

大断面平顶直墙洞桩法暗挖地铁车站零距离下穿施工对既有矩形断面隧道的影响^{*}

赵小燕¹ 易领兵^{2**} 陈庆怀² 刘胜欢³ 郑力铭⁴ 杨涌跃² 吴程浩²

(1. 河南建筑职业技术学院土木工程系, 450064, 郑州; 2. 中国交建轨道交通事业部, 100088, 北京;

3. 中国建筑第八工程局有限公司, 200122, 上海; 4. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 100088,

北京//第一作者, 讲师)

摘要 目的:为研究某零距离条件下大断面平顶直墙洞桩法暗挖地铁车站下穿施工对既有隧道的影响,以零距离下穿区间隧道的洞桩法暗挖站工程为例,对洞桩法暗挖站工程施工进行设计。方法:用有限元分析软件对零距离下穿区间的洞桩法暗挖站施工过程进行仿真模拟分析,将施工监测数据与仿真模拟结果拟合对比,总结洞桩法暗挖站零距离下穿施工过程中地面沉降、既有隧道的结构沉降及横向(z 向)位移规律。结果及结论:施工监测数据与仿真模拟结果的数据及发展趋势基本一致,印证了仿真分析的准确性。地面沉降随开挖步的进行逐渐增大。但步骤1到步骤2的沉降增量最大,步骤6到步骤7的沉降增量最小,沉降量变化自东向西逐渐减小。在各施工步骤中东侧变形缝附近的沉降量均最大。下穿段施工完毕后,监测数据显示既有隧道结构的最大沉降量为6.91 mm,发生在既有隧道b段,而且位于变形缝1附近区域。b段的沉降量相对最大,a段的沉降量次之,c段的沉降量最小。下穿段施工完毕后,监测数据显示既有隧道结构产生的 z 向位移最大值仅为0.19 mm,出现在c段。a段与b段的 z 向位移较小且变化不明显。既有隧道结构变形以沉降为主, z 向位移可忽略不计。

关键词 暗挖车站; 区间隧道; 下穿施工; 洞桩法; 沉降

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.012

Influence of PBA Underground-excavated Metro Station Zero-distance Under-passing Construction on Existing Rectangular Profile Tunnel

ZHAO Xiaoyan, YI Lingbing, CHEN Qinghuai, LIU Shenghuan, ZHENG Liming, YANG Yongyue, WU Chenghao

Abstract Objective: It is aimed to investigate the influence

of large-profile flat-top straight-wall PBA (pile-beam-arch) underground-excavated (hereinafter referred to as 'covered') metro station under-passing construction on the existing tunnel at zero-distance. Taking the above station excavation project as example, the construction of PBA covered station project is designed. Method: Finite element analysis software is used to simulate and analyze the construction process of PBA covered station zero-distance under-passing interval, the construction monitored data and the simulation results are fitted and compared, the law of land subsidence, structural settlement and lateral (z -axis) displacement of existing tunnel throughout the construction process is summarized. Result & Conclusion: The construction monitored data and simulation results are consistent in terms of value and development trends, verifying the accuracy of the simulation analysis. The land subsidence gradually increases with the excavation steps. The maximum settlement increment occurs from step 1 to step 2, while the minimum occurs from step 6 to step 7, and the settlement increments gradually decrease from east to west. The settlement near the east side deformation joint is the largest at each construction step. After completion of the under-passing section construction, the monitored data shows that the maximum settlement of the existing tunnel structure is 6.91 mm, which occurs near the deformation joint 1 in section b of the existing tunnel, and the settlement of section b is the largest, followed by section a, and section c has the smallest settlement. After completion of the under-passing section construction, the monitored data shows that the maximum z -axis displacement of the existing tunnel structure is only 0.19 mm, which occurs in section c. The z -axis displacement of section a and section b is relatively little and the change is not evident. The deformation of the existing tunnel structure is mainly settlement, so the z -

^{*} 河南省科技厅自然科学基金资助项目(162102210188);河南省建筑业协会科研开发项目(YJX-2023-K01, YJX-2023-K02)

^{**} 通信作者

axis displacement can be ignored.

Key words underground-excavated station; interval tunnel; under-passing construction; PBA method; settlement

First-author's address Department of Civil Engineering, Henan Vocational and Technical College of Architecture, 450064, Zhengzhou, China

随着我国各大城市轨道交通网建设的快速发展,换乘车站及区间隧道穿越的节点也迅速增多。例如在 2050 年北京市区轨道交通线路规划图中,此类节点有近 120 处。这对地铁的设计和施工都提出了挑战。PBA(洞桩法)、盾构及 CRD(交叉中隔壁法)等密贴既有站及隧道等的施工项目,以及采用平顶直墙施工、顶撑控制及多线隧道连续穿越施工等技术的项目,近些年呈现增多趋势。文献[1]研究了成都某地下通道下穿城市轨道交通车站的施工方法;文献[2]研究了某新建通道对地铁变形缝的影响;文献[3-4]以北京苹果园站工程为依托,研究了新建车站对既有站的影响;文献[5]研究了新建地下通道穿越既有站的施工工序;文献[6]研究了泥岩地区某新建地铁站下穿方案问题;文献[7]对砂卵石区域新建通道下穿既有站的力学规律进行了研究;文献[8-9]对多线(4 条)隧道连续穿越既有站相关施工预防措施及对车站的影响进行了讨论。

由于双层三跨大断面平顶直墙暗挖地铁车站零距离下穿既有地铁矩形断面区间隧道(以下简称“既有隧道”)施工较为少见,相应的结构影响研究很少。故本文结合工程实例,研究平顶直墙暗挖站零距离下穿施工对既有隧道的影响,总结平顶直墙暗挖车站零距离下穿施工过程中的地面沉降及既有隧道结构变形规律;并将施工监测数据与仿真模拟结果拟合对比,以验证仿真分析的准确性。

1 工程概况

某换乘地铁站跨路口沿南北向敷设。该站为明暗挖相结合的岛式车站。新建车站长 178.60 m(南端明挖段长 100.00 m,中间暗挖段长 18.20 m,北端明挖段长 60.40 m),标准段宽 21.10 m,中间暗挖段顶板覆土厚度为 13.31 m,底板埋深为 26.62 m。既有隧道结构尺寸为 10.15 m(宽)×7.75 m(高),顶部覆土厚度为 5.56 m,隧道埋深为 13.31 m。

新建车站暗挖段为大断面平顶直墙结构,零距离下穿既有隧道施工。新建车站暗挖段顶板顶与既有隧道底板底外皮净距为 0.50 m,包含既有隧道底部的 0.15 m 厚垫层和新建车站顶板顶部的 0.35 m 厚初期支护。新建车站与既有隧道的关系如图 1 所示。

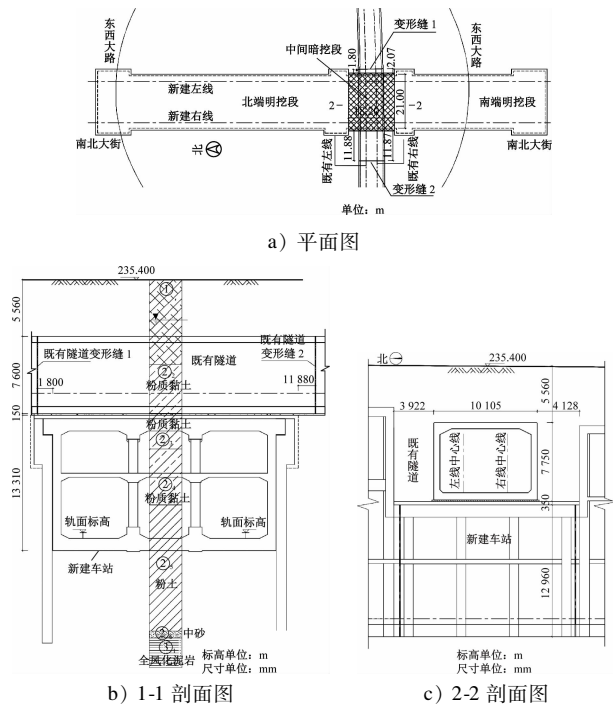


图 1 新建车站与既有隧道的位置关系

Fig. 1 Position relation of newly-built station and existing tunnel

2 有限元计算

2.1 计算模型

针对某平顶直墙暗挖站零距离下穿既有隧道施工项目,本文采用 ABAQUS 仿真模拟软件建立三维计算模型进行分析。计算模型东西向(x 向)长度为 180 m,南北向(z 向)宽度为 50 m,深度(y 向)为 80 m,对每个施工步进行仿真计算。计算模型采用六面体结构化网格单元,如图 2 所示,平顶直墙暗挖站与既有隧道相对位置关系如图 3 所示。土、砂、岩及加固区采用 Mohr-Coulomb 模型模拟,土体相关参数根据工程地质勘察报告和工程经验取值。计算模型中采用线弹性本构模型模拟新建车站站体、既有隧道结构等。材料力学性能参数见表 1。

将整个施工过程划分为 8 个施工步骤,土体-结构断面示意图如图 4 所示。

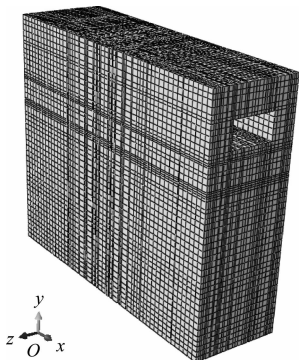


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

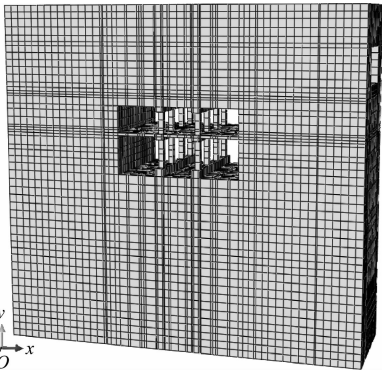


图 3 平顶直墙暗挖站与既有隧道相对位置关系模型

Fig. 3 Relation model of relative position between flat-roof straight-wall underground-excavated (station and existing tunnel)

表 1 材料力学性能参数

| Tab.1 Parameters of material mechanical property | | | | | |
|--|-----------------------------|--------------|------|-------------|--------------|
| 材料 | 重度/ (kN/m ³) | 压缩模 量/MPa | 泊松比 | 黏聚力/ kPa | 内摩擦 角/(°) |
| ①杂填土 | 16.20 | 3.98 | 0.15 | 5.87 | 9.88 |
| ② ₂ 粉质黏土 | 19.40 | 5.15 | 0.30 | 30.24 | 13.25 |
| ② ₃ 粉质黏土 | 19.80 | 7.25 | 0.30 | 35.41 | 12.87 |
| ② ₄ 粉质黏土 | 19.70 | 9.21 | 0.29 | 52.24 | 13.76 |
| ② ₅ 粉土 | 19.30 | 4.45 | 0.24 | 56.97 | 14.02 |
| ② ₆ 中砂 | 20.30 | 9.76 | 0.21 | 0 | 36.00 |
| ③ ₁ 全风化泥岩 | 19.70 | 9.87 | 0.29 | 70.00 | 19.00 |
| ③ ₂ 强风化泥岩 | 21.30 | 15.64 | 0.26 | 80.00 | 23.00 |
| ③ ₃ 中风化泥岩 | 22.50 | 29.75 | 0.26 | 100.00 | 25.00 |
| C20 混凝土 | 25.00 | 26.00 | 0.20 | | |
| C30 混凝土 | 25.00 | 29.00 | 0.20 | | |
| C50 混凝土 | 25.00 | 35.00 | 0.20 | | |
| 钢筋、钢架支护 | 78.00 | 21.00 | 0.30 | | |

注:C20 混凝土用于垫层及注浆加固;C30 混凝土用于既有线结构,以及新建工程的板、墙、梁等车站主体结构;C50 混凝土用于新建工程的钢管柱注浆。

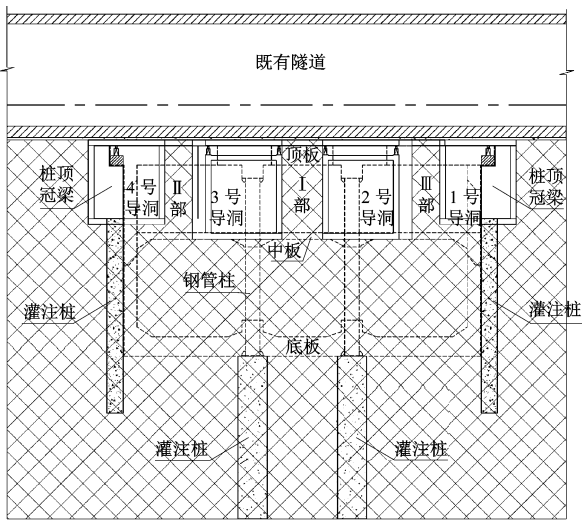


图 4 土体-结构断面示意图

Fig. 4 Diagram of soil-structure profile

步骤 1:1 号导洞开挖与支护,1 号导洞贯通后,施作洞内的灌注桩和桩顶冠梁。步骤 2:4 号导洞开挖与支护,4 号导洞贯通后,施作洞内的灌注桩和桩顶冠梁。步骤 3:2 号导洞开挖与支护,2 号导洞贯通后,施作 2 号导洞内的灌注桩、钢管柱、顶纵梁和部分顶板。步骤 4:3 号导洞开挖与支护,3 号导洞贯通后,施作 2 号导洞内的灌注桩、钢管柱、顶纵梁和部分顶板。步骤 5:开挖 2、3 号导洞之间 I 部分土体。贯通后进行拆除 2、3 号导洞部分初期支护,施作部分顶板。步骤 6:开挖 1、2 号导洞之间 II 部分土体和 3、4 号导洞之间 III 部分土体,拆除其余部分初期支护后,施作剩余顶板和部分侧墙。步骤 7:向下开挖,施作车站中板、中纵梁和部分侧墙。步骤 8:向下开挖,施作车站底板和剩余部分结构,完成车站暗挖段施工。

2.2 地面沉降的计算

施工基本完成时(步骤 8)的地面沉降云图见图 5。步骤 1~8 的地面沉降量最大值曲线见图 6。

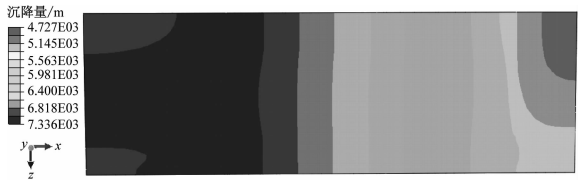


图 5 步骤 8 的地面沉降量云图

Fig. 5 Nephogram of land subsidence amount at step 8

分析仿真结果可以看出:地面沉降量随着开挖的进行逐渐增大。但步骤 1 到步骤 2 的地面沉降增量最大,沉降量由 1.05 mm 增加到 3.77 mm,增加

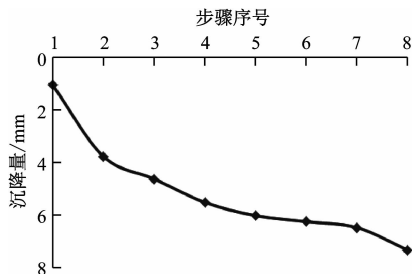


图6 步骤1~8的地面沉降量最大值曲线

Fig. 6 Curve of land maximum subsidence amount

约263.81%;步骤6到步骤7地面沉降增量最小,沉降量由6.25 mm增加到6.48 mm,增加仅3.68%,总体沉降量自东向西逐渐减小;在各施工步中东侧变形缝附近沉降量均最大,施工完成后地面沉降量最大值达到7.34 mm。

2.3 既有线结构变形的计算

为便于分析既有隧道结构在不同施工步骤的变形情况,本文按变形缝位置将既有隧道结构分为3段。图7为既有隧道结构的分段及变形缝示意图。

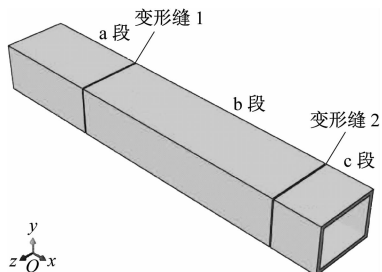


图7 既有隧道结构分段及变形缝示意图

Fig. 7 Diagram of existing tunnel structure segments and deformation joints

2.3.1 既有隧道结构的沉降

施工基本完成时(步骤8)既有隧道结构沉降云图如图8所示。步骤1~8的既有隧道结构沉降量最大值曲线如图9所示。

进一步分析沉降量的仿真结果可以看出:

1) 下穿段施工完毕后,既有隧道结构的最大沉降量为7.30 mm,发生在既有隧道b段上,而且位于变形缝1附近区域。分析同一施工步骤的云图可知,b段的沉降量相对最大,a段次之,区间c段最小。可见,各步骤沉降量最大值均在b段,且均在变形缝1附近。这主要是开挖区域位于b段正下方,而且离变形缝1最近所致。

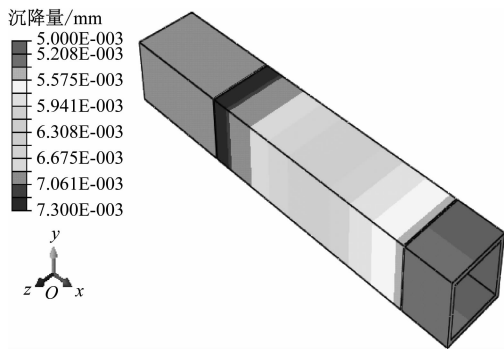


图8 步骤8既有隧道结构沉降云图

Fig. 8 Nephogram of step 8 existing tunnel structure settlement

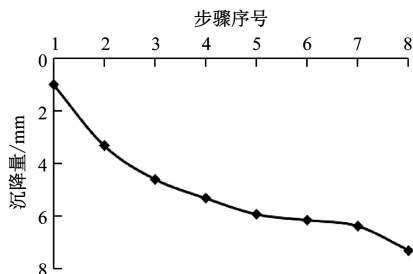


图9 步骤1~8的既有隧道结构沉降量最大值曲线

Fig. 9 Curve of steps 1~8 existing tunnel structure maximum settlement amount

2) b段沉降量沿着x轴正方向逐渐减小,且变化较大。由于c段远离开挖区受干扰比较小,所以c段沉降量最小,且c段不同位置的沉降量整体差别不大。a段各点沉降值差别不明显;由于a段距离开挖区域较近,因此a段表现出较大沉降。

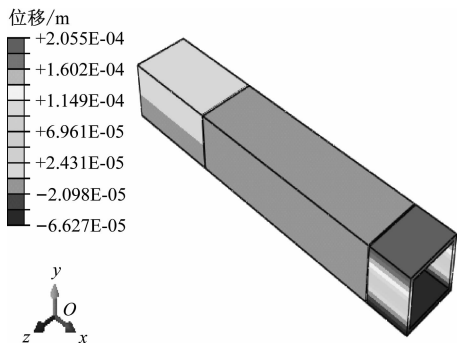
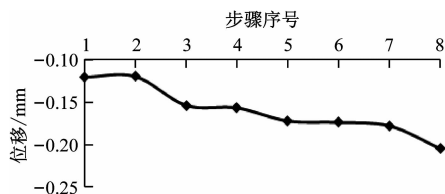
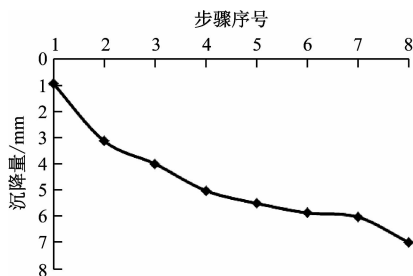
3) 通过对不同施工步骤的既有结构沉降对比分析可以看出,随着开挖的进行,既有隧道结构的最大沉降量在逐渐增大。

2.3.2 既有隧道结构的z向变形

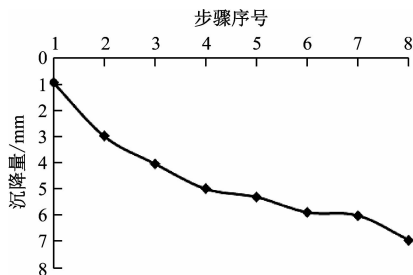
施工基本完成时(步骤8)的既有隧道结构z向位移云图如图10所示。步骤1~8的z向位移最大值曲线如图11所示。

分析仿真结果可以看出:平顶直墙暗挖车站下穿段施工完毕后,既有隧道结构产生的z向位移最大值仅为0.21 mm,出现在区间c段上。

由图10分析可知,c段的z向位移值上部为正值,下部为负值,有发生扭曲倾斜的趋势,但量值较小。a段及b段的z向位移较小且变化不明显。可见,下穿段施工对既有隧道结构的z向位移影响较小,既有隧道结构变形以沉降为主,z向位移可忽略不计。

图10 步骤8的既有隧道结构 z 向位移云图Fig. 10 Nephogram of step 8 existing tunnel structure z -axis displacement图11 步骤1~8的既有隧道 z 向位移最大值曲线Fig. 11 Curve of steps 1 ~ 8 existing tunnel z -axis displacement maximum amount

a) 地面沉降



b) 既有隧道结构沉降

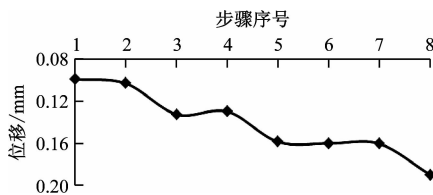
c) 既有隧道结构 z 向位移

图12 实际沉降及位移的施工监测数据曲线

Fig. 12 Construction monitoring data curves of actual settlement and displacement

3 实际施工监测结果的对比分析

基于实际施工监测结果,得到实际沉降及位移的监测数据曲线如图12所示。

监测结果显示:

1) 地面沉降随着开挖的进行逐渐增大。沉降变化自东向西逐渐减小,而且,在各施工步中东侧变形缝处附近沉降均最大。施工完成后地面沉降最大值达到7.00 mm。

2) 下穿段施工完毕后,既有隧道结构产生的最大沉降为6.91 mm,发生在既有隧道b段上,而且位于变形缝1附近区域。统计监测数据显示,b段的沉降相对最大,a段次之,c段最小。各步骤的沉降最大值均出现在b段,并且在变形缝1附近。通过对不同施工步骤的既有结构沉降分析对比可以看出,随着开挖的进行,既有隧道结构的最大沉降在逐渐增大。

3) 下穿段施工完毕后,既有隧道结构产生的 z 向位移最大值仅为0.19 mm,出现在c段。a段及b段的 z 向位移较小且变化不明显,说明下穿段施工对既有隧道结构的 z 向变形影响较小。故既有隧道结构发生的变形以沉降为主, z 向位移可忽略不计。

仿真计算结果和实际监测数据对比如图13所示。

从图13可以看出:监测数值与模拟数值结果基本一致;总体而言,监测数据均小于仿真计算结果,但两者数据显示地面沉降最大值、区间结构沉降最大值、区间结构 z 向位移最大值发生位置均一致,且发展趋势基本一致。这验证了仿真分析结果的准确性。

4 结论

1) 地面沉降随开挖的进行逐渐增大。步骤1到步骤2的沉降增量最大,步骤6到步骤7的沉降增量最小,总体沉降量变化自东向西逐渐减小。在各施工步骤中东侧变形缝附近沉降均最大,施工完成后的最大地面沉降量达到7.34 mm。施工监测数据显示,最大地面沉降量为7.00 mm,同样发生在东侧变形缝附近位置。

2) 下穿段施工完毕后,既有隧道结构产生的最大沉降为7.30 mm,发生在既有隧道b段,而且位于

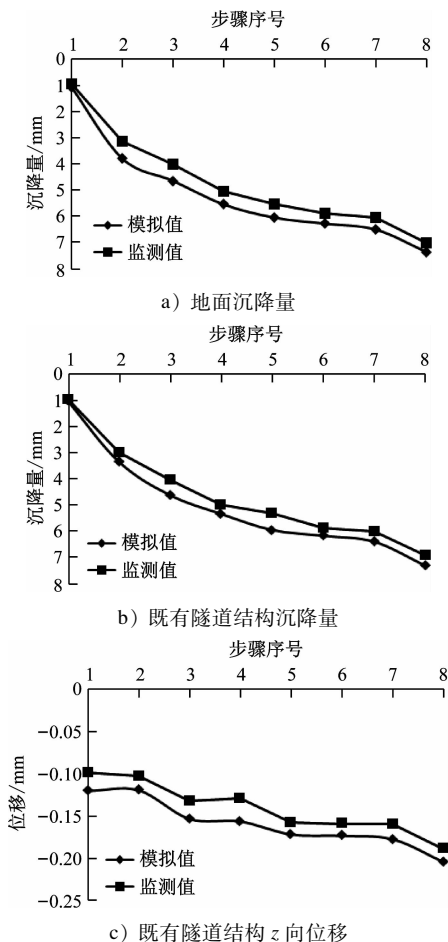


图 13 仿真计算结果和实际监测数据对比曲线

Fig. 13 Comparison curve of simulation calculation results and field-monitored data

变形缝 1 附近区域。b 段的沉降相对最大, a 段次之, c 段最小。施工监测数据显示, 施工完毕后, 既有隧道结构产生的最大沉降量为 6.91 mm, 同样发生在既有隧道 b 段上, 也位于变形缝 1 附近区域。

3) 下穿段施工完毕后, 既有隧道结构产生的 z 向位移最大值仅为 0.21 mm, 出现在 c 段。a 段及 b 段的 z 向位移较小且变化不明显。施工监测数据显示, 施工完毕后, 既有隧道结构的 z 向位移最大值仅为 0.19 mm, 同样出现在区间 c 段。既有隧道结构变形以沉降为主, z 向位移可忽略不计。

参考文献

- [1] 杨宇杰, 江永旺, 牛晓宇, 等. 密贴下穿地铁车站的新建通道开挖方法对比分析[J]. 铁道建筑, 2022, 62(1): 107.
YANG Yujie, JIANG Yongwang, NIU Xiaoyu, et al. Comparison analysis of excavation cases of underpass tunnel which zero-distance going under through metro station[J]. Railway Engineering,

2022, 62(1): 107.

- [2] 梁尔斌. 隧道密贴下穿既有车站变形缝沉降控制研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 182.
LIANG Erbin. Study of the settlement control of deformation joints of tunnels passing closely under the existing station[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 182.
- [3] 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.
ZHANG Zhenbo, WANG Xulin, ZHENG Kai, et al. Control technology of zero-distance under-passing existing station in new two layers station[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 727.
- [4] 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.
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.
- [5] 有智慧, 苗龙刚, 农兴中, 等. 新建换乘通道密贴下穿既有地铁车站施工工序优化[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 99.
YOU Zhihui, MIAO Longgang, NONG Xingzhong, et al. Optimization of construction procedure of newly-built transfer passage closely under-passing existing metro station[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 99.
- [6] 田海波, 李勇志, 杨潇. 泥岩地层地铁车站底板下方密贴暗挖方案研究[J]. 建筑技术, 2021, 52(11): 1338.
TIAN Haibo, LI Yongzhi, YANG Xiao. Study on underground excavation scheme closely under subway station floor in mudstone stratum[J]. Architecture Technology, 2021, 52(11): 1338.
- [7] 苗龙刚. 砂卵石地层地铁通道密贴下穿既有车站施工力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
MIAO Longgang. Study on mechanical behavior of subway tunnel closely under-passing existing station in sandy pebble stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [8] 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.
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.
- [9] 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.
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.

(收稿日期: 2022-07-13)