

DOI:10.11918/202203002

# 连续梁桥上 CRTS 双块式无砟轨道疲劳特性

闫斌<sup>1</sup>, 黄杰<sup>2</sup>, 谢浩然<sup>3</sup>, 潘文彬<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 兰州 730030;  
3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

**摘要:** 为探讨梁轨非线性互作用下连续梁桥上双块式无砟轨道系统静动力荷载下结构响应, 预测桥上无砟轨道结构的疲劳寿命, 基于梁轨相互作用原理与车辆-轨道-桥梁耦合动力学原理, 以昌景黄铁路某(40+64+40)m连续梁为研究对象, 采用有限元方法建立了考虑桥梁、支座、底座板、道床板、扣件和钢轨等构件及结构层间非线性约束的连续梁-CRTS双块式无砟轨道的一体化空间分析模型, 研究列车静活载作用下桥梁、道床板、底座板及钢轨的动力响应特性与无缝线路纵向力分布规律, 分析连续梁桥上无砟轨道结构疲劳特性。结果表明: 温度荷载作用下钢轨最大压应力位于连续梁两端, 最大拉应力位于桥梁跨中; 竖向荷载作用下钢轨最大拉应力位于连续梁桥墩, 最大压应力位于桥梁跨中; 制动荷载作用下钢轨拉、压应力极值均位于桥梁桥墩; 钢轨纵向力由温度荷载控制, 最大应力为143.1 MPa, 满足规范要求; 列车动载作用下, 简支梁和连续梁上钢轨最大拉、压应力相当, 道床板最大拉应力出现在连续梁跨中限位凹槽附近, 其板底拉应力大于板顶, 底座板最大拉应力出现在连续梁主墩附近, 且板顶和板底的拉、压应力基本相同; 列车动载作用下, 钢轨最易破坏处寿命约27.1 a, 道床板和底座板在服役期内不会发生疲劳破坏。

**关键词:** 轨道工程; 无砟轨道; 连续梁; S-N曲线; 疲劳特性

中图分类号: U213.912

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)07-0052-08

## Fatigue characteristics of CRTS bi-block ballastless track on continuous bridge of high-speed railway

YAN Bin<sup>1</sup>, HUANG Jie<sup>2</sup>, XIE Haoran<sup>3</sup>, PAN Wenbin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** In order to investigate the structural response of CRTS Bi-block ballastless track system on continuous bridge under dynamic train load, and predict the fatigue life of the ballastless track structure on the bridge, based on the principle of bridge-rail interaction and train-track-bridge coupling dynamics, a (40+64+40)m continuous bridge of Nanchang-Jingdezhen-Huangshan high speed railway is taken as the research object, the refined simulation model of continuous beam bridge-ballastless track system considering the nonlinear constraints between bridge, bearing and abutment, shear nail, baseplate, elastic cushion, track plate, fastener and rail is established by using the finite element method. The dynamic response characteristics of coupling system and the longitudinal force distribution law of CWR are studied, and the structural fatigue characteristics of ballastless track laid on continuous beam bridge are analyzed. The results show that: the maximum compressive stress of rail under temperature load appears at both ends of continuous beam, and the maximum tensile stress appears in the middle of bridge span. The maximum tensile stress of rail under vertical load appears near the pier of continuous beam bridge, and the maximum compressive stress appears in the middle of bridge span. Under the action of braking load, the maximum tensile and compressive stress of rail appear near the bridge pier. The longitudinal force of the rail is controlled by the temperature load, and the maximum stress is 143.1 MPa, meeting the specification requirements; Under the action of dynamic train load, the maximum tensile and compressive stress of rail on simply-supported bridge and continuous bridge are equivalent. The maximum tensile stress of track plate appears near the limit groove in the middle span of continuous beam bridge, the tensile stress at the bottom surface of track

收稿日期: 2022-03-01; 录用日期: 2022-06-20; 网络首发日期: 2023-06-19

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/23.1235.T.20230619.1501.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278470); 湖南省自然科学基金(2022JJ30741); 中国铁路设计集团有限公司科技开发重点课题(2022A02036002); 皖赣铁路安徽有限责任公司科技研究开发计划课题(池黄2028-00-2020号)

作者简介: 闫斌(1984—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 黄杰, huangjie\_csu@outlook.com

plate is greater than that at the top surface. The maximum tensile stress of the baseplate occurs near the main pier of the continuous beam bridge, the tensile and compressive stress at the top and bottom surface of the baseplate are basically the same. Under the action of dynamic train load, the service life of the most vulnerable part of the rail is about 27.1 years, and there will be no fatigue failure to track plate and baseplate during service.

**Keywords:** track engineering; ballastless track; continuous bridge; S-N curves; fatigue characteristic

目前国内外研究学者对桥上无砟轨道在温度荷载、列车竖向荷载以及制动荷载作用下桥梁和无砟轨道相互作用有了深入的研究<sup>[1-3]</sup>,对路基、简支梁上无砟轨道疲劳特性有了初步的探讨,相关研究成果对丰富无砟轨道理论和指导工程实践有一定的意义,如文献[4]建立了高速铁路简支梁桥上的纵连板式无砟轨道模型,考虑了无砟轨道混凝土裂缝的开裂和闭合效应等,对武汉、哈尔滨和广州地区气候条件下的无砟轨道结构寿命进行了预测;文献[5]基于车-桥耦合振动理论,建立了的64 m简支钢桁梁桥的车-桥动力学模型,分析了不同列车类型和行车速度对桥梁疲劳损伤的影响;文献[6]以 CRTS I型板式无砟轨道为研究对象,考虑了在列车荷载及环境温度共同作用下路基上无砟轨道结构的疲劳特性,得出在无砟轨道要求服役期间内,轨道板、底座板和凸形挡台几乎不会出现疲劳破坏,CA砂浆需要在服役期间加强养护;文献[7]研究了在典型软土地区中,轨道板在路基不均匀沉降、列车荷载及温度场作用下的损伤特性,指出路基不均匀沉降是造成轨道板损伤的关键性因素,并给出了路基不均匀沉降的限值;文献[8]借鉴复合材料界面损伤的研究方法,引入了内聚本构模型研究无砟轨道结构界面损伤,探讨了双线性、多项式及指数内聚本构模型的无砟轨道在温度梯度载荷下的界面损伤演化,结果表明对于无砟轨道界面损伤分析推荐使用指数内聚本构模型,而多项式内聚本构模型可以用来预测不对称损伤;文献[9]采用数字信号处理方法,将频率幅值分配随机相位,从大量实测列车荷载组合中筛选出了最不利的情况,基于该荷载工况,对轨道板的压缩损伤进行了评估,并给出了优化轨道板疲劳寿命的建议。

既有研究中对于无砟轨道的疲劳损伤研究多集中于路基或简支梁上,连续梁桥上无砟轨道系统疲劳损伤特性尚不明确。本文结合实验数据与相关经典文献,以昌景黄铁路上某(40+64+40)m连续梁为研究对象,采用有限元法建立了连续梁桥上 CRTS 双块式无砟轨道系统仿真模型。研究了列车静活载作用下桥梁、道床板、底座板及钢轨的动力响应特性与无缝线路纵向力分布规律,基于 Miner 准则和混凝土 S-N 曲线,分析了连续梁桥上无砟轨道结构疲劳特性。

## 1 连续梁桥上双块式无砟轨道系统仿真模型

### 1.1 无砟轨道结构

钢轨采用 CHN60 轨,截面面积为 77.45 cm<sup>2</sup>,对水平轴的惯性矩为 3 217 cm<sup>4</sup>。扣件为 WJ-8B 型扣件,常阻力扣件的纵向变形-阻力关系表达式<sup>[10]</sup>为

$$r_1 = \begin{cases} 11.625x, & |x| \leq 2 \text{ mm} \\ 23.25 \text{sign } x, & |x| > 2 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $r_1$ 为扣件纵向阻力,kN; $x$ 为钢轨相对承轨台的纵向位移,mm。

扣件横向变形-阻力关系的表达式为

$$r_3 = \begin{cases} 4.5x, & |x| \leq 2 \text{ mm} \\ 9 \text{sign } x, & |x| > 2 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $r_3$ 为扣件横向阻力,kN; $x$ 为钢轨相对承轨台的横向位移,mm。

采用线性弹簧单元模拟垫板和弹条竖向刚度,扣件的竖向刚度取值为 35 kN/mm。桥上 CRTS 双块式无砟轨道结构采用 C40 砼,道床板、底座板分块铺设。每块道床板和底座板之间有两个限位凹槽,限位凹槽四周均放置弹性垫板。道床板高度为 260 mm、底座板高度为 210 mm,长度×宽度均为 5 940 mm×2 800 mm;道床板和底座板间设置弹性垫层,弹性垫层的纵、横向取为 91 kN/mm<sup>[11]</sup>,竖向刚度为 0.1 N/mm<sup>3</sup>,采用只受压弹簧模拟竖向刚度;限位凹槽四周弹性垫板的刚度采用非线性弹簧模拟,顺桥向刚度取为 14.3 kN/mm,横桥向刚度取为 9.8 kN/mm,当道床板和底座板之间顺、横向相对位移超过弹性垫层厚度时,弹性垫层顺、横桥向刚度取为 10 000 kN/mm;底座板和梁体之间通过剪力钉连接,采用刚度为 10 000 kN/mm 的弹簧模拟,使底座板和桥梁形成一个整体<sup>[12]</sup>。

### 1.2 桥梁结构

简支梁梁体采用双线无砟轨道 32 m 预应力混凝土简支箱梁,如图 1 所示。

连续梁采用昌景黄铁路某(40+64+40)m连续梁,梁端、跨中及支座处梁截面,如图 2 所示。根据梁端和支座处截面的截面属性,采用线性内插的方式模拟支座到连续梁跨中的渐变段截面属性。连续梁固定支座处桥墩纵向刚度取为 1 000 kN/cm,简支梁固定支座处桥墩纵向刚度取为 500 kN/cm<sup>[13]</sup>。

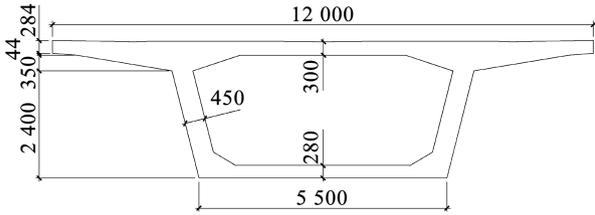
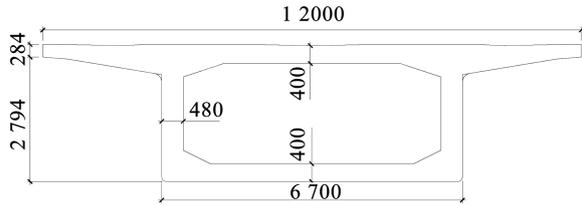
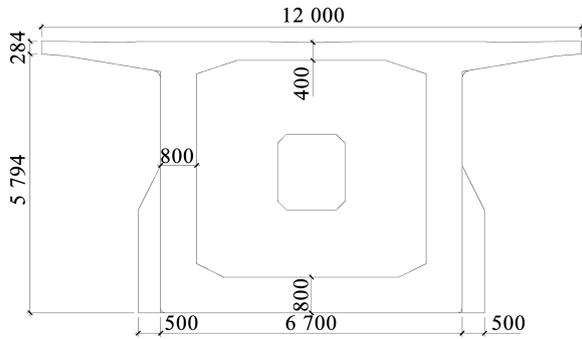


图 1 简支箱梁横截面示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of cross-section of simply supported box girder (mm)



(a) 连续梁梁端及跨中截面



(b) 连续梁支座处截面

图 2 连续梁横截面示意图 (mm)

Fig. 2 Schematic diagram of continuous beam (mm)

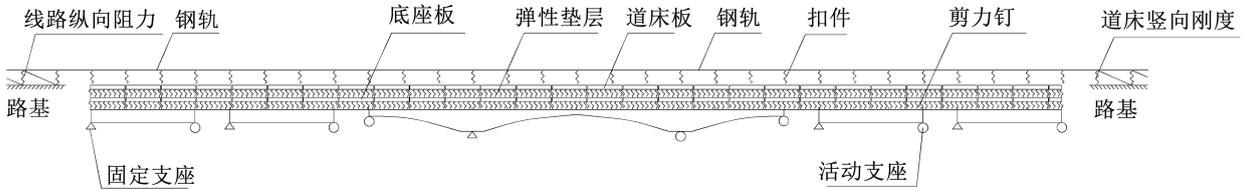


图 3 连续梁-无砟轨道系统模型示意图

Fig. 3 Diagram of continuous bridge-ballastless track system mode

表 1 计算结果与 UIC 算例对比

Tab. 1 Comparison of calculated results and UIC case

位置	伸缩力/MPa		挠曲力/MPa		制动力/MPa	
	UIC	算例	UIC	算例	UIC	算例
固定支座处	8.00	7.83	30.60	30.71	28.00	27.36
滑动支座处	-26.00	-25.62	-10.80	-10.29	-28.00	-27.83

各计算结果与 UIC 算例较为吻合,其中挠曲力误差为 4.72%,这是由于 UIC 采用的是解析算法,本文采用的是有限元方法,因此结果会产生一些误差,但该误差较小,证明本文所用的建模方法能正确模拟梁轨之间的相互作用,且本文计算出的钢轨纵

### 1.3 有限元模型

桥梁-双块式无砟轨道一体化空间分析模型充分考虑桥梁、支座、底座板、道床板、扣件和钢轨等构件及结构层间非线性约束,其中钢轨、道床板、底座板和桥梁用梁单元模拟,扣件、弹性垫层等连接方式采用非线性弹簧单元模拟,简支梁外侧两端考虑 100 m 的路基段,连续梁-无砟轨道系统有限元模型示意如图 3 所示。

模型整体阻尼采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比  $h$  取 0.05,阻尼系数  $\alpha$  和  $\beta$  分别为

$$\alpha = 2h \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2}, \beta = 2h \frac{1}{w_1 + w_2} \quad (3)$$

式中  $w_1$  和  $w_2$  为对结构竖向振型贡献最大的前 2 阶频率。

### 1.4 有限元模型验证

本文采用鱼骨刺模型模拟简支梁和连续梁,利用刚臂模拟底座板和支座的空位置,利用弹簧单元模拟桥梁、底座板、道床板和钢轨之间的约束。本文基于该建模方法建立了与 UIC 774-3 附录 C. 2<sup>[14]</sup> 中单跨单线 60 m 简支梁一致的算例,计算伸缩力时按梁体升温 35 °C 考虑;制动力按 20 kN/m 取值,满跨加载;挠曲作用下梁端发生转动,梁端上缘至桥台处纵向相对位移为 8 mm,计算结果与 UIC 算例 C. 2 进行对比,结果见表 1。

向附加力符合大跨度桥上无缝线路纵向力的一般分布规律<sup>[15]</sup>。本文计算得出的在列车荷载作用下 32 m 简支梁跨中及钢轨最大位移分别为 1.8 mm 和 0.8 mm,与文献[16]中 32 m 简支梁在列车荷载作用下简支梁跨中及钢轨最大位移分别为 1.1 mm 和 0.7 mm 相比偏大,这是因为参考文献中列车行车速度取值为 250 km/h,而本文列车行车速度取值为 350 km/h,由于计算结果受限于列车荷载取值、分析方法以及模型中各个构件的参数取值等因素的影响,总体上本文计算结果与参考文献中结果基本吻合。综上所述,本文所建立的连续梁-CRTS 双块式无砟轨道模型是正确的。

## 2 连续梁上钢轨纵向附加力

为研究大跨度连续梁轨相互作用规律,对连续梁-无砟轨道模型的纵向附加力进行计算,主要针对限制结构钢轨进行伸缩力、挠曲力和制动力的计算。根据铁路无缝线路设计规范<sup>[17]</sup>,计算伸缩力时,梁体升温取为 30 ℃;计算挠曲力时,由于集中荷载对附加力计算影响不大,因此只考虑竖向均布荷载,取

为 64 kN/m<sup>[15]</sup>,加载长度根据列车重量除以均布荷载值得到,取为 300 m;制动力率通常通过轮轨黏着系数计算,中国规范中常取为 0.164,德国和 UIC 规范中规定的计算方法换算为轮轨黏着系数为 0.25。为安全考虑,本文的黏着系数取 0.25,计算制动力时,纵向荷载取为 16 kN/m<sup>[15]</sup>,加载长度取为 300 m。挠曲、制动荷载示意如图 4 所示。

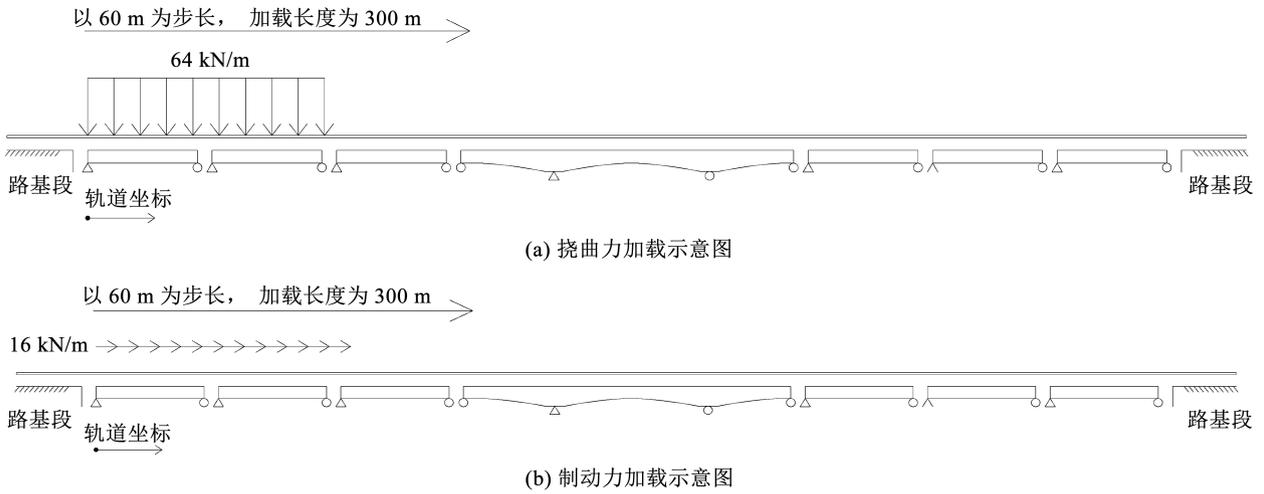
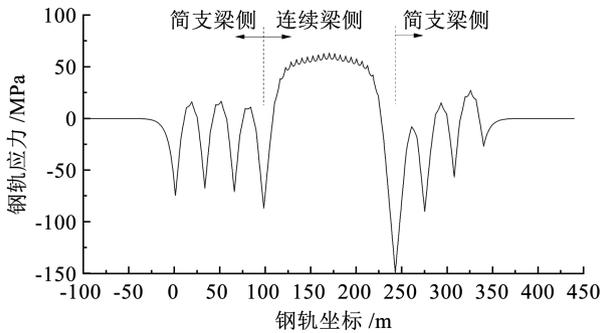


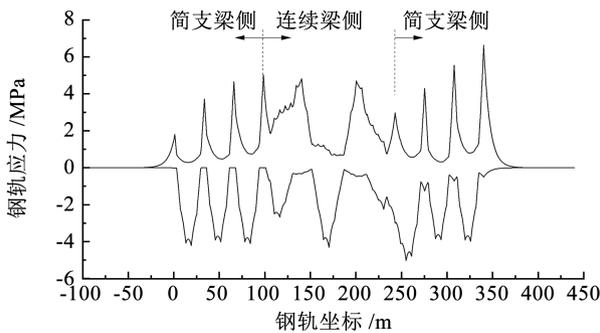
图 4 荷载工况加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading under load cases

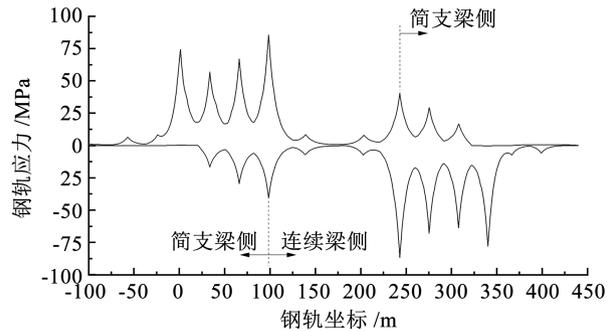
根据以上计算工况,钢轨伸缩力、挠曲力和制动力包络如图 5 所示。



(a) 钢轨伸缩应力



(b) 钢轨挠曲应力



(c) 钢轨制动应力

图 5 钢轨结构应力包络图

Fig. 5 Stress envelope diagram of rail

由图 5 可知,桥上无砟轨道系统其钢轨结构伸缩压应力极大值约为 143.1 MPa,位置位于简支梁和连续梁两端,拉应力极大值约为 61.1 MPa,出现在简支梁和连续梁跨中;钢轨挠曲拉应力极大值出现在简支梁和连续梁桥墩附近位置,最大值约为 6.6 MPa,压应力极值出现在桥梁跨中附近位置,最大值约为 5.0 MPa;钢轨制动力拉、压应力极值均出现在简支梁和连续梁桥墩附近位置,且简支梁处拉、压应力极值远大于连续梁处,最大拉应力为 85.4 MPa,最大压应力为 86.8 MPa。

### 3 桥上无砟轨道系统动力特性

#### 3.1 交通荷载谱

高速列车车辆主要为 CRH 系列高速列车,中国各铁路桥梁设计规范中没有规定相应的标准疲劳车,铁路桥梁设计规范<sup>[18]</sup>的中-活载已不适用于列车动载下结构疲劳强度设计与检算,动力计算采用 CRH380B 列车,列车行车速度取为 350 km/h。

根据铁路轨道设计规范<sup>[19]</sup>,轴重取 1.5 倍静荷载,高速列车交通荷载如图 6 所示。考虑高速列车载客重量较小,动车和拖车重量基本一致,采用 8 节列车编组。

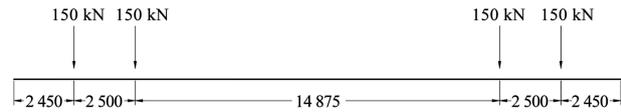


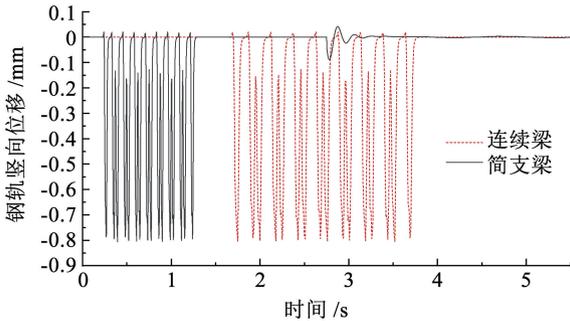
图 6 交通荷载谱 (mm)

Fig.6 Traffic load spectrum (mm)

#### 3.2 无砟轨道结构动位移

选取典型截面,简支梁跨中、连续梁跨中处无砟轨道结构位移分别如图 7 所示。

由图 7 可知,在列车动载作用下,简支梁和连续梁跨中位置处钢轨、道床板最大位移基本相同,桥梁结构型式对轨道结构动位移影响较小。对于同一桥上轨道结构,钢轨、道床板竖向位移分别为 0.8 mm 和 0.3 mm。由于连续梁跨度较简支梁大,相对较柔,因此连续梁跨中处竖向位移比简支梁跨中处大,连续梁跨中处最大竖向位移为 3.1 mm,简支梁跨中处最大竖向位移为 1.8 mm,增幅约 72%。



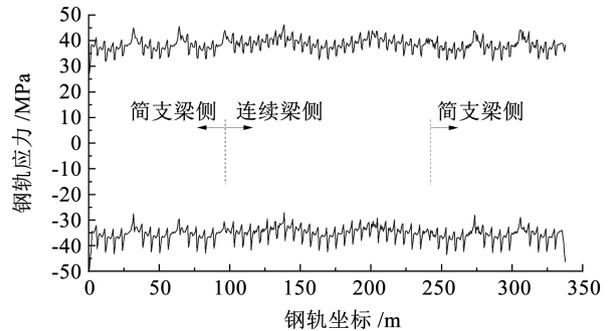
(c) 梁体位移

图 7 桥梁-无砟轨道系统动位移 (mm)

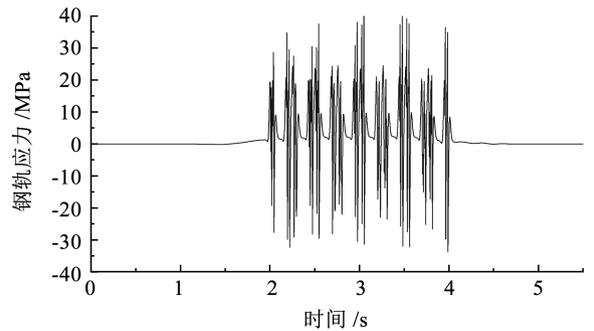
Fig.7 Dynamic displacement of bridge-ballastless track system (mm)

#### 3.3 无砟轨道结构动应力

列车动荷载作用下结构最不利跨中位置处钢轨应力曲线如图 8 所示。



(a) 钢轨应力包络图



(b) 钢轨应力时程曲线

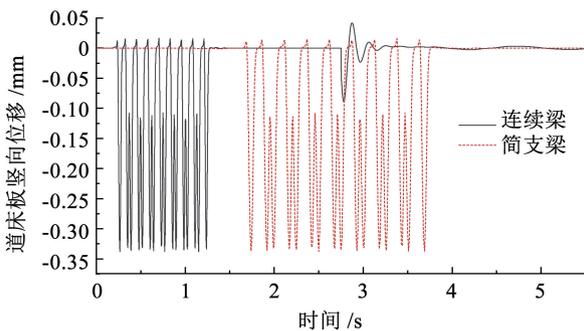
图 8 钢轨动应力

Fig.8 Dynamic stress of rail

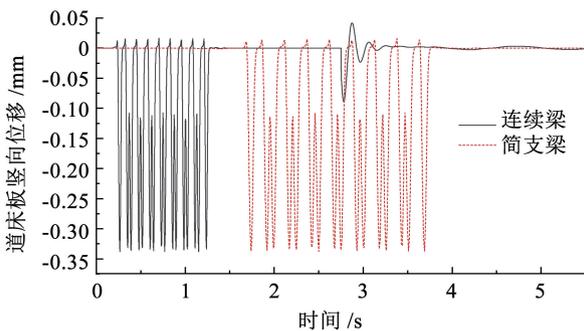
由图 8 可知,列车荷载作用下简支梁和连续梁上钢轨最大拉、压应力基本相同,分别为 45.1 MPa 和 42.8 MPa。列车荷载作用使钢轨出现了 8 组规律基本相同的应力循环,最大拉、压应力分别为 40.7 MPa 和 33.7 MPa。

取每块道床板最易破坏处的进行分析,得到的 54 块道床板应力包络图、全桥道床板最不利位置处板底应力包络图以及典型位置处道床板应力时程曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,全桥范围内,道床板板底的最大拉应力大于板顶处,约 0.22 MPa,压应力呈现相反规

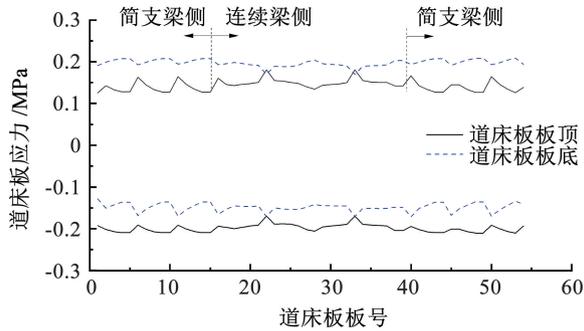


(a) 钢轨位移

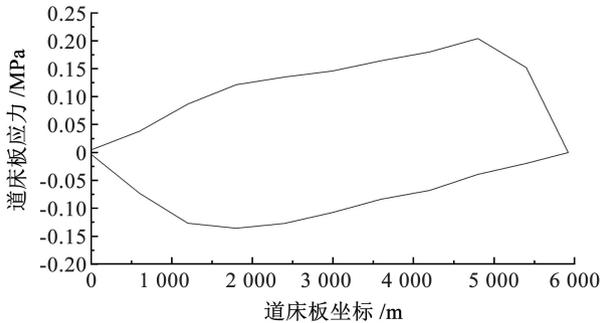


(b) 道床板位移

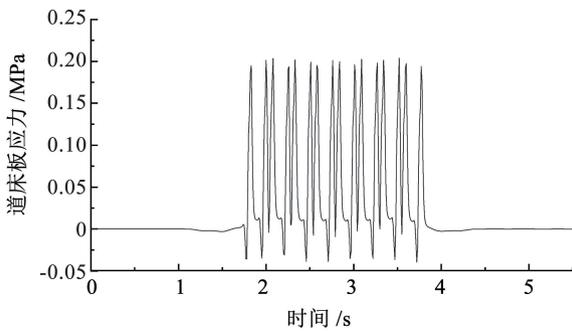
律,最大约0.21 MPa,由于混凝土抗拉强度较弱,道床板板底相对板顶受力状态更为不利。道床板分块铺设,因此在道床板两端应力为0 MPa,对于连续梁跨中位置处道床板,最大拉应力出现在道床板右侧限位凹槽附近,为0.22 MPa,最大压应力出现在道床板左侧限位凹槽附近,为0.13 MPa。列车荷载作用下道床板板底出现了8个应力循环,拉应力峰值基本相同,为0.22 MPa。



(a) 道床板应力包络图



(b) 全桥道床板不利位置板底应力包络图



(c) 道床板应力时程曲线

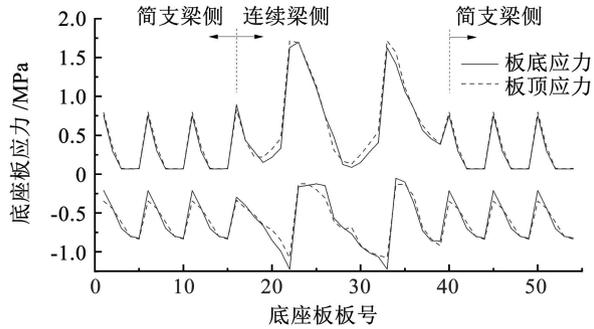
图9 道床板动应力

Fig.9 Dynamic stress of track plate

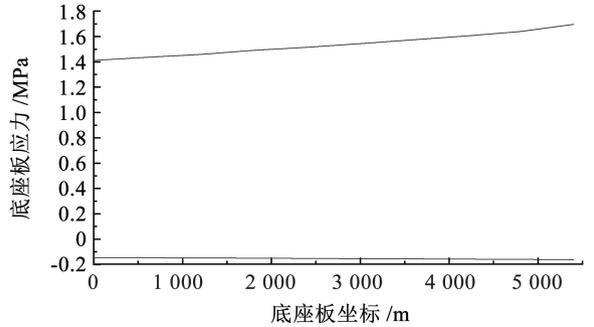
取每块底座板最易破坏处进行分析,得到的54块底座板应力包络图、全桥底座板受力最不利位置处板底应力包络图以及典型位置处底座板应力时程曲线如图10所示。

由图10可知,列车荷载作用下底座板板顶、板底的最大拉、压应力基本相同,分别为1.71 MPa和1.22 MPa,最大拉应力出现在连续梁主墩附近。列

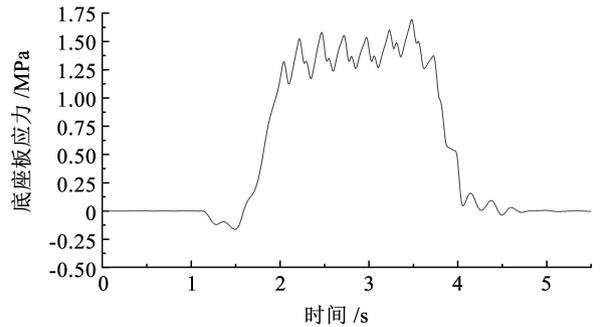
车荷载作用下连续梁跨中产生挠曲变形,使得其上底座板结构受压,因此桥梁跨中处底座板受到的压应力较大,拉应力较小。同时由于跨中桥梁的挠曲,使得桥墩附近梁体受拉,相应地其上底座板受拉应力较大,压应力较小。



(a) 底座板应力包络图



(b) 全桥底座板最不利位置板底应力包络图



(c) 底座板应力时程曲线

图10 底座板动应力

Fig.10 Dynamic stress of baseplate

## 4 桥上无砟轨道结构疲劳特性

### 4.1 结构疲劳寿命计算方法

对于无砟轨道混凝土结构,通过雨流法可计算出列车荷载作用下其应力循环次数和应力幅值,结合 Miner 法则和材料的 S-N 曲线,可以得到在多级循环应力作用下结构的损伤,当损伤数总和达到某一临界值时(根据 Miner 法则,临界值通常取1),即满足  $D \geq 1$  时,便可判断结构发生了疲劳破坏

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_{ij}} \quad (4)$$

式中:  $D_i$  为在应力水平  $S_i$  下的损伤数;  $n_i$  为应力  $S_i$  下试件的实际循环次数;  $N_{ij}$  为应力  $S_i$  下试件破坏时循环次数。

采用 Tepfer 混凝土结构单对数抗拉 S-N 疲劳方程:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_t} = 1 - b \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \right) \lg N \quad (5)$$

式中:  $b$  为抗拉疲劳强度折减系数,  $b$  取为  $0.061 1^{[4]}$ ;  $f_t$  为混凝土静载作用下的轴心抗拉强度, 在列车荷载作用下考虑到无砟轨道结构处于弯拉状态, 混凝土弯拉强度约为轴拉强度的  $1.5 \sim 2$  倍<sup>[20]</sup>, 本文  $f_t$  取  $1.5$ ;  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别为混凝土应力的最大和最小值;  $N$  为混凝土疲劳寿命。

对于钢轨结构, 采用日本铁道总研推导的  $60 \text{ kg/m}$  钢轨焊接部位 S-N 曲线, 即 Miner 组合法:

$$S = a - b \lg N \quad (6)$$

式中:  $S$  为钢轨弯曲应力幅值, MPa;  $N$  为钢轨达到失效所需的循环次数; 系数  $a$ 、 $b$  随着破坏概率而变化, 根据文献<sup>[21]</sup>可知, 当破坏概率为  $0.01\%$  时,  $a$  取  $472.01$ ,  $b$  取  $48.08$ 。

## 4.2 无砟轨道结构疲劳寿命

假定列车日通过量为  $220$  辆列车, 计算可得全桥范围内钢轨疲劳寿命曲线以及每块道床板和底座板最不利位置处的疲劳寿命曲线, 如图 11 所示。

由图 11 可知, 简支梁和连续梁上钢轨和道床板寿命曲线较为平滑, 寿命基本相同, 其中钢轨最不利位置处寿命为  $27.1 \text{ a}$ , 道床板在服役期内不会发生疲劳破坏。由于底座板通过剪力钉与梁面固结, 其疲劳寿命与桥梁有关, 桥梁跨中在列车荷载作用下弯曲, 而其上的底座板由于弯压使得底座板的压应力较大、拉应力较小, 因此跨中部分的底座板寿命较大。桥梁跨中的弯曲会导致桥墩附近桥梁拉长, 从而使桥墩附近的底座板受拉, 因此桥墩附近底座板寿命相较略小。桥梁跨中处底座板寿命较大, 桥墩附近的底座板寿命相较略小, 底座板在服役期内不会发生疲劳破坏。

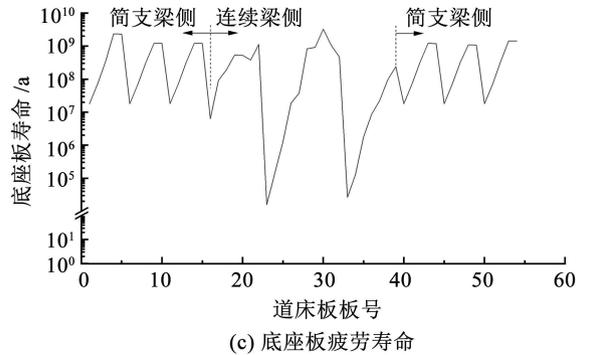
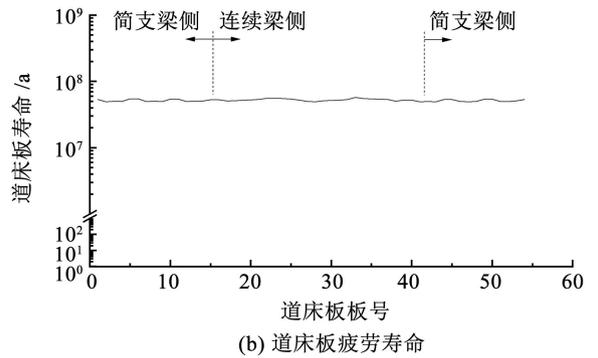
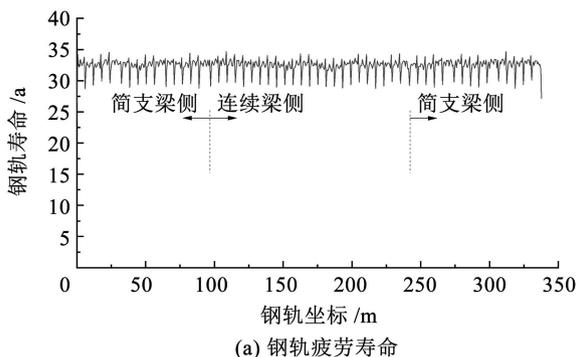


图 11 无砟轨道结构疲劳寿命

Fig. 11 Fatigue life of ballastless track structure

相对于简支梁, 连续梁跨度更大, 结构体系性对较柔, 在列车荷载作用下连续梁跨中的竖向位移比简支梁更大, 因此连续梁主墩处底座板寿命小于简支梁桥墩处。

## 5 结 论

本文通过建立考虑了桥梁、支座、底座板、道床板、扣件和钢轨等构件及结构层间非线性约束的连续梁-CRTS 双块式无砟轨道的一体化空间分析模型, 研究了大跨度连续梁-无砟轨道系统梁轨相互作用规律, 基于 Miner 准则和 S-N 曲线, 得出了无砟轨道结构在列车荷载作用下的疲劳特性, 主要结论如下:

1) 温度荷载作用下, 钢轨压应力极值位于简支梁和连续梁两端, 拉应力极值位于桥梁跨中; 挠曲荷载作用下, 钢轨拉应力极值位于简支梁和连续梁桥墩附近, 压应力极值位于桥梁跨中; 制动荷载作用下, 钢轨拉、压应力极值均位于简支梁和连续梁桥墩附近。钢轨纵向力由温度荷载控制, 最大应力为  $143.1 \text{ MPa}$ , 满足规范要求。

2) 列车动载作用下, 简支梁和连续梁上钢轨最大拉、压应力基本相同, 钢轨寿命曲线较为平滑, 钢轨最易破坏处寿命为  $27.1 \text{ a}$ 。

3) 列车动载作用下, 道床板板底最大拉应力大于板顶处, 位于道床板右侧限位凹槽附近, 全桥范围

内最大动拉应力出现在连续梁跨中位置,道床板寿命曲线较为平滑,在服役期内道床板不会发生疲劳破坏。

4)底座板最大动拉应力出现在连续梁主墩附近,且该处底座板结构最大拉、压应力基本相同。底座板寿命曲线与桥梁有关,寿命极小值出现在简支梁和连续梁桥墩附近,在服役期内底座板不会发生疲劳破坏。

## 参考文献

[1]戴公连,葛浩,邱远喜,等. 高铁大跨度连续梁桥上无砟轨道断板受力研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 100  
DAI Gonglian, GE Hao, QIU Yuanxi, et al. Study on broken plate force of ballastless track on high-speed railway long-span continuous beam bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2015, 43(9): 100

[2]LI Yongle, SU Yang, XIA Feilong, et al. Vertical dynamic response of the ballastless track on long-span plate-truss cable-stayed bridges[J]. Science China-Technological Sciences, 2015, 58(2): 236

[3]WENNER M, MARX S, KOCA M. Additional rail stresses due to long-term deformations of railway viaducts with ballastless track-model and reality[J]. Bautechnik, 2019, 96(9): 674

[4]徐庆元,林青腾,方子匀,等. 组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道疲劳特性[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 37  
XU Qingyuan, LIN Qingteng, FANG Ziyun, et al. Fatigue characteristics of longitudinally connected slab ballastless track on bridge under combined load[J]. China Railway Science, 2017, 38(6): 37

[5]朱志辉,冯乾朔,龚威,等. 考虑车-桥耦合的重载铁路钢桥局部疲劳分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(9): 36  
ZHU Zhihui, FENG Qianshuo, GONG Wei, et al. Local fatigue analysis of heavy-haul railway steel bridge based on train-bridge coupled vibration[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(9): 36

[6]李思云,杨荣山. CRTS-I型板式无砟轨道疲劳寿命研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(3): 34  
LI Siyun, YANG Rongshan. Research on fatigue life of CRTS-I slab ballastless track[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(3): 34

[7]SHAN Yao, WANG Binglong, ZHANG Jiawei, et al. The influence of dynamic loading and thermal conditions on tram track slab damage resulting from subgrade differential settlement[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 128: 105610

[8]ZHANG Jiawei, ZHU Shengyang, CAI Chengbiao, et al. Experimental and numerical analysis on concrete interface damage of ballastless track using different cohesive models[J]. Construction and Building Materials, 2021, 263: 120859

[9]POVEDA E, RENA C, LANCHAJ, et al. A numerical study on the fatigue life design of concrete slabs for railway tracks[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 455

[10]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: 42  
QU Cun. Study on the design theory and method of ballastless continuous welded rail on long-span bridge in high-speed railway

[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013: 42

[11]任娟娟. 桥上无砟轨道设计与维修理论[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 79  
REN Juanjuan. Structural design and maintenance theory of slab track on bridge[M]. Beijing: Science Press, 2015: 79

[12]闫斌,闫晗,黄杰,等. 高速铁路大跨斜拉桥上无砟轨道系统疲劳特性[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(11): 44  
YAN Bin, YAN Han, HUANG Jie, et al. Fatigue characteristics of ballastless track system on the long-span cable-stayed bridge of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(11): 44

[13]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): 12  
ZHANG Pengfei, GUI Hao, LEI Xiaoyan. Dynamic transfer law of braking force for CRTS III ballastless slab track on multi-span simply supported beam bridge[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(10): 12

[14]International Union of Railways. Track/bridge interaction recommendations for calculations: UIC 774-3[S]. Paris: International Union of Railways, 2001: 48

[15]闫斌. 高速铁路中小跨度桥梁与轨道相互作用研究[D]. 长沙:中南大学, 2013: 24  
YAN Bin. Interaction between continuously welded rail and medium/small bridges of high-speed railway[D]. Changsha: Central South University, 2013: 24

[16]翟婉明,夏禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2011: 174  
ZHAI Wanming, XIA He. Train-track-bridge dynamic interaction: theory and engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2011: 174

[17]中华人民共和国铁道部. 铁路无缝线路设计规范: TB 10015—2012[S]. 北京:中国铁道出版社, 2013: 59  
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design of railway continuous welded rail structures: TB 10015—2012[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013: 59

[18]国家铁路局. 铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017[S]. 北京:中国铁道出版社, 2017: 132  
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017: 132

[19]国家铁路局. 铁路轨道设计规范: TB 10082—2017[S]. 北京:中国铁道出版社, 2017: 26  
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of railway track: TB 10082—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017: 26

[20]贡金鑫. 现代混凝土结构基本理论及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009: 4  
GONG Jinxin. Basic theory and application of modern concrete structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 4

[21]刘建锋,魏庆朝. 高速铁路钢轨疲劳寿命预测[J]. 铁道工程学报, 2000(2): 31  
LIU Jianfeng, WEI Qingchao. Prediction of fatigue service life for rails of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000(2): 31