

文章编号:1674-2869(2021)02-0202-05

# 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

王亚飞<sup>1,2</sup>, 杨宏印<sup>\*1,3</sup>, 王莹<sup>4</sup>, 郝静<sup>3</sup>, 徐丰<sup>3</sup>, 柏超<sup>3</sup>

1. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北 武汉 430034;
2. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034;
3. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074;
4. 武汉临空经济区建设投资开发集团有限公司, 湖北 武汉 430000

**摘要:**对武汉市某钢箱梁桥进行温度监测,基于2018年7-9月的实测气象数据计算了钢箱梁的温度场,采用TAITHERM软件建立了其温度场模型,发现计算值与温度监测值变化趋势基本一致。结果表明:日最大竖向温度梯度分布为非线性分布,与《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中的线性分布存在一定差异;日最大竖向温度梯度分布在距顶板50 cm范围内变化明显,分布曲线呈指数形式。通过极值理论发现广义极值分布可以很好的拟合最大温差值,进而确定了设计基准期内武汉地区钢箱梁竖向温度梯度的分布模式。文中的研究方法可用于分析其他地区桥梁结构的温度梯度分布。

**关键词:**桥梁;监测数据;温度分布;钢箱梁;竖向温度梯度

中图分类号:U448.36

文献标识码:A

DOI:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.201912003

## Vertical Temperature Gradient Model of Steel Box Girder: Taking Steel Box Girder of Viaduct in Wuhan as Study Case

WANG Yafei<sup>1,2</sup>, YANG Hongyin<sup>\*1,3</sup>, WANG Ying<sup>4</sup>, HAO Jing<sup>3</sup>, XU Feng<sup>3</sup>, BAI Chao<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory for Health and Safety of Bridge Structures, Wuhan 430034, China;
2. China Railway Bridge Science Research Institute, Ltd, Wuhan 430034, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
4. Wuhan Airport Economic Zone Construction Investment and Development Group Co., Ltd, Wuhan 430000, China

**Abstract:** The temperature of a steel box girder bridge in Wuhan was measured, and its temperature field was calculated with the meteorological data from July to September in 2018, then its temperature field model was constructed by using TAITHERM software. It is found that the variation trend of the calculated values is basically consistent with that of the monitored temperature values. The results show that the daily maximum vertical temperature gradient distribution is nonlinear, which is different from the linear distribution in General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts (JTG D60—2015); the daily maximum vertical temperature gradient changes obviously within 50 cm from the roof, and the distribution curve is exponential. Through the extreme value theory, it is found that the generalized extreme value distribution can well fit the maximum temperature difference, and then the distribution mode of vertical temperature gradient of steel box

收稿日期:2019-12-04

**基金项目:**国家自然科学基金(51708429);桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(2017-04-GF);武汉市城乡建设委员会科技计划项目(201831);武汉工程大学科学研究基金(K201734)

**作者简介:**王亚飞,硕士,高级工程师。E-mail:280545999@qq.com

**\*通讯作者:**杨宏印,博士,讲师,硕士研究生导师。E-mail:yhyhust@163.com

**引文格式:**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.

girder in Wuhan area in the design reference period is determined. The research method can be used to analyze the temperature gradient distribution of bridge structures in other regions.

**Keywords:** bridge; monitoring data; temperature distribution; steel box girder; vertical temperature gradient

与传统混凝土箱梁相比,钢箱梁具有自重轻、施工速度快、刚度大等优点,因此广泛地应用于城市立体交通工程中<sup>[1]</sup>。然而,桥梁结构全生命周期都被置于自然环境中,不可避免地处于瞬态温度场状态,即不同时刻太阳辐射、气温等环境因素的变化使结构的不同部位处于不同的温度状态<sup>[2-3]</sup>。不均匀的温度分布下,结构由于内、外部约束不能自由膨胀或收缩,必将产生温度应力<sup>[4]</sup>。这种温度应力能达到甚至超过汽车荷载产生的应力,甚至影响桥梁的安全运营<sup>[5]</sup>。由于钢材导热性好、对温变更敏感,温度作用对钢结构的影响更为显著<sup>[6]</sup>,因此,对钢箱梁的温度场进行广泛而深入的研究显得尤为迫切。

温度作用下竖向温度梯度对结构的影响最大,所以国内外设计规范中一般将温度作用简化为竖向温度梯度来指导桥梁设计<sup>[7]</sup>。国内外学者对箱梁的竖向温度梯度做了大量的研究工作。叶见曙等<sup>[3]</sup>通过对长江第二大桥3 d的现场观测,用最小二乘法分析观测结果,提出了公路桥梁箱梁温差计算模式;张玉平等<sup>[8]</sup>通过分析江东大桥的实测数据,拟合出了钢箱梁日照温度梯度;Abid和Liu等<sup>[9-10]</sup>通过分析混凝土箱梁的试验结果,提出了最大温度梯度公式。然而,现有关于钢箱梁温度梯度的研究大多集中于大型钢箱梁,小跨径钢箱梁的研究相对较少,且研究成果大多为基于实测数据得到桥梁的竖向温度梯度,所以研究成果仅适用于桥址处附近的地区。我国《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)<sup>[11]</sup>规定了竖向温度梯度模式,但我国跨越了多个气候区,规范中统一的温度梯度模式与实际温度梯度分布区别有多大有待进一步研究。

本文基于武汉市某钢箱梁的温度监测数据,使用TAITHERM软件建立其三维温度场模型,采用极值方法分析其竖向温度梯度曲线的参数值,进而得到设计基准期内武汉地区钢箱梁温度梯度模式。研究方法可为深入研究其他地区、其他结构形式桥梁的温度场提供依据,并可为钢箱梁温度效应研究提供参考。

### 1 钢箱梁温度测点布置

研究对象为武汉市某三跨(35 m+45 m+35 m)

变截面连续曲线钢箱梁,跨径布置如图1所示。主梁截面为单箱双室截面,顶板宽10 m,底板宽5 m,挑臂高度由0.15 m至0.4 m呈直线变化。跨中截面梁高1.5 m,支座截面梁高2 m,底板下缘按折线变化。顶板上铺设10 cm厚高强混凝土,桥面铺装采用9 cm厚沥青混凝土。

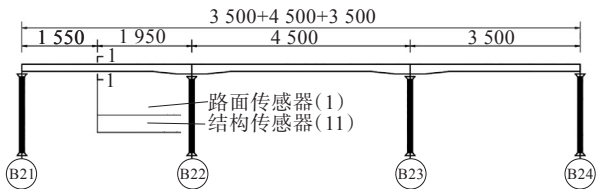


图1 桥梁跨径布置图(单位:cm)  
Fig. 1 Layout of bridge span(unit:cm)

由于桥梁是纵向狭长结构,沿桥轴线方向不同位置具有一致的温度分布形式<sup>[12]</sup>。考虑到经济性,选择在边跨跨中截面(1-1断面)布置温度传感器,每10 min进行一次温度自动采集与存储,监测截面尺寸及传感器布置见图2。梁体结构温度监测(T1-T11)使用LTM型数字温度传感器,该传感器通过温度敏感元件和相应电路转换成方便数据采集设备直接读取的温度数据;路面温度监测(IT1)使用红外温度传感器。

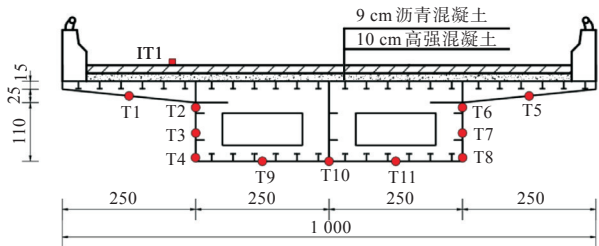


图2 桥梁截面及温度传感器布置(单位:cm)  
Fig. 2 Cross section of girder and layout of temperature sensors (unit:cm)

## 2 温度场模型建立与验证

### 2.1 模型建立

《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)<sup>[11]</sup>规定竖向梯度由桥面板计算,不包括铺装层。然而,在役桥梁较难测到桥面板表面的温度,材料的导热系数又存在差异,所以无法确定桥面板处的温度分布。为较准确地确定该桥桥面板处的温度分布,有必要用可靠的精细化模型来计算。然而,现有研究<sup>[13]</sup>关于桥梁结构温度场的模拟大多用静

态的温度场来估计温度荷载,将热边界条件等效为热物理方程作用于数值模型上,并未考虑风速、辐射的多次反射、空气湿度等影响因素。因此,亟需一种能够更合理地考虑各种自然环境因素的桥梁结构温度场精细计算方法。

热处理软件 TAITHERM 可以全面模拟热传导、热对流和热辐射 3 种传热方式,同时还考虑热辐射的多次反射,具有多层次的对流换热模拟方式和方便的热传导建模方式,适用于长时间瞬态热分析。将天气文件(含逐时气温、辐射、风速、风向、湿度等气象数据)导入到软件中,便可模拟太阳辐射受地理位置、云层遮挡和散射等因素的影响。

表 1 热物性参数  
Tab. 1 Thermophysical parameters

材料	密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 / [W/(m·℃)]	比热容 / [J/(kg·K)]	反射率	对流换热系数 / [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	吸收率
Q345C	7 850	48	480	\	7	\
沥青砼	2 100	2.05	1 168	0.93	5	0.93
高强砼	2 300	2.2	920	\	\	\
涂装层	\	\	\	0.87	\	0.28

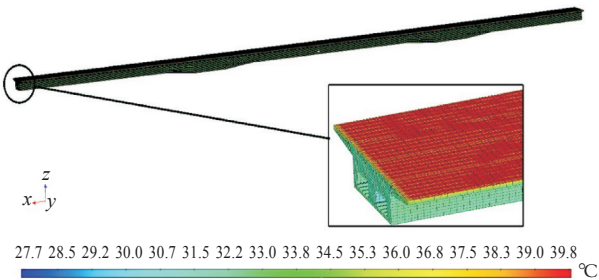


图 3 某时刻模型的温度云图

Fig. 3 Temperature distribution of model on specific time

2.2 模型验证

将桥梁结构温度计算值与实测值进行对比分析,从而验证钢箱梁温度场计算模型的合理有效性。限于篇幅,仅给出 2018 年 8 月 21-30 日(天气较晴朗)典型测点实测值与计算值的对比,见图 4。由图 4 可知,计算值和实测值变化趋势吻合良好,绝对误差基本在 3℃(10%)以内,说明基于桥址处实测气象数据建立的模型是合理可靠的。其中,各测点日最高温度发生在下午 14:00 左右,钢箱梁结构上测点(T1-T11)日最高温度达 40℃,桥面测点(IT1)日最高温度达 55℃;各测点日最低温度发生在凌晨 6:00 左右,结构上测点(T1-T11)和桥面测点(IT1)均为 25℃左右。桥面测点的日最高温度比结构测点高的多,而两者达到最高温的时刻基本接近,说明沿截面高度存在较大的竖向温差。

本文利用 TAITHERM 软件对钢箱梁的温度场进行瞬态分析。为同时保证模型的精度和效率,将箱梁划分为 33 个 part,共 135 033 个单元,每个 part 分为 6 层,part 的各层依次按实际材料及其厚度设置,箱梁表面采用白色涂装。材料的热物性参数如表 1 所示,桥址处的位置参数为东经 114°,北纬 30°,东八区,海拔 23 m。然后,导入天气文件(气象站实测桥址处气象数据)就可计算得到钢箱梁各个时刻温度场的分布。由温度实测数据可知,结构温度 1 h 内变化较小,因此计算模型的时间步长设置为 1 h。某时刻钢箱梁的温度云图见图 3。

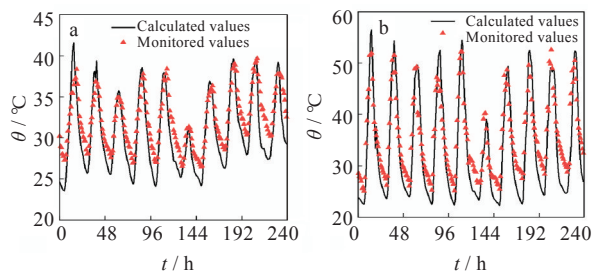


图 4 典型测点计算值与实测值温度对比:  
(a)底板测点 T10,(b)桥面测点 IT1

Fig. 4 Temperature comparison between calculated and measured values at typical points: (a) T10 measuring point of bottom plate, (b) IT1 measuring point of bridge deck

3 竖向温度梯度分析

3.1 钢箱梁实际的温度梯度模式

由于正温度梯度大于负温度梯度,而最不利正温度梯度一般出现在夏季<sup>[14-16]</sup>,因此,通过 TAITHERM 软件计算了钢箱梁 2018 年 7-9 月的温度场。其中,沿梁高方向桥面板和腹板温差的最大值出现在 7 月 30 日,具体的温度分布见图 5。由图 5 可见梁高方向结构存在较大的温差,且温差沿梁高方向呈非线性分布;也可见实际的竖向温度梯度数值在桥面板及以下一定范围内均超过规范值,说明规范限值偏不安全。由温度梯度的变化趋势可知,钢箱梁的竖向温度梯度分布在距顶板 50 cm 范围内变化较显著。因此,通过实测温度数



据来研究武汉地区钢箱梁的竖向温度梯度模式可为地区桥梁结构工程实践提供更为科学的参考。

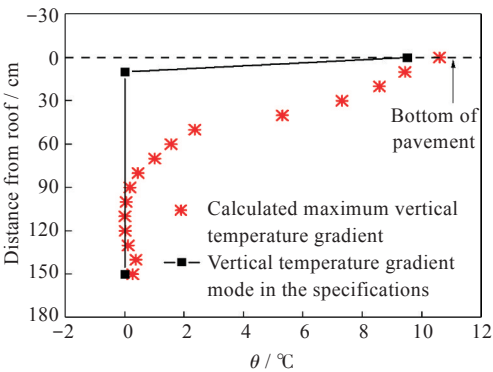


图5 计算的温度梯度分布与规范对比

Fig. 5 Comparison of distribution of calculated temperature gradient and specifications

3.2 钢箱梁的温度梯度模式

由于钢箱梁的温度梯度分布形状与我国铁道部规范规定的指数曲线梯度模式相似,因此假定式(1)为其竖向温度梯度的分布模式。

$$T_y = T_0 e^{-ay} \tag{1}$$

式(1)中: $T_0$ 为箱梁截面梁高方向的最大温差; $y$ 为计算点至箱梁顶面的距离; $T_y$ 为计算点位置处的温差; $a$ 为系数。由最大温差 $T_0$ 和系数 $a$ 便可确定钢箱梁的温度梯度模式。为确定 $T_0$ 值,对日最大温度梯度数据进行极值分布的参数估计,得到日最大竖向正温度梯度的分布函数见式(2)。

$$F(T_0) = e^{-(1 + 0.38 \frac{T_0 - 5.32}{2.47})^{\frac{1}{0.38}}} \tag{2}$$

为验证该分布的合理性,对该极值分布进行统计描述,得到日最大温度梯度的累计概率图,见图6。可见,广义极值分布的实测累积概率和预期累积概率相差不大,样本数据在直线周围较小的范围内变化,因此该分布较为合理。根据规范<sup>[11]</sup>中桥梁结构的设计基准期为100 a,所以气象参数的重现期 $T$ 也考虑为100 a,超越概率中设计基准

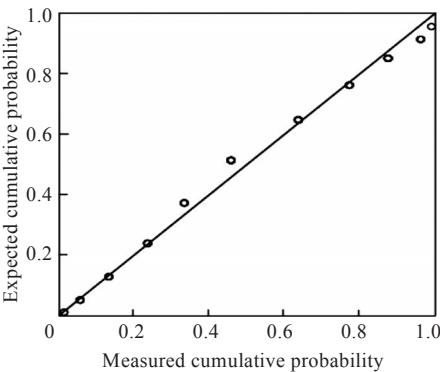


图6 日最大温度梯度累计概率图

Fig. 6 Cumulative probability curve of daily maximum temperature gradient

期与保证率的关系见式(3)。

$$P = 1 - \frac{1}{T_0} \tag{3}$$

将日最大温度梯度作为独立随机变量,当重现期 $T$ 考虑为100 a(保证率取99%)时,得到最大温差 $T_0$ 为10.7℃。晴朗天气条件下,因太阳辐射作用沿截面高度最大温差分布较稳定<sup>[2]</sup>。因此,选取竖向日最大温差大于6℃的温度梯度曲线进行拟合,系数 $a$ 的概率分布如图7所示。由图7可知, $a$ 的取值随样本数据的不同变化,其变化区间分布在2.5~3.6之间。考虑到系数 $a$ 的变化范围较小,对梯度曲线的影响不大,所以将出现在频率较大区域的中间值3.0作为 $a$ 值。

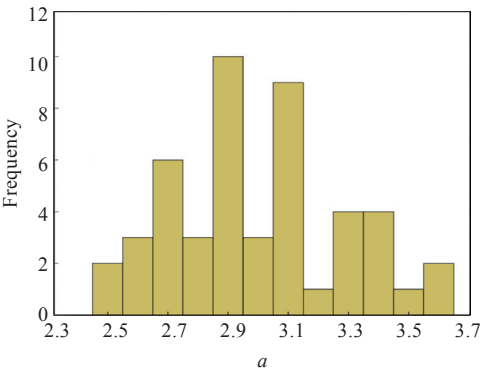


图7 系数a的概率分布图

Fig. 7 Probability distribution of coefficient a

因此,便可确定武汉地区钢箱梁的温度梯度曲线,见式(4)。

$$T_y = 10.7e^{-3y} \tag{4}$$

将文中提出的温度梯度分布模式[式(4)]与实测最大温度梯度分布和规范规定的梯度模式进行对比,如图8所示。由图8可知,与规范规定的温度梯度模式相比,本文提出的温度梯度分布模式更接近实测的最大温度梯度分布趋势,数值上略微超过规范限值。因此,本文提出的温度梯度分布模式更符合地区实际。

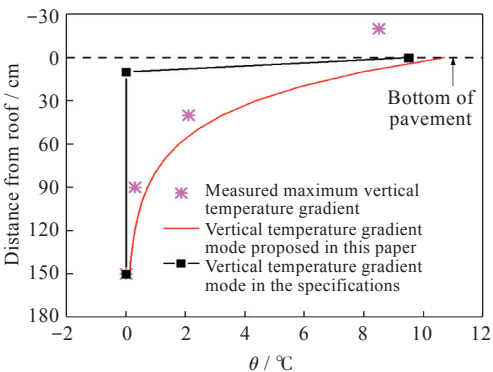


图8 温度梯度分布模式对比

Fig. 8 Comparison of temperature gradient distribution models

4 结 论

针对武汉市某钢箱梁桥,采用 TAITHERM 软件建立了其温度场模型,进而研究了其竖向温度梯度分布模式,得到以下结论:

1)桥梁结构温度计算值与实测值变化趋势基本一致,说明基于气象数据建立的钢箱梁温度场计算模型是合理有效的。

2)统计钢箱梁的日最大竖向温度梯度,发现实际梯度分布形状为非线性,与规范中的线性分布存在一定的差异;参数为(-0.38,2.47,5.32)的广义极值分布可以很好地拟合日最大温度梯度数值。

3)以 100 a 为重现期计算出了梯度曲线参数的极限值,得到了武汉地区钢箱梁竖向温度梯度的分布模式为  $T_y = 10.7e^{-3y}$ 。

4)本文研究方法也适用于确定不同地区、其他类型钢箱梁竖向温度梯度分布模式,只需根据当地实测气象数据建立温度场时空模型,进而由温度数据得到  $T_0$  和  $a$  值,即可得到梯度的分布模式。

参考文献

[1] 沈聪,高培伟,张辉. 钢箱梁大桥桥面铺装温度场有限元分析研究[J]. 公路工程,2018,43(3):21-25.

[2] 刘海弯. 基于概率统计的大跨径连续刚构桥梁温度梯度及温度效应研究[D]. 西安:长安大学,2016.

[3] 叶见曙,贾琳,钱培舒. 混凝土箱梁温度分布观测与研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2002,32(5):788-793.

[4] 葛耀君,翟东,张国泉. 混凝土斜拉桥温度场的试验研究[J]. 中国公路学报,1996,9(2):76-83.

[5] TONG M, THAM L G, AU F T K, et al. Numerical modeling for temperature distribution in steel bridges [J]. Computer & Structures, 2001, 79(6):583-593.

[6] 田黎敏,郝际平,王媛,等. 大跨空间结构温度效应分

析与合拢温度研究[J]. 土木工程学报,2012,45(5):1-7.

[7] 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.

[8] 张玉平,杨宁,李传习. 无铺装层钢箱梁日照温度场分析[J]. 工程力学,2011,28(6):156-162.

[9] ABID S R, TAYŞI N, ÖZAKÇA M. Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders [J]. Construction and Building Materials, 2016,106:523-532.

[10] LIU J, LIU Y J, ZHANG G J. Experimental analysis of temperature gradient patterns of concrete-filled steel tubular members [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(11):1-19.

[11] 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.

[12] 徐祯耀. 曲线钢箱梁桥温度场及其效应分析[D]. 杭州:浙江大学,2016.

[13] 谢旭,张海萍,肖新辉. 考虑沥青路面影响的钢箱梁桥日照温度场数值模拟[J]. 公路与汽运,2017(5):131-134.

[14] 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.

[15] YU Z W, XIE Y, TIAN X Q. Research on mechanical performance of CRTS III plate-type ballastless track structure under temperature load based on probability statistics [J]. Advances in Civil Engineering, 2019:2975274:1-16.

[16] 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, 2020:9572602:1-10.

本文编辑:苗 变