

盾构隧道下穿对既有高铁桥梁的影响及其加固方案*

耿大新 谭 成 王 宁

(华东交通大学土木建筑学院, 330013, 南昌//第一作者, 教授)

摘 要 目的:盾构隧道掘进会引起周围既有高架桥梁整体结构的不均匀沉降,进而影响其正常使用功能和列车运行安全。对此,以南昌市轨道交通4号线一期工程某区间隧道为背景,分析盾构隧道先后下穿对既有高速铁路桥梁的影响及加固方案分析。方法:运用 Midas GTS 软件模拟盾构隧道先后下穿高速铁路桥梁的过程。分析高铁桥梁墩台顶部的位移及沉降的发展规律,以及加固前后墩台顶部的变形。结果及结论:盾构掘进对墩台顶沉降影响最大,墩台顶最大沉降约为 3.40 mm,最大纵向位移约为 2.50 mm;对横向变形影响最小,最大横向位移约为 1.00 mm,且影响主要在初掘进阶段;盾构引起的高铁桥梁墩台顶变形随着后期管片安装和注浆有所减小;采取隔离桩+注浆加固措施后,桥墩台顶部产生的最大沉降约为 1.54 mm,最大沉降差为 0.34 mm,最大纵向位移为 1.41 mm;最大墩顶沉降能满足高铁桥梁墩顶沉降的控制标准(3.00 mm)要求,且留有一定的变形裕量,较安全。采用注浆与隔离桩加固措施效果良好,安全可行。

关键词 双线盾构隧道;高铁桥梁;施工影响;注浆加固

中图分类号 U442.55

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.006

Impact of Shield Tunnel Under-passing Existing High-speed Railway Bridge and Its Reinforcement Scheme

GENG Daxin, TAN Cheng, WANG Ning

Abstract Objective: Shield tunnel excavation causes the overall structure uneven settlement of existing high-speed railway bridges in the surrounding area, thereby affecting their normal functionality and operational safety of train. In this context, based on an interval tunnel of Nanchang Rail Transit Line 4 phase I project, the impact of shield tunnel under-passing existing high-speed railway bridge and the reinforcement schemes are analyzed. Method: The process of shield tunnel under-passing existing high-speed railway bridges is simulated using Midas GTS software. The development law of displacement and settlement on the top of high-speed railway bridge piers and abutments are analyzed, as well as the deformation before and

after reinforcement. Result & Conclusion: Shield tunneling has the greatest impact on the settlement of bridge piers and abutments, with a maximum settlement of approximately 3.40 mm and a maximum longitudinal displacement of about 2.50 mm. The impact on lateral deformation is minimal, with a maximum lateral displacement of about 1.00 mm, mainly occurring in the initial excavation stage. The deformation of high-speed railway piers caused by shield tunneling decreases with the subsequent installation of tunnel segments and grouting. After implementing isolation piles + grouting reinforcement measures, the maximum settlement of bridge pier tops is approximately 1.54 mm, with a maximum settlement difference of 0.34 mm and a maximum longitudinal displacement of 1.41 mm. The maximum settlement of the pier and abutment tops meets the control standard requirement (3.00 mm) for high-speed railway bridge pier settlement and allows for a certain deformation margin, being relatively safe. The reinforcement measures of grouting and isolation piles perform well, being safe and feasible.

Key words double-track shield tunnel; high-speed railway bridge; construction impact; grouting reinforcement

Author's address School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

近年来,盾构法以其挖掘速度快、效率高、对周围环境的影响较小等优势被广泛应用于城市地铁工程建设中^[1-3]。盾构隧道掘进过程常常使周围土体位置发生改变,引起周边既有桥梁整体结构的不均匀沉降,进而影响其正常使用功能和列车运行安全。目前,对盾构施工穿越既有桥梁引起地面位移及桩基变形的因素,以及加固措施已有大量研究^[4-6]。但对盾构施工穿越砂土地层中高速铁路(以下简称“高铁”)简支梁桥的研究仍较少。本文以南昌市轨道交通4号线一期工程某路段隧道工程

* 国家自然科学基金项目(51768021,51868021)

为例,通过 Midas GTS 有限元软件来模拟分析盾构左右线先后下穿对既有高铁简支梁桥墩顶变形的影响,并对相应加固措施进行分析,以期为类似项目的处理提供参考。

1 工程概况

1.1 地铁与桥梁的位置关系

南昌市轨道交通 4 号线一期工程(以下简称“4 号线”)东新站到新洪城大市场站区间隧道下穿 2 条平行的高速铁路(以下简称“高铁”)桥梁——沪昆(上海—昆明)高铁赣江特大桥与昌福(南昌—福州)铁路赣江特大桥。昌福铁路是一条客货联合共线的高速铁路,其设计速度为 200 km / h。沪昆高铁为客运专线,其设计速度为 350 km /h。地铁隧道与既有铁路线路的夹角约为 88°。4 号线下穿 2 条高铁桥梁工程(以下简称“4 号线下穿工程”)的平面图如图 1 所示。



图 1 4 号线下穿工程的平面图

Fig. 1 Plan of Line 4 under-passing engineering

下穿区域的铁路桥均为跨度为 32 m 的简支梁桥。地铁隧道左右线各穿桥梁一跨,其中隧道左线距沪昆高铁桥梁墩台下桩体最小净距为 7.46 m,隧道右线距昌福铁路桥梁墩台下桩体最小净距为 8.11 m,隧道顶部埋深约为 14 m。4 号线下穿工程的横断面示意如图 2 所示。

1.2 工程地质条件

下穿区域地层自上而下为素填土、粉质黏土、中砂、粗砂、砾砂、强风化泥质粉砂岩孔中风化泥质粉砂岩。填土层与砾砂层为主要含水层,地面以下 30 m 之下区域以中风化泥质粉砂岩为主。盾构隧道主要贯通于砾砂层之间。围岩地层、桥梁桩基、桥梁墩台、管片和注浆结构的物理力学参数如表 1 所示。

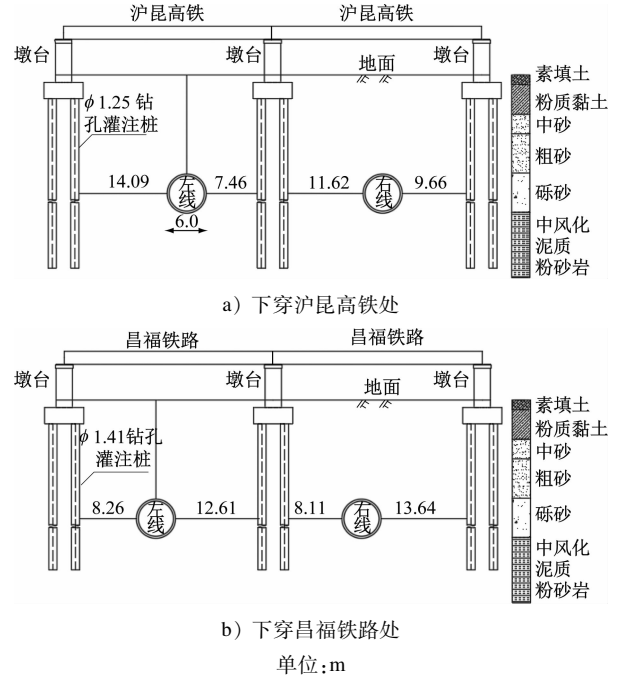


图 2 4 号线下穿工程的横断面示意图

Fig. 2 Cross-section diagram of Line 4 under-passing engineering

表 1 材料的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of materials

材料名称	弹性模量/ MPa	泊松比	重度/ (kN/m³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/(°)
素填土	3	0.20	18	0	10
粉质黏土	12	0.30	18	20	10
砾砂	25	0.20	20	0	36
中风化泥质粉砂岩	80	0.24	26	140	28
桥台	21 000	0.18	25		
桩	21 000	0.30	74		
管片	21 000	0.30	24		
盾壳	250 000	0.20	78		
注浆	10 000	0.30	22		

2 模型的建立与简化

2.1 三维模型建立

使用 MIDAS GTS 有限元软件进行数值模拟分析。根据盾构隧道、沪昆高铁赣江特大桥和昌福铁路赣江特大桥的空间位置关系,建立 4 号线下穿工程的三维分析模型,如图 3 所示。隧道结构模型尺寸为:横向(x 向)取 200 m,竖向(z 向)取 60 m(约

为盾构洞径的 5 倍),纵向(y 向)取 100 m。

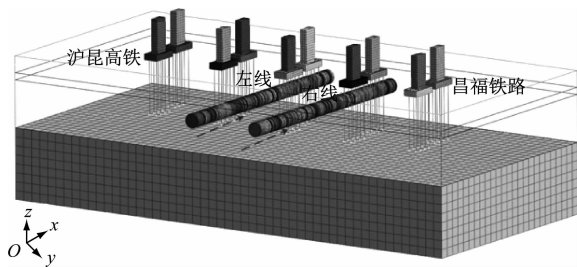


图 3 4 号线下穿工程的三维计算模型

Fig. 3 3D calculation model of Line 4 under-passing engineering

该三维计算模型基于摩尔-库伦准则对地层进行模拟。其中:土体、高铁桥梁墩台用实体单元模拟;桥桩采用梁单元模拟;管片、盾壳及注浆等定义为弹性材料,采用板单元模拟。

2.2 模型简化

盾构掘进过程中的影响因素众多,难以进行细致全面的模拟仿真分析,故需对施工过程中荷载作简化处理。在模拟盾构掘进时,作如下处理:为贴近实际施工情况,需对挖掘部分的土体进行钝化,以保证土体的稳定性;在盾构实际掘进时,管片会受到千斤顶的推力,参考盾构掘进参数分析^[7]及本工程的特点,在三维计算模型中将该推力简化为作用在管片横断面上、大小为 4 500 kN/m² 的均布荷载;由刀盘对开挖掌子面施加 200 kN/m² 的荷载模拟掘进力;在施工过程中,受管片和盾壳周围土体及水的作用,管片及盾壳表面会受到一定的压力,故模拟计算时将这些压力分别简化为作用在管片及盾壳表面、大小分别为 1 000 kN/m² 和 50 kN/m² 的法向均布荷载。此外,将墩台与主梁的接触节点设置为弹性连接。

3 墩台中心点变形分析

3.1 施工步及测点布置

在隧道开挖过程中选取 12 个典型施工步,并在盾构开挖完成典型施工步时提取相应的墩台变形数据。4 号线下穿工程的施工步设置及说明见表 2。

对于双线盾构隧道掘进施工引起高铁桥梁墩台中心点位移变化情况,从沪昆高铁赣江特大桥与昌福铁路赣江特大桥各取 5 个墩台(1#—10#),以墩台中心点为对象进行分析。4 号线下穿工程的墩台中心点俯视图如图 4 所示。

表 2 4 号线下穿工程的施工步设置及说明
Tab. 2 Setting and explanation of Line 4 under-passing engineering construction steps

施工步	施工步说明
1	左线盾构掘进至桥梁下方承台近侧边缘
2	左线盾构掘进至桥梁下方承台宽度 1/2 处
3	左线盾构掘进至通过桥梁下方承台远侧边缘
4	左线盾构掘进至桥梁上方承台宽度 1/2 处
5	左线盾构掘进至桥梁上方承台远侧边缘
6	左线施工完成
7	右线盾构掘进至桥梁下方承台近侧边缘
8	右线盾构掘进至桥梁下方承台宽度 1/2 处
9	右线盾构掘进至通过桥梁承台下方远侧边缘
10	右线盾构掘进至桥梁上方承台宽度 1/2 处
11	右线盾构掘进至桥梁上方承台远侧边缘
12	右线施工完成

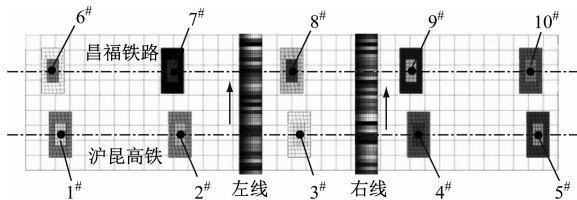


图 4 4 号线下穿工程的墩台中心点俯视图

Fig. 4 Top view of abutment center point of Line 4 under-passing engineering

3.2 墩台中心点变形分析

3.2.1 沉降

模拟计算可得,4 号线下穿工程的墩台中心点沉降变化如图 5 所示。

由图 5 可以观察既有桥梁墩台的沉降变化特点。在盾构左线掘进期间(施工步 1—施工步 6):盾构机掘进造成的地层损失和既有线的列车荷载共同作用使得墩台整体均发生沉降,且沉降值随着施工的进行不断增加,最大沉降约为 3 mm,发生在施工步 3 时的沪昆高铁 2#墩台中心点处;随着盾构继续掘进至左线贯通(施工步 6),受后期管片安装和注浆影响,沉降量整体有所减小。

右线盾构掘进期间(施工步 7—施工步 12):右线掘进初阶段整体沉降值有所减小,可能与盾构右线掘进压力有关;随着右线盾构的掘进,沉降值继续增大,沉降最大值约为 3.4 mm,发生在(施工步 8)沪昆高铁 8#墩台中心点;后期随着右线管片安装和注浆,竖向沉降整体呈减小趋势。

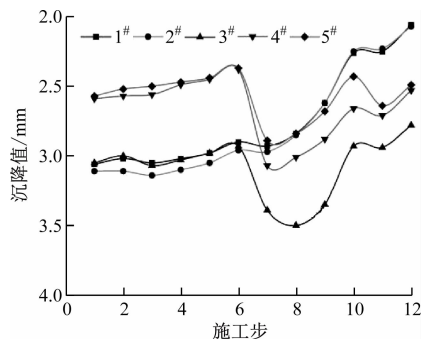
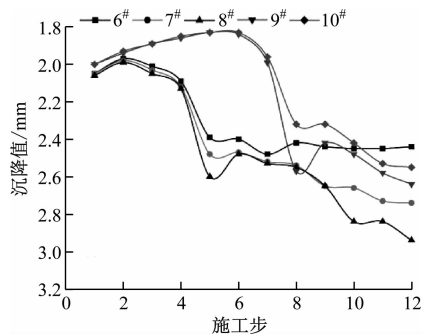
a) 1[#]—5[#]墩台中心点b) 6[#]—10[#]墩台中心点

图5 4号线下穿工程的墩台中心点沉降变化

Fig. 5 Change of Line 4 under-passing engineering abutment center point settlement

3.2.2 纵向位移

4号线下穿工程的墩台中心点纵向位移变化如图6所示。在盾构左线掘进期间(施工步1—施工步6)中,在盾构刚掘进时盾构的掘进力和列车荷载的共同作用下,既有桥梁墩台的纵向位移变化趋势与沉降变化趋势类似:最大纵向位移值约为2.5 mm,发生在施工步5时昌福铁路2[#]墩台中心点;盾构左线完全贯通后,受注浆和管片影响,既有高铁桥梁的墩台纵向位移整体略有减小。

右线盾构掘进期间(施工步7—施工步12):各墩台中心点纵向位移继续增大;当右线贯通(施工步12)时,靠近盾构右线掘进侧的墩台中心点产生最大的纵向变形,变形量为2.9 mm;在右线掘进后期(施工步10—施工步12),既有桥梁的墩台纵向位移整体有所减小。

3.2.3 横向位移

4号线下穿工程的墩台横向位移如图7所示。在盾构掘进整个阶段(施工步1—施工步12),盾构掘进施工与既有高铁或铁路的列车运行对墩台中心点的横向位移变化影响较小。横向位移变化主要发生在盾构初始掘进阶段:最大横向变形值为

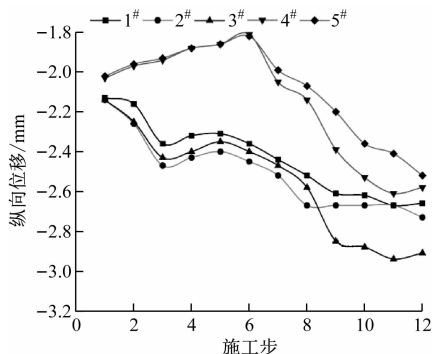
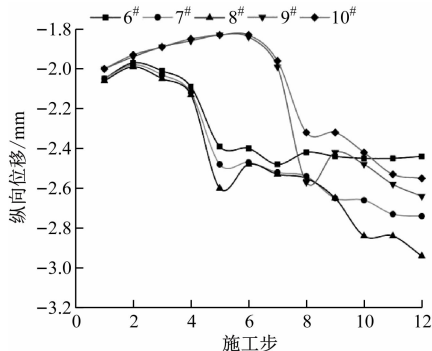
a) 1[#]—5[#]墩台中心点b) 6[#]—10[#]墩台中心点

图6 4号线下穿工程的墩台中心点纵向位移变化

Fig. 6 Change of Line 4 under-passing engineering abutment center point longitudinal displacement

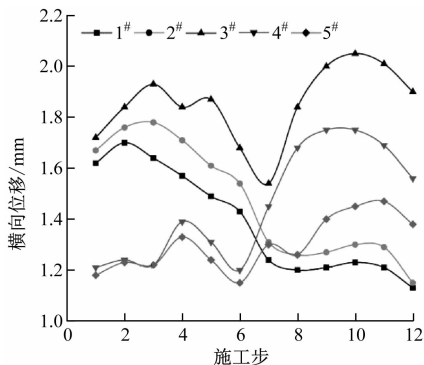
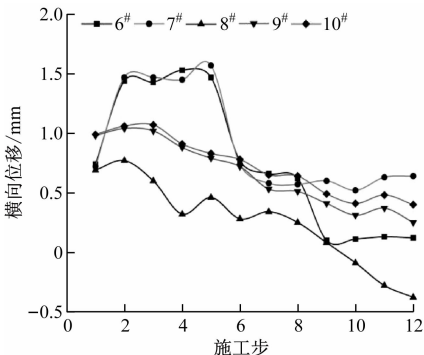
a) 1[#]—5[#]墩台中心点b) 6[#]—10[#]墩台中心点

图7 4号线下穿工程的墩台中心点横向位移变化

Fig. 7 Change of Line 4 under-passing engineering abutment center point lateral displacement

1.9 mm 左右,出现在左线盾构掘进通过承台(施工步 3)时的沪昆高铁 3[#]墩台中心点。此外,随着注浆和管片安装,横向位移也呈减小趋势。

3.2.4 墩台整体变形特征

综上所述,盾构掘进对高铁桥墩顶部沉降影响最大,对横向变形影响最小。此外,随着盾构管片安装及注浆的施工,盾构掘进对既有高铁桥梁墩顶变形影响的逐渐减小。

4 加固方案

根据区间隧道与高铁桥梁的相互关系、侧穿处的工程地质和水文地质等情况,提出隔离桩+注浆加固的保护方案:在原有的地层注浆措施基础上,沿隧道穿越墩台以外方向,在不小于 9 m 距离范围内设置隔离桩;隔离桩为 $\phi 800 \text{ mm} @ 1\,000 \text{ mm}$ 布置,桩顶选用混凝土冠梁连接,隔离桩桩尖位于隧道底板以下 3 m,与区间隧道结构边线净距为 1 m。根据隔离桩+注浆加固保护方案建立加固后盾构隧道模型如图 8 所示。

为探究隔离桩+注浆保护方案的可行性,对盾构左右线分别通过桥桩时,沪昆高铁墩台中心点

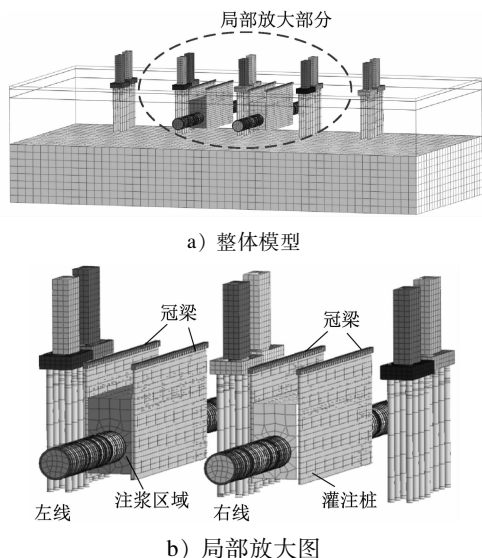


图 8 隔离桩+注浆加固的盾构隧道模型
Fig. 8 Shield tunnel model of isolation piles and grouting reinforcement

(1[#]—5[#]墩台)和昌福铁路墩台中心点(6[#]—10[#]墩台)变形情况,按是否加固进行模拟分析,结果如图 9 所示。

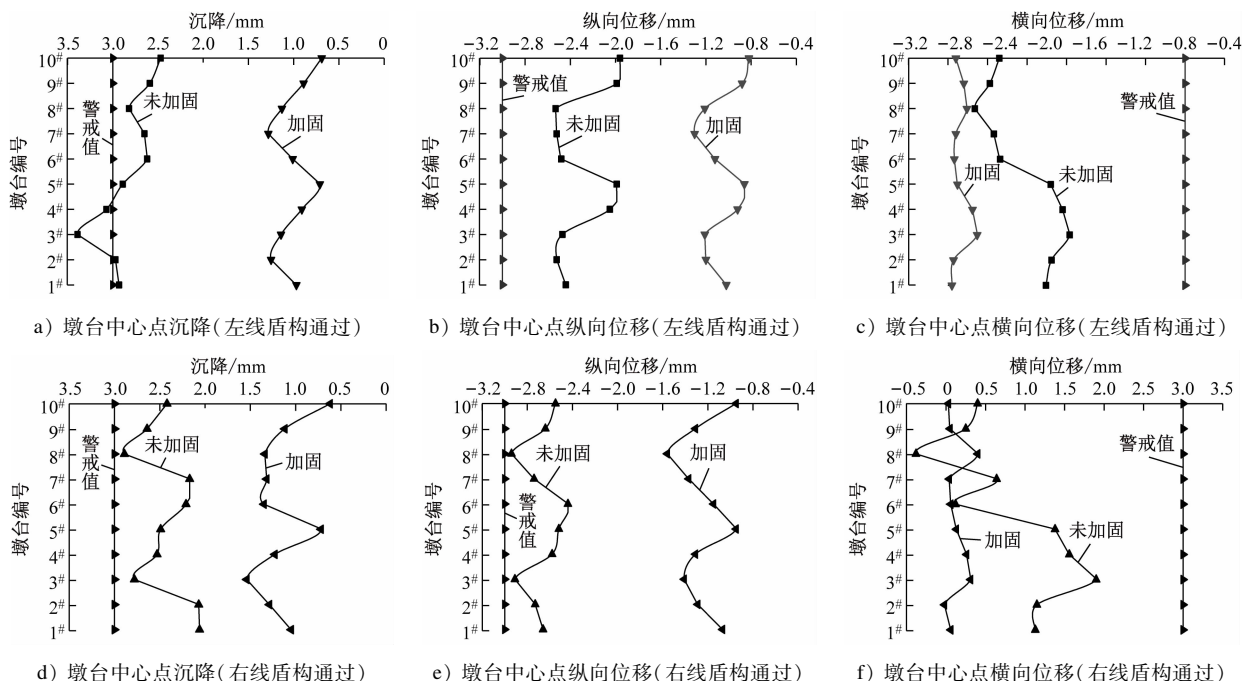


图 9 墩台变形情况模拟结果

Fig. 9 Simulation results of abutment change conditions

从图 9 中可知,在未采取隔离桩+注浆加固方案的工况,桥梁墩台顶中心点(1[#]—10[#]墩台)最大沉

降约为 3.40 mm,最大纵向位移为 2.90 mm,最大横向位移为 2.10 mm,最大沉降差为 0.60 mm。此时,

最大墩顶变形不能满足高铁桥梁墩顶沉降的控制标准(3.00 mm)要求,且变形裕量较小。

采取了隔离桩+注浆加固方案后,在此工况中,墩台顶部中心点(1[#]—10[#]墩台)的最大沉降约为1.54 mm,最大沉降差为0.34 mm,最大横向位移为0.61 mm,最大纵向位移为1.41 mm。此时,最大墩顶沉降能满足高铁桥梁墩顶沉降的控制标准(3.00 mm)要求,且留有一定的变形裕量,较安全。

5 结论

本文针对盾构先后下穿既有高速铁路桥梁施工,采用Midas GTS软件对桥梁墩台中心点的竖向、纵向和横向变形规律以及注浆加隔离桩加固前后两种工况下的变形进行了三维数值模拟分析,得到主要结论如下:

1) 盾构先后掘进对桥墩顶部沉降影响最大,最大沉降约为3.00 mm,对墩顶横向变形影响最小,最大横向位移约为1.00 mm;随着盾构后期管片安装及注浆的实施,盾构掘进对墩顶变形的影响逐渐减小。

2) 双线先后施工时,后施工盾构隧道对先施工隧道引起的沉降有一定的补偿作用,墩台的变形会呈现减小趋势。

3) 采取隔离桩加地层注浆后,桥梁墩台中心点产生的最大沉降约为1.54 mm,其最大墩顶沉降能满足高铁桥梁墩顶沉降的控制标准(3.00 mm)要求,且留有一定的变形裕量,较安全。因此采取隔离桩+注浆加固措施效果良好。

4) 高铁桥梁一般设计要求高、速度快,对变形控制要求严格,盾构掘进时应加强施工监测根据监测情况对隧道进行洞内的相应处理,确保铁路正常运营的要求。

参考文献

- [1] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1):97.
- HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1):97.
- [2] 张治国, 张孟喜. 软土城区土压平衡盾构上下交叠穿越地铁

隧道的变形预测及施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(增刊2):3428.

ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi. Deformation prediction of subway tunnel induced by EPB shield in soft clay during above and down overlapped traversing process and its construction control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(S2):3428.

- [3] 陈馈. 盾构施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- CHEN Kui. Shield construction technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [4] MCKINLEY S A, WEI H. Viability assessment of light rail line planning: case study of Cincinnati eastern corridor[J]. Urban Rail Transit, 2017, 3(1): 34.
- [5] 孙连勇, 黄永亮, 王启民, 等. 地铁盾构隧道下穿既有铁路变形控制研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5):140.
- SUN Lianyong, HUANG Yongliang, WANG Qimin, et al. Study of controlling measures for existing railway deformation caused by metro shield tunnel under-passing construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5):140.
- [6] 胡嘉杰. 盾构主要掘进参数对软土区域地表沉降的影响分析[D]. 广州: 广州大学, 2012.
- HU Jiajie. Analysis of the influence of main tunneling parameters of shield on surface settlement in soft soil area[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012.
- [7] 唐黎明. 地铁盾构近距离下穿多座高铁桥梁影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(2): 45.
- TANG Liming. Numerical analysis for the construction of metro shield tunnel under multiple high-speed railway bridges[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(2): 45.
- [8] 杨丽明, 沈宇鹏, 汤天笑, 等. 地铁盾构隧道下穿施工对简支梁桥安全性影响分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(3): 96.
- YANG Liming, SHEN Yupeng, TANG Tianxiao, et al. Security analysis on subway shield tunneling passing under simply supported girder bridge[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(3): 96.
- [9] 孟炜. 地铁盾构下穿既有铁路施工风险控制与措施[J]. 中国高新科技, 2018(12): 84.
- MENG Wei. Construction risk control and measures of subway shield crossing existing railway[J]. China High-Tech, 2018(12): 84.
- [10] 王炳军. 地铁隧道盾构法施工对邻近桩基变形与内力的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- WANG Bingjun. Influence of subway tunnel shield construction on deformation and internal force of adjacent pile foundation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.

(收稿日期:2021-03-10)