

既有地铁隧道上方明挖基坑施工方案分析

刘长宝 邹金杰 彭加强

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 310014, 杭州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 明挖基坑施工对邻近地铁隧道的影响是工程设计和施工中的难点。选取杭州市延安路至仁和路过街通道基坑开挖作为工程案例, 采用三维有限元分析的方法, 针对地铁隧道上方浅覆土工况, 基坑开挖中采用地基加固、分期开挖等技术方案以减少对既有地铁隧道的影响, 提出门式框架加固、分期开挖及控制降水等保护措施。研究结果表明, 施工期各监测数据稳定合理, 数值模拟与现场实测数据基本吻合, 基坑开挖保护措施切实有效。

关键词 地铁隧道; 门式框架; 有限元; 浅覆土; 加固保护

中图分类号 TU94*1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.030

Analysis of Open-cut Foundation Pit Construction Scheme above Existing Metro Tunnel

LIU Changbao, ZOU Jinjie, PENG Jiaqiang

Abstract The influence of open-cut excavation on the nearby metro tunnels is one of the difficulties in engineering design and construction. A three-dimensional finite element (FEM) method is used to analyze a practical project of cross-road foundation pit in Hangzhou metro. In view of the shallow soil above the metro tunnel, the implementation of foundation reinforcement, staged excavation and other technical schemes in the foundation pit excavation is discussed, in order to reduce the engineering influence on the existing tunnels. At the same time, protection measures like portal frame reinforcement, stratified partition excavation and control precipitation are put forward. The research shows that the detected data are stable and reasonable during the construction, the numerical simulation and field measurement data are basically consistent, proving the effectiveness of the protection measures.

Key words metro tunnel; portal frame; FEM; shallow soil; reinforcement protection

Author's address Power China Huadong Engineering Co., Ltd., 310014, Hangzhou, China

拥有城市轨道交通线路的城市, 其中心区的基础设施建设不可避免地对既有地铁隧道的保护问题。在软土地层中, 开挖基坑引起的坑底隆起会同

步带动下方地铁隧道隆起^[1-3], 从而对地铁隧道使用功能和安全性产生影响, 稍有不慎将会严重威胁地铁的安全。

根据地铁盾构隧道相关技术经验, 保证地铁安全的盾构隧道变形控制值为: 竖向最大沉降及水平位移绝对值 ≤ 20 mm, 隧道变形相对曲率 $\leq 1/2\ 500$, 隧道变形曲率半径 $\geq 15\ 000$ m, 这就给工程建设提出更高的技术要求。因此, 有必要进一步研究明挖基坑施工对邻近地铁隧道的影响, 合理选择控制地铁隧道变形的设计方案, 提出有效措施, 确保地铁隧道可以正常使用。

本文以杭州市延安路至仁和路过街通道基坑开挖具体工程为研究对象, 采用构建三维有限元模型的方法, 探讨基坑开挖中采用的地基加固等技术方案对既有隧道的影响, 提出门式框架加固、分期开挖及控制降水等保护措施。

1 工程概况

延安路至仁和路过街地道位于杭州市最繁华的商业街延安路与仁和路交叉口, 是延安路综合整治工程的一部分, 周边房屋密集。如图 1 所示, 该过街地道主通道呈“一”字型布置, 横跨杭州地铁 1 号线, 与地铁隧道近似垂直相交, 采用明挖法施工。地道基坑开挖深度约 8.4 m, 基坑长 38.2 m, 宽 11.4 m, 坑底部至隧道拱顶覆土厚度仅为 3.9 m。基坑围护采用钻孔桩加止水帷幕, 第一道撑采用混凝土支撑, 第二道撑采用钢管支撑。

工程场地开挖影响范围内的土体自上而下分别为杂填土、素填土、粉质黏土、砂质粉土和淤泥质粉质黏土。坑底位于淤泥质粉质黏土层, 土体性质差, 含水量高, 渗透性差, 流变特性比较明显。

2 主要技术措施

本工程地铁隧道拱顶至基坑底覆土厚度仅为 3.9 m, 小于 1 倍盾构隧道直径($D=6.2$ m), 且施工期

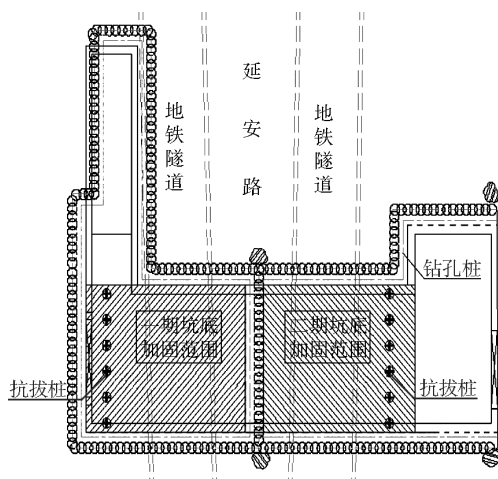


图1 杭州市延安路至仁和路过街地道坑底加固范围

与地铁隧道内道床等二次结构的施工期相冲突,不具备在地铁隧道内部对其进行加固的条件。因此,需考虑采取相应的措施,减少基坑开挖对既有地铁隧道的影响。

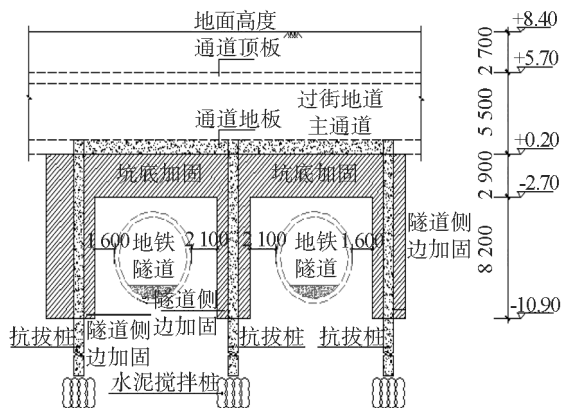
2.1 设计措施

由于过街道路上跨地铁隧道,为尽量减少基坑开挖对既有地铁隧道的扰动,在满足埋设管线的基础上尽可能减小过街地道顶板覆土厚度,以增大地道底板与隧道拱顶间的竖向距离。基坑围护采用“钻孔桩+止水帷幕+混凝土支撑”方案,增大围护体系整体刚度,减少基坑侧向变形。

2.2 加固措施

为降低基坑开挖引起的土体回弹,减小隧道的隆起变形,对坑底与隧道拱顶之间土体,以及隧道两侧土体进行加固并设置抗拔桩,结合过街地道底板形成门式框架结构(见图2)。加固范围包括:

① 地铁隧道顶部土体:地道底板与距地铁隧道顶部 0.5 m 之间的土体;



尺寸单位:mm(标高除外)

图2 坑底加固剖面图

② 位于基坑两端地铁隧道的侧向土体:两端地铁隧道主体至外侧 1.6 m 间土体,加固深度距地铁隧道拱底 1.0 m;

③ 位于基坑中部两地铁隧道间的侧向土体:中部两地铁隧道至内侧 1.6 m 间土体,加固深度距地铁隧道拱底 1.0 m。

2.3 降水措施

本项目位于城市繁华建成区,地层主要为淤泥质粉质黏土层,渗透性差,流变特性明显,开挖困难。坑外大范围降水风险高且实施难度大,所以本工程帷幕内坑内降水主要作为施工辅助措施,为方便坑内土体开挖及运输,在仿真分析中仅按重度变化进行简化处理。

2.4 施工措施

根据本工程地铁隧道覆土浅,以及对施工扰动和注浆压力敏感等特点,土体加固采用注浆压力小、施工振动轻、施工质量保证度高的三轴搅拌桩施工工法。结合地面交通疏解要求,本工程主通道设置分割墙,将通道分为两个基坑,分期实施。

2.5 监测措施

本工程施工过程中对地铁隧道及明挖基坑进行全过程昼夜监测,监测内容主要包括隧道收敛变形、隧道管壁应力监测、地表沉降、土体深层位移等方面。监测过程严格按照规范及国家标准执行,确保数据的连续性和准确性。一旦出现预警,立即停止开挖,采取应急措施,保证施工安全。

3 数值模拟计算

3.1 模型参数及计算工况

采用大型有限元软件 ABAQUS 建立三维数值模型,基坑开挖的淤泥质黏土层和粉质黏土层均采用修正剑桥模型(Clay Plasticity)进行模拟。根据地质详勘报告确定本构模型计算参数,通过分层孔隙比-土体压力值曲线($e-p$ 曲线)变换得到正常固结线(NCL)的斜率 λ 。回弹曲线的斜率 κ 根据经验取 λ 值的 1/5,搅拌桩水泥土加固区域的土体采用线弹性模型模拟。模型参数根据经验选取:①水泥土的模量 $E=120$ MPa,泊松比 $\nu=0.25$;②混凝土 $E=3 \times 10^5$ MPa, $\nu=0.2$;③钢材 $E=2 \times 10^5$ MPa, $\nu=0.3$ 。其他模型参数设置见表 1。

3.2 三维分析计算

根据围护设计技术方案要求,计算工况如表 2 所示。

表1 土层材料模型参数

地层名称	厚度/m	天然重度 γ / (kN/m ³)	孔隙比 e	临界状态 应力比 M	正常固结线 斜率 λ	反弹曲线 斜率 κ	泊松比 ν
①-1 杂填土	3.8	17.5	0.920	1.0	0.060 0	0.012 00	0.40
②-2 粉质黏土	1.7	19.4	0.814	1.0	0.073 6	0.014 72	0.32
③-1 淤泥质黏土	4.5	18.1	1.131	0.8	0.187 6	0.037 52	0.41
③-2 淤泥质黏土夹粉土	5.6	17.6	1.260	0.9	0.133 4	0.026 68	0.38
③-3 淤泥质粉质黏土夹粉土	4.0	18.7	0.954	0.9	0.133 4	0.026 68	0.35
⑥-1 粉质黏土	3.9	19.1	0.876	1.0	0.061 3	0.012 26	0.33
⑥-2 粉质黏土	6.2	19.3	0.845	1.0	0.053 4	0.010 68	0.31

表2 工程围护设计三维分析计算工况表

施工区域	施工工序	施工过程模拟内容
全区域	计算初始应力场	
一期基坑	工序1	基坑钻孔桩施工,坑底搅拌桩和抗拔桩施工,浇筑第一道钢筋混凝土支撑和冠梁,基坑开挖至+2.5 m(设计坑底标高)
	工序2	施工第二道钢管支撑体系和腰梁,开挖土体至+0.20 m(设计坑底标高)
	工序3	拆除支撑,施工一期通道内部结构,顶板覆土回填
二期基坑	工序4	基坑钻孔桩施工,坑底搅拌桩和抗拔桩施工,浇筑第一道钢筋混凝土支撑和冠梁,基坑开挖至+2.5 m(设计坑底标高)
	工序5	施工第二道钢管支撑体系和腰梁,开挖土体至+0.20 m(设计坑底标高)
	工序6	拆除支撑,施工二期通道内部结构,顶板覆土回填

3.3 计算结果分析

各工况计算结果最大值详见表3。由表3可知:一期、二期基坑开挖至坑底时均为最不利工况;基坑最大隆起值为13.98 mm;加固区坑底隆起最大值为1.897 mm;隧道最大水平位移为1.725 mm,最大竖向位移为6.191 mm。由此可见,基坑开挖到底部时隧道变形最大。可采取提高垫层混凝土标号、垫层内设置钢筋网等措施对坑底进行快速封闭,并通过备好钢锭及砂袋进行压重等措施来控制隧道变形。

表3 明挖基坑及地铁隧道变形最大值统计表

施工工序	坑底隆起		地铁隧道	
	非加固区	加固区	水平位移	竖向位移
工序1	13.98	1.245	0.8347	3.222
工序2	13.28	1.891	1.7250	5.922
工序3	12.22	1.455	1.4310	3.080
工序4	12.10	1.587	1.1870	4.109
工序5	12.14	1.897	1.0290	6.191
工序6	12.20	1.473	0.8459	3.302

3.3.1 基坑底部隆起变化

基坑底部最大隆起值变化关系及位移云图见图3~6。从图3可以看出:非加固区基坑底部隆起最大值在施工工序1时最大,为13.98 mm;随着施工工序的增加,基坑底部最大隆起值不断减小;加固区基坑底部隆起呈波动变化,各工序间相差不大,最大隆起值均较小。可见,对基坑进行加固处理可有效减小基坑底部的最大隆起值。

图4~6为工序5时的土体位移分布云图。从

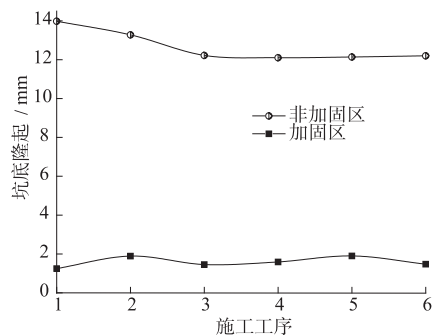


图3 基坑底部隆起值随施工工序变化图

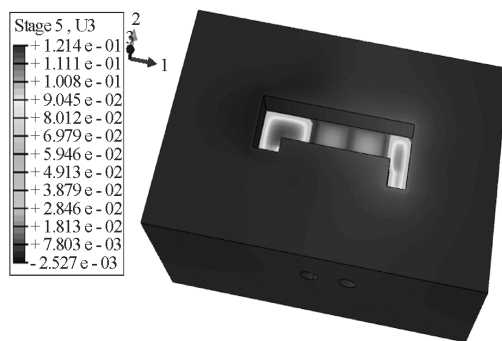


图4 土体竖向位移分布云图(工序5)



图5 土体xz断面竖向位移分布云图(工序5)

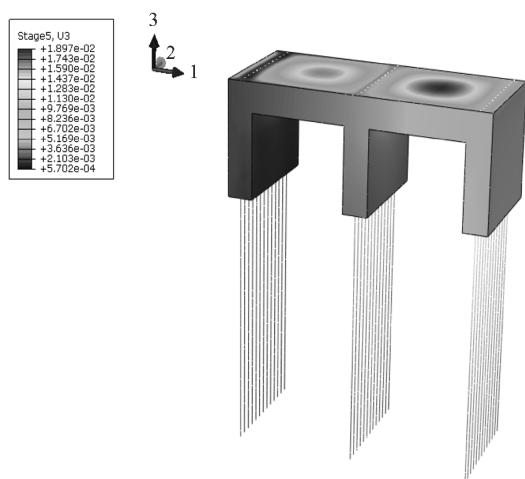


图6 加固区土体竖向位移分布云图(工序5)

图中可以看出:非加固区位置,基坑底部隆起值较大,位置在靠近两端位置处,但基坑底部左右两侧隆起并不是对称的,靠近左侧隧道基坑底部隆起较右侧大;在加固区位置,基坑底部在框架中部隆起较大,且呈对称分布。

3.3.2 地铁隧道结构位移变化

地铁隧道结构水平及竖向位移变化关系及位移云图如图7~9所示。

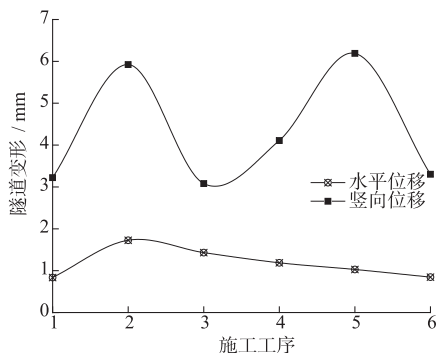


图7 隧道最大变形值随施工工序变化图

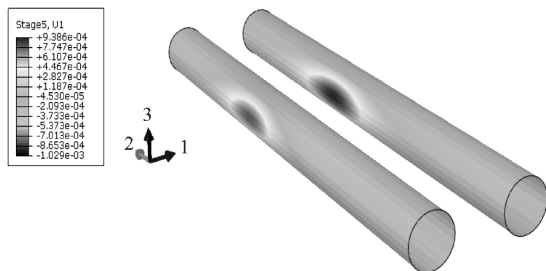


图8 地铁隧道结构水平位移分布云图

从图7可以看出:地铁隧道水平位移最大值随施工工序的变化较小,工序2产生的水平位移最大值较大,为1.725 mm;地铁隧道竖向位移随施工工

序的改变呈波动变化,在工序2与工序5分别达到波峰,工序1、工序3、工序6则位于波谷。基坑的开挖对地铁隧道竖向变形影响较大。

图8、图9为工序5时的地铁隧道结构位移分布云图。从图中可以看出:地铁隧道在基坑位置处水平位移较大,为1.029 mm,其他部位水平位移值均较小;地铁隧道在基坑位置处向上凸起,远离基坑处向下凹陷,且右侧地铁隧道竖向位移变化较大。

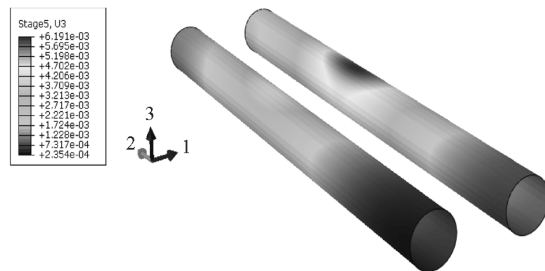


图9 地铁隧道结构竖向位移分布云图

4 监测情况

为掌握明挖基坑施工对地铁隧道的影响,以及基坑自身的变形情况,在本通道施工过程中,对通道下方及左右两侧各50 m范围内的隧道管片进行布点监测(见图10),双线共布置静力水准仪68个、拱顶沉降测点132处、横向收敛测点66组、水平位移测点66处。在明挖基坑周边,共布置房屋沉降观测点20处、地面沉降测点40处、测斜孔7孔、水位孔7孔、桩顶位移测点7处、支撑轴力测点8支。从基坑开挖至土建完工,全过程昼夜不间断监测。

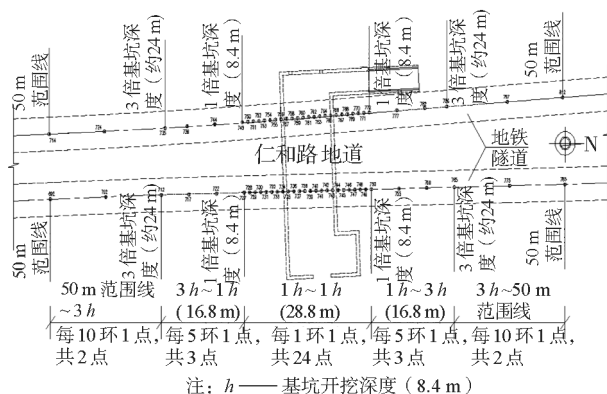


图10 地铁隧道静力水准仪测点布置图

施工全过程监测资料显示,静力水准仪日最大变形值为-0.5 mm,累计最大日变形值为4.3 mm;横向收敛日最大变形值为0.6 mm,累计最大日变形值为-3.9 mm。以上变形均满足地铁保护要求。明挖

基坑监测中房屋累计沉降最大值为 -4.2 mm ,地表沉降累计最大值为 -17.2 mm ,水平位移累计最大值为 16.8 mm ,地下水位变化累计最大值为 -260 mm ,也均满足明挖基本保护要求。根据上述监测数据可看出,仿真数值模拟及现场实测数据基本吻合。由此可见,本工程采用的门式加固体系及分期施工组织方案对既有地铁隧道的保护有效、可靠,满足施工的技术要求。

5 结语

明挖基坑卸荷及降水对邻近地铁隧道有一定的影响。通过三维有限元分析及现场实测数据来看,基坑开挖范围越大、暴露时间越长、土体力学性质越差,地铁隧道所受的影响程度也越大。根据实际工

(上接第132页)

选择将缝隙用绝缘胶密封。

4 结语

轨地之间保持一定的绝缘性能是抑制杂散电流的重要措施。扣件组各绝缘器件的体电阻很大,然而扣件表面积累的污秽会导致扣件表面电阻值下降。运行一段时间后,扣件表面电阻将远小于体电阻,轨地过渡电阻因此而降低。

表面电阻对轨地绝缘性能影响很大,主要与污秽层的电导率、厚度和污秽分布情况有关。污秽层电导率与表面电阻呈线性关系,一般情况下表面电阻远小于扣件组的体电阻;随着污秽的累积,表面电阻值随厚度的增加而逐渐降低,但厚度超过 0.3 mm 后,表面电阻的下降幅度越来越小。当附着在表面的污秽进入轨距块、铁垫板等器件的夹缝时,表面电阻的值有小幅下降。由本文的仿真结果得出一定条件下6个表面的电阻值,并可计算出相应条件下扣件的总表面电阻。以上研究成果可为钢轨对地绝缘的组成,以及表面污秽对轨地过渡电阻的影响研究提供参考。

参考文献

[1] 秦峰,朱祥连,奚杰,等.城市轨道交通设施杂散电流的防护

程情况提出的坑底土体加固、结合地道底板设置抗拔桩的门式框架结构等措施,对地铁隧道起到了确实有效的保护作用,可为今后类似工程提供良好的借鉴。

参考文献

- [1] 刘国彬,黄院雄,侯学渊.基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2001,20(2):202.
- [2] 陈郁,张冬梅.基坑开挖对下卧隧道隆起的实测影响分析[J].地下空间与工程学报,2004,24(增刊1):748.
- [3] 刘小建,贾坚.地铁隧道上方基坑卸荷回弹及控制的试验和探讨[J].地下工程与隧道,2008(2):41.

(收稿日期:2017-07-27)

[J].机电工程,2013(1):102.

- [2] 张泽萌.地铁杂散电流防护措施的研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [3] 蒋雪峰,邱忠才,孟军,等.对地铁中杂散电流泄漏造成腐蚀问题的探索[J].中国科技信息,2009(2):264.
- [4] 许建国.浅谈杂散电流腐蚀机理及防护措施[J].铁道机车车辆,2005(3):61.
- [5] LEE C H. Evaluation of the maximum potential rise in Taipei rail transit systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005,20(2):1379.
- [6] CHARALAMBOUS C,COTTON I. Influence of soil structures on corrosion performance of floating-DC transit systems[J]. Electric Power Applications,2007,1(1):9.
- [7] 蔡力,王建国,樊亚东,等.地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J].高压技术,2015(11):3604.
- [8] 周晓军,高波.地铁杂流对钢筋混凝土中钢筋腐蚀的试验研究[J].铁道学报,1999(5):99.
- [9] 胡云进,钟振,方镜平.地铁杂散电流场的有限元模拟[J].中国铁道科学,2011(6):129.
- [10] 杨迪.城市轨道交通杂散电流实验系统设计与仿真[D].成都:西南交通大学,2013.
- [11] 庞原冰,李群湛,刘炜,等.基于电场的地铁杂散电流模型研究[J].城市轨道交通研究,2008(2):27.
- [12] 宋毅.绝缘子表面污层电导率的影响因素研究[J].高压电器,2014,50(10):102.

(收稿日期:2017-08-28)