

## 上软下硬地层拱柱法暗挖地铁车站施工变形规律研究

王 祥<sup>1</sup> 王顺然<sup>2,3</sup> 刘宪永<sup>4</sup> 宋战平<sup>2,3</sup> 吴 昊<sup>2</sup>

(1. 贵阳市城市轨道交通集团有限公司, 550081, 贵阳; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 710055, 西安;  
3. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 710055, 西安; 4. 北京市政路桥股份有限公司, 100045, 北京)

**摘 要** [目的] 上软下硬地层条件下浅埋地铁车站施工难度较大, 易引起地面沉降、车站变形等工程问题。拱柱法作为一种新型工法, 其工序相对简单, 安全风险较小, 施工效率较高。有必要研究上软下硬地层拱柱法暗挖地铁车站施工变形规律。[方法] 对施工过程进行数值模拟, 计算施工中的地面沉降、隧道水平收敛及拱顶沉降, 并与现场实际监测数据进行对比分析。[结果及结论] 模拟结果显示, 拱柱法施工时车站中线上方地面沉降最大值为 13.91 mm; 拱部净空收敛最大值为 0.66 mm, 下部直墙断面净空收敛为 1.85 mm; 中导洞的拱顶沉降值为 0.66 mm, 边导洞的拱顶沉降值为 0.07 mm。现场监测结果显示, 地面沉降最大值为 19.75 mm; 中导洞净空收敛值为 3.25 mm; 中导洞的拱顶沉降值为 7.07 mm, 边导洞拱顶沉降值为 3.84 mm。

**关键词** 地铁车站; 上软下硬地层; 拱柱法施工; 地面沉降  
**中图分类号** TU433; U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.029

### Deformation Law of Metro Station Underground Excavation by Arch Column Method in Upper-Soft and Lower-Hard Strata

WANG Xiang<sup>1</sup>, WANG Shunran<sup>2,3</sup>, LIU Xianyong<sup>4</sup>, SONG Zhanping<sup>2,3</sup>, WU Hao<sup>2</sup>

(1. Guiyang Urban Rail Transit Group Co., Ltd., 550081, Guiyang, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055, Xi'an, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, 710055, Xi'an, China; 4. Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., 100045, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] The construction of shallow-buried metro station in upper-soft and lower-hard strata is tough, easily leading to engineering issues such as land subsidence and station deformation. As a new construction method, the arch column method features relatively simpler procedures, lower safety risks and higher construction efficiency. It is necessary to study the deformation law of metro station underground excavation by the arch column method in upper-soft and lower-

hard strata. [Method] The construction process is numerically simulated to calculate land subsidence, tunnel horizontal convergence and vault subsidence during construction, and the data are compared and analyzed with the actual monitoring data on-site. [Result & Conclusion] Simulation results show that during arch column method construction, the maximum land subsidence above the station center-line is 13.91 mm; the maximum clearance convergence of the arch is 0.66 mm, and that of the lower straight wall section is 1.85 mm; the vault subsidence of the middle pilot tunnel is 0.66 mm, and that of the side pilot tunnel is 0.07 mm. On-site monitoring results show that the maximum land subsidence is 19.75 mm; the clearance convergence of the middle pilot tunnel is 3.25 mm; the vault subsidence of the middle pilot tunnel is 7.07 mm, and that of the side pilot tunnel is 3.84 mm.

**Key words** metro station; upper-soft and lower-hard strata; arch column method; land subsidence

目前, 在采用现场检测、数值模拟等方法对上软下硬地层中地铁车站施工的诸多研究中<sup>[1-8]</sup>, 对于拱柱法的研究较少。为研究拱柱法在上软下硬地层条件施工的适用性, 本文以贵阳地铁北京路站(以下简称“北京路站”)工程为依托, 研究上软下硬地层拱柱法暗挖地铁车站施工变形规律。

## 1 工程概况

北京路站为贵阳地铁 1 号线与 3 号线的换乘站, 其平面示意图如图 1 所示。该站为地下双层岛

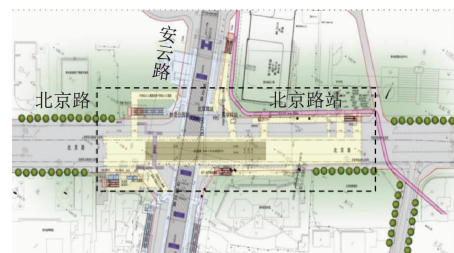


图 1 北京路站平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of Beijing Road Station

式车站,站台宽 15.5 m,车站主体总长度为 259.5 m,标准开挖面净宽度为 25.1 m,最大开挖宽度为 28.0 m,拱顶覆土厚度为 10.2 m。北京路站的横断面及地质条件如图 2 所示。

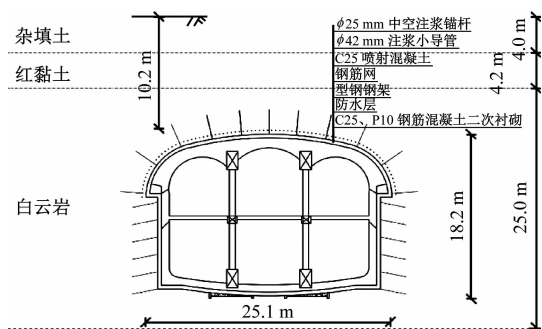


图2 北京路站的横断面及地质条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Beijing Road Station cross-section and geological conditions

该车站施工工序具体施工内容为:

- 1) 工序 1: 下部小导洞开挖, 并施作超前小导管和底部纵梁。
- 2) 工序 2: 上部导洞分步开挖, 并紧跟施作初期支护、边纵梁。
- 3) 工序 3: 分段拆除临时支撑, 施作拱盖、中柱, 形成拱柱体系。
- 4) 工序 4: 下部土体开挖, 并紧跟施作上部侧墙及中板, 上部拱盖封闭成环。
- 5) 工序 5: 继续开挖下部土体, 施作仰拱及侧墙二次衬砌, 并闭合二次衬砌。
- 6) 工序 6: 完成仰拱回填, 施作车站内部结构与装修。

北京路站各工序的施工内容示意图如图 3 所示。

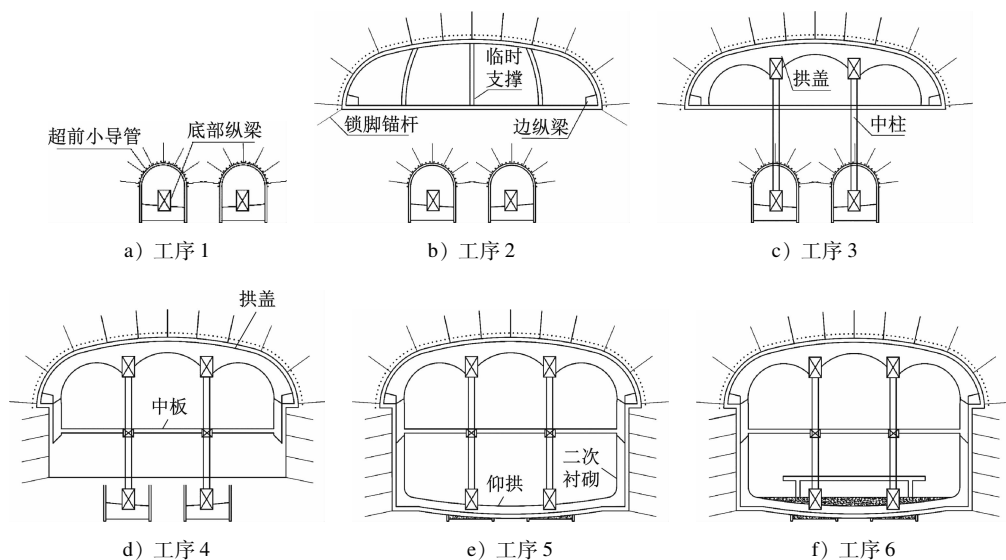


图3 北京路站各工序的施工内容示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Beijing Road Station construction contents of each process

## 2 数值模拟计算

### 2.1 模型建立

采用 Midas GTS/NX 有限元软件对北京路站的施工全过程进行数值模拟分析。

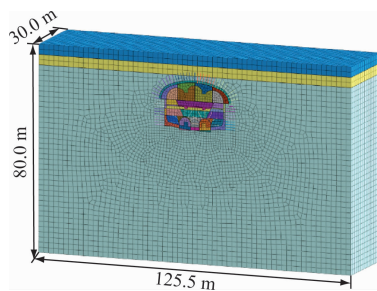
根据地质勘探资料, 建立北京路站施工的有限元模型, 如图 4 所示。

岩土体选取常用的摩尔-库伦本构模型, 结构单元选取弹性本构模型。计算模型的物理力学参数如表 1 所示。

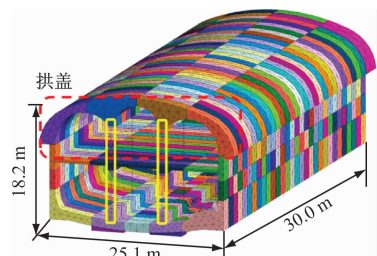
### 2.2 计算结果分析

地面沉降、净空收敛及拱顶沉降等参数对施工安全性具有重要影响, 因此选取以上参数进行分析, 以确保拱柱法施工的安全性。

为了保证模拟结果对施工的指导作用, 模型中测点布置仿照现场实际测点进行布置, 如图 5 所示。对车站上部导洞开挖施工中的净空收敛及拱顶沉降进行分析。由于数值模拟结果中的地面沉降沿车站中线呈对称分布, 因此本研究仅对车站中线某一侧进行地面沉降分析。



a) 整体模型及网格划分



b) 车站结构模型及网格划分

图4 北京路站施工的有限元模型

Fig.4 Construction finite element model of Beijing Road Station

表1 计算模型的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the calculation model

项目	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
杂填土	8	0.30	20.0	10	8.0
红黏土	35	0.36	18.3	26	6.8
中风化白云岩	2 800	0.16	27.1	550	38.0
注浆加固区	4 200	0.20	30.0	720	46.0
初期支护	28 000	0.20	24.0		
二次衬砌	32 000	0.20	24.0		
锚杆	206 000	0.20	78.5		
中柱 (钢管柱)	120 000	0.20	36.0		

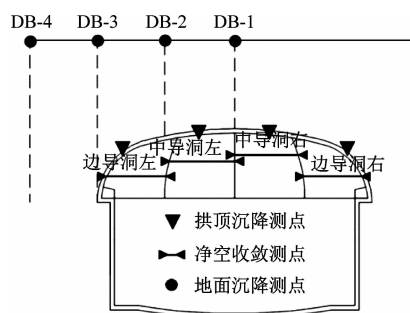


图5 典型断面测点布设示意图

Fig.5 Schematic diagram of typical cross-section monitoring points layout

## 2.2.1 地面沉降

为表述清晰,本研究将施工过程划分为160个施工步,相应的地面沉降变化趋势如图6所示。临时支撑拆除并施作中柱的过程中,车站正上方测点DB-4、DB-3、DB-2迅速下沉;下部直墙断面施工后,测点DB-4、DB-3继续沉降。最终测点DB-4、DB-3、DB-2、DB-1的地面沉降值分别为13.19 mm、6.93 mm、1.75 mm、0.15 mm。

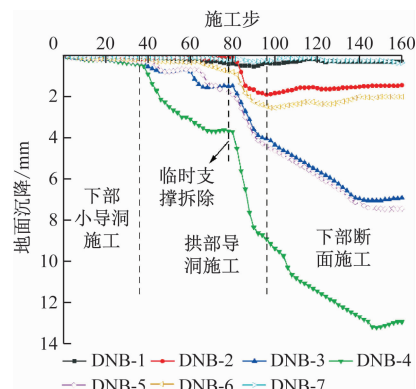


图6 地面沉降变化趋势

Fig.6 Land subsidence variation trends

施工过程中,地面沉降槽曲线如图7所示。由图7可见:地面沉降最大值基本位于车站中线处;在拆除临时支撑时,地面沉降值增速较快;二次衬砌施作后地面沉降值为13.19 mm。

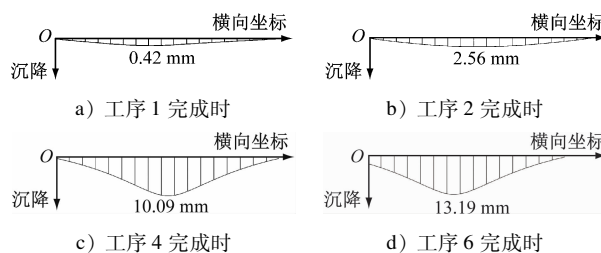


图7 地面沉降槽曲线

Fig.7 Curves of land subsidence trough

## 2.2.2 净空收敛

1) 拱部净空收敛。图8为拱部施工时净空收敛变化图。中导洞的开挖对净空收敛的影响大于边导洞开挖。中导洞的净空收敛最终稳定在0.68 mm和0.49 mm;最终左、右边导洞净空收敛值稳定值为0.02 mm和0.07 mm。

2) 下部直墙断面净空收敛。在第1层岩体两侧布置测点1,在第2层岩体两侧布置测点2,用于监测直墙断面净空收敛。图9为下部直墙断面净空收敛变化趋势图。由图9可知:在第1层和第2层

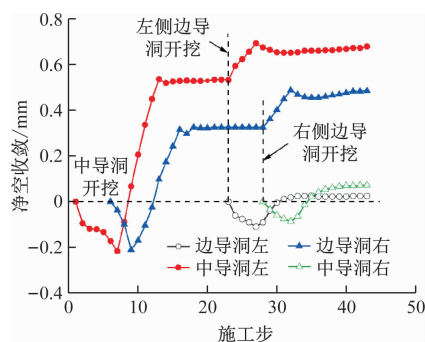


图8 上部导洞开挖初期支护净空收敛变化趋势

Fig. 8 Clearance convergence variation trends of the initial support in upper guiding hole excavation

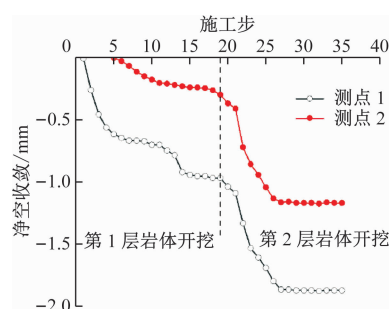


图9 下部直墙断面净空收敛变化趋势

Fig. 9 Clearance convergence variation trends of the lower straight wall section

岩体开挖初期,直墙断面净空收敛增加均较快;最终测点1、2的净空收敛稳定值为 $-1.85\text{ mm}$ 、 $-1.21\text{ mm}$ ;与第1层岩体开挖相比,第2层岩体开挖时下部直墙断面净空收敛更大。

### 2.2.3 拱顶沉降

由图10可知,左、右侧中导洞开挖后,拱顶出现迅速下沉,随后趋于稳定;左、右侧边导洞开挖后,其拱顶均迅速下沉。最终左、右侧中导洞的拱顶沉降逐步稳定,达 $3.48\text{ mm}$ 、 $3.49\text{ mm}$ 。

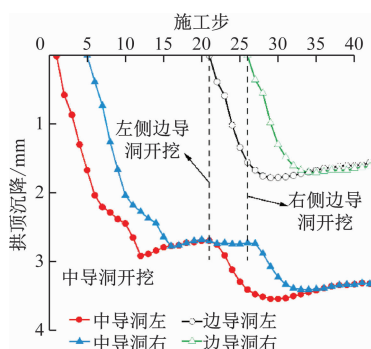


图10 上部导洞开挖初期支护沉降变化趋势

Fig. 10 Subsidence variation trends of the initial support in upper guiding hole excavation

由上述模拟结果的分析可知,采用拱柱法对贵阳地铁3号线北京路地铁车站进行施工时,施工过程的变形均在可控范围内,拆除临时支撑应作为施工中的关键阶段进行控制,同时上部导洞的开挖也是施工中较为关键的阶段。

## 3 现场监测结果及分析

### 3.1 施工阶段净空收敛

对上部导洞开挖阶段(工期120 d)的净空收敛进行实测,结果如图11所示。结合图11可知,现场实测结果略大于数值模拟结果,但变化趋势基本一致。最终,中导洞的净空收敛稳定值为 $3.25\text{ mm}$ ,边导洞的净空收敛稳定值为 $0.61\text{ mm}$ 。

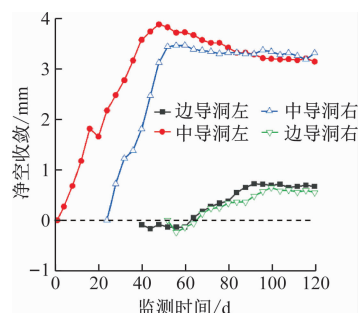


图11 实测上部导洞开挖净空收敛变化图

Fig. 11 Clearance convergence variation diagram of the measured upper guiding hole excavation

### 3.2 施工阶段初期支护沉降特征

图12为拱顶沉降实测图,由图可知,随着各导洞的开挖,拱顶处的沉降值均迅速增加。最终,左、右侧中导洞以及左、右侧边导洞的拱顶沉降值分别为 $7.07\text{ mm}$ 、 $7.01\text{ mm}$ 、 $3.84\text{ mm}$ 、 $3.78\text{ mm}$ 。

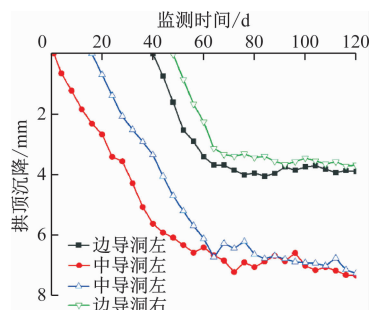


图12 实测拱顶沉降变化图

Fig. 12 Measured vault subsidence variation diagram

### 3.3 施工阶段地面沉降特征

图13为实测地面沉降变化图。取该车站某一监测断面DB1的4个监测点进行分析可知,车站中线处的地面沉降值最大。最终,测点DB1-1、DB1-



2、DB1-3、DB1-4 的地面沉降稳定值为 19.75 mm、11.08 mm、3.94 mm、2.06 mm。

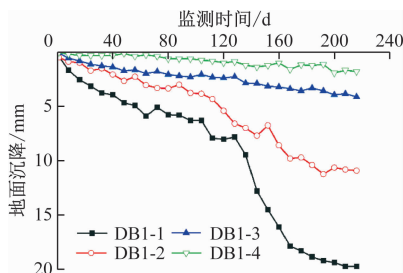


图 13 实测地面沉降变化图

Fig. 13 Measured land subsidence variation diagram

综上,施工各阶段中现场实测结果略大于数值模拟结果,但变化趋势基本一致,验证了数值模拟结果的合理性。

## 4 结论

1) 数值模拟结果表明:车站中线处的最终地面沉降值最大,为 13.19 mm,模拟结果的变形值均在可控范围内。

2) 地面沉降最终稳定值为 19.75 mm;在临时支撑拆除阶段,地面沉降幅度较大。因此临时支撑拆除应作为施工中的关键阶段,并加强监控量测。

3) 在拱柱法施工过程中,拱顶各导洞的净空收敛变化不大,导洞的最大净空收敛值为 7.07 mm,发生在中导洞处。因此在施工过程中应注意中导洞的变形控制,并加强监控量测。

## 参考文献

- [1] 李辉,田小旭,宋战平,等. 基于谢家杰公式的浅埋隧道开挖进尺计算方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(5): 662.  
LI Hui, TIAN Xiaoxu, SONG Zhanping, et al. Study on calculation method of digging length for shallow tunnel based on Xie Jia-jie's Surrounding Rock Pressure Formula[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2018, 50(5): 662.
- [2] 陈凯. 上软下硬岩浅埋地铁车站预留岩柱施工力学特征及围岩稳定性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.  
CHEN Kai. Study on construction mechanical characteristics and surrounding rock stability of reserved rock column in shallow buried subway station with soft upper and hard lower rocks[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [3] 韩科周,王在泉,管洪振,等. “上软下硬”地层条件下地铁车站合理埋深确定[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊

2): 1594.

HAN Kezhou, WANG Zaiquan, GUAN Hongzhen, et al. Method of determining the depth of mass transit railway station under stratified geological conditions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S2): 1594.

- [4] 朱晓雨. 上软下硬地层超浅埋大跨地铁车站拱盖法施工优化研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.  
ZHU Xiaoyu. Study on construction optimization of arch cover method for ultra-shallow buried long-span subway station in soft ground and hard ground[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.
- [5] 龚旭东. 处于上软下硬地层的青岛某地铁车站初支拱盖法施工变形规律及控制[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 109.  
GONG Xudong. Deformation pattern and control of Qingdao metro station adopting primary arch cover construction method in upper soft and lower hard stratum[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 109.
- [6] 赵迎,霍奇,宋战平,等. 大跨暗挖车站叠合初支拱盖法施工适应性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(5): 688.  
ZHAO Ying, HUO Qi, SONG Zhanping, et al. Study on adaptability of overlapping primary support arch cover method for large-span embedded station[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(5): 688.
- [7] 熊田芳,宋超业,乔春生. 上软下硬复合地层中拱盖法单拱大跨地铁车站的埋深影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 222.  
XIONG Tianfang, SONG Chaoye, QIAO Chunsheng. Impacts of depths on the large-span and single-arch subway station with arch cover method in hard-soft heterogeneous stratum[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(2): 222.
- [8] 施玉晶. 基于两种拱盖法修建的青岛地区上软下硬岩质地层大跨隧道结构稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 117.  
SHI Yujing. Study on structural stability of mined large-span tunnels constructed by two arch-cover methods in upper-soft and lower-hard rock stratum of Qingdao area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(2): 117.

· 收稿日期:2023-01-06 修回日期:2023-03-20 出版日期:2025-04-10

Received:2023-01-06 Revised:2023-03-20 Published:2025-04-10

· 第一作者:王祥,高级工程师,3451491613@qq.com

通信作者:王顺然,硕士研究生,164046953@qq.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