

循环荷载作用下岩石阻尼特性的试验研究

刘建锋¹, 谢和平^{1,2}, 徐进¹, 杨春和³

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 中国矿业大学 岩石力学与分形研究所, 北京 100083;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 对2组红层泥质粉砂岩在MTS815 Flex Test GT岩石力学试验系统上进行单轴4级循环加卸载试验。试验加载波形采用正弦波, 频率3 Hz, 循环应力幅值小于其平均抗压强度, 单级应力幅值为30个振动循环, 得到动弹性模量和阻尼比随动应变的变化规律。通过试验发现, 泥质粉砂岩在循环荷载作用下的加卸载应力-应变曲线并不重合, 而是形成一个封闭的滞回环, 动应变相位始终滞后于动应力相位; 滞回环在荷载反转处并非椭圆形, 而是尖叶状, 在该处岩石的塑性变形小, 弹性变形响应迅速。随动应力幅值增加, 泥质粉砂岩的动应变增加, 动弹性模量随动应变增加线性递减, 而阻尼比则线性递增。得到2组泥质粉砂岩的平均动弹性模量和阻尼比与动应变的相关表达式, 其相关系数的平方 R^2 均超过98%。岩石的不可逆塑性变形随动应变增加而增大, 同时由循环荷载引起的损伤变形也逐渐增加。

关键词: 岩石力学; 循环荷载; 动弹性模量; 不可逆变形; 阻尼比

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)04-0712-06

EXPERIMENTAL STUDY ON DAMPING CHARACTERISTICS OF ROCK UNDER CYCLIC LOADING

LIU Jianfeng¹, XIE Heping^{1,2}, XU Jin¹, YANG Chunhe³

(1. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The four-grade uniaxial cyclic loading and unloading tests for two groups of red argillaceous siltstones were carried out on MTS815 Flex Test GT rock mechanics test system. The sine wave is adopted in loading test, and its frequency was 3 Hz. The maximum cyclic stress was less than the value of the average intensity of compression; and the cyclic number of each level cyclic stress was 30. Through the test, the relationships of dynamic moduli of elasticity and damping ratio to dynamic strain for the two groups of rocks were gained. The test results showed that the curves of strain and stress for loading and unloading were not superposition under cyclic loading, but hysteresis loops. The strain wave location was always later than stress wave location; and the hysteresis loops were not ellipse-shaped, but tine-lobation when the cyclic loading was reversed. The dynamic strain increased with the increase of oscillation amplitude; the dynamic modules of elasticity was linearly decreasing with the dynamic strain increasing, but the damping ratio was reversed. The four relationship equations were gained, and the correlation coefficient R^2 was over 0.98. Moreover, the irreversible plastic deformation of

收稿日期: 2007-10-28; **修回日期:** 2008-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50620130440, 50639100); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707); 国际科技合作资助项目(20072626)

作者简介: 刘建锋(1979-), 男, 2002年毕业于山东科技大学土木工程学院建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。
E-mail: ljf7908@yahoo.com.cn

rock increased, and at the same time, the fracture deformation of rock gradually increased, which was produced by cyclic load.

Key words: rock mechanics; cyclic loading; dynamic modulus of elasticity; irreversible deformation; damping ratio

1 引言

岩土体在周期性循环荷载作用下的力学性能是影响其长期稳定性的重要因素^[1]。由于地震作用下岩土体的应力条件相当复杂,但通常认为造成地基或地面结构物破坏的主要原因是基岩运动时向上传播的剪切波^[2]。岩土体的动剪切模量和阻尼比是反映岩土体在地震动力作用下应力-应变特性的主要指标,也是进行地震反应分析和场地安全性评价的重要参数。关于土体在周期性循环荷载作用下的动弹性模量和阻尼比国内外已有较多研究^[3, 4],测试方法主要有共振柱、振动三轴及扭剪等^[5]。而且,已有众多学者^[6~9]对岩石在周期性荷载作用下的强度、变形特性、疲劳损伤及动态响应等进行了研究,取得了丰富的研究成果。

K. Nishi等^[10~12]通过动态试验,分别得到了岩石动剪切模量与阻尼比和围压的关系、岩石动静力学参数之间的关系及饱和岩石在循环荷载下衰减和滞后的可能原因。葛修润等^[1, 13, 14]对循环荷载作用下岩石的不可逆变形及疲劳门槛值等进行过系统的研究,提出了以变形来度量岩体的破坏和强度,认为岩石的疲劳寿命主要由岩石本身结构、幅值荷载和荷载差决定;不可逆变形总量随循环次数增加而增长,应力水平低时,最初几次循环将导致较大的不可逆变形,随循环次数增加,不可逆变形速率逐步递减,最终趋向一个比较稳定的常值,但当应力水平达到某一“门槛”值后,循环次数增加将促使不可逆变形加速增长,最终导致整个试件破坏。葛修润^[1]还给出了日本黑部川4#拱坝左岸基岩变形实测资料整理的不可逆变形量与周期荷载次数的关系图,认为若大坝的岩基变形观测值经过多年循环荷载未有衰减或出现加剧趋势时,就意味着坝基岩体内出现了严重的不正常工作状态,需予以高度重视。莫海鸿^[15]针对红砂岩和大理岩加卸载试验指出,在循环加载过程中,岩石的变形由初始变形、蠕变变形和疲劳损伤变形 3 个部分组成,只要振幅不是很小,则损伤变形是导致岩石破坏的主要变形;振幅越大,损伤变形越大,岩石的工作寿命越短。

岩石的动弹性模量是岩石在动态荷载作用下动

弹性参数的体现,其数值大小反映了岩石的弹性承载性能的好坏;阻尼比数值的大小,反映了动荷载作用下岩石因阻尼作用引起的能量耗散的多少。本文针对泥质粉砂岩的单轴循环加载试验,对动荷载大小与动弹模和阻尼比的关系进行了探讨。

2 试验

2.1 试样制备

试验所用 2 组岩石为红层泥质粉砂岩,取自四川夹江一山顶地面下 15~20 m 深,编号为 NF1 和 NF2。从现场取样后密封,以保持其天然含水量不变,并标明其在现场的向上方向,室内制样保持钻取岩芯的方向与该方向一致。按《水利水电工程岩石试验规程》制样要求,制备标准试样,每组 3 个,尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 。

2.2 试验设备

试验在 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统上进行(见图 1, 2)。该试验机轴向最大荷载为 4 600 kN,振动频率达 5 Hz 以上,振动波形可为正弦波、三角波、方波、斜波及随机波,振动相位差可在 $0 \sim 2\pi$ 任意设定。本次试验采用轴向荷载传感器最大量程为 25 kN,波形为正弦波,频率为 3 Hz。



图 1 MTS815 Flex Test GT 试验系统

Fig.1 Testing system of MTS815 Flex Test GT

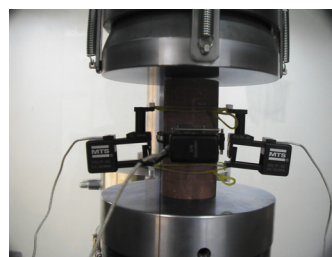


图 2 试验试样

Fig.2 Testing specimens

2.3 试验方法

通过单轴压缩试验已知该泥质粉砂岩的天然抗压强度为 8.7~24.0 MPa, 平均值为 16.7 MPa, 标准值为 12.7 MPa; 饱和抗压强度为 6.4~21.7 MPa, 平均值为 13.6 MPa, 标准值为 11.4 MPa。单个试样按 4 级施加动应力(见表 1), 定义 σ_{max} , σ_{min} 分别为每级动应力的上限和下限动应力(对应的上限和下限动荷载分别为 P_{max} , P_{min}), $\Delta\sigma$ 为动应力幅值 ($\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$)。试验采用荷载控制, 增荷循环加载, 每级上限动应力各 30 个振动循环, 最大上限动应力为 11.2 MPa, 试验中测量试样的纵向和横向变形。

表 1 动应力分级表

Table 1 Gradation table for dynamic stresses

动应力级数	动应力/MPa		动荷载/kN		$\Delta\sigma$ /MPa
	σ_{min}	σ_{max}	P_{min}	P_{max}	
1	1.02	5.09	2.0	10.0	4.07
2	1.02	7.13	2.0	14.0	6.11
3	1.02	9.17	2.0	18.0	8.15
4	1.02	11.20	2.0	22.0	10.18

2.4 试验原理

如果试样是理想的弹性体, 则在每级动应力作用下, 动应力和动应变与时间的波形线必然在时间上是同步对应的, 即动应力作用的同时, 动应变随即产生。但由于岩石的内部机械缺陷以及裂隙、孔洞、颗粒接触面等微结构特征, 使岩石试样实际上为非理想弹性体, 因此其动应力 σ_d 与相应的动应变 ϵ_d 的波形线在时间上并不完全对应, 两者之间恒有一定的时间差, 使同一振动周次的动应力和动应变曲线形成滞回环。滞回环面积的大小反映了振动加载、卸载过程中能量损失的大小, 也反映了其振动阻尼比 λ 的大小; 滞回环的平均斜率反映了动弹性模量 E_d 的大小(见图 3)。

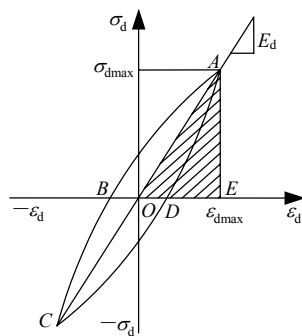


图 3 动应力动应变滞回环

Fig.3 Hysteresis loop of dynamic strain and stress

由此可按式计算动弹性模量 E_d 和阻尼比 λ 的数值:

$$E_d = \sigma_{dmax} / \epsilon_{dmax} \tag{1}$$

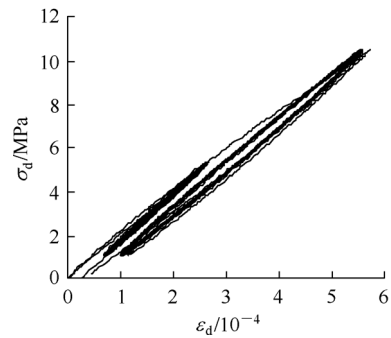
$$\lambda = A / (4\pi A_s) \tag{2}$$

式中: E_d 为动弹性模量, σ_{dmax} 为滞回环的最大动应力, ϵ_{dmax} 为滞回环的最大动应变, λ 为阻尼比, A 为滞回环 $ABCD$ 的面积, A_s 为三角形 OAE 的面积。

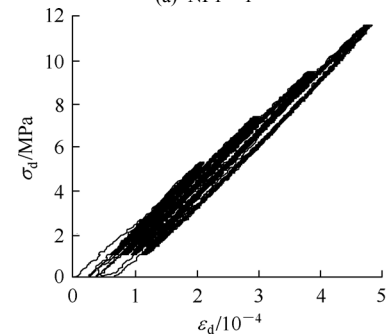
3 试验结果分析

3.1 循环应力应变曲线

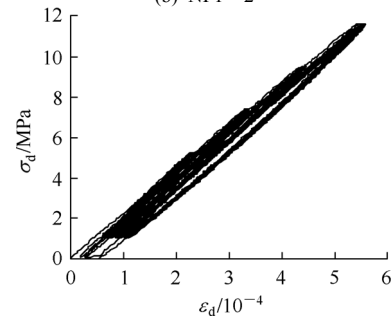
图 4 (a)中试样的动应力 - 动应变关系曲线的加载方式为: 首先从零荷载开始施加第一级动应力(对应动荷载为 2~10 kN), 30 个振动循环完成后, 卸荷至 0 后重新开始施加第二级动应力(对应动荷载为 2~20 kN)。



(a) NF1 - 1



(b) NF1 - 2



(c) NF1 - 3

图 4 NF1 试样动应力 - 动应变关系曲线

Fig.4 Relationship curves of dynamic stress-dynamic strain of rock sample NF1

图 4(b), (c)及图 5 中各试样的动应力 - 动应变关系曲线均按表 1 从 0 开始施加第 1 级动应力, 其余 3 级动应力均在其前一级动应力完成后卸荷至 1.02 MPa, 并在该应力下维持 10 s 后开始施加下级动应力。

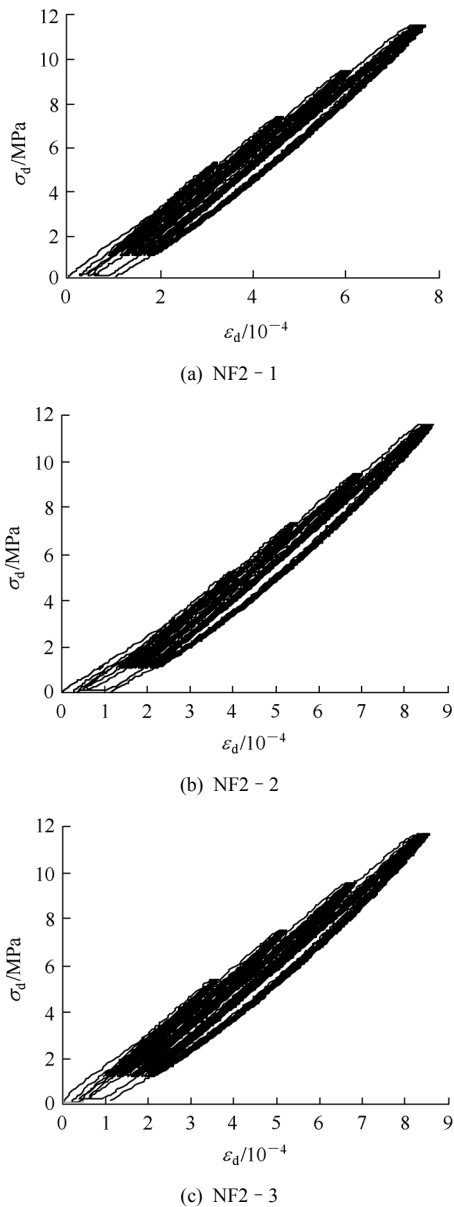


图 5 NF2 试样动应力 - 动应变关系曲线

Fig.5 Relationship curves of dynamic stress-dynamic strain of rock sample NF2

岩石变形包含塑性变形(不可逆变形)和弹性变形 2 个部分, 在循环荷载作用下, 岩石的弹性变形部分在荷载卸除后得到恢复, 而塑性变形部分会残留下来。不可逆变形的大小与岩石损伤程度直接相关, 是岩石在循环荷载下疲劳性能的体现。

图 4(a)中第一级动应力施加完成后, 其上限动应力与第二级动应力的加载曲线重合, 说明在增荷

循环加载下, 试验岩样具有显著的变形记忆性, 且图 4(b), (c)及图 5 中各动应力 - 动应变关系曲线也都反映了岩石的记忆性。由图 4~6 可知, 各级动应力下, 随循环次数增加, 动应变滞回环逐渐向动应变增大的方向移动; 循环荷载应力水平低时, 最初的加卸载循环导致了较大的不可逆变形; 随动应力幅值增加, 滞回环的面积逐渐增大; 随动应力幅值及循环加卸载次数的增加, 泥质粉砂岩的塑性变形增加, 且循环荷载的应力幅值越大, 试样产生的由损伤引起的不可逆变形越大。NF2 试样的动应变均较 NF1 试样的大, 当试验动应力幅值和上限应力一致时, 致使其动弹性模量小于 NF1 试样的动弹性模量, 阻尼比则反之。

各循环加卸载应力 - 应变滞回环均在荷载反转处是尖叶状, 而不是椭圆形, 说明在外部荷载反转时, 试样的弹性变形响应迅速, 同时也表明外部荷载反转时试样的塑性变形小。循环加卸载试验中, 当外部荷载反转时, 试样在该处的塑性变形越大, 则弹性变形响应越滞后, 应力 - 应变滞回环越接近椭圆形, 反之则为尖叶状。滞回环面积的大小, 间接表明了试样在循环荷载作用下微裂隙张开和闭合的程度, 面积越大, 则能量耗散越多, 由循环荷载引起的疲劳损伤则越大。

为揭示动应力和动应变的相位关系, 选取 NF1 - 2 试样的第二级动应力的第 16 个循环的动应力和动应变与时间的关系图(见图 6)分析。图 6 表明, 保持图中峰值和谷值点重合时, 动应变相位始终滞后于动应力相位。

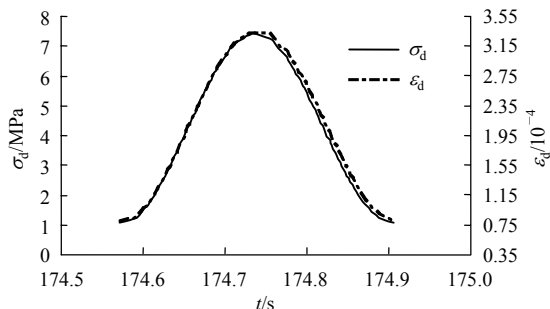


图 6 动应力和动应变与时间关系曲线

Fig.6 Relationship curves of dynamic stress-time and dynamic strain-time

3.2 动弹性模量和阻尼比分析

试样在各级动荷载下的动弹性模量和阻尼比计算时, 均取该级动荷载的第 16 个应力应变滞回环。图 7~9 给出了动弹性模量和阻尼比与动应变关系; 图 10, 11 分别给出了平均动弹性模量和平均阻尼比与动应变关系, 由此分别得到了 2 组岩石的动弹性模量和阻尼比与动应变的相关表达式(见表 2)。

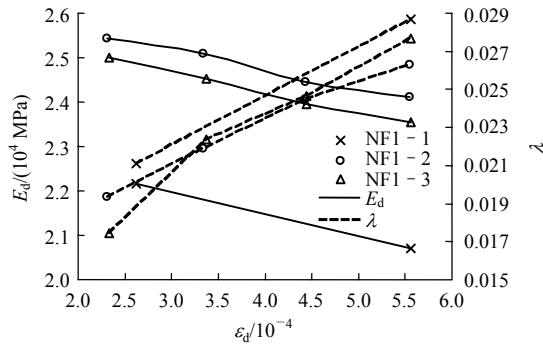


图7 NF1 动弹性模量和阻尼比与动应变关系

Fig.7 Relationship of dynamic modulus of elasticity, damping ratio and dynamic strain of rock sample NF1

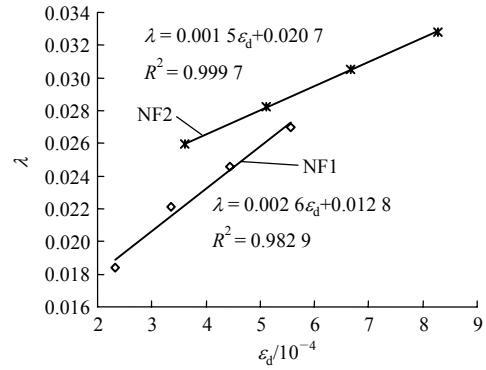


图11 平均阻尼比与动应变关系

Fig.11 Relationship of average damping ratio to dynamic strain

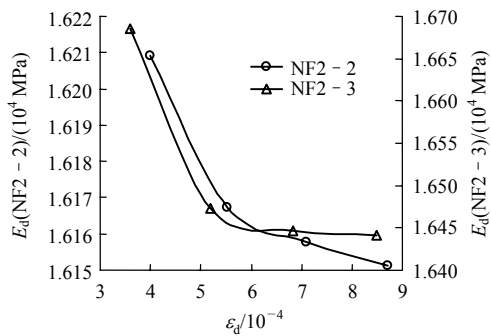


图8 NF2-2, NF2-3 动弹性模量与动应变关系

Fig.8 Relationship of dynamic modulus of elasticity and dynamic strain of rock samples NF2-2 and NF2-3

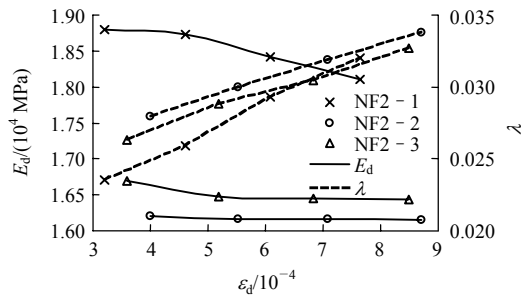


图9 NF2 动弹性模量和阻尼比与动应变关系

Fig.9 Relationship of dynamic modulus of elasticity, damping ratio and dynamic strain of rock sample NF2

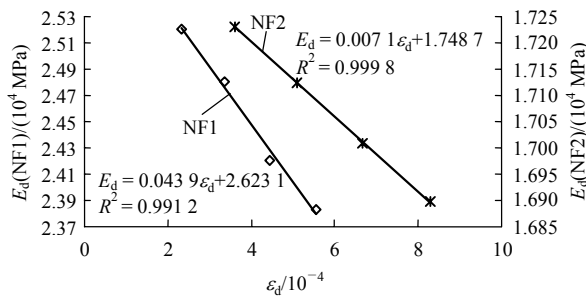


图10 平均动弹性模量与动应变关系

Fig.10 Relationship of average dynamic modulus of elasticity and dynamic strain

表2 动弹性模量和阻尼与动应变关系表

Table 2 Relationship of dynamic modulus of elasticity, damping ratio and dynamic strain

试样编号	表达式	R ²
NF1	$E_d = -0.0439\epsilon_d + 2.6231$	0.9912
	$\lambda = 0.0026\epsilon_d + 0.0128$	0.9829
NF2	$E_d = -0.0071\epsilon_d + 1.7487$	0.9998
	$\lambda = 0.0015\epsilon_d + 0.0207$	0.9997

试验结果表明，动弹性模量随动应变增加而减小，阻尼比则反之。动弹性模量和阻尼比平均值线性拟合结果表明，本次试验研究的同一组岩石，当动应力最大上限值低于其平均抗压强度时，分4级施加动荷载得到的动弹性模量随平均动应变增加线性递减，阻尼比则递增，即随动应力幅值增加，动弹性模量线性递减，阻尼比线性递增；得到的平均动弹性模量和阻尼比与动应变的关系式具有较高的线性相关性，相关系数的平方均超过了0.98。

循环荷载下的平均动弹性模量随动应力振幅增加逐渐减小，岩石的承载能力随循环加载应力增加而降低；阻尼比随动应力振幅增加而增大，岩石在循环荷载作用下的阻尼耗能随动应力振幅的增加而提高。说明岩石在循环加卸载过程中，随每次加卸载循环及动应力振幅增加，会有微裂纹的扩展、新裂纹的产生或汇集，导致不可塑性变形增加，使弹性模量降低；同时，由于岩石损伤变形在循环荷载作用下逐渐增大，能量损耗增加，阻尼比也随动应力增加而增大。

4 讨论

陈运平等^[12]对几种岩石进行了循环荷载试验，指出水饱和大理岩加载段的应变相位超前于应力相位。本文试验虽岩性与其不同，但试验结果表明应

变相位始终滞后于应力相位。笔者认为, 岩石在一定应力下对应相应应变, 循环荷载下的相位超前与滞后, 是应力 - 应变发生早晚的体现。因此, 笔者认为, 循环荷载下岩石是否存在应变超前于应力的情况, 还有待进一步开展试验并进行分析验证。

5 结 论

通过试验得到了动弹性模量和阻尼比随动应变的变化关系, 为该岩石地基考虑地震荷载影响时的建筑物设计和计算分析提供了依据。本文得到了如下主要结论:

(1) 泥质粉砂岩在周期性荷载作用下的加载与卸载的应力 - 应变曲线并不重合, 而是形成一个封闭的滞回环, 应变相位始终滞后于应力相位; 滞回环在荷载反转处并不是椭圆形, 而是尖叶状, 表明该处的弹性变形响应迅速, 塑性变形小。

(2) 循环荷载小于该岩石的平均抗压强度时, 随动应力振幅增加, 泥质粉砂岩的动弹性模量线性递减, 而阻尼比则线性递增, 得到的 4 个关系曲线的相关系数的平方均超过了 0.98。

(3) 随动荷载循环次数及动荷载振动幅值增加, 试样的不可逆塑性变形增大, 同时由循环荷载引起的损伤变形也增加。

参考文献(References):

- [1] 葛修润. 周期荷载作用下岩石大型三轴试验的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11 - 19.(GE Xiurun. Study on deformation and strength behaviour of the large-sized triaxial rock samples under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(2): 11 - 19.(in Chinese))
- [2] 胡文尧, 王天龙. 原状饱和黏性土在地震作用下的剪切模量和阻尼比[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(3): 82 - 94.(HU Wenyao, WANG Tianlong. Shear modulus and damping of cohesive soil under earthquake loading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3): 82 - 94.(in Chinese))
- [3] 何昌荣. 周期荷载作用下的模量阻尼特性[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, 3(2): 113 - 119.(HE Changrong. Modulus and damping under cyclic loading[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, 3(2): 113 - 119.(in Chinese))
- [4] WORTHINGTON M H, KING M S, MARSDEN J R. Determining the damping factor of sedimentary rocks required for seismically designed structures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6): 801 - 806.
- [5] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL237 - 1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [6] 杨永杰, 宋 扬, 楚 俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 201 - 205.(YANG Yongjie, SONG Yang, CHU Jun. Experimental study on characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 201 - 205.(in Chinese))
- [7] JAFARI M K, PELLET F, BOULON M, et al. Experimental Study on mechanical behaviour of rock joints under cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37(1): 3 - 23.
- [8] BAGDE M N, PETROS V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(2): 237 - 250.
- [9] 席道瑛, 王少刚, 刘小燕, 等. 岩石的非线性弹塑性响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 772 - 777.(XI Daoying, WANG Shaogang, LIU Xiaoyan, et al. Nonlinear elastoplastic response of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 772 - 777.(in Chinese))
- [10] NISHI K, KOKUSHO T, ESSAHI Y. Dynamic shear modulus and damping ratio of rocks for a wide confining pressure range[C]// Proceedings of the Fifth Congress of International Society for Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1983: 223 - 226.
- [11] 林英松, 葛洪魁, 王顺昌. 岩石动静力学参数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 216 - 222.(LIN Yingsong, GE Hongkui, WANG Shunchang. Testing study on dynamic and static elastic parameters of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 216 - 222.(in Chinese))
- [12] 陈运平, 席道瑛, 薛彦伟. 循环荷载下饱和岩石的滞后和衰减[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 672 - 678.(CHEN Yunping, XI Daoying, XUE Yanwei. Hysteresis and attenuation of saturated rocks under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 672 - 678.(in Chinese))
- [13] 葛修润, 蒋 宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 581 - 1 585.(GE Xiurun, JIANG Yu, LU Yunde, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 581 - 1 585.(in Chinese))
- [14] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56 - 60.(GE Xiurun, LU Yingfa. Discussion on fatigue failure and irreversible deformation of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56 - 60.(in Chinese))
- [15] 莫海鸿. 岩石的循环试验及本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(3): 215 - 224.(MO Haihong. Study on rock's cyclic experiment and constitutive relation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988, 7(3): 215 - 224.(in Chinese))