

文章编号: 1674—8247(2019)02—0049—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.02.011

高速铁路预制轨道板合理水养方法研究

潘自立¹ 王安琪² 李保友¹ 康维新²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘要:轨道板脱模水中养护期间水化反应还在激烈进行,此时板的温度很高,且混凝土强度尚未形成,板在进行水养时若水温控制不当,则会导致轨道板产生初始缺陷。因此,本文以 CRTSⅢ型普通钢筋混凝土轨道板为研究对象,开展现场试验,对轨道板水养过程温度及水养池水温进行实时动态监测,明确轨道板在水养过程中所承受的温度荷载,并建立有限元模型,分析轨道板在水养过程中在温度、水压力等荷载作用下的应力应变,探讨水养过程水温的合适范围,研究冬季施工水养方法。结果表明:(1)水养时轨道板会承受约 5℃~7℃的整体降温荷载及 100℃/m 的温度梯度荷载;(2)在相同的水养条件下,整体温降相对于温度梯度对轨道板拉应力影响更大;(3)当作用在轨道板上的整体温降(温差)超过 10℃时,轨道板最大拉应力大于此时龄期混凝土的抗拉强度,需要提高水养水温;(4)冬季施工时宜采用逐步降低水温方法进行养护。

关键词:CRTSⅢ型板式;无砟轨道;水中养护;温度梯度;整体温降

中图分类号:U213.2+44

文献标志码:A

Study on Appropriate Water Curing Method for Precast Track Slab of High-speed Railway

PAN Zili¹ WANG Anqi² LI Baoyou¹ KANG Weixin²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: During the curing of the track slab after demoulding in the water, the hydration reaction is still intense. At this time the temperature of the slab is very high and the strength of the concrete has not yet formed. If the water temperature is not controlled properly, the initial defect of the track slab will occur. Therefore, taking the CRTSⅢ ordinary reinforced concrete track slab as the research object, the field test is carried out to monitor dynamically the temperature of the track slab during water curing and the water temperature in the water curing pond in real time, clearly define the temperature load of track slab during the water curing, establish a finite element model for analyzing the stress and strain under the action of temperature, water pressure and other loads during the water curing, discuss the suitable range of water temperature during the water curing and study the water curing method in winter construction. The suitable range of water temperature in the process of water maintenance is discussed, and the water maintenance method in winter is studied. The results show that: (1) the track slab will bear the overall cooling load of about 5℃~7℃ and the temperature gradient load of 100℃/m; (2) under the same water curing condition, the overall temperature drop has a greater influence on the tensile stress of the track slab than temperature gradient; (3) when the overall temperature drop (temperature difference) is over 10℃, the maximum tensile strength of the track slab should be greater than that of the concrete at this age, therefore, the water curing temperature shall be improved; (4) the water

收稿日期:2018-09-19

作者简介:潘自立(1974-),男,教授级高级工程师。

引文格式:潘自立,王安琪,李保友,等. 高速铁路预制轨道板合理水养方法研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(2):49-54.

PAN Zili, WANG Anqi, LI Baoyou, et al. Study on Appropriate Water Curing Method for Precast Track Slab of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(2): 49-54.

temperature for curing of track slab should be gradually reduced in winter construction.

Key words: CRTS Ⅲ track slab; ballastless track; curing in the water; temperature gradient; overall temperature drop

无砟轨道以其高平顺、高稳定及少维修在世界高速铁路上广泛应用^[1]。CRTS Ⅲ型板式无砟轨道是我国自主研发的具有完全自主知识产权的无砟轨道结构型式,也是未来我国高速铁路的主要发展方向^[2]。目前,CRTS Ⅲ型板式无砟轨道已在我国成灌铁路上成功完成铺设,有关 CRTS Ⅲ型板式无砟轨道的施工技术也在不断总结中日益完善^[3-8]。在实际生产过程中,为保证 CRTS Ⅲ型轨道板的预制质量和投资成本,通常采用沿线工厂集中预制的规模化生产模式。

预制轨道板大多采用高标号混凝土,其干燥收缩较为严重,同时放热量也很大,一旦养护不当,极有可能使得轨道出现严重的初始缺陷。为提高预制质量,现通常在混凝土具有一定强度后立即将轨道板脱模浸入水中养护,缓解轨道板干缩,降低轨道温度。由此可见合适的拆模入水养护时间及水养温度对轨道板预制质量有重要影响,而目前对这方面的研究还较少,现场主要依据经验进行施工。为此,本文结合 CRTS Ⅲ型普通钢筋混凝土轨道板现场生产过程,布置相应传感器,对轨道板浇筑、脱模、入水养护全过程的轨道温度及环境温度进行全程监控,明确轨道板预制过程中承受的温度荷载,采用有限元方法对轨道板应力变化进行全程分析,为 CRTS Ⅲ型轨道板的施工优化提供参考。

1 试验概况

如图 1 所示,在四川省乐山制板厂开展了普通钢筋混凝土轨道板从预制浇筑到水养过程中水化热变化情况的监测试验,试验采用 C50 混凝土预制轨道板,板长为 5 600 mm,宽为 2 500 mm,厚度为 200 mm。

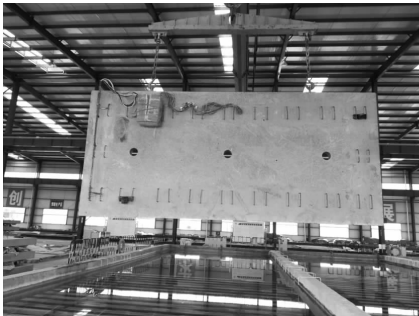


图 1 轨道板入水养护

试验采用温度传感器 pt100 铂电阻测温元件,测量量程 -20 ℃ ~80 ℃,测量精度 $\pm(0.15+0.002|t|)$ ℃ ($|t|$ 为实测温度的绝对值)。温度传感器在轨道板上的布置,如图 2 所示,沿轨道板中部宽度方向上对称布

置 3 个测点,每个测点在厚度方向上从底部(门型筋侧)依次向上布置 3 个温度传感器,分别用于测量轨道板芯部混凝土和表面混凝土的温度变化情况。

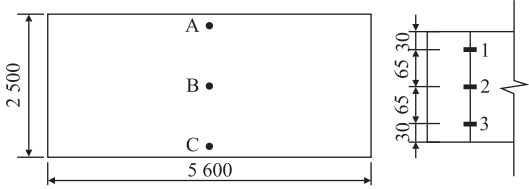


图 2 轨道板温度传感器布置示意图(mm)

2 水养过程轨道板整体温降规律

轨道板混凝土在浇筑完约 15 h 后脱模,进行水养。试验记录轨道板混凝土从 2017 年 7 月 29 日下午 2:30 开始水养,到 8 月 2 日上午 10:30 结束水养,共经历了约 4 d 的水养。

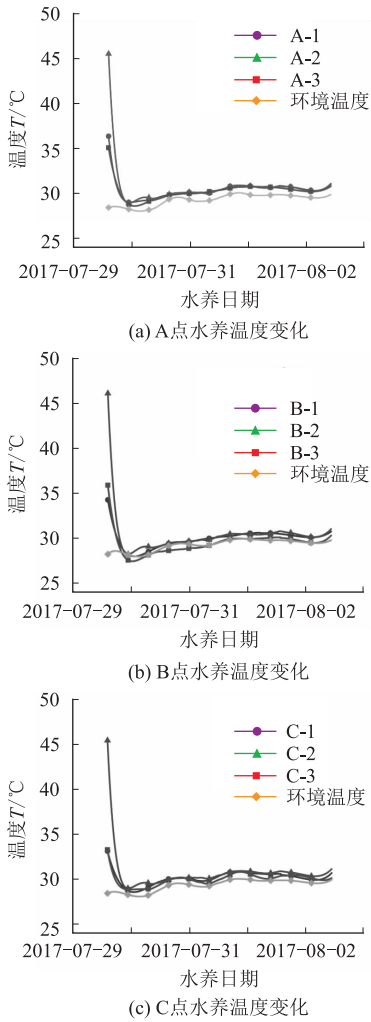


图 3 水养期间轨道板温度变化规律

从图3可以看出,在水养进行约5 h后,轨道板的整体温度几乎与外界水温达到一致,并在此后4 d的水养过程中一直与外界水温保持着动态平衡状态。由于下降到同外界水温相同温度所用的时间相对于轨道板整个养护时长来说很短,可以看作轨道板在水养过程中产生了温度骤然降低,称之为整体温降。

在水养进行约2.5 h后,轨道板芯部混凝土温度从水养时的起始温度下降至表面混凝土的水养起始温度,并在此后2.5 h时间里同表面混凝土一起与外界水温逐渐达到平衡。所以,轨道板的整体温降幅值可以看作水养起始时表面混凝土的温度与水养结束时表面混凝土温度的差值,脱模时轨道板温度越高,这种整体温降表现的越明显。

A点~C点的试验数据显示,水养起始时轨道板混凝土表面温度在35℃~38℃之间,在水养进行约5 h后,轨道板的整体温度下降至与外界水温一致的28℃~29℃,由此可以得出水养过程中轨道板的整体温降差值范围为7℃~10℃。

3 水养过程轨道板温度梯度规律

受施工时水养环境温度、轨道板脱模后起始温度及温降速率等因素的影响,在水养过程中,轨道板芯部混凝土与表面混凝土将产生温差(即温度梯度),由于温差变化在水养初始阶段较为明显,所以只取轨道板水养30 min的试验数据进行分析。

从图4可以看出,浇注、脱模完之后的轨道板混凝土由于水泥水化作用的影响具有很高的初始温度,芯部混凝土在进行水养时温度在48℃左右,表面混凝土温度在35℃~38℃左右。在水养进行约15~20 min后,轨道板混凝土的表面温度下降至接近于外界水温的温度,芯部混凝土却仍处于很高的温度,此时,轨道板芯部混凝土与表面混凝土之间达到水养过程中的温差极值。

A点~C点的试验数据表明,A点在水养进行15 min后,芯部混凝土与表面混凝土之间达到最大温差值10.333℃,B点在水养进行17 min后,芯部混凝土与表面混凝土之间达到最大温差值11.394℃,C点在水养进行16 min后,芯部混凝土与表面混凝土之间达到最大温差值12.493℃,由此可得,水养过程中轨道板温度梯度在10℃~13℃之间。

4 水养过程轨道板受力分析

4.1 计算模型及参数

根据轨道板的结构特性,利用Ansys有限元分析

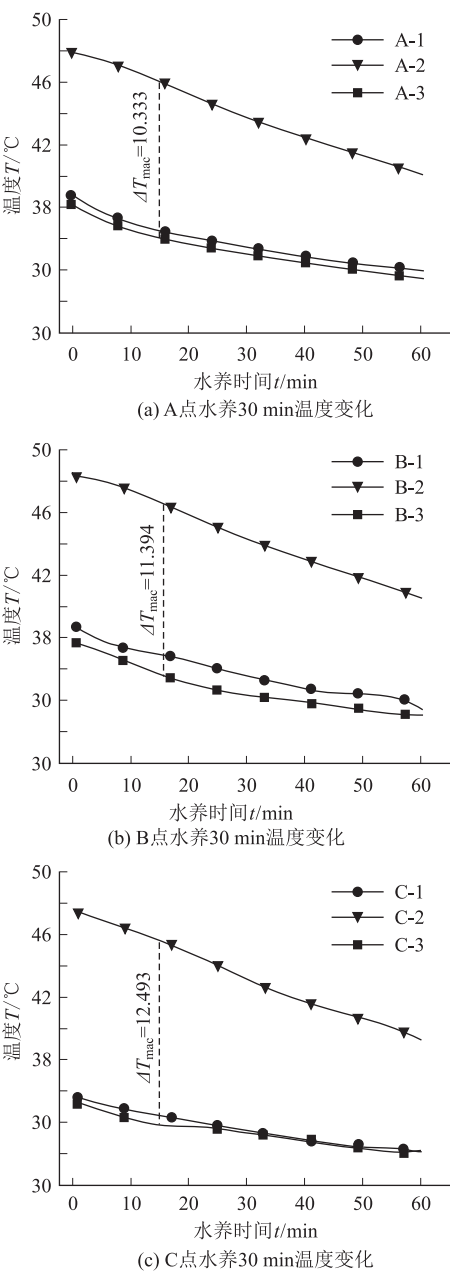


图4 水养过程轨道板垂直向温差规律

软件,对水养过程中轨道板的受力状态进行模拟。其中,轨道板采用实体单元SOLID45进行模拟,与水养池接触的底面采用固定位移约束,考虑轨道板自重、水压力、整体降温和温度梯度的作用。

由于在施工过程中轨道板从浇筑完成到脱模水养所用的时间较短(轨道板混凝土的龄期约为1 d),轨道板混凝土的强度及弹性模量都很低,采用规范规定的相关参数进行计算显然不合适,查阅相关文献^[9-10],可以得到普通C50混凝土龄期1 d时的相关参数,如表1所示。

4.2 荷载及工况

由于在实际的现场监测试验中,无法精确测得轨

表 1 轨道板计算参数表

物理量	数值
长×宽×厚/m	5.6×2.5×0.2
泊松比	0.2
质量密度/(kg/m ³)	2 500
线膨胀系数(1/℃)	1×10 ⁻⁵
弹性模量(1d)/Pa	9×10 ⁹
抗拉强度(1d)/Pa	1.7×10 ⁶

道板上每个点的温度变化情况,所以在计算温度梯度荷载时,假定轨道板芯部到表面方向上的温度梯度呈线性分布,在考虑整体温降荷载时,忽略温降过程中混凝土各部位温差的影响。

根据现场实测的数据分析可知,轨道板的整体温降变化范围在 7℃~10℃,温降步长取值 1℃,相应的温降计算值为 7℃、8℃、9℃和 10℃。水养过程中轨道板芯部和表面温度温度差的极值在 10℃~13℃之间,计算时取 1℃作为一个梯度,相应的计算温度梯度为 100℃/m、110℃/m、120℃/m 和 130℃/m,具体工况如表 2 所示。

表 2 计算工况表

工况号	整体温降	工况号	温度梯度/(℃/m)
1	7	5	100
2	8	6	110
3	9	7	120
4	10	8	130

4.3 整体温降作用下轨道板应力变化

取整体温降为 7℃,计算得到轨道板的横向应力和最大拉应力云图,如图 5 所示。当整体温降取值变

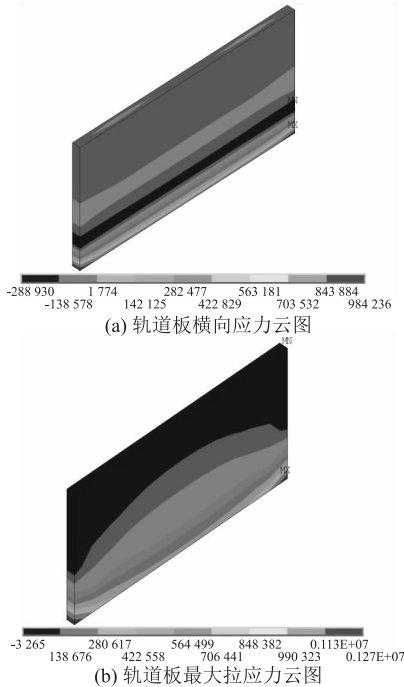


图 5 整体温降作用下轨道板的各向应力

化时,轨道板应力云图分布相似但量值不同。

如图 5 所示,在整体温降荷载作用下,轨道板横向应力以压应力为主,压应力分布范围广但数值较小,在轨道板宽度方向中下部区域至轨道板底部开始逐渐出现拉应力,并在板底达到横向最大拉应力 0.98 MPa。在轨道板最大拉应力云图中,拉应力分布与横向应力类似,轨道板板底端部出现拉应力极值 1.27 MPa,这是由于在自重及水压力的作用下,轨道板底部应力最大,在此施加整体温降荷载,将放大轨道板的底部应力,从而产生最大板底拉应力。

当整体温降从 7℃~10℃变化时,轨道板板底最大拉应力变化,如图 6 所示。

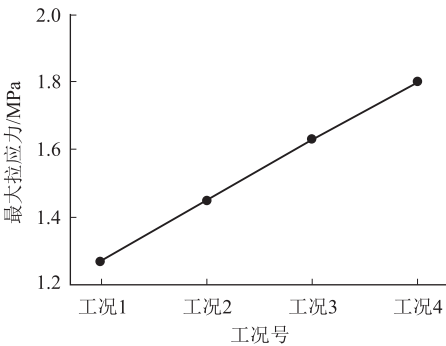


图 6 整体温降工况示意图

由图 6 可以看出,轨道板板底最大拉应力随整体温降幅值的增大而逐渐增大。整体温降为 8℃时,板底最大拉应力为 1.45 MPa;整体温降为 9℃时,板底最大拉应力为 1.63 MPa;整体温降为 10℃时,板底最大拉应力为 1.80 MPa,拉应力随整体温降得线性变化幅值约为 0.18 MPa/℃。

当整体温降超过 10℃时,此时,轨道板的最大拉应力已经超过了龄期内(1 d)轨道板拉应力强度限值,板底的混凝土将产生裂缝甚至发生破裂,对生产过程中轨道板质量将产生影响,因此需严格把控轨道板水养过程中温度的变化。

4.4 温度梯度作用下轨道板应力变化

当温度梯度荷载为 100℃/m 时,在轨道板自重及水压力的共同作用下,轨道板的横向应力和最大拉应力云图,如图 7 所示,当取值其他温度梯度时,轨道板应力云图分布相似但量值不同。

如图 7 所示,轨道板横向应力以拉应力为主,并在轨道板表面中部偏下区域达到横向拉应力极值 1.57 MPa。轨道板最大拉应力也为 1.57 MPa,出现在轨道板表面中部以下区域,这是由于在温度梯度作用下,轨道板不同部位热胀冷缩程度不同,内外温差使轨道板外部产生拉应力,表面轨道板达到其拉应力极值,

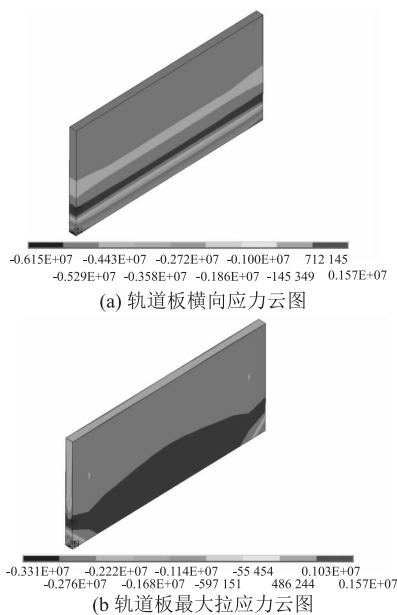


图 7 温度梯度作用下轨道板各向应力

是整个轨道板水养过程中最危险的位置。
当温度梯度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m} \sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 变化时,轨道板表面最大拉应力变化,如图 8 所示。

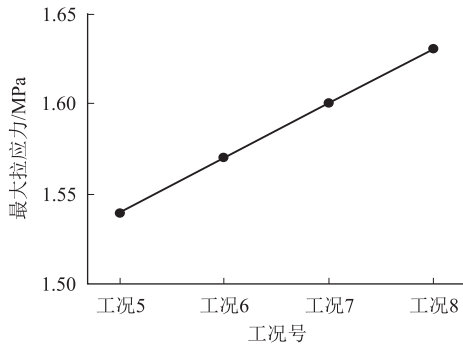


图 8 温度梯度工况示意图

由图 8 可知,轨道板表面拉应力的极值随温度梯度的增加而逐渐增大,温度梯度为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,拉应力最大值为 1.60 MPa ;温度梯度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,拉应力最大值为 1.63 MPa ;温度梯度为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,拉应力最大值为 1.66 MPa 。
轨道板最大拉应力随温度梯度变化幅值约为 $0.03\text{ MPa}/(^{\circ}\text{C}/\text{m})$,对比整体温降作用下轨道板的最大拉应力的变化幅值可以看出,当处于相同水养条件时,整体温降作用下轨道板最大拉应力变化更快,但温度梯度作用下轨道板拉应力出现的区域更广。
生产过程中的混凝土裂缝是不可避免的,但过大的温度应力会降低轨道板的生产质量,也会对轨道板的耐久性造成影响,因此需要控制轨道板生产过程中温度应力。

5 轨道板冬季水养研究

轨道板混凝土由于其自身特点,环境温度对它的生产质量影响极大。在进行大规模工程建设时,通常需要考虑避免在冬季施工,但受工期制约,许多工程尤其高速铁路行业的混凝土冬季施工往往是不可避免的。为此,掌握轨道板混凝土在冬季低温下施工特点与规律,并在此基础上研究其施工控制方法具有重要意义。结合之前轨道板在温度梯度和整体温降荷载作用下计算数据可知,在相同的水养环境下,相较于温度梯度,整体温降作用下轨道板产生的拉应力极值及变化幅度更大。为此,以整体温降作为控制条件,计算大幅度温降作用下轨道板拉应力变化情况。

整体温降由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化至 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,轨道板拉应力变化以及轨道板混凝土龄期 - 强度^[11] 关系,如图 9 所示。

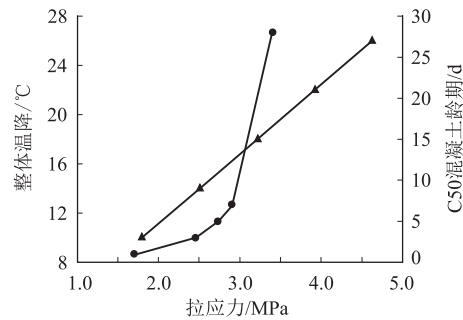


图 9 龄期、温降与轨道板拉应力关系图

由图 9 可以看出,当整体温降大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,轨道板最大拉应力已经大于此时龄期内(1d)轨道板混凝土强度。整体温降为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的轨道板拉应力极值约等于龄期 3 d 的混凝土强度平均值,当整体温降超过 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,轨道板最大拉应力大于温降 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的混凝土强度,轨道板混凝土会发生破坏。

以四川省为例,该地区属于夏热冬冷地区,冬季室外平均温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,有相关试验^[12]测得 12 月份四川省不供暖地区白天室内平均温度在 $12\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,夜间室内平均温度在 $8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。若不采取相应供暖保温措施,冬季施工的室内环境温度可大致认为在 $8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间浮动。取冬季室内平均温度为 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时水养池若没有其它加热措施,则水温温度约 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$,取脱模时轨道板表面温度为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时直接入水会使得轨道板破坏。应用前述模型计算发现,如轨道板不出现病害至少需水温在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,并持续 3 d。3 d 后轨道板强度提升能够承受降温 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时可降低水养温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 继续养护 3 d,3 d 后出水,在室内空气中降温至室温 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。实

际生产中,可根据当地气温条件,按照上述方法分析计算,采用水温逐步降低法进行养护,并结合降低混凝土出仓温度、棉布保温等措施^[13-14]实现冬季生产。

6 结论

本文针对高速铁路无砟轨道预制轨道板合理水中养护问题,以 CRTSⅢ型普通钢筋混凝土轨道板为例,开展现场试验,埋设温度传感器,对水养过程中板温度进行了监测,得出了轨道板承受的温度荷载。利用有限元方法,对轨道板水养过程进行受力分析,对冬季预制轨道板水养过程进行了计算,提出了相应的施工建议。

(1)乐山地区现场实测发现,受水泥水化放热影响,轨道板脱模时表面温度能达到 37℃,板芯温度 47℃,入水后 2~3 h 内承受约 5℃~7℃的整体降温及 100℃/m 的温度梯度荷载,最大拉应力达到 1.27 MPa。整体温降作用下轨道板最大拉应力变化幅值为 0.18 MPa/℃,轨道板的受拉区域大并集中在板面中下部区域,温度梯度作用下轨道板最大拉应力变化幅值为 0.03 MPa/(℃/m),轨道板受拉区域小且集中在板底。

(2)为保障轨道板质量,在特殊情况下应监测轨道板温度及水养池水温。水养温度应根据环境温度和轨道板温度综合考虑设置,但入水前后轨道板温度降低值不应超过 10℃。拆模时间及入水时间应综合考虑轨道板干缩与水养池温度确定,一般规定拆模后轨道板空气中静置时间不能超过 4 h。

(3)轨道板冬季施工时,考虑到轨道板龄期较低时强度较低,能承受的温差较小,此时应设置 30℃以上水温持续 3 d 以上。随时间增加,要控制水养池水温逐步降低,避免出水时轨道板温度骤然降低到室温,防止轨道开裂。

参考文献:

- [1] 何华武. 无砟轨道技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
HE Huawu. Ballastless Track Technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [2] 高亮, 赵磊, 曲村, 等. 路基上 CRTSⅢ型板式无砟轨道设计方案比较分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 848-855.
GAO Liang, ZHAO Lei, QU Cun, et al. Analysis on Design Scheme of CRTSⅢ Slab Track Structure on Roadbed[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 848-855.
- [3] 李昌宁, 戴宇, 高健. CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土揭板试验及质量控制研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(5): 30-33.
LI Changning, DAI Yu, GAO Jian. Exposing-plate Test and Quality Control Research of Self-compacting Concrete of CRTSⅢ Type Slab Ballastless Track [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(5): 30-33.
- [4] 刘伟斌, 王继军, 杨全亮, 等. 高速铁路 CRTSⅢ型板式无砟轨道温度梯度试验研究[J]. 铁道建筑, 2015, 55(3): 103-106.
LIU Weibin, WANG Jijun, YANG Quanliang, et al. Experimental Study on Temperature Gradient for CRTSⅢ Slab-type Ballastless Track on High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2015, 55(3): 103-106.
- [5] 刘洋. CRTSⅢ型轨道板预制关键工序质量控制研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
LIU Yang. Study of the Quality Control of the Key Process of the CRTSⅢ Precasted Slab [D]. Jilin: Jilin University, 2013.
- [6] 赵秀丽. CRTSⅡ型轨道板预制生产关键技术[J]. 铁道建筑, 2011, 51(7): 118-120.
ZHAO Xiuli. Key Technology for Prefabrication of CRTSⅡ Track Slab [J]. Railway Engineering, 2011, 51(7): 118-120.
- [7] 熊德辉. 高速铁路 CRTSⅢ型板式无砟轨道养护维修技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
XIONG Dehui. Research on Maintenance Techniques of CRTSⅢ Slab Ballastless Track System on High Speed Railway [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 2014.
- [8] 李吉林. 高速铁路 CRTSⅢ型板式无砟轨道工程施工质量的管理与控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
LI Jilin. Quality Management and Control for Construction of High-speed Railway CRTSⅢ Slab Ballastless Track Engineering [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [9] 陈萌, 刘立新, 彭少民. 预拌混凝土各龄期抗拉和抗压强度换算关系试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(2): 109-111.
CHEN Meng, LIU Lixin, PENG Shaomin. Experimental Study on Relationships between Tensile Strength and Compressive Strength of Ready-mixed Concrete at Different Age [J]. Building structure, 2010, 40(2): 109-111.
- [10] 刘宏伟. 混凝土早龄期弹性模量无损检测初探[D]. 南京: 河海大学, 2006.
LIU Hongwei. Tentative Research on Non-destructive Detection of Early-age Elastic Modulus of Concrete [D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [11] 李明. 无损检测方法推定普通混凝土早龄期抗拉强度[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线, 2009.
LI Ming. Nondestructive Testing Method for Deducing the Early-age Tensile Strength of Ordinary Concrete [EB/OL]. Beijing: Sciencepaper Online, 2009.
- [12] 陈洪轻, 龙恩深, 黄璐红, 等. 成都地区板房建筑冬季室内热环境研究[J]. 制冷与空调, 2011, 22(1): 60-64.
CHEN Hongqing, LONG Enshen, HUANG Luhong, et al. Discussion of the Indoor Thermal Environment of Prefab House in Winter of Chengdu [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 22(1): 60-64.
- [13] 罗承智, 王文仲, 孙颖涛. 浅议冬季施工混凝土的养护[J]. 科技信息, 2010, 27(4): 343.
LUO Chengzhi, WANG Wenzhong, SUN Yingtao. Discussion on Curing of Concrete in Winter Construction [J]. Science & Technology Information, 2010, 27(4): 343.
- [14] 郝臣君. 寒冷地区冬季混凝土施工质量控制研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
HAO Chenjun. Research on Constructed Quality for Concrete in Winter of Cold Regions [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.

(编辑: 车晓娟 张红英)