

地铁盾构隧道下穿哈大高铁桥梁段沉降控制分析

刘立明¹, 张明俭^{2*}, 李晓鸥³

¹沈阳铁道工程建设管理有限公司, 辽宁 沈阳

²中国铁路沈阳局集团有限公司, 辽宁 沈阳

³蒙辽铁路客运专线有限责任公司, 辽宁 沈阳

Email: *11017085@qq.com

收稿日期: 2021年8月10日; 录用日期: 2021年9月6日; 发布日期: 2021年9月13日

摘要

本文以大连地铁5号线后盐至后关村区间岩溶地层中盾构隧道下穿哈大高铁桥梁段工程为背景, 通过有限元计算软件ANSYS建立了“地层-轨下结构-隧道”三维数值计算模型, 结合自动化监测数据分析了盾构隧道施工过程对地表及哈大高铁桥面板、桥墩等既有结构的变形影响。数值计算及实测结果表明下穿施工引起地表沉降模拟值和实测值最大值分别为-0.59和-0.42 mm、桥面板竖向位移最大值分别为-0.45和-0.45 mm、桥墩竖向位移最大值分别为-0.45和-0.42 mm。通过合理控制盾构施工参数, 在中风化白云岩地层中、无地面加固及隔离防护措施条件下地铁盾构隧道下穿哈大高铁线路能够满足沉降控制要求, 保证了下穿段哈大高铁段线路运营安全, 可为中风化白云岩地层类似工程提供借鉴。

关键词

地铁盾构隧道, 下穿, 哈大高铁, 数值计算, 自动监测, 沉降控制

Settlement Analysis of Metro Shield Tunnel Underpass the Bridge Section of Harbin-Dalian High Speed Railway

Liming Liu¹, Mingjian Zhang^{2*}, Xiao'ou Li³

¹Shenyang Railway Engineering Construction Management Co., Ltd., Shenyang Liaoning

²China Railway Shenyang Bureau Group Co., Ltd., Shenyang Liaoning

³Inner Mongolia Liaoning Railway Passenger Dedicated Line Co., Ltd., Shenyang Liaoning

Email: *11017085@qq.com

*通讯作者。

Abstract

Based on the construction project of shield tunnel underpass the Harbin Dalian high speed railway bridge section in karst stratum from Houyan to Houguancun of Dalian Metro Line 5, this paper proposed the three-dimensional numerical model of "stratum structure tunnel" established by ANSYS and the automatic monitoring data, then, the influence of shield tunnel construction process on the deformation of surface and existing structures such as bridge deck and pier of Harbin-Dalian high speed railway is analyzed. The numerical calculation and measured results show that the maximum values of simulated and measured surface settlement caused by construction are -0.59 mm and -0.42 mm respectively, the maximum vertical displacement of bridge deck is -0.45 mm and -0.45 mm respectively, and the maximum vertical displacement of pier is -0.45 mm and -0.42 mm respectively. The results of numerical calculation and field measurement show that through reasonable control of shield construction parameters, the subway shield tunnel undercrossing Harbin-Dalian high-speed railway line can meet the requirements of settlement control in the moderately weathered dolomite stratum without ground reinforcement and isolation protection measures, which can ensure the operation safety of the undercrossing section, and provide reference for similar projects in the moderately weathered dolomite stratum.

Keywords

Metro Shield Tunnel, Underpass, Harbin-Dalian High Speed Railway, Numerical Calculation, Automatic Monitoring, Settlement Control

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国国民经济发展及交通强国建设不断推进,城市轨道交通进入大规模建设时期。轨道交通形式的多样化、立体化也在不断发展,轨道交通线路之间近接施工、相互影响不可避免,其中地铁隧道下穿既有高铁线路是上述研究难题的典型[1]。由于高铁运行速度高,对线路平顺性要求极为严格,如何保障既有高铁线路运营安全是地铁隧道下穿既有高铁线路施工的核心[2]。

诸多地铁隧道施工方法中,盾构法地铁隧道施工对周边环境影响小、地质条件适应能力强、施工相对安全、迅速,成为地铁隧道下穿既有高铁线路的首选[3]。

盾构法地铁隧道下穿既有铁路线国内外已有不少工程案例[4],尤其是对于岩溶不良地质作用条件下采取地面加固[5]及隔离保护措施[6][7]地铁隧道下穿施工,国内已有不少应用,但是如何在岩溶地区无地面加固及隔离保护措施条件下保障盾构法地铁隧道下穿既有高铁线路时高铁线路的运营安全成为岩溶地区地铁下穿高铁线路时面临的一道难题。

本文以大连地铁5号线后盐至后关村区间岩溶地层中盾构隧道下穿哈大高铁桥梁段施工工程为背景,在统计分析溶洞及岩体破碎带的分布规律及充填物特征的基础上,提出了溶洞及岩体破碎带处治的原则与范围;通过建立“地层-轨下结构-隧道”三维数值计算模型并结合现场自动化实测数据,分析了无地面加固措施及无隔离防护措施条件下盾构隧道下穿施工对于哈大高铁的影响,实现了盾构隧道安全顺

利下穿哈大高铁桥梁段，确保了下穿段以及哈大高铁段线路的运营安全。

2. 工程概况

2.1. 工程简介

大连地铁 5 号线后盐至后关村区间线路全长约 3344.0 m，采用盾构法施工，错缝拼装；管片内径 5.5 m、外径 6.2 m，环宽 1.2 m、厚 0.35 m，3 标准块 + 2 邻接块 + 1 封顶块。由于线路条件及站点设置，区间隧道需在哈大高铁(有砟道床，无缝线路，双线 2 股道，行车速度为 200 km/h)桥梁段 K21+071~+200 处下穿金洲湾 1 号特大桥，穿越长度为 14.95 m。

区间隧道在下穿段线路左、右线平面曲线半径均为 500 m，下穿高铁段区间线路为缓和曲线，长 70 m，其中区间左线下穿 31、32 号桥墩(独立扩大基础)，右线下穿 32、33 号桥墩(独立挖井基础)。区间隧道与哈大高铁相对位置关系见图 1、图 2。区间左线隧道距 31 号桥墩基础水平净距最近 3.27 m、最远 9.91 m，竖向净距 17.10 m；距 32 号桥墩基础水平净距最近 3.03 m、最远 11.31 m，竖向净距 16.45 m；区间右线隧道距 32 号桥墩基础水平净距最近 2.97 m、最远 11.27 m，竖向净距 16.23 m；距 33 号桥墩基础水平净距 3.07 m、最远 10.01 m，竖向净距 13.09 m。

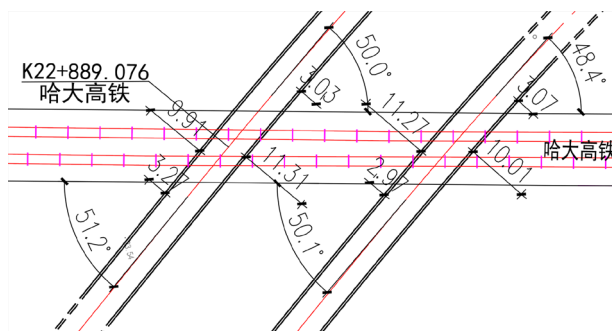


Figure 1. Plane position relationship between shield tunnels and Harbin Dalian high speed railway

图 1. 区间盾构隧道与哈大高铁平面位置关系图

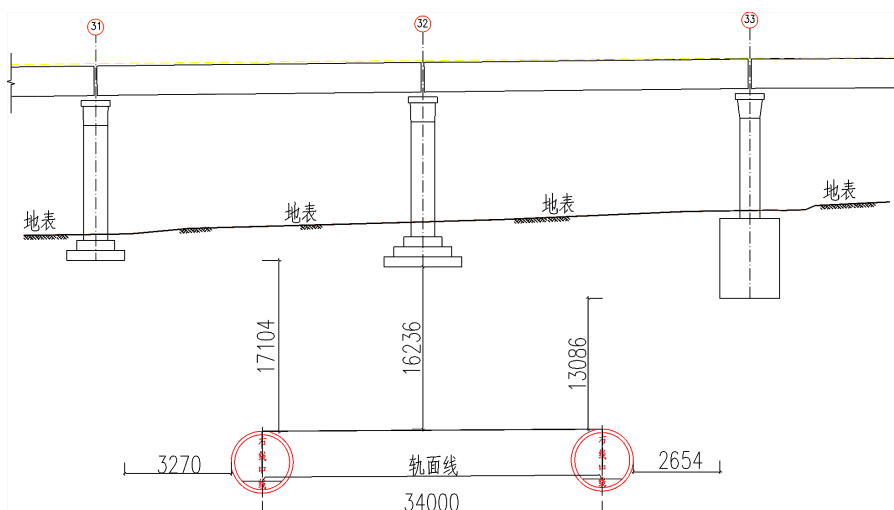


Figure 2. Sectional location relationship between shield tunnel and Harbin Dalian high speed railway

图 2. 区间盾构隧道与哈大高铁剖面位置关系图

2.2. 工程地质及水文条件

下穿段主要穿越地层为中风化白云岩, 岩体完整~较破碎, 局部发育有溶洞, 地表无明显水源, 主要受大气降水影响。根据地层的时代成因及其工程特征, 下穿段地层分为 3 个主层, 地层分布见图 3。

2.3. 不良地质作用处理

下穿段不良地质作用主要由石灰岩溶蚀形成的溶洞及岩体破碎带。据下穿区域内详勘结果, 共揭露溶洞 12 处、岩体破碎带 4 处, 溶洞及岩体破碎带平面分布见图 4。溶洞及岩体破碎带分布规律为隧道顶板以上 10 个, 占 62.50%, 洞径 0.4~2.2 m; 隧道结构范围内 5 个, 占 31.25%, 洞径 0.3~2.6 m; 隧道底板以下 1 个, 占 6.25%, 洞径 0.9 m。根据岩溶及破碎带处理以洞内注浆加固措施为主的原则, 洞内注浆处理措施所用浆液采用水泥浆, 注浆终压为 0.5 Mpa; 注浆速率为 30~70 L/min, 实际施工时根据现场试验确定; 终止注浆标准以各孔注浆压力稳定 10 min 以上、且注浆口浆液速度小于初始浆液速度的 1/4 确定。

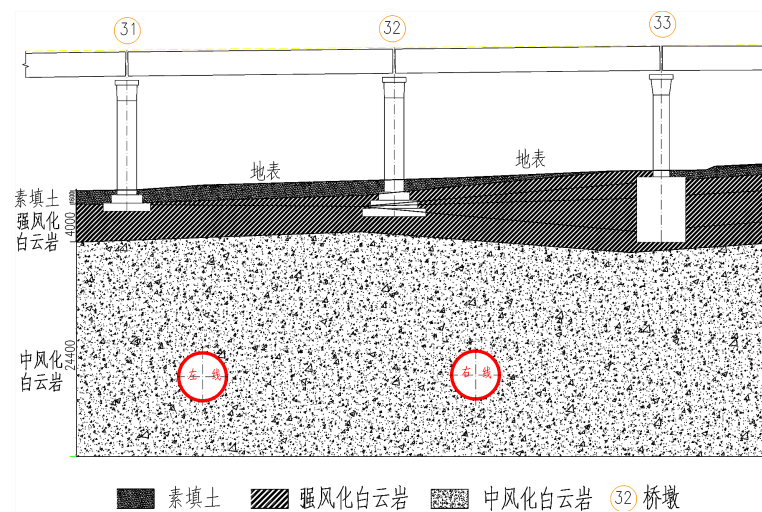


Figure 3. Stratigraphic distribution of underpass

图 3. 下穿段地层分布

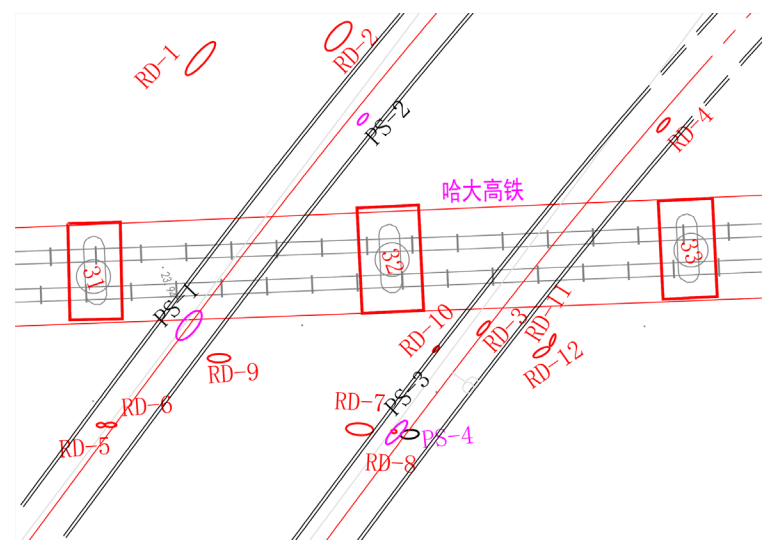


Figure 4. Plane distribution of karst and rock mass fracture zone

图 4. 溶洞及岩体破碎带平面分布

3. 盾构隧道下穿对既有结构影响分析

利用有限元计算软件 ANSYS 建立“地层-轨下结构-隧道结构”的三维数值计算模型,结合自动化实测数据分析了区间盾构隧道施工过程中对地表、既有哈大高铁线桥墩等既有结构的变形影响。

3.1. 数值计算模型

为尽量减小边界效应影响,隧道两侧各取 4 倍洞径即物理模型宽度为 56 m;隧道下方地层取 20 m 即物理模型高度为 40 m;隧道轴向长度取为 48 m;物理模型包括素填土、强、中风化白云岩地层以及高铁桥梁、桥墩及基础等。

物理模型顶部为自由边界,底部为竖向约束,四周为法向约束;盾构隧道管片、地层等结构均为 Solid45 三维实体单元,网格划分单元总数为 140,546,节点数为 562,184,有限元计算模型见图 5。

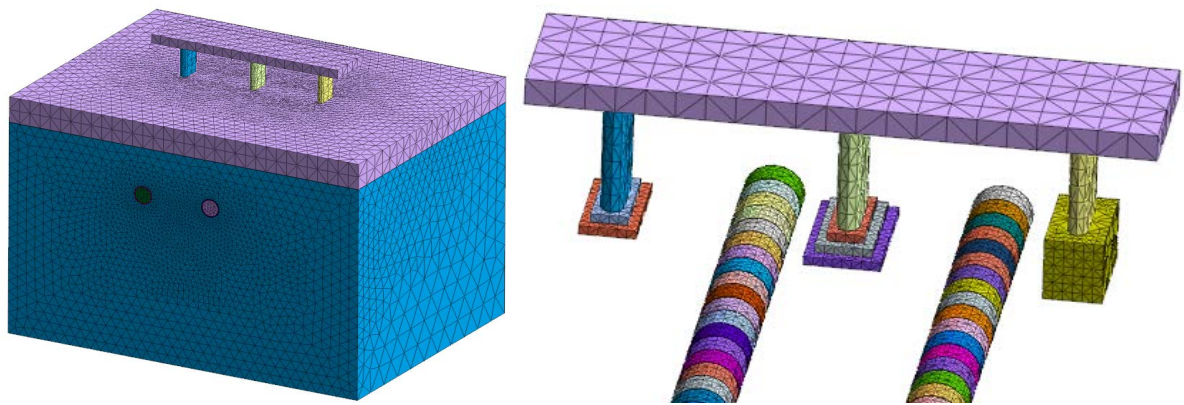


Figure 5. Finite element calculation model

图 5. 有限元计算模型

3.1.1. 计算参数

地层参数根据详勘地质资料参数表选取,见表 1;桥梁结构及隧道管片结构所用材料,见表 2。

Table 1. Physical and mechanical parameters of formation

表 1. 地层物理力学参数

地层	参数	弹性模量/MPa	泊松比	重度/kN/m ³	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
杂填土		40	0.45	17	10	15
中风化石灰岩		39500	0.23	27	130	35

Table 2. Parameters of support and grouting reinforcement

表 2. 支护及注浆加固参数

地层	参数	厚度/mm	弹性模量/MPa	泊松比	重度/kN/m ³
衬砌管片		350	34,500	0.2	25
壁后注浆		140	210	0.2	23
墩台基础		/	28,000	0.2	25
桥梁结构		/	34,500	0.2	25

模型计算时荷载除考虑地层、结构自重外,依据《铁路列车荷载图式》(TB 3466-2016) [8]中考虑安全因素的列车标准活荷载,计算取 20 kPa。

3.1.2. 盾构施工参数设置

切口距铁路保护线 20 m 时检查盾构机状态,保证其处于最佳条件;根据试验段盾构施工参数及同步监测数据确定盾构施工参数如下:土仓压力为 0.65~0.75 bar;刀盘转速为 1.5 r/min;推力在 12,000~14,000 kN;掘进速度为 8~15 mm/min;同步注浆量 6.4 m³/环;出渣量控制在 57 m³/环;同步注浆初凝时间控制在 4 h。

3.1.3. 施工过程模拟

依据盾构隧道施工过程及特点,计算分为 40 步完成,盾构沿隧道轴线掘进一环(1.2 m)为一步;盾构掘进和隧道结构施作通过单元生死法实现,同时通过地层参数硬化实现溶洞处理措施对于地层参数的影响。

3.2. 自动化监测

监测结果是施工效果的直接反映,为了能准确获取相关数据及时反馈并指导区间盾构隧道的施工参数设置,采用三维整体平差、自由设站的方法[9]进行自动化监测并辅以人工监测以获取相关数据。

3.2.1. 监测范围

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013) [10]、《高速铁路工程测量规范》(TB 10601-2009) [11]规定及前述数值计算结果确定的区间盾构隧道穿越哈大高铁桥梁影响区为垂直于高铁线路中心线外两侧各 12.8 m,沿 32#桥墩中心向高铁纵向长度各 40 m。

3.2.2. 监测内容及控制指标

在本区间盾构隧道下穿施工影响的地表竖向位移、高铁桥梁各处竖向位移是监测的重点:

- ①影响区域范围内沿桥墩中心连线的地表沉降;
- ②桥梁桥面板竖向位移;
- ③桥梁墩台竖向位移。

测点布置见图 6、图 7:地表竖向位移测点沿桥墩中线布置,图 6 中从左至右为 1 至 17 号测点;图 7 中桥面板竖向位移测点位于桥梁底部中点,1 至 4 号测点分别位于 30#、31#、32#、33#、34#桥墩上桥梁底部中点;桥墩竖向位移 1 至 4 号测点分别位于 30#、31#、32#、33#、34#桥墩中部。

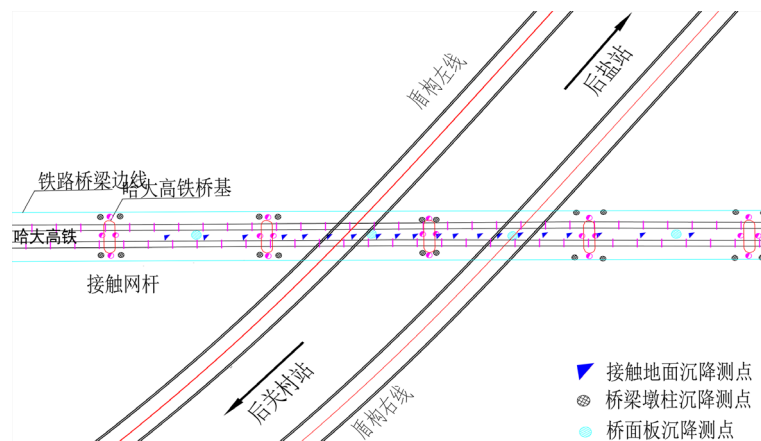


Figure 6. Layout of monitoring points
图 6. 监测点布置平面图

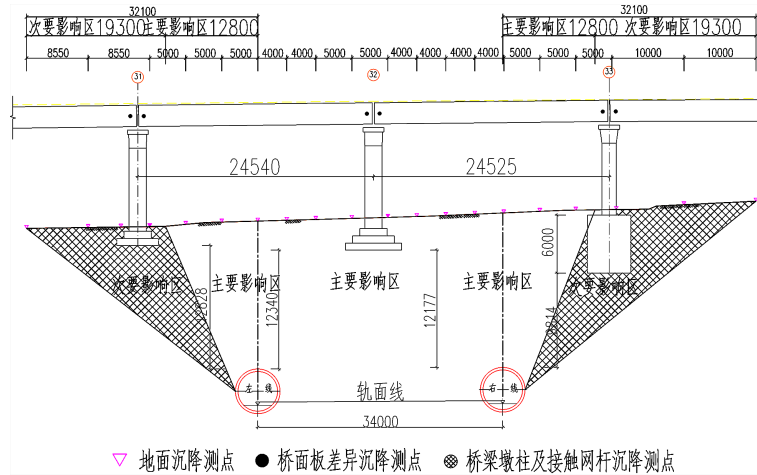


Figure 7. Layout profile of monitoring points
图 7. 监测点布置剖面图

参考规范[12]及类似工程实际控制指标, 本着从严控制原则, 确定相关控制指标及预警值, 见表 3。

Table 3. Relevant control index and early warning value
表 3. 相关控制指标及预警值

监测区域	监测内容	累计变化值/mm			变化速率 mm/d
		预警值	报警值	控制值	控制值
地表	竖向位移	2.8	3.2	4.0	0.5/1.0
桥梁	墩柱竖向位移	1.0	1.2	1.5	0.5/1.0
	桥面板竖向位移	1.0	1.2	1.5	/

3.3. 结果分析

3.3.1. 数值计算结果分析

通过建立的“地层-轨下结构-隧道”三维有限元数值计算模型对地铁盾构隧道下穿哈大高铁桥梁段施工过程数值计算结果及分析如下: 1) 盾构隧道施工引起地表沉降最大值为-0.42 mm, 位于 DBC-05, 盾构隧道施工引起地表沉降小于预警控制标准 2.0 mm, 满足要求。2) 盾构隧道施工引起桥面板竖向位移最大值为-0.45 mm, 位于 QL-02 点位, 隧道施工引起的桥面板竖向位移小于变形控制标准 1.0 mm, 满足要求。3) 盾构隧道施工引起桥墩竖向位移最大值为-0.42 mm, 位于 QL-03 点位, 隧道施工引起的桥面板竖向位移小于变形控制标准 1.0 mm, 满足要求。

3.3.2. 实测数据分析

1) 地表竖向位移实测分析

由图 8 可知, 在盾构机切口进入桥梁保护边线后由于挤压地层等综合作用下地表略有隆起, 此时根据实时监测数据及时调整盾构施工参数以减少对周围地层的扰动; 在 12 月 1 日后施工期间, 地表各点竖向位移均表现为沉降; 地表各点竖向位移累计沉降最大值为-0.59 mm, 即 12 月 8 号盾构机位于 DBC-05 点位下, 沉降速率约为-0.06 mm/d。各地表沉降测点的累计沉降值未超过表 3 的累计变化值及变化速率的控制范围。

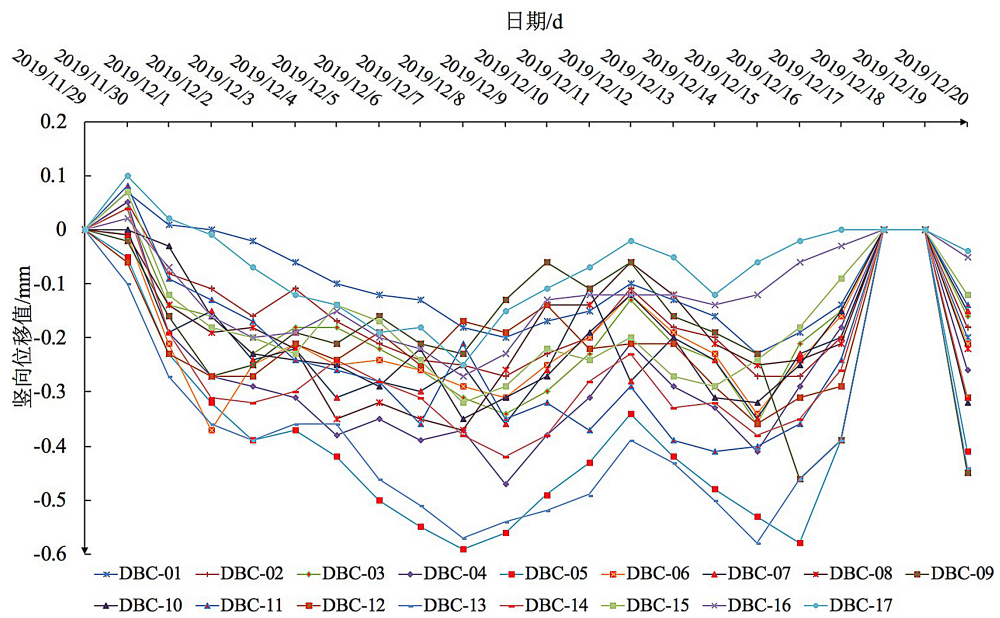


Figure 8. Vertical displacement of ground surface

图 8. 地表竖向位移

2) 桥面板竖向位移实测分析

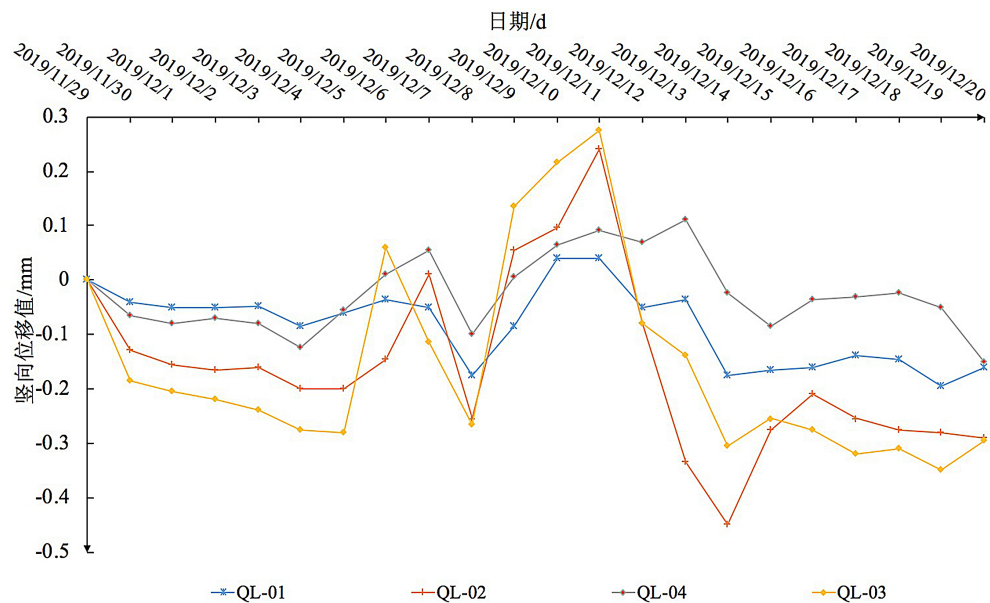


Figure 9. Vertical displacement of bridge deck

图 9. 桥面板竖向位移

由图 9 可知, 在左、右线盾构隧道穿越哈大铁路桥墩过程中, 桥面板位移呈现出先沉降后隆起再沉降后趋于稳定的趋势。在左线盾构到达桥墩前, 桥面板的沉降量很小, 介于 0~0.3 mm 之间。随后左线盾构穿越过程中, 桥面板均发生不同程度的隆起, 最大隆起量仅为 0.06 mm。在左线盾构离开后, 桥面板受地层损失和周围地层扰动的影响出现近 0.27 mm 的沉降。

当右线盾构再次穿越、离开桥墩时, 桥面板同样发生先隆起再沉降的位移变化趋势, 最大隆起量达

到 0.3 mm。最终, 桥面板总体表现为下沉趋势, 介于 0.15~0.45 mm 之间。可见, 注浆率维持在 200% 可有效减小盾构掘进对高铁桥面板的影响。由于左线穿越 31#、32#桥墩, 右线穿越 32#、33#桥墩, 因此位于 32#桥墩两侧的 QL-02 和 QL-03 测点的沉降和隆起量均明显高于远离左右线盾构的 QL-01 和 QL-04 测点位移。各桥墩之间的桥面板竖向位移均未超过表 3 的累计变化值及变化速率的控制范围。

3) 桥梁墩柱竖向位移实测分析

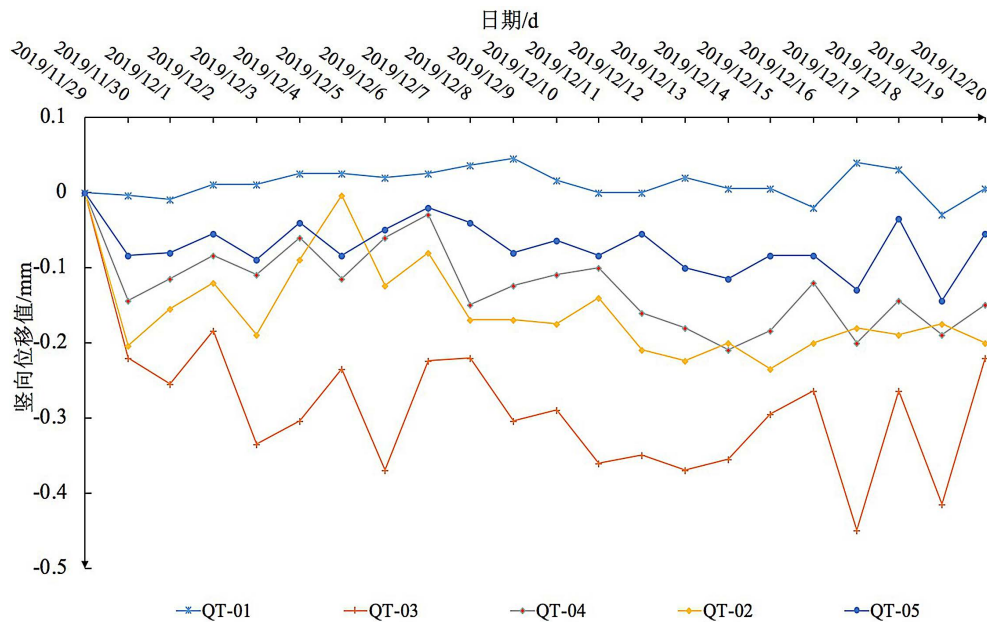


Figure 10. Vertical displacement of pier column of bridge
图 10. 桥梁墩柱竖向位移

由图 10 可知, 左线盾构隧道的开挖, 对高铁桥梁基础产生扰动, 引起左线两侧独立扩大基础的 31# 和 32#桥墩的竖向位移明显大于 33#墩。随着右线盾构隧道开挖至左线和右线贯通, 33#桥墩基础的竖向位移开始逐渐加大, 双线贯通后其最大沉降为 0.21 mm, 位于左线和右线隧道中间的 32#桥墩基础出现最大沉降为 0.45 mm。远离左右线盾构隧道的 30#和 34#桥墩的沉降量相对较小。桥墩沉降整体呈现逐渐增大的趋势并最终趋于稳定。各桥墩的累计沉降值均未超过表 3 的累计变化值及变化速率的控制范围。

4. 结论

本文以大连地铁 5 号线后盐至后关村区间岩溶地层中盾构隧道下穿哈大高铁桥梁段施工工程为背景, 通过三维数值计算结果与相关现场实测数据进行结合分析, 得出结论如下:

1) 经数值计算结果分析, 盾构隧道施工引起地表沉降最大值为-0.42 mm、桥面板竖向位移最大值为-0.45 mm、桥墩竖向位移最大值为-0.42 mm, 均小于预警控制标准 2.0 mm, 满足要求。

2) 自动化监测数据中地表沉降、桥面板及桥墩竖向位移沉降量最大值分别为-0.59、-0.45 和-0.43 mm, 表明在中风化白云岩饱和单轴抗压强度近 40 MPa 地层中, 通过合理控制盾构施工参数, 能够满足在地铁盾构隧道埋深 2 倍洞径、水平最小净距 2.97 m、无地面注浆加固及隔离桩防护措施条件下盾构隧道下穿哈大高铁桥梁段明挖扩大基础、墩台、轨道等铁路设施的沉降控制要求, 可为中风化白云岩地层类似工程提供借鉴。

参考文献

- [1] 周顺华. 地铁盾构法隧道下穿工程[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 张鹏. 地铁隧道下穿高速铁路地表沉降控制标准研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(z1): 1700-1703.
- [3] Cho, A., Bowers, T. and Larsen, B. (2016) Slurry Wall Excavations for a Starter Trench and Receiving Shaft of a New York City Siphon Tunnel Project. *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*, Phoenix, Arizona, 14-17 February 2016, 387-401. <https://doi.org/10.1061/9780784479742.032>
- [4] 方勇, 何川. 盾构法修建正交下穿地铁隧道对上覆隧道的的影响分析[J]. 铁道学报, 2007(2): 83-88.
- [5] 胡建华. 广州地铁五号线草淘盾构区间溶洞处理方案[J]. 西部探矿工程, 2006(S1): 270-271.
- [6] 贾大鹏, 夏柏如, 张影, 张丽芳. 地铁盾构施工下穿高速铁路隔离保护技术[J]. 铁道建筑, 2015(3): 73-75.
- [7] 毕树峰. 岩溶区高速铁路桩基础施工溶洞处理技术研究[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 200-202.
- [8] 国家铁路局. TB3466-2016 铁路列车荷载图式[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [9] 张忠良, 杨友涛, 刘成龙. 轨道精调中后方交会点三维严密平差方法研究[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(5): 33-36.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50911-2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [11] 国家铁路局. TB 10601-2009 高速铁路工程测量规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [12] 国家铁路局. TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.