

doi: 10.11988/ckyyb.20170243

2019, 36(3): 74-78, 83

动态荷载作用下细砂岩流变损伤力学特性试验研究

胡 华^{1,2}, 胡泽佩³, 梁健业^{1,2}, 匡 正⁴

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057;
3. 中建八局第二建设有限公司 济南 250014; 4. 湖南城市学院 土木工程学院 湖南 益阳 413000)

摘 要: 选取软弱砂岩为研究对象, 利用 RLW-2000M 型三轴流变试验机, 测试砂岩试样的轴向应力-应变、轴向流变变形、径向流变变形, 研究了动荷载频率和幅值对砂岩流变特性的影响; 选取轴向应变为损伤变量, 推导出损伤度的计算表达式, 分析了各因素对损伤度的影响特性。研究结果表明: 在动态荷载作用下, 轴向与径向变形随着时间的推移而增大, 滞回曲线会由稀疏变稠密; 轴向、径向变形增量随动载幅值的增大而增大, 而随着频率的增大呈减小的趋势; 试样的损伤度在突变后趋于稳定, 且随着动载幅值的增大而增大。研究结论为揭示动态荷载作用下细砂岩流变损伤演化规律提供科学依据。

关键词: 砂岩; 流变损伤; 动载频率; 动载幅值; 流变曲线

中图分类号: TU45 文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2019)03-0074-05

Mechanical Properties of Rheological Damage of Sandstone under Dynamic Loading

HU Hua^{1,2}, HU Ze-pei³, LIANG Jian-ye^{1,2}, KUANG Zheng⁴

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. Research Institute of Xiamen University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China; 3. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250014, China;
4. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: In this paper the axial stress-strain relation, the axial rheological deformation and radial rheological deformation of soft sandstone are measured by RLW-2000M triaxial rheological testing machine in an attempt to investigate the influence of frequency and amplitude of dynamic loading on sandstone's rheological properties. Moreover, the expression of damage degree with axial strain as damage variable is derived, and the effect of each factor on damage degree is studied. Research results indicate that axial and radial deformations increase with the passage of time, and the hysteresis curve changes from sparse to dense under the action of dynamic loading. The increases in axial and radial deformations intensify with the climbing of dynamic loading amplitude, but attenuate with the rising of frequency. In addition, after an abrupt change, the damage degree of specimen tends to be stable and increases with the climbing of dynamic loading amplitude. The research results will provide scientific basis for us to uncover the rule of rheological damage evolution of sandstone under the action of dynamic loading.

Key words: sandstone; rheological damage; frequency of dynamic loading; amplitude of dynamic loading; rheological curve

收稿日期: 2017-03-08; 修回日期: 2017-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278437); 广东省自然科学基金项目(2014A030313006); 福建省自然科学基金项目(2015J01224)

作者简介: 胡 华(1968-) 男, 湖北孝感人, 教授, 博士, 主要从事岩土力学、岩土工程减灾等方面的研究工作。E-mail: xmhu@xmu.edu.cn

通信作者: 梁健业(1991-) 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的渗流流变研究。E-mail: liangjianye91@163.com

1 研究背景

软弱岩体的流变特性显著,在地震、爆炸、振动等动态荷载作用下,流变损伤加快,是导致软弱岩体流变损伤破坏并导致严重地质灾害的主要外部动力^[1-3]。软弱岩体的破坏过程就是其内部结构微裂纹和微缺陷产生、发展、汇聚、连通的过程,而损伤力学理论将材料视作内部含有各种微缺陷的连续体,研究这些微缺陷的演化过程和材料损伤演化的关系^[4-5]。

近年来,越来越多的专家学者将损伤力学理论引入软弱岩体流变变形破坏的研究中。丁靖洋等^[6]借助盐岩单轴流变-声发射试验,并基于 Weibull 分布构建了声发射事件数随加载时间的关系式,进而获得了损伤变量的演化关系式。李夕兵等^[7]对含圆形和方形孔洞的花岗岩试样分别进行不同轴向预静载、相同冲击动载下的霍普金森压杆试验,得到花岗岩试样的弛豫时间 T_2 谱曲线、核磁孔隙度和核磁共振图像等特性参数。罗璟等^[8]基于疲劳试验,从动力学的角度分析了强震作用下滑坡岩体震裂损伤程度的影响因素。赵延林等^[9]基于岩石蠕变应变的内涵进行分类研究,提出岩石黏弹塑性应变分离的蠕变试验方法和数据处理技巧。本文以软弱砂岩为研究对象,利用 RLW-2000M 型三轴流变试验机,研究动态荷载作用下软弱砂岩的动态流变损伤特性、工程特性及变形破坏机制。研究成果对于防治岩土工程地质灾害、确保我国重点基础工程建设安全有重大理论和实际意义。

2 试验方案与试验过程

2.1 试验方案

以软弱砂岩为研究对象,利用 RLW-2000M 三轴流变试验机研究了软弱砂岩在动态荷载作用下的动态流变损伤特性。试样为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (直径 \times 高)圆柱体细粒砂岩,属于陆源细粒碎屑沉积岩,粒径为 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$,主要成分为石英、长石、燧石和白云母等。RLW-2000M 型三轴流变试验设备见图 1。

试验过程中保持围压 10 MPa 不变,采用呈正弦变化的动荷载加载,直至试样发生破坏。根据试验结果,研究分析动载幅值、动载频率对砂岩试样轴向流变特性曲线、轴向应力-应变曲线、轴向流变变形、径向流变变形、轴向流变变形滞回圈曲线等影响特性;选取轴向应变为损伤变量,推导计算损伤度表达式,并研究各因素对损伤度的影响特性。

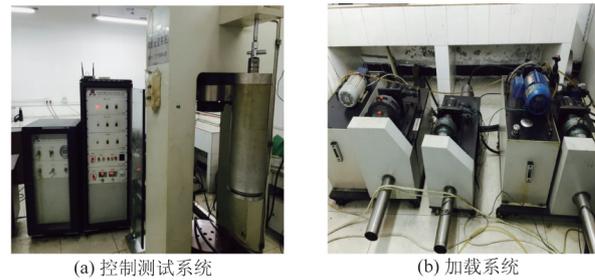


图 1 RLW-2000M 岩石三轴流变试验机

Fig.1 RLW-2000M rock triaxial creep testing machine

为确定试验最大加载峰值,先进行砂岩的全应力-应变曲线测试,试样破坏时峰值强度约为 242 kN ,为保证砂岩在一定的流变时间后能发生破坏,取砂岩三轴压缩破坏峰值强度的 70% 作为设置最大轴向荷载的参考依据。4 级轴向荷载区间分别设置为: $F_{1-2} = 70 \sim 120 \text{ kN}$; $F_{3-4} = 90 \sim 140 \text{ kN}$; $F_{5-6} = 110 \sim 160 \text{ kN}$; $F_{7-8} = 130 \sim 180 \text{ kN}$ 。动载频率从低到高设定 4 个级别,考虑到每一级轴向荷载的变化范围较大,并结合试验设备的实际情况,频率不宜设置较高,通过试验探究,将 4 级频率分别设置为 $0.008, 0.010, 0.020, 0.050 \text{ Hz}$,试验方案的主要参数见表 1。

表 1 试验方案主要参数

Table 1 Main parameters of testing scheme

试样编号	试验次序	频率 f/Hz	动载范围 F/kN
1	1	0.008	70~120
	2		90~140
	3		110~160
	4		130~180
2	5	0.010	70~120
	6		90~140
	7		110~160
	8		130~180
3	9	0.020	70~120
	10		90~140
	11		110~160
	12		130~180
4	13	0.050	70~120
	14		90~140
	15		110~160
	16		130~180

2.2 试验过程

试验采用 RLW-2000M 三轴流变试验机。该试验装备能够完成各种岩石在复杂环境(如动应力场、渗流场、温度场)下的单轴压缩试验、动三轴压缩试验、水渗透试验、岩石流变试验、加卸载试验以及松弛试验等。该设备的软件部分由在 Windows 系统下运行的 test 软件控制,该软件控制功能齐全,能够在试验过程中自动记录数据并将各变量之间的对应关系以图像的形式显示出来。

根据国际岩石力学学会的试验标准,砂岩试样制备过程分为钻芯、切割、打磨和筛选 4 个步骤,制

备尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 标准圆柱砂岩试样。试验前用游标卡尺量测试样的直径、高度。试验过程为：打开电脑设备、控制柜和电控箱；安装试样；加围压、轴压试验；当试样破坏或达到方案设定的条件后 结束试验。开始卸载及卸样。

3 试验结果分析

3.1 各试样轴向流变变形曲线

试样大致呈剪切状破坏 其裂纹与环向呈一定的角度 且试样的表面有多条主裂纹,如图 2 所示。不同频率条件下正弦动载作用下各试样的轴向流变变形随时间的变化关系曲线如图 3 所示。



图 2 试样破坏后的形态
Fig.2 Morphology of test specimens after damage

由图 3 可以看出：试样在第 1 级、第 2 级、第 3 级动载作用下经过短时间的减速流变后变形达到稳定状态,并进入稳态流变阶段。在最后一级动载作

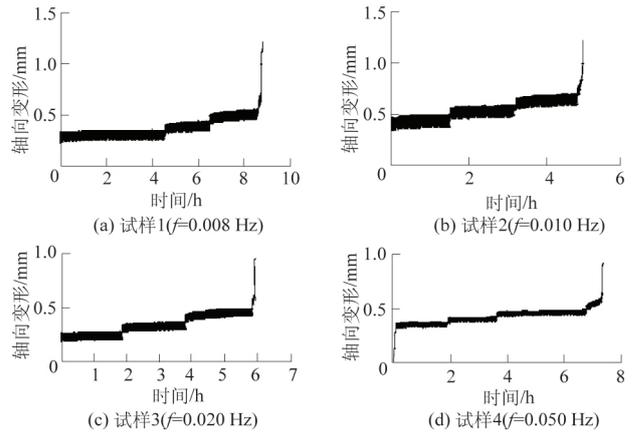


图 3 试样轴向流变变形与时间关系曲线

Fig.3 Curves of axial deformation against time under varying loading frequency

用下,试样的流变呈现明显的加速阶段,试样发生破坏。试样在前 3 级动载作用下产生的变形较小且增长缓慢,而试样在第 4 级动载作用下的变形增量相比前 3 个阶段有明显的增大。

3.2 试样各阶段轴向动应力-应变曲线

1—4 号试样各个阶段轴向动应力-应变曲线如图 4 所示。

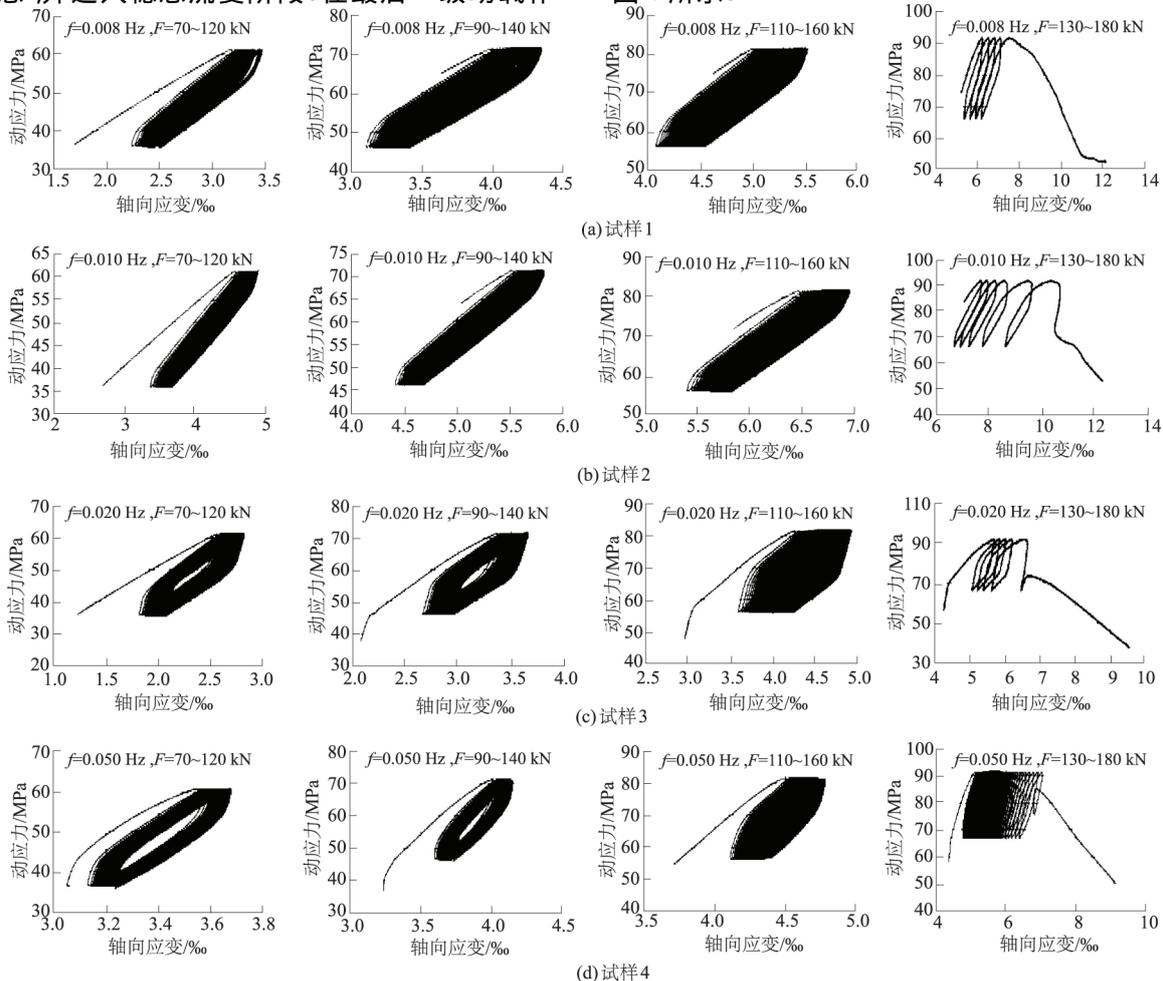


图 4 各试样在不同阶段的轴向应力-应变曲线

Fig.4 Curves of axial stress-strain in different stages

试样在第 1 级、第 2 级、第 3 级动载作用下,初期的几个滞回曲线较为松散;而随着动载的不断作用,滞回曲线逐渐变得稠密起来,表明试样经过短时间的减速流变后进入稳态流变阶段,试样的应变速率在减小,但滞回曲线一直朝着应变增加的方向偏移,反映了试样应变在逐渐增加,其不可逆的塑性应变也逐渐累积。试样各阶段每条滞回曲线的加载段和卸载段不会重合,而是形成一个闭合的环状,反映出砂岩试样在试验过程中明显的弹塑性特征;当试样在第 4 级动载作用下即将破坏时,试样的滞回曲线由稠密逐渐变得稀疏,且最后几个滞回曲线在应力变化不大的情况下,应变却发生显著的增大,这说明试样已经开始出现加速流变阶段。随着动载范围的增大,各阶段滞回曲线所围面积呈增大的趋势,能量耗散逐渐增大,试样的损伤在不断累积。

3.3 动载大小对试样轴向、径向变形的影响

根据试验测试数据和相关曲线算出试样各阶段的轴向、径向变形增量大小,可以得到试样各阶段变形增量随动载大小变化的曲线,如图 5 所示。

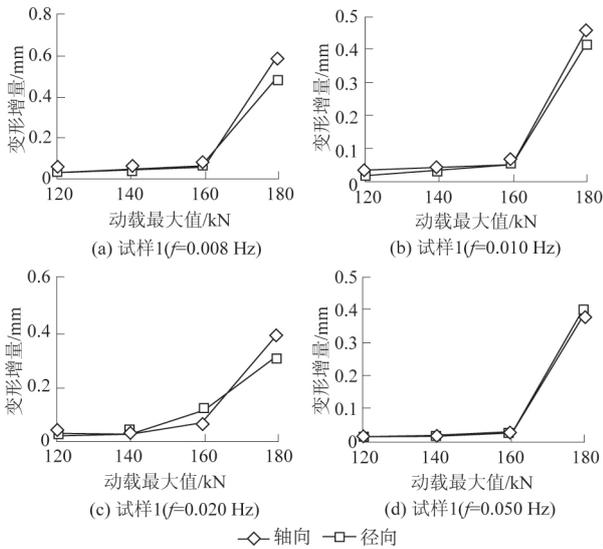


图 5 试样变形增量-动载最大值变化关系曲线
Fig.5 Relationship of axial and radial deformation increments against maximum dynamic load

由图 5 可以看出:对于同一试样,在相同的动载频率作用下,试样的轴向、径向变形增量大致随着动载的增大而增大。各试样在前 3 级动载的作用下,其轴向、径向变形增量增加的幅度并不大,这是由于试样在前 3 个阶段并没有发生加速流变,试样经历短时间的初始减速流变段后进入稳态流变,变形也趋于稳定;试样在最后一级动载作用下,变形增加较大并进入加速流变阶段,轴向、径向变形增量有较大幅度的增加。总体来说,动载的增大使试样的流变特性更为明显,试样的损伤逐渐加大,塑性变形增

大,最终导致试样发生破坏。

3.4 动载频率对轴向、径向变形的影响

在相同动载作用范围、不同动载频率作用下,试样的轴向、径向变形增量随动载频率的变化关系曲线如图 6 所示。

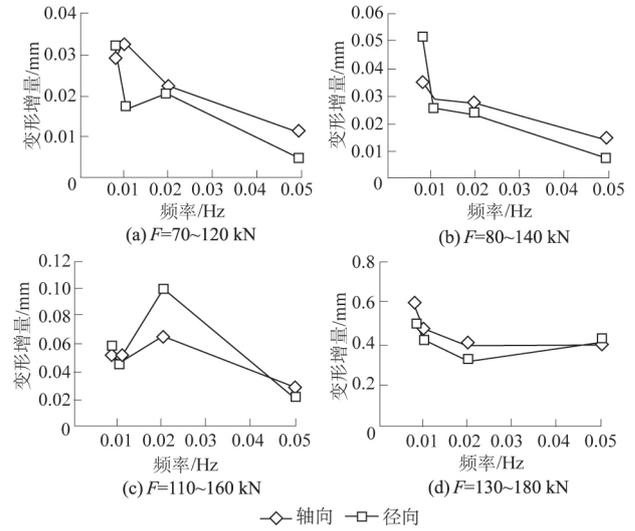


图 6 试样变形增量-频率变化关系曲线

Fig.6 Relationship of axial and radial deformation increments against dynamic load frequency

由图 6 可以看出:当动载的范围一定时,试样的轴向、径向变形增量大致随着频率的增大呈减小的趋势。这是由于在低频的动载作用下,随着动载频率的增加,试样更易趋于密实状态,使得试样可压缩的变形量减少,且发生不可恢复的塑性变形速率减小,试样的流变特性在高频动载下也表现得不显著。

4 动态流变损伤特性研究

4.1 损伤变量的选取

砂岩试样在循环荷载作用下的变形也呈周期性变化。假定试样在损伤演化过程中每一个循环的损伤是不变的,基于此假定可以研究循环荷载上限应力作用时刻所对应的试样损伤状态的发展演化,在循环荷载的作用下上限应力所对应的试样损伤状态的发展演化就代表了砂岩试样的损伤演化过程。具体的砂岩损伤度公式推导如下^[10-11]。

砂岩一维损伤本构方程为

$$1 - D = \frac{\sigma}{E\varepsilon} \quad (1)$$

两端对 ε 求导可得

$$dD = \frac{\sigma}{E\varepsilon^2} d\varepsilon \quad (2)$$

式中: D 为岩体的损伤度; E 为无损伤岩体的弹性模

量(MPa); ε 为第一周循环荷载上限应力所对应的应变,此时试样没有损伤; σ 为应力(MPa)。对式(2)两端求积分得:

$$\int_0^D dD = \frac{\sigma}{E} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \frac{1}{\varepsilon^2} d\varepsilon \quad (3)$$

$$D = \frac{\sigma}{E} \left(\frac{1}{\varepsilon_0} - \frac{1}{\varepsilon} \right) + C \quad (4)$$

将初始条件 $\varepsilon = \varepsilon_0$ 时 $D = 0$, $\varepsilon = \varepsilon'$ 时 $D = 1$ 代入式(4)得

$$D = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon' - \varepsilon_0} \quad (5)$$

式中: ε' 为最后循环荷载上限应力所对应的应变,此时试样完全损伤; C 为积分常数; ε_0 为初始应变。

4.2 动载频率对损伤度的影响

试样的损伤度随时间的变化规律曲线可以由试验数据处理后得到。不同动载频率下试样的损伤度随时间的变化关系曲线如图7。

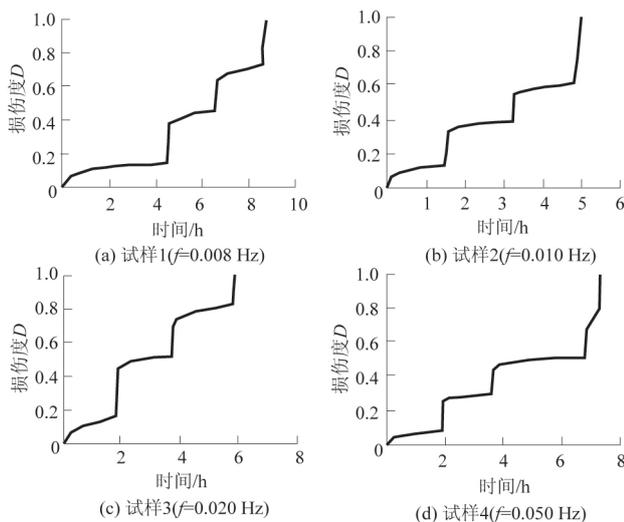


图7 不同频率作用下试样损伤度变化曲线

Fig.7 Variation of damage degree against time under varying dynamic loading frequency

由图7可以看出,各个试样的损伤度随着时间的增加而逐渐增大,各试样在第1级分级荷载作用下损伤度的增加幅度不大,这是由于试样在开始阶段有一个逐渐被压密的过程,试样的损伤还很小。各试样的损伤度在增加动载作用范围后会有一个突变,随后又趋于稳定,损伤度的变化速率也有一个先衰减后稳定的过程,这与试样的变形曲线类似。随着动载的不断增大,试样的损伤表现得也越来越明显,当动应力水平达到并超过试样的屈服应力以后,试样的损伤出现了加速增大的现象直至试样发生破坏。

5 结 论

本文对动应力场作用下软砂岩流变损伤特性进行了试验研究,主要得到以下结论:

(1) 分级加荷载作用下软弱砂岩的流变与静荷载作用下相同,流变曲线特征符合流变演化的3个阶段。随着动荷载的逐级加载,试样的流变变形呈增大的趋势,随着变形的累积,试样在第4级动载作用下的变形增量相比前3个阶段有明显的增大,直至发生加速流变破坏。

(2) 试样在加载过程中,各阶段每条滞回曲线的加载段和卸载段不会重合且形成一个闭合的环状,滞回曲线的形状大致呈斜扁状,动载作用下试样各阶段的滞回曲线面积随着动载幅值的增大有被拉大的趋势,当试样加载到即将破坏时,试样的滞回曲线由稠密逐渐变得稀疏。滞回环的形状大致随着频率的增大越来越扁,滞回圈所围的面积也逐渐减小。

(3) 当动载作用范围一定时,随着动载频率的增大,在相同的时间内动载振动次数增加以消耗更多的能量,试样更易趋于密实状态,导致试样的轴向变形增量和径向变形增量随着频率的增大呈减小的趋势,这与随着动载幅值的增大而增大的趋势相反。

(4) 试样的损伤度在增加动载作用范围后会先突变随后又趋于稳定,随着动载的不断增大,试样的损伤表现得也越来越明显,当动应力水平达到并超过试样的屈服应力以后,试样的损伤出现了加速增大的现象直至试样发生破坏。

参考文献:

- [1] 胡 华,郑晓桐.动载作用频率对海相沉积软土动态流变特性影响试验研究[J].岩土力学,2013,34(增1):9-13.
- [2] WANG Zhi-liang, LI Yong-chi, SHEN R F. Numerical Simulation of Tensile Damage and Blast Crater in Brittle Rock due to Underground Explosion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(5): 730-733.
- [3] ZHANG Chun-liang. The Stress-strain-permeability Behaviour of Clay Rock during Damage and Recompaction [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(1): 16-26.
- [4] 蔡 煜,曹 平.基于 Burgers 模型考虑损伤的非定常岩石蠕变模型[J].岩土力学,2016,37(增2):369-374.

(下转第83页)

4 结 论

通过实时加载-扫描的 CT 三轴试验,分析了陕西宝鸡某黄土的宏观力学特性与细观结构演化规律,得出以下结论:

(1) 基于 CT 值定义和土的三相组成,可推导出土的 CT 值与密度的定量关系,基于含水率的量测可实现土体的密度换算。

(2) 在等压固结条件下,试样中部的 CT 值明显高于试样两侧,对应的密度值亦略高,体现了试样顶、底的端部约束效应。

(3) 整个加载过程中裂隙的形成主要发生在峰值强度后,剪切带在接近残余强度时充分发育。在主裂隙发展过程中,由于黄土的自身节理发育,还伴随着多条次生裂纹发育扩展的现象。

(4) 典型横剖面局部位位置的 CT 值与密度呈正态分布,随应变增加波峰位置下降,波形逐渐变宽,CT 值较小的区间比例逐渐增加,表明裂隙处于扩展、延伸的过程。

参考文献:

- [1] 程展林,吴良平,丁红顺.粗粒土组构之颗粒运动研究[J].岩土力学,2007,28(增1):29-33.
- [2] 吕士展,汪稔,胡明鉴等.玉龙雪山西麓原状冰碛土 CT 扫描试验研究[J].岩土力学,2014,35(6):1593-1599,1622.
- [3] 尚彦军,王思敬,岳中琦等.原状全风化花岗岩三轴实验 CT 监测研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):365-371.

- [4] 王传洋,杨春和,衡帅等.压缩荷载下泥岩裂缝演化规律的 CT 试验研究[J].岩土力学,2015,36(6):1591-1597,1605.
- [5] 赵淑萍,马巍,郑剑锋等.不同温度条件下冻结兰州黄土单轴试验的 CT 实时动态监测[J].岩土力学,2010,31(增2):92-97.
- [6] 方建银,党发宁,肖耀庭等.粉砂岩三轴压缩 CT 试验过程的分区定量研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):1976-1984.
- [7] 王朝阳,许强,倪万魁.原状黄土 CT 试验中应力-应变关系的研究[J].岩土力学,2010,31(2):387-392.
- [8] 雷胜友,唐文栋.黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的 CT 扫描分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(24):4166-4169.
- [9] 程朋,王勇,李雄威等.砂雨法制备三轴砂样的影响因素及均匀性研究[J].长江科学院院报,2016,33(10):79-83.
- [10] 林天干,何华,许东风等.地聚合物加固软土力学性能及微观试验研究[J].长江科学院院报,2018,35(10):104-108.
- [11] SL 237—1999,土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [12] 孙伟,吴爱祥,侯克鹏等.基于 X-Ray CT 试验的塌陷区回填体孔隙结构研究[J].岩土力学,2017,38(12):3635-3641.
- [13] 左永振,程展林,赵娜.千枚岩碎屑土三轴试验剪切带扩展性状的 CT 研究[J].岩土工程学报,2015,37(8):1524-1531.

(编辑:姜小兰)

(上接第 78 页)

- [5] 谢理想,赵光明,孟祥瑞.岩石在冲击载荷下的过应力本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增1):2772-2781.
- [6] 丁靖洋,周宏伟,陈琼等.盐岩流变损伤特性及本构模型研究[J].岩土力学,2015,36(3):769-776.
- [7] 李夕兵,翁磊,谢晓锋等.动静载荷作用下含孔洞硬岩损伤演化的核磁共振特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):1985-1993.
- [8] 罗璟,裴向军,黄润秋等.强震作用下滑坡岩体震裂损伤程度影响因素研究[J].岩土工程学报,2015,37(6):1105-1114.
- [9] 赵延林,唐劲舟,付成成等.岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与蠕变损伤模型[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1297-1308.
- [10] 胡华,蔡亮,郑晓翔.动态荷载不同幅值作用下软土流变特性测试分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(4):884-888.
- [11] 刘杰,李建林,张玉灯等.循环荷载下岩体能量特征及变形参数分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增2):3505-3513.

(编辑:陈敏)