/m³],
 - voda 135 [dm³/m³],
 - riečny kremičitý piesok 0/2 mm 678 [kg/m³],
 - drvené čadičové kamenivo 2/8 mm 581 [kg/m³],
 - drvené čadičové kamenivo 8/16 mm 678 [kg/m³],
 - kremičitý úlet Silimic 48 [kg/m³].

Ostáva ešte určiť dávku superplastifikátora, ktorá zabezpečí vyžadovanú konzistenciu navrhnutého zloženia čerstvého betónu charakterizovanú sadnutím kužela podľa Abramsa 200 mm. Za týmto účelom sa vykonávajú skúšky na zámesi objemu min. 50 dm³ [13].

Predpokladajme, že skúšky preukázali, že potrebná dávka superplastifikátora je 1,5 % z hmotnosti cementu, tj. 480 · 0,015 = 7,2 [kg], čo pri hustote prísady 1,15 kg/m³ v prepočte predstavuje objem 7,2/1,15 = 6,26 [dm³/m³]. Treba pripomenúť, že v takejto dávke prísady je prítomná voda o objeme 7,2 · 0,6 = 4,3 [dm³], ktorá musí byť započítaná do dávky zámesovej vody.

Zloženie čerstvého betónu obsahujúce už aj superplastifikátor je teda nasledujúce:

- cement CEM I 42,5 480 [kg/m³],
- voda 135 - 4,3 = 130,7 [dm³/m³],
- riečny kremičitý piesok 0/2 mm 678 [kg/m³],
- drvené čadičové kamenivo 2/8 mm 581 [kg/m³],
- drvené čadičové kamenivo 8/16 mm 678 [kg/m³],

Literatúra:

- [1] *Aitcin P.-C.*: Trvalý vysokowartościowy beton – sztuka i wiedza, materiały Konferencji Dni betonu – tradycja i nowoczesność, Stowarzyszenie Producentów Cementu i Wapna, Polski Cement, Szczyrk 2002, 7–36
- [2] *Olek J.*: Betony wysokowartościowe – przegląd technologicznych doświadczeń w USA, jak poz. 1, 91-112
- [3] *Blais P. Y., Couture M.*: Precast, prestressed pedestrian bridge – world's first reactive powder concrete structure, PCI Journal, Sep./Oct. 1999,60-71
- [4] *Ajdukiewicz A.*: Rozwój badań i zastosowań betonów wysokowartościowych, materiały Konferencji Beton na progę nowego millenium, Stowarzyszenie Producentów Cementu i Wapna, Polski Cement, Kraków 2000, 413-431
- [5] *Kucharska L.*: Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zmniejszające ilość wody zarobowej, Cement-Wapno-Beton, 2/2000, 46–61
- [6] *Giergiczny Z., Matolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.*: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Wyd. Instytut Śląski, Opole 2002
- [7] *Neville A. M.*: Properties of concrete, IVth and final ed., Prentice Hall, 2000
- [8] *Aitcin P.-C.*: Béton haute performance, Eyrolles, Paris, 2001
- [9] *de Larrard F., Sedran T.*: Mixture-proportioning of high performance concrete, Cement and Concrete Research, 32 (2002), 1699–1704
- [10] *de Larrard F.*: Concrete mixture proportioning. A scientific approach, F&FN SPON, London, New York, 1999
- [11] *de Larrard F., Gorse J. F., Puch C.*: Comparative study of various silica fume as additives in high performance cementitious materials, Materials and Structures, vol. 25, 1992, 265–272
- [12] *Śliwiński J.*: Beton zwykły – projektowanie i podstawowe właściwości, Polski Cement, Kraków 1999
- [13] *Śliwiński J., Czołgosz R.*: Spostrzeżenia z praktycznego projektowania składu betonów samozagęszczalnych, materiały IV Symp. Naukowo-Technicznego Reologia w technologii betonu, Politechnika Śląska, Górażdże Cement, Gliwice, 2002, 53–60
- [14] *Śliwiński J.*: Komputer w projektowaniu składu betonów cementowych, jak poz.4, 159–171
- [15] *de Larrard F., Fau D.*: Logiciel d'aide à la formulation des bétons – BETONLAB, Presses de l'ENPC, Paris 1996
- [16] Premier pont en Ductal® en France, Magazyn Béton[s], Nov/Dec 2005, pp.53
- [17] *Nocuń-Wczelik W.*: Pył krzemionkowy – właściwości i zastosowania w betonie, Polski Cement, Kraków, 2005
- [18] *Đurica T.*: Trvanlivost betónu vo vzťahu k špecifikáciám požiadaviek na kvalitu podľa normy STN EN 206-1. Inžinierske stavby, roč. 51, č. 2/2003, Bratislava, 2003, s. 28–35.
- [19] *Hela R.; Bodnárová, L.*: Vysokopevnostní betony (HSC) s využitím metakaolinu. In METAKAOLIN 2007. Brno. 2007. p. 23–31. ISBN 9788021433397.
- [20] *de Larrard F., Sedran T.*: Une nouvelle approche de la formulation des bétons,
- [21] <http://www.lcpc.fr/fr/produits/betonlabpro/index.dml>

- kremičitý úlet Silimic 48 [kg/m³],
- superplastifikátor 6,26 [dm³/m³].

Následně se na základě vyšší uvedené receptury na 1 m³ h.b. vyrobí skúšobná zámes a znovu sa skontroluje konzistencia zmesi a obsah vzduchu v čerstvom betóne. Zo zmesi sa vyrobí potrebný počet vzoriek na stanovenie pevnosti v tlaku skúmaného betónu, ako aj na zistenie priebehu pevnosti v závislosti od času, príp. aj iné vyžadované vlastnosti navrhovaného vysokohodnotného betónu HPC.

Ak dosiahnuté výsledky zatvrdnutého betónu nie sú v zhode so špecifikovanými požiadavkami, treba vykonať nevyhnutné korektúry zloženia čerstvého betónu a celú procedúru opakovať.

Počítačové programy navrhovania zloženia HPC

Pri navrhovaní zloženia čerstvého betónu HPC sa čoraz častejšie využívajú programy výpočtovej techniky [14]. Samozrejme, že programy musia byť schopné brať do úvahy vplyv takých zložiek betónovej zmesi, ako sú plastifikačná prísada a jemnozrná minerálna prímies, na vlastnosti zmesi čerstvého a zatvrdnutého vysokohodnotného betónu. Jedným z takýchto programov je napr. program Betonlab aj Betonlab Pro, ktorých autorom je de Larrard [15, 20].

ZÁVER

Používanie vysokohodnotných betónov HPC nadobúda v celosvetovom rozsahu stále väčšieho významu a výroba HPC stále väčších objemov.

V podmienkach strednej Európy je používanie HPC ešte stále závislé najmä od odvahy investora a projektanta. Z hľadiska zabezpečenia výroby HPC sú k dispozícii kvalitné cementy, kamenivá, prímiesi a superplastifikátory a rovnako niet pochýb o tom, že aj stavebné firmy sú schopné zhotoviť betónové konštrukcie na báze HPC. Predkladaná metóda navrhovania zloženia zmesi čerstvého betónu pre HPC môže tejto snahe napomôcť.

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

*Prof. dr hab. inż. Jacek Śliwiński
Dr inż. Tomasz Tracz
oba: Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Lądowej
Polsko*

*Prof. Ing. Tíbor Ďurica, CSc.
Žilinská univerzita v Žiline
Stavebná fakulta
e-mail: tiber.durica@fstav.unizva.sk
Slovensko*

ZVÝHODNĚNÉ PŘEDPLATNÉ PRO STUDENTY A STAVEBNÍ INŽENÝRY DO 30 LET

Zvýhodněná cena za roční předplatné (šest čísel) pro studenty a stavební inženýry do 30 let je 270 Kč včetně balného a distribuce (bez DPH). Podmínkou je přiložit k objednávce doklad o studiu, např. kopii studentské karty ISIC, nebo datum narození.

síla zkušenosti

Mott MacDonald Ltd.
je jedna z největších světových
multi-disciplinárních projektově
inženýrských konzultačních
společností

Mott MacDonald Praha, s.r.o. je česká pobočka mezinárodní společnosti Mott MacDonald Ltd. Naše organizace poskytuje služby v mnoha oblastech inženýrského poradenství a projektového managementu. Jedná se o poradenské služby, zpracování studií ekonomického hodnocení, zpracování a posuzování všech stupňů projektové dokumentace, řízení a supervize projektů.

Tyto činnosti zajišťujeme v těchto oblastech:

Silnice a dálnice
Železnice
Mosty a inženýrské konstrukce
Tunely a podzemní stavby
Vodní hospodářství
Životní prostředí
Geodetické práce
Grafické aplikace
Inženýring a konzultační činnost

Kontakt:

Mott MacDonald Praha, spol. s r.o.
Ing. Jiří Petrák
Národní 15, 110 00 Praha 1
tel.: +420 221 412 800, fax: +420 221 412 810
www.mottmac.cz, e-mail: mottmac@mottmac.cz

m Mott
MacDonald