

文章编号: 1674—8247(2024)03—0068—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2024.03.013

复杂地应力环境下隧道底鼓处治技术研究

马有良

(中国铁路昆明局集团有限公司, 云南 玉溪 653100)

摘要:西南地区某隧道仰拱出现底鼓病害,道床开裂变形严重,底鼓速率快,运营安全隐患高。为安全高效处治运营线路无砟轨道隧道底鼓病害问题,采用现场调查、探孔验证、地质补勘等方式,对既有隧道结构现状、病害成因进行了调查,优选了处置方案。结果表明:(1)通过对病害发育程度、地下水情况、混凝土状态、围岩地应力、结构变形等因素的综合分析,得出复杂地应力环境下缓倾软弱岩层与地下水的相互作用是造成该隧道上拱的主要原因;(2)对隧底注浆加固、隧底微型桩、隧底桩筏结构、道床抗拉锚杆(索)及隧底拆换并加深加强结构等方案进行比选,确定采用增大矢跨比、隧底加深加强的拆换重构方案;(3)在施工过程中加强应急管理,根据沉降观测、应力监测、隧底围岩位移监测等数据分析,及时优化调整设计方案,整治完成后效果良好。研究成果可供后续工程借鉴和参考。

关键词:复杂地应力环境;仰拱底鼓;沉降监测;矢跨比

中图分类号: U457

文献标志码: A

Study on Treatment Techniques for Tunnel Floor Heave in Complex Crustal Stress Environments

MA Youliang

(China Railway Kunming Bureau Group Co., Ltd., Yuxi 653100, China)

Abstract: Floor heave and serious track bed cracking deformation occurred in the invert of a tunnel in southwestern China, with rapid heaving rates posing significant operational safety hazards. To address the issue of floor heave in ballastless track tunnels along operational lines efficiently and safely, field investigations, borehole verifications, and supplementary geological explorations were conducted to assess the existing tunnel structure's status and identify the causes of the defects. An optimal remediation strategy was then selected. The findings are as follows: (1) Through a comprehensive analysis of factors including the degree of defect development, groundwater conditions, concrete condition, surrounding rock stress, and structural deformation, it was deduced that the interaction between gently dipping weak rock layers and groundwater under complex crustal stress environments is the primary cause of heaving in this tunnel. (2) Various remediation options, including grouting reinforcement of the tunnel floor, micro-piles of the tunnel floor, raft foundation of the tunnel floor, tensile anchor (cable) in the track bed, and replacement and reinforcement and deepening of the tunnel floor, were compared. Ultimately, the solution of increasing the span-to-rise ratio and reconstructing the tunnel floor by deepening and reinforcing was adopted. (3) During construction, emergency management was intensified, and designs were timely optimized and adjusted based on settlement monitoring, stress monitoring, and surrounding rock displacement monitoring data analyses. The post-treatment effects proved satisfactory. The experiences

收稿日期: 2024-04-10

作者简介: 马有良(1972-),男,高级工程师。

引文格式: 马有良. 复杂地应力环境下隧道底鼓处治技术研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3): 68-72.

MA Youliang. Study on Treatment Techniques for Tunnel Floor Heave in Complex Crustal Stress Environments[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3): 68-72.

gathered from this study can serve as a reference for future projects.

Key words: complex crustal stress environment; invert floor heave; settlement monitoring; span-to-rise ratio

隧道底部结构的刚度和强度不足,难以抵抗围岩形变压力时,将造成隧道底鼓病害。隧道底鼓病害产生的原因主要有:隧道仰拱厚度、曲率不足,围岩膨胀性,地下水对混凝土结构的腐蚀性,地下水压力,地应力集中引起的软质围岩变形等。随着西南复杂艰险地区运营隧道工程的增多,隧道底鼓病害日渐突出,严重影响铁路正常运行。

不同隧道的底鼓病害成因及处治措施存在较大差异,需结合具体工程展开分析。钟祖良^[1]结合桃树垭高速公路隧道对底鼓发生机理与防治技术进行了研究;师亚龙^[2]对软岩隧道底鼓机理及底鼓量的计算方法进行了研究;赵万强^[3]根据铁路隧道底鼓病害风险程度建立了铁路隧道底鼓风险等级评价方法及流程,提出了相应的底鼓控制综合措施。

本文结合西南地区某隧道底鼓情况,在分析病害成因的基础上,对病害的处置过程、整治措施和处治经验进行了介绍。研究成果可为类似工程建设和病害整治提供借鉴。

1 工程概况

西南地区某隧道全长 15 844 m,最大埋深 835 m,为设计时速 160 km 的客货共线双线隧道。隧道通过的地层岩性主要为侏罗系和白垩系砂岩、泥岩、石英砂岩,局部夹盐岩、石膏。受区域构造影响,测区褶皱、构造发育,隧道段发育 4 条断层及 2 条褶皱,断层附近岩层破碎,岩层产状复杂。隧道地质纵断面如图 1 所示。

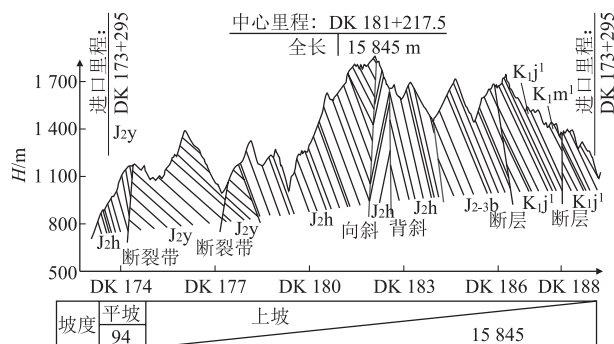


图 1 隧道地质纵断面图(m)

铁路开通运营半年后,轨道受该隧道底鼓影响较精调后累计上升 29.5 mm,速率约为 3 mm/月。

K 264 + 025 ~ 264 + 189 段位于 $R = 2\,800\text{ m}$ 的右

偏圆曲线上,线路纵坡为 6‰的上坡,该段隧道埋深 513~467 m。底鼓段洞内铺设弹性支撑块式无砟轨道,轨道结构高度 600 mm。底鼓段地层岩性为砂岩、泥岩、石英砂岩、盐岩、石膏(K_{ji}),附近发育有马鞍山 1 号断层(小里程方向,距离病害段约 300 m),处于马鞍山 1 号断层与马鞍山 2 号断层(大里程方向,距离病害段约 1 400 m)之间,底鼓段与断层位置关系如图 2 所示。

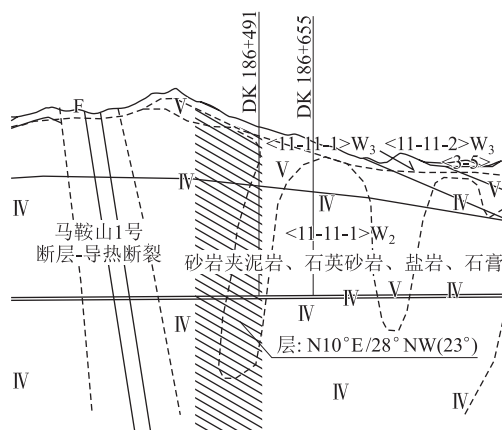


图 2 隧道底鼓段纵断面示意图

地震动峰值加速度为 0.10 g ; 地下水类型主要为基岩裂隙水及构造裂隙水, 地下水环境作用等级为 H2、L1、Y2。该段施工图均为 IV 级围岩; 二衬均为 C40 钢筋砼结构, 拱墙 45 cm 、仰拱 50 cm 厚, 初支喷砼厚度 23 cm , 初支钢架采用拱墙四肢格栅钢架, 间距 1.2 m ; 仰拱矢跨比 $1:11.7$ 。

2 病害情况及应急措施

2.1 病害情况

现场调查发现,道床板与仰拱填充层间脱离,仰拱填充层顶面横向、斜向开裂,中心水沟侧壁出现斜向、竖向、纵向开裂等病害现象,拱墙二衬未见开裂、渗水现象;中心水沟处排水降压孔未见较大承压水。

2.2 应急处理措施

针对该病害的应急处理措施包括疏通既有排水系统、增设排水降压孔及泄水孔、增强隧底结构整体受力等,具体如下:

(1)疏通病害段侧沟、中心水沟、纵、环向盲管、横向排水管、泄水孔等排水系统^[4]。

(2)病害段中心水沟两侧增设排水降压孔,边墙

增设泄水孔。

(3) 将病害段侧沟引入中心水沟的横向排水管封闭,在病害段上游将侧沟水截排至中心水沟,保证上游侧沟水不流经该病害段而渗入道床。

(4) 为减小地下水对病害段隧道下部结构的腐蚀、浸泡影响,增强仰拱填充整体受力性,对病害严重段 K 264 + 060 ~ + 100 中心沟采用钢筋混凝土预制管引排、中间设置检查井、回填混凝土进行处理。

(5) 增设视频监控系统,对病害段开展边墙收敛及道床沉降观测。

3 整治前沉降观测

在仰拱填充顶面和道床板顶面共计布置 8 个沉降观测点和 2 个收敛观测点,共监测 31 次。K 264+085 处 S3 测点(下行线道床板右侧)最大累计上拱 40.1 mm;K 264 + 085 处的 S4 测点(下行线中心水沟边)最大累计上拱 44.1 mm;K 264 + 085 S5(上行线中心水沟边)累计上拱 51.6 mm;K 264 + 085 处的 S6 测点(上行线道床板左侧)最大累计上拱 46.1 mm;边墙收敛点基本无变化。病害段底鼓主要集中在 K 264+065 ~ + 105 段, S5 测点变化速率平均约 5.2 mm/月。

4 底鼓原因分析

底鼓病害发生后,开展了物探(地质雷达、井内电视)、钻探、取样试验及地应力测试等工作,发现除个别测点结构厚度不足外,其余结构强度和厚度均满足设计要求;地下水侵蚀等级未超设计、无高水压及膨胀性等影响。

结合以上排查及现场实际病害情况,综合判定该处病害原因可能为:隧道上拱段埋深约 500 m,位于马鞍山 1 号断层和马鞍山 2 号断层之间,隧底围岩以泥岩夹砂岩为主,围岩破碎,岩层缓倾,开挖后地下水排泄通道改变;受地下水入渗影响,隧底围岩强度降低、泥化发生膨胀^[5-6],破坏隧底结构。复杂地应力环境下缓倾软弱岩层与地下水的相互作用是造成隧道上拱病害的主要原因^[7-8]。

5 仰拱加深方案研究

根据现场调查、取芯、孔内成像等揭示的仰拱结构破坏情况,结合底鼓原因分析及以往类似工点工程的经验^[9-10],充分研讨后确定采用隧底拆换重构处理方案。

对原仰拱结构、仰拱加深 1 m 及加深 1.5 m 三种工况进行试算,具体结果如表 1 所示。考虑该工点处于中等地应力环境,挤压性围岩规范二级变形,垂直

均布压力约 647 kPa。考虑二衬承担 70% 的荷载,即 453 kPa。原衬砌结构按二级变形对仰拱施加向上的均布荷载,结构承载力和裂缝均无法满足规范要求。当仰拱加深 1 m 时,其承载力提升至 550 kPa,可满足二衬承担二级变形荷载的 85%。经计算,双线段仰拱的允许扰度约为 30 mm,因此加深 1 m 可满足中等地应力环境下结构受力和变形要求;加深 1.5 m 时可满足二衬承担三级变形荷载的 70%,约 700 kPa。经比选后采用加深 1 m 的新仰拱方案。

表 1 仰拱结构承载能力对比表									
仰拱结构	仰拱施加力/(kPa/m)	位移		弯矩		承载力		裂缝验算	
		最大位移量/mm	部位	最大弯矩/(kN·m)	部位	承载力	部位	裂缝宽度/mm	部位
原设计	453	33.5	仰拱底部	1 125	边墙脚	不满足	-	不满足	-
加深 1 m	550	21.0	仰拱底部	1 259	边墙脚	满足	-	满足	-
加深 1.5 m	700	10.4	两侧边墙	635	边墙脚	满足	-	满足	-

6 底鼓处治措施

隧道上拱严重段采取钢垫梁临时架空线路及隧底结构拆换重构方案,即:在钢垫梁临时架空线路条件下,利用天窗时间采取全幅分段跳槽开挖,仰拱(含初支)在原设计的基础上加深加强、仰拱填充内部增设横、竖向钢筋桁架及中心水沟调整为中心水管加检查井等措施。

(1) 对既有二衬进行锁脚加固。于 K 264+061.5 ~ + 103.5 段两侧边墙各施作 2 排 $\phi 32$ 全长粘结型锚杆,单根长 4 m,纵向间距 0.8 m/根。

(2) 锯轨及架空线路。根据跳槽施工情况选择合适锯轨方式,锯轨完成后采用钢垫梁对隧底拆换范围线路进行架空,钢垫梁采用 2 片工字型钢,梁长 5.0 m,横梁采用 2 根 22b 槽钢,横梁与纵梁通过加劲板和高强螺栓连接。

(3) 隧底拆除。采取全幅分段(每段 3 m)跳槽开挖方式,对隧底结构严重破坏地段(K 264+061.5 ~ + 103.5)42 m 分 14 个节段进行拆除处理,拆换后的新仰拱在原仰拱基础上加深 1 m(第 1 ~ 第 3 循环,仰拱矢跨比 1:5.3)和 1.5 m(第 4 循环,仰拱矢跨比 1:4.6)。仰拱加深情况如图 3 所示。

(4) 施作新仰拱结构。新仰拱厚度由原设计 50 cm 调整为 60 cm,二衬钢筋主筋由 $\phi 20$ 调整为 $\phi 25$,隧底初支均设 I20b 型钢架与原拱墙连接成环,初支及二衬均采用 C40 砼浇筑。

(5) 施作加强后仰拱填充结构。①仰拱填充内增

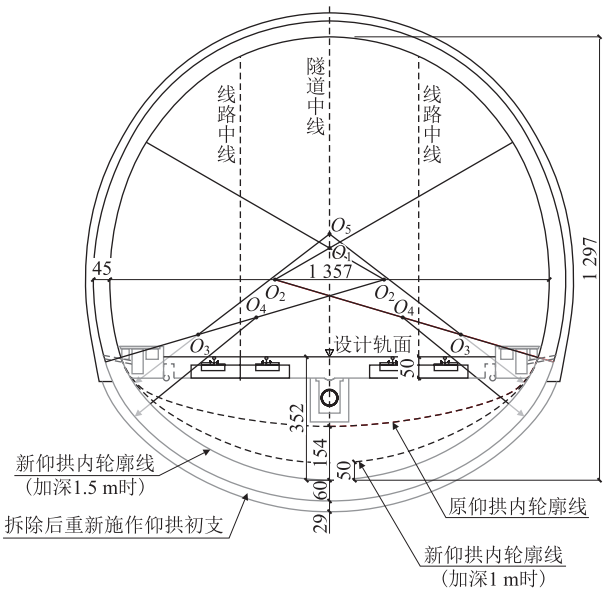


图3 隧底拆换仰拱加深设计图(cm)

设钢筋桁架:仰拱填充顶面及以下1.3 m处增设两道横向双层钢筋,中心水沟两侧各1 m处增设竖向双层钢筋,横向或竖向钢筋采用 $\phi 25@200$ mm钢筋,纵向钢筋采用 $\phi 16@250$ mm。②将中心水沟调整为中心

水管:为增加仰拱填充的整体刚度,将中心水沟调整为 $\phi 500$ C35钢筋混凝土管,每段长5 m,间隔6 m设置检查井(长1.0 m)。仰拱填充采用C40混凝土浇筑。仰拱填充结构加强设计如图4所示。

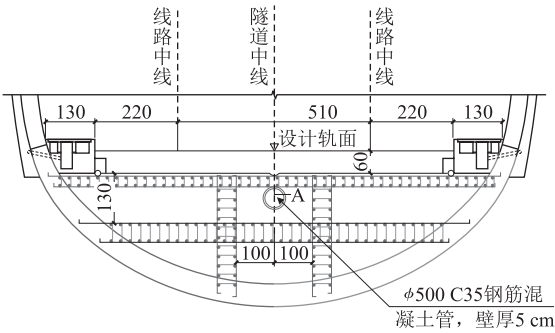


图4 仰拱填充结构加强设计图(cm)

(6)轨道过渡及沉降评估。隧底结构完成后,进入无砟轨道铺设前的沉降变形评估期,评估期间采用木枕进行过渡,木枕间距500 mm,运营限速45 km/h。

(7)恢复无砟道床及线路。沉降评估完成后,按原设计恢复无砟道床及线路,底鼓拆换段弹条Ⅶ型扣件预调高30 mm,以预留扣件调低条件。

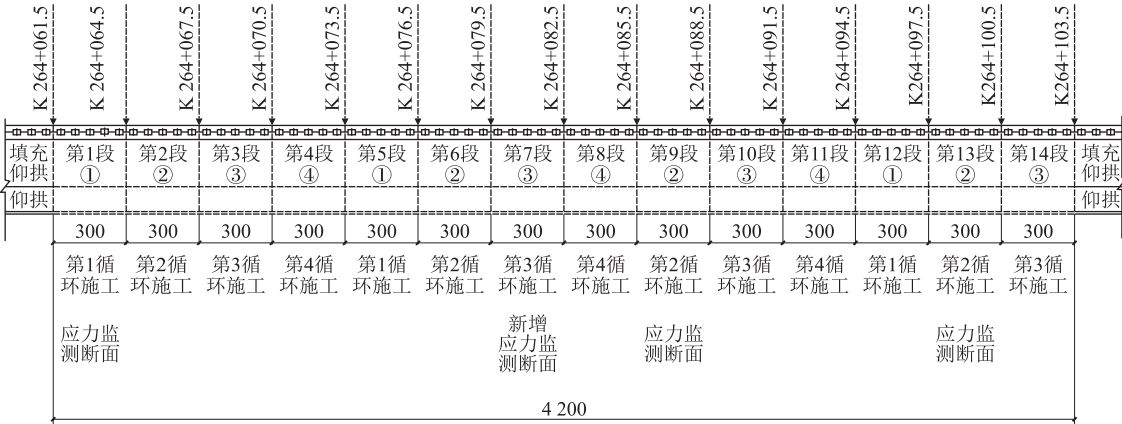


图5 隧底拆换四循环分节设计图(cm)

7 整治后沉降观测

隧底拆换四循环分节设计如图5所示。隧底拆换后新作结构经沉降观测发现存在一定的上拱量,第1循环6.5个月时间达到10.4 mm,第2循环4.6个月时间达到6.6 mm,第3循环2.8个月时间达到1.9 mm。以上3个循环最近1~2个月内基本趋于稳定,第4循环加深1.5 m后基本无变形(最大0.4 mm),具体如表2、图6所示。综合分析,本工点重构段上拱主要原因是复杂地应力环境下应力调整、缓倾软弱岩层与地下水的相互作用,施工扰动及段落间相互干

扰,结构尚未整体受力等多因素耦合造成。

8 结论

(1)隧道底鼓的成因包括软弱缓倾岩层、地下水变化、混凝土腐蚀、复杂地应力环境及施工质量等多因素综合作用。

(2)结构加强宜一次性实施到位。仰拱拆换加深,以拱顶底部到仰拱顶面的净高与隧道净跨一致为宜,即整个结构近似圆形最为合理。采用加深1.5 m时,衬砌全环可承受挤压性围岩规范中等大变形围岩荷载。

表 2 新作隧底结构上拱观测情况统计表

序号	施工顺序	观测断面	观测位置	观测时间			新作结构上拱情况		仰拱加深/m	备注
				首次观测	末次观测	时间/月	上拱量/mm	上拱速率/(mm/月)		
1	第1循环	K 264 + 075	S4	2023-06-10	2024-01-29	7.8	10.3	1.3	1.0	共3个节段
2	第2循环	K 264 + 078	S4	2023-08-07	2024-01-29	5.8	6.5	1.1	1.0	共4个节段
3	第3循环	K 264 + 081	S4	2023-09-29	2024-01-29	4.1	2.4	0.6	1.0	共4个节段
4	第4循环	K 264 + 093	S4	2023-11-08	2024-01-29	2.7	0.8	0.3	1.5	共3个节段

注: 1. S4点位于下行线中心水沟边
2. 由于前三循环新作仰拱沉降观测短时间未稳定, 经研讨后第4循环仰拱结构调整为加深1.5 m

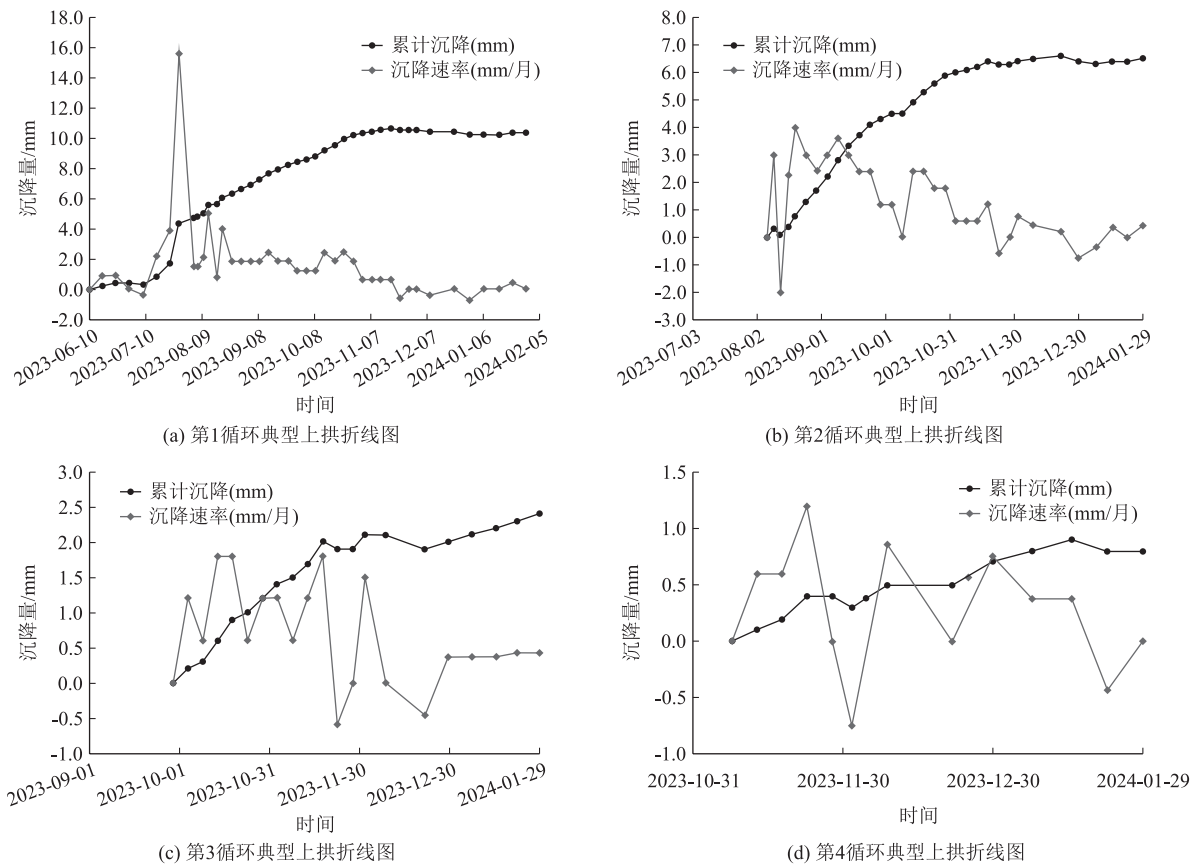


图 6 隧底拆换后新仰拱上拱折线图

(3)隧底初支应封闭成环,并做好新钢架与既有钢架的连接,以发挥整体受力效果。

(4)仰拱填充层内部应增设钢筋桁架以加强其整体抵抗隧底围岩变形的能力。

(5)完善隧底排水系统。隧底应设置环向、纵向排水管,并通过检查井两侧设置的排水降压孔将隧底积水引至中心水管,避免出现承压水及地下水浸泡软化隧底围岩。

参考文献:

[1] 钟祖良,刘新荣,王道良,等. 桃树垭隧道底鼓发生机理与防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 471-476.

ZHONG Zuliang, LIU Xinrong, WANG Daoliang, et al. Mechanism

Analysis of Floor Heave in Taoshuya Tunnel and Its Prevention Techniques [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 471-476.

[2] 师亚龙,陈礼伟,裴涛涛,等. 软岩隧道底鼓机理及底鼓量计算方法[J]. 铁道建筑, 2014, 54(5): 54-56.

SHI Yalong, CHEN Liwei, PEI Taotao, et al. Mechanism and Calculation Method of Floor Heave in Soft Rock Tunnel [J]. Railway Engineering, 2014, 54(5): 54-56.

[3] 赵万强,路军富,汤印,等. 铁路隧道底鼓风险等级划分方法及控制措施研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4): 178-187, 212.

ZHAO Wanqiang, LU Junfu, TANG Yin, et al. Study on Risk Level Classification Method and Control Measures for Railway Tunnel Floor Heave [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(4): 178-187, 212.

(下转第 80 页)

[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(2): 69 – 75.

WANG Shumin. Test Research on Influence of Construction in Soft Soil Area on Abutment of near High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(2): 69 – 75.

[9] 杨泉,高柏松,李井元,等. 新建线临近既有无砟高速铁路路基施工方案研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(2): 15 – 19.

YANG Quan, GAO Baisong, LI Jingyuan, et al. Research on Subgrade Construction Scheme of Newly Built Railway Close to Ballastless Track High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(2): 15 – 19.

[10] 闫薪宇. 增建二线高压旋喷桩施工对既有城际铁路路基稳定性影响分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.

YAN Xinyu. The Influence of the Construction of the Newly Added Second-line High-pressure Jet Grouting Piles on the Stability of the Existing Intercity Railway Subgrade [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.

[11] 毛祖夏,杨兰强,李佳明. MJS工法与高压旋喷桩(双重管)挤土效应对比试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1699 – 1707.

MAO Zuxia, YANG Lanqiang, LI Jiaming. Experimental Study on Compaction Effect between Metro Jet System Method and High-pressure Jet Grouting Pile (Double-tube) [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1699 – 1707.

[12] 李世安. 高速铁路桥墩差异沉降对列车运行影响研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.

LI Shian. Study on Influence of Pier Differential Settlement on Train Operation of High Speed Railway [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.

[13] 朱利明,余康,张楠. 高压旋喷桩施工对相邻既有高铁基础的影响分析[J]. 世界桥梁, 2016, 44(1): 60 – 63.

ZHU Liming, YU Kang, ZHANG Nan. Analysis of Influence of High-pressure Jetting Piles Construction on Adjacent Existing High-speed Railway Foundation [J]. World Bridges, 2016, 44(1): 60 – 63.

[14] 何大为,杨建辉,张康荣,等. 软土地区高压旋喷桩施工对临近高铁桥墩扰动机理室内模型试验[J/OL]. 桂林理工大学学报, 2023: 1 – 7. (2023 – 03 – 10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.n.20230307.1636.004.html>.

HE Dawei, YANG Jianhui, ZHANG Kangrong, et al. Indoor Model Test on Disturbance Mechanism of Adjacent High-speed Railway Piers Caused by High-pressure Jet Grouting Pile Construction in Soft Soil Area [J/OL]. Journal of Guilin University of Technology, 2023: 1 – 7. (2023 – 03 – 10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.n.20230307.1636.004.html>.

[15] TB 10182 – 2017 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程[S].

TB 10182 – 2017 Technical Specification for Highway and Municipal Engineering under Crossing High Speed Railway [S].

(上接第72页)

[4] 汪岳生. 向蒲铁路雪峰山隧道基础沉降及底鼓处治技术[J]. 铁道建筑, 2015, 55(8): 55 – 57.

WANG Chansheng. Foundation Settlement and Floor Heave Treatment Technology of Xuefeng Mountain Tunnel on Xiangpu Railway [J]. Railway Engineering, 2015, 55(8): 55 – 57.

[5] 袁伟,路军富,刘金松,等. 复杂地应力红层泥岩隧道持续底鼓原因分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 242 – 251.

YUAN Wei, LU Junfu, LIU Jinsong, et al. Cause Analysis of Persistent Heaving of Tunnel Floors in Red-bed Mudstone with Complex Geo-stress [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 242 – 251.

[6] 赵涛,梁庆国,吴飞亚,等. 基底围岩膨胀对泥岩隧道受力特性的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 538 – 546.

ZHAO Tao, LIANG Qingguo, WU Feiya, et al. Impact of Base Surrounding Rock Expansion on the Mechanical Characteristics of Mudstone Tunnel [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 538 – 546.

[7] 路军富,王明胜,王奎,等. 水平层状泥岩铁路隧道底鼓机理及解析方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1761 – 1773.

LU Junfu, WANG Mingsheng, WANG Kui, et al. Mechanism and Analytical Method of Bottom Drum in Horizontal Layered Mudstone Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1761 – 1773.

[8] 杨建民,徐怀仁,舒东利,等. 对隧道发生底鼓机理及对策的思考[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(2): 74 – 79.

YANG Jianmin, XU Huairan, SHU Dongli, et al. Reflection on the Mechanism of Tunnel Floor Heave and Its Countermeasures [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(2): 74 – 79.

[9] 李登峰,谢锦鸿. 隧道底鼓的变形研究及处治措施[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 86 – 90.

LI Dengfeng, XIE Jinhong. Deformation Study and Treatment Measures of Tunnel Floor Heaves [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 86 – 90.

[10] 王茂靖,吴俊猛. 西南地区某隧道底鼓病害原因分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 29 – 33, 64.

WANG Maojing, WU Junmeng. Cause Analysis for Floor Bulge of a Tunnel in Southwest China [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 29 – 33, 64.