

文章编号: 1674—8247(2020)04—0065—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.04.013

温度梯度荷载作用下 CRTS II 型轨道板变形差异分析

许振楠¹ 卜建清² 张吉仁²

(1. 中土集团福州勘察设计院有限公司, 福州 350013; 2. 石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

摘 要:为探究线性与非线性温度梯度荷载作用下无砟轨道 CRTS II 型轨道板的变形差异,分析该变形差异与地区气候温度之间的关系,同时验证不同地区非线性温度梯度分布适用公式的准确性,本文选取 3 个不同地区的无砟轨道板作为研究对象,通过 ANSYS 有限元分析软件建立 CRTS II 型板式结构的三维有限元模型。温度数据分别取线性温度梯度计算数据、地区非线性温度梯度分布适用公式计算数据和地区轨道板实测温度数据,并将其转化为模型温度荷载进行模拟计算。研究结果表明,线性和非线性温度梯度荷载作用下,轨道板的变形存在差异,且差异与轨道结构所处的地区有关。轨道结构所处地区气温越高,即轨道板顶面温度越高,轨道板变形的差异越小。

关键词:高速铁路;非线性;温度梯度;模型试验;轨道板;温度变形

中图分类号:U213.2+42 **文献标志码:**A

Analysis of Deformation Difference of CRTS II Track Slab under Temperature Gradient Load

XU Zhennan¹ BU Jianqing² ZHANG Jiren²

(1. CCECC Fuzhou Survey & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350013, China;

2. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to explore the deformation difference of CRTS II slab of ballastless track under linear and nonlinear temperature gradient loads, analyze the relationship between the deformation difference and regional climate temperature, and verify the accuracy of the applicable formula of nonlinear temperature gradient distribution in different regions, this paper selects three ballastless track slabs in different regions as research objects, and establishes the three-dimensional finite element model of CRTS II slab structure using ANSYS finite element analysis software. The temperature data include linear temperature gradient calculation data, applicable formula calculation data of regional nonlinear temperature gradient distribution and measured temperature data of regional track slab, which are converted into model temperature load for simulation calculation. The results show that there are differences in the deformation of track slab under linear and nonlinear temperature gradient loads, and the differences are related to the location of track structure. The higher the air temperature in the area where the track structure is located, that is, the higher the top surface temperature of the track slab, the smaller the difference of track slab deformation.

Key words: high-speed railway; nonlinearity; temperature gradient; model test; track slab; temperature deformation

收稿日期:2019-10-06

作者简介:许振楠(1995-),男,助理工程师。

引文格式:许振楠,卜建清,张吉仁. 温度梯度荷载作用下 CRTS II 型轨道板变形差异分析[J]. 高速铁路技术,2020,11(4): 65-69.

XU Zhennan, BU Jianqing, ZHANG Jiren. Analysis of Deformation Difference of CRTS II Track Slab under Temperature Gradient Load[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 65-69.

CRTS II 型板式无砟轨道是我国对德国博格板式无砟轨道系统引进、消化、吸收、再创新的成果之一,被广泛应用于我国华中、华东等地区的高速铁路。

太阳辐射、空气对流等作用在混凝土轨道板内部形成了复杂的温度场,因混凝土导热性较差,沿轨道板厚度方向会形成温度梯度,从而引起轨道板上拱或翘曲变形,改变轨道结构的几何形位,进而影响列车运行的舒适性和安全性。目前,关于轨道板温度场的研究已比较全面^[1-3],综合各地的实测温度数据,发现轨道板温度横竖向方向均呈现出明显的非线性特征,其竖向温度梯度分布符合指数分布规律^[4-5]。然而,我国 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》^[6]给出板式无砟轨道温度荷载为线性的正温度梯度 90 ℃/m、负温度梯度 -45 ℃/m,并不能很好地适用于我国不同地区的气候条件。在温度梯度荷载对轨道板变形影响的后续研究中^[7-8],多数研究者简化计算模型,以线性温度梯度荷载代替实际情况下轨道板受到的非线性温度梯度荷载。但是,关于线性与非线性温度梯度荷载下轨道板变形的差异大小研究甚少。因此,本文通过有限元软件 ANSYS 建立了 CRTS II 型板式无砟轨道结构的三维有限元模型,选取北京、上海和沈阳 3 个不同地区的轨道板作为研究对象,分别选取线性温度梯度荷载、地区温度梯度适用公式和实测温度数据,对模型进行计算模拟,并对轨道板变形数据进行对比研究。

1 有限元模型建立

桥上 CRTS II 型板式无砟轨道由上至下依次是钢轨、扣件、轨道板、砂浆层和底座板,轨道纵向由 6 根 $\phi 20$ 钢筋将轨道板结构连接成为一个整体。

在三维有限元模型中,钢轨可视为无限长梁,采用 Beam188 梁单元模拟钢轨的受力状态。其优点在于:首先,Beam188 梁单元能模拟 3D 线性有限应变梁,且计入了剪切变形的影响,增加了翘曲自由度;其次,钢轨为不规则截面,Beam188 梁单元允许自定义梁截面来满足不同的需求。

扣件提供纵横向阻力,有效地控制轨道形位,保证钢轨和轨道板的可靠联结。扣件弹性可减缓列车行驶时由动力作用带来的振动。扣件采用 vossloh 300 型扣件,有限元模型中采用弹簧单元模拟,单元类型为 Combin14,弹簧竖向刚度为 2.5×10^7 kN/m,每块轨道板设置 10 个扣件,间距为 625 mm。

钢轨下部的轨道板、砂浆层及底座板均为混凝土结构物,以长方体几何模型按照实际尺寸建立,并用

Solid65 三维实体单元进行离散化。板式无砟轨道结构详细参数如表 1 所示。

表 1 板式无砟轨道结构模型参数表

结构名称	弹性模量 /GPa	泊松比	质量密度 / (kg/m ³)	线膨胀系数 / (m/℃)
钢轨	205.9	0.3	7 830	1.2×10^{-5}
轨道板	36.5	0.2	2 500	1.18×10^{-5}
砂浆层	10	0.34	2 000	1.3×10^{-5}
底座板	30	0.2	2 360	1.0×10^{-5}

为消除模型中轨道板边界效应,参照文献[9]的研究结论,建立三块纵连轨道板结构有限元模型以便更好地反映轨道板的变形情况。板与板之间 6 根连接钢筋以 Link8 杆单元模拟,并与轨道板实体单元耦合在一起,最后取中间那块轨道板为研究对象,探究其不同工况下的温度变形。

2 荷载工况

轨道板温度梯度荷载分为两大类,一类为线性温度梯度荷载,温度梯度分布形式取规范给出的正温度梯度 90 ℃/m、负温度梯度 -45 ℃/m;另一类为非线性温度梯度荷载,又分为两种,一种是各地实测轨道板温度数据荷载,另一种是采用地区非线性温度梯度分布适用公式计算出的轨道板各层温度荷载。

尤明熙等人^[10]以北京交通大学轨道试验场为基础,测试出北京地区 CRTS II 型板式无砟轨道 7 月份高温气候条件下的轨道板温度数据。何庆元^[11]测试了上海地区某客运专线 8 月份高温下的 CRTS II 型板式无砟轨道结构的温度数据。郭超等人^[12]对铺设在东北严寒地区的 CRTS II 型板式无砟轨道在夏季高温和冬季严寒最不利气温条件下的结构温度进行了监测。对 3 个地区 24 h 监测的温度数据进行汇总,如图 1 所示。

综合 3 个地区的温度数据,不难发现轨道板结构温度变化趋势整体与气温变化趋势一致,轨道板表面温度均在下午 14 时达到最大,底部温度均在下午 16 时达到最大,较表面滞后 2 h。北京地区夏季高温最大正温度梯度达 51 ℃/m,此时轨道板顶面温度为 45.6 ℃;上海地区夏季最大正温度梯度达 89 ℃/m,此时轨道板顶面温度 57.6 ℃;沈阳地区夏季最大正温度梯度达 64 ℃/m,此时轨道板顶面温度 36.6 ℃,冬季最大负温度梯度达 -30.5 ℃/m,此时轨道板顶面温度为 -36.4 ℃。

闫斌等人^[13-14]基于我国不同地理坐标和气候条件,引入地区调整系数,提出了适用于我国典型地区板式无砟轨道的竖向温度梯度分布公式:

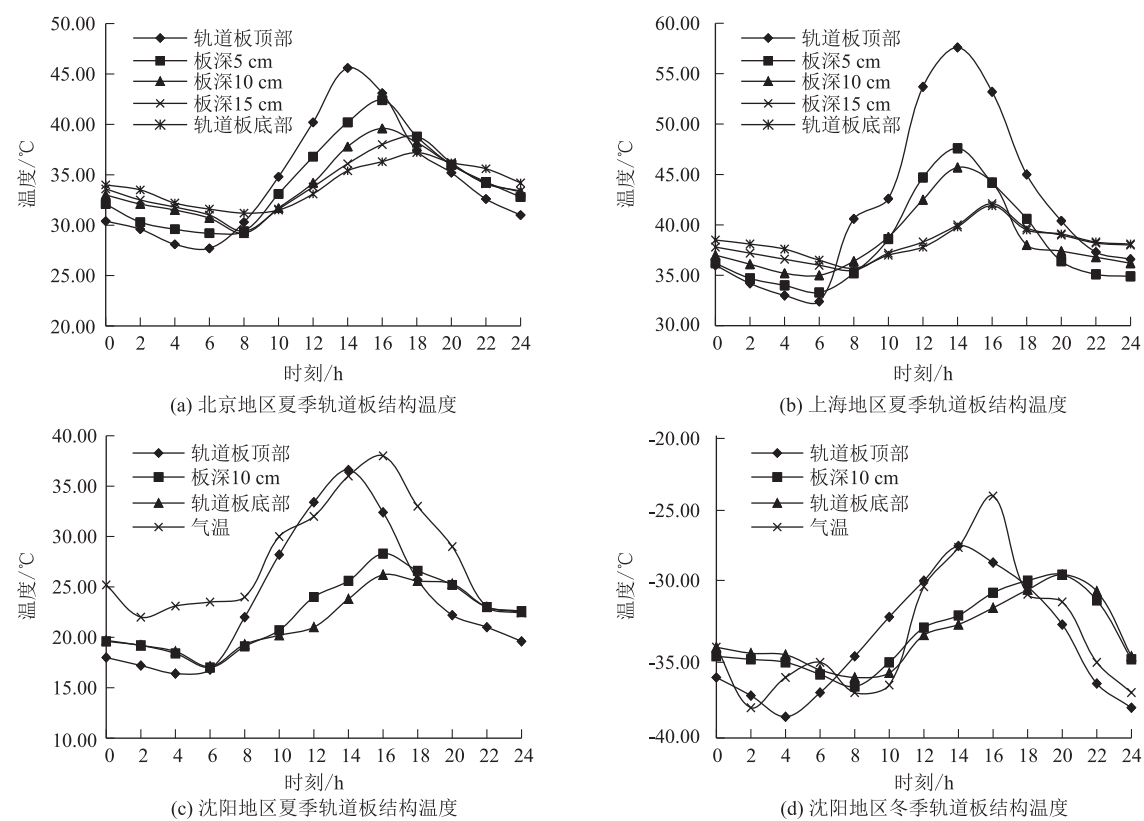


图1 不同地区轨道板结构24 h温度变化曲线图

$$t_{\text{正温度梯度}} = 18e^{-6.5x} + a \tag{1}$$

$$t_{\text{负温度梯度}} = 50x^2 + 42x + b \tag{2}$$

式中: t ——不同深度处轨道板温度(℃);
 x ——距轨道板表面深度(m);
 a 、 b ——拟合得到的正、负温度梯度的地区调整系数,我国不同地区温度梯度调整系数(部分)如表2所示。

表2 我国不同地区温度梯度调整系数(部分)表

地区	a	b	地区	a	b	地区	a	b
北京	27	-5	上海	29	2	沈阳	25	-12
成都	26	3	合肥	29	1	杭州	29	2
长春	24	-16	南昌	30	3	天津	27	-5
长沙	30	3	南宁	29	9	郑州	28	-1
重庆	29	5	济南	28	-3	太原	25	-7
福州	29	8	拉萨	22	-6	武汉	29	1
海口	29	13	南京	29	1	西安	27	-2
杭州	29	2	兰州	24	-7	西宁	20	-9

为进一步研究线性温度梯度荷载和非线性温度梯度荷载下轨道板变形的差异,同时验证适用公式的准确性,本文将北京、上海和沈阳3个地区的温度梯度分布公式提列出来,计算轨道板不同深度处的温度,并作为荷载施加到模型上。取3个地区一天中温度梯度达

到最大时为最不利工况,可细分为12种工况,如表3所示。

表3 轨道板温度梯度荷载工况表

城市	工况编号	温度梯度形式	说明
北京	工况1	正温度梯度90℃/m	轨道板顶面温度取45.6℃
	工况2	图1(a)实测温度数据	
	工况3	$t_{\text{正温度梯度}} = 18e^{-6.5x} + 27$	各层温度取计算值
上海	工况4	正温度梯度90℃/m	轨道板顶面温度取57.6℃
	工况5	图1(b)实测温度数据	
	工况6	$t_{\text{正温度梯度}} = 18e^{-6.5x} + 29$	各层温度取计算值
沈阳	工况7	正温度梯度90℃/m	轨道板顶面温度取36.6℃
	工况8	图1(c)实测温度数据	
	工况9	$t_{\text{正温度梯度}} = 18e^{-6.5x} + 25$	各层温度取计算值
	工况10	负温度梯度-45℃/m	轨道板顶面温度取-36.4℃
	工况11	图1(d)实测温度数据	
	工况12	$t_{\text{负温度梯度}} = 50x^2 + 42x - 12$	各层温度取计算值

3 模拟计算与分析

板式无砟轨道在运营一段时间后,砂浆层与轨道板的黏结效果会逐渐降低,受到温度荷载作用,产生离缝、滑移等病害的几率将有所增加。为反映砂浆层的黏结状态,在轨道板实体模型和砂浆层实体模型间设置一层接触面,以Targe170和Conta174接触单元模拟接触关系,砂浆层与底座板采取共用节点的方法模拟接触关系。

施加不同荷载工况,轨道板发生温度变形。在正温度梯度荷载作用下,轨道板发生上拱变形,在负温度梯度荷载作用下,轨道板发生翘曲变形。将不同工况下轨道板变形的竖向最大位移进行汇总,如表 4 所示。

表 4 不同荷载工况下轨道板变形竖向最大位移表

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
位移/mm	0.728	0.588	0.602	0.783	0.732	0.569	0.688	0.586	0.560	0.434	0.316	0.484

为更加直观地看出其中的差异,以每个地区为单位,将线性温度梯度荷载、非线性实测温度梯度荷载和非线性温度梯度适用公式荷载下的轨道板变形位移用统计直方图显示出来,如图 2 所示。

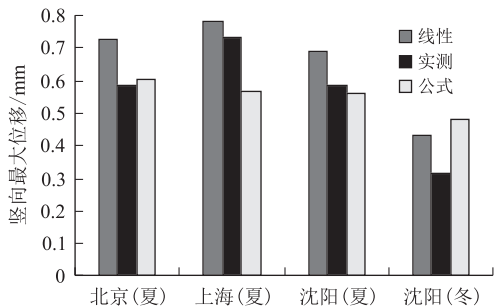


图 2 各地区不同荷载形式下轨道板变形图

从图 2 可以看出,12 种荷载工况下,线性温度梯度荷载与非线性温度梯度荷载对轨道板变形的影响确存在一定差异,这种差异既体现在数值上,又有体现在不同地区上。

对于北京地区,非线性温度梯度荷载作用下,轨道板变形较线性温度梯度荷载作用减小约 19.2%。通过对工况 2 和工况 3 的结果进行对比,发现地区适用公式的温度梯度荷载与实际情况较为符合。首先是轨道板温度数值对应较好,通过地区适用公式计算出的轨道板顶面温度为 45℃,与实际温度 45.6℃相差无几;其次是两种情形下的轨道板温度变形也十分接近。

对于上海地区,线性与非线性实测温度梯度荷载作用下轨道板变形的差异明显减小,实际情况下,轨道板的最大正温度梯度荷载达 89℃/m,接近于规范中给出的设计建议值 90℃/m。通过对工况 5 和工况 6 的结果进行对比,可以看出非线性温度梯度分布适用公式已不能很好地表征该地区轨道板的实际温度情况。上海地区夏季高温最大正温度梯度情况下轨道板顶面温度可达 57.6℃,而适用公式计算得出的板顶面温度为 47℃,相差近 10℃。两者的轨道板温度变形差异约为 22.3%。

对于沈阳地区,在夏季高温气候条件下,轨道板变形情况与北京地区类似,线性与非线性温度梯度荷载下轨道板变形存在约 14.8% 的差异。非温度梯度适用公式能很好地模拟当地轨道板的变形,但采用公式

计算出的轨道板各层温度值与实际测量的温度数值不太相符。通过工况 10~12 的模拟结果可以看出,当处于冬季严寒季节时,采用线性负温度梯度荷载与负温度梯度荷载适用公式都无法很好地表征轨道板在实际温度下的变形。

4 结论

本文通过对线性温度梯度荷载与非线性温度梯度荷载作用下轨道板变形差异的对比分析,得出以下结论:

- (1) 实际情况下,轨道板结构各层温度呈非线性分布,其中竖向正温度梯度可拟合成指数函数的形式,负温度梯度可拟合成二次函数的形式。
- (2) 线性和非线性温度梯度荷载作用下轨道板的变形存在差异,且该差异与轨道结构所处的地理位置有关,轨道结构所处地区气温越高,即轨道板顶面温度越高,线性与非线性温度梯度荷载作用下轨道板变形的差异越小。
- (3) 我国典型地区的无砟轨道竖向温度梯度分布公式具有较高的参考价值。该公式中,正温度梯度分布公式能够很好地表征北方地区轨道板实际温度分布下的变形,对于南方地区,由于温度升高使线性与非线性温度梯度分布下轨道板的变形差异减小,正温度梯度分布公式不够准确。负温度梯度分布公式在东北严寒地区存在较大差别,建议根据当地实测温度数据修改地区调整系数,使该公式能够更好地符合实际情况。

参考文献:

[1] 刘钰,陈攀,赵国堂. CRTS II 型板式无砟轨道结构早期温度场特征研究[J]. 中国铁道科学,2014,35(1):1-6.
LIU Yu, CHEN Pan, ZHAO Guotang. Study on the Characteristics of Early Temperature Field of CRTS II Slab Ballastless Track Structure [J]. China Railway Science,2014,35(1):1-6.

[2] 李东昇,董亮,姜子清,等. 桥上 CRTS II 型板式无砟轨道结构的温度荷载特征试验研究[J]. 铁道建筑,2015,45(9):106-110.
LI Dongsheng, DONG Liang, JIANG Ziqing, et al. Experimental Study on Temperature Load Features of CRTS II Slab-type Ballastless Track Structure on Bridge[J]. Railway Engineering, 2015, 45(9): 106-110.

- [3] 吴斌,刘参,曾志平,等. CRTS II 型板式无砟轨道温度场特征研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(3): 29-33.
WU Bin, LIU Can, ZENG Zhiping, et al. Research on the Temperature Field Characteristic of CRTS II Slab Ballastless Track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(3): 29-33.
- [4] 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 Gonglian, SU Haiting, LIU Wenshuo, et al. Temperature Distribution of Longitudinally Connected Ballastless Track on Bridge in Summer[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(4): 1073-1080.
- [5] 戴公连,温学桢,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 Gonglian, WEN Xuehui, SU Haiting. Study on Horizontal and Vertical Temperature Gradient of Ballastless Track on Bridge in Cold Season [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology. Nature Science, 2015, 43(7): 1-5.
- [6] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].
- [7] 韩志刚,孙立. CRTS II 型板式轨道轨道板温度测量与变形分析[J]. 铁道标准设计, 2011, 54(10): 41-44.
HAN Zhigang, SUN Li. Temperature Measurement and Deformation Analysis for CRTS II Ballastless Track Slabs[J]. Railway Standard Design, 2011, 54(10): 41-44.
- [8] 周敏,戴公连,闫斌. 温度作用下桥上 CRTS II 型轨道离缝及变形分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(12): 2341-2346.
ZHOU Min, DAI Gonglian, YAN Bin. Analysis of Gap and Deformation of CRTS II Track on Bridges under Temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(12): 2341-2346.
- [9] 朱晓嘉. CRTS II 型轨道板温度效应及其对列车运行安全性的影响分析[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
ZHU Xiaojia. Temperature Effect of CRTS II Track Plate and Its Influence on Train Operation Safety. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [10] 尤明熙,高亮,赵国堂,等. 板式无砟轨道温度场和温度梯度监测试验分析[J]. 铁道建筑, 2016, 46(5): 1-5.
YOU Mingxi, GAO Liang, ZHAO Guotang, et al. Analysis of Monitoring Test for Slab-type Ballastless Track Temperature Field and Temperature Gradient[J]. Railway Engineering, 2016, 46(5): 1-5.
- [11] 何元庆. 华东地区 CRTS II 型板式无砟轨道温度特性试验分析[J]. 铁道建筑, 2017, 47(3): 102-105.
HE Yuanqing. Experimental Analysis on Temperature Characteristics of CRTS II Ballastless Track in East China[J]. Railway Engineering, 2017, 47(3): 102-105.
- [12] 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.
- [13] 闫斌,刘施,戴公连,等. 我国典型地区无砟轨道非线性温度梯度及温度荷载模式[J]. 铁道学报, 2016, 38(8): 81-86.
YAN Bin, LIU Shi, DAI Gonglian, et al. Vertical Nonlinear Temperature Distribution and Temperature Mode of Unballasted Track in Typical Areas of China[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8): 81-86.
- [14] 肖虎. CRTS II 型板式无砟轨道高温胀板分布特性与防治研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 9(6): 70-74.
XIAO Hu. Study on Distribution Characteristic and Prevention of Slab Expanding Diseases for CRTS II Slab-type Ballastless Track in High Temperature [J]. High Speed in Railway Technology, 2019, 9(6): 70-74.