

DOI: 10.11779/CJGE2021S2047

# 软土 HSS 模型参数现有试验成果统计分析

陈 赟<sup>1, 2</sup>, 罗敏敏<sup>\*1, 2</sup>, 夏能武<sup>3</sup>, 何 鹏<sup>3</sup>

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028; 3. 上海隧道工程有限公司, 上海 200082)

**摘 要:** 小应变土体硬化模型(HSS 模型)因能考虑土体的小应变特性,在模拟和预测软土地区变形控制要求严格的地下工程的变形规律和变形量方面,有着较高的准确度,从而得到广泛应用。但 HSS 模型的参数较多,试验取值比较麻烦,工程中更多的是经验取值。目前关于软土 HSS 模型参数的研究有一定的成果积累,但仍有进一步丰富的必要。对现有试验成果进行归纳和统计分析,得到软土的破坏比、参考模量及小应变参数的取值范围或比例关系,可为工程应用提供经验参考。

**关键词:** 软土; HSS 模型; 参数取值; 统计分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0197-05

**作者简介:** 陈 赟(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事岩土工程设计及岩土工程测试工作。E-mail: 727681168@qq.com。

## Statistical analysis of existing test results of HSS model parameters for soft soils

CHEN Yun<sup>1, 2</sup>, LUO Min-min<sup>1, 2</sup>, XIA Neng-wu<sup>3</sup>, HE Peng<sup>3</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co, Ltd, Hangzhou 310028, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

**Abstract:** The small-strain soil hardening model (HSS model) takes into account the small-strain characteristics of the soil. In terms of simulating and predicting the deformation of underground engineering with strict deformation control standards, the numerical analysis using the HSS model has high accuracy and usually agrees well with the measured data. Therefore, the HSS model has been widely used, but it is difficult and troublesome to select the parameters, and most of them are empirical values at present. The researches on the parameters of HSS model for soft soils has accumulated a certain amount of results, but there is still a need for further enrichment. In this study, the existing test results are summarized and statistically analyzed, and the value range or proportional relationship of the failure ratio, reference modulus and small strain parameters of soft soil are obtained, which may provide empirical reference for engineering applications.

**Key words:** soft soil; HSS model; parameter selection; statistical analysis

## 0 引 言

传统承载力极限状态分析方法难以预测土体变形,数值分析方法的发展弥补了这一缺陷。数值模拟结果的精确性取决于选用的本构关系的合理性及其模型参数的准确性。工程实践表明,大部分对周边环境控制要求严格的地面及地下工程结构,在其正常工作状态下,其周边土体的变形程度通常很小,典型的应变范围是 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ ,属于小应变范畴<sup>[1]</sup>。因此,能够反映土体小应变特性的 HSS 模型<sup>[2]</sup>得到越来越广泛的应用。限于本文篇幅的要求,关于 HSS 模型的介绍可以参详文献<sup>[2, 3]</sup>。

现有研究结果也表明,采用 HSS 模型得到的数值分析结果通常与实测数据更加吻合。例如:邵羽等<sup>[4]</sup>

采用 MCC 模型(修正剑桥模型)得到的变形预测值比 HSS 模型偏高;褚峰等<sup>[5]</sup>采用 HSS 模型得到的数值结果与实测数据的吻合程度比 M-C 模型(摩尔-库仑模型)好很多;龚东庆等<sup>[6]</sup>采用 HSS 模型的数值模拟结果比采用 HS 模型(土体硬化模型)更为准确,采用 HS 模型得到的变形预测值偏大。

虽然采用 HSS 模型的数值模拟精度较高,但参数取值也更为麻烦。HSS 模型共有 13 个参数,除部分参数可以经验取值外(详见下文),大部分参数受土性变化的影响较大,地区性差异明显,原则上需要通

基金项目:浙江省建设科研项目(2019K029);上海隧道工程有限公司专项研究科研项目(2018-SK-14)

收稿日期:2021-08-16

\*通信作者(E-mail: zjluominmin@163.com)

过相关试验确定；常用的试验方法如表1所示，表中参数意义见下文“HSS模型参数简介”。

目前关于软土的HSS模型参数的取值研究，有文献可查的，除奥地利<sup>[7]</sup>、曼谷<sup>[8]</sup>、天津<sup>[9]</sup>、深圳<sup>[10]</sup>、杭州<sup>[11]</sup>等地区的个别试验成果，其它主要集中在上海地区<sup>[12-22]</sup>。通过现有试验成果的归纳分析，发现软土的部分HSS模型参数具有一定的统计规律和取值范围，可为其经验取值提供参考价值。本文即对此进行综述。

表1 获取HSS模型参数的常用试验方法

Table 1 Test methods for obtaining HSS model parameters	
试验方法	可获得的参数
标准固结试验	$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$
三轴固结排水剪切试验	$c', \varphi', \psi, E_{50}^{\text{ref}}, R_f, m$
三轴固结排水卸载再加载剪切试验	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}, \nu_{\text{ur}}$
共振柱试验	$G_0^{\text{ref}}, \gamma_{0.7}$

## 1 HSS模型参数简介

HSS模型共由13个参数进行表征，包括4个与强度有关的参数、7个与刚度有关的参数和2个小应变参数。

与强度有关的参数包括土的有效黏聚力 $c'$ 、有效内摩擦角 $\varphi'$ 、剪胀角 $\psi$ 和破坏比 $R_f$ 。其中 $c', \varphi'$ 通常可以由勘察报告提供；软土不存在剪胀角， $\psi$ 取0。

与刚度有关的参数包括参考应力 $p^{\text{ref}}$ 、固结试验的参考切线模量 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 、三轴固结排水剪切试验的参考割线模量 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、三轴固结排水卸载再加载试验的参考卸载再加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、与模量应力水平相关的幂指数 $m$ 、卸载再加载泊松比 $\nu_{\text{ur}}$ 和正常固结条件下的静止侧压力系数 $K_0^{\text{nc}}$ 。其中 $p^{\text{ref}}$ 是人为取定的一个参考围压值，目前Plaxis等软件默认为100 kPa； $\nu_{\text{ur}}$ 的变化范围为0.1~0.25<sup>[23]</sup>，软件默认值为0.2<sup>[24]</sup>，叶跃鸿的试验研究验证了 $\nu_{\text{ur}}$ 取默认值的合理性<sup>[10]</sup>； $K_0^{\text{nc}}$ 通常可以按下式取值<sup>[25]</sup>：

$$K_0^{\text{nc}} = 1 - \sin \varphi' \quad (1)$$

式中， $\varphi'$ 为土的有效内摩擦角。

小应变参数包括参考初始剪切模量 $G_0^{\text{ref}}$ 和参考应力下剪切模量 $G$ 衰减为0.7倍 $G_0^{\text{ref}}$ 时对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$ 。

综上，软土HSS模型参数的取值，主要应关注破坏比 $R_f$ ，3个参考模量 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ ，应力指数 $m$ 及小应变参数 $G_0^{\text{ref}}$ 和 $\gamma_{0.7}$ 的取值。下文就针对这些参数的试验取值研究现状进行总结，其中应力指数 $m$ 的试验成果较少，不做统计。

## 2 HSS模型参数试验研究成果统计

### 2.1 破坏比 $R_f$ 的取值

破坏比 $R_f$ 的软件默认值为0.9，但相关试验研究成果则表明 $R_f$ 的大小与土体特性有密切的关系<sup>[12-13]</sup>。

表2统计了部分软土的试验成果，由表可知，围压100 kPa的三轴固结排水剪切试验得到的软土 $R_f$ 值的取值范围约为0.53~0.72，与软件默认值差异较大。

表2 试验得到的 $R_f$ 值统计

Table 2 Statistics of $R_f$ from tests			
文献	地点	土体名称	$R_f$ 值
文献[8]	泰国曼谷	软黏土	0.72
文献[10]	深圳	③淤泥	0.65
文献[12]	上海	③淤泥质粉质黏土	0.58
		④淤泥质黏土	0.54
文献[13]	上海	③淤泥质粉质黏土	0.68
		④淤泥质黏土	0.72
文献[14]	上海	③淤泥质粉质黏土	0.65
		④淤泥质黏土	0.71
文献[16]	上海	③淤泥质粉质黏土	0.53
		④淤泥质黏土	0.64
文献[17]	上海	③淤泥质粉质黏土	0.65
		④淤泥质黏土	0.71
文献[18]	上海	③淤泥质粉质黏土	0.64
		④淤泥质黏土	0.67
文献[19]	上海	③淤泥质粉质黏土	0.68
		④淤泥质黏土	0.72

注：除文献[8]是围压138~414 kPa的试验结果的平均值，其它均为围压100 kPa时的试验值。

### 2.2 参考模量 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的取值

表3和图1对现有一些试验的 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 与 $E_{\text{s1-2}}$ 成果进行了比例关系的统计与拟合分析，结果表明按 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/E_{\text{s1-2}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 进行统计与拟合的效果相对较好。由表3和图1可知， $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/E_{\text{s1-2}}$ 的比值约为0.8~1.1，线性拟合关系为 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}=0.87E_{\text{s1-2}}$ ，偏差在±20%范围之内； $E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 的比值约为0.9~1.4，线性拟合关系为 $E_{50}^{\text{ref}}=1.19E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ ，偏差在±20%范围之内； $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 的离散性相对较大，其取值范围约为4.5~13.6，线性拟合关系为 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=9.16E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ ，偏差范围约为±40%。

### 2.3 小应变参数 $G_0^{\text{ref}}$ 和 $\gamma_{0.7}$ 的取值

表4对一些试验得到的小应变参数进行了汇总，目前关于软土小应变参数的试验研究成果相对较少，且基本是对上海软土的研究。表中文献[20]的 $G_0^{\text{ref}}$ 值由小应变三轴试验获得，比其它由弯曲元试验或共振柱试验获得的参数值偏小。根据表4，不计文献[20]的 $G_0^{\text{ref}}$ 值，上海淤泥质黏土的 $G_0^{\text{ref}}$ 的取值范围约为28.6~45.0 MPa，淤泥质粉质黏土的 $G_0^{\text{ref}}$ 的取值范围约为37.4~52.6 MPa；其平均值分别为36.1，45.3 MPa，极差与平均值的比值分别为45.4%和33.5%，可见取值的变化范围较大，得不到较好的统计指标。

$\gamma_{0.7}$ 的试验研究成果比 $G_0^{\text{ref}}$ 更少。仅就表4的成果归纳而言，上海淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土的 $\gamma_{0.7}$ 比较接近；但不同试验研究成果之间存在较大的差异，其平均值为 $3.0 \times 10^{-4}$ ，极差与平均值的比值为46.4%。

表 3 试验得到的参考模量与压缩模量之间的比例关系统计  
Table 3 Statistics of ratio of reference modulus to compression modulus from tests

文献	地点	土体名称	比例关系					
			$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/E_{\text{s1-2}}$	$E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{s1-2}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{50}^{\text{ref}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{\text{s1-2}}$
文献[8]	泰国曼谷	软黏土	ND	0.94	ND	10.00	9.41	ND
文献[10]	深圳	③淤泥	0.94	1.42	1.33	5.64	8.02	7.52
文献[11]	杭州	③淤泥质黏土	ND	1.38	ND	3.27	4.50	ND
		⑤淤泥质黏土	ND	1.23	ND	3.88	4.77	ND
文献[12]	上海	③淤泥质粉质黏土	0.92	1.33	1.23	9.31	12.42	11.46
		④淤泥质黏土	0.86	1.05	0.91	7.80	8.21	7.09
文献[13]	上海	③淤泥质粉质黏土	1.09	1.20	1.30	11.30	13.56	14.74
		④淤泥质黏土	0.84	1.08	0.91	9.38	10.17	8.51
文献[14]	上海	③淤泥质粉质黏土	ND	1.19	ND	6.24	7.43	ND
		④淤泥质黏土	ND	1.36	ND	5.60	7.64	ND
文献[15]	上海	④淤泥质黏土	ND	ND	ND	5.59	ND	ND
		③淤泥质粉质黏土	0.76	1.21	0.92	4.07	4.92	3.75
文献[16]	上海	④淤泥质黏土	0.76	1.20	0.90	5.69	6.81	5.14
		③淤泥质粉质黏土	1.05	1.19	1.25	6.24	7.43	7.80
文献[17]	上海	④淤泥质黏土	0.81	1.36	1.11	5.60	7.64	6.22
		③淤泥质粉质黏土	0.92	1.33	1.23	9.31	12.42	11.46
文献[18]	上海	④淤泥质黏土	0.86	1.05	0.91	7.80	8.21	7.09
		③淤泥质粉质黏土	1.09	1.20	1.30	11.30	13.56	14.74
文献[19]	上海	④淤泥质黏土	0.84	1.08	0.91	9.38	10.17	8.51

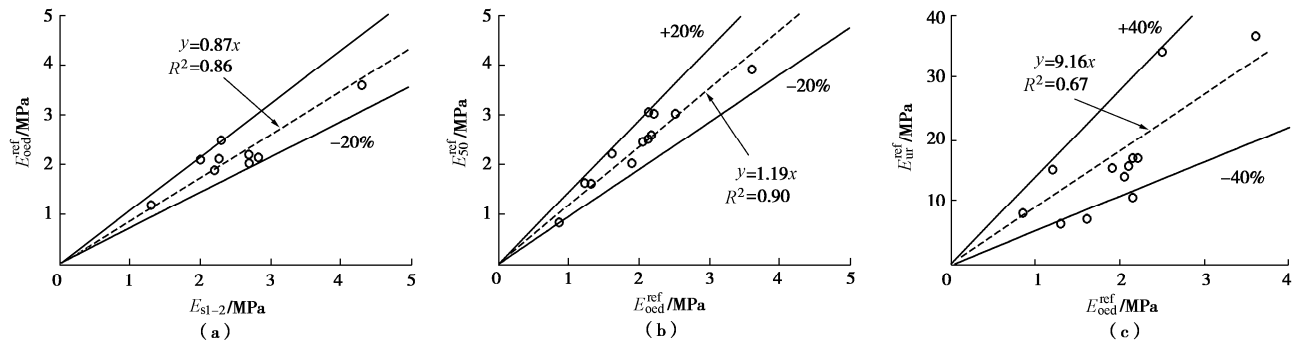


图 1 参考模量与压缩模量之间的比例关系拟合

Fig.1 Fitting of proportional relationship between reference modulus and compression modulus

总体而言，目前关于小应变参数的试验研究工作还很缺乏，现有试验成果数据的离散性较大，得不出良好的统计指标。而王浩然<sup>[18]</sup>和陆路通<sup>[16]</sup>的参数敏感性分析表明，HSS 模型中，小应变参数的变化(尤其是  $G_0^{\text{ref}}$ )对数值分析结果的影响最大。因此亟需加强相关研究，积累取值经验。

表 4 试验得到的小应变参数统计

Table 4 Statistics of small strain parameters from tests

文献	地点	土体名称	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$
文献[13]	上海	③淤泥质粉质黏土	37.40	2.50
		④淤泥质黏土	28.60	2.70
文献[14]	上海	③淤泥质粉质黏土	51.00	2.70
		④淤泥质黏土	45.00	2.70
文献[17]	上海	③淤泥质粉质黏土	41.10	3.90
		④淤泥质黏土	29.20	3.60
文献[20]	上海	④淤泥质黏土	21.52	ND
文献[21]	上海	③淤泥质粉质黏土	44.50	ND
		④淤泥质黏土	35.90	ND
文献[22]	上海	③淤泥质粉质黏土	52.60	ND
		④淤泥质黏土	42.00	ND

3 结    论

通过本文的归纳分析，可知目前关于软土 HSS 模型参数中的应力指数  $m$ 、小应变参数  $G_0^{\text{ref}}$  和  $\gamma_{0.7}$  的试验研究工作还比较匮乏，尚不能统计得出有效的取值范围或比例关系，有待进一步研究。关于破坏比  $R_f$  和参考模量  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ ，得到 3 点结论。

(1) 软土破坏比  $R_f$  的取值范围约为 0.53~0.72，与软件默认值 0.9 差异较大，应按试验结果取值。

(2) 模量比  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/E_{\text{s1-2}}$  和  $E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  的统计结果较好，无试验数据时可按  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}=0.87E_{\text{s1-2}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}=1.19E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  取值。

(3) 模量比  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  的离散性较大，暂得统计关系为  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=9.16E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ ，有待进一步积累试验数据。

总体而言，除上海外，各地区对于软土 HSS 模型参数的试验取值研究工作还开展的不多，而软土地层却又是影响工程结构变形的关键因素，为了更合理的

预测变形、优化设计、节省造价,有必要对软土的HSS模型参数取值加大研究力度。

### 参考文献:

- [1] 王海波, 徐明, 宋二祥. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 39-43, 136. (WANG Hai-bo, XU Ming, SONG Er-xiang. A small strain constitutive model based on hardening soil model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 39-43, 136. (in Chinese))
- [2] BENZ T. Small Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.
- [3] 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. (ZHOU En-ping. Application of Hardening Soil Model with Small-Strain in Deformation Analysis for Foundation Pit[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese))
- [4] 邵羽, 江杰, 陈俊羽, 等. 基于HSS模型与MCC模型的深基坑降水开挖变形分析[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊1): 231-235. (SHAO Yu, JIANG Jie, CHEN Jun-yu, et al. Deformation of deep foundation pits due to excavation and dewatering based on HSS model and Modified Cam-Clay Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 231-235. (in Chinese))
- [5] 褚峰, 李永盛, 梁发云, 等. 土体小应变条件下紧邻地铁枢纽的超深基坑变形特性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 3184-3192. (CHU Feng, LI Yong-sheng, LIANG Fa-yun, et al. Numerical analysis of deformation of deep excavation adjacent to metro considering small-strain stiffness of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3184-3192. (in Chinese))
- [6] 龚东庆, 郑渊仁. 硬化土体模型分析基坑挡土壁与地盘变形的评估[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊2): 175-178. (GONG Dongqing, ZHENG Yuan-ren. (Evaluation of analyzing excavation-induced wall deflection and ground movement using hardening soil models[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 175-178. (in Chinese))
- [7] LÜFTENEGGER R, SCHWEIGER H F, SCHARINGER F. 3D Finite Element Analysis of a Deep Excavation and Comparison with in Situ Measurements[M]// Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London: CRC Press, 2008.
- [8] SURARAK C, LIKITLERSUANG S, WANATOWSKI D, et al. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4): 682-697.
- [9] 刘畅. 考虑土体不同强度与变形参数及基坑支护空间影响的基坑支护变形与内力研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. (LIU Chang. Analysis of Deformation and Stress Due to Deep Excavation Considering Different Deformation and Strength Parameters of Soil and Space Effect of Excavation and Retaining Structure[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [10] 叶跃鸿. 地下通道施工引起下卧地铁隧道上浮规律及控制措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. (YE Yue-hong. Influence of Construction of Open-Cut Tunnelling on Uplift Displacement of the Underneath Metro Tunnel and Its Control Measures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese))
- [11] 夏云龙. 考虑小应变刚度的杭州黏土力学特性研究及工程应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. (XIA Yun-long. (Study of Mechanical Behavior of Hangzhou Clay Considering Small Strain Stiffness and Its Engineering Application[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 宗露丹, 徐中华, 翁其平, 等. 小应变本构模型在超深大基坑分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊1): 231-242. (ZONG Lu-dan, XU Zhong-hua, WENG Qi-ping, et al. Application of small strain constitutive model in the analysis of a ultra large and deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 231-242. (in Chinese))
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] 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. (ZAHNG Jiao. Small Strain Stiffness Properties of Shanghai Soft Soils and Application in Deformation Analysis of Deep Excavations[D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese))
- [18] 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 Excavations in Shanghai Soft Deposit[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))
- [19] 丁钰津. 上海软土小应变刚度特性试验研究及其在深基坑变形分析中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2014. (JING Yu-jin. Experimental Study on Small Strain Stiffness Characteristics of Shanghai Soft Soil and Its Application in Deformation Analysis of Deep Foundation Pit[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))
- [20] 杨同帅, 叶冠林, 顾琳琳. 上海软土小应变三轴试验及本构模拟[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(10): 1930 – 1935. (YANG Tong-shuai, YE Guan-lin, GU Lin-lin. Small-strain triaxial tests and constitutive modeling of Shanghai soft clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(10): 1930 – 1935. (in Chinese))
- [21] 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**(S2): 133 – 136. (in Chinese))
- [22] 张 娇, 张 雁, 李 青, 等. 上海黏性土的初始剪切模量试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(2): 337 – 343. (ZHANG Jiao, ZHANG Yan, LI Qing, et al. Laboratory research on initial shear modulus of Shanghai cohesive soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, **13**(2): 337 – 343. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)