

明挖基坑近距离上跨地铁隧道变形控制研究

杜文浩

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 为研究基坑开挖对下卧地铁隧道变形的影响,提出有效的变形控制措施,以南昌新余街管廊上跨地铁隧道为依托,采用有限元数值模拟,研究明挖基坑对地铁隧道变形的影响规律,进而提出变形控制措施,并结合现场监测数据验证其效果。结果表明:明挖基坑引起的地铁隧道变形以竖向隆起为主,水平位移远小于竖向隆起;影响强烈区域出现在基坑正下方,宽度与基坑宽度接近,对2~3倍基坑深度范围以外区域的影响较小;采用全方位高压喷射注浆(MJS工法)先加固后分区开挖回填、减小单次开挖面积的施工方式能有效减小地铁隧道的竖向隆起变形,符合变形控制标准。

关键词: 明挖基坑;上跨地铁;近距离;变形控制

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0414-06

Study on Deformation Control of Excavated Foundation Pits Crossing Metro Tunnels at Close Range

DU Wenhao

[Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: To study the impact of foundation pit excavation on the deformation of underlying metro tunnels, the effective deformation control measures are proposed. Relying on the utility tunnel crossing the metro tunnel in Xinyu Street of Nanchang, the finite element numerical simulation is used to study the influence rule of excavated foundation pit on the deformation of metro tunnels, and then the deformation control measures are proposed. And combined with the on-site monitoring data, the effects are validated. The results indicate that the deformation of metro tunnels caused by excavated foundation pits is mainly vertical uplift, and the horizontal displacement is much smaller than the vertical uplift. The area of strong influence is located directly below the foundation pit, and its width is close to that of the foundation pits. The impact on areas outside the range of 2 to 3 times the depth of the foundation pit is relatively small. The construction method of using all-round high-pressure jet grouting (MJS method), which involves reinforcing first and then excavating and backfilling in sections to reduce the area of a single excavation, can effectively reduce the vertical uplift deformation of metro tunnels, which meet the deformation control standards.

Keywords: excavated foundation pit; crossing metro; close range; deformation control

0 引言

随着我国城市化率的快速提升,以城市轨道交通、地下管网等为代表的地下空间工程建设蓬勃发展。在此背景下,新建工程与既有地铁线路之间的空间矛盾日益突出。尤其在土地资源有限的城市密集区,在既有地铁隧道上方进行基坑开挖,已成为地下空间开发的关键挑战。开挖卸荷势必扰动地层,导致下卧隧道产生变形,进而威胁地铁运营安全。因此,深入研究此类基坑开挖对下卧既有地铁变形

的影响原理,并提出合理的变形控制方法,具有重要工程价值。

目前,已有学者采用理论计算、数值模拟、现场监测等方法研究了基坑开挖对下卧地铁隧道变形的影响机理。在理论方面,关于基坑开挖引起下卧隧道变形的计算思路主要分2个步骤:第1步根据Mindlin^[1]或者其他理论解,计算由于基坑开挖引起的作用在隧道上的附加应力;第2步将隧道假定为弹性地基梁,将第1步得到的附加应力作用在隧道结构上,计算得到隧道变形结果^[2]。陈郁等^[3]、张治国等^[2]将隧道视为Winkler弹性地基梁;黄栩等^[4]、宗翔^[5]将地铁隧道简化为Kerr地基梁;刘建文等^[6]将盾构隧道假设为Timoshenko梁,建立了隧道变形解

收稿日期: 2025-12-31

作者简介: 杜文浩(1991—),男,硕士,工程师,从事地下工程基坑、边坡以及隧道设计工作。

析方法。在数值模拟方面,施有志等^[7]采用 PLAXIS 3D 数值模拟,研究了厦门地铁停车场基坑零距离上跨盾构隧道对隧道的影响;郑刚强等^[8]采用 FLAC 3D 研究某过江通道上跨地铁盾构隧道的施工扰动效应;付波等^[9]采用 MIDAS GTS NX 对道路施工开挖过程进行模拟,研究下卧地铁的变形,评估其安全风险。在现场监测方面,李志高等^[10]对工程现场监测数据进行分析,总结出隧道隆起量和开挖时间以及开挖宽度的关系;温锁林^[11]采用“弹钢琴”跳仓和分层开挖施工,并结合现场实测数据,表明基坑开挖引起的地铁隧道隆起量可控;袁昶等^[12]采用光学仪器和光纤光栅 2 种监测方法,对上跨深圳地铁 11 号线的分洪箱涵基坑开挖过程进行监测,证明施工方案安全有效,同时还对比了 2 种监测方法的差异;郭鹏飞等^[13]总结归纳了上跨地铁基坑开挖引起地铁隆起变形的特点,并总结了常用的变形控制方法。

综上所述,目前上跨地铁隧道基坑开挖对地铁影响的研究多数针对深埋盾构隧道,对于浅埋明挖地铁隧道,尤其是近距离上跨地铁隧道的基坑开挖所引起的隧道变形及其控制措施实例不多。

本文以南昌新余街管廊上跨地铁隧道为背景,首先根据工程特点以及变形控制标准,确定“先加固后分区开挖”的控制变形方法;然后,采用有限元仿真软件 MIDAS GTS NX,模拟管廊基坑开挖过程,并分析该开挖过程对下卧地铁隧道变形的影响;最后,通过现场施工实际监测数据与模拟结果的对比,验证模拟结果的可靠性以及控制变形措施的合理性,以期类似明挖基坑近距离上跨地铁项目提供理论和工程实践经验。

1 工程背景

1.1 工程概况

新余街管廊位于南昌市,西起青原山路,东至三百山路,全长约 3.1 km。其中下穿三清山大道节点,由于三清山大道下方地铁 2 号线已建设完成并运营,该节点成为了新余街管廊的关键节点,也是该工程的难点。

本节点处管廊和地铁隧道平面关系图见图 1。其中管廊为东西走向,与三清山大道和地铁 2 号线垂直交叉,管廊为单箱 3 室结构,结构外宽 9.4 m,高 3.5 m;地铁隧道为单箱 2 室箱型结构,结构总宽 10.5 m,总高度 6.31 m,并每隔 30 m 左右设置通风井。

地铁隧道至地面覆土厚度约 7.45 m,根据管廊总

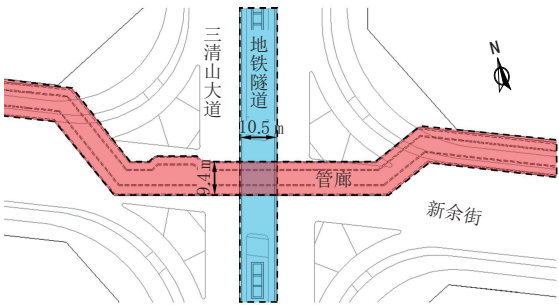


图1 管廊和地铁隧道平面关系图

体设计,管廊需利用该部分覆土上跨地铁隧道。

管廊和地铁隧道纵断面见图 2。

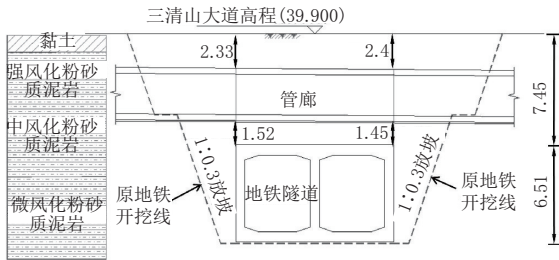


图2 管廊和地铁隧道纵断面(单位:m)

管廊结构顶至三清山大道覆土厚度 2.33 ~ 2.4 m,管廊垫层底距离地铁隧道结构顶仅 1.45 ~ 1.52 m。

管廊上方覆土过浅,不具备暗挖施工的条件,因此该节点采用明挖施工方案。开挖后基坑底至地铁隧道结构的距离仅 1.45 ~ 1.52 m,基坑开挖施工对下卧地铁隧道影响十分敏感。

1.2 工程地质条件

该工程原始地层以黏土以及强-微风化粉砂质泥岩为主。由于地铁隧道采用明挖法施工,地铁基坑两侧放坡开挖,结构施工完成后,两侧放坡区域以及顶板以上回填覆土,回填高程与三清山大道路面设计高程基本一致,因此,地铁结构虽处于风化岩层中,但其两侧以及顶板以上全部为回填土(见图 2)。

2 地铁保护控制标准

2.1 外部作业影响等级的划分

《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)(以下简称为《规范》)规定,外部作业对轨道交通影响的级别根据外部作业工程影响分区及其与轨道交通结构的接近程度确定分为特级、一级、二级、三级、四级。

该工程管廊基坑上跨地铁隧道结构,坑底距离下方地铁结构顶板仅 1.45 ~ 1.52 m,基坑开挖最深 6 m,经判断影响分区属于强烈影响区。地铁隧道为明挖隧道,地铁隧道开挖深度约 15 m,管廊基坑施工

作业边线距离地铁结构顶板外边线约1.5 m,经判断接近程度为非常接近。

综上所述,判断管廊基坑开挖对地铁隧道的影响等级为特级。

2.2 地铁保护控制标准

管廊基坑开挖对地铁的影响安全指标主要为隧道的水平和竖直位移。根据《规范》,城市轨道交通结构安全控制指标值——隧道水平和竖向位移预警值、控制值分别为10、20 mm。

结合该工程实际特点,考虑基坑开挖对地铁影响后果的严重性,该工程对既有地铁隧道结构影响的变形进行从严控制,将隧道水平和竖向位移预警值、控制值分别定为3、5 mm。

3 施工方案

该工程节点处综合管廊基坑底距离现状已运营的地铁2号线箱涵顶最近仅1.45 m,因此施工方案既要满足施工要求,又必须最大程度地减小对下卧地铁隧道的影响。

采用明挖法施工时,地铁隧道顶部开挖面积越小,卸土体积越小,对地铁影响就越小。为最大程度地减小基坑开挖对地铁隧道的影响,地铁上方管廊基坑采用“先加固后开挖”的处理方式,加固后的地层形成重力式挡墙进行垂直开挖,以减小开挖面积。

3.1 加固方案

全方位高压喷射注浆(简称MJS工法)是高压喷射注浆的一种。全方位高压喷射注浆钻杆采用多孔管的构造形式,具有强制排浆和地内压力监控功能,可通过调整强制排浆量达到控制地内压力的目的,从而减小喷射能量的损耗^[14],使地基内不产生附加应力,有效控制邻近建(构)筑物的变形。因此,本节点在上跨地铁段部分采用MJS工法进行地铁隧道结构的土体加固,形成的加固体作为地铁上方基坑的围护结构。MJS桩径2 000 mm,搭接500 mm,加固水泥含量40%。

从基坑边线南北外扩10 m、地铁结构边线东西外扩2 m开始加固,两侧加固宽度10 m,作为上跨地铁区间加固部分。该区间加固开挖分以下部分:地铁结构边线向东西外扩2 m范围内,加固深度至基坑底以下0.1 m(该厚0.1 m的加固土后期兼做管廊结构垫层);向南北外扩3.5 m内区域加固深度15 m,再向外扩6.5 m范围内区域加固深度12 m。MJS加固范围见图3。

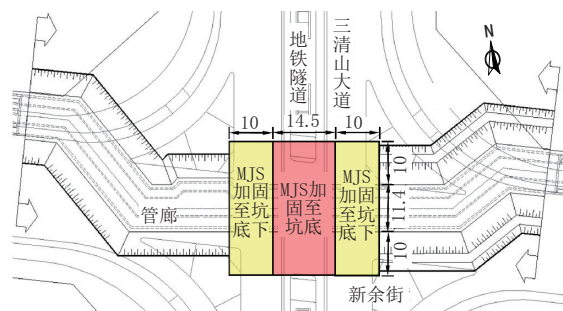


图3 MJS加固平面图(单位:m)

3.2 开挖及回填

根据开挖区域的分布情况,该节点基坑分为MJS加固区和两侧非加固区。MJS加固区又可根据该区与地铁的相对位置关系,分为地铁正上方加固区和地铁两侧加固区(见图4)。

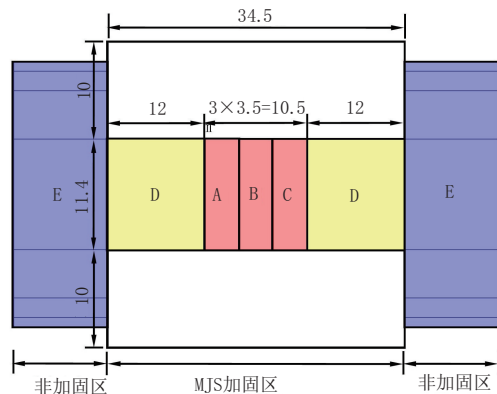


图4 基坑分区开挖平面图(单位:m)

不同分区的开挖顺序及方式如下:首先开挖地铁隧道正上方MJS加固区,分3次(区域A、B、C)开挖,每次开挖长度3.5 m;然后开挖地铁隧道两侧MJS加固区域(区域D);最后开挖地铁隧道两侧非加固区(区域E)。

MJS加固区域采用垂直开挖,两侧非加固区采用2级放坡、中间预留1 m放坡平台。每段开挖完成后,施作该区域管廊结构,待管廊结构强度达到设计要求,顶部回填,再开挖施工下一段。

为保证管廊施工完成后地铁隧道的安全运行,基坑回填时地铁隧道结构上方应尽量减少机械振动碾压荷载。该工程对基坑回填作如下要求:

(1)地铁隧道结构正上方外扩1 m范围内的基坑采用C20素混凝土回填,回填范围从管廊结构顶到路面结构底。

(2)MJS加固区域内管廊结构侧壁与开挖面之间肥槽采用C20素混凝土回填。

(3)其他部位采用素土回填并分层压实。

4 基坑开挖对地铁影响的计算分析

4.1 计算模型及参数

根据实际周围环境及地质条件,采用三维有限元软件MIDAS GTS NX建立模型,模型尺寸50 m×50 m×30 m(高)(见图5)。模型中土体的本构选择修正Mohr–Column模型,管廊以及隧道混凝土结构采用线弹性模型模拟。模型顶部为自由边界,底部完全固定,两侧施加水平方向位移约束。

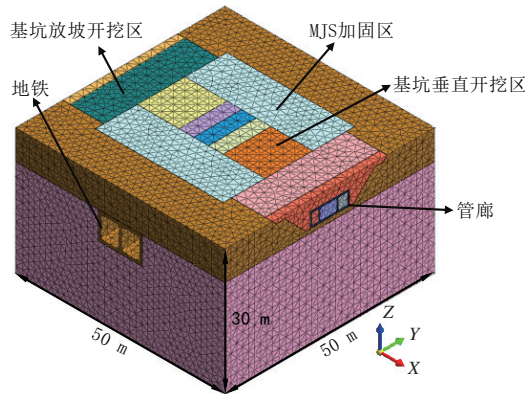


图5 有限元仿真模型

场地各层土的计算参数根据工程地质勘察报告确定,管廊及地铁隧道参数根据实际混凝土等级确定。模型中各单元参数见表1、表2。

表1 土体参数

土层	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$E_{50\text{red}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oedred}}/\text{MPa}$	ν	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
填土	18.5	15	30	0.35	10	15
风化岩	20.5	50	150	0.25	60	35
加固体	18.5	45	90	0.35	30	30

表2 管廊及地铁隧道结构参数

内容	材料	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比
管廊	C40混凝土	25	3.25×10^4	0.2
地铁隧道	C45混凝土	25	3.35×10^4	0.2

4.2 模拟步骤

根据前述施工步骤介绍,整个施工过程在有限元模拟中划分为17个工况,如表3所示。

4.3 计算结果

为了分析管廊基坑开挖不同阶段对地铁隧道的影响,选取隧道结构顶板中心处,间距1.4 m,沿地铁隧道纵向共计34个点位的位移进行分析。由于开挖工况在该工程中为最不利工况,因此选取各开挖工况下地铁隧道竖向和水平位移沿隧道纵向分布进行分析,结果见图6。

由图6可见,地铁隧道竖向和水平位移在基坑正

表3 模拟施工工况

模拟工况	模拟内容
1	初始地应力平衡
2	MJS加固施工
3	地铁隧道正上方MJS加固区区块A开挖
4	区块A管廊结构施工
5	区块A回填
6	地铁隧道正上方MJS加固区区块B开挖
7	区块B管廊结构施工
8	区块B回填
9	地铁隧道正上方MJS加固区区块C开挖
10	区块C管廊结构施工
11	区块C回填
12	地铁隧道两侧MJS加固区区块D开挖
13	区块D管廊施工
14	区块D回填
15	两侧非加固区块E开挖
16	区块E管廊施工
17	区块E回填

下方最大,并向两侧逐渐递减;当与基坑的距离大于2~3倍基坑开挖深度后,竖向变形变化率小于0.01 mm/m,说明此时基坑开挖引起的地铁隧道竖向变形趋于稳定,变形较大的范围宽度与基坑宽度接近。

在地铁正上方开挖时(开挖A至开挖C),地铁隧

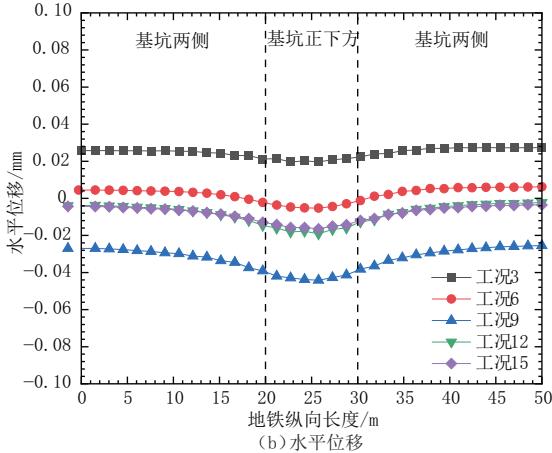
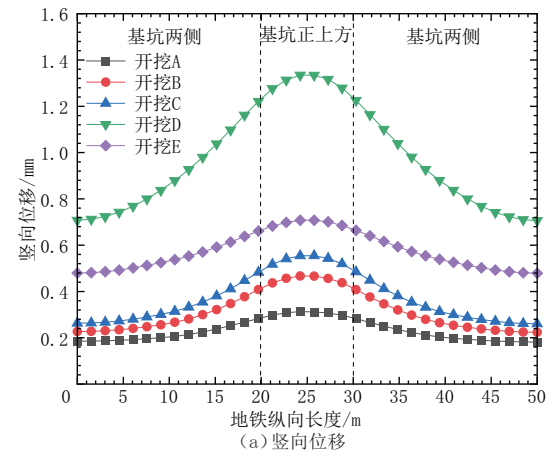


图6 地铁隧道位移沿隧道纵向分布图

道竖向隆起随着开挖的进行逐渐变大;但由于采用了分块开挖,单次开挖面积小,在第3次开挖完成后,其竖向隆起达0.55 mm。之后地铁隧道两侧MJS加固区开挖(开挖D),由于卸荷面积较大且距地铁隧道较近,该阶段开挖引起的地铁隧道竖向隆起最大,为整个开挖过程中最不利工况。

对比竖向和水平位移分布曲线可见,基坑开挖引起的隧道变形以竖向隆起为主,水平位移较小。因此,以下以竖向位移分析为主。

图7为不同开挖阶段基坑正下方和基坑两侧地铁隧道竖向位移变化曲线。

总体而言,基坑正下方地铁隧道变形明显大于基坑两侧。在开挖阶段,由于卸荷作用,地铁隧道竖向变形量增加;在回填阶段,因为顶部加载,地铁隧道竖向变形量减小。随着施工的推进,地铁隧道竖向变形在两侧开挖完成后达到最大。地铁正上方开挖时,由于是分块开挖,因此地铁隧道竖向变形较缓,而地铁两侧开挖是一次性开挖,所引起的地铁隧道竖向变形快速增大。由此说明,对于地铁正上方重点区域应采用分块开挖方式,减小单次开挖面积,此举可以有效减小基坑开挖对地铁隧道的影响。此外,分区结构施工完成后,及时回填产生的竖向压力也可有效减小下卧地铁隧道的隆起变形。

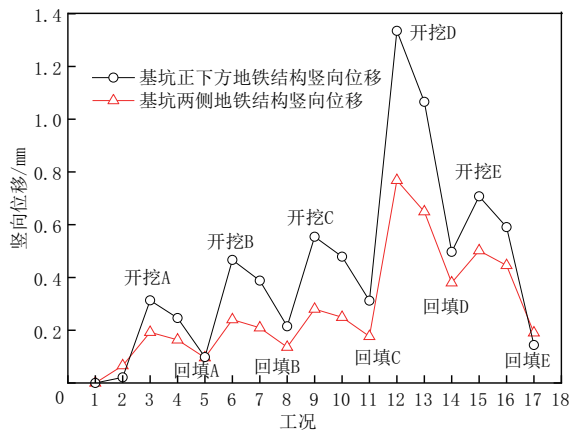


图7 不同开挖工况下地铁隧道竖向位移

提取有无MJS加固情况时,不同工况下地铁隧道的最大竖向位移,见图8。

由图8可知,在地铁正上方开挖时,有MJS加固的地铁隧道竖向变形量仅为无MJS加固的70%左右。整个开挖过程中,无MJS加固时,地铁隧道最大竖向变形量为1.533 mm;有MJS加固时,地铁隧道最大竖向变形量为1.435 mm,竖向变形量减小了约7%。因此,MJS加固可以明显减小地铁隧道的竖向变形,尤其是在地铁正上方开挖时,MJS加固效果尤

为明显。

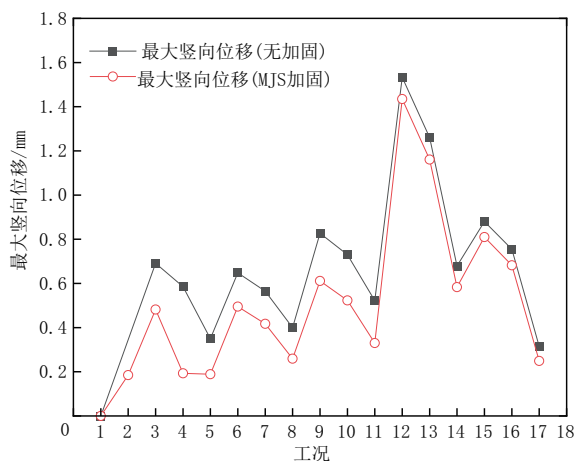


图8 不同开挖工况下地铁隧道最大竖向位移

计算结果表明,管廊明挖基坑采用先加固后分区开挖,并及时回填施工,所引起的地铁隧道变形以竖向隆起为主,最大竖向变形约1.435 mm,满足该工程要求的5 mm控制值以及3 mm预警值的要求。

5 监测结果

5.1 监测方案

为保证管廊基坑开挖期间地铁的正常运营,基坑施工期间,对基坑下方两侧240 m范围内的地铁隧道进行全面监测。其中基坑正下方两侧50 m范围内每隔5 m设置1个监测断面,再向两侧每隔10 m设置1个监测断面,共计19个监测断面,对地铁隧道道床沉降、道床位移、隧道竖向位移、隧道水平位移、隧道水平收敛、地表风井位移进行监测。监测周期从MJS加固施工开始,到管廊施工完成且地铁隧道结构的各项监测值已稳定止。监测开始前,测定监测项目初始值。

5.2 监测结果分析

前述模拟结果表明,地铁隧道变形以竖向隆起为主,水平向位移很小,故选取地铁隧道竖向变形实测值与模拟结果进行对比分析。

图9为基坑正下方及两侧实测地铁隧道竖向位移沿隧道纵向变化曲线。

由图9可见,在地铁隧道纵向长度为0~10 m时,其竖向位移在0 mm左右波动;从10 m开始,其竖向位移逐渐上升,在20~30 m左右达到最大值,此范围正好为基坑正下方;随后在30~40 m左右竖向位移逐渐下降,到40 m之后下降速度加快,到50 m时接近0;2条曲线中,地铁两侧开挖时的竖向位移最大值(约1.5 mm)大于地铁正上方开挖时的竖向位

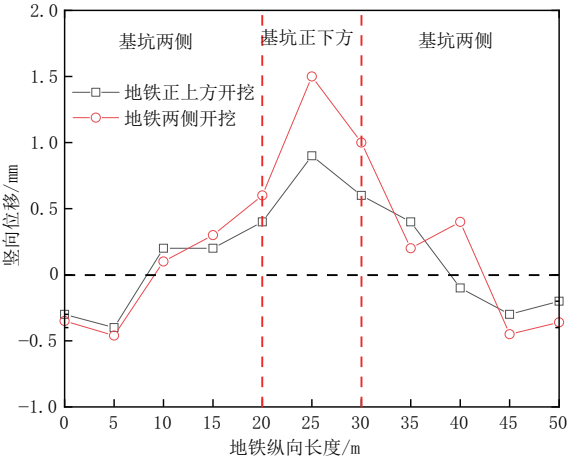


图9 实测地铁隧道竖向位移沿隧道纵向变化曲线

移最大值(约 1.0 mm),说明该工况对地铁的影响更大,与数值模拟结果趋势基本吻合。

图 10 为地铁隧道竖向位移监测历程图。分析图中曲线可知,MJS 施工阶段为初始扰动阶段,地铁隧道竖向位移在 0 附近波动;地铁隧道正上方开挖及回填阶段为开挖初期扰动阶段,地铁隧道竖向位移快速上升至 1.0 mm 左右,随后小幅波动;地铁两侧开挖阶段为开挖二次扰动阶段,此时地铁隧道的竖向位移波动上升至 1.5 mm 左右,地铁两侧回填阶段为恢复阶段,地铁隧道竖向位移波动下降至约 0.8 mm;回填完成后,地铁隧道竖向位移稳定在 0.6 mm 左右,波动幅度显著减小,为稳定阶段。

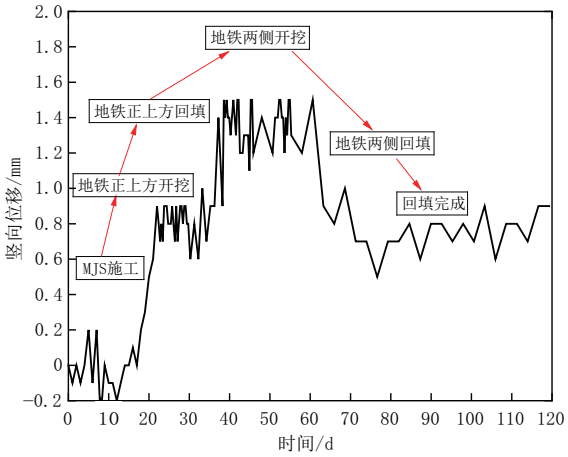


图10 地铁隧道竖向位移监测历程图

与数值模拟结果相比,总体上,隧道变形随着开挖阶段变化的趋势与数值模拟结果相近,但实际监测曲线在隧道正上方回填阶段并无明显的减小阶段。分析原因主要为实际分块回填产生的反压较小,回填时间较短,回填产生的压缩量来不及恢复已经开始下一阶段开挖。实际监测的最大竖向位移为 1.5 mm,与数值模拟结果接近。

施工监测数据表明,基坑开挖过程中,由于采取

了变形控制措施,在一定程度上减小了地铁隧道的变形,隧道的位移小于该工程设定的控制值 5 mm 和变形预警值 3 mm,进一步验证了该工程采取的变形控制措施的有效性。实测管廊基坑开挖引起的地铁隧道竖向变形变化趋势与数值模拟结果一致,整个基坑开挖过程中地铁隧道的实测最大竖向变形为 1.5 mm,数值模拟计算地铁隧道的最大竖向位移为 1.435 mm,两者误差仅为 5%,进一步验证了数值模型的合理性。

6 结 语

(1)明挖基坑上跨地铁隧道所引起的地铁隧道变形以竖向隆起为主,水平位移则远远小于竖向隆起。

(2)影响强烈区域出现在基坑正下方,宽度与基坑宽度接近,2~3 倍基坑深度范围以外区域影响较小。

(3)明挖基坑近距离上跨既有地铁,先加固后开挖,开挖采用分区开挖,减小单次开挖面积,并及时回填的施工方案,可以有效减小地铁隧道的竖向隆起变形。

(4)通过全程监测既有地铁隧道的变形,对地铁运营安全进行预警,并与数值模拟计算结果对比,验证了计算的可靠性以及该工程采取减小地铁隧道变形措施的有效性。

参考文献:

[1] MINDLIN, RAYMOND D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J].Physics, 1936, 7(5):195-202.

[2] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J].岩土力学, 2011, 32(7):2085-2092.

[3] 陈郁,李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J].地下空间与工程学报, 2005, 1(1):91-94.

[4] 黄栩,黄宏伟,张冬梅. 开挖卸荷引起下卧已建盾构隧道的纵向变形研究[J].岩土工程学报, 2012, 34(7):1241-1249.

[5] 宗翔. 基坑开挖卸载引起下卧已建隧道的纵向变形研究[J].岩土力学, 2016, 37(增刊2):571-577.

[6] 刘建文,施成华,雷明锋,等. 基坑开挖对下卧地铁隧道影响的解析计算方法[J].中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9):2215-2225.

[7] 施有志,刘旭东,赵朋,等. 基坑零距离上跨盾构隧道的环境影响与控制[J].科学技术与工程, 2022, 22(18):8110-8121.

[8] 郑刚强,殷洪波,郭永发,等. 基坑上跨既有地铁隧道施工扰动效应研究[J].工程建设与设计, 2022(1):114-117.

[9] 付波,傅家颀,周珊,等. 市政道路上跨现状地铁结构安全影响分析[J].运输经理世界, 2024(29)141-144.

[10] 李志高,刘浩,刘国彬,等. 基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析[J].地下空间与工程学报, 2005, 1(4):619-623.

(下转第 423 页)