

预应力混凝土梁桥温度效应分析

何舒法,王治国,周静雯,王 龙,张桂通

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:温度效应是引起混凝土桥梁裂缝产生的重要因素之一。为研究不同工况下混凝土梁桥的温度效应,通过有限元软件 ADINA 对梁体在浇筑水化热、日照温差两种工况下的温度场进行模拟,结合某预应力混凝土梁桥实桥跟踪试验温度实测值进行对比分析,并计算出温度应力对结构的影响。结果表明:有限元计算结果与现场实测结果较为一致。混凝土 T 梁浇筑时,水化热温度先剧烈上升,约 7~9 h 达到峰值,峰值温度约 60 °C,然后快速下降趋于平稳,早期水化热应力小于混凝土早期抗拉强度;采用《公路桥涵设计通用规范》中温度梯度计算日照温差应力分布规律与实测值基本一致,腹板处温度应力值比较大,对结构有不利影响。

关键词:混凝土梁桥;温度场;水化热;日照温差;ADINA

中图分类号:U441.5;U448.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5322(2021)01-0072-07

随着桥梁建设的不断发展,国内外学者对混凝土结构的温度效应的认知愈来愈深,通过研究的深入发展,发现温度荷载对混凝土结构会产生巨大的影响,有时混凝土结构内部由于温度作用,产生的效应与结构恒载甚至活载效应相当,是结构设计中不可忽视的影响因素^[1-3]。

一般情况下,对桥梁结构的影响较大的温度类型主要有:结构季节性温差和日照温差,其次还存在早期混凝土浇筑水化热、温度骤降、桥面沥青摊铺等温度荷载的作用^[4]。按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[5],结构设计主要考虑均匀温度作用(季节性温差),梯度温度效应,对温度荷载考虑不尽全面,仍需相应的探索,明确结构在温度作用下的实际效应。本文以某预应力混凝土梁桥为例,选取早期浇筑水化热、日照温差两种工况,根据热力学相关原理建立有限元实体模型^[6-9]。首先,分析不同工况下 T 梁结构温度场,然后将温度场引入 ADINA Structure 模块进行结构受力分析,并结合实测数据对比分析得出相应结论。

1 水化热效应分析

1.1 有限元模型建立与分析

1.1.1 相关参数选取

1.1.1.1 水化热计算公式

混凝土水化过程是一个与多种因素相关的过程,水化热常用的计算公式有指数形式、双曲线形式、复合指数形式,根据文献[10]对不同水泥水化热计算公式的分析对比可知,采用指数形式计算公式较符合实际混凝土内水泥放热过程及测试结果,故本文采取指数形式。

$$Q(\tau) = Q_0(1 - e^{-m\tau}) \quad (1)$$

式中: $Q(\tau)$ 为龄期 τ 时混凝土累计水化热值,kJ/kg; Q_0 为水泥水化热总量,kJ/kg; m 为水化系数,按表1取值; τ 为混凝土龄期,d; t 为时间,d。

表1 水化系数取值

Table 1 Hydration coefficient value

浇筑温度/°C	水化系数 m
5	0.295
10	0.318
15	0.34
20	0.362
25	0.384

收稿日期:2020-08-14

基金项目:云南省交通运输厅科技项目(2017)(A)05号。

作者简介:何舒法(1996—),男,湖北荆门人,硕士生,主要研究方向为桥梁安全评估与维护。

1.1.1.2 导温系数

$$a = \frac{\gamma}{c\rho} \quad (2)$$

式中: a 为材料导温系数, m^2/h ; γ 为混凝土导热系数, $kJ/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$; c 为比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ 为混凝土质量密度, kg/m^3 。

根据参考文献[11],取混凝土质量密度 $\rho = 2\,500\, kg/m^3$;混凝土导热系数 $\gamma = 8.5\, kJ/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$;混凝土比热容 $c = 0.836\, kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ 。取沥青混凝土质量密度 $\rho = 2\,500\, kg/m^3$;沥青混凝土导热系数 $\gamma = 5.2\, kJ/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$;沥青混凝土比热容 $c = 0.81\, kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

1.1.1.3 表面换热系数

(1)粗糙表面:

$$\beta = 23.9 + 14.5 v_a \quad (3)$$

(2)光滑表面:

$$\beta = 21.8 + 13.5 v_a \quad (4)$$

式中: v_a 为风速, m/s ; β 为换热系数,按表 2 取值。

表 2 不同风速结构换热系数

Table 2 Structural heat transfer coefficient at different wind speeds

风速/ $(m \cdot s^{-1})$	$\beta/(kJ \cdot (m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1})$	
	光滑表面	粗糙表面
0	18.442 2	21.035
1	35.713 4	38.598 9
3	63.021 2	67.495 9
5	90.036	96.601 9
7	115.922 3	124.746 1
10	152.513 9	164.934 1

根据现场实测数据,混凝土入模温度 $33\, ^\circ C$, 风速 $3\, m/s$,环境温度 $30\, ^\circ C$ 。

1.1.2 模型建立与分析^[12-13]

通过 ADINA 建立 3D 实体有限元模型,混凝土梁体采用 3D-SOLID 单元,普通钢筋和预应力钢束采用 Rebar 方式进行考虑。T 梁结构温度场分布如图 1 所示,梁体内外水化热温度时程曲线如图 2 所示,梁体各截面水化热温度变化规律基本相似,故只列出 C-C 截面,计算点位置与后面试验中一致。

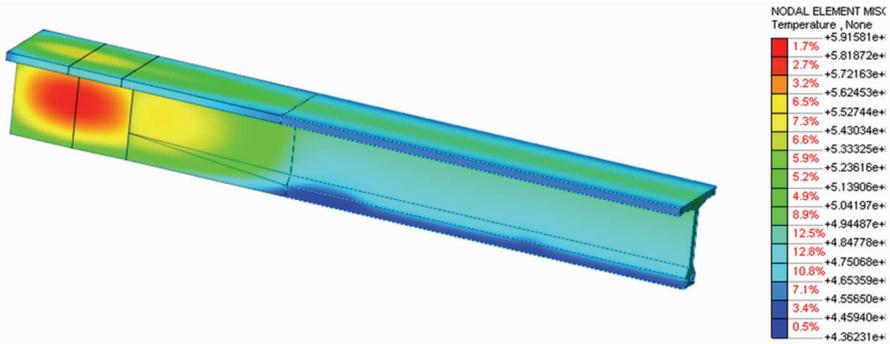


图 1 浇筑 9 h 时 T 梁温度场分布

Fig 1 Temperature field distribution of T-girder in 9 hour pouring

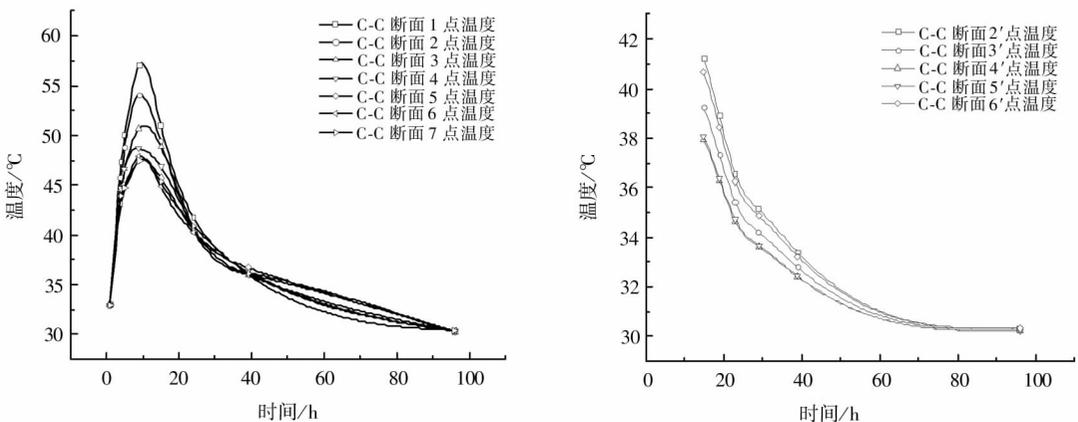


图 2 不同位置温度随时间变化

Fig 2 Temperature changes with time at different positions

根据图 1、2 分析可知,T 梁腹板越厚,水化热影响越剧烈,T 梁梁端截面水化热温度效应远高于跨中截面;梁体内部在浇筑后约 9 h 达到水化热温度峰值,峰值温度 57 ℃ 左右,发生在梗腋处;梁体内部外部温度最大相差 5 ~ 8 ℃,内外温度相差较大,施工时应采取严格的降温、保温措施。

1.2 实桥跟踪试验

1.2.1 试验方案

根据前期病害统计规律,将桥梁距梁端 2 m、9 m、13 m 处截面作为主要测试截面(A-A、B-B、C-C),如图 3 所示。2 m 处的传感器布置按顶板、腹板、底板各一个进行布置,9 m、13 m 处的温度传感器在截面内部布置 7 个监测点,腹板表面布置 5 个测点,测点布置如图 4 所示。

1.2.2 试验结果

根据现场实测资料,混凝土浇筑时的现场环境温度约为 23 ℃(晚上),白天温度约 30 ℃ 且紫外线较强,取梁体浇筑结束后的 24 h 混凝土水化热产生的温度进行分析。在浇筑后的相同时段内,通过对比 3 片试验梁不同测试断面各点的温度得出 3 片梁温度相差不大,故只选取一片梁进行水化热温度分析。

根据图 5、6 分析可知,截面各测点水化热温度前期剧烈上升,约 7 ~ 9 h 达到峰值,峰值出现在顶板靠近梗腋处,峰值温度约为 52 ℃,同时 A-A 截面峰值温度最大相差 15 ℃,A-A 截面的腹板中部水化温度比 C-C 截面腹板中水化温度同一时刻最大相差 20 ℃ 左右。

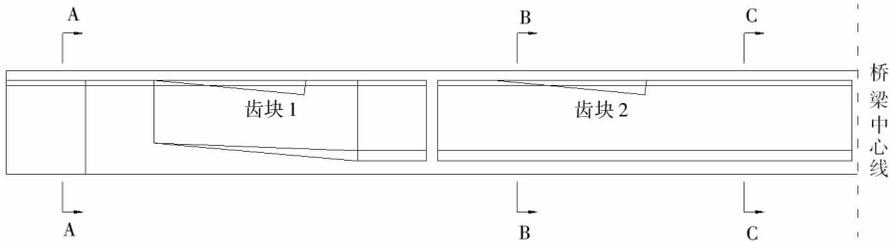


图 3 温度测试控制截面图
Fig 3 Section of temperature test control

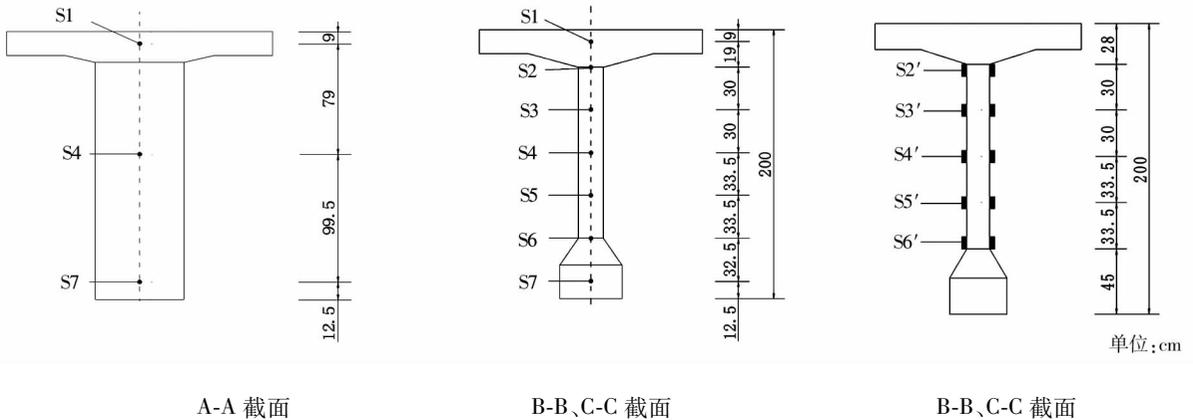


图 4 温度测点位置图
Fig 4 Location of temperature measuring points

根据现场实际情况,梁体在夏季夜晚进行混凝土的浇筑,第二天白天进行模板拆除,拆除后进行粘贴表贴式传感器,监测 T 梁腹板表面的温度情况,其变化曲线如图 7 所示。

根据图 7 分析可知,腹板内外侧温度各点的分布趋势呈现一致的规律,由于底板与钢模板接

触以及马蹄中预应力孔道的缘故,使得马蹄处的温度与腹板类似,故腹板底部内外侧温度与腹板的其他位置(3 点、4 点、5 点)内外侧温度相差较小,腹板顶部(2 点)处的内外温差最大相差 10 ℃,其他各点的内外温差在 3 ~ 8 ℃。

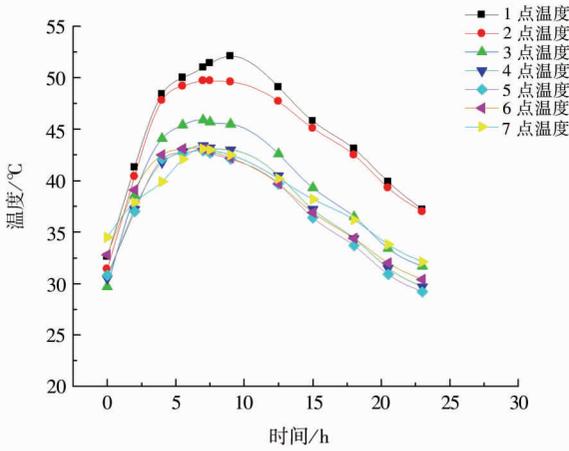


图5 C-C截面前期(24 h)温度图

Fig 5 Temperature diagram of section C-C in early stage (24 h)

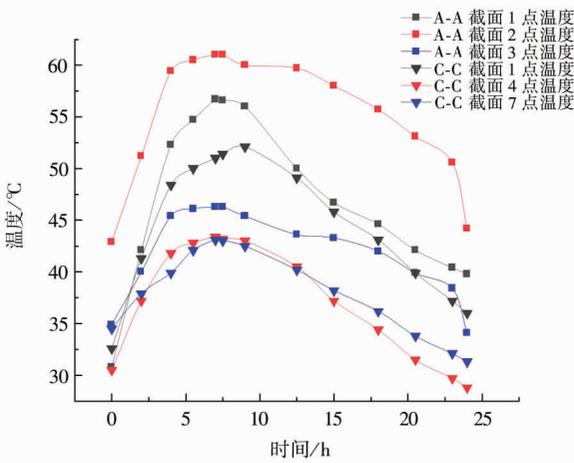


图6 C-C与A-A截面前期(24 h)温度对比图

Fig 6 Temperature comparison of section C-C and A-A in the early stage (24 h)

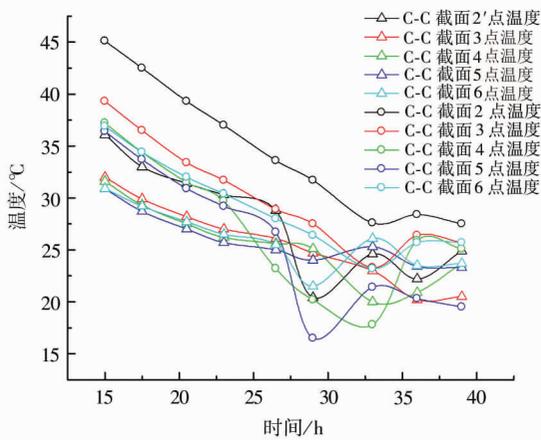


图7 腹板内外温度对比图

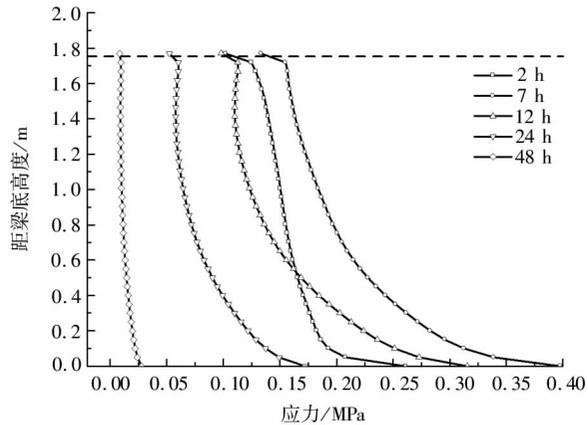
Fig 7 Comparison diagram of internal and external temperature of Web

通过实测值与理论值的对比可以得出,混凝土水化热有限元模拟仿真的结果与试验结果具有较强的一致性,能准确反映混凝土水化热温度场变化的一般规律和趋势。精确的有限元模型,为分析混凝土水化热产生的温度应力提供了基础。

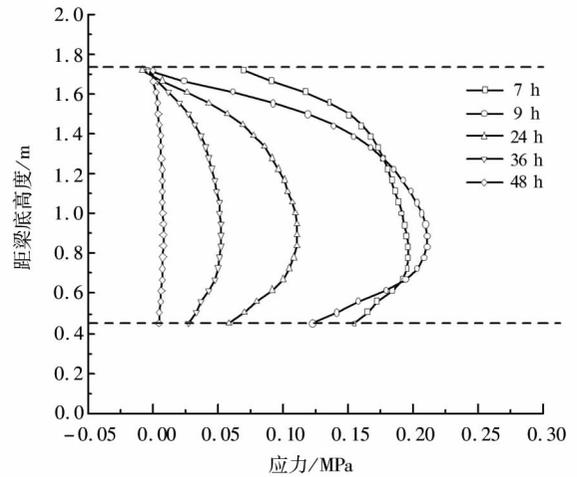
1.3 水化热应力分析

实际T梁浇筑水化过程中,混凝土弹性模量是一个缓慢增长过程,且早龄期混凝土存在较高的应力松弛现象,故需引入混凝土弹性模量随时间变化及徐变效应的影响^[13]。

由图8分析可知,T梁腹板越厚处,水化热对结构的影响越明显。其中A-A截面应力最不利位置在梁底面附近部位,最不利应力可达0.4 MPa,C-C截面应力最不利位置在腹板表面中部,最不利应力可达0.21 MPa,应力值未超过混凝土早期强度。



a A-A截面



b C-C截面

图8 腹板表面力随时间分布

Fig 8 Distribution of web surface stress over time

2 日照温差效应分析

日照是自然界固有的现象,来自太阳的光线其实是带有能量的波,这些波照射到物体上会受到不同程度的吸收以及反射,这些带有能量的波会使物体的温度得到不同程度的变化^[14]。由于日辐射强度、桥梁方位、日照时间等随机因素作用,使结构表面、内部因对流、热辐射以及热传导形成温度不均匀分布,从而在结构内部形成日照温度场,对结构产生影响^[15]。对于公路混凝土桥梁结构,桥面一般较宽,直接受日照作用,而腹板因悬臂的遮挡,两侧温度变化可不计,因此对梁式结构可只考虑沿截面高度方向的日照温差作用。

2.1 有限元分析

文献[5]规定,计算桥梁结构由于梯度温度引起的效应时,可采用图 9 所示竖向温度曲线,桥面板表面最高温度 T_1 见表 3。对于混凝土结构,当梁高 $H < 400$ mm 时, $A = H - 100$; 梁高 ≥ 400 mm 时, $A = 300$ mm。

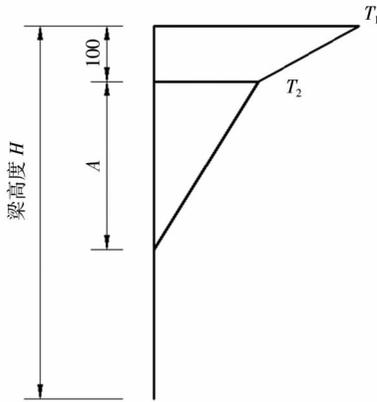


图 9 竖向温度曲线图

Fig 9 Vertical temperature curve

表 3 竖向日照正温差计算的温度基数

Table 3 Temperature base in calculation of vertical sunshine positive temperature difference

结构类型	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$
水泥混凝土铺装	25	6.7
50 mm 沥青混凝土铺装层	20	6.7
100 mm 沥青混凝土铺装层	14	5.5

图 10 为温度梯度正温差温度场图。从图 11 可以看出,在日照正温差作用下,梁体腹板整体受拉,且 C-C 截面的拉应力大于 A-A 截面的拉应力,C-C 截面接近腹板顶部位置处的拉应力最大,其拉应力值达到了 2.8 MPa。

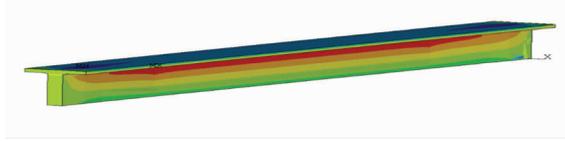


图 10 温度梯度正温差温度场图

Fig 10 Temperature field diagram of positive temperature difference of temperature gradient

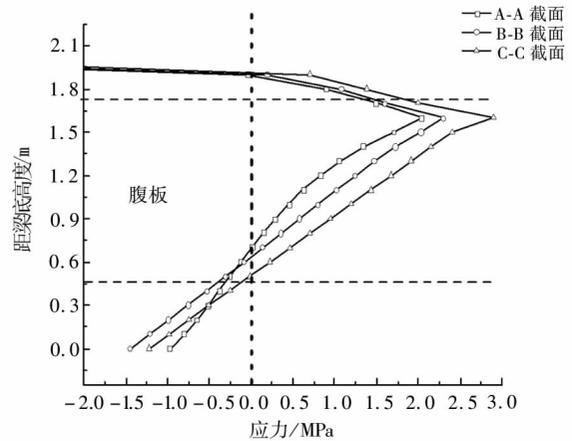


图 11 日照正温差温度正应力(规范值)

Fig 11 Temperature stress under positive sunshine temperature difference (standard value)

2.2 日照温差监测

选取 2019 年 8 月 24 日(晴天)凌晨至 25 日(阴天)晚 12 点两天时间内梁体在日照作用下内外侧腹板温度、应变变化情况进行统计分析,温度、应变变化如图 12、图 13 所示。

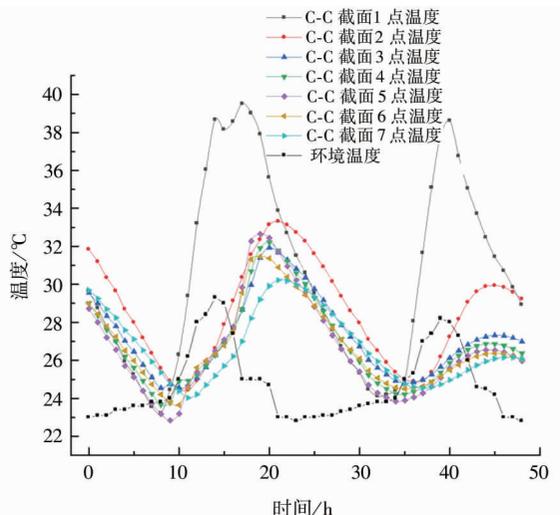


图 12 梁体内部温度统计图

Fig 12 Statistical diagram of internal temperature of beam

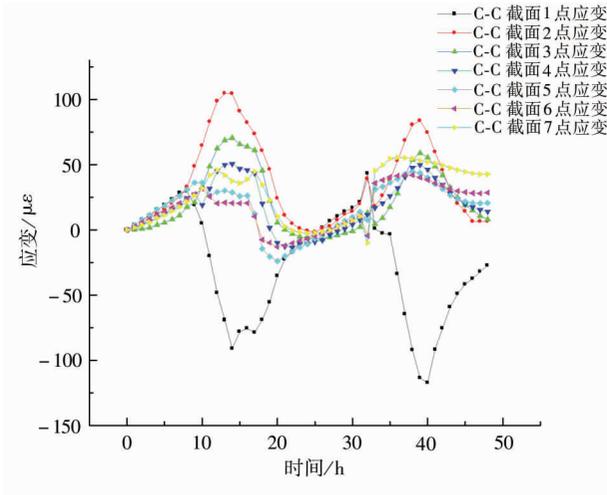


图 13 梁体内部应变统计图

Fig 13 Statistical diagram of internal strain of beam

由图 12、图 13 分析可知,在日照荷载作用下,梁体内温度整体变化曲线与环境温度变化规律类似,与环境温度变化相比梁体温度变化具有一定的滞后性,约 2~6 h,且呈现出随距梁底距离的增加滞后性减小的规律。在应变方面,由于顶板(1 点)比梗腋处(2 点)的温度高,翼缘板处的混凝土膨胀会受到梗腋处混凝土的抑制,因此翼缘板位置会处于受压状态,梗腋处混凝土受拉,其顶板处混凝土应变峰值为 $-120 \mu\epsilon \sim -100 \mu\epsilon$,而与顶板相邻的腹板顶部(2 点)将会承受较大的拉应力,其应变峰值为 $117 \mu\epsilon$ 。

2.3 温度应力分析

将现场实测温度梯度荷载引入 ADINA 有限元模型,利用 ADINA Structure 模块计算日照温度梯度产生的温度应力。

由图 14 分析可知,在实测温度梯度荷载作用下,混凝土 T 梁温度应力分布规律和规范中规定的温度正应力基本一致,顶底板受压,腹板整体受拉,腹板上部拉应力大于腹板下部,C-C 截面腹板顶部的拉应力值为 3.4 MPa 。

参考文献:

- [1] 陈营良. 大跨径混凝土箱梁的温度场及线形控制研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2018.
- [2] 马智慧. 混凝土箱形结构温度梯度模式研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
- [3] 葛俊颖. 预应力混凝土箱梁日照温差效应分析[J]. 中国铁路:2010(1):52-54.
- [4] 杨丹. 砌体结构墙体在日照和季节温差作用下应力分布研究[D]. 成都:西华大学,2016.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [6] HUSEIN MALKAWI A I, MUTASHER S A, QIU T J. Thermal-structural modeling and temperature control of roller com-

3 结论

(1)混凝土 T 梁浇筑时梁体各部位水化热温度发展规律大致相似,呈明显三段式,先剧烈升温,约 7~9 h 达到峰值,然后快速降温趋于平稳,梁体端部温度峰值约 $60 \text{ }^\circ\text{C}$,梁体跨中温度峰值约 $52 \text{ }^\circ\text{C}$,同一截面内外最大温差约 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

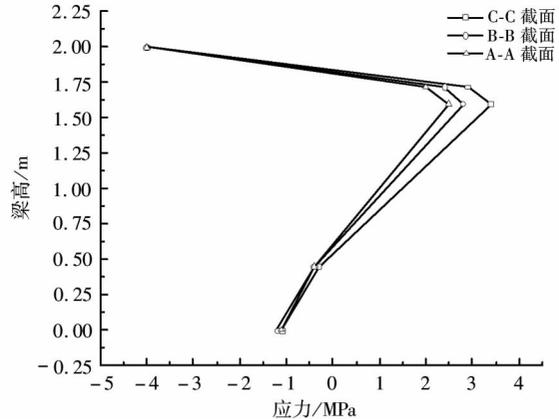


图 14 日照正温差温度正应力(实测值)

Fig 14 Temperature stress under positive sunshine temperature difference (measured value)

(2)混凝土 T 梁浇筑过程中水化热产生的温度应力始终小于混凝土早期抗拉强度,表面不会出现宏观裂缝,但仍需注意环境温度较低或温度骤降等特殊情况,采取严格的降温、保温措施,减小对结构的影响。

(3)日照荷载作用下,梁体内温度整体变化曲线与环境温度变化规律类似,与环境温度变化相比,梁体温度变化具有一定的滞后性,约 2~6 h,且呈现出随距梁底距离的增加滞后性减小的规律。

(4)在实测温度梯度荷载作用下,混凝土 T 梁温度应力分布规律和规范中规定的温度正应力基本一致,腹板顶部处拉应力最大,其量值不可忽略,在设计时应严格考虑。

- pacted concrete gravity dam[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003,17(4):177-187.
- [7] ZHOU Y, MENG D, WANG Y F. Finite-element simulation of hydration and creep of early-age concrete materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014,26(11):05014006.
- [8] 张欣,刘勇. 高速铁路简支箱梁日照温差的变化规律[J]. 铁道建筑,2019,59(7):17-21.
- [9] 曾庆响,韩大建,马海涛,等. 预应力混了箱梁桥的温度效应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41(6):2360-2366.
- [10] 杨学林. ANSYS 热分析及在桥梁中的应用[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2014.
- [11] 程旭东,孙连方,马红,等. LNG 储罐球形混凝土穹顶的热应力及裂缝分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版) 2015,39(5):130-136.
- [12] 孙彦仕,胡长明,李永辉. 基础承台大体积混凝土温度场数值模拟分析[J]. 施工技术,2008,37(12):11-13.
- [13] 张亮亮,赵亮. 桥墩混凝土水化热温度有限元分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2007,30(10):73-76.
- [14] 董振平,王静,胡晓鹏,等. 施工期混凝土力学性能的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(6):788-793.
- [15] 凯尔别克,刘兴法. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 北京:中国铁道出版社,1981.

Analysis of Temperature Effect of Prestressed Concrete Girder Bridge

HE Shufa, WANG Zhiguo, ZHOU Jingwen, WANG Long, ZHANG Guitong

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: Temperature effect is one of the important factors that cause the cracks of concrete bridge. In order to study the temperature effect of concrete beam bridge under different working conditions, the finite element software ADINA is used to simulate the temperature field of beam body under two working conditions of pouring hydration heat and sunshine temperature difference. Combined with the measured temperature value of tracking test of a prestressed concrete beam bridge, the comparative analysis is carried out, and the influence of temperature stress on the structure is calculated. The results show that the finite element calculation results are consistent with the field measurement results. During the pouring of concrete T-beam, the hydration heat temperature rises sharply at first, reaches the peak value in about 7-9 hours, and the peak temperature is about 60 °C, then decreases rapidly and tends to be stable, and the early hydration heat stress is less than the early tensile strength of concrete. The distribution law of sunshine temperature difference stress calculated by the temperature gradient in "General Code for Design of Highway Bridges and Culverts" (JTG D60—2015) is basically consistent with the measured value, and the temperature stress value at the web is relatively large, which has adverse effects on the structure.

Keywords: concrete girder bridge; temperature field; hydration heat; sunshine temperature difference; ADINA

(责任编辑:张英健)