

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.27>

Numerička analiza betonske grede izložene udarnom opterećenju: utjecaj udarne površine

Natalija Bede

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
kontakt: natalija.bede@uniri.hr

Sažetak

Poznato je da ponašanje betonskih konstrukcija uvelike ovisi o brzini nanošenja opterećenja. Numeričke i eksperimentalne studije pokazuju da s porastom brzine opterećenja (brzine deformacije) dolazi do povećanja nosivosti, promjene oblika sloma, distribucije pukotine i brzine širenja pukotine. U radu je prikazan numerički model betonske grede sa zarezom izložene udarnom opterećenju pri različitim brzinama opterećenja. Glavni je cilj rada istražiti utjecaj udarne površine na slom betona, pojavu i razvoj pukotine. Stoga je provedena parametarska studija utjecaja veličine i oblika kontaktne površine udarnoga čekića na ponašanje betona zbog dinamičkog opterećenja. Provedena numerička analiza potvrdila je da veličina i oblik kontaktne površine udarnoga tijela pri većim brzinama opterećenja utječe na mehanizam sloma i smjer širenja pukotine (strukturnalni efekt).

Ključne riječi: *slom betona, dinamičko opterećenje, brzina opterećenja, metoda konačnih elemenata, oblik sloma, račvanje pukotine*

Numerical analysis of the dynamically impacted concrete beam: influence of impact surface

Abstract

Behaviour of concrete structures is known to be strongly influenced by loading rate (strain rate). Numerical and experimental studies show that the increase in loading rate generates an increase in resistance, change of failure mode and crack pattern, and crack propagation velocity. A numerical model of the dynamically impacted notched concrete beam subjected to different loading rates is presented in this paper. The main objective of this study is to investigate influence of impact surface on concrete fracture, crack initiation and propagation. For that purpose, a parametric study is conducted to investigate the influence of the size and shape of the impactor contact surface on concrete behaviour when subjected to dynamic load. The numerical study has confirmed that the size and shape of the impactor contact surface affects the failure mechanism and crack propagation (structural effect) under higher dynamic loads.

Keywords: *concrete fracture, dynamic load, rate sensitivity, finite element method, failure mode, crack branching*

1 Uvod

Betonske konstrukcije (npr. nuklearne elektrane, cestovni mostovi, platforme za bušenje nafte itd.) tijekom svoga vijeka trajanja često su izložene opterećenjima jakoga intenziteta i kratkog trajanja. Poznato je da se ponašanje betonske konstrukcije (nosivost, oblik sloma, način i brzina širenja pukotina) izložene dinamičkom opterećenju (udarno opterećenje) umnogome razlikuje od njezina ponašanja pri kvazistatičkom opterećenju. Osnovni je tome razlog to što pod dinamičkim opterećenjem odziv materijala (betona) postaje ovisan o brzini deformiranja (eng. *rate sensitivity*) te dolazi do pojave inercijalnih učinaka različitoga podrijetla, [1-3]. Numeričke i eksperimentalne studije pokazuju da s porastom brzine opterećenja dolazi do porasta nosivosti. Međutim, ovisno o brzini opterećenja dolazi i do promjene oblika (moda) sloma, načinu širenja pukotine te do pojave račvanja pukotine (eng. *crack branching*), [3, 4]. Opće je poznato da se s povećanjem brzine opterećenja način otvaranja pukotine mijenja od oblika I. (odvajanje u sredini zbog otvaranja pukotine od savijanja) do kombiniranoga sloma, oblik II. (odvajanje zbog kombinacije posmičnih i savojnih pukotina, odnosno kombinacije oblika I. i oblika II.). Na slici 1.a prikazan je tipičan primjer otkazivanja betonske konstrukcije zbog malih brzina opterećenje (oblik I.), a na slici 1.b zbog dinamičkoga opterećenja (kombinacija oblika I. i oblika II.). Do danas postoji ograničeni broj eksperimentalnih i numeričkih studija u kojima se istražuje oblika sloma u zavisnosti o brzini opterećenja. Štoviše, ponašanje betona zbog dinamičkoga opterećenja vrlo je teško razumjeti samo na temelju eksperimentalno dobivenih rezultata. Prema tome, numeričke su studije iznimno bitne, jer omogućavaju točniju interpretaciju eksperimentalnih rezultata. Međutim, numeričko modeliranje ponašanja betona zbog dinamičkoga opterećenja, posebice pojave fenomena račvanja pukotine ili promjene oblika sloma, još uvijek predstavlja veliki izazov za znanstvenike.

Na osnovi pregleda literature vidljivo je da su predložene razne eksperimentalne metode za ispitivanje ponašanja betonskih konstrukcija (uzoraka) pod dinamičkim opterećenjem. Za ispitivanja se najčešće rabi betonska greda izložena udarnom opterećenju čekića. Međutim, ne postoje normirana ispitivanja, već se testovi izvode s betonskim gredama različitih dimenzija i materijalnih svojstava te s različitim veličinama i oblicima udarnoga čekića. Građevinske su konstrukcije često izložene dinamičkim opterećenjima kod kojih je udarna površina velika u odnosu na konstrukciju. Prema tome, zanimljivo je istražiti ponašanje betonske konstrukcije (grede) uzimajući u obzir utjecaj veličine i oblika kontaktne površine udarnoga tijela (čekića).



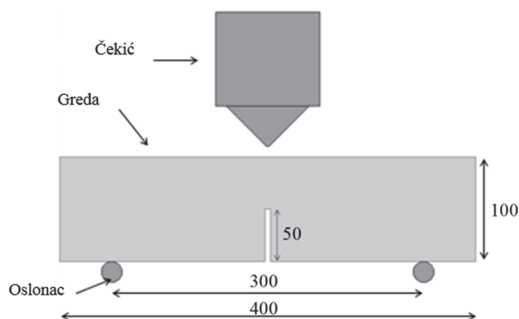
Slika 1. Mehanizam sloma a) savojni slom (statičko opterećenje), b) posmični slom (dinamičko opterećenje) [5]

2 Numerička analiza

Numerička je analiza betonske grede provedena primjenom programa s trodimenzionalnim konačnim elementima u koji je implementiran algoritam direktne numeričke integracije eksplicitnoga tipa te kontaktni algoritam [6]. Kao konstitucijski zakon ponašanja betona upotrijebljen je tzv. mikroravninski model betona. Primijenjeni konstitucijski zakon ovisi o brzini deformiranja [2, 3]. Više detalja o mikroravninskom modelu betona može se naći u [6, 7].

2.1 Validacija numeričkoga modela

Prije parametarske studije utjecaja geometrije kontaktne površine udarnoga čekića na oblik sloma i dinamičku nosivost betonske grede provjerena je valjanost modela usporedbom s eksperimentalnim rezultatima dostupnima u literaturi [1, 8]. Modeliran je eksperiment u kojemu su ispitane betonske grede sa zarezom izložene statičkom i dinamičkom opterećenju koje se postiže udarom čekića [8]. Geometrijske karakteristike betonske grede, preuzete iz [8], prikazane su na slici 2. Usporedbom dobivenih numeričkih rezultata s dostupnim eksperimentalnim rezultatima potvrđeno je da primijenjeni numerički model, utemeljen na mehanici kontinuuma, mikroravninskom modelu materijala i metodi konačnih elemenata, realistično opisuje ponašanje betona zbog dinamičkoga opterećenja, uključujući i složene pojave svojstvene velikim brzinama opterećenja, kao što su promjena nosivosti, promjena oblika sloma, pojava račvanja pukotine, propagacija pukotine i promjena brzine širenja pukotine. Više detalja može se naći u [4].



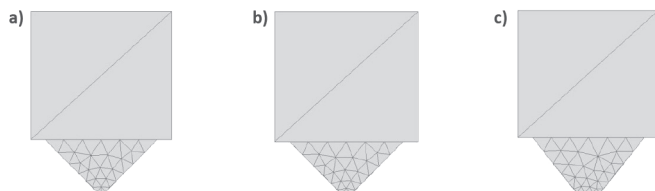
Slika 2. Geometrija (u mm) i način opterećenja betonske grede

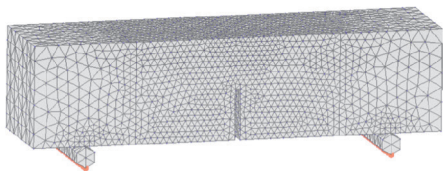
2.2 Numerički model betonske grede i udarnoga čekića

Kako bi se analizirao utjecaj oblika i veličine kontaktne površine udarnoga čekića na ponašanje betonske grede, numerička je analiza provedena za slučaja u kojem je udarna površina čekića u obliku a) polucilindra: linijski kontakt, b) pravokutnika: kontaktna površina 6×100 mm i c) pravokutnika: kontaktna površina 16×100 mm. Na slici 3. prikazane su geometrije i diskretizacije udarnoga čekića u sva tri slučaja. Osim oblika udarne površine čekića (vrh čekića), geometrijske su i materijalne karakteristike čekića iste u sva tri slučaja. Geometrija i diskretizacija numeričkoga modela betonske grede na osloncima za sva tri slučaja jednaka je, a prikazana je na slici 4. Upotrijebljeni su trodimenzionalni tetraedarski konačni elementi. Materijalne karakteristike betona (greda) i čelika (udarni čekić i cilindrični oslonci) upotrijebljene u numeričkoj analizi dane su u tablici 1.

Tablica 1. Mehaničke karakteristike materijala

	Beton [8]	Čelik
Youngov modul, E (GPa)	43,3	200
Poissonov koeficijent (pretpostavljena vrijednost), ν	0,18	0,33
Gustoća, ρ (kg/m^3)	2400	7800
Vlačna čvrstoća, f_t (MPa)	6,3	/
Tlačna čvrstoća, f_c (MPa)	127,0	/
Energija loma, G_f (N/m)	148	/

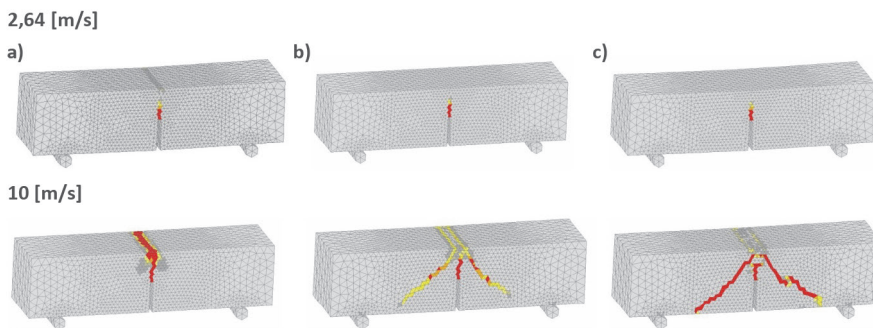

 Slika 3. Geometrija i diskretizacija čekića s udarnom površinom u obliku a) polucilindra: linijski kontakt, b) pravokutnika: kontaktna površina 6×100 mm, c) pravokutnika: kontaktna površina 16×100 mm



Slika 4. Diskretizacija betonske grede i čeličnih oslonaca

2.3 Utjecaj geometrije udarne površine na oblik sloma

Na slici 5. dan je prikaz mehanizma sloma betonske grede i smjer širenja pukotine za brzinu 2,64 m/s i 10 m/s u trenutku dostizanja maksimalne nosivosti. Očito, oblik sloma analizirane grede ovisi o geometriji udarne površine, ali i o brzini opterećenja. Za razmjerno male brzine opterećenja (reda veličine do 10^3 mm/s) u sva tri slučaja kontaktne površine javlja se jedna pukotina na sredini raspona grede (oblik sloma I.). Međutim, povećanjem brzine opterećenja na otprilike red veličine 10^4 mm/s dolazi do promjene oblika sloma te pojave fenomena račvanja pukotine. Dakle, s povećanjem brzine opterećenja dolazi do promjene načina otvaranja pukotine s oblika I. (pukotina od savijanja) na kombinaciju sloma oblika I. i oblika II. (kombinacija savojne i posmične pukotine).



Slika 5. Mehanizam sloma grede i način širenja pukotine pri opterećenju čekića s udarnom površinom u obliku a) polucilindra: linijski kontakt, b) pravokutnika: kontaktna površina 6×100 mm, c) pravokutnika: kontaktna površina 16×100 mm pri različitim brzinama udara u trenutku dostizanja maksimalne sile

3 Zaključak

Cilj je rada bio ispitati utjecaj geometrije udarne površine čekića na oblik sloma i oštećenja betonske grede pri različitim brzinama opterećenja, reda veličine 10^4 mm/s (kvazistatičko opterećenje) do 10^4 mm/s (dinamičko opterećenje). Na temelju numeričke analize može se zaključiti da oblik sloma za male brzine opterećenja, manje od

reda veličine otprilike 10^3 mm/s, nije osjetljiv na oblik kontaktne površine udarnog čekića. Naime, u sva tri slučaja udarne površine mehanizam je sloma betonske grede isti - oblik sloma I., npr. savojna se pukotina širi od dna zareza prema vrhu betonske grede, odnosno prema površini nanošenja opterećenja. Nakon povećanja brzine opterećenja mehanizam sloma i način širenja pukotina ovise o geometriji udarne površine čekića. Npr. pri brzini opterećenja reda veličine 10^4 mm/s u slučaju udarne površine oblika polucilindra (linijski kontakt) još je uvijek dominantan mehanizam sloma savijanjem. Međutim, povećanjem kontaktne površine dolazi do promjene oblika sloma (kombinacija sloma posmikom i savijanjem). Dakle, promjena mehanizma sloma betonske konstrukcije ovisi o energiji koja je apsorbirana zbog dinamičkoga udara; npr. za istu konstrukciju utjecaj će inercijalnih sila biti veći u slučaju veće kontaktne površine udarnoga tijela. Prema tome, realistično modeliranje kontakta između konstrukcije i tijela koje udara, oblika sloma, oštećenja i distribucije pukotina iznimno je bitno kako bi se mogao dobiti detaljan uvid u stvarno ponašanje betona zbog dinamičkoga opterećenja. Na temelju danih numeričkih modela moguće je istražiti utjecaj kontaktne površine na nosivost i otpornost betonskoga uzorka (konstrukcije).

Literatura

- [1] Bede, N., Ožbolt, J., Sharma, A., Irhan, B.: Dynamic fracture of notched plain concrete beams: 3D finite element study, *International Journal of Impact Engineering*, 77(2015), pp. 1776-188, 10.1016/j.ijimpeng.2014.11.02
- [2] Ožbolt, J., Bede, N., Sharma, A., Mayer, U.: Dynamic fracture of concrete L-specimen: Experimental and numerical study, *Engineering Fracture Mechanics*, 148 (2015), pp. 27-41, 10.1016/j.engfracmech.2015.09.002
- [3] Ožbolt, J., Bošnjak, J., Sola, E.: Dynamic fracture of concrete compact tension specimen: Experimental and numerical study, *Int J Solids Struct*, 50 (2013) 25-26, pp. 4270-4278, 10.1016/j.ijsolstr.2013.08.030
- [4] Bede, N.: Numerical and experimental study of concrete fracture under dynamic loading, Doktorski rad, Faculty of Civil Engineering, Rijeka, Croatia, 2015.
- [5] http://nees-anchor.ceas.uwm.edu/wenchuan_earthquake/eeri_lfe_wenchuan.html, pristupljeno 15.07.2017.
- [6] Irhan, B.: High velocity impact and fragmentation of concrete: Numerical simulation, Doktorski rad, Institute for Construction Materials, University of Stuttgart, Germany, 2014.
- [7] Ožbolt, J., Li, Y.J., Kožar, I.: Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint, *Int J Solids Struct*, 38 (2001), pp. 2683–2711.
- [8] Zhang, X.X., Ruiz, G., Yu, R.C., Tarifa, M.: Fracture behavior of high-strength concrete at a wide range of loading rates, *Int J Impact Engng*, 36 (2009), pp. 1204-1209.