

文章编号: 1674—8247(2022)04—0040—07
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.007

市域铁路大跨连续梁桥上无缝道岔群 纵向力学特性分析

张艳平

(东莞市轨道交通有限公司, 广东 东莞 523076)

摘 要:文章以某市域铁路高架站后咽喉区(40+64+40)m 四线变双线道岔梁+26 m 简支梁+6×32 m 单渡线道岔梁为工程背景,基于岔-桥相互作用原理和非线性有限单元法,建立岔-桥-墩一体化计算模型,分析不同轨道设计方案下大跨连续梁桥上无缝道岔群纵向力变化规律,并以规范要求开展设计检算,结果表明:(1)钢轨伸缩力、制动力峰值均出现在大跨连续梁右梁缝处;(2)全桥采用常阻力扣件时,钢轨伸缩力最大值达到 965.1 kN,钢轨总应力超过容许应力限值;(3)采用小阻力扣件可大幅降低钢轨伸缩力,对钢轨制动力则影响不大;(4)铺设小阻力扣件、适当降低锁定轨温、放大断缝值要求等轨道措施可使得无缝道岔应力、位移指标满足设计要求。研究结果可为大跨连续梁桥上无缝道岔群轨道设计方案提供参考。

关键词:市域铁路;桥上无缝道岔;数值模拟;钢轨纵向力;轨道力学检算;小阻力扣件
中图分类号:U213.6 **文献标志码:**A

40

Analysis of Longitudinal Mechanical Properties of Continuously Welded Rail Turnout Groups on Long-span Continuous Girder Bridge of Suburban Railways

ZHANG Yanping

(Dongguan Rail Transit Co., Ltd., Dongguan 523076, China)

Abstract: Taking the (40+64+40)m four-track to double-track turnout girder+26 m simply supported girder+6×32 m single crossing turnout girder in the back throat area of a suburban railway elevated station as the case for analysis, the integrated calculation model of turnout-bridge-pier is established based on the principle of turnout-bridge interaction and nonlinear finite element method, to analyze the variation law of longitudinal force of continuously welded turnout groups on long-span continuous girder bridges under different track design schemes, and the design is carried out according to the specification requirements. The results show that: (1) The peak values of rail stretching force and braking force appear at the right girder joint of long-span continuous girder. (2) When constant resistance fasteners are used for the whole bridge, the maximum rail stretching force reaches 965.1 kN, and the total rail stress exceeds the allowable stress limit. (3) Using small resistance fastener can greatly reduce rail stretching force, but has little effect on rail braking force. (4) Track measures such as laying small resistance fasteners, appropriately reducing the locked rail temperature, and enlarging the requirement of broken seam value can make the stress and displacement indexes of continuously welded rail turnout meet the design requirements. The research results can provide a reference for the track design scheme of continuously welded rail turnout group on long-span continuous girder bridges.

收稿日期:2022-07-11

作者简介:张艳平(1966-),女,高级工程师。

引文格式:张艳平.市域铁路大跨连续梁桥上无缝道岔群纵向力学特性分析[J].高速铁路技术,2022,13(4):40-46.

ZHANG Yanping. Analysis of Longitudinal Mechanical Properties of Continuously Welded Rail Turnout Groups on Long-span Continuous Girder Bridge of Suburban Railways[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):40-46.

Key words: suburban railway; continuously welded rail turnout on a bridge; numerical simulation; longitudinal force of rail; checking calculation of track mechanics; small resistance fastening

市域铁路作为都市圈多层次轨道交通体系的重要组成部分,具有线路条件苛刻、桥跨布置复杂等特点^[1]。随着城市化和铁路的快速发展,市域铁路的建设中不可避免的会出现大跨连续梁上布置无缝道岔的情况。桥上无缝道岔本就是多层异质相互作用的复杂系统^[2],复杂的无缝道岔、无砟轨道结构形式再叠加大跨桥梁大变形、大温跨的影响,轨道安全服役性能将受到严峻挑战。此外,高架站前、站后道岔一般是成群布置的,钢轨纵向力分布还会受到道岔群间相互作用的影响。

诸多学者针对连续梁上无缝道岔纵向力学特性展开了研究,桥梁主跨从32 m、48 m、56 m到64 m逐渐递增,研究内容主要包括岔桥相对位置、各种工况下无缝道岔结构受力变形检算、小阻力扣件布设等方面^[3-6]。高增增等^[7]分析了典型高架站咽喉区无缝道岔的轨道受力和变形特性,提出铺设小阻力扣件以及在道岔梁间插入简支梁对无缝道岔受力有利。陈新^[8]对客运专线道岔梁结构形式和桥跨布置展开了研究,认为在典型咽喉区采用32.7 m的梁桥较为合理,并提出了岔桥相对位置的布置原则。高亮等^[9]建立了主跨48 m连续梁上无缝道岔空间耦合模型,分析了温度荷载及列车荷载作用下无缝道岔受力及变形,着重强调了钢轨横向变形的重要性。孙加林^[10]以郑西客运专线主跨56 m桥上单开和渡线道岔为背景,研究了温度场作用下无缝道岔的纵、横向受力与变形,得出钢轨纵向位移远大于横向位移以及梁体变形与道岔结构形式无关的结论。然而,以上研究中针对主跨

64 m及以上的大跨连续梁桥上无缝道岔的研究较为匮乏,仅文献[2]对主跨64 m连续梁桥上1组18号单开道岔进行了受力变形检算,且其道岔形式单一,并未考虑道岔群间的相互影响。

本文以某市域铁路高架站咽喉区桥上无缝道岔群为研究对象,建立岔-桥-墩一体化计算模型,分析温度变化、列车制(启)动作用下大跨连续梁桥上无缝道岔群纵向力变化规律,并以《铁路无缝线路设计规范》^[11]要求对不同无缝道岔轨道设计方案进行轨道力学检算。研究结果可为大跨连续梁桥上无缝道岔轨道设计方案提供参考。

1 结构与荷载参数

1.1 岔桥相对位置

某市域铁路高架站后咽喉区桥跨布置为:28 m简支梁+(26+27+26) m连续梁+(40+64+40) m连续梁+26 m简支梁+6×32 m连续梁+4×32 m简支梁。主跨64 m连续梁上拟铺设两组18号单开道岔,沿线路中心线对称布置,岔心距连续梁左端85 m,线路条件由四线变为双线,线间距为4.6 m;6×32 m连续梁上拟铺设2组18号4.6 m间距单渡线道岔,4号岔心距连续梁左端52 m,单渡线岔心里程距离为85.656 m。连续梁固定支座设置于4号、6号和12号墩,简支梁固定支座均位于大里程端,股道编号、道岔编号、桥墩编号、支座布置以及岔桥相对位置如图1所示,桥墩纵向刚度如表1所示。

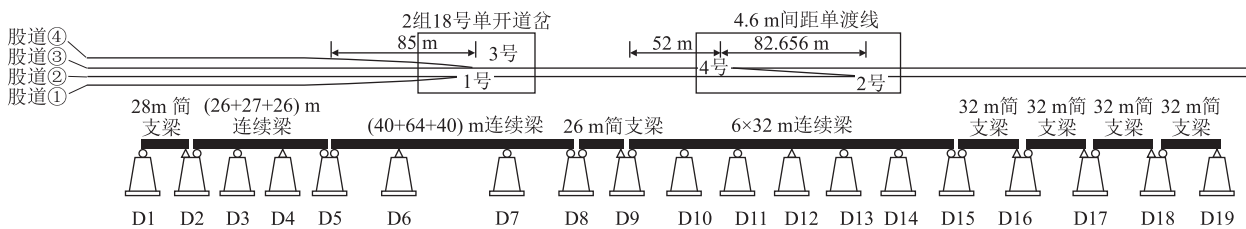


图1 岔桥相对位置布置图

表1 双线桥墩纵向刚度表(kN/cm)

墩号	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
刚度	401	240.13×2	730.60×2	253.60×2	553.2×2	1 478.8×2	709.9×2	1 148.3	489.8
墩号	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18/D19
刚度	630.6	1 057.6	535.3	414.5	409	407	401	377	376

1.2 轨道结构参数

18号无缝道岔采用材质为U71MnG的60 kg/m

钢轨,屈服强度为457 MPa,考虑1.3的安全系数,容许应力为351 MPa。道岔全长69 m,前长31.729 m,

后长 37.271 m。转辙器采用相离半切线型 60AT2 弹性可弯曲尖轨,尖轨尖端为藏尖式,尖轨跟端设置 2 组限位器。辙叉采用钢轨组合型可动心辙叉,心轨采用 60AT2 制造,短心轨后端为滑动端,翼轨采用 60TY1 钢轨制造,长、短心轨与翼轨间各设置 2 组间隔铁。岔区采用弹条 II 型分开式扣件、长枕埋入式无砟轨道,正线采用 WJ-8B 型扣件、CRTS III 型板式无砟轨道。扣件轨下胶垫刚度取为 25 kN/mm,轨枕间距为 0.63 m,阻力采用双线性,根据轨枕间距换算得到每延米线路纵向阻力为 23.8 kN/(m·轨),弹塑性分界位移取为 2 mm。

1.3 荷载参数

锁定轨温是影响无缝道岔群温度力的重要参数^[12]。根据当地气象参数,最高轨温取为 61.3℃,最低轨温为 -28.2℃。参考附近区域工程经验和现场施工要求,正线设计锁定轨温为 22℃±5℃,则最大升温幅度为 44.3℃,最大降温幅度为 55.2℃,岔区设计锁定轨温初步定为与正线一致,则最大温度拉力为 134.2 MPa。参考《铁路无缝线路设计规范》,无砟轨道桥梁按年温差取为 30℃。

车辆采用市域 D 型车,轴重 17 t,固定轴距 2.5 m,转向架中心距 15.7 m,8 辆编组,长度为 188 m,最高运行速度 200 km/h。参考《城际铁路设计规范》,制动荷载取为 48 kN/m,考虑整车加载。根据车辆荷载和轨道参数计算得到的轨底动弯拉应力为 125.1 MPa。

根据《铁路无缝线路设计规范》,为满足钢轨应力不超限,此时伸缩应力和制动应力之和不能超过 91.7 MPa。

2 岔-桥-墩一体化计算模型

无缝道岔与桥梁之间的相互作用除了考虑类似无缝线路固定区的梁轨相互作用外,还需叠加道岔里轨伸缩引起的岔-桥相互作用。道岔里轨在温度变化下产生的伸缩通过岔枕带动基本轨产生位移,再由扣件、道床系统引起与桥梁的相互作用。因此,需将道岔与桥梁看作相互影响的耦合系统,建立岔-桥-墩一体化计算模型来分析桥上无缝道岔纵向力学特性。

模型中钢轨采用梁单元模拟,考虑为只发生纵向位移的拉压杆件,尖轨和心轨变截面范围具有按线性变化的截面刚度;轨枕简化为水平面内弹性可弯等截面梁单元;扣件、尖轨跟端限位器、心轨跟端间隔铁均简化为非线性弹簧,其中扣件弹簧刚度由弹条 II 型扣件阻力以轨枕间距进行换算,限位器和间隔铁的阻力值参考文献^[13]取值。墩台对于梁体的纵向约束采

用线形弹簧模拟,刚度按墩台实际纵向刚度取值。由于道床板与桥梁通过门型钢筋紧密相连,两者相对位移很小,可将道岔板与桥梁视为一体,此时道岔与桥梁之间仅通过扣件纵向阻力产生相互作用^[14],道岔板与桥梁均以梁单元模拟,岔-桥-墩一体化计算模型如图 2 所示。

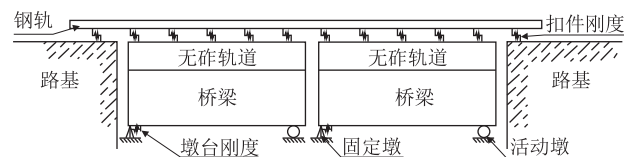


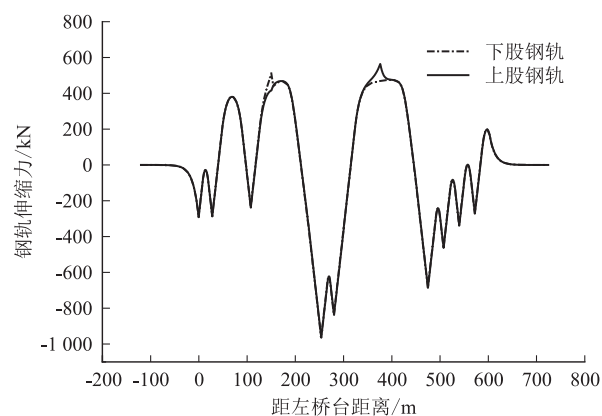
图2 岔-桥-墩一体化计算模型示意图

3 无缝道岔纵向力学特性

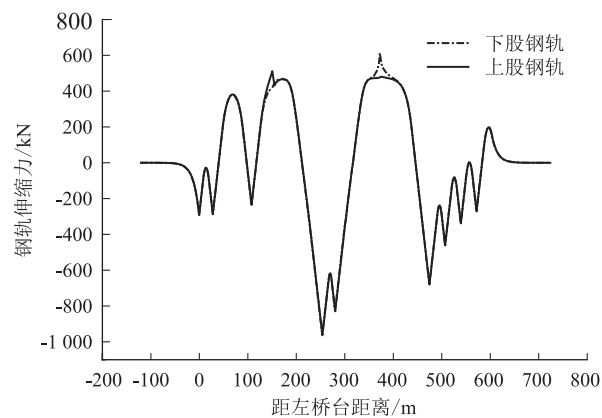
3.1 常阻力扣件方案

3.1.1 温度变化

除岔区外,全桥采用常阻力扣件时,钢轨按最大降温幅度施加温度荷载,桥梁降温 30℃时,第二、三股道的上、下股钢轨伸缩力如图 3 所示,伸缩力以压力为正。



(a) 第二股道



(b) 第三股道

图3 钢轨伸缩力分布图

由图3可知,钢轨伸缩力最大值出现在主跨64 m连续梁右梁缝处,第二股道最大伸缩力为965.1 kN,第三股道最大伸缩力963.2 kN,两者差距不大,故后文仅对第二股道进行分析。在两道岔梁中部伸缩力均出现一定量的突变,这是辙叉区间隔铁作用的结果。对于主跨64 m桥上单开道岔而言,由于右侧温度跨度大于左侧,故钢轨伸缩力峰值出现在右梁缝处,而对于6×32 m桥上单渡线而言,基于同样的原因,钢轨伸缩力峰值本应出现在右梁缝处,但由于道岔群间的相互影响,其左梁缝处钢轨伸缩力反而大于右梁缝处。因此,在分析桥上无缝道岔纵向力时,需考虑道岔群之间相互作用的影响。

3.1.2 列车制(启)动作用

由于列车的制、启动力作用的作用方向不同,使得钢轨纵向力会出现反向,但是量值相同,因此仅分析钢轨制动力分布即可。考虑列车在第二股道发生制动,车头放置在主跨64 m连续梁右梁缝处。列车从左向右入桥和从右向左入桥时钢轨制动力分布如图4所示,制动力以压力为正。

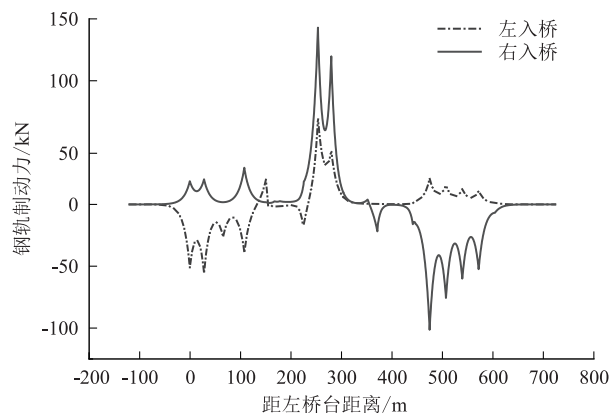


图4 常阻力扣件下钢轨制动力分布图

由图4可知,由于计算时考虑最不利工况,将车头放置在伸缩力最大处,因此无论列车从左向右入桥还是从右向左入桥,钢轨制动力峰值均出现在主跨64 m连续梁右梁缝处。从右向左入桥时钢轨制动力最大值大于从左向右入桥,达到142.9 kN。

由3.1.1节和3.1.2节可知,钢轨伸缩应力和钢轨制动应力之和达到142.8 MPa,远超两者之和的限值91.7 MPa,故常阻力方案不能满足钢轨容许应力要求。

3.2 小阻力扣件方案

由常阻力扣件下钢轨伸缩力分布可知,在主跨64 m连续梁及(6×32) m单渡线梁右梁缝处钢轨伸缩力较大,故考虑两种小阻力扣件方案。

方案一:在伸缩力峰值附近布置小阻力扣件,即在D7~D10、D14~D16号墩之间布置小阻力扣件;

方案二:在道岔梁及其间插入的简支梁的非岔区上布置小阻力扣件,即在D5~D15号墩之间布置小阻力扣件。

3.2.1 温度变化

钢轨按最大降温幅度施加温度荷载,桥梁降温30℃时,两种小阻力扣件布设方案下第二股道下股钢轨伸缩力分布如图5所示。

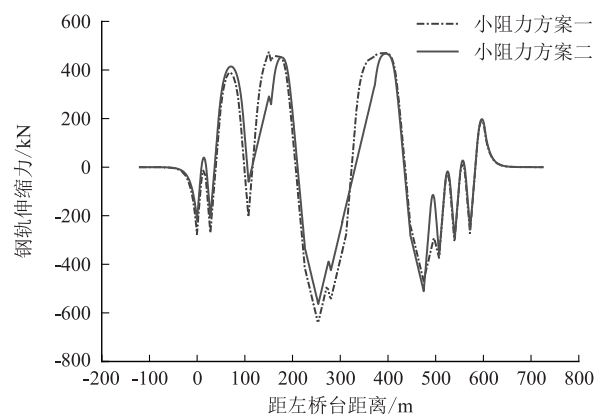


图5 小阻力扣件下钢轨伸缩力分布图

由图5可知,方案一、方案二钢轨伸缩力最大值分别为642.7 kN、568.4 kN,分别较常阻力扣件方案减少了33.4%和41.1%,位置同样出现在主跨64 m连续梁右梁缝处。由此可见,铺设小阻力扣件可有效降低钢轨伸缩力峰值,相比在伸缩力峰值附近铺设小阻力扣件而言,在道岔梁及其间插入的简支梁上铺设小阻力扣件的方案更优。

3.2.2 列车制(启)动作用

考虑列车在第二股道发生制动,车头放置在主跨64 m连续梁右梁缝处,从右向左入桥,两种小阻力扣件方案下钢轨制动力分布如图6所示。

由图6可知,两种小阻力扣件方案钢轨制动力分布规律类似,制动力最大值在141.3 kN左右,位置同样出现在主跨64 m连续梁右梁缝处。相比常阻力扣件方案而言,钢轨伸缩力分布规律以及峰值均近乎相同。由此可见,扣件阻力对钢轨制动力影响不大。

由3.2.1节和3.2.2节可知,钢轨伸缩应力和钢轨制动应力之和达到91.6 MPa,十分接近两者之和的限值91.7 MPa,为使钢轨应力有一定富余,需考虑其他轨道设计措施。

3.3 降低锁定轨温

考虑到无缝道岔本就是轨道的薄弱环节,若再在道岔两端铺设钢轨伸缩调节器,无疑会增加后期运营

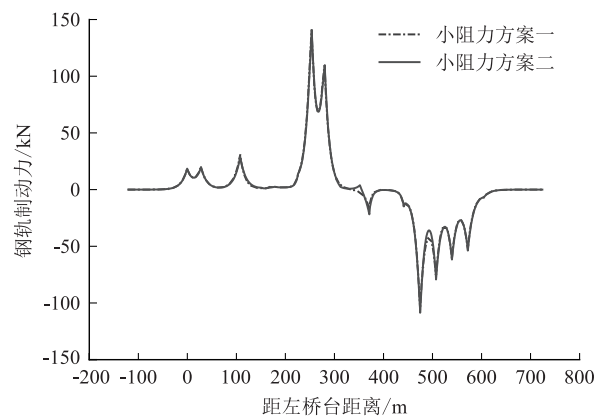


图6 小阻力扣件下钢轨制动力分布图

部门的养护维修工作量。由于无缝道岔及前后一定范围线路可单独设置为一个单元轨节,可适当降低其锁定轨温,从而达到降低温度应力的目的。

考虑将岔区锁定轨温相比正线降低 5℃,即岔区锁定轨温取为 17℃±5℃,则最大升温幅度为 49.3℃,最大降温幅度为 50.2℃,最大温度拉力为 122.0 MPa。

4 轨道力学检算

桥上无缝道岔检算包含应力检算和位移检算,应力检算时需满足钢轨总应力和道岔传力部件联结螺栓受力小于容许应力限值,而位移检算包括钢轨折断时断缝值、道岔可动部分纵向位移不超过规定容许值,同时,为满足设备正常转换和锁闭,在伸缩力和制动力作用下转辙机处梁轨相对位移量不大于 5 mm。

4.1 应力检算

4.1.1 钢轨应力检算

桥上无缝道岔在进行钢轨应力检算时需满足动弯应力、温度应力、伸缩应力以及制动应力之和在钢轨容许应力范围内。通过适当降低锁定轨温,在道岔梁及其间插入的简支梁上铺设小阻力扣件的轨道措施,此时钢轨应力满足容许应力要求,应力检算如表 2 所示。

表2 钢轨应力检算表

锁定轨温 /℃	动弯 应力 /MPa	温度 应力 /MPa	伸缩 应力 /MPa	制动 应力 /MPa	应力 合计 /MPa	容许 应力 /MPa	检算 结果
17	125.1	122.0	73.4	18.2	338.7	351	通过

4.1.2 道岔传力部件受力检算

道岔传力部件包括尖轨跟端的限位器和心轨跟端的间隔铁,限位器或间隔铁联结螺栓剪切强度可按式(1)检算。

$$\tau = \frac{4T}{\pi d^2} \leq [\tau]$$

(1)

式中:τ——螺栓剪切强度(MPa);
t——限位器或间隔铁联结螺栓承受的最大剪力(N);
d——螺栓直径(mm);
[τ]——栓容许剪切应力(MPa)。

由式(1)计算得,限位器或间隔铁螺栓的容许纵向力按 475 kN 为控制标准。

经计算,温度变化对道岔传力部件受力最不利。在降温作用下,各组道岔尖轨跟端限位器所受纵向力基本为 0,心轨跟端间隔铁所受纵向力最大值如表 3 所示,均满足应力限值要求。

表3 间隔铁纵向力表

道岔编号	直股间隔铁/kN	侧股间隔铁/kN
1号	-208.2	-222.6
2号	-173.1	-126.9
3号	-208.3	-224.5
4号	134.6	125.6

4.2 位移检算

4.2.1 钢轨断缝值检算

考虑在最不利工况下发生断轨,仅一股钢轨折断,断轨位置设置在伸缩力最大处,得到钢轨纵向位移分布如图 7 所示,位移以向右为正。

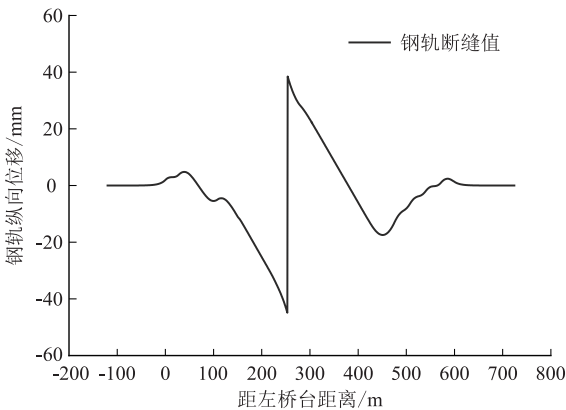


图7 断轨工况下钢轨纵向位移分布图

一般情况钢轨允许断缝值取 70 mm,困难条件下按 90 mm 考虑。由图 7 可知,钢轨断缝值达到 83.4 mm,已超过一般情况下 70 mm 的断缝允许值。一方面,从运营实践来看,由于断轨时的轨温一般高于设计所采用的历年最低轨温,实际断缝值小于设计计算值。另一方面,考虑到本线处于大温差地区,道岔又位于大跨连续梁上,因此考虑为困难条件,断缝允许值按 90 mm 控制。值得注意的是,在桥上断缝允许值放宽范围内不得设置钢轨工地焊接接头,线路养护部门

也应加强钢轨探伤等维护工作。

4.2.2 道岔可动部分纵向位移检算

为保证无缝道岔不出现转换卡阻、尖轨侧拱、心轨爬台等病害,需将尖轨相对基本轨、心轨相对翼轨位移控制在一定范围内。尖轨允许伸缩位移按 40 mm 控制,心轨允许伸缩位移按 20 mm 控制。温度变化下,道岔可动部分纵向位移如表 4 所示,均满足位移限值要求。

表 4 尖轨、心轨位移表

道岔编号	尖轨相对基本轨位移/mm	心轨相对翼轨位移/mm
1 号	-17.6	-7.8
2 号	-16.7	-6.4
3 号	-19.5	-7.8
4 号	20.3	4.8

4.2.3 梁轨相对位移检算

在伸缩力作用下,第二股道和第三股道基本轨梁轨相对位移如图 8 所示。道岔梁固定墩一定范围内梁轨相对位移较小,距离固定墩越远,梁轨相对位移快速增加,在道岔梁左、右梁缝处达到极值,基本轨梁轨相对位移最大值为 30.4 mm。1 号、2 号道岔位于第二股道,3 号、4 号道岔位于第三股道,其尖轨、心轨转辙机处基本轨梁轨相对位移均小于 5 mm,满足位移限值要求。

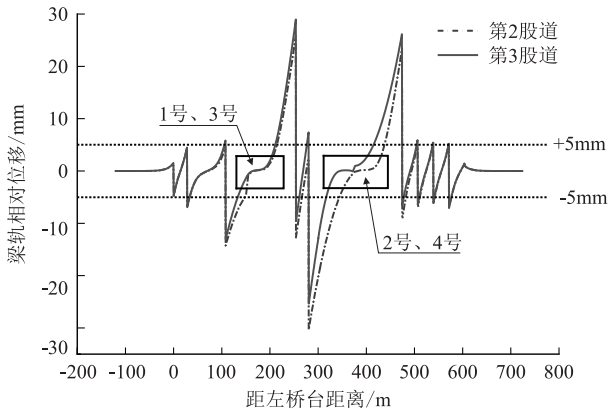


图 8 伸缩力作用下基本轨梁轨相对位移图

在制动力作用下,列车从左向右入桥和从右向左入桥时基本轨梁轨相对位移如图 9 所示。可以看出,列车从右向左制动时,基本轨梁轨相对位移更大,说明列车从右向左制动更为不利,同时也是右入桥时列车制动力大于左入桥时的原因。无论列车从左向右入桥还是从右向左入桥,基本轨梁轨相对位移均小于 1 mm,则尖轨、心轨转辙机处基本轨梁轨相对位移均满足 5 mm 位移限值要求。

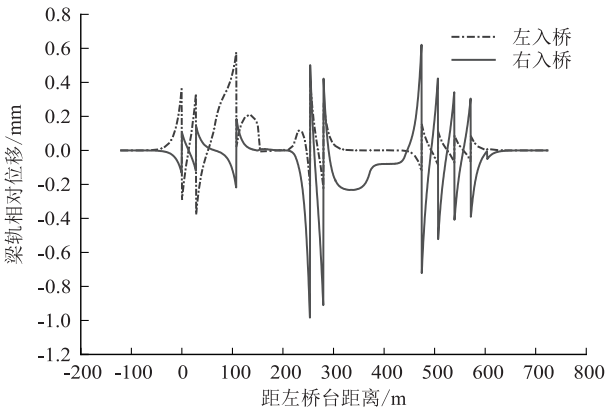


图 9 制动力作用下基本轨梁轨相对位移图

5 结论

本文以某市域铁路主跨 64 m 连续梁桥上无缝道岔群为实际工程背景,建立岔-桥-墩一体化计算模型,分析不同轨道设计方案下大跨连续梁桥上无缝道岔群纵向力变化规律,并以《铁路无缝线路设计规范》要求开展应力和位移检算,得出主要结论如下:

(1)全桥采用常阻力扣件时,温度荷载作用下各股道伸缩力峰值相差不大,最大值达到 965.1 kN,出现在主跨 64 m 道岔梁右梁缝处,钢轨总应力远超容许应力要求。

(2)铺设小阻力扣件可有效降低钢轨伸缩力幅值,对钢轨制动力则影响不大,相比在伸缩力峰值附近铺设小阻力扣件,在道岔梁及其间插入的简支梁上铺设小阻力扣件的方案更优。

(3)相比从左向右入桥,列车从右向左入桥时更为不利,其钢轨制动力和梁轨相对位移均大于从左向右入桥。

(4)考虑到道岔梁不宜采用伸缩调节器,通过铺设小阻力扣件、适当降低锁定轨温、放大断缝值要求等轨道措施,可使得钢轨应力、道岔传力部件受力、道岔可动部分纵向位移、转辙机处梁轨相对位移等指标均满足规范要求。

参考文献:

[1] 李秋义. 市域铁路轨道系统关键技术创新[J]. 中国铁路, 2018(8): 34-40.
LI Qiuyi. Key Technological Innovation in Track System of Suburban Railway[J]. China Railway, 2018(8): 34-40.
[2] 蔡小培, 张乾, 万洪波, 等. 高速铁路 64 m 主跨桥上无缝道岔群计算与结构优化[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(9): 12-17.
CAI Xiaopei, ZHANG Qian, WAN Hongbo, et al. Checking and

Structure Optimization of Welded Turnout on 64 m-Span Bridge in High Speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(9): 12-17.

[3] 罗华朋,陈嵘,宋姣姣,等.地震作用对有砟轨道桥上无缝道岔纵向受力与变形影响分析[J].铁道标准设计,2018,62(5): 30-36.

LUO Huapeng, CHEN Rong, SONG Jiaojiao, et al. Seismic Impacts on Longitudinal Stress and Distortion of Welded Turnout on Bridge [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(5): 30-36.

[4] 王玉泽.京沪高速铁路徐沪段桥上板式无砟无缝道岔设计研究[J].铁道建筑,2014,54(5): 120-123.

WANG Yuze. Design Study on Slab-Type Ballastless Continuous Welded Turnouts on Bridge at Xuzhou-Shanghai Section of Beijing-Shanghai High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2014, 54(5): 120-123.

[5] 唐进锋,刘传鹏,黄江阳,等.路基无缝道岔对桥上无缝线路的影响分析[J].铁道建筑,2017,57(11): 134-136.

TANG Jinfeng, LIU Chuanpeng, HUANG Jiangyang, et al. Analysis about Influence of Subgrade Continuously Welded Turnout on Bridge CWR[J]. Railway Engineering, 2017, 57(11): 134-136.

[6] 张世杰.桥上无缝道岔交叉渡线无砟轨道影响因素分析[J].铁道工程学报,2013,30(10): 48-54.

ZHANG Shijie. Analysis of Influence Factors for the Seamless Turnout Scissors Crossing Ballastless Track on Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(10): 48-54.

[7] 高增增.高速铁路桥上道岔群无缝线路力学特性研究[J].中国铁路,2021(5): 22-27.

GAO Zengzeng. Study on Mechanical Characteristics of Continuously Welded Rail with Turnout Group on HSR Bridge[J]. China Railway, 2021(5): 22-27.

[8] 陈新.客运专线高架站咽喉区道岔梁结构设计与研究[J].铁道工程学报,2016,33(3): 51-54.

CHEN Xin. Design and Research on the Switch Beam Structure of Passenger Dedicated Line Elevated Station Throat Area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(3): 51-54.

[9] 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.

[10] 孙加林.高速铁路温度场作用下桥上无缝道岔与桥梁相互作用研究[J].中国铁道科学,2017,38(1): 43-48.

SUN Jialin. Interaction between Seamless Turnout and Bridge of High Speed Railway under Temperature Field[J]. China Railway Science, 2017, 38(1): 43-48.

[11] TB 10015-2012 铁路无缝线路设计规范[S].

TB 10015-2012 Code for Design of Railway Continuous Welded Rail [S].

[12] 郇晔.高速铁路到发线无砟轨道接轨技术应用研究[J].高速铁路技术,2022,13(2): 31-36.

LI Ye. Study on Application of Ballastless Track Connection Technology to Arrival and Departure Tracks of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 31-36.

[13] 王平.桥上无缝道岔设计理论[M].成都:西南交通大学出版社,2011.

WANG Ping. Design Theory of Seamless Turnout on Bridge [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011.

[14] 徐桂弘,徐浩,王平,等.无砟轨道连续梁桥与道岔纵向相互作用规律的研究[J].铁道建筑,2011,51(5): 119-123.

XU Guihong, XU Hao, WANG Ping, et al. Study on the Longitudinal Interaction Law between Ballastless Track Continuous Beam Bridge and Turnout [J]. Railway Engineering, 2011, 51(5): 119-123.

(上接第39页)

[3] 丁乐宁.成渝中线高速铁路引入重庆铁路枢纽方案研究[J].铁道运输与经济,2021,43(1): 108-114.

DING Lening. Plan of Connecting Chengdu-Chongqing Middle High-speed Line with Chongqing Railway Hub[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(1): 108-114.

[4] 马蒙,刘维宁,刘卫丰.列车引起环境振动预测方法与不确定性研究进展[J].交通运输工程学报,2020,20(3): 1-16.

MA Meng, LIU Weining, LIU Weifeng. Research Progresses of Prediction Method and Uncertainty of Train-Induced Environmental Vibration [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 1-16.

[5] Hanson C E, Towers D A, Meister L D. Transit Noise and Vibration Impact Assessment[R]. Washington DC: U. S. Department of Transportation, 2006.

[6] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. Modelling Ground Vibration from Railways Using Wavenumber Finite- and Boundary-Element Methods[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2005, 461(2059): 2043-2070.

[7] HUSSEIN M, HUNT H, KUO K, et al. The Use of Sub-Modelling Technique to Calculate Vibration in Buildings from Underground Railways[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229(3): 303-314.

[8] 李瑞山,陈龙伟,袁晓铭,等.荷载频率对动模量阻尼比影响的试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(1): 71-80.

LI Ruishan, CHEN Longwei, YUAN Xiaoming, et al. Experimental Study on Influences of Different Loading Frequencies on Dynamic Modulus and Damping Ratio [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 71-80.