文章编号:1674-2869(2025)02-0231-06

基于监测数据的混凝土箱梁桥竖向温度梯度分布研究

彭 娅[1],杨宏印*[1],王昌军[2],来家玉[1],余加仙[3],龚伟康[1]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 亿耀(福建)建设有限公司,福建 莆田 351100;
3. 中交建宏峰集团有限公司,福建 莆田 351100

摘 要:针对某混凝土箱梁桥,进行长期的温度监测,结合桥址处气象资料,采用有限元软件联合使用的仿真分析方法建立其温度场时空模型。基于温度场时空模型,分析了各主要气象因素对混凝土箱梁竖向温度梯度的影响程度,研究了极端天气条件下混凝土箱梁的最不利竖向温度梯度分布模式,并与现行规范进行了对比。结果表明:混凝土箱梁温度的计算值与监测值吻合良好,方法合理准确;太阳辐射对日照作用下混凝土箱梁竖向温度梯度的影响较大,气温和风速对其影响相对较小;混凝土箱梁桥的最不利竖向温度梯度分布模式与规范中的双折线温度梯度模式存在一定的差异,规范未考虑腹板上部及底板处的竖向温度梯度,需引起重视。

关键词:混凝土箱梁;温度场;竖向温度梯度;温度监测;气象因素
中图分类号:U446 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202301008

Monitoring data-based study on vertical temperature gradient distribution in concrete box girder bridges

***PENG Ya*[1], *YANG Hongyin*[*1], *WANG Changjun*[2], *LAI Jiayu*[1], *YU Jiaxian*[3], *GONG Weikang*[1]**
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Yiyao (Fujian) Engineering Co., Ltd, Putian 351100, China;
3. China Communication Construction Hongfeng Group Co., Ltd, Putian 351100, China

Abstract: Based on the long-term temperature monitoring of a concrete box girder bridge and combining it with the meteorological data of the site, we used a simulation analysis method and the finite-element software to establish a spatio-temporal model of the temperature field of this bridge. Based on this model, we analyzed how the major meteorological factors influence the vertical temperature gradient of the concrete box girder, studied the distribution pattern of its most unfavorable vertical temperature gradient under extreme weather conditions, and made a comparison with the current standard. The results indicated that the calculated temperatures of the concrete box girder are highly consistent with the monitored values, demonstrating that the method proposed is reasonable and accurate. Solar radiation exerts a significant influence on the vertical temperature gradient of the concrete box girder, whereas the impacts of air temperature and wind speed are relatively minor. There exists a certain discrepancy between the most unfavorable vertical temperature gradient distribution pattern of concrete box girder bridges and the double-broken-line temperature gradient

收稿日期:2023-01-17
基金项目:国家自然科学基金(51708429);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T2020010);武汉市城乡建设局科技计划(201919);福建省住建行业建设科技研究开发项目(2022-K-15)
作者简介:彭 娅,硕士研究生。Email:2224068756@qq.com
***通信作者**:杨宏印,博士,教授。Email:yhyhust@163.com
引文格式:彭娅, 杨宏印, 王昌军,等. 基于监测数据的混凝土箱梁桥竖向温度梯度分布研究[J]. 武汉工程大学学报, 2025,47(2):231-236.

pattern specified in the current code. It should be noted that the code does not take into account the vertical temperature gradient at the upper part of the web and the bottom plate of the bridge.

Keywords: concrete box girder; temperature field; vertical temperature gradient; temperature monitoring; meteorological factors

在当前的城市箱梁桥中,混凝土箱梁因受力合理、造价较低而占据较大的比例[1]。日照环境下,由于混凝土材料的导热性能较差,混凝土箱梁内部产生非线性的竖向温度梯度[2]。在这种温度效应下,箱梁局部会产生温度应力[3],而温度应力的累积效应会引起结构开裂[4-5],从而影响到桥梁结构的安全性[6]。

国内外学者对混凝土箱形梁的竖向温度梯度进行了大量的研究和讨论[6-8]。Lee等[7]在实验混凝土箱梁段中,记录并利用了整个一年周期的混凝土温度、太阳辐射、空气温度和风速数据,研究不同环境条件下的垂直和横向温度幅度。杨宏印等[8]指出桥梁结构温度变化主要依赖其所处的环境温度,主梁在纵桥方向上的不同位置具有一致的温度分布形式;卫俊岭等[9]用ANSYS软件建立了混凝土箱梁桥二维瞬态日照温度场模型,进一步模拟了混凝土箱梁桥的最大竖向温度梯度分布特征,分析了该温度分布模式对桥梁的作用效应。然而,研究成果大多是基于温度监测数据得到桥梁的竖向温度梯度,仅适用于桥址处所在的地区。现有桥梁温度场的仿真分析方法在热边界条件的处理上过于粗略[10],无法客观地考虑空气流动、辐射的多次反射、日照遮挡等因素。我国跨越多个气候区,但桥梁结构的温度梯度模式统一采用《公路桥涵通用规范》(JTG D60—2015)[11],该规范中的温度梯度模式是否适用于全国各地区的桥梁结构有待更深入地研究。

本文以某混凝土箱梁桥为研究对象,对箱梁典型截面的温度进行长期的监测和分析,以有限元软件联合使用的仿真分析方法建立其温度场时空模型,将模型计算值与现场监测值进行对比。在此基础上,研究极端天气条件下混凝土箱梁的最不利竖向温度梯度分布模式,分析各主要气象因素对混凝土箱梁温度梯度的影响。此外,文中的研究方法可为其他地区桥梁结构的温度场研究提供借鉴和参考。

1 工程背景

本文针对武汉市某立交匝道桥的第三联(20 m+20 m+20 m)混凝土连续曲线箱梁桥,桥梁跨径布置如图1所示。上部结构采用单箱单室截面,梁高1.50 m,顶板宽11.00 m,底板宽6.00 m,翼缘板均长2.50 m,翼缘板高度由0.15 m至0.40 m呈线性变化。桥面铺装由6 cm厚混凝土整平层和7 cm厚沥青混凝土组成。

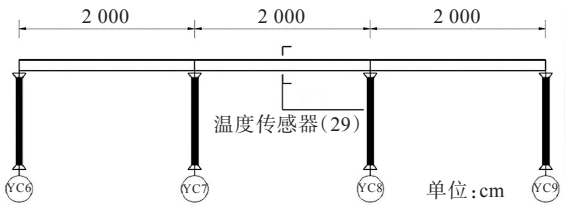

图1 桥梁跨径布置图

Fig. 1 Bridge span layout

考虑到经济、效率,选择混凝土箱梁桥的中跨跨中截面合理布置温度传感器,共计29个,各温度监测截面尺寸及测点布置如图2所示,采用实时监测的方法,每10 min采集1次混凝土箱梁截面腹板、顶板及底板的温度数据。

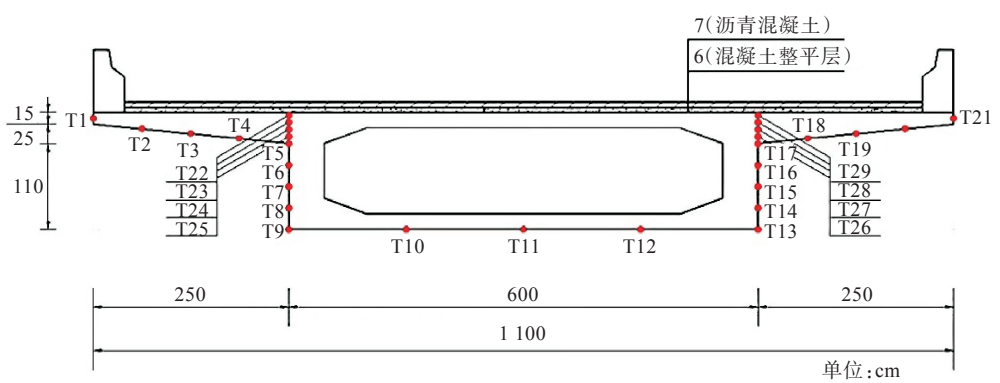

图2 监测截面尺寸及测点布置图

Fig. 2 Monitoring cross-sectional dimensions and the measurement point layout

2　混凝土箱梁桥温度场模型及验证

2.1　温度场时空模型建立

应用ANSYS、HYPERMESH和TAITHERM 3个有限元软件联合使用的仿真分析方法，建立了基于桥梁的基本参数的温度场时空模型。首先在ANSYS软件中建立有限元模型，然后导入HYPERMESH中对其进行网格划分、格式转换，最后再导入TAITHERM软件中，对桥梁结构的温度场进行仿真计算。温度场仿真计算流程如图3所示。

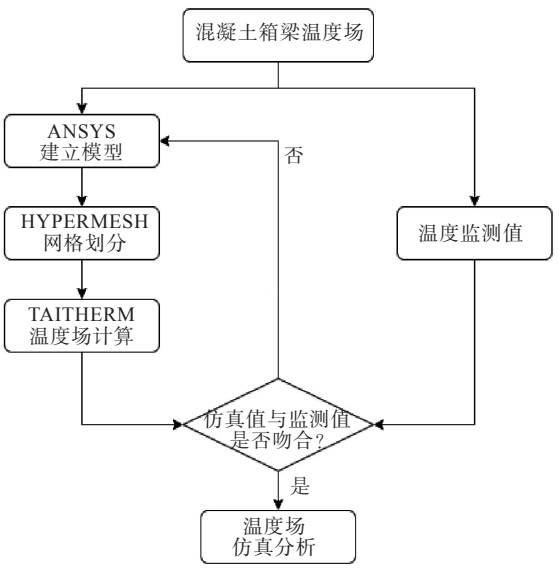

图3　温度场仿真计算流程图

Fig. 3　Flow chart of temperature field simulation calculation

TAITHERM作为专业的热分析软件，可以综合模拟热传导、热对流和热辐射3种传热模式，具有高效的热建模和热求解能力。将含太阳辐射、气温、云量、风速等实时气象数据的天气文件作为热边界条件导入TAITHERM软件中，可准确地模拟环境因素对桥梁结构温度场的影响。在TAITHERM软件中建立的混凝土箱梁温度场时空模型如图4所示。

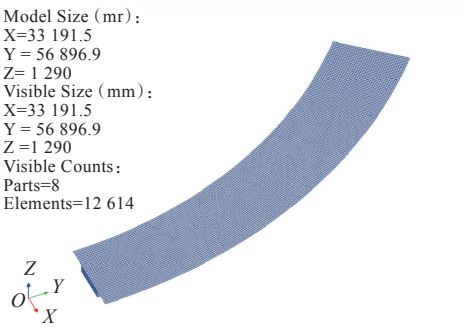

图4　混凝土箱梁温度场时空模型

Fig. 4　Spatio-temporal model of temperature field of concrete box girder

该模型分为8个部分，总计12 614个单元，每个部分沿板厚方向均划分为6层，各部分可根据实际材料及厚度设定，材料的热物理参数如表1所示。在TAITHERM软件中将模型的地理位置、海拔等参数设置成武汉市的特征值，将WolframAlpha网站采集的气象数据作为天气文件导入软件中进行计算，得到混凝土箱梁桥各时刻的温度场分布。根据温度监测数据，1 h内桥梁温度变化不大，故计算模型的时间步长设为1 h。

表1　材料热物理参数

Tab. 1　Thermophysical parameters of the materials

材料	密度/(kg·m^{-3})	导热系数/(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)	比热容/(J·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	太阳辐射吸收率	太阳辐射发射率
沥青	2 100	1.05	1 680	0.93	0.93
混凝土	2 600	1.74	970	0.60	0.85

2.2　温度场时空模型验证

为提高温度场时空模型的精度，基于温度监测数据对模型进行修正，进而得到混凝土箱梁温度场的精细化时空模型。将混凝土箱梁温度的计算值与监测值进行比较分析，从而验证温度场时空模型的准确性。根据桥梁实际的测点布置情况，在模型中提取对应单元的温度仿真计算数据，限于篇幅，综合考虑监测数据的完整性和天气状况，仅展示2020年12月典型测点（顶板T27、底板T11）的计算值和监测值的对比，如图5所示。

由图5可以看出，混凝土箱梁顶、底板测量点的温度计算值与监测值非常接近，变化趋势也很吻合。绝对误差均在3 ℃以内，满足实际工程的精度要求。因此，本文采用的温度场仿真计算方法与选取材料热物理参数合理准确。

3　混凝土箱梁竖向温度梯度分析

3.1　竖向温度梯度影响因素分析

选取混凝土箱梁中同一截面温度最低的数据作为基准温度，竖向温度梯度[12-13]由其余各点的温度与基准温度之差得到。通过分析各气象因素对混凝土箱梁竖向温度梯度的影响大小，可以更深入地研究日照下混凝土箱梁的竖向温度梯度。主要影响因素包括桥梁结构因素和气象因素[14]。

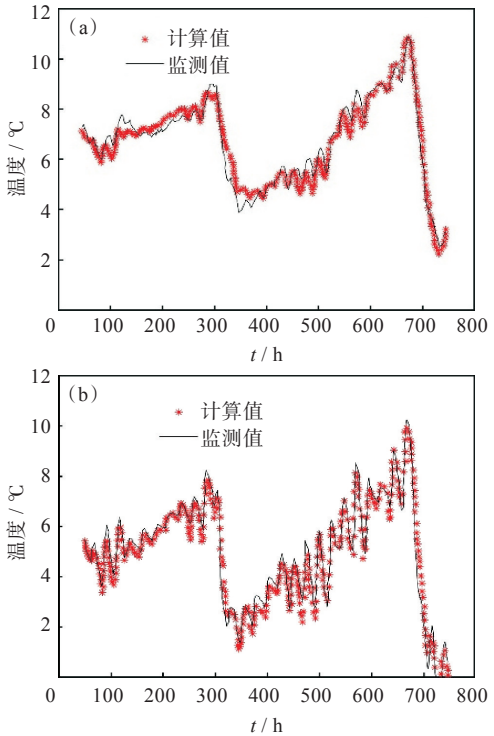

图5 测点温度计算值与监测值对比：(a)顶板测点，(b)底板测点

Fig. 5 Comparison between the calculated and monitored temperature values of the measuring points: (a) the roof measuring points, (b) the base plate measuring points

然而，实际工程设计中一般以规范规定的温度梯度作为控制作用，在桥梁结构设计参数确定的情况下，其温度梯度已确定，太阳辐射、气温及风速等主要气象因素就成为影响桥梁结构温度场分布的变量。

为研究各主要气象因素对混凝土箱梁竖向温度梯度的影响，基于上述的温度场时空模型，选择2020年8月11日–20日天气较晴朗的10 d，采用控制变量法将这10天的气象数据依次控制，各参数按20%的幅度增减，分别计算太阳辐射、气温和风速对于混凝土箱梁竖向温度梯度的影响，计算结果见图6。

由图6可知，在各主要气象因素中，太阳辐射对日照作用下混凝土箱梁竖向温度梯度的影响最大，气温次之，风速的影响最小。结果表明：太阳辐射、气温与竖向温度梯度呈显著正相关，风速与竖向温度梯度呈显著负相关，气象因素对混凝土箱梁竖向温度梯度的影响主要集中在顶板和箱梁底部。

对上述计算结果进一步分析，得到各气象因素对混凝土箱梁竖向温度梯度最大值的影响程度，分析结果见图7。由图7可知，当太阳辐射和气温增加(减少)40%时，混凝土箱梁竖向温度梯

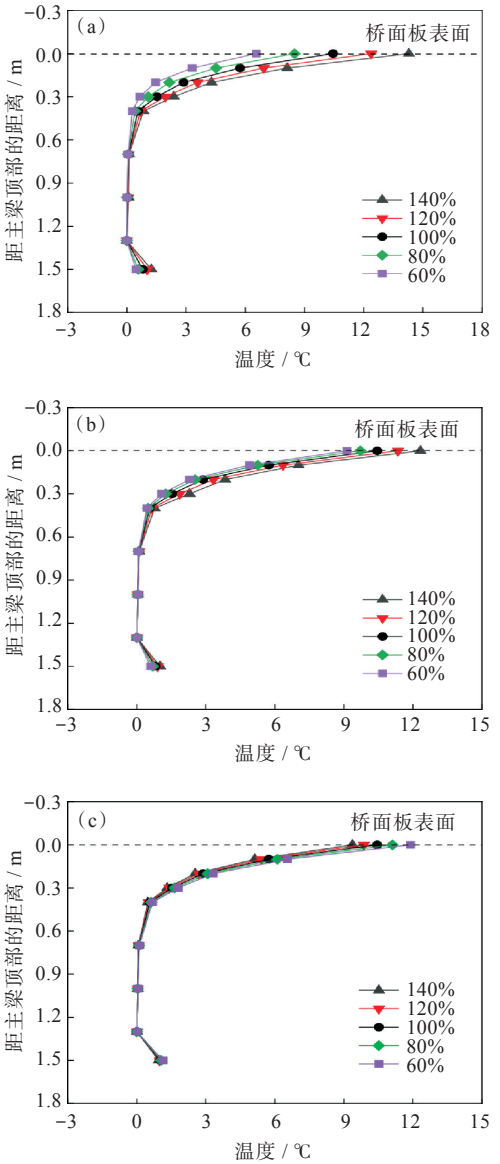

图6 主要气象因素对竖向温度梯度的影响：(a)太阳辐射，(b)气温，(c)风速

Fig. 6 Influence of main meteorological factors on the vertical temperature gradient: (a) solar radiation, (b) air temperature, (c) wind speed

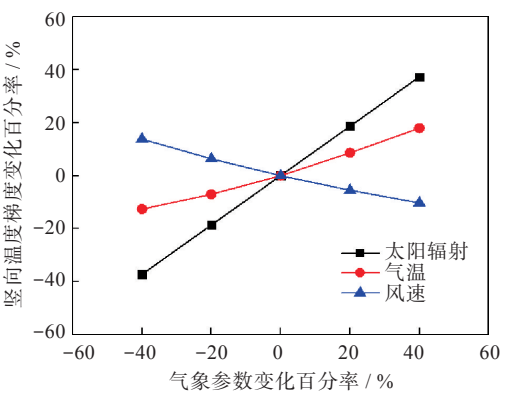

图7 竖向温度梯度随气象因素改变的变化百分率

Fig. 7 Percentage change of vertical temperature gradient with meteorological factors

度的最大值分别增加（减少）40%和15%；当风速增加（减少）40%时，混凝土箱梁竖向温度梯度的最大值减少（增加）10%。

3.2　最不利竖向温度梯度分布模式

为保证桥梁结构在设计基准期限内能正常运营，有必要分析极端天气条件对桥梁结构的影响[15]。对于混凝土箱梁桥在设计基准期限内的最不利竖向温度梯度，可以通过构建极端天气数据，结合建立的温度场时空模型进行预测计算。

构建极端天气数据，需考虑太阳辐射、气温及风速等气象参数的随机性[16]。根据《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》[17]确定室外空气代表参数的方法，确定武汉市（北纬30°、3级大气透明度等级）最不利太阳辐射的逐时代表值。以武汉市历年夏季的日最高气温为研究对象，通过概率统计分析方法得到最不利气温的逐时代表值[18]。因风速变化规律不明显、离散性较大，为计算方便，取武汉市历年夏季的日平均风速作为最不利风速的逐时代表值。

基于最不利太阳辐射、气温和风速等气象参数构建武汉市极端天气资料[19]。将数据导入TAITHERM软件，计算混凝土箱梁的温度场分布，得到极端天气条件下混凝土箱梁最不利的垂直温度梯度分布模式。箱梁截面沿梁高方向的最大温差为13.4 ℃，底板与腹板之间的温差为1.0 ℃。最不利竖向温度梯度分布拟合公式为：

$$\begin{cases} t_y = 13.4\mathrm{e}^{-6y}, & 0 \leqslant y \leqslant (H-0.2) \\ t_y = 5.2y - 6.76, & (H-0.2) \leqslant y \leqslant H \end{cases} \quad (1)$$

式中：t_y为箱梁截面梁高方向计算点处的温差；y为计算点至箱梁顶面的距离；H为箱梁截面的高度。

关于城市混凝土箱梁竖向温度梯度的取值，国内现行主要依据《公路桥涵通用设计规范》（JTG D60—2015）[10]，其桥面板表面的温度t_1规定见表2。该桥为沥青混凝土铺装，铺装层厚度为70 mm，根据线性内插法可以得到t_1=17.6 ℃，t_2=6.22 ℃。

表2　竖向日照正温差计算的温度基数

Tab. 2　The temperature base for calculating the positive vertical solar radiation temperature difference

结构类型	t_1 / ℃	t_2 / ℃
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

根据预测的温度梯度值，将最不利的垂直温度梯度分布模式与公路桥规范规定的温度梯度分布进行对比，结果如图8所示。由图8可知，温度梯度预测值在混凝土箱梁顶板厚度范围内时均符合规范，在规范范围内，按设计规范取值是安全的。但腹板上部和底板的厚度范围内仍存在明显的垂直温度梯度，但规范中并无相关规定，特别是对混凝土箱梁温度效应的详细分析，应引起注意。因此，规范中的双折线温度梯度模式并不能完全反映所有桥梁的实际温度分布，在混凝土箱梁温度场及其温度效应分析中，应尽可能结合桥梁实际地理、气象等情况具体分析，以使结果更精确。

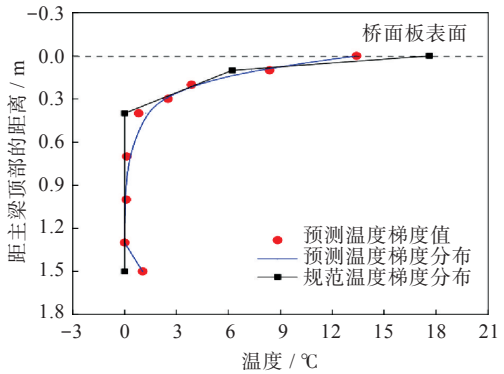

图8　竖向温度梯度分布模式对比

Fig. 8　Comparison of vertical temperature gradient distribution patterns

4　结　论

本文以某混凝土箱梁桥为工程背景，结合桥址处的天气资料，采用有限元软件联合使用的方法建立其温度场时空模型，基于温度场模型，对影响混凝土箱梁竖向温度梯度的主要气象因素进行了分析，研究了极端天气条件下混凝土箱梁的最不利竖向温度梯度分布模式，并将其与现行规范进行了对比。得到如下结论：

（1）混凝土箱梁桥温度的模型计算值与监测值吻合良好，说明本文所采用的有限元软件联合使用的仿真分析方法可较准确地计算混凝土箱梁温度场，该方法亦适用于其他地区和其他桥型。

（2）太阳辐射对日照作用下混凝土箱梁竖向温度梯度的影响较大，气温次之，风速的影响较小，且太阳辐射和气温与其竖向温度梯度呈正相关，风速与其竖向温度梯度呈负相关。

（3）基于极端天气数据和温度场时空模型，可计算得到极端天气条件下混凝土箱梁桥的最不利竖向温度梯度分布模式，其与规范中全国统一的双折线温度梯度模式存在一定的差异，规范未考

虑腹板上部及底板处的竖向温度梯度,需引起重视。在混凝土箱梁温度场及其温度效应分析中,应尽可能结合桥梁实际地理、气象等情况具体分析,以使结果更精确。

参考文献

[1] 肖伟, 王思伟. 城市立交匝道桥箱梁结构形式设计比选[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(1): 123-125.

[2] 王永宝, 赵人达. 混凝土箱梁温度梯度取值研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 43-47.

[3] 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.

[4] TANVIR H, SETH S, AYMAN M O. Structural effects of temperature gradient on a continuous prestressed concrete girder bridge: analysis and field measurements [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(11):1539-1550.

[5] 卢海林,张山,万崇勇,等. 静动荷载作用下简支预应力混凝土曲线箱梁剪力滞效应分析[J].武汉工程大学学报,2016,38(5):465-470.

[6] 刘森林. 基于监测数据的长大跨桥梁温度应力分析与安全评价[D]. 南京:东南大学, 2017.

[7] LEE J H, KALKAN I. Analysis of thermal environmental effects on precast, prestressed concrete bridge girders: temperature differentials and thermal deformations[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(3): 447-460.

[8] 杨宏印, 张爱辛, 张威, 等. 桥梁运营监测数据相关性分析及温度效应剔除[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 7142-7147.

[9] 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.

[10] 刘登, 邓德员, 陈玉骥, 等. 桥梁温度场研究现状及分析[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2018, 36(1): 60-64.

[11] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵通用设计规范:JTG D60—2015[S]. 北京:中华人民共和国交通运输部,2015.

[12] 岳加利,郝静,卢海林,等. 桥梁结构监测数据异常值处理方法[J].武汉工程大学学报,2022,44(1):107-111.

[13] 林才奎, 李义强, 周海俊, 等. 低纬度地区混凝土箱梁温度梯度研究[J]. 桥梁建设,2020,50(5):44-49.

[14] 马先坤. 大跨径预应力混凝土连续箱梁桥温度场与温度梯度效应分析[D]. 西安:长安大学, 2017.

[15] 薛俊青, 林健辉, Bruno Briseghella, 等. 箱内边界模拟方法对箱梁截面温度场的影响研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 52-57.

[16] 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.

[17] 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB50019-2015[S]. 北京: 中华计划出版社, 2016.

[18] 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.

[19] 王亚飞,杨宏印,王莹,等. 钢箱梁竖向温度梯度模式研究——以武汉市某高架桥钢箱梁为例[J].武汉工程大学学报,2021,43(2):202-206.

本文编辑:张 瑞