

۱۸۸۵۹۵۲

ارزیابی رفتار شکست مواد ترد با استفاده از نرم افزار PFC

دکتر هادی حائری
دکتر وهاب سرفرازی
دکتر علیرضا خالو



مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف



مؤسسه انتشارات هادی
دانشگاه صنعتی شریف

ارزیابی رفتار شکست مواد ترد با استفاده از نرم افزار PFC

تألیف: هادی حائری، وهاب سرفرازی، علی رضا خالو

طراحی جلد: الهه احمدی میرقائد

ناشر: مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف

چاپ اول: ۱۳۹۵

شمارگان: ۱۰۰۰

بها: ۱۲۵۰۰۰ ریال

حق چاپ برای مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف محفوظ است

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۲۰۸-۱۷۱-۴ ISBN 978-964-208-171-4

دفتر مرکزی: خیابان آزادی- دانشگاه صنعتی شریف تلفن: ۶۶۰۱۳۱۲۹-۶۴۰۷۲-۶۶۱۶۴۰۷۰

دفتر فروش: میدان انقلاب- خیابان شهید منیري جاوید (اردیبهشت)- ساختمان ۲۵۳ - طبقه چهارم- واحد ۴۰۲

تلفن: ۶۶۴۰۵۱۳۲-۶۶۹۶۷۸۹۶ پست الکترونیکی: publication@mehr.sharif.edu

موضوع: Rock mechanics
(مکانیک)
موضوع: Deformations (Mechanics)
شناسه افزوده: سرافرازی، وهاب.
شناسه افزوده: خالو، علیرضا.
شناسه افزوده: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی
رده بندی کنگره: ۴ ۱۳۹۵ الف ۶/۶-TAV
رده بندی دیویی: ۶۲۴/۱۵۱۳۲
شماره کتابشناسی ملی: ۴۲۴۱۷۲۶

سرشناسه: حائری، هادی، ۱۳۶۲.
عنوان و نام پدیدآور: ارزیابی رفتار شکست مواد ترد با استفاده از نرم افزار PFC.
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری: ۱۸۰ ص. مصور، جلد.
شابک: 978-964-208-171-4
وضعیت فهرست: فیا
موضوع: مکانیک سنگ
موضوع: نرم افزار پی. اف. سی.
موضوع: Computer software (PFC)

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست مطالب

هفت	پیشگفتار
۱	فصل اول: معرفی نرم افزار PFC2D
۱	۱-۱ مقدمه
۱	۲-۱ مدل سازی ذرات مقید در مدل سازی سنگ های سیمان
۶	۳-۱ روش المان مجزا در برنامه کامپیوتری PFC2D
۸	۴-۱ میرایی در حرکت ذرات
۹	۵-۱ رفتار محیط دانه ای در PFC2D و پارامترهای داخلی محیط نیاز
۱۴	۶-۱ توصیف پارامترهای داخلی مدل
۱۵	۷-۱ نحوه ایجاد مدل عددی
۱۷	۸-۱ مزایا و معایب روش نرم افزار PFC2D
۲۰	۹-۱ کاربرد نرم افزار PFC2D در مکانیک سنگ
۲۷	فصل دوم: نحوه همسان سازی مدل عددی
۲۷	۱-۲ مقدمه
۲۷	۲-۲ اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از تست های آزمایشگاهی
۲۸	۱-۲-۲ آماده سازی دوغاب
۲۹	۲-۲-۲ تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه بکر
۳۰	۳-۲ همسان سازی مدل عددی

۳۰	۱-۳-۲ ساخت مدل عددی
۳۱	۲-۳-۲ همسان سازی مدل عددی
۳۱	۱-۲-۳-۲ انتخاب پارامترهای داخلی مدل
۳۳	۲-۲-۳-۲ آزمایش فشاری تک محوری
۳۴	۲-۲-۳-۲ (الف) همسان سازی مدل یانگ ۵۰ %
۳۴	۲-۲-۳-۲ (ب) همسان سازی نسبت پواسون ۵۰ %
۳۵	۲-۲-۳-۲ (ج) همسان سازی مقاومت نهایی
۳۶	۲-۲-۳-۲ (د) همسان سازی تنش شروع ترک
۳۸	۲-۳-۲-۲ آزمایش کشش برزیلی
۳۹	۲-۳-۲-۱ مشخصه آرایش سه محوره

فصل سوم: آزمون برش مستقیم آزمایشگاهی

۴۳	۱-۳ مقدمه
۴۳	۲-۳ آماده سازی نمونه های دارای درز سر نامتد
۴۶	۳-۳ معرفی و اصلاح محفظه برش مستقیم
۵۳	۴-۳ مطالعه الگوی شکست پل سنگ
۵۳	۱-۴-۳ الگوی شکست در نمونه های حاوی درزه های نامتد غیرهم پوشان
۵۴	۲-۴-۳ الگوی شکست در نمونه های حاوی درزه های نامتد هم پوشان
۵۴	۵-۳ رفتار مقاومتی نمونه های حاوی درزه های نامتد

فصل چهارم: شبیه سازی عددی آزمایش برش مستقیم

۵۷	۱-۴ مقدمه
۵۷	۱-۱-۴ آماده سازی مدل های حاوی درزه های نامتد
۶۰	۲-۱-۴ آماده سازی مدل های بکر
۶۰	۳-۱-۴ نحوه بارگذاری برش مستقیم
۶۵	۲-۴ بررسی توزیع نیرو و جابجایی در پل سنگ
۶۵	۱-۲-۴ توزیع نیروهای موازی در مدل قبل از شروع ترک
۶۵	۱-۱-۲-۴ تأثیر نسبت پل سنگ
۶۶	۲-۱-۲-۴ تأثیر زاویه داری پل سنگ
۶۷	۲-۲-۴ توزیع نیروهای تماسی در مدل قبل از شروع ترک

- ۶۷ ۱-۲-۲-۴ تأثیر نسبت پل سنگ
- ۶۹ ۲-۲-۲-۴ تأثیر زاویه‌داری پل سنگ
- ۷۰ ۳-۴ بر دارهای جابجایی دیسک‌ها در لحظه شکست پل سنگ
- ۷۰ ۱-۳-۴ بردار جابجایی دیسک‌های شکسته شده
- ۷۲ ۲-۳-۴ بردار جابجایی در درزه‌های ناممتد پلکانی
- ۷۴ ۴-۴ مطالعه تنش‌های محلی با استفاده از تنش سنج نصب شده در پل سنگ
- ۷۴ ۱-۴-۴ تغییرات تنش‌های محلی در پل سنگ تحت تنش نرمال کم
- ۷۶ ۲-۴-۴ تغییرات تنش محلی در پل سنگ تحت تنش نرمال زیاد
- ۷۹ **فصل پنجم: مطالعه شروع، پیشروی و یکپارچگی ترک در مدل عددی**
- ۷۹ ۱-۵ مکانیزم شکست پل سنگ
- ۸۱ ۱-۱-۵ تأثیر جداسازی درزه بر الگوی شکست درزه‌های ناممتد
- ۸۱ ۱-۱-۱-۵ تأثیر جداسازی درزه بر الگوی شکست درزه‌های ناممتد صفحه ای
- ۹۶ ۲-۱-۱-۵ تأثیر جداسازی درزه بر الگوی شکست درزه‌های پلکانی غیرهم‌پوشان با زاویه پل سنگ 25°
- ۱۰۴ ۳-۱-۱-۵ تأثیر جداسازی درزه بر الگوی شکست درزه‌های ناممتد پلکانی هم‌پوشان با زاویه پل سنگ 140°
- ۱۰۶ ۲-۱-۵ تأثیر زاویه‌داری پل سنگ بر مکانیزم شکست درزه‌های ناممتد
- ۱۰۶ ۱-۲-۱-۵ تأثیر زاویه‌داری پل سنگ بر مکانیزم شکست پل سنگ تحت تنش نرمال خارجی کم
- ۱۱۵ ۲-۲-۱-۵ تأثیر هم‌پوشانی درزه‌ها بر الگوی شکست پل سنگ تحت تنش نرمال خارجی زیاد
- ۱۲۱ **فصل ششم: بررسی منحنی نیروی برشی، تنش شروع ترک، تنش شکست**
- ۱۲۱ ۱-۶ تفسیر منحنی نیروی برشی - جابجایی برشی
- ۱۲۱ ۱-۱-۶ تأثیر نسبت پل سنگ بر منحنی نیروی برشی - جابجایی برشی
- ۱۲۱ ۱-۱-۱-۶ درزه‌های ناممتد صفحه‌ای
- ۱۲۲ ۲-۱-۱-۶ درزه‌های ناممتد پلکانی ناهم‌پوشان
- ۱۲۳ ۳-۱-۱-۶ درزه‌های ناممتد پلکانی هم‌پوشان
- ۱۲۳ ۲-۱-۶ تأثیر زاویه‌داری پل سنگ بر منحنی نیروی برشی - جابجایی برشی

۱۲۵	۳-۱-۶ تأثیر تنش نرمال بر منحنی نیروی برشی - جابجایی برشی
۱۲۵	۱-۳-۱-۶ درزه‌های ناممتد صفحه‌ای
۱۲۶	۲-۳-۱-۶ درزه‌های پلکانی غیرهم‌پوشان با زاویه پل سنگ 50°
۱۲۶	۳-۳-۱-۶ درزه‌های پلکانی هم‌پوشان با زاویه پل سنگ 115°
۱۲۷	۲-۶ مقاومت برشی درزه‌های ناممتد
۱۲۷	۱-۲-۶ براساس تغییر در نسبت پل سنگ
۱۲۹	۲-۲-۶ مقاومت برشی درزه‌های ناممتد براساس تغییر در زاویه‌داری پل سنگ
۱۳۲	۳-۲-۶ با تغییر در تنش نرمال خارجی
۱۳۶	۳-۳-۶ تنش در دوع ترک
۱۳۶	۱-۳-۶ براساس تغییر در نسبت پل سنگ
۱۳۷	۲-۳-۶ براساس تغییر در زاویه پل سنگ
۱۳۸	۳-۳-۶ براساس تغییر در تنش نرمال خارجی
۱۴۱	۴-۶ شکست آبی و شکست ساختمانی پل سنگ
۱۴۱	۱-۴-۶ تأثیر نسبت پل سنگ
۱۴۲	۲-۴-۶ تأثیر زاویه‌داری پل سنگ
۱۴۵	۳-۴-۶ تأثیر تنش نرمال
۱۴۹	مراجع
۱۶۷	واژه‌نامه انگلیسی - فارسی
۱۶۹	واژه‌نامه فارسی - انگلیسی
۱۷۱	فهرست راهنما

پیشگفتار

به‌طور معمول، ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ با فرض ممتد بودن مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. این درحالی‌است که بسیاری از درزه‌ها از نظر پیوستگی و تداوم صد درصد کامل نیستند و توده پل‌های سنگی، که ناحیه بین دو درزه است، از یکدیگر مجزا شده‌اند. لذا برای تشکیل سطح شکست، باید ابتدا پل‌سنگ‌ها گسیخته شوند و گسیختگی آنها به درزه‌های مقطع مجاور وصل شود تا سطح شکست کامل و ممتد گردد. مطالعه شکست پل‌سنگ‌ها تحت بار برشی از جنبه‌های مختلف، از اهمیت است که عبارت‌اند از:

- شناسایی الگوی شکست و مسیر پیشروی ترک در پل‌سنگ که در جابجایی محل بهینهٔ احداث حفاریات زیرزمینی مفید است.
- چنانچه پل‌سنگ‌ها در یک ناحیه ناصله بین دو درزه را اشغال کنند می‌توانند به‌عنوان سیستم نگهداری داخلی عمل کرده، بار زیادی را تحمل کنند. بررسی مقاومت این نگه‌دارنده‌ها می‌تواند منجر به افزایش باربری سطح لغزش، کاهش ملزومات نگهداری خارجی و کاهش هزینه‌ها گردد.
- با آگاهی از مقاومت پل‌سنگ‌ها می‌توان درانتخاب آیا تحت بارگذاری خارجی نظیر سدسازی، پل‌سازی و ... ترک در پل‌سنگ منتشر می‌شود و میزان رشد آن چقدر است.
- با آگاهی از مقاومت برشی پل‌سنگ‌ها می‌توان مسیر شکست آن را شناسایی و گوه‌های مستعد لغزش را تعیین و اقدامات ایمنی را انجام داد.
- دانستن ظرفیت باربری پل‌سنگ‌ها می‌تواند در طراحی میزان بارگذاری خارجی مجاز اعمال شده به پل‌سنگ مفید باشد.

هدف این کتاب، آموزش کد جریان ذره دو بعدی^۱ و مطالعه رفتار برشی درزه‌های ناممتد با استفاده از این کد است. همچنین نحوه اعتبارسنجی این نرم افزار با تست‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. به این ترتیب که با بهره‌گیری از نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار PFC2D و آزمون آزمایشگاهی، تأثیر نسبت سطح پل‌سنگ به سطح کل برش، زاویه‌داری پل‌سنگ و تنش

1.rock bridge

2.particle flow code 2D

نرمال بر حالت، الگو و مکانیزم شکست پل سنگ، تنش‌های داخلی پل سنگ، منحنی تنش برشی - جابجایی برشی، تنش شروع ترک، تنش شکست و شکست آبی و شکست تأخیری پل سنگ بررسی می‌گردد. این کتاب شامل هفت فصل است.

در فصل اول به معرفی نرم‌افزار PFC2D پرداخته می‌شود. در این فصل ساختار روش المان مجزا در مدل‌سازی ذرات متصل توصیف می‌گردد. همچنین پارامترهای داخلی مدل معرفی و رفتار محیط دانه‌ای تشریح می‌گردد.

فصل دوم به نحوه به‌کارگیری نرم‌افزار PFC2D می‌پردازد. نحوه به‌کارگیری شامل همسان‌سازی اولیه است. به عبارت دیگر با استفاده از همسان‌سازی، مدل عددی مشابه نمونه آزمایشگاهی ساخته می‌شود. در این فصل مراحل مورد نیاز برای همسان‌سازی بیان می‌شود.

فصل سوم به تشریح نحوه انجام تست‌های برش مستقیم آزمایشگاهی و چگونگی شبیه‌سازی عددی این آزمایش‌ها می‌پردازد. در این فصل، نحوه مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی پل بین دو درزه با زاویه درزه و طول‌های مختلف بیان می‌شود. مقدار این متغیرها ذکر می‌شود و چگونگی انتخاب تنش‌های نرمال برای آزمایش توصیف می‌گردد.

در فصل چهارم، به بررسی تئوری نیرو و جابجایی در ناحیه بین دو درزه پرداخته می‌شود. به این ترتیب که تأثیر طول و زاویه درزه بر تنش پل سنگ بین دو درزه بر توزیع نیروهای موازی و تماسی در پل سنگ قبل از شروع ترک بررسی می‌گردد. همچنین تأثیر طول پل سنگ و زاویه‌داری پل سنگ بر بردار جابجایی دیسک‌های شکست شده توصیف می‌شود. در این فصل همچنین تغییرات تنش‌های محلی در ناحیه بین دو درزه تحت تنش نرمال کم و زیاد مطالعه می‌گردد.

فصل پنجم به مطالعه حالت، الگو و مکانیزم شکست ناحیه بین دو درزه می‌پردازد و تأثیر طول، زاویه‌داری و تنش نرمال را بر شکست آشکار می‌سازد.

در فصل ششم، منحنی تنش برشی - جابجایی برشی پل سنگ تفسیر می‌گردد. همچنین تأثیر طول، زاویه‌داری و تنش نرمال بر تنش شروع ترک، تنش شکست و شکست آبی و شکست تأخیری پل سنگ آشکار می‌شود.

هادی حائری

فوق دکترای مکانیک شکست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکترای مکانیک سنگ

عضو بنیاد ملی نخبگان

وهاب سرفروزی

استادیار گروه مهندسی معین، دانشگاه صنعتی همدان

علیرضا خالو

استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف