

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: 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, 根据梁-板-轨相互作用原理, 建立 100m 路基+4×40m 连续刚构桥+4×40m 连续刚构桥+100m 路基的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 70.3kN 与 0.6mm、0.8mm; 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 107.8kN、1.6mm、1.7mm; 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

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: In order to study the longitudinal force and deformation law of CWR of ballastless track on the continuous rigid bridge of the metro, 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 with 100m roadbed + 4×40m continuous rigid bridge + 4×40m continuous rigid bridge + 100m subgrade 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. 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 70.3kN, 0.6mm and 0.8mm, 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 107.8kN, 1.6mm and 1.7mm, respectively. 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

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。

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178425、52368063); 2022 年江西省科技专项(国家科技奖后备培育项目)(20223AEI91004); 江西省高层次高技能领军人才培养工程项目资助(1600223003)

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^[1]建立了刚构桥上 CRTSI 型双块式与 CRTSIII 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^[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^[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^[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^[5-8]等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^[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砟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^[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^[15-16]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^[17]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;游颖川^[18]等以高速铁路连续刚构

桥为研究对象,建立有限元模型,计算桥面附加变形,分析桥面附加变形对列车动力响应的影响。

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,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 100m 路基+4×40m 连续刚构桥+4×40m 连续刚构桥+100m 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 $50 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $35 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$;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 590mm,单组扣件最大纵向阻力取 $7 \text{ kN}/\text{组}$ ^[19]。

高架线地段道床分块布置,设置横向缝,缝宽一般为 100mm,梁缝处道床横向缝宽为 150mm。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 $1244 \text{ kN}/\text{cm}$ 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。

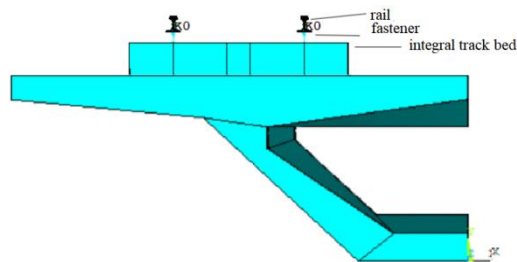


图 2 地铁连续刚构桥 1/2 截面

Fig.2 Metro continuous rigid bridge 1/2 section

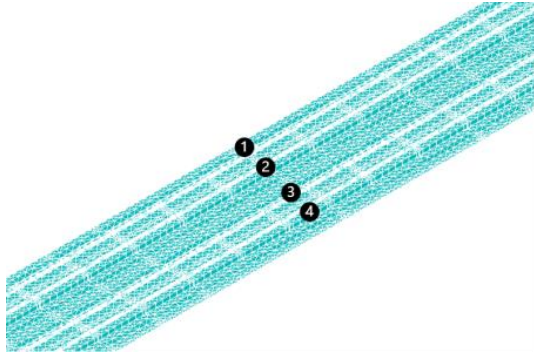


图 3 钢轨编号

Fig.3 Rail number

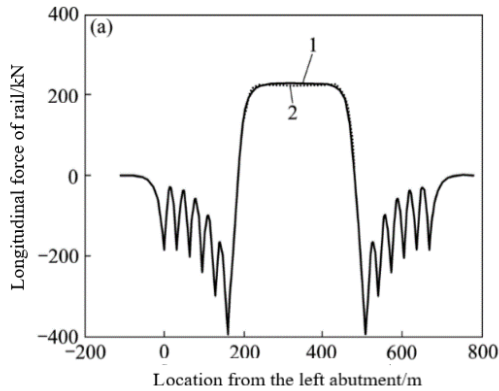
表 1 各结构参数

Tab.1 The Structure Parameters

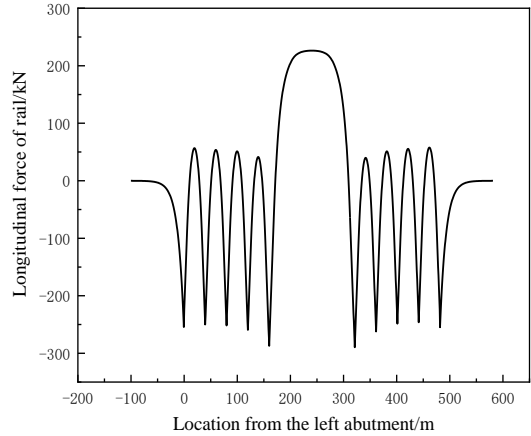
Structure name	Concrete strength grade	Elastic modulus/Pa	Density kg/m ³	Poisson's ratio
Integral track bed	C40	3.40×10^{10}	2500	0.2
Beam body	C60	3.65×10^{10}	2500	0.2

1.3 模型验证

建立同参考文献[7]相似的无缝线路模型进行附加纵向力的计算, 与参考文献结果进行比对。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。计算结果对比见图 4。



(a) References[9]



(b) Our study

图 4 计算结果对比

Fig.4 Comparison of calculation results

由图 4 结果对比可知, 本文钢轨纵向力计算结果分布规律变化趋势基本同文献[9]一致, 考虑到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 120m, 车轮轴重为 14t, 采用设计荷载, 等效为均布荷载, 荷载长度 120m、大小为 28kN/(m·线)^[20]。

(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 7kN/m, 长度为 120m。

(4)分析断缝值时, 梁体降温 30°C, 道床降温 35°C, 钢轨降温 60°C。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

图表中, 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。

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 5~图 7。结构纵向力及位移最大值见表 3。

表 2 伸缩工况表

Table. 2 Expansion condition

Working conditions	Beam body temperature load	Track bed temperature load
--------------------	----------------------------	----------------------------

Condition 1	10°C	15°C
Condition 2	20°C	25°C
Condition 3	30°C	35°C

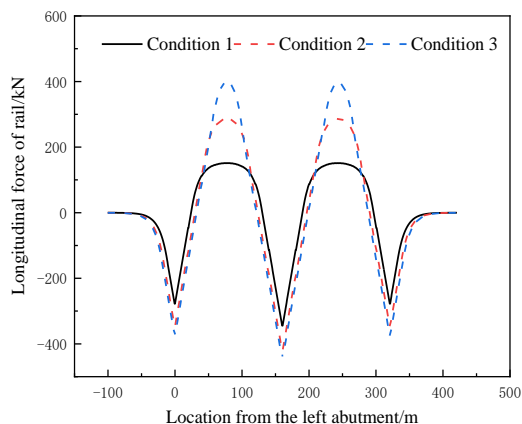


图5 钢轨纵向力

Fig.5 Force of rail

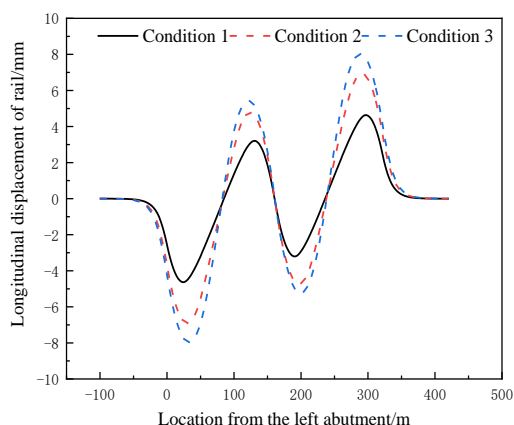


图6 钢轨纵向位移

Fig.6 Displacement of rail

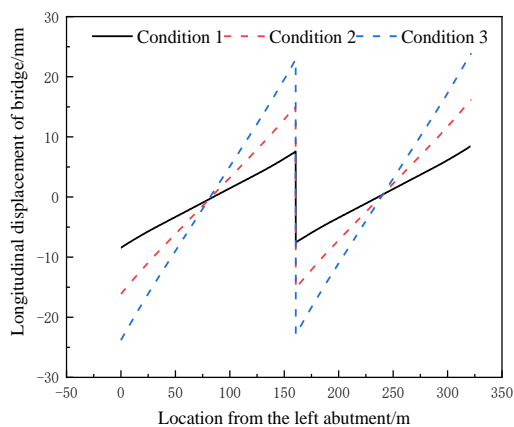


图7 桥梁纵向位移

Fig.7 Displacement of bridges

表3 不同伸缩工况下结构伸缩力与位移最大值

Table.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

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。

工况三各项数值均为三种工况最大,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445.9kN。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8.1mm。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23.8mm,左侧表现为压力,右侧表现为拉力。工况一、工况二及工况三相比各自前一工况,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%、17.4%与91.7%、47.8%。

综合上述,在计算地铁连续刚构桥无缝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120m垂向均布荷载进行挠曲力计算,工况见表4。

表4 挠曲工况表

Table.4 Flexural conditions

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

Condition 3

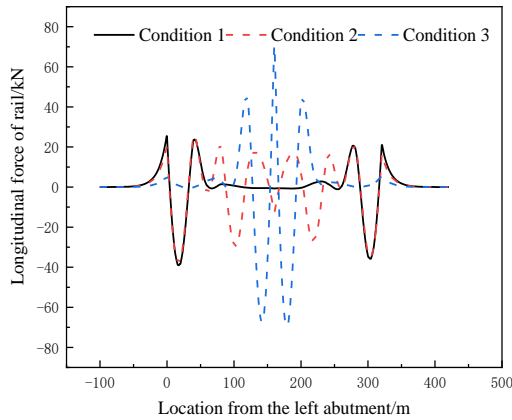


图8 钢轨纵向力

Fig.8 Force of rail

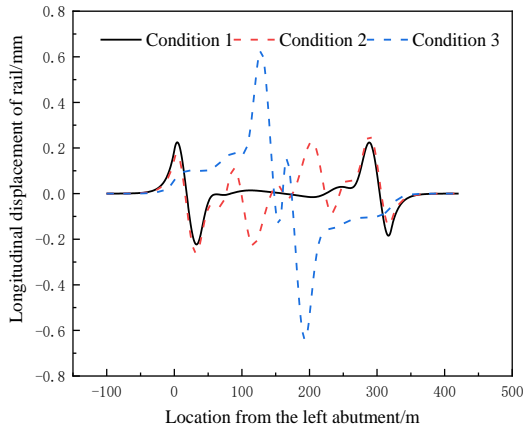


图9 钢轨纵向位移

Fig.9 Displacement of rail

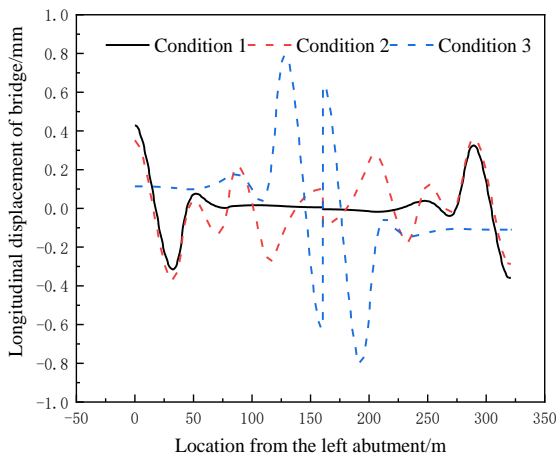


图10 桥梁纵向位移

Fig.10 Displacement of bridges

表5 不同工况下结构挠曲力与位移最大值

Table.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

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8~图10, 双线加载挠曲工况钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移最大值见表5。由图8~图10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, 但三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值, 且在远离荷载位置逐渐减小, 即两辆列车交汇于中部梁端时相互影响作用最大。

在双线加载挠曲工况下, 工况三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70.3kN、69.3kN与0.6mm、0.8mm。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(即工况三)为综合最不利工况。

3.3 制动力计算结果分析

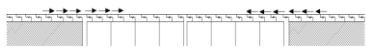
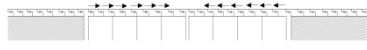

模拟列车双线对向驶入桥梁, 施加120m均布荷载进行制动力计算, 工况见表6。

由于工况均为双线加载且荷载对称, 选取1号钢轨为研究对象。计算结果见图11~图13。双线加载挠曲工况钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移最大值见表7。由图11~图13与表7可知, 在双线加载制动工况下, 工况二的钢轨纵向力与钢轨、桥梁纵向位移均为最大, 数值分别为107.8kN、1.6mm、1.7mm。工况三产生的纵向力与位移最小, 且桥梁位移趋近于零。工况一、工况二及工况三相比各自前一工况, 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。

表 6 制动工况表

Table .6 Brake conditions

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

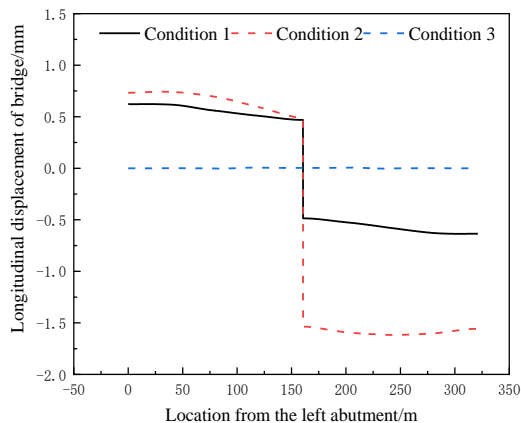


图 13 桥梁纵向位移

Fig.13 Displacement of bridges

表 7 不同工况下结构制动力与位移最大值

Table .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

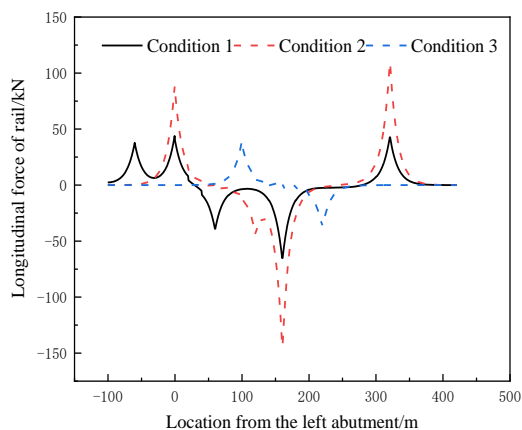


图 11 钢轨纵向力

Fig.11 Force of rail

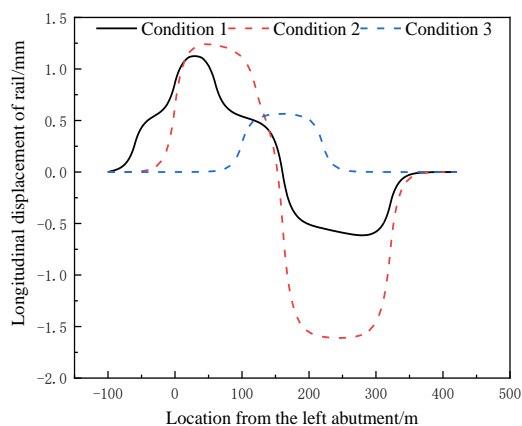


图 12 钢轨纵向位移

Fig.12 Displacement of rail

综上所述，在计算地铁连续刚构桥上无缝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缝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(即工况二)，需着重注意端部轨道结构的日常保养及维护、检测。

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 14~图 15，断轨工况钢轨断轨力与纵向位移最大值见表 8。

由图 14~图 15 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 73.1mm；断轨与非断轨力最大值分别为 1566.8kN、1568.7kN，最小值分别为 0kN、739.6kN。

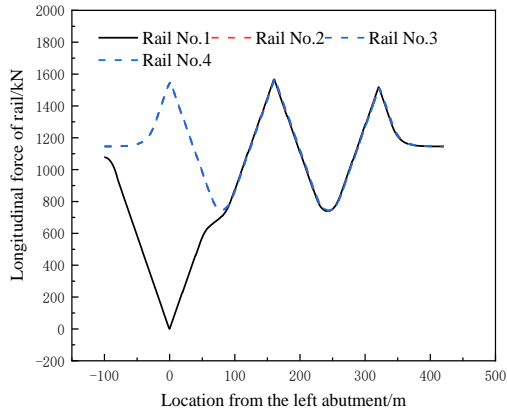


图 14 钢轨纵向力

Fig.14 Force of rail

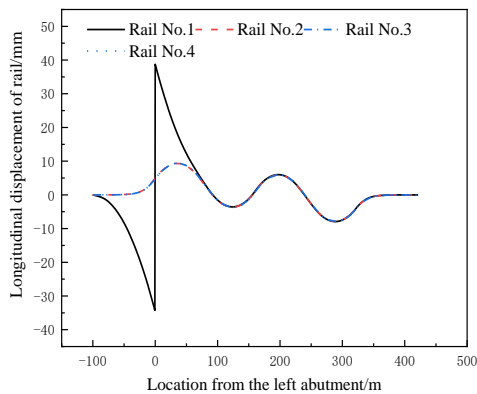


图 15 钢轨纵向位移

Fig.15 Displacement of rail

表 8 断轨工况下结构伸缩力与位移最大值

Table. 8 Maximum force and displacement under rail break conditions

Rail number	Rail breaking force/kN	Longitudinal displacement of rails/mm
Rail No.1	0/1566.8	-34.3/38.8
Rail No.2	739.6/1568.7	-7.9/9.4
Rail No.3	739.6/1568.7	-7.9/9.4
Rail No.4	739.6/1568.7	-7.9/9.4

综合上述, 钢轨发生断轨时, 断轨对钢轨产生瞬时的影响, 并会影响其它线路, 发现断轨应及时更换钢轨, 避免发生危险。

4 结论

针对地铁连续刚构桥上无砟轨道无缝线路的受力与变形进行研究, 以梁-板-轨相互作用原理为基础, 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, 得出以下结论:

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, 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。

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。钢轨温度荷载应依据实际情况选取。

参考文献(References):

- [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(02): 30-38.
ZHANG P F, HUANG A Q, HU D G, W, et al. Analysis of static characteristics of seamless line with ballastless track on rigid bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(02): 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, No.131(01): 85-88.
CHEN P, GAO L, FENG Y W, et al.. Change law of longitudinal additional force of seamless line on continuous girder bridge[J]. Journal of Beijing Jiaotong University. 2007, No.131(01): 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(03): 77-80.
SONG X Y, BAI L. Force analysis of rigid joints of railway

- continuous composite rigid bridge pier beam [J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(03): 77-80.
- [4] 倪向阳. 城市轨道交通桥上无缝线路挠曲力研究[D].北京交通大学,2012.
NI X Y. Study on deflection force of seamless line on urban rail transit bridge[D].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分散的计算研究[J]. 铁道标准设计, 2012(04): 28-31.
XIE K Z, XU J M, WANG P, et al. Calculation study on additional expansion force dispersion of seamless line on bridge[J]. Railway Standard Design, 2012(04): 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(06): 2085-2091.
XIE K Z, WANG P, XU H, et al. Study on the disease of seamless line of ballastless track on rigid bridge[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2014, 45(06): 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 of Calculation Model and Method of Seamless Line on Continuous Rigid Bridge[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 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, (10): 10-14.
XIONG Z W, XIE K Z, WANG P, et al. Study on the influence of train braking on the relative displacement of seamless line girder and rail on rigid bridge[J]. Railway Standard Design, 2013, (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(03):88-93.
WU L Q,WU D J,LI Q. Experimental study onbraking force of urban rail transit bridge[J].Journal of t-he China a Railway Society,2012,34(03):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].北京交通大学,2015.
CHENG J. Force analysis and temperature span study of continuous rigid track structure without support[D].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]. IOP Conference Series: 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).
- [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(07):1966-1976.
ZHU Z H, LI X G, YAN M M, et al. Study on longitudinal force of seamless line on high-speed railway bridge based on fastener resistance test[J].Journal of Central South University(Natural Science Edition), 2020,51 (07) :1966-1976.
- [15] 罗华朋, 马旭峰, 肖杰灵, 等. 桥墩温度荷载对高墩大跨桥上无砟轨道无缝线路的影响研究 [J]. 铁道建筑, 2015(06): 127-131.
LUO H P, MA X F, XIAO J L, et al. Influence of pier temperature load on ballastless track CWR on high pier and long-span bridge [J].Railway Engineering, 2015(06): 127-131.
- [16] 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(08): 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(08): 26-29.
- [17] 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,No.730(04):100-107 .
WANG W H. Study on interaction between 4×40 m continuous rigid bridge and seamless line of intercity railway[J].China Railway, 2023,No.730(04):100-107.
- [18] 游颖川,谢海清,卢斌等.高速铁路跨度 250 m 级连续刚构桥长波不平顺控制研究[J].铁道标准设计:1-6[2023-07-18].
YOU Y C, XIE H Q, LU B, et al. Research on long-wave uneven control of 250 m continuous rigid bridge with span of high-speed railway[J].Railway Standard Design:1-6 [2023-07-18].
- [19] 中华人民共和国铁道部. TB10015-2012. 铁路无缝线路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
Ministry of Railways of the People's Republic of China.

TB10015-2012. Code for design of railway seamless line[S].

Beijing: China Railway Press, 2013.

- [20] 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].都市轨道交通,2012,25(06):96-99.



第一作者: 张鹏飞 (1975-), 男, 教授, 博士, 博士生导师,
国家自然科学基金获得者; 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

WANG D M, NI X Y, WANG H J. Study on deflection
force of seamless line on double-line bridge of urban
rail transit[J]. Urban Express Rail Transit, 2012, 25(06): 96
-99.



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。

修改说明

编辑老师，您好，针对编辑部和审稿专家提出的修改意见，作者对稿件进行了修改，以下是逐条修改说明。

一、第一审稿人专家审稿意见：

1. 文中的挠曲工况和制动工况分别提供了三种，计算这些工况的依据是什么？一般来说，沿桥梁桥轴线移动荷载作用下的受力分析，应该用影响线方法先得到最不利工况，再在最不利组合工况下用有限元分析变形和位移。

修改说明：作者计算挠曲工况和制动工况的依据是模拟列车实际运行中，列车双线对向驶入桥梁时出现的三种情形，设置工况进行计算，具有一定的代表性。在后续深化研究中将按照专家意见，采用影响线法得到最不利工况，在最不利组合工况下用有限元分析变形和位移，对研究进行完善。

2. 文中有部分文字类的瑕疵，例如表 1 中 3.40×1010 应该为 3.40×10^{10} (上标), kg/m^3 , 应该为 kg/m^3 (上标)，后面的变形和受力图横坐标没有单位等。

修改说明：已按照专家意见将部分文字类的瑕疵进行修改。

二、第二审稿人专家审稿意见：

1. 第一节对国内外研究现状进行了概述，但为何进行无砟轨道纵向力分析的原因却未加描述。是否可以对该部分加以补充。

修改说明：已按照专家意见在前言加入“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”，介绍进行无砟轨道纵向力分析的原因。

2. 表 3 中工况一与工况二钢轨纵向位移为相反数，工况三为何不同？

修改说明：表 3 中工况一与工况二钢轨纵向位移为相反数，工况三不同，是由于经有限元软件计算，钢轨纵向位移正值与负值大小相近，并非完全相同，表中数据保留了一位小数，故表中工况一与工况二钢轨纵向位移为相反数，工况三不同。

3. 3.2 中当考虑列车双线对向驶入桥梁，钢轨纵向力图（图 8）、纵向位移图（图 9）体现的是具体哪一根钢轨的受力变形情况？请详细说明。

修改说明：已按照专家意见在文中 3.1 及 3.2 中增加“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”，具体说明了钢轨纵向力图、纵向位移图体现的是具体哪一根钢轨的受力变形情况。

4. 表 3 中用 Rail telescopic force 表达钢轨伸缩力不准确，应该是 Expansion force。

修改说明：已按照专家意见将钢轨伸缩力英文表达进行了修改。

5. 文章中有多余空格，请通篇检查格式，进行完善。

修改说明：已按照专家意见删除多余空格。

三、第三审稿人专家审稿意见：

1. 在建立有限元模型时，钢轨、扣件建模不够详细，扣件纵向和垂向受力如何模拟，是否考虑横向变形与受力等问题，没有描述清楚。

修改说明：已按照专家意见对钢轨、扣件建模进行详细介绍，扣件横纵垂向属性均已详细说明。

2. 桥梁徐变变形与温变对无缝线路纵向受力与稳定性影响较大，是否考虑这个问题。

修改说明：本文参照规范设置了不同温变荷载的工况对温度变化下的无缝线路伸缩力进行了探究。桥梁徐变是在长期应力作用下随时间增长而增加的变形，故本文纵向力分析中未考虑徐变变形的影响，在后续研究者将按照专家意见加以考虑徐变变形的影响。

3、这种钢构桥梁上是否考虑设置温调器。

修改说明: 依据本文的计算结果可知, 本文刚构桥上无砟轨道无缝线路在规范取值的温变荷载下, 纵向受力与变形均未超过限值, 因此未设置温调器。