

DOI: 10.11779/CJGE2023S10046

# 非饱和粉质黏土浸湿静止土压力增量计算模型

王 祥<sup>1,2,3</sup>, 李 旭<sup>2</sup>, 秦宏楠<sup>\*1,3</sup>, 刘 艳<sup>2</sup>, 刘 丽<sup>2</sup>

(1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 2. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044;

3. 中安国泰(北京)科技发展有限公司, 北京 100012)

**摘要:** 在基坑工程和重力式挡墙工程中, 非饱和土体在浸湿条件下会产生显著的侧向土压力增量, 严重时还会造成支挡结构的破坏。为定量评估浸湿作用对非饱和土侧向土压力的影响, 通过室内试验实测浸湿饱和作用下, 不同初始饱和度的试样, 在不同上覆荷载条件下的侧向土压力增量; 并建立相应的静止土压力增量计算模型。研究结果表明: ①试样湿化饱和后, 其静止土压力系数  $K_0$  值大小一致, 与初始饱和度和上覆荷载无关; ②湿化前的初始饱和度越低, 湿化饱和后的静止土压力增量越大; ③湿化饱和后的静止土压力增量, 随湿化时的上覆荷载增加而变大; ④基于试验数据和机理分析, 得到了湿化条件下考虑上覆荷载与初始饱和度的双线性土压力增量计算模型; 将该计算模型应用于某支挡工程, 发现湿化后的土压力可达初始土压力 1.8 倍以上, 在设计时必须予以重视。

**关键词:** 非饱和土; 浸湿条件; 静止土压力; 支挡结构; 膨胀力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0102-05

作者简介: 王 祥(1998—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: wxiang1998666@163.com。

## Model for increment of static earth pressure of unsaturated silty clay under wetting conditions

WANG Xiang<sup>1,2,3</sup>, LI Xu<sup>2</sup>, QIN Hongnan<sup>1,3</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, LIU Li<sup>2</sup>

(1. China Academy of Safety Science & Technology, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of

Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Cathay Safety Technology Co., Ltd., Beijing 100012, China)

**Abstract:** In excavation and retaining wall engineering, wetting of unsaturated soil can result in significant increment of lateral soil pressure and even structural damage. To assess this effect, the tests with different initial saturation degrees and varying overburden loads are conducted, and the relevant model is established. The results show that: (1) After wetting saturation, the static soil pressure coefficient  $K_0$  remains constant and is not affected by the initial saturation degree or overburden load. (2) The samples with lower initial saturation degrees exhibit greater increment in static soil pressure after wetting saturation. (3) The increment of the static soil pressure after wetting saturation increases with higher overburden loads. (4) Based on the experimental data and mechanical analysis, a bilinear model considering the overburden load and initial saturation degree under wetting conditions is established. The model shows that the wetting soil pressure can exceed the initial soil pressure by over 1.8 times and emphasizes the need to consider wetting in design.

**Key words:** unsaturated soil; wetting condition; static earth pressure; retaining structure; expansion force

## 0 引言

非饱和状态下的土体具有很高的强度<sup>[1]</sup>, 然而遇水湿化强度会迅速降低, 局部可能达到饱和, 该状态下的土压力值与非饱和条件下的值差别很大。多名学者统计显示大部分基坑事故都与水有关, 此外, 2019年6月8日南宁绿地中心基坑塌陷也是因为场地管道爆裂, 非饱和土遇水湿化, 作用在支护结构的土压力增大<sup>[2]</sup>。因此, 亟需定量评估浸湿作用对非饱和土侧向土压力的影响, 提出计算方法, 减少此类事故发生。

目前, 对非饱和土压力研究获得了很大进展, 但现有研究多从理论出发进行公式推导, 1961年Coleman等<sup>[3]</sup>提出双变量理论, Fredlund便得到净应力与吸力的双变量理论, 之后得到了扩展的朗肯土压力理论, 但是在平时的设计和研究中, 仍然采用朗肯土

基金项目: 国家自然科学基金项目(52025094, 51979002); 河南省交通运输厅科技项目(2020J-2-1)

收稿日期: 2023-07-05

\*通信作者(E-mail: qinhn@chinaspf.ac.cn)

压力理论<sup>[4]</sup>计算非饱和土压力。姚攀峰等<sup>[5]</sup>提出了与扩展型朗肯土压力不同的计算方法广义朗肯土压力计算方法, 陈铁林等<sup>[6]</sup>解决水位变化及降水条件下的土压力计算问题, 根据  $K_0$  定义推导  $K_0$  求解式。任传健等<sup>[7]</sup>结合 Fredlund 非饱和土抗剪切与强化准则和经典的朗肯土压计算公式, 得出考虑降水变化的土压计算公式。汪丁建等<sup>[8]</sup>在饱和土朗肯土压力分析基础上, 推导出降雨条件下非饱和朗肯土压力。王晓亮等<sup>[9]</sup>将降雨和蒸发对基质吸力的影响引入到非饱和土抗剪强度公式中, 得到  $K_0$  随降雨定性变化, 但没有定量结果。

已有的大量研究充分表明水对静止土压力的影响不可忽略, 但已有的计算公式复杂不实用, 结果有待验证。导致现有非饱和土体仍采用饱和土理论的计算结果加安全储备来设计计算<sup>[10]</sup>, 安全系数是否足够不明确。为了使湿化条件下静止土压力增量的演化规律更明确, 本文通过室内试验确定了其相关的变化规律、建立相应的计算模型, 减小对安全施工的威胁。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 土料特性

取北京延庆地区原状粉质黏土进行烘干、碾碎、过 0.25 mm 筛备用, 进行基本物理性质测试, 依据《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》<sup>[11]</sup>, 结果见表 1。

表 1 土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil

最大干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最优含水率/%	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_P$ /%	塑性指数 $I_P$	土粒相对密度 $G_s$
1.80	16.5	30.7	15.2	15.5	2.73

### 1.2 试验方案

选择干密度 1.53  $\text{g}/\text{cm}^3$  (压实度 0.85)、高度 40 mm 的标准环刀试样开展  $K_0$  压缩试验, 设 5 个不同的初始饱和度与 4 个不同的上覆荷载, 具体方案见表 2。

表 2 浸水条件下非饱和粉质黏土试验方案

Table 2 Test schemes under water immersion conditions

上覆荷载/kPa	加载过程	初始饱和度
100/200/300/400	100(200/300/400)kPa → 湿化 → 逐级加载至 1600kPa	0.2/0.3/0.4/0.5/0.6

### 1.3 试验过程

(1) 仪器标定。本文采用 JCY 型  $K_0$  固结仪来完成  $K_0$  压缩试验, 在气囊中充入与试样等体积的水, 利用水各向等压特性标定仪器在竖向压力下对土压力的测量, 根据试验数据拟合得到两仪器的标定系数<sup>[12]</sup>。

(2) 制样并养护得到不同初始含水率试样。用饱和再风干的土样模拟经过了干湿循环的天然非饱和土, 通过 7 d 密闭养护保证孔隙水分布均匀, 见图 1。



图 1 准备不同初始含水率的试样

Fig. 1 Preparation of samples with different initial moisture contents

(3) 加上覆荷载待稳定后进行湿化饱和, 湿化稳定后养护 7 d, 再完成后续设定加载至试验结束。

(4) 卸压并整理仪器装置, 将不同初始饱和度湿化前与湿化压缩后试样进行对比, 如图 2 所示。

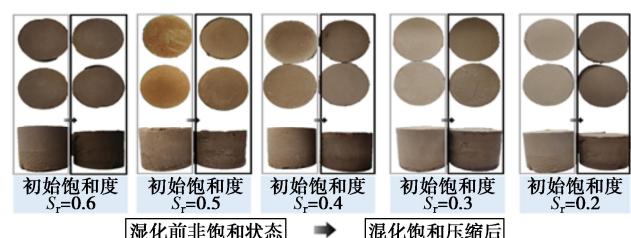


图 2 试验前后对比图

Fig. 2 Comparison of soil samples before and after tests

## 2 试验结果及规律

$K_0$  固结仪连接压力传感器采集数据, 得到侧压力随时间变化关系<sup>[12]</sup>, 从而得到粉质黏土在 5 个不同初始饱和度  $S_r$  和 4 个不同上覆荷载  $P$  作用下发生湿化与湿化后继续加载的水平静止土压力-竖向压力的关系曲线, 见图 3, 因篇幅关系只展示  $S_r=0.2$  结果<sup>[12]</sup>。对于非饱和土一般采用水土合算计算土压力, 此时侧压力传感器测量得到的相当于水土合算下的土压力。

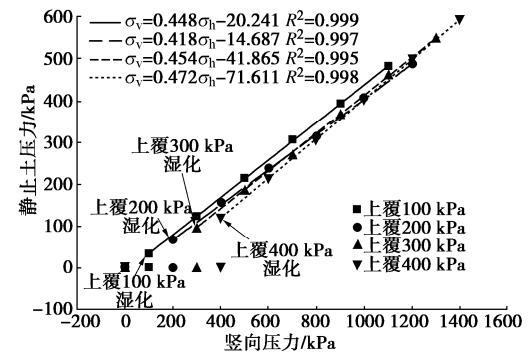


图 3 静止土压力随竖向压力变化关系 ( $S_r=0.2$ )

Fig. 3 Variation of static earth pressure with vertical pressure ( $S_r=0.2$ )

湿化静止土压力增量  $\Delta\sigma_h$  统计见表 3, 计算式为

$$\Delta\sigma_h = \sigma_w - \sigma_d \quad (1)$$

式中:  $\sigma_d$  为上覆荷载作用下湿化前静止土压力大小;  $\sigma_w$  湿化饱和后静止土压力大小。

表 3 湿化静止土压力增量计算值统计

Table 3 Statistics of calculated increment static earth pressure

初始饱和度 $S_r$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
100 kPa 下增量值	35.14	25.10	17.41	12.5	3.53
200 kPa 下增量值	68.95	48.38	33.32	22.97	6.31
300 kPa 下增量值	95.01	68.95	47.86	29.99	8.98
400 kPa 下增量值	118.02	90.00	60.99	35.97	10.11

### 3 静止土压力增量计算模型

#### 3.1 湿化过程中静止土压力演变规律

不同初始饱和度湿化过程的增湿水平不同, 可使用湿化前初始饱和度表示增湿水平, 即:  $S_r=1$  的增湿水平为 0,  $S_r$  越小增湿水平越大。

由表 3 可以看到湿化时静止土压力都有不同程度的增大, 且初始饱和度  $S_r$  越低或上覆荷载  $P$  越大, 静止土压力增量越大。图 3 数据显示, 湿化后继续加载呈线性且斜率基本一致, 表明  $K_0$  值大小近似一致,  $S_r$  与  $P$  的不同不会影响湿化饱和后  $K_0$  大小。可能原因是: 静止土压力系数主要由有效内摩擦角决定, 饱和后有效内摩擦角接近, 因此湿化饱和后  $K_0$  近似一致。

土体强度理论认为土颗粒间存在综合作用, 包括吸力、胶结作用、德华力以及化学键等<sup>[4]</sup>, 非饱和土研究学者<sup>[13]</sup>一般认为土骨架受压为保证完整性依靠两部分力平衡: 一是土颗粒间的基质吸力, 取决于土体的含水量; 另外是土颗粒间的胶结力, 取决于土体内部的黏粒微量物质。静止土压力增量是由颗粒间胶结作用的减弱和基质吸力减小两方面原因引起的<sup>[14]</sup>。为推导计算模型引出中间变量  $0.65-S_r$ , 如图 4 所示, 初始饱和度越小, 湿化导致基质吸力减少量就越大, 静止土压力增量就越大; 湿化饱和后上覆荷载越大, 对土体胶结力破坏就越大, 如图 5 所示, 湿化饱和后的静止土压力增量, 随上覆荷载增加而变大。

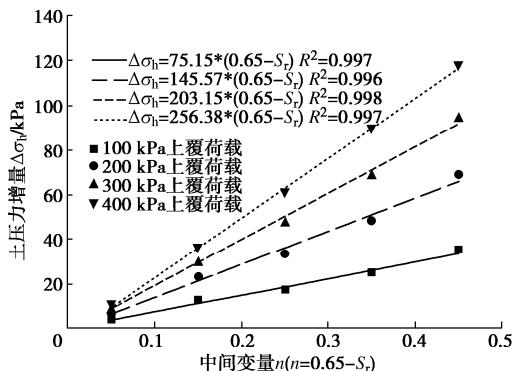


图 4 静止土压力增量与初始饱和度关系

Fig. 4 Variation of increment of static earth pressure increment with initial saturation

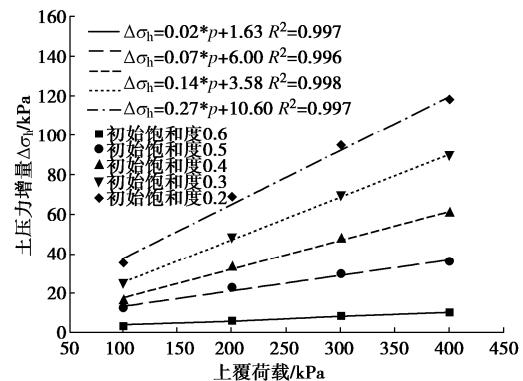


图 5 静止土压力增量与上覆荷载关系

Fig. 5 Variation of increment of static earth pressure with load

#### 3.2 湿化过程中静止土压力增量计算模型

土压力增量  $\Delta\sigma_h$  与上覆荷载  $P$ , 初始饱和度  $S_r$  都呈线性关系, 双线性模型见式 (2),  $P$  和  $S_r$  确定时有一次函数式 (3), (4)。当变量  $n = (S_r + b_1) = 0.65 - S_r$  时, 土压力增量  $\Delta\sigma_h$  与  $n$  成正比例,  $k_1, k_2, m$  为斜率, 见图 4。

$$\Delta\sigma_h = k_1 n \times k_2 m \quad , \quad (2)$$

$$k_1 n = k_1 (S_r + b_1) \quad , \quad (3)$$

$$k_2 m = k_2 (P + b_2) \quad . \quad (4)$$

$P$  与其对应的  $k_1, k_2, m$  拟合得  $k_1 k_2 m = 0.60P + 19.76$ , 再将  $n$  代入式 (2) 中, 得到式 (5)。当初始饱和度  $S_r$  较大接近饱和时, 静止土压力增量为 0, 观察式 (5), 当饱和度  $S_r > 0.65$  时, 湿化不会引起静止土压力增加。

$$\Delta\sigma_h = \begin{cases} (0.60P + 19.76)(0.65 - S_r) & (S_r \leq 0.65) \\ 0 & (S_r > 0.65) \end{cases} \quad . \quad (5)$$

为了更直观的表现增量的含义, 将  $\Delta S_r = 1 - S_r$  代入式 (5), 得到最终的增量表达式如下:

$$\Delta\sigma_h = \begin{cases} (0.60P + 19.76)(\Delta S_r - 0.35) & (\Delta S_r \geq 0.35) \\ 0 & (\Delta S_r < 0.35) \end{cases} \quad . \quad (6)$$

### 4 挡土墙静止土压力计算案例分析

以延庆某深基坑为背景, 结合勘察数据, 对上文的模型进行试算。该基坑开挖深度 23 m, 上表面有 8 kPa 的均布荷载, 施工阶段饱和度 0.25, 已勘测到自然地面以下 34 m 地层特性, 土体基本为粉质黏土。

根据划分土层的重度与厚度计算出土层下表面荷载, 并根据  $K_0$  算出湿化前静止土压力  $\sigma_{hi}$ ,  $K_0$  按经验值取 0.3。根据式 (6) 算出静止土压力增量  $\Delta\sigma_{hi}$ , 接着计算出湿化后静止土压力  $\sigma_{wi}$  和  $\sigma_{wi}/\sigma_{hi}$  比值, 计算值随深度变化绘制在图 6 中, 发现比值随深度增大而减小, 但始终大于 1.8, 说明湿化对静止土压力影响较

大。

由于本文采用重塑土进行试验, 和天然土体湿化时侧压力变化结果不同, 特别是黄土等结构性非饱和土, 其湿化可能发生湿陷等行为, 导致土压力演化较为复杂。本文研究结果仅适用于非结构性的非饱和土。

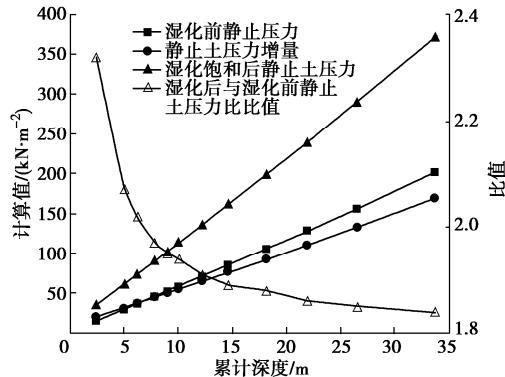


图 6 不同累计深度处静止土压力与其相关计算值关系

Fig. 6 Static earth pressures and their correlation with depth

## 5 结 论

本文通过开展室内试验, 定量评估浸湿作用对非饱和土侧向土压力的影响, 实测浸湿饱和作用下静止土压力增量的变化规律, 建立相应的计算模型, 通过应用发现设计时必须重视湿化的影响, 并得到以下 3 点结论。

(1) 湿化饱和后, 土体的静止土压力系数  $K_0$  值与初始饱和度、上覆荷载无关。推测土体静止土压力系数  $K_0$  值主要由有效内摩擦角决定, 饱和后有效内摩擦角基本一致, 故  $K_0$  值大小近似一致。

(2) 湿化前的初始饱和度越低, 湿化饱和后的静止土压力增量越大; 且湿化饱和后的静止土压力增量, 随湿化时的上覆荷载增加而变大。

(3) 基于试验数据和机理分析, 得到了湿化条件下考虑上覆荷载与初始饱和度的双线性土压力增量计算模型; 将其应用于某支挡工程, 发现湿化后的土压力可达初始土压力 1.8 倍以上, 设计时必须予以重视。

## 参考文献:

- [1] 赵煜鑫, 刘 艳, 李 旭, 等. 非饱和黏性土抗剪强度模型对比分析及参数确定方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 1): 126-131. (ZHAO Yuxin, LIU Yan, LI Xu, et al. Comparative analysis and parameter determination method of shear strength models for unsaturated clayey soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 126-131 (in Chinese))
- [2] LU N, LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 韦昌富, 侯 龙, 简文星, 译. 北京: 高等教育出版社, 2012. (LU N, LIKOS W J. Unsaturated Soil Mechanics[M]. WEI Changfu, HOU Long, JIAN Wenxing, trans. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))

[3] COLEMAN J, RUSSAMK D. Some uses of stress and strain invariants in the thermodynamic study of soils[J]. Géotechnique, 1961, 11(1): 29-36.

[4] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guangxin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))

[5] 姚攀峰, 张 明, 戴 荣, 等. 非饱和土的广义朗肯土压力[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 285-291. (YAO Panfeng, ZHANG Ming, DAI Rong, et al. Generic Rankine theory for unsaturated soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3): 285-291. (in Chinese))

[6] 陈铁林, 陈生水, 顾行文, 等. 折减吸力在膨胀土静止土压力计算中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 237-242. (CHEN Tielin, CHEN Shengshui, GU Xingwen, et al. Application of reduced suction in calculation of soil earth pressure at rest for expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 237-242. (in Chinese))

[7] 任传健, 贾洪彪. 非饱和土特性对朗肯土压力的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(25): 78-82. (REN Chuanjian, JIA Hongbiao. The influence of unsaturated soil's characteristics on Rankine earth pressure[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(25): 78-82. (in Chinese))

[8] 汪丁建, 童龙云, 邱岳峰. 降雨入渗条件下非饱和土朗肯土压力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3192-3196. (WANG Dingjian, TONG Longyun, QIU Yuefeng. Rankine's earth pressure analysis of unsaturated soil under condition of rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3192-3196. (in Chinese))

[9] 王晓亮, 李光范, 杜 娟, 等. 降雨和蒸发对非饱和土土压力的影响[J]. 应用力学学报, 2014, 31(3): 423-427, 493. (WANG Xiaoliang, LI Guangfan, DU Juan, et al. Influence of rainfall and evaporation on unsaturated soil pressure[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(3): 423-427, 493. (in Chinese))

[10] 姚攀峰. 基于安全系数比的非饱和土边坡极限平衡法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3250-3256. (YAO Panfeng. Limit equilibrium method based on ratio of factor of safety for slope stability of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(增刊 1): 3250-3256. (in Chinese))

(下转 118 页)

- [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)