

单裂隙岩石--混凝土组合体断裂特征颗粒流模拟

李庆文 才诗婷 李涵静 钟宇奇 刘艺伟

Particle Flow Simulation of Fracture Characteristics of Rock-Concrete Combination with Single Crack

LI Qingwen, CAI Shiting, LI Hanjing, ZHONG Yuqi, LIU Yiwei

引用本文:

李庆文,才诗婷,李涵静,等.单裂隙岩石-混凝土组合体断裂特征颗粒流模拟[J].高压物理学报,2024,38(5):054202. DOI: 10.11858/gywlxb.20240723

LI Qingwen, CAI Shiting, LI Hanjing, et al. Particle Flow Simulation of Fracture Characteristics of Rock–Concrete Combination with Single Crack[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5):054202. DOI: 10.11858/gywlxb.20240723

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240723

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含裂隙岩石单轴压缩下力学性能及能量演化机制研究

Mechanical Properties and Energy Evolution Characteristics of Fracture-Bearing Rocks under Uniaxial Compression 高压物理学报. 2024, 38(1): 014201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230746

煤岩组合体巴西劈裂动态力学特征数值分析

Numerical Analysis of Dynamic Mechanical Characteristics of Brazilian Splitting of Coal-Rock Combination Bodies 高压物理学报. 2022, 36(5): 054204 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220589

非均质岩石动态断裂损伤细观特征模拟分析

Simulation Analysis of Mesoscale Characteristics in the Dynamic Fracture Damage of Heterogeneous Rock 高压物理学报. 2023, 37(4): 044204 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230638

不同含水状态下裂隙砂岩的声发射及裂纹扩展试验研究

Experimental Study on Acoustic Emission and Crack Propagation of Fissured Sandstone with Different Moisture States 高压物理学报. 2023, 37(5): 054103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230665

混凝土界面过渡区对裂纹扩展过程的影响

Influence of Interfacial Transition Zone on Crack Propagation Process in Concrete 高压物理学报. 2023, 37(4): 044207 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230606

不同试验条件和含水状态下花岗岩的声发射与破裂演化特征

Acoustic Emission and Fracture Evolution Characteristics of Granite under Different Testing and Moisture Conditions 高压物理学报. 2022, 36(6): 064102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220577 DOI: 10.11858/gywlxb.20240723

单裂隙岩石-混凝土组合体断裂特征颗粒流模拟

李庆文¹, 才诗婷¹, 李涵静¹, 钟宇奇¹, 刘艺伟^{1,2} (1. 辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁锦州 121001;

2. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101)

摘要:为了研究不同长度及倾角的裂隙对岩石-混凝土组合体强度和破坏模式的影响,基于 颗粒流模拟软件(PFC),通过对比预置裂隙试样的室内试验结果,选取最接近室内试验结果的 一组数据标定细观参数,由此对含预置裂隙的岩石-混凝土组合体数值模型进行单轴压缩试验。 结果表明:单裂隙岩石-混凝土组合体的承载能力和弹性模量随裂隙倾角的增大整体呈增大趋势,建立了不同裂隙长度和裂隙倾角的增量函数;裂隙长度对岩石-混凝土组合体力学特性的影 响显著;岩石界面的应力状态和混凝土界面附近的约束效应决定裂纹能否扩展通过界面,根据 裂纹的分布情况,分析发现裂纹萌生与扩展的根本原因是应力场的变化和转移,破坏过程中岩 石-混凝土组合体的破坏模式由拉伸破坏逐渐转变成宏观剪切破坏,揭示了单裂隙岩石-混凝土 组合体单轴压缩的损伤演化规律。

关键词:单裂隙;岩石-混凝土组合体;单轴压缩试验;裂纹演化;颗粒流

中图分类号:O346.1; O521.9; TU45 文献标志码:A

天然的岩石(体)内部大多含有一些随机分布的不规则的裂隙和节理,经过复杂的地质成岩作用及 工程开挖,岩石中大量节理发生演化,降低了围岩的稳定性^[1-5]。当对岩石施加外部载荷时,结构面周 围发生的应力集中会引起微裂纹起裂、萌生和合并,最终导致岩石发生不可逆的破坏^[6]。国内外的很 多学者针对预置裂隙岩石开展了大量研究,取得了丰硕的成果。邵珠山等^[7]基于岩体细观力学模型与 断裂扩展规律,根据细观断裂尺寸和宏观应变确定了损伤间的关系。Wong 等^[8]对含单裂隙的大理岩 和模型结构开展了单轴压缩试验,依据裂纹的几何特征和断裂机理,总结了7种断裂形态。Yuan等^[9] 利用颗粒流模拟软件(particle flow code, PFC),针对不同裂隙大理岩类岩石的裂纹扩展规律,在微观层 面上提出了岩石破坏的2种裂纹扩展路径及其对应的破坏模式。Zhao等^[10]研究了裂隙角度对岩石失 效机制和能量演化特征的影响,得到了应力-应变曲线的波动趋势随裂隙倾角的增大呈非线性增加。 研究人员还通过试验对单轴压缩下预置双裂隙、三裂隙、四裂隙和多裂隙的岩石的宏观力学特性和裂 纹贯通模式进行了研究^[11-17]。

上述研究主要针对裂隙对岩体破坏的影响,然而,单独分析岩石或混凝土的损伤变形对于解决此 类问题往往存在局限性,当前很多实际工程是直接建在岩石上的,如高层建筑-地基基础、围岩-隧道衬 砌、坝基-坝体等,致使岩土工程中大量存在工程体-地质体结构。国内外学者针对2种不同介质的组合 模型开展了研究,取得了阶段性成果^[18-19]。研究表明,2种介质之间的接触状态决定了地质体和工程体 系的稳定性。另外,研究人员大多针对完整岩石-混凝土组合试件进行室内单轴压缩试验^[20-22],而在实

^{*} 收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研面上项目(JYTMS20230866);辽宁省自然科学基金(2023-MS-298, 20180550297); 辽宁省博士科研启动基金(2019-BS-120)

作者简介:李庆文(1987-),男,博士,副教授,主要从事岩石力学、新材料与新型组合结构、离散元-有限差分耦合细观模拟研究.E-mail: lgjzlqw@163.com

通信作者: 才诗婷(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事计算颗粒力学研究. E-mail: 453964209@qq.com

际工程中,岩体经过长时间的侵蚀、风化等作用逐渐破裂,如金川二矿区的变形^[23]、川藏公路的滑坡^[24], 形成具有一定长度和倾角的断层^[25]、节理^[26]和裂隙等。

考虑到关于岩石-混凝土组合体的研究主要集中在界面剪切稳定性,而单裂隙对组合体轴压力学性能的影响研究则比较少见,因此,引入单裂隙岩石-混凝土组合体的概念,模拟实际工程中的地质体-工程体结构。在此基础上,采用 PFC^[27-30]实时监测,探究单轴压缩下单裂隙对岩石-混凝土组合体试样的力学特性及裂纹扩展特征的影响规律,从细观尺度上模拟单裂隙花岗岩-混凝土组合体的单轴压缩过程,结合断裂力学与损伤力学理论,提出适用于该单裂隙组合体的损伤因子,进而分析其裂纹损伤演化规律,为解决相应的工程问题提供理论依据。

1 组合体单轴压缩数值试验

1.1 室内试验材料

采用齐热哈塔尔过水隧道的片麻状花岗岩作为组合体的岩石材料^[31],混凝土的强度等级为C30,将2类材料进行切割和表面处理,使其尺寸和表面粗糙度达到统一的标准。采用云石胶将2类材料胶结,以模拟真实工程中岩石与混凝土的胶结状态。通过佛山市锐驰科技有限公司生产的RC-3020龙门式水刀预置岩石裂隙,切割精度为±0.1 mm,先进的水刀技术可以保证在岩石-混凝土组合体上预置单裂隙。

1.2 岩石与混凝土模型选择

PFC 可以从微观角度描述材料的力学特性和行为^[28]。它包括"颗粒-颗粒"接触和"颗粒-墙体"接触,通过颗粒之间的相互作用,将岩石-混凝土组合模型构造成颗粒集合体。本研究中的岩石颗粒之间和混凝土颗粒之间的黏结均采用线性平行黏结模型(linear parallel bond model)模拟。该模型中,接触既可以传递力,又能传递弯矩,且接触是具有一定尺寸的平面而不是点,因此,能够较好地反映岩石材料的力学特性,常用于模拟密实材料,如岩石、煤、砂土等^[29-30]。采用光滑节理模型(smooth-joint contact model)模拟材料的胶结状态。光滑节理模型具备很好的抗剪强度和抗拉强度,常用于模拟具有摩擦特性的结构面^[32]。岩石-混凝土组合体的细观接触模型如图1所示。



1.3 岩石-混凝土组合体模型构建

基于不同工况下室内试验中岩石的裂隙,通过删除颗粒的方法形成岩体缺陷。以倾角(裂隙与水 平方向的夹角β)为30°、长度(L)为30 mm 的裂隙(用 SR-C-30-30°表示,其他裂隙的表示方法与此类 似)为例,设组合体模型的直径为50 mm,高度为100 mm,对模型顶、底部墙体施加0.01 mm/s的加载速 率,直至试样发生破坏,预置裂隙的岩石-混凝土组合体的建模过程如图2所示。



Fig. 2 Mesoscopic model of prefabricated crack rock-concrete combination

1.4 岩石-混凝土组合体细观力学参数确定

试样的宏观力学行为由其有效模量、颗粒摩擦系数、黏结刚度比等细观参数决定,选用文献[33-34] 中的力学参数。为确保岩石-混凝土组合体模型能够准确地模拟真实试件,在数值模拟过程中,通过 "试错法"和"控制变量法"不断校准相应的细观力学参数^[35],使数值计算结果与试验结果相匹配。模拟 所得的细观力学参数见表1。为了验证表1所列参数的合理性,对比了完整岩石、完整混凝土、岩石-混凝土组合体、单裂隙岩石-混凝土组合体4组室内试验和数值模拟试验得到的应力-应变曲线,如 图 3 所示,其中: *E* 为弹性模量, σ_p 为峰值应力。由于 PFC 模拟的颗粒为刚性颗粒,而自然界中的岩体 内部存在原始缺陷^[36],因此,模拟与试验所得应力-应变曲线的压密阶段存在一定差异。整体上看,室 内试验与数值模拟得到的应力-应变曲线和破坏形态基本相同,峰值应力和弹性模量的相对误差均在 10% 以内,说明数值模拟选用的细观力学参数是合理的,可以用于预置裂隙的岩石-混凝土组合模型的 单轴压缩模拟试验。

rable 1 Accessed acture parameters in 17C simulation						
Material	Particle density/	Particle friction	Effective	Stiffness	Tensile strength/	Bonding
	$(kg \cdot m^{-3})$	coefficient	modulus/GPa	ratio	MPa	strength/MPa
Granite	2 7 9 0	0.3	17.5	2.53	50	150
Concrete	2360	0.2	8.0	1.33	51	50
Material	Normal stiffness/	Shear stiffness/	Frictional	Cohesion/	Joint friction	Friction
	$(MN \cdot m^{-1})$	$(MN \cdot m^{-1})$	coefficient	GPa	angle/(°)	angle/(°)
Granite	90	450	0.6	20	0.5	30
Concrete	90	450	0.6	20	0.5	70

表 1 PFC 模拟中的细观参数 Table 1 Mesostructure parameters in PFC simulation

1.5 组合体数值模拟方案

为了分析裂隙倾角 β 和裂隙长度 L 对岩石-混凝土组合体力学特性的影响规律,共构建 12 种工况的组合体模型,对其进行单轴压缩数值模拟,预置裂隙的形心距组合体模型顶端 25 mm, β 分别为 0°、 30°、60°、90°, L 分别为 10、20 和 30 mm, 如表 2 所示。

第38卷



Fig. 3 Comparison of the test results with simulation results

	表 2	数值模拟方案
Table 2	Num	erical simulation scheme

I /mana	Rock-concrete combination model				
L/IIIII	<i>β</i> =0°	<i>β</i> =30°	β=60°	β=90°	
10	-				
20				1	
30					

第5期

2 数值计算结果与讨论

2.1 裂隙对组合体强度的影响

单轴压缩下岩石-混凝土组合体的应力-应变曲线如图4所示。可见,不同裂隙倾角条件下预置裂隙岩石-混凝土组合体试件的应力-应变曲线近似呈直线,加载初期几乎重合。这是由于加载初期岩石 试样内部的原始裂隙等微观结构在应力作用下闭合,内部结构逐渐被压密,达到峰值应力后,内部裂纹 迅速扩展,致使岩石发生破坏,表现出岩石的脆性破坏特征。

数值计算结果见表 3, 其中: ε_p 为峰值应变, σ_i 为初始应力。含预置裂隙试件的应力-应变曲线在峰 值应力之前大多会产生数次应力下降, 裂隙角度较小时尤为明显。随着 β 的增大, 岩石-混凝土组合体 试件的峰值应力呈先增大后减小的趋势; 当 *L*=10 mm 时, β =30°和 β =60°时的峰值应力高于无节理组合 体试件, 而当 *L*=20 mm 及 *L*=30 mm 时, 除了 β =90°的组合体试件的峰值应力(42.54 MPa)比无节理组合 体试件的峰值应力(41.48 MPa)高 2.5% 外, 其余节理组合体试件的峰值应力明显低于无节理试件, 低 34.9%~52.0%, 说明 β 不同的组合体试件的峰值应力随应变的增大幅度存在差异, 这在图 4(c) 中尤为 明显。从图 4(c) 可以看出: 当 β 从 0°增大至 90°时, 试件的峰值应力增大, 分别为 18.18、19.53、28.13、 42.54 MPa, 特别是 β 从 60°增大至 90°时, 峰值应力增长率达到 57.4%, 表明预置裂隙对试件强度具有显 著的削弱作用; 当裂隙长度增大到 30 mm 时, 预置裂隙试样的峰值应力随裂隙倾角的增加而显著增大。



图 4 单轴压缩下预置不同裂隙的岩石-混凝土组合体的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of rock-concrete combination with different pre-cracks under uniaxial compression

Sample	<i>L</i> /mm	β/(°)	$\sigma_{\rm p}/{ m MPa}$	$\varepsilon_{ m p}$	E/GPa	$\sigma_{\rm i}/{ m MPa}$	$\sigma_{ m i}/\sigma_{ m p}$
SR-C			41.48	0.61	7.180	25.47	0.614
SR-C-10-0°	10	0	38.90	0.59	6.644	23.51	0.604
SR-C-10-30°	10	30	44.01	0.68	6.500	19.52	0.444
SR-C-10-60°	10	60	43.41	0.66	6.614	18.87	0.435
SR-C-10-90°	10	90	40.37	0.61	6.671	18.87	0.467
SR-C-20-0°	20	0	31.85	0.52	6.137	20.32	0.638
SR-C-20-30°	20	30	34.06	0.56	6.112	20.24	0.594
SR-C-20-60°	20	60	40.90	0.64	6.390	26.10	0.638
SR-C-20-90°	20	90	43.23	0.68	6.376	12.25	0.283
SR-C-30-0°	30	0	18.18	0.33	5.516	12.65	0.696
SR-C-30-30°	30	30	19.53	0.37	5.222	14.30	0.732
SR-C-30-60°	30	60	28.13	0.46	6.159	19.84	0.705
SR-C-30-90°	30	90	42.54	0.71	6.791	19.75	0.464

表 3 岩石-混凝土组合体单轴压缩的数值计算结果 Table 3 Numerical results of rock-concrete combination under uniaxial compression

2.2 弹性模量

为确定试样弹性模量 E 与各因素之间的关系, 定义裂隙的相对面积 S

$$S = LD \tag{1}$$

式中:D为裂隙形心与顶端的距离。弹性模量E与相对面积S、裂隙倾角 β 之间的关系如图 5 所示。



由图 5 可知:随着 S 的增大,岩石-混凝土组合体的平均弹性模量总体呈减小趋势,但减小率的变化 规律不明显;当 S 从 250 mm² 增大至 750 mm² 时,β=30°的裂隙试样的 E 的下降趋势最显著,从 6.500 GPa 下降到 5.222 GPa,降幅为 19.67%,随着β 的增大,E 总体呈增大趋势;当 S=750 mm² 时,E 随 β 的增大分别提高-3.57%、8.62%、19.05%,E 的增长率与峰值强度的增长率均呈递增趋势,但β 的增长 率相对较小。

基于上述不同 S 下岩石-混凝土组合体试样的 E 随 β 的变化规律,结合非线性拟合分析,得到岩石-混凝土组合体试样的 E(单位为 GPa)与 S(单位为 mm²)及 β(单位为 (°))的关系式

$$E = \frac{6.44 - 7.6 \times 10^{-3} S - 1.2 \times 10^{-2} \beta + 1.4 \times 10^{-4} \beta^2 - 1.0 \times 10^{-6} \beta^3}{1 - 1.2 \times 10^{-3} S - 1.4 \times 10^{-3} \beta}$$
(2)

2.3 微裂纹演化及颗粒位移场

数值模拟试验发现,按照裂纹破坏形态^[37],加 载条件下的单裂隙岩石-混凝土组合体可分为翼 形裂纹、共面次生裂纹、倾斜次生裂纹,按破坏受 力方式,则可分为拉伸裂纹和剪切裂纹,如图 6 所 示,其中:S 表示剪切破坏裂纹,T 表示张拉破坏 裂纹。

当颗粒承受的拉应力和剪应力分别超过最大 拉应力(σ_{max})和最大剪应力(τ_{max})时,平行黏结发 生破坏,材料内部产生张拉裂纹和剪切裂纹,这就 是 PFC 数值模拟试验中裂纹的产生机制。图 7 显





示了破坏时不同预置节理的岩石-混凝土组合体的接触力链分布、颗粒位移矢量以及裂纹素描图。从 裂纹素描图中可以清晰地看出:岩石材料内部以张拉裂纹为主,混凝土材料内部以剪切裂纹为主;随着 裂隙倾角的增大,上部岩石材料的裂隙数逐渐减少,而下部混凝土材料的裂隙数逐渐增多。图7中,用 线条的粗细表示接触力或位移的大小,位移为使用对数函数处理后的数值。可以看出,岩石-混凝土组 合体的最终破坏模式受裂隙倾角的影响,破坏程度随着裂隙倾角的增大而逐渐增强,并且相同裂隙倾 角下裂隙长度的增加对试样劣化程度的影响减弱,该现象在裂隙倾角固定为0°时最显著。





Fig. 7 Contact force chain distribution and particle displacement (Blue and black represent shear cracks, while red represents tensile cracks. The gray line represents the compression force chain, and the orange line represents the tensile force chain.)

加载过程中, 压应力遍布整个试样。由于岩石类材料的单轴抗拉强度普遍小于抗压强度, 致使在 外载荷作用下, 拉应力首先分布在预置节理两侧, 破坏初期, 裂纹尖端由于压应力和拉应力的共同作用 而萌生翼形拉伸裂纹, 表明触点的失效和滑移最可能发生在强拉伸区, 与文献 [38] 得到的结论一致。 因此, 裂纹萌生和扩展的根本原因是应力场的变化和转移。此外, 剪切裂纹未出现在岩石内部, 而是全 分布于混凝土, 这是由于岩石的预置节理周围产生拉伸裂纹后, 因混凝土的抗压强度比岩石的抗拉强 度小 12.94 MPa, 剪切裂纹会沿着拉伸裂纹的路径向混凝土扩展延伸。然而, 对于试样 SR-C-20-0°、 SR-C-30-0°、SR-C-30-30°, 剪切裂纹数为零, 裂纹在界面处停止传播, 这主要是由岩石界面的应力状态 和混凝土界面附近的约束效应引起的^[39], 裂纹能否通过界面与 2 种材料的抗拉强度有关。在颗粒位移 矢量图中也可以看出, 数值模拟试样破坏时, 颗粒定向移动明显, 上部颗粒向下斜移, 下部颗粒的运动 方向则与之相反, 出现明显的剪切带, 说明试样内部发生结构性破坏。

2.4 裂隙对起裂应力的影响

单轴压缩过程中,岩石-混凝土组合体模型的内部裂纹经历萌生、扩展到贯通,最终使模型出现宏观破裂。加载初期,颗粒间的接触作用力小于颗粒间的黏结强度,模型完整且无微裂纹;随着加载的进行,组合体内部出现微裂纹,汪杰等^[33] 定义此时的轴向应力为起裂应力 σ_i,本模拟中岩石-混凝土组合体模型的起裂应力与峰值应力的关系如表 3 所示。

图 8 显示了具有不同裂隙倾角和裂隙长度的岩石-混凝土组合体的裂隙数量演化和裂隙玫瑰图。 裂隙玫瑰图中每一个"玫瑰花瓣"代表一组裂纹走向,裂隙走向也就是方位角,可以理解为在裂隙的发 展平面中裂隙的外尖端与y轴正方向的夹角,按顺时针方向间隔 20°旋转,形成取值范围为 0°~360°的 正圆形图标,如图 8 所示。"花瓣"的长度代表这个方向上的裂隙分布数量,"玫瑰花瓣"越长,该方向上 分布的裂隙越多。例如:试样 SR-C-10-30°的裂隙玫瑰图中,长度为 145 的"玫瑰花瓣"表示裂隙走向与 y轴正方向之间(70°~90°)的裂隙有 145 条。

在初始压缩阶段,试样内部的微裂隙和孔洞逐渐闭合,裂隙数量为零。此后,试件进入弹性变形过程,仅有少许裂隙产生,生成的裂隙总数在400以下。在屈服和峰后阶段,弹性能释放,裂隙总数急剧 增大。在压缩过程中,峰后阶段的裂隙增量最大,比初始压缩和弹性阶段显著。裂隙数量增加时,应 力-应变曲线出现不同程度的抖动,说明试样强度与内部颗粒的黏结有关。通过观察破坏试样的裂隙 玫瑰图,发现单裂隙组合体的裂纹带发育方位角主要集中在70°~130°范围内,且在该范围内不同方位 角的裂隙分布密度较为一致。结合应力-应变曲线可以看出,从裂纹发展到结构失稳,单裂隙组合体的 破坏过程具有一定的共性。

从图 8 可以发现,当岩石-混凝土组合体模型加载至应力峰值后,岩样的裂纹数呈直线突增,显现 出岩体的脆性特征。当裂隙倾角为 90°时,裂纹数最多,主要是由于当裂隙呈竖向时,在上下加载过程 中更易出现应力聚集,从而在较短的时间内形成较多裂纹。

2.5 损伤演化规律

在岩石-混凝土组合体的单轴压缩过程中,损伤与裂隙的产生及扩展有关,可以用损伤因子表征。 裂隙数能够反映试样内部的微裂隙特征和损伤程度。假设试样在压缩前完好无损,定义损伤因子 D

$$D = \frac{A_{\rm d}}{A} \tag{3}$$

式中: *A*_d和 *A* 分别为初始状态下损伤试样和未损伤试样的横截面积。损伤因子 *D*(0≤*D*≤1)表示试样损 伤程度, *D*=0 表示无损伤, *D*=1 表示完全破坏。

假设试样的破坏过程符合 Weibull 分布, 其概率密度函数为

$$f(C) = \frac{m}{n} \left(\frac{C}{n}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{C}{n}\right)^m\right]$$
(4)

式中:C为试样裂隙数,m和n分别为Weibull分布的形状参数和尺度参数。



(d) SR-C-10-90°







图 8 岩石-混凝土组合体模型的微裂纹数量演化曲线 (左) 和裂隙玫瑰图(右)

Fig. 8 Evolution curves of microcrack quantity (left) and rose maps of microcracks (right) in rock-concrete combination model

假设D与C之间存在如下函数关系

$$\mathrm{d}D/\mathrm{d}C = f(x) \tag{5}$$

则损伤因子D可以通过积分得到,即

$$D = \int_0^C f(x) dC = 1 - \exp\left[-\left(\frac{C}{n}\right)^m\right]$$
(6)

令 Ctotal 表示整个压缩过程中的裂纹累积数, C(t) 表示任意时刻 t 的累积裂纹数, 则有

$$C(t) = C_{\text{total}} \int_{0}^{C} f(x) dC$$
(7)

联立式(6)和式(7),可得到D与裂纹累积数Ctotal的关系式

$$D = C(t)/C_{\text{total}} \tag{8}$$

考虑到由裂隙数确定的损伤因子 D 与 Weibull 模型计算的结果相吻合,因此,利用裂隙数再现损伤 演化是合理的。将数值模拟获得的裂纹累积数代入式(8)中,得到岩石-混凝土组合体试样的应力-应 变-损伤关系曲线,因篇幅有限,以 L=20 mm 模型为例,得到其演化规律,如图 9 所示。可见,D 随应变 ε 的增加呈非线性增大。拟合曲线的拟合相关系数 R² 均接近 1,表明拟合曲线具有较高的拟合度。不 同裂隙倾角下岩石-混凝土组合体的损伤曲线基本一致,随着轴压的增加,不断产生新的裂隙,在应力 达到峰值后损伤程度衰减。





Fig. 9 Damage evolution of rock-concrete combination samples with L=20 mm

在初始加载阶段,损伤曲线斜率为零,岩石-混凝土组合体试样内部无裂纹产生,随着加载的进行, D的增加趋势相对缓慢。随后,试样内部裂纹扩展,不断产生新的裂纹,损伤量迅速增加,D在1附近 停止上升,说明此时试样已达到应力峰值。在峰值应力阶段,破坏产生的损伤量占整个破坏过程的 60%~80%。峰后,试样表面裂纹贯通,损伤严重,应力急速下降。试样 SR-C-20-0°和 SR-C-20-30°在加 载后期的峰值应力损伤阶段对应的应变显著小于其他2个试样,说明这2个试样在峰值应力时损伤严 重,破坏过程相对较快。这也说明增大裂隙倾角可以延缓岩石-混凝土组合体结构的失稳。

应变-损伤曲线反映了压缩过程中试样应变对应的裂纹累积数,表明了试样在破坏过程中的损伤 演化规律和损伤过程。数值模拟所得应变-损伤曲线与试样的损伤数据吻合较好,为岩石-混凝土组合 体结构失稳破坏研究提供了理论依据。

3 结 论

通过试验与数值模拟,研究了在单轴压缩加载条件下含单裂隙岩石-混凝土组合体的力学特性和 能量损伤演化,得到如下主要结论:

(1) 单裂隙对岩石-混凝土组合体的峰值强度具有劣化作用, 而弹性模量随着裂隙倾角的增加呈先 增大后减小的变化趋势;

(2) 岩石及其界面处的破坏以张拉裂纹为主, 混凝土以剪切裂纹为主, 岩石-混凝土组合体破坏则是 张拉-剪切混合破坏, 且组合体的裂纹发育带方位角主要集中在 70°~130°范围;

(3) 提出了基于裂纹累积数的损伤因子, 建立了表征单裂隙岩石-混凝土组合体的损伤演化方程, 揭示了含初始单裂隙岩石-混凝土组合体的损伤演化规律。

参考文献:

- [1] 武世岩, 黄彦华. 含弧形裂隙花岗岩裂纹扩展特征 PFC 模拟 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54(1): 169–182.
 WU S Y, HUANG Y H. PFC simulation on crack coalescence behavior of granite specimens containing an arc fissure [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(1): 169–182.
- [2] CHEN Y A, XU J, PENG S J, et al. Experimental study on the acoustic emission and fracture propagation characteristics of sandstone with variable angle joints [J]. Engineering Geology, 2021, 292: 106247.
- [3] 张旭龙, 张盛, 安定超, 等. 平行双裂缝圆盘试样裂纹扩展过程的尺寸效应试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 115-128.

ZHANG X L, ZHANG S, AN D C, et al. Experimental study on the size effect of crack propagation process of disk samples containing parallel double pre-existing flaws [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 115–128.

- [4] SHAO L Y, MAO J, ZHAO L H, et al. A three-dimensional deformable spheropolyhedral-based discrete element method for simulation of the whole fracture process [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 263: 108290.
- [5] WANG Y, HAN J Q, SONG Z Y, et al. Macro-meso failure behavior of pre-flawed hollow-cylinder granite under multi-level cyclic loads: insights from acoustic emission and post-test CT scanning [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 258: 108074.
- [6] LUO Y, GONG H L, XU K, et al. Progressive failure characteristics and energy accumulation of granite with a pre-fabricated fracture during conventional triaxial loading [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 118: 103219.
- [7] 邵珠山,李晓照. 基于细观力学的脆性岩石长期蠕变失效研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(Suppl 1): 2644–2652. SHAO Z S, LI X Z. Research on long-term creep failure of brittle rock based on micromechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl 1): 2644–2652.
- [8] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 239–249.
- [9] YUAN H, XIAO T L, SHE H C, et al. Crack propagation law of rock with single fissure based on PFC^{2D} [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 977054.
- [10] ZHAO Y Q, LI Q S, ZHANG K, et al. Effect of fissure angle on energy evolution and failure characteristics of fractured rock

under uniaxial cyclic loading [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 2678.

[11] 田文岭,杨圣奇,殷鹏飞.张开与充填四裂隙脆性砂岩强度和贯通模式研究 [J].应用基础与工程科学学报,2018,26(5): 1005-1015.

TIAN W L, YANG S Q, YIN P F. Strength and crack coalescence behavior of sandstone containing four filled or unfilled preexisting fissures [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(5): 1005–1015.

[12] 王卫华, 王小金, 姜海涛, 等. 单轴压缩作用下含不同倾角裂隙的类岩石试样力学特性 [J]. 科技导报, 2014, 32(28/29): 48-53.

WANG W H, WANG X J, JIANG H T, et al. Experimental research on mechanical properties of rocklike specimens containing single cracks of different inclination angles under uniaxial compression [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(28/29): 48–53.

- [13] 孙朝阳. 不同裂隙角度对岩体强度影响研究 [J]. 煤炭技术, 2015, 34(6): 113–115.
 SUN Z Y. Research on influences of crack angle in rock on its peak strength [J]. Coal Technology, 2015, 34(6): 113–115.
- [14] 徐贞社, 卞壮, 刘毅, 等. 组合裂隙及其倾角对岩石力学特性及破坏特征的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(11): 140-145.

XU Z S, BIAN Z, LIU Y, et al. The influence of combined fissures and its dip angles on the mechanical properties and failure characteristics of rock [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(11): 140–145.

- [15] 吴钰, 任旭华, 张继勋, 等. 含裂隙岩石单轴压缩数值试验研究 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2021, 43(2): 35-41.
 WU Y, REN X H, ZHANG J X, et al. Numerical and experimental study on rock containing pre-existing cracks under uniaxial compression [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43(2): 35-41.
- [16] ZHOU X P, FU L, JU W, et al. An experimental study of the mechanical and fracturing behavior in PMMA specimen containing multiple 3D embedded flaws under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 101: 207–216.
- [17] 王磊, 商瑞豪, 刘怀谦, 等. 含多裂隙煤体裂纹细观演化规律与相互作用机制 [J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(2): 300-313.
 WANG L, SHANG R H, LIU H Q, et al. Microcrack evolution law and interaction mechanism of coal with multiple cracks [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(2): 300-313.
- [18] YANG K X, HU Q, ZHAO H, et al. Numerical study on the shear behavior of concrete-rock joints with similar triangular asperities [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159: 105468.
- [19] ZHAO J, FENG X T, ZHANG X W, et al. Brittle-ductile transition and failure mechanism of Jinping marble under true triaxial compression [J]. Engineering Geology, 2018, 232: 160–170.
- [20] 赵宝云, 刘保县, 徐柯, 等. 单轴压缩作用下岩石混凝土一体两介质体破裂过程数值模拟 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2007, 26(6): 80-82.
 ZHAO B Y, LIU B X, XU K, et al. Numerical simulation of the failure process of rock and concrete bi-material specimen in uniaxial compression [J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2007, 26(6): 80-82.
- [21] ZHAO B Y, LIU Y, HUANG T Z, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of rock-concrete composite specimens under compressive condition [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(4): 2693–2706.
- [22] MOUZANNAR H, BOST M, LEROUX M, et al. Experimental study of the shear strength of bonded concrete-rock interfaces: surface morphology and scale effect [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(10): 2601–2625.

 [23] 贺耀文. 金川二矿区深部工程地质及开采稳定性技术研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 36-37.
 HE Y W. Study on deep engineering geology and mining stability technology of Jinchuan second mining area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021: 36-37.

- [24] 陶伟, 孙明露, 曹亮, 等. 川藏公路波林段某边坡稳定性以及滑动深度的分析 [J]. 四川建材, 2022, 48(2): 249–251.
 TAO W, SUN M L, CAO L, et al. Analysis of stability and sliding depth of a slope in the Bolin section of the Sichuan Tibet highway [J]. Sichuan Building Materials, 2022, 48(2): 249–251.
- [25] 王明明, 刘俊伟, 汪大洋, 等. 断层岩岩体承载力和变形特性研究 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9546–9550.
 WANG M M, LIU J W, WANG D Y, et al. Study on bearing capacity and deformation characteristics of fault rock mass [J].
 Science Technology and Engineering, 2020, 20(23): 9546–9550.
- [26] 朱金焕. 基于细观模型的节理参数对岩石力学性能的影响 [J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(3): 50-52.
 ZHU J H. Influence of joint parameters based on meso-model on mechanical properties of rock [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2023, 6(3): 50-52.

- [27] ZHANG Z H, GAO W L, LI K P, et al. Numerical simulation of rock mass blasting using particle flow code and particle expansion loading algorithm [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2020, 104: 102119.
- [28] 张振平, 盛谦, 付晓东, 等. 基于颗粒离散元的土石混合体直剪试验模拟研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 135–146.

ZHANG Z P, SHENG Q, FU X D, et al. Research on numerical direct shear test of soil-rock mixture based on particle flow code simulation [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(1): 135–146.

- [29] 张顺金. 裂隙岩体在单轴加载过程中变形、破裂规律的 PFC^{2D} 数值模拟研究 [J]. 中国建材科技, 2022, 31(6): 69–73.
 ZHANG S J. PFC^{2D} numerical simulation of fractured rock mass deformation and rupture law under uniaxial loading [J]. China Building Materials Science & Technology, 2022, 31(6): 69–73.
- [30] 常玉鹏, 于洋, 杨凌云, 等. 基于 PFC^{3D} 软件的原级配砂砾石料三轴试验研究 [J]. 人民黄河, 2023, 45(Suppl 1): 90–91.
 CHANG Y P, YU Y, YANG L Y, et al. Triaxial test of original graded sand gravel based on PFC^{3D} [J]. Yellow River, 2023, 45(Suppl 1): 90–91.
- [31] 李琦. 单轴压缩过程中岩石-混凝土一体两介质体声发射特性研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018: 21-22.
 LI Q. Research on acoustic emission characteristics of rock and concrete monolithic body in uniaxial compression [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018: 21-22.
- [32] SHANG Y H, XU L R, LI Y W. Unloading response characteristics of cross fault caverns: effect of fault angles [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(3): 1061–1073.
- [33] 汪杰,付建新,宋卫东,等. 岩石-充填体组合模型力学特性及微裂纹演化特征颗粒流模拟 [J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(3): 453-462.
 WANG J, FU J X, SONG W D, et al. Particle flow simulation of mechanical properties and microcrack evolution characteristics of rock-backfill combined model [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(3): 453-462.
- [34] 孙旭曙.节理岩体卸荷各向异性力学特性试验研究及工程应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013: 32-33.
 SUN X S. Experimental research and its engineering application of anisotropic mechanics characteristic in jointed rock mass under unloading condition [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013: 32-33.
- [35] 谭攀, 饶秋华, 李卓, 等. 考虑断裂韧度的 PFC^{3D} 细观参数标定新方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52(8): 2849-2866.

TAN P, RAO Q H, LI Z, et al. A new method for quantitative determination of PFC^{3D} microscopic parameters considering fracture toughness [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2849–2866.

- [36] XIA B W, LI Y, HU H R, et al. Effect of crack angle on mechanical behaviors and damage evolution characteristics of sandstone under uniaxial compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(11): 6567–6582.
- [37] ZHOU X P, LONG Y D, Ye W. Experimental investigations on the cracking and mechanical responses of PMMA samples with two 3D embedded elliptic flaws under uniaxial compression [J]. Geohazard Mechanics, 2023, 1(1): 77–85.
- [38] CHANG X, WANG S R, LI Z, et al. Cracking behavior of concrete/rock bi-material specimens containing a parallel flaw pair under compression [J]. Construction and Building Materials, 2022, 360: 129440.
- [39] MA S Z, LIU K W, GUO T F, et al. Experimental and numerical investigation on the mechanical characteristics and failure mechanism of cracked coal & rock-like combined sample under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022(122): 103583.

Particle Flow Simulation of Fracture Characteristics of Rock-Concrete Combination with Single Crack

LI Qingwen¹, CAI Shiting¹, LI Hanjing¹, ZHONG Yuqi¹, LIU Yiwei^{1,2}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China;
 2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: To study the influence of cracks with varying lengths and inclination angles on the strength and

failure modes of rock-concrete combination, a numerical model of rock-concrete combination with preexisting cracks was developed using the particle flow code (PFC). The model underwent calibration by comparing its results with indoor test data from prefabricated fractured specimens to select a set of microstructural parameters that closely align with the indoor test results. Subsequently, uniaxial compression tests were conducted on numerical models of rock-concrete composites containing pre-existing fractures. The results indicate that the bearing capacity and elastic modulus of fractured rock-concrete composites increase with the increase of fracture inclination angle. Moreover, functions were established to calculate the peak strength increment for fractures with varying lengths and inclination angles. The fracture length significantly influences the mechanical properties of composite models. The stress state at the rock interface and the confinement effect near the concrete interface determine whether cracks can extend through the interface. By analyzing the distribution of cracks, it was found that the fundamental reasons for crack initiation and propagation are the changes and transfers of the stress field. During the failure process, the failure mode gradually transitions from tension-dominated to macroscopic shear failure. The results reveal the damage evolution of uniaxial compression of single fissure rock-concrete combination material.

Keywords: single crack; rock-concrete combination; uniaxial compression test; crack evolution; particle flow