

## 富水砂层地铁盾构区间机械法联络通道施工影响\*

杜明芳<sup>1</sup> 张 鹏<sup>1</sup> 易领兵<sup>2,3</sup> 任方毅<sup>2</sup> 邵 奇<sup>2,3</sup>  
肖中圣<sup>2,3</sup> 朱行通<sup>4</sup> 李俊昊<sup>5</sup>(1. 河南工业大学土木工程学院, 450001, 郑州; 2. 中国交通建设股份有限公司轨道交通分公司, 100088, 北京;  
3. 中交铁道设计研究总院有限公司, 100088, 北京; 4. 长春电子科技学院土木工程学院, 130114, 长春;  
5. 中国建筑第七工程局有限公司, 450001, 郑州)

**摘 要** [目的] 目前,富水砂层地铁盾构区间机械法联络通道施工对正线隧道及周围土体影响的研究较少,因此有必要对类似工程进行分析。[方法] 以某富水砂层地铁盾构区间机械法联络通道施工项目为例,采用 ABAQUS 有限元软件建立数值模型,对富水砂层中机械法联络通道施工的全过程进行模拟分析,研究机械法联络通道施工对正线隧道及周围土体的影响;将数值计算结果与实际工程监测数据进行对比,验证所提数值模型的可靠性。[结果及结论] 由机械法联络通道施工引起的沿正线隧道纵向和联络通道纵向的地面沉降曲线均呈 U 形,地面最大沉降值为 4.60 mm;机械法联络通道施工对正线隧道的变形影响,以竖向变形和沿正线隧道横向的水平变形为主,正线隧道竖向变形最大值为 1.08 mm,水平变形最大值为 1.28 mm;施工过程中,正线隧道的最大应力会随着联络通道洞门的破除而突然增大,施工完成时,正线隧道的最大应力值为 52.54 MPa。实际监测数据表明,拟合后的地面沉降监测数据与数值计算结果的变化趋势一致,验证了数值计算的可靠性。

**关键词** 地铁; 联络通道; 富水砂层; 机械法施工

**中图分类号** U455.43; TU431

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.07.015

### Impact of Metro Shield Interval Mechanical Method Connecting Passage Construction in Water-rich Sandy Stratum

DU Mingfang<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, YI Lingbing<sup>2,3</sup>,  
REN Fangyi<sup>2</sup>, SHAO Qi<sup>2,3</sup>, XIAO Zhongsheng<sup>2,3</sup>,  
ZHU Xingtong<sup>4</sup>, LI Junhao<sup>5</sup>

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, 450001, Zhengzhou, China; 2. China Transportation Construction Co., Ltd. Rail Transit Branch, 100088, Beijing, China; 3. China Jiaotong Railway Design and Research Institute Co., Ltd., 100088, Beijing, China; 4. College of Civil Engineering, Changchun Institute of Electronic Science and

Technology, 130114, Changchun, China; 5. China Construction Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., 450001, Zhengzhou, China)

**Abstract** [Objective] There is limited research on the impact of mechanical method connecting passage construction on mainline tunnels and surrounding soil of metro shield interval in water-rich sandy stratum. [Method] Taking a metro shield tunnel interval project with mechanical method connecting passage construction in water-rich sandy stratum as example, a numerical model is established using ABAQUS finite element software to simulate and analyze the entire process of this engineering. The effects of mechanical method connecting passage construction on mainline tunnels and surrounding soil are investigated. The calculation results are compared with actual engineering monitoring data to verify the reliability of the proposed numerical model. [Result & Conclusion] Land subsidence along the longitudinal direction of the mainline tunnel and connecting passage caused by mechanical method connecting passage construction exhibits a U-shaped curve, with a maximum land subsidence value of 4.60 mm. The effects of the construction on mainline tunnel deformation are mainly vertical deformation and horizontal deformation along the mainline tunnel. The maximum vertical deformation of the mainline tunnel is 1.08 mm, and the maximum horizontal deformation is 1.28 mm. During construction, the maximum stress in the mainline tunnel suddenly increases with the breakthrough of the connecting passage portal, reaching 52.54 MPa upon completion of the construction. Actual monitoring data show that the fitted land subsidence monitoring data aligns with the trend of numerical calculation results, validating the reliability of the numerical calculations.

**Key words** metro; connecting passage; water-rich sandy stratum; mechanical method construction

\* 河南省科技厅自然科学基金资助项目(162102210188);河南省建设科技协会科研开发项目(YJKJP-202403)

目前,已有较多学者通过现场监测、足尺试验、数值模拟等不同方法对机械法联络通道施工进行了相关研究<sup>[1-8]</sup>,而针对富水砂层地铁盾构区间机械法联络通道施工对正线隧道及周围土体影响的研究较少。鉴于此,本文以某富水砂层地铁盾构区间机械法联络通道施工项目为例,采用 ABAQUS 有限元软件对施工过程进行模拟,总结富水砂层机械法联络通道施工对地面沉降及正线隧道的影响,并将施工监测数据与数值计算结果进行对比,以验证数值计算的准确性。本文研究可为后续类似工程提供工程经验与技术指导。

## 1 工程背景概况

新建地铁盾构区间隧道埋深约为 10.00 ~ 16.50 m,区间线间距为 13.00 m,衬砌管片内径为 5.50 m,壁厚为 0.35 m,外径为 6.20 m,环宽为 1.50 m。区间隧道设置一处联络通道。

联络通道采用机械法顶管施工,正线隧道开口处特殊衬砌环示意图如图 1 所示。联络通道穿越地层主要为富水细砂层,衬砌厚度为 0.25 m,外径为 3.26 m,环宽为 0.90 m。联络通道地质剖面示意图如图 2 所示。

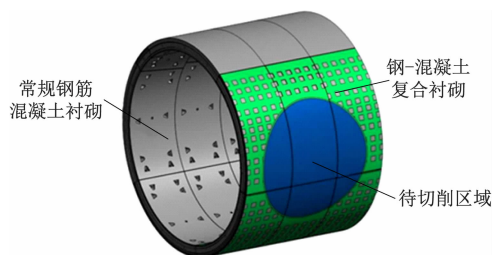


图 1 正线隧道开口处特殊衬砌环示意图

Fig. 1 Diagram of special lining ring at mainline tunnel opening

## 2 建立有限元计算模型

本文采用 ABAQUS 有限元软件对整个施工过程进行模拟,结合本工程实际勘察情况及计算需求,确定模型的整体几何尺寸为 60 m( $x$  轴方向)  $\times$  30 m( $y$  轴方向)  $\times$  60 m( $z$  轴方向)。模型  $x$  轴方向为正线隧道横向方向,同时为联络通道纵向方向;模型  $y$  轴方向为竖直方向;模型  $z$  轴方向为正线隧道纵向方向。计算模型中,土体和隧道均采用实体

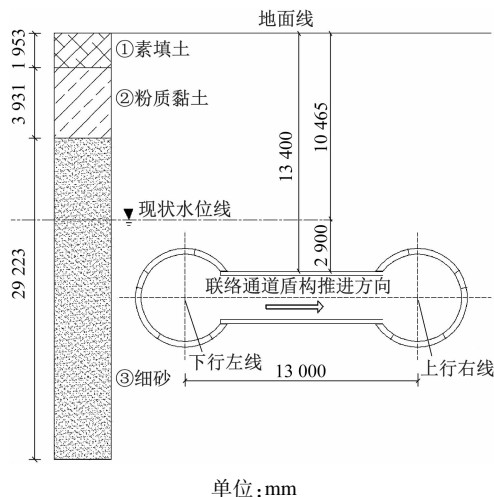


图 2 联络通道地质剖面示意图

Fig. 2 Diagram of connecting passage geological profile

单元模拟,土体采用摩尔-库伦本构模型模拟,隧道衬砌采用线弹性本构模型模拟。计算模型采用位移边界条件,模型四周限制水平位移,模型底部限制竖向位移,顶部为自由面,地面超载设置为 20 kPa。数值计算模型示意图如图 3 所示,数值计算模型的主要力学性能参数如表 1 所示。

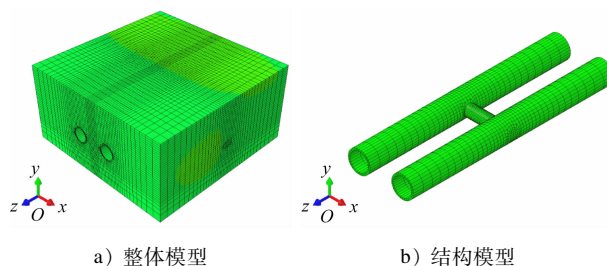


图 3 数值计算模型示意图

Fig. 3 Diagram of numerical calculation model

数值计算模型共分为 14 个施工步,根据机械法联络通道顶管施工的特点,将整个施工过程做如下划分:①工况 1(施工步 1)——以区间正线隧道施工完毕为初始状态,初始地应力计算至平衡状态,初始位移清零;②工况 2(施工步 2)——联络通道始发端台车支撑完成,顶管机安装完毕,准备开始顶进施工;③工况 3(施工步 3)——顶管机开始顶进施工,联络通道始发端洞门破除;④工况 4(施工步 4 ~ 10)——顶管机顶进至接收端,联络通道接收端洞门破除;⑤工况 5(施工步 11 ~ 13)——顶管机继续顶进至指定位置,联络通道施工作业完成;⑥工况 6(施工步 14)——两端隧道台车支撑卸载完成。

表 1 数值计算模型主要力学性能参数

Tab.1 Main mechanical property parameters of numerical calculation model

项目	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
素填土	17.1	10	0.3	10	15
粉质黏土	18.6	20	0.3	22	13
细砂	18.8	80	0.3	2	30
普通衬砌管片	25.0	$3.45 \times 10^4$	0.2		
钢-混凝土复合管片	32.0	$6.00 \times 10^4$	0.2		
玻璃纤维混凝土	24.0	$3.25 \times 10^4$	0.2		

### 3 计算结果分析

#### 3.1 地面沉降分析

由机械法联络通道施工引起的正线隧道及联络通道纵向地面沉降曲线如图 4 所示。由图 4 a) 可知:施工完成后,沿联络通道纵向的地面沉降曲线基本呈 U 形,沉降最大值为 4.60 mm,位于联络通道中心正上方处。由图 4 b) 可知:由于顶管机外机半径与管片半径存在差异,顶管机离开后,土体由于失去支撑而产生沉降变形;同时,由于顶管机顶进过程中联络通道管片与土体之间的摩擦拖拽作

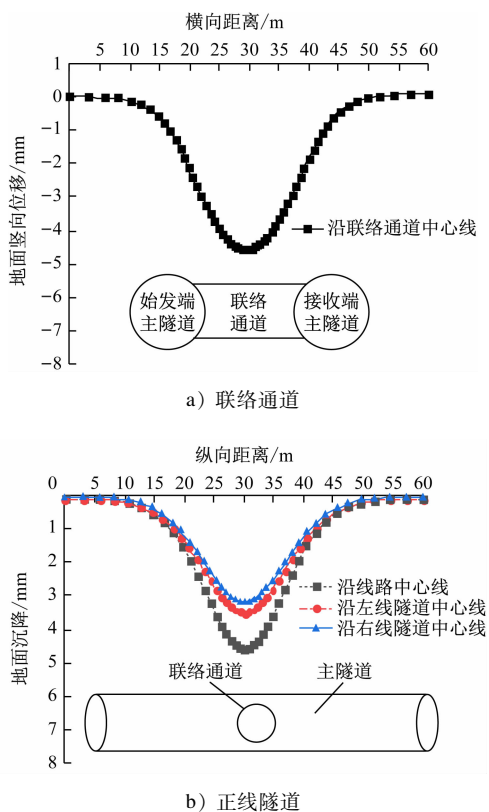


图 4 正线隧道及联络通道纵向地面沉降曲线

Fig.4 Longitudinal land subsidence curves of mainline tunnel and connecting passage

用,施工完成时始发端正线隧道正上方的土体变形大于接收端正线隧道正上方的土体变形;施工完成时,联络通道中心正上方处的土体竖向变形最大,沉降最大值为 4.60 mm,始发端和接收端正线隧道正上方土体沉降最大值分别为 3.52 mm 和 3.20 mm。

#### 3.2 正线隧道变形分析

##### 3.2.1 横向水平变形

机械法联络通道施工完成时,始发端和接收端正线隧道横向水平变形云图如图 5 所示。由图 5 可知:始发端和接收端正线隧道横向水平变形最大值分别为 1.28 mm 和 0.93 mm。由于开洞侧管片顶部和底部土体的沉降和隆起对开洞侧管片产生的挤压作用,使得正线隧道横向最大变形发生在正线隧道开洞口拱腰处。

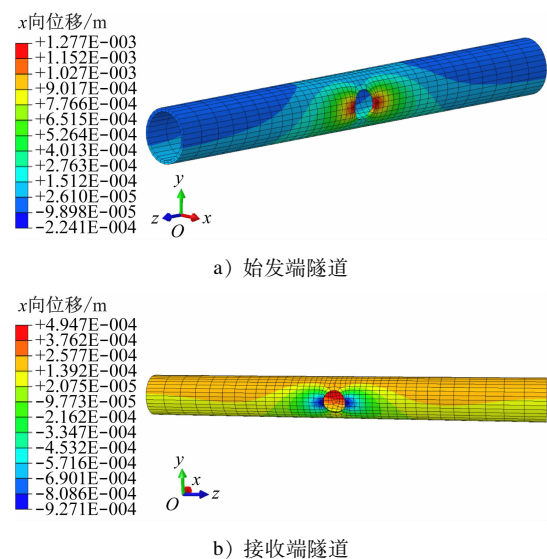


图 5 机械法联络通道施工完成时的始发端和接收端正线隧道横向水平变形云图

Fig.5 Horizontal deformation nephogram of mainline tunnel originating and receiving ends upon completion of mechanical method connecting passage construction

### 3.2.2 纵向水平变形

机械法联络通道施工完成时,始发端和接收端正线隧道纵向水平变形云图如图 6 所示。由图 6 可知:始发端和接收端正线隧道纵向水平变形最大值分别为 0.26 mm 和 0.25 mm;最大变形均发生在正线隧道开洞口拱腰处。

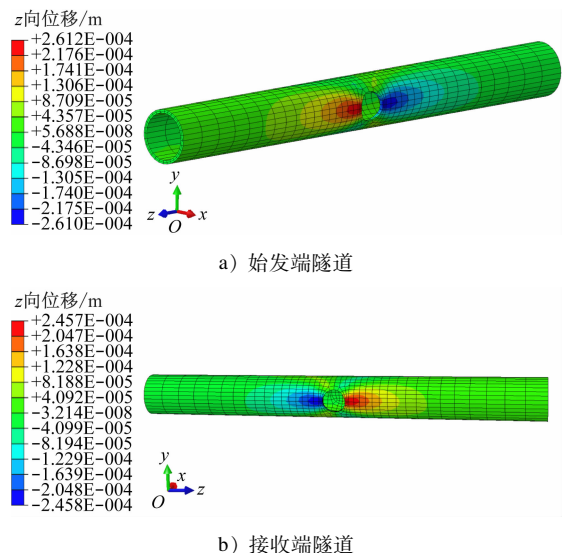


图 6 机械法联络通道施工完成时的始发端和接收端正线隧道纵向水平变形云图

Fig. 6 Longitudinal deformation nephogram of mainline tunnel originating and receiving ends upon completion of mechanical method connecting passage construction

### 3.2.3 竖向变形分析

机械法联络通道施工完成时,始发端和接收端正线隧道竖向变形云图如图 7 所示。由图 7 可知:始发端正线隧道最大沉降值和隆起值分别为 0.83 mm 和 1.08 mm;接收端正线隧道最大沉降值和隆起值分别为 0.87 mm 和 1.02 mm。

### 3.3 正线隧道应力分析

不同施工步骤下的正线隧道最大主应力曲线如图 8 所示。由图 8 可知:正线隧道的最大应力随着联络通道洞门的破除而突然增大;施工完成后,正线隧道的应力最大值为 52.54 MPa。

## 4 模拟结果与实际监测结果对比分析

为节约篇幅,选取线路中心线正上方地面沉降实际监测数据与数值模拟结果进行对比,如图 9 所示。由图 9 可知:施工完成时,地面沉降最大值为 4.00 mm;实际监测曲线与数值模拟的沉降曲线变化趋势一致;实际监测值基本小于数值模拟结果,

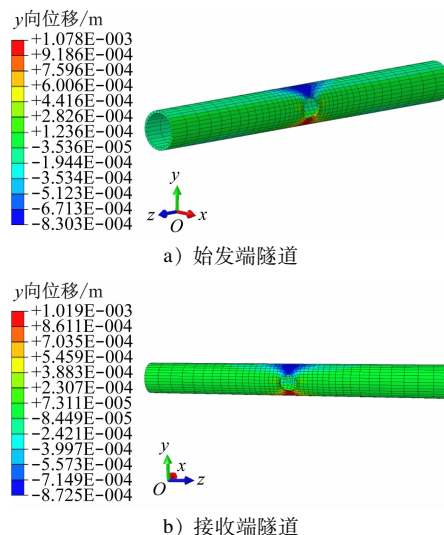


图 7 机械法联络通道施工完成时的始发端和接收端正线隧道竖向变形云图

Fig. 7 Vertical deformation nephogram of mainline tunnel originating and receiving ends upon completion of mechanical method connecting passage construction

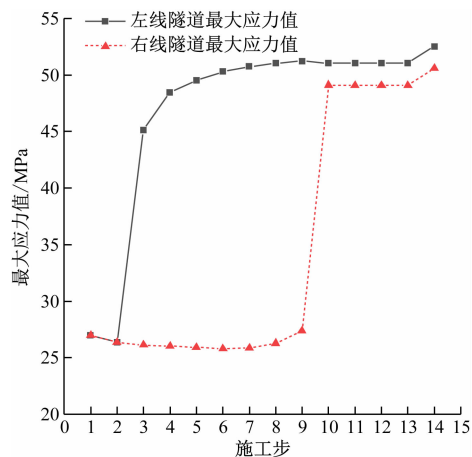


图 8 不同施工步骤下的正线隧道最大主应力曲线

Fig. 8 Maximum principal stress curves of mainline tunnel at different construction steps

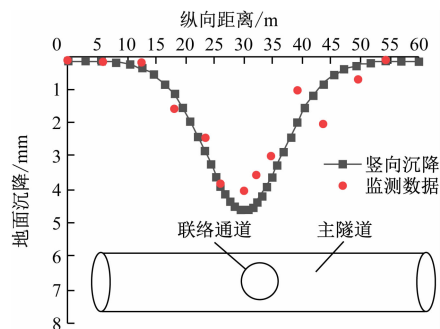


图 9 地面沉降模拟结果与实际监测数据对比

Fig. 9 Comparison between land subsidence simulation results and actual monitoring data



两者沉降最大值发生位置一致。由此可知,本文所提数值模拟方法具备较好的准确性和可实施性。

## 5 结论

1) 机械法联络通道施工引起的沿正线隧道纵向和联络通道纵向的地面沉降曲线均呈 U 形。数值计算结果显示,地面最大沉降值为 4.60 mm,位于联络通道中心正上方处。施工监测数据显示,施工完成时的地面沉降最大值为 4.00 mm,发生位置同样在联络通道中心正上方处。

2) 机械法联络通道施工对正线隧道的变形影响以竖向变形和横向的水平变形为主。正线隧道水平变形最大值为 1.28 mm,竖向变形最大值为 1.08 mm。

3) 施工过程中,正线隧道的最大应力随着联络通道洞门的破除而突然增大。施工完成时,正线隧道的最大应力值为 52.54 MPa。

## 参考文献

- [1] 朱瑶宏,高一民,董子博,等. 盾构法 T 接隧道结构受力现场试验研究:以宁波轨道交通 3 号线联络通道为例[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(11):1759.
- ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Field test on structural mechanism of T-connected shield tunnel: a case study of connecting passage on Ningbo Metro Line No. 3[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1759.
- [2] 吴彩霞. 机械法联络通道特殊管片接缝的变形规律[D]. 宁波:宁波大学,2020.
- WU Caixia. Deformation law of the joint on special segment for mechanical connection channel[D]. Ningbo: Ningbo University, 2020.
- [3] 梅清俊,朱瑶宏,马永政,等. 滨海软土地层机械法联络通道施工影响监测分析[J]. 宁波大学学报(理工版),2021,34(2):73.
- MEI Qingjun, ZHU Yaohong, MA Yongzheng, et al. Monitoring and analysis of the influence of mechanical connecting passage construction in coastal soft soil layer[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2021, 34(2): 73.
- [4] 梅清俊. 机械法联络通道施工扰动影响及注浆措施效果研究[D]. 宁波:宁波大学,2021.
- MEI Qingjun. Study on construction disturbance influence and grouting measures effect of mechanical connecting passage[D]. Ningbo: Ningbo University, 2021.
- [5] 杨佳栋,郑荣跃,郑诗怡,等. 机械法联络通道 T 接部位接收端切削模型试验研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(3):12.
- YANG Jiadong, ZHENG Rongyue, ZHENG Shiyi, et al. Experimental study on cutting model of receiving end of T-joint part of mechanical connection channels[J]. Construction Technology, 2022, 51(3): 12.
- [6] 胡威,黄强,李海波,等. 机械法联络通道施工对 T 接部位沉降影响的实测与数值分析[J]. 施工技术(中英文),2022,51(13):68.
- HU Wei, HUANG Qiang, LI Haibo, et al. Actual measurement and numerical analysis of influence of mechanical connection channel construction on settlement of T-junction[J]. Construction Technology, 2022, 51(13): 68.
- [7] 张恒忠,舒卫建,孟绥宝,等. 海底隧道联络通道机械法施工的结构稳定性分析[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(9):181.
- ZHANG Hengzhong, SHU Weijian, MENG Suibao, et al. Structure stability analysis of subsea tunnel link passage constructed with shield method[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 181.
- [8] 朱瑶宏,高一民,柳献. 深埋机械法联络通道主隧道结构响应研究[J]. 现代隧道技术,2022,59(5):144.
- ZHU Yaohong, GAO Yimin, LIU Xian. Study on the structural response of the main tunnel with deep cross passages built by the mechanical method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(5): 144.

· 收稿日期:2023-08-28 修回日期:2023-11-01 出版日期:2024-07-10  
Received:2023-08-28 Revised:2023-11-01 Published:2024-07-10  
· 第一作者:杜明芳,教授,1507194756@qq.com  
通信作者:易领兵,高级工程师,877800536@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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821