

UTJECAJ ENERGIJE LOMA NA PREDLOŽAK PUKOTINA BETONSKIH BLOKOVA

Živaljić, N., Smoljanović, H. & Nikolić, Ž.

Sažetak: U ovom radu provedena je numerička analiza utjecaja iznosa energije loma na predložak pukotina u betonskim blokovima prilikom slobodnog pada na apsolutno krutu podlogu.

Numeričke analize su provedene numeričkim programom Y-2D koji je baziran na kombiniranoj metodi konačno-diskretnih elemenata (FDEM). Model pukotine implementiran u ovoj metodi namijenjen je za simulaciju nastanka i širenja pukotine u vlaku i posmiku i bazira se na aproksimaciji eksperimentalnih krivulja naprezanje-širina pukotine betona.

Na temelju rezultata dobivenih iz provedenih analiza može se zaključiti da energija loma ima značajan utjecaj na predložak pukotina te predstavlja vrlo važan podatak kojeg je potrebno uzeti u obzir prilikom analize pukotina u kontaktnoj interakciji. Također se pokazalo da uzorci s većom energijom loma imaju veću duktilnost koja se očituje u sposobnosti apsorpcije kinetičke energije u unutrašnju potencijalnu energiju prilikom kontakta bloka s podlogom.

Ključne riječi: *Kombinirana metoda konačno diskretnih elemenata, energija loma, raspucavanje betonskih blokova.*

1 UVOD

U procesu proizvodnje velikih kamenih blokova, propisanih minimalnih dimenzija, koji se koriste kod izrade lukobrana i sl. javlja se potreba za određivanjem maksimalne visine sa koje blokovi mogu padati i međusobno se sudarati a da ne dođe do njihovog pucanja i raspadanja na manje dijelove. Ovaj problem također je izražen i u samim lukobranima ili pomorskim gatovima kada se kameni ili betonski blokovi uslijed djelovanja valova međusobno sudaraju zbog čega može doći do pojave i razvoja pukotina unutar samih blokova.

Predviđanje pojave i razvoja pukotina uslijed kontaktne interakcije kod krutih ili kvazi krutih materijala nameće potrebu za razvojem numeričkog modela koji može obuhvatiti pojave vezane za ponašanje uslijed dinamičkog djelovanja u linearno-elastičnoj i nelinearnoj fazi, prijelaz iz kontinuuma u diskontinuum, inercijalne efekte uslijed gibanja, međudjelovanja koja su posljedica dinamičkog međudjelovanja te naposljetku postizanje stanja mirovanja koje se javlja kao posljedica gubitka energije u sustavu. Sve prethodno navedene efekte moguće je obuhvatiti primjenom kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata [1, 2].

Ova metoda zasniva se na simulaciji sustava s velikim brojem elemenata koji su modelirani s po jednim diskretnim elementom. Svaki diskretni element koji se može naći u interakciji s njemu bliskim diskretnim elementima modeliran je vlastitom mrežom konačnih elemenata čime je omogućena njegova deformabilnost. Materijalna nelinearnost, uključujući i pojavu pukotina i fragmentaciju diskretnih elemenata,

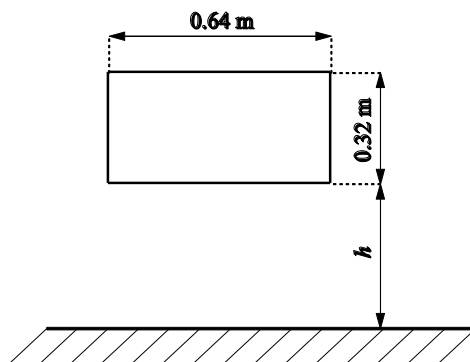
obuhvaćena je kontaktnim elementima koji su implementirani između mreže konačnih elemenata [3]. Da bi se u bilo kojem vremenskom koraku moglo analizirati kontaktno međudjelovanje, razvijen je algoritam za pretraživanje diskretnih elemenata koji se nalaze u kontaktu [4] te algoritam za obradu sila u elementima koji se nalaze u kontaktnom međudjelovanju [5, 6].

2 NUMERIČKA ANALIZA

U nastavku je prikazana serija numeričkih primjera padanja betonskih blokova na apsolutno krutu podlogu sa visina $h=1.0$ m i $h=2.0$ m. Betonski blokovi su dimenzija 64×32 cm sa karakteristikama materijala prikazanim u Tablici 1. Shema numeričkog eksperimenta prikazana je na Slici 1.

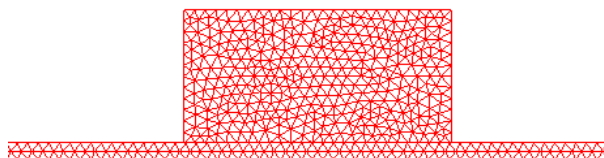
Modul elastičnosti E	30.5 GPa
Vlačna čvrstoća f_t	4.0 MPa
Posmična čvrstoća f_s	12.0 MPa
Poissonov koeficijent ν	0.20
Gustoća ρ	2340 kg/m ³

Tablica 1. Karakteristike materijala



Sl. 1. Shema numeričkog eksperimenta

Primjeri su analizirani s usvojenim različitim energijama loma ($G_f=2\gamma = 100$ N/m, $G_f=2\gamma = 250$ N/m, $G_f=2\gamma = 500$ N/m, $G_f=2\gamma = 750$ N/m, $G_f=2\gamma = 1000$ N/m i $G_f=2\gamma = 1500$ N/m). Blok je diskretiziran u programu Gmsh sa 726 trokutnih konačnih elemenata prosječne dužine stranice u iznosu $d=25$ mm kao što je prikazano na Slici 2.



Sl. 2. Mreža konačnih elemenata kojima je diskretiziran blok

U svim primjerima koeficijent trenja je usvojen $\eta = 0.4$, a prigušenije je uzeto kao kritično prema [1] u iznosu

$$\xi = 2 \cdot d \cdot \sqrt{e \cdot \rho} = 422404, \quad (1)$$

Kao mjeru za određivanje potrebne veličine trokutnog konačnog elementa uzeta je gruba aproksimacija duljine donje granice plastične zone na vrhu pukotine [1]

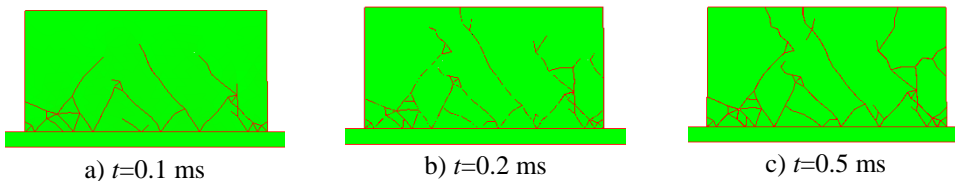
$$\Delta = \frac{\pi E \delta_c}{32 f_t}, \quad (2)$$

koja je dobivena iz Muskhelishvilijevog egzaktnog rješenja za stanje naprezanja u blizini pukotine opterećene u vlaklu koja se nalazi na tijelu beskonačne duljine u ravninskom stanju naprezanja. Kritična širina pukotine δ_c u izrazu (2) predstavlja razmak između stjenki pukotine kada naprezanje pada na nulu, a koji je funkcija vlačne čvrstoće materijala f_t i energije loma G_f . U Tablici 2 prikazane su vrijednosti kritične širine pukotine i procijenjene vrijednosti duljine plastične zone na vrhu pukotine, dobivene iz izraza (2), karakteristične za fizikalne karakteristike materijala korištene u analiziranim primjerima.

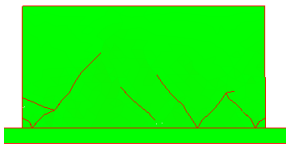
f_t (MPa)	G_f (J/m)	δ_c (mm)	Δ (mm)
4.0	100.0	0.065	48.475
4.0	250.0	0.162	121.188
4.0	500.0	0.324	242.377
4.0	750.0	0.486	363.565
4.0	1000.0	0.648	484.753
4.0	1500.0	0.971	727.130

Tablica 2. Kritične širine pukotina i duljina plastične zone na vrhu pukotine u ovisnosti o vlačnoj čvrstoći i energiji loma

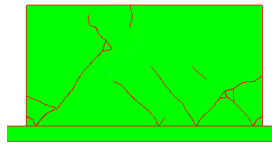
Da bi se mogla opisati koncentracija naprezanja koja se javlja na vrhu pukotine odnosno u plastičnoj zoni, potrebno je da duljina konačnog elementa bude manja od duljine plastične zone. Iz Tablice 2 vidljivo je da je najmanja procijenjena duljina plastične zone koja se javlja u dotičnim primjerima 48.475 mm što znači da bi se ista mogla opisati sa dva elementa duljine $h=25$ mm. Vrijeme je mjereno od trenutka dodira bloka sa podlogom.



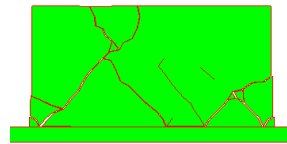
Sl. 3. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=1.0$ m, $G_f=100$ N/m



a) $t=0.1$ ms

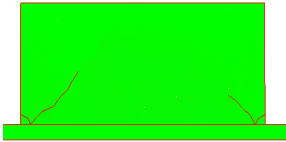


b) $t=0.3$ ms

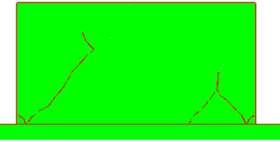


c) $t=1.4$ ms

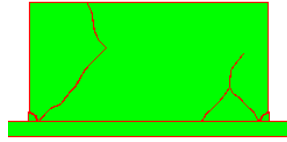
Sl. 4. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=1.0$ m, $G_f=250$ N/m



a) $t=0.1$ ms



b) $t=0.3$ ms

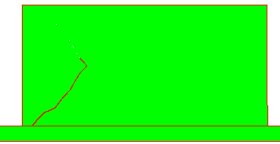


c) $t=1.0$ ms

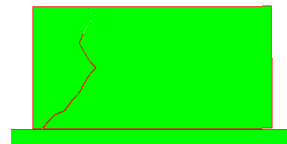
Sl. 5. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=1.0$ m, $G_f=500$ N/m



a) $t=0.1$ ms

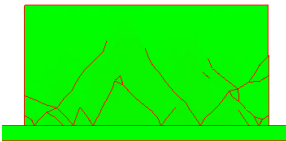


b) $t=0.5$ ms

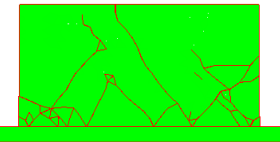


c) $t=1.7$ ms

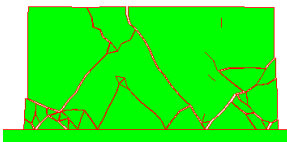
Sl. 6. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=1.0$ m, $G_f=750$ N/m



a) $t=0.1$ ms

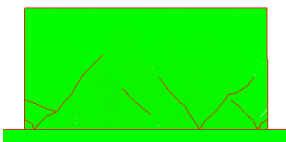


b) $t=0.3$ ms

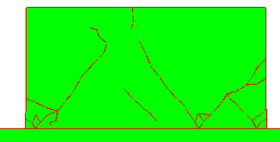


c) $t=1.4$ ms

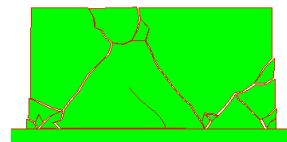
Sl. 7. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=2.0$ m, $G_f=250$ N/m



a) $t=0.1$ ms

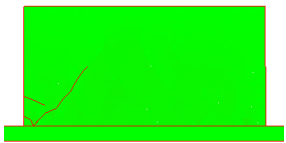


b) $t=0.3$ ms

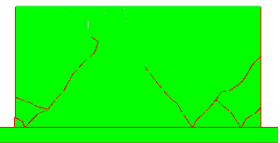


c) $t=1.4$ ms

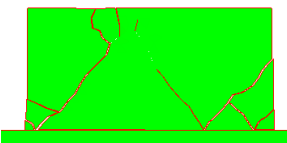
Sl. 8. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=2.0$ m, $G_f=500$ N/m



a) $t=0.1$ ms

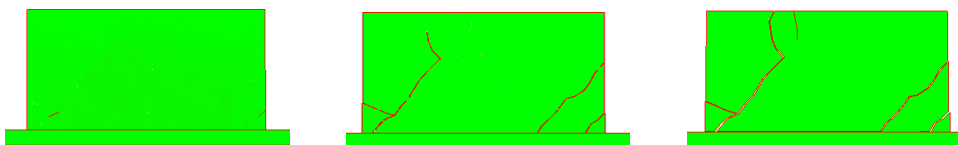


b) $t=0.3$ ms



c) $t=1.0$ ms

Sl. 9. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=2.0$ m, $G_f=750$ N/m

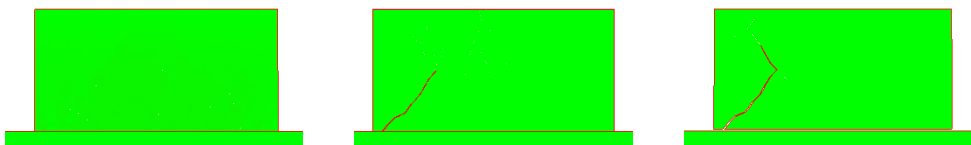


a) $t=0.1$ ms

b) $t=0.5$ ms

c) $t=1.0$ ms

Sl. 10. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=2.0$ m, $G_f=1000$ N/m

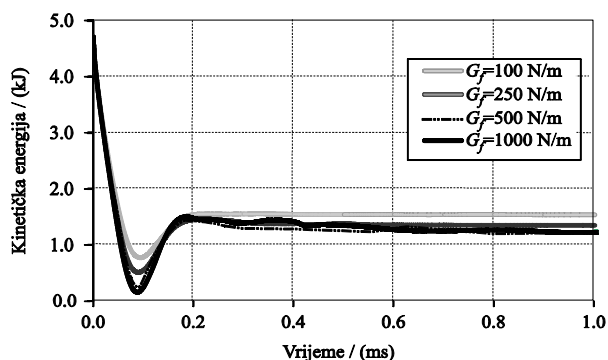


a) $t=0.1$ ms

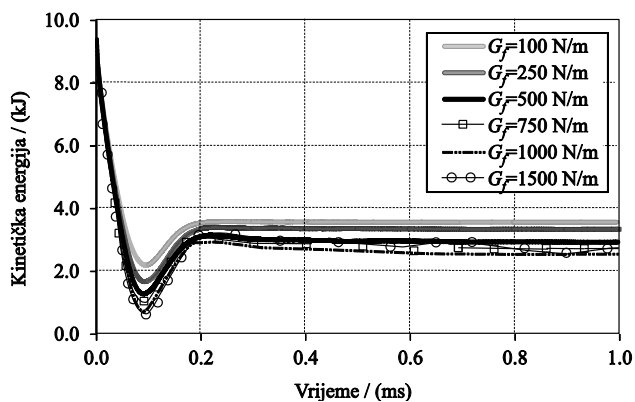
b) $t=0.5$ ms

c) $t=1.7$ ms

Sl. 11. Razvoj pukotina u bloku nakon pada sa visine $h=2.0$ m, $G_f=1500$ N/m



Sl.12. Kinetička energija blokova prilikom pada sa visine $h=1.0$ m



Sl. 13. Kinetička energija blokova prilikom pada sa visine $h=2.0$ m

3 ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je primjena kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata u analizi pojave i razvoja pukotina u betonskim blokovima prilikom slobodnog pada na apsolutno krutu podlogu.

U provedenim analizama varirana je visina slobodnog pada betonskih blokova koja je iznosila $h=1.0$ m i $h=2.0$ m te energija loma u vrijednostima od 100 N/m do 1500 N/m.

Na temelju rezultata dobivenih iz provedenih analiza može se zaključiti da energija loma ima značajan utjecaj na predložak pukotina te predstavlja vrlo važan podatak kojeg je potrebno uzeti u obzir prilikom analize pukotina u kontaktnoj interakciji. Uzorci s većom energijom loma imaju veću duktilnost koja se očituje u sposobnosti apsorpcije kinetičke energije u unutrašnju potencijalnu energiju prilikom kontakta bloka s podlogom zbog čega blokovi sa većom energijom loma imaju manji broj pukotina u odnosu na blokove s manjom energijom loma i jednakom vlačnom čvrstoćom. Provedene analize upućuju na to da je pri određivanju maksimalne visine s koje betonski blok može pasti a da ne nastanu pukotine potrebno poznavati energiju loma materijala. Daljnje analize je potrebno provesti da bi se utvrdilo na koji način vlačna i posmična čvrstoća utječu na pojavu i razvoj pukotina uslijed kontaktnog međudjelovanja te u kolikoj mjeri energija loma utječe na raspucavanje u odnosu na čvrstoću materijala. Također je potrebno napraviti daljnja istraživanja kako bi se utvrdilo kako se energija loma i čvrstoća mijenja kod materijala izloženih brzim dinamičkim opterećenjima.

Zahvala

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom *Razvoj numeričkih modela armirano-betonskih i kamenih zidanih konstrukcija izloženih potresnom opterećenju zasnovanih na diskretnim pukotinama* (IP-2014-09-2319).

Literatura:

- [1] Munjiza, A., *The combined finite-discrete element method*, John Wiley & Sons UK, 2004.
- [2] Munjiza, A., Knight E.E., Rouiger, E., *Computational Mechanics of Discontinua*, John Wiley & Sons UK, 2012.
- [3] Munjiza, A., Andrews, K.R.F., White, J.K., Combined single and smeared crack model in combined finite-discrete element method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 44, 1999, str. 41-57.
- [4] Munjiza, A., Rougier, E., John, N.W.M. MR linear contact detection algorithm, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 66, 2006; str. 46-71.
- [5] Munjiza, A., Andrews, K.R.F., White, J.K., Penalty function method for combined finite-discrete element system comprising large number of separate bodies, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 49, 2000, str. 1377-1396.
- [6] Xiang, J., Munjiza, A., Latham, J.P., Guises, R., On the validation of DEM and FEM/DEM models in 2D and 3D, *Engineering Computations*, Vol. 26, 2009, str. 673-687.

Autori:

Nikolina Živaljić, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Katedra za teoriju konstrukcija, Matice Hrvatske 15, tel. 021/303-323, e-mail: nikolina.zivaljic@gradst.hr

Hrvoje Smoljanović, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Katedra za teoriju konstrukcija, Matice Hrvatske 15, tel. 021/303-378, e-mail: hrvoje.smoljanovic@gradst.hr

Željana Nikolić, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Katedra za teoriju konstrukcija, Matice Hrvatske 15, tel. 021/303-332, e-mail: zeljana.nikolic@gradst.hr