

文章编号: 1674—8247(2019)06—0035—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.007

CRTSⅢ型普通钢筋混凝土轨道板预制浇筑水化热分析

李保友¹ 姜恒昌² 张光明² 康维新² 杨荣山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:轨道板预制浇筑过程中,随着浇筑的进行,混凝土水化反应剧烈,且由于此时混凝土强度较低,较强的水化反应会对轨道板的预制质量产生影响。针对这一问题,文章开展 CRTSⅢ型普通钢筋混凝土轨道板预制浇筑水化热变化的监测试验,明确轨道板预制浇筑过程中承受的温度荷载;采用有限元方法对预制过程中的应力变形进行分析,研究预制浇筑过程中水化热的产生对轨道板质量的影响。结果表明:(1)预制浇筑过程中,轨道板温度随着时间的变化先增大后减小,其中轨道板中部的温度峰值高于上下表面的峰值;(2)轨道板预制浇筑阶段,应对轨道板内部水化热进行重点关注,防止出现整体温降超过 18℃ 的情况,以保证轨道板的预制质量。

关键词:预制;浇筑;水化热;早期强度;温度;峰值

中图分类号:U213.2⁺1 文献标志码:A

Study on Pouring Hydration Heat of CRTSⅢ Ordinary Reinforced Concrete Track Slab

LI Baoyou¹ JIANG Hengchang² ZHANG Guangming² KANG Weixin² YANG Rongshan²

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

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: During the pouring process of the track slab, the concrete hydration reaction is intense, and because the concrete strength is low at this time, the strong hydration heat reaction will affect the prefabrication quality of the track slab. Therefore, the change of hydration heat in the precasting of CRTSⅢ ordinary reinforced concrete track slab is monitored and tested to determine the temperature load during the pouring process of the track slab. The finite element method was used to analyze the stress and deformation of the prefabrication process, and the influence of the hydration heat on the quality of the track slab during the precasting process was studied. The results show that: (1) during the pouring process, the temperature of the track slab increases first and then decreases with the change of time, and the peak value of temperature in the middle of the track slab is higher than that in the upper and lower surfaces; (2) during the pouring stage of the track slab, the internal hydration heat of track slab should be continuously monitored to prevent the overall temperature drop of more than 18℃, so as to ensure the precast quality of track slab.

Key words: precast; pouring; hydration heat; early strength; temperature; peak value

高速铁路轨道结构类型包括有砟轨道和无砟轨道,无砟轨道结构以其良好的稳定性、较少的维修工作

收稿日期:2019-05-09

作者简介:李保友(1982-),男,高级工程师。

引文格式:李保友,姜恒昌,张光明,等. CRTSⅢ型普通钢筋混凝土轨道板预制浇筑水化热分析[J]. 高速铁路技术,2019,10(6):35-40.

LI Baoyou, JIANG Hengchang, ZHANG Guangming, et al. Study on Pouring Hydration Heat of CRTSⅢ Ordinary Reinforced Concrete Track Slab [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 35-40.

量及较长的使用寿命等特点得以广泛应用^[1]。我国目前采用的板式无砟轨道类型有三类,其中 CRTSⅢ型板式无砟轨道是我国自主研发具有完全知识产权的有挡肩新型板式无砟轨道结构^[2]。随着 CRTSⅢ型板式无砟轨道结构在成灌铁路、郑徐铁路、武咸城际铁路等项目上的大规模铺设,针对 CRTSⅢ型板式无砟轨道结构的研究也不断增多,其施工工艺也不断完善^[3-6]。章健华^[7]等人对轨道板腔湿润工艺、自密实混凝土灌注工艺改进等进行了研究;惠宝^[8]针对桥梁地段 CRTSⅢ型无砟轨道施工中易出现的质量问题提出了具体的解决办法;李聪^[9]等人针对无砟轨道施工测试技术、无砟轨道自密实混凝土施工技术等重点分析研究。但截至目前,关于轨道板预制工艺方面的研究成果仍较少。

CRTSⅢ型轨道板采用工厂预制,保证其较高精度的轨道几何尺寸,且易于控制生产成本。轨道板预制过程中,由于水泥水化会产生大量水化热,而混凝土是热的不良导体,水泥产生的热量将聚集在结构物内部不易散失,从而导致混凝土内部温度有较大的上升。若养护不当,将导致轨道板产生包括裂纹在内的多种伤损,所以针对轨道板预制浇筑过程中水化热的分析具有较强的现实意义。因此,本文以无预应力的 CRTSⅢ型普通钢筋混凝土轨道板为研究对象,结合其现场预制浇筑过程,布置温度传感器,对轨道板预制过程进行全程监控,掌握轨道板预制浇筑过程中承受的温度荷载,采用有限元方法对预制过程应力变形进行分析,以提高 CRTSⅢ型轨道板的预制质量。

1 试验概况

在某制板厂进行普通钢筋混凝土轨道板预制浇筑水化热变化的监测试验,以确定轨道板在浇筑过程中的水化热变化情况及混凝土的应力应变,以提高轨道板的预制质量。试验中预制轨道板采用 C50 混凝土,板长 5 600 mm,宽 2 500 mm,厚 200 mm。

本试验的温度传感器采用 PT100 铂电阻测温元件,量程为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度为 $\pm(0.15 + 0.002|t|)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($|t|$ 为实测温度的绝对值)。在轨道板中部沿宽度方向布置 5 个温度传感器测点,每个测点处(即 A、B、C、D、E)的轨道板下表面、轨道板中部和轨道板上表面分别布置 1 个温度传感器,用以测量轨道板内部和上下表面的温度变化情况,测点布置如图 1 所示。

2 预制水化热

轨道板混凝土自 2017 年 7 月 28 日(以下简称为

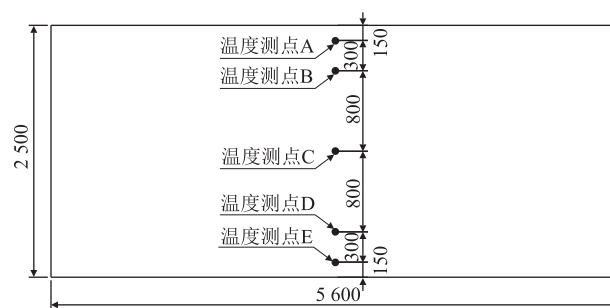


图1 轨道板温度传感器布置(mm)

“28日”)17:30开始浇筑,考虑到混凝土浇筑初期具有较强的流动性,数据波动较大,因此本试验自轨道板初凝时间即2017年7月28日20:00开始采集数据,2017年7月29日(以下简称为“29日”)11:30进行脱模,采集了全程的轨道板内部、轨道板表面以及环境温度数据,结果如图2、图3所示。

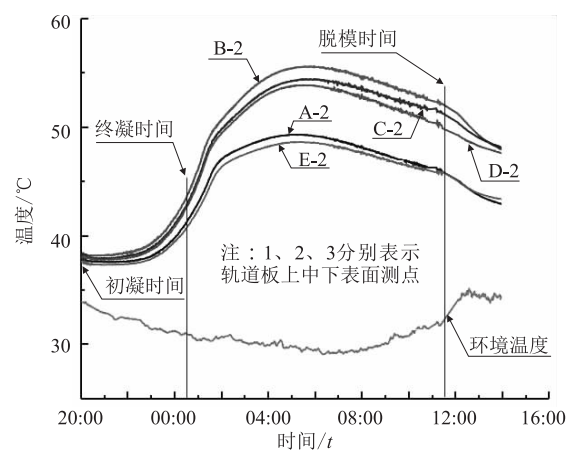


图2 轨道板中心温度变化

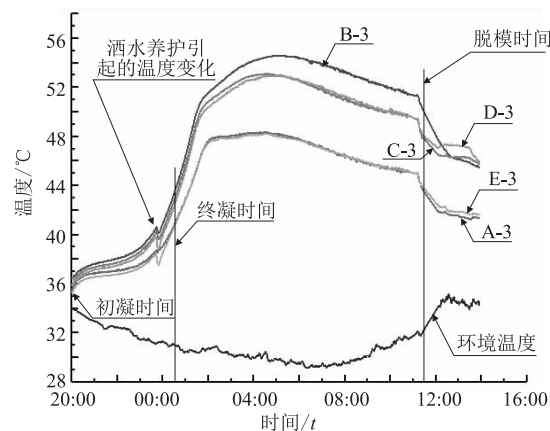


图3 轨道板下表面中心温度变化

由图2可知,截至28日22:00左右温度传感器A-2~E-2温度值升高不明显,说明在此期间现浇混凝土水化放热较缓;28日22:00左右至29日2:00

左右水化放热剧烈进行,温度值急剧上升;此后水化放热略有减缓,29 日 6:00 左右温度达到峰值,此后水化热逐渐减缓。其在 29 日 6:00 左右出现峰值的原因是随着轨道板水化放热的进行,轨道板内部热量积累,导致轨道板温度达到最高。

由图 3 可知,截至到 28 日 22:00 左右温度传感器 A-3~E-3 温度值升高不明显,说明在此期间现浇混凝土水化放热缓慢;28 日 22:00 左右至 29 日 2:00 左右水化放热剧烈进行,温度值急剧上升,在 29 日 00:00 左右对轨道板下表面(门型筋侧)洒水养护,洒水使得温度值短暂下降,后持续上升;此后水化放热开始减缓,29 日 4:30 左右温度值达到峰值。可以看出洒水对降低轨道温度有积极作用。

由图 2 和图 3 可知,轨道板水化放热导致轨道板的温度由板边向板中呈增大的趋势,轨道板对称位置测得的水化热基本一致;水化热温度值达到峰值后,混凝土水化放热开始减缓,水化热温度值逐渐降低;轨道板浇筑完成后,对轨道板下表面(门型筋侧)覆盖塑料薄膜养护,29 日 11:30 左右对轨道板脱模吊板,轨道板中的热量向周围环境中散发,水化热温度值快速下降,随着温度幅值的减小,水化热温度值下降逐渐减缓。轨道板上最大的温度荷载均出现于 B 点,因此单独提取 B 测点处的轨道板下表面、轨道板中部和轨道板上表面的温度数据,如图 4 所示。

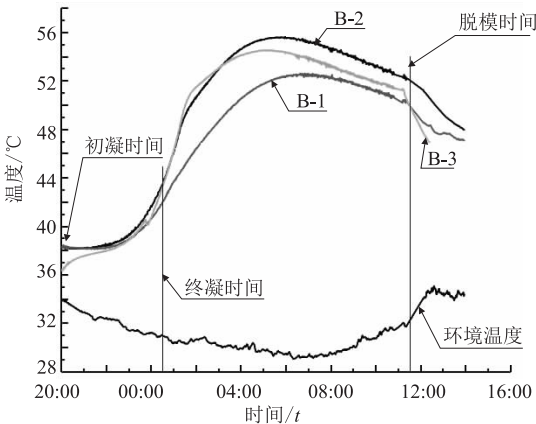


图 4 轨道板 B 点温度变化

图 4 中,水化热温度值的变化规律同图 2、图 3 基本一致,均随着时间的变化先增大后减小,其中轨道板中部的温度峰值高于上下表面的峰值,其升温荷载、降温荷载及升温、降温温度梯度如表 1 和图 5 所示。由于在 29 日 00:00 左右对轨道板下表面进行的洒水养护,加剧了混凝土水化放热的进行,使得轨道板下表面温度提前达到了峰值。达到峰值后,混凝土水化放热减缓,水化热温度值逐渐减小。轨道板脱模后,向周围

环境中散热,水化热温度值降低较快。对下表面进行洒水养护,故其水化热温度值下降更快。

表 1 温度荷载变化情况

| 位置 | 升温幅度 /℃ | 升温温度梯度 /(℃/m) | 最大温度荷载 /℃ | 降温温度梯度 /(℃/m) | 降温幅度 /℃ |
|-----|---------|---------------|-----------|---------------|---------|
| B-1 | 14 | 34 | 52.2 | 5 | 2.0 |
| B-2 | 17.4 | | 55.5 | | 2.5 |
| B-3 | 18.1 | 7 | 54.5 | 1.8 | 4.3 |

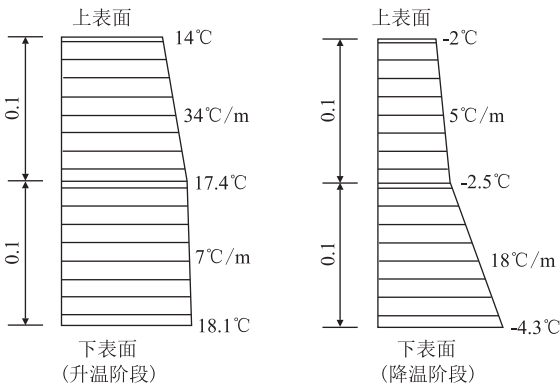


图 5 轨道板横截面温度荷载变化(m)

由图 5 可知,在升温阶段,轨道板下表面的升温幅度最高,为 18.1℃,轨道板上表面的升温幅度最低为 14℃,但轨道板上表面到中部的温度荷载梯度为 34℃/m,是轨道板中部到轨道板下表面的 4.8 倍;在降温阶段,轨道板下表面的降温幅度为 4.3℃,中部为 2.5℃,上表面为 2℃,同时轨道板中部到下表面的温度梯度荷载为 18℃/m,仅为上表面到中部的 3.6 倍。结果表明:无论在升温还是降温阶段,均是轨道板下表面的变温幅度最大,轨道板上表面到中部的温度荷载梯度最大。原因是在轨道板预制浇筑过程中,轨道板是倒着浇筑的,轨道板上表面被倒扣在模具中,导致散热困难,因此其温度变化较小,相反轨道板下表面直接与空气接触,散热性良好,故其温度变化最大。

3 轨道板预制浇筑水化热分析

3.1 轨道板预制浇筑水化热分析模型

根据轨道板的受力特点和结构特性,建立轨道板预制浇筑水化热分析模型,对轨道板预制过程中的受力状态进行数值模拟。其中,轨道板采用 SOLID45 单元进行模拟,在模拟过程中考虑轨道板自重、温度梯度等的作用。

在建立的轨道板预制浇筑水化热分析模型中,轨道板长度为 5.6 m,宽度为 2.5 m,厚度为 0.2 m,泊松比为 0.2,密度为 2 500 kg/m³,线膨胀系数为

0.000 01/℃。考虑到混凝土在终凝前仍具有流动性,因此对模型进行受力计算需在终凝后,查询相关资料^[10]可知,混凝土终凝时间约为浇筑后7 h,轨道板浇筑从28日17:30开始,故终凝时间为29日00:30,因此温度荷载按试验测得的终凝时间至脱模的温度变化曲线进行施加。

从轨道板温度测试数据的结果来看,在板的不同厚度位置存在较明显的温差,但在平面不同位置上,板的温度趋势基本一致;同时预制浇筑阶段存在升温 and 降温两个工况,因此分别针对上、中、下表面按升温 and 降温工况进行温度梯度组合,如表2所示。

表2 温度梯度组合表

| 工况 | 位置 | 温度梯度/(℃/m) |
|------|------|------------|
| 升温工况 | 上中表面 | 34 |
| | 中下表面 | 7 |
| 降温工况 | 上中表面 | -5 |
| | 中下表面 | -1.8 |

经过试验证实,胡长明^[11]等人提出的初凝后水泥浆体弹性模量时变方程与实际的混凝土强度增长曲线符合较好,故本文用其来模拟轨道板浇筑混凝土的弹性模量变化,公式为:

$$H(t) = 12.19 + \frac{225.87}{(t - 0.0125)}$$

(1)

$$E(t) = 25[1 - e^{(-\frac{25}{H(t)})}]$$

(2)

式中: $H(t)$ ——水泥浆体的粘性参数;

t ——时间(d);

$E(t)$ ——混凝土随时间变化的弹性模量(Pa)。

以30 min为一个间隔,计算得终凝后的混凝土弹性模量变化情况,结果如图6所示。

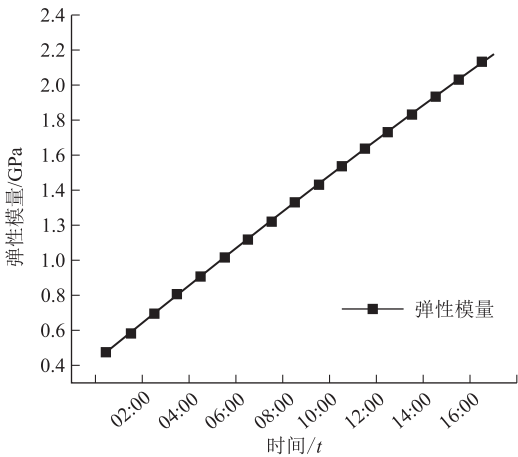


图6 混凝土弹性模量变化曲线

由图6可以看出,轨道板从终凝到脱模期间,混凝土的弹性模量基本呈线性增加的趋势。对于升温工况,按最不利情况考虑,弹性模量取升温工况时间段的

最大值,即 $E_{升} = 1.07$ GPa;同理对于降温工况,按最不利情况考虑,取 $E_{降} = 1.64$ GPa,如表3所示。

表3 工况组合表

| 工况 | 弹性模量/GPa | 位置 | 温度梯度/(℃/m) |
|------|----------|------|------------|
| 升温工况 | 1.07 | 上中表面 | 34 |
| | | 中下表面 | 7 |
| 降温工况 | 1.64 | 上中表面 | -5 |
| | | 中下表面 | -1.8 |

3.2 轨道板应力变化

按余宗明^[12]提出的混凝土强度龄期曲线模拟公式推算混凝土早期强度比较准确,因此本文也采用其推算混凝土从终凝到脱模之间的强度变化,公式为:

$$R_T = aT^3 + bT^2 + cT$$

(3)

式中: R_T ——水泥浆体的粘性参数,MPa;

T ——龄期(d);

$a、b、c$ ——常数。

以混凝土7 d、14 d和28 d的强度值带入上式,得出C50号混凝土的 $a = 0.000\ 075\ 3$, $b = -0.005\ 15$, $c = 0.121$ 。从而计算得到终凝至脱模之间的混凝土理论强度曲线,结果如图7所示。

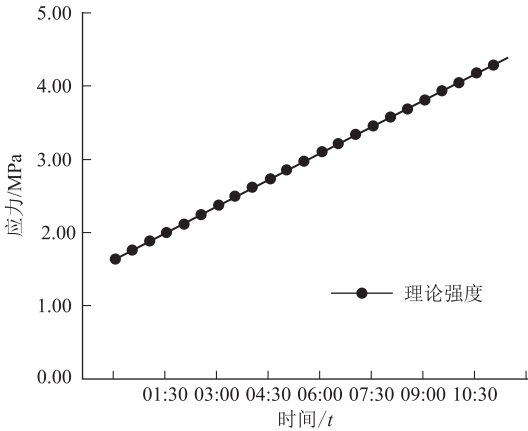


图7 混凝土理论强度曲线

由于在12个测点中,B-2强度曲线峰值最大,因此对比B-2测点的强度和理论强度结果表明:本试验温度条件下,在混凝土预制浇筑过程中,混凝土能够产生的最大应力仅为0.27 MPa,而仅在终凝时间时,混凝土的早期强度已达到1.6 MPa,远高于预制浇筑过程中温度荷载及温度梯度荷载作用产生的应力强度,同时由于在预制浇筑过程中,轨道板四周和上表面被模具所约束,因此,水化热不会造成混凝土的开裂。

3.3 极端荷载条件

依据前文研究,在本试验实测温度数据荷载的条件下,轨道板不会发生开裂现象。但在实际施工过程中,现场可能出现昼夜温差较大的极端情况。故下面分别针对轨道板的升温 and 降温阶段进行研究,以获得

轨道板可允许的最大升温与降温荷载,为现场施工提供指导。

通过前文研究发现,在轨道板预制浇筑过程中,轨道板出现的温度梯度较小,在大幅度升降温的情况下,温度梯度对板内应力的影响较弱,因此对于极端荷载条件下的研究均不考虑温度梯度,均按整体温升和温降考虑。

针对升温荷载,取轨道板温度峰值时间的弹性模量进行有限元模拟,结果表明:在轨道板预制浇筑的整体升温阶段,由于轨道板终凝不久,其弹性模量较低,故升温阶段的混凝土强度相对较低,过高水化温度会导致混凝土水分蒸发过快。干缩严重等,结合阮静^[13]等人的研究成果(混凝土升温不宜超过70℃),建议水化温度不宜过高,以不超过70℃为宜。

考虑到在实际预制浇筑过程中,可能会出现温度骤降的情况,按最不利工况考虑进行整体温降研究。弹性模量取最终弹性模量($E = 3.45 \text{ GPa}$),即在最高温55.5℃的基础上,分别整体降温10℃、20℃和30℃计算轨道板中的最大拉应力,结果如图8所示。

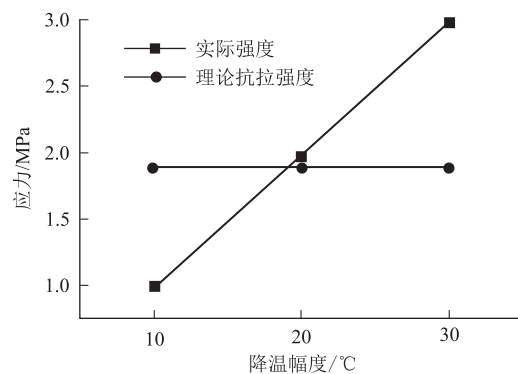


图8 不同降温幅度下的轨道板强度

由图8可知,随着降温幅度的增大,轨道板产生的拉应力近似线性增加,且最大拉应力均出现在四边角处。其中在降温18℃的情况下,在四边角处出现了1.79 MPa的最大拉应力,接近于C50混凝土的抗拉强度设计值1.89 MPa;同时考虑到轨道板脱模后,一般会在空气中静置4 h,特殊情况下有可能放置超时,若此时突遇骤然降温,极易出现损伤。因此建议在轨道板降温阶段,对混凝土四角处的水化热温度进行实时监测,采用蒸汽养护等手段,防止轨道板内降温幅度超过18℃。

4 结论

本文通过对CRTSⅢ型普通钢筋混凝土轨道板预制浇筑水化热变化的监测试验及有限元模拟,提取了相应位置的轨道板混凝土应力,经过对比分析得出如

下结论:

(1)在预制浇筑过程中,轨道板温度随着时间的变化先增大后减小,其中轨道板中部的温度峰值高于上下表面的峰值,约为55℃。洒水养护能在一定程度上降低水化产生的热量,对轨道板内部升温有一定程度的改善。

(2)在轨道板升温阶段,由于轨道板终凝不久,其弹性模量低,故升温阶段的混凝土强度相对较低,此时过高水化温度会导致混凝土水分蒸发过快,干缩严重,因此建议在轨道板升温阶段,对混凝土内的水化热温度进行实时监测,采取蒸汽养护措施防止因过度升温造成轨道板干缩。

(3)在整体温降18℃的情况下,轨道板四边角处出现了1.79 MPa的最大拉应力,接近于C50混凝土的抗拉强度设计值,建议在轨道板降温阶段,将18℃的降温作为安全标准,并采取蒸汽养护措施避免轨道板的温度骤降超过此限值,导致轨道板四角处出现开裂。

参考文献:

- [1] 王安华. CRTSⅢ型板式无砟轨道耐久性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
WANG Anhua. Study on the Durability of CRTSⅢ Ballastless Slab Track [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [2] 高霞. 寒冷地区CRTSⅢ型板式无砟轨道力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
GAO Xia. Study on Mechanical Characteristics of CRTSⅢ Slab Ballastless Track in Cold Region [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [3] 陈孟强. CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土施工关键技术[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(5): 82-86.
CHEN Mengqiang. Key Construction Technology for Self-compacting Concrete of CRTSⅢ Slab Ballastless Track[J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(5): 82-86.
- [4] 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.
- [5] 李保友, 颜华. 成都至都江堰铁路路基段CRTSⅢ型板式无砟轨道纵向连接设计[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(1): 71-75.
LI Baoyou, YAN Hua. Study on Structure Design of Longitudinal Connection of CRTSⅢ Slab Ballastless Track for Subgrade Section of Chengdu-Duijiangyan Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(1): 71-75.
- [6] 谭盐宾, 谢永江, 李化建, 等. 高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土性能研究[J]. 铁道建筑, 2015, 55(1): 132-136.
TAN Yanbin, XIE Yongjiang, LI Huajian, et al. Research on Self-compacted Concrete Performance for CRTSⅢ Slab-type Ballastless Track on High Speed Railway[J]. Railway Engineering, 2015(1):

- 132-136.
- [7] 章健华, 李荣飞, 刘赞群. CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土充填层施工技术研究[J]. 中国铁路, 2013, 52(12): 33-37.
ZHANG Jianhua, LI Rongfei, LIU Zhanqun. Study on Construction Technology for Self-compacting Concrete Filling Layer of CRTSⅢ Slab Ballastless Track[J]. Chinese Railways, 2013, 52(12): 33-37.
- [8] 惠宝. 谈桥梁地段 CRTSⅢ型板式无砟轨道施工工艺[J]. 山西建筑, 2015, 41(14): 177-179.
HUI Bao. Discussion on the Construction Technology of Bridge Section CRTSⅢ Plate Ballastless Track[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(14): 177-179.
- [9] 李聪, 马超, 姬付全. CRTSⅢ型板式无砟轨道施工技术应用研究[J]. 交通建设与管理, 2014, 51(18): 205-208.
LI Cong, Ma Chao, JI Fuquan. Application of Construction Technology for CRTSⅢ Slab Ballastless Track[J]. Transportation Construction & Management, 2014, 51(18): 205-208.
- [10] 张克跃. 混凝土结构(上)—混凝土结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHANG Keyue. Concrete Structure (Book I)—Design Principle of Concrete Structure [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [11] 胡长明, 王玉洲, 马继明. 初凝后水泥浆体的弹性模量研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(2): 177-182.
HU Changming, WANG Yuzhou, MA Jiming. Elastic Modulus Research on Initial Setting of Cement Pastes[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2012, 44(2): 177-182.
- [12] 余宗明. 按混凝土强度龄期曲线推算混凝土早期强度[J]. 施工技术, 1994, 23(10): 5-8.
YU Zongming. Estimation of Early Strength of Concrete according to Age Curve of Concrete Strength[J]. Construction Techniques, 1994, 23(10): 5-8.
- [13] 阮静, 叶见曙, 谢发祥, 等. 高强度混凝土水化热的研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 53-56.
RUAN Jing, YE Jianshu, XIE Faxiang, et al. Study on Heat of Hydration on High Strength Concrete [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(3): 53-56.

(编辑: 赵立红 张红英)

(上接第14页)

- [5] 刘鑫, 刘增杰. 秦沈客运专线高速试验段线路缓和曲线动力学仿真分析[J]. 铁道学报, 2004, 26(1): 82-87.
LIU Xin, LIU Zengjie. Rail/Wheel Dynamics Simulation for the Transition Curve of the High Speed Test Section of the Qinshen Passenger Railway Line [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(1): 82-87.
- [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] 赵海燕. 高速铁路缓和曲线线型浅析[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(1): 15-17.
ZHAO Haiyan. Analysis of Transition Curved Lines on High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(1): 15-17.
- [8] 张滨. 高速铁路缓和曲线线型探讨[J]. 铁道建筑, 1995, 35(12): 13-17.
ZHANG Bin. Discussion on Transition Curve of High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 1995, 35(12): 13-17.
- [9] 周宪忠. 关于我国高速铁路缓和曲线的探讨[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 69-74.
ZHOU Xianzhong. A Discussion on China's Transition Curve on High Speed Railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(1): 69-74.
- [10] 朱文升. 4-3-4型与3次改善型缓和曲线理论上的主要特征及其差异[J]. 中国铁道科学, 1997, 18(2): 36-45.
ZHU Wensheng. The Main Features and the Differences between Transition Curves of 4-3-4 Shape and 3 Power Improved Shape [J]. China Railway Science, 1997, 18(2): 36-45.
- [11] 李木松. 高速铁路缓和曲线线型及其行车动力特性对比分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2010.
LI Musong. Comparison and Analysis on the Types of the High-speed Railway Transition Curves and Vehicle Dynamic Behavior [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2010.
- [12] TB/T 2360-1993 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准[S].
TB/T 2360-1993 Test Method and Evaluation Standard for Dynamic Performance of Railway Locomotives [S].
- [13] 95J01-L 高速试验列车动力车强度及动力学性能规范[S].
95J01-L Specification for Strength of Motor Car and Dynamics Performance of High Speed Test Train [S].
- [14] 李向国, 李木松, 卜建清, 等. 2种铁路缓和曲线线型力学性能对比分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 1-6.
LI Xiangguo, LI Musong, BU Jianqing, et al. Comparative Analysis on the Linetype Mechanical Performances of Two Railway Transition Curves [J]. China Railway Science, 2009, 30(6): 1-6.
- [15] TB 10098-2017 铁路线路设计规范[S].
TB 10098-2017 Code for Design of Railway Line [S].

(编辑: 苏玲梅 白雪)