双块式无砟轨道温度场试验研究和数值分析

李健, 赵坪锐*, 万章博, 任勃

西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031

* E-mail: przhao@163.com

收稿日期: 2014-03-26; 接受日期: 2014-06-03

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB0036202)、国家自然科学基金(批准号: 51008258, 51008254)和中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU12CX065)资助项目

摘要 为较准确掌握无砟轨道温度场的分布规律, 建立无砟轨道温度与环境温度的对应关系, 为温度应力的计算和无砟轨道设计提供基础参数, 本文测试了双块式无砟轨道不同部件、不同位置的温度和环境温度变化情况, 建立有限元模型对无砟轨道温度场进行了数值模拟和对比. 实测数据及数值模拟的结果均表明: 道床板温度随外界气温呈以日为周期的周期性变化, 秋季平均每天的升温时间约为 8 h, 降温约 16 h; 由于热交换条件的差异, 距轨道表面越远, 轨道温度受环境气温的影响越小, 道床板角部的温度变化幅度大于中部, 支撑层与基床表层的温度变化幅度很小; 道床板内存在较大的温度梯度, 随着距表面距离的增大, 温度梯度逐渐减小, 至支撑层时温度梯度可忽略不计; 采用有限元模拟的方法获取无砟轨道温度随气温变化规律是可行的.

关键词

无砟轨道
温度场
环境温度
有限元

1 引言

随着我国高速铁路和城市轨道交通的快速发展, 具有高稳定、高平顺和少维修特点的无砟轨道得到了广泛应用, 例如 CRTS I、II 型板式无砟轨道、双块式无砟轨道等^[1].

我国无砟轨道大多是采用钢筋混凝土材料构成的层状结构物, 由于混凝土是一种感温性材料, 所以处于轨道结构上层的道床板受环境温度影响较大. 无砟轨道在其使用寿命周期内, 除了要反复承受列车动荷载作用外, 还要承受随环境温度交替变化的温度荷载作用, 轨道温度主要表现为温度升降和温度梯度两种荷载, 温度升降会使道床板发生伸缩变形, 产生伸缩应力; 温度梯度会使道床板发生翘曲,

产生翘曲应力^[2]. 当温度应力超过混凝土的强度时, 会引起道床板和支撑层开裂, 影响无砟轨道的正常使用. 在无砟轨道结构设计中, 温度效应是不可忽略的一种主要荷载^[3]. 准确掌握无砟轨道内部的温度场分布规律, 对无砟轨道结构不同组成部分温度变化进行长期观测, 可为温度应力的计算和无砟轨道的设计提供基础数据.

目前, 国内外学者对道路温度场的研究很多. 相关文献^[4~7]中对道路路面温度场进行了研究, 提出了相应的预测模型, 具有很大的理论价值. 但是道路温度场大多研究温度极值及对应的温度应力, 且由于路面结构尺寸大, 热边界条件不同于无砟轨道, 无法直接利用路面温度场理论进行无砟轨道的设计计算^[8]. 本文拟以双块式无砟轨道结构为研究对象, 测

引用格式: 李健, 赵坪锐, 万章博, 等. 双块式无砟轨道温度场试验研究和数值分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 729–735

Li J, Zhao P R, Wan Z B, et al. Experimental research and numerical analysis of temperature field on bi-block ballastless track (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 729–735, doi: 10.1360/N092014-00086

试环境气温和无砟轨道不同位置的温度, 并且借助有限元软件进行数值分析, 建立无砟轨道温度场与环境气温的关系, 以进一步为全国范围内的无砟轨道温度荷载取值提供理论依据, 为无砟轨道长期性能研究提供基础支持。

2 试验方案

选择具有代表性的 CRTS I 型双块式无砟轨道进行无砟轨道温度场的测试。测试部件包括道床板、支撑层及基床表层, 同时对周围环境的温度进行同步监测。

选取成都地区某单位厂区内空地为试验场地, 该试验场地开阔, 无建筑物或树木遮挡。场地面积为 $9\text{ m}\times 9\text{ m}$, 四周设置简易围护, 如图 1 所示。

场地内现浇 5.5 m 长的 CRTS I 型双块式无砟轨道, 支撑层用模筑 C15 混凝土修建, 道床板采用 C40 混凝土浇筑, 其内部配置钢筋保证各处温度传感器的定位, 将温度传感器设置于道床板表面和轨道结构内。由于钢轨和扣件对无砟轨道温度场的影响较小, 本试验段未设置钢轨和扣件。CRTS I 型双块式无砟轨道温度场测点布置如图 2 和 3 所示。

道床板表面布置测温点 10 个, 编号为 DB-1~DB-10, 板内布置测温点 7 处, 编号为 D-1~D-7, 每处设置 3 个温度传感器, 沿板厚度方向由上到下测点号依次为: D-1-1, D-1-2, D-1-3~D-7-1, D-7-2 和 D-7-3; 支撑层共布置 3 处测点, 分别位于 1, 2 和 6 号点正下方, 每处设置 3 个温度传感器, 编号为 Z-1-1, Z-1-2, Z-1-3~Z-6-1, Z-6-2, Z-6-3; 基床表层共布置 3 个测点, 分别位于 1, 2 和 6 号点的正下方, 编号为 JC1, JC2 和 JC6。

试验需要建立无砟轨道温度场与周边环境温度之间的对应关系, 进而根据环境温度提出合理的温

图 1 (网络版彩图)试验场地布置图

图 2 (网络版彩图)道床板表面温度测点布置图(mm)

图 3 (网络版彩图)轨道结构内温度测点布置图(mm)

度荷载建议值, 因此周边环境温度是一个需要测量的重要参数。周边环境温度监控点布置于 CRTS I 型双块式无砟轨道相邻周边中点处, 总共布置 2 个测点。采用温度采集仪自动采集无砟轨道温度和环境温度, 采样间隔为 30 min , 试验开始时间为 2013 年 10 月 8 日, 计划持续一年以上。

3 轨道温度随气温的变化规律

3.1 道床板表面温度随气温的变化

选取所测 2013 年 10 月 18~19 日两天的试验数据分析无砟轨道道床板表面温度随气温的变化规律, 该时间段处于秋季, 天气晴好。

图 4 为道床板表面温度和气温的变化情况。道床板表面温度随环境气温呈周期性变化。凌晨 5:00~6:30, 道床板表面温度最低, 日出后, 气温迅速升高, 道床板温度也随之升高, 并于午后 14:00 左右达到最高, 之后逐渐下降。道床板表面温度的变化几乎与气温同步, 升温阶段约 8 h , 降温阶段约 16 h , 在一天中的绝大多数时间内道床板表面温度都较气温高, 最大差值约为 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。

图 4 (网络版彩图)道床板表面温度变化图

3.2 轨道内部温度随气温的变化规律

为了解轨道内部温度随气温的变化规律,选取道床板、支撑层、基床表层 2013 年 10 月 19 日所测数据,将各测点不同温度传感器数据平均值作为各结构层温度,其温度变化如图 5、6 和 7 所示。

由图 5 可以看出道床板内各测点的温度变化趋势与环境气温变化趋势基本一致,但道床板温度达到极值的时间较气温极值滞后约 2 h。处在道床板内对称位置上的测点温度变化基本相同,由于热交换条件的差异,测点距离轨道表面越近,道床板温度变化幅度越大,位于角部的 3 和 4 号测点道床板温度变化幅度达到 5.9°C (变化范围为 $15.2\sim 21.1^{\circ}\text{C}$),明显比中部的 6 号测点变化幅度 2.9°C 大(变化范围为 $17.5\sim 20.4^{\circ}\text{C}$),道床板温度变化幅度由大到小的部位分别为板角、板边和板中,道床板温度极值包含在气温极值范围内。

图 5 (网络版彩图)道床板内部温度变化图

图 6 (网络版彩图)支撑层内部温度变化图

图 7 (网络版彩图)基床表层温度变化图

相比于道床板,支撑层内部温度变化随气温的日周期性特征不明显,而是在一个很小的范围内波动(图 6),靠近边部的 1 和 2 号测点波动幅度稍大,约 1°C 左右,支撑层中部的 6 号测点波动幅度很小,只有 0.5°C ,可见支撑层内温度受外界环境的影响较小。同样由于热交换条件的差异,支撑层中部的温度比边部温度高。

图 7 为基床表层 3 个测点的温度值随气温的变化情况,可以看出基床表层温度几乎保持不变。与支撑层情况一样,中部温度较边部温度高。

4 轨道温度梯度分布规律

为了分析轨道温度梯度的分布规律,选取道床板不同测点在不同时刻的温度数据进行分析,轨道

温度梯度由道床板表面各测点与其下部不同深度处测点的温度差除以相应间距得到, 轨道不同深度温度与道床板表面温差和轨道温度梯度随深度的变化规律如图 8 和 9, 由道床板内最上下的温度传感器计算的温度梯度随时间的变化规律如图 10. 从测试可知支撑层与基床温度基本保持不变, 故轨道最大深度仅取到道床板范围, 即距道床板表面 30 cm.

图 8 和 9 表明, 随着距道床板表面距离的增加, 轨道的内外温差逐渐增大, 早上轨道温度较气温高, 且轨道板中部温差较角部大; 中午外界气温升高后, 角部温差较中部大. 随着深度的增大, 轨道平均温度梯度逐渐减小, 距道床板表面 10 cm 内道床板温度梯度较大, 至支撑层趋于稳定.

图 8 (网络版彩图)轨道不同深度处与道床板表面温差关系图

图 9 (网络版彩图)轨道温度梯度随深度的变化

图 10 (网络版彩图)轨道温度梯度随时间的变化

道床板温度梯度与气温的变化规律基本一致. 如图 10 所示, 每天承受正温度梯度荷载的时间大约在 10:00~18:00, 其余时段为负温度梯度(轨道内部温度比表面温度高), 早上 7:00 左右, 由于太阳辐射, 外界气温升高, 轨道温度梯度迅速变化, 负温度梯度的幅值逐渐减小, 并于午后 14:00 左右达到正温度梯度(轨道内部温度比表面低)的极值. 轨道承受正温度梯度荷载时, 轨道边部的温度梯度大于轨道中部; 承受负温度梯度荷载时则刚好相反.

5 双块式无砟轨道温度场模拟

我国地域宽广、气候复杂, 采取长期测试的手段获取不同地区无砟轨道温度荷载的方法是不现实的. 若能建立环境气温与无砟轨道温度之间的关系, 则可通过气温的统计特征, 获取无砟轨道温度荷载统计特征. 因此本节拟通过有限元模拟, 分析无砟轨道温度随气温的变化规律, 探讨采用有限元技术分析无砟轨道温度场的可行性.

5.1 有限元模型建立

基于双块式无砟轨道的结构特征, 忽略对温度影响不大的双块式轨枕部分, 建立无砟轨道温度场有限元模型, 其中道床板和混凝土支撑层采用可用于三维瞬态热分析的八节点 SOLID70 单元进行模拟, 同时由测试可知基床温度的日变化很小, 可忽略不计, 因而忽略路基层的影响. 模型及单元划分情况如图 11 所示.

轨道结构涉及三种传热方式: 热传导、热对流和热辐射, 以热对流和热辐射形式进入轨道中的热流,

以热传导的方式向轨道内部进行传导. 为分析轨道结构内部温度场, 假设各层均为完全均匀和各向同性的连续体, 道床板和支撑层接触良好, 热传导连续. 将太阳辐射强度, 热辐射和对流三种荷载, 用对流方式施加, 即将综合换热系数和每时刻的综合温度施加给道床板表面节点, 初始温度取前一天 23:30 轨道温度测试数据, 进行温度场瞬态热分析. 时间步长取 0.5 h, 计算时间 24 h, 混凝土的导热系数取 3.0 W/(m K) , 比热取 $0.95 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}$. 图 12 表示无砟轨道内部距离道床板表面 5 cm 截面在 10 月 19 日 6:00 和 15:00 的温度分布云图.

从上图可以看出随着距轨道表面距离的变化, 轨道内部温度逐渐改变. 凌晨轨道表面温度低, 内部

图 11 ANSYS 三维模型图

图 12 无砟轨道内部温度云图

(a) 2013.10.19-06:00; (b) 2013.10.19-15:00

温度高; 午后随着太阳辐射和外界气温升高, 轨道温度升高, 表面温度高于内部温度.

5.2 计算结果与实测结果比较

利用 ANSYS 计算 2013 年 10 月 19 日轨道板的温度场. 选取轨道表面 D-3-1 和 D-3-2 测点的计算数据与实测数据进行对比分析, 如图 13 所示. 同时选取 2013 年 10 月 19 日至 2013 年 10 月 21 日的实测数据与计算数据进行对比, 分析较长的温度趋势, 如图 14 所示.

从上图图中可以看到, 计算的轨道温度变化趋势与实测的轨道温度变化趋势相同, 实测数据与计算数据均呈现与环境气温的周期性变化. 由于 2013 年 10 月 20 日为阴雨天气, 外界环境与无砟轨道间的热交换量减小, 仍采用综合温度法会导致热负荷估计偏低, 论计算值与实测值误差比其余时段大, 最大

图 13 轨道内部温度对比

图 14 轨道温度历史对比

误差为 1.5°C , 但属于工程允许范围; 在其他时段内, 计算值与实测值吻合较好, 采用的数值方法可作为预测双块式无砟轨道温度场的模型.

6 结论与建议

本文对双块式无砟轨道模型温度和近地表气温进行了试验观测, 同时通过有限元模拟, 对比分析了无砟轨道温度随气温的变化规律, 探讨了采用有限元技术分析无砟轨道温度场的可行性. 通过对试验数据的分析和有限元模拟可以得到如下结论, 为我国无砟轨道结构设计及长期服役性能评价提供依据.

1) 无砟轨道温度受外界环境的影响较大, 道床板随着外界气温呈以日为周期的周期性变化.

2) 道床板温度极值包含在气温极值范围内, 道床板温度极值出现时间滞后于环境气温约 2 h.

3) 随着距轨道表面距离的增大, 轨道受环境的影响程度逐渐减弱, 温度改变的幅度逐渐减小, 角部温度改变幅度大于中部, 支撑层和基床表层随气温改变幅度很小.

4) 随着距道床板表面距离的增加, 轨道的温差逐渐增大, 轨道温度梯度逐渐减小, 且距道床板表面 10 cm 内道床板温度梯度较大, 至支撑层趋于稳定.

参考文献

- 1 何华武. 无砟轨道技术. 北京: 中国铁道出版社, 2006. 34–36
- 2 刘学毅, 赵坪锐, 杨荣山, 等. 客运专线无砟轨道设计理论与方法. 成都: 西南交通大学出版社, 2010. 106–110
- 3 王森荣. 板式无砟轨道温度力研究. 硕士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2007. 10–15
- 4 韩子东. 道路结构温度场研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学, 2001. 10–40
- 5 康海贵, 郑元勋, 蔡迎春, 等. 实测沥青路面温度场分布规律的回归分析. 中国公路学报, 2007, 20: 13–16
- 6 贾璐. 沥青路面高温温度场数值分析和实验研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2004. 1–20
- 7 秦健, 孙立军. 沥青路面温度场的分布规律. 公路交通科技, 2006, 23: 19–23
- 8 逯彦秋, 张肖宁, 唐伟霞. 桥面铺装层的温度场模拟. 华南理工大学学报, 2007, 35: 60–63

Experimental research and numerical analysis of temperature field on bi-block ballastless track

LI Jian, ZHAO PingRui, WAN ZhangBo & REN Bo

MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

In order to accurately grasp the distribution rule of temperature field on ballastless track, establish corresponding relationship between track temperature and environment temperature and provide basic parameters for the calculation of temperature stress and the design of ballastless track, the temperature in different parts and at different location of the track and environment temperature were tested in this paper. At the same time finite element model was established for numerical simulation and comparison of ballastless track temperature field. The measured data and the results of numerical simulation show that the temperature of track plate changed periodically with the ambient temperature in a day of cycles, the heating time per day is about 8 hours, cooling about 16 hours in the autumn. Due to the difference in thermal exchange conditions, the greater the distance away from the track surface, the smaller the track temperature is affected by environmental temperature, variation in the temperature of the track plate in the corner is greater than central, the internal temperature in supporting layer and subgrade layer change very little. There are large temperature gradient in the track plate, with the increase of distance away from the track plate surface, the temperature gradient of track decreases and it can be neglected in support layer. The method of finite element simulation for ballastless track temperature with the environmental temperature change law is feasible.

ballastless track, temperature field, environmental temperature, finite element

doi: 10.1360/N092014-00086