

引用格式 陈志军,朱晨,潘晓东,等. 台州湾新区软土小应变硬化模型参数试验研究[J]. 工业建筑,2024,54(12):186-193. CHEN Z J,ZHU C,PAN X D, et al. Experimental Study on Parameters of the HSS Model for Taizhou Soft Clay[J]. Industrial Construction, 2024, 54(12): 186-193 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gyzG23071904

## 台州湾新区软土小应变硬化模型参数试验研究\*

陈志军<sup>1</sup> 朱晨<sup>2</sup> 潘晓东<sup>2</sup> 潘坤<sup>2</sup>

(1. 方远房地产集团有限公司, 浙江台州 318000; 2. 浙江工业大学土木工程学院, 杭州 310014)

**摘要** 土体小应变硬化(HSS)模型可考虑小应变范围内土体的非线性特性,在基坑开挖等岩土工程精细化数值分析中得到了广泛运用。通过一系列三轴剪切试验、共振柱试验和标准固结试验,对台州湾新区典型土层的HSS模型参数进行标定,探讨各土层模型参数间的比例关系,并与国内其他典型软土地区的数据进行比较,验证相关参数的合理性,进一步确定相关参数与土体初始孔隙比间的经验关系。研究结果可用于计算开挖产生的变形,并为其他区域软土HSS模型参数确定提供参考。

**关键词** 软土;HSS模型;参数标定;三轴试验;共振柱试验

### Experimental Study on Parameters of the HSS Model for Taizhou Soft Clay

CHEN Zhijun<sup>1</sup> ZHU Chen<sup>2</sup> PAN Xiaodong<sup>2</sup> PAN Kun<sup>2</sup>

(1. Fangyuan Construction Group Corporation, Taizhou 318000, China;

2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The Hardening Soil Small strain (HSS) model, which can consider the nonlinear performances of soil in the small strain range, has been widely used in the numerical analysis of geotechnical engineering. The HSS model parameters for Taizhou soft clay were elaborately calibrated by series of triaxial shear tests, resonant column tests, and standard consolidation tests. The proportional relations of parameters for soils derived from different layers were established, which was then compared with those of soft soil in other typical areas of China, and the rationality of the relations was verified. The empirical relations between the related parameters and initial void ratios of soil were determined further. The findings could be used to calculate the deformation caused by excavation in soft clay strata. The method could also provide reference to determining parameters of soil for the HSS model in other areas.

**Keywords:** soft clay; HSS model; parameter calibration; triaxial test; resonant column test

\* 浙江省自然科学基金项目(LTZ21E080001);浙江省建设科研项目(2023K151)。

第一作者:陈志军,高级工程师,主要从事建筑工程管理的研究,156688878@qq.com。

通信作者:潘晓东,博士,教授,博士生导师,主要从事地基处理和深基坑支护的研究,pxd@zjut.edu.cn。

收稿日期:2023-07-19

近海城市开发地下空间已成为城市新区建设的重要举措,该部分的基坑工程数量也日益增加,并出现越来越多的深大基坑。台州地处浙江省中部沿海,海岸线占全省海岸线的1/3,该地区广泛分布海相沉积软土层,大多由淤泥、淤泥质黏土、粉质黏土级粉砂交互沉积固结而成,具有含水率高、强度低、高灵敏度和高压缩性等特点。考虑到对周围土体变形的影响和对既有建筑物的保护,基坑工程的设计施工须更严格地控制变形。多项工程实例证明:基坑开挖过程中绝大部分土体的应变介于 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ <sup>[1]</sup>,属于小应变范畴,该范畴内的土体变形具有明显的非线性特点。通过数值分析对基坑开挖过程中导致的土体及邻近建、构筑物的变形进行预测是基坑工程安全分析的重要内容。在数值分析时,须选择合适的土体本构模型和准确的计算参数,以反映土体小应变的非线性和应力路径的相关特性,从而保证数值分析结果的可靠性<sup>[2]</sup>。传统的土体本构模型如 Mohr-Coulomb 模型<sup>[3]</sup>、Duncan-Chang 模型<sup>[4]</sup>、Drucker-Prager 模型<sup>[5]</sup>、Modified Cam-Clay 模型<sup>[6]</sup>和 Hardening Soil 模型<sup>[7]</sup>等均未考虑小应变范畴的土体非线性响应特点。而土体小应变硬化(HSS)模型<sup>[8]</sup>不仅考虑了土体在小应变范畴内的剪切模量衰减行为<sup>[9]</sup>,还可相对全面地反映不同类型土体的非线性等特性。相关研究<sup>[10-13]</sup>表明:相较于其他本构模型,基于 HSS 模型的基坑开挖诱发土体变形预测更为精确,更适用于深基坑工程数值计算分析。

HSS 模型共含 13 个参数,包括了强度参数、刚度参数、高级参数和小应变参数等。为了获得精确的 HSS 模型参数,学者通常须进行大量的室内单元体试验和现场测试。文献[14-16]介绍了对珠海、宁波、杭州地区典型土层进行的 HSS 试验参数研究,克服了原有经验取值参数范围较大,精确度较差的缺点,确定了典型土层的模型参数值以及各参数间的比例关系,为其他地区的模型参数确定提供了参考依据。文献[17-18]介绍了对上海地区典型软土开展的三轴剪切试验、共振柱试验或弯曲元试验,通过大量试验数据分析对比确定了 HSS 模型参数取值,依托实际工程案例进行的三维分析,与实测变形规律相吻合,验证了 HSS 模型基坑工程数值计算的适用性和准确性。文献[19-20]介绍了对 HSS 模型参数敏感性的研究,指出小应变参数取值对数值模拟结果有较大影响。梁发云等提出软土边

界模型小应变刚度修正方法<sup>[21]</sup>,其模拟分析变形结果与实测基本吻合。顾晓强等进一步确定了上海地区土体 HSS 模型参数与孔隙比之间的关系<sup>[22]</sup>,并通过工程实例验证了参数的合理性。综上所述,国内现有的试验研究主要集中于广东、浙江和上海等沿海地区,浙江地区试验研究主要集中在杭州、宁波,而台州滨海地区土体的相关研究则较为匮乏。为进一步探讨不同区域土体初始状态对其参数取值的影响,将通过一系列室内试验,获得台州湾新区软土 HSS 模型部分参数,并对不同土层间的参数关系进行分析,为台州滨海地区软土基坑工况变形预测、控制及类似软土地区深基坑数值模拟提供参考。

## 1 试验内容

### 1.1 试验土样

试验采用台州湾新区基坑钻探取得的原状土样,采用敞口式薄壁取土器,内径为 76 mm,壁厚为 1.5 mm,长度为 500 mm。试验土样的取土深度分别为 2、8、20、28、35、47、60 m,分别为吹填土、淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、黏土、粉质黏土和黏土,其基本的物理指标见表 1。采用卧式推土器推出并制作试验土样,标准固结试样直径和高度分别为 63.5、20 mm;三轴固结排水剪切、加卸载和共振柱试样的直径和高度分别为 50、100 mm。由于②层淤泥质粉质黏土为软塑状态,取出土样时扰动很大,并无法进行标准制样,因此未进行试验。

表 1 试验土样的基本性质指标

土层序号	名称	取土深度/m	含水率/%	初始孔隙比	塑性指数/%
①	吹填土	2	37.42	1.024	21.72
②	淤泥质粉质黏土	8	43.84	1.167	15.77
③	淤泥质黏土	20	44.9~55.5	1.304	26.34
④	淤泥质粉质黏土	28	40.7~46.5	1.081	28.96
⑤	黏土	35	40.95	1.113	18.38
⑥	粉质黏土	47	47.05	0.937	20.83
⑦	黏土	60	32.03	0.898	19.01

### 1.2 试验目的

试验的主要目的为确定 HSS 模型的 8 个参数,具体如下:基于标准固结试验得到应力  $p^{\text{ref}}$  下的切线模量  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ ;采用 GDS 标准应力路径系统,通过三轴排水剪切获得土的有效黏聚力  $c'$ 、有效内摩擦角  $\varphi'$ 、参考割线模量  $E_{50}^{\text{ref}}$  和破坏比  $R_t$ ;通过三轴加卸载

试验获得  $p^{ref}$  时的加卸载模量  $E_{ur}^{ref}$ ;利用 GDS 共振柱系统获得模型参数  $G^{ref}0$  和  $\gamma_{0.7}$ ,试验参考应力  $p^{ref}$

为 100 kPa。模型的其他参数可参考已有研究成果取值,如表 2 所示。

表 2 HSS 部分参数取值

Table 2 Parameter values for HSS

静止土压力系数 $K_0$	剪胀角 $\psi$	泊松比 $\nu_{ur}$	$m$
$1 - \sin \varphi'^{[23]}$	对于砂土取 $\varphi' - 30^\circ$ , 小于 $30^\circ$ 时, 取 $0^\circ$ ; 对于黏性土, 一般取 $0^\circ$ <sup>[24]</sup>	0.2 <sup>[25]</sup>	对于黏性土, 取 0.5~1.0 <sup>[26]</sup>

1.3 试验步骤

1.3.1 标准固结试验

采用 GDS 标准固结仪,试验土层每层取 2 个环刀试样,分别在 12.5、25、50、100、200、400、800 kPa 下做分级加载测试,每级荷载持续时间为 24 h。

1.3.2 三轴固结剪切试验

1) 反压饱和。选用高级加载模块,试样的反压饱和参数设置:反压为 100 kPa,围压为 110 kPa。该步骤持续时间 5 h,使土体内的气泡不断溶解减少。

2) 孔压系数  $B$  值检测。通过保持反压恒定,围压升至 140 kPa,测定不排水的条件下试样孔压与围压增量之比。试样饱和的标准为  $B > 0.95$ 。

3) 等向固结。每层土设置三组试样,在不同围压情况下进行等向固结,设置围压分别为 100、200、300 kPa,固结稳定以轴向应变率小于 0.02%。

4) 剪切。保持围压和应变速率恒定,剪切速率设为 0.005 mm/min,试验破坏标准为应变达到 20% 或试样发生变形破坏。

1.3.3 三轴固结排水加卸载试验

该试验与三轴排水剪切试验中前三个步骤相同(反压饱和、 $B$  值检测、固结),固结过程中的有效围压为 100 kPa,利用高级加载模块控制应力剪切,剪切速率为 0.08 kPa/min。根据此围压下剪切获得的偏应力峰值,首先加载至偏应力峰值的 40%,再将偏应力卸载到零,随后增大偏应力至轴向应变达到 15% 或破坏。

1.3.4 共振柱试验

1) 饱和固结。首先对试样施加 200 kPa 的反压,进行反压饱和,持时 24 h,以充分溶解试样中的气体,然后对试样进行  $B$  值检测, $B > 0.95$  时认为试样达到饱和。采用高级加载模块对试样施加压力进行同向固结,各层土样的固结压力分别为 50、200、280、300、450、600 kPa,当固结排水量小于  $50 \text{ mm}^3/\text{h}$  认为固结完成。

2) 激振。在固结后试样顶部施加激振电压,以产生相应的激振力,并通过调整电压的频率及幅值来测量计算得到试验系统与土样之间的共振

频率<sup>[27]</sup>。设定频率增量和范围,从宽频扫描到精确扫描,测得不同激振电压下的共振频率。通过不同电压共振时的共振频率和剪切应变,计算对应的剪切波速,进而得出试样剪应变与动剪切模量曲线关系。试验使用的共振柱系统的转动惯量为  $0.0037 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

2 试验结果分析

2.1 标准固结试验结果

根据试验土样在各级荷载加载下的变形情况,获得轴向荷载-应变的曲线关系。如图 1 所示:每层土试样变化趋势一致,曲线斜率逐渐增大,拟合优度  $R^2$  均大于 0.99。轴向荷载 100 kPa 时的拟合曲线斜率,即参考应力下的固结切线模量  $E_{oed}^{ref}$ ,如表 3 所示。

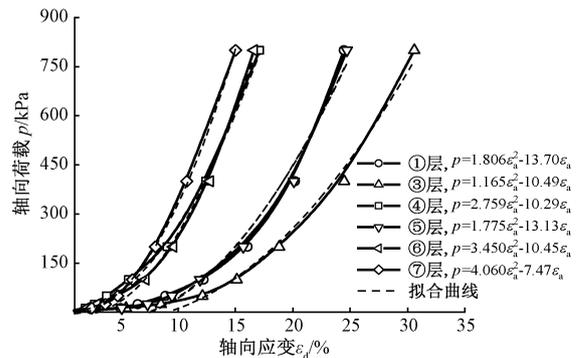


图 1 各土层轴向荷载-应变关系

Fig. 1 Relations between axial loads and axial strain of each soil layer

根据孔隙比-轴向荷载的关系曲线(图 2),计算各层土样的压缩系数  $a_{1-2}$  和压缩模量  $E_{s1-2}$ 。试验土层的  $a_{1-2}$ 、 $E_{s1-2}$  和  $E_{oed}^{ref}$  如表 3 所示。从表 3 可以看出:①、④层土与其他土层相反,存在  $E_{s1-2} < E_{oed}^{ref}$ ,根据顾晓强的经验算式<sup>[22]</sup>通过孔隙比计算对比情况较为一致。

2.2 三轴固结剪切试验结果

2.2.1 强度参数  $c'$  和  $\varphi'$

对每层土分别进行三种不同围压(100、200、300 kPa)下的固结排水试验,根据轴向破坏应力和围压绘制摩尔应力圆,如图 3 所示。根据图 3 中包

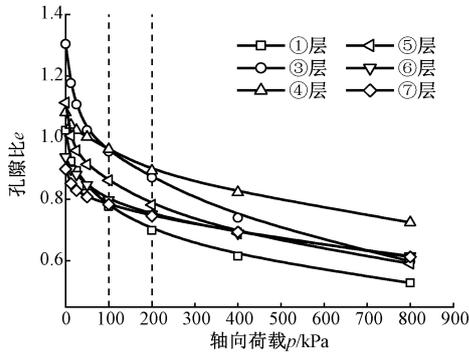


图2 孔隙比与荷载关系曲线

Fig. 2 Relations between porosity ratios and loads

表3 各层土的  $a_{1-2}$ 、 $E_{s1-2}$  和  $E_{\text{wed}}^{\text{ref}}$  值

土层序号	$a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	$E_{s1-2}/\text{MPa}$	$E_{\text{wed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	模量间的比例关系
①	0.771	2.297	2.5	$E_{\text{wed}}^{\text{ref}} = 1.09E_{s1-2}$
③	0.850	2.300	1.9	$E_{\text{wed}}^{\text{ref}} = 0.83E_{s1-2}$
④	0.697	2.816	3.0	$E_{\text{wed}}^{\text{ref}} = 1.06E_{s1-2}$
⑤	0.798	2.332	2.2	$E_{\text{wed}}^{\text{ref}} = 0.94E_{s1-2}$
⑥	0.465	3.868	3.4	$E_{\text{wed}}^{\text{ref}} = 0.87E_{s1-2}$
⑦	0.380	4.696	3.9	$E_{\text{wed}}^{\text{ref}} = 0.83E_{s1-2}$

络线确定每层土的抗剪强度参数,具体强度参数指标如表4所示,其中④层土和⑥层土均存在阶段式的夹砂现象,在300 kPa围压下的固结排水试验中,

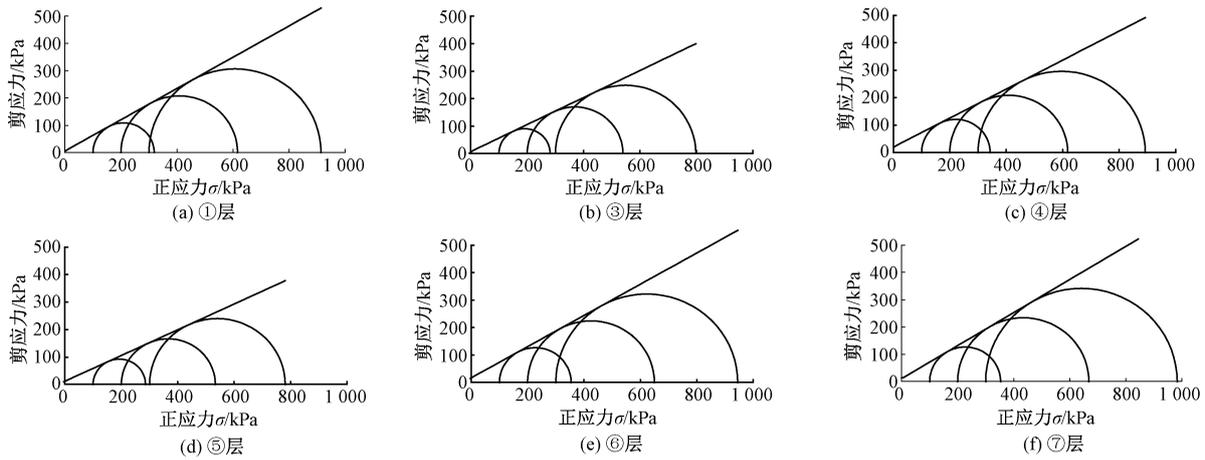


图3 各土层试样破坏时的摩尔应力圆

Fig. 3 Mohr stress circles of soil samples of each soil layer

表4 各土层的  $c'$  和  $\varphi'$  值

Table 4 Values of  $c'$  and  $\varphi'$  of each soil layer

土层序号	名称	取样深度/m	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'/(^\circ)$
①	吹填土	2	6.1	29.8
③	淤泥质黏土	20	7.3	26.2
④	淤泥质粉质黏土	28	20.6	27.8
⑤	黏土	35	12.3	25.1
⑥	粉质黏土	47	17.2	29.6
⑦	黏土	60	10.8	31.2

试样的夹砂情况更为严重,导致该两层土的有效黏聚力较其他土层略高。

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

在有效围压为参考应力  $p^{\text{ref}}$  时,各层土试样的应力-应变关系曲线如图4所示。各土层试样的偏应力  $q$  随着轴向应变  $\varepsilon_1$  的增大而增大,但增幅不断变小。到达某一范围后,偏应力开始保持不变或者有所下降。⑤、⑥、⑦三层试样均出现了应变软化现象,导致偏应力达到峰值后开始下降。 $q_f$  为应变值到达15%对应的偏应力或偏应力峰值,连接原点与

偏应力-应变曲线与  $0.5 q_f$  处交点所对应的直线斜率得到  $E_{50}^{\text{ref}}$ 。

根据HSS模型的定义,在三轴加载下偏应力  $q$  与轴向应力- $\varepsilon_1$  之间为双曲线函数关系:

$$- \varepsilon_1 = \frac{q}{2E_{50}(1 - q/q_a)} \quad (1)$$

式中: $q_a$  为渐近线对应的强度。

对式(1)进行变换,可将  $q$ - $\varepsilon_1$  关系转换成  $\varepsilon_1/q$ - $\varepsilon_1$  关系<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\varepsilon_1}{q} = \frac{\varepsilon_1}{q_a} - \frac{1}{2E_{50}} \quad (2)$$

转换获得  $\varepsilon_1/q$ - $\varepsilon_1$  曲线关系,在应变值3%~13%一段进行线性拟合,拟合优度  $R^2$  均大于0.97。 $1/q_a$  为此直线的斜率,根据  $R_f = q_f/q_a$ ,可得到破坏比  $R_f$  值(表5)。

### 2.3 三轴固结加载卸载再加载试验结果

对各层土样在100 kPa围压下进行三轴固结排

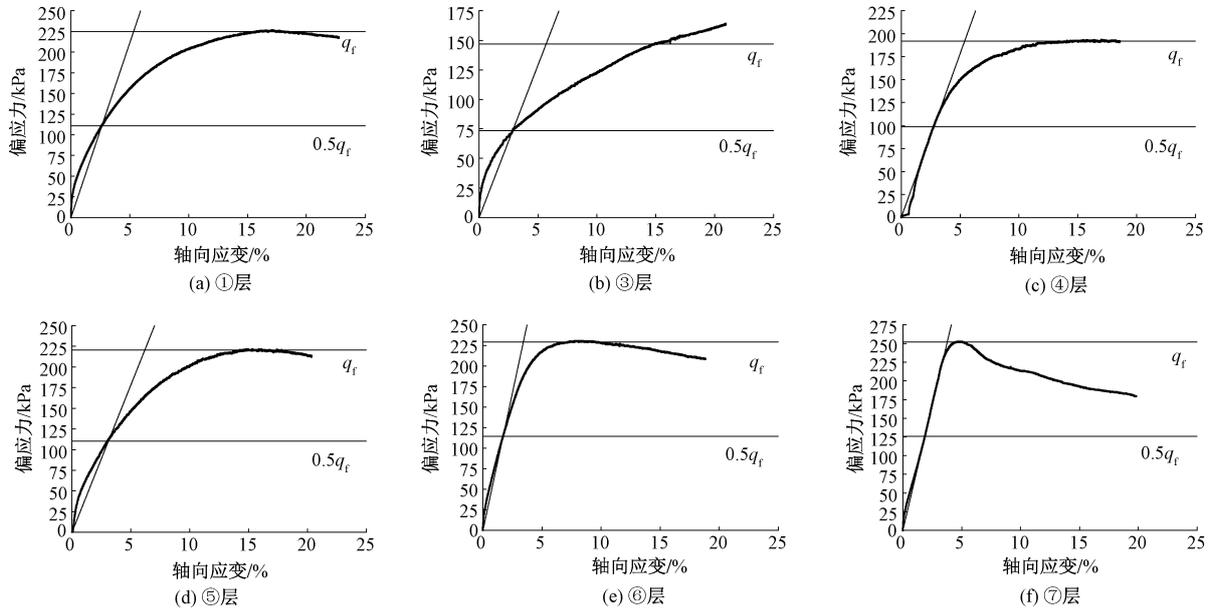


图 4 各土层试样应力-应变关系

Fig. 4 Relations between strain and stress for soil samples of each soil layer by triaxial consolidated drain tests

表 5 各层土的  $E_{50}^{ref}$  和  $R_f$  值

Table 5 Values of  $E_{50}^{ref}$  and  $R_f$  for each soil layer

土层序号	名称	取样深度/m	$E_{50}^{ref}$ /MPa	$R_f$
①	吹填土	2	4.28	0.78
③	淤泥质黏土	20	2.58	0.72
④	淤泥质粉质黏土	28	3.56	0.88
⑤	黏土	35	3.63	0.73
⑥	粉质黏土	47	4.73	0.96
⑦	黏土	60	6.84	0.89

水加载-卸载-加载试验,基于各层土样的应力-应变关系曲线(图 5),获得参考加卸载模量。

从图 5 可以看出:每层土在卸载过程均出现回弹现象,再加载时的应力-应变曲线,在前期发展较为陡峭,并随卸载的进行逐渐变缓。在加-卸载过程中,各土层试样曲线呈现“滞回圈”,连接滞回圈的两个端点所得直线的斜率,即为参考模量  $E_{ur}^{ref}$ 。

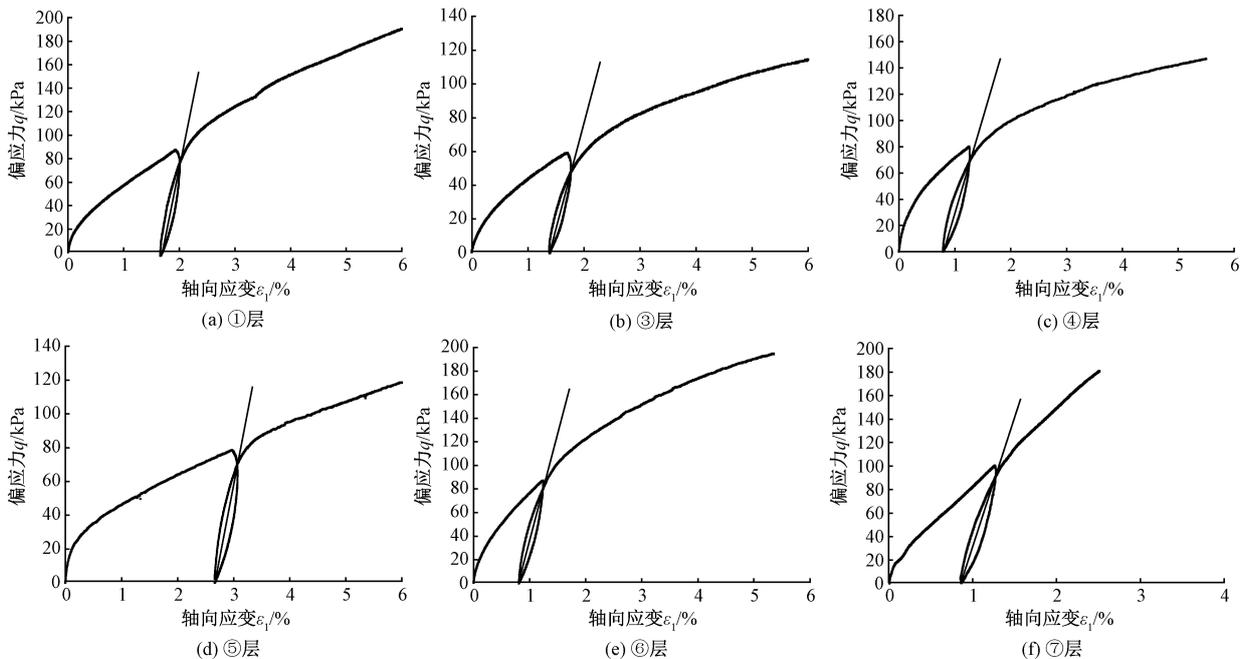


图 5 各土层试样加卸载试验应力-应变曲线

Fig. 5 Relations between strain and stress for soil samples of each soil layer by triaxial loading-unloading-reloading tests

①、③、④、⑤、⑥和⑦的土层的  $E_{ur}^{ref}$  分别为 21.8、12.5、16.1、17.4、23.8、22.1 MPa。

2.4 共振柱试验结果

通过 GDS 共振柱试验获得各土样在不同剪应变下的剪切模量。试验中采用的围压分别为 50、200、280、300、450、600 kPa。Hardin 和 Drnevich 的研究<sup>[28]</sup>表明  $G_d-\gamma_d$  曲线呈双曲线关系：

$$\frac{1}{G_d} = a + b\gamma_d \quad (3)$$

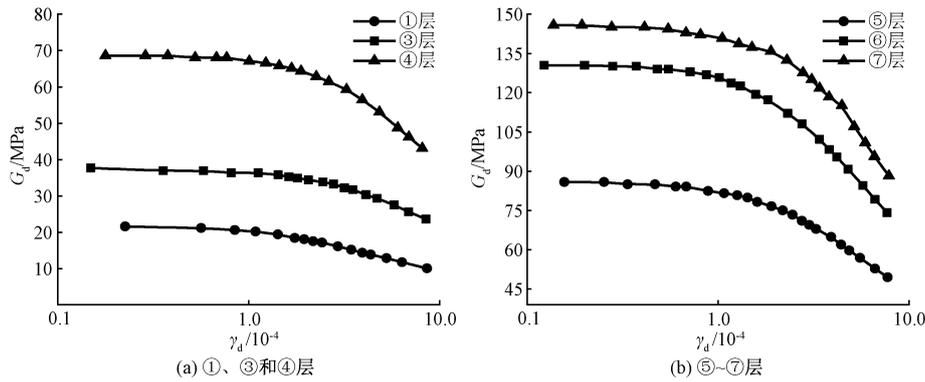


图 6 动剪切模量与剪切应变曲线

Fig. 6 Relations between dynamic shear moduli and strain for each soil layer

表 6 各层土的  $G_0$  和  $\gamma_{0.7}$  值

序号	围压 $p/kPa$	拟合曲线		$G_0/MPa$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$
		$a/MPa^{-1}$	$b/MPa^{-1}$		
①	50	0.044 6	60.990 4	22.42	3.1
③	200	0.025 6	19.874 1	39.06	5.5
④	280	0.013 3	12.776 9	75.19	4.4
⑤	300	0.010 7	12.254 1	93.46	3.7
⑥	450	0.007 2	7.990 8	138.89	3.9
⑦	600	0.005 9	7.097 7	169.49	3.6

式中： $a$ 、 $b$  为常数。

当  $\gamma_d$  趋于零时，可近似简化为  $1/G_d = a$ ，认为此时的  $G_d$  值为初始剪切模量  $G_0$ 。

初始剪切模量衰减至 70% 所对应的剪应变为  $\gamma_{0.7}$ ，当  $G_d = 0.7G_0$ ， $\gamma_{0.7} = 0.429a/b$ 。图 6 为各层土的试样的剪切模量与剪切应变关系拟合曲线，其中拟合优度  $R^2$  均大于 0.99。相关参数见表 6。

2.5 试验结果总结与对比

通过台州湾新区典型软土的标准固结、三轴固

结排水、三轴固结排水加卸载和共振柱试验得到各层土样的 HSS 模型参数，具体参数如表 7 所示，可以发现  $E_{oed}^{ref}$ 、 $E_{50}^{ref}$ 、 $E_{ur}^{ref}$  之间的比值都较为相近，存在稳定的比例关系，黏土层的  $E_{50}^{ref}$  与  $E_{oed}^{ref}$  比值为 1.7 倍左右，较淤泥质黏土和粉质黏土比值偏大；①~⑥层土的  $E_{ur}^{ref}$  与  $E_{50}^{ref}$  比值约为 4.8 倍左右，而⑦层黏土层的比值为 3.23 倍，与该土层  $E_{ur}^{ref}$  值偏小有关。由于土体变形特征与土体的结构状态密切相关，

表 7 各层土体 HSS 模型参数汇总

土层名称	$E_{oed}^{ref}/MPa$	$c'$	$\phi'/(\circ)$	$E_{50}^{ref}/MPa$	$E_{ur}^{ref}/MPa$	$R_f$	$G_0/MPa$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	$p^{ref}/kPa$	$K_0$	$\psi$	$\nu_{ur}$	$m$
①层吹填土	2.5	6.1	29.8	4.28	21.8	0.78	22.42	3.1	100	0.50	0	0.2	0.65
③层淤泥质黏土	1.9	7.3	26.2	2.58	12.5	0.72	39.06	5.5	100	0.51	0	0.2	0.65
④层淤泥质粉质黏土	3.0	20.6	27.8	3.56	16.1	0.88	75.19	4.4	100	0.48	0	0.2	0.65
⑤层黏土	2.2	12.3	25.1	3.63	17.4	0.73	93.46	3.7	100	0.53	0	0.2	0.65
⑥层粉质黏土	3.4	17.2	29.6	4.73	23.8	0.96	138.89	3.9	100	0.46	0	0.2	0.65
⑦层黏土	3.9	10.8	31.2	6.84	22.1	0.89	169.49	3.6	100	0.48	0	0.2	0.65

图7给出了  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{s}1-2}$  与孔隙比  $e_0$  间的关系,并引用其他文献中的参考模量值作为对比。该拟合结果分别为:

$$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = -4.70 \ln e_0 + 3.08 \quad (4a)$$

$$E_{50}^{\text{ref}} = -6.33 \ln e_0 + 4.23 \quad (4b)$$

$$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = -33.85 \ln e_0 + 20.66 \quad (4c)$$

$$E_{\text{s}1-2} = -4.76 \ln e_0 + 3.29 \quad (4d)$$

与顾晓强通过大量室内和现场数据统计所确定的经验算式<sup>[22]</sup>趋势一致,其他相关文献内的参考模量值也均在此拟合曲线上小幅度波动。因此可通过土体的孔隙比值,获得HSS模型参数的参考模量值。

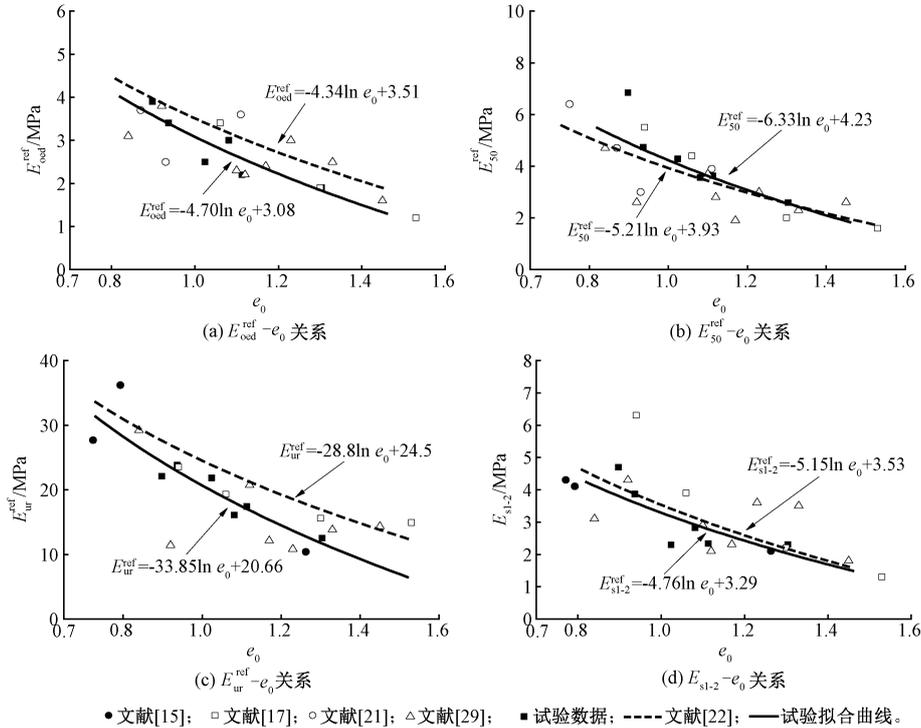


图7 土体  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{s}1-2}$  与  $e_0$  关系

Fig.7 Relations between  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ ,  $E_{50}^{\text{ref}}$ ,  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  or  $E_{\text{s}1-2}$  and  $e_0$

### 3 结束语

通过标准固结、三轴剪切试验和共振柱试验的数据整理,获得台州湾新区软土层的小应变硬化模型参数。试验数据可供滨海地区软土层的相关基坑工程数值分析使用,也可为其他地区软土层HSS模型参数校准提供参考。具体结论如下:

1) ③层淤泥质黏土层为软弱土层,其参数  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $c'$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 $R_f$ 、 $G_0$  取值均小于其他土层;各土层  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  值与  $E_{\text{s}1-2}$  值的比例关系基本相同(比值约为0.8~0.9),该比例关系与其他地区软土基本相当。

2) 台州湾新区软土  $E_{50}^{\text{ref}}$  值为  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  值1.1~1.7倍,黏土层较淤泥质黏土层偏大;③~⑤层土  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  值为  $E_{50}^{\text{ref}}$  的4.5~4.8倍,较为接近,①、⑥层土基本相同,而⑦层黏土层  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{50}^{\text{ref}} = 3.2$ ,总体较上海地区软土该值偏小,因此在模型取值和计算分析时应予重视。

3) 台州原状软土  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{s}1-2}$  值均随试样初始孔隙比  $e_0$  增大而减小,可通过半对数关系进行拟合,该经验关系可为不同初始状态土体的参数取值预测提供参考。

### 参 考 文 献

[1] ATTEWELL P B, FARMER I W. Ground deformations resulting from shield tunneling in London Clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(3): 380-395.  
 [2] 王卫东, 吴江斌, 黄绍铭. 上海地区建筑基坑工程的新进展与特点[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 547-553.  
 [3] 张雪嫄. 软土地基狭长型深基坑性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
 [4] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1629-1653.  
 [5] DRUCKER D C, PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1952, 10(2): 157-165.

- [6] ROSCOE K H, Burland J B. On the generalized stress strain behavior of wet Clay [C]//Proceedings of Engineering Plasticity Cambridge: Cambridge University Press, 1968: 535-609.
- [7] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model: formulation and verification[J]. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, 1999: 281-296.
- [8] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [9] 赵保, 田雷, 赵伟阳, 等. 杭州富水粉砂水泥土 HSS 模型参数实验研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2021, 49(1): 53-59.
- [10] 尹骥. 小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(增刊 1): 166-172.
- [11] BRINKGREVE R B J. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application [C]//YAMAMURO J A, KALIAKIN V N. *Proceedings of GeoFrontiers 2005: Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration*. Reston: ASCE Press, 2005: 69-98.
- [12] SCHWEIGER H F, SCHARINGER F, LÜFTENEGGER R. 3D finite element analysis of a deep excavation and comparison with in situ measurements[C]//NG C W W, HUANG H W, LIU G B. *Proceedings of the 6th International Symposium: Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. London: CRC Press, 2008: 193-199.
- [13] 褚峰, 李永盛, 梁发云, 等. 土体小应变条件下紧邻地铁枢纽的超深基坑变形特性数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊): 3184-3192.
- [14] 李栋, 吴宏生, 李学, 等. 珠海软土 HSS 模型参数试验研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2023, 62(2): 137-145.
- [15] 叶俊能, 刘干斌, 骆睿栋, 等. 宁波地区典型地层 HSS 模型参数试验研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2022, 35(5): 72-78.
- [16] 林德周. 小应变土体硬化模型参数试验研究及工程应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [17] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [18] 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.
- [19] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 258-264.
- [20] 施有志, 阮建凑, 吴昌兴. 厦门地区典型地层 HS-small 模型小应变参数敏感性分析[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(2): 100-105.
- [21] 梁发云, 郑瀚波, 李林, 等. 考虑小应变刚度特性的软土界面模型与应用[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(5): 535-539.
- [22] 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): 833-845.
- [23] MAYNE P W, KULHAWY F H.  $K_0$ -OCR relationships in soils [J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1982, 108(6): 851-872.
- [24] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. *Geotechnique*, 1987, 37(2): 219-226.
- [25] BRINKGREVE R B J, BROERE W. *Plaxis material models manual*[R]. Delft: Delft University of Technology, 2006.
- [26] 徐中华, 王建华, 王卫东. 主体地下结构与支护结构相结合的复杂深基坑分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(增刊 1): 1355-1359.
- [27] 张剑锋, 周序源, 王德民. 共振柱试验的原理及应用[J]. *勘察科学技术*, 1986(2): 25-29.
- [28] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, 98(6): 603-624.
- [29] 顾晓强, 刘文倩, 陈玺元, 等. 广东阳江地区海洋软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 43(增刊 2): 41-44.