

群洞施工邻近既有线深孔注浆加固范围研究

王利民¹, 冯志耀²

(1. 湖南致力工程科技有限公司, 长沙 410208; 2. 中南大学土木学院, 长沙 410075)

摘要: 为分析邻近既有线时深孔注浆对既有隧道变形的影响,并确定合理的注浆加固范围,以北京地铁17号线东大桥站邻近既有线隧道为工程背景,通过数值计算和现场实测分析在距离既有线一定区域进行全断面深孔注浆的加固效果。结果表明,在上层导洞与既有线高程相同,下层导洞小于既有线高程的情况下,下层导洞开挖是引起既有隧道变形的主要施工阶段,而上层导洞开挖对既有隧道的变形几乎没有影响,因此建议减小上层导洞的深孔注浆范围,重点加固下层导洞;随着深孔注浆范围的增大,既有线的竖向变形逐渐减小,但两者之间呈非线性变化关系,存在最优加固范围;当注浆范围大于10 m时,继续增加注浆范围对减少既有线变形的作用很小。

关键词: 地铁车站; 既有线; 深孔注浆; 数值模拟

中图分类号: U231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)16-0252-06

随着大规模城市轨道交通的建设,势必会出现大量的地铁线路交叉和换乘的情况,需要大量的节点车站^[1-2]。受于地下空间的局限性及换乘需求,地铁车站不可避免地要穿越既有线或车站^[3]。在穿越过程中,需要严格控制既有线的变形,以确保其运营安全。现有的车站穿越工程多为整体穿越,即下层结构的顶面位于上层结构底面下方,对于无法整体穿越时,则需要将地铁车站分成不同区域进行分段施工,其施工难度会进一步增大^[4-5]。车站顶面高于既有线隧道的顶面且其底面低于隧道的底面,无法直接上穿或下穿,因此车站设计分为三段,既有线两侧的车站采用洞桩法,既有线下方的双线隧道采用交叉中隔强法(cross diaphragm method)。出现了群洞施工邻近既有线的情况,容易使既有线超过变形标准,会对既有线结构和线路的运营安全产生影响。

为更好地控制既有线的变形,群洞施工邻近既有线时须采取相应的加固措施,常见的加固措施有管棚超前支护、超前小导管注浆、超前深孔注浆等。张传强等^[6]通过数值模拟的手段,分析了基坑近接分期施工引起的既有地铁车站变形问题;马军^[7]以北京地铁16号线苏州街站北段邻近既有10线车站为背景,从施工工艺的角度详述了邻近既有车站群洞施工的技术及措施;阮艳妹等^[8]通过数值模拟研究了分离岛式

车站交叉洞群的周边环境效应;张成平等^[9]以北京地铁5号线崇文门站下穿既有地铁隧道为背景,探讨柱洞法结合超前管幕施工的技术;张振波等^[10]依托北京地铁6号线苹果园站零距离下穿既有地铁1号线苹果园站工程,探究两层三跨地铁车站密贴下穿既有结构变形控制技术;王联平^[11]讨论深圳地铁7号线下穿既有地铁4号线福民站的施工难点和相应的施工技术,介绍全断面深孔注浆与工作面注浆相结合的加固方式;姚文花^[12]结合北京地铁12号线蓟门桥站T型换乘节点,通过现场监控量测研究粉细砂地层洞桩法(pile beam arch method)工法地铁车站管幕法超前支护施工技术;孙旭东^[13]以北京地铁6号线下穿既有5号线东四站为例,介绍超前注浆加固及止水技术、辅助深孔注浆及背后回填和补偿注浆技术等暗挖隧道下穿既有车站施工技术;熊逸凡^[14]探讨盾构掌子面开挖距离断层破碎带的安全距离。

本文以北京地铁17号线东大桥站南侧标准段邻近既有线为工程背景,针对具体的地质条件和施工方法,研究深孔注浆加固范围对既有隧道变形的影响,以确定合理的注浆加固范围,并通过现场实测验证,可供类似工程参考借鉴。

1 工程概况与计算模型

1.1 工程简介

车站位于成熟社区和商业区,地面车流量大,交

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 中南大学自主创新项目(2023ZZTS0366)

作者简介: 王利民(1986—),男,湖南张家界人,高级工程师,研究方向为隧道与地下工程;冯志耀(1993—),男,河南焦作人,博士研究生,研究方向为隧道与地下工程。

通繁忙。车站为岛式车站,车站南侧标准段为暗挖双层双柱三跨结构,结构宽为 28.9 m,高为 19.57 m,其八导洞如图 1 所示,采用洞桩法施工,无水暗挖作业。中间下穿既有线段为暗挖单层双洞结构,采用交叉中隔墙法施工,中心里程处单层结构覆土约为 15.18 m,车站有效站台中心处底板埋深约为 33.6 m。

1.2 计算模型及参数

本文利用 Flac3D 数值模拟软件进行分析计算,根据新建地铁车站南侧标准段的尺寸,考虑施工过程中的空间效应及边界影响,所建模型的尺寸为 120 m×100 m×65 m,如图 2 所示。在土体本构模型方面,地层采用摩尔-库仑模型,采用空单元(null zone)模拟来开挖,边界条件为顶面为自由边界,模型左右两侧面约束 x 方向水平位移,模型前后两侧面约束 y 方向水平位移,底面约束 z 方向位移。

土层参数取值以岩土工程勘察报告给出的岩土参数值为依据,根据所给的土体压缩模量 E_s ,由 $E_0 = E_s \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}\right)$ 推导出初始弹性模量 E_0 ,并以初始弹性模量为基础,进行多次试算,通过反演的

方式确定合理的土层参数。计算过程中各土层、既有隧道的衬砌、小导管注浆、深孔注浆的力学参数如表 1 所示。

表 1 土层及结构的计算参数

类型	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
#1	4.32	0.24	1 956	18.4	16.56
#2	30.00	0.27	2 145	31.3	0.00
#3	10.22	0.28	2 030	21.8	37.75
#4	44.04	0.25	2 261	37.4	0.00
#5	9.71	0.26	2 000	10.0	40.00
#6	52.23	0.24	2 350	41.3	0.00
#7	22.83	0.27	2 129	24.0	10.26
小导管注浆	60.00	0.28	2 200	35.0	60.00
初支	20 000	0.20	2 300	—	—
衬砌	34 500	0.20	2 500	—	—
深孔注浆	121.80	0.25	2 350	33.9	40.00

依据室内土工试验的结果对部分性质相近的土层进行合并,合并后的土层共分为 7 层,从上到下依次为:1 层土,29.5~38.5 m,由杂填土、素填土、黏质粉土构成;2 层土,22~29.5 m,由粉细砂、细中砂、圆砾构成;3 层土,16~22 m,由粉质黏土、黏质粉土构成;4 层土,6.5~16 m,由中砂、圆砾构成;5 层土,3~6.5 m,由粉质黏土构成;6 层土,-7~3 m,由中砂、卵石构成;7 层土,-26.5~-7 m,由粉砂、粉质黏土、粉细砂、粉质黏土、中砂构成。

2 深孔注浆加固范围计算分析

由于小导洞封端距离既有隧道较近,在邻近既有线隧道时,如果仅采用小导管注浆来加固土体,导洞开挖所引起的既有隧道变形势必会超过变形标准,隧道变形过大会严重影响地铁的运营安全,甚至会造成既有隧道结构的破坏。为确保地铁的运营安全,本工程采用深孔注浆的加固措施。

2.1 深孔注浆加固方案

当群洞施工邻近既有线时,先采用深孔注浆的方式加固土层,然后再进行小导洞开挖,且在导洞开挖到封端后,用钢焊管对区间隧道侧壁及下方土体进行注浆加固。深孔注浆加固的断面范围为导洞开挖轮廓线外 2 m 及掌子面全断面,深孔注浆距离既有线的垂直距离为 L ,如图 3 和图 4 所示。注浆浆液采用水泥-水玻璃双液浆,注浆压力为 0.8~1.5 MPa,加固后的土体应具有良好的均匀性、自稳性,无侧限抗压强度为 0.8 MPa。

2.2 深孔注浆加固模拟

群洞施工采用“先上后下,先边后中,错洞开

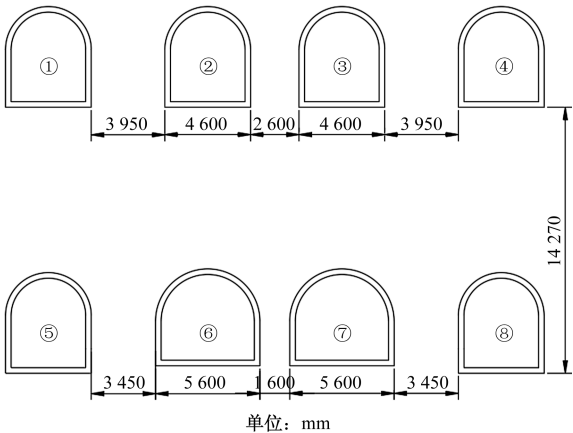


图 1 八导洞示意图

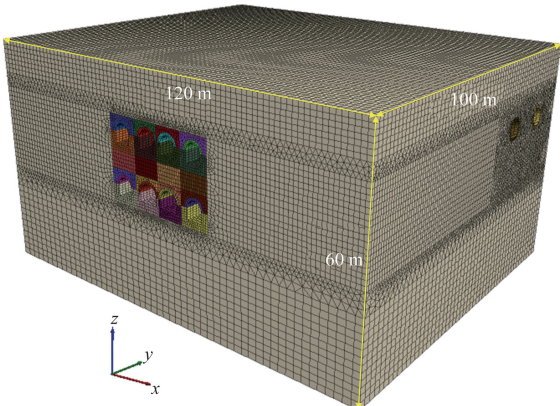


图 2 网格模型

挖”的开挖顺序,开挖面距不小于15 m,开挖前用 $\phi 32\text{ mm}\times 2.8\text{ mm}$ 小导管对拱顶轮廓线以外0.5 m范围内的土体进行预注浆加固,加固范围超前开挖面2 m,采用上下台阶开挖,台阶长度为3 m,初支采用C20网喷混凝土加钢格栅与钢筋网片。在上述群洞施工顺序已定的情况下,针对既定的注浆浆液配比、注浆压力、布孔方案,以及相同施工工艺,对深孔注浆加固范围进行分析研究,其中深孔注浆加固范围是指距离既有隧道左线的侧壁的长度,具体加固范围工况如下:工况1:不进行深孔注浆加固;工况2:深孔注浆范围 L 为5 m;工况3:深孔注浆范围 L 为10 m;工况4:深孔注浆范围 L 为15 m。

具体模拟计算过程,当开挖面与既有有线之间的距离为 L 时,通过改变深孔注浆范围内原有土体的力学参数来模拟深孔注浆过程,注浆后的土体采用摩尔-库仑模型。当导洞开挖到封端后,通过改变封端与既有有线之间以及上导洞与下导洞之间土体的力学参数,来模拟钢焊管注浆加固过程,同样采用摩尔-库仑模型。

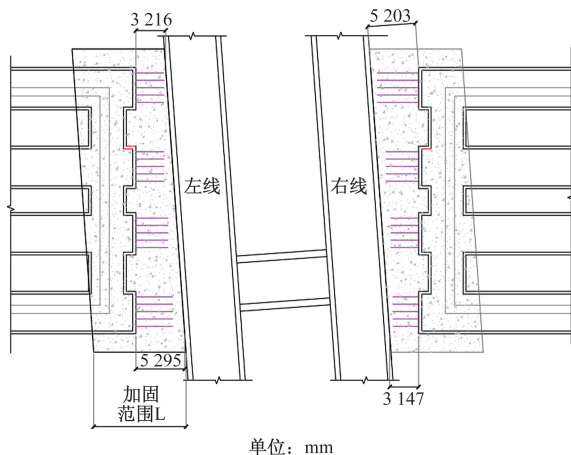


图3 导洞与既有区间隧道的平面

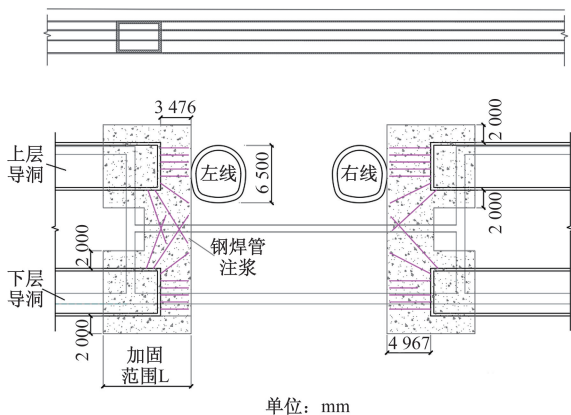


图4 导洞与既有区间隧道的剖面

2.3 模拟分析结果

在对既线隧道结构进行详细检验和评估后,根据检测评估和安全验算结果,参考国内外类似工程,并结合具体的工程地质条件,认为在邻近既有线的施工过程中,既有隧道底板的竖向变形量控制在3 mm以内满足线路运营安全的要求。四种工况下既有隧道的竖向位移云图如图5所示,通过对上述四种深孔注浆加固范围的模拟计算可知,最大竖向变形发生在隧道左侧壁。

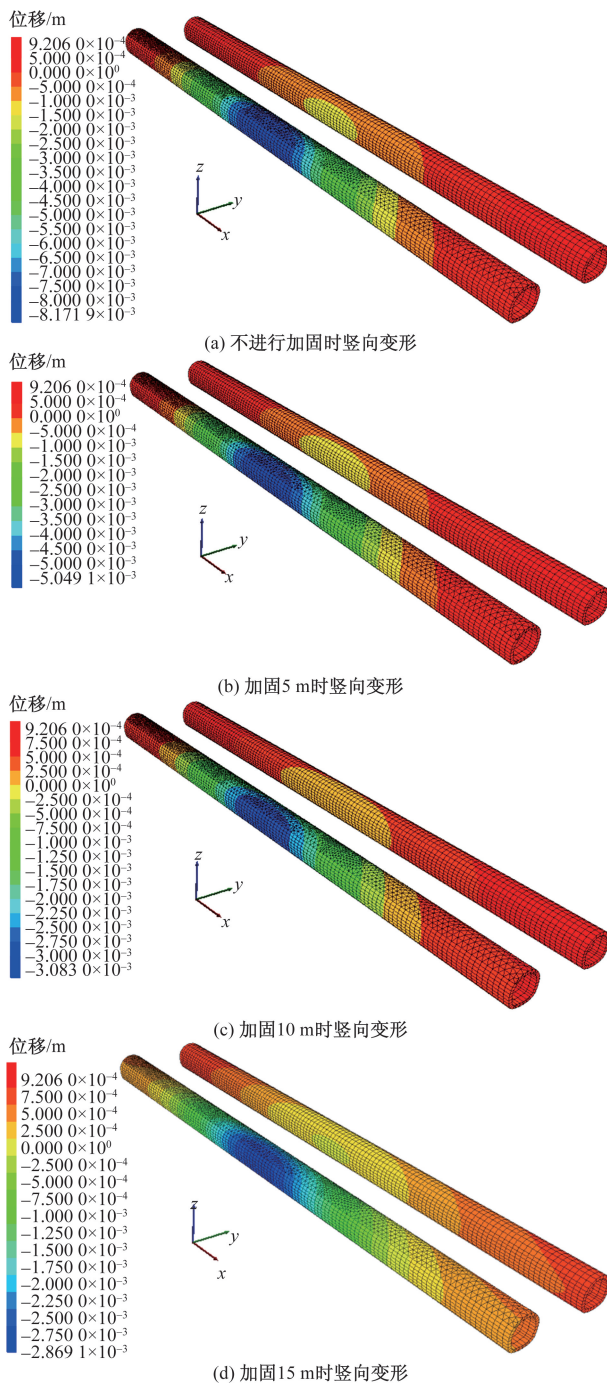


图5 不同工况下既有隧道的竖向位移云图

由于轨道铺设在隧道底板上,因而既有隧道底板的变形对于地铁的运营安全至关重要。图6为不同加固范围下隧道底板的竖向变形,其中不进行深孔注浆加固时,最大竖向变形为7.95 mm,深孔注浆加固范围为5 m时,最大竖向变形为4.83 mm,深孔注浆加固范围为10 m时,最大竖向变形为2.92 mm,深孔注浆加固范围为15 m时,最大竖向变形为2.68 mm。由图7可知,既有线底板的最大竖向变形随注浆加固范围的增大而注浆减小,但二者呈非线性关系,当深孔注浆加固范围大于10 m时,继续增加注浆范围对减少既有线竖向变形的作用很小,即存在最优注浆加固范围。当加固范围为10 m时既有隧道底板的竖向变形满足底板变形控制要求。

在不同的注浆范围情况下,既有线隧道底板的最大竖向变形量随施工阶段的变化如图8所示。可以看出在上层导洞高程与既有隧道底板高程基本

相同,下层导洞高程小于既有隧道底板高程,且导洞封端与既有隧道水平间距较近的情况下,引起既有隧道地板变形的主要施工阶段是导洞5~导洞8的开挖,即下层导洞。其中深孔注浆加固范围为10 m时,不同群洞施工阶段中既有隧道底板的竖向变形曲线如图9所示,可以较为直观地看出上层导洞开挖会使既有隧道底板产生“隆起”现象,但变形量较小;下层导洞开挖会使既有隧道产生向下的竖向变形,且变形量较大,下层导洞开挖是引起既有隧道变形的主要工序。开挖导洞5、8所引起的竖向变形量占总变形的45.3%,开挖导洞7所引起的竖向变形量占总变形的32.5%,开挖导洞6所引起的竖向变形量占总变形的22.2%。

因此在特定的工程地质条件下,群洞施工邻近既有线时,既有线结构断面中线以上的导洞开挖对既有线的变形影响较小,对其进行全断面深孔注浆

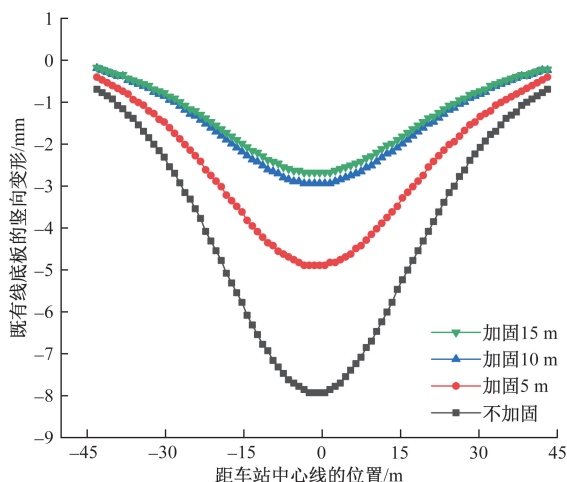


图6 既有隧道底板的竖向变形曲线

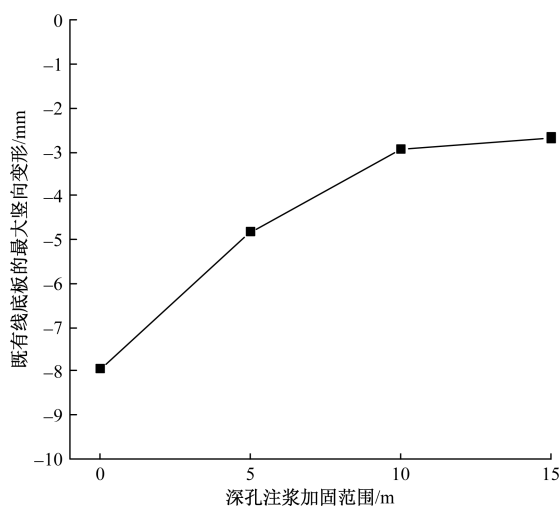


图7 既有隧道底板的竖向变形曲线

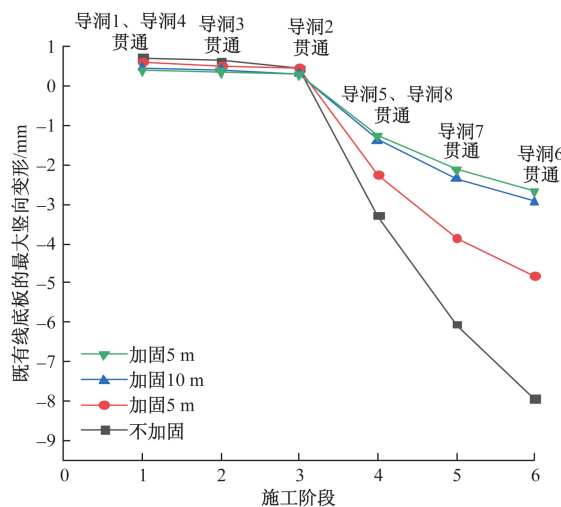


图8 各阶段既有隧道底板的最大竖向变形量

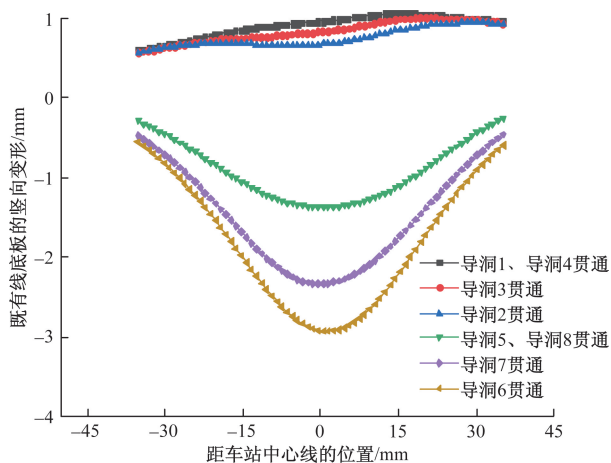


图9 不同施工阶段下既有隧道底板的竖向变形

是不必要的,为节约成本和加快施工进度,建议取消上层导洞的深孔注浆或者减小深孔注浆的加固范围,重点对下层导洞的开挖进行超前深孔注浆加固。

3 现场监测方案与结果分析

施工过程中监控测量是一项重要的内容,既有隧道结构的位移监控测点布置示意图如图10所示,通过监控测量能够及时了解前一步施工工艺的合理性,以及验证数值计算的准确性,进一步增加数值分析结论的说服力。实测既有隧道底板的竖向变形如图11所示,在深孔注浆为10 m的情况下,实测既有隧道底板的最大竖向变形发生车站中心线偏左的位置,这是由于既有隧道并非完全垂直小导洞,车站中心线偏左处的隧道结构距离小导洞更近。最大竖向变形量为2.84 mm,与数值计算结果基本相符,满足工程要求。

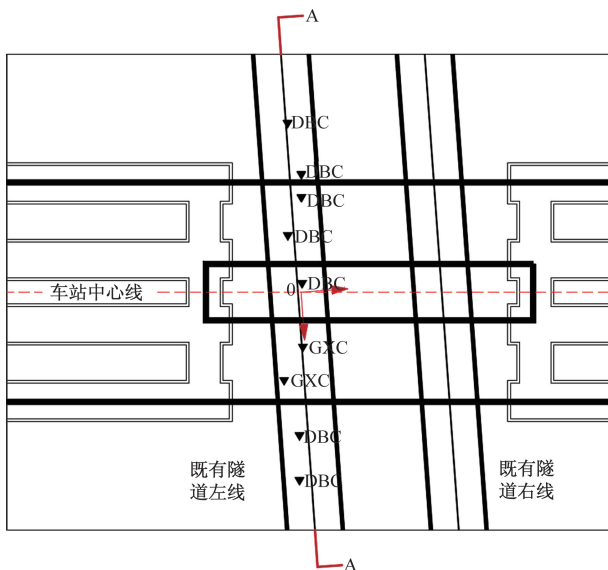


图10 既有隧道监控量测平面测点布置示意图

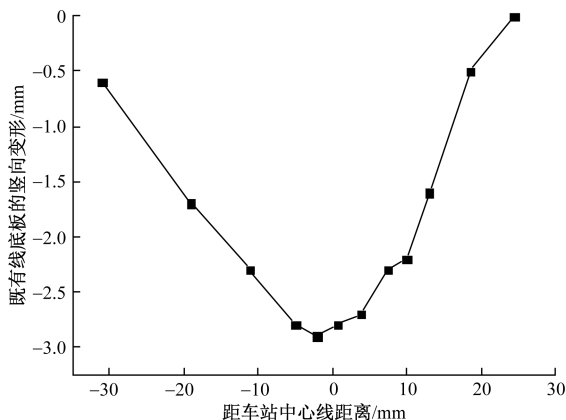


图11 实测既有隧道底板的竖向变形

4 结论

针对北京地铁17号线东大桥站南侧标准段邻近既有区间隧道工程,针对相同的注浆浆液配比、注浆压力、布孔方案,以及相同施工顺序,在上层导洞高程与既有线高程相同而下层导洞小于既有线高程的情况下,采用数值模拟和现场实测的方法分析了不同的深孔注浆加固范围对既有隧道变形的影响,可得到以下结论。

(1)下层导洞开挖是引起既有隧道变形的主要施工阶段,而上层导洞开挖对既有线的影响很小,开挖导洞5、8所引起的竖向变形量占总变形的45.3%,开挖导洞7所引起的竖向变形量占总变形的32.5%,开挖导洞6所引起的竖向变形量占总变形的22.2%。因此建议取消上层导洞的深孔注浆或者减小深孔注浆的加固范围,重点对下层导洞的开挖进行超前深孔注浆加固。

(2)在既有线周边先进行注浆加固,然后再进行小导洞施工可有效减少既有隧道底板的竖向变形,深孔注浆加固范围越大,既有线底板的竖向变形越小,但两者之间呈非线性变化关系,存在最优注浆加固范围,当深孔注浆加固范围大于10 m时,继续增加注浆范围对减少既有线竖向变形的作用较小。

参考文献

- [1] 冯志耀,潘旦光,曹德更,等.小导洞开挖的围岩应力分布规律——以北京地铁17号线东大桥1号导洞为例[J].科学技术与工程,2020,20(11):4528-4533.
- [2] 范勇峰,李轲,王军平,等.基于CRITIC-TOPSIS法地铁车站基坑开挖施工安全风险评估——以济南地铁9号线开源路站为例[J].科技和产业,2024,24(5):239-245.
- [3] 隋晓燕.大直径土压平衡盾构下穿既有U型槽结构变形[J].科学技术与工程,2019,19(17):320-326.
- [4] 白纪军.宣武门地铁车站群洞施工技术及其沉降分析[J].铁道建设,2007(5):42-45.
- [5] 杨会军,周冉.下穿地铁车站暗挖施工对既有线影响分析[J].铁道工程学报,2018(7):86-90.
- [6] 张传强,孔令坤,乔南,等.基坑近接分期施工对既有地铁车站的影响分析[J].科技和产业,2023,23(9):156-161.
- [7] 马军.邻近既有运营地铁车站群洞开挖技术[J].铁道建筑技术,2015(5):74-78.
- [8] 阮艳妹,李进,袁炳祥,等.分离岛式地铁车站交叉洞群施工的周边环境效应分析[J].科学技术与工程,2023,23(26):11405-11413.
- [9] 张成平,张顶立,吴介普,等.暗挖地铁车站下穿既有地

- 铁隧道施工控制[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 69-73.
- [10] 张振波, 王煦霖, 郑凯, 等. 双层车站零距离下穿既有车站变形控制技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 727-733.
- [11] 王联平. 暗挖区间隧道下穿既有地铁施工技术[J]. 铁道建筑, 2017(1): 98-102.
- [12] 姚文花. 粉细砂地层 PBA 工法地铁车站管幕法超前支护施工技术[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15682-15689.
- [13] 孙旭东. 暗挖隧道密贴下穿既有车站施工关键技术[J]. 隧道建设, 2013, 33(5): 412-418.
- [14] 熊逸凡. 城市地铁盾构隧道与前方断层破碎带临界安全距离研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(6): 239-248.

Research on the Deep Hole Grouting Reinforcement Scope during Group Tunnels Construction Adjacent to the Existing Line

WANG Limin¹, FENG Zhiyao²

(1. Hunan Zhili Science and Technology Co. Ltd., Changsha 410208, China;
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to analyze the influence of deep hole grouting on the deformation of existing tunnel in the process of adjoining it, and to determine the reasonable grouting reinforcement range, the Dongdaqiao Station of Beijing Subway Line 17, adjoining the existing Metro Line, was taken as the engineering background. The effect of full-section deep hole grouting reinforcement in a certain distance from the existing line was analyzed by numerical calculation and on-site measurement. The results show that the lower pilot tunnel excavation is the main construction stage that causes the deformation of the existing tunnel under the condition that the elevation of the upper pilot tunnel is the same as the existing line and the elevation of the lower pilot tunnel is smaller than the existing line, while the upper pilot tunnel excavation has little effect on the deformation of the existing tunnel. Therefore, it is recommended to reduce the deep hole grouting range of the upper pilot tunnel and pay more attention on reinforcement of the lower pilot tunnel. The vertical deformation of the existing tunnel gradually decreases with the increase of the range of deep hole grouting reinforcement, but the relationship between the two is nonlinear, and there exists the most optimal reinforcement range. There is little effect on reducing the deformation of the existing tunnel by increasing the grouting range when it is greater than 10 m.

Keywords: subway station; the existing line; deep hole grouting; numerical simulation