

Vpliv mehanskih lastnosti kamnine na odboj kamnitega kosa

The impact of mechanical properties of rock to the collision of rock piece

Borut MACUH & Bojan ŽLENDER

Univerza Maribor, Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija
e-pošta: borut.macuh@uni-mb.si, bojan.zlender@uni-mb.si

Ključne besede: podor, trk, enoosna tlačna trdnost, modul elastičnosti

Key words: rock-fall, collision, uniaxial compressive strength, elasticity modulus

Izvleček

Namen pričujočega prispevka je ugotoviti pogoje pri katerih pride do loma kamnitega kosa in s tem do zmanjšanja njegove mase in spremembe odbojnih karakteristik. Lom kamnitega kosa je odvisen od strukture in kvalitete kamnine, ki sta izraženi z modulom elastičnosti in enoosno tlačno trdnostjo kamnine.

Abstract

The paper presents the analytical solution of the rock piece motion considering influences of geometrical and mechanical characteristics of rock mass on the arbitrary slope. The main objective of the paper is to determine the motion of the rock piece considering possibility of rock piece failure due to collision. Brief description of the analytical solution of the rock piece motion on a steep slope is given. The laboratory tests were performed to determine uniaxial compressive strength and elastic properties of the considered rock mass. Further, velocities that cause rock piece failure were determined. These maximum velocities indirectly belong to certain mass of rock piece and can be lower than velocities calculated in rock-fall analysis for certain slope geometry. Consequently, the energy magnitude is limited, because at certain velocity and mass of rock piece bigger pieces crash at collision.

Uvod

Članek obravnava vpliv mehanskih lastnosti podorne kamnine na pogoje odboja padajočega kamenja. Analitične rešitve gibanja posameznega kamnitega kosa po pobočju se izpeljejo z upoštevanjem teorije trka dveh teles in prostega pada.

Rešitve upoštevajo naslednje vplive: velikost in maso kamnitega kosa, geometrijo pobočja, ravnost podlage, vpadni kot, pogoje trka, hrapavost podlage oz. pogoje drsenja in gravitacijo.

Obravnavane so naslednje mehanske in geometrijske lastnosti kamnine: masa in velikost padajočega kamenja, koeficient trka,

koeficient statičnega trenja, koeficient kinetičnega trenja, enoosna tlačna trdnost in modul elastičnosti. S terensko prospekcijsko in laboratorijskimi preizkusi so bili določeni odbojni parametri, trdnost in elastičnost obravnavane kamnine in posredno določene hitrosti pri katerih pride do loma posameznih kamnitih kosov.

Rezultati analitičnih rešitev so običajno translacijske in rotacijske hitrosti gibanja kamnitega kosa pred in po vsakem odboju od podlage, spremembe hitrosti po odbojih, vpadni koti in koti odboja od podlage, število odbojev, krivulje gibanja kamnitega kosa,

dolžine in višine posameznih odbojev ter iz njih izhajajoče energije.

Z upoštevanjem pogojev loma kamnitega kosa pa imajo te rešitve določene omejitve. Namen pričujočega prispevka je analizirati pogoje pri katerih pride do loma kamnitega kosa in s tem do zmanjšanja njegove mase in spremembe odbojnih karakteristik. Lom kamnitega kosa je odvisen od strukture in kvalitete kamnine, ki sta izraženi z modulom elastičnosti in enoosno tlačno trdnostjo kamnine. Parametri strukture in kvalitete kamnine se določijo kot kombinacija rezultatov terenske raziskave in laboratorijskih preizkusov trdnosti vzorcev kamnin.

Teorija trka

Uporabljena je teorija trka, ki s koeficientom trka e upošteva pogoje trka, s koeficientoma statičnega μ in kinetičnega μ' trenja pa upošteva pogoje hrapavosti oz. možnost drsenja (Kane & Levinson, 1985).

Izpeljave uporabljene teorije apliciramo na obravnavano okroglo kamnito maso z maso m in radijem R , ki trči pod kotom α ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) glede na osnovo s translatorsno hitrostjo $\mathbf{v}_1$ in kotno hitrostjo $\boldsymbol{\omega}_1$ (slika 1). Generalizirane hitrosti v smeri $\mathbf{n}_i$, ter v časih t_1 (pred trkom) in t_2 (po trku) označimo z u_{i1} oziroma u_{i2} ($i = 1, 2, \dots, 6$). Njihove začetne vrednosti so:

$$\begin{aligned} u_{11} &= \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n}_1 = v_1 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \cos \alpha_3 \\ u_{21} &= \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n}_2 = v_1 \cdot (\cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_3 + \sin \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1) \\ u_{31} &= \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n}_3 = v_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 \\ u_{41} &= \boldsymbol{\omega}_1 \cdot \mathbf{n}_1 = \omega_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 \\ u_{51} &= \boldsymbol{\omega}_1 \cdot \mathbf{n}_2 = \omega_1 \cdot (\sin \alpha_2 \cdot \sin \alpha_3 + \cos \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1) \\ u_{61} &= \boldsymbol{\omega}_1 \cdot \mathbf{n}_3 = \omega_1 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \cos \alpha_3 \end{aligned} \quad (1)$$

Če je smer gibanja kamnite mase v ravnini, ki jo tvorita enotska vektorja in $\mathbf{n}_1$ in $\mathbf{n}_2$, ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0$), se generalizirane hitrosti reducirajo v naslednje izraze:

$$\begin{aligned} u_{11} &= \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n}_1 = v_1 \cdot \cos \alpha_3 \\ u_{21} &= \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n}_2 = v_1 \cdot \sin \alpha_3 \\ u_{61} &= \boldsymbol{\omega}_1 \cdot \mathbf{n}_3 = \omega_1 \cdot \cos \alpha_3 \end{aligned} \quad (2)$$

Trk – odboj brez drsenja

Pogoj, da pride do trka je $u_{21} < 0$. Hitrosti po trku so v primeru gibanja kamnite mase v ravnini, ki jo tvorita enotska vektorja in $\mathbf{n}_1$ in $\mathbf{n}_2$ enake

$$\begin{aligned} u_{12} &= -R \cdot u_{62} \\ u_{22} &= -e \cdot u_{21} \\ u_{32} &= -R \cdot u_{42} = 0 \\ u_{42} &= \frac{I \cdot u_{41} - m \cdot R \cdot u_{31}}{m \cdot R^2 + I} = 0 \\ u_{52} &= 0 \\ u_{62} &= \frac{I \cdot u_{61} - m \cdot R \cdot u_{11}}{m \cdot R^2 + I} = \frac{2}{7} \cdot u_{61} - \frac{5}{7} \cdot \frac{u_{11}}{R} \end{aligned} \quad (3)$$

Komponenti impulza v tangencialni smeri S_1 in normalni smeri S_2 sta

$$\begin{aligned} S_1 &\approx m \cdot (u_{12} - u_{11}) \\ S_2 &= -m \cdot (e + 1) \cdot u_{21} \end{aligned} \quad (4)$$

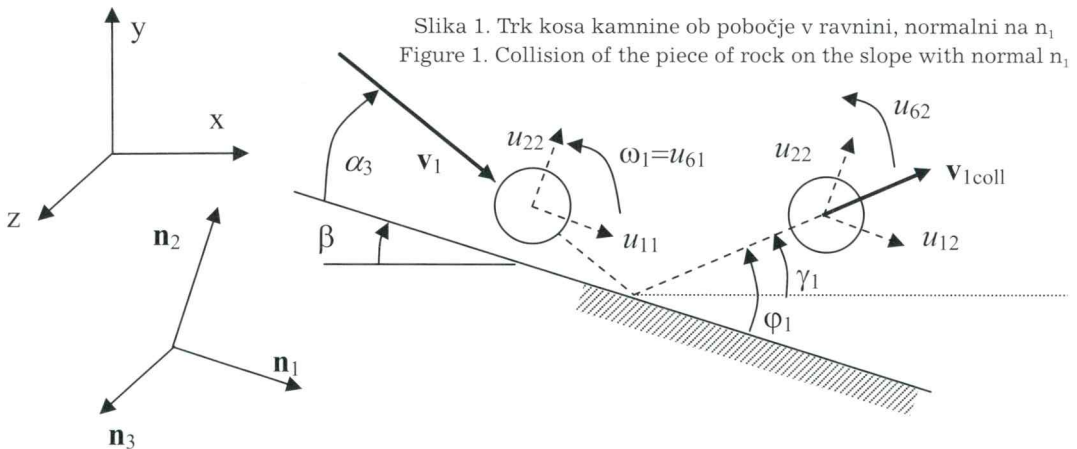
Če je izpolnjen pogoj

$$|S_1| < \mu |S_2| \quad (5)$$

$$u_{12} - u_{11} < \mu \cdot (e + 1) \cdot u_{21}$$

v času t_2 ne pride do drsenja ter je kot odboja enak

$$\varphi' = \arctan |u_{22} / u_{12}| \quad (6)$$



Drsenje

V primeru, da pogoj (5) ni izpolnjen, pride v času t_2 do drsenja in je potrebno uporabiti naslednje dodatne enačbe:

$$\alpha^* \cong u_{11} + R \cdot u_{61} \quad (7)$$

$$S_1 = -\mu' \cdot \alpha^* \cdot |S_2|/|\alpha^*|$$

$$u_{12} \cong u_{11} + S_1 / m \quad (8)$$

$$u_{62} \cong u_{61} + R \cdot S_1 / I$$

Kot odboja φ' je prav tako enak izrazu (6). V obeh primerih, tudi ko je $u_{12} < 0$, je dejanski kot odboja enak

$$\varphi = \pi/2 + \varphi' \quad (9)$$

Kotaljenje

Kotaljenje nastopi, ko je hitrost po odboju manjša od neke primerljive hitrosti $v_{\min}$. Obravnavamo različne primere, glede na velikost naklona pobočja β in strižni kot φ .

$$\beta = \varphi$$

Končna hitrost v_k je enaka hitrosti pred začetkom kotaljenja v_z .

$$v_k = v_z \quad (10)$$

$$\beta > \varphi$$

Hitrost se povečuje, če poznamo razdaljo d od začetka kotaljenja do opazovane točke je končna hitrost v_k enaka (v_z je začetna hitrost tangencialno na segment):

$$v_k = \sqrt{v_z^2 + 2 \cdot d \cdot g \cdot (\pm \sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \varphi)} \quad (11)$$

Zgornji predznak v gornji enačbi je uporabljen za začetno hitrost navzdol ali nič, spodnji pa za začetno hitrost navzgor.

$$\beta < \varphi$$

Hitrost se zmanjšuje, končno razdaljo d_k določimo z izrazom:

$$d_k = -\frac{v_z^2}{2 \cdot g \cdot (\pm \sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \varphi)} \quad (12)$$

Analiza padajočega kamenja

Pobočje opišemo v globalnem kartezijemskem koordinatnem sistemu. Pobočje razdelimo na segmente, ki jih opišemo z množico

ravnin, točk, ki tvorijo ravnine in so njihove ogliščne točke in linij, ki razmejujejo posamezne ravnine.

Karakteristike odboja

Obravnavamo kamnito maso z lastnostmi

m [kg]	masa
V [m ³]	prostornina
ρ [kg/m ³]	gostota
R [m]	pripadajoči radij idealno okrogle kamnite mase
I [kgm ²]	pripadajoči vztrajnostni moment

$$V = \frac{T}{\gamma} = \frac{m \cdot g}{\rho \cdot g}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot m}{3 \cdot \pi \cdot \rho}} \quad (13)$$

$$I = \frac{2}{5} m \cdot R^2$$

Trk kamnite mase ob površino pobočja opišemo z mehanskimi parametri

e [-]	koeficient trka
μ [-]	koeficient statičnega trenja
μ' [-]	koeficient kinetičnega trenja

Potek analize

Padajoči kos kamnine z maso m in radijem R ima nek začetni položaj na pobočju (x_0, y_0, z_0) in začetno hitrost (v_0, ω_0), ki je posledica odloma kamnite mase. Hitrost gibanja telesa opišemo s komponentami v kartezijemskem koordinatnem sistemu.

Njihove začetne vrednosti za prvi korak so:

v_{x0} [m/s]	horizontalna translatorska hitrost v smeri geološkega prereza na pobočje
v_{y0} [m/s]	vertikalna translatorska hitrost
v_{z0} [m/s]	horizontalna translatorska hitrost v smeri pravokotni na prerez
ω_{x0} [s ⁻¹]	kotna hitrost okoli x osi
ω_{y0} [s ⁻¹]	kotna hitrost okoli y osi
ω_{z0} [s ⁻¹]	kotna hitrost okoli z osi

Komponente hitrosti pred trkom, zapisane v globalnem koordinatnem sistemu, transformiramo v lokalni koordinatni sistem, ki ima izhodišče v točki trka tako, da je rezultanta translatorske hitrosti v ravnini, ki jo definirata enotska vektorja n_1 in n_2 .

Enotski vektor n_1 deluje v smeri tangente na pobočje, enotski vektor n_2 pa v smeri normale.

Členi transformacijske matrike iz globalnega v lokalni koordinatni sistem so smerni kosinusi osi lokalnega glede na globalni koordinatni sistem.

Nadalje določimo velikosti rezultante translatorne hitrosti in rezultantne kotne hitrosti, njihove komponente v lokalnem koordinatnem sistemu ter komponente generalizirane hitrosti pred trkom.

Z uporabo zvez iz teorije trka določimo generalizirane hitrosti po trku, normalno in tangencialno komponento translatorne in kotne hitrosti po trku v lokalnem koordinatnem sistemu ter komponente translatorne hitrosti v globalnem koordinatnem sistemu.

Po odboju se zaradi prostega pada poveča vertikalna komponenta hitrosti, ostale komponente ostanejo nespremenjene. Najprej izračunamo položaj točke trka, koordinate točke drugega trka, vpadna kota glede na pobočje in vpadno hitrost pred drugim odbojem.

Izračunamo tudi maksimalno višino odboja padajočega kosa kamnine med odbojema.

Po zgornjem opisu ponavljamo analizo za vse naslednje odboje.

V vsakem trenutku lahko določimo translatorno, rotacijsko in totalno kinetično energijo:

$$W_{k,t} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$W_{k,r} = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad (14)$$

$$W_{k,tot} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + \frac{1}{2} I \cdot \omega$$

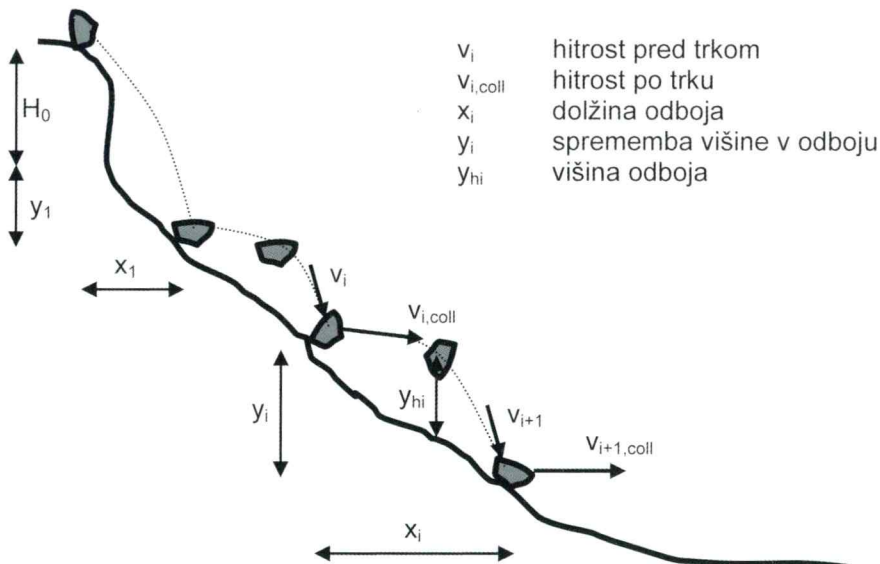
Hitrost pri lomu

Za določitev hitrosti pri porušitvi predlagamo naslednji postopek. Kljub temu, da so vrednosti posameznih količin v predstavljenem postopku podane za laporje z Meljskega hriba v Mariboru, je postopek uporaben za kakršnikoli drug material.

Interval časa odboja ob oviro Δt je določen iz poti $s = R \cdot \varepsilon_f = v_{pop} \cdot \Delta t$ (zajema deformabilnost osnove, R je radij kamnitega kosa, ε_f pa specifična deformacija pri porušitvi), ki jo je opravljal kamniti kos pri poprečni mejni hitrosti pri porušitvi $v_{pop} = v_f/2$:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot R \cdot \varepsilon_f}{v_f} \quad (15)$$

Z uporabo zakona o enakosti spremembe gibalne količine in impulza lahko določimo mejno hitrost pri porušitvi za okrogel kamniti kos $\Delta G = F \cdot \Delta t \Rightarrow m \cdot v_f = F \cdot \Delta t = \sigma_{ci} \cdot A \cdot \Delta t$; $= \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot R^3}{3}$;). Mejna hitrost pri porušitvi v_f in energija pri tem W_f sta enaki:



Slika 2. Prerez pobočja s prikazano potjo kosa kamnine
Figure 2. Cross-section of the slope with motion of rock piece

$$v_f = \sigma_{ci} \cdot \sqrt{\frac{3}{2 \cdot \rho \cdot E}} \quad (16)$$

$$W_f = \frac{3 \cdot m \cdot \sigma_{ci}^2}{4 \cdot \rho \cdot E},$$

kjer je E elastični modul, ρ gostota kamnite mase, m masa in σ_{ci} enoosna tlačna trdnost kamnite mase. Za gostoto kamnite mase je bila vzeta vrednost $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, enoosna tlačna trdnost in elastični modul pa sta bila določena z laboratorijskimi preiskavami. Poiskati je potrebno odnos med elastičnim modulom in maso za določitev mejne hitrosti pri porušitvi za posamezni kamniti kos. Poprečna masa preizkušancev je bila okoli 0.75 kg, elastični modul za vse preizkušance je razviden iz slike 4 in je enak 4600 MPa.

Ker so bile mase preizkušancev relativno majhne (okoli 1 kilogram), smo elastični modul za večje mase določili indirektno kot funkcije mase iz zveze podane v Hoek s sodelavci. (2002).

$$E_m [\text{GPa}] = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (17)$$

kjer je D dislokacijski faktor, ki vključuje relaksacijo napetosti in poškodbe hribine pri gradnji ($D = 1$), σ_{ci} je enoosna tlačna trdnost ter GSI je geološki indeks trdnosti.

Hitrost pri kateri pride do loma kamnitega kosa ob trku s podlago je torej odvisna predvsem od enoosne tlačne trdnosti in elastičnega modula. Z višanjem enoosne tlačne trdnosti kamnitega kosa se viša tudi hitrost pri kateri pride do loma, z višanjem modula elastičnosti pa se mejna hitrost (nelinearno) manjša.

Primer uporabe

Uporabnost modela je prikazana na praktičnem primeru potencialnega padanja kamenja po pobočju Meljskega hriba. Ob vznožju hriba vzdolž reke Drave je situirana cesta v nevoznem stanju, predvidena pa je gradnja nove ceste. Dolžina obravnavanega odseka ceste je približno 500 m in je izpostavljena padajočemu kamenju z bližnjega zelo strmega pobočja, ki med drugim vsebuje v zgornjem delu previse. V analizi so upoštevane predpostavljene vrednosti mase, velikosti in oblike kamnitih kosov, višina pada s previsa in aproksimirana konfiguracija terena (z naključnimi nakloni pobočja v točkah trka).

Pobočja Meljskega hriba so izredno strma, v osrednjem delu okoli 45° , zgornje stene pa so skoraj navpične. Hrib v celoti do višine 150 m sestavljajo plasti laporja s polami peščenjaka. Plasti vpadajo proti severu pod kotom $15\text{--}20^\circ$. V spodnjem delu ob erozijskih jarkih so vpadi niz pobočja pod kotom $15\text{--}30^\circ$. Preko pobočja (prečno na pobočje) poteka več prelomov, ob katerih se ustvarjajo erozijski jarki, po katerih odnaša material v dolino.

V spodnjem delu je pobočje dokaj zaraščeno z drevjem in grmovnicami, medtem ko so previsi v zgornjem delu nezaraščeni. Na pobočju je vidnih šest večjih žlebov (erozijskih jarkov) po katerih se odbijajo, kotlijo oz. drsijo razpadle kamnite mase, ki so vidne v vznožju žlebov in pod ogroženo cesto vse do struge reke Drave. Večino kamnite mase tvorijo zdrobljeni kosi do premera 10 cm, posamezni kamniti kosi pa so tudi do premera približno 50 cm.

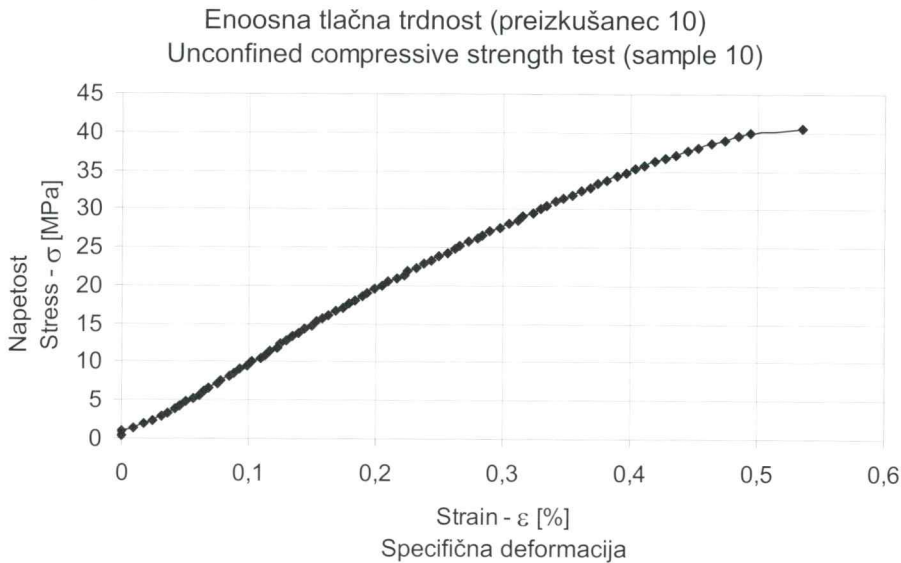
Cesta, ki je že več kot 20 let v nevoznem stanju je bila v preteklosti varovana pred padajočim kamenjem s palisadami ter kamnitimi in opečnimi zidovi. Ti ukrepi varovanja so dotrajani in večinoma neuporabni.

Terenska raziskava

Na osnovi zbranih podatkov in terenske prospekcije obravnavanega območja smo ugotovili, da obstaja velika in permanentna možnost odlomov kamnitih mas iz stene strmega pobočja zaradi vremenskih in ostalih vplivov. Na stenah so razvidne sledi prepevanja in ponekod večje razpoke.

Laboratorijski preizkusi

Laboratorijski preizkusi enoosne tlačne trdnosti so bili izvedeni na trinajstih (13) preizkušancih lapornatih kosov z območja Meljskega hriba v Mariboru. Preizkušanci so bili iregularne oblike z različnimi razmerji višina proti premer ter različnimi površinami prereзов po višini. Mase preizkušancev so bile med 0.3 in 1.5 kg. Na sliki 3 je prikazan linija odvisnosti napetost – specifična deformacija za enega od takšnih testov. Na sliki 4 pa je razviden elastični modul za obravnavano kamnino, ki je enak regresijski premici skozi izhodišče in točke za napetosti in specifične deformacije pri porušitvi. Večina vrednosti enoosnih tlačnih trdnosti je bila med 35 MPa in 55 MPa, porušitev pa je nastopila pri specifični deformaciji med



Slika 3. Odnos napetost – deformacija za preizkušanec 10
Figure 3. Stress vs. strain for sample 10

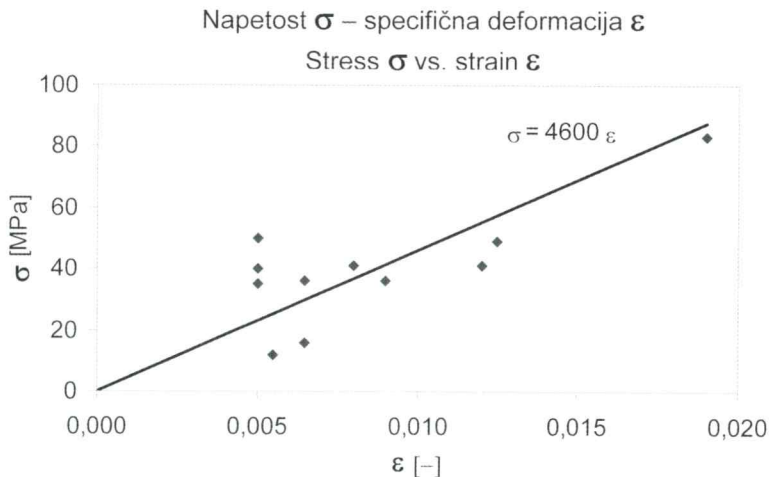
0.5% in 1.25%. Poudariti je potrebno, da se specifične deformacije pri porušitvi nanašajo na statične pogoje.

Privzete lastnosti kamnine

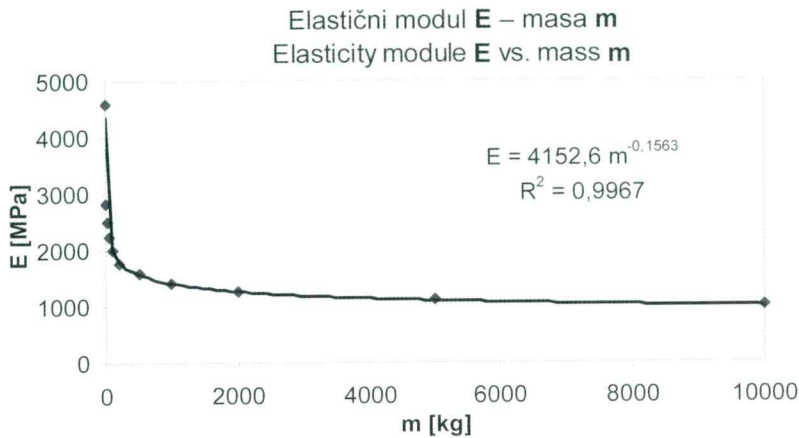
Na sliki 5 je prikazan odnos med elastičnim modulom in maso, ki vključuje elastični modul 4600 MPa za poprečno maso preizkušancev 0.75 kg iz slike 4 in izračunane elastične module za ocenjene geološke indekse trdnosti za različne izbrane mase in poprečno enoosno tlačno trdnost iz preizkusov $\sigma_{ci} = 40$ MPa. Te vrednosti lahko aprok-

simiramo z eksponentno funkcijo $E = 4152.6 \cdot m^{-0.1563}$, ki je bila uporabljena v nadaljnjih izračunih.

Prav tako je na sliki 5 v grafični obliki prikazan izraz (17). Hitrosti pri porušitvi so predstavljene kot funkcije elastičnega modula $E = 4152.6 \cdot m^{-0.1563}$ za različne enoosne tlačne trdnosti σ_{ci} . Ker je elastični modul enak naklonu napetostne deformacijske linije za linearno elastičen material, lahko izračunamo hitrosti pri porušitvi za določeno mejno specifično deformacijo in elastični modul. Hitrosti pri porušitvi za izolinije treh mejnih specifičnih deformacij $\varepsilon_f = 0.5, 1$



Slika 4. Odnos napetost – deformacija za pri porušitvi
Figure 4. Stress vs. strain at failure



Slika 5. Odnos elastični modul – masa za $\sigma_{ci} = 40$ MPa
Figure 5. Elasticity module vs. mass for $\sigma_{ci} = 40$ MPa

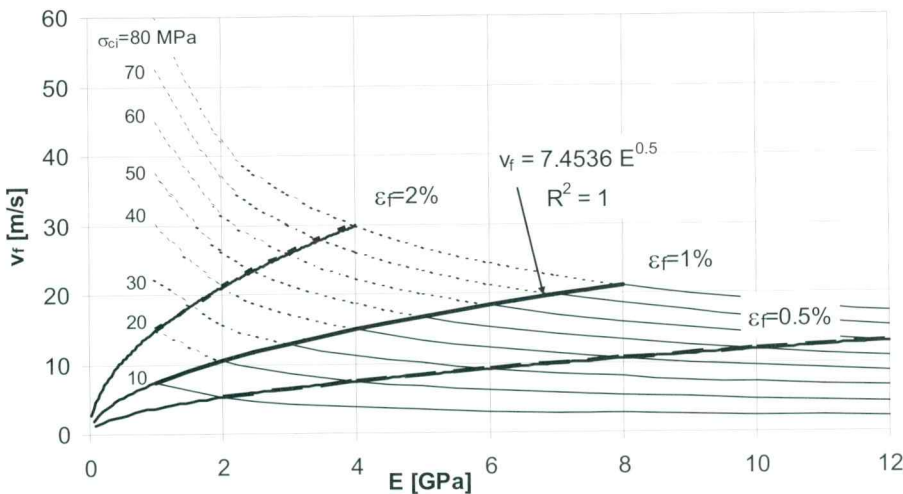
in 2% pri porušitvi so prikazane na sliki 6. Enačba regresijske linije hitrost pri porušitvi za izbrano mejno specifično deformacijo pri porušitvi ε_f je enaka:

$$\begin{aligned} v_f [m/s] &= \frac{\sigma_{ci}}{E} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E}{2 \cdot \rho}} = \varepsilon_f \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E}{2 \cdot \rho}} = \\ &= 745.36 \cdot \varepsilon_f \cdot \sqrt{E [GPa]} \\ v_f [m/s] &= \frac{\sigma_{ci}}{E} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E}{2 \cdot \rho}} = \varepsilon_f \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E}{2 \cdot \rho}} = \varepsilon_f \cdot \\ &\cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E [GPa] \cdot 10^9}{2 \cdot 2700}} = 745.36 \cdot \varepsilon_f \cdot \sqrt{E [GPa]} \end{aligned} \quad (18)$$

Za vrednost mejne specifične deformacije pri porušitvi ε_f enaki 1% dobi zgornja enačba naslednjo obliko $v_f = 7.4536 \cdot E^{0.5}$.

Iz slike 6 je razvidno, da se velikost mejne hitrosti pri porušitvi povečuje z večjo enoosno tlačno trdnostjo σ_{ci} in mejno specifično deformacijo pri porušitvi ε_f . Nadalje, z večanjem mase (ki pomeni manjšanje elastičnega modula) mejna hitrost pri porušitvi raste pri določeni enoosni tlačni trdnosti in doseže svoj maksimum pri določeni mejni specifični deformaciji pri porušitvi.

Za laporje z območja Mejskega hriba lahko iz slike 6 ugotovimo, da je maksimalna hitrost kamnitega kosa z enoosno tlačno trdnostjo $\sigma_{ci} = 80$ MPa pri $\varepsilon_f = 2\%$ okoli 30 m/s (ali 108 km/h). Z laboratorijskimi preizkusi pa smo ugotovili, da je maksimalna specifična deformacija pri porušitvi bližje vrednosti 1%, in maksimalna hitrost okoli 21 m/s (ali okoli 75 km/h).



Slika 6. Odnos hitrost pri porušitvi – elastični modul, kot funkcija enoosne tlačne trdnosti σ_{ci} in izolirane mejnih specifičnih deformacij pri porušitvi ε_f
Figure 6. Velocities at failure vs. elasticity module as functions of uniaxial compressive strength σ_{ci} and isolines of limit strain at failure ε_f

Zaključki

Analitična rešitev gibanja kamnitega kosa po pobočju upošteva vplive geometrijskih in mehanskih karakteristik kamnite mase in pobočja.

Gibanje kamnitega kosa je opisano s pogoji trka, poleg pogojev drsenja in kotavljenja so upoštevani tudi pogoji loma kosa kamnine.

Do loma pride pri neki mejni hitrosti kosa kamnine. Ta mejna hitrost je izražena kot funkcija modula elastičnosti, enosne tlačne trdnosti in mejne specifične deformacije kamnine pri lomu. Mejne hitrosti so lahko nižje od izračunane hitrosti padajočega kamenja za določeno geometrijo pobočja, v tem primeru pride do loma kamnitega kosa.

Velikost energije padajoče kamnite mase je torej omejena z njeno mejno hitrostjo pri lomu.

Prikazan primer uporabe kaže, da je rešitev uporabna pri načrtovanju varovalnih ukrepov na pobočju in v njegovem vznožju (varovanje cest, stavb, ..).

Literatura

Macuh, B. & Žlender, B. 2005: Spatial model of rock-fall. V: Eberhardt, E. (ur.). International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, May 31 to June 3, 2005. Landslide risk management: proceedings: supplementary volume (CD).

Macuh, B. & Žlender, B. 2006: Influence of mechanical characteristics of rock piece on rock-fall analysis results. V: Eberhardt, E. (ur.). Proc. XIII th Danube European Conference on Geotechnical Engineering, Ljubljana, Slovenia, 29–31 May 2006, 2, 807–812.

Kane, R.T. & Levinson, A.D. 1985: Dynamics: Theory and Applications. McGraw-Hill, pp. 379, New York.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. 2002: Hoek-Brown criterion – 2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, 1, 267–273, Toronto.