

高压物理学报

单轴压缩下裂隙倾角对花岗岩-混凝土力学行为及能量演化的影响

李庆文 李涵静 钟宇奇 李玲 才诗婷 刘艺伟

Influence of Crack Angles on the Mechanical Behavior and Energy Evolution of Granite-Concrete under Uniaxial Compression

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

引用本文:

李庆文, 李涵静, 钟宇奇, 等. 单轴压缩下裂隙倾角对花岗岩-混凝土力学行为及能量演化的影响[J]. 高压物理学报, 2024, 38(6):064202. DOI: 10.11858/gywlb.20240803

LI Qingwen, LI Hanjing, ZHONG Yuqi, et al. Influence of Crack Angles on the Mechanical Behavior and Energy Evolution of Granite-Concrete under Uniaxial Compression[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(6):064202. DOI: 10.11858/gywlb.20240803

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240803>

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/gywlb.20230746>

不同含水率下岩石材料的能量与损伤演化特征

Energy and Damage Evolution Characteristics of Rock Materials under Different Water Contents

高压物理学报. 2023, 37(3): 034105 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220699>

三轴应力下花岗岩加载破坏的能量演化和损伤特征

Damage and Energy Evolution Characteristics of Granite under Triaxial Stress

高压物理学报. 2021, 35(2): 024102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200622>

不同不耦合系数下花岗岩爆破损伤特性的离散元模拟

Discrete Element Simulation of Blasting Damage Characteristics of Granite under Different Decoupling Coefficients

高压物理学报. 2022, 36(1): 015301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210804>

不同应变率和碳纳米管掺量下混凝土的力学性质与能量演化特征

Mechanical Properties and Energy Evolution Characteristics of Concrete under Different Strain Rates and Content of MWCNTs

高压物理学报. 2023, 37(1): 014101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220654>

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/gywlb.20230606>

单轴压缩下裂隙倾角对花岗岩-混凝土力学行为及能量演化的影响

李庆文¹, 李涵静¹, 钟宇奇¹, 李 玲¹, 才诗婷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: 为探究单轴压缩下不同裂隙倾角对花岗岩-混凝土组合体试件的强度及能量演化的影响, 结合室内试验标定的细观参数, 采用二维离散元颗粒流程序 (PFC^{2D}) 对组合体试件开展了数值模拟研究。结果表明: 花岗岩-混凝土的强度和变形特征受裂隙倾角影响, 其强度和变形参数随裂隙倾角的增大呈逐渐增大趋势; 在单轴压缩过程中, 试样内部能量转化为宏观裂纹扩展, 最终的破坏模式主要以拉伸失效断裂和剪切失效断裂为主; 组合体试件的总能量和耗散能随裂隙倾角的增大而增大, 试件破坏时总应变能大于耗散能。基于耗散能的计算, 构建了损伤本构方程, 当损伤因子为 0.8 时, 试件接近极限状态, 此时的能量消耗较大, 显著降低了组合体试件的强度。

关键词: 花岗岩-混凝土组合体; 单裂隙; 离散元颗粒流程序; 单轴压缩; 能量损伤本构

中图分类号: O346.1; O521.9; TU45

文献标志码: A

在大坝、地下工程和围岩-隧道衬砌等大型工程建设中, 工程结构与地质结构的相互作用是不可避免的, 其稳定性与变形特征对工程安全至关重要。为了深入了解这种相互作用, 研究人员针对岩石-混凝土复合结构界面的力学性能进行了广泛的研究, 特别是在抗剪性能^[1-7]、受弯性能^[8]、冻融性^[9-11]、高温性能^[12-13] 等方面取得了丰硕的成果。然而, 在实际工程中, 如水电工程的倾倒变形^[14]、巷道岩体变形破坏^[15] 等, 岩体内部缺陷(裂隙、空洞、软弱岩层等) 往往是导致工程体-地质体不稳定的主要因素。

自然界中的岩石因具有不均匀性、非连续性和各向异性, 其内部容易产生裂隙、空洞和断层等缺陷, 这些缺陷在岩石受到外界荷载时会导致变形^[16-17]、积聚内部能量, 促进能量的耗散与转化^[18-19]。岩石的原生缺陷主要分为宏观层面上的不连续裂缝和细观层面上的微裂隙。为了研究宏观层面的裂缝, 研究人员采用水射流、激光切割、线切割等技术在完整岩石上预制裂隙, 由此对裂隙岩石开展了大量的研究工作。例如: Zhao 等^[20] 进行了预制裂隙岩石的单轴循环加载和卸载试验, 发现输入能、弹性能和耗散能随循环加载和卸载次数的增加而非线性增大, 揭示了裂隙倾角对岩石能量演化和破坏机制的重要影响; Hu 等^[21] 针对含双平行裂隙的层状岩体, 研究了裂隙倾角对层状岩体损伤、破裂及声发射特征的影响, 发现在裂纹扩展阶段, 拉应力主导上下裂隙区域, 压剪应力主导左右区域, 形成“蝴蝶”形应力分布; 武世岩等^[22] 通过二维颗粒流程序 (two-dimensional particle flow code, PFC^{2D}) 对含弧形裂隙花岗岩进行细观模拟, 发现在倾角和长短轴比的影响下其弧形裂隙主要表现为拉伸破坏, 破坏强度、弹性模量和峰值强度随倾角的增大而提高, 长短轴比则影响裂隙的类型、数量和萌生位置。

* 收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-05-23

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面上项目 (2023-MS-298); 辽宁省博士科研启动基金 (2019-BS-120); 辽宁省自然科学基金指导项目 (20180550297)

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-有限差分跨尺度耦合数值模拟研究. E-mail: lgjzlw@163.com

通信作者: 李涵静 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事计算颗粒力学研究. E-mail: 1965213088@qq.com

目前,国内外学者已对预制裂隙岩石的力学性能、完整岩石-混凝土组合体的力学性能开展了大量研究,并取得了一定的研究成果,但对含裂隙复合结构的轴压性能研究尚且不足。为此,本研究采用缩小比例尺寸的花岗岩-混凝土复合材料模型来模拟实际工程中的地质体-工程体,利用 PFC^{2D} 进行模拟,并与室内单轴压缩试验结果进行对比验证,在此基础上,进一步研究裂隙倾角对花岗岩-混凝土复合材料裂纹扩展的影响,并根据花岗岩-混凝土内部能量损耗程度构建损伤本构方程,以完善复合材料能量演化机制,为解决实际工程体-地质体的稳定性提供理论依据。

1 室内单轴压缩试验

1.1 试样制备

组合体试件中的岩石部分采用花岗岩,混凝土的强度等级为 C40,混凝土材料的配合比如表 1 所示。根据国际岩石力学学会推荐标准,加工成 $\varnothing 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱试样,其中:花岗岩与混凝土的高度比为 1:1。利用佛山市锐驰科技有限公司生产的 RC-3020 龙门水刀,对花岗岩-混凝土组合试样中的岩石部分进行裂隙切割,切割精度为 $\pm 0.1\text{ mm}$,组合体界面处采用云石胶胶结,用来模拟实际工程中岩石与混凝土之间的黏结。

表 1 C40 混凝土的配合比
Table 1 Mixture ratio of C40 concrete

Cement	Mineral filler	Fly ash	Sand	Aggregate	Admixture
270	75	45	860	880	8.5

1.2 试验设备

如图 1(a) 所示,采用 WDW-300 微机控制式万能试验机(长春科新试验仪器有限公司生产)开展室内单轴压缩试验,其最大试验力为 300 kN,轴向最大位移为 1 100 mm,位移加载速率为 $2.5\times 10^{-3}\sim 250\text{ mm/min}$ 。如图 1(b) 所示,采用 DH3820N 型分布式信号测试分析系统(东华测试公司生产)采集试验数据,其中, n 为数据采集器编号。采用行业标准^[23]推荐的位移控制方式进行加载,加载速率为 0.01 mm/s,分别对混凝土、花岗岩、完整花岗岩-混凝土组合试件进行 3 次重复试验,取平均值,以减少偶然性。

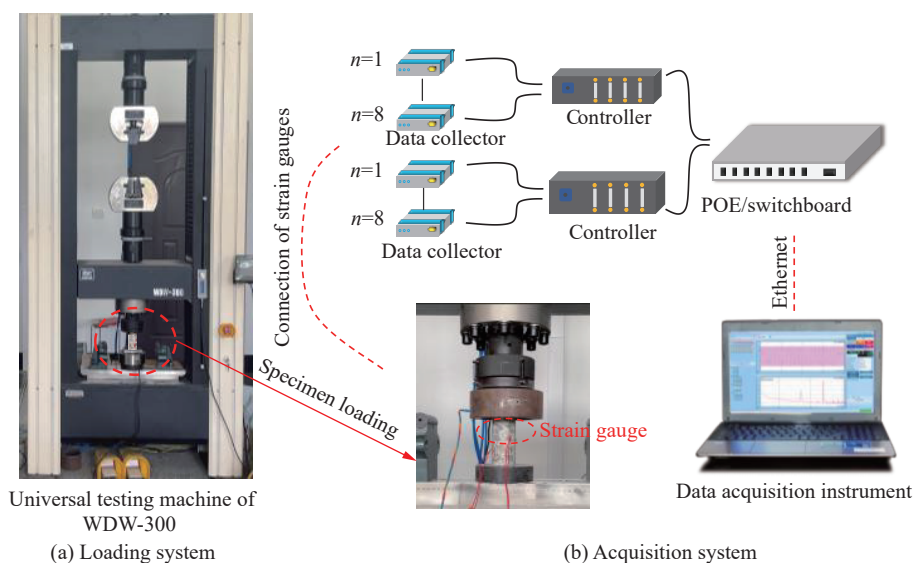


图 1 单轴压缩试验装置
Fig. 1 Testing machine of the uniaxial compression

1.3 试验结果分析

图 2(a) 给出了非均质岩石材料的应力-应变曲线^[24], 其中: σ 为非均质岩石在单轴压缩下产生的轴向应力, ε 为轴向应变, $\sigma_{\max}$ 为最大轴向应力, ε_i 为最大轴向应力对应的应变。该曲线直观地反映了岩石的破坏特征以及力学性能, 典型的岩石变形过程可分为 4 个阶段: 初始压密阶段、线弹性变形阶段、非稳定破裂发展阶段和破坏阶段。在实际工程中, 岩石内部矿物组合和结构面具有差异性, 导致应力-应变曲线也存在差异。图 2(b) 显示了室内单轴压缩下不同材料的应力-应变曲线, 其中, 上标 G、C 和 GC 分别代表花岗岩、混凝土和花岗岩-混凝土组合体, 具体数据见表 2。综合分析图 2(b) 和表 2 数据可知, 花岗岩的峰值轴压强度最大, 混凝土最小, 花岗岩-混凝土组合结构的峰值轴压强度介于两者之间。产生该现象的主要原因是: 花岗岩是一种高硬度的天然岩石, 具有极高的抗压强度和耐久性, 而混凝土是一种人造类岩石材料, 其抗压强度虽然不及花岗岩, 但也具有一定的承载能力; 当这两种材料组合在一起时, 它们的性能会相互影响, 在受到轴压时, 两种材料的界面能够传递和分散摩擦力和黏结力, 产生正协同效应, 致使花岗岩-混凝土组合结构试件能够承受更大的压力而不易破坏。花岗岩试件的弹性模量最大, 花岗岩-混凝土组合试件的弹性模量最小, 混凝土试件的弹性模量介于两者之间。这是因为花岗岩-混凝土组合体试件存在界面过渡区, 在受力过程中, 界面过渡区为应力集中区域, 易发生破坏, 从而降低组合试件的整体弹性模量, 文献 [25] 也验证了这一现象。

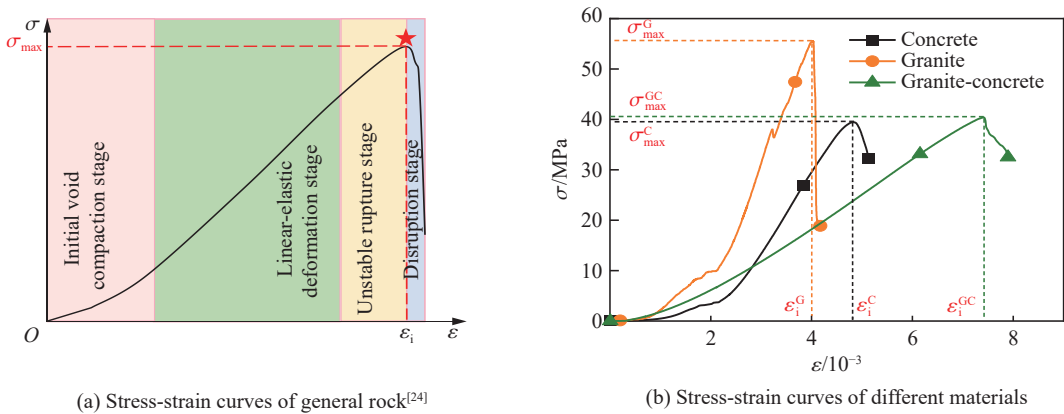


图 2 室内单轴压缩试验得到的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of indoor uniaxial compression tests

表 2 试验结果分析

Table 2 Analysis of test results

Material	Sample ID	Compressive strength/MPa		Elastic modulus/GPa	
		Test data	Average value	Test data	Average value
Granite	G-1	55.5	54.2	28.0	24.3
	G-2	55.5		22.1	
	G-3	51.5		22.9	
Concrete	C-1	39.4	39.3	16.1	18.7
	C-2	39.7		18.2	
	C-3	38.9		21.8	
Granite-concrete	GC-1	40.4	41.1	7.2	6.7
	GC-2	41.5		6.7	
	GC-3	41.5		6.1	

Note: In sample ID, G represents the granite, C represents the concrete, GC denotes the granite-concrete, and 1, 2, 3 represents the sample number.

2 细观数值模拟

2.1 接触模型

线性平行黏结接触 (parallel bond contact, PBC) 模型可以传递颗粒之间的力和力矩, 与混凝土、岩石的契合度较高^[26], 陆建友^[27]、Yue 等^[28]就采用 PBC 模型模拟了花岗岩和混凝土材料。光滑节理接触 (smooth joint contact, SJC) 模型含有抗剪强度和抗拉强度, 不具备抗扭转能力, 常用于具有摩擦性的结构面^[29], 可以模拟材料的胶结状态。本研究采用 PBC 模型模拟花岗岩和混凝土, 采用 SJC 模型^[30]模拟花岗岩-混凝土界面, 如图 3 所示, 其中: g_s 为黏结激活间隙, k_n 为法向刚度, $\bar{k}_n$ 为平行黏结法向刚度, k_s 为切向刚度, $\bar{k}_s$ 为平行黏结切向刚度, μ 为摩擦系数, σ_c 为法向拉伸强度, $\bar{\sigma}_c$ 为平行黏结抗拉强度, ϕ 为摩擦角, $\bar{\phi}$ 为平行黏结摩擦角, c 为切向黏结强度, $\bar{c}$ 为平行黏结强度, F^d 为阻尼力, F^l 为线性阻尼力, F_c 为接触力, $\bar{F}$ 为平行黏结力, M_c 为接触弯矩, $\bar{M}$ 为平行黏结力矩, D_c 为颗粒间的距离。

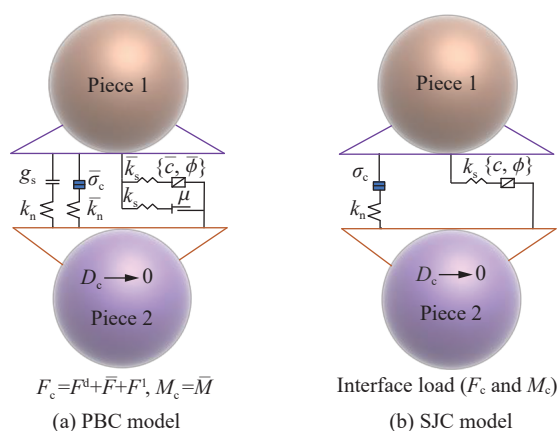


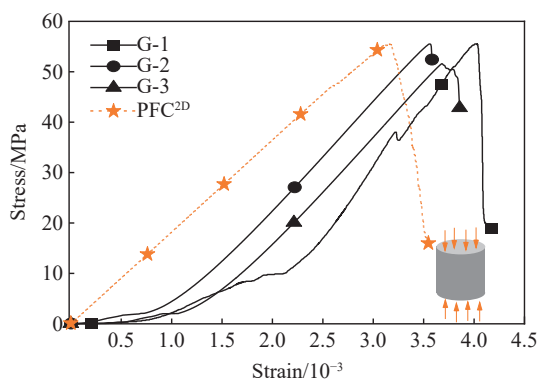
图 3 接触模型^[30]

Fig. 3 Contact model^[30]

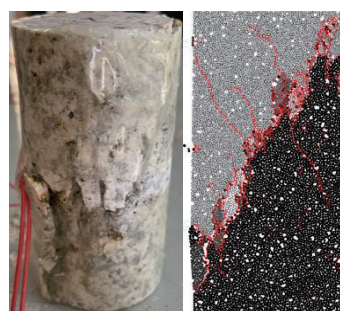
2.2 细观参数标定

通过 PFC^{2D} 数值模拟软件对花岗岩-混凝土组合体试件的力学性能进行深入研究。由于 PFC^{2D} 软件获取的细观参数无法与宏观参数形成直接的联系, 因此, 研究人员往往采用试错法^[31]对模型的细观参数进行标定。对组合体试件中涉及的 PBC 模型和 SJC 模型参数进行调整, 直到室内试验数据与数值模拟得到的应力-应变曲线及破坏形态相吻合, 对比结果见图 4。

表 3 给出了完整混凝土试件、完整花岗岩试件和完整花岗岩-混凝土组合试件的弹性模量和峰值应力的对比结果, 可见, 相对误差较小。图 4 所示的完整混凝土试件、完整花岗岩试件和完整花岗岩-混凝土组合试件的应力-应变曲线特征直观地展示了不同材料在受压过程中的变化趋势, 也反映了试件的脆性破坏特征。在单轴压缩加载初期, 天然花岗岩中的空洞和裂隙等缺陷产生闭合效应, 但是 PFC^{2D} 模拟的颗粒为刚性^[32-33], 无法模拟应力-应变试验曲线中的压密阶段, 导致两者存在一定的差异。尽管如此, 图 4 所示的模拟曲线与试验曲线在变化趋势上是一致的, 即应力先增大至峰值强度, 然后减小直至试件破坏。以上结果进一步验证了 PBC 模型和 SJC 模型细观参数的可靠性, 所建立的数值模型可以有效地表征花岗岩-混凝土组合体试件的力学特性, 具体的细观参数如表 4 和表 5 所示。



(a) Stress-strain curves of granite



(b) Failure mode of granite

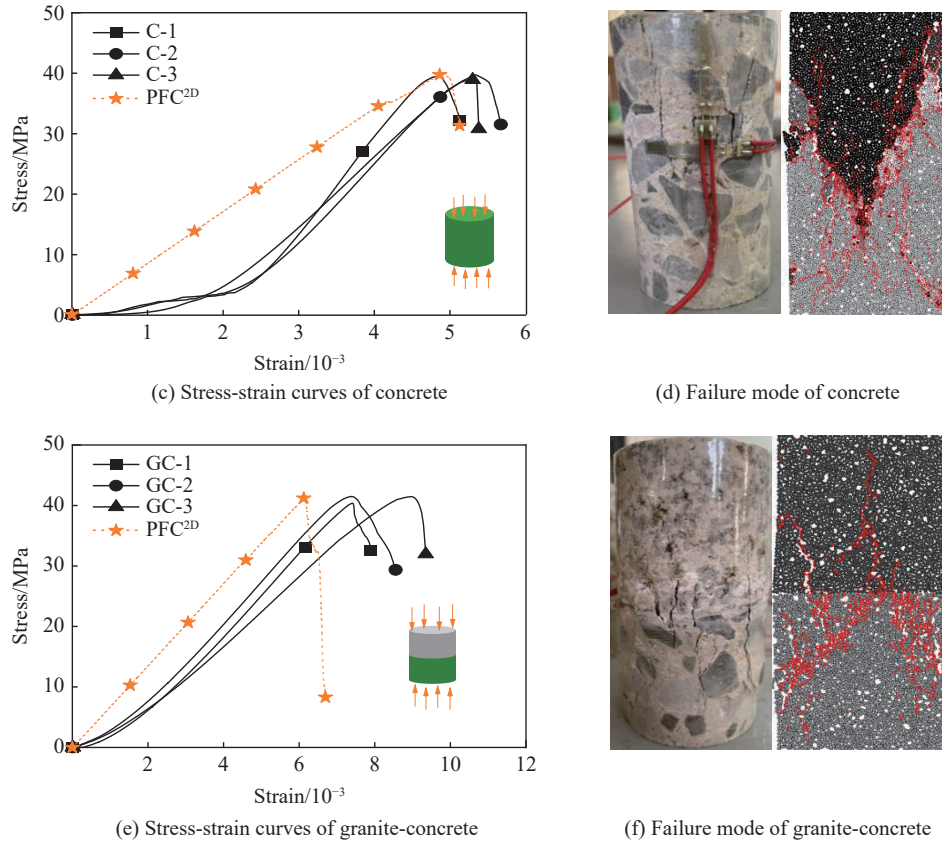


图 4 试验与数值模拟得到的应力-应变曲线及破坏形态对比

Fig. 4 Comparison of stress-strain curves and failure modes between test and numerical simulation

表 3 试验值与模拟值的比较

Table 3 Comparison between test and simulated value

Material	Effective modulus			Peak stress		
	Test/GPa	Simulation/GPa	Error/%	Test/MPa	Simulation/MPa	Error/%
Granite	24.3	24.3	0	54.2	55.3	2.0
Concrete	18.7	18.7	0	39.3	40.1	2.0
Granite-concrete	6.7	6.7	0	41.1	41.1	0

表 4 材料细观参数

Table 4 Microscopic parameters of materials

Material	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Tensile strength/MPa	Cohesive strength/MPa	Effective modulus/GPa	Particle friction coefficient	Stiffness ratio	Friction angle/(°)
Granite	2 790	50	150	17.5	0.3	2.53	30
Concrete	2 360	51	50	8.0	0.2	1.33	70

表 5 界面细观参数

Table 5 Microscopic parameters of interfaces

Normal stiffness/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	Shear stiffness/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	Cohesion/GPa	Joint friction angle/(°)	Frictional coefficient
9×10^7	4.5×10^8	20	20	0.6

2.3 模拟方案

根据表 4 和表 5 所列的细观参数, 结合室内压缩试验, 在花岗岩上预制一条具有不同倾角(α)的裂隙, 并在 PFC^{2D} 中生成模型尺寸为 $\varnothing 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的组合物体试件, 如图 5 所示, 其中 L 为裂隙长度。采用 PFC^{2D} 生成 5 144 个不同粒径的圆形颗粒, 其中: 最小粒径为 0.4 mm, 包含 10 026 个接触, 花岗岩试样的颗粒密度为 2 790 kg/m³, 混凝土试样的颗粒密度为 2 360 kg/m³, 在组合物体试件的垂直方向上设置上、下墙体, 用来模拟试验中单轴压缩的加载板。采用位移加载方式, 以 0.01 mm/s 的恒定速率加载, 直至试件模型破坏。具体模拟方案见表 6, 其中: H 为裂隙宽度, v_0 为加载速度, E 为弹性模量。

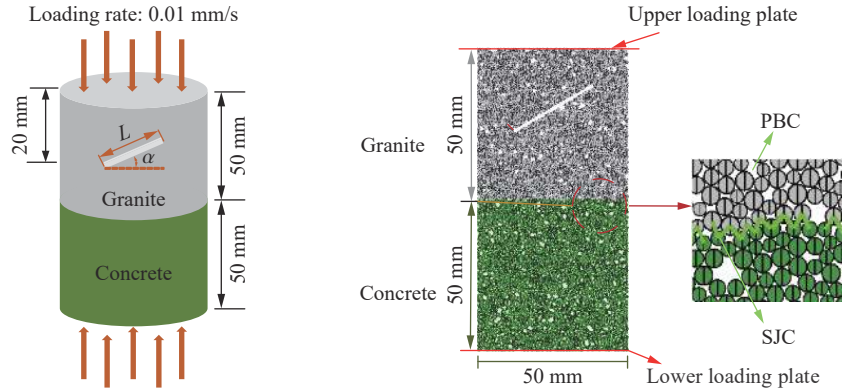


图 5 单裂隙花岗岩-混凝土试样的数值模型

Fig. 5 Numerical model of granite-concrete specimen with single crack

表 6 数值模拟方案

Table 6 Scheme of numerical simulation

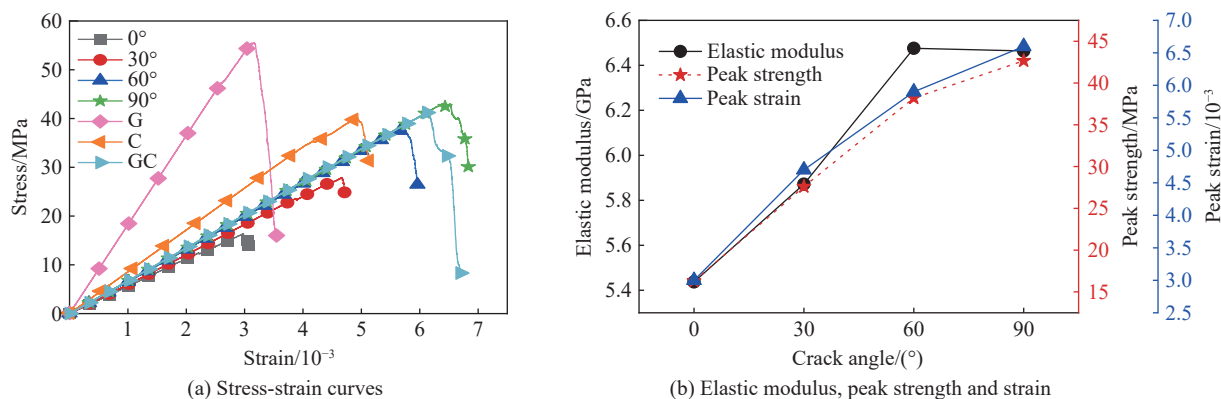
$\alpha/(^{\circ})$	Model	L/mm	H/mm	$v_0/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	E/GPa	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$\varepsilon_f/10^{-3}$
0		30	1	0.01	5.437	16.31	0.30
30		30	1	0.01	5.872	27.60	0.47
60		30	1	0.01	6.476	38.21	0.59
90		30	1	0.01	6.464	42.66	0.66

2.4 细观模拟结果分析

2.4.1 裂隙倾向对组合物体变形参数的影响

图 6(a) 为不同裂隙倾向下花岗岩-混凝土组合物体试件的应力-应变曲线。应力达到峰值强度后, 不同裂隙倾向下花岗岩-混凝土组合物体试件的应力-应变曲线呈快速下降趋势, 在短时间内丧失承载力, 体现了试件的脆性破坏特征。图 6(b) 显示了不同裂隙倾向下花岗岩-混凝土组合物体试件的弹性模量、峰

值应力与应变,可以看出,随着裂隙倾角的增大,组合体试件的弹性模量、峰值应力与应变均增大。混凝土与花岗岩之间存在约束作用,裂隙两侧的花岗岩材料在受到外力作用时会相互挤压,产生一种“自锁”效应,从而增加了试件的强度和刚度,最终导致组合体试件的弹性模量、峰值应力和应变增大。此外,文献[34–35]也证明了裂隙倾角会影响岩石与混凝土之间的约束,从而导致力学特性的改变。

图 6 PFC^{2D} 的数值模拟结果Fig. 6 Numerical simulation results of PFC^{2D}

2.4.2 破坏模式

图 7 给出了不同裂隙倾角下花岗岩-混凝土组合体试件的裂纹扩展情况。基于李庆文等[36]提出的破坏模式判断依据,花岗岩-混凝土组合体试件主要包含拉伸失效裂纹和剪切失效裂纹 2 种。花岗岩-混凝土组合体试件的颗粒位移矢量图表明:裂纹首先以裂隙尖端为主干开始扩展;当裂隙倾角在 0°~30°之间时,组合体试件中只有拉伸裂纹;随着裂隙倾角的增大,裂纹数逐渐增多,并产生新的裂隙;当裂隙倾角达到 60°时,组合体试件中的裂纹开始贯穿整个组合体,并出现了剪切裂纹,试件变形较大,组合体试件最终发生拉伸和剪切模式破坏。

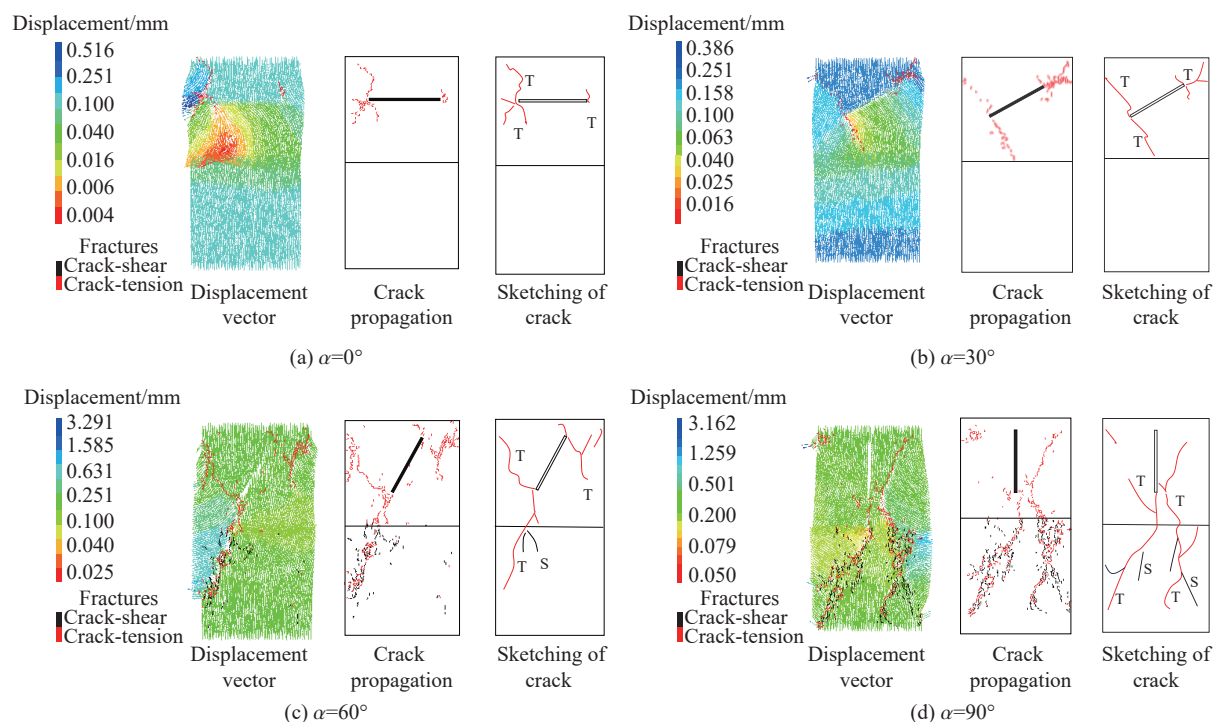


图 7 裂纹扩展路径

Fig. 7 Propagation path of cracks

3 花岗岩-混凝土能量损耗本构

3.1 能量损耗计算方法

将花岗岩-混凝土组合体视为一个整体,忽略组合体界面在压缩过程产生的摩擦力。单轴压缩过程中一般岩石的弹性能与耗散能的关系如图 8^[37]所示。李庆文等^[38]指出,单轴压缩破坏过程符合能量演化的 4 个阶段:能量输入、能量积累、能量耗散和能量释放。假设试件在变形过程中不与外界产生热交换,根据热力学第一定律^[38],有

$$U = U_e + U_d \quad (1)$$

式中: U 为花岗岩-混凝土的总应变能, J/cm^3 ; U_e 为花岗岩-混凝土的弹性应变能, J/cm^3 ; U_d 为花岗岩-混凝土的耗散应变能, J/cm^3 。这里的总应变能、弹性应变能、耗散应变能均为能量密度。

图 8 所示的应力-应变曲线下方的面积代表总应变能 U , 绿色区域为弹性应变能 U_e , 点区域为耗散应变能 U_d , 则花岗岩-混凝土组合体试件单元体的总应变能^[39]为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{1i} + \sigma_{1i-1}) (\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{1i-1}) \quad (2)$$

式中: σ_{1i} 为花岗岩-混凝土组合体试件轴向应力-应变曲线上任意一点的应力, MPa ; ε_{1i} 为应力-应变曲线中任意一点的应变。

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3^e \quad (3)$$

根据胡克定律^[40], 式 (3) 可改写为

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (4)$$

式中: ν 为泊松比; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一主应力(轴向应力)、第二主应力、第三主应力, σ_2 、 σ_3 也可称为环向应力; ε_1^e 、 ε_2^e 、 ε_3^e 分别为主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 对应的弹性应变。在单轴压缩过程中, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 则式 (4) 可简化为

$$U_e = \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (5)$$

将式 (5)、式 (2) 代入式 (1), 得到花岗岩-混凝土组合体试件的耗散应变能

$$U_d = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{1i} + \sigma_{1i-1}) (\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{1i-1}) - \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (6)$$

3.2 不同倾角下花岗岩-混凝土的能量演化规律

根据 PFC 模拟所得的 4 种倾角组合体应力-应变曲线结果, 结合 3.1 节的能量计算方法, 根据式 (2)、式 (5)、式 (6), 可以得到不同倾角下花岗岩-混凝土组合体试件的能量演化规律, 如图 9 所示。可以发现, 组合体试件的总应变能随应变的增加呈半抛物线形增加, 并且随着裂隙倾角的增大, 总应变能增大, 当裂隙倾角为 90° 时, 总应变能的平均值约为 $159.89 \text{ J}/\text{cm}^3$; 弹性应变能在达到峰值之前也随应变的增大呈半抛物线形增大, 峰值应变之后, 弹性应变能急剧下降, 并且也在裂隙倾角为 90° 时达到最大, 平均值为 $131.57 \text{ J}/\text{cm}^3$; 耗散能-应变曲线在加载前期比较平缓, 几乎无波动, 这是由于加载前期试件未被破坏, 在加载后期即峰值点之后, 耗散能激增, 此时组合体试件完全破坏, 内部能量完全释放。

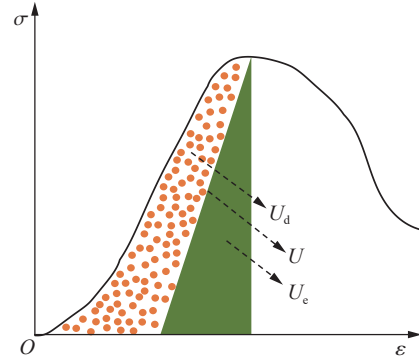


图 8 一般岩石的弹性能与耗散能之间的关系^[37]

Fig. 8 Relationship between elastic energy and dissipated energy of general rock^[37]

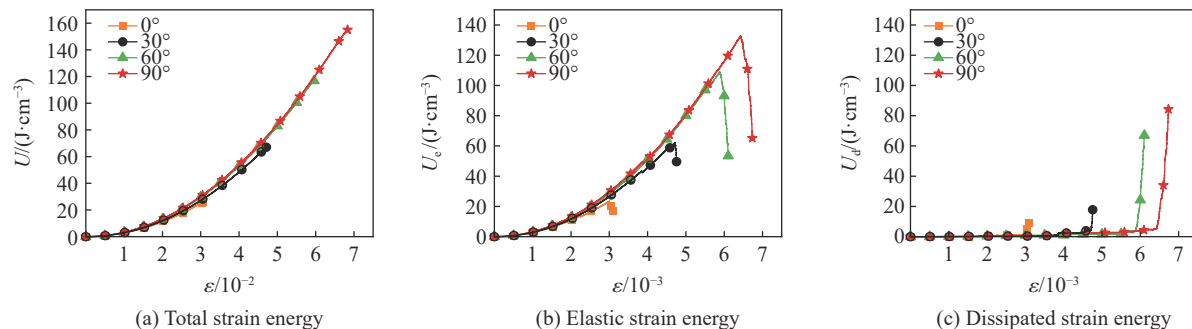


图 9 不同裂隙倾向下花岗岩-混凝土试件的能量演化

Fig. 9 Energy evolution of granite-concrete specimen under different fracture angles

3.3 花岗岩-混凝土组合体峰值点能量

图 10 显示了花岗岩-混凝土试件峰值时刻的能量演化与裂隙倾向之间的关系, 其中: 图 10(a) 给出了组合体试件在峰值应力处的能量, 图 10(b) 给出了峰值弹性应变能在总能量中的占比以及峰值耗散应变能占比。分析图 10(a) 可知, 当裂隙倾向从 0° 增加到 30° 、 60° 、 90° 时, 峰值时刻总应变能的增长率分别为 64.09%、47.35%、15.69%, 弹性应变能的增长率分别为 66.67%、46.61%、6.32%, 耗散应变能的增长率分别为 16.52%、-12.09%、74.61%。图 10 直观地反映了试样在不同裂隙倾向下的能量重分布: 当裂隙倾向为 60° 时, 裂隙贯穿整个试件; 当裂隙倾向为 90° 时, 由于能量释放最大, 宏观裂纹数量最多, 破碎程度达到最大。

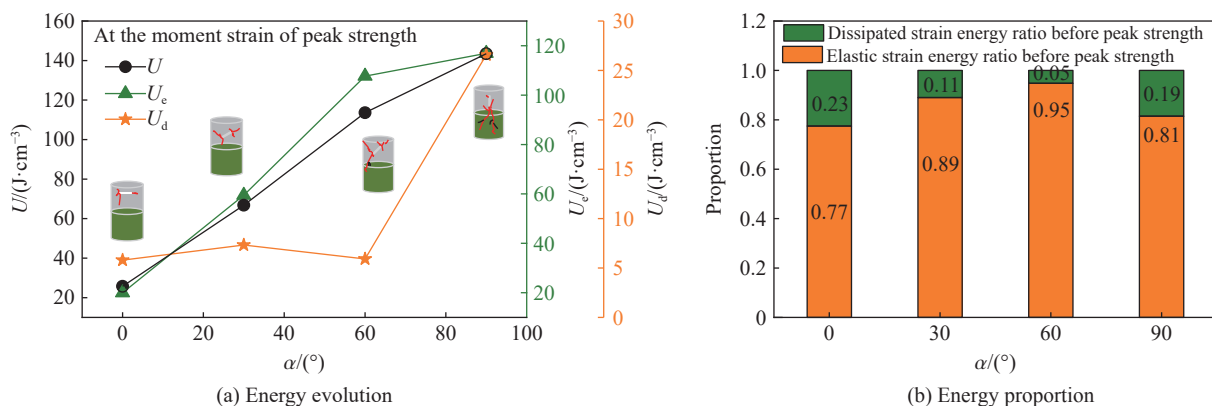


图 10 不同倾向下花岗岩-混凝土试件峰值时刻的能量演化

Fig. 10 Energy evolution of granite-concrete specimen under different angles at the moment of peak strength

Xia 等^[41]指出, 峰值点的弹性应变能可反映试件在单轴压缩过程中吸收能量的强度。从图 10(b) 可以看出, 峰值点的弹性应变能越大, 试件吸收的能量越多, 变形和断裂的可能性越大。在裂隙倾向从 0° 增大到 90° 的过程中, 弹性应变能和耗散应变能呈现先增加后减少的规律, 特别是在裂隙倾向大于或等于 60° 时, 弹性应变能占比和耗散应变能占比的改变导致内部能量波动, 变形或破坏随之发生, 进而影响试件的稳定性。

3.4 花岗岩-混凝土组合体的单轴压缩本构关系

3.4.1 损伤因子

马秋峰等^[42]采用耗散能与损伤耗能率相除的方法求解损伤变量, 发现岩石损伤过程与能量耗散有关, 进而用能量耗散过程来反映损伤演化。以累积耗散能为特征的花岗岩-混凝土组合试件的损伤因子为

$$D = \frac{U_d^t}{U_d^T} \quad (7)$$

式中： U_d' 为某一应变 ε 在任意时刻 t 的累积能量耗散， J/cm^3 ； U_d^T 为完全失效时的累积总耗散能量， J/cm^3 。损伤因子的数值范围为 $0 \sim 1$ ， $D=0$ 表示花岗岩-混凝土试件未损坏， $D=1$ 表示花岗岩-混凝土试件在单轴压缩过程中完全损坏。

借鉴研究人员对煤、岩石材料的损伤概率密度函数^[43-45]，提出了基于耗散能损伤的预制裂隙组合体试件的概率密度函数

$$f(U_d) = \frac{m_3(m_1 + m_2 U_d^2) - 2m_2 U_d(1 + m_3 U_d)}{(1 + m_3 U_d)^2} \exp\left(\frac{m_1 + m_2 U_d^2}{1 + m_3 U_d}\right) \quad (8)$$

式中： m_1 、 m_2 和 m_3 为概率密度参数。损伤因子 D 与耗散能 U_d 存在以下函数关系

$$\frac{dD}{dU_d} = f(x) \quad (9)$$

对损伤因子 D 进行积分，可得

$$D = \int_0^{U_d} f(x) dU_d = 1 - \exp\left(\frac{m_1 + m_2 U_d^2}{1 + m_3 U_d}\right) \quad (10)$$

花岗岩-混凝土试件在整个单轴压缩破坏过程中任意时刻的能量损失由 U_d' 表示，即

$$U_d' = U_d^T \int_0^{U_d} f(x) dU_d \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10)，可得

$$\frac{U_d'}{U_d^T} = \int_0^{U_d} f(x) dU_d = 1 - \exp\left(\frac{m_1 + m_2 U_d^2}{1 + m_3 U_d}\right) = D \quad (12)$$

3.4.2 本构方程的建立

基于李庆文等^[46]的本构关系，花岗岩损伤的应力-应变关系为

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (13)$$

将式 (12) 代入式 (13)，可以计算得到花岗岩-混凝土组合体试件的能量耗散损伤本构模型

$$\sigma = E\varepsilon \exp\left(\frac{m_1 + m_2 U_d^2}{1 + m_3 U_d}\right) \quad (14)$$

3.4.3 本构方程的验证

借鉴张超等^[47]对模型参数敏感性的讨论，将应力-应变曲线、弹性模量 E 与耗散能 U_d 代入式 (14)，利用 1stopt 软件对参数 m_1 、 m_2 和 m_3 在不同裂隙倾角下进行修正，得到

$$\begin{cases} m_1 = -0.01334 - 6.1987 \times 10^{-4} \alpha + 5.0187 \times 10^{-6} \alpha^2 \\ m_2 = -0.00109 + 0.03462 \times 0.88609^\alpha \\ m_3 = -1.4952 + 0.0589\alpha - 4.6250 \times 10^{-4} \alpha^2 \end{cases} \quad (15)$$

对应的修正曲线如图 11 所示，其中 R^2 为拟合相关系数。

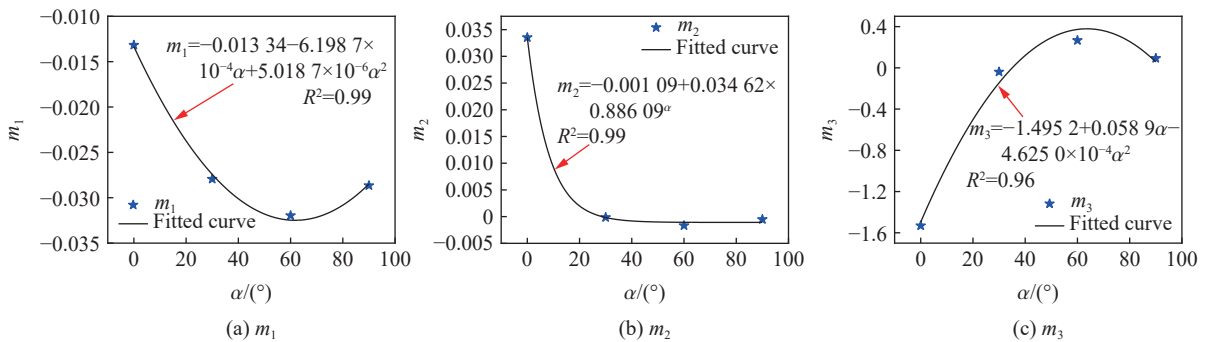


图 11 考虑裂隙倾角的参数修正

Fig. 11 Parameter correction considering crack dip angle

将式 (14) 与式 (15) 联立, 可得到单裂隙花岗岩-混凝土组合体试件能量耗散损伤本构方程, 即

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon \exp\left(\frac{m_1 + m_2 U_d^2}{1 + m_3 U_d}\right) \\ m_1 = -0.01334 - 6.1987 \times 10^{-4} \alpha + 5.0187 \times 10^{-6} \alpha^2 \\ m_2 = -0.00109 + 0.03462 \times 0.88609^\alpha \\ m_3 = -1.4952 + 0.0589 \alpha - 4.6250 \times 10^{-4} \alpha^2 \end{cases} \quad (16)$$

理论计算与数值模拟得到的应力-应变曲线对比结果如图 12 所示。观察图 12 可知, 不同裂隙倾角下, 式 (16) 的理论计算结果与模拟结果的吻合度较高。

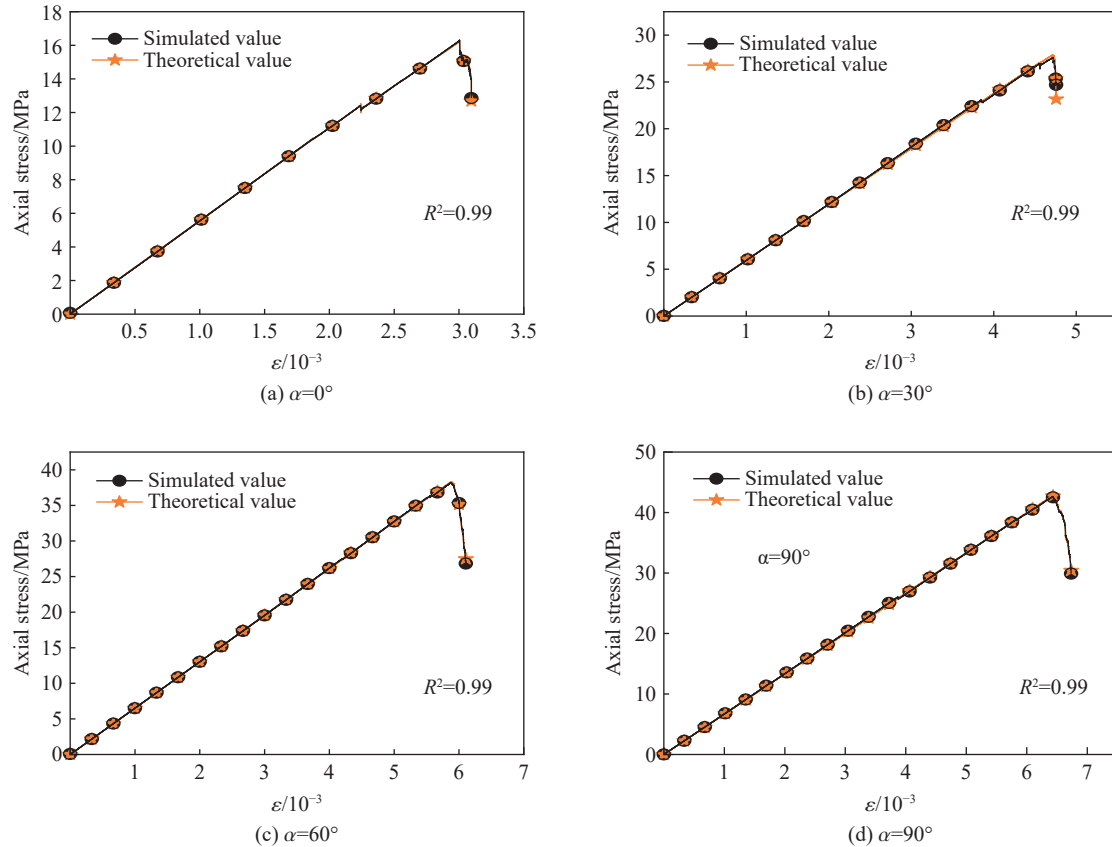


图 12 本构模型的验证

Fig. 12 Verification of constitutive model

3.5 能量演化分析

根据式 (12) 可以计算出花岗岩-混凝土组合试件的损伤因子, 结果如图 13 所示。在不同裂隙倾角条件下, 损伤因子-应变曲线可以大致分为 3 段渐进增长过程: 在第 1 阶段, 不同裂隙倾角下, 损伤因子随应变的增加而缓慢增大; 在第 2 阶段, 因 PFC^{2D} 模拟岩石颗粒之间碰撞而产生的误差, 损伤因子-应变曲线近似呈 90° 直线骤增; 在第 3 阶段, 在应变达到一定值时, 由于试件内部的损伤累积量不变, 故损伤因子-应变曲线趋于稳定。在单轴荷载作用下, 岩石内部裂纹逐渐扩展, 损伤不断累积。花岗岩-混凝土组合体试样也遵循这一损伤规律: 在初始加载阶段, 损伤因子-应变曲线缓慢上升, 达到一定应变值时, 呈 75° 急剧上升, 损伤因子接近 0.8, 曲线逐渐平缓不再有上升趋势, 表明随着载荷的增加, 花岗岩-混凝土组合体试件已经达到损伤极限。

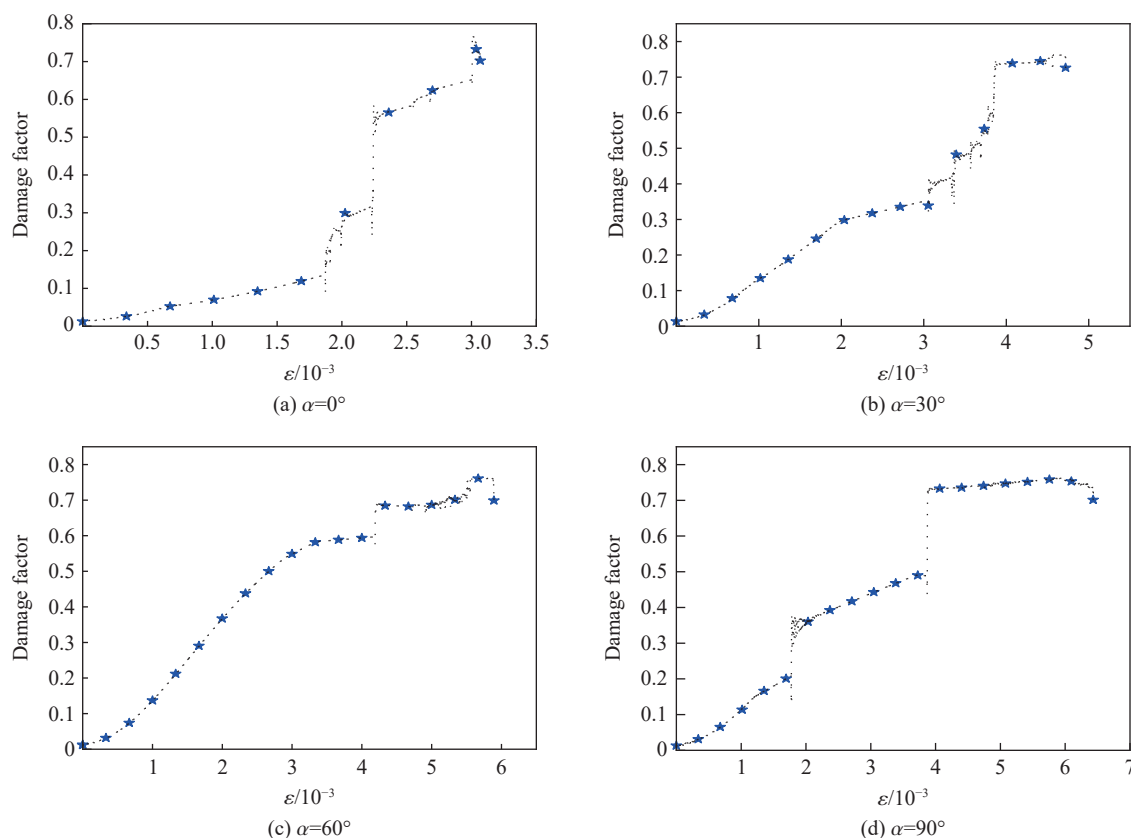


图 13 损伤因子演化曲线

Fig. 13 Evolution curves of damage factor

4 结 论

通过分析数值模拟结果,探究了不同裂隙倾角对花岗岩-混凝土组合试件力学性能的影响,基于内部能量计算,构造了相应的损伤本构方程,分析了能量演化规律,得到以下主要结论。

(1) 裂隙倾角对花岗岩-混凝土试件强度的影响:随着裂隙倾角的增加,峰值强度和弹性模量呈非线性上升趋势;在单轴压缩前期,闭合效应导致不同倾角下的应力-应变曲线近乎重合,应力达到峰值强度后迅速下降,表明试件破坏完全,显示出岩石的脆性破坏特性。

(2) 裂隙倾角对花岗岩-混凝土试件变形的影响:在花岗岩-混凝土试件的整个压缩破坏过程中,主要有 2 种破坏模式,即拉伸破坏和剪切破坏;当裂隙倾角为 0° 时,花岗岩-混凝土组合体试件的主要破坏模式为拉伸破坏;当裂隙倾角为 90° 时,试件的应力-应变曲线产生了应力跌落,此时的轴向应变达到最大(0.66%),破坏模式变为剪切破坏。

(3) 裂隙倾角对花岗岩-混凝土能量演化规律的影响:试件的总应变能随应变的增加呈半抛物线形增加,耗散应变能随着应变的增加先平缓增大而后在峰值应变处骤增,弹性应变能的大小与试件储能的强弱呈正相关,当弹性应变能随着应变的增加先增大后减小时,试件储能也先增大后减小。

(4) 提出了基于耗散能的损伤因子,并建立了含 4 种倾角的单裂隙花岗岩-混凝土组合体的损伤本构方程,揭示了含 4 种倾角单裂隙花岗岩-混凝土组合体的损伤演化规律。

参考文献:

- [1] FU J W, HAERI H, SARFARAZI V, et al. The shear behaviors of concrete-gypsum specimens containing double edge cracks under four-point loading conditions [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 119: 103361.

- [2] LI D J, SHI C, RUAN H N, et al. Study on shear behavior of coral reef limestone-concrete interface [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022, 40(4): 438–447.
- [3] DONG W, WU Z M, ZHANG B S, et al. Study on shear-softening constitutive law of rock-concrete interface [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(9): 4677–4694.
- [4] ZHANG D C, SHE H C, XIAO T L. Influence of coplanar double fissures on failure characteristics of sandstone and fracture mechanics analysis [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1180636.
- [5] BISTA D, SAS G, JOHANSSON F, et al. Influence of location of large-scale asperity on shear strength of concrete-rock interface under eccentric load [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(3): 449–460.
- [6] DONG W, WU Z M, ZHOU X M, et al. An experimental study on crack propagation at rock-concrete interface using digital image correlation technique [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 171: 50–63.
- [7] YANG L Y, ZHANG F, LIN C Y, et al. Experimental study on failure characteristics of rock-fiber concrete composite under compression load [J]. *Structures*, 2022, 44: 1863–1873.
- [8] LI X J, LAN L J, BAI Y F, et al. Study on fracture failure mechanism and crack propagation law of granite-shotcrete composite structure [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(6): 464.
- [9] WEI X, SHEN Y J, LI X T, et al. Influence of freeze-thaw cycles and shear rate on sandstone-concrete interfacial bond strength: experiment and degradation model [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 126986.
- [10] SHEN Y J, ZHANG H, ZHANG J Y, et al. Sandstone-concrete interface transition zone (ITZ) damage and debonding micromechanisms under freeze-thaw [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2021, 13(2): 133–149.
- [11] PAN J, SHEN Y J, YANG G S, et al. Debonding behaviors and micro-mechanism of the interface transition zone in sandstone-concrete interface in response to freeze-thaw conditions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 191: 103359.
- [12] XIA W, CUI S A, XU L L, et al. Study on the fracture performance for rock-concrete interface in the high geothermal tunnel environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 347: 128568.
- [13] HU Y P, WANG M N, WANG Z L, et al. Mechanical behavior and constitutive model of shotcrete-rock interface subjected to heat damage and variable temperature curing conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120171.
- [14] 陆文博, 晏鄂川, 邹浩, 等. 我国倾倒变形体发育规律研究 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(8): 111–119.
LU W B, YAN E C, ZOU H, et al. Development rules of toppling deformation slopes in China [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(8): 111–119.
- [15] 邓鹏海, 刘泉声, 黄兴. 隧道底板渐进破裂碎胀大变形: 一种新的底鼓机制研究 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(5): 1512–1529.
DENG P H, LIU Q S, HUANG X. Progressive fracture and swelling deformation of tunnel floor: a new floor heave mechanism [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(5): 1512–1529.
- [16] 李树忱, 马腾飞, 蒋宇静, 等. 深部多裂隙岩体开挖变形破坏规律模型试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(6): 987–995.
LI S C, MA T F, JIANG Y J, et al. Model tests on deformation and failure laws in excavation of deep rock mass with multiple fracture sets [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(6): 987–995.
- [17] CAO W G, TAN X, ZHANG C, et al. Constitutive model to simulate full deformation and failure process for rocks considering initial compression and residual strength behaviors [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(5): 649–661.
- [18] 李庆文, 禹萌萌, 高森林, 等. 加载速率对碳纤维布被动约束煤能量演化影响研究 [J/OL]. *煤炭学报* (2023-06-08)[2024-04-26]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0238>.
LI Q W, YU M M, GAO S L, et al. The effect of loading rate on energy evolution of coal confined passively by CFRP sheets [J/OL]. *Journal of China Coal Society* (2023-06-08)[2024-04-26]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0238>.
- [19] 周辉, 李震, 杨艳霜, 等. 岩石统一能量屈服准则 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(11): 2170–2184.
ZHOU H, LI Z, YANG Y S, et al. Unified energy yield criterion of rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11): 2170–2184.
- [20] 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.
- [21] HU J, WANG H K, XIA Z G, et al. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of two dissimilar layers of rock-like specimens with prefabricated parallel fissures [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2024, 10(1): 19.
- [22] 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.

- [23] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程: SL/T 264—2020 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for rock tests in water and hydropower projects: SL/T 264—2020 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
- [24] SONG L B, WANG G, WANG X K, et al. The influence of joint inclination and opening width on fracture characteristics of granite under triaxial compression [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(5): 04022031.
- [25] 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.
LI Q. Research on acoustic emission characteristics of rock and concrete monolithic body in uniaxial compression [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [26] SU C, WU Z, XU H, et al. Analysis of influencing factors of pneumatic flow enhancement of pumped concrete based on discrete element method [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 968085.
- [27] 陆建友. 岩石-混凝土圆盘径向压缩条件下力学性能研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
LU J Y. Study on mechanical properties of rock-concrete disc under radial compression [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.
- [28] YUE Z F, MENG F Z, ZHOU X, et al. Influence of non-persistent joint aperture and inclination angle on the shear behavior and fracture mode of solid rock and concrete material [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 316: 125892.
- [29] 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.
- [30] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流 (PFC5.0) 数值模拟技术及应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
SHI C, ZHANG Q, WANG S N. Numerical simulation technology and application with particle flow code (PFC5.0) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [31] 陈鹏宇, 孔莹, 余宏明. 岩石单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数标定研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1240–1249.
CHEN P Y, KONG Y, YU H M. Research on the calibration method of microparameters of a uniaxial compression PFC^{2D} model for rock [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(5): 1240–1249.
- [32] 许尚杰, 尹小涛, 马双科, 等. 基于颗粒流的混凝土材料数值实验研究 [J]. 实验力学, 2009, 24(3): 251–258.
XU S J, YIN X T, MA S K, et al. Numerical test study of concrete material based on particle flow [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(3): 251–258.
- [33] 冯一. 基于岩石细观力学的裂缝闭合机理研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
FENG Y. Fracture closure mechanism based on rock meso-mechanics [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [34] 易婷, 唐建新, 王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 98–106, 134.
YI T, TANG J X, WANG Y L. Effect of fracture dip angle and number on mechanical properties and failure modes of rock mass [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(1): 98–106, 134.
- [35] 王国艳, 于广明, 李刚, 等. 初始裂隙倾角对岩石破坏模式及峰值强度的影响 [J]. 中国矿业, 2017, 26(10): 173–176.
WANG G Y, YU G M, LI G, et al. Influence of initial crack dip angle on failure mode and peak strength of rock [J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(10): 173–176.
- [36] 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.
LI Q W, CAI S T, LI H J, 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.
- [37] 王桂林, 张亮, 许明, 等. 单轴压缩下非贯通节理岩体损伤破坏能量演化机制研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 639–647.
WANG G L, ZHANG L, XU M, et al. Energy damage evolution mechanism of non-across jointed rock mass under uniaxial compression [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 639–647.
- [38] 李庆文, 曾杏钢, 张向东, 等. 碳纤维布层数对煤圆柱力学特性影响的细观研究 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 73–85.
LI Q W, ZENG X G, ZHANG X D, et al. Mesoscopic study on the effect of CFRP layers on the mechanical properties of coal circular-columns [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(8): 73–85.
- [39] 李庆文, 高安梁, 禹萌萌, 等. 碳纤维布均匀约束下煤圆柱的损伤演化 [J]. 金属矿山, 2024(2): 104–113.
LI Q W, GAO A L, YU M M, et al. Damage evolution of coal cylinder under uniform confinement of carbon fiber sheets [J]. *Metal Mine*, 2024(2): 104–113.
- [40] 尹升华, 侯永强, 杨世兴, 等. 单轴压缩下混合集料胶结充填体变形破坏及能耗特征分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52(3): 936–947.
YIN S H, HOU Y Q, YANG S X, et al. Analysis of deformation failure and energy dissipation of mixed aggregate cemented backfill during uniaxial compression [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(3): 936–947.

- [41] 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.
- [42] 马秋峰, 刘志河, 秦跃平, 等. 基于能量耗散理论的岩石塑性-损伤本构模型 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(5): 1210–1220.
MA Q F, LIU Z H, QIN Y P. Rock plastic-damage constitutive model based on energy dissipation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1210–1220.
- [43] 张琪, 李祥春, 李彪, 等. 单轴压缩条件下煤体的宏-微观损伤破坏特征研究 [J/OL]. 采矿与安全工程学报 (2023-11-03) [2024-04-26]. <https://www.chinacaj.net/i,92,489849,0.html>.
ZHANG Q, LI X C, LI B, et al. Research on the damage characteristics of macro and microscopic scales of a loaded coal under uniaxial compression [J/OL]. *Journal of Mining & Safety Engineering* (2023-11-03)[2024-04-26]. <https://www.chinacaj.net/i,92,489849,0.html>.
- [44] 张慧梅, 谢祥妙, 张蒙军, 等. 真三轴应力状态下岩石损伤本构模型 [J]. *力学与实践*, 2015, 37(1): 75–78.
ZHANG H M, XIE X M, ZHANG M J, et al. Damage constitutive model of rock under the true triaxial confinement state [J]. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(1): 75–78.
- [45] 宋浩然, 李守宇, 张庆文, 等. 含水泥砂岩声发射阶段特征与损伤演化研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2024, 20(1): 72–81.
SONG H R, LI S Y, ZHANG Q W, et al. The acoustic emission stage characteristics and damage evolution of argillaceous siltstone [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(1): 72–81.
- [46] 李庆文, 高森林, 胡露露, 等. 不同加载速率下非均质煤样能量耗散损伤本构关系 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(Suppl 1): 90–102.
LI Q W, GAO S L, HU L L, et al. Constitutive relation of energy dissipation damage of heterogeneous coal samples under different loading rates [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(Suppl 1): 90–102.
- [47] 张超, 杨楚卿, 白允. 岩石类脆性材料损伤演化分析及其模型方法研究 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(9): 2344–2354.
ZHANG C, YANG C Q, BAI Y. Investigation of damage evolution and its model of rock-like brittle materials [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(9): 2344–2354.

Influence of Crack Angles on the Mechanical Behavior and Energy Evolution of Granite-Concrete under Uniaxial Compression

LI Qingwen¹, LI Hanjing¹, ZHONG Yuqi¹, LI Ling¹, CAI Shiting¹, 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 investigate the influence of the crack angle on the strength and energy evolution of granite-concrete composite specimens under uniaxial compression, a numerical simulation study was conducted using the two-dimensional particle flow code (PFC^{2D}) based on the micro-parameters calibrated through laboratory tests. The research results indicate that the strength and deformation characteristics of granite-concrete are affected by crack angles, and their strength and deformation parameters gradually increase with the increase of crack angle. During the uniaxial compression process, the internal energy of the specimens transforms into macroscopic crack propagation, and the final failure modes are mainly tensile fractures and shear fractures. The total energy and dissipated energy of the composite specimens increase with the increase of crack angle, and the total strain energy is more than the dissipated energy when the specimens are damaged. Based on the calculation of dissipated energy, a damage constitutive equation was constructed, indicating that when the damage factor reaches 0.8, the specimen is already close to its limit state, resulting in significant energy consumption and a decrease in the strength of the composite specimen.

Keywords: granite-concrete composite; single crack; particle flow code; uniaxial compression; energy damage constitutive