

Rudarsko-geološko- naftni zbornik	Vol. 8	str. 91-97	Zagreb, 1996.
-----------------------------------	--------	------------	---------------

UDK 622.355:622.273.12:518.5

Izvorni znanstveni članak

This publication is based on work sponsored by the U.S.-Croatian Science and Technology Joint Fund in cooperation with Bureau of Mines under Project Number JF279

NUMERIČKE ANALIZE PODZEMNE EKSPLOATACIJE ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA

Biljana KOVAČEVIĆ-ZELIĆ¹⁾, Slavko VUJEC¹⁾ i Ivan COTMAN²⁾

¹⁾ Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

²⁾ "Kamen" d.d., Trg slobode 2, HR-52000 Pazin, Hrvatska

Ključne riječi: Arhitektonsko-građevni kamen, Podzemna eksploatacija, Komorno stupna metoda, Stabilnost komora, Dimenzioniranje stupova, Numeričko modeliranje, FLAC

Podzemna eksploatacija blokova arhitektonsko-građevnog kamena u posljednje se vrijeme sve više širi zbog tri glavna razloga: ekonomskog, tehnološkog i ekološkog, a osim toga podzemni otvori mogu se naknadno uporabiti za mnoge svrhe.

Podzemna se eksploatacija razlikuje od površinske samo u početnoj fazi vađenja gornjeg sloja odnosno etaže. Naredne se etaže izvode kao i pri površinskoj eksploataciji.

U podzemnim rudnicima kamena problemi stabilnosti zahtijevaju odgovarajuće studije kako bi se izbjegli skupi radovi na podgrađivanju. Izložene su numeričke analize jednog podzemnog rudnika arhitektonsko-građevnog kamena, načinjene uporabom programa FLAC baziranog na metodi konačnih diferencija.

Key-words: Dimension stone, Underground exploitation, Room and-pillar method, Room stability, Pillar design, Numerical modelling, FLAC

Underground exploitation of dimension stone is spreading lately for three main reasons: economy, organisation and environment. Moreover, underground openings can be used for many purposes.

Underground exploitation is different from surface quarrying only in the first stage, the removal of top slice, descending slices are worked as in conventional quarries.

In underground stone quarries, stability problems require adequate studies in order to avoid expensive artificial support measures. The article presents numerical analyses of an underground stone quarry made using of the finite difference code FLAC.

Uvod

Eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena tradicionalno se provodila površinski. U posljednje se vrijeme sve više primjenjuje podzemna eksploatacija zbog tri glavna razloga: ekonomskog, tehnološkog i ekološkog. Prva dva razloga odnose se na uvjete dobivanja blokova kamena iz ležišta (npr. prevelika otkrivka) odnosno ovisnost o vremenskim prilikama (sezonski rad). Posljednji se razlog sve više ističe posebice u područjima zaštićenih zona i parkova prirode, te u turistički atraktivnim zonama. Tako se npr. u Carrari (Italija), s godišnjom proizvodnjom od 1,2 Mt, podzemnom eksploatacijom dobiva 25% mramora (P i g a et al., 1994), tj. od 220 aktivnih rudnika 50-ak radi podzemno (F o r n a r o & B o s t i c c o, 1994).

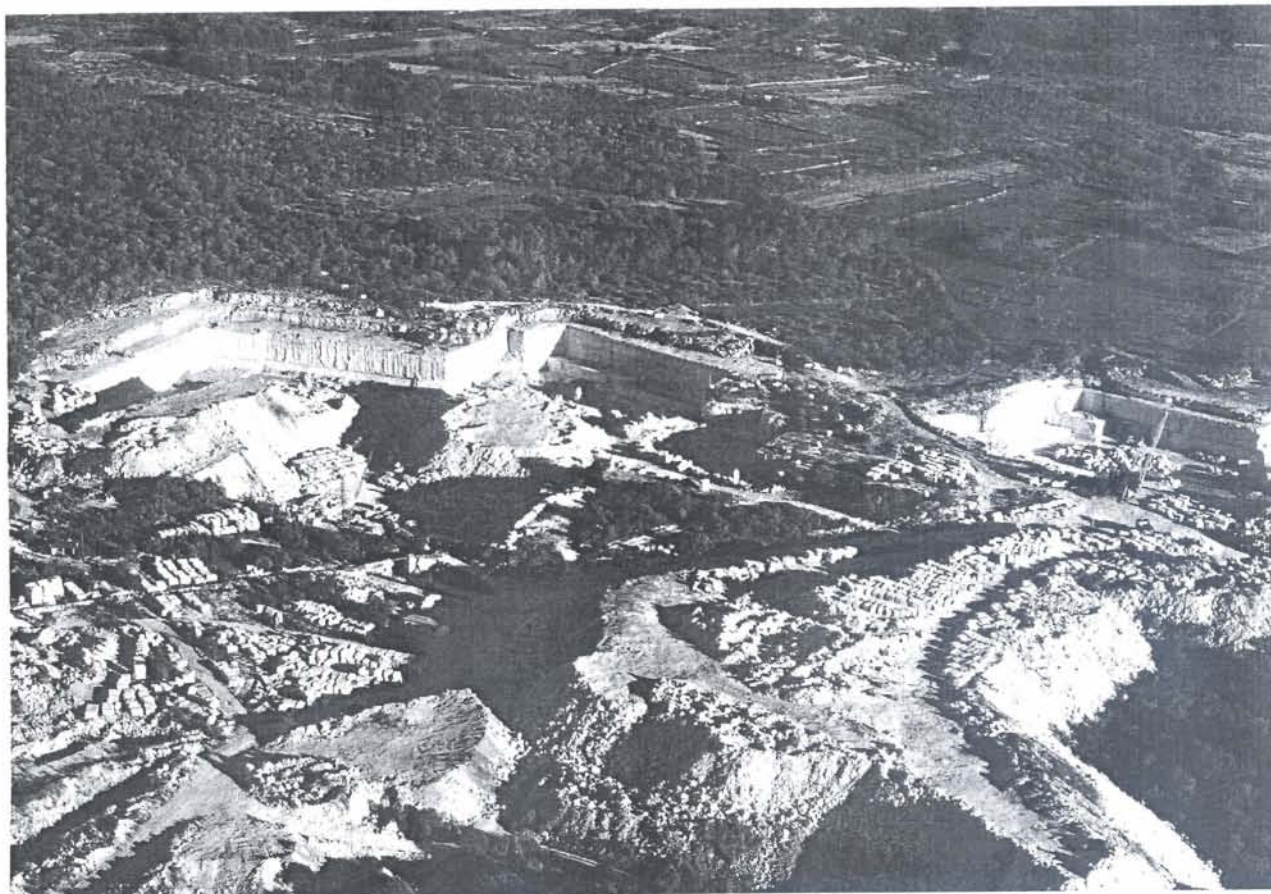
Prema nekim istraživanjima (M o s e r & O b e r n d o r f e r, 1994) tehnički kamen, posebno dolomit i vapnenac, također će se u bliskoj budućnosti eksploatirati podzemno. Kao razloge za prelazak na podzemnu eksploataciju navodi se ograničenost prostora u gusto naseljenim zonama poput Srednje Europe, te otpor javnosti prema otvorenim kopovima i popratnim pojavama vezanim uz njih (buka, prašina, vibracije i sl.). Analizom 150-ak podzemnih rudnika (od kojih 4 proizvode tehnički kamen) u Europi, Sjevernoj Americi i Australiji, određeni su uvjeti pod kojima se mogu postići zadovoljavajući ekonomski efekti.

Podzemna eksploatacija kamena primjenjuje se u slučajevima ponovnog otvaranja starih podzemnih

rudnika, otvaranja novih podzemnih rudnika ili prelaska s površinske na podzemnu eksploataciju, bilo zbog geoloških prilika bilo zbog problema zaštite okoliša. U svijetu je poznata uporaba napuštenih podzemnih otvora kao skladišta tekućina, hrane, industrijskih proizvoda, strateških materijala; kao zaštićene zone za vojne ili civilne potrebe (npr. arhivi, muzeji, istraživački centri); za odlaganje industrijskog i opasnog otpada. U Italiji se stari podzemni otvori tek počinju rabiti pa se kao takvi primjeri navode između ostalog skladišta sira i vinski podrumi. Napušteni podzemni rudnici arhitektonsko-građevnog kamena još nisu u uporabi, iako za to postoje velike mogućnosti, posebno zato što se najčešće radi o vrlo kvalitetnim stijenama (F o r n a r o & B o s t i c c o, 1995).

Općenito, podzemna je eksploatacija skuplja zbog radova na otvaranju i pripremi. Troškovi dalje proizvodnje usporedivi su s troškovima površinske eksploatacije. Međutim, otvori dobiveni podzemnom eksploatacijom mogu se često naknadno uporabiti (P e l i z z a et al., 1994), što pogoduje prelasku na podzemnu eksploataciju arhitektonsko-građevnog kamena.

Tehnološki se podzemna eksploatacija razlikuje od površinske samo u početnoj fazi, za vrijeme vađenja gornjeg sloja (etaže). Naredne etaže izvode se kao i pri površinskoj eksploataciji (P e l i z z a et al., 1994). Time je omogućen lakši prijelaz s površinske na podzemnu eksploataciju.



Sl. 1. Kamenolom "Kanfanar III" (fotografska snimka V. Giuricin)
 Fig. 1. Quarry "Kanfanar III" (photo by Giuricin)

Pri podzemnoj eksploataciji kamena treba osigurati samonosivost svodova, da bi se izbjeglo skupo podgrađivanje, sidrenje i sl. U takvim uvjetima problem stabilnosti zahtijeva odgovarajuće studije, provjere i kontrolu tijekom eksploatacije (P e l i z z a e t a l., 1994, F o r n a r o & B o s t i c c o, 1995).

U kamenolomu arhitektonsko-gradevnog kamena "Kanfanar III" (sl. 1) tvrtke "Kamen" - Pazin nailazimo na sličnu situaciju. Površinska eksploatacija postala je otežana zbog otkrivke znatne debljine (15-20 m), a ekološki su razlozi također izraženi (turistička zona). Zbog toga je donešena odluka o postepenom prelasku s površinske na podzemnu eksploataciju. Na ležištu "Kanfanar III" u zapadnom dijelu nastavit će se s površinskom eksploatacijom, a u istočnom se dijelu na površini približno 150 m x 100 m pristupa podzemnom vadenju blokova. U skladu s tim, najprije su provedena laboratorijska ispitivanja materijala iz ležišta, a zatim i numeričke analize stabilnosti podzemnih komora te dimenzioniranje stupova. Rezultati tih istraživanja izloženi su u ovom članku.

Određivanje ulaznih podataka za numeričke analize

Za analizu stabilnosti podzemnih komora i dimenzioniranja stupova potrebno je načiniti model

koji će što realnije opisati stvarnu situaciju u ležištu. Geometrija problema definirana je geološkim podacima o vrstama materijala i pojavama diskontinuiteta, a mehaničko ponašanje pojedinih komponenti modela opisuje se na temelju ispitivanja deformabilnosti i čvrstoće.

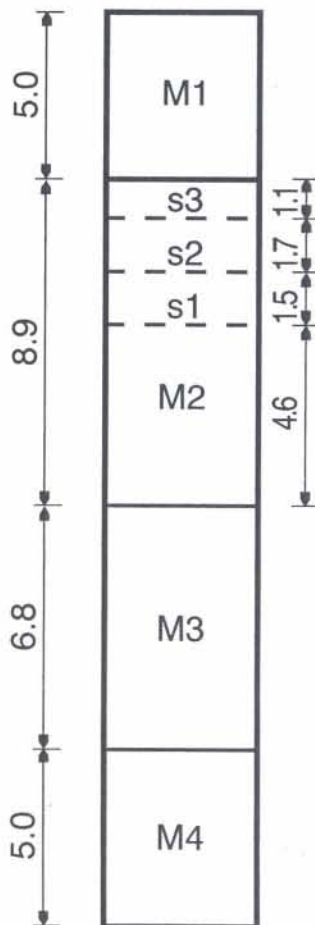
Ranijim geološkim istraživanjima utvrđen je geološki profil ležišta "Kanfanar III". Također, terenskom prospekcijom utvrđen je položaj diskontinuiteta u ležištu koji mogu bitno utjecati na navedene analize. Utvrđeno je da se u krovini nalazi blokoviti vapnenac s vidljiva tri horizontalna diskontinuiteta tj. slojnice. Također, uočena je pojava vertikalnih i subvertikalnih tektonskih diskontinuiteta.

Detaljna ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava materijala iz ležišta i diskontinuiteta provedena su tijekom 1995. godine u Laboratoriju za mehaniku stijena na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu. Rezultati tih laboratorijskih ispitivanja navedeni su u članku (C o t m a n, 1996), koji se odnosi na probnu eksploataciju u ležištu "Kanfanar II" te se ovdje neće detaljnije razmatrati.

Početne dimenzije komora i stupova određene su prema zahtjevima tehnološkog procesa i iskustvu kao izvedive kombinacije dimenzija komora i stupova.

Tablica 1. Ulazni podaci za numeričke analize Table 1. Input data for numerical analyses

SLOJ (Layer)	VRSTA MATERIJALA (Type of material)	VISINA SLOJA (Layer height) [m]	ρ [kgm ⁻³]	K [MPa]	G [MPa]	c [MPa]	φ [°]	σ_{vl} [MPa]
M1	gornja otkrivka (upper roof)	5.0	1800	8.5	3.9	0.05	20	0.0
M2	neposredna krovina (immediate roof)	8.9	2633	7600	4340	17	50	5.3
M3	eksploatacijski slojevi I-VI (exploitable layers I-IV)	6.8	2635	9345	5878	13	55.5	4.4
M4	neposredna podina (immediate footwall)	5.0	2635	9500	5900	15	60	5.0



Sl. 2. Profil za numeričke analize - "Kanfanar III"

Fig. 2. Profile for numerical analyses - "Kanfanar III"

Legenda (Legend):

- M1 - gornja otkrivka (upper roof)
- M2 - neposredna krovina (immediate roof)
- M3 - eksploatacijski slojevi I-IV (exploitable layers I-IV)
- M4 - neposredna podina (immediate footwall)
- s1, s2, s3 - slojnice (discontinuities)

Na temelju navedenih istraživanja definiran je model za numeričke analize koji je prikazan u tablici 1 i na slici 2.

Numeričke analize stabilnosti komora i dimenzioniranje stupova

Numeričke analize provedene su korištenjem programa FLAC (I t a s c a, 1991), baziranog na metodi konačnih razlika i namijenjenog za rješavanje zadataka iz područja mehanike stijena i mehanike tla. U program je ugrađen niz konstitucijskih odnosa od kojih su korištena dva i to model izotropno-elastičnog materijala i model Mohr-Coulombove plastičnosti.

Kontrola stabilnosti provedena je za pravilni raspored stupova u obliku šahovske ploče, a za dva slučaja dimenzija stupova i komora (tablica 2).

Za slučaj 1 načinjeni su modeli koji obuhvaćaju neke moguće karakteristične situacije u ležištu "Kanfanar III":

Tablica 2. Vrste proračuna

Table 2. Types of analyses

	VELIČINA STUPA (dimensions of pillar) $w_p \times l_p$ [m x m]	VELIČINA KOMORE (dimensions of room) $w_o \times l_o$ [m x m]	GUBITAK MASE U STUPOVIMA (pillar loss) [%]
SLUČAJ 1 (Case 1)	2.8 x 5.0	5.5 x 5.5	16
SLUČAJ 2 (Case 2)	3.3 x 5.0	5.5 x 5.5	17.9

w_p - širina stupa (pillar width); l_p - duljina stupa (pillar length); w_o - širina komore (room width); l_o - duljina komore (room length)

- MODEL 1 čvrsta krovina bez diskontinuiteta,
 MODEL 2 krovina s tri paralelna horizontalna diskontinuiteta (slojnice),
 MODEL 3 krovina s jednim vertikalnim tektonskim diskontinuitetom po sredini komore,
 MODEL 4 krovina s jednim vertikalnim tektonskim diskontinuitetom odmaknutim za 0,5 m od stupa,
 MODEL 5 čvrsta krovina bez diskontinuiteta s povećanim razmakom između stupova na 10,0 m (model križišta),
 MODEL 6 krovina s jednim vertikalnim tektonskim diskontinuitetom po sredini komore i razmakom između stupova 10,0 m.
 MODEL 7 krovina s jednim vertikalnim tektonskim diskontinuitetom odmaknutim za 0,5 m od stupa i razmakom između stupova 10,0 m.

Za slučaj 2 načinjeni su isti modeli osim modela 2, s obzirom da je taj model za slučaj 1 pokazao neznatne razlike u rezultatima u odnosu na model 1.

Diskontinuiteti su u modele uvedeni korištenjem kliznih (*interface*) elemenata s ovim svojstvima:

- kohezija $c=0$ MPa,
 kut trenja $\varphi=34^{\circ}$,
 vlačna čvrstoća $\sigma_{vl}=0$ MPa,
 posmična krutost $k_s=1.0 \times 10^3$ MPa/m
 normalna krutost $k_n=2.7 \times 10^3$ MPa/m

Kut trenja dobiven je laboratorijskim ispitivanjem diskontinuiteta u pokusu direktnog smicanja. Vlačna čvrstoća i kohezija svedene su na nulu zbog pretpostavke da će se ispuna vremenom isprati. Time se posmična čvrstoća reducira samo na utjecaj trenja po zidovima diskontinuiteta, a omogućeno je i slobodno otvaranje diskontinuiteta u okomitom smjeru. Normalna i posmična krutost određene su prema literaturnim podacima za vapnenačke materijale (B a n d i s e t a l., 1983), te u skladu sa zahtjevima za numeričku stabilnost proračuna u programu FLAC.

Rezultati numeričke analize

Stanje naprezanja i deformacija

U tablici 3. pokazani su rezultati numeričkih analiza preko veličine maksimalnog tlačnog naprezanja σ_{max} u stupu, te preko veličine maksimalnog vertikalnog pomaka δ_{max} u sredini komore. Uočavaju se mali iznosi tlačnog naprezanja u odnosu na tlačnu čvrstoću materijala u stupovima koja prosječno iznosi 88,6 MPa. Također, maksimalni vertikalni pomaci su malih iznosa, što se i moglo očekivati s obzirom na kvalitetu stijene tj. module elastičnosti u krovini od približno 11 GPa.

Razmatranjem podataka iz tablice 3 uočava se slijedeće. Za slučaj 1 s manjom širinom stupova ($w_p=2,8$ m) dobivaju se veći iznosi maksimalnog

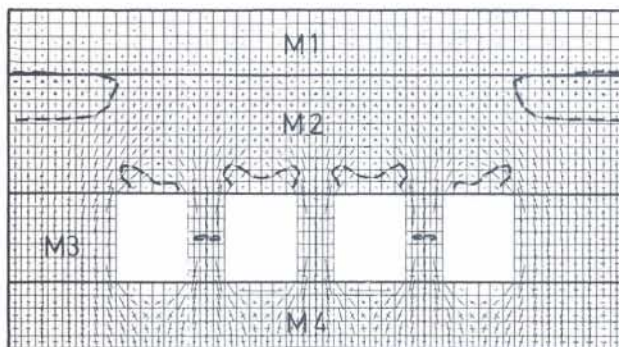
Tablica 3. Rezultati numeričkih analiza

Table 3. Results of numerical analyses

	SLUČAJ 1 (Case 1)		SLUČAJ 2 (Case 2)	
	σ_{max} [MPa]	δ_{max} [mm]	σ_{max} [MPa]	δ_{max} [mm]
MODEL 1 (Model 1)	1.211	0.46	1.132	0.420
MODEL 2 (Model 2)	1.223	0.47	-	-
MODEL 3 (Model 3)	1.224	0.50	1.139	0.454
MODEL 4 (Model 4)	1.275	0.65	1.178	0.585
MODEL 5 (Model 5)	1.871	0.98	1.676	0.904
MODEL 6 (Model 6)	1.881	1.00	1.694	0.985
MODEL 7 (Model 7)	2.526	2.40	2.314	2.240

naprezanja u stupovima kao i maksimalnih vertikalnih pomaka u komorama za sve modele u usporedbi sa slučajem 2 ($w_p=3,3$ m). Manji iznosi navedenih naprezanja i pomaka dobiveni su za komore raspona 5,5 m (modeli 1-4), nego za križišta s rasponom od 10,0 m (modeli 5-7).

U svim modelima za slučaj 1 uočene su zone kombiniranog stanja naprezanja u kojima je jedno glavno naprezanje tlačno, a drugo vlačno. Takve zone nalazimo iznad komora, ali i u sredini stupova. Slika 3 pokazuje takvo stanje naprezanja za model 1.

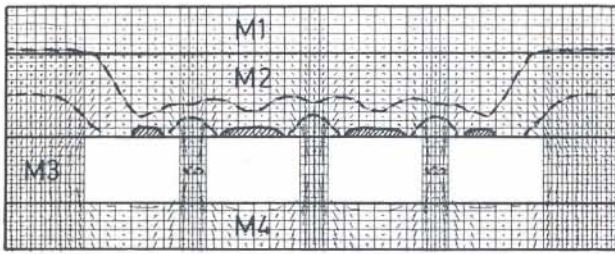


Sl. 3. Model 1

Fig. 3. Model 1

Legenda (Legend):

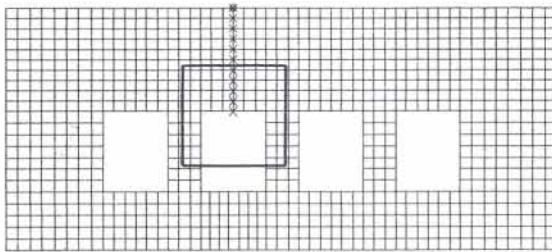
- M1-M4 oznake materijala (*material number*)
 glavna naprezanja (*principal stresses*)
 zona kombiniranog stanja naprezanja (*region of mixed stress state*)



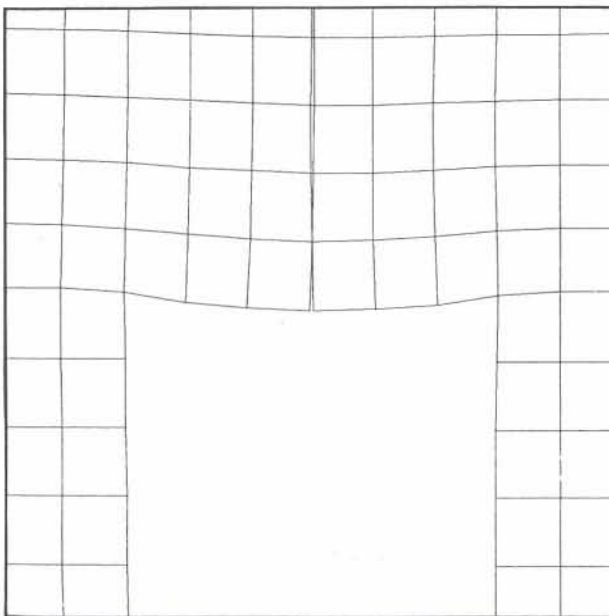
Sl. 4. Model 5 Fig. 4. Model 5

Legenda (Legend):

- M1-M4 oznake materijala (material number)
- glavna naprezanja (principal stresses)
- zona kombiniranog stanja naprezanja (region of mixed stress state)
- ▨ zona vlačnog naprezanja (tension region contour)



0 10 m a)



b)

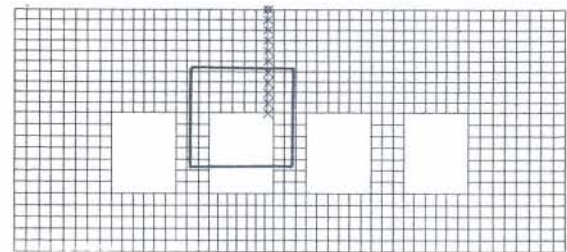
Sl. 5. Model 3 Fig. 5. Model 3

- a) osnovna mreža s kliznim elementom
 - b) detalj deformirane mreže (povećano 1000 puta)
 - a) basic mesh with interface element
 - b) detail of deformed mesh (enlargement 1000 times)
- Legenda (Legend):
xxxxxxx klizni element (interface element)

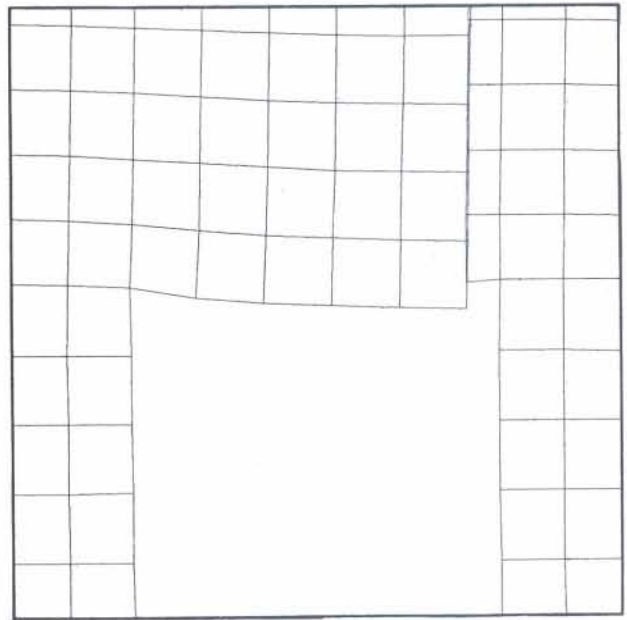
Također, kod svih modela s povećanim rasponom na 10,0 m (križište, modeli 5-7) zone kombiniranih naprezanja iznad komora povećane su i međusobno povezane, što nije dobiveno za modele 1-4. U modelu 4 dobivena je i zona čistoga vlačnog naprezanja (oba glavna naprezanja su vlačna) ograničena na samo jedan element iznad srednje komore. Ta zona javlja se za modele 5-7 iznad svih komora i proširena je na nekoliko elemenata. Slika 4 pokazuje navedene zone naprezanja za model 5.

Rezultati proračuna za slučaj 2 također pokazuju pojavu zona kombiniranog stanja naprezanja, ali samo iznad komora, dok se u stupovima ne javljaju. Kod svih modela s povećanim rasponom na 10,0 m (križište, modeli 5-7) zone kombiniranih naprezanja iznad komora su povećane, ali su međusobno povezane samo u modelu 7. U modelima 5-7

Sl. 6



0 10 m a)



b)

Sl. 6. Model 4 Fig. 6. Model 4

- a) osnovna mreža s kliznim elementom
 - b) detalj deformirane mreže (povećano 1000 puta)
 - a) Basic mesh with interface element
 - b) detail of deformed mesh (enlargement 1000 times)
- Legenda (Legend):
xxxxxxx klizni element (interface element)

dobivene su zone čistog vlačnog naprezanja slične onima za varijantu 1.

Ponašanje diskontinuiteta

Uvođenje tri horizontalna diskontinuiteta, odnosno klizna elementa u model 2 nije bitno utjecalo niti na stanje naprezanja niti na stanje deformacija. To se i moglo očekivati s obzirom da je intaktna stijena vrlo dobrih fizičko-mehaničkih svojstava, a diskontinuiteti se nalaze relativno duboko u krovini.

Vertikalni tektonski diskontinuitet, što se nalazi u sredini komore ili u blizini stupa, uzrokuje značajnije promjene stanja naprezanja i deformacija. Na kliznom elementu u sredini komore (modeli 3 i 6) uslijed progiba krovine dolazi do otvaranja pukotine zbog prekoračenja vlačne čvrstoće po diskontinuitetu. Dubina tako dobivenih vlačnih pukotina iznosi oko 1 m u modelu 3 (sl. 5) odnosno oko 2 m u modelu 6. Pojava vlačnih pukotina niti u jednom slučaju nije uzrokovala nastajanje generalnog sloma u krovini, nego samo lokalne poremećaje stabilnosti.

U slučaju kada se vertikalni tektonski diskontinuitet nalazi u blizini stupa dobivaju se veći progibi u komorama, kao i vertikalni pomaci na kliznom elementu (sl. 6). Za model 4 (raspon komore 5,5 m) u oba slučaja to nije uzrokovalo pojavu klizanja po plohama diskontinuiteta. U modelu 7 (raspon komore 10,0 m) za oba slučaja dobiveni su vertikalni pomaci koji su 4 puta veći nego u modelu 4 (vidi tablicu 3). To je uzrokovalo prekoračenje posmične čvrstoće diskontinuiteta i pojavu klizanja po čitavoj njihovoj duljini.

Međutim, ta pojava niti u ovom slučaju nije uzrokovala generalni slom u krovini.

Dobivene pojave lokalnih poremećaja stabilnosti pri vrlo malim iznosima vertikalnih pomaka (do maksimalno 2,4 mm) ukazuju na potrebu preciznih mjerenja i praćenja pomaka. Iako ovim proračunima nije utvrđena pojava generalnog sloma u krovini nužan je oprez s obzirom na to da prikazane dvodimenzionalne analize ne uključuju u proračun prostorne efekte prisutne pri modeliranju otkopno-stupne metode.

Zaključak

Na temelju rezultata provedenih numeričkih analiza zaključuje se da je slučaj 2 (dimenzije stupova 3,3 m x 5,5 m) prihvatljiviji sa stajališta sigurnosti stupova. Kod stupova čije su dimenzije 2,8 m x 5,5 m (slučaj 1) nije uočen lom materijala, ali zbog pojave vlačnih naprezanja u sredini stupova nije se moglo u fazi probne eksploatacije dimenzionirati stupove na tu širinu.

Stabilnost komora zadovoljena je za dimenzije 5,5 m x 5,5 m. Iako se u krovini javljaju zone kombiniranih naprezanja iznad komora, niti u jednom modelu pri ovim dimenzijama komora nije uočena pojava generalnog sloma.

Pojava horizontalnih slojnih diskontinuiteta duboko u krovini ne uzrokuje bitnu promjenu stanja naprezanja i deformacija niti poremećaje stabilnosti komora. Međutim, pojave vertikalnih tektonskih diskontinuiteta u krovini uzrokuju lokalne poremećaje stabilnosti koji se očituju ili pojavom otvaranja pukotina na ograničenoj dubini ili pojavom klizanja i povećanih pomaka na samom diskontinuitetu. To nije uzrokovalo pojavu generalnog sloma u krovini. S obzirom na istraženost ležišta i nedostatak in-situ mjerenja čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase, ukazuje se na potrebu praćenja i mjerenja (*monitoring*) takvih pojava iz dva razloga. Najprije, zbog uvođenja zaštitnih mjera odnosno prilagodavanja rasporeda stupova ako je to potrebno. Zatim, time bi se omogućilo usavršavanje prikazanih numeričkih modela i analiza u povratnoj petlji što i jeste suvremeni pristup projektiranju u složenim uvjetima na koje nailazimo u stijenskoj masi.

U komorama čija širina iznosi 10,0 m i koje predstavljaju model križišta također nisu uočene pojave loma. Međutim, zone kombiniranih naprezanja u ovom su slučaju povezana a javljaju se i ograničene zone čistog vlačnog naprezanja iznad komora. Pri pojavi vertikalnih diskontinuiteta u krovini također su uočene pojave lokalnih poremećaja stabilnosti, ali bez pojave generalnog sloma u krovini.

Na temelju rezultata analiza određeni su parametri za probnu podzemnu eksploataciju arhitektonsko-građevnog kamena u kamenolomu "Kanfanar III". Potrebna površina poprečnog presjeka stupa iznosi minimalno 16 m². Minimalna širina stupova je 3,3 m, a maksimalno dopušteni raspon komora 5,5 m.

Treba napomenuti da se do navedenih podataka došlo interpretacijom rezultata u ravninskom modelu iako je problem u stvarnosti trodimenzionalan. Probnom eksploatacijom i odgovarajućim mjerenjima trebalo bi navedene postavke verificirati. Na ovom problemu praćenjem eksploatacije očekujemo dalja istraživanja.

Primljeno: 1996.05.08.

Prihvaćeno: 1996.06.25.

LITERATURA

- Bandis, S. C., Lumsden, A. C., Barton, N. R. (1983): Fundamentals of Rock Joint Deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 249-268.
- Cotman, I. (1996): Probna podzemna eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena u kamenolomu "Kanfanar". *Rud.-geol.-naft. zb.*, Vol. 8, Zagreb.
- Fornaro, M., Bosticco, L. (1994): Underground Stone Quarrying in Italy-Its Origins, The Present Day and prospects (Part 2). *Marmomacchine International*, No. 7, 22-51.
- Fornaro, M., Bosticco, L. (1995): Underground Stone Quarrying in Italy-Its Origins, The Present Day and prospects (Part 4). *Marmomacchine International*, No. 9, 64-87.
- Moser, P., Oberndorfer, T. (1994): Low Cost Underground Mining of Bulk Material. XVI. World Mining Congress, 435-442, Sofia.

- Pelizza, S., R., Fornaro, M., Peila, D., Cardu, M., Bosticco, L. (1994): Design Criteria to transfer Underground Ornamental Stone Quarries. XVI. World Mining Congress, 425-434, Sofia.
- Piga, P., M., Raspa, G., Giccu, R., Manca, P.P. Massacci, G., Badino, V., Peliza, S., Fornaro, M., Bonifazi, G., Berry, P., Ferrara, G., Shena, G. D., Frisamorandini, A., Ghian, M. (1994): Applied Research in Italian Universities in the Field of Ornamental Stone. XVI. World Mining Congress, 685-693, Sofia.
- ...(1991). FLAC, Users Manual, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.

Numerical Analyses of the Underground Exploitation of Dimension Stone

B. Kovačević-Zelić, S. Vujec and I. Cotman

Underground exploitation of dimension stone is spreading lately for three main reasons: economy (heavy overburden), organisation (seasonal weather constraints), and environment (nature protection areas, areas of tourist interest). In Carrara district approximately 25 % of the presently worked marble quarries develops underground (Piga et al., 1994).

According to some investigations (Moser & Oberndorfer, 1994) even for bulk materials like limestone and dolomite, low cost underground mining can be realised.

Underground exploitation is different from surface quarrying only in the first stage, the removal of top slice, descending slices are worked as in conventional quarries (Pelizza et al., 1994).

Underground openings can be used for many purposes such as storing liquids, food, industrial products, strategic materials; creating protected areas for military and civil use (archives, museums, research centres); storing of industrial and toxic waste; or cheese storehouses and wine cellars (Fornaro & Bosticco, 1995).

In underground dimension stone exploitation, stability problems require adequate studies and stability checks in order to avoid expansive artificial support measures (Pelizza et al., 1994, Fornaro & Bosticco, 1995).

In the quarry "Kanfanar III"-Kamen"-Pazin (Fig. 1), surface exploitation was not possible because of the economical reasons (heavy overburden) and environmental constraints (area of tourist interest). Therefore, an existing active surface exploitation is transferred to the underground. The analysis of room stability and pillar design was made on the basis of numerical modelling with the finite difference code FLAC.

The numerical model was created according to the available geological data and laboratory determination of mechanical properties for all layers (Table 1, Fig. 2). Regular room and pillar method was chosen and two cases of pillar dimensions were examined (Table 2). The following analysis were modelled:

- MODEL 1 - roof without discontinuities (competent rock),
- MODEL 2 - roof with 3 parallel horizontal discontinuities,
- MODEL 3 - roof with 1 vertical discontinuity in the middle of the room,
- MODEL 4 - roof with 1 vertical discontinuity near the pillar,
- MODEL 5 - same as model 1, with room width enlarged to 10 m,

MODEL 6 - same as model 3, with the room width enlarged to 10 m,

MODEL 7 - same as model 4, with the room width enlarged to 10 m.

The discontinuities were modelled using interface elements.

Table 3 shows the results of the numerical analyses in terms of maximum compressive stress in pillar σ_{max} and maximum vertical displacement in rooms δ_{max} . Compressive are small in comparison to the strength of roof materials (approx. 88.6 MPa). The low magnitude of displacements was also expected because of high moduli of elasticity (approx. 11 GPa).

Figures 3 and 4 represent the stress state for the model 1 and model 5, respectively. The regions of mixed stress state (one principal stress is tensile and one is compressive) and pure tension (both principal stresses are tensile) are emphasised.

Three horizontal discontinuities (model 2) did not affect very much the results of numerical analyses, because of very good quality of rock and the position of discontinuities relatively high in the roof.

The influence of the vertical tectonical discontinuities was more obvious. For the interface element placed in the middle of the room, tension crack was obtained. The length of tension crack was approximately 1 m for model 3 (Fig. 5) and approximately 2 m for model 6. It caused only local instabilities and not the general roof failure.

Interface element near the pillar caused larger vertical displacement (Fig. 6). It did not induce shear failure on interface for room width of 5.5 m. But, for the rooms of 10 m, shear failure and slippage along discontinuity occurs. As in the previous case, it was only local instability phenomenon and did not cause a general roof failure.

In the light of previously presented results, the following parameters were chosen for the trial underground exploitation of dimension stone in "Kanfanar III". The minimum area of pillar cross section must be 16 m², minimum pillar width 3.3 m, and maximum room width 5.5 m.

It should be mentioned here that all results were obtained in two dimensional analyses. In reality, the stability problem of room-and-pillar method is three-dimensional. Therefore, adequate in-situ measurements and monitoring is necessary during the trial phase. Further investigations are foreseen.