

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0741

上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证

顾晓强^{1,2}, 吴瑞拓^{1,2}, 梁发云^{1,2}, 高广运^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 小应变硬化(HSS)模型能较合理考虑土体小应变阶段的非线性、应力相关等特性,在隧道和基坑开挖等变形数值计算中得到了广泛的应用,但目前对模型整套参数的合理取值尚缺乏系统地研究。剖析了 HSS 模型各参数的意义和对应的试验方法,并基于大量室内和现场试验数据建立了上海土体 HSS 模型主要参数与土体孔隙比的经验关系,为实际工程利用勘察报告方便且较准确地确定 HSS 模型参数提供了合理途径。通过多个深基坑工程的数值分析表明,采用现场试验确定的小应变初始剪切模量时,围护墙水平位移计算值和实测值基本吻合,表明提出的上海土体 HSS 模型整套参数取值方法有很好的普适性和工程实用价值,也为其他地区建立类似的 HSS 模型参数取值方法提供了借鉴。

关 键 词: 基坑工程; 变形分析; 小应变特性; 小应变模型; 参数取值

中图分类号: U655.54

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)03-0833-13

On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification

GU Xiao-qiang^{1,2}, WU Rui-tuo^{1,2}, LIANG Fa-yun^{1,2}, GAO Guang-yun^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The hardening strain model with small strain (HSS) can appropriately consider the nonlinear and stress-dependent behavior of soils at small strain range. Thus, it is widely used for deformation predictions during pit and tunnel excavations. However, currently there is a lack of systematic study on how to reasonably and conveniently determine all the model parameters. This paper firstly introduces the definitions of all the HSS model parameters and their measurements. Based on the statistics of laboratory and field test data, the relationships between the model parameters and the void ratio of Shanghai soils are proposed, which can be conveniently used in engineering practice. Finally, the HSS model with parameters determined by the proposed method is used to analyze the deformation in four excavation cases. The results show that with the field measured small strain shear stiffness, the calculated lateral deformations of the retaining wall agree well with the measurements. It indicates that the proposed method for determining the HSS model parameters is appropriate and it can provide references for similar projects in Shanghai and similar regions.

Keywords: excavation; deformation analysis; small strain properties; HSS model; parameter determination

1 引 言

近年来,随着国家基础设施建设的快速发展,各类重大工程对变形提出了越来越高的要求,例如上海环境保护等级为 1 级的深基坑围护结构最大变形控制目标为 $0.18\%H$ (H 为开挖深度)^[1],无砟轨道高速铁路路基的工后沉降不超过 15 mm^[2],因此

此类工程设计由传统的强度控制设计为主转变为变形控制设计为主。严格的变形控制必然需要土体处于较小应变范围内。同时,大量的工程实测数据和数值分析也表明,在正常使用荷载条件下,岩土工程中绝大部分区域土体处于较小的应变范围(例如 $0.01\%\sim 0.10\%$)^[3-5]。根据 Atkinson 等^[6]的定义,应变可分为 3 个范围:非常小应变(不大于 10^{-6})、小

收稿日期: 2020-05-31

修回日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(No.51822809, No.51738010); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No.22120200074)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51822809, 51738010) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(22120200074).

第一作者简介: 顾晓强,男,1981 年生,博士,教授,主要从事土的基本特性、土动力学和宏微观土力学等方面的研究。E-mail: guxiaoqiang@tongji.edu.cn

应变 ($10^{-6} \sim 10^{-3}$) 和大应变 (大于 10^{-3})。图 1 是常见岩土工程中土体的应变量级、不同试验方法适用的应变范围, 以及土体归一化剪切模量曲线。图中, G 为割线剪切模量, G_0 为初始剪切模量。因此, 土体小应变特性的准确评估和应用对实际工程中土体与结构变形准确预测与变形控制都有重要的意义。

大量的工程经验也表明, 对岩土工程变形的准确分析预测十分困难, 其中一个可能的重要原因是缺乏对土体变形特性尤其是小应变特性的合理理解和应用。目前, 由于小应变硬化 (HSS) 模型^[7]能较合理考虑土体弹性 (小应变) 阶段模量的非线性、应力相关等特性, 其已被广泛用于实际工程的变形分析^[8-18]。尽管利用 HSS 模型的计算结果和工程实测结果基本接近, 但是模型参数, 尤其是与变形相关的模量参数取值缺乏理论依据, 同时, 部分参数的确定存在一定的误区。例如, 尹骥^[13]、管飞^[16]和李连祥等^[18]利用 HSS 模型分别对上海地区和济南地区的深基坑工程进行变形分析, 但模型参数主要基于 PLAXIS 等数值软件的推荐值或工程反演结果, 而非基于试验值。王卫东^[19]、梁发云^[12]、谢东武^[20]等先后开展了上海土体 HSS 模型参数试验研究, 但遗憾的是没有给出 HSS 模型整套参数的取值, 尤其是 G_0 , 也没有开展模型参数取值普适性的验证工作。为此, 本文基于大量试验数据给出了上海土体 HSS 模型整套参数的取值方法, 并通过多个实际深基坑工程变形分析对其在上海地区的普适性进行验证, 以期土体 HSS 模型的应用和参数的准确方便确定提供有力支撑。

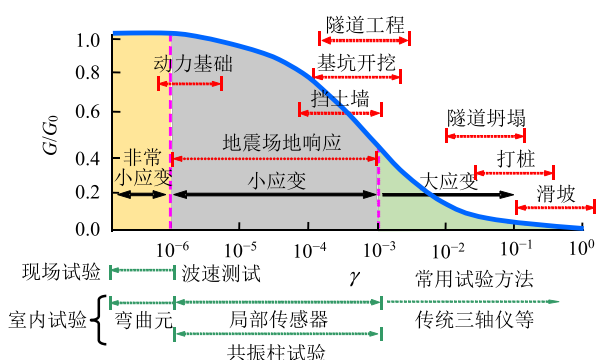


图 1 典型岩土工程中的应变量级及试验的应变适用范围
Fig.1 Strain levels in typical geotechnical engineering with illustration for typical geotechnical testing

2 HSS 本构模型及其参数剖析

数值分析已成为重大岩土工程设计和研究中强

有力的工具, 其中的关键问题之一是选择合适的土体本构模型以及模型参数的准确确定。针对深基坑和隧道开挖等变形问题, 合理的本构模型需要能反映土体小应变变形特性, 主要是非线性、状态相关特性和应力路径相关特性。徐中华^[21]、宋广^[22]等探讨了基坑变形数值分析中本构模型的选取, 研究表明传统的线弹性模型、摩尔-库仑 (MC) 理想弹塑性模型基本无法预测基坑变形的趋势, 而修正剑桥模型 (MCC) 和硬化土 (HS) 模型等硬化类弹塑性模型由于无法考虑小应变阶段的弹性非线性, 通常导致预测的变形偏大。Obrzud^[23]给出了典型的几类本构模型在不同分析类型 (强度或变形)、不同土体种类中的适用条件。Benz^[7]在传统硬化土 HS 模型上建立了能考虑弹性阶段土体非线性特性的小应变硬化 (HSS) 模型。HSS 模型已被嵌入到 PLAXIS、Z-SOIL 等有限元商业软件中, 并被广泛用于基坑和隧道开挖等工程中的变形分析, 计算和实测结果的比较也表明 HSS 模型有较好的变形预测能力。上海市基坑工程技术标准^[1]也已推荐 HSS 模型作为基坑开挖数值分析的土体本构模型, 并给出了上海典型土层的 HSS 模型主要参数的初步取值范围。

HSS 模型一共包含 13 个参数, 各参数定义如表 1 所示, 各参数均有明确的物理意义和试验确定方法^[7]。需要注意的是, 参数需要根据其对应的试验方法来确定。HSS 模型主要参数可分为土体强度类参数、变形类参数和应力状态参数。

土体强度参数 c' 、 ϕ' 分别为土体的黏聚力和内摩擦角, 两者均为有效应力指标, 可通过三轴固结排水或不排水剪切试验确定, 而不得采用勘察报告给出的固结快剪强度参数 (总应力指标)。当黏土采用不排水分析时, 在 PLAXIS 软件中也可直接输入黏土的不排水抗剪强度, 建议输入随深度增加的不排水抗剪强度以反映土体初始固结应力的影响^[24]。

剪胀角 ψ 一般可通过三轴固结排水剪切试验测得。不实测时, 可根据 Bolton^[25]的研究取值, 对于砂土, ψ 可取为 $\phi' - 30^\circ$, 当内摩擦角 $\phi' < 30^\circ$ 时, ψ 可取为 0; 对于黏性土, ψ 一般取为 0。

破坏比 R_f 为土体破坏时偏应力值与剪切强度的渐近值的比值, 通过三轴固结排水剪切试验确定。HSS 模型假设三轴排水剪切试验中轴向应变 ϵ_1 与偏应力 q 的双曲线关系, 而 R_f 主要反映应力-应变曲线的形态。

由于土体模量有应力相关特性, 因此需定义该模量值对应的应力, 即参考应力 p^{ref} 。绝大部分文献中 p^{ref} 取 100 kPa, 或在 100 kPa 下开展试验确定参

表 1 HSS 模型参数的定义及上海土体 HSS 模型参数的取值方法
Table 1 Definition of HSS model parameters and suggested values for Shanghai soils

参数	上海土体的经验取值
E_{s1-2} : 固结试验 100~200 kPa 对应的压缩模量 (非 HSS 模型参数, 但勘察报告提供该参数, 可供确定 HSS 模型参数用)	黏性土: $E_{s1-2} = -5.15\ln e + 3.53$ MPa (基于室内试验数据) (e 为土体孔隙比) 砂性土: $E_{s1-2} = 111.0\exp(-2.89e)$ MPa (由上海市地基基础规范 ^[28] 数据拟合)
$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$: 标准固结试验测定的参考应力下的切线模量	黏性土: $E_{\text{sed}}^{\text{ref}} = -4.34\ln e + 3.51$ MPa (基于室内试验数据) $E_{\text{sed}}^{\text{ref}} = 0.81E_{s1-2}$ (试验和理论推导均类似, 黏性土和砂性土均适用)
c' : 土的有效黏聚力	砂性、粉性土: $c' = -1.32(\phi' - 33)$; 黏性土: $c' = -0.76(\phi' - 38)$ (由上海市地基基础规范 ^[1] 数据拟合)
ϕ' : 土的有效内摩擦角	砂性、粉性土: $\phi' = 26.9e^{-0.72}$; 黏性土: $\phi' = 30.4e^{-0.65}$ (由上海市地基基础规范 ^[28] 数据拟合)
ψ : 土的剪胀角	砂性土, $\psi = \phi' - 30^\circ$, 当 $\phi' < 30^\circ$ 时, $\psi = 0$; 黏性土, $\psi = 0$ (根据 Bolton ^[25] 推荐取值)
R_f : 三轴排水剪切测定的破坏比	$e > 1.5$, $R_f = 0.50$; $e < 1.0$, $R_f = 0.95$; $1.0 < e < 1.5$, $R_f = -0.9(e - 1.5) + 0.5$ (基于室内试验数据)
E_{s0}^{ref} : 三轴固结排水剪切试验测定的参考割线模量	黏性土: $E_{s0}^{\text{ref}} = -5.33\ln e + 3.95$ MPa (基于室内试验数据) $E_{s0}^{\text{ref}} = 1.02E_{s1-2}$ (为黏性土室内试验结果, 砂性土无试验数据可按该式确定)
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$: 三轴固结排水加卸载试验测定的加卸载模量	黏性土: $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = -28.8\ln e + 24.5$ MPa (基于室内试验数据) $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 4.2E_{s1-2} + 7.24$ (为黏性土室内试验结果, 砂性土无试验数据可按该式确定)
u_{ur} : 加卸载泊松比	无试验数据时可取 0.2 (基于 PLAXIS 手册推荐)
K_0 : 初始静止侧压力系数	黏性土: $K_0 = 0.049e + 0.02I_p + 0.139$ 或 $K_0 = 0.95 - \sin \phi'$ (基于室内试验数据) 砂性、粉性土: $K_0 = 0.154e + 0.224$ 或 $K_0 = 1 - \sin \phi'$ (基于室内试验数据)
p^{ref} : 参考应力	100 kPa
G_0^{ref} : 动剪切初始模量	黏性土 (含黏质粉土): $G_0^{\text{ref}} = 67.5e^{-1.57}$ MPa (基于现场波速试验数据) 砂性土 (含砂质粉土): $G_0^{\text{ref}} = 98.9e^{-0.45}$ MPa (基于现场波速试验数据)
m : 模量应力水平相关幂指数	黏性土 (含黏质粉土): $m = 0.65$ (基于现场波速试验数据) 砂性土 (含砂质粉土): $m = 0.70$ (基于现场波速试验数据)
$\gamma_{0.7}$: 剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时对应的剪应变	黏性土 (含黏质粉土): $\gamma_{0.7} = 2.4 \sim 4.4 \times 10^{-4}$, 平均值为 3.2×10^{-4} (基于室内试验数据) 砂性土 (含砂质粉土): $\gamma_{0.7} = 2.9 \sim 5.2 \times 10^{-4}$, 平均值为 3.9×10^{-4} (基于室内试验数据)

注: e 为孔隙比; I_p 为塑性指数。

数。但是对于较深土体, 100 kPa 时土体处于超固结状态, 可能导致结果有一定偏差。因此建议 p^{ref} 采用土层的现场应力值, 并在该应力下开展相应的试验, 有需要时可再换算到 100 kPa 下的模量。

$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 为当固结应力为参考应力 p^{ref} 时的切线压缩模量, 通过标准一维固结试验测定。不同应力下的土体压缩模量 E_{sed} 可通过下式换算确定:

$$E_{\text{sed}} = E_{\text{sed}}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \phi' - \frac{\sigma'_3}{K_0} \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{\text{ref}} \sin \phi'} \right)^m \quad (1)$$

式中: σ'_3 为现场初始水平向应力, 以压应力为负。由于固结试验控制的是竖向应力, 因此压缩模量换算中用竖向应力 σ'_1 , 即 σ'_3/K_0 。

E_{s0}^{ref} 为在初始等向有效围压为 p^{ref} 情况下偏应力等于最大偏应力 50% 时对应的割线杨氏模量, 而 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为初始等向有效围压为 p^{ref} 时三轴固结排水加卸载试验测定的加卸载模量。值得注意的是, 已有研究表明在不同应力点卸载时的加卸载模量不同^[20], 实质上反映了模量随应变的非线性特性。根据开挖工程的特性, 建议在三轴试验加载到现场

应力状态时进行卸载确定 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。不同围压 σ'_3 下的 E_{ur} 和 E_{s0} 可由下式换算:

$$E_{\text{ur(或}50)} = E_{\text{ur(或}50)}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma'_3 \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{\text{ref}} \sin \phi'} \right)^m \quad (2)$$

G_0^{ref} 为参考围压下的初始小应变剪切模量, 可通过现场波速试验、室内共振柱或弯曲元试验等确定。PLAXIS 中不同围压 σ'_3 下的 G_0 由下式换算:

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma'_3 \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{\text{ref}} \sin \phi'} \right)^m \quad (3)$$

但是, 必须指出的是, 大量试验表明土体的 G_0 值由平均有效应力 p' 决定, 而不是由水平向有效围压 σ'_3 决定。因此, 不同应力下 G_0 应由下式换算:

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \phi' - \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{\text{ref}} \sin \phi'} \right)^m \quad (4)$$

因此, 当在 PLAXIS 软件中输入测试条件下的 p^{ref} 和 G_0^{ref} 时, 采用式 (3) 计算的 G_0 值会偏小, 尤其是 K_0 比较小和 m 值比较大时。为解决该问题, 建议在 PLAXIS 软件输入 G_0^{ref} 的值时应改为输入式

计算的值来修正:

$$G_0^{\text{ref}} (\text{PLAXIS 输入值}) = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cot \phi' + \frac{1+2K_0}{3K_0} p^{\text{ref}} \sin \phi'}{c' \cot \phi' + p^{\text{ref}} \sin \phi'} \right)^m \quad (5)$$

$\gamma_{0.7}$ 为剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时对应的剪应变, 反映了剪切模量衰减的快慢。 $\gamma_{0.7}$ 可由共振柱或带高精度局部位移量测系统的三轴试验确定。已有研究表明, 砂土的 $\gamma_{0.7}$ 主要受有效围压的影响^[11], 而黏土主要受塑性指数的影响^[12]。

m 为应力相关指数, 反映模量随应力的敏感程度。需要指出的是, m 值随应变增大而增大^[26], 因此不同模量对应的 m 应不尽相同, 然而目前在 PLAXIS 软件中 m 为相同值。已有基坑开挖变形对 HSS 模型参数敏感度的分析表明^[27], G_0 为最敏感参

数。因此建议采用 G_0 值对应的 m 值作为输入参数。

u_{ur} 为加卸载泊松比, 可通过三轴排水加卸载试验确定, 它在小应变阶段保持不变, 和初始小应变剪切模量 G_0 一起来表征土体小应变阶段的弹性特性, 无试验数据时按 PLAXIS 手册推荐可取 0.2。

3 上海土体 HSS 模型参数确定

由于 HSS 模型中与模量相关的参数众多, 如果实际工程中每个参数都通过试验确定存在较大困难。目前大部分研究均尝试建立各参考模量与固结试验中 100~200 kPa 对应的压缩模量 E_{s1-2} 的关系, 这样即可通过勘察报告提供的 E_{s1-2} 来估算其他模量, 如上海市基坑规范^[1]也推荐类似方法 (见表 2)。此类方法主要的问题是模量间关系的倍数浮动范围很大, 并且如果 E_{s1-2} 出现偏差, 各个模量的取值就

表 2 上海市基坑规范^[1]推荐的上海土体 HSS 模型参数取值方法

Table 2 Values of HSS model parameters for Shanghai typical soils given by design code^[1]

土层	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$\gamma_{0.7} / 10^{-4}$	m	R_f
②黏土			$6E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$				0.9
③淤泥质粉质黏土			$8E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$				0.6
④淤泥质黏土	$0.9E_{s1-2}$	$1.2E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$8E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$(2.5 \sim 4.9) E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	$1.5 \sim 9.0$	0.8	0.6
⑤粉质黏土			$6E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$				0.9
⑥黏土			$6E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$				0.9

会出现较大偏差。

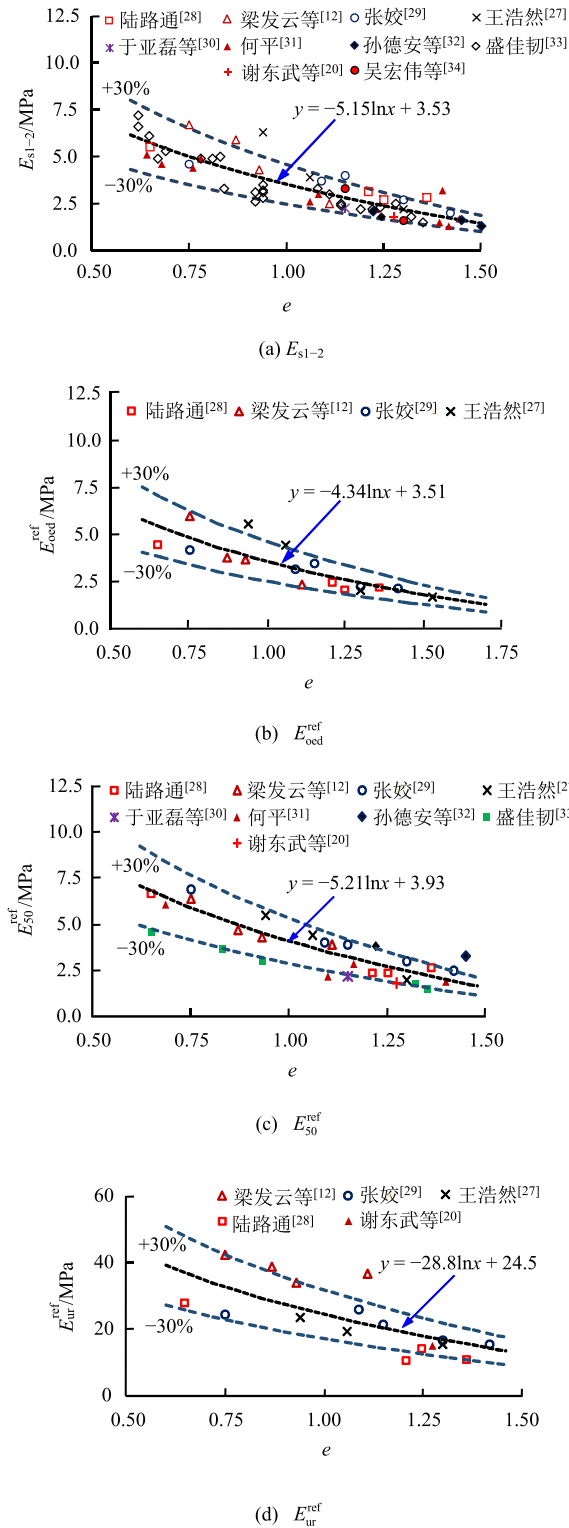
考虑到土体变形特性主要与土体的状态 (孔隙比和有效应力状态) 有关, 本文基于大量试验数据的统计建立各模型参数和土体孔隙比等物理参数的关系, 这样即可根据勘察报告中土体的孔隙比较准确地计算各参考模量, 供工程分析使用。其他地区可根据类似做法, 确定适合本地区的 HSS 模型参数取值方法。

图 2 给出了大量室内试验文献中上海黏性土的各参考模量 E_{s1-2} 、 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 与孔隙比 e 的关系。由图可见, 各参考模量均随着参考孔隙比的增加而减小, 两者间均有良好的关系, 基本在均值的 $\pm 30\%$ 以内波动。显然, 通过勘察报告中提供土体孔隙比, 即能较准确地确定 HSS 模型的参考模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。

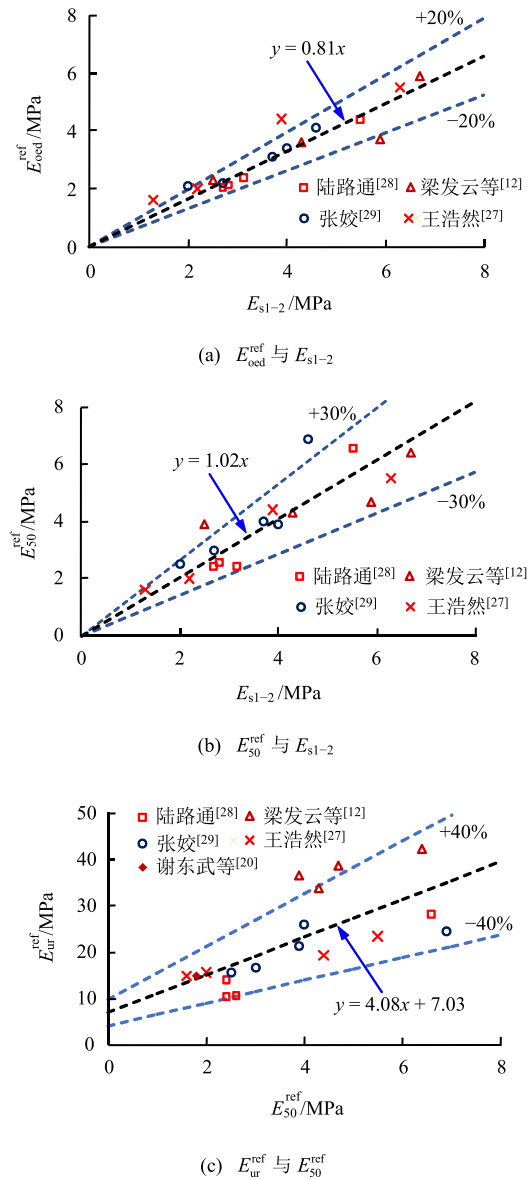
另一种确定模量的方法就是建立各模量间的相互关系, 从而通过勘察报告提供的 E_{s1-2} 确定各参考模量。由图 2 可知, 各模量均与孔隙比存在密切关系, 因此各模量间必然存在一定的关系。图 3(a) 给出了均由固结试验确定的 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 与 E_{s1-2} 的关系。由图可见, 两者确实有很好的线性关系。值得说明的是,

由于土体的压硬性, 对于正常固结黏土 E_{s1-2} 必然大于 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$, 因此部分文献中给出 $E_{s1-2} < E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 时可能存在一定的问题。另外, 基于公式 (1), 通过理论推导可得 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / E_{s1-2} = (2^{1-m} - 1) / (1 - m)$ 。当 m 在 0.5~0.6 时, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / E_{s1-2} = 0.83 \sim 0.80$, 可见与试验统计结果 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 0.81 E_{s1-2}$ 非常吻合。图 3(b) 给出了 E_{50}^{ref} 与 E_{s1-2} 的关系。由图可见, 两者有较好的线性关系, 且 $E_{50}^{\text{ref}} \approx 1.02 E_{s1-2}$ 。图 3(c) 给出了 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 与 E_{50}^{ref} 的关系, 由于两者均由三轴排水试验确定, 应该比规范中给出的 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 与 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 关系有更好的相关性。同时, 定性上, 如果土体越软, 那么卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 与加载模量 E_{50}^{ref} 的比值应越大, 这与规范中较软的③和④两层土取 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 8 E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$, 而其余土层取 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 6 E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 相一致。因此, 本文采用不过原点的线性拟合, 拟合结果为 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 4.08 E_{50}^{\text{ref}} + 7.03$ 。

由于通常勘察报告中不提供土体的有效应力强度指标 c' 和 ϕ' , 因此本文尝试建立土体摩擦角 ϕ' 与孔隙比 e 的关系, 同时建立 c' 与 ϕ' 的相关关系 (尽管理论上正常固结黏土和砂土的 $c' = 0$), 如图 4 所示。上海地基基础规范^[35]中给出了部分土层的 e 、 c' 和 ϕ' 变化范围, 统计时 e 的下限值对应摩擦角 ϕ' 上

图2 E_{s1-2} 、 E_{oed}^{ref} 、 E_{50}^{ref} 、 E_{ur}^{ref} 与 e 的关系Fig.2 Relationships between E_{s1-2} , E_{oed}^{ref} , E_{50}^{ref} , E_{ur}^{ref} and void ratio e

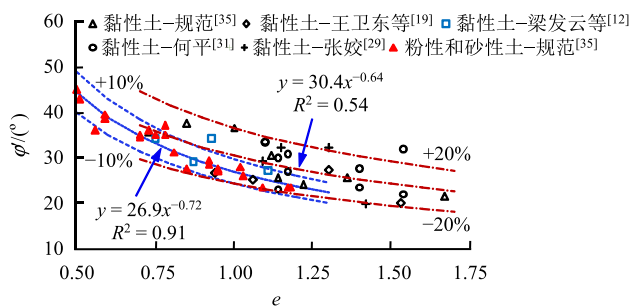
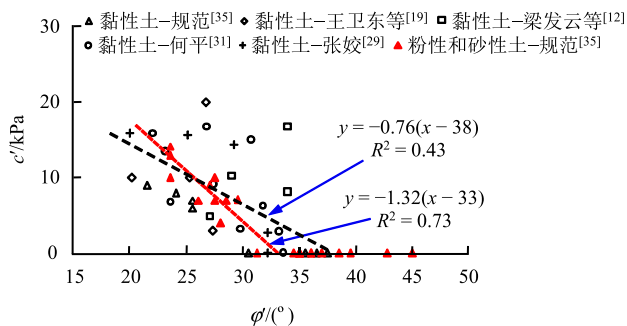
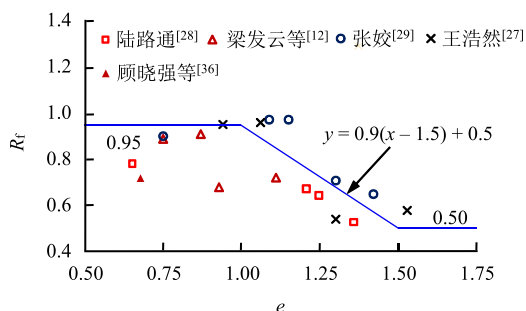
限值,同时 ϕ 的上限值对应 c' 的下限值。由图4可见, ϕ 与 e 有较好的关系,在缺乏试验数据时,根据图中拟合公式由 e 确定 ϕ ,再根据 ϕ 确定 c' 。需要说明的是,参数敏感度分析表明, c' 和 ϕ 取值对基坑变形影响小^[27],但对基坑稳定性影响很大。后续可进一步开展三轴固结不排水试验确定上海典型土层

图3 E_{oed}^{ref} 与 E_{s1-2} 、 E_{50}^{ref} 与 E_{s1-2} 、 E_{ur}^{ref} 与 E_{50}^{ref} 关系
Fig.3 Relationships between E_{oed}^{ref} and E_{s1-2} , E_{50}^{ref} and E_{s1-2} , E_{ur}^{ref} and E_{50}^{ref}

的有效应力强度指标,并尝试建立其与土体孔隙比、塑性指数等的关系,为实际工程根据勘察报告确定土体有效应力强度指标提供依据。

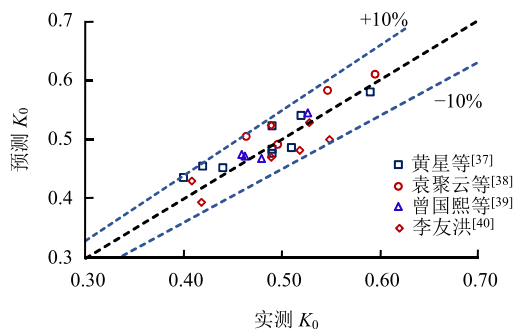
图5给出了土体破坏比 R_f 与孔隙比 e 的关系。理论上土体 e 较小时,土体模量较大,根据双曲线型的应力-应变关系可推测土体的 R_f 较大。由图可见,总体上试验结果符合理论预期,在实际应用中,当 $e \geq 1.5$ 时,可取 $R_f = 0.5$,当 $e \leq 1.0$ 时,可取 $R_f = 0.95$,中间按插值计算。上海基坑规范^[1]建议较软的③和④两层土 R_f 取0.6,其余 R_f 取0.9,与本文取值较一致。

土体静止侧向土压力系数 K_0 决定了土体的初始现场应力,对土体的变形和强度有很大的影响。图6给出了上海典型土体的 K_0 试验成果。由图可见,

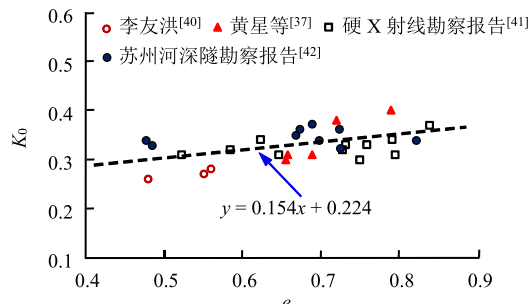
(a) ϕ' 与 e (b) c' 与 ϕ' 图 4 ϕ' 与 e 、 c' 与 ϕ' 的关系Fig.4 Relationships between ϕ' and e , c' and ϕ' 图 5 破坏比 R_r 与孔隙比 e 的关系Fig.5 Relationships between R_r and e

黏性土的 K_0 在 0.4~0.6 间, 跟土体的塑性指数 I_p 和孔隙比 e 有关。砂性和粉性土的 K_0 在 0.3~0.4 之间, 跟孔隙比 e 有一定的关系。另外, 也可根据上海基坑规范^[1]建议, 黏性土取 $K_0 = 0.95 - \sin\phi'$, 砂性土 $K_0 = 1 - \sin\phi'$ 。需要说明的是, 通常对砂土采用峰值有效摩擦角预测较临界状态摩擦角更合理^[43]。

图 7 给出了由共振柱试验测定的上海黏性土 (含黏质粉土) 和砂性土 (含砂质粉土) 的 G_0 值。由图可见, G_0 主要由土体的孔隙比 e 和有效围压 p' 决定, 可采用 $G_0 = AF(e)(p'/P_a)^m$ 形式拟合, 其中 A 为与土颗粒特性、土体级配及组构等相关的常数; $F(e)$ 为孔隙比 e 的函数, 反映孔隙比 e 的影响, 本文采用 $F(e) = e^{-n}$ 的形式^[10], n 为拟合参数; P_a 为参考应力, 这里取 100 kPa。值得注意的是, 已有研究



(a) 黏性土



(b) 砂性土

图 6 黏性土、砂性和粉性土的 K_0 预测方法Fig.6 Predicted K_0 for clayey soils and sandy soils

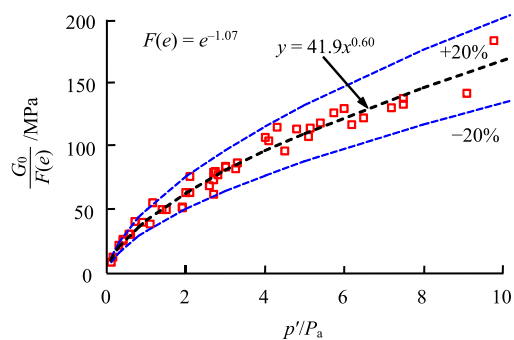
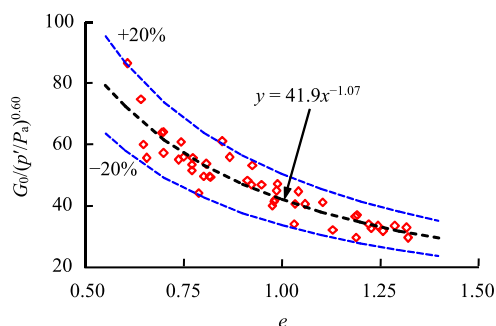
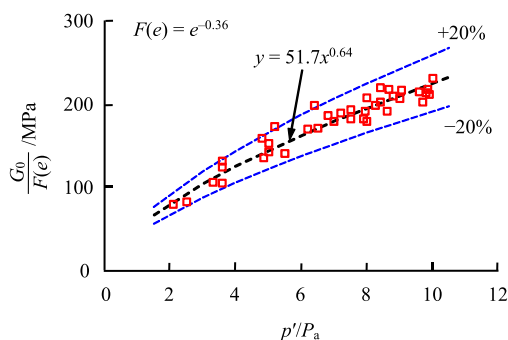
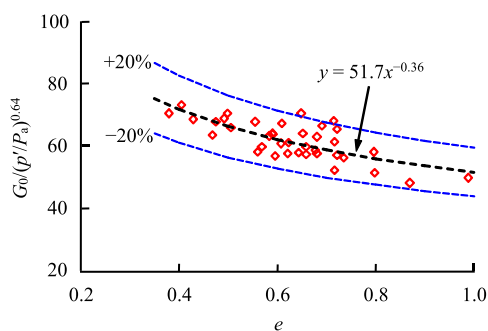
表明取样扰动可能对土体 G_0 值影响较大^[44]。因此, 本文还统计了上海几个重大工程中由现场波速试验确定的 G_0 值, 如图 8 所示。对比图 7 和图 8 可知, 现场试验的 G_0 比室内试验 G_0 高, 且离散性也相对要大。由于变形对 G_0 很敏感, 因此特别要注意取样扰动对 G_0 的影响, 下面也会对比研究采用室内试验和现场试验的 G_0 值对开挖变形的影响。

图 9 给出了由室内共振柱试验测定的上海典型土体剪切模量的衰减曲线。由图可见, 黏性土 (含黏质粉土) $\gamma_{0.7}$ 的范围为 $(2.4 \sim 4.2) \times 10^{-4}$, 其平均值为 3.2×10^{-4} , 而砂性土 (含砂质粉土) 的 $\gamma_{0.7}$ 范围为 $(2.9 \sim 5.2) \times 10^{-4}$, 其平均值为 3.9×10^{-4} 。需要说明的是, 由于现场无法测定剪切模量的衰减特性, 因此取样扰动对 $\gamma_{0.7}$ 的影响尚未清晰, 需进一步的研究。

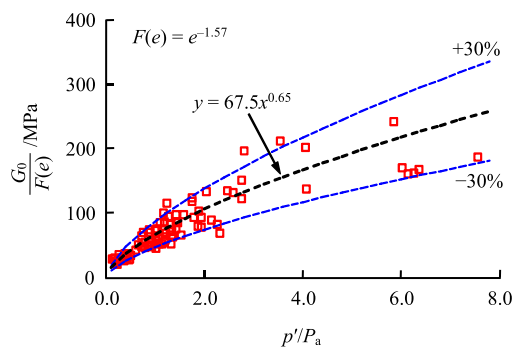
表 1 汇总了基于大量试验数据统计的上海土体 HSS 模型整套参数的取值方法, 所有参数均可基于土体的基本物理指标来确定。值得注意的是, 砂性土的各模量参数试验研究相对较少, 同时取样扰动对除 G_0 外的其他参数的影响需进一步研究。另外, 建议后续对大量实际工程进行反演分析, 根据反演结果对参数取值作进一步修正。

4 HSS 模型在基坑工程中的应用

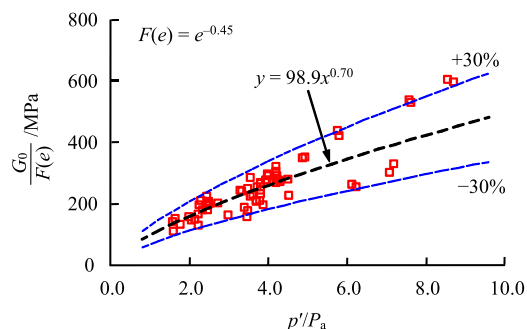
为进一步验证上述 HSS 模型参数取值方法的

(a) 黏性土 G_0 与 p' (b) 黏性土 G_0 与 e (c) 砂性土 G_0 与 p' (d) 砂性土 G_0 与 e 图7 室内共振柱试验确定的黏性土的 G_0 与 p' , G_0 与 e , 和砂性土的 G_0 与 p' , G_0 与 e 的关系Fig.7 G_0 and p' , G_0 and e for clayey soil and G_0 and p' , G_0 and e for sandy soils from laboratory tests

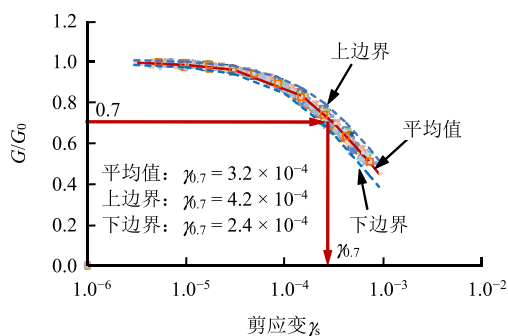
合理性和普适性, 采用 PLAXIS 有限元程序对上海 4 个基坑工程 (开挖深度为 6.9~16.0 m, 支撑数量



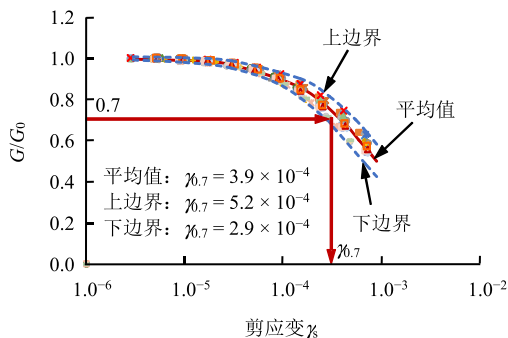
(a) 黏性土



(b) 砂性土

图8 现场波速试验确定的黏性土和砂性土的 G_0
Fig.8 G_0 for clayey soil and sandy soils obtained by field shear wave measurements

(a) 黏性土



(b) 砂性土

图9 黏性土、砂性土的归一化模量衰减曲线
Fig.9 Normalized modulus reduction curves for clayey soils and sandy soils

为 1~4 道) 进行变形分析, 并与实测数据进行比较。需要说明的是, 计算中 HSS 的模型参数均基于勘察报告提供的土层孔隙比 e 等物理指标, 由表 1 确定。

4.1 上海新金桥广场基坑

上海新金桥广场基坑面积为 4 827 m², 本次分析剖面开挖深度为 6.9 m。围护结构采用 SMW 工法, 三轴水泥搅拌桩桩径为 850 mm, 内插 H700×300 mm 型钢, 桩长为 18 m, 桩间距为 600 mm。设置一道钢支撑, 地下水位在地表下 0.5 m, 基坑剖面如图 10 所示。图中, γ 为天然重度。该基坑的详细信息可见王浩然^[27]的论文。根据图 10 所示的土层信息, 按表 1 确定的土层 HSS 模型参数见表 3。图 11 对比了围护桩水平变形的实测值和计算值。图

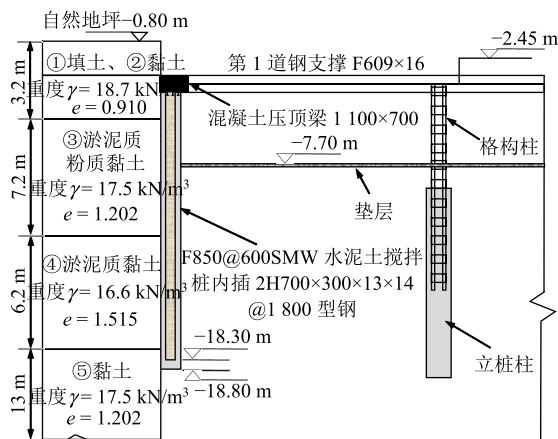


图 10 上海新金桥广场基坑支撑剖面示意图

Fig.10 Profile of the excavation of New Jinqiao Plaza

表 3 上海新金桥广场基坑各层土体 HSS 模型参数

Table 3 HSS model parameters used in the excavation of New Jinqiao Plaza in Shanghai

土层	e	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	K_0	$E_{\text{ood}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{so}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_{\text{OL}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_{\text{OF}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	调整后 $G_{\text{OF}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	m	R_{f}
①填土、②黏土	0.910	4.35	32.3	0.42	3.92	4.42	27.2	46.3	78.2	98.0	3.2	0.65	0.95
③淤泥质粉质黏土	1.202	8.34	27.0	0.50	2.71	2.97	19.2	34.4	50.6	58.5	3.2	0.65	0.77
④淤泥质黏土	1.515	11.2	23.30	0.55	1.71	1.77	12.5	26.9	35.2	38.8	3.2	0.65	0.50
⑤黏土	1.202	8.3	27.03	0.50	3.92	4.42	27.2	34.4	50.6	58.5	3.2	0.65	0.77

注: 所有案例计算中 $p^{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$; $\psi = 0$; $\nu_{\text{ur}} = 0.2$; 墙-土界面参数 $R_{\text{inter}} = 0.67$ 。

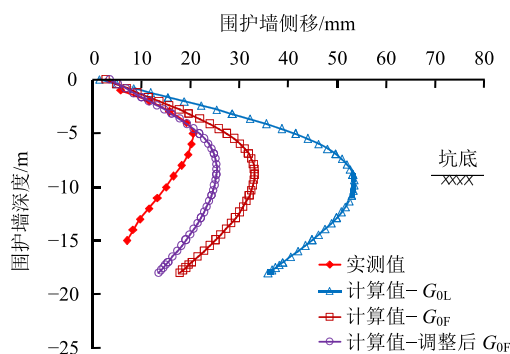


图 11 围护墙侧移的计算值和实测值的比较

Fig.11 Calculated and measured lateral deformation

中 G_{OL} 、 G_{OF} 分别为室内共振柱和现场测试获得的 G_0 值, 而调整后的 G_{OF} 表示现场 G_0 根据式 (5) 调整后的值。由图可见, 当采用 G_{OF} 时计算的围护墙侧移比采用 G_{OL} 时小很多, 当采用调整后 G_{OF} 值时计算的围护墙侧移较实测值稍大, 但已较接近, 表明采用合理的 G_0 值对 HSS 模型预测变形的重要性。

4.2 上海兴业银行大厦基坑

上海兴业银行大厦基坑面积约为 6 200 m², 本次分析剖面开挖深度为 12.2 m。围护结构采用全逆作法的 800 mm 厚地下连续墙, 插入 26 m, 采用结

构梁板作为水平支撑体系, 地下水位在地表下 1.0 m, 基坑剖面如图 12 所示, 图中 EA 为抗压刚度。该基坑的详细信息可见徐中华^[45]的研究。根据图 12 所示的土层信息, 按表 1 确定的土层 HSS 模型参数见表 4, 其中加固水泥土的参数参考王军等^[46]和杨芳^[47]有关水泥土的静动力特性试验确定。图 13 对比了围护桩水平变形 P3 测点的实测值和计算值。由图可

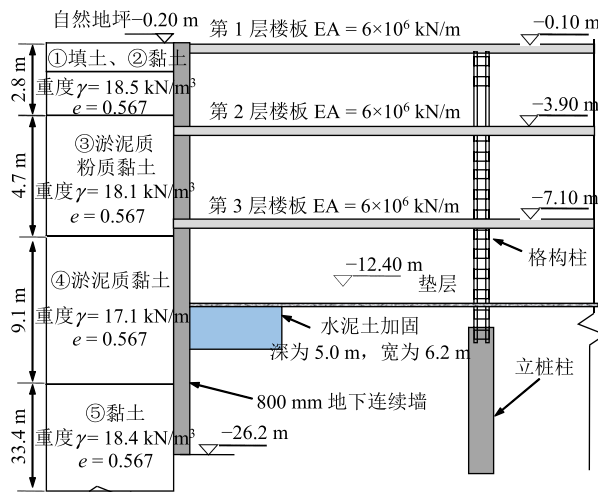


图 12 上海兴业银行大厦基坑支撑剖面示意图

Fig.12 Profile of the excavation of Shanghai Xinye bank

表 4 上海兴业银行大厦基坑各层土体 HSS 模型参数
Table 4 HSS model parameters used in the excavation of Xinye bank in Shanghai

土层	e	c'/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	K_0	$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_{\text{OL}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_{\text{OF}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	调整后 $G_{\text{OF}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	m	R_f
①填土、②黏土	0.954	5.07	31.3	0.43	3.71	4.17	25.85	44.0	72.6	89.6	3.2	0.65	0.95
③淤泥质粉质黏土	1.043	6.39	29.6	0.46	3.33	3.71	23.30	40.1	63.2	75.9	3.2	0.65	0.77
④淤泥质黏土	1.343	9.75	25.2	0.52	2.23	2.40	16.02	30.6	42.5	47.9	3.2	0.65	0.50
⑤黏土	0.971	5.34	31.0	0.44	3.64	4.08	25.34	43.2	70.6	86.6	3.2	0.65	0.77
加固土	—	60.00	25.0	0.50	15.00	15.00	85.00	170.0	170.0	170.0	20.0	0.12	0.95

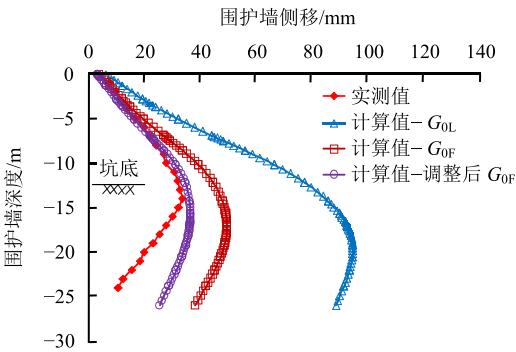


图 13 围护墙侧移的计算值和实测值的比较
Fig.13 Calculated and measured lateral deformation

见，当采用 G_{OF} 值时计算的围护墙侧移比采用 G_{OL} 值时小很多，当采用调整后 G_{OF} 值时计算的围护墙侧移较实测值稍大，但已很接近。

4.3 上海银行大厦基坑

上海银行大厦基坑面积约为 7 454 m²，本次分析剖面开挖深度为 14.95 m。围护结构采用两墙合一的 800 mm 厚地下连续墙，插入 28.6 m，采用 3 道混凝土支撑，地下水位在地表下 0.5 m 左右，基坑剖面如图 14 所示。该基坑的详细信息可见王浩然^[27]的研究。根据图 14 所示的土层信息，按表 1

确定的土层 HSS 模型参数见表 5。图 15 对比了围护桩水平变形 J2 测点的实测值和计算值。由图可见，当采用 G_{OF} 值时计算的围护墙侧移比采用 G_{OL} 值时小很多，当采用调整后 G_{OF} 值时计算的围护墙侧移较很接近，进一步表明本文确定的 HSS 模型参数的合理性。

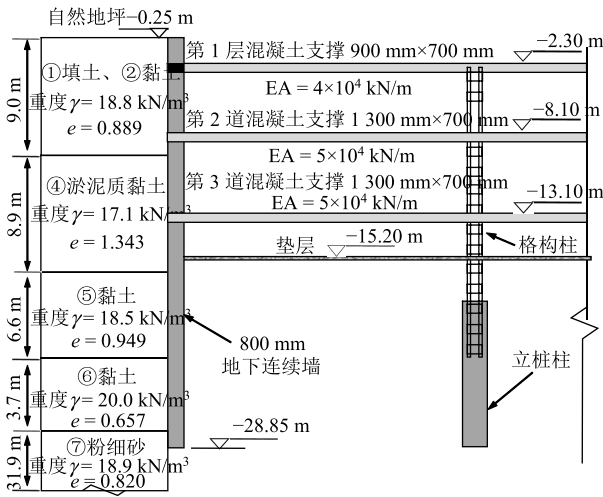


图 14 上海银行大厦基坑支撑剖面示意图
Fig.14 Profile of the excavation of Shanghai bank building

表 5 上海银行大厦基坑各层土体 HSS 模型参数
Table 5 HSS model parameters used in the excavation of Shanghai Bank building

土层	e	c'/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	K_0	$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_{\text{OL}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_{\text{OF}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	调整后 $G_{\text{OF}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	m	R_f
①填土、②黏土	0.889	3.97	32.8	0.41	4.02	4.54	27.88	47.5	81.2	102.5	3.2	0.65	0.95
④淤泥质黏土	1.343	9.75	25.2	0.52	2.23	2.40	16.02	30.6	42.5	47.9	3.2	0.65	0.64
⑤黏土	0.949	4.98	31.4	0.43	3.74	4.20	26.02	44.3	73.3	90.6	3.2	0.65	0.95
⑥黏土	0.657	20.0	35.0	0.38	5.33	6.12	36.58	65.6	130.4	159.9	3.2	0.65	0.95
⑦粉细砂	0.820	2.60	31.0	0.48	8.41	10.59	50.83	55.5	108.1	131.8	3.9	0.70	0.95

4.4 上海地铁 9 号线商城路站基坑

上海地铁 9 号线商城路站基坑长约为 290 m、宽约为 20 m，埋深为 16~18 m，利用截盖技术开挖。本次分析为基坑的中部 B20 剖面，开挖深度为 16 m。基坑围护采用 800 mm 厚地下连续墙，插入 33.7 m。基坑设置 4 道水平钢支撑，地下水位在地面下 1.0 m，具体土层情况如图 16 所示。该基坑的

详细信息可见 Tan 等^[48]的研究。根据图 16 所示的土层信息，由表 1 确定的土层 HSS 模型参数见表 6。图 17 给出了基坑围护桩水平变形的实测值和计算值的对比。由图可见，与上海新金桥广场基坑结果类似，当采用 G_{OF} 值时计算的围护墙侧移比采用 G_{OL} 值小很多，当采用调整后 G_{OF} 值时计算的围护墙侧移也比实测值稍大，但已十分接近，表明本文提出

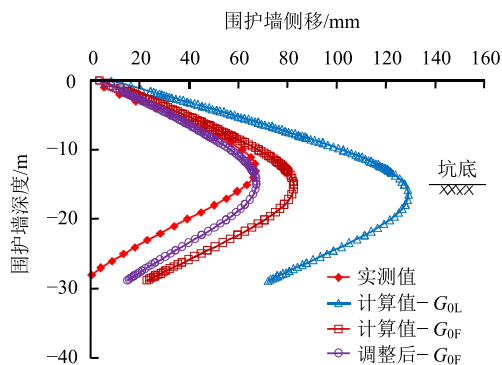


图 15 围护墙侧移的计算值和实测值的比较

Fig.15 Calculated and measured lateral deformation

的 HSS 模型参数取值方法的合理性。

由上可见,采用本文提出的 HSS 模型参数取值方法,所有参数都可根据勘察报告方便确定。同时尽管开挖深度和支撑数量不同,但计算的围护结构

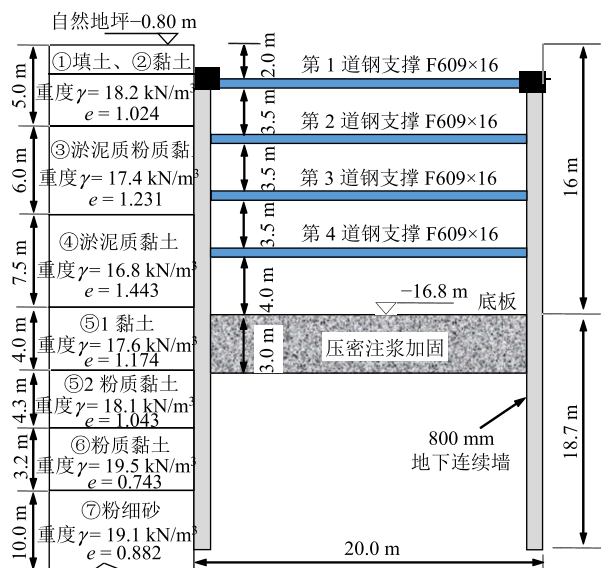


图 16 上海 9 号线地铁基坑支撑剖面示意图

Fig.16 Profile of the excavation of a metro station of line 9

表 6 上海地铁 9 号线商城路站基坑各层土体 HSS 模型参数

Table 6 HSS model parameters used in the excavation of Shangcheng Road station of metro line 9 in Shanghai

土层	e	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	K_0	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_{0L}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_{0F}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	调整后 $G_{0F}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	m	R_f
①填土、②黏土	1.024	6.13	29.94	0.52	3.41	3.81	23.81	40.8	65.0	75.2	3.2	0.65	0.93
③淤泥质粉质粘土	1.231	8.65	26.62	0.50	2.61	2.85	18.52	33.6	48.7	56.2	3.2	0.65	0.74
④淤泥质黏土	1.443	10.61	24.04	0.61	1.92	2.02	13.94	28.3	38.0	41.2	3.2	0.65	0.55
⑤1 黏土	1.174	8.03	27.44	0.56	2.82	3.10	19.89	35.3	52.5	59.1	3.2	0.65	0.79
⑤2 粉质黏土	1.043	6.39	29.60	0.48	3.33	3.71	23.30	40.1	63.2	74.6	3.2	0.65	0.91
⑥粉质黏土	0.743	0.93	36.77	0.48	4.80	5.48	33.06	57.6	107.7	131.0	3.2	0.65	0.95
⑦粉细砂	0.882	4.69	29.44	0.41	7.03	8.85	43.67	54.1	104.6	133.1	3.2	0.70	0.95
加固土	—	60.00	25.00	0.50	15.00	15.00	84.96	170.0	170.0	170.0	20.0	0.12	0.95

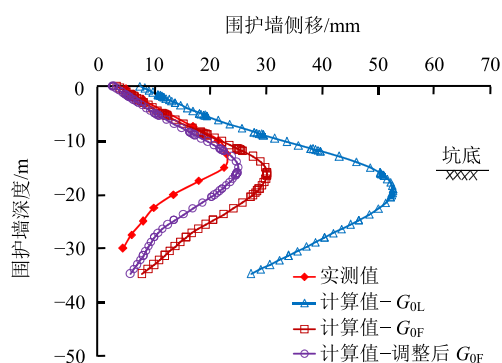


图 17 围护墙侧移的计算值和实测值的比较

Fig.17 Calculated and measured lateral deformation

最大变形值和变形模式均与实测结果较为接近,充分体现了本文提出的 HSS 模型参数取值方法的方便性、准确性及普适性。后续可开展大量基坑实例的反演计算,进一步验证和修正本文提出的 HSS 模型参数取值方法。需要注意的是,目前围护踢脚处

计算的变形均较实测大,具体原因有待进一步研究。

5 结论与建议

本文首先介绍了土体的小应变变形特性,并剖析了 HSS 模型各参数的意义和试验确定方法。基于大量试验数据,建立了上海土体 HSS 模型整套参数的取值方法,并通过 4 个实际深基坑工程的开挖变形分析进行验证。初步结论与建议如下:

(1) 基于大量的室内和现场试验数据统计,建立了主要基于土体孔隙比的上海土体 HSS 模型整套的取值方法,为上海地区实际工程中根据工程勘察报告来方便且较准确地确定 HSS 模型整套参数提供了科学依据。

(2) 研究表明,取样扰动导致室内试验确定的土体小应变剪切模量 G_0 较现场试验值小很多,建议采用现场试验确定的 G_0 值进行变形分析。同时,提出了 PLAXIS 软件中参考模量 G_0^{ref} 输入值的修正方

法,以修正软件中采用有效侧向围压控制 G_0 而实际为平均有效应力控制 G_0 的缺点。

(3) 对上海 4 个深基坑的开挖变形进行有限元分析,当采用本文推荐的 HSS 模型参数取值后,计算结果和实测结果均较为接近,从而验证了本文推荐的土体 HSS 模型参数取值方法的合理性,也为其他地区确定 HSS 模型参数提供了有益的参考。

参考文献

- [1] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DG/TJ 508-61-2018 基坑工程技术标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of Shanghai City. DG/TJ 508-61-2018 Technical code for excavation engineering[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [2] 中华人民共和国铁道部. TB10621-2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
Ministry of Railway of the People's Republic of China. TB10621-2014 Code for design of high speed railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [3] BURLAND J B. Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1989, 26(4): 499-516.
- [4] JARDINE R J, POTTS D M, FOURIE A B, et al. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction[J]. **Géotechnique**, 1986, 36(3): 377-396.
- [5] MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations[C]//Proceedings of the ICE-Civil Engineering. London: [s. n.], 1993.
- [6] ATKINSON J H, SALLFORS G. Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests[C]//Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Florence, Italy: [s. n.], 1991.
- [7] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [8] HARDIN B O, BLACK W L. Sand stiffness under various triaxial stresses[J]. **Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division**, 1966, 92: 27-42.
- [9] 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): 740-746.
- GU Xiao-qiang, YANG Jun, HUANG Mao-song, 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): 740-746.
- [10] YANG J, GU X Q. Shear stiffness of granular material at small strain: does it depend on grain size?[J]. **Géotechnique**, 2013, 63(2): 165-179.
- [11] KOKUSHO T. Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range[J]. **Soils and Foundations**, 1980, 20(2): 45-60.
- [12] 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.
LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(2): 269-278.
- [13] 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.
YIN Ji. Application of hardening soil model with small strain stiffness in deep foundation pits in Shanghai[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Suppl.1): 166-172.
- [14] 梁发云, 褚峰, 宋著, 等. 紧邻地铁枢纽深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 657-664.
LIANG Fa-yun, CHU Feng, SONG Zhu, et al. Centrifugal model test research on deformation behaviors of deep foundation pit adjacent to metro stations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 657-664.
- [15] 居尚威, 李雄威, 刘正明, 等. 基于 HSS 模型预测基坑开挖影响下的管线安全性分析[J]. 常州工学院学报, 2017, 30(1): 7-12.
JU Shang-wei, LI Xiong-wei, LIU Zheng-ming, et al. Safety analysis for excavation-induced impact on surrounding pipelines based on an HSS mode[J]. **Journal of Changzhou Institute of Technology**, 2017, 30(1): 7-12.
- [16] 管飞. 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, 2010, 32(增刊 1): 177-180.
GUAN Fei. 3D numerical analysis for a ultra-large deep excavation in soft clay based on HSS constitutive model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Suppl.1): 177-180.

- [17] 温科伟, 刘树亚, 杨红坡. 基于小应变硬化土模型的基坑开挖对下穿地铁隧道影响的三维数值模拟分析[J]. 工程力学, 2018, 35(增刊 1): 80-87.
- WEN Ke-wei, LIU Shu-ya, YANG Hong-po. Three-dimensional numerical simulation analysis of the influence of pit excavation based on hardening soil-small strain model for metro tunnel[J]. **Engineering Mechanics**, 2018, 35(Suppl.1): 80-87.
- [18] 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.
- LI Lian-xiang, LIU Jia-dian, LI Ke-jin, et al. Study of parameters selection and applicability of HSS model in typical stratum of Jinan[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 4021-4029.
- [19] 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.
- WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [20] 谢东武, 管飞, 丁文其. 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, 2017, 39(5): 898-906.
- XIE Dong-wu, GUAN Fei, DING Wen-qi. Determination and sensitivity analysis of the parameters of hardening soil model with small strain stiffness[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2017, 39(5): 898-906.
- [21] 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.
- XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. 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): 258-264.
- [22] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86-94.
- SONG Guang, SONG Er-xiang. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations[J]. **Engineering Mechanics**, 2014, 31(5): 86-94.
- [23] OBRZUD R F. On the use of the Hardening soil small strain model in geotechnical practice[C]//Numerical in Geotechnics and Structures. [S. l.]: [s. n.], 2010.
- [24] 陈祖煜. 深基坑稳定分析中几个问题的讨论[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 1-8.
- CHEN Zu-yu. Discussion on several problems in deep foundation pit engineering[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Suppl.1): 1-8.
- [25] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. **Géotechnique**, 1986, 36(1): 65-78.
- [26] IWASAKI T, TATSUOKA F, TAKAGI Y. Shear modulus of sands under cyclic torsional shear loading[J]. **Soils and Foundations**, 1978, 18(1): 39-56.
- [27] 王浩然. 上海软土地区深基坑变形与环境影响预测方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- WANG Hao-ran. Prediction of deformation and response of adjacent environment of deep excavation in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [28] 陆路通. 上海土体小应变特性的试验研究及其在基坑工程中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2018.
- LU Lu-tong. Experimental study on the small strain properties of soil in Shanghai and its application in excavation[D]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [29] 张娇. 上海软土小应变特性及其在基坑变形分析中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2017.
- ZHANG Jiao. Small strain stiffness properties of Shanghai soft soils and application in deformation analysis of deep excavations[D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [30] 于亚磊, 叶冠林, 熊永林. 上海第 4 层黏土力学特性的弹塑性本构模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2541-2546.
- YU Ya-lei, YE Guan-lin, XIONG Yong-lin. Elastoplastic constitutive modelling for mechanical behavior of Shanghai 4th layer clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2541-2546.
- [31] 何平. 上海黏土强度变形特性研究及其在基坑工程分析中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2019.
- HE Ping. Strength and deformation characteristics of Shanghai clay and its application in the analysis of excavation engineering[D]. Shanghai: Tongji University, 2019.
- [32] 孙德安, 陈波. 结构性软土力学特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊 2): 65-68.
- SUN De'an, CHEN Bo. Experimental study on the mechanical behavior of structural soft clay[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(Suppl.2): 65-68.
- [33] 盛佳韧. 上海黏土力学特性综合试验研究及本构模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- SHENG Jia-ren. Laboratory tests and constitutive modeling on the mechanical behavior of Shanghai clays[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [34] 吴宏伟, 李青, 刘国彬. 上海黏土一维压缩特性的试验

- 研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 630-636.
- NG CWW, LI Qing, LIU Guo-bin. Characteristics of one-dimensional compressibility of Shanghai clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(4): 630-636.
- [35] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DGJ 08-61-2018 地基基础设计标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of Shanghai City. DGJ 08-61-2018 Foundation design code[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [36] 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, 46(3): 312-317.
- GU Xiao-qiang, LU Lu-tong, LI Xiong-wei, et al. Experimental study of small strain stiffness properties of soil[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2018, 46(3): 312-317.
- [37] 黄星, 丁国洪. 深隧工程地质分析与关键岩土参数研究[R]. 上海: 上海市政工程设计研究总院有限公司, 2016.
- HUANG Xing, DING Guo-hong. The analyses of engineering geology and key geotechnical parameters in the deep sewage tunnel[R]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., 2016.
- [38] 袁聚云, 王新波, 董建国, 等. K_0 固结条件对上海粘性土强度和变形的影响[J]. 大坝观测与土工测试, 1999, 23(4): 29-32.
- YUAN Ju-yun, WANG Xin-bo, DONG Jian-guo, et al. Research on the strength and deformation of Shanghai clayey soils under K_0 consolidation condition[J]. **Dam Observation and Soil Tests**, 1999, 23(4): 29-32.
- [39] 曾国熙, 龚晓南, 盛进源. 正常固结粘土 K_0 固结剪切试验研究[J]. 浙江大学学报, 1987, 21(2): 1-9.
- ZENG Guo-xi, GONG Xiao-nan, SHENG Jin-yuan. Research on normally consolidated clay by K_0 consolidated shear test[J]. **Journal of Zhejiang University**, 1987, 21(2): 1-9.
- [40] 李友洪. 上海土体各向异性小应变特性试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2018.
- LI You-hong. Experimental study on anisotropic small strain characteristics of Shanghai soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2019.
- [41] 陈琛, 苏辉, 路家峰, 等. 硬 X 射线自由电子激光装置项目岩土工程初步勘察报告[R]. 上海: 上海市隧道工程轨道交通设计研究院. 2017.
- CHEN Chen, SU Hui, LU Jia-feng, et al. The site investigation report of the hard X-ray project in Shanghai[R]. Shanghai: Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, 2017.
- [42] 熊卫兵, 杨子良, 周新权, 等. 苏州河段深层排水调蓄管道系统工程(试验段)勘察 I 标—苗圃及云岭综合设施岩土工程勘察报告[R]. 上海: 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 2017.
- XIONG Wei-bin, YANG Zi-liang, ZHOU Xin-quan, et al. The site investigation report of the experimental session of the deep sewage tunnel-Miaopu and Yunling facilities[R]. Shanghai: SGIDI Eng. Cons. (Group) Co., Ltd., 2017.
- [43] GU X Q, HU J, HUANG M S. K_0 of granular soils: a particulate approach[J]. **Granular Matter**, 2015, 17(6): 703-715.
- [44] 陈少杰, 顾晓强, 高广运. 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, 2019, 41(增刊 2): 133-136.
- CHEN Shao-jie, GU Xiao-qiang, GAO Guang-yun. Comparison and application of small strain shear moduli from field and laboratory measurements[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.2): 133-136.
- [45] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [46] 王军, 丁光亚, 潘林有, 等. 静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1407-1412.
- WANG Jun, DING Ya-guang, PAN Ling-you, et al. Experimental study on small-strain dynamic properties of cemented soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1407-1412.
- [47] 杨芳. 水泥土小应变动力特性试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(4): 102-105.
- YANG Fang. Experimental study on small-strain dynamic properties of cemented soil[J]. **Industrial Construction**, 2013, 43(4): 102-105.
- [48] TAN Y, WEI B. Observed behaviors of a long and deep excavation constructed by cut-and-cover technique in Shanghai soft clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 138(1): 69-88.