

地铁盾构下穿既有铁路框架桥的变形与动力响应^{*}汤新辉¹ 赖咸根² 刘维正³ 卢世德² 卢细兵²(1. 长沙市建设工程质量安全监督站, 410023, 长沙; 2. 中建五局土木工程有限公司, 410004, 长沙;
3. 中南大学土木工程学院, 410075, 长沙)

摘 要 [目的] 目前, 对于下穿盾构与上部车辆-轨道结构相互影响的研究较少。为确保新建地铁盾构施工和既有线路运行安全, 有必要分析地铁盾构下穿施工扰动, 以及列车荷载对既有结构的变形特性及动力响应的影响规律。[方法] 结合长沙地铁 6 号线盾构隧道下穿既有京广铁路框架桥工程, 建立盾构下穿铁路框架桥的开挖子模型和车辆-轨道动力耦合子模型, 采用数值软件进行联合仿真, 针对盾构开挖进程、注浆压力、土仓压力、地层加固、列车速度等不同工况, 研究地层、框架桥、轨道结构的变形, 并总结车辆-轨道动力响应变化规律。[结果及结论] 盾构左线先行开挖导致的轨道最大沉降约为 3.0 mm, 右线开挖后最大沉降发生位置向左右线中心处偏移, 最大沉降达 5.4 mm, 先行盾构引起的轨道沉降略大于后行开挖的沉降; 车体的振动加速度和轮轨作用力随车速的提高而增大, 轮轨垂向力受列车速度的影响大于轮轨横向力受列车速度的影响; 振动位移、车体振动加速度、轮轨作用力及脱轨系数均随盾构开挖的不断推进逐渐增大, 但增大幅度不大。与未采取措施开挖时相比, 提高注浆压力、提高土仓压力和采取地层加固措施后, 钢轨垂向振动位移分别减小了 14.7%、11.5%、44.1%。在盾构施工过程中, 应采取地层加固措施, 以保证盾构顺利施工和铁路正常运行。

关键词 地铁盾构; 铁路框架桥; 下穿; 变形; 动力响应; 数值仿真

中图分类号 U455.43; TU433; TU435

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.04.024

Deformation and Dynamic Response Analysis of Metro Shield Tunnel Under-Crossing Existing Railway Frame Bridge

TANG Xinhui¹, LAI Xiangen², LIU Weizheng³, LU Shide², LU Xibing²

(1. Changsha Construction Project Quality and Safety Supervision Station, 410023, Changsha, China; 2. CCFEB Civil Engineering Co., Ltd., 410004, Changsha, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China)

Abstract [Objective] At present, there are few studies on the interaction between the under-crossing shield and the upper vehicle-track structure. In order to ensure the safety of new metro shield construction and existing line operation, it is necessary to analyze the influence law of metro shield construction disturbance and train load on the deformation characteristics and dynamic response of the existing structure. [Method] Based on the Changsha Metro Line 6 shield tunnel project under-crossing the existing Beijing-Guangzhou Railway frame bridge, an excavation submodel of the shield tunnel under-crossing railway frame bridge and a vehicle-track dynamic coupling submodel are established. Numerical software is adopted for joint simulation to study the deformation of strata, frame bridge and track structure under different working conditions such as shield excavation process, grouting pressure, soil chamber pressure, stratum reinforcement, train speed, etc., so as to summarize the changing laws of vehicle-track dynamic response. [Result & Conclusion] The maximum settlement caused by advancing excavation of the shield left line is about 3.0 mm. After the excavation of the right line, the maximum settlement occurs at the position offset towards the center of the left and right lines, and the maximum settlement value reaches 5.4 mm. The track settlement caused by the advancing shield tunnel is slightly greater than the settlement caused by the following excavation; the car body vibration acceleration and the wheel-rail force increase when the train speeds up, and the wheel-rail vertical force is more affected by the train speed than by the wheel-rail lateral force; the vibration displacement, the car body vibration acceleration, the wheel-rail force and the derailment coefficient all gradually increase with the continuous advancement of the shield excavation, but not by much; after increasing grouting pressure, soil chamber pressure and taking ground reinforcement measures, the vertical rail vibration displacement is reduced by 14.7%, 11.5% and 44.1% respectively compared with the excavation without taking measures. During the shield construction process, ground reinforcement

^{*} 湖南省住房和城乡建设厅科学技术计划项目(KY202108)

measures should be taken for the smooth shield tunnel construction and normal railway operation.

Key words metro shield tunnel; railway frame bridge; under-crossing; deformation; dynamic response; numerical simulation

随着我国地铁建设的快速发展,地铁盾构隧道常常下穿既有铁路结构^[1]。盾构下穿既有铁路框架桥时,新建隧道的施工必然会引起地层扰动,使既有铁路基础产生附加变形,导致轨道结构不平整。为确保新建地铁盾构施工和既有线路运行安全,有必要分析地铁盾构下穿既有铁路结构的变形与动力响应。

目前的盾构下穿既有铁路结构研究大多采用数值模拟法。文献[2-5]建立三维数值模型,讨论了盾构下穿铁路框架桥时路基与车站的沉降及应力变化规律,研究了不同施工参数下的纵横向沉降及不均匀沉降特点,提出相应的施工控制措施。在车辆-轨道动力响应研究方面,文献[6]提出了完整的车辆-轨道耦合动力学模型,为大多学者分析车辆-轨道动力相互作用提供了理论基础。对于车辆-轨道-桥梁动力相互作用的强度和稳定性问题方面,我国学者做了大量研究。文献[7]基于能量变分法导出车辆-轨道-路基动力有限元耦合矩阵,对车辆-轨道-路基的垂向及横向动力特性进行了研究;文献[8]建立车辆-轨道-路基耦合动力学模型,分析不同列车轴重下路基面的动应力分布特征;文献[9-11]针对隧道沉降、桥梁变形等方面分析了盾构下穿对高铁轨道结构变形特征及其变化规律的影响。但目前,对于下穿盾构与上部车辆-轨道结构相互影响的研究较少。

本文基于既有文献研究,以长沙地铁6号线下穿京广(北京—广州)铁路框架桥为依托,采用有限元软件进行联合仿真,建立车辆-轨道-基础-盾构相互作用动力耦合模型,揭示地层、框架桥和轨道结构的变形及动力响应规律。

1 工程概况

长沙地铁6号线朝阳村站—芙蓉区政府站区间盾构隧道下穿京广铁路框架桥,盾构外径为6.40 m;管片外径为6.20 m,内径为5.50 m,厚度为0.35 m,环宽为1.50 m。京广铁路框架桥为四孔钢筋混凝土结构,孔径依次为11.00 m、8.00 m、8.00 m、

11.00 m,净高依次为4.90 m、5.00 m、5.00 m和5.30 m,如图1所示。

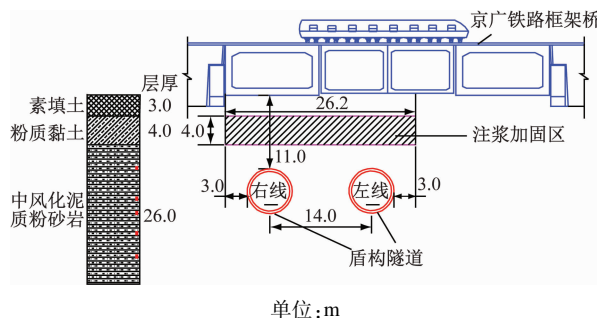


图1 地铁盾构隧道与框架桥位置关系

Fig. 1 Position relationship between metro shield tunnel and frame bridge

隧道下穿地层主要为素填土、粉质黏土、中风化泥质粉砂岩,隧道全断面位于中风化泥质粉砂岩中。地下水常见水位为1.70~6.50 m,以孔隙潜水为主。

2 联合仿真模型建立

采用ABAQUS有限元软件建立盾构-地层-铁路框架桥的盾构开挖子模型,并采用MATLAB数值分析软件建立车辆-轨道动力耦合子模型。

2.1 盾构-地层-框架桥子模型

以距离框架桥左、右各30.0 m处作为模型的横向边界,取15个开挖步作为模型的纵向边界,每个开挖步为4环管片,开挖总长度为90.0 m。所建模型尺寸为104.6 m(x向)×90.0 m(y向)×40.0 m(z向),如图2所示。

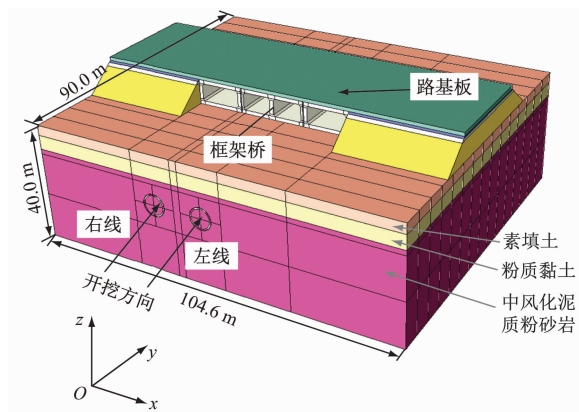


图2 盾构下穿铁路框架桥子模型

Fig. 2 Sub-model of shield tunnel under-crossing railway frame bridge

2.2 车辆-轨道动力耦合子模型

车辆-轨道动力耦合子模型包括车辆子模型及

轨道子模型,如图3所示。车辆模型为具有二系悬挂的四轴客车模型。根据京广铁路实际情况,轨道模型为有砟轨道,并采用伯努利-欧拉梁单元模拟钢轨和轨枕,以离散的质量块模拟道砟层,通过线性弹簧-阻尼单元连接不同单元。

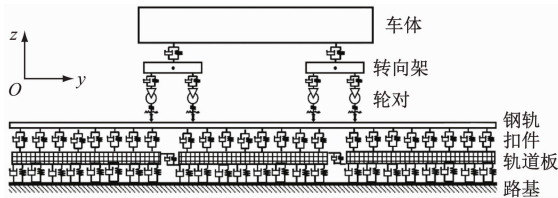


图3 车辆-轨道动力耦合子模型

Fig.3 Vehicle-track dynamic coupling sub-model

车辆-轨道动力相互作用的动力学运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_V & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_V \\ \ddot{\mathbf{X}}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{VV} & \mathbf{C}_{VT} \\ \mathbf{C}_{TV} & \mathbf{C}_{TT} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_V \\ \dot{\mathbf{X}}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{VV} & \mathbf{K}_{VT} \\ \mathbf{K}_{TV} & \mathbf{K}_{TT} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_V \\ \mathbf{X}_T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_V \\ \mathbf{F}_T \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_G = \sum_i \sum_k [\cdots 0 \cdots W_{i,k} \cdots 0 \cdots]^T \quad (2)$$

式中:

\mathbf{M}_V 、 \mathbf{M}_T ——列车质量矩阵、矩阵轨道系统质量矩阵;

\mathbf{C}_{VV} 、 \mathbf{C}_{VT} 、 \mathbf{C}_{TT} ——列车自身、列车与轨道之间、轨道自身的阻尼矩阵;

\mathbf{K}_{VV} 、 \mathbf{K}_{VT} 、 \mathbf{K}_{TT} ——列车自身、列车与轨道之间、轨道自身的刚度矩阵;

\mathbf{F}_G 、 \mathbf{F}_V 、 \mathbf{F}_T ——列车轴重列阵、车辆系统荷载列阵、轨道系统荷载列阵;

$\ddot{\mathbf{X}}_V$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_V$ 、 \mathbf{X}_V ——车辆系统加速度向量、车辆系统速度向量和车辆系统位移向量;

$\ddot{\mathbf{X}}_T$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_T$ 、 \mathbf{X}_T ——轨道系统加速度向量、轨道系统速度向量和轨道系统位移向量;

$W_{i,k}$ ——列车第*i*节车辆第*k*位轮对的轴重。

2.3 模拟计算工况

为研究盾构开挖引起的车辆-轨道动力响应影响,本文设置了10种不同的工况进行分析。其中工况10为针对双线隧道外边缘3 m、框架桥下方4 m范围内的粉质黏土层注浆加固。模拟计算工况如表1所示。

表1 模拟计算工况

Tab.1 Simulation calculation of the working conditions

工况	加固情况	注浆压力/MPa	土仓压力/MPa	列车运行速度/(km/h)	开挖位置情况
工况1	无	无	无	50	未开挖
工况2	无	无	无	160	未开挖
工况3	无	0.10	0.10	50	右线贯通
工况4	无	0.10	0.10	160	右线贯通
工况5	无	0.10	0.10	160	左线一半
工况6	无	0.10	0.10	160	左线贯通
工况7	无	0.10	0.10	160	右线一半
工况8	无	0.30	0.10	160	右线贯通
工况9	无	0.10	0.14	160	右线贯通
工况10	地层注浆	0.10	0.10	160	右线贯通

3 模拟结果分析

3.1 盾构开挖引起的结构变形

3.1.1 地层变形

不同注浆压力条件下,横截面的地面沉降曲线见图4。地面沉降随着注浆压力的逐渐提升而不断减小。

图5是不同土仓压力条件下地面纵向沉降曲线。地面隆起区域主要集中在开挖面前方20 m范

围内。随着土仓压力的增加,地面隆起出现得越早则隆起量越大。在本文依托工程的实际施工过程中,土仓压力一般控制在0.13~0.16 MPa。

3.1.2 框架桥变形

图6为框架桥沉降随盾构开挖的变化曲线。其中, y_1 、 y_2 为盾构左、右线开挖面距框架桥测点的纵向距离。由图6可见:左线开挖引起的最大沉降为3.0 mm,发生在左线隧道正上方;随着盾构右线的开挖,框架桥沉降不断向右线偏移,且最大沉降为

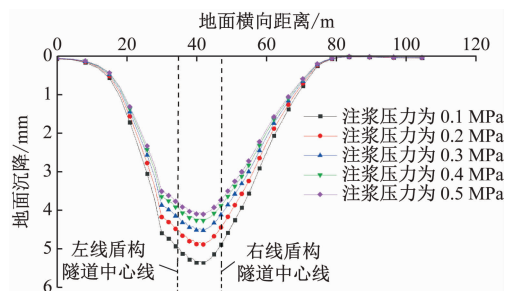


图4 不同注浆压力下横截面的地面沉降曲线

Fig. 4 Transverse cross-section land subsidence curves under different grouting pressures

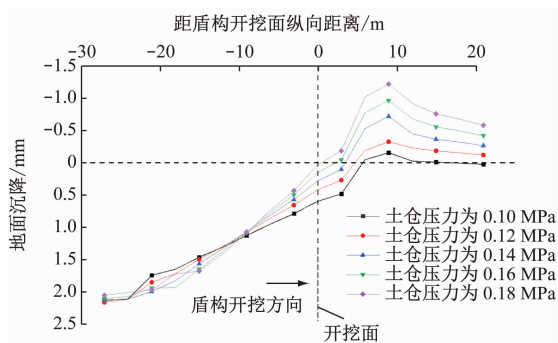


图5 不同土仓压力下地面纵向沉降曲线

Fig. 5 Longitudinal land subsidence curves under different soil chamber pressures

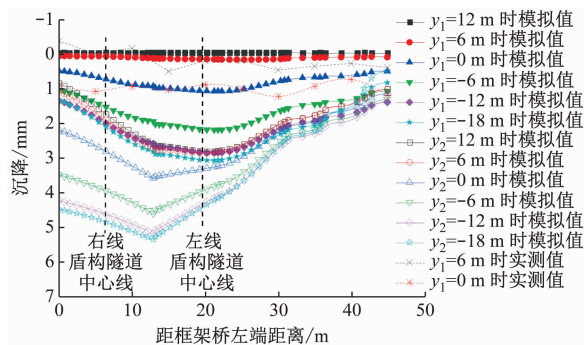


图6 框架桥横断面沉降曲线

Fig. 6 Transverse cross-section settlement curves of frame bridge

5.4 mm,出现在双线中心线正上方;左线施工引起的框架桥沉降略大于右线施工引起的框架桥沉降。

3.1.3 轨道变形

京广铁路的轨道沉降曲线如图7所示。由图7可见,左线开挖后轨道沉降最大值为3.0 mm,右线开挖后,最大沉降发生位置向双线中心处偏移,最大值达5.4 mm,左线开挖引起的轨道沉降略大于右线。有限元分析结果与实测数据变化规律基本一致。

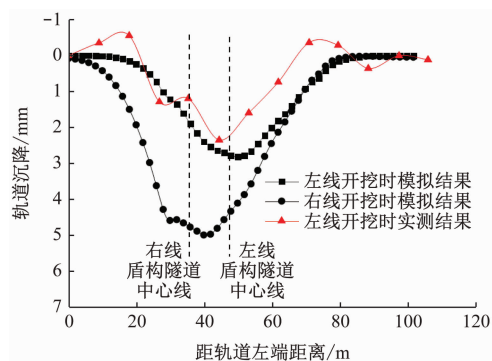


图7 京广铁路的轨道沉降曲线

Fig. 7 Track settlement curves of Beijing-Guangzhou Railway

3.2 列车荷载作用下结构动力响应分析

3.2.1 控制标准

根据 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》,车辆动力性能可采用脱轨系数和车体振动加速度来评价。脱轨系数为某一时刻车轮作用在钢轨的横向力 Q 与垂向力 P 的比值,是判定防止车轮脱轨的稳定性的指标,规范界限值见表2。车体振动加速度用于评价列车的运行品质,规范要求限值为 2.5 m/s^2 。

表2 脱轨系数(Q/P)的界限值Tab. 2 Critical limit values of derailment factor (Q/P)

参数	优秀	良好	合格
脱轨系数最大值	0.6	0.8	0.9
脱轨系数一般值	0.4	0.6	0.7

轨道结构的动力性能一般采用轮轨垂向力、轮轨横向力等参数进行评价。我国对于轮轨力的限值目前还没有统一规定,结合前人关于轮轨垂向力研究所取的限值和 95J01-L—1995《高速试验列车动力车强度及动力学性能规范》中的规定,本文取轮轨垂向力限值为 170 kN;根据其他国家的试验结果,一般采用静轮重的 0.4 倍作为横向力的限值,本文取轮轨横向力限值为 28 kN。

3.2.2 不同列车运行速度对车辆-轨道响应的影响

为分析不同列车运行速度对车辆-轨道响应的影响,模拟计算工况 1—工况 4 下的车体垂向振动加速度,结果如图 8 分析。从图 8 可以看出,列车运行速度较高时,车体的垂向振动加速度也相应较大,其最大值为 0.41 m/s^2 ;在盾构开挖完成后,车体振动加速度变化较小,其垂向振动加速度为 0.42 m/s^2 ,满足规范要求。

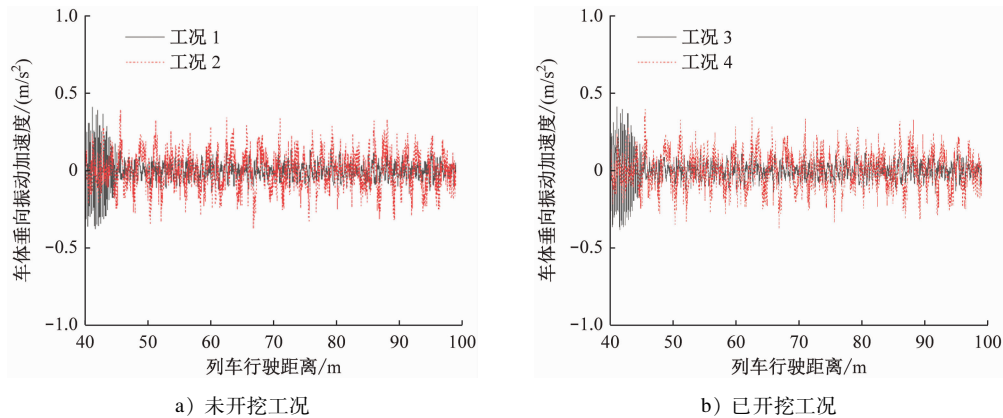


图 8 工况 1—工况 4 下的车体垂向振动加速度

Fig. 8 Vertical vibration acceleration of the vehicle body under working conditions 1 to 4

工况 3 及工况 4 下盾构开挖引起的轮轨横向力和垂向力如图 9 所示。从图 9 可以看出:列车运行速度较高时,轮轨横向力和轮轨垂向力均较大;与轮轨横向力相比,轮轨垂向力受列车运行速度的影

响更大;右线贯通后,轮轨横向力和轮轨垂向力的变化幅度减小;轮轨垂向力和横向力的最大值分别为 120.7 kN 和 5.42 kN,均小于其相应限值。

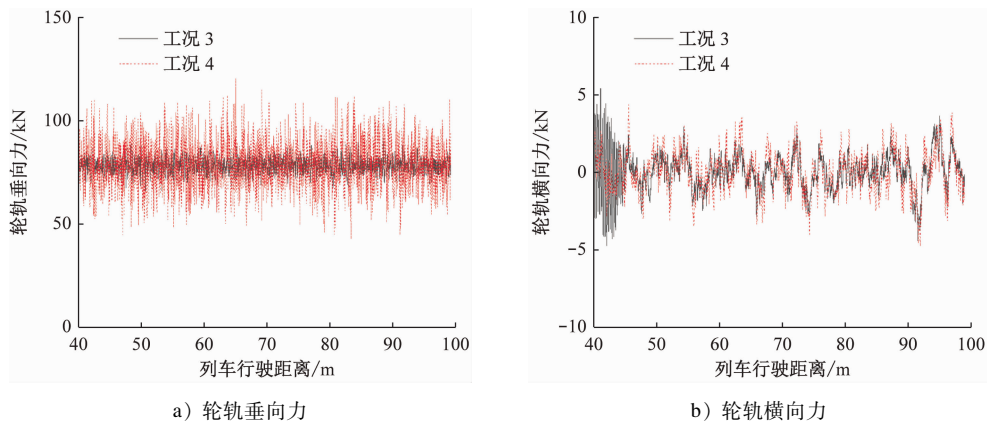


图 9 不同列车运行速度下的轮轨力

Fig. 9 Wheel-rail forces at different train running speeds

3.2.3 盾构开挖位置对车辆-轨道响应的影响

为分析盾构在不同开挖位置对车辆-轨道响应的影响,模拟计算工况 4—工况 7 下的钢轨垂向振动位移及横向振动位移,结果分别如图 10 和图 11 所示,从图 10 及图 11 中可以看出,既有铁路的钢轨振动位移变化受盾构开挖位置的不同影响较小。此外,不同工况下,钢轨的垂向振动位移随列车运行变化的规律相似:在列车刚驶入框架桥上方时,横向振动位移及竖向振动位移较小,列车整车进入后振动位移达到最大,随后逐渐减小稳定,钢轨垂向振动位移最大值为 5.20 mm、横向振动位移最大值为 0.42 mm。

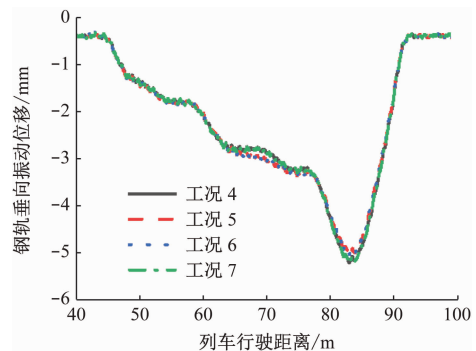


图 10 不同开挖情况下钢轨垂向振动位移

Fig. 10 Vertical rail vibration displacement under different excavation conditions

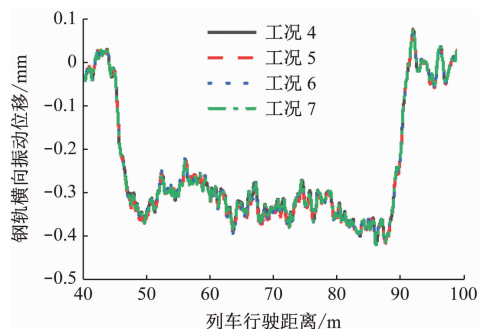
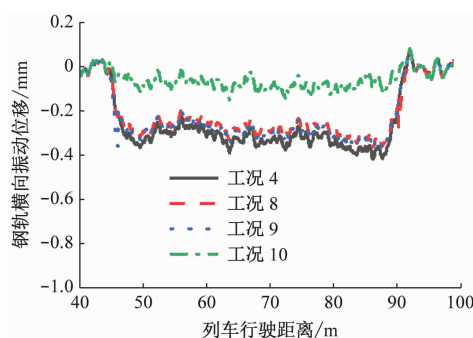
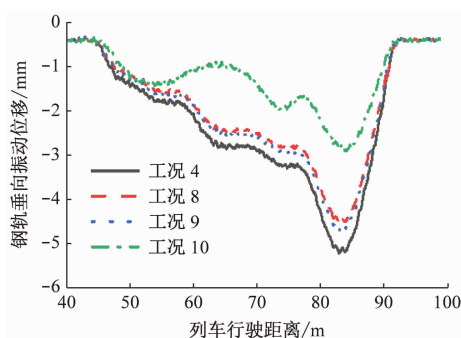


图 11 不同开挖情况下钢轨横向振动位移

Fig. 11 Transverse rail vibration displacement under different excavation conditions



a) 横向振动位移



b) 垂向振动位移

图 12 不同施工条件下钢轨振动位移

Fig. 12 Rail vibration displacement under different construction conditions

4 结论

1) 盾构左线先行开挖后轨道沉降最大值为 3.0 mm, 后续右线开挖后最大沉降发生位置向左右线中心处偏移, 最大沉降值达 5.4 mm。

2) 车体垂向振动加速度和横向振动加速度最大值分别为 0.42 m/s^2 和 0.93 m/s^2 , 轮轨垂向力和横向力最大值分别为 120.7 kN 和 5.42 kN, 满足规范要求。

3) 框架、路基板和钢轨的振动位移, 以及车体振动加速度、轮轨作用力及脱轨系数均随盾构开挖的不断推进逐渐增大; 相对于单线开挖一半时, 双线盾构开挖完成后的车体垂向振动加速度、轮轨垂向力以及脱轨系数分别增大了 6.2%、5.9%、6.6%。

4) 与初始工况(工况 4)相比, 提高注浆压力、提高土仓压力和采取地层加固措施后, 钢轨垂向振动位移分别减小了 14.7%、11.5%、44.1%, 其中地层加固措施对结构振动位移的控制效果最明显。

3.2.4 不同施工条件对车辆-轨道响应的影响

为分析不同注浆压力及土仓压力, 以及采取地层加固措施等施工条件对车辆-轨道响应的影响, 以工况 4 为初始条件, 分析工况 8、9、10 的盾构结构振动位移, 结果如图 12 所示。由图 12 可见: 钢轨的横向及纵向振动位移都得到了一定控制; 工况 4 的钢轨垂向振动位移最大值为 -5.20 mm ; 提高注浆压力、提高土仓压力及采取地层加固措施后, 钢轨垂向振动位移分别减小了 14.7%、11.5%、44.1%。这表明地层加固措施能有效降低既有铁路框架桥钢轨的振动位移。

参考文献

- [1] 章邦超. 上软下硬地层区段新建地铁线路盾构法下穿既有地铁运营线路关键施工技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 132.
ZHANG Bangchao. Key construction techniques for metro lines with shield tunneling method under-crossing existing lines in upper-soft lower-hard stratum[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 132.
- [2] 刘维正, 孙康, 戴晓亚, 等. 地铁盾构长距离下穿对既有铁路框架桥影响的数值与实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 208.
LIU Weizheng, SUN Kang, DAI Xiaoya, et al. Numerical simulation and field monitoring of influence of metro shield tunnel undercrossing the existing railway frame bridge by long distance[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(1): 208.
- [3] 朱连臣, 王渭明, 王有旗, 等. 卵石流塑地层盾构下穿铁路框架桥加固技术与变形控制研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(9): 125.
ZHU Lianchen, WANG Weiming, WANG Youqi, et al. Study on reinforcement technology and deformation control of shield tunnel in pebble flow plastic stratum under railway frame bridge[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(9): 125.

- [4] QIAN W, QI T, ZHAO Y, et al. Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(1): 88.
- [5] 朱正国, 陈信宇, 陈自飞, 等. 盾构隧道下穿既有车站变形控制研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 6.
ZHU Zhengguo, CHEN Xinyu, CHEN Zifei, et al. Research on deformation control of shield tunneling under subway station[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 6.
- [6] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学:下册[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI Wanning. Vehicle-track coupled dynamics: Volume 2 [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [7] XU L, YU Z, SHI C. A matrix coupled model for vehicle-slab track-subgrade interactions at 3D space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 128: 105894.
- [8] 梅慧浩, 冷伍明, 聂如松, 等. 重载铁路路基面动应力峰值随机分布特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1603.
MEI Huihao, LENG Wuming, NIE Rusong, et al. Random distribution characteristics of peak dynamic stress on subgrade surface of heavy haul railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1603.
- [9] 蔡小培, 蔡向辉, 谭诗宇, 等. 盾构下穿施工对高速铁路轨道结构的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(7): 11.
- CAI Xiaopei, CAI Xianghui, TAN Shiyu, et al. Research on the influence of under-passing shield tunnel construction on the track structures of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(7): 11.
- [10] 赵闻强, 高亮, 肖宏, 等. 地铁线路隧道沉降对车辆-轨道系统力学特性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(增刊1): 107.
ZHAO Wenqiang, GAO Liang, XIAO Hong, et al. Influence of subway tunnel settlement on mechanical characteristics of vehicle-track system[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(S1): 107.
- [11] CHEN Z, BI L, ZHAO J. Comparison of single-pier settlement model and multi-pier settlement model in solving train-track-bridge interaction[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(10): 1484.
- 收稿日期:2023-02-14 修回日期:2023-04-13 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-14 Revised:2023-04-13 Published:2025-04-10
• 第一作者:汤新辉,高级工程师, 425662161@qq.com
通信作者:刘维正,副教授, liuwz2011@csu.edu.cn
• ©《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

(上接第 125 页)

- [9] 王士民, 林志宇, 王先明, 等. 溶洞诱发上覆砂层塌陷对既有盾构隧道的扰动分析[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊2): 75.
WANG Shimin, LIN Zhiyu, WANG Xianming, et al. Disturbance analysis on existing shield tunnel under collapse of overlying sand layer induced by Karst cave[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 75.
- [10] 樊浩博, 周定坤, 刘勇, 等. 富水管道型岩溶隧道衬砌结构力学响应特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1884.
FAN Haobo, ZHOU Dingkun, LIU Yong, et al. Mechanical response characteristics of lining structure of pipeline Karst tunnels in water-rich areas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1884.
- [11] 杨公标. 浅埋隧道与邻近地层空洞相互作用机理及其对地层变形的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
YANG Gongbiao. Interaction mechanism between shallow tunnel and adjacent stratum cavity and its influence on stratum deformation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [12] 李术才, 潘东东, 许振浩, 等. 承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3164.
LI Shucai, PAN Dongdong, XU Zhenhao, et al. A model test on catastrophic evolution process of water inrush of a concealed Karst cave filled with confined water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3164.
- [13] 莫伟平. 贵阳喀斯特地区地铁盾构施工风险及防范措施[J]. 铁道建筑, 2021, 61(4): 67.
MO Weiping. Construction risk and preventive measures for subway shield in Guiyang's Karst area[J]. Railway Engineering, 2021, 61(4): 67.
- [14] 何祥凡, 申兴柱, 王帆, 等. 盾构隧道穿越上软下硬地层施工力学特性分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 89.
HE Xiangfan, SHEN Xingzhu, WANG Fan, et al. Construction mechanical property analysis of shield tunnel through upper-soft and lower-hard stratum[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(2): 89.
- [15] 宋晓军. 涂山轨道停车段施工对内环快速路安全影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
SONG Xiaojun. Study on the influence of Tu Shan rail parking section construction on the safety of inner ring expressway[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- 收稿日期:2023-02-17 修回日期:2024-10-28 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-17 Revised:2024-10-28 Published:2025-04-10
• 第一作者:陈俊,高级工程师, 287728006@qq.com
通信作者:王士民,教授, wangshimin@swjtu.edu.cn
• ©《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