

文章编号: 1674—8247(2018)06—0005—06

高速铁路自密实混凝土合理养护温度研究

敬洪武¹ 潘自立² 王安琪³ 康维新³

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

摘 要: CRTSⅢ型无砟轨道自密实混凝土由于其结构的密闭性, 养护过程中混凝土水化热不易散发, 热量积聚容易产生较大的温度梯度和较高的整体温度, 会导致其产生较大的温度应力而出现早期裂缝。对此, 本文开展现场试验, 对养护过程中自密实混凝土的温度进行实时动态监测, 明确自密实混凝土在养护过程中所承受的温度荷载, 并建立有限元模型, 分析自密实混凝土养护过程中在温度梯度、整体温降等荷载作用下的应力应变, 研究冬季施工合理温度控制条件。得出以下结论: (1) 养护前期自密实混凝土中部与边缘区域会达到 5 ℃ 的温差, 养护结束时混凝土的整体温降约为 5 ℃; (2) 冬季施工时, 需确保自密实混凝土在养护 1 d 时间内中间与边缘区域的温度差值不超过 8 ℃, 养护过程中自密实混凝土的整体温降不超过 10 ℃。

关键词: 自密实混凝土; 养护过程; 温度梯度; 整体温降

中图分类号: U213.2 文献标志码: A

Study on Reasonable Curing Temperature of Self-compacting Concrete for High-speed Railway

JING Hongwu¹ PAN Zili² WANG Anqi³ KANG Weixin³

(1. Chengdu-Guiyang Railway Company, Chengdu 610031, China;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
3. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Due to the structure tightness of the self-compacting concrete for CRTSⅢ ballastless track, the hydration heat in the concrete is not easy to be dissipated during the curing. The accumulation of heat is likely to produces larger temperature gradient and a higher overall temperature, which will lead to a larger temperature stress and early cracks. Therefore, this paper carries out field tests to monitor dynamically the temperature of self-compacting concrete in real time during curing, clarifies the temperature load of self-compacting concrete during curing, establishes a finite element model to analyze the stress and strain of self-compacting concrete during curing under the action of temperature gradient and overall temperature loads and studies the reasonable temperature control conditions for winter construction. Study results show that the temperature difference between the middle and the edge of the self-compacting concrete in the early stage of curing will reach 5 ℃ and the overall temperature of concrete will drop about 5 ℃ at the end of curing. During construction in winter, it is necessary to ensure that the temperature difference between the edge region and the middle region of self-compacting concrete cannot exceed 8 ℃ during curing for 1d and the overall temperature of the self-compacting concrete during curing cannot drop over 10 ℃.

Key words: self-compacting concrete; curing process; temperature gradient; overall temperature drop

收稿日期: 2018-11-20

作者简介: 敬洪武(1969-), 男, 高级工程师。

引文格式: 敬洪武, 潘自立, 王安琪, 等. 高速铁路自密实混凝土合理养护温度研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(6): 5-10.

JING Hongwu, PAN Zili, WANG Anqi, et al. Study on Reasonable Curing Temperature of Self-compacting Concrete for High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 5-10.

CRTS III型板式无砟轨道^[1]的结构特点之一就是采用了高稳定性自密实混凝土^[2-3]作为充填材料,与轨道板形成复合结构,共同承受列车动荷载,自密实混凝土在整个结构中起承力、传力、支撑调整与缓冲等作用,其质量的优劣直接决定轨道结构的服役性能及使用寿命。

自密实混凝土层作为轨道板和支承层(或底座板)之间的现浇结构,水化反应热量不易散发,加之不能洒水养护等,自密实层中心可能会产生较高温度,降温后有可能产生初始裂缝^[4-5]。为掌握自密实混凝土成形过程中温度及温度应力,本文开展有关自密实混凝土浇筑现场试验,布置相应传感器,对自密实混凝土养护过程中的温度进行全程监控,明确自密实混凝土在养护过程中承受的温度荷载。采用有限元方法对自密实混凝土温度应力变化进行全程分析,为自密实混凝土的施工过程中温度控制提出建议。

1 试验概况

为探究自密实混凝土在养护过程中内部钢筋混凝土的水化热变化情况,确定自密实混凝土合适的施工条件,在四川省乐山(E103°43', N29°35')现场试验段开展了对自密实混凝土从灌注完成到养护初期内部钢筋混凝土水化热变化情况的监测试验。

自密实混凝土长5 600 mm,宽2 700 mm,厚100 mm,强度等级采用C40,中部单层配筋。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),温度传感器布置在内部钢筋网上,钢筋网上共设置9个测点,沿自密实混凝土长度、宽度方向上各对称布置3个测点,分别用于测量钢筋混凝土中间和边缘区域温度变化情况,具体测点布置如图1所示。

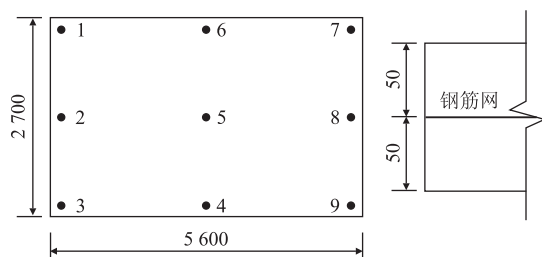


图1 自密实混凝土测点布置示意图(mm)

2 自密实混凝土温度变化

2.1 各测点温度变化规律

自密实混凝土的温度变化数据在灌注完成15 h

后开始记录,试验共记录了从9月16日-9月20日4 d内自密实混凝土各测点的温度变化情况,4 d内各测点的温度变化总体走向如图2所示。

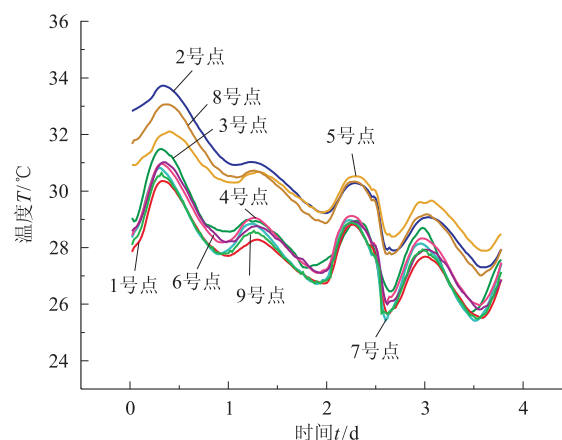


图2 各测点温度总体变化图

从图2可以看出,自密实混凝土在养护过程中,各测点温度的总体变化趋势相同,都随外界环境温度的起伏而波动。其中,2号、5号、8号测点的平均温度在养护开始的前2 d时间内明显高于其他测点,在后2 d的养护过程中,各测点依旧保持着相同的温度变化趋势且温度逐渐趋于一致。

养护3 d时自密实混凝土的整体温降最大约为4℃,养护4 d时自密实混凝土的整体温降最大约为5℃,4 d后,自密实混凝土内部各测点之间温度差异很小,基本上可认为此后自密实混凝土各处没有明显温差。

2.2 长度方向上的温度变化规律

为更直观地描述自密实混凝土在长度方向上的温度差异,现将1号、6号、7号测点,2号、5号、8号测点,3号、6号、9号测点分别分为A、B、C三组横向对比进行分析,得到各组测点的温度变化曲线如图3(a)~(c)所示。

从图3(a)~(c)可以看出,除B组3个测点在养护初期半天的时间内温度有少许差异外,其余时间B组3个测点及A、C组中的各测点之间温度值差异小且温度变化曲线几乎重合,基本上可认为A、B、C组中各测点温度变化一致,不存在长度方向上的温差。

2.3 宽度方向上的温度变化规律

再将1号、2号、3号测点,4号、5号、6号测点,7号、8号、9号测点分别分为D、E、F3组进行纵向对比分析,各组测点的温度变化曲线如图3(d)~(f)所示。

从图3(d)~(f)可以看出,D、E、F3组测点的温

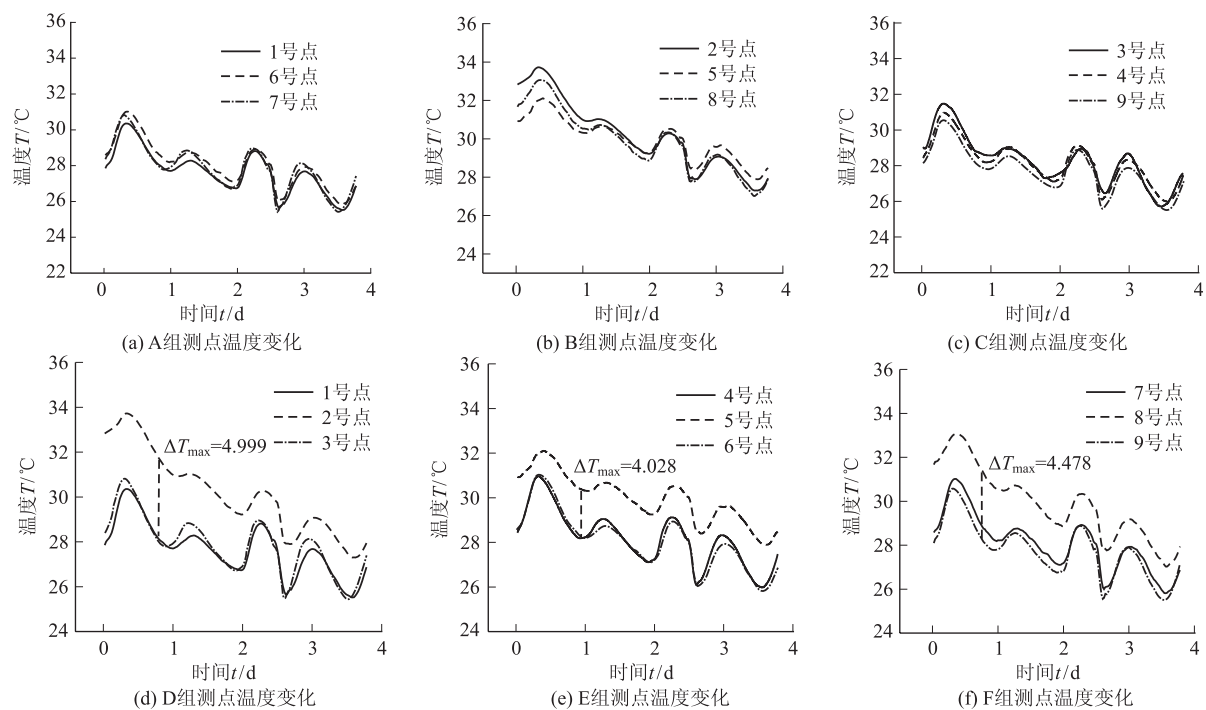


图3 长度、宽度方向各测点温度变化规律

度变化趋势基本相同,对于每组测点来说,都是中部测点(2号、5号、8号测点)区域的温度高于边缘测点区域的温度,其中,D、E、F 3组测点养护前2 d的时间内温差较大,D组测点之间最大温度差值为4.999℃,E组测点之间最大温度差值为4.028℃,F组测点之间最大温度差值为4.478℃,随着养护时间的增加,后2 d各组3个测点之间的温度差值逐渐减小,在第四天结束时,除E组各测点之间的温度差值略大一些外,其余两组各测点之间的温度差值都保持在1℃左右的范围内。

对自密实混凝土成型过程中温度变化规律分析发现,在龄期1 d内主要承受温度梯度荷载(即板中与板长边间存在的温差)。随着龄期增长水化反应逐渐放缓,自密实混凝土温度趋于一致,温度梯度荷载逐渐变小,此时主要为整体升降温荷载。

3 模型建立与试验结果分析

3.1 模型的建立与参数选取

根据自密实混凝土的结构特性,利用 Ansys 有限元分析软件,对养护初期内自密实混凝土的受力状态进行模拟,其中,混凝土采用实体单元 SOLID45 进行模拟,内部钢筋网采用杆单元 LINK180 进行模拟。由于自密实混凝土处于轨道板下近似封闭的空腔中,针对充填层的封闭结构,对自密实混凝土有限元模型进行上下全约束。

由于自密实混凝土的抗拉强度与弹性模量在养护初期内随时间的增加而增长,直接采用规范规定的统一计算参数显然与实际情况不符。通过查阅相关文献,可以得到 C40 混凝土的弹性模量与龄期^[6]之间的关系为:

E=32.53(1-e^{-0.338t}) (1)

式中:E——C40 混凝土弹性模量;

t——龄期。

实测 C40 混凝土强度与龄期之间关系^[7]及其余各计算参数如表 1 所示。

表1 自密实混凝土计算参数表

部件	物理量	数值
混凝土	长×宽×厚/m	5.6×2.7×0.1
	泊松比	0.2
	质量密度/(kg/m ³)	2500
	线膨胀系数/(1/℃)	1×10 ⁻⁵
	抗拉强度(0.5d)/Pa	0.38×10 ⁶
钢筋	直径/m	0.012
	线膨胀系数/(1/℃)	1×10 ⁻⁵

3.2 计算假定及试验结果分析

由于在实际的现场监测试验中,我们无法精确测量自密实混凝土上每个点的温度变化情况,所以在对宽度方向上自密实混凝土的温度梯度荷载进行模拟时,假定自中间区域向上下两边的温度梯度呈线性分布,且忽略长度和高度方向上的温度差异。

根据现场的实测数据,以 2 h 为一个时间节点,分

别取宽度方向上各测点的温差极值,计算养护4 d内自密实混凝土在不同弹性模量与温差作用下的受力变形。由于荷载、结构及约束的对称性,下面只取试验中4个测点(2号、3号、4号、5号测点)的应力进行对比分析,养护4 d内各测点纵向应力及最大拉应力变化如图4所示。

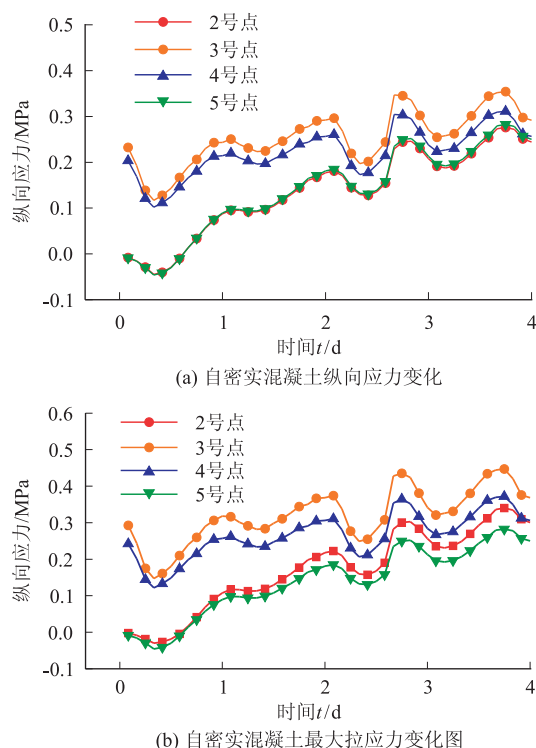


图4 养护初期各测点应力变化

从图4可以看出,对于自密实混凝土来说,各测点纵向应力与最大拉应力变化趋势基本相同,都是随自身温度的起伏而波动,在温度变化的波峰处对应应力变化的波谷,温度变化的波谷则对应应力变化的波峰,这是由于处在温度波谷处的测点与外界温差变大,使得测点在此处产生了局部应力极值。

对于纵向应力来说,3号、4号测点的应力值要高于2号、5号测点,其中,3号测点纵向应力的最大值为0.35 MPa,4号测点纵向应力的最大值为0.31 MPa,2号、5号测点纵向应力变化曲线几乎完全重合,应力极值都为0.28 MPa,可以看出,养护过程中自密实混凝土的纵向应力在宽度边缘处达到最大,中间区域混凝土的纵向应力略低于边缘区域,但各测点之间纵向应力差值很小,都在0.3 MPa的范围内波动。

对于最大拉应力来说,3号、4号测点的应力值同样高于2号、5号测点,其中,3号测点的拉应力极值为0.44 MPa,4号测点的拉应力极值为0.37 MPa,2号测点的拉应力极值为0.34 MPa,5号测点的拉应力极值

为0.28 MPa,可以看出,养护过程中自密实混凝土宽度边缘处的最大拉应力同样高于中部区域的最大拉应力,各测点之间最大拉应力相差也不大,差值在0.7 MPa内的范围波动。

为直观描述养护初期自密实混凝土在各时间节点处的应力变化情况,取养护12 h处自密实混凝土的竖向应力及最大压应力云图(如图5所示)进行分析,其他不同时间节点处混凝土的应力云图相似而量值不同。

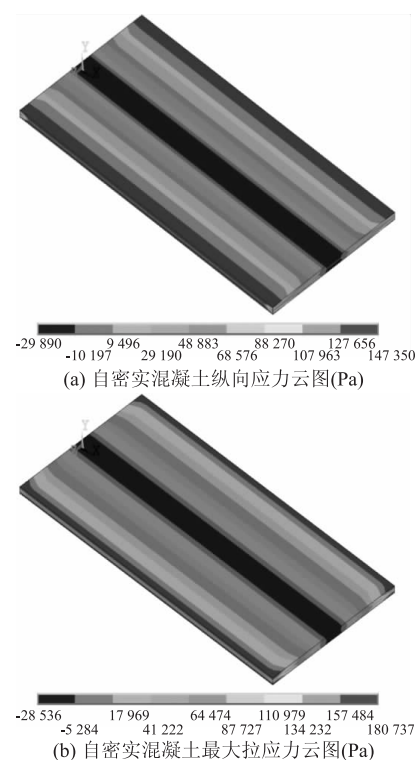


图5 养护12 h时自密实混凝土应力云图

从图5(a)可以看出,自密实混凝土在对称荷载及约束作用下,其纵向应力云图也呈对称分布,纵向应力以拉应力为主,应力量值由中间向边缘区域逐渐增大,并在边缘区域达到纵向应力的最大值0.14 MPa,这是由于养护过程中的自密实混凝土处于轨道板与底座板之间近似封闭的空间,在温度荷载作用下,自密实混凝土不同部位热胀冷缩程度不同,边缘区域温度最低,在此会出现应力极值。

从图5(b)可以看出,自密实混凝土的最大拉应力云图与纵向应力云图分布规律相似,都是由中间区域向边缘区域应力逐渐增大,边缘区域有最大拉应力0.18 MPa,查阅相关文献可知,此时拉应力极值并未超过龄期内(0.5 d)混凝土的抗拉强度极限值0.38 MPa,自密实混凝土不会被拉坏,但边缘区域的

自密实混凝土仍是养护过程中最危险的位置,温差过大时极有可能产生温度裂缝。

4 冬季施工工况及分析

由于其自身的特性,环境温度对混凝土的生产质量影响极大,在之前的现场试验中,自密实混凝土在养护初期内的温差极值约为 5℃,温度梯度作用下自密实混凝土的拉应力较小,这是由于试验所处的施工环境为秋季温度适宜期,在适宜的施工环境下,混凝土的施工质量会得到保障,但在实际的大规模工程建设时,受工期的制约,低温环境^[8]下的混凝土施工是不可避免的。为此,需要掌握低温环境下自密实混凝土的施工特点及规律,为自密实混凝土的冬季施工的温度控制提出合理建议。

4.1 施工工况确定

四川省在我国气候分区中属于夏热冬冷地区,冬季室外平均温度^[10]在 0~10℃,低温环境下,自密实混凝土边缘区域的温降速度比中间区域温降速度快,会使得养护前期自密实混凝土中间与边缘区域形成很大温差,同时,早龄期混凝土的强度增长缓慢,在中部与边缘区域温度梯度作用下自密实混凝土极有可能产生早期裂纹,从而影响后续脱模时混凝土的施工质量,为得到低温条件下自密实混凝土的应力变化规律,结合现场实测的温度数据,分别取中部混凝土与边缘混凝土温度差值为 6℃、8℃、10℃、12℃,计算养护 12 h 时混凝土最大拉应力与其抗拉极限强度之间的关系。

在冬季施工时,低温天气会使得自密实混凝土的温度在很短的时间内产生骤降,此时可以视为自密实混凝土在低温环境下产生了整体温降,即忽略养护过程中的温度波动,只考虑养护起始于结束时的温降幅度,结合之前的试验数据可知,养护 3 d 后自密实混凝土的温度下降了约 4℃,在低温条件下整体温降下降幅度会更甚,为得到自密实混凝土的应力随温降幅度的变化规律,现分别取整体温降为 6℃、8℃、10℃、12℃,计算养护 3 d 后混凝土最大拉应力与其抗拉极限强度的关系,具体计算工况如表 2 所示。

表 2 计算工况表

工况号	温度梯度差值/℃	工况号	整体温降/℃
1	6	5	6
2	8	6	8
3	10	7	10
4	12	8	12

4.2 结果分析及建议

根据确定的施工工况,计算得到自密实混凝土在不同工况下的应力变化如图 6 所示。

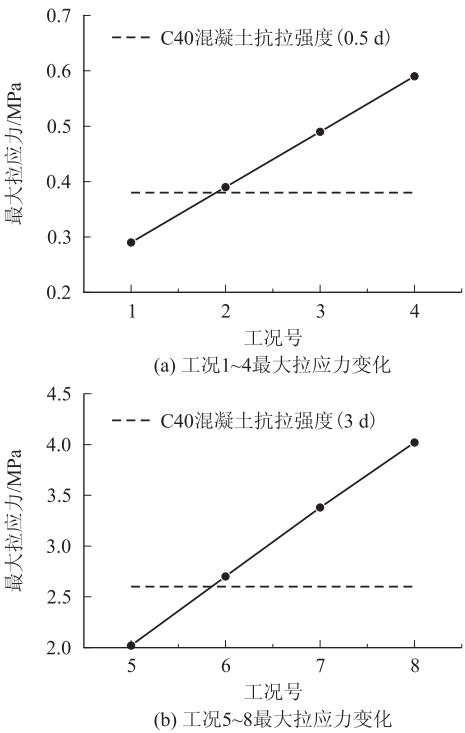


图 6 不同工况下的应力变化图

由 6(a)可知,自密实混凝土的最大拉应力随温度梯度的增加而逐渐增大,当中间与边缘区域混凝土的温度梯度差值为 6℃、8℃、10℃、12℃时,自密实混凝土的最大拉应力分别为 0.29 MPa、0.39 MPa、0.49 MPa和 0.59 MPa,可以看出,拉应力随温度梯度差值变化的线性幅值为 0.05 MPa/℃,当温度梯度差值超过 8℃时,此时自密实混凝土的拉应力极值已经超过龄期内混凝土的抗拉强度 0.38 MPa,边缘区域的自密实混凝土会在温度应力的作用下产生裂缝甚至被拉坏。

由图 6(b)可知,自密实混凝土的拉应力同样也随整体温降幅度的增大而增大,当整体温降为 6℃、8℃、10℃、12℃时,最大拉应力分别为 2.02 MPa、2.70 MPa、3.38 MPa与 4.06 MPa,拉应力随整体温降的线性变化幅值为 0.34 MPa/℃,当温降超过 10℃时,混凝土所产生的最大拉应力已经超过此时龄期内的抗拉强度极限 2.6 MPa,自密实混凝土将在温度应力的作用下产生裂缝,影响后续混凝土的脱模质量。

综上分析可知,为保证冬季施工时自密实混凝土在养护过程中的生产质量,需对养护过程中混凝土的温度变化进行把控,在养护初期 1 d 的时间内,由于混

凝土强度还处在较低的水平,需确保混凝土中间与边缘区域的温度差值最大不超过 8°C ,在脱模前的整个养护过程中,应确保混凝土的起始养护降温幅度不超过 10°C 。

5 结论

本文针对自密实混凝土施工过程中温度变化对其质量影响的问题,以CRTSⅢ型自密实混凝土的施工为例,开展现场试验,埋设温度传感器,对养护过程中自密实混凝土的温度进行了监测,得出了其在养护过程中承受的温度荷载。利用有限元方法,对自密实混凝土的养护过程进行受力分析,并对冬季自密实混凝土的施工提出合理工况,进行相应计算,提出在冬季施工时对自密实混凝土温度控制的建议。

(1)受外界温度及混凝土水化放热影响,自密实混凝土在养护初期间区域与边缘区域混凝土的温度差值能达 5°C ,其中中部区域混凝土温度最高,养护4 d后,混凝土各部位温度基本无差异,混凝土养护起始的整体降温约为 5°C 。

(2)养护过程中混凝土的应力变化与其自身温度波动相关,纵向应力与最大拉应力变化趋势相同且应力云图分布相似,拉应力极值在自密实混凝土边缘处产生。

(3)自密实混凝土冬季施工时,要控制养护1 d时间内混凝土中间与边缘区域的温度差值不超过 8°C ,养护起始自密实混凝土的整体降温不超过 10°C 。

参考文献:

- [1] 何华武. 无碴轨道技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
HE Huawu. Ballastless Track Technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [2] 李秋义. 郑徐高铁 CRTS Ⅲ 型板式无砟轨道主要技术创新[J]. 铁

道工程学报, 2017, 34(12): 18-23.

LI Qiuyi. The Main Technical Innovation of CRTS III Slab Track for Zhengzhou-Xuzhou High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(12): 18-23.

- [3] 陈孟强. CRTS Ⅲ 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 CRTS III Slab Ballastless Track [J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(5): 82-86.

- [4] 黄健. 高速铁路板式无砟轨道结构充填层自密实混凝土技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.

HUANG Jian. Research on Self-compacting Concrete Technology for Filling Layer of Slab Ballastless Track of High-Speed Railway [D]. Changsha: Central South University, 2011.

- [5] 李吉林. 高速铁路 CRTS Ⅲ 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. Construction Quality Management and Control for CRTS III Slab Ballastless Track Engineering of High-Speed Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

- [6] 刘宏伟. 混凝土早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: Hehai University, 2006.

- [7] 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 Conversion Relation Between Tensile Strength and Compressive Strength of Ready-mixed Concrete at Different Age [J]. Building Structure, 2010, 40(2): 109-111.

- [8] 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. Study on Quality Control for Concrete Construction in Winter in Cold Regions [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.

(编辑:车晓娟 张红英)