

DOI: 10.11779/CJGE2021S2010

# 广东阳江地区海洋软土 HSS 模型参数的试验研究

顾晓强<sup>1,2</sup>, 刘文倩<sup>1,2</sup>, 陈玺元<sup>1,2</sup>, 林毅峰<sup>3</sup>, 校建东<sup>3</sup>, 吴彩虹<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

**摘要:** 海上风机对循环动荷载作用下基础的倾斜和振动频率均有严格控制要求, 其中海洋土的小应变模量特性起着至关重要的作用。由于小应变硬化 (Hardening Soil-Small, HSS) 模型能够反映土体在小应变范围内模量的高度非线性, 其在岩土工程变形分析中得到了广泛的应用。利用室内一维固结仪、GDS 应力路径三轴仪及弯曲元波速测试系统, 测定了广东阳江地区典型海洋软土 HSS 模型参数, 包括强度参数  $c'$  和  $\varphi'$ , 刚度参数  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ , 破坏比  $R_f$  和小应变参数  $G_0^{\text{ref}}$ 。基于试验结果, 建立了实测模型参数与土体孔隙比之间的关系, 并对该地区海洋软土 HSS 模型参数的取值给出了初步建议。

**关键词:** 海洋软土; 小应变模量; HSS 模型; 固结试验; 三轴试验; 弯曲元

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2021)S2-0041-04

**作者简介:** 顾晓强(1981—), 男, 浙江桐乡人, 博士, 教授, 主要从事土的基本特性、土动力学和宏微观土力学等方面的研究。E-mail: guxiaoqiang@tongji.edu.cn。

## Experimental study on HSS model parameters for marine soft soils in Yangjiang, Guangdong Province

GU Xiao-qiang<sup>1,2</sup>, LIU Wen-qian<sup>1,2</sup>, CHEN Xi-yuan<sup>1,2</sup>, LIN Yi-feng<sup>3</sup>, XIAO Jian-dong<sup>3</sup>, WU Cai-hong<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

**Abstract:** The offshore wind turbine structure has strict control criteria of the tilt and the resonant frequency of the foundation, while the small strain stiffness of the marine soils plays an important role in these properties. The hardening strain model with small strain (HSS) can appropriately consider the nonlinear stiffness degradation in the small strain range. The laboratory oedometer, GDS triaxial and bender element tests are carried out to determine the HSS model parameters for typical marine soft soils in Yangjiang, Guangdong Province. The parameters include the strength parameters  $c'$ ,  $\varphi'$ , stiffness parameters  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ ,  $E_{50}^{\text{ref}}$ ,  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ , failure ratio  $R_f$  and small strain shear stiffness  $G_0^{\text{ref}}$  at a reference stress. The test results are analyzed, and the relationship between these parameters and void ratio of the soils is proposed. It provides useful suggestions for determining the HSS model parameters of the marine soft soils in Yangjiang.

**Key words:** marine soft soil; small strain stiffness; HSS model; oedometer test; triaxial test; bender element

## 0 引言

阳江地处粤港澳大湾区、北部湾城市群和海南自由贸易试验区“金三角”中心地带, 是海上丝绸之路节点城市, 地理位置优越, 经济地位重要。近年来, 随着粤港澳大湾区建设的深入推进和海上风电资源的开发建设, 阳江海洋软土的静动力特性备受关注。与一般土体不同, 海洋软土具有含水率高、强度低、蠕变性强和灵敏度高等特点。同时, 海上风机等重大工程对变形的要求越来越严格, 其累积倾斜要求小于  $0.17^\circ$ , 在严格的变形控制下土体大部分处于小应变

变形范围。小应变硬化 (hardening soil-small, HSS) 模型由Benz<sup>[1]</sup>提出, 其能够考虑土体小应变阶段的非线性弹性特征以及应力相关特性。诸多学者的研究结果表明<sup>[2-3]</sup>, 相较于其它本构模型, 利用HSS模型计算的变形值与实测值更为接近, 更适用于对变形有严格控制要求的工程问题。HSS模型参数众多, 其获取需要大量的室内试验, 目前仅有上海地区积累了典型土层的HSS模型参数经验值<sup>[4-6]</sup>。广东阳江地区正在大

规模建设海上风电场, 但对该地区海洋软土HSS模型参数的试验研究较少。因此, 本文针对广东阳江地区的典型海洋软土, 开展了室内试验研究, 确定了HSS模型的强度参数和刚度参数。同时, 基于试验成果, 进一步建立了实测模型参数与土体孔隙比之间的关系, 为该地区海洋软土HSS模型参数的取值提供科学依据。

## 1 试验内容

### 1.1 试验土样

试验采用广东阳江地区某大型海上风电场钻探取得的典型原状软土样, 土样的基本物理指标见表 1。试验中, 标准固结试验试样直径为 61.8 mm, 高度为 20 mm; 三轴固结排水剪切试验试样直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm; 三轴固结排水加卸载试验试样直径为 50 mm, 高度为 100 mm。

表 1 试验土样的基本物理指标

Table 1 Physical indexes of test soil samples

土层序号	土层名称	取土深度/m	$\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	w/%	$e_0$	$I_p$ /%
ZK1-①	淤泥质粉质黏土	1.50~2.50	18.6	44.2	1.12	15.6
ZK1-②	淤泥质粉质黏土	4.50~5.50	18.0	43.4	1.17	11.8
ZK1-③	淤泥质黏土	7.45~7.85	16.7	49.6	1.45	18.5
ZK1-④	淤泥质黏土	10.80~11.20	17.2	46.8	1.33	19.3
ZK1-⑤	淤泥质黏土	16.35~16.75	17.7	43.4	1.23	19.4
ZK2-①	淤泥质粉质黏土	2.00~2.50	19.3	31.0	1.10	14.0
ZK2-②	粉质黏土	11.00~11.40	18.8	26.9	0.84	12.6
ZK2-③	粉质黏土	19.90~20.30	18.8	22.8	0.92	11.1

### 1.2 试验目的

HSS 模型中 13 个参数的具体定义和试验确定方法可参见顾晓强等<sup>[6]</sup>。本文通过三轴固结排水剪切试验获得了强度参数  $c'$  和  $\varphi'$ , 通过标准固结、三轴固结排水剪切、三轴固结排水加卸载以及弯曲元波速试验获得了刚度参数  $E_{oed}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$  和  $E_{ur}^{\text{ref}}$  和小应变模量  $G_0^{\text{ref}}$ , 并建立了刚度参数与土体孔隙比的关系。

### 1.3 试验方法

#### (1) 标准固结试验

标准固结试验采用一维固结仪, 每个原状样中切取 2 个环刀试样, 分级加载的荷重序列取为 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa, 每级固结时间为 24 h。

#### (2) 三轴固结排水剪切试验

三轴固结排水剪切试验采用 GDS 应力路径三轴仪, 3 个不同固结围压下的剪切试验构成一组。装样前先将试样进行真空饱和, 再通过三轴仪进行反压饱和,

直至测定的孔隙水压力系数  $B$  大于 0.95。然后分别在 100, 200, 300 kPa 的有效围压下进行固结。最后进行等应变速率排水剪切, 剪切速率为 0.008 mm/min<sup>[7]</sup>, 当轴向应变达到 25% 时, 结束试验。

#### (3) 三轴固结排水加卸载试验

三轴固结排水加卸载试验的仪器及试样饱和步骤与三轴固结排水剪切试验完全相同。试样的有效固结围压为 100 kPa。试样的加卸载剪切过程采用应力控制模块, 首先将试样加载到由三轴固结排水剪切试验确定的峰值偏应力的 40%, 然后将偏应力卸载到 0, 最后不断增大偏应力直至试样破坏。

#### (4) 弯曲元波速试验

土样的剪切波速试验通过安装在三轴仪上的弯曲元波速系统进行, 试验试样与三轴固结排水加卸载试验相同, 并测定试样在 100 kPa 有效围压下固结后的剪切波速, 进而得到剪切模量。剪切模量由下式确定:

$$G_0 = \rho V_s^2, \quad V_s = L_{ut} / \Delta t, \quad (1)$$

式中,  $L_{ut}$ ,  $\Delta t$  分别为弯曲元激发端尖和接收端尖的距离与波传播时间,  $\rho$  为试样固结后的密度。

试验前通过标定得到本弯曲元的系统延迟时间为 7  $\mu$ s, 弯曲元输入信号与输出信号初始偏振方向一致, 上下两端弯曲元各插入土样 3 mm。根据顾晓强等<sup>[7]</sup>的建议, 为更好地确定波速到达时间点, 激发频率分别采用 5, 10, 20, 50, 100 kHz。

## 2 试验结果

### 2.1 标准固结试验结果

图 1 为标准固结试验过程中各试样的轴向荷载  $p$  与应变  $\varepsilon_a$  关系曲线。由图 1 可以看出, 8 个试样的轴向应变随荷载的变化趋势相似, 当轴向应变较小时, 曲线变化比较平缓, 随着轴向应变的增大, 轴向荷载增加的越来越快。对 8 条荷载 - 应变曲线进行 2 次多项式拟合得到拟合曲线, 每条拟合曲线函数相关系数  $R^2$  均大于 0.97。根据拟合曲线函数, 可以得到轴向荷载为 100 kPa 时的曲线斜率, 即为参考固结切线模量  $E_{oed}^{\text{ref}}$ 。根据试验结果可以计算出各土样的压缩模量  $E_{s1-2}$ 。标准试验结果和其他试验结果汇总在表 2。

### 2.2 三轴固结排水剪切试验结果

#### (1) 强度参数 $c'$ 和 $\varphi'$

图 2 为 ZK1-③ 层试样破坏时的莫尔应力圆。为了得到各层土的强度参数, 根据 100, 200, 300 kPa 围压下的三轴固结排水试验结果绘制莫尔圆, 进而绘制抗剪强度包线。通过抗剪强度包线可以得到各层土的抗剪强度参数。

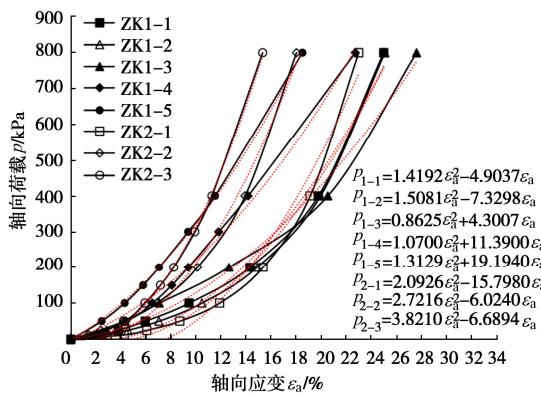


图 1 标准固结试验轴向荷载 - 应变关系

Fig. 1 Relationships between axial load and strain in consolidation tests

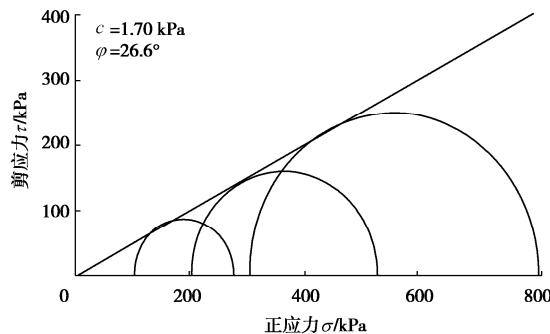


图 2 ZK1-③层试样破坏时的莫尔应力圆

Fig. 2 Mohr circles for a sample consolidated under different pressures

#### (2) 刚度参数 $E_{50}^{\text{ref}}$ 和破坏比 $R_f$

图 3 给出了 ZK1-③层试样在 100 kPa 参考围压下三轴固结排水剪切试验的应力 - 应变曲线。对于本次试验的所有试样，在剪切过程中，试样的偏应力  $q$  随着轴向应变  $\epsilon_a$  先增大而后基本保持不变或者有所下降。取 15% 应变对应的偏应力或者峰值偏应力作为  $q_f$ <sup>[7]</sup>，根据  $q - \epsilon_a$  曲线在  $0.5 q_f$  处所对应的割线斜率得到  $E_{50}^{\text{ref}}$ 。将各层试样的应力 - 应变曲线拟合成双曲线函数得到偏应力的渐进值  $q_a$ ，进而根据式  $R_f = q_f / q_a$  计算得到各层试样的  $R_f$  值。

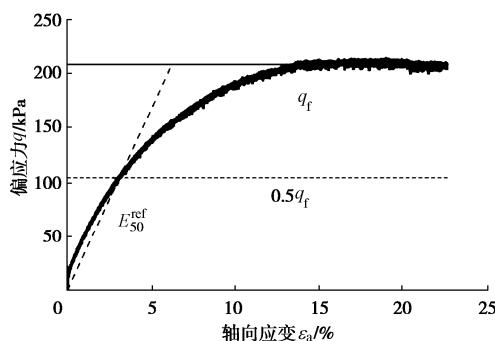


图 3 ZK1-③层试样固结排水剪切试验应力 - 应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve in a triaxial CD test

### 2.3 三轴固结排水加卸载试验结果

ZK1-③层试样在 100 kPa 参考围压下的三轴固结排水加卸载试验结果如图 4 所示。固结排水加载过程中随着轴向应变的增加偏应力逐渐增大。加卸载过程中，各试样的应力应变曲线均出现一个滞回圈，连接滞回圈的两个端点所得直线的斜率即为 HSS 模型参数中的另外一个刚度参数  $E_{ur}^{\text{ref}}$ 。根据表 2，ZK2-①层试样的  $E_{ur}^{\text{ref}}$  明显偏高，这是因为该层土为海洋下表层土，夹杂有较多坚硬的贝壳等。类似于固结排水剪切试验，此次试验同样可以得到参考割线模量  $E_{50}^{\text{ref}}$ 。

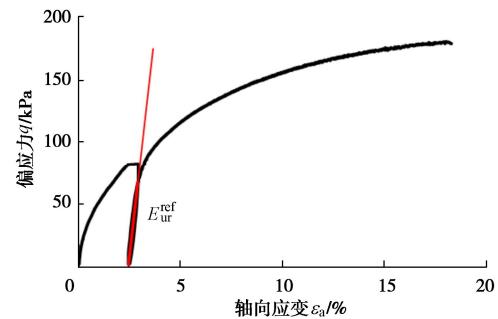


图 4 ZK1-③层试样固结排水加卸载试验应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve in a triaxial CD loading-unloading-reloading test

### 2.4 弯曲元测试结果

图 5 为弯曲元测试中 ZK1-⑤层试样的剪切波信号。参考顾晓强等<sup>[7]</sup>的建议，采用时域初达波法确定剪切波在试样中的传播时间和传播速度，进而确定试样的参考初始小应变剪切模量  $G_0^{\text{ref}}$ 。

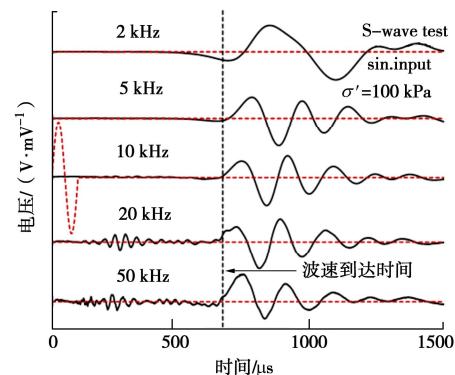


图 5 ZK1-⑤层试样弯曲元测试剪切波接收信号

Fig. 5 Received shear-wave signals in a bender element test

## 3 试验结果汇总与分析

### 3.1 试验结果汇总

表 2 给出了所有土层土体的 HSS 模型参数。由表 2 可以看出，参考初始小应变剪切模量最大，参考固结切线模量和压缩模量很接近且最小。

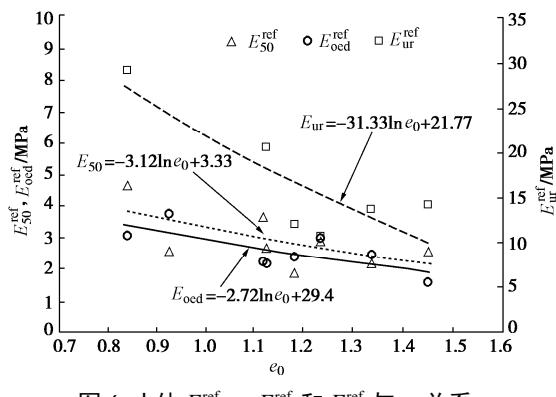
表 2 试验所得土体 HSS 模型参数汇总

Table 2 Summary of parameters of HSS model in this research

土层序号	$c'$ /kPa	$\phi'$ ( $^{\circ}$ )	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{sl-2}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{50}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	$G_0^{\text{ref}}$ /MPa	$R_f$
ZK1-①	50.1	15.8	2.2	2.1	2.8	20.7	39.6	0.62
ZK1-②	—	—	2.4	2.3	1.9	12.1	38.6	0.67
ZK1-③	1.7	26.6	1.6	1.8	2.6	14.3	—	0.75
ZK1-④	—	—	2.5	3.5	2.3	13.8	34.8	0.70
ZK1-⑤	18.5	17.4	3.0	3.6	3.0	10.8	45.2	0.70
ZK2-①	5.6	31.9	2.3	2.9	3.7	41.3	75.8	0.61
ZK2-②	11.5	22.6	3.1	3.1	4.7	29.2	—	0.73
ZK2-③	8.1	18.6	3.8	4.3	2.6	11.4	—	0.71

### 3.2 试验结果分析

考虑到土体变形特性主要跟土体的状态有关, 对于黏土, 影响土体模量的因素主要包括应力状态、孔隙比和天然结构等。参考顾晓强等<sup>[6]</sup>, 图 6 给出了土体各参考模量  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  与  $e_0$  关系。总体上, 本次试验结果与大量室内试验统计结果<sup>[6]</sup>较一致。由图 6 可以看出, 各模量均与孔隙比  $e_0$  存在良好的关系, 其拟合结果分别为  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = -2.72 \ln e_0 + 29.4$ ,  $E_{50}^{\text{ref}} = -3.12 \ln e_0 + 3.33$ ,  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = -31.33 \ln e_0 + 21.77$ 。

图 6 土体  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  与  $e_0$  关系Fig. 6 Relationships among  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ ,  $E_{50}^{\text{ref}}$ ,  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  and  $e_0$ 

## 4 结 论

本文通过标准固结、三轴固结排水剪切、三轴固结排水加卸载和弯曲元波速试验, 获得了广东阳江地区典型海洋软土层 HSS 模型的部分参数, 初步结论和建议如下:

(1) 试验确定了典型海洋软土 HSS 模型的强度参数和刚度参数, 为该地区海洋软土 HSS 模型参数的取值提供了科学依据。

(2) 基于试验成果, 本文模型参数与土体孔隙比之间的关系, 建议进一步研究以上关系, 以便更精确地应用于实际工程中。

## 参考文献:

- [1] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [2] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. (ZHOU En-ping. Application of hardening soil model with small-strain in deformation analysis for foundation pit[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese))
- [3] 陈磊. 小应变本构模型在留有反压土的基坑开挖变形中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2014. (CHEN Lei. Application of Hardening Soil Small in Analysis of Foundation Pit with Earth Berms[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [4] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269–278. (LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 269–278. (in Chinese))
- [5] 谢东武, 管飞, 丁文其. 小应变硬化土模型参数的确定与敏感性分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(5): 898–906. (XIE Dong-wu, GUAN Fei, DING Wen-qi. Determination and sensitivity analysis of the parameters of hardening soil model with small strain stiffness[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 898–906. (in Chinese))
- [6] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 1–14. (GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. The HSS model parameters for Shanghai soils and engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 1–14. (in Chinese))
- [7] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [8] 顾晓强, 杨峻, 黄茂松, 等. 砂土剪切模量测定的弯曲元、共振柱和循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 740–746. (GU Xiao-qiang, YANG Jun, HUANG Mao-song, et al. Combining bender element, resonant column and cyclic torsional shear tests to determine small strain shear modulus of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 740–746. (in Chinese))

(编校: 孙振远)