

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202111071

# 西部横断山区强降温气候条件下桥塔温度效应 及抗裂性能优化研究\*

黄旭, 朱金, 李永乐, 张明金

(西南交通大学桥梁工程系, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在强降温极端气候条件下, 桥塔混凝土表面存在开裂风险。为此, 以我国西部横断山脉地区某大跨悬索桥为工程背景, 开展了强降温气候条件下桥塔温度效应及抗裂性能优化研究。首先, 提出了桥址区极端天气的识别与模拟方法, 并验证了所提模拟方法的有效性。随后, 建立桥塔节段的3D有限元模型, 分析了强降温极端天气下混凝土桥塔的温度场以及温度应力分布特征。最后, 针对强降温极端天气下混凝土桥塔外表面存在开裂风险的问题, 提出了两种桥塔混凝土表面抗裂优化方法, 并通过参数分析给出了本例桥塔的最优参数。研究结果表明: 在强降温天气下, 当不考虑任何抗裂优化措施前, 桥塔表面拉应力极值为2.06 MPa, 存在较大开裂风险; 当采用抗裂优化措施后, 提出的两种措施均能有效降低混凝土桥塔表面的拉应力极值。通过参数分析发现, 采用有机涂料涂装桥塔表面的优化方法时, 白色有机涂料的优化效果最佳; 当采用桥塔表面覆盖UHPC的优化方法时, 其厚度为0.04 m时优化效果最佳。

**关键词:** 桥塔; 横断山区; 强降温气候; 温度效应; 抗裂性能优化

**中图分类号:** U443.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0310-10

## Study on Thermal-induced Effect and Anti-Crack Performance Optimization of Bridge Pylon under Strong Cooling Weather Conditions in Hengduan Mountain Region of Western China

HUANG Xu, ZHU Jin, LI Yongle, ZHANG Mingjin

(Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The concrete bridge pylon may be at risk of surface cracking under strong cooling weather conditions. In view of this, a study on thermal-induced effect and anti-crack performance optimization of bridge pylon under strong cooling weather conditions is carried out, taking a long-span suspension bridge in the Hengduan Mountain Region of Western China as an engineering background. Firstly, an approach is proposed to identify and simulate the strong cooling weather scenario at the location of the prototype bridge through analyzing the in-situ historical meteorological data. Secondly, a 3D finite element (FE) model of the bridge pylon segment is developed. The established FE model enables the in-

\* 收稿日期:2021-10-04;修回日期:2021-11-22

基金项目:中央高校基本科研业务费(2682021CX012)、国家自然科学基金青年基金(51908472)资助

作者简介:黄旭(1995—),男,博士研究生。主要从事桥梁结构温度效应研究。E-mail:2506500919@qq.com

通讯作者:朱金(1988—),男,助理研究员,博士(后)。主要从事风-车-桥耦合振动,桥梁温度效应。

E-mail:zhujin19880102@126.com

investigation into the characteristics of the temperature field and the temperature induced stress of the bridge pylon under various strong cooling weather scenarios. Lastly, two anti-crack measures are proposed to mitigate the risk of surface cracking of the bridge pylon under strong cooling weather conditions. Parametric studies are also conducted to seek the optimum parameters of the two proposed anti-crack measures for the prototype bridge pylon. The simulation results show that the surface of the concrete bridge pylon without any anti-crack measures undertakes tensile stress up to 2.06 MPa, indicating there may exist a risk of surface cracking. After employing the two proposed anti-crack measures, the tensile stress at the surface of the bridge pylon reduces significantly. In addition, according to the parametric study on the two anti-crack measures, it is found that the white organic coating of the first anti-crack measure has the best performance, and the UHPC (Ultra-High-Performance Concrete) with a thickness of 0.04 m of the second anti-crack measure is the best.

**Keywords:** bridge pylon; Hengduan Mountain region; strong cooling weather; thermal-induced effect; anti-crack performance optimization

## 引言

在桥塔结构的服役期间,由于太阳辐射、日气温变化、季节温度变化、强降温等环境因素,桥梁结构内部存在波动的温度<sup>[1-3]</sup>。有研究表明,在环境因素的影响下,结构中逐渐形成不均匀的温度分布,由此产生的温度内力与结构静荷载和活荷载相当。近年来,我国川藏铁路和西部大开发战略的实施,交通建设的重点向西部地区转移。其典型气候包括温带大陆性气候和高原山地气候,特点是太阳辐射强、风速高、温度低、昼夜温差大、常伴随强降温天气。短期强降温会增加桥塔混凝土表面的拉应力,这将显著影响桥塔的耐久性和使用寿命。由于桥塔结构使用寿命长,难以更换,因此亟需开展高原极端天气下桥塔温度效应的研究。

有不少学者对桥塔的温度效应进行了相关研究。B.Chen等<sup>[4]</sup>和Y.Xia等<sup>[5]</sup>基于传热学理论,提出了一种确定桥梁温度分布的分析方法。并建立了桥面板、横梁和桥塔的精有限元模型进行热分析,在此基础上,提出了一种大跨度桥梁热-结构耦合分析的新方法。采用了青马大桥的健康监测数据与数值模拟结果进行对比,验证了所提出的热-结构耦合分析新方法的可行性和有效性。D.H.Yang等<sup>[6]</sup>分析了桥塔的温度场分布特征和桥塔准静态响应的变化。基于监测温度和位移数据,研究了桥梁的温度场分布,并研究了塔身位移的时变性。通过分析相关关系,研究了温度与塔梁位移及塔梁距离的关系。J.S.Zhu等<sup>[7]</sup>和M.Q.Ling等<sup>[8]</sup>分别通过多

尺度建模和计算流体力学(CFD)方法分析了桥塔表面的非均匀对流换热系数。最后,基于精细的桥梁温度分布,量化并比较了季节、环境温度变化、温度梯度、材料特性和路面对结构动力特性的影响。Y.Li等<sup>[9]</sup>建立了跨海斜拉桥塔的太阳温度场计算模型,其中,考虑了影响桥塔温度分布的太阳仰角、方位角、辐射吸收系数等参数。将实测数据与温度场和温度变形值进行比较,验证了该模型的正确性。

而目前针对气候复杂地区桥塔温度效应的相关研究仍相对滞后。在强降温气候条件下,钢筋混凝土桥塔表面的拉应力会显著增加,不利于该地区桥塔的耐久性和使用寿命。大多数现有研究使用日常环境参数<sup>[5,10]</sup>,无法满足不同地区,尤其是极端气候地区桥塔温度效应的分析<sup>[11]</sup>。鉴于此,本文以位于我国横断山脉地区某大跨悬索桥为工程背景,开展了强降温极端天气下钢筋混凝土桥塔温度效应及抗裂优化方法的研究。

## 1 热边界计算理论

### 1.1 热辐射

桥塔主要受到以下几种辐射:太阳的直接辐射、散射辐射、地面反射、大气辐射、环境辐射和结构辐射散热等。现有的研究中,太阳辐射的获取主要有公式计算<sup>[12-13]</sup>、现场实测,本文在桥址区架设了全自动气象站,因此,本文采用桥址区实测的太阳辐射,相关仪器以及参数详见2.1节。

## 1.2 热对流

流体流过固体表面时,由于温差的存在,热量在流体与固体之间传递的过程称为对流换热。对流换热服从牛顿冷却公式,单位时间单位接触面积交换的热量为<sup>[14-15]</sup>:

$$q = h_1(T_1 - T) \quad (1)$$

式中, $q$ 为对流换热密度, $(W \cdot m^{-2})$ ;  $T_1$ 为流体温度(环境温度);  $T$ 为固体表面温度;  $h_1$ 为对流换热系数, $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ ,表示物体表面与附近空气温差 $1^\circ C$ ,单位时间单位面积上通过对流与附近空气交换的热量。

对流换热系数的数值与换热过程中空气的物理性质、换热表面的形状、部位、表面与流体之间的温差以及空气的流速等都有密切关系。在桥塔结构的温度场计算中,通常采用如下计算公式<sup>[16]</sup>:

$$h_1 = 2.6[\sqrt[4]{\Delta T} + 1.54U] \quad (2)$$

式中, $\Delta T$ 为结构表面温度与周围气温之差,以绝对温度计;  $U$ 为风速 $(m \cdot s^{-1})$ 。

## 1.3 等效气温

桥塔周围的气温是影响其温度分布的另一重

$$\begin{cases} T = 0.5[(T_{\max} + T_{\min}) + (T_{\max} - T_{\min}) \sin(\frac{\pi(t+30)}{24})], & 0 \leq t < 6 \\ T = 0.5[(T_{\max} + T_{\min}) + (T_{\max} - T_{\min}) \sin(\frac{\pi(t-10.5)}{9})], & 6 \leq t < 15 \\ T = 0.5[(T_{\max} + T_{\min}) + (T_{\max} - T_{\min}) \sin(\frac{\pi(t-9)}{12})], & 15 \leq t \leq 24 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $t$ 为时刻数(h);  $T_{\max}$ 为下午3点的气温值;  $T_{\min}$ 为上午6点的气温值。

## 2 环境参数取值

### 2.1 实例背景

本文中采用的实例桥塔为我国西部横断山脉地区的某大跨度悬索桥,位于西藏自治区的昌都市南方约78 km处,具体位置为 $97^\circ 10'E, 30^\circ 45'N$ 。桥塔的布置如图1所示,该悬索桥加劲梁的轴线方向与正北方夹角为 $47^\circ 12'$ ,桥塔塔架高165 m,桥塔底部尺寸为 $10 m \times 12.32 m$ 。为了便于区分,对桥塔底部外表面按I~IV编号,如图1所示。桥址区的气候条件复杂多变,极端最高气温为 $32.7^\circ C$ ,最低气温为 $-17.5^\circ C$ ,桥址区年均温度和风速分别为 $8.0^\circ C$ 和 $1.2 m/s$ 。

要因素。气温与桥塔发生热交换主要通过通过对流换热和辐射换热综合作用传热,本文采用等效气温来进行简化计算<sup>[13]</sup>:

$$T_2 = T_1 + \alpha \frac{I}{h_1 + h_2} \quad (3)$$

式中, $T_1$ 为桥塔结构周围的气温;  $T_2$ 为桥塔结构表面的等效气温;  $I$ 为桥塔结构表面所吸收的太阳辐射;  $\alpha$ 为材料的辐射吸收系数,桥塔表面的 $\alpha$ 取0.65;  $h_1$ 为对流换热系数,见式(2),  $h_2$ 为辐射换热系数,由下式计算<sup>[17]</sup>:

$$h_2 = C\epsilon[(T_2 + T_0)^4 + (T_1 + T_0)^4] \quad (4)$$

式中, $\epsilon$ 为材料辐射发射系数,桥塔结构表面为混凝土材料,因此, $\epsilon$ 取0.9。由式(4)可知, $h_2$ 是桥塔表面等效气温 $T_2$ 和周围气温 $T_1$ 的函数。因此,需要联立式(2)~(4)进行迭代计算。

此外,由式(3)~(5)不难看出,等效气温实质上是在结构周围气温的基础上增加了对流和辐射换热引起的温度变化项。因此,计算等效气温需要获得桥址区的气温。本文通过某日最高温和最低温对全天的气温进行拟合。具体拟合公式如下<sup>[18]</sup>:

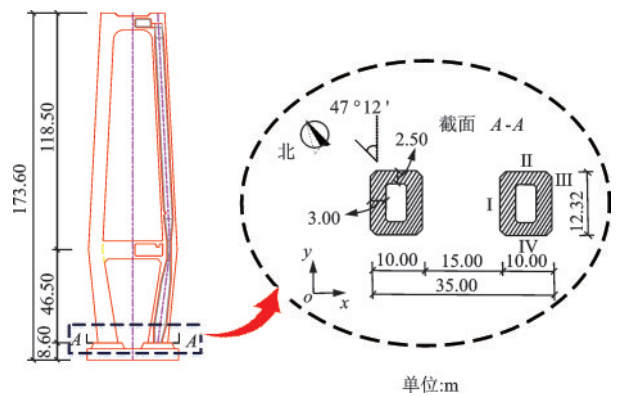


图1 实例桥塔布置示意图

Fig.1 Layout of prototype bridge pylon

为了探究桥址区的局部气候特征,在桥址处建立了一座无人值守的全自动六要素气象站(Hysd-CAWS3000\_JT),如图2所示。该气象站测试塔由

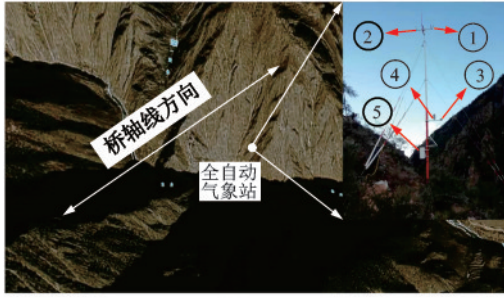


图2 桥址区全自动气象站布置

Fig.2 Layout of automatic meteorological station at the bridge site

华云升达(北京)气象科技有限公司提供,总高度为50 m。本气象站采集的六要素数据包含风速、风向、气温、气压、湿度和太阳辐射,采样时间间隔设置为1 min,并通过远程传输设备实时传输。气象站的各传感器及采集仪如图3所示。本文中仅使用了采集数据中的风速、气温和太阳辐射数据。



图3 传感器及传输设备

Fig.3 Sensor and transmission equipment

## 2.2 强降温极端气候环境温度

该悬索桥桥址区能够采集到的气温数据十分有限,其范围为2019年10月9日至2020年10月。为此,本文还联合了昌都市的实测气温数据开展了桥址区的温度研究,其范围为2011年1月1日至2020年12月31日。桥址区和昌都市的日气温的最高值和最低值如图4所示。

### 2.2.1 强降温天气识别与模拟

目前,寒潮作为重要的指标被广泛应用于强降温极端天气的研究<sup>[19]</sup>。但关于寒潮的具体定义,目前学者们还没有形成统一的认识。例如,文献[19]将寒潮定义为:24 h内降温8℃,或48 h内降温10℃,或72 h内降温12℃,且三种情况下最低温均低于4℃。但是,本文作者在研究强降温极端天气

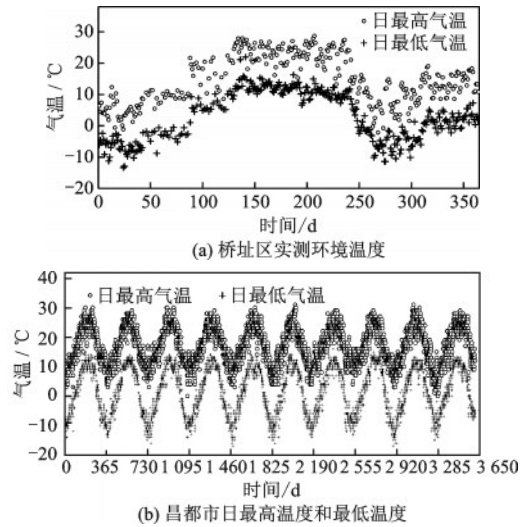


图4 实测环境温度

Fig.4 Measured ambient temperature

下桥塔的温度效应时发现,一定时间内的降温会导致桥塔表面混凝土产生较大的拉应力,而平均气温不是影响桥塔温度效应的关键因素。因此,本文仅采用24 h和48 h内环境温度的温差这一指标来识别桥址区的强降温天气。具体识别过程如下。首先,通过对桥址处的实测气温进行分析,提取桥址区连续三天的日最高气温,记为 $T_1, T_2, T_3$ ,以及日最低气温,记为 $t_1, t_2, t_3$ 。在此基础上,为了准确识别出桥址区的强降温天气,本文共计算了6个不同温差代表值,即24 h内的3种温差代表值,包括 $T_1 - T_2, t_1 - t_2, T_1 - t_2$ ;以及48 h内的3种温差代表值,包括 $T_1 - T_3, t_1 - t_3, T_1 - t_3$ 。最后,通过分析上述6种温差代表值,确定桥址区强降温天气及发生的具体日期。采用上述提出的6种温差代表值对图4(a)中桥址区实测的气温进行识别,结果一致表明桥址区的强降温天气出现2020年9月21日至23日。强降温天气温度变化曲线如图5所示。由图5可以明显看出,该强降温天气在48 h内迅速降低至18.4℃。

在识别得到的桥址区强降温天气基础上,本文结合公式(5),采用如下方法模拟桥址区强降温天气的气温:

(1)首先假定日温差符合正态分布,求得桥址区秋季日温差值的均值 $\Delta T_0$ 和标准差 $\sigma$ 。因此,令 $\Delta T_0 + 3\sigma = \Delta T_1, \Delta T_0 - 3\sigma = \Delta T_2$ ,其中, $\Delta T_1$ 为降温前的日温差值, $\Delta T_2$ 为降温后的日温差值,则 $T_{\max} - T_{\min} = \Delta T_1 = 25.2^\circ\text{C}, T'_{\max} - T'_{\min} = \Delta T_2 = 4.0^\circ\text{C}$ 。

(2)计算识别的强降温天气气温的平均气温 $T'$ ,并由此可以得到 $T_{\max} = T' + 0.5\Delta T_1, T_{\min} = T' - 0.5\Delta T_1$ 。

(3)假定降温后日最高气温  $T'_{\max}=T_{\min}$  (降温前的日最低气温),则降温后的日最低气温为  $T'_{\min}=T_{\min}-\Delta T_2=\mu_1-0.5\Delta T_1-\Delta T_2$ 。

(4)将降温后 24 h 内气温时程叠加直线  $t_1t_2$  (见图 5),由此来模拟降温前后之间的气温过渡。其中,  $t_1$  为 48 h 的气温,  $t_2$  为降温后 72 h 的气温。

通过上述方法得到的强降温天气模拟气温如图 5 所示,模拟的气温在 48 h 内降温幅度达到 29.2 °C。

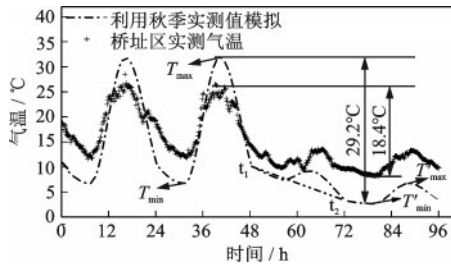


图 5 环境温度(气温)

Fig.5 Ambient temperature (air temperature)

### 2.2.2 强降温环境温度模拟方法验证

由于桥址区的实测数据仅有 1 年,且这 1 年中强降温天气出现的次数有限,需要对本文提出的强降温识别和模拟方法进行验证。基于此,将本文提出的强降温识别和模拟方法用于桥址区附近的 12 个城市。如图 6 所示,  $P_0$  代表桥址区,  $P_{1-12}$  代表为我国西部的 12 个城市,分别为昌都、丁青、洛隆、八宿、左贡、芒康、理塘、白玉、德格、石渠、囊谦、玉树。这些城市均位于西藏自治区、四川省、青海省交界的横断山脉区域,其气候环境相近,数据样本具有相似性,能代表该地区的气候状况。这 12 个城市的实测气温数据包含了从 2011 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日的最高温和最低温。



图 6 桥址区附近城市

Fig.6 Cities around the bridge site

限于篇幅,本文仅给出八宿和左贡两个城市强降温的识别和模拟结果。需要说明的是,由于样本数据仅包含日最高温和最低温,在识别出强降温天气后,还需要利用式(5)得到强降温天气的气温时程曲线,如图 7 所示。从图 7 可以看出,本文提出的强降温天气识别方法能很好的识别出强降温天气,气温在 24 h 内分别降温 24.0 °C 和 21.0 °C, 48 h 内分别降温 24.1 °C 和 27.0 °C。此外,采用本文提出的方法模拟的强降温天气气温在 24 h 或 48 h 内的降温幅度均大于识别的实测气温,图 7 中,模拟的气温 24 h 内最大降温幅度为 24.3 °C 和 27.2 °C, 48 h 内最大降温幅度为 28.0 °C 和 32.9 °C,因此,模拟的气温能作为该地区强降温天气的最不利气温来开展后续研究,同时,也能为同区域桥梁的设计和施工提供参考。

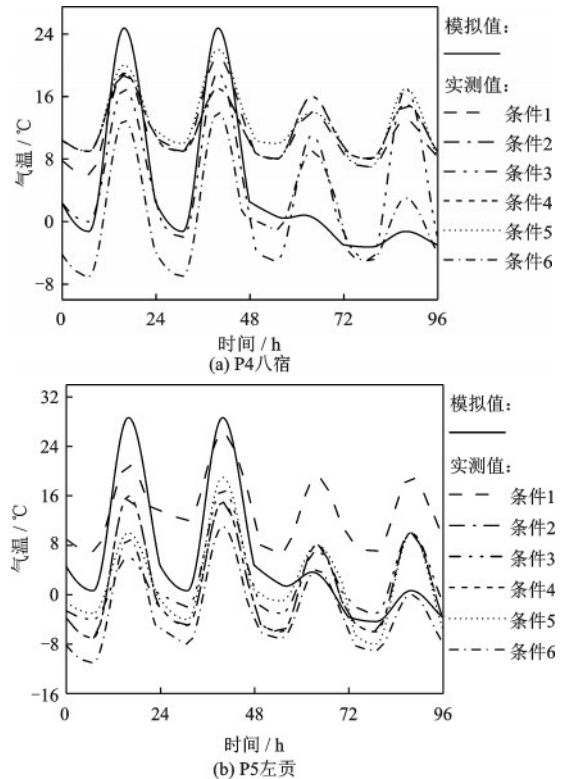


图 7 强降温天气环境温度的识别与模拟

Fig.7 Identification and simulation of ambient temperature during strong cooling

### 2.3 强降温极端气候风速和太阳辐射

此外,桥址区的风速和辐射对桥塔的温度效应均有影响,因此,其取值直接影响有限元模拟的结果,本文所用的风速和辐射值均采用强降温天气(即 2020 年 9 月 21 日至 23 日)的实测数据,如图 8 所示。

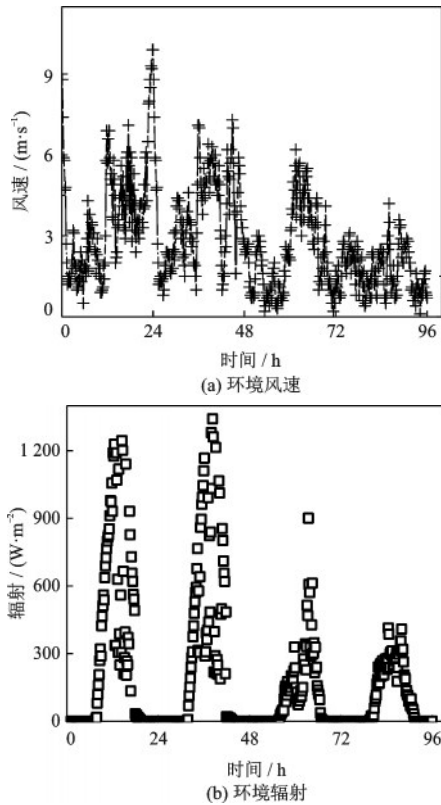


图8 桥址区强降温过程中的实测环境参数

Fig.8 Measured environmental parameters during strong cooling at the bridge site

### 3 实例温度效应分析

#### 3.1 热参数取值及有限元建模

由于本例中桥塔采用的受力钢筋纵筋 $\Phi 32$ ,环向箍筋为 $\Phi 16$ ,而桥塔截面尺寸为 $10\text{ m}\times 12.32\text{ m}$ ,配筋率较低。因此,可忽略内部钢筋对桥塔温度场的影响。本例中桥塔采用C55混凝土,此外,由于桥塔内部封闭,太阳辐射和热对流几乎不对桥塔内壁产生影响,因此桥塔内部填充空气来模拟热传导,且不考虑空腔内壁的互相辐射作用。由此,本例中有限元模型的热边界条件为热辐射和热对流,分别采用等效气温和对流换热系数施加。本文数值模拟所用到的所有材料参数见表1。值得说明的是,参照我国《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017)<sup>[20]</sup>的规定,对于降温温差(强降温气候条件),一般认为计算降温温差应力时弹性模量应在受压弹性模量的基础上进行折减。因此按照《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017)<sup>[20]</sup>的建议,本文在计算降温温差应力时,对

表1 材料热参数<sup>[21-22]</sup>

Table1 Thermophysical properties of different materials

材料	$\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$C/$ ( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	$K/(\text{W}\cdot$ ( $\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	$E/$ ( $10^{10}\text{Pa}$ )	$l/$ ( $10^{-5}$ )	$\alpha$	$\varepsilon$
C55 混凝土	2 500	1 000	2.63	2.84	1.0	0.65	0.9
空气	1.2	1 007	0.026	—	—	—	—
UHPC	2 480	500	2.28	3.40	1.15	0.65	0.9

注: $\rho$ 为密度; $C$ 为比热容; $K$ 为导热系数; $E$ 为弹性模量; $l$ 为线膨胀系数; $\alpha$ 为辐射吸收系数; $\varepsilon$ 为辐射发射系数;“—”为不考虑或极小值

C55混凝土的弹性模量取按0.8倍进行折减,即 $E=2.84\times 10^{10}\text{ Pa}$ 。

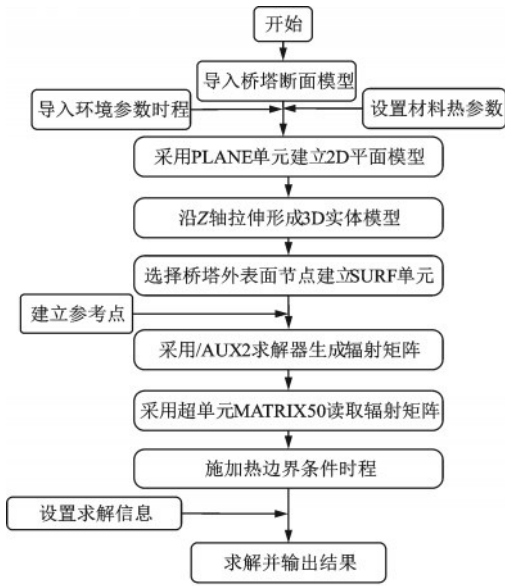
本文采用ANSYS温度-应力耦合分析模块的瞬态分析功能对桥塔的温度效应展开研究。图9(a)给出了有限元方法的模拟步骤。在进行桥塔建模时,为了消除模型边界约束的影响,根据圣维南原理将二维模型沿垂直于桥梁横截面的方向拉伸3倍左右桥塔宽度。此外,对于位移约束,直接固结桥塔底面,并在顶面施加上部结构传递而来的均匀压应力。该压应力事先通过全桥模型计算确定,数值为10 MPa。

图9(b)给出了最终的桥梁有限元模型。最后,为了使计算结果达到稳定,在进行桥塔温度效应的研究时,每步时长取10 min(600 s),共进行了12 d的模拟,共采用了 $12\times 144$ 个荷载步。需要说明的是,桥塔断面的初始温度为气温的平均值。

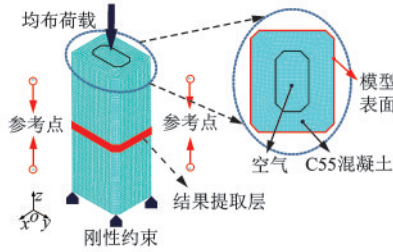
#### 3.2 温度场分布特征

考虑到初始条件以及边界约束条件的影响,针对强降温天气下桥梁温度效应的模拟结果,本文仅提取第9~12 d的分析结果。本文提取的断面位置为模型1/2高度( $z$ 方向)处,如图9(b)所示。桥塔外表面最高温度时程如图10所示。由图10可以看出,在日常天气情况下,桥塔表面温度呈波动形式。强降温天气条件下的桥塔外表面温度变化剧烈,其温度在54 h内由最高时的 $29.4\text{ }^\circ\text{C}$ 降低38%至最低时的 $18.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。另外,从图10可以明显看出,桥塔外表面温度在强降温过程的初期下降速率较快,在18 h内迅速降低了 $9.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。在此之后,下降速率明显放缓,在36 h内仅降低 $1.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。

为了进一步分析强降温极端天气条件下桥塔温度场分布特征,提取了桥塔断面各壁面不同深度的温差分布,以及最不利温度分布进行分析(18:00),如图11所示。从图中给出的桥



(a) 有限元模拟流程



(b) 桥塔有限元模型

图9 分析流程及有限元模型

Fig.9 Analysis process and FE model

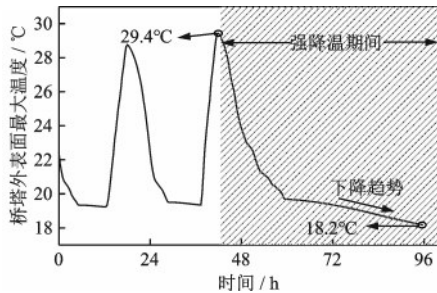


图10 断面外表面最大温度时程

Fig.10 Time-history of maximum temperature on exterior surface of cross section

塔不同壁面沿深度的温差分布可以看出,桥塔表面0.5 m 范围内,温差变化剧烈,由表面的最大值迅速降低至截面内部温度。而从温度分布图中可以看出,强降温极端天气下,桥塔断面温度均呈现分层分布。此外,在距离桥塔外表面,各壁面的温度均发生剧烈变化,桥塔内部大部分区域的温度均较低,且分布较为均匀。这说明在桥塔的设计和施工过程中,桥塔表面的温度效应不可

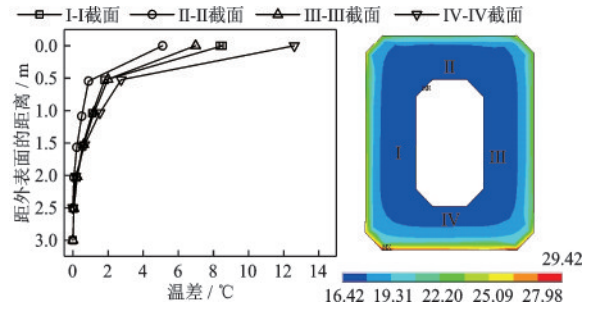


图11 断面温差及温度分布云图(18:00)

Fig.11 Temperature gradient and temperature field distribution of cross section

忽视。

### 3.3 温度应力分布特征

由于混凝土材料的抗压强度明显高于抗拉强度,混凝土桥塔表面的温度拉应力容易引起桥塔表面的开裂。为了进一步分析桥塔断面的温度应力分布特征,绘制了桥塔外表面最大拉应力的时程,如图12所示。在强降温极端天气下,桥塔混凝土外表面的最大拉应力出现在桥塔表面温度较低的时间段,即20:00~24:00。这个时间段内桥塔外表面温度达到最低,表面混凝土呈收缩状态。与此同时,内层混凝土温度相对较高,阻止表面混凝土收缩。因此,桥塔不同深度的混凝土层之间的不一致变形最终会导致桥塔表面产生较大拉应力。此外,需要特别指出的是,此时桥塔外表面的最大拉应力达到了2.06 MPa。由于该拉应力超过了C55混凝土轴心抗拉强度设计值 $f_t$ (1.96 MPa),因此桥塔外表面存在开裂的风险。

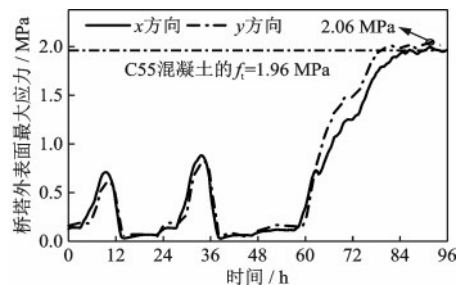


图12 断面外表面最大拉应力时程(MPa)

Fig.12 Time-history of maximum tensile stress of cross section(MPa)

为了进一步研究混凝土桥塔断面沿壁面厚度方向的应力分布以及应力分布特征,提取了桥塔断面各壁面应力沿壁面厚度方向的分布以及最大拉

应力出现时刻(20:00)的应力分布,如图13所示。从图中可以看出,类似于桥塔混凝土温度分布,桥塔的应力分布在桥塔外表面0.5 m范围内变化剧烈,而在桥塔内部分布较为均匀。如图13所示,桥塔外表面最大拉应力值出现时,其I~IV号面的表面最大拉应力值相近,均为2.00 MPa左右。主要是由于该时刻没有太阳辐射的作用,桥塔仅受到均匀的气温作用。经过以上分析表明:强降温天气下桥塔外表面在温度应力作用下存在开裂风险。虽然此时桥塔内部大部分混凝土均处于安全应力范围内,但仍需对桥塔外表面采取必要的抗裂优化措施,以提高桥塔的安全和耐久性。

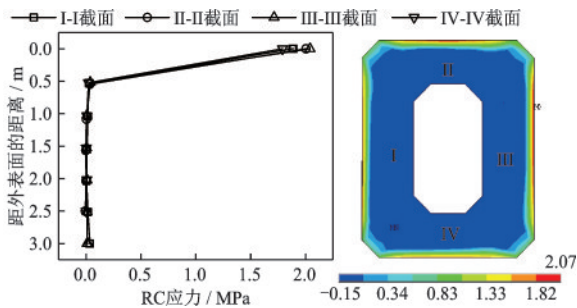


图13 断面应力差及应力分布云图(20:00)

Fig.13 Stress difference and stress distribution of cross section

## 4 实例桥塔的抗裂性能优化研究

通过上述的桥塔温度场和温度应力分布特征的研究发现,强降温极端天气下混凝土桥塔外表面一定厚度内的温度及温度应力变化剧烈。与此同时,由于桥塔塔壁较厚且混凝土材料的导热系数小,桥塔内部混凝土的温度及温度应力变化平缓,这导致桥塔外表面拉应力较大,桥塔表面混凝土有开裂的风险。为此,拟从改善热边界条件和提高桥塔结构表面材料性能这两个方面,提出桥塔表面抗裂性能优化数值模拟方法,如图14所示。方案一通过在桥塔表面涂装不同颜色的有机聚合物涂料来改善桥塔温度效应数值模拟的边界条件,为了验证方法的有效性,本文分别采用白色、灰色以及深灰色的聚氨酯涂料<sup>[23]</sup>,对应的辐射吸收系数分别为0.26、0.32以及0.40。方案二通过在桥塔单元外表面覆盖一层UHPC单元来改善结构材料性能,即桥塔RC外包超高性能混凝土,其材料热参数见表1,具体数值模拟方法为RC表面建立一定厚度的UH-

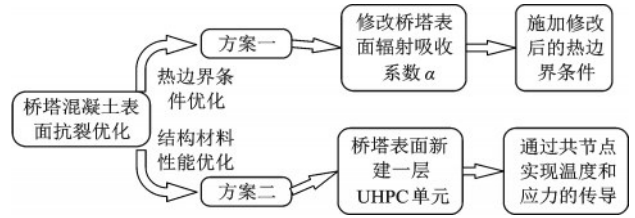


图14 桥塔混凝土表面抗裂优化数值方法

Fig.14 Numerical method for crack resistance optimization of bridge tower concrete surface

PC单元,通过UHPC单元与RC单元接触面的共节点,实现温度和应力的传导。

### 4.1 涂装有机涂料优化

为了给出方案一的优化参数,本节分析了3种不同的桥塔外表面涂料对桥塔抗裂性能的影响。图15给出了优化前后桥塔混凝土外表面的最大拉应力时程。由图可知,采用有机涂料涂装,能有效降低桥塔外表面的最大拉应力。有机涂料的颜色越浅,辐射吸收系数越小,优化效果也越明显。例如,当采用白色有机涂料优化时,由于其辐射吸收系数最小,为0.26,因此该颜色涂料的优化效果最佳,能将断面最大拉应力由2.06 MPa减小至1.91 MPa,减小了7.3%。此外,当采用其余两种颜色的涂料优化后,桥塔混凝土外表面最大拉应力值分别降低了5.8%(灰色)和3.4%(深灰色)。

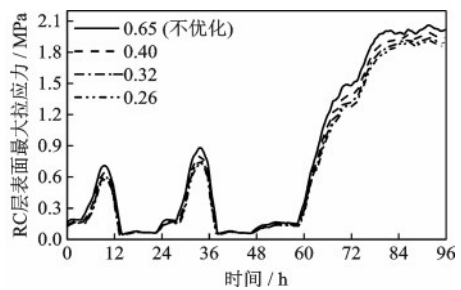


图15 有机涂料优化后的断面最大拉应力时程

Fig.15 Time-history of maximum tensile stress of exterior surface of cross section after organic coating

为了分析桥塔外表面最大拉应力与辐射吸收系数之间的关系,提取了不同涂料优化后的桥塔外表面最大拉应力极值,如图16所示。由图可以看出,桥塔外表面最大拉应力极值均会随辐射吸收系数的减小而降低,验证了方案一的有效性。理论上,颜色越浅,优化效果越明显。

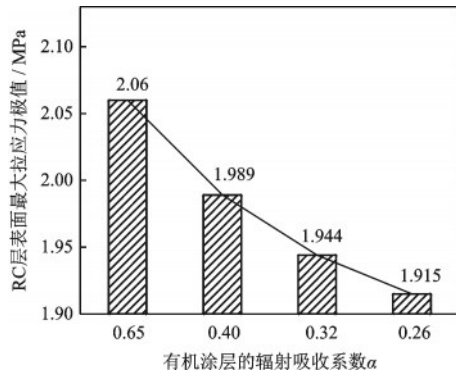


图16 断面最大拉应力极值与辐射吸收系数的关系

Fig.16 Relationship between extreme value of maximum tensile stress and radiation absorption coefficient

## 4.2 外包UHPC优化

为了给出桥塔外包UHPC的最优优化参数,本节提取了强降温极端天气下,桥塔外包不同厚度UHPC时,RC表面的最大拉应力时程,如图17所示。图17表明:UHPC对桥塔RC层外表面最大拉应力时程的变化规律和极值出现的时间均有显著的影响。这是由于在桥塔表面外包UHPC后,桥塔RC层的受力特性发生了变化。如图17所示,当桥塔表面不采取任何优化措施时,桥塔外表面最大拉应力出现在混凝土表面温度降至最低的降温段(图12)。当采用UHPC优化方案后,桥塔RC层外表面最大拉应力出现在UHPC受到最小拉应力的时刻,即降温前期(图12)。这是由于桥塔RC层受到外包UHPC的约束,从而最大拉应力转由UHPC承担。上述分析可知,采用UHPC优化方案也能显著降低桥塔RC层外表面的最大拉应力极值。以采用外包0.1 m厚度的UHPC层优化方案为例,桥塔RC层外表面最大拉应力由2.06 MPa减小至0.80 MPa,减小幅度为61.2%。验证了方案二的有效性。

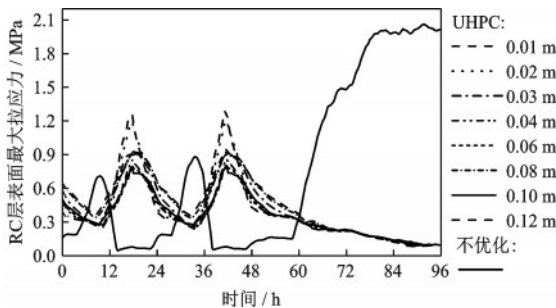


图17 断面外包UHPC后最大拉应力时程

Fig.17 Time-history of maximum tensile stress of the cross section after covering with a layer of UHPC

为了给出最优的外包UHPC层厚度,提取了不同外包UHPC厚度下,桥塔RC层表面最大拉应力时程,如图18所示。由图可知,当UHPC层的厚度在0~0.04 m时,桥塔RC层外表面最大拉应力极值随外包UHPC层厚度的增加而迅速降低。此后,随着UHPC厚度的增加,桥塔RC层外表面的拉应力极值趋于稳定。因此,外包UHPC的厚度存在一个最优值。对于本文采用的桥塔算例,桥塔表面外包UHPC厚度的最优值为0.04 m。

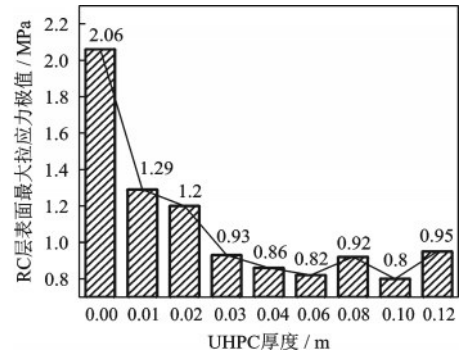


图18 桥塔外表面最大拉应力极值与UHPC厚度的关系

Fig.18 Relationship between extreme value of maximum tensile stress on the outer surface of bridge tower and UHPC thickness

## 5 结论

为了深入研究强降温极端天气下桥塔的温度效应,提出了一种强降温天气气温的识别和模拟方法。此外,以我国西部横断山脉地区某大跨悬索桥为工程背景,分析了强降温极端天气下该桥混凝土桥塔的温度场以及温度应力分布特征。随后,针对强降温天气下混凝土桥塔外表面存在开裂风险的问题,根据热边界条件和材料性能两方面,提出了桥塔外表面抗裂性能优化方案,并通过参数分析给出其最优参数。主要结论如下:

(1)在强降温天气下,桥塔外表面温度在54 h内从最高点的29.4℃降低至18.2℃,降幅达到了38%。此外,在强降温前期,桥塔外表面温度先迅速下降,然后降速放缓。另外,桥塔断面的温度场呈现分层分布的特征,且在桥塔外表面变化剧烈。

(2)由于桥塔温度场在桥塔表面0.5 m范围内变化剧烈。类似于温度分布,桥塔的温度应力最大值分布于桥塔外表面,为2.06 MPa,超过C55混凝土轴心抗拉强度设计值 $f_t$ (1.96 MPa),表明桥塔表

面混凝土存在开裂风险。但需要说明的是,此时桥塔断面大部分混凝土应力远小于抗拉强度设计值。

(3)采用有机涂料涂装和外包UHPC两种优化方案后,桥塔混凝土表面的拉应力极值降幅显著。特别的,白色有机涂料方案和桥塔外包0.1 m厚度UHPC能使桥塔表面的最大拉应力极值分别降低7.3%和61.2%。

(4)有机涂料涂装抗裂优化方案的优化效果随桥塔外表面涂料辐射吸收系数的减小而增强:本文中采用的白色有机涂料辐射吸收系数最低(0.26),抗裂效果最佳。对于外包UHPC抗裂优化方案,当UHPC层的厚度为0.04 m时,优化效果最佳。

### 参考文献:

[1] Elbadry M M, Ghali A. Temperature variations in concrete bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(10): 2355-2374.

[2] Moorty S, Roeder C W. Temperature-dependent bridge movements [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(4): 1090-1105.

[3] Branco F A, Mendes P A. Thermal actions for concrete bridge design [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119(8): 2313-2331.

[4] Chen B, Chen Z W, Sun Y Z, et al. Condition assessment on thermal effects of a suspension bridge based on SHM oriented model and data [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 1-18.

[5] Xia Y, Chen B, Zhou X Q, et al. Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(4): 560-575.

[6] Yang D H, Yi T H, Li H N, et al. Monitoring and analysis of thermal effect on tower displacement in cable-stayed bridge [J]. *Measurement*, 2018, 115: 249-257.

[7] Zhu J S, Meng Q L. Effective and fine analysis for temperature effect of bridges in natural environments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(6): 04017017.

[8] Ling M Q, Song Z J. Fine temperature effect analysis - based time-varying dynamic properties evaluation of long-span suspension bridges in natural environments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(10): 04018075.

[9] Li Y, He S H, Liu P. Effect of solar temperature field on a sea-crossing cable-stayed bridge tower [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(8): 1867-1877.

[10] Nandan H, Singh M P. Effects of thermal environment on structural frequencies: Part I-A simulation study [J]. *Engineering Structures*, 2014, 81(15): 480-490.

[11] Oskar L, Sven T. Estimating extreme values of thermal gradients in concrete structures [J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(8): 1491-1500.

[12] 段飞. 大跨度钢桥日照温度场和温度效应研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
Duan F. Research on the sunshine temperature field and temperature effect on long-span steel bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

[13] Zhou L R, Xia Y, Brownjohn J M W, et al. Temperature analysis of a long-span suspension bridge based on field monitoring and numerical simulation [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(1): 04015027.

[14] Holman J P. Heat transfer [M]. New York: McGrawHill, 2010.

[15] Kakaç S, Yener Y, Naveira-Cotta C P. Heat conduction [M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.

[16] 赵人达, 王永宝. 日照作用下混凝土箱梁温度场边界条件研究 [J]. *中国公路学报*, 2016, 29(7): 52-61.  
Zhao R D, Wang Y B. Studies on temperature field boundary conditions for concrete box-girder bridges under solar radiation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(7): 52-61. (in Chinese)

[17] 高宇. 港珠澳大桥青州航道桥扁平钢箱梁温度场分析 [D]. 西安: 长安大学, 2015.  
Gao Y. Qingzhou channel bridge of the Hong Kong, Zhuhai and Macao bridge flat steel box girder temperature field analysis [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)

[18] Huang X, Zhu J, Li Y L. Temperature analysis of steel box girder considering actual wind field [J]. *Engineering Structures*, 2021, 246(2021): 113020.

[19] 陆亚群. 混凝土温度作用中的气象因素分析 [D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Lu Y Q. Research for meteorological phenomena on the thermal load of concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)

[20] 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB 10092—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.  
Code for design of concrete structures of railway bridge and culvert: TB 10092—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)

[21] Xing Z, Beaucour A L, Hebert R, et al. Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95: 18-28.

(本文责编:周小潭)

(下转第339页)