

DOI: 10.11779/CJGE2023S10016

宁波浅层软土小应变硬化土模型参数试验研究

沈丹祎^{1,2}, 陈 赞^{1,2}, 罗敏敏^{*1,2}, 黄家晟¹

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028; 2. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310028)

摘要: 小应变硬化土模型 (HSS 模型) 因能考虑土体小应变特性, 所得数值模拟结果通常更接近于实测值, 因此在数值分析中得到广泛应用。目前, 关于软土 HSS 模型参数的研究, 主要集中在上海地区, 其它地区的研究成果较少。通过室内试验方法对宁波地区的浅层软土进行 HSS 模型参数的取值研究, 并与现有文献的统计成果进行对比, 结果表明: 大部分 HSS 模型参数的试验值处在统计范围之内, 说明宁波浅层软土与其它地区的软土有其共通性; 个别参数的试验值不在统计范围之内, 说明宁波浅层软土亦有其地区差异性。

关键词: 软土; HSS 模型; 小应变参数; 共振柱试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0114-05

作者简介: 沈丹祎(1991—), 女, 博士, 工程师, 主要从事岩土工程及地质灾害研究。E-mail: shendanyi1107@163.com。

Experimental research on parameter selection of HSS model for Ningbo shallow soft soil

SHEN Danyi^{1,2}, CHEN Yun^{1,2}, LUO Minmin^{1,2}, HUANG Jiasheng¹

(1. The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China; 2. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

Abstract: The small strain hardening soil model (HSS model) is widely used in numerical analysis because it can consider the small strain characteristics of soil, and the numerical simulation results are usually closer to the measured values. At present, the researches on the HSS model parameters of soft soil are mainly concentrated in Shanghai, and the research results in other areas are less. The HSS model parameters of shallow soft soil in Ningbo area are studied through indoor tests, and compared with the statistical results of the existing literatures. The results show that most of the HSS model parameters are within the statistical range, indicating that the Ningbo shallow soft soil has its commonness with that in other areas. The test values of some parameters are not within the statistical range, indicating that the Ningbo shallow soft soil also has its regional differences.

Key words: soft soil; HSS model; small strain parameter; resonance column test

0 引言

小应变硬化土模型 (HSS 模型) 因能较为全面的描述土体剪切硬化、压缩硬化、加卸载、小应变等方面力学特性, 以及可以模拟土体复杂的应力路径, 因此相比于莫尔-库仑模型 (M-C 模型)、修正剑桥模型 (MCC 模型) 和土体硬化模型 (HS 模型) 等常用土体本构模型, 采用 HSS 模型得到的数值分析结果通常与实测数据更为接近^[1-4]。

虽然采用 HSS 模型的数值模拟精度较高, 但参数取值也更为困难和麻烦。目前关于软土的 HSS 模型参数的取值研究, 有文献可查的, 除了奥地利^[5]、泰国曼谷^[6]、天津^[7]、深圳^[8]、杭州^[9]、阳江^[10]等地区的个别试验成果, 其它主要集中在上海地区^[11-15]。而且, 在这些仅有的研究中, 受限于试验条件, 大部分试验研究只涉及了其中的 HS 模型参数, 而没有关注小应

变参数的研究。林乔宇^[16]的参数敏感性分析结果表明, 小应变参数 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 对数值计算结果的精度影响最大, 因此有必要重视对小应变参数的试验研究。

本文通过室内试验方法, 对宁波浅层软土 (②-2 层) 进行 HSS 模型参数试验取值研究, 以便积累地区经验, 为相应的工程建设提供服务。

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: 有效黏聚力 c' (kPa), 有效内摩擦角 φ' (°), 剪胀角 ψ (°) 和破坏比 R_f (无量纲)。7 个与刚度有关的参数: 参考应力 p^{ref} (kPa), 参考应

基金项目: 浙江省建设科研项目 (2021K103)

收稿日期: 2023-07-05

*通信作者 (E-mail: zjluominmin@163.com)

力下的切线模量 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ (MPa)、割线模量 E_{50}^{ref} (MPa)、卸载再加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa) 和相应的卸载再加载泊松比 ν_{ur} (无量纲), 正常固结静止侧压力系数 K_0 (无量纲) 以及与模量应力水平相关的幂指数 m (无量纲)。2 个小应变参数: 参考应力下的小应变初始剪切模量 G_0^{ref} (MPa) 和剪切模量衰减为 0.7 倍初始剪切模量时对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$ (无量纲)。

这些参数中, 参考应力 p^{ref} 一般人为规定取为 100 kPa; 有效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 φ' 可以参考岩土工程勘察报告; 对于软土而言, 剪胀角 ψ 、静止侧压力系数 K_0 、卸载再加载泊松比 ν_{ur} 、幂指数 m 可以如表 1 进行经验取值。因此需要通过试验确定的参数主要是破坏比、各类模量和小应变参数。相应的试验方法包括标准固结试验、三轴固结排水剪切试验、三轴固结排水加卸载剪切试验和共振柱试验。具体试验过程参详文献[12]。

表 1 部分 HSS 模型参数经验取值^[12]

Table 1 Empirical values of partial HSS model parameters

参数	ψ	K_0	ν_{ur}	m
经验取值	0	$1-\sin\varphi'$	0.2	$0.5 \sim 1.0$

2 HSS 模型参数试验取值

本文试验研究的对象为宁波浅层软土(②-2 层), 其基本物理性质参数如表 2 所示。

表 2 基本物理性质参数

Table 2 Basic physical property parameters

取样	天然密度	天然含水率	初始孔隙比
地层	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	w / %	e_0
②-2	1.68	62.7	1.67

2.1 标准固结试验

图 1 所示为标准固结试验得到的竖向荷载 σ_v 与竖向应变 ε_v 的关系曲线, 拟合关系以二次多项式表示, 并指定过原点。对图 1 中拟合关系曲线进行求导, 并代入 $\sigma_v=100$ kPa 对应的竖向应变值 ε_v , 即可获得参考应力 (100 kPa) 下的切线模量 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$, 其值为 0.98 MPa。同时通过标准固结试验可得压缩模量 $E_{\text{sl-2}}=0.89$ MPa, 则土样的参考切线模量 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 与压缩模量 $E_{\text{sl-2}}$ 比值为 1.1。

2.2 三轴固结排水剪切试验

图 2 所示为三轴固结排水剪切试验得到的参考应力下的应力应变关系曲线, 由图 2 可以获得土样的 q_f 值和 E_{50}^{ref} 值。对于没有应变软化现象的曲线, 破坏值 q_f 取轴向应变 15% 对应的偏应力值, 即 $q_f=126.6$ kPa。 E_{50}^{ref} 为对应于 50% 的极限荷载 (即 $0.5q_f$) 的割线模量, 其值等于坐标原点与曲线上 $0.5q_f$ 对应点的连线的斜率, 为 1.2 MPa。

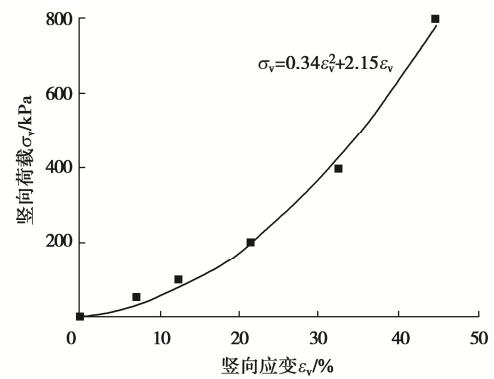


图 1 标准固结试验竖向荷载与竖向应变关系图

Fig. 1 Relationship between load and strain of consolidation tests

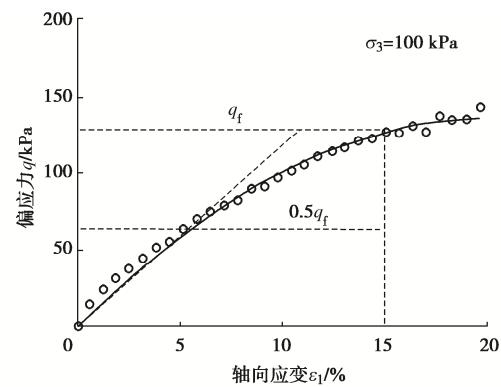


图 2 三轴固结排水剪切试验应力应变关系曲线

Fig. 2 Strain-stress curves of triaxial CD tests

由 HSS 本构模型的定义, 偏应力 q 与轴向应变 ε_1 之间的关系, 可用双曲线函数表征,

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

变换式 (1), 可得 ε_1/q 与 ε_1 的线性关系式:

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

式 (1), (2) 为理论上假定的关系, 实际应力应变 ($q-\varepsilon_1$) 曲线不能严格吻合双曲线关系; 因此变换得到的 $\varepsilon_1/q-\varepsilon_1$ 关系曲线, 也不能完全吻合线性关系, 尤其在曲线初始阶段 (ε_1 接近于 0 时) 和达到峰值之后。因此, 本文在将图 2 的应力应变关系曲线转换为图 3 的 $\varepsilon_1/q-\varepsilon_1$ 关系曲线时, 取其中线性程度较好的数据点进行拟合。综合分析后, 取 $\varepsilon_1=5\%$ 至破坏值 q_f 对应的轴向应变范围之间的数据进行线性拟合。由式(2)可知, 图 3 中拟合直线的斜率为 $1/q_a$, 即渐近值 q_a 为拟合直线的斜率的倒数, 而破坏比 R_f 定义为破坏值 q_f 与渐近值 q_a 的比值; 即 $q_a=263.1$ kPa, $R_f=0.5$ 。

2.3 三轴固结排水加卸载剪切试验

图 4 所示为三轴固结排水加卸载剪切试验得到的参考应力下的应力应变关系曲线, 可得 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=15.7$ MPa。

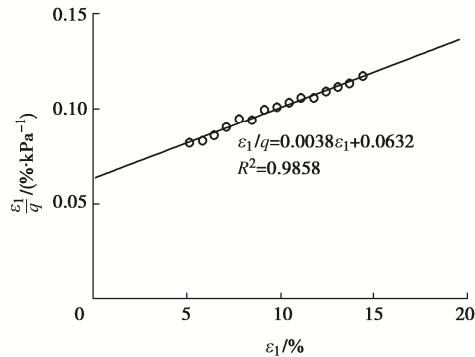
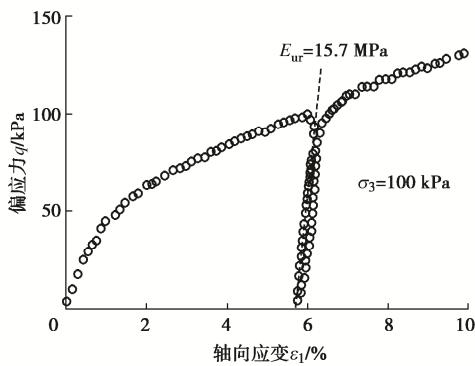
图 3 ε_1/q - ε_1 关系曲线Fig. 3 ε_1/q - ε_1 curves of each soil layer

图 4 三轴固结排水加卸载剪切试验应力应变关系曲线

Fig. 4 Strain-stress curves of triaxial CD loading-unloading-reloading tests

2.4 共振柱试验

图 5 (a) 所示为共振柱试验得到的参考应力下的动剪切模量与剪应变的关系曲线。图 5 (b) 所示为按 Hardin 公式拟合得到的 $1/G$ - γ 关系曲线：

$$1/G = a + b\gamma \quad (3)$$

式中： G 为土的动剪切模量； γ 为剪应变； a ， b 为常数，可基于试验数据经回归统计分析确定。

当 $\gamma = 0$ 时，对应的 G 即为初始剪切模量，一般用 G_0 表示，

$$G_0 = 1/a \quad (4)$$

式中： G_0 为土的初始动剪切模量。

图 5 (b) 数据在参考应力下获得，按式 (4) 计算得到的 G_0 即为 G_0^{ref} ，为 33.8 MPa。

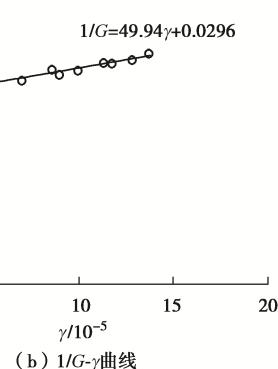
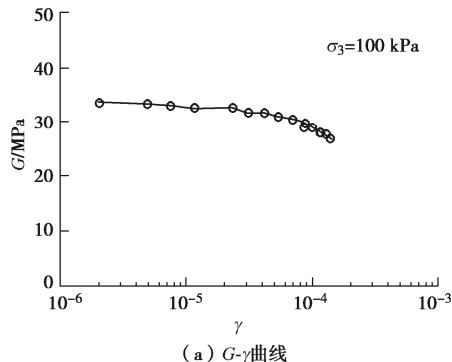


图 5 动剪切模量与剪应变的关系曲线

Fig. 5 Curves of dynamic shear modulus and strain

图 6 所示为共振柱试验得到的参考应力下的归一化剪切模量衰减曲线。即按 DaVidenkoV 模型对各类土的 G/G_0 - γ 关系曲线进行拟合，DaVidenkoV 模型的函数关系式：

$$G = G_0 [1 - H(\gamma)] \quad (5)$$

$$H(\gamma) = \left[\frac{(\gamma/\gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \right]^A \quad (6)$$

式中： A ， B ， γ_0 为拟合参数。

由 DaVidenkoV 模型可以绘制出从 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ 剪应变幅值范围内的 G/G_0 - γ 关系曲线，其中归一化剪切模量 (G/G_0) 为 0.7 时对应的剪应变幅值即为 $\gamma_{0.7}$ ，其值为 2.78×10^{-4} 。

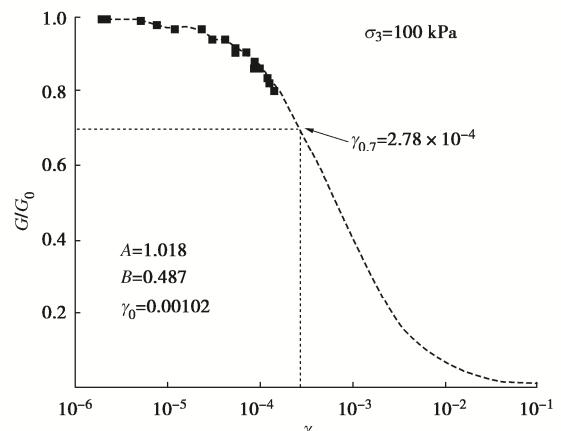


图 6 归一化剪切模量衰减曲线

Fig. 6 Normalized shear modulus reduction curve

3 试验结果分析

综上，宁波浅层软土 (②-2 层) 的主要 HSS 模型参数的试验值及相应模量比例关系汇总如表 3 所示。

文献[17]统计了现有文献中关于各地软土的 HSS 模型参数的试验成果，其中破坏比 R_f 的取值范围为 0.53~0.72，本文试验值为 0.5，略小于统计范围的低

表 3 HSS 模型参数及参考模量比例关系汇总

Table 3 Summary of HSS model parameters and proportional relation of reference modulus

土层编号	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	R_f	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/E_{s1-2}$	$E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}$	$G_0^{\text{ref}}/E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$
②-2	0.98	1.2	15.7	0.5	33.8	2.78	1.10	1.22	16.02	2.15

值; 小应变参数 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 的取值分别为 $21.5\sim 52.6$ MPa 和 $2.5\times 10^{-4}\sim 3.9\times 10^{-4}$, 本文试验值分别为 33.8 MPa 和 2.78×10^{-4} , 处在统计范围内。文献[17]统计得到的参考模量比例关系中, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/E_{s1-2}$ 的比值为 $0.8\sim 1.1$, 线性拟合关系为 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}=0.87 E_{s1-2}$, 本文试验比值为 1.1, 与统计范围的高值一致; $E_{50}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 的比值为 $0.9\sim 1.4$, 线性拟合关系为 $E_{50}^{\text{ref}}=1.19 E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$, 本文试验比值为 1.22, 处在统计范围内, 与线性拟合的比例值 1.19 接近; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 的比值为 $4.5\sim 13.6$, 线性拟合关系为 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=9.16 E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$, 本文试验比值为 16.02, 比统计范围的高值要大约 18%。

本文试验结果与文献统计结果的偏差, 一方面可能来源于土性的地区差异性, 另一方面由于取样的随机性和离散性, 同时也包含了试验操作和参数取值方法等带来的系统误差和人为误差。

4 结 论

本文通过室内试验方法, 获取了宁波浅层软土的主要 HSS 模型参数, 并与现有文献资料的统计结果进行对比, 得到 2 点结论。

(1) 宁波浅层软土的 HSS 模型参数基本处在现有文献的统计范围之内, 但也有个别参数略低或高于统计值, 说明宁波浅层软土与其它地区的软土有其共通性, 也有其地区特殊性。

(2) 鉴于岩土参数取值的地区差异性和经验性, 以及试验结果的离散性与误差性, 有必要进一步广泛开展软土 HSS 模型参数的取值研究, 积累更多经验。

参考文献

- [1] BENZ T. Small Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.
- [2] 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 Yongsheng, LIANG Fayun, 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))
- [3] 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 Junyu, 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))
- [4] 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 Yuanren. 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))
- [5] LÜFTENEGGER R, SCHWEIGER H, 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: Taylor & Francis Group, 2009.
- [6] 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.
- [7] 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))
- [8] 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 Yuehong. 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))
- [9] 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 Yunlong. Study of Mechanical Behavior of Hangzhou Clay Considering Small Strain Stiffness and Its Engineering Application[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese))

- [10] 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**(增刊 2): 41-44. (GU Xiaoqiang, LIU Wenqian, CHEN Xiyuan, et al. Experimental study on HSS model parameters for marine soft soils in Yangjiang, Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 41-44. (in Chinese))
- [11] 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 Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. 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))
- [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 Fayun, 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, **39**(2): 269-278. (in Chinese))
- [13] 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 Ludan, XU Zhonghua, WENG Qipeng, 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))
- [14] HUANG X, SCHWEIGER H F, HUANG H W. Influence of deep excavations on nearby existing tunnels[J]. International Journal of Geomechanics, 2013, **13**(2): 170-180.
- [15] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 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, 2021, **42**(3): 833-845. (GU Xiaoqiang, WU Ruituo, LIANG Fayun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(3): 833-845. (in Chinese))
- [16] 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. (LIN Qiaoyu. Study and Engineering Application of HSS Model Parameters of Xiamen Granite Residual Soil[D]. Quanzhou: Huqiao University, 2019. (in Chinese))
- [17] 陈 赘, 罗敏敏, 夏能武, 等. 软土 HSS 模型参数现有试验成果统计分析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 2): 197-201. (CHEN Yun, LUO Minmin, XIA Nengwu, et al. Statistical analysis of existing test results of HSS model parameters for soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 197-201. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)

(上接 105 页)

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 3250-3256. (in Chinese))
- [11] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Test Methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [12] 王 祥. 非饱和粉质黏土静止土压力和压缩特性的演化规律及机理[D]. 北京: 北京交通大学, 2022. (WANG Xiang. Evolution Law and Mechanism of Static Earth Pressure and Compression Characteristics of Unsaturated Silty Clay[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese))

- [13] 赵成刚, 李 舰, 刘 艳, 等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1825-1831. (ZHAO Chenggang, LI Jian, LIU Yan, et al. Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1825-1831. (in Chinese))
- [14] 金松丽, 赵卫全, 张爱军, 等. 原状黄土增湿过程中的静止土压力系数变化规律试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, **49**(5): 63-70. (JIN Songli, ZHAO Weiquan, ZHANG Aijun, et al. Experimental study of variation rules of the coefficient of earth pressure at rest during wetting for original loess[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2017, **49**(5): 63-70. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)