

بررسی رفتار درزه مصنوعی بعد از مقاومت برشی حداکثر

مجتبی عسکریⁱ؛ مرتضی احمدیⁱⁱ

چکیده

مقاومت برشی سطوح درزه و ناپیوستگی‌ها در تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی و سایر سازه‌هایی که در سنگ طراحی و اجرا می‌شوند اهمیت زیادی دارند. انتقال از نقطه پیک تا مقاومت ماندگار به دلیل کمبود اطلاعات، اغلب به صورت کاهش خطی یا نمایی فرض می‌شود. افزایش جابجایی برشی و تخریب دندانها باعث کاهش نرخ اتساع می‌شود؛ بنابراین با دانستن مقدار کاهش نرخ اتساع و JRC (ضریب زبری درزه) بعد از مقاومت برشی حداکثر می‌توان منحنی تنش برشی-جابجایی برشی درزه را بعد از نقطه پیک رسم نمود. در این تحقیق آزمایشهای برش مستقیم بر روی دندانهای مصنوعی منظم اجرا و تجزیه و تحلیل شده‌است. تعداد ۱۲ نمونه $15 \times 15 \times 15$ با زوایای زبری $i=15$ ، $i=30$ و $i=40$ درجه و طول پایه 2cm ساخته شده‌است. نمونه‌ها تحت چهار تنش قائم مختلف، سه مرتبه مورد برش قرار گرفته‌است. میزان کاهش اتساع، زاویه i و JRC در هر مرحله برش بررسی شده و مقدار مقاومت برشی ماندگار از رابطه پاتون و بارتون تخمین زده شده‌است. با استفاده از بعد فراکتال یک روش ساده برای تعیین مقدار JRC در هر مرحله برش ارائه شده‌است. رابطه بارتون تخمین مناسبی از مقاومت ماندگار درزه ارائه می‌کند. از این رو، روش ارائه شده برای تعیین JRC مناسب است.

کلمات کلیدی

مقاومت برشی ماندگار، درزه مصنوعی، بعد فراکتال و ضریب زبری درزه

Post-Peak Shear Behavior of Artificial Joints

M. Askari; M. Ahmadi

ABSTRACT

The presence of numerous discontinuity planes in rock mass structure would decrease strength, increase deformability of the rock mass and make the mechanical behavior of the rock mass much more complex. The effect of strength, deformation and conductivity characteristics of discontinuities on physical properties of rock mass is even more important than characteristics of the intact rock itself. Because information is lacking, the transition from peak to residual values now often assumes to decrease either linearly or exponentially when the joints exhibit strain-softening behavior. Three types of artificial joints with angle $i=15$, $i=30$ $i=40$ degree asperity under repeated direct shearing are performed in this experimental research. The progressive failure mechanism and strength degradation of rock joints after peak strength are monitored during shearing. The progressive degrading of shear strength parameter or index is examined according to two strength criteria (Barton and Patton). The JRC (joint roughness coefficient) value for a given profile is estimated by fractal dimension.

KEYWORDS

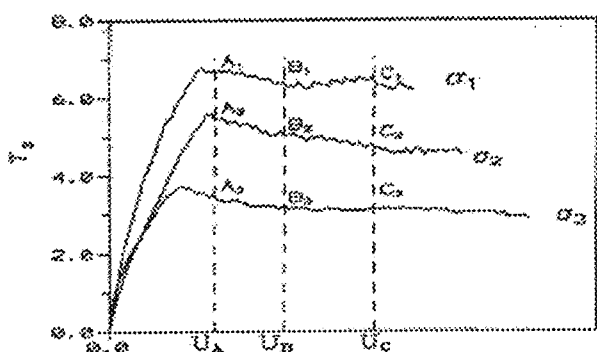
Residual State, Artificial Joint, Fractal Dimension, Joint Roughness Coefficient

ⁱ کارشناس ارشد مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس تهران، mojtabaaskari2000@yahoo.com، تلفن

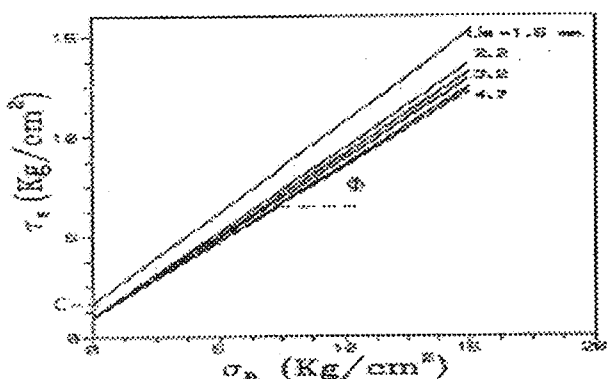
۰۹۱۲۵۱۷۹۷۶۸

ⁱⁱ استادیار دانشگاه تربیت مدرس تهران، بخش مهندسی معدن، گروه مکانیک سنگ

عمودی مختلف نشان می‌دهد. برای هر جابجایی انتخاب شده، یک رگرسیون خطی برای معیار کولمب انجام شده است (شکل (۲)). با افزایش جابجایی (u_s) مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک بعد از نقطه پیک کاهش می‌یابد.



شکل (۱): بدست آوردن مقاومت برشی بعد از نقطه پیک در نقاط مختلف [۹]



شکل (۲): بدست آوردن پارامترهای ϕ و c بعد از نقطه پیک با استفاده از رگرسیون خطی [۹]

شکل (۳) تغییرات ϕ و c نسبت به جابجایی را نمایش می‌دهد. فرمول تجربی برای تغییرات این دو پارامتر ارائه شده است [۹].

$$c(u_s) = 1.60 - 0.45 \ln(u_s) \quad (2)$$

$$\phi(u_s) = 42.1 - 2.7 \ln(u_s) \quad (3)$$

حالت ماندگار وقتی رخ می‌دهد که مقدار چسبندگی مساوی با صفر باشد؛ بنابراین با مساوی صفر قرار دادن معادله (۲) مقدار جابجایی برشی ماندگار (u_r) برابر با ۲۵mm بدست می‌آید. بنابراین جابجایی ماندگار ۳۰-۱۵ مرتبه بزرگتر از جابجایی برشی پیک ($u_p = 0.99-2.17\text{mm}$) است.

با جایگزینی $u_r = 25\text{mm}$ در معادله (۳) مقدار زاویه اصطکاک ماندگار (ϕ_r) برابر ۲۲ درجه بدست می‌آید. این زاویه یک درجه زبرتر از زاویه اصطکاک پایه $\phi_b = 31^\circ$ است. مراحل محاسبه در ضمیمه آورده شده است.

به طور کلی منحنی تنش برشی - جابجایی برشی درزه سنگ به دو قسمت تقسیم می‌شود، که قبل از نقطه پیک و بعد از نقطه پیک تا حالت مقاومت ماندگار^۱ را شامل می‌شود. امکان وقوع رفتار پلاستیکی نیز وجود داشته که باعث می‌شود نقطه پیک قابل تشخیص نباشد، این رفتار متأثر از زبری سطح می‌باشد. این تغییرات با دندانه‌های موجود بر روی دو سطح و نحوه خرابی آن ارتباط دارد. معمولاً اطلاعات در این زمینه کامل نیست و انتقال از نقطه پیک تا مقاومت ماندگار اغلب به صورت خطی یا نمایی کاهش می‌یابد [۴]. فهم مراحل شکست بعد از اولین نقطه پیک یک موضوع مهم است.

پاتون [۶] دندانه‌ها را به دو دسته موجی^۲ (دندانه‌های اولیه) و ناهموار^۳ (دندانه ثانویه) تقسیم بندی کرد. رفتار درزه در جابجایی‌های کوچک به وسیله دندانه ثانویه کنترل می‌شود و دندانه اولیه بر روی جابجایی بزرگ تاثیر می‌گذارد. بارتون، هوک و بری [۲] معتقدند که در تنش عمودی کم دندانه ثانویه (دندانه با زاویه بیشتر) رفتار برشی را کنترل می‌کند، هنگامی که تنش عمودی افزایش می‌یابد دندانه ثانویه بریده شده و دندانه اولیه (با قاعده بیشتر و زاویه کمتر) نقش کنترل کننده را دارا است.

هابرفیلد و جانسون^۴ [۵] جزئیات مکانیزم برش برای درزه مثلثی شکل را مطالعه کردند. آنها بیان کردند که دندانه‌ها با شیب بیشتر در ابتدا بار برشی را تحمل می‌کنند، وقتی شکست رخ می‌دهد و جابجایی نسبتاً زیادی حاصل می‌شود دندانه‌ها با زاویه کمتر تماس پیدا می‌کنند.

هانگ و یانگ^۹ [۹] مطالعاتی بر روی کاهش پارامترهای مقاومت برشی (ϕ و c) در قسمت بعد از نقطه پیک را مطالعه کردند و فرمول تجربی برای آن ارائه و منحنی تنش - جابجایی بعد از مقاومت برشی حداکثر را پیش بینی نمودند. پارامترهای مقاومت برشی درزه، c و $\phi = (\phi_b + i)$ با حرکت برشی و تخریب دندانه‌های درزه کاهش پیدا می‌کند. مقاومت برشی بعد از نقطه پیک تابعی از جابجایی برشی است به صورت زیر بیان می‌شود [۷].

$$\tau_s(u_s > u_p) = c(u_s) + \sigma_n \times \tan(\phi(u_s)) \quad (1)$$

u_p : جابجایی برشی در نقطه پیک (mm)

u_s : جابجایی برشی بعد از نقطه پیک (mm)

$c(u_s)$: چسبندگی بعد از نقطه پیک

$\phi(u_s)$: زاویه اصطکاک بعد از نقطه پیک

شکل (۱) چندین نقطه اختیاری بعد از نقطه پیک در تنشهای

می‌شود. طول خط ساحلی (L) نیز می‌تواند توسط معادله زیر تخمین زده‌شود.

$$L = N.Y \quad (4)$$

مشخص شد که لگاریتم تعداد گامها ($\log N$) یک ارتباط خطی با لگاریتم مقیاس اندازه‌گیری ($\log Y$) می‌باشد، که شیب این خط برابر با بعد فراکتال (D) است.

$$D = \frac{-\log N}{\log Y} \quad (5)$$

جدول (۱): طول خط ساحلی انگلیس با مقیاسهای مختلف [۳].

| مقیاس اندازه‌گیری (Y) Km | طول خط ساحلی انگلیس (L) Km |
|------------------------------|--------------------------------|
| ۵۰۰ | ۲۶۰۰ |
| ۱۰۰ | ۲۸۰۰ |
| ۵۰ | ۵۷۷۰ |
| ۱۷ | ۸۶۴۰ |

محققان زیادی از روشهای مختلف مانند تقسیم کردن^۷ یا جعبه شمارش^۸ برای محاسبه مقدار بعد فراکتال درزه نامنظم استفاده کرده‌اند، که این روشها دارای محاسبات زیاد و پیچیده می‌باشد [۱۰]. در این تحقیق روش ساده‌ای به منظور تعیین بعد فراکتال درزه مصنوعی و منظم (شکل (۴)) ارائه شده‌است و رابطه تجربی بین بعد فراکتال و JRC به دست آمده‌است.

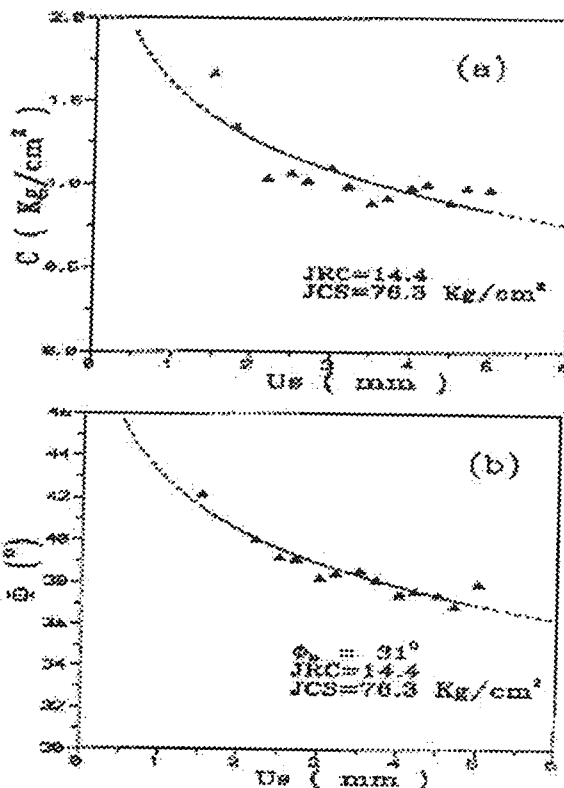
۲-۱- تعیین بعد فراکتال درزه مصنوعی

زی و پارسیو مطالعاتی بر روی درزه‌های مصنوعی همانند شکل (۴ الف) انجام دادند. بعد فراکتال درزه طبق رابطه زیر تعیین شده‌است [۸].

$$D = \frac{\log 4}{\log [2(1 + \cos(\tan^{-1} \frac{2h}{l}))]} \quad (6)$$

که در آن h متوسط ارتفاع و l متوسط قاعده است. طبق رابطه (۶) فاصله n بین دندانها تاثیری بر روی بعد فراکتال ندارد، با توجه به اینکه این فاصله (n) بر روی JRC تاثیر می‌گذارد رابطه فوق برای تعیین JRC مناسب نیست و مدل درزه شکل (۴ ب) در این تحقیق برای تعیین بعد فراکتال در نظر گرفته شده‌است.

به منظور به دست آوردن بعد فراکتال درزه همانند شکل (۴ ب)، به طور سیستماتیک به طول خطی با اندازه واحد مقداری اضافه می‌شود. ایجاد شکل با یک پاره‌خط مستقیم با طول واحد شروع می‌شود (شکل (۵)). ابتدا پاره‌خط به دو بخش تقسیم می‌شود، هر بخش با دو ضلع جانبی یک مثلث متساوی ساقین با زاویه i جایگزین می‌گردد. در حقیقت با هر مرحله



شکل (۳): تغییرات ϕ و c نسبت به جایابی برشی [۹].

این تحقیق بر رفتار برشی درزه مصنوعی بعد از نقطه پیک می‌باشد. برای تعیین مقدار JRC درزه یک روش ساده با استفاده از بعد فراکتال معرفی شده‌است. با توجه به تغییرات نرخ اتساع و مقدار JRC رفتار درزه در حالت ماندگار با استفاده از روابط پاتون و بارتون بررسی شده‌است.

۲- تعیین مقدار JRC درزه با استفاده از بعد فراکتال

مقدار JRC (ضریب زبری درزه) را می‌توان با مقایسه ۱۰ پروفیل استاندارد بارتون بین ۰ تا ۲۰ تعیین کرد که این روش بسیار سلیقه‌ای و مقایسه‌ای است، با معرفی هندسه فراکتال تلاشهای زیادی برای ارتباط بعد فراکتال و ضریب زبری درزه (JRC) صورت گرفت. هندسه فراکتال نخستین بار توسط ماندلبروت با مطرح ساختن یک پرسش کهنه که طول ساحل انگلیس چقدر است، مطرح شد [۳]. هنگامی که از مقیاسهای گوناگون برای اندازه‌گیری طول ساحل استفاده می‌شد مقادیر متفاوتی بدست می‌آمد (جدول (۱)). ماندلبروت در جستجوی پاسخی به این پرسش، نظریات تازه‌ای را مطرح ساخت که منجر به پیدایش هندسه فراکتال شد. طول خط ساحلی را می‌توان با استفاده از روش تقسیم‌کننده محاسبه کرد. بدین صورت که Y بعنوان طول مقیاس اندازه‌گیری انتخاب و دور جزیره با آن پیمایش می‌شود، تعداد شمارش (N) نیز ثبت

۲-۲- تعیین JRC درزه مصنوعی

مقدار JRC درزه، از رابطه کراندن و تس^۱ محاسبه می‌شود [۷].

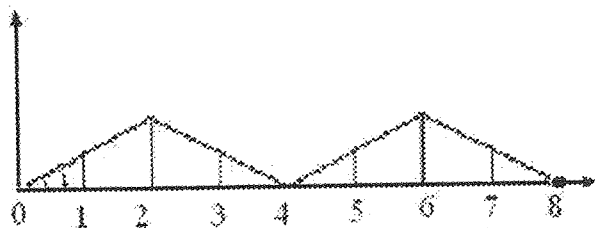
$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad (۹)$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{m(\Delta x)^2} \sum_{i=0}^m (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۱۰)$$

که در آن m : تعداد نمونه‌گیری، Δx : فاصله نمونه‌گیری، y_i و y_{i+1} : ارتفاع دو نقطه مجاور هم می‌باشد. مقدار Z_2 به فاصله نمونه‌گیری برای تخمین JRC حساس است و باید تا حد امکان فاصله نمونه‌گیری را کوچک در نظر گرفت تا دقت محاسبه JRC افزایش یابد [۷].

مقدار Z_2 درزه مصنوعی مورد نظر (شکل (۴)) طی مراحل زیر به دست می‌آید.

۱- پروفیل درزه با طول واحد و دندان با زاویه i در نظر گرفته می‌شود (شکل (۶)). طول پروفیل به ۸ قسمت تقسیم می‌شود ($m=8$ و $\Delta x = \frac{1}{8}$).



شکل (۶): پروفیل درزه مصنوعی با زاویه i [۱].

۲- ارتفاع هر نقطه (y) تعیین می‌شود. در جدول (۳) مقدار y برای هر نقطه ارائه شده است.

۳- مقدار $\sum_{i=0}^8 (y_{i+1} - y_i)^2$ با استفاده از جدول (۳)، برابر با $(\tan i)^2$ حاصل می‌شود.

۴- مقدار Z_2 با توجه به فرمول (۱۰) و مراحل فوق به صورت زیر محاسبه می‌شود.

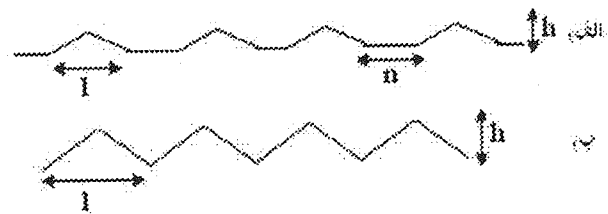
$$\tan i = Z_2 \quad (۱۱)$$

به کمک رابطه (۱۱) و (۹) می‌توان مقدار JRC درزه مصنوعی با زاویه i را محاسبه نمود.

جدول (۳): مقدار y در هر نقطه [۱].

| i | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------|---|----------------------|----------------------|----------------------|---|----------------------|----------------------|----------------------|---|
| y_i | 0 | $\frac{1}{8} \tan i$ | $\frac{2}{8} \tan i$ | $\frac{3}{8} \tan i$ | 0 | $\frac{1}{8} \tan i$ | $\frac{2}{8} \tan i$ | $\frac{3}{8} \tan i$ | 0 |

طول خط با مقیاس $\frac{1}{\cos(i)}$ افزایش می‌یابد. اگر این مراحل چند بار تکرار شود به راحتی می‌توان به خصوصیات خود تشابهی در این مثال پی برد [۱].



شکل (۴): مدل درزه مصنوعی [۱].



شکل (۵): مدل فراکتال درزه منظم [۱].

در جدول (۲) ارتباط میان تعداد تقسیمات (N) و طول تقسیمات (Y) نشان داده شده است. هنگامی که تعداد تقسیمات افزایش می‌یابد طول کلی پاره‌خط بیشتر می‌شود.

جدول (۲): ارتباط تعداد تقسیمات با طول تقسیمات [۱].

| Step | 0 | 1 | 2 |
|-----------------------|---|-----------------------|--------------------------------------|
| تعداد تقسیمات (N) | 1 | 4 | $(4)^2$ |
| طول تقسیمات (Y) | 1 | $\frac{1}{4 \cos(i)}$ | $\left(\frac{1}{4 \cos(i)}\right)^2$ |

با توجه به جدول (۲) بعد فراکتال محاسبه می‌شود.

$$D = \frac{-\log N}{\log Y} = \frac{-\log 4}{\log \frac{1}{4 \cos(i)}} = \frac{\log 4}{\log 4 \cos(i)} \quad (۷)$$

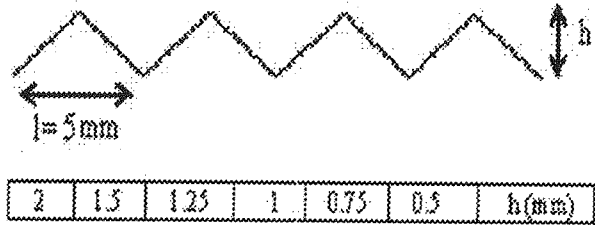
بنابراین بعد فراکتال برای درزه مصنوعی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$D = \frac{\log 4}{\log 4 [\cos(\tan^{-1} \frac{2h}{l})]} \quad (۸)$$

که در آن h متوسط ارتفاع و l متوسط قاعده است. بنابراین در درزه‌هایی که شکل آن مانند مدل فراکتالی شکل (۵) با داشتن پارامترهای آماری h (متوسط ارتفاع) و l (متوسط قاعده) مقدار JRC محاسبه می‌شود.

۲-۳- ارتباط بعد فراکتال و مقدار JRC

شکل (۷) یک پروفیل درزه منظم را نمایش می‌دهد. مقدار بعد فراکتال از رابطه (۸) و مقدار JRC از رابطه (۹) و (۱۱) برای پروفیل مورد نظر محاسبه می‌شود (جدول (۴)).

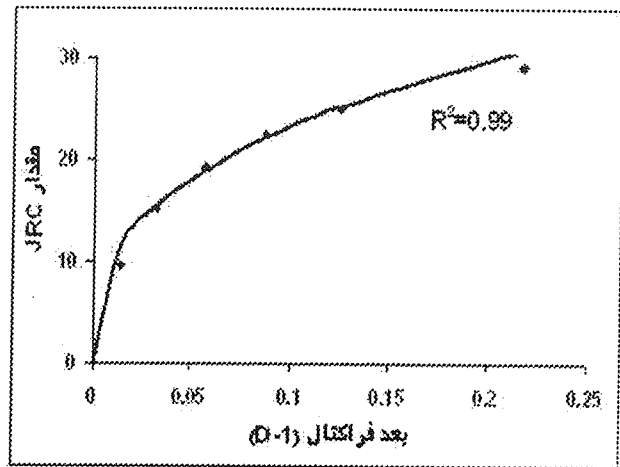


شکل (۷): پروفیل درزه منظم مصنوعی [۱].

منحنی ارتباط بعد فراکتال و مقدار JRC در شکل (۸) نشان داده شده است. یک ارتباط تجربی میان بعد فراکتال و مقدار JRC وجود دارد (ضریب همبستگی ۰/۹۸۵)

$$JRC = 53.7031 (D - 1)^{0.3642} \quad (12)$$

که در آن D بعد فراکتال می‌باشد.



شکل (۸): ارتباط میان بعد فراکتال و مقدار JRC [۱].

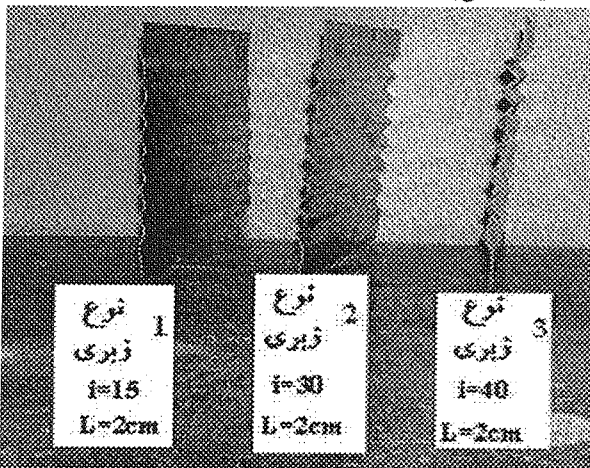
۳- نحوه ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش

گچ بعنوان مصالح مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها با نسبت وزنی گچ به آب، ۱/۷۵ در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها $15 \times 15 \times 15$ cm در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری (σ_c) بعد از یک هفته از ساخت نمونه‌ها و در دمای آزمایشگاه به

جدول (۴): محاسبه مقدار بعد فراکتال و مقدار JRC [۱].

| 2 | 1.5 | 1.25 | 1 | 0.75 | 0.5 | h (mm) |
|---------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| 1.21718 | 1.12474 | 1.08753 | 1.0566 | 1.03208 | 1.01435 | D |
| 29.05 | 25.00 | 22.43 | 19.28 | 15.22 | 9.5 | JRC |

45 kg/cm^2 می‌رسد. مقدار زاویه اصطکاک پایه نمونه‌ها برابر با 25° است. سه درجه مصنوعی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درجه با طول پایه ۲cm (شکل (۹)) و نسبت تنش ($S_r = \frac{\sigma_n}{\sigma_c}$) ۰/۲ و ۰/۱۴۳ سه مرتبه مورد برش قرار گرفته شده است. برای انجام برش بعد از اولین سیکل برشی نمونه دوباره به حالت اولیه بر می‌گردد و برشی دوباره تکرار می‌شود. در این مرحله رفتار دندانها در برش متوالی تا رسیدن به حالت مقاومت ماندگار را مدل می‌کند. این عمل تا سه مرحله انجام شده است با توجه به اینکه نمونه بر اثر بار شکسته می‌شود دیگر امکان انجام این عمل برای مراحل بیشتر میسر نمی‌باشد.



شکل (۹): مشخصات هندسی پروفیل زبری در نظر گرفته شده (L) طول قائده دندانها و i زاویه دندانها.

۴- ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج

با افزایش سایش و کاهش زاویه دندانها مقدار اتساع و مقاومت برشی در سیکل برش متوالی درزه به تدریج کاهش پیدا می‌کند (شکل (۱۰)).

جدول (۵) مقدار اتساع، JRC و زاویه اصطکاک ماندگار در هر مرحله از برش را نمایش می‌دهد. در مرحله سوم مقدار مقاومت درزه به مقاومت ماندگار نزدیک می‌شود، اما به علت وجود زبری در سطح درزه زاویه اصطکاک درزه بیشتر از زاویه اصطکاک پایه ($\phi_0 = 25^\circ$) است.

جدول (۵): محاسبه پارامترهای مقاومت برشی درزه طی سه مرحله برش.

| شماره زبری | مرحله برش | نسبت تنش | زاویه اتساع | JRC | τ_r (kg/cm ²) | τ_{patton} (kg/cm ²) | τ_{barton} (kg/cm ²) | ϕ_r |
|------------|-----------|----------|-------------|-------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|
| ۱ | مرحله (۱) | ۰/۲ | ۸ | ۴/۵۳ | ۷/۱ | ۸/۲۸ | ۷/۱۵ | ۳۸/۲ |
| | مرحله (۲) | ۰/۲ | ۴ | ۱ | ۶/۵ | ۷/۱۹ | ۶/۳۲ | ۳۵/۸ |
| | مرحله (۳) | ۰/۲ | ۳ | ۰/۵ | ۶/۲ | ۶/۹۴ | ۶/۳۲ | ۳۵/۳ |
| ۱ | مرحله (۱) | ۰/۱۳۳ | ۱۰ | ۷/۷۳ | ۶/۰۱ | ۶/۲۲ | ۵/۵۱ | ۴۱ |
| | مرحله (۲) | ۰/۱۳۳ | ۶ | ۳/۲ | ۵/۱ | ۵/۴۱ | ۴/۸ | ۳۸/۴ |
| | مرحله (۳) | ۰/۱۳۳ | ۴ | ۱ | ۴/۲ | ۵/۰۴ | ۴/۴۹ | ۳۷ |
| ۲ | مرحله (۱) | ۰/۲ | ۱۴/۵ | ۱۳/۱۲ | ۱۱/۱ | ۱۰/۴۰ | ۹/۲۳ | ۵۰/۹۶ |
| | مرحله (۲) | ۰/۲ | ۸/۷ | ۵/۷۳ | ۹/۱ | ۸/۴۹ | ۷/۴۱ | ۴۵/۳۳ |
| | مرحله (۳) | ۰/۲ | ۵/۲ | ۳ | ۷/۳ | ۷/۵۰ | ۶/۸۲ | ۴۹/۰۵ |
| ۲ | مرحله (۱) | ۰/۱۳۳ | ۱۶/۵ | ۱۵/۰۴ | ۸/۸ | ۷/۸۲ | ۶/۸۴ | ۵۳/۸۴ |
| | مرحله (۲) | ۰/۱۳۳ | ۱۱/۳ | ۹/۴۹ | ۵/۶ | ۶/۵۱ | ۵/۸۰ | ۴۱ |
| | مرحله (۳) | ۰/۱۳۳ | ۸/۲ | ۴/۸۸ | ۴/۹ | ۵/۸۴ | ۵/۰۶ | ۳۷/۴ |
| ۳ | مرحله (۱) | ۰/۲ | ۲۳ | ۲۰/۱۲ | ۱۲/۹ | ۱۴/۲۱ | ۱۱/۳۷ | ۵۵/۱۰ |
| | مرحله (۲) | ۰/۲ | ۱۴/۵ | ۱۳/۱۲ | ۱۰/۱ | ۱۰/۴۰ | ۹/۲۳ | ۴۸/۳۰ |
| | مرحله (۳) | ۰/۲ | ۹/۵ | ۶/۹۹ | ۸/۱ | ۸/۷۳ | ۷/۶۹ | ۴۱/۹۹ |
| ۳ | مرحله (۱) | ۰/۱۳۳ | ۲۶ | ۲۲/۰۸ | ۱۰/۱ | ۱۱/۲۲ | ۸/۴۵ | ۵۷/۵۲ |
| | مرحله (۲) | ۰/۱۳۳ | ۱۹ | ۱۷/۱۷ | ۸/۲ | ۸/۵۶ | ۷/۲۸ | ۵۲ |
| | مرحله (۳) | ۰/۱۳۳ | ۱۳ | ۱۱/۵۳ | ۶/۳ | ۶/۹۱ | ۶/۱۶ | ۴۵ |

در این رابطه i مقدار اتساع درزه است با توجه به رابطه فوق تنها کمیتی که در این رابطه در برش متوالی درزه تغییر می‌کند زاویه i می‌باشد. بنابراین اگر مقدار تغییرات زاویه i نسبت به جابجایی معلوم باشد می‌توان منحنی تنش - جابجایی بعد از نقطه پیک را رسم نمود. مقدار زاویه اتساع بعد از جابجایی u_s (در هر مرحله برش در جدول (۵) ارائه شده است و با توجه به آن مقدار τ_{patton} محاسبه شده است.

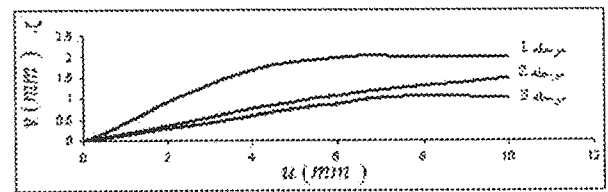
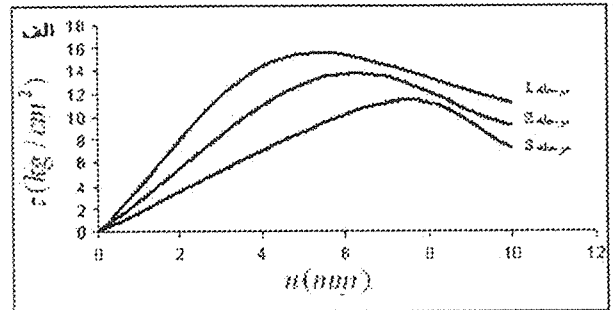
۴-۲- پارامترهای زبری در مدل بارتون

بارتون معیار مقاومت برشی زیر را برای درزه سنگ ارائه داده است [۷].

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left\{ JRC(u_s) \times \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right\} \quad (14)$$

با توجه به رابطه فوق تنها پارامتری که در برش متوالی درزه تغییر می‌کند JRC یا زبری درزه است که با افزایش جابجایی مقدار JRC درزه کاهش می‌یابد بنابراین اگر مقدار تغییرات JRC نسبت به جابجایی بعد از نقطه پیک ($JRC(u_s)$) را معلوم باشد می‌توان منحنی تنش - جابجایی بعد از نقطه پیک را رسم نمود.

شکل (۱۱) وضعیت نمونه نوع (۲) با نسبت تنش



شکل (۱۰): سه مرحله برش بر روی دندان $i=30$ با نسبت تنش

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_c} = 0.2$$

الف) تغییرات تنش برشی نسبت به جابجایی

برشی، ب) منحنی اتساع.

۴-۱- زاویه اتساع در مدل پاتون

پاتون معیار مقاومت برشی زیر را برای درزه سنگ ارائه داده است [۶].

$$\tau_p = \sigma_n \tan \{ \phi_b + i(u_s) \} \quad (13)$$

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار درزه مصنوعی بعد از مقاومت برشی حداکثر با در نظر گرفتن کاهش نرخ اتساع و JRC بررسی شد. به منظور تعیین مقدار JRC در هر مرحله برش از هندسه فراکتال استفاده شد و رابطه تجربی بین JRC و بعد فراکتال ارائه شد. بنابراین با دانستن زاویه اتساع در هر مرحله برش می توان به راحتی مقدار JRC درزه را تعیین کرد و رفتار درزه را بعد از نقطه پیک بررسی نمود. نتایج زیر از این تحقیق حاصل شده است.

- ۱- مقدار مقاومت برشی بعد از نقطه پیک به تغییرات نرخ اتساع وابسته بوده و با کاهش نرخ اتساع مقاومت برشی درزه نیز کاهش می یابد.
- ۲- کاهش زاویه i و JRC درزه در اثر برش متوالی مورد بررسی قرار گرفت. نرخ تغییرات زاویه i و JRC وابسته به تنش عمودی و زبری اولیه درزه است.
- ۳- مقدار زاویه اصطکاک ماندگار بعد از سه مرحله برش بیشتر از زاویه اصطکاک پایه بدست آمده است که این بیانگر وجود زبری بر روی سطح درزه بعد از برش متوالی است.
- ۴- پارامترهای هندسی درزه را می توان با به دست آوردن عدد فراکتال سطح درزه بدست آورد.
- ۵- با افزایش مقدار بعد فراکتال مقدار JRC درزه نیز افزایش می یابد.
- ۶- با مشخص شدن پارامترهای h (متوسط ارتفاع) و l (متوسط قاعده) می توان JRC درزه را تعیین نمود.
- ۷- مقدار مقاومت ماندگار بدست آمده از آزمایشات انجام شده به مقدار تخمینی از ملاک بارتون نزدیک می باشد، بنابراین روشی که برای تعیین JRC ارائه شده است، مناسب می باشد.

۶- ضمائم

چسبندگی که در اینجا مورد بحث است چسبندگی آنی می باشد که در اثر برش دندانها ایجاد می شود، مقدار این چسبندگی در اثر جابجایی برشی به تدریج افزایش پیدا کرده تا به نقطه پیک می رسد و بعد از نقطه پیک که متناظر با نقطه پیک منحنی تنش برشی-جابجایی است، به تدریج کاهش می یابد تا به مقدار صفر می رسد و حالت ماندگار رخ می دهد. با مساوی قرار دادن معادله (۲) می توان جابجایی برشی ماندگار (u_r) را به دست آورد.

$$c(u_r) = 1.60 - 0.45 \ln(u_r) = 0 \Rightarrow u_r = u_p = 35 \text{ mm} \quad (\text{الف-۱})$$

$\frac{\sigma_n}{\sigma_c} = 0.2$ پس از انجام آزمایشات را نشان می دهد. آنچه که با مقایسه این تصویر آشکار می گردد، افزایش میزان خرابی دندانها با افزایش تعداد مراحل برش است.

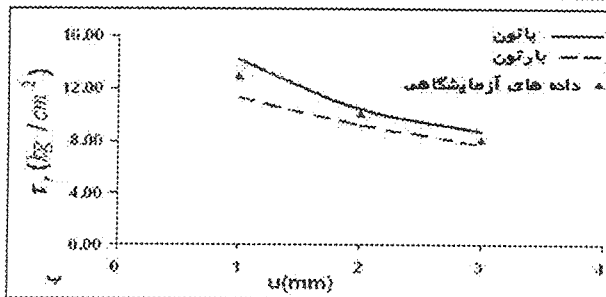
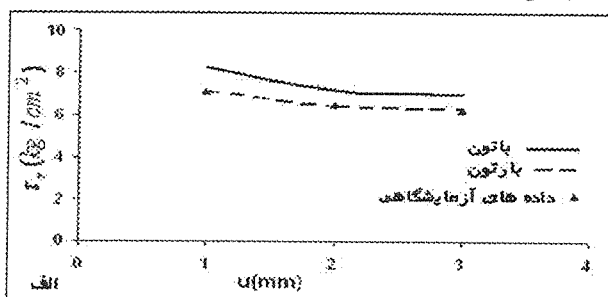


شکل (۱۱): تصویر نمونه نوع (۲) قبل و بعد از انجام آزمایشات با

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_c} = 0.2$$

با استفاده از نرخ اتساع و روابط (۸) و (۱۲) مقدار JRC درزه بعد از هر مرحله برش محاسبه شده است (جدول (۵)) با استفاده از مقدار JRC در هر مرحله برش مقدار T_{barton} محاسبه شده است.

با توجه به معادلات (۱۳) و (۱۴) و کاهش زاویه دندانها و مقدار JRC منحنی تنش - جابجایی براساس رابطه بارتون و بارتون و داده های آزمایشگاهی رسم شده است (شکل (۱۲)). بنابراین رفتار برشی یک درزه بعد از نقطه پیک بر اساس رابطه بارتون و پاتون تخمین زده شده است. نتایج آزمایش با رابطه بارتون همپوشانی بهتری دارد. این امر نشان می دهد رابطه (۸) و (۱۲) که برای تخمین JRC سطح درزه در نظر گرفته شده است مناسب می باشد.



شکل (۱۲): منحنی تنش برشی ماندگار نسبت به جابجایی افقی با

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_c} = 0.2 \quad (\text{الف: } i=15, \text{ ب: } i=40)$$

برای به دست آوردن زاویه اصطکاک ماندگار مقدار $u_s = 35$ m در رابطه (۳) قرار داده می شود و مقدار $\phi_s = 32^\circ$ بدست می آید.

$$\phi(u_s) = 42.1 - 2.7 \ln(35) \Rightarrow \phi(u_s) = 32^\circ \quad (ب-۲)$$

۷- مراجع

- [۱] عسکری، مجتبی؛ "مدل سازی فیزیکی رفتار ناپیوستگی ها در سنگ"، پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ۱۳۸۴.
- [۲] Hoek, E.; Bray, J.W.; "Rock slope engineering. London": IMM, 1981.
- [۳] Haston, M.B.; "Shear strength testing and fractal analysis of rock discontinuities": A Thesis Presented for the Master of Science Degree, The University of Tennessee, Knoxville Chapter 4, 1996.
- [۴] Cundall, P.; Marti, J.; Beresford, J.; Last, P.; Asagian, M.; "Computer modeling of jointed rock masses", Report for the U.S. Army Corp. of Engineer Waterways Experimental Station (by Dames and Moor), 1978
- [۵] Haberfield, C.M.; Johnson, I.W.; "A mechanistically-based model for rough rock joints", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, vol. 31, p.p. 279 - 92, 1994
- [۶] Patton, F.D.; "Multiple model of shear failure in rock", Proceedings of the First Congress of ISRM, Lisbon, p.p. 509-13 1966
- [۷] Tse, R.; Cruden, D.; "Estimating joint roughness coefficients", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci, vol. 16, p.p. 303-307, 1978
- [۸] Xie, H.; Pariseau, W.G.; "Fractal estimation of joint roughness coefficients", Proc. Int. Conf. on Fractured and Jointed Rock Masses, Balkema, Rotterdam, 125-131, 1995
- [۹] Yang, Z.Y.; Huang, Y.M.; "Post-Peak shear behaviour of artificial joint", Mechanics of jointed and faulted rock, Balkema, Rotterdam, p.p. 139 - 145, 1995
- [۱۰] Yang, Z.Y.; Yen, K.C.; "The effect of asperity order on the roughness of rock joints", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 38 745-752, 2001.

۸- زیر نویس ها:

- ∧ Residual
- ∧ Waviness
- ∧ Unevenness
- ∧ Haberfield & Johnson
- ∧ Huang & Yang
- ∧ Joint roughness coefficient
- ∧ Divider
- ∧ Box Counting
- ∧ Cruden and Tse