

文章编号: 1674—8247(2021)01—0022—04  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.01.005

## 严寒地区 CRTS I 型板式无砟轨道温度场分析

赵丽华<sup>1,2</sup> 赵世嘉<sup>1</sup> 张吉松<sup>1</sup> 刘思桐<sup>3</sup>

(1. 大连交通大学, 辽宁 大连 116028; 2. 北京交通大学, 北京 100044;  
3. 大悦城控股集团股份有限公司, 沈阳 110000)

**摘 要:**为研究严寒地区夏季、冬季极端天气条件下, CRTS I 型板式无砟轨道温度场分布问题, 应用 Abaqus 有限元软件, 基于气象数据和热传导理论, 建立 CRTS I 型板式无砟轨道三维瞬态温度场计算模型, 分析板式无砟轨道横、竖向温度场分布情况。得到以下结论: (1) CRTS I 型板式无砟轨道瞬时温度场呈对称分布, 轨道板内部温度场变化情况滞后于大气温度变化, 其变化规律与大气温度变化规律相似, 按正弦变化; (2) CA 砂浆的热阻隔作用, 使得无砟轨道温度场在轨道板与 CA 砂浆接触面发生温度跳跃现象; (3) 无论冬季还是夏季, 轨道板最大正温度梯度均出现在下午 13:00 时, 且夏季轨道板最大正温度梯度比冬季大, 夏季最大正温度梯度为 73.2 °C/m, 冬季最大正温度梯度 30 °C/m; (4) CRTS I 型板式无砟轨道竖向温度呈非线性分布, 且随着深度增加温度变化减小。

**关键词:**无砟轨道; 严寒地区; 温度场

**中图分类号:**U213.2<sup>+</sup>44 **文献标志码:**A

## Analysis on Temperature Field for CRTS I Slab Ballastless Track in Severely Cold Region

ZHAO Lihua<sup>1,2</sup> ZHAO Shijia<sup>1</sup> ZHANG Jisong<sup>1</sup> LIU Sitong<sup>3</sup>

(1. Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
3. Joy City Holdings Northeast Region Company, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** In order to study the temperature field distribution of CRTS I slab ballastless track under extreme weather conditions in summer and winter in a severely cold region, this paper establishes a three-dimensional transient temperature field calculation model of CRTS I slab ballastless track with the finite element software Abaqus based on meteorological data and heat conduction theory, and analyzes the horizontal and vertical temperature field distribution of slab ballastless track. The conclusions are as follows: (1) The transient temperature field of CRTS I slab ballastless track is symmetrically distributed, and the change of temperature field inside the track slab lags behind the change of atmospheric temperature, and its change law is similar to that of atmospheric temperature, which changes according to sine. (2) The thermal barrier effect of CA mortar makes the temperature field of ballastless track jump at the interface between track slab and CA mortar. (3) The maximum positive temperature gradient of the track slab appears at 13:00 in both winter and summer, which is 73.2 °C/m in summer and 30 °C/m in winter. (4) The vertical temperature distribution of CRTS I slab ballastless track is nonlinear, and the change of temperature decreases with the increase of

收稿日期: 2020-10-09

作者简介: 赵丽华(1981-), 女, 副教授。

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究支持项目(JDL2019018); 大连市青年科技之星项目支持计划(2017RQ137); 轨道工程北京市重点实验室基金项目(2017GDGC-1)

引文格式: 赵丽华, 赵世嘉, 张吉松, 等. 严寒地区 CRTS I 型板式无砟轨道温度场分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 22-25.

ZHAO Lihua, ZHAO Shijia, ZHANG Jisong, et al. Analysis on Temperature Field for CRTS I Slab Ballastless Track in Severely Cold Region[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 22-25.

depth.

**Key words:** ballastless track; severely cold region; temperature field

CRTS I 型板式无砟轨道是我国高速铁路的主要结构形式之一,实现了高速列车运行的安全性、平稳性和舒适性<sup>[1]</sup>要求。轨道板作为混凝土结构,长期直接暴露在自然环境当中,在太阳辐射下,受混凝土传热性能影响,轨道板内部散热慢温度高,导致轨道板温度分布不均,产生温度应力,从而引起轨道板变形。温度应力影响主要分为两个方面:一是轴向伸缩;二是在温度应力作用下轨道板发生板角翘曲或板中上拱。因此,掌握严寒地区 CRTS I 型板式无砟轨道的温度场变化规律,可为 CRTS I 型板式无砟轨道在严寒地区的温度荷载研究提供参考。

在无砟轨道温度场分析中,杨荣山<sup>[2]</sup>等实地测验成都地区 CRTS I 型双块式轨道冬季温度特性,得出了成都地区冬季 CRTS I 型双块式无砟轨道温度荷载的取值;欧祖敏<sup>[3]</sup>等利用气象数据资料,推导出可用于无砟轨道结构温度场计算的有效方程;钟阳龙<sup>[4]</sup>等基于内聚力模型,建立 CRTS II 型板式轨道层间剪切破坏三维有限元分析模型,分析温度力作用下 CRTS II 型板式轨道结构层间剪切破坏过程及参数影响规律;郭超<sup>[5]</sup>等通过模拟 CRTS II 型板式轨道瞬态温度场,得到严寒地区冬、夏两季 CRTS II 型板式轨道温度特性作用机理;赵勇<sup>[6]</sup>等通过监测哈大高速铁路 CRTS I 型板式轨道温度场及变形情况,认为温差是影响轨道板翘曲情况的最大因素;周小勇<sup>[7]</sup>等基于气象学和传热学原理,建立 CRTS III 型板式轨道瞬态分析模型,认为风速在轨道表面 10 cm 范围内对轨道板温度场影响较大。现阶段大多数研究主要针对具体路段实测数据进行分析,而针对严寒地区 CRTS I 型板式无砟轨道温度场分布规律的理论研究较少。本文根据气象学原理及热传导理论,建立基于气象数据的无砟轨道温度场模型,研究冬季、夏季极端温度条件下 CRTS I 型板式无砟轨道温度场,从而为确定无砟轨道在严寒地区的温度荷载提供理论依据。

## 1 计算模型与材料参数

### 1.1 无砟轨道计算模型

本文以严寒地区 CRTS I 型板式无砟轨道为研究对象,根据热传导理论与有限元法<sup>[8]</sup>,建立 CRTS I 型板式无砟轨道有限元模型,如图 1 所示。为消除无砟轨道结构边界效应,模型纵向选取 3 块板长度。

模型中钢轨采用 CHN60 钢轨,轨距为 1 435 mm,



图 1 CRTS I 型板式无砟轨道结构图

采用实体单元模拟;扣件采用离散支撑的线弹性元件,即采用 Cartesian 连接模拟<sup>[9]</sup>;无砟轨道基础根据弹性地基梁理论<sup>[10]</sup>,用线弹性弹簧模拟路基;轨道板、CA 砂浆层及底座板均采用实体单元进行模拟;CA 砂浆层与轨道板采用粘结接触。温度场分析时,采用 DC3D8 单元进行分析,模型共 57 392 个单元。

### 1.2 计算参数

CRTS I 型板式无砟轨道温度场为瞬态温度场,需要确定结构的参数包括:弹性模量  $E$ 、泊松比、热膨胀系数、比热容  $c$  及导热系数  $\lambda$ ,结构材料参数如表 1 所示。

表 1 轨道结构材料参数表

结构 部件	弹性模量 /MPa	泊松比	热膨胀系数 /( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	比热容 /[J/(kg $\cdot^{\circ}\text{C}$ )]	导热系数 /[J $\cdot(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{k})^{-1}$ ]
轨道板	$3.65 \times 10^4$	0.2	$1.0 \times 10^{-5}$	925	1.54
CA 砂浆	300	0.25	$1.8 \times 10^{-5}$	1 352	1.40
底座板	$3.4 \times 10^4$	0.2	$1.0 \times 10^{-5}$	925	1.54

## 2 CRTS I 型板式无砟轨道温度场分析

选取 2019 年哈尔滨夏季、冬季极端天气作为计算数据,夏季最高气温发生在 2019 年 6 月 24 日,为  $21^{\circ}\text{C} \sim 33^{\circ}\text{C}$ ,平均风速 3 m/s;冬季最低气温发生在 2019 年 12 月 30 日,为  $-29^{\circ}\text{C} \sim -22^{\circ}\text{C}$ ,平均风速 3.2 m/s。

### 2.1 初始温度场

为符合实际情况,本研究选取极端天气前一日的气象资料,模拟分析温度场的计算结果作为初始温度场,此方法可提高计算结果的稳定性和准确度。因此,所计算结果皆为两日内温度变化数据。

### 2.2 横向温度场分析

以 2019 年夏季 6 月 23 日、冬季 12 月 29 日气温建立初始温度场,计算 6 月 24 日和 12 月 30 日无砟轨道典型时刻温度分布,无砟轨道纵向中心横截面温度

场分布云图,如图2所示。

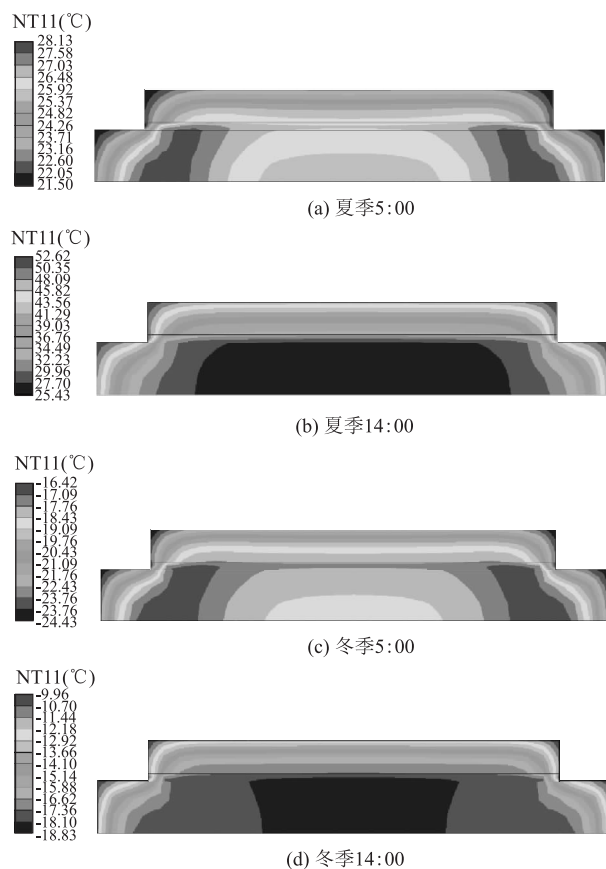


图2 典型时刻无砟轨道横向温度场图

由图2可知,无论夏季还是冬季,CRTS I型板式无砟轨道横向温度场皆呈对称分布,且相同时刻无砟轨道内部温度场变化规律一致:凌晨时无砟轨道结构温度场表现为“内热外冷”,无砟轨道结构内部温度高于轨道结构表面温度,而在下午表现为“内冷外热”,无砟轨道结构内部温度低于轨道结构表面温度。由于无砟轨道板边接受太阳辐射较多,因此无砟轨道结构板边温度变化比板中温度变化更为明显。

轨道板与底座板皆为混凝土材料,按热传导理论分析,无砟轨道结构温度场由上而下应为连续分布,但对比图2(a)与图2(c)、图2(b)与图2(d)可以看出,在同一时刻,轨道板温度场与底座板温度场产生明显差异。这是由于CA砂浆充填层阻隔了热量的竖向传递,CA砂浆的热阻隔作用,使得无砟轨道温度场沿深度方向产生跳跃现象。由此可见,在相同气候条件下,相较于温度场变化较为稳定的底座板,轨道板温度梯度变化更大,受温度荷载作用影响更大,更易受到大气温度变化的影响。

取轨道板顶面、底面中心处不同时刻温度,轨道板温度梯度变化情况,如图3、图4所示。

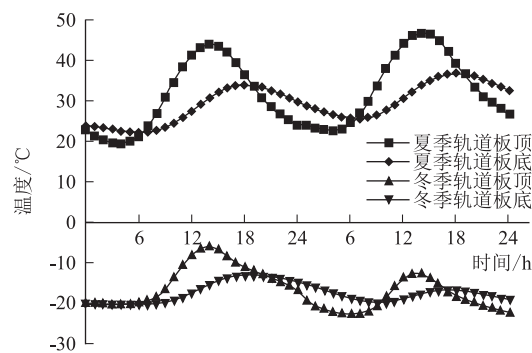


图3 轨道板温度随时间变化曲线图

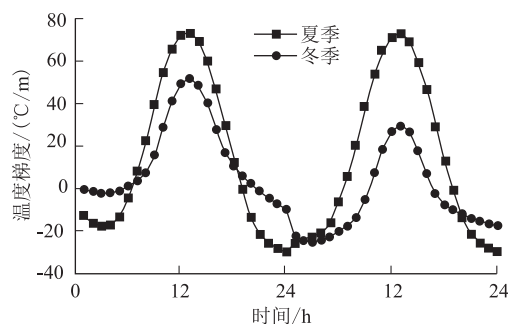


图4 轨道板温度梯度随时间变化曲线图

由图3、图4可知,当夏季温度升高 $15^{\circ}\text{C}$ 时,轨道板顶温度由 $22.6^{\circ}\text{C}$ 升高至 $46.9^{\circ}\text{C}$ ,轨道板顶最高温度发生在下午14:00时;轨道板底温度由 $25.7^{\circ}\text{C}$ 升高至 $36.9^{\circ}\text{C}$ ,板底最高温度发生在下午18:00时。夏季轨道板最大正温度梯度出现在下午13:00时,为 $73.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,最大负温度梯度为 $29.7^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

当冬季温度降低 $18^{\circ}\text{C}$ 时,轨道板顶面温度变化趋势与夏季轨道板表面温度变化相同,轨道板顶最高温度出现在下午14:00时,为 $-12.4^{\circ}\text{C}$ ;轨道板底最高温度出现在下午17:00时,为 $-16.5^{\circ}\text{C}$ 。冬季轨道板最大正温度梯度出现在下午13:00时,为 $30^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,最大负温度梯度为 $24.9^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

综上所述,无砟轨道结构内部温度变化滞后于大气温度,变化规律与大气温度一致,随气温做周期性变化,呈正弦变化趋势。冬季与夏季无砟轨道板最大正温度梯度均出现在下午13:00时,且夏季轨道板最大正温度梯度大于冬季,轨道板受温度荷载影响更大。

### 2.3 竖向温度场分析

在轨道板中心处,沿无砟轨道竖向每隔 $0.05\text{ m}$ 取1点,读取不同时刻轨道板温度变化曲线,如图5所示。

由图5可知,夏季、冬季无砟轨道竖向温度均呈非线性分布,且随着竖向深度的增加温度变化减小。不

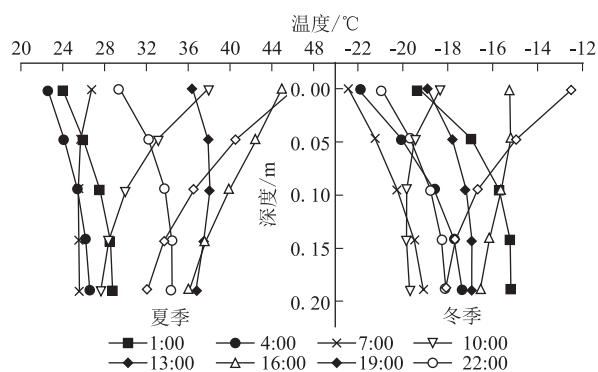


图5 不同时刻轨道板内部温度沿深度变化曲线图

同时刻无砟轨道内部温度梯度不同,夜间时,轨道板表面与外界环境对流换热,“外冷内热”使无砟轨道呈现负温度梯度;白天随着太阳辐射的增大,无砟轨道温度场呈现“外热内冷”的现象,无砟轨道受正温度梯度影响。

对比夏季、冬季不同时刻温度随时间变化曲线可以清晰看出,无砟轨道轨道板最大温度梯度发生在下午 13:00,这是由于此时大气温度接近最高日气温,且太阳辐射也达到最大值,大量热量流入轨道板,导致轨道板顶面温度越来越高。但由于轨道板为混凝土材料,导热性能较差,轨道板底面温度却变化缓慢,所以轨道板顶面、底面温差变大,轨道板温度梯度达到最大。

### 3 结论

本文依据热传导基本原理,以气象数据建立 CRTS I 型板式无砟轨道边界条件,研究了严寒地区夏季、冬季极端温度条件下,无砟轨道温度场的变化规律。得出以下结论:

(1) CRTS I 型板式无砟轨道瞬时温度场呈对称分布,轨道板内部温度场变化滞后于大气温度,变化规律与大气温度一致,随气温做周期性变化,呈正弦变化趋势。由于 CA 砂浆充填层的热阻隔作用,无砟轨道温度场在轨道板与 CA 砂浆接触面发生温度跳跃现象,轨道板更易受大气温度变化影响。

(2) CRTS I 型板式无砟轨道冬季和夏季的最大正温度梯度均出现在下午 13:00 时,且夏季轨道板最大正温度梯度大于冬季。

(3) CRTS I 型板式无砟轨竖向温度呈非线性分布,且随着深度增加温度变化减小。轨道板正温度梯度在下午 13:00 时达到最大值。

### 参考文献:

[1] 刘哲. 温度荷载对 CRTS I 型板式轨道 CA 砂浆充填层影响规律

研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

LIU Zhe. Effect of Temperature Load on CA Mortar Filling Layer of CRTS I Slab Track[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[2] 杨荣山, 万章博, 刘学毅, 等. CRTS I 型双块式无砟轨道冬季温度场试验[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(3): 454-460.

YANG Rongshan, WAN Zhangbo, LIU Xueyi, et al. Temperature Field Test of CRTS I Twin-Block Ballastless Track in Winter[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(3): 454-460.

[3] 欧祖敏, 孙璐, 程群群. 基于气象资料的无砟轨道温度场计算与分析[J]. 铁道学报, 2014, 36(11): 106-112.

OU Zumin, SUN Lu, CHENG Qunqun. Analysis on Temperature Field of Ballastless Track Structure Based on Meteorological Data[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(11): 106-112.

[4] 钟阳龙, 高亮, 王璞, 等. 温度荷载下 CRTS II 型轨道板与 CA 砂浆界面剪切破坏机理[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 230-238.

ZHONG Yanglong, GAO Liang, WANG Pu, et al. Mechanism of Interfacial Shear Failure between CRTS II Slab and Ca Mortar under Temperature Loading[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2): 230-238.

[5] 郭超, 陆征然, 吕菲, 等. 严寒地区 CRTS II 型无砟轨道板温度特性研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(9): 29-34.

GUO Chao, LU Zhengran, LV Fei, et al. Research on the Temperature Features of CRTS II Ballastless Track Slab in Severe Cold Region[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(9): 29-34.

[6] 赵勇, 司道林, 姜子清, 等. 严寒地区 CRTS I 型板式无砟轨道温度场及变形研究[J]. 铁道建筑, 2016(5): 47-52.

ZHAO Yong, SI Daolin, JIANG Ziqing, et al. Study on Temperature Field and Deformation of CRTS I Slab-Type Ballastless Track in Severe Cold Area[J]. Railway Engineering, 2016(5): 47-52.

[7] 周小勇, 曾小毛, 潘勋, 等. 基于气象资料的 CRTS III 型无砟轨道温度场特性研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(6): 52-56.

ZHOU Xiaoyong, ZENG Xiaomao, PAN Xun, et al. Study on Temperature Field Characteristics of CRTS III Ballastless Track Based on Meteorological Data[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(6): 52-56.

[8] 徐浩, 刘霄, 徐金辉, 等. 温度作用下轨道板与 CA 砂浆离缝对 CRTS II 型板式轨道的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(9): 9-12.

XU Hao, LIU Xiao, XU Jinhui, et al. Influence on CRTS-II Slab Track Structure Caused by the Debonding between Slab and CA Mortar under the Action of Temperature Load[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(9): 9-12.

[9] 孟庆武, 赵丽华, 赵晶. 基于 CA 砂浆粘弹特征的无砟轨道结构变形分析[J]. 低温建筑技术, 2019, 41(12): 34-37.

MENG Qingwu, ZHAO Lihua, ZHAO Jing. Deformation Analysis of Ballastless Track Structure Based on Viscoelastic Characteristics of Ca Mortar[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2019, 41(12): 34-37.

[10] 朱浩, 徐浩, 谢铠泽, 等. CA 砂浆离缝对 CRTS II 型板式轨道的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(12): 35-39.

ZHU Hao, XU Hao, XIE Kaize, et al. Influence on CRTS-II Slab Track Caused by the De-Bonding of Emulsified Cement Asphalt Mortar[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(12): 35-39.