



مرکز بررسی‌ها و مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



بررسی فشار مؤثر در یک ترک سنگی «معرفی یک مدل کوپلاژ هیدرومکانیکی تجربی و تعیین فاکتور آن»

دکتر محمد حاجی ستوده

گروه آب دانشکده صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

۱- مقدمه

یک محیط ترکدار مرکب از یک شبکه ترکها و قطعات پیوسته سنگی است. شبکه ترکها تأثیر عمیقی بر رفتار محیط و مشخصات آن میگذارد که مطالعه آن در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری بوده است. شبکه ترکها توسط خصال و مشخصات یک یا چند ترک تعیین میگردد. مهمترین خصال این شبکه عبارت است از تعداد دسته ترکها و سمت و فاصله هر دسته ترک و تعداد ترک در واحد حجم (دانسیته ترکها). هر دسته ترک با یک ترک معرفی میگردد. مشخصات مهم این ترک عبارت از طول ترک، عرض یا باز شدگی ترک، شکل ترک، زبری آن و پر شدگی ترک و خصوصاً پارامترهای معرفی کننده پاسخ ترک در قبال بار گذاریهای مکانیکی و یا هیدرو مکانیکی می‌باشند.

موضوع این مقاله در خصوص رفتار هیدرو مکانیکی این درز منفرد می‌باشد. رفتار ترکها تحت بارهای برشی یا عمودی بنحو گسترده‌ای در سالهای اخیر بررسی شده و همچنان میدان تحقیقات وسیعی را شامل است لیکن این رفتار در حالتی که علاوه بر بارهای محیطی در داخل درز نیز فشار میان حفره‌ای موجود باشد مستقلاً کمتر مطالعه شده است و هر جا که به آن نیاز بوده از دیدگاههای نظری مکانیک خاک و یا محیطهای متخلخل استفاده شده است.

طی مطالعه اخیر بدواً بصورت تجربی و فقط در زیر بارهای عمودی (بار برشی صفر) پاسخ درز برداشت شده و با داشتن این اطلاعات عینی متناسب با رفتار ترک مدل ریاضی مناسب آن جستجو شده است. بدین منظور درز سنگی در محیط گرانیت، مرمر و شنیست مطالعه شده است که در این مقاله نتایج مربوط به ترک مرمر ارائه می‌شود.

۲- مشخصات و آماده نمودن نمونه‌ها و تجهیزات بکار رفته برای اجرای آزمایشات

نمونه قطعات استوانه‌ای به قطر ۶۵ و به ارتفاع تقریبی ۱۲۰ میلیمتر بودند که به کمک روش آزمون برزیلی در زیر پرس یک ترک طولی در آن ایجاد شده بود. ابعاد دقیق و محل نصب گیرنده‌ها به میلیمتر در شکل ۱

نشان داده شده است. این تمهیدات به ما امکان اندازه گیریهای زیر را میداد:

- برآورد باز و بسته شدن درز،
 - اندازه گیری فشار منفذی در نقاط مختلف درز،
 - اندازه گیری کرنش در نقاط مختلف درز،
 - اندازه گیری دبی و تغییرات آن در اثر تغییرات فشار تزریق در میدان فشار هماور ثابت و بالعکس.
- تجهیزات ساخته و پرداخته شده شامل موارد زیر بود:
- یک کپسول فشار هماور تا ۲۰۰ MPa
 - دو پمپ برای تنظیم فشار هیدرو استاتیکی همآور و فشار تزریق یا میان حفره‌ای
 - یک تابلو از لوله‌های مویینه به اقطار مختلف جهت اندازه گیری مایع تزریق شده و یا زهکشی شده در فاصله زمانی معین
 - یک مرکز اندازه گیری و یک رایانه جهت اندازه گیری و انبار همزمان فشارها، کرنش‌ها، تغییر مکانها و زمان.

۳- مشاهدات تجربی آزمایشات

دو نوع از آزمایش‌ها که برای تعیین فاکتور اندر کنش (کوپلاژ) بکار رفته، در اینجا ارائه میگردد.

آزمایش نوع اول:

به آزمایشاتی میگوییم که در آن فشار منفذی صفر بوده اندازه گیری تغییرات عرض ترک در اثر تغییرات بار هماور مورد نظر است. وسیله اندازه گیری مرکب از شش تغییر مکان سنج (LVDT) است که دو به دو در سه تراز مختلف به صورت متقابل نصب بوده تغییر مکانها را اندازه گیری میکنند (شکل ۱). نتایج آزمایشها طی چهار دوره بارگذاری و باربرداری روی ترک مرمر در شکل ۲ نشان داده شده است. این آزمایشها نکات زیر را بر ما آشکار میکند:

- ۱- گیرنده‌های تغییر مکان در ترازهای مختلف، در ازای هر تغییر بار عمودی هماور، در هر دوره بارگذاری تغییر مکانهای مختلفی را ثبت میکنند. این اختلاف خصوصاً بین صفر تا یک MPa بیشتر است که میتواند مبین تغییر مکانهای موضعی در اثر انطباق طرفین درز باشد. آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است میانگین این مقادیر است که بعنوان تغییر مکان ترک اختیار میشود.
- این رفتار با معادلات گوناگونی از جمله مدل (۱۹۷۶) Goomand نشان داده‌اند.

$$\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0} = A \left(\frac{V - V_0}{V_m - V_0} \right)^t \quad (1)$$

در این رابطه σ تنش هماور و V تغییر مکان درز بوده A و t پارامترهای مدل هستند. زیرنویس (۰) بیانگر مقادیر اولیه و V_m نشان دهنده حد تغییر مکان هنگام بسته شدن کامل درز است.

۲- رفتار عمومی شکاف شبیه به یک سهمی است که در یک دوره باربرداری و بارگذاری بر هم منطبق بوده و تشکیل حلقه‌ای میدهد که مقدار انرژی ذخیره نشده در داخل محیط و شکاف را نشان میدهد (در اثر اصطکاک دو لبه درز و یا خرد و له شدن زبری سطح شکاف و یا رفتار خمیری دندانه‌های آن). این حلقه در دوره‌های بعدی تکرار پذیری بیشتری یافته و از سطح داخلی آن کاسته میشود.

آزمایش نوع دوم آزمونی است که اثر متقابل فشار هماور و فشار منفذی در عرض ترک را با آن میتوان دنبال نمود. در این آزمایش ابتدا نمونه تحت فشار هماور معینی مثلاً 10 MPa قرار داده میشود. پس از آن در داخل شکاف با تزریق، فشار منفذی یکنواختی برقرار نموده با تغییر این فشار یکنواخت، تغییرات عرض ترک در مقابل تفاضل فشارهای هماور و منفذی استخراج میشود. حاصل منحنیهای نشان داده شده در شکل ۳ خواهد شد که چهار نمونه از این آزمایشها را در فشار هماور ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و 25 MPa در مسیرهای صعودی و یا نزولی تفاضل فشارهای فوق نشان میدهد.

۴- وضع مفهوم «فشار مؤثر» و «نشانه اندرکنش ترک»

بدواً با نظر به تعریف فشار مؤثر در مکانیک خاک (فرمول ترزاقی $P_c - P_f = P_{eff}$) و در مکانیک محیطهای متخلخل (فرمول بیو $\alpha P_c - \alpha P_f = P_{eff}$: $\alpha < 1$) مفهوم فشار مؤثر را میتوان تعمیم داد. بطور کلی چنانچه D پاسخ ترک به فشار هماور P_{c0} و با فشار منفذی صفر در مورد کم دلخواهی از ترک باشد، در صورتیکه فشار هماور P_c و فشار منفذی P_f همان تحریک D را در آن کم ایجاد کند، فشار مؤثر P_{eff} در اثر حرکت همان فشار P_{c0} خواهد بود. بنابراین و بطور کلی میتوان نوشت:

$$D(P_c, P_f) = D(P_c, 0) \Leftrightarrow P_{eff}(P_c, P_f) = P_{c0}(2)$$

با این تعمیم فشار مؤثر برای یک حالت واحد به کم مربوطه نیز بستگی مییابد. مثلاً اگر تحت فشار هماور و فشار منفذی معینی کمیات مورد نظر تراوایی و تغییر مکان باشند هیچ ضرورتی ندارد که فشار مؤثر در هر دو مورد مساوی باشد.

این تعمیم وضوح زیادی به تعریف فشار مؤثر داده به مدلهای حاصل از آن کارآیی بالایی میبخشد بنابراین توجه دقیق به آن اهمیت زیادی دارد. نظر به همین تعمیم ما را قادر ساخت تا برای حل مسئله اندرکنش (کوپلاژ) در درزها، از طریق مقایسه آزمایشات نوع اول و دوم راهی را جستجو کنیم. شکل ۴ چگونگی این مقایسه را نشان میدهد.

در شکل ۴ خط پر، تغییر مکانهای درز را در یک آزمایش نوع یک در مقابل تغییرات فشار هماور تا ۱۵ MPa را نشان میدهد و خط چین یک آزمایش نوع ۲ را تحت فشار هماور ۱۵ MPa نشان میدهد. در این منحنی محور طولها تغییر مکان و محور عرضها تفاضل فشارهای هماور و منفذی را نشان میدهند. برای اجرای این آزمایش پس از برقراری ۱۵ MPa فشار هماور، با بستن شیر زهکشی فشار منفذی در داخل شکاف برقرار میشود که با افزودن آن منحنی فوق حاصل میشود. بنابراین تغییرات فشار روی منحنی ۱ تغییرات فشار هماور و روی منحنی ۲ تغییرات فشار منفذی است.

اینک چنانچه به تعریف فشار مؤثر برگردیم پر واضح است که روی منحنی ۱ فشار همان فشار مؤثر است و اگر در آزمایش نوع ۲ بتوان فشار مؤثر را پیدا کرد نمایش نتایج تغییر مکان بر حسب فشار مؤثر در این دو نوع آزمایش و در مسیرهای متناظر، میبایست بر یکدیگر منطبق گردند.

در آزمایش نوع ۲ هنگامی که فشار منفذی صفر است در شرایط متناظر، نقطه‌ای متناظر با آزمایش نوع ۱ دیده میشود که می‌توان آن را مبنای مقایسه این دو نوع آزمایش قرار داد (در شکل ۴ فشار ۱۵ MPa). حال چنانچه کمی که می‌خواهیم فشار مؤثر را در رابطه با آن تعریف کنیم، کم تغییر مکان باشد، برای یافتن فشار مؤثر کفایت از مبنای فوق، تغییر مکان واحدی مثل ΔV را در این دو نوع آزمایش ملاحظه کنیم. دیده میشود که ΔP_1 تغییر متناظر در محور عرضها در آزمایش نوع ۱، با ΔP_2 تغییر متناظر در محور عرضها در آزمایش نوع دو مساوی نیست. مقدار فشار در این نوع آزمایش از رابطه $P_{eff} = P_c - P_f$ منظور شده که P_f فشار منفذی و P_c فشار هماور میباشد. اگر فرض شود که فشار مؤثر از رابطه $P_{eff} = P_c - bP_f$ بدست می‌آید، با معلوم شدن b ، فشار مؤثر معین خواهد شد. در اینجاست که با مقداری توجه به تعاریف فوق و روابط ۲ دیده میشود که:

$$b = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \quad (3)$$

با ثابت نگهداشتن مبنا و با تغییر ΔV ، مقدار b در نقاط مختلف آزمایش بدست خواهد آمد. در ادامه مطالعه بجای ضریب b از مکمل آن $a = 1 - b$ استفاده شده است. a میتواند ضریب عدم تاثیر فشار منفذی تلقی شود و در محدوده وسیعی از آزمایش میتواند به نسبت سطح بهم چسبیده ترک به سطح کل آن بسیار مرتبط و نزدیک باشد. مفید به یادآوری است که این نسبت خود نشانه‌ای از زبری سطح است که در بسیاری از مباحث مکانیک ترک، داخل میشود و تعیین آن عملاً در اغلب موارد با دشواری زیادی روبرو است.

در قدم بعدی محاسبه ضریب a در نقاط دیگر نشان دهنده بستگی آن به فشار منفذی بود. در شکل ۵ هر منحنی حاصل مقایسه یک آزمون نوع ۲ با چهارمین دوره بارگذاری و باربرداری ترک مرمز است که مقدار a را در مقابل فشار مؤثر نشان میدهد. در هر آزمایش نوع ۲ فشار هماور ثابت است که در مقابل هر منحنی نشان داده شده است. مقدار فشار مؤثر هنگام مقایسه با آزمایش نوع ۱ از روی آن قرائت شده است. همانطور که شکل ۵ نشان میدهد منحنیهای حاصل شمایل خطوط مستقیمی را دارند که از مبدا مختصات میگذرند و هر چه فشار هماور کمتر باشد شیب آن کمتر است. بدینگونه اگر شیب متوسط خطی ϕ باشد میتوان آنرا با معادله

$$P_{eff} = \phi a \quad (4)$$

مدل نمود. ϕ را نشانه ضریب عدم تأثیر فشار منفذی میتوان نامید. ملاحظه گردید که این نشانه به فشار هماور آزمایش نوع ۲ مربوطه بستگی داشته این ارتباط برای کلیه آزمایشها روی ترک مرمر در شکل ۶ نشان داده شده است. منحنی حاصل باز با یک خط گذرنده از مبدا قابل تشبیه بوده چنانچه شیب متوسط آن ζ باشد معادله حاصل چنین خواهد بود:

$$\phi = \zeta P_c \quad (5)$$

از تلفیق روابط ۳ و ۴ و ۵ در رابطه $P_{eff} = P_c - (1-a)P_f$ فشار مؤثر را از رابطه زیر میتوان بدست آورد.

$$P_{eff} = \frac{\zeta(P_c - P_f)}{\zeta P_c - P_f} = f(V) \quad (6)$$

ζ فاکتور بسیار جالبی است که ما را قادر میسازد که با استفاده از رابطه ساده فوق اثرات همزمان فشارهای هماور و منفذی را در برآورد فشار مؤثر در یک ترک، لحاظ کنیم. این فاکتور با عنوان فاکتور اندرکنش (کوپلاژ) ترک میتواند بصورت یکی از خصایص آن اختیار گردد.

مدل $P_{eff} = f(V)$ میتواند بکمک آزمایش نوع ۱ و با استفاده از یکی از مدلهای رفتار ترک تحت بار هماور، مثلاً رابطه ۱ معلوم گردد. بدین گونه و با تعاریف فوق رفتار ترک تحت بارهای عمودی هماور و منفذی بار رابطه تغییر مکان، فشار مؤثر، مستقل از نوع آزمایش ۱ یا ۲ و به شکل واحدی قابل ارائه است.

۵- مراجع

1. Long, J.C.S., J.S., Romer, C.R. Wilson & P.A. Witherspoon 1982. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. Water resources research 18, PP 645-658.
2. Baecher, G.B. 1983. Statistical analysis of rock masses fracturing \. Jour. of the int. Association for mathematical Geology vol. 15 no2:329-348.
3. Goodman, R.E. (1976). Method of geological engineering in discontinuous rocks. West Publishing Company.
4. Bandis S.C., A.C. Lumsden & N. Barton (1983). Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abst. 20:249-268.
5. Gentier S. (1986). Morphologie et comportement hydromecanique d'une fracture naturelle dans un granite sous contrainte normal. Th. doctorat: et 495-541.
6. Saeb S., Amedei B. (1990). Constutive model of rock joints. Proc. Int. Symp. rock joints, Loen, Norway: 581-594.

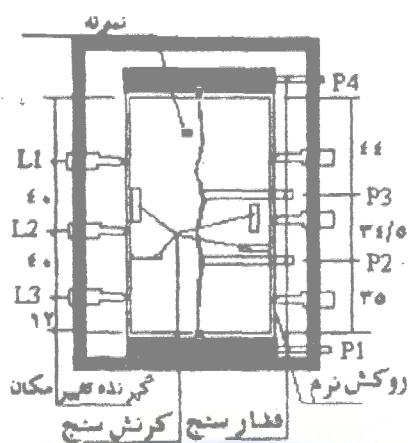
7. Sibai M. (1990). "Etude de L'interaction fluide squelette dans les roches", these de doctorat, universite de LILLEI, 27 avril 1990.

8. Haji Sotoudeh, M., M. Sibai, J.P. Henry (1995). Determination experimentale du couplage ??; hydrom ecanique dans des joints rocheux. Ates du 12^e Congres Francais de Mecanique, Strasbourg. 217-221.

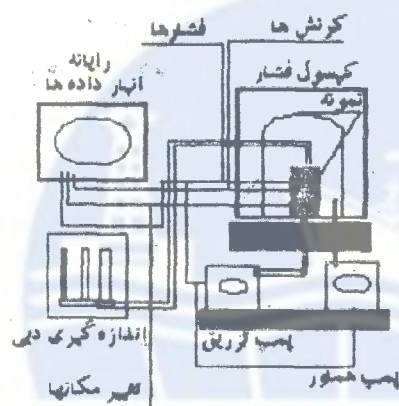
9. Haji Sotoudeh, M., M. Sibai, J.P. Henry (1995). Experimental study of hydromechanical behavior of rock joint. Proceeding of the second international conference on mechanics of jointed and faulted rock, MJFR2, Supplementary volume, Vienne, Austria: 31-36.

10. Haji Sotoudeh, M. (1995). Etude experimentale et modelisation du couplage hydromecanique de joints rocheux. these de doctorat, universite de LILLE I, France.





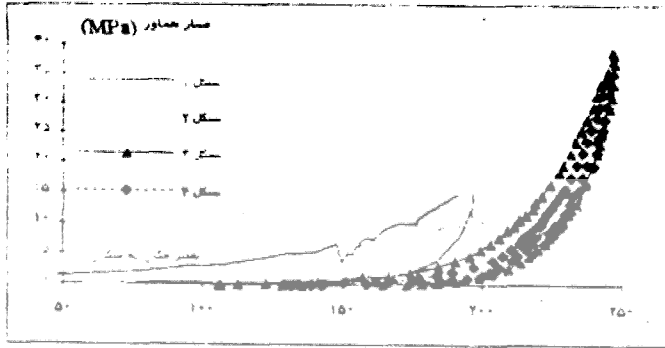
ب: تجهیز و تهیه نمونه



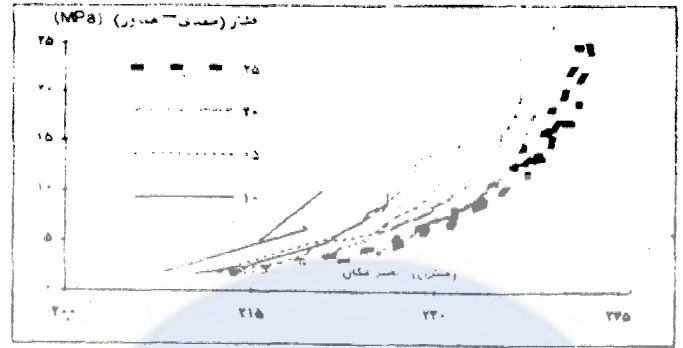
ا: تجهیزات و ابزار اجرای آزمایشات

شکل ۱: مشخصات نمونه و وسایل نگار رفته برای اجرای آزمایشات

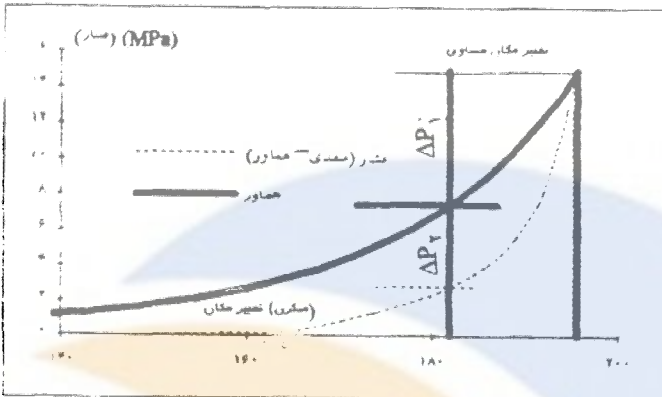
ICOPMAS



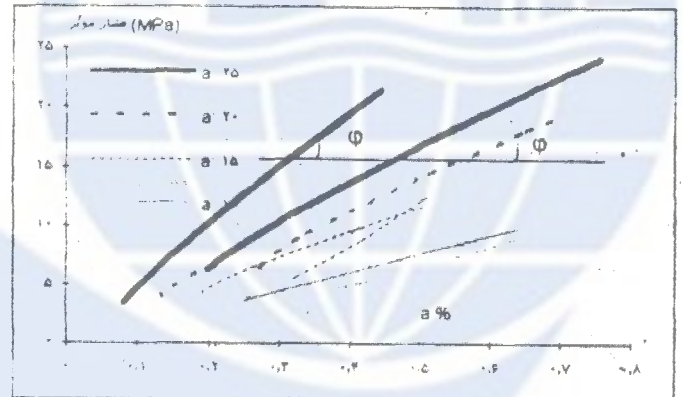
شکل ۲: تیر مک‌های سگاف در اثر
تیرات فشار هم‌طور بی چهار نوره بارگذاری و بار برداری



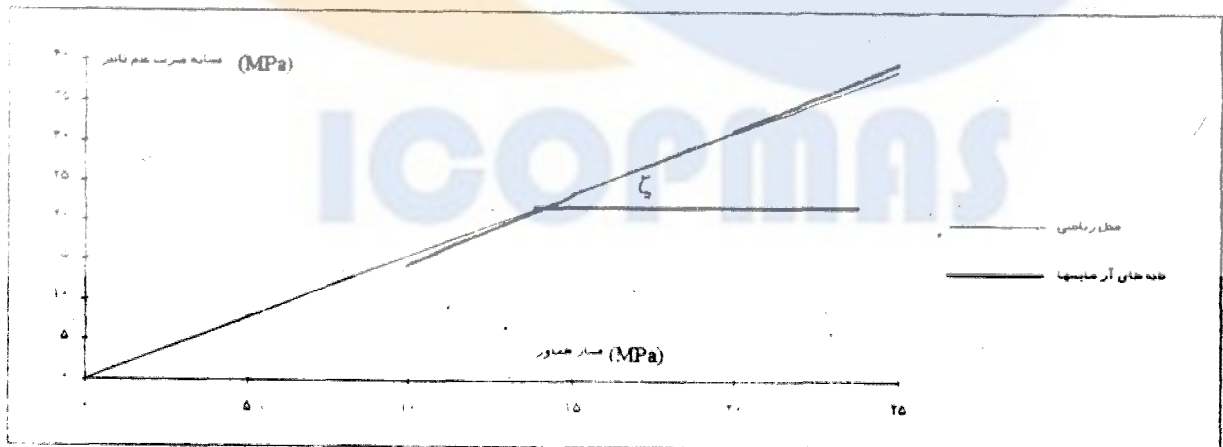
شکل ۳: تیر مک‌های سگاف در اثر تیرات فشار مندی
در چهار ارجاس مختلف، تیر هم‌طور در هر ارجاس باشد.



شکل ۴: مقایسه ارجاسی نوع ۱ و نوع ۲



شکل ۵: تیرات تیرت عدم مادی تیر هم‌طور مندی در جهات تیر
مندی، تیر هم‌طور در هر ارجاس باشد.



شکل ۶: مقایسه سگاف تیرت عدم مادی، تیر هم‌طورهای مختلف

Survey on the Effective Pressure in a Stone Crack

"Introducing an Experimental Hydro-mechanical Coupling and Determining Its Factors"

M. H. Sotoude, Ph.D.

Water Department of the Water and Power Faculty

Abstract

A cracked environment is a combination of crack networks and coherent stone segments, and the network has a deep impact on the environment behavior and its characteristics, which is determined by the characteristics of one or more cracks. The most significant characteristic of this network is that from the number of crack sets, their direction, their distance from each other and the number of cracks per volume unit (crack density); each crack set is introduced with a single crack. Important features of this crack are: length, width or dehiscence, shape, roughness, congestion and especially the introducing parameters of the crack response to the mechanical or hydro-mechanical loadings. This article is about the hydro-mechanical behavior of this single crack. Crack behavior under shear or vertical loads has been vastly studied in recent years and still is. However, it has been less studied in conditions with intra-crack pressures along the environmental loads, and where necessary, the theoretical soil or porous environments mechanics were used. Primarily, the crack response was experimentally obtained only for vertical loads (zero shear load) and with genuine information proportionate to crack behavior, an adequate mathematical model were investigated. Stone cracks in granite, marble and schist environments were studied, and the results for marble cracks are presented in this article.

Keywords: crack environment; hydro-mechanical coupling; shear pressure