

# 新建车站采用 PBA 法密贴下穿既有车站施工时 对既有车站结构变形的影响规律

田江涛<sup>1</sup> 王子杰<sup>2</sup>

(1. 武汉地铁集团有限公司, 430030, 武汉; 2. 河北科技师范学院城市建设学院, 066004, 秦皇岛)

**摘要** [目的] 新建车站密贴下穿既有车站施工时, 会对既有车站结构变形产生影响, 需研究其影响规律。[方法] 依托北京地铁 6 号线苹果园站密贴下穿既有车站工程, 采用 GTS-NX 有限元分析软件建立有限元模型。通过与实际监测结果的对比, 验证了有限元模型的计算准确性。基于有限元模型计算结果, 研究了 PBA (洞桩) 法施工对既有车站的影响, 并分析了既有车站的存在对地面沉降的影响。[结果及结论] 在 PBA 法施工过程中, 对既有车站轨道结构及既有车站结构影响较大的施工阶段为导洞开挖阶段及二次衬砌扣拱阶段; 越靠近既有车站, 地面沉降值越小; 在监测断面位置相同时, 既有车站结构断面越大, 地面沉降越小; 在既有车站断面尺寸相同时, 越靠近新建车站开挖中心线, 地面沉降值越大; 既有车站影响范围与既有车站结构的断面尺寸有关。

**关键词** 地铁车站; 施工影响; 密贴下穿; PBA (洞桩) 法

**中图分类号** TU94: U231.4

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.036

## Influence Law of PBA Method New Station Closely Undercrossing Existing Station on Its Structural Deformation

TIAN Jiangtao<sup>1</sup>, WANG Zijie<sup>2</sup>

(1. Wuhan metro group Co., Ltd., 430030, Wuhan, China;

2. Hebei Normal University Of Science & Technology College of Urban Construction, 066004, Qinhuangdao, China)

**Abstract** [Objective] A new station constructed with PBA method closely undercrossing existing station will influence the deformation of the latter's structure. The influence law needs to be studied. [Method] Based on the project of Pinguoyuan Station on Beijing Metro Line 6 closely undercrossing the existing station, a finite element model is established by the GTS NX finite element analysis software, and its computing accuracy is verified through comparison with the actual monitored results. According to the calculation results of the finite element model, the impact of PBA (pile beam arch) method construction on the existing station is studied, and the influence of the existing station on land subsidence is analyzed. [Result &

**Conclusion**] In the process of PBA construction, the construction stages that greatly affect the track structure and the building structure of the existing station are the guiding hole excavation and the second lining arch stages. The closer the construction is to the existing station, the smaller the land subsidence. When the monitoring sections are at the same location, the larger the existing station structure section, the smaller the land subsidence. With the same section size of the existing station, the closer to the excavation centerline of the new station, the greater the land subsidence value. The influence range of the existing station is related to the sectional size of the existing station structure.

**Key words** metro station; construction influence; closely underpassing; PBA construction method

新建地铁车站采用 PBA (洞桩) 法下穿既有车站施工时, 往往会引起地层应力重分布, 使周围地层产生较大变形, 进而导致地面及周围建筑物发生较大沉降, 引发一系列的工程安全问题。

针对上述问题, 国内外学者展开了大量的研究。文献[1]将 PBA 法施工阶段分为导洞开挖、初期支护扣拱、二次衬砌扣拱、地铁站内土体开挖, 并采用数值模拟的方法研究了 PBA 法开挖过程中各阶段的地面沉降发展规律; 文献[2]采用结构概念法, 对土层、初期支护等进行了合理假设, 研究了 PBA 法密贴下穿既有车站施工时既有车站的力学响应规律; 文献[3]采用数值模拟结合现场实测的方法, 研究了四导洞 PBA 法地铁车站施工引起的地层变形规律、承重结构应力变化规律、承重结构受力转化规律及施工顺序对钢管柱的影响规律; 文献[4]通过数值模拟及车辆-轨道耦合动力分析等技术, 研究了 PBA 法引起的群洞效应对既有结构的影响规律; 文献[5]在单洞开挖引起的地面沉降变形计算模型的基础上, 提出了一种用于考虑水平平行开挖相互影响下盾构隧道施工的地面沉降的计算

方法;文献[6]提出了一种用于增加地下结构刚度的施工方法,通过实测论证,验证了该方法的有效性;文献[7]基于北京地铁 6 号线某站工程,利用有限元模拟的技术手段,得到了 PBA 法不同导洞开挖顺序所引起的地面及初期支护的力学响应规律。

目前,关于新建地铁车站采用 PBA 法下穿既有车站施工的影响规律研究较少<sup>[8-10]</sup>。本文以北京地区首例新建车站 PBA 法大跨度密贴下穿既有车站工程——北京地铁 6 号线苹果园站(以下简称“新建车站”)下穿既有 1 号线苹果园站(以下简称“既有车站”)为工程背景,采用数值模拟的方法,分析了密贴施工对既有车站及地面沉降的影响规律;依据上述研究提出了一些施工辅助措施,以期为类似工程提供参考。

1 工程概况

既有车站由 C30 钢筋混凝土单层四跨(部分为五跨)框架结构组成,采用明挖法施工,覆土厚度约为 4.90 m。四跨结构宽 17.00 m,高 6.45 m;五跨结构宽 29.60 m,高 6.80 m。

新建车站位于苹果园南路南侧。下穿段总长度为 52.40 m(密贴下穿段长度约为 35.00 m),宽度为 23.50 m,高度为 14.92 m,顶板覆土厚度约为 11.76 m,底板埋深约为 27.03 m。

新建车站与既有车站夹角为 70°,竖向最小间距仅为 0.46 m。在此情况下进行密贴下穿施工的危险系数大,属特级风险。新建车站与既有车站的位置关系如图 1 所示。

根据地铁运营方的要求,在新建车站密贴既有车站施工的过程中,1 号线要保证正常运行。根据相关规范及业主要求,既有车站结构累计沉降要控制在 5 mm 之内,导洞开挖阶段既有车站结构沉降要控制在 3 mm 之内。

2 建立有限元模型

2.1 选取参数

根据相关工程资料可知,工程范围内,由上至下各地层、初期支护及二次衬砌的物理力学参数如表 1 所示。

2.2 有限元模型的建立

本文采用 GTS-NX 有限元分析软件建立有限元模型,如图 2 所示。为减少尺寸效应的影响,有限模型横向( $x$  向)取车站开挖断面宽度的 3.0 倍,竖

向( $z$  向)取洞身高度的 2.0 倍,纵向( $y$  向)沿车站开挖方向取实际开挖段长度的 1.5 倍,最终模型尺寸为 150 m( $x$  向) $\times$ 90 m( $y$  向) $\times$ 60 m( $z$  向)。

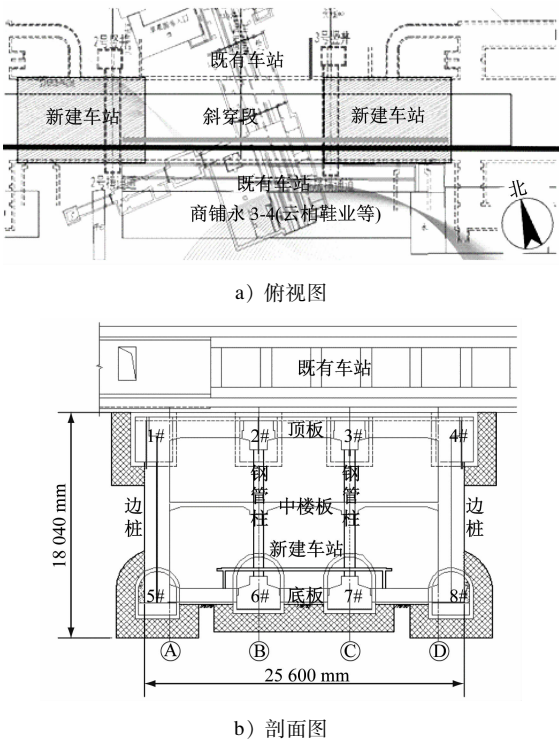


图 1 新建车站与既有车站的位置关系

Fig. 1 Location relationship between the newly built station and the existing one

表 1 地层、初期支护及二次衬砌的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of stratum, initial support and second lining

土层	弹性模量/ MPa	泊松 比 $\nu$	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/ $^{\circ}$	天然密度/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	孔隙率
杂填土	7.00	0.31	0	8	1.70	
粒径 5 mm 卵石层	40.00	0.29	0	40	2.10	0.33
粒径 7 mm 卵石层	45.00	0.29	0	42	2.15	0.32
粒径 9 mm 卵石层	50.00	0.29	0	45	2.15	0.31
粒径 11 mm 卵石层	55.00	0.29	0	45	2.15	0.31
初期支护	$2.55 \times 10^4$	0.20				
二次衬砌	$3.25 \times 10^4$	0.20				

在保证计算精度的前提下,作出以下假设:土层及工程材料均为均质、各向同性,土层均视为水平;土层选用修正摩尔-库伦本构模型,其余材料均选用弹性本构模型;土体采用六面体实体单元进行

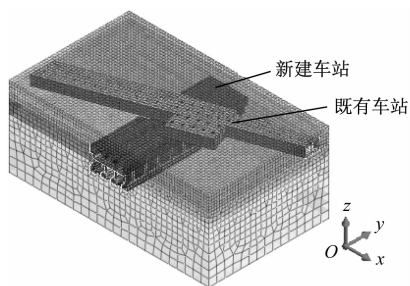


图2 计算模型图

Fig. 2 Calculation model

模拟,初期支护、中板等采用板单元进行模拟,边桩、钢管柱等采用梁单元进行模拟,二次衬砌、底板及侧墙等材料采用改变属性的方式进行模拟;荷载仅考虑结构自重及地面超载的影响;模型的上边界为自由约束,四周采用法向约束,底部采用固定约束。

### 2.3 施工步骤

6号线苹果园车站采用PBA法施工。结合实际施工步骤,设定计算施工步骤如图3所示。

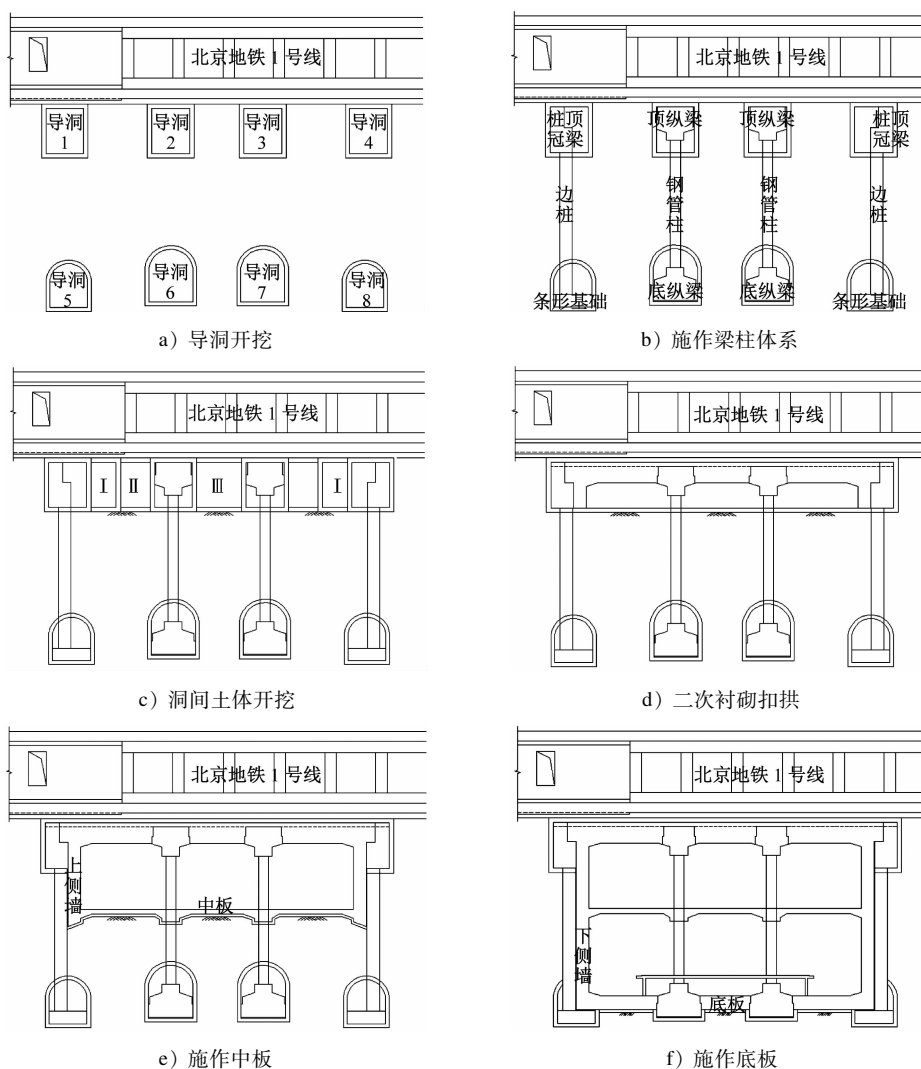


图3 各施工步骤示意图

Fig. 3 Schematic illustration of construction steps

步骤1 导洞开挖:对导洞进行开挖并施作初期支护。

步骤2 施作梁柱体系:施作顶、底纵梁、桩顶冠梁、条形基础及边桩、钢管柱。

步骤3 洞间土体开挖:采用中隔壁法开挖上

部导洞间Ⅰ、Ⅱ部土体,采用台阶法开挖Ⅲ部土体。

步骤4 二次衬砌扣拱:拆除多余的导洞初期支护及洞间中隔壁,施作二次衬砌扣拱。

步骤5 施作中板:开挖中板以上土体,并施作上侧墙以及中板。

步骤6 施作底板:开挖中板以下土体,并施作下侧墙以及底板。

## 2.4 有限元模型计算准确性的验证

为验证该有限元模型的计算准确性,本研究根据工程实际沉降监测情况,在有限元模型中布设模拟的监测断面及监测点,并将各施工步骤下的既有轨道结构沉降模拟结果和实测结果进行对比。

监测断面及监测点布设图如图4所示。在既有车站轨道结构处布设轨道结构监测断面 L1、L2,其中监测点 A、B 点为 L1、L2 监测断面中心监测点;为研究新建车站施工对既有车站结构的影响,在既有车站顶板中心线处布设监测断面 L3,其中监测点 C 为 L3 监测断面中心监测点;为研究既有车站的存在对地面沉降的影响,沿垂直于新建车站开挖方向平行布设监测断面 L4、L5、L6、L7,其中监测断面 L1、L4 为地面以下无既有车站监测断面,监测断面 L2、L3 为地面以下有既有车站监测断面,图中监测点 D、E、F、G 分别为监测断面 L4、L5、L6、L7 中心监测点;在地面沿新建车站开挖方向平行布设监测断面 a、b、c,其中监测断面 a 为新建车站左边界断面,监测断面 b 为新建车站开挖中心线断面,监测断面 c 为新建车站右边界断面。

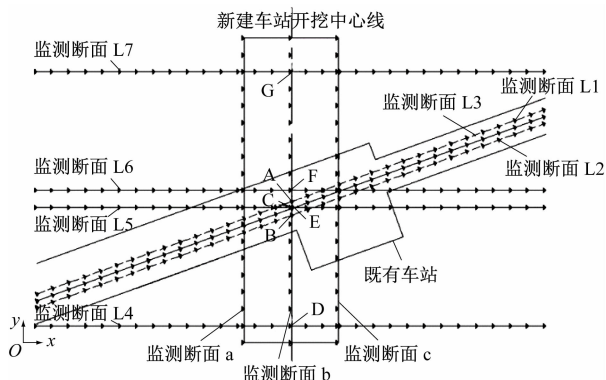


图4 监测断面及监测点布设图

Fig.4 Layout of monitoring points and monitored sections

图5为既有车站轨道结构左线沉降的模拟值与实测值的对比曲线。由图5可知:既有车站轨道结构沉降的模拟值和实测值变化规律相同;在导洞开挖至二次衬砌扣拱阶段,轨道结构的沉降在不断的累加,且在导洞开挖阶段的最大沉降值均在3mm以内,最终结构累计沉降也在5mm之内。

有限元模型的模拟值与实测值基本一致,说明有限元模型的计算较为准确,能较好地反映出实际施工对既有车站轨道结构的影响情况。故本文采

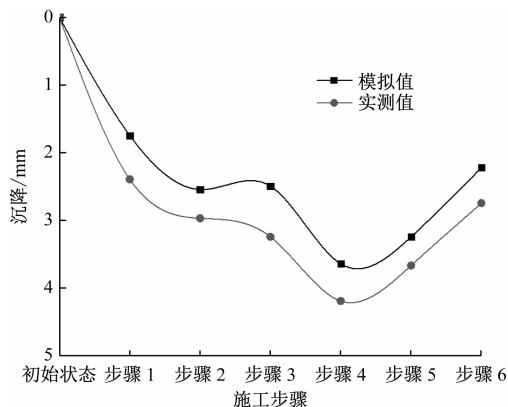


图5 既有车站轨道结构沉降模拟值与实测值对比曲线

Fig.5 Comparison curves of the simulated and measured subsidence of the existing station track structure

用该模型对施工过程既有车站轨道结构及车站结构的沉降进行仿真计算,以研究新建车站施工对既有车站轨道结构的影响。

## 3 有限元模型计算结果

### 3.1 既有车站沉降

#### 3.1.1 既有车站轨道结构的沉降

既有车站轨道结构(监测点 A、B 处)沉降时程曲线如图6所示。

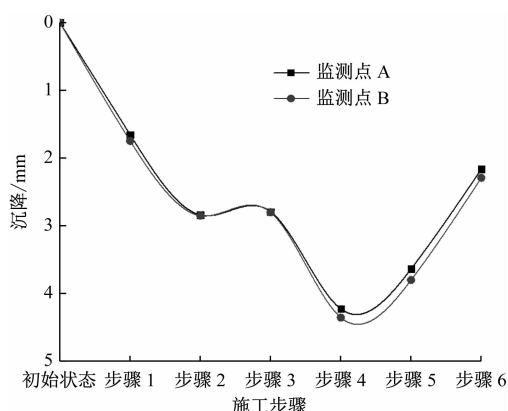


图6 既有车站轨道结构沉降时程曲线图

Fig.6 Time history curves of the existing station track structure subsidence

由图6可知:既有车站轨道结构沉降最大的施工步骤为导洞开挖(步骤1),其次为二次衬砌扣拱(步骤4);待二次衬砌扣拱施作完成后,轨道结构发生了一定的回弹;最终,随着底板施作(步骤6)完成,轨道沉降趋于稳定。可见,需要在导洞开挖及二次衬砌扣拱施工中采取一些辅助措施,以保证既有车站轨道结构的安全。



### 3.1.2 既有车站结构沉降

既有车站结构(监测点 C)沉降时程曲线如图 7 所示。

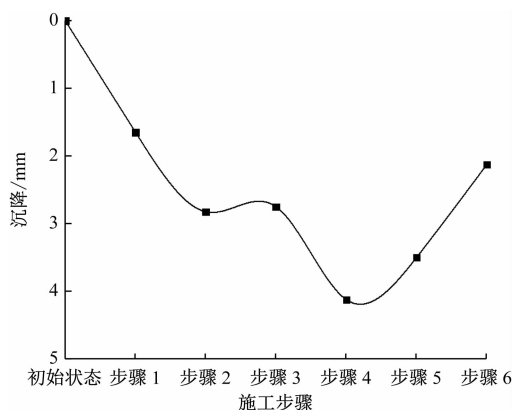


图 7 既有车站结构沉降时程曲线

Fig. 7 Time history curve of the existing station structure subsidence

比较图 6 及图 7 可知:既有车站结构变形趋势与既有车站轨道结构的趋势一致,满足变形协调规则;车站结构沉降最大的施工步骤为导洞开挖,其次为二次衬砌扣拱;二次衬砌扣拱施作完成后,既有车站结构发生一定的回弹,最终随着底板施作完成,既有车站结构沉降趋于稳定。

## 3.2 既有车站对地面沉降的影响

### 3.2.1 各监测点处的地面沉降

由监测点 D、E、F、G 的数据可得到各监测点处的地面沉降时程曲线如图 8 所示。

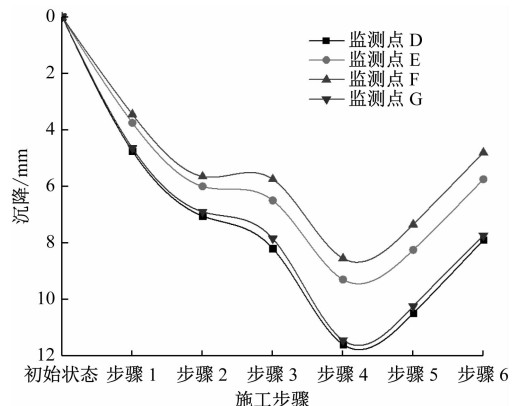


图 8 地面沉降时程曲线

Fig. 8 Time history curve of land subsidence

由图 8 可知:在不同施工步骤下,各监测点处的地面沉降变化趋势大致相同;前期施工中,地面沉降逐步增加;待二次衬砌扣拱阶段施工完成后,地面沉降趋于稳定;中板施作及底板施作时,地面发

生较大的隆起;待底板施作完成后,地面变形趋于稳定。经分析,地面沉降变化的主要原因为:前期开挖导致地应力重分布,对地面产生较大扰动,从而引起较大的沉降;二次衬砌扣拱完成后,形成了梁-柱-地基受力体系,使得地层变形趋于稳定;进行中板上、下土体开挖时,原位于中板上部与下部的土体作用于结构的荷载消失,原结构会发生一定的隆起变形,由结构-土层协调变形可知,地面也会产生较大隆起,直至地层间应力再次达到平衡时,地层才会进入相对稳定状态;其中导洞开挖引起的沉降值占比最大,其次为二次衬砌扣拱阶段。

由图 8 还可知,各监测点处的地面沉降变化趋势虽相同,但沉降值却不相同。按最大沉降值排序为:监测点 D、监测点 G、监测点 E、监测点 F。由此可知,既有车站的存在会对地面沉降产生一定的影响,越靠近既有车站处的地面沉降值就越小。

### 3.2.2 施工完成后的垂直布设监测断面沉降

施工完成后,垂直布设监测断面(监测断面 L4、L5、L6、L7)处的最终地面沉降如图 9 所示。

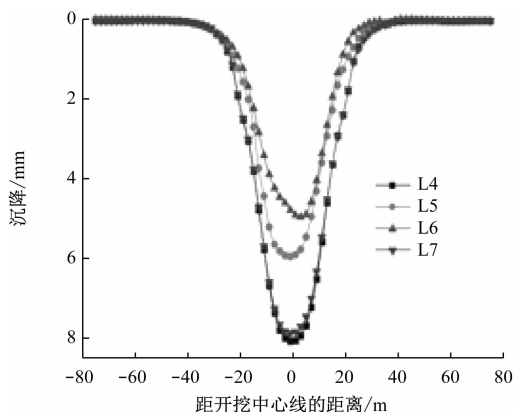


图 9 垂直布设监测断面的最终地面沉降图

Fig. 9 Diagram of the final land subsidence of the vertically monitored section

由图 9 可知:不同监测断面的地面沉降变形趋势大致相同,均符合 Peck 公式预测沉降曲线特征,且沉降槽宽度基本相同;各监测断面处的地面沉降最大值各不相同,各断面按地面沉降最大值排序为:L4、L7、L5、L6。由此可知,在既有车站监测线上部的地面沉降小于无既有车站监测线上部的地面沉降。

此外,L3 处地面沉降最大值点位于中心线靠右即靠近既有车站位置,说明既有车站的存在会影响地面沉降最大值,也会影响地面沉降中心的位置,

但不会影响地面沉降槽宽度。

### 3.2.3 施工完成后的平行布设监测断面竖向沉降规律

平行布设监测断面(断面a、b、c)处的地面沉降如图10所示。

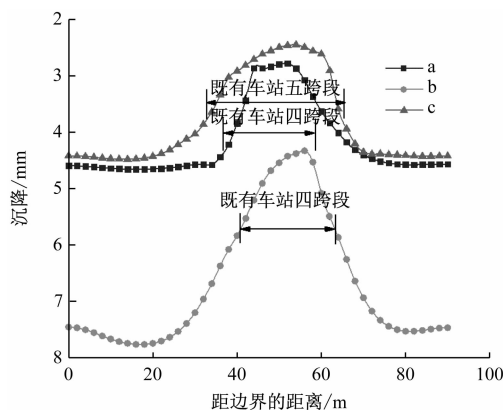


图10 监测断面地面沉降图

Fig. 10 Land subsidence diagram of the monitored section

由图10可知,不同水平监测线最终的变形趋势是相同的,但最大沉降值是不同的。各断面按最大地面沉降值排序为:b、a、c。由断面a处地面沉降大于断面c处地面沉降可知,既有车站结构断面越大,对地面沉降的限制作用越强。由断面b处地面沉降大于断面a处地面沉降可知,当既有车站断面尺寸相同时,越靠近开挖中心线的监测线,沉降值就越大。

除此之外,既有车站结构对地面沉降的限制作用是存在一定范围的。既有车站结构的断面尺寸越大,既有车站影响范围就越大。

## 4 辅助控制措施

由模拟计算结果可知,在新建车站施工时,导洞开挖及二次衬砌扣拱的施工阶段为最不利阶段,由此提出如下相应辅助措施:

1) 超前注浆。导洞开挖引起的地面沉降是最大的,故在导洞开挖前设置超前注浆段,提前对地层进行加固,从而形成地层-注浆层稳定受力结构,以减小导洞开挖造成的不利影响。

2) 抬升注浆及丝杠支顶。二次衬砌扣拱为引起既有车站沉降较大的施工步骤。为保障既有结构的安全,在二次衬砌扣拱施工时,在既有车站底部进行压密注浆,预先抬升既有车站结构,从而抵消二次衬砌扣拱阶段引起的不利沉降。为避免由于注浆不均匀导致的既有车站不均匀抬升,在梁、

柱体系施作时,须提前预埋可调节丝杠,从而保证既有车站结构隆起及沉降的均匀性。

## 5 结语

本文建立有限元模型,并通过既有车站轨道结构模拟值与实测值的对比结果,验证了有限元模型计算结果的准确性。基于有限元模型的计算结果,研究了新建车站采用PBA法密贴下穿既有车站施工对既有车站轨道结构与车站结构沉降的影响,以及既有车站的存在对地面沉降的影响,得到结论如下:

1) 在PBA法施工过程中,对既有车站轨道结构及既有车站结构沉降影响较大的施工步骤为导洞开挖及二次衬砌扣拱。

2) 越靠近既有车站,地面沉降值越小;在两监测断面位置相同时,既有车站结构断面越大,地面沉降越小;在既有车站断面尺寸相同时,越靠近新建车站开挖中心线的地面沉降值越大;既有车站影响范围与既有车站结构的断面尺寸有关。

## 参考文献

- [1] GUO X, WANG Z, GENG P, et al. Ground surface settlement response to subway station construction activities using pile-beam-arch method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103729.
- [2] 赵伟. 基于结构概念分析法的洞桩法密贴下穿既有地铁站施工力学研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(11): 9.  
ZHAO Wei. Mechanical study of construction closely passing underneath the existing subway station with PBA method based on the structural concept analysis[J]. Railway Construction Technology, 2021(11): 9.
- [3] 罗庆斐. 地铁车站洞桩法梁拱柱结构施工力学转换研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.  
LUO Qingfei. Study on construction mechanics transformation of beam-arch column structure by hole-pile method in subway station[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.
- [4] 李骥. PBA工法地铁车站密贴下穿既有车站工程风险控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.  
LI Ji. Risk control research of metro station constructed by PBA method closely beneath existing station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [5] 魏纲, 周杨侃. 随机介质理论预测近距离平行盾构引起的地表沉降[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 113.  
WEI Gang, ZHOU Yangkan. A simplified method for predicting ground settlement caused by adjacent parallel twin shield tunnel construction based on stochastic medium theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 113.

(下转第206页)

见,与采用前相比,采用城轨 AFC 智能运维系统后的运维人工减少了约 20%,说明该系统能有效节约人力。

2) 降本增效。通过实施智能维护策略、专项维修策略以及大修策略,城轨 AFC 智能运维系统实现了精准管理,不仅提高了计划的准确性和设备的可用率,还降低了模块更换和修理的成本。在确保城轨安全运行、保证运营服务质量的前提下,根据 2012 年 3 号线的运维费用统计,维保合同费用及大修费用总计为 10 504.33 万元(主要数据来自上海地铁第三运营有限公司)。采用城轨 AFC 智能运维系统后,维保总费用为 8 804.25 万元,可见维保费用降低了 16%。

表 1 采用城轨 AFC 智能运维系统前后的 3 号线运维人员配置

Tab.1 Personnel deployment before and after adoption of urban rail AFC intelligent operation and maintenance system

岗位	人员配置/人	
	采用前	采用后
驻站人员	42	27
抢修人员	18	18
维修组长	3	3
应急支援人员	8	8
线路主管	1	1
合计	72	57

## 5 结语

目前,城轨 AFC 智能运维系统实现了智能维

护、智能维保、设备动态履历管理、远程监控、移动终端、无纸化维护等功能,该系统运行平稳、操作方便、流程顺畅。通过效益分析,可以切实提高工作维修效率,降低运营成本,并计划未来推广到上海轨道交通所有线路。

## 参考文献

- [1] JIANG X, LI S. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. International Journal of Robotics and Control, 2018, 1(1): 1.
  - [2] JIANG X, LI S. Beetle antennae search without parameter tuning (BAS-WPT) for multi-objective optimization[EB/OL]. (2017-08-11)[2021-10-21]. <http://arxiv.org/abs/1711.02395>.
  - [3] 方晖,王扬,蒋坚迪,等. AFC 系统基于区块链的跨城市安全联动框架设计[J]. 信息技术, 2021, 45(11): 143.  
FANG Hui, WANG Yang, JIANG Jiandi, et al. Cross-city security interaction framework design of AFC system based on block chain[J]. Information Technology, 2021, 45(11): 143.
  - [4] 林忠山,朱小莲,肖芳. 基于容器云平台的轨道交通自动售检票系统架构设计[J]. 电子技术与软件工程, 2021(19): 157.  
LIN Zhongshan, ZHU Xiaolian, XIAO Fang. Architecture design of automatic fare collection system for rail transit based on container cloud platform[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021(19): 157.
- 收稿日期:2021-12-24 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-06-10  
Received:2021-12-24 Revised:2022-03-22 Published:2024-06-10  
· 通信作者:李景虎,正高级工程师,ljh287422@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 201 页)

- [6] VALIZADEH K A, SADAGHIANI M H, AHMADI M M. Numerical modeling of ground settlement control of large span underground metro station in Tehran Metro using Central Beam Column (CBC) structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 1.
- [7] 李铁生,郝志宏,刘军,等. PBA 工法中导洞开挖顺序的优化分析研究[J]. 市政技术, 2016, 34(2): 67.  
LI Tiesheng, HAO Zhihong, LIU Jun, et al. Optimization analysis of pilot excavation sequence of PBA method[J]. Municipal Engineering Technology, 2016, 34(2): 67.
- [8] 王健宏,阳军生,刘守花,等. 邻近边坡地铁车站深基坑施工工法比选[J]. 建筑结构, 2020, 50(21): 133.  
WANG Jianhong, YANG Junsheng, LIU Shouhua, et al. Comparison and selection on construction methods for deep foundation pit of subway station adjacent to the slope[J]. Building Structure, 2020, 50(21): 133.
- [9] 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.

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 Tunnelling Technology, 2018, 55(3): 176.

- [10] 李皓,葛克水. PBA 工法导洞开挖顺序数值模拟研究[J]. 施工技术, 2015, 44(7): 110.

LI Hao, GE Keshui. Research on heading pilot's excavation of PBA method[J]. Construction Technology, 2015, 44(7): 110.

- 收稿日期:2021-11-22 修回日期:2022-05-19 出版日期:2024-06-10  
Received:2021-11-22 Revised:2022-05-19 Published:2024-06-10  
· 通信作者:田江涛,助理工程师,395814048@qq.com.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license