

环境因素引发的 CRTS III 型无砟轨道板温度场和竖向变形特征分析*

杨东晓¹ 吴 尚² 周俊召²

(1. 中国铁路上海局集团有限公司徐州工务段, 221005, 徐州;

2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海 // 第一作者, 高级工程师)

摘 要 针对轨道交通 CRTS III 无砟轨道板在环境因素作用下产生的翘曲变形, 在实际运营线路上采用传感器对其温度和竖向变形进行现场测试, 分析在不同的环境条件下轨道板的变形规律以及轨道板变形后对列车运行的平稳性和舒适性的影响。研究发现: 板内温度梯度是 CRTS III 型轨道板产生翘曲变形的主要影响因素, 在夏季晴天, 轨道板在太阳辐射和环境温度共同作用下, 白天时轨道板变形呈现上凸变形, 夜晚时轨道板变形呈现下凹变形, 且上凸变形幅度大于下凹变形; 阴雨天气由于太阳辐射程度减小, 轨道板变形相对较小; 在不同的环境条件下的轨道板变形中, 轨道板边缘处的竖向变形要大于其他部位; 轨道板变形会对钢轨的不平顺产生影响, 但其变形量对列车的平稳性和舒适度影响不大, 且在极端工况下, 列车的平稳性指标和舒适性指标均为优。

关键词 轨道交通; 无砟轨道板; 温度场; 竖向变形特征; 环境因素

中图分类号 U213.2⁺44

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.003

Analysis of Temperature Field and Vertical Deformation Characteristics of CRTS III Ballastless Track Slab Caused by Environmental Factors

YANG Dongxiao, WU Shang, ZHOU Junzhao

Abstract In view of the warping deformation of CRTS III ballastless track slab of rail transit under the action of environmental factors, the temperature and vertical deformation taking place on actual operation line are observed and tested on site by sensors. The deformation patterns of the track slab under different environmental conditions and the influence of the track slab deformation on stability and comfort of train operation are studied. It is found that the temperature gradient is the main factor affecting the warpage of CRTS III track slab. On a sun-

ny Summer day, under combined action of solar radiation and ambient temperature, the deformation of track slab in daytime presents "upward convex", while it is "concave" at night, and the deformation amplitude of convex deformation is larger than that of concave deformation. Due to the reduction of solar radiation, the deformation of track slab is relatively small in rainy weather. The vertical deformation at the edge of track slab is larger than that of other parts in different environmental conditions. Through calculation, it is found that track slab deformation will affect irregularity of the rail, however the deformation value has little effect on stability and comfort of the train. Under extreme working conditions, stability and comfort indicators of the train are both excellent.

Key words rail transit; ballastless track slab; temperature field; vertical deformation characteristics; environmental factors

First-author's address Xuzhou Track Maintenance Subdivision, China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., 221005, Xuzhou, China

目前, 国内高速铁路和城市轨道交通建设中, 无砟板式轨道中得到了广泛应用。其中, CRTS III 型单元板式无砟轨道在环境温度下, 尤其是在强烈的温度变化下, 轨道板沿厚度方向产生的温度变化会导致其竖向变形不均匀, 进而发生翘曲变形^[1-2], 同时轨道板的变形还受到扣件和砂浆层的约束, 使得轨道板变形较为复杂^[3-4]。若轨道板的翘曲变形量过大, 势必对轨道不平顺产生较大的影响, 以及对铁路的安全性和可靠性产生不利影响^[5-7]。因此, 有必要对 CRTS III 型无砟轨道单元板翘曲变形规律进行研究, 为进一步寻求改善上述现象的措施奠定理论基础。针对环境温度影响下无砟轨道翘

* 国家自然科学基金项目(51678446)

曲变形的相关研究,德国学者和日本铁路研究所取得了一些成果。文献[8]采用数值模拟分析方法,对严寒地区 CRTSⅢ型无砟轨道板进行研究。文献[9]通过数值仿真发现负温度梯度引发的轨道板的温度翘曲变形相对较小,而正温度梯度引发的轨道板的翘曲变形较大。文献[10]通过监测曲线线路中 CRTSⅡ型无砟轨道的温度场,发现1 d内无砟轨道温度随结构深度的减小而减小,最高温度出现时间滞后于表面层,且垂直温度分布满足指数分布。文献[11]以大气温度和太阳辐射作为输入,建立了无砟轨道的温度场有限元计算模型。文献[12]对车辆载荷与温度梯度作用下板式无砟轨道耦合系统在路基上的动力特性等内容进行了研究。

现有研究大多建立在理论上,而仿真分析往往无法全面、准确地描述其变化规律。本文在现有研究成果的基础上,通过对实际高铁线路中的 CRTSⅢ型轨道板的变形及温度场进行长期监测,分析环境温度变化下轨道板的连续变化特征及其影响因素,为进一步掌握环境温度影响下的轨道板变形的特征提供依据。

1 温度变化条件下 CRTSⅢ型无砟轨道板温度场及竖向变形特征

1.1 环境影响下温度场变化机理

无砟轨道表面处于复杂的外界环境中,通常通过太阳辐射、热传导和热对流等方式与外界环境进行热交换。太阳辐射直接作用于轨道板表面,大部分被轨道板吸收,小部分反射回空气中;轨道板内部热量从高温部分向低温部分传递;轨道板表面与空气进行对流热交换。无砟轨道内部温度场受上述因素影响,且随时间变化而变化。白天时太阳辐射是影响无砟轨道内部温度场的主要因素,夜晚则主要表现为环境温度。

1.1.1 热对流

热对流是由于固体表面与周围流体存在温差而导致热量交换。热对流分为自然对流和强制对流两类。热对流 q 使用牛顿冷却方程来描述:

$$q = h(T_s - T_b) \quad (1)$$

式中:

h ——对流换热系数,与表面形状、对流运动成因和流动状态等诸多因素有关;

T_s ——固体物表面的温度;

T_b ——周围空气温度。

1.1.2 热辐射

太阳辐射是指经过大气直射和大气散射后到达地面的能量。太阳直接辐射方向上的辐射强度 I_D 为:

$$I_D = I_0 P^m \quad (2)$$

式中:

I_0 ——垂直于大气层外边界处的太阳辐射强度;

P ——大气透明度系数;

m ——光线透过大气的质量。

对于太阳入射角为 θ 的结构表面,太阳直接辐射强度 I_θ 为:

$$I_\theta = I_D \cos \theta \quad (3)$$

太阳辐射对轨道板的影响受到包括大气质量、辐射强度和角度、辐射波频率等多种因素的影响。

1.1.3 热传导

轨道板内部温度场分布不均匀,热量从高温部分向低温部分传递,这种传递的方式为热传导。热量从一侧平面向另一侧传递,满足热传导基本定律。

$$\frac{Q}{t} = \frac{KA(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{d} \quad (4)$$

式中:

Q ——时间 t 内的传热量;

K ——热传导率;

$T_{\text{hot}}, T_{\text{cold}}$ ——分别为高温部分和低温部分的温度;

A ——平面面积;

d ——两平面之间的距离。

由上述分析可知,引发轨道板温度场变化的环境因素主要包括热辐射、热传导和热对流。上述因素又与太阳辐射强度、大气质量、空气对流和轨道板材质、几何形状和边界条件等相关。因而,理论上实现轨道板温度场变化的精确计算存在一定的困难。

1.2 环境变化条件下的轨道板变形试验

环境影响下的轨道板温度场变化受多方面的复杂因素影响,在实际线路中对其进行现场测试分析成为目前较为直观准确的手段,即通过在 CRTSⅡ型轨道板上安装温度和位移传感器,测定轨道板在不同环境条件下轨道板的竖向位移和温度。对实测数据进行初步观察及分析,发现轨道板的变形在不同季节存在差异,尤其在夏季其变化幅度远大于其他季节,因此,本文主要对夏天轨道板的变形

进行分析。

测试区段选择在铺设 CRTSIII 型轨道板的某高速铁路上。选取相邻两块轨道板作为测试对象,沿着轨道板外沿布置垂向位移测点,每个工装上安装 2 个接触式位移传感器,共计 20 个传感器,具体位置如图 1 所示。在轨道板中钻孔,且钻孔分别距离轨道板上表面 20 mm、100 mm、180 mm,并分别埋入 3 个温度传感器,如图 2 所示。试验采用的传感器具有全天候防水和防尘功能,其中,位移传感器的灵敏度为 0.1 mm。对轨道板的垂向位移及温度进行长期监测,并选取夏季典型环境下监测的数据进行分析。

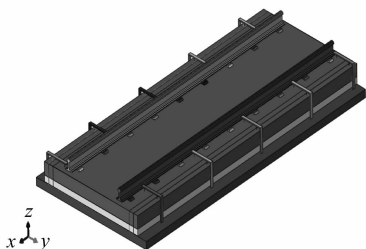


图 1 CRTSIII 型轨道板位移传感器布置示意图

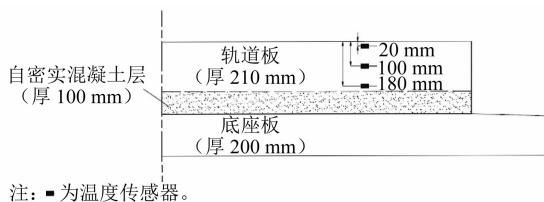


图 2 温度传感器布置示意图

1.2.1 轨道板竖向位移变化

结合当地气象资料,选取轨道板变化幅度最大的夏季白天和夜晚的轨道板位移进行分析,得到如图 3~4 所示的轨道板变形特征图。由图 3~4 可知,在白天太阳辐射影响下,轨道板的竖向变形特征为中间向上隆起、边缘部位下沉,且边缘部位产生的向下位移幅值要大于板中向上的位移幅值。夜晚由于无太阳辐射,环境温度下降,轨道板的位移会

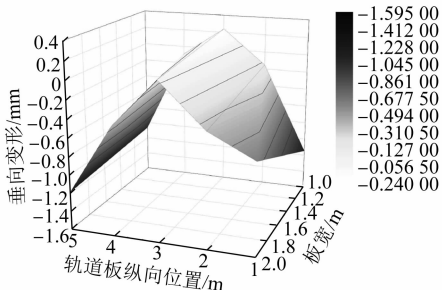


图 3 夏季白天轨道板的上拱变形

出现相反的变化,即轨道板中部产生向下位移,而边缘部位产生向上的位移,形成中间低、边缘高的下凹变形,但轨道板的翘曲程度小于白天。

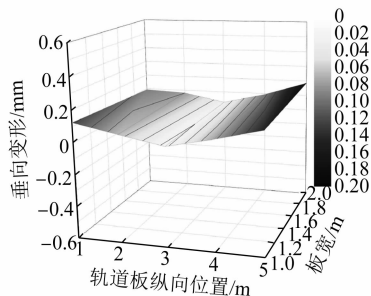


图 4 夏季夜晚轨道板的翘曲变形

1.2.2 单日轨道板温度场变化

结合当地气象资料,分别选取夏季晴天与阴雨天轨道板温度变化数据进行分析。图 5 为夏季晴天轨道板温度单日变化图。从时间维度来看,从凌晨到次日正午,夏季晴天太阳辐射逐渐增强,相应的轨道板的温度也快速升高,在中午前后其昼夜温度差值达到最大。对于相同时刻的轨道板而言,从轨道板表面到轨道板底面,板内温度沿深度方向逐渐下降。此外,对于轨道板表面而言,由于其直接受到太阳辐射的影响,因而其单日的温度变化幅度远大于板底的温度变化,且板表面温度一般都大于环境温度。

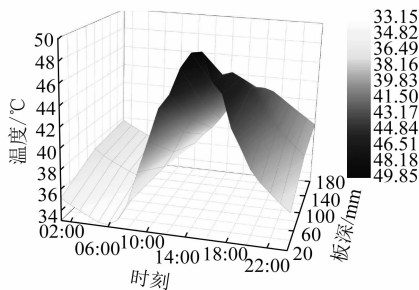


图 5 夏季晴天轨道板温度场

夏季阴雨天轨道板温度单日变化如图 6 所示。由于没有强烈的太阳辐射,轨道板整体的温度变化

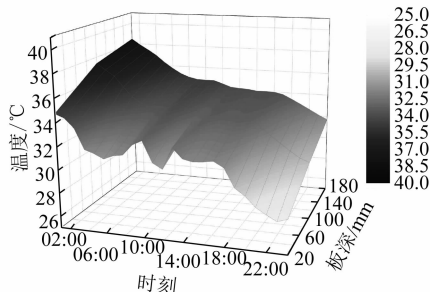


图 6 夏季阴雨天轨道板温度场

比较平稳,板内不同深度的温度场变化幅度也相对较小。与夏季晴天不同的是,轨道板表面在降雨过程中会率先降温,导致轨道板的表面温度低于板内部的温度,板内出现“负”温度梯度。

1.2.3 单日轨道板位移变化

图7与图8分别为夏季晴天与阴雨天单日轨道板位移变化三维图。如图7所示,对于夏季晴天,单日不同时段太阳辐射差异显著,在热辐射与热传导的共同作用下,轨道板的温度场梯度单日变化明显,引发的轨道板翘曲变形量差异较大。在太阳未直接照射到轨道板时,板表面的温度与环境温度基本一致,轨道板内温度梯度较小,整个轨道板的平整性也较好。当太阳直射轨道板后,轨道板表面温度迅速升高,且温度场梯度增大,轨道板中部发生向上拱起,边缘处产生向下位移,中午期间,太阳辐射最强,这种现象也最为明显。值得注意的是,从测试结果来看,轨道板温度在14:00左右达到最大值,但轨道板的竖向位移变化存在一定滞后,轨道板发生最大变形量的时刻滞后于其温度最高时刻。傍晚随着太阳辐射减弱和环境温度降低,轨道板的变形逐渐减小。

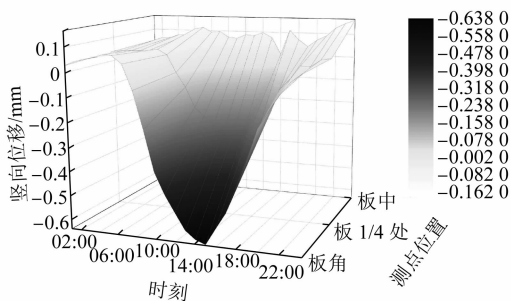


图7 夏季晴天单日轨道板的位移

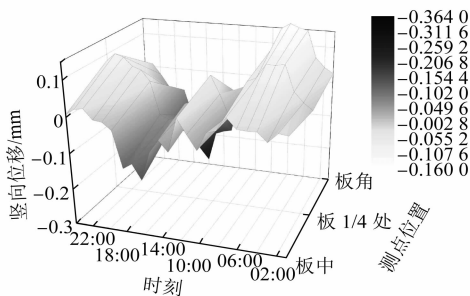


图8 夏季阴雨天单日轨道板的位移

对于夏季阴雨天而言,影响轨道板垂向温度梯度的因素除太阳辐射、环境温度外,还有降雨。当降雨后,轨道板表面降温速度大于板底的温度,从而形成板面温度高、板底温度低的负温度梯度,相

应的轨道板发生中间低、边缘高的下凹变形(见图8),但其最大变形量不超过0.3 mm,远小于夏日晴天的轨道板翘曲变形。

测试结果表明,对于夏季晴天,在环境温度及太阳辐射的共同作用下,轨道板内部温度垂向分布不均匀,进而发生翘曲变形。其中,白天有太阳辐射时,影响轨道板变形的主要因素是太阳辐射;当夜晚无太阳辐射时,环境温度是影响轨道板变形的主要因素。对于夏季阴雨天,降雨也是影响轨道板变形的另外一个重要因素。

2 轨道板翘曲变形后列车运行的平稳性和舒适性

2.1 平稳性和舒适性计算方法

轨道板变形会引起线路不平顺,其对列车的平稳性和乘客舒适度会产生一定的影响,因此,须进行轨道板翘曲变形后列车运行的平稳性和舒适性分析。平稳性和舒适性不仅是衡量列车运行性能的重要指标,也是判断乘客舒适程度的主要依据。根据相关标准,平稳性指标为:

$$W = 7.08 \sqrt{\frac{A^3}{f}} F(f) \quad (5)$$

式中:

W ——平稳性指标;

A ——振动加速度值, g ;

f ——振动频率, Hz ;

$F(f)$ ——频率修正系数。

总平稳性指标 $W_{总}$ 为:

$$W_{总} = (W_1^{10} + W_2^{10} + W_3^{10} + \dots + W_n^{10})^{1/10} \quad (6)$$

式中:

W_1, W_2, \dots, W_n ——由每一段频率范围内的加速度幅值计算得到的平稳性指标。

GB/T 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》将平稳性计算结果划分为3个等级,当平稳性指标小于2.5时,平稳性等级为1级,评定为优。

UIC 513:1994《铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则》将舒适度计算方法划分为坐姿和站姿的简化方法、坐姿完整计算方法、站姿完整计算方法等3种情况。其中,坐姿和站姿的简化计算公式为:

$$N_{MV} = 6 \sqrt{(a_{XP95, W_d})^2 + (a_{YP95, W_d})^2 + (a_{ZP95, W_b})^2} \quad (7)$$

式中:

N_{MV} ——舒适性指标;

W ——计权曲线所采用的频率计权值;

$a_{XP95, W_d}, a_{YP95, W_d}, a_{ZP95, W_b}$ ——车辆地板面加速度方向分别为 X 、 Y 、 Z 时滤波在 95% 置信概率下的加速度统计值。

根据式(7), 当 $N_{MV} < 1$ 时, 评定为舒适性非常好。

2.2 轨道板变形后极端工况下列车平稳性和舒适性指标计算

将试验测得的轨道板位移数据和轨检车测得的轨道板位移数据进行对比, 发现轨道板变形量和钢轨变形量基本一致, 因此, 可将轨道板的变形与初始不平顺合成轨道板变形后的钢轨不平顺。将轨道板极端工况下的最大变形量与初始不平顺进行叠加, 得到合成后的轨道不平顺波形, 再将合成的轨道不平顺导入仿真软件, 通过仿真软件计算得到车体的垂向、横向和纵向加速度, 通过 matlab 编程进行列车平稳性和舒适性计算, 得到列车的横向平稳性指标为 0.998 0、垂向平稳性指标为 1.104 9, 列车的舒适性指标约为 0.400 0。由此可知, 极端工况下, 列车的平稳性和舒适性指标仍然为优。因此, 在本文的研究工况下, 温度应力作用下轨道板变形对列车的平稳性和舒适性影响不大。

3 结论

1) 轨道板温度变化受环境温度和太阳辐射等因素影响, 白天时太阳热辐射是造成轨道板温度变化的主要原因, 夜晚时环境温度是造成轨道板温度变化的主要原因。

2) 轨道板竖向位移变化主要受太阳辐射强度和板温度梯度的影响, 当太阳辐射较强、环境温度较高时, 轨道板温度梯度较大, 继而引发轨道板产生翘曲变形。

3) 在夏季晴天, 由于太阳辐射较强及环境温度较高, 白天轨道板产生的竖向位移较大, 其中板中部会产生向上位移, 板边缘产生向下位移, 整个板发生上凸变形, 其特征是板边缘处的向下位移占

主导。

4) 夜间, 由于气温下降, 且太阳辐射基本为零, 轨道板处于热量的释放状态, 其整体变形由上凸逐渐转变为下凹, 但是下凹的变形量相对较小, 而轨道板上翘是环境温度影响下轨道板的主要变形。此外, 在夏季阴雨天, 降雨对轨道板的温度梯度有较大影响, 从而影响轨道板变形。

5) 轨道板变形会对钢轨的不平顺产生影响, 但其变形量对列车的平稳性和舒适性影响不大, 在极端工况下, 列车的平稳性和舒适性指标均为优。

参考文献

- [1] 王继军, 尤瑞林, 王梦, 等. 单元板式无砟轨道结构轨道板温度翘曲变形研究[J]. 中国铁道科学, 2010(3): 9.
- [2] 奚绍良, 熊永亮, 单傲, 等. 温度应力作用下无砟轨道板的竖向变形特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020(6): 54.
- [3] 胡松林, 周小林, 徐庆元, 等. 温度梯度荷载作用下 CRTS II 型轨道板与 CA 砂浆界面损伤扩展研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019(9): 2143.
- [4] CHEN Z, XIAO J, LIU X, et al. Deformation behavior of slab warping for longitudinal continuous rigid slab under temperature effect [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(13): 2823.
- [5] JI Z, YANG G, LIU Y, et al. Analysis of vertical vibration characteristics of the vehicle-flexible track coupling system under wind load and track irregularity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(10): 2444.
- [6] CAI X, ZHAO L, LAU A, et al. Analysis of vehicle dynamic behavior under ballasted track irregularities in high-speed railway [J]. Noise & Vibration Worldwide, 2015, 46(10): 10.
- [7] TOMAS K, MATS B, SEBASTIAN S, et al. Correlation of track irregularities and vehicle responses based on measured data [J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56(6): 967.
- [8] 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(9): 29.
- [9] 付娜, 刘钰, 李成辉. 单元双块式无砟轨道道床板温度翘曲变形的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2016(3): 16.
- [10] 戴公连, 苏海霞, 闫斌. 圆曲线段无砟轨道横竖向温度梯度研究[J]. 铁道工程学报, 2014(9): 40.
- [11] 李健. 双块式无砟轨道温度场试验研究及数值分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

(收稿日期: 2020-10-20)