

循环荷载下含双裂隙砂岩弹性模量的演化规律

王述红, 王子和, 王凯毅, 庄贤鹏

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以含预制裂隙砂岩单轴循环加卸载试验结果为基础,探究裂隙几何参数对试样弹性模量的影响规律;结合 PFC^{2D}颗粒流程序,对试样裂纹发育状态与弹性模量演化规律的关系进行深入分析. 研究结果表明:随着循环周数增加,多数试样的弹性模量呈现出强化现象,且第一次加卸载循环对弹性模量的强化作用最为显著,这与试件内部细观结构的调整有关;然而少数试样的弹性模量则呈现出弱化现象,结合 PFC^{2D}颗粒流程序得出,弱化现象与裂纹发育状态密切相关.

关 键 词: 循环荷载;预制裂隙;弹性模量;颗粒流模拟

中图分类号: TD 313

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)02-0282-05

Evolution Law of Elastic Modulus of Sandstone with Double Fissures Under Cyclic Loading

WANG Shu-hong, WANG Zi-he, WANG Kai-yi, ZHUANG Xian-peng

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: shwangneu@126.com)

Abstract: According to the uniaxial cyclic loading and unloading test results of sandstone with precast fissures, the effects of fracture geometric parameters on elastic modulus of specimens were investigated. Using PFC^{2D} code, the relationship between crack development status and elastic modulus of specimens was analyzed. The research results show that: with the increase of cycle numbers, the elastic modulus of most specimens shows a strengthening phenomenon, and the first loading/unloading cycle has the most significant strengthening effect on the elastic modulus, which is related to the internal meso-structure; while the elastic modulus of a few specimens shows a weakening phenomenon; and combining with the PFC^{2D} code simulation, the weakening phenomenon is closely related to the crack development status.

Key words: cyclic loading; precast fissures; elastic modulus; particle flow code

岩体历经漫长的地质构造作用,其内部存在大量的节理裂隙,这对岩体的强度和破坏模式影响较大,故而针对裂隙岩石力学特性及破坏模式的研究意义深远^[1-3]. 近年来,有关裂隙岩石的研究受到国内外学者的广泛关注. Yang 等^[4-5]分析了裂隙几何参数对砂岩强度、破坏及裂纹扩展特性的影响;Park 等^[6]探究了单轴压缩作用下含预制裂隙类岩石材料裂纹的3种类型,并对不同类型裂纹贯通模式进行了详述;张平等^[7]利用预埋抽条法制作断续双裂隙类砂岩模型,分析了动、静

载条件对几何分布不同的分支裂纹扩展与贯通模式的影响;杨圣奇^[8]分析了单轴压缩作用下三裂隙砂岩宏观变形特性与裂纹扩展过程之间的关系;Zhang 等^[9]借助 PFC^{2D}颗粒流数值模拟程序,分析了单轴压缩条件下双裂隙岩石的裂纹起裂、扩展和贯通模式. 然而,关于循环荷载作用下裂隙岩石力学性质的研究较少.

有鉴于此,本文先以含预制裂隙砂岩单轴循环加卸载试验结果为基础,探究了裂隙几何参数对试样弹性模量的影响规律,分析了弹性模量的

收稿日期: 2019-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, U1602232); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N170108029); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540304, 20170520341); 中建股份科技研发课题(CSCEC-2016-Z-20-8); 辽宁省科学技术计划重大项目(2019JH2/10100035); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201810145043).

作者简介: 王述红(1969-),男,江苏泰州人,东北大学教授,博士生导师.

强化现象及其成因,讨论了裂纹发育状态与弹性模量变化规律间的联系.而后结合 PFC^{2D} 颗粒流程序,深入分析微裂纹数目与宏观裂纹发育状态对试样弹性模量变化趋势的影响,旨在揭示含预制裂隙砂岩试样弹性模量的变化规律与裂纹发育状态之间的关系.

1 试验概况

1.1 试验材料及试件制备

试验用红砂岩采自山东省临沂市莒南县.经实验室精加工,将红砂岩岩块制成长方体试样,高度为 100 mm,宽度为 50 mm,长度为 50 mm.加工后的试样宏观结构均匀一致.经测量,红砂岩试样密度平均值为 2 407 kg/m³,标准差约为 12.68 kg/m³,试样个体之间差异性较小.

在完整试样上,切割如图 1 所示的裂隙.预制裂隙的长度 $l=10$ mm,宽度约 2 mm,岩桥的长度 $w=15$ mm.裂隙倾角设为 α ,岩桥倾角设为 β .

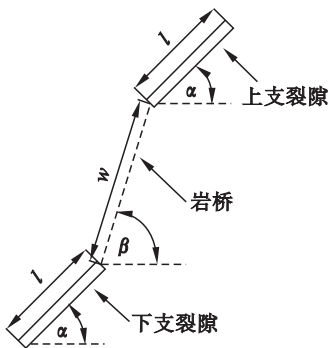


图 1 预制裂隙与岩桥分布图

Fig. 1 Geometry of precast fissures and rock-bridge

试验中,依据裂隙的几何参数将试样分成若干组,各组砂岩试样的裂隙几何参数见表 1.每组含有 3 块砂岩试样,通过在岩样组号后面标注数字来区分同一组的不同试样,例如:Y1 组的 3 块试样分别命名为 Y1-1、Y1-2 和 Y1-3.值得注意的是:Y 组与 L 组分别探究岩桥倾角与裂隙倾角对试样弹性模量的影响,而 Y3 组砂岩试样的

表 1 砂岩试样裂隙几何参数表

Table 1 Fracture geometry parameters of sandstone samples

岩样组号	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	岩样组号	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$
Y1	45	15	Y5	45	105
Y2	45	45	L1	15	75
Y3	45	75	L2	75	75
Y4	45	90	L3	90	75

岩桥倾角与 L 组相同,可以进行对比分析.

1.2 试验加载程序及数据采集

试验在 YAW-2000B 液压微机伺服控制压力试验机上进行.试验前,在试样中部对称放置两枚千分表,表征试样循环过程中的横向变形特性;在试样端部均匀涂抹一层凡士林,减弱端面效应的影响;利用数码摄像机实时记录试样的破坏情况.

首先通过单轴压缩试验获取砂岩试样的预估抗压强度,以此为依据合理选取各级加卸载循环峰值应力的数值.本试验采用力控制加载方式,加载和卸载速率均为 200 N/s,加载方式如下:对每个试样进行 6 周加卸载循环,6 个加卸载循环峰值应力依次为 13.2、15.0、16.8、18.6、20.4 和 22.2 MPa,而后加载直至岩石破坏.

2 试验结果及分析

2.1 裂隙几何参数对砂岩弹性模量的影响

从每组试样中选取一个作为代表绘制图 2a 和图 2b,用以反映不同裂隙几何参数下试样弹性模量的演化规律.本文取加载阶段应力-应变曲线近似直线区段的斜率来对弹性模量进行计算.

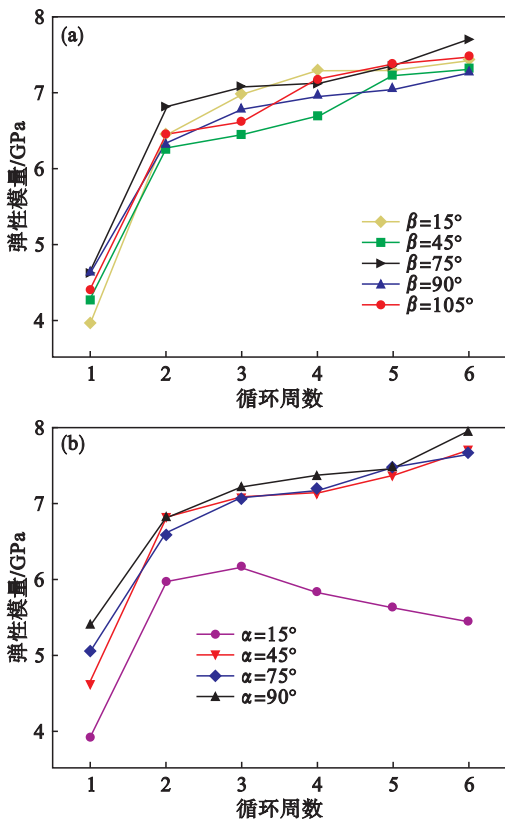


图 2 裂隙几何参数对弹性模量变化规律的影响

Fig. 2 Influence of fracture geometric parameters on the variation of elastic modulus

(a) —Y 组试样; (b) —L 组试样.

不难看出,随着循环周数增加,大多数试样的弹性模量都在逐渐增加,整体上呈现出明显的强化现象,且第一次加卸载循环对弹性模量的强化作用最为显著;而后随着循环周数的增加,试样弹性模量的增幅大大减小。

作者认为上述现象的成因主要是:

① 加卸载循环可以调整微裂隙的层面间结构,提高试样的密实程度,而本试验循环应力水平相对较低,不足以对试样造成过多的损伤,所以在反复的循环加卸载作用下,试样的密实程度逐渐提高,这使得试样的弹性模量整体上呈现增加趋势。

② 天然状态下砂岩内部存在大量的原生缺陷,首次加载时,试样内部大量原生微裂纹被压密,而在卸载阶段,仅有少数微裂纹得以恢复,使得第一周加卸载循环后试样的密实程度有较大提升;并且由于试样加载初期应力-应变曲线非线性特征较为明显,故而近似直线计算法会导致试样弹性模量计算结果偏小,所以第二周循环加载时试样的弹性模量大幅提升。这与周家文等^[10]的试验结果相近。

③ 经过第一周加卸载循环后,试样内部细观结构调整基本完成,密实程度已经得到大幅提升,所以从第二周加卸载循环开始,试样弹性模量的增幅变小;并且自第二周加卸载循环起,应力-应变曲线的近似直线段特征非常明显,计算误差较小。

值得注意的是,强化现象并没有发生在所有试样上,部分试样在循环加卸载过程中会出现弹性模量“弱化”现象,这一现象在 L1 组中尤为明显;作者认为该“弱化”现象与加载过程中宏观裂纹的扩展发育有密切关系,详细的讨论将在后文给出。

2.2 裂纹扩展模式对弹性模量变化趋势的影响

由 2.1 节可知,多数试样在循环荷载作用下以弹性模量的强化现象为主,但却有少部分试样出现了弹性模量的弱化现象,且弱化现象主要集中在 L1 组试样。因篇幅所限,作者在这里着重对试样 L1-1 的试验现象进行阐述。

图 3a~图 3c 分别表示第三、四和五周循环结束后试样的裂纹发育情况,图 3d 为试样最终破坏后的裂纹发育情况,图 3e 则为试样 L1-1 的应力-应变曲线图。结合图 2b 可知,试样 L1-1 在前两周循环中呈现出弹性模量的强化现象,此时试样表现完好。第三次加载过程中,试样表现未发现宏观裂纹,依然保持强化趋势,但在峰值应力保持阶段试样岩桥突然贯通,产生裂纹 A_2 ,并在两

条预制裂隙靠近尖端的位置萌生翼型裂纹 A_1 和 A_3 。第四周循环加载阶段,弹性模量降低至 5.83 GPa,随着轴向应力的增加,两条翼型裂纹不断沿最大压应力方向缓慢扩展;第五周循环加载阶段,弹性模量降低至 5.62 GPa,翼型裂纹长度没有明显变化,但宽度略有增加;最后一次加载的弹性模量降低至 5.44 GPa,加载前期裂纹发育不明显;临近破坏时,试样才突然萌生大量裂纹($B_1 \sim E_1$)。

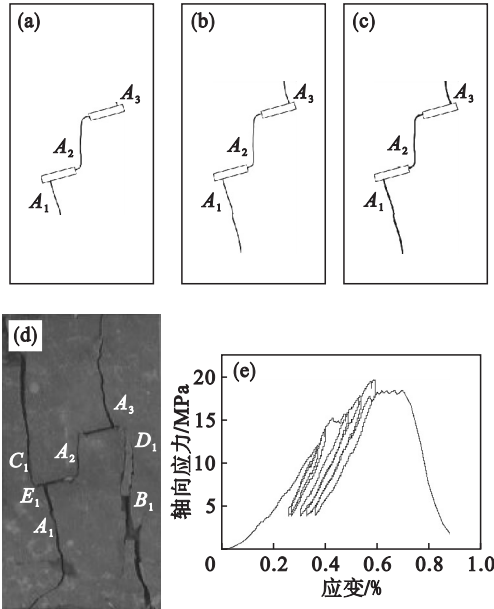


图 3 试样 L1-1 破裂模式及应力-应变曲线
Fig. 3 Fracture mode and stress-strain curve of sample L1-1

(a)—第三周循环; (b)—第四周循环; (c)—第五周循环;
(d)—最终破坏图; (e)—应力-应变曲线。

值得注意的是,试样 L1-1 共经历了完整的 5 次加卸载循环。由图 3c 可知,试样 L1-1 在第五周加卸载循环结束后,其结构间的联结并未完全消失,且横向变形数据的变化一直较为稳定,故而试样此时并未发生破坏;第六次加载初期试样横向变形数据依旧稳定变化,当轴向应力约为 17.8 MPa 时,试样的横向变形值突然急剧上升,并且萌生多条裂纹($B_1 \sim E_1$),随后试样发生破坏。作者认为前五周的加卸载循环导致试样裂纹逐渐发育,弱化了试样的承载结构,最终致使试样在第六周加卸载循环的加载阶段中提前发生破坏。

观察所有试样的循环加卸载试验过程,可以发现以下规律:除 L1 组试样外,其余各组试样在循环加卸载过程中均以弹性模量的强化现象为主,且循环过程中试样表现无宏观裂纹产生,这与试样 L1-1 前两周循环的试验规律相近;第三周循环加载阶段试样表现仍然完好,弹性模量也表

现出强化现象,而在第三周循环峰值应力保持阶段试样突然萌生多条裂纹,弱化了试样的承载结构,这直接导致了第四周循环加载阶段弹性模量的弱化.由以上试验现象的描述可知,此后该试样的弹性模量开始逐渐降低,且弹性模量的逐渐弱化总是伴随着宏观裂纹的发育,二者关系非常密切.观察试样 L1 - 2 和试样 L1 - 3 的试验过程也发现了类似现象.

综上所述,作者认为循环加卸载过程中弹性模量弱化现象的成因主要是其裂纹的萌生与扩展.为了进一步验证这一观点,作者采用 PFC^{2D} 颗粒流数值模拟程序对室内试验进行拟合分析.

3 颗粒流模拟与分析

PFC^{2D} 程序是一种通过离散单元法来模拟圆形颗粒运动及相互作用关系的二维颗粒流程序,常被用于模拟岩石的力学行为;颗粒介质间的力学关系遵从牛顿第二定律. PFC^{2D} 程序的接触模型是指颗粒间的相互作用,为了更好地反映岩石材料的特性,本文使用平行黏结接触模型;历经多次试验最终确定了如表 2 所示的一组细观参数.

为了进一步验证细观参数的合理性,图 4 给出了完整砂岩试样单轴压缩应力 - 应变曲线和 PFC^{2D} 数值模拟曲线.不难看出,两条曲线的整体变化趋势呈现出较好的一致性,但是值得注意的一点是,PFC^{2D} 程序获得的应力 - 应变曲线无法表现出砂岩试样的初始压密阶段,所以数值模拟曲线的峰值应变小于室内试验曲线的峰值应变.试样室内试验峰值强度为 53.2 MPa,与数值模拟试验峰值强度(53.4 MPa)相差 0.38%;试样室内试验弹性模量为 7.61 GPa,而 PFC^{2D} 程序模拟试验弹性模量为 7.54 GPa,相差仅 0.92%.综上所述,该组细观参数模拟试验的结果可以较好地拟合室内试验结果.

表 2 PFC ^{2D} 细观参数			
Table 2 Micro-parameters in PFC ^{2D}			
参数	取值	参数	取值
颗粒最小半径/mm	0.5	平行接触模量/GPa	3.5
颗粒粒径比	1.6	平行黏结刚度比	1.0
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 407	法向黏结强度/MPa	14.1
颗粒间摩擦系数	0.577	切向黏结强度/MPa	50.0
接触模量/GPa	3.5	内摩擦角/(°)	40.0
连接刚度比	1.0	法向临界阻尼比	0.7

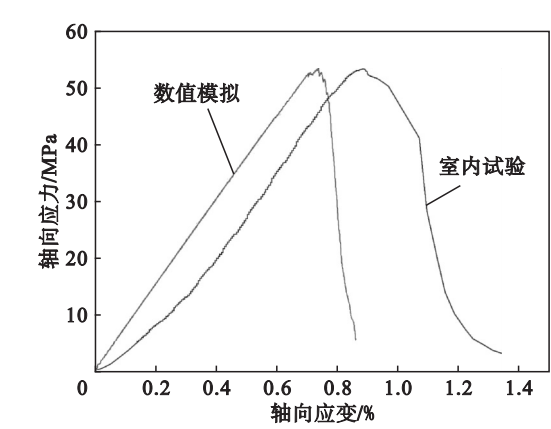


图 4 完整砂岩试验与模拟应力 - 应变曲线对比
Fig. 4 Comparison of stress-strain curves of complete sandstone obtained by experiment and simulation

数值模拟试验的加载方案与室内试验相同,在数值模拟试验过程中,当颗粒之间的接触力大于法向黏结强度或切向黏结强度时,颗粒之间就会发生破坏并产生微裂纹,PFC^{2D} 程序可以自动记录微裂纹的数目,实时监测微裂纹的发育状态,以此进一步辅证裂纹发育状态与弹性模量变化规律的关系.在 PFC^{2D} 程序中,微裂纹的数目仅代表颗粒之间的断裂数,微裂纹数目的变化可以反映出岩石内部裂纹的发育状态,却不能直接反映真实岩石内部的微裂纹数目.

图 5 反映了 L 组和 Y3 组试样微裂纹数量与加卸载循环周数的关系.不难看出,L2 组和 L3 组试样在循环加卸载阶段并没有萌生微裂纹,室内试验中两组试样在循环加卸载阶段同样没有发现裂纹的萌生.Y3 组试样前两周循环期间微裂纹数目的增幅非常小,虽然第三次加载后微裂纹数目的增长速率有所提高,但是其整体微裂纹数目仍然维持在较低的水平,室内试验中该组试样的弹

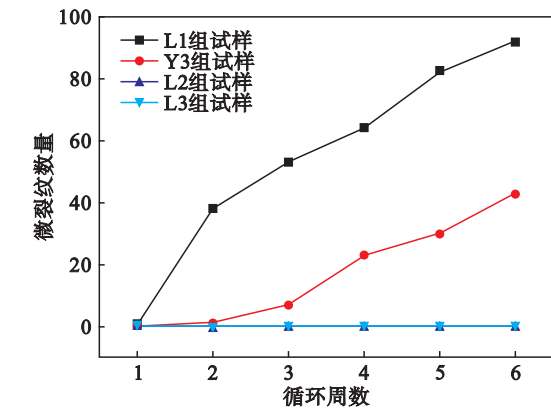


图 5 裂隙倾角对微裂纹演化规律的影响
Fig. 5 Influence of fissure inclination angle on the evolution of microcracks

性模量此时处于上升阶段;第六次加载至峰值应力时,微裂纹数目增至 43 条,此时室内试验过程也发现了弹性模量的弱化现象. L1 组试样第一周循环后微裂纹仅有 1 条,而第二周循环后微裂纹数目突然增至 38 条,随后的加载过程中微裂纹数目始终保持着较快的增长速率,第六次加载后微裂纹数目已经增至 92 条,远高于其余各组试样的微裂纹数目;室内试验也发现宏观裂纹多萌生于第三周循环加卸载过程中,且 L1 组试样弹性模量的弱化现象也是自第三周循环后开始的. 综上所述,试样加卸载循环过程中弹性模量的变化规律与微裂纹数目演化规律有着密切关系.

4 结 论

- 1) 循环荷载作用下,多数含预制裂隙砂岩试样的弹性模量随循环周数的增加表现出强化现象,且第一周循环过程对弹性模量的强化作用最为显著,这与试样内部细观结构的调整有关.
- 2) 循环荷载作用下,少数含预制裂隙砂岩试样的弹性模量表现出弱化现象,结合循环加卸载试验结果与 PFC^{2D}数值模拟试验结果发现,弹性模量的弱化现象与裂纹发育状态密切相关.

参考文献:

[1] Wang S H, Lee C I, Ranjith P G, et al. Modeling the effects of heterogeneity and anisotropy on the excavation damaged/ disturbed zone (EDZ) [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, 42 (2) : 229 – 258.

[2] Wang S H, Ni P P, Guo M D. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38 : 357 – 367.

[3] Wang S H, Ni P P. Application of block theory modeling on

spatial block topological identification to rock slope stability analysis [J]. *International Journal of Computational Methods*, 2014, 11 (1) : 903 – 914.

[4] Yang S Q, Jing H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression [J]. *International Journal of Fracture*, 2011, 168 (2) : 227 – 250.

[5] Yang S Q. Crack coalescence behavior of brittle sand-stone samples containing two coplanar fissures in the process of deformation failure [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78 (17) : 3059 – 3081.

[6] Park C H, Bobet A. Crack coalescence in specimens with open and closed flaws a comparison [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46 (5) : 819 – 829.

[7] 张平, 李宁, 贺若兰, 等. 动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25 (6) : 1210 – 1217.

(Zhang Ping, Li Ning, He Ruo-lan, et al. Mechanism of fracture coalescence two pre-existing flaws under dynamic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25 (6) : 1210 – 1217.)

[8] 杨圣奇. 断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34 (1) : 31 – 39.

(Yang Sheng-qi. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstone containing three pre-existing fissures [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34 (1) : 31 – 39.)

[9] Zhang X P, Wong L N Y. Crack initiation, propagation and coalescence in rock-like material containing two flaws; a numerical study based on bonded-particle model approach [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46 (5) : 1001 – 1021.

[10] 周家文, 杨兴国, 符文熹, 等. 脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29 (6) : 1172 – 1183.

(Zhou Jia-wen, Yang Xing-guo, Fu Wen-xi, et al. Experimental test and fracture damage mechanical characteristics of brittle rock under uniaxial cyclic loading and unloading conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29 (6) : 1172 – 1183.)