

مطالعه آزمایشگاهی رشد ترک در نمونه های گچی دیسکی برزلی ترک- دار و بررسی تاثیر شیب ترک در رفتار شکست آن

حسین میرزائی نصیرآباد^۱، محمود شریعتی^۲، رضا کاکایی^۳، سید محمد اسماعیل جلالی^۴

۱. استادیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۰۹۱۴۳۱۵۸۴۱۶، hm_nasr@yahoo.com
۲. دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳. دانشیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۴. استادیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

محیط های سنگی اغلب حاوی ترک های متعددی هستند و در بیشتر موارد این ترک ها رفتار مکانیکی آن را کنترل می کنند. در فرایند رشد ترک، اطلاع از میزان بار منجر به انشعاب ترک، زاویه انشعاب ترک، نوع مود رشد ترک، ضروری می باشد. شیب ترک تاثیر قابل توجهی در رفتار شکست محیط ترک دار دارد. در این مقاله با استفاده از مصالح گچی نمونه های دیسکی برزلی ترک دار با مقادیر مختلف شیب ترک تهیه شده و تحت بار فشاری قرار گرفته است. برای تمامی نمونه ها بار منجر به شکست نمونه، زاویه انشعاب ترک ها از نوک ترک اصلی و مود رشد ترک های جدید ثبت شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که وجود ترک مرکزی با طول یک سوم قطر دیسک، بسته به شیب ترک حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد مقاومت نمونه را کاهش می دهد و شیب ترک در میزان کاهش مقاومت تاثیر بسزایی دارد. بر مبنای نتایج بدست آمده، شیب صفر درجه بیشترین مقاومت و شیب ۴۵ درجه کمترین مقاومت را در برابر رشد ترک دارند. همچنین با افزایش شیب ترک میزان زاویه انشعاب ترک های جدید نسبت به راستای ترک اصلی کاهش می یابد.

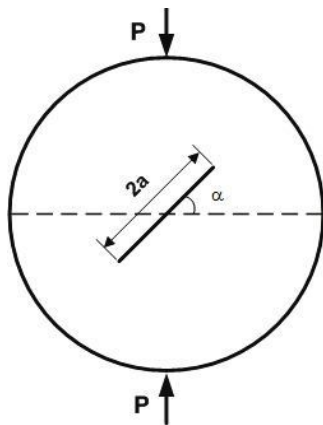
واژه های کلیدی: مکانیک شکست سنگ، دیسک برزلی ترک دار، نمونه گچی، زاویه انشعاب ترک

۱- مقدمه

در مطالعات مورد نظر، شامل روش های عددی المان محدود، المان مرزی و المان مجزا است. برای مطالعه محدود مکانیسم رشد و اتصال ترک ها در محیط های سنگی یا شبه سنگی تحت بار فشاری از المان محدود، استفاده شده است. [۱] - [۳]. در سال های اخیر به خاطر ماهیت مسائل انتشار ترک (مرزهای متغیر) و مشکلات مربوط به مش بندی روش المان محدود، برای تعیین میدان تنش، محاسبه ضرایب تمرکز تنش و مطالعه رشد و اتصال ترک ها در محیط های سنگی روش المان مرزی، یا شبه سنگی کاربرد فراوانی داشته است [۴] - [۷]. روش المان مجزا نیز قابلیت تحلیل محیط های سنگی ترک دار را دارد. [۸]. لازم به ذکر است، روش های عددی علی رغم قابلیت بالا و هزینه کم، در تحلیل انتشار و اتصال ترک ها در محیط های سنگی به خاطر فرضیات مختلف نیازمند اعتبارسنجی با مطالعات آزمایشگاهی هستند.

مطالعات آزمایشگاهی علی رغم هزینه بالا و زمان بر بودن، نتایج معتبر داشته و در بیشتر موارد برای ارزیابی دقت مطالعات عددی

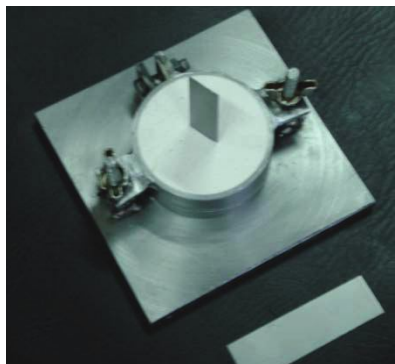
امروزه سازه های مختلف مهندسی معدن و یا عمران در محیط های سنگی احداث می شوند. محیط های سنگی اغلب حاوی ترک های متعددی هستند و در اثر بارگذاری ترک های موجود در محیط، رشد کرده، به هم متصل شده و منجر به شکست آن می شوند در علم مکانیک شکست رفتار شکست مصالح با استفاده از روش های مختلف نظیر روش های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مطالعه می شود. به دلیل ماهیت پیچیده رفتار شکست محیط های سنگی ترک دار و فرضیات محدود کننده روش های تحلیلی، مکانیسم رشد و اتصال ترک های سنگ به طور تحلیلی مطالعه نشده است. روش به کار برده شده در مطالعه نحوه انتشار و اتصال ترک ها در محیط های سنگی تحت انواع بارها؛ روش های عددی است و این بخاطر قابلیت بالای این روش ها است. لازم به ذکر است، روش های عددی مورد استفاده



شکل (۱): نمونه دیسکی حاوی ترک مرکزی شیب دار تحت بار فشاری

۲- تهیه نمونه های دیسکی ترک دار

برای مطالعه و بررسی تاثیر هندسه ترک (شیب ترک) در رفتار شکست نمونه ترک دار، نمونه های دیسکی از جنس گچ (ترکیب گچ و آب با نسبت وزنی ۳ به ۲) با قطر ۷۵ میلی متر، ضخامت ۳۰ تا ۳۲ میلی متر و با ترک مرکزی شیب دار به طول ۲۲/۵ میلی متر تهیه شدند. شکل (۲) نمونه های تهیه شده با زوایای مختلف شیب ترک در شکل (۳) نشان داده شده اند.



شکل (۲): قالب ساخت نمونه حاوی ترک شیب دار و نحوه ایجاد ترک در آن

نمونه ها به حداقل مقدار رسیده و در رفتار شکست آنها بی تاثیر است. با اندازه گیری وزن و حجم نمونه بدون ترک، وزن مخصوص مصالح گچی تشکیل دهنده نمونه ها، ۱/۰۲ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری شد.

بکار گرفته می شوند. همچنین این مطالعات علاوه بر اعتبارسنجی نتایج عددی، بطور مستقل و دقیق قادر هستند جنبه های مختلف مکانیسم انشعاب، انتشار و اتصال ترک ها را نمایان سازند. در مطالعات آزمایشگاهی مختلف، با استفاده از انواع مصالح سنگی یا شبه سنگی، مکانیسم رشد و اتصال ترک ها در نمونه های حاوی یک یا چند ترک، با هندسه های مختلف تحت بارهای فشاری یک محوری و دو محوری بررسی شده است. در این مطالعات انواع مصالح نظیر پلاستر پاریس [۹]، سنگ آهک [۱۰]، ماسه سنگ [۱۱]، گچ [۱۲] - [۱۴] و ماسه سنگ مصنوعی [۱۵] و ... استفاده شده است.

در حوزه مکانیک شکست سنگ، تعیین ضرایب تمرکز تنش به عنوان عوامل مخرب و چقرمگی شکست مود کششی و برشی به عنوان عوامل مقاومتی و ارزیابی آنها در قالب یک معیار شکست ضروری است. در مطالعات آزمایشگاهی مکانیک شکست سنگ به خاطر سهولت تهیه نمونه دیسکی نسبت به نمونه های مکعبی، نمونه دیسکی حاوی ترک شیب دار (شکل ۱) کاربرد متعددی دارد. این نوع نمونه در مطالعات متعدد عددی و آزمایشگاهی برای مطالعه تاثیر هندسه ترک در مکانیزم رشد آن [۱۶]، تعیین چقرمگی شکست سنگ ها [۱۷]، [۱۸] و ... بکار گرفته شده است. در این مقاله تاثیر هندسه ترک (شیب ترک)، در رفتار شکست نمونه های دیسکی حاوی ترک های شیب دار بررسی شده است. همانطور که اشاره شد برای شبیه سازی مصالح سنگی در موارد متعددی از گچ استفاده شده است. به این منظور، نمونه های مختلف با مقادیر مختلف شیب ترک از جنس گچ تهیه شده و رفتار شکست آنها به ازای مقادیر مختلف شیب ترک (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) تحت بار فشاری تک محوری به طور آزمایشگاهی مطالعه شده است. در این مطالعه قطر نمونه ۷۵ میلی متر، ضخامت آن ۳۰ میلی متر و طول ترک ۲۲/۵ میلی متر در نظر گرفته شده است.

بعد از ساخت نمونه ها با استفاده از قالب تهیه شده، نمونه ها به مدت ۳ روز در اون با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده می شوند تا آب خود را پس داده و خشک و ترد شوند. بعد از این مرحله رطوبت



شکل (۳): نمونه های دیسکی حاوی ترک مرکزی با شیب متغیر

۳- تعیین خواص مکانیکی نمونه ها

مقاومت کششی، ضریب ارتجاعی، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تعیین شدند. این پارامترها در جدول (۱) درج شده است.

با آزمایش های مختلف، خواص مکانیکی مصالح گچی تشکیل دهنده نمونه های آزمایشگاهی از قبیل: مقاومت فشاری تک محوری،

جدول (۱): خواص مکانیکی مصالح گچی مورد استفاده در مطالعات آزمایشگاهی

مقاومت فشاری	مقاومت کششی	ضریب ارتجاعی	ضریب پواسون	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی
۱۵/۷ MPa	۳/۱۷ MPa	GPa ۳/۳۳	۰/۱۹	۵/۳۲ MPa	۱۰

۴- بارگذاری نمونه ها

نمونه های تهیه شده با شیب های مختلف، در آزمایشگاه تعیین خواص مکانیکی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود به کمک دستگاه فشاری INSTRON با سلول بار به ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن تحت بار فشاری قرار گرفتند و رفتار شکست آنها ثبت شد (شکل ۴). بار فشاری اعمالی به طور تدریجی و با نرخ حدود ۲۰ نیوتن بر ثانیه افزایش داده شد. برای هر یک از مقادیر شیب دو نمونه یکسان تهیه و بارگذاری گردید و نتایج کیفی کاملاً یکسان و نتایج کمی خیلی نزدیک به هم ثبت شد.



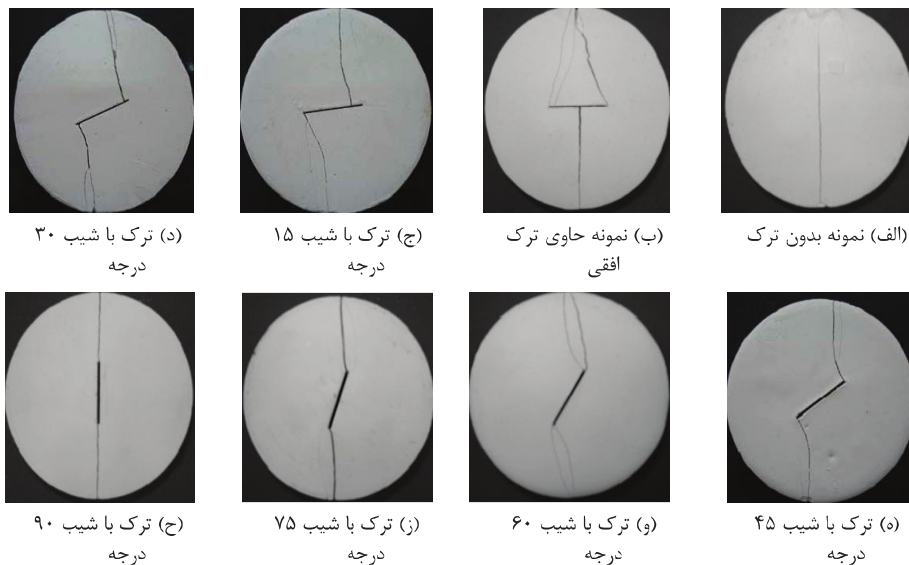
شکل (۴): بارگذاری فشاری نمونه های دیسکی با دستگاه INSTRON و با سلول بار به ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن

۵- رفتار شکست نمونه ها

نمونه های مختلف بسته به شیب ترک، با مکانیزم خاصی می-شکنند. در فرآیند شکست این نمونه ها، میزان بار منجر به شکست نمونه، محل انشعاب ترک های جدید، مود انتشار ترک های منشعب شده و رشد ناپایدار ترک های منشعب شده حائز اهمیت است. لازم به ذکر است تمامی ترک های جدید منشعب شده از نوع کششی بوده و به طور ناپایدار رشد می کنند. در شکل (۵) وضعیت نمونه ها بعد از شکست نشان داده شده است.

همچنین نمونه دیسکی بدون ترک تحت بار فشاری همان آزمایش برزبلی بوده و نمونه با مکانیزم کشش غیر مستقیم و در راستای قائم شکسته شد (شکل ۵-الف). این نمونه تحت بار فشاری ۷/۹ کیلو نیوتن می شکند. در نمونه دیسکی با ترک افقی، تحت بار فشاری ابتدا یک ترک از وسط ترک اصلی منشعب شده به مرز

پایینی می رسد. سپس ترک دیگری از نوک ترک اصلی منشعب می-شوند و به مرز بالایی می رسد (شکل ۵-ب). این نمونه تحت بار ۳/۱ کیلو نیوتن می شکند. در نمونه دیسکی ترک دار با شیب ۱۵ درجه، تحت بار فشاری از نزدیکی دو نوک ترک (نه دقیقاً نوک ترک)، ترک های کششی با زاویه ۱۱۲ درجه نسبت به امتداد ترک، منشعب شده به مرزهای بالایی و پایینی می رسند (شکل ۵-ج). این نمونه تحت بار ۲/۷۹ کیلو نیوتن می شکند. در نمونه دیسکی ترک دار با شیب ۳۰ درجه، تحت بار فشاری از دو نوک ترک، ترک های کششی با زاویه ۹۳ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند (شکل ۵-د). این نمونه تحت بار ۱/۷۵ کیلو نیوتن می شکند. در نمونه دیسکی ترک دار با شیب ۴۵ درجه، تحت بار فشاری از دو نوک ترک اصلی، ترک های کششی با زاویه ۸۰ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب می شوند و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند (شکل ۵-ه).



شکل (۵): شکست نمونه های دیسکی حاوی ترک با شیب متغیر تحت بار فشاری

می شکند. نمونه دیسکی با ترک قائم تحت بار فشاری همانند نمونه بدون ترک با مکانیزم کشش غیر مستقیم و در راستای قائم می شکند (شکل ۵-ح). این نمونه تحت بار ۲/۲۸ کیلو نیوتن می شکند. مقدار بار شکست نمونه های ترک دار و زاویه انشعاب ترک های کششی از نوک ترک اصلی برای مقادیر مختلف شیب ترک در جدول (۲) درج و در نمودارهای (۶-الف و ب) نشان داده شده است.

این نمونه تحت بار فشاری ۱/۴۵ کیلو نیوتن می شکند. در نمونه دیسکی ترک دار با شیب ۶۰ درجه تحت بار فشاری از دو نوک ترک، ترک های کششی با زاویه ۶۵ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب شده به مرزهای بالایی و پایینی می رسند (شکل ۵-و). این نمونه تحت بار ۱/۷۵ کیلو نیوتن می شکند. در نمونه دیسکی ترک دار با شیب ۷۵ درجه تحت بار فشاری، از دو نوک ترک، ترک های کششی با زاویه ۳۴ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند (شکل ۵-ز). این نمونه تحت بار ۲/۰۵ کیلو نیوتن

جدول (۲): میزان بار شکست و زاویه انشعاب ترک های کششی برای مقادیر مختلف شیب ترک

زاویه ترک	۰	۱	۳	۴	۶	۷	۹
بار شکست (کیلو نیوتن)	۳	۲/۹	۱/۱	۱/۵	۱/۵	۲/۵	۲/۸
زاویه انشعاب (درجه)	-	۱۲	۳	۰	۵	۴	۰

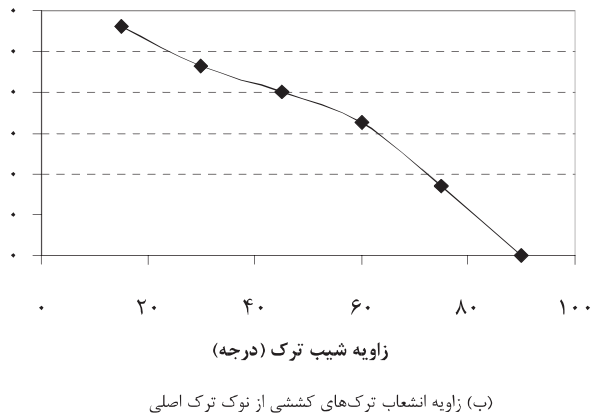
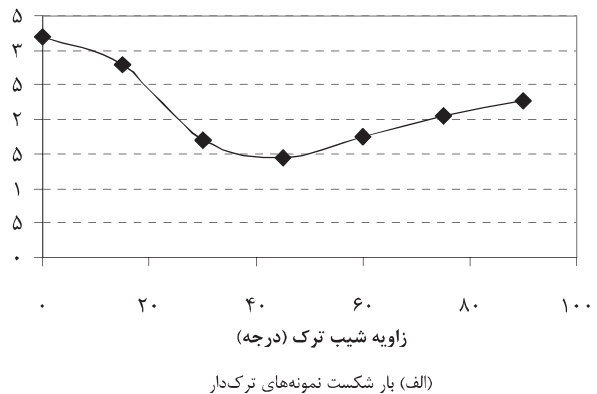
آزمایشگاهی مطالعه گردید. نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- به خاطر وجود ترک در محیط های سنگی، مقاومت توده سنگ به مراتب کمتر از مقاومت ماده سنگ است.
- در نمونه های دیسکی به خاطر وجود ترک با طول یک سوم قطر نمونه، بسته به شیب ترک، مقاومت فشاری تک محوری، حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد کاهش می یابد.
- در نمونه های دیسکی ترک دار، نمونه حاوی ترک با شیب ۴۵ درجه کمترین و نمونه حاوی ترک با شیب صفر درجه بیشترین مقاومت را دارند.
- در تمامی نمونه های ترک دار با ترک شیب دار، تحت بار فشاری متمرکز، از نوک ترک ها، ترک های کششی، منشعب و به طور ناپایدار رشد می کنند و راستای آنها به راستای بارگذاری متمایل می شود.
- با افزایش شیب ترک، زاویه انشعاب ترک های کششی نسبت به امتداد ترک اصلی، کاهش می یابد.

۷- منابع

- [1] Ingraffia A.R.; "Theory of crack initiation and propagation in rock", In: Atkinson, B.K. (Ed.), Fracture Mechanics of Rock, Geology Series. Academy Press, New York, pp. 151-208, 1987.
- [2] Tasdemir M.A.; Maji A.K.; Shah S.P.; "Crack propagation in concrete under compression", Journal of Engineering Mechanics, 116 (5), pp. 1058-1076, 1990.
- [3] Reyes O.; Einstein H.H.; "Failure mechanism of fractured rock - A fracture coalescence model", Proceedings 7th International Congress of Rock Mechanics, 1, pp. 333-340, 1991.
- [4] Shen B.; Stephansson O.; "Modification of the G-criterion for crack propagation subjected to compression", Engineering Fracture Mechanics, 47(2), pp. 177-189, 1994.
- [5] Bobet A.; Einstein H.H.; "Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material", Int. J. Fract., 92, pp. 221-252, 1998.
- [6] Dobroskok A.; Ghassemi A.; Linkov A.; "Extended structural criterion for numerical simulation of crack propagation and coalescence under compressive loads", International Journal of Fracture, 133, pp. 223-246, 2005.
- [7] Fatehi M.M.; Hosseini Nasab H.; Kohsary A.H.; "On the uses of special crack tip elements in numerical rock fracture mechanics", International Journal of Solids and Structures, 43, pp. 1669-1692, 2006.
- [8] Kemeny J.; "Time-dependent drift degradation due to the progressive failure of rock bridges along discontinuities", Rock Mech Rock Sci, 42, pp. 35-46, 2005.
- [9] Lajtai, E.Z.; "Brittle fracture in compression", International Journal of Fracture, 10(4): pp.525-36, 1974.
- [10] Ingraffia A.R.; Hcuze FE.; "Finite element models for rock fracture mechanics", Int J Num Anal Methods Geomech, 4: pp.25-43, 1980.
- [11] Petit, J.; Barquins, M.; "Can natural faults propagate under Mode II conditions?", Tectonics, 7(6): pp.1243-56, 1988.
- [12] Shen, B.; "Mechanics of fractures and intervening bridges in hard rock", Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Division of Engineering Geology, 1993.
- [13] Bobet, A.; Einstein, H.H.; "Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material", International Journal of Fracture, 92: pp. 221-52, 1998.
- [14] Sagong, M.; Bobet, A.; "Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39: pp. 229-41, 2002.
- [15] Wong, R.H.C.; Chau, K.T.; Tang C.A.; Lin, P.; "Analysis of

با توجه به اینکه نمونه دیسکی بدون ترک تحت بار ۷/۹ کیلو نیوتن، شکسته است؛ نتایج جدول (۲) بیانگر این است که وجود ترک مرکزی با طول یک سوم قطر دیسک، بسته به شیب ترک حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد مقاومت نمونه را کاهش می دهد و شیب ترک در میزان کاهش مقاومت تاثیر بسزایی دارد.



شکل (۶): الف) بار شکست نمونه های ترک دار ب) زاویه انشعاب ترک های کششی از نوک ترک اصلی

بر مبنای نتایج به دست آمده شکل (۶-الف) شیب ۱۵ درجه بیشترین مقاومت و شیب ۴۵ درجه کمترین مقاومت را دارد. با توجه به شکل (۶-ب) که مقدار زاویه انشعاب ترک های کششی را به صورت تابعی از زاویه شیب ترک نشان می دهد، می توان نتیجه گرفت که با افزایش شیب ترک میزان زاویه انشعاب ترک های کششی کاهش می یابد.

۶- نتیجه گیری

مطالعات آزمایشگاهی علی رغم هزینه بالا و زمان بردن، نتایج معتبر داشته و در اکثر موارد برای ارزیابی دقت مطالعات عددی به کار گرفته می شوند. در این مطالعه، نمونه های دیسکی حاوی ترک شیب دار با مقادیر مختلف شیب ترک، از جنس گچ تهیه شد و رفتار شکست آنها به ازای مقادیر مختلف شیب ترک (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) تحت بار فشاری تک محوری به طور

crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part I: experimental approach", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 38: pp. 909-24, 2001.

[16] Al-Shayea N.; "Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I-II fracture", Engineering Geology, 81, pp. 84-97, 2005.

[17] Liu H., Y.; Kou S., Q.; Lindqvist P., A.; Tang C., A.; "Numerical Modelling of the Heterogeneous Rock Fracture Process Rock Mech. Rock Engng., 40 (2), Using Various Test Techniques", pp. 107-144, 2007.

[18] Chang S., H.; Lee C.; Jeon S.; "Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens", Engineering Geology, 66, pp. 79-97, 2002.