

文章编号: 1674—8247(2023)02—0013—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.02.003

客货共线铁路简支梁上无砟轨道无缝道岔纵向受力分析

杨文茂¹ 林红松¹ 徐井芒² 徐浩¹ 赵思琪²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘 要:孟加拉国帕德玛大桥铁路连接线为设计轴重 25 t 的客货共线铁路,桥上采用无砟轨道及跨区间无缝线路。基拉里甘杰站咽喉区位于简支梁桥上,此运营条件下的简支梁上无缝道岔群在国内外较为罕见。为保证结构安全,通过建立“岔梁墩一体化”计算模型,对伸缩、挠曲、断轨、制动工况下的道岔强度和纵向稳定性进行了分析,结果表明:(1)基拉里甘杰站钢轨纵向力最大值出现在正线(即“股道-2”)上,铺轨及运营过程中应重点关注正线的无缝线路服役状态;(2)钢轨纵向应力、钢轨断缝值、尖轨尖端位移、心轨位移、转辙器处基本轨位移、间隔铁纵向力等指标均满足规范要求,设计方案合理;(3)本文所采用的无缝道岔检算方法,既论证了 25 t 轴重条件下简支梁上铺设无缝道岔的可行性,同时也对中国标准“走出去”指导海外铁路跨区间无缝线路设计有一定的指导意义。

关键词:简支梁;无缝道岔;岔桥墩一体化模型;纵向力;位移

中图分类号: U213.2

文献标识码: A

Longitudinal Stress Analysis of Continuously Welded Rail Turnout of Ballastless Track on Simply-supported Girder of Mixed Passenger and Freight Railway

YANG Wenmao¹ LIN Hongsong¹ XU Jingmang² XU Hao¹ ZHAO Siqi²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The Padma Bridge on a railway connecting line in Bangladesh, which is a mixed passenger and freight railway with a design axle load of 25 t, and ballastless track and trans-section continuously welded rail track are laid on the bridge. The throat area of Keraniganj Station is located on a simply-supported girder bridge. Under this operation condition, the continuously welded rail turnout group on the simply-supported girder is rare both in and out of China. In order to ensure the structure safety, the strength and longitudinal stability of the turnout under the working conditions of expansion, deflection, broken rail, and braking were analyzed by establishing an integrated calculation model of the turnout, girder, and pier. The results show that: (1) The maximum longitudinal force of rail at Keraniganj Station appears on the main track (i.e. "Track-2"), and attention shall be paid to the service state of the continuously welded rails of the main track during track laying and operation. (2) Longitudinal stress of rail, rail fracture value, displacement of the point of switch rail, displacement of point rail, displacement of stock rail at the switch, the longitudinal force

收稿日期: 2022-01-02

作者简介: 杨文茂(1988-),男,高级工程师。

基金项目: 中铁二院工程集团有限责任公司科学技术研究计划(KSNQ213031), 中铁二院工程集团有限责任公司科学技术研究计划(KSNQ223022)。

引文格式: 杨文茂, 林红松, 徐井芒, 等. 客货共线铁路简支梁上无砟轨道无缝道岔纵向受力分析[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 13-18.

YANG Wenmao, LIN Hongsong, XU Jingmang, et al. Longitudinal Stress Analysis of Continuously Welded Rail Turnout of Ballastless Track on Simply-supported Girder of Mixed Passenger and Freight Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 13-18.

of spacer block, and other indexes meet the specification requirements, and the design scheme is reasonable. (3) The method for checking calculation of continuously welded rail turnouts applied in this paper not only demonstrates the feasibility of laying continuously welded rail turnouts on simply supported girders under the condition of 25 t axle load, but also has certain significance for the Chinese standards "going global" to guide the design of trans-section continuously welded rail tracks of overseas railways.

Key words: simply-supported girder; continuously welded rail turnout; integrated model of turnout, girder, and pier; longitudinal force; displacement

孟加拉帕德玛大桥铁路连接线起自孟加拉国首都达卡,终于南部重镇杰索尔,线路全长 169.829 km,是横跨该国中西部地区的铁路干线。该线为设计速度 120 km/h、轴重 25 t 的客货共线铁路,其中 30.04 km 长的高架桥上均采用了无砟轨道及跨区间无缝线路,为该国首例。轨道工程控制性节点基拉里甘杰站,铺设 12 组无缝道岔,均位于简支梁桥上。此轴重条件下的客货共线铁路,在简支梁上铺设无砟轨道无缝道岔,突破了国内规范的相关要求。

桥上无缝道岔的纵向受力强度及稳定性问题,是关乎运营安全及轨道长期服役状态的控制性因素^[1-3]。

当简支梁上铺设道岔时,伸缩附加力和位移对道岔几何状态的影响较大,往往存在道岔稳定性难以保持的难题。如浙赣铁路涓池站简支梁桥上无缝道岔,其在投入运行初期,轨向变化较大,每 10 d 左右即需养修 1 遍,后期通过增设限位桩才使情况得以改善^[4];海南东环铁路海口东站简支梁上道岔,在运营初期也出现了道岔几何形位不易保持的问题,后期为调整岔区线型,采用了大量的特制扣件垫板。从上述两个案例可以看出,简支梁上道岔是轨道病害的易发区,因此,在设计初期进行客观的受力分析,从源头上减少甚至避免运营过程中的岔区病害是十分必要的。

针对桥上无缝道岔的受力问题,国内相关学者也进行了大量的研究分析。任娟娟^[5]建立了桥上岔区纵连无砟轨道的计算模型与方法,分析了温度影响、制动力和偶然荷载作用下桥上岔区纵连无砟轨道的受力与变形规律;乔神路^[6-7]建立了高速铁路桥上无砟道岔精细化空间耦合模型,系统研究了高速铁路桥上无砟道岔的力学特性及参数影响规律,并建立了相应的评估指标及方法;曲村、高亮、陶凯等^[8]建立了客运专线 42 号无砟轨道可动心轨无缝道岔有限元计算模型,对不同扣件阻力和不同翼轨末端间隔铁数量条件下的道岔的主要力学特性等进行计算分析与比较。

目前,国内关于桥上无缝道岔的相关研究,主要呈现出两个特点:一是相关研究多针对高速铁路

工况,缺乏针对 25 t 或更大轴重条件下客货共线铁路无砟轨道无缝道岔的力学特性研究;二是由于 TB 10015-2012《铁路无缝线路设计规范》^[9]规定“正线道岔区桥梁梁部应采用连续结构”,故我国桥上无缝道岔下部基础尽量避免采用简支梁结构,因此针对简支梁上无缝道岔的受力分析尚不多见。

孟加拉帕德玛大桥铁路连接线基拉里甘杰站,是我国工程技术人员首次挑战 25 t 轴重铁路简支梁桥上的无砟轨道无缝道岔设计,其纵向稳定性对后期运营安全至关重要。针对于此,本文通过建立“岔梁墩一体化”计算模型,对伸缩、挠曲、断轨、制动工况下的道岔强度和稳定性进行了分析,以指导轨道设计实践。

1 简支梁桥上无缝道岔群设计

1.1 道岔与桥梁总体布置

孟加拉帕德玛大桥铁路连接线基拉里甘杰站为 2 台 4 线(含预留线路 1 条)的高架车站,如图 1 所示。站内设有 4 股道,“股道-2”为正线,“股道-1”、“股道-3”、“股道-4”为到发线。其中“股道-3”为远期预留,其它股道均为近期实施。“股道-1”与“股道-2”之间、“股道-3”与“股道-4”的线间距为 7.03 m,“股道-2”与“股道-3”的线间距为 10.8 m。站内设置 12 组道岔,均为 12 号单开道岔。其中“道岔-1~道岔-6”与“道岔-7~道岔-12”呈对称布置。

基拉里甘杰站站线下基础均为 38 m 跨度的钢筋混凝土简支箱梁,如图 2 所示。考虑到站内道岔布置的对称性,图 2 中仅显示“道岔-1~道岔-6”范围内的梁片布置。

1.2 道岔及无砟轨道结构设计

采用 12 号单开道岔,按无缝道岔设计。道岔前长 16.989 m;后长 24.181 m,辙叉角 $4^{\circ}45'49''$,导曲线半径 440.522 m。道岔基本轨采用 60E1 钢轨,尖轨采用 60E1A5 钢轨,尖轨采用弹性可弯结构,尖端为藏尖式,跟端采用间隔铁结构。

岔区采用双层结构的轨枕埋入式无砟轨道,其自上而下分别为桁架式岔枕、道床板、“两布一膜”滑动

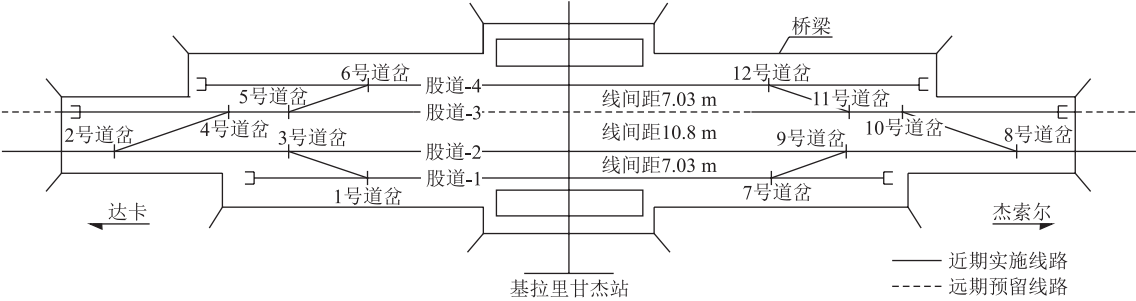


图 1 基拉里甘杰站平面布置示意图

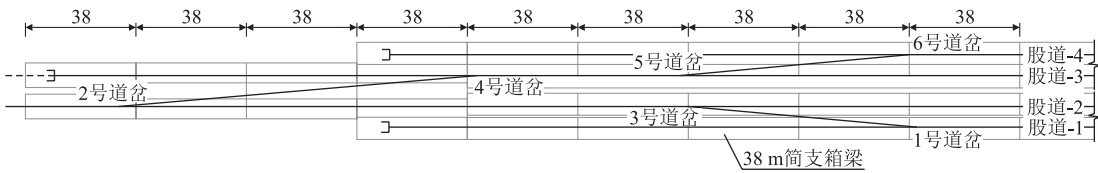


图 2 基拉里甘杰站桥梁平面布置示意图(以“道岔 1~道岔 6”范围内的梁片布置为例)(m)

层、底座。通过在底座上设置限位凹槽,实现对道床板的限位。限位凹槽四周设置三元乙丙橡胶弹性垫层,在道床板与底座凹槽之间起到缓冲作用,如图 3 所示。

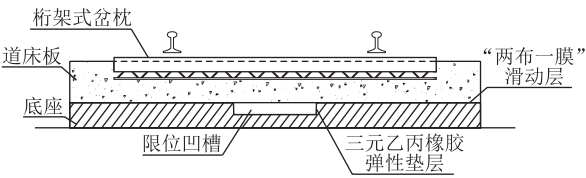


图 3 岔区道床结构示意图

2 岔桥墩一体化模型

根据岔-桥相互作用的原理,将道岔和桥梁作为一个耦合系统,建立“岔梁墩一体化”计算模型,如图 4 所示。

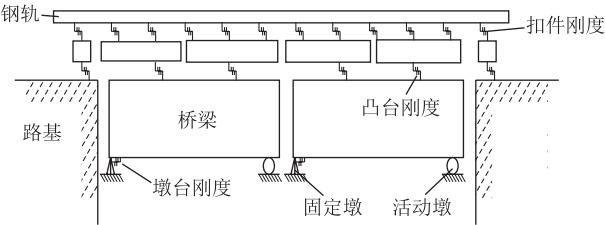


图 4 岔梁墩一体化计算模型示意

由于道床板和底座之间铺设“两布一膜”滑动层,允许二者之间有相对滑动,故把桥上无缝道岔结构看作一个由道岔、道床板、梁体组成的三层结构体系,道

岔和道床板之间的扣件采用弹簧模拟,道床板和梁体通过弹簧连接。岔区采用Ⅱ型弹条扣件,岔区扣件纵向阻力为 12.5 kN/组。道床板和梁体之间的纵向刚度主要取决于底座限位凹槽内的橡胶弹性垫层刚度。根据三元乙丙橡胶的材料属性及垫层尺寸,换算得到其纵向刚度为 73.84 kN/mm。

列车荷载根据孟加拉国铁路实际情况,取其邻国印度 25 t 轴重列车“COMBINATION-5”荷载组合,如图 5 所示。

达卡—杰索尔地区最低轨温 0℃,最高轨温 58℃。本线无缝线路锁定于温度在 34.5℃~39.5℃的时段内进行,故钢轨最大温升为 23.5℃,最大温降为 39.5℃,无砟轨道及桥梁均按年温差 30℃考虑。

3 计算结果

3.1 钢轨纵向力

(1) 伸缩力

升温及降温工况下,钢轨伸缩力分布如图 6 所示。钢轨伸缩力峰值如表 1 所示。

表 1 升温及降温工况下的钢轨伸缩力峰值表(kN)

工况	股道-1	股道-2	股道-3	股道-4
升温	- 849.81	- 868.46	- 866.04	- 853.04
降温	+ 1 170.40	+ 1 220.32	+ 1 189.83	+ 1 171.94

注:“+”表示拉力,“-”表示压力

由表 1 可知,升温时,钢轨最大伸缩压力出现在正线(即“股道-2”)上,为 868.46 kN,即 112.993 MPa (60E1 钢轨断面积为 76.86 cm²);降温时,钢轨最大

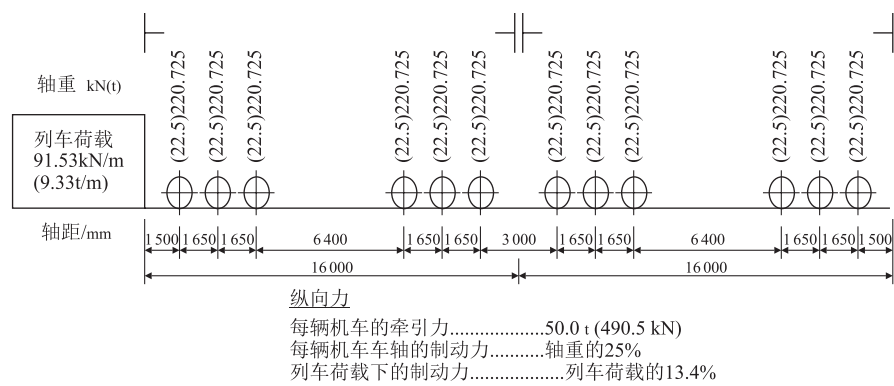


图 5 印度 25 t 轴重列车 COMBINATION-5 荷载图

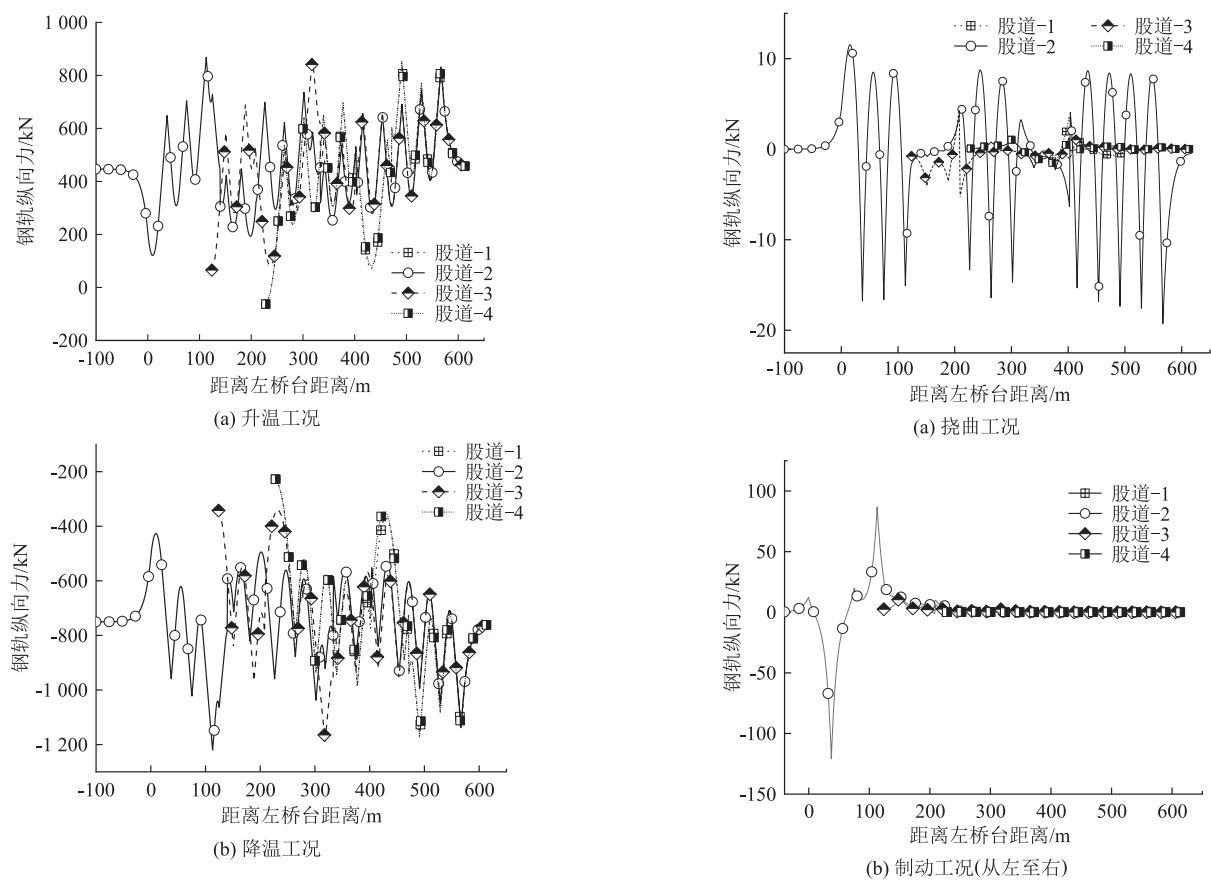


图 6 升温及降温工况下的钢轨伸缩力分布图

伸缩拉力也出现在股道 -2 上, 为 1 220. 32 kN, 即 158. 772 MPa。

(2) 挠曲力和制动力

升温及降温时, 钢轨最大伸缩压力均出现在“股道 -2”上。按最不利工况选择, 将车辆荷载布置在“股道 -2”上计算挠曲工况和制动工况。挠曲力和制动力分布计算结果如图 7 所示。挠曲力和制动力峰值如表 2 所示。

由表 2 可知, 从右至左制动时, 制动附加力较大, 其中最大制动附加压力为 153. 17 kN, 即 19. 93 MPa; 最大制

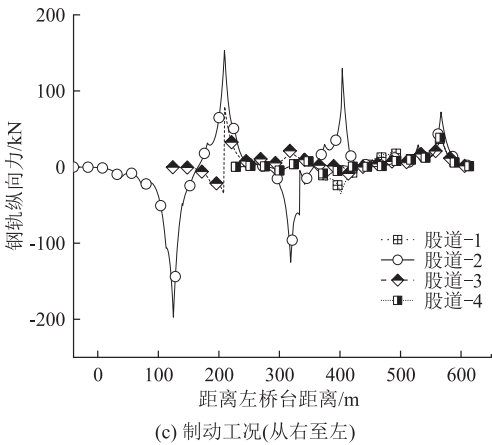


图 7 挠曲及制动工况下的钢轨纵向力分布图

表 2 挠曲及制动工况下的钢轨纵向力峰值表(kN)				
工况	股道-1	股道-2	股道-3	股道-4
挠曲	+ 2. 03/ -3. 58	+ 19. 26/ -11. 53	+ 5. 32/ -4. 36	+ 2. 30/ -1. 24
制动 1	0. 00/ -0. 82	+ 120. 79/ -86. 82	+ 13. 32/ -1. 22	0. 14/ -0. 82
制动 2	35. 22/ -42. 74	197. 26/ -153. 17	34. 66/ -79. 40	14. 50/ -42. 50

注:“制动 1”表示从左至右制动,“制动 2”表示从右至左制动;“+”表示拉力,“-”表示压力

动附加拉力为 197. 26 kN,即 25. 66 MPa。

(3)钢轨动弯应力

将钢轨视为连续弹性支承的等截面无限长梁,根据 Q/CR 9130-2018《铁路轨道设计规范(极限状态法)》^[10]附录 A 计算,在 25 t 轴重条件下,轨头边缘最大可能动弯压应力为 122. 64 MPa;轨底边缘最大可能动弯拉应力为 105. 11 MPa。

(4)钢轨纵向应力组合

钢轨纵向应力组合如表 3 所示。由于伸缩工况与挠曲工况不叠加,且前文所显示计算结果中伸缩力大于挠曲力,采用伸缩工况计算结果进行钢轨强度检算。

表 3 钢轨纵向应力组合表(MPa)				
应力类型	动弯应力	伸缩应力	制动应力	合计
压应力	122. 64	112. 993	19. 93	255. 56
拉应力	105. 11	158. 772	25. 66	289. 55

本项目采用 R320Cr 材质的 60E1 钢轨,屈服强度为 645. 82 MPa,考虑 1. 3 的安全系数,钢轨容许应力值为 496. 78 MPa。由表 3 可知,钢轨纵向最大压应力为 255. 56 MPa,最大拉应力为 289. 55 MPa,均小于钢轨容许应力,钢轨强度满足要求。

3.2 钢轨断缝值

取降温工况下最大伸缩力处(即股道 -2 上距离车站始端 112. 90 m 处)计算断缝值,钢轨位移计算结果如图 8 所示。

由图 8 可知,钢轨断缝值最大为 37. 96 mm,未超出《铁路无缝线路设计规范》所规定的容许限值(70 mm),满足要求。

3.3 尖轨及心轨伸缩位移

升温、降温工况下,尖轨尖端和心轨尖端相对于基本轨的伸缩位移如表 4、表 5 所示。

由表 4、表 5 可知,尖轨尖端和心轨尖端相对于基本轨的伸缩位移最大分别为 8. 23 mm 和 17. 73 mm,小于《铁路无缝线路设计规范》所规定的容许限值

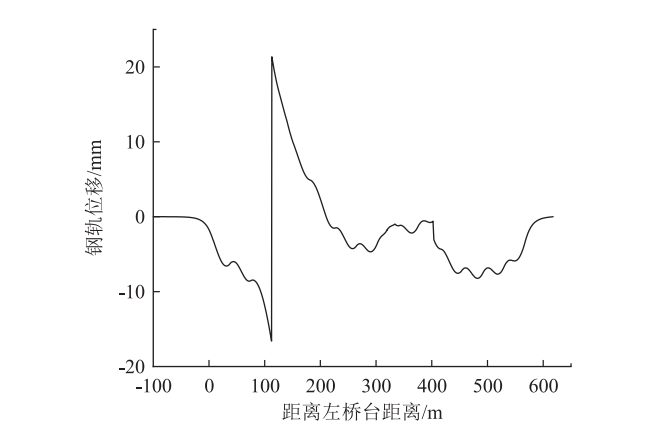


图 8 断轨工况钢轨位移图

表 4 尖轨尖端相对于基本轨的伸缩位移表(mm)		
道岔编号	相对位移	
	升温工况	降温工况
1 号	5. 89	-8. 20
2 号	-4. 41	7. 24
3 号	1. 93	-4. 45
4 号	2. 37	-4. 51
5 号	2. 38	-6. 58
6 号	5. 96	-8. 23

注:“+”表示方向向右,“-”表示方向向左

表 5 心轨尖端相对于基本轨的伸缩位移表(mm)		
道岔编号	相对位移	
	升温工况	降温工况
2 号	3. 38	14. 14
3 号	0. 72	14. 16
4 号	4. 13	-11. 54
5 号	-1. 53	17. 73
6 号	1. 87	-9. 37

注:“+”表示方向向右,“-”表示方向向左

(40 mm),满足要求。

3.4 转辙器处基本轨与桥梁相对位移

为保证转辙机动作杆、连接杆、锁闭杆在同一直线位置,避免道岔转换过程转辙机发生卡阻现象,转辙器处基本轨与桥梁之间的相对位移应控制在合理范围之内。

不同工况下,转辙器处基本轨与桥梁相对位移如表 6 所示。

由表 6 可知,转辙器处基本轨与桥梁相对位移最大为 4. 91 mm,符合《铁路无缝线路设计规范》在 7. 3. 4 节“条文说明”中所建议的“桥上道岔转辙机处基本轨与桥梁相对位移不大于 5 mm”的规定。

3.5 间隔铁纵向受力

不同工况下,道岔直、侧股间隔铁所承受的最大

表 6 转辙器处基本轨与桥梁相对位移表(mm)

道岔编号	升温	降温	挠曲	制动 1	制动 2	断轨
1 号	4. 91	4. 11	0. 00	0. 00	0. 32	2. 14
2 号	0. 65	0. 71	0. 10	0. 22	0. 02	1. 01
3 号	1. 20	1. 07	0. 10	0. 01	0. 35	1. 91
4 号	4. 71	1. 96	0. 01	0. 08	1. 10	1. 38
5 号	3. 81	4. 72	0. 02	0. 08	0. 76	4. 90
6 号	4. 39	4. 38	0. 00	0. 00	0. 07	2. 90

注:“制动 1”表示从左至右制动,“制动 2”表示从右至左制动,“+”表示方向向右,“-”表示方向向左

纵向力计算结果分别如表 7、表 8 所示。

表 7 道岔直股间隔铁承受的纵向力表(kN)

道岔编号	升温	降温	挠曲	制动 1	制动 2	断轨
1 号	218. 78	-225. 00	-0. 25	0. 01	5. 41	-225. 00
2 号	-140. 22	189. 59	0. 21	-4. 07	-5. 15	85. 96
3 号	-142. 97	225. 31	-0. 22	-0. 02	-8. 02	225. 02
4 号	75. 00	-75. 00	-0. 06	0. 25	2. 10	-75. 00
5 号	-191. 89	225. 00	0. 16	-0. 47	-4. 20	225. 00
6 号	220. 83	-225. 00	0. 12	0. 04	0. 73	-225. 00

注:“制动 1”表示从左至右制动,“制动 2”表示从右至左制动,“+”表示方向向右,“-”表示方向向左

表 8 道岔侧股间隔铁承受的纵向力表(kN)

道岔编号	升温	降温	挠曲	制动 1	制动 2	断轨
1 号	218. 84	-225. 00	-0. 22	0. 01	5. 16	-225. 00
2 号	-138. 94	189. 21	0. 20	-4. 09	62. 82	288. 08
3 号	-142. 13	225. 54	-0. 24	-0. 02	59. 73	225. 02
4 号	75. 00	-75. 00	-0. 04	0. 23	1. 89	-75. 00
5 号	-191. 14	225. 00	0. 16	-0. 48	-4. 20	225. 00
6 号	220. 80	-225. 00	0. 12	0. 04	0. 72	-225. 00

注:“制动 1”表示从左至右制动,“制动 2”表示从右至左制动,“+”表示方向向右,“-”表示方向向左

由表 7 和表 8 可知,2 号道岔侧股间隔铁在断轨工况下所承受纵向力最大,为 288. 08 kN。本工程单个间隔铁通过 2 根 10. 9 级 M27 螺栓与一侧基本轨(或尖轨)相连结。根据 GB/T 3098. 1-2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》,每根 M27 螺栓的螺纹公称应力截面积为 459 mm²,故每根螺栓所承受的剪应力为 313. 82 MPa,小于 10. 9 级高强螺栓的容许剪应力 415 MPa。

4 结论

孟加拉国首次在 25 t 轴重的客货共线铁路简支梁桥上开展无砟轨道无缝道岔设计。本文通过建立岔梁墩一体化模型,对伸缩、挠曲、断轨、制动工况下无缝道岔纵向受力进行了检算和评估,结论如下:

(1) 钢轨纵向应力最大值出现在正线(即“股

道-2”)上,故轨道铺设及运营过程中应重点关注正线的无缝线路服役状态。

(2) 钢轨纵向应力及断缝值、道岔尖轨尖端相对于基本轨的伸缩位移、心轨尖端相对于基本轨的伸缩位移、转辙器处基本轨与桥梁相对位移、间隔铁纵向力均未超限。说明本文所设计的无缝道岔布置方案,道岔主要部件强度、纵向稳定性均满足要求,设计方案合理。

(3) 本文所采用的无缝道岔检算方法,既论证了在 25 t 轴重简支梁上铺设无砟轨道无缝道岔的可行性,同时也对中国标准“走出去”指导海外铁路跨区间无缝线路设计具有一定的指导意义。

需要注意的是,简支梁上道岔仍是轨道结构病害的易发区。在简支梁上铺设道岔时,应重点关注道岔结构线型的控制,选择合理的施工时机和施工温度,减少梁端伸缩变形对道岔结构的影响。同时,运营期间还应加强对道岔线型的跟踪监测,以确保结构安全。

参考文献:

[1] 高亮,陶凯,曲村,等. 客运专线桥上无缝道岔空间力学特性的研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 29-35.
GAO Liang, TAO Kai, QU Cun, et al. Study on the Spatial Mechanical Characteristics of Welded Turnout on the Bridges for Passenger Dedicated Lines [J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 29-35.

[2] 杨荣山. 桥上无缝道岔纵向力计算理论与试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
YANG Rongshan. Research on Longitudinal Force Cumputation Theory and Experiment of Welded Turnout on Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[3] 殷明旻,蔡文锋,许智焰,等. 厦深客运专线大跨连续梁上无缝道岔设计研究[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(4): 48-51.
YIN Mingmin, CAI Wenfeng, XU Zhiyan, et al. Design of Welded Turnout on Long-span Continuous Beam on Xiamen-Shenzhen Passenger Dedicated Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(4): 48-51.

[4] 刘芳. 有砟桥上无缝道岔轨道几何状态现场检测分析及控制[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(12): 4-8.
LIU Fang. On-site Inspection, Analysis and Control of Track Geometry of Jointless Turnout on Ballasted Bridge [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(12): 4-8.

[5] 任娟娟. 桥上无缝道岔区纵连式无砟轨道受力特性与结构优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
REN Juanjuan. Research on Force Characteristics and Structural Optimization for Longitudinal Coupled Ballastless Track Turnout on

(下转第 47 页)

(2) 溶洞回填体内隧道开挖成型困难, 为提高回填体整体性, 增强回填体自稳能力, 采用钢管袖阀管进行注浆加固。注浆采用分区块先进行帷幕封闭, 再填充注浆的方式, 取得了良好效果, 且钢管也对注浆体起到了加强连接、锚固作用, 增强了回填体的整体稳定性。

(3) 为有效控制沉降, 先经计算分析确定了控制标准, 再通过基底注浆改善回填体物理力学性质, 减少沉降量, 最后设置健康监测掌握沉降情况, 并根据监测结果及时进行补偿注浆, 达到有效控制沉降的目的。

(4) 隧道结构采用了“宽变形缝+短节段衬砌”的柔性防生构造, 在减小基底不均匀沉降影响方面取得了良好效果。从现场监测情况看, 每节段间差异沉降对结构基本无影响, 节段内差异沉降最大值发生在对角点上, 隧底采用了大刚度的厚底板结构以及补偿注浆, 基本消除了基底不均沉降对隧道的影响, 保证了隧道的结构安全。

参考文献:

- [1] 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量[J]. 中国岩溶, 1983, 2(2): 147-150.
LI Datong, LUO Yan. Measurement of Carbonate Rocks Distribution Area in China [J]. Carsologica Sinica, 1983, 2(2): 147-150.
- [2] 林本涛, 巩江峰. 朱砂堡二号隧道特大型岩溶空腔处理技术[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 91-96.
LIN Bentao, GONG Jiangfeng. Treatment Technology of Super Large Karst Cavity in Zhushabao No. 2 Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 91-96.
- [3] 李勇良. 云桂客专营盘山隧道穿越巨型溶洞处治技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2016(2): 57-60, 74.
LI Yongliang. Treatment Technology for Yingpan Mountain Tunnel of Kunming-Nanning Dedicated Line Passing through a Giant Cave [J]. Railway Construction Technology, 2016(2): 57-60, 74.
- [4] 马涛. 宜万铁路龙麟宫隧道1号大型溶洞处理技术研究[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(8): 125-128.
MA Tao. Study on Treatment Technology of No. 1 Large Karst Cave in Longlingong Tunnel of Yichang-Wanzhou Railway [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(8): 125-128.
- [5] 刘同江, 唐钢, 王军, 等. 黔张常铁路高山隧道巨型溶洞处理技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 972-982.
LIU Tongjiang, TANG Gang, WANG Jun, et al. Treatment Technology of Giant Karst Cave of Gaoshan Tunnel on Qianjiang-Zhangjiajie-Changde Railway [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 972-982.
- [6] 张欣. 田德铁路陇外隧道巨型溶洞的处理[J]. 铁道运营技术, 2011, 17(2): 29-31.
ZHANG Xin. Treatment of Giant Karst Cave in Longwai Tunnel of Tiande Railway [J]. Railway Operation Technology, 2011, 17(2): 29-31.
- [7] 邱敬格. 巨型岩溶条件下高铁隧道超厚回填体路基沉降规律与控制技术研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
QIU Jingge. Settlement Regularity and Control Technology Research of Ultra Thick Backfill Subgrade in High Speed Railway Tunnel under the Condition of Giant Karst [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018.
- [8] Q/CR 9218-2015 铁路隧道监控量测技术规程[S].
Q/CR 9218-2015 Technical Specification for Monitoring Measurement of Railway Tunnel [S].
- [9] 曲村, 高亮, 陶凯, 等. 客运专线42号无砟轨道无缝道岔参数分析[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(2): 43-46.
QU Cun, GAO Liang, TAO Kai, et al. Parameter Analysis of Jointless Turnout on No. 42 Ballastless Track of Passenger Dedicated Line [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(2): 43-46.
- [10] TB 10015-2012 铁路无缝线路设计规范[S].
TB 10015-2012 Code for Design of Railway Continuous Rail [S].
- [11] Q/CR 9130-2018 铁路轨道设计规范(极限状态法)[S].
Q/CR 9130-2018 Code for Design of Railway Track (Limited State Method) [S].
- [12] 乔神路. 高速铁路桥上无砟道岔系统空间精细化设计理论及试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
QIAO Shenlu. Spatial Detailed Design Theory and Experimental Research on Ballastless Turnout System on Bridge in High-speed Railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [13] 乔神路, 高亮, 程玉生. 复式交分道岔力学特性及无缝化研究[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(4): 61-65.
QIAO Shenlu, GAO Liang, CHENG Yusheng. Mechanical Characteristics and Seamless Research of Double Slip Switches [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(4): 61-65.