

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.04.013

不同应变速率下双裂隙红砂岩 力学特征试验研究

张 通^{1,2}, 祝梓航^{1,2}, 郑雪梅^{1,2}, 王述红^{1,2}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省岩土工程实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 节理岩体在外力扰动下的失稳破坏往往对工程产生较大影响。为探究应变速率对节理裂隙岩体力学特征的影响, 室内采用不同加载速率对含两条预制裂隙的红砂岩试样进行单轴加载试验, 在此基础上利用数值分析软件进行模拟和分析, 并对试验结果进行验证。试验结果表明: 在不同加载速率下, 含预制双裂隙红砂岩破坏过程大致相同; 随着加载速率的增加, 试样的峰值强度增加, 试样发生应力强度跌落时的应变也有一定的增长; 随着加载速率的增加, 在预制裂隙两端萌生的裂隙数量逐渐增多, 裂隙的扩展方向更多样, 扩展的距离也更远, 导致试样逐渐从局部破坏形式向整体破坏形势发展。利用FLAC^{3D}软件数值分析得到, 随着加载速率的增加, 单轴压缩荷载作用产生的塑性区范围变大。

关键词: 应变速率; 裂隙扩展; 破坏形态; 峰值强度; 数值模拟

中图分类号: TU458.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)04-0064-04

Experimental Study on Mechanical Properties of Red Sandstone Containing Two Pre-existing Fissures under Different Strain Rates

ZHANG Tong^{1,2}, ZHU Zihang^{1,2}, ZHENG Xuemei^{1,2}, WANG Shuhong^{1,2}

(1. Northeastern University, School of Resources & Civil Engineering, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. Geotechnical Engineering Laboratory of Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: The instability of fractured rock mass under outer force perturbation usually have great influence on engineering constructions. Aimed at the mechanical properties of joint rocks under different strain rates, the red sandstone specimens containing two pre-existing flaws were studied inside under uni-axial loading with different strain rates to perform numerical simulation in order to analyze the influence of strain rates on joint rocks and verify the result. It was shown that the peak strengths increased with strain rates and the corresponding strain when the stress dropped increased as well. In addition, as the strain rates increased, more and more cracks appeared, and the cracks spread to different directions and further distance, resulting in the specimens changed from local failure to general demolition. Simulation results of FLAC^{3D} showed that the increase of strain rates enlarged the range of plastic zone caused by uni-axial loading.

Keywords: strain rate; crack spreading; failure mode; peak strength; numerical simulation

由于山体、边坡等的破坏往往造成重大的工程安全事故, 通过理论推导、试验分析和数值模拟等方法, 探究裂隙分布形式、岩桥倾角和裂隙间距等因素对节理裂隙岩石破坏特征和裂隙扩展方式的影响进程从未停止^[1-8]。

杨圣奇^[9-10]进行了多条预制裂隙砂岩强度和裂纹扩展特征的试验研究, 总结了试样宏观变形特性与裂纹扩展间的关系; 蒲成志等^[11-12]基于滑动裂纹模型理论, 结合试件破坏全应力-应变曲线和贯通破坏面颗粒体破坏形态, 分析了裂隙试件断裂

收稿日期: 2016-03-22

修稿日期: 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, 51179031); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLGP2012K009, SKLGP2014K011); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006); 东北大学第九批国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201510145035)

作者简介: 张 通(1995—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 本科生, 所学专业为土木工程。E-mail: zhangtongneu@163.com

通讯作者: 王述红(1969—), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士生导师, 主要从事节理岩体工程特性研究工作。E-mail: wangshuhong@mail.neu.edu.cn

破坏机理。刘学伟等^[13]系统地研究了 T 形、X 形交叉裂隙等多种裂隙分布形式对岩体强度特征及失稳模式的影响;苏承东等^[14]对细晶大理岩试样进行了多级应变速率下的单轴压缩试验,分析了应变速率对大理岩力学性质的影响;尹小涛等^[15]通过 Fish 语言编程,虚拟实现岩石数值试件,探究了加载速率对岩石材料力学行为的影响。

为了进一步探究加载速度对节理岩体力学性能及裂隙扩展形态的影响,本文通过从现场采集的红砂岩试样,在实验室采用不同加载速率对含两条预制裂隙的试样进行单轴加载试验,分析不同加载速率对含预制双裂隙红砂岩力学性能的影响,在此基础上通过 FLAC^{3D} 软件利用数值方法模拟加载速率对节理岩体力学行为的影响,对试验结果进行验证。

1 试验材料

试验红砂岩采自辽宁省鞍山市,岩块宏观结构均匀一致。采集的红砂岩试块,经实验室精加工,制备成完整的红砂岩长方体岩样,试验材料的物理力学性质指标见表 1。

表 1 试验材料物理力学参数

抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比 μ
56.35	6.11	22.18	18.69	0.18

试样的尺寸:宽度 L × 高度 H × 厚度 W 分别为 100 mm × 200 mm × 30 mm。在完整长方体岩样上标出预制裂纹的位置,然后用高压水枪在裂纹的端部冲孔,冲孔完成后沿标出的裂纹位置完成整个裂纹的切割,得到含预制双裂隙的红砂岩试样,如图 1 所示。预制的裂隙长度均为 $d = 18$ mm,裂隙倾角为 $\alpha = 30^\circ$,裂隙之间的岩桥长度和岩桥倾角分别为 $d = 18$ mm 和 $\beta = 60^\circ$,预制的两条裂隙宽度 w 均近似为 2.0 mm。

2 试验方案及试验设备

本试验采用 9 个相同的试样,共分 3 组,每组 3 个试块,所有试块的预制裂隙位置和岩石的物理力学性质均相同,每组内的 3 个试块加载速度相同,不同组的试块采用不同的加载速度进行加载,加载速率分别为 0.001 mm/s、0.002 mm/s、0.003 mm/s。

试验在东北大学 211 工程岩土力学与地下工程实验中心的 YAG—3000 微机控制岩石刚度试验机上进行。该试验系统可通过控制轴向位移的方式控

制轴压,并能自动采集实验数据,系统所能施加的最大轴向力为 3 000 kN。

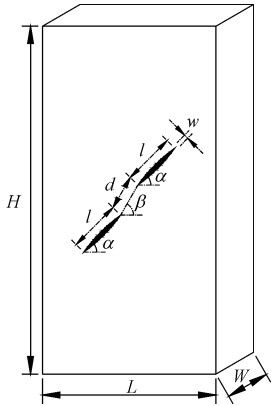


图 1 含两条预制裂隙的红砂岩试样裂隙分布示意图

3 试验方法及步骤

试验程序如下:试验前,在试样上下端部均匀涂抹一层凡士林,以减少端部摩擦。试验时,首先将试样放在岩石试验机中央;其次,调整试块与加载设备间距至合适位置;然后,采用控制轴向位移的方式,对试件进行单轴加载。本试验采用一次加载,当预制裂隙贯通,试块丧失承载能力时(此时的应变约为 0.9%)卸载。

在加载的同时,采用数码摄像机连续拍摄结合数码相机瞬间抓拍的方法,对加载过程预制裂隙的起裂、贯通及破坏过程进行记录,并用试验仪器自带的软件采集试块的应力 - 应变曲线等试验数据。

4 试验结果及分析

如图 2 所示,为三个不同加载速率下含两条预制裂隙的红砂岩单轴压缩试验所得的应力 - 应变曲线对比情况。不同加载速率下,含预制双裂隙红砂岩破坏过程相似,都是预制裂隙先发生起裂、贯通,并在外加荷载的作用下裂隙逐渐延伸,最终导致试块破坏。不同加载速率下,试块的应力 - 应变曲线变化趋势也大致相同,均有一次明显的应力跌落。分析某一速率下的应力 - 应变曲线可知:在初始阶段应力随应变的增长而缓慢增加;当应变到达 0.3% 左右后,应力进入快速增长阶段,且应力随应变增长的速率逐渐加快;当应变增长至 0.9% 附近达到极值,随后由于两条预制裂隙接近贯通,出现应力跌落现象,即应变不发生变化而应力大幅减小;之后应力随应变缓慢增长,但此时试样已经失去承载能力,发生脆性破坏。

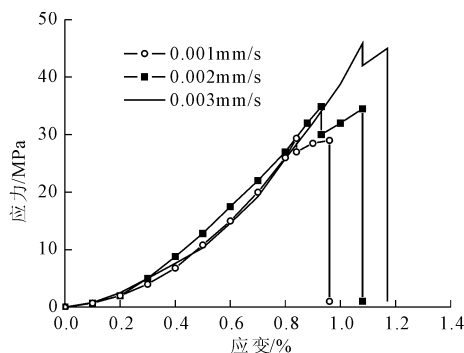


图2 不同加载速率下应力-应变曲线对比

4.1 加载速率对峰值强度的影响

由不同速率下试样的应力-应变曲线对比可知,随着加载速率变快,试件的峰值强度有一定增长,且加载速率越快,峰值强度增加的越多。在加载速率为 0.001 mm/s 时,峰值强度为 29.36 MPa;当加载速率增加至 0.002 mm/s 时,峰值强度为 34.86 MPa,峰值强度的变化值为 5.50 MPa;当加载速率增加至 0.003 mm/s 时,峰值强度为 45.18 MPa,峰值强度的变化值约为 10.32 MPa。可见,由于加载速率的增加,裂隙的萌生,扩展和贯通消耗的能量越多,导致试块的承载力有一定的增长,峰值强度变大。并且随着加载速率的增加,这种效应也越明显,试样的破坏形式也由局部破坏逐渐向整体破坏发展,导致试样的峰值强度变化量也逐渐增大。从接近峰值强度曲线斜率的变化来看,加载速率越大,曲线变化的斜率越大,但影响效果不明显。由于真实试验存在一定偶然性,还有待进行更多的试验对相关结论进行进一步验证和探讨。

4.2 加载速率对应力强度跌落时应变的影响

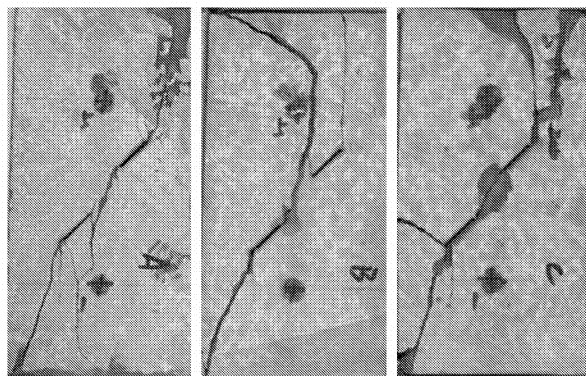
由试验数据可知,加载速率越快,试件发生应力强度跌落时对应的应变值也越大。在加载速率为 0.001 mm/s 时,应力强度跌落时的应变值为 0.84%;当加载速率增加至 0.002 mm/s 时,应力强度跌落时的应变值为 0.93%;当加载速率增加至 0.003 mm/s 时,应力强度跌落时的应变值为 1.08%。可见,加载速率的增加,使由预制裂隙贯通导致的应力强度跌落现象在产生更大的应变后发生。

但在 3 个不同加载速率下,试样发生跌落现象时应力跌落的数值大致相同,分别为 3.92 MPa、4.16 MPa、4.02 MPa。这是因为导致跌落现象的主要原因是两条预制裂隙的贯通,而不同加载速率下试样预制裂隙的长度,岩桥的倾角和岩桥的长度等参数均相同,所以预制裂隙贯通造成的应力下降的幅度也大致相同。

4.3 加载速率对破坏形态的影响

如图 3 所示,为不同加载速率下含预制双裂隙红砂岩试样破坏后的实物图。从图 3 中可以看出,不同应变速率下的破坏形式大体相同,导致试样最终破坏的主要原因是两条非共线预制裂隙的贯通。但是,随着加载速率的增加,在两条预制裂隙外端会萌生更多裂隙,且裂隙延伸的方向和距离有一定的差异。

从裂缝延伸和分布情况看,当单向加载速度为 0.001 mm/s 时,裂隙主要从预制裂隙外端部向试件边缘,沿着试件高度 H 方向扩展,且萌生的裂隙较少;当加载速度为 0.002 mm/s 时,主要的裂隙仍是从预制裂隙外端部向试件边缘,沿着试件高度 H 方向扩展,但在上方的预制裂隙两端各萌生出一条新的裂隙,并且其中一条裂隙有沿着试件宽度 L 方向,即横向延伸的趋势;当加载速度为 0.003 mm/s 时,在两条一直裂隙的外端各萌生出两条新的裂隙,且裂隙的延伸不再局限与沿着试件高度 H 方向扩展,部分裂隙沿着试件宽度 L 方向延伸的趋势更加明显。对于从上方预制裂隙外端萌生的两条裂隙在试件的端部,即远离预制裂隙的位置上还有发生横向贯通的趋向。



(a) 加载速率 0.001 mm/s (b) 加载速率 0.002 mm/s (c) 加载速率 0.003 mm/s

图3 不同加载速率下含预制双裂隙红砂岩试样破坏实物图

由于较高加载速率下,裂隙萌生数量的增长和延伸方向的更加多样,延伸距离也更远。所以,试样破坏得更严重,裂隙遍布范围更广,且试样整体破坏形式呈现从局部破坏向整体破坏发展的态势。

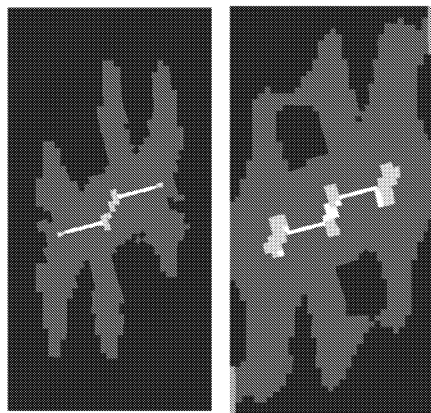
5 数值模拟结果分析

数值模拟采用的 FLAC^{3D} 软件,是利用最大不平衡力来描述 FLAC 计算的收敛过程的。由于 FLAC^{3D} 软件对模拟塑性破坏和塑性流动采用的是“混合离散法”,且计算方程采用了动态运动方程,其计算结

果比有限元软件更精确,适合对含有预制裂隙试样进行数值模拟分析。

运用的 FLAC^{3D} 软件,通过建立模型、定义荷载、边界条件等步骤,模拟含有断续双裂隙红砂岩在不同速率下加载的试验。在运用软件模拟加载过程中,首先对试样底面施加 Z 方向位移约束,顶面采用不同计算时步的速度加载。然后,设定的试块物理力学参数为:弹性模量 32.8 GPa,泊松比 0.22,黏聚力为 28.6 MPa,内摩擦角为 41.2°,抗拉强度为 2.46 MPa。最后,利用 ANSYS 建立模型并利用其自动划分网格功能进行网格划分,设定网格边长 2.5 mm,提交作业,经过软件自带的后处理功能,可以得到塑性区域示意图。

通过提取的单元塑性状态,可以判断破坏模式为脆性破坏;通过模拟过程中记录的应力-应变曲线,可以判断试样的力学特征。如图 4 所示,给出了运用 FLAC^{3D} 软件数值模拟单轴加载速率为 0.001 m/s 和 0.050 m/s 的两种条件下,含断续双裂隙红砂岩试样塑性区域示意图。



(a) 加载速率 0.001 m/s (b) 加载速率 0.050 m/s

图4 数值模拟含双裂隙红砂岩试样塑性区域示意图

从贯通裂隙的整体分布范围来看,在较小的单轴加载速率下,萌生的裂隙主要分布在预制裂隙的周围,贯通裂隙的主要沿着试件的高度 H 方向延伸,但延伸范围不是很广,未能遍及整个试件,呈现一种局部破坏的形态。而对于加载速率较大条件下的试样,萌生裂隙的分布范围虽然也是以预制裂隙周围为主,但贯通裂隙的延伸范围遍及整个试样高度,并出现了一些横向 L 方向贯通的裂隙,呈现一种整体破坏的形态。特别是对于加载速率较大的试件的破坏,由于萌生的裂隙数量的增长,萌生裂隙甚至可以在试样的两端,即距离预制裂缝较远的位置上发生局部横向的贯通。

总之,从数值模拟所得试样塑性区域示意图中可以明显看到:随着加载速率的增加,单轴压缩荷载对试样的影响越大,塑性区范围越广,发生贯通的裂隙也越多,在预制裂隙周围萌生的新的裂隙数量也随着加载速率的增大而有所增长。但由于初始边界条件等参数的选取与实际值还存在一定的差异,对于数值分析结果仍需进一步修正和检验。

6 结 论

(1) 不同加载速率下,含预制双裂隙红砂岩破坏过程大致相同,导致试样最终破坏的主要原因都是两条非共线预制裂缝的贯通,且应力-应变曲线均有一次明显跌落现象。

(2) 含预制双裂隙红砂岩试样的峰值强度会随加载速率的增加而变大,且加载速率越快,峰值强度增加量也越大。

(3) 加载速率越快,试件发生应力强度跌落时对应的应变也越大。但不同加载速率下,试样发生跌落现象时,应力跌落的数值大致相同。

(4) 从最终试样的破坏形态来看,加载速率增加后,试样萌生的裂隙数量更多,延伸的方向更多样,延伸范围也更广,并且完整试样的破坏形态由局部破坏逐渐向整体破坏发展。

(5) 从数值模拟结果看,随着加载速率的增加,单轴压缩荷载作用产生的塑性区范围变大。同时,由于加载速率的增长,裂隙的扩展方式也不局限于沿着试件高度 H 方向开展,而有部分裂隙发生横向 L 方向扩展和贯通。

参考文献:

- [1] Lee H, Jeon S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(6): 979-999.
- [2] Haeri Hadi, Shahriar Kourosh, Marji Mohammad Fatehi, et al. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67(4): 20-28.
- [3] Huang Bingxiang, Liu Jiangwei. The effect of loading rate on the behavior of samples composed of coal and rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 61(10): 23-30.
- [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(08): 1644-1653.

(上接第 67 页)

- [5] 梅 林,王述红,佟可蕙,等.不同交界面对二元结构边坡破坏影响试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):6-11.
- [6] 刘红岩,吕淑然,丹增卓玛,等.节理岩体宏微观损伤耦合的三维本构模型研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):85-88.
- [7] 郭牡丹,朱浮声,王述红,等.岩体非贯通结构面的岩桥贯通准则研究[J].岩土工程学报,2013,35(8):1513-1518.
- [8] 王述红,穆橄江,张 航,等.岩体结构面精细化空间模型及块体失稳分析[J].东北大学学报(自然科学版),2012,33(8):1186-1189.
- [9] Yang Shengqi. Crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing two coplanar fissures in the process of deformation failure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011,78(17):3059-3081.
- [10] 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.
- [11] 蒲成志,曹 平,衣永亮.单轴压缩下预制 2 条贯通裂隙类岩材料断裂行为[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2708-2716.
- [12] 蒲成志.岩体断裂与蠕变损伤破坏机理研究[D].长沙:中南大学,2014:23-45.
- [13] 刘学伟,刘泉声,陈 元,等.裂隙形式对岩体强度特征及破坏模式影响的试验研究[J].岩土力学,2015,36(S2):208-214.
- [14] 苏承东,李怀珍,张 盛,等.应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):943-950.
- [15] 尹小涛,葛修润,李春光,等.加载速率对岩石材料力学行为的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2610-2615.