

Određivanje modula deformacije karbonatnih stijena u hrvatskom kršu

Meho Saša Kovačević, Danijela Jurić-Kačunić, Radovan Simović

Ključne riječi

krš,
karbonatne stijene,
stijenska masa,
modul deformacije,
klasificiranje,
laboratorijska ispitivanja,
terenska ispitivanja

Key words

karst,
carbonate rocks,
rock mass,
strain modulus,
classification,
laboratory testing,
in situ testing

Mots clés

karst,
roches carboniques,
masse rocheuse,
module de contrainte,
classification,
essai en laboratoire,
essai in situ

Ключевые слова

карстовый грунт,
карбонатные породы,
масса породы,
модуль деформации,
классификация,
лабораторные
испытания, испытания
на местности

Schlüsselworte

Karst,
Karbonatgestein,
Gesteinsmasse,
Verformungsmodul,
Klassifizierung,
Laboruntersuchungen,
Geländeuntersuchungen

M. Saša Kovačević, D. Jurić-Kačunić, R. Simović

Pregledni rad

Određivanje modula deformacije karbonatnih stijena u hrvatskom kršu

Ističe se da krš zauzima više od polovice površine Hrvatske u kojem prevladavaju karbonatne stijene podložne okršavanju. Dan je pregled laboratorijskih i terenskih ispitivanja modula deformacije stijenske mase te neizravnog određivanja krutosti na temelju rezultata klasificiranja stijenske mase. Prikazana su hrvatska iskustva u primjeni klasifikacija za određivanje modula deformacije stijenske mase neophodna za stjecanje novih spoznaja o krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske.

M. Saša Kovačević, D. Jurić-Kačunić, R. Simović

Subject review

Determination of strain modulus for carbonate rocks in Croatian flysch

It is emphasized that karst is present in more than a half of Croatian areas in which carbonate rocks are affected by karstification. An overview of laboratory and in situ testing of rock mass strain modulus, including an indirect determination of stiffness based on rock mass classification results, is given. Croatian experience in the conduct of classifications aimed at determining the rock mass strain modulus, essential for gaining new knowledge about stiffness of carbonate rocks in Croatian karst, is presented.

M. Saša Kovačević, D. Jurić-Kačunić, R. Simović

Ouvrage de synthèse

Détermination du module de déformation pour les roches carboniques dans le flysch croate

Il est souligné que le karst est présent dans plus d'une moitié des zones croates dans lesquelles les roches carboniques sont soumises à la karstification. Un aperçu sur des essais en laboratoire et in situ du module de déformation de la masse rocheuse, y compris la détermination indirecte de rigidité basée sur les résultats de classification de la masse rocheuse, est présenté. L'expérience croate dans le développement des classifications visées à déterminer le module de contrainte de la masse rocheuse, indispensable pour l'acquisition des connaissances nouvelles sur la rigidité des roches carboniques dans le karst croate, est présentée.

M. Саша Ковачевич, Д. Јурич-Каџунич, Р. Симович

Обзорная работа

Определение модуля деформации карбонатных пород карстовых грунтов Хорватии

В статье указывается, что карстовые грунты занимают большие половины площади Хорватии. В карстовом грунте преобладают карбонатные породы, подверженные разрушению. Приведен обзор испытаний модуля деформации массы породы, проведенных в лабораторных условиях и на местности, а также косвенное определение жесткости на основании результатов классификации массы породы. Описан имеющийся в Хорватии опыт по применению классификации для определения модуля деформации массы породы, необходимый для получения новых сведений о жесткости карбонатных пород в карстовом грунте.

M. Saša Kovačević, D. Jurić-Kačunić, R. Simović

Übersichtsarbeit

Bestimmung des Verformungsmoduls von Karbonatgestein im kroatischen Karst

Es wird hervorgehoben dass der Karst mehr als die Hälfte der Oberfläche Kroatiens einnimmt, wobei dem das der Versplitterung ausgesetzte Karbonatgestein überwiegend ist. Ausgelegt ist ein Überblick der Labor- und Geländeuntersuchungen des Verformungsmoduls der Gesteinsmasse sowie der indirekten Bestimmung der Steifigkeit auf Grund der Ergebnisse des Klassifizierens der Gesteinsmasse. Dargestellt sind kroatische Erfahrungen mit der Anwendung der Klassifikation für die Bestimmung des Verformungsmoduls der Gesteinsmasse, unentbehrlich für den Erwerb neuer Erkenntnisse über die Steifigkeit des Karbonatgesteins im Karst Kroatiens.

Autori: Prof. dr sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl. ing. građ.; dr. sc. **Danijela Jurić-Kačunić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb; **Radovan Simović**, dipl. ing. građ., Institut IGH, Zagreb

1 Uvod

Određivanje krutosti stijenske mase jedna je od najvažnijih zadaća pri provođenju numeričkih analiza u stijenjskom inženjerstvu. Modul elastičnosti stijenske mase nužan je parametar za svaku numeričku analizu i prognozu deformacija geotehničkih konstrukcija. Stijena je uglavnom razlomljena, heterogena, anizotropna i diskontinuirana. Krutost stijenske mase ovisi o stupnju raspucalosti stijenske mase, stišljivosti pukotina i stišljivosti intaktnoga stijenskog materijala između pukotina. Raspucana stijenska masa ima znatno manju krutost od intaktne stijene.

Krutost stijenske mase može se odrediti laboratorijskim ispitivanjima, terenskim ispitivanjima te na temelju rezultata klasificiranja stijenske mase.

2 Laboratorijska ispitivanja modula deformacije stijenske mase

Za ispitivanje modula deformacije u laboratoriju rabe se cilindrični uzorci stijene dobiveni dijamantnim bušenjem koje najmanje oštećuje stijenu i na taj način najbolje reprezentira njezina svojstva krutosti. Obujam je ispitano uzorka $V \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$.

Rezultat laboratorijskih ispitivanja je modul elastičnosti (E) definiran kao omjer naprezanja i deformacija ispod granice proporcionalnosti materijala. Ovisno o tipu stijene, modul elastičnosti varira od 1 do više od 100 GPa [1].

Modul elastičnosti može se ispitivati u jednoosnom ili troosnom stanju naprezanja u uvjetima kontinuiranog prirasta sile ili kontinuiranog prirasta pomaka. Laboratorijski pokusi provode se na uzorcima stijene izrazito malog obujma koji su homogeni i sadrže vrlo malo diskontinuiteta odnosno mikropukotina. Laboratorijska ispitivanja na uzorcima jezgre ne odgovaraju ponašanju stijenske mase većeg obujma. Zbog malih dimenzija uzorak se ponaša kao intaktna stijena i zbog toga daje znatno veće vrijednosti modula elastičnosti od modula dobivenih terenskim ispitivanjima [2]. Farmer i Kemeny [3] su pokazali da su laboratorijski moduli elastičnosti 5 do 20 puta veći od modula dobivenih terenskim ispitivanjima.

Zbog malog obujma uzoraka laboratorijskih ispitivanja ne mogu se izravno primjenjivati u proračunima deformacija geotehničkih konstrukcija izvedenih u stijenskoj masi.

3 Terenska ispitivanja

Terenska se ispitivanja zasnivaju na opterećivanju određenog obujma stijenske mase te mjerenju deformacija izazvanih poznatim naprezanjem. Metode terenskih ispitivanja obuhvaćaju različite obujmove stijenske mase

koji su u većini slučajeva značajno veći od laboratorijskih uzoraka i kao takvi mogu prikazati ponašanje stijenske mase.

Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM) preporučuje sljedeća terenska ispitivanja stijenske mase: pokus opterećenja pločom, pokus radijalnog opterećenja, ispitivanja velikim tlačnim jastucima te ispitivanje fleksibilnim i krutim dilatometrom.

Pokus opterećenja pločom zahvaća obujam stijenske mase oko 2 m^3 [4]. Zasniva se na određivanju modula deformacija mjerenjem pomaka stijenske mase izazvanih opterećivanjem fleksibilnom ili krutom kružnom pločom odgovarajućeg promjera. Za potrebe temeljenja tlo se opterećuje pločom na površini terena. Za projektiranje podzemnih građevina kod kojih je potrebno poznavanje krutosti na velikim dubinama pokus se izvodi u probnim tunelima ili galerijama. Pokus opterećenja pločom, zbog poremećenosti stijenske mase i pretpostavke o linearno-elastičnom ponašanju stijenske mase pri interpretaciji modula, često daje dvojbene rezultate. Boyle [5] ističe da se često dobivaju moduli deformacije nekoliko puta veći od modula intaktne stijene iz laboratorijskih pokusa što je fizikalno nemoguće. Rocha i Silva [6] su ispitivanjem velikog broja pokusa opterećenja pločom u probnom tunelu pokazali da su za ploče koje se nalaze na razmaku manjem od 3 m dale rezultate koji se u 30 % slučajeva više do dvostruko razlikuju.

Pokus radijalnog opterećenja potencijalno je najpouzdanija metoda. Zahvaća obujam od oko 1000 m^3 [4]. Zasniva se na određivanju modula deformacija mjerenjem pomaka stijenske mase izazvanih radijalnim opterećivanjem stijenske mase hidrauličkim prešama ili tlakom vode. Primjenjuje se za potrebe temeljenja velikih brana i drugih teških građevina u ispitnim komorama velikog polumjera ili u početnim dionicama tunela, gdje se onda ispitivanja izvode u mjerilu 1:1. Oberty, Coffi i Rossi [7] smatraju da se svi drugi pokusi trebaju evaluirati u odnosu na pokus radijalnim opterećenjem. Glavni nedostatak ovog pokusa jest visoka cijena i trajanje ispitivanja zbog čega se danas rijetko izvodi.

Ispitivanje velikim tlačnim jastucima zahvaća obujam od oko 10 m^3 [4]. Zasniva se na određivanju modula deformacije mjerenjem pomaka stijenske mase izazvanih povećanjem tlaka u velikim hidrauličkim jastucima umetnutima u prethodno izrađen prorez u stijenskoj masi. Primjenjuje se kod svih značajnijih geotehničkih konstrukcija koje se izvode u stijenskoj masi. Daje relativno pouzdane rezultate no složenost, cijena i trajanje ispitivanja u posljednje su vrijeme znatno smanjili njegovu primjenu [8].

Ispitivanja fleksibilnim i krutim dilatometrom zahvaćaju volumen od oko $0,1 \text{ m}^3$ [4]. Zasnivaju se na mjerenju

promjene radijusa bušotine izazvanog radijalnim širenjem dilatometarske sonde postavljene na određenoj dubini. Prednost dilatometarskih ispitivanja jest da se relativno brzo može provesti više ispitivanja unutar jedne bušotine i time dobiti raspodjela deformacijskih karakteristika stijenske mase po dubini. Zbog iznimno malog obujma stijenske mase koji zahvaćaju ovi pokusi nikako ne mogu predstavljati stijensku masu što bitno umanjuje značaj i iskoristivost ovog pokusa [9].

Terenska su ispitivanja veoma skupa i vremenski vrlo zahtjevna, a zbog pretpostavki na kojima se temelje interpretacije rezultata, pouzdanost terenskih ispitivanja često je vrlo upitna [8]. Problematična je i usporedba rezultata ispitivanja različitim metodama. Bieniawski [10] je pokazao da krutost kvalitetne i relativno uniformne stijenske mase uvelike ovisi o metodi ispitivanja. Dobio je da devijacija modula elastičnosti iznosi 25% odnosno 10 GPa za prosječni modul od 40 GPa. Pinto da Cunha i Muralha [11] pokazali su usporedbu dobivenih modula deformacije u laboratoriju i terenskih ispitivanja dilatometrom i velikim tlačnim jastucima. Zaključili su da ispitivanja koja zahvaćaju veći obujam stijenske mase daju manje module deformacije i manje rasipanje rezultata.

Clerici [12] je zaključio da terenskim ispitivanjima ne treba biti cilj određivanje apsolutne vrijednosti modula, već rasponi u kojem se oni kreću.

4 Određivanje modula deformacije pomoću klasifikacija stijenske mase

Terenska ispitivanja stijenske mase zahtijevaju veliki utrošak vremena i sredstava pa je izrada programa terenskih ispitivanja, posebice za velike građevine, vrlo težak i složen zadatak.

Ideju da se klasifikacije, kao kvantitativni pokazatelj inženjersko-geoloških svojstava stijenske mase u cjelini, rabe pri određivanju karakteristika krutosti stijenske mase dao je Bieniawski [2] radi najpovoljnijega određivanja broja, pozicija i tipa terenskih ispitivanja modula deformacija. Sugerirao je da se pomoću klasifikacija odredi očekivani modul unutar točnosti od 20 %, a da se onda na temelju njega izrađuje program terenskih ispitivanja.

Koncept koji je predložio Bieniawski [2], da se modul deformacije određuje uspostavljenim korelacijskim vezama s rezultatima klasificiranja stijenske mase, prihvaćen je u znanstvenim krugovima i inženjerskoj praksi kao standard za određivanje krutosti i bez provođenja terenskih ispitivanja [8].

Najviše se rabe klasifikacije RQD [13], Q [14], RMi [15], RMR [10] i GSI [16]. S obzirom na to da se svi parametri klasifikacije ne mogu jednoznačno izmjeriti

ili procijeniti za veći obujam stijenske mase, jasno je da će određivanje krutosti odnosno parametara za proračun preko klasifikacija, u velikom broju slučajeva, biti opterećeno znatnom razinom nepouzdanosti [17].

4.1 RQD klasifikacije

RQD index (Rock Quality Designation) kao klasifikacijski sustav razvili su Deere i dr. [13].

Prva značajnija istraživanja povezanosti RQD i modula deformacija proveli su Coon i Merritt [18] na temelju baze podataka od 54 terenska ispitivanja modula deformacija pri izvedbi nekoliko brana u SAD-u. Dodali su i rezultate terenskih ispitivanja na brani Dworshak koje su objavili Deere i dr. [13]. Uključili su sekantni modul elastičnosti intaktnog uzorka (E_r) i uspostavili linearnu vezu :

$$E_m = E_r (0,0231RQD - 1,32). \quad (1)$$

Zhang i Einstein H. H. [19] proširili su bazu podataka koju su rabili Coon i Merritt [18] s bazama podataka koje su publicirali Bieniawski [10] te Ebisu i dr. [20]. Tako formirana baza podataka pokazuje izrazito nelinearnu povezanost RQD i modula deformacije.

Predložili su redukciju sekantnog modula elastičnosti intaktne stijene (E_r):

$$E_m = E_r 10^{0,0186RQD - 1,91}. \quad (2)$$

Kayabasi, Gokceoglu i Ercanoglu [21] uočili su da za određivanje modula deformacije stijenske mase nije dovoljno koristiti se samo RQD indeksom. Zaključili su da u redukciju modula elastičnosti intaktne stijene treba uključiti trošnost stijenki diskontinuiteta (WD) koja se standardno određuje u RMR klasifikaciji. Kao bazu podataka rabili su rezultate 57 terenskih ispitivanja modula deformacije stijenske mase na dvije brane u Turskoj. Predložili su redukciju modula elastičnosti intaktne stijene (E_i):

$$E_m = 0,135 \left[\frac{E_i (1 + 0,01RQD)}{WD} \right]^{1,1811}. \quad (3)$$

Gokceoglu, Sonmez i Kayabasi [22] u redukciju modula elastičnosti intaktne stijene, osim trošnosti stijenki diskontinuiteta (WD), uključili su i jednoosnu tlačnu čvrstoću intaktnog uzorka. Proširili su bazu podataka, primijenjenju u izrazu (3), sa 58 terenskih ispitivanja modula deformacija stijenske mase na jednoj hidroelektrani u Turskoj. Predložili su redukciju modula elastičnosti intaktne stijene (E_i):

$$E_m = 0,001 \left[\frac{E_i / \sigma_{ci} (1 + 0,01RQD)}{WD} \right]^{1,5528}. \quad (4)$$

4.2 Q klasifikacija

Klasifikacijski sustav Q (*Rock Tunneling Quality Index*) razvili su Barton, Lien i Lunde [14].

Prva istraživanja određivanja modula deformacije na osnovi rezultata Q klasifikacije proveli su Barton i dr. [23], Barton i dr. [24] te Grimstad i Barton [25] koristeći se rezultatima izmjerenih deformacija i povratne numeričke analize na velikom broju izvedenih podzemnih iskopa u Norveškoj primjenjujući izraz:

$$E_m = 25 \log Q. \quad (5)$$

U rezultate navedenih istraživanja bile su uključene samo čvrste stijene te nisu uzeti u obzir dubina i početno stanje naprezanja. Nakon što su uključene slabije i porozne stijenske mase te laboratorijska ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene, predložio je Barton [26] novi izraz koji se znatno bolje uklapao i u vlastita istraživanja tako i u prethodno provedena istraživanja Bieniawskog [2] te Serafima i Pereire [27]:

$$E_m = 10(Q_c)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

gdje je: $Q_c = \frac{\sigma_{ci}}{100}$,

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene u MPa.

4.3 R_{Mi} klasifikaciju

Klasifikacijski R_{Mi} sustav (*Rock Mass index*) razvio je Palmstrom [15].

Vežu između modula deformacije stijenske mase i R_{Mi} > 1 teoretski je izveo Palmstrom [15] povezivanjem parametara R_{Mi} i RMR klasifikacije te koristeći se izrazom Bieniawskog [2]:

$$E_m = 5,6 R_{Mi}^{0,375}. \quad (7)$$

Značajnije istraživanje proveli su Palmstrom i Singh [28] na temelju baze podataka od 42 terenska ispitivanja modula deformacije pri izvedbi 8 hidroelektrana u Indiji, Nepal i Bhutanu. Uključili su bazu podataka i rezultate ispitivanja koje su objavili Clerici [12] te Thorpe i dr. [29]. Ustanovili su da izraz (7) daje premale vrijednosti modula deformacije i da ga je nužno korigirati za veće vrijednosti R_{Mi}. Predložili su da se izraz (7) primjenjuje se za $0,1 < R_{Mi} < 1$, dok su za $1 < R_{Mi} < 30$ predložili izraz:

$$E_m = 7 R_{Mi}^{0,5} \quad (8)$$

a za $R_{Mi} > 30$ izraz:

$$E_m = 7 R_{Mi}^{0,4}. \quad (9)$$

4.4 RMR klasifikacija

Klasifikacijski sustav RMR (*Rock Mass Rating System*) ili Geomehaničku klasifikaciju razvio je Bieniawski [10].

Prva istraživanja određivanja modula deformacije na osnovi rezultata RMR klasifikacije proveo je Bieniawski [2] stavljajući u korelacijski odnos rezultate terenskih ispitivanja modula deformacije i rezultate RMR klasifikacije pri provedbi istražnih radova za tri velika hidrotehnička projekta u Južnoj Africi, unutar kojih je bilo potrebno, između ostalog, izvesti 90 m visoku branu, 80 km dug tunel, 500 km dug spremnik i dvije crpne stanice snage 1000 MW. Uspostavio je linearnu vezu između rezultata RMR klasifikacije i modula deformacije u GPa:

$$E_m = 2 RMR - 100. \quad (10)$$

Serafim i Pereira [27] proširili su bazu podataka kojom se koristio Bieniawski sa modulima deformacije dobivenim na temelju opaženih slijeganja i povratnih numeričkih analiza nekoliko velikih brana u Portugalu. Dobili su nelinearnu vezu između rezultata RMR klasifikacije i modula deformacije u GPa:

$$E_m = 10 \frac{RMR - 10}{40}. \quad (11)$$

Izrazi koje su predložili Bieniawski [2] te Serafim i Pereira [27] u znanstvenoj su i stručnoj literaturi najcitiranije, a u projektantskoj praksi najčešće primjenjivane ovisnosti modula deformacije o rezultatima RMR klasifikacije.

Istom bazom podataka koristili su se Nicholson i Bieniawski [30]. Postavili su izraz:

$$E_m = E_i \cdot RF, \quad (12)$$

gdje je:

E_m – modul deformacije stijenske mase,

E_i – modul elastičnosti intaktne stijene iz pokusa jednoosnog tlaka i

RF – faktor redukcije usporediv s rezultatima terenskih istražnih radova.

Faktor redukcije RF dobiven je uspostavom nelinearne korelacijske veze s rezultatima RMR klasifikacije iz postojeće baze podataka, uz pretpostavku da je $RF = 1$ za $RMR = 100$, $RF = 0$ za $RMR = 0$ te da oblik krivulje faktora redukcije s porastom RMR slijedi oblik promjene modula deformacije dobivenog terenskim istražnim radovima:

$$E_m = \frac{E_i}{100} \cdot 0,028 RMR^2 + 0,9 e^{\frac{RMR}{22,82}}. \quad (13)$$

Mitri, Edrissi i Hennig [31], analizirajući podzemne iskope u rudnicima u Kanadi, predložili su također redukciju modula deformacije intaktne stijene:

$$E_m = E_i [0,5(1 - (\cos(\pi \cdot \text{RMR} / 100)))], \quad (14)$$

dok su Read, Richards i Perrin [32] na osnovi izmjerenih rezultata ponašanja grauvaka u Novom Zelandu predložili izraz:

$$E_m = 0,1 \left(\frac{\text{RMR}}{10} \right)^3. \quad (15)$$

Najveće istraživanje na području primjene RMR klasifikacije za određivanje modula deformacije stijenske mase do sada proveli su Galera, Alvarez i Bieniawski [33] na bazi od više 700 rezultata terenskih mjerenja modula deformacije, a uključili su i podatke koje su objavili Bieniawski [2] te Serafim i Pereira [27]. Izraz (11) koji su predložili Serafim i Pereira [27] poboljšan je novim izrazom koji za 10 % daje bolju procjenu modula deformacije:

$$E_m = e^{\frac{\text{RMR}-10}{18}}. \quad (16)$$

4.5 GSI klasifikacija

Geološki indeks čvrstoće (GSI) razvio je Hoek [16].

GSI klasifikaciju su za potrebe određivanja modula deformacije prvi put uveli Hoek i Brown [34]. Na osnovi rezultata mjerenja i povratnih numeričkih analiza zaključili su da izraz Serafima i Pereire [27] dobro opisuje krutost za kvalitetnije stijenske mase, ali daje prevelike vrijednosti za slabije stijenske mase. Korigirali su njihov izraz zamjenjujući RMR sa GSI te uvodeći redukciju modula deformacije za stijene kod kojih je jednoosna tlačna čvrstoća $\sigma_{ci} < 100$ MPa:

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{\text{GSI}-10}{40}} \quad (17)$$

Hoek, Carranza-Torres i Corkum [35] predlažu modificirani izraz (17) uzimajući u obzir poremećenost stijenske mase izazvanu miniranjem ili relaksacijom stijenske mase zbog iskopa za $\sigma_{ci} < 100$ MPa:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{\text{GSI}-10}{40}}, \quad (18)$$

gdje je D faktor poremećenosti koji ovisi o stupnju poremećenosti stijenske mase zbog oštećenja nastalih miniranjem i relaksacijom. Vrijednost D varira od 0 za neporemećenu stijensku masu *in situ* do 1 za znatno poremećenu stijensku masu.

Sonmez, Gokceoglu i Ulusay [36] na bazi od 115 rezultata terenskih ispitivanja modula deformacije na brana-ma i hidroelektranama u Turskoj predložili su izraz:

$$E_m = E_i (s^a)^{0,4}, \quad (19)$$

gdje su s i a konstante koje su dali Hoek, Carranza-Torres i Corkum [35].

Najveće su istraživanje na području primjene GSI-a za određivanje modula deformacije stijenske mase do sada proveli Hoek i Diederich [8] na bazi od oko 500 rezultata terenskih mjerenja modula deformacije.

Dobili su sljedeći izraz za E_m (MPa):

$$E_m = 100.000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-\text{GSI})/11)}} \right). \quad (20)$$

U izraz (20) nije uključen modul elastičnosti intaktnog uzorka (E_i). Da bi to prevladali napravili su analizu uključivši samo one rezultate za koje su imali E_i i predložili sljedeći izraz:

$$E_m = E_i \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-\text{GSI})/11)}} \right). \quad (21)$$

5 Primjenjivost klasifikacija za određivanje modula deformacije karbonatnih stijena u hrvatskom kršu

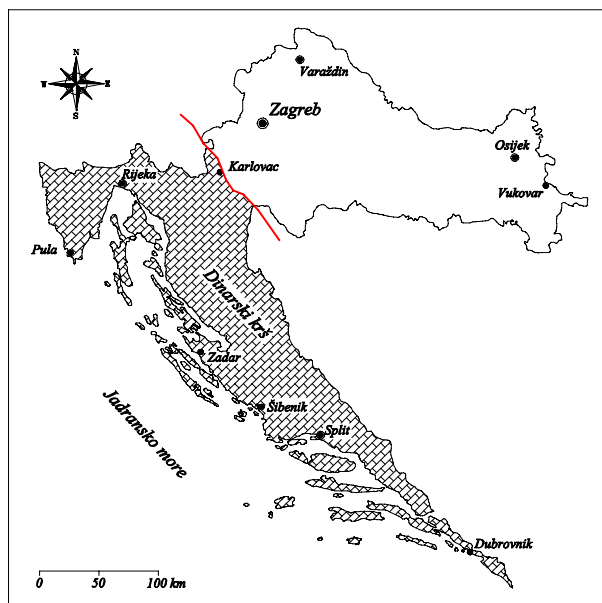
Krški je teren uglavnom pokriven vapnencem i dolomitom čija je topografija pretežno oblikovana od topljivih stijena. Krš je rezultat prirodnih procesa na zemlji i u kori Zemlje uzrokovan otapanjem i ispiranjem vapnenca, dolomita, gipsa, halita i drugih topljivih stijena [37].

Karbonatne stijene, za koje su najčešće vezani krški prostori prostiru se na oko 30 milijuna km^2 ili na približno 20 % ukupnog svjetskog kopna [38]. Hrvatska krška područja pripadaju tipu krša umjerenih širina (Dinaridi, Alpe, Pireneji, Apalachian gorje, gorja Australije itd.) koja se ističu debelim (i do 8 km) karbonatnim mezozojskim i paleogenskim sedimentima, što uz naglašenu tektonsku razlomljenost utječe na podjednaku zastupljenost horizontalnih i vertikalnih oblika (speleoloških objekata).

U Hrvatskoj se krš pruža od Slovenije na sjeverozapadu do Crne Gore na jugoistoku, dok mu sjeverna granica ide južno od Karlovca prema istoku gdje prelazi u Bosnu i Hercegovinu (slika 1.). Lončar i Garašić [39] navode da "klasični krš" zauzima više od polovice površine (54 %) Hrvatske ili više 70 % ako se uzme u obzir i hrvatsko jadransko podmorje u kojem prevladavaju karbonatne stijene podložne okršavanju. Zbrajanjem kopnenih i podmorskih krških površina proizlazi da Hrvatska ima

39.500 km² krša ili 56 % od ukupnih površina (70.400 km²) Dinarskoga krškog sustava u cjelini.

U Hrvatskoj su u posljednjih 15 godina provedena vrlo intenzivna mjerenja na svim važnijim geotehničkim zahvatima izvedenima u kršu Hrvatske. Stečena su iznimno velika iskustva i stvorena je značajna baza podataka nužna za stjecanje novih spoznaja o krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske. U gotovo svim zahvatima karakteristike krutosti stijenske mase određivale su se na temelju korelacija modula deformacije i rezultata klasificiranja stijenske mase. Najviše su rabljene korelacije sa RMR klasifikacijom koje su predložili Bieniawski [2] te Serafim i Pereira [27].



Slika 1. Raširenost krša u Hrvatskoj

Geotehnička mjerenja koja su provedena za vrijeme inženjerskih zahvata izvedenih u kršu pokazala su da su izmjerene deformacije znatno veće od onih dobivenih proračunima preko navedenih korelacija [40]. Pokušaj da se rabe noviji izrazi koji se koriste GSI klasifikacijom, a koje su predložili Hoek i Brown [34] te Hoek, Carranza-Torres i Corkum [35], nisu pridonijeli značajnijem približavanju prognoziranih i izmjerenih deformacija [41].

6 Zaključak

Krutost stijenske mase može se odrediti iz modula deformacije koji se dobiva laboratorijskim ispitivanjima,

LITERATURA

- [1] Hudson, J. A.: *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*, CIRIA Ground Engineering Report: Underground Construction, London (1989) 72 p.

terenskim ispitivanjima te na temelju rezultata klasificiranja stijenske mase.

Laboratorijski pokusi provode se na uzorcima stijene izrazito malog obujma, ne prikazuju ponašanje stijenske mase većeg obujma, pa se rezultati laboratorijskih ispitivanja ne mogu izravno primjenjivati u proračunima deformacija geotehničkih konstrukcija izvedenih u stijenskoj masi.

Terenska ispitivanja stijenske mase zahvaćaju, u većini slučajeva, znatno veći obujam stijenske mase od laboratorijskih i neka od njih mogu prikazivati ponašanje stijenske mase. Pokus radijalnog opterećenja izveden u mjerilu 1:1 u tunelima koji se kopaju potencijalno je najpouzdanija metoda za određivanje modula deformacije stijenske mase. No ta ispitivanja su veoma skupa i vremenski vrlo zahtjevna.

Korelacijska veza između modula deformacije i klasifikacija može se uspostaviti koristeći se rezultatima terenskih ispitivanja ili pomoću povratnih proračuna na temelju rezultata mjerenja deformacija geotehničkih konstrukcija izvedenih u stijenskoj masi. Brojne građevine širom svijeta, projektirane određivanjem krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase, pokazale su manje deformacije od prognoziranih. S vremenom je postalo jasno da sama klasifikacija nije dovoljna, već da u izraze za određivanje modula deformacije treba uključiti i neke dodatne parametre. Do sada su popravljani odnosno korigirani uvođenjem dodatnih parametara kao što su: laboratorijski modul elastičnosti intaktne stijene [8], [19], [21], [30], [31], [33], [36] i jednoosna tlačna čvrstoća [22], [26], [34] i [35], stupanj poremećenosti stijenske mase zbog oštećenja nastalih radovima u stijeni i relaksacijom [8] i [35] te trošnost stijenski diskontinuiteta [21] i [22].

U svim inženjerskim zahvatima krutost karbonatnih stijena u hrvatskom kršu određivala se preko publiciranih korelacija modula deformacije i rezultata klasificiranja stijenske mase. Najviše su rabljene korelacije sa RMR i GSI klasifikacijama. Intenzivna geotehnička mjerenja za izvedbe složenih inženjerskih zahvata u hrvatskom kršu pokazala su da su izmjerene deformacije znatno veće od onih dobivenih proračunima u kojima su parametri dobiveni preko postojećih veza s klasifikacijama stijenske mase te da su izmjereni oblici deformacija po dubini znatno različiti od proračunanih odnosno projektom očekivanih. Ta su mjerenja omogućila razvoj novog pristupa određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu [42].

- [2] Bieniawski, Z. T.: *Determining rock mass deformability: experience from case histories*, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr (1978) 15:237-47.

- [3] Farmer, I. W.; Kemeny, J. M.: *Deficiencies in rock test data*, Proc. Int. Conf. Eurock, Thomas Telford, London (1992) pp. 298-303.
- [4] He, J.: *A case review of the deformation modulus of rock mass. Scale effect*, Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Lisbon. Ed. Balkema (1993) 87-91.
- [5] Boyle, W.J.: *Interpretation of plate load test data*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. (1992) Vol. 29, No. 2, pp. 133-141.
- [6] Rocha M.; Da Silva J.N.: *A new method for the determination of deformability of rock masses*, In: Proceedings of the Second Congress on Rock Mechanics. International Society for Rock Mechanics, Belgrade (1970) paper 2-21.
- [7] Oberti G.; Coffi L.; Rossi P.P.: *Study of stratified rock masses by means of large scale tests with an hydraulic pressure chamber*, In: Proceedings of the fifth ISRM congress, Melbourne (1983) p. A133-41.
- [8] Hoek, E.; Diederich, M.S.: *Empirical estimation of rock mass modulus*, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. (2006) 43, 203-215.
- [9] Panek, L.A.: *Effect of rock fracturing on the modulus determined by borehole dilation tests*, In: Proceedings of the Second Congress on Rock Mechanics. International Society for Rock Mechanics, Belgrade (1970) paper 2-16.
- [10] Bieniawski, Z.T.: *Engineering Rock Mass Classification*, New York: John Wiley & Sons (1989) 251 p.
- [11] Pinto de Cunha A.; Muralha J.: *About LNEC experience on scale effects in the deformability of rock masses*. Int Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen. Ed. Balkema (1990) 219-229.
- [12] Clerici, A.: *Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses-case histories*. Proc. Conf. Eurock (1993) pp. 509-517.
- [13] Deere, D.U.; Hendron, A.J. Jr.; Patton, F.D.; Cording, E.J.: *Design of Surface Near Surface Construction in Rock*, In: Failure and Breakage of Rock, C. Fairhurst Ed. Society of Mining Engineers of AIME, New York (1967) pp. 237-302.
- [14] Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J.: *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*, Rock Mech. (1974) Vol. 6, (4), pp. 189-239.
- [15] Palmstrom, A.: *RMi-A Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes*, Ph. D. Thesis, University of Oslo, Norway (1995) 400 p.
- [16] Hoek, E.: *Strength of rock and rock masses*. ISRM News journal, International society for rock mechanics, Lisboa (1994) 2/2, 4-16.
- [17] Kovačević, M. S.; Arapov, I.; Lušo, P.; Kuželički, R.: *Povratne numeričke analize u tunelu Pećine, 4. Savjetovanje HGD-a Ojačanje tla i stijena, 05-07 listopada, Opatija, Hrvatska* (2006) pp. 143-152.
- [18] Coon R. F.; Merritt A.H.: *Predicting in situ modulus of deformation using rock quality indices*. In: Determination of the In Situ Modulus of Deformation of Rock, ASTM STP 477, Philadelphia (1970) p. 154-73.
- [19] Zhang, L.; Einstein, H. H.: *Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. (2004) Vol. 41, pp. 337-341.
- [20] Ebisu, S.; Aydan, O.; Komura, S.; Kawamoto, T.: *Comparative study on various rock mass characterization methods for surface structures*. In: Proceedings of the Eurock'92. London: Thomas Telford (1992) p. 203-8.
- [21] Kayabasi A.; Gokceoglu C.; Ercanoglu M.: *Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study*. Int J Rock Mech Min Sci (2003) 40:55-63.
- [22] Gokceoglu C.; Sonmez, H.; Kayabasi A.: *Predicting the deformation moduli of rock masses*, Int J Rock Mech Min Sci (2003) 40:701-710.
- [23] Barton, N.; Løset, F.; Lien, R.; Lunde, J.: *Application of the Q-system in design decisions*. In Subsurface space (1980) 2, 553-561.
- [24] Barton, N.; Chryssanthakis, L.; Tunbridge, L.; Kristiansen, J.; Løset, F.; Bhasin, R.K.; Westerdahl, H.; Vik, G.: *Comparison of prediction and performance for a 62 m span sports hall in jointed gneiss*. Proc. 4th. int. Rock Mechanics and Rock Engineering Conf., Torino (1992) Paper 17.
- [25] Grimstad, E.; Barton, N.: *Updating the Q-System for NMT*. Proc. int. symp. on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Oslo, Norwegian Concrete Assn (1993).
- [26] Barton, N.: *TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock*. Rotterdam Balkema (2000).
- [27] Serafim, J.L.; Pereira, J.P.: *Considerations on the Geomechanical Classification of Bieniawski*, Int. Symp. Engineering Geology and Underground Construction. Lisbon (1983) Theme II. Vol. 1, pp II.33 - II.42.
- [28] Palmstrom, A.; Singh, R.: *The Deformation Modulus of Rock Masses - Comparisons between In Situ Tests and Indirect Estimates*, Tunnelling and Underground Space Technology (2001) Vol. 16, pp. 115-131.
- [29] Thorpe, R.; Watkins, D.J.; Ralph, W.E.; Hsu, R.; Flexser, S.: *Strength and permeability tests on ultra-large Stripa granite core*. Technical Information Report No. 31. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720 (1980) p. 211.
- [30] Nicholson, G.A.; Bieniawski, Z.T.: *A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification*. Int J Min Geol Eng (1990) 8: 181-202.
- [31] Mitri, H.S.; Edrissi, R.; Henning, J.: *Finite element modelling of cable bolted slopes in hard rock ground mines*. Presented at the SME Annual Meeting, Albuquerque: New Mexico (1994) p. 94-116.
- [32] Read, S.A.L.; Richards, L.R.; Perrin, N.D.: *Applicability of the Hoek-Brown Failure Criterion to New Zealand Greywacke Rocks*, Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress, Paris (1999) Vol. 2, pp. 655-660.
- [33] Galera, J.M.; Álvarez, M.; Bieniawski, Z.T.: *Evaluation of the deformation modulus of rock masses: comparison of pressuremeter and dilatometer tests with RMR prediction*, ISP5-PRESSIO International Symposium, Paris (2005).
- [34] Hoek, E.; Brown, T.: *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. (1997) 34, 8, 1165-1186.
- [35] Hoek, E.; Carranza-Torres, C.T.; Corkum, B.: *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*. In: Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada (2002) vol. 1, p. 267-73.
- [36] Sonmez, H.; Gokceoglu, C.; Ulusay, R.: *Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system*. Int J Rock Mech Min Sci (2004) 1:849-57.
- [37] Field, M.S.: *A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology*. USEPA, Washington (1999).
- [38] Lukić, A.: *Raširenost krša u Hrvatskoj*. (2006) www.geografija.hr.
- [39] Lončar, N.; Garašić, M.: *Osnovna obilježja krškog reljefa - nedovoljno istraženo i zaštićeno bogatstvo*, Okoliš, Glasilo Ministarstva zaštite okoliša i prostornog uređenja, Zagreb (2002.) str. 33.
- [40] Arbanas, Ž.; Kovačević, M.S.; Szavits-Nossan, V.: *Influence of Rock Bolt Behaviour on Deep Excavations in Urban Environments*, XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 24-27 September 2007., Madrid, Spain (2007) 509-514.
- [41] Arbanas, Ž.: *Predviđanje ponašanja ojačane stijenske mase analizama rezultata mjerenja izvedenih građevina*, Doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (2004) 272 p.
- [42] Jurić-Kačunić D.: *Krutost karbonatnih stijena u kršu Hrvatske*, Doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (2009) 235 p.