

兰景岩, 王延伟, 曹振中, 刘娟, 2019. 固结时间对软土动力特性影响的试验研究. 震灾防御技术, 14 (4): 742—749. doi: 10.11899/zzyf20190405

# 固结时间对软土动力特性影响的试验研究<sup>1</sup>

兰景岩<sup>1,2)</sup> 王延伟<sup>1,2)</sup> 曹振中<sup>2)</sup> 刘娟<sup>2,3)</sup>

1) 北京工业大学, 北京 100022

2) 桂林理工大学, 广西桂林 541004

3) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

**摘要** 固结试验是研究软土动力特性的重要环节, 固结时间是影响软土动力特征参数的重要因素。围绕岩土工程及科研工作中对动三轴试验中固结时间影响规律的认识较为模糊的问题, 拟对天津滨海软土开展动三轴平行试验, 分别采用 8h、12h、24h、48h 进行固结, 针对软土的最大动剪切模量  $G_{\max}$ 、最大阻尼比  $\lambda_{\max}$  及动剪切模量比  $G_d/G_{\max}$  和阻尼比  $\lambda$  随动剪切应变  $\gamma_d$  的变化规律, 分析固结时间对软土动力特性参数的影响。试验结果表明:  $G_{\max}$ 、 $\lambda_{\max}$ 、 $G_d/G_{\max}$ - $\gamma_d$  曲线、 $\lambda$ - $\gamma_d$  曲线受固结时间的影响较为显著。 $G_d/G_{\max}$ - $\gamma_d$  曲线随着固结时间的增加而减小。阻尼比试验结果表明动剪切应变存在明显的分界点, 分界点以下, 中长期固结时间所得阻尼比较大, 而分界点以上, 短期固结时间所得阻尼比较大。

**关键词:** 滨海软土 固结时间 动剪切模量比 阻尼比

## 0 引言

固结是指在荷载或其他因素作用下, 土体孔隙中水分逐渐排出、体积压缩、密度增大的现象, 是室内试验还原土体实际应力的重要过程, 同时也是准备土动力前期试验的重要环节。在动三轴、共振柱等土动力试验开始前, 需对土体施加反压排水固结, 但对于稳定固结时间而言, 目前尚未有明确的答案和公认的结论, 相关规范中关于固结时间的规定较为模糊, 《土工试验规程》(SL 237—1999, 中华人民共和国水利部, 1999) 规定粘土试样 1 小时内固结排水量变化不大于  $0.1\text{cm}^3$ ; 《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—2015, 中国人民共和国住房和城乡建设部, 2015) 则指出在静力作用下固结稳定即可试验。

研究表明 (Yilmaz 等, 2004; Frost 等, 2004; Rao 等, 2007), 剪切模量和阻尼随着地质年龄而变化, 其中粘性土所受影响较砂土更大。Anderson 等 (1978) 采用动剪切模量增量系数描述土体动剪切模量随固结时间增加而增大的规律。但也有研究表明, 粘性土动力特性受固结应力历史的影响有限, 粘性土孔隙比随应力状态与应力历史变化, 而动剪切模量

**1 基金项目** 国家自然科学基金 (51408559); 广西自然科学基金 (2018GXNSFAA281183); 桂林理工大学博士启动基金 (GLUTQD2016025)

[收稿日期] 2019-05-28

[作者简介] 兰景岩, 男, 生于 1981 年。博士, 副研究员。主要从事岩土工程与地震工程的教学与科研工作。E-mail: lanjy1999@163.com

比曲线则几乎不受应力状态与应力历史的影响(陈国兴等, 1995)。可知, 关于固结时间或应力历史对粘性土的动力特性影响的研究结论尚未统一, 仍存在争议。基于此, 王炳辉等(2009)通过软粘土自振柱试验, 分析固结时间对软粘土最大动剪切模量、动剪切模量比和试样尺寸的影响, 并得到有益结论。熊伟等(2011)进行室内动三轴试验, 试验结果表明, 在排水固结阶段, 随着固结时间的推移, 剪切模量曲线上升而阻尼比曲线下降。此外, 随着地震安全性评价工作在我国广泛开展, 为满足土动力学参数测试日益增多的需求, 并提高试验工作效率, 通常采用 1h 或 3h 的快速方法对土体进行固结, 研究结果显示(刘霞等, 2010), 两种试验结果差别不大。

总的来看, 在动三轴或共振柱等土动力试验中, 由于没有具体的规范界定土体固结时间, 也没有可靠的试验数据作为依据, 使得这一问题往往被人们所忽视, 固结时间过长或过短都不能客观反映土体真实的受力状态和应力水平, 特别是软土, 因其具有含水量高、孔隙率大等特性, 实验室中试样制备、仪器装样等过程较困难, 因此软土的固结试验成为科研人员关注的焦点(刘洋等, 2013; 雷华阳等, 2014; 兰景岩, 2016)。故基于上述观点, 拟通过室内动三轴试验, 对比不同固结时间对土动力特性的影响, 定性分析滨海软土动力特性参数随固结时间的变化, 重点考察工程关注的动剪切模量和阻尼比试验结果。

## 1 试验概况

### 1.1 试验用土

试验用土均为原状土, 采自天津滨海新区, 属滨海沉积相软粘土, 呈软塑状, 含水量较高, 孔隙比较大, 形态较松软, 物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 试验用土物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of test soft soil

指标	量值	指标	量值
深度/m	5	天然密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	1.8
含水量/%	39.8	液限/%	30.7
比重	2.52	塑限/%	18.1
孔隙比	1.09		

### 1.2 仪器设备

采用目前较为先进的英国 GDS 商业型动态三轴试验系统(型号为 ELDyn, 见图 1), 可在荷载控制或位移控制的条件下对试样进行循环加载, 提供 4 通道的动态数据采集, 并带有 16 比特数据采集和轴向作动器的编码器, 编码器可提供高精度的位置反馈。基本参数为: 最大轴向位移 100mm, 最大轴向荷载 5kN(5Hz), 可使用不同尺寸的试样, 试样直径最大可达 150mm。

### 1.3 饱和方式和固结试验

所取土样均位于地下水位之下, 处于或接近于饱和状态。由于土样在获取、运输、储存过程中均有不同程度的失水现象, 需饱和后进行试验, 为提高饱和度, 采用真空抽气与反压饱和的方式, 即按《土工试验规程》进行抽气饱和, 真空抽气 2h 后水中静置 10h。反压饱和, 即先施加 20kPa 围压进行预压, 然后分级施加(每级增量约 30kPa)反压和围压, 先施加围压后施加反压, 始终保持围压比反压大 20kPa, 其中有效围压保持为 100kPa。

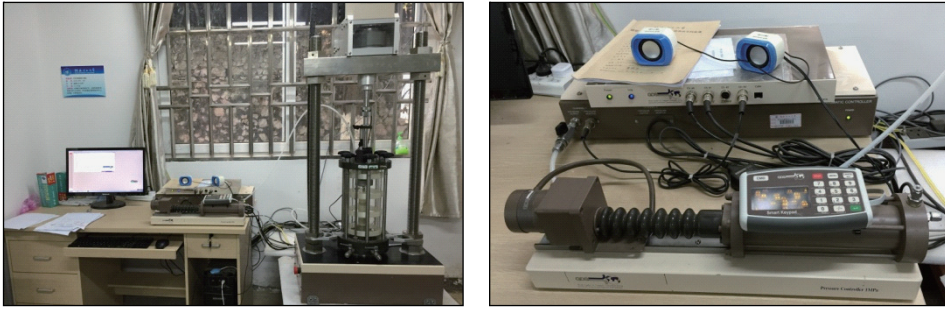


图 1 GDS 动三轴反压控制系统

Fig.1 Back pressure control system of GDS triaxial test

采用均等固结不排水试验，先施加 20kPa 围压，然后逐级施加均等的围压和轴向压力，直至预定压力。固结时间分别为 8h、12h、24h、48h，以便定性分析固结时间对土动力特性的影响。

### 1.4 加载方式

动剪切模量、阻尼比试验采用应变控制，应变设为  $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$ ，6 级左右，每级应随机设定；为减少累积的振动次数对试样刚度的影响，每级振动次数为 3 次。

## 2 分析方法

动三轴试验中直接测定的参数为动轴向应力  $\sigma_d$ 、动轴向应变  $\varepsilon_d$ ，关于模量和阻尼的定义如图 2 所示，动弹性模量  $E_d$ 、阻尼比  $\lambda$  可按下式计算：

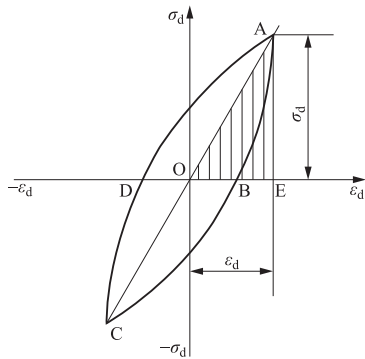


图 2 理想动应力-动应变滞回曲线

Fig.2 Dynamic stress-strain hysteresis loop

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\text{滞回圈}ABCD\text{的面积}}{\text{三角形}OAE\text{的面积}} \quad (2)$$

参考《地基动力特性测试规范》动剪切模量  $G_d$  与  $E_d$  及动剪切应变  $\gamma_d$  与  $\varepsilon_d$  关系如下：

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$\gamma_d = \varepsilon_d(1+\nu) \quad (4)$$

式中  $\nu$  为泊松比，由于试样为饱和土样，因此  $\nu=0.5$ 。

动剪切应力-动剪切应变滞回圈主干线用双曲线表示为：

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d} \quad (5)$$

则割线剪切模量  $G_d$  为：

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma_d} = \frac{1}{a + b\gamma_d} \quad (6)$$

$$1/G_d = a + b\gamma_d \quad (7)$$

绘制  $1/G_d-\gamma_d$  关系曲线，即可得到  $a, b$ 。因此， $\gamma_d=0$  时，最大动剪切模量  $G_{\max}=1/a$ 。 $1/b$  为主干线的水平渐近线在纵轴上的截距，称为极限抗剪强度  $\tau_{\text{ub}}$ 。 $\gamma_r=a/b$ ，为参考剪应变。

试样在荷载作用下的阻尼比  $\lambda$  可由下式求得：

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (8)$$

式中  $\Delta W$  为一个循环消耗的能量，用动应力-动应变滞回曲线所围的面积表示； $W$  为施加的最大应变能。根据 Hardin-Drnevich 模型，阻尼比与剪应变的关系为： $\lambda = \lambda_{\max} (1 - G_d / G_{\max})^n$ ，其中  $n$  为试验拟合参数，两边取对数得：

$$\lg \lambda = \lg \lambda_{\max} + n \lg(1 - G_d / G_{\max}) \quad (9)$$

绘制  $\lg \lambda \sim \lg(1 - G_d / G_{\max})$  关系曲线，曲线呈线性关系，截距即为  $\lambda_{\max}$ 。

### 3 试验结果及分析

根据试验方案，取同一位置、同一深度的同种土，分别采用不同固结时间（8h、12h、24h、48h），在保证施加的围压、轴压和动应力完全一致的情况下，对 4 个试样进行平行试验。图 3 所示为不同固结时间下饱和滨海软土试样动应力-动应变曲线，由图 3 可知，应力方向变化时，应变也随之变化，即出现压应变和拉应变的反转；随着循环次数的增加，动应力-动应变曲线的形状也发生变化；随着动剪切应变的发展，动应力-动应变曲线的形状最终发展为 S 形。

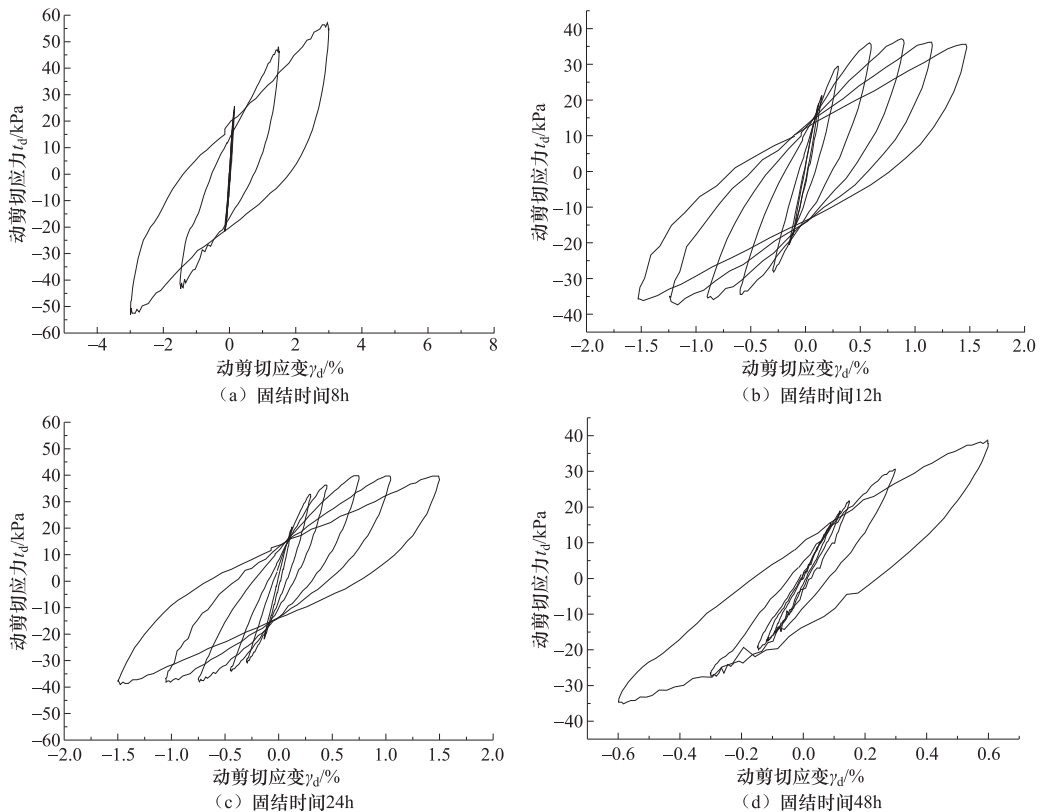


图 3 动应力-动应变滞回曲线

Fig.3 Stress-strain hysteresis loop by different consolidation time

利用动三轴试验得到滨海软土动剪切模量和动剪切应变间的关系，采用双曲线骨架曲线模型，可求得试验特征参数  $a$ 、 $b$  值、 $G_{\max}$ 、 $\lambda_{\max}$ 、 $\tau_{\text{ulb}}$  与固结时间的关系，如图 4、表 2 所示。

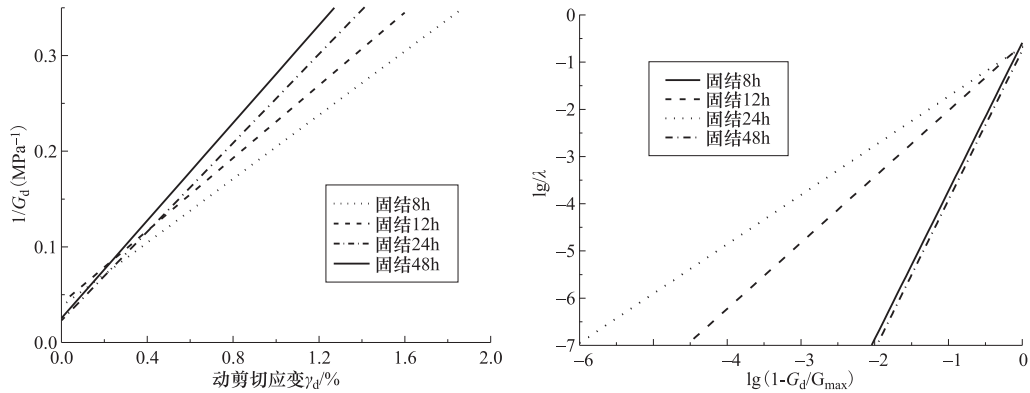


图 4 动剪切模量和阻尼比的拟合结果对比

Fig.4 Comparison of fitting result for dynamic modulus and damping

表 2 动三轴试验特征参数拟合值

Table.2 Characteristic fitting parameters of dynamic triaxial test

固结时间	8h	12h	24h	48h
$a$	0.041	0.038	0.025	0.023
$b$	0.167	0.190	0.232	0.255
$G_{\max}$	24.6	26.5	39.5	43.4
$\lambda_{\max}$	0.258	0.236	0.210	0.179
$\tau_{\text{ulb}}$	5.99	5.26	4.31	3.92

由表 2 可知， $G_{\max}$  随着固结时间的增加而增大， $\lambda_{\max}$  与  $\tau_{\text{ulb}}$  则随着固结时间的增加而减小。根据上述结论，绘制固结时间与  $G_{\max}$  和  $\lambda_{\max}$  的关系曲线，如图 5 所示。由图 5 可知，固结时间与  $G_{\max}$ 、 $\lambda_{\max}$  呈现一定线性关系。其中，固结时间为 48h 的  $G_{\max}$  为固结时间 8h 的 1.76 倍，而  $\lambda_{\max}$  为 0.69 倍。

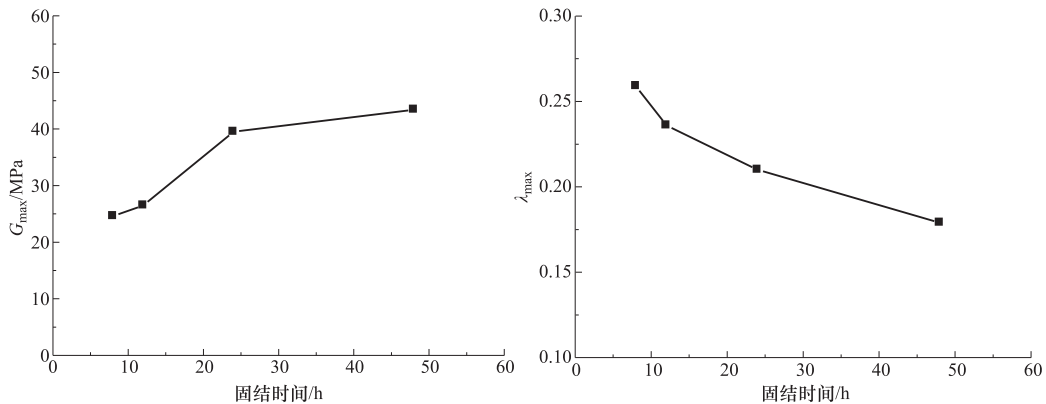


图 5  $G_{\max}$ 、 $\lambda_{\max}$  与固结时间的关系

Fig.5 The relationships between consolidation time and  $G_{\max}$ ,  $\lambda_{\max}$

根据表 2 试验结果, 拟合得到不同固结时间下动剪切模量比  $G_d/G_{\max}$ 、阻尼比  $\lambda$  与动剪切应变  $\gamma_d$  的关系曲线 (见图 6)。由图 6 可知,  $G_d/G_{\max}$  随着  $\gamma_d$  的增大而减小,  $\lambda$  随着  $\gamma_d$  的增大而增大。曲线变化趋势随着固结时间的变化而变化, 其中动剪切模量比受固结时间的影响较显著, 且随着固结时间的增加而减小。阻尼比同样受固结时间的影响, 以  $\gamma_d=0.26\times 10^{-4}$  为分界点, 当  $\gamma_d>0.26\times 10^{-4}$  时,  $\lambda$  随着固结时间的增加而减小; 当  $\gamma_d<0.26\times 10^{-4}$  时,  $\lambda$  随着固结时间的增加而增大。产生这一现象的原因, 可根据阻尼比的定义 (正比于滞回圈和三角形面积之比) 进行分析, 在循环振动过程中, 阻尼比随着动剪切应变动态变化。由图 3 可知, 随着动剪切应变的逐渐升高, 滞回圈的面积随之增大, 但 8h 固结条件下的滞回圈和三角形面积之比先大后小, 而 48h 固结条件下的滞回圈和三角形面积之比则先小后大, 在 8h 固结条件下滞回圈先小后大, 而在 48h 固结条件下滞回圈则先大后小, 阻尼比在动剪切应变增长的过程中可能达到平衡, 即出现分界点。具体结果还需多组平行试验进行有效验证, 进而提高试验结果的精度。

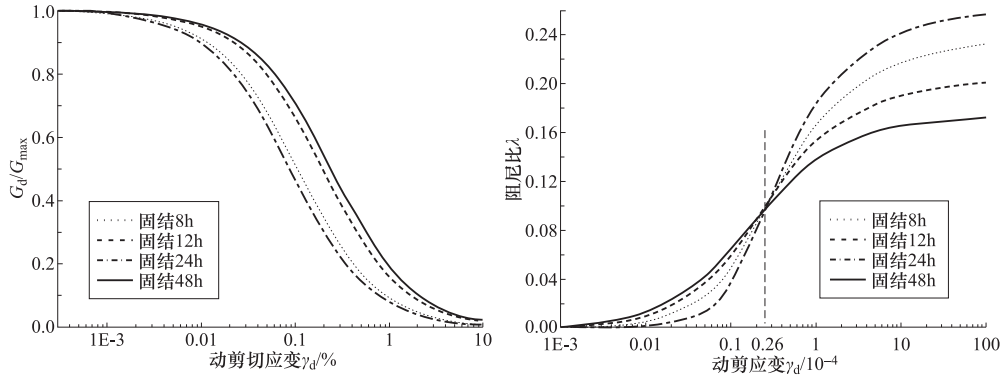


图 6  $G_d/G_{\max} - \gamma_d$  和  $\lambda - \gamma_d$  曲线

Fig.6 The curve of  $G/G_{\max} - \gamma$  and  $\lambda - \gamma$  under different consolidation time

为满足工程需要, 计算目前广泛使用的土粘弹性等价线性本构模型中常用的 8 个典型动剪切应变下的动剪切模量比和阻尼比, 结果表 3 所示。

表 3 典型动剪切应变下的动剪切模量比与阻尼比

Table.3 The values of shear modulus and damping ratio by typical shear strains

$\gamma_d(\times 10^{-4})$	固结时间							
	8h		12h		24h		48h	
	$G_d/G_{\max}$	$\lambda$	$G_d/G_{\max}$	$\lambda$	$G_d/G_{\max}$	$\lambda$	$G_d/G_{\max}$	$\lambda$
100	0.1974	0.2568	0.1667	0.2329	0.0975	0.2010	0.0826	0.1722
50	0.3298	0.2550	0.2857	0.2305	0.1776	0.1998	0.1525	0.1701
10	0.7110	0.2440	0.6667	0.2180	0.5192	0.1900	0.4737	0.1660
5	0.8311	0.2307	0.8000	0.2103	0.6835	0.1843	0.6429	0.1616
1	0.9609	0.1903	0.9524	0.1700	0.9153	0.1560	0.9000	0.1404
0.5	0.9801	0.1452	0.9756	0.1355	0.9558	0.1307	0.9474	0.1196
0.1	0.9960	0.0295	0.9950	0.0450	0.9908	0.0561	0.9890	0.0659
0.05	0.9980	0.0083	0.9975	0.0217	0.9954	0.0324	0.9945	0.0372

## 4 结论

针对天津滨海软土, 利用动三轴试验仪, 通过应变控制施加循环荷载进行模量、阻尼试验, 初步分析动三轴固结时间对滨海软土动力特性参数的影响, 得出以下结论:

(1) 随着固结时间的增加, 最大动剪切模量  $G_{\max}$  有逐渐减小的趋势, 而最大阻尼比  $\lambda_{\max}$  和极限抗剪强度  $\tau_{\text{ult}}$  随之增大, 并呈现一定的线性关系。

(2) 动剪切模量比  $G_d/G_{\max}$  随着动剪切应变  $\gamma_d$  的增大而减小, 阻尼比  $\lambda$  随着动剪切应变  $\gamma_d$  的增大而增大。试验结果表明, 固结时间对  $G_d/G_{\max}-\gamma_d$  曲线、 $\lambda-\gamma_d$  曲线的影响较大,  $\gamma_d$  相同时,  $G_d/G_{\max}$  随着固结时间的增大而减小。对于阻尼比而言, 以  $\gamma_d=0.26\times 10^{-4}$  为分界点, 当  $\gamma_d>0.26\times 10^{-4}$  时, 阻尼比随着固结时间的增加而增大; 当  $\gamma_d<0.26\times 10^{-4}$  时, 阻尼比随着固结时间的增加而减小。

由于天然软土含水量高、孔隙比大等特殊物理力学性质, 在动三轴试验中会受到制样难和装样难等条件制约, 并直接影响固结试验的成功率, 也导致本研究中平行试验未能得到多组试验数据。此外, 对于更长的固结时间对软土动力特性的影响将在下一步工作中进行研究。

## 参考文献

- 陈国兴, 谢君斐, 张克绪, 1995. 土的动模量和阻尼比的经验估计. 地震工程与工程振动, **15** (1): 73—84.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015. GB/T 50269—2015 地基动力特性测试规范. 北京: 中国计划出版社.
- 兰景岩, 2016. 软土动力特性及其地震动效应研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 雷华阳, 任倩, 张文振等, 2014. 吹填超软土固结特性试验分析. 工程地质学报, **22** (6): 1039—1045.
- 刘霞, 贾荣光, 杜历英等, 2010. 动三轴试验固结时间对动剪切模量比和阻尼比影响的初步分析. 华北地震科学, **28** (4): 31—36.
- 王炳辉, 杨树才, 陈国兴等, 2009. 固结时间对软粘土动剪切模量的影响. 防灾减灾工程学报, **29** (4): 399—404.
- 刘洋, 王喆, 闫鸿翔, 2013. 软土固结试验数值模拟. 岩土力学, **34** (S2): 407—412, 420.
- 熊伟, 尚守平, 王海东等, 2011. 应变历史对黏土剪切模量和阻尼比的影响. 土木建筑与环境工程, **33** (1): 71—76.
- 中华人民共和国水利部, 1999. SL 237—1999 土工试验规程. 北京: 中国水利水电出版社.
- Anderson D. G., Stokoe K. H., 1978. Shear modulus a time-dependent soil property. ASTM STP 654, Symposium on Dynamic Geotechnolgy Test. Denver, Colorado, USA, ASTM, 66—90.
- Frost M. W., Fleming P. R., Rogers C. D. F., 2004. Cyclic triaxial tests on clay subgrades for analytical pavement design: Proceedings of the American society of civil engineers. Journal of Transportation Engineering, **130**(3): 378—386.
- Rao S. N., Kumar N. D., 2007. Earth pressure on caissons in marine clay under cyclic loading. Marine Georesources & Geotechnolgy, **25**(1): 15—35.
- Yilmaz M. T., Pekcan O., Bakir B. S., 2004. Undrained cyclic shear and deformation behavior of silt-clay mixtures of Adapazan, Turkey. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, **24**(7): 497—507.

## Experimental Study on the Influence of Consolidation Time on Dynamic Characteristics of Soft Soil

Lan Jingyan<sup>1,2)</sup>, Wang Yanwei<sup>1,2)</sup>, Cao Zhenzhong<sup>2)</sup> and Liu Juan<sup>2,3)</sup>

1) Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

2) Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

3) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

**Abstract** The consolidation test is an important step of dynamic characteristic test for soft soil, and the consolidation time is an important factor affecting the dynamic characteristic parameters of soft soil. To address the uncertainty of the consolidation time in triaxial test for engineering and scientific research work, the parallel triaxial tests of soft soil will be carried out in this paper, by using the 8 hours, 12 hours, 24 hours and 24 hours to finish the consolidation test. The influence of consolidation time on dynamic characteristics of soft clay is analyzed through the test results of characteristic parameters, such as  $G_{\max}$ ,  $\lambda_{\max}$ ,  $G/G_{\max}-\gamma$  curve,  $\lambda-\gamma$  curve. The results show that dynamic characteristics parameters of soft soil are significantly affected by consolidation time. The values of  $G/G_{\max}-\gamma$  decrease with the increase in consolidation time. The damping ration test results show that there is a clear boundary point for dynamic shear strain. Below the boundary point, the damping obtained at the mid-to-long term consolidation time is relatively large, while above the point, the damping obtained at the short-term consolidation time relatively large.

**Key word:** Coastal soft soil; Consolidation time; Dynamic shear modulus; Damping ratio