

Određivanje oblika nestabilnosti i mehanike loma čvrstih debelouslojenih stijena

Determination of Instability Modes and Fracture Mechanics of Hard Thick-Bedded Rocks

dr. sc. Zlatko Briševac, izvanredni profesor
Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet



Ključne riječi: debelouslojene stijene, mehanika loma, podzemne prostorije, stijenska masa, laboratorijska ispitivanja, stabilnost

Key words: thick-bedded rocks, fracture mechanics, underground openings, rock mass, laboratory testing, stability



Sažetak

U radu se predstavljaju ciljevi, metodološki pristup i očekivani znanstveni doprinos NPOO projekta „Određivanje oblika nestabilnosti i mehanike loma čvrstih debelouslojenih stijena oko podzemnih prostorija“ (akronim ONMELS), koji se financira sredstvima Mehanizma za oporavak i otpornost Europske unije. Istraživanje je usmjereno na sustavno eksperimentalno određivanje fizičko-mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala i diskontinuiteta te na njihovu integraciju u analitičke i numeričke modele ponašanja stijenske mase. Poseban naglasak stavljen je na laboratorijska ispitivanja, koja čine osnovu za pouzdanu interpretaciju deformacijskih procesa i razvoj različitih oblika nestabilnosti u zoni utjecaja podzemnih prostorija. Laboratorijska istraživanja provodit će se i na drugim ležištima mineralnih sirovina radi osiguravanja šire primjenjivosti rezultata i njihove usporedbe u sličnim geomehaničkim uvjetima. Očekivani rezultati projekta doprinose razvoju pouzdanih metoda proračuna

i sigurnijem projektiranju podzemnih prostorija u čvrstim debelouslojenim stijenama.



Abstract

This paper presents the objectives, methodological framework, and expected scientific contribution of the NPOO project „Determination of Instability Modes and Fracture Mechanics of Hard Thick-Bedded Rocks Surrounding Underground Openings“ (acronym ONMELS), funded by the European Union Recovery and Resilience Facility. The research focuses on the systematic experimental determination of the physical and mechanical properties of intact rock material and discontinuities, and their integration into analytical and numerical models of rock mass behaviour. Special emphasis is placed on laboratory testing, which forms the basis for reliable interpretation of deformation processes and the development of various instability modes within the zone influenced by underground openings. Laboratory investigations will also be conducted at other mineral deposit sites to ensure broader applicability of the results and to enable comparison of the behaviour of different rock mass types under similar geomechanical conditions. The expected project outcomes will contribute to the development of more reliable calculation methods and safer design of underground openings in hard thick-bedded rock masses.

1. Uvod

Stijenska masa predstavlja izuzetno složenu geotehničku sredinu jer uključuje značajke intaktnog stijenskog materijala, diskontinuitete strukturnih elemenata i njihovo zajedničko djelovanje u obliku mase. Prilikom izgradnje podzemnih prostorija, poput rudničkih prostorija, komora i tunela, ponašanje stijenske mase očituje se kroz razvoj deformacija, pojavu različitih oblika nestabilnosti te mehanizme loma (Hoek et al., 1995.; Hoek & Brown, 1997.; Kaiser et al., 2000.; Jing & Hudson, 2002.; Martin et al., 2003.; Diederichs, 2007.).

U općem smislu, ponašanje stijenske mase može se opisivati kao kontinuirana, diskontinuirana ili kvazikontinuirana geotehnička sredina. Međutim, u slučaju čvrstih debelouslojenih stijena (slika 1) često se javlja složeno ponašanje koje nije moguće u potpunosti opisati klasičnim pristupima mehanike kontinuuma ili diskontinuuma (Zhu & Zhao, 2004.). Stoga je potrebno sustavno istraživanje koje povezuje laboratorijska ispitivanja, terenska mjerenja te analitičke i numeričke metode (Hoek et al., 1995.; Hoek & Brown, 1997.; Wiles, 2006.).

Dosadašnja istraživanja uglavnom su bila usmjerena na diskontinuirane stijenske mase kod kojih su dimenzije podzemnih prostorija znatno veće od razmaka diskontinuiteta (Bewick, 2021.). Takav pristup ne daje uvijek zadovoljavajuće rezultate u slučaju čvrstih debelouslojenih stijena, gdje značajke intaktnog materijala imaju izražen utjecaj na ukupno ponašanje sustava stijenska masa – podzemna prostorija (Martin et al., 2003.; Diederichs, 2007.).



Slika 1. Čvrste debelouslojene stijene na području EP Kanfanar jug

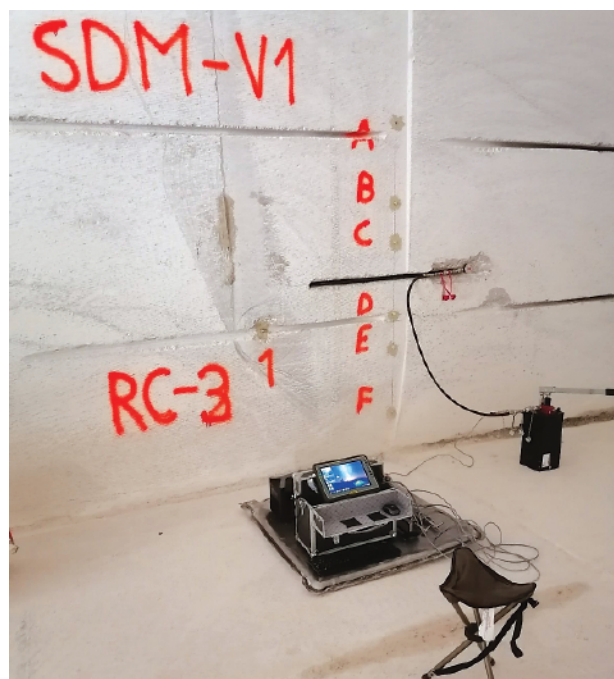
2. Ciljevi istraživanja

Cilj istraživanja je cjelovito razumijevanje ponašanja čvrstih debelouslojenih stijena u zoni utjecaja podzemnih prostorija, s naglaskom na laboratorijsko određivanje njihovih fizičko-mehaničkih značajki. Dobiveni parametri čvrstoće, deformabilnosti i mehanizama loma predstavljaju temelj za interpretaciju terenskih mjerenja i kalibraciju numeričkih modela (Hoek & Brown, 1997.; Jing & Hudson, 2002.; Zhang et al., 2012.).

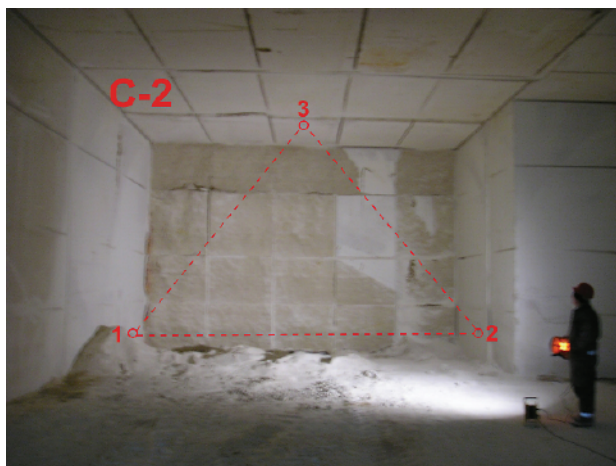
Istraživanjem se analizira međudjelovanje intaktnog materijala i diskontinuiteta te njihov utjecaj na razvoj deformacija i pojavu različitih oblika nestabilnosti (Kaiser et al., 2000.; Bakun-Mazor et al., 2009.; Kun, 2014.). Konačni cilj je razvoj praktično primjenjivih modela i metoda proračuna za sigurnije i racionalnije projektiranje podzemnih prostorija.

3. Metodologija istraživanja

Metodologija se temelji na integriranom pristupu koji obuhvaća laboratorijska ispitivanja, terenska mjerenja i numeričko modeliranje. Laboratorijska ispitivanja čine temelj istraživanja te uključuju određivanje gustoće, poroznosti, jednoosne tlačne čvrstoće, modula deformacije, čvrstoće u troosnom stanju naprezanja te čvrstoće pri savijanju (Hrženjak et al., 2013.; Briševac et al., 2017.). Laboratorijska ispitivanja će se obavljati i na drugim ležištima mineralnih sirovina, kako bi se



Slika 2. Terenska mjerenja konvergencija



Slika 3. Uređaji za terensko mjerenje naprezanja

osigurala šira primjenjivost dobivenih rezultata i mogućnost usporedbe ponašanja različitih tipova stijenske mase u sličnim geomehničkim uvjetima (Hoek et al., 1995.; Hoek & Brown, 1997.; Diederichs, 2007.).

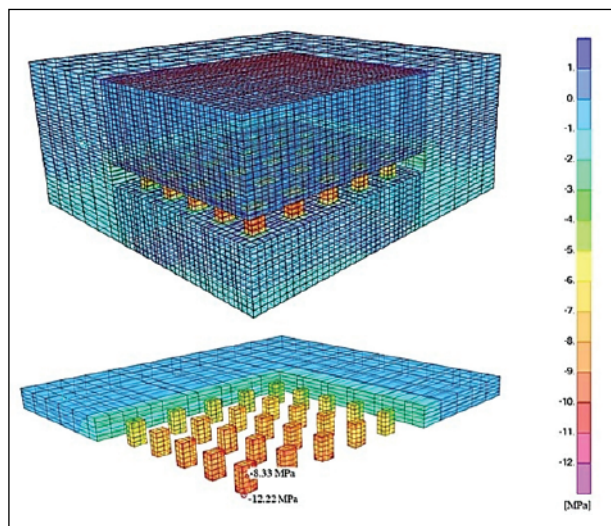
Terenska ispitivanja obuhvaćaju određivanje in situ naprezanja (slika 2), deformabilnosti stijenske mase te mjerenja konvergencija (slika 3) i pomaka na diskontinuitetima (Hrženjak et al., 2023.; Mališ et al., 2023.).

Numeričke analize (slika 4) provode se radi simulacije različitih geometrijskih stanja i uvjeta naprezanja te kalibracije modela na temelju eksperimentalnih rezultata (Segalini et al., 2006.; Exadaktylos et al., 2007.).

4. Svrha i opravdanost istraživanja

Zbog sve izraženije potrebe za podzemnom eksploatacijom mineralnih sirovina, pouzdano predviđanje ponašanja stijenske mase postaje ključno za sigurno i ekonomično projektiranje. Čvrste debelouslojene stijene prisutne su u brojnim ležištima mineralnih sirovina te predstavljaju specifičan geomehnički problem koji zahtijeva detaljna eksperimentalna istraživanja (Hoek et al., 1995.; Diederichs, 2007.; Bewick, 2021; Martin et al., 2003).

Rezultati ovog istraživanja imat će primjenu u projektiranju podzemnih kopova, tunela i drugih podzemnih građevina u sličnim geomehničkim uvjetima.



Slika 4. Numerička simulacija vertikalnog naprezanja (Mališ et al., 2023)

5. Zaključak

Važnost projekta ONMELS očituje se u njegovu doprinosu razvoju nacionalnih znanstvenih i stručnih kapaciteta u području mehanike stijena i geotehnike, kao i u unapređenju sigurnosti i održivosti podzemne eksploatacije mineralnih sirovina. Sustavno prikupljanje eksperimentalnih podataka i razvoj prilagođenih modela predstavljaju značajan iskorak u razumijevanju ponašanja čvrstih debelouslojenih stijena te stvaraju temelj za buduća istraživanja i primjenu u inženjerskoj praksi.

Istraživanje ima za cilj potvrditi ključnu ulogu laboratorijskih i terenskih ispitivanja u određivanju parametara potrebnih za pouzdano modeliranje ponašanja čvrstih debelouslojenih stijena. Integracija eksperimentalnih rezultata, terenskih mjerenja i numeričkih analiza omogućuje razvoj pouzdanijih metoda proračuna stabilnosti podzemnih prostorija te smanjenje nesigurnosti u fazi projektiranja.

Zahvala

Ovaj rad je podržan Next Generation NPOO projektom „Određivanje oblika nestabilnosti i mehanike loma čvrstih debelouslojenih stijena oko podzemnih prostorija“ (akronim „ONMELS“; Fakultetski projekt br. 581100012) u sklopu Mehanizam oporavka i otpornosti, koji je financiran od Europske unije.

Literatura

1. BAKUN-MAZOR, D., HATZOR, Y. H. & DERSHOWITZ, W. S.: Modeling mechanical layering effects on stability of underground openings in jointed sedimentary rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46, 262–271. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.09.002
2. BEWICK, R. P.: The strength of massive to moderately jointed rock and its application to cave mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(8), 3629–3661. DOI: 10.1007/s00603-021-02466-3
3. BRIŠEVAC, Z., HRŽENJAK, P. & COTMAN, I.: Estimate of uniaxial compressive strength and Young's modulus of elasticity of natural stone Giallo d'Istria. In: Konicek, Soucek & Konecny (eds.), *Eurock 2017*, Ostrava, 2017, 191, 431–441.
4. DIEDERICH, M. S.: The 2003 Canadian geotechnical colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(9), 1082–1116. DOI: 10.1139/T07-033
5. EXADAKTYLOS, G., TSOUVALA, S., LIOLIOS, P. & BARAKOS, G.: A three-dimensional model of an underground excavation and comparison with in situ measurements. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, 31, 411–433. DOI: 10.1002/nag.552
6. HOEK, E. & BROWN, E. T.: Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8), 1165–1186. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X
7. HOEK, E., KAISER, P. K. & BAWDEN, W. F.: *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.
8. HRŽENJAK, P., DOBRILOVIĆ, I., NAVRATIL, D. & KOVAČEVIĆ ZELIĆ, B.: Shear strength determination of very rough and partially filled extension fractures in thick-bedded and karstified limestones. In: SCHUBERT, W. & KLUCKNER, A. (eds.): *15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium*, Salzburg, Austria, 2023, 2296–2301.
9. HRŽENJAK, P., JAGULJNIAK LAZAREVIĆ, A., TOPIĆ, Z. & COTMAN, I.: Development and application of in situ flexural strength testing method. In: *23rd World Mining Congress & Expo 2013 Proceedings*, Montreal, 2013.
10. JING, L. & HUDSON, J. A.: Numerical methods in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(4), 409–427. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00065-5
11. KAISER, P. K., DIEDERICH, M. S., MARTIN, C. D. & SHARP, J.: Underground works in hard rock tunnelling and mining. In *GeoEng2000*, 2000. DOI: 10.1201/9781003073656
12. KUN, M.: Evaluation and applications of empirical approaches and numerical modelling of an underground limestone quarry with room and pillar design. *Journal of Mining Science*, 2014, 50(1), 126–136. DOI: 10.1134/S1062739114010114
13. MALIŠ, T., HRŽENJAK, P., JAGULJNIAK LAZAREVIĆ, A. & MIKULEC, M.: Application of the SAP2000 computer programme in the modelling of an underground quarry of dimension stone. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 2023, 38(4), 19–25. DOI: 10.17794/rgn.2023.4.2
14. MARTIN, C. D., KAISER, P. K. & CHRISTIANSSON, R.: Stress, instability and design of underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40, 1027–1047. DOI: 10.1016/S1365-1609(03)00110-2
15. SEGALINI, A., D'ATTOLI, M., FERRERO, A. M., MIGLIAZZA, M.: Stability analysis of fractured rock mass excavation in ornamental stone quarries by means of 3D numerical modelling. In: *ARMA: 41st U. S. Rock Mechanics Symposium (USRMS): 50 Years of Rock Mechanics – Landmarks and Future Challenges*, Golden, Colorado, USA, Proceedings, 2006, 121–128.
16. WILES, T. D.: Reliability of numerical modelling predictions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(3), 454–472. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005
17. ZHU, W. C. & ZHAO, J.: Stability analysis of underground openings in jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3), 477–484. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.03.083