

文章编号: 1005-0523(2023)02-0030-09

## 刚构桥上无砟轨道无缝线路静力特性对比分析

张鹏飞<sup>1</sup>, 黄安琪<sup>2</sup>, 胡达贵<sup>1</sup>, 陈华鹏<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. 福建水利电力职业技术学院建筑工程学院, 福建 永安 366000)

**摘要:** 针对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, 分别建立刚构桥上 CRTS III 型板式和 CRTS I 型双块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, 并对两种轨道结构静力特性进行对比分析, 为刚构桥上无缝线路轨道结构设计提供参考。结果显示: 在温度荷载、列车荷载作用下, 采用 CRTS I 型双块式轨道结构时钢轨纵向力更小, 但轨板相对位移增幅明显, 可能产生安全隐患; 在列车制动荷载工况下, 采用 CRTS III 型板式轨道结构时钢轨纵向力与轨板相对位移均更小; 在断轨工况下, 采用 CRTS I 型双块式轨道结构时断缝值超过了规范容许限值。建议在刚构桥上采用 CRTS III 型板式无砟轨道。

**关键词:** 刚构桥; CRTS III 型板式无砟轨道; CRTS I 型双块式无砟轨道; 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, 黄安琪, 胡达贵, 等. 刚构桥上无砟轨道无缝线路静力特性对比分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(2): 30-38.

## Comparative Analysis on Static Characteristics of CWR of Ballastless Track on Rigid Frame Bridge

Zhang Pengfei<sup>1</sup>, Huang Anqi<sup>2</sup>, Hu Dagui<sup>1</sup>, Chen Huapeng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Architectural Engineering, Fujian Vocational & Technical College of Water Conservancy & Electric Power, Yong'an 366000, China)

**Abstract:** To study the stress and deformation of ballastless track CWR on rigid frame bridge, Based on the principle of beam-slab-rail interaction, the models of CRTS III slab track and CRTS I bi-block track jointless track on rigid frame bridge were established respectively. The longitudinal forces and displacements of each structure under the conditions of expansion, deflection, braking and rail breaking were calculated, and the static characteristics of two kinds of ballastless track structures were compared and analyzed, so as to provide consultation for the track structural design of CWR on rigid frame bridge. The results show that under temperature load and train load conditions the rail longitudinal force of CRTSI bi-block track CWR on rigid frame bridge is smaller, but the relative displacement of rail and track slab increases significantly, which may lead to potential safety hazards; Under the train braking load condition, the longitudinal stress of the rail and the relative dis-

收稿日期: 2022-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178425); 国家重点研发计划项目(2021YFE0105600)

placement of the rail slab of CRTS III slab track CWR on the rigid frame bridge are smaller; Under the broken track condition, the broken joint value of CRTSI bi-block track CWR on rigid frame bridge exceeds the allowable limit of the specification. Accordingly, CRTSIII slab track is recommended for rigid frame bridge.

**Key words:** rigid frame bridge; CRTS III slab track; CRTS I bi-block track; longitudinal force

**Citation format:** 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.

学者对高速铁路桥梁无砟轨道进行了大量研究,戴公连等<sup>[1-3]</sup>研究了非线性温度和小阻力扣件条件下桥上无砟轨道的纵向附加力;张世杰<sup>[4]</sup>分析了过渡段对桥上 CRTS III 型板式无砟轨道在减振地段对轮轨动力响应的影响;谢铠泽等<sup>[5-6]</sup>研究了连续刚构桥上无缝线路模型,分析了树脂强度,小阻力扣件和伸缩调节器对其受力和变形的影响;罗华朋等<sup>[7-8]</sup>指出在设计时需考虑桥墩升温对高墩大跨连续刚构桥的影响;Ma 等<sup>[9]</sup>指出结构刚度,预应力损失,环境温度等是影响刚构桥挠度的主要因素;Yan<sup>[10]</sup>研究了地基不均匀沉降对连续刚构桥力学特性的影响,指出不同沉降情况对桥梁的影响程度;Zhang 等<sup>[11]</sup>对大跨度 V 形墩预应力连续刚构桥进行了静力特性分析和静载试验研究;Li 等<sup>[12]</sup>提出三弹簧模型是桩土作用下刚构桥高墩最优计算模型。

综上,既有研究对刚构桥上不同无砟轨道无缝线路静力特性讨论较少。CRTS I 型双块式与 CRTS III 型板式无砟轨道无缝线路在刚构桥上应用逐渐广泛。CRTS I 型双块式无砟轨道结构道床板较厚,结构连续性较强,造价低,但道床本身容易开裂,结

构不易修补。CRTS III 型板式无砟轨道结构整体受力性好,平顺度高,维修方便,但结构会受到很大的温度梯度影响,且产生一定的变形。本文根据实际刚构桥工程结构设计图,选取两种无砟轨道类型,分别建立了刚构桥上 CRTS III 型板式(以下称 III 型板式)无砟轨道无缝线路空间耦合模型以及刚构桥上 CRTS I 型双块式(以下称 I 型双块式)无砟轨道无缝线路空间耦合模型,对比分析了在伸缩、挠曲、制动、断轨工况下。

## 1 精细化空间有限元建模

### 1.1 模型概述

刚构桥上 I 型双块式无砟轨道包括钢轨、扣件、轨枕、道床板、凸台及底座板等结构<sup>[13]</sup>,桥梁及两种无砟轨道结构如图 1 所示。

本文根据梁-板-轨相互作用原理,利用 ANSYS 有限元软件建立了  $5 \times 32$  m 简支梁+(80+160+80) m 刚构桥梁+ $5 \times 32$  m 简支梁的有限元空间耦合模型,并在简支桥两端分别建 100 m 的路基段,充分消除边界效应的影响。

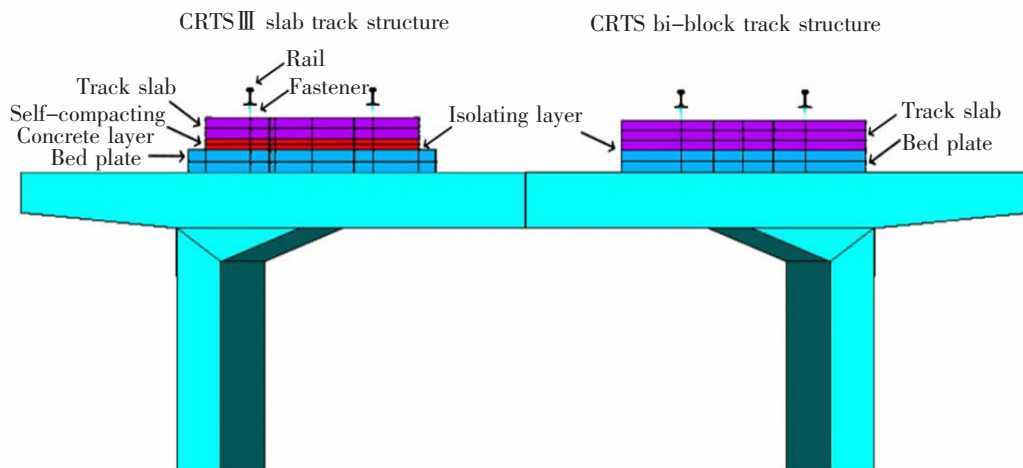


图 1 桥梁及两种无砟轨道结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of bridge and two ballastless track structures

## 1.2 模型参数

钢轨类型为 CHN60 钢轨,以 BEAM188 梁单元模拟。每个扣件节点用纵-横-垂向弹簧单元连接,采用 COMBIN39 非线性弹簧单元模拟扣件纵向阻力,采用 COMBIN14 线性弹簧单元模拟其横、垂向刚度,横向刚度为 50 kN/mm,垂向刚度为 35 kN/mm。

Ⅲ型板式无砟轨道通常使用 WJ-8 型常阻力扣件,扣件间距为 0.63 m<sup>[14]</sup>; I 型双块式无砟轨道一般选取 WJ-8 型常阻力扣件,扣件间距为 0.65 m<sup>[13]</sup>。WJ-8 型常阻力扣件在有载时车辆下、无载时扣件纵向阻力根据式(1)计算取值,可计算出,单组扣件最大纵向阻力为 15.12 kN/组,记为 15 kN/组。

$$r = \begin{cases} 12.0x & x \leq 2.0 \text{ mm} \\ 24.0 & x > 2.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $r$ 为扣件纵向阻力; $x$ 为钢轨相对扣件的纵向位移。

Ⅲ型板式无砟轨道轨道板混凝土强度等级为 C60,相邻轨道板间设伸缩缝,长度为 70 mm。自密实混凝土层和底座板混凝土强度等级为 C40。轨道板、自密实混凝土层、凸台及底座板均采用 SOL-

ID45 实体单元进行模拟,隔离层摩擦系数取 0.7。

I 型双块式无砟轨道的道床板、凸台及底座板混凝土强度等级均为 C40,均采用 SOLID45 实体单元模拟,每块道床板上设置十对双块式轨枕与钢轨节点相对应,相邻轨道结构间设置伸缩缝,长度为 100 mm。

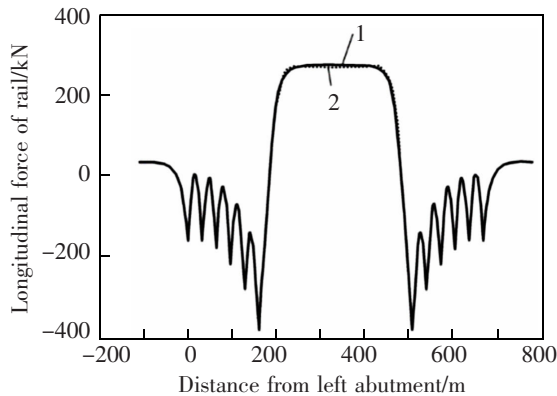
简支箱梁为预制等截面梁,刚构桥梁体为现浇变截面梁,混凝土强度等级分别为 C50 与 C60,均采用 SOLID45 实体单元参照实际工程尺寸进行建模。用 COMBIN14 线性弹簧单元模拟简支梁固定支座纵向刚度,在桥墩及桥台分别取 350,3 000 kN/cm<sup>[14]</sup>,刚构桥墩顶取 2 688 kN/cm<sup>[5]</sup>。详细结构参数如表 1 所示。

## 1.3 模型验证

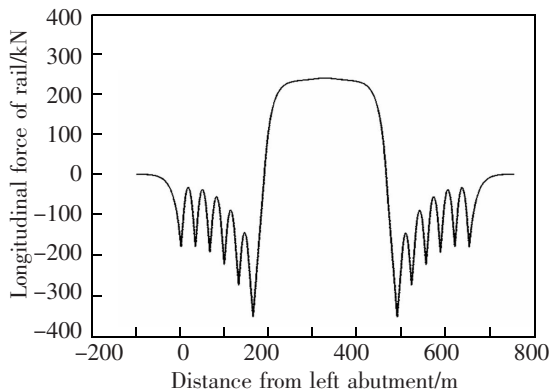
本文建立与文献[5]中相同跨度的刚构桥上无缝线路有限元模型,施加桥梁整体升温 15 °C 的温度荷载,如图 2 所示。本文和文献[5]的钢轨纵向力曲线变化趋势是一致的,从表 2 可得,本文所建立的有限元空间耦合模型与文献[5]中的结果误差较小。

表 1 结构参数  
Tab.1 Structural parameters

Part	Parameter	CRTSⅢ slab track	CRTS I bi-block track
Track slab	Elastic modulus/Pa	3.65×10 <sup>10</sup>	3.40×10 <sup>10</sup>
	Density/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500	2 500
	Size/mm	5 600×2 500	6 400×2 800
Self-compActing Concrete Layer	Elastic modulus/Pa	3.40×10 <sup>10</sup>	
	Density/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500	
	Length×width/mm	5 600×2 500	
Bed plate	Elastic modulus/Pa	3.40×10 <sup>10</sup>	3.40×10 <sup>10</sup>
	Density/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500	2 500
	Length×width/mm	5 650×2 900	6 400×2 800
Elastic cushion	Elastic modulus/Pa	2.5×10 <sup>7</sup>	2.5×10 <sup>7</sup>
	Density/(kg/m <sup>3</sup> )	1 900	1 900
	Thickness/mm	4	4
Convex block	Elastic modulus/Pa	3.40×10 <sup>10</sup>	3.40×10 <sup>10</sup>
	Density/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500	2 500
	Length×width/mm	1 000×700	1 000×700



(a) Refererue[5]



(b) Our study

图 2 钢轨纵向力对比

Fig.2 Comparison for rail longitudinal force

表 2 结构纵向力与位移计算结果对比

Tab.2 Comparison of structural longitudinal force and displacement calculation results

Comparative items	Results of this paper	Literature results	Error comparison
Maximum longitudinal force of rail/kN	237.45	227.83	4.22%
Minimum longitudinal force of rail/kN	-353.39	-395.25	10.59%
Maximum relative displacement/mm	8.57	9	4.78%

## 2 模型加载

1) 计算伸缩力时,根据 TB 10015-2012《铁路无缝线路设计规范》和 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》,刚构桥和筒支梁均升温 20 ℃,轨道板升温 30 ℃,自密实混凝土层、底座板均升温 25 ℃,钢轨不施加温度荷载。

2) 计算挠曲力时,采用 ZK 标准活载,以 64 kN/(m·线)的均布荷载竖向作用在钢轨顶面,单线加载,长度为全桥范围。

3) 计算制动力时,制动率取 0.164,制动荷载以 10.5 kN/(m·线)的均布荷载纵向作用在钢轨顶面,单线加载,长度为全桥范围。

4) 计算断缝值时,施加降温荷载,其中梁体降温 20 ℃,自密实混凝土层、底座板、弹性垫层降温 25 ℃,轨道板降温 30 ℃,钢轨降温 60 ℃。单根钢轨在刚构桥与筒支梁的连接处折断。

## 3 两种无砟轨道计算结果对比

以下图表中,纵向力正值表示拉力、负值表示压力; $F_r$ 为钢轨最大纵向力用; $D_b$ 为桥梁位移用; $\Delta D_{rs}$ 为轨板纵向相对位移用; $S_{bs}, S_{bp}$ 分别为轨道板、底座板的最大纵向力; $\Delta_{el}$ 为弹性垫层的上下表面应力差; $F_p$ 为墩顶最大纵向力。

### 3.1 伸缩力工况

温度荷载作用下,刚构桥上两种轨道结构的轨轨纵向力、轨板相对位移及墩顶纵向力如图 3~图 5 所示。主要结构纵向力及位移最大值如表 3 所示。

由图 3~图 5,表 3 可知,轨道结构、梁体升温条件下,钢轨伸缩力在刚构桥跨中表现为拉力,两端表现为压力。由于两种轨道结构在桥上均为纵向不连续的板块,故其轨道结构的纵向应力呈现波动曲线,并在板缝处出现突变。凸形挡台约束了上下轨道结构的纵向位移,使得该处的结构应力较大。

伸缩工况两种不同轨道结构条件下,桥梁位移相差不大,说明伸缩工况下桥上轨道结构类型对桥梁变形的影响不大。相较于 III 型板式无砟轨道结构:I 型双块式无砟轨道结构钢轨最大纵向力减少了 48.45%;轨板纵向相对位移增加了 65.90%;轨道板、底座板最大纵向力减少了 19.15%,5.09%;墩顶最大纵向力增加了 18.8%;弹性垫层上下表面应力差增加了 76.6%。

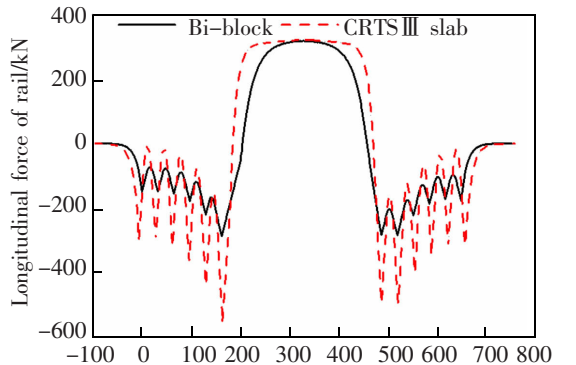


图 3 钢轨纵向力

Fig.3 Longitudinal force of rail

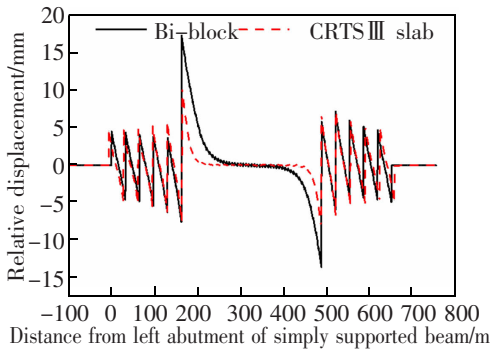


图4 轨板纵向相对位移

Fig.4 Relative displacement of rail and slab

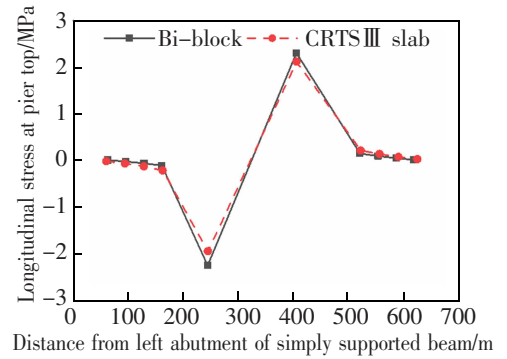


图5 墩顶纵向力

Fig.5 Longitudinal displacement of pier top

表3 不同轨道结构条件下结构伸缩力与位移最大值

Tab.3 Longitudinal force and displacement of structure under different track structure

Different track structures	$F_l/\text{kN}$	$\Delta D_{\text{rel}}/\text{mm}$	$D_l/\text{mm}$	$S_l/\text{MPa}$	$S_{\text{top}}/\text{MPa}$	$\Delta_{\text{top}}/\text{MPa}$	$F_l/\text{MPa}$
CRTS III slab track	325.292/-559.548	10.440	32.490	2.527	2.320	0.111	2.096
CRTS I bi-block track	320.254/-288.469	17.320	32.390	2.043	2.202	0.196	2.284

综上所述, I型双块式无砟轨道结构的钢轨、底座板和轨道板的最大纵向力会更小,但是轨板相对位移显著增大,对轨道结构安全不利。在温度荷载较大的环境中,使用Ⅲ型板式无砟轨道结构更稳定。

### 3.2 挠曲工况

列车荷载作用下,刚构桥上两种轨道结构的钢轨纵向力、轨板相对位移及墩顶纵向力如图6~图8所示。主要结构纵向力及位移最大值如表4所示。

由图6~图8,表4可知,列车荷载作用于全桥时,刚构桥上挠曲力在主跨表现为压力,在边跨表现为拉力,最大值出现在刚构桥主跨跨中和边跨边缘处,并且轨道结构的纵向力和位移均很小。轨道结构的纵向力拉压分布以及极值的位置与钢轨挠曲力一致,并且由于两种无砟轨道结构均含有板缝和凸台,其纵向力为波动曲线。

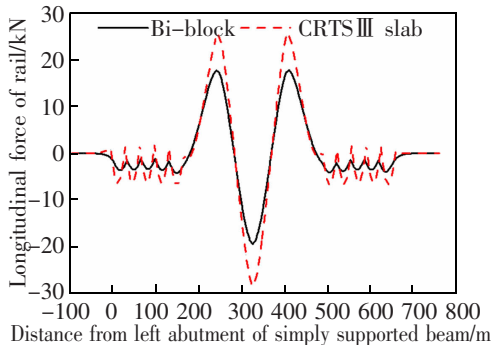


图6 钢轨纵向力

Fig.6 Longitudinal force of rail

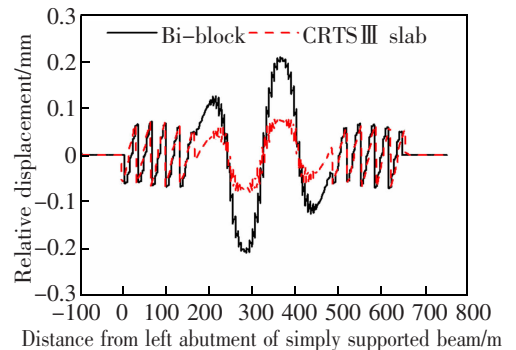


图7 轨板纵向相对位移

Fig.7 Relative displacement of rail and slab

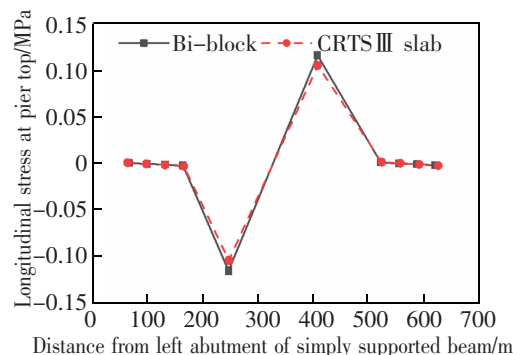


图8 墩顶纵向力

Fig.8 Longitudinal displacement of pier top

两种不同轨道结构条件下,桥梁位移相差不大,说明挠曲工况下桥上轨道结构类型对桥梁变形的影响不大。相较于Ⅲ型板式无砟轨道结构:I型双块式无砟轨道结构钢轨最大纵向力减少了31%;轨板

表 4 不同轨道结构条件下结构挠曲力与位移最大值  
Tab.4 Longitudinal force and displacement of structure under different track structure

Different track structures	$F_l/kN$	$\Delta D_{rsj}/mm$	$D_l/mm$	$S_{ij}/MPa$	$S_{ij}/MPa$	$\Delta_{sj}/MPa$	$F_l/MPa$
CRTS III slab track	25.778/-28.245	0.081	33.080	0.410	0.699	0.043	0.106
CRTS I bi-block track	17.834/-19.489	0.212	33.950	0.386	0.694	0.045	0.117

纵向相对位移增加了 161.7%;轨道板、底座板最大纵向力减少了 5.85%,0.72%;墩顶最大纵向力增加了 10.38%;弹性垫层上下表面应力差的最大值相差不大。

综上所述,不同无砟轨道结构对钢轨纵向力、墩顶纵向力、轨板相对位移影响较大,而对其他轨道结构纵向力影响较小。刚构桥上 I 型双块式无砟轨道结构无缝线路轨板纵向相对位移增幅明显。III 型板式无砟轨道结构在挠曲力工况下更加稳定。

3.3 制动力工况

列车制动荷载作用下,刚构桥上两种轨道结构的钢轨纵向力、轨板相对位移及墩顶纵向力如图 9~图 11 所示。主要结构纵向力及位移最大值如表 5 所示。

由图 9~图 11,表 5 可知,列车制动荷载作用于全桥时,钢轨纵向力由拉力逐渐转为压力,并且钢轨纵向力最大及最小值均出现在制动荷载两端。轨板相对位移在刚构桥跨中处均较小,最大值出现在刚构桥梁与简支梁交界处或简支梁最后一跨固定支座处。

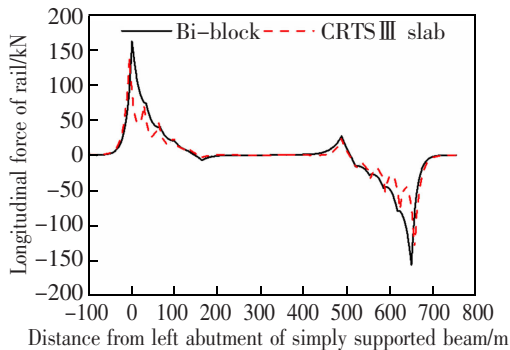


图 9 钢轨纵向力  
Fig.9 Longitudinal force of rail

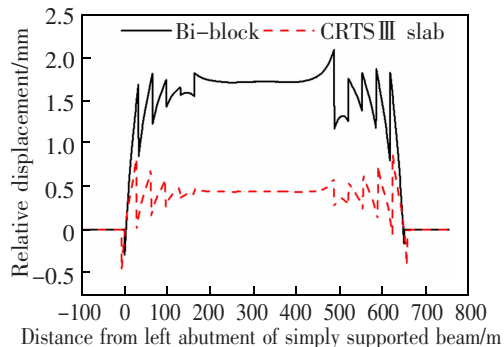


图 10 轨板纵向相对位移  
Fig.10 Relative displacement of rail and slab

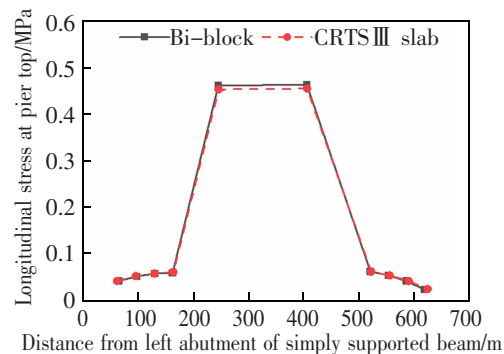


图 11 墩顶纵向力  
Fig.11 Longitudinal displacement of pier top

制动工况不同轨道结构条件下,相较于 III 型板式无砟轨道结构:I 型双块式无砟轨道结构钢轨最大纵向力增大了 17.41%;桥梁位移增大了 6.84%;墩顶最大纵向力增加了 1.77%;轨板纵向相对位移增幅明显,增大了 141.4%;轨道板、底座板最大纵向力减幅明显;弹性垫层上下表面应力差的最大值相差不大。

表 5 不同轨道结构条件下结构制动力与位移最大值  
Tab.5 Longitudinal force and displacement of structure under different track structure

Different track structures	$F_l/kN$	$\Delta D_{rsj}/mm$	$D_l/mm$	$S_{ij}/MPa$	$S_{ij}/MPa$	$\Delta_{sj}/MPa$	$F_l/MPa$
CRTS III slab track	137.084/-131.408	0.870	3.800	0.093	0.035	0.002	0.453
CRTSI bi-block track	160.951/-155.755	2.100	4.060	0.016	0.016	0.002	0.461

综上所述,不同无砟轨道结构对钢轨纵向力、轨板相对位移、轨道板和底座板纵向力影响较大,而对桥梁位移、其他轨道结构纵向力影响很小。刚构桥上 I 型双块式无砟轨道结构轨板相对位移增幅明显,严重时会导致轨下胶垫滑出。Ⅲ型板式无砟轨道结构相对更加合适。

### 3.4 断轨力工况

钢轨折断与温度荷载共同作用下,刚构桥上两种轨道结构的钢轨纵向力、钢轨纵向位移、轨板相对位移及墩顶纵向力如图 12~图 15 所示。主要结构纵向力及位移最大值如表 6 所示。

由图 12~图 15,表 6 可知,单根钢轨在刚构桥与简支梁的连接处折断,在断缝附近,钢轨纵向力急剧减少,钢轨位移和轨板相对位移也发生明显改变。刚构桥上Ⅲ型板式无砟轨道和刚构桥上 I 型双块式无砟轨道结构的断轨缝分别为 66.74 mm 和 86.56 mm,其中,双块式无砟轨道结构的断缝值大于均规范要求的 70 mm。

断轨工况不同轨道结构条件下,相较于Ⅲ型板式无砟轨道结构:I 型双块式无砟轨道结构钢轨最大纵向力减小了 19.99%;轨道板、底座板最大纵向力分别减少了 19.83%和 5.93%;轨板纵向相对位移增幅明显,增大了 175.14%;桥梁位移增大了 2.62%;墩顶最大纵向力增加了 3.97%。I 型双块式无砟轨

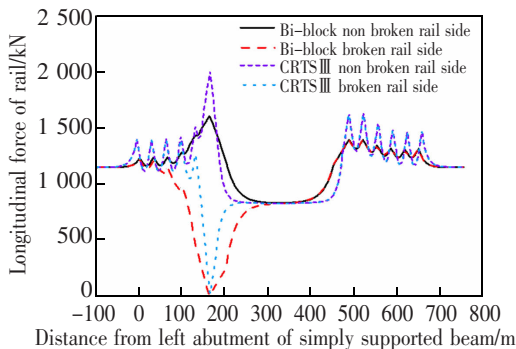


图 12 钢轨纵向力

Fig.12 Longitudinal force of rail

表 6 不同轨道结构条件下结构断轨力与位移最大值

Tab.6 Longitudinal force and displacement of structure under different track structure

Different track structures	$F_r/kN$	$\Delta D_{rs}/mm$	$D_r/mm$	$S_r/MPa$	$S_{br}/MPa$	$\Delta_c/MPa$	$F_p/MPa$
CRTS III slab track	1 999.093/1 619.332	8.970	33.080	2.517	2.295	0.110	2.165
CRTS I bi-block track	1 599.518/1 387.533	24.680	33.950	2.018	2.159	0.193	2.251

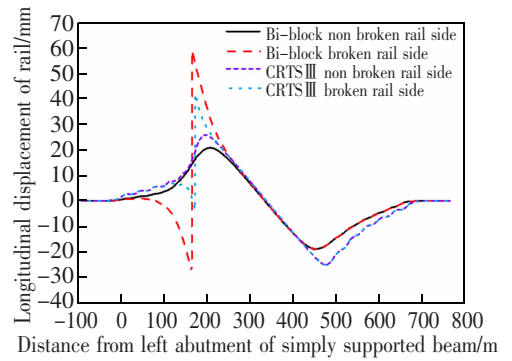


图 13 钢轨纵向位移

Fig.13 Longitudinal displacement of rail

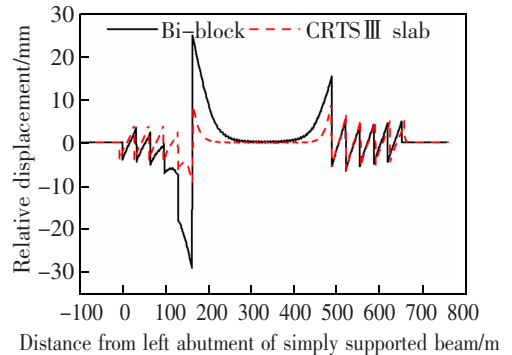


图 14 轨板纵向相对位移

Fig.14 Relative displacement of rail and slab

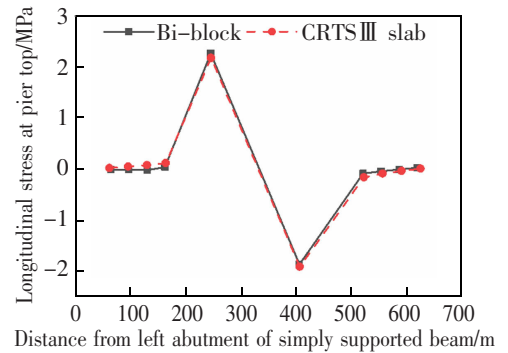


图 15 墩顶纵向力

Fig.15 Longitudinal displacement of pier top

道结构的弹性垫层上下表面应力差的最大值略有增加。

综上所述,在钢轨折断并且降温的条件下,折断钢轨的纵向力、位移和轨板相对位移在断缝处明显波动,需对钢轨断缝值、轨板相对位移进行检算;不同无砟轨道结构对钢轨纵向力、轨板相对位移影响较大,而对桥梁位移、墩顶最大纵向力和表中其他轨道结构纵向力影响很小。刚构桥上 I 型双块式无砟轨道结构的断缝值已超过规范容许限值,并且断缝处的轨板相对位移剧烈突变,大大增加了安全隐患。在低温环境下,刚构桥上铺设无砟轨道使用 III 型板式无砟轨道更加安全。

## 4 结论

1) 温度荷载作用下,两种轨道结构中 CRTS I 型双块式无砟轨道结构的钢轨、轨道板和底座板最大纵向力会更小,但是轨板相对位移增幅明显,对轨道结构安全不利,并且纵向力的减小主要集中在简支梁桥段,对刚构桥段影响较小。在温度荷载较大的环境中,使用 CRTS III 型板式无砟轨道结构更加安全。

2) 列车垂向荷载作用下,两种轨道结构中 CRTS I 型双块式无砟轨道结构的钢轨纵向力、轨道板和底座板最大纵向力会更小,而轨板相对位移、墩顶最大纵向力会更大,使用 CRTS III 型板式无砟轨道结构更有利于轨道结构的稳定。

3) 列车制动荷载作用下,两种轨道结构中 CRTS I 型双块式无砟轨道结构的钢轨纵向力、桥梁位移、墩顶最大纵向力会更大,轨板相对位移增幅明显,需考虑安全问题,使用 CRTS III 型板式无砟轨道结构会更加合适。

4) 在钢轨折断降温作用下,折断钢轨的纵向力、位移及轨板相对位移均在断缝处显著变化。两种轨道结构中 CRTS I 型双块式无砟轨道结构的钢轨纵向力、轨道板和底座板最大纵向力会更小,而轨板相对位移、钢轨断缝值会更大。其数值已超过规范容许限值,并且断缝处的轨板相对位移突变剧烈,易带动轨下胶垫的滑出。在低温环境下,使用 CRTS III 型板式无砟轨道更加安全,并且要对轨板相对位移、钢轨断缝值检算。

5) CRTS III 型板式无砟轨道使用预制混凝土轨道板,施工质量更好,施工方便、便于维修,且 CRTS III 型板式无砟轨道作为我国自主研发的新型轨道结构,结构安全可靠、经济合理,在桥上无缝线路广泛应

用,建议在刚构桥上使用 CRTS III 型板式无砟轨道。

## 参考文献:

- [1] 戴公连,葛浩,刘文硕,等. 实测温度下大跨度桥上纵连无砟轨道受力研究[J]. 铁道工程学报,2017,34(5):26-31.  
DAI G L, GE H, LIU W S, et al. Analysis of longitudinally connected ballastless track on the high-speed railway long-span bridge base on the actual measured temperature [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(5): 26-31.
- [2] DAI G, YAN B. Longitudinal forces of continuously welded track on high-speed railway cable-stayed bridge considering impact of adjacent bridges[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(8): 2348-2353.
- [3] DAI G, LIU W. Applicability of small resistance fastener on long-span continuous bridges of high-speed railway[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(5): 1426-1433.
- [4] 张世杰. CRTS III 型板式无砟轨道减振过渡段动力特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 8-16.  
ZHANG S J. Study on the settings of transition section for CRTS III slab ballastless track [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 8-16.
- [5] 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.
- [6] 谢铠泽, 徐井芒, 魏贤奎, 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, WEI X K, 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.
- [7] 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(6): 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(6): 127-131.
- [8] 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.



- [9] 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.
- [10] 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).
- [11] ZHANG F, WANG Y. Static load test study on long-span continuous rigid frame bridge with V-shaped pier[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 295(4): 042062.
- [12] 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.
- [13] 曲村. 高速铁路长大桥梁无砟轨道无缝线路设计理论及方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.  
QU C. The design theory and method of ballastless CWR on long span bridge of high-speed railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [14] 张鹏飞, 桂昊, 雷晓燕. 多跨简支梁桥上Ⅲ型板式无砟轨道制动力传递规律研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(10): 10-15.  
ZHANG P F, GUI H, LEI X Y. Transfer law of braking

force for CRTSⅢ ballastless slab track on multi-span simply supported beam bridge[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(10): 10-15.



第一作者: 张鹏飞(1975—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 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。



通讯作者: 黄安琪(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为桥上无缝线路。E-mail: haq1996@sina.com。

(责任编辑: 姜红贵)