

Projekt »Kriteriji loma materijala izraženi deformacijama kao osnova za analizu stabilnosti podzemnih prostorija« financiran od Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske

PROGNOZA ODVALA U TUNELIMA PREMA GEOLOŠKI DEFINIRANIM RAVNINAMA DISKONTINUITETA

Mladen HUDEC i Lidija FRGIĆ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu,
Pierottijeva 6, 41000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Teorija blokova, Metoda rubnih elemenata, Geološka statistika, Podzemne prostorije, Tuneli

Inženjersko-geološki podaci moraju biti adekvatno pripremljeni za kasniju provjeru stabilnosti podzemnih prostorija. Srednje vrijednosti smjera i nagiba ravnina diskontinuiteta nisu mjerodavne, nego granice područja tih kuteva unutar kojeg se nalazi odabrani postotak mjerenja. Osnovne postavke teorije blokova primijenjene su za grafički prikaz očekivanih i mogućih odvala u presjecima podzemnih prostorija. Prostor odvaljenih blokova stijene treba u pravilu ispuniti skupim betonom. Radi toga, studija mogućnosti nastajanja, prognoziranja ali i izbjegavanja odvala pri iskopu predstavlja izazov i teoriji i praksi tunelogradnje. U program rubnih elemenata, adaptiran za proračun deformacija i naprezanja uz podzemne prostorije, moguće je ugraditi, uz kriterije loma stijene prema teoriji Hoeka i Browna, također i kriterij loma na ravninama diskontinuiteta, pa je tako omogućena i numerička prognoza oblika i dimenzija blokova sklonih rušenju.

Key-words: Block theory, Boundary elements method, Statistics in geology, Underground rooms, Tunnels

The data from the engineering geological measurements have to be adequate prepared for later use in the computer programs for examination of the underground rooms stability. The only mean values of the dip direction and dip angles are not relevant for later calculations, but rather the statistically defined area containing chosen percentage of the collected data. The main conclusions of the block theory are accepted for visual presentation of the relation between the rooms cross-sections and the planes of discontinuities so that the position and shape of critical (key) blocks can be easily recognized. The roof falls and side sidings volumes have to be filled in the site with the expensive concrete, so the avoiding of falls is a challenge to the theory and tunnelling practice. The program based on the boundary elements is adapted so that it can calculate the failure criteria on the planes of weakness and compare this with the failure criteria through in the rock itself. The area with critical security factor will be displayed and so the numerically possible rock and block failure recognized.

Uvod

Prema načelima novih metoda tunelskog iskopa i podgrađivanja glavni projekti podgrađivanja ostaju samo principijelna rješenja koja se svakodnevno prilagođuju geotehničkim uvjetima na danoj lokaciji. Projektiranje podgradnih sistema preseljeno je tako iz konstrukcijskih biroa na gradilišta, gdje u odabiru konkretnih rješenja sudjeluju visoko stručni kadrovi izvođača i nadzora, ili posebnih stručnih ekipa znanstvenih organizacija na samom radilištu, a pri tome su osnovni kriteriji ekonomičnost i sigurnost objekta.

Logično je u proces odlučivanja uključiti i novija dostignuća teorije stabilnosti podzemnih prostorija. Ovaj rad predstavlja pokušaj da se uz primjenu osobnih računala, kakva već postoje na većini gradilišta, omogućiti jednostavna i zorna primjena nekih postavki teorije blokova. Tako će se moći korisno upotrebljavati dio inženjersko-geoloških podataka koji se već duže vrijeme marljivo prikupljaju na našim gradilištima. Posebno će biti moguće odvojiti pogreške primijenjenog sistema miniranja i iskopa od nekih neizbježnih ispadanja većih blokova koja se obično uvjetno nazivaju »geološkim odvalama«. Predloženi zorni prikaz mogućih odvala poslužiti će za traženje načina da se one izbjegniju ili smanji njihov volumen.

U razlomljenim karbonatnim stijenama odvale mogu npr. u profilu cestovnog tunela iznositi i po nekoliko kvadratnih metara. Logično je radi toga da i izvođači radova i investitori moraju nastojati da nekontroliranog odvaljivanja blokova bude što manje.

Grafičko prikazivanje inženjersko-geoloških podataka

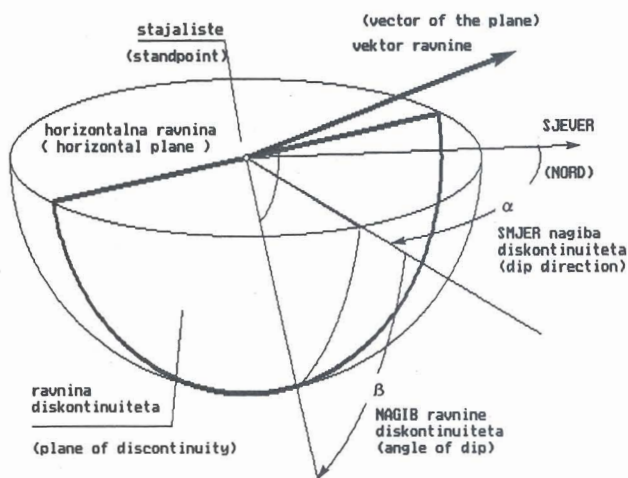
Ukratko će se prikazati stereografsko prikazivanje ravnina diskontinuiteta u stijenama uobičajeno u inženjerskoj geologiji, jer takav način prikazivanja općenito nije poznat građevinskim inženjerima. Izlažu se osnovni principi, radi jednoznačnog interpretiranja takvih prikaza i time vezane pripreme za kasniju numeričku analizu. Na slici 1. pokazana je jedna kosa ravnina diskontinuiteta stijene u odnosu na horizontalnu ravninu položenu kroz stajalište opažača i u odnosu na zamišljenu kuglu sa središtem u stajalištu. Uobičajeni podaci koji se na terenu registriraju (v. Hoek-Brown, 1980) su prema sl.1.:

- kut smjera nagiba ravnine diskontinuiteta, azimut ili kratko »smjer« α , mjeren od sjevera u desno, izražen u stupnjevima, ($0 < \alpha < 360^\circ$);

- kut nagiba ravnine diskontinuiteta ili kratko »nagib« β , mjereno od horizontalne ravnine prema dolje ($0 < \beta < 90^\circ$).

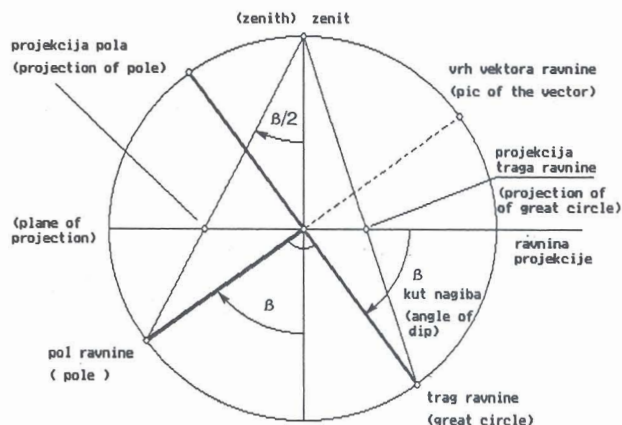
Obično se oba podatka bilježe u obliku α/β na primjer 140/55. Predlaže se registriranje još dva podatka koji će dati mjerodavnije vrijednosti za proračun konstrukcija podgrada i obloga podzemnih prostorija. Površinu na kojoj se snimaju podaci o diskontinuitetima, primjerice, čelo iskopa podzemnog prostora, trebalo bi podijeliti na određen broj jednakih površina i zabilježiti:

- okomite razmake ravnina diskontinuiteta, npr. debljinu slojeva, odnosno okomite razmake ravnina bilo kojeg sistema diskontinuiteta;
- broj jednakih ili vrlo bliskih podataka α i β , dakle tzv. statističku frekvenciju koja se označuje sa f .



Sl. 1. Položaj ravnine diskontinuiteta u prostoru
Fig. 1. The plane of discontinuity

Razmak ravnina diskontinuiteta je mjerodavan naročito za odvale u uzdužnom smjeru, a u ravni poprečnog presjeka će odvale često biti nazubljene i ograničene upravo ravninama na razmacima diskontinuiteta. Broj ponavljanja istih podata-

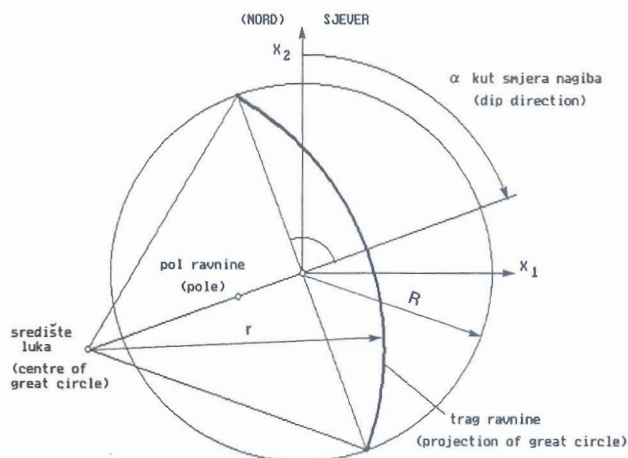


Sl. 2. Vertikalni presjek kroz pravac smjera nagiba i kuglu projekcije, polarna stereografska projekcija pola ravnine i traga ravnine

Fig. 2. The vertical section through dip direction and the sphere of projection, polar stereographic projection of the pole and the trace of the plane

ka daje veću (statističku) težinu dominantnim ravninama diskontinuiteta i smanjuje utjecaj pojedinačnih odstupanja. Za svaku vrstu (grupu) diskontinuiteta trebao bi ukupni broj parova podataka (zbroy frekvencija) biti barem dvadeset.

Radi mogućnosti povezivanja inženjerskogeoloških podataka s kasnijom numeričkom analizom metodom konačnih elemenata ili metodom rubnih



Sl. 3. Prikaz ravnine u polarnoj stereografskoj projekciji
Fig. 3. Representing the plane in stereographic projection

elementa, treba uz ove podatke vezati i sve ostale koji su potrebni za klasifikaciju stijena.

Prihvata se sustav projiciranja i oznake autora Hoeck — Browna (1980), jer su one povezane s konvencijama u mehanici stijena i kompjutorskim programima. Nažalost, pri tome se moraju primijeniti dva koordinatna sustava: jedan desni, globalni, vezan uz vektorsku analizu s geografskim koordinatnim sustavom $0 x_1 x_2 x_3$, a koji korisniku ostaje uglavnom skriven u kompjutorskom programu i drugi, lokalni, lijevi $0 x y z$, koji veže geološke podatke s podacima poprečnih presjeka podzemnih prostorija i ulaznim podacima za programe analize stabilnosti, deformacija i napreznja.

Ravninu diskontinuiteta sa sl.1. predstavlja jedinični vektor \vec{n} , okomit na tu ravninu. Komponente tog jediničnog vektora u prostoru $0 x_1 x_2 x_3$ su kosinusi smjera normale na ravninu:

$$\begin{aligned} n_1 &= \sin \beta \sin \alpha \\ n_2 &= \sin \beta \cos \alpha \\ n_3 &= \cos \beta \end{aligned} \quad (1)$$

Podaci o ravninama diskontinuiteta prikazuju se u stereografskoj projekciji, kod koje se svi vektori i ravnine u prostoru prikazuju projekcijama probodišta vektora i tragova ravnine s donje polukugle na horizontalnu ravninu. Ovdje se prihvaća očište u zenitu jedinične kugle. Vrh vektora koji predstavlja ravninu je polumjer jedinične kugle, a naziva se pol ravnine. U prihvaćenoj varijanti stereografske projekcije projicira se donji vrh vektora na horizontalnu ravninu. Slika 2. prikazuje vertikalni presjek kroz kuglu projekcije i vektor ravnine pa je na slici vidljiv način projiciranja vrha vektora ravnine \vec{n} i traga ravnine na horizontalnu

ravninu projekcije. Ravninu projekcije predstavlja horizontalna kružnica jediničnog polumjera R, pokazana na sl. 3, a projekcija vrha donjeg vektora n , tj. pol ravnine dobiva u ravnini projekcije koordinate:

$$\begin{aligned} x_1 &= -R n_1 \tan(\beta/2) \\ x_2 &= -R n_2 \tan(\beta/2) \end{aligned} \quad (2)$$

Ravnina diskontinuiteta presijeca ravninu projekcije u promjeru koji zapravo leži u smjeru pružanja diskontinuiteta, tj. okomito na smjer nagiba, a trag presjeka s jediničnom kuglom je u prostoru koso položena glavna kružnica kugle. Stereografska projekcija te polukružnice na horizontalnu ravninu je opet segment kružnice (sl. 3) koja prolazi kroz dvije krajnje točke promjera duž pružanja sloja. Projekcija glavne kružnice na ravninu projekcije ima polumjer:

$$r = R/\cos \beta \quad (3)$$

Koordinate središta te kružnice jesu:

$$\begin{aligned} x_{1c} &= -R \tan \beta \sin \alpha \\ x_{2c} &= -R \tan \beta \cos \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

Radi identifikacije za kompjutorsku statističku obradu treba pojedinim grupama diskontinuiteta dati oznake a, b, c, d itd, pa će tako kutevi smjera i kutevi nagiba dobiti oznake $\alpha_a, \beta_a, \alpha_c$ i sl., a komponente jediničnih vektora ravnina dobiti će oznake s dva indeksa n_{1a}, n_{2a}, n_{2c} itd. Kod toga prvi indeks označuje smjer projekcije vektora, a drugi indeks je oznaka ravnine.

Presječnicu dviju ravnina »a« i »b« koje prolaze ishodištem koordinatnog sustava predstavlja pravac kroz ishodište, a kosinuse smjera te presječnice \vec{p}_{ab} dobiva se vektorskim produktom kosinusa smjerova obiju ravnina:

$$\vec{p}_{ab} = \vec{n}_a \times \vec{n}_b \quad (5)$$

Ako se za ortove uvedu oznake $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ onda taj produkt daje:

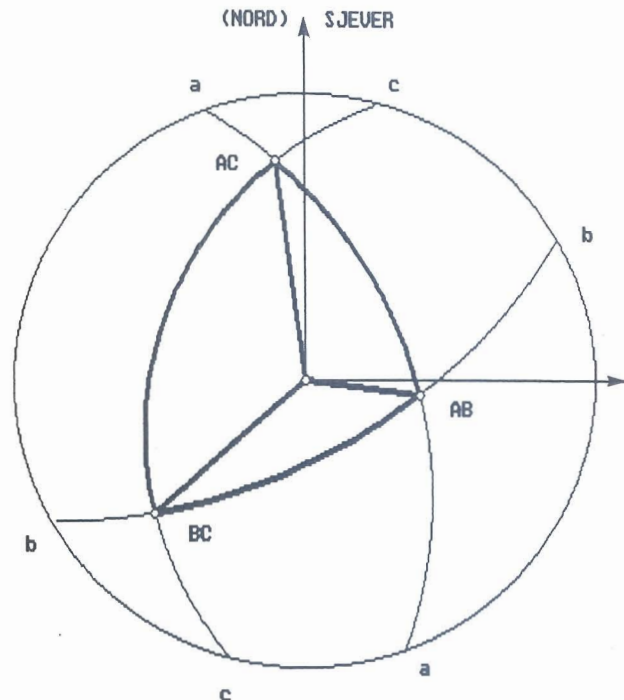
$$\vec{p}_{ab} = \vec{e}_1 (n_{2a} n_{3b} - n_{3a} n_{2b}) + \quad (6)$$

$$\vec{e}_2 (n_{3a} n_{1b} - n_{1a} n_{3b}) + \vec{e}_3 (n_{1a} n_{2b} - n_{2a} n_{1b})$$

ili kraće pisano uz indeksno označavanje:

$$\vec{p}_{ab} = \vec{e}_i p_i; \quad i = 1, 2, 3 \quad (6a)$$

U stereografskoj projekciji presječnica dviju ravnina očituje se kao vektor povučen iz ishodišta u presjecište lukova koje prikazuju te dvije ravnine (sl.4). Slično se mogu odrediti presječnice ravnine čela iskopa tunela s ravninama pojedinih diskontinuiteta. Radi toga treba i čelo tunela shvatiti kao ravninu diskontinuiteta, kod čega će se smjer osi tunela α_i definirati analogno smjeru nagiba ravnine diskontinuiteta. Za horizontalni tunel treba nagib usvojiti $\beta_i = 90^\circ$, a za tunel u usponu pod kutem δ treba uvrstiti $\beta_i = 90^\circ - \delta$, odnosno za tunel u padu pod kutem δ uvrstiti $\beta_i = 90^\circ + \delta$.



Sl. 4. Stereografska projekcija triju ravnina, njihovih presječnica i bloka ograničenog tim ravninama
Fig. 4. The stereographic projection of three planes, its crossing, and of the block of its intersection

Numerička priprema ulaznih podataka

U inženjerskoj geologiji uobičajena je grafička statistička interpretacija, ali takva ne može poslužiti kao ulazni podatak za numeričke postupke u mehanici stijena. Predlaže se registracija podataka na uobičajeni način, ali dalju obradu treba prilagoditi primjeni u numeričkim postupcima. Pri tome će se postupati analogno postupcima povezivanja rezultata ispitivanja materijala i teorije konstrukcija.

Statistička obrada rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, pa i stijena, uvedena je u mehaniku materijala i konstruktorsku praksu naročito nakon što su prihvaćeni principi graničnih stanja naprezanja i deformacija kao temelj za analizu nosivosti i stabilnosti konstrukcija. Rezultati mjerenja nekog mehaničkog svojstva, označenog ovdje sa X, rasipani su oko svoje srednje vrijednosti X_s . Redovito se prihvaća Gaussova normalna raspodjela (sl.5) sa standardnom devijacijom s kao osnovnom mjerom jednoličnosti raspodjele podataka (Spiegel, 1961):

$$s = \sqrt{\frac{\sum f_i (X_i - X_s)^2}{\sum f_i}} \quad (7)$$

Ovdje je označeno:

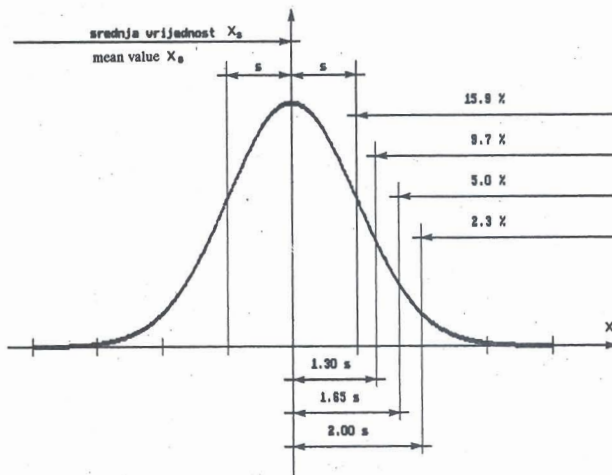
- s — standarna devijacija
- X_i — pojedinačni mjereni rezultat
- f_i — frekvencija, tj. broj istovjetnih mjerenih podataka
- X_s — srednja vrijednost mjerenih rezultata

$$X_s = (\sum f_i X_i) / (\sum f_i) \quad (8)$$

Radi postizanja što manjih vjerojatnosti loma konstrukcija traži se da tek mali postotak rezulta-

ta leži izvan odabranih granica. Na sl.5 prikazane su uz Gaussovu krivulju normalne raspodjele (Bronštejn, 1980), i neke granice i postoci rezultata koji se očekuju izvan tih granica. Za različite tipove konstrukcija usvajaju se granice u skladu s traženim kriterijima vjerojatnosti loma, obično prikriivenih u obliku faktora sigurnosti i faktora jednoličnosti materijala.

Ovise li mjereni podaci o dva međusobno nezavisna obilježja može se očekivati raspodjela u obliku dvostruko zakrivljene plohe raspodjele (Davis, 1973). Raspodjelu karakteriziraju dvije standardne devijacije prema (7), a područje unutar kojeg se može očekivati određen postotak svih rezultata može se dobiti integracijom relativnih frekvencija prikazanih na sl. 6. Ograniči li se područje integracije slojnicom s određenom relativnom frekvencijom, tada bi ono bilo ograničeno elipsom, a kao karakteristične točke trebalo bi prihvatiti točke na krajevima poluosi. Slično bi se moglo odabrati pravokutno područje integracije unutar odabranih granica, ali bi za takvo područje upravo frekvencije u vrhovima pravokutnika bile manje od svih frekvencija unutar pravokutnog područja.



Sl. 5. Gaussova krivulja normalne raspodjele
Fig. 5. The curve of normal distribution

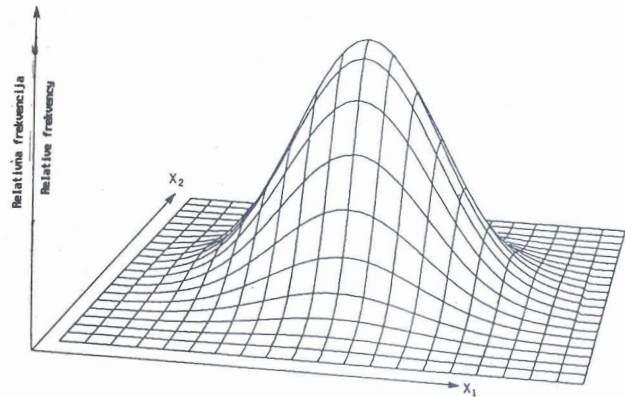
Vrijednosti pokazane u tablici 1. dobivene su numeričkom integracijom, a pokazuju postotke podataka koji se očekuju u područjima unutar pravokutnog odnosno eliptičnog područja dimenzija:

$$e = c \times s \tag{9}$$

pri čemu su:

- e — polovina stranice pravokutnika odnosno polumjer elipse
- c — faktor kojim se definira obuhvatno područje
- s — standardna devijacija

Potrebno je još provjeriti je li opravdana primjena normalne Gaussove raspodjele za konkretan skup podataka, a za to se, umjesto nekih složenijih statističkih postupaka, može jednostavno odbrojiti broj podataka koji leže unutar elipse odabranih dimenzija. Ako podaci nisu raspoređeni u skladu s normalnom raspodjelom dobit će se



Sl. 6. Normalna raspodjela za dva obilježja
Fig. 6. The normal distribution for two characteristics

Tablica 1: Normalne raspodjele
Table 1: The normal distributions

x	F(1)	F(2)	F(3)	F(4)	x	F(1)	F(2)	F(3)	F(4)
0.00	0.399	0.00	0.00	0.00	1.50	0.130	86.64	74.95	60.72
0.10	0.397	7.97	0.60	0.34	1.60	0.111	89.04	79.18	65.48
0.20	0.391	15.85	2.45	1.48	1.70	0.094	91.09	82.88	69.94
0.30	0.381	23.58	5.47	3.45	1.80	0.079	92.81	86.07	73.99
0.40	0.368	31.08	9.55	6.17	1.90	0.066	94.26	88.78	78.97
0.50	0.352	38.29	14.53	9.62	2.00	0.054	95.45	91.05	83.17
0.60	0.333	45.15	20.23	13.62	2.10	0.044	96.43	92.94	86.68
0.70	0.312	51.61	26.47	18.16	2.20	0.035	97.22	94.48	89.55
0.80	0.290	57.63	33.04	23.12	2.30	0.028	97.86	95.73	91.89
0.90	0.266	63.19	39.76	28.39	2.40	0.022	98.36	96.73	93.76
1.00	0.242	68.27	46.44	33.83	2.50	0.018	98.76	97.51	95.26
1.10	0.218	72.87	52.94	39.39	2.60	0.014	99.07	98.13	96.42
1.20	0.194	76.99	59.12	44.94	2.70	0.010	99.31	98.61	97.33
1.30	0.171	80.64	64.89	50.42	2.80	0.008	99.49	98.97	98.02
1.40	0.150	83.85	70.18	55.68	2.90	0.006	99.63	99.25	98.55
1.50	0.130	86.64	74.95	60.72	3.00	0.004	99.73	99.46	98.94

- x = apscisa
apscise
- F(1) = normalna raspodjela
normal distribution
- F(2) = integral raspodjele s jednim obilježjem
integral for one characteristic
- F(3) = integral za dva obilježja unutar pravokutnika
integral for two characteristics within rectangular area
- F(4) = integral za dva obilježja unutar elipse
integral for two characteristics within elliptic area

manji (ili veći!) postotak od odabranog i tada bi trebalo promijeniti granicu, što je moguće provesti unutar programa, bez intervencije korisnika.

Prosječne vrijednosti mehaničkih karakteristika kao što su čvrstoća, moduli i sl., mogu ponekad dovesti do rezultata koji nisu mjerodavni. U proračunima deformacija i napreznja u strukturama složenim od više materijala, ili u strukturama s izraženom anizotropijom, rezultati ovise o odnosima mehaničkih karakteristika materijala. Primjere, veći moduli mogu dati manje deformacije i istovremeno veća napreznja na jednom dijelu promatrane strukture, dok će manji moduli dati kritične vrijednosti negdje drugdje. Uobičajeno je i radi toga mnogo korektnije da se takve proračune provodi za nekoliko slogova (setova) graničnih vrijednosti mehaničkih karakteristika, jer će se time moći bolje uočiti sve moguće, pa i kritične utjecaje. Na isti način bi trebalo postupati i s orijentacijama diskontinuiteta, pa se ne mogu smatrati mjerodavnim samo prosječni podaci za kuteve smjera i nagiba, nego treba uzeti u obzir i rasipanje tih podataka.

Kod prostornih elemenata diskontinuiteta su razlike pojedinačnih mjerenja kuteva i odgovarajućih srednjih vrijednosti često dosta velike, naročito ako se pokušava te podatke prikazati za veća

područja, a ne samo lokalno. Da bi takvi podaci bili uporabivi za realnije prognoze uvjeta neposredno idućih iskopa podzemnih prostorija, treba podatke ograničiti na manja područja uz obradivanu zonu, dakle na jedan strukturni blok, uz uvažavanje učestalosti podjednakih podataka. Budući da nije očigledno kakav je utjecaj rasipanja orijentacije ravnina diskontinuiteta na stabilnost blokova u pojedinačnim slučajevima, usvojiti će se za sada proizvodnje granice unutar kojih leži 75% svih podataka, prema izrazu (9), ali opravdanost te pretpostavke tek treba provjeriti.

Statističnom obradom mogu se, uz nešto malo kompjutorskog računa, naći i podaci koji bolje opisuju geometrijske odnose u pojedinim grupama diskontinuiteta. Na sl.7 pokazan je skup podataka te u njemu naznačene srednje vrijednosti. Bilo bi najjednostavnije uzeti u račun obje srednje vrijednosti u i v , (prema (8)), a zatim i obje standardne devijacije prema (7), množene s faktorom c radi obuhvaćanja odabranog postotka mjerenja prema (9).

Iako ne postoji neka direktna uzročna (funkcijska) veza između oba mjerena podatka, ipak oblik grafički nanesenih rezultata mjerenja kuteva ukazuje da se ponegdje mogu naći izvjesne statističke pravilnosti i da se može pokušati barem s linearnom regresijom. Postavljajući ishodište za ovu operaciju u točku srednjih vrijednosti, te postavljajući proizvoljnu radnu pretpostavku veze $\beta = \beta(\alpha)$, može se naći pravac regresije

$$v = k u \quad (10a)$$

čiji će koeficijent smjera k biti jednak:

$$k = (\sum f_i u_i v_i) / (\sum f_i v_i^2) \quad (10b)$$

Ovdje je označeno:

- u_i — razlika kuta α_i i srednje vrijednosti $(\alpha_i - \alpha_{sr})$
- v_i — razlika kuta β_i i srednje vrijednosti $(\beta_i - \beta_{sr})$
- f_i — frekvencija

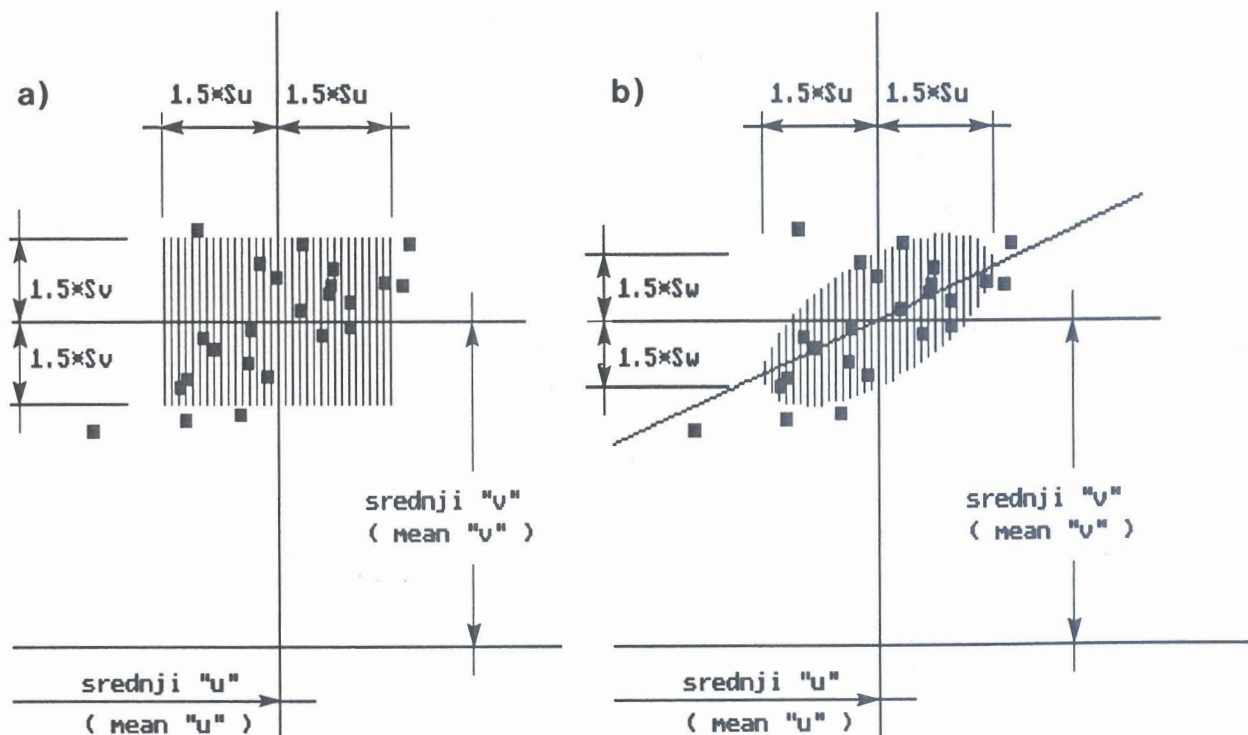
Opravdanost primjene regresije treba ispitati izračunavanjem koeficijenta korelacije r_v . Uz navedene oznake dobilo bi se:

$$r_v = \sqrt{\frac{\sum f_i (k u_i)^2}{\sum f_i v_i^2}} \quad (11)$$

Linearnu regresiju će se usvojiti kao mjerodavnu samo ako je koeficijent korelacije veći od 0.5. U tom slučaju treba i veličinu devijacije s_w računati od pravca regresije:

$$s_w = \sqrt{\frac{\sum f_i (v_i - k u_i)^2}{\sum f_i}} \quad (12)$$

Ako koeficijent korelacije ne zadovoljava, ostaje devijacija $s_v = s_w$ bez promjene, tj. prema (7). Isto tako treba preko kontrole stvarnog postotka podataka ustanoviti zadovoljava li pretpostavka raspodjele ovisnosti o dva obilježja postavljena uvjet da odabrani postotak mjerenja leži unutar odabranih granica.



Sl. 7. Statistička obrada skupa podataka
 a) obuhvaćeni podaci unutar granica 1.5-strukih standardnih devijacija unutar pravokutnog područja
 b) isto, ali uzimajući u obzir raspodjelu oko kosog pravca unutar eliptičnog područja
 Za konkretni slučaj $s_w = 0.75 s_v$

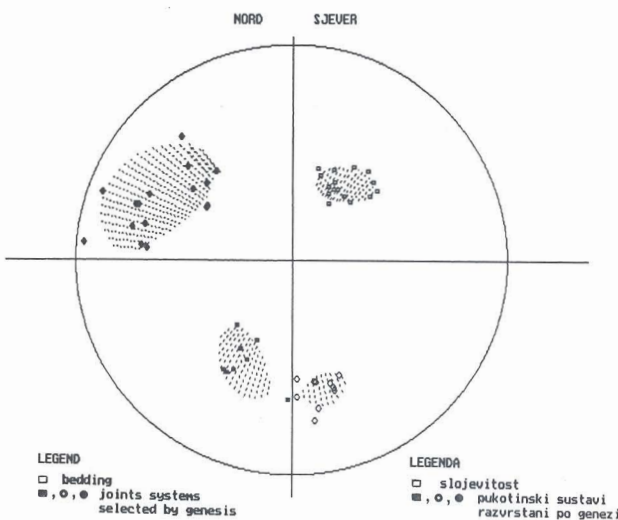
Fig. 7. The statistical interpretation of a set of data
 a) the data in quadrilateral region of 1.5 standard deviations
 b) the data, concerning linear trend and within an elliptical region,
 In the shown example $s_w = 0.75 s_v$

Logično je sada da se, kao mjerodavne vrijednosti za daljnji proračun, usvoji pet parova koji najbolje opisuju cijelo područje:

$$\begin{aligned} (1) & \alpha_{sr} \text{ i } \beta_{sr} \\ (2) & \alpha_{sr} \text{ i } (\beta_{sr} - c k s_{\beta}) \\ (3) & \alpha_{sr} \text{ i } (\beta_{sr} + c k s_{\beta}) \\ (4) & (\alpha_{sr} + c s_{\alpha}) \text{ i } \beta_{sr} \\ (5) & (\alpha_{sr} - c s_{\alpha}) \text{ i } \beta_{sr} \end{aligned} \quad (13)$$

Obuhvaćeno područje može se približno prikazati kosom elipsom oko srednje vrijednosti, kako je to pokazano na sl.7b i smatramo ju mjerodavnijom od pravokutnika na sl.7a.

Razrađen je posebni program »DISKONT« kojim se mogu interaktivno unositi novi inženjersko-geološki podaci, kao i dopunjavati ili mijenjati podaci u već postojećim zapisima. Program prihvaća nove ili učitava s diska stare podatke, obavlja njihovu statističku obradu i daje grafički prikaz, tzv. točkasti dijagram u koji su uneseni polovi ravnina. U dijagram se ucrtava područje ograničeno elipsom za 75% podataka. Prema opcijama na kraju, može se dijagram iscrtati na crtaču ili na grafičkom štampaču kao što je pokazano na sl.8. Radi dalje numeričke obrade, vezano na teoriju blokova i konkretni profil tunela, kao i program rubnih elemenata, spremaju se podaci statističke obrade u posebni zapis koji će se koristiti u daljoj obradi.



Sl. 8. Konturni dijagram polova s naznačenim područjima za 75% podataka

Fig. 8. The diagram with the areas with 75% of data

Ključni blokovi

Stereografsku projekciju koriste autori metode blokova Goodman i Gen-hua Shi (1985) za određivanje oblika blokova sklonih odaljivanju. Na sl.4 prikazane su tri ravnine i njihove presječnice u stereografskoj projekciji. Segmentni trokut između lukova predstavlja blok koji je ograničen tim ravninama diskontinuiteta. Takav blok iznad horizontalno položenog ravnog stropa prostorije bio bi sklon ispadanju. Uz vektorsku analizu koristi se, zbog jednostavnosti, i grafička interpreta-

cija stereograma. Detaljnije o tome može se naći u citiranoj literaturi (Goodman, 1989).

Teorija blokova prihvatljiva je za analizu stabilnosti pojedinačnih blokova uz slobodne kosine gdje se pojedini blokovi nalaze isključivo pod djelovanjem sila težine i normalnih i posmičnih sila na ravninama diskontinuiteta potrebnih za uravnoteženje sila vlastite težine. Originalna teorija blokova tretira na isti način i blokove uz podzemne prostorije, zanemarujući primarna i sekundarna naprezanja u stijeni koja mogu ostvarivati djelomično ili potpuno uklještenje blokova. Također, originalna teorija ne uzima u obzir sile koje nastaju zbog djelovanja susjednih blokova, pa se time zanemaruje uklještenje blokova u masivu. Ovdje se radi toga odustaje od direktne primjene tako koncipirane teorije blokova, ali će se pokušati povezati geometriju podzemnih prostorija i geometriju ravnina diskontinuiteta i na temelju toga omogućiti kvalitativnu ocjenu pojava odvala i mogućih lomova.

Mnogo realnije rezultate moglo bi se dobiti ako bi se prethodno riješilo stanje deformacija i naprezanja oko otvora, npr. metodom rubnih elemenata ili metodom konačnih elemenata, te nakon toga ispitalo ispunjavanje kriterija loma na stranama kritičnog »ključnog« blokova. Za kvantitativnu analizu i proračun stanja deformacija i naprezanja oko otvora bilo bi potrebno prethodno poznavati mehaničke karakteristike osnovnog materijala, kao i koheziju i kuteve trenja na svim ravninama diskontinuiteta. Dakle, potreban je veći broj konstanti materijala za koje se obično mogu samo pretpostaviti neke manje ili više proizvoljne vrijednosti. Naravno, teško je očekivati realne rezultate iz ma koliko sofisticiranog proračuna s nepouzdanim pretpostavkama. U ovoj fazi nije još razrađen program rubnih elemenata koji bi omogućio i kvantitativnu analizu.

Odnosi ravnina diskontinuiteta i obrisa podzemnih prostorija

Stereografski prikazi ravnina diskontinuiteta služe dobro za uočavanje njihovih međusobnih odnosa u prostoru, ali su oni manje povoljni kada se traže odnosi ravnina diskontinuiteta i kontura otvora podzemne prostorije. Posebice je teže uočiti te odnose ako obris otvora podzemne prostorije (itrados iskopa) nije ograničen samo sa nekoliko ravnina, nego, kao obično, sadrži i kružne, košaraste ili eliptične lukove.

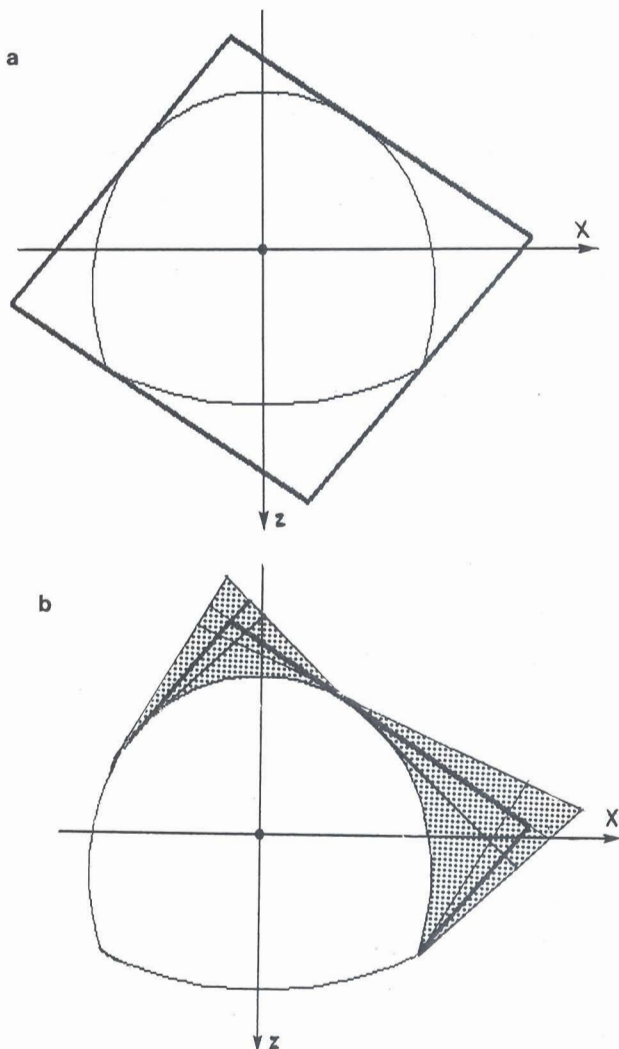
Odnosi ravnina diskontinuiteta i kontura podzemne prostorije mogu se mnogo lakše uočiti u ortogonalnim projekcijama diskontinuiteta na čelo iskopa podzemne prostorije, dakle na ravninu poprečnog presjeka i na uzdužni profil prostorije ili tunela. Kosinuse smjera presječnica ravnina diskontinuiteta »r« i ravnine poprečnog presjeka »t« označene sa p_{ri} ili p_{ti} , odnosno projekcijama presječnica p_i , mogu se naći pomoću izraza (6) i (6a). Preostaje da se te presječnice projicira na normalni presjek prostorije koji je definiran vektorom m_i i tako dobiju tragovi ravnina diskontinuiteta na čelu iskopa. U ravnini poprečnog presjeka usvaja

se koordinatni sistem $0 \times z$, kod čega je pozitivna grana osi z orijentirana prema dolje, dok je os y orijentirana u smjeru iskopa, kako je to uobičajeno u geotehnici. Komponente vektora presječne p_{ab} projicirane u novi koordinatni sustav dobit će se kao:

$$\begin{aligned} n_x &= m_{1x} p_1 + m_{2x} p_2 + m_{3x} p_3 \\ n_y &= m_{1y} p_1 + m_{2y} p_2 + m_{3y} p_3 \\ n_z &= m_{1z} p_1 + m_{2z} p_2 + m_{3z} p_3 \end{aligned} \quad (14)$$

Ovdje su upotrebljene oznake:

- n_x, n_y, n_z — kosinusi smjera presječne u koordinatnom sustavu presjeka prostora (profila),
 m_{1x}, m_{2y}, \dots — kosinus kuta između globalnih koordinatnih osi l i lokalne osi x , itd.
 p_1, p_2, p_3 — kosinusi smjera presječne u globalnom sistemu $0 \ x_1 \ x_2 \ x_3$



Sl. 9. Dvije ravnine diskontinuiteta projicirane na čelo tunelskog iskopa.

- a) svi mogući blokovi,
 b) odabrani blok s vjerojatnim promjenama kuteva α i β

Fig. 9. Two planes of discontinuities projected on the tunnels front

- a) all possible blocks,
 b) selected block but with variations of α and β

Pomoću dobivenih kosinusa može se ucrtati u ravninu poprečnog i uzdužnog presjeka tragove presječna ravnina diskontinuiteta sa čelom (i bokom!) podzemne prostorije.

Prethodno se mora, naravno, detaljno determinirati točke konture standardnog poprečnog presjeka podzemne prostorije. U tu je svrhu razrađen generator koordinata »PROFIL« koji za lučne dijelove intradosa proračunava koordinate za svaki stupanj centralnog kuta. Koordinate točaka generiraju se na ravnim, kružnim ili eliptičkim segmentima i spremaju u vanjsku memoriju, radi kasnijeg višekratnog korištenja. Uz podatke o koordinatama točaka intradosa iskopa spremaju se i podaci o nagibima tangenti u pojedinim točkama.

Poznata je činjenica da najčešće odvale blokova polaze s ruba profila podzemne prostorije, iz točaka u kojima ravnine diskontinuiteta tangiraju profil. Unutar programa traže se točke u kojima pojedine ravnine diskontinuiteta tangiraju profil i kroz te točke povlače se tangente. Za svaki par ravnina diskontinuiteta može se naći četiri takva bloka mogućih odvala, kako je pokazano na sl.9a. Sva četiri moguća bloka nisu uvijek niti kritična a niti vidljiva, jer će nakon loma ili klizanja po diskontinuitetima doći do ispadanja samo ako oslanjanje bloka, nakon parcijalnog loma, ne može uravnotežiti silu vlastite težine bloka. Očigledno, blokovi odvojeni ravninama diskontinuiteta u kaloti ili na bokovima mogu imati tendenciju odvaljivanja. Dakle, već takva posve grafička prezentacija odnosa ravnina diskontinuiteta i poprečnih i uzdužnih profila prostorije može imati svoju kvalitativnu vrijednost, jer pokazuje kakav se lom ili odvala može očekivati.

U prvooj aproksimaciji može se svjesno usvojiti ista pogreška kao i u originalnoj teoriji blokova, tj. zanemariti stanje naprezanja u masivu, dakle i primarnu i sekundarnu uklještenost blokova. Na blok u obliku klina, koji se poslije loma već odvojio po ravninama diskontinuiteta djeluju stvarno samo sile vlastite težine i njima izazvane reakcije na plohama bloka.

Mogu se usvojiti neka iskustvena pravila koja će i u samoj kvalitativnoj slici mogućih blokova na konturi intradosa ukazati na to hoće li očekivani blokovi biti skloni ispadanju ili ne. Od tih preporučenih pravila ne treba očekivati da su uvijek i svugdje potpuno pouzdana, niti pridržavanje tih pravila garantira da poneki blok neće ispasti ili se odvaliti, jer to ovisi o većem broju faktora. Ne treba zaboraviti ni ono poznato pravilo da u podzemlju nema neprekršivih pravila. Kao pisana, ali ne i propisana pravila, mogli bismo usvojiti:

- blokovi koji završavaju vrlo tupim kutem redovito su skloni padu i u kaloti i u bokovima, a takve odvale je teško spriječiti;
- blokovi koji završavaju pravim ili oštrim kutem razvijaju se do kraja samo ako su koeficijenti trenja na plohama diskontinuiteta vrlo maleni. Veće odvale obično ne završavaju u krajnjem kutu najvećeg mogućeg bloka, nego će imati nazubljen oblik. Lom će završiti na dijelu gdje ravnina diskontinuiteta dosiže cca 45° (ili vjero-

jatnije na $45^\circ + \varphi_d/2$) u odnosu na radialni pravac. Ovdje je φ_d kut trenja na ravnini diskontinuiteta, a taj kut može biti u vrlo širokim granicama, ovisno o ispuni diskontinuiteta;

c. ravnine diskontinuiteta koje leže pod vrlo ostrim kutem u odnosu na uzdužnu os prostorije redovito izazivaju odvale u kaloti do debljine jednog razmaka između ravnina diskontinuiteta. Do značajnijih odvala u uzdužnom smjeru u pravilu neće doći ako je diskontinuitet strmiji od $(45^\circ - \varphi_d/2)$, jer je tada ukliještenost bloka dovoljna da ga unutrašnje trenje pridržava.

Ovdje se mora uključiti interaktivno korisnik programa koji će odlučiti koje od blokova treba detaljnije prikazati. U prvoj se fazi prikazuju sva četiri moguća bloka sa svojim tangentama, ali samo sa srednjim vrijednostima kuteva α_{sr} i β_{sr} . Korisnik programa treba odabrati blok koji će se detaljnije prikazati, a zatim se iscrtavaju blokovi koji se dobivaju za srednje vrijednosti kuteva α i β . Tanjim linijama iscrtavaju se blokovi koji mogu nastati zbog lomova po diskontinuitetima koji se od srednjih vrijednosti razlikuju za devijacije množene s odabranim faktorom (sl.9b). Iskusnom će graditelju biti dovoljan i takav prikaz da doneše zaključak o tome što bi trebalo poduzeti da se pri daljem iskupu izbjegnu velike odvale. To može biti jedan od ovih zahvata:

- sidra s ruba profila položena koso prema gore i naprijed,
- konturno miniranje koje ne bi suviše potreslo kritične blokove niti izazvalo njihov pad,
- vrlo oprezno prethodno odvajanje iskopa (prespliting) po konturi, ili
- povećanje broja bušotina u kritičnom dijelu profila uz istovremeno smanjenje punjenja.

Izbjegavanje odvala ima značajan financijski učinak, ali ostaje otvoreno pitanje tko će biti zaslužan za izbjegavanje odvala i kome pripada financijski učinak. Autori članka se ograđuju od te diskusije koja je pitanje financijskih odnosa investitora i izvođača radova, a ne pitanje teorije i tehnike.

Povratna analiza odvala

Teoretske uvjete loma stijene određuju barem dvije konstante. Prema kriterijima Mohr—Coulomba i Drucker—Pragera to su kohezija c i kut nagiba tangente na anvelopu graničnih kružnica φ . Hoek i Brown (1980) predlažu konstante »m« i »s« pomoću kojih se može izraziti kriterij:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad (15)$$

pri čemu su uporabljene oznake:

- σ_1 — granično glavno tlačno naprezanje (najveći tlak)
- σ_3 — najmanje glavno tlačno naprezanje
- σ_c — jednoosna tlačna čvrstoća uzorka stijene
- m, s — bezdimenzionalne konstante, koje definiraju odnose čvrstoće masiva i čvrstoće uzorka stijene. Autori kriterija daju izvjesne okvirne sugestije o vrijednostima tih koeficijenata

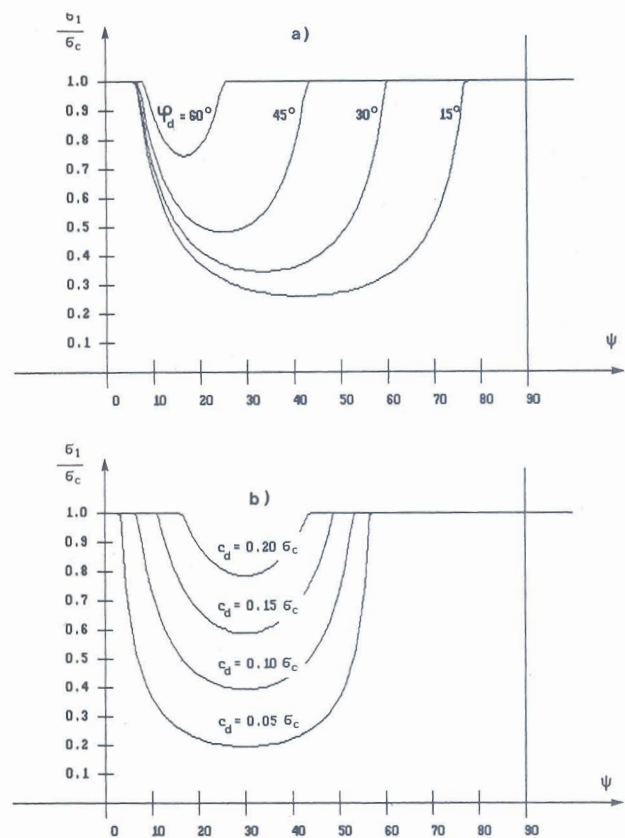
Taj je kriterij ugrađen u program rubnih elemenata koji se koristi u daljoj analizi.

Na ravninama kontakta bloka s ostalom stijenom angažiraju se kohezija i trenje karakteristični za taj diskontinuitet. Uz konstante koje definiraju čvrstoću osnovne stijene, pojavljuju se za svaku ravninu diskontinuiteta barem po dvije nove konstante (c_i, φ_i ili m_i, s_i) koje određuju uvjete loma po tim plohama. Uz nešto drugačije formulirane kriterije (Boshkov, Hudec, 1972), jednostavnije je prihvatiti nešto drugačije formulirane kriterije loma po plohama diskontinuiteta definirane, npr. izrazima Jaegera i Cooka (1969). Ti se kriteriji mogu, slično kao i Mohr—Coulombov uvjet loma, svesti na oblik sličan Hoek—Brownovom kriteriju loma. Kriterij loma na diskontinuitetu može se tako svesti na oblik:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_d + \sigma_3 \operatorname{tg} \varphi_d)}{(1 - \operatorname{tg} \varphi_d \operatorname{tg} \psi) \sin 2\psi} \quad (16)$$

Ovdje indeks »d« označuje da se c_d i φ_d odnose na svojstva na ravnini diskontinuiteta, a kut ψ je kut između smjera većeg tlačnog glavnog napreznja σ_1 i ravnine diskontinuiteta.

Radi uočavanja utjecaja pojedinačne ravnine diskontinuiteta na čvrstoću uzorka stijene izražene Hoek—Brownovim kriterijem loma, izrađeni su dijagrami prikazani na slikama 10a i 10b. Uz pret-



Sl. 10. Odnos loma klizanjem na ravnini diskontinuiteta i loma u stijeni bez diskontinuiteta

a) utjecaj promjene kuta trenja uz $c_d = 0.1 \sigma_c$
 b) utjecaj promjene kohezije c_d uz $\varphi_d = 35^\circ$
 Fig. 10. The relation between the sliding on a plane of discontinuity and the failure of solid rock
 a) changing the friction angle, but with $c_d = 0.1 \sigma_c$
 b) changing the cohesion c_d with $\varphi_d = 35^\circ$

postavku $\sigma_3 = 0$ i konstantnu koheziju c_d dobivaju se za razne iznose $\tan \varphi_d$ krivulje prikazane na sl.10a. Analogno, ali uz zadržavanje $\varphi_d = 35^\circ$, dobivaju se krivulje na sl.10b. U oba slučaja postoji izvjestan opseg orijentacija glavnih naprezanja koje rezultiraju klizanjem po ravninama diskontinuiteta umjesto klizanja po plohi koja zatvara kut od $(\pi/4 - \varphi/2)$ sa smjerom većeg tlaka, u kojem smjeru dolazi do klizanja u stijeni bez diskontinuiteta.

Očigledno, za jedan strukturni blok istovrsne stijene s nekoliko karakterističnih grupa diskontinuiteta, bilo bi potrebno poznavati desetak konstanti koje bi mogle definirati mehanički odgovor stijenskog masiva. Te bi konstante morale biti poznate prije ulaska u fazu modeliranja i proračuna! Postavlja se pitanje pouzdanosti bilo kakvog proračuna stabilneta blokova uz toliki broj konstanti materijala, a koje bi sve trebalo eksperimentalno odrediti, uzevši još u obzir i činjenicu da svaka od tih konstanti može varirati u izvjesnim granicama. Pri tome se uopće nije uključilo činjenicu da i sama stijena i ravnine diskontinuiteta pokazuju redovito i plastična i viskozna svojstva, jer bi se time broj potrebnih konstanti još više umnožio. Ovo ne znači da treba odustati od bilo kakvog modeliranja geometrijskih i mehaničkih utjecaja uz podzemne prostorije. Naprotiv, prihvatljiv je svaki, pa i prividno najjednostavniji, računski model ako može dati odgovor na neka pitanja.

Zaključak

Programi rubnih elemenata omogućuju brzi proračun deformacija i naprezanja uz otvore podzemnih prostorija, uz mogućnost uključivanja utjecaja podgrade, kratkih sidara i dugih prednapregnutih sidara. Programom »RUBNI«, preuzetim u osnovnom obliku od Hoecka i Browna (1980), proračunavaju se naprezanja za elastičnu sredinu. Iako je to samo prva aproksimacija stanja uz otvore podzemnih prostorija, time se dobiva stanje naprezanja koje je deformacijski kompatibilno, dakle vjerojatno tako dugo dok negdje ne dođe do parcijalnog plastičnog loma ili klizanja. Osnovni dio programa proračunava naprezanja i deformacije na rubu otvora i odabranoj mreži točaka oko ruba otvora. Uz intenzitete naprezanja i orijentaciju glavnih naprezanja program proračunava i relativne koeficijente sigurnosti, uspoređujući dobivena naprezanja s kriterijem loma prema Hoek-Brownu. Program »RUBNI« (Hudec i dr. 1992) dopunjen je uključivanjem ravnina diskontinuiteta stijene i kriterijima loma po tim ravninama. Program prihvaća zadavanje više orijentacija ravnina diskontinuiteta i konstanti c_d i φ_d . Tako je bilo moguće program proširiti kriterijem loma po privilegiranim plohama diskontinuiteta prema Jaegeru i Cooku. Za svaku točku u kojoj se računaju naprezanja ispituju se kriteriji loma na svim zadanim privilegiranim kliznim plohama i ispisuje najnepovoljniji tj. minimalni (prividni) koeficijent sigurnosti. U numeričkom se ispisu označuje o kojem se tipu loma radi, odnosno, po kojoj ravnini dolazi do klizanja. Osnovna pretpostavka za iole

vjerodostojan rezultat je postulat da su konstante c_d i φ_d dobro pretpostavljene. Kontrola oblika područja u kojem je koeficijent sigurnosti manji od 1.0, može ukazati na to jesu li konstante dobro procijenjene. Iterativno, odabiranjem raznih vrijednosti za konstante na plohama diskontinuiteta, može se doći do rezultata koji su najbliži stvarnom obliku odvala i na taj način takvom povratnom analizom naći više podataka o ispitivanom masivu.

Naravno, korištenje programa, kao i rezultata koje daje metoda rubnih elemenata (Hudec i Frgić, 1993), traži izvjesno iskustvo koje se stječe samo radom s tim programima. S obzirom na brzinu kojom program daje rezultate i na preglednost grafičkih prikaza, mogu se postupno uočiti utjecaji pojedinih faktora koji ulaze kao početni podaci.

Da bi se uočio utjecaj ravnina diskontinuiteta treba u program najprije unijeti takvu čvrstoću mase stijene da se uz rub otvora koeficijent sigurnosti dovede do vrijednosti 1.0, ali bez zadanih ravnina diskontinuiteta. Uz takve pretpostavke nema nigdje uz otvor ni lomova ni klizanja. Ako se sada uvedu podaci c_d i φ_d za ravnine diskontinuiteta, dobit će se, očigledno, izdvojeni utjecaji diskontinuiteta. Kao jedna od opcija prikaza izlaznih podataka, mogu se dobiti prikazane zone popuštanja uslijed klizanja po ravninama diskontinuiteta.

Naravno, rezultate grafičkih prikaza mogućih odvajanja blokova i proračune relativnih koeficijenata sigurnosti ne treba prihvatiti s onom težinom koju imaju statički proračuni nosivih čeličnih, drvenih ili armiranobetonskih konstrukcija u »nadzemlju«. Osnovni nosivi element u podzemnim konstrukcijama ipak je sama stijena kojoj podgradnim sistemima samo povećavamo nosivost i osiguravamo geometrijsku stabilnost otvora prostorije. Stvarna svojstva stijene obično su premalo poznata. Tome pridonosi i činjenica da se ta svojstva u realnim uvjetima tunelskog iskopa često bitno mijenjaju i na kraćim razmacima, a realno se mogu ustanoviti tek kada je kritična faza iskopa već davno završena! Svaki podatak o mehaničkim svojstvima stijene, koji služi kao ulazni parametar za modeliranje, pa i sve rezultate proračuna koji se na temelju njih dobivaju, treba radi toga prihvaćati uvažavajući moguće razlike između stvarnih svojstava stijene i svojstava koja su zadana ulaznim podacima za proračun.

Primljeno: 17.II. 1994.

Prihvaćeno: 9.VI. 1994.

LITERATURA

- Boshkov, S. and Hudec, M. (1972): Kriteriji loma za materijale s izraženim plohama diskontinuiteta. III. Jugoslavenski simpozij iz mehanike stijena i podzemnih radova, 1—6, Tuzla.
- Bronštejn, I.N. i Semendjajev K.A. (1980): Spravočnik po matematike. publ. Toibner, 1—825 pp, Leipzig.
- Davis, J.C. (1973): Statistics and data analysis in geology. J. Wiley, 1—550 pp, New York.
- Goodman, R. and Gen—Hua Shi (1985): Block theory and its application to rock engineering. Prentice—Hall International, 1—338 pp, New Jersey.

- Goodman, E.R. (1989): Introduction to rock mechanics. John Wiley & Sons, 1–562 pp, New York.
- Hoek, W. and Brown E. (1980): Underground excavation in rock. Institution of Mining nad Metalurgy, 1–525 pp, London.
- Hudec, M., Frgić, L i Paris, B. (1992): RUBNI, program rubnih elemenata. Interna publikacija RGN fakulteta, 1–22, Zagreb.
- Hudec, M. i Frgić, L. (1993): Metoda rubnih elemenata. *Rud.-geol.-naft. zb.* 5, 109–118, Zagreb.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W. (1969): Fundamentals of rock mechanics. R.Clay Ltd., 1–512 pp, Bungay, Great Britain.
- Spiegel, M.R. (1961): Theory and problems of statistics. McGraw—Hill Publ.Comp., 122–140 pp, New York.

Definition of the Failure Shape in Tunnels by means of the Geologically defined Planes of Discontinuities

M. Hudec and L. Frgić.

The users of the engineering geological data are not acquainted with stereographic presentation of the data. That kind of presentation is not useful in the computation of the stress distribution, sliding and failure of the rock blocks in the underground rooms. Therefore we find particularly useful to show the way of the geological data presentation, as well as to prove the usefulness of the standardized geological data. This was the reason to recommend the way of statistical treatment of engineering geological data for the use as input in the computation of the stability of underground rooms. At the end a computer program is presented, to calculate the shape of possible unstable blocks and its graphical presentation.

Because of sometimes very expressed dispersion of the data of dip direction and dip itself, it is evident that only the mean values of dip and of dip direction for a family of the discontinuities, are not competent for a stability analysis. Such an analysis has to include not only the mean values but also dispersion of these data. We have calculated the distribution of data depending on two characteristics and we find the areas containing the chosen percentage of all data. To do this, it is necessary to compute both standard deviations and include the limit

values of dip and dip directions in further computation. In the plane representing the distribution of measured values, these limit values correspond to the points lying on the boundary of chosen elliptic area. Sometimes the data for dip and dip directions show statistically evident trend, so the deviations from a linear trend can give more competent data for further computations. The computer program for this statistical analysis and its graphical presentation is prepared, giving the area containing 75% of all data, i.e. both radii of this ellipse. This percentage was chosen arbitrary, and has to be proved by numerical examples.

Finally, the way to use this data in the block failure analysis is presented. The intersection lines of the mean values of discontinuities and frontal area of an underground room gives only a mean shape of possible failure. The shape of blocks calculated with the mean values of dip and dip direction differs significantly from the blocks obtained with the data at the end points of the ellipse containing 75% of the data. So the shapes of the »mean block« and expected blocks with dispersed data can be determined.