

宁波地区典型地层 HSS 模型参数试验研究

叶俊能¹, 刘干斌², 骆睿栋², 高游², 陆幸¹

(1.宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315010; 2.宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: HSS(小应变硬化)模型能够反映土体在小应变范围内模量的高度非线性, 在软土地区基坑开挖模拟中得到广泛应用. 本文对宁波地区典型地层的 HSS 模型参数进行了试验测定, 通过固结试验确定参考切线模量 $1-\sin\phi'$; 三轴剪切试验确定参考割线模量 $1-\sin\phi'$ 、有效内摩擦角 ϕ' 、黏聚力 c' 、破坏比 R_f 和参考加卸载模量 $1-\sin\phi'$; GDS 弯曲元试验测定参考初始模量 $1-\sin\phi'$, 再间接计算得到参考应变 $\gamma_{0.7}$. 在此基础上, 系统分析了各土层的模型参数与模量间的比例关系, 并将其与国内其他地区的结果进行了比较. 试验结果可为宁波地区基坑开挖工程数值分析中 HSS 模型参数的选取提供参考.

关键词: 宁波软土; HSS 模型; 参数间比例关系; 数值模拟

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 05-0072-07

地下空间的开发已然成为城市建设重点方向, 一方面基坑工程的规模越来越大, 另一方面基坑工程向超深方向发展^[1]. 宁波市位于长江三角洲南翼, 濒临东海, 土质属于典型的海相沉积软土. 宁波市区建筑物密集, 地下管线错综复杂, 在这种条件下进行基坑的开挖工作, 除了需要关注基坑开挖本身的安全性外, 开挖过程中对周围环境和建筑物的影响也需引起重视. 随着基坑工程规模和难度的不断增加, 数值方法逐渐成为基坑变形分析最为有效的方法之一^[2].

在数值方法计算过程中, 选择合适的本构模型和准确的模型参数至关重要. 其中, HS 模型^[3-4]适用于敏感环境下的基坑开挖数值分析, 且近年来使用率不断提高. 在此基础上, Benz^[5]对 HS 模型进行了修正, 得到了 HS-Small 模型(简称 HSS 模型). 修正后的模型考虑了土体剪硬性和压硬性在土体开挖过程中产生的影响; 同时, 在小应变范围内还考虑了剪切模量随应变的减小而衰减的行为. 而 HSS 模型参数的选取在很大程度上影响着模拟结果的准确性, 因此, 王卫东等^[2]进行了一系列室

内土工试验, 较为完整地获得了上海浅层土层的 HSS 模型参数, 并结合相关工程实例对参数的准确性进行了验证. 梁发云等^[6]通过对工程实例进行数值分析, 验证了 HSS 模型参数的确定方法及其适用性. 司马军等^[7]通过室内试验, 较完整地获得了武汉地区老黏土 HSS 模型参数, 指出 HSS 模型可以模拟超固结土的峰前力学行为. 林乔宇^[8]通过对厦门花岗岩残积土进行一系列试验研究, 较为完整地获得了该类型土的 HSS 模型参数, 并对相关参数进行了敏感性分析. 张骁等^[9]根据土工试验初步拟定了苏南地区各典型土层的 HSS 模型参数, 对参数作了进一步优化, 并结合数值模拟的结果提出了相应工程防护措施. 张卫兵等^[10]通过反演的方法获得了银川地区典型土层的 HSS 模型参数, 并基于该参数进行了数值模拟.

目前, 关于宁波地区软土 HSS 模型参数的研究较为欠缺, 现有工程应用中的 HSS 模型参数多采用经验取值, 但经验取值存在参数范围较大、不够精确的缺点. 本文通过一系列室内土工试验, 对宁波地区 HSS 模型参数进行较为系统的研究, 获

得了宁波地区典型土层的 HSS 模型主要参数, 即淤泥质粉质黏土层②、③, 粉质黏土层④、⑥、⑦, 和含粉砂粉质黏土层⑤的 HSS 模型关键参数, 最后详细分析了各土层 HSS 模型关键参数间的关系, 可为后续宁波地区基坑开挖等数值模拟中的参数选择提供基础性的参考数据。

1 HSS 模型简介

HSS 模型即硬化土小应变模型, 是 Benz^[5]在 HS 模型的基础上, 结合修正的 Hardin-Drnevich 剪切模量关系^[11]改进得到的。相较 HS 模型, 它考虑了小应变范围内刚度和应变的非线性变化关系。HSS 模型共包含 13 个参数, 其中 11 个为 HS 模型参数, 另外 2 个为小应变相关参数。其中: K_0 为正常固结条件下静止侧压力系数; ψ 为土的剪胀角; m 为刚度应力水平相关幂指数; p^{ref} 为参考应力; v_{ur} 为加卸载泊松比。上述 5 个参数可根据经验或者公式取值^[6], 见表 1。

表 1 HSS 模型部分参数的取值

参数	取值
K_0	$1 - \sin \varphi'$
ψ	对于砂土, $\varphi' > 30^\circ$ 取 $(\varphi' - 30^\circ)$, $\varphi' < 30^\circ$ 则取为 0° ; 对于黏性土, 一般取为 0°
p^{ref}	100 kPa
v_{ur}	0.2
m	黏性土一般取 0.5~1

此外, 还有 8 个参数可以根据室内试验进行量测: $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 为参考切线模量; E_{50}^{ref} 为参考割线模量; R_f 为破坏比; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为参考加卸载模量; c' 为土的有效黏聚力; φ' 为土的有效内摩擦角; G_0^{ref} 为参考初始模量; $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时所对应的剪应变。

2 试验材料及仪器

试验土样取自宁波海曙区, 取土土层分别为②、③、④、⑤、⑥、⑦层, 取土深度分别为 6~7、19~22、25~30、46~51、57~62 和 68~72 m。三轴试验和弯曲元试验试样为直径 50 mm、高度 100 mm 的三轴样, 固结试验试样为直径 61.8 mm、高度 20 mm 的环刀样。各层土样的基本物理力学参数见表 2。

表 2 土层基本物理力学参数

土层	含水率 (w)/%	密度/ (g·cm ⁻³)	初始孔 隙比	液限/%	塑限/%	取土深 度/m
②	47.4	1.733	1.263	53.8	28.0	6~7
③	28.6	1.977	0.771	49.1	22.7	19~22
④	28.7	1.983	0.793	32.7	14.5	25~30
⑤	25.1	2.032	0.660	44.0	19.4	46~51
⑥	34.4	1.884	0.724	32.1	11.3	57~62
⑦	28.5	1.990	0.666	48.8	29.2	68~72

HSS 模型参数中 K_0 、 ψ 、 p^{ref} 、 v_{ur} 和 m 可参照已有经验进行取值, 具体取值方法见表 1, 本文重点是确定其他 8 个参数。针对宁波软土, 通过以下 4 部分试验来确定这些参数: (1) 标准固结试验获得参数 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$; (2) 常规三轴不排水剪切试验获得参数 c' 和 φ' ; 常规三轴排水剪切试验获得 R_f 和 E_{50}^{ref} ; (3) 三轴固结排水加卸载剪切试验获得参数 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$; (4) 弯曲元试验获得参数 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 。

标准固结试验采用常规固结仪, 8 级荷载逐级加载: 12.5、25、50、100、200、400、800、1 600 kPa, 每级加荷时间为 24 h。常规三轴排水/不排水剪切试验采用全自动三轴仪, 三轴固结排水加卸载剪切试验和弯曲元试验采用动三轴仪器和弯曲元设备, 试验步骤依据土工试验方法标准^[12]。

3 试验结果分析

3.1 参数 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 的确定与分析

图 1 表示各土层轴向荷载与轴向应变的实测点与拟合曲线。实测点数据由标准固结试验测得, 线条为拟合曲线 (R^2 均为 0.99)。图中 1、2 和 3 表示 3 组平行试验, 要获取参考切线模量需对实测点进行拟合。拟合曲线采用一元三次方程^[8]:

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D, \quad (1)$$

式中, A 、 B 、 C 和 D 为拟合参数。根据每层确定参数的试验曲线拟合函数, 求得轴向荷载为 100 kPa 时曲线的斜率, 该斜率即为参考切线模量 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 。根据图 1 即可求得各土层参考切线模量 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 。其中, ⑤层土 3 号拟合曲线的离散性较大, 这是因为⑤层土土质不均匀, 土中存在较多砂粒和碎石, 故 3 号取土孔所取的土与 1、2 号取土孔所取的土存在较大差异, 故导致数据产生了较大离散性。表 3 汇总了各土层参考切线模量 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 与压缩模量 $E_{\text{sl-2}}$ 。

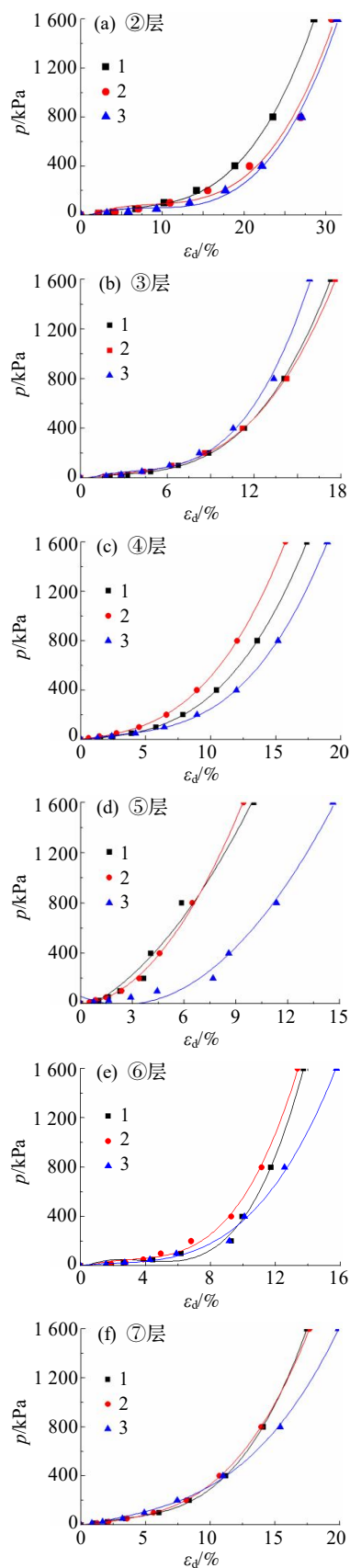
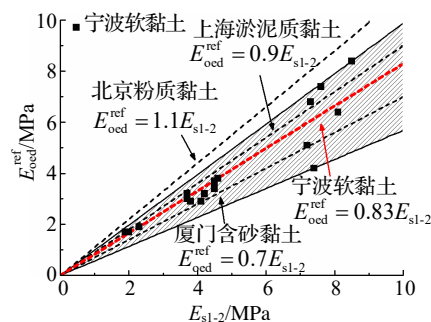


图1 轴向荷载与轴向应变关系曲线

表3 各土层的 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{s1-2}}$ 值 MPa

土层	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{s1-2}}$	土层	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{s1-2}}$
②	1.7~1.9	1.92~2.27	⑤	6.8~8.4	7.31~8.54
③	3.2~3.6	4.15~4.54	⑥	4.2~6.4	7.16~8.13
④	3.2~3.8	3.68~4.59	⑦	2.9~3.0	3.74~4.05

图2所示为宁波地区及其他地区土体的 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{s1-2}}$ 关系曲线. 由图可知, 宁波地区土体的 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为 $E_{\text{s1-2}}$ 的 0.83 倍, 厦门含砂黏土为 0.7 倍^[8], 上海淤泥质黏土为 0.9 倍^[13], 北京粉质黏土为 1.1 倍^[14]. 各土层 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{s1-2}}$ 的比例关系较为接近, 没有表现出很大的离散性. 目前在实际应用中, 对于参数 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$, 一般与 $E_{\text{s1-2}}$ 取值相同. 对于包括宁波在内等多地的参数间比例关系进行分析后可知, 该方法是可行的.

图2 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{s1-2}}$ 关系曲线

3.2 参数 E_{50}^{ref} 和 R_f 的确定与分析

参考割线模量 E_{50}^{ref} 的测定方法: 围压 σ_3 取参考应力 p^{ref} 为 100 kPa, 在此条件下, 进行常规三轴固结排水剪切试验, 根据各层土样偏应力—轴向应变的关系曲线, 若曲线存在峰值点, 则取峰值点作为破坏应力 q_f 值; 若无峰值点, 则取轴向应变 15% 所对应的偏应力值作为破坏应力 q_f 值^[12]. 再取曲线中相应破坏应力 q_f 值的 50% 所对应的点, 将原点与该点相连, 连线的斜率即为参考割线模量 E_{50}^{ref} , 如图3所示.

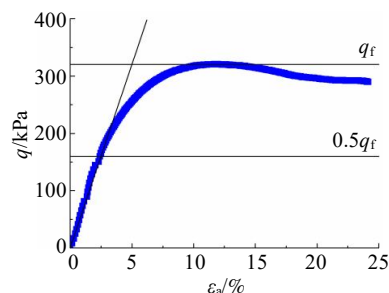


图3 应力—应变曲线

破坏比 R_f 的确定: 将 HS 模型中偏应力和轴向应变的双曲线关系^[11]转换成 $\varepsilon_a/q - \varepsilon_a$ 直线关系:

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

在转换过程中, 为了提高准确性, 使直线通过 $q/q_f = 70\%$ 和 95% 的点, 绘制出 $\varepsilon_a/q - \varepsilon_a$ 关系曲线, 直线斜率的倒数即为 q_a , 故破坏应力比 $R_f = q/q_f$, 图 4 给出了宁波各土层的 $\varepsilon_a/q - \varepsilon_a$ 关系曲线. 由图可以看出, 各土层的 $\varepsilon_a/q - \varepsilon_a$ 关系几乎为线性关系, 第⑤层斜率最大, 即 q_a 最小.

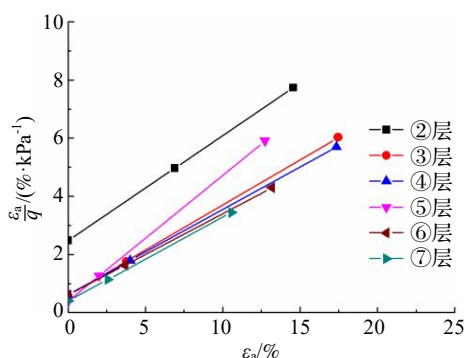


图 4 $\varepsilon_a/q - \varepsilon_a$ 关系曲线

表 4 给出了②~⑦层土样的参考割线模量 E_{50}^{ref} 和破坏应力 q_f . 由表可知, 各土层之间的参考割线模量 E_{50}^{ref} 存在较大差异, 如第②层最小 2.6 MPa, 第⑦层最大 12.4 MPa. 但是破坏比 R_f 相对均衡, 除了第②层的破坏比最小为 0.71, 其余土层的破坏比均比较接近, 取值在 0.91~0.98 之间.

表 4 各土层的 q_a 和 R_f 值

土层	E_{50}^{ref} MPa	q_f kPa	q_a kPa	R_f	土层	E_{50}^{ref} MPa	q_f kPa	q_a kPa	R_f
②	2.6	197.9	276.9	0.71	⑤	8.1	226.1	231.0	0.98
③	7.2	305.1	321.1	0.95	⑥	7.7	322.3	355.8	0.91
④	6.4	320.5	340.9	0.94	⑦	12.4	323.1	346.8	0.93

图 5 给出了 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 关系曲线. 由图可知, 宁波软土的 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 关系曲线与上海软黏土的 1.3 倍^[12]、北京粉质黏土的 2.2 倍^[13]和台北粉质黏土的 2.8 倍^[15]存在较大的区别. 宁波软土的 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 关系曲线可以由折线构成, 当 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 小于 4 MPa 时, E_{50}^{ref} 为 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 的 1.87 倍左右, 当 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 大于 4 MPa 时, E_{50}^{ref} 可以表示为 $4 + 0.75 E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$. 因此, 对于宁波软土的 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 关系曲线不能简单利用单一关系来表述.

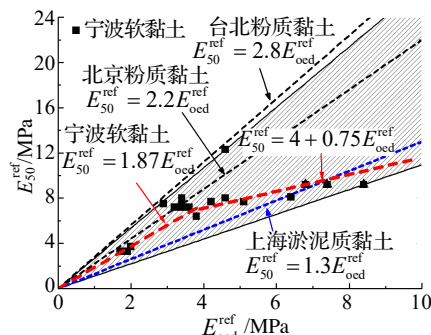


图 5 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 关系曲线

3.3 参数 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的确定与分析

为了获得参考加卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$, 取②~⑦层土样进行三轴固结排水加卸载剪切试验, 所取围压为参考应力 p^{ref} (取 100 kPa). 各层土样偏应力与轴向应变的关系曲线如图 6 所示. 连接滞回圈两个端点, 其斜率即为 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$, 因各层土存在两个滞回圈, 故取两个值的平均值, 最终得到②~⑦层土样的 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 分别为 10.37、29.78、36.16、22.09、27.64 和 44.24 MPa.

宁波地区的 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为 E_{50}^{ref} 的 2.82~5.65 倍, 与其他地区参数进行对比后可知, 上海淤泥质黏土的 4.0 倍^[12]、北京粉质黏土的 4.6 倍^[13]和宁夏粉质黏土的 3.0 倍^[16]都在此范围内. 此外, 武汉老黏土的 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为 E_{50}^{ref} 的 2.5 倍^[7], 济南黏性土的 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为 E_{50}^{ref} 的 8.0 倍^[17]. 由上述数据可知, 在不同地区, 这两个参数间比例的离散性较大. 因此, 在实际工程建设中, 不能盲目地根据经验取值, 应充分考虑当地的土体性质^[18].

3.4 参数 c' 和 φ' 值的确定

通过常规三轴固结排水剪切试验获得土体的值, 试样的围压根据不同埋深来确定, 若原状土试样的原位有效竖向应力为 σ'_v , 则有效等向压力值 σ'_3 的计算公式为:

$$\sigma'_3 = \frac{2K_0 + 1}{3} \sigma'_v. \quad (3)$$

根据工程经验 K_0 取 0.6, 设置固结的有效围压为 $0.5 \sigma'_3$ 、 σ'_3 、 $2 \sigma'_3$. 3 个围压下的莫尔应力圆如图 7 所示, 通过绘制圆的公切线得到每层土样的 c' 、 φ' 值, 并将其列入表 5 中. 实验中最小围压取 $0.5 \sigma'_3$, 试样属于超固结状态, 会导致小围压试样的抗剪强度偏高, 试验测得的摩擦角略微偏小, 黏聚力略微偏大.

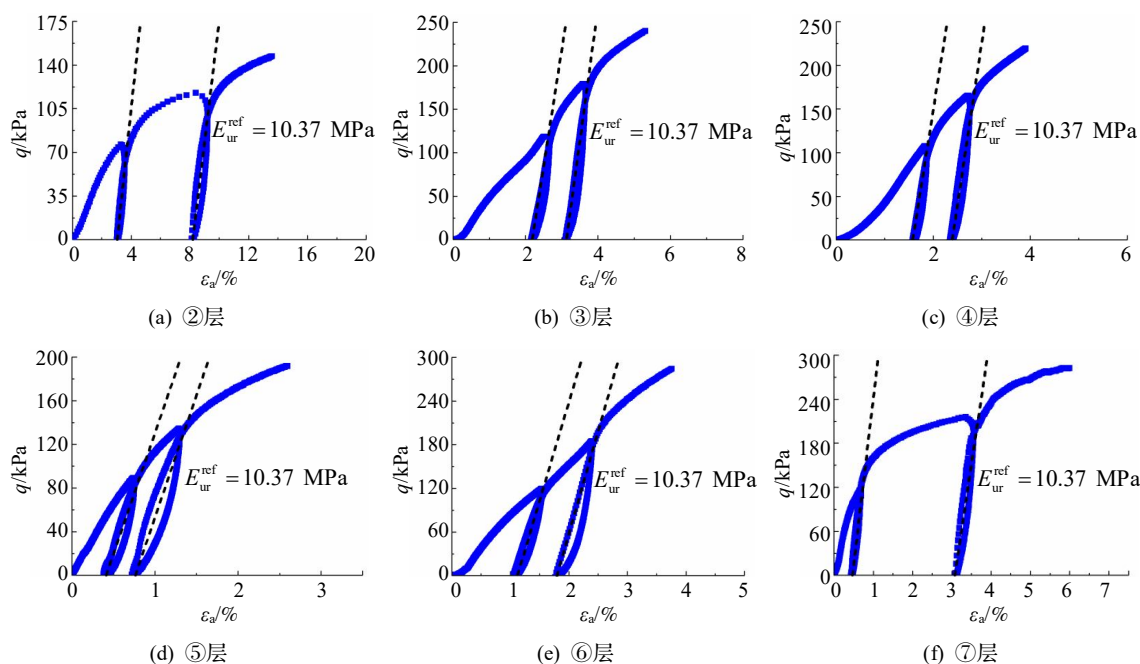


图6 各土层应力—应变曲线

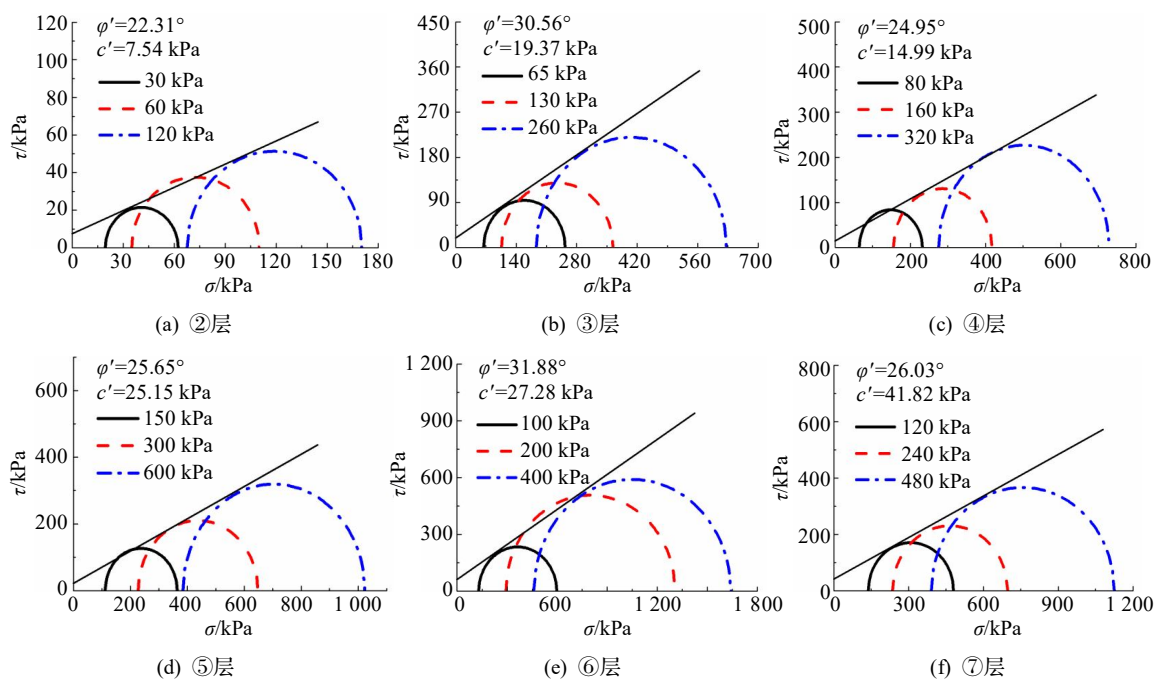


图7 各土层莫尔应力圆

表5 各土层的 c' 和 ϕ' 值

土层	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	土层	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$
②	7.54	22.31	⑤	25.15	25.65
③	11.51	31.43	⑥	27.28	31.88
④	14.99	26.55	⑦	41.82	26.03

3.5 参数 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 的确定与分析

图8为参考围压在100 kPa下,各土层的弯曲

元试验波形. 本次试验中, 剪切波的传播时间通过峰值法(P-P法)来确定, 即发射波和接收波第一个波峰间的时间间隔 t , 实际计算中的时间间隔还应扣除仪器空接时产生的误差. 完成固结后, 在计算机中打开 GDS BES 软件, 输入试样的高度、采样频率及采样时间, 选择正弦波作为激发信号, 并输入发射波的频率, 本次试验发射波频率选为 2 kHz,

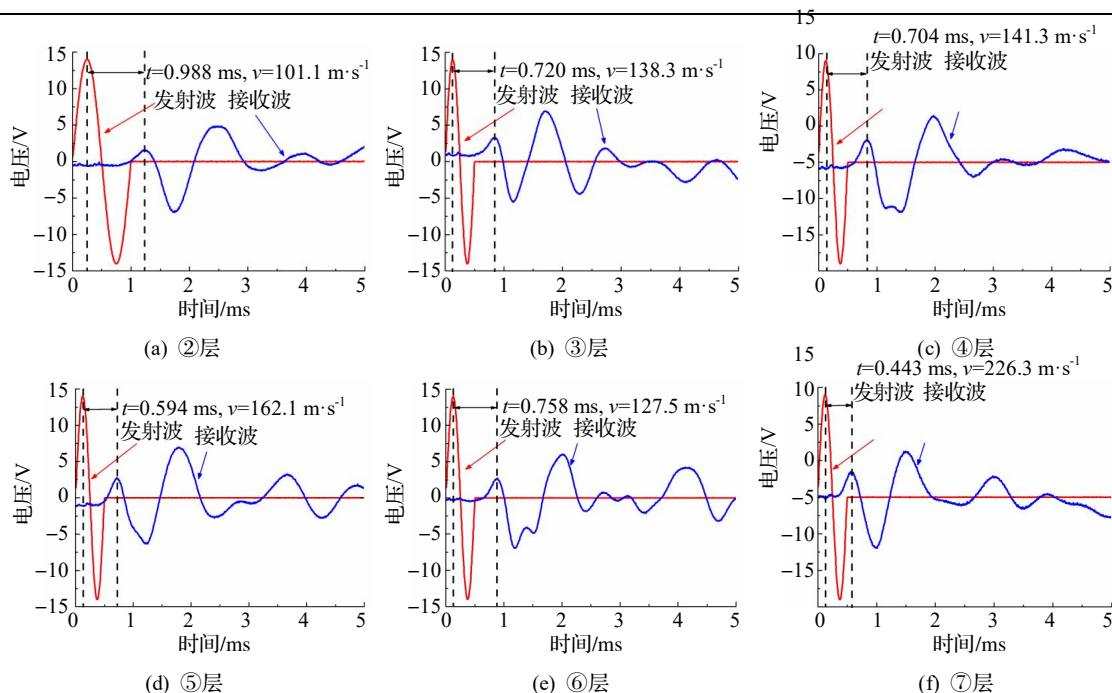


图8 各土层弯曲元波形图

剪切波速可根据下式求得:

$$V_s = L / t, \quad (4)$$

式中, L 为试样的高度. 小应变剪切模量可根据土体密度 ρ 和 V_s 由下式求得:

$$G_0^{\text{ref}} = \rho V_s^2. \quad (5)$$

根据 Brinkgreve 等^[19]的介绍, 参考应变 $\gamma_{0.7}$ 可由下式表达:

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{G_0} 2c[1 + \cos 2\varphi' + \sigma'_1(1 + K_0)\sin 2\varphi'], \quad (6)$$

其中,

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \varphi' + \sigma'_3 \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{\text{ref}} \sin \varphi'} \right)^m, \quad (7)$$

式中: σ'_1 为土体的竖向有效应力; σ'_3 为土体的侧向应力; G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 的值见表 6.

表6 各土层的 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 值

土层	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/(\times 10^{-4})$	土层	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/(\times 10^{-4})$
②	37.2	3.97	⑤	52.09	4.03
③	63.44	3.12	⑥	51.54	4.09
④	66.49	3.01	⑦	99.33	4.32

4 结论

本文通过一系列室内土工试验, 获得了宁波地区典型地层的 HSS 模型参数及主要模型参数之

间的比例关系, 主要结论如下:

(1) 第②层为软弱土层, 根据试验得到的参数 c' 、 φ' 、 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 、 E_{50}^{ref} 、 R_f 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 较其他土层明显较小. 而⑦层土土质较硬, 该层土的 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 参数明显大于其他土层.

(2) 宁波地区的 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 为 $E_{\text{sl-2}}$ 的约 0.83 倍, 与厦门含砂黏土的 0.7 倍和上海淤泥质黏土的 0.9 倍均较为接近. 其中, 北京粉质黏土的 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 为 $E_{\text{sl-2}}$ 的 1.1 倍, 高于宁波、上海和厦门. 各土层 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{sl-2}}$ 的比例关系较为接近, 且不同地区间的参数比例关系也差别较小. 此外, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 与 E_{50}^{ref} 的倍数关系离散性较大, 介于 2.82~5.65 倍之间,

(3) 宁波软土的 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 关系曲线与上海软黏土的 1.3 倍存在较大的差异. 当 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 小于 4 MPa 时, E_{50}^{ref} 为 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 的 1.87 倍左右, 当 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 大于 4 MPa 时, E_{50}^{ref} 可以表示为 $4 + 0.75 E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$. 因此, 对于宁波软土的 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 关系曲线不能简单用单一关系来表述.

参考文献:

- [1] 王卫东, 丁文其, 杨秀仁, 等. 基坑工程与地下工程——高效节能、环境低影响及可持续发展新技术[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7):78-98.
- [2] 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):1766-1774.
- [3] Schanz T, Vermeer P A, Bonnier P G. The Hardening Soil Model: Formulation and Verification[M]//Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Amsterdam: Balkema, 1999: 281-296.
- [4] 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.
- [5] Benz T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [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, 39(2):269-278.
- [7] 司马军, 马旭, 潘健. 武汉老黏性土小应变硬化模型参数的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 93-97.
- [8] 林乔宇. 厦门花岗岩残积土 HSS 模型参数的研究及工程应用[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
- [9] 张骁, 肖军华, 农兴中, 等. 基于 HS-Small 模型的基坑近接桥桩开挖变形影响区研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2):263-273.
- [10] 张卫兵, 张刚柱, 韩自刚, 等. 基于 HS-Small 本构模型的银川地区深基坑开挖-降水过程数值分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2):211-218.
- [11] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98(7): 667-692.
- [12] GB/T 50123-1999. 土工试验方法标准[S].
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Ou C Y, Shiau B Y, Wang I W. Three-dimensional deformation behavior of the Taipei Enterprise Center excavation case history[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2):438-448.
- [16] 张刚柱. 基于 HS-Small 本构的深基坑开挖-降水过程数值分析及群锚效应研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [17] 李连祥, 刘嘉典, 李克金, 等. 济南典型地层 HSS 参数选取及适用性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10):4021-4029.
- [18] 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, 2021, 43(S2):41-44.
- [19] Brinkgreve R B J, Broere W. Plaxis Material Models Manual[M]. Delft, Netherlands: PLAXIS Company, 2006.

Experimental study on HS-Small model parameters of typical stratum in Ningbo area

YE Junneng¹, LIU Ganbin², LUO Ruidong², GAO You², LU Xing¹

(1.Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315010, China;

2.Institution of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In soft soil area, HS-Small model has strong applicability, mainly because it can better consider the behavior of shear modulus of soil with strain attenuation in the range of small strain. In this paper, the parameters of HS-Small model of undisturbed soft soil in different soil layers in Ningbo are measured. The reference tangent modulus $1 - \sin \phi'$ is determined by consolidation test. The reference secant modulus $1 - \sin \phi'$, effective internal friction angle ϕ' , cohesion c' , failure ratio R_f and reference loading and unloading modulus $1 - \sin \phi'$ are determined by triaxial shear test. The reference initial modulus $1 - \sin \phi'$ is determined by GDS bending element test, and then the shear strain $\gamma_{0.7}$ can be obtained. On this basis, the proportional relationship between model parameters and modulus of each soil layer is systematically analyzed, and compared with the results of other regions in China. The test results can provide a reference for determining the parameters of HS-Small model in the numerical analysis of foundation pit excavation in Ningbo.

Key words: Ningbo soft soil; HS-Small model; proportional relationship between parameters; numerical simulation

(责任编辑 韩 超)