



Ana Hranilović-Trubić¹, Dalibor Sekulić², Srđan Uzelac³

OVISNOST TLAČNE ČVRSTOĆE O SASTAVU BETONA

Rezime

U radu su opisani rezultati istraživanja fizikalno mehaničkih svojstava očvrsnulog betona, provedeni u IGH. Istraživanje je provedeno na ispitnim uzorcima izrađenim od više vrsta probnih mješavina betona, pri čemu su korištene dvije vrste cementa, s i bez aeranta. U mješavinama je variran vodocementni omjer i količina dodatka. Uzorci su ispitani i metodom vremena prolaska ultrazvučnog impulsa, nakon čega je uspostavljena korelacija između tlačne čvrstoće određene razornom metodom i tlačne čvrstoće određene ultrazvučnom metodom. Diskutirana je mogućnost korištenja ultrazvučne metode za određivanje tlačne čvrstoće betona, te utjecaj sastava betona na točnost rezultata ispitivanja ultrazvukom.

Ključne riječi

aerirani beton, brzina ultrazvučnog impulsa, tlačna čvrstoća

COMPRESSIVE STRENGTH DEPENDENCE ON CONCRETE COMPOSITION

Summary

Paper describes results of physical-mechanical properties investigation of hardened concrete conducted in IGH. Investigation was performed on test specimens made from different trial concrete mixtures, with usage of two types of cement, with and without aerant. In trial mixtures water to cement ratio and quantity of additive was varied. Test specimens was also tested with method of ultrasonic pulse transition time, after that correlation between compressive strength determined by ultrasonic method and by destructive method was established. Possibility of ultrasonic method for compressive strength determination, and influence of concrete composition to accuracy of ultrasonic test results was discussed.

Key words

aerated concrete, ultrasonic pulse velocity, compressive strength

¹ Mr, dipl.ing. građ, Institut građevinarstva Hrvatske, J. Rakuše 1, 10000 Zagreb, ana.hranilovic@igh.hr

² Dipl.ing.fiz, Institut građevinarstva Hrvatske, J. Rakuše 1, 10000 Zagreb, dalibor.sekulic@igh.hr

³ Dipl.ing.građ, Institut građevinarstva Hrvatske, J. Rakuše 1, 10000 Zagreb, srdjan.uzelac@igh.hr

1. UVOD

Utjecaj vodocementnog omjera i dodatka aeranta na tlačnu čvrstoću betona je dobro poznat. Povećanjem vodocementnog omjera, odnosno dodavanjem aeranta dolazi do povećanja poroznosti betona čime se tlačna čvrstoća smanjuje. Jednadžbe koje povezuju brzinu ultrazvučnog impulsa s fizikalno-mehaničkim svojstvima betona vrijede za idealno elastičan, izotropan i homogen materijal, pa se postavlja pitanje mogućnosti karakterizacije svojstava betona na osnovi širenja ultrazvučnih impulsa. Modul elastičnosti je povezan fizikalnim zakonima s brzinom širenja ultrazvuka, dok je veza između tlačne čvrstoće empirijska. U literaturi [1] se navode poteškoće kod određivanja tlačne čvrstoće na osnovi širenja ultrazvučnih impulsa, koje proizlaze iz sljedećih činjenica: tlačna čvrstoća betona je u većoj mjeri određena čvrstoćom cementne paste, dok brzinu ultrazvuka u najvećoj mjeri određuju svojstva agregata. Male promjene unutarnje strukture betona (pore, udio zraka) slabo utječu na promjenu brzine ultrazvučnih impulsa, dok imaju veliki utjecaj na tlačnu čvrstoću.

2. PLAN ISPITIVANJA

Planom ispitivanja zadana je izrada mješavina aeriranog i referentnog (bez dodatka) betona. U mješavinama se varirala vrsta cementa, v/c faktor i količina dodatka (Tabela 1).

Tabela 1. Sastavi betona

Oznaka mješavine	Vrsta cementa	Količina cementa (kg/m ³)	Vrsta agregata	Frakcija (mm)	v/c	Aerant	Količina aeranta (%)
A1	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,50	-	-
A2	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,52	-	-
A3	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,54	-	-
C1	CEM III/B 32,5N-SR/LH	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,50	-	-
C2	CEM III/B 32,5N-SR/LH	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,52	-	-
C3	CEM III/B 32,5N-SR/LH	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,54	-	-
A4	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,50	+	0,15
A5	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,50	+	0,20
A6	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,52	+	0,15
A7	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,52	+	0,20
A8	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,52	+	0,30
A9	CEM II/A-S 42,5R	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,54	+	0,15
C4	CEM III/B 32,5N-SR/LH	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,50	+	0,15
C5	CEM III/B 32,5N-SR/LH	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,50	+	0,20
C6	CEM III/B 32,5N-SR/LH	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,52	+	0,15
C7	CEM III/B 32,5N-SR/LH	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,52	+	0,20
C8	CEM III/B 32,5N-SR/LH	300	Tounj	0-4;8-16;16-32	0,54	+	0,15

Aerant : Cementol ETA S

3. METODE ISPITIVANJA

3.1. TLAČNA ČVRSTOĆA

Tlačna čvrstoća uzoraka ispitana je prema normi HRN EN 12390-3:2002 [2]. Uzorak se stavi u prešu i nanosi se sila okomito na smjer ugradnje ispitnih tijela, jednolikom brzinom prirasta sile. Sila se nanosi kontinuirano bez udara, sve do sloma ispitnog tijela. Tlačna čvrstoća dana je jednadžbom: $f_c = F/A_c$ (MPa) ili (N/mm²), gdje je F (maksimalna sila u trenutku sloma u kN), f_c (tlačna čvrstoća u MPa ili N/mm²) i A_c (površina ispitnog tijela na koju djeluje sila, izračunata iz projektirane veličine uzorka u mm²).

3.2. ISPITIVANJE ULTRAZVUKOM

3.2.1. Određivanje brzine ultrazvuka

Određivanje brzine longitudinalnog ultrazvučnog impulsa određeno je prema normi HRN EN 12504-4:2004. Uređaj za određivanje brzine ultrazvučnog impulsa sastoji se od generatora električnih impulsa, para pretvarača, pojačala i elektroničkog uređaja za mjerenje vremenskog intervala utrošenog između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka njegovog dolaska na prijemni pretvarač [4]. Brzina ultrazvučnog impulsa računa se iz jednadžbe:

$$v=l/t \quad (1)$$

gdje je v brzina impulsa, l duljina koju impuls prolazi (debljina mjerenog materijala, a t izmjereno vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa stazom određene duljine.

U ovom radu mjerenje je provedeno na laboratorijskim uzorcima oblika kocke brida 150 mm, metodom izravne transmisije.

3.2.2. Dinamički modul elastičnosti

Brzina longitudinalnog ultrazvučnog impulsa je egzaktno teorijski povezana s modulom elastičnosti materijala. Uz pojednostavljenu pretpostavku da je beton homogen, izotropan i savršeno elastičan materijal dinamički modul elastičnosti se može izračunati iz izraza:

$$E = v_L^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu}, \quad (2)$$

gdje je E dinamički modul elastičnosti, v_L brzina longitudinalnog ultrazvučnog impulsa, ρ gustoća betona, a μ Poissonov omjer.

Poissonov omjer se definira kao omjer transverzalne i longitudinalne deformacije uzorka koja se javlja uslijed promjene naprezanja:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1}}{\varepsilon_{L2} - \varepsilon_{L1}}, \quad (3)$$

gdje je: $\varepsilon_{T2}, \varepsilon_{T1}$ – poprečna deformacija uzorka pri naprežanju σ_2 , odnosno σ_1 ,
 $\varepsilon_{L2}, \varepsilon_{L1}$ – uzdužna deformacija uzorka pri naprežanju σ_2 , odnosno σ_1 .

3.2.3. Tlačna čvrstoća iz brzine ultrazvučnog impulsa

Za razliku od modula elastičnosti za koji postoji fizikalna veza s brzinom ultrazvučnog impulsa, tlačna čvrstoća se ne može egzaktno odrediti iz statičkog modula elastičnosti. Za određivanje tlačne čvrstoće postoji više empirijskih izraza (ref). U ovom radu korištena je pretpostavka da je tlačna čvrstoća proporcionalna kvadratu modula elastičnosti:

$$fc \propto E^2. \quad (4)$$

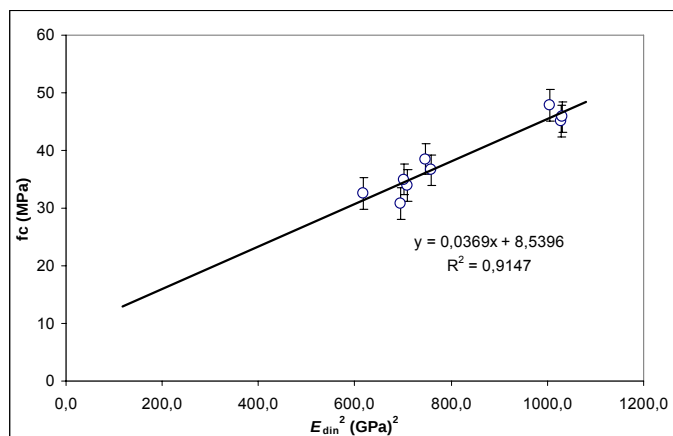
4. REZULTATI ISPITIVANJA

Tabela 2 prikazuje rezultate ispitivanja gustoće, tlačne čvrstoće i ispitivanja ultrazvukom. Brzina ultrazvučnog impulsa je određena iz vremena prolaska impulsa kroz uzorak korištenjem izraza 1. Iz brzine ultrazvučnog impulsa korištenjem relacije 2 izračunat je dinamički modul elastičnosti. U proračunu je korišten Poissonov koeficijent $\mu=0,20$ izmjeren na betonu sličnog sastava.

Tabela 2. Rezultati ispitivanja betona

Oznaka mješavine	Volumna masa očvrstnalog betona (kg/m ³)	Tlačna čvrstoća (MPa)	Brzina ultrazvučnog impulsa (km/s)	Dinamički modul elastičnosti (GPa)	Tlačna čvrstoća određena iz brzine ultrazvuka (MPa)
A1	2,38	45,1	5,09	32,1	46,5
A2	2,42	45,8	5,05	32,1	46,5
A3	2,40	47,8	5,04	31,7	45,6
A4	2,29	38,5	4,79	27,3	36,1
A5	2,28	36,6	4,82	27,5	36,5
A6	2,27	33,9	4,75	26,6	34,7
A7	2,24	32,5	4,62	24,9	31,3
A8	2,22	30,8	4,78	26,4	34,2
A9	2,26	35,0	4,75	26,5	34,5
C1	2,37	35,4	4,94	30,1	36,8
C2	2,34	36,5	4,89	29,1	35,3
C3	2,37	36,7	4,85	29,0	35,2
C4	2,29	31,4	4,76	27,0	32,3
C5	2,25	29,1	4,76	26,5	31,7
C6	2,29	32,0	4,62	25,4	30,3
C7	2,26	31,1	4,76	26,6	31,9
C8	2,26	33,0	4,76	26,6	31,9

Korištenjem pretpostavke 4, provedena je prilagodba grafa koji prikazuje ovisnost tlačne čvrstoće o kvadratu dinamičkog modula elastičnosti pravcem (slika 1 i 2).

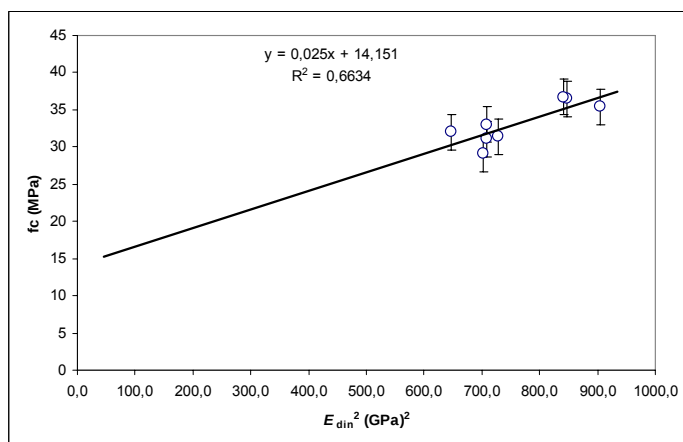


Slika 1. Ovisnost brzine ultrazvučnog impulsa o tlačnoj čvrstoći (CEM II/A-S 42,5R)

Na ovaj način je dobiven izraz:

$$f_c = 0,0369 E^2 + 8,5396 \quad (5)$$

iz kojeg su određene tlačne čvrstoće prikazane u tabeli 2.



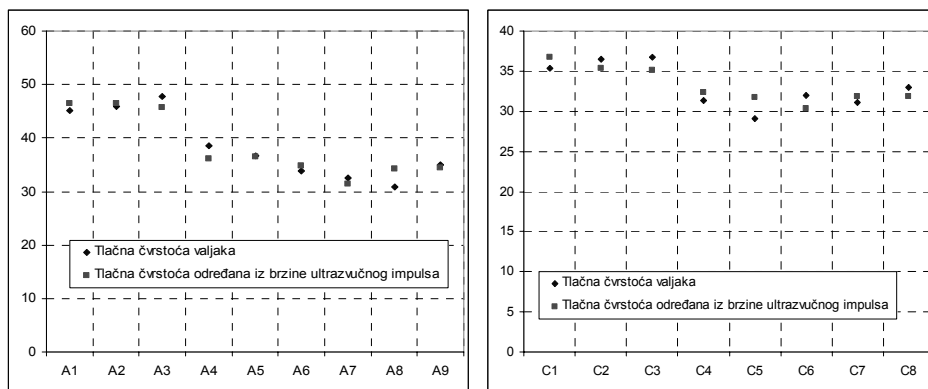
Slika 2. Ovisnost brzine ultrazvučnog impulsa o tlačnoj čvrstoći (CEM III/B 32,5N-SR/LH)

Za beton s cementom CEM III/B 32,5N-SR/LH dobiven je slijedeći izraz za određivanje tlačne čvrstoće:

$$f_c = 0,025 E^2 + 14,151 \quad (6)$$

Slika 3 prikazuje tlačnu čvrstoću dobivenu ispitivanjem presom i tlačnu čvrstoću određenu na osnovi izmjerene brzine ultrazvučnog impulsa. Vidljivo je da nema razlike u točnosti određivanja tlačne čvrstoće betona bez dodatka aeranta (uzorci A1, A2, A3 s

cementom CEM II/A-S 42,5R i C1, C2 te C3 s cementom CEM III/B 32,5N-SR/LH) u usporedbi s uzorcima s dodatkom aeranta. Također se uočava da variranje v/c omjera ne utječe na točnost određivanja tlačne čvrstoće iz brzine ultrazvučnog impulsa.



Slika 3. Tlačna čvrstoća prešom i tlačna čvrstoća određena iz brzine ultrazvučnog impulsa

5. ZAKLJUČAK

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da se tlačna čvrstoća betona bez obzira na udio aeranta i vodocementni faktor može iz brzine ultrazvuka odrediti uz točnost od oko $\pm 8\%$. Ovo je vrlo dobar rezultat uzme li se za usporedbu u obzir da ponovljivost ispitivanja tlačne čvrstoće prema normi EN 12390-3 iznosi $\pm 5\%$. Ovo podrazumijeva da su uzorci prije ispitivanja bili osušeni do stalne mase, što nije slučaj betona u konstrukciji, pa se kod in-situ mjerenja mogu očekivati veće pogeške zbog utjecaja vlage na brzinu ultrazvučnog impulsa. Može se zaključiti da se tlačna čvrstoća betona s promjenljivim udjelom pora i zračnih šupljina, uz korištenje istog agregata uspješno može predvidjeti korištenjem uspostavljene korelacije.

LITERATURA

- [1] Popovics S., "Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship", Materials Evaluation 59 (2) (2001) 123-129.
- [2] HRN EN 12390-3:2002 ispitivanje očvrslaga betona-3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka.
- [3] HRN EN 12390-7:2001 Ispitivanje očvrslaga betona-7. dio: Gustoća očvrslaga betona.
- [4] HRN EN 12504-4:2004 Ispitivanje betona u konstrukcijama-4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa.
- [5] Sekulić D., Mikulić D., Kuzminski D.: Utjecaj mikrostrukture cementne paste na tlačnu čvrstoću betona, Građevinar 50 (1998) 3, 145-152.