

DOI: 10.11779/CJGE201701005

# 荷载频率对动模量阻尼比影响的试验研究

李瑞山, 陈龙伟\*, 袁晓铭, 李程程

(中国地震局工程力学研究所中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 目前荷载频率对动模量阻尼比影响规律尚无较为统一认识, 定量结果尚少。采用新型高精度动三轴仪试验, 研究不同荷载频率对典型砂土和黏土动模量阻尼比影响问题, 并以此为基础从对地震动影响角度讨论考虑荷载频率相关动模量阻尼比必要性。结果表明: 对砂土而言, 荷载频率对其动剪切模量影响不大, 随着加载频率的增大, 阻尼比略有减小, 但差别基本可以忽略; 对黏土而言, 荷载频率对其动剪切模量和阻尼比有重要影响, 随着振动频率的增加, 动剪切模量增大, 阻尼比减小; 黏土参考剪应变随荷载频率增大而增大, 二者呈递增的指数函数, 当 $f \leq 1\text{ Hz}$ 时, 影响十分明显, 当 $1\text{ Hz} < f \leq 3\text{ Hz}$ 时, 有一定影响, 当 $f > 3\text{ Hz}$ 时, 影响不明显; 黏土最大阻尼比随频率的增大而减小, 二者呈递减的指数函数, 当 $f \leq 10\text{ Hz}$ 时, 影响较为明显, 当 $f > 10\text{ Hz}$ 时, 影响程度显著减弱; 采用两组频率下模量阻尼比曲线计算黏土层地震动, 地表加速度峰值和反应谱差别很大, 且随着震动增强而显著增大, 说明考虑黏土层动模量阻尼比的荷载频率相关性是十分必要的。

**关键词:** 荷载频率; 剪切模量; 阻尼比; 地震反应分析

中图分类号: TU435; TU411.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)01-0071-10

作者简介: 李瑞山(1987-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: lrshan22@hotmail.com.

## Experimental study on influences of different loading frequencies on dynamic modulus and damping ratio

LI Rui-shan, CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, LI Cheng-cheng

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration; Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** There is not a consistent conclusion on the influences of loading frequency on dynamic modulus and damping ratio, and the quantitative results are few. Through a series of tests using the new cyclic triaxial (CT) device with high precision, the main objective of which is to evaluate the influences of excitation frequency on the shear modulus and damping ratio of typical sand and clay samples are studied. The necessity of considering the frequency-dependent modulus and damping ratio is discussed from the perspective of ground motion on the basis of the tests. The results show that: (1) For the sand, the shear modulus is almost independent of the loading frequency. The damping ratio slightly decreases due to the increase of vibration frequency, but the deviations can be ignored. (2) For the clay soil, the loading frequency has significant influences on its shear modulus and damping ratio. The shear modulus increases, but the damping ratio decreases with the increase of the loading frequency. (3) The CT tests indicate measurable growth in the reference shear strain  $\gamma_r$  with the loading frequency in the form of an increasing exponential function. The dynamic properties are very sensitive to the excitation frequency when  $f \leq 1\text{ Hz}$ . In the range of  $1\text{ Hz} < f \leq 3\text{ Hz}$ , the influences are clear. When the frequency exceeds the upper band of 3 Hz, the shape is nearly on the same level. (4) The maximum damping ratio  $D_{\max}$  decreases with the vibration frequency in a form of exponential function. When the frequency is lower than 10 Hz, the influences are obvious. If  $f > 10\text{ Hz}$ , the influences gradually vanish. (5) The ground motion of a simplified ideal clay site is calculated using two sets of shear modulus and damping ratio curves under two different test loading frequencies, 0.1 Hz and 3 Hz. The peak ground accelerations and the response spectra show serious dissimilarities, which are increasingly severe as the intensity of ground shaking is enhanced. This study therefore demonstrates that considering the frequency correlation of shear modulus and damping ratio is of extreme necessity.

**Key words:** loading frequency; shear modulus; damping ratio; seismic response analysis

基金项目: 地震行业专项(201408020-03); 中国地震局创新团队发展计划(2016PIRTCEA07); 黑龙江省科学基金资助项目(LC2013C14)

收稿日期: 2015-09-01

\*通讯作者 (E-mail: chenlw@iem.ac.cn)

## 0 引言

土的动力学性能中, 动模量与阻尼比是首要参数, 也是土体地震反应分析必备参数<sup>[1-2]</sup>。在众多土层地震反应分析方法当中, 以 SHAKE 等<sup>[3]</sup>为代表的一维等效线性化方法使用最为广泛。等效线性化方法的计算结果受两个关键因素的影响: ①各土层之间的波阻抗; ②各层土的动模量比和阻尼比。尽管地震荷载频率成分分布在一定频宽范围内, 但在实际地震反应分析当中却很少考虑振动频率对动模量阻尼比的影响, 比如 Seed 等的方法<sup>[4]</sup>。虽然已有学者从输入地震动的角度出发对传统的等效线性化方法进行了改进, 提出了若干考虑频率相关性的等效线性化方法<sup>[5-7]</sup>, 但这些修改方法均只是将最大剪应变折减系数由统一的 0.65 修改成与频率相关的不同折减系数, 实际上并未真正考虑荷载不同频率下土体动模量阻尼比的变化。

自 20 世纪 90 年代以来, 不断有学者就振动频率对土体动模量和阻尼比的影响给出了一些零星的研究成果, 没有专门试验研究。但不同学者给出的频率对动模量阻尼比的影响规律不尽相同, 尤其是阻尼比问题, 一些结论彼此矛盾。同时, 实际进行土层地震反应分析时所采用的土体剪切模量比和阻尼比曲线通常由共振柱 (RC) 试验给出, 而共振柱的试验频率一般都在 30 Hz 以上, 这一结果与地震加速度常见卓越频率内动模量阻尼比的关系尚不得知。另外, 讨论荷载频率对动模量阻尼比影响问题, 所谓影响大小并不决定这一问题本身, 而是取决于与荷载频率动模量阻尼比对地震动的影响大小问题, 而后一问题的研究尚未见报道。

本文首先对现有研究成果进行总结对比, 然后采用新型高精度动三轴仪, 对典型砂土和黏土进行了不同振动频率下的动模量阻尼比试验, 力图获取荷载频率对动模量阻尼比影响的规律和定量结果, 最后从对地震动影响角度评估考虑荷载频率相关动模量阻尼比问题的必要性。

## 1 现有研究成果

荷载频率是动荷载 (地震荷载) 组成要素之一, 由于土体的非线性, 其动力参数会因为施加荷载频率的变化而有不同表现。Bolton 等<sup>[8]</sup>和 Iwasaki 等<sup>[9]</sup>使用循环扭转剪切试验和共振柱试验对干砂和饱和砂进行了测试, 指出砂土的动模量不随加载频率的变化而发生明显的改变。张建民等<sup>[10]</sup>和 Wichtmann 等<sup>[11]</sup>使用不同的试验设备在不同的加载频率范围内也给出了类似的结论。Yasuhara 等<sup>[12]</sup>和 Teachavorasinsuk 等<sup>[13]</sup>认为

振动频率对重塑软黏土动模量几乎没有影响, 但是何昌荣<sup>[14]</sup>通过动三轴试验得出结论是加载频率对砂性土动力特性影响不大, 对黏性土有明显影响, 而 Matesic 等<sup>[15]</sup>的结论却是砂土和黏土的剪切模量都会随着加载频率的增大而增大。

陈存礼等<sup>[16]</sup>、王建荣等<sup>[17]</sup>指出频率的增长会使黄土的动模量和阻尼比均有所增大, 但动模量受到的影响程度非常有限, 而阻尼比呈现出明显增大的趋势, 如图 1, 2 所示。徐学燕等<sup>[18]</sup>对冻结粉质黏土进行了大量的低温动三轴试验, 结果表明: 振动频率愈大, 动剪切模量愈大, 阻尼比愈小, 但频率的影响远小于冻土负温的影响。

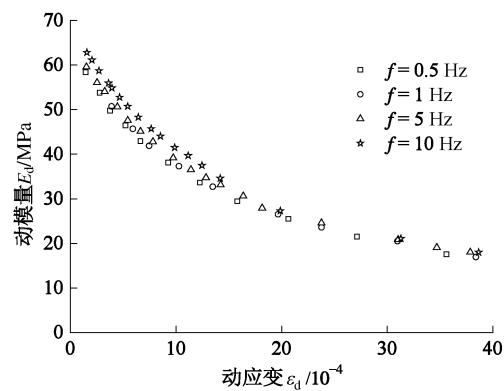


图 1 振动频率对原状黄土试样动模量的影响<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Influences of vibration frequency on dynamic modulus of loess samples<sup>[17]</sup>

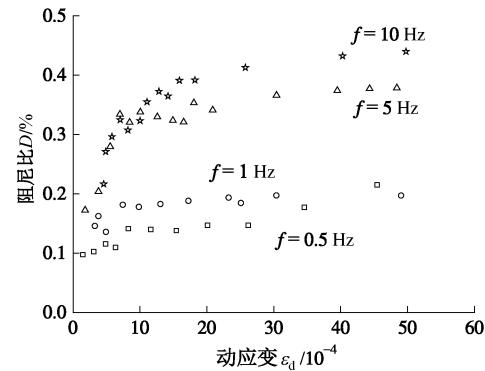


图 2 振动频率对原状黄土试样阻尼比的影响<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Influences of vibration frequency on damping ratio of loess samples<sup>[17]</sup>

张茹等<sup>[19]</sup>给出了频率对饱和黏土动力特性影响, 结果显示动模量和阻尼比均随振动频率的增大而增大, 但其中动模量增大幅度非常有限, 如图 3, 4 所示。但是, 郑刚等<sup>[20]</sup>的试验结果却显示振动频率对黏土动模量的影响非常明显, 不可忽略。黎冰等<sup>[21]</sup>通过室内动三轴试验在 0.02~1.0 Hz 范围内研究了振动频率对黏土与 EPS 颗粒混合轻质土动力特性的影响, 指出振

动频率对其动力特性有一定影响, 频率越大, 动模量越大, 阻尼比越小。D'Onofrio 等<sup>[22]</sup>和 Shibuya 等<sup>[23]</sup>对不同类型的黏性土进行了试验, 表明在 0.001~200 Hz 范围内, 剪切模量随振动频率的增大而增大。Khan 等<sup>[24]</sup>的非共振试验结果也表明振动频率对剪切模量有明显的影响。

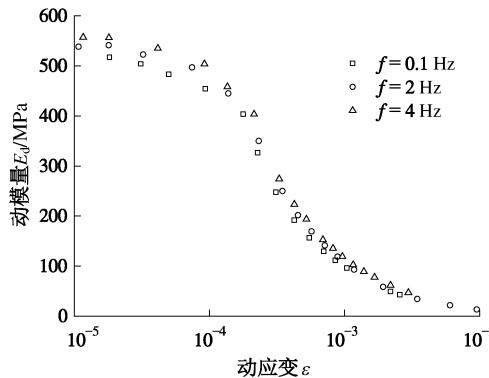


图 3 振动频率对饱和黏土试样动模量的影响<sup>[19]</sup>

Fig. 3 Influences of vibration frequency on dynamic modulus of saturated clay samples<sup>[19]</sup>

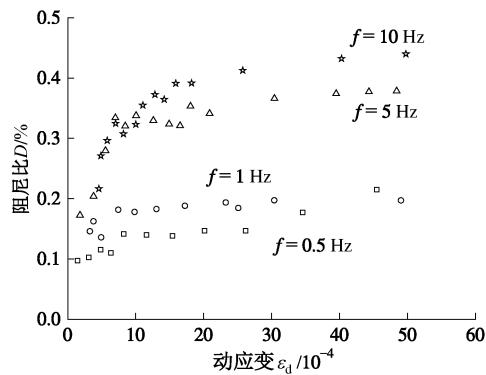


图 4 振动频率对饱和黏土试样阻尼比的影响<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Influences of vibration frequency on damping ratio of saturated clay samples<sup>[19]</sup>

综合上述各学者的试验结果及结论, 可以得出以下 4 点基本认识: ①振动频率对土体动力特性的影响尚未有形成比较统一的认识, 尤其是对黏性土; ②多数结果表明黏性土动力特性受振动频率的影响较无黏性土更明显; ③绝大多数试验结果显示土体动模量随振动频率的增大而增大的趋势, 但增幅大小和模式尚不清晰; ④振动频率对阻尼比的影响比对动模量的影响要复杂, 影响幅度也更大。

以上的荷载频率对土体动力特性影响研究, 其重点都放在动强度和变形方面, 还没有专门针对荷载频率对动模量阻尼比影响的研究成果。事实上, 荷载频率对动模量阻尼比影响的研究所需要的设备有其特殊性, 要求设备具有施加地震加速度波常见卓越频段荷载的能力, 同时设备动应变和应力量测精度要高, 也

要求所能完成的动模量阻尼比试验应变范围要宽, 这样才能较为准确描述动模量阻尼比随应变变化的非线性规律和模式, 以往的很多试验在这几个方面都或多或少存在局限。

## 2 动三轴仪试验

### 2.1 试验设备

试验采用英国 GDS 公司生产的新型伺服电机控制式动三轴仪 (DYNTTS)。这一设备是应 2012 年中国地震局工程力学研究所提出的指标和要求, 由英国 GDS 公司专门研制的。由于采用新型伺服电机控制, 该设备具有在地震波常见频段内具有高精度和宽应变的特点。该系统主要由以下 5 部分组成: ①用于对轴向应力和轴向位移动态控制的主机; ②用于围压控制的压力体积控制器; ③用于设置反压和测量体积变化的控制器; ④用于采集和传输数据的 DCS; ⑤系统控制终端。DYNTTS 将三轴压力室和动力驱动器合为一体, 采用动态伺服电机从压力室底座施加轴向力和轴向位移, 可以非常精确地在动态试验中控制轴向位移和轴向力, 因而可以对土体动强度、动模量及阻尼比等动力特性进行准确测试。本文实验所采用动三轴系统主要性能参数如表 1。试件尺寸大小为直径  $D=50$  mm, 高度  $H=100$  mm。加载波形采用正弦波。

### 2.2 试验土样

试验主要目的是研究振动频率对无黏性土和有黏性土动模量和阻尼比的影响。选取标准砂作为无黏性土代表, 选取一种典型黏土作为有黏性土代表。试验用标准砂的物理力学性质见表 2。砂样制备直接在三轴仪上完成, 共分 5 层均匀制样, 严格控制每层厚度为 20 mm。为了减少试验结果影响因素, 宜采用干砂进行试验, 但干砂制样难度高, 离散型大, 成样质量无法保证。在实际试验时, 先在每层标准砂样中加入 1 mL 水 (含水率约为 1.63%), 搅拌均匀再进行制样, 这样既保证了成样质量, 又方便操作。

试验所用黏土取自南宁市轨道交通 4 号线一期工程, 取样深度 6.2~6.4 m, 表面呈现黄色。经测定其天然含水率为 34.48%, 天然重度为 1.95 g/cm<sup>3</sup>, 换算得到其天然干密度为 1.45 g/cm<sup>3</sup>, 土样的其他物理力学性质见表 3。将所取天然土样烘干、粉碎后过 1 mm 孔筛, 装入密闭容器中备用。按照《土工试验规程》(SL237—1999) 的要求进行重塑黏土样制备。将过筛后的干黏土样按照设计含水率 23% 用喷雾器均匀洒水, 并不断搅拌。将润湿后的土样用保鲜膜包裹, 并置于密闭容器中 24 h 以上, 使土样充分潮湿, 水分扩散也更加均匀。黏土重塑样的具体成型是在对开模中

表 1 DYNTTS 动三轴系统主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of DYNTTS advanced dynamic triaxial testing system

轴向位移			轴向力			正常工作	最大试样	额定围压	最大采样
量程/mm	精度/ $\mu\text{m}$	分辨率/ $\mu\text{m}$	量程/kN	精度/N	分辨率/N	频率/Hz	尺寸/mm	/MPa	点数
90	0.7/0.07%	0.208	10	1/0.1%	0.4	$\leq 5\text{Hz}$	150	1.0	1000

表 2 试样用标准砂的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of test standard sand

材料	颗粒比重 $G_s$	最大干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最小干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	相对密度 $D_r$
标准砂	2.644	1.679	1.464	1.44	0.92	50%

表 3 试验用重塑黏土的物理力学性质

Table 3 Physical and mechanical properties of remolded clay

材料	颗粒比重 $G_s$	塑限含水率 $w_p/\%$	液限含水率 $w_l/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	重塑含水率 $w/\%$	重塑密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
黏土	2.661	22.0	55.7	33.7	23.0	1.80

采用锤击法实现, 按照设计密度  $1.80 \text{ g/cm}^3$  (对应干密度为  $\rho_d = 1.46 \text{ g/cm}^3$ ) 分 5 层均匀制样, 严格控制每层厚度为  $20 \text{ mm}$ 。

### 2.3 试验方案

试验采用应变控制, 最小应变取  $0.01\%$ , 最大应变根据试样刚度取  $1.0\% \sim 1.5\%$ , 对应的轴向位移为  $0.01 \sim 1.0$  ( $1.5$ )  $\text{mm}$ 。试验采用逐级加载方式, 应变由小到大。每级振动加载完毕, 先用固结状态压力对土样稳定  $15 \text{ min}$  再进行下一级测试。固结围压分别取  $\sigma_0 = 100, 200, 300 \text{ kPa}$ , 取固结应力比  $K_c = 1.0$ 。本文研究振动频率对土体动模量和阻尼比的影响, 主要目的是检验采用不同频率试验结果对土层地震反应分析有什么影响。所以, 循环加载频率  $f=0.1 \sim 5 \text{ Hz}$ , 具体取  $4 \sim 6$  个频率值, 这一频率范围几乎完整包含了一般地震动的卓越频率。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 试验数据处理及分析方法

DYNTTS 动三轴仪通过安装于终端操作系统中的 GDSLAD 软件来控制。它可以通过对监测变量的换算直接输出振动过程中作用于土样的剪应力  $\tau$  和土样产生的剪应变  $\gamma$ 。具体换算公式如下:

$$\tau = q/2 = (\sigma_a - \sigma_r)/2 \quad , \quad (1)$$

$$\gamma = (\varepsilon_a + \varepsilon_r) \times 2/3 \quad , \quad (2)$$

式中,  $q = (\sigma_a - \sigma_r)$  表示土样所受偏应力,  $\sigma_a$  和  $\sigma_r$  分别为轴向应力和环向应力,  $\varepsilon_a$  和  $\varepsilon_r$  分别为轴向应变和环向应变。

根据一个振动周期内的应力、应变值便可以得到该循环的剪应力-剪应变滞回曲线。中等密实度的标准砂在  $\sigma_0=200 \text{ kPa}$  时, 不同剪应变幅水平下的滞回圈如图 5 所示。从图当中可以明显看出: 在振动水平相对较小时 ( $\gamma \leq 0.3\%$ ), 滞回曲线形状比较对称; 随

着振动应变幅的增大, 滞回曲线加-卸载两半部分表现出越来越明显的不对称性, 呈尖叶状, 正向加-卸载半周 ( $\sigma_a \geq \sigma_r$ ) 刚度明显大于反向加-卸载半周 ( $\sigma_a < \sigma_r$ )。

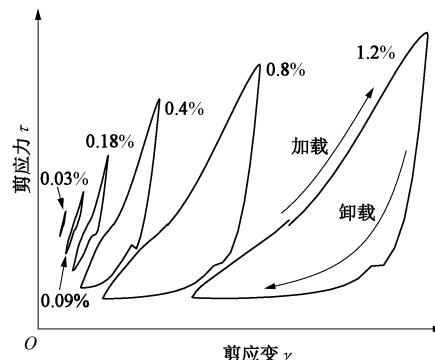


图 5 不同应变幅水平下的典型滞回曲线形态

Fig. 5 Typical hysteresis loops under different shear strain level

根据周期荷载作用形成的剪应力-剪应变滞回曲线可以求得该应变水平下的等效动剪切模量  $G$  和阻尼比  $D$ 。图 6 所示为一理想的应力-应变滞回圈, 但其可以代表图 5 所示的一般状态。等效动剪切模量  $G$  和阻尼比  $D$  通过下式来求解:

$$G = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\gamma_1 - \gamma_2} \quad , \quad (3)$$

$$D(\%) = \frac{1}{2\pi} \frac{W_D}{W_{S(OAB)} + W_{S(OA'B')}} \times 100\% \quad . \quad (4)$$

式中  $W_D$  为滞回圈的面积, 代表在一个循环过程中耗散的能量;  $W_S$  为阴影三角形的面积, 代表在循环中储存的最大应变能。在图 6 和式 (4) 当中, 将弹性应变能  $W_S$  区分为正向加-卸载半周的应变能  $W_{S(OAB)}$  和反向加-卸载半周应变能  $W_{S(OA'B')}$ , 这一改进对图 5 中大应变水平下的尖叶形滞回圈阻尼比的求解具有非常好的适用性, 有效地克服了其正、反向加-卸载两半周模量相差悬殊的缺陷。

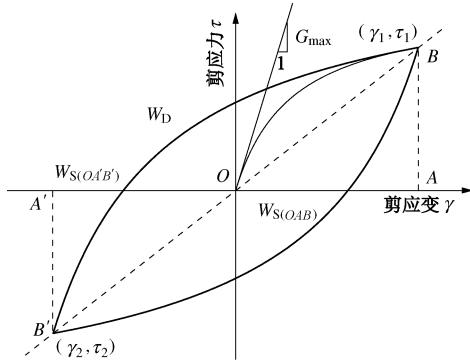


图 6 等效剪切模量和阻尼比示意图

Fig. 6 Equivalent shear modulus and damping ratio according to hysteresis strain-stress relation

通常认为土体的等效动剪切模量  $G$  和动应变幅  $\gamma$  之间服从双曲线关系:

$$G = \frac{1}{a + b\gamma}, \quad (5a)$$

$$G/G_{\max} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r}, \quad (5b)$$

式中, 参考剪应变  $\gamma_r = a/b$  为归一化模量比曲线的唯一参数,  $a=1/G_{\max}$ ,  $b = 1/\tau_{\text{ult}}$ ,  $G_{\max}$  表示小应变 ( $< 1 \times 10^{-6}$ ) 剪切模量,  $\tau_{\text{ult}}$  表示最大剪应力幅值。阻尼比与动应变幅  $\gamma$  之间的关系可用下式表达:

$$D = D_{\max} \left( 1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)^n, \quad (6)$$

式中, 最大阻尼比  $D_{\max}$  和  $n$  为两个拟合参数。

### 3.2 荷载频率对砂土动模量阻尼比的影响

本文用标准砂代表无黏性土。相对密度  $D_r=50\%$  的标准砂在固结围压  $\sigma_0=100 \text{ kPa}$ 、固结应力比  $K_c=1.0$  时的动剪切模量随动剪应变变化曲线如

图 7 所示, 总共给出了 5 个不同加载频率  $f$  下的  $G_d - \gamma_d$  关系。从图 7 中可以看出: 等效剪切模量随剪应变幅的增大而减小, 符合一般规律; 循环动荷载加载频率对砂土动剪切模量几乎没有影响, 仅在 0.1%~0.5% 的动剪应变范围内, 动剪切模量随着加载频率的增大略微有增大的趋势, 这与其他学者的研究成果一致<sup>[8-11, 14]</sup>。

图 8 所示结果为试验所得标准砂阻尼比随动剪应变幅的变化曲线, 其试验条件与图 7 一致。从图 8 中可以看出: 阻尼比随着剪应变幅的增大而增大, 符合一般规律; 循环动荷载加载频率对砂土阻尼比有一定影响, 阻尼比随加载频率的增大而减小, 但变化幅度不是特别显著。

总体而言, 在一般地震动的卓越频率范围内, 砂土动力特性受振动频率影响不大。在进行土层地震反应分析时, 采用上述任一频率下的试验结果应不会对最终分析结果有实质性影响。

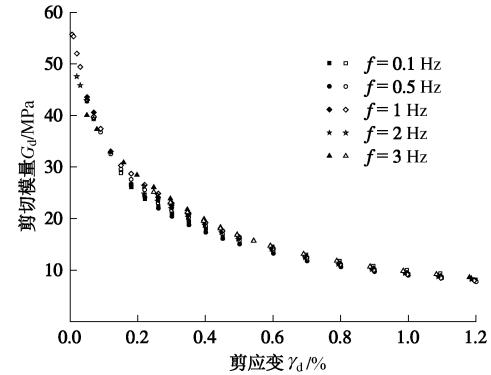
图 7 不同荷载频率下标准砂  $G_d - \gamma_d$  曲线

Fig. 7  $G_d - \gamma_d$  relation curves of standard sand under different loading frequencies for case of  $\sigma_0 = 100 \text{ kPa}$  and  $K_c = 1.0$

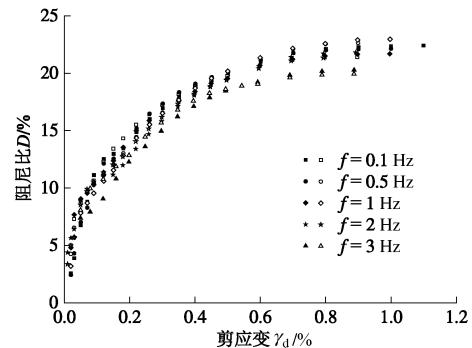
图 8 不同荷载频率下标准砂  $D - \gamma_d$  曲线

Fig. 8  $D - \gamma_d$  relation curves of standard sand under different loading frequencies for case of  $\sigma_0 = 100 \text{ kPa}$  and  $K_c = 1.0$

### 3.3 荷载频率对黏土动模量阻尼比的影响

本文用黏土代表有黏性土。固结围压  $\sigma_0=200 \text{ kPa}$ 、固结应力比  $K_c=1.0$  时, 其动剪切模量随动剪应变幅变化曲线如图 9 所示, 总共给出了 6 个不同加载频率下的  $G_d - \gamma_d$  关系。从图 9 中可以明显看出, 加载频率对黏土的等效动剪切模量具有显著的影响, 随着振动频率的增大, 动剪切模量不断增大, 这与部分学者的试验结论较为一致<sup>[15, 20, 22, 23]</sup>。在不同动剪应变水平下, 动模量与荷载频率的关系如图 10。从图 10 中可以看出, 在相同的剪应变幅条件下, 动模量与加载频率之间呈现出较好的线性相关性。

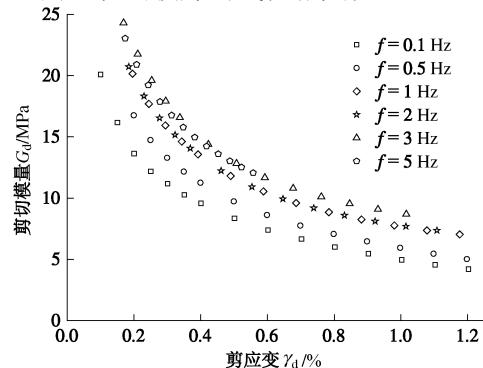
图 9 不同荷载频率下黏土  $G_d - \gamma_d$  系曲线

Fig. 9  $G_d - \gamma_d$  relation curves of clay under different loading frequencies for case of  $\sigma_0 = 200 \text{ kPa}$  and  $K_c = 1.0$

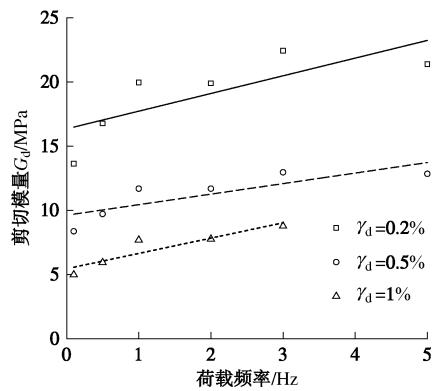


图 10 不同应变水平下荷载频率对动剪切模量的影响

Fig. 10 Influences of loading frequency on shear modulus under different shear strain levels

图 11 所示结果为试验所得黏土阻尼比随动剪应变幅的变化曲线, 其试验条件与图 9 一致。从图 11 当中可以明显看出, 加载频率对黏土的阻尼比也具有十分显著的影响, 随着振动频率的增大, 阻尼比不断减小, 这说明加载越缓慢, 所得的应力 - 应变滞回圈越饱满。与张茹等<sup>[19]</sup>所给结果(图 4)中荷载频率增加阻尼比曲线变化不定的情况相比, 本文试验结果规律相更明显, 也更具有可解释性和合理性。

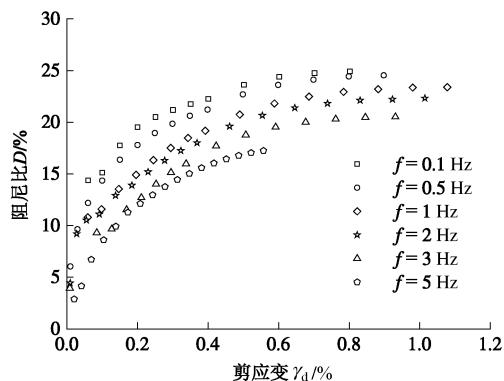
图 11 不同荷载频率下黏土  $D - \gamma_d$  系曲线

Fig. 11  $D - \gamma_d$  relation curves of clay under different loading frequencies for case of  $\sigma_0 = 200\text{ kPa}$  and  $K_c = 1.0$

在不同动剪应变水平下, 阻尼比与振动频率的关系如图 12。从图 12 中可以看出, 在相同的剪应变幅条件下, 阻尼比与加载频率之间呈现出非常好的线性相关性, 用线性拟合所得的决定性系数分别为  $R_{0.08}^2 = R_{0.4}^2 = 0.89$  和  $R_{0.8}^2 = 0.97$ , 3 个下标分别代表图中的 3 个剪应变水平。

下面按式(5)所给双曲线形式对图 9 所示结果进行归一化处理。当振动幅值极小时 ( $\gamma_d < 1 \times 10^{-6}$ ), 完全可以认为土体处于弹性状态, 对应的最大剪切模量  $G_{\max}$  基本不受振动频率的影响, 这与陈存礼、胡再强<sup>[16]</sup>的观点一致。这样, 对各个振动频率下的  $G_d - \gamma_d$

关系进行拟合时, 需要使式(5a)中的拟合参数  $a$  值相同, 所以原本简单的曲线拟合变成了一个最优解寻求问题。最终结果如表 4, 归一化的  $G/G_{\max} - \gamma_d$  曲线如图 13。从表 4 中的决定性系数可知, 各频率下模量与剪应变关系可用式(5)中双曲线模型很好地表示。图 13 中, 归一化模量比之间的差值随着剪应变的增大先增大后减小, 当  $\gamma_d < 3.5 \times 10^{-4}$ , 最大相差不超过  $10\%G_{\max}$ ; 当  $\gamma_d$  约为  $2.5 \times 10^{-3}$  时, 差额达到最大, 接近  $20\%G_{\max}$ ; 此后随着剪应变的增大, 差值逐渐减小, 但在图示应变范围内, 差值一直在  $10\%G_{\max}$  以上。

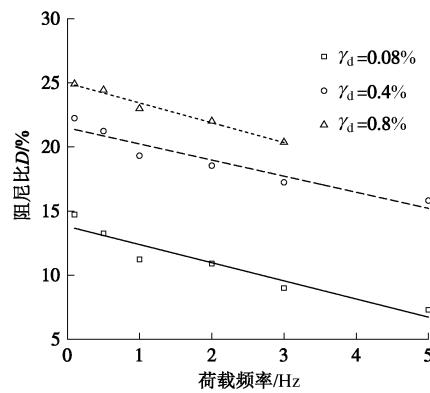


图 12 不同应变水平下荷载频率对动剪切模量的影响

Fig. 12 Influences of loading frequency on damping ratio under different shear strain levels

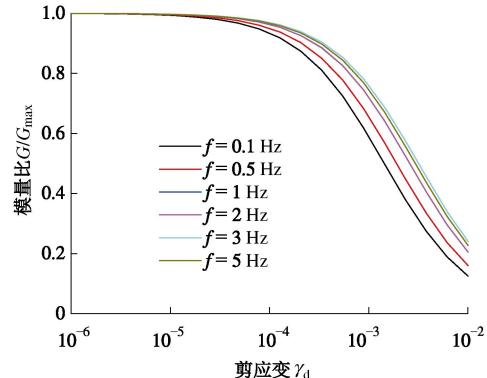


图 13 荷载频率对黏土模量比的影响

Fig. 13 Influences of loading frequency on normalized shear modulus of clay samples

表 4 剪切模量归一化参数

Table 4 Parameters for normalizing the shear modulus

频率 / Hz	$a$ 值	$b$ 值	$\gamma_r / \%$	$R^2$
0.1	0.0286	19.95	0.14	0.98
0.5	0.0286	15.00	0.19	0.99
1.0	0.0286	11.06	0.26	0.99
2.0	0.0286	11.06	0.26	0.99
3.0	0.0286	9.01	0.32	0.99
5.0	0.0286	9.72	0.29	0.99

表 4 当中, 拟合参数  $b=1/\tau_{ult}$ , 表征土样极限剪切

强度的大小,  $b$  值随着振动频率的增大而减小, 说明应变率越大, 试样强度测试值越高, 符合普遍认识。图 14 所示为  $b$  值与荷载频率之间的关系, 从图中可以明显看出: 当荷载频率  $f \leq 1 \text{ Hz}$  时,  $b$  值随着频率的增大而快速减小, 说明在这一范围内, 加载应变率的增大会使土样剪切强度明显升高; 当  $1 \text{ Hz} < f \leq 3 \text{ Hz}$  时, 随加载频率的增加,  $b$  值有所减小, 但幅度不大; 当  $f > 3 \text{ Hz}$  时, 加载频率对  $b$  值影响很小。

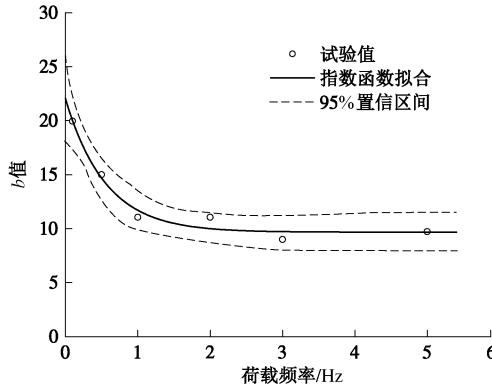
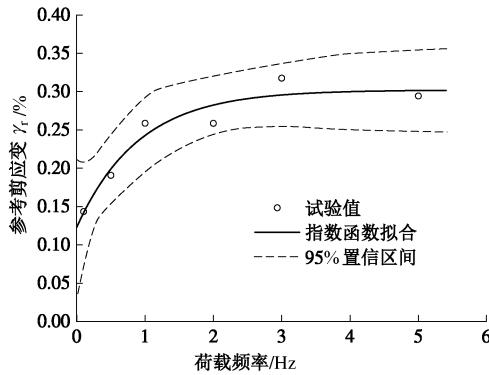
图 14  $b$  值随荷载频率变化曲线Fig. 14 Values of  $b$  under different loading frequencies图 15 参考剪应变  $\gamma_r$  随荷载频率的变化曲线Fig. 15 Values of  $\gamma_r$  under different loading frequencies

表 4 中还给出了不同荷载频率下的参考剪应变  $\gamma_r$ , 该参数唯一地确定了归一化模量比曲线, 其物理意义为模量比  $G/G_{\max}=0.5$  时所对应的剪应变值。图 15 所示为不同荷载频率下试验得到的  $\gamma_r$  值, 从中可以明显看出: 当荷载频率  $f \leq 1 \text{ Hz}$  时,  $\gamma_r$  值随着频率的增大而迅速增大, 说明在这一范围内, 模量比受荷载频率影响明显; 当  $1 \text{ Hz} < f \leq 3 \text{ Hz}$  时, 随加载频率的增加,  $\gamma_r$  值有所增大, 但幅度有限; 当  $f > 3 \text{ Hz}$  时, 加载频率对  $\gamma_r$  值影响不明显。

下面按式(6)对图 11 所示阻尼比进行拟合, 其中模量比采用图 13 结果。最终拟合得到的不同荷载频率下阻尼比随剪应变变化曲线如图 16。图中不同振动频率下阻尼比之间的差值随着剪应变的增大先增大后

减小, 当  $\gamma_d < 5 \times 10^{-5}$  时, 阻尼比差值最大不超过 2.5%; 当  $\gamma_d$  约为  $1.5 \times 10^{-3}$  时, 差额达到最大, 接近 8%; 此后随着剪应变的增大, 差值逐渐减小, 但在图示应变范围内, 差值一直在 5% 以上。

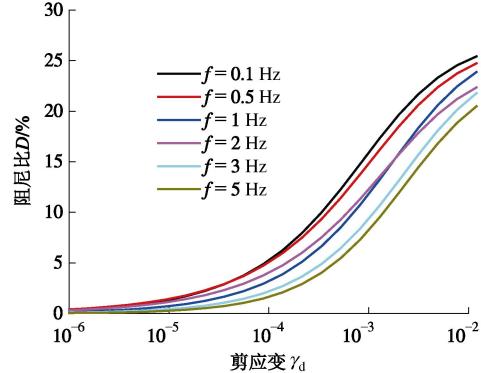
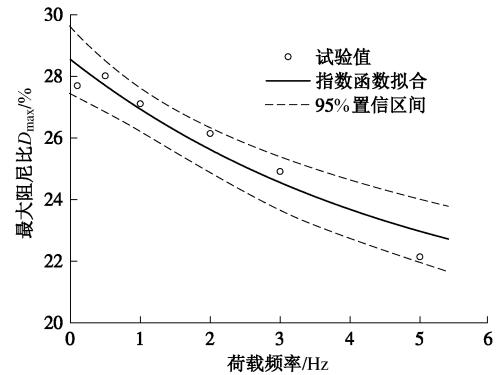


图 16 荷载频率对黏土标准化阻尼比的影响

Fig. 16 Influences of loading frequency on normalized damping ratio of clay samples

综合以上分析可知, 荷载频率对黏土的等效动剪切模量和阻尼比具有十分显著的影响, 加载频率越小, 应变开展越充分, 滞回曲线越饱满, 表现为剪切模量越小而阻尼比越大。

在式(6)当中, 最大阻尼比  $D_{\max}$  相比参数  $n$  更具有实际的物理意义, 且只要  $n$  取值在某一合理范围内时, 总可以得到良好的拟合结果。为了减少影响参数, 将  $n$  取定值 0.65 后重新对阻尼比按式(6)进行拟合, 此时最大阻尼比  $D_{\max}$  为唯一一个随荷载频率变动的参数。当荷载频率很大时, 采用共振柱试验得出的最大阻尼比  $D_{\max,f=30}=20\%$ , 最终得到的  $D_{\max}-f$  图像如图 17。从图中可以明显看出: 当荷载频率  $f \leq 20 \text{ Hz}$  时,  $D_{\max}$  随频率的增大而显著减小, 说明在这一频率范围内土样阻尼特性受荷载频率影响较为明显; 当荷载频率  $f > 10 \text{ Hz}$  时,  $D_{\max}$  随频率的增大而继续有所减小, 但减小幅度明显减弱, 最终逼近于 20%。

图 17 最大阻尼比  $D_{\max}$  随荷载频率的变化Fig. 17 Values of  $D_{\max}$  under different loading frequencies

综合以上分析可以看出, 荷载频率对动剪切模量

比和阻尼比的影响程度都是随着频率的增大而减小，但频率对二者的影响模式又不完全相同。表 5 给出了频率在 0.01~30 Hz 范围内，按拟合得到的指数公式计算出的  $b$  值和参考剪应变  $\gamma_r$  值以及最大阻尼比  $D_{\max}$ 。

表 5 不同荷载频率下的  $b$ ,  $\gamma_r$  和  $D_{\max}$  值

Table 5 Calculated values of  $b$ ,  $\gamma_r$  and  $D_{\max}$  under different loading frequencies

频率 $f$	$b$ 值	$\gamma_r$ /%	$D_{\max}$
0.01	21.83	0.12	0.29
0.1	20.01	0.14	0.28
0.5	14.69	0.20	0.28
1	11.71	0.24	0.27
3	9.72	0.30	0.25
10	9.67	0.30	0.21
30	9.67	0.30	0.20

#### 4 考虑荷载频率对地震动计算结果影响的初步评估

以上分析中得到了荷载频率对黏土的等效动剪切模量和阻尼比具有十分显著的影响，这仅是从荷载频率与黏土等效动剪切模量和阻尼比关系的自身图像上得到了结果，究竟是不是真正“十分显著”，在什么情况下十分显著，还需要研究考虑不同荷载频率下的动模量阻尼比对计算对地震动结果的影响大小后才能下结论。

##### 4.1 计算工况选取

本文采用一维等效线性化土层地震反应分析程序 SHAKE2000 对简化的假想场地进行计算。为了与前面试验条件相符合，假想场地条件按下面方法来选取：①场地剪切波速的确定。根据表 4 中  $a=0.0286$  可得  $G_{\max}=34.97 \text{ MPa}$ ，然后将  $\rho=1.80 \text{ g/cm}^3$  带入  $G_{\max}=\rho v_s^2$  可以换算得到  $v_s=139.37 \text{ m/s}$ ，实际取  $v_s=140 \text{ m/s}$ ；②场地覆盖层厚度的选取。试验固结围压  $\sigma_0=200 \text{ kPa}$ ，从平均意义上选取场地覆盖层厚度  $H=20 \text{ m}$ ，按  $T=4H/v_s$  计算得场地卓越周期为 0.57 s；③场地其他特征参数的选取。土层重度均取为  $\rho=1.80 \text{ g/cm}^3$ ，土体非线性曲线取两组，分别为图 13 和图 16 中 0.1 Hz 和 3 Hz 结果；④输入条件。将 1940 年 El Centro 地震动的南北地震分量调幅至 0.1g, 0.2g 和 0.4g 作为输入地震，分别代表小震、中震和大震。

##### 4.2 结果对比分析

输入加速度峰值为 0.2g 时，采用振动频率分别为 0.1 Hz 和 3 Hz 的两条模量阻尼比曲线所计算出的地表加速度反应谱如图 18。从图中可以看出，在两个不同频率的动模量阻尼比下，加速度反应谱在周期  $T<1 \text{ s}$  时表现出明显的差别，尤其在 0.5~0.8 s 范围内，这一范围正好在场地卓越周期附近。

在小震、中震和大震 3 个震动水平下，采用不同振动频率下的土动力特性参数所得到的地表加速度峰值如图 19，其中的  $\beta$  表示输出和输入加速度峰值之比。从图中可以明显看出，输入地震动越强，取两个不同频率的动模量阻尼比下计算出的地表响应差别也越大。3 种地震强度下，取 0.1 Hz 动模量阻尼比计算得到的地表 PGA 的分别是 0.19g, 0.33g 和 0.34g，取 3 Hz 动模量阻尼比计算得到的地表 PGA 的分别是 0.26g, 0.45g 和 0.63g，3 种地震强度下二者的差别分别是 33%, 38% 和 85%。可见，在小震、中震和大震下，取 0.1 Hz 和 3 Hz 动模量阻尼比计算得到的地表 PGA 的差别分别是较大和十分显著。

也就是说，如果按现有方法，取与荷载频率无关（或某一个频率下）动模量阻尼比作为计算参数，如果有黏土存在，必然会使地震反应分析结果产生较大或十分显著的偏差。这样，从为地震反应分析提供合理可靠计算参数的角度，考虑荷载频率相关的动模量阻尼比问题，就成为十分必要的研究工作。

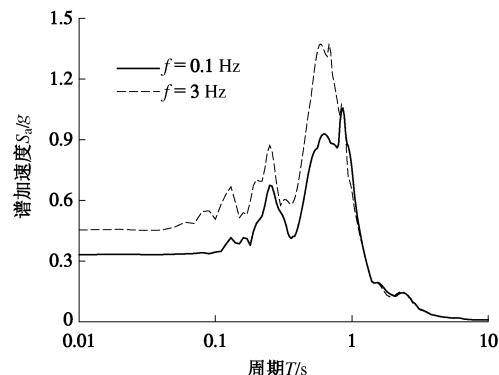


图 18 两个不同频率的动模量阻尼比下计算得出的地表输出加速度反应谱对比

Fig. 18 Calculated acceleration response spectra of ground surface using two sets of shear modulus and damping ratio under different loading frequencies

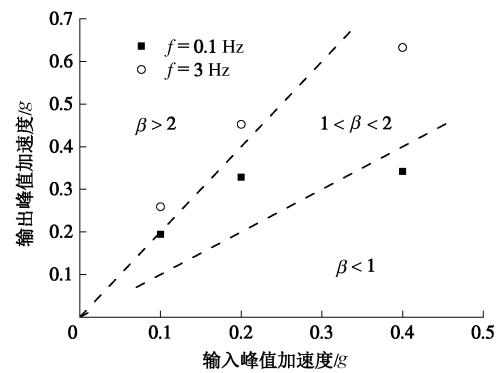


图 19 两个不同频率的动模量阻尼比下计算得出的地表加速度峰值

Fig. 19 Calculated PGA using two sets of shear modulus and damping ratio under different loading frequencies

## 5 结 论

鉴于目前荷载频率对动模量阻尼比影响规律尚无较为统一认识及定量结果尚少的现状, 本文采用新型高精度动三轴仪进行了典型砂土和黏土的不同荷载频率下的动模量阻尼比试验, 并以此为基础采用两个频率下的黏土动模量阻尼比对计算土层地震动进行了对比分析, 主要结论如下:

(1) 对砂土而言, 荷载频率对其动剪切模量影响不大, 随着加载频率的增大, 阻尼比略有减小, 但差别基本可以忽略。

(2) 对黏土而言, 荷载频率对其动剪切模量有重要影响, 随着振动频率的增加, 动剪切模量增大, 阻尼比减小。

(3) 黏土试样在低频荷载和高频荷载下动剪切模量比最大相差 20%, 阻尼比最大相差 8%, 随剪应变的增大, 差值都是先增大后减小。

(4) 黏土参考剪应变随荷载频率的增大而增大, 二者呈递增的指数函数; 当  $f \leq 1 \text{ Hz}$  时, 影响十分明显; 当  $1 \text{ Hz} < f \leq 3 \text{ Hz}$  时, 有一定影响; 当  $f > 3 \text{ Hz}$  时, 影响程度不明显。

(5) 黏土最大阻尼比随荷载频率的增大而减小, 二者呈递减的指数函数; 当  $f \leq 10 \text{ Hz}$  时, 影响较为明显; 当  $f > 10 \text{ Hz}$  时, 影响程度不明显。

(6) 对于黏土层, 考虑动模量阻尼比的荷载频率相关是必要的, 否则会使计算出地震反应分析结果产生较大或十分显著的偏差。

## 参 考 文 献:

- [1] 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 - 140. (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 - 140. (in Chinese))
- [2] 孙 静, 袁晓铭. 土的动模量和阻尼比研究述评[J]. 世界地震工程, 2003, **19**(1): 88 - 95. (SUN Jing, YUAN Xiao-ming. A state-of-art of research on dynamic modulus and damping ratio of soils[J]. World Earthquake Engineering, 2003, **19**(1): 88 - 95. (in Chinese))
- [3] SHNABEL P B, LYSMER J, SEED H B. SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontal layer sites[R]. Berkeley: University of California, 1972.
- [4] SEED H B, IDRISI I M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis[R]. Report No. EERC-70-10, Berkeley: University of California, 1970.
- [5] YOSHIDA N, KOBAYASHI S, SUETOMI I, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, **22**(3): 205 - 222.
- [6] ASSIMAKI D, KAUSEL E. An equivalent linear algorithm with frequency and pressure-dependent moduli and damping for the seismic analysis of deep sites[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, **22**(9-12): 959 - 965.
- [7] 蒋 通, 邢海灵. 水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(2): 218 - 224. (JIANG Tong, XING Hai-ling. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic response analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(2): 218 - 224. (in Chinese))
- [8] BOLTON M D, WILSON J M R. An experimental and theoretical comparison between static and dynamic torsional soil tests[J]. Géotechnique, 1989, **39**(4): 585 - 599.
- [9] IWASAKI T, TATSUOKA F, TAKAGI Y. Shear modulus of sands under cyclic torsional shear loading[J]. Soils and Foundations, 1978, **18**(1): 39 - 56.
- [10] 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. (ZHANG Jian-min, WANG Wen-xiang. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated sandy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(1): 89 - 97. (in Chinese))
- [11] WICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLLOIDIS T. Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained triaxial tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, **25**(12): 967 - 979.
- [12] YASUHARA K, YAMANOUCHI T, HIRAO K. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay[J]. Soils and Foundations, 1982, **22**(3): 77 - 91.
- [13] TEACHAVORASINSKUN S, THONGCHIM P, et al. Shear modulus and damping of soft Bangkok clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(5): 1201 - 1208.
- [14] 何昌荣. 动模量和阻尼的动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(2): 39 - 48. (HE Chang-rong. Dynamic triaxial test on modulus and damping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(2): 39 - 48. (in Chinese))
- [15] MATEŠIĆ L, VUCETIĆ M. Strain-rate effect on soil secant

- shear modulus at small cyclic strains[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(6): 536 – 549.
- [16] 陈存礼, 胡再强. 强夯地基黄土的动力特性参数及其与振动频率的关系[J]. 西安理工大学学报, 1998, **14**(2): 216 – 220. (CHEN Cun-li, HU Zai-qiang. Dynamic characteristics parameters and their relation to vibrofrequency of dynamically-compacted foundation loess[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1998, **14**(2): 216 – 220. (in Chinese))
- [17] 王建荣, 张振中, 王 峻, 等. 振动频率对原状黄土动本构关系的影响[J]. 西北地震学报, 1999, **21**(3): 310 – 314. (WANG Jian-rong, ZHANG Zhen-zhong, WANG Jun, et al. Effect of vibration frequency on dynamic constitutive relationship of loess[J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, **21**(3): 310 – 314. (in Chinese))
- [18] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(5): 77 – 81. (XU Xue-yan, ZHONG Cun-li, CHEN Ya-ming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 77 – 81. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 郑 刚, 霍海峰, 雷华阳, 等. 振动频率对饱和黏土动力特性的影响[J]. 天津大学学报(科学技术版), 2013, **46**(1): 38 – 43. (ZHENG Gang, HOU Hai-feng, LEI Hua-yang, et al. Contrastive study on the dynamic characteristics of saturated clay in different vibration frequencies[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, **46**(1): 38 – 43. (in Chinese))
- [21] 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, 2740. (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, 2740. (in Chinese))
- [22] D'ONOFRIO A, SILVESTRI F, VINALE F. Strain rate dependent behaviour of a natural stiff clay[J]. Soils and Foundations, 1999, **39**(2): 69 – 82.
- [23] SHIBUYA S, MITACHI T, FUKUDA F, et al. Strain-rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 1995, **18**(3): 365 – 375.
- [24] KHAN Z, NAGGAR M H E, CASCANTE G. Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests[J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, **348**(7): 1363 – 1376.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创刊于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)