

文章编号: 1000-4750(2011)06-0156-07

# 无铺装层钢箱梁日照温度场分析

\*张玉平<sup>1</sup>, 杨 宁<sup>2</sup>, 李传习<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南, 长沙 410114; 2. 镇江市航道管理处, 江苏, 镇江 212003)

**摘 要:** 针对我国桥涵设计规范未给出无铺装层钢箱梁日照温度梯度和采用实测方法确定其温度梯度工作量大的不足, 根据热传导和有限元基本原理, 应用 ANSYS 建立了江东大桥自锚式悬索桥一段无铺装层钢箱梁三维模型, 求解了其温度梯度, 并经现场实桥测试, 实测值与计算值吻合较好。对钢箱梁日照温度场影响因素进行参数敏感性分析, 发现吸收率对温度场计算影响最大, 风速次之, 辐射率影响最小。以江东大桥钢箱梁日照温度梯度实测数据为基础, 采用指数函数加一次函数的形式对钢箱梁日照温度梯度进行了拟合, 验证了拟合公式也适用于广州东沙大桥斜拉桥钢箱梁日照温度场的模拟, 可推广应用于我国桥梁无铺装层钢箱梁温度梯度的确定。指出在桥梁结构分析时按照英国 BS5400 规范确定我国桥梁无铺装层钢箱梁温度场可能存在与实际情况较大差别的现象。

**关键词:** 桥梁工程; 温度场; 拟合; 钢箱梁; 温度梯度

**中图分类号:** U448.36; U448.21<sup>+3</sup>      **文献标识码:** A

## RESEARCH ON TEMPERATURE FIELD OF STEEL BOX GIRDER WITHOUT PAVEMENT CAUSED BY THE SOLAR RADIATIONS

\*ZHANG Yu-ping<sup>1</sup>, YANG Ning<sup>2</sup>, LI Chuan-xi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2. Zhenjiang Channel Management, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China)

**Abstract:** In design specifications for highway bridges and culverts of China, no solar thermal gradient is provided for the steel box girder without pavement, as a result, the solar thermal gradient has to be measured on site, which is a heavy work. This paper established a three-dimensional model for a section of the JiangDong Bridge steel box girder without pavement using ANSYS. The temperature field was calculated according to principles of heat conduction. The calculated temperature field at the scene of JiangDong Bridge coincides better with the measured one. Sensitivity analysis was carried out to study the effects of various parameters on the temperature field. The study shows that the absorptivity has the most significant effects on the temperature distribution, the wind speed and the emissivity also have some effects. Based on the measured data of JiangDong Bridge, the formula of exponential function and the linear function are adopted to model the vertical temperature gradient of the steel box girder without pavement. It proves that the fitting formula can also be applied to the solar thermal gradient of DongSha Bridge steel box girder, and can be applied further to the solar thermal gradient field of similar bridges in China. It is finally pointed out British Standard BS5400 may introduce large errors in analyzing the solar thermal gradient field of bridge structures in china.

**Key words:** bridge engineering; temperature field; fitting; steel box girder; temperature gradient

收稿日期: 2009-11-18; 修改日期: 2010-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778024); 交通部应用基础项目(2008-329-825-040); 长沙理工大学桥梁与隧道工程省重点学科基金项目(10CA09)

作者简介: \*张玉平(1976—), 男, 辽宁人, 副教授, 博士生, 从事桥梁工程的教学和科研研究(E-mail: zyp5032@163.com);

杨 宁(1985—), 男, 江苏人, 助工, 硕士, 从事桥梁工程的科研研究(E-mail: yangningcsu@126.com);

李传习(1963—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 院长, 博导, 从事桥梁工程的教学和科研研究(E-mail: lichuanxi2@163.com).

日照温度变化对桥梁结构影响显著,对日照温度变化引起的结构响应进行分析的前提和关键是合理确定其温度场。我国的《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2004)只给出了有铺装层混凝土主梁和钢-混叠合梁的日照温度梯度<sup>[1]</sup>。对施工中的钢箱梁而言,因钢箱梁的某些面板直接受太阳照射,钢材导热性能好,温度影响更加显著<sup>[2-3]</sup>。

目前,国内外对于混凝土箱梁温度梯度研究较多,而对于钢箱梁温度梯度的研究不多,对无铺装层钢箱梁温度梯度的研究就更少。文献[4]仅根据一座桥梁无铺装层钢箱梁温度场的实测数据提出了钢箱梁日照温度梯度模式,该模式只适用于桥位所在地区。文献[5]和文献[6]也涉及到了施工阶段无铺装层钢箱梁温度场的问题,但其研究主要偏重于考察日照温差对施工阶段结构线形和内力的影响,并未给出无铺装层钢箱梁温度场的梯度模式。目前国内设计单位在对无铺装层钢箱梁进行结构分析时,一般是参照英国规范 BS-5400 的规定来计入竖向温度梯度的影响,这种计入是否合适值得研究。随着钢箱梁在大跨径斜拉桥和悬索桥中日益广泛的应用,为了较准确地考虑日照温差对施工期钢箱梁线形和内力的影响,对施工阶段钢箱梁日照温度场进行广泛而深入的研究显得尤为迫切。

本文以杭州江东大桥自锚式悬索桥和广州东沙大桥斜拉桥为工程背景,借助软件 ANSYS 和无铺装层钢箱梁温度的现场实测对其温度场进行计算和比较;对影响温度场分布计算的主要参数进行了敏感性分析;采用指数函数加一次函数的形式对钢箱梁竖向温度梯度进行了拟合,并对英国、美国、中国桥涵设计规范中有关钢箱梁温度梯度的规定进行了比较分析。

## 1 热传导和有限元基本原理

物体内部和表面的某一点,在某一时刻的温度  $T_i$ , 可以用下式表示:

$$T_i = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中:  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为空间笛卡尔坐标;  $t$  为时间。

物体间热量传递有三种基本方式:热传导、对流和热辐射。在固体内部的热量传递主要表现为热传导,对流和热辐射则可忽略不计。对于各向均质同性的固体,根据 Fourier 热传导的基本理论(傅里叶定律)和能量守恒定律(微元体内能的增量——表现为温度的上升等于其吸收的能量),可得导热偏

微分方程为<sup>[7]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'}{k} \right) \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为钢材密度;  $c$  为物体的比热;  $k$  为导热系数;  $q'$  为单位体积中内热源释放的热量。

钢箱梁沿桥梁纵向的热流可以忽略不计,即各截面具有一致的温度分布形式<sup>[8-9]</sup>,因此可以近似地用二维热传导问题描述钢箱梁温度场,且由于钢箱梁并无内热源,可将式(2)写成下式:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

热传导微分方程建立了物体内部的温度与时间、空间的关系。为了确定需要的温度场,还必须引入初始条件和边界条件(称为定解条件),与微分方程联立求解<sup>[10]</sup>。

初始条件是初始瞬时物体整个区域中所具有的温度已知值(在相当多的情况下已知),用公式表示为:

$$T_{t=0} = T_0(x, y) \quad (4)$$

式中,  $T_0(x, y)$  为物体的初始温度函数。

若再给出导热物体的边界条件,就可以得到式(3)的解答。在日照作用下,钢箱梁结构与外界的热交换,主要是来自与周围环境之间的对流和辐射热交换及太阳辐射的热流。根据傅里叶定律,这些钢箱梁边界上的热交换过程用下式表示<sup>[10-11]</sup>:

$$q_c + q_r + q_s = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) \quad (5)$$

式中:  $q_c$  为对流换热热流密度;  $q_r$  为热辐射换热热流密度;  $q_s$  为太阳辐射换热热流密度;  $\frac{\partial T}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial y}$  为温度梯度在直角坐标  $x$ 、 $y$  的分量;  $n_x$ 、 $n_y$  为法线的方向余弦。

$q_c$  依赖于空气的流动速度和边界、空气的温度,用公式可表示为:

$$q_c = h_c (T_a - T_s) \quad (6)$$

式中:  $h_c$  为对流热交换系数;  $T_a$  为空气的温度;  $T_s$  为结构表面温度。

$q_r$  根据 Stefan-boltzman 辐射定律可表示为:

$$q_r = c_s \varepsilon [(T^* + T_a)^4 - (T^* + T_s)^4] \quad (7)$$

式中:  $c_s$  为 Stefan-boltzman 常数,其值为  $5.677 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $\varepsilon$  为辐射率;  $T^*$  为常数,其值为 273.15,用于将  $^{\circ}\text{C}$  转换为 K。

$q_s$  可表示为:

$$q_s = \alpha I_t \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为太阳辐射吸收率;  $I_t$  为太阳直接辐射、太阳散射和地面反射强度的总和。

在空气温度  $T_a$  和太阳辐射强度  $I_t$  已知(为时间的函数)的前提下, 有了式(4)~式(8), 就可以用有限元方法求解偏微分方程式(3)。本文采用有限元软件 ANSYS 的求解思路就是如此。

## 2 有限元模型的建立

采用软件 ANSYS 进行无铺装层钢箱梁温度场的计算分析, 选用的三维热壳单元 shell57 单元可以模拟薄壁钢板传热<sup>[12]</sup>, shell57 是具有面内传热能力的三维热壳单元, 该单元有 4 个节点, 每个节点只有一个温度自由度。单元示意图见图 1。

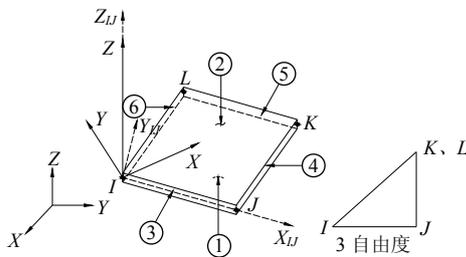


图 1 shell57 单元示意图

Fig.1 Sketch of shell57 element

在杭州江东大桥自锚式悬索桥钢箱梁中, 沿桥梁纵向选择 9.0m 长一段钢箱梁按实际尺寸建立模型, 对其进行网格划分, 单元划分见图 2 所示, 共有 12372 个节点和 14482 个单元。钢箱梁与外界发生的对流、吸收太阳辐射能量和热辐射三种热交换荷载分别施加在钢箱梁节段模型上。对钢箱梁日照温度场进行分析, 载荷随时间变化, 需用到多载荷步, 使用 Table 数组来定义荷载进行计算。根据实测数据或参考相关文献, 获取有限元建模所需的各项钢材物理参数值和热传导计算参数值见下表 1<sup>[8,10]</sup>—表 4, 并假定钢箱梁梁体初始温度均匀(均为 30℃), 当计算的第  $n$  天温度场与第  $(n+1)$  天温度场对应时刻一致或者误差可忽略不计时, 即可用第  $n$  天的计算结果作为最终的计算结果。

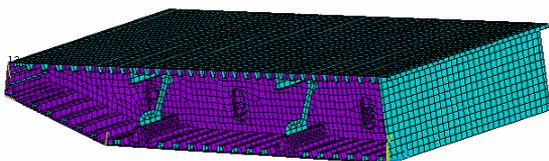


图 2 钢箱梁单元划分图

Fig.2 Element mapping of steel box girder

表 1 钢材物理参数

Table 1 Physical parameters of steel

参数	密度 $\rho/(kg/m^3)$	比热 $c/(J/(kg \cdot ^\circ C))$	导热系数 $k/(W/(m \cdot ^\circ C))$	吸收率 $\alpha$	辐射率 $\epsilon$
数值	7854	434	60.5	0.82	0.60

表 2 钢箱梁各边界不同时刻太阳辐射强度总和  $I_t$   $/(W/m^2)$

Table 2 Total solar radiation intensity of steel box girder boundary under different periods  $I_t$

时间	3:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
顶板	116.3	115.0	290.0	481.9	662.8	810.5	909.1	948.4
腹板及底板	3.9	3.3	35.0	66.4	90.8	110.8	127.5	140.8
时间	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	21:00	24:00
顶板	924.7	840.0	702.4	526.1	331.3	144.2	136.9	119.6
腹板及底板	150.0	152.5	145.0	123.9	83.1	16.1	12.9	4.7

注: 太阳辐射强度可通过太阳热量计或日射强度计进行测量, 本文通过获取的曝辐量等气象资料计算得到; 由于篇幅所限, 本文只列出江东大桥夏季太阳辐射强度总和  $I_t$  的一组计算结果。

表 3 钢箱梁各边界对流换热系数  $h_c$   $/(W/(m^2 \cdot ^\circ C))$

Table 3 Convective heat transfer coefficient of steel box girder boundary  $h_c$

时间	3:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
顶板	10.76	10.69	12.39	13.81	15.66	17.51	20.64	23.48
腹板及底板	12.30	12.20	14.48	16.37	18.84	21.30	25.47	29.26
时间	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	21:00	24:00
顶板	21.21	18.65	16.66	14.38	12.68	10.97	10.90	10.83
腹板及底板	26.23	22.82	20.16	17.13	14.86	12.58	12.49	12.39

注: 对流换热系数主要取决于经箱梁表面的实际风速、壁面粗糙度等参数, 本文中箱梁表面的风速参照了实测风速资料, 壁面粗糙度按光滑表面考虑(钢箱梁表面锈蚀程度较弱)。

表 4 桥址处大气温度  $/(^\circ C)$

Table 4 Atmospheric temperature of the bridge site

时间	3:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
梁外	31.1	30.5	31.0	32.0	34.0	35.5	36.0	36.5
梁内	32.4	31.0	30.5	31.5	33.5	35.5	37.5	40.0
时间	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	21:00	24:00
梁外	36.5	37.0	37.5	37.5	37.0	35.0	33.2	31.7
梁内	42.0	43.0	44.0	45.5	46.0	45.0	41.3	34.2

注: 大气温度采用放置在桥位附近的大气温度计进行测量; 由于篇幅所限, 本文只列出江东大桥夏季的一组温度实测数据。

## 3 计算值与实测值对比分析

在江东大桥自锚式悬索桥施工过程中, 选择下游幅钢箱梁(桥面尚未铺装)中跨跨中截面进行温度场观测, 测点布置见图 3 所示, 共布置了 21 个测点。测试元件采用铂热电阻传感器。在典型天气(指不同季节的晴天和阴天)条件下进行全天候观测, 每隔 1h 对所有测点观测一次。随机选取一组实测数据(测试时间为 2008 年 8 月 21 日)和对应有限元计算结果进行比较, 见图 4。

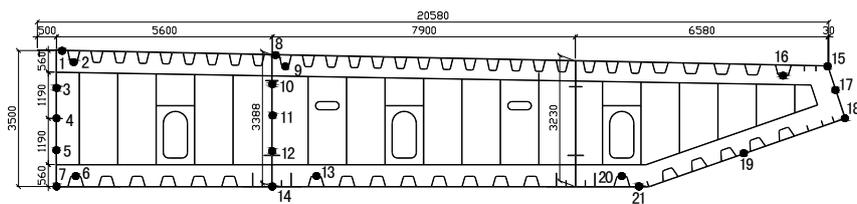


图3 江东大桥钢箱梁温度测点布置图 /mm

Fig.3 Thermal observation points position of Jiangdong Bridge

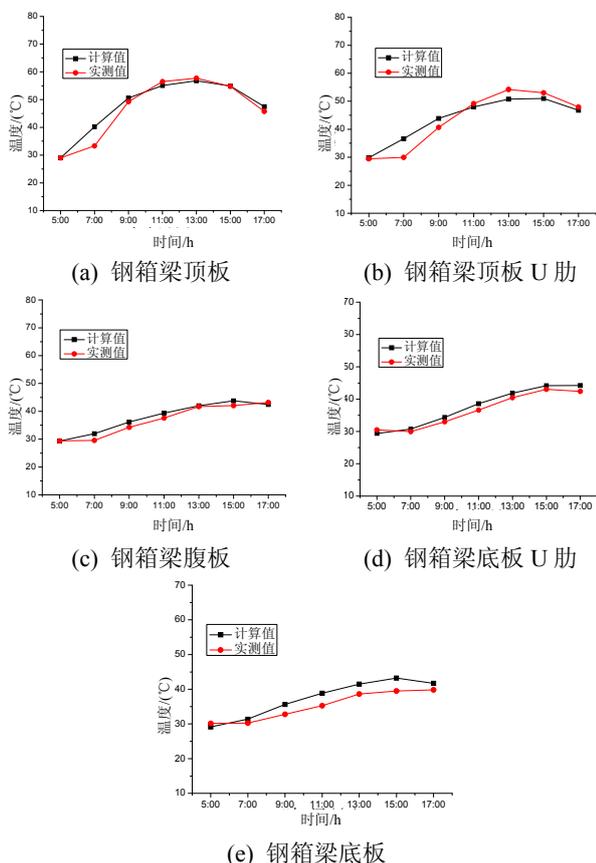


图4 钢箱梁温度变化曲线

Fig.4 Temperature curve of steel box girder

从图4可以看出,钢箱梁顶板、顶板U肋、腹板、底板和底板U肋的温度计算值和实测值均比较吻合,温度走势完全一致。

#### 4 钢箱梁日照温度场影响因素参数分析

无铺装层钢箱梁日照温度场计算模型已经实测温度场检验,可利用其计算模型对日照温度场主要影响因素进行参数敏感性分析。在无铺装层钢箱梁日照温度场影响因素中,钢材密度、比热和导热系数是钢材材料特性,离散性不大;太阳辐射强度总和可根据实测数据计算得到;钢箱梁内外大气气温由实测得到。钢箱梁边界的对流换热系数可表示成风速的正比例函数<sup>[13]</sup>;而钢箱梁边界的实际风速

一般不好实测;钢板的吸收率和辐射率与钢板表面状况有关,也不容易准确确定。因此,下面就研究这3个参数取不同值时对钢箱梁温度场的影响。其中一个参数按30%幅度增减,其他参数保持不变,分别对钢箱梁边界风速、钢板吸收率和辐射率进行参数敏感性分析。计算结果见图5。

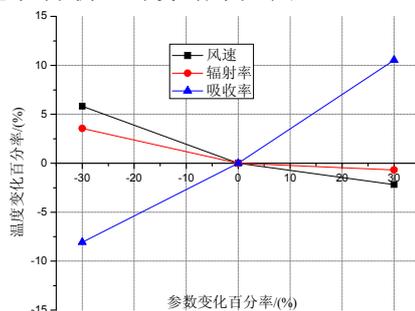


图5 参数敏感性曲线

Fig.5 Sensitivity curves of the parameters

从图5可以看出,吸收率 $\alpha$ 对无铺装层钢箱梁日照温度计算影响最大,风速 $v$ 次之,辐射率 $\epsilon$ 影响最小。吸收率决定了钢板太阳辐射的被吸收量,吸收率增大30%会导致温度增大大约10%。风速是另一个重要影响因素,风速对钢箱梁表面对流换热系数大小起决定作用。

#### 5 钢箱梁日照竖向温度梯度拟合公式

在桥梁结构分析中计入日照温度场对主梁的影响时,一般是以某一特定时刻上缘、下缘最大温差时对应的主梁竖向温度场作为温度控制荷载。为此,对春季和夏季顶板、底板温差最大时江东大桥钢箱梁(无铺装层)的各30组实测温度分别进行分析,应用最小二乘法拟合钢箱梁竖向实测温度数据。结合钢材导热性强的特点,距梁顶1m范围以内的无铺装层钢箱梁日照竖向温度梯度按式(9)进行拟合,1m范围以下部分按线性插值,如图6。在采集的60组数据中,大部分测点拟合值与实测值离散性较小,两者的差值在1°C以内;两者差值个别较大的测点,差值均在3°C以内。

$$T_y = (T_1 - T_2)e^{-\alpha y} + T_2 \quad (9)$$

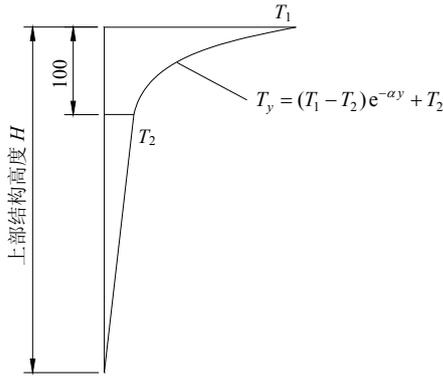


图 6 竖向温度梯度 /cm

Fig.6 Vertical temperature gradient of the steel box girder

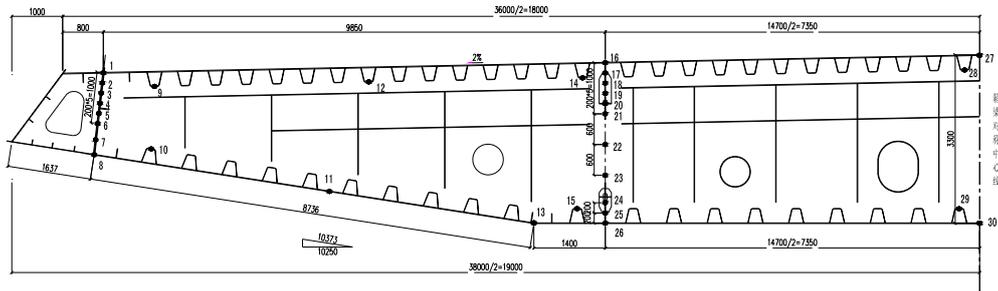


图 7 东沙大桥钢箱梁温度测点布置图 /mm

Fig.7 Thermal observation points position of Dongsha Bridge

将 2009 年春季观测的东沙大桥斜拉桥钢箱梁顶板、底板温差最大时(2009 年 5 月 5 日下午 14 : 00 时)的一组温度场数据分别代入拟合公式(9), 通过计算分析得到参数  $T_1=33$ 、 $T_2=10$ 、 $\alpha=3.7$ 。实测温度梯度曲线与拟合温度梯度曲线对比见图 8, 可以看出两条曲线基本重合。在采集的 30 组数据中, 大部分测点拟合值与实测值离散性较小, 两者的差值在 1℃ 以内; 两者差值个别较大的测点, 差值均在 3℃ 以内。表明无铺装层钢箱梁日照温度梯度拟合公式(9)也适用于广州地区钢箱梁日照温度场的模拟。

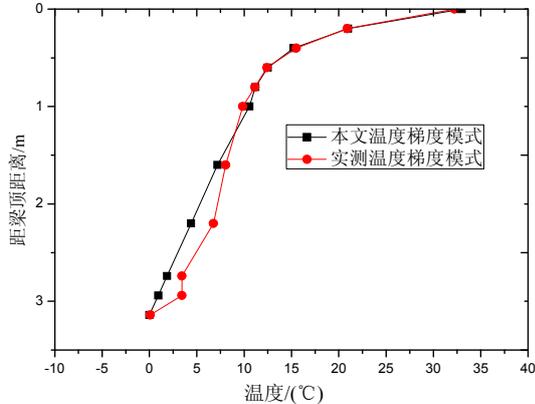


图 8 实测曲线与拟合曲线对比

Fig.8 The measured curve compared with the fitted curve

上式中:  $T_1$ 、 $T_2$  定义为无铺装层钢箱梁日照温度梯度计算温度基数, 不同季节的取值不同, 春季:  $T_1=30$ ,  $T_2=7$ , 夏季:  $T_1=25$ ,  $T_2=10$ ;  $y/m$  为温度测点到顶板的距离;  $\alpha$  定义为无铺装层钢箱梁日照温度梯度计算参数, 不同季节的取值不同, 春季:  $\alpha=1.5$ , 夏季:  $\alpha=0.9$ 。

为了考察式(9)是否适用于其他地区桥梁无铺装层钢箱梁日照温度梯度的确定, 采用与江东大桥钢箱梁相同的测试方法, 对广州东沙大桥斜拉桥无铺装层钢箱梁的日照温度场进行现场实测。测点布置方案见图 7, 共布置了 30 个测点。

综上, 不同地区(例如广州和杭州)和同一地区的不同季节(比如杭州地区的夏季和春季)无铺装层钢箱梁日照温度梯度均有一定的差别。对于其他地区无铺装层桥梁钢箱梁日照温度场的确定, 只需在不同季节测量少量典型天气条件下的温度场实测数据, 代入拟合公式(9)得到计算基数  $T_1$ 、 $T_2$  和参数  $\alpha$  的值, 即可得到该地区不同季节无铺装层钢箱梁日照温度梯度。

## 6 英、美、中规范钢箱梁温度梯度比较分析

### 6.1 英国桥规(BS-5400)关于温度梯度规定<sup>[14]</sup>

图 9 给出了英国 BS-5400 规范 40mm 厚桥面铺装层的钢箱梁温度梯度, 其他桥面铺装层厚度的钢箱梁温度基数  $T$  值由表 5 给出。

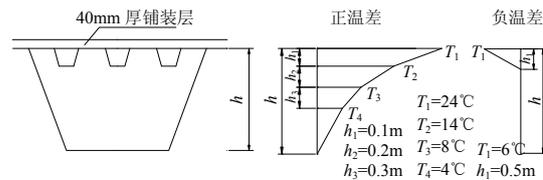


图 9 英国规范中钢箱梁温差曲线

Fig.9 Temperature difference curve of the steel box girder in BS-5400

表 5 参数  $T$  取值  
Table 5 Values of  $T$

铺装层厚度/mm	升温				降温
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_1$
无铺装层	30	16	6	3	8
20	27	15	9	5	6
40	24	14	8	4	6

6.2 美国规范(AASHTO)关于温度梯度规定<sup>[15]</sup>

美国 AASHTO 规范温度梯度模式见图 10 所示, 其中参数  $T_1$ 、 $T_2$  取值见表 6; 参数  $T_3$  值取为  $0.0^\circ\text{C}$ , 除非进行了特殊研究, 但其值不得超过  $3.0^\circ\text{C}$ 。

图 10 中,  $H/\text{mm}$  是梁高;

$$A = \begin{cases} 300\text{mm}, & H > 400\text{mm} \text{ 的混凝土上部结构} \\ H - 100\text{mm}, & H < 400\text{mm} \text{ 的混凝土上部结构,} \\ 300\text{mm}, & \text{带混凝土桥面板的钢结构} \end{cases}$$

$t$  为混凝土桥面板的厚度。

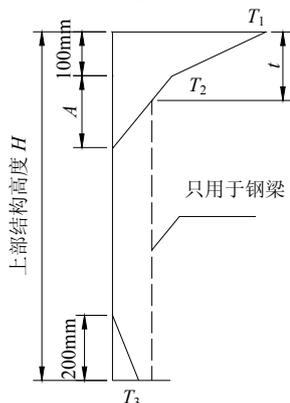


图 10 美国 AASHTO 规范中竖向正温度梯度曲线  
Fig.10 Positive vertical temperature gradient in AASHTO

表 6 AASHTO 温度梯度温度基数  $/(^\circ\text{C})$

Table 6 Basis for temperature gradients in AASHTO

地区	$T_1$	$T_2$
1	30	7.8
2	25	6.7
3	23	6.0
4	21	5.0

6.3 中国桥涵设计规范(JTG D60-2004)的规定<sup>[1]</sup>

中国桥涵设计规范(JTG D60-2004)规定的主梁温度梯度模式见图 11, 其中各参数取值见表 7。

图 11 中,

$$A = \begin{cases} 300\text{mm}, & H \geq 400\text{mm} \text{ 的混凝土上部结构} \\ H - 100\text{mm}, & H < 400\text{mm} \text{ 的混凝土上部结构,} \\ 300\text{mm}, & \text{带混凝土桥面板的钢结构} \end{cases}$$

$t$  为混凝土桥面板的厚度。

比较以上 3 个规范关于钢箱梁温度梯度的条文, 英国 BS-5400 规范对钢箱梁竖向温度梯度做出

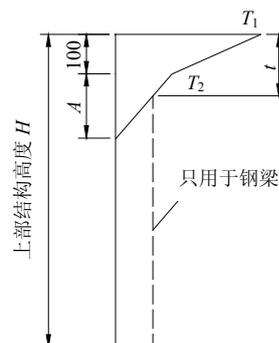


图 11 中国规范中竖向正温度梯度曲线

Fig.11 Positive vertical temperature gradient in Chinese code

表 7 竖向日照正温差的计算温度基数  $/(^\circ\text{C})$

Table 7 Basis for temperature gradients

结构类型	$T_1$	$T_2$
素混凝土铺装	25	6.7
50mm 沥青混凝土铺装层	20	6.7
100mm 沥青混凝土铺装层	14	5.5

了较详细的规定, 给出了无铺装层、带有 20mm 铺装层和 40mm 铺装层钢箱梁的竖向温度梯度曲线; 而美国 AASHTO 规范和我国现行的公路桥涵设计规范都只涉及到带铺装层钢-混凝土叠合结构的竖向温度梯度, 未给出无铺装层钢箱梁的竖向温度梯度。美国 AASHTO 规范则根据气象状况将全国划分了 4 个地区, 不同地区取用不同的温差计算基数及参数, 该做法值得借鉴。

在桥梁结构分析中考虑无铺装层钢箱梁竖向温度梯度的影响时, 国内设计单位一般是参照英国 BS-5400 规范的规定进行设计计算。为了考察此种做法是否合适, 将 2009 年 5 月 5 日 14:00 时广州东沙大桥斜拉桥钢箱梁温度场的实测数据与英国 BS5400 规范进行比较, 见表 8。

表 8 竖向温度梯度的比较

Table 8 Comparison of vertical temperature gradient

距梁顶高度/m	2009 年 5 月 5 日 实测值/ $(^\circ\text{C})$	英国规范/ $(^\circ\text{C})$	两者的差值/ $(^\circ\text{C})$
0.00	32.1	30.0	2.1
0.20	20.8	11.0	9.8
0.40	15.4	5.0	10.4
0.60	12.3	3.0	9.3
0.80	11.1	2.8	8.3
1.00	9.8	2.5	7.3
1.60	8.0	1.8	6.2
2.20	6.7	1.1	5.6
2.74	3.3	0.5	2.8
2.94	3.3	0.2	3.1
3.14	0.0	0.0	0

通过表 8 可以发现, 广州东沙大桥斜拉桥钢箱梁温度场的实测值与采用英国 BS-5400 规范的温度

值相差较大,最大差值达 10.4℃。杭州江东大桥钢箱梁日照温度场也存在类似情况,最大差值达 9.0℃。可见,按照英国 BS-5400 规范确定我国桥梁无铺装层钢箱梁日照温度场不一定合适。因此,应在积累无铺装层钢箱梁温度场研究成果基础上,制定我国桥涵设计规范关于无铺装层钢箱梁日照温度梯度的条文。

## 7 结论

(1) 建立了 ANSYS 模型,计算无铺装层钢箱梁日照温度场,同时对其日照温度场进行了现场实测,计算结果和实测结果吻合较好。

(2) 参数敏感性分析表明吸收率  $\alpha$  对无铺装层钢箱梁日照温度计算影响最大,风速  $v$  次之,辐射率  $\varepsilon$  影响最小。

(3) 我国现行公路桥涵设计规范并未给出无铺装层钢箱梁日照温度梯度模式,本文采用的指数函数加一次函数的拟合公式能较准确地反映杭州江东大桥和广州东沙大桥的无铺装层钢箱梁日照温度梯度,可供我国其他桥梁参考借鉴。

(4) 完全采用英国 BS5400 规范确定我国无铺装层钢箱梁日照温度梯度并不合适,我国应加强钢箱梁温度场的研究,制定桥涵设计规范关于钢箱梁日照温度梯度的相关条文。

(5) 无铺装层钢箱梁日照温度梯度在不同区域、不同季节差别较大,建议根据气象状况,不同地区取用不同的温差计算基数及参数。

## 参考文献:

- [1] JTG D60-2004, 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 88—89.  
JTG D60-2004, General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004: 88—89. (in Chinese)
- [2] Tong M, Tham L G, Au F T K, Lee P K K. Numerical modeling for temperature distribution in steel bridges [J]. Computer & Structures, 2001, 79(6): 583—593.
- [3] Tong M, Tham L G, Au F T. Extreme thermal loading on steel bridges in tropical region [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 128(3): 446—457.
- [4] 陈家齐, 颜全盛. 湛江海湾大桥施工中钢箱梁温度分布观测与分析[C]. 第十三届全国工程建设计算机应用学术会议论文集. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 512—518.  
Chen Jiaqi, Yan Quansheng. Observation and analysis of Zhanjiang Bay Bridge temperature field during construction [C]. The 13th Computer Application Academic Conferences Symposium of Engineering Construction. Guangzhou: South China University Technology Press, 2006: 512—518. (in Chinese)
- [5] 黄腾, 李淞泉, 华锡生. 钢箱梁温度变形特性分析及合拢状态控制[J]. 公路, 2002, 32(7): 84—87.  
Huang Teng, Li Songquan, Hua Xisheng. Characteristic of bridge's steel box girder deformed by temperature and closure condition control [J]. Highway, 2002, 32(7): 84—87. (in Chinese)
- [6] 郝超. 大跨度钢斜拉桥施工阶段非线性温度影响研究[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 63—66.  
Hao Chao. Study on nonlinear influence of temperature on long-span steel cable-stayed bridge during construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 63—66. (in Chinese)
- [7] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.  
Yang Shiming. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese)
- [8] 凯尔别克. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981.  
Kehlbeck. The influence of solar radiation on the bridge structure [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1981. (in Chinese)
- [9] 范立础. 桥梁工程(上册)[M]. 第2版. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
Fan Lichu. Bridge engineering (volume 1) [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)
- [10] 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: 9—41.  
Zhu Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999: 9—41. (in Chinese)
- [11] 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: 48—79.  
Kong Xiangqian. Thermal stress analysis of finite element method [M]. Shanghai: Press of Shanghai Jiaotong University, 1999: 48—79. (in Chinese)
- [12] 美国 ANSYS 公司北京办事处. ANSYS 热分析指南[M]. 北京: 美国 ANSYS 公司北京办事处, 2000.  
ANSYS Inc. Beijing Office United States. ANSYS thermal analysis guide [M]. Beijing: ANSYS Inc. Beijing Office United States, 2000. (in Chinese)
- [13] Saetta A, Scotta R, Vitaliani R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(3): 446—457.
- [14] BS5400:Part2:1978, Steel, concrete and composite bridges (Part 2. Specification for loads) [S]. British Standard Institute, 1978: 20—23.
- [15] LRFDSI-3, AASHTO LRFD Bridge design specifications [S]. American Association of State High and Transportation Officials, 2004: 96—98.