

基坑开挖影响下临近地下管线的力学行为分析

Analysis of Mechanical Behavior of Adjacent Underground Pipelines under Foundation Pit Excavation

刘安¹, 杨靖华¹, 邢一鸣³, 张坤勇^{2,3}

(1. 中交第三航务工程局有限公司南京分公司, 南京 210009; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210024; 3. 河海大学岩土工程科学研究所, 南京 210024)

摘要: 为了研究南京软土地区深基坑开挖对邻近地下管线力学行为的影响, 考虑基坑开挖过程中的复杂条件, 采用数值模拟方法分析了地下管线在不同情况下的变形规律。结果表明: 地下管线竖向位移和弯矩呈现对称分布形式, 在基坑开挖对称面上达到峰值; 揭示了管线直径、管线材质、距基坑边缘水平距离对管线力学行为的影响规律; 管线与基坑边缘的水平距离增加时, 管线的位移和弯矩呈现先增大后减小的趋势, 在距离约为基坑开挖深度的 0.5 倍时, 管线的位移和弯矩达到最大值。通过对这些关键参数的深入研究, 可以有效地指导实际工程中的管线保护与监测工作, 保障地下管线的安全与稳定。

关键词: 基坑开挖; 管线; 数值模拟; 单因素分析

中图分类号: TU473.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 03-0078-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.015

LIU An¹, YANG Jinghua¹, XING Yiming³, ZHANG Kunyong^{2,3}

(1. Nanjing Branch of CCCC Third Harbor Engineering Bureau Co., Ltd., Nanjing 210009, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Geotechnical Engineering Institute of Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to study the influence of deep foundation pit excavation on the mechanical behavior of adjacent underground pipelines in the soft soil area of Nanjing, the deformation law of underground pipelines in different situations is analyzed by numerical simulation method considering the complex conditions in the process of foundation pit excavation. The results show that: the vertical displacement and bending moment of the underground pipeline show symmetrical distribution, and reach the peak value on the symmetrical surface of the pit excavation; the influence of pipeline diameter, pipeline material, and horizontal distance from the edge of the pit on the mechanical behavior of the pipeline is revealed; when the horizontal distance between the pipeline and the edge of the pit is increased, the displacement and bending moment of the pipeline show the tendency to increase firstly and then decrease, and the displacement and bending moment of the pipeline reach the maximum value at the distance of 0.5 times of the depth of the pit excavation. At a distance of about 0.5 times of the pit excavation depth, the displacement and bending moment of the pipeline reach the maximum value. Through the in-depth study of these key

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51608170)。

作者简介: 刘安 (1992—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 深基坑施工等方面。

通信作者: 邢一鸣 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 土的基本特性、土与结构相互作用及岩土工程数值分析等方面。

收稿日期: 2024-07-10

parameters, it can effectively guide the pipeline protection and monitoring work in the actual project to ensure the safety and stability of underground pipelines.

Key words: foundation pit excavation; pipeline; numerical simulation; single factor analysis

0 引言

随着城市的发展, 地上建筑用地日趋紧张, 城市建设逐渐转向地下空间发展, 与之相应的深基坑工程日益增多。由于城市基坑工程往往处于建筑物、道路和地下管线等设施的密集区, 基坑开挖不可避免会造成土体扰动, 引起邻近埋管产生变形, 当变形过大时, 将造成结构物破坏。因此, 基坑开挖对周围管线影响的研究显得尤为重要。解决问题的关键在于施工前准确预测基坑开挖引起的管线的受力和变形, 从而在施工中采取比较合理的技术保护措施^[1-2]。

基坑开挖对邻近既有管线影响是基坑工程环境问题中的重要课题。国内外许多学者对此进行了研究, 一类是两阶段理论解析方法。龚晓南等^[3]基于 Winkler 地基梁理论, 给出了地面超载引起邻近埋管位移的解析解; 在此基础上, 姜峥^[4]针对解析求解的计算困难, 进一步给出了加权残值解, 完善了弹性地基梁解答; 李永焕等^[5]基于围护墙侧向变形空间分布曲线, 采用影像源法提出了预测基坑开挖引起坑外土体水平位移的表达式, 在此基础上, 基于 Pasternak 地基梁理论, 采用两阶段分析法, 得到基坑开挖引起邻近埋管水平变形的解析解答; 魏纲等^[6]基于影像源法, 结合 Pasternak 地基模型, 提出了一种考虑管线老化和破损的邻近地下埋管纵向变形的分析方法; 李振龙等^[7]利用有限元软件 MIDAS GTS NX 建立模型, 对基坑开挖对地下埋管的影响进行模拟分析, 从埋管埋距、埋管埋深、地连墙厚度以及不同弹性模量地连墙 4 个方面研究基坑开挖对邻近地下埋管的影响; 杜金龙等^[8]采用 FLAC 3D 分析了基坑开挖对邻近不同管径埋管的影响, 在此基础上, 提出基于土体位移的基坑开挖对邻近小管径埋管影响的简化分析方法; 吴峥等^[9]利用 ABAQUS 建立三维有限元模型对实际工程进行数值模拟, 在此基础上分析了埋管周围土体注浆加固的作用。

基坑开挖引起的埋管响应受不同地区土质的影

响, 南京地区广泛分布的漫滩相软土具有含水量高、孔隙比大、高灵敏度、低渗透性及显著流变特性, 导致基坑开挖的难度及风险较大^[10-12], 这种特殊地质条件使得基坑开挖过程中极易引发管线的差异沉降。然而, 目前针对该地区的研究多集中于传统监测数据分析, 采用数值模拟方法系统揭示“土体-支护结构-地下埋管”耦合作用机理的研究明显不足。鉴于此, 以南京市某地铁附属基坑工程为例, 通过数值模拟的方法, 分析基坑开挖对邻近埋管的影响规律, 并对埋管相关参数进行单因素分析, 以便为该地区类似基坑工程施工中埋管保护提供一定参考。

1 有限元模型建立

1.1 项目概况

南京某地铁附属基坑工程, 全长 25 m, 标准段宽 12 m, 基坑开挖深度 10 m, 明挖顺做法施工, 采用地连墙+内支撑的支护方案, 地连墙厚 1 000 mm、深 21 m, 标准幅宽 6 m, 采用 H 型钢接头, 基坑分两次开挖 (第一次开挖 3 m, 第二次开挖 7 m), 每次开挖后设支撑, 第一道支撑为钢筋混凝土支撑 (800 mm×1 000 mm), 支撑水平间距为 6~7 m; 第二道支撑为钢支撑 ($\phi 800$ mm, $t=20$ mm), 支撑水平间距为 3 m。

该附属基坑工程地貌类型属于长江漫滩地貌, 现状形势较平坦, 地面高程在 4.33~5.64 m 之间。开挖范围内的土层主要为①层填土、②-2b4 淤泥质粉质黏土、②-2c+d3 粉土夹粉砂、②-3d2 粉砂、②-3b3-4 粉质黏土等, 土层参数见表 1。

表 1 土层参数表

Table 1 Table of soil parameters

土层名称	厚度 /m	重度 /(kN/m^3)	压缩模量 /MPa	泊松比	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
填土	1	18.2	5.0	0.35	15.0	10.0
淤泥质粉质黏土	3	18.0	3.0	0.39	12.0	10.0
粉土夹粉砂	3	19.3	8.5	0.37	11.0	31.5
粉砂	3	19.5	12.0	0.34	6.5	35.0
粉质黏土	10	18.6	4.0	0.35	19.0	14.5
粉土	5	18.7	7.0	0.33	13.0	28.0
粉细砂	5	19.3	10.0	0.31	6.5	34.5

岩土力学

根据勘察资料显示, 基坑外沿基坑长度方向有一地理混凝土管, 如图 1 所示, 管径 1 000 mm, 壁厚 0.01 m, 管线埋深 3 m, 与基坑边缘距离 4 m。

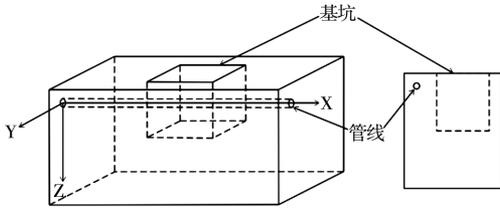


图 1 管线与基坑位置关系图

Fig. 1 Relationship diagram of pipeline and foundation pit position

1.2 模型建立

数值模拟基于工程实际情况, 由于实际工程中工况较为复杂, 所以需要进行合理的简化, 有限元分析中做如下假设:

模型中每一土层厚度均匀, 将土体视为均质、各向同性的弹塑性材料, 围护墙和内支撑视为弹性材料, 不考虑地连墙施工对土体的扰动; 土体本构采用摩尔-库伦模型, 支护结构采用线弹性模型, 不考虑土体的排水固结。

根据基坑与管线的位置关系, 运用有限元软件建立基坑-土体-管线三者耦合的三维有限元模型, 对基坑的整个施工过程进行模拟。根据文献 [13-16], 为了减小边界效应影响, 基坑开挖影响宽度约为基坑开挖深度的 3~5 倍, 影响深度约为基坑开挖深度的 2~4 倍。因此, 模型尺寸为 100 m × 90 m × 30 m, 模型以混合网格生成器生成网格, 整体模型如图 2 所示。共 17 516 个节点, 31 043 个单元。

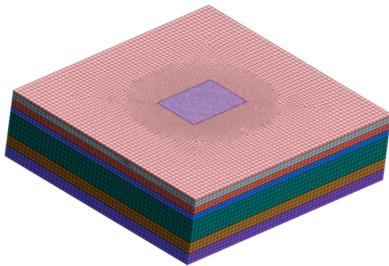


图 2 三维模型图

Fig. 2 Three-dimensional model diagram

1.3 模型基本参数

计算所需土体参数见表 1。

地下连续墙弹性模量 30 GPa, 泊松比 0.3; 首道混凝土支撑弹性模量 30 GPa, 泊松比 0.2, 第二道钢支撑弹性模量 200 GPa, 泊松比 0.3; 管线弹性模量

30 GPa, 泊松比 0.2。

1.4 基坑开挖过程模拟

在基坑开挖前, 进行土体的初始应力场模拟; 进行第一步开挖, 开挖至地表以下 3 m 深度。

移除该部分的土体单元, 激活第一道支撑单元;

进行第二步开挖, 开挖至地表以下 10 m 深度, 移除该部分土体单元, 激活第二道支撑单元。

2 基本分析模型分析

对上述模型进行计算, 得到管线的竖向位移、转角和弯矩, 计算结果如图 3~5 所示。

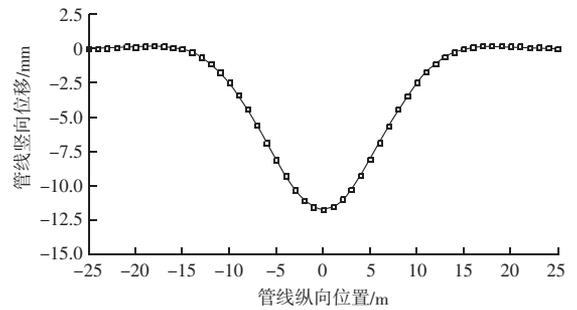


图 3 竖向位移图

Fig. 3 Vertical displacement diagram

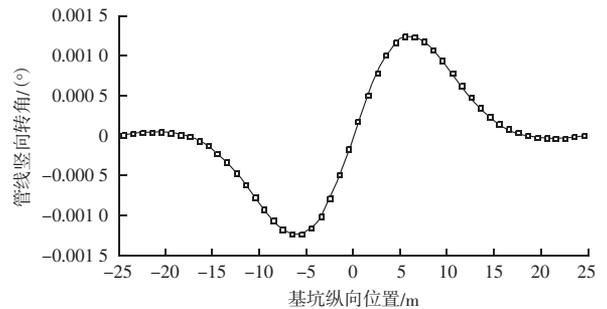


图 4 转角图

Fig. 4 Corner diagram

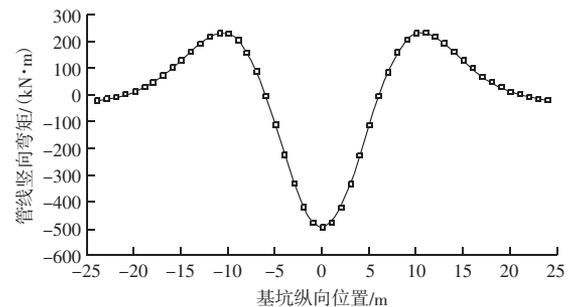


图 5 弯矩图

Fig. 5 Bending moment diagram

由图 3 可知, 管线竖向位移关于基坑对称面对称, 大致呈正态分布, 在基坑对称面位置处管线有最大位移, 最大位移值为 11.736 mm, 越靠近两端管线位移越小, 在离基坑对称面大约 15 m ($1.5H$) 的位置处管线位移很小, 接近为 0。

由图 4 可知, 管线转角关于基坑对称面反对称, 在基坑对称面上, 管线转角为 0, 在离基坑对称面大约 6.5 m ($0.65H$) 的位置处, 管线转角最大, 最大值为 $0.001\ 239^\circ$ 。

由图 5 可知, 管线弯矩也是关于基坑对称面对称, 在基坑对称面上, 管线弯矩有最大值 $499.06\ \text{kN}\cdot\text{m}$, 结合图 4 可知, 在管线转角最大的位置处, 弯矩为 0, 在距离基坑对称面大约 11 m ($1.1H$) 的位置处出现管线最大正弯矩 $231.67\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 。

由此可知, 管线在基坑对称面处有最大位移和最大弯矩, 在基坑施工过程中对此处应加强监测、重点保护。

3 影响因素分析

3.1 管径的影响

为了研究管线受基坑开挖影响中管线直径这一因素的影响, 采用单因素分析方法, 在基本分析模型基础上, 选取管线直径为 600、800、1 000、1 200、1 400 mm 分别建立模型, 而保持其他因素不变。计算得到的位移和弯矩如图 6~8 所示。

由图 6 可知, 不同管径下, 管线位移图的变化规律是一致的, 管径越大, 管线的位移越小。

由图 7 可知, 管线最大竖向位移和管径近似呈线性关系, 随着管径的增加, 管线最大竖向位移线性减小。

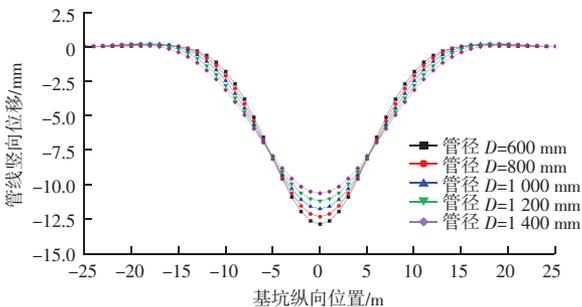


图 6 管径对管线竖向位移的影响

Fig. 6 Effect of pipe diameter on vertical displacement in pipelines

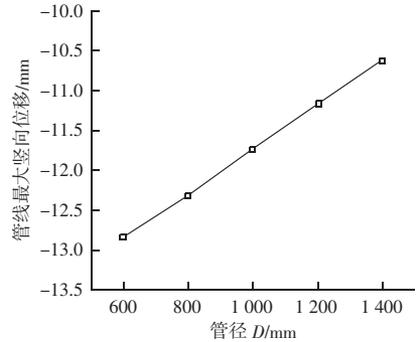


图 7 管径与管线最大竖向位移关系

Fig. 7 Relationship between pipe diameter and maximum vertical displacement of pipelines

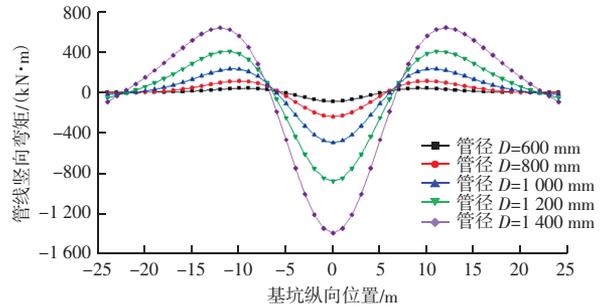


图 8 管径对管线弯矩的影响

Fig. 8 Effect of pipe diameter on bending moment in pipelines

由图 8 可知, 不同管径下, 管线弯矩图的变化规律是一致的, 随着管径的增加, 管线弯矩显著增加, 管径从 600 增加到 800 mm 时, 管线弯矩增加了 $151.801\ \text{kN}\cdot\text{m}$, 管径从 1 200 增加到 1 400 mm 时, 管线弯矩增加了 $512.454\ \text{kN}\cdot\text{m}$, 同比增加了 237.58%。

3.2 管材的影响

选取铸铁管、混凝土管、PVC 管三种常见材质管线, 不同材质管线参数见表 2, 保持其他因素不变, 计算结果如图 9~10 所示。

由图 9 可知, 铸铁管的位移最小, 混凝土管次之, PVC 管的位移最大。考虑三种材料弹性模量的差异, 随着管线弹性模量的增加, 管线竖向位移减小较为显著, PVC 管的最大竖向位移为 $13.144\ \text{mm}$, 而铸铁管的最大竖向位移为 $9.759\ \text{mm}$, 相比于 PVC 管,

表 2 管线材质参数表

Table 2 Table of pipeline material parameters

管材	密度 /(kg/m^3)	弹性模量 /GPa	泊松比
铸铁管	7 300	160.0	0.30
混凝土管	2 500	30.0	0.20
PVC 管	1 200	3.5	0.35

岩土力学

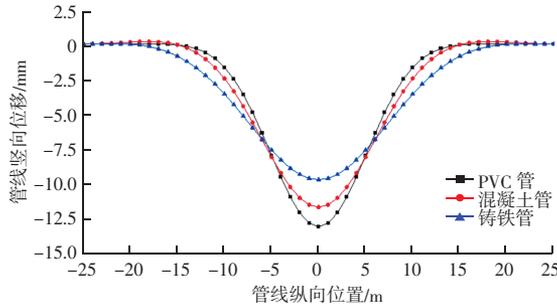


图9 管线材质对管线竖向位移的影响

Fig. 9 Effect of pipeline material on vertical displacement in pipelines

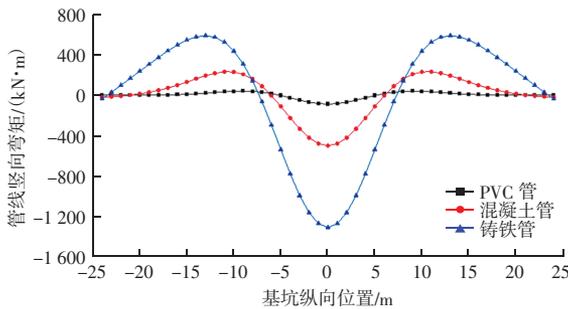


图10 管线材质对管线弯矩的影响

Fig. 10 Effect of pipeline material on bending moment in pipelines

管线竖向位移最大值减小了 25.75%，所以提高管线材质可作为管线保护的有效手段。

由图 10 可知，铸铁管的弯矩最大，混凝土管次之，PVC 管的弯矩最小。考虑三种材料弹性模量的差异，管线弹性模量增加时，管线的弯曲刚度 EI 增加，管线抵抗变形能力增强，管线承担的弯矩增大。

3.3 管线到基坑边缘水平距离的影响

基于基本分析模型，将管线距离基坑边缘距离分别取为 1、3、5、7、10、14、20、25、30、35 m，保持其他因素不变，计算结果如图 11~13 所示。

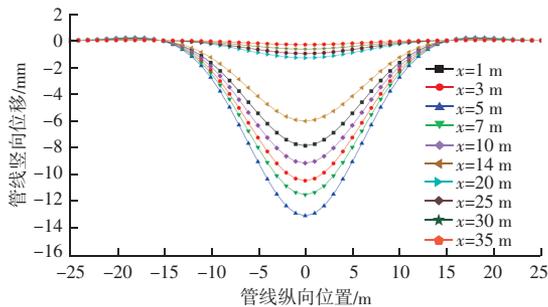


图11 管线埋距对管线竖向位移影响

Fig. 11 Effect of buried distance of pipeline on vertical displacement of pipeline

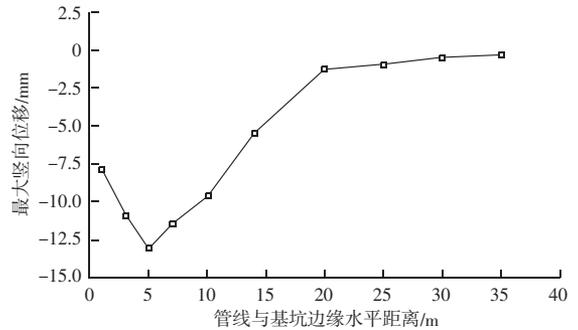


图12 管线埋距与管线最大竖向位移关系

Fig. 12 Relationship between buried distance of pipeline and maximum vertical displacement of pipeline

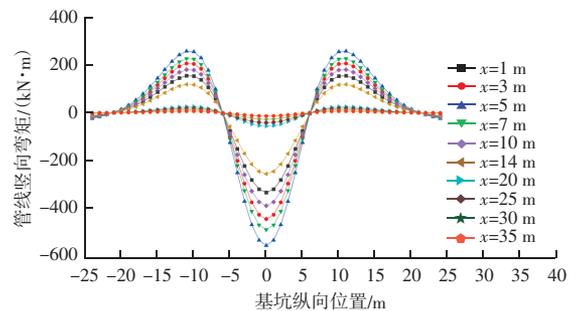


图13 管线埋距对管线弯矩的影响

Fig. 13 Effect of pipeline buried distance on bending moment in pipelines

由图 11 可知，当埋距小于等于 5 m 时，随着埋距的增加，管线的竖向位移逐渐增大，当埋距等于 5 m 时，管线出现最大竖向位移 13.04 mm，当埋距等于 5 m 时，随着埋距的增加，管线竖向位移逐渐减小，当埋距大于 20 m 时，管线竖向位移很小且埋距再增加时对管线位移影响很小。

由图 12 可知，管线最大竖向位移随管线距离基坑边缘水平距离的增加先增大后减小，管线最大竖向位移出现在 5 m 处（即 $0.5H$ 左右），当管线埋距为 30~35 m（即 $4H$ 左右），管线竖向位移已经很小，当管线埋距大于 $4H$ 时管线将不受开挖影响。

由图 13 可知，随着管线埋距的增加，管线弯矩与管线竖向位移的变化趋势相一致，即管线弯矩随管线埋距的增加先增大后减小，当管线埋距为 $0.5H$ 附近时管线弯矩最大，当管线埋距大于 $3H$ 时，管线弯矩已经很小，近似可以忽略不计。

由此，可以通过管线与基坑的位置关系判断管线是否处于危险区域，且管线距离基坑边缘大约 $0.5H$ 时最为危险。

4 结论

通过建立考虑基坑-土体-管线耦合作用的三维有限元模型, 并进行了单因素分析, 得出如下结论:

(1) 对于与基坑平行的管线, 基坑开挖引起的管线竖向位移和弯矩关于基坑对称面对称, 并在基坑对称面处取得最大值, 因此基坑对称面附近管线较为危险, 在基坑施工过程中应加强监测、重点保护。

(2) 随着管线直径的增加, 管线惯性矩 I 增加, 弯曲刚度 EI 增加, 抵抗变形能力增强, 变形减小, 弯矩增加。

(3) 管线材质对于管线受基坑开挖的影响效果较为显著, 随着管线弹性模量 E 的增加, 弯曲刚度 EI 增加, 抵抗变形能力增强, 变形减小, 弯矩增加。

(4) 随着管线距离基坑边缘距离的增加, 管线位移和弯矩先增加后减小, 管线距离基坑边缘距离为 $0.5H$ 附近时, 管线位移和弯矩最大, 当管线距离基坑边缘距离达到 $3.5H$ 时, 管线位移和弯矩很小, 基坑开挖对管线的影响可以忽略不记, 可通过基坑与管线的位置关系判断管线是否处于危险区域。

参 考 文 献

- [1] 卢玉林, 何金泽, 陈晓冉, 等. 基坑开挖过程中埋地管线沉降位移解析计算 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51 (2): 144-154.
- [2] 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (1): 1-25.
- [3] 龚晓南, 孙中菊, 俞建霖. 地面超载引起邻近埋地管道的位移分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (2): 305-310.

- [4] 姜峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10 (2): 362-368.
- [5] 李永焕, 刘志贺, 饶勤波, 等. 考虑空间效应的基坑开挖对邻近管线的影响分析 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40 (5): 125-130.
- [6] 魏纲, 郭丙来, 王哲, 等. 考虑管线老化和破损时基坑开挖对邻近管线纵向变形的影响 [J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52 (1): 9-16, 24.
- [7] 李振龙, 汪东林, 吴剑平, 等. 基于 MIDAS 的基坑开挖对邻近地下管线的影响分析 [J]. 兰州工业学院学报, 2022, 29 (6): 30-34.
- [8] 杜金龙, 杨敏. 深基坑开挖对邻近埋地管线影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增刊1): 3015-3020.
- [9] 吴峥, 姚黎芳, 陈学良, 等. 基坑开挖对下卧管线竖向变形影响的数值分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (7): 2843-2849.
- [10] 万星, 戈铭, 贺智江, 等. 南京软土地区基坑墙体变形性状研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (增刊1): 85-88.
- [11] 顾祯雪, 楼伟中, 程钰博, 等. 南京软土地区超长异形深基坑地连墙变形性状分析 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (1): 182-189.
- [12] 丰土根, 王湛铭, 张箭, 等. 基坑开挖卸荷对侧方隧道的影响研究——以南京市某地铁车站基坑开挖为例 [J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 2024, 47 (5): 482-494.
- [13] 李向群, 张兆辉. 基坑开挖引起管线位移影响规律研究 [J]. 岩土工程技术, 2017, 31 (5): 253-257.
- [14] 徐宏增, 石磊, 王振平, 等. 深基坑开挖对邻近大直径管线影响的优化分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (2): 714-719.
- [15] 韩非. 地铁车站深基坑工程周边环境变形控制研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [16] 黄传胜, 张家生. 地铁深基坑三维有限元模型尺寸效应分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8 (2): 59-63.