DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20220428004

文章编号:1674-599X(2025)02-0121-10

引用格式:张玉平,谢俊良.无铺装PK断面组合梁温差取值分区研究[J].交通科学与工程,2025,41(2):121-130.

**Citation:** ZHANG Yuping, XIE Junliang. Zoning of temperature difference value of composite beam with PK section without pavement[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 121-130.

## 无铺装PK断面组合梁温差取值分区研究

## 张玉平,谢俊良

(长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:【目的】研究施工阶段无铺装 PK 断面钢-混组合梁竖向温度梯度中的温差取值,为工程设计与施工提供科学 依据。【方法】对广东省江门市某桥施工阶段组合梁进行温度场有限元数值模拟和实桥测试,基于夏季晴天和日照 时数长的多云天气的气象参数进行数值模拟以获得日最大竖向正温差数据,对模拟数据进行统计分析,采用指数 函数描述竖向正温度梯度分布曲线,并基于纬度、海拔和年最高气温对应的日温差三个气象参数提出竖向正温差 标准值预测公式,最后根据全国235座城市的预测结果进行温差取值分区。【结果】数值计算结果与实测结果吻合较 好;日最大竖向正温差数据服从广义极值分布,以50年重现期为标准得到的竖向正温差标准值为14.946℃;提出的 预测公式能准确反映竖向正温差标准值的变化规律;根据预测结果,将中国划分为3个区域进行温差取值,每个区 域的取值分别为14、16、18℃。【结论】提出的竖向正温差标准值预测公式和温差取值分区适用于无铺装PK断面的 组合梁,为工程设计与施工提供了可靠的参考依据。。

# Zoning of temperature difference value of composite beam with PK section without pavement

ZHANG Yuping, XIE Junliang

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This paper carried out research on temperature difference value in vertical temperature gradient of steel-concrete composite beams with PK section without pavement during construction to provide a scientific basis for engineering design and construction. [Methods] Finite element numerical simulation and a real bridge test in temperature field were conducted on the composite beam of a bridge in the construction stage in Jiangmen City, Guangdong Province. Based on meteorological parameters on sunny days and cloudy days with long sunshine duration in summer, numerical simulation was carried out to obtain daily maximum vertical positive temperature difference data. Statistical analysis was made on simulation data, and an exponential function was used to describe the vertical positive temperature gradient distribution curve. Using three meteorological parameters of latitude, elevation, and the diurnal temperature range corresponding to the annual maximum temperature, the paper proposed a prediction formula for the standard value of vertical

#### 收稿日期:2022-04-28

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057702);国家自然科学基金资助项目(52078059);湖南省教育厅创 新平台资助项目(16K005)

通信作者:张玉平(1976—),男,副教授,主要从事桥梁工程方面的研究工作。E-mail:zyp5032@163.com

positive temperature difference. Finally, zoning of temperature difference value was conducted according to the predicted results for 235 cities across China. [Findings] The numerical results agree well with the measured data. The daily maximum vertical positive temperature difference data obey the generalized extreme value distribution. Taking the 50-year return period as the standard, the standard value of vertical positive temperature difference is 14.946 °C. The proposed prediction formula can accurately reflect the change law of the standard value of vertical positive temperature difference. According to the prediction results, China is divided into 3 regions for temperature difference values. The values for the three zones are 14 °C, 16 °C, and 18 °C. [Conclusions] The proposed prediction formula for the standard value of vertical positive temperature difference and zoning of temperature difference value are suitable for composite beams with PK section without pavement. This research provides a reliable reference basis for engineering design and construction.

**Key words**: bridge engineering; composite beam; PK section; temperature gradient; meteorological parameter; standard value of temperature difference; temperature action zoning

钢-混凝土组合梁凭借其优异的受力性能在斜拉 桥工程领域得到了广泛应用。然而,当组合梁暴露 于日照环境时,由于受热量传递的滞后效应及结构 自身热传导特性的影响,其竖向温度分布呈现出显 著的非均匀性与非线性特征。这种温度梯度不仅会 导致结构内部产生较大的自应力,而且在受到外部 约束时,还可能进一步引发次应力效应,使温度应力 成为组合梁结构设计的关键控制因素。目前,针对 箱形断面的混凝土梁和钢梁日照温度梯度已有大量 研究[1-5]:周爱国[6]对钢-混凝土组合梁的温度响应进 行了分析;张玉平等<sup>[7]</sup>对无铺装的PK断面混凝土梁 日照温度场进行了研究;李威<sup>[8]</sup>对沥青混凝土铺装的 PK断面钢箱梁温度梯度进行了研究。但目前国内尚 无关于PK断面组合梁温度梯度的研究,且《公路桥 涵设计通用规范》(JTG D60-2015)<sup>[9]</sup>中尚未对无铺 装层组合梁的温度梯度设计参数作出明确规定。

桥梁结构因所处地理位置不同,其温差取值呈 现出整体层面上的地域性差异。美国AASHTO规 范<sup>101</sup>将美国分为4个区域进行温差取值;刘江等<sup>111</sup> 针对组合梁在温差作用下的地域差异展开研究,绘 制了组合梁桥温度梯度升温模式与降温模式中各 温差代表值的等值线分布图,但所得结论仍需不同 地域、不同结构形式组合梁桥的实际数据加以验 证。目前,针对PK断面组合梁温差取值分区的研 究尚属空白,鉴于此,开展适用于我国全域的PK断 面组合梁温差取值分区的研究很有必要。

关于桥梁结构温差取值的研究已有较多成果, 文献[12-16]通过长期温度场测试和统计分析,成功 获取了温差标准值,然而,这种方法对测试精度和

实验经费要求较高。基于此,国内外部分学者转而 研究气象参数对桥梁温度梯度的影响,他们基于最 不利状况下的气象参数取值,通过数值模拟方法, 计算得出温差标准值[17-19]。但由于不同的气象参数 不可能同时达到极值,因此该方法所得的温差标准 值一般偏大。彭友松<sup>[20]</sup>和顾斌等<sup>[21]</sup>基于从气象部 门获得的气象数据,通过高效参数化模型计算得到 了足量的温差数据,再进行概率分析得到混凝土箱 梁结构温差标准值,虽然该方法所得结果更加可 靠,但该方法是否适用于组合梁尚有待验证。因 此,本文提出了一种基于气象参数且针对施工阶段 无铺装组合梁温度梯度中温差取值进行区域划分 的方法:首先,构建组合梁的有限元模型,并通过实 测数据验证该模型的准确性;其次,基于夏季晴天 以及日照时长较长的多云天气的气象参数开展数 值模拟,以获取温差数据,并对这些数据进行统计 分析,确定竖向正温差的标准值;再次,基于实测结 果,通过函数拟合的方法得出竖向正温度梯度的分 布模式;最后,通过统计分析方法建立不同地区气 象参数与竖向正温差标准值之间的函数关系,并对 全国不同区域的组合梁竖向正温差标准值进行预 测和分区。

## 1 温度场数值模拟

#### 1.1 热传导与有限元基本理论

组合梁温度场数值模拟的基础是对三维热传导微分方程的求解。而组合梁沿纵桥向温度分布 较均匀<sup>[22]</sup>,且不存在内部热源,因此组合梁温度场 的求解可近似认为是对二维微分方程的求解:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$
(1)

式中:T为组合梁内部或表面任一点的瞬时温度;x、 y为该点的横、纵坐标;t为时刻;k为导热系数;p为 密度;c为比热容。

温度场的数值模拟还需引入初始条件与边界 条件,其中,日照边界条件的模拟至关重要。组合 梁在日照作用下与周围环境的热交换包括太阳辐 射、辐射换热和对流换热三种。这些热交换的边界 条件可用式(2)表示<sup>[23-24]</sup>:

$$q_{\rm c} + q_{\rm r} + q_{\rm s} = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) \tag{2}$$

式中: $q_c$ 为对流换热热流密度; $q_r$ 为辐射换热热流密 度; $q_s$ 为太阳辐射换热热流密度; $\frac{\partial T}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial y}$ 分别为温 度梯度在x轴、y轴上的分量; $n_x$ 、 $n_y$ 分别为法线向量 在x轴、y轴上的投影比例。

组合梁表面与外界的对流换热热流密度q。可 用式(3)表示:

$$q_{\rm c} = h_{\rm c} (T_{\rm a} - T_{\rm s}) \tag{3}$$

式中: $T_a$ 为空气温度; $T_s$ 为结构表面温度; $h_a$ 为对流换热系数,可通过表面风速v计算得出<sup>[25-26]</sup>。

根据Stefen-Boltzman辐射定律可得出组合梁表面与外界的辐射换热热流密度 $q_r$ :

$$q_{\rm r} = c_{\rm s} \varepsilon \left[ (T^* + T_{\rm a})^4 - (T^* + T_{\rm s})^4 \right] \tag{4}$$

式中: $c_s$ 为常数,取值为5.677×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>); $\varepsilon$ 为 辐射率; $T^*$ 为常数,取值为273.15 K。

组合梁表面太阳辐射换热热流密度 $q_s$ 可用式 (5)表示:

$$q_s = \alpha I \tag{5}$$

式中: α 为太阳辐射吸收率; I 为太阳辐射强度。

在缺乏逐时大气温度数据的情况下,可依据日 最高气温与日最低气温将一天划分为3个时段,并 据此来估算各时段的大气温度<sup>[17]</sup>。

将式(3)~(5)带入式(2),可得:

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial x}n_{x} + \frac{\partial T}{\partial y}n_{y}\right) = (h_{e} + h_{r})\left(T_{a} - T + \frac{\alpha I}{h_{e} + h_{r}}\right)$$
(6)

式中:h,为辐射换热系数。 将上式简化可得:

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial x}n_{x} + \frac{\partial T}{\partial y}n_{y}\right) = h_{0}(T_{sa} - T)$$
(7)

式中: $h_0$ 为综合换热系数; $T_{sa}$ 为综合大气温度。 综合换热系数可表示为:

$$h_0 = h_c + h_r$$
 (8)  
综合大气温度可表示为:

 $T_{\rm sa} = T_{\rm a} + \frac{\alpha I}{h_c + h_r} \tag{9}$ 

因此,求解式(2)的关键即为求解式(7)中的综 合换热系数 $h_0$ 和综合大气温度 $T_{sa}$ 。在已知初始条 件T的情况下,可利用有限元方法求解式(1),本文 使用有限元软件进行求解。

#### 1.2 有限元模型的建立

本文通过ANSYS软件建立有限元模型,针对江 门地区某一处于施工阶段的无铺装PK断面钢-混组 合梁,开展热传导分析以探究其温度场分布。选用 solid70单元模拟混凝土桥面板、shell57单元模拟钢 梁部分。为确保模拟的准确性,沿纵桥向选取了一 段长度为10.5 m的组合梁,并依据其实际尺寸进行 建模,单元划分如图1所示。在模拟过程中,结合实 测数据与计算分析,确定了组合梁材料的物理性能 参数,见表1。组合梁边界条件参数随时刻的变化 如图2~4所示。将结构的初始温度设定为实测点 在2021年11月20日7:00的平均温度23.68 °C,并 对组合梁的日照温度场进行数值模拟。



图1 组合梁单元划分图 Fig.1 Element division of composite beam

表1 材料物理性能参数

Table 1 Physical parameters of each material

材料	密度 <sup><i>p</i></sup> /(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容 c/ (J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	导热系数 <i>k</i> / (W⋅m <sup>-1</sup> ・℃ <sup>-1</sup> )	吸收 率 α/%	辐射 率 ε/%
C55混 凝土	2 500	945	3.3	55	88
Q345C 钢材	7 850	480	58.2	82	60

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home 中国知网 https://www.cnki.net



Fig. 2 Solar radiation intensity



Fig. 3 Comprehensive heat transfer coefficient

## 2 计算值与实测值的对比

在桥梁施工阶段,选择组合梁某半幅截面进行



Fig. 4 Comprehensive atmospheric temperature

温度场实测,共布置了34个温度测点,如图5所示。 组合梁内腹板区域的混凝土顶板和钢腹板分别设 置了23#~26#和1#~11#测点(测点编号由上至下 排列);边腹板区域则对应设置了30#~33#和 12#~21#测点(同样按由上至下顺序编号)。采用 埋入式热电偶传感器监测混凝土顶板温度,通过磁 吸式温度传感器获取钢腹板温度数据。实测工作 开展于2021年10月至12月期间,数据采集间隔设 定为1h。基于2021年11月20日的实测数据,本 文选取了顶板、腹板及底板部分测点的时程温度数 据,并与有限元计算结果进行对比分析,如图6 所示。

由图6可知,组合梁顶板、腹板和底板各温度测 点计算值与实测值的时程变化趋势基本一致,最大 差值小于1.5℃,说明有限元模型计算结果与实测 值吻合较好,验证了基于实测气象数据建立的有限 元模型的准确性。





Fig. 5 Layout of temperature measurement points on composite beam (unit: mm)



图6 测点温度实测值与计算值时程变化对比

#### Fig. 6 Comparison of time-dependent variations between measured and calculated temperature values

## 3 基于气象参数的竖向温度梯度

当组合梁结构处于日照环境时,受热量传递存 在滞后效应等多种因素影响,温度在结构竖直方向 上会呈现出较为明显的非线性分布特征。为准确描 述组合梁竖向正温度梯度模式,需确定特定重现期的 正温差标准值,并对温度分布数据进行拟合以确定温

中国知网

## 3.1 温差标准值

在日照影响下,组合梁的最不利竖向正温差通 常集中出现在夏季,且这一现象往往是在太阳辐射 强度达到最大值时产生的<sup>[19]</sup>。而太阳辐射强度主要 在晴天以及日照时数长的多云天气达到最大。本文 基于气象部门提供的2019年到2021年江门地区夏 季晴天以及日照时数长的多云天气的气象数据,获

度梯度曲线形式,以下围绕这两个方面展开研究。

得边界条件参数,并利用有限元模型模拟组合梁温 度场,得到了这类天气下组合梁每日的最大竖向正 温差,部分日期的最大竖向正温差计算值见表2。 表2 晴天以及日照时数长的多云天气的气象参数及有限

## 元计算值

 Table 2
 Meteorological parameters and finite element

 calculation values of sunny days and cloudy days with long
 sunshine duration

日期	日最高 气温/℃	日最低 气温/℃	日平均风 速/(m·s <sup>-1</sup> )	日最大竖向正 温差有限元计 算值/℃
2019年6月7日	34	27	1.8	13.92
2019年6月14日	31	25	1.5	13.11
2019年7月13日	33	28	3.5	13.65
2019年7月27日	35	27	2.1	14.26
2020年6月11日	34	27	2.9	13.89
2020年6月24日	34	27	6.4	13.90
2020年7月8日	34	27	7.3	13.92
2020年7月15日	37	28	2.6	14.76
2020年8月8日	34	27	3.1	13.98
2020年8月11日	35	27	5.4	14.22
2020年8月24日	33	26	3.0	13.58
2021年6月5日	30	24	1.2	12.88
2021年6月21日	36	28	2.4	14.42
2021年7月14日	35	27	4.6	14.23
2021年7月26日	37	28	3.3	14.79
2021年8月23日	35	27	1.6	14.11

采用广义极值分布方法估算组合梁每日最大 正温差参数,据此可推导出日最大正温差的累积分 布函数,见式(10)。

 $G(x) = \exp\left[-(1 - 0.3534 \frac{x - 13.9181}{0.3837})^{2.8297}\right] (10)$ 式中:x为日最大正温差。

日最大正温差频率直方图与概率密度曲线如

图7所示,并通过分位数-分位数(quantile-quantile, QQ)图验证广义极值分布函数的合理性,如图8所 示。由图8可知,广义极值分布能很好地描述组合梁 日最大正温差的概率分布特征。

我国桥梁设计规范中将设计基准期设定为100年。而本文在确定温度作用标准值时,参考了欧洲规范中50年重现期的标准。假定在1年时间内,最大温度作用超过该标准值的概率P为0.02,则竖向正温差标准值T,可由式(11)得出:

$$1 - P = G^n(T_t) \tag{11}$$

式中:G(T<sub>1</sub>)为典型天气下组合梁日最大正温差分布 函数;n为一年内夏季中该类型天气的天数。

由式(11)计算得出江门地区无铺装组合梁竖 向正温差标准值为14.946 ℃。



图7 组合梁日最大正温差频率直方图与概率密度曲线

Fig. 7 Histogram of daily maximum positive temperature

difference frequency and probability density curve for

composite beams



图8 组合梁日最大正温差广义极值分布QQ图检验

Fig. 8 QQ plot test of generalized extreme value distribution of daily maximum positive temperature difference of composite beam

#### 3.2 温度梯度曲线拟合

采用最小二乘法对组合梁竖向温度梯度实测数据进行拟合,结果表明:竖向温度梯度分布形式与指数函数形式较为接近,其表达式见式(12),实测值及拟合曲线如图9所示,由图9可知拟合效果较好。

$$T_y = T_0 e^{-ay}$$
 (12)  
式中: $y$ 为计算点至组合梁顶的距离; $T_y$ 为计算点与  
梁底的正温差; $T_0$ 为梁顶日最大正温差; $a$ 为指数系  
数,本文取值为12.3。

将基于气象参数得到的组合梁竖向正温差标 准值与拟合温度梯度曲线相结合,即可得到江门地 区施工阶段无铺装 PK 断面钢-混凝土组合梁竖向正 温度梯度公式  $T_x$  = 14.946 $e^{-12.3y}$ 。



Fig. 9 Fitting curve of vertical temperature gradient of composite beam

## 4 温差的地域差异和取值分区

由于特定地区的组合梁温差取值并不具备普 适性,无法直接应用于我国其他地区。为深入探究 不同地区组合梁温差取值规律,在已验证模式可行 性的前提下,本研究进一步分析并构建了不同地区 气象参数与正温差标准值之间的函数关系,旨在实 现对全国不同地区组合梁竖向正温差标准值的精 准预测与分区。

在众多气象参数中,太阳辐射和日温差对组合 梁温差的影响尤为显著。但部分地区获取太阳辐 射数据较为困难,根据 Hottel 太阳辐射计算模型<sup>[27]</sup> 可知:太阳辐射与纬度和海拔两个参数息息相关, 而太阳辐射强度最大时间通常发生在年最高气温 日。基于此,本研究收集了全国部分城市的纬度*l*、 海拔*H*和2021年最高气温对应的日温差*T*<sub>va</sub>三个气 象参数,并基于前文已验证的有限元数值模型计算 得出这些城市的组合梁竖向最大正温差*T*<sub>vo</sub>。随后, 基于这三个气象参数对正温差计算值进行了回归 分析<sup>[28-29]</sup>。全国部分城市的气象参数和组合梁正温 差计算值见表3。

经过回归分析得到了基于以上三个气象参数的正温差计算公式,见式(13)。该公式的决定系数 R<sup>2</sup>为0.9851,因此该公式能较好地反映纬度1、海拔 H和年最高气温对应的日温差T<sub>va</sub>三个气象参数与 正温差计算值T<sub>vo</sub>之间的回归关系。

$$T_{\rm v0} = -0.05l + 0.242H + 0.297T_{\rm va} + 12.431$$

**表3** 全国部分城市的气象参数和组合梁正温差计算值 **Table 3** Meteorological parameters and calculated values of positive temperature differences of composite beams in some

cities across China

城市	<i>l/</i> (°)	<i>H</i> /km	$T_{a, max}/^{\circ}C$	$T_{\rm a,min}/^{\circ}{\rm C}$	$T_{\rm Va}/^{\circ}{\rm C}$	$T_{\rm V0}/^{\circ}\rm C$
石家庄	38.0	0.081	38	24	14	14.81
拉萨	29.7	3.660	29	15	14	16.08
西安	34.3	0.385	38	21	17	15.84
贵阳	26.6	1.277	33	21	12	14.97
南京	32.1	0.013	37	27	10	13.96
太原	37.9	0.788	36	15	21	16.91
武汉	30.6	0.015	37	27	10	13.93
乌鲁木齐	43.8	0.836	38	25	13	14.20
长春	43.8	0.219	33	24	9	12.90
银川	38.5	1.111	38	23	15	15.32
郑州	34.7	0.110	39	27	12	14.43
西宁	36.6	2.263	32	16	16	15.90
合肥	31.8	0.038	36	27	9	13.69
海口	20.0	0.015	38	29	9	13.90
福州	26.1	0.010	39	28	11	14.41
呼和浩特	40.8	1.072	36	20	16	15.43
台北	25.0	0.011	32	26	6	13.02
南昌	28.7	0.016	38	30	8	13.52
南宁	22.8	0.079	37	26	11	14.45
沈阳	41.8	0.051	35	24	11	13.43
长沙	28.2	0.063	38	28	10	14.05
昆明	24.9	1.930	30	19	11	14.90
哈尔滨	45.8	0.118	34	24	10	12.82
广州	23.1	0.018	37	26	11	14.44
杭州	30.3	0.019	37	27	10	14.04
兰州	36.1	1.525	38	19	19	16.54
济南	36.7	0.148	37	24	13	14.61
成都	30.6	0.485	36	25	11	14.37
北京	39.9	0.031	36	21	15	14.98
上海	31.2	0.016	37	29	8	13.44
天津	39.3	0.003	36	22	14	14.73
重庆	29.4	0.238	40	28	12	14.54
澳门	22.2	0.040	34	26	8	13.57
香港	22.4	0.321	35	28	7	13.33

虽然式(13)反映了气象参数与正温差计算值之间的回归关系,但仍需进一步确定组合梁设计基准期内正温差标准值T<sub>v</sub>的预测公式。假设*l*、H和T<sub>va</sub>三个气象参数与正温差计算值T<sub>vo</sub>的变化满足式(14):

 $\Delta T_{\rm v0} = -0.05\Delta l + 0.242\Delta H + 0.297\Delta T_{\rm va}$ 

(14)

本文研究的无铺装 PK 断面组合梁的竖向正温 差标准值为 14.946 °C, 纬度 l 为 22.46°, 海拔 H 为 0.01 km,  $T_{v_a}$ 为 9 °C。将  $\Delta T_{v_0} = T_v - 14.946 \langle \Delta l = l - l \rangle$  22.46、 $\Delta H = H - 0.01$  和 $\Delta T_{v_a} = T_{v_a} - 9$ 代入式(14), 即可得出正温差标准值 $T_v$ 的预测公式:

 $T_{\rm v} = -0.05l + 0.242H + 0.297T_{\rm va} + 13.394 \quad (15)$ 

利用式(15)对中国235座城市的无铺装PK断面组合梁竖向正温差标准值进行预测,其中部分城市的正温差标准值计算结果见表4。结合我国现行规范<sup>[9]</sup>,本文根据组合梁竖向正温差标准值将我国划分为3个区域(I区、II区、II区),并给出每个区域的取值。

表4 中国部分城市组合梁坚向正温差标准值 Table 4 Standard values of vertical positive temperature differences of composite beams in some cities in China

城市	$T_{\rm V}$ /°C	城市	$T_{\rm v}/{\rm ^{\circ}C}$
石家庄	15.67	南昌	14.34
拉萨	16.95	南宁	15.54
西安	16.82	沈阳	14.58
贵阳	15.94	长沙	14.97
南京	14.76	昆明	15.88
太原	17.93	哈尔滨	14.10
武汉	14.84	广州	15.51
乌鲁木齐	15.27	杭州	14.85
长春	13.93	兰州	17.60
银川	16.19	济南	15.46
郑州	15.25	成都	15.25
西宁	16.86	北京	15.86
合肥	14.49	上海	14.21
海口	15.07	天津	15.59
福州	15.36	重庆	15.55
呼和浩特	16.37	澳门	14.67
台北	13.93	香港	14.43

I 区主要分布于中国东部、中部及东北地区,在 此区域内组合梁竖向正温差标准值取值为14℃; II 区主要分布于中国北部、东南部、东北部分区域、西 北边陲地带、云贵高原以及西南盆地地区,在此区 域内组合梁竖向正温差标准值取值为16℃; III 区主 要分布于中国西北部、内蒙古高原及青藏高原地 区,在此区域内组合梁竖向正温差标准值取值为 18℃。本文所提出的竖向正温差标准值预测公式 及温差取值分区方案适用于无铺装 PK 断面的组合 梁结构。

## 5 结论

1)利用气象数据,采用有限元数值模拟方法对 施工阶段的无铺装 PK 断面钢-混凝土组合梁的温度 场进行了模拟分析,计算结果与实测数据吻合度较高,从而验证了有限元模型的准确性。

2)基于江门地区夏季晴天以及日照时数较长的多云天气的气象数据,利用有限元模型计算得到了日最大竖向正温差数据。经过统计分析,发现该类天气条件下最大竖向正温差服从广义极值分布。以50年重现期为标准,计算得出竖向正温差标准值为14.946℃。同时,采用指数函数对竖向温度梯度分布曲线进行了拟合,最终确定了江门地区无铺装PK断面组合梁的竖向正温度梯度模式。

3) 基于纬度*l*、海拔*H*和年最高气温对应的日 温差*T*<sub>va</sub>这3个气象参数,提出了竖向正温差标准值 预测公式;根据全国235座城市组合梁竖向正温差 标准值的预测结果,本文将我国划分为3个区域进 行温差取值,各区域分别取值为14、16、18℃。

然而,由于目前尚无我国西部高寒地区及东北 严寒地区组合梁温差取值的相关研究,本文基于我 国南部地区的组合梁温度梯度研究对全国组合梁 温差取值进行了预测,其结果是否适用于我国西部 及东北寒冷地区仍有待进一步验证。

#### 参考文献(References):

- [1] 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.07.007.
  ZHAO Renda, WANG Yongbao. 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. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2016.07.007.
  [2] 张玉平, 李思阳,杨胜江,等. 基于概率分析运营阶段 四位流泪度作用[V]. 克泽和港上工用。2021. 27(4)
- 和金平, 季志和, 杨庄仁, 等. 金子碱平分析适合的较 钢箱梁温度作用[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 33-42. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.004.
  ZHANG Yuping, LI Siyang, YANG Shengjiang, et al. Temperature effect of steel box girder at operation stage based on probability analysis [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 33-42. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.004.
- [3] 刘思琴,李传习,李涛,等.基于概率分析的钢箱梁竖 向温度梯度模式[J].交通科学与工程,2018,34(2): 45-51.DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.02.009. LIU Siqin, LI Chuanxi, LI Tao, et al. Study on temperature gradient of steel box girder without pavement based on probability analysis [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 45-51.DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.02.009.
- [4] 缪长青,史长华.大跨悬索桥扁平钢箱梁温度梯度与温

度影响研究[J]. 中国科学(技术科学), 2013, 43(10): 1155-1164. DOI: 10.1007/s11431-013-5280-8.

MIAO Changqing, SHI Changhua. Temperature gradient and its effect on flat steel box girder of long-span suspension bridge [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2013, 43 (10) : 1155-1164. DOI: 10.1007/s11431-013-5280-8.

[5] 刘永健,刘江,张宁.桥梁结构日照温度作用研究综述
 [J]. 土木工程学报, 2019, 52 (5): 59-78. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.05.006.
 LIU Yongjian, LIU Jiang, ZHANG Ning. Review on

solar thermal actions of bridge structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 59-78.DOI: 10. 15951/ j.tmgcxb.2019.05.006.

- [6] 周爱国.钢-混凝土组合梁的温度响应分析[J].长沙理 工大学学报(自然科学版), 2012, 9(2): 39-43. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2012.02.007.
  ZHOU Aiguo. Temperature responses of steel-concrete composite girders[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2012, 9(2): 39-43. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2012.02.007.
- [7] 张玉平,谢文昌,李传习.无铺装层 PK 断面混凝土梁 日照温度场分析[J].公路交通科技,2016,33(4):59-65. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.04.010.
  ZHANG Yuping, XIE Wenchang, LI Chuanxi. Analysis of temperature field of PK section concrete girder without pavement caused by solar radiation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016,33(4):59-65. DOI: 10.3969/j.issn. 1002-0268.2016.04.010.
- [8] 李威.沥青混凝土铺装层PK断面钢箱梁温度梯度研究
   与效应分析[D].长沙:长沙理工大学,2019.DOI:
   10.26985/d.cnki.gcsjc.2019.000597.

LI Wei. Research and effect analysis of temperature gradient of steel box girder at PK section of asphalt concrete pavement [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2019. DOI: 10.26985/d. cnki. gcsjc.2019.000597.

- [9] 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.
   Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [10] American association of state highway and transportation officials. LRFD bridge design specifications [S].
   Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [11] 刘江,刘永健,马志元,等.钢-混凝土组合梁桥的温度 梯度作用:地域差异与等值线地图[J].中国公路学报, 2023,36(1):135-149. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372. 2023.01.012.

LIU Jiang, LIU Yongjian, MA Zhiyuan, et al. Temperature gradient action of steel-concrete composite girder bridge: regional difference and isoline map [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 135-149. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.01.012.

- [12] 雷笑, 叶见曙, 王毅. 日照作用下混凝土箱梁的温差代表值[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(6): 1105-1109. DOI:10.3321/j.issn:1001-0505.2008.06.032.
  LEI Xiao, YE Jianshu, WANG Yi. Representative value of solar thermal difference effect on PC box-girder [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(6): 1105-1109. DOI: 10.3321/j. issn: 1001-0505.2008.06.032.
- [13] 陶翀,谢旭,申永刚,等.基于概率分析的混凝土箱梁 温度梯度模式[J].浙江大学学报(工学版),2014,48
  (8):1353-1361.DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.0
  8.002.

TAO Chong, XIE Xu, SHEN Yonggang, et al. Study on temperature gradient of concrete box girder based on probability analysis [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(8): 1353-1361. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.08.002.

- [14] 刘扬,张海萍,邓扬,等.基于实测数据的悬索桥钢箱 梁温度场特性研究[J].中国公路学报,2017,30(3): 56-64. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.006.
  LIU Yang, ZHANG Haiping, DENG Yang, et al. Temperature field characteristic research of steel box girder for suspension bridge based on measured data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 56-64. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.006.
- [15] WANG H, ZHU Q X, ZOU Z Q, et al. Temperature distribution analysis of steel box-girder based on longterm monitoring data[J]. Smart Structures and Systems, 2020, 25: 593-604. DOI: 10.12989/SSS.2020.25.5.593.
- [16] LI D N, MAES M A, DILGER W H. Thermal design criteria for deep prestressed concrete girders based on data from confederation bridge [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31 (5) : 813-825. DOI: 10.1139/104-041.
- [17] 肖建庄, 宋志文, 赵勇, 等. 基于气象参数的混凝土结构日照温度作用分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (4): 30-36. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.04.008.
  XIAO Jianzhuang, SONG Zhiwen, ZHAO Yong, et al. Analysis of solar temperature action for concrete structure based on meteorological parameters [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4): 30-36. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.04.008.
- [18] 顾斌, 陈志坚, 陈欣迪. 基于气象参数的混凝土箱梁日照温度场仿真分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 950-955. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505. 2012.05.028.

GU Bin, CHEN Zhijian, CHEN Xindi. Simulation

analysis for solar temperature field of concrete box girder based on meteorological parameters [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42 (5) ; 950-955. DOI: 10.3969/j.issn. 1001-0505. 2012. 05.028.

- [19] LU H L, HAO J, ZHONG J W, et al. Analysis of sunshine temperature field of steel box girder based on monitoring data [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 20(1): 9572602. DOI: 10.1155/2020/9572602.
- [20] 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.
- [21] 顾斌,高望,谢甫哲,等.基于历史气象参数的桥梁结构日照温度作用代表值研究[J].公路交通科技,2019,36(12):79-86,93.DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2019.12.010.

GU Bin, GAO Wang, XIE Fuzhe, et al. Study on representative values of solar temperature action on bridge structure based on historical meteorological parameters [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(12): 79-86, 93. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.12.010.

- [22] 王动,邓继华.对称几何非线性三角形平面单元研究
  [J].交通科学与工程,2023,39(5):102-110.
  WANG Dong, DENG Jihua. Study on geometrically nonlinear triangle plane element with symmetry [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (5): 102-110.
- [23]朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北 京:中国电力出版社,1999.

ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

[24] 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. KONG Xiangqian. Thermal stress finite element analysis [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999.

- [25] MIRAMBELL E, AGUADO A. Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116 (9) : 2388-2409. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1990)116:9(2388).
- [26] 刘照球. 混凝土结构表面对流换热研究[D]. 上海: 同 济大学, 2006.
  LIU Zhaoqiu. Study on convective heat transfer on the surface of concrete structure [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [27] HOTTEL H C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres [J]. Solar Energy, 1976, 18(2): 129-134. DOI: 10.1016/0038-092X(76)90045-1.
- [28] 丁滨阳,田仲初,彭学军,等.钢-混组合梁桥桥面板铺 装顺序优化设计研究[J].公路与汽运,2022(6):109-112. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.025.
  DING Binyang, TIAN Zhongchu, PENG Xuejun, et al. Study on optimal design of deck pavement sequence of steel-concrete composite beam bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2022 (6): 109-112. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.025.
- [29]杨博闻,张玉平,杨晔.辅助墩设置对大跨PK断面混 合-组合梁斜拉桥受力性能的影响[J].长沙理工大学学 报(自然科学版),2025,22(1):111-121.DOI:10.19951/ j.cnki.1672-9331.20221219001.

YANG Bowen, ZHANG Yuping, YANG Ye. Influence of auxiliary pier setting on mechanical performance of long-span cable-stayed bridge with hybrid and composite girders incorporating PK section[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2025, 22(1): 111-121. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331. 20221219001.

(责任编辑:薛仪)