

持续高温环境下桥上 CRTSⅢ型无砟轨道热响应分析

张鹏飞¹, 余路¹, 江浩宇¹, 翟利华², 刘书语¹

(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. 同济大学道路与交通工程教育部重点试验室, 上海 201804)

摘要: 基于传热学理论和梁-板-轨相互作用机制, 构建了精细化热-结构耦合模型, 模拟桥上 CRTS Ⅲ型无砟轨道无缝线路在持续 2~10 d 高温环境下温度场、各结构组件纵向力及位移变化。结果表明: 随着持续高温时间增加, 轨道结构的温度持续升高, 且随着轨道结构垂向深度的增加, 热量积聚现象更明显; 随着持续高温时间的增加, 最大正温度梯度逐渐减小, 而最大负温度梯度逐渐增大。随着持续高温时间增加, 钢轨纵向力、各轨道结构纵向位移不断累积, 轨道板、自密实混凝土、底座板纵向应力随着加载天数的增加而减小。

关键词: 持续高温; 桥上 CRTS Ⅲ 型无砟轨道; 无缝线路; 热响应

中图分类号: U213.9

文献标志码: A

Thermal Response Analysis of the CRTS Ⅲ Type Ballastless Track on Bridge under Sustained High Temperature Environment

ZHANG Pengfei¹, YU Lu¹, JIANG Haoyu¹, ZHAI Lihua², LIU Shuyu¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Infrastructure Performance Monitoring and Guarantee, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: Based on the theory of heat transfer and the mechanics of beam-slab-rail interaction, a refined thermo-mechanical coupling model for the bridge-mounted CRTSⅢ type ballastless track seamless lines was established to simulate the temperature field, longitudinal forces, and displacement variations of the track structure components under sustained high temperature environment ranging from 2~10 days. The findings elucidate a direct correlation between the escalation of sustained high temperature periods and the continual increase in temperature within the track structure, with an accentuated phenomenon of heat accumulation at deeper vertical strata. Additionally, there is a progressive reduction in the magnitude of the maximum positive temperature gradient, while the maximum negative temperature gradient experiences a gradual increase. Moreover, the longitudinal forces exerted on the steel rails and the longitudinal displacements of the track structure exhibit a cumulative pattern with the extension of the high-temperature regimen. In contrast, the longitudinal stresses within the track slabs, self-compacting concrete layers and slab demonstrate a decremental trend in correlation with the duration days.

Key words: sustained high temperature; CRTSⅢ; ballastless track on the bridge; seamless track; thermal response

CRTS Ⅲ 型无砟轨道因其在安全性、经济性、耐久性以及施工维护方面的优势, 已逐步确立为我国新建高速铁路主型无砟轨道结构^{[1][2]}。夏季持续高温天气在我国较为普遍, 根据气象数据统计, 华东、华中区域七八月份气温超过 35℃, 持续时间超过 3 d 的占比 22%~38%^[3]。由于轨道结构导热性差的特性, 高温环境下其内部将产生巨大的无法释放的温度应力, 桥上 CRTS Ⅲ型无砟轨道无缝线路的稳定性和可靠性仍面临一系列挑战。当温度应力超过一定阈值时, 可能诱发轨道板翘曲、层间离缝以及轨道板和底座板的开裂现象^{[4][5]}, 甚至导致有的轨道结构层间离缝尺寸超过 3 mm^[6], 这些结构损伤不仅会影响轨道的

收稿日期: 2024-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52368063, 52178425); 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(1600223003)

正常使用,还会降低无砟轨道无缝线路的稳定性和可靠性,进而威胁到行车安全。因此,确保桥上无砟轨道无缝线路在持续高温环境下的安全服役,成为当前亟待解决的关键技术难题。在探讨无砟轨道温度效应方面,国内外学者进行了广泛的研究。戴公连等^{[7][8]}专注于桥上纵连式无砟轨道,进行了多季节的温度监测,揭示了其温度场的动态变化规律,并基于统计方法建立了温度荷载的分布模型。Zhou 等^[9]建立 CRTS III型板式无砟轨道在环境温度作用下的垂直变形分析模型,通过现场试验验证模型。Song^[10]等结合了气象数据和轨道多层结构特性,提出了无砟轨道结构热变形和界面分离分析方法。Li^[11]等在桥梁上设立了温度场监测系统,详细分析了影响混凝土结构性能的关键因素,并揭示了环境温度与轨道板温度之间的关系。Ou^[12]分析了暴露于大气环境下的无砟轨道结构温度场的分布规律。万章博^[13]通过试验手段,研究了太阳辐射对道床板表面温度的影响,并给出了相关的计算参数建议。Li 等^[14]基于混凝土的损伤塑性特性,模拟了轨道板在日温变化下的损伤过程。钟阳龙等^[15]研究了板轨在日温度变化条件下的变形和界面应力,以及初始温度和施工季节产生的影响。张鹏飞等^[16]对桥上轨道结构在复杂条件下的力学与变形特性进行了深入研究。Liu 等^[17]通过实验研究了自然环境下 CRTS III型无砟轨道的温度特性,并提出了相应的温度场分析方法及其对轨道结构的影响。也有学者^[18]通过构建有限元模型,计算了不同时间下温度梯度引起的轨道板翘曲应力和位移。目前学者对无砟轨道结构温度效应研究多以瞬态结构温差或单日温度曲线为加载工况,而对于持续高温对桥上无砟轨道无缝线路温度效应的分析,仍处于探索阶段。同时,当今温度荷载加载方法多是结构的整体温差,而未充分考虑实际非线性的温度梯度,这不足以反映桥上无砟轨道结构无缝线路的真实工作状态。

本研究通过探究无缝线路持续高温环境下的热响应,揭示其工作机理和性能变化规律,有助于提高无缝线路持续高温环境下的稳定性和可靠性。

1 传热学理论与模型建立

1.1 传热学理论

在日照下,桥上无砟轨道无缝线路的热传递主要有热辐射、热对流、热传导,可通过三维瞬态导热微分方程模拟其热传递特性

$$\frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: T 为结构表面温度; t 为时间,处于运营期的 ϕ 值为 0, ϕ 为内部热源强度; ρ , c , λ 分别为混凝土材料的密度,比热容,导热系数。

太阳辐射 q 由太阳直射、散射和地面反射辐射组成,共同影响桥上无砟轨道热效应。

$$I_{DM} = I_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \cos i \quad (2)$$

$$I_{DH} = 0.5 I_0 \sin h \frac{1 - P^m}{1 - 1.4 \ln P} \quad (3)$$

$$I_{R0} = R_e (I_{DN} \sin h + I_{D0}) \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

式中: I_{DM} , I_0 , I_{DH} , I_{R0} 分别为太阳常数,太阳直射辐射,太阳散射辐射,地面反射辐射; h , i , P , R_e 分别为太阳高度角,太阳入射角,大气透明度,地面短波反射率。

对流换热形成的热流密度 q_c 与对流热交换系数 h_c 的关系可通过相应的数学表达式来描述

$$q_c = h_c (T - T_a) \quad (5)$$

式中: T , T_a 分别为结构表面温度和空气温度。

表面热辐射能力 F_1 计算式为

$$F_1 = \varepsilon C_0 (273 + T)^4 \quad (6)$$

式中: ε 指物体的发射率, 混凝土一般取 0.88; C_0 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

对于倾角为 θ 的倾斜面, 其表面上所受到的大气辐射 $F_{a\theta}$ 计算式为

$$F_{a\theta} = \varepsilon_a C_0 (273 + T_a)^4 \cos^2 \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

式中: ε_a 为大气辐射系数。

对于倾角为 θ 的倾斜面, 其表面上所受到的地面辐射 $F_{b\theta}$ 计算式为

$$F_{b\theta} = C_0 (273 + T_a)^4 \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

混凝土表面至内部的热流密度 q_r 计算式为

$$q_r = a_1 (F_{a\theta} + F_{b\theta}) - F_1 = \varepsilon C_0 [(273 + T_a)^4 - (273 + T)^4] - \varepsilon (1 - \varepsilon_a) C_0 (273 + T_a)^4 \cos^2 \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

可改写成如下表达式

$$q_r = h_r (T_a - T) - q_{ra} \quad (10)$$

$$h_r = \varepsilon [4.8 + 0.075 (T_a - 5)] \quad (11)$$

$$q_{ra} = \varepsilon (1 - \varepsilon_a) C_0 (273 + T_a)^4 \cos^2 (\theta / 2) \quad (12)$$

式中: h_r 为辐射热交换系数; q_{ra} 为辐射换热中与 T 无关的一个分项。

推算可得传热边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h (T_a' - T) \quad (13)$$

式中: T_a' 为综合大气温度。

$$h = h_c + h_r \quad (14)$$

$$T_a' = T_a + (a_s I_s - q_{ra}) / h \quad (15)$$

式中: a_s 为表面短波辐射吸收率; I_s 为太阳总辐射; h 为综合换热系数,

1.2 空间精细化有限元模型

基于传热学理论和梁-板-轨相互作用原理, 采用 Ansys 有限元软件构建了考虑 CRTS III 型板式无砟轨道各细部结构尺寸和力学特性的 7 跨简支梁桥上无缝线路热-结构耦合模型, 如图 1 所示。采用间接热-应力耦合分析方法, 即将热分析结果映射为结构体荷载, 实现热分析与结构分析的耦合。模型各结构参数如表 1 所示。

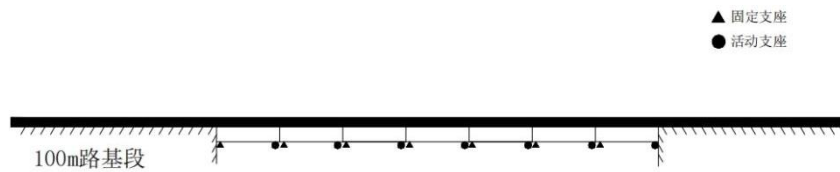


图 1 7×32 m 简支梁桥结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a 7×32 m simply supported beam bridge model

表 1 结构参数表

Tab.1 Table of structural parameter

结构名称	混凝土强度等级	弹性模量/Pa	密度/ (kg/m ³)	泊松比	线膨胀系数/°C
钢轨	—	2.1×10^{11}	7 830	0.3	1.18×10^{-5}
轨道板	C60	3.65×10^{10}	2 500	0.2	1×10^{-5}
自密实混凝土层	C40	3.40×10^{10}	2 500	0.2	1×10^{-5}
底座板	C40	3.40×10^{10}	2 500	0.2	1×10^{-5}
梁体	C50	3.55×10^{10}	2 500	0.2	1×10^{-5}
土工布	—	7.8×10^9	1 300	0.47	1×10^{-5}

模型采用了 BEAM188 梁单元（一种有限元梁单元）模拟 CHN60 钢轨，全线扣件采用 WJ-8 型常阻力扣件。采用 SOLID70 实体单元（一种有限元实体单元）模拟轨道板、自密实混凝土、简支箱梁结构。

1.3 模型验证

为验证模型准确性，采用文献[22]中的工况 3 进行加载，计算得到桥上轨道结构纵向力对比如表 2 所示。

从表 2 可知，相同工况 3 下，本文得到的轨道板、自密实混凝土最大纵向力与文献[21]相近，误差较小，模型准确性良好。

表 2 结构纵向力计算结果对比

Tab. 2 Calculation results comparison of longitudinal force of the structure

工况	本文计算结果/MPa	文献[22]计算结果/MPa
轨道板纵向力	-3.470	-3.353
自密实混凝土纵向力	1.992	1.873

2 环境参数与初始条件

气象学定义日最高气温超过 35 °C 为高温，连续 3 d 则触发黄色预警^[22]。基于此，对于桥上 CRTS III 型板式无砟轨道的持续高温定义为连续 3 d 日最高气温在 35 °C 以上，同时日温差小于 10 °C。选取南昌市境内某桥上 CRTS III 型板式无砟轨道无缝线路为研究对象，以 2019 年 7 月 25 日实测数据为例，最高和最低气温分别为 37，28 °C，模拟循环加载 10 d。

日气温变化模拟示意图如图 2 所示。为避免初始温度选取不当造成影响，设定的初始条件为施加边界条件后首个计算日的结果，后续分析仅基于从第 2 天起的温度场计算数据进行。

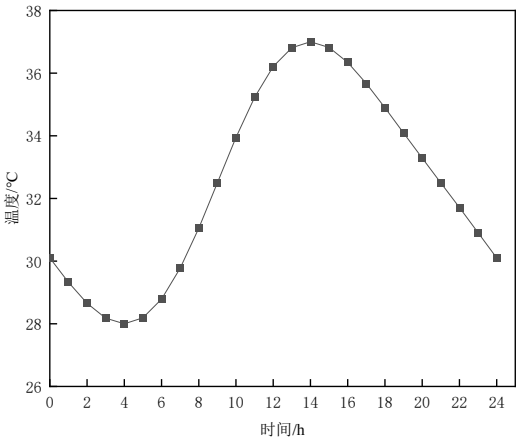


图 2 日气温变化模拟示意图

Fig. 2 Diagram of daily ambient temperature change

3 温度场规律分析

3.1 轨道结构温度变化规律

持续高温环境下垂向温度变化时程曲线如图 3 所示。为了便于分析，选取每天 6:00 与 16:00 典型时刻进行分析，持续高温环境下 6:00 与 16:00 时垂向温度变化曲线如图 4 所示。

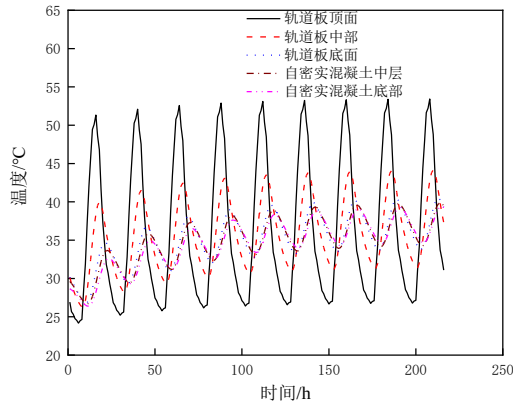
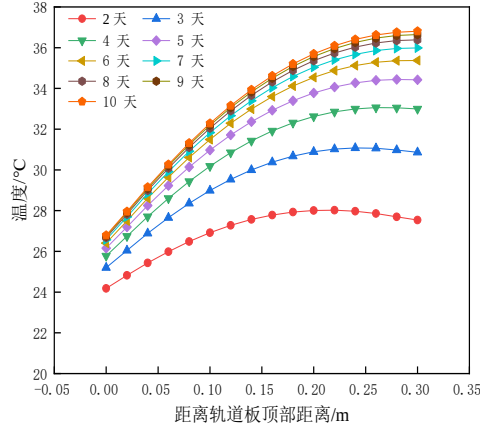
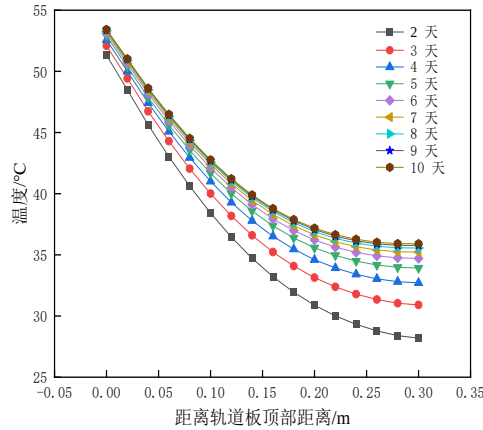


图 3 垂向温度变化时程曲线

Fig. 3 Vertical temperature variation chronogram



(a) Vertical temperature distribution at 6:00



(b) Vertical temperature distribution at 16:00

图 4 持续高温环境下垂向温度变化曲线

Fig. 4 Vertical temperature variation curve under sustained high temperature environment

由图 3、图 4 可知，距离轨道板顶面越深，温度变化曲线的波动幅度受持续高温时间影响越大。其中，由于轨道板顶面直接与外界环境接触，故受持续高温时间影响最小，温度最大值增加达 3.9 °C；温度最小值增加达 2.5 °C；轨道板中部温度最大值增加 7.5 °C，温度最小值增加 5.1 °C；轨道板底部温度最大值增加 9.5 °C，温度最小值增加 7.0 °C；混凝土中部温度最大值增加 10.0 °C，温度最小值增加 7.6 °C；混凝土底部温度最大值增加 10.7 °C，温度最小值增加 8.3 °C。

综上所述，随着持续高温的时间增加，无砟轨道无法在当天完成热温差循环，结构温度持续升高。随着轨道结构垂向深度的增加，热量积聚现象更为明显，温度升高幅度更大，温度升高幅度在 2.5~10.7 °C。

3.2 温度梯度变化规律

持续高温环境下垂向温度梯度变化时程曲线如图 5 所示。由图 5 与表 3、表 4 可知：随着循环天数的增加，最大负温度梯度逐渐增大，相较于第 2 天，第 10 天轨道板中部最大负温度梯度增大 82.88%，轨道板底面最大负温度梯度增大 135.36%，自密实混凝土底面最大负温度梯度增大 250.37%；随着循环周期的累积，最大正温度梯度呈现递减趋势。相较于第 2 天，第 10 天轨道板中部最大正温度梯度减小 15.85%，轨道板底面最大正温度梯度减小 20.97%，自密实混凝土底面最大正温度梯度减小 25.76%。随着轨道结构纵深方向的延伸，其温度梯度逐渐减小。这一现象主要归因于轨道结构自身传热效率的局限性，导致了温度梯度变化曲线的延迟现象，特别是对于自密实混凝土而言，其温度梯度的变化相较于轨道板滞后了约两小时。

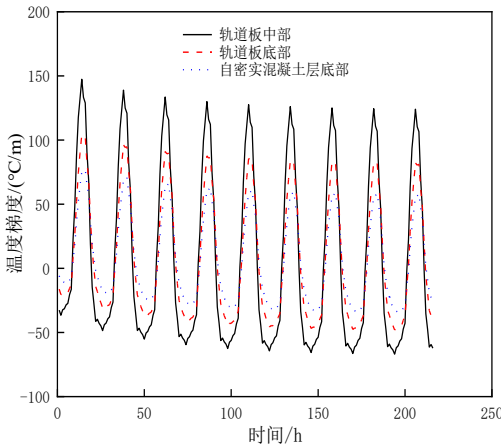


图 5 持续高温环境下垂向温度梯度变化时程曲线

Fig. 5 Chronogram of vertical temperature gradient variation under sustained high temperature environment

表 3 不同持续天数影响下负温度梯度极值

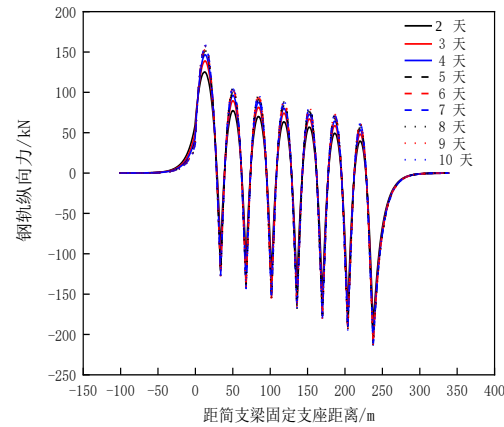
Tab.3 Maximum extremes of negative temperature gradients influenced by varying durations °C/m			
持续天数/d	轨道板中部温度梯度	轨道板底面温度梯度	自密实混凝土底面温度梯度
2	-36.57	-20.42	-9.53
3	-48.53	-30.78	-17.86
4	-55.17	-36.97	-23.36
5	-59.55	-41.12	-27.11
6	-62.46	-43.87	-29.61
7	-64.36	-45.67	-31.23
8	-65.58	-46.84	-32.28
9	-66.37	-47.58	-32.96
10	-66.88	-48.06	-33.39

表 4 不同持续天数影响下正温度梯度极值

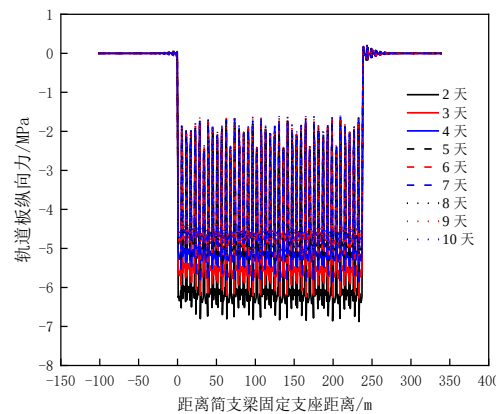
Tab.4 Maximum extremes of positive temperature gradients influenced by varying durations °C/m			
轨道板中部温度梯度	轨道板底面温度梯度	自密实混凝土底面温度梯度	轨道板中部温度梯度
2	147.40	103.94	75.11
3	138.88	96.18	68.43
4	133.51	91.12	63.88
5	129.94	87.73	60.81
6	127.58	85.50	58.79
7	126.05	84.05	57.48
8	125.07	83.12	56.64
9	124.44	82.53	56.10
10	124.04	82.14	55.76

4 热响应分析

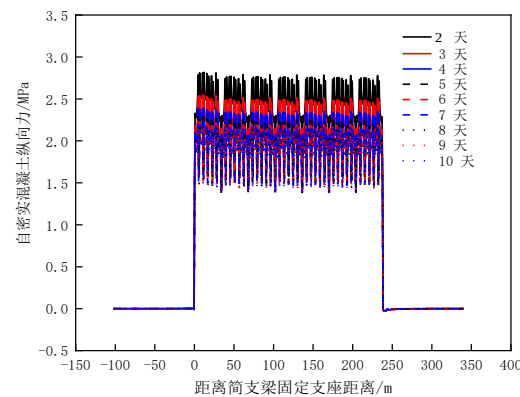
在单日高温时段，每日的 16:00 轨道板所受应力会达到顶峰，同时其轨道结构中的无缝线路也会经历显著的受力和位移增大。因此，选定 16:00 这一时间点，来详细分析持续高温环境下无砟轨道结构无缝线路的纵向应力和变形情况。图 6 展示了各构件纵向应力与位移的分布规律，而关于这些构件纵向应力和位移的数据，具体可参见表 5 和表 6。 F_r 为钢轨最大纵向力，正值为拉力，负值为压力； S_{ts} ， S_{sc} ， S_{bp} 分别为轨道板，自密实混凝土层，底座板最大纵向应力； D_r ， D_{ts} ， D_{sc} ， D_b 分别为钢轨，轨道板，自密实混凝土层，桥梁梁体最大纵向位移。



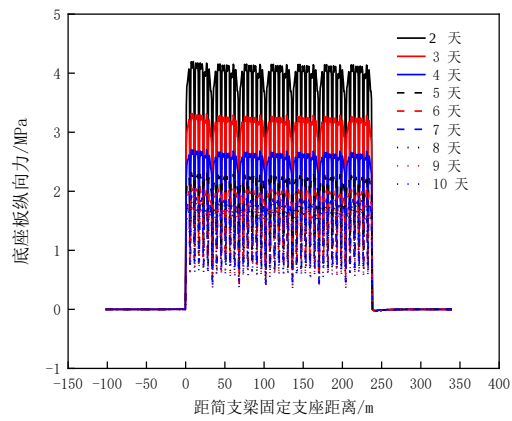
(a) 钢轨纵向力



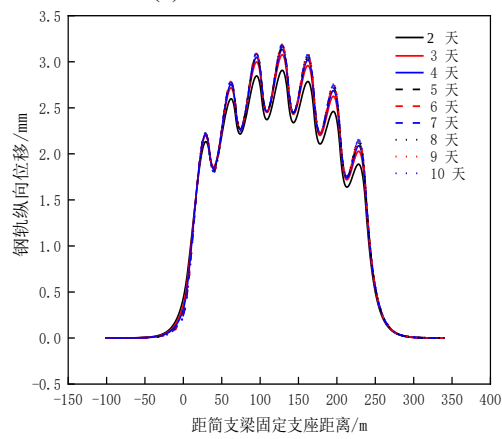
(b) 轨道板纵向应力



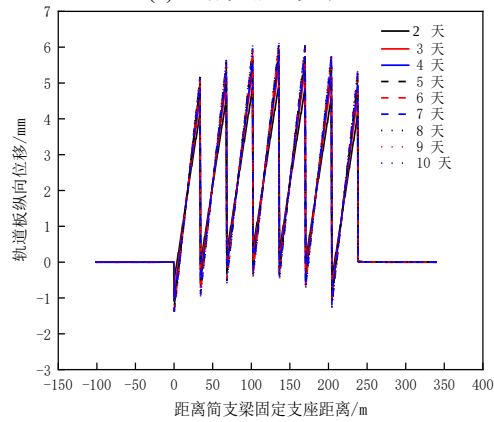
(c) 自密实混凝土纵向应力



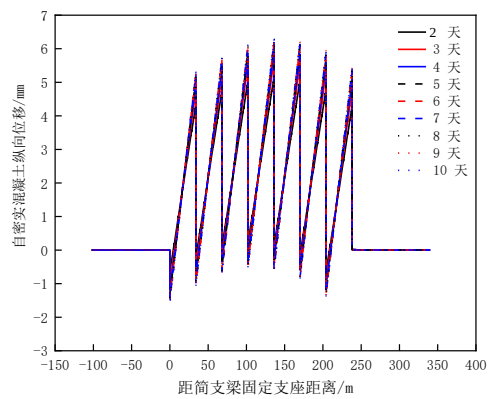
(d) 底座板纵向力



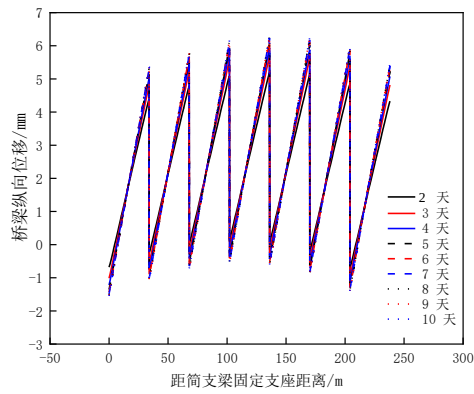
(e) 钢轨纵向位移



(f) 轨道板纵向位移



(g) 自密实混凝土纵向位移



(h) 桥梁纵向位移

图 6 持续高温环境下轨道结构纵向应力与位移

Fig. 6 Longitudinal stress and displacement of track structure under sustained high temperature environment

表 5 各构件纵向应力最大值

Tab.5 Maximum longitudinal stress values of various components

持续天数/d	F_t/kN	S_{ts}/MPa	S_{scc}/MPa	S_{bp}/MPa
2	125.254/-190.319	-6.874	2.817	4.197
3	138.940/-203.182	-6.270	2.547	3.320
4	146.533/-208.449	-5.854	2.391	2.705
5	151.102/-211.102	-5.589	2.298	2.320
6	153.947/-212.592	-5.421	2.240	2.080
7	155.719/-213.490	-5.315	2.206	1.931
8	156.855/-214.032	-5.248	2.185	1.836
9	157.575/-214.366	-5.206	2.171	1.778
10	158.032/-214.576	-5.179	2.163	1.740

表 6 各构件纵向位移最大值

Tab.6 Maximum longitudinal displacement values of various components

持续天数/d	D_r	D_{ts}	D_{scc}	D_b
2	2.907	4.987	5.124	5.188
3	3.077	5.510	5.633	5.686
4	3.135	5.784	5.895	5.937
5	3.161	5.946	6.049	6.084
6	3.175	6.046	6.143	6.173
7	3.183	6.109	6.202	6.230
8	3.188	6.149	6.240	6.265
9	3.191	6.174	6.264	6.288
10	3.193	6.189	6.278	6.302

由图 6 和表 5, 表 6 可知, 持续高温作用下, 随着加载时长的增加, 桥上无砟轨道无缝线路各轨道构件纵向受力与位移变化趋势相似, 仅在极值上存在变化。其中, 随着加载天数的持续累积, 钢轨纵向力与整个轨道结构的位移均呈现出累积增长的趋势。然而, 与此相反, 轨道板、自密实混凝土、底座板纵向应力却逐渐减小, 这与加载天数的增加呈负相关。由于轨道板上表面直接与外部环境接触, 故表面温度最大值相对稳定, 几乎不受加载天数的影响。然而下部结构温度最大值却随着持续天数的不断增加而增加, 这种变化从轨道板至底座板逐层加剧, 导致层间温差逐渐缩小。因此, 轨道板、自密实混凝土层和底座板纵向应力也随之减小。

由于初始条件的显著影响, 在加载的初始阶段, 各轨道结构在受力和变形方面均表现出较大的变化幅度。然而, 随着持续天数的持续增加, 这些变化幅度逐渐趋于稳定, 显示出一种减缓的趋势。以第 2 天、第 6 天、第 10 天计算结果为例, 在相同的时间间隔下, 第 6 天钢轨纵向力, 轨道板应力相较于第 2 天分别增加了 23.2%, 21.1%, 而第 10 天相较于第 6 天

仅增加了 2.60%, 4.46%; 第 6 天钢轨纵向位移、轨道板位移相较于第 2 天增加了 9.22%, 21.2%, 而第 10 天相较于第 6 天仅增加了 0.57%, 2.37%。

综上所述,在持续高温环境下,桥上 CRTS III 型无砟轨道无缝线路钢轨纵向力、各轨道组成部分位移表现出不断累积增长现象,轨道板、自密实混凝土、底座板纵向应力随着加载天数的增加而不断减小,故夏季高温时段需要加强对无砟轨道无缝线路的监测与养护,采取相应的热应力缓解措施以保护轨道结构基础设施。

5 结语

1) 随着持续高温时间增加,无砟轨道无法在当天完成热温差循环,轨道结构温度持续升高。随着轨道结构垂向深度的增加,热量积聚现象更为明显,温度升高幅度更大,温度升高幅度在 2.5~10.7 °C。

2) 持续高温天数的增加,最大正温度梯度呈现减小趋势,减小比例极值为 25.76%;最大负温度梯度则逐渐增大,增大比例极值为 250.37%。温度梯度变化在自密实混凝土中比轨道板滞后 2 h。

3) 随着持续高温加载天数的不断增加,钢轨纵向力与各轨道结构纵向位移不断累积,呈现不断增加的趋势,轨道板、自密实混凝土、底座板纵向应力随着加载天数的增加而不断减小,故夏季持续高温需要加强对无砟轨道无缝线路的监测与养护。

参考文献:

- [1]陈泽林,蔡小培,赵磊,等.基于热力耦合的桥隧过渡段无砟轨道温度效应分析[J].铁道学报,2023,45(4):84-91.
CHEN Z L,Cai X P,Zhao L,et al.Analysis of temperature effect of ballastless track in bridge-tunnel transition section based on thermo-mechanical coupling[J].Journal of the China Railway Society,2023,45(4),84-91.
- [2]冯青松,廖春明,孙魁,等.温度荷载对连续梁桥上无砟轨道变形特性影响分析[J].铁道科学与工程学报,2021,18(9):2280-2288.
FENG Q S,LIAO C M,Sun K,et al.Influence of complex temperature load on ballastless track on continuous beam bridge[J].Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(9),2280-2288.
- [3]林超.持续高温对 CRTS II 型板式无砟轨道温度场影响的试验研究[J].铁道建筑,2016(5):15-18.
Lin C.Experimental study on the influence of sustained high temperature on temperature field of CRTS II slab-type ballastless track [J].Railway Construction,2016,(5),15-18.
- [4]宋安祥,姚国文,刘佳伟,等.温度与列车荷载作用下高速铁路无砟轨道力学性能研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(5):125-146.
SONG A X,Yao G W,LIU J W,et al.Research progress on mechanical properties of high-speed railway ballastless track under temperature and vehicle load[J].Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English),2023,45(5),125-146.
- [5]陈龙,陈进杰,王建西.CRTS II 型板式无砟轨道层间传力规律及离缝破坏研究[J].铁道学报,2018,40(8):130-138.
CHEN L,Chen J J,WANG J X. Study on stress transfer and interface damage of CRTS II slab ballastless track[J].Journal of the China Railway Society,2018,40(8),130-138.
- [6]姜海楼.高铁无砟轨道 II 型板高温病害防治及结构优化研究[D].东南大学,2022.
JIANG H L.Study on deterioration prevention and structural optimization of CRTS II track slab system under high temperature[D]. Southeast University,2022.
- [7]戴公连,温学松,苏海霆.寒冷季节桥上无砟轨道横竖向温度梯度研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(7):1-5.
DAI G L,WEN X H,SU H T .Study on horizontal and vertical temperature gradient of ballastless track on bridge

- in cold season[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2015,43(7),1-5.
- [8]戴公连,苏海霆,刘文硕,等.高温季节桥上纵连板式无砟轨道的温度分布[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(4):1073-1080.
- DAI G L,SU H T,LIU W S,et al. Temperature distribution of longitudinally connected ballastless track on bridge in summer[J]. Journal of Central South University ((Natural Science Edition),2017,48(4),1073-1080.
- [9]ZHOU J Z,LUO Y Y,LV G S and XIONG Y L.Simulation study on vertical deformation of CRTS III slab track under ambient temperature and its upgrade to“Green Maintenance”[J].Applied Sciences,2021,11:7830.
- [10]SONG L,LIU H,CUI C,et al.Thermal deformation and interfacial separation of CRTS II slab ballastless track multilayer structure used in high-speed railways based on meteorological data[J].Construction and Building Materials,2020,237(7):117528.
- [11]LI D S,Dong L,Jiang Z,et al.Experimental study on temperature load features of CRTS II slab-type ballastless track structure on bridge[J]. Railway Engineering,2015.
- [12]OU Z M,SUN L,CHENG Q Q.Analysis on temperature field of ballastless track structure based on meteorological data[J].Journal of the China Railway Society,2014,36(11):106-112.
- [13]万章博,杨荣山,任勃,等.太阳辐射对 CRTS I 型双块式无砟轨道道床板表面温度影响的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2015,12(1):6.
- Wan Z B,YANG R S,Ren B,et al. Experimental study on impact of solar radiation intensity on the surface temperature of deck slab for CRTS I twin-block ballastless track [J].Journal of Railway Science and Engineering,2015,12(1):6.
- [14]LI Y,ZHAO C,ZHU S.Damage analysis of the CRTS III ballastless track slab under temperature load and vehicle load[J].Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2018,42(6):956-961.
- [15]Cai X P,Luo B C,Zhong Y L,et al. Arching mechanism of the slab joints in CRTS II slab track under high temperature conditions[J].Engineering Failure Analysis,2019,98:95-108.
- [16]张鹏飞,姚典,涂建,等.双向温梯荷载下简支梁桥上 CRTS II 型板受力变形[J]. 北京交通大学学报,2021,45(1):32-38.
- ZHANG P F,Yao D,Tu J,et al.Stress and deformation of CRTS II track slab on simply supported beam bridge under bidirectional temperature gradient load[J].Journal of Beijing Jiaotong University,2021,45(1),32-38.
- [17]LIU H B,SONG L,LIU R,YU Z W.Temperature field and thermal effect analysis of CRTS III ballastless track structure under the outdoor natural environment[J].Construction and Building Materials,2022,358:129383.
- [18]杨静静,张楠,高芒芒,等.CRTS II 型无砟轨道温度翘曲变形及其对车线动力响应的影响[J]. 工程力学,2016,33(4):210-217.
- YANG J J,ZHANG N,GAO M M,et al.Temperature warping and it's impact on train-track dynamic response of CRTS II ballastless track[J].Engineering Mechanics,2016,33(4),210-217.
- [19]刘钰,赵国堂.CRTS II 型板式无砟轨道结构层间早期离缝研究[J].中国铁道科学,2013,34(4):1-7.
- LIU Y,ZHAO G T..Analysis of early gap between layers of CRTS II slab ballastless track structure[J]. China Railway Science,2013,34(4):1-7.
- [20]王森荣,孙立,李秋义,等.无砟轨道轨道板温度测量与温度应力分析[J].铁道工程学报,2009,26(2):52-55.
- Wang S R.,SUN L,LI Q Y,et al.Temperature measurement and temperature stress analysis of ballastless track slab[J]. Journal of Railway Engineering Society,2009,26(2),52-55.
- [21]桂昊.桥上 CRTS III 型板式无砟轨道无缝线路纵向力研究[D].南昌:华东交通大学,2019.
- GUI H. Study on longitudinal force of CRTS III slab track CWR on bridge[D].Nanchang:East China Jiaotong University,2019.

[22]康维新,陈帅,魏春城,等.无砟轨道温度场计算及持续高温天气影响分析[J].铁道学报,2019,41(7):127-134.

Kang W X,CHEN S,WEI C C,et al.Temperatures of ballastless track and effect of continuous hot weather.[J].Journal of the China Railway Society,2019,41(7),127-134.



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



通信作者: 翟利华(1979—), 男, 正高级工程师, 博士研究生, 研究方向为轨道交通工程绿色建造技术。E-mail: zhailihua@gmdi.cn。