Mr Dragoljub Cvetković,
dipl. inž.

»ISPITIVANJE BETONA POMOĆU MALIH EKSPLOZIVNIH PUNJENJA SA PRIMENOM NA ODREĐIVANJE ZNAČENJA ČINIOCA OTPOROSTI MATERIJALA ZA BETON«

Uvod

Do nedavno, terenske metode za ispitivanje betona mogle su se jednostavno kategorisati kao destruktivne ili nedestruktivne po prirodi. Destruktivna ispitivanja sadrže ispitivanja do loma ili kompletnih elemenata konstrukcije ili betonskih jezgara uzetih iz konstrukcije, dok nedestruktivne metode ne mere direktno neko od svojstava čvrstoće betona, već neka druga svojstva koja se mogu povezati sa čvrstoćom, a mogu se dobiti nedestruktivnim postupcima. Prednosti i nedostaci destruktivnih i nedestruktivnih ispitivanja su široko poznati, a vlada mišljenje da ne postoji metoda koja u potpunosti zadovoljava, tj. omogućava tačnu i pouzdanu procenu čvrstoće betona u gotovim konstrukcijama.

Da bi se prevazišla ograničenja standardnih metoda ispitivanja, u poslednje dve decenije sprovedena su značajna istraživanja na konstituisanju postupaka nedestruktivnog karaktera, odnosno razvijene su metode lokalne destrukcije. Ove metode su delimično destruktivne (postoji samo lokalno razaranje betonske površine), jer, iako se beton ispituje do loma, destrukcija učestvuje u malom obimu i element koji se ispituje nije ozbiljno oslabljen. U ovu grupu specifičnih metoda, koje se, ipak, mogu svrstati u mehaničke,

spadaju sledeće metode: ispitivanje betona vađenjem umetka (ankera) iz betona (tzv. »pull-out« test), direktno određivanje čvrstoće na zatezanja čupanjem zalepljenih čeličnih diskova sa betonske površine (tzv. »pull-off« test), direktno određivanje čvrstoće betona na zatezanje savijanjem (tzv. »break-off« metoda) i ispitivanje betona merenjem otpornosti na prodiranje (tzv. »Windsor probe«) [1].

U ovu grupu metoda spadaju i postupci lokalne destrukcije pomoću malih eksplozivnih punjenja. Na betonskoj površini izvode se otvori u vidu bušotina u koje se postavlja odgovarajuće (malo) eksplozivno punjenje (MEP), pa se nakon aktiviranja eksploziva meri veličina dobijenog oštećenja. Oštećenje ima oblik levka (kratera), a njegova veličina izraziće se preko zapremine i prečnika izbačenog materijala. Ova vrednost predstavljaće parametar za ocenu čvrstoće betona. Inače, namenjena ovog postupka je primenljivost u posebnim slučajevima, kada iz nekih razloga (npr. hitnost ispitivanja ili nedostupnost mesta ispitivanja), nije moguće primeniti poznate metode lokalne destrukcije.

U dostupnoj literaturi postoje oskudni podaci o sličnom ispitivanju, izvedenom u bivšem SSSR-u, pod rukovodstvom Skramtaew-a [2]. Naime, sedamdesetih godina, na Vojnotehničkom

rijskoj akademiji u Kujbiševu, predložena je metoda ispitivanja, tzv. metoda eksploziva (metod vzryva), koja se sastoji u tome da se na površinu betona postavlja malo eksplozivno punjenje, a zatim se aktivira. Prema zapremini obrazovanog kratera (levka) određuje se čvrstoća betona u konstrukciji. Kako u dostupnoj literaturi, osim ideje o ovakvom načinu ispitivanja, ne postoje nikakvi drugi podaci, npr. o vrsti punjenja i, uopšte, načinu ispitivanja ili izvedenim eksperimentima, ili o teoretskim postavkama problema, pristupilo se rešavanju jednog istraživačkog zadatka koji bi obuhvatio određivanje svih nepoznatih parametara.

Teoretska osnova za jedno ovakvo ispitivanje nalazi se u mehanizmu dejstva eksplozije na okolnu sredinu, i na beton. Ne zadržavajući se detaljno na opštim pitanjima teorije eksplozije, neophodno je pomenuti osnovni princip dejstva eksplozije na sredinu koju deformiše, a koji je istakao još prof. M. M. Protođakonov u svom delu »O čvrstoći minerala sa gledišta rudarske veštine« (štampano u časopisu »Gornozavodskoe delo«, br. 52 iz 1911. godine), a koji je opširno razrađen u njegovom radu »Materijali za naučnu tezu — 1« (»Gornue raboty«, 1926. godine) [3]. Pomenuti princip sastoji se u tome što je »čvrstoća minerala u svakom smislu i u svim uslovima poređenja proporcionalna otporu sabijanja« (otpornosti na dejstvo eksplozije). To znači da postoji određena veza između fizičko-mehaničkih svojstava sredine i njenog ponašanja prilikom dejstva eksplozije. Širi razvoj datog principa omogućava stvaranje teorije o dejstvu eksplozije na sredinu, na osnovu podataka o otporu koji sredina pruža silama koje vrše deformaciju.

Pomoću veličine kratera, koja će se opisati preko prečnika ili zapremine izbačenog materijala, definišće se posebno svojstvo betona koje ćemo nazvati »otpornost na dejstvo eksplozije« za koje će se smatrati da je pro-

porcionalno čvrstoći betona na pritisak.

Prema tome, cilj istraživanja je eksperimentalno određivanje zavisnosti između otpornosti betona na dejstvo eksplozije i čvrstoće betona na pritisak, kao osnovnog parametra kojim definišemo kvalitet betona.

Takođe, dobijeni rezultati se ovakvim postupkom mogu primeniti na formulu za rušenje betona iz Uputstva za rušenje [13], a posebno na određivanje značenja činioca otpornosti materijala za beton, kao parametra koji bi trebalo da definiše osnovna svojstva materijala u pomenutoj formuli.

Oprema za ispitivanje i postupak

Cilj istraživanja jeste uspostavljanje tražene zavisnosti između veličine kratera na površini betonskog elementa koji izaziva unapred usvojeno eksplozivno punjenje (tzv. otpornosti na dejstvo eksplozije) i čvrstoće betona na pritisak. Naime, eksperimentalnim putem izvršiće se paralelna ispitivanja oba svojstva — otpornosti na dejstvo eksplozije i čvrstoće na pritisak na određenom broju uzoraka, pa će se one dovesti u vezu statističkim metodama. Tako jednom utvrđena veza koristiće se za određivanje čvrstoće betona u zavisnosti od izmerene veličine kratera.

Da bi usvojili osnovne parametre potrebne za izvođenje eksperimenta, izvršena su prethodna ispitivanja radi određivanja minimalne količine eksploziva i odgovarajuće dubine postavljanja eksplozivnog punjenja. Provere su izvršene na dve kocke 20x20x20 cm, nepoznate čvrstoće, projektovane MB 40. Za eksplozivno punjenje korišćena je detonatorska (rudarska) kapisla 8 (DK-8) [4], sa promenljivom dubinom postavljanja. Utvrđeno je da detonatorska (rudarska) kapisla (DK-8) izaziva lokalno oštećenje na betonskoj površini u obliku levka (kratera), ako je du-

bina postavljanja do ≈ 20 mm, pa se može usvojiti kao osnovno eksplozivno punjenje pri izvođenju tražene zavisnosti.

Od sporogorećeg štapina i kapisli izrađuje se sporogoreći upaljač, koji se, u ovom slučaju, koristi kao osnovno eksplozivno punjenje za izvođenje eksperimenta. Za izradu sporogorećeg upaljača koristi se komad sporogorećeg štapina (ne kraći od 60 cm) i DK-8 [5].

Od ostale opreme, potrebne za izvođenje opita, izdvaja se oprema za bušenje otvora u betonu do prečnika malo većeg nego što je prečnik kapisle, npr. ϕ 8 mm Iako je prečnik kapisle ϕ 6,9 mm manji od pripremljenog otvora, razlika u prečnicima je neophodna radi eliminisanja rizika prilikom postavljanja sporogorećeg upaljača u bušotinu, tj. izbegavanja paljenja detonatora u neželjeno vreme. Bušilica za

Dakle, neophodno je obezbediti da se sva paljenja izvedu pri istim — projektovanim dubinama postavljanja eksplozivnog punjenja jer to znatno utiče na tačnost dobijenih rezultata.

Dva osnovna parametra koja karakterišu veličinu formiranog kratera, a koji se mogu izmeriti jesu prečnik kratera i zapremina izbačenog materijala. Pod pretpostavkom da je formirani krater oblika idealnog konusa, između ovih veličina može se uspostaviti jednostavna algebarska veza, pa je, u nekim slučajevima dovoljno izmeriti samo jednu od ovih veličina, npr. prečnik kratera.

Eksperimentalno određivanje zavisnosti između čvrstoće na pritisak i otpornosti na dejstvo eksplozije betona

Da bi izveli traženu eksperimentalnu zavisnost generalno, potrebne su dve grupe uzoraka istih karakteristika — isti sastav mešavine, isti uslovi nege i ista kompaktnost betona. Jedna grupa biće ispitana posmatranom metodom, tj. meriće se otpornost na dejstvo eksplozije, dok će druga grupa uzoraka biti ispitana nekom od poznatih metoda za određivanje čvrstoće na pritisak. Malhotra [6] je još 1976. godine (ACI Monograph No. 9 »Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods«) predložio da se koristi najmanje šest uzoraka istog sastava, po tri za svako ispitivanje, i da srednja vrednost tako dobijenih rezultata daje jednu tačku na traženom dijagramu.

Dakle, za oba ispitivanja moguće je koristiti standardne uzorke, kocke ili cilindre, mada se za ispitivanje otpornosti betona na dejstvo eksplozije mogu koristiti i drugi nestandardni uzorci, npr. grednog ili pločastog oblika. U ovom slučaju, kao betonski uzorci za oba ispitivanja usvojene su standardne betonske kocke 20x20x20 cm, pre svega, jer su prethodna ispitivanja pokaza-

Sl. 1 — Pripremljeni sporogoreći upaljač pre aktiviranja

pravljenje otvora u betonu obavezno mora posedovati dodatak koji omogućava bušenje otvora do projektovane dubine. Naime, obavezna je kontrola izvedenih otvora, a ako se dogodi da su veće dubine od projektovanih, takve otvore treba eliminisati i izbušiti nove.

la da su oštećenja na njima usled dejstva malog eksplozivnog punjenja, kakvo je detonatorska kapisla, sasvim lokalnog karaktera. Drugi razlog za njihovo usvajanje je mogućnost izvođenja više testova otpornosti na dejstvo eksplozija na jednom uzorku. Prvobitna ideja je bila da se čak kapisle aktiviraju na svakoj od šest strana kockastog uzorka, ali su prva ispitivanja pokazala da treća i ostala aktiviranja značajnije oštećuju uzorak, pa je do kraja ispitivanja svaki uzorak ispitan samo na dve suprotne strane. Otvori za smeštaj punjenja izvedeni su bušenjem u središtima strana uzorka.

Takođe, važan parametar u ispitivanju predstavlja usvajanje dubine postavljanja eksplozivnog punjenja. Jasno je da veća dubina postavljanja uzrokuje i osetno veća oštećenja betonske površine, pa je zbog toga i usvojena kao parametar koji ćemo varirati u ispitivanju. Naime, kako dužina eksplozivnog punjenja kod DK-8 iznosi 21 mm, to će biti i prva usvojena dubina postavljanja punjenja. Uslov je da celo punjenje bude smešteno u bušotinu. Kako su prethodna ispitivanja pokazala, s obzirom na veličinu oštećenja, to se može smatrati gornjom granicom za dubinu postavljanja punjenja. Tražena zavisnost će se istraživati za još jednu dubinu postavljanja punjenja, koja će iznositi 15 mm, a kriterijum će biti što manje oštećenje betonske površine. Za eksplozivno punjenje u oba slučaja će se usvojiti azidna detonatorska kapisla 8, sa masom punjenja od približno 1,1 g.

Kao što je već napomenuto, parametri koji će se meriti jesu prečnik i zapremina kratera. Na osnovu prethodnih ispitivanja jasno je da krater nema pravilan oblik, već da je taj oblik približno elipsast, tj. da dominiraju dve ose — najveća i najmanja. Meriće se obe vrednosti, a za merodavnu veličinu kratera usvojimo njihovu srednju vrednost.

Takođe, meriće se masa uzoraka pre i posle aktiviranja punjenja, pa će

se na osnovu razlike u masi i poznate zapremine mase betona odrediti zapremina izbačenog materijala.

Plan ispitivanja

Da bi se postigao što veći raspon u čvrstoći betona, ukupno je projektovano sedam serija betonskih uzoraka različitog sastava. Svaka serija se sastojala od po tri betonske mešavine istog sastava, od koje su pravljena po tri uzorka (kocke 20x20x20 cm), ukupno devet uzoraka. Iz svake mešavine jedan uzorak je ispitan standardnim postupkom na pritisak, a po jedan na otpornost prema dejstvu eksplozije sa dubinom postavljanja punjenja od $h=15$ mm i $h=21$ mm.

Dakle, na otpornost prema dejstvu eksplozije ukupno je ispitano po 7 serija x 3 mešavine = 21 uzorak za obe dubine postavljanja punjenja, i isti broj uzoraka je ispitan standardnim postupkom.

Na sl. 2 prikazan je predhodno opisani plan obeležavanja i ispitivanja uzoraka.

U tabeli 2 dati su rezultati standardnog ispitivanja na pritisak uzoraka po serijama, kao i osnovni statistički parametri: srednja vrednost čvrstoće na pritisak, standardna devijacija i koeficijent varijacije.

Iz tabele se može uočiti ostvareni raspon u čvrstoći pojedinačnih rezultata koji iznosi 22,2 MPa, dok kod osrednjenih rezultata iznosi 18 MPa i može se smatrati da je dovoljan za izvođenje tražene zavisnosti.

U sledećim tabelama prikazani su eksperimentalni rezultati ispitivanja otpornosti betona na dejstvo eksplozije preko masa (Q u kg) izbačenog materijala.

Cela serija 7 za $h=21$ mm izuzeta iz razmatranja, jer su uzorci bili znatno oštećeni prilikom transporta i istovara.

Tabela 1.

Sastav betonskih uzoraka po serijama

		1	2	3	4	5	6	7
rečni agregat (kg/m ³)	0/4	638	623	597	567	545	535	521
	4/8	319	312	298	284	272	267	261
	8/16	319	312	298	284	272	267	261
	16/32	852	831	796	756	728	713	694
ukupno agregata		2128	2078	1989	1891	1817	1782	1737
cement (kg/m ³) PC15z45b Beočin		200	240	280	360	420	450	500
voda (lit/m ³)		128	144	158	169	177	180	180
svega (kg/m ³)		2456	2462	2427	2420	2414	2412	2417
V/C		0.64	0.60	0.56	0.47	0.42	0.40	0.36
A/C		10.64	8.67	7.10	5.25	4.33	3.96	3.47

Starost uzoraka u trenutku ispitivanja iznosila je oko 100 dana.

Mase izbačenog materijala sračunate su na osnovu merenja masa uzoraka pre i posle aktiviranja eksplozivnog punjenja. Na svakom uzorku izvedena su po dva opita na dve suprotne

strane kocke (I i II). Uočava se da su oba opita po uzorku merodavna, jer ne postoji uočljiva razlika između prvog i drugog opita. Dakle, nije izražena težnja da su npr. sve razlike u masama posle prvog opita manje od razlika u masama posle drugog opita, što

serija br.	1	2	3	4	5	6	7
------------	---	---	---	---	---	---	---

mešavina br.	I			II			III		
redni broj uzorka:	1	2	3	4	5	6	7	8	9

vrsta ispitivanja	standardno na pritisak			pomoću MEP, h=15 mm			pomoću MEP, h=21 mm		
ukupan broj uzoraka	3 x 7 = 21			3 x 7 = 21			3 x 7 = 21		
oznaka uzorka	1	4	7	2	5	8	3	6	9

Sl. 2 — Plan obeležavanja i ispitivanja uzoraka

bi navodilo na zaključak da je uzorak znatnije poremećen posle prvog opita, tj. da drugi opit po uzorku nije mero-

cijenat varijacije veći od 20%. Iz daljeg razmatranja izuzet je rezultat koji najviše odstupa od srednje vrednosti.

Tabela 2.

Rezultati standardnog ispitivanja uzoraka na pritisak

	1	2	3	4	5	6	7
1	28.96	29.47	36.02	40.04	43.43	46.82	44.49
4	26.63	35.37	37.08	40.61	45.24	48.31	44.08
7	34.65	34.76	34.53	40.25	46.51	48.83	44.69
f_b (MPa)	30.08	33.2	35.88	40.3	45.06	47.99	44.42
σ_b (MPa)	3.37	2.65	1.05	0.24	1.26	0.85	0.25
C_v (%)	11.2	8.0	2.9	0.6	2.8	1.8	0.6

davan. U tabelama su prikazani i osnovni statistički pokazatelji, na osnovu kojih je izvršena korekcija rezultata, odnosno u svim serijama gde je koefi-

Sličan princip se koristi i u nekim drugim metodama lokalne destrukcije, npr. određivanja otpornosti na prodiranje [7] ili kod nekih varijanti »pull-out«

Tabela 3.

Rezultati merenja masa izbačenog materijala (Q u g) za $h = 15$ mm

		1	2	3	4	5	6	7
2	I	210	160	140	130	110	60	80
	II	160	190	130	120	130	110	50
5	I	150	170	100	90	90	100	-
	II	260	200	140	70*	90	100	110*
8	I	120*	250	100	80	80	70	70
	II	190	150	90	*135	100	80	-
Q (gr)		182	187	117	104	100	87	77.5
σ_b (gr)		45	33	21	25	16	18	22
C_v (%)		24.9	17.6	17.6	24.0	16.3	20.6	27.9
* Q (gr)		194			111			67
* σ_b (gr)		39			22			12
* C_v (%)		20.2			19.8			18.6

Tabela 4.

Rezultati merenja masa izbačenog materijala (Q u g) za $h = 21$ mm

		1	2	3	4	5	6	7
3	I	340	-	250	140	170	130	-
	II	-	-	250	-	230*	-	-
6	I	270	230	200	210	120	100	-
	II	-	190	-	220	150	-	-
9	I	370	-	150	110*	160	110	-
	II	-	230	190	-	120	-	-
Q (gr)		327	217	208	170	158	113	-
σ_n (gr)		42	19	38	46	37	12	-
C_v (%)		12.8	8.7	18.3	27.0	23.5	11.0	-
* Q (gr)					190	144		
* σ_n (gr)					36	21		
* C_v (%)					18.7	14.3		

NAPOMENA: Sa * su označeni rezultati koji su izuzeti iz razmatranja,

Tabela 5.

Rezultati merenja prečnika formiranog kratera (R u cm) za $h = 15$ mm

		1	2	3	4	5	6	7
2	I	11.5	10.8	10.5	10.0	9.8	7.3	9.5
	II	9.5	11.5	10.3	9.9	10.8	9.4	8.0
5	I	9.5	11.0	10.9	9.0	9.5	9.6	-
	II	11.8	11.5	9.7	8.5	9.3	9.8	9.3
8	I	10.3	11.8	9.9	9.8	9.3	8.2	9.0
	II	11.0	11.0	9.5	10.0	9.5	8.5	-
R (cm)		10.6	11.3	10.1	9.5	9.7	8.8	8.95
σ_n (cm)		0.91	0.35	0.48	0.58	0.52	0.89	0.58
C_v (%)		8.5	3.1	4.8	6.1	5.4	10.1	6.5

testa [8]. Naime, smatra se da ovakav postupak neće bitno uticati na opis same pojave. Granicu od 20%, kao gornju vrednost koeficijenta varijacije, preporučuju neki autori, npr. Bungey [6], i sreće se kod BRE testa (engleska varijanta »pull-out« testa na bazi ekspanzivnog ankera) koji se nalazi u njihovim tehničkim propisima (BS 6089: 1981 [8]).

Linearna veza između čvrstoće betona na pritisak i otpornost na dejstvo eksplozije

Prikazaćemo rezultate linearne regresione analize primenjene na prosečne rezultate po serijama uzoraka. Svaka čvrstoća betona na pritisak na dijagramu predstavlja srednju vrednost od tri ispitivanja, dok svaka zapremina ili

Tabela 6.

Rezultati merenja prečnika formiranog kratera (R u cm) za $h = 21$ mm

		1	2	3	4	5	6	7
3	I	13.8	-	11.8	10.6	11.0	10.2	.
	II	-	-	11.7	-	-	.	.
6	I	12.5	12.3	10.4	12.2	10.0	9.3	.
	II	-	11.5	12.0	10.8	11.2	.	.
9	I	13.3	-	10.4	9.7	10.3	9.5	.
	II	-	12.5	12.0	-	11.0	.	.
R (cm)		13.3	12.1	11.4	10.8	10.7	9.7	.
σ_n (cm)		0.41	0.43	0.70	0.90	0.46	0.39	.
C_v (%)		3 2	3.6	6 2	8 3	4.3	4 0	.

Kod dubljih otvora ($h=21$ mm) na jednom broju uzoraka posle prvog opita došlo je do značajnijeg oštećenja — rastresanja uzoraka, što je dovelo do toga da drugi opit potpuno »razbije« uzorak. Naravno, takvi uzorci su izuzeti iz daljeg razmatranja.

Za dalju upotrebu, vrednosti masa izbačenog materijala (Q u gr) preračunate su u zapremine izbačenog materijala (V u cm^3), koristeći podatak da prosečna zapreminska masa nearmiranog betona iznosi 2400 kg/m^3 .

Navodimo rezultate određivanja otpornosti na dejstvo eksplozije, izražene preko srednjeg prečnika formiranog kratera.

prečnik kratera predstavljaju srednje vrednosti od tri do šest ispitivanja, u zavisnosti od broja uspehlih opita. Ovakav način predstavljanja rezultata je u skladu sa sličnim postupcima koji se koriste u literaturi pri ispitivanju betona lokalnom destrukcijom. Tako npr. Malhotra [9], [10] koristi ovakav postupak pri određivanju otpornosti na prodiranje i kod »pull-out« testa, dok ga Chabowski i Brayden-Smith [11] koriste pri ispitivanju betona unutrašnjim lomom (tzv. BRE test).

Zavisnost čvrstoće betona na pritisak (f_b) od otpornosti na dejstvo eksplozije biće predstavljena u sledećem obliku:

$$f_b = a \cdot V + b, \quad f_b = a \cdot R + b \quad (1)$$

gde je V — zapremina kratera, a

R — prečnik formiranog kratera, dok su a i b koeficijenti određeni metodom najmanjih kvadrata. Kako je varirana i dubina postavljanja punjenja, uvešćemo označavanje zapremine i prečnika kratera na sledeći način: $V(h=15 \text{ mm})=V_{15}$ $V(h=21 \text{ mm})=V_{21}$, $R(h=15 \text{ mm})=R_{15}$ i $R(h=21 \text{ mm})=$

$=R_{21}$. U tabeli 7 dati su rezultati linearne regresione analize za sve posmatrane slučajeve, i to koeficijent korelacije (r^2), standardna greška regresije (S_f) i koeficijenti a i b regresionih linija.

Na sl. 3 prikazane su regresione linije sa 95% granicama pouzdanosti.

Tabela 7.

Parametri veze dobijeni linearnom regresijom

	a	b	r^2	S_f (MPa)
$f_b - V_{15}$	-0.30	54.8	0.81	3.2
$f_b - V_{21}$	-0.21	56.3	0.87	2.8
$f_b - R_{15}$	-6.60	104.5	0.77	3.5
$f_b - R_{21}$	-5.30	98.8	0.91	2.4

Sl. 3 — Pravolinijska veza između čvrstoće betona na pritisak i veličine kratera;
a) $f_b - V_{15}$, b) $f_b - V_{21}$, c) $f_b - R_{15}$, d) $f_b - R_{21}$

Krivolinijska veza između čvrstoće betona na pritisak i otpornosti na dejstvo eksplozije

Iako je linearna regresija dala relativno dobru korelaciju, ipak je treba uzeti sa rezervom, s obzirom na to da su za analizu korišćeni osrednjeni rezultati. Naime, sprovođenje analize sa pojedinačnim rezultatima, što, takođe, neki autori preporučuju (Bickley [12]), svakako bi dalo realniju sliku pojave,

ali i znatno veće rasipanje rezultata, uzimajući u obzir relativno mali broj izvedenih opita i činjenicu da je u sastavu mešavina betona po serijama variran veći broj faktora (V/C, A/C). Zbog toga je sprovedena nelinearna regresiona analiza osrednjenih rezultata, radi uspostavljanja što bolje korelacije između promenljivih veličina. Kao regresione linije usvojene su kvadratna parabola, tzv. geometrijska kriva i eksponencijalna kriva. U tabeli 8 dati su parametri pomenutih regresionih linija.

Tabela 8.

Koeficijenti jednačina za nelinearnu regresiju

		$f_b - V_{15}$	$f_b - V_{21}$	$f_b - R_{15}$	$f_b - R_{21}$
$y = ax^2 + bx + c$	a	0.001	0.002	1.66	0.74
	b	-0.39	-0.61	-39.93	-22.48
	c	57.2	72.8	270.2	197.0
	r^2	0.81	0.95	0.80	0.93
	VGr	0.052	0.014	0.055	0.019
$y = ax^b$	a	187.8	307.1	1942.3	1841.0
	b	-0.405	-0.477	-1.710	-1.599
	r^2	0.81	0.93	0.77	0.94
	VGr	0.048	0.018	0.059	0.015
	S_f	3.2	2.1	3.5	1.9
$y = ae^{bx}$	a	58.5	60.6	210.0	185.1
	b	-0.008	-0.006	-0.171	-0.139
	r^2	0.84	0.89	0.77	0.93
	VGr	0.044	0.030	0.063	0.019
$y = ax + b$	r^2	0.81	0.87	0.77	0.91
	VGr	0.048	0.033	0.059	0.023

Sl. 4 — Krivolinijska veza između čvrstoće betona na pritisak i veličine kratera;
a) f_b - V_{15} , b) f_b - V_{21} , c) f_b - R_{15} , d) f_b - R_{21}

U tabeli su, takođe, prikazani koeficijenti korelacije posmatranih regresionih linija, kako radi međusobnog poređenja, tako i radi poređenja sa linearnom regresijom. U odnosu na pravolinijsku vezu, nelinearna regresija je dala, u većini slučajeva, poboljšanja merena povećanjem koeficijenta korelacije. Ovo povećanje je najizraženije kod kvadratne parabole (f_b - V_{21}) i iznosi 9% u odnosu na pravolinijsku vezu, dok u većini preostalih slučajeva iznosi od 0 do 4%. Iz tabele se još može zaključiti da je poboljšanje dobijeno nelinearnom regresijom, u većini slučajeva, približno jednako verovatnoj grešci koeficijenta korelacije (V_{Gr}) za linearnu vezu, iz čega proizilazi da linearna regresija sasvim dobro prikazuje dobijene rezultate. Ipak, izvesno po-

boljšanje pokazuje geometrijska kriva ($y=ax^b$) za slučajeve veće dubine postavljanja punjenja ($h=21$ mm), pa će se ona usvojiti pored pravolinijske veze za interpretaciju dobijenih rezultata. Na sl. 4 prikazana je krivolinijska veza ($y=ax^b$) između čvrstoće betona na pritisak (f_b) i otpornosti na dejstvo eksplozije, zajedno sa 95% granicama pouzdanosti.

Poređenje dobijenih rezultata

Na sl. 5 i 6 prikazane su predložene krive, kako radi poređenja dobijenih rezultata sa različitim dubinama postavljanja punjenja, tako i zbog samog poređenja prave i geometrijske krive, kao osnovnih predloga za traženu zavisnost.

Poredeći linije (1) i (2) jasno se uočava razlika između veličina zapremina za različite dubine postavljanja punjenja. Nagib linije (1) iznosi 0,3 MPa/cm³ izbačenog materijala, dok na-

Sl. 5 — Zavisnost između čvrstoće betona na pritisak i zapremine kratera; (1) f_b-V_{15} prava, (2) f_b-V_{21} prava, (3) f_b-V_{15} geometrijska kriva, (4) f_b-V_{21} geometrijska kriva

gib linije (2) iznosi 0,21 MPa/cm³, tako da je za raspon u čvrstoći betona od 16,5 MPa (30 — 46,5) postignut raspon u zapremini izbačenog materijala linije (2) od 78 cm³, dok kod linije (1) iznosi 55 cm³, tj. manji je za oko 40%.

Srednja vrednost razlike zapremine iznosi ~ 30 cm³ (za $f_b=38$ MPa) izbačenog materijala, odnosno sa povećanjem dubine sa $h=15$ mm na $h=21$ mm, srednja zapremina kratera se povećava za oko 55%. Ta razlika je izražena za niže čvrstoće betona i iznosi 42 cm³ za $f_b=30$ MPa, dok je kod viših čvrstoća (za $f_b=46,5$ MPa) 19 cm³. Međutim, stvarno povećanje zapremine je veće kod viših čvrstoća i ono iznosi 68%, dok je za niže čvrstoće povećanje zapremine manje i iznosi oko 50%. Dakle, veća dubina postavljanja punjenja ($h=21$ mm) daje nam veći raspon u zapremini izbačenog materijala, što pri istim ostalim uslovima omogućava preciznije određivanje čvrstoće betona.

Isti zaključak mogao bi se izvesti i za linije (3) i (4) — geometrijske kri-

ve, uz napomenu da u posmatranom rasponu one daju niže čvrstoće betona i da za srednju zapreminu kratera pri obe dubine postavljanja punjenja maksimalna razlika između geometrijske krive i prave ne prelazi 2 MPa, što je niža vrednost od standardne greške regresije za sve četiri linije.

Prema tome, iako su vrednosti čvrstoće betona koje daju geometrijske krive na strani sigurnosti, one se nalaze u okviru 95% granica pouzdanosti prave kao regresione linije, pa možemo zaključiti da prava sasvim zadovoljavajuće aproksimira dobijene rezultate.

Istovetni zaključci mogu se izvesti i za vezu čvrstoće betona i prečnika kratera kao pokazatelja dejstva eksplozije.

Sl. 6 — Zavisnost između čvrstoće betona na pritisak i srednjeg prečnika kratera; (1) f_b-R_{15} prava, (2) f_b-R_{21} prava, (3) f_b-R_{15} geometrijska kriva, (4) f_b-R_{21} geometrijska kriva

Nagib linije (1) iznosi 6,6 MPa/cm prečnika formiranog kratera, dok je nagib linije (2) nešto manji i iznosi 5,3 MPa/cm. Za ostvareni raspon u čvrstoći od 16,5 MPa, postignut je raspon u prečniku kratera od 2,5 cm ($2R_k=8,8-11,3$ cm) za liniju (1), i 3,6 cm ($2R_k=9,7-13,3$ cm) za liniju (2). Razlika u prečnicima ($2\Delta R$), za srednju čvrstoću od 38 MPa, za linije (1) i (2) iznosi oko 1,5 cm, odnosno prečnik kratera za dublje otvore ($h=21$ mm)

jeste za oko 15% veći od prečnika kratera za pliće otvore ($h=15$ mm). Razlika u prečnicima za obe dubine postavljanja punjenja je izraženija kod nižih čvrstoća betona (za $f_b=30$ MPa, $2\Delta R=1,7$ cm) u odnosu na više čvrstoće (za $f_b=46,5$ MPa, $2\Delta R=1,1$ cm). Stvarno povećanje prečnika u odnosu na dubinu postavljanja punjenja približno je isto, bez obzira na nivo čvrstoće i iznosi pomenutih 15% i razlikuje se od stvarne promene zapremine koja je promenljiva u odnosu na nivo čvrstoće i do 18% (68—50). Jedan od razloga za to treba potražiti u kvadratnoj vezi zapremine (V) i prečnika kratera ($2R_k$), sl. 7.

Sl. 7 — Veza između prečnika i zapremine formiranog kratera

Uvodeći i linije (3) i (4) u diskusiju (geometrijske krive), može se izvesti isti zaključak kao kod zapremine kratera, uz napomenu da je maksimalno odstupanje između geometrijske krive i prave još manje nego kod zapremine kratera (~ 1 MPa), tj. da prava sasvim dobro aproksimira dobijene rezultate.

Primena zavisnosti između čvrstoće betona i prečnika kratera na značenje činioca otpornosti materijala

Proračun potrebne količine eksploziva za rušenje elemenata od betona i armiranog betona, prema odredbama

Uputstva za rušenja [13]_f (u daljem tekstu Uputstvo), vrši se po obrascu:

$$P = MZ \cdot h^3 \quad (2)$$

za sva koncentrisana eksplozivna punjenja, gde je:

- P — potrebna količina eksploziva u kg;
- M — činilac otpornosti materijala, tablična vrednost;
- Z — činilac začepljenja, tablična vrednost;
- h — računaska linija otpora u metrima.

Činilac otpornosti materijala »M« trebalo bi da izražava osnovna svojstva materijala u pogledu njegovog kvaliteta, odnosno podataka na osnovu karakteristika čvrstoće materijala koji se posmatra. Uputstvo [13], daje vrednost koeficijenta »M« u zavisnosti od dužine računске linije otpora (h), i za $h < 0,5$ m, za beton i armirani beton M ima vrednost između 5 i 10. Vrednosti koeficijenta »M« date su još u zavisnosti od toga da li je beton armiran armaturom do 5% ili nearmiran, i da li je element koji se ruši opterećen ili neopterećen, (prema tabeli 9).

Po Uputstvu [13], potrebna količina eksploziva za rušenje elemenata od armiranog betona zavisi od procenta armature i njenog rasporeda u poprečnom preseku elementa na mestu rušenja, vrste eksplozivnog punjenja (spoljno, unutrašnje, kumulativno), vrste upotrebljenog eksploziva i mesta i načina njegovog postavljanja na element koji se ruši, kao i od oblika konstrukcije elementa.

Jedan od osnovnih pokazatelja kvaliteta betona jeste marka betona, koja se definiše kao »normirana čvrstoća pri pritisku u MPa, a zasniva se na karakterističnoj čvrstoći pri starosti betona od 28 dana« [16]. Za konstrukcije i elemente od betona danas se upotrebljavaju sledeće marke betona (MB): 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60. Pre-

Vrednosti činioca otpornosti materijala »M« za beton i armirani beton, za $h < 0,5 m$

Običan beton		Armirani beton sa armaturom do 5%	
neopterećen	opterećen	neopterećen	opterećen
5	7	8	10

ma [16], betoni iznad MB 60 su specijalni betoni, koji se mogu upotrebiti samo u posebne svrhe. Inače, ova granica je uslovna i menja se uporedo sa razvojem novih materijala u građevinarstvu. Tako su pedesetih godina betoni visoke čvrstoće smatrani betoni sa čvrstoćom iznad 35 MPa, šezdesetih godina proizvode se i primenjuju betoni čvrstoće 35 — 40 MPa, dok sedamdesetih čvrstoće već prelaze 60 MPa. Ilustracije radi, navešće se osnovna podela klasičnih betona napravljenih na bazi portland cementa, standardnih agregata i dodataka u zavisnosti od postignute čvrstoće pri pritisku [15]:

- normalne čvrstoće — do 50 MPa,
- srednje visoke čvrstoće — od 50 do 70 MPa;

— visoke čvrstoće — od 70 do 100 MPa, i

— izuzetno visoke čvrstoće — preko 100 MPa.

S obzirom na to Uputstvo [13] datira iz 1972. godine, i da su u njega u neti rezultati na osnovu iskustava iz šezdesetih godina, može se pretpostaviti da kvalitet betona na koji se odnosi koeficijent »M« iz jednačine (2) odgovara čvrstoći betona između 30 i 40 MPa. Kako se danas koriste betoni 2 do 3 puta veće čvrstoće, to svakako ukazuje na potrebu uzimanja i ovog faktora u obzir prilikom određivanja činioca otpornosti materijala (M).

Ova pretpostavka može se ilustrovati korišćenjem rezultata određivanja čvrstoće betona pomoću malih eksplozivnih punjenja (MEP). U pomenutom

Sl. 8 — Geometrijski parametri pri određivanju čvrstoće betona pomoću MEP;
a) $d = 21 \text{ mm}$, b) $d = 15 \text{ mm}$

ispitivanju korišćeno je bušotinsko, nezačepljeno punjenje (užljebljeno), pri čemu je usvojen koeficijent začepljenja $Z=2$ (tabela 4 u [13]), i činilac otpornosti materijala $M=5$ (tabela 9), sl. 8.

Kako računska linija otpora (h) predstavlja odstojanje od težišta eksplozivnog punjenja do one tačke do koje želimo ispoljiti dejstvo, a radijus rušenja (r) odstojanje od težišta punjenja do one tačke u materijalu do koje je eksplozivno punjenje izvršilo razaranje, to zamenom $h=r$ u jednačini (2) možemo odrediti prečnik formiranog kratera kao posledicu dejstva ovako usvojenih MEP. Korišćenjem izvedene veze između čvrstoće betona i prečnika kratera (tabela 7, slike 3 c, d) i 95% granica pouzdanosti, mogu se odrediti odgovarajuće čvrstoće betona za koje važi jednačina (2), odnosno odgovarajući činilac otpornosti materijala »M«.

ta, jer je poznato da se za prednapreznje koriste betoni viših čvrstoća (45 MPa i više).

Mogućnost primene, prednosti i nedostaci metode

Osnovna namena ovog postupka sastoji se u proceni kvaliteta betona u gotovim konstrukcijama, kada iz nekih razloga, npr. nepristupačnost mesta ispitivanja, nije moguće primeniti već poznate metode. Takođe, ponekad je potrebno raspolagati podacima o čvrstoći u vrlo kratkom roku, pri čemu ovakav način ispitivanja može doći do punog izražaja. Naime, posle nastanka vanrednih događaja (npr. zemljotresi, požar, eksplozije) često je potrebno brzo i dovoljno pouzdano odrediti kvalitet betona, kako u neoštećenoj, tako i u delimi-

Tabela 10.

Parametri potrebni za procenu čvrstoće betona

	P(gr)	r(cm)	R(cm)	2R(cm)	procenjena f_c (MPa)
d=21 mm	1,1	4,8	4,7	9,4	44
d=15 mm	0,8	4,3	4,2	8,4	42

Dakle, u oba slučaja dejstva MEP, dobijena je čvrstoća betona koji se ruši nešto preko 40 MPa, što se i očekivalo s obzirom na to da su šezdesetih godina betoni normalne čvrstoće bili oko 30 MPa. Ova analiza ukazuje na zaključak da bi za rušenje betona čvrstoća preko 40 MPa trebalo da koriguje vrednost činioca otpornosti materijala »M« iz jednačine (2), jer primenom vrednosti datih u tabeli 9 možemo uspešno porušiti beton čija čvrstoća ne prelazi 40 MPa. Na ovakav zaključak navodi i podatak da Uputstvo [13] reguliše rušenje prednapregnutog betona prema odredbama za rušenje čeličnih elemenata

čno oštećenoj konstrukciji. Postupak sa malim eksplozivnim punjenjima nudi prednosti u takvim situacijama, jer se može sprovesti vrlo brzo, pri čemu su dobijeni podaci odmah raspoloživi za dalju upotrebu.

Nije zanemarljiva ni mogućnost primene metode u vojnom građevinarstvu. Pored obučenog ljudstva za rad sa eksplozivnim materijama, vojska se lako može snabdeti opremom potrebnom za ispitivanje, pa je za potpunu primenu metode potrebno raspolagati i dijagramima zavisnosti čvrstoće betona od veličine formiranog kratera. Dakle, potrebno je unapred pripremiti dijagrame za različite vrste betona (u smislu raz-

ličitih vrsta agregata ili cementa) da bi se uz minimalno poznavanje karakteristika betona koji se ispituje mogao izvršiti izbor dijagrama, tj. sprovesti ispitivanje.

Prednost ove metode jeste da ispitivanje nema strogo površinski karakter (kao, npr. metoda sklerometra), već da se zona koja utiče na veličinu formiranog kratera prostire i do dubine 7—8 cm. Sličnu osobinu ima i metoda određivanja čvrstoće betona preko otpornosti na prodiranje, što postupak sa malim eksplozivnim punjenjima čini merodavnim i za ispitivanje zona u blizini betonske površine. Značaj koji ova zona ima na ukupnu nosivost elementa koji se ispituje doprinosi značaju same metode.

Osnovni nedostatak predložene metode svakako je i relativno veliko oštećenje betonske površine, prečnika 9—13 cm, koje se naknadno mora popravljati, kao i nemogućnost njene primene kod elemenata male debljine. Na osnovu sprovedenog eksperimenta, predlaže se da minimalna debljina elementa koji se ispituje ne bude manja od 20 cm (približno dve zone uticaja), kao i da minimalni razmak između dva ispitna mesta bude 20 cm, kako bi se izbeglo preklapanje zona uticaja. Najmanje odstojanje od ivice elementa, takođe bi trebalo ograničiti na 10 cm, dok bi uticaj blizine armature u odnosu na mesto ispitivanja trebalo naknadno ispitati.

Poredeći veličinu oštećenja betonske površine, pri primeni ove metode sa drugim metodama lokalne destrukcije [1], može se zaključiti da metode kao »pull-off«, otpornost na prodiranje ili LOK test imaju znatno manja površinska oštećenja, dok su oštećenja kod nekih varijanti »pull-out« testa (npr. prema GOST-u) i »break-off« metode istog reda veličine kao kod metode sa malim eksplozivnim punjenjima.

Zaključak

Ovaj rad govori o novom postupku koji za ispitivanje betona koristi mala eksplozivna punjenja [14]. Naime, iskorišćena je osnovna karakteristika dejstva eksplozije u neprekidnoj sredini da radijus dejstva eksplozije zavisi, kako od količine i vrste eksploziva, tako i od osobina sredine (npr. čvrstoće sredine na pritisak). Kako jedan takav postupak ne zahteva posebno projektovanu opremu, to je, usvajanjem osnovnih parametara, na osnovu probnih ispitivanja, izvedena tražena eksperimentalna zavisnost između čvrstoće betona i veličine kratera. Osnovna karakteristika tako dobijene veze sastoji se u tome da je ona, ipak, izvedena na osnovu malog broja uzoraka i da se može samo kao početni rezultat u konstituisanju metode. Razloge za nešto veće rasipanje pojedinačnih rezultata treba tražiti, pre svega, u malom broju uzoraka, varijaciji karakteristika agregata po serijama uzoraka, veličini maksimalnog zrna agregata od 32 mm, kao i neusavršenosti samog postupka ispitivanja.

Kako je ispitivanje sprovedeno ravnopravno sa dve dubine postavljanja punjenja ($d=21$ mm i $d=15$ mm), poredeći dobijene rezultate možemo izvesti sledeće zaključke: znatno bolju korelaciju dali su uzorci sa većom dubinom postavljanja punjenja, gde se koeficijent korelacije kretao oko 0,9, u odnosu na uzorke sa manjom dubinom gde je koeficijent korelacije iznosio oko 0,8 za sve posmatrane slučajeve. Razlog za to nalazi se, pre svega, u činjenici da su u površinskoj zoni betonskog elementa često skoncentrisani lokaliteti sa krupnim zrnima agregata koja imaju visoku čvrstoću, ali i slaba mesta u cementnom kamenu koja sadrže zarobljen vazduh, čije prisustvo može znatno povećati rasipanje rezultata. Međutim, na uzorcima sa većom dubinom postavljanja punjenja ($d=21$ mm) primećen je i veći stepen oštećenja na površini uzorka, kao i u izvesnom bro-

ju slučajeva pojava radijalnih pukotina sve do ivica betonskih kocki na kojima su vršena ispitivanja. Kod ovih uzoraka, u više slučajeva, drugo pucanje je potpuno razbijalo uzorak, pa takvi rezultati nisu uzimani u razmatranje. Dakle, dubina postavljanja punjenja od $d=21$ mm, iako daje manje rasipanje rezultata, znatnije oštećuje uzorak, pa bi za dalja ispitivanja trebalo ili povećati uzorak ili smanjiti dubinu postavljanja punjenja.

Dobijena veza između čvrstoće betona i prečnika kratera iskorišćena je za ilustraciju značenja činioca otpornosti materijala »M« iz formule za rušenje

betona prema Uputstvu za rušenje. Zaključeno je da činilac otpornosti materijala odgovara čvrstoći betona između 30 i 40 MPa, te da za rušenje betona viših čvrstoća (koje su, inače, u današnje vreme normalne čvrstoće u građevinarstvu), treba korigovati njegovu vrednost. Takođe, ovakav zaključak navodi na potrebu istraživanja značenja činioca otpornosti materijala za beton i druge vrste eksplozivnih punjenja (površinska, kumulativna), kao i na probe sa velikim eksplozivnim punjenjima, vodi određivanja uticaja čvrstoće betona na njegovu vrednost, a samim tim i na ukupne efekte rušenja.

Literatura:

- [1] Malhotra, V. M.: In situ/non-destructive testing of concrete, ACI SP-82, 1984.
- [2] Leščinski, M.: Ispytanie betona — spravočnoe posobie, Strojizdat, 1980.
- [3] Pokrovskij, G., Fedorov, I.: Dejstvie udara i vzryva v deformiruemyh sredah Strojizdat, Moskva, 1957.
- [4] ... JUS H.D3.150: Detonatorske (rudarske) kapisle — tehnički uslovi za izradu i isporuku, Službeni list SFRJ br. 18/73.
- [5] Škarec, Ž.: Rušenje, VIZ, Beograd, 1979.
- [6] Bengay, J.: The testing of concrete in structures, Surrey University Press, London, 1982.
- [7] ... ASTM Designation: C 803-90: Standard test method for penetration resistance of hardened concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, p.449—452.
- [8] ... BS 6089: Guide to assessment of concrete strenght in existing structures, British Standard Institution, London, 1981.
- [9] Malhotra, V. M.: Evaluation of the Windsor probe test for estimating compressive strenght of concrete, Materials and Structures (RILEM, Paris), Vol. 7, No.37, jan—feb. 1974, p.3—15.
- [10] Malhotra, V. M.: Evaluation of the pullout test to determine strenght of in situ concrete, Materials and Structures (RILEM, Paris), Vol. 8, No.43, 1975, p.19—31.
- [11] Chabowski, A. J., Bryden-Smith D.: Assessing the strenght of in situ Portland cement concrete by internal fracture test, Magazine of Concrete Research, Vol. 32, No.112, sept. 1980, p.164—172.
- [12] Bickley, J.: The variability of pullout tests and in-place concrete strenght, Concrete International, april 1982, p.44—51.
- [13] ... Uputstvo za rušenje, SSNO UI, Beograd, 1972.
- [14] Cvetković, D.: »Ispitivanje betona metodama lokalne destrukcije sa osvrtom na određivanje čvrstoće betona pomoću malih eksplozivnih punjenja«, magistarski rad, Građevinski fakultet, Beograd, 1993.
- [15] Rajić, R.: »Betoni visoke čvrstoće«, Magistarski rad, Građevinski fakultet, Beograd, 1992.
- [16] ... Pravilnik BAB 87 o tehničkim normativima za Beton i Armirani beton, Beograd, 1987.