

## 洞桩法车站扣拱方案优化\*

裴行凯<sup>1</sup> 黄彪<sup>2</sup> 戴永兴<sup>1</sup> 陈委<sup>3</sup> 杨宇杰<sup>3</sup> 章慧健<sup>3</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 广州地铁建设管理有限公司, 510330, 广州;

3. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都)

**摘要** [目的]在洞桩法施工中,不同扣拱方案的选择对结构力学特性具有重要的影响。为确保城市地下结构的可靠性和安全性,必须严格监测地面沉降,因此有必要系统地研究各类扣拱方案对支护结构及地面变形的影响规律。[方法]以广州地铁 11 号线天河东站工程为例,采用 MIDAS/GTS 软件构建三维有限元模型,深入分析不同扣拱方案下的地面沉降特征及拱部初期支护的内力分布规律。同时,结合现场地面沉降监测数据对数值模拟结果进行验证。[结果及结论]根据初支扣拱的计算结果可知,相较于 CD(中隔墙)法,台阶法的地面沉降、拱部初支弯矩和轴力分别增加了 6.80%、9.74% 和 14.62%,但均满足施工控制要求。根据二衬扣拱的研究结果可知,相较于顺序拆撑法,交替拆撑法能够显著减小地面沉降,且对拱部初支内力的影响较小。CD 法初支扣拱配合交替拆撑二衬扣拱的方案具有优越性。

**关键词** 地铁车站; 洞桩法; 扣拱方案**中图分类号** U231.3**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.12.029**Optimization of PBA Method Station Arch Support Scheme**PEI Xingkai<sup>1</sup>, HUANG Biao<sup>2</sup>, DAI Yongxing<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>3</sup>, YANG Yujie<sup>3</sup>, ZHANG Huijian<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Metro Design &amp; Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., 510330, Guangzhou, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] In PBA (pile-beam-arch) method construction, the choice of different arch support schemes significantly impacts the structural mechanics. To ensure the reliability and safety of urban underground structures, it is essential to rigorously monitor the land subsidence. Thus, it is necessary to systematically study the impact law of various arch support schemes on supporting structures and ground deformation.

[Method] Based on Tianhe East Station project on Guangzhou

Metro Line 11 and using MIDAS/GTS software, a three-dimensional finite element model is constructed to analyze the land subsidence characteristics and the arch initial support internal force distribution law of various arch support schemes in depth. Meanwhile, field monitoring data of land subsidence is also used to validate the numerical simulation results. [Result & Conclusion] The calculation results of initial support arches reveal that, compared to the CD (center diaphragm) method, the stepped method results in increases of 6.80% in land subsidence, 9.74% in initial support bending moment, and 14.62% in axial force, all meeting the construction control requirements. Research results of secondary lining arch support show that the alternating support removal method significantly reduces land subsidence with a smaller impact on arch initial support internal forces compared to the sequential support removal method. The scheme of combining CD method for initial arch support with alternating support removal method for secondary lining arch support proves to be advantageous.

**Key words** metro station; PBA method; arch support scheme

洞桩法属于浅埋暗挖法,其主要施工步骤包括小导洞开挖、桩-梁-柱施工、拱部初期支护(以下简称“初支”)扣拱、拱部二次衬砌(以下简称“二衬”)扣拱、主体工程开挖施工。已有研究表明,扣拱阶段为洞桩法施工的关键阶段。

文献[1]依托某洞桩法车站工程,研究了施工过程中的地面沉降变化规律,得到了扣拱阶段引起的地面沉降占地面沉降最大值 71.16% 的结论,说明了扣拱阶段为施工的关键阶段。文献[2]以大连地铁 5 号线劳动公园站工程为例,研究了 3 跨 6 导洞 PBA(洞桩逆作)法车站施工对地面沉降的影响,研究结果表明,小导洞施工和初支扣拱对地面沉降的影响较大。文献[3]以已施工完的沈阳地铁 1 号线和 2 号线一期工程的十字交叉换乘车站青年大街站为例,研究了多跨 PBA 法暗挖车站施工中,二衬

\* 国家自然科学基金项目(52178395)

扣拱过程中的地面沉降变化规律,得出了扣拱施工为 PBA 法关键工序的结论。文献[4]以北京地铁 6 号线田村站工程为例,结合数值模拟及现场实测数据,研究了洞桩法车站采用不同扣拱施工顺序对地面沉降的影响规律,研究结果表明,先边扣拱、再中间扣拱、再边扣拱施工顺序下的地面沉降减小幅度为 5.23%。

上述文献研究结果表明,扣拱为洞桩法施工中的关键阶段,但针对初支及二衬扣拱顺序的优化研究较少。基于此,本文以广州地铁 11 号线天河东站工程为例,对比分析不同扣拱方案下的地面沉降及拱部初支内力变化规律,结合施工效率、施工成本等因素提出相对较优的扣拱方案。本文研究可为后续类似洞桩法车站的施工提供借鉴与参考。

## 1 工程背景介绍

### 1.1 工程概况

广州地铁 11 号线天河东站为地下两层车站,车站结构埋深约为 9 m,车站总高度为 23.9 m,车站宽度为 21.7 m,车站总长度为 275.5 m。天河东站范围内的地层分别包括杂填土、粉质黏土、强风化砾岩、中风化泥质粉砂岩、微风化泥质粉砂岩,其中,车站主要处于粉质黏土地层。

车站采用洞桩法施工,主要分为 4 个施工阶段:小导洞开挖、桩-梁-柱施工、拱部初支及二衬扣拱、主体工程开挖。

### 1.2 扣拱方案拟定

本文主要对扣拱方案进行优化研究,分为初支扣拱及二衬扣拱两个施工阶段。对于初支扣拱而言,需研究 CD(中隔墙)法及台阶法扣拱施工的力学特性。CD 法和台阶法初支扣拱施工示意图如图 1 所示。对于二衬扣拱而言,需研究顺序拆撑及交替拆撑施作二衬扣拱的力学特性。以台阶法为例,二衬扣拱施工示意图如图 2 所示。4 种扣拱方案如表 1 所示。

1) CD 法施工步骤:拱部土体分为 4 部开挖,开挖顺序为①→②→③→④(见图 1 a)),先开挖①部,台阶长度为 4 m,初支紧跟并及时施作初支结构;当①部掌子面推进 10 m 后,开始开挖②部;同理,③部与④部台阶长度为 4 m,开挖进尺为 2 m,初支紧跟并及时施作初支结构。

2) 台阶法施工步骤:拱部土体分为两部分开

挖,开挖顺序为①→②,台阶长度为 4 m,开挖步距为 2 m,初支紧跟并及时施作初支结构。

3) 顺序拆撑施工步骤:纵向向上按 7 m 长度拆除临时支撑,并施作拱部二衬,待二衬形成强度后,紧接着上次拆除位置继续按照 7 m 长度进行临时支撑拆除,并施作二衬。

4) 交替拆撑施工步骤:纵向向上按 7 m 长度拆除临时支撑,并施作拱部二衬,待二衬达到强度后,间隔 7 m 的间距按照 7 m 长度进行临时支撑拆除,并施作二衬。

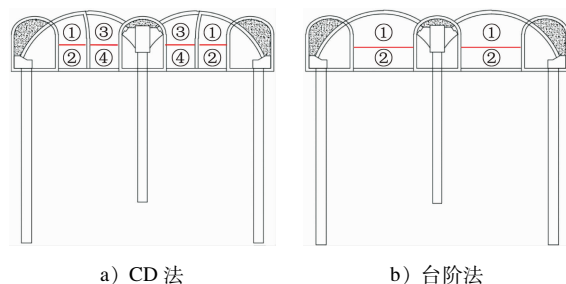


图 1 CD 法和台阶法初支扣拱施工示意图

Fig. 1 Diagram of CD method and step method for initial support arch construction

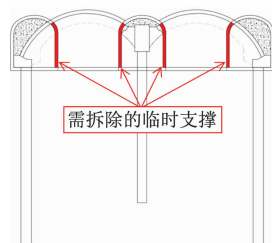


图 2 二衬扣拱施工示意图(以台阶法为例)

Fig. 2 Diagram of secondary lining arch support construction (taking step method as example)

表 1 4 种扣拱方案

Tab. 1 4 arch support schemes

扣拱方案	初支扣拱施工方法	二衬扣拱施工方法
方案 1	CD 法	顺序拆撑
方案 2	CD 法	交替拆撑
方案 3	台阶法	顺序拆撑
方案 4	台阶法	交替拆撑

## 2 数值模拟

### 2.1 计算模型

根据广州地铁 11 号线天河东站的实际工程情况,采用 MIDAS/GTS 软件建立三维计算模型,如图 3 所示。模型沿车站横向长度取 100 m,高度取 90 m,沿开挖方向取长度 100 m。边界约束分别为左、

右、前、后施加水平约束,底部施加竖向约束,上表面为自由面,初始地应力仅考虑自重应力场。在模拟计算中,围岩、支护结构均采用实体单元模拟,围岩服从 Mohr-Coulomb 强度准则,支护结构服从弹性准则。围岩土层物理力学参数如表 2 所示,支护结构计算参数如表 3 所示。

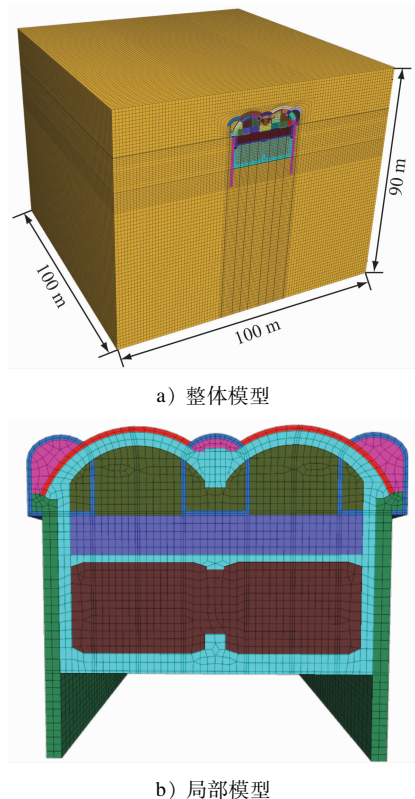


图 3 三维计算模型

Fig. 3 Three-dimensional calculation model

表 2 围岩物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rocks

土层名称	弹性模量/ MPa	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
杂填土	10	1 800	0.30	8	20
粉质黏土	70	1 900	0.32	5	30
强风化砾岩	120	1 950	0.33	2	25
中风化泥 质粉砂岩	300	2 200	0.25	18	33
微风化泥 质粉砂岩	500	2 200	0.25	20	35

在进行边桩数值模拟时,由于边桩属于抗弯和受压构件,根据等刚度原则将边桩简化为地下连续墙,具体简化方程为:

$$\frac{1}{12}(D+t)h^3 = \frac{1}{64}\pi D^4 \quad (1)$$

$$h = 0.838D \sqrt[3]{\frac{1}{1 + \frac{t}{D}}} \quad (2)$$

式中:

$D$ ——人工挖孔桩直径,单位 m;

$t$ ——桩间净距,单位 m;

$h$ ——地下连续墙的折算厚度,单位 m。

表 3 支护结构计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of supporting structure

支护结构名称	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
初支	25 000	0.2	2 500
二衬	32 500	0.2	2 700
冠梁	32 500	0.2	2 700
中柱	33 500	0.2	2 700
边桩	20 000	0.2	2 300

在数值模拟中,根据弹性模量的叠加原理,可将初支中的格栅钢架及喷混作用折算在一起考虑,折算过程可以表示为:

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \quad (3)$$

式中:

$E$ ——折算后的混凝土弹性模量;

$E_0$ ——原混凝土弹性模量;

$E_g$ ——钢材弹性模量;

$S_g$ ——钢拱架截面积;

$S_c$ ——混凝土截面积。

## 2.2 计算结果分析

### 2.2.1 地面沉降

以距离车站洞口 50 m 处的断面作为研究断面,不同扣拱方案下,扣拱施工前、初支扣拱后、二衬扣拱后的地面最大沉降值如表 4 所示。方案 1 和方案 2 的地面最大沉降值为 18.24 mm,方案 3 和方案 4 的地面最大沉降值为 19.48 mm,即 CD 法较台阶法的地面沉降减少了 1.24 mm,说明 CD 法初支扣拱对地面沉降有较好的控制作用。这主要是由于 CD 法增加了一道临时支撑,且减少了每次开挖的土体体积,从而减少了地面沉降,但其减少幅度较小。二衬扣拱后,方案 1—方案 4 的地面最大沉降值分别为 20.85 mm、20.21 mm、22.03 mm、21.39 mm,拆撑阶段导致的地面沉降增量分别为 2.61 mm、1.97 mm、2.55 mm、1.91 mm。由此可知,相较于顺

序拆撑,交替拆撑对地面沉降有更好的控制作用。

表 4 不同扣拱方案下各施工阶段的地面最大沉降值

Tab.4 Maximum land subsidence values at each construction stage under different arch support schemes

扣拱方案	各施工阶段的地面最大沉降值/mm		
	扣拱施工前	初支扣拱后	二衬扣拱后
方案 1	14.93	18.24	20.85
方案 2	14.93	18.24	20.21
方案 3	14.93	19.48	22.03
方案 4	14.93	19.48	21.39

### 2.2.2 拱部初支内力

以拱部初支为研究对象(见图 4),初支扣拱后的拱部初支弯矩及轴力如图 5 和图 6 所示,二衬扣拱后的拱部初支弯矩和轴力如图 7 和图 8 所示。

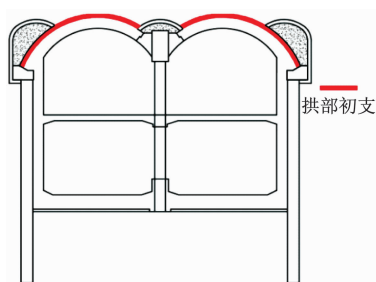


图 4 拱部初支示意图

Fig.4 Diagram of arch initial support

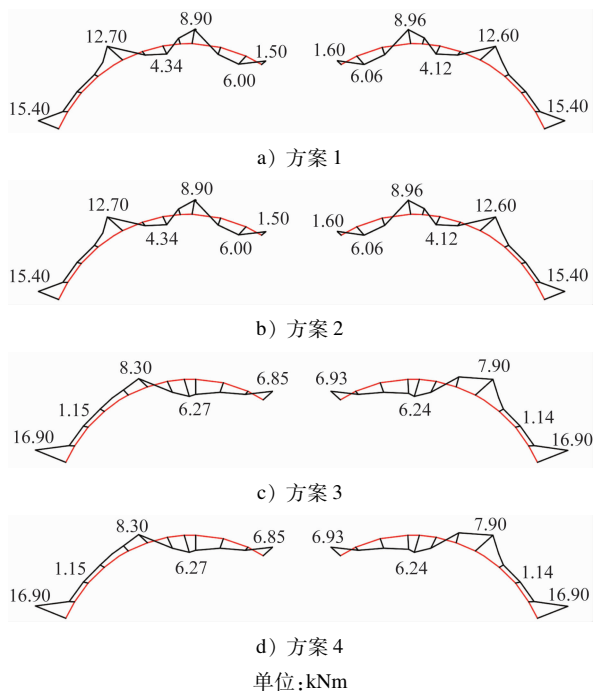


图 5 不同方案下初支扣拱后的拱部初支弯矩

Fig.5 Arch initial support bending moments after initial support arch in different schemes

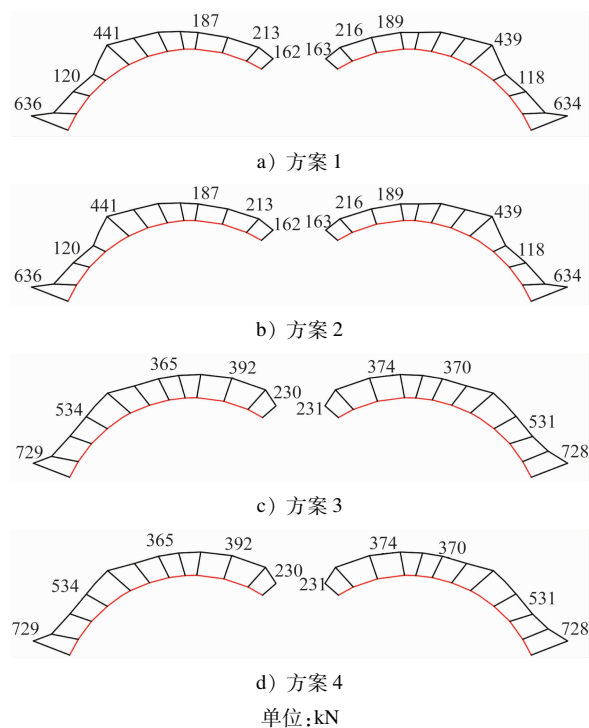


图 6 不同方案下初支扣拱后的拱部初支轴力

Fig.6 Arch initial support axial forces after initial support arch in different schemes

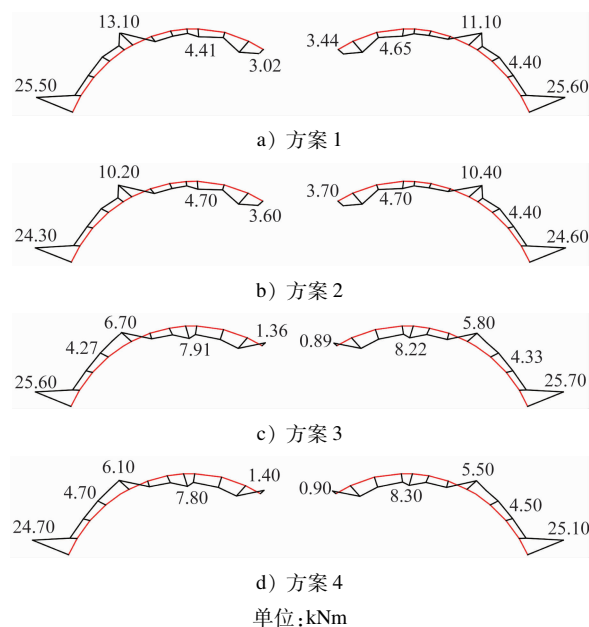


图 7 不同方案下二衬扣拱后的拱部初支弯矩

Fig.7 Arch initial support bending moments after secondary lining arch support in different schemes

初支扣拱后,不同初支扣拱方案的拱部初支弯矩分布差异较大。由于 CD 法增加了一道临时支撑,故方案 1 和方案 2 的拱顶处表现为内侧受压、外侧受压;方案 3 和方案 4 的拱顶处表现为内侧受拉、



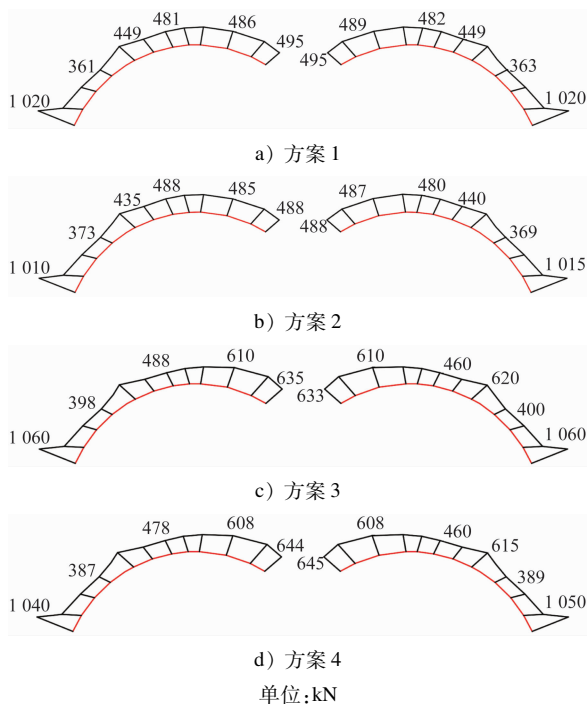


图8 不同方案下二衬扣拱后的拱部初支轴力  
Fig.8 Arch initial supporting axial forces after secondary lining arch support in different schemes

外侧受压。不同初支扣拱方案的轴力分布差异较小。方案1和方案2的弯矩及轴力最大值分别为15.4 kNm、636 kN,方案3和方案4的弯矩及轴力最大值分别16.9 kNm、729 kN。各方案下的弯矩及轴力最大值均位于与冠梁连接的拱脚处,说明相较于台阶法,CD法扣拱能够改善拱部初支的受力情况,弯矩及轴力分别减小了8.88%、12.76%。

二衬扣拱后,各方案下的弯矩及轴力分布无明显差异。二衬扣拱后,方案1—方案4的弯矩最大值分别为25.6 kNm、24.6 kNm、25.7 kNm、25.1 kNm,较上一施工阶段分别增加了66.23%、59.74%、52.07%、48.52%。二衬扣拱后,方案1—方案4的轴力最大值分别为1020 kN、1015 kN、1060 kN、1050 kN,较上一施工阶段分别增加了60.38%、59.59%、45.40%、44.03%。由此可知,相较于顺序拆撑,交替拆撑能够小幅度减小拱部初支的内力增量,方案1和方案2的内力增量明显大于方案3和方案4。

采用破损阶段法计算得到方案1—方案4在二衬扣拱后的安全系数分别为5.45、5.49、5.26、5.32,均满足规范要求。总体而言,各施工方案条件下的拱部内力差异较小,CD法优于台阶法,交替拆撑优于顺序拆撑。

### 3 现场监测

为保证地面建筑物及地面道路的安全稳定性,需对地面位移进行动态监测,保证其变形在安全限值内,本节主要选取1#横通道与4#横通道之间的施工段作为监测目标段,分别选取与进出口距离10 m、50 m等3个监测断面分析现场数据,车站横断面及地面沉降监测点平面布置示意图如图9所示。不同监测断面的地面沉降历时曲线如图10所示。

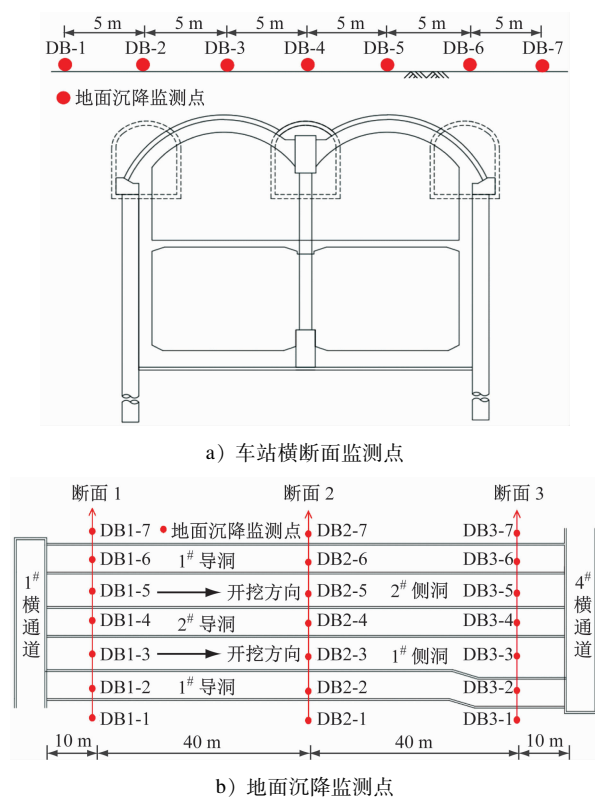


图9 车站横断面及地面沉降监测点平面布置示意图  
Fig.9 Plan layout diagram of station cross-section and land subsidence monitoring points

随着导洞开挖施工的进行,地面沉降量逐渐增大,且在经过监测断面前、后的增长最快。对于监测断面1,各测点在导洞开挖时的地面沉降量增长较快,随着开挖面逐渐远离监测断面,地面沉降量逐渐趋于稳定,直至导洞开挖完成;桩-梁-柱及初支扣拱阶段,地面沉降量小幅增加,之后逐渐趋于稳定,监测断面1的地面最大沉降值为18.68 mm。对于监测断面2与监测断面3,二者的地面沉降变化趋势与监测断面1类似,主要表现为导洞开挖阶段有较大的地面沉降量,后续由桩-梁-柱施工导致的地面沉降量较小,监测断面2和监测断面3的地面

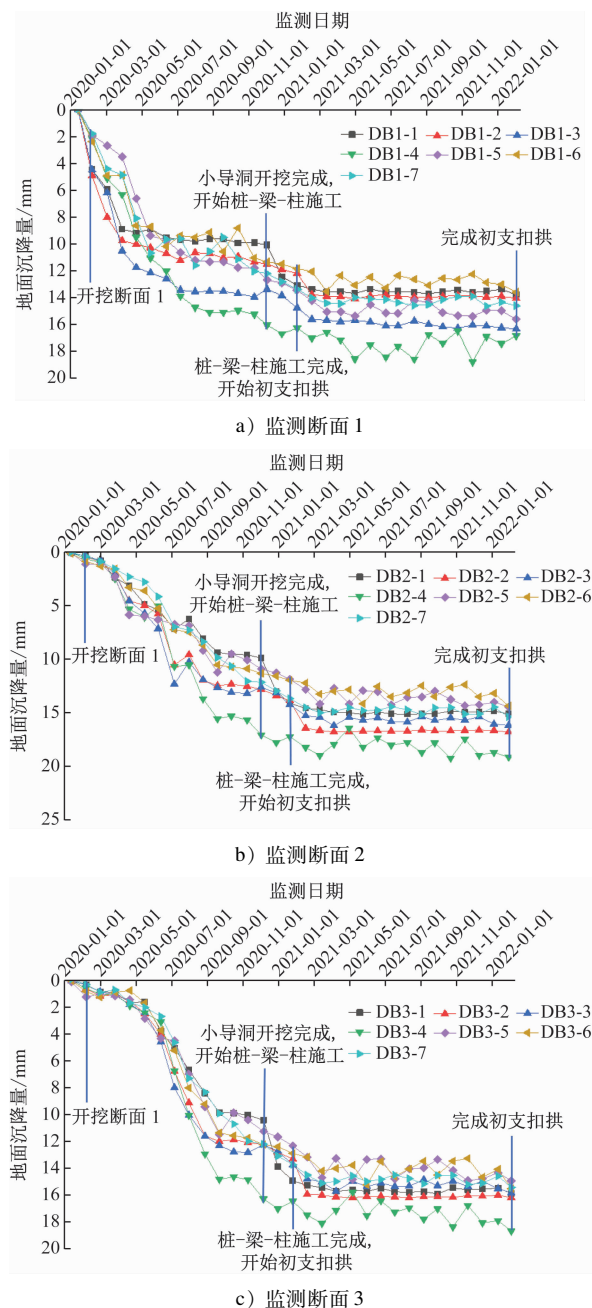


图10 不同监测断面的地面沉降历时曲线

Fig. 10 Land subsidence time-history curves on different monitoring sections

最大沉降值分别为 19.26 mm、18.32 mm, 均未达到现场预警值。由此可知, 现场施工对地面建筑物及地面道路的影响相对较小。相较于数值模拟结果, 各监测断面沉降值误差分别为 8.24%、1.30%、2.94%, 验证了数值模拟结果的准确性和合理性。

## 4 结论

1) 初支扣拱后, 方案 1 和方案 2 的地面最大沉

降值为 18.24 mm, 拱部初支弯矩、轴力分别为 15.4 kNm、636 kN。方案 3 和方案 4 的地面最大沉降值为 19.48 mm, 拱部初支弯矩、轴力分别为 16.9 kNm、729 kN, 这三个值较方案 1 和方案 2 增加了 6.80%、9.74%、14.62%, 故相较于台阶法, CD 法具有较好的地面沉降控制作用及减少拱部初支内力作用, 但其减小幅度有限。

2) 方案 1—方案 4 的地面沉降增量分别为 2.61 mm、1.97 mm、2.55 mm、1.91 mm, 拱部初支弯矩拆撑后分别增加了 66.23%、59.74%、52.07%、48.52%, 拱部初支轴力分别增加了 60.38%、59.59%、45.40%、44.03%, 说明交替拆撑可以减小地面沉降, 但拆撑顺序对拱部初支的内力影响较小。

3) 综合地面沉降、拱部初支内力, 以及现场施工效率、施工成本等因素, 建议选用方案 4 进行扣拱施工, 即初支扣拱采用台阶法, 二衬扣拱采用交替拆撑。

## 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]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103729.
- [2] GUO X, JIANG A, WANG S. Study on the applicability of an improved pile-beam-arch method of metro station construction in the upper-soft and lower-hard stratum[J]. Advances in Civil Engineering, 2021(1): 11.
- [3] 曾冰海. 洞桩法(PBA)暗挖多跨地铁车站扣拱施工[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 456.  
ZENG Binghai. Arch lining construction of mined multi-span metro station constructed by PBA method[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(4): 456.
- [4] 李涛, 贾奥运, 徐公文, 等. 北京地铁车站洞桩法扣拱顺序对地表沉降的影响[J]. 施工技术, 2019, 48(1): 61.  
LI Tao, JIA Aoyun, XU Gongwen, et al. Influence of the arch construction sequences on the surface settlements in Beijing metro station with PBA method[J]. Construction Technology, 2019, 48(1): 61.

· 收稿日期:2022-10-09 修回日期:2022-11-09 出版日期:2024-12-10

Received:2022-10-09 Revised:2022-11-09 Published:2024-12-10

· 第一作者:裴行凯,高级工程师,peixingkai@gmdi.cn

通信作者:章慧健,副教授,huijianz@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