

# 富水砂层中地铁盾构隧道下穿既有铁路病害桥施工的风险分析及控制措施

李 晔

(中国铁路南昌局集团有限公司,南昌,330002//正高级工程师)

**摘 要** 目的:在富水砂层中新建的地铁盾构隧道下穿既有铁路病害桥时,会增大施工风险,需对施工进行风险分析,并制定针对性的控制措施。**方法:**介绍了南昌轨道交通4号线起凤路站—七里站区间下穿京九铁路工程的概况,对该工程施工的风险进行了识别与分析。基于FLAC3D软件建立了数值模型,设置了与之相匹配的材料参数,以模拟盾构的掘进过程。设置了3种施工工况,对不同工况下的地面沉降、既有铁路路基沉降进行了数值计算,确定该工程采用工况三(地层注浆加固+框架涵加固)作为施工控制措施。针对工况三的控制措施,制定了实际施工的监测方案,并对实测数据进行了分析。**结果及结论:**合理的盾构机下穿参数可有效降低地面沉降和铁路路基沉降,工况三的控制措施可以很好地解决铁路病害桥敏感性高、整体稳定性差等问题,进而降低了盾构下穿施工的风险。

**关键词** 地铁盾构隧道;富水砂层;下穿工程;铁路病害桥;施工风险控制

**中图分类号** U455.43

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.11.022

## Risk Analysis and Control Measures for Shield Tunneling of Metro Crossing under Existing Railway Diseased Bridges in Rich Water Sand Strata

LI Ye

**Abstract** **Objective:** In the case of constructing a new subway shield tunnel crossing an existing diseased railway bridge in a rich water sand layer, due to the possibilities of increasing construction risks. A risk analysis of the construction needs to be carried out, and specific control measures need to be formulated to address the risks. **Method:** The project of crossing Beijing-Kowloon Railway by Nanchang rail transit Line 4 from Fenglu Station to Qili Station is overviewed, the construction risks of the project are identified and analyzed. Based on the FLAC3D software, a numerical model is established with matching material parameters to simulate the shield tunnel excavation process. Three construction conditions are set, and

numerical calculations are performed on ground subsidence and existing railway subgrade settlement under different conditions. It is determined that the project should adopt Construction Condition III (layer grouting reinforcement + framed culvert reinforcement) as the construction control measure. Regarding this measure, a monitoring plan for actual constructions is formulated, and the measured data are analyzed. **Result & Conclusion:** Reasonable parameters for shield machine tunneling can effectively reduce ground settlement and railway subgrade settlement. The above control measures can effectively address issues such as high sensitivity of railway diseased bridge and poor overall stability, thus reducing the risks of shield tunneling construction.

**Key words** subway shield tunnel; rich water sand layer; underpass engineering; railway damaged bridges; construction risk control

**Author's address** China Railway Nanchang Group Co., Ltd., 330002, Nanchang, China

当新建隧道下穿既有桥梁时,会增加桥梁桩基的侧向变形及沉降,减弱桩基承载力,进而带来安全隐患<sup>[1-2]</sup>。因此,新建隧道工程需采取针对性的控制措施,以降低工程风险。文献[3]系统地阐述了软弱地层条件下盾构穿越高铁所存在的风险,并提出相应的安全控制体系。文献[4]认为与注浆加固周围土体相比,隔离桩对盾构下穿铁路桥施工的防护效果更佳。文献[5]对盾构下穿引起的隧道纵向及环向结构响应进行了全过程的跟踪及分析。文献[6]探讨了多种隔离桩对盾构下穿高铁桥的防护效果。文献[7]采用数值手段,对盾构穿越引起已运营铁路桥涵的力学行为进行了预测。文献[8]利用数值技术,探讨了隧道下穿高铁工程的控制标准及施工控制措施。

上述研究成果涉及新建工程下穿既有铁路病害桥的情况较少。铁路病害桥纵横向刚度不足、



表 1 数值模型的材料参数

Tab. 1 Material calculation parameters

土层/材料	厚度/ m	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	3.0	19.8	8	0.35	8	10
粉质黏土	3.0	18.0	15	0.30	20	13
中砂	7.0	19.9	18	0.25	1	20
砾砂	10.0	21.0	50	0.28	1	25
强风化泥质粉砂岩	17.0	22.0	300	0.25	100	30
铁路路基	5.0	21.0	25	0.30		
钢轨		78.0	210 000	0.20		
既有铁路桥		23.0	20 000	0.24		
管片	0.3	26.0	30 000	0.20		
注浆层(初凝)	0.1	22.0	1	0.25		
注浆层(终凝)	0.1	22.0	100	0.25		
盾壳	0.3	120.2	200 000	0.30		

3.2 掘进过程模拟

初始地应力平衡后,以 5 环管片的累计宽度(7.5 m)作为 1 个开挖步,每步开挖后的地层应力释放采用节点反力法(应力释放系数取 0.5)。应力释放完成后,立即施作实体单元,以模拟管片的拼装。同时修改周边土体的参数,以模拟同步注浆过程。

3.3 施工工况设置

本文设置了 3 种施工工况:①工况一,不进行预加固;②工况二,地层注浆加固;③工况三,地层注浆加固+框架涵加固,其中地层注浆加固的区域为:z 向取双线隧道底部以下 3.4 m 至隧道结构顶部以上 9.4 m, y 向取隧道结构左右各 6 m。

3.4 监测点布置

图 3 为施工时地面及桥面监测点平面布置图。根据施工监测要求,沿既有铁路上下行方向各布置 2 个地面监测断面(DB1、DB2),这 2 个监测断面与

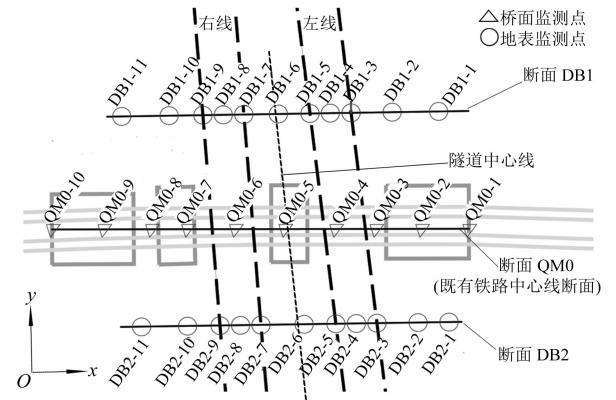


图 3 地面及桥面监测点平面布置图

Fig. 3 Layout plan of surface and bridge deck monitoring points

铁路中心线的距离均为 7 m。2 个断面上均设 11 个地面监测点(DB1-1—DB1-11、DB2-1—DB2-11),相邻地面监测点的间距为 5 m。在既有铁路中心线(立交桥桥面上)设 1 个桥面监测断面 QM0(其中 QM0-5 为既有铁路中心线和起七区间隧道中心线的交点),在该断面上设置 10 个监测点(QM0-1—QM0-10),相邻桥面监测点的间距为 5 m。

4 模拟结果分析

图 4 为盾构贯通后模型在工况一下的隧道围岩竖向位移云图。由图 4 可知:盾构隧道施工导致上覆地层在一定范围内形成了“碗形”沉降区;既有高架桥与地面接触范围内的围岩变形尤为明显,最大沉降(沉降量为 18.08 mm)发生在拱顶处。

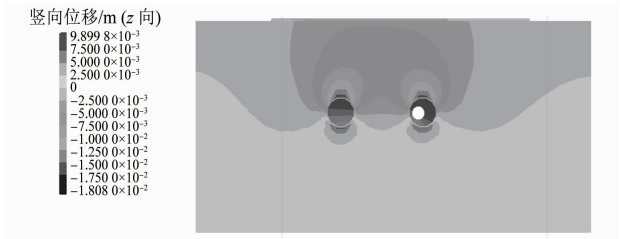


图 4 盾构贯通后模型在工况一下的竖向位移云图

Fig. 4 Vertical displacement cloud map of the model under operating conditions after shield tunneling completion

4.1 地面沉降分析

选取地面在 y=50 m 处的监测断面进行分析。该断面不同工况下的地面沉降曲线如图 5 所示,横轴取 QM0-5 至 QM0-1 的方向为正方向。由图 5 可知:工况一下地面的最大沉降量约为 6.21 mm;采取预加固措施(工况二及工况三)后,地面沉降量有所减少;工况二及工况三对地面沉降的影响差别不大,最大沉降值约为 3.18 mm,较工况一约减少 48.8%。

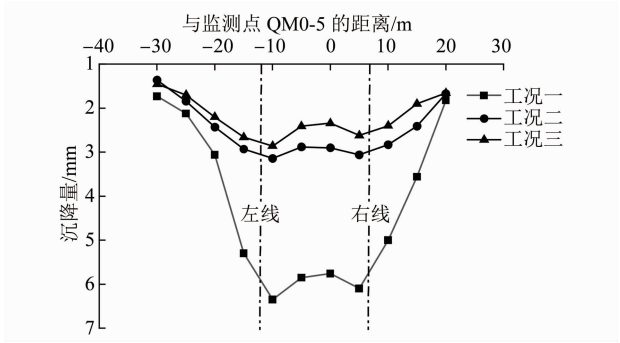


图 5 不同工况下 y=50 m 处监测断面的地面沉降曲线

Fig. 5 Ground settlement curves of monitoring section at y=50 m under different working conditions

## 4.2 既有铁路路基沉降分析

选取既有铁路路基中心所在的横断面 ( $y = 50 \text{ m}$ ) 为监测断面, 该监测断面与隧道轴线方向垂直。该断面不同工况下的地面沉降曲线如图 6 所示, 横轴取 QM0-5 至 QM0-1 为正方向。由图 6 可知: 工况一下既有铁路路基的最大沉降量达  $5.92 \text{ mm}$ ; 工况二下既有铁路路基的最大沉降量明显减少, 其最大沉降量为  $3.71 \text{ mm}$ ; 工况三对既有铁路路基的沉降控制效果最为显著, 其最大沉降量为  $2.18 \text{ mm}$ ; 相比工况一和工况二, 工况三下既有铁路路基的最大沉降量分别减少了  $63.2\%$  和  $41.2\%$ 。

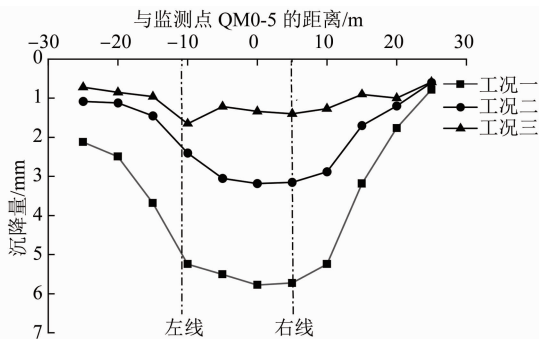


图 6 不同工况下  $y = 50 \text{ m}$  处既有铁路路基的地面沉降曲线  
Fig. 6 Ground settlement curves of existing railway subgrade at  $y = 50 \text{ m}$  under different working conditions

根据上述的数值模拟结果, 本文采用工况三作为施工控制措施。

## 5 施工实测分析

基于上文的数值模拟结果, 实际施工时采用工况三的控制措施, 即在盾构穿越京九铁路青山路立交桥前, 对地层进行了注浆加固, 对桥梁进行了框架涵加固。基于此制定实际施工的监测方案, 并对实测数据进行分析。

依据相关规范的要求, 结合施工的具体情况, 本工程的地面变形控制值取  $-20 \sim 10 \text{ mm}$ , 桥面沉降控制值取  $6 \text{ mm}$ , 桥梁不均匀沉降控制值取  $5 \text{ mm}$ 。

取右线隧道正上方的监测点 DB1-8、DB2-8、QM0-6 进行分析, 其实测的地面竖向变形时程曲线如图 7 所示。由图 7 可知: 地面测点的竖向变形量随时间的变化较为明显, 这是由于掌子面与监测断面距离随时间变化而变化导致的; 监测点 DB1-8、DB2-8 的地面竖向变形随时间推移而增大, 直到隧道下穿通过后, 竖向变形量才开始趋于稳定; 桥面监测点 QM0-6 的竖向变形量远小于 2 个地面监测

点的最大竖向变形量。

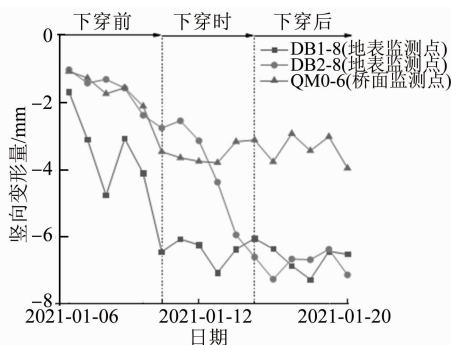


图 7 地面、桥面部分测点的实际竖向变形时程曲线  
Fig. 7 Actual vertical deformation time history curves of surface and bridge deck measurement points

图 8 是隧道下穿完成后 5 d (即 2021 年 1 月 20 日) 地面、桥面监测断面内各测点的累计竖向变形曲线。由图 8 可知: 铁路桥两侧的地面累计竖向变形量差异不大, 累计竖向变形的最大值出现在双线隧道中心线附近, 其累计竖向变形量为  $7.63 \text{ mm}$ , 桥面整体的累计竖向变形量在  $3.0 \sim 4.2 \text{ mm}$  之间, 满足变形监测要求。

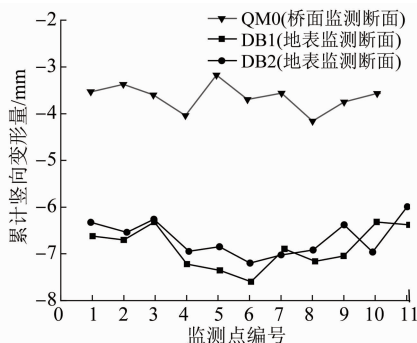


图 8 地面、桥面监测断面内各测点的累计竖向变形曲线  
Fig. 8 Accumulated vertical deformation curve of each measuring point within the surface and bridge deck monitoring section

## 6 结论

1) 采用地下基础注浆加固及现浇框架加固桥梁的方式, 可以很好地解决铁路病害桥敏感性高、整体稳定性差等问题, 进而降低隧道下穿的施工风险。

2) 通过对盾构机下穿时的各项参数进行合理设计, 可有效地降低隧道施工风险, 保证隧道安全、快速穿过铁路病害桥。

3) 从控制效果看, 在盾构隧道下穿过程中采用本文所述的各项控制方法后, 地面沉降量较小, 桥

梁变形满足控制要求,且盾构通过时间小于预期。

## 参考文献

- [1] 周济民. 盾构区间隧道下穿高架桥桩基群施工技术与环境影响预测[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 165.  
ZHOU Jimin. Construction technology and environmental impact prediction for a shield tunnel under a viaduct pile foundation group[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 165.
- [2] 曹成勇, 施成华, 彭立敏, 等. 浅埋大跨下穿高速公路隧道施工风险评估及控制措施研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(7): 1439.  
CAO Chengyong, SHI Chenghua, PENG Limin, et al. Study on risk assessment and control measures in the construction process of shallow and large-span tunnel beneath expressway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1439.
- [3] 陈海丰, 袁大军, 王飞, 等. 软弱地层地铁盾构下穿高铁的安全控制技术研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 256.  
CHEN Haifeng, YUAN Dajun, WANG Fei, et al. Study on safe control of metro shield underpassing high-speed railway in weak stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 256.
- [4] 陈聪, 蹇蕴奇, 鲁茜茜, 等. 盾构隧道下穿既有铁路桥梁桩基的加固措施[J]. 铁道建筑, 2019, 59(3): 60.  
CHEN Cong, JIAN Yunqi, LU Xixi, et al. Reinforcement measures for bridge pile foundation of existing railway undercrossed by shield tunnel[J]. Railway Engineering, 2019, 59(3): 60.
- [5] 高东奇, 廖少明, 张迪, 等. 杭州环北大直径泥水盾构隧道下穿高铁桥涵的实测分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(4): 403.  
GAO Dongqi, LIAO Shaoming, ZHANG Di, et al. Analysis of monitoring of large diameter slurry shield tunnel crossing underneath high-speed railway bridge and culvert: case study on North Huancheng Road underground expressway in Hangzhou[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(4): 403.
- [6] 王国富, 郑涛, 路林海, 等. 小半径盾构下穿高铁桥支护优化及变形控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 113.  
WANG Guofu, ZHENG Tao, LU Linhai, et al. Research on the optimization and deformation control of high speed railway bridge tunnel with small radius shield[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 113.
- [7] 杨俊龙, 门燕青, 廖少明, 等. 大直径盾构浅覆土下穿铁路桥涵的影响分析及施工控制[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(3): 297.  
YANG Junlong, MEN Yanqing, LIAO Shaoming, et al. The effect and construction control of large diameter shield tunneling under railway culvert[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(3): 297.
- [8] 高亚明. 既有铁路桥梁支撑体系病害诊治研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.  
GAO Yaming. Diagnosis and treatment of existing railway bridge support system diseases[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.

(收稿日期: 2021-05-17)

## (上接第 121 页)

- LI Yang, YANG Xin'an. Research on deformation of tunnel in Karst cave area under rainfall infiltration[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(6): 36.
- [3] 李毅, 伍嘉, 李坤. 基于 FLAC3D 的饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 617.  
LI Yi, WU Jia, LI Kun. Saturated-unsaturated seepage analysis based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 617.
- [4] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃. 基于 FLAC3D 平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 855.  
JIANG Zhongming, XIONG Xiaohu, ZENG Ling. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 855.
- [5] 周亚峰. 水工隧洞渗流-应力-损伤/开裂耦合理论及方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.  
ZHOU Yafeng. Study on seepage-stress-damage/crack coupling theory and method for hydraulic tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [6] 郑世杰, 李杨, 杨新安. 基于流固耦合的下穿隧道及古运河安全性分析[J]. 施工技术, 2019, 48(24): 59.  
ZHENG Shijie, LI Yang, YANG Xin'an. Safety analysis of underpass tunnel and ancient canal based on fluid-structure coupling[J]. Construction Technology, 2019, 48(24): 59.
- [7] 孙琪皓, 马凤山, 赵海军, 等. 基于渗流-损伤-应力耦合作用下考虑力学参数弱化的巷道围岩变形破坏分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 955.  
SUN Qihao, MA Fengshan, ZHAO Haijun, et al. Deformation and failure of surrounding rock considering weakening of mechanical parameters under seepagedamage-stress coupling[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 955.

(收稿日期: 2021-04-07)