بررسی تأثیر جهتیابی حفره روی پاسخ ماسه سنگهای حفرهدار در برابر بارهای استاتیکی تراکمی و دینامیکی کششی

علی اکبر مومنی^{*}؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکدهٔ علوم زمین، مینگ تااو؛ دانشگاه CSU چین، دانشکدهٔ مهندسی منابع و ایمنی، علیرضا طالب بیدختی؛ دانشگاه بینالمللی امام خمینی(ره)، دانشکدهٔ علوم پایه گروه زمینشناسی تاریخ: دریافت ۹۸٬۰۸/۵

چکیدہ

تونلهای کم عمق نقش حیاتی در برنامه ریزی شهری و خطوط حمل و نقل ریلی و جاده ای دارند. وجود این حفرات زیر سطحی می تواند باعث تمرکز تنش شده و ناپایداری این فضاها را در برابر بارهای استاتیکی و به ویژه دینامیکی، در پی داشته باشد. از این رو، هدف از این پژوهش ارزیابی تأثیر وجود حفره بیضوی و جهتیابی آن بر رفتار ماسه سنگ تحت بارهای استاتیکی فشاری و دینامیکی کششی است. به منظور ارزیابی تأثیر حفره در برابر شرایط تنش استاتیکی دو گروه از مغزه های ماسه سنگی بدون حفره و حفره دار با جهتیابی من ۲۰ من ۲۰ و ۹۰ درجه فراهم شده و تحت آزمون بارگذاری فشاری تک محوری قرار گرفتند. حین آزمون علاوه بر ثبت تنش، با به کار بردن کرنش سنج، سنسور ثبت انتشار امواج صوتی دینامیکی از دستگاه میله فشار هایکینسون استفاده شد. برای انجام آزمون بارگذاری استفاده از دوربین با سرعت زیاد با نرخ یک عکس در ۱۰ میکروثانیه، ثبت شد. نتایج به دست آمده نشان داد که وجود حفره باعث کاهش مقاومت سنگ در بیشترین حالت ($\cdot=\theta$) تا ۵۰ استفاده از دوربین حالت ($\cdot=\theta$) تا ۷۷ درصد مقاومت فشاری تک محوری می شود. آمره نشان داد که وجود حفره باعث کاهش مقاومت سنگ در بیشترین حالت ($\cdot=\theta$) تا ۵۰

٧٢٩

^{*}نویسنده مسئول ali_moomeni@yahoo.com

حفره موجود در خارج از این منطقه با هر جهت یابی دچار گسیختگی ورقهای شده است. بررسی سطح شکست با استفاده از بررسی میکرسکوپ الکترونی و مقطع نازک نشان داد که شکستگی غالب از نوع مرز بلوری بوده است و سیمان اکسید آهن نقش کلیدی در توسعه این نوع شکستگی دارد.

واژههای کلیدی: ماسه سنگ، حفره بیضوی، تمرکز تنش، بارگذاری دینامیکی، گسیختگی ورقهای

مقدمه

در مقایسه با سنگهای آذرین و دگرگونی، بخش زیادی از سطح زمین با ضخامت نازکی از سنگهای رسوبی پوشیده شده است. ماسه سنگها یکی از انواع سنگهای رسوبی تخریبی بوده است که رخنمون قابل توجهای دارند. بنابراین بسیاری از پروژههای مهندسی با این نوع سنگ درگیر هستند. با توجه به رشد سریع جمعیت و شهرها، توسعهٔ فضاهای زیرزمینی کم عمق بهمنظور ساخت پناهگاه، تونلهای مترو، تونلهای راه و راه آهن، زاغههای مهمات و غیره، یکی از اصول مهم برنامهریزی شهری و زیرساختهای لازم برای توسعهٔ پایدار است. تاریخچهٔ ادبیات مکانیک سنگ نشان میدهد که محققان بسیاری رفتار ماسه سنگها را بررسی کردهاند. بررسی این کارهای پژوهشی نشان میدهد که عمده این پژوهشها روی رفتار مهندسی ماسه سنگ بکر در برابر بارهای استاتیکی و خستگی بوده است [۱]، [۲]، و۳ است، کمتر بررسی شده است.

بهعلت رخداد مکرر بارگذاری دینامیکی طبیعی یا مصنوعی ناشی از زلزله یا انفجار بر روی تونلهای کمعمق، در دو دههٔ گذشته برخی از محققان بهمنظور ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر حفره در تمرکز تنش و مکانیک شکست، بر رفتار دینامیکی سنگهای حفرهدار متمرکز شده-اند. پرکاربردترین فناوری استفاده شده بهمنظور تعیین رفتار دینامیکی سنگها در نرخهای کرنش متوسط و زیاد آزمایش میلهٔ فشاری هاپکینسون است. لی و همکاران این دستگاه را بهسازی کردند و با بهکار بردن یک ضربه زننده دوکی شکل توانستند موج نیمهسینوسی ایجاد کنند که باعث نرخ کرنش ثابت میشود [٤]. ژائو و همکاران با استفاده از میلهٔ فشاری

هایکینسون مقاومت کششی سنگهای گرانیتی را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی بررسی و مشاهده کردند که با افزایش تنش محصورکننده استاتیکی، مقاومت کششی کاهش می یابد [٥]. دایی و همکاران با استفاده از این دستگاه، مقاومت فشاری و کششی دینامیکی سنگ را ارزیابی کردند [٦]. نتایج بررسی آنها نشان داد که مقاومت فشاری و کششی سنگ با افزایش نرخ بارگذاری، افزایش مییابد. فخیمی و همکاران با انجام یک سری آزمونهای آزمایشگاهی و شبیهسازی عددی، رفتار دینامیکی نوعی ماسه سنگ را ارزیابی کردند [۷]. آنها ضريبي تحت عنوان ضريب تقويت مقاومتي را براي همخواني بهتر نتايج آزمونهاي آزمایشگاهی و شبیهسازی عددی، معرفی کردند. پژوهش های ذکر شده همگی روی سنگ بكر انجام شدهاند. این در حالی است كه وجود حفره باعث تغییر در وضعیت تنش ها شده و اطراف حفره یک زون تمرکز تنش ایجاد می شود. این تمرکز تنش می تواند باعث ایجاد آسیب جدی و حتی گسیختگی سنگ شود. هوانگ و همکاران رفتار گرانیت حاوی سه حفری دایرهای را در برابر تنش تراکمی تکمحوری با استفاده از آزمون آزمایشگاهی استاتیکی و مدلسازی عددی بررسی کردند و الگوی توسعه ترک در سنگ دربرگیرنده حفره را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که مدلسازی PFC توانایی زیادی در ارزیابی شکست ناشی از تمرکز تنش در اطراف حفره دارد [۸]. تااو و همکاران با استفاده از آزمایش میله فشاری هاپکینسون اصلاح شده و شبیهسازی عددی، تأثیر فشار جانبی و شرایط فشار اولیه را بر رفتار دینامیکی گرانیت حاوی حفره دایرهای با قطر ۱ سانتیمتر را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که شرایط تنش اولیه استاتیکی، بر رفتار سنگ در برابر بار دینامیکی تأثير بهسزایی دارد [۹]، [۱۰]. نادی و همکاران با استفاده از آزمایش هایکینسون رفتار دینامیکی ماسه سنگ بکر را بررسی کرده و دریافتند که بهعلت نرخ کرنش زیاد، مقاومت دینامیکی سنگ به مقدار چشمگیری افزایش می یابد [۱۱].

معمولاً فضاهای زیر سطحی در برابر بارهای لرزه ای پایداری بیشتری نسبت به سازههای سطحی دارد. همچنین فضاهای زیرسطحی در برابر بارهای دینامیکی فشاری معمول، کم و بیش پایدار بوده است هرچند چنانچه بار دینامیکی وارده شدید باشد، مانند بارگذاری دینامیکی ناشی از زلزلههای بزرگ، ناپایداری رخ میدهد. با این وجود بهدلیل کم بودن مقاومت کششی سنگ در برابر مقاومت فشاری آن، تنشهای دینامیکی کششی می توانند حتی در رخدادهای لرزهای نه چندان شدید، باعث آسیب به فضاهای زیرسطحی شوند که اصطلاحاً به آن گسیختگی ورقهای (اسپالینگ) گفته می شود. اسپالینگ به گسیختگی مواد تحت کشش ایجاد شده به دلیل بازتاب موج فشاری در محل تغییر یک ماده به مادهای دیگر با امپدانس صوتی کم تر، گفته می شود [۱۲]. سنگها از جمله مصالحی هستند که تحت مانند دیواره تونلها و مغارهای زیرزمینی نیز گزارش شده است [۱۳]. اخیراً استفاده از میله فشاری هاپکینسون برای ارزیابی گسیختگی اسپالینگ مصالح سنگی یا شبه سنگ مانند بتن، فشاری هاپکینسون برای ارزیابی گسیختگی اسپالینگ مصالح سنگی یا شبه سنگ مانند بتن اوزایش تنش محصور کننده اولیه بررسی کردند و نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت اسپالینگ سنگ با هاپکینسون، بر ماسه سنگهای تحت فشار اولیه آزمون اسپالینگ را نجام دادند و نتایج مشابهی با پژوهش لی و همکاران گزارش کردند [۱۲].

بررسی کارهای قبلی نشان میدهد که عمده آزمونهای اسپالینگ انجام شده بر سنگ بکر یا سنگ حاوی حفره دایرهای انجام شده است. در این پژوهش رفتار مقاومتی ماسه سنگ حاوی حفره بیضوی تحت بار استاتیکی فشاری و دینامیکی کششی بررسی میشود. همچنین در هر دو گروه آزمونهای استاتیکی و دینامیکی حفره بیضوی حداقل در ٤ جهت مختلف نسبت به امتداد بارگذاری تست شده تا تأثیر جهتیابی حفره روی مقاومت استاتیکی و دینامیکی ماسه سنگها بررسی شود.

مواد و روشها

بهمنظور انجام این پژوهش یک بلوک ماسه سنگی از معدنی در شهر لینیی واقع در استان شاندونگ چین تهیه شد و برای تهیهٔ مغزهها و تیرهای سنگی مناسب به آزمایشگاه دانشگاه ⁽CSU) انتقال داده شد. مغزههای تهیه شده بهمنظور انجام آزمونهای فشاری

^{1.} Central South University

استاتیکی دارای نسبت طول به قطر ۲ و قطر ۵۰ میلی متر بوده اند. سطوح انتهایی این مغزه ها مطابق با استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ آماده و در دو گروه دست نخورده و حفره دار تقسیم شدند [۱۵]. حفره ایجاد شده در این مغزه ها بیضوی با محور بلند ۱/۰ سانتی متر و محور کوتاه ۱ سانتی متر است که نسبت به محور مغزه، محور بلند بیضی در چهار جهت با زاویهٔ ۰، ۳۰، ۲۰ و ۹۰ درجه آرایش یافته است. به منظور ایجاد این حفرات بیضوی در نمونه ها از جت آب استفاده شد. قبل از انجام آزمون مقاومت فشاری تک محوری، بر این مغزه ها کرنش سنج الکترونیکی و سنسور ثبت انتشار امواج صوتی نصب شد تا رفتار کرنشی و روند توسعه آسیب به هنگام بارگذاری ثبت و ارزیابی شود. به علاوه از یک دوربین با نرخ فریم بالا برای ثبت روند توسعه ترک در نمونه ها استفاده شد. لازم به ذکر است که آزمون های استاتیکی به وسیلهٔ یک دستگاه سروکنترل MTS و به روش جابه جایی کنترل انجام شد (شکل ۱).

به منظور ارزیابی مقاومت دینامیکی کششی و تأثیر جهتیافتگی حفره بر آن تعدادی تیر سنگی با سطح مقطع مربعی با اندازه اضلاع ٤ سانتی متری و طول ٦٥ سانتی متر تهیه شد. به مانند آزمون استاتیکی، این تیرهای سنگی نیز به دو گروه سالم و حفره دار تقسیم شدند. در هر تیر حفره دار، دو حفره بیضوی با محور بلند ١٠ میلی متر و محور کوتاه ٢ میلی متر در چهار راستای ٥، ٣٠، ٦٠ و ٩٠ درجه نسبت به محور تیر ایجاد شد. جانمایی این حفرات به این صورت است که یکی از حفرات در فاصله ۸ سانتی متری از انتهای آزاد نمونه و دیگری در فاصله ٢٨ سانتی متری از انتهای متصل به میله دستگاه، قرار دارد. در این پژوهش از دستگاه میله فشاری هایکینسون دانشگاه CSU استفاده شد. چنان که در شکل ۲ دیده می شود این سیستم شامل مخزن گاز نیتروژنی است که گاز از آن وارد تفنگ گازی می شود. هنگام باز کردن شیر تفنگ، فشار گاز باعث به حرکت در آمدن ضربه زننده ۲ دوکی شکل شده و متناسب با سرعت حرکت آن، ضربهای به میلهٔ ورودی وارد شده که تولید موج نیم سینوسی

1. ISRM

2. Striker

فشاری میکند. هنگام رسیدن این موج به نمونه، بهعلت تفاوت در دانسیته میلهٔ فولادی و سنگ، بخشی از این انرژی بهصورت موج کششی منعکس شده و بخش دیگری از آن وارد





شکل ۱. تجهیزات استفاده شده در آزمون مقاومت فشار تکمحوری استاتیکی

نمونه شده و از آن عبور میکند^۳. به محض رسیدن موج به استرین گیج نصب شده در میله ورودی، دستگاه سیگنال را دریافت کرده و از طریق اسیلوسکوپ به دوربین با سرعت زیاد

- 1. Incident wave
- 2. Reflected wave
- 3. Transmitted wave

دستور فیلمبرداری را میدهد. دوربین با سرعت زیاد بهکار برده شده در این پژوهش (FASTCAM SA 1.1) توانایی گرفتن ۱۰۰۰۰ فریم در ثانیه با رزولوشن 176×320 را دارا بوده و علارغم نرخ کرنش بالا در این آزمایش، این امکان را فراهم میکند تا روند توسعه آسیب در نمونه ثبت شود. لازم به ذکر است که علاوه بر تحلیل رفتار دینامیکی و توسعه گسیختگی به وسیلهٔ عکسهای دوربین با سرعت زیاد، سطح گسیختگی از طریق تهیه مقطع نازک و همچنین آنالیز SEM ارزیابی شد.



شکل ۲. اجزای آزمون میله فشاریهاپکینسون اصلاح شده استفاده شده در این پژوهش

نتايج و بحث

أزمونهای مقاومت فشاری تکمحوری استاتیکی

آزمایش های مقاومت فشاری تکمحوری استاتیکی روی نمونه های دست نخورده و حفره دار انجام شده که نتایج آن در جدول ۱ و شکل ۳ ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری تکمحوره و مدول الاستیسیته برای ماسه سنگ سالم بهترتیب ۲۷/۹ مگاپاسکال و ۱۲/۱ گیگاپاسکال به دست آمد. این در حالی است که مقادیر میانگین این پارامترها برای مغزه های حاوی حفره بیضوی کاهش چشمگیری از خود نشان می دهد. چنان که ملاحظه بررگ بیضوی افقی و عمود بر محور مغزه بوده (حالت صفر درجه) است. در این وضعیت بورگ بیضوی افقی و عمود بر محور مغزه بوده (حالت صفر درجه) است. در این وضعیت بعلت این که محدوده تحت تنش کششی ناشی از توزیع مجدد تنش اطراف حفره نسبت به بقیه آرایش های حفره بیش تر است، مقاومت سنگ به مقدار ۵۵ درصد مقاومت حالت بدون به طوری که در حالتی که قطر بزرگ بیضی به موازات محور بارگذاری و عمود بر سطح افق است (حالت ۹۰ درجه) این مقاومت به ۲۷/۸ مگاپاسکال رسیده که برابر با ۷۰ درصد مقاومت سنگ سالم است. بررسی تغییرات مدول الاستیسیته نشان می دهد که در صورت نادیده گرفتن نتایج نمونه های ۱ و ۲ مغزه های حاوی حفره ۲۰ درجه، روند تغییرات مدول الاستیسیته کاملاً منطبق بر روند تغییرات مقاومت فشاری تک محوری بوده است و کم ترین مقدار برای حالت صفر درجه به دلیل زیاد بودن شعاعی انحنای سقف حفره و بیش ترین مقدار برای حالت ۹۰ درجه با کم ترین شعاع انحنای سقف حفره، است. نتایج نشان می دهد که مدول الاستیسیته در مقایسه با مقاومت فشاری تأثیر پذیری کم تری نسبت به حفره داشته ولی با این وجود ایجاد فضای مناسب برای جابه جایی ذرات سنگ و کرنش محوری در اثر وجود حفره باعث شده تا این پارامتر در بازه ۲۰ تا ۳۳ درصد مقدار اولیه خود در سنگ بکر، کاهش یابد.

شماره نمونه	وضعيت نمونه	مقاومت فشارى	مدول الاستيسيته
		تک محوری (MPa)	(GPa)
S1		63.9	10.5
S2	مغزه	74.7	13.1
S3		67.7	14.2
S4	دستنحورده	68.14	11.8
S5		65.2	10.9
S-0-1	مغزه با بيضوي	29.5	7.2
S-0-2		31.6	8.4
S-0-3	• درجه	30.8	7.6
S-30-1		37.3	8.5
S-30-2	مغزه با بيضوى	35.4	7.3
S-30-3		30.6	6.8
S-30-4	۲۰ درجه	30.1	8.1
S-30-5		35.1	6.6
S-60-1		20.8	4.5
S-60-2	مغزه با بيضوى	25.2	5.6
S-60-3		45.4	7.5
S-60-4	،، درجه	40.0	8.1
S-60-5		45.9	10.3
S-90-1		47.4	9.8
S-90-2	مغزه با بيضوى	50.0	11.3
S-90-3	4.	46.9	10.4
S-90-4	۲۰ درجه	47.0	7.5

جدول ۱. نتایج آزمون مقاومت فشاری تکمحوری در حالت استاتیکی

بهمنظور ارزیابی روند باربری مغزهها در حالت حفرهدار یا بدون حفره، نمودار تنش-زمان بههمراه دادههای انتشار امواج فراصوتی در شکل ٤ نشان داده شده است. در این شکل، رفتار بررسی تأثیر جهتیابی حفره روی پاسخ ماسه سنگهای حفرهدار در برابر بارهای استاتیکی تراکمی و دینامیکی کششی 🕊

نمونه S2 بهعنوان نماینده سنگ بکر نشان میدهد که پس از گذشت حدود ۱۰۰ ثانیه از بارگذاری، منحنی تجمعی انتشار امواج صوتی به آرامی شروع به افزایش کرده و از محور افقی جدا می شود. این تغییر می تواند نشاندهندهٔ این مطلب باشد که در این زمان سنگ وارد فاز پلاستیک شده و ایجاد ریزترکها شروع شده است. با وجود این تا لحظهٔ شکست نمونه در تنش حداکثر، پیک چشم گیری در داده انتشار امواج صوتی مشاهده نمی شود. روند تغییرات تنش با زمان نیز به طور پیوسته تا لحظه پیک تنش افزایش یافته و پس از رخداد گسیختگی با شیب بسیار زیادی کاهش می یابد. هم چنین حداکثر پیک منحنی تعداد AE و پیک مقدار تنش تقریباً برهم منطبق است و نشان می دهد که بیش ترین تعداد صدای ترک



منحنی تنش-زمان برای سنگ بکر بهصورت تک قلهای است (شکل ٤ الف). این در حالی است که منحنیهای تنش-زمان برای نمونههای حفرهدار تماما دو قلهای است. برای نمونههای با حفره صفر درجه داده برداری انتشار امواج صوتی با شکست مواجه شده و تنها منحنی تنش زمان نشان داده شده است (شکل ٤ ب). بررسی نمودار تغییرات تنش با زمان برای نمونه 2-0-8 بهعنوان نمایندهٔ نمونههای حاوی حفره صفر درجه نشان میدهد که در تراز تنشی معادل ۸۸ درصد مقاومت نهایی نمونه سنگ یک شکست اولیهای را متحمل شده و پس از کاهش باربری به اندازهٔ ٤ مگایاسکال دوباره نمونه تا نقطه مقاومت نهایی باربری داشته است. شکل (٤ ج) مربوط به نمونهٔ 5-30-S است و چنانکه دیده می شود پس از ٦٠ ثانیه از شروع بارگذاری منحنی تجمعی AE از محور افقی جدا شده و با شیب نسبتاً ثابت و کمی شروع به افزایش میکند. در ۹۷ ثانیه پس از بارگذاری و در تراز ۸۹ درصد مقاومت نهایی، منحنی تنش به ناگهان کاهش یافته و شیب منفی از خود نشان میدهد. لازم به ذکر است که میزان کاهش تنش این نمونه نسبت به دیگر نمونههای با حفره ۳۰ درجه کمتر بوده است. همزمان با این کاهش تنش، سنسور AE تعداد ۲۰۱۷ پالس موج صوتی ثبت کرده و نشان از رخداد شکست اولیه سنگ دارد. شکل (٤ د) مربوط به نمونه 5-60-8 است و نشان میدهد که منحنی تجمعی AE پس از ٤٠ ثانیه از شروع آزمایش از محور افقی جدا شده و به آرامی زیاد میشود تا در زمانی نزدیک به ۹۰ ثانیه پس آزمایش ناگهان افزایش چشمگیری از خود نشان داده بهطوری که منحنی دارای نقطه عطف تغییر شیب است. منحنی تنش-زمان نیز در این لحظه که معادل ۹۲ درصد مقاومت نهایی سنگ است، کاهشی ناگهانی نشان داده و به شکست رخداد اولیه گواهی می دهد. ۱۰۷ ثانیه پس از آزمایش تعداد ۲٤٤٥۲ پالس AE ثبت شده و باعث می شود که منحنی تجمعی AE با شیب نزدیک به قائم شروع به افزایش نماید و نقطه عطف دوم ظاهر شود. بدین معنی که چنان چه دو بخش خطی منحنی تجمعی را ادامه دهیم در یک نقطه یکدیگر را قطع میکنند که تراز تنش مربوط به زمان این نقطه، تنش شروع اتصال ترکهای ایجاد شده است. شکل (٤ ه) مربوط به نمونهٔ S-90-3 است و نشان میدهد در لحظهٔ زمانی ۱۰۰ ثانیه یک پالس نسبتاً قوی از AE ثبت شد. منحنی تنش در این لحظه که در تراز ۹۸ درصدی مقاومت نهایی است نیز یک کاهش خفیفی نشان داده و از رخداد شکست اولیه ضعیف و کرنش پیوسته حکایت دارد. در بازهٔ ۱۰۲ تا ۱۰۶ ثانیه نیز چند پالس قوی ثبت شد و تنش در تراز حداکثر ثابت ماند. در واقع در این مرحله رشد ترکها و اتصال آنها بههم رخ داده تا در نهایت در لحظه ۱۰٤ ثانیه نمونه گسیخته می شود. علاوه بر داشتن دو قله تنش برای نمونههای حاوی حفره، می توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویهٔ جهت یابی حفره نسبت به افق، تراز تنش مربوط به قله اول نسبت به مقاومت نهایی، افزایش یافته و همچنین شدت کاهش تنش در قله اول نیز کاهش می یابد. با توجه به تأثیر جهتیابی حفره بر مقاومت ماسه سنگهای بررسی شده، احتمال این که الگوی شکست نیز از این پارامتر متأثر شود، وجود داشت. از اینرو، در شکل ٥ روند ظاهر شدن ترک تا گسیختگی نمونه نشان داده شده است. برای نمونههای با حفره افقی (S-O-3) وقتی تراز تنش به مرحله ایجاد ترک می رسد، ابتدا در محل تمرکز تنش فشاری در دیوارهها ترک ظاهر می شود. در ادامه با رشد این ترکها که ماهیت برشی دارند، در کف حفره و در محدودهٔ کششی یک ترک کششی به موازات محور بارگذاری ظاهر می شود. با افزایش تنش



S- (ج، S-0-2، برای نمونه های مختلف الف) S- (ج، ج) -S- شکل ٤. نمودار تنش و AE در برابر زمان برای نمونه های مختلف الف) S-0-2، ج) -S- شکل ٤-90-3.

این سه ترک اصلی رشد کرده و الگوی شکست Y شکل کامل می شود. روند گسترش ترک در نمونه با جهت یافتگی ۳۰ درجه برای حفره بیضوی کم و بیش مشابه با نمونه با حالت صفر درجه است. با افزایش تنش ابتدا در محل دیواره چپ ترک برشی و در کف حفره ترک کششی ظاهر می شوند. در ادامه با رشد این ترکها، در محل دیواره سمت راست نیز ترک برشی دوم ظاهر میشود. برعکس نمونه با حفره صفر درجه، در این نمونه الزاماً ترکهای برشی در محلی که حفره کمترین شعاع انحنا را داشته ظاهر نشده و همچنین ترک کششی در محلی که بیشترین شعاع انحنا وجود دارد ایجاد نشده است. در نهایت الگوی Y ناقص نشاندهنده سطوح گسیختگی است. با افزایش جهت یافتگی حفره به ۲۰ درجه (S-60-2)، الگوی گسیختگی تغییر مییابد. ابتدا امتداد محور نمونه دو ترک کششی ظاهر شده و شروع به رشد میکنند. با افزایش سطح تنش وارده به سنگ، تمرکز تنش در دیواره به مقدار لازم رسیده و ترک برشی در دیواره سمت راست ظاهر شده و با رشد این ترکها نمونه گسیخته شده و باربری خود را از دست میدهد. در حالتی که امتداد بیضوی در امتداد محور مغزه قرار دارد (S-90-3) با رسیدن تراز تنش به نقطه تسلیم و گذر از آن، بهعلت تمرکز تنش در دیواره، قطعاتی از دیواره بهسمت داخل حفره، شبیه به آنچه که در اثر یدیده انفجار سنگ ٔ اتفاق میافتد، پرتاب شده و همچنین حالتی شبیه اسپالینگ در کف حفره مشاهده می شود. در ادامه با افزایش تراز تنش، ترکهای برشی تشکیل شده در دیواره شروع به رشد کرده و خود را به لبه مغزه میرسانند. در نهایت گسیختگی تک صفحه مانند آنچه در اغلب آزمایش های مقاومت فشاري تكمحوري سنگ بكر ديده مي شود، تشكيل مي شود.

آزمونهای دینامیکی

به منظور بارزتر شدن اثر جهت یابی حفره بر رفتار دینامیکی سنگ، قطر بزرگ بیضوی ۱۰ میلی متر و قطر کوچک آن ۲ میلی متر در نظر گرفته شد. هم چنین فشار گاز ۰/۳۲ بار در نظر گرفته شده تا شدت موج ایجاد شده به اندازهای نباشد که نمونه را تحت موج فشاری بشکند. پس از باز کردن شیر تفنگ گازی با فشار ۰/۳۲ بار، میله ضربه زن به سمت جلو رانده شده و به سطح مقطع میلهٔ ورودی بر خورد کرده و متناسب با شدت بر خورد موجی فشارشی با دامنهٔ مشخص در میله ورودی منتشر می شود و در طول این میله به سمت نمونه حرکت می کند.

^{1.} Rock burst



بررسی تأثیر جهتیابی حفره روی پاسخ ماسه سنگهای حفرهدار در برابر بارهای استاتیکی تراکمی و دینامیکی کششی

شکل ۵ . الگوی توسعهٔ ترک در نمونههای ماسه سنگی با جهتیافتگی متفاوت حفره

٧٤١

وقتی موج منتشر شده به حد فاصل میله و نمونه میرسد، به دو قسمت تقسیم می شود که قسمت اول به داخل میله ورودی به صورت موج کششی بازگشته که به آن موج برگشتی گفته می شود. قسمت دوم موج بدون تغییر ماهیت از داخل نمونه عبور کرده و وقتی به انتهای نمونه می رسد، به دلیل پایین بودن دانسیته و امپدانس صوتی هوا در مقابل نمونه سنگی، به مانند مرز میله فولادی و سنگ، موج فشاری به صورت موج کششی بازتاب شده و در طول نمونه حرکت می کند. علی رغم کم بودن شدت موج کششی بازتاب شده در برابر موج فشاری اولیه، کم تر بودن مقاومت کششی سنگ می تواند باعث شود تا موج انعکاسی شدت لازم برای گسیختگی اسپالینگ سنگ داشته باشد.

فرایند گسیختگی نمونه با حفرات بیضوی در جهات مختلف به وسیلهٔ دوربین با سرعت زیاد ثبت شده است (شکل ٦). لازم به ذکر است که زمان ثبت شده روی این تصاویر از لحظه رسیدن موج به کرنش سنج است و به علت تعداد زیاد عکسهای گرفته شده برای هر آزمون (٣٠٩٢ عکس)، امکان آوردن تمامی آنها مقدرو نیست و تنها در چهار زمان آورده می شود. چنانکه در شکل ٦ دیده می شود، نمونه سنگ بکر فاقد حفره در برابر این بار گسیخته نشده است، در حالی که نمونه های حاوی حفره همگی از دیواره حفره دوم (حفره نزدیک به میله ورودی) دچار گسیختگی شدهاند. این نتایج نشان می دهد که این حفرات باعث تمرکز تنش و افزایش آن تا بیش از مقاومت کششی سنگ شدهاند. در نمونه هایی که امتداد قطر بزرگ حفره بیضوی به موازات و عمود بر جهت امتداد بارگذاری (امتداد طولی نمونه) هستند، سطح شکست به صورت مستقیم و عمود بر محور طولی نمونه، در جایی که

حفره بهترتیب بیشترین و کمترین شعاع انحنا را دارد، تشکیل شده است. نمونههای با ۳۰ و ۲۰ درجه امتداد قطر بزرگ بیضی نسبت به جهت انتشار موج، سطح شکست خطی نیست و بهصورت پلهای است. در واقع محل ایجاد ترک در جایی است که حفره بیضوی کمترین شعاع انحنا را دارد اتفاق افتاده و با توجه بهاینکه این محلها به موازات قطر بزرگ بیضی بوده است و این راستا بهصورت زاویهدار نسبت به انتشار موج آرایش یافته است، شکست پلهای تشکیل شده است. نکته قابل توجه در نتایج به دست آمده این است که حفره دوم گسیخته شده است.



بررسی تأثیر جهتیابی حفره روی پاسخ ماسه سنگهای حفرهدار در برابر بارهای استاتیکی تراکمی و دینامیکی کششی ۷۲۳

شکل ٦. نحوهٔ گسیختگی اسپالینگ نمونهها در آزمون بارگذاری دینامیکی

علت این تفاوت رفتار در حفرات همسان، ناشی از محل قرارگیری آنها است. حفره گسیخته نشده در انتهای آزاد نمونه یعنی جایی که موج فشاری به موج کششی تبدیل می شود قرار دارد. با توجه به این که موج نیمه سینوسی ایجاد شده داری یک طول موج است، زمانی که جبهه موج به انتهای نمونه رسیده و به صورت موج کششی بازمی گردد، بخش عقبی موج هنوز در فاز فشاری است. بنابراین در بخش انتهای نمونه بخشی از موج به صورت کششی است و بخشی فشاری تا جایی که قسمت عقبی موج نیز به انتها رسیده و به صورت موج کششی بازتاب شود.

از آنجاکه موج فشاری و کششی اثر همدیگر را خنثی میکنند، در این منطق که هر دو موج حضور دارند، شدت تنش کششی از مقاومت کششی سنگ کمتر است و علی رغم ایجاد تمرکز تنش در اطراف حفره، به ترازی که باعث گسیخته شدن نمونه شود، نمی رسد. به این بخش از انتهای نمونه، منطقه ایمن یا سوپر پوزیشن می گویند.

برای بررسی رفتار کانی های تشکیل دهندهٔ این ماسه سنگ ها تحت بارگذاری دینامیکی و چگونگی گسترش ترک در آنها، سطح شکست با استفاده از پژوهش های میکروسکوپ الکترونی و نوری بررسی شد. بررسی مقاطع نازک حاوی سطح شکست نشان می دهد که سیمان در سنگ های بررسی شده نقش بارزی در توسعه ترک بازی می کند. سه تیپ سیمان شامل سیمان کربناته، سیلیسی و اکسید آهن در این ماسه سنگ ها حضور دارند. در این بین اکسید آهن نقش بسیار کلیدی در کنترل مسیر رشد ترک ها دارد. این نوع سیمان غالباً به صورت نوار باریکی دور قطعات آواری که عمدتاً از کوارتز، فلدسپات و خرده سنگ های آتشفشانی تشکیل شده است را پوشانده است (شکل ۷). از آن جاکه مقاومت سیمان اکسید آهن در مقایسه با دیگر سیمان ها و اجزای آواری تشکیل دهندهٔ سنگ ضعیف تر است، ترک ها و شکستگی های تشکیل شده در طول سیمان اکسید آهن توسعه یافته و باعث شده تا شکستگی غالب سنگ به صورت شکستگی های مرز بلوری بوده و جلوه مضرسی داشته باشد.

مشاهدات میکروسکوپ الکترونی بر سطح شکست نتایج مشابهی با بررسیهای پتروگرافی مقاطع نازک در پی داشت. نکته قابل توجه در درشت نماییهای کم سطح شکست سنگ، حضور قطعات آواری برجسته با گرد شدگی خوب و یا غالب این قطعات که بهصورت فرورفتگی مقعر است (شکل ۸). این مطلب تأییدکنندهٔ توسعه شکستگی بهصورت مرز بلوری است. با وجود این برخی از کانیهای که دارای رخ بوده است مانند میکا، در امتداد رخ گسیخته شدهاند.



شکل ۷. تصاویر مقطع نازک تهیه شده حاوی سطح شکست. Q: کوارتز، F: خرده سنگ آتشفشانی، P: پلاژیوکلاز، C: سیمان کربناته



شكل ٨. تصاوير SEM از سطح شكست نمونه GD1، الف-ج) و نمونه GD2، د)

نتيجه گيرى

در این پژوهش، رفتار ماسه سنگهای حفرهدار با جهت حفره متفاوت در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی ارزیابی شده واین نتایج بهدست آمده است:

۱. مقاومت فشاری سنگ حفرهدار در شرایطی که قطر بزرگ بیضی عمود بر محور مغزه است با بیشترین کاهش به ۵۵ درصد مقاومت حالت بدون حفره و در حالتی که قطر بزرگ به موازات محور مغزه است با کمترین کاهش به ۷۰ درصد مقاومت سنگ بکر میرسد. روند کاهش مدول الاستیسیته مشابه مقاومت فشاری تکمحوره بوده است و این پارامتر در بازه ۲۰ تا ۳٦ درصد مقدار اولیه خود کاهش یابد.

- ۲. منحنی تنش زمان و AE –زمان نمونه های سنگ بکر دارای یک قله منطبق بر لحظه شکست نمونه بوده است در حالی که وجود حفره باعث ایجاد پله در منحنی تنش – کرنش یا تنش زمان شده و منحنی تعداد انتشار امواج صوتی به صورت دو قله ای بوده است که قله اول در لحظهٔ اولیه ایجاد ترک ناشی از تمرکز تنش در اطراف حفره و قلهٔ دوم در لحظه گسیختگی نمونه دیده می شود. علاوه بر داشتن دو قله تنش برای نمونه های حاوی حفره، می توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویهٔ جهتیابی حفره، تراز تنش مربوط به قلهٔ اول نسبت به مقاومت نهایی، افزایش یافته و هم چنین شدت کاهش تنش در قله اول نیز کاهش می یابد.
- ۳. بررسی الگوی شکست نشان میدهد که در حالتی که محور بزرگ بیضی عمود بر محور مغزه است، الگوی شکست به صورت Y است و نشان از دو سطح شکست برشی (تیپ II) و یک سطح شکست کششی (تیپ I) دارد. در حالت ۳۰ درجه الگوی شکست Y ناقص بوده است و با افزایش جهتیابی حفره به ۲۰ درجه، الگوی آسیب نمونه شامل دو سطح شکست کششی ناقص به موازات محور مغزه و دو شکستگی برشی توسعه یافته است. در حالت ۹۰ درجه شکست نمونه به صورت برش خالص توسعه می یابد.
- ۴. نتایج آزمون دینامیکی اسپالینگ نشان داد که در شدت بار دینامیکی مشابه، سنگ بکر دچار آسیب نشده ولی تمامی نمونههای حاوی حفره گسیخته شدند. در سنگهای حاوی حفره، تمامی حفرات نزدیک به انتهای آزاد نمونه سالم بوده است در صورتی که حفره نزدیک به میله بارگذاری با هندسه یکسان حفره، تماماً گسیخته شده و نشان میدهد در منطقه سوپرپوزیشن به علت تداخل امواج فشاری و کششی موج ضعیف شده و تنش متناظر با آن به کمتر از مقاومت کششی سنگ کاهش یافته و مطقهٔ ایمنی در این بخش وجود دارد. در نمونههایی که امتداد قطر بزرگ حفره بیضوی به موازات و عمود بر جهت امتداد بارگذاری (امتداد طولی نمونه) است، سطح شکست به صورت مستقیم و عمود بر محور طولی نمونه بوده در حالی که نمونههای با جهت یابی ۳۰ و است که حفره بیضوی کمترین شعاع انحنا را دارد.
- ۵. ارزیابی رفتار کانی ها در برابر بارگذاری دینامیکی با استفاده از آنالیز SEM و بررسی مقطع نازک بر سطح شکست نشان میدهد که ترکهای توسعه یافته از نوع ترک مرز

بلوری بوده است و در گسترش این نوع ترک، حضور نوار نازکی از سیمان اکسید آهن در مرز بلورها نقش کلیدی ایفا میکند.

تشکر و قدردانی

از پروفسور خیبینگ لی ریس گروه مهندسی معدن دانشگاه مرکزی جنوب چین، بهدلیل همکاری در انجام این پژوهش، همچنین از آقایان اوما و وانگ برای همکاری در آزمایشگاه و انجام آزمایشها تشکر میکنیم.

منابع

- 1. Khanlari G. H., Rafiei B., Abdilor Y., "An experimental investigation of the Brazilian tensile strength and failure patterns of laminated sandstones", Rock Mech Rock Eng, 48 (2) (2015) 843-852.
- Heidari M., Momeni A., Rafiei B., Khodabakhsh S., Torabi-Kaveh M., "Relationship Between Petrographic Characteristics and the Engineering Properties of Jurassic Sandstones, Hamedan, Iran", Rock Mech Rock Eng. 46 (2013) 1091-1101.
- Liu E., He S., "Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions", Engineering Geology, 125 (2012) 81-91.
- Li X. B., Zhou Z. L., Lok T., Hong L., Yin T. B., "Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads", Int J Rock Mech Min Sci, 45 (5) (2008) 739-48.
- Zhou Z., Li X., Zou Y., Jiang Y., Li G., "Dynamic Brazilian tests of granite under coupled static and dynamic loads", Rock Mech Rock Eng, 47 (2) (2014) 495-505.
- Dai F., Huang S. H., Xia K., Tan Z. H., "Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar)", Rock Mech Rock Eng, 43 (6) (2010) 657-666.

- Fakhimi A., Azhdari P., Kimberley J., "Physical and numerical evaluation of rock strength in Split Hopkinson Pressure Bar testing", Computers and Geotechnics, 102 (2018) 1-11.
- Huang Y.H., Yang S. Q., Ranjith P. G., Zhao J., "Strength failure behavior and crack evolution mechanism of granite containing preexisting non-coplanar holes: Experimental study and particle flow modeling", Computers and Geotechnics, 88 (2017)182-198.
- Tao M., Zhao H., Li X. B., Li X., Du K., "Failure characteristics and stress distribution of pre-stressed rock specimen with circular cavity subjected to dynamic loading", Tunnelling and Underground Space Technology, 81 (2018) 1-15.
- Tao M., Ma A., Cao W., Li X., Gong F., "Dynamic response of prestressed rock with a circular cavity subject to transient loading", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 99 (2017) 1-8.
- Nadi A., Goshtasbi K., Naghdabadi R., Arghavani J., Ashrafi M. J., "Experimental investigation of dynamic behavior of sandstone under high strain rates", Modares Civil Engineering journal, 15 (3) (2015)119-128(In Persian).
- Weerheijm J., VanDoormaal J., "Tensile failure of concrete at high loading rates: newtest data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests", Int. J. Impact. Eng, 34 (2007) 609-26.
- Li X. B., Tao M., Chengqing W., Du K., Qiuhong W., "Spalling strength of rock under different static pre-confining pressures", International Journal of Impact Engineering, 99 (2017) 69-74.
- 14. Zhao H., Tao M., Li X. B., Cao W., Wu C., "Estimation of spalling strength of sandstone under different pre-confining pressure by experiment and numerical simulation", International Journal of Impact Engineering, 133, (2019) 103359.
- 15. ISRM, Brown E. T., editor, "Rock characterization testing and monitoring-ISRM suggested methods", Oxford: Pergamon, (1981) 211.