

DOI: 10.7672/sgjs2024210071

# 曲线盾构隧道下穿施工影响分析\*

黄毅<sup>1</sup>, 何健<sup>1</sup>, 张家硕<sup>1</sup>, 畅继鹏<sup>1</sup>, 李俊华<sup>2</sup>, 黄强<sup>2</sup>

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 浙江 宁波 315101;

2. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

**[摘要]** 依托宁波地铁6号线某区间曲线盾构隧道下穿既有车站工程实例, 基于Midas GTS NX软件进行三维数值建模, 模拟隧道下穿施工全过程, 分析上部车站底板、隧道结构、地表变形变化规律。基于数值计算结果对曲线隧道下穿施工安全进行评价, 提出变形控制措施。研究表明, 曲线盾构隧道施工时由于内侧超挖造成更大的地层损失, 对车站底板沉降造成叠加影响, 隧道开挖完成后车站底板最大沉降位于双线隧道中心; 左线隧道开挖完成时, 竖向收敛变形呈中间小、两端大的分布特点, 且右线隧道施工对左线隧道竖向收敛变形的影响较小; 曲线隧道下穿施工引起的地表沉降变形主要集中在双线隧道中心两侧25m范围内; 通过采取必要的变形控制措施, 可使结构变形处于安全范围内。

**[关键词]** 地铁; 车站; 隧道; 沉降; 数值模拟

**[中图分类号]** U45

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2024)21-0071-07

## Analysis of Influence of Curved Shield Tunnel Undercrossing Construction

HUANG Yi<sup>1</sup>, HE Jian<sup>1</sup>, ZHANG Jiashuo<sup>1</sup>, CHANG Jipeng<sup>1</sup>, LI Junhua<sup>2</sup>, HUANG Qiang<sup>2</sup>

(1. Construction Branch, Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315101, China;

2. School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** Based on the engineering example of a curve shield tunnel of Ningbo Subway Line 6 undercrossing an existing subway station, three-dimensional numerical simulation was carried out based on Midas GTS NX software, the whole construction process of tunnel undercrossing was simulated, and deformation characteristics of the upper station floor, tunnel structure and ground surface were analyzed. Based on the numerical calculation results, the construction safety of curve shield tunnel undercrossing is evaluated, and the deformation control measures are put forward. The research results show that during the curve shield tunnel construction, the ground loss caused by the over excavation of the inner side is greater, which has a superimposed impact on the settlement of the station floor, and the maximum settlement of the station floor is located at the center of the double-line tunnel when the tunnel excavation is completed. When the excavation of the left line tunnel is completed, the vertical convergence deformation is smaller in the middle and larger on both sides, the construction influence of the right tunnel on the vertical convergence deformation of the left tunnel is smaller. The surface settlement caused by the undercrossing construction by the curve shield tunnel is mainly concentrated within 25m away from the center of the double-line tunnel. By taking necessary deformation control measures, the structure deformation can be kept within the safe range.

**Keywords:** subways; stations; tunnels; settlement; simulation

\* 宁波市自然科学基金项目(2023J083)

[作者简介] 黄毅, 高级工程师, E-mail: huangy@nbmetro.com

[通信作者] 李俊华, 教授, 博士生导师, E-mail: lijunhua@nbu.edu.cn

[收稿日期] 2024-08-31

## 0 引言

城市轨道交通在城市建设发展中发挥着日益重要的作用, 随着城市地铁线路不断增多及城市地下空间的不断开发, 新建地铁线路穿越既有城市地

下结构的现象较普遍。其中,新建地铁隧道下穿既有车站为常见的工程问题<sup>[1-3]</sup>。当新建结构邻近既有建筑物时,近距离穿越施工会对既有地下结构变形和受力造成影响。相关研究表明,当新建隧道下穿既有地铁轨道交通结构时会表现出复杂的力学响应和变形特征,导致既有地下结构性能劣化,影响地铁轨道交通的运营安全<sup>[1-2]</sup>。因此,准确预测新建隧道近距离施工对邻近建筑物的影响规律是关键。

对于新建地铁隧道穿越既有地下车站的情况,已有学者进行了相关研究。邓海鹏等<sup>[3]</sup>建立了小曲率下穿隧道开挖对既有隧道影响的三维数值模型,分析了新建隧道对既有运营隧道的影响。杨陈<sup>[4]</sup>模拟分析了新建直线隧道下穿既有车站的影响规律,研究结果表明,既有车站越靠近下穿段的区域内力变化值越大,最大值出现在下穿段隧道拱顶与既有车站最接近处。陈杰等<sup>[5]</sup>研究结果表明,新建隧道采用盾尾同步注浆的方式可降低既有车站沉降。

当地铁隧道曲线下穿时,受制于地质、地形和地下建筑物条件,需对地铁隧道施工影响进行研究。贾茁<sup>[6]</sup>依托实际工程,研究了地面复杂环境及复杂地质条件下新建小半径曲线隧道施工技术。姜国栋<sup>[7]</sup>通过理论推导和二维、三维数值模拟,研究了复合地层盾构隧道掘进参数对开挖施工的影响及邻近桩基变形规律,提出曲线盾构隧道施工地层损失量计算方法。刘博峰等<sup>[8]</sup>建立大坡度小半径曲线隧道盾构下穿引起建筑物地面沉降的数学模型,进行了理论推导计算并验证了模型的合理性。吴贤国等<sup>[9]</sup>采用FLAC 3D软件对盾构使用参数进行了精细模拟,研究了隧道近接施工对既有隧道的影响。张利涛<sup>[10]</sup>认为2条隧道施工时,应错开一定距离,否则会相互影响导致支护结构和既有结构变形,选择合理的加固措施可减小既有隧道变形。Lin等<sup>[11]</sup>研究发现既有隧道在靠近新建隧道开挖区域一侧的位移较大,而在远离开挖区域一侧的位移较小,新建隧道开挖导致附近位置的应力松弛,因此,在远离开挖的位置压应力增加,这表明荷载从新建隧道转移到了既有隧道。

不同于直线隧道施工,曲线隧道下穿地铁车站时,为达到转弯的目的,往往对盾构内侧进行主动超挖,因此,曲线隧道较直线隧道超挖率更高,因而地层损失更大,对上部既有车站沉降的影响更严重<sup>[9]</sup>。对于曲线隧道,曲线半径越小,所需的内侧超挖量越大,对上部车站结构变形的影响越大。现

有曲线隧道研究多针对单线小半径盾构隧道施工的可行性,对于小半径曲线隧道下穿车站的施工影响研究有限,对近距离穿越施工时既有车站变形控制的关注较少。因此,在曲线隧道下穿地铁车站前,对曲线隧道下穿施工影响进行预测分析,提出相应的变形控制方案,对于保障既有车站运营安全具有重要意义。

本文基于Midas GTS NX软件对宁波地铁6号线拟建区间隧道曲线下穿地铁2号线某车站工程进行三维施工全过程数值分析,揭示双线地铁隧道曲线下穿施工对上部车站和周围地层沉降的影响,并基于数值模拟结果提出相应的变形控制方案。

## 1 工程概况

宁波地铁6号线一期工程正大路站—甬江南站区间盾构隧道段为小半径曲线段,下穿宁波地铁2号线正大路车站。地铁隧道采用单圆盾构法施工,所在地层主要为粉砂层和黏质粉土层。既有车站主要位于黏土层和淤泥质黏土层。隧道顶部距车站底板的距离为6.5m,属于近距离施工。隧道外径为6.2m,内径为5.5m,线路平面曲线半径为400m,为小半径曲线盾构隧道。隧道管片宽1.5m,每次掘进平均进尺6环。区间线路包括左、右独立隧洞,二者净距为12.4m(2D,D为隧道外径)。车站长200m、宽23m、深12m,为2层矩形框架结构,顶板埋深为3.3m,中柱采用边长0.5m的C30混凝土方柱,侧墙厚0.6m,顶板和中板厚0.8m,底板厚1m。

## 2 数值计算

### 2.1 计算模型

采用Midas GTS NX软件建立三维有限元模型(见图1),模拟双线曲线地铁隧道掘进对既有车站变形的影响。模型尺寸为200m×90m×45m(长×宽×高),模型顶面为地表自由边界,底部采用固定约束,其他各面均施加法向约束,场地范围内地层自上而下依次为杂填土层(厚3.3m)、黏土层(厚9.3m)、淤泥质黏土层(厚8.3m)、粉砂层(厚5.3m)、黏质粉土层(厚8.8m)、粉质黏土层(厚10m)。三维模型单元数为194 290,节点数为1 263 269,全部采用实体单元模拟。盾构隧道开挖半径6.6m,开挖边界与隧道外侧之间区域为注浆层,厚度为0.2m。盾构隧道管片采用C50钢筋混凝土,厚度为0.35m,每环管片纵向宽1.5m。盾构机长度为9m,每次掘进开挖长度为9m(6环),建模时隧道全长90m,共划分10个开挖阶段。

### 2.2 模型参数与模拟过程

采用修正莫尔-库仑本构模型反映土层变形特

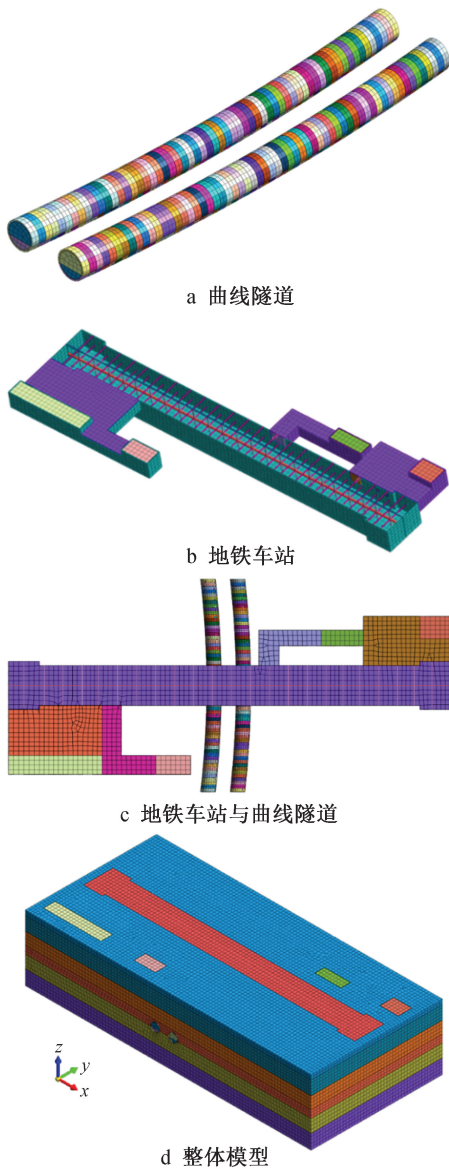


图1 三维数值模型与网格划分

Fig.1 3D numerical model and meshes

性,各土层力学参数如表1所示。隧道、车站、盾构、注浆体等材料考虑为弹性,盾构壳为0.06m厚钢壳。根据设计,盾构隧道掘进时掌子面推力为300kPa,注浆层压力为150kPa。

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	厚度/m	割线刚度/MPa	切线刚度/MPa	卸载模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa
杂填土	3.3	5.1	5.0	15.2	0.30	17.0
黏土	9.3	5.0	5.5	15.0	0.30	11.3
淤泥质黏土	8.3	4.2	3.2	18.0	0.32	26.0
粉砂	5.3	4.0	4.4	17.3	0.35	25.0
黏质粉土	8.8	8.4	8.0	25.3	0.35	15.0
粉质黏土	10.0	7.5	7.6	27.8	0.27	22.0

数值模拟步骤为:自重应力场生成→车站主体开挖模拟→附属结构开挖模拟→左线隧道施工模拟→右线隧道施工模拟。自重应力场生成时,首先激活各土层自重应力场并进行位移清零,此阶段不考虑地下结构物的存在,地下结构物属性设为所在土层。车站主体开挖模拟步骤为:激活车站主体结构支护→钝化土体以模拟开挖→激活车站侧墙、底板、底部纵筋→激活车站中柱、中板、纵筋→激活车站顶板→完成车站主体开挖。附属结构开挖模拟步骤为:激活附属结构支护→钝化附属结构土体以模拟施工开挖→回填土体,再次进行位移清零。左、右线隧道施工模拟步骤为:激活掌子面掘进力300kPa→钝化上个阶段掘进力、开挖层,激活盾构机盾壳→模拟盾构机行进→激活管片,模拟注浆,激活浆体对盾构机盾壳和管片的注浆压力150kPa→利用边界组模拟浆体硬化→拆掉盾构机盾壳→钝化注浆压力,循环模拟直至开挖完成。

### 3 数值计算结果与分析

#### 3.1 车站结构竖向位移

双线曲线隧道主要施工阶段车站底板竖向位移云图如图2所示。由图2可知,隧道开挖至车站前方一定距离时引起了车站底板沉降;当左线隧道开挖至车站底板中心正下方时(左线隧道开挖45m),车站底板最大竖向位移达2.25mm,位于车站底板中心;当左线隧道开挖90m时,车站底板中心竖向位移增至3.80mm,整个车站底板沉降基本相同,可知底板沉降均匀;右线隧道开挖时,车站底板沉降继续增大,当右线隧道开挖完成时,车站底板沉降增至5.77mm,增大了1.97mm。

车站底板中心沉降随左、右线隧道开挖距离的变化如图3所示。由图3可知,随着隧道开挖的进行,车站底板中心沉降先小幅度增大后快速增大最后趋于平稳。由于双线隧道下穿的影响,车站底板在横向上出现明显沉降槽(见图4),左线隧道开挖完成时,车站底板最大沉降位于左线隧道正上方,右线隧道开挖完成时,车站底板最大沉降所处位置移至两隧道中心,这表明右线隧道的修建使车站底板最大沉降位置发生变化。

#### 3.2 车站结构水平位移

隧道施工过程中车站底板水平位移云图如图5所示。由图5可知,左线隧道开挖45m时,车站底板最大水平位移为0.11mm;左线隧道开挖完成时,车站底板最大水平位移增至0.17mm;右线隧道施工后,车站底板水平位移缓慢增加,最大水平位移增至0.28mm。双线隧道开挖完成后,车站底板水



a 左线隧道开挖45m



b 左线隧道开挖完成



c 右线隧道开挖45m



d 右线隧道开挖完成

图 2 隧道施工引起的车站底板竖向位移云图(单位:mm)

Fig. 2 Vertical displacement cloud map of the station floor due to the tunnel construction(unit: mm)

平位移基本呈反对称分布形式,最大水平位移出现在距底板中心约 25m 处,如图 6 所示。

### 3.3 新建隧道竖向位移

新建隧道竖向位移云图如图 7 所示,其中左线隧道竖向收敛变形曲线如图 8 所示。由图 7,8 可知,隧道开挖后由于应力释放,底部向上隆起,拱顶向内挤压;左线隧道开挖完成时,由于车站底板的

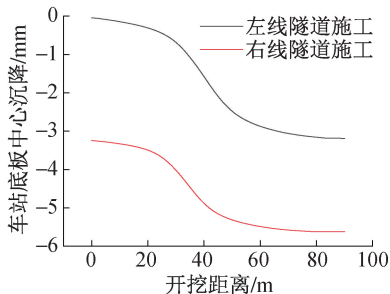


图 3 车站底板中心沉降随隧道开挖距离变化曲线

Fig. 3 Station floor central settlement curves with the increase of tunnel excavation distance

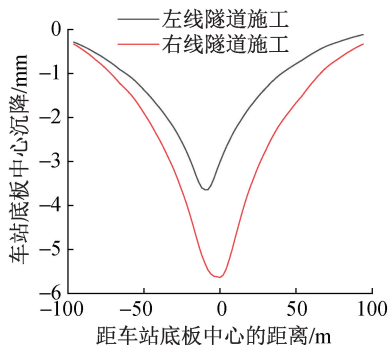


图 4 不同位置处车站底板中心沉降曲线

Fig. 4 Station floor center settlement curves at different locations

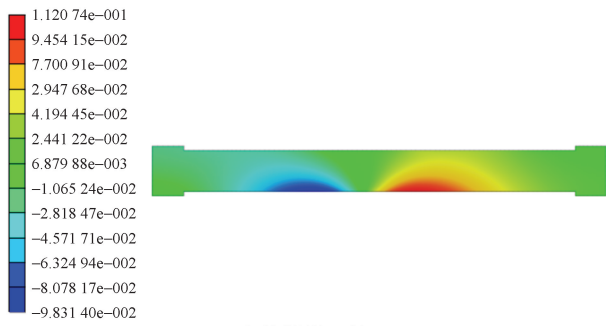
存在,使竖向收敛变形受到了抑制,呈中间小、两端大的分布特点,最大竖向收敛变形为 13.21mm,最大拱顶沉降为 8.53mm;右线隧道开挖完成时,拱底隆起与拱顶沉降规律与左线隧道基本一致,最大拱顶沉降为 9.25mm,其施工引起的左线隧道最大竖向收敛变形为 13.34mm;右线隧道施工对左线隧道竖向收敛变形的影响较小。

### 3.4 新建隧道水平位移

新建隧道水平位移云图如图 9 所示。由图 9 可知,左线隧道开挖 45m 时,最大水平位移为 6.32mm,拱腰处均向外变形;左线隧道开挖完成时,最大水平位移为 6.28mm,这表明隧道开挖过程中水平位移变化较小;右线隧道开挖 45m 时,最大水平位移为 7.20mm,此时左线隧道最大水平位移为 6.29mm;右线隧道开挖完成时,最大水平位移为 7.16mm,此时左线隧道最大水平位移为 6.33mm。综上所述,右线隧道开挖过程中左线隧道水平位移基本保持不变,表明右线隧道施工影响较小。

### 3.5 地表沉降

曲线隧道下穿引起的地表沉降如图 10 所示。由图 10 可知,随着隧道开挖的进行,地表沉降和受



a 左线隧道开挖45m



b 左线隧道开挖完成



c 右线隧道开挖45m



d 右线隧道开挖完成

图5 隧道施工引起的车站底板水平位移云图(单位:mm)

Fig. 5 Station floor horizontal displacement cloud map due to tunnel construction (unit: mm)

影响范围逐渐增大,双线隧道开挖完成后地表沉降存在叠加效应,地表最大沉降位于左、右线隧道中心;车站范围内的地表沉降变形明显小于其他区域,地表沉降在横向上形成沉降槽,在纵向上由于底板的存在呈中间小、两端大的分布特点,主要分布在下穿隧道上方。新建双线隧道下穿施工引起的地表沉降主要影响范围为双线隧道中心两侧

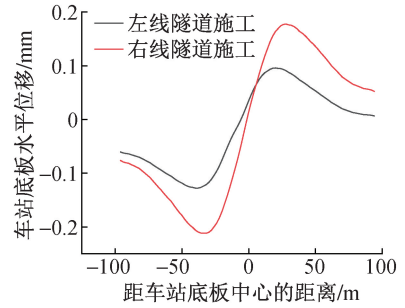
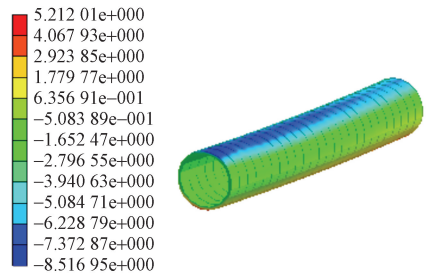
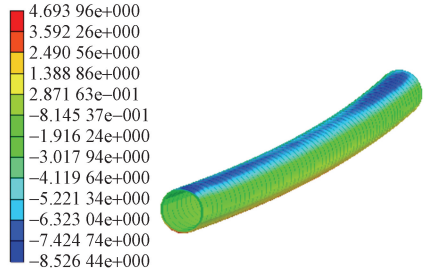


图6 不同位置处车站底板水平位移曲线

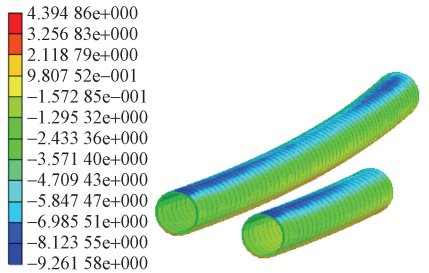
Fig. 6 Station floor horizontal displacement curves at different locations



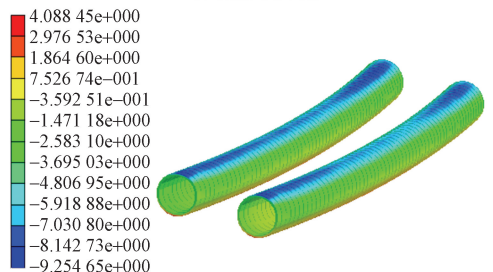
a 左线隧道开挖45m



b 左线隧道开挖完成



c 右线隧道开挖45m



d 右线隧道开挖完成

图7 新建隧道竖向位移云图(单位:mm)

Fig. 7 Vertical displacement cloud map of the new constructed tunnel (unit: mm)

25m,与车站底板沉降区域基本一致。

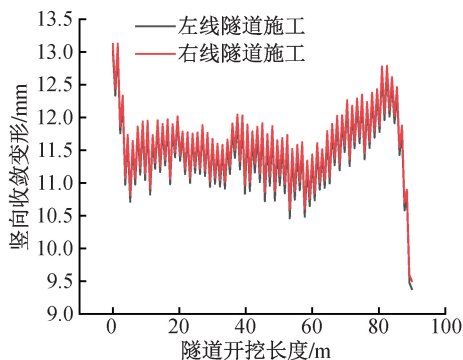


图8 隧道竖向收敛变形曲线

Fig. 8 Vertical convergence deformation curves of the tunnels

#### 4 下穿既有车站施工控制措施

隧道近接施工位移控制限值如表2所示,对比数值计算结果可知,本工程双线隧道施工引起的结构变形小于控制限值,结构变形处于安全范围内。考虑到近接施工的复杂性,施工时仍需采取必要的变形控制措施,以减小近接施工带来的影响。

表2 隧道近接施工位移控制限值

Table 2 Tunnel proximity construction displacement control values

项目	预警值/ mm	报警值/ mm	控制值/ mm
车站底板水平位移	0.62 (0.10%D)	0.93 (0.15%D)	1.24 (0.20%D)
车站底板竖向位移	12	16	25
隧道拱顶沉降	15	15	30
隧道拱底隆起	15	15	30
地表沉降	15	20	30

1) 现场施工时为确保盾构机能够顺利下穿既有车站,下穿前可对既有车站下部土体进行加固,增强土体承载力,使加固体强度达到要求。本文数值计算时假设土体预先进行了加固处理,其弹性模量和抗剪强度有所提高。

2) 曲线隧道施工时盾构机需增大外侧推力,以减小内侧推力产生的横向力,因此需设置合理的内外侧推力,减小对周围土体的扰动。

3) 盾构隧道管片注浆压力是重要考虑因素之一,隧道下穿施工过程中及时做好同步注浆,减少因超挖带来的土层损失。另外,注浆体对隧道管片和盾构机盾壳的压力不可忽视,应保持注浆量均衡,为保证注浆效果,本文设置的注浆压力为150kPa。

#### 5 结语

1) 隧道下穿会引起地铁车站底板沉降且存在叠加影响,底板中心沉降先小幅度增大后快速增大

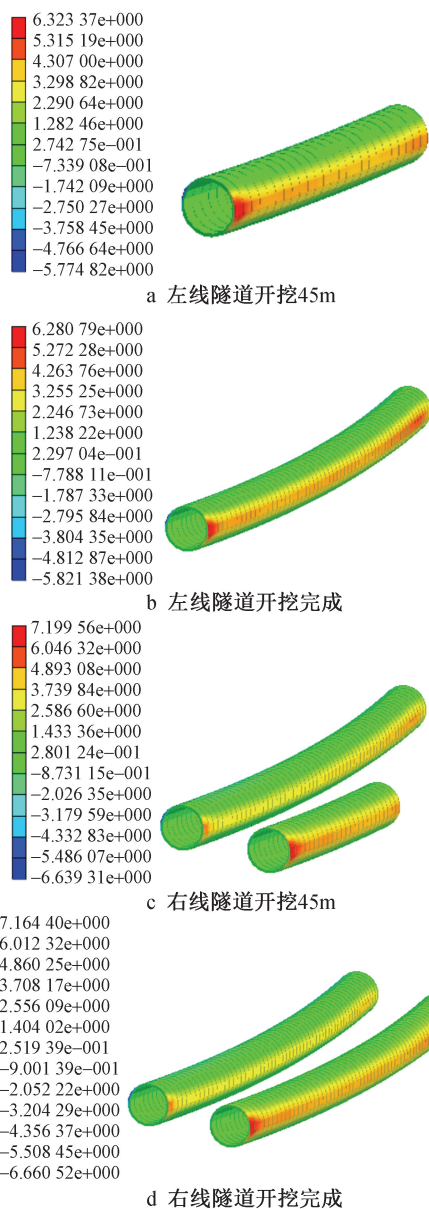


图9 新建隧道水平位移云图(单位:mm)

Fig. 9 Horizontal displacement cloud map of the new constructed tunnel (unit: mm)

最后趋于平稳,并在横向形成沉降槽。随着右线隧道的开挖,车站底板最大沉降所处位置逐渐移至两隧道中心。

2) 左线隧道开挖完成时,由于车站底板的存在,使竖向收敛变形受到了抑制,呈中间小、两端大的分布特点。左、右线隧道净距为 $2D$ 时,曲线隧道结构自身变形受相邻隧道施工的影响较小。

3) 曲线隧道下穿车站施工引起的地表沉降变形主要集中在双线隧道中心两侧25m范围内。地表沉降在横向上形成沉降槽,在纵向上由于底板的存在呈中间小、两端大的分布特点。

4) 数值计算结果表明,在采取必要的变形控制

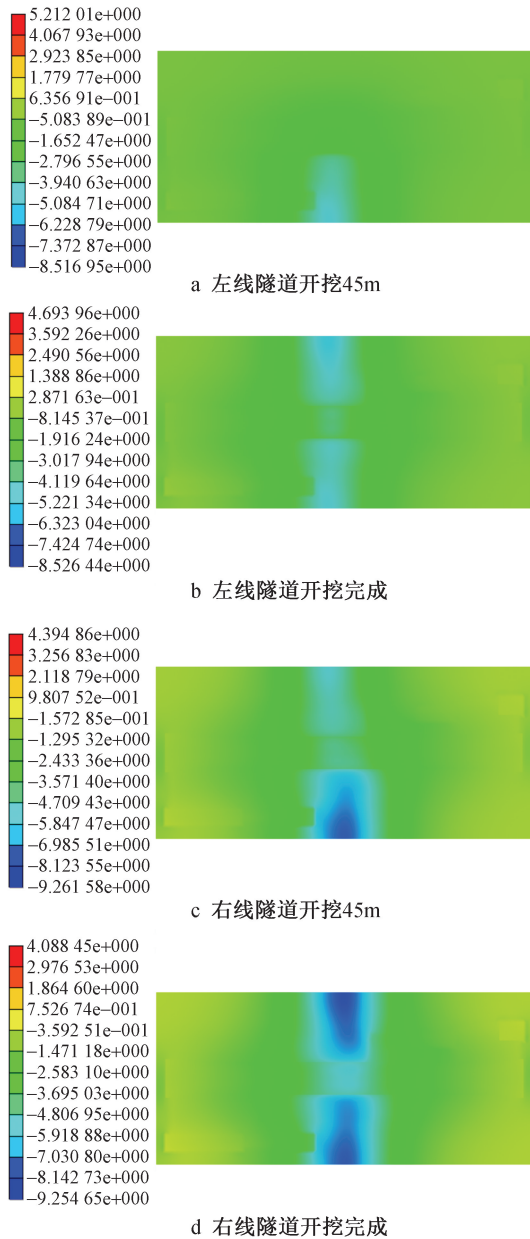


图 10 地表沉降云图(单位:mm)

Fig. 10 Ground surface settlement cloud map(unit: mm)

措施情况下,曲线隧道施工引起的结构变形小于控制限值,结构变形处于安全范围内。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 叶青荣. 邻近基坑等复杂环境下小曲率盾构隧道开挖影响研究进展[J]. 施工技术, 2024, 53(16):11-20.  
YE Q R. Research progress on influence of small curvature shield tunnel excavation in complex environments such as adjacent foundation excavation [ J ]. Construction technology, 2024, 53 ( 16 ): 11-20.
- [ 2 ] 苗壮. 雅万高铁大直径盾构隧道下穿轻轨施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(16): 92-94,127.  
MIAO Z. Construction technology of large-diameter shield tunnel underpassing light rail of Jakarta-Bandung High-speed Railway [ J ]. Construction technology, 2020, 49( 16 ): 92-94,127.

- [ 3 ] 邓海鹏,丁祖德,李兴龙. 盾构隧道下穿多股铁路影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1):130-135.  
DENG H P, DING Z D, LI X L. Analysis on influence of shield tunnel under cross multiple railway lines [ J ]. Construction technology, 2024,53( 1 ):130-135.
- [ 4 ] 杨陈. 基于 Midas-GTS NX 的新建地铁隧道施工对既有地铁车站影响的研究[J]. 四川水泥, 2021, 2(2): 166-167.  
YANG C. Study on impact of the construction for a new metro tunnel on an existing metro station based on Midas-GTS NX [ J ]. Sichuan cement, 2021, 2( 2 ): 166-167.
- [ 5 ] 陈杰,汤德芸,孟宪忠,等. 盾构机穿越小曲线半径隧道施工技术[J]. 建筑施工, 2014(10): 1187-1188,1194.  
CHEN J, TANG D Y, MENG X Z, et al. Tunnel construction technology for TBM passing through small radius curve tunnel [ J ]. Building construction, 2014( 10 ): 1187-1188,1194.
- [ 6 ] 贾苗. 软硬交互地层盾构长距离小半径曲线穿越地面复杂环境成套施工关键技术研究——以杭州机场轨道快线 SGJC-1 标为例[J]. 中国建材科技, 2021(1): 103-105.  
JIA Z. Research on key technology of shield tunneling in soft and hard interactive strata with long distance and small radius curve crossing complex ground environment: Taking Hangzhou Airport Rail Express SGJC-1 as an example [ J ]. China building materials science & technology, 2021( 1 ): 103-105.
- [ 7 ] 姜国栋. 复合地层曲线盾构隧道施工的周边环境效应研究 [ D ]. 南京: 东南大学, 2020.  
JIANG G D. Research on surrounding environmental effects of the curved shield tunnel construction in compound stratum [ D ]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [ 8 ] 刘博峰,李春芳,谢春蓉. 大坡度并小半径曲线隧道盾构下穿建筑物沉降预测及控制研究[J]. 建筑机械, 2022(6): 48-54.  
LIU B F, LI C F, XIE C J. Study on settlement prediction and control of shield tunneling through buildings with large slope and small radius curve [ J ]. Construction machinery, 2022 ( 6 ): 48-54.
- [ 9 ] 吴贤国,杨赛,田金科,等. 盾构近接施工对既有隧道影响参数分析及近接度分区研究[J]. 土木工程与管理学报, 2021(4): 96-109,114.  
WU X G, YANG S, TIAN J K, et al. Analysis on the influence of shield tunneling construction on proximity of existing tunnels and research on proximity zoning [ J ]. Journal of civil engineering and management, 2021( 4 ): 96-109,114.
- [ 10 ] 张利涛. 地铁隧道下穿施工对既有运营隧道的影响分析 [ J ]. 国防交通工程与技术, 2019, 17( 2 ): 29-32,28.  
ZHANG L T. Analysis of influence for construction of a subway-undercrossed tunnel on an existing tunnel in operation [ J ]. Traffic engineering and technology for national defence, 2019, 17 ( 2 ): 29-32,28.
- [ 11 ] LIN W, XIE D, ZHANG Z Z, et al. 3D discrete element method modelling of tunnel construction impact on an adjacent tunnel [ J ]. KSCE journal of civil engineering, 2020, 45 ( 5 ): 251-259.