

珠海富水软土小应变硬化参数试验研究*

卫俊杰^{1,2}, 凌飞³, 陈玉林⁴, 冷紫旺³, 胡正^{1,2}, 戴北冰^{1,2}, 刘建坤^{1,2}

1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082
2. 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 广东 广州 510275
3. 珠海市轨道交通有限公司, 广东 珠海 519100
4. 中铁隧道局集团有限公司大盾构工程分公司, 河南 郑州 450007

摘要: 基于三轴排水、标准固结等室内试验, 并结合经验方程, 标定了珠海富水土体的成套HSS模型参数, 并分析了主要强度参数 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、 G_0^{ref} 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的比例关系, 为珠海地区不同土层的HSS模型参数取值及计算提供参考。研究发现, 珠海地区黏土的小应变参考剪切模量 G_0^{ref} 高于砂土, 且远高于淤泥质黏土。与长三角等滨海地区相比, 珠海地区的黏土因含水率较高, 其参考割线模量 E_{50}^{ref} , 参考加卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$, 参考切线模量 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 和参考剪切模量 G_0^{ref} 均较低。

关键词: 富水软土; HSS模型; 参数分析; 试验

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)04-0132-09

Experimental study on parameters of small strain hardening model of Zhuhai soft soil with high water content

WEI Junjie^{1,2}, LING Fei³, CHEN Yulin⁴, LENG Ziwan³, HU Zheng^{1,2}, DAI Beibing^{1,2}, LIU Jiankun^{1,2}

1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Guangzhou 510275, China
3. Zhuhai Rail Transit Company Limited, Zhuhai 519100, China
4. China Railway Tunnel Bureau Group Company Limited Shield Engineering Branch, Zhengzhou 450007, China

Abstract: This study completed a series of laboratory tests to obtain all HSS model parameters of water-rich soft soil in Zhuhai area, and analyzed the proportional relationship between the modulus of key parameters E_{50}^{ref} , $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$, G_0^{ref} and $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$, providing an important supplement to the HSS model parameters of different soil layers in Zhuhai area. Compared with the results in the literature, it is found that the small strain reference shear modulus G_0^{ref} of the clay in Zhuhai area is higher than that of the sand. Compared with other coastal areas such as the Yangtze River Delta, the water content of Zhuhai clay is higher, and its reference secant modulus E_{50}^{ref} , reference loading and unloading modulus $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$, reference tangent modulus $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ and reference shear modulus G_0^{ref} are lower.

Key words: soft soil with high water content; HSS model; parameters analysis; tests

* 收稿日期: 2024-01-06 录用日期: 2024-03-05 网络首发日期: 2024-04-10
基金项目: 国家自然科学基金(52008409); 广东省自然科学基金(2023A1515012140)
作者简介: 卫俊杰(2000年生), 男; 研究方向: 宏细观土力学; E-mail: weijj8@mail2.sysu.edu.cn
通信作者: 胡正(1991年生), 男; 研究方向: 宏细观土力学; E-mail: huzheng6@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240012

作为构筑物的最终承载体,珠海软土具有典型的压缩性高、灵敏度大等特点。随着粤港澳大湾区建设不断推进,珠海的基坑工程、隧道工程、地下建筑工程和基础工程等面临的城市工程地质环境越来越复杂,对开挖过程中的地层变形控制要求日趋严格。根据大量工程实测数据和数值分析,地下结构在正常使用荷载条件下,周边区域的土体基本处于小应变状态,其应变范围在 10^{-4} 至 10^{-3} 之间(Burland, 1989; 王海波等, 2011)。土的剪切模量在小应变状态时,会随应变增加而快速减小,呈现高度非线性的特点(管飞, 2010)。传统弹塑性本构模型,如摩尔-库伦理想弹塑性模型(Heyman, 1972)、剑桥模型(Roscoe, 1963)等,无法描述这种力学特性,采取考虑土体小应变特性的土体本构模型十分必要。

为考虑土体剪切硬化和压缩硬化的特征, Schanz et al.(1998, 1999)提出采用弹塑性关系式表达的硬化土模型(HSM, hardening soil model); Benz (2007)在此基础上提出了小应变硬化土体模型(HSSM, hardening soil-small model),考虑了土体在小应变弹性变形阶段的模量非线性和应力等特征。HSS模型所需要的试验参数较多,需要进行高精度、长周期的室内试验,实际工程中通常使用经验公式和比例关系获取部分参数值(罗敏敏等, 2021)。针对上海地区软土,梁发云等(2017)选取了典型上海软土层开展了HSS模型参数标定;顾晓强等(2021)给出了上海HSS模型参数的取值方法,并应用于多个基坑工程验证;董鑫等(2023)采用PLAXIS有限元软件,结合HSS模型对常州某基坑工程进行分析。值得说明的是,当前针对HSS模型的参数标定工作多集中于长三角等地区。针对珠三角地区,特别是粤港澳大湾区城市的相关研究工作较少。近年来,李栋等(2023)进行了珠海软土的HSS模型参数试验,发现土体的状态对其变形特性有显著影响,填土的HSS模型参数相较于淤泥和淤泥质土有较大区别。然而,珠海地区地质条件复杂,各类天然土层的HSS模型参数研究亟待补充。

本研究以珠海隧道软土层为研究对象,通过标准固结试验、应力路径三轴试验、三轴固结排水试验、三轴固结排水加卸载试验和共振柱试验,确定了珠海隧道土层的HSS模型参数;并分析了各参数间的比例关系。最后,将珠海地区黏土和砂土的HSS模型主要强度参数与珠海地区淤泥、

其他地区的砂土和黏土的参数相比较,探究珠海地区黏土和砂土的HSS模型参数特征。研究成果能够为粤港澳大湾区滨海软土的HSS模型确定和工程实践提供参考依据。

1 HSS模型与参数取值方法

HSS模型不仅能够反映软土的剪胀性、压缩硬化和固结变化等特征,而且能够反映土体在小应变状态下的刚度变化特征,更适合模拟粉土、黏土等软土。HSS模型共有13个参数,包括有效黏聚力 c' ,有效内摩擦角 φ' ,剪胀角 ψ ,破坏比 R_f ,参考应力 p^{ref} ,参考割线模量 E_{50}^{ref} ,参考加卸载模量 E_{ur}^{ref} ,参考切线模量 E_{oed}^{ref} ,刚度应力水平相关幂指数 m ,加卸载泊松比 ν_{ur} ,正常固结条件下静止侧压力系数 k_0 ,初始参考剪切模量 G_0^{ref} ,阈值剪应变 $\gamma_{0.7}$ 。其中, G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 属于小应变参数,能够反映土体在小应变阶段具有较大刚度的特征。对于砂土,当 $\varphi' > 30^\circ$ 时, $\psi = \varphi' - 30$,否则 $\psi = 0^\circ$;而Plaxis模型手册推荐黏性土的 ψ 取为 0° (Bolton, 1983; Brinkgreve, 2006), k_0 可按照 $(1 - \sin\varphi')$ 取值(Gao et al., 1986), E_{ur}^{ref} 和 ν_{ur} 可使用经验公式取值(徐中华等, 2006; 梁发云等, 2017; 贾晶玺等, 2022)。据李栋等(2023)和Janbu(1963),砂土和粉土的 m 取0.5,淤泥的 m 取0.75,淤泥质土的 m 取0.7。 m 可在0.5~1中取值,参考应力 p^{ref} 为100 kPa,其他参数使用表1中的试验方法获取。

2 试验过程

2.1 试样制备

本次试验钻孔取样于珠海隧道TJ2标段,隧道起于珠海大桥西,终于珠海大桥东,下穿珠江出海口,是含水量和渗透率土较高的软土,其土层主要分为淤泥质粉质黏土、粉质黏土细中砂和中粗砂,均为珠海地区广泛分布的典型土层。

采用土工试验测量土样基本力学性质,测得土样的含水率、天然密度、比重、液限、塑限、塑性指数和渗透系数(表2)。将筛分法和密度计法相结合,获得土样的级配曲线。图1为7.5 m处粉砂级配曲线,粒径范围集中于0.004~0.021 mm,不均匀系数为38.82,曲率系数为5.13;对于连续级配土,曲率系数大于5时可视为级配良好(刘松玉, 2020)。初始孔隙比 e_0 可由 $e_0 = \gamma_s(1 + \omega)/(\gamma_w - 1)$ 计算, γ_s 为土的天然比重, γ_w 为水的比重, ω 是土的天然含水率。

表 1 HSS 模型参数试验取值方法

Table 1 Experimental determination methods for HSS model parameters

参数	室内试验取值方法
c'	三轴固结排水剪切试验 (CD) 或三轴固结不排水剪切试验 (CU)
φ'	三轴固结排水剪切试验 (CD) 或三轴固结不排水剪切试验 (CU)
ψ	砂土: $\varphi' - 30(\varphi' > 30^\circ)$ 或 $0(\varphi' < 30^\circ)$; 黏土: 0
R_f	三轴固结排水剪切试验 (CD)
p^{ref}	通常取 100
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	标准固结试验
E_{50}^{ref}	三轴固结排水剪切试验 (CD)
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	$-28.8 \ln(e + 24.5)$ (e 为土体孔隙比)
ν_{ur}	0.2
k_0	$1 - \sin \varphi'$
m	0.5 (砂土); 0.7 (淤泥); 0.75 (淤泥质土)
小应变参数	
G_0^{ref}	共振柱试验
$\gamma_{0.7}$	共振柱试验

表 2 土样的基本物理力学性质

Table 2 Basic physical and mechanical properties of samples

土层	试样深度/m	含水率/%	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	初始孔隙比 e_0	液限 w_L	塑限 w_p	塑性指数 I_p	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
粉砂(I)	7.5	32.12	1.87	2.669	0.992	/	/	/	4.94×10^{-8}
粉质黏土(II)	14.5~19.5	43.63	1.77	2.688	1.245	41.0	22.9	12.59	7.98×10^{-8}
黏土(III)	24.5~29.5	53.41	1.72	2.618	1.269	33.4	19.4	9.84	8.22×10^{-8}
细砂(IV)	32~38.5	38.21	1.85	2.653	1.132	54.1	23.9	20.32	6.79×10^{-8}

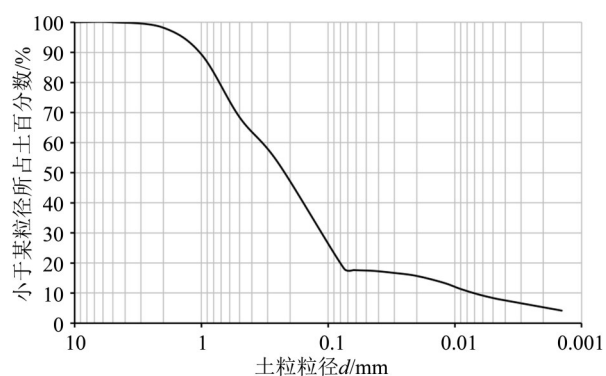


图 1 7.5 m 处粉砂级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of silty soil at 7.5 m

2.2 试验步骤

为测定土样的小应变硬化模型参数, 参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019), 开展如下室内试验: 采用四联直剪仪进行直剪试验, 采用 TXXSZ-5 土工三轴仪进行三轴固结排水剪切试验(CD)和三轴固结不排水剪切试验(CU), 采

用 GZQ-1 型全自动气压固结仪进行标准固结试验和固结加卸载试验, 采用无弹簧支撑的扭转振动 GDS-stoke 型共振柱系统进行共振柱试验。

2.2.1 三轴试验 进行三轴试验前, 选取 20 m 和 30 m 深度的淤泥质粉质黏土制作直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的试样, 置于真空饱和缸中进行预饱和。之后将试样放入三轴仪的饱和室中进行反压饱和, 应注意分级施加围压, 以减少对试样的扰动。计算每级围压下孔压增量 Δu 和围压增量 $\Delta \sigma_3$, 当 $\Delta u / \Delta \sigma_3 > 0.98$ 时认为试样饱和。当试样达到饱和和状态后, 根据试验需要, 开展选择排水固结与不排水固结, 固结时间为 24 h 以上。选用 50、100、200 kPa 围压进行试验, 维持饱和期间的反压值不变, 增加所需的固结围压值, 观察孔隙水压力变化。当孔隙水压力消散至反压附近不再变化时, 视为固结完成。随后开展剪切试验, 当剪切位移达到 16 mm (对应 20% 轴向应变) 时停止试验。

2.2.2 标准固结试验 采用GZQ-1型全自动气压固结仪进行标准固结试验。使用固结环刀切入钻孔取得土样,且切土方向需要与土的天然垂直方向一致。将制备好的试样放入叠式饱和器内置于真空抽气饱和缸中,连续真空抽气2~4 h,停止抽气后,再进行12 h抽真空饱和。将饱和后的环刀试样置于一维气压固结仪中加载,试验的荷载梯度依次为12.5、25、50、100、200、400、800、1 600、3 200 kPa,判稳标准为24 h,在施加完第一级压力后,立即向水槽中注水至满。

2.2.3 共振柱试验 共振柱试验的试样制备步骤与反压饱和步骤均与2.2.1中的相同,制备完毕后,将试样套入乳胶膜,安装至GDS-stoke型共振柱系统上,将有效围压设置为50 kPa,在此有效围压下固结48 h。试样固结完成后,保持固结的有效围压不变,进行共振柱试验。从较小的激振电压开始施加激振电压,通过宽频扫描和精确频率扫描确定最大电压峰值对应的频率,在此频率下进行阻尼比测试获取对应的阻尼比。重复上述步骤,可得到一系列的共振频率、动应变幅值和对应的阻尼比。

3 试验结果与参数确定

3.1 三轴试验结果

选取粉质黏土(II)、黏土(III)分别在100、200和300 kPa的围压下施加轴向压力进行三轴排水剪切试验;选取细砂(IV)层土样,在上述三种围压状态下,施加轴向压力进行三轴不排水剪切试验。在试样破坏时,根据摩尔-库伦理论求得有效黏聚力 c' 与有效内摩擦角 φ' 的值,有效应力摩尔圆如图2所示。根据所绘制摩尔圆的包络线,计算出包

络线方程,其截距即为 c' ,斜率即为 φ' 的正切值。在围压为100 kPa的三轴试验获得应力-应变关系,取曲线轴向应变为15%时对应的偏应力为破坏值 p_f ,将原点与应力为 $0.5p_f$ 时对应的应变值点连线,所得直线的斜率即为参考割线模量 E_{50}^{ref} 。计算结果如表3所示。

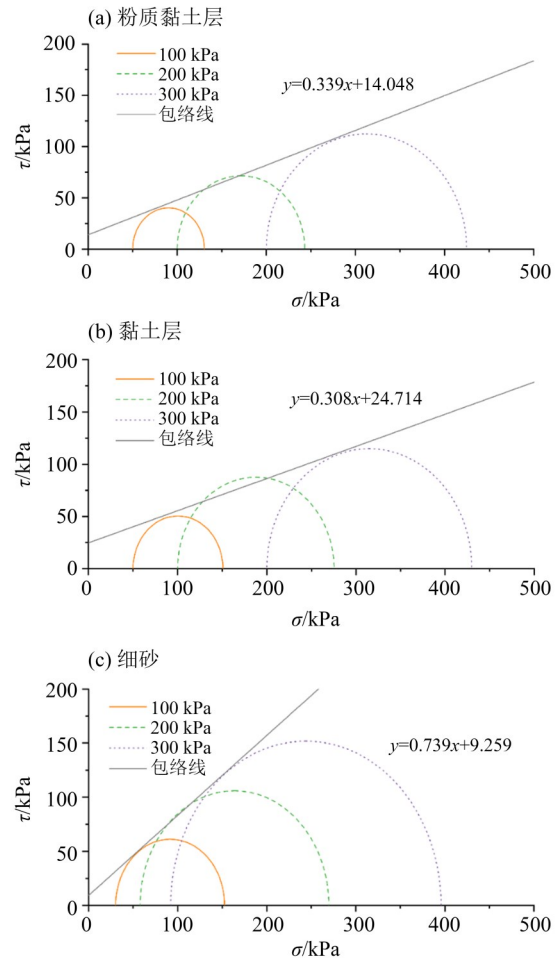


图2 有效应力摩尔强度包络线与莫尔应力圆
Fig. 2 Effective stress molar strength envelope and Mohr stress circle

表3 抗剪强度指标
Table 3 Shear strength index

土层	c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$	R_f	E_{50}^{ref} / MPa
粉质黏土 (II)	14.048	18.723	0.896	1.684
黏土 (III)	24.712	17.128	0.892	1.608
细砂 (IV)	9.259	13.127	/	/

3.2 标准固结试验结果

对各土层进行标准固结试验,取固结压力为100 kPa时的切线压缩模量为参考切线模量,绘制轴向应力-应变关系曲线,如图3所示。使用指数

函数形式拟合数据点,绘制出拟合函数,图中各拟合函数的判定系数 R^2 均大于0.99。各层土样在轴向应力小于500 kPa时,轴向应变随应力增加而增加的趋势较平缓;当轴向应力大于500 kPa时,

应变随应力增加而增加的速度加快, 曲线斜率快速增加。拟合曲线后, 截取轴向应力为 100 kPa 时的曲线斜率, 即为参考切线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 。粉砂(I)、粉

质黏土(II)、黏土(III)和细砂(IV)的 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 分别为 3.52、3.22、2.27 和 4.58 MPa。

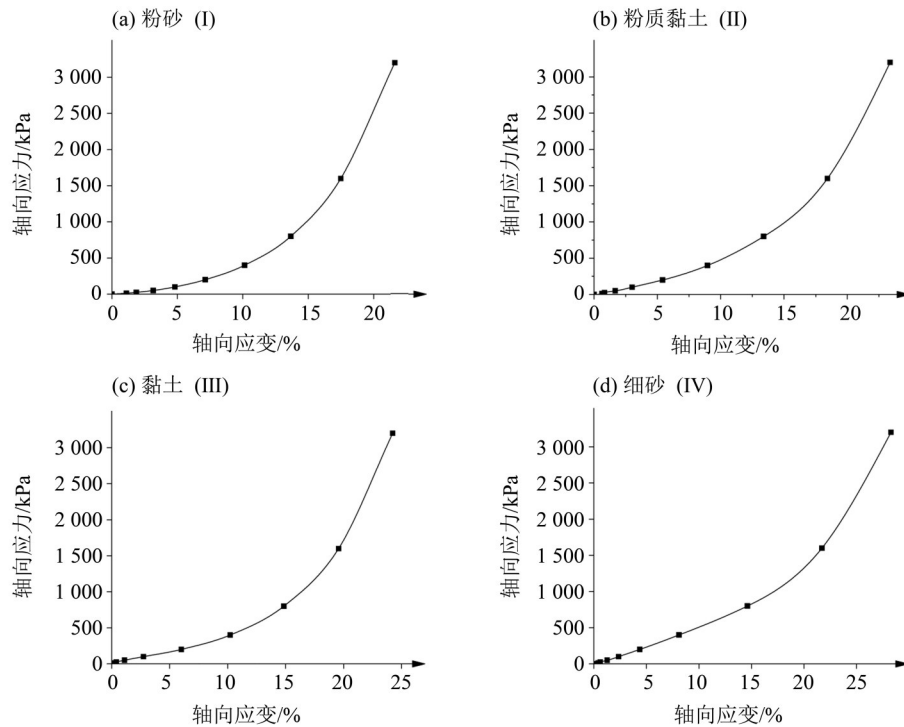


图 3 轴向应力-应变曲线

Fig. 3 Axial stress-strain curve

3.3 共振柱试验结果

共振柱试验主要用于研究土层的小应变刚度值, 能够获得土样在不同动剪应变下的动剪切模量。对特定土层进行共振柱试验时, 应尽量将围压选为取土深度处的竖向有效自重应力。而李栋等(2023)的研究结果表明, 当动应变幅值一定时, 动剪切模量与围压成正比关系, 但总体动剪切模量受围压影响较小。因此, 选取不同围压进行共振柱试验后, 通过换算关系获得的参考初始剪切模量 G_0^{ref} 误差较小。本文考虑试验效率, 将共振柱试验的围压统一确定为 50 kPa, 试验结果如图 4 所示。在小应变范围内, $\gamma_{0.7}$ 表示剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时所对应的剪应变。据此可计算各土层对应的阈值剪应变 $\gamma_{0.7}$, 如表 4 所示。

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。据 Hardin et al. (1972) 的研究, 土体动剪切模量与阻尼比的关系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(1)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 $1/G_d = a + b\gamma$ 。其中, a 和 b 为土体试验参数。当 γ 接近于 0 时, 有 $G_0 = 1/a$ 。如图 5 所示, 绘制各土层的 $1/G_d$ 与剪应变 γ 关系曲线, 使用线性趋势线 $y = a'x + b'$ 拟合数据点, 获得虚线所示的回归方程。其中, 截距 b' 和斜率 a' 分别对应为 a 和 b 的值。根据 PLAXIS 软件手册, 在参考围压 100 kPa 下, 初始动剪切模量和参考初始剪切模量的关系为

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \varphi' - \sigma_3' \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + P^{\text{ref}} \sin \varphi'} \right)^m, \quad (3)$$

式中 P^{ref} 为参考围压, σ_3' 为固结有效围压, m 为土体刚度与应力水平相关程度系数。据式(3)可得各土层的初始剪切模量和参考初始剪切模量。

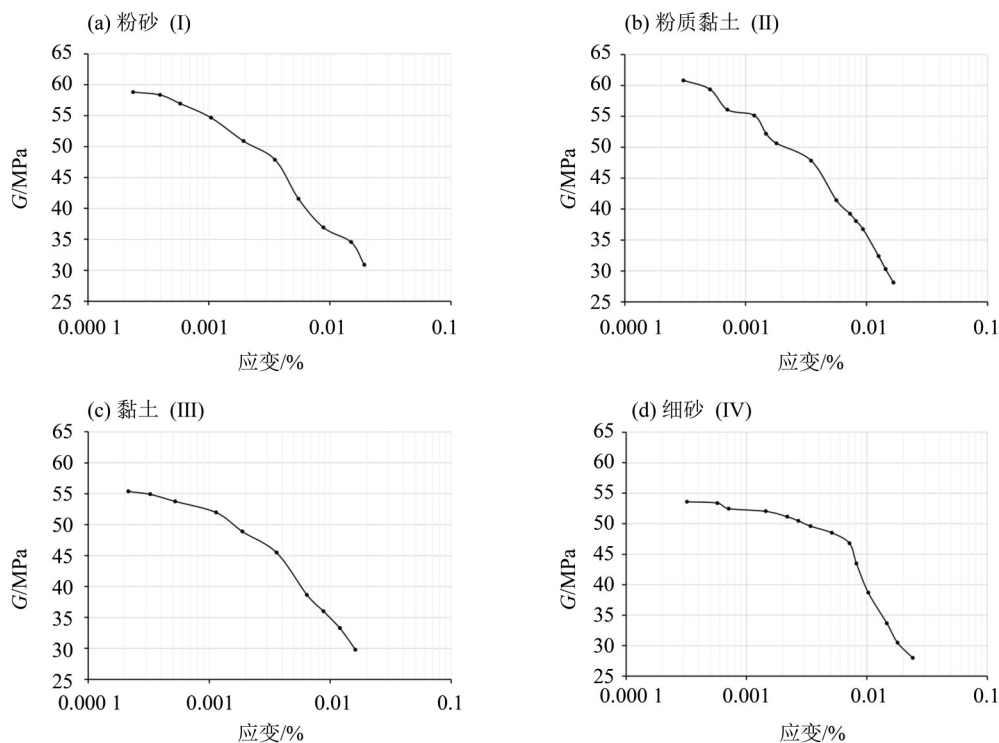


图 4 动剪切模量-剪应变曲线

Fig. 4 Dynamic shear modulus - shear strain curve

表 4 小应变参数

Table 4 Small strain parameters

土层	$\gamma_{0.7}/\%$	G_0/MPa	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$
粉砂层 (I)	0.005 78	56. 18	10. 66
粉质黏土层 (II)	0.005 24	58. 82	25. 35
黏土层 (III)	0.006 38	54. 64	20. 87
细砂层 (IV)	0.011 3	56. 18	12. 68

4 参数分析

4.1 模型参数汇总

本研究通过室内试验获得了珠海富水软土 HSS 模型的参数 c' 、 φ' 、 R_f 、 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 G_0^{ref} 、 $\gamma_{0.7}$, 如表 5 所示。根据所得结果, 进一步分析各参数之间的比例关系。

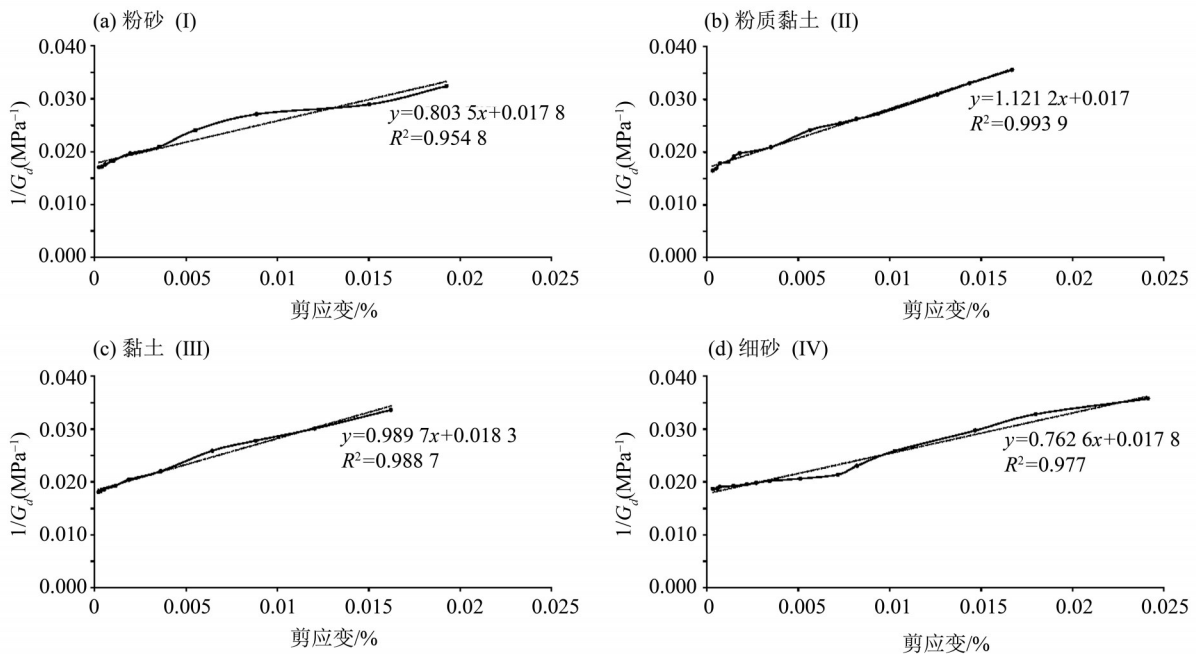
4.2 参数对比分析

将本次试验获得的珠海富水软土的小应变土体硬化模型参数与相关研究中的进行对比, 比较相同地区不同土层, 不同地区中性质相近的土层的 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 的比例关系, 如表 6 所示。本次试验中, 各土层的 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 的模量比例在 0.49~1.12 范围内, 与珠海地区的淤泥质土(李栋

表 5 珠海富水软土 HSS 模型主要强度参数

Table 5 Main strength parameters of HSS model of Zhuhai soft soil with high moisture content

土层	c'	φ'	R_f	E_{50}^{ref}	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	G_0^{ref}	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$
粉砂 (I)	2. 318	12. 743	0. 910	3. 935	24. 731	3. 52	10. 66	5. 78
粉质黏土 (II)	14. 048	18. 723	0. 896	1. 684	18. 189	3. 22	25. 349	5. 24
黏土 (III)	24. 712	17. 128	0. 892	1. 608	17. 639	3. 31	20. 865	6. 38
细砂 (IV)	9. 259	13. 127	0. 785	2. 417	20. 929	4. 58	12. 679	11. 3

图 5 $1/G_d - \gamma$ Fig. 5 $1/G_d - \gamma$

等, 2023) 相比较小, 与上海地区 (顾晓强等, 2021) 黏土的模量比例相近。黏土的 E_{ur}^{ref} 和 E_{50}^{ref} 的比例关系为 $E_{ur}^{ref} = (10.80 \sim 10.97)E_{50}^{ref}$, 与上海地区 (顾晓强等, 2021) 的黏土比例关系相近, 但与珠海地区的淤泥质土比例关系相差较大, 说明影响模量比例关系的因素之一是土的种类。黏土的 G_0^{ref} 和 E_{ur}^{ref} 的比例关系为 $G_0^{ref} = (1.18 \sim 1.39)E_{ur}^{ref}$, 与李栋等 (2023) 的试验结果大致相当。而粉砂与细砂的模量关系分别为 $E_{ur}^{ref} = (6.28 \sim 8.66)E_{50}^{ref}$ 、 $G_0^{ref} = (0.43 \sim 0.61)E_{ur}^{ref}$, 均小于黏土对应的模量比例。与袁聚云等 (2022) 在阳江地区测得的 HSS 模型参数比例关系相比, 黏土的 $E_{ur}^{ref}/E_{50}^{ref}$ 比值偏大, 而 G_0^{ref}/E_{ur}^{ref} 比值偏小。这说明淤泥质土、中砂与黏土在模量比例关系上存在较大差异, 使用经验公式前应判断土层类型。

由于珠海软土高含水率、高压缩性、高渗透率的特性不利于土层变形控制, 应在对土层开挖前采取排水、防渗、添加固化剂等加固措施。利用本试验获得的 HSS 模型参数, 在 PLAXIS、Zsoil 等有限元软件对施工区域的土层建立数值模型, 对土体的变形进行数值模拟, 采取不同的措施减少土层变形以寻找经济安全的方案。同时, 施工区域应布置监测设备实时监控土层位移, 将位移信息及时输入数值模型, 再根据数值模型的预测改进加固措施, 实现工程数字孪生的协同处理。

5 结 论

针对珠海地区典型富水软土, 本文通过室内试验测定了 HSS 模型主要强度参数, 并采用经验公式对其余参数取值、对比参数间的比例关系。主要结论为:

(1) 通过三轴固结试验、标准固结试验和共振柱试验, 获得了 HSS 模型的 7 个主要强度参数: c' 、 φ' 、 R_f 、 E_{50}^{ref} 、 E_{ur}^{ref} 、 G_0^{ref} 、 $\gamma_{0.7}$, 并使用经验公式计算其余 8 个参数, 提供了 HSS 模型整套参数的取值方案。其结果能有效补充珠海地区黏土和砂土的 HSS 模型参数, 为沿海软土地区的工程数值分析提供参考。

(2) 珠海地区近海软土以浅层粉砂、中层黏土、深层细砂结构为主, 级配良好。其中浅层粉砂的细颗粒含量较多, 初始孔隙比为 0.992; 中层黏土厚度约 15 m, 含水率最高, 初始孔隙比为 1.245~1.269; 深层细砂含水率介于粉砂和黏土之间, 初始孔隙比为 1.132。

(3) 珠海富水软土的参数比例关系中, 砂土的 $E_{ur}^{ref}/E_{50}^{ref}$ 和 G_0^{ref}/E_{ur}^{ref} 值大于黏土, 而 $E_{50}^{ref}/E_{oed}^{ref}$ 小于黏土。与珠海地区的淤泥相比, 砂土和黏土的抗剪切性能更好; 但与上海地区的黏土、阳江地区的砂土相比, 珠海地区的砂土和黏土因高含水率而呈现较差的抗剪切性能。

(4) 珠海地区黏土和砂土的 E_{ur}^{ref} 、 E_{oed}^{ref} 、 E_{50}^{ref} 、

表 6 HSS 模型参数比例对比
Table 6 Proportional comparison of HSS model parameters

土层	c'	φ'	G_0^{ref}	E_{50}^{ref}	E_{ur}^{ref}	E_{oed}^{ref}	模量比例关系	
珠海地区 (本研究)	粉砂 (I)	2.318	12.743	10.66	3.935	24.731	3.52	$E_{50}^{ref} = 1.12 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 6.28 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 0.43 E_{ur}^{ref}$
	粉质黏土 (II)	14.048	18.723	25.349	1.684	18.189	3.22	$E_{50}^{ref} = 0.52 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 10.80 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 1.39 E_{ur}^{ref}$
	黏土 (III)	24.712	17.128	20.865	1.608	17.639	3.31	$E_{50}^{ref} = 0.49 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 10.97 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 1.18 E_{ur}^{ref}$
	细砂 (IV)	13.127	29.505	12.679	2.417	20.929	4.58	$E_{50}^{ref} = 0.52 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 8.66 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 0.61 E_{ur}^{ref}$
珠海地区 (李栋等, 2023)	填土	0	34.6	0.92	4.28	/	12.37	$E_{50}^{ref} = 0.35 E_{oed}^{ref}$
	淤泥	10.76	9.09	0.87	3.01	8.02	1.73	$E_{50}^{ref} = 1.74 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 2.66 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 2.02 E_{ur}^{ref}$
	淤泥质土	16.41	8.54	0.73	3.21	10.89	2.20	$E_{50}^{ref} = 1.46 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 3.39 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 1.61 E_{ur}^{ref}$
阳江地区 (袁聚云等, 2022)	中砂	8.7	39.3	83.2	17.7	42.3	11.0	$E_{50}^{ref} = 1.61 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 2.39 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 1.97 E_{ur}^{ref}$
上海地区 (顾晓强等, 2021)	黏土	10.37	29	45.0	4.7	38.8	3.7	$E_{50}^{ref} = 1.2 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 8.4 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 1.2 E_{ur}^{ref}$
	淤泥质粉质黏土	8.13	34	37.4	3.0	33.9	2.5	$E_{50}^{ref} = 1.61 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 2.39 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 1.1 E_{ur}^{ref}$
	淤泥质黏土	4.96	27	28.6	3.9	36.6	3.6	$E_{50}^{ref} = 1.2 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 11.6 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 0.8 E_{ur}^{ref}$
	粉质黏土	16.90	34	33.6	6.4	42.4	5.9	$E_{50}^{ref} = 1.08 E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} = 9.4 E_{50}^{ref}$ $G_0^{ref} = 0.8 E_{ur}^{ref}$

G_0^{ref} 参数间的比例关系均与其他地区黏土、砂土的参数比例关系存在差异, 说明土层状态及含水率对 HSS 模型参数的取值均有影响。因此, 本研究补充了珠海地区黏土和砂土的 HSS 模型主要强度参数比例关系, 为 HSS 模型参数取值提供了简化路径。

(5) 珠海地区富水软土高含水率、高渗透、高压缩的独特性不利于工程中的土层变形控制, 对土层开挖前应采取排水、防渗、加入固化剂等加固措施。开挖过程中, 应充分利用基于 HSS 模

型参数建立的数值模型, 采取监控与模型预测交叉协同的数字孪生方式, 及时控制土层变形, 使工程更加经济安全。

最后, 本研究受试验设备和试样数量的限制, 未能以试验的方式获取 HSS 模型全部参数。同时, 珠海地区土层种类繁多, 有海滨砂土、盐渍沼泽土等, 且分布复杂, 需要研究涵盖更多土层种类的 HSS 模型参数。

参考文献:

- 董鑫,周峰,王旭东,等,2023. 基坑数值分析中HSS模型参数试验及应用[J]. 科学技术与工程, 23(18): 7878-7885.
- 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等,2021. 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.
- 管飞,2010. 基于HSS本构模型的软土超大型深基坑3D数值分析[J]. 岩土工程学报, 32(S1): 177-180.
- 贾晶玺,于奎,黄勇,等,2022. 基于小应变土体硬化模型的水工隧洞围岩稳定性研究[J]. 河南科学, 40(7): 1108-1114.
- 李栋,吴宏生,李学,等,2023. 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), 62(2): 137-145.
- 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.
- 刘松玉,2020. 土力学(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 罗敏敏,陈赞,周江,2021. 小应变土体硬化模型参数取值研究现状与展望[J]. 工业建筑, 51(4): 172-180.
- 王海波,徐明,宋二祥,2011. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J]. 岩石力学, 32(1): 39-43.
- 徐中华,王建华,王卫东,2006. 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, 28(S1): 1355-1359.
- 袁聚云,陈玺元,顾晓强,等,2022. 广东阳江海洋砂性土小应变硬化土模型参数的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 6: 852-860.
- BENZ T, 2007. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart.
- BOLTON M D, 1983. The strength and dilatancy of sands[J]. Géotechnique, 37(2): 219-226.
- BRINKGREVE R B J, BROERE W, 2006. Plaxis material models manual[D]. Technische Universiteit Delft.
- BURLAND J B, 1989. "Small is beautiful"—The stiffness of soils at small strains[J]. Can Geotech J, 26(4): 499-516.
- GAO D Z, HUZ X, WEI D D, 1986. Geotechnical properties of Shanghai soils and engineering applications [M]. ASTM International, 923: 161-177.
- HARDIN B O, DRNEVICH V P, 1972. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves[J]. J Soil Mech Found Div, 98(7): 667-692.
- HEYMAM J, 1972. Coulomb's memoir on statics: An essay in the history of civil engineering[M]. London: Imperial College Press.
- JANBU J. 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests [C]//Proceedings of the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1: 19-25.
- ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, TUHRAIRAJAH A, 1963. Yielding of clays in states wetter than critical[J]. Géotechnique, 13(3): 211-240.
- SCHANZ T, VERMEER P A, 1998. On the stiffness of sands [M]. Thomas Telford Publishing, 383-387.
- SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G, 1999. The hardening soil model: Formulation and verification [C]// Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Amsterdam: 281-296.

(责任编辑 王海蓉)