

Projekt »Unapređenje metoda eksploatacije boksita i njihova primjena« financiran od Ministarstva znanosti, tehnologije i informatike Republike Hrvatske

## UREDAJ ZA ISPITIVANJE ČVRSTOĆE NA SMICANJE SREDNJE ČVRSTIH STIJENA

Miroslav PETZEL

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

**Ključne riječi:** Smicanje uzoraka, Uredaj za smicanje, Laboratorijska ispitivanja stijena

U radu je opisan uređaj za smicanje predviđen za ispitivanje »mekših« stijena s maksimalnom horizontalnom i vertikalnom silom do 400 kN, a za površinu uzorka između 100 i 200 cm<sup>2</sup>. Uredaj se može koristiti i za ispitivanje smicanja po plohi diskontinuiteta i vrlo čvrstih stijena. Prosječni sadržaj CaCO<sub>3</sub> u ispitanim uzorcima iznosi 71,39%.

**Key-words:** Sample shearing, Shearing machine, Rock laboratory tests

Paper describes a shearing machine intended for »softer« rocks with maximal horizontal and vertical force of 400 kN, and surface of samples is between 100 and 200 cm<sup>2</sup>. The machine can be used for shear tests along the plane of discontinuity of very hard rocks. Average content of CaCO<sub>3</sub> in tested samples is 71,39%.

### Uvod

Jedna od osnovnih karakteristika u današnjem razvoju mehanike stijena je oslanjanje na rezultate brojnih eksperimentalnih metoda. Orijentirajući se na izučavanje stijenske mase kao realne sredine metode izučavanja u području mehanike stijena bile su usmjerene na ispitivanje uzoraka. Da bi ispitivanja bila reprezentativna, uzorci trebaju biti većih dimenzija. Veličina uzoraka zbog prirodnih ili tehničkih ograničenja može se povećati samo do neke granice.

U većini slučajeva prepreka za realizaciju reprezentativnih ispitivanja jest mogućnost oblikovanja uzorka na takav način da se pri obradi ne ošteti. Uzorci su u pravilu od materijala visokih mehaničkih čvrstoća, što uzrokuje posebne teškoće kod njihove izrade.

Eksperimentalne se metode stalno razvijaju i unapređuju čime se njima određeni parametri približavaju realnim svojstvima stijenskih masa.

### Čvrstoća na smicanje

Čvrstoća na smicanje u mehanici stijena ima važnu ulogu, jer se lomovi u stijenskim masama pod djelovanjem opterećenja izazvanih raznim izgrađenim objektima i radovima u stijeni događaju u pravilu uslijed njenog prekoračenja. Proračun stabilnosti stijenskih masa izloženih opterećenjima svodi se na dva osnovna problema. Prvo treba pronaći najpovoljniju kinematičku površinu loma, i drugo, za tu površinu treba raspolagati mehaničkim karakteristikama čvrstoće na smicanje. Kod toga treba imati u vidu da se površina loma može formirati po postojećim diskontinuitetima, a dijelom i kroz osnovnu kamenu masu.

### Kriterij loma Mohr-Coulombe

Rješavanje problema čvrstoće na smicanje u smislu određivanja vrijednosti njenog parametra objavljeno je u poznatim radovima Coulomba krajem osamnaestog stoljeća. Parametri čvrstoće na smicanje određeni su normalnim naprežanjem ( $\sigma$ ) i smičnim naprežanjem ( $\tau$ ). Njihov odnos vidimo iz jednadžbe:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \text{ MPa} \quad (1)$$

gdje su:

- $\tau$  – smično naprežanje, MPa;
- $\sigma$  – normalno naprežanje, MPa;
- $c$  – kohezija, MPa;
- $\varphi$  – kut unutrašnjeg trenja, °.

Kohezija ( $c$ ) i kut unutrašnjeg trenja ( $\varphi$ ) u jednadžbi (1) nisu materijalne konstante, već njihove brojčane vrijednosti ovise o načinu i uvjetima ispitivanja te veličini površine smicanja.

U anizotropnoj sredini, koja ima dva naročito izražena pravca anizotropije (slojevitost, škrljavost), otpornost na smicanje u pravcu slojevitosti ili škrljavosti može se također prikazati izrazom:

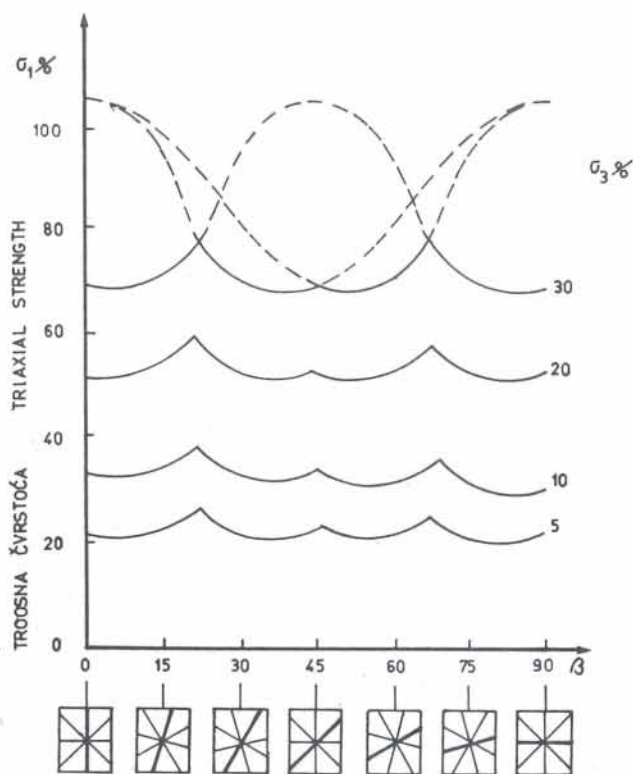
$$\tau_s = c_1 + \sigma_s \operatorname{tg} \varphi_1, \text{ MPa} \quad (2)$$

gdje su:

- $c_1$  – kohezija, u ovom slučaju više karakteristika veze između slojeva;
- $\varphi_1$  – kut naprežanja u pravcu sloja;
- $\tau_s$  – smična naprežanja u pravcu sloja;
- $\sigma_s$  – normalno naprežanje, djeluje okomito na slojeve.

### Kriterij loma za privilegirane klizne plohe

Ako se broj diskontinuiteta u stijeni povećava, ukupno ponašanje čvrstoće stijene teži postati sve



Sl. 1. Grafikon relativne čvrstoće stijene s četiri diskontinuiteta pod  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta$ -kut zakretanja diskontinuiteta

Fig. 1. Diagram of relative rock strength with four discontinuities at angle  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta$ -angle of rotation of discontinuities

više izotropno. Kod izrade podzemnih prostorija *Bray* smatra opravdanim tretiranje stijene koja sadrži četiri ili više diskontinuiteta kao izotropne stijene. Na sl. 1 prikazan je utjecaj nekoliko diskontinuiteta na čvrstoću stijene, a napravljene su na bazi čvrstoće ispitanih od *McLamore* i *Gray* (prema *Hoek* i *Brown*, 1980).

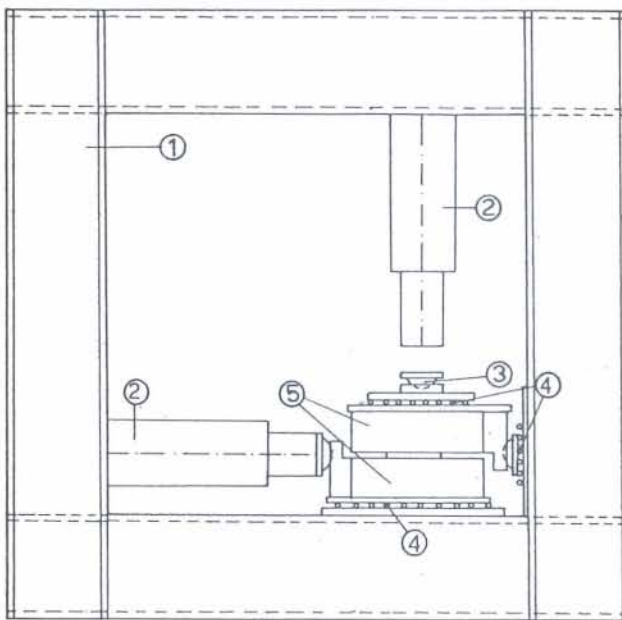
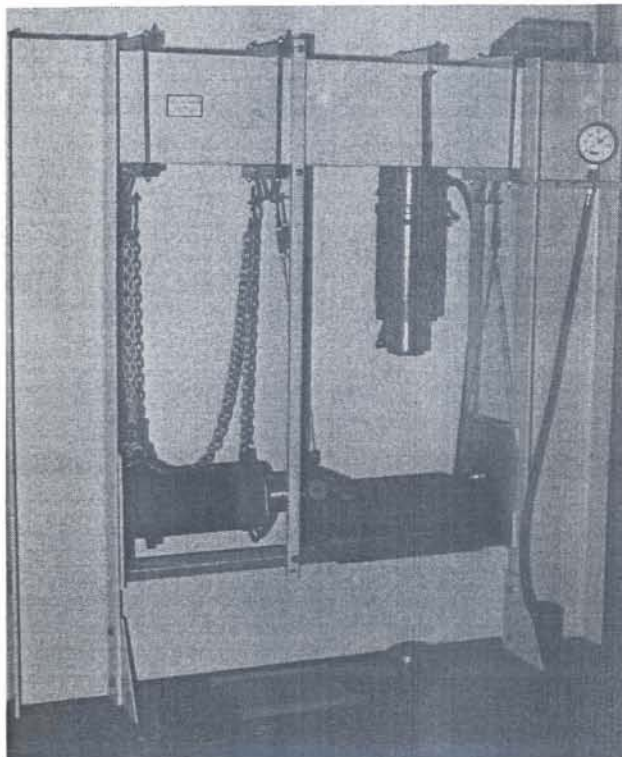
### Uređaj za smicanje uzoraka

U Zavodu za rudarstvo i geotehniku Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, a u laboratoriju za Mehaniku stijena projektiran je i izraden uređaj za smicanje za srednje čvrste stijene (*Petzl*, 1992). Uređaj je shematski prikazan na sl. 2, a sastoji se iz slijedećih glavnih dijelova:

- okvir uređaja;
- hidraulički cilindri;
- ležaj s kuglinom kapičom;
- valjkasti ležajevi;
- kalupi za uzorak.

Uzorci laporovitog vapnenca za ispitivanje izvađeni su na površinskom kopu »Prvoborac« s više mjesta. Iz blokova je mehaničkom obradom izvađeno 12 komada uzoraka koji su ispitani na izradenom uređaju. Uzorak je prije ispitivanja ugrađen u kalup, a kao sredstvo za njegovo vezivanje može se koristiti brzovezujući cement veće čvrstoće. Površina uzorka određuje se nakon što je uzorak ugrađen u donju polovicu kalupa. Prosječna površina ispitanih uzoraka iznosi  $100,4 \text{ cm}^2$ .

Da bismo u svakom trenutku znali kolika je sila i njezin porast, postavljena su dva manometra. Sile



Sl. 2. Shematski prikaz uređaja za smicanje: 1 - okvir uređaja; 2 - hidraulički cilindri; 3 - ležaj s kuglinom kapičom; 4 - valjkasti ležajevi; 5 - kalupi za uzorke

Fig. 2. Schematic illustration of shearing machine: 1 - machine frame; 2 - hydraulic columns; 3 - bearing ball cap; 4 - roller bearing; 5 - sample mouldings

izračunavamo preko površine tlačnog cilindra. Za potrebe uređaja izradene su tablice s vrijednostima od 1 do 400 bara izraženo u N. Sastav uzoraka određen je kalcimetrijskom analizom. Prosječni sadržaj  $\text{CaCO}_3$  u ispitanim uzorcima iznosi 71,39% (maksimalno 75,58% i minimalno 67,96%  $\text{CaCO}_3$ ).

### Rezultati ispitivanja u uređaju

Podaci za svaki uzorak unose se u zapisnik ispitivanja: površine presjeka, veličine vertikalnih sila,

prirast horizontalnih sila, veličine deformacije za svako povećanje sile te normalno i tangencijalno smično naprezanje. Na temelju dobivenih podataka obilježi se u dijagramu  $\sigma - \tau$  za svaki uzorak po jedna točka.

Točkama niza  $(\sigma_1, \tau_1), (\sigma_2, \tau_2), \dots, (\sigma_n, \tau_n)$  odgovara pravac:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \text{ MPa} \quad (3)$$

za koji se konstante  $\operatorname{tg} \varphi$  i  $c$  računaju iz sistema jednadžbi:

$$\begin{aligned} \Sigma \tau_i &= \operatorname{tg} \varphi \Sigma \sigma_i + n c \\ \Sigma \sigma_i \tau_i &= \operatorname{tg} \varphi \Sigma \sigma_i^2 + c \Sigma \sigma_i \end{aligned} \quad (4)$$

Linearna ovisnost (3) određena pomoću sistema jednadžbi (4) daje pravac regresije I. stupnja.

Cjelokupni proračun proveden je tabelarno. Da bismo izračunali konstante  $\operatorname{tg} \varphi$  i  $c$  iz sistema (4) prethodno je izračunato:  $\Sigma \sigma_i, \Sigma \sigma_i^2, \Sigma \sigma_i \tau_i$  i  $\Sigma \tau_i$  (tablica 1).

Tablica 1. Rezultati ispitivanja uzoraka na smicanje  
Table 1. Results of shear tests

Oznaka uzorka Sample No	Normalno naprezanje Normal stress $\sigma$ (MPa)	Tangencijalno naprezanje Shear strength $\tau$ (MPa)	$\sigma \cdot \tau$	$\sigma^2$	Površina presjeka Surface of the cut (m <sup>2</sup> )
1-1	6,52	13,03	84,96	42,51	0,012560
2-2	8,80	11,00	96,80	77,44	0,013280
3-5	6,26	10,95	68,55	39,19	0,007475
4-6	11,98	19,81	237,32	143,52	0,012685
5-7	4,37	10,71	46,80	19,10	0,010695
6-8	5,25	11,21	58,85	27,56	0,006675
7-9	5,73	12,60	72,20	32,83	0,007145
8-10	10,84	16,00	173,44	117,51	0,008035
9-11	3,21	11,56	37,11	10,30	0,007275
10-12	9,37	16,69	156,39	87,80	0,013730
11-13	7,71	13,22	101,93	59,44	0,010610
12-14	10,20	14,95	152,49	104,04	0,010315
n = 12	$\Sigma 90,24$	$\Sigma 161,73$	$\Sigma 1286,84$	$\Sigma 761,24$	

Vrijednost kohezije izračunava se iz izraza:

$$c = \frac{\Sigma \sigma_i^2 \cdot \Sigma \tau_i - \Sigma \sigma_i \cdot \Sigma \sigma_i \tau_i}{n \Sigma \sigma_i^2 - (\Sigma \sigma_i)^2} = \quad (5)$$

$$c = 7,05 \text{ MPa}$$

Kut unutrašnjeg trenja izračunava se iz izraza:

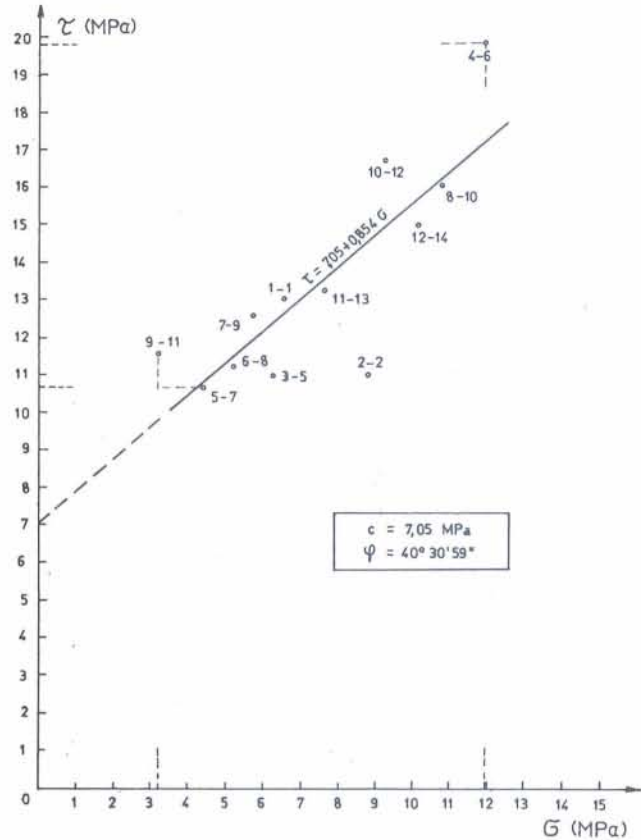
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{n \Sigma \sigma_i \tau_i - \Sigma \sigma_i \Sigma \tau_i}{n \Sigma \sigma_i^2 - (\Sigma \sigma_i)^2} = \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,854$$

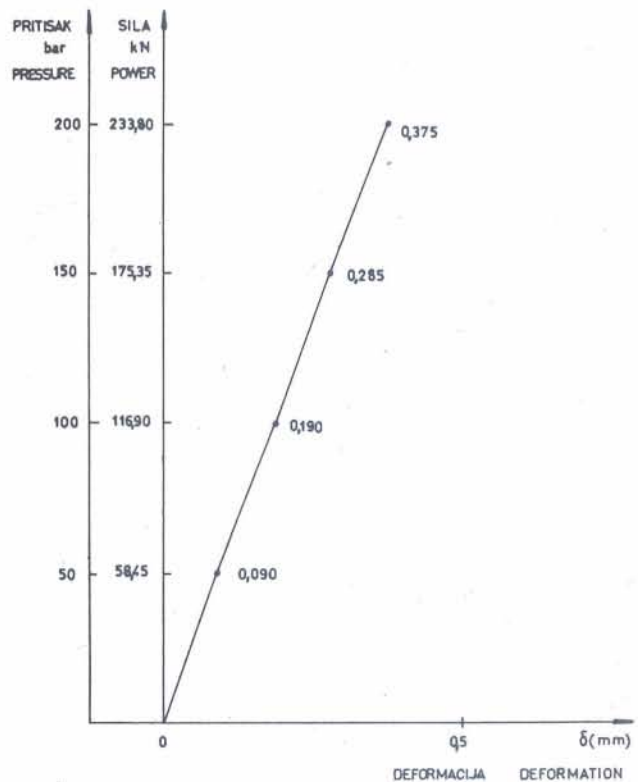
$$\varphi = 40^\circ 30' 59''$$

Prema (3) jednadžba pravca regresije (sl. 3) glasi:

$$\tau = 7,05 + 0,854 \sigma$$



Sl. 3. Grafikon normalnog i tangencijalnog naprezanja  
Fig. 3. Diagram of normal stress and shear strength



Sl. 4. Deformacija horizontalnog nosača okvira  
Fig. 4. Deformation of the horizontal U-iron frame

### Kontrola uređaja

Izvedeno je mjerenje deformacija gornje i donje grede okvira uređaja. Na slici 4 prikazana je deformacija s odgovarajućom silom. Maksimalna sila kod koje se mjerila deformacija je 233,8 kN s deformacijom koja iznosi 0,375 mm.

Za kalibraciju sistema koristio se dinamometar sistema WIRTH-GALLO, marke »PRECEQ« s podatkom skale dinamometra 5 kN i maksimalnom silom kojom se dinamometar mogao opteretiti 1000 kN, kalibracija je provedena na principu mjerenja deformacije elastičnog sistema (prstena).

### Zaključak

Na konstruiranom i izrađenom uređaju za smicanje ispitan je odgovarajući broj uzoraka laporovitog vapnenca. Uređaj je prvenstveno konstruiran za stijene s maksimalnom horizontalnom i vertikalnom silom

do 400 kN, a za površinu presjeka uzorka od 100 do 200 cm<sup>2</sup>.

Uređaj se može koristiti i za ispitivanje smicanja po plohi diskontinuiteta i vrlo čvrstih stijena. Dobivene rezultate ispitivanja na direktno smicanje možemo smatrati zadovoljavajućim. Ispitivanja takve vrste su skupa i dugotrajna, ali su dobiveni podaci za potrebe rudarstva i mehanike stijena vrlo korisni.

*Primljeno:* 16. II. 1993.

*Prihvaćeno:* 27. V. 1993.

### LITERATURA

Hoek, E., Brown E. T. (1980): *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, 131–182 pp., London

Petzel, M. (1992): *Razvoj i ispitivanje uređaja za smicanje na primjeni srednje čvrstih stijena*. Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 73 pp, Zagreb.

## Machine for Testing Shearing Strength of Medium Hard Rocks

*M. Petzel*

Shearing machine is described in the paper. Hydraulic cylinders in the frame of the shearing machine are used to obtain the force. Maximal working pressure of hydraulics built in is 445 bars. In order to be able to know at any moment the amount of pressure i.e. the increase of pressure, two pressure gauges were installed. Pressures are calculated through the surface of hydraulic cylinder. Tables with respective values were made for the need of the machine. For this machine samples can be of irregular shapes with maximum height of 200 mm.

After the sample has been built into the lower part of the mould, the surface of the cut is being determined, and the surface can range between 100 and 200 cm<sup>2</sup>.

In order to test the machine, measurement of the frame deformation was carried out i.e. bending distortion of the upper and lower part of the frame.

Dynamometer system WIRTH-GALLO type »PROCEQ« was used to calibrate the whole system.