

بررسی توسعه ترک در مصالح شبه سنگی ترد

مهتاب علی طالش^۱، مرجان نعیم آبادی^۲، محمود یزدانی^{۳*}

۱. دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

*Myazdani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۷/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت ۹۶/۰۹/۲۵

چکیده

درک بهتر شکل‌گیری و رشد ترک‌ها منجر به ارزیابی بهتر از عملکرد توده‌های سنگ می‌شود. بررسی رشد و توسعه ترک‌ها می‌تواند نتایج ارزشمندی به دست دهد که در مهندسی ژئوتکنیک نیز کاربرد دارد. از جمله کاربردهای مطالعه رشد ترک در ژئوتکنیک، می‌توان به ارزیابی پایداری شیروانی‌های سنگی، طراحی سازه نگهبان تونل‌ها و دیگر سازه‌های ژئوتکنیکی و همچنین پیش‌بینی جریان در توده‌های سنگی اشاره کرد. همچنین مطالعه توسعه و اندرکنش ترک‌ها می‌تواند منجر به ایجاد درکی از رفتار گسل‌ها شود. در این مقاله از گچ پر مقاومت به‌عنوان یک ماده مدل برای شبیه‌سازی رفتار سنگ‌های شکننده استفاده شده است. با استفاده از نمونه‌های به شکل دیسک دارای شکاف‌های از پیش موجود، توسعه ترک از شکاف‌ها برای دو حالت شکاف باز و شکاف بسته‌ی دارای اصطکاک تحت بارگذاری فشاری قطری مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر تعیین فرآیند توسعه ترک از شکاف‌های از پیش موجود، تاثیر شکاف‌های باز و بسته بر روی مقاومت نمونه بدون شکاف بررسی و چقرمگی شکست در مدهای I، II و مد ترکیبی I-II محاسبه شد. همچنین برای شکاف‌های بسته چگونگی توزیع لغزش در سطح شکاف مورد بررسی قرار گرفت و نمودار توزیع جابه‌جایی برای زاویه‌های مختلف انحراف شکاف نسبت به راستای بارگذاری در سطح شکاف ترسیم شد. این نمودارها هماهنگی خوبی با نمودارهای توزیع لغزش به دست آمده از مطالعه روی سطح گسل‌های واقعی نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: آزمایش برزیلی، شکاف از پیش موجود، رشد ترک، ضریب شدت تنش، مکانیک شکست

۱- مقدمه

برهم‌کنش ترک‌ها کمک می‌کند. همچنین درک بهتر فرآیندهای شکل‌گیری، انتشار، برهم‌کنش و در نهایت پیوند ترک‌ها در سنگ می‌تواند منجر به ارزیابی مطلوب‌تر ویژگی‌ها و عملکرد کلی توده سنگ شود و در طراحی‌های مهندسی ژئوتکنیک منجر به ارزیابی مطلوب‌تر پایداری شیروانی‌های سنگی، طراحی بهتر سازه‌های نگهبان تونل و پیش‌بینی جریان در توده‌های سنگی شود [1]. به‌عنوان نمونه برای یک شیروانی

رفتار یک توده سنگ تنها با استفاده از ویژگی‌های ماتریس سنگ تعیین نمی‌شود بلکه با استفاده از وجود و ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها یا شکستگی‌ها داخل سنگ تعیین می‌شود. درک شکستگی به‌طور کلی و پیوند شکستگی‌ها به‌طور خاص در مکانیک سنگ مهم است. مطالعه انتشار و به هم پیوستن ترک‌ها به درک بهتر چگونگی تغییر شکل پوسته قاره‌ای و چگونگی

به صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی برای مطالعه انتشار ترک در دیسک برزیلی دارای شکاف سراسری مرکزی در مدهای I، II و ترکیبی I-II استفاده کرده‌اند [12, 31].

شکل ۱. شکستگی‌های هورستیل^۱ در انتهای یک درزه گسله (F). هورستیل بیانگر وقوع ترک‌های دارای نوک‌های متعدد است. پیکان‌ها در تصویر نشان‌دهنده جهت برش خوردن است [11]

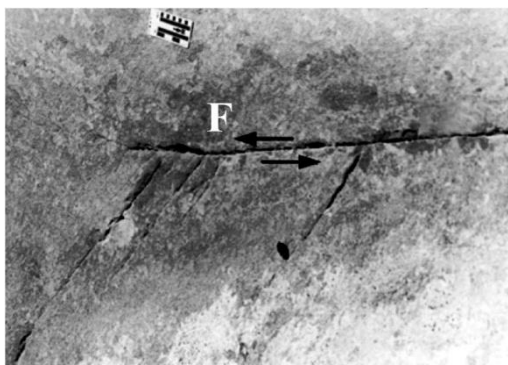


Fig. 1. Horsetail fractures at the end of a faulted joint (F), left-lateral shearing is shown by pair of arrows [11]

در انتشار یک شکاف از پیش موجود، دو نوع از ترک‌ها در فشردگی دیده می‌شوند ترک‌های کششی یا بالی^۲ و ترک‌های برشی یا ترک‌های ثانویه که در شکل (۲) قابل مشاهده است [32]. ترک‌های بالی ترک‌های کششی هستند که در نوک‌ها یا نزدیکی نوک‌های شکاف‌ها ظاهر می‌شوند و با زاویه‌ای نسبت به شکاف تشکیل می‌شود و با حالتی پایدار به سمت ناحیه با بیشینه فشار انتشار می‌یابند. ترک‌های ثانویه ترک‌های برشی هستند که همواره از نوک‌های شکاف‌ها تشکیل می‌شوند. آنها در ابتدا پایدار هستند اما ممکن است طی فرآیند بارگذاری در لحظه انعقاد ترک‌ها یا گسیختگی نمونه، ناپایدار شود.

زاویه تمایل شکاف نسبت به راستای بارگذاری، اندازه شکاف و تعداد شکاف‌ها روی الگوهای توسعه و به هم پیوستن ترک‌ها به یکدیگر و همچنین تنش‌های تشکیل و پیوند ترک‌ها تاثیرگذار است. در مطالعات انجام شده تمایل پژوهشگران به استفاده از شکاف باز در دیسک برزیلی بیشتر بوده و مطالعات معدودی در مورد شکاف‌های بسته اصطکاکی انجام شده است.

سنگی، در مکانیک زمین‌شناسی ضروری است تا درباره وجود شکستگی‌ها و چگونگی رشد و به هم پیوستن آنها و ایجاد یک سطح پیوسته شکست اطلاع حاصل شود. درک توسعه، اندرکنش و پیوند بین شکاف‌ها همچنین به درک بهتر ساز و کارهای پیدایش و تکامل گسل‌ها [2, 6] و پیش‌بینی تاثیر سیستم گسل بر انتشار جریان از میان مخازن کمک می‌کند [7]. هر چند لازم به ذکر است که ساختارهای گسله و درزه‌دار که به طور کلی آنها را به عنوان ناپیوستگی‌ها می‌شناسند، در طبیعت بسیار پیچیده‌تر از مشاهدات آزمایشگاهی هستند. پژوهشگران زمین‌شناس و مهندسی سنگ علاقه‌مندند تا درک بهتری از چگونگی پیدایش ترک‌ها و انعقاد آنها در مقیاس‌های طولی مختلف داشته باشند.

داده‌های کمی زمین‌شناسی میدانی و مدلسازی‌های رایانه‌ای بر اساس مکانیک‌های شکست و محیط‌های پیوسته و مطالعات آزمایشگاهی روی سنگ‌های طبیعی و مدل با یک مقیاس کاهش یافته، گستره وسیعی از سوالات اساسی پیرامون گسلش، شکست و تغییر شکل سنگ را می‌توانند به طور کامل پاسخ دهند. گروه‌های پژوهشی مختلفی در دنیا تکنیک‌های مذکور را برای ساختارهای زمین‌شناسی مختلف به کار برده‌اند [8, 10]. همچنان که شدت برش اضافی افزایش می‌یابد و توسعه انعقاد ترک‌ها شدید می‌شود، ساختارهای زمین‌شناسی جدیدی شکل می‌گیرند. بر اساس مطالعات میدانی، تشکیل یک ناحیه گسله ساده ناشی از به هم پیوستن گسل‌های غیر هم‌سطح (شکاف‌های دارای لغزش) توسط شکستگی‌های گسترده متعدد در یک سمت به سمت دیگر و از انتهایی به انتهای دیگر است. در تصویر شکل (۱) یک مورد واقعی از پیوند شکستگی‌ها به یکدیگر و تشکیل مناطق گسله در طبیعت را می‌توان به وضوح دید.

مطالعات آزمایشگاهی بسیاری به منظور درک رشد و گسترش ترک‌ها در مصالح طبیعی و مصنوعی صورت گرفته است. یکی متداول‌ترین آزمایش‌هایی که برای مطالعات در زمینه مکانیک شکست روی نمونه‌های سنگی یا شبه‌سنگی انجام شده است، آزمایش بارگذاری قطری دیسک برزیلی دارای شکاف باز سراسری مرکزی است. پژوهشگران بسیاری از این آزمایش

¹Horsetail: دم اسبی

²Wing

شکل ۳. طرح‌واره دیسک برزیلی دارای شکاف سراسری مرکزی (در این پژوهش، قطر دیسک ۱۰۰ میلی‌متر، ضخامت دیسک ۵۰ میلی‌متر، بازشدگی شکاف برای شکاف‌های باز ۱ میلی‌متر و طول شکاف ۳۰ میلی‌متر می‌باشد)

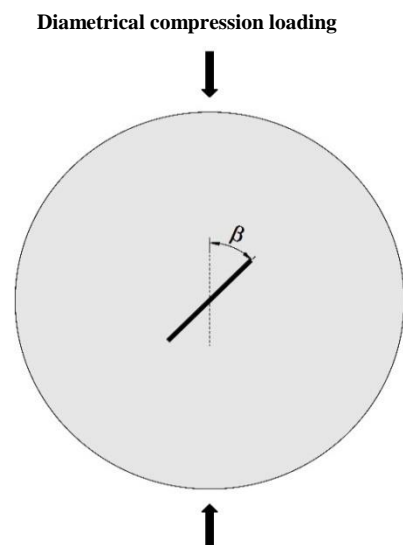


Fig. 3. schematic representation of the disk containing a central straight pre-existing flaw (disks are 100 mm in diameter and 50 mm in thickness containing 30 mm open or closed flaw. Opening of open flaws were 1 mm)

۲-۱- چگونگی آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های گچ قالب‌گیری شده ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از ترکیب پودر گچ با آب به نسبت ۳ به ۱ جرمی ساخته شده است. به منظور کاهش آب انداختن ملات و ته نشین شدن گچ در آب، از افزودن پودر خاک دیاتومه به مخلوط آب و گچ، با نسبت جرمی ۱ خاک دیاتومه به ۳۵ آب استفاده شده است. در ابتدا مخلوط آب و خاک دیاتومه به مدت ۲۰ ثانیه با یکدیگر ترکیب می‌شوند و سپس پودر گچ به صورت تدریجی به ترکیب اضافه می‌شود و پس از آن ملات به مدت ۲ دقیقه با استفاده از مخلوط‌کن هم زده می‌شود. سپس ملات داخل قالب‌ها با ضخامت ۵ سانتی‌متر ریخته می‌شود. به منظور ایجاد شکاف‌های از پیش موجود باز از تسمه‌های استیل ضد زنگ با عرض ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر که به طور مناسبی داخل قالب قرار داده می‌شوند، استفاده شده است (شکل ۴). برای ایجاد شکاف‌های از پیش موجود بسته، نوارهای سیلیکونی با عرض ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۰/۰۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است (شکل

شکل ۲. انواع ترک‌های مشاهده شده در نمونه‌های دارای ترک از پیش موجود در مصالح سنگی تحت فشار [32]

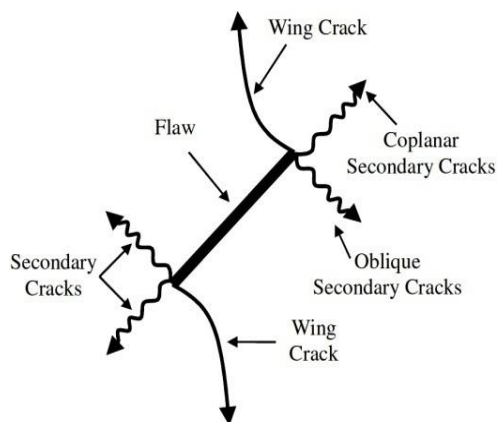


Fig. 2. Types of observed cracks initiated from a pre-existing flaw in rock materials under compression [32]

در این مقاله نتایج مطالعه آزمایشگاهی در مورد فرآیند شکست در نمونه‌های شبه‌سنگی شکننده دارای شکاف از پیش موجود ارائه شده است. نمونه‌ها به شکل دیسک برزیلی از نوع گچ پر مقاومت است که تحت بارگذاری فشاری قطری قرار داده شده‌اند. برای ایجاد شکاف از دو روش استفاده شده است تا بتوان شکاف‌های باز و شکاف‌های بسته دارای اصطکاک داشت. نتایج آزمایش‌ها، به صورت محاسبه چقرمگی شکست نمونه‌ها، بررسی چگونگی رشد ترک در هر دو نمونه دارای شکاف باز و بسته و همچنین بررسی توزیع لغزش در سطح شکاف‌های بسته اصطکاکی ارائه شده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از نتایج بارگذاری قطری بر نمونه‌های به شکل دیسک با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر که دارای شکاف‌های از پیش موجود باز و بسته به طول ۳۰ میلی‌متر، استفاده شده است. برای هر یک از شکاف‌های باز و بسته، ۶ زاویه‌ی، ۰، ۱۰، ۲۷/۲، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه برای راستای قرارگیری شکاف‌ها نسبت به راستای بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. نمایش شماتیک دیسک دارای شکاف سراسری مرکزی تحت بارگذاری فشاری قطری در شکل (۳) نشان داده شده است.

قالب و سپری شدن زمان گیرش نهایی، نمونه‌ها از قالب جدا و به مدت یک شبانه‌روز در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شوند. پس از آن نمونه‌ها به گرمخانه با دمای ۵۰ درجه منتقل می‌شوند و تا رسیدن به وزن ثابت، آنجا باقی می‌مانند. پس از خشک شدن نمونه‌ها، با استفاده از سمباده زواید نمونه‌ها گرفته و سطح نمونه کاملاً صاف می‌شود به گونه‌ای که ضخامت نمونه در تمام بخش‌های آن یکنواخت باشد.

پس از آماده‌سازی تمام نمونه‌ها و اندازه‌گیری ابعاد، بارگذاری روی نمونه‌ها انجام می‌شود. لازم به ذکر است که برای دنبال کردن لغزش در سطح ترک‌ها، خطوطی عمود بر ترک در فواصل مختلف روی نمونه، رسم می‌شود. تصویری از شکل ترک در نمونه‌های دارای شکاف بسته و باز در شکل (۶) نشان داده شده است.

شکل ۶. نمونه دارای شکاف باز (سمت راست)؛ نمونه دارای شکاف بسته اصطکاکی که برای تعیین لغزش عمود روی شکاف علامت‌هایی زده شده است (سمت چپ)



Fig. 6. Specimen containing open (right) and closed (left) flaw. Markers are used to follow slippage of closed flaw

۲-۲- چگونگی انجام آزمایش

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، هر نمونه به صورت قطری تحت بارگذاری فشاری قرار داده می‌شود. دستگاه بارگذاری یک جک بارگذاری فشاری است که با استفاده از لودسل ۱۰ تن (متناسب با ظرفیت نمونه‌ها) نیروی وارد بر نمونه‌ها قرائت می‌شود. در حین بارگذاری، با استفاده از دوربین از سطح نمونه به‌طور پیوسته تصویربرداری می‌شود. نمونه‌ها داخل فک آزمایش برزلی قرار داده می‌شوند تا توزیع بار به سطح نمونه مناسب باشد. در شکل (۷) تصویری از سیستم بارگذاری، تصویربرداری و ثبت داده‌ها نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که پیش‌تر با انجام آزمایش‌های بارگذاری

۵). هر یک از قالب‌های محتوی ملات به‌همراه تسمه‌های داخل آن، به مدت ۴ دقیقه بر روی میز لرزان، لرزانده می‌شوند تا حباب‌های هوای داخل ملات خارج شود. پس از آن قالب‌ها به سطحی که کاملاً تراز است منتقل، تا ضخامت نمونه در تمام بخش‌های آن یکنواخت باشد.

شکل ۴. قالب‌های مربوط به نمونه‌های دارای شکاف باز و چگونگی قرارگیری تسمه‌های استیل داخل قالب



Fig. 4. Molds used to prepare specimens containing pre-existing open flaw (Steel slims inserted in the mold)

شکل ۵. قالب مربوط به نمونه‌های دارای شکاف بسته و نحوه قرارگیری تسمه سیلیکونی داخل قالب

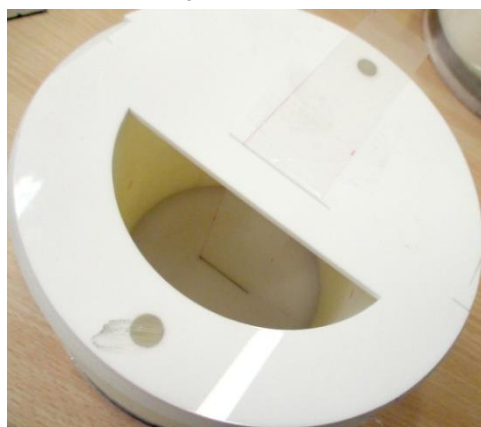


Fig. 5. Molds used to prepare specimens containing pre-existing closed flaw (Silicon tapes inserted in the mold)

پس از گذشت ۸ دقیقه از ریختن ملات داخل قالب‌ها و سپری شدن زمان گیرش اولیه، تسمه‌ها از ملات بیرون کشیده می‌شوند و بعد از گذشت ۱ ساعت از ریختن ملات داخل

۴- بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها

۴-۱- محاسبه ضرایب شدت تنش

سه مد، I، بازشدگی کششی، II، برش درون صفحه‌ای و III برش خارج از صفحه، برای توسعه ترک در مکانیک شکست شناسایی شده است. بسته به شرایط بارگذاری ممکن است یک، دو یا تمامی مدهای شکست و ترکیبی از آنها اتفاق بیافتد. انتشار ترک در مد ترکیبی I-II در مصالح ترد شبه‌سنگی بسیار متداول است [37]. یکی از مناسب‌ترین آزمایش‌ها برای مطالعه شکست در مد ترکیبی I-II در مواد ترد، آزمایش بارگذاری قطری دیسک برزیلی دارای شکاف سراسری مرکزی است [13,14,19,22].

راه‌حل‌های عددی برای تعیین ضرایب شدت تنش توسط اتکینسون و همکاران در سال ۱۹۸۲ برای دیسک برزیلی دارای یک ترک سراسری مرکزی به صورت زیر بیان شده است [38]:

$$K_I = \frac{P \sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_I \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P \sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_{II} \quad (2)$$

که در روابط فوق، K_I ، ضریب شدت تنش مد I، K_{II} ، ضریب شدت تنش مد II، R شعاع دیسک برزیلی، B ضخامت دیسک، P ، بار فشاری در لحظه گسیختگی و a ، نصف طول ترک است. همچنین N_I و N_{II} ، ضرایب بدون بعدی هستند که بستگی به طول ترک بدون بعد، a/R و زاویه انحراف ترک، β ، دارند. برای ترک‌های با طول نسبتاً کوچک ($a/R \leq 0.3$)، مسئله به صورت یک ترک در یک محیط بینهایت در نظر گرفته و راه‌حل‌ها برای N_I و N_{II} با عبارات زیر بسط داده می‌شود [38]:

$$N_I = 1 - 4 \sin^2 \beta + 4 \sin^2 \beta \times (1 - 4 \cos^2 \beta) \left(\frac{a}{R} \right)^2 \quad (3)$$

$$N_{II} = \left[2 + (8 \cos^2 \beta - 5) \left(\frac{a}{R} \right)^2 \right] \times \sin 2\beta \quad (4)$$

ضرایب شدت تنش برای نمونه‌های آزمایش شده در این پژوهش، با استفاده از روابط فوق محاسبه شده است. برای هر

تک‌محوری روی نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر و همچنین کشش غیرمستقیم روی دیسک‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر، طبق استانداردهای ASTM و ISRM [36, 33]، ویژگی‌های مهندسی گچ مورد استفاده در این پژوهش، ارزیابی شد. مقاومت فشاری تک‌محوری، q_{II} ، برابر با ۳۸MPa، مقاومت کششی، σ_T ، برابر با ۷MPa، ضریب پواسون، ν ، برابر با ۰/۲۵ و مدول الاستیسیته، E ، برابر با ۸/۵GPa برای این ماده به دست آمد.

شکل ۷. سیستم بارگذاری، ثبت داده و تصویربرداری استفاده شده در آزمایش‌ها

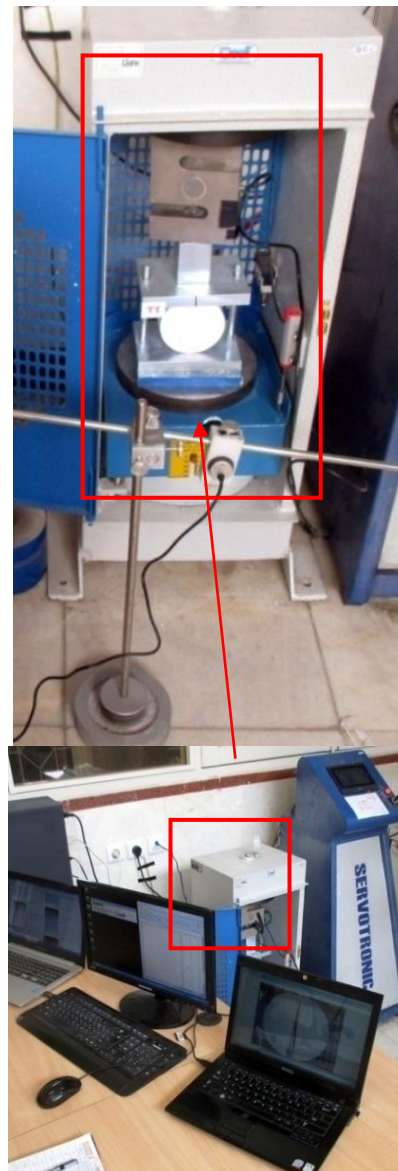


Fig. 7. Loading apparatus, data acquisition system and imaging system used in the tests of this study

حالتی قرار می‌گیرد که ترک تحت کشش نیست بلکه تحت بار فشاری است. مقادیر ضرایب شدت تنش بیانگر رفتار شکننده ماده مورد آزمایش است.

۴-۲- بررسی فرآیند توسعه ترک

طی بارگذاری نمونه‌ها با تصویربرداری پی در پی از وجه نمونه، الگوی توسعه ترک‌ها در هنگام شکست نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. تصاویر مربوط به توسعه ترک در نمونه‌های دارای شکاف باز، با بازشدگی ۱mm، در شکل (۹) نشان داده شده است. رشد ترک در حالت $\beta=0^\circ$ ، به صورت مد کششی خالص، I، اتفاق می‌افتد و ترک کششی جدید از نوک شکاف از پیش موجود توسعه یافته و موازی با راستای بارگذاری ادامه می‌یابد. با افزایش زاویه انحراف ترک نسبت به راستای بارگذاری، با توسعه ترک‌های بالی شکل از نوک ترک رشد ترک آغاز و با هم امتداد شدن با راستای بارگذاری کامل می‌شود. برای دیگر زوایای انحراف نیز همین روند مشاهده می‌شود. اما در زاویه انحراف 90° درجه، فرآیند رشد کاملاً تحت تاثیر رفتار ماده است و مشابه یک دیسک بدون ترک فرآیند دونیم شدن تحت بار کششی اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که برای زوایای انحراف بزرگتر از زاویه $27/2^\circ$ ، رشد ترک تحت مد ترکیبی I-II اتفاق می‌افتد در حالیکه ضریب شدت تنش مد اول نیز کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان مشاهده نمود که برای شکاف‌های باز که زاویه انحراف آنها از راستای بارگذاری بیشتر از $27/2^\circ$ است، توسعه ترک‌های بالی شکل دقیقاً از نوک شکاف از پیش موجود اتفاق نمی‌افتد و ترک بالی شکل از کمی به سمت داخل شکاف رشد یافته است. این موضوع در تصاویر مربوط به توسعه ترک در زاویه‌های 45° و 60° کاملاً مشخص است. با افزایش زاویه انحراف ترک نسبت به راستای بارگذاری و کاهش ضریب شدت تنش مد I، توسعه ترک‌ها تحت تاثیر شکاف از پیش موجود و گسیختگی کششی دیسک خواهد بود که هرچه زاویه انحراف به 90° نزدیک می‌شود، اثر گسیختگی کششی دیسک بر ساز و کار شکست غالب می‌شود.

حالت از زاویه انحراف ترک نسبت به راستای بارگذاری، ۳ نمونه برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها، تحت بارگذاری قرار گرفت. زاویه انحراف ترک نسبت به راستای بارگذاری، β ، در حالت ۰، 10° ، $27/2^\circ$ ، 45° ، 60° و 90° مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۱) مقادیر محاسبه شده برای ضرایب شدت تنش در مدهای I، II و مد ترکیبی I-II ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر ضریب شدت تنش برای شکست در مد I-II

β (°)	K_I (MPa.m ^{0.5})	K_{II} (MPa.m ^{0.5})
0	0.25	0.00
10	0.128	0.116
27.2	0.00	0.258
45	-0.263	0.423
60	-0.647	0.485
90	-1.521	0.00

Table 1. Values of mixed mode I-II stress intensity factors

شکل ۸ ضریب شدت تنش در مدهای I، II و ترکیبی I-II برای نمونه‌های

مورد آزمایش (D=100±1mm, a/R=0.3)

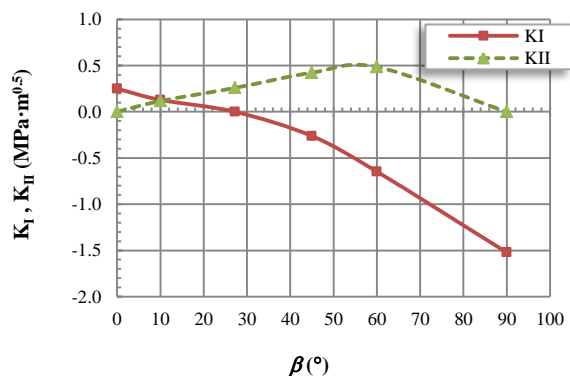


Fig. 8. Stress intensity factors in Modes I, II and mixed mode I-II for tested specimens (a/R=0.3, D=100±1mm)

همچنین نمودار تغییرات ضریب شدت تنش برای ماده مورد بررسی در شکل (۸) ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای زوایای بزرگتر از زاویه‌ای که مد خالص برشی ایجاد می‌شود ($27/2^\circ$)، مقدار ضریب شدت تنش در مد I منفی می‌شود زیرا زاویه انحراف ترک نسبت به راستای بارگذاری در

شکل ۱۰. الگوهای توسعه ترک در لحظه شکست نمونه‌های دارای شکاف بسته ($D=100\pm 1\text{mm}$, $a/R=0.3$)

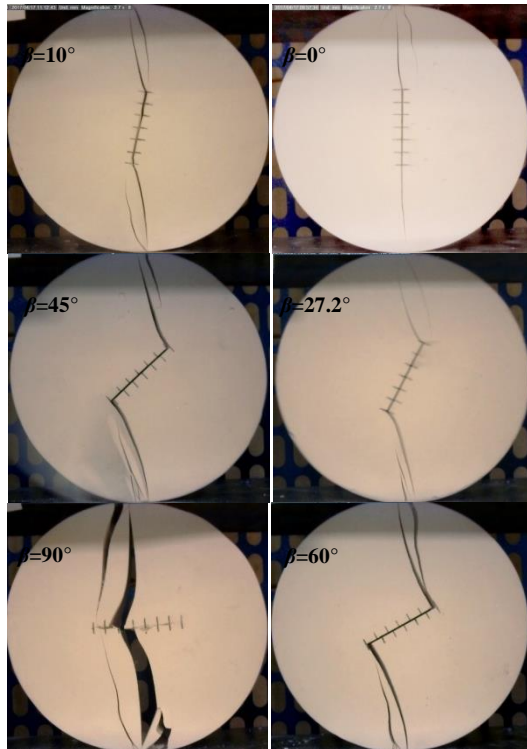


Fig. 10. Crack growth patterns in specimens containing pre-existing closed flaw ($a/R=0.3$, $D=100\pm 1\text{mm}$)

شکل ۹. الگوهای توسعه ترک در لحظه شکست نمونه‌های دارای شکاف باز با بازشدگی ۱ میلی‌متر ($D=100\pm 1\text{mm}$, $a/R=0.3$)

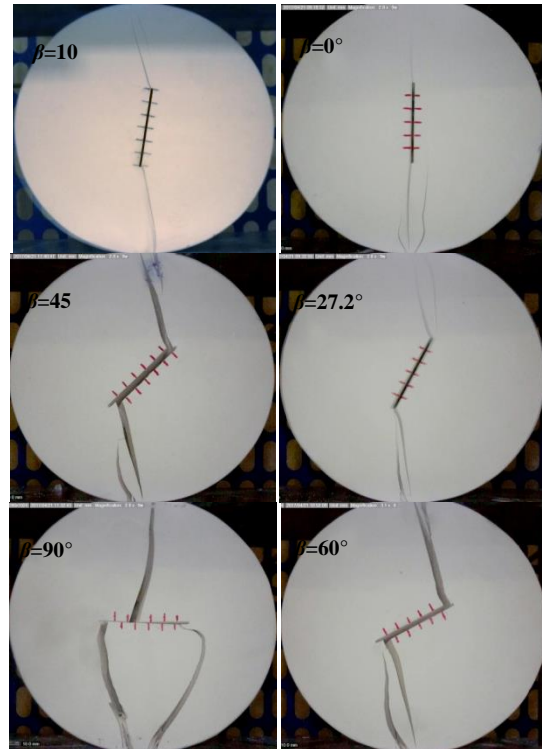


Fig. 9. Crack growth patterns in specimens containing pre-existing open flaw with 1mm opening ($a/R=0.3$, $D=100\pm 1\text{mm}$)

لازم به ذکر است که ترک‌هایی که در بالا و پایین نمونه در کنار ترک‌های بالی شکل در شکل‌های (۹)، (۱۰) قابل مشاهده است، ناشی از ادامه بارگذاری پس از شکست و فشردگی بیش از حد نمونه‌ها است.

۳-۴- بررسی تاثیر زاویه انحراف شکاف بر مقاومت

به منظور ارزیابی تاثیر وجود شکاف روی مقاومت دیسک در دو حالت شکاف باز و بسته، مقدار بار شکست برای دیسک‌های دارای شکاف بر بار شکست دیسک بدون شکاف تقسیم شده است. در شکل (۱۱)، تاثیر زاویه انحراف شکاف نسبت به راستای بارگذاری، β ، بر نسبت P_{Flaw}/P_{Intact} نشان داده شده است. در این شکل، P_{Flaw} بار بیشینه برای شکست نمونه‌های دارای شکاف و P_{Intact} بار بیشینه برای شکست نمونه بدون شکاف است. به طور کلی با افزایش β ، از صفر تا مقدار $27/2^\circ$ ، مقدار نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد

در مورد نمونه‌های دارای شکاف بسته شکل (۱۰)، روند توسعه ترک تقریباً مشابه با نمونه‌های دارای ترک باز است. برای شکاف‌های دارای انحراف نسبت به راستای بارگذاری، ترک‌های بالی شکل از نوک شکاف‌های از پیش موجود توسعه می‌یابند و در ادامه با راستای بارگذاری هم‌امتداد می‌شوند. در مورد زاویه انحراف 90° ، شکاف بسته مانند شکاف باز است و دیسک تحت تاثیر گسیختگی کششی قرار می‌گیرد و به دو نیم تقسیم می‌شود که بیانگر این موضوع است که شکاف اثر قابل توجهی در فرآیند توسعه ترک‌ها ندارد. تفاوتی که بین توسعه ترک‌ها از شکاف‌های باز و بسته وجود دارد، مربوط به توسعه ترک‌های بالی شکل برای زاویه‌های 45° و 60° است. در شکاف بسته، ترک بالی از نوک شکاف از پیش موجود توسعه می‌یابد که شاید دلیل این موضوع را بتوان به اثر اصطکاک بین سطوح شکاف نسبت داد.

شکل ۱۱. تاثیر زاویه انحراف ترک نسبت به راستای بار بر نسبت مقاومت

نمونه‌های دارای شکاف باز و بسته به مقاومت نمونه بدون شکاف

$$(D=100\pm 1\text{mm}, a/R=0.3)$$

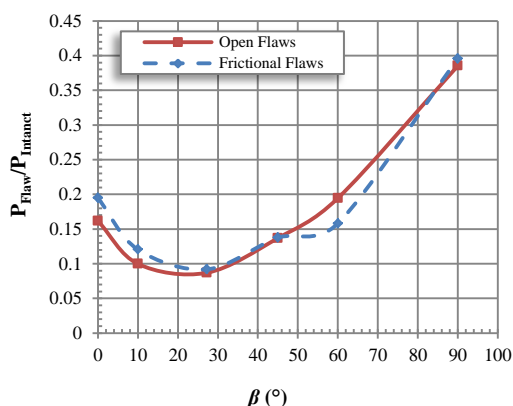


Fig. 11. Effect of flaw inclination angle on specimens normalized failure load (the failure load of specimens containing open and closed flaw divided to the failure load of intact specimen, $a/R=0.3, D=100\pm 1\text{mm}$)

شکل ۱۲. تصویر بزرگنمایی شده از لغزش دو وجه شکاف بسته نسبت به یکدیگر



Fig. 12. Magnified image of the slip occurred between two faces of the closed flaw

شکل ۱۳. نمودار تعدیل یافته توزیع لغزش در سطح شکاف بسته

اصطلاحاً برای زوایای مختلف انحراف ترک نسبت به راستای

$$\text{بارگذاری } (D=100\pm 1\text{mm}, a/R=0.3)$$

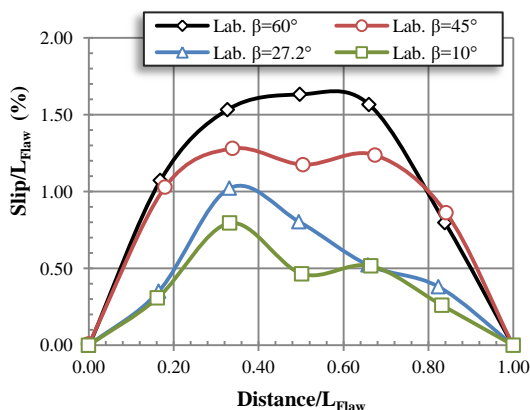


Fig. 13. Normalized slip distribution at closed flaw versus distance for various values of flaw inclination angle

و در زاویه $27/2^\circ$ ، که مد خالص برش اتفاق می‌افتد، نیروی لازم برای شکست به کمینه مقدار خود (۸ درصد نمونه سالم) می‌رسد و پس از آن با افزایش زاویه انحراف مقدار نیروی لازم برای شکست نمونه دارای شکاف افزایش می‌یابد. به‌طور کلی تفاوت معنی‌داری در نیروی لازم برای شکست نمونه‌های دارای شکاف باز و بسته نمی‌توان قائل شد. با توجه به اینکه در زاویه انحراف $27/2^\circ$ ، مد خالص II رخ می‌دهد و پس از آن ترک‌ها تحت مد ترکیبی I-II رشد می‌کنند می‌توان انتظار داشت که با توجه به افزایش زاویه انحراف ترک نسبت به راستای بار، تمایل نمونه برای شکست در کشش و به‌تبع آن نیروی لازم برای شکست افزایش می‌یابد.

۴-۴- بررسی توزیع لغزش در شکاف‌های بسته

در لحظه شکست دیسک‌هایی که دارای شکاف‌های بسته هستند، توزیع لغزش و جابجایی دو وجه شکاف نسبت به یکدیگر مورد ارزیابی قرار گرفته است. با اخذ تصاویری از لحظه شکست نمونه و با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری در برنامه DinoCapture 2.0 مقدار لغزش در دو وجه ترک برای شکاف‌های بسته بررسی شده است. تصویر بزرگنمایی شده از لغزش دو وجه ترک در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با اندازه‌گیری‌های انجام شده، نمودار توزیع لغزش در سطح شکاف بسته برای زاویه‌های انحراف مختلف در شکل (۱۳) ترسیم شده است. همان‌گونه که از نمودارها مشخص است با افزایش زاویه انحراف ترک نسبت به راستای بارگذاری، مقدار لغزش در سطح ترک افزایش می‌یابد، اما در زاویه صفر و 90° درجه به دلیل موقعیت خاص ترک نسبت به راستای بارگذاری، هیچ‌گونه لغزشی اتفاق نمی‌افتد. در زاویه β برابر با صفر، ترک در مد کششی خالص گسیخته می‌شود و بنابراین هیچ‌گونه لغزشی بین دو وجه ترک اتفاق نمی‌افتد. در این نمودارها مشخص است که لغزش در نوک شکاف برای تمامی حالت‌ها صفر است و با حرکت به سمت مرکز شکاف تقریباً به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

شد. نتایجی که از این بررسی‌ها به دست آمده است را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- برای زوایه‌های انحراف ترک نسبت به راستای بارگذاری که بزرگتر از زاویه $27/2^\circ$ (مد برش خالص) است، در شکاف‌های باز اثر شکاف در رشد ترک به تدریج کمتر و تاثیر گسیختگی کششی خود دیسک بیشتر می‌شود و در زاویه 90° تاثیر شکاف در فرآیند گسیختگی دیسک کاملاً از بین می‌رود. در نمونه‌های دارای شکاف بسته وجود شکاف در نمونه تاثیری مشابه حالت باز دارد با این تفاوت که در زوایه‌های 45° و 60° برخلاف شکاف باز که رشد ترک از داخل ترک و قبل از نوک اتفاق می‌افتد، ترک از نوک شکاف رشد و توسعه می‌یابد که شاید بتوان این موضوع را به اثر اصطکاک ایجاد شده در سطح شکاف نسبت داد. در هر دو حالت، وجود شکاف منجر به کاهش بیش از ۵۰ درصدی مقاومت نمونه می‌شود.

۲- مقدار ضریب شدت تنش برای مدهای شکست I, II و مد ترکیبی I-II، برای نمونه‌های دارای شکاف‌های باز محاسبه شد که نشان می‌دهد ماده مورد بررسی ترد است. ضریب شدت تنش مد I، برای زوایه‌های انحراف بزرگتر از $27/2^\circ$ ، مقداری منفی دارد که بیانگر این موضوع است که در این زوایا ترک تحت فشار قرار می‌گیرد.

۳- بررسی توزیع لغزش در سطح شکاف‌های بسته نشان می‌دهد که مقدار لغزش در نزدیکی مرکز شکاف بیشینه و در نوک ترک صفر می‌شود. برای حالت‌های بررسی شده در این پژوهش، توزیع لغزش در سطح ترک هماهنگی خوبی با نمودارهای ارائه شده برای گسل‌های واقعی نشان می‌دهد.

گسل‌ها را به عنوان ترک‌های شبه‌استاتیکی که اصطکاک رفتار می‌کنند، در نظر می‌گیرند. الگوی تغییر مکان در صفحه گسل به گونه‌ای است که جابه‌جایی گسل با سطح گسل‌ها تغییر می‌کند [39] و در نوک گسل صفر و معمولاً در نزدیکی مرکز سطح گسل به بیشینه می‌رسد.

در شکل (۱۴)، مثالی از لغزش در طول یک گسل واقعی ارائه شده است. با مقایسه نمودار شکل (۱۳) با نمودارهای شکل (۱۴)، به شباهت رفتار یک ترک اصطکاک با گسل می‌توان پی برد. لازم به ذکر است که مقدار محاسبه شده برای نمودارهای هر زاویه انحراف، از میانگین‌گیری اعداد به دست آمده از آزمایش روی ۳ نمونه در هر زاویه به دست آمده است.

شکل ۱۴. (الف) پروفیل جابجایی مورد انتظار مدل CFFT در مورد یک گسل یا زلزله بدون اندرکنش. (ب) و (ج) مثال‌هایی از گسل‌های واقعی که D نشان‌دهنده لغزش است. خط چین‌ها نشان‌دهنده تخمین‌های

باریک‌شوندگی در نوک گسل هستند [40]

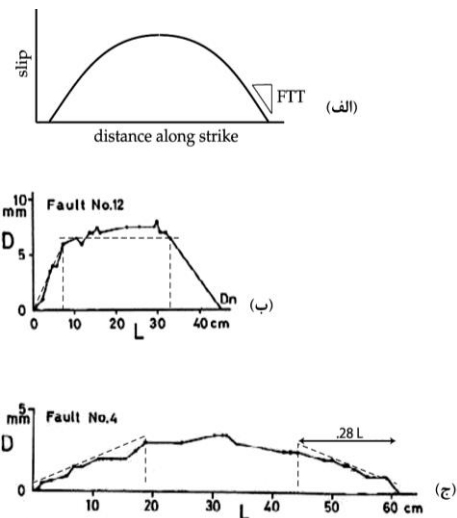


Fig. 14. (a) Expected displacement profile at a single fault without interaction and earthquake. (b) and (c) are examples of real faults, (D indicates slip) [40]

References

1. Yazdani, S., Yazdani, M., & Ahmadi M.T. 2008 Evaluation of geometrical characteristics of rock joints on hydraulic behavior and seepage through the abutments of concrete arch dams, *Hydraulic Journal*, Ser. 3, No. 1, 33-44, (In Persian).
2. Yazdani, S., & Yazdani, M. 2010 Evaluation of Hydromechanical Behavior of Jointed Rock Mass on Stability of Concrete Arch Dam Abutments,

۶- مراجع

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی روند توسعه ترک از شکاف‌های از پیش موجود باز و بسته در دیسک‌های بزرگ با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر دارای ترک سراسری مرکزی با زوایه‌های انحراف مختلف، تحت بارگذاری قطری پرداخته

- dam, *15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*, September, Lisbon, Portugal.
12. Mahdavi, A., & Yazdani, M. 2013 Numerical study of brittle behavior of hard rocks and its effects on wall deformation and plastic zone surrounding deep tunnels, *Sharif Journal -Civil Engineering*, Year 29-2, No. 2, 87-98, (In Persian).
 13. Wong, N.Y. 2008 Crack Coalescence in Molded Gypsum and Carrara Marble. Sc.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
 14. Yazdani, M., & Solgi, Kh. 2006 The landslide event in left bank of Seymareh dam project: the history, geotechnical conditions and remedy works, *22nd International Congress on Large Dams, June 18-23, Barcelona, Spain*.
 15. Willemsse, E. J. 1997 Segmented normal faults: Correspondence between three-dimensional mechanical models and field data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B1), 675-692.
 16. Martel, S. J., & Boger, W. A. 1998 Geometry and mechanics of secondary fracturing around small three dimensional faults in granitic rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B9), 21299-21314.
 17. Vermilye, J. M., & Scholz, C. H. 1999 Fault propagation and segmentation: insight from the microstructural examination of a small fault. *Journal of Structural Geology*, 21(11), 1623-1636.
 18. Kim, Y. S., Peacock, D. C. P., & Sanderson, D. J. 2003 Mesoscale strike-slip faults and damage zones at Marsalforn, Gozo Island, Malta. *Journal of Structural Geology*, 25(5), 793-812.
 19. Grant, J. V., & Kattenhorn, S. A. 2004 Evolution of vertical faults at an extensional plate boundary, southwest Iceland. *Journal of Structural Geology*, 26(3), 537-557.
 20. Cooke, M. L. 1997 Fracture localization along faults with spatially varying friction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B10), 22425-22434.
 21. Sasani, M., & Yazdani, M. 2010 Numerical simulation of strike-slip faults based on stick-slip behavior of faults, *The 5th International Symposium on In-Situ Rock Stress, Beijing, China*.
 22. Riazi, E., Yazdani, M., Alitalesh, M., & Shafiee, M.B. 2014 The Assessment of crack surface friction on crack tip's stress intensity factor (SIF) using XFEM., *In 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Minneapolis, MN, USA, 1-4 June*.
Sharif Journal -Civil Engineering, Year 26-2, No. 2, 69-78, (In Persian).
 3. Yazdani, S., & Yazdani, M. 2010 2D Numerical analysis of the stability of concrete arch dam abutments with emphasis on the roles of rock joints and water flow, *Engineering Geology*, Year 11, No. 1-2, 71-82, (In Persian).
 4. Yazdani, S., Yazdani, M., & Ahmadi, M.T. 2011 Importance of joint geometrical parameters on the safety of concrete arch dam abutments, *Modares Civil Engineering Journal*, Year 11, No. 1, 27-39, (In Persian).
 5. Kimata, H., Fujita, Y., Horii, H., & Yazdani, M. 2012 Dynamic Behavior of Concrete Gravity Dam on Jointed Rock Foundation During Large-Scale Earthquake, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, Volume 68, No.4, 891-898, http://doi.org/10.2208/jscejseee.68.I_891.
 6. Kimata, H., Horii, H., & Yazdani, M. 2013 Seismic Safety Evaluation of Concrete Arch Dams against Earthquake-Induced Failure of Jointed Rock Foundations (Japanese Title: 基礎岩盤の不連続面の進行性破壊を考慮したアーチ式コンクリートダムの耐震安全性評価), *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, Volume 69, No.4, 19-119, http://doi.org/10.2208/jscejseee.69.I_9.
 7. Ardeshiri-Lajimi, S., Yazdani, M., & Langroudi, A.A. 2015 Control of fault lay-out on seismic design of large underground caverns, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 50, 305-316, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.07.002>.
 8. Kim, H.M., Lee J.W., Yazdani, M., Tohidi, E., Nejat, H.M., & Park E.S. 2017 Coupled Viscous Fluid Flow and Joint Deformation Analysis for Grout Injection in a Rock Joint, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-12, <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1339-3>.
 9. Yazdani, M., & Horii, H. 2002 Application of damage indices for seismic safety assessment of arch dams against sliding and opening failure in jointed rock mass at abutment. *New Developments in Rock Mechanics*, October 10-12, Shenyang, China, 411-416.
 10. Kimata, H., Horii, H., & Yazdani, M. 2009 Dynamic Analysis of Crack Propagation in Concrete Gravity Dams with Jointed Rock Foundation, *Annual meeting of JSCE*, September 2-4, Fukuoka, Japan, (in Japanese).
 11. Kimata, H., Rungbanaphan, P., Fujita, Y., Horii, H., & Yazdani, M. 2012 Influence of jointed rock foundation on propagation behavior of earthquake induced crack in concrete gravity

35. Haeri, H., Marji, M. F., Shahriar, K., & Moarefvand, P. 2015 On the HDD analysis of micro crack initiation, propagation, and coalescence in brittle materials. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5), 2841-2852.
36. Dai, F., Xia, K., Zheng, H., & Wang, Y. X. 2011 Determination of dynamic rock mode-I fracture parameters using cracked chevron notched semi-circular bend specimen. *Engineering fracture mechanics*, 78(15), 2633-2644.
37. Ayatollahi, M. R., & Sistaninia, M. 2011 Mode II fracture study of rocks using Brazilian disk specimens. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(5), 819-826.
38. Wang, Q. Z., Feng, F., Ni, M., & Gou, X. P. 2011 Measurement of mode I and mode II rock dynamic fracture toughness with cracked straight through flattened Brazilian disc impacted by split Hopkinson pressure bar. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(12), 2455-2469.
39. Wang, Q. Z., Gou, X. P., & Fan, H. 2012 The minimum dimensionless stress intensity factor and its upper bound for CCNBD fracture toughness specimen analyzed with straight through crack assumption. *Engineering Fracture Mechanics*, 82, 1-8.
40. Awaji, H., & Sato, S. 1978 Combined mode fracture toughness measurement by the disk test. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 100(2), 175-182.
41. Sanchez; J. 1979 Application of the disk test to mode-I-II fracture toughness analysis. M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, U.S.A.
42. Atkinson, C., Smelser, R. E., & Sanchez, J. 1982 Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test. *International Journal of Fracture*, 18(4), 279-291.
43. Shetty, D. K., Rosenfield, A. R., & Duckworth, W. H. 1986 Mixed-Mode Fracture of Ceramics in Diametral Compression. *Journal of the American Ceramic Society*, 69(6), 437-443.
44. Krishnan, G. R., Zhao, X. L., Zaman, M., & Roegiers, J. C. 1998 Fracture toughness of a soft sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(6), 695-710.
45. Khan, K., & Al-Shayea, N. A. 2000 Effect of specimen geometry and testing method on mixed mode I-II fracture toughness of a limestone rock from Saudi Arabia. *Rock mechanics and rock engineering*, 33(3), 179-206.
46. Al-Shayea, N. A. 2005 Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I-II fracture. *Engineering Geology*, 81(1), 84-97.
23. Yazdani, M., & Sasani, M. 2012 Numerical simulation of frictional behavior of strike-slip North Tabriz fault using finite element method. *Modares Civil Engineering Journal*, Year 12, No. 2, 71-83, (In Persian).
24. Pollard, D. D., & Segall, P. 1987 Theoretical displacements and stresses near fractures in rock. *Fracture Mechanics of Rock*. *BK Atkinson*, 277-349.
25. Pollard, D. D., & Aydin, A. 1988 Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, 100(8), 1181-1204.
26. Aydin, A. 2000 Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Marine and petroleum geology*, 17(7), 797-814.
27. Yazdani, M., & Molla Ali, M. 2010 Numerical Modelling of Hydraulic Fracturing in Oil Reservoirs using Extended Finite Element. *Sharif Journal -Civil Engineering*, Year 26-2, No. 2, 69-78, (In Persian).
28. Cruikshank, K. M., Zhao, G., & Johnson, A. M. 1991 Analysis of minor fractures associated with joints and faulted joints. *Journal of Structural Geology*, 13(8), 865-886.
29. Ayatollahi, M. R., & Aliha, M. R. M. 2008 Mixed mode fracture analysis of polycrystalline graphite—a modified MTS criterion. *Carbon*, 46(10), 1302-1308.
30. Wang, Q. Z. 2010 Formula for calculating the critical stress intensity factor in rock fracture toughness tests using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(6), 1006-1011.
31. Dai, F., Chen, R., Iqbal, M. J., & Xia, K. 2010 Dynamic cracked chevron notched Brazilian disc method for measuring rock fracture parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(4), 606-613.
32. Haeri, H., Shahriar, K., Marji, M. F., & Moarefvand, P. 2014 Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 20-28.
33. Haeri, H., Shahriar, K., Fatehi Marji, M., & Moarefvand, P. 2014 On the crack propagation analysis of rock like Brazilian disc specimens containing cracks under compressive line loading. *Latin American journal of solids and structures*, 11(8), 1400-1416.
34. Haeri, H., Khaloo, A., & Marji, M. F. 2015 Experimental and numerical analysis of Brazilian discs with multiple parallel cracks. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8), 5897-5908.

- ASTM. 1984 Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens, Soil and rock, building stones. annual book of ASTM standards, Philadelphia, Pennsylvania Barton.
52. ASTM. 2008 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. ASTM International, West Conshohocken.
53. Barry, N. W., Raghu, N. S., & Gexin, S. 1992 Rock fracture mechanics principles design and applications.
54. [38] Atkinson, C., Smelser, R. E., & Sanchez, J. 1982 Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test. *International Journal of Fracture*, 18(4), 279-291.
55. Barnett, J. A., Mortimer, J., Rippon, J. H., Walsh, J. J., & Watterson, J. 1987 Displacement geometry in the volume containing a single normal fault. *AAPG Bulletin*, 71(8), 925-937.
56. Muraoka, H., & Kamata, H. 1983 Displacement distribution along minor fault traces. *Journal of Structural Geology*, 5(5), 483-495.
47. Al-Shayea, N. A., Khan, K., & Abduljawad, S. N. 2000 Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode (I-II) fracture toughness of a limestone rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), 629-643.
48. Ghazvinian, A., Nejati, H. R., Sarfarazi, V., & Hadei, M. R. 2013 Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11), 4435-4444.
49. Park, C. H., & Bobet, A. 2010 Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(14), 2727-2748.
50. ISRM. 1979 Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16(2), 135-140.
51. ISRM. 1978 Suggested Methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 99-103.

Investigation of Crack Growth in Rock-Like Brittle Material

Mahtab Alitalesh¹, Marjan Naeimabadi², Mahmoud Yazdani^{3*}

1-Ph.D., School of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- M.Sc., School of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Assist. Prof., School of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Myazdani@modares.ac.ir

Abstract

Understanding initiation and growth of cracks leads to better evaluation of rock masses behavior. Investigation of crack growth and propagation is noteworthy in geotechnical engineering, petroleum engineering, geology, seismology and many other sciences which encounter with rock fracture mechanics problems. Evaluation of rock slopes stability, design of retaining structures, design of tunnels, and prediction of flow path through rock masses, are some example of application of crack growth study in geotechnical engineering. By evaluating cracks growth, propagation and coalescence, faults seismic behavior can be understood. In general faults are considered as quasi-static cracks, so study of crack propagation under various loading conditions brings important information about faults. Many researchers studied crack growth in Brazilian disk shape specimen under diametrically compression loading. Previous research focused on open crack propagation and closed crack were infrequently included.

In this paper using molded gypsum, as a model material, crack growth in Brazilian disk shape specimens with pre-existing open and closed flaws are investigated. The dimension of specimens is 100 mm in diameter and 50 mm in thickness. Inserted open and closed flaws length is 30 mm. Open and closed flaws are inserted using 1 mm thickness steel shims and 0.05 mm thickness silicon tapes, respectively. In this study, the specimens engineering properties were determined by conducting uniaxial compression test and indirect tensile test on Brazilian disks. The experiments were conducted according to ISRM and ASTM standards. Uniaxial compressive strength, Poisson ratio, elastic modulus, and tensile strength of specimens are, respectively, $q_u=38$ MPa, $\nu=0.25$, $E=8.5$ GPa, and $\sigma_t=7$ MPa. Diametrical compressive loading was applied to the specimens in various inclination angles of flaws with respect to the loading direction. In this paper, influence of open and closed cracks on strength of the specimen is investigated. Fracture toughness of mode I, II and mixed mode I-II, are also determined using analytical solutions. Throughout the tests, slippage between closed crack surfaces is continually monitored by digital microscope. According to the curves of slip distribution along the crack length derived from laboratory data, there is a good agreement between slip distribution along closed flaws and that recorded from real faults by other researchers. Also, results of this study show that open and closed flaws reduce disks strength, significantly (i.e., more than 50%). Inclination angles of the flaw with respect to the loading direction affects crack propagation patterns. Generally, new wing cracks initiate from the flaw tips and then propagate toward the loading direction. Increase in the inclination angle leads to a reduction in the effect of open flaw on crack growth and for angles more than 27.2° (i.e., pure shear, mode II) new crack does not initiate from flaw tips. At inclination angle of 90° , flaw has no effect on crack propagation pattern and the disk fails under tensile splitting condition. In disks with closed flaws, new cracks initiate from flaw tips expect for the case of 90° which is the same as open flaws. For the material used in the study, mode I and II fracture toughness are calculated from experimental data and found to be equal to 0.250 and 0.258, respectively. The obtained values for fracture toughness indicate that used material is brittle. Also, the values of mode I fracture toughness for angles above 27.2° are negative which point to the fact that flaw tips in these angles are in compression and not in tension.

Keywords: Rock, Fracture Toughness, Brazilian Disk, Crack Growth, Pre-Existing Flaw