

Primljen / Received: 16.1.2021.

Ispravljen / Corrected: 19.9.2021.

Prihvaćen / Accepted: 20.10.2021.

Dostupno online / Available online: 10.3.2023.

Ponašanje betonskih ploča od cementnog morta pri udarnom opterećenju

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **R. Tuğrul Erdem**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Građevinski fakultet

tugrul.erdem@cbu.edu.tr

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Murat Berberoğlu**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Građevinski fakultet

murat.berberoglu@cbu.edu.trIzv.prof.dr.sc. **Engin Gücüyen**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Građevinski fakultet

engin.gucuyen@cbu.edu.tr

Prethodno priopćenje

R. Tuğrul Erdem, Murat Berberoğlu, Engin Gücüyen

Ponašanje betonskih ploča od cementnog morta pri udarnom opterećenju

Na konstrukcije tijekom njihove uporabe mogu djelovati razna udarna opterećenja pa se stoga provode različite metode ispitivanja materijala i konstrukcija udarnim opterećenjem. U ovom se radu istražuje utjecaj udarnog opterećenja na betonske ploče izvedene od cementnog morta. U okviru eksperimentalnog programa ispitano je ukupno devet uzoraka ploča dimenzija 500 x 500 x 50 mm. Pripremljeni uzorci različitih čvrstoća ispitani su metodom padajućeg tereta. Udarna čvrstoća uzoraka određena je na temelju mjerenih vrijednosti ubrzanja, udarnog opterećenja i pomaka. Osim toga, tijekom pokusa određen je i raspored pukotina koje nastaju nakon udarnog opterećenja. Ustanovljeno je da vrsta morta bitno utječe na udarnu čvrstoću uzoraka. Za svaki je uzorak provedena i analiza konačnim elemenatima radi provjere eksperimentalnih rezultata. Na odabranim su uzorcima uspoređene vrijednosti ubrzanja, pomaka i udarnog opterećenja. Prikazan je odnos između eksperimentalnih i numeričkih rezultata, a dobivene vrijednosti pokazuju da se metoda konačnih elemenata može primijeniti u ocjenjivanju dinamičkog odziva uzoraka podvrnutih udarnom opterećenju male brzine.

Ključne riječi:

betonska ploča, ispitivanje padajućim teretom, udarno opterećenje, numerička analiza

Research Paper

R. Tuğrul Erdem, Murat Berberoğlu, Engin Gücüyen

Investigation of concrete slabs made with cement based mortars under impact loads

As structural members can be subjected to impact loading during their service life, impact experiments are applied for various materials and objects by taking different methods into consideration. The effect of impact load on concrete slabs prepared with cement-based mortars is investigated in this study. A total of nine slab specimens measuring 500 x 500 x 50 mm are tested within the experimental program. Test specimens are prepared to provide different strength values and tested under impact load using the drop test setup. The impact resistance values of the specimens are determined based on the acceleration, impact load and displacement values, as obtained by measurement devices. In addition, crack distribution of the specimens is observed during impact tests. It has been noted that mortar types have a significant effect on the impact behaviour of the specimens. The finite element analysis is generated for each specimen to verify experimental results. Time histories of the acceleration, displacement and impact load values of the selected test specimens are compared. The relationship between experimental and numerical analysis results is presented, which reveals that the finite element procedure can be used in the evaluation of dynamic response of test specimens under the low velocity impact loading.

Key words:

concrete slab, drop test setup, impact load, numerical analysis

1. Uvod

Unatoč njegovoj krutosti, beton je materijal koji se danas najviše upotrebljava u građevinskoj industriji. Ipak, novija istraživanja u znanosti o materijalima upućuju na neke prednosti koje su ostvarene u tehnologiji građenja. Mortovi za injektiranje mogu se definirati kao samozbijajući materijali bazirani na cementu. Osim toga, oni se odlikuju visokim vrijednostima čvrstoće. Služe za prekrivanje različitih površina zbog svoje fluidnosti, nepropusnosti i otpornosti na skupljanje. Kratko vrijeme vezivanja postiže se dodavanjem aditiva u strukturu morta. Injekcijski se mortovi mogu stoga bez poteškoća upotrebljavati u kritičnim situacijama kada je potrebna brza ugradnja.

Općenito se utjecaj udara može definirati kao promjena mehaničkih svojstava predmeta pri udarnom momentu. Utjecaj udara istražuje se iz više razloga. Njegov utjecaj na različite materijale i elemente konstrukcija u novije vrijeme analiziraju brojni istraživači, i to naročito vezano za sudare vozila, odrone kamenja, udare projektila, eksplozije, klizanja terena, sudare brodova s naftnim platformama te nesreće zbog rušenja dizalica. Otpornost uzoraka na udar uglavnom se analizira na temelju dobro pripremljenog pokusa s padajućim teretom [1-8]. Učinkovitost takvih pokusa u novije je vrijeme poboljšana zahvaljujući primjeni norme ASTM E 23 u kojoj su zadane granične vrijednosti za ispitivanje padajućim teretom [9].

Nije jednostavno osigurati uvjete ispitivanja koji omogućuju prikladnu analizu ponašanja uzoraka pri udarnom opterećenju. Zbog toga istraživači u novije vrijeme za te potrebe provode numeričke analize [10-17]. Osim toga, kako je udarno opterećenje najmanje proučavana vrsta opterećenja, u literaturi nema mnogo studija o tom utjecaju, naročito u usporedbi s drugim vrstama statičkih i dinamičkih opterećenja. Ispitivanje otpornosti uzoraka na udarno opterećenje obično se provodi pomoću odgovarajuće opreme s mehanizmom za ispuštanje tereta s određene visine [18-23].

Cilj je ovog rada određivanje ponašanja uzoraka podvrgnutih udarnom opterećenju. U tu je svrhu u laboratoriju izrađeno devet ploča od injekcijskog cementnog morta. Korištene su različite vrste injekcijskih mortova kako bi se postigle različite vrijednosti tlačnih čvrstoća. Pripremljen je postav za provedbu eksperimentalnog ispitivanja. U okviru eksperimenta, tereti različitih masa ispuštani su s nekoliko različitih visina, pri čemu najveća visina ispuštanja nije iznosila više od 2500 mm.

Masa čeličnog čekića korištenog za nanošenje udarnog opterećenja iznosila je 4,125 kg, a čekić je ispuštan s visine od 600 mm. Svi su uzorci ispitani pri konstantnoj razini udarne energije. Te su vrijednosti definirane kako bi se mogao pratiti razvoj pukotina i raspodjela oštećenja na uzorcima tijekom provedbe ispitivanja. Čelična ploča visoke čvrstoće dimenzija 50 x 50 x 10 mm korištena je kako bi se spriječilo drobljenje u točki nanošenja udarnog opterećenja, te kako bi se udarno opterećenje ravnomjerno raspodijelilo po uzorku. Osim toga, sloj gume postavljen je između uzorka i čelične ploče kako bi se spriječila lokalizacija naprezanja zbog hrapavosti površine.

Uz spomenuti postav, u ispitivanju su korišteni akcelerometri, linearno varijabilni diferencijalni transformator (LVDT), dinamička doza za mjerenje opterećenja, uređaji za bilježenje podataka i optičke fotočelije kako bi se odredilo ubrzanje, pomak, udarno opterećenje, trajanje pada i broj padova. Eksperiment se provodio do otkazivanja svih uzoraka. Pri ispitivanju praćen je i razvoj oštećenja uzoraka.

U dijelu istraživanja koji se odnosi na numeričku analizu, primjenjen je program za analizu konačnih elemenata Abaqus [24]. U eksplisitnom modulu tog programa provedena je inkrementalna dinamička analiza koja omogućuje postizanje preciznih rezultata. Osim toga, tim se modulom mogu odrediti i neka svojstva materijala. Nakon provođenja numeričkih analiza dobivene su vrijednosti ubrzanja, pomaka i udarnog opterećenja. Zatim je prezentiran usporedni prikaz pomoću dijagrama ubrzanje - vrijeme, pomak - vrijeme, udarno opterećenje - vrijeme i udarno opterećenje - pomak. Smatra se da će ovo ispitivanje biti od koristi u budućim istraživanjima ponašanja uzoraka pri udarnom opterećenju.

2. Eksperimentalno ispitivanje

2.1. Uzorci i materijali

U eksperimentalnom programu koji je proveden u okviru magistarskog rada [25], u laboratoriju je izrađeno devet uzoraka od tri različite vrste cementnih injekcijskih mortova. Uzorci 1-3 proizvedeni su pomoću prve vrste injekcijskog morta, uzorci 4-6 pomoću druge vrste injekcijskog morta, a uzorci 7-9 proizvedeni su pomoću treće vrste injekcijskog morta. Dimenzije uzoraka iznosile su 500 x 500 x 50 mm. Ispitalo se ponašanje uzoraka pri udarnom opterećenju. Vrijednosti mase i visine pada čekića usvojene su kao konstantne vrijednosti, a čvrstoće uzoraka usvojene su kao varijable. Svojstva mortova korištenih u izradi uzoraka prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva korištenih mortova

Svojstvo	Tip 1	Tip 2	Tip 3
Kemijski sastav	cement	cement	cement
Oblik/boja	prašina/siva	prašina/siva	prašina/siva
Količina vode [l] (za vreću od 25 kg)	2,27 – 3,50	2,75 – 3,25	2,5
Temperatura primjene [°C]	0 - 25	5 - 30	2 – 35
Tlačna čvrstoća [N/mm ²]	30 - 35 (nakon jednog dana)	≥ 60 (nakon 28 dana)	≥ 90 (nakon 28 dana)

Za izradu uzoraka prethodno su pripremljena tri različita tipa mortova. Homogene mješavine za svaki tip morta izlivena su u kalupe kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Injekcijski mortovi

Za izradu uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće korišteni su čelični kalupi dimenzija 40x40x120 mm. Kao što se vidi na slici 2., uzorci su formirani lijevanjem iz svake od mješavina. Svi su uzorci čuvani u laboratorijskim uvjetima u potrebnom razdoblju njege.



Slika 2. Ispitni uzorci

Određena je tlačna čvrstoća za ukupno 27 ispitnih uzoraka dobivenih iz devet ploča. Nakon toga su na temelju rezultata ispitivanja kocaka izračunane prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće. Te su vrijednosti prikazane u tablici 2.

Tablica 2. Vrijednosti tlačne čvrstoće

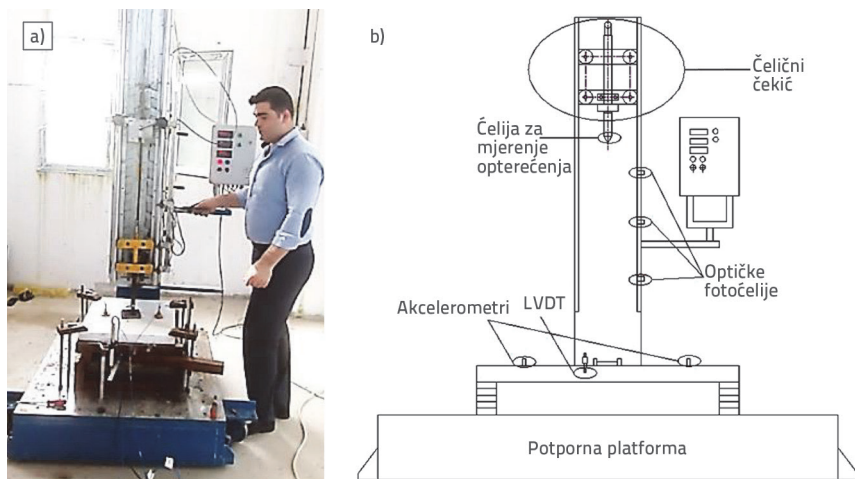
Ispitni uzorak	Uzorak ploče	Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka [N/mm ²]			Prosječna tlačna čvrstoća [N/mm ²]
		1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9	
S1	1, 2, 3	33,06	30,56	31,73	31,78
S2	4, 5, 6	30,45	29,70	31,69	30,61
S3	7, 8, 9	29,28	31,54	30,16	30,33
S4	10, 11, 12	66,59	64,18	65,91	65,56
S5	13, 14, 15	63,41	64,95	66,39	64,92
S6	16, 17, 18	66,74	65,19	67,98	66,64
S7	19, 20, 21	91,14	93,65	94,68	93,16
S8	22, 23, 24	93,41	91,55	92,62	92,53
S9	25, 26, 27	94,13	92,29	95,63	94,02

2.2. Uređaji za provedbu ispitivanja

Ispitivanje udarnim opterećenjem provedeno je pomoću postava koji je projektiran za ispitivanje ponašanja uzoraka pri naglom opterećenju udarom. Prema podacima iz literature [1-7], mnogi istraživači koriste ovakve postave u udarnim ispitivanjima. U ovom se ispitivanju udarno opterećenje nanosi čeličnim čekićem. Visina s koje se čekić ispušta može varirati do 2500 mm, pa se tak uzorci mogu izlagati različitim udarnim energijama. Čekić dimenzija 200x200 mm postavlja se između dvije vodilice. Razmak između vodilica iznosi 200 mm. Čekić je spojen s uređajem pomoću četiri elementa koji nalikuju kotačima. Ti su elementi izrađeni od "castermida" kako bi se na minimum svelo trenje tijekom udarnih ispitivanja. Podloga postava teži gotovo 500 kg, a izrađena je od čeličnih ploča velike čvrstoće. Kada se postavi na tlo, dimenzije te podloge iznose 1000x1000x200 mm. Uzorci se pridržavaju pomoću čeličnih podupora. Dimenzije tih podupora iznose 50x50x500 mm. Njima se sprječava horizontalno i vertikalno pomicanje na bočnim stranama uzorka.

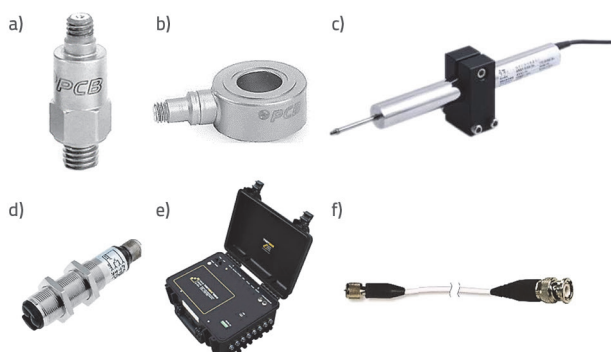
U ovom eksperimentalnom ispitivanju koriste se sljedeći mjerni uređaji: akcelerometar, LVDT, dinamička doza za mjerenje opterećenja, uređaj za bilježenje podataka i optičke fotočelije. Na slici 3. shematski je prikazan postav ispitivanja s mjernim uređajima.

Udarno se opterećenje nanosi na sredinu uzorka. Čelična ploča velike čvrstoće debljine 10 mm i sloj od neoprenske gume debljine 5 mm postavljaju se na kontaktu između



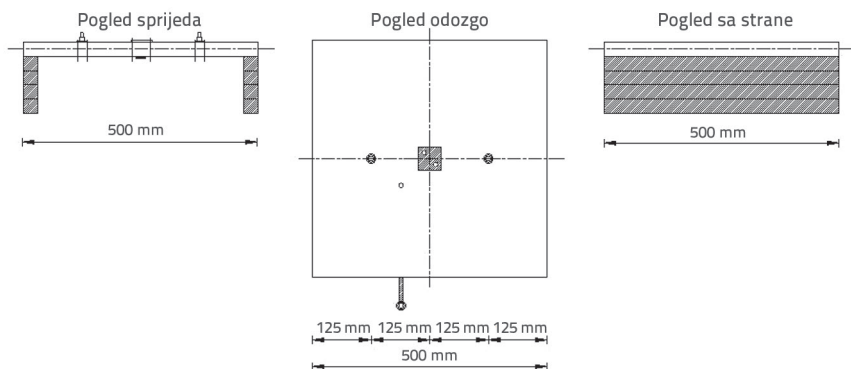
Slika 3. Postav ispitivanja: a) Mjerni uređaji; b) Shematski prikaz

čekića i uzorka. Na taj se način sprječava lokalno pucanje na kontaktnoj površini te se opterećenje ravnomjerno raspoređuje po uzorku.



Slika 4. Oprema za udarna ispitivanja: a) Akcelerometar; b) Čelija za mjerenje opterećenja; c) LVDT; d) Optička fotočelija; e) Uređaj za bilježenje podataka; f) Spojni kabel

Pijezoelektrični akcelerometri tipa ICP simetrično se raspoređuju po uzorcima i to 125 mm od točke udara. Tak se brzo i bez gubitka mogu izmjeriti vrijednosti ubrzanja i vibracije. Osim toga, akcelerometri imaju konstantnu naponsku



Slika 5. Pozicija opreme za ispitivanje na uzorku

osjetljivost, pa tak čak i negativni uvjeti okoline ne utječu na kvalitetu signala akcelerometra. Raspon mjerenja tih akcelerometara iznosi $\pm 4905 \text{ m/s}^2$, a radna temperatura je u rasponu od -18 do $+66 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pomaci se mjere uređajem LVDT za svako ispuštanje čeličnog čekića. LVDT-om se mehaničko kretanje čekića pretvara u električne signale. LVDT je fiksiran ispod uzorka oko točke udara. Mjerna baza varira u rasponu od -18 do $+66 \text{ }^\circ\text{C}$.

Udarno opterećenje mjeri se dinamičkom dozom tipa ICP koja se postavlja na rubni dio čekića. Ta se doza tijekom svakog ispusta pomiče zajedno s čekićem. Osim

toga, njoms se mogu u kratkom vremenu odrediti veliki signali s malim valovima. Raspon mjerenja te čelije iznosi do 88,96 kN, a radna temperatura joj varira od -54 do $+121 \text{ }^\circ\text{C}$.

U ovako postavljenom ispitivanju, optičke fotočelije imaju dva osnovna zadatka. Prvi je uključivanje zaustavnog mehanizma. Zbog toga se uzorak opterećuje samo jednom. Dakle, sprječava se drugi prijenos opterećenja s čeličnog čekića na uzorak nakon odskoka čekića. Drugi zadatak je mjerenje vremena pada i broja ispusta. Te se vrijednosti mogu vidjeti na elektroničkom ekranu nakon svakog pada čeličnog čekića.

Tijekom udarnog ispitivanja primjenjuju se posebni dinamički sustavi za bilježenje podataka jer se na uzorke nanosi naglo dinamičko opterećenje. Raspon mjerenja tog sustava je 138 dB, maksimalna brzina uzorkovanja je 16 kHz, rezolucija ADC iznosi 24 bita, a ulazna snaga je 12 vdc. Radna temperatura ovog uređaja varira u rasponu od -20 do $+55 \text{ }^\circ\text{C}$. Oprema korištena u ovom ispitivanju prikazana je na slici 4. Razmještaj uređaja za ispitivanje prikazan je na slici 5.

3. Eksperimentalni rezultati

Udarne se ispitivanja provode nakon postavljanja uzorka u odgovarajući položaj. Na uzorke se nanosi ista količina udarne energije ($4,125 \times 9,81 \times 0,6 = 24,28$ džula), a masa i visina pada su konstantni. Čelični se čekić podiže do zadane visine gdje ga u tom položaju drži mehanizam s magnetskim sustavom pridržavanja. Nakon toga se čekić ispušta te se na uzorak nanosi udarno opterećenje. Prije samog pokusa uzorci se obojaju bijelom bojom kako bi se jednostavnije mogla uočiti pojava i razvoj pukotina i oštećenja. U eksperimentalni program uključena je i podloga za uzorak. Radi ilustracije, uzorak S5 prikazan je na slici 6.

Tablica 3. Eksperimentalni rezultati

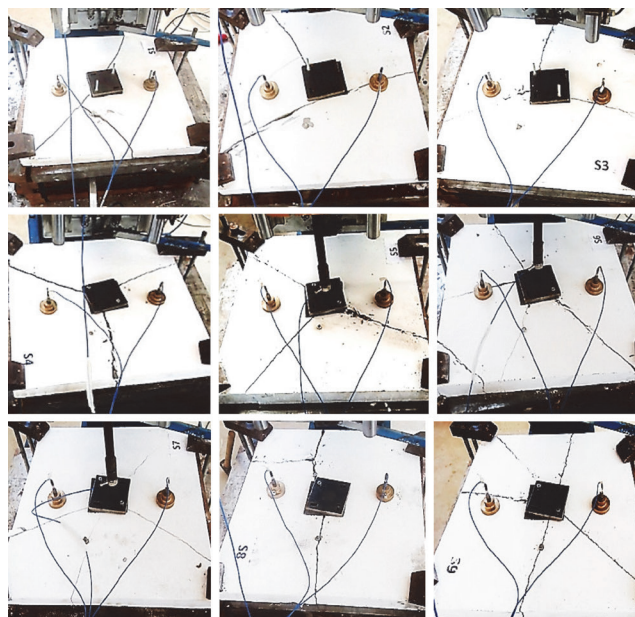
Uzorak br.	Ubrzanje s lijeve strane [m/s ²]		Ubrzanje s desne strane [m/s ²]		Maks. pomak [mm]	Maks. udarno opterećenje [N]
S1	- 813,64	736,30	- 794,41	723,72	8,90	18130,52
S2	- 693,24	741,88	- 736,68	677,56	8,52	18007,19
S3	- 730,50	690,02	- 685,93	719,34	9,04	17586,96
S4	- 980,60	938,97	- 962,56	935,17	7,07	21303,43
S5	- 958,80	1017,24	- 994,61	937,49	6,90	20976,14
S6	- 977,64	996,26	- 936,42	978,83	7,26	22045,69
S7	- 1363,03	1228,97	- 1213,58	1284,62	6,17	25243,09
S8	- 1176,24	1260,10	- 1163,42	1208,74	6,32	24946,20
S9	- 1255,95	1384,60	- 1249,04	1345,53	5,98	25534,37



Slika 6. Uzorak S5

Ispitivanje se provodi dok ne dođe do sloma svakog uzorka. LVDT-om se mjeri maksimalna vrijednost pomaka u stanju sloma, tj. kada uzorak više ne može izdržati udarno opterećenje. U takvoj situaciji dijelovi morta se počnu djelomično odvajati. Stanje sloma uzoraka na kojima je proveden pokus prikazano je na slici 7.

U okviru eksperimentalnog programa izmjerene su vrijednosti ubrzanja, pomaka i udarnog opterećenja kako bi se odredilo opće ponašanje uzoraka pri udarnom opterećenju [25]. Vrijednosti minimalnog i maksimalnog ubrzanja, maksimalnog pomaka i udarnog opterećenja prikazane su u tablici 3. Kako su vrijednosti ubrzanja izmjerene pomoću dva simetrična akcelerometra, lijeve i desne vrijednosti ubrzanja kod svakog su uzorka podjednake.



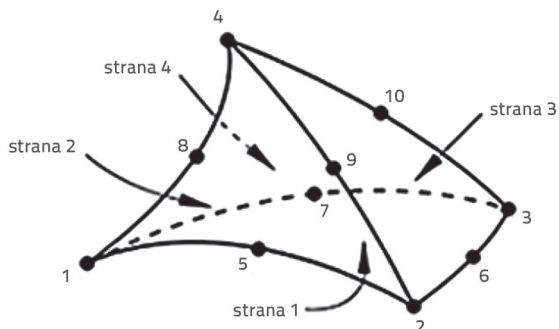
Slika 7. Uzorci nakon sloma

Optičkim fotočelijama, koje su postavljene duž putanje pada, mjeri se broj ispusta i trajanje pada. Te se vrijednosti prikazuju na elektroničkom ekranu. Kako se na uzorke nanosi ista količina udarne energije, koja je odraz mase i visine pada čekića, za uzorke su dobivene podjednake vrijednosti trajanja pada. Prosječna vremena pada razlikovala su se za 374 do 385 milisekundi. S druge strane, broj ispusta do sloma uzorka razlikovao se zbog razlika u tlačnoj čvrstoći uzoraka. U tom smislu, najveći broj ispusta zabilježen je kod uzoraka S7, S8 i S9 koji su izvedeni s trećom vrstom morta (tip 3).

4. Numerička analiza

U numeričkoj analizi, modeli konačnih elemenata uzoraka generiraju se pomoću programa Abaqus. Abaqusovim eksplicitnim modulom može se provoditi inkrementalna dinamička analiza u slučajevima kada dolazi do naglih udarnih opterećenja. Osim toga, u programu su sadržani i brojni modeli

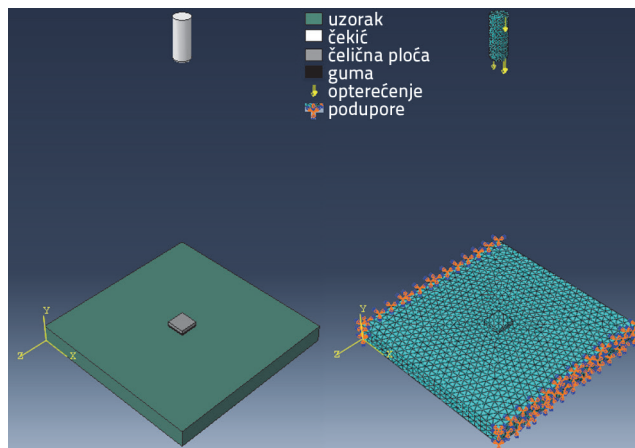
materijala, a obuhvaćene su i razne karakteristike sloma. U novije se vrijeme taj program primjenjuje za istraživanje ponašanja elemenata konstrukcije pri različitim vrstama opterećenja. U prvom se koraku programom modeliraju uzorci, čelična ploča i gumeni sloj. U tu se svrhu koriste trodimenzionalni elementi modificiranog tetraedra s deset čvorova (C3D10M) koji često služe za simuliranje udarnog opterećenja konstrukcijskih elemenata. Izgled elemenata C3D10M prikazan je na slici 8.



Slika 8. Slom uzoraka

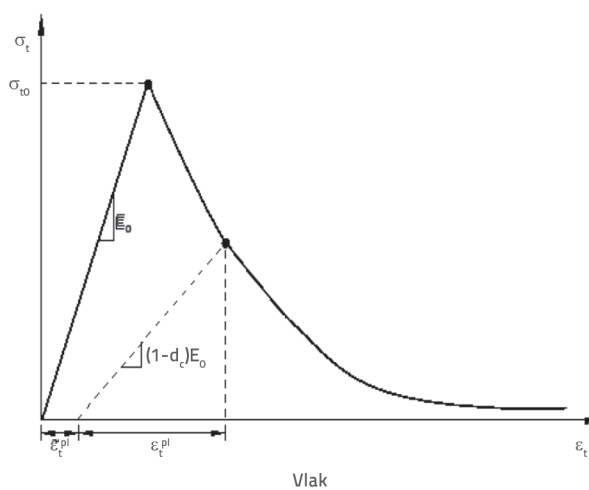
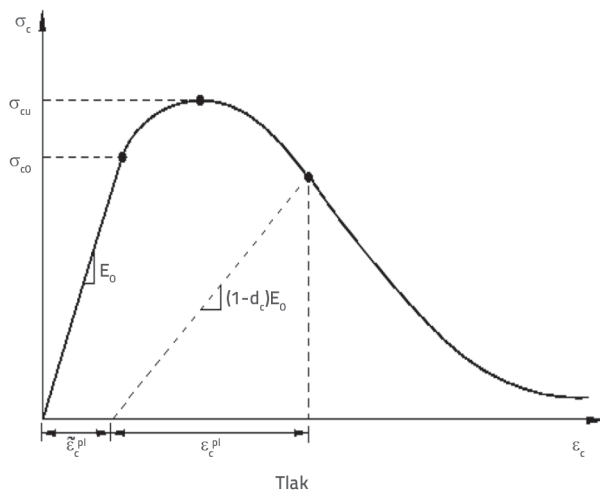
Veličine mreža i vremenski intervali značajni su parametri koji izravno utječu na numeričke rezultate. Stoga se ti parametri smatraju značajnim dijelovima inkrementalne dinamičke analize. Definiranje mreže provedeno je kako bi se modeli konačnih elemenata podijelili u manje segmente. Osim toga, primijenjeni su i manji vremenski intervali kako bi rezultati bili što precizniji. Provedeno je i odgovarajuće ispitivanje kako bi se odredila veličina mreže i vremenski intervali uzimajući u obzir vrijeme potrebno za izračunavanje. Konačno je u analizi usvojena veličina mreže od 20 mm te vremenski intervali od 2×10^{-8} s. Za uzorke su korištena 20893 čvora i 13075 elementa, za čekić 4614 čvora i 2897 elementa, a za gumu i ploču 273 čvora i 128 elemenata. Prihvaćeno je da su uvjeti podupiranja uzoraka slični onima koji su primijenjeni u eksperimentu, te su stoga takvi uvjeti i usvojeni uzimajući u obzir rubne uvjete u horizontalnom, vertikalnom i uzdužnom smjeru. Kako se radi o problemu ispitivanja

slobodnog pada, te kako se udarno opterećenje nanosi čekićem u vertikalnom smjeru, razmatrano je samo vertikalno kretanje čekića, a nikakve vanjske sile – osim sile teže – nisu uzete u obzir. Model konačnih elemenata za uzorak br. 1 prikazan je na slici 9. i to prije i nakon definiranja mreže.



Slika 9. Model konačnih elemenata za uzorak br. 1

Kako se utjecaj trenja ne može posve zanemariti, usvojeno je da koeficijent trenja na kontaktnim površinama iznosi 0,02. Geometrijski su spojevi usvojeni primjenom interakcijskog svojstva korištenog programa. Za ove je potrebe primijenjeno svojstvo kontakta između površina čekića i uzorka. Pritom je površina čekića kojom se nanosi udarno opterećenje definirana kao glavna površina (eng. master), a površina uzorka definirana je kao pomoćna površina (eng. slave). Definirana su materijalna svojstva betonske ploče, gumenog sloja, čeličnog čekića i čelične ploče te su im dodijeljene odgovarajuće geometrijske značajke. CDP model (eng. Concrete Damage Plasticity) korišten je za definiranje betonskih ploča na bazi cementa. U tom je modelu ponašanje definirano i u tlačnom i u vlačnom području, kao što se to vidi na slici 10. U tlačnom je području putanja linearna sve do vrijednosti početnog popuštanja



Slika 10. Materijalni model za ploče

σ_{co} . Međutim, ponašanje se mijenja u plastičnom području. Dolazi do očvršćivanja nakon kojeg slijedi omekšavanje nakon graničnog naprezanja σ_{cu} . U vlačnom području, taj odnos karakterizira linearno elastično ponašanje sve do vrijednosti naprezanja σ_{to} . Nakon te točke, formiraju se mikropukotine i dolazi do omekšavanja u dijagramu naprezanje-deformacije.

Tablica 4. Materijalna svojstva ploča

Svojstvo	Vrijednost
Poissonov koeficijent	0,20
Gustoća [kg/m ³]	2400
Ψ	30
E	0,10
σ_{bo}/σ_{co}	1,16
K_c	0,6667
m	0,0001

Tablica 5. Svojstva čelika i gume

Svojstvo	Čekić i ploča	Guma
Poissonov koeficijent	0,30	0,45
Gustoća [kg/m ³]	7850	1230
Modul elastičnosti [MPa]	200000	22
Posmični modul [MPa]	76923	7,59
Modul kompresije [MPa]	166670	73,33

Postoje i drugi značajni parametri plastičnosti kao što su kut dilatacije, ekscentričnost, odnos početnog dvoosnog tlačnog naprezanja pri popuštanju i početnog jednoosnog tlačnog

naprezanja pri popuštanju, koeficijent oblika i viskoznost. Ti se parametri primjenjuju za definiranje funkcije plohe popuštanja, potencijala tečenja i viskoznosti materijala te tlačnog i vlačnog ponašanja, a redom se za to koriste oznake (ψ), (e), (σ_{bo}/σ_{co}), (K_c) i (μ). Osim tih parametara, definiran je modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, gustoća, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća. Za graničnu deformaciju betona (ϵ_{cu}) usvojena je vrijednost od 0,03. Jednadžba ($E_c = 4700\sqrt{f_c}$) primjenjuje se za izračunavanje modula elastičnosti, a jednadžba ($f_t = 0.623\sqrt{f_c}$) za izračunavanje vlačne čvrstoće. Za svaki su uzorak zasebno definirane vrijednosti modula elastičnosti, tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće. Ostale materijalne karakteristike betonskih ploča na bazi cementa prikazane su u tablici 4.

Nakon definiranja materijalnih karakteristika ploča, programom su definirana i svojstva gumenog sloja, čeličnog čekića i čelične ploče. Za to su korišteni linearno elastični modeli materijala. Odgovarajuće vrijednosti prikazane su u tablici 5.

U završnoj fazi numeričkog ispitivanja provedena je inkrementalna dinamička analiza na tri ploče koje su imale najviše prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće u svakoj vrsti morta. Dakle, u provjeri eksperimentalnih rezultata primijenjeni su rezultati numeričke analize na uzorcima 1, 6 i 9. Nakon numeričke analize, programom je definirano minimalno i maksimalno ubrzanje, maksimalni pomak te udarno opterećenje. Usporedba minimalnih i maksimalnih ubrzanja prikazana je u tablici 6., a vrijednosti maksimalnog pomaka i udarnog opterećenja uspoređene su u tablici 7.

Kako bi se utvrdio odnos između eksperimentalnih i numeričkih rezultata, za odabrane su ploče prikazani vremenski zapisi ubrzanja, pomaka i udarnog opterećenja. Osim toga, prikazane su i krivulje opterećenje – pomak uzimajući u obzir iste vremenske intervale za vrijednosti udarnog opterećenja i pomaka. Krivulje

Tablica 6. Usporedba rezultata ubrzanja

Uzorak br.	Ubrzanje [m/s ²]				Odnos*	Odnos**
	Eksperimentalne vrijednosti		Numeričke vrijednosti			
S1	- 813,64	736,30	- 781,92	831,26	1,04	0,89
S6	- 977,64	996,26	- 945,38	918,67	1,03	1,08
S9	- 1255,95	1384,60	- 1187,26	1264,52	1,06	1,09
Prosjeak					1,04	1,02

*Odnos eksperimentalnih i numeričkih rezultata minimalnih vrijednosti ubrzanja
** Odnos eksperimentalnih i numeričkih rezultata maksimalnih vrijednosti ubrzanja

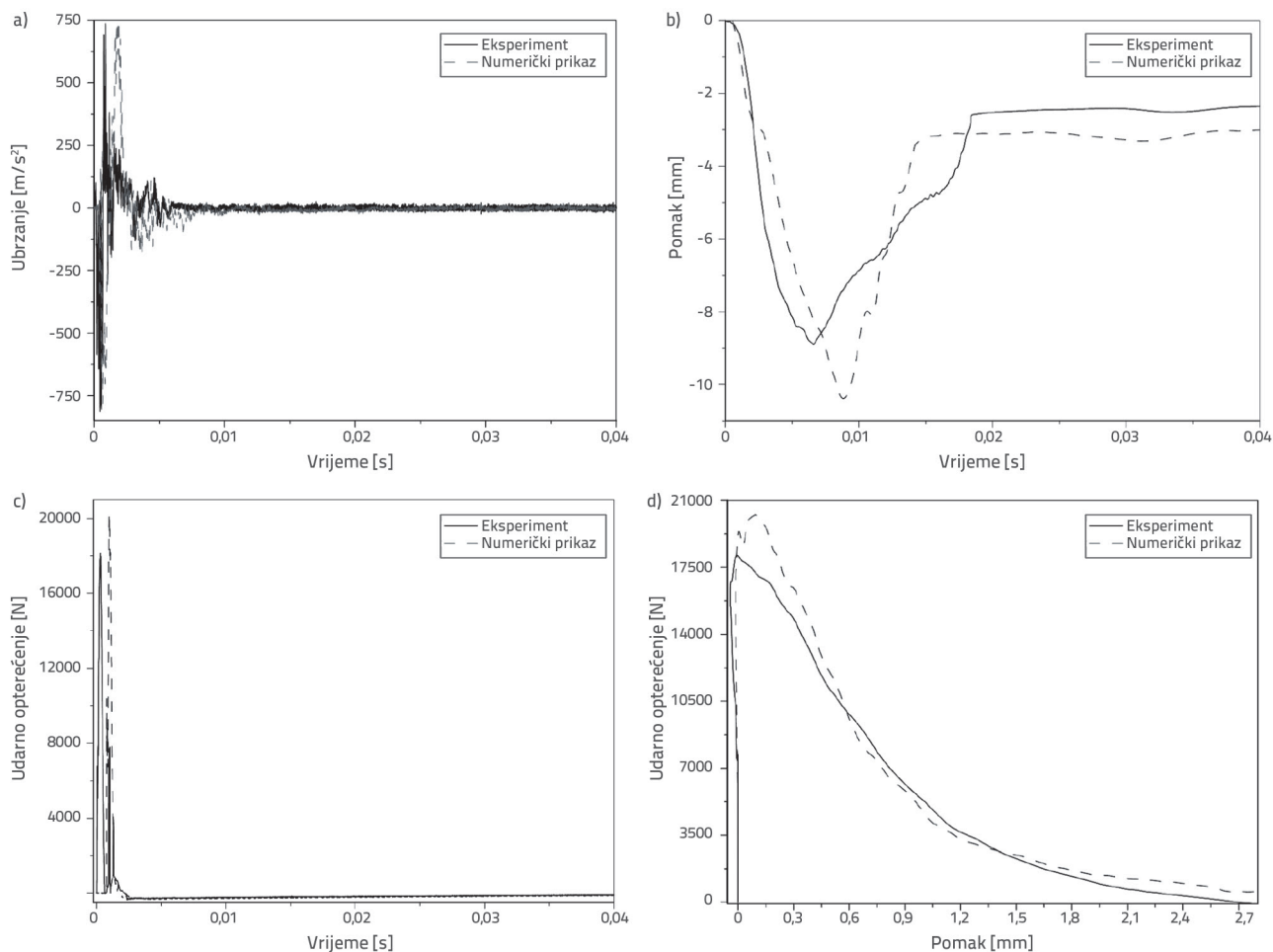
Tablica 7. Usporedba rezultata pomaka i udarnog opterećenja

Uzorak br.	Pomak [mm]		Odnos***	Udarno opterećenje [N]		Odnos****
	Eksperimentalne vrijednosti	Numeričke vrijednosti		Eksperimentalne vrijednosti	Numeričke vrijednosti	
S1	8,90	10,38	0,88	18130,52	20254,41	0,90
S6	7,26	8,16	0,90	22045,69	22964,37	0,96
S9	5,98	6,35	0,94	25534,37	24086,52	1,06
Prosjeak			0,91	Prosjeak		0,97

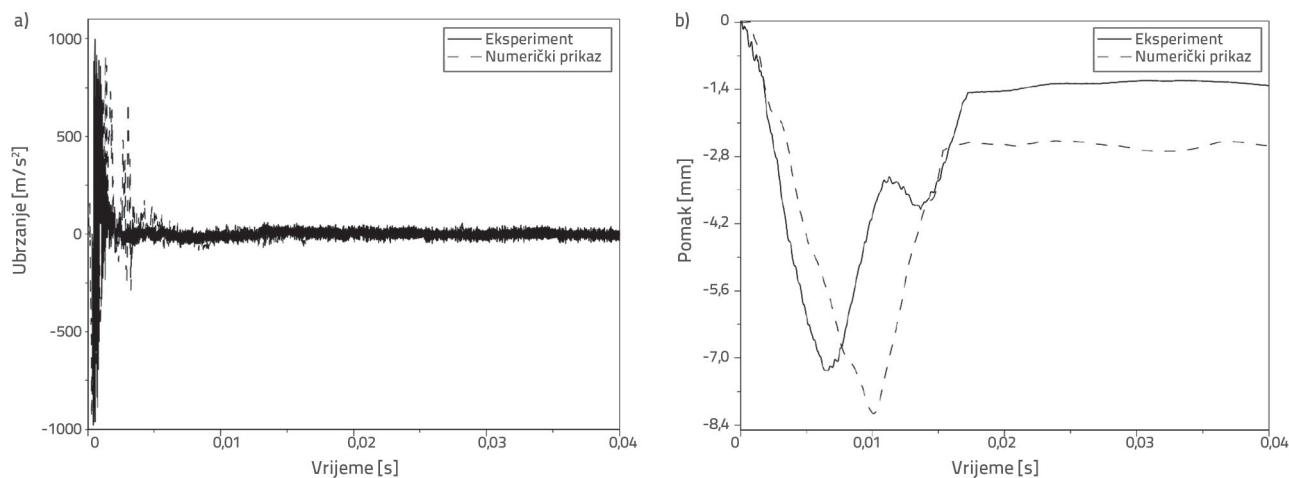
*** Odnos eksperimentalnih i numeričkih rezultata maksimalnih vrijednosti pomaka
**** Odnos eksperimentalnih i numeričkih rezultata maksimalnih vrijednosti udarnog opterećenja

ubrzanje-vrijeme, pomak-vrijeme, udarno opterećenje-vrijeme i udarno opterećenje-pomak prikazane su na slikama 11. do 13. za prvi pad čekića kod odabranih uzoraka.

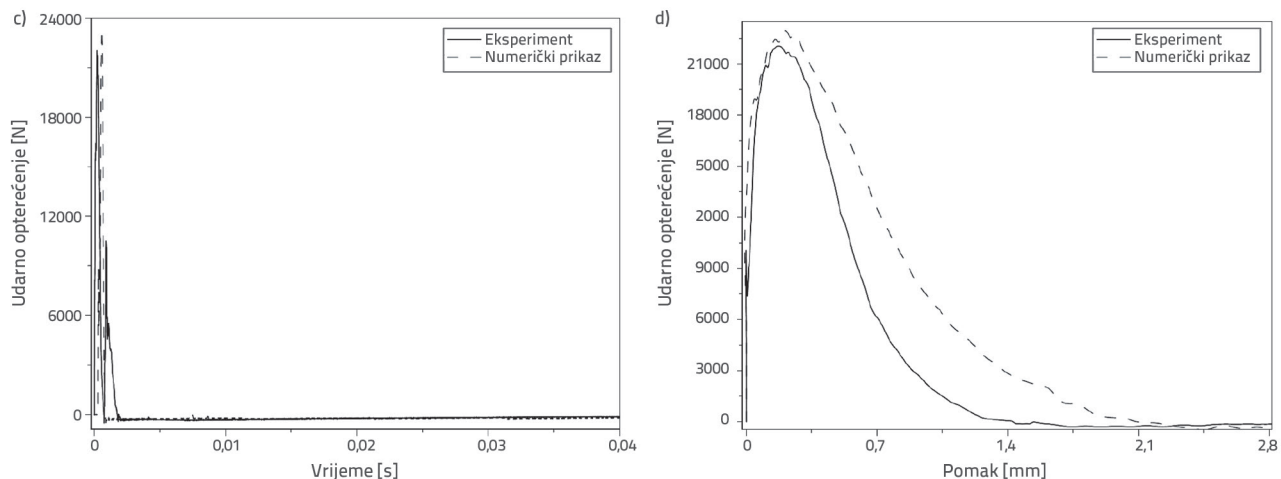
Na kraju je primijenjena funkcija oštećenja kako bi se dobio uzorak raspodjele oštećenja (slika 14.). Tom se funkcijom dobivaju ujednačeni rezultati u postupku određivanja pukotina na uzorcima



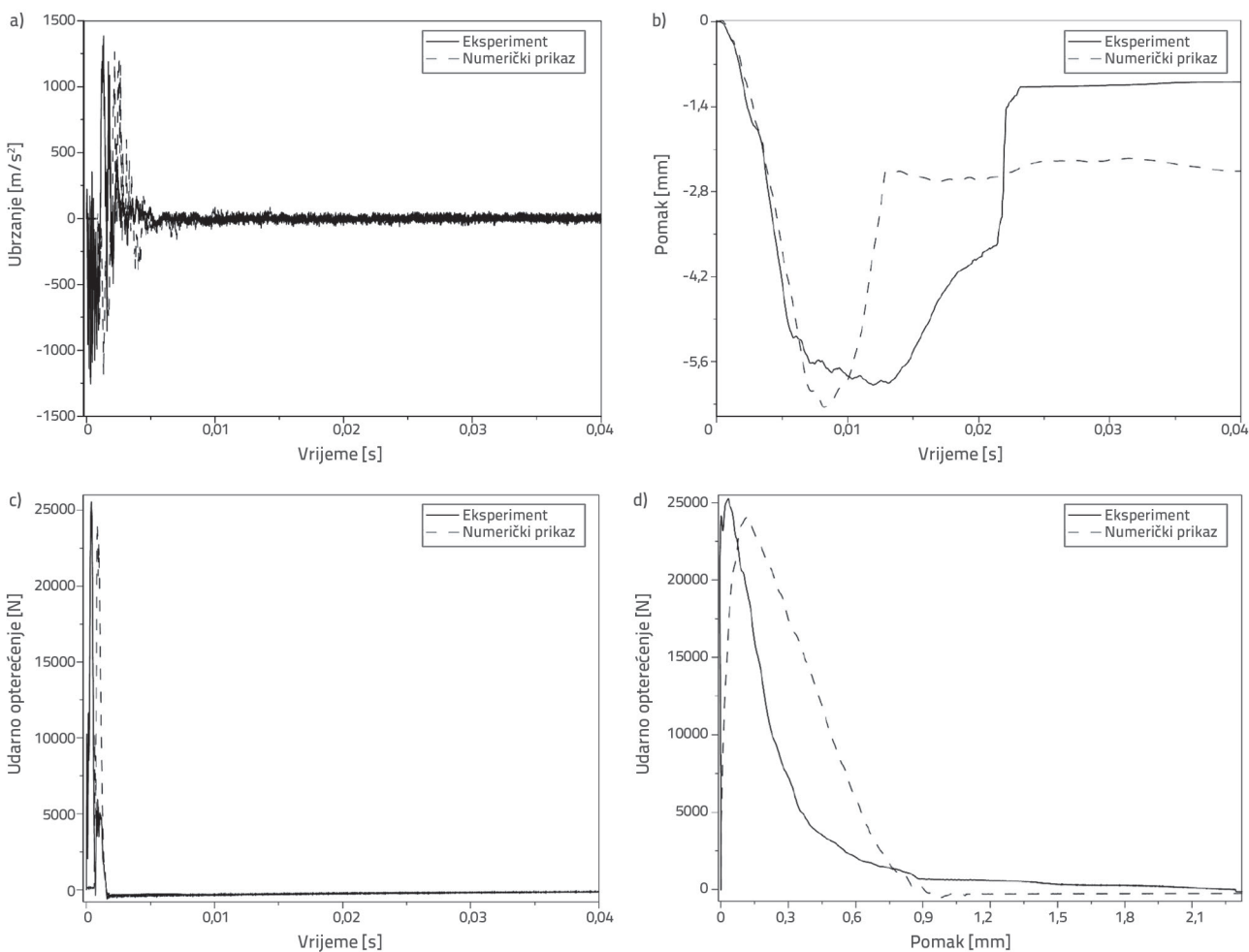
Slika 11. Dijagrami za uzorak S1: a) Dijagram ubrzanje – vrijeme; b) Dijagram pomak – vrijeme; c) Dijagram udarno opterećenje – vrijeme; d) Dijagram udarno opterećenje - pomak



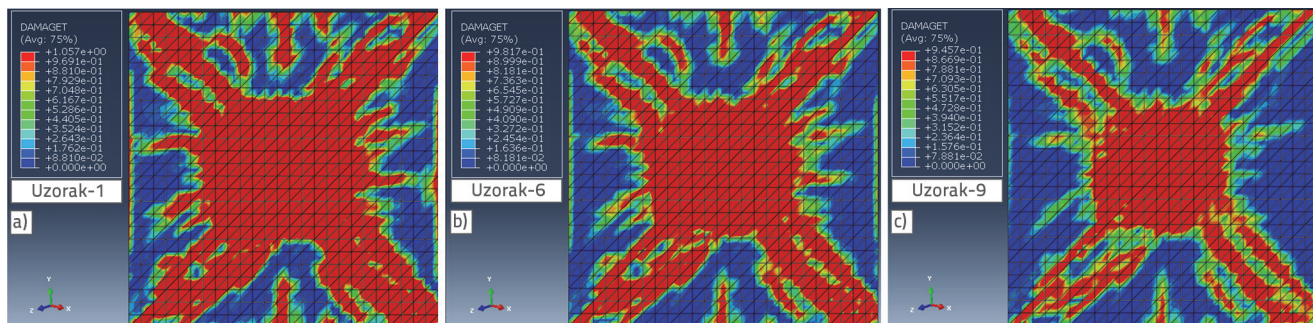
Slika 12. Dijagrami za uzorak S6: a) Dijagram ubrzanje – vrijeme; b) Dijagram pomak – vrijeme (prvi dio slike)



Slika 12. Dijagrami za uzorak S6: c) Dijagram udarno opterećenje – vrijeme; d) Dijagram udarno opterećenje - pomak (drugi dio slike)



Slika 13. Dijagrami za uzorak S9: a) Dijagram ubrzanje – vrijeme; b) Dijagram pomak – vrijeme; c) Dijagram udarno opterećenje – vrijeme; d) Dijagram udarno opterećenje – pomak



Slika 14. Uzorak raspodjele oštećenja po pločama: a) Numerički raspored za uzorak 1; b) Numerički raspored za uzorak 6; c) Numerički raspored za uzorak 9

izloženim udarnom opterećenju [26]. Oštećenja su koncentrirana oko sredine ploča, tj. na mjestu nanošenja opterećenja, odakle se oštećenja šire prema poduporama. Može se također uočiti da na raspored oštećenja utječe krutost uvjetovana vrijednošću tlačne čvrstoće.

4. Zaključak

Djelovanje udara uglavnom nastupa kada predmet određene brzine kratko udari u drugi predmet koji se nalazi u stabilnom položaju. Zbog naglog udarnog momenta, mijenjaju se svojstva materijala ili konstrukcijskih elemenata. Osnovni razlozi zbog kojih se analizira utjecaj udara jesu nesreće poput prirodnih nepogoda, prometnih nezgoda i eksplozija kakve se u današnje vrijeme mogu očekivati. Deformacije i pojava pukotina zbog velikih naprezanja koja se javljaju u trenutku udara istražuju se pomoću posebno projektiranih postava za ispitivanje udarnog opterećenja.

Cilj je ovog istraživanja određivanje dinamičkog odziva na naglo udarno opterećenje kojemu su podvrgnute ploče dimenzija 500 x 500 x 50 mm izrađene od raznih vrsta injekcijskih mortova. Projektiran je odgovarajući postav za ispitivanje udarnog opterećenja, a pri ispitivanju se na uzorke nanosila konstantna razina udarne energije. Uz to su korišteni i mjerni uređaji pomoću kojih je u eksperimentu određeno ubrzanje, pomak, udarno opterećenje i trajanje pada. U eksperimentalnom se ispitivanju pratio i razvoj oštećenja uzoraka.

Eksperimentalne vrijednosti ubrzanja pokazuju da krutost uzoraka bitno utječe na rezultate mjerenja. Maksimalno ubrzanje

registrirano je na uzorku S9 koji ima najvišu vrijednost tlačne čvrstoće. Ista je tendencija uočena i kod mjerenja udarnog opterećenja. Naime, vrijednosti udarnog opterećenja rastu s porastom tlačne čvrstoće. Najviše su vrijednosti zabilježene kod uzoraka izrađenih iz treće vrste morta.

Kada su u okviru eksperimentalnog programa mjerene vrijednosti pomaka, najveći je pomak zabilježen na uzorku S1 koji ima najnižu tlačnu čvrstoću. Također su prikazane i krivulje opterećenje – pomak kako bi se utvrdila povezanost između vrijednosti udarnog opterećenja i pomaka. Tak su dobivene vrijednosti energetskog kapaciteta uzoraka. Može se uočiti da duktilnost pada s povećanjem krutosti uzoraka.

Tijekom ispitivanja udarnog opterećenja bilježene su i vrijednosti trajanja pada i broj ispusta čekića. Kako su udarna ispitivanja provedena za istu razinu energije udara, može se uočiti da su vrijednosti trajanja pada vrlo slične. S druge strane, maksimalni brojevi ispusta dobiveni su za uzorke S7, S8 i S9 čije su vrijednosti tlačne čvrstoće više u usporedbi s ostalim uzorcima.

U numeričkom dijelu ispitivanja provedena je inkrementalna dinamička analiza kako bi se odredilo ponašanje ploča za svaku vrstu morta. Softverskim su programom utvrđene vrijednosti ubrzanja, pomaka, udarnog opterećenja i razvoja oštećenja. Uočene su, međutim, i manje pogreške. Smatra se da je do tih pogrešaka došlo zbog unutarnjih pukotina, utjecaja trenja te zbog manjih pomaka podupora tijekom provođenja eksperimenta. Stoga se na kraju može zaključiti da se predloženi model konačnih elemenata može primjenjivati za istraživanje općeg ponašanja cementno betonskih ploča izloženih udarnom opterećenju.

LITERATURA

- [1] Ranade, R., Li, V.C., Heard, V.F., Williams, B.A.: Impact resistance of high strength-high ductility concrete. *Cement and Concrete Research*, 98 (2017), pp. 24-35.
- [2] Yılmaz, T., Kiraç, N., Anil, Ö., Erdem, R.T., Sezer, C.: Low velocity impact behaviour of two way rc slab strengthening with cfrp strips. *Construction and Building Materials*, 186 (2018), pp. 1046-1063.
- [3] Anil, Ö., Erdem, R.T., Tokgöz, M.N.: Investigation of lateral impact behavior of rc columns. *Computers and Concrete*, 12 (2018) 1, pp. 123-132.
- [4] Hering, M., Bracklow, F., Kühn, T., Curbach, M.: Impact experiments with reinforced concrete plates of different thicknesses. *Structural Concrete*, 21 (2020) 2, pp. 587-598.

- [5] Feng, S., Zhou, Y., Wang, Y., Lei, M.: Experimental research on the dynamic mechanical properties and damage characteristics of lightweight foamed concrete under impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 140 (2020), pp. 1-10.
- [6] Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A B.: Statistical variations in impact resistance of steel fiber-reinforced concrete subjected to drop weight test, *Cement and Concrete Research*, 29 (1999) 7, pp. 989-995.
- [7] Wang, B., Chen, Y., Fan, H., Jin, F.: Investigation of low-velocity impact behaviors of foamed concrete material, *Composites: Part B Engineering*, 162 (2019), pp. 491-499.
- [8] Xu, X., Ma, T., Ning, J.: Failure mechanism of reinforced concrete subjected to projectile impact loading, *Engineering Failure Analysis*, 96 (2019), pp. 468-483.
- [9] ASTM E23-00, Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2002).
- [10] Erdem, R.T., Gücüyen, E.: Non-linear analysis of reinforced concrete slabs under impact effect, *Građevinar*, 69 (2017) 6, pp. 479-487, <https://doi.org/10.14256/JCE.1557.2016>
- [11] Arros, J., Doumbalski, N.: Analysis of Aircraft Impact to Concrete Structures, *Nuclear Engineering and Design*, 237 (2007), pp.1241-1249.
- [12] Delhomme, F., Mommessin, M., Mougin, J.P., Perrotin, P.: Simulation of a Block Impacting a Reinforced Concrete Slab with a Finite Element Model and a Mass-Spring System, *Engineering Structures*, 29 (2007) 11, pp. 2844-2852.
- [13] Kostaski, L.E., Riera, J.D., Iturrioz, I., Singh, R.L., Kant, T.: Analysis of Reinforced Concrete Plates Subjected to Impact Employing the Truss-Like Discrete Element Method, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38 (2015) 3, pp. 276-289.
- [14] Mokhatar, S.N., Abdullah, R.: Computational Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Impact Loads, *International Journal of Integrated Engineering*, 4 (2012) 2, pp. 70-76.
- [15] Tai, Y.S., Tang, C.C.: Numerical simulation: The Dynamic Behaviour of Reinforced Concrete Plates under Normal Impact, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 45 (2006), pp. 117-127.
- [16] Mokhatar, S.N., Abdullah, R., Kueh, A.B.H.: Computational impact responses of reinforced concrete slabs, *Computers and Concrete*, 12 (2013) 1, pp. 37-51.
- [17] Yankelevsky, D.Z.: Local response of concrete slabs to low velocity missile impact, *International Journal of Impact Engineering*, 19 (1997) 4, pp. 331-343.
- [18] Hrynyk, T.D., Vecchio, F.J.: Behavior of steel fiber-reinforced concrete slabs under impact load, *ACI Structural Journal*, 111 (2014) 5, pp. 1213-1224.
- [19] Radnic, J., Matešan, D., Grgic, N., Baloevic, G.: Impact testing of RC slabs strengthened with CFRP strips, *Composite Structures*, 121 (2015), pp. 90-103.
- [20] Xiao, Y., Li, B., Fujikake, K.: Behavior of reinforced concrete slabs under low velocity impact, *ACI Structural Journal*, 114 (2017) 3, pp. 643-650.
- [21] Zineddin, M., Krauthammer, T.: Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 34 (2007), pp. 1517-1534.
- [22] Zhang, M.H., Shim, V.P.W., Lu, G., Chew, C.W.: Resistance of high-strength concrete to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 31 (2005) 7, pp. 825-841.
- [23] Micallef, K., Sagasetta, J., Ruiz, M.F., Muttoni, A.: Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 71 (2014), pp. 17-33.
- [24] ABAQUS User's Manual, Version 6.12, SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015.
- [25] Berberoğlu, M.: Experimental investigation of concrete slabs produced with cement based mortars under dynamic loads, M.Sc. Thesis, Manisa Celal Bayar University, 2019.
- [26] Yılmaz, T., Kırac, N., Anil, Ö., Erdem, R.T., Kaçaran, G.: Experimental Investigation of impact behaviour of RC Slab with different reinforcement ratios, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24 (2020) 1, pp. 241-254.