

Projektiranje sastava betona visoke otpornosti na smrzavanje

Srđan Uzelac, Ana Hranilović Trubić, Igor Šustić

Ključne riječi

HE Lešće, beton, sastav betona, projektiranje, smrzavanje, otpornost na smrzavanje

Key words

Lešće Hydropower Plant, concrete, concrete composition, design, frost, frost resistance

Mots clés

Centrale hydraulique de Lešće, béton, composition du béton, études, congélation, résistance au gel

Ключевые слова

ГЭС Леиче, бетон, состав бетона, проектирование, замерзание, сопротивление замораживанию

Schlüsselworte

Wasserkraftwerk Lešće, Beton, Betonzusammensetzung, Entwerfen, Gefrieren, Frostbeständigkeit

S. Uzelac, A. Hranilović Trubić, I. Šustić

Stručni rad

Projektiranje sastava betona visoke otpornosti na smrzavanje

Prikazano je projektiranje sastava masivnog betona visoke otpornosti na smrzavanje za potrebe izgradnje HE Lešće. Tijekom ispitivanja podobnosti dodatka za kontrolno uvlačenje zraka u betonski kompozit otkrivena je nesukladnost Tehničkog propisa za betonske konstrukcije i norme HRN EN 206-1 glede zahtjeva za minimalnu količinu zraka u betonu izloženom smrzavanju (2% umjesto 4%). Upozoreno je da ta činjenica može prouzročiti probleme pri projektiranju i proizvodnji betona.

S. Uzelac, A. Hranilović Trubić, I. Šustić

Professional paper

Designing a concrete composition highly resistant to frost

Design of the massive concrete highly resistant to frost, that is to be used during construction of the Lešće Hydropower Plant, is presented. While testing suitability of the additive for the entraining of air into the concrete composite, a non-compliance was discovered between the Technical regulation for concrete structures and the Standard HRN EN 206-1, regarding minimum air content in concrete exposed to frost action (2% instead of 4%). The authors caution that this fact may cause problems in the design and production of concrete.

S. Uzelac, A. Hranilović Trubić, I. Šustić

Ouvrage professionnel

Étude de composition du béton de haute résistance au gel

L'étude de composition du béton massif d'une haute résistance au gel, qui sera utilisé sur la centrale hydraulique de Lešće, est présentée. Au cours d'essai de convenance de l'additif contrôlant l'introduction de l'air dans le composite de béton, un écart relatif à la quantité minimum de l'air dans le béton soumis au gel (2% au lieu de 4%) à été découvert entre le Règlement technique pour les structures de béton et la norme HRN EN 206-1. Les auteurs soulignent que ce fait peut causer problèmes au cours de l'étude et la fabrication du béton.

C. Узелац, А. Хранилович Трубић, И. Шустич

Отраслевая работа

Проектирование состава бетона высокого сопротивления замораживанию

В работе показано проектирование состава массивного бетона высокого сопротивления замораживанию для потребностей строительства ГЭС Леиче. В течении испытания годности добавок для контрольного вовлечения воздуха в бетонный состав открыта несоответственность Технических правил для бетонных конструкций и правил HRN EN 206-1 в отношении требований для минимального количества воздуха в бетоне, подвергнутом замораживанию (2% вместо 4%). Предупреждается, что тот факт может вызвать проблемы при проектировании и производстве бетона.

S. Uzelac, A. Hranilović Trubić, I. Šustić

Fachbericht

Strukturentwurf für hochfrostbeständigen Beton

Dargestellt ist das Entwerfen der Zusammensetzung des hochfrostbeständigen massiven Betons für die Erfordernisse des Ausbaus des Wasserkraftwerks Lešće. Während der Tauglichkeitsprüfung der Zutaten für die Kontrolluftfeinziehung in das Betongefüge entdeckte man die Uneinstimmigkeit der Technischen Vorschrift für Betonkonstruktionen mit der Norm HRN EN 206-1 hinsichtlich der Forderung über den minimalen Luftgehalt im Beton der dem Frost ausgesetzt ist (2% anstatt 4%). Es wird darauf hingewiesen dass diese Tatsache Probleme hervorrufen kann bei Entwurf und Herstellung des Betons.

Autori: Srđan Uzelac, dipl. ing. građ.; Ana Hranilović Trubić, dipl. ing. građ.; Igor Šustić, dipl. ing. kem. tehn., Institut građevinarstva Hrvatske, J. Rakuša 1, Zagreb

1 Uvod

Za potrebe izgradnje HE Lešće na rijeci Dobri trebalo je projektirati sastav masivnog betona. Projektom dokumentacijom osnovna svojstva masivnog betona specificirana su markom betona (MB20), vodonepropusnošću V4-V6, otpornošću na smrzavanje M100 i M200 (ovisno o položaju u konstrukciji odnosno izloženosti) te najvećim zrnom agregata 125(63) mm. Dodatni su zahtjevi upotrebom cementa niske topline hidratacije, ograničene temperature tijekom očvršćivanja (45°C) i najmanja količina (mikropora) uvučenog zraka (2% - 3%). Projektna je dokumentacija izrađena krajem 80-ih godina u skladu s tada valjanim Pravilnikom o tehničkim normativima za beton i armirani beton – (PBAB, N.N. br.11/87).

Nova europska norma za beton, a sada i hrvatska norma HRN EN 206-1:2002, ne specificira posebno hidrotehnički beton te se preporuke o najmanjoj količini cementa (320 kg/m³), maksimalnom cementnom omjeru (0,50) i razredu tlačne čvrstoće (30/37) u razredu izloženosti XF3 ne mogu u potpunosti primijeniti na masivni beton za koji se količina cementa nastoji što je moguće više smanjiti, kako bi se eliminirala pojava pukotina prouzročenih visokom unutarnjom temperaturom tijekom očvršćivanja, a istovremeno osigurala projektirana otpornost cementnog kompozita na smrzavanje, što je i tema ovog rada.

2 Projektiranje sastava betona

Za potrebe provedbe natječaja o izgradnji brane trebalo je u kratkom vremenu definirati realne komponente betona, odabrati pogodan aerant i dokazati osnovna svojstva betona.

Dokazivanje otpornosti na smrzavanje izravnom metodom ispitivanja prema normi HRN U.M1.016:1977 zbog višemjesečnog ispitivanja na 200 ciklusa nije bilo moguće provesti te je dokazivanje otpornosti na smrzavanje provedeno utvrđivanjem faktora razmaka pora u svježem betonu uređajem AVA (*Air Void Analyzer* - Analizator zračnih pora) [1], [2] (slika 1.) i metodom mikroskopske analize na očvrslulom betonu prema HRN EN 480-11:2005 (slika 2.). Ispitivanja su provedena u Zavodu za betonske i zidanje konstrukcije Instituta građevinarstva Hrvatske.

Sve do kraja prošlog stoljeća projektiranje sastava betona osnivalo se uglavnom na iskustvu. No današnje stanje tehnologije nužno uvjetuje opsežna prethodna ispitivanja, iako TPBK-om i normom HRN EN 206-1:2002 sam postupak utvrđivanja najpovoljnijeg sastava betona nije specificiran. Ovisno o projektiranim svojstvima, mogućnosti dobave materijala i uvažavanjem valjanih norma, pretpostavljaju se sastavi u očekivanom području zadanih svojstava te se provjeravaju na laboratorijskim mješavinama.

Obično se pripremaju tri mješavine. Dobiveni rezultati ispitivanja omogućavaju grafički prikaz ovisnosti između količine cementa i v/c omjera (za zadanu konzistenciju) i v/c omjera i tlačne čvrstoće ili nekog drugog svojstva. Iz tako dobivenih dijagrama mogu se usvojiti sastavi betona zahtijevanih svojstava.



Slika 1. Mjerenje strukture mikropora svježeg betona uređajem AVA



Slika 2. Uređaj za mikroskopsku analizu strukture mikropora očvrslulog betona

Prije provedbe opisanog postupka u fazi odabira dodatka betonu, uređajem AVA provjerili smo mogućnost formiranja odgovarajuće strukture mikropora u svježem betonu nužne za postizanje zahtijevane otpornosti na smrzavanje. Formiranjem strukture ravnomjerno raspoređenih zračnih mjehurića u masi betona s faktorom razmaka < 0,20 mm osigurava se otpornost cementnog kompozita na smrzavanje [3], [4].

Ispitivanja su provedena s četiri aeranta različitih proizvođača (A1-A4) i jednim superplastifikatorom (S1). Rezultati su prikazani tablično (tablice 1. do 4.). Laboratorijske su mješavine pripremljene s dvije vrste cementa u rasponu 250-360 kg/m³, drobljenim agregatom maksimalnih zrna 16, 32 i 63 mm i v/c omjerom (0,45-0,54).

Tablica 1. Sastavi betona spravljenih s dodatkom aeranta

Cement [tip]	Količina cementa [kg/m ³]	Agregat D _{max} [mm]	v/c	Dodatak [%]	Pore (HRN EN 12350-7:2000) [%]	Uređaj AVA	
						spec. ploština [mm ² /mm ³]	faktor razmaka [mm]
II	360	16	0,52	A1 (0,06)	6,0	10,7	0,570
II	360	16	0,50	A1 (0,045)	4,4	19,8	0,324
II	360	16	0,50	A1 (0,08)	6,0	13,1	0,515
III	360	16	0,50	A1 (0,10)	4,5	17,4	0,390
III	360	16	0,50	A1 (0,06)	4,5	12,6	0,546
III	360	16	0,50	A1 (0,20)	4,8	20,2	0,334

Tablica 2. Sastavi betona spravljenih s dodatkom aeranta i superplastifikatora

Cement [tip]	Količina cementa [kg/m ³]	Agregat D _{max} [mm]	v/c	Dodatak [%]	Pore (HRN EN 12350-7:2000) [%]	Uređaj AVA		HRN EN 480-11:2005
						spec. ploština [mm ² /mm ³]	faktor razmaka [mm]	faktor razmaka [mm]
II	360	16	0,45	A1+S1 (0,05+0,5)	2,9	23,1	0,333	0,404
II	360	16	0,45	A1+S1 (0,055+0,5)	3,4	12,4	0,785	0,702
II	360	16	0,45	A1+S1 (0,045+0,5)	2,9	5,8	2,007	-
II	360	16	0,48	A1+S1 (0,05+0,50)	2,9	8,9	0,993	-
II	360	16	0,50	A1+S1 (0,05+0,50)	2,5	12,3	0,996	-

Tablica 3. Sastavi betona spravljenih s različitim aerantima

Cement [tip]	Količina cementa [kg/m ³]	Agregat D _{max} [mm]	v/c	Dodatak [%]	Pore (HRN EN 12350-7:2000) [%]	Uređaj AVA	
						spec. ploština [mm ² /mm ³]	faktor razmaka [mm]
III	250	32	0,54	A1 (0,10)	5,2	15,9	0,286
III	250	32	0,54	A2 (0,20)	4,6	22,7	0,237
III	250	32	0,54	A3 (0,20)	3,8	16,0	0,391
III	250	32	0,54	A4 (0,20)	5,8	23,9	0,192

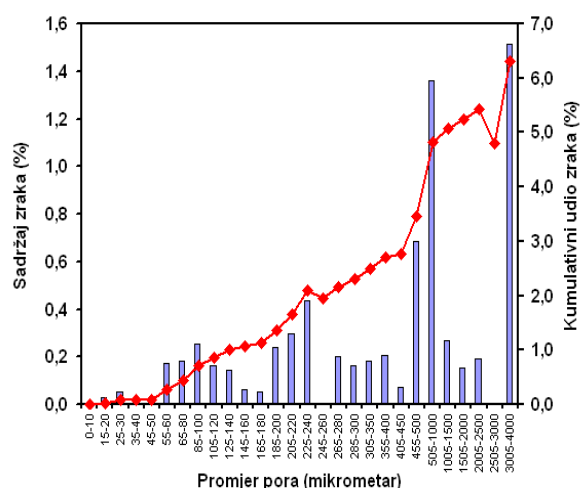
Tablica 4. Sastavi betona spravljeni s aerantom A4

Cement [tip]	Količina cementa [kg/m ³]	Agregat D _{max} [mm]	v/c	Dodatak [%]	Pore (HRN EN 12350-7:2000) [%]	Uređaj AVA		HRN EN 480-11:2005
						spec. ploština [mm ² /mm ³]	faktor razmaka [mm]	faktor razmaka [mm]
III	300	63	0,52	A4 (0,2)	5,3	27,1	0,185	0,139
II	300	63	0,52	A4 (0,2)	6,0	20,5	0,185	0,172
III	250	63	0,52	A4 (0,2)	5,2	24,8	0,204	0,137
III	250	63	0,52	A4 (0,2)	4,2	27,1	0,199	0,186
III	320	63	0,50	A4 (0,2)	4,7	25,5	0,136	0,112

Tip II: CEM II/A-S 42,5R
Tip III: CEM III/B 32,5N-SR/LH

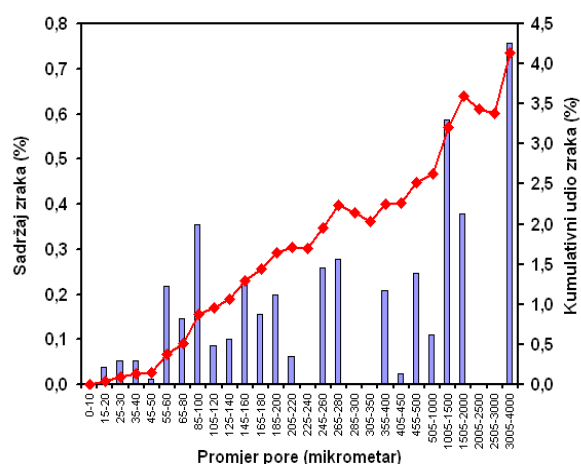
U mješavini s dodatkom aeranta A4 u drugoj fazi ispitivanja dodatno smo provjerili i strukturu mikropora

u očvrslom betonu mikroskopskom metodom prema normi HRN EN 480-11:2005 (slike 3., 4. i 5.).



Sadržaj zraka [%]: **6,30**
 Specifična površina [mm^{-1}]: **24,46**
 Faktor razmaka [mm]: **0,172**

Slika 3. Grafički prikaz rezultata ispitivanja distribucije zračnih pora prema HRN EN 480-11 ($c = 300 \text{ kg/m}^3$; $v/c = 0,52$; pore = 6,0 %)

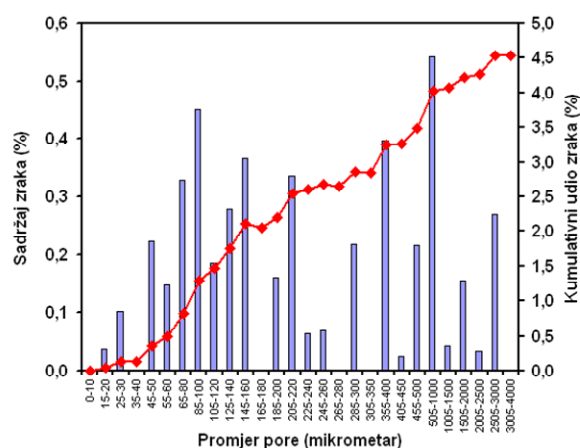


Sadržaj zraka [%]:
 Specifična površina [mm^{-1}]:
 Faktor razmaka [mm]:

Slika 4. Grafički prikaz rezultata ispitivanja distribucije zračnih pora prema HRN EN 480-11 ($c = 250 \text{ kg/m}^3$; $v/c = 0,52$; pore = 4,2 %)

3 Analiza i komentari rezultata ispitivanja

- Smatra se da će aerirani beton biti otporan na djelovanje smrzavanja i odmrzavanja ako je mjerenjem utvrđen faktor razmaka među zračnim porama manji od 0,20 mm [3; 4]. Dodatno se preporučuje i da ploština zračnih mjehurića bude veća od $23,6 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ [5].
- Osim navedenog pri ocjeni otpornosti betona na smrzavanje treba uzeti u obzir stupanj zasićenosti i sastav cementnog kompozita, uvjete režima smrzavanja i itd. što nije tema ovoga rada.



Sadržaj zraka [%]:
 Specifična površina [mm^{-1}]:
 Faktor razmaka [mm]:

Slika 5. Grafički prikaz rezultata ispitivanja distribucije zračnih pora prema HRN EN 480-11 ($c = 320 \text{ kg/m}^3$; $v/c = 0,50$; pore = 4,7%)

- Za formiranje odgovarajuće strukture mikropora potrebna je određena kritična količina pora što nije dovoljan, ali je svakako nužan uvjet (tablice 1. i 4.). Prema rezultatima ispitivanja i dosadašnjem iskustvu u određivanju strukture mikropora u svježem i očvrslom betonu potrebna najmanja količina uvučenog zraka jest $\geq 4\%$, što je i u skladu s normom HRN EN 206-1:2002 za betone izložene djelovanju okoliša razreda XF1-XF4.
- U prilog su ovoj tvrdnji i opći zahtjevi za kemijske dodatke betonu prema normi HRN EN 934-2:2004, gdje se pri ispitivanju učinkovitosti aeranta u svježe aeriranom betonu zahtijeva ukupna količina pora od 4-6 obujmnih postotaka, a u poredbenoj mješavini najviše 2%.
- Zadržavanjem uvjeta iz PBAB-a o potrebnoj količini uvučenog zraka ovisno o D_{max} (uvjetuje aeriranje sa $\geq 2\%$) bitno se precjenjuje otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje s najvećim zrnom agregata $>16 \text{ mm}$.
- Taj zadržani uvjet i u novom pravilniku (TPBK) za posljedicu može imati krivo specificiranje projektiranih svojstava i posljedično proizvodnju i ugradnju betona „slučajno otpornog na smrzavanje“, kao što je često bila i dosadašnja praksa (slika 6.).
- Relativno je usko područje u kojem vrijedi linearni odnos između količine dodanog aeranta i posljedično količine uvučenog zraka. Udvostručenje količine dodanog aeranta nije se odrazilo na količinu uvučenih pora, već je postignut tek na nešto povoljniji faktor razmaka i specifičnu ploštinu (tablica 1.).



Slika 6. Primjeri oštećenja smrzavanjem

- Uređajem AVA omogućena je pouzdana spoznaja o otpornosti na smrzavanje na svježem betonu već tijekom pripremanja, a provjerom prema normi HRN EN 480-11:2005 mikroskopskom analizom očvrstnulo betona već nakon 7 dana te se time bitno smanjuje vrijeme potrebno za provedbu prethodnih ispitivanja i ocjenu prikladnosti odabranih materijala.
- Razlike u rezultatima ispitivanja pojedinih parametara (količina zraka, specifična ploština i faktor razmaka) potječu od različitih metoda ispitivanja na svježem i očvrstnulom betonu, a nešto su više vrijednosti faktora razmaka utvrđene uređajem AVA na strani sigurnosti pri ocjeni učinkovitosti aeranta.
- Našom dosad uobičajenom praksom rezultati otpornosti na smrzavanje često su se vidjeli nakon završetka betonskih radova.

LITERATURA

- [1] Hranilović A., Uzelac S.: *Metode ispitivanja otpornosti betona na smrzavanje*, Građevinar 57 (2005) 5, 327.-332.
- [2] Hranilović A., Uzelac S.: *Neka iskustva u ispitivanju otpornosti betona na smrzavanje*, Internacionalni naučno stručni skup, Građevinarstvo- nauka i praksa, GNP 2006, Žabljak, SCG, str. 527.-532.
- [3] Bjegović, D.; Mikulić, D.; Zajc, A.; Rebić, M.: *Review of International Applied Methods for Testing the Resistance of Concrete to Frost and Frost and De-icing Salt*, Proceedings of the International Colloquium Materials Science and Restoration, Technische Akademie Esslingen, 6-8 September 1983, pp. 87-91

- Kombinacija aeranta i superplastifikatora (tablica 2.) najčešće je tržišno nametnuta kombinacija, često bez opravdanja i bez prethodnih ispitivanja, što može pogoršati ionako upitnu otpornost na smrzavanje. Neki od superplastifikatora ne uvlače zrak (melamini) dok oni lignosulfonatskog tipa dodatno aeriraju kompozit. Najnoviji superplastifikatori na osnovi karbosilatnih etera čak oslobađaju zarobljeni zrak. Zbog toga u praksi valja pažljivo ustanoviti kompatibilnost različitih dodataka i popratne efekte.
- Tijekom projektiranja sastava betona važno je uzeti u obzir očekivano smanjenje tlačne čvrstoće od 2 % -6 % pri 1 postotnim povećanju količine uvučenog zraka.
- Beton izložen agresivnom djelovanju okoliša oznake razreda XF1 do XF4 prema normi HRN EN 206-1:2002 treba aerirati količinom mikropora uvučenog zraka utvrđenoj prema normi HRN EN 12350-7:2000 sukladno navedenom prijedlogu u tablici 5.

Tablica 5. Prijedlog količine mikropora pri aeriranju

PBAB (N.N. br.11/87) TPBK (N.N. br.101/05)		Prijedlog
D _{max}	Količina pora (%)	
32-63	2-3	4-5
16-32	3-5	
8-16	5-7	5-7
4-8	7-10	7-10

4 Zaključak

Pravilnim odabirom sastojaka betona mogu se ostvariti osnovni uvjeti za postizanje otpornosti masivnog betona na smrzavanje s relativno malom količinom veziva (250 kg/m³), relativno visokim vodocementnim omjerom (0,52) i preporučenom količinom uvučenog zraka (min 4 % [6]i faktorom razmaka < 0,20 mm [4]). Dosadašnju praksu projektiranja i pripremanja aeriranog betona s precijenjenom otpornošću na smrzavanje prema PBAB-u (čl.32), a usvojenu i zadržanu u novome tehničkom propisu (TPBK), treba prihvatiti samo za betone s najvećim zrnom agregata ≤ 16 mm. Za sve ostale najčešće rabljene betone treba strogo primijeniti uvjet norme HRN EN 206-1:2002 o najmanjem sadržaju uvučenog zraka od 4 %. što je i najčešće slučaj u normama zemalja s kontinentalnom klimom.

- [4] *Tehnički propis za betonske konstrukcije*, Narodne novine, br. 101/05 (TPBK)
- [5] Đureković, A.: *Cement, cementni kompozit i dodaci za beton*, IGH, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [6] HRN EN 206-1:2002 Beton-1. dio: Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206-1:2000)
- [7] Heikki Kukko, Hannele Kuosa: *Requirements on frost resistance of concrete in various countries*, Proceedings PRO 25, Frost damage in concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop, Minneapolis, USA, 28-30 June 1999