

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.018

大跨径单箱双室箱梁桥温度梯度研究

杨文斌

(中铁十二局集团有限公司,山西太原 030024)

摘要:该文旨在针对单箱双室箱梁温度效应复杂的问题,依托跨径布置为(120+120) m的矮塔单箱双室斜拉桥,开展箱梁截面温度梯度研究。通过在大里程合龙段截面布置21个温度传感器,设置采集频率为1次/h的方式,数据采集使用无线采集模块,进行了为期171 d的温度观测,得到了合龙段截面温度梯度分布规律。研究表明:箱梁梁体温差与大气温度温差密切相关,箱梁梁体平均温度与大气温度变化趋势相同,箱梁梁体最高、最低平均温度和相应的大气最高、最低温度的相关系数 R 分别为0.958、0.931,箱梁梁体温差与大气温度相关性较高。此外,该文基于整体温差最大时刻16:00时的实测温差和预测最大温差开展温度梯度研究,提出了考虑每日太阳总辐射(I)、每日大气温差(T)及每日平均风速(w)的箱梁截面竖向整体温度梯度预测公式,并与文献预测公式对比,证明了该文预测公式的有效性。最后,针对测试截面的顶板部位横向最大温差为4.54℃、底板部位横向最大温差为1.99℃的问题,进一步提出了箱梁顶板和底板部位横向温度梯度预测公式,并发现其相关系数分别为0.819、0.851。

关键词:桥梁工程;单箱双室箱梁;温度分布;现场试验;温度梯度

中图分类号:U441

文献标志码:A

0 引言

桥梁结构暴露在自然环境中,由于其环境温度以及日照等作用,桥梁表面温度迅速上升或下降,于是在桥梁结构中形成较大的温差,桥梁结构的各部分处于不同温度状态,由此产生的温度变形,当被结构的约束阻碍时,会产生较大的温差应力,有时甚至比活载产生的应力还要大,不少预应力混凝土桥梁因此发生开裂,给桥梁结构带来很大危害。

目前对于温度场的研究主要集中在普通混凝土桥梁和钢桥中。Kim等^[1]研究了斜拉桥在施工过程中钢箱梁温度分布的变化规律,采用简单的数值方法来预测钢箱梁中温度分布的近似变化;Tong等^[2]通过建立钢桥温度分布数值模型,分析各种参数对温度分布的影响,并将计算结果与缩尺模型进行比较;叶见曙等^[3]对混凝土箱梁进行了研究,建立了竖向及横向最大温度梯度计算经验公式;Song等^[4]对106 m混凝土箱梁进行三维有限元分析,研究太阳温

度梯度对大跨度桥梁施工过程的影响,得出梁的最大纵向拉应力为2.67 MPa,而横向拉应力可达4.41 MPa;Mondal等^[5]花费5年时间,对箱梁最大竖向温差和箱梁内空气温度的关系进行了回归分析;Abid等^[6]和Taysi等^[7]利用节段模型,对箱梁进行了13个月的动态监测,统计箱梁各部位温度梯度,提出经验公式来预测最大垂直和横向温度梯度,并建立三维有限元模型开展了参数分析;Ding等^[8]研究了斜拉桥扁钢箱梁的极端温差,总结了钢箱梁截面实测温差的日变化和季节变化,进一步建立了温差概率分布模型,并对极端温差进行估计;Wang等^[9]提出改进贝叶斯模型来预测温度应变的建模;Lei等^[10]采用三维有限元分析研究了单柱墩箱梁的横向和垂直温差,比较了不同支座布置的应力和位移,发现在中间桥墩使用两个固定连接支座的情况下,在横向温差和垂直温差下分别降低了46.2%和55.6%的垂直位移;Chai^[11]根据现场实测数据提出箱梁桥温度经验预测方程;Zhou等、Rodriguez等^[12-13]建立箱梁截面有限元模型,对模型进行了瞬态传热分析,得到了相应温

收稿日期:2021-12-29

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2016EEM21)

作者简介:杨文斌,男,大学本科,高级工程师.E-mail:373595817@qq.com

时间变化的温度分布,为温度效应分析提供了基础;刘永健等^[14]在任意温度分布作用下,推导了钢-混凝土组合梁界面剪力,相对滑移和温度应力理论计算公式,采用有限元模拟对考虑界面滑移的公式进行了验证;黄毅^[15]对大跨度预应力混凝土连续箱梁桥的温度场及其温度效应进行了24 h不间断现场实测,运用大型通用有限元软件Ansys建立箱梁平面模型,模拟计算箱梁温度场,并将计算结果与实测温度值进行对比分析,了解各测点的计算值与实测值吻合情况,证明使用有限元软件Ansys模拟混凝土箱梁的温度场是可行的;彭友松^[16]对混凝土箱梁等薄壁结构的三维温度应力进行了研究,提出了实用计算方法,只需运用结构力学方法即可实现考虑应力分量之间耦合关系的三维温度应力空间分析,并通过计算实例,验证了提出的三维温度应力计算方法的准确性。

国内外对混凝土箱梁的温度作用已有大量研究,但是其研究对象基本为单箱单室梁,对于单箱多室箱梁的温度场及温度效应研究较少^[17-19]。多室箱梁较单室箱梁其宽度更宽,刚度更大、截面变形自约束能力更强,因此多室箱梁的温度场效应更为复杂。

本文依托跨径布置为(120+120) m的矮塔斜拉单箱双室斜拉桥,在其合龙段截面布置21个温度传感器,并结合太阳辐射传感器和风速传感器,利用无线采集模块进行数据采集,对箱梁桥的合龙段截面开展测试,进行为期171 d的温度观测,基于现场实测数据,研究其(5—12月份)截面温度梯度变化规律。

1 箱梁桥温度测试

1.1 测试内容及布置方案

该桥是一座独塔双跨双索面有砟轨道矮塔加劲预应力混凝土T构桥,跨度为(120+120) m。截面采用单箱双室、变高度连续箱梁,中支点截面梁高7.0 m,跨中及边跨等高段梁高4.5 m,梁底下缘按二次抛物线变化。

为研究该桥箱梁截面温度分布方面的差异,选择大里程方向合龙段截面(图1)开展温度测试,测试截面梁高4.5 m,顶板宽度16.1 m,腹板高3.75 m,腹板厚度0.5 m,顶板和底板厚度均为0.4 m。测试截面共布置21个温度测点,其截面测点布置及区域划分如图2所示,其中,太阳位置示意为16:00太阳方位。

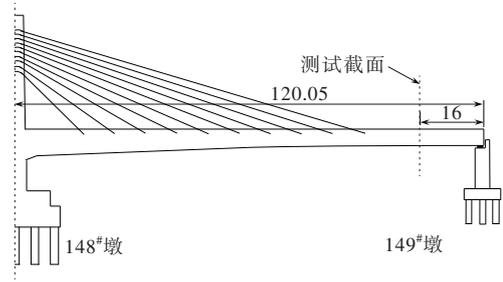


图1 测试断面布置图(单位:m)

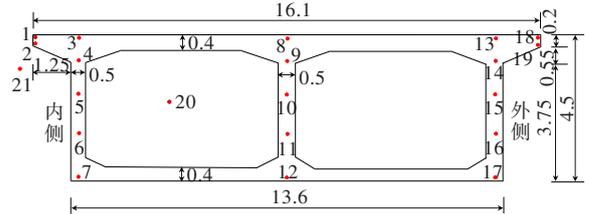


图2 测点布置(单位:m)

测试截面的温度测点采用预埋式JMT-36B智能温度传感器,除布置19个混凝土温度测点外,还布置了20、21号测点用于测试箱室内温度和环境温度,温度传感器采集频率为1次/h。

1.2 气温、风速和太阳辐射测试值

已有研究表明,影响箱梁温度梯度的主要因素为:环境温差、风速和太阳辐射,其中环境温差基于21号温度测点实测数据得出,平均风速查询全球天气网得到,每日太阳辐射总值取同地区的小清河特大桥现场实测值。测试时间为2019年6月23日至2019年12月10日,测试期间环境最高气温出现在2019年7月6日,气温为36.9℃,最低气温出现在2019年12月5日,气温为-3.6℃。测试结果如图3所示。

由图3(a)、(b)可知:大气温度随季节推移整体呈现周期性变化,同一时刻的环境最高、最低气温在夏季(0~46 d)温度最高,在冬季(138~170 d)最低。

由图3(d)可知:每日最大太阳辐射值与季节变化存在相关性,在夏季(0~46 d)温度较高时,太阳辐射值较大,在秋季(46~138 d)温度逐渐降低时,太阳辐射值随之降低,在冬季(138~170 d)时太阳辐射值最低。

2 箱梁平均温度

2.1 箱梁每日平均温度

箱梁的平均温度是箱梁不同部位各个温度的平

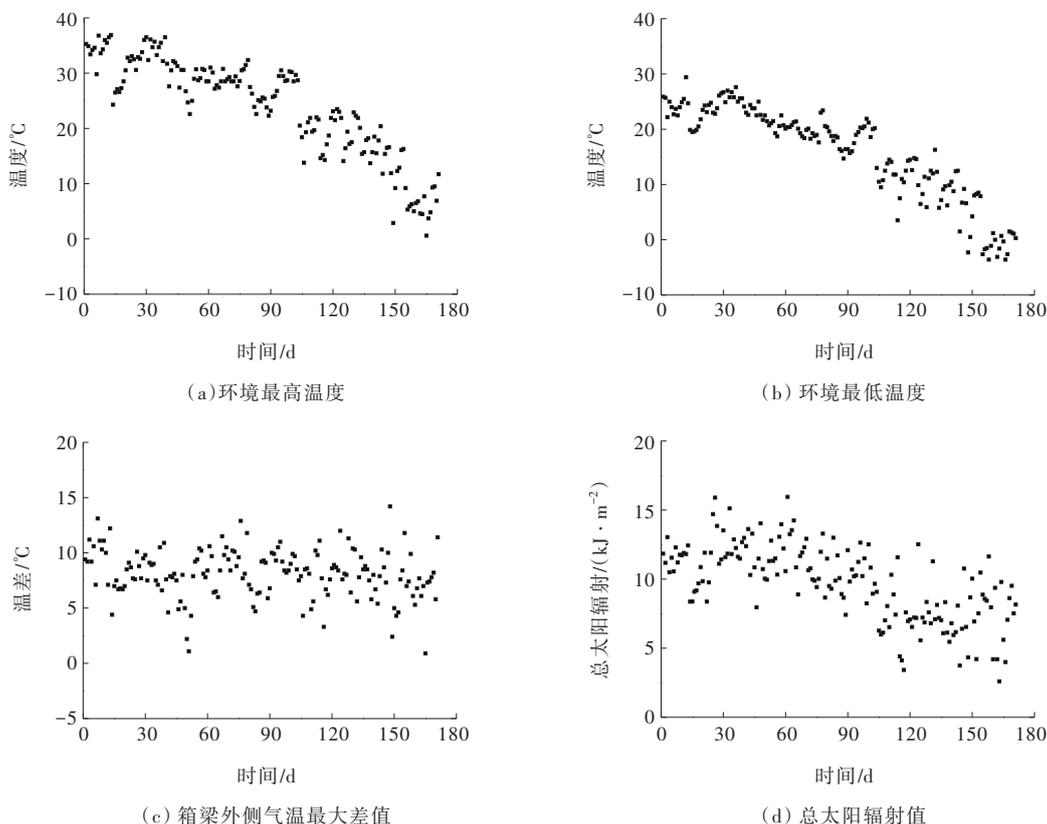


图3 测试期间(2019-06-23—2019-12-10)环境温度及总太阳辐射值

均值。在此研究测试中,箱梁平均温度的计算是通过每个温度测点的温度乘以其周围区域的乘积之和再除以箱梁截面的总面积来估算箱梁截面的平均温度,平均温度 \bar{T} 的计算公式为:

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

式中: T_i 为第*i*个温度测点的温度(°C); A_i 为第*i*个温度测点周围的截面面积(m^2)。如图4所示,将内衬混凝土截面分成7个区域,将每个区域内测点的平均温度作为该区域温度来计算箱梁截面的平均温度。

图5(a)为箱梁结构内部从2019年5月11日—2019年12月10日的每日最高平均温度,而图5(b)为相同日期对应的每日最低平均温度(夏季0~46 d,秋季46~138 d,冬季138~170 d)。为表征不同季节箱梁平均温度与环境温度的相关性,分别选取夏季(2019年7月23日)、秋季(2019年9月15日)、冬季(2019年12月8日)作为代表性日期,将所选3 d的箱梁平均温度与相同时刻的环境温度进行比较,结果如图6所示。

由图6可知:箱梁平均温度和环境温度变化趋势相同,气温对箱梁的平均温度有显著影响。在整个测试期间,每日最高平均温度范围为 $-0.5 \sim 33.6$ °C,

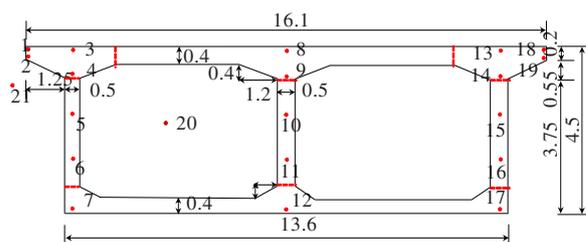


图4 截面分块示意(单位:m)

每日最低平均温度范围为 $-6.1 \sim 28.6$ °C。

2.2 箱梁最高和最低平均温度预测公式

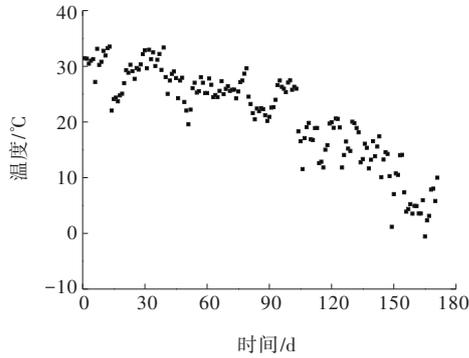
由图7可知箱梁平均温度和外侧环境温度有着相同的变化趋势,为定量评估桥梁平均温度和外侧环境温度关系,提出箱梁平均温度和外侧环境温度预测公式:

$$\bar{T}_{\max} = 0.909T_{\max} - 0.585 \quad (2)$$

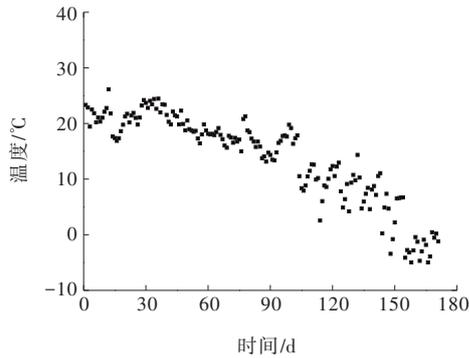
$$\bar{T}_{\min} = 0.929T_{\min} - 1.202 \quad (3)$$

式中: \bar{T}_{\max} 为箱梁最高平均温度(°C); \bar{T}_{\min} 为箱梁最低平均温度(°C); T_{\max} 为环境最高温度(°C); T_{\min} 为环境最低温度(°C)。

由图7可知箱梁每日最高平均温度和最高环境温度的线性相关程度较高, \bar{T}_{\max} 和 T_{\max} 之间的相关系



(a) 箱梁每日最高平均温度



(b) 箱梁每日最低平均温度

图5 测试期间(2019-05-11—2019-12-10)箱梁每日平均温度

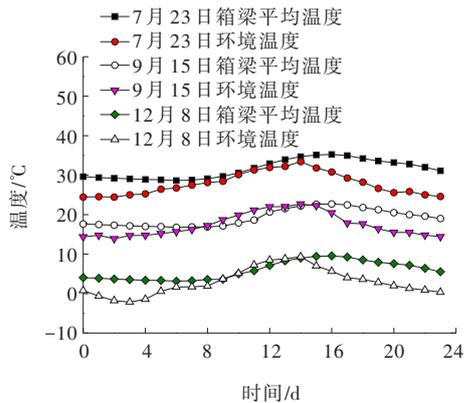


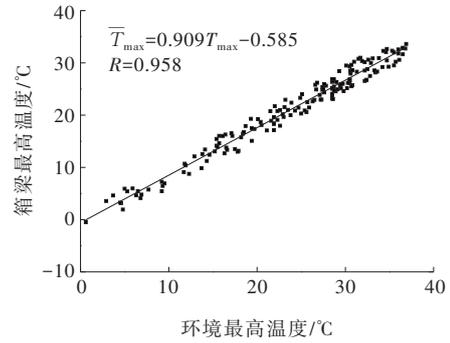
图6 箱梁平均温度和外侧环境温度对比

数 R 值为 0.958; 同时, 箱梁每日最低平均温度与和最低环境温度的线性相关程度较高, \bar{T}_{\min} 和 T_{\min} 之间的相关系数 R 值为 0.931, 故可以认为箱梁的平均温度与外界环境气温高度相关。

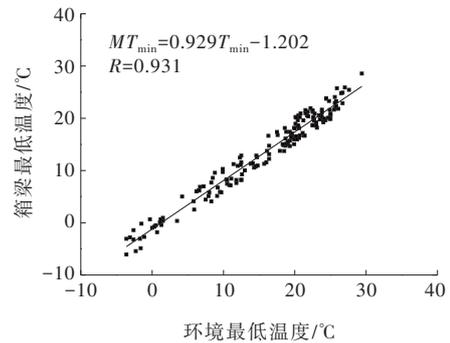
3 箱梁温度梯度

3.1 每日最高温度梯度测试值

本文中“温度梯度”指的是沿指定截面竖向或横



(a) 最高平均温度和最高环境温度



(b) 最低平均温度和最低环境温度

图7 箱梁每日平均温度

向的温差, 图8为从2019年6月23日至2019年12月10日期间每日最高垂直和横向温度梯度(夏季0~46 d, 秋季46~138 d, 冬季138~170 d)。通过桥梁各部位所有测点温度减去最低测点温度来计算温度梯度。沿其腹板高度方向来计算垂直温度梯度, 而横向温度梯度则是沿着顶板和底板水平方向进行计算。根据每日最大温度梯度和环境温度、每日平均风速和每日总太阳辐射值拟合简化公式, 进而预测垂直和横向温度梯度。

由图8可知: ① 箱梁各个部位温度梯度在夏季高, 在冬季则降低到较小值。这是由于夏季太阳辐射强烈, 箱梁在夏季接收到的太阳辐射也高于秋冬季节, 经过长时间的升温, 造成夏季温度梯度大于秋季和冬季; ② 顶板横向温度梯度要大于底板横向温度梯度, 显然顶板平面横向温差高于底板平面横向温差, 这是因为顶板平面受到太阳直射作用而底板平面仅受到大气温度散射作用, 顶板的升温效果相比于底板升温效果更明显; ③ 内侧腹板温度梯度 > 中间腹板温度梯度 > 外侧腹板温度梯度。

3.2 箱梁竖向温度梯度

本节中将通过每日环境温差、每日总太阳辐射值和每日平均风速来研究箱梁垂直最高温度梯度,

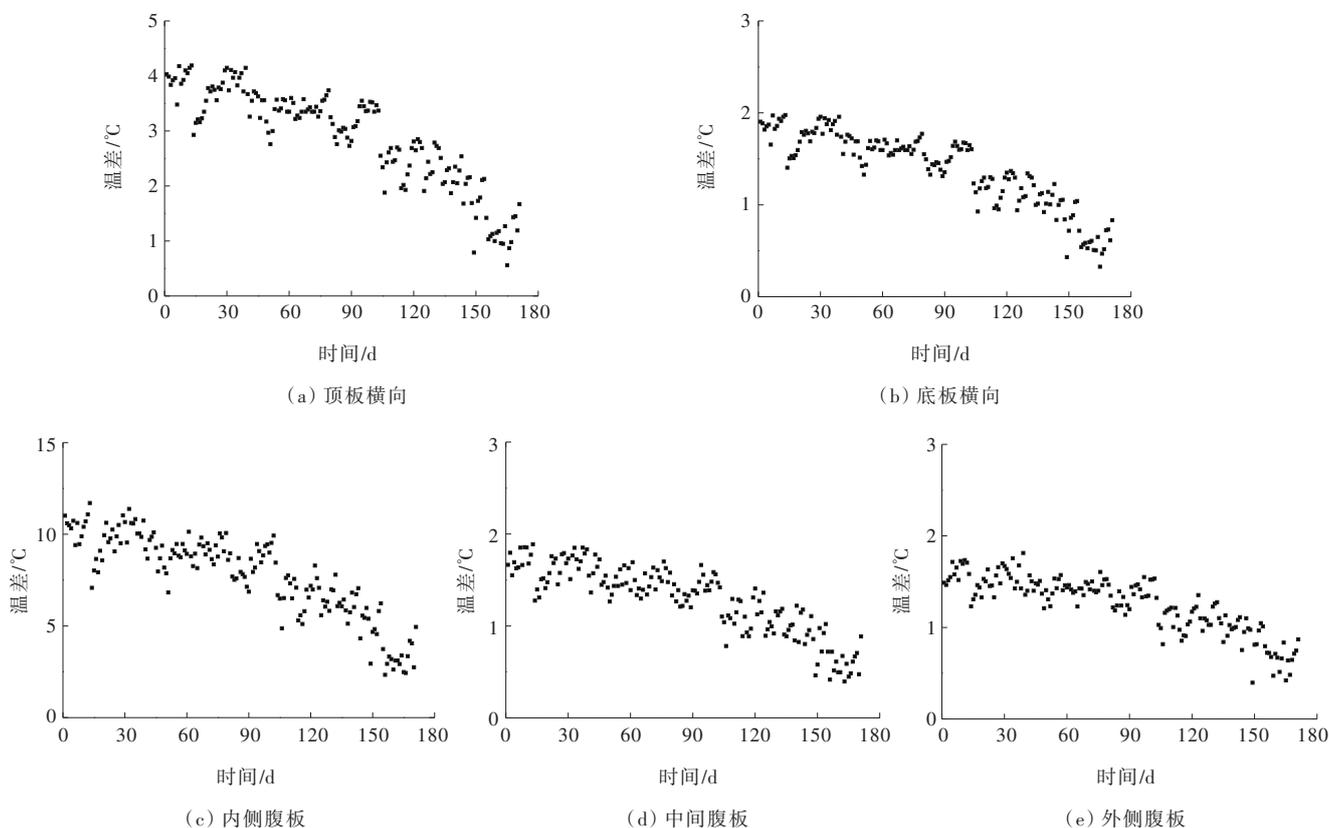


图 8 测试期间(2019-06-23—2019-12-10)各部位每日最大温差

使用从试验实测值拟合得到的预测公式来评估箱梁截面的垂直最高温度梯度,为确定预测公式表达形式,参考 Abid^[6]、Pottier^[20]、Roberts-Wollman^[21]和 Lee^[22]研究,确定本文预测公式为每日环境温差(T)最高次数一次、每日总太阳辐射(I)最高次数一次和每日平均风速(w)最高次数二次的表达形式。

将 171 d 实测最大温差数据与每日最高环境温度温差(T),每日总太阳辐射(I)以及每日平均风速(w)拟合成预测内衬截面垂直最高温度梯度(T_{Ver})公式:

$$T_{\text{Ver}} = 0.38262 + 1.22452T - 0.04261I - 0.02505w - 0.00582w^2 \quad (4)$$

Abid^[6]建立节段箱梁模型,对箱梁模型进行动态监测,根据每日太阳总辐射(I),每日气温差(T)和每日平均风速(w)建立了箱梁截面垂直最大温度梯度预测公式为:

$$T_{\text{Ver}} = 2.57 + 0.181T + 0.534I - 0.00269I^2 - 1.32w + 0.208w^2 \quad (5)$$

Pottier^[20]针对无桥面铺装层的情况提出预测温差公式,以评估最大的垂直温度梯度,公式是根据每日太阳总辐射(I),混凝土表面的太阳吸收率(α),每日气温差(T)和每日平均风速(w)建立,提出

的公式为:

$$T_{\text{Ver}} = 28.2 \left[\frac{I \cdot \alpha}{29.089} - 0.7 \right] + 0.342(T - 11.1) + V \quad (6)$$

$$V = 32.3 - 4.84w + 0.771w^2 - 0.088w^3 + 0.00463w^4 \quad (7)$$

Roberts-Wollman^[21]在 2002 年提出了一个简化公式,根据每日最高气温(T_{max})预测最大垂直温度梯度。公式根据 3 d 的平均气温($3T_{\text{ave}}$)和日总太阳辐射量(I)建立,提出的公式为:

$$T_{\text{Ver}} = 0.9[T_{\text{max}} - 3T_{\text{ave}}] + 0.56(I - 12) \quad (8)$$

Lee^[22]在 2012 年使用预制混凝土梁的二维有限元热分析来评估最大垂直温度梯度。该公式是根据日最高(T_{max})和日最低(T_{min})气温,日总太阳辐射量(I)和日平均风速(w)进行计算的,提出的公式为:

$$T_{\text{Ver}} = \frac{3}{4}I + \frac{1}{15}(T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) - V \quad (9)$$

$$V = 0.37 + 2.93w - 0.25w^2 + 0.008w^3 \quad (10)$$

将现场测试数据进行统计,并代入式(4)~(10)计算,其中本文梁高为 5 m,对比桥梁截面如图 9 所示, Abid^[6]、Pottier^[20]、Roberts-Wollman^[21]、Lee

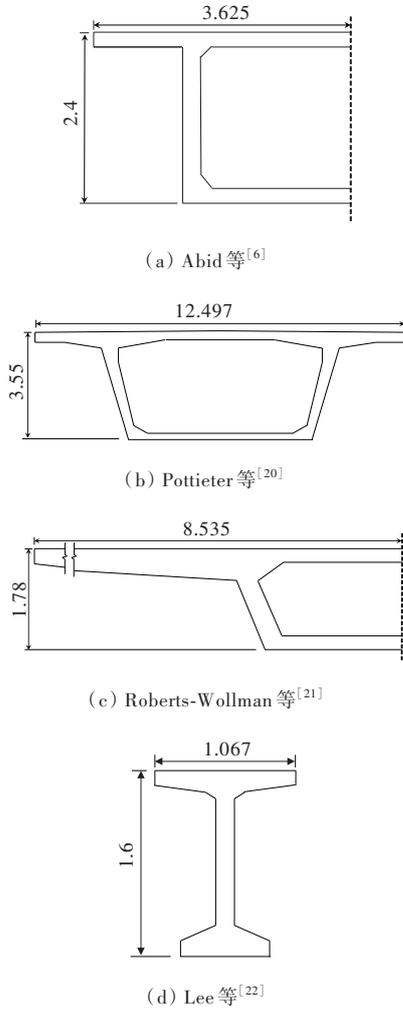


图9 对比桥梁截面(单位:m)

等^[22]研究梁高分别为2.4 m、3.55 m、1.78 m、1.6 m。

为了比较预测公式的准确性,使用实测和预测值的相关系数(R)、预测值/实测值的均值(A_{ave})及预测值/实测值的样本方差(V_{var}) 3个统计变量开展分析。定义第*i*个样本的预测值 X_{prep} 和实测值 X_{exp} 的比值为 D_i , A_{ave} 和 V_{var} 的定义为:

$$A_{ave} = \frac{\sum D_i}{n} \quad (11)$$

$$V_{var} = \sqrt{\frac{\sum [D_i - A_{ave}(D_i)]^2}{n - 1}} \quad (12)$$

式中: X_{prep} 为预测值; X_{exp} 为试验实测值; n 为样本数。

垂直最高温度梯度对比见图10、表1。

根据图10和表1可以看出:Abid等^[6]、Potttieter等^[20]、Roberts-Wollman等^[21]和Lee等^[22]研究结果相关性小于本文预测公式,分析其原因因为他们研究桥梁截面腹板高度均小于本文研究桥梁,导致其研究结果与本试验测试结果相关性较差。

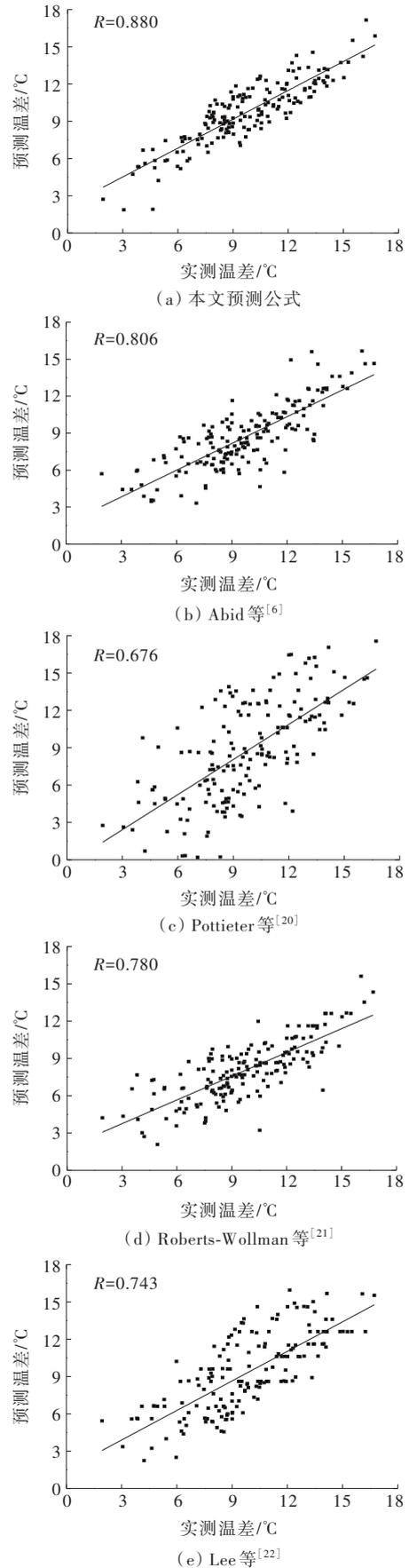


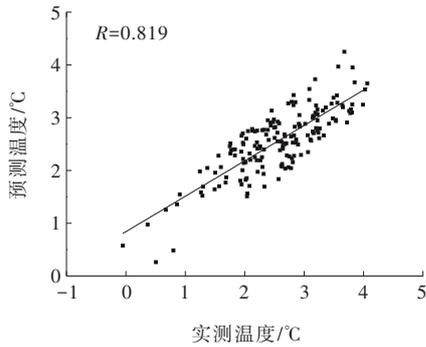
图10 垂直最高温度梯度对比

表 1 垂直最高温度梯度公式对比

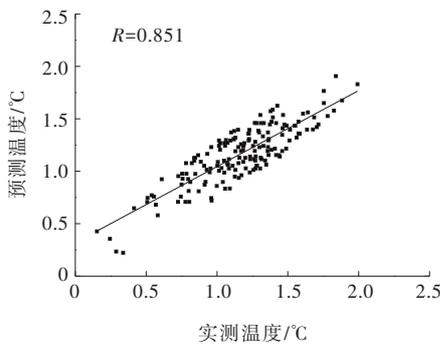
公式	R	A _{ave}	V _{var}
本文预测公式	0.880	1.023	0.170
Abid 等 ^[6]	0.806	0.924	0.253
Potgieter 等 ^[20]	0.676	0.902	0.365
Roberts-Wollman 等 ^[21]	0.780	0.857	0.245
Lee 等 ^[22]	0.743	0.976	0.289

3.3 箱梁横向温度梯度

箱梁横向温差对箱梁的横向热变形和应力具有重要影响,但目前研究有限,未能揭示箱梁顶板横向温度变化规律。参照竖向温差研究思路,将实测顶板、底板温度数据用于计算顶板、底板横向最大温差,从而确定简化的横向最大温差预测公式,研究箱梁横向温度变化规律。顶板部位横向最大温差结果见图 11。



(a) 顶板横向



(b) 底板横向

图 11 顶、底板部位横向最大温差

顶板部位每日横向温度梯度预测公式为:

$$T_{ver} = 0.09713 + 0.30952T - 0.0191I - 0.0058\omega + 0.00119\omega^2 \quad (13)$$

底板部位每日横向温度梯度预测公式为:

$$T_{ver} = 0.16684 + 0.12737T + 0.00025I - 0.01103\omega - 0.0001\omega^2 \quad (14)$$

统计预测拟合公式的特征参数结果参见表 2。

表 2 横向最大温差比较

位置	R	A _{ave}	V _{var}
顶板横向	0.819	1.018	0.284
底板横向	0.851	1.034	0.221

根据图 11 及表 2 可以看出:① 测试截面的顶板横向最大温差为 4.54 °C,底板横向最大温差为 1.99 °C,这是由于箱梁顶板直接受到太阳辐射作用,而底板部处于背阴面,不受太阳辐射影响,因此在顶板部位产生远大于底板部位的横向温差;② 顶板横向与底板横向温差预测公式的相关系数 R 分别为 0.819、0.851,顶、底板横向部位预测值与实测值比值的均值 A_{ave} 分别为 1.018、1.034,其比值方差 V_{var} 分别为 0.284、0.221,故顶板、底板横向预测公式相关性很好,证明了预测公式的有效性。

4 结论

通过大量实测数据对单箱双室箱梁桥的截面温度梯度分布规律进行研究,建立考虑桥址位置的太阳辐射值、风速和大气温差与梁体温度分布计算公式,将本文竖向温度梯度预测公式与其他相关文献^[6,20-22]预测公式对比,得到以下结论:

(1) 箱梁梁体温差与大气温度温差密切相关。基于大量实测数据表明:箱梁梁体平均温度与大气温度变化趋势相同,箱梁梁体平均温度和大气温度的相关系数 R 分别为 0.958、0.931,表明箱梁梁体温差与大气温度相关性较高。

(2) 选取整体温差最大时刻 16:00 的实测温差和预测最大温差开展温度梯度研究,提出考虑每日太阳总辐射(I)、每日大气温差(T)及每日平均风速(ω)的箱梁截面竖向整体温度梯度预测公式,并与其他相关预测公式对比,发现箱梁高度对拟合公式精度影响较大,本文预测公式有最高的相关系数和最低的偏差,故本文预测公式相关性很好,证明了公式的有效性。

(3) 测试截面的顶板部位横向最大温差为 4.54 °C,底板部位横向最大温差为 1.99 °C,是由于箱梁顶板直接受到太阳辐射作用,而底板部位处于背阴面,不受太阳辐射影响,因此在顶板部位将会产生远大于底板部位的横向温差,进一步提出箱梁顶板和底板

部位横向温度梯度预测公式,顶板部位和底板部位预测公式的相关系数分别为0.819、0.851,故顶板、底板横向温度梯度预测公式相关性良好,可有效预测顶板、底板实际温度梯度。

参考文献:

- [1] KIM S H, PARK S J, WU J X, et al. Temperature variation in steel box girders of cable-stayed bridges during construction[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 112: 80-92.
- [2] TONG M, THAM L G, AU F T K, et al. Numerical modelling for temperature distribution in steel bridges[J]. *Computers & Structures*, 2001, 79(6): 583-593.
- [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] SONG X M, MELHEM H, LI J, et al. Effects of solar temperature gradient on long-span concrete box girder during cantilever construction[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(3): 04015061.
- [5] MONDAL P, DEWOLF J T. Development of computer-based system for the temperature monitoring of a post-tensioned segmental concrete box-girder bridge[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007, 22(1): 65-77.
- [6] 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.
- [7] TAYŞI N, ABID S. Temperature distributions and variations in concrete box-girder bridges: Experimental and finite element parametric studies[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2015, 18(4): 469-486.
- [8] DING Y L, WANG G X. Estimating extreme temperature differences in steel box girder using long-term measurement data[J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(9): 2537-2545.
- [9] WANG H, ZHANG Y M, MAO J X, et al. Modeling and forecasting of temperature-induced strain of a long-span bridge using an improved Bayesian dynamic linear model [J]. *Engineering Structures*, 2019, 192: 220-232.
- [10] LEI X A, JIANG H W, WANG J E. Temperature effects on horizontally curved concrete box-girder bridges with single-column piers[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(3): 04019008.1-04019008.14.
- [11] CHAI Y H. Temperature gradients in lightweight aggregate concrete box-girder bridges[J]. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 2013, 6(3): 199-210.
- [12] ZHOU L R, WANG L, OU J P, et al. Temperature numerical analysis of a large rigid-continuous concrete bridge[C]//*SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. Proc SPIE 9437, Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2015, San Diego, California, USA. 2015, 9437: 467-475.*
- [13] RODRIGUEZ L E, BARR P J, HALLING M W. Temperature effects on a box-girder integral-abutment bridge[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2014, 28(3): 583-591.
- [14] 刘永健,刘江,张宁,等.钢-混凝土组合梁温度效应的解析解[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(4): 9-19.
- [15] 黄毅.混凝土连续箱梁日照温度场及温度效应研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [16] 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.
- [17] 潘旦光,郭馨远,丁民涛,等.单箱三室混凝土箱梁温度分布研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 513-520.
- [18] 邹波,滕念管.混凝土单箱双室磁浮轨道梁的日照温度场分布研究[J]. *铁道标准设计*, 2019, 63(4): 96-101, 106.
- [19] 盛焰正,刘国坤,赵海军.单箱多室混凝土箱梁结构的温度场预测[J]. *中外公路*, 2018, 38(4): 106-110.
- [20] POTGIETER I C, GAMBLE W L, et al. Response of highway bridges to nonlinear temperature distributions[D]. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1983.
- [21] ROBERTS-WOLLMAN C L, BREEN J E, CAWRSE J. Measurements of thermal gradients and their effects on segmental concrete bridge[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2002, 7(3): 166-174.
- [22] 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): 447-459.