

预制裂隙岩样宏观力学行为颗粒流数值模拟

王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 贾帅龙

Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample

WANG Xingchen, WANG Zhiliang, HUANG Youpeng, and JIA Shuailong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究

A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil

魏婕, 魏玉峰, 黄鑫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 114-122

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79

基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160

基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

基于颗粒识别分析系统的碎屑流堆积物颗粒识别和统计方法研究

Particle identification and statistical methods of a rock avalanche accumulation body based on the particle analysis system

陈达, 许强, 郑光, 彭双麒, 王卓, 何攀 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 60-69

基于非均质系数的裂隙岩体表征单元体研究

Investigation of the representative elementary volume of fractured rock mass using the homogeneity index

王晓明, 杜玉芳, 梁旭黎 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 55-60



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010044

预制裂隙岩样宏观细观力学行为颗粒流数值模拟

王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 贾帅龙

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了研究双轴压缩下预制裂隙岩样宏观细观力学行为及裂纹扩展模式, 采用颗粒流程序(PFC)先分析平行粘结模型细观参数对宏观参数的影响, 接着结合完整花岗岩常规三轴压缩试验结果对其细观参数进行标定, 最后借助该组参数模拟有围压下预制裂隙(上裂隙①和下裂隙②)岩样的力学特性。研究表明: 基于 PFC 程序和标定的参数能较好地模拟完整岩样的破坏情况; 随着围压增大, 双裂隙岩样的峰值强度和弹性模量均增大, 且裂隙②与水平向夹角 α_2 为 90° 时, 两者均达到最大值; 不同的 α_2 下, 各岩样的裂纹演化均经过裂纹萌生、发展和稳定等 3 个阶段; 随着围压的降低和轴向应力的增大, 颗粒间的力链破坏情况愈严重。由于拉伸力链的集中和分布不同, 水平裂隙长度方向上的裂纹沿着轴向扩展, 且两裂隙的贯通呈现不同方式。

关键词: 颗粒流程序; 平行粘结模型; 参数标定; 双裂隙岩样; 裂纹演化

中图分类号: TU458⁺.3; TU458⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0086-07

Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample

WANG Xingchen, WANG Zhiliang, HUANG Youpeng, JIA Shuailong

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: To examine the macro-and meso-mechanical behaviors and crack propagation mode of the prefabricated and fractured rock sample under biaxial compression, the particle flow code (PFC) is first used to study the effect of the micro-parameters of the parallel bond model on the macro-parameters. Combined with the conventional triaxial compression test of intact granite, the meso-parameters are calibrated. The mechanical properties of the sample with prefabricated double fractures (upper fracture ① and lower fracture ②) under confining pressure are simulated with the set of parameters. The results show that the PFC code and the calibrated parameters can better simulate the failure of the complete samples. As the confining pressure increases, the peak strength and elastic modulus of the double-fractured rock sample increase. When the angle α_2 between the lower fracture ② and the horizontal is 90° , both of them reach the maximum values. Under different α_2 , the simulated crack evolution of each rock sample goes through three stages of crack initiation, development and stabilization. With the decreasing confining pressure and the increasing axial stress, the damage of the force chains between particles becomes more severe. Due to the difference in the concentration and distribution of the tensile force chains, the cracks along the length of the horizontal fracture propagate along the axial direction, and the penetration of the two fractures presents different ways.

Keywords: PFC; parallel bonding model; parameter calibration; double-fissure rock sample; crack evolution

收稿日期: 2020-10-23; 修订日期: 2020-12-11

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江联合基金项目(U1965101)

第一作者: 王星辰(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩石力学研究。E-mail: 269068082@qq.com

通讯作者: 王志亮(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学教学与科研。E-mail: cvewzL@hfut.edu.cn

颗粒流程序(PFC)已成为研究岩石力学特性重要工具,在岩土工程领域得到了广泛应用,如模拟岩石力学性能演化、边坡的变形失稳^[1]以及桩-土相互作用等。通过PFC标定出的岩石细观参数能较好地表征岩石压缩行为^[2],并可进一步研究含预制裂隙岩石的力学特性,如Yang等^[3]采用平行粘结接触模型对预制双裂隙红砂岩进行了单轴压缩模拟,结果表明裂纹扩展模式取决于裂隙的倾角。另有学者^[4-7]采用PFC模拟了含预制裂隙的各种岩石的双轴压缩,并对其力学特性和裂纹演化过程和机理进行了分析。此外,王振永^[8]运用PFC分析了不同裂隙参数(单裂隙角度和双裂隙延桥倾角)对岩体试样强度和裂纹扩展模式的影响。

综上所述,凭借围压作用下的平行粘结接触模型细观参数标定,来开展预制双裂隙岩样力学行为模拟方面的研究并不多见。因此,本文采用花岗岩常规三轴压缩下的力学特性标定花岗岩的细观参数,通过得到的参数模拟预制双裂隙花岗岩的力学特性,最后分析预制双裂隙花岗岩力学特性及裂纹发展的演化过程,力求得出有参考价值的结论。

1 建立模型及标定细观参数

1.1 数值模型

PFC^{2D}通过离散单元方法模拟单位厚度圆形颗粒的运动和相互作用,从基本颗粒角度来考虑材料的力学特性,反映出裂纹的形成和扩展过程。因此,可采用PFC^{2D}模拟岩石的宏观力学特性^[9]。以华山花岗岩为模拟研究对象,其平均密度为2 600 kg/m³。试验采用直径为50 mm、高100 mm的圆柱体试样。为方便与试验结果对比,在PFC^{2D}中建立宽50 mm、高100 mm的二维岩石颗粒模型来进行模拟研究(图1)。该数值模型共随机生成19 791个半径在0.20~0.332 mm之间的圆形颗粒,最大粒径与最小粒径之比为 $R_{\max}/R_{\min}=1.66$,颗粒密度为2 600 kg/m³,半径因子 $\bar{\lambda}$ 的默认值为1.0,

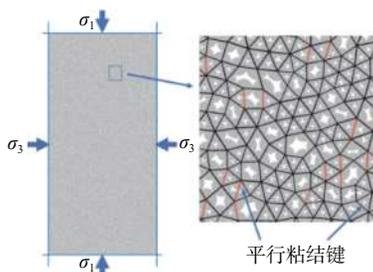


图1 PFC^{2D}模型和平行粘结键

Fig. 1 The PFC^{2D} model and parallel-bond bond

设置模型的孔隙率为1%。花岗岩属于硬岩,采用平行粘结模型能够更好地模拟此类材料的压缩力学特性^[10],模型中产生51 459个平行粘结。标定中固定围压 σ_3 为15 MPa,设置加载到轴压降低为峰值强度的70%时停止。

1.2 平行粘结模型细观参数分析

压缩作用下岩石的宏观力学响应主要受如下细观参数影响:有效模量 E^* 、刚度比 k^* 、平行粘结有效模量 \bar{E}^* 、平行粘结刚度比 \bar{k}^* 、抗拉强度 $\bar{\sigma}_c$ 、粘结强度 \bar{c} 、摩擦角 $\bar{\phi}$ 和摩擦系数 μ 。而宏观参数主要包括弹性模量 E 、峰值强度 σ_p 、泊松比 ν 、内摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 。细观参数的初始假定值如表1所示。为简化分析过程,选取对宏观参数影响较大的细观参数进行讨论。细观变形参数包括 E^* 、 k^* 、 \bar{E}^* 和 \bar{k}^* 。参照表1中的设定值,采用控制变量法,分别设置 E^* 、 \bar{E}^* 为10, 15, 20, 25, 30, 35 GPa, k^* 、 \bar{k}^* 为1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5。图2(a)为变形细观参数对宏观参数的影响,可见随着 E^* 和 \bar{E}^* 的增加, E 均呈近似线性增加,且在讨论范围内,其增加幅度分别为58.1%和71.1%。随着 \bar{k}^* 的增加, E 的降低幅度逐渐减小。而 k^* 对 E 的影响最小。采用相同方法,将 $\bar{\sigma}_c$ 、 \bar{c} 和 $\bar{\phi}$ 作为强度细观参数,分别设置 $\bar{\sigma}_c$ 、 \bar{c} 为10~100 MPa, $\bar{\phi}$ 为10°~70°。从图2(b)中可知, σ_p 受 $\bar{\sigma}_c$ 和 \bar{c} 的影响较大, σ_p 的增加幅度分别为106.6%、72.3%,且随 $\bar{\phi}$ 的增加 σ_p 增加幅度较小并渐趋稳定。

表1 平行粘结模型参数

Table 1 Parameters of the parallel-bond model		
细观参数	假定值	标定值
E^*/GPa	30	41
k^*	2.0	2.6
\bar{E}^*/GPa	30	20
\bar{k}^*	2.0	2.6
$\bar{\sigma}_c/\text{MPa}$	40	45
\bar{c}/MPa	50	85
$\bar{\phi}/(^{\circ})$	30	30
μ	0.70	0.56

1.3 参数的标定与验证

本部分采用“试错法”对参数进行标定,其思路为:先确定各细观参数对宏观参数的影响,运用得到的变化规律,反复调试细观参数,直到模拟出的力学响应与试验的力学响应接近为止。通过调整平行粘结有效模量 \bar{E}^* 和有效模量 E^* 对弹性模量 E 进行标定,然后通过调整刚度比 k^* 和平行粘结刚度比 \bar{k}^* 对泊松比 ν 进行标定,并调整粘结强度 \bar{c} 和抗拉强度 $\bar{\sigma}_c$ 对峰值强

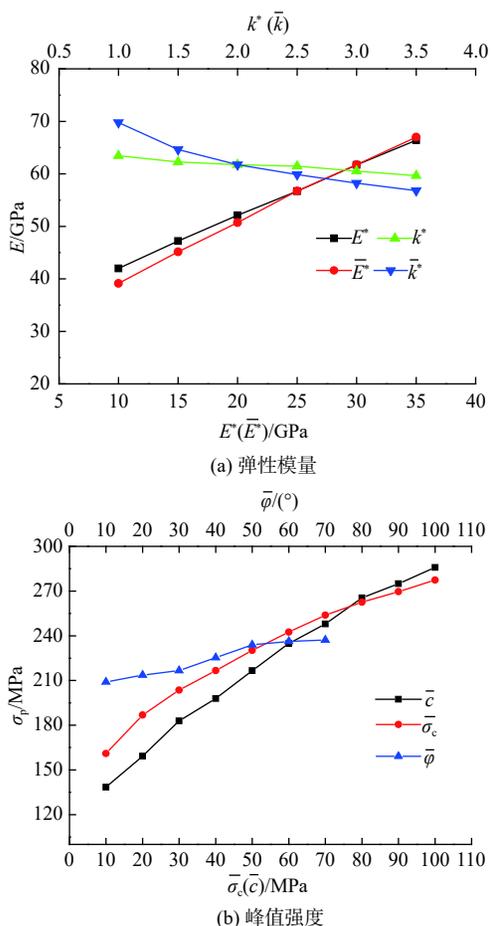


图 2 细观参数对宏观参数的影响

Fig. 2 Effects of meso-parameters on macro-parameters

度 σ_p 进行标定, 最后调整围压, 运用莫尔-库伦准则来验证内摩擦角 φ 和黏聚力 c 。所得到的细观参数列于表 1。

图 3 为采用上述参数模拟和试验得到的应力-应变曲线和破坏模式的对比, 其中破坏效果图中红色部分代表裂纹。可以看出, 模拟破坏结果中形成 1 条沿对角线的贯穿裂纹, 与试验结果吻合较好。试验和模拟峰值强度分别是 272.5 MPa 和 270.5 MPa, 弹性模量分别是 58.6 GPa 和 56.3 GPa, 结果比较接近, 表明标定的参数具有可靠性。同理, 可进行围压为 25 MPa 和 35 MPa 的模拟试验, 得到高围压下峰值强度。25 MPa 围压下试验和模拟的峰值强度分别为 320.0 MPa 和 313.5 MPa, 35 MPa 围压下试验和模拟的峰值强度为 370.0 MPa 和 375.5 MPa。采用库伦准则来获得黏聚力和内摩擦角:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1)$$

式中: c ——黏聚力;

φ ——内摩擦角。

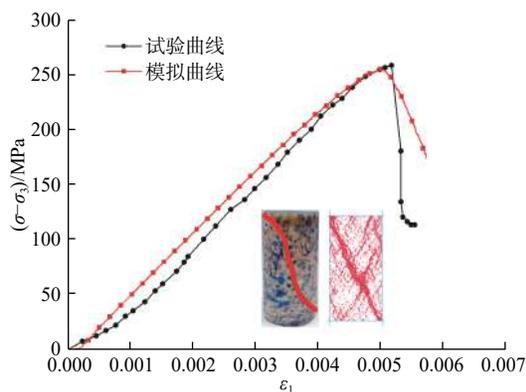


图 3 试验结果与模拟结果的比较

Fig. 3 Comparison of the experimental and simulated results

采用式 (1) 分别拟合试验和模拟数据。求得试验值 $c=43.9$ MPa, $\varphi=41.7^\circ$, 模拟值 $c=41.2$ MPa, $\varphi=42.8^\circ$, 内摩擦角 φ 和黏聚力误差分别为 6.15% 和 2.64%, 表明模拟效果较好。

综上所述, 通过标定的细观参数是可行的, 能够很好地反映华山花岗岩常规三轴压缩的力学特性, 故采用标定的材料参数来模拟带围压的含预制双裂隙华山花岗岩的力学特性与破坏特征。

2 双裂隙岩样双轴压缩模拟

2.1 岩样宏观力学特性与破坏特征

为了研究含缺陷岩样的力学特性, 可将不同形式的孔洞、裂隙预制在岩样中, 如张科等^[11]研究了含圆形灌浆孔洞岩样的力学特性和裂纹扩展模式。Shi 等^[12]分析了预制裂隙的不均匀性对岩石的影响。本文研究不同围压下 (5, 15, 25 MPa) 含双裂隙花岗岩的力学特性, 参照文 [13] 中红砂岩试样模型和预制裂隙样式, 设计本文模型和预制裂隙。如图 4 所示, 模型高为 100 mm, 宽为 50 mm, 裂隙均为非闭合裂隙, 不考虑摩擦阻力^[14], 岩桥长度 $b=10$ mm, 岩桥倾角 $\beta=45^\circ$, 裂

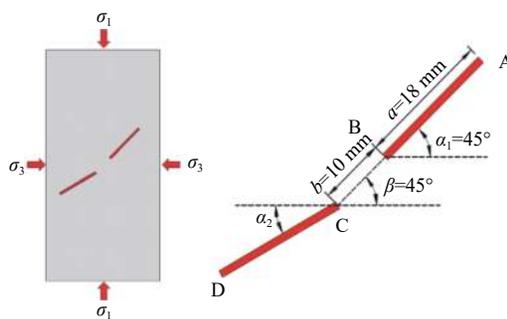


图 4 预制双裂隙及相应的岩样模型

Fig. 4 Prefabricated double fractures and the corresponding sample model

隙长度 $a=18\text{ mm}$, 宽度 $d=1\text{ mm}$ 。裂隙①的倾角 $\alpha_1=45^\circ$, 位置不变, 端点分别为 A 和 B。裂隙②的倾角 α_2 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 变化, 端点分别记为 C 和 D。

图 5 为不同围压下峰值强度与弹性模量随裂隙角度 α_2 的变化情况, 在各围压下, 随着角度 α_2 的增加, σ_p 与 E 均是先增加后减小, 且在 $\alpha_2=90^\circ$ 时达到了峰值。同时, 随着围压的增大, 各角度下 σ_p 与 E 均逐渐增加。这主要与预制裂隙②在水平方向的投影长度有关。随着角度的增加, 2 条预制裂隙水平方向的投影长度先减小后增加; 当 α_2 到达 90° 时, 可近似看作只有预制裂隙①。易见水平投影长度越长, 对岩样的影响越大, 岩样的力学性能也就相对较弱。

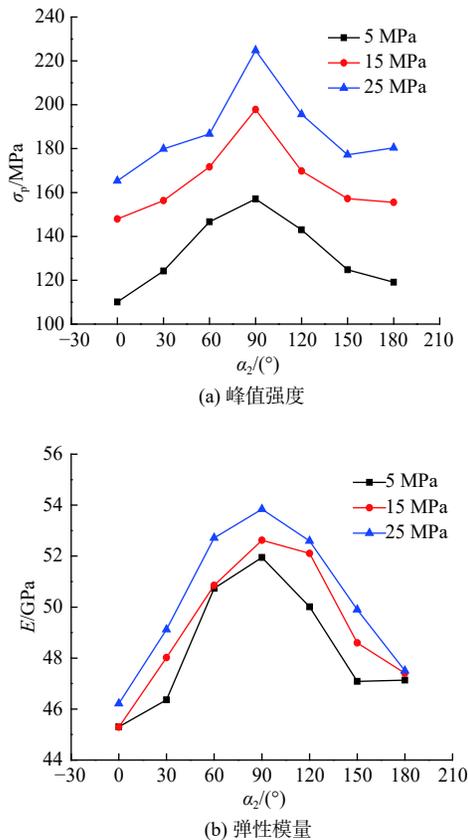


图 5 不同围压下裂隙角度 α_2 对宏观参数的影响

Fig. 5 Effects of fracture angle α_2 on macroscopic parameters under different confining pressures

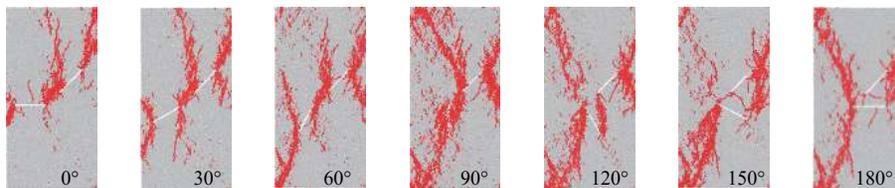


图 6 不同裂隙角度 α_2 下最终裂纹扩展形态 ($\sigma_3=5\text{ MPa}$)

Fig. 6 Final crack growth pattern under different fracture angles α_2 ($\sigma_3=5\text{ MPa}$)

图 6 为 5 MPa 围压条件下预制双裂隙岩样在不同裂隙角度 α_2 下的最终裂纹扩展形态。当 $\alpha_2 < 90^\circ$ 时, A 和 D 端点裂纹均向试样边缘发展, B 和 C 端点的裂纹搭接并沿主应力方向发展; 当 $\alpha_2 = 90^\circ$ 时, 在裂隙②的长度方向上出现大量的裂纹, 且有 1 条裂纹发展到试样的左下角, B 端点和预制裂隙②长度方向裂纹搭接形成贯通。当 $\alpha_2 = 120^\circ$ 时, 出现 B 和 D 端裂隙贯通, 且主要裂隙的宽度增大。当 $\alpha_2 > 120^\circ$ 时, B 和 C 端点裂隙贯通现象减弱, 而 A 和 D 端点裂隙贯通, 在试样左侧形成以 C 端点为主要起裂点的裂纹。另一方面, 围压对裂隙拓展形态的影响不甚明显, 主要体现出围压越大裂隙越宽的特点, 此处不再赘述。当 α_2 为 0° 和 180° 时, 裂隙②中部会产生垂直拉伸裂纹, 当 α_2 为 120° 和 150° 时, B 和 D 端点裂隙贯通。

为观察不同裂隙角度 α_2 的试样的裂纹发展情况, 针对围压 5 MPa 模拟组开展讨论。限于篇幅, 仅对 0° 、 60° 、 90° 、 150° 进行分析 (图 7)。试样起裂强度定义为峰值强度 σ_p 时裂纹数目的 1% 所对应的主应力大小^[15]。不同加载应力水平下裂纹扩展情况如图 7 所示, 可见各裂隙角度 α_2 下试样均存在裂纹萌生、增长和稳定 3 个主要阶段:

(1) $\sigma_1 \leq 0.7\sigma_p$ 为裂纹萌生阶段。所有岩样的裂隙尖端开始萌发出微小的翼裂纹, 当 α_2 较大时, 裂隙附近产生几条明显的拉伸裂纹。特别是在 $\alpha_2 = 0^\circ$ 时, 裂隙②中间段产生了微小的拉伸裂纹。当 $\alpha_2 = 90^\circ$ 时, 裂隙②端点没有萌发裂纹。

(2) $0.7\sigma_p < \sigma_1 \leq \sigma_p$ 为裂纹增长阶段。裂纹数量迅速增多, 先前形成的微裂纹逐渐加宽加长, 几条主裂纹开始形成规模, 2 条预制裂隙通过裂纹接近贯通。当 $\alpha_2 = 0^\circ$ 时, 裂纹主要在岩样上半部分发展; 当 $\alpha_2 = 90^\circ$ 时, 裂纹在预制裂隙②在长度方向产生。 α_2 较大时裂纹总面积相对较小, 且裂纹宽度也相对较窄, 而 α_2 较小时裂隙端点裂纹向岩样边缘拓展现象更明显。

(3) $\sigma_1 > \sigma_p$ 为裂纹形成稳定阶段。各岩样的主要裂纹完全形成, 并贯通至岩样边缘, 2 条预制裂隙通过裂纹完全贯通, 且随着加载所有裂纹长度与宽度几乎没

有变化。最终的裂纹形态表现为：当 $\alpha_2 < 90^\circ$ 时，形成左、中、右 3 条分离的大裂纹；当 $\alpha_2 > 90^\circ$ 时，形成左、

右 2 条大裂纹。 $\alpha_2 = 0^\circ$ 时，裂纹区最紧凑，而 $\alpha_2 = 90^\circ$ 时裂纹区最分散。

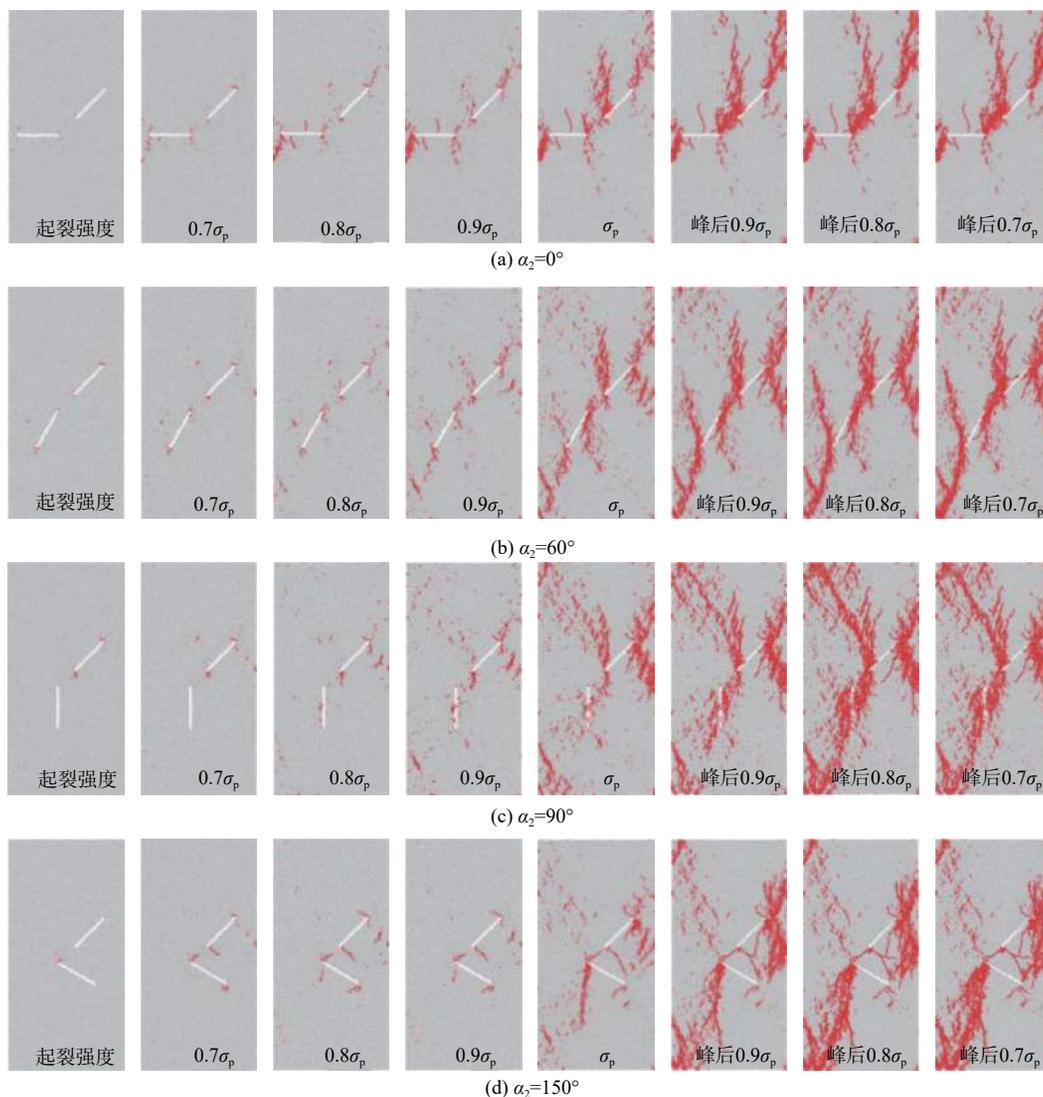


图 7 不同裂隙角度 α_2 下裂纹演化过程 ($\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$)

Fig. 7 Crack evolution processes under different fracture angle α_2 ($\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$)

2.2 力学特征微观表现

图 8 为力链在不同围压下的最终破坏情况。图中红色代表拉伸力链，而黑色代表受压力链。当外力大于力链的承载能力时，力链断裂使得颗粒间的作用力消失，从而致使裂纹萌发。在预制裂隙的端点处有受压力链的集中，且随着围压的增加红色部分逐渐减小。在预制裂隙周围力链相对稀薄，低围压下力链的空白区域比较高围压情况下面积相对较大。力链越密集，则承载能力越大，达到破坏而产生的裂纹越多。因此，岩石的峰值强度会随着围压的增大而增大。

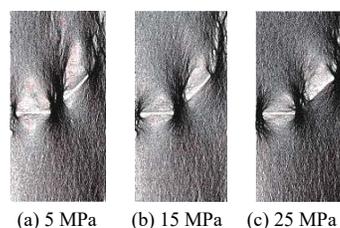


图 8 $\alpha_2 = 0^\circ$ 时不同围压下岩样力链破坏情况

Fig. 8 Force chains failure states of the samples under different confining pressures when $\alpha_2 = 0^\circ$

图 9 为不同围压下预制裂隙②周围力链。可知，在预制裂隙②长度方向上有许多红色的拉伸裂纹，且

方向多与预制裂隙平行,表明此处有拉应力的集中,这就是在破坏的过程中裂纹产生并且裂纹方向(力链断裂方向)是沿着主压力方向的原因。同时,在预制裂隙长度方向的力链较为稀疏,在端点处有密集的压缩力链。随围压增大,预制裂隙②长度方向上的红色逐渐变淡,表明拉伸力链逐渐减少。可见,在高围压下,拉应力集中并不明显,不会出现沿着主压力方向产生拉伸裂纹。 $\alpha_2=180^\circ$ 时,预制裂隙②也是如此。

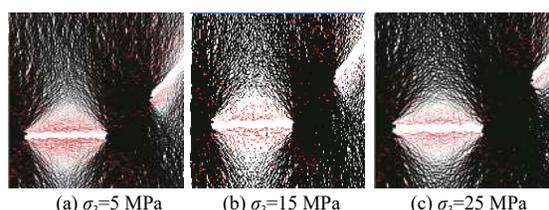


图9 $\alpha_2=0^\circ$ 时裂隙②周围力链
Fig. 9 Force chains around crack ② when $\alpha_2=0^\circ$

图10为加载前预制裂隙②周围力链。当 $\alpha_2=90^\circ$ 时,预制裂隙②周围并没有产生力链空白区,这种情况下对岩石产生的影响最小,其力学特性与没有预制裂隙②的时候最为接近。在预制裂隙②的C端点与预制裂隙①的B端点之间并没有拉伸力链,而在B端点与预制裂隙②中部之间区域分布较多,所以在两预制裂隙的贯通上与 $\alpha_2<90^\circ$ 时有所不同。在 $\alpha_2=150^\circ$ 时,两预制裂隙之间力链复杂,B端点与D端点之间以及A端点和D端点之间均有较多拉伸力链,在B、C端点间仅有少量的拉伸裂纹。从裂纹的发展过程可知,在B和C端点之间产生的裂纹是C端点萌发的翼裂纹产生的,最终与C端点贯通,这与其他的两预制裂隙贯通的机制并不一样。所以, $\alpha_2=150^\circ$ 时,有3条使两预制裂隙贯通的裂纹。

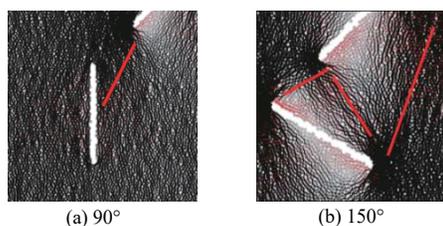


图10 围压5 MPa作用下的裂隙②周围力链
Fig. 10 Force chains around the fissure ② under the confining pressure of 5 MPa

3 结论

(1) 平行粘结接触模型的强度细观参数对花岗岩

峰值强度的影响较大,而变形细观参数对弹性模量和泊松比的影响较大。采用“试错法”标定出了一组细观参数,并基于该参数模拟的花岗岩破坏形貌与试验结果吻合较好。

(2) 围压作用下预制双裂隙花岗岩的峰值强度和弹性模量均随 α_2 增大呈先增大后减小的趋势,当 $\alpha_2=90^\circ$ 时,两者均达到最大值。裂纹演化过程包括萌生、扩展和稳定3个阶段; α_2 的不同导致裂隙的贯通方式和贯通裂纹数量均有所差异。

(3) 力链承载力随围压增大而增大,表现出宏观的峰值强度越大。拉伸力链对水平裂隙上垂直裂纹的发展和预制裂隙的贯通方式影响较大。围压越高,则水平裂隙周围的拉伸力链越稀疏,产生拉伸裂纹较少。在不同 α_2 下,裂隙端点间及端点与裂隙中部间会产生不同形式的拉伸裂纹。

参考文献 (References) :

- [1] 罗浩,霍宇翔,巨能攀,等. 弃渣场边坡的粒径分布特征及其失稳机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 69 - 79. [LUO Hao, HUO Yuxiang, JU Nengpan, et al. A study of the particle size distribution characteristics and instability mechanism of the slope of an abandoned slag yard[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 69 - 79. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 赵国彦,戴兵,马驰. 平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1491 - 1498. [ZHAO Guoyan, DAI Bing, Ma Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1491 - 1498. (in Chinese with English abstract)]
- [3] YANG S Q, HUANG Y H, JING H W, et al. Discrete element modeling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2014, 178: 28 - 48.
- [4] 黄彦华,杨圣奇. 非共面双裂隙红砂岩宏观力学行为颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1644 - 1653. [HUANG Yanhan, YANG Shengqi. Particle flow simulation of macro-and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8): 1644 - 1653. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 王林丰. 含预制裂隙花岗岩变形破坏特征三轴试验与离散元数值分析[D]. 厦门: 华侨大学, 2017. [WANG Linfeng. Analysis of deformation and failure characteristics of pre-cracked granite samples with triaxial experiments and discrete element method[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华. 不同围压下共面双裂隙脆性砂岩裂纹演化特性颗粒流模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1207 – 1215. [TIAN Wenling, YANG Shengqi, HUANG Yanhua. PFC2D simulation on crack evolution behavior of brittle sandstone containing two coplanar fissures under different confining pressures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1207 – 1215. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张社荣, 孙博, 王超, 等. 双轴压缩试验下岩石裂纹扩展的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3083 – 3091. [ZHANG Sherong, SUN Bo, WANG Chao, et al. Discrete element analysis of crack propagation in rocks under biaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 2): 3083 – 3091. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王振永. 裂隙性围岩力学特性和破裂机理的颗粒流数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [WANG Zhenyong. Numerical simulation of mechanical properties and failure mechanism of fractured surrounding rock using particle flow code[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [9] YAO W, CAI Y Y, YU J, et al. Experimental and numerical study on mechanical and cracking behaviors of flawed granite under triaxial compression[J]. *Measurement*, 2019, 145: 573 – 582.
- [10] 何树江. 基于颗粒流的灰岩细观力学参数标定方法及其敏感性分析[D]. 济南: 山东大学, 2018. [HE Shujiang. Calibration method and sensitivity analysis of micromechanic parameters for limestone based on particle flow[D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张科, 刘享华, 杨红宣, 等. 含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 79 – 85. [ZHANG Ke, LIU Xianghua, YANG Hongxuan, et al. Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 79 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [12] SHI H, ZHANG H Q, SONG L, et al. Failure characteristics of sandstone specimens with randomly distributed pre-cracks under uniaxial compression[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(3): 394 – 405.
- [13] HUANG Y H, YANG S Q, ZENG W. Experimental and numerical study on loading rate effects of rock-like material specimens containing two unparallel fissures[J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23(6): 1474 – 1485.
- [14] 刘华伟, 杨晨. 闭合与非闭合裂隙岩石单轴压缩的颗粒流细观分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 131 – 135. [LIU Huawei, YANG Chen. Micro-analysis of uniaxial compression of cracked rock containing open or closing fissure based on PFC[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(1): 131 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [15] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329 – 1364.

编辑: 张明霞