

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 04 - 1031 - 06

强风化花岗岩动力学参数的试验研究

宋全杰¹, 李海波¹, 李俊如¹, 曲宏远², 张 伟¹, 付河东³(1. 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, 武汉 430071;
2. 北京华宇工程有限公司, 北京 100120; 3. 福州铁建建筑有限公司, 福州 350013)

摘 要: 地震反应分析通常采用等效非线性模型, 动剪切模量 G 和阻尼比 λ 是该模型的两个重要参数。为研究目前在大型工程建设中遇到越来越多的强风化花岗岩的动力特性, 利用固定-自由型共振柱 (GDS RCA) 对强风化花岗岩的剪切模量和阻尼比进行试验研究。GDS RCA 为一种国际上广泛应用的共振柱, 具有良好的性能, 利用其控制试样的固结围压和孔隙水压力, 可以测得试样在不同有效应力状况下的动剪切模量和阻尼比。对比研究不同有效应力下共振频率、动剪切模量和阻尼比随剪应变的变化情况, 给出其变化曲线。按照 Hadin-Drnevich^[1] 所提出的双曲线模型, 拟合动剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化曲线。利用摩擦理论, 对试样阻尼的产生机制进行探讨。试验结果表明, 随着剪应变的增加, 试样系统的共振频率随之减小, 试样阻尼比随之增大; 试样的动剪切模量和阻尼比皆与试样固结时的有效应力有关, 而试样阻尼比也受孔隙水压力的影响。

关 键 词: 强风化花岗岩; 剪切模量; 阻尼比; 共振柱**中图分类号:** TU 452**文献标识码:** A

Experimental study of dynamic properties of highly weathered granite

SONG Quan-jie¹, LI Hai-bo¹, LI Jun-ru¹, QU Hong-yuan², ZHANG Wei¹, FU He-dong³(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. Beijing Huayu Engineering Co., Ltd., Beijing 100120, China; 3. Fuzhou Tiejian Construction Co., Ltd., Fuzhou 350013, China)

Abstract: Equivalent nonlinear model is usually applied in seismic response analysis. The shear modulus and damping ratio are two important properties in this model. Highly weathered granite is common in large engineering. It is essential to study dynamic properties of highly weathered granite. The shear modulus and damping ratio of highly weathered granite are studied with GDS resonant-column; as its the capability is excellent, it is popular in the world. The confining pressure and pore water pressure to consolidate can be controlled well by GDS RCA. After the end of sample' consolidation, shear modulus and damping ratio can be given by experiment in the state of this effective stress. Changing confining pressure and pore water pressure, resonant frequency, shear modulus and damping ratio can be given with another effective stress. In different effective stresses, variation of shear modulus and damping ratio can be observed. And fitting curves of shear modulus and damping ratio that are put forward by Hadin-Drnevich^[1] are turned out on the basis of experimental data. The authors discuss the damping mechanism of highly weathered granite sample by amfusing frictional theory. It can be seen that resonance frequency of the sample's system has a positive correlation with shear strain, but sample's damping ratio has a negative with shear strain. The effective stress can have impact on both sample's shear modulus and damping ratio. However, pore water pressure can only act on damping ratio.

Key words: highly weathered granite; shear modulus; damping ratio; resonant column

1 引 言

岩土的动剪切模量和阻尼比是岩土动力学特性的主要参数, 是场地地震安全性评价中必不可少的

内容, 也是进行地基动力反应分析等效非线性模型中的两个重要参数^[2]。由于影响土动力学参数的因素有 13 ~ 15 个之多^[1], 因此, 各地土动力学参数有较大差别, 重大工程一般都要进行专门的试验测

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家杰出青年基金资助 (No. 51025935); 国家 973 计划项目资助 (No. 2010CB732001); 国家科技重大专项资助 (No. 2011ZX06002-010-15)。
第一作者简介: 宋全杰, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事岩石动力学方面的研究。E-mail: qjsong109@163.com

定。实验室测试岩土动剪切模量和阻尼比所用得最多的仪器是土动三轴试验仪和共振柱试验仪。这两种仪器测试岩土动参数时的应变范围有所不同,以 10^{-4} 为分界线,土动三轴仪多测试在应变高于 10^{-4} 的岩土动参数,共振柱多测试在应变低于 10^{-4} 的岩土动参数。

岩土体的动力学参数不是定值,不仅与其应变幅值相关,而且与动荷载的振动频率、围压、密实度、塑性指数、加载历史、饱和度等因素有关。蒋通等^[3]研究了围压对土动剪模量和阻尼比影响的简化计算方法,指出大震作用下宜考虑围压对土性质的影响。柏立懂^[4]研究了荷载历史对砂土剪切模量的影响。张建民等^[5]研究了振动频率对砂土动力特性的影响。Cabalar等^[6]、Kallioglou等^[7]分别研究了黏土的动力特性。陈国兴等^[8]、袁晓铭等^[9]、曹成效等^[10]、蔡辉腾等^[11]、何晓民等^[12]对全国各地的沉积土、粉土、砂土等土样的阻尼比和剪切模量进行了试验研究,并给出了相应的推荐值。

花岗岩是一种分布广泛的岩石,强风化后颗粒松散,有别于一般的砂土。随着大型工程建设施工的增多,强风化花岗岩的地基也随之增多,而之前学者们的研究鲜见关于强风化花岗岩的。大型工程需进行地震反应分析,在地震反应分析中通常采用等效非线性模型。动剪切模量 G 和阻尼比 λ 是该模型的两个重要参数,在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 应变范围内土动三轴试验达不到要求,为此可用共振柱试验研究这一应变范围内的 G 和 λ 的变化规律。本次利用共振柱,对强风化花岗岩的动剪切模量和阻尼比进行了试验研究,考虑了有效应力可能对试验结果造成的影响,分析有效应力及孔隙水压力对共振频率、动剪切模量、阻尼比的影响。

2 试样、试验仪器及试验方法

2.1 试样

试样取自某核电站地下5m处,颗粒松散,黏结力极小,其物性参数见表1。

表1 强风化花岗岩基本特性

Table 1 Basic properties of strongly weathered granite

平均粒径 d_{50}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	密度 $\rho_s/(\text{g}/\text{cm}^3)$	含水率 $\omega/\%$
0.779	26.02	2.52	2.64	17.1

由于试样粘结力不大,原状样制作起来极其困

难,为了能更好地控制试样的试验条件,对试样按照原密度不做任何其他配料添加,保持原有含水率,制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的试样。试样制作前,挑出个别较大颗粒后对制作重塑样所用粒径进行测试,经测试最大粒径为4.189 mm,小于试样直径的1/10,满足美国的ASTM标准^[13]中对试样尺寸的要求。制作好的重塑样如图1所示。



图1 强风化花岗岩试样

Fig.1 Highly weathered granite sample

2.2 试验仪器

试验采用仪器为英国GDS公司生产的固定-自由型共振柱(可缩写为GDS RCA),该种共振柱在国际上较为广泛的应用。GDS RCA试验仪如图2所示。在这种固定-自由试验中,由一个驱动系统产生扭矩,通过位于试样自由端顶盘上的加速度传感器,测得试样受到激励后的响应。在共振过程中,通过改变所施加激励的频率,测得试样的共振频率。根据测得的共振频率和试样的密度、尺寸计算动剪切模量,然后,通过自由振动测出试样在这一剪应变下的阻尼比。

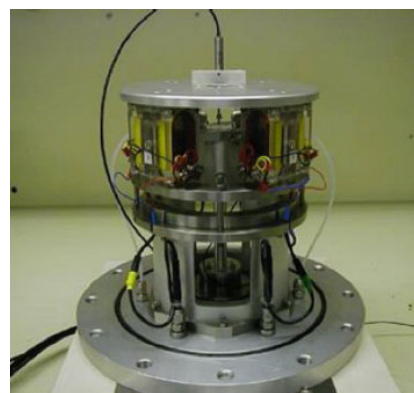


图2 GDS共振柱

Fig.2 GDS resonant column

共振柱测试可在试件不破损的情况下研究中小应变范围内的动力学性能。它以一维波动理论为原

理，试样下端固定，上端自由，通过驱动盘在试样上施加扭转激振力，测出体系的共振频率后，依据试件的几何尺寸和边界条件等，按照波动理论计算出试件的动剪切模量。其计算公式为

$$G = \rho (2\pi fh / \beta)^2 \quad (1)$$

式中： G 为土样的动剪切模量； ρ 为土样的质量密度； f 为扭转振动共振频率； h 为土样的高度； β 为扭转振动频率方程的特征值。

在共振柱试验中，试样的黏滞阻尼比 λ 是根据自由振动测得的衰减曲线获得的，这个曲线由安装在共振柱驱动盘的加速度计测得。在测得某一剪应变下的共振频率后，给试样施加一个这一剪应变下频率的瞬时正弦波，测量试样的自由振动的情况。测得的衰减曲线如图 3 所示，衰减曲线对数衰减量 δ 可以根据连续循环振幅比值的对数来计算。

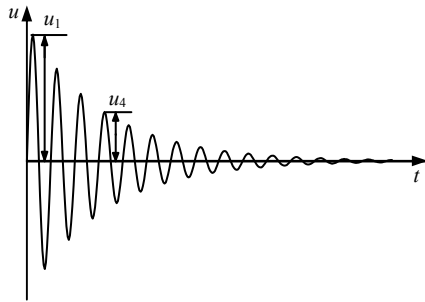


图3 衰减曲线
Fig.3 Attenuation curve

阻尼比计算公式为

$$\lambda = \frac{1}{2\pi n} \ln \left(\frac{u_1}{u_{1+n}} \right) \quad (2)$$

本次实验测试之前已对仪器进行标定，保证了测量仪器的准确性。标定所用的是 4 个已知剪切模量且共振频率低于 100 Hz 的铝制金属标定杆。在 GDS RCA 上进行了自振和共振试验，据此求出了共振柱驱动系统的转动惯量，同时，也验证了使用该仪器所测试验结果的可靠性。铝制金属标定杆的剪切模量（量级为 10 GPa）远高于本次所试验的强风化花岗岩试样的动剪切模量（量级为 10 ~ 100 MPa），试验所用的强风化花岗岩的共振频率比一般砂土略高，试样刚度在试验仪器要求范围之内，保证了本次所测得的试验结果是可靠的。

2.3 试验方法

由于共振柱试验是在试样不破损的小应变条件下进行的，可对同一试样进行多次试验。本次试验就是在同一试样上通过改变围压和孔隙水压力而获

得多种工况下试样的动力学参数。试验时，所施加的围压和孔压见表 2。在完成一个工况下的试验后再进行下一工况的试验，按照试验序号顺序依次进行，测出了 9 组工况下的动力学参数。

表2 试验时试样所受应力状态
Table 2 Testing states of sample

试验序号	围压/kPa	孔压/kPa
1	200	100
2	300	200
3	400	300
4	300	100
5	400	200
6	500	300
7	500	100
8	600	200
9	700	300

在重塑样制作、饱和后，在 GDS RCA 上，利用 GDS 的饱和模块，输入试验要求的围压和反压，施加的围压变化率为 100 kPa/h。当达到等向固结时的有效应力后，稳定 6 h。然后开始试验，先对试样进行共振条件下的扫频，一次扫频完成后，在所测得的共振频率和施加的电压下进行自由振动试验，测试试样的阻尼比^[14]。为了减小前次激振对下一次试验测试的影响，每次激振后待试样在预置有效应力下静置 3 min 后再进行下一次激振。

3 试验结果及分析

3.1 共振频率

场地土层的自振频率是场地土的重要动力特性之一。为避免结构物与场地地基的共振效应，工程设施的固有频率应尽量避免地基的固有频率。尽管物体的共振频率与其形状及所处的状态有关，也就是说室内共振柱测得试样的共振频率一般不会与场地的自振频率相等，但通过室内试验得出共振频率随剪应变、有效应力等的变化关系，对场地自振频率的研究具有一定的启示作用。

在共振柱试验中，首先测出的是试样对应于某一剪应变下的共振频率，共振频率并不是定值，它随着剪应变、固结有效应力的改变而改变。试验中测出的 9 组试验数据如图 4 所示。图中，200/100 kPa 表示试样在围压为 200 kPa、孔隙水压力为 100 kPa 情况下进行固结后测得的试验数据。这 9 组数据可分为有效应力等于 100、200、400 kPa 三种情况，可以看出固结时的有效应力是影响试样共

振频率的重要因素。在同一固结有效应力条件下，不同围压测得的数据基本一致。从图中可以清晰地看出，试样的共振频率随剪应变的增加而减小，随着有效应力的增加而增大，同时随着固结有效应力的提高，共振频率随剪应变变化曲线的曲率变小，曲率半径增大，而且拐点朝着剪应变增大的方向移动。

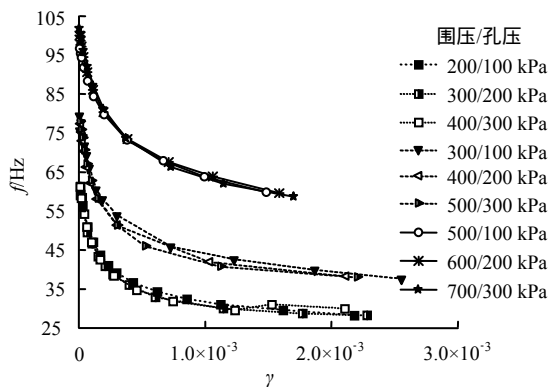


图4 共振频率变化曲线

Fig.4 Resonant frequency curves

3.2 动剪切模量

Hardin 和 Black 在 1968 年的研究指出，土的剪切模量受一系列因素的影响，这种影响可一般表示为

$$G = f(\sigma'_m, e, \gamma, t, H, c, \theta, \tau_0, S, T) \quad (3)$$

式中： σ'_m 为平均有效主应力； f 为频率； e 为孔隙比； c 为颗粒特征； γ 为剪应变幅； θ 为土的结构； t 为次固结时间效应； τ_0 为八面体剪应力； H 为受荷历史； S 为饱和度； T 为温度。

试验得出了 9 组不同状态下试样动剪切模量随剪应变的变化曲线，如图 5 所示。9 组数据分为有效应力为 100、200、400 kPa 三种情况。从图中可以看出，同一有效应力的固结下的试样，剪应变-动剪切模量曲线的基本一致，随着剪应变的增加，动剪切模量逐渐减小，随着有效应力的增加，动剪切模量逐渐增大。

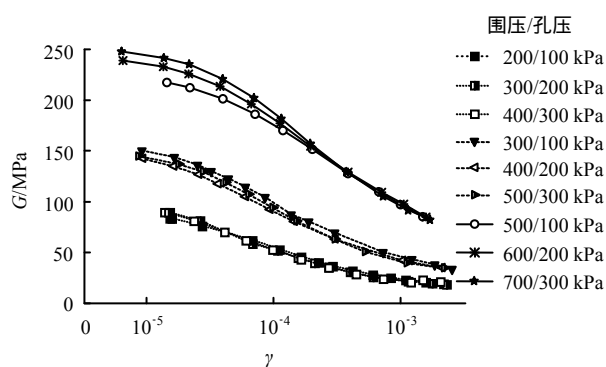


图5 剪切模量变化曲线

Fig.5 Shear modulus curves

一般情况下土孔隙的可压缩性大大超过土骨架的压缩性，弹性波的传播主要由土骨架控制。对于剪切波来说，孔隙水不能传递剪力，因此土中的剪切波只取决于土骨架的性质。在相同有效应力条件下固结，试样土颗粒间所承受的力、试样的孔隙比、土骨架的性质基本一致。尽管试样中的含水率发生了变化，但由于孔隙水不能传递剪力，才会出现同一有效应力固结情况下，剪应变-动剪切模量曲线的基本一致的情况。

对于土动剪切模量的模型关系式，已有许多学者进行了归纳，大多比较复杂，考虑的参数较多。为了能得出一种简单有效应力对动剪切模量的关系式，通过上述试验数据，可以建立剪切模量与有效应力的关系模型：

$$G_1 / G_2 = (\sigma'_1 / \sigma'_2)^m \quad (4)$$

式中： G_1 、 G_2 分别为同一剪应变大小下对应于有效应力 σ'_1 、 σ'_2 下的动剪切模量。按照这一模型对以上数据进行分析发现， m 随着剪应变增大而逐渐增大，但在剪应变较小时， m 变化不大，当剪应变小于 10^{-4} 时， m 基本稳定在 0.7 附近。

3.3 阻尼比

在动荷载作用下，岩土材料往往表现出黏弹塑性。从微观上看，岩土材料受到激励时，分子、颗粒间的相对运动产生热效应是不可逆的，这才导致阻尼的存在，阻尼比是反映能量耗散的重要指标。

通过试验，得到 9 组试样阻尼比随剪应变的变化曲线如图 6 所示，从图中可以看出，数据较为离散，不如之前的动剪切模量的规律性好，但阻尼比随着剪应变的增加而出现增大，随着有效应力的增加而减小。在相同有效应力下，每组测得的阻尼比离散性比测得剪切模量值要大，这说明阻尼比不仅与固结时的有效应力有关，可能还与试样含水率（孔隙水压力）有关。孔隙水的存在，一方面可以消耗能量，起着增大试样阻尼比的作用，波在传播过程中，将引起孔隙流体的黏滞运动，增大了剪切波在传递过程中能量的损耗，引起能量的耗散。另一方面起着润滑作用，降低了土颗粒间的摩擦，起着减小阻尼比的作用，这两个方面的合力影响了阻尼比的变化。从试验结果来看，相同有效应力下，在孔隙水压力较大条件下的试样阻尼比略大，说明孔隙水的存在增大了剪切波能量传递时的耗散，但

含水率的多少以及孔隙水具体是怎么影响试样阻尼比变化的，还需进一步专门研究。

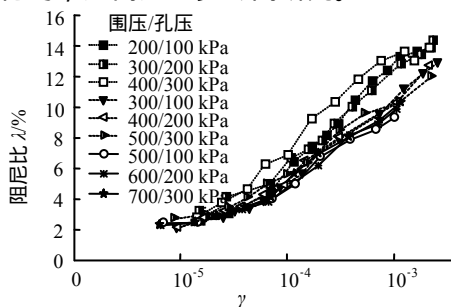


图 6 阻尼比变化曲线
Fig.6 Damping ratio curves

尽管人们对土阻尼的影响因素以及变化规律已有相当的认识，但对土阻尼的产生机制却并不清楚，本文对本次试验中试样的阻尼机制做简要的探讨。根据不同的耗能机制，较常应用的阻尼模型主要有黏性阻尼、滞变阻尼、摩擦阻尼。本次试验所用的强风化花岗岩为一种松散的颗粒介质，其阻尼是一种宏观的力学测量，指的是试样在振动中由于内部原因所引起的能量消耗。这些能量的耗散往往表现出应变滞后应力的现象。松散颗粒介质无论如何固结，内部总会存在孔隙，而小于此孔隙的颗粒连同液态介质就能够组成一种黏滞介质。这种黏滞介质中的颗粒以滚动摩擦的方式消化能量。当试样受到激励时，由于接触摩擦的关系，黏滞介质中粒径较大的颗粒首先发生滚动，较小颗粒暂未受到启动。当剪应变增大时，颗粒滚动距离相应增加，从而带动了细小颗粒的滚动，宏观上造成阻尼比的增大。当应变达到一定的值后，黏滞介质中所有粒径大小的颗粒都得到启动后，阻尼比将变为稳定值，这与双曲线模型拟合后的结果是吻合的。随着固结有效应力的升高，试样中的孔隙将减小，从而使组成黏滞介质的颗粒的最大粒径减小，这就减少了能够产生阻尼的进行滚动摩擦的颗粒的数量，使得阻尼比变小。而且，产生滚动摩擦的颗粒粒径的减小，也使颗粒的滚动周期变短，相应的共振频率增大，这与试验所测的结果是一致的。

3.4 动剪模量比及阻尼比的拟合

共振柱上的试样在受到强迫振动和自由振动时，假定符合 Hadin-Drnevich 所提出的双曲线模型^[1]，则在动载作用下土的动剪应力 τ 和剪应变幅值 γ 之间的关系符合双曲线规律：

$$\tau = \frac{\gamma}{a + b\gamma} \quad (5)$$

式中： a 、 b 分别为试验参数，可通过测得试验数据

进行拟合。

土的动剪切模量定义为

$$G = \tau / \gamma \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5) 有

$$G = \frac{1}{a + b\gamma} \quad (7)$$

令

$$G_{\max} = 1/a \quad (8)$$

$$\gamma_r = a/b \quad (9)$$

由式 (6) 可知， $1/G-\gamma$ 呈直线关系，其截距 $a = 1/G_{\max}$ ， γ_r 为该线的截距 a 和斜率 b 的比值。

对于阻尼比 λ ，由于 Hardin-Drnevich 双曲线模型对试验结果的拟合均不理想。为此，工程上通常采用如下的经验公式：

$$\lambda = \lambda_0 (1 - G/G_{\max})^{n\lambda} \quad (10)$$

按照上述公式对测得的数据进行拟合，在相同有效应力下，取 3 组中测得数值位于中间的一组进行拟合，拟合后的曲线如图 7 所示。从图中可以看出，有效应力较小时，有效应力的改变对阻尼比的影响比较明显；有效应力较大时，有效应力的改变对动剪切模量比的影响比较明显。例如，从 100 kPa 变化到 200 kPa 时，阻尼比变化大于有效应力从 200 kPa 到 400 kPa 时阻尼比的变化，而从 100 kPa 变化到 200 kPa 时，动剪切模量比变化小于有效应力从 200 kPa 到 400 kPa 时阻尼比的变化，即随着固结有效应力的增加，阻尼比增加速率逐渐减小。从图中还可以看出，强风化花岗岩的阻尼比比起常见的黏土、粉土、松砂都要小一些。

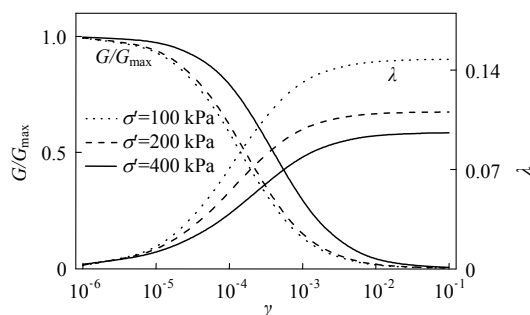


图 7 拟合曲线
Fig.7 Fitting curves

4 结 论

- (1) 随着剪应变的增加，共振频率随之减小，剪切模量减小，阻尼比增大。
- (2) 随着固结有效应力的增加，强风化花岗岩

剪切模量随之增大, 阻尼比随之减小。

(3) 动剪切模量与固结时的有效应力大小有关, 反映了动剪切模量与岩石的骨架性质有关, 但与试样中孔隙水含量关系不大; 阻尼比不但与固结时的有效应力有关, 且与孔隙水压力的大小也有关系, 随着固结有效应力的增加, 阻尼比增加速率逐渐放缓。

参 考 文 献

- [1] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils[J]. **Design Equations and Curves**, ASCE, 1972, 98(6): 6 - 7.
- [2] 孙静. 岩土动剪切模量阻尼试验及应用研究[博士学位论文 D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2004.
- [3] 蒋通, 邢海灵. 围压对土动剪模量和阻尼比影响的简化计算方法[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(7): 1432 - 1437.
JIANG Tong, XING Hai-ling. A simple method considering effects of confining pressure on dynamic shear module and damping ratio[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1432 - 1437.
- [4] 柏立懂. 荷载历史对砂土最大剪切模量影响的共振柱试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(11): 2366 - 2374.
BAI Li-dong. Effects of loading history on maximum shear modulus of sand by resonant column tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(11): 2366 - 2374.
- [5] 张建民, 王稳祥. 振动频率对饱和砂土动力特性的影响[J]. **岩土工程学报**, 1990, 12(1): 89 - 97.
- [6] ÇABALAR A F. Dynamic properties of various plasticity clays[J]. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, B(14): 1 - 11.
- [7] KALLIOGLOU P, TIKI T H, PITILAKIS K. Shear Modulus and damping ratio of cohesive soils[J]. **Journal of Earthquake Engineering**, 2008, 12: 879 - 913.
- [8] 陈国兴, 刘雪珠. 南京及邻近地区新近沉积土的动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(8): 1403 - 1410.
CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu. Testing study on ratio of dynamic shear module and ratio of damping for recently deposition soils in Nanjing and its neighboring areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1403 - 1410.
- [9] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. **地震工程与工程振动**, 2000, 20(4): 133 - 139.
YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 20(4): 133 - 139.
- [10] 曹成效, 刘乐军, 李培英, 等. 循环荷载作用下粉土的动力学特性[J]. **海洋科学进展**, 2007, 25(1): 54 - 62.
CAO Cheng-xiao, LIU Le-jun, LI Pei-ying, et al. Dynamic characteristics of silty soil under cyclic loadings[J]. **Advances in Marine Science**, 2007, 25(1): 54 - 62.
- [11] 蔡辉腾, 李英民, 欧秉松. 福州地区典型土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(2): 361 - 365.
CAI Hui-teng, LI Ying-min, OU Bing-song. Testing study of dynamic shear modulus and damping ratio of typical soils in Fuzhou area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 361 - 365.
- [12] 何晓民, 陈志强, 张婷. 武汉砂土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. **世界地震工程**, 2010, 26(增刊): 41 - 45.
HE Xiao-min, CHEN Zhi-qiang, ZHANG Ting. Experimental studies on dynamic shear modulus and damping ratio of sandy soil in Wuhan[J]. **World Earthquake Engineering**, 2010, 26(Supp.): 41 - 45.
- [13] American Society for Testing and Materials. D4015 - 92 Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method[S]. United States: ASTM STP, 2000.
- [14] YOUN J U, CHOO Y W, KIM D S. Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(10): 1426 - 1438.