

مطالعه آزمایشگاهی انتشار ترک در نمونه‌های با درزه‌های بسته و باز تحت بارگذاری تک‌محوری

عبدالهادی قزوینیان^{۱*}، پیمان نوروزی^۲

۱- دانشیار مکانیک سنگ، عضو هیات علمی دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

hadi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۲۷

چکیده- این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی رفتار نمونه‌های شبه‌سنگی دارای درزه تحت بارگذاری تک‌محوری پرداخته است. تعدادی مدل فیزیکی درزه‌دار با سطح صاف و ناصاف با ترکیب سیمان، گچ و آب با ابعاد $10 \times 20 \times 5$ سانتی‌متر ساخته شده است. درزه‌ها به صورت باز و بسته در مرکز نمونه و با سطح صاف و زیر (دندانه‌اره‌ای) قرار گرفته است. طول درزه‌ها برابر با ۴، ۵ و ۶ سانتی‌متر است که با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور بارگذاری قرار گرفته است. به منظور ایجاد درزه‌های زیر در نمونه‌ها از پروفیل‌های دندانه‌اره‌ای استفاده شد. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که بسته به طول و شیب قرارگیری درزه بسته یا باز دو نوع ترک (باله‌ای و ثانویه) از نوک ترک تعبیه شده در نمونه منتشر می‌شود. انتشار ترک‌های ثانویه پس از ایجاد ترک‌های باله‌ای رخ می‌دهد. با افزایش تنش داخلی ناشی از بارگذاری تک‌محوری در نمونه، ابتدا تمرکز تنش کششی و سپس تمرکز تنش برشی در نوک درزه باز ایجاد می‌شود. انتشار ترک از نوک نمونه نشان می‌دهد که تمرکز تنش در نوک درزه می‌باشد و قطعاً در سایر قسمت‌های این درزه ناهموار و دندانه‌اره‌ای تمرکز تنش کم‌تر از نوک درزه بوده است. در درزه‌های بسته با کاهش زاویه درزه نسبت به افق (عمود بر محور بارگذاری) محل شروع انتشار ترک باله‌ای از نوک درزه به سمت مرکز درزه منتقل و تمرکز تنش کششی در مرکز نمونه بیش‌تر از اطراف نمونه می‌شود. شیب قرارگیری، طول، باز و بسته بودن درزه بر تنش شروع ترکها موثر می‌باشد. تنش شروع ترک باله‌ای با زاویه درزه از قبل موجود نسبت به محور بارگذاری رابطه مستقیم و با طول درزه رابطه معکوس دارد. در شرایط یکسان تنش شروع انواع ترک‌ها در درزه‌های بسته بیش‌تر از باز است. در این مطالعه همچنین به عوامل مؤثر در انتشار ترک‌های ثانویه پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که در انتشار ترک‌های ثانویه شیب درزه و همچنین میزان فاصله نوک ترک از لبه نمونه تعیین‌کننده است. در صورتی که کوچک‌ترین فاصله میان نوک ترک و لبه نمونه (s) و عرض نمونه (b) نامیده شود، در نمونه‌هایی که شیب درزه برابر با ۳۰ درجه و نسبت $(\frac{s}{b})$ کوچک‌تر از ۰/۳ است، ترک‌های ثانویه از نوک درزه از قبل موجود شروع به انتشار نموده و تابعاً نمونه منتشر می‌شوند.

واژگان کلیدی- انتشار ترک، ترک باله‌ای، ترک ثانویه، درزه باز، درزه بسته

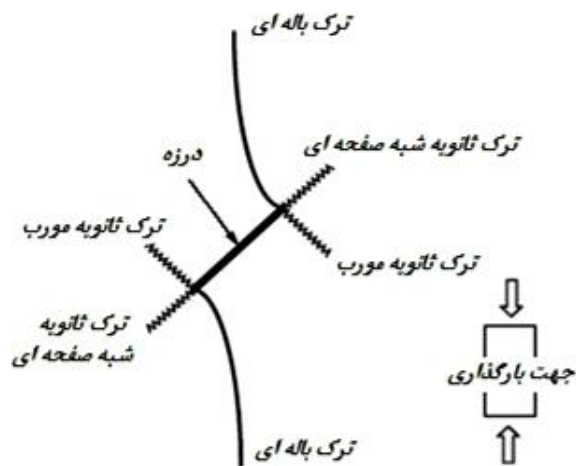
به‌سزایی در رفتار مکانیکی توده سنگ داشته و باعث کاهش

مقاومت در توده سنگ می‌شوند. بنابراین لزوم شناخت و

۱- مقدمه

نایبوستگی‌ها به عنوان جزء جدانشدنی توده‌های سنگی تأثیر

محوره در نمونه‌های شبه سنگی حاوی یک درزه، مکانیزم ایجاد ترک و نحوه پیشروی آن را بررسی کردند. بر این اساس، زمانی که یک نمونه شبه سنگی حاوی درزه شیب‌دار تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد، الگوی ترک‌های ایجاد شده در آن، مطابق شکل ۱ است.



شکل (۱) الگوی ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های شبه سنگی حاوی درزه شیب دار، در فشار تک محوره [۵]

با مشاهده شکل ۱ دو نوک ترک قابل شناسایی است:

۱- ترک‌های کششی که به ترک‌های باله‌ای معروفند. این ترک‌ها اغلب تحت زاویه‌ای نسبت به نوک درزه شروع شده و به سمت تنش ماکزیمم پیشروی می‌کنند.

۲- ترک‌های برشی که به ترک‌های ثانویه مشهورند. این ترک‌ها که اغلب از نوک درزه‌ها آغاز و خود به دو دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند: الف- ترک‌های شبه صفحه‌ای که در امتداد درزه پیشروی می‌کنند؛ ب- ترک‌های مورب که در امتداد ترک‌های اولیه ولی در جهت مخالف شکل می‌گیرند.

لی و همکاران [۸] با انجام آزمایشات تک‌محوره روی نمونه‌های سنگی (سنگ مرمر) حاوی درزه شیب‌دار، مکانیزم شکل‌گیری ترک را تأیید نمود. همچنین وانگ و همکاران [۹] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، نتایج مشابهی را ارائه دادند. مطالعات بسیاری نیز روی شروع و پیشروی

بررسی رفتار ناپیوستگی‌ها در توده سنگ اهمیت زیادی دارد. تا کنون مطالعات زیادی به صورت تحلیلی، آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در خصوص شروع و انتشار ترک در نمونه‌های درزه‌دار صورت گرفته است. گریفیث [۱۰] برای اولین بار انتشار ترک را در نمونه‌های شیشه‌ای دارای درزه‌های دو بعدی به صورت تحلیلی مطالعه کرد. وی تئوری خود را با انجام آزمایش کشش روی پلاکی از شیشه که دارای ترکی به طول محور بزرگ 2c بود، ارائه داد. بر این اساس، زمانی که ماده تحت کشش قرار می‌گیرد، در نوک ترک تمرکز تنش کششی ایجاد می‌شود. زمانی که این تنش به حد بحرانی برسد، ترک شروع به پیشروی کرده و در نهایت شکست اتفاق می‌افتد. طبق این معیار، تنش لازم برای ایجاد شکست، با طول ترک اولیه نسبت عکس دارد، یعنی هرچه طول ترک اولیه کوتاه‌تر باشد، تنش لازم برای رشد ترک بیش‌تر خواهد بود. وی در ادامه، تئوری خود را برای حالت فشاری بسط داده و دریافت که اگر $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} < 1/3$ ، آنگاه شکست هنگامی رخ

می‌دهد که $\sigma_3 = -\sigma_1$ باشد. همچنین اگر $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} > 1/3$ ، آنگاه

شکست زمانی اتفاق می‌افتد که $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + \sigma_3)} = 8\sigma_1$ باشد. در

روابط ارائه شده، σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی و جانبی وارد بر نمونه حاوی درزه و σ_1 مقاومت کششی توده بکر می‌باشد. از آنجا که گریفیث در مطالعات خود از اثر اصطکاکی سطح درزه‌ها چشم‌پوشی کرده بود، لذا والش و مک کلیتاک [۳] با در نظر گرفتن اثر اصطکاکی سطوح درزه‌ها، معیار گریفیث را به صورت زیر اصلاح نمودند:

$$\mu(\sigma_3 + \sigma_1 - 2\sigma_c) + (\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu^2)^{0.5} = 4\sigma_t \left[1 - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right) \right]^{0.5}$$

در ادامه افراد دیگری نظیر نعمت ناصر و هوری [۴]، هوک و بنیایوسکی [۵] و بوبت [۶ و ۷] با انجام آزمایش تک

می‌افتد که نسبت (s/c) کم‌تر از $\frac{1}{3}$ باشد، یعنی دو درزه صفحه‌ای یا تقریباً صفحه‌ای باشند. در این حالت، ترک‌های برشی شبه صفحه‌ای از نوک‌های داخلی درزه‌ها رشد کرده و با پیشروی درون پل سنگ به یکدیگر متصل می‌شوند.

یکپارچگی نوع (۲): این الگو یکپارچگی، زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت (s/c) بزرگ‌تر از $\frac{1}{3}$ و کوچک‌تر از ۱ باشد. در این حالت، دو ترک برشی که در نوک داخلی درزه‌ها ایجاد شده‌اند، با ترک کششی به یکدیگر متصل شود.

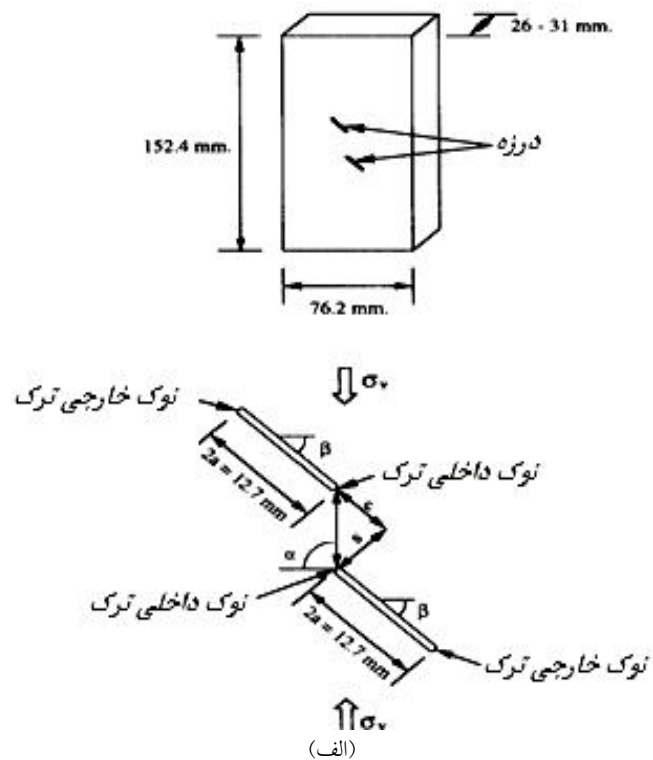
یکپارچگی نوع ۳: این الگو یکپارچگی زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت (s/c) اندکی کوچکتر از ۱ باشد. در این حالت، یک ترک برشی که در نوک داخلی یکی از درزه‌ها ایجاد شده، توسط یک ترک کششی به نوک داخلی درزه دیگر، متصل می‌گردد.

ترک در پل سنگ واقع بین دو درزه بسته و باز، تحت آزمایشات تک محوره انجام شد. این تحقیقات را افرادی نظیر پارک و بوبت [۱۰]، وانگ و انشتین [۱۱]، ریس و انشتین [۱۲]، شن [۱۳]، وانگ و چو [۱۴]، بوبت و انشتین [۱۵]، و موجدی [۱۶] روی نمونه‌های شبه سنگی انجام دادند. بوبت و انشتین [۱۵] به مطالعه تأثیر مکانیزم انتشار ترک در نمونه‌های دارای دو درزه باز و بسته با فاصله داری طولی (c) و عرضی (s) و با شیب (β) تحت بارگذاری تک‌محوری پرداخته‌اند (شکل ۲). نتایج حاکی از آن است که الگوهای یکپارچگی در درزه‌های باز و بسته شبیه به هم می‌باشد؛ ولیکن اختلافاتی در تنش شروع ترک‌های کششی و برشی، در درزه‌های باز و بسته وجود دارد. الگوهای یکپارچگی درزه‌ها به شرح زیر است:

یکپارچگی نوع ۱: این الگو یکپارچگی، زمانی اتفاق

Geometry	β	s	c
0	No crack	—	—
1	30°	0	2a
2	30°	0	3a
3	30°	0	4a
4	30°	a	a
5	30°	a	2a
6	30°	a	3a
7	30°	a	4a
8	30°	2a	2a
9	30°	2a	3a
10	30°	2a	4a
11	30°	3a	2a
12	30°	3a	3a
13	30°	3a	4a
14	30°	4a	3a
15	30°	4a	4a
16	45°	0	2a
17	45°	0	3a
18	45°	0	4a
19	45°	a	a
20	45°	a	2a
21	45°	a	3a
22	45°	a	4a
23	45°	2a	2a
24	45°	2a	3a
25	45°	2a	4a
26	45°	3a	3a
27	45°	3a	4a
28	45°	4a	4a
29	60°	0	2a
30	60°	0	3a
31	60°	0	4a
32	60°	a	2a
33	60°	a	3a
34	60°	a	4a
35	60°	2a	4a

(ب)



(الف)

شکل (۲) الف- هندسه نمونه مورد آزمایش؛ ب- مقادیر فاصله داری طولی (c) و عرضی (s) درزه‌ها

به منظور ایجاد شرایط یکسان تمام نمونه‌های در شرایط یکسان دما (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت (۵۰ درصد) عمل‌آوری شده‌اند و پس از ۲۰ روز مورد آزمایش شده‌اند.

۲-۲- ساخت نمونه با درزه بسته و باز

به منظور نیل به اهداف این مطالعه، مدل‌های فیزیکی با ابعاد $5 \times 20 \times 10$ (سانتی‌متر) از جنس مصالح ذکر شده در جدول ۱ ساخته شد. در تمام آزمایشات برای مقایسه نتایج تمام آزمایشات با یکدیگر روش مشابهی برای ساخت نمونه استفاده شد. به منظور ساخت درزه‌های باز، پروفیل‌های زبری از جنس آهن گالوانیزه با ضخامت $0/4$ میلی‌متر، در داخل قالب از جنس پلکسی‌گلاس قرار داده شد. سپس ملات تهیه‌شده، در قالب ریخته شد. پس از ۲۰ دقیقه پروفیل زبری و پس از 40 دقیقه نمونه از قالب با آرامی خارج شد. تهیه درزه بسته با سطح قابل قبول با استفاده از ورق فلزی از جنس استیل و مس با ضخامت $0/1$ میلی‌متر مقدور نبود. بنابراین برای ساخت نمونه‌های با درزه‌های بسته، روشی جدید استفاده شد. در این روش ابتدا روی پروفیل‌های زبری با ضخامت $0/4$ میلی‌متر یک لایه‌ی نازک از نایلون کشیده و پس از قراردادی پروفیل زبری و نایلون در داخل قالب، ملات تهیه شده در قالب ریخته شد. با گذشت حدود 5 و 10 دقیقه به ترتیب پروفیل زبری و نایلون از نمونه خارج شد. ملات تهیه شده پس از 5 دقیقه حالت نیمه جامد داشته و بنابراین با خروج پروفیل زبری از نمونه، دو سطح درزه به اندازه نایلون موجود در نمونه بهم نزدیک می‌شوند.

یکپارچگی نوع ۴: این نوع یکپارچگی، مربوط به حالتی است که نسبت (s/c) برابر با ۱ باشد. در این شرایط، ترک‌های کششی از نوک‌های داخلی درزه‌ها ایجاد و با پیشروی از درون پل سنگ، به یکدیگر متصل می‌شوند. در تمام موارد بالا، در نوک‌های خارجی درزه‌ها، ترک‌های کششی شکل گرفته و تالبه‌های نمونه گسترش می‌یابند. همانطور که اشاره شد، در مطالعات پیشین به بررسی مکانیزم گسترش ترک در نمونه‌های حاوی درزه‌های باز و بسته با سطح صاف تحت بارگذاری تک‌محوری پرداخته شده است. بنابراین هدف از انجام این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، بررسی نحوه‌ی گسترش ترک در نمونه‌های حاوی درزه‌های باز و بسته با سطح صاف و ناهموار تحت بارگذاری تک‌محوری، ارائه‌ی معیار تجربی به منظور پیش‌بینی مکانیزم گسترش ترک و همچنین بررسی تأثیر ناهمواری سطح درزه در انتشار ترک در نمونه‌های مذکور است.

۲- ساخت مدل فیزیکی و برنامه آزمایشات

۲-۱- خصوصیات فیزیکی مصالح مورد استفاده


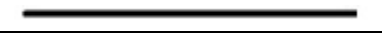
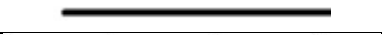



به منظور مدل‌سازی درزه‌های سنگ‌های نرم همچون زغال، سنگ‌آهک ترد، شیل رسی و گل سنگ با دقت مناسبی می‌توان از ترکیب پلاستر گچ و آب استفاده نمود [۱۸]. افزودن نسبت مناسبی از سیمان پرتلند پوزولانی به گچ خالص، باعث کاهش ناهمگنی و افزایش اندیس تردی $\frac{\sigma_c}{\sigma_t}$ ملات می‌گردد [۱۹]. لذا مصالح مورد استفاده برای ساخت مدل‌های فیزیکی، سیمان پرتلند، گچ و آب با درصد وزنی و خواص فیزیکی ذکر شده در جدول ۱ است.

جدول (۱) خصوصیات فیزیکی مصالح مورد استفاده

ملات	درصد ترکیبات			خصوصیات مقاومتی			
	سیمان (%)	گچ (%)	آب (%)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν
نوع ۱	۳۳/۵	۳۱/۵	۳۵	۱۰/۶۲	۱/۹۶	۲/۳۹	۰/۲۷۴

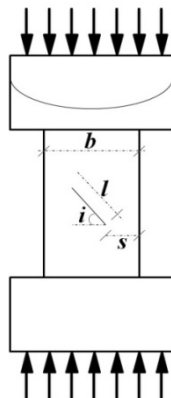
سطح نمونه نشسته و بار به صورت محوری اعمال شود. در شکل ۲ شماتیک نمونه تحت بارگذاری تک محوری است.

جدول (۲) مشخصات و شماتیک پروفیل های زبری مورد استفاده

شماره پروفیل	هندسه پروفیل	طول (cm)
۱		۶
۲		۵
۳		۴
۴		۶
۵		۵
۶		۴

۳- تحلیل نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشات حاکی از آن است که براساس طول و زاویه درزه از قبل موجود در سنگ دو نوع ترک باله‌ای و ثانویه شبه صفحه‌ای از نوک درزه از قبل موجود منتشر می‌شود. شکست نمونه در اثر انتشار این ترک‌ها بوده و به محض انتشار این ترک‌ها، نمونه مقاومت خود را در مقابل بارگذاری تک محوری از دست می‌دهد. در شکل ۳ (الف تا و) انتشار ترک‌های باله‌ای و ثانویه برای برخی از نمونه‌ها آورده شده است.



شکل (۲) تصویر شماتیک نحوه بارگذاری نمونه‌ها.

بنابراین درزه‌ی ساخته شده به صورت بسته می‌باشد. با شکستن تعدادی از نمونه‌های ساخته شده از سلامت دندانها و دقت آن‌ها اطمینان حاصل شده است.

۲-۳ طراحی پروفیل زبری درزه

برای ایجاد درزه‌های با سطح ناصاف از پروفیل‌های زبری دندان‌اره‌ای استفاده شده است. به منظور بررسی طول درزه از قبل موجود (I) بر مکانیزم شکست، سه هندسه برای پروفیل‌های زبری با طول‌های ۶، ۵ و ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین برای بررسی تأثیر زاویه قرارگیری درزه‌ی از قبل موجود (i) درزه‌ها در سه وضعیت، با زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق در مرکز نمونه‌ها قرار داده شده‌اند. شماتیک نمونه‌ها با درزه‌های صاف و ناهموار در جدول ۲ نشانگر است. زاویه دندان‌های تمام پروفیل‌ها برابر با ۳۰ درجه است.

۲-۴ آزمایش بارگذاری تک محوری

ثبت و قرائت میزان بار اعمال شده در هر سه ثانیه به کمک دستگاه ثبت‌کننده دیجیتال، کامپیوتر شخصی و یک سلول بار (Load cell)^۱ با ظرفیت ۵۰ تن و دقت ۲ کیلوگرم صورت گرفته است. قرائت میزان بار اعمال شده و همچنین بارگذاری تا لحظه ایجاد ترک در نمونه‌ها صورت گرفته است. نرخ بارگذاری ۰/۰۰۲ کیلونیوتن بر ثانیه در نظر گرفته شد تا شکست نمونه‌ها ظرف مدت ۱۵ تا ۲۵ دقیقه اتفاق بیفتد. دستگاه مجهز به دو صفحه بار گذاری فولادی با سختی راکول HRC ۵۸ می‌باشد، تا در هنگام اعمال بار مسئله‌ای از لحاظ انرژی الاستیک ذخیره شده در دستگاه به وجود نیاید. نشیمن‌گاه یکی از صفحات به صورت کروی و دیگری صفحه صلب و محکم است. نشیمن‌گاه کروی که در بالای نمونه قرار می‌گیرد، باعث می‌شود که صفحات بارگذاری کاملاً روی

1- Load cell

۳-۱- ترک‌های باله‌ای

این گونه از ترک‌ها، از نوع ترک‌های کششی می‌باشند که از نوک و یا نقطه‌ای نزدیک به نوک درزه در هر دو نوع درزه‌های باز و بسته شروع به انتشار می‌نمایند. ترک‌های باله‌ای روی یک مسیر قوس‌دار (منحنی شکل) و در رفتاری پایدار به سمت مسیر بارگذاری منتشر می‌شوند. سطح ترک‌های باله‌ای سطح صاف و براق بوده که گواه بر کششی بودن این نوع ترک‌ها است.

در شکل ۳-الف الگوی شکست برای نمونه‌ای با طول ۶ سانتی‌متر و زاویه درزه باز 30° آورده شده است. با اعمال نیرو به این نمونه، دو نوع ترک باله‌ای و ثانویه شبه‌صفحه‌ای در نمونه گسترش یافته است. با اعمال بار تک‌محوری ابتدا ترک باله‌ای و سپس ترک ثانویه در نمونه منتشر شده است. این موضوع بیان می‌دارد که با افزایش تنش داخلی در نمونه، در نوک درزه باز ابتدا تمرکز تنش کششی و سپس تمرکز تنش برشی ایجاد شده است. انتشار ترک از نوک نمونه نشان می‌دهد که تمرکز تنش در نوک درزه می‌باشد و قطعاً در سایر نوک‌های این درزه ناهموار و دندان‌اره‌ای تمرکز تنش کم‌تر از نوک درزه بوده است. ترک باله‌ای در این نمونه در تنش $5/437 \text{ MPa}$ منتشر شده است.

در شکل ۳-ب الگوی شکست برای نمونه‌ای با طول ۶ سانتی‌متر و زاویه درزه باز 45° آورده شده است. در این نمونه شکست نمونه فقط در اثر انتشار ترک باله‌ای است. در این نمونه نیز، ترک باله‌ای را نوک درزه باز منتشر شده که نشان دهنده تمرکز تنش کششی در نوک درزه باز است. تنش شروع ترک باله‌ای برای این نمونه مقدار $5/947 \text{ MPa}$ است. با مقایسه‌ی مقادیر تنش شروع ترک باله‌ای برای این نمونه و نمونه قبل، مشخص می‌شود که افزایش زاویه قرارگیری درزه باز باعث افزایش تنش شروع ترک باله‌ای می‌گردد. در ادامه مقادیر تنش شروع ترک باله‌ای برای سایر

نمونه‌های باز و بسته مقایسه شده است. این روند برای درزه‌های بسته نیز مشاهده شده است.

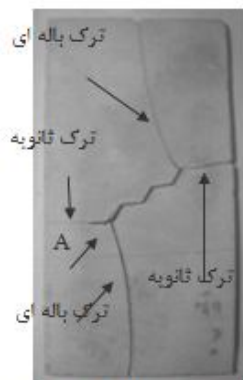
در شکل ۳-ج الگوی شکست برای نمونه‌ای با طول ۵ سانتی‌متر و زاویه درزه باز 30° آورده شده است. در این نمونه شکست نمونه در اثر انتشار ترک‌های باله‌ای و ثانویه است. ترک باله‌ای در نیمه فوقانی نمونه از نوک درزه بسته منتشر شده است و در نیمه تحتانی، نمونه از پایین‌ترین گوشه ناهمواری دندان‌اره‌ای (نقطه A) منتشر شده است. این در حالی است که ترک باله‌ای برای نمونه‌های دیگر از ابتدای درزه بسته منتشر می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان در زاویه یال ناهمواری دندان‌اره‌ای نسبت به محور بارگذاری (زاویه O) در شکل ۱۰ دانست. برای درزه‌هایی با سطح ناصاف بسته که امتداد نوک آن‌ها با محور بارگذاری زاویه‌ای کم‌تر از 60° درجه داشته است، ترک باله‌ای از نوک درزه منتشر می‌گردد. ولی برای درزه‌های بسته با سطح ناصاف که امتداد نوک آن‌ها با محور بارگذاری زاویه‌ای بیش‌تر از 60° درجه داشته است، ترک باله‌ای از نوک درزه منتشر نشده و از رأس مجاور در نمونه منتشر می‌شود. انتشار ترک از رأس مجاور چنین نمونه‌هایی حاکی از آن است که تمرکز تنش این نمونه‌ها در نیمه فوقانی و تحتانی متفاوت است و همچنین شیب یال ناهمواری‌های دندان‌اره‌ای (در حالت کلی‌تر شیب درزه بسته) از قبل موجود تأثیر به‌سزایی در تمرکز تنش در نقاط مختلف نمونه‌ها خواهد داشت. بدین صورت که با کاهش زاویه شیب درزه نسبت به افق (عمود بر محور بارگذاری) محل شروع انتشار ترک باله‌ای از نوک درزه به سمت مرکز درزه منتقل می‌گردد و تمرکز تنش کششی در مرکز نمونه بیش‌تر از اطراف نمونه می‌شود. این در حالی است که این روند برای درزه‌های باز مشاهده نمی‌شود (شکل ۳-و). در شکل ۳-و الگوی شکست برای نمونه‌ای با طول ۵ سانتی‌متر و زاویه درزه باز 30° آورده شده است.

این رو، این درزه‌ها بر توزیع تنش در سنگ اطراف تأثیر قابل توجهی اعمال می‌کنند [۱۹].

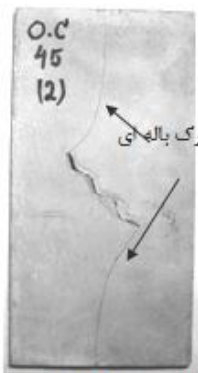
بنابراین انتقال تنش فشاری از درزه بسته ناممتد در نمونه شکل (۳-ج) باعث ایجاد تمرکز تنش در نقطه A موجود در این شکل می‌شود. بدیهی است که تمرکز تنش در این نقطه نسبت به نقاط مجاور بیش‌تر است. این در حالی است که در نمونه شکل (۳-و) تمرکز تنش در نوک درزه باز معطوف می‌شود.

در مطالعه وانگ و چو [۱۴]، بیان شده که مکانیزم انتشار ترک در درزه‌های باز و بسته با سطح صاف مشابه است. با توجه به مسائل مطرح شده در بالا، تأثیر ناهمواری سطح درزه در انتشار ترک در نمونه‌های دارای درزه از قبل موجود را می‌توان دریافت.

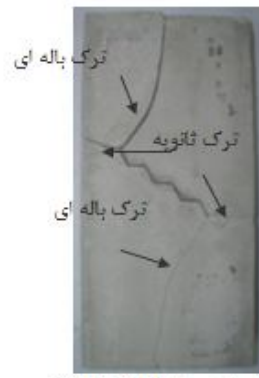
مشخصات ژئومتریکی این نمونه مشابه نمونه موجود در شکل (۳-ج) است. با این تفاوت که درزه موجود در شکلهای (۳-ج) و (و) بترتیب بسته و باز می‌باشند. مشاهده می‌شود که در نمونه شکل (۳-و) شروع هر دو ترک باله‌ای موجود در نمونه از نوک درزه باز بوده است. بنابراین می‌توان دریافت که بسته یا باز بودن درزه موجود در تمرکز تنش درونی نمونه تأثیرگذار است. برای این منظور بایستی که به ماهیت درزه‌های بسته و باز پرداخت. زمانی که درزه‌های بسته ناممتد در معرض تنش فشاری قرار می‌گیرند، قادر به انتقال تنش از خود می‌باشند. درزه‌های باز در انتقال تنش‌های نرمال و برشی ناتوان می‌باشند، بنابراین هنگامی که این‌گونه درزه‌ها تحت بارگذاری فشاری قرار گیرند، تنش‌های اعمال شده به اطراف آنها معطوف می‌شوند. از



(ج) درزه بسته $\beta=30^\circ$, $l=5\text{cm}$
 $s/b=0.26$



(ب) درزه باز $\beta=45^\circ$, $l=6\text{cm}$
 $s/b=0.31$



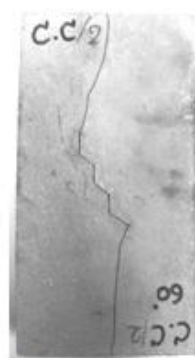
(الف) - درزه باز $\beta=30^\circ$, $l=6\text{cm}$
 $s/b=0.25$



(و) - درزه باز $\beta=30^\circ$, $l=5\text{cm}$
 $s/b=0.26$

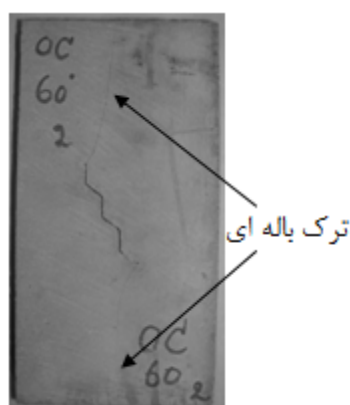


(ه) - درزه باز $\beta=45^\circ$, $l=6\text{cm}$
 $s/b=0.31$



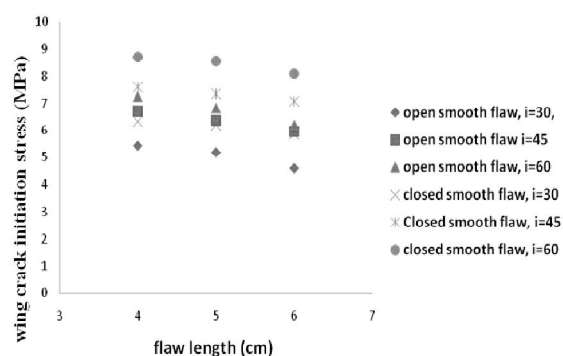
(د) - درزه بسته $\beta=60^\circ$, $l=6\text{cm}$
 $s/b=0.38$

شکل (۳) شکست نمونه‌ها در اثر انتشار ترک باله‌ای و ثانویه



شکل (۵) انتشار ترک باله‌ای از درزه باز با $l=5\text{cm}$ و $i=60^\circ$

در شکل ۶ دیاگرام تنش شروع ترک کششی برای نمونه‌های باز و بسته بر حسب طول ترک‌های ۴، ۵ و ۶ سانتی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش شروع ترک کششی برای درزه‌های بسته بیش‌تر از درزه‌های باز است. افزایش سطح تنش شروع ترک باله‌ای ناشی از اصطکاک بین دو سطح درزه بسته می‌باشد. هم‌چنین از این شکل برمی‌آید که تنش شروع ترک کششی با افزایش طول درزه کاهش می‌یابد. بنابراین تنش لازم برای ایجاد شکست، با طول ترک اولیه نسبت عکس دارد.

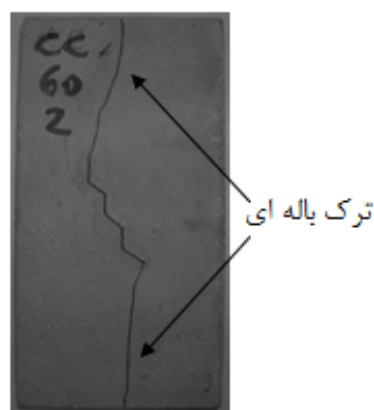


شکل (۶) دیاگرام تنش شروع ترک باله‌ای برای طول‌های مختلف درزه‌های باز و بسته

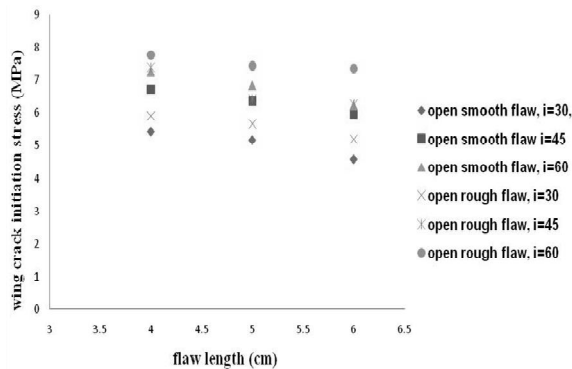
شکل ۷ دیاگرام تنش شروع ترک باله‌ای بر حسب زوایای مختلف درزه‌های باز و بسته آورده شده است. با توجه به

در انتشار ترک باله‌ای برای درزه‌های باز و بسته تفاوت در زاویه انتشار ترک باله‌ای و سطح تنش شروع انتشار باله‌ای نیز وجود دارد. در درزه‌های باز زاویه انتشار ترک باله‌ای نسبت به امتداد درزه بیش‌تر از ترک‌های بسته است. در شکل ۴ و ۵ انتشار ترک باله‌ای در نمونه‌های دارای درزه بسته و باز با شیب 60° درجه و طول ۵ سانتی‌متر نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها برمی‌آید زاویه انحراف ترک کششی برای درزه‌های باز بیشتر از درزه‌های بسته می‌باشد. در نمونه‌های دارای درزه باز، دو سطح درزه تماسی با هم نداشته و اصطکاک بین آن‌ها وجود ندارد و دو سطح را می‌توان سطوح با ضریب اصطکاک صفر در نظر گرفت. در حالی‌که در نمونه‌های دارای درزه‌های بسته دو سطح درزه به هم در تماس می‌باشند و ضریب اصطکاک بین دو سطح قطعاً غیرصفر بوده و مسلماً از ضریب اصطکاک برای درزه‌های باز بیش‌تر است. در مطالعه آزمایشگاهی وانگ [۱۲] و شبیه‌سازی عددی شن [۱۳] نیز اشاره شده است که با افزایش ضریب اصطکاک، انحراف ترک کششی نسبت به امتداد درزه کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق نیز مشابه به این دو مطالعه عددی و آزمایشگاهی می‌باشد.

دیگر تفاوت بین انتشار ترک باله‌ای در نمونه‌های دارای درزه باز و بسته در میزان تنش شروع ترک باله‌ای است.



شکل (۷) انتشار ترک باله‌ای از درزه بسته با $l=5\text{cm}$



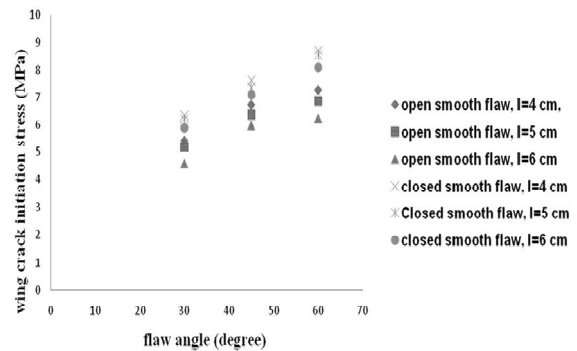
شکل (۹) دیاگرام تنش شروع ترک باله‌ای برای طولهای مختلف درزه‌های بسته با سطح صاف و زیر

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ زاویه بین امتداد نوک درزه و امتداد بارگذاری را بترتیب برای درزه‌های با سطح صاف و دندان‌اره‌ای با زاویه درزه یکسان نسبت به افق و طول برابر (شرایط یکسان) نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای درزه با سطح دندان‌اره‌ای زاویه (O): زاویه بین دو امتداد نوک ترک و نحود بارگذاری) نزدیک به صفر و برای درزه صاف زاویه (O) بزرگ‌تر از صفر است. از آنجا که برای نمونه‌های با درزه‌های باز با سطح زیر نیز تنش شروع ترک‌های کششی بیشتر از انواع صاف آن‌ها، بنابراین افزایش تنش شروع ترک کششی مستقل از سطح درزه بوده و فقط به امتداد نوک ترک نسبت به امتداد بارگذاری بستگی دارد.



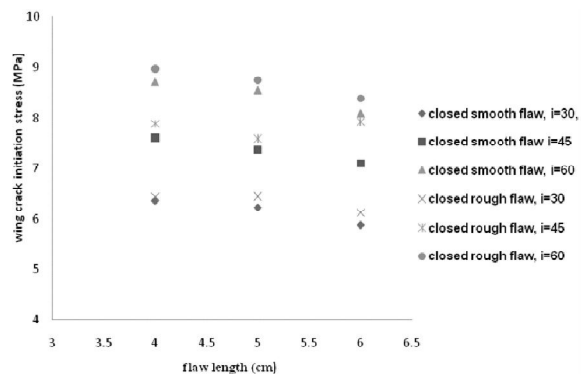
شکل (۱۰) زاویه بین امتداد نوک درزه و امتداد محور بارگذاری برای درزه صاف

دیاگرام، برای درزه‌های با طول‌های مختلف تنش شروع ترک باله‌ای با افزایش زاویه درزه از قبل موجود افزایش می‌یابد.



شکل (۷) دیاگرام تنش شروع ترک باله‌ای برای زوایای مختلف درزه‌های باز و بسته

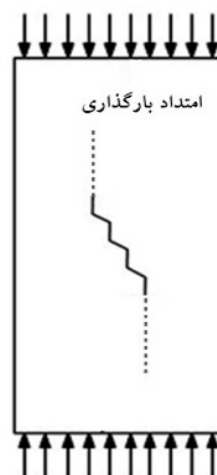
با مقایسه تنش شروع ترک کششی برای درزه‌های با سطح صاف و زیر می‌توان دریافت که هندسه نوک درزه نیز بر تنش شروع ترک بسته و باز تاثیرگذار است. در شکل ۸ و ۹ تنش شروع ترک باله‌ای برای نمونه‌های با درزه‌های صاف و ناهموار با یکدیگر مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که برای درزه‌های باز و بسته، تنش شروع ترک باله‌ای برای درزه‌های زیر نسبت به نمونه‌های با درزه‌های صاف بیشتر است. دلیل این افزایش در تنش شروع ترک باله‌ای را می‌توان به کاهش زاویه بین امتداد محور بارگذاری و امتداد نوک درزه دانست.



شکل (۸) دیاگرام تنش شروع ترک باله‌ای برای طولهای مختلف درزه‌های باز با سطح صاف و زیر

میان نوک ترک و لبه نمونه (s) و عرض نمونه (b) نامیده شود، در نمونه‌هایی که شیب درزه برابر با ۳۰ درجه و نسبت (s/b) کوچک‌تر از ۰/۳ است، ترک-های ثانویه از نوک درزه از قبل موجود شروع به انتشار نموده و تا لبه نمونه منتشر می‌شوند. در شکل (۳-الف) نحوه انتشار ترک ثانویه از نوک بالایی و پایینی نمونه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود زاویه این درزه ۳۰ درجه و طول آن ۶ سانتی‌متر و نسبت (s/b) برابر با ۰/۲۵ است. فواصل دو نوک درزه از قبل موجود با لبه نمونه برابر با ۲/۵ سانتیمتر بوده است. بنابراین ترک ثانویه از دو نوک درزه منتشر شده است. برای اثبات تأثیر فاصله نوک ترک از لبه نمونه، در تعدادی از نمونه‌های با طول‌های ۴ و ۵ سانتی‌متر درزه اندکی متمایل به یکی از لبه‌ها قرار گرفت. به‌عنوان مثال در شکل (۳-و) همانطور که مشاهده می‌شود ترک ثانویه از نوک ترک پایینی منتشر شده و از نوک فوقانی هیچگونه ترک برشی (ثانویه) منتشر نشده است.

نتایج آزمایشات حاکی از آن است که ترک‌های ثانویه در نمونه‌های دارای درزه بسته و باز صاف در امتداد درزه‌های صاف است (شکل ۱۴). برای نمونه‌های دارای درزه‌های با سطح دندانه‌اره‌ای امتداد انتشار ترک ثانویه به موازات یال‌های سطح درزه دندانه‌اره‌ای است که زاویه این بالها با امتداد محور بارگذاری بیش‌تر از ۶۰ درجه است (شکل ۳-ج و و). به‌منظور ارائه‌ی بهتر در شکل (۱۲-۲۳) ترک‌های منتشر شده در نمونه‌های حاوی درزه‌های باز و بسته به‌طور شماتیک نشان داده شده است. ترک‌های باله‌ای با رنگ قرمز و ترک‌های ثانویه با رنگ سبز نشان داده شده‌اند.

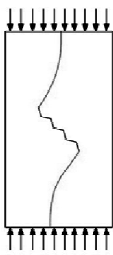


شکل (۱۱) زاویه بین امتداد نوک درزه و امتداد محور بارگذاری برای درزه با سطح دندانه‌اره‌ای

۳-۲- ترک‌های ثانویه (شبه صفحه‌ای)

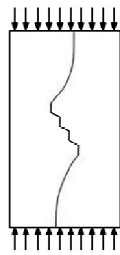
ترک‌های ثانویه ذاتاً ترک‌های برشی هستند. سطح این ترک‌ها زبر بوده و آثار مواد خرد و ساییده شده در سطح آن‌ها وجود دارد [۲۰]. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که این ترک‌ها پس از انتشار ترک‌های باله‌ای منتشر می‌شوند و در انتشار این ترک‌ها شیب درزه و همچنین میزان فاصله نوک ترک از لبه نمونه مؤثر است. باز و بسته بودن درزه تأثیری در الگوی شکست ترک‌های ثانویه ندارد.

پیش‌تر اشاره شد که در نمونه شکل (۳-الف) ترک ثانویه نیز گسترش یافته است. تفاوت نمونه موجود در این شکل با نمونه شکل‌های (۳-ه و د) تنها در زاویه قرارگیری درزه است. در نمونه شکل (۳-ه) هیچ اثری از انتشار ترک ثانویه مشاهده نمی‌شود. بنابراین زاویه قرارگیری درزه باز و یا بسته ناممتد در نمونه بر انتشار ترک ثانویه تأثیر گذار است. مقایسه دو شکل (۳-ج) و (و) مشخص می‌کند که علاوه بر زاویه قرارگیری درزه ناممتد باز یا بسته، پارامتر دیگری در انتشار ترک در این نمونه‌ها دارد. در صورتی که کوچک‌ترین فاصله



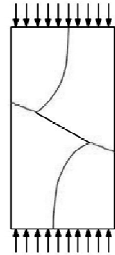
شکل (۱۶) درزه بسته

$$l=6\text{cm}^\circ, \alpha=45, s/b=0.31$$



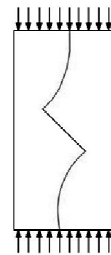
شکل (۱۵) درزه بسته

$$l=6\text{cm}^\circ, \alpha=60, s/b=0.37$$



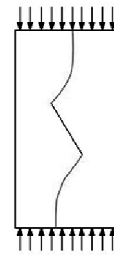
شکل (۱۴) درزه بسته

$$l=6\text{cm}^\circ, \alpha=30, s/b=0.24$$



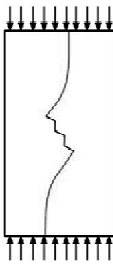
شکل (۱۳) درزه بسته

$$l=6\text{cm}^\circ, \alpha=45, s/b=0.28$$



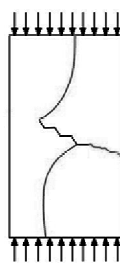
شکل (۱۲) درزه بسته

$$l=6\text{cm}^\circ, \alpha=60, s/b=0.36$$



شکل (۲۱) درزه بسته

$$l=4\text{cm}^\circ, \alpha=60, s/b=0.37$$



شکل (۲۰) درزه بسته

$$l=5\text{cm}^\circ, \alpha=30, s/b=0.26$$



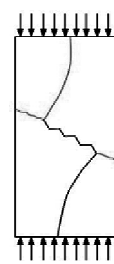
شکل (۱۹) درزه بسته

$$l=5\text{cm}^\circ, \alpha=45, s/b=0.31$$



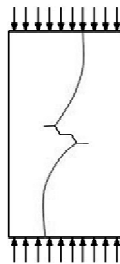
شکل (۱۸) درزه بسته

$$l=5\text{cm}^\circ, \alpha=60, s/b=0.37$$



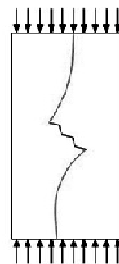
شکل (۱۷) درزه بسته

$$l=6\text{cm}^\circ, \alpha=30, s/b=0.26$$



شکل (۲۳) درزه بسته

$$l=4\text{cm}^\circ, \alpha=30, s/b=0.30$$



شکل (۲۲) درزه بسته

$$l=4\text{cm}^\circ, \alpha=45, s/b=0.32$$

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، رفتار نمونه‌های شبه سنگی دارای درزه‌های بسته و باز با سطح صاف و ناصاف (دندان‌اره‌ای) تحت بارگذاری تک‌محوری بررسی شده است. برای این منظور تعدادی مدل فیزیکی از ترکیب سیمان، گچ و آب ساخته شد تا رفتار درزه‌های باز و بسته در سنگ‌های نرم به صورت آزمایشگاهی بررسی شود. نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح ذیل است:

- ۱- دو نوع ترک کششی (باله‌ای) و برشی (ثانویه) در

نمونه‌های دارای یک درزه ناممتد بسته و باز با سطح صاف و زبر منتشر می‌شود؛

- ۲- انتشار ترک ثانویه پس از انتشار ترک باله‌ای است؛
- ۳- افزایش زاویه قرار گیری درزه‌های ناممتد صاف و ناهموار، افزایش تنش شروع ترک باله‌ای را در پی دارد؛
- ۴- انتشار ترک باله‌های در نمونه‌های حاوی درزه‌های صاف مستقل از باز و بسته بودن درزه از قبل موجود است. در نمونه‌های حاوی درزه‌های ناهموار دندان‌اره‌ای باز و بسته بودن درزه از قبل موجود بر مکانیزم انتشار ترک

- cracks in compression” Eng. Fract.Mech. Vol. 66, pp187-219.
- [7] Bobet A. 2000 “Modeling of crack initiation propagation and coalescence in uniaxial compression” Rock Mech Rock Eng. Vol. 33(2), pp. 119–39.
- [8] Li Y.P. Chen L.Z. Wang Y.H. 2005 “Experimental research on pre-Cracked marble” International Journal of Solids and Structures. Vol. 42, pp. 2505-16.
- [9] Wong R.H.C. Tang C.A. Chau K.T. Lin P.”Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression”. Engineering Fracture Mechanics. . 2002. Vol. 69, pp. 1853–1871.
- [10] Park, C.H. Bobet, A. Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: A comparison, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 46 (2009), 819–829.
- [11] Wong.L. N. Y. Einstein.H. H. Crack Coalescence in Molded Gypsum and Carrara Marble: Part 1. Macroscopic Observations and Interpretation. Rock Mech. Rock Eng 2009. 42:475–511 DOI 10.1007/s00603-008-0002-4
- [12] Reyes O. Einstein H.H. 1991 “Failure mechanism of fractured rock—a fracture coalescence model” Proc 7th Congress of the ISRM Tokyo Japan Vol.1 pp.333–340.
- [13] Shen B. 1995 “The mechanism of fracture coalescence in compression experimental study and numerical simulation” Engineering Fracture Mechanics. Vol. 51(1), pp. 73–85.
- [14] Wong R.H.C. Chau KT. 1998, “Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks” International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol. 35(2), pp. 147–164.
- [15] Bobet A. Einstein HH.1998, “Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression”. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol. 35(7) pp. 863–88.
- [16] Mughieda, Alzoubi A.K., 2004, “Fracture mechanisms of offset rock joints-A laboratory investigation”, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 22, pp. 545–562.
- تاثیرگذار است و تمرکز تنش در این نمونه‌ها بسته به زاویه درزه می‌تواند متفاوت از هم باشد؛
- ۵- انحراف بین امتداد انتشار ترک‌های باله‌ای از امتداد درزه از قبل موجود، برای نمونه‌های با درزه‌های باز بیشتر است؛
- ۶- تنش لازم برای ایجاد ترک باله‌ای، با طول ترک اولیه نسبت عکس دارد؛
- ۷- تنش شروع ترک باله‌ای برای نمونه‌های با درزه‌های باز کوچک‌تر از درزه‌های بسته است؛
- ۸- تنش شروع ترک باله‌ای با افزایش زاویه درزه از قبل موجود افزایش می‌یابد؛
- ۹- در انتشار ترک‌های ثانویه شیب درزه و هم‌چنین میزان فاصله نوک ترک از لبه نمونه مؤثر است. در صورتی که کوچکترین فاصله میان نوک ترک و لبه نمونه (s) و عرض نمونه (b) نامیده شود، در نمونه‌هایی که شیب درزه برابر با 30° درجه و نسبت (s/b) کوچک‌تر از 0.3 است، ترک‌های ثانویه از نوک درزه از قبل موجود شروع به انتشار نموده تا لبه نمونه، منتشر می‌شوند؛

۵- مراجع

- [1] Griffith, A. A., The theory of rupture. Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft, 1924, pp. 55-63.
- [2] Griffith, A. A., The phenomena of rupture and flow in solids. Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A, 1921, 221,163-198.
- [3] Jaeger J.C. Cook N.G.W. 1969 “Fundamentals of rock mechanics” By Methuen & Co. Ltd. 11 New fetter lane London EC4. First published.
- [4] Horii H. Nemat-Nasser S. 1985 “Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure” J Geophy Res. Vol.90 (B4) pp.3105 – 3125.
- [5] Hoek E. Bieniawski Z.T. 1984 “Brittle fracture propagation in rock under compression” International Journal of Fracture. Vol. 26, pp. 276-294
- [6] Bobet A. 2000 “The initiation of secondary

- [19] Wittke W. 1965 "Rock mechanics: theory and applications with case histories" Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [20] A. Ghazvinian, M. J. Azinfar and P. Norozi, 2012 "Mechanical response of discontinuities of different joint wall contact strengths", Journal of Arabian Journal of Geosciences, under Press.
- [17] Indraratna B. "Development and applications of a synthetic material to simulate soft sedimentary rocks". Geotechnique, 1990, Vol. 40 (2), pp. 189-200.
- [18] A. H. Ghazvinian A. Taghichian. The Shear Behavior of Bedding Planes of Weakness Between Two Different Rock Types with High Strength Difference. Rock Mech & Rock Eng, 2009, DOI 10.1007/s00603-009-0030-8.

Experimental Research on Crack Propagation in Specimens with Open and Closed Crack Under Uniaxial Loading

A.H. Ghazvinian^{1*}, P. Norouzi²

1- Assistant Professor of Rock Mechanics, Tarbiat Modares University

2- M.Sc. Student of Rock Mechanics, Tarbiat Modares University

hadi@modares.ac.ir

Abstract:

An attempt in this paper has been made to experimentally investigate the behavior of rock like pre-cracked samples under uniaxial loading. To reach that aim, several physical models made up mixture of cement, gypsum and water with $5 \times 10 \times 20$ cm of dimensions which contained open and closed joints with rough and smooth surface. Open and closed joints with rough and smooth surfaces were located in the center of samples. Open and closed joints with 4, 5 and 6 cm of lengths and 30, 45 and 60 degree of angles relative to loading direction were located in the center of samples. Saw cut profiles were used to make a roughness in the specimens. Experimentally results illustrate that depend on length and angle of closed or open joints, two types of cracks (wing and secondary cracks) propagated from the tips of pre-existing joints. Secondary cracks propagated after than wing cracks. With increasing internal stress due to loading, tensile stress concentration were happened earlier than shear stress concentration at the tips of pre-existing open cracks. Propagation of cracks from the tips of joint proved stress concentration was larger than another part of joints. In fact stress concentration in the central part of joint is more than joint tips. Location of crack propagation changed into the central part of joint with decreasing of closed joints angle relative to horizontal direction so stress concentration in the center more than another part of closed joints. Crack initiation stress depends on length, dip and closed or open state of joints. Wing crack initiation stress proportional to joint angle relative to loading axis and inversely proportional to joint length. In the Similar circumstances Initiation stress for closed joints more than open joints. In this research, effective parameters on secondary crack propagation were investigated. The experimental results reveal that secondary crack propagation depends on joint dip and distance between crack tips and sample sides. If minimum distance between crack tips and sample sides called (s) and width sample called (b) then for the specimens with 30 degree of dip angle and ratio $\frac{s}{b} < 0.3$, secondary cracks propagated from crack tips to sample sides.

Keywords: Crack propagation, Wing crack, Secondary crack, Closed join, Open joint