

深大基坑分区分步开挖对既有地下管线的影响研究

Study on the Influence of Zone and Step Excavation of Deep and Large Foundation Pit on Existing Underground Pipelines

王 义¹, 蔡 龙², 林 刚³, 徐长节^{2,4}, 万 鹏⁵

(1. 浙江省地矿建设有限公司, 杭州 310000; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013;
3. 浙江省地矿勘察院有限公司, 杭州 310000; 4. 浙江大学 滨海与城市岩土工程研究中心, 杭州 310000;
5. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430000)

摘 要: 以杭州凤起潮鸣深大基坑工程为背景, 采用现场监测与 Midas GTS NX 三维有限元耦合方法, 系统研究分区分步开挖对并行双盾构管线的影响。监测项目涵盖拱底沉降、水平位移及地表变形, 数值模型按实际施工顺序模拟七级开挖与两道内支撑架设, 对比验证后提取管线弯矩、差异沉降及地表隆起。结果表明: 跨中拱底沉降最大达 4.2 mm, 两侧递减; 水平位移随开挖深度递增, 最终稳定在 -3.9 mm; 拱顶、拱底出现最大正弯矩, 拱腰负弯矩最显著; 中区开挖使地表局部隆起 1.9 mm。结论指出分区开挖顺序与支撑时机是控制管线变形的关键, 可为软土地区类似深基坑工程提供量化参考。

关键词: 基坑开挖; 地下管线; 三维有限元; 监测; 受力变形

中图分类号: TU434 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0109-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.020

WANG Yi¹, CAI Long², LIN Gang³, XU Changjie^{2,4}, WAN Peng⁵

(1. Zhejiang Geology and Mining Construction Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
3. Zhejiang Geology and Mineral Exploration Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. Research Center
of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;
5. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Based on the deep excavation project of Hangzhou Fengqi Chaoming, this study employs a coupled approach of field monitoring and 3D finite element analysis using Midas GTS NX to systematically investigate the impact of zoned excavation on parallel double-shield utility tunnels. The monitoring program covers arch bottom settlement, horizontal displacement, and surface deformation. The numerical model simulates seven excavation stages and the installation of two internal supports according to the actual construction sequence. After comparative validation, parameters such as pipeline bending moment, differential settlement, and surface heave were extracted. Results indicate that the maximum arch bottom settlement at the

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2023YFC3009400); 国家自然科学基金 (52238009)。

作者简介: 王 义 (1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程技术管理与研究工作。

通信作者: 徐长节 (1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 岩土工程、地下工程等。

收稿日期: 2024-07-03

岩土力学

midspan reaches 4.2 mm, decreasing towards both sides; horizontal displacement increases with excavation depth and eventually stabilizes at -3.9 mm; the maximum positive bending moment occurs at the arch crown and arch bottom, while the most significant negative bending moment appears at the arch waist; excavation in the central zone causes local surface heave of 1.9 mm. The study concludes that the sequence of zoned excavation and the timing of support installation are critical for controlling pipeline deformation, providing quantitative references for similar deep excavation projects in soft soil areas.

Key words: foundation pit excavation; underground pipeline; three-dimensional finite element; monitor; stress deformation

0 引言

随着社会的不断发展,城市建设进程的不断加快,地下空间也不断开发,产生大量的基坑工程和地下管线工程。随着基坑的深度和规模不断增加,基坑开挖会导致各种问题的产生,其对地下管线的影响问题也会日益突出^[1-4]。地下管线涉及交通、水电、通信等方方面面,一旦地下管线受到影响甚至损害,会给人们的生活带来不便。所以在基坑开挖的过程中如何保护地下管线,使其对地下管线的影响降到最小是需要研究的一个重要课题。

近些年来,国内外学者对基坑开挖引起的地下管线问题展开了众多研究工作,并取得了一些成果。在国内,王成华等^[5]采用 plaxis 进行建模,研究了基坑开挖中的土体与地下管线相互影响关系;彭基敏等^[6]通过建立有限元模型分析了基坑开挖工况对相邻地下管线的变形影响;施有志等^[7]以厦门地铁一号线的某车站深基坑为依托,建立三维有限元模型,研究深基坑施工对临近管线的影响程度,通过数值模拟来选择不同保护方案并选出最优方案;郜新军等^[8]依托实际工程,基于有限元分析方法,分析了深基坑开挖过程中临近管线的位移变化规律并对其安全性进行了评价;蒋真皓等^[9]研究了基坑开挖过程中对地表及既有建筑、管线的沉降和变形的影响;邹森等^[10]研究发现管线沉降受分布开挖深度影响较大,需要重视基坑开挖中的底板施工阶段;金祎等^[11]研究发现基坑开挖深度与地下管线埋藏深度存在三种不同的位置关系,并且分析了水平位移和竖向位移之间的差异;王洪德等^[12]研究了深基坑开挖对临近管线的位移和力学行为规律,对管线纵向弯矩影响最大的是管线的材料,影响最小的是连续墙的弹性模量,埋距、埋深及管径都有一定的影响;袁小平等^[13]考虑了不加支撑、加支撑、支撑刚度、

周围土体参数等因素,对比双层管道之间的水平沉降和竖直沉降;张陈蓉等^[14]基于位移控制理论,对板式支护体系因基坑开挖而引起的周围自由土体位移场的分布规律进行了探讨;左殿军等^[15]研究了基坑开挖对临近地铁隧道的影响,结果表明内支撑间距较大时,沉降与位移增加速率较大,在影响分析中应考虑管-土的相互作用;在国外,Vorster等^[16]对隧道开挖对邻近管线的影响进行了预测分析;Sharma等^[17]通过实测与数值分析联合的方法对临近地铁深基坑开挖导致的地铁变形进行了分析;Calvetti等^[18]对管土相互作用进行了数值分析与试验研究;Yimsiri等^[19]用试验研究和有限元对比分析了管线在深埋时水平和竖向的土与管线之间相互作用;Guo等^[20]用 Winkle 模型来模拟管线与土体之间的相互作用,并用有限元分析了管线埋深与管径之比对管线路-位移关系的影响。

综上所述,国内外学者针对基坑开挖对地下管线的变形影响进行了大量的研究,但目前对深基坑分区分步开挖对地下双管线的研究较少,利用 Midas GTS NX 建立完整的深基坑分区分步开挖三维有限元模型,主要模拟了深基坑开挖分区分步开挖过程中,地下管线的竖向位移和纵向变形,开挖土体和支护结构与地下管线的相互变形关系,对开挖过程中管线的变形特征进行了计算分析及评价,并根据计算结果,与现场监测的数据进行了对比,分析了基坑开挖对地下管线的影响。对地下管线工程有一定的参考意义,能给后续深基坑工程提供帮助。

1 工程概况

1.1 工程介绍

拟建基坑场地位于杭州市滨江区,基坑开挖面积约 33 167 m²,基坑周长 1 264 m,基础形式为桩孔灌注桩,在两块基坑中设置二层地下室相连。基坑深 7.6 m,盾构管位于地下 13 m 处,直径 6.6 m,厚度

为 0.35 m，采用 C35 混凝土浇筑。支护结构采用内支撑，一共架设两道支撑。地下管线与基坑位置及支护结构的平面图如图 1 所示。

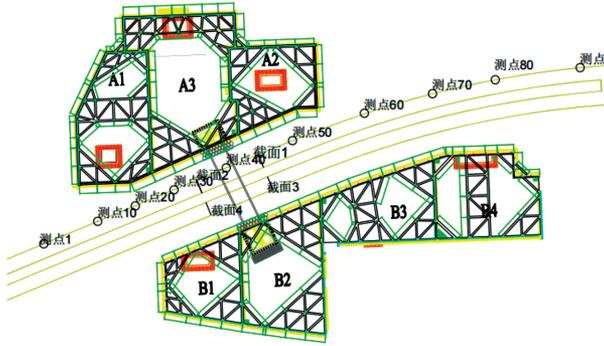


图 1 基坑开挖平面图

Fig. 1 Foundation pit excavation plan

1.2 工程地质条件

根据勘察报告，基坑影响范围内土层主要物理力学性质指标见表 1，该地区土层含水量较大，分布均匀，密实度中等。计算模型采取 P-P 土层剖面，如图 2 所示，该剖面位于基坑中部，穿过地下管线和地下室，土质分布均匀，具有代表性，能很好的反映该工程基坑开挖对地下管线的影响。

表 1 土体参数
Table 1 Soil parameter

土	厚度 /m	重度 /(kg/m^3)	泊松比	摩擦角 / ($^\circ$)	黏聚力 /kPa
素填土	3	18	0.2	12	12
砂质粉土	5	19	0.2	19	3
砂质粉土夹粉砂	5	19	0.3	27	2
砂质粉土	8	19	0.3	19	3
淤泥质粉质黏土夹粉砂	10	17	0.4	10	13
粉砂	3	18	0.3	27	2
含砂粉质黏土	16	18	0.3	12	21

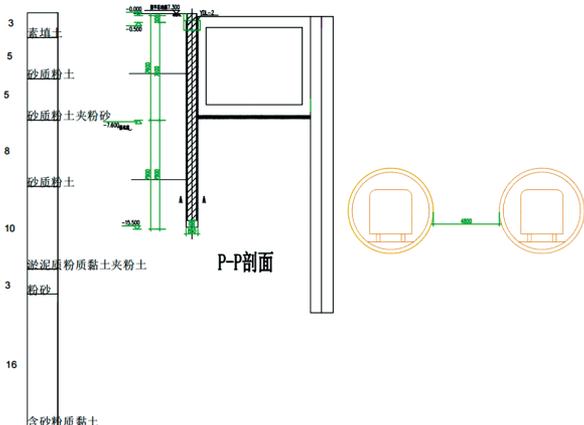


图 2 土层剖面图

Fig. 2 Soil profile

2 数值模拟

2.1 计算模型

采用有限元软件 Midas GTS NX 进行模拟，计算基本假定为：基坑计算范围内土体为各向同性、均质和连续土体；地下连续墙地下管线和顶管采用板单元，内支撑、腰梁和立柱锚杆单元，土体采用实体单元；对于土体与结构单元的接触面，设置无厚度的界面单元；本模型不考虑地下水和降水的影响。

计算域尺寸为 280 m × 220 m × 50 m，基坑开挖深度为 7.6 m，基坑边缘离计算域边缘 30 m，是基坑深度的 4 倍。地下管线的直径为 6.2 m，厚度为 0.35 m，贯穿整个模型，两管线距离 5 m，距离基坑最近 16 m，地下管线的材料采用 C60 混凝土。地下连续墙厚度为 0.8 m，插入地下 32 m；内支撑截面、冠梁和腰梁均采用 0.8 m × 0.8 m 的矩形截面；立柱截面采用直径为 0.8 m 的圆形截面；上述构件的材料均采用 C35 混凝土。地下室顶管截面为 4.4 m × 8 m 的矩形截面，厚度为 0.35 m，该构件的材料采用 C35 混凝土。有限元模型如图 3 所示。

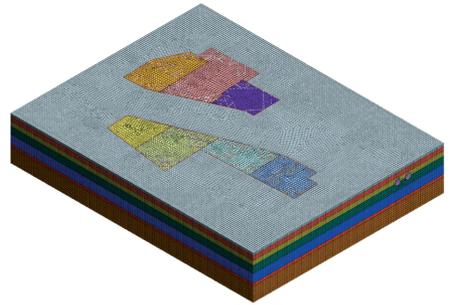


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.2 施工步骤

基坑分为三个区域依次开挖，每个区域分四次开挖，架设两道支撑，具体施工步骤见表 2。

3 监测布置情况

基坑工程分为南北两个区块，场地间横穿有地铁六号线中医药大学站 ~ 伟业路站，基坑活动影响范围约为 GGC - L380 ~ GGC - L580 和 GGJ - 380 ~ GGJ - L580。根据实际影响情况，主要监测地下管线的水平位移以及地下管线的拱底沉降。对所有的监测点位和监测数据进行整理，主要的监测点位数量及位置如图 1 所示。

岩土力学

表 2 施工步骤

Table 2 Construction procedure

步骤	内容	简述
1	初始地应力平衡	本工程为工程分析的第一步, 在整个计算模型内只有土体
2	地下管线施工	在基坑开挖前进行地下管线的施工
3	支护结构施工	地下连续墙施工, 立柱施工
4	开挖第一层土体	土体开挖到标高 -1 m 处
5	施作第一道混凝土支撑	混凝土支撑高度为 0 m 处
6	开挖第二道土体	土体开挖到标高 -3 m 处
7	开挖第三道土体	土体开挖到标高 -5 m 处
8	施作第二道混凝土支撑	混凝土支撑高度为 -4 m 处
9	开挖第四道土体	土体开挖到标高 -7.6 m 处

4 基坑开挖对地下管线影响分析

4.1 拱底沉降分析

在基坑的动态开挖过程中, 由于土体开挖卸载作用, 土体应力会进行重分布, 从而会对地下管线产生一定影响, 使地下管线产生竖向位移。地下管线的拱底沉降实际监测值与计算模拟值的对比曲线如图 4 所示。

地下管线的两侧沉降量较小, 管线中部沉降量较大, 整体趋势为凹形, 地下管线的总体沉降值在 2~8 mm 之间。左、右侧管线拱底实测的最大沉降分别为 7.64、5.78 mm, 有限元模拟的最大沉降分别为 4.1、4.73 mm。通过将有限元模拟数据与监测结果进行对比发现, 地下管线拱底沉降的模拟结果与实际监测数据趋势上基本吻合, 地下管线的沉降最大处基本重合, 整体开挖完成时地下管线的拱底沉降与实际监测值拟合较好。有限元的计算结果稍微小于实际监测值, 地下管线的沉降趋势整体呈凹形, 即地下管线的跨中处拱底沉降最大, 两侧最小, 这是由于基坑施工区位于地下管线的跨中区域, 基坑开挖导致的土体效应, 对地下管线的跨中处影响最大, 使得地下管线跨中处沉降位移大于两侧。有限元模拟结果与实际监测值的差值大都处于在 2 mm 之内, 这主要是由于在实际施工中, 顶管的施工与基坑的施工同步进行, 在对顶管施工时开挖土体, 会进一步的造成地下管线沉降, 而在本次有限元模拟中, 将顶管的施工看作和地下管线施工同步进行的, 不会对地下管线产生拱底沉降, 这就导致了有限元模拟的结果小于实际监测值。

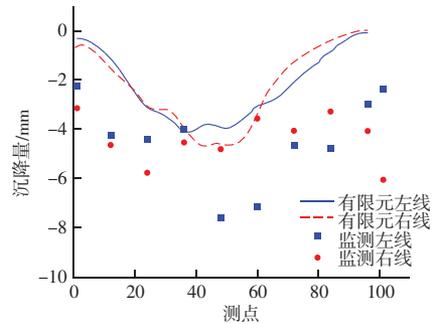


图 4 地下管线的拱底沉降

Fig. 4 Arch bottom settlement of underground pipeline

4.2 水平位移分析

地下管线的水平位移实际监测值与计算模拟值的对比曲线如图 5 所示, 地下管线的水平位移整体在 2 mm 浮动, 且差异不大, 地下管线的位移趋势表现为向一侧移动, 其中左线的位移量总体大于右线的位移量。左、右侧管线实测的最大水平位移为 -3.9、-2.7 mm, 有限元模拟的最大水平位移分别为 -2.14、-2.43 mm; 通过将有限元模拟数据与监测结果进行对比发现, 地下管线水平位移的模拟结果与实际监测数据趋势上基本吻合, 整体浮动不大, 差值在 2 mm 以内。计算结果显示, 两根地下管线的跨中处水平位移最大, 地下管线两侧的水平位移都接近于 0, 且两根地下管线的水平位移值大都小于 0, 这说明两根地下管线都往一个方向偏移。这主要是因为地下管线的左方和右方均有基坑开挖, 且基坑开挖的面积不同, 开挖顺序的不同, 导致地下管线的一侧受到土体压力更大, 两根地下管线向同一个方向偏移。地下管线跨中区域为基坑开挖的范围内, 由于基坑导致的开挖效应, 对该区域的地下管线产生的水平位移影响较大, 导致地下管线的水平位移最大值出现在跨中处。远离开挖区域的两侧管线,

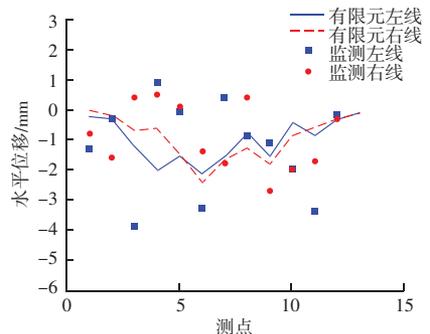


图 5 地下管线的水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of underground pipelines

受到基坑开挖的影响较小，产生的水平位移接近于 0，可以忽略不计。

4.3 弯矩分析

地下管线的截面弯矩图如图 6 所示，左侧管线所受到的弯矩大于右侧管线。这是由于靠近左侧管线的基坑开挖区较多，有四块开挖区，基坑开挖造成的土体效应对临近管线影响较大，所以左侧管线所受弯矩较右侧管线大。左、右两侧管线最大正向弯矩值分别为 116.5、79.1 kN·m，均出现在拱顶处，最大负向弯矩值为 -109.7、-57.5 kN·m，均出现在拱腰处。正向弯矩大都出现在拱顶处和拱底处，而负向弯矩大都出现在两侧拱腰处，且正向弯矩的值大于负向弯矩的值，这是因为基坑开挖导致地下管线两侧土体发生位移，使得地下管线出现挤压，拱顶和拱底出现正向弯矩，两侧拱腰出现负向弯矩。随着开挖的进行，弯矩值逐渐增大，在基坑整体开挖完成后达到最大并趋于稳定。

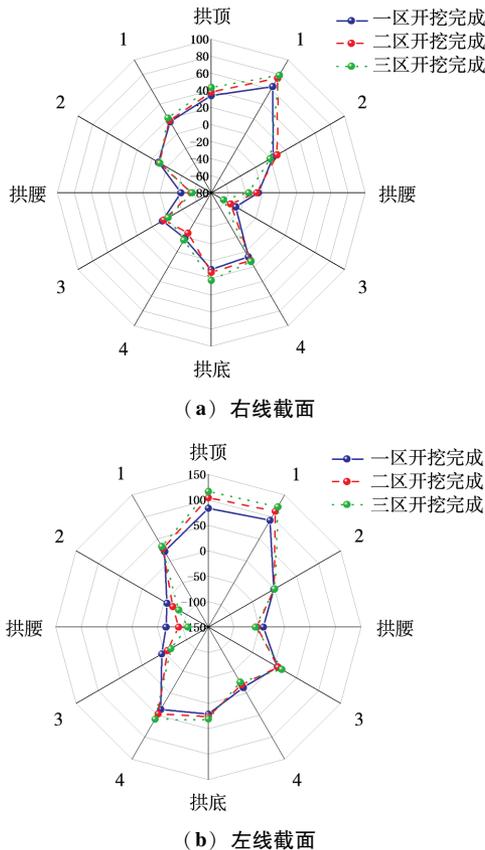


图 6 地下管线的截面弯矩

Fig. 6 Section bending moment of underground pipeline

4.4 差异沉降分析

基坑分区开挖左右管线的竖向变形图如图 7 所示，一区开挖完成后，两根地下管线跨中处隆起明显，左侧管线的最大隆起值为 12.10 mm，右侧管线的最大隆起值为 12.12 mm。离基坑开挖区较远的地下管线变形不明显，没有发生隆起或者沉降，说明该处管线受到基坑开挖的影响很小。这是由于地下管线两侧基坑开挖导致的土体效应，使得距离开挖区近的土体向上隆起，使得地下管线发生向上的竖向位移，距离开挖区越近，土体效应更明显，而距离基坑开挖区域较远的区域，土体开挖效应不明显，不会对地下管线产生影响。随着分区开挖的进行，地下管线的隆起值逐渐变小，最后开挖完成后，地下管线跨中处出现略微沉降，左侧管线的最大沉降值为 4.1 mm，右侧管线的最大沉降值为 4.7 mm。当基坑的三个区块整体开挖完成后，会对地基层产生扰动，周围土体水平应力动态卸载，不可避免地产生沉降。

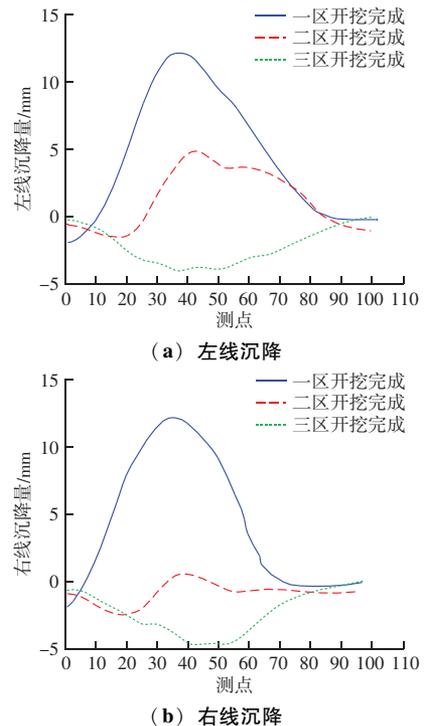


图 7 地下管线的整体沉降

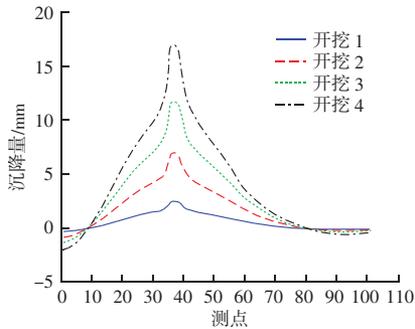
Fig. 7 Overall settlement of underground pipeline

4.5 地表沉降分析

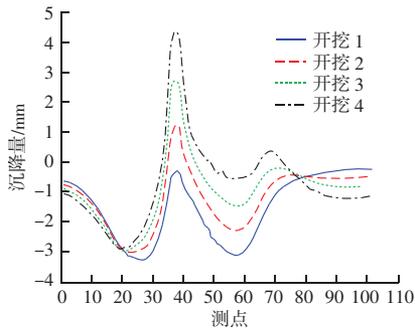
基坑开挖引起的地下管线上方地表的竖向变形如图 8 所示，当一区开挖时，如图 8 (a) 所示，地表会向上隆起，并且随着开挖深度的增大，隆起变

岩土力学

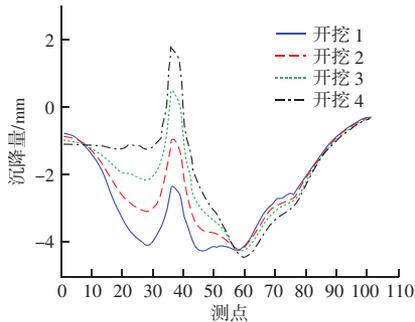
形值也会增大。其中最大变形值出现在测点 30 到测点 40 之间, 该区段位于基坑开挖区域的中段, 受到基坑开挖影响最大, 变形最大。这是因为地下管线左右两侧都有基坑开挖, 由于基坑开挖卸载效应, 使得靠近基坑附近的土体向上隆起, 地下管线上方地表土体离两侧基坑较近, 隆起效果较为明显。当二区开挖时, 如图 8 (b) 所示地表的竖向变形明显变小, 这是由于在一区整体开挖完成后, 地下结构也施工完毕, 后续开挖造成的地表竖向变形会变小。随着开挖的进行, 整体趋势为向上隆起, 在测点 35 到测点 45 处仍然向上隆起, 在测点 20 到测点 35 和测点 45 到测点 65 之间, 地表变形显示为沉降, 随着



(a) 一区开挖



(b) 二区开挖



(c) 三区开挖

图 8 地表沉降

Fig. 8 Ground surface settlement

开挖的进行沉降值逐渐变小。三区开挖时, 如图 8 (c) 所示, 地表竖向变形趋势与二区开挖一致, 当整体开挖完成时, 只有测点 35 到测点 40 处出现地表隆起, 其他位置都表现为沉降, 最大地表隆起值为 1.9 mm, 最大地表沉降值为 4.2 mm。

5 结论

通过对杭州市凤起潮鸣项目基坑开挖对下卧地铁隧道影响的数值模拟研究, 可得到如下结论:

(1) 软土地区基坑开挖对下卧隧道有明显影响。基坑开挖导致的隧道变形主要表现为竖向隆起, 主要是由于隧道上方土体卸载, 隧道上方强度低于隧道下部, 隧道产生隆起变形。

(2) 随着基坑开挖深度的增加, 核心区隧道变形逐渐增大。由于施工前期, 土体往往处于较为稳定的状态, 其初始应力场较为均匀, 因此土方开挖对隧道的影响相对较小。而在后期土方开挖过程中, 土体已经受到了较大的扰动, 其初始应力场可能已经发生变化, 导致隧道的隆起速度加快。

(3) 隧道上下行线的变形相差不大, 只有在基坑边缘处, 上行线隧道下沉变形比下行线大, 主要原因是该处地连墙呈现为不规则形状, 这与总变形上行线变形大于下行线的位置相照应。

参考文献

- [1] 刘伟, 赵亚军, 吕朋, 等. 施工开挖对富水软弱土深基坑变形特性的影响 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 1): 2784 - 2789.
- [2] 李永录, 李晓东. 既有地下管线综合评估应用 [J]. 建筑结构, 2007, 37 (增刊 1): 672 - 674.
- [3] 裴学军, 帅彬, 王洪涛, 等. 复杂环境下深大基坑开挖变形与数值模拟分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 1): 2777 - 2783.
- [4] 林钊睿, 蒋亚龙, 徐长节, 等. 单侧有限土体非对称基坑受力变形机理试验研究 [J/OL]. 岩土工程学报, 1 - 11 [2025 - 03 - 25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20250208.1638.004.html>.
- [5] 王成华, 段贤伟. 基坑开挖对地下管线工作性状影响的数值分析 [C] //中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会. 《地下空间与工程学报》vol. 9 No. 5. 2013: 7.
- [6] 彭基敏, 何庆萍. 深基坑施工对相邻地下管线的影响分析 [J]. 工业建筑, 2008, (增刊 1): 889 - 890, 964.
- [7] 施有志, 华建兵, 连宇新, 等. 地铁深基坑施工扰动下邻近管

- 线安全评价及保护措施 [J]. 工程地质学报, 2018, 26 (4): 1043-1053.
- [8] 郜新军, 段鹏辉, 王磊. 基坑开挖对邻近管线变形影响及控制措施研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2020, 41 (5): 66-71.
- [9] 蒋真皓, 徐利锋. 基坑开挖对临近建筑和管线的变形影响分析及控制措施 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 1): 2832-2836.
- [10] 邹森, 吴禄源, 王磊. 某地铁站深基坑开挖对临近管线的影响分析 [J]. 铁道标准设计, 2016, 60 (3): 106-111.
- [11] 金祎, 柯磊, 胡方剑, 等. 深基坑开挖对近邻大直径管线的影响 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (2): 790-796.
- [12] 王洪德, 肖杨. 深基坑开挖对邻近地理管线扰动影响分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2018, 37 (5): 769-775.
- [13] 袁小平, 刘红岩, 吕淑然. 深基坑开挖对双层地下管线影响的有限元分析 [J]. 工业建筑, 2011, 41 (增刊 1): 771-775.
- [14] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (7): 2027-2034.
- [15] 左殿军, 史林, 李铭铭, 等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (增刊 2): 391-395.
- [16] VORSTER T E, KLAR A, SOGA K, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (11): 1399-1410.
- [17] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16 (2): 93-98.
- [18] CALVETTI F, DI P C, NOVA R. Experimental and numerical analysis of soil pipe interaction [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004, 130 (12): 1292-1299.
- [19] YIMSIRI S, SOGA K, YOSHIZAKI K, et al. Lateral and upward soil-pipeline interactions in sand for deep embedment conditions [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004, 130 (8): 830-842.
- [20] GUO P. Numerical modeling of pipe soil interaction under oblique loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (2): 260-268.

(上接第 108 页)

- [9] 陈建峰, 李良勇, 徐超, 等. 套筒长度对加筋碎石桩复合地基路堤变形和稳定性的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (7): 1662-1669.
- [10] 李丽华, 曹毓, 刘巨强, 等. 不同加筋方式下碎石桩复合地基承载性能试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (12): 3085-3094.
- [11] 黄世斌, 邹辰皓, 王家全, 等. 基于离散-连续耦合的加筋包裹碎石桩承载机理分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2022, 47 (1): 13-21.
- [12] GAO J, ZHANG Y, WANG C, et al. Behavior characteristics of geosynthetic-encased stone column under cyclic loading [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 28: 100554.
- [13] ZHANG X, YOO C, CHEN J F, et al. Numerical modeling of floating geosynthetic-encased stone column supported embankments with basal reinforcement [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50 (4): 720-736.
- [14] 王家全, 常志凯, 林志南, 等. 土工格栅包裹碎石桩力学特性数值模拟分析 [J]. 公路, 2021, 66 (8): 7-12.
- [15] 郭跃飞, 章本本, 罗正东, 等. 竹筋格栅套筒加筋碎石桩极限承载力计算 [J]. 公路, 2023, 68 (10): 111-117.
- [16] LEE D Y, YOO C, PARK S, et al. Field load tests of geogrid encased stone columns in soft ground [C]. Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. California: International society of Offshore and Polar Engineers, 2008, 2: 521-524.