

钢板桩围护基坑开挖对下卧地铁隧道影响的数值模拟研究^{*}

韩宇峰¹ 徐前卫¹ 黄通² 贺翔¹ 段罗² 杨革² 郭玉坤³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 中国中铁二局第五工程有限公司, 610031, 成都;

3. 中国铁路上海局集团有限公司上海东站铁路建设项目管理部, 200071, 上海)

摘要 [目的]在既有地铁隧道上方施工深基坑将引起隧道变形,采用钢板桩围护垂直开挖施工,可减少单段开挖覆土量,有利于控制隧道上浮,应对钢板桩围护垂直开挖对下卧地铁隧道的变形影响进行深入研究。[方法]依托某地铁隧道工程,采用数值模拟方法,建立了钢板桩围护基坑的二维和三维有限元模型,分别模拟了基坑降水工况及不同开挖步骤条件。通过线性回归分析,讨论了降水对下卧隧道沉降和水平位移的影响情况。通过校验模型结果与实测值,讨论了土方开挖对下卧隧道沉降和水平位移的影响情况。结合现场监测结果验证模型可靠性后,进一步预测了采用钢板桩围护条件下隧道的上浮变形。[结果及结论]钢板桩围护垂直开挖可有效控制隧道变形;下卧隧道拱顶处的沉降峰值较拱腰处更大,且变化幅度也更大;利用监测数据拟合获得的隧道沉降降水影响折减系数为0.05~0.30,在覆土越多的区域,该经验折减系数更趋向于较大值;水平位移不受降水影响,不需要折减;修正结果后预测在钢板桩围护垂直开挖区段内,东线和西线隧道拱顶上浮分别约为3.3~5.7 mm和4.5~6.6 mm。

关键词 地铁;下卧隧道;基坑工程;钢板桩围护

中图分类号 U455.4;TU94⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.20245958

Impact Numerical Simulation of Steel Sheet Pile Foundation Pit Excavation on Underlying Metro Tunnels

HAN Yufeng¹, XU Qianwei¹, HUANG Tong², HE Xiang¹, DUAN Luo², YANG Ge², GUO Yukun³

(1. Key Laboratory of Road and Transportation Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. China Railway ERJU No. 5 Engineering Co., Ltd., 610031, Chengdu, China; 3. Shanghai East Railway Station Project Management Department, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., 200071, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Deep foundation pit excavation above

existing metro tunnels may cause tunnel deformation. Vertical excavation with steel sheet pile support can reduce the amount of overburden soil removed from each segment, which is conducive to help control the tunnel uplift. It is required to conduct an in-depth analysis of the deformation effects of vertical excavation with steel sheet pile support on underlying metro tunnels. [Method] Based on a metro tunnel engineering, using numerical simulation method, two-dimensional and three-dimensional finite element models of a foundation pit retained by steel sheet piles are established, to simulate the dewatering conditions of the foundation pit and the conditions of different excavation steps separately. Then, through linear regression analysis, the impact of earthwork excavation on the settlement and horizontal displacement of the underlying tunnel is discussed. Through the verification model results and field-measured results, the influence of soil excavation on underlying tunnel settlement and horizontal displacement is discussed. After verifying model reliability with field-monitored data, tunnel uplift deformation under steel sheet pile support conditions is further predicted. [Result & Conclusion] Vertical excavation with steel sheet pile support can effectively control tunnel deformation. The peak settlement at underlying tunnel vault is greater and exhibits larger variation than that at arch waist, and the variation amplitude is bigger; the reduction coefficient for tunnel settlement dewatering impact obtained from monitoring data fitting is 0.05 to 0.30. In areas with greater overburden soil, the empirical reduction coefficient tends to be higher; the horizontal displacement is not under dewatering impact and no reduction is needed. It is predicted that after correction, in the steel sheet pile excavation section, the tunnel vault uplifts on east-line and west-line are approximately 3.3 to 5.7 mm and 4.5 to 6.6 mm, respectively.

Key words metro; underlying tunnel; foundation pit engineering; steel sheet pile support structure

^{*} 国家重点研发计划项目(2023YFC3009401);中国国家铁路集团有限公司2024年科研专项(RD2024G022)

在既有地铁隧道上方施工深基坑的工程中,为准确预测、控制隧道变形,国内外学者已从理论分析^[1]、数值模拟^[2-6]、模型试验^[7-9]和现场监测^[10]等不同角度开展了研究。文献[1]提出了一种包含基坑降水因素影响的下卧隧道变形的计算方法;文献[2]基于数值模拟,得出隧道上方直接开挖是引起下卧隧道隆起主要原因的结论;文献[7]开展离心试验,得出基坑距隧道越近,基坑卸载一再加载扰动作用越明显的结论;文献[10]基于全过程监测,认为卸荷量与隧道隆起量成正相关,分区开挖对隧道的净空收敛没有明显的抑制作用。

在预测计算方法和控制对策方面,文献[11]采用机器学习方法,建立了基于多模型融合的Stacking模型对沉降进行预测。文献[12]提出了基坑施工全过程控制理念,以及基坑变形进行主动控制的理论。

以上研究较少系统地考虑开挖和降水的共同作用,较少考虑不同围护结构对隧道变形的影响,且研究对象所属地区的地质条件和工程情况存在很大差异。鉴于此,本研究以某地铁隧道基坑开挖工程为例,依托现场监测与数值仿真,研究基坑采用钢板桩围护条件下基坑开挖对下卧地铁隧道的影响机理及变形控制效果。

1 工程概况与现场监测

1.1 工程背景

某地铁隧道基坑结构总长为 369.3 m,基坑标准宽度为 32.0 m,基坑深度为 13.3 m,设计采用明挖顺作法、半盖挖法施工。基坑围护结构采用“800 mm 厚地下连续墙+内支撑”的形式。基坑标准段内支撑共采用两道支撑,其中:第一道为钢筋混凝土撑,水平间距为 6 m;第二道为外径 $\phi=609$ mm、壁厚 $t=16$ mm 的钢管撑,水平间距为 3 m。

由于下卧地铁隧道上浮变形与卸载率近似呈线性关系^[13-16],为减少传统放坡式开挖工况下的单段开挖覆土量,本工程选取一段试验段,采用钢板桩围护垂直开挖施工,以控制隧道的上浮变形。试验段钢板桩围护宽度为 8 m,总长度约为 32 m。区间隧道自动化监测里程为 DK3+824~DK3+944,隧道每 8 m 设一个断面进行监测,每个断面布设 5 个监测点,监测拱顶、拱腰及底板的变形情况。截至 2021 年 3 月 31 日,基坑施工情况与开挖分区如图 1 所示,基坑地质剖面与隧道测点布置如图 2 所示。

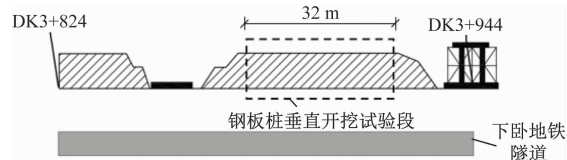
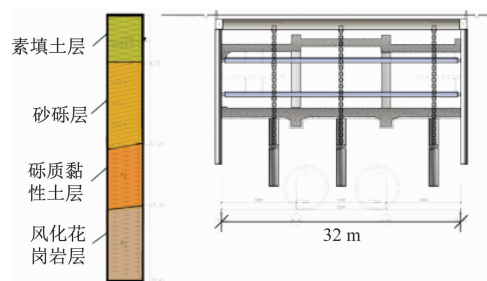
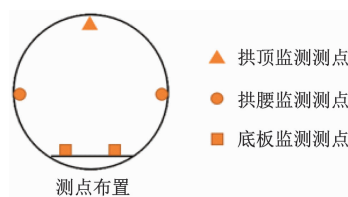


图 1 基坑施工情况与开挖分区

Fig. 1 Construction situation and excavation partition of foundation pit



a) 基坑地质剖面



b) 监测断面测点布置

图 2 基坑地质剖面与隧道测点布置图

Fig. 2 Diagram of foundation pit geological profile and tunnel measuring point layout

1.2 工程地质与水文地质

某地铁隧道基坑工程所处地层从上至下分别为:素填土层、素填土(碎石)层、砂砾层、砾质黏性土层、风化花岗岩层等。隧道结构底板大多位于砾质黏性土层。

本段地面水不发育,地下水位埋深 2.00~6.20 m、高程 1.09~6.88 m,地下水位年平均变化幅度为 2.00~3.00 m。地下水主要有 2 种类型:一类是松散岩类孔隙水,主要赋存于冲洪积砂层和残积砾质黏性土层中;另一类为基岩裂隙水,主要赋存于块状强风化、中等风化带裂隙中,略具承压性,主要由孔隙水补给,排泄方式为地下径流。

2 基坑分层降水施工影响

2.1 基坑分层降水计算模型

针对钢板桩围护垂直开挖试验段,采用二维有限元分析法,在不进行土方开挖前提下,研究基坑分层降水至不同深度时,下卧地铁隧道及坑外地面的沉降情况。模型尺寸为 93.6 m(宽)×50.0 m

(高), 基坑底距模型底部约 30.0 m, 基坑围护结构距模型边界约 30.0 m, 该有限元模型如图 3 所示。

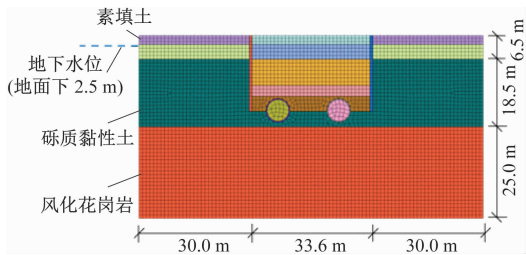


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.2 模型参数

依据现场水位观测, 确定基坑内初始水位维持在地面下 2.5 ~ 3.0 m。数值模拟定义初始水位为地下 2.5 m。隧道采用弹性本构(C50 混凝土), 地下连续墙(以下简称“地连墙”)采用弹性本构(C35 混凝土), 地层均采用修正摩尔库伦本构, 以上对象均采用平面应变单元模拟。土层物理力学性质计算参数如表 1 所示。

2.3 基坑降水结果分析

本节提取基坑降水至不同深度处的计算结果, 重点分析坑外地面沉降最大值, 以及下卧地铁隧道水平及竖向变形的最大值。由图 4 观察到变形值与

降水深度近似呈线性关系, 通过一元线性回归分析, 得出不同变形指标与降水深度的拟合曲线, 如图 4 所示。由图 4 可知: 当基坑钢板桩围护垂直开挖试验段单纯考虑降水施工影响时, 基坑内整层水位每下降 1.0 m, 基坑外地面随之沉降约为 3.3 mm; 下卧隧道沉降约为 2.8 mm; 下卧隧道水平位移约为 0.2 mm, 位移方向指向两条隧道之间。考虑到降水井分散布设, 实际施工中很难做到整层水位同时下降, 因此, 图中所示单位降水深度所引起的变形响应量, 尚需结合实测水位变化情况进行分析, 并引入降水影响折减系数进行修正, 以更合理地评估实际工程条件下的变形水平。

表 1 土层物理力学性质计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of soil layer physical and mechanical properties

地层编号	岩土名称	密度/(kg/m³)	压缩模量/MPa	直剪(快剪)	
				内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
① ₁	素填土	18.2	5	15.0	12.0
⑦ ₃	砾质黏性土	18.1	6	23.0	22.0
⑧ ₁	全风化花岗岩	18.6	8	24.0	24.5
⑧ ₂₋₁	强风化花岗岩	18.9	12	27.0	25.5

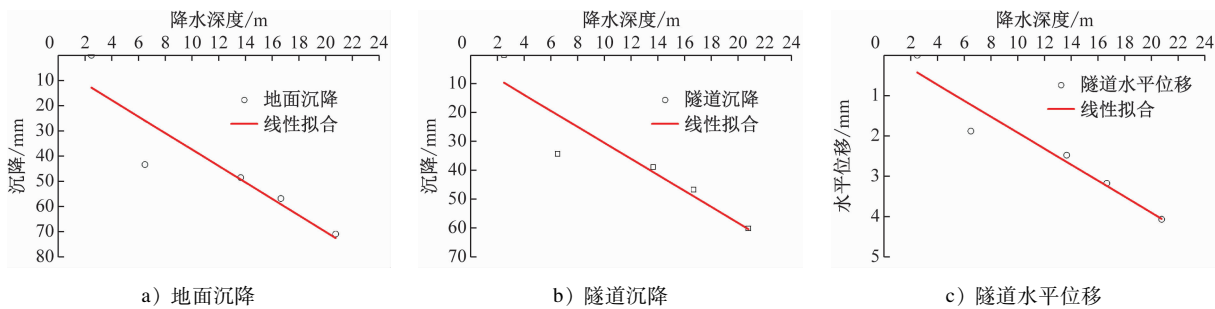


图 4 不同变形指标与降水深度的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of different deformation indexes and dewatering depths

3 基坑开挖施工影响分析

本章选取钢板桩围护垂直开挖试验段与前后标准段区域, 进行三维有限元分析。施工阶段模拟现场实际开挖情况, 研究基坑下卧既有地铁隧道的变形情况, 并与现场监测结果进行校核。

3.1 基坑开挖计算模型

三维数值模型尺寸为 120.0 m(长) × 93.6 m(宽) × 50.0 m(高), 某地铁隧道基坑底距模型底部约 35.0 m, 基坑围护结构距模型边界约 30.0 m, 基

坑开挖的三维模型轴测透视图如图 5 所示。

3.2 模型参数与施工步骤

三维模型土层物理力学参数与 2.2 节取值相同, 模拟对象(材料)及其单元类型分别为: ① 隧道(C50 混凝土)、地连墙(C35 混凝土)、钢板桩(钢材)采用板单元模拟; ② 混凝土支撑(C35 混凝土)、混凝土土系杆(钢材)、钢支撑(钢材)、钢系杆(钢材)、围护纵向支撑(钢材)采用植入式桁架单元模拟; ③ 格构柱(钢材)、工程桩(C35 混凝土)采用植入式梁单元模拟, 以上对象均采用弹性本构。模型

设置垂直开挖试验段长度为 32.0 m, 设置 4 个小坑进行垂直开挖作业。试验段三维模型纵剖面图如图 6 所示, 模拟 1#坑、2#坑、3#坑及 4#坑依序施工, 在每个小坑底板施工完成后进行下一个小坑的土方开挖。

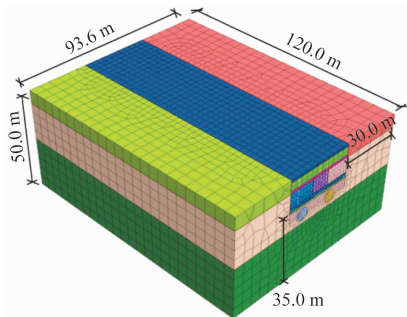


图 5 基坑开挖的三维模型轴测透视图

Fig. 5 Axonometric perspective of foundation pit excavation 3D model

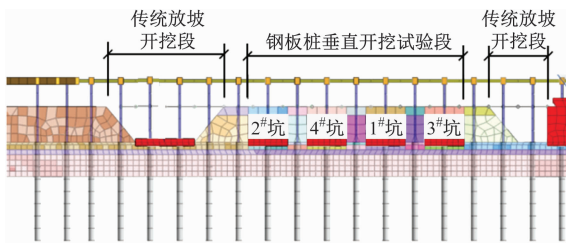


图 6 试验段三维模型纵剖面图

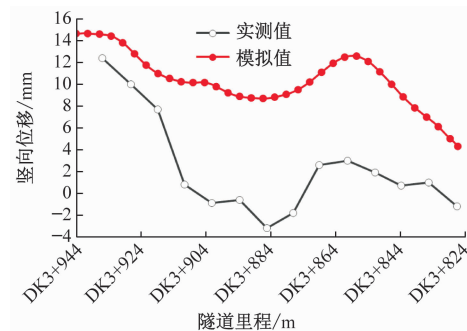
Fig. 6 Longitudinal section of test section 3D model

3.3 模拟结果校核

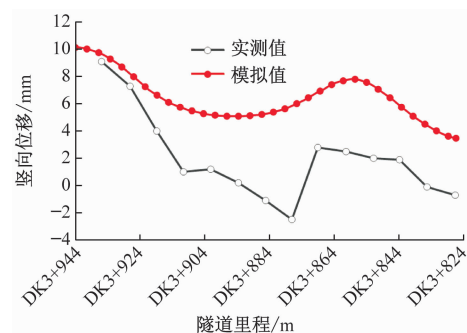
本节分析三维模型计算结果并与监测数据进行复合校验, 从而能够更好地修正模型结果并为后续施工提供参考。由于某地铁隧道东线与西线隧道在研究区段内基本平行, 且均位于基坑下方同一标高位置, 本节选取东线隧道作为研究对象。绘制东线隧道拱顶与拱腰处的位移曲线, 东线隧道变形的模拟值与实测值对比如图 7 所示。由于实测值受测点布设数量限制, 点线连接存在折角, 而数值模拟建模节点很密, 点线连接圆滑。

图 7 a) 和图 7 b) 分别反映了隧道拱顶和拱腰处的竖向位移情况。实测值与模拟值结果的分布规律高度吻合。总体而言, 模拟上浮变形较实测更为显著, 主要是由于建模参数选取趋于安全考虑。此外, 由于实测中采取了降水措施, 可使隧道上浮得到一定的控制^[17-18], 但不同区域坑内水位不完全一致, 纵向覆土厚度也不同, 会导致降水抗浮效果也有所不同, 根据曲线差异值计算, 可将 2.3 节提出

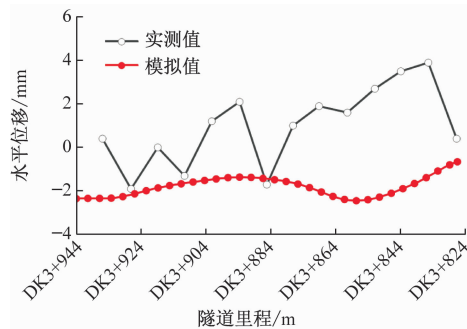
的降水影响经验折减系数初步确定为 0.05 ~ 0.30。在覆土越多的区域, 该经验折减系数越趋向于较大值。



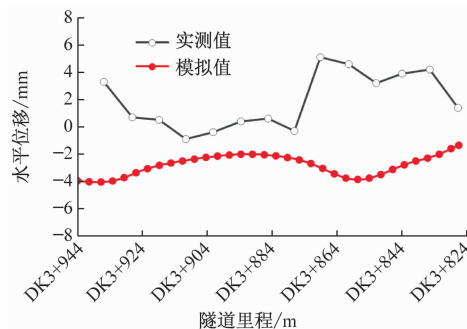
a) 拱顶竖向位移



b) 拱腰竖向位移



c) 拱顶水平位移



d) 拱腰水平位移

注: 水平位移中, 正值代表朝东发生位移, 负值代表朝西发生位移。

图 7 东线隧道变形的模拟值与实测值对比

Fig. 7 Comparison of east line tunnel deformation simulation and measurement values

图7 c)和图7 d)分别反映了隧道拱顶和拱腰处的水平位移情况。由于实际测点纵向间隔较大,导致数据波动明显,实测值均小于模拟值,可以认为数值仿真计算更趋于安全。根据曲线差异值计算,得出降水影响经验折减系数不适用于水平位移,即降水不影响水平位移,不需要折减。

在早先开挖至底板的区域及邻近放坡处,其下卧隧道上浮比在未开挖区域的上浮明显更大;水平位移也表现出同样的特点,即已开挖区域下卧隧道水平偏移更显著。

对比拱顶和拱腰的实测值,拱顶处的沉降峰值较拱腰处更大,且在隧道纵向上拱顶的沉降变化幅度也更大。

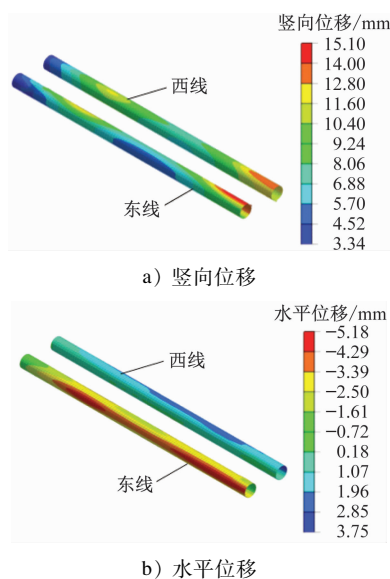
4 钢板桩段施工影响与预测

本章采用与第3章相同的模型,施工步在第3章现场实际工况的基础上增加钢板桩围护垂直开挖工况,研究下卧某地铁隧道的位移发展规律,并依据模拟值预测隧道后续变形情况。

4.1 下卧地铁隧道受到的影响

4.1.1 隧道整体变形

随着试验段钢板桩围护垂直开挖施工步推进,隧道沉降和水平位移的峰值均未发现明显突变,且出现峰值的位置也较为稳定。在试验段施工完成后,隧道管片模型的整体变形云图如图8所示。



注:水平位移正值代表朝东发生位移,负值代表朝西发生位移。

图8 试验段施工完成后隧道管片模型的整体变形云图

Fig. 8 Nephogram of tunnel segment model overall deformation after test section construction completion

4.1.2 隧道拱顶变形

根据3.3节已得出的结论,拱顶处的沉降峰值较拱腰处大,因此提取隧道拱顶沿线路方向的位移分布,不同阶段隧道拱顶变形如图9所示,该图展示了试验段开挖前后拱顶的变形情况。

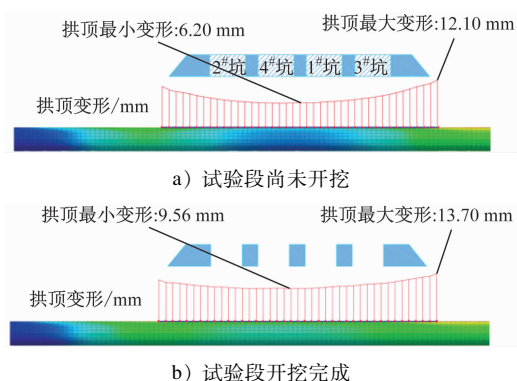


图9 不同阶段隧道拱顶变形

Fig. 9 Deformation of tunnel vault at different stages

由图9可知:试验段下卧地铁隧道拱顶上浮模拟结果最大值从12.10 mm逐步增大至13.70 mm;最小值从6.20 mm逐步增大至9.56 mm,峰值点位置随着开挖小坑位置变化而变化。

在水位保持稳定的情况下,仅实施后续4个小坑的钢板桩垂直开挖,预计仍将引起试验段下卧隧道至少3.00 mm的上浮。相较于传统放坡开挖方式,钢板桩围护垂直开挖可有效控制隧道上浮变形发展,但开挖过程中的上浮增速仍较为明显,需要在过程中严格控制施工质量,提高开挖效率,尽早施工结构底板。

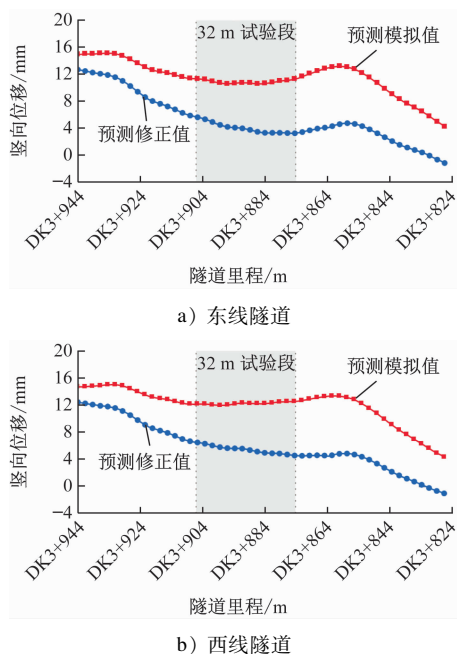
4.2 模型修正与预测

结合基坑分层降水影响分析与现场实测值,对计算结果进行修正,预测隧道东线与西线最大的沉降情况。根据上述研究,将拱顶作为最不利点进行分析,隧道拱顶竖向位移预测如图10所示。

由图10可知:东线隧道拱顶处最大上浮约为12.73 mm,西线隧道拱顶处最大上浮约为12.50 mm,均发生在传统放坡开挖段,这是由于该区域内隧道前期累计变形较大所致。在垂直开挖试验段内,预测东线隧道拱顶处上浮处于3.3~5.7 mm范围内,预测西线隧道拱顶处上浮处于4.5~6.6 mm范围内。

5 结语

1) 基坑开挖后下卧地铁隧道拱顶处的沉降峰



注:预测修正值为考虑了降水情况修正后的最终计算结果。

图 10 隧道拱顶竖向位移预测

Fig. 10 Prediction of tunnel vault vertical displacement

值较隧道拱腰处更大,且隧道纵向上拱顶的沉降变化幅度也更大。

2) 钢板桩划分小坑垂直开挖施工效果相较于传统放坡开挖更为有利,预测东线隧道拱顶上浮处于 3.3 ~ 5.7 mm 范围内,西线隧道拱顶上浮处于 4.5 ~ 6.6 mm 范围内,隧道总体上浮变形可控。

3) 降水影响对于隧道沉降的经验折减系数可初步确定为 0.05 ~ 0.30,并且在覆土越多的区域,该经验折减系数越趋向于较大值。水平位移不受降水影响,不需要折减。

4) 钢板桩围护垂直开挖过程中的上浮增速较为明显,实际工程中须关注钢板桩打设可靠性、每道支撑的架设时间、无支撑围护结构暴露时间,以及底板及后续主体结构施工进度,合理组织施工并加强施工过程监测。

参考文献

- [1] 欧雪峰,张学民,刘学勤,等. 基坑开挖与降水引起下卧隧道变形的解析计算方法[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 147.
OU Xuefeng, ZHANG Xuemin, LIU Xueqin, et al. Analytic calculation method of underlying tunnel deformation caused by excavation and dewatering of upper pit[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 147.
- [2] YANG T, TONG L, PAN H, et al. Effect of excavation sequence on uplift deformation of underlying existing metro tunnel[J].

Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, 35 (2): 04021003.

- [3] 艾楠, 侯和涛, 王培森, 等. 路面交通和拟建济南地铁 6 号线对邻近砖木结构古建筑振动影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 61.
AI Nan, HOU Hetao, WANG Peisen, et al. Impact analysis of ground traffic and proposed Jinan Metro Line 6 on nearby ancient brick-wood structure vibration[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 61.
- [4] 聂鹏. 钻孔灌注桩施工对地层及既有管沟振动影响规律研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 108.
NIE Peng. Study on the vibration influence law of bored cast-in-place pile construction on existing strata and pipe trenches[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 108.
- [5] 金平, 王涛, 蔡海兵, 等. L 形地铁换乘车站超深基坑支护结构设计优化分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 60.
JIN Ping, WANG Tao, CAI Haibing, et al. Optimization analysis of ultra deep foundation pit support structure design for L-shaped subway transfer stations[J]. Urban Mass Research, 2023, 26(1): 60.
- [6] 赵耀, 黄长鑫, 张青, 等. 新建隧道小净距斜下穿既有隧道变形多因素分析[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 58.
ZHAO Yao, HUANG Changxin, ZHANG Qing, et al. Multi-factor deformation analysis for newly-built tunnel obliquely under-passing existing tunnels by small clearance[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 58.
- [7] 张玉伟, 谢永利, 翁木生. 非对称基坑开挖对下卧地铁隧道影响的离心试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2555.
ZHANG Yuwei, XIE Yongli, WENG Musheng. Centrifugal test on influence of asymmetric foundation excavation to an underlying subway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2555.
- [8] 孙慧, 李从安, 李波, 等. 基于离心机数值模拟的深基坑开挖支护结构受力和变形研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊 2): 114.
SUN Hui, LI Cong'an, LI Bo, et al. Study on stress and deformation of deep excavation support structure based on centrifuge tests and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S2): 114.
- [9] 孙慧, 李波, 王志鹏, 等. 盾构机始发井深基坑力学和变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊 1): 244.
SUN Hui, LI Bo, WANG Zhipeng, et al. Centrifuge model test study on mechanical behavior and deformation characteristics of deep foundation pit for shield launching shaft[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S1): 244.
- [10] 毕书琦, 甘彬霖, 梁亚华, 等. 基坑开挖对既有近距离下卧隧道影响实测分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1198.
BI Shuqi, GAN Binlin, LIANG Yahua, et al. Analysis of the influence of foundation pit excavation on the existing tunnel[J].

- Science and Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1198.
- [11] 秦胜伍, 张延庆, 张领帅, 等. 基于 Stacking 模型融合的深基坑地面沉降预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1316.
- QIN Shengwu, ZHANG Yanqing, ZHANG Lingshuai, et al. Prediction of ground settlement around deep foundation pit based on stacking model fusion[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1316.
- [12] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1.
- ZHENG Gang. Method and application of deformation control of excavations in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 1.
- [13] 王定军, 王尉行, 刘俊景, 等. 基坑开挖对下卧隧道变形影响分析及合理加固范围研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 4.
- WANG Dingjun, WANG Weixing, LIU Junjing, et al. Influence of foundation pit excavation on the deformation of underlying tunnel and the reasonable reinforcement range[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 4.
- [14] 陈仁朋, 叶跃鸿, 王诚杰, 等. 大型地下通道开挖对下卧地铁隧道上浮影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(7): 1269.
- CHEN Renpeng, YE Yuehong, WANG Chengjie, et al. Influence of large underground passage excavation on the uplift of underlying metro tunnel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(7): 1269.
- [15] 吴剑秋, 孙旻, 蔡庆军, 等. 基坑开挖对紧邻下卧地铁隧道变形的影响与控制研究[J]. 建筑施工, 2020, 42(2): 145.
- WU Jianqiu, SUN Min, CAI Qingjun, et al. Study on deformation impact and control of closely underlying metro tunnel caused by foundation pit excavation[J]. Construction Technology, 2020, 42(2): 145.
- [16] 夏明, 张慧鹏, 张志强, 等. 泥质粉砂岩地层盾构隧道管片上浮影响因素[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 120.
- XIA Ming, ZHANG Huipeng, ZHANG Zhiqiang, et al. Influencing factors of segment uplift in shield tunnel under argillaceous siltstone stratum[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 120.
- [17] 赫德亮, 李红普, 何本国. 地铁深基坑硬化土模型参数敏感性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 90.
- HE Deliang, LI Hongpu, HE Benguo. Sensitivity study of hardened soil constitutive model parameters for metro deep foundation pit[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 90.
- [18] 闫文博, 刘燕, 刘俊岩, 等. 黄河中下游超深盾构工作井基坑变形警情分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 97.
- YAN Wenbo, LIU Yan, LIU Junyan, et al. Deformation alarm analysis of ultra-deep shield working shaft foundation pit in Yellow River middle-lower reaches[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 97.
- [19] 薛彦琪, 张可能, 胡晓军. 深基坑开挖卸荷对下卧既有地铁隧道的影响分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1230.
- XUE Yanqi, ZHANG Keneng, HU Xiaojun. Analysis of the influence of unloading during deep excavation on underlying existing subway tunnels[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6): 1230.
- [20] 邓日朗, 郑先昌, 岳云鹏, 等. 竖井工法开挖深基坑对下卧既有隧道上浮变形的控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8947.
- DENG Rilang, ZHENG Xianchang, YUE Yunpeng, et al. Control of uplift deformation of underlying existing tunnels induced by deep shaft excavation[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(20): 8947.
- [21] 王军, 宋雪松, 郎俊彪, 等. 无降水深基坑锚杆-旋喷体封底止水体的抗浮机理试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(3): 322.
- WANG Jun, SONG Xuesong, LANG Junbiao, et al. Experimental study on the anti-uplift mechanism of bottom-sealed grouting structures for deep excavation without dewatering[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2023, 42(3): 322.
- [22] 黄振科, 曹珂, 谢俊. 地铁车站深基坑近接施工安全控制研究[J]. 土工基础, 2024, 38(3): 399.
- HUANG Zhenke, CAO Ke, XIE Jun. Safety control of a subway station deep excavation construction[J]. Soil Engineering and Foundation, 2024, 38(3): 399.
- [23] 周振华. 复杂地质环境下超深地铁基坑支护施工技术研究[J]. 价值工程, 2024, 43(16): 146.
- ZHOU Zhenhua. Research on construction technology for ultra deep subway foundation pit support in complex geological environments[J]. Value Engineering, 2024, 43(16): 146.
- [24] 胡博韬, 张小会, 王炳龙, 等. 地基加固对隧道下穿铁路路基车致动力响应的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 1606.
- HU Botao, ZHANG Xiaohui, WANG Binglong, et al. Dynamic response of foundation reinforcement to underpass system under train load[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(10): 1606.
- [25] 文璐, 狄宏规, 陈金铭, 等. 软土基坑伺服钢支撑轴力变化对相邻支撑轴力与围护结构变形的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 88.
- WEN Lu, DI Honggui, CHEN Jinming, et al. Effect of axial force adjustment of servo steel struts on axial force of adjacent struts and enclosure structure deformation of foundation pit in soft soil[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 88.

· 收稿日期:2024-11-23 修回日期:2025-04-11 出版日期:2025-07-10
 Received:2024-11-23 Revised:2025-04-11 Published:2025-07-10
 · 第一作者:韩宇峰,硕士研究生,2233412@tongji.edu.cn
 通信作者:徐前卫,副教授,xuqianwei@tongji.edu.cn
 · ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
 © Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license