

# 上海临港砂质粉土硬化土小应变模型参数研究

陈尚荣<sup>1,2</sup>, 李通达<sup>1</sup>, 梁发云<sup>1</sup>, 顾晓强<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海地矿工程勘察有限公司, 上海 200072)

**摘要:** 硬化土小应变模型(HSS模型)考虑了土体在小应变区域内刚度随应变的非线性变化,是土工数值分析中应用较为广泛的软土本构模型之一。上海地区软土的特性研究已取得了较为丰富的成果,但关于浅层砂质粉土的研究还不够全面。通过三轴固结排水剪切试验,三轴固结加卸载试验,固结试验以及共振柱试验,获得上海临港地区浅层砂质粉土的硬化土小应变本构模型的试验参数,包括土体的初始剪切模量、土体强度参数和加卸载模量等。将试验结果与已有文献的相关数据进行对比分析,试验结果可为上海地区浅层砂质粉土的深基坑工程数值分析提供参考数据,具有工程参考价值。

**关键词:** 硬化土小应变模型(HSS模型);小应变刚度;三轴试验;固结试验;共振柱

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

## Parameters of Hardening Soil Model with Small Strain of Shallow Sandy Silt in Shanghai Lin-Gang Special Area

CHEN Shangrong<sup>1,2</sup>, LI Tongda<sup>1</sup>, LIANG Fayun<sup>1</sup>, GU Xiaoliang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Geological & Mineral Engineering Investigation Co. Ltd., Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The hardening soil model with small strain (HSS model) has become one of the most widely used constitutive models in numerical analysis of excavations because it can reflect the attenuation of soils with strain in tiny strain range. The research on small strain shear modulus of silty sand is inconsistent, despite the fact that great progress has been made in the research of typical soft soils in Shanghai. In this study, through triaxial consolidated drained test, triaxial loading-unloading-reloading drained test, consolidation test and resonance column test to measure the small strain stiffness properties of silty sand in Shanghai. The parameters for

Lin-Gang involved in the hardening soil model with small strain stiffness, including the initial shear modulus, the soil strength parameters and unloading and reloading modulus. The measured parameters are compared with other soils in Shanghai and verified through practical engineering. The test results can be used as references for numerical analysis of excavation in Shanghai. It is of reference value to similar engineering.

**Key words:** hardening soil model with small strain(HSS Model); small-strain stiffness; triaxial test; oedometer test; resonant column

近年来,随着城市化的不断推进,建设用地日趋紧张,城市开发逐渐向周边的边缘地区推进。以上海为例,地处长江口和杭州湾交汇处的临港地区得到了重点开发,在工程建设中遇到一些新的岩土工程问题。上海城区绝大部分区域的浅部土层以黏性土为主,但在临港地区浅层存在有较厚的砂质粉土层,由于该区域的开发建设相对较晚,对于类似土层的工程性质了解的不够全面,有待深入研究。

根据上海市《岩土工程勘察规范》(DGJ-37-2012),临港地区与工程建设相关的100m以内的晚第四纪地层发育齐全,土层顶部暗绿、褐黄色硬土层以及中部的硬土层均有保留。浅部的淤泥质黏土层厚度较小,而在浅层广泛分布有高含水率的砂质粉土层,厚度较大,其下地层与上海市区分布情况基本一致。临港地区新建建筑物的建设标准较高,区域内有着越来越多的深基坑工程,数值方法已成为复杂深基坑变形分析最为有效的方法之一,土体本构模型和计算参数的选取对于分析结果的合理性非常重要<sup>[1-2]</sup>。在分析软土地区变形控制要求严格的深基坑问题时,有必要采用考虑土体小应变刚度特性

收稿日期: 2019-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800200)

第一作者: 陈尚荣(1982—),男,高级工程师,博士生,主要研究方向为软土基坑工程。E-mail: 35035657@qq.com.

通信作者: 梁发云(1976—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为力学与基础工程。

E-mail: fyliang@tongji.edu.cn.



论文  
拓展  
介绍

的本构模型,即硬化土小应变模型(HSS模型),可以反映土体在小应变区域内刚度随应变的非线性变化特性<sup>[3-4]</sup>。HSS模型在上海软土深基坑工程的变形分析中得到较多的应用,并被2018年最新修订的上海市《基坑工程技术标准》(DG/TJ08-61-2018)列为推荐的土体模型之一。

王卫东等<sup>[5]</sup>采用反分析法获取了上海典型土层的HSS模型参数,通过若干基坑工程实例的计算验证了HSS模型在上海软土地区的适用性。笔者等<sup>[6]</sup>则采用室内土工试验,获得上海地区典型软土层HSS模型的主要参数值。顾晓强等<sup>[7]</sup>利用固结仪、应力路径三轴仪和共振柱等测定了常州地区典型土层原状土的小应变刚度特性。已有文献没有针对类似上海临港地区的砂质粉土层开展过专门的研究,随着该区域复杂深基坑工程分析的需要,有必要针

对此类高含水率的砂质粉土层开展HSS模型参数的试验研究。

本文通过室内试验,获得了上海临港地区浅部砂质粉土HSS模型的主要参数,可为今后该区域浅部砂质粉土层在小应变范围内剪切模量的变化规律以及HSS模型参数的确定提供参考。

## 1 硬化土小应变模型

上海临港地区为潮坪地貌,分布于该区域的砂质粉土具有较为明显的特点,土体中含云母,夹薄层黏性土,土质不均匀,属中等压缩性土,存在地震液化和流沙可能性。本文目的在于测定上海临港地区砂质粉土的HSS模型参数,HSS模型共包含13个参数,各参数定义见表1。

表1 HSS模型参数定义

Tab. 1 Parameters of HSS model

| 参数         | 定义             | 参数             | 定义                         |
|------------|----------------|----------------|----------------------------|
| $c'$       | 土的有效黏聚力        | $E_{50,ref}$   | 三轴排水剪切试验的参考割线模量            |
| $\varphi'$ | 土的有效内摩擦角       | $E_{ur,ref}$   | 三轴排水剪切试验的参考加卸载模量           |
| $K_0$      | 正常固结条件下静止侧压力系数 | $E_{oed,ref}$  | 固结试验中的参考切线模量               |
| $\Psi$     | 土的剪胀角          | $R_f$          | 破坏比                        |
| $m$        | 刚度应力水平相关幂指数    | $G_{0,ref}$    | 小应变刚度试验的参考初始模量             |
| $p_{ref}$  | 参考应力           | $\gamma_{0.7}$ | 割线剪切模量衰减到初始剪切模量70%时所对应的剪应变 |
| $v_{ur}$   | 加卸载泊松比         |                |                            |

表中 $K_0$ 、 $\Psi$ 、 $p_{ref}$ 、 $v_{ur}$ 和 $m$ 的取值可参照已有研究成果,具体方法参见文献[6-9]。本文通过室内试验测定其他8个参数:常规三轴固结排水剪切试验获得参数 $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $R_f$ 和 $E_{50,ref}$ ;三轴固结排水加卸载试验获得参数 $E_{ur,ref}$ ;标准固结试验获得参数 $E_{oed,ref}$ ;共振柱试验获得小应变参数 $G_{0,ref}$ 和 $\gamma_{0.7}$ 。

## 2 取样及试验过程

### 2.1 现场取样

试验所用土样取自上海临港地区某深基坑工程,均属第四纪全新世长江三角洲潮坪地带型沉积土层,主要由黏性土、砂质粉土及砂土组成,地下稳定水位埋深约1.6m。在已开基坑内,用PVC管材取土器,压入取样,减少取土过程对土样的扰动。取土深度为8m,采用对应于临港地区编号为②<sub>3</sub>的砂质粉土层。土样基本物理性质指标见表2。

### 2.2 试验仪器与方法

三轴固结排水剪切试验和三轴固结加卸载试验

表2 土层基本性质

Tab. 2 Physical parameters of soil layer

| 土体   | 含水率/% | 重度/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 初始孔隙比 |
|------|-------|--------------------------|-------|
| 砂质粉土 | 29.00 | 18.14                    | 0.93  |

使用GDS三轴试验系统,标准固结试验采用标准固结仪,共振柱试验采用GDS公司生产的共振柱测试系统。

(1)共振柱试验。试验时将试样底部固定在仪器上,试样上端自由。该仪器的测试频率为0~200Hz,精度为0.1Hz。利用共振柱测试系统,通过改变对土样施加激振的频率确定不同激振力作用下土体的固有(共振)频率,并由此得出土体在不同级别小应变时候的动剪切模量<sup>[10-11]</sup>。土体试样的尺寸为直径50mm,高100mm,将土样从盛土器中取出,削制成大小适宜的试样,安置在仪器上。①试样安置好之后,施加固结围压 $\sigma_3$ ,使试样等压固结,根据土体试样埋置深度的竖向有效自重确定施加的围压 $\sigma_3$ ,本文所选取的围压为80kPa;②施加激振力并改变激振频率直至系统共振,记录共振频率及共振时

产生的剪应变,计算此刻试样的动剪切模量,增大激振频率,继续试验,得到试样不同阶段的动剪切模量  $G_d$ ;③结束试验,将压力归零,收拾仪器设备,将试样取下。

(2)三轴固结排水剪切试验。在开展三轴固结排水剪切试验时,具体步骤为:①采用反压法使土体试样饱和,在该阶段所施加的轴向压力为 100kPa,围压为 110kPa,持续时间为 3h;②在保持反压不变的情况下增大围压,将仪器调整为不排水状态,测量试样的孔隙水压力系数  $B$ ,当  $B > 95\%$  时认为试样饱和;③根据土样的埋置深度,设置适宜的围压  $\sigma_3$ ,进行等向固结,固结时间为 36h,在该阶段需对试样施加 3 种不同的围压,分别为 100kPa、200kPa、300kPa;④保持上一步设定的围压不变,进行剪切速率固定的排水剪切速率为  $5.6 \times 10^{-3} \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,当试样应变达到 20% 时,停止试验。

### 3 试验结果分析及对比

#### 3.1 三轴固结排水剪切试验结果

HSS 模型中的土体参考割线模量  $E_{50, \text{ref}}$ 、破坏比  $R_f$  和土体强度参数可通过三轴固结排水剪切试验获得。图 1 为试样在有效围压 100kPa 的情况下应力应变的关系。从图 1 中可知在试验初期,随着试样轴向应变增加,偏应力逐渐增长,当应变增长超出某一范围时,偏应力达到峰值。在此之后随着轴向应变的增加,试样的偏应力保持不变或有下降的趋势,直至试样破坏。将试验中的峰值偏应力作为试样破坏应力值  $q_f$ ,找到应力-应变曲线中  $0.5q_f$  处点,则连接该点与坐标原点直线的斜率即为试样的参考割线模量  $E_{50, \text{ref}}$ 。试验获得的  $E_{50, \text{ref}}$  为 14.41MPa。

通过轴向应变  $\epsilon_1$  与偏应力  $q$  之间的关系可以确定抗剪强度的近似值  $q_a$  及破坏比  $R_f$ 。三轴加载情况下,  $\epsilon_1$  与  $q$  两个变量满足双曲线关系,见式(1)。通过公式变换可调整式(1)中各变量之间的系数,  $\epsilon_1/q$ 、 $\epsilon_1$  两变量之间存在线性关系,见式(2)。为减少误差,绘制  $\epsilon_1/q - \epsilon_1$  的关系直线,该直线通过偏应力水平  $s=70\%$  与  $s=95\%$  的点,通过关系直线的斜率获得剪切强度的近似值  $q_a$ ,见图 2,求解破坏比  $R_f$ ,见表 3。

$$-\epsilon_1 = \frac{1}{E} \times \frac{q}{(1 - q/q_a)} \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_1}{q} = \frac{\epsilon_1}{q_a} - \frac{1}{E} \quad (2)$$

为了获得土体试样的有效黏聚力及内摩擦角,

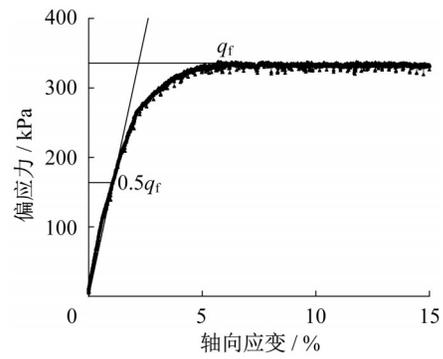


图 1 三轴试验应力-应变关系

Fig. 1 Strain-stress curve of triaxial CD test on soil layer

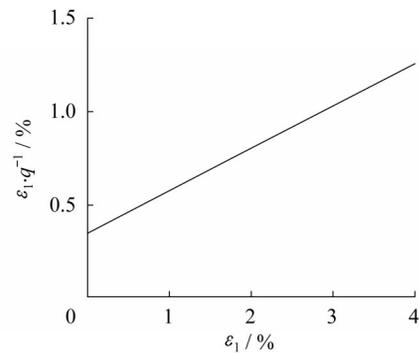


图 2  $\epsilon_1/q - \epsilon_1$  关系

Fig. 2 Relationship between  $q - \epsilon_1$  and  $\epsilon_1$

表 3 土层的  $q_a$  及  $R_f$  值

Tab. 3 Values of  $q_a$  and  $R_f$  of soil layer

| 土体   | $q_f/\text{kPa}$ | $q_a/\text{kPa}$ | $R_f$ |
|------|------------------|------------------|-------|
| 砂质粉土 | 373.8            | 584.79           | 0.64  |

除上述试验外又开展围压为 200kPa、300kPa 的三轴固结排水剪切试验,并根据试验结果绘制土体试样的摩尔应力圆,见图 3。

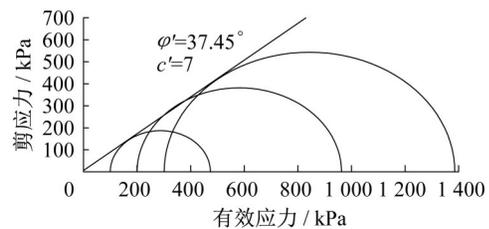


图 3 土试样破坏时的应力摩尔圆

Fig. 3 Stress Mohr circle for soil layer

可知,试样的  $c' = 7 \text{kPa}$ ,  $\phi' = 37.45^\circ$ 。

#### 3.2 三轴固结排水加卸载试验结果

在围压 100kPa 条件下土体试样的三轴固结排水加卸载试验应力-应变关系如图 4 所示。和相同

围压下的三轴固结排水剪切试验相似,在初始阶段随着轴向应变的增长试样内部的偏应力也随之增加。在卸载过程中试样的轴向应变有一定程度的缩减,表现为卸载回弹。再加载过程中,在开始阶段应力应变曲线的斜率较大,当轴向应变到达卸载前位置时,关系曲线的斜率逐渐减小,最终变得平缓。整个过程中应力-应变曲线构成一个滞回圈。连接滞回圈的上下两个端点,所得直线的斜率即为参考卸载模量 $E_{ur,ref}$ ,试样的 $E_{ur,ref}$ 为42.8MPa。

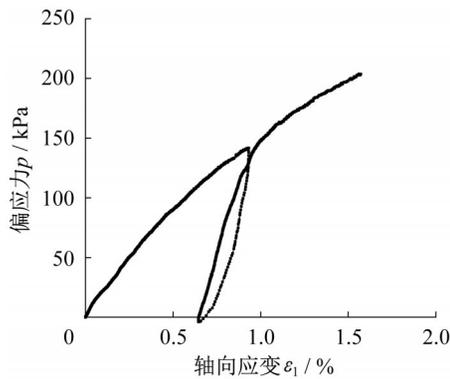


图4 三轴加卸载试验应力-应变关系

Fig. 4 Strain-stress curves of triaxial CD loading-unloading-reloading test on soil layer

### 3.3 标准固结试验结果

如图5所示为土体试样的标准固结试验结果,当轴向荷载较小的时,轴向应变 $\epsilon_1$ 的变化较为平缓,随着轴向荷载逐渐增加,试样的轴向应变逐渐增大。根据试验数据拟合曲线,由曲线的拟合函数可以得到轴向荷载为100kPa时曲线的斜率,所得数值即为试样的参考固结割线模量 $E_{oed,ref}$ 。

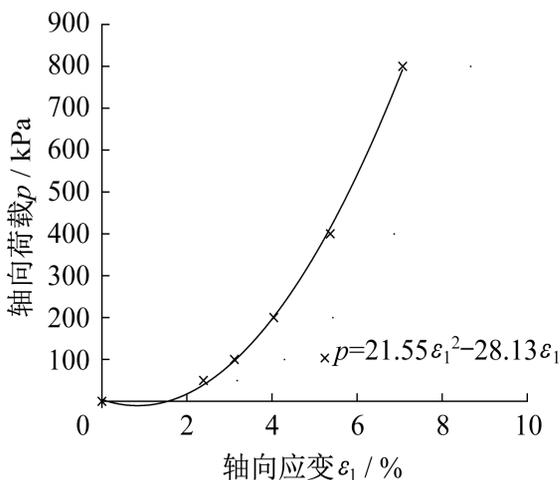


图5 固结试验轴向荷载应力-应变关系

Fig. 5 Relationship between axial load and strain of consolidation tests

从图6可看出,随着轴向荷载增大,砂质粉土试样的孔隙比减小,并由此计算得到试样在荷载 $p=100\text{kPa}\sim 200\text{kPa}$ 之间对应的压缩模量 $E_{s1-2}$ 。试样参考固结割线模量 $E_{oed,ref}$ 及压缩模量 $E_{s1-2}$ 的值见表4。

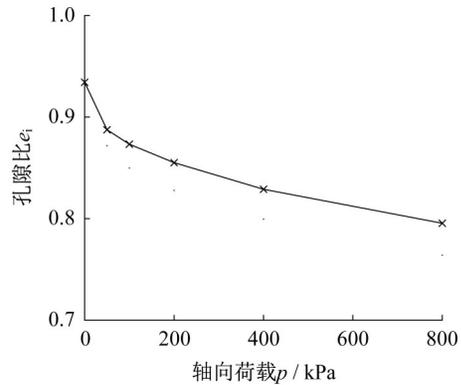


图6 固结试验孔隙比与荷载关系曲线

Fig. 6 Relationship between load and void ratio of layer in consolidation tests

表4 砂质粉土的 $E_{oed,ref}$ 及 $E_{s1-2}$ 的值

Tab. 4 Values of  $E_{oed,ref}$  and  $E_{s1-2}$  of soil layer

| 土体   | $E_{oed,ref}/\text{MPa}$ | $E_{s1-2}/\text{MPa}$ |
|------|--------------------------|-----------------------|
| 砂质粉土 | 10.77                    | 10.81                 |

### 3.4 共振柱试验结果

为了获得上海临港地区砂质粉土的小应变刚度值,通过GDS公司生产的共振柱测试系统测定了在不同应变阶段动剪切模量 $G_d$ 与剪应变 $\gamma$ 之间的关系。如图7所示,在小应变条件下,砂质粉土的动剪切模量并非是一成不变的,表现出明显的非线性:在激振过程中随着试样剪应变增加,动剪切模量逐渐衰减,且衰减速率逐渐增加。

试验过程中,施加于土体的围压为取土深度处

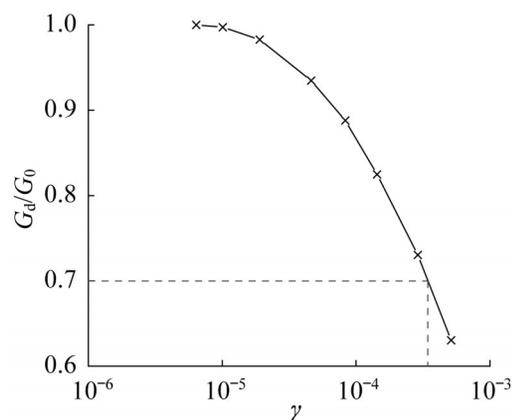


图7 试样动剪切模量与应变关系

Fig. 7 Dynamic shear modulus-strain curve of soil layer

的竖向有效自重应力。根据 Hardin 与 Drnevich<sup>[12]</sup> 在土体剪切模量与阻尼关系的论述,可用双曲线模型描述  $G_d \sim \gamma$  之间的曲线特征。在动荷载作用下动剪应力与剪应变  $\gamma$  符合双曲线规律,即

$$\tau_d = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma}{\tau_y}} \quad (3)$$

式中: $G_0$ 为初始剪切模量, $\tau_y$ 为最大动剪应力。而土体的动剪切模量定义为  $G_d = \tau_d / \gamma$  由此可得

$$1/G_d = a + b\gamma \quad (4)$$

式中: $\gamma$ 为动剪切模量; $a$ 、 $b$ 为试验参数,与土体的性质有关。当  $\gamma$  接近 0 时,则此时  $G_d$  趋近于  $a$ ,此时  $G_d$  用  $G_0$  表示即  $G_0 = 1/a$ , $G_0$  即为初始剪切模量,土体试样的拟合曲线及初始剪切模量见表 5。

$\gamma_{0.7}$  表示割线剪切模量 70% 时所对应的剪应变,由图 7 可得,临港地区砂质粉土的  $\gamma_{0.7}$  为  $3.6 \times 10^{-4}$ 。

表 5 拟合参数及  $G_0$  值

Tab. 5 Values of fitting parameters and  $G_0$  of soil layer

| 土体   | 围压 $p$ /kPa | 拟合曲线                   |                        | $G_0$<br>/MPa |
|------|-------------|------------------------|------------------------|---------------|
|      |             | $a$ /MPa <sup>-1</sup> | $b$ /MPa <sup>-1</sup> |               |
| 砂质粉土 | 80          | 0.021                  | 28.18                  | 47.2          |

由式(5)可得,试样在参考围压  $p_{ref} = 100$ kPa 时的初始参考模量  $G_{0,ref}$  为 55.5MPa。

$$G_0 = G_{0,ref} \left( \frac{c' \cos \varphi' - \sigma'_3 \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{ref} \sin \varphi'} \right)^m \quad (5)$$

### 3.5 试验成果汇总及分析

通过上述室内土工试验得到上海临港地区砂质粉土的 HSS 模型参数,见表 6。表 6 还给出了相关文献中报道的上海典型土层 HSS 模型参数取值范围,详细对比情况如下。

表 6 HSS 模型参数对比

Tab. 6 Comparison of parameters of HSS model

| 土体名称                           | $c'$ /<br>(kPa) | $\varphi'$ /<br>(°) | $E_{oed,ref}$ /<br>(MPa) | $E_{50,ref}$ /<br>(MPa) | $E_{ur,ref}$ /<br>(MPa) | $R_f$ | $E_{s1-2}$ /<br>(MPa) | 模量比例关系   |         |          |      |
|--------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|-----------------------|----------|---------|----------|------|
|                                |                 |                     |                          |                         |                         |       |                       | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ |      |
| 上海地区(梁发云等 <sup>[6]</sup> )     | ②粉质黏土           | 10.37               | 29                       | 3.7                     | 4.7                     | 38.8  | 0.91                  | 5.9      | 1.20    | 8.40     | 0.63 |
|                                | ③淤泥质粉质黏土        | 8.13                | 34                       | 2.5                     | 3.0                     | 33.9  | 0.68                  | 2.3      | 1.20    | 11.60    | 1.06 |
|                                | ④淤泥质黏土          | 4.96                | 27                       | 3.6                     | 3.9                     | 36.6  | 0.72                  | 4.3      | 1.08    | 9.40     | 0.85 |
|                                | ⑤粉质黏土           | 16.90               | 34                       | 5.9                     | 6.4                     | 42.4  | 0.89                  | 6.7      | 1.08    | 6.70     | 0.87 |
| 上海地区(王卫东 <sup>[5]</sup> )      | ②黏土             | 10.00               | 25.2                     | 3.4                     | 4.4                     | 19.3  | 0.96                  | 3.9      | 1.30    | 4.40     | 0.90 |
|                                | ③淤泥质粉质黏土        | 10.00               | 20.1                     | 1.2                     | 1.6                     | 14.9  | 0.58                  | 1.3      | 1.30    | 9.30     | 0.90 |
|                                | ④淤泥质黏土          | 3.00                | 27.3                     | 1.9                     | 2.0                     | 15.6  | 0.54                  | 2.2      | 1.10    | 7.80     | 0.90 |
|                                | ⑤粉质黏土           | 20.00               | 26.7                     | 6.1                     | 5.5                     | 23.5  | 0.95                  | 6.3      | 0.90    | 4.30     | 1.00 |
| 上海地区(Huang 等 <sup>[13]</sup> ) | 粉土              | 3.00                | 30.0                     | 10                      | 12.5                    | 37.5  |                       |          | 1.25    | 3.00     |      |
| 上海地区(本次试验)                     | 砂质粉土            | 7.00                | 37.45                    | 10.77                   | 14.41                   | 42.8  | 0.64                  | 10.81    | 1.34    | 2.97     | 1.00 |

注: $\alpha = E_{50,ref} / E_{oed,ref}$ ;  $\beta = E_{ur,ref} / E_{50,ref}$ ;  $\gamma = E_{oed,ref} / E_{s1-2}$ 。

由表 6 可知,试验得到的临港地区砂质粉土有效黏聚力  $c'$  略小于上海市其他地区,有效内摩擦角  $\varphi'$  略大;且与其他地区相同埋深处的土体相比,砂质粉土的破坏比  $R_f$  较小;三轴排水剪切试验的参考割线模量  $E_{50,ref}$  与固结试验中的参考切线模量  $E_{oed,ref}$  间的比为 1.34,略大于上海其他地区( $E_{50,ref} = 0.9 \sim 1.3E_{oed,ref}$ ); $E_{ur,ref}$  与  $E_{50,ref}$  之间的比值约为 2.97,同上海其他地区地典型软土层相比较小( $E_{ur,ref} = 4.3 \sim 11.6E_{50,ref}$ ),其比例关系同 Huang 等<sup>[13]</sup> 的取值更为接近。 $E_{oed,ref}$  与  $E_{s1-2}$  的比为 1.00,同上海其他地区大致相同。差异源于砂质粉土自身特性,性质介于黏土和砂土之间,接近砂土。

由表 7 可知,临港地区砂质粉土的初始参考模量  $G_{0,ref}$  为 55.5MPa,王卫东等<sup>[5]</sup> 测得上海市第二层 ②黏土  $G_{0,ref}$  为 100.8MPa,梁发云等<sup>[6]</sup> 通过试验测得

埋深为 7m 的上海典型软土 ②黏土  $G_{0,ref}$  为 45.0MPa。本文试验数据介于文献[5]和文献[6]之间;Vucetic 等<sup>[14]</sup> 通过研究表明,黏土的  $\gamma_{0.7}$  值受土的塑性指数  $I_p$  和超固结比 OCR 的影响较大,试验所得到的  $\gamma_{0.7}$  为  $3.6 \times 10^{-4}$  略大于上海典型软土的取值。

表 7 土体试样  $G_{0,ref}$  值及  $\gamma_{0.7}$

Tab. 7 Values of fitting parameters and  $G_0$  of soil samples

| 土体                   | $p_{ref}$ /kPa | $G_{0,ref}$ /MPa | $\gamma_{0.7}/10^{-4}$ |
|----------------------|----------------|------------------|------------------------|
| 砂质粉土                 | 100            | 55.5             | 3.6                    |
| ②黏土 <sup>[5]</sup>   | 100            | 100.8            | 2.0~2.8                |
| ②粉质黏土 <sup>[6]</sup> | 100            | 45.0             | 2.9                    |

## 4 结论

通过室内试验,获得了临港地区砂质粉土的硬化土小应变模型(HSS模型)参数,并同上海其他地区典型软土进行对比。得出主要结论如下:

(1)通过试验确定了上海临港地区砂质粉土 $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $E_{50,ref}$ 、 $E_{oed,ref}$ 、 $E_{ur,ref}$ 、 $E_{s1-2}$ 、 $G_{0,ref}$ 和 $\gamma_{0.7}$ 等HSS模型参数,为该地区深基坑分析提供参考。

(2)上海临港地区砂质粉土同上海其他地区土体相比,有效黏聚力 $c'$ 略小,有效内摩擦角 $\varphi'$ 略大。 $E_{50,ref}$ 与 $E_{oed,ref}$ 之间的比为1.34略大于上海其他地区( $E_{50,ref}=0.9\sim 1.3E_{oed,ref}$ ); $E_{ur,ref}$ 与 $E_{50,ref}$ 之间的比约为2.97,与上海其他地区存在一定的差异。

### 参考文献:

- [1] 龚晓南. 对岩土工程数值分析的几点思考[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 321.  
GONG Xiaonan. Reflections on numerical analysis of geotechnical engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 321.
- [2] 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.  
XU Zhonghua, WANG Weidong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258.
- [3] BURLAND J B. Ninth Laurits Bjerrum memorial lecture: "Small is beautiful"the stiffness of soils at small strains [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4): 499.
- [4] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.
- [5] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 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, 2013, 34(6): 1766.  
WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1766.
- [6] 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, 36(2): 269.  
LIANG Fayu, JIA Yajie, DING Yujin, *et al.* Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 36(2): 269.
- [7] 顾晓强, 陆路通, 李雄威, 等. 土体小应变刚度特性的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 312.  
GU Xiaoqiang, LU Lutong, LI Xiongwei, *et al.* Experimental study of small strain stiffness properties of soil [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 36(3): 312.
- [8] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands [J]. Geotechnique, 1986, 36(1): 65.
- [9] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis material models manual[R]. Delft: Delft University of Technology, 2006.
- [10] 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.  
GU Xiaoqiang, YANG Jun, HUANG Maosong, *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.
- [11] YANG J, GU X Q. Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on grain size? [J]. Géotechnique, 2013, 63(2): 165.
- [12] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98(7): 667.
- [13] HUANG Xu, HELMUT F S, HUANG Hongwei. Influence of deep excavations on nearby existing tunnels [J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(2): 170.
- [14] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(1): 89.