文章编号:1672-3961(2024)01-0109-14 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2022.363

混凝土单箱三室箱梁水化热温度场及应变场模型试验

王鹏[1],黄成[2],赵国浩[3],张峰[3*]
(1.招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 2.广西路建工程集团有限公司, 广西 南宁 530001; 3.山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要:为研究单箱三室混凝土箱梁水化热温度场及应变场分布规律,在广西来宾浇筑混凝土箱梁缩尺(1∶2)模型,埋置 148 个温度传感器和 20 个应变传感器,并布置气象传感器,通过现场实测数据分析,得到 C60 高强混凝土箱梁水化热温度场分布规律。单箱三室箱梁水化热共分为 3 个阶段:温升阶段(0~24 h)、快速温降阶段(24~96 h)和平稳温降阶段(96~240 h)。箱梁截面平均温度需 179 h 才低于入模温度,说明箱梁水化产生的热量至少需要 7 d 才能完全消散。全截面温度峰值为浇筑后 24 h,最高区域为梗腋位置处,最高温度达 90.2 ℃,此时顶板最大横向温差达 32.2 ℃。受分层浇筑影响,浇筑后12 h,边腹板最大竖向温差达 40.1 ℃,现场可观察到施工冷缝。梗腋处温度场分布复杂,梗腋最大横向温差为 22.5 ℃,最大竖向温差为 29.9 ℃,梗腋表面横向收缩应变小于竖向。梗腋外表面温度较低且受模板约束,应变小于梗腋内部, 有 6 个梗腋存在竖向开裂风险,最大收缩拉应力为抗拉强度的 1.51 倍。

关键词:水化热;试验模型;温度场;应变场;混凝土箱梁
中图分类号:U441.5 **文献标志码**:A
引用格式:王鹏,黄成,赵国浩,等. 混凝土单箱三室箱梁水化热温度场及应变场模型试验[J].山东大学学报(工学版),2024,54(1):109-122.
WANG Peng, HUANG Cheng, ZHAO Guohao, et al. Experiment of the model of hydration heat temperature field and strain field of concrete single box and three chamber girder[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(1):109-122.

Experiment of the model of hydration heat temperature field and strain field of concrete single box and three chamber girder

WANG Peng[1], HUANG Cheng[2], ZHAO Guohao[3], ZHANG Feng[3*]
(1. China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co. Ltd., Chongqing 400067, China; 2. Guangxi Road Construction Engineering Group Co. Ltd., Nanning 530001, Guangxi, China; 3. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In order to study the distribution law of concrete hydration heat temperature field and strain field in concrete single box and three chamber girder, a concrete box girder scaled-down(1∶2) model was cast in Laibin, 148 temperature sensors and 20 strain sensors were embedded in the concrete. Meteorological sensors were arranged, and the distribution law of hydration heat field of C60 high-strength concrete box girder was obtained through the analysis of field actual measurement data. The research results showed that the hydration heat of single-box three-compartment box girder was divided into three stages: temperature rise stage (0-24 h), rapid temperature drop stage (24-96 h) and smooth temperature drop stage (96-240 h). The average temperature of the box girder cross-section needed 179 h before it was lower than the entering temperature, the heat generated by the hydration of the box girder needed at least 7 d to be completely dissipated; the peak temperature of the whole cross-section was 24 h after pouring, and the highest area was at the pedicle axillary position, with the highest temperature reaching 90.2 ℃, and the maximum horizontal temperature difference of the top plate reached 32.2 ℃ at this time. Influenced by the layered pouring, the maximum vertical temperature difference of the side web reached 12 h after pouring 40.1 ℃, and the construction cold joints could be observed on the site. The temperature field distribution at the stalk axle was complicated, and the maximum transverse temperature difference at the stalk axle was 22.5 ℃ and the maximum vertical temperature difference was 29.9 ℃, and the transverse shrinkage strain at the surface of the

收稿日期:2022-11-01
第一作者简介:王鹏(1973—),男,山东邹平人,高级工程师,博士,主要研究方向为桥梁结构可靠性与安全性评估。E-mail: wangpeng@cmhk.com
*通信作者简介:张峰(1978—),男,江苏泰州人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为桥梁加固。
E-mail: zhangfeng2008@ mail.sdu.edu.cn

stalk axil is smaller than the vertical one. The strain on the outer surface of the stalk axil is lower and constrained by the template, so the strain is smaller than that inside the stalk axil. it was calculated that there was a risk of vertical cracking in six pedicle axils, and the maximum shrinkage tensile stress was 1.51 times of the tensile strength.

Keywords: heat of hydration; test model; temperature field; strain field; concrete box girder

0 引言

在混凝土浇筑时,水泥和水化合时产生大量热量,由于混凝土表面热交换迅速,于是在混凝土内外形成较大的温差,桥梁结构的各部分处于不同的温度状态,导致发生不同的温度变形。由于各部分的变形不协调,混凝土会出现较大的温度应力。对桥梁结构而言,温度应力能达到和恒载应力同等的应力水平[1]。因此在浇筑混凝土早期,大量的水化放热给桥梁结构带来严重的破坏[2]。混凝土强度越高,水化效应越剧烈,因此,对于高强度大体积混凝土结构而言,水化热分析是十分有必要的。

目前对于水化热的研究主要集中在墩柱和桥面板上[3-5]。文献[6]中以1:5比例的拱桥节段模型试验为基础,研究了大体积墩混凝土的温度时程。探讨大体积混凝土结构的温升规律,通过管道冷却法降低混凝土结构水化热。文献[7]利用ANSYS讨论带有管道冷却系统的混凝土结构水化热时程变化。文献[8]利用ANSYS建立了考虑水管冷却的某高墩刚构桥体混凝土水化热温度场的精确计算模型。文献[9]研究某海上桥梁预制墩水化热效应,提出采用膨胀外加剂和涂装复合养护方法降低水化热对湿接缝的影响。文献[10]研究了新旧混凝土在施工缝处的温度梯度,分析因水化热、环境和边界条件变化而导致的混凝土开裂现象。文献[11]通过ABAQUS二次开发,研究了早期混凝土热膨胀系数变化趋势,采用多场耦合研究混凝土墩柱干缩变形。然而,箱梁截面的结构和热边界条件与墩柱和桥面板不同,箱梁截面的顶板、底板与腹板具有不同的水化热分布特点。

对箱梁截面的水化热研究主要通过结合特征点实测数据与数值模拟实现[12-16]。文献[17]通过现场监测研究了水化热引起的混凝土箱梁桥温度场分布状态。文献[18]结合长春的气候特征利用Midas civil模拟分层浇筑过程,分析某PC桥0号块温度场温度场与应力场分布。文献[19]考虑混凝土收缩徐变、弹性模量和抗拉强度的时变特性,利用Midas civil对64 m槽式箱梁在浇铸过程中水化热和早期热应力产生的温度场进行了数值模拟。文献[20]中以安徽省某单箱三室桥为工程实例,埋置了38个测点,建立ANSYS有限元模型,分析了温度分布和预应力连续箱梁桥在不同温度下的温度效应。而箱梁截面内部中空、边界复杂,影响水化热的因素较多,通过混凝土热学参数来修正有限元模型,也难以准确预测该类结构的温度发展规律。仅基于沿深度方向或沿高度方向的特征点实测数据,测点位置选取依赖于经验,无法全面反映结构的最不利温度分布。

目前仅有文献[21-22]基于点阵式测量研究箱梁截面温度场。文献[21]在单箱单室混凝土模型上布置了479个温度测点,研究箱梁水化热期间的温度分布。文献[22]在混凝土顶板上埋置了71个测点研究钢混组合梁桥水化热,建立ABAQUS模型,提出温度应力简化计算方法。但单箱三室箱梁含有4个腹板,温度场分布复杂,目前没有研究是针对单箱三室梁截面的特点,浇筑单箱三室箱梁点阵式温度场模型,并在点阵式温度场的基础上结合实测应变数据进行讨论分析。本研究依托柳江特大桥,在混凝土内部埋置了148个温度传感器和20个应变传感器,并结合太阳辐射传感器和风速传感器,利用无线采集模块进行数据采集,研究混凝土浇筑后240 h内混凝土水化热温度场分布,为后续同类型桥梁截面的温度分布评估和桥梁抗裂分析提供了借鉴。

1 箱梁温度试验

培森柳江特大桥(象州至来宾段),位于广西省来宾市象州县,为亚洲第一跨径公路预应力钢筋混凝土部分斜拉桥。结合培森柳江特大桥,本文制作了单箱三室混凝土箱梁1:2缩尺模型(图1)。箱梁模型长2 m,顶板宽14.5 m,底板宽10.4 m,高3.79 m,顶板厚度为0.52 m,底板厚度为0.5 m,边腹板厚度为0.8 m,中腹板厚度为0.7 m。模型摆放位置和主桥走向一致,均为东西方向。热传导相似比方程[23]:

$$t_{\mathrm{m}}=\left(\frac{L_{\mathrm{p}}}{L_{\mathrm{m}}}\right)^{2}t_{\mathrm{p}}, \tag{1}$$

$$F_{\mathrm{m}}=\left(\frac{L_{\mathrm{p}}}{L_{\mathrm{m}}}\right)F_{\mathrm{p}}, \tag{2}$$

$$h_{\mathrm{m}}=\left(\frac{L_{\mathrm{p}}}{L_{\mathrm{m}}}\right)h_{\mathrm{p}}, \tag{3}$$

式中,t 为时间,L 为长度,F 为太阳辐射,h 为热传递系数,下标 m 和 p 分别代表模型和实桥。

试验模型和实际桥梁保持一定相似比的前提是基于一定的热比例因子,本试验模型为 1∶2缩尺模型,因此试验模型测试时为实桥测试时间的 1/4,太阳辐射和表面传热系数均为实桥的 2 倍。为了更精确研究截面温度分布,埋设 148 个温度传感器,结构应变传感器为 20 个,风速风向以及太阳辐射传感器各 2 个,温度传感器布置见图 2。

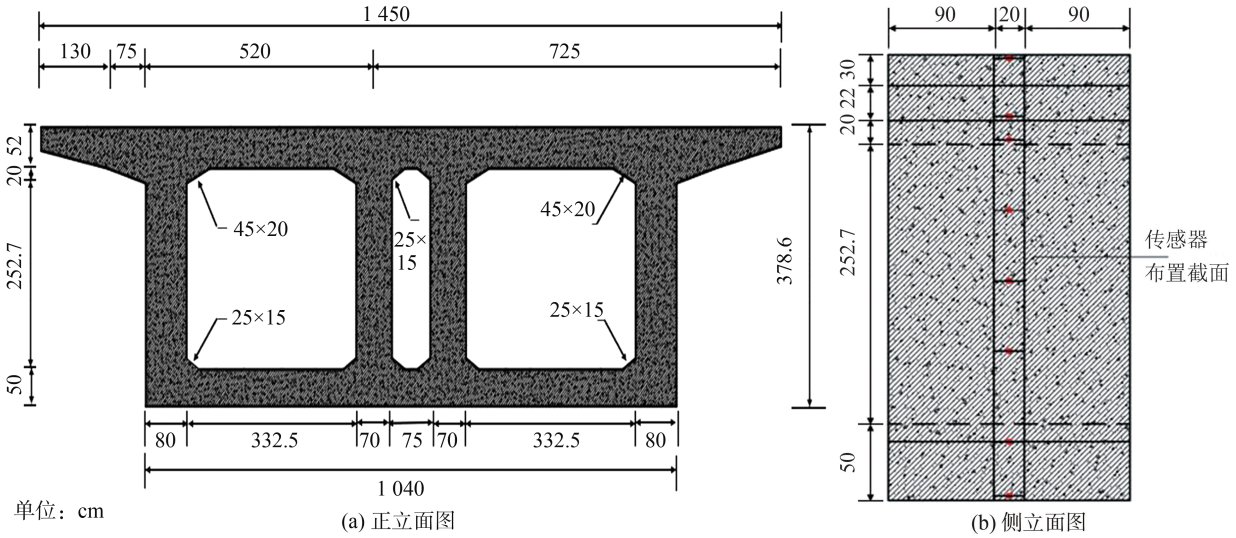


图 1　模型结构尺寸图

Fig.1　Diagram of model structure size

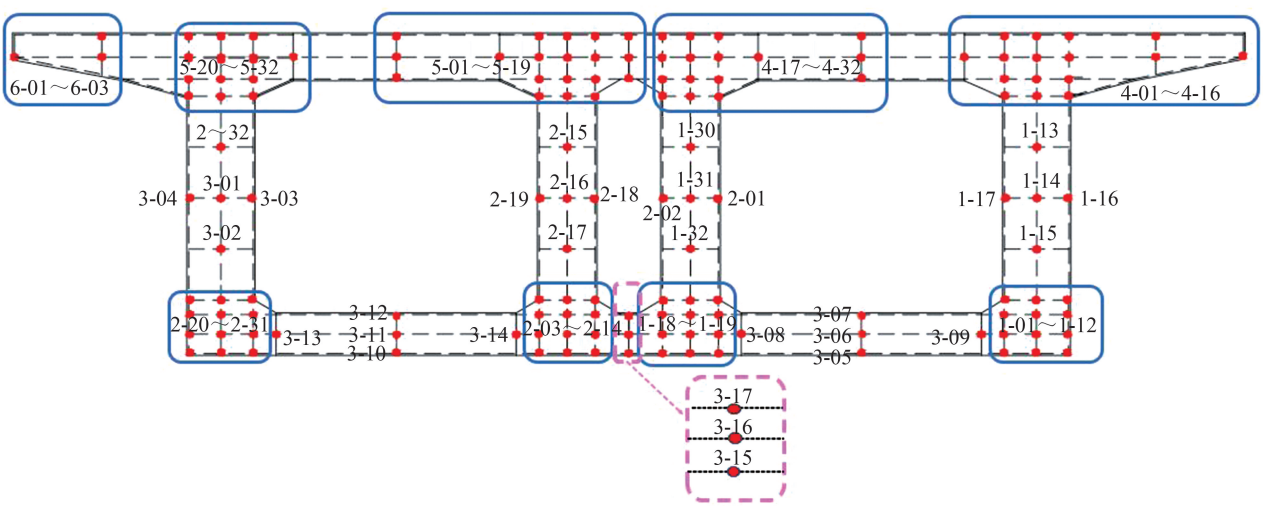


图 2　传感器布置图

Fig.2　Diagram of sensor arrangement

箱梁模型下方搭设 2 m 高脚手支架,利用该支架将箱梁从地面抬起,以模拟地面反射辐射。此外,这个支架允许空气自由流动到底板的下表面,模拟该表面的对流作用。箱梁顶底部分别架设风速、风向传感器和太阳辐射传感器,用以测定箱梁所在环境的气象数据,见图 3。


(a) 箱梁模型整体图


(b) 气象参数采集器


(c) 应变传感器布置


(d) 温度传感器布置

图 3　现场模型示意图

Fig.3　Site model schematic

温度测试采用 JMT-36C 电阻温度传感器,测量范围:-30~120 ℃,精度为±0.5 ℃。气象测试采用 JMFY-1F 型风速风向传感器和 JMFY-1G 型太阳辐

射传感器。结构应变测试采用埋入式智能弦式应变计 JMZX-209HAT(T 为内置温度传感器),测量范围±1.5×10^{-3},精度 0.001S(S 为全量程)。测试结果为总应变,为避免在测试过程中由于温度变化产生的误差,应变计读数取钢弦和被测材料的线胀系数进行温度修正,通过混凝土弹性模量可计算出结构应力。风速风向传感器和太阳辐射传感器由 JMZX-1I 型单通道采集模块进行采集和保存,采集模块由 JMTX-2017 型 DTU 手机上网模块连接,采用 5G 网络,以实现远程数据采集,每 30 min 采集一次。

混凝土为 C60 混凝土,具体热工参数见表 1,其中 ω 为各种材料质量所占全部材料总质量的百分比。试验室测得第 7 天抗压强度为 60.2 MPa。单箱三室箱梁模型分两层浇筑,第一层先浇筑底板;第二层浇筑腹板顶板,相隔时间为 4 h,在浇筑混凝土时避开传感器布置位置,避免破坏传感器。浇筑完 12 h 开始洒水养护,顶板覆盖 2 mm 土工布进行保温保湿。

表 1 混凝土配合比和热工参数

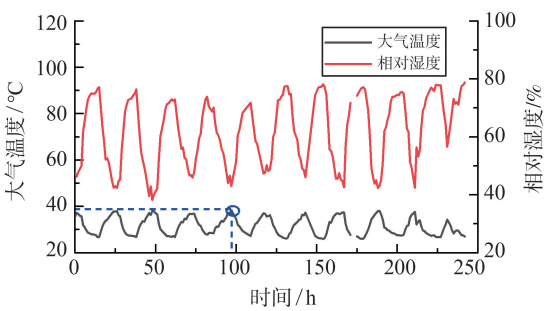
Table 1 Concrete quantity per square table

项目	每 m^3 用量/kg	比热/(kJ·(kg·℃)$^{-1}$)	ω/%
水泥	422.00	0.46	17.5
砂	725.00	4.19	6.4
石	1 044.00	0.70	30.1
水	153.00	0.80	43.4
粉煤灰	53.00	0.92	2.2
减水剂	7.92		0.3

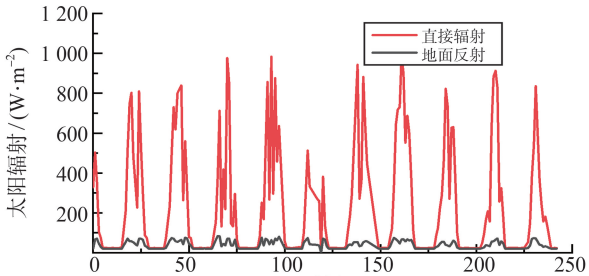
2 测试数据及结果分析

2.1 气象参数分析

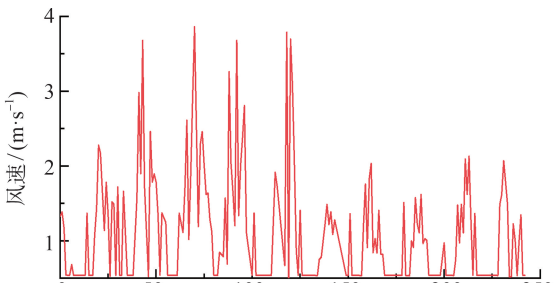
采取现场实测的气象数据绘制水化热期间大气温湿度、太阳辐射及风速变化情况。由图 4 可知,水化热期间大气温湿度、太阳辐射呈周期性变化,大气温度最高为 38.33 ℃,出现在混凝土入模后 89 h。



(a) 大气温湿度



(b) 太阳辐射



(c) 风速

图 4 水化热阶段气象条件

Fig.4 Meteorological conditions of hydration heat stage

空气湿度受温度以及外界空气含水量影响,外界环境温度升高,大气环境湿度则降低。太阳直接辐射在每日 10~12 h 均大于 400 W/m^2,其中最大太阳辐射出现在水化热 161 h,为 988.38 W/m^2。风速浇筑后 24~125 h 内变化较大,但整体在 1.5~3.5 m/s内波动。

2.2 截面平均温度

箱梁截面的平均温度为箱梁所有测点温度平均值,代表了箱梁截面水化热全过程的发展趋势。绘制箱梁截面平均温度与大气温度对比图(图 5)。

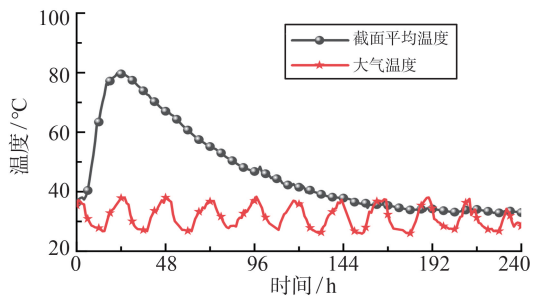


图 5 截面平均温度对比图

Fig.5 Cross-sectional average temperature comparison chart

由图 5 可以看出,箱梁截面平均温度在浇筑后 24 h 达到峰值,为 79.7 ℃。混凝土的入模温度(0 h)为 35.7 ℃,箱梁截面平均温度在浇筑 179 h 后才低于入模温度,因此认为箱梁水化产生的热量至少需要 7 d 才能消散。

2.3 截面温度分布状态

为了研究箱梁水化热的分布状态,基于温度传

感器实测数据,建立了温度点阵坐标,运用 Tecplot 软件绘制单箱三室箱梁水化热期间温度分布的二维温度场云图,如图 6 所示。

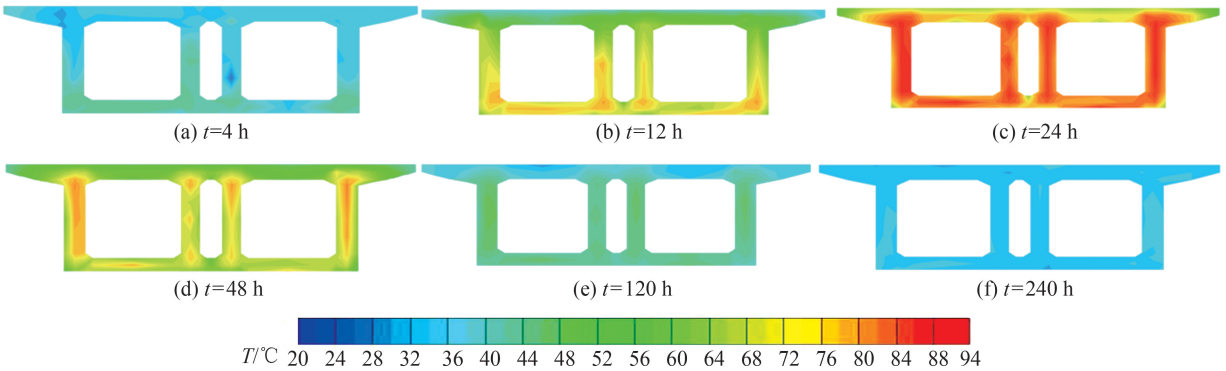


图 6　二维温度场云图

Fig.6　Two-dimensional temperature field clouds

分析图 6,可以得出以下结论:

(1)在水化热 240 h 之内,箱梁截面温度变化比较明显,其中最低温度为 31 ℃,最高温度为 90.2 ℃,见图 6 (a)。

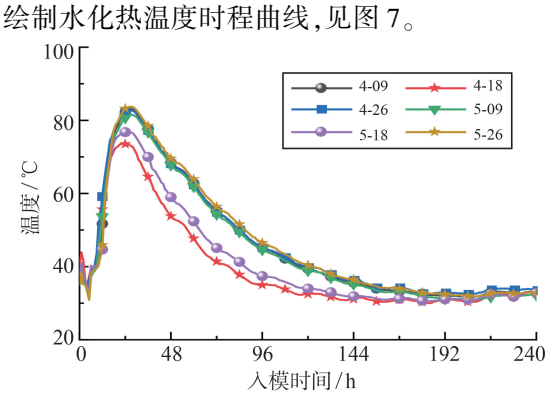
(2)混凝土浇筑 4 h 后,底板由于水泥水化作用产生大量热量,此时腹板顶板位置混凝土还未入模,因此形成了 12 ℃的温差,见图 6(a)。

(3)混凝土浇筑 12 h 后,由于第二层混凝土浇筑时间短,水化放热不充分,而第一层浇筑混凝土浇筑时间长,水化放热量较大,此时出现了整个水化热阶段中最大温差值,为 40.6 ℃,见图 6(b)。

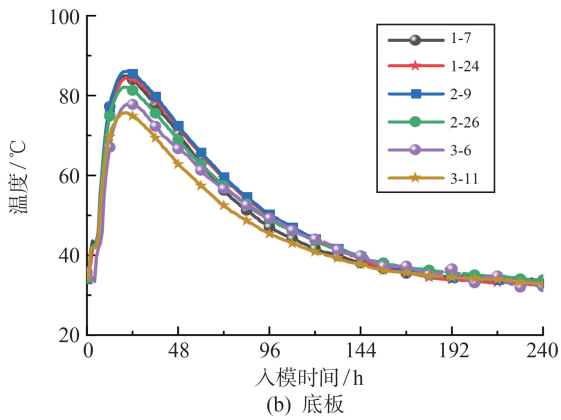
(4)在混凝土浇筑 24 h 后,此时各部位均出现温度峰值,其中左腹板温度为全截面水化热温度最高位置处,四个梗腋位置处温度普遍高于其它部位,截面最大温差为 15.9 ℃,见图 6(c)。

(5)在混凝土浇筑 240 h 后,截面最大温差为 3.8 ℃,向阳侧边腹板温度为全截面最大,该阶段太阳辐射作用明显,可认为水化热完全散尽,见图 6(f)。

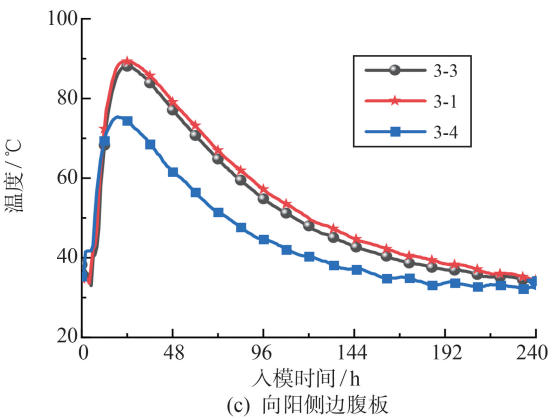
为了进一步描述箱梁各部分水化热发展过程,选取顶板传感器 4-09、4-18、4-26、5-09、5-18 和 5-26 测点,底板 1-7、1-24、2-9、2-26、3-6 和 3-11 测点,向阳侧边腹板 3-3、3-1 和 3-4 测点;向阳侧中腹板 2-18、2-16 和 2-19 测点实测数据,测点编号图见图 2,绘制水化热温度时程曲线,见图 7。



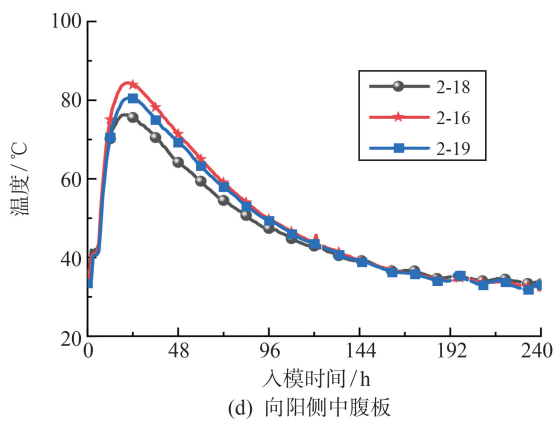
(a) 顶板



(b) 底板



(c) 向阳侧边腹板



(d) 向阳侧中腹板

图 7　箱梁典型位置水化热温度时程曲线

Fig.7　Time course curve of heat of hydration at typical location of box girder

分析图 7,可以得出以下结论:

(1)水化热温度曲线主要分为温升,快速温降及平稳温降三个阶段。

(2)混凝土浇筑 0~24 h 为温升阶段,在此期间水化热温度急剧升高。顶板表面由于没有模板覆盖,因此与外界进行热传递,散热程度比底板大,因此顶板温度变化相对底板比较平缓。其中,顶板最高温度为 83.7 ℃;底板最高温度为 86.5 ℃;边腹板最高温度为 89.4 ℃;中腹板最高温度为 88.4 ℃。

(3)混凝土浇筑 24~96 h 期间为快速温降阶段,各部位降温速率为 0.5~1.2 ℃/h。此阶段水化热温度降低,顶板由于散热速度比较快,因此温度下降速率比其它部位快得多,底板散热较慢,温降不明显。

(4)混凝土浇筑 96~240 h 期间为平稳温降阶段,各部位降温速率为 0.1~0.5 ℃/h。箱梁各位置温度缓慢下降至与大气温度相当。考虑混凝土结构温度与外界环境温差不大时,即可拆模。

2.4 腹板温差

2.4.1 腹板横向温差

观察边腹板和中腹板温度时程曲线,见图 8,均发现腹板中部测点高于两侧测点,因此将沿腹板宽度的温度测点取平均值进行讨论,各板沿板厚度方向温度时程曲线见图 8,表 2 给出了温度云图变化具体数值。

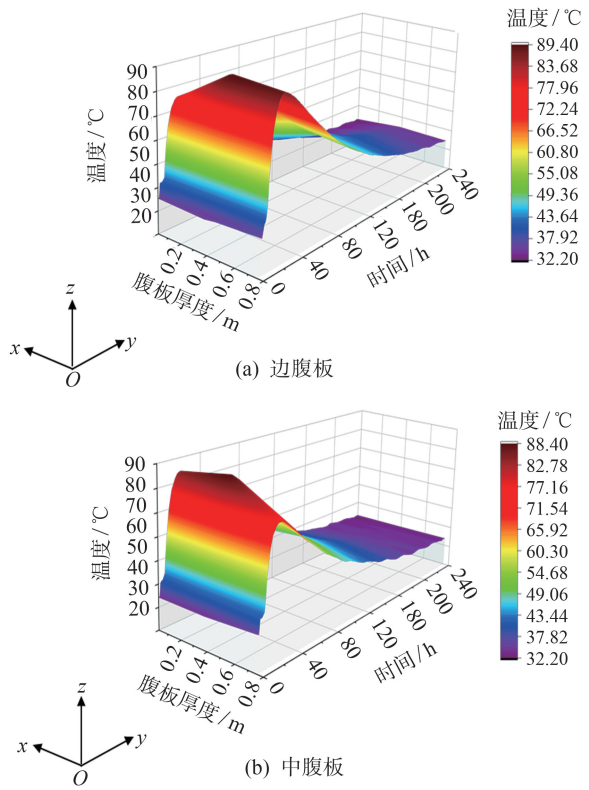


图 8 腹板沿宽度方向水化热分布

Fig.8 Distribution of heat of hydration along the width of the web

表 2 腹板水化热温度变化表

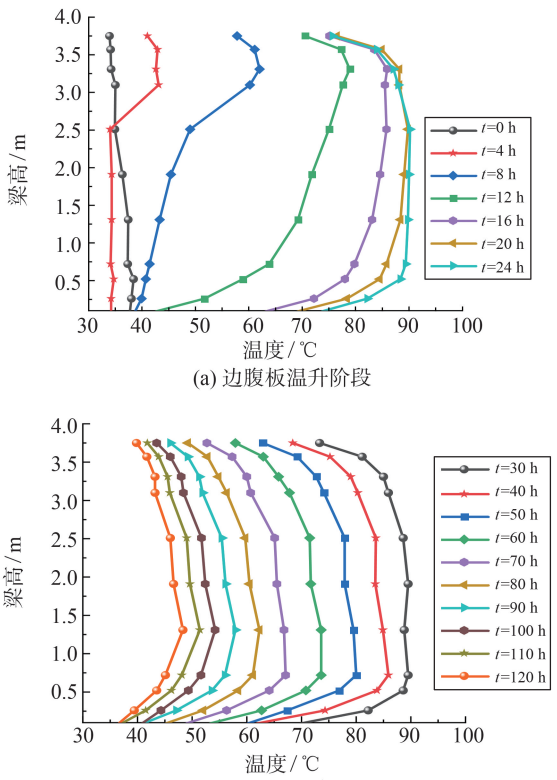
Table 2 Table of changes in heat of hydration temperature of the web 单位:℃

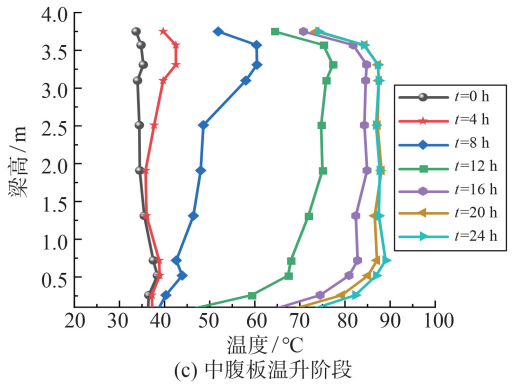
边腹板温度	中腹板温度
89.40	88.40
83.68	82.78
77.96	77.16
72.24	71.54
66.52	65.92
60.80	60.30
55.08	54.68
49.36	49.06
43.64	43.44
37.92	37.82
32.20	32.20

由图 8 和表 2 可以看出,腹板沿厚度方向三个测点中,内部温度最高,外部温度最低。边腹板和中腹板最大温差分别为 18.0 ℃和 8.7 ℃,中腹板横向温差较小,边腹板外侧温度均显著低于内侧测点温度,因此针对边腹板需格外注意腹板处横向开裂问题。

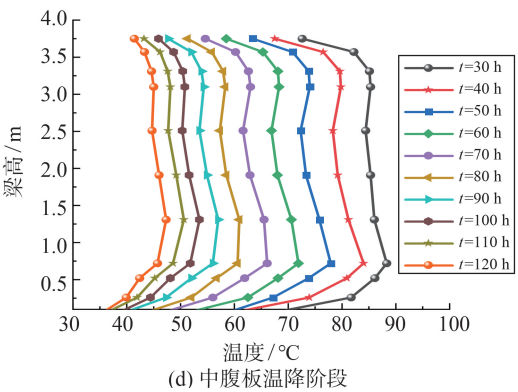
2.4.2 腹板竖向温差

混凝土箱梁水化热期间竖向温度分布在桥梁设计中占据重要的地位,考虑到水泥与水发生水化反应导致结构内部温度升高,在箱梁竖向方向产生较大的竖向温度梯度,本研究通过整理实测数据,以底板混凝土表面为坐标原点,绘制向阳侧边,中腹板水化热 120 h 内竖向温度分布曲线,见图 9。





(c) 中腹板温升阶段



(d) 中腹板温降阶段

图 9　腹板水化热期间竖向温度分布

Fig.9　Vertical temperature distribution during the hydration heat of the web

由图 9 可以得到以下结论:

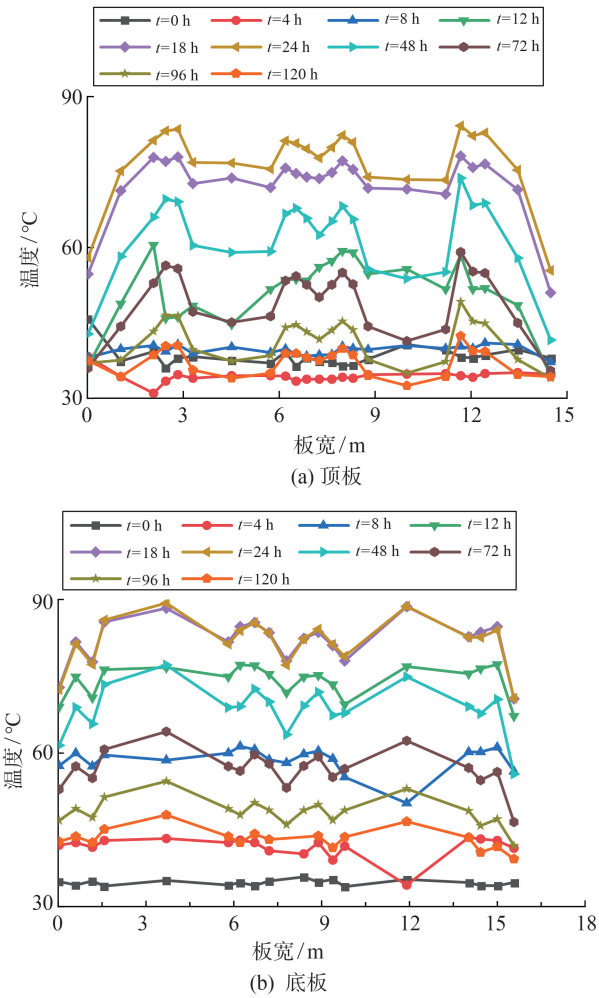
(1)在温升阶段,混凝土浇筑后 0~8 h 阶段,顶板温度几乎没有变化,呈“1”字型分布,相对于底板出现了温升滞后现象,这是由于底板先于腹板和顶板浇筑,因此底板出现高温时间早于顶板。边腹板及中腹板最高温度均出现在底板梗腋位置处,竖向最大温差出现在混凝土浇筑 12 h,边腹板最大竖向温差为 40.1 ℃,中腹板最大竖向温差为 35.4 ℃,即此时刻为混凝土箱梁处于最不利温度梯度状态,见图 9(a)(c)。

(2)在温降阶段,最高温度均出现在底板梗腋位置处,最大竖向温差均出现在混凝土浇筑后 40 h。其中边腹板竖向最大温差为 29.1 ℃,中腹板最大竖向温差为 26.8 ℃,见图 9(b)(d)。

2.5　横向温差

以顶板、底板内部中心测点实测数据为例,分别绘制横向温度分布曲线,见图 10,分析单箱三室混凝土箱梁在水化热期间横向温度时程变化规律。

由图 10 可以发现,最大横向温差均出现在混凝土浇筑 48 h 后,顶板处梗腋部位温度明显高于其他位置处,梗腋最大温度为 73.8 ℃,而其他部位最低温度为 41.6 ℃,最大横向温差为 32.2 ℃。观察底部这一现象不太明显,分析原因为:顶板采用遮盖处理,因此太阳辐射对顶板的影响较小,而底板未进行遮盖处理,导致底板规律不太显著。



(a) 顶板

(b) 底板

图 10　箱梁横向温度分布曲线

Fig.10　Transverse temperature distribution curves of box girder

3　梗腋部位分析

为了进一步分析箱梁梗腋处水化热期间温度变化,本研究选取 8 处梗腋部位作为温度测试点进行分析(见图 11)。

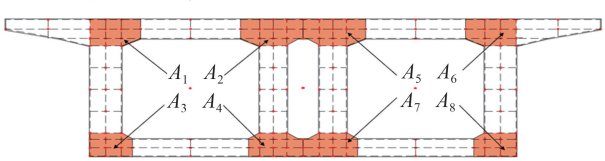


图 11　梗腋区域划分示意图

Fig.11　Schematic diagram of the division of the pedicle axillary area

绘制各梗腋部位处平均温度、截面平均温度和大气温度时程曲线(见图 12):

由图 12 可知:箱梁梗腋区域温度分布规律符合混凝土结构整体温度场分布规律,在水化热前期温升阶段(0~24 h),梗腋各区域温度始终高于箱梁全截面温度,其中 A_6、A_7 区域温度峰值最高,分别为

81 ℃和 80.6 ℃;而箱梁截面平均温度在水化热24 h时出现最大值,峰值为 79.8 ℃,两者相差不大;在水化热温降阶段(24~120 h),A_5~A_8 区域温度始终略高于截面整体温度,A_1~A_4 区域温度则逐渐与截面温度趋于一致,这是因为底板与腹板交接处散热速率比较慢,顶板与腹板交接处由于没有覆盖而散热速率相对较快;受水化热的影响,箱梁截面整体温度与梗腋处温度都始终高于大气温度。

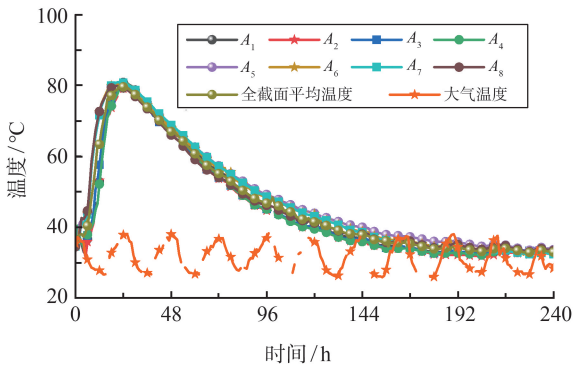


图 12 梗腋-截面温度时程曲线

Fig.12 Stem axillary-cross-sectional temperature time course curve

3.1 梗腋横向温差

选取向阳侧梗腋部位进行分层,见图 13,将同一横轴同一时刻的最大横向温差 T_{cl}($T_{max}-T_{min}$)作为梗腋最大横向温度梯度,以左腹板和左中腹板为例,绘制箱梁在 240 h 水化热期间梗腋部位温度梯度时程分布曲线,如图 14 所示。

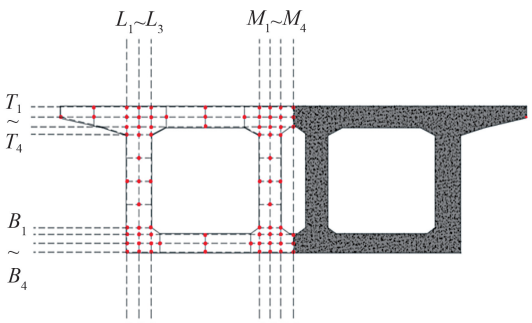
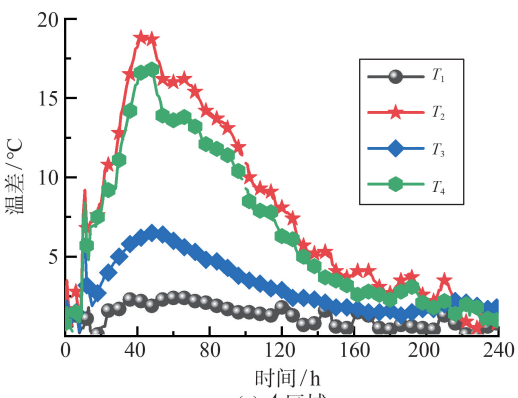
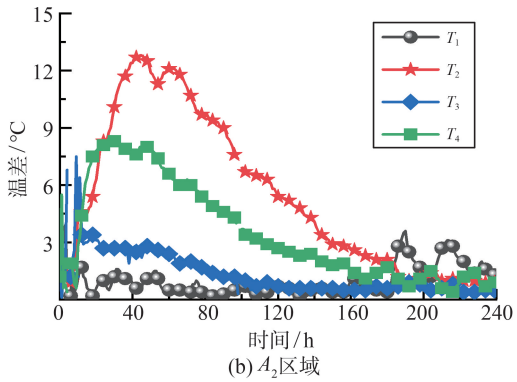


图 13 温度梯度分层示意图

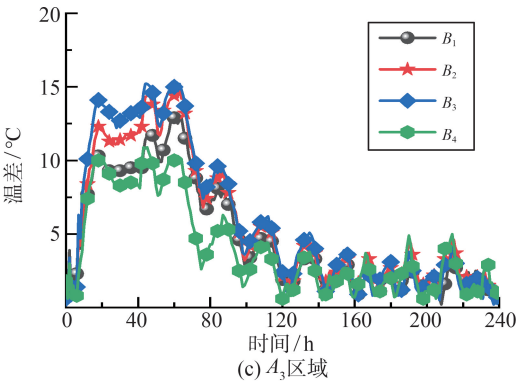
Fig.13 Temperature gradient stratification diagram



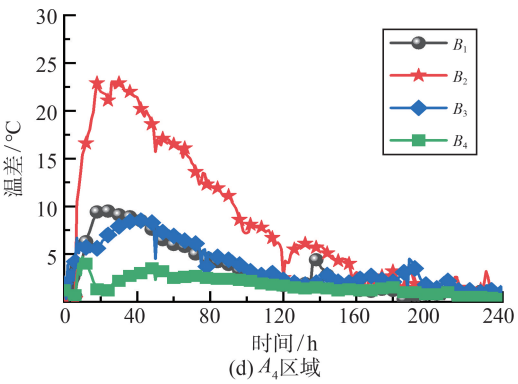
(a) A_1区域



(b) A_2区域



(c) A_3区域



(d) A_4区域

图 14 梗腋部位横向温差分布

Fig.14 Stem axils Lateral temperature distribution

顶板处梗腋。A_1、A_2 区域中 T_2~T_3 层与 T_1 层温度梯度存在明显的差值,其中 A_2 区域最大温度梯度出现在 T_2 层混凝土入模 45 h 时,为12.8 ℃;A_1 区域最大温度梯度也出现在 T_2 层,为 18.8 ℃,对于顶板梗腋部位而言,在水化热期间横向最大温度梯度始终出现在第二层(T_2),即腹板中心轴线上。相比之下,T_1 层温度梯度波动很小且整体温差为 0.3~2.5 ℃。分析原因,T_1 层为混凝土表面层,与外界环境进行热交换,散热速度也比较快,因此在 T_1 层的各测点温度值相对较为平均。

底板处梗腋。底板梗腋部位各层横向温差变化规律与顶板相似。B_2 层出现较大温差,由于底板梗腋部位 3~17 测点温度普遍低于其他测点,导致横向温度梯度为 22.5 ℃。A_4 区域受到太阳辐射和对流作用影响较大,横向温度产生较大波动,在水化热浇筑 60 h 后横向温度梯度仍可达到15.2 ℃,说

明太阳辐射作用也会影响早龄期混凝土开裂。

3.2　梗腋竖向温差

将同一竖轴同一时刻的最大竖向温差T_{cv}($T_{max}-T_{min}$)作为每时刻箱梁最大竖向温度梯度,以右腹板和右中腹板为例,绘制箱梁在 240 h 水化热期间梗腋部位温度梯度随时间分布曲线,见图 15。

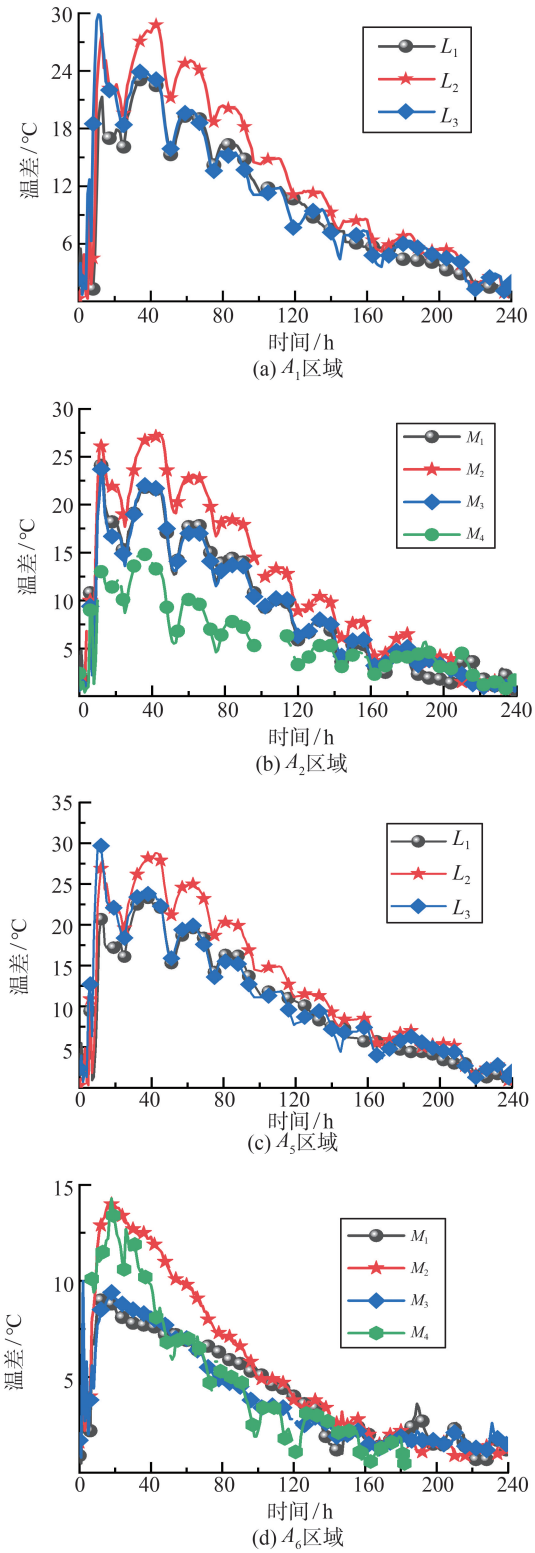


图 15　梗腋部位竖向温度梯度分布

Fig.15　Vertical temperature gradient distribution

分析图 15,可以得到以下结论。

(1)顶板梗腋部位竖向温度梯度出现周期性波动,最大竖向温度梯度出现在 M_2 竖轴上,顶板上缘测点由于散热较快原因普遍低于内部测点,而内部测点由于水泥水化反应热量积累导致温度较高,因此在混凝土浇筑 12 h 时出现最大竖向温度梯度 29.1 ℃,在此过后水化热温度梯度呈下降趋势。29~45 h时,由于白天日照作用使混凝土内部温度再次升高,在混凝土浇筑完 45 h,A_2 区域出现了峰值为 26.5 ℃的竖向温度梯度。A_1 区域最大温度梯度出现的时间为浇筑完 12 h,为 29.9 ℃。

(2)底板梗腋部位竖向温度梯度出现显著差异,A_3 区域温度呈周期性波动,A_4 区域温降较为平稳。A_3 区域最大竖向温度梯度为 29.8 ℃,出现在 L_2 竖轴。A_4 区域最大竖向温度梯度为14.1 ℃,出现在 M_2 竖轴。这是由于向阳侧边腹板受到太阳辐射作用影响,导致 A_3 区域竖向温度梯度更大。

3.3　梗腋应变场分析

大体积混凝土在水化热阶段引起的开裂主要是由水泥水化热与外界气温变化引起的温度变形导致,最大温度梯度出现在单箱三室梁的梗腋位置处,因此本研究在梗腋位置处埋置应变传感器,见图 16。主要测试混凝土应变与温度之间的关系,其中表面测点均埋置于距混凝土表面 1 cm 处,内部测点均埋置于温度传感器所在截面,考虑到纵向节段模型仅为 2 m,以及纵向应变与实桥差异性,因此仅在模型横向和竖向布置了应变传感器,利用二维平面框架分析法进行分析。

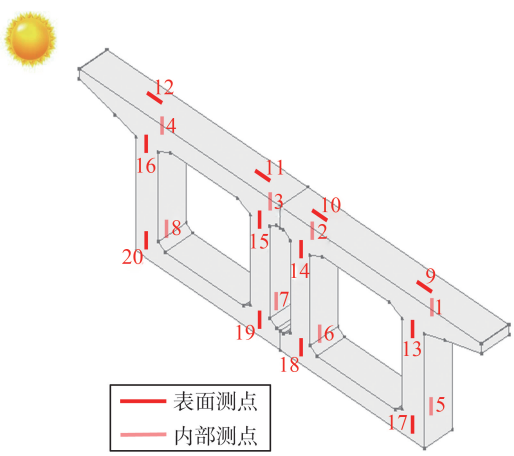
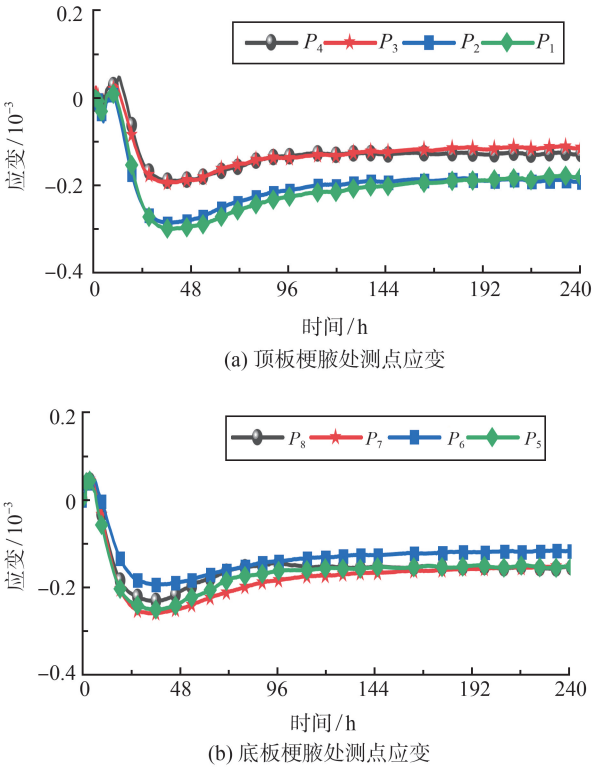


图 16　梗腋应变传感器布置图

Fig.16　Stem axillary strain sensor arrangement

绘制混凝土箱梁梗腋区域内部测点(1~8)在水化热期间时程曲线,见图 17。



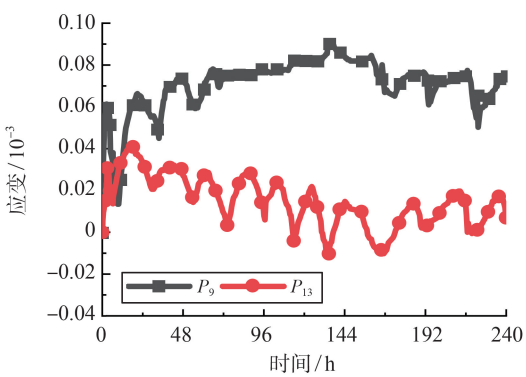
(a) 顶板梗腋处测点应变

(b) 底板梗腋处测点应变

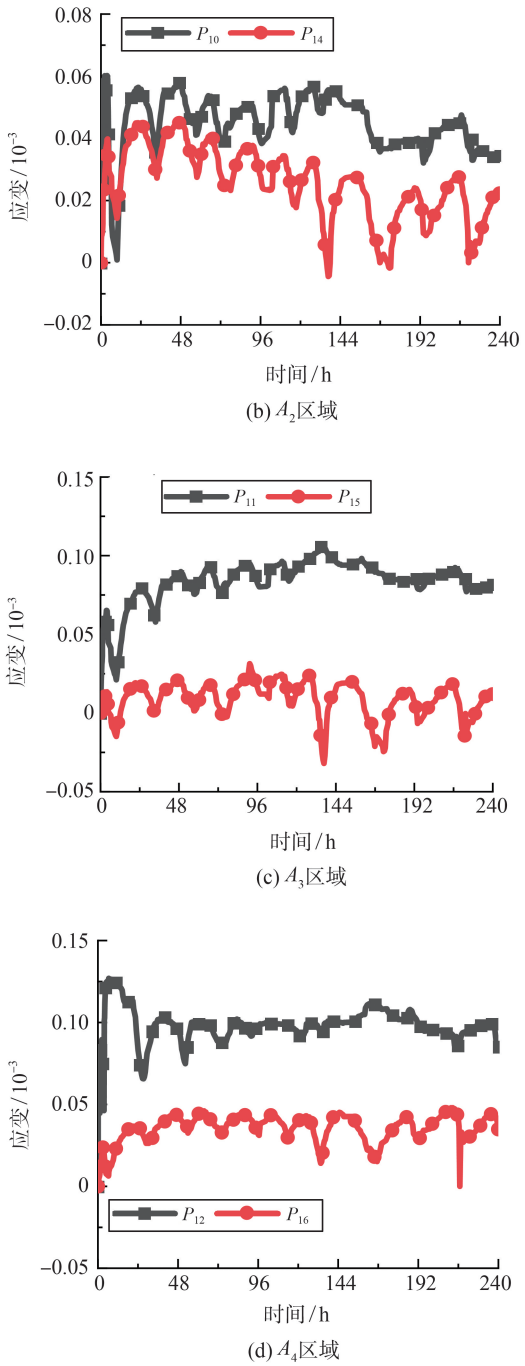
图 17 梗腋各部位截面测点应变时程曲线

Fig.17 Strain time curves at each section of the stem axle

分析图 17,由于混凝土浇筑 6 h,在浇筑时期(0~6 h),部分传感器出现数据异常现象。6 h 后,各传感器开始出现负应变,这是由于刚浇筑完的混凝土处于塑性流动状态,在模板约束下受到模板侧压力的影响导致。当混凝土膨胀变形结束,收缩变形开始,混凝土开始具有固体特征,这一时刻作为基于微观机理的混凝土凝结时间,在此之前发生的变形均为无害变形。凝结之后,混凝土的变形才会在结构中产生应力[24]。将混凝土变形的起始时刻移至混凝土膨胀结束的时刻即可得到混凝土收缩变形与时间关系。选取应变传感器 240 h 内实测数据,分别绘制混凝土箱梁顶板梗腋区域(A_1~A_4)表面测点(9~16)应变时程曲线,见图 18。



(a) A_1区域



(b) A_2区域

(c) A_3区域

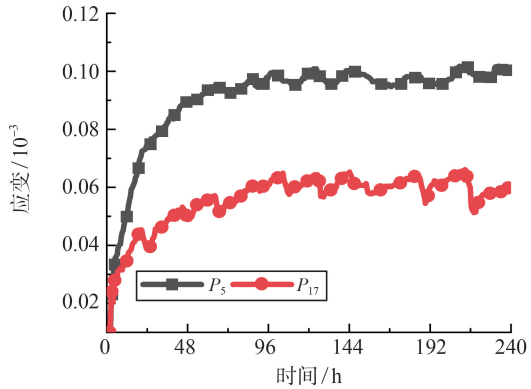
(d) A_4区域

图 18 顶板梗腋表面测点应变分布曲线

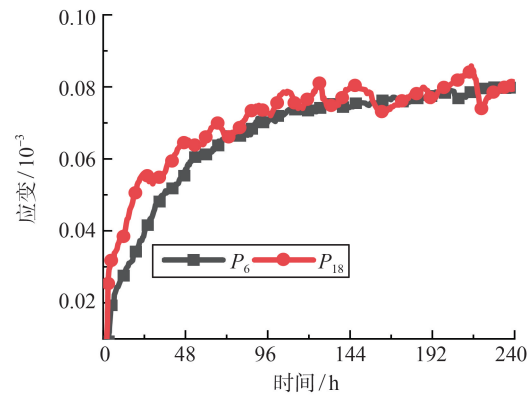
Fig.18 Strain distribution curve of measured points on the axillary surface of the roof plate

由图 18 可以看出,竖向应变显著大于横向应变。由 3.1 节和 3.2 节可知,顶板各梗腋处竖向温度梯度明显大于横向温度梯度,可认为温度梯度较大的位置和方向,应变也会增大,因此各梗腋表面存在竖向开裂风险。

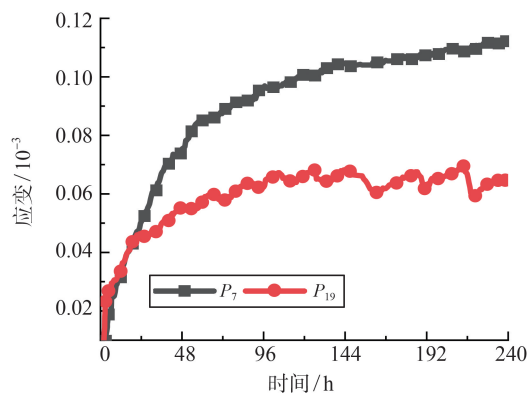
选取底板梗腋区域(A_5~A_8)表面测点(17~20)与内部测点(5~8),分别绘制内外测点竖向应变时程曲线,见图 19。



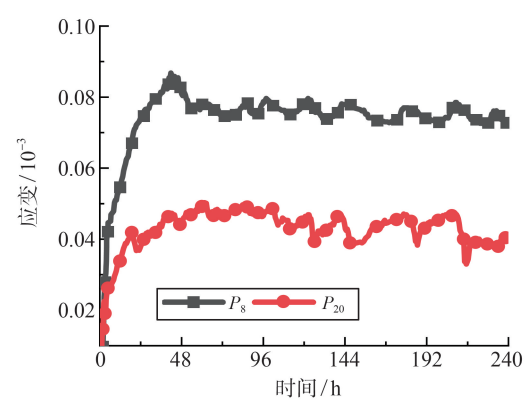
(a) A_5区域



(b) A_6区域



(c) A_7区域



(d) A_8区域

图 19　底板梗腋内部测点竖向应变时程曲线

Fig.19　Vertical strain time course curves of measurement points inside the pedicle axil of the substrate

由图 19 可以看出,除 A_6 区域外,各混凝土内部测点温度应变明显大于表面测点,这是由于混凝土表面受到模板约束较强,应变变化较小。A_6 区域规律不明显可能是由于该位置处应变计随浇筑振捣时移位至距混凝土表面较深的位置处。

在混凝土早期浇筑时,混凝土的弹性模量和抗拉强度随时间逐渐增加。在浇筑完成初期,混凝土的弹性模量和抗拉强度都很小,此时若产生较大的温度应力,混凝土极易发生开裂。文献[25]对混凝土早龄期弹性模量和抗拉强度随时间的变化公式定义如下:

$$E_{ci}(t)=E_{ci}\cdot(1-e^{-0.09t}), \tag{4}$$

$$f_t(t)=f_t\cdot(1-e^{-0.3t}), \tag{5}$$

式中:E_{ci}为混凝土弹性模量,$E_{ci}=36.0$ GPa;f_t 为混凝土标准抗拉强度,$f_t=2.85$ MPa。收缩过程产生的拉应力由累加计算可得,见图 20。

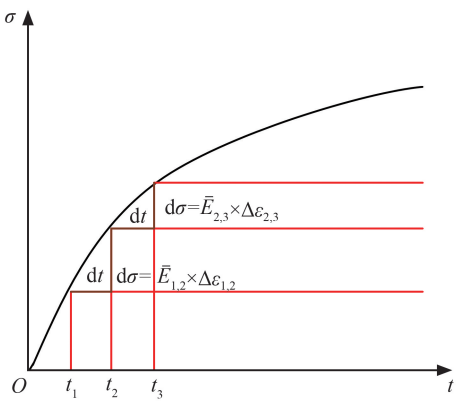


图 20　收缩应力计算图示

Fig.20　Calculation of contraction stress diagram

图 20 中,dt 为相邻时刻时间差值,$\bar{E}_{1,2}$为公式(1)中 t_1 时刻和 t_2 时刻的平均弹性模量,$\Delta\varepsilon_{1,2}$为实测 t_1 时刻和 t_2 时刻的应变差值。

Altoubat[26]通过试验发现,当混凝土中产生的收缩拉应力达到 0.75 f_t~0.8 f_t 时,混凝土便出现开裂,本研究按照 0.8 f_t 进行考虑,绘制内部测点(1~8)与 0.8 f_t 时程曲线如图 21 所示。

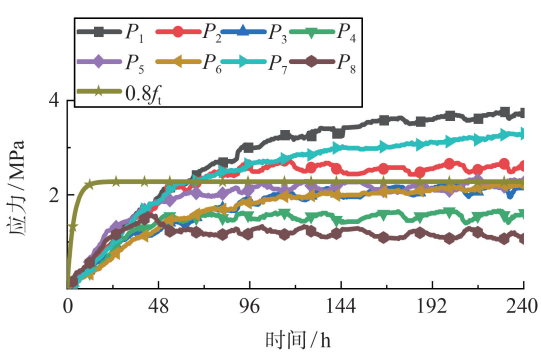


图 21　梗腋处早龄期应力

Fig.21　Early-age stress at the peduncle axils

由图 21 可以看出,应力最大的测点为 P_1 测点,

收缩导致的最大拉应力为 3.74 MPa，此时 0.8 倍抗拉强度仅为 2.28 MPa。除了向阳侧的两个梗腋外，其他梗腋部位均有竖向开裂风险，因此梗腋位置处的早龄期开裂不容忽视，本模型也在试验现场观察到梗腋位置处的早龄期裂缝出现，如图 22 所示。

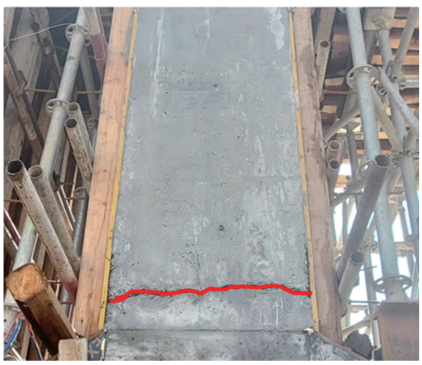


图 22 底板梗腋处早龄期裂缝

Fig.22 Early-age cracks at the pedicle axils of the base plate

3.4 数值分析

3.4.1 热边界

为了求满足热传导方程的解，确定需要的温度场，必须知道热传导过程的边界条件，即热对流。采用文献[27]给出的公式计算不同保温材料的热交换系数，风速采用现场实测值，见图 4。混凝土的比热容为单位质量混凝土温度升高 1 ℃所需的热量，混凝土的比热容为

$$C=\frac{1}{p}\sum p_i C_i, \tag{6}$$

式中，p_i 为配合比各组分百分比，C_i 为各组分比热。配合比如表 1 所示，计算得该模型的比热容为 0.882 kJ/(kg·℃)。热膨胀系数取为 10^{-5}，热传导系数取为 2.55 W/(m·℃)。

在计算混凝土内部所受的温度应力时，一般需要混凝土的绝热温升[28]，采用指数型计算绝热温升曲线[28]：

$$Q(\tau)=Q_0(1-\mathrm{e}^{-m\tau}), \tag{7}$$

式中：Q_0 为最终水化热，kJ/kg；m 为方程常数（随水泥品种、浇筑温度及比表面积而变化）。

3.4.2 模型建立及验证

采用有限元 DIANA 软件进行模型建立，由于浇筑模型为对称结构，因此仅建立四分之一模型对其进行模拟。由于流经对称面的热流量恒为 0，因此对称面通过第二类边界条件进行约束。划分为 6 930个实体结构单元，其中 2 836 个 BQ4HT 单元用于热边界，在热边界上输入环境温度时程曲线，见图 4，所有单元大小均为 0.5 m。

根据有限元计算结果，从瞬态热分析结果中选择与实测水化热截面温度对应时刻下的温度分布，见图 23。结合图 6 可以看出，有限元计算结果与现场实测云图相吻合。

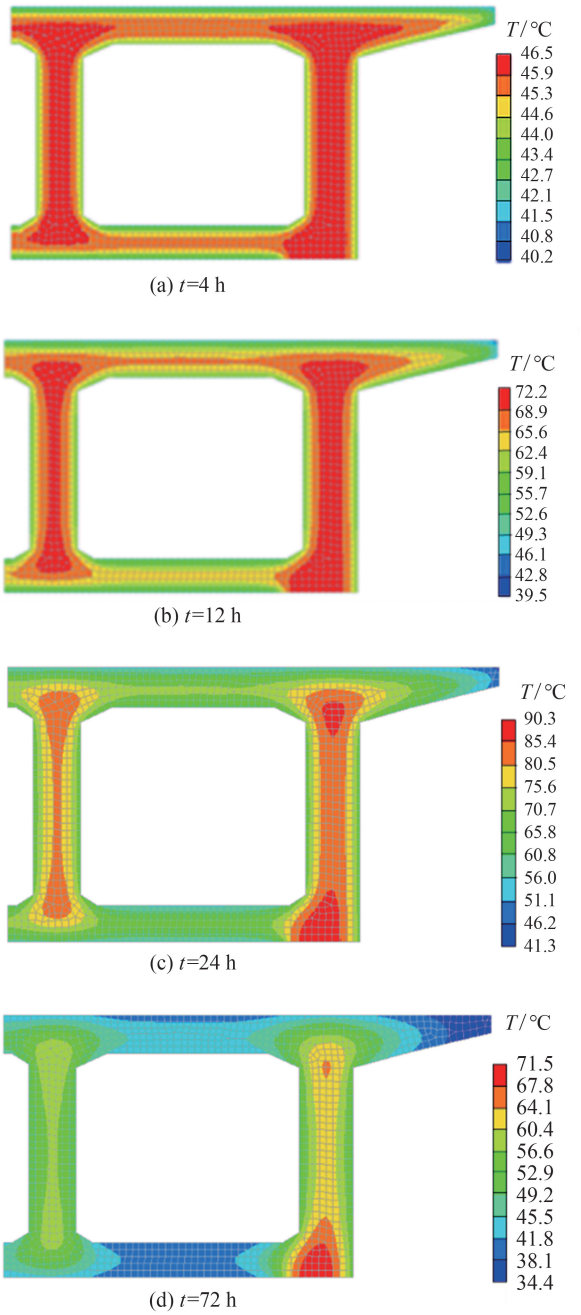


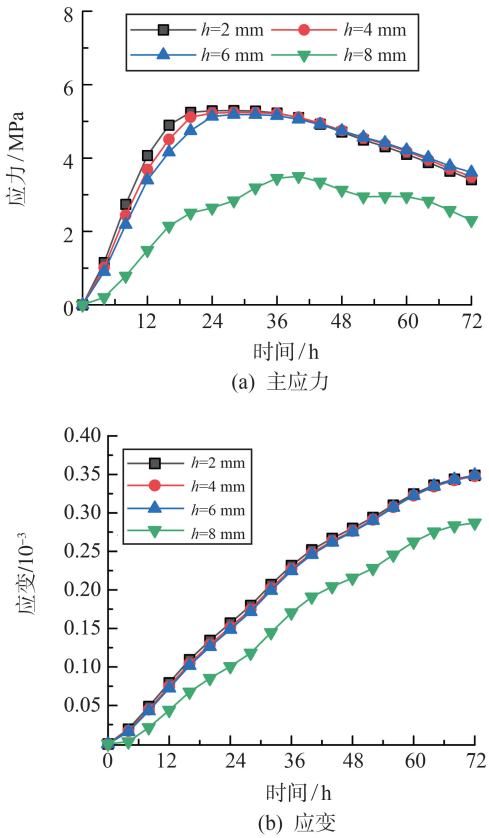
图 23 有限元计算云图

Fig.23 Finite element calculation cloud map

3.4.3 参数分析

在实际工程施工中，选择合适的浇筑温度以及合理的养护措施可以减小水泥水化产生的热量，从而降低水化温度，因此本研究主要从土工布铺设厚度和浇筑温度两个方面进行参数分析。

分别选取土工布厚度 h 为 2、4、6 和 8 mm 的箱梁测点主应力和应变时程发展规律，绘制主应力和应变时程分布曲线，见图 24。



(a) 主应力

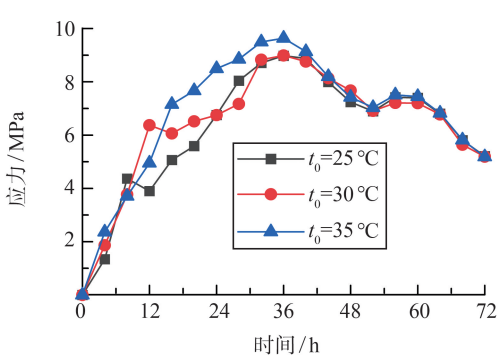
(b) 应变

图 24　土工布影响效果

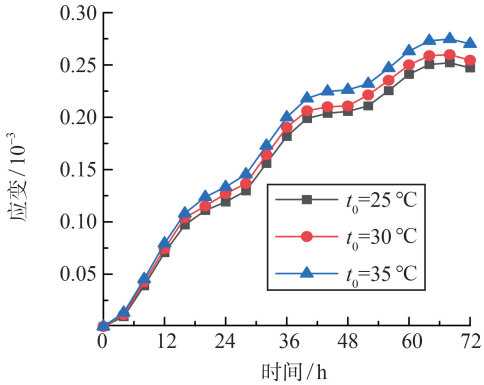
Fig.24　Geotextile effect

由图 24 可知,土工布厚度对箱梁第一主应力产生重要影响,在铺设 4 层土工布下(厚度为 8 mm)情况下,第一主应力为 3.6 MPa,比厚度 2 mm 降低了 46.3%。由于浇筑模型较大,因此改变土工布厚度对箱梁梗腋温度最高位置处作用不明显,仅对箱梁顶板测点处温度明显升高作用,进而对箱梁截面温差起到了降低作用。同理对于热应变,土工布较厚的工况下热应变较其他三种情况明显减小,厚度为 8 mm 的热应变相比厚度为 2 mm 的热应变降低了 35.8%。

分别选取初始温度 t_0 为 25 ℃、30 ℃和 35 ℃的箱梁测点主应力和应变时程发展规律,绘制主应力和应变时程分布曲线,见图 25。



(a) 主应力



(b) 应变

图 25　浇筑温度影响效果

Fig.25　Effect of pouring temperature

分析图 25 可知,初始温度为 25 ℃情况下对结构应力应变都明显的降低作用,其中在初始温度为 25 ℃时,比在初始温度为 35 ℃时浇筑混凝土主应力降低了 6.8%,热应变降低了 10.9%。

4　结论

本研究在柳江特大桥桥址位置放置了混凝土箱梁温度场监测模型,在箱梁截面上埋设大量温度传感器和应变传感器,实现了箱梁全截面的二维水化热温度场和应变场的实时测量,得到如下结论。

(1)单箱三室箱梁水化热共分为三个阶段:温升阶段(0~24 h)、快速温降阶段(24~96 h)和平稳温降阶段(96~240 h)。箱梁截面平均温度需 179 h 后才低于入模温度,说明箱梁水化产生的热量至少需要 7 d 才能完全消散。

(2)施工过程中两层混凝土浇筑间隔为 4 h,导致两层混凝土产生较大的温差,在浇筑后 12 h,边腹板最大竖向温差达 40.1 ℃,会导致早龄期出现施工冷缝。

(3)全截面水化热最高温度出现在底板梗腋位置处,为 90.2 ℃。水化热全过程中,梗腋位置处温度均高于截面平均温度,说明梗腋处热量难以散出,在浇筑后 24 h,顶板最大横向温差达 32.2 ℃。

(4)梗腋处温度场分布复杂,梗腋内部最大横向温差为 22.5 ℃,最大竖向温差为 29.9 ℃,梗腋表面竖向应变大于横向应变。

(5)梗腋外表面受模板约束收缩应变小于梗腋内部收缩应变。考虑弹性模量和抗拉强度随时间变化规律,计算发现有 6 个梗腋存在竖向开裂风险。

(6)在实际施工中,通过改变顶板土工布厚度和浇筑温度达到降温的目的是比较容易的,其中土工布厚度为 8 mm 相比厚度为 2 mm 情况下,结构

主应力降低了46.3%，应变降低了35.8%。浇筑温度为25 ℃相比浇筑温度为35 ℃时混凝土主应力降低了6.8%，应变降低了10.9%。

参考文献：

[1] 孔祥谦. 热应力有限单元法分析[M]. 上海：上海交通大学出版社，1999.

[2] 戴伟. 大跨度连续刚构桥施工阶段温度效应研究[D]. 长沙：中南大学，2014.
DAI Wei. Study on the temperature effect in the construction phase of large span continuous rigid bridge[D]. Changsha：Central South University，2014.

[3] CHOI Seongcheol，CHA S W，OH B H，et al. Thermo-hygro-mechanical behavior of early-age concrete deck in composite bridge under environmental loadings：Part 1：temperature and relative humidity[J]. Materials and Structures，2011，44(7)：1325-1346.

[4] FLAGA K，KLEMCZAK B，JEDREZEJEWSKA A. Early-age thermal-shrinkage crack formation in bridge abutments. Experiences and modelling[C]//Fib Symposium. Tel Aviv，Israel：Agnieszka Jędrzejewska，2013.

[5] LEE Yun，KIM J K. Numerical analysis of the early age behavior of concrete structures with a hydration based microplane model[J]. Computers & Structures，2009，87(17-18)：1085-1101.

[6] HUANG Yonghui，LIU Guoxing，HUANG Shiping，et al. Experimental and finite element investigations on the temperature field of a massive bridge pier caused by the hydration heat of concrete[J]. Construction and Building Materials，2018，192(12)：240-252.

[7] KIM Jinkeun，KIM Kookhan，YANG Kyoung. Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system[J]. Computers & Structures，2001，79(2)：163-171.

[8] 王解军，李辉，卢二侠. 大体积混凝土桥墩水化热温度场的数值分析[J]. 中南林业科技大学学报，2007，27(1)：124-128.
WANG Jiejun，LI Hui，LU Erxia. Numerical analysis of hydration heat temperature field of mass concrete pier[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology，2007，27(1)：124-128.

[9] LI Fangyuan，SHEN Yin. Full-scale test of the hydration heat and the curing method of the wet joints of a precast segmental pier of a bridge[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering，2017，21(3)：348-370.

[10] GILLILANG J A，DILGER W H. Monitoring concrete temperature during construction of the Confederation Bridge[J]. Canadian Journal of Civil Engineering，1997，24(6)：941-950.

[11] 陈王. 早期混凝土性态变化的试验研究与数值模拟[D]. 天津：天津大学，2014.

[12] ABID S R. Three-dimensional finite element temperature gradient analysis in concrete bridge girders subjected to environmental thermal loads[J]. Cogent Engineering，2018，5(1)：1-15.

[13] GU Bin，ZHOU Fengyi，GAO Wang，et al. Temperature gradient and its effect on long-span prestressed concrete box girder bridge[J]. Advances in Civil Engineering，2020，2020(9)：1-18.

[14] DONG Wei，LIU Yinghua，XIANG Zhihai. A numerical method for estimating the maximal temperature gradients reached in fire-damaged concrete structures based on the parameter identification[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences，2009，46(1)：77-106.

[15] TONG Yifei，GE Zhihao，ZHOU Xingchen，et al. Research on welding deformation for box girder of bridge crane based on thermal elasto-plastic theory[J]. Advances in Mechanical Engineering，2018，10(5)：1-12.

[16] XU Hanzheng，YAN Xiaofeng. Numerical analysis of temperature influence on transverse cracks in concrete box-girder bridges[J]. Mathematical Problems in Engineering，2020，2020(1)：1-11.

[17] LUKAS Krkoška，MORAVCIK Martin. The measurement of thermal changes on concrete box girder bridge[C]//MATEC Web of Conferences. Baghdad，Iraq：EDP Sciences，2016.

[18] GONG Yafeng，WANG Luning，BI Haipeng，et al. Hydration heat stress change rule in the construction of segment No. 0 of PC box girder bridge[C]//Fourth International Conference on Transportation Engineering. Chengdu，China：Southwest Jiaotong University，2013.

[19] XIAO Xiangnan，PENG Yunyong，LUO Guijun. Study on hydration heat of concrete channel-box girder[J]. Thermal Science，2021，25(2A)：967-975.

[20] HOUSSEIN Nasteho A，LIU Ronggui，GU Bin，et al. Study on the hydration heat temperature field of large-scale prestressed concrete box girder[J]. IOSR Journal of Engineering，2018，8(1)：19-26.

[21] ZHANG Ning，ZHOU Xin，LIU Yongjian，et al. In-situ test on hydration heat temperature of box girder based on array measurement[J]. China Civ Eng J，2019，52：76-86.

[22] LIU Jiang，LIU Yongjian，ZHANG Ning，et al. Research on temperature action and cracking risk of steel-concrete composite girder during the hydration process[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering，2020，20(2)：1-21.

（下转第130页）