

基坑开挖引起下卧地铁隧道上浮变形的控制研究

李 鹏^{1,2} 赵 伟^{1,3} 韩理想¹

(1. 徐州地铁集团有限公司, 221007, 徐州; 2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 221116, 徐州;

3. 徐州地铁基础设施工程有限公司, 221007, 徐州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 以徐州轨道交通 1 号线工程车辆段基坑开挖施工为工程背景,在基坑开挖过程中对下卧地铁隧道的卸荷回弹变形进行动态再评估;对实测数据进行分析,提出了基坑施工对下卧地铁隧道的工程风险控制措施;有效控制了地铁隧道的上浮变形,确保了基坑及下卧地铁隧道结构安全。

关键词 明挖基坑; 地铁隧道; 风险评估; 上浮变形; 工程实测

中图分类号 TU42

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.019

Control Study on Uplift Behavior of Underlying Metro Tunnel Caused by Pit Excavation

LI Peng, ZHAO Wei, HAN Lixiang

Abstract Taking the depot foundation pit excavation project of Xuzhou Metro Line 1 as the background, the rebound deformation of underlying metro tunnel after unloading is re-evaluated dynamically in the process of foundation pit excavation. The field measured data is analyzed and risk control countermeasures for underlying metro tunnel in foundation pit excavation is proposed. The uplift displacement of metro tunnel is effectively controlled, ensuring structural safety of foundation pit and underlying metro tunnel.

Key words foundation pit open excavation; metro tunnel; risk assessment; uplift displacement; field measurement

First-author's address Xuzhou Metro Group Co., Ltd., 221007, Xuzhou, China

随着城市地铁隧道建设的规模越来越大,不可避免会出现基坑开挖工程位于既有隧道上方的情况,由此带来的施工风险也越来越大。

基坑开挖卸载,会使基坑影响范围内土体的应力状态改变而产生变形^[1],下卧于基坑的临近既有隧道结构会因基坑开挖后周围土体卸载回弹而产生上浮变形,严重时可能会造成盾构隧道管片开裂漏水,影响地铁运营安全。国内外专家^[2-5]大多采用理论解析、数值模拟及实测分析等方法对此问题

进行了研究,分析了基坑开挖过程临近既有隧道的变形规律,提出了基坑施工对地铁隧道的工程风险控制措施等,取得了一定的成果。考虑到地质条件的复杂性及施工方法的多样性,本文以徐州地铁 1 号线车辆段基坑施工为背景,针对地铁基坑开挖引起下卧既有隧道上浮变形控制技术进行了研究,可为同类工程提供参考。

1 工程概况

徐州地铁 1 号线车辆段出入段线大致呈东南至西北走向布置,全长 882 m,分为地下段、U 型槽段与路基段。其中,车辆段出入段线地下段为明挖基坑,局部跨越既有地铁盾构隧道(已贯通,尚未通车),开挖基底距离盾构隧道顶面高程最小竖向净距仅 3.025 m。

1.1 出入段线明挖基坑

出入段线明挖基坑全长 230 m,平面图如图 1 所示。里程 K0+590~666 段采用 $\Phi 850@600$ mm SMW 桩围护开挖,基坑开挖宽度为 10.8 m,局部扩大部分达到 13.2 m;里程 K0+666~820 段直接放坡开挖,基坑开挖宽度约 39.6~45.0 m 不等,基坑开挖深度约为 7.0~10.3 m。

综合考虑居民建筑拆迁和管线迁改的情况,出入段线明挖基坑设计开挖分四段:第一段为 K0+697~757 交叉核心段;第二段为 K0+757~820 段,此段待交叉段施工完成后放坡开挖施工;第三段为 K0+590~666 段,此段待 SMW 围护桩施工完成可进行降水施工;第四段为 K0+666~697 段,此段待第三段主体结构顶板施工完成后施工,具体情况如图 1 所示。

1.2 既有隧道

既有地铁盾构隧道(已贯通,未通行)交叉下卧于出入段线明挖基坑,衬砌采用预制钢筋砼管片错缝拼装,环宽 1 200 mm,厚度为 350 mm,每环管片

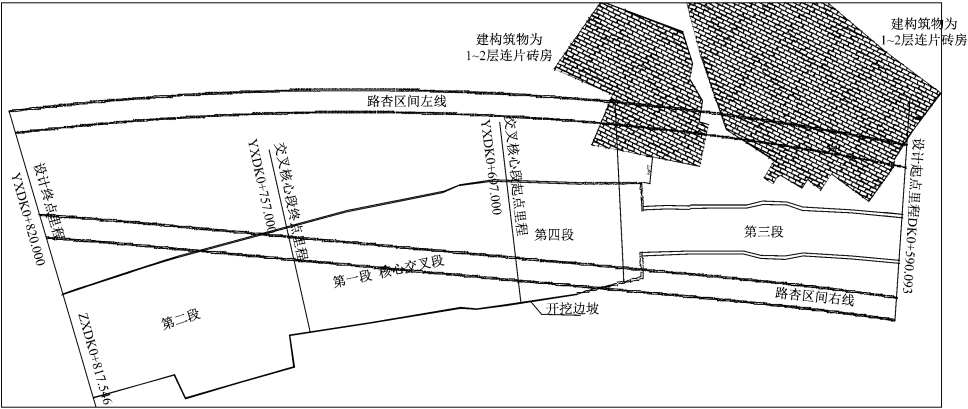


图 1 基坑平面示意图

由 6 块管片通过纵向螺栓相连,管片混凝土强度等级为 C50,抗渗等级为 P10。其中,区间右线隧道自里程 KX+697~757 与出入段线斜交,既有地铁隧道与出入段线基坑的位置关系如图 2 所示。

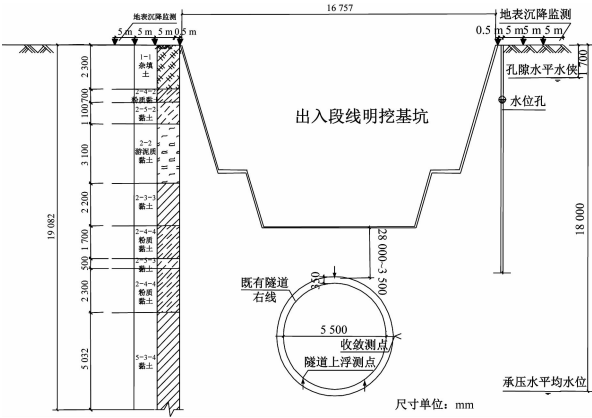


图 2 地铁隧道与出入段线基坑位置关系示意图

1.3 场地水文地质情况

工程场地表层主要分布杂填土和素填土。地铁隧道主要位于第四系全新统冲积层,主要包括②₄粉质黏土层和②₃黏土层。①人工填土层结构疏松,强度较低,压缩性高;②₄粉质黏土层,软塑至硬塑状,层厚 0.50~5.50 m;②₃黏土层,可塑状,局部夹薄层粉土,层厚 0.8~3.0 m;隧道下卧段主要为⑤粉质黏土层,可塑至硬塑状,场地地质断面图如图 2 所示。

根据区域水文地质资料、现场调查、钻孔简易水文地质观测及抽水试验成果资料分析,场地水文地质条件一般。根据现场钻探揭露情况,上层滞水分布不均,局部富水性较好。在附近水井中量测承压水稳定水位埋深约 18 m,高程约为 21.5 m。

2 施工前风险评估及控制措施

2.1 工程风险评估

基坑开挖施工前,对车辆段基坑施工风险管理采用综合风险分析方法,建立工程风险矩阵如表 1 所示。通过专家调查法,利用专家经验对可能的致险因子的重要性进行评价,综合成整个项目风险。具体步骤如下:① 确定每个致险因子的权重,以表征其对项目风险的影响程度;② 确定每个致险因子的等级值,按风险发生的概率和风险发生的后果确定风险的等级。

表 1 车辆段基坑与下卧隧道交叉段施工风险矩阵

风险等级		风险后果值(R_c)				
		30 ~ 27	26 ~ 23	22 ~ 16	15 ~ 9	8 ~ 1
风险概率 值(R_p)	30 ~ 27	I	I	I	II	III
	26 ~ 24	I	I	II	III	III
	23 ~ 17	I	II	III	III	IV
	16 ~ 10	II	III	III	IV	IV
	1 ~ 9	III	III	IV	IV	IV

表 1 中,风险等级参照 GB 50652 划分, I 级表示风险最大, IV 级表示风险最小,从 I 级到 IV 级,风险递减^[6]。对风险概率值、风险后果值划分主要依据 GB/T 20984^[7]。

2.1.1 风险评估指标确定

风险评估中风险值计算涉及的风险要素一般为资产、威胁和脆弱性,由威胁和脆弱性确定安全事件发生可能性,由资产和脆弱性确定安全事件的损失,以及由安全事件发生的可能性和损失确定风险值^[7]:

$$R = P \times C \tag{1}$$

式中:

R ——风险值；
 P ——致险因子发生的概率；
 C ——致险因子发生时可能产生的后果。

将车辆段基坑与下卧隧道交叉段施工风险模型的指标设为隧道上浮变形、基坑局部坍塌,通过风险评估专家对基坑施工中涉及的资产、威胁和脆弱性进行识别量化,实现风险指标的定量处理。具体结果如表 2 所示。

表 2 车辆段基坑与下卧隧道交叉段施工风险指标识别表

分区段里程	风险部位					
	隧道结构上浮变形			基坑局部坍塌		
	资产 a	威胁 t	脆弱性 v	资产 a	威胁 t	脆弱性 v
K0 + 590 ~ 666	1	2	2	3	2	4
K0 + 666 ~ 697	5	4	3	2	3	2
K0 + 697 ~ 757	5	4	4	3	4	4
K0 + 757 ~ 820	2	3	2	4	3	2

2.1.2 风险发生概率和后果

根据风险评估专家对风险指标识别定量,得到风险发生的概率值 R_p 和后果 R_c 为:

$$R_p = \alpha t + \beta v \tag{2}$$

$$R_c = ma + nv \tag{3}$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & t \leq 2 \\ 2, & 2 < t \leq 5 \end{cases}; \beta = \begin{cases} 2, & v \leq 2 \\ 2, & 2 < v \leq 5 \end{cases}$$

$$m = \begin{cases} 2, & a \leq 3 \\ 3, & 3 < a \leq 5 \end{cases}; n = \begin{cases} 1, & v \leq 3 \\ 2, & 3 < v \leq 5 \end{cases}$$

式中:
 α, β, m, n ——常数。

根据计算得出风险发生概率值与风险结果值。结合车辆段基坑与下卧隧道交叉段施工风险矩阵表,明确施工风险等级,如表 3 所示。

表 3 车辆段基坑与下卧隧道交叉段施工风险等级表

分区段里程	风险部位					
	隧道结构上浮变形			基坑局部坍塌		
	概率值 R_p	后果值 R_c	风险等级	概率值 R_p	后果值 R_c	风险等级
K0 + 590 ~ 666	6	4	IV	10	10	IV
K0 + 666 ~ 697	17	18	III	10	6	IV
K0 + 697 ~ 757	20	23	II	20	17	II
K0 + 757 ~ 820	10	6	IV	10	14	III

根据评估结果,出入段线基坑里程 K0 + 697 ~ 757 核心交叉段的隧道结构变形与基坑坍塌风险等

级均为 II 级,属风险最高区段。该段基坑开挖施工对既有地铁隧道影响明显,既有隧道上方基坑开挖卸载,易造成既有隧道纵向拉伸变形和位移,损伤既有隧道的拱作用,从而使既有隧道的衬砌荷载加大,存在既有隧道衬砌开裂、支护结构变形、管片上浮风险。因此,在基坑开挖前充分做好降水、地基加固等措施,开挖过程中应控制开挖进尺,严格分层分段放坡开挖,做好边坡支护,密切关注监测数据。

2.2 风险控制措施

2.2.1 基坑降排水施工

为提高坑内土体强度,解决基坑开挖施工期间结构抗浮的影响,设计降低基坑范围内浅层地下水水位至基坑底部以下 1.0 m。

基坑降水采用大管井法降水,围护桩段 K0 + 590 ~ 666 设置降水疏干井 5 口,纵向每隔 15 m 左右;放坡开挖段 K0 + 666 ~ 820 纵向每隔 15 m 设置一排疏干井,疏干井横向间距约 15 m,每排 4 口,两侧坡顶和坡底各 1 口。结合出入段线基坑开挖深度,综合考虑地质水文情况及开挖深度确定疏干井基底深入不透水层即可(约底板下 4 m)。

考虑到基坑降水对下卧隧道可能造成的影响,在盾构区间两侧各设置 3 口备用观测井,井深为底板以下 10 m。同时加强降水过程中的水位监测,如出现盾构隧道隆起超过预警值的情况,则启动备用观测井,如图 3 所示。

2.2.2 监控量测

该基坑监测项目主要包括坡顶竖向位移、水平位移、周边地表沉降、地下水位等。考虑到基坑施工可能引起下卧地铁隧道上浮,应增加对既有盾构隧道的监测,在交叉核心段范围内,右线隧道每隔约 10 m(部分区间监测点加密)设一个监测断面,每个监测断面布置 5 个变形测点,以便对既有隧道进行净空收敛、拱顶沉降及上浮变形监测。

2.2.3 基坑开挖施工

基坑采用渐进式放坡开挖,首先施工交叉核心段中间部分,及时浇筑底板和部分侧墙,再开挖交叉段核心段两侧基坑,减少基坑暴露时间。

考虑单侧开挖对盾构隧道偏压的影响,交叉核心段采用两台长臂挖机从南北两侧对称开挖,土方开挖时按 1:1 放坡,自上而下开挖,先开挖至钢板桩位置,进行钢板桩施工,分层厚度为 2 m,直至基坑底部挖至坡脚线;底部 30 cm 土方采用人工配合小

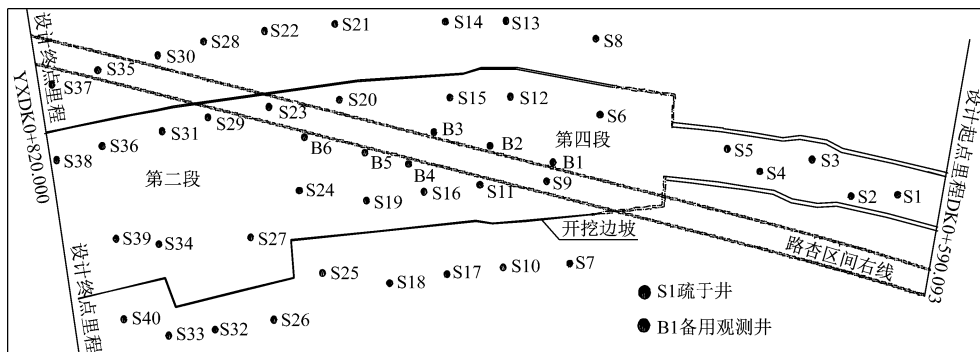


图3 降水井布置示意图

挖机进行施工,一次性开挖到位,严禁来回碾压扰动和超挖。

2.2.4 坡体防护

为保证基坑稳定,放坡开挖时,及时挂网并喷射混凝土(厚度 10 cm),同时在坡面设置一排钢板桩和二排松木桩以稳固坡面。钢板桩规格为 600 mm × 210 mm,长度为 9 m;松木桩径为 15 ~ 20 cm,长度为 3.0 ~ 5.5 m 不等。

2.2.5 既有隧道保护

为了确保出入段线明挖基坑开挖过程中地铁隧道上浮变形满足控制要求,在基坑开挖前对既有盾构隧道内交叉段设置纵向加强联系条,以增加盾构隧道整体稳定性。在隧道拱腰以上布设加强联系条,联系条采用 Q235 热轧槽钢,加强范围为核心段及两侧各 20 m,安装时联系条根据节长焊接。

3 隧道上浮变形分析及控制措施

出入段线交叉核心段基坑于 2018 年 1 月 12 日开挖,1 月 14 日 12:00 左右,基坑开挖深度约 6 m,距基底设计标高约 3 m。1 月 15 日,里程 K0 + 723 ~ 733 范围内基本开挖至 8 m,基坑下方盾构隧道上浮监测点日变速率最大值 3.5 mm/d(控制值 2 mm/d),上浮累计值最大 4.9 mm(控制值 5 mm);开挖至 9 m 时(到基底设计标高),日变速率最大值 6.7 mm/d,上浮累计值 8.5 mm,达到监测红色预警^[9],如图 4 所示。

3.1 监测预警分析

在里程 K0 + 697 ~ 757 范围内跨越既有隧道,隧道拱顶与开挖基底相距 2.8 ~ 3.5 m。鉴于 1 月 14—19 日核心区地下水水位、地表沉降数据稳定可控,而隧道上浮、拱顶沉降均超出监测控制值,达到监测红色预警。综合分析,主要原因是隧道上方基坑土体卸载,损伤既有隧道的拱作用,从而使既有

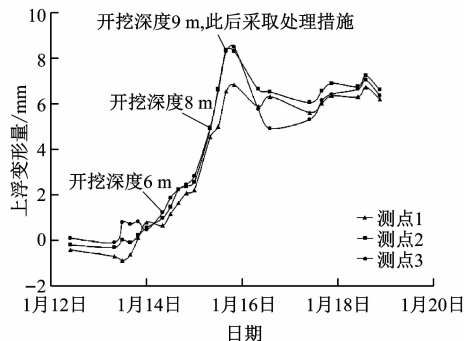


图4 K0 + 723 ~ 733 段隧道上浮实测数据

隧道的衬砌荷载加大,造成既有隧道纵向拉伸变形和上浮位移。

3.2 处理措施

立即停止基坑开挖,加强现场降水管理,24 h 不间断降水,将交叉核心段水位降至隧道底部以下;加密监测频率,及时准确反馈监测数据;对既有盾构隧道进行压重,减小基坑开挖卸载的影响,压重采用成型轨排,每段轨排长度 25 m,质量约 13 t,共堆载 4 层;对既有盾构隧道管片增加 6 道纵向联结板,以增强既有隧道整体性。同时,加快已开挖至基底部分的主体结构施工进度,加大资源配置,确保底板结构尽快完成。

1 月 18 日,监测数据显示隧道上浮速率已减缓,日最大上浮变形量为 0.9 mm,数据已基本趋于稳定,如图 5 所示,表明应急处理措施有效。

3.3 基坑开挖与隧道变形规律分析

考虑隧道上浮变形量与上方土体卸载程度有关,用开挖深度 H_e 与拱顶覆土厚度 H_c 的比值来表示土体应力的释放程度,即卸载率 $a = H_e/H_c$ ^[9]。

经对基坑 K0 + 723 ~ 733 里程下部隧道结构监测数据分析,发现不同卸载率和隧道上浮变形量存在线性关系,如图 5 所示。在卸载率较小的时候,隧道上浮变形量很小,这是由于在卸荷初期,卸荷比

很小,此时土体的回弹模量很大,由此而产生的回弹变形较小;随着基坑开挖深度的增加,卸荷比逐渐增大,回弹模量则相应线性减小,回弹变形开始明显增大。在卸载率较大时,土体卸荷回弹造成隧道上浮变形量与卸载率基本呈线性相关。

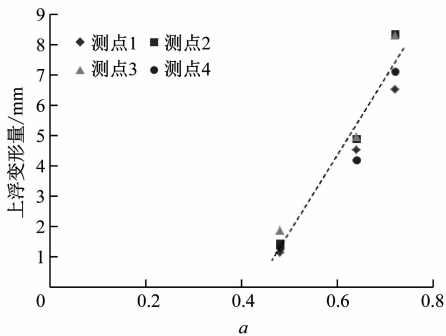


图5 K0+723~733段隧道上浮变形量与卸载率的关系曲线

基坑 K0+720~740 里程段开挖期间,下卧盾构隧道的典型上浮发展曲线如图6所示,主要包含3个上浮段和3个回落段。上浮段的主要原因是基坑开挖卸载导致隧道周围土体回弹变形,回落段主要是由于基坑结构施工及覆土回填。从图6可以看出,在第一次开挖出现预警后,采取控制措施减小盾构隧道上浮,后面两次开挖引起盾构隧道上浮变形量均小于第一次开挖时引起的上浮变形量,且整个开挖过程中上浮变形量均未达到警戒值,表明对既有隧道进行压重及降低地下水位等措施对控制隧道上浮具有较好的效果。

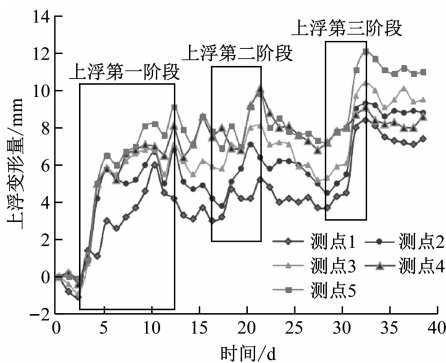


图6 K0+720~740段隧道上浮变形量随时间变化曲线

4 结论

1) 基坑开挖对下卧既有隧道有明显的影响。基坑开挖卸荷使下方土体应力状态发生变化,隧道周围土体发生回弹变形。在土体卸载率较大时,卸荷回弹造成隧道上浮变形量与卸载率基本呈线性相关。

2) 分层分段基坑开挖的同时,采用合理科学的降水,在既有盾构隧道内采用压重与纵向联结等措施,可以有效控制基坑开挖卸荷引起的隧道位移变形。

3) 为保护既有隧道的结构安全,基坑开挖过程中需要对其进行严格的变形监测。通过实施信息化监测施工,可以有效地掌握既有隧道的变形情况,从而能够及时采取合理有效的工程措施。

参考文献

- [1] CHEN R P, MENG F Y, LI Z C, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 58: 224.
- [2] 徐志兵,熊卫兵. 基坑开挖对地铁区间隧道影响的计算分析[J]. 地下隧道与工程, 2009(2): 36.
- [3] 汪小兵,贾坚. 深基坑开挖对既有地铁隧道的影响分析及控制措施[J]. 城市轨道交通研究, 2009(5): 52.
- [4] 李家平. 基坑开挖卸载对下卧地铁隧道影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009(6): 1345.
- [5] 张治国,张谢东,王卫东,等. 临近基坑施工对地铁隧道影响的数值模拟分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010(11): 93.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 信息安全技术信息安全风险评估规范: 第5部分: GB/T 20984—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范: 第4部分: GB 50652—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省城市轨道交通工程监测规程: 第11部分: DGJ32/J 195—2015[S]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2016.
- [9] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013(5): 1421.

(收稿日期: 2019-07-29)