

Primljen / Received: 7.2.2014.

Ispravljen / Corrected: 10.3.2014.

Prihvaćen / Accepted: 12.4.2014.

Dostupno online / Available online: 10.7.2014.

Otpornost betonskih elemenata na udarno opterećenje

Autori:



¹ Doc.dr.sc. **R. Tugrul Erdem**, dipl.ing.građ.
tugrul.erdem@cbu.edu.tr



¹ Doc.dr.sc. **Engin Gucuyen**, dipl.ing.građ.
engin.gucuyen@cbu.edu.tr



¹ Doc.dr.sc. **Erkan Kantar**, dipl.ing.građ.
erkan.kantar@cbu.edu.tr



¹ Izv.prof.dr.sc. **Muhiddin Bagci**, dipl.ing.građ.
muhiddin.bagci@cbu.edu.tr

¹ Sveučilište Celal Bayar, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo

Prethodno priopćenje

R. Tugrul Erdem, Engin Gucuyen, Erkan Kantar, Muhiddin Bagci

Otpornost betonskih elemenata na udarno opterećenje

Određivanje ponašanja konstrukcijskih elemenata pod opterećenjem postaje sve značajnije zbog današnjih tehnoloških dostignuća. Utjecaj udara na kruta tijela ne smije se zanemarivati. U radu je prikazano istraživanje reakcija nearmiranih betonskih elemenata na udarno opterećenje i to kako eksperimentalnim putem tako i primjenom analize konačnih elemenata. Elementi su ispitani u laboratoriju, a za potrebe proračuna primjenjen je računalni program ABAQUS. U okviru provedenih analiza dobivene su vrijednosti ubrzanja, brzina, pomaka, udarnih sila i apsorpcije energije.

Ključne riječi:

ABAQUS, betonske grede, konačni elementi, udarno opterećenje, ispitivanje na udar

Preliminary note

R. Tugrul Erdem, Engin Gucuyen, Erkan Kantar, Muhiddin Bagci

Impact behaviour of concrete beams

The determination of behaviour of structural members under load has become increasingly prominent with current advances in technology. The effect of impact on solids should not be ignored. The impact behaviour of non-reinforced concrete beams is investigated in this study both experimentally and using the finite element analysis. Members are tested in laboratory, and the ABAQUS software is used in the analysis. Accelerations, velocities, displacements, impact forces, and energy absorption capacities, have been obtained in the scope of these analyses.

Key words:

ABAQUS, concrete beams, finite elements, impact load, impact testing

Vorherige Mitteilung

R. Tugrul Erdem, Engin Gucuyen, Erkan Kantar, Muhiddin Bagci

Verhalten von Betonbalken unter Anprallbelastung

Die Bestimmung des Verhaltens von Strukturelementen unter verschiedenen Lasten ist aufgrund der heutigen technologischen Fortschritte von zunehmender Bedeutung. Der Einfluss von Lasten beim Anprall von Festkörpern darf dabei nicht überschaut werden. In dieser Arbeit wird das Verhalten nichtarmierter Betonbalken unter Anpralllasten durch experimentelle Versuche und durch auf der Finite-Elemente-Methode beruhende Analysen untersucht. Dementsprechend sind die Laborversuche und die im Software-Programm ABAQUS durchgeführten Berechnungen beschrieben. Im Rahmen der vollendeten Analysen sind Werte der Beschleunigung, Geschwindigkeit, Verschiebung, Anprallkräfte und Energieabsorption ermittelt worden.

Schlüsselwörter:

Abaqus, Betonbalken, finite Elemente, Anprallbelastung, Anpralluntersuchung

1. Uvod

Na razvoj tehničkih znanosti svakako utječe i raznolikost materijala. Svojstva materijala imaju veliko značenje u području građevinarstva. U tom se smislu velika pažnja polaže na ponašanje građevinskih materijala kada na njih djeluju razne vrste opterećenja. Znanstvenici i inženjeri svjesni su koristi koje donosi poznavanje prednosti, nedostataka i deformacija materijala.

Beton je složeni materijal koji se vrlo često koristi u izvođenju građevina, mostova i cestovnih prometnica. Sastoji se od cementa, agregata, pijeska, vode te od kemijskih dodataka ako je potrebno. Iako se beton odlikuje visokom tlačnom čvrstoćom, njegova je vlačna čvrstoća vrlo niska. Betonski elementi mogu se proizvoditi u različitim oblicima i otporni su na visoke temperature.

Poznato je da na građevine djeluju statička i dinamička opterećenja. Statička opterećenja su trajna, a dinamička nastupaju naglo. Zbog dinamičkih djelovanja na pojedine elemente dolazi do promjene naprezanja. Udarno opterećenje javlja se u trenutku sudara između elemenata. Iz prakse je dobro poznato da postoje razni udari, primjerice udari vozila u građevinu, eksplozije u vojnim građevinama, udari projektila, nesreće s dizalicom kada prenosi elemente, te stijenski odroni koji pogađaju građevine smještene uz cestovne prometnice. Provedene su brojne eksperimentalne i numeričke studije [1-13] da bi se što bolje istražio utjecaj udara na elemente.

Ispitivanje udara temelji se na analizi elemenata koji su podvrgnuti udarnom opterećenju, a u tu se svrhu koristi nekoliko uređaja. Uređaji za ispitivanje koriste se u eksperimentalnim studijama za određivanje utjecaja udara na konstrukcijske elemente. Iako ne postoji norma za metode ispitivanja, u normi ASTM E 23 ipak daju podaci o uređajima za ispitivanje i o granicama za ispitivanja udara [14]. Takvi se uređaji mogu koristiti za određivanje otpornosti elemenata na udar.

U okviru ovog istraživanja izrađeno je šest različitih betonskih greda da bi poslužile za ispitivanje otpornosti na udar. U eksperimentalnom dijelu elementi su ispitani u laboratoriju na odgovarajućim uređajima za ispitivanje tlačne čvrstoće te na udarno opterećenje uz primjenu dodatne mjerne opreme, kao što su akcelerometri, uređaji za mjerenje dinamičke sile, spojni kabeli, uređaj za bilježenje podataka i optičke fotočelije. U dinamičkoj analizi konačnih elemenata korišten je program ABAQUS [15]. Vrijednosti ubrzanje – vrijeme, brzina – vrijeme, pomak – vrijeme, udarna sila – vrijeme te apsorpcija energije definirane su u okviru i jednog i drugog ispitivanja. Na kraju je provedena usporedba rezultata te su dani odgovarajući prijedlozi.

2. Eksperimentalno istraživanje

Za provedbu eksperimentalnog dijela istraživanja, izrađene su u laboratoriju betonske grede koje su nakon odgovarajuće starosti ispitane na udar.

2.1. Oprema i uređaji za ispitivanje

Kako oprema za ispitivanje nije propisana normama, uređaj je definiran na bazi istraživanja prikazanih u dostupnoj literaturi. Iz tih se istraživanja vidi da je za ispitivanje pukotina, oštećenja i deformacija elemenata najprikladniji uređaj s padajućim teretom. Ovaj uređaj temelji se na padu čeličnog tereta čija se masa može mijenjati. Teret pada na sredinu elementa koji se ispituje, a ekscentričnost tereta podešava se na nulu da bi se izbjegli sekundarni efekti.

Osnovni koncept uređaja za ispitivanje zasniva se na prijelazu potencijalne energije u kinetičku u trenutku udara. Gubitak energije tijekom slobodnog pada jednak je energiji koju prima ispitivani element. Uređaj može ispuštati terete raznih masa s visine od 2500 mm. Dimenzije čelične podloge za provedbu ovog ispitivanja iznose 1000 x 1000 x 200 mm. Podloga je koncipirana kao masivna konstrukcija koja može apsorbirati pomake u trenutku udara. Razmak između vodilica uređaja iznosi 200 mm. Optičke fotočelije koje se nalaze na uređaju mjere vrijeme pada od početka kretanja tereta. Na podlozi se nalaze simetrični otvori da bi se postigli uvjeti pridržavanja za razne udaljenosti. Uređaj za za provedbu ispitivanja na udar prikazan je na slici 1. Opremljen je s četiri akcelerometra, mjerjačem dinamičke sile postavljenim na rubu tereta, uređajem za bilježenje podataka, optičkim fotočelijama i računalom.



Slika 1. Uređaj za provedbu ispitivanja na udar

2.2. Priprema betonskih uzoraka za ispitivanje

Dimenzije betonskih uzoraka koji su ispitivani varirale su od 100 x 100 x 710 mm do 200 x 200 x 710 mm. Za izradu uzoraka korišteni su posebno pripremljeni kalupi, a nakon izrade ti su betonski uzorci njegovani u komori 28 dana. Oznake uzoraka i njihove dimenzije prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Dimenzije uzoraka za ispitivanje

Oznaka uzorka	Širina [mm]	Visina [mm]	Duljina [mm]
CS1	100	100	710
CS2	100	150	710
CS3	100	200	710
CS4	150	150	710
CS5	150	200	710
CS6	200	200	710

Najprije su određeni udjeli materijala za 1 m³ betona, a nakon toga su izračunane potrebne količine ovisno o dimenzijama kalupa. Omjeri materijala za 1 m³ betona prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Materijali za 1 m³ betona

Materijal	Količina [kg]	Udio [%]
Cement (42,5 R)	390	16,3
Šljunak (5-15 mm)	910	38,2
Pijesak (0-5 mm)	870	36,5
Voda	215	9,0

Za potrebe ispitivanja izrađeno je dvanaest uzoraka, pri čemu je šest od tih uzoraka korišteno u prethodnim ispitivanjima kako bi se odredila visina pada i masa tereta. Nakon pripreme kalupa (premazivanjem stranica kalupa), provedeno je ugrađivanje betona u kalupe, slika 2.



Slika 2. Izrada uzoraka za ispitivanje

Tlačna čvrstoća betona određena je na uzorcima oblika kocke (dimenzije 150x150x150 mm) i to nakon 28 dana njege. Prikaz ispitivanja vidljiv je na slici 3., a rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 3.



Slika 3. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Tablica 3. Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka

Oznake uzoraka	Tlačna čvrstoća [MPa]	Prosječna vrijednost [MPa]
Uzorak 1	38,5	38,1
Uzorak 2	37,9	
Uzorak 3	37,5	
Uzorak 4	38,8	
Uzorak 5	37,6	
Uzorak 6	38,3	

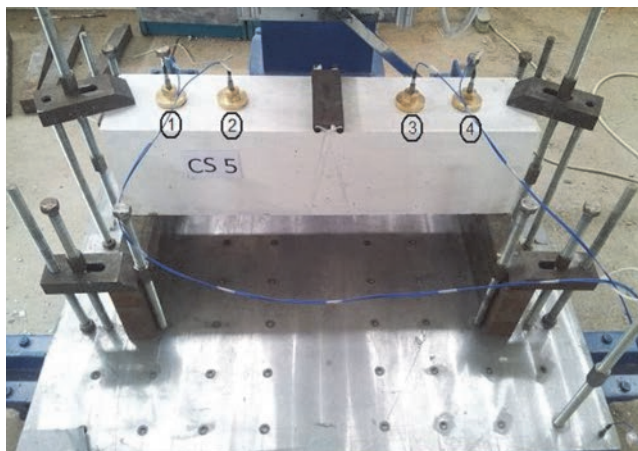
Kako bi ispitivanje na udar bilo što uspješnije, provedene su određene predradnje. Na uzorke je nanosena boja tako da se pukotine pri ispitivanju bolje vide. Na svakom su uzorku označena mjesta za četiri akcelerometra. U izbušene otvore postavljeni su čelični moždanici promjera 6 mm, kao što je vidljivo na slici 4. Da bi se postiglo mjerenje ubrzanja bez ikakvih gubitaka, akcelerometri su postavljeni simetrično u dodatke od mjeda. Vrijednosti ubrzanja mjerene su na udaljenosti 150 mm i 250 mm od točke udara.



Slika 4. Uzorci pripremljeni za ispitivanje

Za potrebe ispitivanja korištena je i čelična ploča te sloj od neoprenske gume koji su postavljeni na sredinu uzorka te su

učvršćeni pomoću plastičnih traka. Kada teret dođe u kontakt s uzorkom, ostvareno je koncentrirano opterećenje i na površini uzorka dolazi do uleknuća. Čelična ploča i gumeni sloj služe za ravnomjerno raspoređivanje opterećenja po površini uzorka tijekom ispitivanja. Na slici 5. prikazan je uzorak CS5 koji se nalazi u uređaju za ispitivanje. Kako je vidljivo, uzorak je pridržan pomoću čeličnih stega. Visina pada utega je 1000 mm, a za sve se uzorke koristio uteg mase 8 kg.



Slika 5. Uzorak CS5 pripremljen za ispitivanje

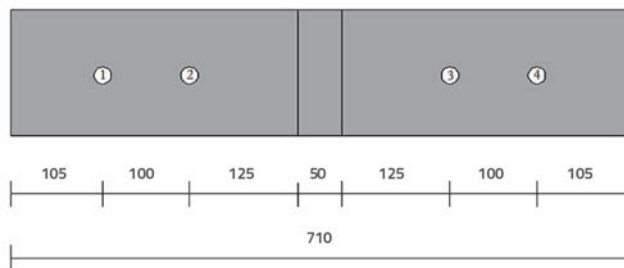
3. Analiza metodom konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata primijenjena je za određivanje ubrzanja, brzina, pomaka, sile udara i raspodjele naprezanja. Za provedbu tih analiza služio je računalni program ABAQUS koji se vrlo često koristi za provedbu dinamičkih proračuna. Najprije je modelirana oprema za ispitivanje, uzorci koji se ispituju, čelična ploča te gumena podloška. U analizi je također usvojena visina pada od 1000 mm te masa tereta od 8 kg. Uvjeti pridržavanja određeni su tako da budu kompatibilni s onima u eksperimentalnoj analizi. Pri modeliranju korišteni su linearni modeli jer bi primjenom nelinearnih modela analiza trajala znatno duže. Svojstva materijala prikazana su u tablici 4.

Tablica 4. Svojstva materijala

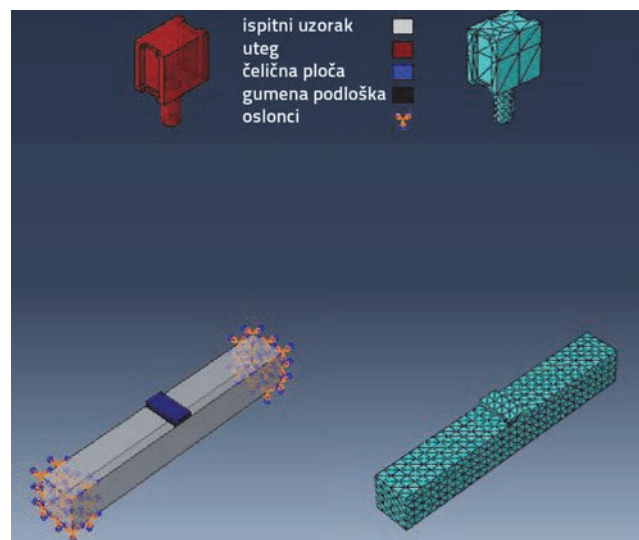
Svojstvo	Materijal		
	Beton	Čelični uteg i ploča	Gumena podloška
Masa po jedinici volumena [kg/m ³]	2400	7850	1230
Modul elastičnosti [MPa]	32000	200000	22
Poissonov koeficijent	0,20	0,30	0,45
Modul posmika [MPa]	13333,33	76923,08	7,59

Kako se problem javlja pri slobodnom padu, u numeričkom modelu je u obzir uzeta samo sila teža. Za vrijednosti odskoka u obzir su uzete vrijednosti koje odgovaraju vrijednostima zabilježenima u tijeku ispitivanja. Vremenski intervali definirani su od početka pa do kraja kretanja. Modeli su opetovano analizirani u vrlo kratkim vremenskim intervalima. Položaj akcelorometara, čelične ploče i gumene podloške na uzorcima koji se ispituju prikazan je na slici 6.



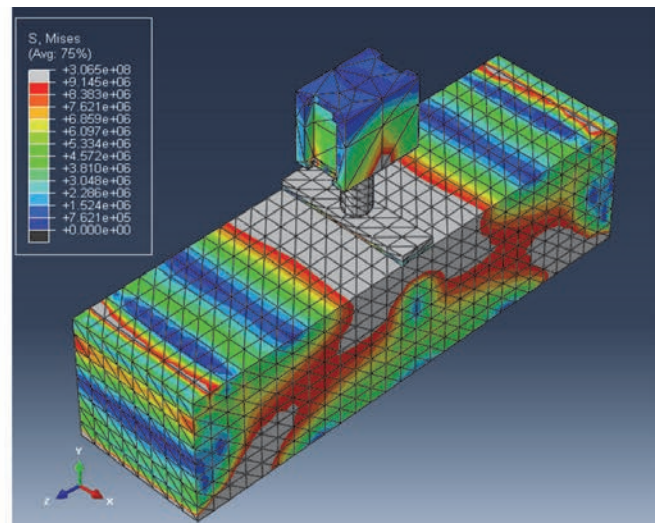
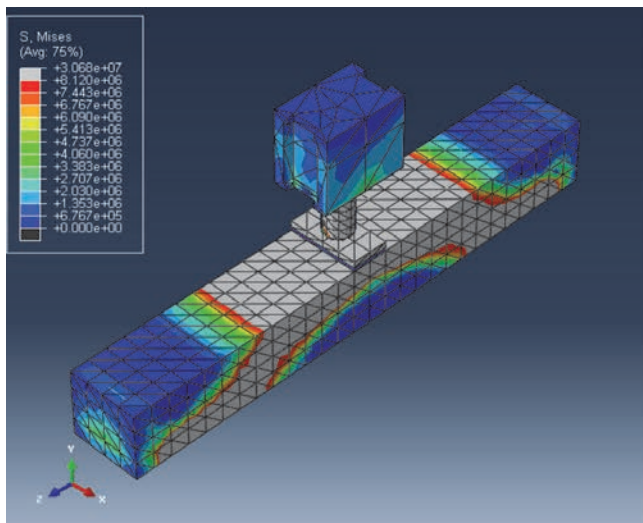
Slika 6. Tlocrni prikaz uzorka koji se ispituju (dimenzije u mm)

Kao što je poznato, kod metode konačnih elemenata, model se sastoji od mreže elemenata. Na taj se način mogu istraživati složena geometrijska svojstva te se mogu postići točniji rezultati. U analizama su korišteni elementi tipa C3D10M (modificirani tetraedar s deset čvorova) koji su pogodni za rješavanje problema udara.



Slika 7. Model konačnih elemenata (element CS1)

Veličina konačnog elementa značajna je za trajanje proračuna. Za manje se veličine dobivaju pouzdaniji rezultati. Međutim, time bi se znatno produžilo vrijeme analize. Zbog toga je za određivanje najpogodnije veličine konačnog elementa proveden proračun utjecaja mreže na rezultate. Rezultati su konzistentni u rasponu veličina od 1 cm do 3 cm. Usvojeno je dakle da veličina mreže iznosi 2,5 cm. Kako je za rješavanje problema značajna kontaktna površina, usvojeno je da veličina



Slika 8. Raspodjela naprezanja uslijed udarnog opterećenja

mreže na kontaktnoj površini iznosi 2,5 cm. Za ostale dijelove tereta usvojena je veličina od 5 cm. Dužina pridržavanja iznosi 50 mm za svaku stranu uzorka. Model konačnih elemenata (element CS1) prikazan je na slici 7.

Nakon što su za svaki uzorak obavljene analize, dobivena je raspodjela naprezanja. Vrijednosti naprezanja iskazane su u Pa (N/m^2). Maksimalne vrijednosti naprezanja zabilježene su oko točke udara. Raspodjela naprezanja za slučaj nanošenja punog udarnog opterećenja na elemente CS1 i CS6 prikazana je na slici 8.

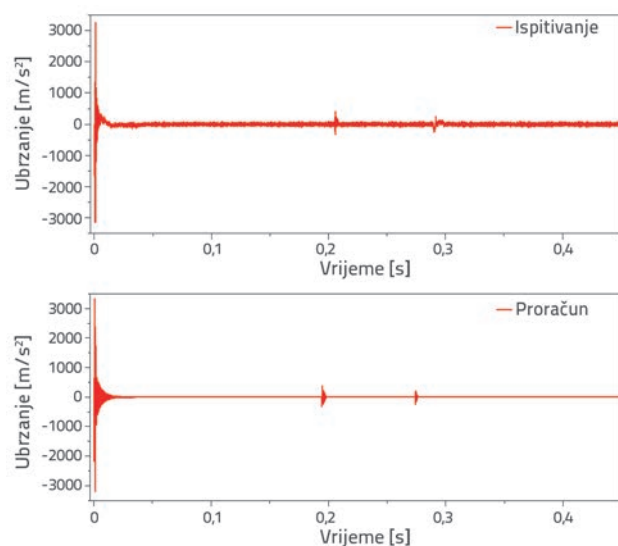
4. Analiza rezultata

U ovom dijelu istraživanja prikazani su rezultati numeričkih proračuna i eksperimentalnih ispitivanja za uzorke

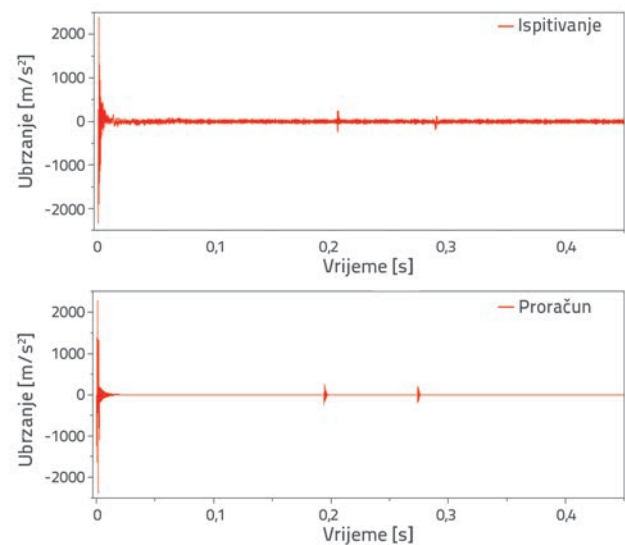
različitih veličina. Za ispitivane uzorke su izrađeni grafički prikazi odnosa "ubrzanje – vrijeme", "brzina – vrijeme", "pomak – vrijeme", "udarna sila – vrijeme" i "udarna sila – pomak". Vrijednosti brzine dobivene su integriranjem ubrzanja, a vrijednosti pomaka određene su integriranjem brzina.

Vremenski pojas za prvi pomak uslijed udarnog opterećenja usvojen je za postupak integracije u grafičkim prikazima odnosa ubrzanja i vremena. Minimalne i maksimalne vrijednosti ubrzanja odabranih pojaseva korištene su za izračunavanje vrijednosti brzine i pomaka.

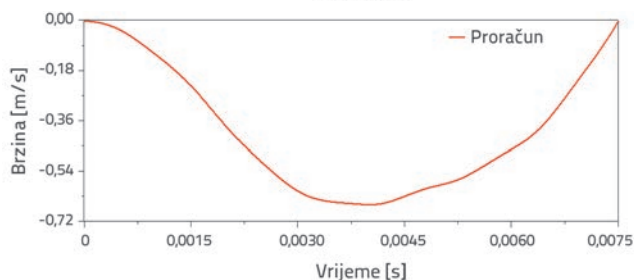
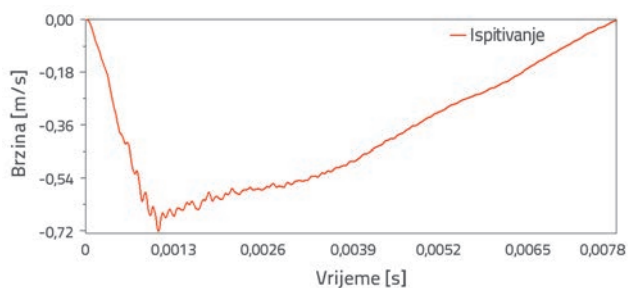
Usporedni rezultati numeričkih i eksperimentalnih analiza za uzorak CS4 prikazani su na slikama od 9 do 14.



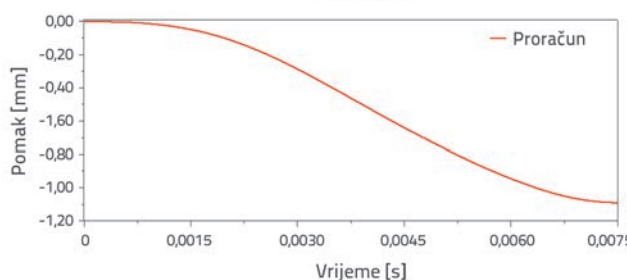
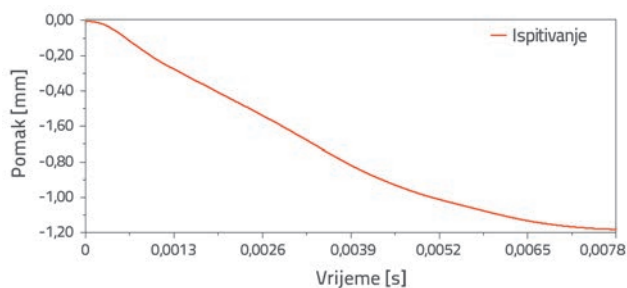
Slika 9. Odnos ubrzanja i vremena na 150 mm od točke udara



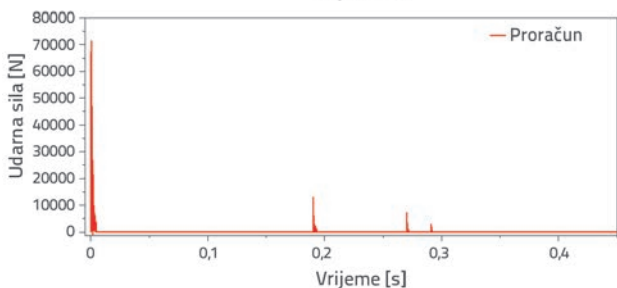
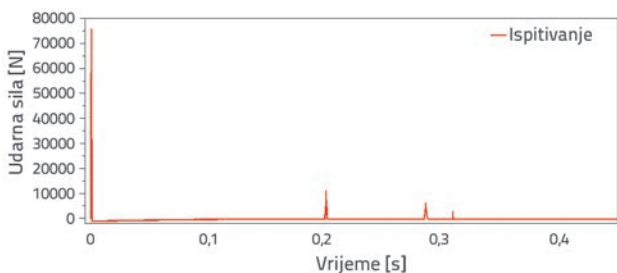
Slika 10. Odnos ubrzanja i vremena na 250 mm od točke udara



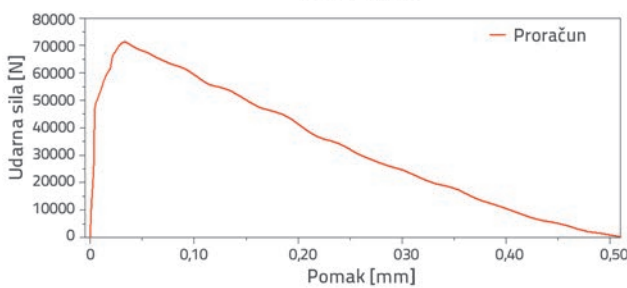
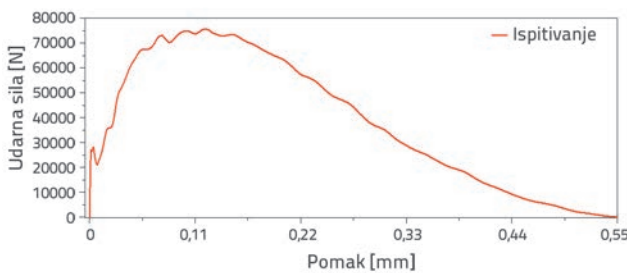
Slika 11. Odnos brzine i vremena



Slika 12. Odnos pomaka i vremena



Slika 13. Odnos udarne sile i vremena



Slika 14. Odnos udarne sile i pomaka

U tablici 5. nalaze se vrijednosti ubrzanja za sve uzorke koji su eksperimentalno ispitani u laboratoriju te analizirani metodom konačnih elemenata. U istoj tablici iskazane su i prosječne vrijednosti te vrijednosti standardnog odstupanja. Te su vrijednosti određene tijekom ispitivanja pomoću akcelerometra. Rezultati su dobiveni i metodom konačnih elemenata za iste položaje.

Nakon što su pomoću akcelerometara izmjerena ubrzanja, postupkom integracije proračunane su vrijednosti brzine i pomaka. Usporedba brzina prikazana je u tablici 6. Vrijednosti pomaka izračunane su integriranjem brzina. Rezultati ispitivanja

i analiza prikazani su u tablici 7. Vrijednosti udarne sile izmjerene su pomoću mjeraca dinamičke sile koji je postavljen na rubni dio čeličnog tereta. Rezultati su prikazani u tablici 8.

Vrijednosti apsorpcije energije određene su prema površini ispod krivulje udarne sile i pomaka. Te su vrijednosti prikazane u tablici 9.

Zabilježene su i vrijednosti odskoka nakon pada tereta. Vrijednosti odskoka i odgovarajući vremenski intervali, dobiveni ispitivanjem i analizom, prikazani su u tablici 10. Te su vrijednosti određene pomoću mjeraca dinamičke sile koji se kreće zajedno s teretom.

Tablica 5. Vrijednosti ubrzanja dobivenih ispitivanjem i proračunom

Ispitni uzorci		Vrijednosti na udaljenosti od 150 mm			Vrijednosti na udaljenosti od 250 mm		
		Ispitivanje [m/s ²]	Proračun [m/s ²]	Ispitivanje / Proračun	Ispitivanje [m/s ²]	Proračun [m/s ²]	Ispitivanje / Proračun
CS1	min.	-2869	-2708	1,06	-2352	-2013	1,17
	maks.	2334	2403	0,97	1435	1856	0,77
CS2	min.	-3097	-2815	1,10	-1842	-2025	0,91
	maks.	2312	2422	0,95	2186	2018	1,08
CS3	min.	-2628	-2958	0,89	-2349	-2325	1,01
	maks.	3025	2743	1,10	2115	2284	0,93
CS4	min.	-3142	-3198	0,98	-2350	-2392	0,98
	maks.	3248	3323	0,98	2390	2288	1,04
CS5	min.	-3758	-3573	1,05	-2604	-2634	0,99
	maks.	2935	3337	0,98	2926	2774	1,05
CS6	min.	-3791	-3663	1,03	-3129	-2911	1,07
	maks.	3142	3395	0,93	3130	2996	1,07
Srednja vrijednost				0,99	Srednja vrijednost		1,01
Standardno odstupanje				0,08	Standardno odstupanje		0,10

Tablica 6. Vrijednosti brzina dobivenih ispitivanjem i proračunom

Ispitni uzorci		Vrijednosti na udaljenosti od 150 mm			Vrijednosti na udaljenosti od 250 mm		
		Ispitivanje [m/s]	Proračun [m/s]	Ispitivanje / Proračun	Ispitivanje [m/s]	Proračun [m/s]	Ispitivanje / Proračun
CS1		-1,25	-1,18	1,06	-1,18	-1,11	1,06
CS2		-0,93	-0,92	1,01	-0,83	-0,88	0,94
CS3		-0,84	-0,89	0,94	-0,68	-0,77	0,88
CS4		-0,72	-0,66	1,09	-0,65	-0,61	1,07
CS5		-0,68	-0,64	1,06	-0,63	-0,57	1,11
CS6		-0,47	-0,45	1,04	-0,43	-0,39	1,10
Srednja vrijednost				1,03	Srednja vrijednost		1,03
Standardno odstupanje				0,05	Standardno odstupanje		0,09

Tablica 7. Vrijednosti pomaka dobivenih ispitivanjem i proračunom

Ispitni uzorci		Vrijednosti na udaljenosti od 150 mm			Vrijednosti na udaljenosti od 250 mm		
		Ispitivanje [mm]	Proračun [mm]	Ispitivanje / Proračun	Ispitivanje [mm]	Proračun [mm]	Ispitivanje / Proračun
CS1		-1,84	-1,64	1,12	-0,92	-0,86	1,07
CS2		-1,56	-1,50	1,04	-0,78	-0,81	0,96
CS3		-1,38	-1,44	0,96	-0,69	-0,75	0,92
CS4		-1,18	-1,09	1,08	-0,65	-0,60	1,08
CS5		-0,88	-0,79	1,11	-0,49	-0,43	1,13
CS6		-0,36	-0,32	1,13	-0,29	-0,26	1,12
Srednja vrijednost				1,07	Srednja vrijednost		1,05
Standardno odstupanje				0,06	Standardno odstupanje		0,09

Tablica 8. Vrijednosti udarne sile

Ispitni uzorci	Ispitivanje	Proračun	Ispitivanje/ Proračun
	Udarana sila [N]	Udarana sila [N]	
CS1	54424	50576	1,08
CS2	61979	56838	1,09
CS3	69759	66625	1,05
CS4	75704	71437	1,06
CS5	76428	78825	0,97
CS6	83878	81938	1,02
Srednja vrijednost			1,04
Standardno odstupanje			0,04

Tablica 9. Kapacitet apsorpcije energije ispitanih elemenata

Ispitni uzorci	Ispitivanje	Proračun	Ispitivanje/ Proračun
	Apsorpcija energije [J]	Apsorpcija energije [J]	
CS1	15,66	13,98	1,12
CS2	17,82	15,72	1,13
CS3	19,57	17,38	1,13
CS4	20,55	18,14	1,13
CS5	20,83	20,94	0,99
CS6	21,30	21,06	1,01
Srednja vrijednost			1,09
Standardno odstupanje			0,07

Tablica 10. Vrijednosti odskoka i odgovarajući vremenski intervali

Ispitni uzorci	Ispitivanje/Proračun	1. vrijeme odskoka [s]	2. vrijeme odskoka [s]	3. vrijeme odskoka [s]	4. vrijeme odskoka [s]
CS1	Ispitivanje	0,180	0,255	–	–
	Proračun	0,174	0,245	–	–
CS2	Ispitivanje	0,180	0,255	–	–
	Proračun	0,173	0,245	–	–
CS3	Ispitivanje	0,190	0,270	0,290	–
	Proračun	0,181	0,257	0,274	–
CS4	Ispitivanje	0,200	0,285	0,310	–
	Proračun	0,190	0,270	0,291	–
CS5	Ispitivanje	0,220	0,315	0,345	–
	Proračun	0,207	0,296	0,326	–
CS6	Ispitivanje	0,235	0,340	0,380	0,400
	Proračun	0,220	0,320	0,357	0,378

5. Zaključak

U okviru ovog istraživanja, šest betonskih elemenata dimenzija od 100 x 100 x 710 do 200 x 200 x 710 mm ispitano je na udar. Visina s koje je ispuštan teret i masa tereta nisu se mijenjali tijekom ispitivanja. Betonski elementi su proizvedeni iz iste mješavine betona koja je ugrađena u kalupe. Njega betona iznosila je 28 dana. Uz uređaj za ispitivanje korištena su četiri akcelerometra, mjerac dinamičke sile, uređaj za bilježenje podataka i računalo. U svrhu ravnomjerne raspodjele udarnog opterećenja po elementu te radi smanjenje koncentracije unutarnjih djelovanja u trenutku udara korištena je čelična ploča i gumena podloška. Vremena ispuštanja bila su izražena u milisekundama, a za mjerenje su upotrijebljene optičke fotoćelije. Izrađeni su grafički prikazi odnosa između ubrzanja i vremena, brzine i vremena, pomaka i vremena, udarne sile i vremena, te udarne sile i pomaka. Izračunane su i vrijednosti apsorbirane energije.

U okviru analize pomoću metode konačnih elemenata, uređaj za ispitivanje i ispitni elementi modelirani su

primjenom računalnog programa ABAQUS koji se često koristi za provođenje dinamičkih proračuna. Analize su obavljene nakon definiranja svojstava materijala te nakon određivanja uvjeta pridržavanja. Usvojena je visina ispuštanja od 1000 mm, a masa tereta iznosila je 8 kg. Najprikladnija veličina konačnih elemenata i vremenski intervali definirani su nakon preliminarnih analiza. Analize su obavljene za prvo ispuštanje i za pripadni odgovor. Definirane su vrijednosti ubrzanja, brzine, pomaka, udarne sile i apsorpcije energije. Istražen je i odnos između rezultata dobivenih stvarnim ispitivanjem i numeričkom analizom. Određena je i raspodjela naprezanja po elementu u trenutku udara.

Vrijednosti ubrzanja simetrično su mjerene pomoću četiri akcelerometra koji su bili 150 mm i 250 mm udaljeni od točke udara. Vrijednosti brzine i pomaka izračunane su nakon integriranja za iste točke u kojima su dobivena ubrzanja. Udarne su sile izmjerene pomoću mjerača dinamičke sile. Vrijednosti apsorbirane energije izračunane su pomoću grafičkog prikaza udarne sile i pomaka.

Grafički prikazi odnosa između ubrzanja i vremena izrađeni su na temelju vrijednosti dobivenih pomoću akcelerometara. Vrijednosti ubrzanja izmjerene na 150 mm od točke udara veće su od vrijednosti izmjerenih na 250 mm. Isto tako, vrijednosti ubrzanja rastu s povećanjem presjeka. Najveće vrijednosti dobivene su na elementu CS6. Osim toga, utjecaji šuma jasnije se vide na grafičkom prikazu odnosa između izmjerenog ubrzanja i vremena.

Prilikom istraživanja vrijednosti brzine i pomaka ustanovljeno je da se veće vrijednosti dobivaju za udaljenost od 150 mm, baš kao i u slučaju ubrzanja. S druge strane, vrijednosti se smanjuju s povećanjem presjeka. Najveće vrijednosti brzine i pomaka dobivene su za element CS1, a najniže za element CS6. Zbog utjecaja šuma i variranja sile teže i brojčanih podataka, uočene su neke razlike između analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Udarne sile izmjerene su pomoću mjerača dinamičke sile koji je postavljen na rub tereta. Vrijednosti sile rasle su s povećanjem presjeka. Najveća vrijednost zabilježena je na elementu CS6. Vrijednosti apsorbirane energije izračunane

su prema površini koja se nalazi ispod krivulje koja određuje odnos između udarne sile i pomaka. Najveći kapacitet apsorpcije energije zabilježen je na elementu CS6.

Za elemente je određen i vremenski period nakon pada tereta. Vrijednosti pomaka rastu od elementa CS1 prema elementu CS6. Periodi odgovora rastu paralelno s vrijednostima pomaka. Kako visina odskoka raste usporedo s veličinom presjeka, najviše vrijednosti odskoka zabilježene su na elementu CS6.

Dijagrami ubrzanja, brzine, pomaka, udarne sile i apsorpcije energije izrađeni su na temelju proračuna metodom konačnih elemenata. Prosječne vrijednosti i vrijednosti standardnog odstupanja izračunane su da bi se omogućila usporedba između eksperimentalnih i analitičkih rezultata. Ustanovljena je dobra podudarnost između tih rezultata. S obzirom na to, analitički se model može koristiti u fazi projektiranja za određivanje otpornosti uzoraka na udarnu silu. Na kraju vrijedi napomenuti da provedena analiza može poslužiti kao osnova za dodatno istraživanje rasta deformacija raznih materijala i konstrukcijskih elemenata.

LITERATURA

- [1] Arros, J., Doumbalski, N.: Analysis of Aircraft Impact to Concrete Structures, Nuclear Engineering and Design, 237, pp. 1241-1249, 2007.
- [2] Arslan, A.: Mixed-Mode Fracture Performance of Fibre Reinforced Concrete Under Impact Loading, Materials and Structures, 28, pp. 473-478.
- [3] Barr B., Baghli A.: A Repeated Drop-Weight Impact Testing Apparatus for Concrete, Magazine of Concrete Research, 40 (144), pp. 167-176, 1988.
- [4] Barr, B., Bouamrata, A.: Development of A Repeated Drop-Weight Impact Testing Apparatus for Studying Fibre Reinforced Concrete Materials, Composites, 19, pp. 453-466, 1988.
- [5] Chakradhara, Rao M., Bhattacharyya, S.K., Barai, S.V.: Behaviour of Recycled Aggregate Concrete Under Drop Weight Impact Load, Construction and Building Materials, 25, pp. 69-80, 2011.
- [6] Erki, M.A., Meier, U.: Impact Loading of Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates, Journal of Composites for Construction, 3 (3), pp. 117-124, 1999.
- [7] Kantar, E., Anil, Ö.: Low Velocity of Impact Behavior of Concrete Beam Strengthened with CFRP Strip, Steel and Composite Structures, 12 (3), pp. 207-230, 2012.
- [8] Kishi, N., Konno, H., Ikeda, K., Matsuoka, K.G.: Prototype Impact Tests on Ultimate Impact Resistance of PC Rock Sheds, International Journal of Impact Engineering, 27 (9), pp. 969-985, 2002.
- [9] Rambaud, P.B., Timsah, Y., Daudeville, L., Mazars, J.: Finite Element Modelling of Concrete Protection Structures Submitted to Rock Impacts, 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, Seattle, pp. 1-12, 2003.
- [10] Saatci S., Vecchio, F.J.: Nonlinear Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Under Impact Loads, ACI Structural Journal, Technical Paper, 106-567, pp. 717-725, 2009.
- [11] Sawamoto, Y., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Morikawa, H.: Analytical Studies on Local Damage to Reinforced Concrete Structures Under Impact Loading by Discrete Element Method, Nuclear Engineering and Design, 179, pp. 157-177, 1998.
- [12] Suaris, W., Shah, S.P.: Properties of Concrete Subjected to Impact, Journal of Structural Engineering, 109, pp. 1727-1741, 1983
- [13] Zineddin, M., Krauthammer, T.: Dynamic Response and Behavior of Reinforced Concrete Slabs Under Impact Loading, International Journal of Impact Engineering, 34, pp. 1517-1534, 2007.
- [14] Siewert, T. A., Manahan, M. P., McCowan, M. P., Holt, J. M., Marsh, F. J., Ruth, E. A.: The History and Importance of Impact Testing, Pendulum Impact Testing: A Century of Progress ASTM STP 1380, West Conshohocken PA, pp. 3-15, 1999.
- [15] ABAQUS/CAE 6.10, 2010.