

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.016

彭泽核电厂砂岩动力学试验研究

蒋新兴^{1,2}, 朱珍德^{1,2}, 石 崇^{1,2}, 郝振群^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:对江西彭泽核电厂一期工程主厂区的细砂岩和含砾石英砂岩进行了单轴循环加卸载试验, 研究了 2 种岩性的阻尼比和动弹性模量与幅值、频率和深度之间的关系. 结果表明 细砂岩和含砾石英砂岩在相同幅值变化范围和相同频率变化范围下, 其阻尼比和动弹性模量的变化趋势类似. 在不同幅值下, 2 种岩性的动参数不同; 当循环频率在 0.01 ~ 1.0 Hz 范围内变化时, 随着频率的增大, 滞回环面积和阻尼比都会增大, 而动弹性模量基本不变. 细砂岩的动参数随深度基本不变, 而含砾石英砂岩的动弹性模量随着深度的增加而减小, 阻尼比反之.

关键词:砂岩循环荷载 动力试验 动弹性模量 阻尼比

中图分类号: TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)01-0078-06

岩石在地震、爆破、波浪等循环荷载作用下的力学性能是影响其稳定性的重要因素, 决定了岩土工程的动稳定性特征. 其中, 动弹性模量和阻尼比是反映岩石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, 研究这些动参数规律对于认识岩体动荷载作用机制, 评价工程动稳定性具有重要意义.

国内外很多学者对岩石在周期性循环荷载作用下的强度、变形特性及疲劳损伤等进行了研究, 取得了许多研究成果. 郭文等^[1]进行了振动频率对饱和砂卵石土动模量和动阻尼比影响的试验研究. 黎冰等^[2-3]进行了振动频率对 LCES 动力特性的影响分析及其机制初探. 刘建锋等^[4-6]对循环荷载作用下岩石阻尼特性进行了研究, 得出了弹性模量和阻尼比与动荷载大小的关系. 葛修润等^[7-9]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了系统的研究, 提出了以变形来度量岩体破坏强度的方法, 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. Tutuncu 等^[10]对沉积岩在单轴循环应力作用下的应力应变滞回环曲线特征进行了研究, 指出应力应变滞后回线的特征与施加荷载的频率、应变振幅等因素有关. 薛彦伟等^[11-12]运用 Preisach-Mayergoyz 模型(PM 模型)对岩石非线性弹性滞后和记忆特性进行了研究.

本文在参考国内外研究成果的基础上, 借助江西彭泽核电厂一期工程核岛区典型岩石动力学试验, 研究了动力参数与试验荷载幅值、频谱、试样地点的关系.

1 工程背景

拟建江西彭泽核电厂位于九江市彭泽县马当镇境内, 北临长江, 南靠太泊湖, 是中国第 1 批内陆核电站. 核电厂在地震时一旦发生事故, 将对工程及当地居民和环境带来不可忽视的危害, 因此具有较高的抗震性能要求. 为了考察场地岩体在地震循环荷载下的动力特性, 自江西彭泽核电厂场地区域取细砂岩和含砾石英砂岩多组进行了单轴不同幅值、不同频率和不同深度下的循环加卸载试验, 研究了 2 种岩性动弹性模量、阻尼比与幅值、频率以及深度之间的关系.

2 试验原理

岩石试样内部一般都存在许多机械缺陷以及空洞等微结构特征, 其动应力与动应变的波形线在时间上

并不完全对应,两者之间有一定的差距,因此同一振动周次的动应力和动应变曲线形成滞回环(图 1). 滞回环面积的大小反映了加卸载过程岩石的能量缺失. 动弹性模量 E_d 和阻尼比 λ 定义如下:

$$\left\{ \begin{aligned} E_d &= \frac{\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}}{\epsilon_{d\max} - \epsilon_{d\min}} \\ \lambda &= \frac{A}{4\pi A_s} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: $\sigma_{d\max}$ ——滞回曲线最大动应力; $\sigma_{d\min}$ ——滞回曲线最小动应力;
 $\epsilon_{d\max}$ ——滞回曲线最大动应变; $\epsilon_{d\min}$ ——滞回曲线最小动应变; A ——滞回曲线 $ABCD$ 的面积; A_s ——三角形 AEF 的面积; λ ——阻尼比.

滞回曲线 $ABCD$ 的面积大小反映了岩石在一个循环周期中所耗散的能量大小. 4 倍三角形 AEF 的面积 $4A_s$ 反映了岩石在一个周期内所储备的最大弹性应变能.

3 试验方案

3.1 制样

试验所用岩石岩性为细砂岩和含砾石英砂岩,采用圆柱形试件,取样点位于地面以下 7.375 ~ 66.775 m 范围内,按 SL264—2001《水利水电工程岩石试验规程》制样要求制备标准试样,尺寸为 $\varnothing 60\text{ mm} \times 110\text{ mm}$. 共制得 37 个试样,其中细砂岩试样 26 个,含砾石英砂岩试样 11 个. 分为 2 组,一组进行单轴抗压强度试验,另一组进行循环荷载下阻尼特性试验.

3.2 试验设备

岩石阻尼试验采用 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机(图 2). RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机轴向最大荷载 1 MN,振动波形可为斜坡、正弦波、三角波、方波,振动频率为 0.001 ~ 1 Hz. 试验中不断变化频率、振幅、不同试件深度,以分析不同位置、波频等因素产生的影响.

3.3 试验方法

由单轴压缩试验可知,该细砂岩和含砾石英砂岩的天然抗压强度平均值约为 20 MPa.

3.3.1 不同幅值的循环荷载试验

采用应力控制方式,设定位移上限值,首先以 1 kN/s 应力速率施加轴向荷载,直至试样应力达到 11 MPa,然后循环加载,循环次数 30,振动波形采用正弦波,频率为 1 Hz,一开始振幅为 9 MPa,下限动应力为 7 MPa,上限动应力为 16 MPa,在加卸载试验过程中,在其他条件不变的情况下,先保持上限动应力不变调节下限动应力使其分别为 6.5,6,5.5,5 MPa,从而改变其试验幅值. 而后保持下限动应力不变调节上限动应力使其分别为 16.5,17,17.5,18 MPa,从而改变其试验幅值. 该过程数据自动采集.

3.3.2 不同频率的循环荷载试验

采用应力控制方式,设定位移上限值,首先以 1 kN/s 应力速率施加轴向荷载,直至试样应力达到 11 MPa,然后循环加载,循环次数 30,振动波形采用正弦波,振幅为 9 MPa,频率为 1 Hz,然后在其他条件不变的情况下,频率依次变为 0.5,0.2,0.1,0.05,0.02,0.01 Hz.

3.3.3 不同位置的循环荷载试验

采用应力控制方式,设定位移上限值,首先以 1 kN/s 应力速率施加轴向荷载,直至试样应力达到 11 MPa,然后循环加载,循环次数 30,振动波形采用正弦波,振幅为 9 MPa,频率为 1 Hz,然后取不同位置不同深度的岩石进行循环加卸载.

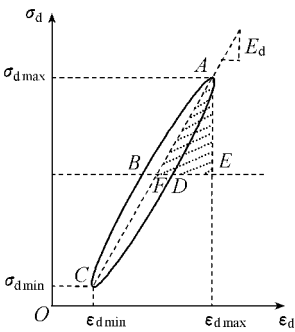


图 1 动应力动应变滞回环
Fig. 1 Hysteresis loop of dynamic strain and stress

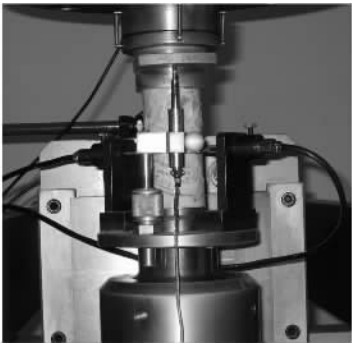


图 2 RMT-150B 试验机
Fig. 2 RMT-150B testing machine

4 试验结果分析

4.1 循环应力-应变曲线

由于细砂岩和含砾石英砂岩的应力-应变曲线类似,此处仅给出细砂岩试样不同幅值下的轴向动应力(σ_x)与轴向动应变(ϵ_x)的关系曲线(图 3).从图 3 可知 细砂岩在不同幅值时的循环加载与卸载的应力-应变曲线并不重合,而是形成一个封闭的滞回环.各循环加卸载应力-应变滞回环在荷载翻转处为尖叶状形,而不是椭圆形.这与文献[4]的研究结果类似.

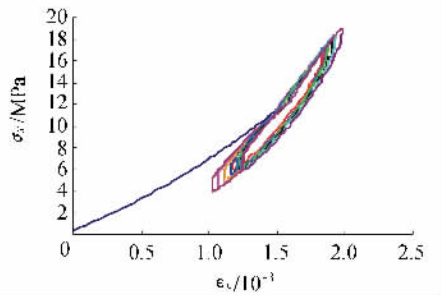


图 3 典型动应力与动应变的关系曲线
Fig. 3 Typical hysteresis loop of dynamic strain and stress

4.2 不同幅值对岩石动参数的影响

由图 4 和图 5 可知:当上限动应力(16 MPa)不变而减小下限动应力时,滞回环的上尖端基本不移动而下尖端向左下方移动,且下限动应力降得越多其下移的幅度越大;当下限值(7 MPa)不变而增大上限动应力时,滞回环的下端不移动而上端向右上方移动,且上限动应力升得越多其上移的幅度越大.比较试验结果可以看出 振幅小则滞回环窄,振幅大则滞回环大,滞回环的大小表示一个循环中微裂隙闭合和张开的程度以及损伤量及能量耗散量.随着动应力幅值的增大,滞回环的面积也逐渐增大,即在振幅加大的过程中,其能量的缺失变大,同时试样由损伤引起的不可逆变形增大.从 2 种岩性的试验数据分析曲线可以看出,在幅值变化的过程中,细砂岩和含砾石英砂岩变化趋势类似.定义 $\bar{\sigma}$ 为上下限动应力值之和的平均值,即动应力平均值.单从细砂岩的变化曲线来看,细砂岩的阻尼随振幅的增大而增大,动弹性模量随动应力平均值的增大而增大.试件在变形过程中包括弹性变形和塑性变形,卸载后试件的弹性变形恢复而塑性变形不可逆.由于卸载过程中人为控制了下限的动应力,其弹性变形并没有全部恢复,而有一部分留在试件中,因此,在卸载整个过程中试件的变形包括塑性变形和小部分的弹性变形.由于在施加动荷载的过程中未超过其平均强度,即试件不发生破坏且试件本身一般存在着微裂隙,在加载过程中其微裂隙紧闭而导致动弹性模量增大,且施加的动荷载越大塑性变形越大,其动弹性模量也越大.同时,弹性变形余下越多,微裂隙张开程度越小,相应地也会导致动弹性模量增大.因此,越大的动应力平均值留下的弹性变形和塑性变形越大,其动弹性模量也越大.在增大振幅的过程中,塑性变形的能力越大,其能量缺失越大,滞回环面积越大,阻尼比也越大.

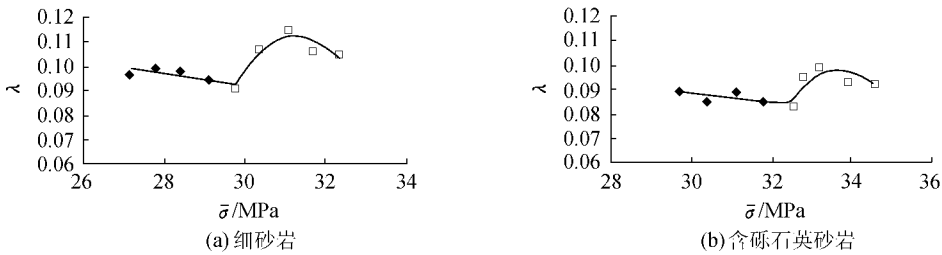


图 4 阻尼比与动应力的关系曲线

Fig. 4 Relationship between damping ratio and dynamic strain

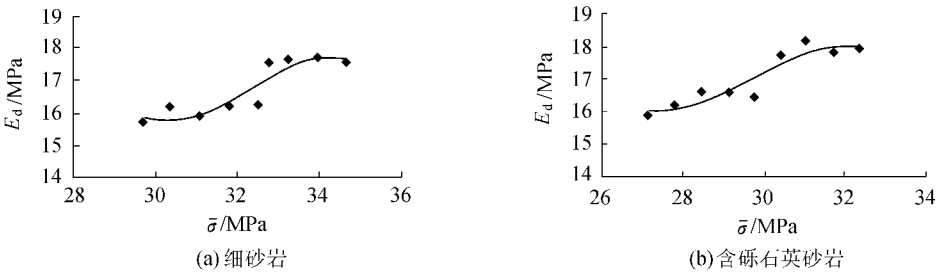


图 5 动弹性模量与动应力的关系曲线

Fig. 5 Relationship between dynamic elastic modulus and dynamic strain

4.3 不同频率对岩石动参数的影响

已有研究^[4]表明,不同频率下的岩石动应力与动应变滞回环关系曲线存在差异.从图 6 和图 7 可以看出:当频率在 0.01 ~ 1 Hz 之间时,2 种岩性的阻尼比随频率的增大而增大,且阻尼比与入射频率之间呈二次曲线关系,而动弹性模量基本保持不变,接近于常数.同时,细砂岩的阻尼比比含砾石英砂岩的阻尼比要大,而动弹性模量恰好相反.因为在循环加载过程中,荷载振幅不变,试件的塑性变形不变,且荷载振幅一般较小,动应力传播基本处于弹性状态,即施加的动荷载不会造成试件的疲劳破坏,因此岩石本身的微裂隙或裂纹基本不发生闭合和张开现象,动弹性模量也几乎不受频谱的影响.

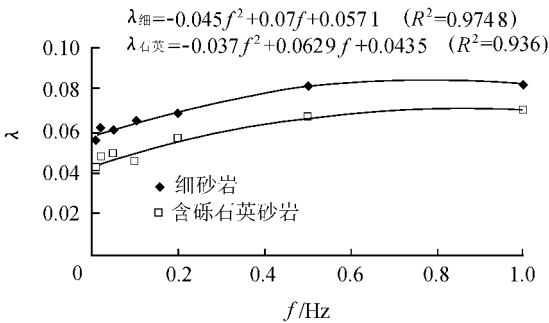


图 6 阻尼比与频率的关系曲线

Fig. 6 Relationship between damping ratio and frequency

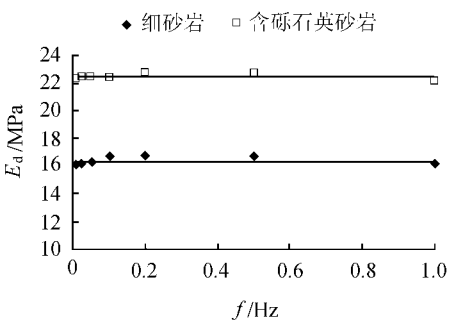
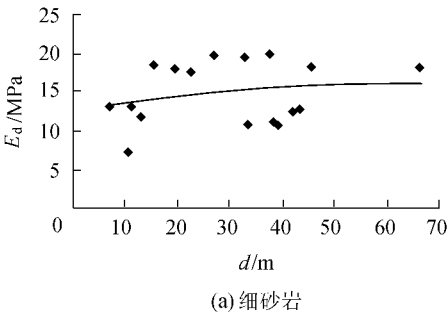


图 7 动弹性模量与频率的关系曲线

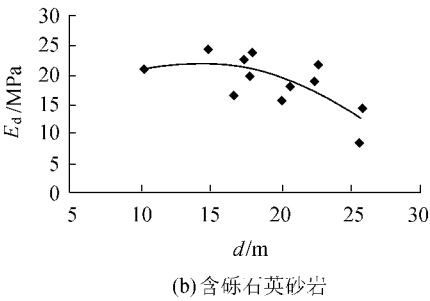
Fig. 7 Relationship between dynamic elastic modulus and frequency

4.4 不同位置对岩石动参数的影响

图 8 和图 9 为根据试验得出的数据绘制出的动弹性模量、阻尼比与深度的关系曲线.由图 8 和图 9 可以看出:细砂岩的动弹性模量随着深度的增加而增大,阻尼比随着深度的增加而减少;含砾石英砂岩的动弹性模量随着深度的增加而减少,阻尼比随着深度的增加而增大.主要原因是:粒径在 0.25 ~ 0.125 mm 之间的细砂岩,颗粒之间的孔隙较小,受地下水影响较小,动参数基本不发生变化.而含砾石英砂岩颗粒相对较大,颗



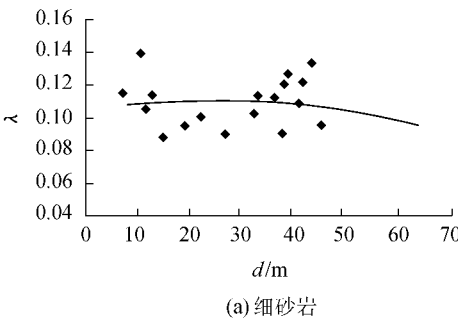
(a) 细砂岩



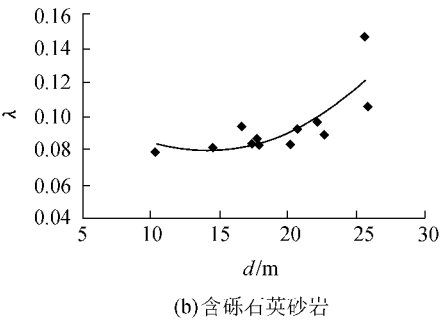
(b) 含砾石英砂岩

图 8 动弹性模量与深度(d)的关系曲线

Fig. 8 Relationship between dynamic elastic modulus and depth



(a) 细砂岩



(b) 含砾石英砂岩

图 9 阻尼比与深度的关系曲线

Fig. 9 Relationship between damping ratio and depth

粒之间的孔隙也较大,地下水也较容易进入孔隙,深度越大,地下水对其侵蚀作用越强,对岩石的损伤也越大.试件微裂缝增大会导致动弹性模量降低,相应的阻尼比增大,因此,细砂岩的阻尼比、动弹性模量随埋深变化不明显,而含砾石英砂岩的阻尼比、动弹性模量随埋深变化则比较显著.

多组试件结果(图10)表明,阻尼比与动弹性模量呈幂函数反比关系,且相关性非常显著,细砂岩相关系数达0.93,含砾石英砂岩达0.98.

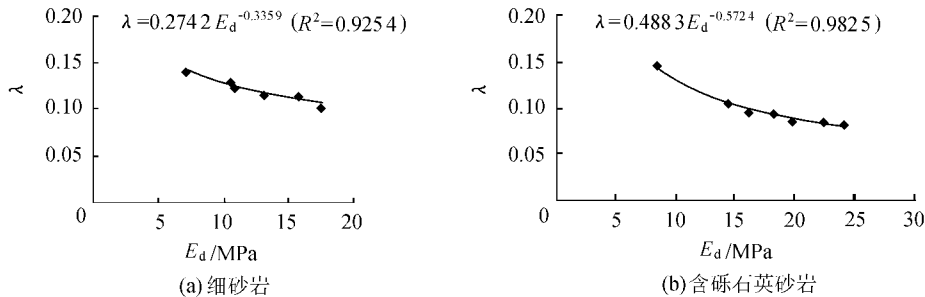


图10 阻尼比与动弹性模量的关系曲线

Fig. 10 Relationship between damping ratio and dynamic elastic modulus

5 结 语

通过 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机进行了细砂岩和含砾石英砂岩单轴不同幅值、频率和深度下的循环加卸载试验,研究了2种岩性的动应变-应力滞回曲线,阻尼比、动弹性模量与振幅、频率和深度之间的关系,并得出了如下结论:(a)荷载振幅在9~11 MPa变化范围内时,细砂岩和含砾石英砂岩的动应力-动应变曲线为滞回环,且随着振幅的增大,滞回环的面积增大,相应的阻尼比也会增大,而动弹性模量随着动应力平均值的增大而增大;(b)频率在0.01~1 Hz变化范围内时,细砂岩和含砾石英砂岩的阻尼比随频率的增大而增大,动弹性模量基本保持不变;(c)深度在7.375~66.775 m范围内时,细砂岩动参数基本上不发生变化,而含砾石英砂岩动弹性模量随着深度的增加而减小,阻尼比随着深度的增加而增大.

参考文献:

- [1] 郭文,李强,王汝恒.振动频率对饱和砂卵石土动模量和动阻尼比影响的试验研究[J].四川建筑科学研究,2007,33(6): 113-115. (GOU Wen, LI Qiang, WANG Ru-heng. Experimental study on influence of vibration frequency to dynamic modulus and damping ratio characteristics of saturate sandy pebble soil[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(6): 113-115. (in Chinese))
- [2] 黎冰,高玉峰,丰土根.振动频率对LCES动力特性的影响分析及其机理初探[J].岩土力学,2008,29(10): 2731-2734. (LI Bing, GAO Yu-feng, FENG Tu-gen. Cyclic loading frequency effect and mechanism of lightweight clay-EPS beads soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2731-2734. (in Chinese))
- [3] 张茹,涂扬举,费文平,等.振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J].岩土力学,2006,27(5): 699-704. (ZHANG Ru, TU Yang-ju, FEI Wen-ping, et al. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 699-704. (in Chinese))
- [4] 刘建锋,谢和平,徐进,等.循环荷载作用下岩石阻尼特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4): 165-171. (LIU Jian-feng, XIE He-ping, XU Jin, et al. Experimental study on damping characteristics of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 165-171. (in Chinese))
- [5] 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 Wen-yao, WANG Tian-long. Shear modulus and damping of cohesive soil under earthquake loading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3): 82-94. (in Chinese))
- [6] 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 Chang-rong. Modulus and damping under cyclic loading[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, 3(2): 113-119. (in Chinese))
- [7] 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): 1581-1585. (GE Xiu-run, JIANG Yu, LU Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1581-1585. (in Chinese))
- [8] 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 Xiu-run, LU Ying-fa. Discussion on fatigue damage and irreversible deformation problems of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56-60. (in Chinese))

- run, LU Ying-fa. Discussion on problems of Rock fatigue damage and irreversible deformation under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56-60. (in Chinese))
- [9] 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 Xiu-run. 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))
- [10] TUTUNCU A N, PODIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock: part I: effect of frequency and strain amplitude[J]. Geophysics, 1998, 63(1): 184-194.
- [11] 薛彦伟, 席道瑛, 徐松林. 岩石非经典非线性频率效应的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 5020-5025. (XUE Yan-wei, XU Dao-ying, XU Song-lin. Micro-study on rock non-classical and non-linear frequency effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup 1): 5020-5025. (in Chinese))
- [12] 席道瑛, 刘斌, 田象燕. 饱和岩石的各向异性及非线性黏弹性响应[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 109-118. (XU Dao-ying, LIU Bin, TIAN Xiang-yan. Anisotropy and nonlinear viscoelastic behavior of saturated rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(1): 109-118. (in Chinese))

Experimental study on sandstone dynamics of Pengze Nuclear Power Plant

JIANG Xin-xing^{1,2}, ZHU Zhen-de^{1,2}, SHI Chong^{1,2}, HAO Zhen-qun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Uniaxial cyclic loading-unloading tests on fine-grained sandstone and quartz sand with gravel in the main plant of the first stage project of Pengze Nuclear Power Plant in Jiangxi Province were performed. The variations of damping ratio and dynamic elastic modulus of the two kinds of rocks with frequency, amplitude and depth were studied. The test results show that under the same amplitude and frequency ranges, the variation trends of the damping ratio and the dynamic elastic modulus of the fine-grained sandstone are similar to those of the quartz sand with gravel. Under different amplitudes, the dynamic parameters of the two kinds of rocks are different. When the cyclic frequency changes from 0.01 to 1.0 Hz, the hysteresis loop area and the damping ratio of the two kinds of rocks both increase with the increase of the frequency, while the dynamic elastic modulus almost does not change. The dynamic parameters of the fine-grained sandstone does not change with the depth, while the dynamic elastic modulus of quartz sand with gravel decreases with the increase of the depth and its damping ratio increases with the increase of the depth.

Key words : sandstone cyclic loading ; dynamic test ; dynamic elastic modulus ; damping ratio