Mr Dragoljub Cvetković,
dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

ANALIZA OŠTEĆENJA BETONA PRI ISPITIVANJU METODOM EKSPLOZIVNIH PUNJENJA

UDC: 620.178.7-033.3.001.575

Rezime:

Prikazani su rezultati istraživanja korišćenjem jedne nove metode za određivanje čvrstoće betona pri pritisku pomoću malih eksplozivnih punjenja. Metoda se zasniva na merenju veličine kratera na betonskoj površini koji se dobija nakon eksplozije. Posebno mesto zauzima određivanje stepena oštećenja uzoraka usled dejstva malih eksplozivnih punjenja i mogućnost aproksimacije dobijenih rezultata normalnom raspodelom. Na osnovu srednje vrednosti opadanja čvrstoće pri pritisku uzoraka, pre i posle aktiviranja eksplozivnog punjenja od oko 10%, zaključeno je da je nastalo oštećenje lokalnog karaktera. Takođe, kriterijum za ocenu valjanosti normalnom raspodelom zadovoljen je u svim posmatranim slučajevima, pa se aproksimacija može smatrati dobrom.

Ključne reči: ispitivanje betona, oštećenje betona, kontaktna eksplozija, eksperimentalni rezultati, Gausova raspodela

ANALYSIS OF CONCRETE DAMAGE DURING TESTING BY EXPLOSIVE CHARGES

Summary:

The results of a new testing method for the determination of concrete strength under pression using small quantities of explosive charges are given. The method is based on the measurement of the crater size on a concrete surface after explosion. The special emphasis is placed on the determination of a sample damage degree as the effect of small quantities of explosive charges as well as on the possibility to approximate obtained results using the normal distribution. On the basis of mean value of strength declination during sample pression, before and after the activation of explosive charge of about 10%, it was concluded that local damage had occurred. The validity estimation criterion using the normal distribution was satisfied in all observed cases so the approximation can be taken as valuable.

Key words: concrete testing, contact explosion, experimental results, Gaussian distribution.

Uvod

U toku 1992. i 1993. godine u našoj zemlji dobijeni su prvi rezultati ispitivanja betona pomoću malih eksplozivnih punjenja (MEP), pri čemu su određene početne relacije između čvrstoće betona pri pritisku i nastalog oštećenja betonske površine, tj. prečnika

i zapremine formiranog kratera [1, 2]. Pri tome je iskorišćena osnovna karakteristika dejstva eksplozije u kompaktnoj (neprekidnoj) sredini, a to je da radijus dejstva eksplozije zavisi od količine i vrste eksploziva, i od osobina sredine koja se ruši (npr. čvrstoće betona pri pritisku).

Dobijeni rezultati ukazali su na mogućnosti primene ovog postupka za ispitivanje (procenu) kvaliteta očvrslih betona u posebnim situacijama, kao i na činjenicu da se osnovne prednosti metode ogledaju u jednostavnosti i pouzdanosti postupka. Međutim, s obzirom na obim prethodnih ispitivanja, otvorena su i neka pitanja koja u novom ciklusu eksperimentalnih provera tek treba razrešiti. Neka od tih pitanja su:

— stepen oštećenja uzoraka usled dejstva MEP tj. koliko su ovakva ispitivanja stvarno lokalnog karaktera;

— određivanje realnijih statističkih pokazatelja o grupisanju rezultata korišćenjem većih serija istovrsnih uzoraka, u okviru čega će se izvršiti provera valjanosti aproksimacije dobijenih rezultata merenja normalnom raspodelom;

— mogućnosti uspostavljanja korelacije otpornosti na dejstvo eksplozije sa drugim referentnim karakteristikama betona, kao što su čvrstoća betona na zatezanje, modul elastičnosti i sl., s obzirom na to da je za referentnu čvrstoću usvojena samo čvrstoća betona pri pritisku [1];

— poređenje pouzdanosti metode sa nekim drugim već standardizovanim nedestruktivnim postupcima, npr. sa metodom određivanja čvrstoće betona pomoću sklerometra.

Ovaj rad obuhvata, pored kratkog prikaza dosadašnjih rezultata, odgovore na neka od postavljenih pitanja, a posebno ona koja se odnose na određivanje stepena oštećenja uzoraka usled dejstva MEP i na mogućnost aproksimacije rezultata normalnom raspodelom.

Dosadašnji rezultati

Sprovedena su istraživanja sa ciljem da se uspostavi zavisnost između veličine kratera na površini betonskog elementa koji izaziva unapred usvoje-

no eksplozivno punjenje — tzv. otpornosti na dejstvo eksplozije — i čvrstoće betona pri pritisku. Pored toga, izvršena su paralelna ispitivanja oba navedena svojstva betona, nakon čega su dobijene veličine dovedene u vezu sa statističkim metodama.

Biće dati samo krajnji rezultati linearne regresione analize (jednačina regresione linije, koeficijent korelacije r^2 i standardna greška regresije S_f), kojom je određena veza između čvrstoće betona pri pritisku (f_{bp}) i veličine kratera (prečnika $2R$ i zapremine V) za dubinu postavljanja punjenja $h=15$ mm. Dobijeni su sledeći rezultati [1]:

$$\begin{aligned} f_{bp} &= -0,30V + 54,8; \quad r^2 = 0,81; \\ S_f &= 3,2 \text{ MPa} \\ f_{bp} &= -6,60(2R) + 104,5; \quad r^2 = 0,77; \\ S_f &= 3,5 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (1)$$

Plan ispitivanja

Ispitivanja su sprovedena na betonskim uzorcima čija je starost bila oko 100 dana. Korišćene su betonske kocke, čije su ivice 20 cm, dok su referentne karakteristike betona određene na kockama ivica 15 cm i 20 cm i prizmama $12 \times 12 \times 36$ cm. Svi uzorci su projektovane marke betona MB 35, čiji je sastav prikazan u tabeli 1.

Na kockama ivica 20 cm (41 kom.) u središtu jedne strane izvedene su bušotine prečnika 8 mm, dubine 17 mm, u kojoj će se aktivirati MEP DK-8 (JUS H.D3.150). Visina eksplozivnog punjenja u ovako formiranoj bušotini iznosiće 15 mm, uzimajući u obzir konusni oblik vrha burgije kojom se bušotina izvodi i debljinu dna čaure kapsle. S obzirom na ranija iskustva [1], zahteva se da tačnost bušenja izvedenih bušotina bude u okviru 17 ± 1 mm, pa će se u slučaju većih odstupanja izvršiti ili odbacivanje takvih uzoraka ili korekcija rezultata usled nejednake

Tabela 1

Karakteristike betona korišćenog za izradu uzoraka

Materijal	Količina (kg/m ³)
— Frakcija agregata 0/4 mm	620
— Frakcija agregata 4/8 mm	252
— Frakcija agregata 8/16 mm	375
— Frakcija agregata 16/32 mm	670
— cement „Popovac” 30 z 45 B	330
— Vodocementni faktor	0,53
— Zapreminska masa svežeg betona: projektovana ostvarena	2422 kg/m ³ 2397 kg/m ³
— Pokazatelj konzistencije — sleganje	12 cm

dubine bušenja. Meriće se prečnik ($2R$), zapremina (V) i dubina (d) nastalog oštećenja (slika 1).

Zapremina kratera odrediće se na osnovu zapreminske mase betona i mase izbačenog materijala, koja će se dobiti na osnovu razlike u masama uzoraka pre i posle aktiviranja DK-8. Me-

Sl. 1 — Šematski prikaz postavljanja MEP

renje zapremine kratera izvršiće se na još jedan način, i to korišćenjem opreme za određivanje zapreminske mase sa normiranim peskom.

Ovim postupkom, koristeći pesak poznate zapreminske mase, moguće je određivanje zapremine kratera na horizontalnim površinama većih uzoraka (kod kojih nije moguće odrediti mase uzoraka pre i posle pucanja). Takođe, svi uzorci bili su podvrgnuti prethodnim i naknadnim ispitivanjima u odnosu na ispitivanje sa MEP. U prethodna ispitivanja spada ispitivanje jedne strane uzorka sklerometrom (određivanje visine odskoka h^I) pre dejstva MEP, dok u naknadna ispitivanja uzoraka spadaju ispitivanja posle dejstva MEP. Uzorci će biti »zakrpljeni« — formirani krateri će se popuniti cementnim malterom, a zatim će se ponovo izvršiti ispitivanje sklerometrom (određivanje visine odskoka h^{II}), i ispitivanje standardnim postupkom (loma na presi) za određivanje čvrstoće betona pri pritisku (f_{bp}^{pk}).

Takođe, određene su i sledeće referentne karakteristike betona: čvrstoća pri pritisku (f_{bp}) odrediće se standardnim postupkom ispitivanja (lom na presi) na 9 uzoraka — 6 kocki ivice 20 cm i 3 kocke ivice 15 cm, prema JUS U.M1.020. Kocke 20×20×20 cm će, takođe, biti izložene prethodnom ispitivanju pomoću sklerometra; čvrstoća pri zatezanju savijanjem (f_{bz}) odrediće se prema JUS U.M1.010 na prizmama (6 kom.) 12×12×36 cm lomom pomoću koncentrisanog opterećenja u sredini raspona; čvrstoća pri zatezanju cepanjem (f_{bz}) odrediće se prema JUS U.M1.022 na delovima prizmi (12 kom.) dobijenim prilikom loma savijanjem — tzv. modifikovana metoda kocke; da bi se kompletirale mehaničke karakteristike betona kao materijala odrediće se još i statički modul elastičnosti pri pritisku (E_b), na prizmama 12×12×36 cm (6 kom.) prema JUS U.M1.025, a zatim praćenjem do loma istih uzoraka odrediće se njihova čvrstoća pri pritisku (f_{bp}) i σ - ϵ dijagram.

Rezultati ispitivanja

Eksperimentalna ispitivanja sprovedena su kada je starost uzoraka dostizala 100 dana, što je odgovaralo starosti uzoraka iz ranijih ispitivanja i omogućilo je upoređenje dobijenih rezultata.

Biće objašnjen izabrani način utvrđivanja stepena oštećenja, korekcija pojedinih rezultata usled nejednake dubine bušotina za smeštaj MEP-a, i provera valjanosti aproksimacije dobijenih rezultata normalnom raspodelom.

Slabljenje uzoraka usled dejstva bušotinskih MEP

Jedno od osnovnih pitanja postavljeno u nastavku istraživanja čvrstoće betona pomoću MEP bilo je određivanje stepena oštećenja uzoraka (kocke ivice 20 cm), odnosno utvrđivanje lokalnosti pojave. Da bi se to pokazalo, vršena su ispitivanja svih uzoraka sklerometrom, pa je zatim na jednom broju referentnih uzoraka (6 kom.) određena čvrstoća betona pri pritisku u neporemećenom stanju. U tabeli 2 prikazani su rezultati merenja visine odskoka h (mm) i čvrstoće betona pri pritisku f_{bp} (MPa).

Odnos srednjih vrednosti $k = f_{bp}/h = 44,9/34,7 = 1,294$ korišćen je da bi se za uzorke na kojima je aktivirano bušotinsko MEP (41 kom.), a koristeći merene visine odskoka sklerometra pre (h^I) i posle (h^{II}) eksplozije, na posredan način odredile i pojedine čvrstoće betona pri pritisku $f_{bp}(h^I) = k \cdot h^I$ i $f_{bp}(h^{II}) =$

$= k \cdot h^{II}$ za odgovarajuće faze eksperimenta. Takođe, uzorci na kojima su formirani krateri dejstvom MEP su »zakrpljeni« cementnim malterom, pa je posle odležavanja određena njihova stvarna čvrstoća pri pritisku lomom na presi (f_{bp}^{pk}). Na taj način, bilo je moguće odrediti odstupanje (%) u čvrstoći pri pritisku, pre i posle aktiviranja bušotinskog MEP, svakog pojedinog uzorka. Prema tome, odstupanje iznosi:

$$\Delta(\%) = \frac{f_{bp}(h^I) - f_{bp}^{pk}}{f_{bp}(h^I)} \cdot 100 \quad (2)$$

Rezultati ove analize prikazani su u tabeli 3.

Sličan postupak za određivanje stepena oštećenja betona korišćen je kod metode lokalne destrukcije, poznate pod nazivom BRE-test (engleska varijanta pull-out testa na bazi ekspanzivnih ankera — britanski standard BS 6089/81) [3]. Čabovski i Brajden-Smit [4] dobili su srednju vrednost slabljenja uzoraka (kocke ivice 15 cm) od 5 %, mereno padom čvrstoće pri pritisku uzoraka na kojima je izvršeno čupanje ankera, a zatim »krpljenje« i lom na presi, prema čvrstoći pri pritisku neporemećenih uzoraka.

U našem slučaju, srednja vrednost slabljenja uzoraka iznosila je prihvatljivih 10,4 %, dok se pojedinačne vrednosti kreću od -4 % do 25 %. Slabljenja uzoraka veća od 20 % sreću se na četiri uzorka (r.br.7,16,18,38) i ne može se smatrati lokalnom pojavom, jer je »izgubljeno« više od petine nosivosti uzorka. Ovaj kriterijum uspos-

Tabela 2

Određivanje karakteristika referentnih uzoraka

Redni broj	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Sr. vr.	$C_v(\%)$
f_{bp} (MPa)	46,6	43,7	46,0	45,5	44,0	43,6	44,9	2,9
h (mm)	35,3	35,7	34,5	33,6	33,6	35,6	34,7	2,8

tavljen je na osnovu pretpostavke da se dvostruka vrednost srednjeg slabljenja može usvojiti za gornju granicu tolerancije slabljenja pojedinačnih uzoraka. Zbog toga su iz dalje analize izbačeni rezultati merenja veličine kratera uzoraka sa slabljenjem većim od 20 %, jer se može smatrati da pojava na njima nije lokalnog karaktera. Razloge za to treba tražiti, pre svega, u neadekvatnosti veličine uzoraka, a i u posrednom određivanju čvrstoća pri pritisku (preko sklerometra) uzoraka u neporemećenom stanju.

Korekcija rezultata usled nejednake dubine bušenja

Pre nego što se prikažu rezultati merenja veličine kratera, izvršice se korekcija pojedinih rezultata, jer je na osnovu uvida u vrednosti dubina bušotine za smeštaj MEP-a (DK-8) zaključeno da su one izvedene sa varijacijama za koje se može pretpostaviti da mogu uticati na ukupno rasipanje rezultata. Zbog toga će se razmotriti kako varijacije u dubini bušenja (Δd_b) utiču na varijacije u dubini kratera (Δd_k), a samim tim i na veličinu samog kratera, odnosno na njegovu zapreminu (V) i prečnik ($2R$) (slika 2).

Uspostavljanje veze između dubine bušotine (d_b) i dubine kratera (d_k) iz-

vršeno je linearnom regresijom osrednjih rezultata merenja, koji su grupisani u četiri grupe: I grupa $d_b \leq 1,6$ cm, II grupa $1,6 < d_b \leq 1,7$ cm, III grupa $1,7 < d_b \leq 1,8$ i IV grupa $d_b > 1,8$ cm, pri čemu su dobijeni sledeći rezultati: $d_k = 0,42 d_b + 1,41$, i $r^2 = 0,85$. Takođe, uvedena su i određena uprošćenja radi pojednostavljenja postupka izvođenja, i to:

- formirani krater je u obliku idealnog konusa ($V_k = R^2 \pi d_k / 3$),
- veza između dubine bušotine i dubine kratera je u obliku prave linije,
- zanemaruju se male veličine višeg reda, proizvodi tipa $\Delta R \cdot \Delta d_k$, $(\Delta R)^2$, i sl.

Neka je $V_1 = \pi R^2 d_k / 3$ zapremina idealnog osnovnog kratera, i $V_2 = \pi (R + \Delta R)^2 (d_k + \Delta d_k) / 3$ zapremina kratera usled povećanja d_k za Δd_k . Njihova razlika iznosi $\Delta V = V_2 - V_1 = \pi (R^2 \Delta d_k + 2R \Delta R d_k) / 3$. Iz jednostavnih geometrijskih transformacija može se dobiti da je $R \Delta d_k = \Delta R d_k$, pa sledi: $\Delta V = \pi R \Delta R d_k = \pi R^2 \Delta d_k$. Korišćenjem pretpostavke o idealnom konusu dobija se:

$$\Delta V = 3V \frac{\Delta d_k}{d_k}$$

$$(2\Delta R) = \frac{12 V \Delta d_k}{\pi (2R) d_k^2} \quad (3)$$

Sl. 2 — Osnovni geometrijski parametri kratera

Slabljenje uzoraka usled dejstva MEP-a i obrađeni rezultati merenja

R.br.	d_b (cm)	d_k (cm)	h^I (mm)	h^{II} (mm)	f_{bp}^{pk} (MPa)	$f_{bp}(h^I)$	$\Delta(\%)$	$V_{RM}(cm^3)$	$V_{GP}(cm^3)$	2R(cm)
1.	1,77	2,37	34,4	35,0	38,1	44,5	14	37,5	35,1	8,75
2.	1,59	2,51	31,7	34,3	37,7	41,0	8	53,0*	50,9*	9,66*
3.	1,68	2,23	32,5	35,4	40,7	42,1	3	41,7	38,5	9,0
4.	1,73	2,25	35,3	34,3	37,9	45,7	17	41,7	35,8	9,0
5.	1,70	2,30	35,2	32,5	36,4	45,5	20	41,7	36,5	9,0
6.	1,68	2,30	35,1	35,1	40,1	45,4	12	25,0	25,0	8,75
7.	—	—	35,2	34,5	34,1	45,5	25	—	—	—
8.	1,56	1,88	35,0	35,5	44,1	45,3	3	32,0*	33,3*	7,99*
9.	1,60	2,20	33,8	34,3	41,6	43,7	5	45,8	42,6	9,75
10.	1,79	2,11	34,4	34,8	44,7	44,5	—1	50,0	44,6	9,25
11.	1,85	2,30	33,7	33,1	38,6	43,6	11	65,3*	62,3*	10,46*
12.	1,63	2,28	32,5	33,5	43,7	42,1	—4	54,2	49,3	9,75
13.	1,57	1,95	34,3	34,4	38,5	44,4	13	44,9*	44,4*	9,48*
14.	1,61	1,98	34,3	34,9	39,5	44,4	11	62,5	56,8	10,25
15.	1,60	2,04	36,1	35,4	37,8	46,7	19	41,7	39,2	10,0
16.	—	—	36,1	36,2	36,2	46,7	22	—	—	—
17.	1,60	2,17	34,4	33,2	42,5	44,5	4	41,7	39,9	9,0
18.	—	—	35,6	32,9	34,9	46,1	24	—	—	—
19.	1,70	1,87	34,6	34,5	35,9	44,8	20	41,7	31,8	9,5
20.	1,68	1,85	31,9	29,6	34,4	41,3	17	41,7	39,2	8,0
21.	1,64	2,22	31,3	30,3	39,4	40,5	3	54,2	44,6	9,25

R.br.	d_b (cm)	d_k (cm)	h^I (mm)	h^{II} (mm)	f_{bp}^{pk} (MPa)	$f_{bp}(h^I)$	$\Delta(\%)$	$V_{RM}(cm^3)$	$V_{GP}(cm^3)$	2R(cm)
22.	1,66	2,14	35,1	35,3	40,1	45,4	12	37,5	32,4	8,75
23.	1,61	2,05	33,6	36,5	43,8	43,5	—1	37,5	39,9	9,0
24.	1,66	2,10	34,9	33,9	43,2	45,2	4	45,8	37,8	9,75
25.	1,65	2,18	33,6	33,0	40,2	43,5	8	41,7	48,6	9,25
26.	1,60	1,90	32,5	35,6	43,5	42,1	—3	33,3	37,8	7,75
27.	1,82	2,25	31,2	31,9	35,8	40,4	11	50,6*	50,5*	9,8*
28.	1,60	2,60#	33,8	33,7	41,6	43,7	5	45,8	38,5	9,25
29.	1,64	2,19	33,8	32,4	39,6	43,7	9	41,7	31,8	9,0
30.	1,70	2,07	34,1	33,0	42,0	44,1	5	33,3	39,9	8,25
31.	1,60	2,00	35,0	33,8	43,2	45,3	5	45,8	45,3	9,75
32.	1,75	2,17	34,6	34,9	45,5	44,8	—2	37,5	36,5	8,75
33.	1,77	1,97	35,2	34,8	36,7	45,6	20	45,8	43,9	10,0
34.	1,75	2,32	34,7	30,7	45,0	44,9	0	29,2	30,4	8,5
35.	1,64	2,01	36,0	35,5	39,5	46,6	15	33,3	31,8	8,75
36.	1,64	1,96	34,0	34,2	35,5	44,0	19	50,0	39,2	9,5
37.	1,84	1,95	34,3	34,0	39,7	44,4	11	52,9*	46,0*	10,17*
38.	—	—	36,1	36,3	36,8	46,7	21	—	—	—
39.	1,64	1,99	34,1	32,5	40,4	44,1	8	37,5	26,4	7,5
40.	1,74	2,10	36,3	36,0	42,1	47,0	10	37,5	32,4	8,75
41.	1,69	2,05	33,5	33,0	37,0	43,4	15	45,8	38,5	9,5
Sr.vr.	1,68	2,13	34,2	34,0	39,7	44,3	—	43,2	39,9	9,16
S_{n-1}	0,08	0,18	1,31	1,59	3,19	1,69	—	8,57	7,93	0,70
$C_v(\%)$	4,6	8,2	3,8	4,7	8,0	3,8	—	19,8	19,9	7,7

* Rezultati korigovani prema jednačini (3).

U tabeli 3 prikazani su korigovani rezultati, pri čemu je uzimano u obzir da je usvojena tolerancija u dubini bušenja $1,7 \pm 0,1$ cm, tako da je izvršena korekcija samo kod onih uzoraka kod kojih je dubina bušenja bila manja od 1,6 cm (uzorci r.br.2,8,13) i veća od 1,8 cm (uzorci r.br.11,27,37).

Takođe, u tabeli 3 prikazani su krajnji dobijeni i obrađeni rezultati, i uvedene su sledeće oznake: V_{RM} (cm³) — zapremina kratera određena na osnovu razlike u masi uzoraka pre i posle eksplozije (usvojena zapreminska masa betona od 2400 kg/m³), V_{GP} (cm³) — zapremina kratera određena korišćenjem metode sa normiranim peskom; dobija se iz jednačine: $((5000 - Q_2) / 1,48) - 1000$, gde je Q_2 masa posude aparata posle pražnjenja (masa punog aparata iznosila je 5000 g); korišćen je granulirani pesak poznatih karakteristika (zapreminska masa je 1480 kg/m³ — srednja vrednost iz šest merenja); zapremina posude aparata za merenje iznosi 1000 cm³; $2R$ (cm) — srednji prečnik koji je jednak srednjoj vrednosti zbira najduže i najkraće ose kratera.

Određivanje referentnih karakteristika betona

Biće prikazani samo krajnji rezultati merenja i određivanje osnovnih karakteristika betona korišćenog za izradu ispitanih uzoraka, tako da je čvrstoća betona pri pritisku iznosila 44,4 MPa (srednja vrednost iz 9 merenja 6 kocki ivice 20 cm iz tabele 2 i 3 kocke ivice 15 cm), čvrstoća betona pri zatezanju savijanjem 7,0 MPa (srednja vrednost iz šest merenja), čvrstoća betona pri zatezanju cepanjem 4,1 MPa (srednja vrednost iz 12 merenja), i modul elastičnosti betona pri pritisku 34,4 GPa (srednja vrednost iz tri merenja).

Normalna raspodela dobijenih rezultata

Osnovni uzorci, u ovom slučaju skupovi izmerenih vrednosti veličine kratera (V_{RM} , V_{GP} , $2R$), imaju svoje zakone raspodele. U poslovima kontrole kvaliteta, kakvim se mogu smatrati posmatrana merenja, najčešće se koristi normalna (*Gaus-Laplasova*) raspodela verovatnoća.

Tehnika određivanja ovog zakona raspodele dovoljno je poznata i zastupljena u literaturi, a proračun se može sprovesti u nekoliko etapa:

I — Grupisanje rezultata.

Brojanjem se utvrđuje koliko je u osnovnom skupu pojava izmerenih vrednosti po pojedinim intervalima.

II — Određivanje statističkih parametara.

Za osnovni skup kao uzorak (n) mogu se definisati: srednja vrednost u obliku aritmetičke sredine ($\bar{x}$) i mera rasipanja izmerenih vrednosti kao standardna devijacija u obliku srednjeg kvadratnog odstupanja (s_n).

III — Normalna raspodela verovatnoća.

Dugogodišnja ispitivanja u oblasti kvaliteta materijala pokazala su da je, po pravilu, oko 90 % empirijskih raspodela dobijenih merenjima moguće uspešno aproksimirati normalnom raspodelom [5]. Određivanje osnovnih parametara normalne raspodele opšte je poznato [6]. Simboli korišćeni u proračunu (tabele 4,5,6) jesu:

f_i — apsolutna frekvencija,

f_{ri} — relativna frekvencija,

$u_i = (x_i - \bar{x}) / s_{n-1}$ — argument normalne normirane funkcije raspodele.

$p_i = F(u_i)$ — verovatnoće standardizovane funkcije normalne raspodele, (preuzete iz tabele T-1.5.6 [6]),

$p_{ti} = p_i - p_{i-1}$ — verovatnoće za svaki grupni interval,

$f_{ti} = n p_{ti}$ — teoretske frekvencije za svaki grupni interval, koje predstavljaju odgovarajuće relativne frekvencije normalne raspodele kojom se aproksimira empirijska raspodela.

Aproksimacija empirijske raspodele normalnom raspodelom sprovedena je za rezultate merenja prečnika (2R) i zapremina kratera (V_{RM} , V_{GP}), koji su prikazani u tabeli 3.

Dobijeni rezultati grafički su prikazani na slikama 3, 4. i 5.

Nakon aproksimacije empirijske raspodele nekom teoretskom raspodelom verovatnoća, uvek se uočava da veličine apsolutnih frekvencija f_i i f_{ti} po grupnim intervalima nisu jednake. Postavlja se pitanje da li su te razlike prihvatljive (slučajne) ili ne, odnosno

Sl. 3 — Histogram i teorijska kriva normalne raspodele za izmerene vrednosti zapremina kratera preko razlika u masi

Sl. 4 — Histogram i teorijska kriva normalne raspodele za izmerene vrednosti zapremina kratera pomoću normiranog peska

Sl. 5 — Histogram i teorijska kriva normalne raspodele za izmerene vrednosti prečnika kratera

da li je aproksimacija dobra. Provera valjanosti aproksimacije na pouzdan način vrši se pomoću statističkih testova. U poslovima kontrole kvaliteta, provera valjanosti aproksimacije kod normalne raspodele vrši se najčešće Pirsonovim χ^2 testom, koji ne zahteva veće dopunske proračune. Postupak testiranja je jednostavan. Iz empirijske raspodele poznate su apsolutne frekvencije (f_i), a aproksimacijom se mogu dobiti teoretske frekvencije normalne raspodele (f_{ti}) po grupnim intervalima. Za svaki grupni interval treba izračunati veličinu χ^2 prema obrascu:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^j \frac{(f_i - f_{ti})^2}{f_{ti}} \quad (4)$$

gde je:

j — broj grupnih intervala.

Dobijena vrednost χ^2 se upoređuje sa kritičnim vrednostima za χ^2 -raspodelu i izabrani nivo značajnosti α , odnosno za interval poverenja $1 - \alpha$ [5].

Broj stepeni slobode iznosi:

$$v = n - k - 1,$$

gde je:

$n = j$ — broj grupnih intervala koji je poslužio za izračunavanje veličine χ^2 , k — broj nezavisnih parametara teoretske raspodele kojom se vrši aproksimacija.

Za normalnu raspodelu koja zavisi od promenljivih x i s_n , $k=2$. Uslovi za primenu ovog testa su da su sve širine grupnih intervala jednake i da je najmanja vrednost apsolutne frekvencije u jednom intervalu $f_i=5$. Ako to nije slučaj, onda se frekvencije iz dva ili više susednih intervala saberu i grupišu u jedan interval. Kriterijum za ocenu valjanosti aproksimacije tada glasi:

$$\chi^2 \leq \chi^2_{1-\alpha} \quad (5)$$

Kada je ovaj uslov ispunjen, aproksimacija se može smatrati dobrom. U posmatranom slučaju, usvojeno je $\alpha=0,01$, ($1-\alpha=0,99$), dok kritične vrednosti za χ^2 raspodelu [5] iznose za $n=1: \chi^2(0,99)=6,635$, i za $n=2: \chi^2(0,99)=9,21$.

U tabelama 4, 5 i 6 dati su na ovaj način razmatrani rezultati ispitivanja.

Prema tome, u sva tri posmatrana slučaja kriterijum za ocenu valjanosti aproksimacije (5) zadovoljen je i ap-

roksimacija empirijske raspodele verovatnoća teorijskom (normalnom) raspodelom može se smatrati dobrom.

Poređenje sa dosadašnjim rezultatima

Na slikama 7 i 8 prikazane su regresione linije date jednačinom (1) sa 95 % granicama pouzdanosti, kao i srednje vrednosti dobijenih rezultata uzetih iz tabele 3.

Poredeći srednju vrednost čvrstoće betona pri pritisku referentnih uzoraka, koja iznosi 44,4 MPa, sa vrednostima procenjenih čvrstoća dobijenih na osnovu srednjih vrednosti veličine kratera (tabela 3) i dobijenih veza iz ranijih istraživanja (1), mogu se izračunati odstupanja dobijenih rezultata od usvojene regresione linije, i ona iznose:

— kod zapremina određenih preko razlika u masi 5,8% (slika 6 — RM);

— kod zapremina određenih preko granuliranog peska 3,6 %, (slika 6 — GP);

Tabela 4

Zapremina kratera određena preko razlika u masi

V_{RM}	I (25—30)	II (30—35)	III (35—40)	IV (40—45)	V (45—50)	VI (50—55)	VII (55—60)	VIII (60—65)
f_i	2	4	6	10	6	7	1	1
Σf_i	2	6	12	22	28	35	36	37
$p_e(x_i)$	5,41	10,81	16,22	27,03	16,22	18,92	2,70	2,70
$\Sigma p_e(x_i)$	5,41	16,22	32,44	59,47	75,69	94,61	93,31	100,01
u_i	—1,540	—0,956	—0,373	0,210	0,793	1,376	2,543	—
$p_i=F(u)$	0,0618	0,1695	0,3546	0,5832	0,7861	0,9156	0,9945	1,0000
p_{ti}	0,0618	0,1077	0,1851	0,2286	0,2029	0,1295	0,0789	0,0055
f_{ti}	2,29	3,98	6,85	8,46	7,51	4,79	2,92	0,20
f_i^*	(2+4) = 6		6	10	6	(7+1+1)=9		
f_{ti}^*	(2,29+3,98)=6,27		6,85	8,46	7,51	(4,79+2,92+0,20)=7,91		
$(f_i^*-f_{ti}^*)^2/f_{ti}^*$	0,012		0,105	0,280	0,304	0,147		

$$v=n-k-1=5-2-1=2; \quad \alpha=0,01; \quad 1-\alpha=0,99; \quad \chi^2=0,848 < 9,21=\chi^2_{0,99}.$$

Tabela 5

Zapremina kratera određena postupkom koji koristi granulirani pesak

V_{GP}	I (25—30)	II (30—35)	III (35—40)	IV (40—45)	V (45—50)	VI (50—55)	VII (55—60)	VIII (60—65)
f_i	2	7	15	5	4	2	1	1
Σf_i	2	9	24	29	33	35	36	37
$p_e(x_i)$	5,41	18,92	40,54	13,51	10,81	5,41	2,70	2,70
$\Sigma p_e(x_i)$	5,41	24,33	64,87	78,38	89,18	94,6	97,3	100,0
u_i	-1,248	-0,618	0,012	0,643	1,273	1,903	2,534	—
$p_i=F(u)$	0,1060	0,2683	0,5048	0,7399	0,8985	0,9715	0,9944	1,0000
p_{ti}	0,1060	0,1623	0,2365	0,2351	0,1586	0,0730	0,0229	0,0056
f_{ti}	3,92	6,01	8,75	8,70	5,87	2,70	0,85	0,21
f_i^*	$(2+7)=9$		15	5	$(4+2+1+1) = 8$			
f_{ti}^*	$(3,92+6,01)=9,93$		8,75	8,70	$(5,87+2,70+0,85+0,21) = 9,63$			
$(f_i^* - f_{ti}^*)^2 / f_{ti}^*$	0,087		4,464	1,574	0,276			

$$v=n-k-1=4-2-1=1; \alpha=0,01; 1-\alpha=0,99; \chi^2=6,401 < 6,635 = \chi^2_{0,99}.$$

Tabela 6

Prečnik kratera

2R	I (7,5—8)	II (8—8,5)	III (8,5—9)	IV (9—9,5)	V (9,5—10)	VI (10—10,5)
f_i	3	2	7	11	9	5
Σf_i	3	5	12	23	32	37
$p_e(x_i)$	8,11	5,41	18,92	29,73	24,32	13,51
$\Sigma p_e(x_i)$	8,11	13,52	32,44	62,17	86,49	100,0
u_i	-1,652	-0,940	-0,228	0,484	1,197	—
$p_i=F(u)$	0,0493	0,1736	0,4098	0,6858	0,8843	1,0000
p_{ti}	0,0493	0,1243	0,2362	0,2760	0,1985	0,1157
f_{ti}	1,82	4,60	8,74	10,21	7,34	4,28
f_i^*	$(3+2) = 5$		7	11	9	5
f_{ti}^*	$(1,82+4,60) = 6,42$		8,74	10,21	7,34	4,28
$(f_i^* - f_{ti}^*)^2 / f_{ti}^*$	0,314		0,346	0,061	0,375	0,121

$$v=n-k-1=5-2-1=2; \alpha=0,01; 1-\alpha=0,99; \chi^2=1,217 < 9,21 = \chi^2_{0,99}.$$

— kod prečnika kratera 0,9 %, (slika 7).

Dobijena odstupanja nalaze se u okviru očekivanih vrednosti i obuhvaćena su 95 % granicama pouzdanosti.

Sl. 6 — Veza između čvrstoće betona pri pritisku i zapremine kratera

Sl. 7 — Veza između čvrstoće betona pri pritisku i prečnika kratera

Mogućnosti korelacije parametara veličine kratera sa nekim drugim karakteristikama betona

Kako je planom ispitivanja predviđeno, pored čvrstoće betona pri pritisku kao referentne čvrstoće, ovom prilikom su na posebnim uzorcima određivane i neke druge karakteristike betona, kao što su čvrstoće pri zatezanju cepanjem i savijanjem i modul elastičnosti. S obzirom na to da je ispitivanje sprovedeno samo sa jednom vrstom betona, direktno uspostavlja-

nje veza između veličine kratera i ovih veličina nije bilo moguće. Korišćene su njihove posredne veze sa čvrstoćom betona pri pritisku koje preporučuje Evropski komitet za beton (SEV-FIP Model Code 1990 — MC 90) [7] i veze definisane jednačinama (1). Takođe, u razmatranje će se uvesti još jedna veličina, tzv. energija loma (G_F), koja u ovom istraživanju nije direktno određivana, ali koja je značajna pri opisu realnijeg ponašanja betona izloženog dominantnim zatežućim naponima i pri primeni koncepta mehanike loma na beton. Ona se definiše kao energija potrebna za propagiranje pukotine od zatezanja jedinične površine [8]. Prema tome, koristeći veze između čvrstoće betona pri pritisku i prečnika ($2R$) i zapremine kratera (V) definisane jednačinama (1) i veza datih u MC 90 kojima se u odsustvu eksperimentalnih podataka procenjuju čvrstoća betona pri aksijalnom zatezanju (f_{bz}), modul elastičnosti betona (E_b) i energija loma (G_F — J/m²) preko čvrstoće betona pri pritisku, uspostaviće se direktna veza između ovih veličina i veličine kratera (V , $2R$).

Relacije potrebne za ovo izvođenje su:

$$\begin{aligned} f_{bz} &= 0,30 \cdot f_{bk}^{2/3} \\ E_b &= 10^4 \cdot f_{bp}^{1/3} \\ G_F &= 10 \cdot f_{bp}^{0,7} \end{aligned} \quad (6)$$

gde je:

f_{bp} — srednja čvrstoća betona pri pritisku (MPa),
 f_{bk} — karakteristična čvrstoća betona pri pritisku $f_{bp} = f_{bk} + 8$.

U tabeli 7 prikazani su rezultati procene vrednosti ovih karakteristika betona na osnovu srednjih vrednosti veličina kratera i njihovo upoređenje sa izmerenim vrednostima na referentnim uzorcima. Referentna vrednost za G_F određena je na osnovu srednje vrednosti čvrstoće betona pri pritisku referentnih uzoraka (44,4 MPa) i odgovarajuće veze iz (6), jer ona nije merena.

Procena nekih karakteristika betona na osnovu veličine kratera

	$f_{bz}=4,1$ MPa		$E_b=34,4$ GPa		$G_F=142,3$ J/m ²	
	(1)+(6)	$\Delta(\%)$	(1)+(6)	$\Delta(\%)$	(1)+(6)	$\Delta(\%)$
$V_{GP}=39,3$ cm ³	4,12	0,5	34980	1,7	138,7	2,5
$V_{RM}=43,2$ cm ³	4,06	1,0	34700	0,9	136,4	4,1
$2R=9,16$ cm	4,18	2,0	35300	2,6	141,4	0,8

Kao što se vidi iz tabele 7, korišćenjem već uspostavljenih veza između čvrstoće betona pri pritisku i veličine kratera moguće je odrediti i neke druge karakteristike betona, kao što su čvrstoća betona pri zatezanju, modul elastičnosti ili energija loma, pri čemu se dobijaju minimalna odstupanja u odnosu na direktno određivanje ovih vrednosti. Ova činjenica ukazuje na još jednu mogućnost korišćenja uspostavljenih veza (1), ali i na potrebu definisanja relacija koje direktno povezuju veličinu kratera (prečnik i zapreminu) sa čvrstoćom pri zatezanju, modulom elastičnosti i energijom loma kao referentnim vrednostima. Na osnovu prethodno prikazanih rezultata može se pretpostaviti da će pouzdanost koju nude predložene relacije biti bar istog reda, ako ne i višeg, u odnosu na pouzdanost relacija koje za referentnu karakteristiku betona koriste čvrstoću pri pritisku.

Zaključak

Na osnovu sprovedenih eksperimentalnih provera i naknadnih analiza dobijenih rezultata, mogu se izvesti sledeći zaključci:

— srednje slabljenje svih uzoraka usled dejstva bušotinskih MEP, izraženo padom čvrstoće pri pritisku iznosilo je 10,4 %, i može se smatrati dovoljno niskom vrednošću da bi izveli zaključak da je nastalo oštećenje lokalnog karaktera. Pojedini uzorci kod kojih je pad u čvrstoći bio veći od 20 % (4 kom.) su izuzeti iz daljeg raz-

matranja, pri čemu je srednji pad u čvrstoći smanjen na 10 %, tako da ovo izuzeće nije uticalo na opštost prethodnog zaključka. Takođe, korekcija pojedinih rezultata usled nejednake dubine bušotina za smeštaj MEP, sprovedena je na šest rezultata merenja dubina koje se nalaze van opsega od 17 ± 1 mm, na taj način što su odgovarajući rezultati korigovani najviše do 10 %. Navedena korekcija praktično nije promenila srednje vrednosti posmatranih veličina, već je samo uticala da se koeficijent varijacije sveđe ispod 20 %.

— kao i u većini slučajeva određivanja kvaliteta materijala, i u ovom slučaju empirijska raspodela dobijena nezavisnim merenjima može se uspešno aproksimirati normalnom raspodelom. Pri tome, provera valjanosti aproksimacije kod normalne raspodele izvršene Pirsonovim χ^2 testom, u svim posmatranim slučajevima zadovoljila je postavljeni kriterijum za izabrani nivo značajnosti 0,01, odnosno za interval poverenja 0,99.

— cilj paralelnog ispitivanja svih uzoraka pomoću sklerometra bio je da se pokuša ustanoviti, da li ovaj merni postupak može registrovati pad u čvrstoći uzoraka pre i posle dejstva MEP. Dobijeni rezultati su pokazali skoro istu vrednost srednje visine odskoka u oba slučaja (pre i posle dejstva MEP), što s obzirom na pokazani pad u čvrstoći od oko 10 % i činjenicu da se radi o metodi koja meri površinsku tvrdoću, ukazuje na to da se ovaj postupak ne može koristiti za registrovanje slabljenja uzoraka usled dejstva MEP.

-a. Takođe, ovakav zaključak potvrđuje navode da postupak ispitivanja betona pomoću MEP nema strogo površinski karakter već da »angažuje« određenu masu betona ispod površine tako da se postupak sa pravom može svrstati u grupu metoda lokalne destrukcije.

— dobijeni rezultati su pokazali i vrlo dobru saglasnost sa dosadašnjim rezultatima. Takođe, oni su ilustrovali mogućnost primene ranije dobijenih veza i za određivanje (sa dovoljnom tačnošću) nekih drugih karakteristika betona kao što su čvrstoća pri zatezanju, modul elastičnosti i energiju loma.

Literatura:

- [1] Cvetković, D.: Ispitivanje betona metodama lokalne destrukcije sa posebnim osvrtom na određivanje čvrstoće betona pomoću malih eksplozivnih punjenja, Magistarski rad, Beograd, 1993.
- [2] Cvetković, D.: Ispitivanje betona pomoću malih eksplozivnih punjenja sa primenom na određivanje značenja činioca otpornosti materijala za beton, Vojnotehnički glasnik, 5/1994., Beograd.
- [3] — BS 6089: Guide to assessment of concrete strength in existing structures, British Standard Institution, London, 1981.
- [4] Chabowski, A. J., Bryden-Smith, D. W.: Assessing the strength of in-situ Portland cement concrete by internal fracture tests, Magazine of concrete research, V.32, No.112, sept. 1980.
- [5] Flašar, A.: Statistička analiza podataka dobijenih ispitivanjem materijala i konstrukcija, Materijali i konstrukcije, 36 (96—112), 3—4, 1993.
- [6] Nenadović, M.: Matematička obrada podataka dobijenih merenjima, posebno izdanje SANU, Beograd, 1988.
- [7] — CEB — FIP Model Code 1990 (MC 90).
- [8] Hilsdorf, H. K., Brameshuber, W.: Code — type formulation of fracture mechanics concepts for concrete, International Journal of Fracture, 51:61—72, 1991.