

北京地区小净距隧道下穿高速铁路路基段的施工影响^{*}

高利琴¹ 易领兵² 吕兆龙³ 郑力铭⁴ 权威² 聂善军² 胡楠² 刘胜欢⁵

(1. 河南水利与环境职业学院水利工程系, 450008, 郑州; 2. 中国交通建设股份有限公司, 100088, 北京;

3. 郑州一建集团有限公司, 450099, 郑州; 4. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 100088, 北京;

5. 中国建筑第八工程局有限公司, 200122, 上海//第一作者, 讲师)

摘要 以下穿既有高速铁路路基段的北京地区新建小净距暗挖区间工程为背景, 采用 Madis/GTS 有限元软件建立有限元模型对下穿施工过程进行计算分析。总结了小净距暗挖区间施工过程中既有高速铁路路基水平位移及沉降变化特征, 并用实际监测数据总结位移变化规律, 验证了数值计算的可行性。基于类似项目相关数据, 提出了下穿施工过程中高速铁路的路基结构及轨道变形控制指标。

关键词 小净距暗挖隧道; 下穿高速铁路路基; 路基变形控制

中图分类号 U455; U216.41⁺1: U238

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.026

Construction Influence of Small Clear Distance Tunnel Under-crossing High-speed Railway Subgrade Section in Beijing

GAO Liqin, YI Lingbing, LYU Zhaolong, ZHENG Liming, QUAN Wei, NIE Shanjun, HU Nan, LIU Shenghuan

Abstract With the background of newly-built small clear distance underground excavation interval project in Beijing under-crossing the existing high-speed railway subgrade section, a finite element model is established by using the Madis/GTS finite element software to calculate and analyze the construction process of under-crossing. The characteristics of the horizontal displacement and settlement of the existing high-speed railway subgrade during the construction of the small clear distance underground excavation interval are summarized. The displacement variation pattern is summarized with the actual monitoring data to verify the feasibility of the numerical calculation. Based on the relevant data of similar projects, the subgrade structure and track deformation control indexes of high-speed railway during the construction of under-crossing are put forward.

Key words small clear distance excavation tunnel; under-crossing high-speed railway subgrade; subgrade deformation control

First-author's address Department of Hydraulic Engineering, Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, 450008, Zhengzhou, China

目前,小净距暗挖隧道施工对邻近既有盾构隧道、房屋、市政管线、普速铁路等设施影响的研究较多^[1-10]。由于小净距暗挖区间隧道下穿高速铁路的情况较少出现,故小净距暗挖隧道施工对高速铁路影响的研究极少。

本文以某下穿既有高速铁路路基段的新建小净距暗挖区间工程为背景,用 Madis/GTS 有限元软件对施工过程进行了模拟分析,研究施工过程中既有高速铁路的路基位移变化特征,收集相关的实际监测数据,用于总结位移变化规律,并验证有限元模拟计算的可行性。

1 工程概况

本研究选取北京地铁昌平线南延伸段(以下称为“昌南线”)清河站北侧区间(以下称为“清河北区间”)作为研究对象。清河北区间长 1 070.2 m,设计里程为 K31 + 499.797—K32 + 569.997。清河北区间有多种结构形式,从小里程段起依次为:高架段,长 203.4 m;路基段,长 130.3 m;U 型槽明挖段,长 211.9 m;地下明挖框架段,长 129.6 m;地下暗挖段,长 250 m;合槽明挖框架段,长 145 m。

清河北区间的地下暗挖段下穿京张高铁(北京—张家口高速铁路),二者位置关系图如图 1 所

^{*} 郑州交通重点工程建设管理中心横向委托资助项目(51000128)

示。清河北区间采取了初期支护加强措施,且左右线初期支护净距为 903~1 145 mm。下穿处的京张高铁里程为 K24+120 附近。

清河北区间穿越段为平直段,总长 72 m,对应里程为 K32+303.000—K32+375.000。下穿范围的场地地下水位埋深为 27.0 m。暗挖二次衬砌结构底板埋深约为 17.0 m,未进入地下水范围。

北京地铁 19 号线支线清河站两侧区间为预留,与昌南线工程同期实施,建成后可与昌南线及北京既有地铁 M13 号线在清河站换乘。工程位置关系如图 1 所示。

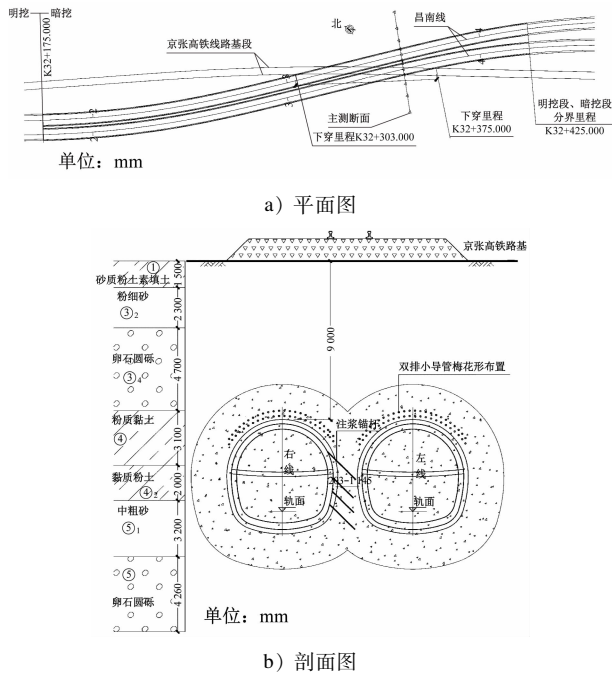


图 1 下穿高铁路基工程位置关系图

Fig. 1 Position relation diagram of under-crossing high-speed railway subgrade project

清河北区间下穿处的京张高铁为路基段。路基基床厚度为 1.2 m。其中,基床表层为厚 0.6 m 的级配碎石,中粗砂层厚 0.1 m,基床底层厚 0.5 m。京张高铁地处严寒地区,冻结影响范围填料应符合防冻胀要求。基床填料及压实的要求见表 1。

路基基床以下部位填料最大粒径不宜大于 300 mm 或摊铺厚度的 2/3。填料及压实标准见表 2。

2 有限元计算模型的模拟计算

2.1 有限元计算模型的建立

根据相关资料,采用 Midas/GTS 有限元分析软件建立三维空间施工模型,并对不同施工工况进行

表 1 路基基床厚度、填料及压实的要求

Tab. 1 Standards of subgrade thickness, filing and compaction

层位	厚度/m	填料	地基系数 $K_{30}/$ (MPa/m)	压实系 数 k	孔隙率 $n/\%$
基床表层	0.6	级配碎石	≥ 150		< 28
		化学改良土	≥ 100	0.93	
基床底层	0.5	砾石类	≥ 120		< 31
		碎石类	≥ 130		< 31

表 2 路基基床以下部位填料及压实标准表

Tab. 2 Standards of filing and compaction below subgrade bed

参数	压实标准		
	化学改良土	砾石类	碎石类
$K_{30}/$ (MPa/m)	≥ 80	≥ 110	≥ 120
$n/\%$	9	< 32	< 32
k	≥ 0.9		

模拟计算。计算初始条件为新建工程尚未施工,且既有高铁路基处于变形稳定状态。

基于施工过程中的空间效应,对新建清河北区间地下暗挖段地层和既有的京张高铁路基结构进行实体建模,如图 2 所示。

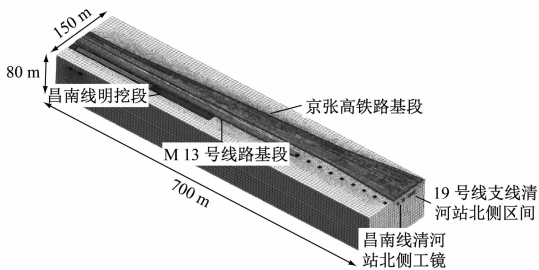


图 2 清河北区间下穿京张高铁的三维地层-结构模型图

Fig. 2 Three-dimensional stratigraphic-structural model map of Qinghe north interval under-crossing Beijing-Zhangjiakou High-speed Railway

为确保三维模型有足够的计算精度并尽量减少收敛时间,本次计算对模型范围作如下限定:沿长度方向取 700 m,宽度方向取 150 m,垂直方向上从地表以下取 80 m。模型中:地面超载取 20 kPa,高铁列车荷载取 50 kN/m;板、墙结构采用二维板单元模拟,围护结构采用板单元模拟,本构关系为弹性;路基段、土层采用实体单元,本构关系为摩尔库伦(M-C);采用固定位移边界,上边界取至地面,为自由面;4 个侧面地层边界限制水平位移;下部边界

限制竖向位移。昌南线的结构模型如图 3 所示。

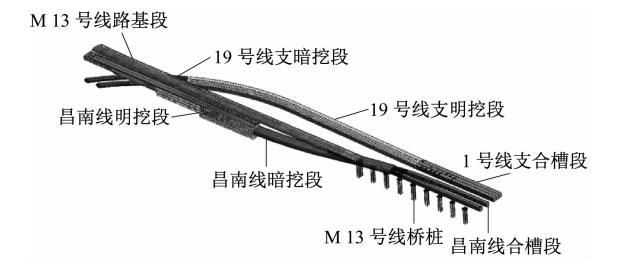


图 3 昌南线清河北区间的结构模型图
Fig. 3 Diagram of Changnan Line Qinghe north interval rail structure model

由于本工程下穿段施工步序较复杂,故本文简化为 6 个主要施工步序:步序 1,初始地应力平衡;步序 2,昌南线暗挖段全断面注浆;步序 3,昌南暗挖段开挖;步序 4,昌南线暗挖段支护;步序 5,施加列车荷载;步序 6,昌南线暗挖段的二次衬砌施工。为节约篇幅,仅选取有代表性的工况进行研究。工况一为昌南线暗挖区间施作完初期支护后,工况二为昌南线暗挖区间施作二次衬砌后。

土体及车站的材料参数见表 3。

表 3 材料参数表					
Tab. 3 Material parameter list					
材料	重度/(kN/m ³)	变形模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
〈1〉砂质粉土素填土	18.4	3.00	0.29	8	10
〈3-2〉粉细砂	19.5	6.47	0.33	0	35
〈3-4〉卵石圆砾	19.8	7.00	0.29	30	20
〈4〉粉质黏土	19.8	12.00	0.25	25	20
〈4-2〉黏质粉土	20.5	12.00	0.25	25	20
〈5-1〉中粗砂	20.2	10.00	0.26	0	35
〈5〉卵石圆砾	22.0	50.00	0.26	0	40
加固区土体	22.0	120.00	0.35	40	46
结构	25.0	30 000	0.20		

2.2 计算结果分析

在工况一和工况二下,京张高铁路基结构的水平位移和沉降计算结果如图 4—7 所示。



图 4 工况一水平位移云图
Fig. 4 Nephogram of horizontal displacement under working condition I



图 5 工况二水平位移云图
Fig. 5 Nephogram of horizontal displacement under condition II

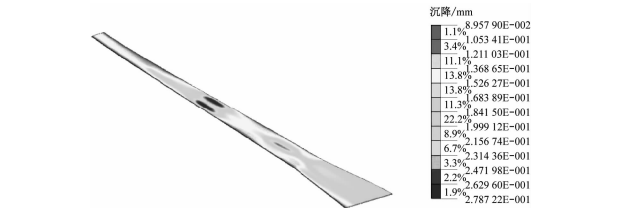


图 6 工况一沉降云图
Fig. 6 Nephogram of vertical settlement under working condition I

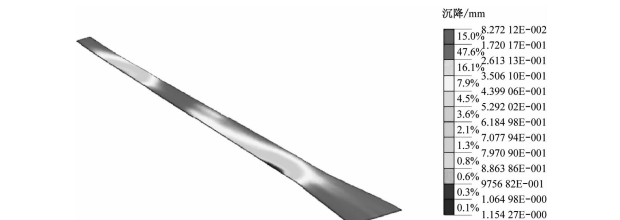


图 7 工况二沉降云图
Fig. 7 Nephogram of vertical settlement under working condition II

由图 4—7 可知:

1) 工况一下,高铁路基结构水平位移最大值为

0.01 mm,沉降最大值为 0.28 mm;
2) 工况二下,高铁路基结构水平位移最大值为 0.01 mm,沉降最大值为 1.15 mm。

3 实际监测数据

现场监测可及时提供实时数据,以便现场施工及时调整参数,保证京张高铁线的运行安全。本文选取主断面位置进行分析。主断面的监测点布置图如图 8 所示。

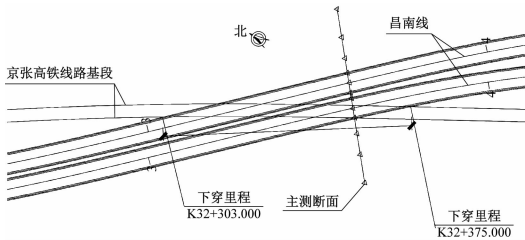


图 8 主断面监测点布置图

Fig. 8 Layout of monitoring points of main survey section

工况二下的主断面监测点数据见图 9。

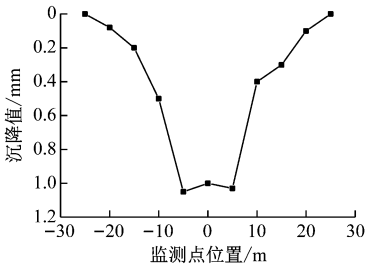


图 9 主断面的监测点数据

Fig. 9 Monitoring point data of main survey section

由图 9 可知,主断面的最大沉降监测值为 1.05 mm。而有限元模型模拟计算结果中的最大沉降值为 1.15 mm。二者基本一致,说明模型准确性较好。

4 变形控制

4.1 其他类似项目

为更加全面地反映北京地区新建小净距暗挖隧道对既有结构沉降的影响程度,现整理 5 个已完工类似项目的既有结构沉降如表 4。由表 4 可知:当采取合理的施工方法和防护措施时,可将新施工暗挖隧道对既有结构的沉降控制在合理范围;其他类似项目的既有结构沉降最大值为 4.83 mm,最小值为 2.35 mm。

对比类似项目数据可知,清河北区间隧道下穿

对京张高铁路基的沉降影响是可控的。

表 4 北京地区新建小净距暗挖隧道下穿时既有结构的沉降
Tab. 4 Settlement of newly built small clear distance excavation tunnel under-crossing existing structure in Beijing

新施工暗挖隧道	既有工程结构	施工方法	最大沉降值/mm
公主坟站 ^[6]	车站	CRD 法	2.91
军博站 ^[7]	区间	CRD 法	2.35
南水北调暗涵 ^[5]	车站	台阶法	4.83
郑常庄热力隧道 ^[6]	区间	台阶法	2.60
国贸站-双井站区间 ^[8]	区间	CRD 法	4.69

注:CRD 法为交叉中隔墙法。

4.2 控制指标

根据 TB 10182—2017《公路与市政管线下穿高速铁路技术规程》,对于列车设计运行速度为 200 ~ 250 km/h 的线路,轨道静态几何尺寸容许偏差管理值如表 5 所示。

表 5 200 ~ 250 km/h 线路轨道静态几何尺寸容许偏差管理值表
Tab. 5 Management value of allowable deviation of track static geometry dimensions for 200 ~ 250 km/h line

项目	容许偏差			
	作业验收	经常保养	临时补修	160 km/h 限速
轨距/mm	±2	+4/-2	+6/-4	+8/-6
水平/mm	3	5	8	10
高低/mm	3	5	8	11
轨向(直线)/mm	3	4	7	9
扭曲/(mm/3 m)	3	4	6	8
轨距变化率	1/1 500	1/1 000		

从有限元模型计算结果及实际监测数据来看,新建小净距暗挖隧道施工引起的高铁路基结构的沉降及水平位移均较小。

基于工程实际特点、现有常规测量仪器的监测精度、运营安全要求及变形预测结果,在京张高铁的路基及轨道预测变形值、结构验算应力的基础上,考虑一定的安全裕度,可确定京张高铁的路基结构及轨道变形控制指标。为能及时采取措施控制京张高铁的变形,本文提出将控制值的 70% 作为预警值,将控制值的 80% 作为报警值。变形控制值如表 6 及表 7 所示。

表 6 高速铁路基及轨道结构最终累计变形控制值表

Tab. 6 Final accumulative deformation control value of high-speed railway subgrade and track structure

部位	位移	预警值/ mm	报警值/ mm	控制值/ mm
路基结构	水平位移	1.75	2.0	2.5
	沉降	1.75	2.0	2.5
轨道变形	水平位移	1.75	2.0	2.5
	沉降	1.75	2.0	2.5

注:水平位移包括沿轨道方向和垂直于轨道方向。

表 7 结构变形速率控制值表

Tab. 7 Structural deformation rate control values

变形速率控制指标	控制值
竖向变形速率/(mm/d)	0.5
水平变形速率/(mm/d)	0.5

5 结论

- 1) 既有高铁的路基水平位移及沉降均满足控制标准。
- 2) 监测数值与模拟数值结果基本一致,验证了数值计算结果的可靠性。
- 3) 数值计算结果显示:清河北区间施作完初期支护后,京张高铁路基结构水平位移最大值为 0.01 mm,竖向位移最大值为 0.28 mm;清河北区间施作二次衬砌后,高铁路基结构水平位移最大值为 0.01 mm,沉降最大值为 1.15 mm。

参考文献

[1] 马梁. 三孔小净距隧道后行洞施工对先行洞的变形影响及加固对策研究[D]. 济南:济南大学,2019.

MA Liang. Study on the deformation influence of the construction of the back passage of the three hole small clear distance tunnel on the front passage and the reinforcement countermeasures[D]. Ji'nan: Ji'nan University, 2019.

[2] 万涛,林刚,习淑娟. 超小净距地铁三洞隧道群施工动态数值模拟[J]. 铁道工程学报,2016(12):93.

WAN Tao, LIN Gang, XI Shujuan. Numerical simulation analysis of construction behavior for metro triplet tunnels with extremely small spacing[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016 (12): 93.

[3] 王勇,王国欣,李金会,等. 城市超小净距大断而叠层隧道群

施工过程动态模拟与分析[J]. 现代隧道技术,2018(增刊 2):1210.

WANG Yong, WANG Guoxin, LI Jinhui, et al. Dynamic simulation and analysis on construction process of overlapped urban tunnel group with super-small spacing and large cross-section[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018(S2):1210.

[4] 赵胜,陈浩. 砂卵石地层超浅埋小净距暗挖群洞施工探析[J]. 隧道建设,2015(9):907.

ZHAO Sheng, CHEN Hao. Research on construction technologies for super-shallow-covered and close-spaced mined multiple tunnels in sand and gravel strata[J]. Tunnel Construction, 2015 (9):907.

[5] 王振田. 盾构与浅埋暗挖隧道小间距并行施工技术研究[J]. 铁道建筑技术,2019(1):82.

WANG Zhentian. Study on small spacing parallel construction technology of shield and shallow buried excavation tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2019(1):82.

[6] 张龙. 隧道小净距下穿公路隧道施工风险分析及控制措施[J]. 山西建筑,2018(14):175.

ZHANG Long. Construction risk analysis and control measures of small spacing tunnel under-passing highway tunnel[J]. Shanxi Architecture, 2018(14): 175.

[7] 马立忠. 浅埋暗挖法隧道小净距下穿公路隧道施工技术研究[J]. 铁道建筑技术,2016(4):53.

MA Lizhong. Construction technology of the tunnel nearby under-going expressway tunnel with the shallow depth excavation method[J]. Railway Construction Technology, 2016(4):53.

[8] 裴涛涛,郑波,袁顺德. 小净距暗挖隧道下穿铁路动态设计施工分析[J]. 施工技术,2017(增刊 2):1066.

PEI Taotao, ZHENG Bo, YUAN Shunde. Analysis on dynamic design and construction of bored tunnel with little clear spacing distance under-acrossing railway[J]. Construction Technology, 2017(S2):1066.

[9] 付书锋. 三孔小净距隧道洞下穿铁路干线地表沉降控制基准研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2016(1):33.

FU Shufeng. Study on ground settlement control benchmark of three-hole small clear distance tunnel under-crossing railway trunk line[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2016(1): 33.

[10] 路亮. 超浅埋三孔小净距隧道洞下穿铁路干线施工技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2015.

LU Liang. Research on construction technology of ultra-shallow three-hole neighborhood tunnel across railway main line[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015.

(收稿日期:2020-05-24)