

Primljen / Received: 22.1.2026.

Ispravljen / Corrected: 20.5.2026.

Prihvaćen / Accepted: 9.6.2026.

Dostupno online / Available online: 10.8.2026.

Mehaničko ponašanje i razvoj oštećenja betona velike čvrstoće pod udarnim opterećenjem

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Yu Wu**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Nanyang Normal, Kina

Fakultet za građevinarstvo i arhitekturu

nynuwuy@163.com

Autor za korespondenciju

**Xiaoyang Wu**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Nanyang Normal, Kina

Fakultet za građevinarstvo i arhitekturu

wuxiaoyang2536@163.com**Tong Ye**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Nanyang Normal, Kina

Fakultet za građevinarstvo i arhitekturu

tongye2026@163.com**Jie Zhou**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Nanyang Normal, Kina

Fakultet za građevinarstvo i arhitekturu

nynuzj2018@sina.com

Prethodno priopćenje

Yu Wu, Xiaoyang Wu, Tong Ye, Jie Zhou

Mehaničko ponašanje i razvoj oštećenja betona velike čvrstoće pod udarnim opterećenjem

Beton velike čvrstoće (HSC) široko se primjenjuje u konstrukcijama otpornima na udarna i eksplozivna djelovanja zbog svoje velike čvrstoće. Međutim, njegov dinamički mehanički odziv i razvoj kumulativnog oštećenja pri jednokratnim i višekratnim udarnim opterećenjima još uvijek nisu u cijelosti razjašnjeni, osobito u pogledu trajanja udarnog impulsa i utjecaja brzine deformacije. Ovo istraživanje analizira utjecaj brzine deformacije i duljine udarne šipke na dinamičko mehaničko ponašanje i razvoj oštećenja betona velike čvrstoće razreda C80. Za ispitivanja korišten je sustav Split-Hopkinson tlačne šipke promjera $\varnothing 75$ mm, pri čemu su provedena ispitivanja pojedinačnog i ponovljenog udara pri različitim brzinama udara, uz primjenu udarne šipke duljine 400 mm, 600 mm i 800 mm. Mjerenjem brzine ultrazvučnog pulsa procijenjen je razvoj oštećenja tijekom ponovljenih udara, pri čemu je utvrđeno da se stupanj fragmentacije pri lomu betona C80 HSC povećava s porastom brzine deformacije. Dinamička tlačna čvrstoća i maksimalna deformacija povećavaju se s porastom brzine deformacije, dok dinamički modul elastičnosti ostaje relativno stabilan u određenome rasponu.

Ključne riječi:

beton velike čvrstoće, Split-Hopkinsonova tlačna šipka, dinamička mehanička svojstva, razvoj kumulativnog oštećenja, višekratno udarno opterećenje

Research Paper

Yu Wu, Xiaoyang Wu, Tong Ye, Jie Zhou

Mechanical behavior and damage evolution of high-strength concrete under impact loading

High-strength concrete (HSC) is widely utilised in impact-resistant and blast-protective structures owing to its superior strength. However, its dynamic mechanical response and cumulative damage evolution under single and repeated impact loading require further clarification, particularly regarding impact pulse duration and strain rate effects. This study investigates the influence of strain rate and striker length on the dynamic mechanical behaviour and damage evolution of C80 HSC. A $\varnothing 75$ mm split Hopkinson pressure bar system was used to conduct single- and repeated-impact tests at different impact velocities, with 400 mm, 600 mm, and 800 mm strikers. Ultrasonic pulse velocity measurements evaluated damage evolution during repeated impacts, revealing that the fragmentation of the failure modes of C80 HSC intensified with increasing strain rates. The dynamic compressive strength and maximum strain increased with the strain rate, whereas the dynamic elastic modulus remained relatively stable within a certain range. Increasing the striker length prolonged the pulse duration while increasing peak stress and the elastic modulus.

Key words:

high-strength concrete, split hopkinson pressure bar, dynamic mechanical properties, cumulative damage evolution, repeated impact loading

1. Uvod

Beton velike čvrstoće (eng. *High-strength concrete* - HSC) odlikuje se brojnim prednostima, uključujući veliku čvrstoću, dobru obradivost, visoku trajnost i malu deformabilnost [1–3]. Konstrukcije izvedene od betona velike čvrstoće mogu zamijeniti konstrukcije od konvencionalnog običnog betona te zadovoljiti zahtjeve suvremenih građevinskih konstrukcija u pogledu velikih raspona, velikih opterećenja i izgradnje visokih objekata kao i otpornosti na nepovoljne okolišne uvjete. Osim toga omogućuju smanjenje poprečnih presjeka elemenata, povećanje korisne površine te smanjenje troškova gradnje, čime se ostvaruju znatne gospodarske koristi [4, 5]. Nedavna istraživanja cementnih kompozita visokih uporabnih svojstava istaknula su njihovu važnost za poboljšanje nosivosti i trajnosti konstrukcija. He i sur. [6] istražili su usklađeno djelovanje armature velike čvrstoće i betona ultra velikih uporabnih svojstava (eng. *ultra-high-performance concrete* - UHPC) pri cikličkome opterećenju, dok su Zouini i sur. [7] ocijenili trajnost betona visokih uporabnih svojstava armiranog otpadnim čeličnim vlaknima. Rezultati tih istraživanja upućuju na to da su mehanička svojstva i trajnost betona visokih uporabnih svojstava važni čimbenici u primjeni konstrukcija u građevinskoj praksi. Tijekom uporabe betonske su konstrukcije neizbježno izložene djelovanju dinamičkih opterećenja kao što su opterećenje vjetrom, potresi i eksplozije [8, 9]. Zato je pri projektiranju i građenju potrebno u cijelosti uzeti u obzir utjecaj dinamičkih opterećenja na ponašanje betonskih konstrukcija [10]. Budući da je beton materijal osjetljiv na brzinu deformacije, njegova se mehanička svojstva pri udarnome opterećenju razlikuju od onih pri statičkome opterećenju. Zbog toga je istraživanje dinamičkih mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće pri visokim brzinama deformacije vrlo važno za protupotresno projektiranje, procjenu učinaka eksplozija i druga srodna područja.

Pionirsko ispitivanje dinamičkoga tlačnog opterećenja betona proveo je Abrams [11], koji je prvi dokumentirao osjetljivost krhkih materijala poput betona na brzinu deformacije. Naknadna istraživanja domaćih i inozemnih autora opsežno su proučavala dinamičko ponašanje betona primjenom različitih eksperimentalnih metoda, uključujući različite dimenzije uzoraka i razrede čvrstoće. Cowell [12] je za ispitivanja udarnog opterećenja upotrijebio cilindrične uzorke tlačne čvrstoće 33,30 MPa i 60,41 MPa. Rezultati ispitivanja pokazali su izraženu ovisnost tlačne čvrstoće o brzini deformacije, pri čemu je osnovna čvrstoća materijala znatno utjecala na povećanje dinamičke čvrstoće. Wakabayashi [13] istraživao je tlačni odziv pri brzinama deformacije u rasponu od 2×10^{-5} do $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ te utvrdio pozitivnu korelaciju između tlačne čvrstoće i porasta brzine deformacije. Navedena istraživanja postavila su temelje za razumijevanje ponašanja betona ovisnog o brzini deformacije, no uglavnom su bila usmjerena na uvjete jednokratnog opterećenja te nisu u cijelosti razmatrala kumulativno oštećenje uslijed opetovanog udarnog opterećenja.

Ponašanje betona pri dinamičkome opterećenju vrlo je složeno te ovisi ne samo o svojstvima materijala, već i o vanjskim

čimbenicima, uključujući brzinu opterećivanja, geometriju konstrukcije, dimenzijske značajke te okolišne uvjete [14–20]. Abbas [21] je istraživao rezidualna mehanička svojstva betona velike čvrstoće pri udarnome opterećenju primjenom modificiranoga Kolskyjeva sustava za tlačna ispitivanja s ugrađenom tehnologijom zadržavanja impulsa, pri čemu je utvrđeno da su degradacija krutosti i čvrstoće u početnim fazama oštećenja gotovo proporcionalne. Međutim, s daljnjom akumulacijom oštećenja smanjenje krutosti postalo je izraženije od smanjenja čvrstoće. Zhou [22] kvantitativno je ispitao utjecaj čvrstoće agregata na dinamička vlačna svojstva i mehanizme oštećenja primjenom ispitivanja cijepanjem, pri čemu je pokazano da čvrstoća agregata znatno poboljšava dinamička vlačna svojstva materijala te da omjer čvrstoće agregata i cementne matrice ima ključnu ulogu u određivanju mehanizama loma i stupnja oštećenja pojedinih sastavnica. Guo [15] je potom, primjenom akustične emisije (AE) i digitalne korelacije slike (eng. *digital image correlation* - DIC), analizirao oštećenja nastala mješovitim načinom loma na kontaktnoj plohi stijena-beton tijekom cikličkoga posmičnog opterećenja te utvrdio da petrofizička svojstva stijenske podloge pretežno određuju mehaničko ponašanje ispitnog uzorka. Chen [23] je nadalje primijenio praćenje akustične emisije za procjenu učinkovitosti samoobnavljanja u cementnim materijalima rane starosti te ustanovio da pragovi oštećenja nisu konstantni, već znatno ovise o starosti materijala tijekom njege i parametrima sastava mješavine. Li [24] je proveo sinkrotronsku računalnu tomografiju (CT) tijekom jednoosnoga tlačnog opterećenja te povezao promjene CT broja s razvojem oštećenja, varijablama oštećenja i promjenama Poissonova koeficijenta, potvrdivši da su navedeni pokazatelji osjetljivi parametri za kvantificiranje stupnja degradacije materijala. Navedena istraživanja pokazuju da se razvoj oštećenja može pratiti i opisivati primjenom različitih metoda nadzora i ispitivanja. Međutim, njihov je fokus ponajprije usmjeren na rezidualna svojstva materijala, vlačna oštećenja, ponašanje na kontaktnim plohama ili karakterizaciju oštećenja na mikrorazini, dok problematika oštećenja betona velike čvrstoće uslijed ponovljenoga udarnog tlačnog opterećenja i dalje nije dovoljno istražena.

Tehnika Split-Hopkinsonove tlačne šipke (eng. *Split Hopkinson Pressure Bar* - SHPB) jedna je od najčešće primjenjivanih eksperimentalnih metoda za istraživanje oštećenja materijala pri dinamičkome opterećenju. Sun [25] proveo je rendgensku računalnu tomografiju uzoraka betona ultra velikih uporabnih svojstava (UHPC) i konvencionalnog betona (CC) tijekom dinamičkog opterećivanja te utvrdio različite mehanizme razvoja oštećenja. Kod UHPC-a došlo je do znatne akumulacije oštećenja prije postizanja vršne čvrstoće, nakon čega je pri dosezanju vršnog opterećenja uslijedio nagli lom. Nasuprot tome, kod CC-a pri vršnome naprezanju zabilježena su tek neznatna oštećenja, dok se njihova postupna akumulacija događala isključivo tijekom faze omekšavanja nakon dosezanja vršne čvrstoće. Scheiden [26] primijenio je SHPB sustav integriran s praćenjem akustične emisije (AE) za istraživanje mehanizama zamornog oštećenja betona velike čvrstoće s granitnim i bazaltnim agregatom.

Rezultati su pokazali da je beton s granitnim agregatom ostvario veći broj ciklusa pri višim razinama naprezanja, dok je pri nižim razinama naprezanja uočen suprotan trend. Nadalje, Sun [27] utvrdio je temeljne razlike u širenju pukotina između UHPC-a i CC-a te pokazao da korelacija između izmjerenih parametara pukotina i konstitutivnih varijabli oštećenja potvrđuje veću sposobnost deformacijskog omekšanja nakon vršne čvrstoće kod CC-a. Također je utvrđeno da su rezidualna mehanička svojstva, odnosno čvrstoća i krutost, osjetljivija na razvoj makropukotina kod CC-a nego kod UHPC-a. Iako su istraživanja provedena primjenom SHPB metode pružila znatan doprinos razumijevanju dinamičkog ponašanja cementnih materijala, utjecaj duljine udarne šipke i pripadajućeg trajanja naponskog vala na odziv betona velike čvrstoće razreda C80 pri ponovljenome udarnom opterećenju još uvijek nije dovoljno razjašnjen.

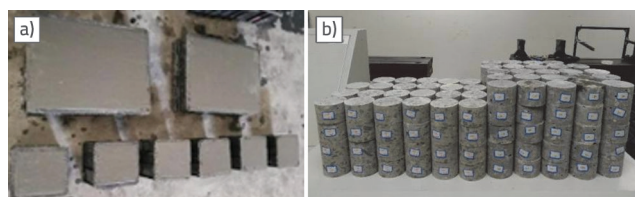
Dosadašnja istraživanja opsežno su proučavala oštećenja betona pri dinamičkome opterećenju primjenom različitih eksperimentalnih metoda te pružila važna polazišta za projektiranje konstrukcija i njihovu optimizaciju. Međutim, kako pokazuju prethodna istraživanja, između betona velike čvrstoće (HSC) i betona normalne čvrstoće (NSC) postoje znatne razlike u dinamičkome ponašanju, dok su istraživanja mehaničkih svojstava HSC-a pri ponovljenome udarnom opterećenju i promjenjivim parametrima udara još uvijek relativno ograničena. Ovo istraživanje polazi od pretpostavke da na dinamički mehanički odziv i razvoj kumulativnog oštećenja betona velike čvrstoće razreda C80 utječu ne samo brzina deformacije nego i svojstva naponskog vala povezana s duljinom udarne šipke, osobito trajanje impulsa. Kako bi se popunila ta istraživačka praznina, u radu primijenjen je SHPB sustav sa šipkom promjera 75 mm za ispitivanje udarnog opterećenja uzoraka betona C80 uporabom udarnih šipki duljine 400 mm, 600 mm i 800 mm pri različitim brzinama udara. Ciljevi istraživanja bili su: (1) ispitati dinamička mehanička svojstva betona C80 pri različitim brzinama udara i duljinama udarne šipke; (2) razjasniti utjecaj duljine udarne šipke na svojstva naponskog vala, krivulje naprezanje-deformacija i mehanizme loma; (3) procijeniti razvoj kumulativnog oštećenja pri ponovljenome udarnom opterećenju na temelju mjerenja brzine ultrazvučnih impulsa, te (4) usporediti dinamička svojstva betona velike čvrstoće razreda C80 s odgovarajućim svojstvima betona normalne čvrstoće razreda C35.

2. Priprema uzoraka i plan istraživanja

Na temelju literature [28], za statička tlačna ispitivanja odabrani su kubični uzorci dimenzija 150 × 150 × 150 mm kada je čvrstoća

betona prelazila 60 MPa. Za udarna ispitivanja primijenjeni su cilindrični uzorci promjera 75 mm i visine 50 mm kako bi se zadovoljio preporučeni omjer visine i promjera uzorka ($L/D = 0,4 - 1$) za SHPB sustave [29]. Kako bi se spriječila neravnomjerna raspodjela naprezanja i narušavanje pretpostavke o jednolikoj raspodjeli naprezanja uslijed odstupanja od paralelnosti čeonih ploha uzorka, tolerancija ravnosti održavana je unutar 0,02 mm preciznim brušenjem.

Sastav betona velike čvrstoće projektiran je uporabom superplastifikatora i silicijske prašine, uz cement, krupni agregat, sitni agregat i vodu. Nakon opsežnih laboratorijskih pokusnih miješanja određeni su optimalni udjeli sastojaka prikazani u tablici 1. kako bi se zadovoljili zahtjevi u pogledu čvrstoće, trajnosti, obradivosti i ekonomičnosti. U betonu C80 silicijska prašina primijenjena je radi poboljšanja zbijenosti matrice i povećanja razine čvrstoće zahvaljujući učinku ispunjavanja pora i pucolanskoj aktivnosti, dok je superplastifikator omogućio postizanje odgovarajuće obradivosti pri niskome omjeru vode i veziva. Reprezentativni kubični i prizmatični uzorci prikazani su na slici 1.a, dok su uzorci ispitani pri dinamičkome opterećenju



prikazani na slici 1.b.

Slika 1. Izrada betona i priprema uzoraka ($\Phi = 75$ mm, $h = 50$ mm): a) betonski ispitni blok; b) betonski uzorak za ispitivanje

2.1. Postupak statičkog ispitivanja

Kako bi se provjerilo zadovoljava li beton zahtjeve projektirane čvrstoće, kubični uzorci njegovani su 3, 7 i 28 dana prije ispitivanja. Nakon završetka razdoblja njege uzorci su izvađeni iz komore za njegovanje i podvrgnuti statičkim tlačnim ispitivanjima na hidrauličnome ispitnom stroju. Za svaki razred čvrstoće i svaku starost ispitana su po tri kubična uzorka, odnosno ukupno 18 uzoraka za određivanje tlačne čvrstoće betona C35 i C80. Budući da su udarna ispitivanja provedena na uzorcima betona velike čvrstoće C80 nakon 28 dana njege, u tablici 2. prikazani su rezultati 28-dnevne tlačne čvrstoće kubičnih uzoraka betona C80.

Prije ispitivanja uklonjena je površinska vlaga s uzoraka, a tlačne ploče ispitnog stroja očišćene su kako bi se osigurao pravilan kontakt između uzorka i uređaja. Uzorci su opterećivani

Tablica 1. Sastav betonske mješavine

Razred čvrstoće	Šljunak [kg/m ³]	Pijesak [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Silicijska prašina [kg/m ³]	Reduktor vode [kg/m ³]
C35	1200	620	410	195	0	0
C80	1156	590	540	102	60	24

Tablica 2. Rezultati 28-dnevne tlačne čvrstoće kubičnih uzoraka betona C80

Oznaka uzorka	Vrijednost opterećenja [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]
C80-28d-1	1822,88	81,00
C80-28d-2	1871,40	83,20
C80-28d-3	1799,91	80,00
Prosječna vrijednost	1831,40	81,40
Standardno odstupanje	36,50	1,64

kontrolom pomaka pri konstantnoj brzini opterećenja od 0,8 do 1,0 MPa/s sve do sloma. Maksimalno opterećenje zabilježeno tijekom ispitivanja korišteno je za izračun tlačne čvrstoće svakog uzorka (tablica 2.).

2.2. Protokol i postupak ispitivanja udarom

Kako bi se istražio odnos između dinamičkih karakteristika udarnog opterećenja betona velike čvrstoće razreda C80 i parametara naponskog vala (duljine udarne šipke i amplitude vala), provedena su ispitivanja uporabom udarnih šipki duljine 400 mm, 600 mm i 800 mm. Brzine udara održavane su u rasponu od 4 do 10 m/s. Kao što je to prikazano na slici 2., SHPB sustav sastoji se od visokotlačnog spremnika dušika, sustava za lansiranje udarne šipke, udarne šipke, upadne šipke, prijenosne šipke, apsorpcijske šipke, tenzometarskih mjernih traka, dinamičkoga tenzometarskog mjernog uređaja i sustava za prikupljanje podataka. Tijekom ispitivanja betonski uzorak postavljen je između upadne i prijenosne šipke, pri čemu su čelone plohe uzorka pažljivo poravnane s krajevima šipki. Standardizirani postupak za udarnu šipku duljine 600 mm prikazan je u nastavku:

- Udarne šipke duljine 600 mm postavljena je u SHPB sustav promjera $\varnothing 75$ mm. Mjerne trake kalibrirane su provedbom pokusa bez uzorka kako bi se odredio kalibracijski faktor za pretvorbu signala vala.
- Prije udara na površinu uzorka ravnomjerno je nanesen viskozni lubrikant (vazelin ili mast) radi smanjenja trenja na dodirnoj plohi. Uzorak je potom postavljen između upadne i prijenosne šipke uz precizno poravnanje.
- Udarno ispitivanje započelo je pri niskome tlaku dušika, nakon čega je tlak u komori postupno povećavan kako bi se postigle

veće brzine udara. Takav postupak omogućuje kontrolirano napredovanje procesa loma, od neoštećenog stanja, preko inicijacije pukotina i fragmentacije do usitnjavanja materijala. Brzina udara i valni zapisi bilježeni su istodobno.

- Za svaku ciljanu brzinu udara provedena su tri ponovljena ispitivanja, pri čemu je odstupanje brzine održavano unutar $\pm 0,2$ m/s.

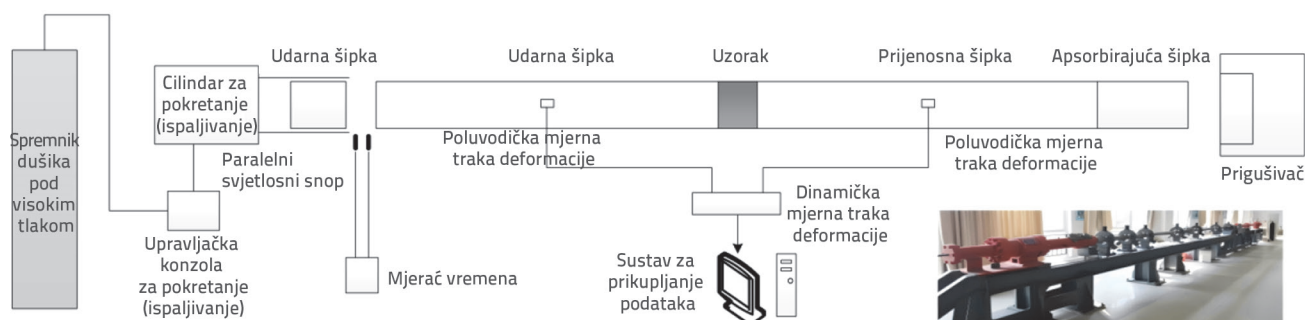
Tijekom ponovljenih udarnih ispitivanja isti je uzorak uzastopno izlagan udarima sve do pojave prolazne pukotine, fragmentacije, usitnjavanja ili potpunoga gubitka mogućnosti mjerenja brzine ultrazvučnog impulsa. Navedena stanja korištena su kao kriteriji loma za prekid ispitivanja ponovljenim udarima.

3. Analiza pojedinačnih udarnih opterećenja

3.1. Karakteristike valnog oblika

3.1.1. Analiza valnog oblika pri različitim brzinama deformacije

Kao što je to prikazano na slici 3., reprezentativni zapisi napona u vremenu dobiveni su na cilindričnim uzorcima betona velike čvrstoće C80 dimenzija $\varnothing 75 \times 50$ mm pri udarnome opterećenju primjenom udarne šipke duljine 600 mm. Za svaku brzinu udara iz ponovljenih ispitivanja odabran je reprezentativni zapis. Signali prikazani na slici 3. zabilježeni su poluvodičkim tenzometarskim mjernim trakama postavljenima na upadnoj i prijenosnoj šipki. Upadni i reflektirani val određeni su na temelju mjerenja na upadnoj šipki, dok je preneseni val određen na temelju mjerenja na prijenosnoj šipki. Neprekinute linije prikazuju upadni i reflektirani val, dok isprekidane linije prikazuju

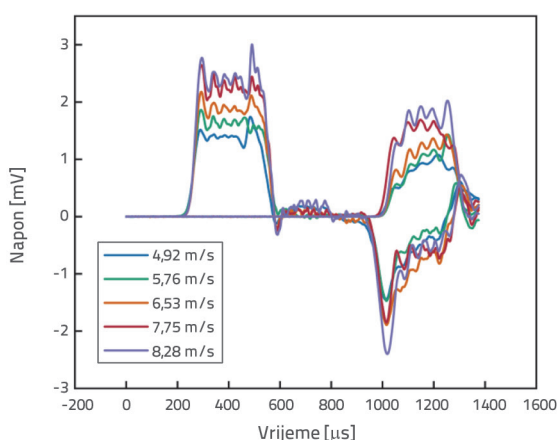


Slika 2. SHPB sustav za udarna ispitivanja primijenjen u istraživanju

preneseni val. Upadni val pri udarnome opterećenju betona C80 imao je oblik približno pravokutnog impulsa. Na cijelome valnom zapisu uočene su visokofrekvencijske oscilacije koje se pripisuju disperziji valova tijekom njihova širenja kroz tlačne šipke. Iz rezultata vidljivo je da se s povećanjem brzine udarne šipke povećava amplituda vala, prema teoriji jednodimenzionalnoga elastičnog vala, izraz (1):

$$\sigma = \frac{\rho_0 c_0 v}{2} \quad (1)$$

gdje su ρ_0 i c_0 gustoća i brzina širenja elastičnog vala u tlačnoj šipki. Između amplitude upadnog vala i brzine udara uspostavlja se linearna ovisnost, što je u skladu s eksperimentalnim rezultatima.



Slika 3. Zapis napona u vremenu za beton velike čvrstoće C80 pri primjeni udarne šipke duljine 600 mm

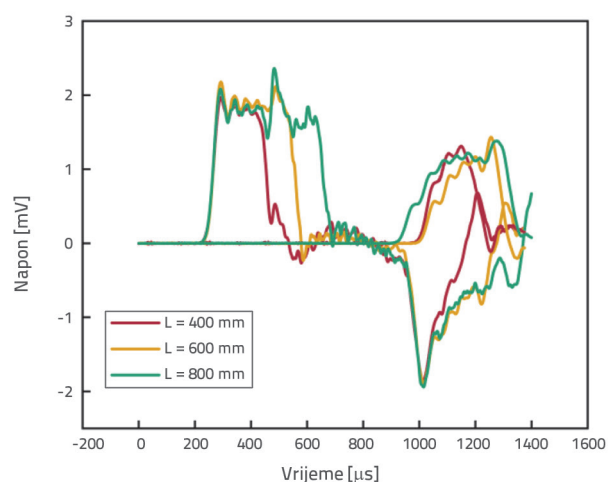
S povećanjem brzine udara putovi širenja i ciklusi refleksije naponskih valova unutar betonskih uzoraka mijenjali su se uslijed nastanka novih mikropukotina i šupljina. Amplituda reflektiranih valova određena je superpozicijom višestrukih refleksija, pri čemu su promjene amplitude pokazatelj razvoja oštećenja. Taj mehanizam uzrokuje nepravilne oblike reflektiranih valova. Pri većim brzinama udara valni zapisi pokazuju dva karakteristična fenomena:

- reflektirani val poprima izražen oblik slova "W", pri čemu je izraženost tog oblika pozitivno povezana sa stupnjem razvoja oštećenja
- preneseni val pokazuje približno linearan pad amplitude, što upućuje na širenje pukotina kroz cijeli presjek uzorka i naglo oslobađanje naprezanja nakon dosezanja granične čvrstoće.

Kako to potvrđuju opažanja nakon ispitivanja, reflektirani val u obliku slova "W" i linearni pad prenesenog vala pojavljuju se isključivo pri fragmentaciji uzoraka betona velike čvrstoće C80. Takav valni zapis karakteristično je obilježje krhkog loma betona velike čvrstoće. To se obilježje znatno razlikuje od ponašanja pri lomu koje je uočeno kod betona normalne čvrstoće (NSC).

3.1.2. Analiza valnih oblika pri različitim duljinama udarnih šipki

Kako bi se procijenio utjecaj duljine udarnih šipki na svojstva valnih oblika, analizirani su reprezentativni zapisi napona u vremenu dobiveni na cilindričnim uzorcima betona velike čvrstoće C80 dimenzija $\varnothing 75 \times h 50$ mm primjenom udarnih šipki duljine 400 mm, 600 mm i 800 mm. Kako bi se smanjio utjecaj brzine udara, za usporedbu odabrana su reprezentativna ispitivanja s usporedivim brzinama udara i amplitudama upadnog vala. Zapisi napona dobiveni su primjenom metode mjerenja opisane u poglavlju 3.1.1. Usporedba preklopljenih valnih zapisa prikazana je na slici 4. Neprekinute linije prikazuju upadni i reflektirani val, a isprekidane linije preneseni val.



Slika 4. Zapis napona u vremenu za uzorke betona velike čvrstoće C80 pri trima različitim duljinama udarača

Na temelju rezultata prikazanih na slici 4. provedene su sljedeće analize:

- Utvrđena je jasna povezanost između trajanja impulsa (odnosno trajanja opterećenja) upadnog vala i duljine udarne šipke, pri čemu dulje udarne šipke rezultiraju duljim trajanjem impulsa, neovisno o brzini udara. Prema teoriji širenja elastičnih valova:

$$T = \frac{2L}{c_0} \quad (2)$$

gdje T predstavlja trajanje impulsa, L duljinu udarne šipke, a c_0 brzinu širenja elastičnog vala u čeličnim tlačnim šipkama (5060 m/s). Izraz (2) pokazuje da trajanje impulsa raste proporcionalno duljini udarne šipke, što je u skladu s opaženim svojstvima valnih zapisa.

- Pri usporedivim brzinama udara (4 do 10 m/s), amplitude upadnog vala ne pokazuju jasnu monotonu ovisnost o duljini udarne šipke. To upućuje na zaključak da duljina udarne šipke primarno utječe na trajanje impulsa, dok je njezin utjecaj na amplitudu upadnog vala razmjerno ograničen.

3.2. Analiza dinamičkih krivulja naprezanje-deformacija betona velike čvrstoće

Dinamičko ponašanje cilindričnih uzoraka promjera 75 mm i visine 50 mm betona velike čvrstoće C80 u odnosu naprezanje-deformacija pri udaru udarne šipke duljine 600 mm prikazano je na slici 5.a. Deformacije i naprezanja izračunani su iz signala deformacije upadnog, reflektiranog i prenesenog vala zabilježenih poluvodičkim mjernim trakama postavljenima na upadnoj i prijenosnoj šipki. Nakon kalibracije i pretvorbe električnog signala u deformaciju, naprezanje uzorka, brzina deformacije i deformacija određeni su na temelju jednodimenzionalne teorije naponskih valova primijenjene u SHPB ispitivanjima kako slijedi:

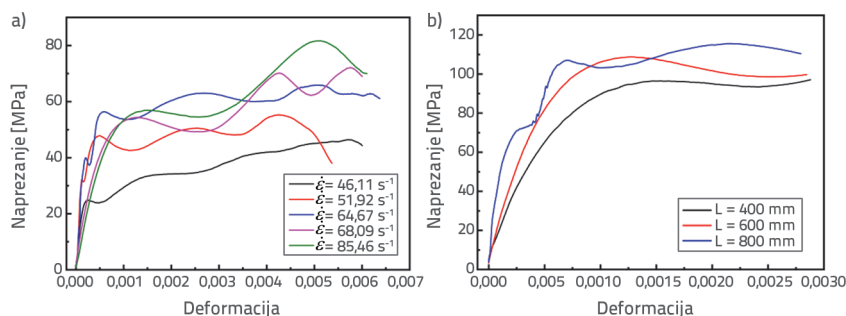
$$\sigma_s(t) = \frac{E_b A_b}{A_s} \varepsilon_t(t) \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C_b}{L_s} \varepsilon_r(t) \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C_b}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \quad (5)$$

gdje su $\sigma_s(t)$, $\dot{\varepsilon}_s(t)$ i $\varepsilon_s(t)$ naprezanje, brzina deformacije i deformacija uzorka, E_b , A_b i C_b modul elastičnosti, površina poprečnog presjeka i brzina širenja elastičnog vala u tlačnim šipkama, A_s i L_s površina poprečnog presjeka i duljina uzorka, a $\varepsilon_r(t)$ i $\varepsilon_t(t)$ deformacije povezane s reflektiranim i prenesenim valom. Za jednake duljine udarne šipke uočeni su sljedeći mehanički odzivi:

- elastična faza: naprezanje raste približno linearno uz zanemarivu akumulaciju deformacije, što upućuje na visok dinamički modul elastičnosti
- faza nakon vršnog naprezanja: nakon što je dosegnuto prvo vršno naprezanje, prevladava plastična deformacija, što se očituje ograničenim porastom naprezanja i ubrzanim razvojem deformacije.



Slika 5. Dinamičke krivulje naprezanje-deformacija uzoraka betona velike čvrstoće C80 dimenzija Ø75 mm x h50 mm: a) pri različitim brzinama deformacije za udarnu šipku duljine 600 mm; b) pri različitim duljinama (L) udarnih šipki

Ovisnost o brzini deformacije očituje se u dvama različitim režimima:

- niske brzine deformacije: tijekom međufaze zadržava se gotovo linearan odnos naprezanja i deformacije, što odgovara neoštećenim uzorcima
- visoke brzine deformacije: pojavljuju se izraženo nelinearne krivulje, pri čemu na njihov oblik utječu brzina udara i progresivni razvoj oštećenja. Razlike u obliku krivulja odražavaju različite mehanizme loma.

Na slici 5.b prikazane su krivulje naprezanje-deformacija dobivene za uzorke betona velike čvrstoće C80 izložene udaru udarnih šipki duljine 400 mm, 600 mm i 800 mm pri usporedivome rasponu brzina deformacije (66 do 69 s^{-1}). Ključna opažanja prikazana su u nastavku:

- Značajke elastične faze: dulje udarne šipke uglavnom su rezultirale višim vršnim naprežanjima, dok je dinamički modul elastičnosti pokazivao znatnu raspršenost rezultata među uzorcima.
- Udarne šipke duljine 400 mm: kraće trajanje opterećenja u pravilu je rezultiralo nižim vršnim naprežanjem i manjom vršnom deformacijom, dok je dinamički modul elastičnosti pokazivao određenu raspršenost rezultata. Krivulja naprezanje-deformacija pokazivala je izražena elastoplastična obilježja.
- Udarne šipke duljine 800 mm: dulje trajanje opterećenja općenito je rezultiralo višim vrijednostima naprezanja i deformacije te izraženijim deformacijskim obilježjima na krivulji naprezanje-deformacija.
- Udarne šipke duljine 600 mm: u odnosu na slučaj s udarnom šipkom duljine 800 mm, faza deformiranja bila je manje izražena, dok su vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti pokazivale određenu raspršenost među uzorcima umjesto jasnog trenda.

3.3 Analiza deformacije i loma

Eksperimentalno određena dinamička mehanička svojstva betona C80 pri udarnome opterećenju primjenom udarnih šipki duljine 400 mm, 600 mm i 800 mm sažeto su prikazana u tablici 3. Budući da

heterogenost betona i osjetljivost SHPB metode mogu uzrokovati lokalno iniciranje oštećenja, vrijednosti brzine deformacije i dinamičkog modula elastičnosti pokazuju određenu raspršenost rezultata. Zato se daljnja rasprava usmjerava na opće trendove ponašanja materijala. Oznaka uzorka sastoji se od kratice "DM" i rednog broja, pri čemu "DM" označava uzorke korištene za određivanje dinamičkih mehaničkih parametara. Dinamički modul elastičnosti određen je linearnom regresijom početnog, približno linearnog dijela dinamičke krivulje naprezanje-deformacija.

Tablica 3. Dinamički mehanički parametri betona C80

Oznaka uzorka	Duljina udarne šipke [mm]	Brzina udara [m/s]	Brzina prirasta deformacije [s^{-1}]	Vršno naprezanje [MPa]	Maksimalna deformacija [$\times 10^{-6}$]	Dinamički modul elastičnosti [GPa]	Način loma
DM-1	400	4,83	52,19	45,25	6228,44	129,42	Neoštećeno
DM-2		6,15	66,66	58,48	6552,94	175,94	Pukotina kroz cijeli presjek
DM-3		7,91	83,48	71,81	7971,06	153,39	Fragmentacija
DM-4		8,82	86,88	74,84	10 668,95	128,02	Fragmentacija
DM-5		9,59	93,57	88,39	9809,87	261,92	Usitnjavanje
DM-6	600	4,88	55,13	49,88	8352,87	219,03	Neoštećeno
DM-7		5,70	50,68	55,74	7142,92	358,53	Neoštećeno
DM-8		5,76	52,67	64,35	6100,10	176,62	Neoštećeno
DM-9		6,49	64,95	67,68	7955,74	257,96	Pukotina kroz cijeli presjek
DM-10		6,53	67,48	67,48	9224,47	179,97	Pukotina kroz cijeli presjek
DM-11		7,55	74,67	73,67	10 876,76	196,75	Fragmentacija
DM-12		7,75	66,06	75,51	8767,66	257,98	Fragmentacija
DM-13		8,28	85,46	90,13	10 353,58	269,156	Usitnjavanje
DM-14	800	5,36	52,70	60,37	9478,28	154,6	Neoštećeno
DM-15		5,83	56,67	63,68	7514,46	166,53	Neoštećeno
DM-16		6,28	69,49	67,41	12 577,19	111,20	Fragmentacija
DM-17		7,08	66,94	77,23	10 001,80	135,89	Fragmentacija
DM-18		8,12	78,09	86,49	10 808,97	273,60	Usitnjavanje
DM-19		8,28	62,50	92,22	7193,22	282,00	Usitnjavanje

Analiza eksperimentalnih podataka pokazala je proporcionalan odnos između brzine udara i brzine deformacije. Utvrđena su četiri karakteristična oblika loma: neoštećeno stanje, pukotina kroz cijeli presjek, fragmentacija i usitnjavanje. Njihov morfološki razvoj prikazan je na slici 6.

Neoštećeno stanje (niska brzina udara): male amplitude upadnog vala uzrokuju unutarnja mikrooštećenja bez vidljivih promjena na površini uzorka (slika 6.a). Unatoč početku nastanka unutarnjih oštećenja, uzorci su zadržali svoju strukturnu cjelovitost.

Pukotina kroz cijeli presjek (umjerena brzina udara): povećanje amplitude vala potiče brzo širenje pukotina kroz cijeli presjek uzorka. Širenje pukotina zaustavlja se bez raspadanja uzorka, pri čemu je njegova makrostruktura cjelovitost očuvana (slika 6.b).

Fragmentacija (visoka brzina udara): kritične amplitude vala

uzrokuju lom pretežno posmičnoga karaktera na kontaktnoj plohi agregata i cementne matrice, što rezultira razdvajanjem uzorka na više fragmenata (slika 6.c).

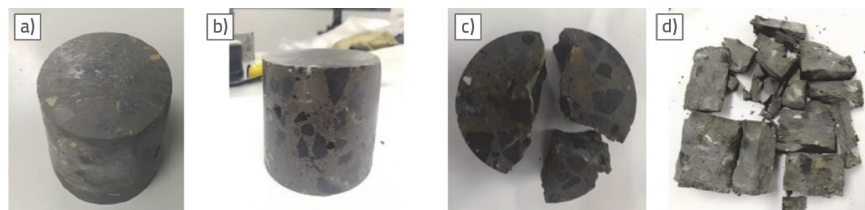
Usitnjavanje (vrlo visoka brzina udara): katastrofalni lom očituje se eksplozivnim izbacivanjem fragmenata. Petrografska analiza potvrdila je prevladavanje loma agregata u tome obliku loma (slika 6.d).

4. Analiza oštećenja pri udarnome opterećenju

4.1. Definicija i mjerenje varijable oštećenja

Varijable oštećenja služi kao kvantitativna mjera za procjenu degradacije cjelovitosti strukture i mehaničkih svojstava

betona. U postojećim pristupima varijable oštećenja betona najčešće se definira na temelju smanjenja učinkovite površine presjeka ili degradacije modula elastičnosti. Zbog mjernih nesigurnosti povezanih s tim fizikalnim parametrima, varijable oštećenja D u ovom je radu definirana na temelju elastodinamičke teorije kako slijedi:



Slika 6. Oblici loma betona velike čvrstoće C80: a) neoštećeno stanje; b) pukotina kroz cijeli presjek; c) fragmentacija; d) usitnjavanje

$$D = 1 - \left(\frac{\bar{v}_p}{v_p} \right)^2 \quad (6)$$

gdje su $\bar{v}_p$ i v_p brzina ultrazvučnog impulsa nakon udara i početna brzina ultrazvučnog impulsa.

Eksperimentalni postupak: Za ispitivanje korišten je ultrazvučni uređaj RSM-SY5 s pretvornicima za uzdužne valove. Uzorci su koaksijalno poravnani između pretvornika. Na kontaktnu plohu uzorka i pretvornika nanesen je tanki sloj masti, uz održavanje ujednačenoga kontaktnog tlaka od $0,05 \pm 0,01$ MPa, u skladu s normom ASTM D6087-08. Brzina ultrazvučnog vala mjerena je prije udara i nakon njega. Varijabla oštećenja zatim je izračunana primjenom izraza (6).

4.2. Oštećenje pri pojedinačnome udaru

Za ispitivanja pojedinačnim udarom na uzorcima betona velike čvrstoće provedeni su pokusi s udarnim šipkama različitih duljina i pri različitim brzinama udara. Brzina ultrazvučnog vala mjerena je prije svakog udara i nakon radi njega kvantificiranja razvoja oštećenja na temelju promjene brzine širenja uzdužnog vala. Varijable oštećenja izračunate su prema postupku opisanome u poglavlju 4.1, a rezultati prikazani u tablici 4. Oznaka uzorka sastoji se od kratice "DA" i rednog broja, pri čemu "DA" označava uzorke korištene za određivanje oštećenja ultrazvučnom metodom (eng. *ultrasonic damage assessment*). Kao primjer prikazana je analiza za udarnu šipku duljine 600 mm.

Analiza rezultata prikazanih u tablici pokazuje da varijabla oštećenje pri pojedinačnome udarnom opterećenju za svaku duljinu udarne šipke pokazuje određenu raspršenost, ali istodobno slijedi opći trend povećanja s porastom brzine udara. Unutar područja mjerljivog oštećenja vrijednosti varijable oštećenja pri nižim brzinama udara ostaju male, dok se njihov intenzitet postupno povećava s porastom brzine udara. Eksperimentalni rezultati pokazuju da je oštećenje posebno izraženo pri brzinama većima od 5,5 m/s, što upućuje na to da je pri toj graničnoj vrijednosti osigurana dovoljna količina energije za širenje pukotina i razvoj stabilnog procesa loma. Nasuprot tome, udarna opterećenja nižeg intenziteta uzrokuju oštećenja stohastičke prirode, premda su njihove vrijednosti dosljedno manje. Podaci prikazani u tablici 4. pokazuju opći trend povećanja oštećenja s porastom brzine udara, iako to povećanje nije strogo monotono za sve uzorke. Takva raspršenost rezultata ponajprije je posljedica heterogene strukture betona, lokalnih razlika u raspodjeli agregata i nastanku mikropukotina te mogućih odstupanja u ultrazvučnome sprezanju nakon udara. Zato rezultate oštećenja pri jednokratnome udarnom opterećenju treba promatrati kroz opće razvojne trendove, a ne kroz strogu usporedbu pojedinačnih mjernih vrijednosti.

Kako bi se razjasnila povezanost između razvoja oštećenja i duljine udarača, za sustavnu analizu odabrane su tri karakteristične brzine udara: 4,00 m/s, 5,20 m/s i 6,00 m/s. Kvantificirani odnosi između oštećenja i duljine udarne šipke prikazani su u tablici 5.

Tablica 4. Vrijednosti oštećenja pri pojedinačnome udaru (600 mm)

Oznaka uzorka	Brzina udara [m/s]	Brzina uzdužnog vala prije oštećenja [m/s]	Brzina uzdužnog vala nakon oštećenja [m/s]	Varijabla oštećenja, D
DA-1	3,45	3846	3125	0,072
DA-2	4,17	4545	3125	0,312
DA-3	4,18	3846	2778	0,278
DA-4	4,25	4545	3125	0,312
DA-5	4,51	3846	2941	0,235
DA-6	4,77	3846	3333	0,133
DA-7	4,87	3846	3125	0,187
DA-8	4,9	3846	2941	0,235
DA-9	4,97	3846	3125	0,187
DA-10	5,09	3846	2632	0,316
DA-11	5,10	3333	2778	0,167
DA-12	5,20	4545	3846	0,154
DA-13	5,50	3846	2632	0,216
DA-14	5,79	3846	3571	0,187
DA-15	5,81	3846	3333	0,198
DA-16	5,85	3846	2941	0,235
DA-17	6,18	3846	3333	0,323
DA-18	6,21	3846	2273	0,409
DA-19	6,57	4167	3571	0,543

Tablica 5. Vrijednosti oštećenja betona velike čvrstoće pri različitim duljinama udarne šipke

Duljina udarne šipke [mm]	Brzina udara [m/s]	Vrijednost oštećenja
400	4,00	0,083
	5,20	0,133
	6,00	0,154
600	4,00	0,278
	5,20	0,316
	6,00	0,409

Razvoj oštećenja u osnovi ovisi o duljini udarne šipke i brzini udara. Glavni rezultati eksperimentalnih istraživanja mogu se sažeti kako slijedi:

- Stalna duljina udarne šipke: pri duljini udarne šipke od 400 mm varijabla oštećenja D povećala se za 0,071 pri porastu brzine udara s 4,00 na 6,00 m/s, dok je za udarnu šipku duljine 600 mm zabilježeno povećanje ΔD od 0,131. Akumulacija oštećenja pokazala je pozitivnu ovisnost o brzini udara.
- Stalna brzina udara: iniciranje oštećenja nastupa pri nižim brzinama s povećanjem duljine udarne šipke. Drugim riječima, minimalna brzina udara potrebna za izazivanje oštećenja betona C80 smanjivala se s povećanjem duljine udarne šipke, što je ubrzavalo razvoj oštećenja.
- Različita dinamika razvoja oštećenja: kod udarne šipke duljine 400 mm oštećenje se povećavalo postupno s porastom brzine udara, dok je kod duljih udarnih šipki (600 mm i 800 mm) porast oštećenja bio znatno izraženiji.
- Odnos između duljine udarne šipke i oštećenja: pri istoj brzini udara (npr. 5,20 m/s) povećanje duljine udarne šipke dovodilo je do većih vrijednosti oštećenja (tablica 5.).

4.3. Razvoj oštećenja pri višekratnome udarnom opterećenju

4.3.1. Plan ispitivanja pri višekratnome udarnom opterećenju

Betonske konstrukcije tijekom uporabe često su izložene ponovljivim dinamičkim opterećenjima (npr. opterećenjima uzrokovanim eksplozijama i potresima), što dovodi do postupne akumulacije oštećenja uslijed nepovratnih promjena u mikrostrukturi materijala. Za razliku od analize pojedinačnog udara, u ovom se poglavlju istražuje razvoj oštećenja betona velike čvrstoće C80 pri višekratnome udarnom opterećenju.

Za razliku od ispitivanja pojedinačnim udarom, ispitivanja višekratnim udarnim opterećenjem zahtijevaju jednake amplitude upadnog vala kako bi se procijenili mehanička svojstva i razvoj oštećenja betona C80 pri cikličkome opterećenju. Zato je prioritet bio odrediti brzinu udara za svaku duljinu udarne šipke pri kojoj uzorci betona C80 mogu izdržati najmanje pet uzastopnih udara. Standardizirani postupak za udarnu šipku duljine 400 mm opisan je u nastavku.

Kalibracija brzine udara: početna ispitivanja provedena su pri niskim brzinama udara, nakon čega je brzina postupno

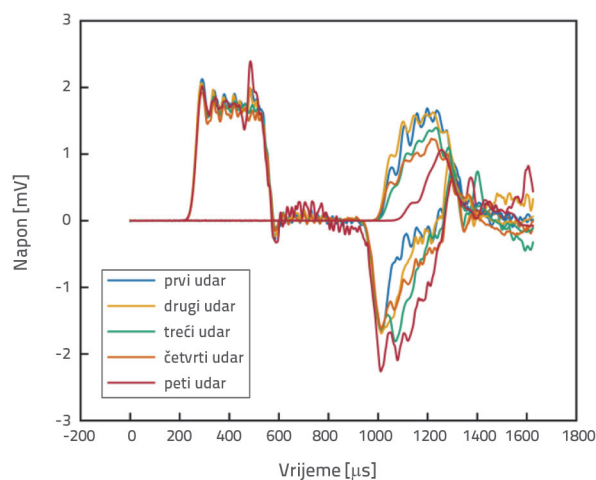
povećavana u koracima od 0,2 m/s sve dok nisu zadovoljena sljedeća tri kriterija: a) brzina ultrazvučnog impulsa ostaje mjerljiva; b) nakon udara ne pojavljuju se vidljive pukotine; c) uzorak može izdržati najmanje pet uzastopnih udara.

Provedba ispitivanja višekratnim udarnim opterećenjem: za udarne šipke duljine 400 mm i 600 mm udari su izvođeni pri konstantnim brzinama ($\pm 0,5$ % odstupanja). Udarne šipke duljine 800 mm nije korištena pri višekratnome udarnom ispitivanju jer su preliminarni pokusi pokazali da već u ranim fazama ispitivanja uzrokuje prekomjerna oštećenja. Ispitivanje se nastavljalo sve do pojave širenja pukotina ili usitnjavanja materijala. Za svaku kombinaciju brzine udara i duljine udarne šipke ispitana su tri uzorka jednakih dimenzija i sastava.

Praćenje oštećenja: nakon svakog ciklusa udara mjerena je brzina ultrazvučnog impulsa.

4.3.2. Analiza valnih oblika pri višekratnim udarima

Valni zapisi uzoraka betona velike čvrstoće C80 izloženih višekratnim udarima pri konstantnoj amplitudi upadnog vala prikazani su na slici 7. Neprekinute linije prikazuju signale upadnog i reflektiranog vala, a isprekidane linije signal prenesenog vala.



Slika 7. Valni zapisi pri višekratnome udarnom opterećenju primjenom udarne šipke duljine 600 mm

Analiza reflektiranih i prenesenih valova pokazuje sljedeće. Kod reflektiranog vala početni reflektirani impuls postupno se

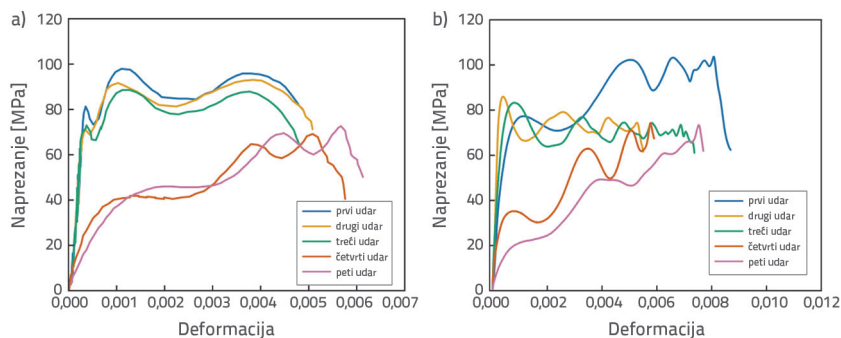
razdvaja na dva uzastopna vrha tijekom prvih nekoliko udara (drugi i treći udar), pri čemu se u kasnijim fazama ispitivanja (treći i četvrti udar) uočava njihovo međusobno približavanje. Kod prenesenog vala vršna vrijednost tijekom prvog udara pojavljuje se kasnije nego tijekom sljedećih udarnih događaja.

Prema izrazima trovalne analize koji vrijede za SHPB sustave, trenutna stanja naprezanja i deformacije jednoznačno su određena amplitudama upadnog, reflektiranog i prenesenog vala. Postupni razvoj valnog oblika očituje se kao monotono povećanje amplituda reflektiranog vala s brojem udara, uz postupno vremensko kašnjenje pojave vrha. Amplitude prenesenog vala sustavno se smanjuju, a pojava vrha postupno pomiče prema ranijem vremenu.

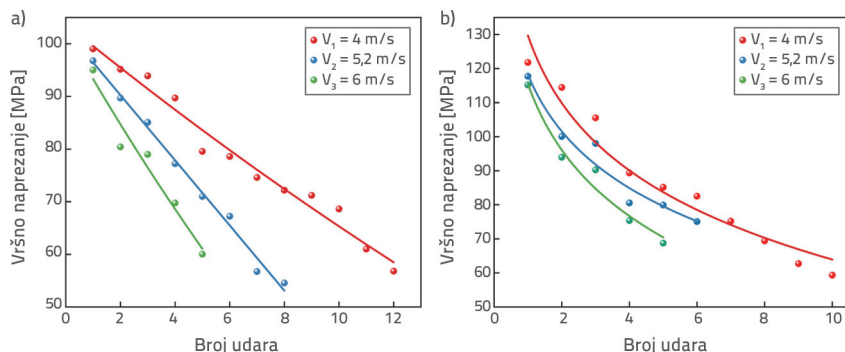
Takvo ponašanje posljedica je postupne akumulacije oštećenja u betonu, praćene razvojem mikropukotina i šupljina. Vremenski razmak između upadnog i reflektiranog vala povećava se zbog kašnjenja pojave vršne vrijednosti reflektiranog vala, dok se kod prenesenog vala vršna vrijednost pojavljuje sve ranije. Također je uočeno da pri jednakim amplitudama upadnog vala dulje udarne šipke tijekom višekratnih udara ubrzavaju smanjenje amplitude reflektiranog vala te promjene svojstava prenesenog vala.

4.3.3. Krivulje naprezanje-deformacija pri višekratnome udarnom opterećenju

Krivulje naprezanje-deformacija dobivene pri višekratnome udarnom opterećenju za dvije različite duljine udarnih šipki prikazane su na slici 8.



Slika 8. Krivulje naprezanje-deformacija: a) višestruki udari pri duljini udarne šipke od 400 mm; b) višestruki udari pri duljini udarne šipke od 600 mm



Slika 9. Odnos između vršnog naprezanja i broja udara: a) višestruki udari pri duljini udarne šipke od 400 mm; b) višestruki udari pri duljini udarne šipke od 600 mm

Analiza krivulja naprezanje-deformacija pokazala je da su njihovi razvojni trendovi u skladu s promjenama uočenima na valnim zapisima. Vršno naprezanje zabilježeno pri prvome udaru bilo je veće nego pri drugome i trećemu udaru, dok su vrijednosti vršnog naprezanja pri drugome i trećemu udaru bile gotovo jednake. Nagib krivulje tijekom trećeg udara bio je osjetno veći nego tijekom četvrtog i petog udara, što upućuje na zatvaranje unutarnjih pora betona nakon trećeg udara. Tijekom četvrtog udara dolazi do nastanka novih pukotina, što uzrokuje daljnje oštećenje uzorka. Posljedično, vršno naprezanje i modul deformacije pri četvrtome udaru manji su nego pri trećemu. Krivulja dobivena pri četvrtome udaru pokazuje skraćene elastične faze i izraženiji razvoj plastične faze. Za duljinu udarne šipke od 400 mm elastična faza tijekom završnog udara još je uvijek prisutna, premda znatno skraćena, dok kod udarne šipke duljine 600 mm gotovo potpuno nestaje te krivulja neposredno prelazi u plastičnu fazu. Takvo ponašanje posljedica je akumulacije oštećenja s povećanjem broja udara.

Tijekom višekratnoga udarnog opterećenja najveća deformacija pri slomu uzoraka postupno se povećavala s porastom broja udara. To je posljedica postupne akumulacije oštećenja izazvanih ponovljenim udarnim opterećenjem, koja dovodi do povećanja deformacije materijala. Ponavljani udari uzrokovali su porast broja unutarnjih pora i pukotina u betonu, što je rezultiralo postupnim smanjenjem brzine ultrazvučnog impulsa te istodobnim povećanjem stupnja oštećenja.

4.4. Odnos između udarnih parametara i broja udara

Mehanički parametri betonskih uzoraka izloženih višestrukim udarima pri dvjema različitim duljinama udarne šipke prikazani su u tablici 6. Rezultati ispitivanja pri višestrukome udarnom opterećenju prikazani u tablici 6. dobiveni su pri nominalno kalibriranoj brzini udara od približno 4 m/s. Vrijednosti brzine udara navedene u tablici predstavljaju stvarno izmjerene brzine za pojedine udare te pokazuju manja odstupanja u odnosu na nominalnu vrijednost. Zato je analiza usmjerena na ukupni razvoj akumuliranog oštećenja i utjecaj duljine udarne šipke. Kada je nakon udara izmjerena brzina ultrazvučnog impulsa iznosila 0 m/s, smatralo se da zbog izraženog raspucavanja ili fragmentacije uzorka nije bilo moguće registrirati stabilan ultrazvučni signal. U tom je slučaju pripadna vrijednost akumuliranog oštećenja određena kao $D = 1$.

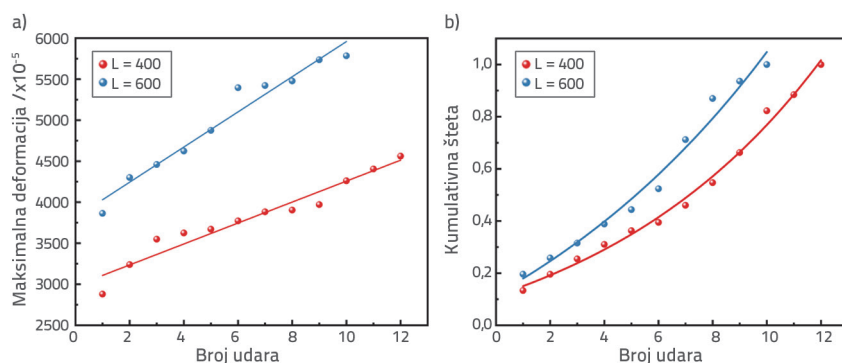
Odnos između broja udara i vršnog naprezanja pri višekratnome udarnom

Tablica 6. Dinamička svojstva betona velike čvrstoće C80 pri cikličkome udaru

Duljina udarne šipke [mm]	Broj udara	Brzina udara [m/s]	Amplituda [MPa]	Vršno naprezanje [MPa]	Maksimalna deformacija ($\times 10^{-6}$)	Brzina uzdužnog vala prije oštećenja [m/s]	Brzina uzdužnog vala nakon oštećenja [m/s]	Vrijednost kumulativnog oštećenja
400	1	4,04	80,36	99,03	2879,32	3846	3333	0,133385
	2	3,74	74,39	95,15	3238,99	3333	3125	0,195792
	3	3,82	75,9	93,92	3549,45	3125	2941	0,254672
	4	3,88	77,17	89,70	3625,03	2941	2778	0,310095
	5	4,06	80,75	79,57	3670,03	2778	2632	0,362651
	6	3,73	74,19	78,60	3771,95	2632	2548	0,394566
	7	3,81	75,78	74,62	3882,64	2548	2381	0,460107
	8	4,22	83,94	72,17	3904,09	2381	2174	0,547045
	9	3,92	77,97	71,21	3970,91	2174	1923	0,662501
	10	4,31	85,73	68,62	4260,36	1923	1615	0,822667
	11	4,21	83,74	61,00	4404,78	1615	1515	0,884587
	12	3,97	78,96	56,80	4561,81	1515	0	1
600	1	4,24	84,33	121,78	3863,26	4145	3333	0,195899
	2	3,89	77,37	104,47	4300,50	3333	3125	0,258305
	3	4,02	79,96	86,52	4459,43	3125	2947	0,315265
	4	4,20	83,54	84,36	4623,64	2947	2732	0,38822
	5	4,26	84,73	83,15	4875,19	2732	2581	0,443491
	6	3,72	73,99	82,54	5395,76	2581	2374	0,523693
	7	4,25	84,53	78,19	5422,44	2374	1927	0,711983
	8	4,08	81,15	74,42	5477,46	1927	1623	0,869741
	9	4,17	82,94	72,72	5736,43	1623	1515	0,936284
	10	4,02	79,96	68,34	5784,67	1515	0	1

opterećenju uzoraka betona udarnim šipkama različitih duljina i pri različitim brzinama udara prikazan je na slici 9. Pri istoj duljini udarne šipke vršno naprezanje općenito se smanjivalo s porastom broja udara, što upućuje na postupnu akumulaciju unutarnjih oštećenja u betonu. Pri duljini udarne šipke od 400 mm i brzini udara od približno 4 m/s uzorci su mogli izdržati do 12 uzastopnih udara. Vršno naprezanje smanjivalo se postupno tijekom prvih četiriju udara, a zatim je nakon četvrtog udara zabilježen izraženiji pad. Takvo ponašanje može se povezati sa zatvaranjem unutarnjih pora tijekom početnih udara, nakon čega dolazi do nastanka i širenja novih pukotina te postupne fragmentacije materijala. Pri brzinama udara od približno 4,0 m/s, 5,2 m/s i 6,0 m/s uočeno je da se s povećanjem brzine udara smanjuje broj udara do loma, dok se istodobno ubrzava pad vršnog naprezanja. To potvrđuje da se s porastom broja udara unutarnja oštećenja kontinuirano akumuliraju. Početni udari dovode do

zatvaranja unutarnjih pora, dok sljedeći udari potiču razvoj i širenje pukotina, premda uz postupno smanjenje brzine njihova rasta. Tijekom daljnjih udara pukotine se postupno povećavaju, a oštećenja akumuliraju sve do konačne fragmentacije uzorka. Aproksimacijske krivulje koje povezuju broj udara i vršno naprezanje pokazuju približno linearan odnos za duljinu udarne šipke od 400 mm, dok se za duljinu od 600 mm uočava zakrivljeni



Slika 10. Odnos između maksimalne deformacije, akumuliranog oštećenja i broja udara: a) odnos između broja udara i maksimalne deformacije; b) odnos između broja udara i kumulativnog oštećenja

trend. To upućuje na to da duljina udarne šipke utječe na način degradacije vršnog naprezanja. Kao što je to prikazano na slici 9., vršno naprezanje naglo opada tijekom prvih nekoliko udara, nakon čega se brzina opadanja smanjuje, dok veće brzine udara dodatno ubrzavaju degradaciju vršnog naprezanja.

Kako bi se obuhvatio cjelokupan proces ponašanja betona velike čvrstoće pri višekratnome udarnom opterećenju, za daljnju analizu odabrani su rezultati pri brzini udara od približno 4,0 m/s. Na slici 10. prikazan je odnos između broja udara i maksimalne deformacije. Uočava se pozitivna povezanost između maksimalne deformacije i broja udara, pri čemu se maksimalna deformacija postupno povećava s povećanjem broja udara. Prema jednodimenzionalnoj trovalnoj teoriji, deformacija se određuje na temelju reflektiranog vala, a promjena deformacije odražava razvoj oštećenja u materijalu. Za istu duljinu udarne šipke, pri višekratnim udarima jednake brzine, deformacija ostvarena pri posljednjemu udaru znatno je veća od deformacije pri prvome udaru, što upućuje na postupnu akumulaciju unutarnjih oštećenja. S povećanjem broja udara otpornost uzorka na udarno opterećenje postupno se smanjuje, što se očituje padom vršnog naprezanja. Takvo ponašanje u skladu je s prethodno utvrđenim odnosom između broja udara i vršnog naprezanja. Akumulacija oštećenja očituje se postupnim povećanjem maksimalne deformacije. Kao što je to prikazano na slici 10.a, pri istoj brzini udara broj udara do loma smanjuje se s povećanjem duljine udarne šipke, dok se maksimalna deformacija povećava.

Na slici 10.b prikazan je odnos između broja udara i akumuliranog oštećenja betona velike čvrstoće. Na njoj može se uočiti da se za istu duljinu udarne šipke akumulirano oštećenje postupno povećava s porastom broja udara. Pri duljini udarne šipke od 400 mm akumulirano oštećenje povećavalo se relativno sporo tijekom prvih četiriju udara, nakon čega je zabilježen njegov znatno brži porast. Kada je duljina udarne šipke iznosila 600 mm, nije uočena početna faza sporijeg povećanja praćena naglim rastom, a broj udara potreban za postizanje iste razine akumuliranog oštećenja bio je manji nego kod udarne šipke duljine 400 mm. Takvo ponašanje u skladu je s prethodno opisanim eksperimentalnim opažanjima te zato nije dodatno razmatrano. Nadalje, usporedba

različitih duljina udarne šipke pokazuje da one dulje dovode do brže akumulacije oštećenja pri istome broju udara.

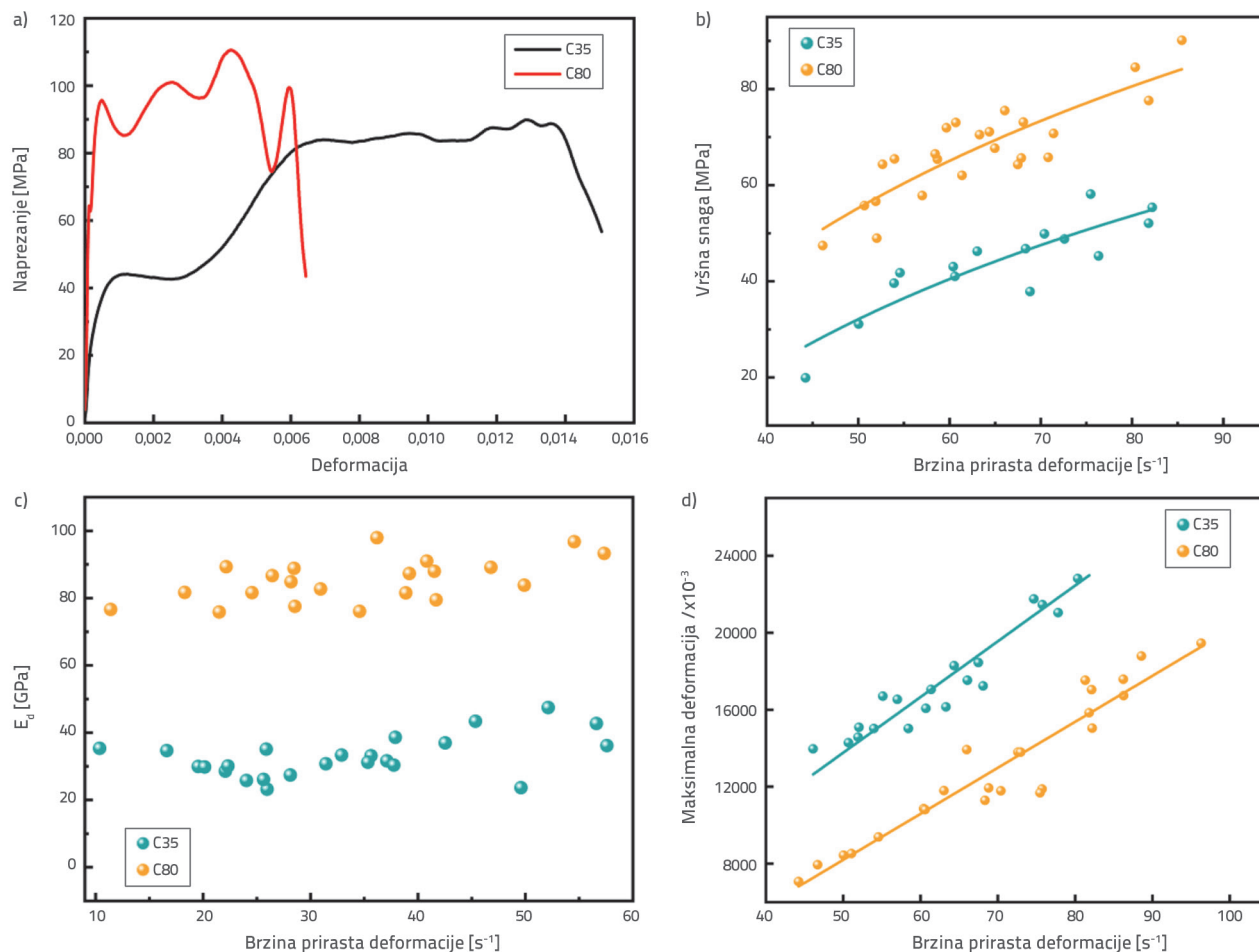
5. Usporedba dinamičkih mehaničkih svojstava betona C35 i C80

Kako bi se istražile razlike u mehaničkim svojstvima između betona velike čvrstoće i betona normalne čvrstoće pri udarnome opterećenju, provedena su ispitivanja na dvjema vrstama uzoraka jednakih dimenzija, ali različitih razreda čvrstoće, pri približno jednakoj brzini deformacije od 50 s^{-1} . Nakon usporedbe njihovih dinamičkih svojstava, glavni parametri dinamičkoga mehaničkog odziva betona C35 i C80 u usporedivome rasponu brzina deformacije sažeto su prikazani u tablici 7.

Kao što je to prikazano na slici 11.a, dinamički modul elastičnosti betona velike čvrstoće C80 bio je znatno veći od odgovarajuće vrijednosti za beton C35, a i prvo vršno naprezanje betona C80 bilo je više. U elastičnoj fazi krivulje naprezanje-deformacija oba su betona pokazivala približno linearan porast deformacije uz relativno mali porast naprezanja. Nakon dosezanja prvoga vršnog naprezanja u betonu C80 dolazi do nastanka novih pukotina, što upućuje na završetak elastične faze deformiranja, dok je daljnji odziv uglavnom obilježen razvojem plastične deformacije. Međutim, nakon dosezanja prvoga vršnog naprezanja uočene su izražene razlike između betona C35 i C80. Krivulja naprezanje-deformacija betona C35 pokazuje plato, pri čemu naprezanje ostaje gotovo nepromijenjeno unatoč povećanju deformacije, što upućuje na pojavu omekšanja materijala. Nakon toga slijedi postupni porast naprezanja. Takvo ponašanje povezano je s prisutnošću većeg broja pora u betonu C35 koje se zatvaraju pod djelovanjem udarnog opterećenja. Nasuprot tome, beton C80 ima gušću unutarnju strukturu, zbog čega izostaje pojava omekšanja nakon prvoga vršnog naprezanja. Tijekom faze rasterećenja krivulja za beton C80 pokazuje izraženiji silazni trend, dok je kod betona C35 pad naprezanja postupniji. To se može pripisati različitim mehanizmima loma. Kod betona C80 lom se pretežito događa kroz krupni agregat, dok je kod betona C35 dominantan lom na prijelaznoj zoni između krupnog agregata i cementne matrice.

Tablica 7. Usporedba dinamičkog odziva betona C35 i C80

Parametar \ Klasa betona	C35	C80	Usporedba
Vršno naprezanje	Niže	Više	C80 pokazuje veću dinamičku otpornost
Dinamički modul elastičnosti	Niži i raspršeniji	Općenito viši	C80 pokazuje veću krutost
Maksimalna deformacija	Veća	Manja	C35 pokazuje veću deformaciju
Učinak brzine deformacije	Povećava se s brzinom deformacije	Povećava se s brzinom deformacije	Obje pokazuju osjetljivost na brzinu deformacije
Ponašanje nakon vršnog opterećenja	Izraženije omekšanje pri deformaciji	Nagli pad naprezanja	Ponašanje pri lomu se razlikuje
Mogući mehanizam oštećenja	Zatvaranje pora i oštećenje međupovršine	Gušća matrica i lom povezan s agregatom	Potrebni su dodatni mikroskopski dokazi



Slika 11. Usporedba dinamičkih mehaničkih svojstava betona C35 i C80: a) dinamičke krivulje naprezanje-deformacija; b) odnos vršnog naprezanja i brzine deformacije; c) odnos dinamičkog modula elastičnosti i brzine deformacije; d) odnos maksimalne deformacije i brzine deformacije

Krivulje ovisnosti vršnog naprezanja o brzini deformacije za dva razreda čvrstoće betona, dobivene aproksimacijom eksperimentalnih podataka, prikazane su na slici 11.b. Pri istoj brzini deformacije vršno naprezanje betona velike čvrstoće C80 bilo je približno 1,5 puta veće od vršnog naprezanja betona C35, što jasno potvrđuje veću dinamičku tlačnu čvrstoću betona velike čvrstoće. U odnosu na brzinu deformacije od $60 s^{-1}$, porast čvrstoće pri brzini deformacije od $82 s^{-1}$ iznosio je 14,67 MPa za beton C35 te 26,76 MPa za beton velike čvrstoće C80. To pokazuje da se porast čvrstoće pod dinamičkim opterećenjem povećava s porastom razreda čvrstoće betona. Kao što je to prikazano na slici 11.b, vršno naprezanje kod oba razreda betona povećava se s porastom brzine deformacije, što potvrđuje izražen učinak brzine deformacije. Nagibi aproksimacijskih krivulja vršnog naprezanja u ovisnosti o brzini deformacije za oba razreda betona bili su gotovo jednaki, što upućuje na sličan prirast čvrstoće s povećanjem brzine deformacije. Kao što je to prikazano na slici 11.c, dinamički modul elastičnosti betona oba razreda čvrstoće mijenjao se unutar određenog raspona s porastom brzine deformacije. Međutim, te su promjene

bile relativno male, što upućuje na zaključak da dinamički modul elastičnosti betona nije jako osjetljiv na brzinu deformacije. U literaturi ne postoji jedinstveno stajalište o tome pitanju. Rezultati ovog istraživanja u skladu su sa zaključcima Zhaoa i sur. [31], dok su Wang i sur. [32] utvrdili da se dinamički modul elastičnosti povećava s porastom brzine deformacije, a Su i sur. [33] da se smanjuje. Razlog takvih razlika može biti činjenica da pri višekratnome udarnom opterećenju na vrijednost dinamičkog modula elastičnosti utječu stupanj razvoja mikropukotina i heterogenost pojedinih dijelova betonskog uzorka. Osim toga, različiti uvjeti i metode ispitivanja mogu utjecati na određivanje modula elastičnosti, što također može pridonijeti razlikama u rezultatima objavljenima u literaturi. Kao što je to prikazano na slici 11.c, dinamički modul elastičnosti betona C80 bio je znatno veći od betona C35. Takav rezultat izravno je povezan s razredom čvrstoće betona. U usporedbi s betonom velike čvrstoće C80, beton C35 ima više unutarnjih pora i manje zbijenu strukturu matrice. Pri udarnome opterećenju zatvaranje pora i oštećenja na prijelaznim zonama između agregata i cementne matrice mogu uzrokovati veće deformacije te niže vrijednosti

prividnoga dinamičkog modula elastičnosti. S povećanjem čvrstoće povećava se zbijenost unutarnje strukture betona, udio agregata postaje veći, omjer vode i cementa manji, a broj unutarnjih pora manji. Zbog toga beton velike čvrstoće pokazuje veće vrijednosti modula elastičnosti.

Na slici 11.d može se uočiti da se maksimalna deformacija uzoraka betona različitih razreda čvrstoće povećava s porastom brzine deformacije. Takvo ponašanje posljedica je razvoja deformacija povezanih s nastankom i širenjem pukotina pri udarnome opterećenju. Međutim, zbog kratkog trajanja opterećenja nosivost unutarnje strukture betona ostaje uglavnom očuvana, što omogućuje postizanje većih vrijednosti maksimalne deformacije. Pri istoj brzini deformacije maksimalna deformacija betona C35 bila je približno 1,5 puta veća od deformacije betona C80, što pokazuje da je beton C35 podložniji deformiranju pri dinamičkome opterećenju. Pri povećanju brzine deformacije s 50 s^{-1} na 80 s^{-1} maksimalna deformacija betona C35 povećala se za 0,01046, dok je kod betona velike čvrstoće C80 porast iznosio 0,00807. Na slici 11.d također je vidljivo da je nagib krivulje ovisnosti maksimalne deformacije o brzini deformacije veći za beton C35 nego za beton C80. To upućuje na zaključak da beton velike čvrstoće ne samo da ostvaruje manje maksimalne deformacije, nego pokazuje i manju osjetljivost na promjene brzine deformacije. Takvo se ponašanje može povezati s gušćom unutarnjom strukturom betona C80 i njegovom manjom sposobnošću deformiranja pri dinamičkome opterećenju. Zbog većeg udjela unutarnjih pora beton normalne čvrstoće pri udaru razvija veće deformacije, dok beton velike čvrstoće zbog svoje zbijenije strukture pokazuje manju deformabilnost. Zato pri jednakim uvjetima dinamičkog opterećenja beton velike čvrstoće pokazuje manju osjetljivost maksimalne deformacije na promjene brzine deformacije.

6. Zaključak

Kako bi se istražila mehanička svojstva betona velike čvrstoće pri udarnome opterećenju, provedena su SHPB ispitivanja na uzorcima betona C80 primjenom udarnih šipki različitih duljina i pri različitim brzinama udara. Na temelju dobivenih rezultata određena su dinamička svojstva betona velike čvrstoće. Brzina ultrazvučnog impulsa korištena je za procjenu oštećenja i analizu loma uzoraka. Također je provedena usporedba udarnog ponašanja betona normalne čvrstoće i betona velike čvrstoće. Glavni zaključci prikazani su u nastavku:

- Pri pojedinačnome udarnom opterećenju amplituda upadnog vala povećavala se s porastom brzine udara, dok je trajanje impulsa ponajprije ovisilo o duljini udarne šipke. S povećanjem

brzine deformacije povećavali su se vršno naprezanje i maksimalna deformacija betona velike čvrstoće C80, dok je duljina udarne šipke uglavnom utjecala na trajanje impulsa i razvoj oštećenja. Pri usporedivim brzinama deformacije dulje udarne šipke rezultirale su višim vrijednostima naprezanja zbog duljeg trajanja opterećenja. Međutim, vršno naprezanje bilo je ponajprije određeno brzinom deformacije i amplitudom upadnog vala, a ne duljinom udarne šipke. Pri istoj duljini udarne šipke brzina razvoja oštećenja povećavala se s porastom brzine udara, dok su dulje udarne šipke ubrzavale akumulaciju oštećenja.

- Pri višekratnome udarnom opterećenju maksimalna deformacija povećavala se s porastom broja udara, dok se vršno naprezanje postupno smanjivalo. Unutarnje pore i mikropukotine razvijale su se i akumulirale tijekom uzastopnih udara. Pri istoj duljini udarne šipke veće brzine udara smanjivale su broj udara potreban za slom uzorka te ubrzavale degradaciju vršnog naprezanja. Pri istoj brzini udara uzorci izloženi djelovanju duljih udarnih šipki pokazivali su kraći vijek trajanja, veće maksimalne deformacije i bržu akumulaciju oštećenja, što upućuje na to da dulje trajanje impulsa ubrzava razvoj kumulativnog oštećenja.
- Pri istoj duljini udarne šipke i brzini udara valni zapisi betona C35 i C80 bili su slični kada su amplitude upadnog vala bile usporedive. Nakon nastanka oštećenja pri većim brzinama udara reflektirani val kod betona C35 pokazivao je profil u obliku slova "U", dok je kod betona C80 poprimao karakterističan oblik slova "W". Vršno naprezanje i dinamički modul elastičnosti betona velike čvrstoće C80 bili su znatno veći nego kod betona C35. Beton C35 pokazivao je izraženije postvršno omekšanje, dok je beton C80 imao veću dinamičku krutost i manju osjetljivost maksimalne deformacije na promjene brzine deformacije. Navedene razlike povezane su s gušćom unutarnjom strukturom betona velike čvrstoće te različitim mehanizmima oštećenja i loma dvaju razreda betona.

Zahvala

Autori s zahvalnošću priznaju financijsku potporu Projektima znanosti i tehnologije provincije Henan (brojevi potpora 252102320207, 252102321016, 262102320347) i Specijalnom doktorskome projektu Sveučilišta Nanyang Normal (brojevi potpora 2020ZX007, 2026QN019). Zahvaljujemo se članovima Laboratorija za strukturni udar na pomoći u radu SHPB sustava i obradi eksperimentalnih podataka.

LITERATURA

- [1] Shin, H.O., Yoo, D.Y., Lee, J.H., Lee, S.H., Yoon, Y.S.: Optimized mix design for 180 MPa ultra-high-strength concrete, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (2019) 5, pp. 4182–4197.

- [2] Kumar, R., Singh, S., Singh, L.P.: Studies on enhanced thermally stable high strength concrete incorporating silica nanoparticles, *Construction and Building Materials*, 153 (2017), pp. 506–513.

- [3] Bedon, C., Amadio, C.: Enhancement of the seismic performance of multi-storey buildings by means of dissipative glazing curtain walls, *Engineering Structures*, 152 (2017), pp. 320–334.
- [4] Gangolu, J., Kumar, A., Bhuyan, K., Sharma, H.: Probabilistic demand models and performance-based fragility estimates for concrete protective structures subjected to missile impact, *Reliability Engineering & System Safety*, 223 (2022), Article 108497.
- [5] Mechtcherine, V.: Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures, *Construction and Building Materials*, 41 (2013), pp. 365–373.
- [6] He, S., Tian, L., Li, M.: Experimental investigation of the coordinated working performance of high-strength reinforcement and UHPC under varying parameters, *GRAĐEVINAR*, 78 (2026) 2, pp. 95–105, <https://doi.org/10.14256/JCE.4360.2025>
- [7] Zouini, R., Amjad, U., Irshidat, M., Makani, A.: Durability assessment of high-performance concrete reinforced with waste steel fibres, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 12, pp. 1225–1232, <https://doi.org/10.14256/JCE.4295.2025>
- [8] Hao, H., Bi, K., Chen, W., Pham, T.M., Li, J.: Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard resistant, resilient, and smart civil engineering structures, *Engineering Structures*, 277 (2023), Article 115477.
- [9] Maluk, C., Bisby, L., Terrasi, G.P.: Effects of polypropylene fibre type and dose on the propensity for heat-induced concrete spalling, *Engineering Structures*, 141 (2017), pp. 584–595.
- [10] Asprone, D., Jalayer, F., Prota, A., Manfredi, G.: Proposal of a probabilistic model for multi-hazard risk assessment of structures in seismic zones subjected to blast for the limit state of collapse, *Structural Safety*, 32 (2010) 1, pp. 25–34.
- [11] Abrams, D.A.: Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete, 1917.
- [12] Cowell, W.L.: *Dynamic Properties of Plain Portland Cement Concrete*, 1966.
- [13] Wakabayashi, M., et al.: Dynamic loading effects on the structural performance of concrete and steel materials and beams, *Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 6, Turkish National Committee on Earthquake Engineering, 1980.
- [14] Jin, L., Kaixin, L., Zhang, R., Yu, W., Du, X., Deng, X.: Combined effects of cryogenic temperature and strain rates on compressive behavior of concrete, *International Journal of Damage Mechanics*, 31 (2022).
- [15] Guo, Y.B., Gao, G.F., Jing, L., Shim, V.P.W.: Dynamic Properties of Mortar in High-strength Concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 165 (2022), Article 104216.
- [16] Williams, B., Heard, W., Graham, S., Nie, X.: Effect of specimen geometry on triaxial compressive response of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 244 (2020), Article 118348.
- [17] Khaliq, W., Mujeeb, A.: Effect of processed pozzolans on residual mechanical properties and macrostructure of high-strength concrete at elevated temperatures, *Structural Concrete*, 20 (2019), pp. 307–317.
- [18] Guo, Y.B., Gao, G.F., Jing, L., Shim, V.P.W.: Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading, *International Journal of Impact Engineering*, 108 (2017), pp. 114–135.
- [19] Zhou, W., Tang, L., Liu, X., Ma, G., Chen, M.: Mesoscopic simulation of the dynamic tensile behaviour of concrete based on a rate-dependent cohesive model, *International Journal of Impact Engineering*, 95 (2016), pp. 165–175.
- [20] del Viso, J.R., Carmona, J.R., Ruiz, G.: Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete, *Cement and Concrete Research*, 38 (2008) 3, pp. 386–395.
- [21] Abbas, M.A., Williams, B.A., Heard, W.F., Nie, X.: Residual mechanical properties of high strength concrete BBR9 subjected to dynamic uniaxial compressive loading, *Cement and Concrete Research*, 180 (2024), Article 107488.
- [22] Zhou, X., et al.: Meso-scale numerical simulation of the effect of aggregate strength on damage and fracture of high-strength concrete under dynamic tensile loading, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 122 (2022), Article 103551.
- [23] Guo, Y., Chen, X., Wang, Z., Ning, Y., Bai, L.: Identification of mixed mode damage types on rock-concrete interface under cyclic loading, *International Journal of Fatigue*, 166 (2023).
- [24] Li, N., Zhao, Y., Xing, Y., He, X., Li, H.: Meso-damage analysis of concrete based on X-ray CT in-situ compression and using deep learning method, *Case Studies in Construction Materials*, 18 (2023), Article e02118.
- [25] Sun, Q., Martin, B., Williams, B., Heard, W., Frew, D., Nie, X.: Comparative study on the impact-induced microstructural damage in concrete using X-ray computed micro-tomography, *Mechanics of Materials*, 168 (2022), Article 104277.
- [26] Timmermann, T., Oneshkow, N.: Influence of coarse aggregate type on the damage mechanism in high-strength concrete under compressive fatigue loading, *Structural Concrete*, 20 (2019), pp. 1212–1219.
- [27] Sun, Q., Martin, B., Williams, B., Heard, W., Frew, D., Nie, X.: Comparative study on the impact-induced microstructural damage in concrete using X-ray computed micro-tomography, *Mechanics of Materials*, 168 (2022).
- [28] Sun, Q., et al.: Comparative study of strength-based damage evolution in ultra-high-performance concrete (UHPC) and conventional concrete (CC) under dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, 155 (2021).
- [29] Liu, Z., Jiang, L., Cheng, G., Yan, C., Li, Z.: Size effect on compressive and tensile strength of high-strength concrete, *Science Technology and Engineering*, 15 (2015) 30, pp. 209–213.
- [30] Li, S., Liu, D., Li, X., Kang, H., Wang, L.: Experimental study on length effect of $\varnothing 5$ mm split Hopkinson pressure bar specimens, *Journal of China University of Mining & Technology*, (2010) 1.
- [31] Zhao, P., Lok, T., Lu, G.: Using the Split Hopkinson-Bar to investigate dynamic behavior of SFRC, *Magazine of Concrete Research*, 55 (2003), pp. 183–191.
- [32] Wang, S., Zhang, M.-H., Quek, S.T.: Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading, *Construction and Building Materials*, 31 (2012), pp. 1–11.
- [33] Su, H., Xu, J.: Dynamic compressive behavior of ceramic fiber reinforced concrete under impact load, *Construction and Building Materials*, 45 (2013), pp. 306–313.