文章编号:1674-2869(2025)05-0571-07

日照作用下混凝土曲线箱梁竖向温度梯度分析

翟孟祥[1],杨宏印*[1],刘卫军[2],来家玉[1],王昌军[3],顾箭峰[1]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 中建三局集团有限公司,湖北 武汉 430070;
3. 亿耀(福建)建设有限公司,福建 莆田 351100

摘 要:为研究混凝土曲线箱梁桥的温度分布情况以及气象参数对混凝土箱梁桥温度分布的影响,基于现场实测数据,以武汉市某混凝土曲线箱梁桥为对象,采用热仿真软件TAITHERM对日照作用下的混凝土箱梁桥温度场进行了数值模拟。模型综合考虑了环境温度、风速和太阳辐射的影响,分析了混凝土箱梁桥竖向温度梯度的分布模式,并与实测值进行了对比,进行了影响温度分布的气象因素的敏感性分析。结果表明:混凝土曲线箱梁桥横截面的温度模拟结果与现场实测数据趋势一致,表明TAITHERM模型计算桥梁结构温度场是准确合理的;武汉地区混凝土曲线箱梁桥曲线内外侧最不利温度梯度有不同的规律——顶板与腹板的温差是内侧大于外侧,底板与腹板的温差是外侧大于内侧;通过对比仿真温度梯度模式与规范给出的温度梯度模式,发现在武汉地区距离顶板0.4 m范围内的竖向温度梯度数值处于规范值范围内,但距离顶板0.4~0.6 m时竖向温度梯度数值会超出规范值;在影响温度分布的各种因素中,风速和云层遮挡系数对竖向温度梯度影响最大,辐射次之,大气日温差影响最小。该研究对于混凝土箱梁桥的设计、日常养护等工作具有一定的理论研究和工程应用价值。

关键词:混凝土曲线箱梁;温度场;竖向温度梯度;数值模拟;敏感性分析
中图分类号:U448.36 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202207006

Analysis of vertical temperature gradient of concrete box girder bridge under sunshine action

ZHAI Mengxiang[1], *YANG Hongyin*[*1], *LIU Weijun*[2], *LAI Jiayu*[1], *WANG Changjun*[2], *GU Jianfeng*[1]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Wuhan 430070, China;
3. Yiyao (Fujian) Engineering Co., Ltd., Putian 351100, China

Abstract: In order to study the temperature distribution of concrete curved box girder bridge and the influence of meteorological parameters on the temperature distribution of concrete box girder bridge, based on field measured data, this paper took a concrete curved box girder bridge in Wuhan as the object, and used the thermal simulation software TAITHERM to carry out numerical simulation of the temperature field of concrete box girder bridge under the action of sunlight. The model comprehensively considered the influence of ambient temperature, wind speed, and solar radiation, analyzed the distribution mode of vertical temperature gradient of concrete box girder bridge, compared with the measured value, and analyzed the sensitivity of meteorological factors affecting temperature distribution. The results showed that the temperature simulation results of the cross section of the concrete curved box girder bridge are consistent with

收稿日期:2022-07-07
基金项目:国家自然科学基金(51708429);武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2024537);湖北省建设科技计划项目(2023011);武汉市城建局科技项目(202359);福建省住建厅科技研究项目(2022-K-15)
作者简介:翟孟祥,硕士研究生。Email:zhaimengxiang@stu.wit.edu.cn
***通信作者**:杨宏印,博士,教授。Email:yanghongyin@wit.edu.cn
引文格式:翟孟祥,杨宏印,刘卫军,等. 日照作用下混凝土曲线箱梁桥竖向温度梯度分析[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(5):571-577.

the trend of the field measured data, which indicates that the TAITHERM model is accurate and reasonable in calculating the temperature field of the bridge structure. The most unfavorable temperature gradient inside and outside the curve of the concrete curved box girder bridge in Wuhan area has different patterns: the temperature difference between the top plate and the web is greater inside than outside, and the temperature difference between the bottom plate and the web is greater outside than inside. By comparing the simulated temperature gradient mode with the temperature gradient mode provided by the specifications, it was found that the vertical temperature gradient value within the range of 0.4 m from the roof in Wuhan area is within the standard value range, but the vertical temperature gradient value exceeds the standard value when it is 0.4−0.6 m from the roof. Among various factors affecting temperature distribution, wind speed and cloud cover coefficient have the greatest impact on vertical temperature gradient, followed by radiation, and the smallest impact on daily atmospheric temperature difference. The above research conclusions have important theoretical value and engineering application for the design and daily maintenance of concrete box girder bridge.

Keywords: curved box girder; temperature field; temperature gradient; numerical simulation; sensitivity analysis

曲线桥具有占地面积小、地形适应性强、造型美观等优点，被广泛应用于城市道路立体交叉工程中。其中，混凝土曲线箱梁桥又因其截面抗弯抗扭能力强，且自重较轻等优点，从而成为工程建设中应用最为普遍的一种曲线桥型[1-3]。然而，混凝土曲线箱梁桥在运营期间有可能产生一些病害，主要包括支座脱空、主梁侧移和侧翻、腹板墩身开裂等[4-6]。在引发上述混凝土曲线箱梁桥病害的因素中，温度效应的研判难度较大[7]。原因是桥梁长期处于自然条件下，且混凝土曲线箱梁桥的几何外形导致桥梁各部位接受太阳辐射的效率不同，因此混凝土曲线箱梁桥的热环境复杂多变[8]。

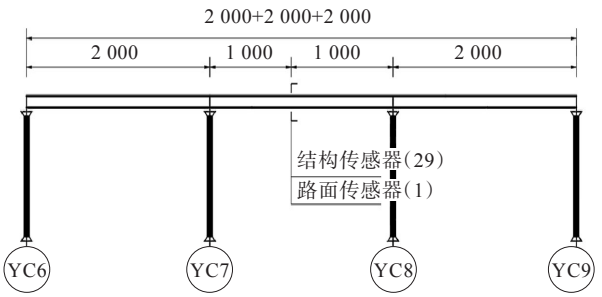
Miao等[9]通过对运行中的润扬长江大桥钢箱梁（悬索桥部分）的现场温度试验，分析了日照条件下正交异型扁平钢箱梁的温度场变化规律和分布特征，并对试验数据进行了函数优化拟合和误差分析，提出了适用于六边形扁钢箱梁的温度梯度分布曲线。基于测量结果，采用有限元方法分析了正交异型扁钢箱梁的温度效应，并比较了不同温度梯度模式对钢箱梁力学特性和应力分布的影响。赵雄飞[10]采用热传导理论和有限元软件ANSYS进行温度场的模拟，使用Midas/Civil软件对桥梁进行了温度效应分析，很好地指导了实际施工线形。Zhu等[11]根据精细温度效应分析和热特征值理论，对大跨度悬索桥的动力特性进行了描述，通过多尺度建模和计算流体动力学方法分别得到了索内温度变化和索塔表面非均匀传热系数。李小国等[12]基于某高墩大跨度预应力混凝土连续刚构桥箱梁截面的温度数据，拟合得到箱梁纵向温度梯度和横向温度梯度的非线性分布拟合曲线，并对实测的垂直温度梯度模态以及垂直和水平温度梯度组合模态进行了模拟分析。朱超等[13]考虑钢箱梁受太阳辐射、外环境气流、内部输送干燥空气等影响，对昼夜不同区间下其内部温度场、湿度场进行分析。

综上所述，日照作用作为影响温度荷载的重要因素之一，会导致桥梁自身产生温度应力和变形，对混凝土结构的可靠性和耐久性造成影响[14-16]。当前研究发现温度荷载对桥梁的影响在某些情况下已超过其他荷载作用[17]，使得混凝土结构的温度场成为热点问题。我国疆域辽阔，桥梁所处的地理位置和气候环境也各不相同，在设计中对温度梯度作用的计算仅依据现行的公路桥涵通用设计规范[18]进行简化处理，将导致桥梁温度效应计算分析存在一定误差[19]。混凝土曲线箱梁桥在不均匀的日照作用下，其结构将出现不均匀的非线性温度分布，从而形成明显的竖向温度梯度[20]。竖向温度梯度对桥梁结构的应力分布有较大的影响，因此研究最不利的竖向温度梯度模式对指导桥梁设计和日常养护工作具有重要的实际工程价值。

本文采用热分析软件TAITHERM建立武汉市某混凝土曲线箱梁桥的温度场空间动态分析模型，结合大量实测数据，研究日照作用对混凝土曲线箱梁桥温度梯度分布规律的影响，从而提出符合武汉地区日照作用下混凝土曲线箱梁桥的竖向温度梯度分布模式，对于混凝土箱梁桥的设计、日常养护等工作具有重要的理论研究和工程应用价值。

1 桥梁温度测点布置

以武汉市某立交匝道桥的第三联（3×20 m）混凝土曲线箱梁桥为研究对象，桥梁跨径布置如图1



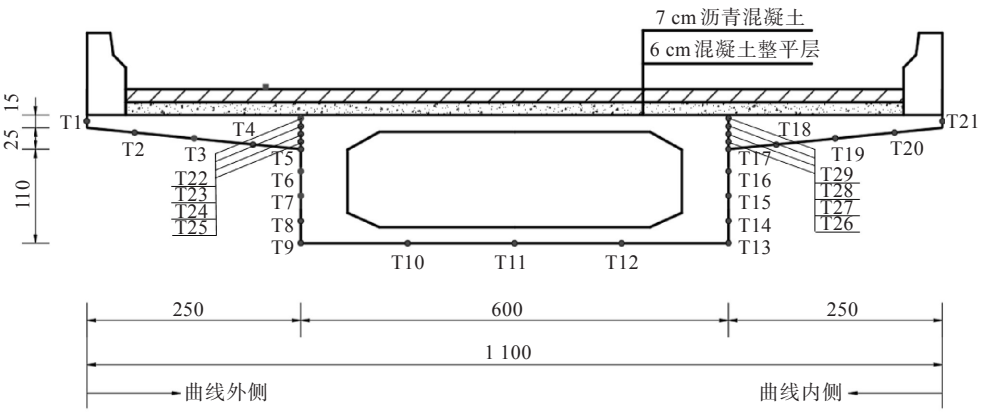
注：单位为cm。

图1　桥梁跨径布置图

Fig. 1　Layout of bridge span

所示。该桥地理位置为东经114°13′28.47″，北纬30°29′52.99″，桥梁曲率半径为70 m，走向为南偏东49.1°。其上部结构采用单箱单室混凝土连续箱梁，梁高为1.50 m，顶板宽11.00 m，底板宽5.50 m，挑臂均为2.75 m。桥面铺装为7 cm沥青混凝土和6 cm混凝土整平层。

图2为桥梁截面及温度测点布置断面图。考虑到桥梁结构纵向狭长的特点，沿桥轴线方向的不同位置温度分布形式具有一致性，选择中跨跨中截面进行温度实时监测，该截面共布置了29个传感器，分别用于监测箱梁底板、腹板、翼缘板及桥面铺装的温度。



注：单位为cm。

图2　桥梁截面及温度测点布置断面图

Fig. 2　Bridge cross-section and temperature measuring point layout section

2　温度场空间模型的建立与验证

2.1　温度场空间模型的建立

采用热分析软件TAITHERM建立了该混凝土连续曲线箱梁桥的温度场空间动态分析模型，如图3所示。为确保模型的计算精度和计算效率，本模型沿厚度方向将箱梁顶板、底板、腹板划分为6层，共包含11 664个单元。数值模型的热边界条件基于桥址处时区、海拔等地理信息位置，以及随着时间变化的大气温度、风向风速、太阳辐射强度等气象数据，由系统进行信息识别和热边界条件生成，从而实现混凝土连续曲线箱梁桥温度场时空分布情况的精细计算。在建模过程中，根据实时的温度监测数据，以卡尔曼滤波方法对模型模拟结果进行实时修正，从而修正模型参数。

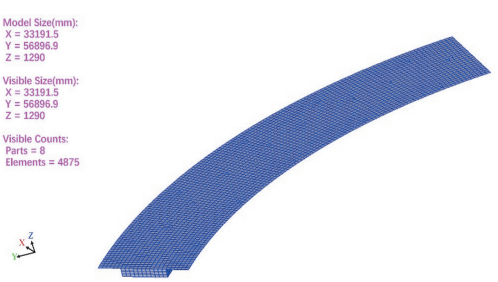


图3　曲线箱梁桥温度场空间分析模型

Fig. 3　Three dimensional model for analyzing temperature field of the curved box girder bridge

2.2　模型验证

收集整理武汉地区2018年全年的天气数据文件，逐月进行桥梁温度场的计算分析。根据天气文件中气温、太阳辐射数值以及每日温差的对比结果可知，7月份气温、太阳辐射等均较高、温度作用最为剧烈。以7月份为例，主要测点（翼缘DTS-03、腹板DTS-07、底板DTS-11）的计算仿真结果与实测结果的对比情况如图4所示。

由于初始热边界条件与实际情况存在一定差异，模型计算结果的前3天为渡越时间。由图4可知，渡越时间之后温度的计算结果与监测结果吻合良好，绝对误差基本小于3 ℃，故桥梁温度场计算模型的建立方法和材料热物理参数的选取是合理的，具有较高的精度，可用于分析预测曲线桥梁温度场空间分布情况。而气象参数、现场测试的精度等因素可能是引起局部偏差的原因。

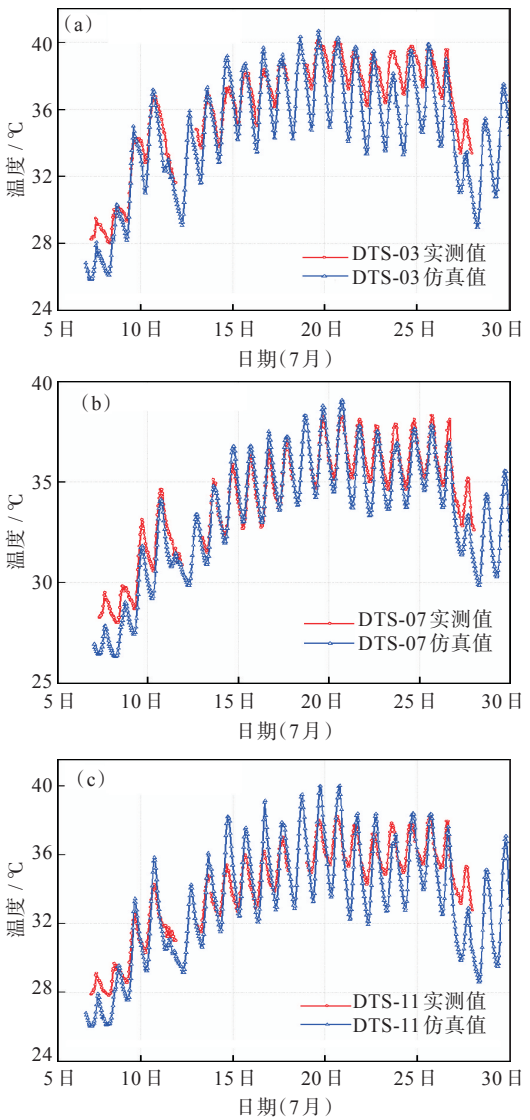


图4 主要测点计算值与实测值结果对比:(a)翼缘测点DTS-03,(b)腹板测点DTS-07,(c)底板测点DTS-11

Fig. 4 Comparison between calculated and measured values of main measurement points:(a)DTS-03 measurement point of flange,(b)DTS-07 measurement point of web,(c)DTS-11 measurement point of bottom plate

3 竖向温度梯度分析

3.1 最大竖向温差出现时刻

由于混凝土曲线箱梁桥中温度场具有不均匀性,该性质对温度作用的大小具有重要影响,即温度场不均匀性越突出桥梁受到的温度作用就越明显。而混凝土曲线箱梁桥中顶板、腹板及底板的温度场因外部环境不同而存在差异。各构件间的温度梯度是温度场不均匀性研究的重点,因此针对这一类桥型,主要研究顶板和腹板以及底板和腹板间的竖向温度梯度。

本文以顶板外表面和腹板外表面的温度差值作为竖向温度梯度,实测温差分别取内侧的T15测点温度和外侧的T7测点温度作为内外侧的温度基准点,仿真温差分别取内侧腹板和外侧外腹板的中间位置的温度作为温度基准点。运用模型仿真对同一时刻对应位置处的温度梯度进行计算和对比分析。根据两者的对比结果进一步分析顶板、底板的外表面温度与腹板温度的温差情况。

考虑到曲线箱梁桥的外形特点,对桥梁4个位置与腹板的温差进行分析,分别是内外侧的顶板与腹板和内外侧底板与腹板。图5为内外侧顶板与腹板和内外侧底板与腹板的温差月平均值的分布图,由图5可知顶板与腹板的内侧温差大于外侧,底板与腹板的外侧温差大于内侧。

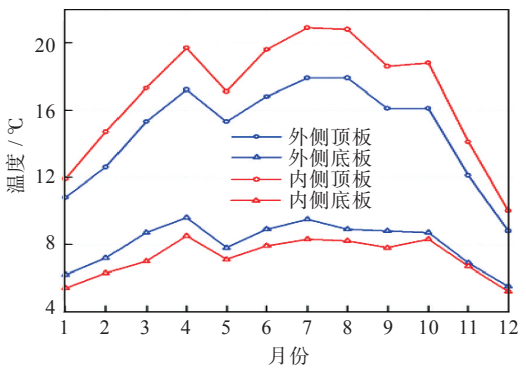


图5 2018年全年顶板与腹板和底板与腹板的温差分布图

Fig. 5 Distribution of temperature differences between roof and web, bottom and web in 2018

图6是全年最大竖向温差出现时刻分布图。由图6可知,最大竖向温差出现的时刻分布从全年来看近似为一个正弦函数,同年从2月份到10月份最大竖向温差出现的时刻由14:00变化到13:00;最大温差出现时刻在春秋两季变化较大,在冬夏两季变化非常小。图7是最大竖向温差出现时刻概率分布图。由图7可知,夏季(2018年6—8月)最大温差出现时刻的分布具有明显的最大概率密度分布的特征,最大概率密度出现在13:00或14:00。

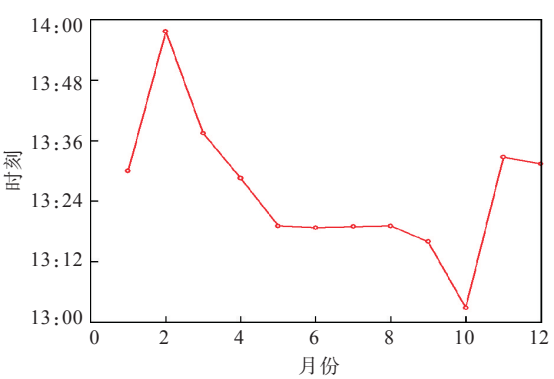


图6 全年最大竖向温差出现时刻分布

Fig. 6 Temporal distribution of annual maximum vertical temperature difference

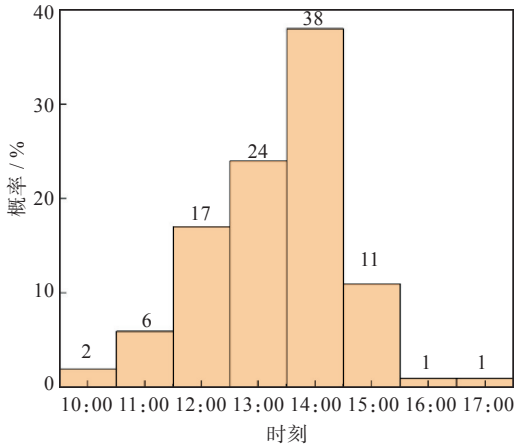


图7　最大竖向温差出现时刻概率分布图

Fig. 7　Probability distribution diagram at the time of maximum vertical temperature difference

3.2　竖向温度梯度分析

《公路桥涵通用设计规范》(JTG D60—2015)[18]中温度梯度模式，采用双折线形式的温度梯度曲线。但在之前众多学者的研究中[21-23]，中国铁路规范中指数分布模式更符合桥梁实际竖向温度梯度分布情况，广泛应用于桥梁竖向温度梯度的研究，因此本文采用指数分布公式(1)来拟合桥梁竖向温度分布模式，即：

$$T = c \cdot \mathrm{e}^{-dx} \tag{1}$$

式中：c值代表日最大温差；d表示温度梯度变化趋势的快慢程度，d值越大则温度梯度越大；x为计算点至箱梁顶板外侧的距离。

由此可知，靠近顶板的一定厚度范围是温差主要分布的区域，温度梯度越大，温差分布的厚度范围也越小。竖向温度梯度会产生较大的温度作用，从而导致桥梁结构出现较大的温度响应，通常最大竖向温度梯度出现在夏季[18]。因此，根据前文所得出的结果，代入出现最大温差的时间7月10日12时的数据，进行最大温度梯度的公式拟合，拟合结果如图8所示，即为武汉地区混凝土曲线箱梁的实测温度梯度曲线，见式(2)：

$$T = 14.1\mathrm{e}^{-8.3x} \tag{2}$$

将所得出的温度梯度模式与我国当前规范规定的温度梯度模式进行对比，结果如图9所示。从图9中可以看出，距离顶板小于0.4 m时，实际竖向温度梯度数值处于规范值范围内；距离顶板0.4~0.6 m时，实际竖向温度梯度数值会超出规范值。即规范中关于混凝土曲线箱梁桥的温度梯度模式仍有不合理处存在，规范中部分内容仍然有需要改进的地方。

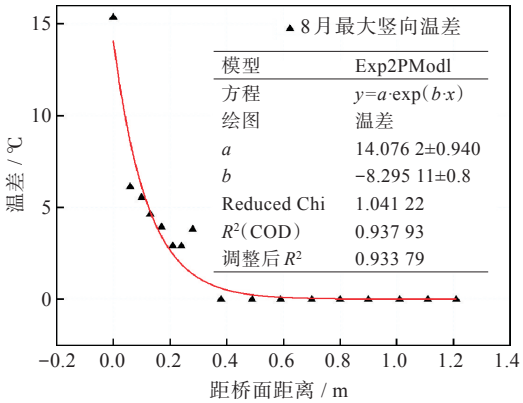


图8　最大竖向温度梯度拟合示意图

Fig. 8　Schematic diagram of fitting for the maximum vertical temperature gradient

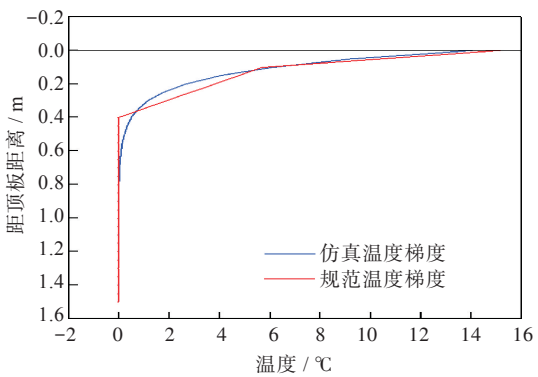


图9　温度梯度模式对比

Fig. 9　Comparison of temperature gradient distribution models

4　气象参数敏感性分析

4.1　气象参数对竖向温度梯度的影响

由于影响曲线箱梁桥温度梯度分布的因素众多，且桥梁设计基准期内(100年)气象参数多变，为了解气象因素对桥梁温度梯度的影响情况，本文采用经实测数据验证后的数值模型对大气日温差、太阳辐射、风速和云层遮挡系数四项影响日照温度场主要气象因素进行敏感性分析。通过分析各气象因素对混凝土箱梁竖向温度梯度的影响程度，可以更深入地研究阳光下混凝土箱梁的竖向温度梯度。有助于为实际桥梁桥梁设计和健康监测与维修提供理论依据。确定主要气象因素的敏感性，为分析极端天气条件对桥梁结构的影响提供指导，为实际桥梁安全评估和结构设计提供依据。

因此本文基于前文所建立的温度场模型，选取2018年3月26日−31日的气象数据，通过单一变量法分别研究各气象参数按比例变换时竖向温差的改变程度，由此分析气象参数对混凝土竖向温度梯度的影响。

为研究大气日温差对曲线箱梁竖向温度梯度的影响，要求增大日温差的同时保持变换后的日平均气温不变，根据数列公式(3)对气象数据中的气温进行变换：

$$T_i' = T_i + (T_i - \bar{T})\cdot k \tag{3}$$

式中：T_i'为变换后的大气温度，T_i为实测气温，$\bar{T}$为日平均气温，k为日温差变换系数。

日温差变换系数k每增大0.1，变换后的最大日温差将比原始最大日温差增大10%，当k=1时，变换后的最大日温差为原始最大日温差的2倍。

为研究太阳辐射强度对曲线箱梁竖向温差的影响，要求增大日辐射强度差的同时辐射强度日平均强度和辐射强度变化趋势保持不变，采取数列公式(4)对气象数据中的辐射强度进行变换：

$$Q_i' = Q_i + (Q_i - \bar{Q})\cdot m \tag{4}$$

式中：Q_i'为变换后的辐射强度，Q_i为实测辐射强度，$\bar{Q}$为日平均辐射强度，m为日辐射强度差变换系数。

日辐射强度差变换系数m每增大0.1，变换后的最大日辐射强度差将比原始最大日辐射强度差增大10%，当m=1时，变换后的最大日辐射强度差为原始最大日辐射强度差的2倍。

如图10所示，风速与竖向温度梯度呈负相关，当风速小于4 m/s时对竖向温度梯度影响较大，风速大于4 m/s时影响较小；箱梁竖向温差随k值变化呈线性关系，大气日温差越大对箱梁竖向温差的影响越大；云层遮挡系数与最大竖向温差呈负相关，箱梁最大竖向温差会随着云层遮挡系数的增大而减小，减小速率先慢后快，云层遮挡系数小于6时对竖向温度梯度影响较小，大于6时影响较大；辐射强度与竖向温度梯度呈正相关，辐射强度越大，则竖向温差越大。

4.2 气象参数敏感性排序

为了得到各气象参数对竖向温度梯度的影响程度，采取单一变量法进行计算分析。当风速、大气日温差、云层遮挡系数、太阳辐射分别增加(减少)相同的幅度后，混凝土曲线箱梁的竖向温差分别增加(减少)50.3%、28.1%、48.4%和35.2%。因此，在影响竖向温度梯度的各气象参数中，风速和

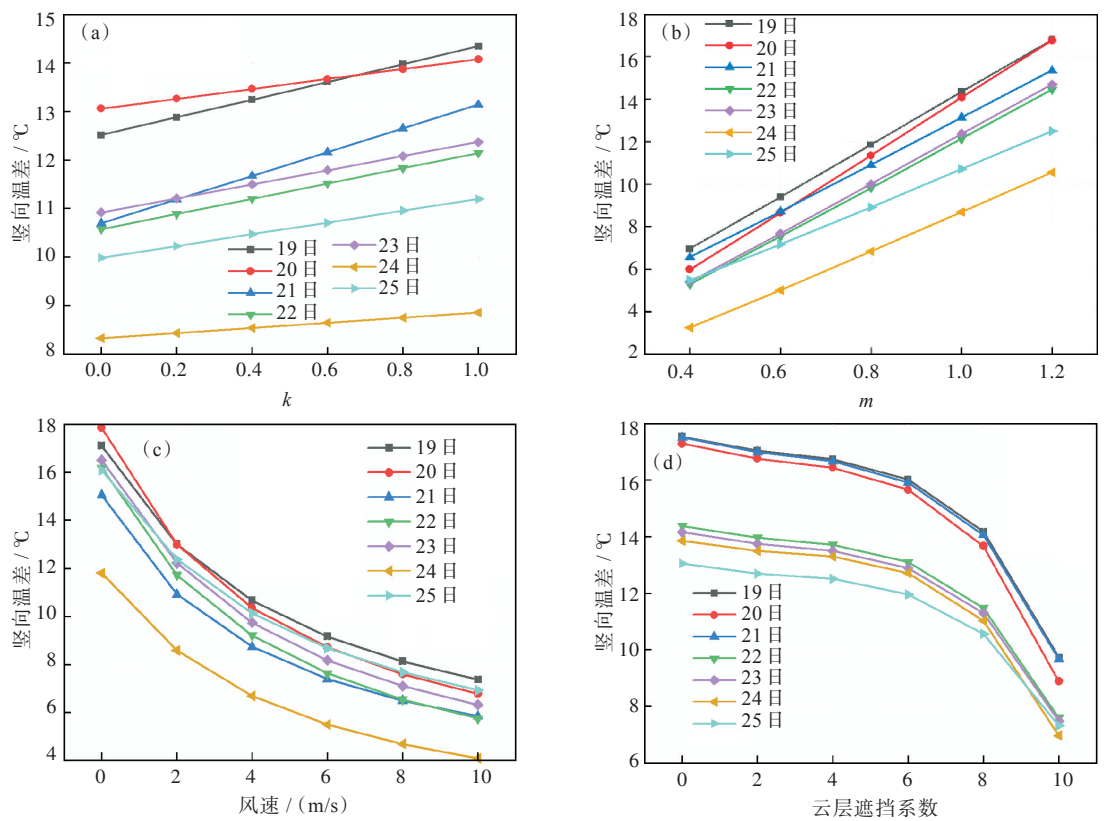


图10 各气象参数对竖向温度梯度的影响：(a)最大竖向温差随日温差变化关系图，(b)最大竖向温差随辐射强度变化关系图，(c)最大竖向温差随风速变化关系图，(d)最大竖向温差随云层遮挡系数变化关系图

Fig. 10 Influence of meteorological parameters on vertical temperature gradient: (a) relationship between the maximum vertical temperature difference and the daily temperature difference, (b) relationship between the maximum vertical temperature difference and the radiation intensity, (c) relationship between the maximum vertical temperature difference and the wind speed, (d) relationship between the maximum vertical temperature difference and the cloud cover coefficient

云层遮挡系数对竖向温差的影响程度最大、辐射次之，大气日温差的影响程度最小。

5　结　论

本文以武汉市某混凝土曲线箱梁桥为研究对象，采用热仿真软件TAITHERM计算其温度场，进而研究了该桥梁的温度梯度分布规律。根据实测数据的分析和仿真模型的计算结果得到以下结论：

（1）以TAITHERM为平台建立了桥梁温度场三维仿真模型，模型综合考虑了环境温度、风速和太阳辐射的影响，结构温度仿真值与实测值的变化趋势基本相同。

（2）混凝土曲线箱梁桥曲线内外侧最不利温度梯度的规律存在差异：顶板与腹板内侧的温差大于外侧，底板与腹板外侧的温差大于内侧。

（3）根据仿真温度梯度模式与国内规范中桥梁温度梯度模式的对比结果，可知在距离顶板0.4 m范围内的实际竖向温度梯度数值处于规范值范围内，但距离顶板0.4~0.6 m时实际竖向温度梯度数值会超出规范值。

（4）根据气象因素影响桥梁温度分布的敏感性分析的结果，可知风速和云层遮挡系数对竖向温度梯度影响最大，辐射次之，大气日温差最小。

参考文献

[1] 沈杰.曲线刚构桥的空间受力分析研究[J].交通世界，2021，2(30)：80-81.

[2] 冯升阳，郭增伟，赵付强.小半径曲线连续箱梁桥恒载应力的空间分布特性分析[J].科学技术与工程，2021，21(36)：15617-15623.

[3] 李特.混凝土曲线箱梁桥温度场及其作用效应分析[D].大连：大连理工大学，2020.

[4] 梁立农，肖龙峰，肖金梅.混凝土桥梁温度作用模式及效应规律[J].广东公路交通，2014(3)：16-20，27.

[5] 段凯凯.基于实测温度场的曲线连续刚构桥温度效应分析[D].西安：长安大学，2020.

[6] 马志元，刘江，刘永健，等.钢-混组合梁桥有效温度取值的地域差异性[J].浙江大学学报(工学版)，2022，56(5)：909-919.

[7] 钟守砚.混凝土曲线连续箱梁桥温度效应分析[D].西安：长安大学，2013.

[8] 王文利，陈松男，张文娇，等.气候环境因素作用下预应力混凝土箱梁桥温度场分析[J].低温建筑技术，2022，44(2)：118-122.

[9] MIAO C Q，SHI C H. Temperature gradient and its effect on flat steel box girder of long-span suspension bridge [J]. Science China Technological Sciences，2013，56(8)：1929-1939.

[10] 赵雄飞.大跨度连续钢箱梁桥温度场及其效应分析[D].广州：华南理工大学，2016.

[11] ZHU J S，MENG Q L. Fine temperature effect analysis-based time-varying dynamic properties evaluation of long-span suspension bridges in natural environments [J]. Journal of Bridge Engineering，2008，23(10)：55-68.

[12] 李小国，黄炜煜，余玲玲.大跨径连续刚构桥箱梁日照温度效应分析[J].西部交通科技，2019(3)：112-115.

[13] 朱超，卢靖宇，代希华，等.大尺寸钢箱梁温湿度场分析[J].桥梁建设，2021，51(4)：81-87.

[14] 徐行军，黄树榕.桥梁大体积混凝土浇筑过程的温度场及温度应力[J].武汉工程大学学报，2010，32(1)：65-69，73.

[15] YAN P. Research on temperature field and temperature stress of large span concrese cable-stayed bridge girder [J]. Applied Mechanics and Materiaes，2012，178/179/180/181：2075-2080 .

[16] MOSAVI A A，SERACINO R，RIZKALLA S. Effect of temperature on daily modal variability of a steel-concrete composite bridge [J]. Journal of Bridge Engineering，2012，17(6)：979-983.

[17] 高大峰，董旭，陈凯旋，等.预应力混凝土连续箱梁桥温度效应研究[J].公路工程，2016，41(2)：80-83.

[18] 公路桥涵通用设计规范：JTG D60-2015[S].北京：人民交通出版社，2015.

[19] 姚彬，李国平，陈贤俊，等.混凝土箱梁日照温度效应研究[J].中国市政工程，2019(4)：81-85，119-120.

[20] 李克冰.日照条件下铁路钢混组合梁温度效应分析[J].铁道建筑，2023，63(5)：73-77.

[21] 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.

[22] 周云，郑佳缘，郝官旺，等. 基于气象大数据的大跨桥梁温度效应预测方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2024，51(7)：164-176.

[23] 徐丰，周孟林，孟康.斜拉桥索塔温度效应分析[J].武汉工程大学学报，2022，44(3)：336-340.

本文编辑：张　瑞