

DOI: 10.11779/CJGE2020S1023

# 静动荷载作用下海洋软黏土刚度弱化特性研究

陆素洁<sup>1</sup>, 童俊豪<sup>2</sup>, 潘坤<sup>2\*</sup>, 袁宗浩<sup>2</sup>, 潘晓东<sup>2</sup>, 史吏<sup>2</sup>, 何奔<sup>1</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 利用动三轴联合弯曲元测试系统对嘉兴原状海洋软黏土进行了一系列不排水条件下单调和循环三轴试验, 分析静动荷载作用对正常固结软黏土的小应变剪切模量及刚度弱化特性的影响。试验结果表明, 土体小应变剪切模量在单调荷载作用下先减小后增大, 在循环荷载作用时则逐渐减小并最终保持稳定。在中到大应变下, 饱和软土归一化动模量随循环单幅应变发展不断减小, 且其值相较于单调剪切时的割线模量略大。研究发现, 土体动模量弱化规律与动荷载作用下的小应变刚度特性密切相关, 在不同固结围压和循环加载条件下表现出很好的一致性。研究结果可为该区域海洋构筑物设计提供依据, 也可供其他同类型工程借鉴。

**关键词:** 海洋软黏土; 单调荷载; 循环荷载; 小应变剪切模量; 刚度弱化

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0116-05

**作者简介:** 陆素洁(1982—), 女, 福建古田人, 高级工程师, 主要从事水工结构设计研究。E-mail: lu\_sj@ecidi.com。

## Stiffness degradation of marine soft clay under monotonic and cyclic loadings

LU Su-jie<sup>1</sup>, TONG Jun-hao<sup>2</sup>, PAN Kun<sup>2</sup>, YUAN Zong-hao<sup>2</sup>, PAN Xiao-dong<sup>2</sup>, SHI Li<sup>2</sup>, HE Ben<sup>1</sup>

(1. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. College of Civil Engineering and

Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** A series of undrained monotonic and cyclic triaxial tests are conducted on Jiaying intact marine soft clay by using a testing system combined with triaxial apparatus and bender element to investigate the small strain shear modulus and stiffness degradation of isotropically consolidated soft clay. The results indicate that the small strain shear modulus decreases and then increases under monotonic loading, but it tends to decrease continuously under cyclic loading. At medium to large strains, the normalized equivalent modulus of saturated soft clay decreases gradually with the development of single-amplitude cyclic strain with a larger degradation rate than the monotonic secant modulus. In addition, a fairly unique relationship exists between the cyclic degraded stiffness and small strain shear modulus, which is barely affected by the initial confining pressure and cyclic stress condition. The findings obtained in this study can provide the basis for the design of offshore structures in this area, and can also be used as a reference in other engineering projects.

**Key word:** marine soft clay; monotonic loading; cyclic loading; small strain shear modulus; stiffness degradation

## 0 引言

为了解沿海地区能源需求缺口问题并减少对石化能源的依赖, 海上风电作为一种清洁可再生资源已经成为新能源领域发展的重点。中国近海风能资源丰富, 根据国家能源局发展规划, 中国“十三五”期间风电开工建设规模达到千万千瓦。目前, 嘉兴在建的300兆瓦嘉兴1号海上风电场是杭州湾平湖海域大型海上风电场。风场中心点离岸约20 km, 工程海域水深8~12 m, 海底滩地表层主要为淤泥, 软土地基厚达40 m。在风机设备自重荷载及风浪、机器振动引起的循环荷载的作用下, 海洋软黏土易发生孔压累积、变形发展和刚度弱化, 进而引起风机基础性能劣化或失稳。因此, 海洋结构物基础设计需对静动荷载作用

下海底饱和软黏土刚度弱化特性进行更为深入的研究。

小应变剪切模量是土的基本力学参数, 在室内土工试验中通常可由共振柱试验或弯曲元试验进行量测。使用弯曲元测量土体小应变剪切模量时可与三轴试验系统联合测试, 试验原理明确, 操作方法简单, 获得了较多应用<sup>[1-2]</sup>。早期研究表明, 土体小应变剪切模量与其孔隙比、有效应力和超固结比有关, 这些影响因素可通过Hardin公式描述<sup>[3]</sup>。对于静动荷载作用下的土体, 不排水静动加载历史对小应变剪切模量的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909249)

收稿日期: 2020-06-02

\*通信作者(E-mail: pk2018@zju.edu.cn)

影响除了反映在有效应力的改变之外, 还需考虑土体结构的损伤演化。周燕国等<sup>[4]</sup>和谷川等<sup>[5]</sup>分别在饱和砂土和软土中发现了小应变剪切模量在大幅值动力荷载作用下减小的现象。与小应变剪切模量不同, 土作为强非线性材料, 其在中到大应变下的塑性模量将发生衰减。研究表明, 影响土体刚度弱化特性的因素包括超固结比、非等向固结、加载幅值、主应力轴旋转等<sup>[6-7]</sup>。为了在海洋基础设计中考虑海床的循环弱化效应, 建立软弱土循环弱化的表征模型甚为关键。Idriss 等<sup>[8]</sup>通过分析动模量衰减规律提出了软化指数的概念, 并将其与循环振次建立关联。基于软化指数的刚度弱化模型得到了研究者的广泛采用, 王军等<sup>[9]</sup>、黄茂松等<sup>[10]</sup>、郭小青等<sup>[11]</sup>分析了国内不同区域的典型软黏土循环弱化特性与振次的关系。应当指出的是, 小应变剪切模量和塑性模量作为土体结构响应的宏观表征, 应进一步研究二者间相互关系, 而以往研究多针对其中的单一对象开展。

本文开展了一系列不排水静动三轴试验, 在单调和循环剪切不同阶段进行剪切波速量测, 研究了正常固结海洋软黏土的小应变剪切模量和刚度弱化特性。本文研究成果揭示了静动加载历史对原状软黏土刚度特性的影响规律, 通过建立小应变剪切模量与动模量的关系, 为复杂应力条件下土体力学特性分析提供了新的途径, 可应用于工程荷载作用下场地软土刚度弱化特性的评价。

# 1 试验方法

## 1.1 试验土样与试样制备

本文试验所用原状软黏土取自嘉兴 1 号海上风电场工程所处海域, 取样深度 18~21 m, 液限 42%, 塑性指数 23。主要物性参数: 相对密度  $G_s=2.66$ , 含水率  $w=45\sim48\%$ , 孔隙比  $e=1.20\sim1.28$ , 黏粒含量=49%, 粉粒含量=50%。试验时, 对原状薄壁土样切取直径为 50 mm, 高度为 100 mm 的圆柱体试样。试验采用 GDS 土体多功能三轴试验系统, 该系统可实现固结、单调及循环荷载等多种加载模式。将制备的试样装入三轴压力室进行反压饱和并检查  $B$  值, 均达到 0.95 以上, 满足饱和度要求。

## 1.2 试验方案

对制备的饱和软黏土试样等向固结至初始有效围压  $p'_0=50\sim400$  kPa。一维压缩试验表明本文土样的先期固结应力约为 35 kPa, 因此试样均处于正常固结状态。固结完成后分别在不排水条件下进行单调和循环三轴试验, 试验方案见表 1。单调加载时, 采用应变控制式三轴压缩加载模式, 加载速率为 0.05 mm/min。

循环加载时, 输入应力控制式正弦波形荷载并调整循环应力比 CSR (CSR 定义为循环偏应力幅值和单调加载时峰值偏应力之比) 大小。对于 Cyc1 和 Cyc2 组试验, CSR 逐级增大且每级荷载循环振次  $N$  均为 10。

表 1 单调及循环三轴试验

Table 1 Monotonic and cyclic triaxial tests				
试验类别	组号	$p'_0$ /kPa	$N$	CSR
单调试验	Mon1	200	—	—
	Mon2	400	—	—
	Mon3	50	—	—
	Mon4	100	—	—
	Mon5	300	—	—
循环试验	Cyc1	200	130	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.7, 1.0, 1.35
				0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.7, 1.0, 1.35
	Cyc2	400	130	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.7, 1.0, 1.35
				0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.7, 1.0, 1.35
	Cyc3	200	1000	0.5
	Cyc4	200	20	1.0
	Cyc5	400	1000	0.5

为了获得静动加载条件下土体小应变刚度演化规律, 本文结合 GDS 弯曲元测试系统对单调和循环三轴试验过程中的土样进行剪切波速测试。该系统包括两个压电传感器, 其中一个作为激发源装配在土样帽上插入土样上端, 另一个作为接收器固定在压力室底部插入土样下端。试验时, 激发源产生的剪切波通过土体传播到接收端, 通过观察时域波形得到剪切波在土样内的传播波速, 进而根据土体密度得到其小应变剪切模量。本次试验在多个阶段进行了剪切波速的量测。第一个阶段为固结完成时 ( $\varepsilon_a=0$  或  $N=0$ ), 以建立小应变剪切模量与初始固结围压的定量关系。同时, 为了研究静动力加载历史对土体小应变刚度特性的影响, 对 Mon1、Mon2 和 Cyc1~5 等 7 组三轴试验, 当应变或振次达到设定值后暂停加载, 待试样内孔压均匀稳定分布后进行弯曲元试验。

# 2 试验结果与分析

## 2.1 固结完成时的小应变剪切模量

图 1 (a) 所示为通过弯曲元试验获得的固结完成时土体小应变剪切模量  $G_0$  和初始固结围压  $p'_0$  的关系。由图可知,  $G_0$  随  $p'_0$  增大而增大。早期研究表明, 对于正常固结饱和软黏土, 其小应变剪切模量可表示为初始固结围压和孔隙比的函数<sup>[3]</sup>, 即 Hardin 公式:

$$G_0/p_a = SF(e)(p'_0/p_a)^n \quad (1)$$

式中  $S$ ,  $n$  为经验参数;  $p_a$  为大气压力以统一量纲 ( $p_a=101 \text{ kPa}$ );  $F(e)$  是表征孔隙比影响的函数, 对于饱和软黏土一般采用以下形式<sup>[5]</sup>:

$$F(e) = 1/(0.3 + 0.7e^2) \quad (2)$$

根据式 (1), (2) 对图 1 (a) 中数据进行归一化处理, 如图 1 (b) 所示。结果表明, 考虑孔隙比影响的小应变剪切模量与初始有效围压有较好的相关性, 可用式 (1) 拟合。对于本试验所用的嘉兴原状软黏土, 经验参数  $S$ ,  $n$  可分别取为  $S=358$  和  $n=0.665$ 。

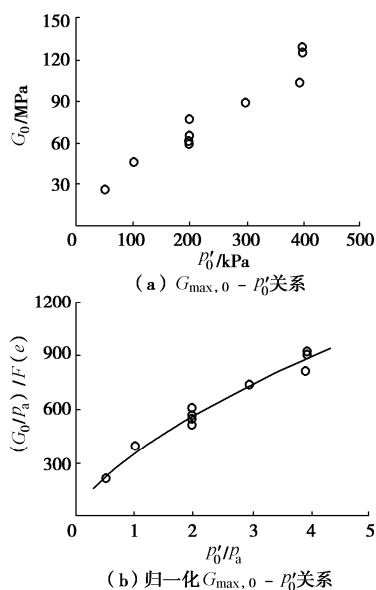


图 1  $G_{\max,0} - p'_0$  关系和归一化  $G_{\max,0} - p'_0$  关系

Fig. 1 Relationship between  $G_{\max,0}$  and  $p'_0$  and normalized relationship between  $G_{\max,0}$  and  $p'_0$

## 2.2 单调加载条件下海洋软黏土刚度特性

对于单调荷载试验 Mon1 和 Mon2, 在轴向应变发展的不同阶段进行了剪切波速的量测, 并根据土样高度变化情况算出各阶段小应变剪切模量  $G_{\max}$ , 如图 2 所示。可见, 土体小应变剪切模量随单调加载引起的轴向应变先减小后增大; 在  $\varepsilon_a$  为 8%~10%处,  $G_{\max}/G_0$  达到最小值。这表明在单调加载初期, 由于孔压累积引起有效应力降低、颗粒排布扰动及结构损伤, 土体刚度逐渐降低; 随着加载继续进行, 试样呈现应变硬化, 且由于发生剪胀有效应力有所恢复, 土体小应变剪切模量转而增大。

单调剪切荷载作用时, 土体在中到大应变下的刚度弱化特性一般用割线模量  $G_{\text{sec}}$  表征。图 3 给出了不同初始围压条件下割线模量衰减规律。具体来说,  $G_{\text{sec}}$  随应变发展逐渐减小并趋近于 0; 同时, 初始固结围压越大,  $G_{\text{sec}}$  相对更大且衰减更快。进一步地, 对割线模量进行归一化处理后, 可以发现,  $G_{\text{sec}}/G_0$  随轴向应变衰减的规律不受初始固结条件的影响而近似唯

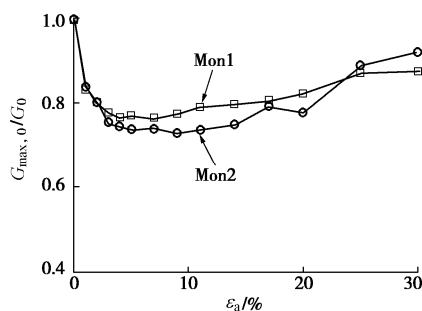


图 2 单调加载下的小应变剪切模量

Fig. 2 Small strain shear moduli under monotonic loading

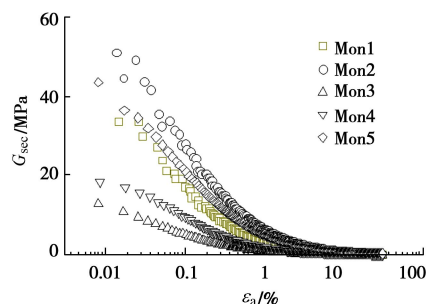


图 3 割线模量与应变的关系

Fig. 3 Secant moduli against axial strain

## 2.3 循环加载条件下海洋软黏土刚度特性

与图 2 类似, 图 4 所示为循环剪切过程中土体归一化小应变剪切模量  $G_{\max}/G_0$  与单幅应变的关系, 该关系受初始固结围压和循环荷载幅值影响较小。当应变较小时, 归一化剪切模量急剧减小; 随着循环应变进一步发展,  $G_{\max}/G_0$  减小的趋势逐渐缓慢, 最终稳定至 0.2 左右。这表明, 动荷载作用下土体的循环弱化将使得其刚度降低, 且这种降低的趋势可由单幅应变较好表征。与常见的基于循环振次  $N$  的刚度软化模型相比, 建立小应变剪切模量与循环单幅应变的关联无需考虑动荷载幅值的影响。

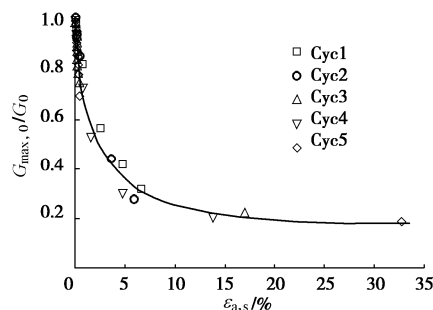


图 4 循环加载下的小应变剪切模量

Fig. 4 Small strain shear moduli under cyclic loading

循环剪切荷载作用下, 土体发生塑性变形时的刚度弱化特性通常用等价模量  $G_{\text{eq}}$  表征,  $G_{\text{eq}}$  一般定义为某一循环振次所形成的应力应变滞回圈骨干线的

斜率<sup>[12]</sup>。图 5 (a) 所示为 5 组循环三轴试验中等价模量衰减规律。总体来说,  $G_{eq}$  随单幅应变发展逐渐减小并趋近于 0; 给定固结围压条件下, 循环应力比 CSR 对动模量随应变减小的规律无显著影响; 但是, 当初始固结围压不同时,  $G_{eq}$  在高围压下相对较大且衰减更快。根据弯曲元试验测得的固结完成时小应变剪切模量对等价模量进行归一化处理, 如图 5 (b) 所示。可以看到, 归一化后的等价模量与动单幅应变的关系在不同试验条件下具有较好一致性, 与初始围压和循环应力比均无关。这与王军等<sup>[9]</sup>观察到的杭州软土刚度软化特征类似。 $G_{eq}/G_0$  随  $\varepsilon_{a,s}$  减小的趋势在应变较小时逐渐加快后又减慢, 在  $\varepsilon_{a,s}=1\%$  后缓慢趋近于 0。图 5 (b) 中一并给出了单调加载下土体归一化割线模量  $G_{sec}/G_0$  随轴向应变衰减的均值线。与循环剪切荷载相比, 单调加载时饱和软黏土在中到大应变下 ( $\varepsilon_a$  或  $\varepsilon_{a,s} > 0.01\%$ ) 塑性模量相对较小, 刚度衰减速率也相对较慢。

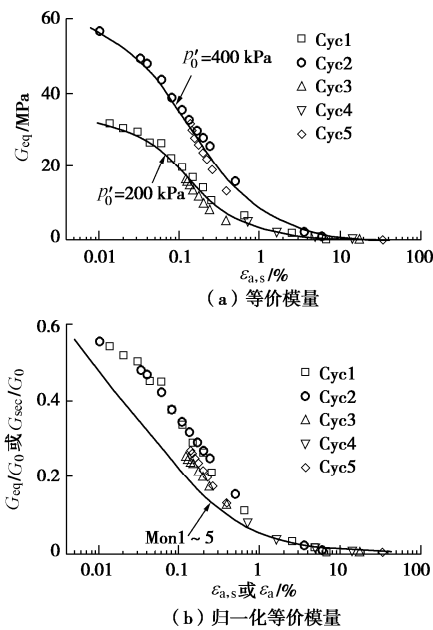


图 5 等价模量及归一化等价模量与应变的关系

Fig. 5 Equivalent moduli and normalized equivalent moduli against axial strain

图 4, 5 表明, 饱和软黏土在动荷载作用下的小应变剪切模量  $G_{max}$  和等价模量  $G_{eq}$  都会随循环应变累积发生弱化, 且这种弱化趋势经归一化处理后与固结围压和循环应力比无关。据此, 可直接建立动模量  $G_{eq}/G_0$  和小应变剪切模量  $G_{max}/G_0$  之间的关联, 如图 6 所示。从图中可以看到, 在循环荷载作用的不同阶段, 饱和软土的  $G_{eq}/G_0$  和  $G_{max}/G_0$  间存在唯一关系: 前者随着后者的减小而不断减小, 可用下式表示:

$$\ln(G_{eq}/G_0) = a + b(G_{max}/G_0) \quad (3)$$

式中,  $a, b$  为经验参数, 对于本文的嘉兴海洋软黏土,

分别取  $a=-6.57$  和  $b=5.85$ 。在工程实际中, 可通过现场试验获得的剪切波速确定土体小应变剪切模量, 基于实验室建立的动模量与小应变剪切模量的关系, 从而快速评估动力加载历史对土体刚度弱化特性的影响。为了获得针对海上风电工程动荷载作用特点的软黏土强度折减规律, 尚需对动载结束的土样进一步开展抗剪强度试验研究, 并考虑复杂初始应力状态和动力加载条件的影响。

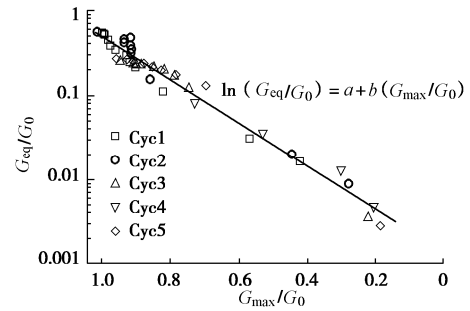


图 6 循环加载下等价模量与小应变剪切模量的关系

Fig. 6 Relationship between equivalent modulus and small strain shear modulus under cyclic loading

### 3 结 论

本文开展了一系列静动三轴联合弯曲元试验, 探讨不排水条件下静动应力加载历史对原状饱和软黏土刚度弱化特性的影响。

(1) 海洋软黏土正常固结完成时的小应变剪切模量与初始有效围压有较好的相关性, 可用 Hardin 公式描述孔隙比和固结围压的影响。

(2) 单调剪切荷载作用下, 土体小应变剪切模量随轴向应变先减小后增大; 其中到大应变下的割线模量则不断减小直至趋近于 0。

(3) 循环剪切荷载作用下, 土体小应变剪切模量逐渐减小并最终趋于稳定; 归一化动模量随循环单幅应变不断减小, 且其值相较于单调剪切时的割线模量略大。土体动模量弱化特性可通过动荷载作用下的小应变剪切模量表征, 二者存在较好的一致性关系, 与初始固结围压和循环荷载幅值无关。

### 参考文献:

- [1] 黄 博, 陈云敏, 殷建华, 等. 粉土和粉砂的动力特性试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(2): 143 - 147. (HUANG Bo, CHEN Yun-min, YIN Jian-hua, et al. Laboratory study on dynamic properties of silt and silty sand[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(2): 143 - 147. (in Chinese))

- [2] 董全杨, 蔡袁强, 徐长节, 等. 干砂饱和砂小应变剪切模量共振柱弯曲元对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2283 - 2289. (DONG Quan-yang, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. Measurement of small-strain shear modulus  $G_{max}$  of dry and saturated sands by bender element and resonant column tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2283 - 2289. (in Chinese))
- [3] HARDIN B O, BLACK W L. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 1968, **94**(2): 453 - 469.
- [4] 周燕国, 陈云敏, 柯瀚. 砂土液化势剪切波速简化判别法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(13): 2369 - 2375. (ZHOU Yan-guo, CHEN Yun-min, KE Han. Improvement of simplified procedure for liquefaction potential evaluation of sands by shear wave velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(13): 2369 - 2375. (in Chinese))
- [5] 谷川, 蔡袁强, 王军, 等. 循环应力历史对饱和软黏土小应变剪切模量的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1654 - 1660. (GU Chuan, CAI Yuan-qiang, WANG Jun, et al. Effects of loading history on small-strain shear modulus of saturated clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1654 - 1660. (in Chinese))
- [6] ZHOU J, GONG X. Strain degradation of saturated clay under cyclic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(1): 208 - 212.
- [7] GUO L, CAI Y, JARDINE R J, et al. Undrained behaviour of intact soft clay under cyclic paths that match vehicle loading conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **55**(1): 90 - 106.
- [8] IDRIS I M, DODRY R, SINGH R D. Nonlinear behavior of soft clay during cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, **104**(12): 1427 - 1447.
- [9] 王军, 蔡袁强, 徐长节. 循环荷载作用下软黏土刚度软化特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2138 - 2144. (WANG Jun, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Experimental study on degradation of stiffness of saturated soft clay under undrained cyclic loading[J]. Rock and soil mechanics, 2007, **28**(10): 2138 - 2144. (in Chinese))
- [10] 黄茂松, 李帅. 长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1491 - 1498. (HUANG Mao-song, LI Shuai. Degradation of stiffness and strength of offshore saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1491 - 1498. (in Chinese))
- [11] 郭小青, 朱斌, 刘晋超, 等. 珠江口海洋软土不排水抗剪强度及循环弱化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(4): 1005 - 1012. (GUO Xiao-qing, ZHU Bin, LIU Jin-chao, et al. Experimental study of undrained shear strength and cyclic degradation behaviors of marine clay in Pearl River Estuary[J]. Rock and soil mechanics, 2016, **37**(4): 1005 - 1012. (in Chinese))
- [12] SHIBUYA S, MITACHI T. Small strain shear modulus of clay sedimentation in a state of normal consolidation[J]. Soils and foundations, 1994, **34**(4): 67 - 77.

(编校: 胡海霞)