

DOI: 10.11779/CJGE2024S20029

软土深层调蓄排水管道长期运营累积沉降规律研究

朱麒麟^{1,2}, 周维祥³, 徐柯锋⁴, 徐震³, 朱长根⁴, 吕玺琳^{*1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 4. 上海宝冶集团有限公司, 上海 200941)

摘要: 深层调蓄管道因长期承受充放水循环荷载导致运营期产生较大沉降, 并可能进一步引起管道泄漏、损坏等, 从而影响深隧调蓄系统正常运营与环境安全。针对长期充放水循环荷载导致的软土地层管道沉降问题, 采用拟静力有限元模拟得到管道满流荷载导致的地基应力分布, 并基于分层总和法与软土塑性应变、孔压随加载循环累积的经验公式, 提出了管道下方软土地基长期沉降的计算方法。将该法用于上海苏州河段深层调蓄管道长期沉降预测, 分析得到了管底地基未加固条件下管道-地基系统长期沉降演化规律。结果表明因充放水循环荷载具有低频重载的特点, 地基沉降的绝大部分由于软土的循环累积塑性应变导致, 而由孔压消散引起的固结沉降几乎可以忽略。研究成果可为软土地区深隧排水系统设计和运维安全保障提供有益参考。

关键词: 深层; 排水管道; 长期沉降; 循环荷载; 经验模型

中图分类号: TU475 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0231-05

作者简介: 朱麒麟(2000—), 女, 硕士, 主要从事软土地区地下工程的研究工作。E-mail: kylin_0702@163.com。

Laws of long-term operation accumulation settlement of deep drainage pipelines in soft soil areas

ZHU Qixuan^{1,2}, ZHOU Weixiang³, XU Kefeng⁴, XU Zhen³, ZHU Changgen⁴, LÜ Xilin^{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; 3. Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai 200941, China)

Abstract: The deep drainage pipelines experience significant settlement during operation due to the long-term cyclic loading from water filling and discharge, potentially leading to pipe leakage and damage, consequently affecting the normal operation of the deep tunnel drainage system and environmental safety. To address the settlement issue of pipelines in soft soils caused by the long-term cyclic loading from water filling and discharge, a quasi-static finite element method is employed to simulate the stress distribution in the foundation induced by full-flow loads on the pipeline. Based on the layered summation method and empirical formulas for plastic strain and pore pressure accumulation with loading cycles in soft soils, a method for calculating the long-term settlement of the soft soil foundation beneath the pipeline is proposed. This method is used to predict the long-term settlement of the deep pipelines in the Suzhou River section of Shanghai, and the evolution laws of settlement in the pipeline-foundation system under untreated conditions of the bottom foundation are analyzed. The results indicate that due to the low-frequency heavy loading characteristics of water filling and discharge cycles, the settlement induced by the cumulative plastic strain in the foundation soils accounts for the vast majority. In contrast, the consolidation settlement caused by pore pressure dissipation can be almost ignored. The research findings can provide references for the design and operation safety assurance of deep tunnel drainage systems in soft soil areas.

Key words: deep stratum; drainage pipeline; long-term settlement; cyclic loading; empirical model

0 引言

城市内涝是城市治理一直以来关注的问题。海绵城市作为新兴的城市雨洪管理概念正蓬勃发展, 为解决城市内涝问题提供了创新思路^[1]。深隧排水系统作为一种灰色海绵技术, 已在国外得到多年的实践应用^[2]。

其常埋设于地下 30~60 m, 具有较大调蓄空间和排水能力, 可有效解决城市土地资源利用矛盾, 提升水污

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”项目(23692106500)

收稿日期: 2024-06-21

*通信作者(E-mail: xilinlu@tongji.edu.cn)

染控制能力与城市雨洪管理能力。

目前国内多个城市正在积极开展深隧排水工程建设和规划^[3]。深层调蓄隧道及竖井汛期充放水的频率一般为每年数十次,软土地区调蓄隧道因长期承受周期性水荷载形成累积沉降,进而有可能导致隧道变形过大甚至破裂,对城市内部正常供、排水功能及水环境治理造成严重影响。因此,针对深隧排水管道运营期沉降进行预测有助于管道安全运维,保障城市深隧排水系统正常运行。有关循环荷载作用下饱和软黏土累积变形研究方面已取得较大进展^[4-12],提出的相关方法已成功应用于地铁隧道和软土路基长期沉降预测。由于深隧排水系统研究尚处于起步阶段,关于其长期运营及维护方面研究仍较缺乏,目前鲜有针对长期充放水循环荷载下深隧调蓄管道的沉降预测研究。

针对当前有关软土地区深部排水管道长期运营沉降分析方面存在的不足,基于以往长期循环荷载作用下软土地基沉降预测模型,结合深层调蓄管道工程充放水循环荷载特点,采用拟静力有限元计算与分层总和法相结合的方法,以上海市深层排水调蓄管道系统工程为背景,探讨了软土深层排水管道长期运营沉降演化规律。

1 荷载下饱和软黏土累积变形特性

针对循环荷载作用下饱和软黏土地基长期变形问题,虽有大量土体本构模型可用,但由于计算量大而难以工程应用。相比而言,基于经验拟合方法可建立土体循环荷载作用下的残余变形与其固结特性、静态应力状态及循环次数间的关系,便于实际工程中地基长期沉降的计算分析。

针对循环荷载引起的长期沉降,可分为不排水循环荷载作用下土体中累积变形引起的沉降及动荷载引起孔压消散产生的固结沉降两部分^[4]。基于经验公式预测方法只需计算第一次循环塑性应变与孔压,将循环加载动应力大小和应力历史等影响因素包含在第一次循环塑性应变与孔压中。最早 Monishmith 等^[5]提出了指数模型,直接建立了累积塑性应变与循环次数间的关系,随后有不同学者对经验拟合计算模型与公式进行优化,将动偏应力和静强度参数、初始静偏应力等因素影响考虑在内^[6-8]。结合分层总和法, Huang 等^[9]和姚兆明等^[10]提出的计算公式得到较广泛的认可及应用:

$$Q = a \left(\frac{q_d}{q_{ult}} \right)^n \left(\frac{p_0}{p_a} \right)^c N^b \quad (1)$$

式中: Q 为累积塑性应变或累积孔压; q_d 为第一次循环荷载作用后地基产生的动偏应力; q_{ult} 为不排水抗剪强度, p_0 为平均固结应力; N 为荷载循环次数; a , n , c , b 均为通过试验拟合得到的参数,其中 a , n 反

映动偏应力对累积沉降的影响, c 与 b 可分别反映围压与荷载循环次数对运营期间沉降的影响; 大气压力 $p_a = 101.3 \text{ kPa}$ 。

2 应力状态计算及参数选取

2.1 循环荷载下地基动偏应力计算

依托上海市苏州河段深层排水调蓄系统某区间建立分析模型,苏州河段深层排水调蓄工程总长约 15 km,包含 8 个竖井,其中一个区间隧道及竖井的示意如图 1 所示。管道内径为 10 m,埋深为 40 m,管道衬砌厚度为 0.65 m。由于隧道轴向长度远大于径向尺寸,且横截面和地基条件沿轴向方向变化较小,因而可将问题简化为平面应变问题进行分析。由于充放水循环荷载频率极低,故可近似忽略深层管道中的水流效应,将其转化为多次重复作用的静分布力,即采用拟静力方法对动力问题进行简化分析^[11]。式(1)中第一次循环荷载作用后地基中的静偏应力和动偏应力,可通过有限元方法计算。考虑隧道两侧土体范围为 5 倍隧道直径,模拟土体宽度为 110 m,建立的分析模型如图 2 所示。

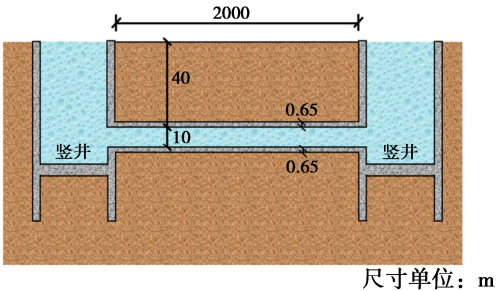


图 1 管道及竖井示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pipelines and shafts

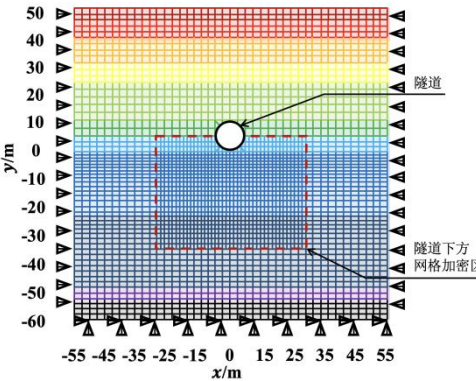


图 2 地层应力分析有限元模型

Fig. 2 FE model for stress distribution analysis of soil strata

由于隧道埋深较大,为充分考虑隧道下方较大范围内的沉降,竖向宽度取 11 倍洞径,即 110 m。左右两侧土体边界条件限制水平方向变形,底部固定。地下水位于地表,土体采用弹性模型计算,代表断面土层的分布及深隧管道位置如图 3 所示,各土层相关参数根据工程勘察报告选取,具体数值见表 1。

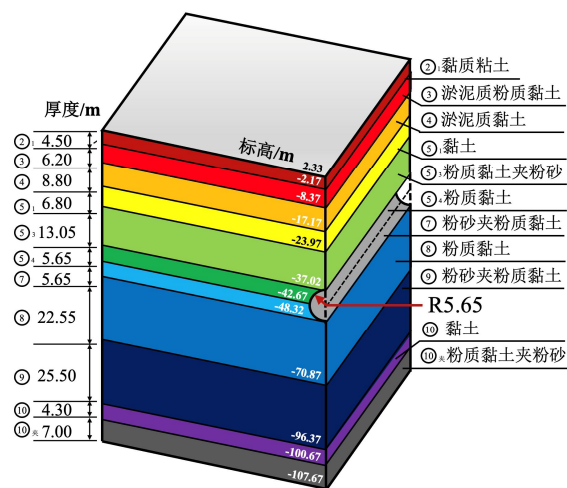


图 3 典型土层分布

Fig. 3 Distribution of soil strata in a typical section

管道上方衬砌内表面距地表 40 m, 隧道半径为 5.65 m (衬砌厚 0.65 m), 衬砌材料为 C60 混凝土。通过有限元模拟得到隧道重力场分布, 并提取管道下方中轴线不同深度处的应力分量作为初始应力状态, 由此可计算得初始静偏应力 q_s 。管道及竖井汛期充水及之后排放水, 每次按管道满流考虑, 水荷载经计算可得 76.969 kPa, 将其简化为均布荷载作用在管道下部直径范围的地基土。为计算第一次充放水循环荷载作用后地基的应力状态, 在施加荷载后, 提取管道下方中轴线不同深度处应力分量并计算此时的偏应力大小, 增加数值即为一次汛期充放水循环荷载引起的基础动偏应力 q_d 。

计算得隧道正下方地基土中动偏应力分布如图 4 所示, 其随深度急剧减小。曲线在 22 m 左右深度出现转折, 分析可知该深度处为第 8、9 层土的界面, 两层土压缩模量相差较大, 动偏应力从较软的第 8 层土传入较硬的第 9 层土时发生了应力集中。综合来看, 0~22 m 深范围内动偏应力随深度增大显著减小, 在

图 4 中曲线呈现较大斜率, 考虑到 22 m 处有较大土层性质差别等影响因素, 初步认为充放水循环荷载对管道下方地基的影响主要集中在约 20 m 深度内。

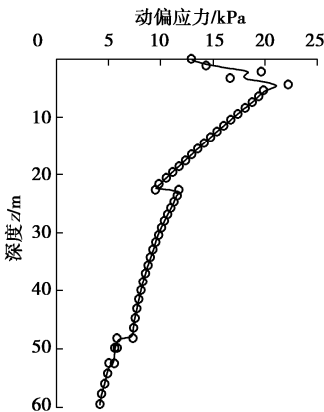


图 4 管道正下方动偏应力随深度变化

Fig. 4 Variation of dynamic deviatoric stress with depth

2.2 地基初始应力状态计算及参数选取

确定土体平均有效固结压力 p_0 时, 认为土层处于 K_0 固结状态, 通过分层土体自重应力来确定竖向应力, 并根据土体侧压力系数 K_0 确定水平应力, 具体计算方法为

$$p_0 = \frac{(1 + 2K_0)}{3} \sum_{i=1}^k \gamma'_i h_i \quad (2)$$

式中: k 为计算应力点上部土层数; γ'_i 为上部第 i 层土体有效容重; h_i 为上部第 i 层土体厚度。

饱和软黏土固结不排水抗剪强度 q_{ult} 可采用 K_0 固结状态下的不排水抗剪强度公式^[12]计算:

$$q_{ult} = Mpc \left[\frac{M + \alpha}{2M} \right]^{\frac{\lambda - \kappa}{\lambda}} \quad (3)$$

$$\alpha = 3(1 - K_0)/(1 + 2K_0) \quad (4)$$

$$M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi') \quad (5)$$

式中: λ , κ 分别为 e - $\ln p$ 空间的正常固结线和回弹

表 1 土层基本参数

Table 1 Basic parameters of soil strata

| 层序 | 土名 | 厚度/ m | 密度/ (g·cm ⁻³) | 压缩模量/ MPa | 泊松比 | 渗透系数/ (m·s ⁻¹) | 侧压力系 数 | 孔隙比 <i>e</i> | 有效内摩擦角 ϕ' /(°) |
|----------------|---------|----------|------------------------------|--------------|------|-------------------------------|-----------|-----------------|------------------------|
| ② ₁ | 粉质黏土 | 4.50 | 1.85 | 5.03 | 0.38 | 2E-8 | 0.48 | 0.926 | 28.5 |
| ③ | 淤泥质粉质黏土 | 6.20 | 1.75 | 3.34 | 0.41 | 1E-7 | 0.50 | 1.175 | 29.6 |
| ④ | 淤泥质黏土 | 8.80 | 1.70 | 2.68 | 0.41 | 1E-8 | 0.53 | 1.335 | 27.9 |
| ⑤ ₁ | 黏土 | 6.80 | 1.76 | 3.82 | 0.41 | 2E-8 | 0.51 | 1.127 | 30.5 |
| ⑤ ₃ | 粉质黏土夹粉砂 | 13.05 | 1.79 | 5.20 | 0.38 | 3E-7 | 0.47 | 1.001 | 31.6 |
| ⑤ ₄ | 粉质黏土 | 5.65 | 1.95 | 6.36 | 0.38 | 1E-8 | 0.45 | 0.699 | 32.4 |
| ⑦ | 粉砂夹粉质黏土 | 5.65 | 1.94 | 11.55 | 0.33 | 5E-6 | 0.37 | 0.694 | — |
| ⑧ | 粉质黏土 | 22.55 | 1.84 | 5.76 | 0.35 | 3E-7 | 0.47 | 0.900 | 32.8 |
| ⑨ | 粉砂夹粉质黏土 | 25.50 | 2.01 | 15.56 | 0.35 | 5E-4 | 0.38 | 0.570 | 33.0 |
| ⑩ | 黏土 | 4.30 | 2.00 | 10.97 | 0.38 | 2E-7 | 0.51 | 0.641 | 31.6 |
| ⑩ _夹 | 粉质黏土夹粉砂 | 7.00 | 1.95 | 8.67 | 0.38 | 5E-5 | 0.51 | 0.710 | 32.0 |

线的斜率，文献[13]通过固结试验获得上海典型土层参数的取值，根据文献[13]，第③层土取 $\lambda = 0.182$ ， $\kappa = 0.0347$ ，以下土层均取 $\lambda = 0.0991$ ， $\kappa = 0.0129$ 。

上海苏州河段隧道埋深在地表 40 m 以下，隧底地层为粉质黏土，与文献[9]的土样较一致，可采用文献[9]中通过动态空心圆柱扭剪试验拟合得到的参数分析，其中 a ， n ， c ， b 为累积塑性应变计算模型参数， a_u ， n_u ， c ， b_u 为累积孔压计算模型参数，如表 2 所示。

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

| a | n | c | b | a_u | n_u | c | b_u |
|-------|-------|-----|-------|--------|-------|-----|-------|
| 0.076 | 1.408 | 0.5 | 0.408 | 0.0385 | 1.37 | 0.5 | 0.32 |

3 深层排水管道长期运营沉降预测

3.1 深隧管底地基长期沉降计算方法

不排水条件下软黏土累积变形引起的地基沉降为

$$s_s = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^p h_i \quad , \quad (6)$$

式中： ε_i^p 为第*i*层累积塑性应变， n 为压缩层总层数。

通过有限元模拟得到应力分量，利用式（1）即可计算得到每层土的不排水累积变形，叠加后可得到地基土的沉降。根据应力分布特征，确定需要调蓄管道以下 60 m 深范围的地基沉降量。根据有限元网格大小将土层分为厚度不等的 50 余层，每层厚度约 1 m，对该 50 余层土使用分层总和法计算总沉降。

累积孔压消散引起的固结沉降也可采用相似方法计算，其计算公式为

$$s_v = \sum_{i=1}^n m_{vi} h_i u_i U_i \quad . \quad (7)$$

式中： s_v 为累积孔压消散引起的固结沉降， u_i 为第*i*层不排水循环累积孔压； m_{vi} 为第*i*层体积压缩系数； U_i 为第*i*层固结度， h_i 为第*i*层厚度， n 为分层数。从长期来看，可认为累积孔压完全消散，即固结度为 100%。

将不排水条件下土体塑性累积变形得到的地基沉降 S_s 与累积孔压消散得到的沉降 S_v 叠加，即可得到总沉降 S 。

3.2 长期沉降计算结果分析

考虑深隧管道使用年限为 50 a，每年按充放水循环 50 次计，计算得到 10 a ($N=500$)、20 a ($N=1000$)、30 a ($N=1500$)、40 a ($N=2000$) 及 50 a ($N=2500$) 运营期累积塑性应变引起的沉降分别为 0.1892，0.2510，0.2961，0.333，0.365 m；10，20，30，40，50 a 孔压消散引起的固结沉降分别为 0.0012，0.0015，0.0017，0.0019，0.0020 m；10，20，30，40，50 a 的

总沉降量分别为 0.1904，0.2525，0.2978，0.3349，0.3668 m，深隧管道各沉降量随时间变化如图 5 所示。从图 5 中可知，总沉降随运营时间增长呈指数增加，在运营初期深隧管道变形较大，沉降量增长较快，但随着运营时间增加其增长速率逐渐减小。循环累积孔压消散引起的固结沉降远小于循环累积塑性应变引起的沉降，相较累积塑性应变产生的沉降可忽略。

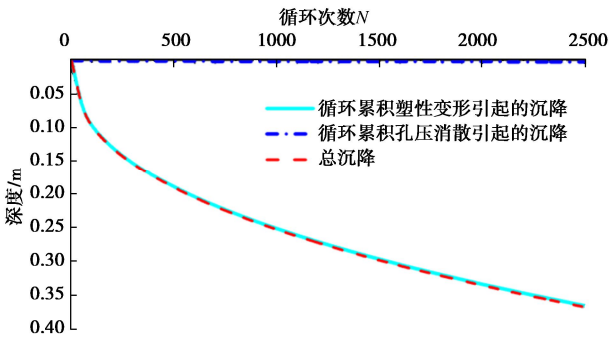


图 5 管底地基沉降与循环次数关系

Fig. 5 Relationship between settlement of foundation below pipeline and number of cycles

记管道底部深度为 0 m，绘制循环充放水荷载运营 10，20，30，40，50 a 时管道下方地层不同深度处总沉降量如图 6 所示，并标出不同深度处的沉降量值。由图可知，管道下方地层总沉降量随深度增大而快速减小，在 20 m 范围内已基本减小至可忽略不计。随着距管道深度增加，在循环次数增加即运营时间增加条件下，深隧管道总沉降量不断增加，在运营 50 a 时达到 0.367 m 的显著沉降。这是由于在计算时未考虑管道下方地基加固的影响，计算结果偏保守。对比不同运营年数下管道下方地基沉降分布，可发现同一深度处地基总沉降值随运营时间不断增长，但增长速率不断减慢，说明深隧管道运营期间沉降值会随时间增加而逐渐趋于某一定值，最终达到稳定状态。

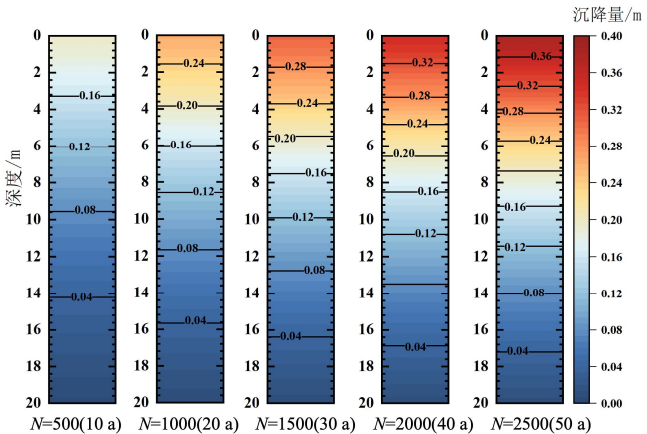


图 6 不同循环次数下管道下方地基不同深度处总沉降量

Fig. 6 Total settlement at different depths of foundation beneath pipeline for different numbers of cycles

4 结 论

为合理预测软土地区深层调蓄管道长期运营沉降, 根据累积塑性应变和累积孔压公式并结合分层总和法, 建立循环荷载作用下饱和软黏土长期沉降简化计算方法, 分析了管底地基未经处理条件下的管道-地基系统的沉降演化规律, 得到以下 4 点结论。

(1) 考虑充放水循环荷载低频重载特点, 利用以往所提出的循环荷载作用下饱和软黏土累积变形计算模型, 可对城市深层调蓄隧道长期沉降进行预测, 进而为管道的运维提供参考。

(2) 管道总沉降量随运营时间增长呈指数级增加, 因充放水循环荷载循环频率极低, 地基土中由孔压消散引起的固结沉降相比软黏土循环荷载导致的累积变形极小, 几乎可忽略不计。

(3) 由于深层调蓄管道直径大, 满管时水荷载较为可观, 在未考虑管道下方地基加固情况下计算得管道运营 50 a 沉降为 0.367 m, 主要影响范围约在管道以下 20 m。

(4) 目前深隧排水系统建设运维仍处于初步探索阶段, 充放水循环荷载将引起深隧管道运营期间较大沉降量, 需在开展工程设计时引起重视。

参考文献:

- [1] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 给水排水, 2015, **51**(3): 1-7. (QIU Baoxing. Connotation, approach and prospect of sponge city (LID)[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, **51**(3): 1-7. (in Chinese))
- [2] WALKER D E, HEATH G R, LEVY W P. Design of a storage tunnel control strategy to eliminate cso and reduce stormwater discharges to south Boston beaches[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2006, **2006**(4): 226-250.
- [3] 何巍伟, 王梦华, 武今巾. 深层排水隧道研究进展[J]. 科技资讯, 2023, **21**(3): 59-64, 134. (HE Weiwei, WANG Menghua, WU Jinjin. Research progress of deep drainage tunnel[J]. Science & Technology Information, 2023, **21**(3): 59-64, 134. (in Chinese))
- [4] 刘 明, 黄茂松, 李进军. 地铁荷载作用下饱和软黏土的长期沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(5): 813-817. (LIU Ming, HUANG Maosong, LI Jinjun. Long-term settlement of saturated soft clay under subway loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(5): 813-817. (in Chinese))
- [5] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975(537): 1-17.
- [6] LI D Q, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(12): 1006-1013.
- [7] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(11): 907-916.
- [8] 黄茂松, 姚兆明. 循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 325-331. (HUANG Maosong, YAO Zhaoming. Explicit model for cumulative strain of saturated clay subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 325-331. (in Chinese))
- [9] HUANG M S, YAO Z M. Effect of the principal stress direction on cyclic cumulative deformation and pore pressure of soft clay[J]. Procedia Engineering, 2016, **143**: 811-819.
- [10] 姚兆明, 张明慧, 陈军浩. 饱和软黏土循环累积孔压模型及地铁隧道路基长期沉降计算[J]. 铁道学报, 2012, **34**(9): 87-92. (YAO Zhaoming, ZHANG Minghui, CHEN Junhao. Cyclic accumulative pore pressure explicit model of saturated soft clay and long-term settlement calculation of subway tunnel roadbed[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, **34**(9): 87-92. (in Chinese))
- [11] 马 霄, 钱建固, 韩黎明, 等. 交通动载下路基长期运营沉降等效有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 910-913. (MA Xiao, QIAN Jiangu, HAN Liming, et al. Equivalent finite element method for long-term settlement of subgrade induced by traffic load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 910-913. (in Chinese))
- [12] 黄茂松, 宋晓宇, 秦会来. K_0 固结黏土基坑抗隆起稳定性上限分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 250-255. (HUANG Maosong, SONG Xiaoyu, QIN Huilai. Basal stability of braced excavations in K_0 -consolidated soft clay by upper bound method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 250-255. (in Chinese))
- [13] 毛 盘, 张旭东, 叶 斌, 等. 特深圆形竖井土压力分布模式及影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, **18**(1): 257-267. (MAO Pan, ZHANG Xudong, YE Bin, et al. Study on earth pressure distribution pattern of ultra-deep circular shaft and its influential factors[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, **18**(1): 257-267. (in Chinese))