

文章编号: 1005-0523(2024)02-0064-08



地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路纵向力分析

张鹏飞, 江浩宇, 胡达贵

(华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】为研究地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路纵向受力与变形规律,对地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路设计改进、运营养护维修提供理论指导。【方法】根据梁-板-轨相互作用原理,建立地铁连续刚构桥上整体道床式无砟轨道无缝线路空间耦合模型,计算伸缩、挠曲、制动、断轨工况下轨道结构和桥梁纵向力及位移,并对轨道结构静力特性进行对比分析,为地铁连续刚构桥上无缝线路轨道结构设计提供参考。【结果】结果表明:双线列车荷载中点与中部梁端处重合时为列车垂向荷载最不利工况,此时钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移均为最大,均出现在中部梁端附近,数值分别为70.3 kN与0.6, 0.8 mm;双线制动荷载列车尾部位于两侧梁端时为列车制动荷载最不利工况,此时钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移均为最大,数值分别为107.8 kN与1.6, 1.7 mm。【结论】伸缩力作用下各个端部桥缝处为薄弱部位,在平时养护中应特别注意梁端部桥缝处轨道结构,防止因伸缩力过大而产生断轨;钢轨发生断轨时,在断缝处纵向力、纵向位移均发生突变,严重影响线路行车安全。

关键词: 地铁连续刚构桥; 整体道床; 桥上无缝线路; 纵向力

中图分类号: U213.9

文献标志码: A

本文引用格式: 张鹏飞, 江浩宇, 胡达贵. 地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路纵向力分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(2): 64-71.

Longitudinal Force Analysis of Ballastless Track Continuous Welded Rail on Subway Continuous Rigid Frame Bridge

Zhang Pengfei, Jiang Haoyu, Hu Dagui

(State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】In order to study the longitudinal force and deformation law of CWR of ballastless track on the continuous rigid bridge of the metro, and to provide theoretical guidance for the design improvement, operation and maintenance. 【Method】Based on the principle of beam-plate-rail interaction, a spatial fine coupling model of CWR of the integral track bed type ballastless track on the continuous rigid bridge of the metro was established, and under stretching, bending, braking and broken rail conditions, the displacement track and longitudinal force of track structure and bridge were calculated, and the static characteristics of the track structure were compared and analyzed. This paper provides a reference for the design of CWR track structure on continuous rigid bridge of metro. 【Result】The results show that when the midpoint of the double-line train load coincides with the end of the middle beam, the vertical load of the train is the most unfavorable working condition, and the force of the rail and the displacement of the rail and bridge are the largest, and the values are 70.3 kN, 0.6 mm

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178425, 52368063); 江西省科技专项(20223AEI91004); 江西省高层次高技能领军人才培养工程项目(1600223003)

and 0.8 mm, respectively. When the tail of the double-line brake load train is located at the end of the beams on both sides, the most unfavorable working condition of the train braking load, at this time, the longitudinal force of the rail and the longitudinal displacement of the rail and the bridge are the largest, and the values are 107.8 kN, 1.6 mm and 1.7 mm, respectively. **【Conclusion】** Under expansion force, each end bridge joint is a weak part, and attention should be paid to the structure at the end bridge joint of the beam in the usual maintenance to prevent rail breakage due to excessive expansion force; When the rail is broken under cooling conditions, the longitudinal force and longitudinal displacement of the broken rail are abruptly changed at the fracture, which seriously affects the safety of the line.

Key words: metro continuous rigid bridge; integral track bed; continuous welded rail on the bridge; longitudinal force

Citation format: ZHANG P F, JIANG H Y, HU D G. Longitudinal force analysis of ballastless track continuous welded rail on subway continuous rigid frame bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(2): 64–71.

【研究意义】地铁高架线路相对地下线路具有造价低、施工速度快、适应能力强等优点,连续刚构桥上无砟轨道无缝线路因具有高平顺性及稳定性,在地铁高架线路中应用逐渐增多。探索地铁高架线路连续刚构桥上无砟轨道无缝线路纵向力的分布规律和影响因素,为优化无砟轨道结构参数和提高线路平顺性提供理论支持。

【研究进展】国内外学者在桥上无砟轨道领域进行了大量研究工作,张鹏飞等^[1]建立了刚构桥上CRTS I型双块式与CRTS III型板式无砟轨道模型,并对两种轨道结构静力特性进行了对比分析;陈鹏等^[2]分析了改变支座位置、跨长、联数等因素影响下,桥上无缝线路力学特征与变化规律;宋晓宇等^[3]探讨了工字型钢连续组合梁刚性节点的传力机制;倪向阳等^[4]分析了改变桥梁结构条件下,桥上无缝线路轨道结构受力变化规律;王平等^[5-8]建立了连续刚构桥上无缝线路模型,研究了伸缩附加力的放散计算;吴亮秦等^[9]通过列车制动试验,探究了制动条件下桥梁受力及其传递规律;程杰^[10]分析了桥墩横向刚度对无支座预应力混凝土连续刚构桥的影响规律;Ma等^[11]建立了桥梁模型,提出可能影响挠度的因素,采用控制单个因素值的灵敏度分析方法得到挠度计算结果;Yan^[12]研究了支承基础发生不均匀沉降时,连续刚构桥力学特性的变化规律;Li等^[13]通过对顶部合龙相对位移的比较分析,确定了刚构桥高墩优化计算模型;朱志辉等^[14]采用点荷载模

式分析了列车荷载作用下的无缝线路附加力;罗华朋等^[15]建立高墩大跨桥墩,分析了桥墩在太阳辐射下形成温差时,桥墩刚度对无缝线路附加力的影响规律;王伟华^[16]建立了多联连续刚构桥上无缝线路模型,研究了不同刚度对附加力的影响;。

【创新特色】综上,目前针对连续刚构桥上无砟轨道无缝线路的研究较少,且较少考虑轨道结构之间的相互作用。为探究地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路纵向受力与变形规律,对地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路设计改进、运营养护维修提供理论指导。**【关键问题】**针对地铁连续刚构桥上无缝线路结构特点,建立空间精细化耦合模型,分析伸缩力、挠曲力、制动力和断轨力作用下地铁连续刚构桥上无缝线路纵向力分布规律,研究成果以期对地铁连续刚构桥上无缝线路设计优化提供参考。

1 精细化空间有限元建模

1.1 模型概述

地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路包括钢轨、扣件、整体道床、变截面梁体、墩梁固结等细部结构,建模时均需详细考虑。本文根据梁-板-轨相互作用原理,利用有限元分析软件结合考虑实际力学属性,建立100 m路基+4×40 m连续刚构桥+4×40 m连续刚构桥+100 m路基的地铁连续刚构桥上无缝线路模型,桥梁的布置简图见图1,两侧阴影部分为路基段。

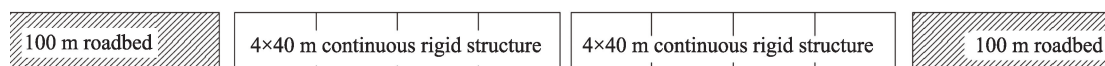


图1 地铁连续刚构桥布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of metro continuous rigid frame bridge

1.2 模型参数

钢轨为细长结构且要发生弯曲、扭转、伸缩等变形,而梁单元可以承受拉、压、扭转和弯曲等荷载,故CHN60钢轨选用BEAM188梁单元。

钢轨和轨枕间有扣件约束,采用COMBIN14线性弹簧单元模拟扣件的横向和垂向刚度,其大小分别为50,35 kN/mm;扣件纵向阻力采用COMBIN39非线性弹簧单元进行模拟。全桥铺设WJ-2A型小阻力扣件,高架线地段扣件节点间距取590 mm,单组扣件最大纵向阻力取7 kN/组。

高架线地段道床分块布置,设置横向缝,缝宽一般为100 mm,梁缝处道床横向缝宽为150 mm。路基地段道床设置和桥梁地段相同。整体道床混凝土强度C40,变截面桥梁梁体按图纸尺寸建模,采用C60混凝土,二者均选用SOLID45实体单元。墩顶纵向刚度选用COMBIN14弹簧单元,刚度根据工程资料取1 244 kN/cm进行计算分析。地铁连续刚构桥1/2截面见图2,钢轨编号见图3,详细结构参数见表1。

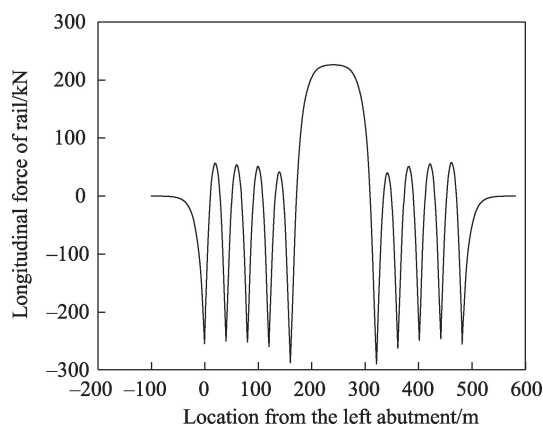


图2 计算结果

Fig. 2 Calculation results

1.3 模型验证

建立同王平等^[7]研究成果中相似的无缝线路模型进行附加纵向力的计算,并与之进行比对。模型除桥梁截面与跨度外其他计算参数均采用与文献相同的数值。计算结果见图4。

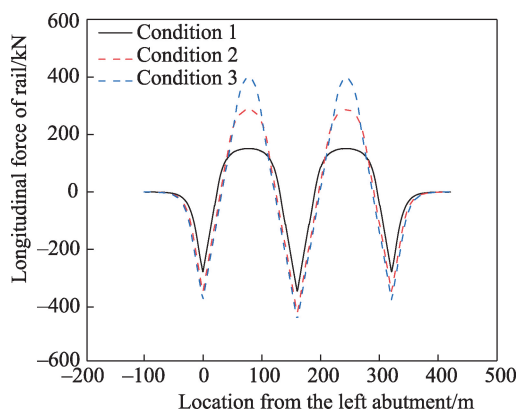


图3 钢轨纵向力

Fig. 3 Force of rail

表1 各结构参数

Tab.1 The structure parameters

Structure name	Concrete strength grade	Elastic modulus/Pa	Density/(kg/m ³)	Poisson's ratio
Integral track bed	C40	3.40×10^{10}	2 500	0.2
Beam body	C60	3.65×10^{10}	2 500	0.2

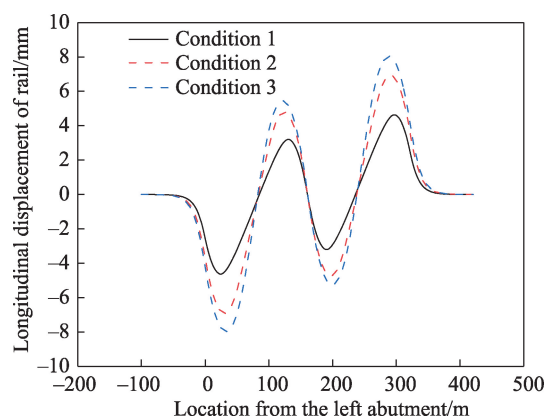


图4 钢轨纵向位移

Fig. 4 Displacement of rail

由图4结果对比可知,本文钢轨纵向力计算结果的分布规律变化趋势基本同王平等^[7]计算结果一致,考虑到本文中刚构桥截面尺寸和跨度与文献存在差异,因此可以认为所建立的有限元模型是准确可行的。

2 模型加载

1) 分析伸缩力时,为对比不同温差荷载下伸缩力的差异,对刚构桥梁体与整体道床施加温度荷载。

2) 分析挠曲力时,列车长度 120 m,车轮轴重为 14 t,采用设计荷载,等效为均布荷载,荷载长度 120 m、大小为 28 kN/(m·线)^[17]。

3) 分析制动力时,轮轨黏着系数采用 0.25。制动荷载以均布荷载形式进行施加,荷载作用位置为钢轨顶面,大小为 7 kN/m,长度为 120 m。

4) 分析断缝值时,梁体降温 30 ℃,道床降温 35 ℃,钢轨降温 60 ℃。断轨位置取刚构桥左端与路基连接处。

3 无缝线路纵向力计算分析

图 3~图 13 与表 3~表 8 中,纵向力正值为拉力,负值为压力。

3.1 伸缩力计算结果分析

对刚构桥梁体与整体道床施加不同温度荷载,具体工况见表 2。

表 2 伸缩工况表

Tab.2 Expansion condition			℃
Working conditions	Beam body temperature load	Track bed temperature load	
Condition 1	10	15	
Condition 2	20	25	
Condition 3	30	35	

温度荷载作用下,刚构桥上钢轨纵向力及钢轨、桥梁纵向位移见图 3~图 5。结构纵向力及位移最大值见表 3。

由图 5~图 7 与表 3 可知,随着温升的增大,轨道结构受力与变形均增大。钢轨纵向力最大值均出现在桥梁端部,钢轨位移最大值出现在桥梁内侧靠近中间端部的位置,桥梁位移最大值出现在桥梁端部。

工况 3 各项数值均为 3 种工况最大,钢轨伸缩力最大值出现在两跨桥梁相连端部,表现为压力,大小为 445.9 kN。钢轨纵向伸缩位移最大值出现在路基与桥梁相连端部附近,表现为拉伸位移,大小为 8.1 mm。桥梁纵向伸缩位移最大值出现在与路基连接端部,数值均为 23.8 mm,左侧表现为压

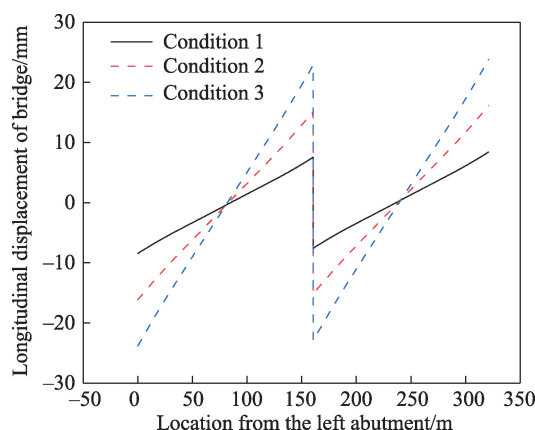


图 5 桥梁纵向位移

Fig. 5 Displacement of bridges

表 3 不同伸缩工况下结构伸缩力与位移最大值

Tab.3 Maximum force and displacement under expansion force

Working conditions	Rail expansion force/kN	Longitudinal displacement of rails/mm	Longitudinal displacement of bridges/mm
Condition 1	-344.4/151.3	-4.6/4.6	-8.4/8.4
Condition 2	-420.8/287.0	-6.9/6.9	-16.1/16.1
Condition 3	-445.9/398.5	-8.0/8.1	-23.8/23.8

力,右侧表现为拉力。工况 2 及工况 3 相比各自前一工况,钢轨最大纵向力分别增加了 22.2%,6.0%,钢轨及桥梁最大纵向位移分别增加了 50.0%,17.4%与 91.7%,47.8%。

综上所述,在计算地铁连续刚构桥无砟轨道无缝线路伸缩力时,需考虑不同轨道结构的温度差异对受力与变形产生的影响。随着温度的上升,各个结构对温度的敏感度逐渐下降。此外各个端部桥缝处为薄弱部位,在平时养护中应特别注意梁端部桥缝处轨道结构,防止因伸缩力过大而产生断轨。

3.2 挠曲力计算结果分析

模拟列车双线对向驶入桥梁,施加 120 m 垂直均布荷载进行挠曲力计算,工况见表 4。

由于工况均为双线加载且荷载对称,选取 1 号钢轨为研究对象。计算结果见图 6~图 8,双线加载挠曲工况钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移最值见表 5。由图 6~图 8 与表 5 可知,不同加载工况最大挠曲力及最大结构位移产生的位置不同,但 3 种工况中钢轨挠曲力、钢轨及桥梁位移均在有车辆荷载作用的桥梁端部产生最大值,在车头车尾处产生峰

表4 挠曲工况表
Tab.4 Flexural conditions

Working conditions	Schematic diagram of the load position
Condition 1	
Condition 2	
Condition 3	

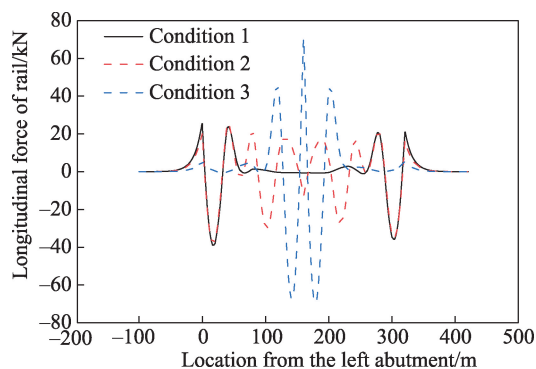


图6 钢轨纵向力
Fig. 6 Force of rail

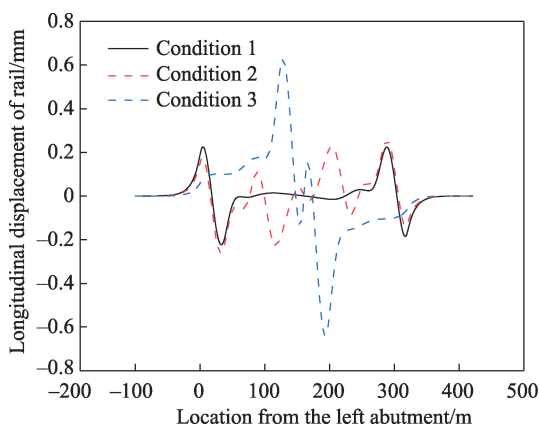


图7 钢轨纵向位移
Fig. 7 Displacement of rail

值,且在远离荷载位置逐渐减小,即两辆列车交会于中部梁端时相互影响作用最大。

在双线加载挠曲工况下,工况3的钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移均为最大,均出现在中部梁端附近,数值分别为70.3,69.3 kN与0.6,0.8 mm。可知在双线列车逐渐驶入桥梁中部时挠曲力及各项结构位移逐渐增大,且在交汇处相互作用最大。

综上所述,地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线

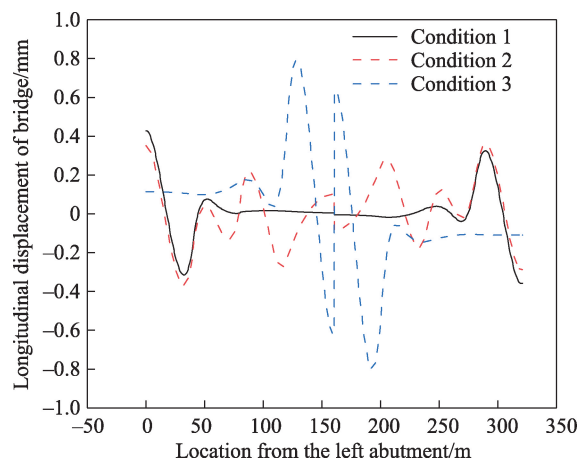


图8 桥梁纵向位移
Fig. 8 Displacement of bridges

表5 不同工况下结构挠曲力与位移最大值

Tab.5 Maximum force and displacement under flexural conditions

Working conditions	Rail flexure/ kN	Longitudinal displacement of rails/mm	Longitudinal displacement of bridges/mm
Condition 1	-39.0/25.4	-0.2/0.2	-0.4/0.4
Condition 2	-38.0/25.5	-0.3/0.3	-0.4/0.4
Condition 3	-69.3/70.3	-0.6/0.6	-0.8/0.8

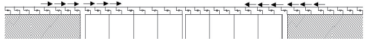
路受列车垂向荷载时,需关注梁缝处轨道结构的受力与变形。列车荷载作用于中部梁端处作用力明显大于两侧梁端处,并在车头车尾产生峰值。在计算列车荷载下地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路轨道受力和变形时,荷载中点与中部梁端处重合时(即工况3)为综合最不利工况。

3.3 制动力计算结果分析

模拟列车双线对向驶入桥梁,施加120 m均布荷载进行制动力计算,工况见表6。

由于工况均为双线加载且荷载对称,选取一根钢轨为研究对象。计算结果见图9~图11。双线加载挠曲工况钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移见表7。由图9~图11与表7可知,在双线加载制动工况下,工况2的钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移均为最大,数值分别为107.8 kN与1.6,1.7 mm。工况3产生的纵向力与位移最小,且桥梁位移趋近于零。工况2及工况3相比各自前一工况,钢轨最大纵向力分别增大了121.5%,-57.9%,钢轨及桥梁最大纵向位移分别增大了166.7%,-100%与188.3%,-100%。可知在列车逐渐驶入桥梁中部时

表6 制动工况表
Tab.6 Brakel conditions

Working conditions	Schematic diagram of the load position
Condition 1	
Condition 2	
Condition 3	

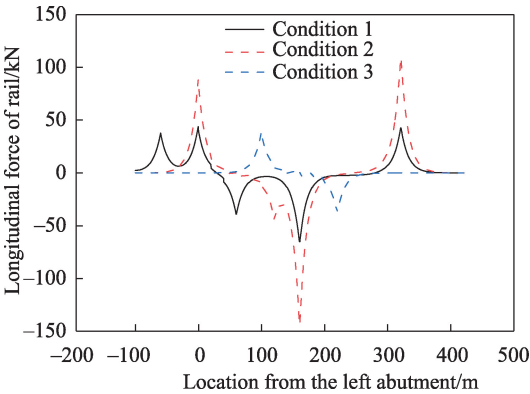


图9 钢轨纵向力
Fig.9 Force of rail

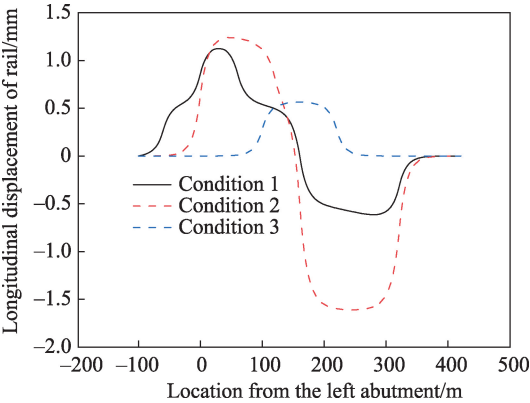


图10 钢轨纵向位移
Fig. 10 Displacement of rail

制动力及各项结构呈先增大后减小趋势,且近距离对向制动会产生较大抵消作用。

综上所述,在计算地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路制动力时,列车头尾位于梁端时产生的作用力明显大于列车中部位于梁端产生的作用力。在计算地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路受到制动荷载产生的受力和变形时,列车头尾位于梁端时为综合最不利工况(即工况2),需着重注意端部轨道结构的日常保养及维护、检测。

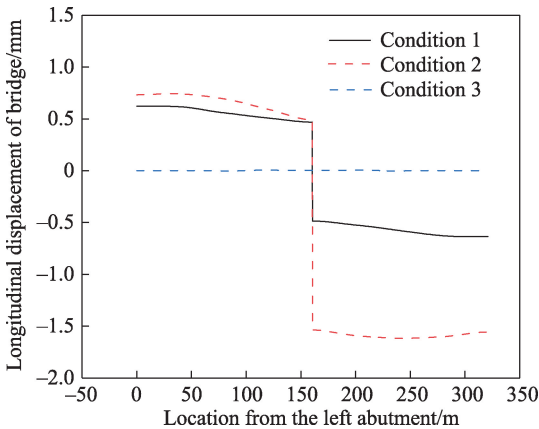


图11 桥梁纵向位移
Fig. 11 Displacement of bridges

表7 不同工况下结构制动力与位移最大值

Tab.7 Maximum force and displacement under brakel conditions

Working conditions	Rail braking force/kN	Longitudinal displacement of rails/mm	Longitudinal displacement of bridges/mm
Condition 1	-65.1/43.9	-0.6/1.1	-0.6/0.6
Condition 2	-144.2/107.8	-1.6/1.3	-1.7/0.8
Condition 3	-37.3/39.1	0/0.6	0/0

3.4 断轨力计算结果分析

钢轨折断条件下,钢轨断轨力及钢轨位移计算结果见图12~图13,断轨工况钢轨断轨力与纵向位移最值见表8。

由图12~图13与表8可知,在钢轨折断处,断轨纵向力趋近于零;而在梁端处,未折断钢轨纵向力达到最大值;折断钢轨形成的断缝值为73.1 mm;断轨与非断轨力最大值分别为1566.8,1 568.7 kN,最小值分别为0,739.6 kN。

综上所述,钢轨发生断轨时,断轨对钢轨产生瞬时的影响,并会影响其他线路,发现断轨应及时更换钢轨,避免发生危险。

4 结论

- 1) 温度荷载作用下,随着温度的上升,各个结构对温度的敏感度逐渐下降。钢轨纵向力在梁端表现为压力、在跨中表现为拉力;桥梁各个端部为无缝线路的薄弱环节,中间端部的纵向力大于桥梁与路基连接处端部纵向力。
- 2) 列车垂向荷载作用下,列车荷载作用于中部梁端处时,作用力明显大于两侧梁端处,并在车头

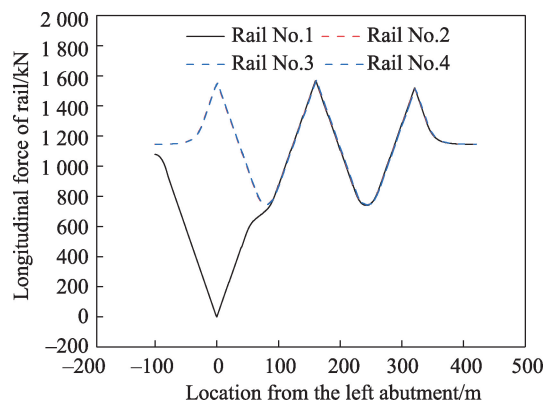


图12 钢轨纵向力
Fig. 12 Force of rail

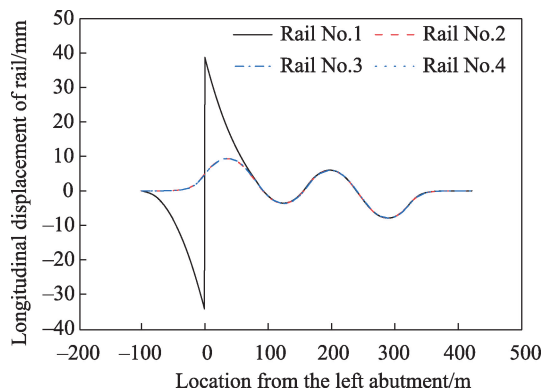


图13 钢轨纵向位移
Fig. 13 Displacement of rail

表8 断轨工况下结构伸缩力与位移最大值
Tab.8 Maximum force and displacement under rail break conditions

Rail number	Rail breaking force/kN	Longitudinal displacement of rails/mm
Rail No.1	0/1 566.8	-34.3/38.8
Rail No.2	739.6/1 568.7	-7.9/9.4
Rail No.3	739.6/1 568.7	-7.9/9.4
Rail No.4	739.6/1 568.7	-7.9/9.4

车尾产生峰值。列车垂向荷载往中部移动时产生的挠曲力逐渐加大,在列车荷载中部与桥梁中部梁端重合时产生最大值。双线列车荷载中点与中部梁端处重合时为列车垂向荷载最不利工况。

3) 列车制动荷载作用下,纵向位移在桥梁各个端部及荷载首尾端产生峰值。在列车从桥头逐渐驶入桥梁中部时制动力及各项结构位移呈先增大后减小趋势。双线加载时与挠曲工况会叠加不同,制动工况在对向加载时会产生抵消作用,可减少钢

轨受力及结构位移。双线制动荷载列车尾部位于两侧梁端时为列车制动荷载最不利工况。

4) 钢轨在低温条件下折断,断缝处钢轨纵向力发生突变,非折断钢轨在断缝同一横坐标表现为拉力;折断钢轨在断口处急剧收缩,使得钢轨纵向位移在此处发生较大变化,并对梁端产生断轨力。

参考文献:

- [1] 张鹏飞, 黄安琪, 胡达贵, 等. 刚构桥上无砟轨道无缝线路静力特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(2): 30-38.
ZHANG P F, HUANG A Q, HU D G, et al. Comparative analysis on static characteristics of CWR of ballastless track on rigid frame bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(2): 30-38.
- [2] 陈鹏, 高亮, 冯雅薇, 等. 连续梁桥上无缝线路纵向附加力的变化规律[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(1): 85-88.
CHEN P, GAO L, FENG Y W, et al. Variety rules of additional longitudinal force of continuously welded rails on bridge with continuous beam[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(1): 85-88.
- [3] 宋晓宇, 白玲. 铁路连续复合刚构桥墩梁刚性节点的受力分析[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(3): 77-80.
SONG X Y, BAI L. Mechanical characteristics analysis of pier-girder rigid node of continuous hybrid rigid frame railway bridge[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(3): 77-80.
- [4] 倪向阳. 城市轨道交通桥上无缝线路挠曲力研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
NI X Y. The study of deflection force in CWR of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [5] 谢铠泽, 徐井芒, 王平, 等. 桥上无缝线路附加伸缩力放散的计算研究[J]. 铁道标准设计, 2012(4): 28-31.
XIE K Z, XU J M, WANG P, et al. Research on the calculation of stress relief of additional expansion force of continuously welded rails on bridge[J]. Railway Standard Design, 2012(4): 28-31.
- [6] 谢铠泽, 王平, 徐浩, 等. 刚构桥上无砟轨道无缝线路病害研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 2085-2091.
XIE K Z, WANG P, XU H, et al. Diseases of continuous welded rail of ballstless track on rigid frame bridge[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6): 2085-2091.

- [7] 王平, 谢铠泽. 连续刚构桥上无缝线路计算模型及方法的简化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(7): 2795-2743.
WANG P, XIE K Z. Simplification for calculation model and method of CWR on continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(7): 2795-2743.
- [8] 熊震威, 谢铠泽, 王平, 等. 列车制动对刚构桥上无缝线路梁轨相对位移的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(10): 10-14.
XIONG Z W, XIE K Z, WANG P, et al. Influence of train braking on relative displacement between girder and rail of continuous welded rail upon rigid-frame bridge[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(10): 10-14.
- [9] 吴亮秦, 吴定俊, 李奇. 城市轨道交通桥梁列车制动力试验研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(3): 88-93.
WU L Q, WU D J, LI Q. Experiment study on braking force for urban rail transit bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(3): 88-93.
- [10] 程杰. 无支座连续刚构轨道结构受力分析及温度跨度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
CHENG J. Analysis of track structure and research on temperature span of continuous rigid frame without supports[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [11] MA Y R, CHEN H B, HAN Q W. Sensitivity analysis of factors affecting down deflection of long-span continuous rigid frame bridge[J]. Earth and Environmental Science, 2021, 781(2): 022048.
- [12] YAN Y H. The effect of foundation differential settlement on mechanical properties of continuous rigid frame bridge[J]. International Journal of Civil Engineering and Machinery Manufacture, 2017, 2(3): 973-991.
- [13] LI Y L, WU X G. Study on optimal calculation model for high piers of rigid frame bridge under pile-soil effect[J]. Engineering and Applied Sciences, 2019, 3(6): 134-144.
- [14] 朱志辉, 李晓光, 闫铭铭, 等. 基于扣件阻力试验的高速铁路桥上无缝线路纵向力研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 1966-1976.
- ZHU Z H, LI X G, YAN M M, et al. Longitudinal force of CWR on high speed railway bridge based on fastener resistance test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51 (7) : 1966-1976.
- [15] 罗华朋, 邢俊, 杨凯, 等. 桥墩温度梯度对高墩大跨桥上无砟轨道影响研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8): 26-29.
LUO H P, XING J, YANG K, et al. Effects of pier temperature gradient on ballastless track of long-span bridge[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(8): 26-29.
- [16] 王伟华. 城际铁路4×40 m连续刚构桥与无缝线路相互作用研究[J]. 中国铁路, 2023, 30(4): 100-107.
WANG W H. Research on the interaction between 4×40 m continuous rigid frame bridge and CWR of intercity railway[J]. China Railway, 2023, 30(4): 100-107.
- [17] 王冬梅, 倪向阳, 王慧珺. 城市轨道交通双线桥上无缝线路挠曲力研究[J]. 都市快轨交通, 2012, 25(6): 96-99.
WANG D M, NI X Y, WANG H J. Analysis of the flexural Forces in CWR on double-track bridges of urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(6): 96-99.



第一作者:张鹏飞(1975—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为桥上无缝线路设计理论与关键技术。E-mail: zhangpf4236@163.com。



通信作者:胡达贵(1997—),男,硕士研究生,研究方向为桥上无缝线路。E-mail: 1463492008@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)