

PRIMJENA INDEKSNIH METODA ISPITIVANJA U ODREĐIVANJU MEHANIČKIH ZNAČAJKI INTAKTNOG STIJENSKOG MATERIJALA

APPLICATION OF INDEX TESTING METHODS IN DETERMINING MECHANICAL PROPERTIES OF INTACT ROCK MATERIAL

IVANA DOBRILLOVIĆ¹, VLATKO GULAM², PETAR HRŽENJAK³

¹Geo-eko d.o.o., Nikole Pavića 11, 10000 Zagreb, Hrvatska

²Hrvatski geološki institut, Sachsova 2, 10000 Zagreb, Hrvatska

³Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: indeksne metode ispitivanja, mehaničke značajke, intaktni stijenski material

Key words: index testing methods, mechanical properties, intact rock material

Sažetak

U radu je prikazan pregled indeksnih metoda ispitivanja s detaljnijim osvrtom na primjeni postupka određivanja tvrdoće Schmidtovim čekićem te određivanja indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki u procjenama mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala. Uz to su prikazani i rezultati provedenih ispitivanja na utvrđivanju primjenjivosti spomenutih metoda u procjenama jednoosne tlačne čvrstoće, modula elastičnosti, vlačne čvrstoće te čvrstoće na savijanje za tri karakteristična tipa vapnenaca iz krovinskih naslaga ležišta „Korenići“.

Abstract

The review of index testing methods with detailed observations on the application of Schmidt rebound hardness and point load strength index in mechanical properties estimations of intact rock material is given in this paper. The results of conducted testing in determining applicability of the above-mentioned testing methods for the estimations of uniaxial compressive strength, elasticity modulus, tensile strength and flexural strength for three characteristic types of limestone from the roof layers of „Korenići“ deposit are also presented.

Uvod

Pod mehaničkim značajkama materijala obično se podrazumijevaju osnovna mehanička svojstva kao što je čvrstoća i deformabilnost, čije se vrijednosti najčešće određuju postupcima laboratorijskih ispitivanja na uzorcima standardnih veličina. Uzorak intaktnog stijenskog materijala predstavlja zapravo cjelovit uzorak stijene bez većih vidljivih oštećenja, odnosno pukotina ili oslabljenja materijala, uslijed kojih bi se on raspadao. Većina postupaka laboratorijskih ispitivanja propisana je preporučenim metodama (Suggested Methods, SM) izdanih od strane Međunarodnog društva za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanics, ISRM) ili ASTM (American Society for Testing and Materials) normama, a neki postupci i drugim nacionalnim normama ili normama ISO organizacije (International Organization for Standardization).

Pri tome, propisi koji se odnose na oblik, dimenzije i kvalitetu obrađenosti površina uzoraka vrlo su zahtjevni i u praksi se teško postižu. S obzirom na diskontinuirani karakter stijena, odnosno razlomljenost stijenske mase uslijed genetskih i postgenetskih procesa, često je zapravo slučaj potpune nemogućnosti pripreme uzoraka zadovoljavajućih dimenzija i kvalitete ispitivanog materijala. Zbog toga su razvijene različite indirektno, odnosno indeksne metode ispitivanja, na temelju čijih se rezultata, primjenom prethodno utvrđenih korelacija, procjenjuju vrijednosti značajnijih (više korištenih) mehaničkih značajki stijena. Mehaničke značajke koje se najviše koriste u mehanici stijena su jednoosna tlačna čvrstoća i modul (Youngov) elastičnosti. Gotovo da nema inženjerskih zadataka, počevši od klasifikacija i procjena čvrstoća i deformabilnosti stijenskih masa pa

do različitih proračuna, u kojima se ne bi koristila značajka kao što je jednoosna tlačna čvrstoća (Cargill & Shakoor, 1990). Prema tome, jednoosna tlačna čvrstoća predstavlja jednu od najznačajnijih mehaničkih značajki koja se koristi u mehanici stijena.

S obzirom na karakteristike metoda, indeksna ispitivanja u mehanici stijena predstavljaju ispitivanja kojima se utvrđuju pokazatelji određenog svojstva, a ne samo svojstvo materijala. Metode mogu biti više ili manje jednostavne, relativno brze i jeftine u provedbi, a neke od njih su i nerazorne zbog čega im je primjena vrlo ekonomična (Cargill & Shakoor, 1990). Jednostavnije metode ne zahtijevaju posebnu pripremu ili obradu uzoraka dok one složenije to mogu. Primjena jednostavnijih metoda ispitivanja je zbog toga znatno raširenija, čime su stečena i veća saznanja o primjenjivosti istih u procjenama mehaničkih značajki materijala. Međutim, provedbom ispitivanja na različitim materijalima i u različitim uvjetima, stečena su isto tako ponešto različita iskustva, na temelju kojih su dane određene smjernice. S ciljem utvrđivanja primjenjivosti jednostavnijih metoda indeksnih ispitivanja, to jest metode određivanja tvrdoće Schmidtovim čekićem i određivanja indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki, u procjenama mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala, provedena su laboratorijska ispitivanja na tri karakteristična, vrlo različita vapnenca po fizikalno-mehaničkim značajkama, koji pripadaju krovinskim naslagama ležišta „Korenići“.

Indeksne metode ispitivanja

Uvodno o metodama ispitivanja

Indeksnim metodama ispitivanja, koje se uspješnije mogu koristiti u određivanju mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala, najčešće se smatraju: određivanje tvrdoće (odskočne) Schmidtovim čekićem (Schmidt Rebound Hardness, SRH), određivanje indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki (Point Load Test, PLT) i određivanje BP indeksa čvrstoće (Block Punch strength Index) te ostale, koje ili nemaju veću primjenu ili su još u fazi razvoja, kao što je na primjer CST (Core Strangle Test). U literaturi se ove metode najčešće još zovu i indirektnim metodama ispitivanja (Kahraman, 2001). Uz njih, kao jedna od indirektnih metoda ispitivanja koja se koristi za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti, često se podrazumijeva i metoda za određivanje brzina prolaza ultrazvučnih elastičnih valova. Međutim, metoda za određivanje brzina prolaza ultrazvučnih elastičnih valova je postupak direktnog ispitivanja, odnosno mjerenja brzina prolaza valova, zbog čega je onda ispravnije metodu tako i promatrati.

S ciljem otklanjanja glavnih nedostataka konvencionalnih metoda ispitivanja, a naročito PLT-a, za indirektno određivanje vrijednosti jednoosne tlačne

čvrstoće razvijen je CST test (Yilmaz, 2009). Ispitivanjem se određuje CS (Core Strangle) indeks na jezgri promjera 25 mm ili više. Princip ispitivanja je sličan PLT-u uz osnovnu razliku što se ispitivanje ne provodi u jednoj točki već se prstenom obuhvati jezgra i preko prstena nanosi sila. Na taj se način obuhvaća veća površina uzorka, što predstavlja veliku prednost ukoliko se ispitivanja provode na heterogenim stijenama (Yilmaz, 2009). Međutim, kako uređaj za ovo ispitivanje ima prilično složenu konstrukciju, što uz mogućnost ispitivanja samo valjkastih uzoraka te nepostojanja samog uređaja na tržištu, ne očekuje se da ova metoda relativno brzo dođe u veću primjenu.

Postupak određivanja BP indeksa čvrstoće temelji se na sili koja je potrebna da bi se klinom širine 19,5 mm poprečno istisnuo dio materijala iz uzorka u obliku diska, minimalnog promjera 42 mm. Cilj razvoja i ovog postupka bila je metoda ispitivanja kojom bi se dobili bolji rezultati procjene čvrstoće materijala na manjim uzorcima, na kojima nisu moguće primjene metode klasičnih ispitivanja (Ulusay et al., 2001). Međutim, istraživanja su pokazala da je pri određivanju BP indeksa čvrstoće jako bitna korekcija vrijednosti prema veličini uzoraka, odnosno da uzorci deblji od 15 mm ne bi trebali biti ispitivani jer je kod takvih uzoraka uočen povećan broj neregularnih lomova. Nadalje, utvrđivanjem raspodjele naprežanja pri ovom ispitivanju zaključeno je da određivanje BP indeksa čvrstoće nije pogodno za direktno određivanje posmične čvrstoće, iako se na početku metoda upravo s tim ciljem razvila, zbog čega je i ovo ispitivanje potrebno promatrati kao indeksnu metodu ispitivanja (Sulukcu & Ulusay, 2001). Ispitivanjem je utvrđena nešto bolja korelacija s jednoosnom tlačnom čvrstoćom te vlačnom čvrstoćom dobivenom brazilskim testom u odnosu na korelacije dobivene PLT postupkom ispitivanja. (Ulusay et al., 2001). Međutim, kako je za provedbu ispitivanja BP indeksa čvrstoće ipak potrebna određena priprema i obrada uzoraka te također nepostojanja uređaja na tržištu, metoda još uvijek nema širu primjenu.

Na temelju svega izloženog može se zaključiti da određivanje tvrdoće Schmidtovim čekićem te određivanje indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki, kao indeksne metode ispitivanja, zbog svoje jednostavnosti u provedbi još uvijek imaju najširu primjenu, zbog čega je u nastavku dan detaljniji pregled objavljenih rezultata istraživanja primjenom ovih metoda ispitivanja.

Postupak određivanja tvrdoće Schmidtovim čekićem

Schmidtov čekić je u originalnoj izvedbi konstruiran 1948. godine kao uređaj za nerazornu metodu ispitivanja čvrstoće betona na mjestu njegove ugradnje (Schmidt, 1951). Od tada se primjena Schmidtovog čekića naglo proširila i na druga područja, odnosno ispitivanja drugih materijala kao što je na primjer ugljen ili općenito stijenski materijal. Već 1966. godine Deere i

Miller daju korelacije između vrijednosti tvrdoće dobivene Schmidtovim čekićem i tlačne čvrstoće materijala za različite stijene, pri čemu su utvrdili da tip stijene ima značajni utjecaj na razvoj empirijskih relacija, odnosno da se dobivaju bolje korelacije ukoliko se vrijednosti odskočne tvrdoće pomnože s gustoćom materijala (Deere & Miller, 1966). Schmidtov čekić sastoji se od utega koji uslijed oprugom akumulirane energije udara u čelični klip koji je u kontaktu s površinom ispitivanog materijala (ISRM, 1978b). Vrijednost odskoka utega nakon udara u odnosu na njegov ishodišni položaj prije udara predstavlja zapravo mjeru odskočne tvrdoće ispitivanog materijala. U primjeni postoje modeli Schmidtvog čekića s različitim energijama udara. Najčešće se koristi L-tip čekića s energijom udara od 0,735 Nm i N-tip s energijom udara od 2,207 Nm. Prema prvotnim preporukama ISRM-a, ispitivanja se mogu provoditi na valjkastim uzorcima ne manjeg promjera od približno 54 mm ili na blokovima s ne manjim duljinama stranica od 60 mm. Prije ispitivanja Schmidtov čekić potrebno je umjeriti na čeličnom nakovnju za kalibraciju, koji je izrađen od strane proizvođača Schmidtvog čekića. Korekcijski faktor se dobiva na temelju omjera specificirane vrijednosti odskoka i dobivene prosječne vrijednosti od 10 ispitivanja na čeličnom nakovnju za kalibraciju. Prilikom ispitivanja potrebno je uraditi najmanje 20 ispitivanja po svakom uzorku materijala, pri čemu je potrebno da se kod svakog ispitivanja mjesto udara pomakne najmanje za vrijednost promjera čeličnog klipa. Za vrijednost odskočne tvrdoće materijala uzima se prosječna vrijednost od dobivenih 10 većih vrijednosti, koja se zatim množi s korekcijskim faktorom.

Objavljivanjem rezultata istraživanja mnogih autora došlo se do značajnih saznanja o primjenjivosti Schmidtvog čekića u određivanju mehaničkih značajki materijala. Vrijednost odskoka odražava zapravo kombinaciju djelovanja međusobno povezanih svojstava materijala kao što je modul elastičnosti, čvrstoća, tvrdoća, gustoća i cementacija zrna. Ispitivanja su pokazala da osim navedenih svojstava zaglađenost površina ima značajnu ulogu na povećanje vrijednosti odskoka. Vrijednost odskoka kao i ponovljivost rezultata povećava se s intenzitetom zaglađenosti površina na kojima se provode ispitivanja Schmidtovim čekićem (Katz et al., 2000). Korelacije između jednoosne tlačne čvrstoće i Schmidtove tvrdoće najbolje se utvrđuju eksponencijalnim funkcijama jer se jednoosna tlačna čvrstoća eksponencijalno povećava s produktom gustoće materijala i odskočne tvrdoće (Kahraman, 2001). Međutim, izvedene jednadžbe od strane različitih autora jako ovise o tipu materijala i uvjetima ispitivanja. Osim propisanog postupka ispitivanja prema ISRM-u postoje i drugi postupci, kao što je na primjer postupak Hucka ili Poolea i Farmera, koji se razlikuju u broju ponavljanja ispitivanja u istoj točki (Kahraman et al., 2002). Postupak Hucka temelji se na uzimanju najveće vrijednosti odskoka od deset

ponovljenih ispitivanja u istoj točki dok postupak Poolea i Farmera na uzimanju najveće vrijednosti od pet ponovljenih ispitivanja u istoj točki. Uspoređujući dobivene vrijednosti laboratorijskih ispitivanja tvrdoće Schmidtovim čekićem na jezgrama s vrijednostima ispitivanja na terenu došlo se do zaključka da su dobivene vrijednosti odskoka kod laboratorijskih ispitivanja, u slučaju postupaka Hucka te Poolea i Farmera, manje od terenskih vrijednosti za razliku od postupka ISRM-a kod kojega je situacija suprotna (Kahraman et al., 2002). S obzirom na različite vrijednosti kuta pod kojim se ispitivanja mogu provoditi u odnosu na horizontalu, što je najčešće vezano uz uvjete ispitivanja na terenu i uzrok dobivanja različitih vrijednosti odskoka, razvijena je metoda za normalizaciju vrijednosti koja se može primijeniti kod svih tipa čekića i ispitivanja u svim smjerovima (Basu & Aydin, 2004).

Detaljnijim istraživanjem više čimbenika koji imaju utjecaja na tvrdoću dobivenu Schmidtovim čekićem utvrđeno je da bi se u pravilu trebali koristiti veći uzorci od NX promjera, da je potrebno utvrditi mogući uzrok rasipanja vrijednosti prilikom ispitivanja a ne samo koristiti 10 najvećih vrijednosti kako to preporučuju norme, te da vrijednosti koje su dobivene ponavljanjem ispitivanja u istoj točki nije dobro koristiti za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti, zbog toga što su te vrijednosti više vezane uz stupanj trošnosti materijala a ne mehaničke značajke pa je u skladu s tim treba i koristiti (Aydin & Basu, 2005). Tim istraživanjima utvrđeno je i to da veličina zrna ima značajnu ulogu na raspršenje dobivenih vrijednosti, zbog čega N-tip čekića daje nešto bolje rezultate, upravo zbog primjene veće energije udarca čime se zapravo zahvati veći volumen materijala prilikom ispitivanja. Uspoređujući dobivene korelacije različitih autora može se zaključiti da one jako ovise o tipu materijala, odnosno o mikrostrukturnim značajkama kao i o uvjetima ispitivanja, zbog čega je potrebno korelacije koristiti s oprezom u procjenama mehaničkih značajki različitih materijala (Fener et al., 2005). Provedena usporedna ispitivanja s L i N-tipom čekića na različitim materijalima pokazala su da je N-tip Schmidtvog čekića efikasniji i precizniji u procjeni jednoosne tlačne čvrstoće materijala u rasponu od 20 do 290 MPa (Buyuksagis & Goktan, 2007). Uz to utvrđeno je da metode s ponavljanjem ispitivanja u istoj točki daju nešto veće vrijednosti koeficijenta korelacije od onih koje se temelje na pojedinačnom ispitivanju u različitim točkama. Istraživanja na utvrđivanju optimalne veličine uzoraka kod laboratorijskih ispitivanja, primjenom različitih metoda ispitivanja na različitim vrstama stijena, pokazala su da bi uzorci u obliku kocke trebali imati najmanju veličinu stranica od 110 mm da bi se dobile jednake vrijednosti laboratorijskih i terenskih ispitivanja (Demirdag et al., 2009).

Na temelju rezultata svih istraživanja, predložena je revizija ISRM preporuke za određivanje odskočne

tvrdoće u laboratorijskim i terenskim uvjetima, s naglaskom na primjeni vrijednosti, kao indeksne veličine, u procjeni jednoosne tlačne čvrstoće i modula (Youngovog) elastičnosti stijenskog materijala (Aydin, 2009). Najznačajnije smjernice revidirane metode odnose se na tip čekića, veličinu uzoraka te obradu podataka ispitivanja. S obzirom na veću energiju udarca te manju osjetljivost na površinske nepravilnosti, čekić N-tipa se preporuča koristiti kod terenskih ispitivanja i čvršćih materijala. Schmidtov čekić L-tipa može se koristiti za čvrstoće u rasponu od 20 do 150 MPa s obzirom da on ima bolju razlučivost kod slabijih stijena. Promjer valjkastih uzoraka ne bi smio biti manji od NX promjera (54,7 mm) kod ispitivanja s L-tipom čekića te po mogućnosti 84 mm kod ispitivanja s N-tipom čekića. Uzorci kvadratnog oblika ne bi smjeli imati debljinu manju od 100 mm na mjestu ispitivanja. Pri ispitivanju uzoraka potrebno je koristiti čelično postolje minimalne mase od 20 kg kod ispitivanja s L-tipom te 40 kg kod ispitivanja s N-tipom čekića. Dobivene vrijednosti pri ispitivanju, s obzirom na položaj čekića u odnosu na horizontalu, potrebno je korigirati s normalizacijskim funkcijama. Ispitivanje se provodi na način da se uradi najmanje 20 ispitivanja po svakom uzorku materijala, pri čemu je potrebno da se kod svakog ispitivanja mjesto udara pomakne najmanje za vrijednost promjera čeličnog klipa. Na temelju dobivenih vrijednosti, bez odbacivanja ijednog podatka, računa se prosječna vrijednost, medijan i mod.

Pregled objavljenih rezultata istraživanja na utvrđivanju korelacijskih veza između tvrdoće (odskočne) utvrđene Schmidtovim čekićem i jednoosne tlačne čvrstoće te modula elastičnosti za različite materijale dalo je nekoliko autora (Aydin & Basu, 2005; Fener et al., 2005; Yagiz, 2009). Na temelju rezultata svih istraživanja jasno je da usprkos primjene jednakih uvjeta i metoda ispitivanja nije moguće postići jedinstvenu korelacijsku vezu primjenjivu na sve vrste i tipove stijena (Yagiz, 2009). Zbog toga je potrebno utvrđene korelacijske veze koristiti oprezno i samo za specificirane tipove materijala.

Određivanje indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki

Razvoj ove metode ispitivanja može se reći da je započeo istraživanjima D'Andrea i Reichmutha (D'Andrea et al., 1964; Reichmuth, 1968), koji su koristili vrlo slične metode ispitivanja u procjeni tlačne čvrstoće preko drugih svojstava te studiji utjecaja veličine i oblika uzoraka na čvrstoću stijena. Broch i Franklin (Broch & Franklin, 1972) su nakon toga pojednostavili složenu jednadžbu Reichmutha u oblik koji se i danas koristi te predložili indeks čvrstoće koji se određuje postupkom opterećenja u točki, popularno nazvan PLT (Cargill & Shakoore, 1990). Metoda je kasnije prihvaćena od strane Međunarodnog društva za mehaniku stijena, prema kojoj je, kao indeksna metoda

ispitivanja, namijenjena za klasifikaciju intaktnog stijenskog materijala (ISRM, 1985). Metoda se može koristiti u procjeni i ostalih veličina, kao što je na primjer jednoosna tlačna i vlačna čvrstoća, što je kasnije zapravo predstavljao glavni uzrok razvoja i primjene ove metode ispitivanja. Postupkom ispitivanja određuje se indeks čvrstoće $I_{s(50)}$ te indeks anizotropije $I_{a(50)}$ stijenskog materijala koji su svedeni na standardnu dimenziju uzoraka. Uređaj za provedbu ispitivanja sastoji se od dijela za nanošenje opterećenja, uređaja za mjerenje sile potrebne za slom uzoraka i dijela za mjerenje udaljenosti između dva kontaktna šiljka. Dio za nanošenje opterećenja sastoji se od okvira, konusnih šiljaka od tvrdog metala te hidraulične pumpe i potisnog cilindra. Konusni šiljci služe za prijenos opterećenja na uzorak. Šiljci moraju biti izvedeni pod kutom od 60° te radijusom zakrivljenosti od 5 mm na samom vrhu, pri čemu centriranost mora biti dobro osigurana. Ispitivanje se provodi na uzorcima pravilnih ili nepravilnih oblika. Standardno ispitivanje provodi se na valjkastim uzorcima s promjerom D od 50 mm. Ispitivanje se može provesti kao: poprečno ispitivanje, osno ispitivanje i ispitivanje uzoraka nepravilnih oblika. Poprečno ispitivanje provodi se na uzorcima koji imaju odnos duljina/promjer veći od 1, a osno na uzorcima koji imaju odnos duljina/promjer od 0,3 do 1. Ispitivanje uzoraka nepravilnih oblika provodi se na uzorcima koji imaju približnu veličinu 50 ± 35 mm te odnos debljine i širine D/W približno između 0,3 i 1. Pri ispitivanju mora se osigurati da udaljenost od kraja uzorka do kontaktne točke L bude najmanje $0,5 \times D$. Opterećenje se nanosi kontinuirano tako da se slom dogodi između 10 i 60 s pri čemu je potrebno zabilježiti najveću silu. Preporuča se provesti najmanje deset ili više ispitivanja ovisno o kvaliteti jezgre i ujednačenosti uzoraka. Kod određivanja indeksa čvrstoće anizotropnih stijena, odnosno indeksa anizotropije materijala, ispitivanje je potrebno provesti u najjačem i najslabijem smjeru, što zapravo znači okomito i paralelno plohama oslabljenja. Kod valjkastih uzoraka najbolji se rezultati dobivaju ako je os uzoraka okomita na plohe oslabljenja. Nakon sloma uzorka ocjenjuje se valjanost ispitivanja koja se provodi na temelju izgleda lomnih ploha.

Indeks čvrstoće $I_{s(50)}$ za uzorke različitih oblika i dimenzija računa se preko izraza:

$$I_{s(50)} = F \frac{P}{D_e^2}, \quad (1)$$

gdje je:

- F – korekcijski faktor,
- P – sila loma (N),
- D_e – efektivni promjer uzorka (m).

Korekcijski faktor uveden je iz razloga ako se ispitivanja provode na uzorcima čiji efektivni promjeri ne iznose 50 mm. Korekcijski faktor računa se izrazom:

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad (2)$$

Efektivni promjer za uzorke nepravilnog oblika računa se relacijom:

$$D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}} \quad (3)$$

gdje je:

W - prosječna širina uzorka (m),
 D - razmak točaka opterećenja, tj. debljina uzorka na mjestu ispitivanja (m).

Istraživanja na utvrđivanju korelacijskih veza između indeksa čvrstoće $I_{s(50)}$ i jednoosne tlačne čvrstoće za različite vrste stijena provodilo je mnogo autora, a pregled objavljenih rezultata tih istraživanja dalo je nekoliko autora (Fener et al., 2005; Kahraman et al., 2005). Na temelju objavljenih rezultata istraživanja može se zaključiti da su korelacijske veze između indeksa čvrstoće $I_{s(50)}$ i jednoosne tlačne čvrstoće za različite vrste i tipove stijena uglavnom ostvarene preko linearnih funkcija s različitim vrijednostima koeficijentata prirasta. Utvrđene vrijednosti koeficijenta kreću se od 15 do 50. Zbog tih razlika poduzeta su određena istraživanja i pokušaji nalaženja teorijskih rješenja za utvrđene razlike u vrijednostima koeficijenta (Chau & Wong, 1996). Teorijskim razmatranjima u posljednje vrijeme došlo se do zanimljivih rezultata. Novim analitičkim pristupom u interpretaciji raspodjele naprezanja unutar uzorka predložen je kriterij sloma koji otkriva činjenicu da PLT zapravo pruža pouzdaniju procjenu tlačne čvrstoće nego li vlačne, iako se u početku upravo suprotno vjerovalo (Russell & Wood, 2009). Osim toga, rezultati istraživanja su pokazali postizanje boljih korelacijskih veza ukoliko se stijene podijele u grupe prema porozitetu (Kahraman et al., 2005). Pri tome je utvrđeno da stijene s poroznošću manjom od 1 % imaju značajno strmiji pravac korelacije od stijena s poroznošću većom od 1 %. Nadalje, istraživanja su pokazala da prodiranje šiljka u materijal prilikom ispitivanja može biti značajno, naročito kod svježih i čvršćih stijena (Basu & Aydin, 2006). Ukoliko se pri tome računa indeks čvrstoće $I_{s(50)}$ s vrijednošću razmaka u trenutku sloma, dobivaju se veće vrijednosti te bolje korelacije s jednoosnom tlačnom čvrstoćom. Na temelju iznesenog, kao i u slučaju prethodne metode, može se konstatirati da nije moguće postići jedinstvenu korelacijsku vezu, koja bi bila primjenjiva na sve vrste i tipove stijena uz zadovoljavajuću pouzdanost procjene.

Provedena ispitivanja

Materijal i metode ispitivanja

Kako je već u uvodnom dijelu spomenuto, laboratorijska ispitivanja provedena su na tri karakteristična vapnenca, vrlo različita po fizikalno-mehaničkim značajkama, koji pripadaju krovinskim naslagama ležišta arhitektonsko-građevnog kamena „Korenići“ u Istri. Ležište izgrađuju slojeviti vapnenci krednih i paleogenih naslaga. Kamen je determiniran kao organogeni vapnenac ili mikrit, poznat pod udomaćenim nazivom kao „istarski žuti“. Uzorci kamena pripadaju slojevima neposredne krovine označeni kao A, E i F sloj. Izgled uzoraka prikazan je na slici 1.



Slika 1. Uzorci od A, E i F slojeva
Figure 1 A, B and F layers specimens

Od laboratorijskih ispitivanja provedeno je: određivanje gustoće i poroznosti materijala; ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće i deformabilnosti materijala (Youngov modul elastičnosti); ispitivanje vlačne čvrstoće brazilskim testom; ispitivanje čvrstoće na savijanje; određivanje indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki (PLT) te određivanje tvrdoće Schmidtovim čekićem (SRH). Sva ispitivanja osim čvrstoće na savijanje provedena su prema preporučenim metodama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1979a; 1979b; 1978a; 1985; 1978b). Čvrstoća na savijanje provedena je prema europskoj normi EN 12372 (CEN, 1999). Kod određivanja tvrdoće (odskočne) Schmidtovim čekićem korištena su dva modela čekića L-tipa, analogni i digitalni. Osnovna razlika između ova dva modela čekića je u tome što analogni čekić radi na mehaničkom principu u mjerenju visine odskoka, dok digitalni mjeri brzinu utega neposredno prije i nakon udara (Proceq, 2007). Pri tome, odnos izmjerene brzine nakon i prije udara kod digitalnog je ekvivalentan odnosu visine odskoka i početne visine pada utega kod analognog čekića. Obje veličine se iskazuju u postotnom iznosu i predstavljaju

apsorbiranu kinetičku energiju. Iako oba čekića mjere istu apsorbanu kinetičku energiju u praksi se vrijednosti prilično razlikuju. Ta razlika uglavnom je posljedica utjecaja gravitacije i trenja kod analognog čekića u odnosu na digitalni kod kojega je taj utjecaj minimaliziran. Zbog toga, kod digitalnog čekića nije potrebno provoditi normalizaciju u odnosu na položaj čekića prema horizontali.

Rezultati ispitivanja

Kako se radi o uslojenim vapnencima, koji često mogu imati izraženu anizotropiju, ispitivanja materijala svakog sloja provedena su na dvije grupe uzoraka; na grupi uzoraka s djelovanjem sile u smjeru okomitom na slojne plohe te na grupi uzoraka s djelovanjem sile u smjeru paralelnom sa slojnim plohami. Kod svake grupe ispitano je po pet uzoraka na temelju čijih su vrijednosti dobivene prosječne vrijednosti, standardne

devijacije te koeficijenti varijacije. Rezultati svih ispitivanja prikazani su tablicom 1.

S ciljem utvrđivanja primjenjivosti indeksnih metoda ispitivanja u određivanju mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala, između dobivenih vrijednosti indeksnih ispitivanja i vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće, modula elastičnosti, vlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje, uspostavljene su korelacije linearnim funkcijama u obliku $y=ax+b$. Korelacije linearnim funkcijama korištene su iz razloga manjeg broja podataka i relativno manjeg raspona vrijednosti te zbog lakše međusobne usporedbe. Kod svake uspostavljene korelacije, osim vrijednosti konstanti funkcije, izračunata je i vrijednost koeficijenta determinacije R^2 . Dobivene vrijednosti koeficijenta determinacije za sve uspostavljene korelacije, kao mjere primjenjivosti korelacijskih funkcija, prikazane su tablicom 2.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja fizikalno-mehaničkih značajki materijala
Table 1 Testing results of physical-mechanical properties of material

Određivana značajka materijala	Sloj A			Sloj E			Sloj F		
	Prosječna vrijednost	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Prosječna vrijednost	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Prosječna vrijednost	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije
Slučaj djelovanja sile u smjeru okomitom na slojne plohe									
Gustoća (kg/m ³)	2643	11	0,004	2363	15	0,006	2170	20	0,009
Poroznost (%)	1,7	0,3	0,195	6,7	0,2	0,036	15,3	0,8	0,050
Jedn. tlačna čvrstoća (MPa)	135,48	14,91	0,110	71,62	11,63	0,162	72,85	5,37	0,074
Modul elastičnosti (GPa)	82,19	3,11	0,038	48,25	5,74	0,119	35,68	1,36	0,038
Vlačna čvrstoća (MPa)	5,58	1,88	0,337	4,70	0,82	0,175	2,76	0,39	0,141
Čvrstoća na savijanje (MPa)	9,73	0,77	0,079	6,04	2,24	0,371	6,20	1,40	0,226
PLT $I_{s(50)}$ (MPa)	3,96	0,12	0,030	3,35	0,29	0,086	2,62	0,49	0,187
SRH-analogni (%)	49,8	1,3	0,026	42,4	2,6	0,061	36,5	2,0	0,054
SRH-digitalno (%)	52,7	0,8	0,016	51,4	1,5	0,029	38,2	4,0	0,103
Slučaj djelovanja sile u smjeru paralelnom sa slojnim plohami									
Gustoća (kg/m ³)	2624	27	0,010	2526	46	0,018	2187	34	0,015
Poroznost (%)	2,3	0,5	0,232	3,9	1,6	0,400	14,8	1,1	0,075
Jedn. tlačna čvrstoća (MPa)	88,88	12,75	0,144	79,46	8,35	0,105	68,66	7,85	0,114
Modul elastičnosti (GPa)	57,45	4,72	0,082	59,10	6,64	0,112	37,02	3,00	0,081
Vlačna čvrstoća (MPa)	4,84	1,93	0,398	3,92	1,02	0,261	2,90	0,47	0,160
Čvrstoća na savijanje (MPa)	7,42	1,61	0,217	0,48	0,21	0,430	6,90	0,73	0,105
PLT $I_{s(50)}$ (MPa)	3,13	0,30	0,097	2,36	0,71	0,299	2,30	0,20	0,089
SRH-analogni (%)	52,5	4,0	0,076	40,0	1,0	0,025	39,0	1,5	0,040
SRH-digitalno (%)	53,2	1,6	0,031	41,9	1,1	0,026	38,3	1,1	0,029

Tablica 2. Vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 za uspostavljene korelacijske funkcije
Table 2 Values of determination coefficients R^2 for established correlation functions

Indeksno ispitivanje	Jednoosna tlačna čvrstoća	Modul elastičnosti	Vlačna čvrstoća	Čvrstoća na savijanje
Slučaj podataka svih grupa uzoraka				
PLT $I_{s(50)}$	0,619	0,539	0,769	0,443
SRH-analogno	0,462	0,533	0,731	0,262
SRH-digitalno	0,346	0,485	0,906	0,198
SRH-analogno × gustoća	0,524	0,663	0,783	0,152
SRH-digitalno × gustoća	0,467	0,659	0,946	0,134
Slučaj podataka s djelovanjem sile u smjeru okomitom na slojne plohe				
PLT $I_{s(50)}$	0,686	0,905	0,975	0,666
SRH-analogno × gustoća	0,829	0,979	0,896	0,813
SRH-digitalno × gustoća	0,536	0,796	0,999	0,514
Slučaj podataka s djelovanjem sile u paralelnom smjeru sa slojnim ploham				
PLT $I_{s(50)}$	0,776	0,253	0,786	0,246
SRH-analogno × gustoća	0,931	0,468	0,936	0,083
SRH-digitalno × gustoća	0,975	0,574	0,978	0,034

Diskusija rezultata

Rezultati provedenih ispitivanja sa statističkom obradom podataka, koji su prikazani tablicama 1 i 2, daju odgovor na nekoliko bitnih postavki. Kao prvo, uspoređujući dobivene vrijednosti koeficijenta varijacije, kao najbolje veličine za utvrđivanje mjere rasipa podataka te međusobnu usporedbu s drugim veličinama, jasno pokazuju da su od mehaničkih značajki najkonzistentniji rezultati dobiveni za tvrdoću određivanu Schmidtovim čekićima te module elastičnosti materijala. Pri tome, tvrdoća određivana digitalnim Schmidtovim čekićem ima u prosjeku manje rasipanje podataka od analognog. Nakon njih po konzistentnosti slijedi jednoosna tlačna čvrstoća te indeks čvrstoće $I_{s(50)}$, koji uz to ima i prilično različite varijacije u odnosu na tlačnu čvrstoću. Najveće mjere rasipa imaju vlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje s prilično različitim varijacijama u vrijednostima. Kao drugo, za slučaj djelovanja sile u smjeru paralelnom sa slojnim ploham u prosjeku su dobivene nešto veće vrijednosti rasipanja podataka nego u slučaju djelovanja sile u okomitom smjeru na slojne plohe prilikom ispitivanja. Uspoređujući dobivene vrijednosti koeficijenta determinacije može se ipak zaključiti da su u prosjeku dobivene nešto bolje korelacije preko vrijednosti tvrdoća Schmidtovim čekićima, nego li preko vrijednosti indeksa čvrstoće $I_{s(50)}$. Pri tome su u prosjeku dobivene slične vrijednosti kod oba modela Schmidtovog čekića. Bolje korelacije su dobivene u slučaju množenja vrijednosti odskoka s gustoćom materijala, što je u skladu s prethodnim istraživanjima drugih autora. Međutim, treba jasno istaći da kod anizotropnih materijala, ukoliko se ne razdvoje rezultati ispitivanja prema orijentaciji uzoraka, ispitivanja Schmidtovim čekićem imaju malu primjenjivost. Najveću „zabunu“, odnosno pogrešku, čine rezultati

ispitivanja u smjeru paralelnom sa slojnim ploham, jer se u tom slučaju dobivaju suprotni trendovi vrijednosti. S druge strane, postupak određivanja indeksa čvrstoće $I_{s(50)}$ pokazao se pogodnijim za utvrđivanje razlike u čvrstoći kod anizotropnih materijala. Općenito gledano, mehaničke značajke kao što je jednoosna tlačna čvrstoća, modul elastičnosti te vlačna čvrstoća su značajke za koje se mogu ostvariti dobre korelacijske veze. Pri tome se modul elastičnosti značajno bolje procjenjuje preko vrijednosti tvrdoće utvrđene Schmidtovim čekićem pri ispitivanju u smjeru okomitom na slojne plohe nego li preko indeksa čvrstoće $I_{s(50)}$. Za razliku od njih, čvrstoća na savijanje predstavlja značajku koja se teško procjenjuje bilo kojom od ovdje korištenih indeksnih metoda ispitivanja.

Zaključak

Metode indeksnih ispitivanja, kao što je postupak određivanja tvrdoće Schmidtovim čekićem te određivanje indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki, su zbog svoje jednostavne primjene doživjele intenzivniji razvoj i korištenje u posljednje vrijeme, a naročito u procjenama jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti materijala. Međutim, provedena su istraživanja potvrdila da nije moguće postići jedinstvenu korelacijsku vezu, koja bi bila primjenjiva na sve vrste i tipove stijena uz zadovoljavajuću pouzdanost procjene. Prema tome, korelacije u jednostavnom matematičkom obliku, odnosno na temelju vrijednosti jedne nezavisne varijable koju u ovom slučaju predstavlja indeksna veličina, potrebno je razvijati za svaku vrstu i tip stijena posebno da bi se dobile pouzdanije procjene vrijednosti mehaničkih značajki materijala. Kod određivanja tvrdoće Schmidtovim čekićem ispitivanje je potrebno provoditi u smjeru okomitom na slojne plohe jer se u tom slučaju dobivaju značajno bolje korelacijske veze.

Pri tome je također potvrđeno da se korelacije u slučaju primjene vrijednosti tvrdoće određivane Schmidtovim čekićem mogu osjetno poboljšati uvođenjem dodatne varijable kao što je gustoća materijala. To upućuje na zaključak da bi daljnji razvoj primjene indeksnih metoda ispitivanja, a naročito postupka određivanja tvrdoće Schmidtovim čekićem, trebalo usmjeriti na uvođenje novih varijabli i složenijih matematičkih modela u procjeni mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala.

Accepted: 29.10.2010.

Received: 20.10.2010.

Literatura

- Aydin, A. (2009): ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 46, pp. 627-634.
- Aydin, A., Basu, A. (2005): The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, Vol. 81, pp. 1-14.
- Basu, A., Aydin, A. (2004): A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 1211-1214.
- Basu, A., Aydin, A. (2006): Predicting uniaxial compressive strength by point load test: significance of cone penetration. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 39, pp. 483-490.
- Broch, E., Franklin, J. A. (1972): The point load strength test. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 9, pp. 669-697.
- Buyuksagis, I. S., Goktan, R. M. (2007): The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 44, pp. 299-307.
- Cargill, J. S., Shakoor, A. (1990): Evaluation of Empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, Vol. 27, pp. 495-503.
- CEN (1999): EN 12372; Natural stone test methods – Determination of flexural strength under concentrated load, Brussels.
- Chau, K. T., Wong, R. H. C. (1996): Uniaxial compressive strength and point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, Vol. 33, pp. 183-188.
- D'Andrea, D. V., Fisher R. L., Fogelson, D. E. (1964): Prediction of compression strength from other rock properties. *Colorado School of Mines*, 59 (4B), pp. 623-640.
- Deere, D. U., Miller, R. P. (1966): Engineering classification of intact rock. Technical Report AFWL-TR-65-116, Kirtland Air Force Base, New Mexico.
- Demirdag, S., Yavuz, H., Altindag, R. (2009): The effect of sample size on Schmidt rebound hardness value of rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 46, pp. 725-730.
- Fener, M., Kahraman, S., Bilgil, A., Gunaydin, O. (2005): A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 38, pp. 329-343.
- ISRM (1978a): Suggested methods for determining tensile strength of rock materials; Part 2: Suggested method for determining indirect tensile strength by the brazil test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 15, pp. 99-103.
- ISRM (1978b): Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rock; Part 3: Suggested method for determination of the Schmidt rebound hardness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 15, pp. 89-98.
- ISRM (1979a): Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties; Part 1.3: Suggested method for porosity/density determination using saturation and caliper techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 16, pp. 141-156.
- ISRM (1979b): Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 16, pp. 135-140.
- ISRM (1985): Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 22, pp. 51-60.
- Kahraman, S. (2001): Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 38, pp. 981-994.
- Kahraman, S., Gunaydin, O., Fener, M. (2005): The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 42, pp. 584-589.
- Kahraman, S., Fener, M., Gunaydin, O. (2002): Predicting the Schmidt hammer values of in-situ intact rock from core sample values. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 39, pp. 395-399.
- Katz, O., Reches, Z., Roegiers, J. C. (2000): Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 37, pp. 723-728.
- Proceq (2007): Silver Schmidt; Operating Instructions. Proceq SA, Schwerzenbach.
- Reichmuth, D. R. (1968): Point load testing of brittle materials to determine tensile strength and relative brittleness. *Status of Practical Rock Mechanics; Proceedings of the 9th US symposium on rock mechanics*, Colorado School of Mines, Boulder, Colorado, pp. 134-159.
- Russell, A. R., Wood, D. M. (2009): Point load tests and strength measurements for brittle spheres. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 46, pp. 272-280.
- Schmidt, E. (1951): A non-destructive concrete tester. *Concrete*, Vol. 59, pp. 5-34.
- Sulukcu, S., Ulusay, R. (2001): Evaluation of the block punch index test with particular reference to the size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength.

- International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 1091-1111.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Sulukcu, S. (2001): Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 1113-1119.
- Yagiz, S. (2009): Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol. 68, pp. 55-63.
- Yilmaz, I. (2009): A new testing method for indirect determination of unconfined compressive strength of rocks. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 46, pp. 1349-1357.