

新建换乘通道密贴下穿既有地铁车站施工工序优化^{*}

有智慧¹ 苗龙刚² 农兴中¹ 江永旺² 郭宏博¹ 章慧健²

(1. 广州地铁设计院股份有限公司, 510010, 广州;

2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都 // 第一作者, 高级工程师)

摘要 依托新建换乘通道密贴下穿既有地铁车站工程, 针对新建换乘通道采用多分部开挖的施工工序难题, 采用数值模拟对比分析了3种不同施工工序引起的既有地铁车站、新建换乘通道、围岩介质等的力学响应。结果表明: 从既有地铁车站底板附加变形、新建换乘通道初期支护变形及围岩塑性区指标来看, 工况1所引起的最大变形值及塑性区体积均相对最小, 建议采用工况1为优选施工工序。

关键词 地铁车站; 换乘通道; 施工工序; 数值模拟

中图分类号 U456.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.022

Optimization of Construction Procedure of Newly-built Transfer Passage Closely Underpassing Existing Metro Station

YOU Zhihui, MIAO Longgang, NONG Xingzhong, JIANG Yongwang, GUO Hongbo, ZHANG Huijian

Abstract Taking the project of the newly-built transfer passage closely underpassing existing metro station as the background, targeting the construction procedure challenge caused by the newly-built transfer passage adopting multi-division excavation, the mechanical responses of existing metro station, newly-built transfer passage, surrounding rock medium caused by three different excavation procedures are compared and analyzed using numerical simulation. Results show that: judging from the additional deformation index of the existing metro station floor, the initial support deformation of the new transfer passage, the surrounding rock mass plastic zone index, the maximum deformation value and the volume of surrounding rock mass plastic zone of Case 1 are both relatively small, therefore it is recommended to consider Case 1 as the preferred construction procedure.

Key words metro station; transfer passage; construction procedure; numerical simulation

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

路穿越既有线路的交叉换乘问题越来越多^[1]。目前, 无论是单一隧道施工还是隧道邻近既有结构物施工, 对于采用多分部开挖的隧道工程, 施工工序均是重难点问题之一。文献[2]以深圳地铁3号线红岭中路站—老街站区间重叠盾构隧道为背景, 对该区间隧道的施工工序进行了数值模拟分析, 并根据现场具体施工情况得出了优选工法。文献[3]对采用CRD(交叉中隔墙)法施工的大跨度连拱隧道施工工序进行了研究, 根据洞内位移控制效果与支护承载情况比选出最优施工工序。文献[4]采用FLAC3D软件对某新建地铁浅埋暗挖矩形隧道各导洞不同开挖顺序的施工方案进行数值模拟, 通过对比分析地表沉降、隧道拱顶沉降、底板隆起位移、初期支护内力等指标, 选出最优施工方案。文献[5]根据动态规划最优化原理, 以地表沉降作为目标函数, 对每个开挖阶段的目标函数值进行比较分析, 从而选出最优施工工序。文献[6-11]对近距离穿越既有地铁线路进行了研究。

上述研究成果中隧道施工工序优化主要集中在单一洞室, 而针对近接施工的新建工程工序优化方面的成果则较少, 且因地质差异以及近接方式和近接程度的不同, 既有成果也未必能被简单套用。本文以成都地铁8号线(以下简为“8号线”)倪家桥站换乘通道在砂卵石地层中大跨度、零距离密贴下穿既有地铁1号线(以下简为“1号线”)倪家桥站为工程背景, 采用数值模拟方法对比分析了新建换乘通道采用的不同开挖顺序对既有车站、新建工程及围岩介质的影响。

1 工程概况

1.1 新建换乘通道和既有地铁车站的相对位置关系

新建8号线倪家桥站换乘通道与既有1号线倪

随着城市轨道交通线网的不断加密, 新建地铁线

^{*} 国家重点研发计划项目(2017YFC0806006); 国家自然科学基金面上项目(51578459)

家桥站的相对位置关系如图 1 所示。新建 8 号线倪家桥站总长 277.0 m,宽 22.3 m,顶板覆土约 2.0 m,沿倪家桥路东西向敷设;与既有 1 号线倪家桥站南北走向呈近乎 90°交叉关系,车站主体位于交叉路口西侧。受既有 1 号线倪家桥站结构影响,新建 8 号线倪家桥站换乘通道在负 3 层暗挖下穿既有车站,暗挖段零距离密贴既有车站底板。下穿段结构长 17.3 m,宽 22.7 m,高 8.35 m。

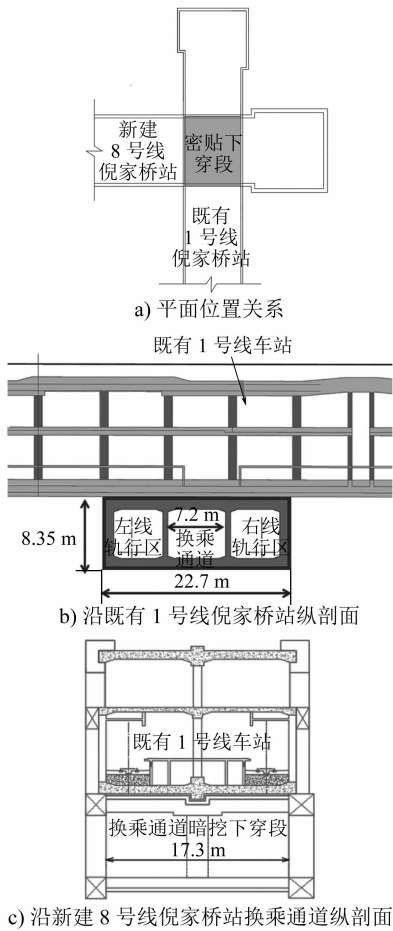


图 1 新建 8 号线倪家桥站换乘通道与既有 1 号线倪家桥站的相对位置关系

1.2 支护参数

新建 8 号线倪家桥站换乘通道采用平顶直墙、多分部暗挖施工,在下穿暗挖段起始处施作马头门;初期支护采用 H 型钢+钢筋网+喷射 C25 混凝土;二次衬砌采用模筑 C35 钢筋混凝土。既有 1 号线倪家桥站的墙、板、梁均为 C30 钢筋混凝土,中柱为 C40 钢筋混凝土。详细支护参数如表 1 所示。

1.3 施工工序

新建 8 号线倪家桥站换乘通道采用分层分块的多部开挖法,拟定如图 2 所示的 3 种不同施工工序

表 1 既有车站和新建换乘通道支护参数

| 名称 | | 支护材料 | 厚度/m | |
|-------------------------|----------|-----------|--|------|
| 既有 1 号线 倪家桥站 | 负 1 层侧墙 | C30 钢筋混凝土 | 0.60 | |
| | 负 2 层侧墙 | C30 钢筋混凝土 | 0.70 | |
| | 顶板 | C30 钢筋混凝土 | 0.80 | |
| | 中板 | C30 钢筋混凝土 | 0.40 | |
| | 底板 | C30 钢筋混凝土 | 0.80 | |
| | 顶纵梁 | C30 钢筋混凝土 | 1.80 | |
| | 中纵梁 | C30 钢筋混凝土 | 1.00 | |
| | 底纵梁 | C30 钢筋混凝土 | 2.10 | |
| | 中柱 | C40 钢筋混凝土 | 0.80 | |
| 新建 8 号线 倪家桥站 换乘通道 | 初期 支护 | 钢筋网 | $\phi\ 8\ \text{mm}@150\ \text{mm}\times 150\ \text{mm}$ | |
| | | 钢架 | 工 28a,0.5 m/榀 | |
| | | 喷混凝土 | C25 喷混凝土 | 0.35 |
| | 二次 衬砌 | 侧墙 | C35 钢筋混凝土 | 1.00 |
| | | 中墙 | C35 钢筋混凝土 | 0.60 |
| | | 顶板 | C35 钢筋混凝土 | 1.20 |
| | | 底板 | C35 钢筋混凝土 | 1.00 |

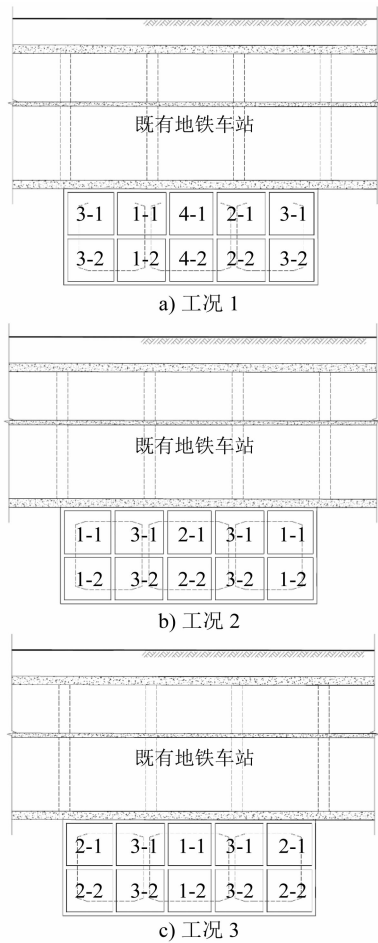


图 2 新建 8 号线倪家桥站换乘通道开挖工况

进行对比研究。总体而言,3 种工况下换乘通道均分为 5 条带,每一条带又分为上、下两个台阶,台阶长度均为 18 m,开挖步距为 1 m。每一步开挖后及时施作初期支护,初期支护施作完成后,整体施作

二次衬砌,最后拆除中隔壁。

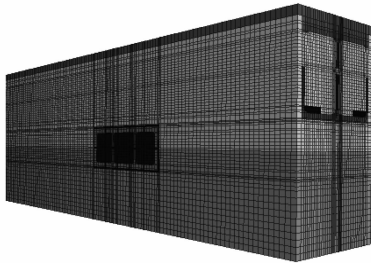
2 数值模拟计算

2.1 计算模型

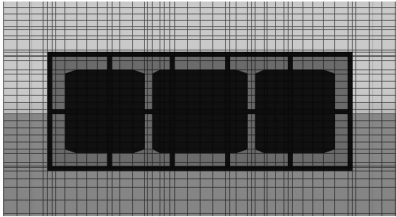
计算模型如图 3 所示。计算范围为:沿暗挖方向模型宽度取 21.0 m,纵向长度取 125.0 m,竖向自结构底部取 36.6 m,顶部取至地表。模型前、后、左、右边界施加相应方向的水平约束,下边界施加竖向约束,上边界为自由面。初始应力仅考虑自重应力场的影响。围岩、支护结构均采用实体单元模拟,分别服从 Mohr-Coulomb 准则和弹性准则。

2.2 计算参数

计算模型中的地层分布自上而下依次为:杂填土、细砂、松散卵石、稍密卵石、中密卵石、强风化泥岩、中等风化泥岩。土层厚度及相关物理力学参数如表 2 所示。



a) 整体模型



b) 新建 8 号线倪家桥站换乘通道模型

图 3 计算模型

表 2 地层物理力学参数

| 土层编号 | 名称 | 厚度/m | 体积质量/(kg/m ³) | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|------|-------|-------|---------------------------|----------|------|---------|----------|
| 1 | 杂填土 | 2.70 | 1 800 | 18.3 | 0.30 | 8 | 10 |
| 2 | 粉质黏土 | 2.30 | 1 950 | 45.3 | 0.43 | 20 | 16 |
| 3 | 松散卵石土 | 3.00 | 2 000 | 66.0 | 0.33 | 0 | 32 |
| 4 | 稍密卵石土 | 6.00 | 2 100 | 90.0 | 0.30 | 0 | 35 |
| 5 | 中密卵石土 | 7.10 | 2 200 | 105.0 | 0.25 | 10 | 40 |
| 6 | 强风化泥岩 | 5.60 | 2 200 | 90.0 | 0.25 | 65 | 30 |
| 7 | 中风化泥岩 | 10.00 | 2 300 | 180.0 | 0.15 | 300 | 35 |

既有地铁车站和新建换乘通道的支护结构计算参数如表 3 所示。需要说明的是:初期支护中的钢拱架(H 型钢)作用按其弹性模量折算成喷射混凝土考虑。具体计算方法为:

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \tag{1}$$

式中:

- E ——折算后的混凝土弹性模量;
- E_0 ——原混凝土弹性模量;
- S_g ——钢拱架截面积;
- E_g ——钢材弹性模量;
- S_c ——混凝土截面积。

表 3 既有 1 号线倪家桥站和新建 8 号线倪家桥站换乘通道计算参数

| 材料 | 体积质量/(kg/m ³) | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|-----------|---------------------------|----------|-----|
| C30 钢筋混凝土 | 2 500 | 30.0 | 0.2 |
| C40 钢筋混凝土 | 2 500 | 32.5 | 0.2 |
| C25 喷射混凝土 | 2 500 | 28.0 | 0.2 |

2.3 计算结果

2.3.1 既有地铁车站底板沉降

以距离开挖起点 5.15 m 的断面为考察断面,提取每一个导洞通过该断面后引起的既有车站底板沉降值,如图 4 所示。

由图 4 可知:①工况 1 下,当导洞 4-2 开挖至 5.15 m 时,既有车站底板出现上抬现象,最大上抬值为 0.35 mm;工况 2 和工况 3 下,当导洞 3-2 开挖至 5.15 m 时,既有车站底板亦出现上抬趋势,最大上抬值分别为 0.61 mm 和 0.39 mm。②换乘通道施工完成后,既有车站底板沉降呈非对称分布,最大沉降值发生在换乘通道中心线左侧。③工况 1 下,既有车站底板最大沉降值为 4.72 mm;工况 2 和工况 3 下,既有车站底板最大沉降值分别为 4.90 mm 和 4.86 mm。

导洞开挖期间,工况 1、2、3 下既有车站底板的最大沉降值分别为 3.33 mm、3.84 mm、3.54 mm,占总沉降值的比例均在 70% 以上。由此可见,换乘通道施工引起的既有车站底板沉降大部分发生在导

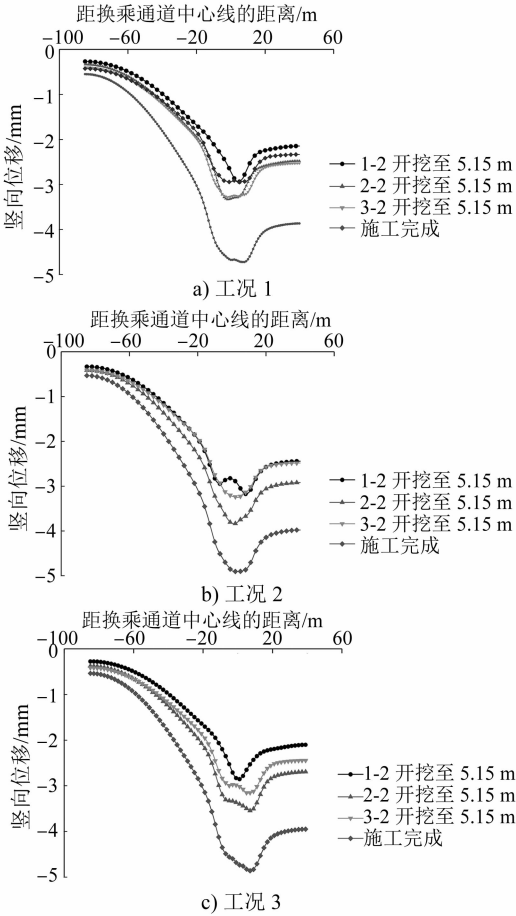


图4 既有1号线倪家桥站底板沉降曲线

洞开挖期间,故工况1对控制既有车站底板沉降更具优势。

2.3.2 新建换乘通道初期支护变形

以距离开挖起点 5.15 m 的断面为考察断面,在换乘通道施工完成后,提取换乘通道初期支护的变形量,如图 5 所示。

由图 5 可知,换乘通道初期支护顶板沉降基本均匀分布,工况 1 下顶板的最大沉降值为 4.66 mm,工况 2 和工况 3 下顶板的最大沉降值分别为 4.74 mm 和 4.61 mm,由此可见,3 种工况下换乘通道顶板的沉降值相差不大;各工况下底板隆起分布基本一致,在初期支护中隔壁附近,底板隆起量明显小于各导洞跨中的隆起量;工况 1 下底板最大隆起量为 9.04 mm,工况 2 和工况 3 下底板最大隆起量分别为 9.83 mm 和 9.20 mm,由此可知,工况 1 下底板最大隆起量分别为工况 2 和工况 3 下的 92.0% 和 98.3%;换乘通道初期支护左右侧墙的水平位移均较小,左侧墙的水平位移大于右侧墙的水平位移。由此可见,对于换乘通道初期支护变形控制而

言,工况 1 更具优势。

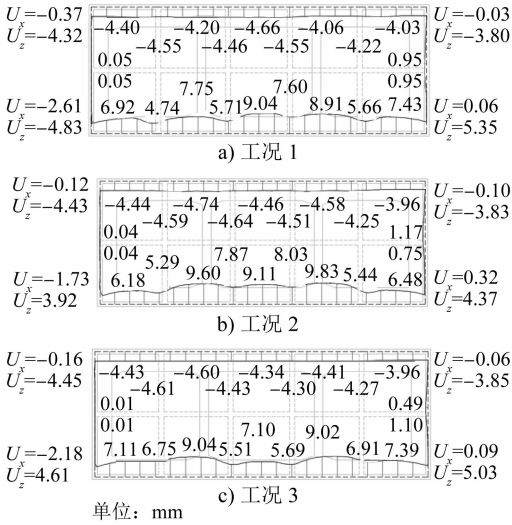
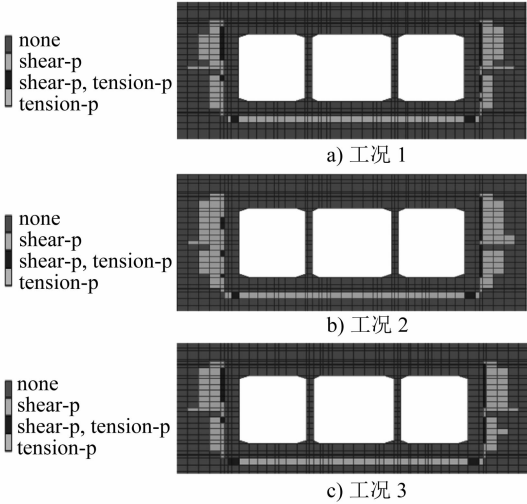


图5 新建8号线倪家桥站换乘通道初期支护横断面变形图

2.3.3 围岩塑性区分布

图 6 为距开挖起点 5.15 m 处换乘通道横断面方向的围岩塑性区分布图。由图 6 可知,换乘通道开挖后,围岩塑性区主要表现为剪切变形,且分布在换乘通道两侧墙外的围岩中;换乘通道底板下部围岩塑性区主要表现为拉伸变形。统计 3 种工况下围岩塑性区范围,如表 4 所示。



注: none 表示未进入塑性区; shear-p 表示剪切塑性区; tension-p 表示拉伸塑性区。

图6 围岩塑性区

表4 围岩塑性区体积 单位:m³

| 工况 | 剪切塑性区体积 | 拉伸塑性区体积 | 总塑性区体积 |
|----|----------|---------|----------|
| 1 | 1 089.03 | 629.04 | 1 718.07 |
| 2 | 1 213.10 | 610.27 | 1 823.37 |
| 3 | 1 134.93 | 624.02 | 1 758.94 |

由表4可知,工况1下,围岩剪切塑性区体积为 $1\,089.03\text{ m}^3$;工况2和工况3下,围岩的剪切塑性区体积分别为 $1\,213.10\text{ m}^3$ 和 $1\,134.93\text{ m}^3$,工况1下的剪切塑性区体积分别为工况2和工况3下的89.8%和96.0%;工况1下围岩总的塑性区体积为 $1\,718.07\text{ m}^3$,工况2和工况3下围岩总的塑性区体积分别为 $1\,823.37\text{ m}^3$ 和 $1\,758.94\text{ m}^3$,工况1的总塑性区体积分别为工况2和工况3下的94.2%和97.7%。由此可见,工况1下由新建换乘通道施工产生的围岩塑性区体积最小。

3 结论

1) 从既有车站底板附加变形指标来看,3种工况下既有车站底板沉降呈非对称分布,工况1下的底板最大沉降值为4.72 mm,工况2和工况3下的底板最大沉降值分别为4.90 mm和4.86 mm,工况1对既有车站底板的沉降控制更具优势。

2) 从新建换乘通道初期支护变形指标来看,顶板沉降值相差不大;底板隆起分布基本一致,在中隔壁附近的底板隆起量小于各导洞跨中的隆起量;工况1下底板的最大隆起量为9.04 mm,工况2和工况3下底板的最大隆起量分别为9.83 mm和9.20 mm,工况1下底板的最大隆起量分别占工况2和工况3下的92.0%和98.3%;工况1下换乘通道初期支护变形更小。

3) 从围岩塑性区来看,3种工况下围岩塑性区分布基本一致,两侧壁外侧主要为围岩剪切塑性区,底板下部主要为围岩拉伸塑性区。从量值上看,采用工况1施工产生的围岩塑性区体积在3种

工况中最小,分别为工况2和工况3下的94.2%和97.7%。

4) 3种工况均能满足施工安全需求,工况1相对最优。

参考文献

- [1] 贾龙飞. 新建地铁车站密贴下穿既有异型地铁车站的影响研究[D]. 北京:北京建筑大学,2016.
- [2] 崔光耀,倪嵩陟,伍修刚,等. 深圳地铁小净距盾构重叠隧道施工工序及加固方案[J]. 铁道建筑,2016(9): 66.
- [3] 段卫党,袁成海,郑文博,等. 城市浅埋连拱隧道单洞法施工工序的优化[J]. 上海交通大学学报,2012(1): 99.
- [4] 申玉生,何尉祥,赵乐,等. 浅埋暗挖矩形隧道施工方案比选研究[J]. 铁道标准设计,2017(2): 100.
- [5] 吴波,高波,漆岳岳,等. 城市地铁区间隧道洞群开挖顺序优化分析[J]. 中国铁道科学,2003(5): 24.
- [6] 韩焜,刘赅伟,STANDING J R. 隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J]. 土木工程学报,2012(1): 134.
- [7] 沈良帅,贺少辉. 复杂环境条件下跨下穿同一既有地铁隧道的变形控制分析及施工方案优化[J]. 岩石力学与工程学报,2008(增刊1): 2893.
- [8] 胡元芳,王守慧. 大跨浅埋暗挖地铁车站中洞法施工安全性分析[J]. 现代隧道技术,2008(4): 1.
- [9] 杨建华,朱彬. 大跨度软岩隧道开挖方法及施工方案数值模拟研究[J]. 西安科技大学学报,2011(3): 287.
- [10] 黄成林,罗学东,吕乔森. 软岩隧道开挖方法对变形影响数值模拟研究[J]. 铁道建筑,2011(11): 35.
- [11] 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(4): 53.
- [12] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

(收稿日期:2020-05-23)

(上接第98页)

- [7] 舒东利,杨建民,谢文强,等. 保安营特长高瓦斯隧道运营通风方案研究[J]. 现代隧道技术,2019(增刊2): 96.
- [8] 赵光. 超大断面盾构穿越江中瓦斯地层风险识别与预控技术[J]. 市政技术,2018(2): 103.
- [9] 赵阶勇. 铁路瓦斯隧道施工特点及问题探讨[J]. 隧道建设,2011(1): 82.
- [10] 杨余秀. 工程隧洞新型开挖方式悬臂掘进施工工艺研究[J]. 工程技术与应用,2018(11): 61.
- [11] 梁鲜明. 悬臂掘进机在临近既有线隧道施工中的运用[J]. 工

程建设与设计,2017(12): 263.

- [12] 漆岳岳,李斌. 悬臂掘进机在复杂断面地铁隧道中的应用研究[J]. 现代隧道技术,2011(4): 32.
- [13] 周少东,夏银飞,杜先照,等. 地铁盾构隧道穿越瓦斯地层的施工技术[J]. 城市轨道交通研究,2009(8): 68.
- [14] 李越. 沼气对盾构隧道的影响及施工控制措施[J]. 城市轨道交通研究,2013(2): 95.

(收稿日期:2019-05-27)