



مکانیسم انتشار و اتصال ترک‌ها در محیط‌های سنگی ترد تحت اثر بارهای فشاری

حسین میرزائی نصیرآباد^{۱*}، رضا خالوکاکی^۲، بهروز حسینی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری معدن دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۲- استادیار دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۳- دانشیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود

E-mail: hmirezaii@Shahroodut.ac.ir

چکیده

در این مقاله مکانیسم انتشار و اتصال ترک‌ها تحت بارگذاری فشاری بررسی شده است. برای مطالعه انتشار ترک واحد، یک ترک با شیب ۴۵ درجه در نظر گرفته شده و تحت بارگذاری فشاری توزیع مولفه‌های تنش در مجاورت نوک ترک تعیین شده و بر اساس نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی مسیر انتشار ترک بحث شده است. برای مطالعه مکانیسم اتصال ترک‌ها تحت بار فشاری، نمونه‌های حاوی دو ترک در نظر گرفته شده و به ازای مقادیر مختلف شیب ترک‌ها و شیب خط واصل دو ترک، مراحل انتشار و اتصال ترک‌ها بر مبنای نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. تحت بارگذاری فشاری، از نوک ترک‌ها ابتدا ترک‌های کششی و سپس ترک‌های برشی منتشر می‌شوند. ترک‌های برشی تقریباً در امتداد درزه‌ها و ترک‌های کششی تقریباً در راستای عمود بر امتداد ترک منشعب می‌شوند.

واژگان کلیدی: محیط سنگی درزه‌دار، توزیع تنش، انتشار ترک، اتصال ترک، ترک‌های کششی و برشی

مقدمه

پایداری سازه‌هایی نظیر سد، تونل، پل، راه و... که در یک بستر سنگی احداث می‌شوند، به خصوصیات مهندسی زمین شناسی سنگهای بستر وابسته می‌باشد. در مقیاس مهندسی توده سنگ از مجموعه ماده سنگ و انواع ناپوستگی‌ها نظیر درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی، ریز ترک‌ها و... تشکیل شده است. در مکانیک شکست سنگ به این ناپوستگی‌ها، شکستگی اطلاق می‌شود. پایداری یک محیط سنگی درزه‌دار تحت انواع بارگذاری‌ها به انتشار یا عدم انتشار شکستگی‌ها یا ترک‌های آن بستگی دارد. وقتی محیط سنگی درزه‌دار تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، در نوک شکستگی‌های آن تمرکز تنش بوجود آمده و بسته به میزان چقرمگی شکست^۱ سنگ، ممکن است شکستگی‌ها گسترش یافته و با اتصال^۲ آن‌ها محیط سنگی گسیخته شود. برای تحلیل پایداری و در صورت لزوم طراحی سیستم نگهداری سازه‌های مهندسی، لازم است رفتار ژئومکانیکی بستر مورد مطالعه دقیق قرار گیرد. رفتار ژئومکانیکی یک محیط سنگی درزه‌دار اغلب توسط ناپوستگی‌ها و شکستگی‌های آن کنترل می‌شود. بنابراین لازم است با استفاده از اصول مکانیک شکست و با ارزیابی رفتار شکستگی‌ها، رفتار کلی توده سنگ مطالعه شده و با تعیین میزان باری که منجر به گسیختگی توده سنگ می‌شود، سازه مورد نظر با فاکتور اطمینان مناسبی طراحی گردد.

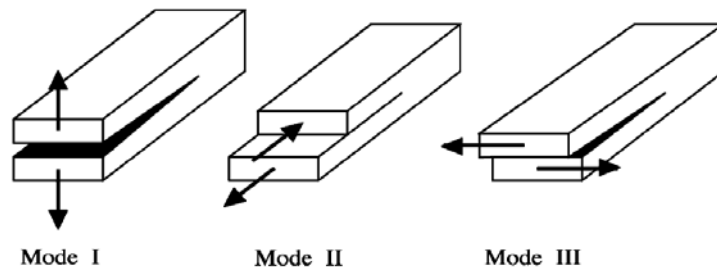
1 – Fracture Toughness

2 – Coalescence

تمرکز تنش بوجود آمده در نوک شکستگی های سنگ به پارامترهایی نظیر نوع بارگذاری، میزان بارگذاری، هندسه ترکها و... بستگی دارد. ترکها تحت بارگذاری های متفاوت (فشاری، کششی، برشی و...)، به ازای میزان بار مشخصی گسترش یافته و با مکانیزم متفاوتی بهم متصل می شوند. از آنجائیکه سازه های احداث شده در محیط های سنگی عموماً تحت بارگذاری فشاری قرار می گیرند، در این مقاله مکانیسم انتشار و اتصال ترکها در محیط های سنگی، تحت اثر بارهای فشاری بررسی شده است.

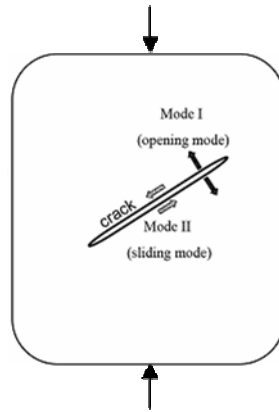
انتشار ترکها در محیط های سنگی

بسته به نوع بارگذاری و هندسه شکستگی های سنگ، یک شکستگی به صورت یکی از سه حالت اصلی و یا ترکیبی از آنها گسترش می یابد. حالت اول، حالت بازشدگی یا کششی است که سطوح ترک یا شکستگی در راستای عمود بر صفحه ترک جدا می شوند. حالت دوم، حالت لغزشی یا برشی است که سطوح ترک نسبت به هم در جهت عمود بر خط نوک ترک می - لغزند. حالت سوم، حالت پارگی است که سطوح ترک در جهتی به موازات خط پروفیل ترک می لغزند. در شکل (۱) سه حالت انتشار ترک نشان داده شده است.



شکل (۱) سه حالت اصلی انتشار ترک (چانگ و همکاران، ۲۰۰۲).

در اکثر کاربردهای عملی، سازه ها و توده های سنگی ترکدار در معرض بارهای پیچیده قرار داشته و شکست سازه به واسطه مشارکت حالت های کششی و برشی (شکست حالت ترکیبی I/II) بوقوع می پیوندد. شکل (۲) بارگذاری حالت ترکیبی I/II را در یک محیط ترکدار نشان می دهد. مطابق شکل نمونه حاوی ترک شیبدار فقط تحت بار فشاری قرار گرفته است ولی به خاطر وضعیت قرارگیری ترک، در نوک آن تمرکز تنش های نرمال کششی و برشی ایجاد می شود و پتانسیل شکست حالت ترکیبی (حالت I و حالت II) وجود دارد. بنابراین بسته به تمرکز تنش حالت I (K_I) و حالت II (K_{II}) و چقرمگی شکست حالت های I و II (K_{IC}, K_{IIC}) ترک ممکن است در حالت I، حالت II و یا حالت ترکیبی گسترش یابد.



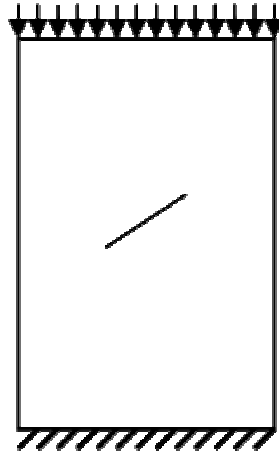
شکل ۲) بارگذاری حالت ترکیبی I/II را در یک محیط ترک‌دار

اتصال ترک‌ها در محیط‌های سنگی تحت اثر بارهای فشاری

برای تحلیل یک مدل پیچیده و حاوی درزه‌هایی با آرایش دلخواه لازم است ابتدا مدل‌های ساده‌تر تحلیل شده و نتایج حاصله به حالت کلی تعمیم داده شود. بنابراین در مطالعه مکانیسم انتشار و اتصال شکستگی‌ها اغلب از نمونه‌های حاوی یک، دو و یا سه ترک استفاده می‌شود.

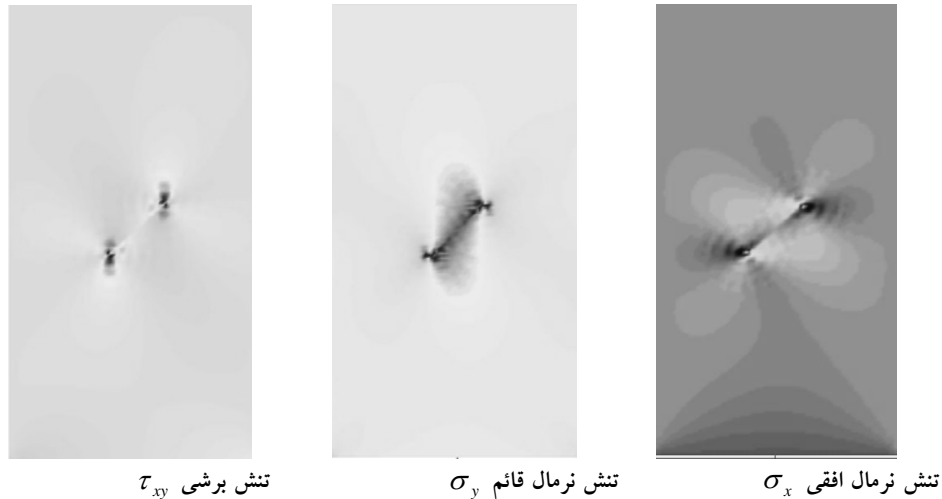
مکانیسم انتشار ترک در محیط‌های سنگی تحت اثر بارهای فشاری

وقتی یک نمونه سنگی حاوی یک ترک شبیدار، مطابق شکل (۳) تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد، مولفه‌های تنش مطابق شکل (۴) در دامنه نمونه توزیع می‌شوند^۱. همانطور که در شکل مشخص است در نوک ترک تمرکز تنش‌های کششی و برشی ایجاد شده و تمایل دارند به نوبه خود ترک را در حالت I و حالت II انتشار دهند ولی از آنجائیکه چقرمگی شکست حالت II سنگ از چقرمگی شکست حالت I آن خیلی بیشتر است، شکست در حالت I زودتر از حالت II اتفاق می‌افتد. یعنی از نوک ترک ابتدا ترک‌های کششی^۲ و سپس ترک‌های برشی ثانویه^۳ گسترش می‌یابند.



شکل ۳) نمونه تحت بارگذاری فشاری

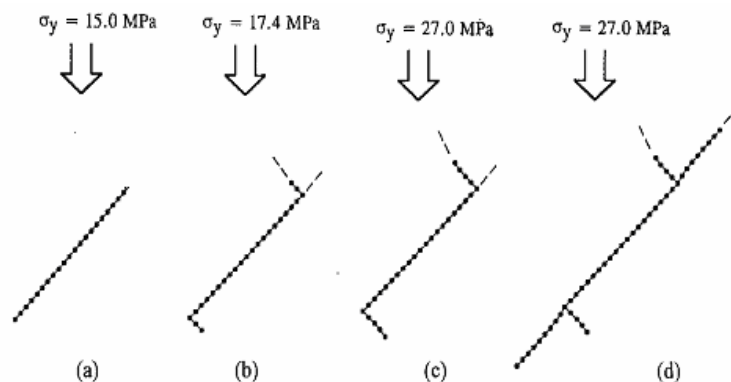
۱ - توزیع مولفه‌های تنش در دامنه مسئله با استفاده از برنامه کامپیوتری که توسط نگارنده تهیه شده، تعیین شده است. این برنامه بر مبنای روش عددی بدون مش گالرکین نوشته شده است.



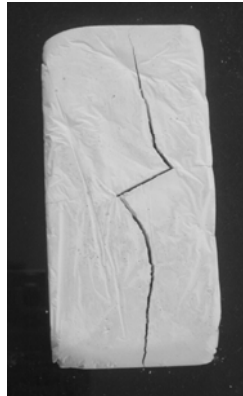
شکل ۴) توزیع مولفه های تنش در دامنه نمونه سنگی که تحت بار فشاری قرار گرفته است.

محققان مختلفی با مطالعات عددی (شن، ۱۹۹۳)، (تانگ و همکاران، ۲۰۰۲)، (دوبروسکوک و همکاران، ۲۰۰۶) و آزمایشگاهی (شن، ۱۹۹۳)، (وونگ و همکاران، ۲۰۰۱)، (ساگونگ و بابت، ۲۰۰۲) و (الشایه، ۲۰۰۵) به مسئله انتشار ترک پرداخته و نوع حالت شکست و جهت انتشار ترک را تحت بارگذاری فشاری تعیین کرده اند. بر مبنای مطالعات شن روند انتشار یک ترک شیبدار تحت بارگذاری فشاری در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود با افزایش تدریجی بار، ترک های کششی تقریباً در راستای عمود بر صفحه ترک اصلی و از دو لبه آن گسترش یافته و به تدریج راستای آنها به راستای بارگذاری متمایل می شود و همزمان با آن ترک های برشی در امتداد ترک اصلی و از دو لبه آن منتشر می شوند.

برای مطالعه آزمایشگاهی مکانیسم انتشار ترک، نمونه ای حاوی ترک شیبدار با شیب ۴۵ درجه از جنس خاک سنگ و سیمان تهیه شده و تحت بارگذاری فشاری قرار گرفت. مسیر انتشار ترک در شکل (۶) نشان داده شده است. مطابق این شکل نیز ترک تقریباً در راستای عمود بر صفحه خود گسترش یافته و به تدریج راستای آن به راستای بارگذاری متمایل می شود. بنابراین نتایج آزمایشگاهی کاملاً موید نتایج عددی است.



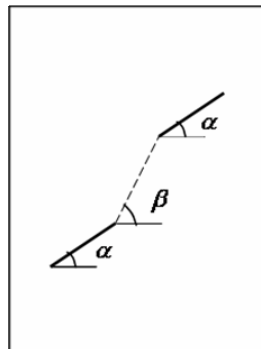
شکل ۵) مراحل رشد ترک در یک نمونه حاوی ترک شیبدار. (a) ضرایب تنش کمتر از چقرمگی شکست سنگ است، بنابراین ترک گسترش نمی یابد؛ (b) و (c) ترک های کششی (حالت I) ایجاد و منتشر می شوند؛ (d) ترک های برشی (حالت II) تقریباً در راستای ترک منتشر می شوند (شن، ۱۹۹۳).



شکل ۶) نمونه حاوی ترک شیبدار که از خاک سنگ و سیمان تشکیل شده است. مسیر انتشار ترک تحت بار گذاری فشاری نشان داده شده است.

مکانیسم اتصال ترک ها در نمونه های حاوی دو ترک

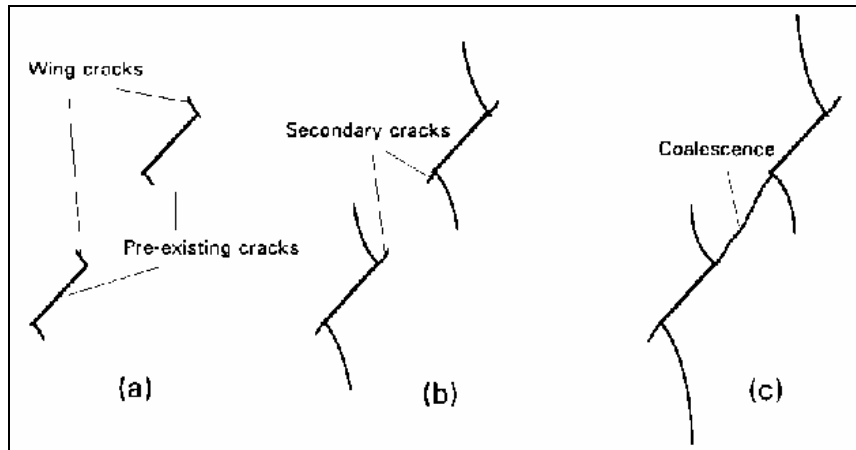
برای مطالعه نحوه انتشار و اتصال نمونه های حاوی دو ترک لازم است موقعیت هندسی ترک ها با استفاده از پارامترهایی مشخص باشد بدین منظور مطابق شکل (۷) از زاویه شیب درزه ها (α) و زاویه خط واصل دو درزه (β) استفاده می شود.



شکل ۷) نمونه حاوی دو درزه؛ α زاویه شیب درزه ها و β زاویه خط واصل دو درزه

شن در سال ۱۹۹۳ در رساله دکتری خود با روش عددی المان مرزی و بطور آزمایشگاهی مکانیسم انتشار و اتصال دو ترک شیبدار را به ازای مقادیر متفاوت زاویه شیب ترک (α) و شیب خط واصل ترک ها (β)، مطالعه کرده است. وی برای این منظور نمونه های گچی تهیه کرده و در آنها ترک های مصنوعی ایجاد کرده است (شن، ۱۹۹۳). ساگونگ و بابت در سال ۲۰۰۱ بطور آزمایشگاهی و با ایجاد ترک های مصنوعی در نمونه های گچی مکانیسم انتشار و اتصال ترک ها در نمونه های حاوی دو و سه ترک را مطالعه کرده است (ساگونگ و بابت، ۲۰۰۲). تانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ با استفاده از نرم افزارهای که با استفاده از روش المان محدود نوشته شده و نیز بطور آزمایشگاهی به مطالعه مکانیسم انتشار و اتصال ترک ها در نمونه های حاوی دو و سه ترک پرداخته اند (تانگ و همکاران، ۲۰۰۲) و (وونگ و همکاران، ۲۰۰۱).

بر مبنای مطالعات شین مکانیسم رشد درزه‌ها و اتصال آنها در حالتی که زاویه شیب ترک‌ها 45° و زاویه خط واصل 60° درجه باشند، توضیح داده می‌شود. مراحل مختلف گسترش و اتصال ترک‌ها برای حالت فوق در شکل (۷) نشان داده شده است. مطابق شکل با اعمال بار فشاری بر نمونه ترک‌دار و با افزایش تدریجی بار به محض اینکه فاکتور تمرکز تنش حالت I بر چقرمگی شکست حالت I سنگ غلبه کرد، ترک‌های کششی در نوک ترک‌ها گسترش می‌یابند (شکل (۸-a)). با افزایش میزان بار تمرکز تنش حالت II نیز بر چقرمگی شکست حالت II سنگ غلبه می‌کند و ترک‌های برشی از نوک ترک‌ها منتشر می‌شوند (شکل (۸-b)). با افزایش بار ترک‌های کششی و برشی همزمان گسترش یافته و در نتیجه اتصال ترک‌های برشی منشعب شده، ترک‌های اولیه بهم متصل می‌شوند (شکل (۸-c)).



شکل ۸) مراحل انتشار و اتصال ترک‌ها وقتی که $\alpha = 45^\circ$ و $\beta = 60^\circ$ می‌باشد (شین، ۱۹۹۳).

مکانیسم اتصال دو ترک به زاویه شیب ترک‌ها (α) و زاویه خط واصل آنها (β) بستگی دارد. بسته به مقادیر α و β ممکن است دو ترک بهم متصل نشوند، فقط با گسترش ترک‌های کششی منشعب از نوک ترک‌ها بهم متصل شوند، فقط با رشد ترک‌های برشی منشعب از نوک ترک‌ها بهم متصل شوند و یا از انتشار مجموعه ترک‌های کششی و برشی به هم متصل شوند. حالت‌های مختلف مقادیر α و β برای ترک‌های باز و بسته توسط شین مطالعه شده و نتایج حاصل بطور مختصر و مفید در جدول (۱) درج شده است. در یک ترک باز سطوح ترک با هم تماس نداشته و چسبندگی وجود ندارد ولی در ترک‌های بسته سطوح ترک‌ها با هم تماس داشته و مقداری چسبندگی وجود دارد.

جدول (۱) مکانیسم اتصال ترک‌ها به ازای مقادیر مختلف α و β (شین، ۱۹۹۳).

α/β	$30^\circ/45^\circ$	$45^\circ/45^\circ$ ($45^\circ/60^\circ, 60^\circ/45^\circ, 60^\circ/60^\circ$)	$45^\circ/75^\circ$ ($60^\circ/75^\circ$)	$45^\circ/90^\circ$ ($60^\circ/90^\circ$)	$45^\circ/105^\circ$ ($60^\circ/105^\circ$)	$45^\circ/120^\circ$
Closed pre-existing cracks	no coalescence	secondary "shear" crack	secondary shear/tensile crack	secondary shear/tensile crack	wing crack	wing crack
Open pre-existing cracks	secondary "shear" crack	secondary "shear" crack	secondary shear/tensile crack	secondary shear crack + wing crack	wing crack	other crack



نتایج

نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- از آنجائیکه چقرمگی شکست حالت II سنگ بمراتب از چقرمگی شکست حالت I سنگ بیشتر است، بنابراین انتشار ترک در حالت I (ترک کششی) زودتر از حالت II (ترک برشی) اتفاق می افتد.
- در نمونه حاوی ترک شیبدار تحت بار فشاری، ترک برشی تقریباً در راستای امتداد ترک و ترک کششی در راستای عمود بر امتداد ترک منشعب می شود.
- در نمونه حاوی یک ترک شیبدار، ابتدا ترک کششی و سپس ترک برشی گسترش می یابند و ترک کششی در راستای عمود بر امتداد ترک منشعب شده و بتدریج راستای آن به راستای بارگذاری متمایل می شود.
- در نمونه های حاوی دو ترک همانند نمونه حاوی یک ترک، از نوک هر یک از ترک ها، ترک های کششی و برشی گسترش می یابند ولی مکانیسم اتصال ترک ها تابع زاویه شیب ترک ها و زاویه خط واصل دو ترک می باشد.
- بسته به میزان زاویه شیب و زاویه خط واصل ترک ها، ممکن است اتصال ترک ها از نوع کششی، برشی و یا ترکیب کششی و برشی باشد. تحت شرایط خاصی ($\alpha = 30^\circ, \beta = 45^\circ$)، ترک باز) اتصال ترک ها صورت نمی گیرد.

منابع

- S.H. Chang, C.I. Lee, S. Jeon, Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens, *Engineering Geology* 66 (2002) 79–97.
- B. Shen, Mechanics of fractures and intervening bridges in hard rock. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Division of Engineering Geology; 1993.
- C.A. Tang, P. Lin, R.H.C. Wong, K.T. Chau, Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part II: numerical approach, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38 (2001) 925–939
- A. Dobroskok, A. Ghassemi, A. Linkov, Extended structural criterion for numerical simulation of crack propagation and coalescence under compressive loads, *International Journal of Fracture* (2005) 133:223–246
- R.H.C. Wong, K.T. Chau, C.A. Tang, P. Lin, Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part I: experimental approach, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38 (2001) 909–924.
- M. Sagong, A. Bobet, Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 39 (2002) 229–241.
- N. Al-Shayea, Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I–II fracture. *Engineering Geology* 81 (2005), pp. 84–97.