

地铁车站密贴斜穿既有地铁车站的变形分析

姜晓¹, 张志伟²

1. 北京北咨工程咨询有限公司, 北京 100020; 2. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 山东 济南 250002

摘要:以北京地铁6号线苹果园站密贴斜穿既有地铁1号线苹果园站主体结构为研究对象,采用三维有限元数值分析软件GTS-NX建立地铁车站-既有车站的三维有限元模型,计算分析桩梁拱(pile beam arc, PBA)工法动态施工时地表沉降变形发展规律,并对比实测沉降与数值模拟沉降。模拟研究表明:采用PBA工法修建地铁车站整个施工阶段,导洞开挖引起的地表沉降为-12.25 mm,占地表总沉降的48.2%,扣拱施工引起的地表沉降为-6.94 mm,占地表总沉降的27.3%,说明导洞开挖、二衬扣拱阶段是控制地表沉降的关键环节;既有车站对地表沉降产生一定的影响。最大实测沉降为-25.89 mm,最大数值模拟沉降为-25.41 mm,实测与数值模拟结果相差小于5%,验证了数值模拟结果的有效性,数值模拟结果较准确地反映实际情况。

关键词:PBA工法;密贴斜穿施工;既有地铁车站;沉降

中图分类号:U231

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)01-0088-07

引用格式:姜晓,张志伟. 地铁车站密贴斜穿既有地铁车站的变形分析[J]. 山东交通学院学报, 2022, 30(1): 88-94.

JIANG Xiao, ZHANG Zhiwei. Deformation analysis of a subway station close-fitting and diagonal crossing an existing subway station[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(1): 88-94.

0 引言

各国对开发利用城市地下空间的研究不断深入,新建地铁车站时遇到较多穿越施工问题,即新建车站或隧道对既有建(构)筑物造成影响^[1-4],因岩土工程领域的复杂性,既有工程的典型案例往往不能照搬到新工程中。如:长春地铁1号线卫星广场站下穿轻轨3号线,采用了叠合板的结构设计,两者净距为0^[5];北京地铁10号线公主坟站下穿既有1号线公主坟站,2个车站的净距为0.5 m^[6];北京地铁5号线崇文门站下穿既有地铁隧道车站-隧道间净距为2.5 m^[7];成都地铁倪家桥站与既有倪家桥站间净距为2.4~2.6 m^[8]。田均举等^[9]引入最大沉降量修正系数和沉降槽宽度修正系数改进Peck公式,获得较准确的地表沉降预测曲线;周庆国^[10]扩大既有隧道注浆加固范围,可使隧道结构变形呈线性减小;刘士海等^[11]提出既有盾构隧道沉降理论公式并拟合分析沉降实测数据,认为增大拱脚受力面积的施工辅助措施对控制地层损失率有一定作用;何海健等^[12]从既有车站沉降的影响来源、传播路径和保护对象等方面总结穿越技术措施,采用丝杠横梁支顶辅以高压补浆工艺在采用桩梁拱(pile beam arc, PBA)工法施工梁柱体系形成后对抑制既有车站后期沉降起到关键作用。

北京地铁6号线苹果园站采用PBA工法进行施工。车站与既有车站主体结构存在空间交叉,两者之间的最小净距仅为0.5 m,须先通过理论计算分析,了解并掌握施工过程中地表沉降变形基本规律,为地铁车站的施工提供相应的技术指导。本文采用三维软件GTS-NX建立地铁车站-既有车站的三维有限元模型,计算分析PBA工法动态施工时地表沉降变形发展规律,并对比实测沉降与数值模拟沉降结果。

收稿日期:2021-04-21

基金项目:中铁十四局集团科技研究开发计划项目(2020QT03)

第一作者简介:姜晓(1988—),女,山东聊城人,工程师,主要研究方向为岩土工程及地下方向,E-mail:jiangxiao518518@163.com。

1 工程概况

地铁6号线苹果园站位于既有1号线苹果园站的下方,6号线苹果园车站斜穿段为双层双柱三跨岛式站台暗挖车站结构,斜穿段两侧为3层结构,斜穿段底板埋深27.029 m,结构顶板覆土11.759 m,结构宽23.5 m,高14.92 m。斜穿段处于复杂地层中,施工范围内上部为杂填土、粉质黏土,下部为5种不同粒径的卵石地层。

车站共设置4处出入口,2座风亭,1个安全出口;规划5处施工竖井,2个无障碍电梯、2个过街通道、2个换乘通道车站。

施工的主要技术难点在于新建车站需密贴斜穿(净距为0.5 m)既有车站结构,且地表沉降不得大于30 mm,既有车站沉降不得大于3 mm。施工变形控制指标如表1所示^[13-16],新建车站与既有车站位置关系见图1。

表1 施工变形控制指标

控制指标	预警变形/mm	报警变形/mm	控制变形/mm
既有车站变形	2.1	2.4	3.0
地表沉降	20.0	26.0	30.0

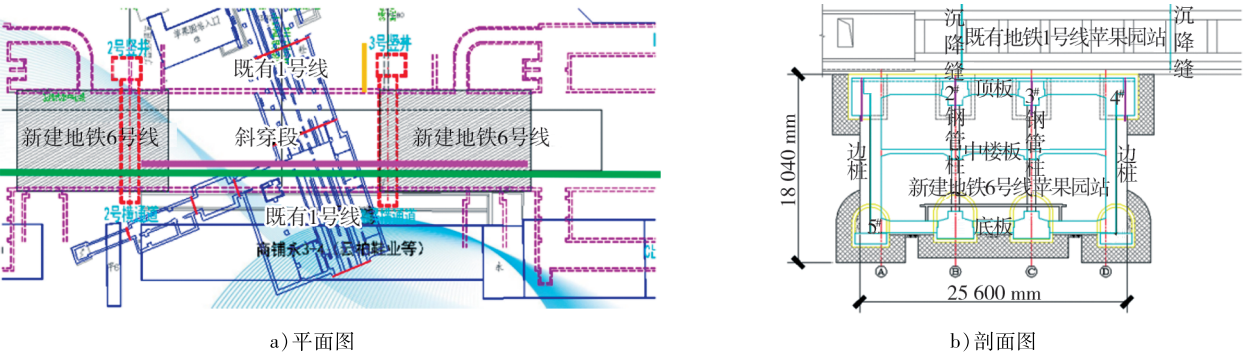


图1 新建车站与既有车站位置关系

2 车站下穿施工变形模拟

2.1 车站开挖过程

车站施工时采用超前注浆条件下的PBA工法,施工工序为:导洞周围土体超前注浆—开挖导洞并加装初期支护—施作底部条形基础及底纵梁—施作边桩及中柱—施作顶纵梁及顶冠梁—采用中隔壁(center diaphragm, CD)法开挖边导洞与中导洞间的土体—采用台阶法开挖中导洞间的土体—拆除中隔壁及部分导洞初期支护,施作顶部二衬扣拱并及时注浆回填—向下开挖土体并施作侧墙及中楼板—继续向下开挖剩余土体并施作底板直至整个结构完成^[17-20]。PBA工法施工主要施工步骤如图2所示。

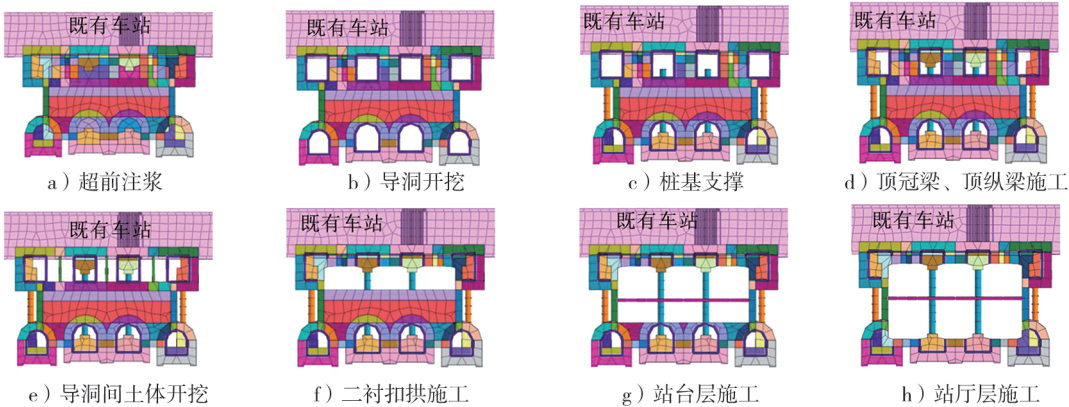


图2 苹果园站PBA工法施工主要施工步骤

2.2 三维有限元模型的建立

采用迈达斯有限元分析软件 GTS-NX 建立三维数值模型,分析各施工阶段对地表沉降及既有车站底板沉降变形的影响。综合考虑尺寸效应带来的计算误差,模型左右边界长度为开挖断面长度的 3 倍,模型上下边界为开挖断面高度的 3 倍,模型尺寸为 $100\text{ m}\times 60\text{ m}\times 60\text{ m}$ 。土体本构模型采用修正摩尔-库伦模型,模型上边界为地表,设为自由边界,其他面边界采取法向约束。结构受力只考虑重力场的作用。为保证数值模拟结果的可靠性,在保证计算精度的前提下,对既有车站模型进行了合理简化。模拟土层、二次衬砌及既有车站均采用六面体实体单元,模拟初期支护单元采用板单元,模拟新建车站与既有车站的边桩与中柱均采用梁单元。采用改变属性的方式模拟超前加固及回填注浆等措施^[21-23]。有限元模型如图 3 所示,新建车站与既有车站的关系如图 4 所示。

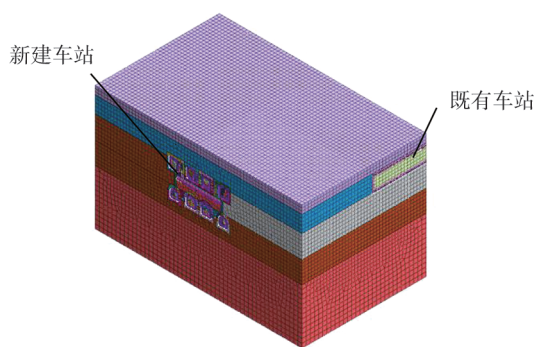


图 3 三维有限元计算模型

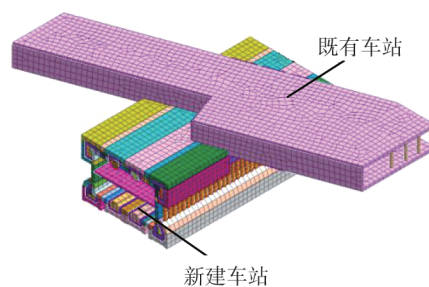


图 4 新建车站与既有车站的关系

土体数值模拟计算参数见表 2。初期支护、二次衬砌、既有车站柱、新建车站桩、新建车站柱、条形基础、底纵梁、顶冠梁、顶纵梁、超前注浆的弹性模量分别为 2.55×10^4 、 3.25×10^4 、 2.10×10^5 、 3.00×10^4 、 2.00×10^5 、 3.00×10^4 、 3.00×10^4 、 3.00×10^4 、 3.00×10^4 、 50 MPa ,泊松比除超前注浆为 0.23 外,其余均为 0.20。

表 2 土体数值模拟计算参数

土层	厚/m	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙率
粉质黏土	1.8	8.00	0.32	8	10	1.65	
杂填土	0.5	7.00	0.31	0	8	1.70	
2~5 cm 卵石	1.5	30.00	0.20	0	25	2.02	0.34
5 cm 卵石	8.0	40.00	0.29	0	40	2.10	0.33
7 cm 卵石	11.0	45.00	0.29	0	42	2.15	0.32
9 cm 卵石	8.5	50.00	0.29	0	45	2.15	0.31
11 cm 卵石	7.6	55.00	0.29	0	45	2.15	0.31

3 结果分析

3.1 数值计算结果分析

为分析密贴下穿施工对地表沉降变形的影响,布设监测断面 L_1 ,如图 5 所示。

对不同施工阶段引起的地表沉降进行分析,对监测断面 L_1 进行全过程监测。监测断面 L_1 地表沉降结果如图 6 所示。

由图 6 可知:随着新建车站的开挖,地表发生竖向沉降并逐渐增加。导洞开挖和二衬扣拱阶段引起的地表沉降较大,导洞开挖完成后最大地表沉降为 -12.25 mm ,占整个开挖阶段总沉降的 48.2%;扣拱阶段完成后最大地表沉降为 -24.21 mm ,占整个开挖阶段总沉降的 27.3%;二衬扣拱完成后,地表变形趋近

于稳定。地表沉降曲线沿着开挖中心线呈对称分布,左侧沉降略大于右侧沉降。各阶段施工引起的地表沉降占总地表沉降比例如表3所示。

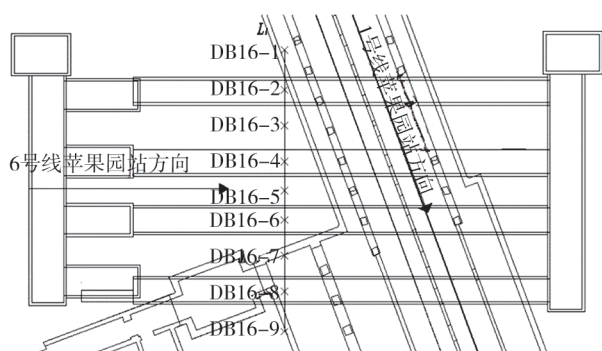


图5 地表沉降监测布置图

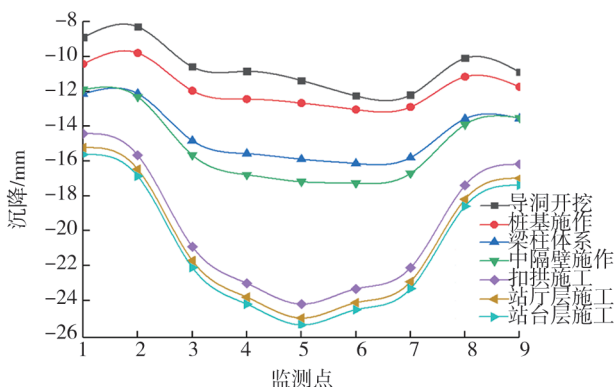


图6 数值模拟监测断面 L_1 累计地表沉降曲线

表3 各阶段施工引起的地表沉降占总地表沉降比例

施工步骤	累计地表沉降/mm	各施工步骤沉降/mm	各施工步骤沉降百分比/%
导洞开挖	-12.25	-12.25	48.2
桩基施作	-13.04	-0.79	3.1
梁柱体系	-16.13	-3.09	12.1
中隔壁施作	-17.27	-1.14	4.5
扣拱施工	-24.21	-6.94	27.3
站厅层施工	-25.00	-0.79	3.1
站台层施工	-25.41	-0.41	1.6

由图6、表3可知:导洞开挖阶段对地表沉降影响最大。导洞开挖时应严格遵守施工管理规定,做好超前预加固措施及导洞开挖方式规划,尽量避免群洞效应带来的不利影响。进行中隔壁施工时,开挖完成后在结构内土体的卸载作用下,既有车站和梁柱体系引起地表发生部分回弹。进行扣拱施工时,地应力随施工进程重新分布,地表变形增加。扣拱施工是整个结构受力转化最复杂的部分,需合理安排扣拱施工顺序,及时注浆回填等。进行站厅层及站台层施工时,因扣拱阶段施工完成,整个结构受力体系完成,进一步开挖不再对地表产生较大影响^[24-26]。但既有车站对地表沉降变形有一定的影响。

3.2 实测结果分析

断面 L_1 实际沉降监测结果如图7所示。数值模拟沉降与实测沉降对比如图8所示。各施工阶段引起的地表沉降占总沉降比例如表4所示。

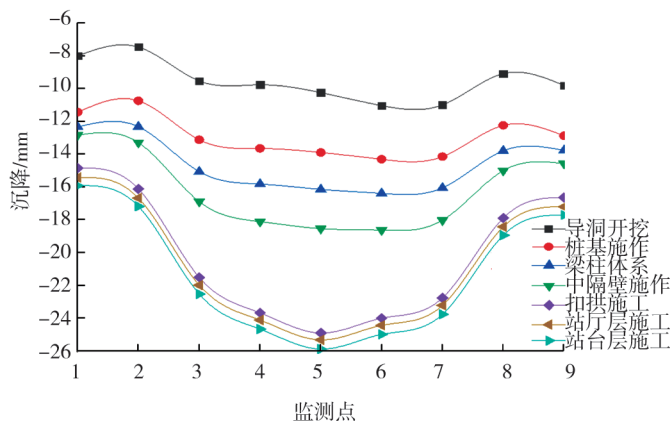


图7 断面 L_1 实际监测结果

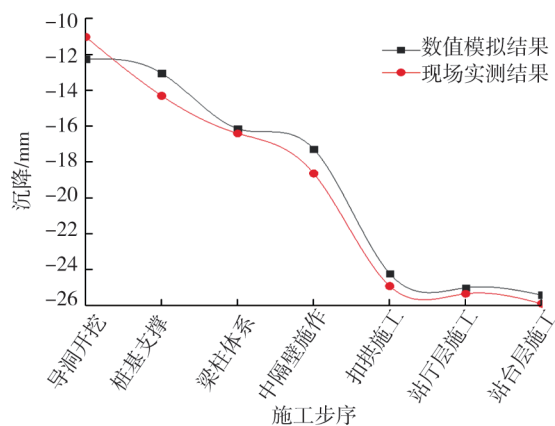


图8 数值模拟沉降与实测沉降结果对比

表 4 各阶段施工引起的地表沉降占总沉降比例

施工步骤	累计地表沉降/mm	各施工步骤沉降/mm	各施工步骤沉降百分比/%
导洞开挖	-11.02	-11.02	43.5
桩基施作	-14.30	-3.28	12.9
梁柱体系	-16.39	-2.09	8.2
中隔壁施作	-18.63	-2.24	8.8
扣拱施工	-24.91	-6.28	24.8
站厅层施工	-25.33	-0.42	1.6
站台层施工	-25.89	-0.56	2.1

由图 7、8 及表 3、4 可知:1) 实测沉降及数值模拟沉降均显示导洞开挖引起的地表沉降占地表总沉降的比例最大,其次为二衬扣拱阶段;2) 实测沉降略大于数值模拟沉降,原因是进行数值模拟计算时进行了简化,不能完全模拟实际情况,但两者最大沉降差不超过 5%;3) 实测结果显示,监测点 8、9 最大沉降略小于监测点 1、2,既有车站对地表沉降产生影响。

4 结论

1) 采用 PBA 工法修建地铁车站,施工中导洞开挖阶段引起的地表沉降占地表总沉降的 43.5%,扣拱施工引起的地表沉降占地表总沉降的 24.8%,说明导洞开挖、二衬扣拱阶段是控制地表沉降的关键环节。

2) 既有车站的存在对地表沉降产生一定的影响。

3) 实测最大沉降与数值模拟最大相对沉降相差小于 5%,验证了数值模拟结果的有效性,可以较准确地反映实际情况。

参考文献:

- [1] 陈孟乔, 杨广武. 新建地铁车站近距离穿越既有地铁隧道的变形控制[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4):53-59.
CHEN Mengqiao, YANG Guangwu. Deformation control of a new-built subway station crossing the adjacent existing existing subway tunnel[J]. China Railway Science, 2011, 32(4):53-59.
- [2] 张成平, 张顶立, 王梦恕. 大断面隧道施工引起的上覆地铁隧道结构变形分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5):805-810.
ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WANG Mengshu. Structural deformation analysis of overlying subway tunnels induced by tunnelling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5):805-810.
- [3] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5):1373-1380.
ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Response of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5):1373-1380.
- [4] 王占生, 张顶立. 浅埋暗挖隧道近距下穿既有地铁的关键技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2):4208-4214.
WANG Zhansheng, ZHANG Dingli. Key techniques on shallow embedded tunnel constructed beneath existing subway tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl. 2):4208-4214.
- [5] 杜文, 王永红, 李利, 等. 双层车站密贴下穿既有隧道案例分析及隧道沉降变形特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(7):2765-2773.
DU Wen, WANG Yonghong, LI Li, et al. Case study on double-deck subway station undercrossing and analysis of filed monitoring about this case[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7):2765-2773.
- [6] 吴海洋. 北京地铁新线车站穿越既有地铁车站影响及安全控制措施研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
WU Haiyang. Research on impact and safety control measures of Beijing newly built subway station crossing the existing

- subway station[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2012.
- [7] 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.
ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WU Jiepu, et al. Construction control of a newly-built subway station undercrossing the existing subway tunnel[J]. China Railway Science, 2009, 30(1):69-73.
- [8] 郭宏博, 李少友. 新建地铁车站大断面密贴暗挖下穿既有地铁车站施工方案[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊1):576-580.
- [9] 田均举, 朱坤, 蔡松, 等. 基于郑州地铁下穿南水北调干渠的 Peck 公式反演分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(2):109-113.
TIAN Junju, ZHU Kun, CAI Song, et al. Inversion analysis of peck formula based on Zhengzhou Subway running down the main channel of South-to-North Water Transfer[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(2):109-113.
- [10] 周庆国. 砂卵石地层地铁近接下穿既有盾构区间施工控制技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6):2459-2470.
ZHOU Qingguo. Construction control technology of metro passing through the existing shield under the sand pebble stratum[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6):2459-2470.
- [11] 刘士海, 贺美德, 刘继尧. 新建隧道斜交下穿既有盾构隧道的变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1):263-272.
LIU Shihai, HE Meide, Liu Jiyao. Deformation analysis on the existing shield tunnel obliquely crossed by new tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1):263-272.
- [12] 何海健, 李松梅, 童利红, 等. 新建地铁车站下穿既有车站土建措施研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1):273-281.
HE Haijian, LI Songmei, TONG Lihong, et al. Research on construction technical measures of a new metro station passing underneath an existing one[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1):273-281.
- [13] 程小虎. 在既有建筑下修建浅埋暗挖岩石车站的关键技术[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(6):99-106.
CHENG Xiaohu. Key technologies for the construction of shallow-buried rock metro stations under existing buildings[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6):99-106.
- [14] 路清泉, 夏瑞萌. 复杂地层暗挖车站小净距下穿大直径管线研究与应用[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(6):107-114.
LU Qingquan, XIA Ruimeng. Research and application of an underground excavation station in a complex stratum with small intervals under large-diameter pipelines[J]. Urban Express Rail Transit, 2020, 33(6):107-114.
- [15] 姚晓明, 舒波, 李波. 新建盾构隧道近距离下穿既有地铁线的安全控制技术[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5):243-250.
YAO Xiaoming, SHU Bo, LI Bo. Safety control technology for the newly constructed shield tunnels approaching existing metro lines underneath[J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(5):243-250.
- [16] 杨子璇, 姚爱军, 张东, 等. 隧道密贴下穿既有地铁车站沉降控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1):442-449.
YANG Zixuan, YAO Aijun, ZHANG Dong, et al. Study on settlement control of tunnel closely passing through existing metro station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(Suppl. 1):442-449.
- [17] 刘胜欢, 杜明芳, 易领兵, 等. 北京新机场线大断面暗挖隧道下穿京沪铁路施工影响数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8):125-129.
LIU Shenghuan, DU Mingfang, YI Lingbing, et al. Numerical analysis of the large section tunnel excavation for Beijing New Airport Line crossing under Beijing-Shanghai Railway[J]. Urban Rail Transit Research, 2020, 23(8):125-129.
- [18] 白鹏程. 超浅埋暗挖大跨隧道下穿既有隧道的沉降控制技术[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(3):175-181.
BAI Pengcheng. Settlement control techniques of the super-shallow buried large-span mined tunnel underneath an existing tunnel[J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(3):175-181.
- [19] 寇鼎涛, 高太平, 闫建龙, 等. 四线隧道密贴下穿既有地铁车站注浆加固圆砾石地层效果研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(12):94-100.
KOU Dingtao, GAO Taiping, YAN Jianlong, et al. Research on the effect of grouting reinforcement of gravel stratum in the four-line tunnel closely undercrossing the existing metro station[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(12):94-100.
- [20] 魏英华. 北京地铁16号线区间隧道下穿4号线施工变形模拟分析与控制[J]. 铁道建筑, 2020, 60(2):75-78.
WEI Yinghua. Simulation analysis and control of construction deformation of the interval tunnel in Beijing Metro Line 16

- under-crossing Beijing Metro Line 4[J]. *Railway Construction*, 2020, 60(2): 75-78.
- [21] 高太平, 闫建龙, 申健昊, 等. 四线隧道密贴下穿既有车站施工参数优化分析[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(9): 95-102.
GAO Taiping, YAN Jianlong, SHEN Jianhao, et al. Optimization analysis of construction parameters in the four-line tunnel closely passing under the existing station[J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(9): 95-102.
- [22] 陈彬科, 陈林杰, 吴建辉, 等. 新建地铁下穿既有轨道车站施工方案研究[J]. *中外公路*, 2018, 38(6): 186-189.
CHEN Binke, CHEN Linjie, WU Jianhui, et al. Study on construction schemes of new metro down-passing existing metro station[J]. *China & Foreign Highway*, 2018, 38(6): 186-189.
- [23] 杨会军, 周冉. 下穿地铁车站暗挖施工对既有有线影响分析[J]. *铁道工程学报*, 2018, 35(7): 86-90.
YANG Huijun, ZHOU Ran. Analysis of influence of underground excavation on existing line under subway station[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2018, 35(7): 86-90.
- [24] 赵江涛, 牛晓凯, 苏洁, 等. 洞桩法地铁车站顺行密贴下穿既有隧道方案优化研究[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(3): 176-185.
ZHAO Jiangtao, NIU Xiaokai, SU Jie, et al. Optimization of the construction scheme for a pba metro station adjacent to an existing metro tunnel[J]. *Modern Tunnel Technology*, 2018, 55(3): 176-185.
- [25] 王剑晨, 刘运亮, 张顶立, 等. 暗挖地铁车站平行下穿既有隧道的变形控制及规律研究[J]. *铁道学报*, 2017, 39(11): 131-137.
WANG Jianchen, LIU Yunliang, ZHANG Dingli, et al. Study of deformation control and deformation law of existing tunnel with parallel running underneath subway station[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(11): 131-137.
- [26] 张旭, 张成平, 韩凯航, 等. 隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(4): 759-766.
ZHANG Xu, ZHANG Chengping, HAN Kaihang, et al. Case study of control technology of structural settlements due to tunnelling beneath a subway station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(4): 759-766.

Deformation analysis of a subway station close-fitting and diagonal crossing an existing subway station

JIANG Xiao¹, ZHANG Zhiwei²

1. Beijing Beizi Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100020, China;

2. China Railway No. 14 Group Corporation Tunnel Engineering Co., Ltd., Jinan 250002, China

Abstract: The main structure for Pingguoyuan Station of Beijing Metro Line 6, closely attached to the existing Metro Line 1 Pingguoyuan Station, is taken as the research object. The GTS-NX three-dimensional finite element numerical analysis software is used to simulate the subway station-existing station. The three-dimensional finite element model of the PBA method is used to analyze the development law of surface settlement deformation during the dynamic construction of the PBA method, the measured data and the numerical simulation results are compared. The research results show that the pilot tunnel is excavated during the entire construction phase of the PBA method of the subway station. The surface settlement caused by the stage accounts is -12.25 mm, for 48.2% of the total surface settlement, and the surface settlement caused by the arch construction is -6.94 mm, accounted for 27.3% of the total settlement. The existence of a station will have a certain impact on ground settlement. The difference between the measured data (-25.89 mm) and the numerical simulation result (-25.41 mm) is less than 5%, which verifies the validity of the numerical simulation result, so the numerical simulation can better reflect the actual situation.

Keywords: PBA construction method; close-fitting and diagonal crossing construction; existing station; settlement

(责任编辑:郭守真)