

# 高温天气对宽幅矮塔斜拉桥大悬臂施工控制影响研究

朱豪杰<sup>1</sup>, 张谢东<sup>1\*</sup>, 李勇<sup>2</sup>, 林源<sup>2</sup>, 吴迪<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430000; 2. 湖北路桥高速公路管理有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:**为研究高温天气下温度梯度对处于大悬臂施工阶段的宽幅矮塔斜拉桥施工的影响,通过理论计算宽幅等高箱梁的太阳辐射和热边界条件,采用Abaqus建立宽幅等高箱梁的热分析有限元模型,使用智能弦式传感器与红外测温仪实测箱梁截面温度,计算宽幅箱梁在夏季某天从日出至日落的温度梯度大小及其分布。采用Midas Civil建立施工阶段有限元模型,分析大悬臂阶段控制工况下正温度梯度对主梁线形与应力的影响规律。结果表明:热分析有限元模型结果与实测温度结果吻合较好。宽幅等高箱梁边中腹板处温度梯度效应最显著,中午高温时段内宽幅等高箱梁边中腹板顶部竖向温度梯度大小与作用范围均高于《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)规定值。正温度梯度使主梁产生下挠,并且随着悬臂的增大,主梁下挠效应越显著,与无温度梯度相比最大悬臂节段浇筑后正温度梯度使主梁悬臂端下挠量增大了36.08 mm,尾索张拉主梁悬臂端下挠量增大了40.23 mm。正温度梯度使主梁顶板压应力显著增加。

**关键词:**宽幅矮塔斜拉桥;大悬臂施工;日照温度场;温度梯度;桥梁线形与应力

中图分类号:U445

文献标志码:A

## Influence of High Temperature on Large Cantilever Construction Control of Wide Extradosed Cable-Stayed Bridge

ZHU Haojie<sup>1</sup>, ZHANG Xiedong<sup>1\*</sup>, LI Yong<sup>2</sup>, LIN Yuan<sup>2</sup>, WU Di<sup>2</sup>

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430000, China;

2. Hubei QiaoXiao Expressway Management Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of temperature gradient on the construction of wide extradosed cable-stayed bridges in the large cantilever construction stage at high temperatures, the solar radiation and thermal boundary conditions of wide equal-height box girder were theoretically calculated, and the thermal analysis finite element model of the wide equal-height box girder was established by Abaqus. The cross-section temperature of the box girder was measured by intelligent string sensors and an infrared thermometer. The temperature gradient and its distribution of wide equal-height box girder from sunrise to sunset on a certain day in summer were calculated. The finite element model of the construction stage was established by Midas Civil, and the influence of positive temperature gradient on the main beam alignment and stress under control conditions of a large cantilever was analyzed. The results show that the results of the thermal analysis finite element model are in good agreement with the measured temperature results. The temperature gradient effect at the side and middle web of the wide equal-height box girder is the most significant. During the noon period at high temperatures, the vertical temperature gradient and the range of action at the top of the side and middle web of the wide equal-height box girder are higher than the specified value of the *General Specifications for*

收稿日期:2023-03-23

基金项目:内蒙古自治区交通运输厅建设科技项目(编号:NJ-2013-29)

作者简介:朱豪杰,男,硕士研究生.E-mail:2665188298@qq.com

\*通信作者:张谢东,男,博士,教授.E-mail:zhangxd@whut.edu.cn

*Design of Highway Bridges and Culverts* (JTG D60—2015). The positive temperature gradient causes the main beam to deflect, and as the cantilever increases, the deflection effect of the main beam is more significant. Compared with no temperature gradient, the deflection of the cantilever end of the main beam increases by 36.08 mm after the maximum cantilever segment pouring, and the deflection of the cantilever end of the tail-cable tensioning main beam increases by 40.23 mm. The positive temperature gradient makes the compressive stress on the roof of the main beam increase significantly.

**Keywords:** wide extradosed cable-stayed bridge; large cantilever construction; solar temperature field; temperature gradient; bridge alignment and stress

## 0 引言

矮塔斜拉桥是一种以主梁受力为主,斜拉索受力为辅,介于常规斜拉桥与连续梁桥之间的桥梁结构形式<sup>[1]</sup>。矮塔斜拉桥与连续梁桥相比,梁高更小,跨径更大,并且大跨径连续梁桥与连续刚构桥在服役期间会出现跨中下挠问题,而矮塔斜拉桥可以通过补张斜拉尾索与中跨合龙段预应力备用束来克服此缺陷。与常规斜拉桥相比,矮塔斜拉桥塔高较低,斜拉索应力值大且应力幅小,其刚度更大。

温度作用在桥梁建设期与运营期均需重点关注<sup>[2]</sup>。当斜拉桥采用挂篮悬臂施工时,需实时监测桥梁的整体线形以及应力状态,尤其是挂篮悬臂施工至大悬臂阶段时,不均匀温度场对主梁线形与应力扰动较大,应严格控制日照温度场对桥梁施工的影响<sup>[3]</sup>。

国内外学者对混凝土桥梁日照温度场研究较多。彭友松<sup>[4]</sup>系统地描述了桥梁日照温度场的产生机理,并且完善了桥梁结构在日照温度场中的传热边界条件;王成<sup>[5]</sup>以混凝土箱梁尺寸与混凝土热工参数为变量对桥梁日照温度场进行敏感性分析,发现混凝土导热系数对箱梁截面温度分布影响最显著;卫俊岭等<sup>[6]</sup>对单箱单室混凝土箱梁的日照温度场进行数值模拟,提出了竖向温度梯度指数型计算公式;付春雨等<sup>[7]</sup>分析了单箱三室混凝土箱梁的日照温度场,发现内腹板加剧了箱梁的温度梯度。此外,学者们也针对其余桥梁结构形式的温度场开展了研究工作。刘诚<sup>[8]</sup>对一组钢混组合箱梁进行室内烤灯辐射试验与室外日照试验,发现组合梁顶面不出现明显的横向温度梯度,但是混凝土板翼缘长度会影响钢混组合梁的横向温度分布;孙金等<sup>[9]</sup>计算了高温沥青摊铺时钢混组合板梁截面的竖向温度梯度大小及其

分布;Wang等<sup>[10]</sup>采用平面有限元与三维梁有限元联合仿真计算了混凝土箱梁拱桥的温度场,并且研究了混凝土箱梁拱肋的热场分布、热应力和位移。

目前针对高温天气下处于大悬臂施工阶段的宽幅矮塔斜拉桥日照温度场研究较少,本文基于Abaqus热分析结果与实测温度数据的条件下,研究矮塔斜拉桥宽幅等高主梁截面温度梯度大小及其分布规律,采用Midas Civil分析大悬臂施工阶段控制工况下正温度梯度对桥梁线形与应力的影响规律。

## 1 工程概况

以一座桥跨布置为(110+200+110) m的双塔三跨单索面预应力混凝土斜拉刚构组合体系桥为研究对象,该矮塔斜拉桥立面布置如图1所示。主梁采用单箱三室大悬臂变截面PC连续箱梁,0#块箱梁高度6.5 m,跨中箱梁高度3.3 m,双薄壁墩起58 m范围内箱梁高度按1.6次抛物线变化,斜拉索为单索面,双排布置在中央分隔带上。宽幅主梁等高段标准断面见图2,箱梁顶宽34 m,底宽20 m,翼缘悬臂长达7 m,横坡为双向2%,外腹板与中腹板均为直腹板,斜拉索锚固在箱梁中室顶板。主梁共划分为27个号块,0#块梁段长14 m,采用托架支撑混凝土分层浇筑施工,1#~25#梁段采用菱形挂篮对称悬臂浇筑施工,其中1#~8#块节段长度为3 m,9#~25#块节段长度为4 m。主梁挂篮悬臂施工顺序为:立模与钢筋绑扎,浇筑节段混凝土,混凝土养护,张拉体内预应力(纵向、横向、竖向),张拉斜拉索,挂篮推出。此矮塔斜拉桥17#~27#块为等截面箱梁,故以施工至17#块作为步入大悬臂施工阶段的临界点,施工现场步入大悬臂施工阶段后,正值夏季频繁持续出现高温天气,施工现场日间最高温度可达40℃,夜间温度也可以达到20℃,日照温度场对桥梁施工的影响不容忽视。

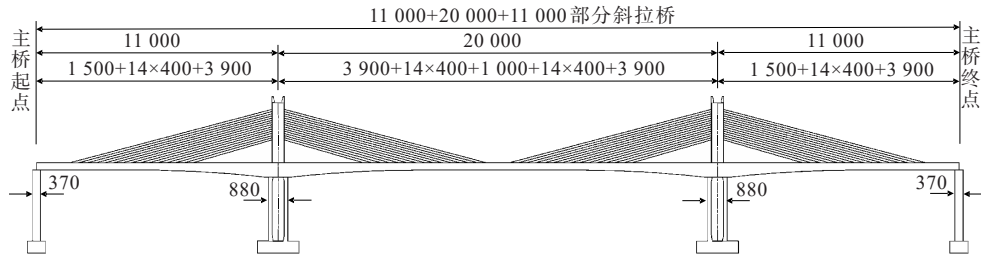


图1 矮塔斜拉桥立面布置图(单位:cm)

Figure 1 Elevation layout of extradosed cable-stayed bridge (unit:cm)

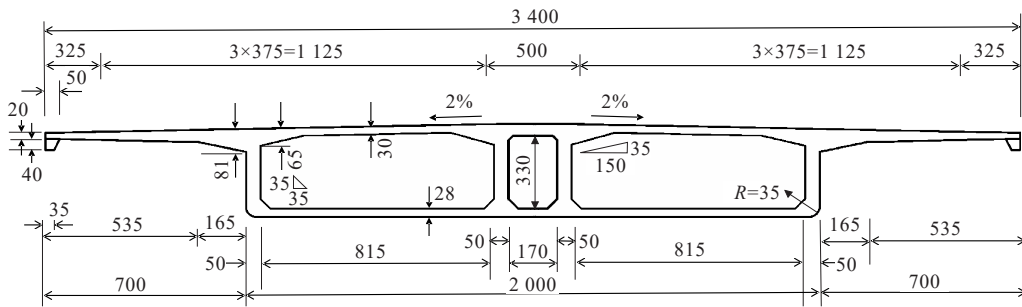


图2 宽幅主梁等高段标准断面图(单位:cm)

Figure 2 Standard cross-section of wide equal-height section of main beam (unit:cm)

## 2 日照温度场计算

宽幅矮塔斜拉桥步入大悬臂施工阶段后,主梁处于不断变化的日照温度场中导致主梁截面产生较大的温度梯度。太阳辐射是导致桥梁结构出现温度梯度的主要来源。桥梁日照温度场主要由以下两个部分决定:① 太阳辐射,需考虑大气散射,地面反射与太阳辐射接受率等因素;② 桥梁结构的换热边界条件,包括对流散热与辐射换热。为研究主梁在夏季气温较高并且风速较小时的日照温度场,根据桥梁所在地的实际气象条件,选择计算2022年6月1日从日出至日落时的桥梁日照温度场,该气候条件为典型夏季高温天气。

### 2.1 太阳辐射计算

太阳辐射计算需考虑太阳常数 $I_0$ 、太阳倾角 $\delta$ 、太阳时角 $\tau$ 、太阳高度角 $\beta_s$ 、太阳方位角 $\alpha_s$ 和太阳入射角 $\phi$ ,这里不加证明地列出各个参数,其推导过程可参考文献[4,8]。该桥桥址位于北纬 $31.53^\circ$ ,桥梁走向为南北走向。通过太阳常数 $I_0$ 与太阳倾角 $\delta$ 来确定太阳的绝对位置,2022年6月1日日出时间为06:00,日落时间为18:00,日序数 $N=180$ ,通过日序数 $N$ 计算该天大气层上界的太阳常数 $I_0$ 与太阳倾角 $\delta$ ,太阳常数 $I_0=1\,321.93\text{ W/m}^2$ ,太阳倾角 $\delta=23.24^\circ$ 。

通过太阳时角 $\tau$ 、太阳高度角 $\beta_s$ 和太阳方位角 $\alpha_s$ 确定太阳相对于桥址的相对位置,太阳时角 $\tau$ 根据一天不同时刻来计算, $\tau$ 每隔1 h变化 $15^\circ$ 。太阳时角 $\tau$ 、太阳高度角 $\beta_s$ 和太阳方位角 $\alpha_s$ 随着时刻 $t$ 不断变化,其计算公式见式(1)~(3):

$$\tau = (12 - t) \times 15^\circ \quad (1)$$

$$\sin \beta_s = \cos \varphi \cos \delta \cos \tau + \sin \varphi \sin \delta \quad (2)$$

$$\cos \alpha_s = \frac{\sin \varphi \cos \delta \cos \tau - \cos \varphi \sin \delta}{\cos \beta_s} \quad (3)$$

式中: $t$ 为时刻; $\varphi$ 为桥址的地理纬度。

太阳入射角 $\phi$ 是决定桥梁接受太阳辐射强度的因素之一,计算公式见式(4):

$$\cos \phi = \cos \beta_n \cos \beta_s \cos (\alpha_n - \alpha_s) + \sin \beta_n \sin \beta_s \quad (4)$$

式中: $\beta_n$ 为倾斜面法线与水平面的倾角; $\alpha_n$ 为倾斜面法向相对于正南方向的夹角;混凝土箱梁顶面,太阳入射角 $\phi=90^\circ-\beta_s$ ,且 $\beta_n=90^\circ$ ;箱梁底面 $\beta_n=-90^\circ$ ,不受太阳直接辐射;箱梁腹板为直腹板,箱梁直腹板 $\beta_n=0^\circ$ , $\alpha_n=\pi/2$ 。

太阳辐射到达桥梁结构物要经过一系列复杂的光学物理过程,太阳辐射强度包括太阳直接辐射强度、大气散射强度和地面反射强度。对于入射角为 $\phi$ 的结构表面直接辐射强度 $I_{D\phi}$ ,任意斜面上的天空散

射强度  $I_{d\beta}$ , 地面反射辐射强度  $I_{r\beta}$  和总辐射强度  $q_\phi$  计算公式分别见式(5)~(8):

$$I_{D\phi} = I_0 P^{\frac{1}{\sin\beta_s}} \cos\phi \quad (5)$$

$$I_{d\beta} = \frac{1 + \sin\beta_n}{2} (0.271I_0 - 0.294I_0 P^{\frac{1}{\sin\beta_s}}) \sin\beta_s \quad (6)$$

$$I_{r\beta} = \frac{1 - \sin\beta_n}{2} r_e (I_0 P^{\frac{1}{\sin\beta_s}} \sin\beta_s + (0.271I_0 - 0.294I_0 P^{\frac{1}{\sin\beta_s}}) \sin\beta_s) \quad (7)$$

$$q_\phi = I_{D\phi} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (8)$$

式中:  $P$  为复合大气透明度系数, 取  $P=0.6^{[4]}$ ;  $r_e$  为地表反射率, 取  $0.2^{[11]}$ 。

箱梁翼缘板对边腹板遮挡产生的悬臂阴影长度  $l_s$  计算公式见式(9):

$$l_s = \frac{b_c \tan\beta_s}{\cos(\alpha_s - \alpha_n)} \quad (9)$$

式中:  $b_c$  为翼缘板悬臂长度, 其值为 7 m。

桥梁结构表面的太阳辐射并不能完全被吸收, 顶板太阳辐射吸收率为 0.6, 底板与腹板太阳辐射吸收率为 0.5<sup>[5]</sup>。宽幅等截面箱梁外表面接收太阳辐射强度见图 3。箱梁各外表面均是 12:00 接收的太阳辐射强度最大, 日出与日落时接收的太阳辐射强度最小。12:00 时顶板接收的太阳辐射强度为 543.4 W/m<sup>2</sup>, 底板接收的太阳辐射强度为 90.6 W/m<sup>2</sup>, 腹板接收的太阳辐射强度为 76.5 W/m<sup>2</sup>, 同一时刻腹板与底板接收的太阳辐射强度均小于顶板。腹板与底板接收的太阳辐射强度差异不大, 这是因为此矮塔斜拉桥箱梁翼缘板悬臂长达 7 m, 而等截面梁段梁高只有 3.3 m, 导致 07:00 至 17:00 时间段外腹板均处在翼缘板的悬臂阴影范围内。

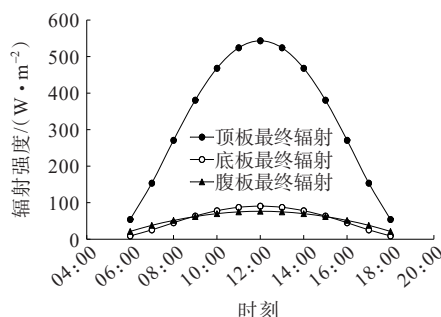


图3 宽幅等截面箱梁外表面接收的太阳辐射强度

Figure 3 Solar radiation intensity received by outer surface of wide equal section box girder

## 2.2 热边界条件计算

桥梁结构热交换不仅与气象条件有关, 还与当地的自然地理环境与结构的几何特征有关<sup>[4]</sup>。混凝土箱梁换热包括对流散热与辐射换热, 箱梁内部无风, 属于自然对流, 而箱梁外部存在自然风, 属于强制对流。通过风速测试仪测得 2022 年 6 月 1 日风速稳定在 3 m/s, 对流散热计算采用 Kehlbeck<sup>[12]</sup>提出的对流散热经验公式。混凝土箱梁与外界其他物体进行热量交换和传递, 这个过程用辐射散热来描述, 结合工程所处地气象资料, 辐射换热系数取 5.852 W/(m<sup>2</sup>·K)。箱梁表面换热系数计算结果见表 1。

表1 箱梁表面换热系数

Table 1 Heat transfer coefficient of box girder surface

计算位置	对流散热系数 $h_a$ / [W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> ]	辐射换热系数 $h_r$ / [W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> ]	综合换热系数 $h$ / [W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> ]
箱梁顶板外表面	$h_a = 3.83v + 4.67$	5.852	22.012
箱梁底板外表面	$h_a = 3.83v + 2.71$	5.852	20.052
箱梁腹板外表面	$h_a = 3.83v + 3.67$	5.852	21.012
箱梁内表面	$h_a = 3.5$	5.852	9.352

注:  $h = h_a + h_r$ 。

## 3 热分析有限元模型建立及验证

选取处于大悬臂施工阶段的等截面宽幅箱梁作为分析对象, 采用 Abaqus 建立等截面宽幅箱梁热分析有限元模型见图 4, 单元类型为热传导 DC2D4 单元, 单元网格采用结构化网格划分方式。主梁处于悬臂施工阶段尚未铺装沥青混凝土, 箱梁材料均为 C55 混凝土, 其热工参数如表 2 所示。

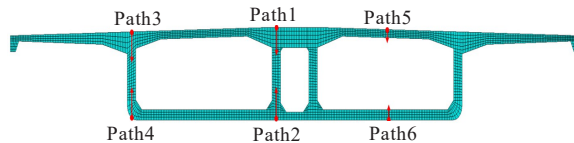


图4 宽幅单箱三室箱梁有限元模型网格划分及路径定义

Figure 4 Mesh division and path definition of finite element model of wide single-box three-cell box girder

太阳辐射通过表面热通量 (Surface Heat Flux) 分别施加到箱梁外侧。对流散热与辐射换热边界条件采用表面热流 (Surface Film Condition) 施加到箱梁内外侧节点上。计算时间为 2022 年 6 月 1 日日出 (06:00) 至日落 (18:00), 实测当日 06:00 现场环境温度为 17.5℃, 在预定义场中定义箱梁的初始环境温



度为  $17.5^{\circ}\text{C}$ , 设置温度瞬态分析步, 总时间步长为 43 200 s。

表 2 C55 混凝土热工参数

Table 2 Thermal parameters of C55 concrete

导热系数/ [ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	比热/ [ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	弹性模 量/MPa	泊松 比	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	膨胀率
3.0	960	$3.55\times 10^{-4}$	0.2	2 600	$1\times 10^{-5}$

通过数值模拟结果与实测温度数据对比来验证热分析有限元模型的准确性。在箱梁 18# 块中腹板与边腹板混凝土顶面和距离中腹板与边腹板顶面竖直向下 60 cm 处各布置 8 个智能弦式传感器, 传感器布置实况如图 5 所示。实测温度数据采用无线采集模块与综合测试仪获得。边中腹板混凝土顶面传感器与两边固定装置直接接触, 实测温度数据与边中腹板混凝土顶面真实温度差别较大, 故改用红外测温仪测量边中腹板混凝土顶面真实温度。

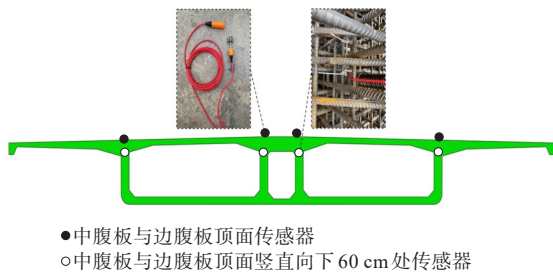


图 5 智能弦式传感器布置实况

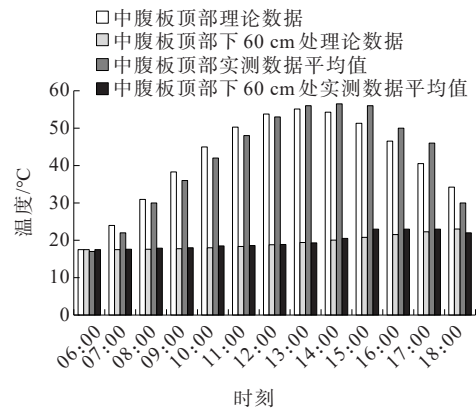
Figure 5 Intelligent string sensor layout

将 6 月 1 日实测温度数据与数值模拟理论温度结果对比见图 6。实测温度与数值模拟理论温度误差均为  $-6\sim 6^{\circ}\text{C}$ , 验证了箱梁热分析有限元模型的准确性。

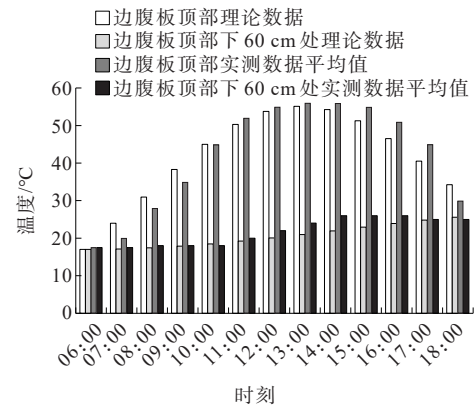
#### 4 表面温度与温度梯度

首先分析宽幅等截面箱梁表面温度变化规律, 选取翼缘板小纵梁顶面与底面、中腹板顶面、边腹板侧面、箱梁底面和箱梁内部 6 个位置处的温度如图 7 所示。日出后同一时刻下箱梁顶板表面温度均高于其余位置表面温度, 箱梁顶板表面温度在 11:00 至 15:00 都达到了  $50^{\circ}\text{C}$ , 13:00 时达到峰值温度  $55.1^{\circ}\text{C}$ 。箱梁翼缘板小纵梁底面、边腹板侧面以及箱梁底面温度基本一致, 14:00 时达到峰值温度  $35^{\circ}\text{C}$ , 这些位置在翼缘板悬臂阴影范围内没有受到太阳直接辐射。箱梁内表面温度相较于腹板外表面温度略低,

14:00 时达到峰值温度  $32^{\circ}\text{C}$ 。由于热传导的时效性, 箱梁顶板表面与其余表面相比提前 1 h 左右达到峰值温度。



(a) 中腹板处实测温度与模拟温度对比



(b) 边腹板处实测温度与模拟温度对比

图 6 实测温度与数值模拟理论温度对比

Figure 6 Comparison between measured temperature and theoretical temperature of numerical simulation

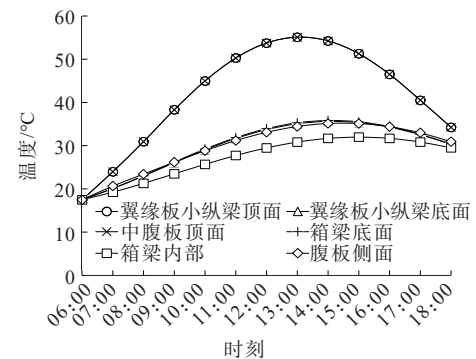


图 7 箱梁表面温度

Figure 7 Temperature on box girder surface

选取 11:00、13:00 和 15:00 共 3 个时刻宽幅等高箱梁温度云图如图 8 所示, 箱梁截面存在较为显著的竖向温度梯度与横向温度梯度。为便于研究箱梁截

面温度梯度分布规律,在箱梁截面选取了6条路径见图4,6条路径在各个时刻的温度梯度如图9所示,同一路径下,均在13:00左右竖向温度梯度达到峰值,边、中腹板顶部竖直向下温度梯度峰值均达到32.6℃,边箱顶板竖直向下温度梯度峰值24.2℃,中腹板底部竖直向上温度梯度峰值12.8℃,边腹板底部竖直向上温度梯度峰值11.5℃,边箱底板竖直向上温度梯度峰值8.6℃。宽幅箱梁边中腹板处竖向温度梯度效应最显著。宽幅箱梁横向温度梯度也主要集中在边中腹板处,13:00达到横向温度梯度峰值15℃。

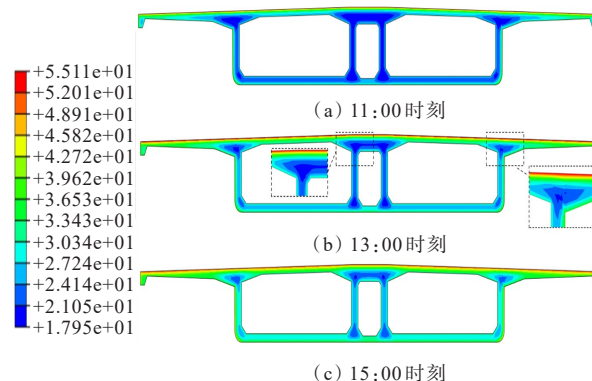


图8 宽幅等高箱梁温度云图(单位:℃)

Figure 8 Temperature cloud diagram of wide equal-height box girder (unit:℃)

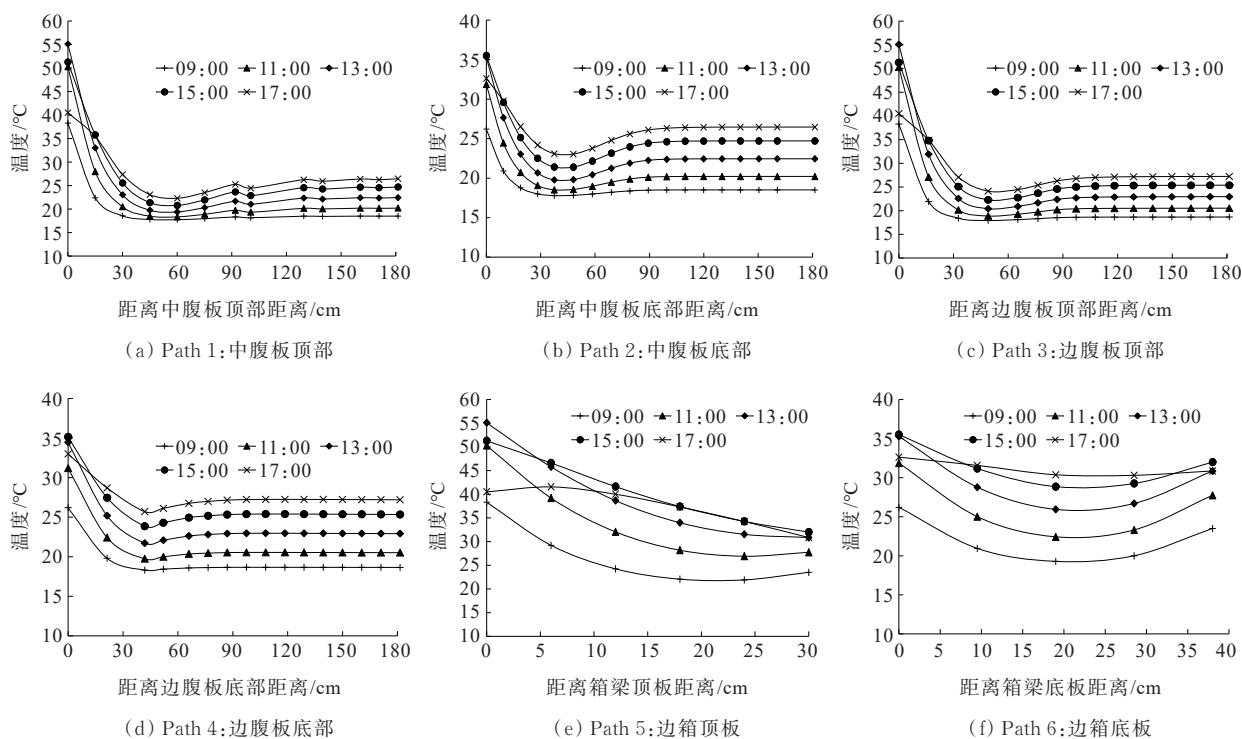


图9 宽幅等高箱梁截面6条路径温度梯度

Figure 9 Temperature gradient of six paths of wide equal-height box girder

由于自然地理环境的差异,各国的桥梁设计规范对温度梯度的规定也各不相同<sup>[13]</sup>。选取各国现行桥梁设计规范:中国《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)<sup>[14]</sup>、美国AASHTO规范<sup>[15]</sup>、新西兰桥梁设计规范与英国BS 5400规范<sup>[16]</sup>对于竖向正温度梯度的规定。以主梁不设置铺装层,梁高3.3 m为例,计算主梁高度范围内的正温度梯度大小及其分布。

美国AASHTO规范考虑了其地域的影响,共划分为4个区,这里选用1区计算。各国规范下正温度梯度计算结果如图10所示。由图10可知:各国规范

表明箱梁顶板温度梯度基本集中在顶板以下0.5 m范围内,底板温度梯度基本集中在底板以上0.2 m范围内,并且顶板温度梯度值远大于底板温度梯度值。《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)(以下简称中国规范)有关混凝土桥梁正温度梯度的规定与其他国家规范相比,考虑的温度梯度比较保守,并且中国规范不计算混凝土梁底板温度梯度。热分析所得的箱梁温度梯度与中国规范相比,中午11:00至15:00边中腹板顶部竖向温度梯度大小和作用范围与中国规范值相比均偏大,并且边中腹板处横向温度

梯度与底板竖向温度梯度也不容忽视。中国地域宽广,近年来许多地区夏季极易出现极端高温天气,有关桥梁温度梯度规定值得进一步研究。

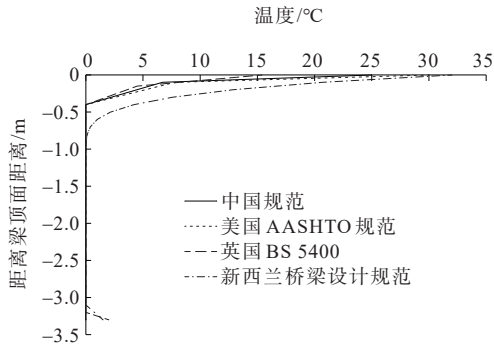


图 10 各国规范下正温度梯度计算结果

Figure 10 Calculation results of positive temperature gradient under national codes

## 5 正温度梯度对大悬臂施工控制的影响

为研究正温度梯度对处于大悬臂施工阶段宽幅矮塔斜拉桥主梁线形与应力的影响,采用 Midas Civil (2019)建立施工阶段有限元模型如图 11 所示。主梁节点编号如下:1<sup>#</sup>节点为桥梁起点,37<sup>#</sup>节点为左主墩 0<sup>#</sup>块中心,67<sup>#</sup>、68<sup>#</sup>节点为跨中合龙段。通过不断修正施工阶段模型混凝土弹性模量与重度、混凝土收缩徐变等材料参数、预应力损失参数、施工临时荷载等参数使有限元模型不断逼近真实桥梁结构。实测变形值、应力值与理论变形值、应力值吻合良好,验证了施工阶段模型的准确性。

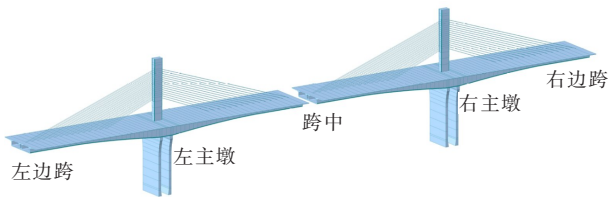
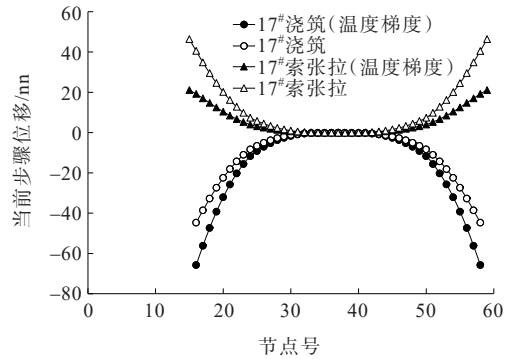


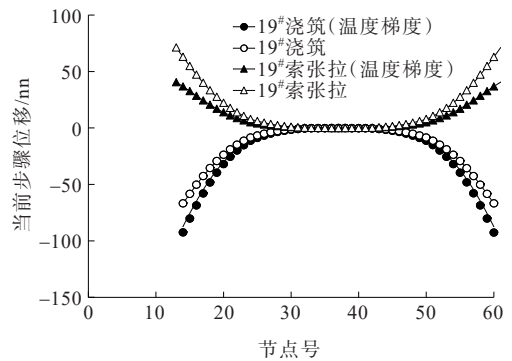
图 11 施工阶段有限元模型(最大悬臂阶段)

Figure 11 Finite element model of construction stage-maximum cantilever stage

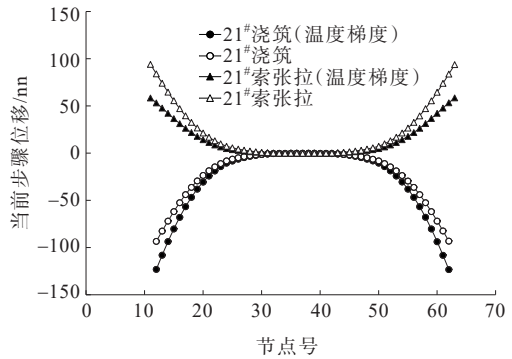
在大悬臂施工阶段,混凝土浇筑和斜拉索张拉是对线形和应力控制最为关键的工况。按照中国规范分别在大悬臂阶段混凝土浇筑工况与斜拉索张拉工况施加正温度梯度荷载。选取 17<sup>#</sup>、19<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>与最大悬臂节段混凝土浇筑与斜拉索张拉工况在正温度梯度与无温度梯度作用下的主梁变形对比如图 12 所示。无温度梯度作用下,随着悬臂的增大,节段混凝土



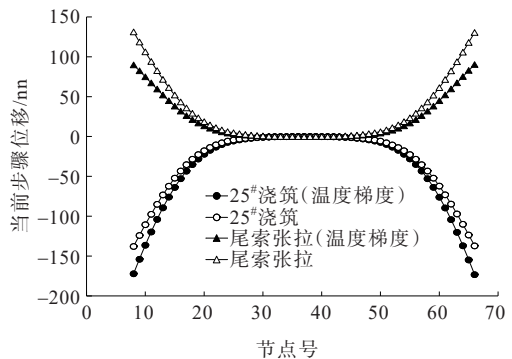
(a) 17<sup>#</sup>浇筑与索张拉主梁变形



(b) 19<sup>#</sup>浇筑与索张拉主梁变形



(c) 21<sup>#</sup>浇筑与索张拉主梁变形



(d) 25<sup>#</sup>浇筑与尾索张拉主梁变形

图 12 正温度梯度与无温度梯度作用下大悬臂施工阶段控制工况下主梁变形对比

Figure 12 Comparison of main beam deformation under control conditions in large cantilever construction stage with positive temperature gradient and no temperature gradient

土浇筑主梁下挠量与斜拉索张拉主梁抬升量逐渐增加,尾索张拉主梁悬臂端上抬量可达131 mm,最大悬臂节段混凝土浇筑主梁悬臂端下挠量可达137 mm,为了确保全桥顺利合龙,必须增加控制精度。正温度梯度作用与无温度梯度作用相比,大悬臂阶段节段混凝土浇筑工况下主梁下挠量增加,斜拉索张拉工况下主梁上抬量不足,正温度梯度会使主梁产生下挠,并且随着悬臂的增大,主梁下挠效应越明显。正温度梯度作用与无温度梯度作用相比,17<sup>#</sup>到25<sup>#</sup>混凝土浇筑主梁悬臂端下挠量从21.06 mm增加至36.08 mm,17<sup>#</sup>斜拉索张拉到尾索张拉主梁悬臂端下挠量从25.26 mm增加至40.23 mm。

最大悬臂节段混凝土浇筑和斜拉索尾索张拉工况在正温度梯度与无温度梯度作用下主梁顶板与底板应力对比如图13所示,正温度梯度对主梁底板应力影响较小,但正温度梯度显著增大了主梁顶板的压应力。正温度梯度导致主梁顶板上层单元伸长,

并且顶板单元伸长量从顶面向下逐渐减小,而顶板体内预应力钢束与锚固在顶板的斜拉索约束和抑制了顶板单元的形变,导致主梁顶板压应力增大。

正温度梯度会使主梁线形与应力状态严重偏离施工控制的预期,节段立模放样以及变形与应力测量应该避免日照温度场的影响,并且建议施工过程中监测日照温度场对桥梁线形与应力的影响。

## 6 结论

本文在理论日照温度场与实测温度数据的基础上,通过Abaqus建立热分析有限元模型研究高温天气下各时刻宽幅等高主梁截面温度梯度大小及其分布,再采用Midas Civil建立施工阶段模型分析大悬臂施工阶段控制工况下正温度梯度对主梁线形与应力的影响规律。得出以下结论:

(1) 基于智能弦式传感器与红外测温仪实测温度数据,宽幅箱梁热分析结果与实测温度数据吻合良好,可以较为准确地获得宽幅箱梁的日照温度场。

(2) 夏季高温天气下宽幅箱梁内外腹板加剧了箱梁截面的温度梯度,11:00至15:00内外腹板顶部竖向温度梯度大小与作用范围均高于中国规范规定值,边中腹板处横向温度梯度与底板竖向温度梯度也不容忽视。

(3) 宽幅矮塔斜拉桥进入大悬臂施工阶段后,正温度梯度使主梁产生下挠,并且随着悬臂的增加,下挠效应越明显,与无温度梯度相比最大悬臂节段浇筑后正温度梯度使主梁悬臂端下挠量增大了36.08 mm,尾索张拉主梁悬臂端下挠量增大了40.23 mm。正温度梯度显著增加了主梁顶板的压应力。桥梁施工控制时应排除日照温度场的干扰,提高施工控制精度。

## 参考文献:

## References:

- [1] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路斜拉桥设计规范:JTG/T 3365-01—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.  
China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co.,Ltd..Code for design of highway cable-stayed bridge: JTG/T 3365-01—2020[S].Beijing: China Communications Press Co., Ltd.,2020.

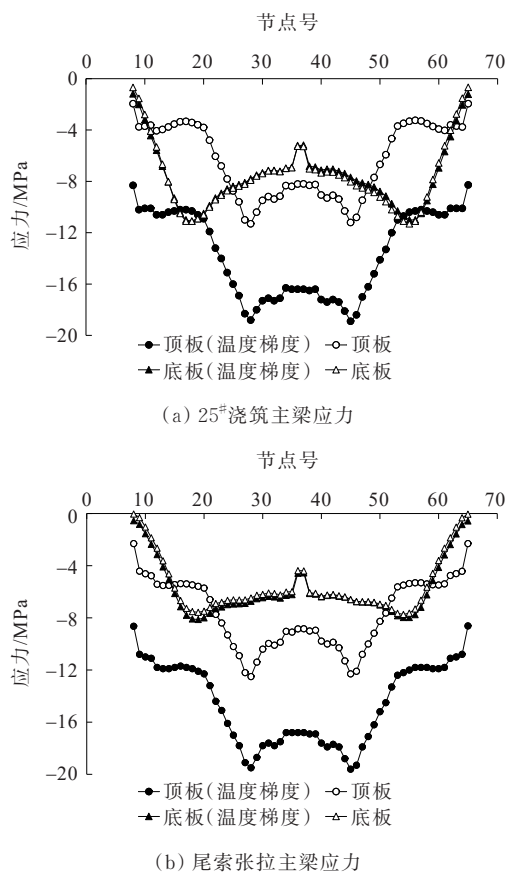


图13 正温度梯度与无温度梯度作用下最大悬臂节段浇筑与尾索张拉主梁应力对比

Figure 13 Stress comparison between maximum cantilever segment pouring and tail-cable tensioning main beam under positive temperature gradient and no temperature gradient



- [2] 肖林,蔡俊宇,杨妍秋,等.桥梁温度作用与效应2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(增刊1): 167-174.  
XIAO Lin, CAI Junyu, YANG Yanqiu, et al. Research progress of bridge temperature action and effect in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(sup 1): 167-174.
- [3] SONG X M, MELHEM H, LI J, et al. Effects of solar temperature gradient on long-span concrete box girder during cantilever construction[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3): 97-104.
- [4] 彭友松.混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究[D].成都:西南交通大学,2007.  
PENG Yousong. Study on the theory and application of sunshine temperature effect of concrete bridge structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [5] 王成.大温差地区混凝土箱梁温度场与温度效应研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.  
WANG Cheng. Study on temperature field and temperature effect of concrete box girder in large temperature difference area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [6] 卫俊岭,王浩,茅建校,等.混凝土连续箱梁桥温度场数值模拟及实测验证[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(3): 378-383.  
WEI Junling, WANG Hao, MAO Jianxiao, et al. Numerical simulation and test verification for temperature field of concrete continuous box girder bridges[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 378-383.
- [7] 付春雨,严鹏,唐波.单箱多室混凝土箱梁结构的日照温度场分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(2): 270-274.  
FU Chunyu, YAN Peng, TANG Bo. Studies on temperature field of concrete single box beam with multiple cells under solar radiation[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2022, 46(2): 270-274.
- [8] 刘诚.钢-混凝土组合桥梁的温度场和温度效应研究[D].北京:清华大学,2018.  
LIU Cheng. Study on temperature field and temperature effect of steel-concrete composite bridge[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [9] 孙金,冯小青,唐焱,等.高温沥青摊铺时钢-混凝土叠合梁桥温度场有限元分析[J].中外公路,2018,38(3):216-221.  
SUN Jin, FENG Xiaoqing, TANG Yan, et al. Finite element analysis on temperature field of steel-concrete composite girder bridge under high temperature asphalt paving[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(3): 216-221.
- [10] WANG Y B, ZHAN Y L, ZHAO R D. Analysis of thermal behavior on concrete box-girder arch bridges under convection and solar radiation[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(7): 1043-1059.
- [11] 庞振宇.城市预应力混凝土曲线梁桥温度场及温度效应研究[D].南京:南京工业大学,2015.  
PANG Zhenyu. Study on temperature field and temperature effect of urban prestressed concrete curved beam bridge[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2015.
- [12] (德)凯尔别克.太阳辐射对桥梁结构的影响[M].刘兴法,等,译.北京:中国铁道出版社,1981.  
KEHLBECK F. Effect of solar radiation on bridge structure [M]. LIU Xingfa. Beijing: China Railway Publishing House, 1981.
- [13] 李戴.国内外规范关于竖向温度梯度的规定研究[J].中国铁路,2017(9): 73-78.  
LI Wei. Research on domestic and foreign specifications on vertical temperature gradient[J]. China Railway, 2017 (9): 73-78.
- [14] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.  
CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [15] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRED bridge design specifications(2009) [S]. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2009.
- [16] 杨春,张大伟.Eurocode桥梁混凝土结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.  
YANG Chun, ZHANG Dawei. Eurocode bridge concrete structure design[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.