

文章编号: 1674—8247(2024)05—0113—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.019

超浅埋隧道下穿运营铁路新工法研究及应用

陈 力¹ 焦康杰²

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125;

(2. 中铁二院贵阳勘察设计院有限公司, 贵阳 550002)

摘 要:随着我国铁路的快速发展,新建浅埋暗挖隧道下穿既有运营铁路常有涉及,新建隧道施工严重威胁铁路运营安全,保障隧道施工安全与既有线运营安全是亟待解决的问题。本文以西南地区某铁路隧道下穿运营铁路工程为背景,提出“短循环,三次衬砌截桩”新工法,通过衬砌结构验算、三维数值模拟及工程应用进行研究。结果表明:(1)在超浅埋隧道小角度下穿运营铁路工程中,该工法使得 D 型便梁可自由组合,摆脱了 D 型便梁长度受限的束缚;(2)三次衬砌不仅提高了永久支护结构的安全系数,而且解决了隧道防水问题;二次、三次衬砌的最小安全系数均位于拱顶,分别为 5.8 和 14.9,均满足规范要求;(3)隧道从两端向中间掘进,初期支护拱顶沉降曲线呈现出中间小两端大的“ Δ ”形态,最后贯通的 8 m 围拱顶沉降最小;(4)待二次衬砌达到设计强度 100% 后再进行人工截桩施工,可以减小因桩体支撑点的改变所引起的隧道拱部沉降量;(5)该工法通过短开挖及时支护控制隧道应力释放,进而减小地层损失所引起的地表沉降对运营铁路的轨道变形影响。经过 5 年跟踪调查,该工程未发现衬砌裂缝及渗漏水等病害,充分验证了该工法的安全可行性。

关键词:浅埋隧道;下穿铁路;新工法;数值分析;工程应用

中图分类号:U455 **文献标志码:**A

Study on Novel Methodology for Ultra-shallow Tunnel Construction underneath Operational Railways and Application

CHEN Li¹ JIAO Kangjie²

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China;

2. Guiyang Survey and Design Co., Ltd. of CREEC, Guiyang 550002, China)

Abstract: Amidst the rapid expansion of China's railway network, the construction of new shallow tunnels that cross beneath existing operational railway lines is increasingly common, posing significant threats to the safety of both tunnel construction and railway operations. Based on the construction of a railway tunnel, this study introduced a novel “short cycle, three-stage lining with pile cutting” approach. Through the examination of lining structure calculations, three-dimensional numerical simulations, and practical applications, the following conclusions are drawn: (1) In ultra-shallow tunneling projects involving small-angle crossings beneath operational railways, this methodology enables flexible assembly of D-type temporary supports, overcoming limitations imposed by fixed D-type beam lengths. (2) The three-stage lining not only enhances the safety factor of the permanent support structure but also addresses waterproofing concerns. The minimum safety factors for the secondary and tertiary linings, respectively located in the arch crown, are

收稿日期:2023-02-13

作者简介:陈力(1987-),男,工程师。

引文格式:陈力,焦康杰.超浅埋隧道下穿运营铁路新工法研究及应用[J].高速铁路技术,2024,15(5):113-118.

CHEN Li, JIAO Kangjie. Study on Novel Methodology for Ultra-shallow Tunnel Construction underneath Operational Railways and Application[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5):113-118.

found to be 5.8 and 14.9, both meeting regulatory requirements. (3) Excavation progresses from both ends towards the middle, resulting in a “Λ” shaped profile of initial lining vault settlement, with the smallest settlements occurring in the final 8 m stretch before breakthrough. (4) Undertaking pile cutting after the secondary lining reaches 100% design strength mitigates tunnel vault settlement caused by changes in pile support points. (5) The method effectively manages stress release through short excavation cycles and prompt support installation, thereby minimizing ground settlement-induced railway track deformation due to ground loss. A five-year follow-up investigation reveals no instances of lining cracks or water ingress, substantiating the safety and feasibility of the proposed methodology.

Key words: shallow tunnel; crossing beneath railways; novel construction method; numerical analysis; practical application

近些年我国铁路工程取得了长足发展,截至2023年底,投入运营的铁路隧道18 573座,在建2 668座,规划中5 460座^[1]。新建浅埋暗挖隧道穿越敏感周边环境(如下穿既有运营铁路)常有涉及,并可能对铁路运营安全产生威胁,且随着交通线位用地资源日渐紧张,该问题越发突出且复杂化^[2-3]。

鉴于此,国内外专家学者针对下穿工程中如何保障隧道施工安全与既有铁路运营安全进行了研究。在风险评估方面,Lei^[4]采用层次分析法对长沙地铁1号线下穿京广铁路工程进行风险评估,认为地层自身稳定性、盾构注浆及土仓压力是主要风险源。刘建友^[5]从应力的角度研究了高速铁路承载分区和下穿工程扰动分区的特点,将下穿工程的安全风险划分为5个级别,建议根据风险等级来制定相应的施工措施。在盾构隧道施工方面,杨庆刚^[6-9]等研究了双线隧道下穿铁路变化规律,发现通过地表注浆、同步注浆及动态补偿注浆等加固措施可有效补偿地应力损失,减少地层变形。在隧道暗挖法施工方面,付琪生^[10]采用数值分析了双线隧道开挖顺序和开挖间距对铁路沉降的影响。刘胜欢^[11]利用数值分析研究了北京新机场线下穿京沪铁路工程采用管幕+CRD工法、洞内及地表注浆加固措施的效果。任高峰^[12-14]等研究了管幕法在大断面隧道下穿火车站既有线的效果。丁维利^[15]研究了洞内采用大管棚+双侧壁导坑法、既有铁路纵横梁扣轨加固施工方法的应用效果。秦虎^[16]采用数值分析方法研究了隧道下穿铁路路基沉降规律,分析了地表注浆+D24型便梁扣轨加固措施抑制沉降的效果。张军^[17]采用数值分析及现场实测方法研究了双侧壁导坑法结合超前大管棚+小导管+预应力锚杆等措施对浅埋大跨隧道能有效控制围岩变形。

由此可见,隧道下穿既有运营铁路加固主要是通过既有铁路和洞内分别采取辅助措施来完成,即既有铁路路基下采用注浆加固,轨道采用便梁扣轨加固,而盾构法采用同步注浆,浅埋暗挖法则采用管棚等超前

支护。在超浅埋隧道小角度下穿运营铁路工程中,如何保障隧道施工安全与既有铁路运营安全的研究具有重要意义。本文以某快速铁路隧道工程为背景,提出“短循环,三次衬砌截桩”新工法,采用三维数值模拟方法分析应用效果,并结合现场施工进行验证。本文提出的方法可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

某新建隧道为200 km/h客货共线铁路双线隧道,全长800 m,1.25%单面上坡。横断面最大跨度14.26 m,高12.45 m,开挖断面约143.6 m²。隧道全线浅埋,上覆表层土为红黏土,下伏基岩为白云岩夹泥岩。

新建隧道DK 278+073~+100段下穿某既有货运铁路,交点里程DK 278+083,平面交角约37°。该既有运营铁路货运繁忙,运货十余次/d,隧道施工期间不能中断。两线轨面高差约14 m,最小埋深4.1 m,下穿段存在一“V”型凹槽,红黏土厚度为2.5~17 m,如图1所示。

2 施工工法

2.1 运营铁路加固措施

D型便梁加固轨道在箱涵顶进下穿铁路工程中较为常用且技术成熟,但该隧道下穿运营铁路最大跨度达31 m,而D型便梁最大长度为32 m。若定制更长的便梁,则周期长,造价高。综合考虑成本及工期,最终租赁D16、D24型便梁进行组合跨越拟建隧道。3号、4号两根桩基础设置在新建隧道内,桩与初期支护、二次衬砌交接位置处预埋 $\phi 25@200$ 接茬钢筋,便于连接,如图2、图3所示。为分散桩基础顶部荷载,在便梁中间设置7~10号扩大基础。1号、2号、5号、6号桩截面尺寸1.5 m×1.25 m,7~9号扩大基础截面尺寸4 m×1.5 m。桩底嵌入稳定基岩且桩底嵌入隧底不小于0.5 m,中间桩底嵌入隧道不小于2.5 m。

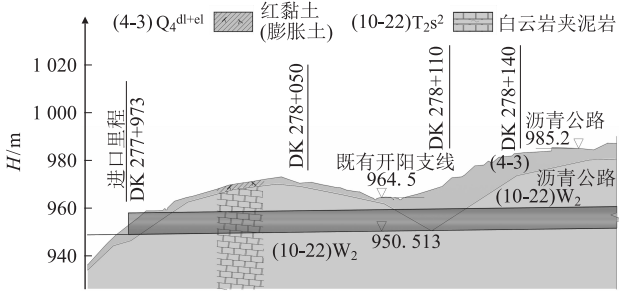


图1 隧道局部纵断面图

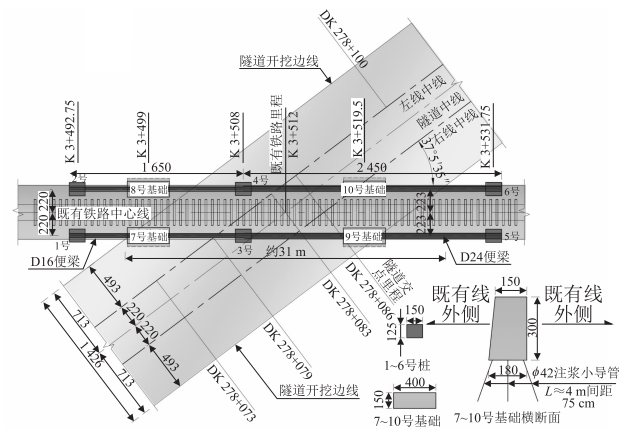


图2 D型便梁布置平面图(cm)

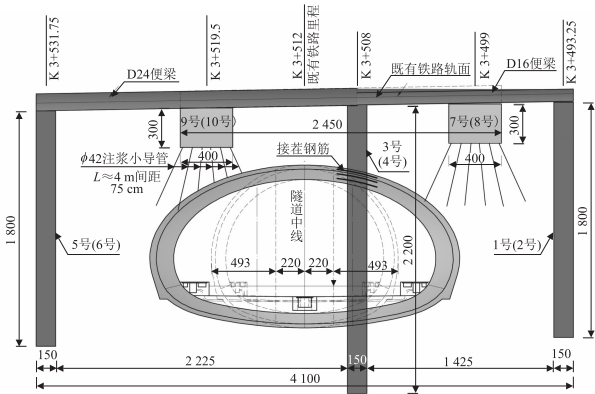


图3 D型便梁布置纵断面图(cm)

2.2 隧道施工工法

2.2.1 衬砌设计

由于上方运营铁路加固措施中3号、4号桩插入隧道内,需结合隧道施工进行截断,并针对该情况设计特殊衬砌。因洞内桩体在二次衬砌施作之后切除,二次衬砌与残余桩体之间存在施工缝,为防止渗水在二次衬砌内再设置一道衬砌即三次衬砌,于二次、三次衬砌之间设置防水层,如图4所示。三次衬砌底部与二次衬砌仰拱之间的施工缝采用遇水膨胀止水条+中埋式钢边止水带处理。三次衬砌起到两个作用,其一增加永久支护安全系数,防止上部残余桩体刺入,其二便

于施作防水层,解决渗水问题。

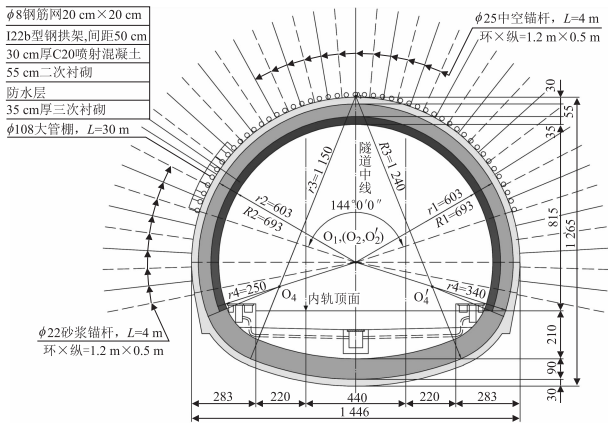


图4 衬砌横断面图

2.2.2 三次衬砌截桩施工

隧道分进出口两个工区掘进,下穿既有运营铁路段采用三台阶七步法施工。二次衬砌施工至下穿段,再进行下穿施工,先贯通无桩一侧,再贯通有桩一侧。“短循环”施工,即仰拱、二次衬砌紧跟,每6~10m进尺一个工作循环,待二次衬砌施作完后再掘进,如图5所示。

桩基位置前后共预留约8m长的范围,采用“三次衬砌截桩”法施工。待两端二次衬砌强度达到设计强度100%后,出口端台车向前推进,进口端台车退出洞内,将台车对应桩基位置进行切割改装,然后再对台车进行加固并封堵,施作二次衬砌。二次衬砌与残余桩体之间的施工缝,采用沥青麻絮+双组份聚硫密封胶封堵。最后,施作防水板及三次衬砌。

“短循环,三次衬砌截桩”法下穿既有铁路工法工艺流程如图6所示。

3 计算分析

3.1 衬砌验算分析

根据隧道设计规范,采用荷载-结构法对二次、三次衬砌进行验算。隧道围岩为V级,路基轨道及列车荷载取67.81kPa。二次衬砌分担围岩荷载80%,三次衬砌作为结构安全储备暂按其与二次衬砌厚度比值(35/55)进行分担,如表1所示。基于安全考虑,三次衬砌再承担上部约3m长的残余桩体全部附加荷载75kPa。

衬砌采用 $\phi 25@200$ 钢筋,安全系数均大于2.4,满足规范^[18]要求。二次、三次衬砌最小安全系数均位于拱顶,分别为5.8、14.9。三次衬砌考虑了残余桩体荷载,桩体所对应位置安全系数有所减小,如图7

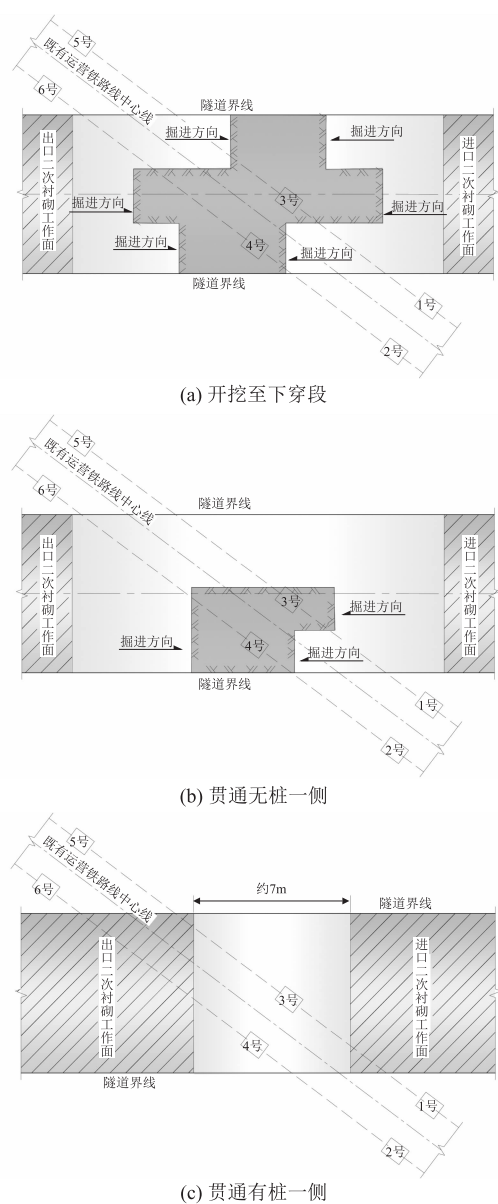


图 5 开挖步骤平面示意图

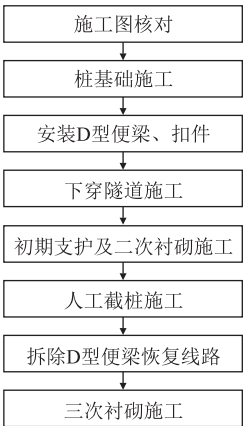
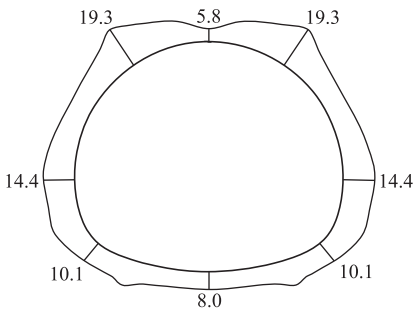


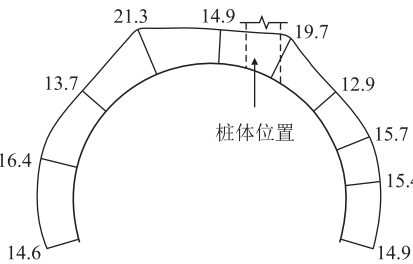
图 6 工艺流程图

表 1 计算参数表

项目	荷载/kPa			弹性抗力系数/(MPa/m)	
	竖直压力	水平压力 e_1	水平压力 e_2	拱墙	仰拱
二次衬砌	118.6	29.3	79.3	125	187.5
三次衬砌	46.1	11.4	30.8	125	-



(a) 二次衬砌安全系数



(b) 三次衬砌安全系数

图 7 衬砌安全系数图

3.2 数值模拟分析

3.2.1 模型建立

为分析三次衬砌截桩法施工过程中结构受力变形及对既有运营铁路的影响,基于 Midas GTS/NX 有限元软件建立三维模型进行研究。

根据隧址地质及模型边界效应情况,确定模型尺寸为 90 m×56 m×50 m,如图 8 所示。土体、路基采用实体单元,D 型便梁、横梁及轨道采用梁单元,衬砌采用板单元,共计 71 800 个单元。假设土体服从德鲁克-普拉格屈服准则,材料参数如表 2 所示。

表 2 材料物理力学指标表

土层	层厚/m	重度 γ /(kN/m ³)	c /kPa	φ /(°)	E /MPa	泊松比 ν
红黏土	2.50	18.0	32	11	20	0.36
白云岩夹泥岩	47.50	24.0	200	40	1.0e6	0.30
路基	0.45	18.9	40	25	25	0.30
管棚等效加固	-	26.3	-	-	3.2	0.34
初期支护	-	23.0	-	-	26e6	0.20
钢筋混凝土	-	25.0	-	-	31.5e6	0.20
钢	-	78.5	-	-	210e6	0.20

模型主要分析步为:①初始地应力平衡;②既有铁路施作 D 型便梁等;③施作大管棚;④七步三台阶法

所示。

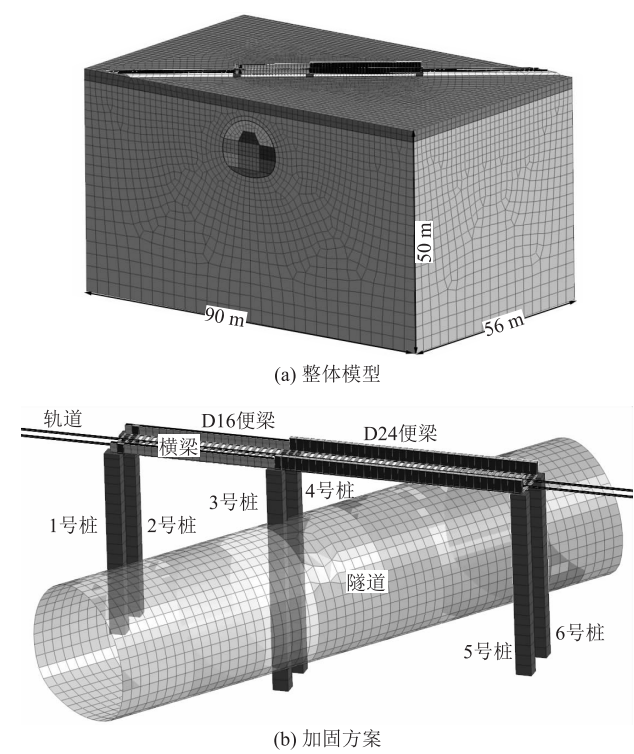


图8 三维有限元模型图

6~10 m 依次循环开挖施作初期支护、二次衬砌;⑤撤离 D 型便梁等;⑥截断隧道内桩体;⑦施作三次衬砌。

3.2.2 结果分析

初期支护沉降如图 9 所示。由图 9 可知,位于桩附近的初支拱顶沉降稍大于拱腰及拱脚;得益于短循环施作支护结构,最后 8 m 施工拱部沉降变化极小;受到截桩的影响,上部桩体荷载直接作用在支护结构上,拱部会产生微小沉降。

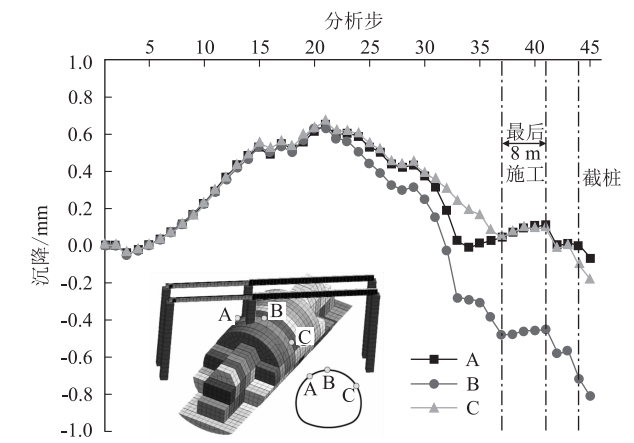


图9 初期支护沉降图

拱顶沉降如图 10 所示。由图 10 可知,隧道从两端向中间掘进,初支拱顶沉降曲线呈现出中间小两端大的“Λ”形态,最后贯通的 8 m 范围拱顶沉降最小。

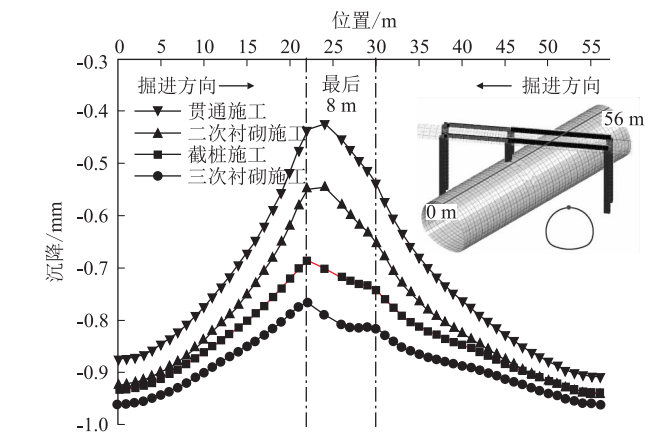


图10 拱顶沉降图

桩顶沉降如图 11 所示。由图 11 可知,因隧底隆起引起桩体有微小上抬情况;远离隧道的 1 号、5 号桩桩顶变化极小;由于截桩,其支撑点转移到二次衬砌上,隧道内的 3 号桩桩顶产生沉降,但均在 1 mm 范围内。

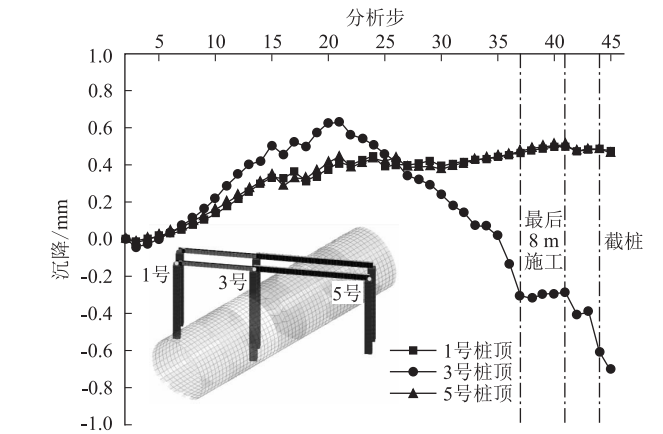


图11 桩顶沉降图

轨道沉降如图 12 所示,两条轨道沉降呈凹型,两轨变化相差较小;最大沉降位于隧道开挖范围内,均控制在 1 mm 以内。

综上所述,可得以下结论:

(1) 利用 D 型便梁加固运营铁路,可以大幅减小隧道施工对铁路的影响,保障行车安全。

(2) 采用该工法,控制隧道应力释放,进而减小地层损失所引起地表沉降对运营铁路轨道变形的影响。

(3) 待二次衬砌达到设计强度后再截桩,可以减小因桩体支撑点的改变所引起的隧道拱部沉降。

故从理论角度分析,该工法可行。

4 现场施工

该隧道下穿铁路段于 2015 年 4 月施工,7 月顺利

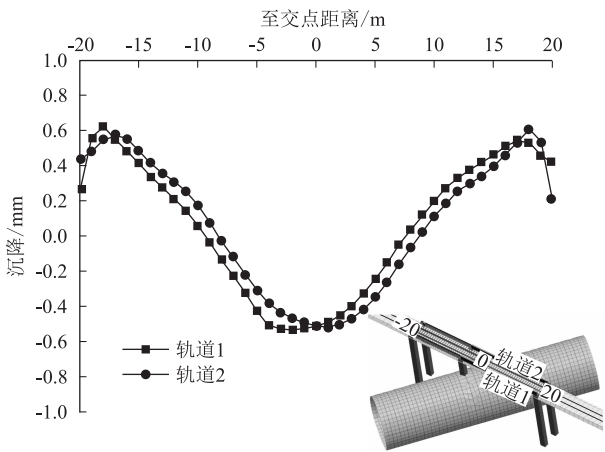


图 12 轨道沉降图

完成施工,施工过程中既有铁路沉降均满足相关要求,列车安全运行。

隧道施工采用机械开挖或控制爆破,钢轨处爆破震速不超过 5 cm/s 下穿,既有铁路运营限速 15 km/h。此外,铁路段开挖影响范围设置监控量测点,量测点按 10 m × 10 m 网格布置,并尽量布置在既有铁路路肩两侧附近。

自铁路开通运营至今,该工程点均未发现裂缝及渗漏水等病害,充分验证了该工法的安全可行性。

5 结论

(1)“短循环,三次衬砌截桩”工法有效解决了超浅埋小角度下穿运营铁路工程问题,使得 D 型便梁可自由组合,摆脱了 D 型便梁长度受限的束缚,同时三次衬砌不仅提高了永久支护结构的安全系数,且解决了防水问题。

(2)该工法通过短开挖及时支护控制隧道应力释放,进而减小地层损失所引起地表沉降对运营铁路的轨道变形影响。

(3)经过 5 年跟踪调查,该工程未发现衬砌裂缝及渗漏水等病害情况,充分验证了该工法的安全可行性,可为今后类似工程提供借鉴。

参考文献:

[1] 巩江峰,王伟,王芳,等. 截至 2023 年底中国铁路隧道情况统计及 2023 年新开通重点项目隧道情况介绍[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(2): 377-392.
GONG Jiangfeng, WANG Wei, WANG Fang, et al. Statistics of China's Railway Tunnels by the End of 2023 and Overview of Tunnels of Key New Projects in 2023 [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 377-392.
[2] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.

Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Traffic Tunnel Engineering Research: 2022 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40.
[3] 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): 6-11.
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): 6-11.
[4] LEI Mingfeng, LIN Dayong, HUANG Qiyu, et al. Research on the Construction Risk Control Technology of Shield Tunnel underneath an Operational Railway in Sand Pebble Formation: a Case Study [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24(10): 1558-1572.
[5] 刘建友,赵勇,吕刚,等. 隧道下穿高速铁路路基风险分级及风险评价方法研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 8-16, 54.
LIU Jianyou, ZHAO Yong, LV Gang, et al. Research on Risk Classification and Assessment Method for Tunnels Crossing under High-speed Railway Subgrade [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6): 8-16, 54.
[6] 杨庆刚,孙明,倪小东,等. 超浅埋隧道下穿铁路引起变形敏感度数值分析[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(3): 112-119.
YANG Qinggang, SUN Ming, NI Xiaodong, et al. Numerical Analysis of the Sensitivity of Deformation Caused by a Super Shallow-buried Tunnel Passing under an Existing Railway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(3): 112-119.
[7] LUO Gongshuang, CHENG Yihong, BAI Zhe, et al. Study on Deformation Law of Subway Construction under Passing Existing Line in Short Distance [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6626927.
[8] 赵太东. 泥岩地层盾构隧道下穿既有成昆铁路无预加固施工安全分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(3): 122-127.
ZHAO Taidong. Analysis on Construction Safety of a Shield Tunnel beneath Existing Chengdu-Kunming Railway without Pre-Reinforcement in Argillite [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(3): 122-127.
[9] SONG Qiyu. Study on Control Measures of the Influence of Shallow Buried Tunnel Excavation on the Subgrade Settlement of High Speed Railway in Operation [J]. Vibroengineering PROCEDIA, 2021, 36: 37-42.
[10] 付琪生. 电力隧道下穿铁路沉降控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(4): 32-36.
FU Qisheng. Research on Settlement Control Technology of Power Tunnel Underpassing Railway [J]. Railway Construction Technology, 2021(4): 32-36.
[11] 刘胜欢,杜明芳,易领兵,等. 北京新机场线大断面暗挖隧道下穿京沪铁路施工影响数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 125-129.
LIU Shenghuan, DU Mingfang, YI Lingbing, et al. Numerical Analysis of the Large Section Tunnel Excavation for Beijing New Airport Line Crossing under Beijing-Shanghai Railway [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(8): 125-129.

WPZ-500 Ballastless Intelligent Track Laying Unit [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(6): 30-33.

[5] 景璞. 铁路扣件使用问题分析与建议[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(5): 11-14.

JING Pu. Analysis and Suggestion on the Use of Railway Fastener [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(5): 11-14.

[6] 黄旭升, 王时越, 伍曾, 等. WJ-7 型无砟轨道扣件弹条强度分析 [J]. 铁道建筑, 2018, 58(9): 127-129.

HUANG Xusheng, WANG Shiyue, WU Zeng, et al. Strength Analysis of WJ-7-Type Ballastless Track Fastening Elastic Rod [J]. Railway Engineering, 2018, 58(9): 127-129.

[7] 刘玉涛, 段玉振, 王豪, 等. 高速铁路无砟轨道扣件弹条疲劳损伤统计分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(2): 42-46, 53.

LIU Yutao, DUAN Yuzhen, WANG Hao, et al. Statistical Analysis of Fatigue Damage to Elastic Clips of Ballastless Track Fastenings for High-speed Railways [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(2): 42-46, 53.

[8] 邓建华. WZ500E 无砟智能铺轨机组长钢轨牵引车设计[J]. 装备制造技术, 2021(6): 34-36.

DENG Jianhua. Design of Long Rail Tractor for WZ500E Ballastless Intelligent Track Laying Machine [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(6): 34-36.

[9] 陈宗平, 成功, 刘清源, 等. 高速铁路扣件动刚度频变和温变特性研究[J]. 振动测试与诊断, 2022, 42(3): 495-502, 616-617.

CHEN Zongping, CHENG Gong, LIU Qingyuan, et al. A Study on the Frequency and Temperature-dependence of the Dynamic Stiffness of Fasteners Used on High-speed Railways[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 495-502, 616-617.

(上接第 118 页)

[12] 任高峰, 杨旭春, 张聪瑞, 等. 新管幕法下穿铁路既有线施工地表沉降监测[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 163-171.

REN Gaofeng, YANG Xuchun, ZHANG Congrui, et al. On the Ground Subsidence Monitoring in the Construction of the Currently Existing Rail-lines under the New Tube Curtain Method [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 163-171.

[13] LI Xiaoxue, TAN Zhongsheng, WANG Xiuying, et al. Comparative Study on the Influence of Different Forms of New Tubular Roof Method Construction on Railway Tracks [J]. Symmetry, 2022, 14(7): 1361.

[14] YANG Songsong, ZHANG Dingwen, WANG Mei, et al. Ground and Tunnel Deformation Induced by Excavation in Pipe-roof Pre-construction Tunnel: a Case Study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: 104832.

[15] 丁维利, 赵永明, 初厚永, 等. 浅埋大断面黄土隧道下穿既有铁路施工技术[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(6): 76-81.

DING Weili, ZHAO Yongming, CHU Houyong, et al. Technology for a Shallow Large Profile Loess Tunnel to Underpass Existing Railway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(6): 76-81.

[16] 秦虎, 马亢, 贾剑青. 隧道下穿对上覆铁路线的影响及风险管控研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S2): 871-877.

QIN Hu, MA Kang, JIA Jianqing. Study on the Influence of Tunnel Underpass on Overlying Railway Line and Its Risk Management and Control [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 871-877.

[17] 张军, 麻建飞, 刘夏冰, 等. 浅埋超大跨隧道洞口段围岩稳定性研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 7-12, 18.

ZHANG Jun, MA Jianfei, LIU Xiabing, et al. A Study on Rock Stability in Portal Section of Shallow Extra-large-span Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 7-12, 18.

[18] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范 [S].

TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].