

# 应变历史对黏土剪切模量和阻尼比的影响

熊伟<sup>1</sup>, 尚守平<sup>2</sup>, 王海东<sup>2</sup>, 周方圆<sup>3</sup>, 李光辉<sup>4</sup>

(1. 中南大学土木建筑学院, 长沙 410075; 2. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082;  
3. 名古屋大学土木工程系, 日本爱知县名古屋 4648601; 4. 湖北襄阳市交通规划设计院, 湖北 襄阳 430071)

**摘要:**在 50 kPa、100 kPa、300 kPa 和 500 kPa 固结压力下, 对 16 个土样进行高循环次数剪切试验以测定应变历史对正常固结黏土动力特性影响。实验结果表明: 在排水固结阶段随着固结时间推移, 剪切模量曲线上升而阻尼比曲线下降, 剪切模量变化因固结压力增大更明显, 25 h 后两者变化趋于稳定; 等幅值应变控制循环加载时, 动剪模量和阻尼比在振动 50 周期内变化明显, 之后变化趋缓, 其中阻尼比随循环周数呈双曲线型变化。试验中发现明确应变历史门槛标志, 其中阻尼比受其影响比动剪模量更明显, 这对评估应变历史对土动力特性影响具有重要意义, 值得进一步深入研究。

**关键词:**应变历史; 动剪模量; 阻尼比; 循环单剪; 门槛应变

**中图分类号:** TU435    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2011)01-0071-06

## Effects of Vibration History on Modulus and Damping of Clay

XIONG Wei<sup>1</sup>, SHANG Shou-ping<sup>2</sup>, WANG Hai-dong<sup>2</sup>, ZHOU Fang-yuan<sup>3</sup>, LI Guang-hui<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, P. R. China;  
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China;  
3. Department of Civil Engineering, Nagoya University, Nagoya, 4648601 Aichi, Japan;  
4. Xiangyang's Design Insitute for Transportation Planning Hubei Province, Xiangyang, 430071, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** Aiming at evaluating the effects of vibration history on dynamic characteristics of normally consolidated clay, a series of multi-cycled cyclic shear tests were conducted on 16 soil samples under consolidation pressure of 50 kPa, 100 kPa, 300 kPa and 500 kPa respectively. The experimental results reveal that, on the stage of drainage and consolidation, with the development of duration shear modulus curve ascends while damping curve descends; this trend became significant as consolidation pressure increased. The variation tends to be stable in 25 hours. When subjected to cyclic loading controlled by constant strain amplitude, both the modulus and damping of soil samples change significantly during the first 50 cycles, and then the differences become moderate afterwards, in which the damping curve acts in hyperbolic type. It is also found that there exists a clear sign of pre-straining that affects damping more significantly than modulus.

**Key words:** Pre-straining; dynamic shear modulus; damping ratio; cyclic simple shear; threshold strain

随着中国经济迅猛发展, 软黏土分布地区高层建筑、高速公路特别是核电站和水电站大坝等重大设施大量修建。许多情况下由于黏土动力特性尚未得到充分研究, 在工程上造成很多灾难性后果。以

**收稿日期:** 2010-07-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(50578062、50808078); 国家科技支撑计划子课题(2006BAJ03A10-06); 高等学校博士点基金(20070532090); 湖南省自然科学基金(08JJ4016); 湖南省科技计划重点项目(06sk4057)

**作者简介:** 熊伟(1982-), 男, 博士, 主要从事基础隔震减震方面研究, (E-mail) bbbear2002@gmail.com.

往地震研究一般集中于砂土地基抗液化分析,而 1964 年日本 Niigata 地震<sup>[1]</sup>、1976 年中国唐山大地震<sup>[2]</sup>、1985 年墨西哥大地震<sup>[3]</sup>和 1995 年阪神大地震<sup>[4]</sup>都表明,由于下部软黏土层的破坏导致电站大坝等上部结构损毁不容忽视;最近发生的几次强烈破坏性地震(中国汶川大地震<sup>[5]</sup>、海地太子港地震<sup>[6]</sup>、智利康赛普西翁省大地震<sup>[7]</sup>等)中软黏土地区分布十分广泛,这些地区上部结构破坏程度和破坏形式与地基属性的耦合关系值得深究,所以对黏土在模拟地震循环荷载下动力特性研究则显得尤为迫切而具有工程实际意义。许多学者对此做了一些研究工作,取得很多建设性成果:蒋军等<sup>[8]</sup>进行了长期循环荷载作用下含砂芯黏土复合地基分析;周建等<sup>[9]</sup>进行了循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究,建立了数学模型反映土体软化情况;唐益群等<sup>[10]</sup>调查了上海地区地铁振动荷载对饱和软黏土微观状态的影响,并指出地铁运行动力作用对地基黏土有压密作用。国外的 Toufigh 等<sup>[11]</sup>基于太沙基理论提出一种考虑固结系数变化,塑性黏土在循环荷载作用下单向固结问题的半解析方法,并通过一系列往返加载下的固结试验以及数值模拟验证该方法的可行性;Nagase 等<sup>[12]</sup>对日本有明地区海底黏土沉积层进行了浸出状态下循环剪切试验,结果表明随着循环次数的增加,黏土剪切模量与动力强度均有显著折减。论文拟通过一系列室内循环剪切试验,较系统研究循环荷载以及加载历史对黏土动力特性的影响,以期进一步深入了解黏土在循环荷载作用下以及加载历史后动力性状。

## 1 试验内容和方法

能测定土动剪模量和阻尼室内试验有动三轴试

验、动剪切试验、振动扭转剪切试验等。许多研究者认为,循环剪切原理是在实验室内模拟土单元承受理想地震应力适宜途径,因为它较好模拟由基岩向上传播剪切波在土体中产生应力状态和土体本身平面应变边界条件,并且能直接测出土样动剪模量,无需像动三轴试验那样需假定土泊松比,而后由动弹模换算得出。该文试验采用仪器是 WFI 循环单向剪切仪,利用叠迭薄铜环来模拟试件侧向边界,如图 1 所示。

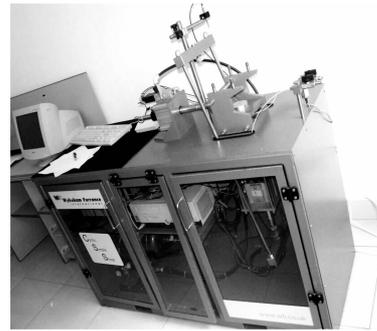


图 1 循环剪切系统示意图

仪器可以输入频率从 0~70 Hz 等幅度正弦荷载以及随机荷载,可以实现常固结压力剪切、常高度剪切、应变控制式剪切、应力控制式剪切。其位移传感器精度可达到 1  $\mu\text{m}$ ,力传感器精度为 0.001 kN,试验土样直径为 70 mm、高 20 mm 圆柱体,可以测量土从  $10^{-5}$ ~ $10^{-1}$  应变范围内动力特性。土样详细物理性质见表 1。

试样采用分层击实,使其含水量和密度均匀。剪切试验波形采用正弦波,根据实际地震荷载作用情况,设置振动频率为 1 Hz,固结压力分别为 50 kPa、100 kPa、300 kPa 和 500 kPa,双面排水固结 50 h。

表 1 土样物理性质指标

颗粒组成/%			天然含水量/ %	天然密度 $\rho$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_P$	液性指数 $I_L$
2~0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm					
32	63	5	23.9	2.02	0.656	14	0.121

在实际地震作用过程中土体动应变变量级主要在  $[10^{-5}, 10^{-2}]$  区间内变化,单级荷载下土样塑性变形积累不明显,选用较大应变控制可更好反应单级荷载下动剪模量和阻尼比随循环加载次数变化规律。本文试验设定循环周数均为 200 次,每种土样只施加一级动剪应变,测试程序如表 2 所示。

## 2 试验过程和试验数据

土体在施加动力循环荷载时动应力—应变关系

可以形成一组滞回曲线。目的土动力分析多数采用“等效线性模型(Hardin-Drnevich 模型)”。等效线性模型将土视为粘弹性体,采用等效剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$  反映土体动应力—动应变关系非线性与滞后性。

循环剪切试验把每一周期振动波形按照同一时刻  $\tau_d$  与值一一对应描绘  $G_d - r_d$  坐标上,得到图 2 所示滞回曲线。定义滞回环的平均斜率,则  $G_{dmax} = \tau_{dmax} / r_{dmax}$ 。按照等效粘滞阻尼概念,阻尼比定义可表

示为

表 2 土样试验流程汇总

试验号	固结压力/kPa	试验方法*	应变幅值 $\gamma$
1	50	A	$1.0 \times 10^{-2}$
2	50	A	$1.5 \times 10^{-2}$
3	50	A	$2.0 \times 10^{-2}$
4	50	B	动应变
5	100	A	$1.0 \times 10^{-2}$
6	100	A	$1.5 \times 10^{-2}$
7	100	A	$2.0 \times 10^{-2}$
8	100	B	动应变
9	300	A	$1.0 \times 10^{-2}$
10	300	A	$1.5 \times 10^{-2}$
11	300	A	$2.0 \times 10^{-2}$
12	300	B	动应变
13	500	A	$1.0 \times 10^{-2}$
14	500	A	$1.5 \times 10^{-2}$
15	500	A	$2.0 \times 10^{-2}$
16	500	B	动应变

\* 试验方法:A 为固结 50 h 后施加等幅值循环荷载,持续测定剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$ ,循环荷载完成后施加分级动应变  $\gamma_d$  测定动剪模量曲线  $G_d-\gamma_d$  和阻尼比曲线  $\lambda_d-\gamma_d$ ;B 为固结 50 h 后立刻施加动应变  $\gamma_d$  测定动剪模量曲线  $G_d-\gamma_d$  和阻尼比曲线  $\lambda_d-\gamma_d$ 。

$$\lambda = \frac{A_o}{4\pi A_T} \quad (1)$$

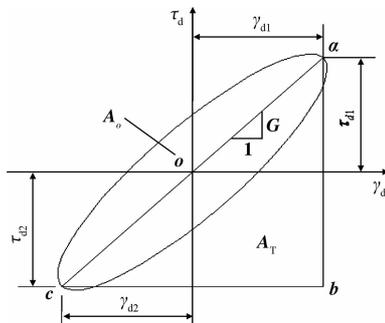


图 2 理想的动应力-应变曲线

式中: $A_o$  为滞回圈面积,它表示土体在一个应力应变周期内等效粘滞能量损耗; $A_T$  为原点到最大的幅值点( $\gamma_a, \tau_a$ ) 连线下三角形  $abc$  面积。如果改变给定值将得到另一套滞回曲线族。在多个应变加载

作用下,能得到对应动应变 ( $\gamma_{d1}, \gamma_{d2}, \gamma_{d3}, \dots, \gamma_{dn}$ ) 和相应动剪切模量 ( $G_{d1}, G_{d2}, G_{d3}, \dots, G_{dn}$ )。由这些数据可得到  $\tau_d - \gamma_d, G_d - \gamma_d$  以及  $\lambda_d - \gamma_d$  曲线。

### 2.1 土动力特性在循环剪切中变化规律

为确认在循环动力荷载作用下孔隙水压力变化,在试验过程中通过底部排水孔测量试样孔隙水压力,如图 3 所示。可见在循环荷载作用过程中土样孔隙水压力不断变化呈锯齿状,但总体上变化不大,与土样固结压力相比可以认为保持不变。由此可以排除在循环过程中孔隙水压力变化对模量和阻尼影响。

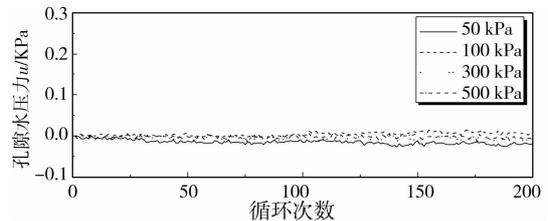


图 3 孔隙水压力随循环次数变化

### 2.2 固结时间对土样动力参数影响

许多学者研究表明<sup>[13-15]</sup>,剪切模量和阻尼随地质年龄而变化,其中黏土受其影响比砂土更大。虽然试验过程只持续数小时,但评估固结时间对土样形状影响十分重要。为测得此影响,在试样固结过程中每隔 0.5~1 h 对土样进行一次微小应变 ( $\gamma = 0.8 \times 10^{-5}$ ) 控制下剪切,所得数据如图 4 所示。可以看出,随着固结时间缓慢增大,剪切模量  $G$  随之增大而阻尼比  $\lambda$  减小。随着固结压力增大,剪切模量曲线变化更明显,且阻尼比曲线受其影响不大。两者变化在固结时间超过 25 h 后不明显,表明固结时间超过 25 h 后,土样剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$  趋于稳定。

图 5 表示在 50 kPa, 100 kPa, 300 kPa 和 500 kPa 固结压力下以 3 种不同剪应变控制剪切模量  $G$  与阻尼比  $\lambda$  随循环周数变化情况。从图 5(a) 中可以看出,当剪应变  $\gamma = 2.0 \times 10^{-2}$  时,剪切模量随循环周数变化不明显;当剪应变  $\gamma = 1.5 \times 10^{-2}$  时,剪切模量在循环前 50 周增大较明显,而之后变化趋缓;当剪应变为  $\gamma = 1.0 \times 10^{-2}$  时,剪切模量随循环周数而增大趋势更明显。通过比较 3 组曲线可发现,在同循环次数时,剪切模量随剪应变增大而减小;随着剪应变增大,动剪模量随循环周数增大趋势减缓;当循环周数低于 50 时,剪切模量增大较快;当循环周数超过 50 时,动剪模量缓慢增长。通过比较图 5(b)3 组曲线可知阻尼比随着循环周数增大呈双曲线变化,而且同一循环次数时剪应变越大,阻尼比也越大。

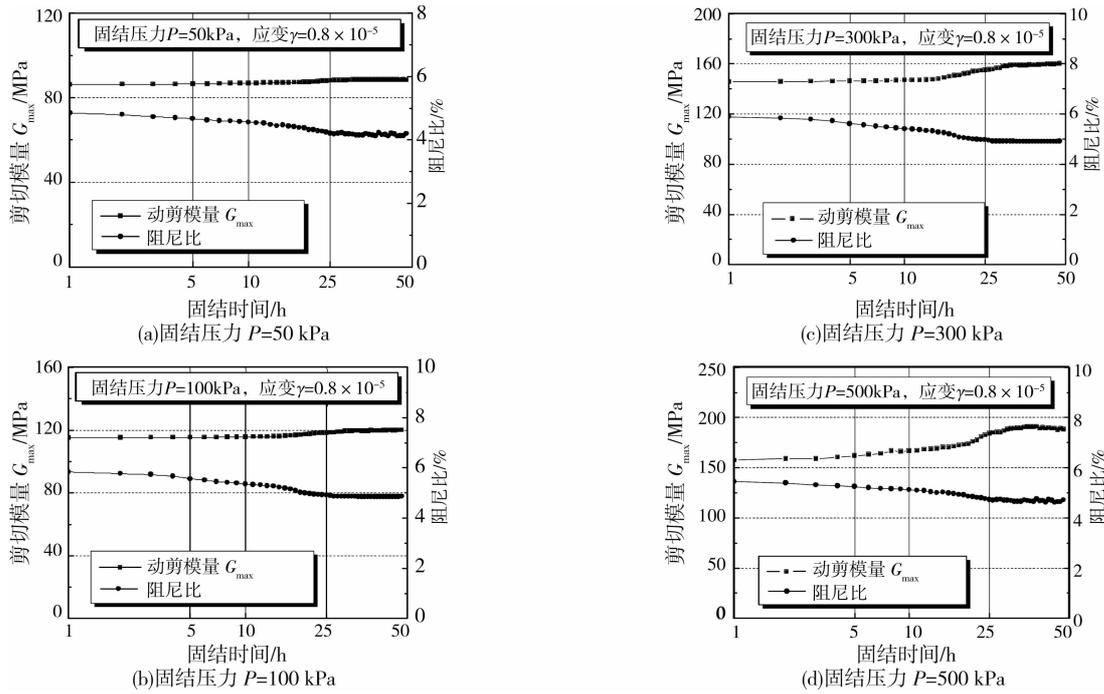
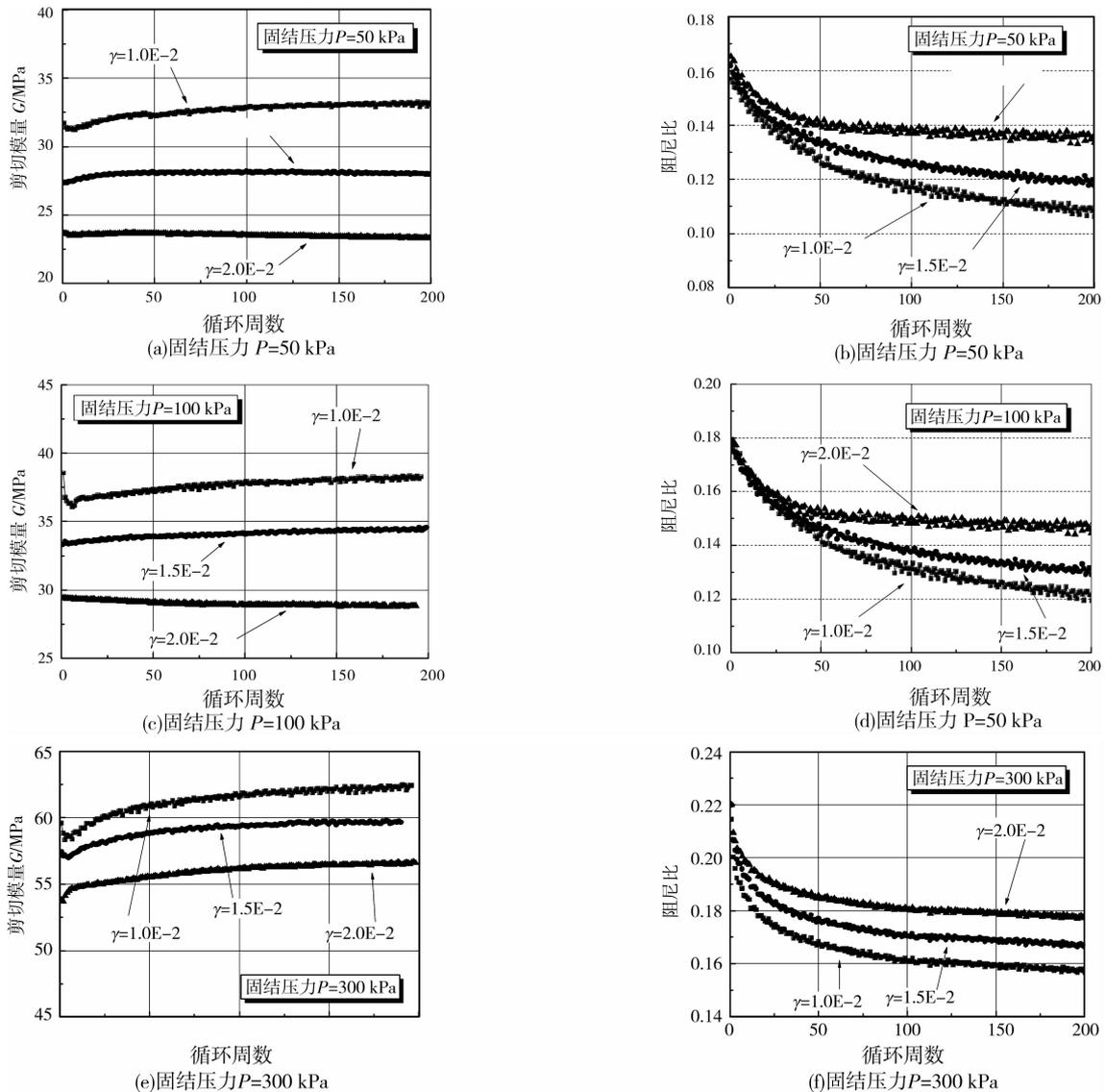


图 4 不同固结压力作用下固结时间对最大剪切模量  $G_{max}$  和阻尼比影响



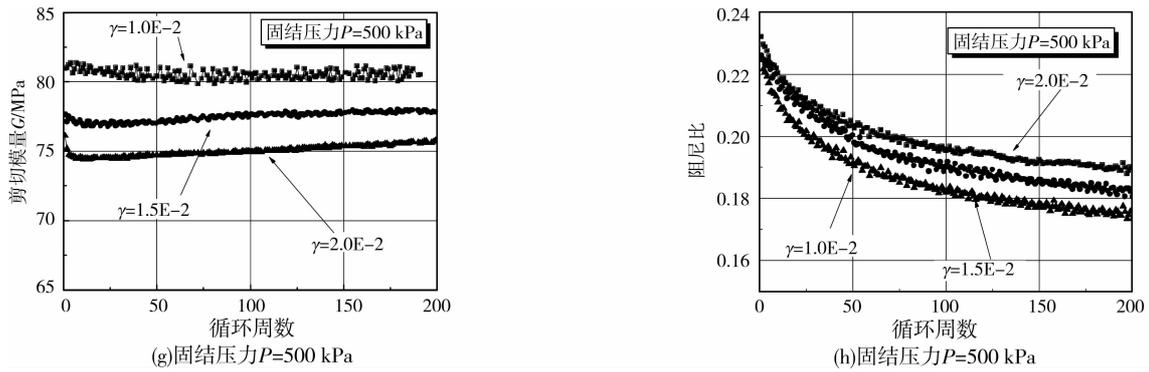


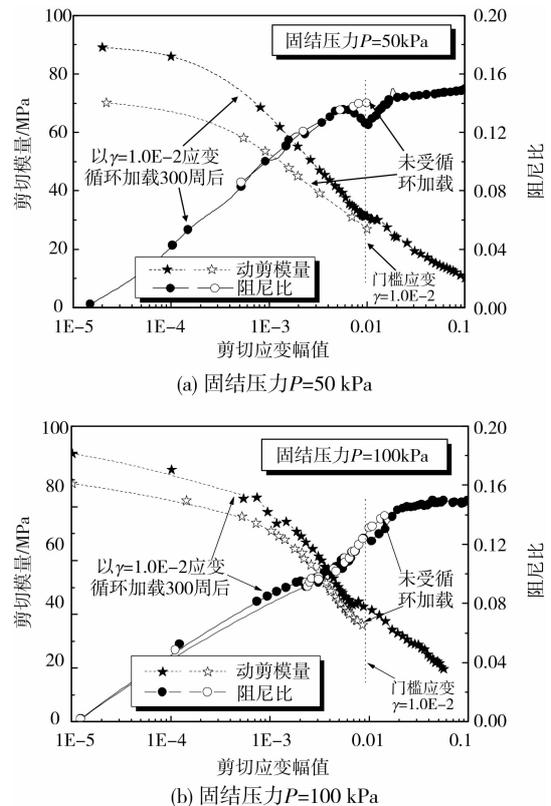
图 5 不同固结压力下剪切模量及阻尼比随循环周数变化情况

图 5(c)和图 5(d)表示 100 kPa 固结压力下 3 种不同应变控制剪切模量  $G$  与阻尼比  $\lambda$  随循环周数变化曲线。可以看出曲线在 100 kPa 固结压力作用下与在 50 kPa 固结压力作用下情况类似。随着固结压力增大到 100 kPa, 剪切模量 3 条曲线比 50 kPa 固结压力作用下相邻更紧密。剪应变  $\gamma = 2.0 \times 10^{-2}$  时, 剪切模量曲线在循环次数低于 50 周时稍微下降, 在 50 周过后下降趋缓; 当  $\gamma = 1.5 \times 10^{-2}$  和  $\gamma = 1.0 \times 10^{-2}$  时, 剪切模量随循环周数增大而缓慢增加。3 条曲线在循环周数前 50 周变化较快, 50 周后变化趋缓。在固结压力 100 kPa 时, 土样阻尼比曲线更紧密, 随循环周数变化而呈双曲线形状。

图 5(e)~图 5(h)分别表示 300 kPa 和 500 kPa 固结压力下以 3 种不同应变控制循环剪切模量  $G$  与阻尼比  $\lambda$  随周数变化趋势。随着固结压力提高, 剪切模量和阻尼比 3 条以不同应变控制曲线相邻紧密趋势更明显。其中动剪模量曲线随循环次数变化不具备规律性。

比较图 5(a)~图 5(h)可看出固结压力变化对土样动剪模量和阻尼比曲线影响: 随着固结压力增大, 动剪模量  $G$  增大而阻尼比  $\lambda$  减小, 对于受到振动加载历史土样和未受到振动加载历史土样都如此。

图 6 表示加载历史对剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$  影响。图中实心曲线为等幅循环应变(门槛应变)  $\gamma_h = 1.0 \times 10^{-2}$  加载后动剪模量随动应变  $G_d - r_d$  曲线和阻尼比随动应变  $\lambda_d - \gamma_d$  曲线(试验条件 A), 图中空心曲线为未受应力历史影响土样曲线  $G_d - r_d$  和  $\lambda_d - \gamma_d$  曲线(试验条件 B)。比较 2 组曲线可以看出在小于门槛应变  $r_h$  时, 循环加载后土样动剪模量明显大于未加载土样, 随着动应变增大到门槛应变  $r_h$ , 两条曲线相互汇聚, 表明应变历史影响下土样动剪模量曲线比未受其影响土样曲线下降更快。与之相反, 阻尼比在动应变小于门槛应变  $r_h$  时受应变历史影响较小, 但当动应变一旦达到或超过门槛应变, 循

图 6 应变加载之前/之后剪切模量和阻尼比曲线 ( $\gamma = 1.0 \times 10^{-2}$ )

环加载后土样  $\lambda_d - r_d$  曲线与未受加载土样曲线差异显著增大。值得注意的是, 在门槛应变时, 图中两条实心曲线均出现拐点, 这个拐点可以表明振动历史对土样动力属性影响。从这 2 组曲线(受振动历史影响和未受影响)走向趋势来看, 可推断这两组曲线在大应变下将重新汇聚, 这表明土样应力历史记忆将被更大动应变下循环加载过程所“擦除”, 这和传统塑性理论一致。剪切模量曲线在小于门槛应变  $r_h$  时高于未受应变历史影响土样, 而阻尼比曲线则在动应变超过门槛应变时下降。图 6 中曲线拐点清晰表明应变历史对土样动力参数影响。

### 3 结语

土体具有非线性、滞后性和变形积累性等 3 方

面特性。作为一种非弹性材料,土趋向于“记住”其加载历史<sup>[16]</sup>。这种记忆表明土应力-应变关系依赖于以往加载历史影响。为此,进行土样循环加载试验研究,得出如下结论:

1) 固结压力对剪切模量影响大于对阻尼影响。随着固结时间增大,动剪模量增大而阻尼下降。经过 25 h 后,动剪模量和阻尼比数值趋于稳定。

2) 等幅值多次循环加载时,同循环周数下,随着剪应变增大,剪切模量减小而阻尼比增大。随着固结压力增大,动剪模量和阻尼比曲线族相邻更趋紧密。50 周循环内,动剪模量变化较大,循环周数超过 50 后变化趋缓,阻尼比曲线随循环周数呈双曲线型变化。

3) 经过循环加载后土样在小于门槛应变  $= 1.0 \times 10^{-2}$  时剪切模量曲线大于未受加载历史影响土样。与之相反,阻尼比在小于门槛应变时未受应力历史明显影响,而随着动应变超过门槛应变时,受应力历史影响土样和未受应力历史影响土样阻尼比曲线差异逐渐增大。

4) 受到振动历史影响土样动剪模量和阻尼比曲线在达到门槛应变时出现拐点,拐点对阻尼比曲线影响比对剪切模量曲线影响更明显,且未受固结压力影响。由此可以进一步深入研究一种证实场地土应力加载历史对土动力特性影响评估方法。

致谢:本文受国家自然科学基金(50578062, 50808078)、国家科技支撑计划子课题(2006BAJ03A10-06)、高等学校博士点基金(20070532090)、湖南省自然科学基金(08JJ4016)、湖南省科技计划重点项目(06sk4057)资助。作者也诚挚感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

#### 参考文献:

- [1] SHINODA M, WATANABE K, KOJIMA K, et al. Seismic stability of a reinforced-soil structure constructed after the mid-Niigata prefecture earthquake [J]. *Geosynthetics International*, 2009, 16(4): 274-285.
- [2] ROBINSON R, ZHOU S Y. Stress interactions within the Tangshan, China, earthquake sequence of 1976 [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(6): 2501-2505.
- [3] TENA-COLUNGA A, GODINEZ-DOMINGUEZ EA, PEREZ-ROCHA L E. Vulnerability maps for reinforced concrete structures for Mexico City's Metropolitan Area under a design earthquake scenario [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(4): 809-840.
- [4] CHANDIER A M. Engineering design lessons from Kobe [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 227-229.
- [5] HUBBARD J, SHAW J H. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan (M = 7.9) earthquake [J]. *Nature*, 2009, 458(7235): 194-197.
- [6] BILHAM R. Lessons from the Haiti earthquake [J]. *Nature*, 2010, 463(7283): 878-879.
- [7] KAISER J, REGALADO A. Latin America: Chile's earthquake may set back research for years [J]. *Science*, 2010, 327(5971): 1308-1309.
- [8] 蒋军, 朱向荣, 曾国熙. 循环荷载作用下黏土及含砂芯复合土样特性分析 [J]. *土木工程学报*, 2003, 36(8): 96-101.  
JIANG JUN, ZHU XIANG-RONG, ZENG GUO-XI. Analysis for the behaviour of clay and sand cored composite specimens under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 2003, 36(8): 96-101.
- [9] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究 [J]. *土木工程学报*, 2000, 33(5): 75-78.  
ZHOU JIAN, GONG XIAO-NAN. Study on strain softening in saturated soft clay under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 2000, 33(5): 75-78.
- [10] 唐益群, 赵书凯, 杨坪, 等. 饱和软黏土在地铁荷载作用下微结构量化研究 [J]. *土木工程学报*, 2009, 42(8): 98-103.  
TANG YI-QUN, ZHAO SHU-KAI, YANG PING, et al. Quantitative analysis of the microscopic behavior of saturated soft clays under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 2009, 42(8): 98-103.
- [11] TOUFIGH M M, OURIA A. Consolidation of inelastic clays under rectangular cyclic loading [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(2): 356-363.
- [12] NAGASE H, SHIMIZU K, HIRO-OKA A, et al. Earthquake-induced residual deformation of Ariake clay deposits with leaching [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(2-4): 209-220.
- [13] YILMAZ M T, PEKCAN O, BAKIR B S. Undrained cyclic shear and deformation behavior of silt-clay mixtures of Adapazan, Turkey [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(7): 497-507.
- [14] RAO S N, KUMAR N D. Earth pressure on caissons in marine clay under cyclic loading [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2007, 25(1): 15-35.
- [15] FROST M W, FLEMING P R, ROGERS C D F. Cyclic triaxial tests on clay subgrades for analytical pavement design [J]. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 2004, 130(3): 378-386.
- [16] LI X S, YANG W L. Effects of vibration history on modulus and damping of dry sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(11): 1071-1081.

(编辑 王秀玲)