

珠海软土 HSS 模型参数试验研究*

李栋¹, 吴宏生², 李学³, 林彬彬¹, 常丹³, 刘建坤^{3,4}

1. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519001
2. 珠海航空城(机场)集团, 广东 珠海 519000
3. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275
4. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082

摘要: 小应变硬化模型(HSS)可考虑土体在小应变范围内剪切模量随应变增大而衰减的特性, 能够准确描述土体的压硬性剪胀性。本研究通过常规固结试验、三轴固结排水试验以及共振柱试验获得珠海地区典型软土层的 HSS 模型参数以及参数之间的比例关系。结果显示, 珠海地区填土的有效抗剪强度指标 c' 接近 0, 均小于淤泥和淤泥质土; 但其 φ' 大于淤泥和淤泥质土。珠海地区淤泥和淤泥质土的三轴切线模量 E_{50}^{ref} 和卸载再加载切线模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的比例关系为 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = (2.66 \sim 3.39) E_{50}^{\text{ref}}$ 。填土的固结切线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 明显大于 E_{50}^{ref} , 约是后者的 2.89 倍, 而淤泥和淤泥质土的 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 略小于 E_{50}^{ref} 。此外, 淤泥和淤泥质土在 100 kPa 参考围压下的卸载再加载切线模量分别为 8.02 和 10.89 MPa, 与固结切线模量的比例关系大概在 3.6~4.1 倍之间。

关键词: 珠海软土; HSS 模型; 参数标定; 抗剪强度; 阻尼比

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)02-0137-09

Experimental study on parameters of HSS model for soft soil in Zhuhai

LI Dong¹, WU Hongsheng², LI Xue³, LIN Binbin¹, CHANG Dan³, LIU Jiankun^{3,4}

1. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519001, China
2. Zhuhai Aviation City Engineering Construction Co., Ltd., Zhuhai 519000, China
3. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519082, China

Abstract: The HS-Small (HSS) model can reflect the decrease of the shear modulus of soft soil with strain in the small range and describe hardening and dilatancy behavior. In the present study, the conventional oedometer test, triaxial experiment, and resonant column test were conducted to obtain the parameters of the HSS model for typical soft soil in Zhuhai and the relationship between these parameters. Test results show that the effective shear strength index c' of backfill is close to zero, which is less than that of silt and silty soil, but φ' larger than silt and silty soil. Besides the loading-unloading tangent modulus $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ of silt and silty soil is about 2.66 ~ 3.39 times than the triaxial tangent modulus E_{50}^{ref} . However, the consolidation tangent modulus $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ of backfill soil is significantly greater than triaxial tangent modulus, which is about 2.89 times of E_{50}^{ref} . In addition, the loading-unloading tangent modulus $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ of silt and silty soil under reference confining pressure of 100 kPa is 8.02 and 10.89 MPa, respectively, showing proportional relationship with the consolidation tangent modulus is in the range of 3.6~4.1.

Key words: soft soil in Zhuhai; HSS model; parameter calibration; shear strength; damping ratio

* 收稿日期: 2022-02-12

录用日期: 2022-04-28

网络首发日期: 2022-09-19

基金项目: 广东省基础与应用基础研究粤深联合基金重点项目(2020B1515120083); 珠海市产学研合作项目(ZH22017001200149PWC); 珠海市社会发展领域科技计划项目(ZH22036204200009PWC)

作者简介: 李栋(1986年生), 男; 研究方向: 岩土与地下工程; E-mail: lidongcq@163.com

通信作者: 刘建坤(1965年生), 男; 研究方向: 冻土和软土; E-mail: liujiank@mail.sysu.edu.cn

珠海位于粤港澳大湾区的核心地带,其境内软土地基的不均匀沉降计算以及深基坑开挖需要严格控制土体变形在较小应变范围内。软土受荷载作用往往会发生较大的侧向变形,但规范方法无法准确反映侧向变形对总体沉降的影响,因此需要发展新的计算方法(李学等,2017)。软土受赋存环境、沉积年代以及排水条件的影响,其物理力学性质表现出较大的地域性和时空差异性(蒋明镜等,2010);同时,土体变形常根据本构关系以及数值计算方法来确定,不同的本构关系以及岩土体参数对计算结果影响显著(陈尚荣等,2020)。

随着土体本构理论以及数值计算技术的发展,确定软土的力学参数以及合适的本构模型对预测软土沉降和控制基坑开挖至关重要(胡静等,2021; Alzabeebee, 2020)。由于岩土体材料的各向异性,基于传统的摩尔-库伦(MC, Mohr-Coulomb)理想弹塑性模型和线弹性模型等基本无法准确预测地基或基坑变形,而修正剑桥模型(MCC, modified cam-clay)和硬化土模型(HS, hardening soil)等硬化弹塑性模型无法考虑小应变阶段的非线性特征,导致预测的变形偏大(刘汉龙等, 2011)。当土体应变逐渐增大时,土体模量会从小到进行非线性转化(鲁泰山等,2021)。目前,小应变硬化土模型(HSS, hardening soil-small模型)较好地考虑了这一条件(谢东武等,2017;顾晓强等,2021b),可很好地描述小应变范围内的土体变形,考虑土体在小应变范围内剪切模量随应变增大而减小的特性。为了得到可靠的土体变形结果,必须考虑小应变刚度对应变幅度的非线性依赖,并对小应变参数的敏感性进行分析(李金柱等,2010; Alzabeebee, 2020)。就上海软土而言,基于MC、HS、HSS三种本构模型计算位移变形时,采用HS模型的计算结果偏大,而HSS模型最为精确(盛旭圆, 2020)。尽管利用HSS模型计算的土体变形结果与实测数据较为接近,但HSS模型参数的取值缺乏相应理论依据(董学超等, 2020; 李连祥等, 2019)。此外,由于岩土体材料的地区差异性以及空间变异性,不同地区的土体参数取值相同(施有志等,2017;陈少杰等,2019)。常见的长三角地区软土与珠三角地区软土HSS模型参数存在较大差异(陈赞等,2021;顾晓强等,2021b)。此外,在实际应用中,工程地质勘察报告通常无法提供HSS模型参数,且缺乏长周期、高精度的室内试验。由此可见,选择合适的本构关系以及精确的岩土

体参数对计算软土变形以及塑性区分布至关重要。

本研究主要通过室内试验,包括常规固结、固结排水剪切、共振柱、循环加卸载等,对珠海典型软土的物理力学特性进行了分析,重点就HSS模型参数以及各参数之间的比例关系进行了探讨,研究成果可为相关软土工程提供参考依据。

1 HSS模型及参数简介

基于弹塑性本构以及Mohr-Coulomb破坏准则, Schanz et al. (1999)提出了HS模型。虽然HS模型考虑了压硬性和剪胀性,但其卸载再加载模量未与应力-应变水平相关联,无法模拟小应变范围内土体模量的非线性,也没有体现小应变范围内土体的变形特性。有研究在HS模型的基础上考虑小应变范围内土体应变与剪切刚度的非线性关系,提出了HSS模型(梁发云等,2017; Niemunis et al., 2018; Benz et al., 2009)。HSS模型的主要参数包括: 效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 φ' 、固结切线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、三轴切线模量 E_{50}^{ref} 、破坏比 R_f 、参考应力 P^{ref} 、剪胀角 Ψ 、应力水平相关幂指数 m 、正常固结条件下静止侧压力系数 k_0 、卸载再加载切线模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和卸载再加载泊松比 ν_{ur} 。此外,初始参考剪切模量 G_0 和割线模量为 $0.7G_0$ 时对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$ 也是HSS模型必需的。HSS模型中,参考应力 P^{ref} 一般取值100 kPa,其他参数的试验确定方法见表1。

表1 HSS模型参数确定方法

Table 1 Determination methods for HSS model parameters

模型参数	试验方法
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	标准固结试验
$c', \varphi', E_{50}^{\text{ref}}, R_f, \Psi, m, k_0$	三轴剪切试验
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}, \nu_{\text{ur}}$	三轴加卸载试验
$G_0, \gamma_{0.7}$	共振柱

2 珠海软土HSS模型参数确定

2.1 试样制备

为最大限度减小对土样的扰动,利用薄壁取土器重锤击入法采取珠海航空城某工地现场土样。观察所取土样可知,填土、淤泥以及淤泥质土均存在不同程度上的较大塌陷孔洞以及富含贝壳,试样质量一般。其中,填土砾粒含量为8.12%,粒径 > 0.075 mm的颗粒占比63.59%,属于粉砂土。淤泥和淤泥质土呈灰黑色,有轻微腐臭味。在室

内利用削土器将土样切削成三轴试验以及共振柱试验所需的圆柱样, 并置于饱和器中进行初步饱和和处理。据土工试验测得的土样物理特性见表 2。

采用筛分法测试填土的级配曲线, 通过密度计法测试淤泥和淤泥质土的级配曲线(见图 1)。其中, 填土的粒径范围集中于 0.02~10.0 mm, 而淤泥和淤泥质土的粒径集中于 0.001~0.075 mm, 属于细颗粒土。由图 1 可知, 填土的不均匀系数为 6.5, 曲率系数为 1.4, 级配良好。

根据土工试验规范(GB/T50123-2019)(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019), 基于原状土

制取相应尺寸的土样分别进行固结试验、共振柱试验、固结排水三轴剪切以及循环加卸载试验。

2.2 固结试验

通过压缩实验可得到土样(直径 60.0 mm, 高 20.0 mm)轴向应力与轴向应变曲线以及孔隙比与固结压力之间的关系, 如图 2 所示。从图 2(a)中可看出, 填土、淤泥以及淤泥质土的孔隙比随着固结压力的增大逐渐减小, 但减小速率越来越小。其中, 淤泥的初始孔隙比最大, 淤泥质土次之, 填土最小。相应地, 淤泥的压缩系数最大, 淤泥质土的次之, 填土最小。从图 2(b)看出, 试样的

表 2 土体物理特性统计

Table 2 Physical properties of tested soil in Zhuhai

土体	取样深度/m	含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
填土	1.8~2.0	18.20	1.98	2.65	-	-	-	3.45×10 ⁻⁴
淤泥	15.8~16.0	67.94	1.53	2.63	63.62	28.03	35.59	1.29×10 ⁻⁷
淤泥质土	40.8~41.0	55.78	1.66	2.64	55.01	29.38	25.63	3.74×10 ⁻⁸

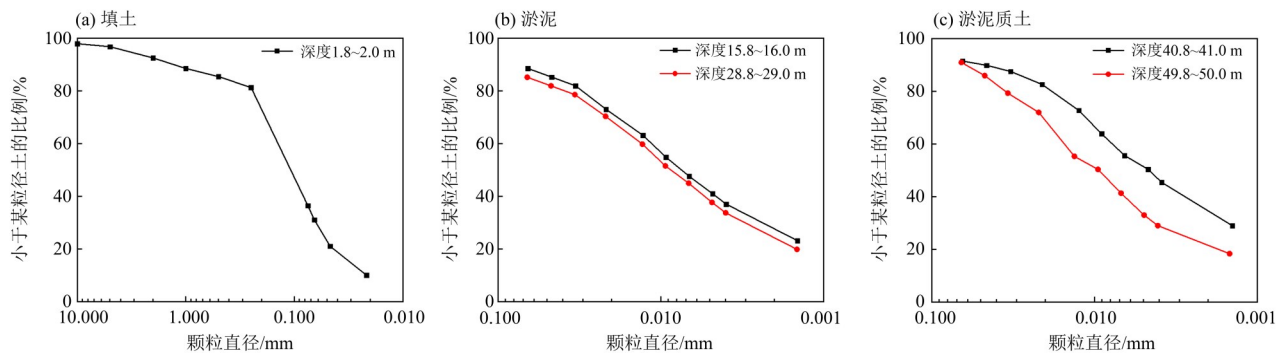


图 1 土体颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution

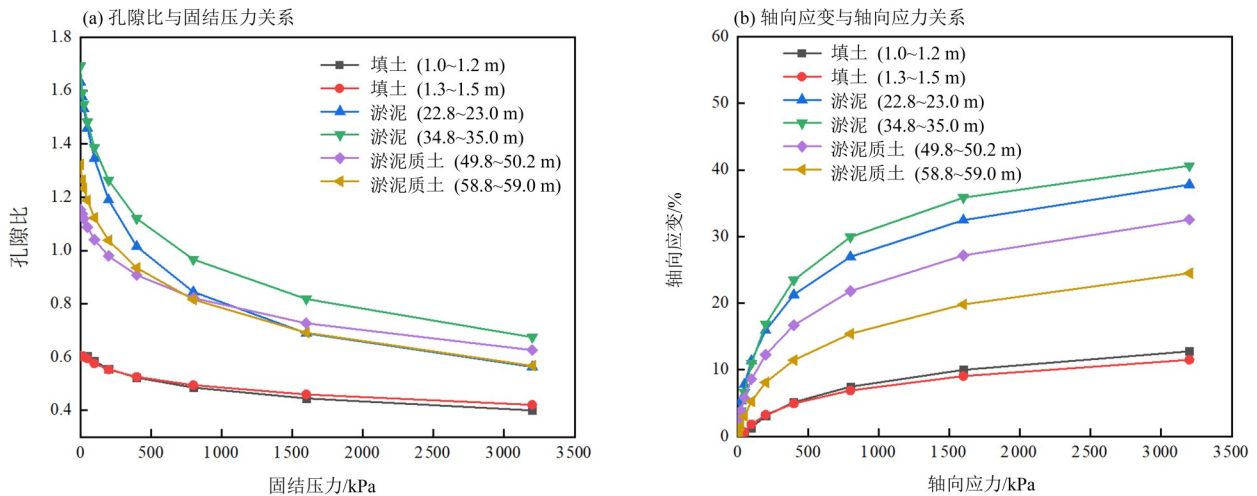


图 2 固结试验结果

Fig. 2 Oedometer test results

轴向应变随着轴向应力的增大逐渐增大, 与孔隙比的变化趋势刚好相反。统计压缩指标与参考切线模量见表3所示。

表3 三种不同深度土样的压缩系数、压缩指数和参考切线模量

Table 3 Compression coefficient, compression index and referenced tangent modulus of three soft soils from various depths

项目	填土		淤泥		淤泥质土	
	1.0~1.2 m	1.3~1.5 m	22.8~23 m	34.8~35 m	49.8~50.2 m	52.8~53 m
压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	0.23	0.29	1.23	1.55	0.84	0.61
压缩指数 C_c	0.06	0.07	0.44	0.36	0.25	0.18
$E_{\text{ref}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	12.37	17.47	1.73	1.67	2.20	3.60

由表3知, 淤泥和淤泥质土属高压缩性土, 而填土为中压缩性土。填土的固结切线模量最大, 达到17.47 MPa; 淤泥质土次之, 为2.1~3.6 MPa; 淤泥最小, 为1.67~1.73 MPa。

2.3 共振柱试验

共振柱试验主要应用于研究土体在小应变范围内的动力特性, 并用来确定动剪切模量和阻尼比。本共振柱试验中土体直径为50.0 mm, 高100.0 mm。通过装载试样、反压饱和、B值检测、固结、共振频率和阻尼比测量后得到淤泥和淤泥质土的动剪切模量(比)、最大剪切模量以及阻尼比, 如图3和图4所示。

在半对数坐标中(图3), 动剪切模量在小应变范围内总体上随动应变幅值的增大先缓慢减小后迅速减小。当动应变幅值一定时, 动剪切模量与围压成正比关系, 最大可相差75%。动剪切模量比也随着动应变幅值先缓慢减小后快速减小, 从1.0减小至约0.2。但动剪切模量比受围压影响较

小。在小应变范围内, 软土的动剪切模量表现出较强的非线性, 且在共振柱激振过程中动剪切模量逐渐衰减, 衰减速率逐渐增加。根据土体动剪切模量与阻尼比关系的研究(Niemunis et al., 2018), 可用双曲线模型描述。在动载作用下, 动剪应力与剪应变之间符合双曲线

$$\tau_d = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma}{\tau_y}}, \quad (1)$$

式中 G_0 是初始剪切模量, τ_y 是最大动剪应力, γ 是剪应变, 根据土体动剪切模量定义

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma}, \quad (2)$$

式中 G_d 是动剪切模量, τ_d 是动剪应力。因此, 有

$$1/G_d = a + b\gamma, \quad (3)$$

式中 a 、 b 为土体试验参数。当 γ 接近于0时, 有 $G_0 = 1/a$, 此时 G_0 即初始剪切模量。在小应变范围内, 通常用 $\gamma_{0.7}$ 表示剪切模量衰减到初始剪切模量70%时所对应的剪应变。本研究中, 淤泥试样取

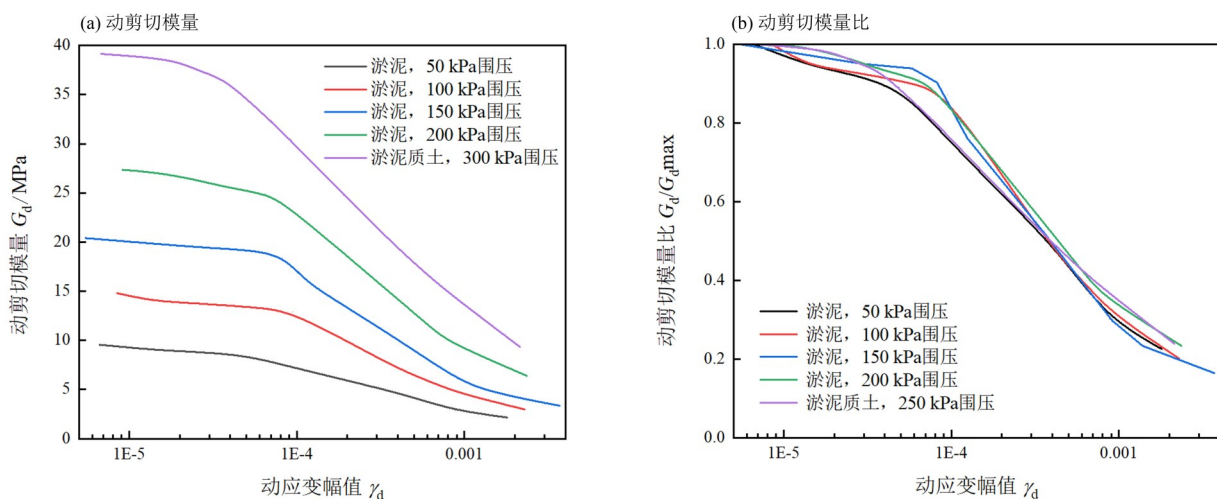


图3 共振柱试验结果

Fig. 3 Resonance column test results

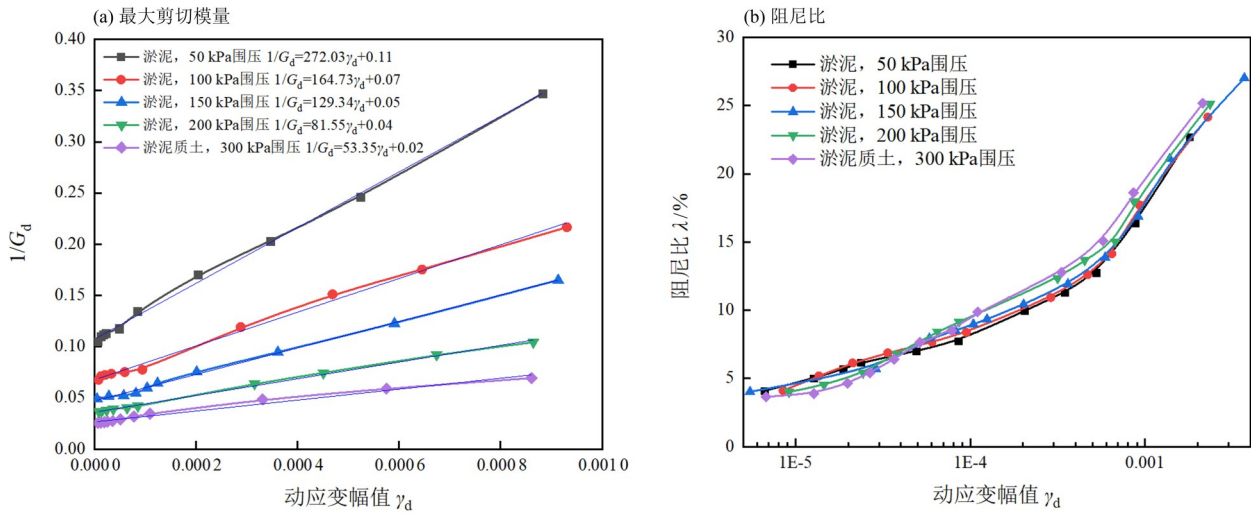


图 4 最大剪切模量与阻尼比
Fig. 4 Maximum shear modulus and damping ratio

$\gamma_{0.7} = 2 \times 10^{-4}$, 淤泥质土试样取 $\gamma_{0.7} = 1.2 \times 10^{-4}$ 。虽然本研究中的淤泥质土处于超固结状态, 但前人研究显示超固结比 OCR 对 $\gamma_{0.7}$ 的影响有限, 即当超固结比 OCR 从 1.08 增大至 5.76 时, $\gamma_{0.7}$ 的变化范围较小, 为 $1.5 \times 10^{-4} \sim 2.8 \times 10^{-4}$, 超固结比 OCR 的影响可忽略不计(王卫东等, 2013)。对动剪切模量做回归分析, 如图 4 所示, 可得到初始剪切模量 G_0 。统计各土样的初始剪切模量, 当围压分别为 50、100、150、200 和 300 kPa 时, 初始剪切模量分别为 9.32、14.78、21.31、27.79 和 37.79 MPa。此外, 土样的阻尼比与动应变幅值呈正相关关系(图 4(b))。在小应变范围内, 阻尼比随动应变幅值先缓慢增大后迅速增大。

围压越大, 在相同的动应变幅值下, 阻尼比越小。而动应变相对较大时($> 4 \times 10^{-5}$), 围压越大, 相同的动应变幅值下, 阻尼比越大。对于不同围压下的试样, 随试样产生的动应变幅值增大, 对

应的动剪切模量减小。100 kPa 围压下的参考初始剪切模量 G_0^{ref} 与 G_0 存在以下关系(梁发云等, 2017):

$$G_0^{ref} = G_0 \left(\frac{c' \cos \varphi' - \sigma_3' \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + P^{ref} \sin \varphi'} \right)^{-m}, \quad (4)$$

式中 G_0^{ref} 为 100 kPa 围压下的参考初始剪切模量; G_0 为初始剪切模量; c' 和 φ' 为有效抗剪强度指标; $P^{ref} = 100$ kPa; m 为应力水平相关幂指数, 对砂土和粉土一般取 0.5, 对黏性土一般取 0.5~1.0。本研究中的填土、淤泥、淤泥质土的 m 值分别为 0.5、0.75、0.7(顾晓强等, 2021b)。根据式(4)可得到, 淤泥和淤泥质土在参考围压为 100 kPa 下的初始剪切模量 G_0^{ref} 分别约为 16.2 和 17.5 MPa。

2.4 三轴试验

通过三轴剪切试验可得到土体参考割线模量 E_{50}^{ref} 、破坏比 R_f 以及土体有效抗剪强度参数 c' 和 φ' 。图 5 为填土在不同围压下的应力应变关系。从图 5(a) 可看出, 偏应力随轴向应变的增大先快速增大后

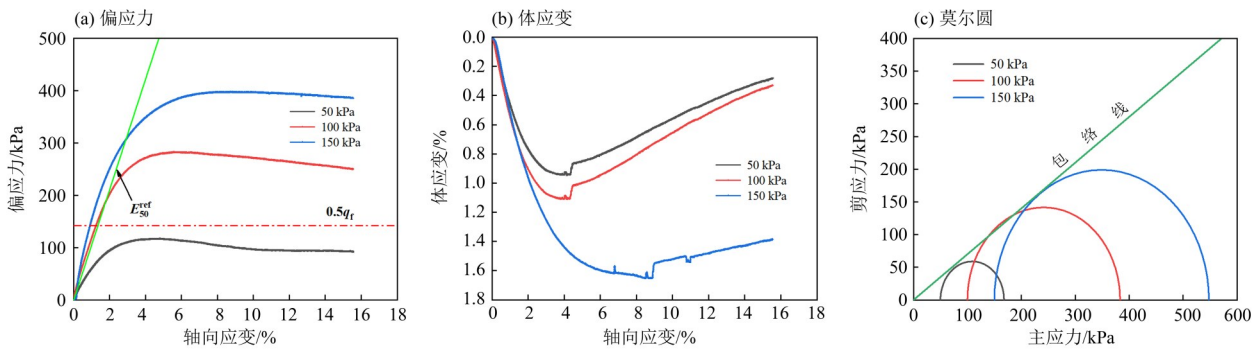


图 5 填土三轴试验结果
Fig. 5 Triaxial test results of backfill soil

基本不变甚至有减小的趋势, 说明填土在固结排水剪切下表现出一定的应变软化特性。随着围压的增大, 应变软化点对应的轴向应变逐渐增大, 分别为 3.3%、4.5% 和 6.8%。此外, 最大偏应力也随着围压增大而增大, 分别达到了 117.98、283.24 和 398.02 kPa。如图 5(b) 所示, 填土的体应变幅值随轴向应变的增大而先增大后减小, 但始终表现出剪缩性, 且围压越大, 剪缩越明显。最大体应变幅值对应的轴向应变分别为 4.1%、4.4% 和 8.5%。通过应力圆得出填土的黏聚力约为 0 kPa, 内摩擦角 34.6°。取参考围压在 100 kPa 下曲线峰值应力值或者轴向应变为 15% 时对应的偏应力作为破坏值 q_f , 填土的 q_f 为 283.24 kPa。参考割线模量 E_{50}^{ref} 对应于荷载 q_f 在 50% 时的割线模量, 即连接原点和 $0.5q_f$ 对应点的直线斜率就是参考割线模量 E_{50}^{ref} 。在三轴加载下, 轴向应变和偏应力存在以下关系

$$-\varepsilon_1 = \frac{q}{2E_{50}(1 - q/q_a)}, \quad (5)$$

式中 ε_1 是轴向应变, q 是偏应力。式(5)是双曲线, 将 $\varepsilon_1/q - \varepsilon_1$ 转变成线性关系, 有

$$\frac{\varepsilon_1}{q} = \frac{\varepsilon_1}{q_a} - \frac{1}{2E_{50}}, \quad (6)$$

则破坏比 R_f 可表示为

$$R_f = q_f/q_a. \quad (7)$$

在 $P^{ref}=100$ kPa 时, 填土的 $E_{50}^{ref}=4.28$ MPa, 破坏比 $R_f=0.92$ 。

如图 6 所示, 类似于填土, 淤泥在低围压下表现出应变软化, 而在高围压下不明显。淤泥在 100 kPa 围压下应变软化点对应的轴向应变约为 6.7%, 略大于填土的 4.4%。此外, 淤泥在剪切过程中也表现出了剪缩特性, 且体应变幅值随着轴向应变的增大一直增大, 无转折点。由淤泥的摩尔应力圆得到其黏聚力 10.76 kPa, 内摩擦角是 9.09°。与填土类似, 得到淤泥在 $P^{ref}=100$ kPa 下的 $E_{50}^{ref}=3.01$ MPa, 破坏比 $R_f=0.87$ 。

从应力-应变曲线可以看出(图 7), 淤泥质土在 50 和 100 kPa 围压下偏应力随轴向应变逐渐增大, 但增大的速率逐渐减小。而在 200 kPa 围压下, 淤泥质土偏应力先快速增大, 后基本不变乃至有减小趋势, 说明淤泥质土在较高围压下有应变软化趋势。通过应力圆知淤泥质土黏聚力 16.41 kPa, 内摩擦角 8.54°。同理得到淤泥质土在

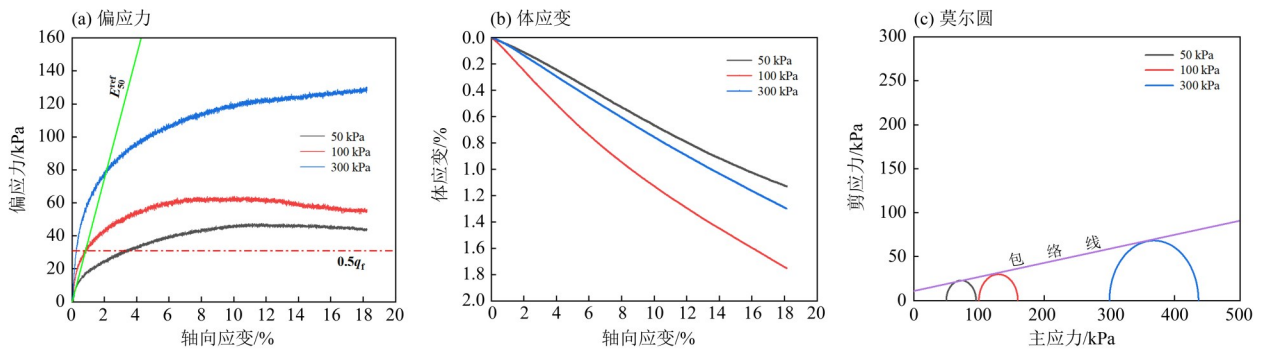


图 6 淤泥三轴试验结果
Fig. 6 Triaxial test results of silt

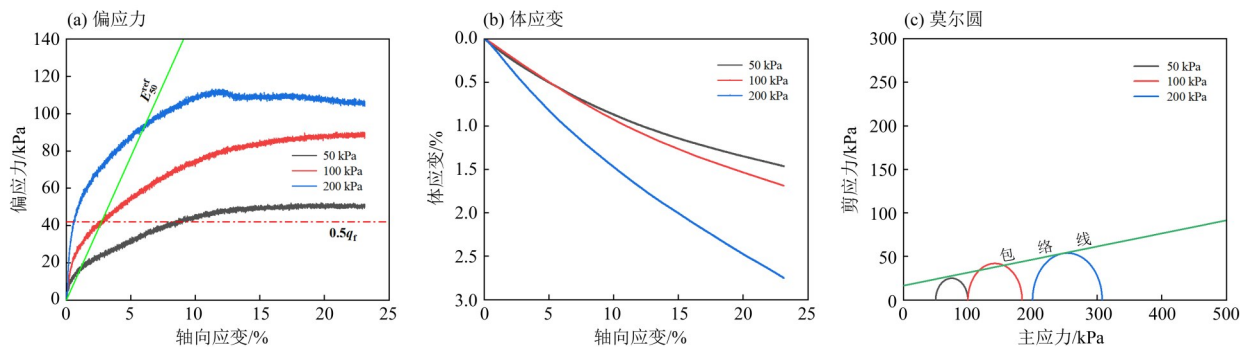


图 7 淤泥质土三轴试验结果
Fig. 7 Triaxial test results of silty soil

$P^{ref} = 100$ kPa 下的 $E_{50}^{ref} = 3.21$ MPa, 破坏比 $R_f = 0.73$ 。

2.5 三轴加卸载试验

HSS 模型参数加卸载模量 E_{ur}^{ref} 需通过三轴加卸载剪切试验获得。在本研究中, 参考围压取 100 kPa 下淤泥和淤泥质土的循环加卸载偏应力与轴向应变的关系曲线分别如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 淤泥和淤泥质土的循环加卸载曲线比较类似。卸载期间轴向应变逐渐减小, 再加载过程中初期应力增长很快, 但在后期变得缓慢, 构成一个应力滞回圈。此外, 重新加载达

到之前的轴向应变时, 偏应力略小于首次加载时的, 整体上表现出一定的卸载回弹。淤泥及淤泥质土这类结构性软土在经历多次循环加卸载后, 土体的结构与初始状态相比发生了很大变化。为尽可能还原土体的加卸载模量, 选取首次加卸载时的滞回圈。连接首个滞回圈的两个端点, 此直线的斜率就是加卸载模量 E_{ur}^{ref} 。在参考围压 100 kPa 下, 淤泥和淤泥质土的 E_{ur}^{ref} 分别为 8.02 和 10.89 MPa。

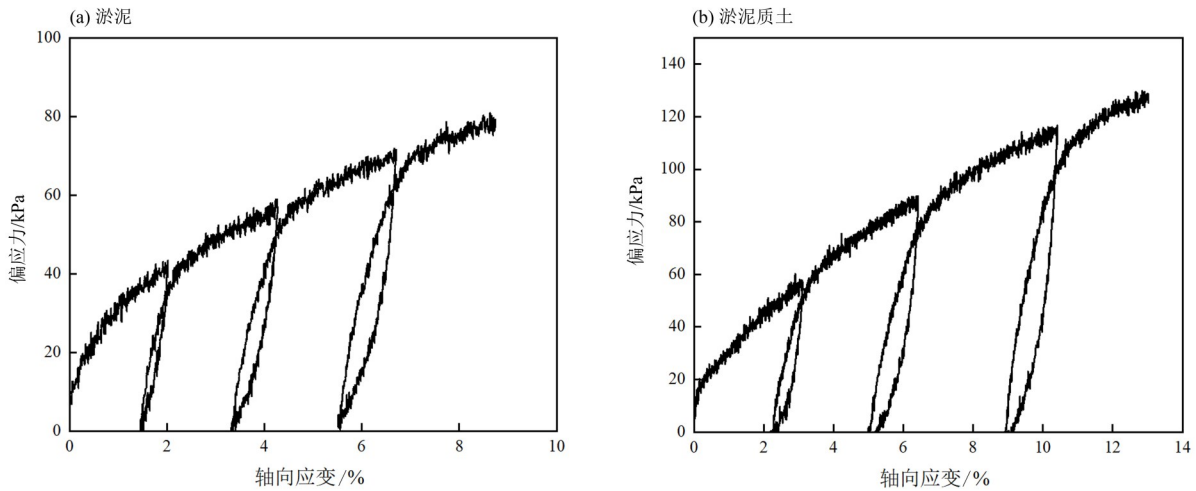


图 8 淤泥与淤泥质土加卸载 100 kPa 围压下的试验结果

Fig. 8 The experiment results of silt and silty soil on loading-unloading 100 kPa confining pressure

3 模型参数汇总及对比分析

3.1 参数汇总

通过一系列室内土工试验获得了珠海软土 HSS 模型的 13 个参数 c' 、 φ' 、 E_{oed}^{ref} 、 E_{50}^{ref} 、 R_f 、 P^{ref} 、 Ψ 、 m 、 G_0^{ref} 、 $\gamma_{0.7}$ 、 k_0 、 E_{ur}^{ref} 、 ν_{ur} 以及各参数之间的比例关系, 如表 4 所示。

3.2 参数对比分析

通过标准固结压缩试验知珠海金湾地区填土、淤泥和淤泥质土的压缩系数分别为 0.23~0.29、

1.23~1.55 和 0.61~0.84 MPa^{-1} 。三种土体中, 中层的淤泥压缩系数最大, 下层的淤泥质土压缩系数次之, 上层填土最小, 这主要与土体的初始孔隙比相关。从图 2 中可看出, 淤泥的初始孔隙比最大, 在同一轴压下其孔隙比变化也最大。宋许根等(2019)统计珠海西部中心城区软土的压缩系数为 0.53~3.74 MPa^{-1} , 平均 1.55 MPa^{-1} , 与本研究中淤泥的压缩系数较为接近。此外, 姜燕等(2019)统计广州南沙淤泥的压缩系数均值为 1.78 MPa^{-1} ,

表 4 珠海软土 HSS 模型主要参数¹⁾

Table 4 HSS model parameters of soft soil in Zhuhai

土层	c'	φ'	E_{oed}^{ref} /MPa	E_{50}^{ref} /MPa	R_f	P^{ref} /kPa	$\Psi/(^\circ)$	m	G_0^{ref} /MPa	$\gamma_{0.7}$	k_0	E_{ur}^{ref} /MPa	ν_{ur}
填土	0	34.6	12.37	4.28	0.92	100	4.6	0.5	—	—	0.44	—	0.2
淤泥	10.76	9.09	1.73	3.01	0.87	100	0	0.75	16.2	2×10^{-4}	0.82	8.02	0.2
淤泥质土	16.41	8.54	2.20	3.21	0.73	100	0	0.7	17.5	1.2×10^{-4}	0.87	10.89	0.2

1) 静止侧压力系数 $k_0 = 1 - \sin\varphi'$ (梁发云等,2017)。剪胀角 Ψ , 砂土 $\Psi = \varphi' - 30^\circ$, 当 $\varphi' > 30^\circ$ 时; $\Psi = 0$, 当 $\varphi' < 30^\circ$ 时; 黏性土, $\Psi = 0$ (梁发云等,2017)。应力水平相关幂指数 m , 砂土和粉土 $m = 0.5$, 黏性土 $m = 0.5 \sim 1.0$ 。

略大于珠海地区的。珠海地区的淤泥及淤泥质土属高压缩性土,其固结切线模量分别在 1.67~1.73 MPa 及 2.1~3.6 MPa 范围内,与广东阳江地区(1.6~3.8 MPa)及长三角地区淤泥质黏土的固结切线模量(3.01 MPa(吕锋,2018))较为接近,但都明显小于填土的 12.37 MPa,说明土体的变形特性与其状态有关。统计淤泥和淤泥质土在 100 kPa 围压下的初始剪切模量 G_0^{ref} 和加卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 如表 5 所示。

从表 5 可以看出,淤泥和淤泥质土的 G_0^{ref} 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 相差不大,且比例关系大概在 1.61~2.02 之间,与长三角地区软土的 1~2 倍关系大致相当(梁发云等,2017)。此外,本次试验中的淤泥和淤泥质土的 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的比例关系是 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = (2.66\sim 3.39)E_{50}^{\text{ref}}$,与梁发

云等(2017)的结果较为接近。此外,填土的 $E_{\text{ned}}^{\text{ref}}$ 明显大于 E_{50}^{ref} ,约是后者的 2.89 倍,而淤泥和淤泥质土的 $E_{\text{ned}}^{\text{ref}}$ 略小于 E_{50}^{ref} 。

通过三轴试验获得的淤泥及淤泥质土的黏聚力分别为 10.76 和 16.41 kPa,内摩擦角分别为 9.09° 、 8.54° ,略大于珠海西部城区软土的 4.93 kPa 和 3.26° (宋许根等,2019)。与长三角软土不同,以珠海软土为代表的珠三角软土的破坏比 R_f 在 0.7~0.9 之间,与广东阳江地区海洋软土的 R_f (0.61~0.75)相当(顾晓强等,2021a),但略高于长三角软土,这可能是由于本研究中土样质量一般,土体中存在较大孔洞以及贝壳等碎屑物,这些都对试验结果有明显影响。

表 5 淤泥和淤泥质土的 G_0^{ref} 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 统计
Table 5 Values of G_0^{ref} and $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ for silt and silty soil

土体	G_0^{ref} /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	系数关系
淤泥	16.2	8.02	$G_0^{\text{ref}} = 2.02 E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$
淤泥质土	17.5	10.89	$G_0^{\text{ref}} = 1.61 E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$

4 结 论

本研究通过室内土工试验获得了珠海地区典型软土的 HSS 模型参数值、参数确定方法以及模型参数之间的比例关系,得到的主要结论如下:

1) 通过常规固结试验、三轴固结排水剪切、共振柱以及循环加卸载试验,获得了珠海典型软土的 HSS 模型参数,包括 c' 、 φ' 、 $E_{\text{ned}}^{\text{ref}}$ 、 E_{50}^{ref} 、 R_f 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 等以及它们之间的比例关系。

2) 珠海地区填土有效抗剪强度指标 c' 接近于

0,均小于淤泥和淤泥质土的,但 φ' 大于淤泥和淤泥质土的。此外,淤泥和淤泥质土的 G_0^{ref} 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 差别不大,且比例关系大概在 1.61~2.02 之间。

3) 填土的 $E_{\text{ned}}^{\text{ref}}$ 、 E_{50}^{ref} 、 R_f 均大于淤泥和淤泥质土,淤泥和淤泥质土在 100 kPa 参考围压下的 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 分别是位于 8.02~10.89 MPa 之间。

4) 珠海地区淤泥和淤泥质土的 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的比例关系是 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = (2.66\sim 3.39)E_{50}^{\text{ref}}$ 。填土的 $E_{\text{ned}}^{\text{ref}}$ 明显大于 E_{50}^{ref} ,约是后者的 2.89 倍,而淤泥和淤泥质土的 $E_{\text{ned}}^{\text{ref}}$ 略小于 E_{50}^{ref} 。

参考文献:

陈尚荣,李通达,梁发云,等,2020.上海临港砂质粉土硬化土小应变模型参数研究[J].同济大学学报(自然科学版),48(6):841-846.
陈少杰,顾晓强,高广运,2019.土体小应变剪切模量的现场和室内试验对比及工程应用[J].岩土工程学报,41(S2):133-136.
陈赅,罗敏敏,夏能武,等,2021.软土 HSS 模型参数现有试验成果统计分析[J].岩土工程学报,43(S2):197-201.
董学超,王水林,郭明伟,等,2020.基于压缩试验曲线的 HSS 模型参数优化[J].岩土力学,41(增刊2):1-9.
李连祥,刘嘉典,李克金,等,2019.济南典型地层 HSS 参数选取及适用性研究[J].岩土力学,40(10):4021-4029.

顾晓强,刘文倩,陈玺元,等,2021a.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(S2):41-44.
顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等,2021b.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,42(3):833-845.
胡静,唐跃,张家康,等,2021.高速列车荷载作用下饱和软土地基动力响应研究[J].岩土力学,42(11):3169-3181.
姜燕,杨光华,孙树楷,等,2019.广州市南沙区软土物理力学指标统计分析[J].长江科学院院报,36(9):99-103.
蒋明镜,彭立才,朱合华,等,2010.珠海海积软土剪切带微

- 观结构试验研究[J]. 岩土力学, 31(7): 2017-2023+2029.
- 李金柱, 朱向荣, 刘用海, 2010. 结构性软土弹塑性损伤模型及其应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 44(4): 806-811.
- 李学, 刘治清, 宋晶, 等, 2017. 有机质在吹填淤泥固结中的微宏观特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 47(10): 28-35.
- 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等, 2017. 上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 39(2): 269-278.
- 刘汉龙, 肖杨, 崔允亮, 2011. 结构性软土三维弹塑性损伤本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 33(4): 637-642.
- 鲁泰山, 刘松玉, 蔡国军, 等, 2021. 软土地层基坑开挖扰动及土体再压缩变形研究[J]. 岩土力学, 42(2): 565-573+580.
- 吕锋, 2018. 基于HSS和M-C本构模型软土基坑变形数值分析[J]. 建材与装饰, (44): 94-95.
- 盛旭圆, 2020. MC、HS、HSS本构模型在深基坑开挖模拟中的比较分析[J]. 低温建筑技术, 42(7): 128-131, 138.
- 施有志, 阮建凑, 吴昌兴, 2017. 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, 17(2): 100-105.
- 宋许根, 王志勇, 柏威伟, 等, 2019. 珠海西部中心城区大面积深厚软土工程特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 38(7): 1434-1451.
- 王卫东, 王浩然, 徐中华, 2013. 上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-Small模型参数的研究[J]. 岩土力学, 34(6): 1766-1774.
- 谢东武, 管飞, 丁文其, 2017. 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, 39(5): 898-906.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社.
- ALZABEEBEE S, 2020. Numerical analysis of the interference of two active machine foundations[J]. Geotech Geol Eng, 38(5): 5043-5059.
- BENZ T, VERMEER P A, SCHWAB R, 2009. A small-strain overlay model[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 33(1): 25-44.
- NIEMUNIS A, CUDNY M, 2018. Discussion on “*Dynamic soil-structure interaction: A three-dimensional numerical approach and its application to the Lotung case study*”—Poor performance of the HSS model[J]. Comput Geotech, 98: 243-245.
- SAIF A, 2021. Influence of soil model complexity on the seismic response of shallow foundations[J]. Geomech Eng, 24(2): 193-203.
- SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G, 1999. The hardening soil model: Formulation and verification [C]// Proceedings of the International Symposium Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Amsterdam.

(责任编辑 秦社彩)