

文章编号: 1674-599X(2021)04-0033-10

## 基于概率分析运营阶段钢箱梁温度作用

张玉平<sup>1</sup>, 李思阳<sup>1</sup>, 杨胜江<sup>2</sup>, 李威<sup>1</sup>, 刘思琴<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 贵州交通建设集团有限公司, 贵州 贵阳 550001;  
3. 广西交通科学研究院, 广西 南宁 530007)

**摘 要:** 针对钢箱梁日照温度场在中国中西部地区研究成果较少的现状, 对四川省泸州市沱江四桥运营阶段钢箱梁温度场进行长期监测, 利用ANSYS软件计算分析其钢箱梁温度场, 并对比了计算值和现场实测值。基于该桥夏季运营阶段钢箱梁顶板、底板温差最大时的温度实测数据, 采用指数函数描述钢箱梁日照温度梯度分布形式。选用高斯混合模型描述该桥钢箱梁夏季日最大正温差的概率分布, 并在其基础上计算钢箱梁日照竖向正温差标准值。研究结果表明: 计算值与现场实测值吻合较好, 温度随时间变化趋势基本一致, 验证了该有限元模型的准确性。采用统计分析方法, 得到竖向正温差标准值为18.4℃, 略高于公路桥涵设计通用规范中按线性内插得到的钢箱梁竖向正温差标准值, 并得到了该桥运营阶段钢箱梁竖向正温度梯度模式, 该模式可为泸州及其周边地区运营阶段钢箱梁桥竖向温度梯度取值提供借鉴, 也为后续规范温度梯度相关条文的修订和完善提供了数据支撑。

**关键词:** 钢箱梁; 温度场; 温度梯度; 拟合; 概率模型

中图分类号: U448.36

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.004

## Temperature effect of steel box girder at operation stage based on probability analysis

ZHANG Yu-ping<sup>1</sup>, LI Si-yang<sup>1</sup>, YANG Sheng-jiang<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LIU Si-qin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Guizhou Transportations Construction Group Co., Ltd., Guiyang 550001, China;

3. Guangxi Transportation Research Institute, Nanning 530007, China)

**Abstract:** Aiming at less research on the sunshine temperature field of steel box girder at the middle and western areas of and western China, the temperature field of the steel box girder in the operation stage of the Tuojiang 4th bridge in Luzhou, Sichuan Province was monitored for a long time, the temperature field was then calculated and analyzed using the ANSYS software. The calculated value was compared with the measured data. Based on the measured data of maximum temperature difference between roof and bottom of operational steel box girder in summer, the exponential function was used to describe the sunshine temperature gradient distribution of steel box girder. The Gaussian mixture model was used to describe the probability distribution of the maximum daily positive temperature difference of the steel box girder in summer, and the standard value of vertical positive temperature difference was then calculated. The results show that the calculated temperature agree well with the measured data, and the trend of temperature changing with time is basically the same. Consequently, the accuracy of the finite element model is verified. The standard value of vertical positive temperature difference is 18.4℃ obtained by statistical method. The value is slightly higher than that was

收稿日期: 2020-10-28

基金项目: 国家重点发展研究计划发展计划(973)项目(2015CB057702); 国家自然科学基金项目(52078059); 湖南省教育厅创新平台资助项目(16K005)

作者简介: 张玉平(1976—), 男, 长沙理工大学副教授, 博士。

calculated by linear interpolation according to general code for design of highway bridges and culverts. Finally, the vertical positive temperature gradient model of operational steel box girder was obtained. The model can be used for the taking values of vertical temperature gradient of steel box girder bridge in Luzhou and its surrounding areas, and the data can be supported for the revision and improvement of relevant provisions on temperature gradient.

**Key words:** steel box girder; the temperature field; temperature gradient; fitting; probability model

桥梁结构施工和运营过程中, 温度作用会削弱结构的承载能力, 甚至使结构发生开裂<sup>[1]</sup>。桥梁结构设计对温度作用主要表现为对均匀温度(年温差)和梯度温度(日照温差)2个方面进行分析。其中, 梯度温度往往为桥梁设计的主要控制因素之一, 尤其是对于闭口箱形截面主梁。钢箱梁因其质量轻、强度高、施工便捷等优点在斜拉桥、悬索桥等大跨桥梁中广泛应用。国内外学者对钢箱梁温度梯度模式等进行了大量研究, 取得了不少成果。Capps等人<sup>[2-3]</sup>通过监测传统构造形式的钢箱梁温度场, 基于实测数据进行分析, 得到了适用于英国地区的钢箱梁温度梯度模式。Lucas等人<sup>[4-5]</sup>基于法国诺曼底大桥钢箱梁长期温度实测数据, 给出了钢箱梁竖向温差的经验公式。Lee<sup>[6]</sup>制作沥青铺装厚度分别为0、50、100、150 mm的钢箱梁模型, 并基于4种模型温度观测数据得出韩国地区桥梁温度梯度模式。

国内针对钢箱梁温度梯度模式研究主要集中在江浙地区, 汪劲丰等人<sup>[7]</sup>采用传统双折线形式, 而张玉平等人<sup>[8]</sup>则采用指数函数加一次函数形式描述钢箱梁竖向温度梯度分布。李国强等人<sup>[9]</sup>采用指数函数描述磁浮轨道梁竖向温度梯度曲线。缪长青等人<sup>[10]</sup>在实测温度数据基础上, 提出适合于六角形扁平钢箱梁温度梯度分布的曲线形式。周广东等人<sup>[11-15]</sup>分别采用不同概率模型(单威布尔与正态分布加权、极值分布、双威布尔加权)研究扁平钢箱梁温度梯度模式。钱鲲等人<sup>[16]</sup>将浙江嘉绍大桥钢箱梁实测温度梯度模式与《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)<sup>[17]</sup>及英国BS5400规范<sup>[18]</sup>进行了对比。针对中国北方寒旱地区与中西部地区钢箱梁温度梯度模式研究成果并不多<sup>[19-22]</sup>, 但桥梁日照温度作用对整体范围内有明显的地域性差异, 对于不同地区, 桥梁温度作用模式与取值有所不同<sup>[23]</sup>。不同钢箱梁截面形式, 其温度梯度模式也会有所不同<sup>[12][24]</sup>, 国内一些学者对不同截面形式的钢箱梁温度梯度模式进行了研究, 但针对PK断

面钢箱梁温度梯度模式成果少见。文献[20]研究了四川泸州地区PK断面钢箱梁在施工期间无铺装层的竖向温度梯度, 但其运营阶段值得进一步研究。针对该问题, 作者拟以泸州市沱江四桥斜拉桥为工程背景, 利用热传导原理建立运营阶段带铺装层的钢箱梁有限元模型, 将计算值与现场实测值进行对比。利用指数函数描述钢箱梁竖向温度梯度分布, 并基于长期温度监测数据, 利用高斯混合模型描述运营阶段PK断面钢箱梁日最大正温差的概率分布, 并确定钢箱梁竖向正温差标准值。以期为泸州及其周边地区运营阶段钢箱梁桥竖向温度梯度取值提供借鉴, 也为完善箱梁温度梯度相关的规范条文提供一定理论基础和数据支撑。

## 1 热传导与有限元基本理论

根据傅里叶定律和能量守恒定律, 建立钢箱梁结构在空间笛卡尔坐标系中的导热微分方程:

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \Phi = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $T$ 为钢箱梁任意一点在某一瞬时的温度, 其为空间笛卡尔坐标 $x, y, z$ 与时间 $t$ 的函数;  $k$ 为导热系数;  $\Phi$ 为结构单位时间内单位体积所产生的热量, 由于钢箱梁无内热源, 其值为0;  $\rho$ 为钢材密度;  $c$ 为比热容。

对式(1)求解, 若获得某时刻钢箱梁温度场的分布, 还需要已知初始条件和边界条件。初始条件为钢箱梁起始时刻温度分布, 其计算式为:

$$T_0(x, y, z) = T(x, y, z, t)|_{t=0} \quad (2)$$

式中:  $T_0$ 为坐标的已知函数。

边界条件反映钢箱梁结构通过其表面与外界环境换热情况, 日照作用下钢箱梁与外界进行热交换, 主要为太阳辐射、辐射换热、对流换热3种形式, 钢箱梁传热边界条件的表达式为:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q_c + q_r + q_s \quad (3)$$

式中:  $n$  为边界外法向方向;  $q_c$  为对流换热热流密度;  $q_r$  为辐射换热热流密度;  $q_s$  为太阳辐射热流密度。

根据牛顿冷却定律, 钢箱梁与外界环境对流换热的表达式为:

$$q_c = h_c(T_a - T_s) \quad (4)$$

式中:  $h_c$  为对流换热系数;  $T_a$  表示钢箱梁外界空气温度;  $T_s$  表示钢箱梁结构表面温度。

$q_r$  根据 Stefan-Boltzmann 定律, 其表达式为:

$$q_r = h_r(T_a - T_s) \quad (5)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma [(T_a + T^*)^2 - (T_s + T^*)^2] \quad (6)$$

式中:  $h_r$  为辐射换热系数;  $\varepsilon$  为辐射率;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数, 其值为  $5.677 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T^*$  为常数, 取值为 273.15。

$q_s$  的表达式为:

$$q_s = \alpha I \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为吸收率;  $I$  为太阳辐射强度总和, 包括太阳直接辐射强度、太阳散射强度及地面反射强度。

通过式 (4)、(5)、(7), 式 (3) 又可以转换为:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{sa} - T_s) \quad (8)$$

$$h = h_c + h_r \quad (9)$$

$$T_{sa} = T_a + \frac{\alpha I}{h_c + h_r} \quad (10)$$

式中:  $h$  为综合换热系数;  $T_{sa}$  为综合大气温度。

在有限元软件中, 以  $T_0$  作为初始温度, 将  $T_{sa}$ 、 $h$  作为荷载加载到钢箱梁各边界上, 即可求解钢箱梁温度场。

## 2 工程概况与有限元模型建立

### 2.1 工程概况与桥位气象条件

四川省泸州市沱江四桥主桥采用独塔双索面斜拉桥结构形式, 主桥主梁采用钢-砼混合梁, 主跨为钢箱梁, 边跨为混凝土梁, 其中, 主桥钢箱梁断面为半分离式双箱截面形式, 钢箱梁中心线内轮廓高为 3.452 m, 钢箱梁全宽为 49.0 m, 钢箱梁顶面设置 2% 双向横坡, 底面水平, 如图 1 所示。主桥钢箱梁段桥面铺装组成为: 35 mm 改性沥青 SMA10+40 mm 浇筑式沥青混凝土 GA10+Eliminator 防水黏结系。该工程所在地属亚热带湿润季风气候, 冬暖夏热, 日照充足。受地形影响, 该地区夏季雷雨天气多, 风速大部分为 0~2 m/s 的微风, 年平均气温为 18 °C 左右。

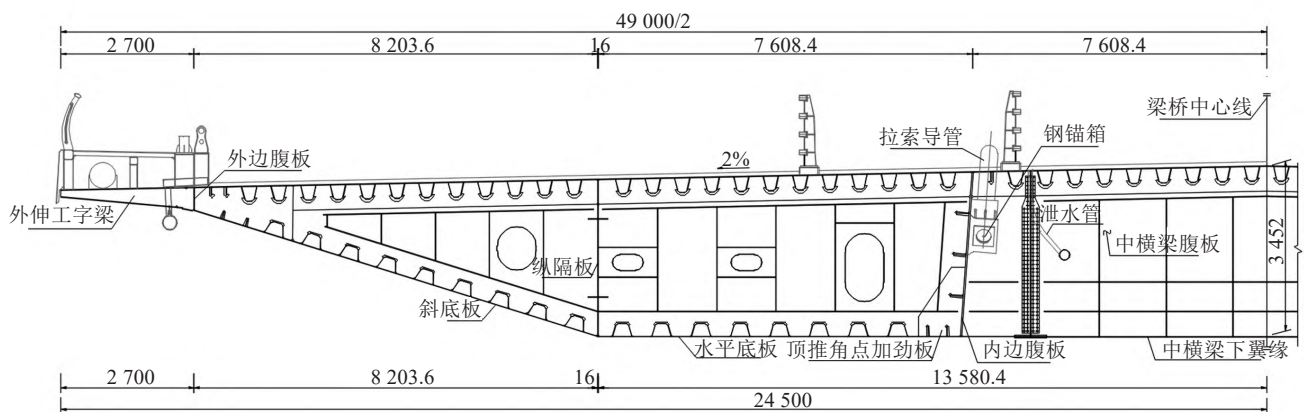


图1 沱江四桥钢箱梁 1/2 标准横断面 (单位: mm)

Fig. 1 Half section of the steel box girder of the Tuojiang 4th Bridge (unit: mm)

### 2.2 有限元模型的建立

采用 ANSYS 有限元软件建立模型, 计算运营阶段带铺装层的钢箱梁温度场。采用 shell57 壳单元模拟钢箱梁, 该单元有 4 个节点; 采用 solid70 实体单元模拟铺装层, 该单元有 8 个节点, 且 2 种

单元每个节点均只有一个温度自由度, 单元示意图如图 2~3 所示。

本研究主要研究钢箱梁竖向梯度温度, 在沱江四桥斜拉桥主跨中, 沿纵桥向选择一段 12.0 m 半幅钢箱梁, 按实际尺寸建立模型。有限元模型

经网格划分后，由 52 806 个节点、37 962 个单元组成，如图 4 所示。

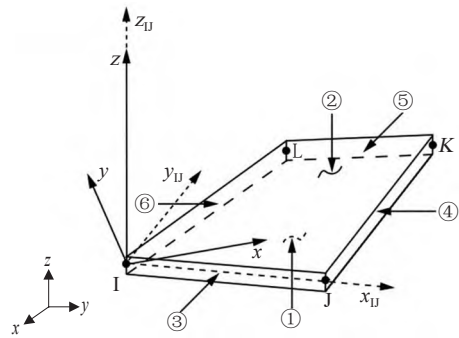


图 2 shell57 单元示意  
Fig. 2 Sketch of the shell 57 element

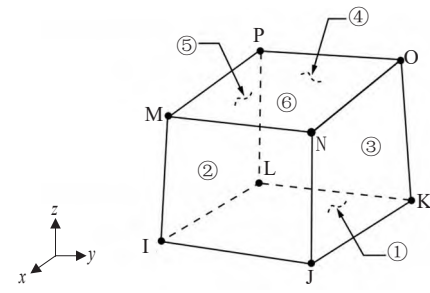


图 3 solid70 单元示意  
Fig. 3 Sketch of the solid 70 element

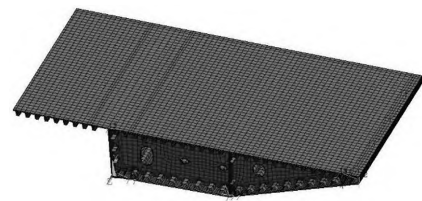


图 4 钢箱梁单元划分  
Fig. 4 Element division of steel box girder

以 2018 年 7 月 20 日 6:00 钢箱梁梁体实测温度作为初始温度，将钢箱梁与外界热交换按式 (8) 转化成综合大气温度和综合换热系数，施加到钢箱梁边界上，求解 2018 年 7 月 20 日 6:00~18:00 的钢箱梁温度场。根据现场实测数据和文献[25]，确定材料物理参数见表 1，钢箱梁各边界条件参数见表 2~4。

| 表 1 材料物理参数                              |                              |   |   |      |      |
|---|------------------------------|---|---|------|------|
| Table 1 Physical parameters of material |                              |   |   |      |      |
| 参数                                      | 密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 比热容/<br>(J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ) | 导热系数/<br>(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ) | 吸收率  | 辐射率  |
| 钢材                                      | 7 854                        | 434   | 60.50   | 0.82 | 0.60 |
| SMA-10                                  | 2 400                        | 957   | 2.05  | 0.95 | 0.95 |
| GA-10                                   | 2 050                        | 1 179   | 2.46  | —    | 0.95 |

| 表2 钢箱梁各边界对流换热系数  |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                        |
|--|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| Table 2 Convective heat transfer coefficient of the boundary of steel box girder |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       | W/(m <sup>2</sup> ·°C) |
| 时刻   | 6:00 | 7:00 | 8:00 | 9:00  | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00                  |
| 铺装层  | 7.11 | 8.48 | 9.72 | 10.93 | 12.05 | 12.96 | 13.68 | 14.16 | 14.40 | 14.40 | 14.12 | 13.48 | 12.53                  |
| 底板及腹板  | 6.72 | 8.24 | 9.69 | 11.10 | 12.43 | 13.53 | 14.37 | 14.94 | 15.24 | 15.24 | 14.90 | 14.14 | 13.04                  |

注：对流换热系数主要受结构表面粗糙程度和表面风速影响，结合 7 月 20 日的实测风速，风速取日平均值 2.4 m/s，根据文献[26]计算得到。桥梁结构温度和外界大气温变化时，辐射换热系数变化幅度非常小<sup>[27]</sup>，因此，钢箱梁部分  $h_r$  取 3.85 W·(m<sup>2</sup>·°C)<sup>-1</sup>，铺装层部分  $h_r$  取 6.45 W·(m<sup>2</sup>·°C)<sup>-1</sup>

| 表3 钢箱梁各边界不同时刻太阳辐射强度   |      |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |                   |
|---|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| Table 3 Solar radiation intensity of steel box girder boundary under different periods <i>I</i> |      |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | W•m <sup>-2</sup> |
| 时刻  | 6:00 | 7:00  | 8:00   | 9:00   | 10:00  | 11:00  | 12:00  | 13:00  | 14:00  | 15:00  | 16:00  | 17:00  | 18:00             |
| 铺装层   | 4.54 | 52.92 | 249.70 | 494.81 | 611.34 | 801.29 | 920.60 | 955.91 | 902.34 | 843.76 | 669.59 | 440.67 | 320.33            |
| 底板及腹板   | 0.91 | 10.58 | 49.94  | 98.96  | 122.27 | 160.26 | 184.12 | 191.18 | 180.47 | 168.75 | 133.92 | 88.13  | 64.07             |

注：根据文献[28]并结合桥梁所处地理位置，确定太阳辐射强度

| 表4 桥址处大气温度   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Table 4 Atmospheric temperature of the bridge site |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | °C    |
| 时刻   | 6:00  | 7:00  | 8:00  | 9:00  | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 |
| 铺装层  | 29.00 | 29.50 | 29.75 | 30.00 | 31.00 | 33.5  | 34.50 | 37.25 | 38.25 | 38.50 | 39.50 | 40.50 | 41.60 |
| 腹板及底板  | 28.90 | 28.80 | 29.26 | 28.36 | 28.40 | 27.5  | 27.30 | 28.97 | 30.56 | 31.31 | 33.44 | 35.52 | 36.70 |
| 箱内   | 34.25 | 33.75 | 33.00 | 33.00 | 33.13 | 34.0  | 35.38 | 37.38 | 39.50 | 40.50 | 42.25 | 43.62 | 44.13 |

注：钢箱梁各边界及铺装层边界大气温度通过收集现场实测值得到



### 3 温度实测值与计算值作对比

选择沱江四桥斜拉桥运营阶段主跨跨中上游幅截面进行温度场观测, 共布置36个温度测点, 测点安放如图5所示, 其中, 36号测点用于测量钢箱梁底板外侧环境温度。测试仪器采用磁吸式温

度传感器(测量误差在 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 范围内)和通道采集箱, 如图6~7所示。从2018年7月—2019年1月对运营阶段钢箱梁温度场进行全天候观测, 每隔1 h对所有测点观测1次。随机选取1组实测数据(测试时间为2018年7月20日)与对应有限元模型求解结果进行对比, 如图8所示。

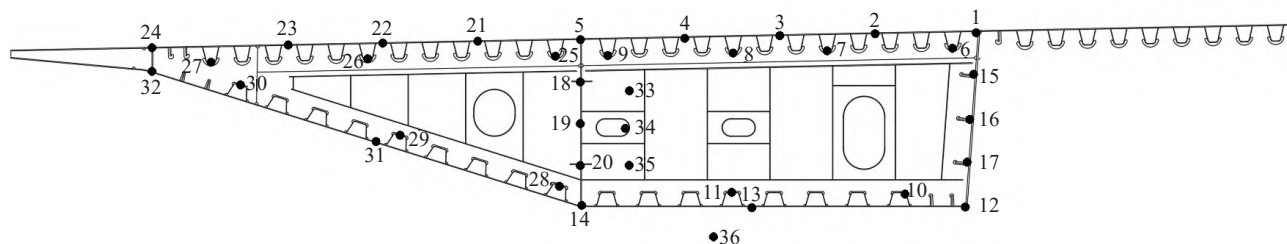


图5 沱江四桥钢箱梁温度测点布置(单位: mm)

Fig. 5 Thermal observation points layout of the Tuojiang 4th Bridge(unit: mm)



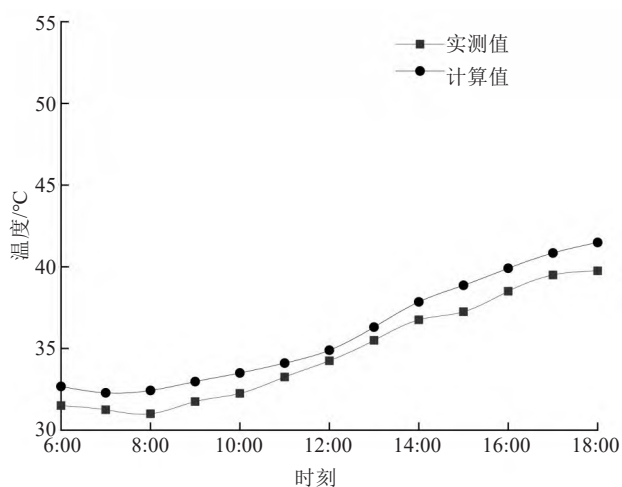
图6 磁吸式温度传感器布置示意

Fig. 6 Layout of magnetic suction temperature sensor

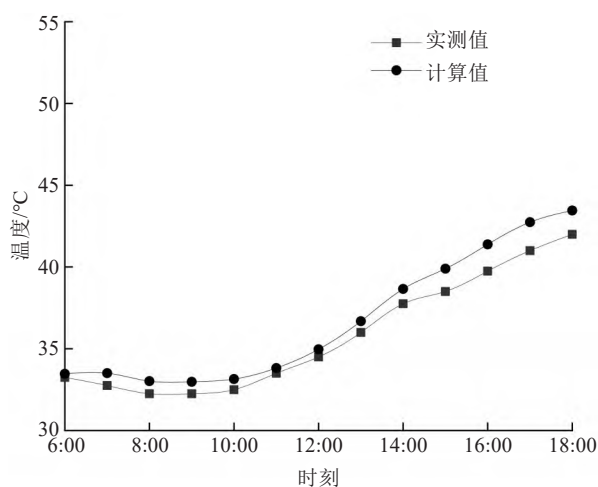


图7 通道采集箱

Fig. 7 Channel acquisition box



(a)钢箱梁底板(13#测点)



(b)钢箱梁底板u肋(11#测点)

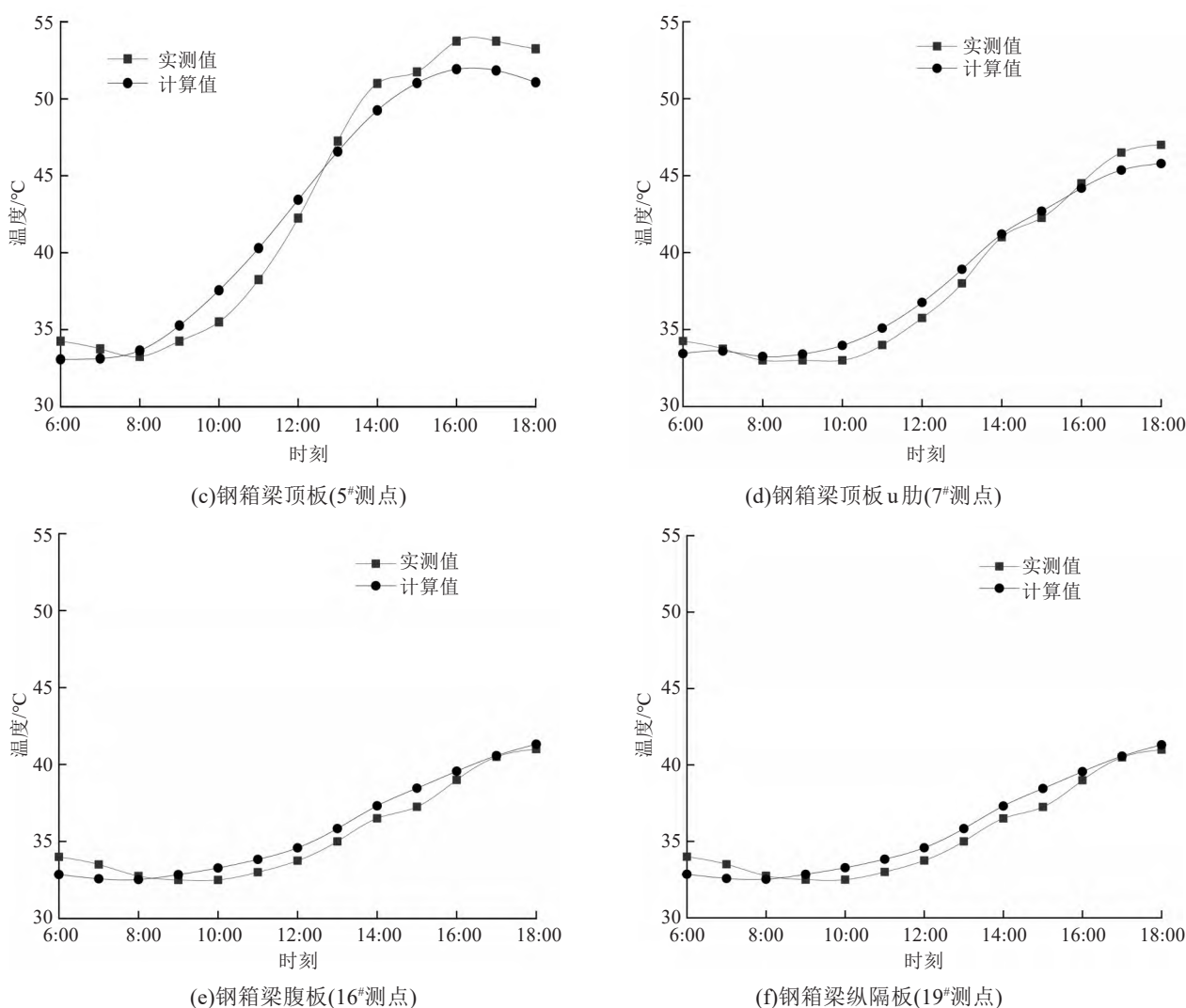


图8 钢箱梁实测温度与计算值对比

Fig. 8 Comparison of measured value and calculated value of steel box girder

从图8中可以看出,钢箱梁温度实测值与计算值吻合较好,实测值与计算值最大温差不超过 $2.1^{\circ}\text{C}$ ,且两者温度随时间走势基本一致,因此可以验证本文有限元模型的准确性。由于受地域影响,测点达到温度峰值时间与文献[29-30]类似,较我国沿海地区钢箱梁温度到达温度峰值的时间偏晚。

#### 4 钢箱梁竖向温度梯度曲线拟合

描述桥梁结构最不利竖向温度梯度分布主要有多次抛物线、指数函数曲线、多折线3种形式。

本研究收集了运营阶段钢箱梁7—8月份顶、底板温差最大时纵隔板的30组实测温度数据进行对比分析。在日照作用下,沿梁高方向竖向正温差接近指数函数分布形式。故采用最小二乘法,按式(11)对钢箱梁竖向温度梯度分布进行拟合,并将拟合结果与实测数据对比,两者差值均在 $2^{\circ}\text{C}$ 以内,如图9所示。

$$T_y = T_{dd} e^{-ay} \quad (11)$$

式中: $y$ 为距离钢箱梁顶距离; $T_y$ 为计算点与梁底正温差; $T_{dd}$ 为钢箱梁顶底日最大正温差; $a$ 为指数系数常数,本研究取值为1.144。

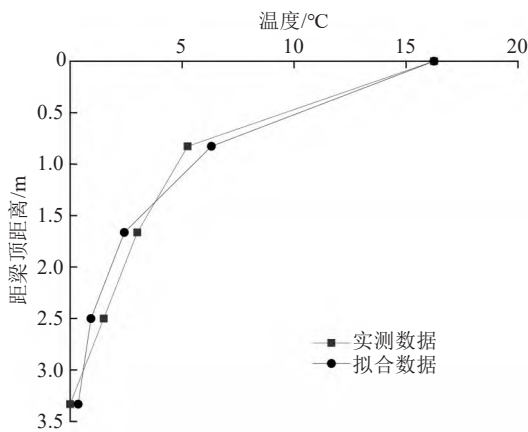


图9 纵隔板实测数据与拟合数据对比

Fig. 9 Comparison of the measured value and the fitted value of the longitudinal claspboard

5 钢箱梁日照温度作用标准值

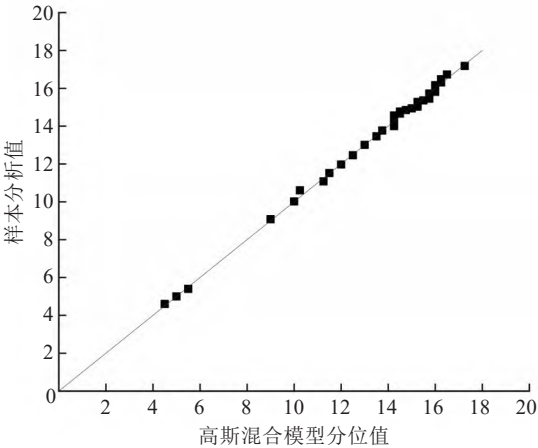
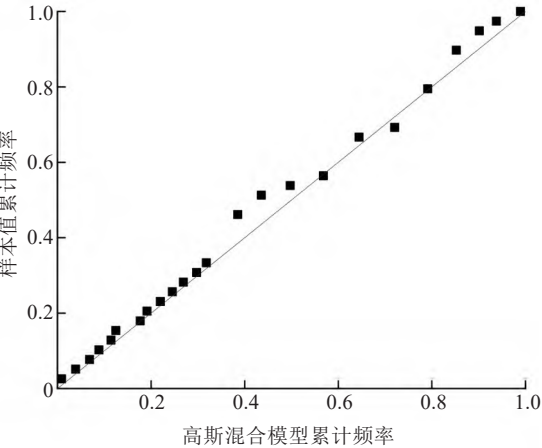
5.1 最大正温差概率分析

箱梁结构竖向正温差主要是由于顶板受太阳辐射影响大, 底板受太阳辐射影响小导致, 因此, 桥梁结构一年内最大竖向正温差总是在夏季出现。本研究以夏季实测数据作为样本, 采用统计分析方法获得日最大正温差的概率密度函数, 选取高斯混合模型描述钢箱梁日最大正温差概率密度分布, 其表达式为:

$$f(T_{dd}) = \sum_{i=1}^n w_i \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp \left[ -\frac{(T_{dd} - u_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (13)$$

式中:  $w_i$ 为第*i*个高斯函数权重比;  $n$ 为高斯混合模



(a)P-P

(b)Q-Q

图11 高斯混合模型检验

Fig. 11 Inspection of the Gaussian mixture model

型中成分个数;  $u_i$ 和 $\sigma_i$ 分别为相应的均值和标准差。

利用 Matlab 自带的 EM 算法对高斯混合模型进行参数估计, 高斯混合模型参数取值见表 5。日最大正温差的概率密度直方图和拟合曲线如图 10 所示。利用 P-P 图和 Q-Q 图如图 11 所示, 验证采用该高斯混合模型的合理性。从图 11 中可以看出, 所有点几乎都位于斜率等于 1 的直线上, 验证了采用该高斯混合模型描述钢箱梁日最大正温差概率分布的合理性。

表5 日最大正温差高斯混合模型参数取值

Table 5 Parameter selection of the Gaussian mixture model for daily maximum positive temperature difference

| <i>i</i> | $w_i$   | $u_i$    | $\sigma_i$ |
|----------|---------|----------|------------|
| 1        | 0.704 6 | 15.257 0 | 0.842 9    |
| 2        | 0.076 9 | 4.999 9  | 0.166 7    |
| 3        | 0.218 5 | 11.413 3 | 2.223 0    |

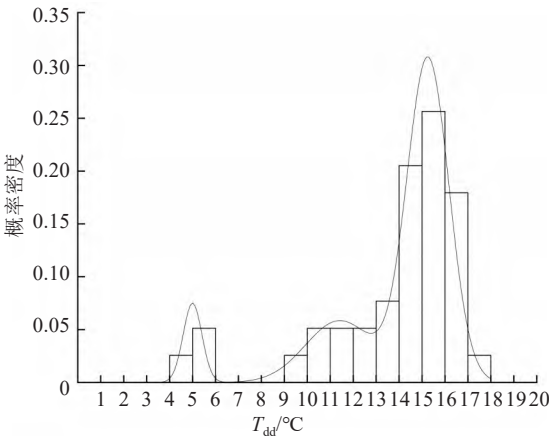


图10 日最大正温差频率直方图与拟合曲线

Fig. 10 Frequency histogram and fitting curve of daily maximum positive temperature difference

## 5.2 钢箱梁竖向正温差标准值

温度作用属于可变作用, 欧洲结构设计标准规定温度作用特征值是具有重现期为 50 a 的作用值<sup>[31]</sup>, 按照我国桥梁规范中规定的设计基准期 100 a 计算, 则设计基准期内最大温度作用超过标准值次数的数学期望为 2 次。

设一年内最大竖向温差超过标准值的超越概率为  $P$ , 并考虑到年最大竖向温差总是出现在夏季, 钢箱梁竖向正温差标准值  $T_B$  按下式计算:

$$1 - P = F(T_B)^n = \left( \int_{-\infty}^{T_B} f(T_{dd}) dT_{dd} \right)^n \quad (14)$$

式中:  $F(T_B)$  为夏季日最大正温差的分布函数;  $n$  为一年内夏季总天数;  $P$  取 0.02。

经计算, 得到钢箱梁竖向正温差标准值为  $18.4^\circ\text{C}$ , 根据《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)<sup>[17]</sup> 中性内插, 得到 75 mm 沥青混凝土铺装层竖向正温差标准值为  $17^\circ\text{C}$ , 对比发现本研究取值要略高于规范取值。表明: 中国规范对桥梁温度作用的规定并不能涵盖所有地区, 桥梁温度作用代表值与地域、气候的关系较大。

结合拟合的竖向温度梯度曲线, 最终获得了运营阶段钢箱梁竖向正温度梯度模型, 如图 12 所示, 其表达式为:  $T_y = 18.4e^{-1.144y}$ 。

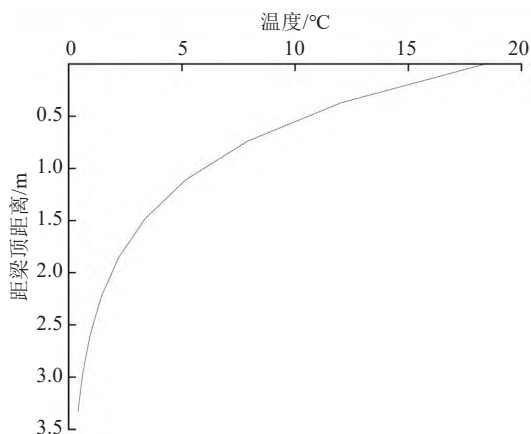


图 12 运营阶段 PK 断面钢箱梁竖向正温度梯度模式

Fig. 12 Vertical positive temperature gradient model of the PK section of steel box girder at operation stage

## 6 结论

1) 根据热传导与有限元基本理论, 借助 ANSYS 软件计算运营阶段钢箱梁温度场, 并通过对比计算值与现场实测值, 发现结果吻合较好,

表明采用本方法和参数计算运营阶段钢箱梁温度场可行。

2) 采用  $T_y = T_{dd}e^{-ay}$  能较好地描述运营阶段钢箱梁日最大正温差分布形式。对于带沥青混凝土铺装层钢箱梁竖向正温差标准值, 《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)<sup>[17]</sup> 只对厚度为 50 mm 与 100 mm 给出了具体取值。基于高斯混合模型, 得到沥青混凝土铺装层厚度为 75 mm 的钢箱梁竖向正温差标准值  $18.4^\circ\text{C}$ , 其值要高于按规范中性内插得到的值。因此, 针对规范不同厚度铺装采用线性内插法是否合理值得进一步研究, 后续工作可以针对不同铺装厚度钢箱梁温度梯度模式展开研究。

3) 本方法计算泸州市沱江四桥运营阶段日照作用下, PK 断面钢箱梁竖向正温度梯度模式为:  $T_y = 18.4e^{-1.144y}$ , 该模式可为泸州市及周边气候环境相似地区运营阶段 PK 断面钢箱梁桥竖向温度梯度取值提供一定参考和借鉴。目前针对我国西南地区 PK 断面钢箱梁温度梯度模式研究成果还比较少, 还需多地区实桥测试与研究。

## 参考文献(References):

- [1] 吴瑞瑞, 林友杨. 乌海黄河大桥箱梁截面日照温度场及温度应力研究[J]. 公路与汽运, 2018(5): 97-101. (WU Rui-rui, LIN You-yang. Study on sunshine temperature field and temperaute stress of box girder section of Wuhai Yellow river bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2018(5): 97-101.(in Chinese))
- [2] Capps M M R. The thermal behavior of the beachley viaduct/wye bridge[J]. Heat Radiation, 1968.
- [3] Emerson M. The calculation of the distribution of temperature in bridges. Department of the Environment, TRRL Report LR 561. 1973.
- [4] Lucas J M, Berred A, Louis C. Thermal actions on a steel box girder bridge[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 2003, 156(2): 175-182.
- [5] Lucas J M, Virlogeux M, Louis C. Temperature in the box girder of the normandy bridge[J]. Structural Engineering International, 2005, 15(3): 156-165.
- [6] Lee S H. Vertical temperature difference of steel box girder bridge considering asphalt thickness of concrete deck[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial



- Cooperation Society, 2019, 20(3).
- [7] 汪劲丰, 张良, 向华伟, 等. 港珠澳大桥深水区非通航孔桥施工的温度效应[J]. 中国公路学报, 2016, 29(12): 70-77. (WANG Jin-feng, ZHANG Liang, XIANG Hua-wei, et al. Temperature effect during construction of non-navigable bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge over deep water area[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12): 70-77.(in Chinese))
- [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. (ZHANG Yu-ping, YANG Ning, LI Chuan-xi. Research on temperature field of steel box girder without pavement caused by the solar radiations[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(6): 156-162.(in Chinese))
- [9] 李国强, 王琛奥, 叶丰, 等. 磁浮轨道钢箱梁日照温度场及变形研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 45-55. (LI Guo-qiang, WANG Chen-ao, YE Feng, et al. Research on temperature field and thermal deformation of steel box maglev guideway caused by solar radiation[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(11): 45-55. (in Chinese))
- [10] 缪长青, 史长华. 大跨悬索桥扁平钢箱梁温度梯度与温度影响研究[J]. 中国科学(技术科学), 2013, 43(10): 1155-1164. (MIAO Chang-qing, SHI Chang-hua. Temperature gradient and its effect on flat steel box girder of long-span suspension bridge[J]. Science China: (Technological Sciences), 2013, 43(10): 1155-1164.(in Chinese))
- [11] 周广东, 丁幼亮, 李爱群, 等. 基于长期实测数据的大跨悬索桥扁平钢箱梁温差特性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 114-125. (ZHOU Guang-dong, DING You-liang, LI Ai-qun, et al. Thermal difference characteristic analysis of a flat steel box girder in long-span suspension bridge based on long-term field measurement data[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 114-125. (in Chinese))
- [12] 丁幼亮, 王高新, 周广东, 等. 基于长期监测数据的润扬大桥扁平钢箱梁温度分布特性[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 94-101. (DING You-liang, WANG Gao-xin, ZHOU Guang-dong, et al. Temperature distribution on flat steel box girders of Runyang bridges based on long-term measurement data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 94-101.(in Chinese))
- [13] 许翔, 黄侨, 任远, 等. 大跨钢斜拉桥实测结构温度场分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(9): 14-21. (XU Xiang, HUANG Qiao, REN Yuan, et al. Thermal field analysis for large span steel cable-stayed bridges using in situ measurements[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 14-21.(in Chinese))
- [14] 王高新, 丁幼亮, 王晓晶, 等. 苏通大桥扁平钢箱梁温度场长期监测与统计分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2): 69-73, 120. (WANG Gao-xin, DING You-liang, WANG Xiao-jing, et al. Long-term monitoring and statistical analysis of temperature field of flat steel-box girder of sutong bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(2): 69-73, 120. (in Chinese))
- [15] 陈一飞, 孙宗光, 邵元. 基于长期监测的北方跨海斜拉桥钢箱梁截面温差特性分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(5): 65-72. (CHEN Yi-fei, SUN Zong-guang, SHAO Yuan. Analysis on temperature difference characteristic of steel box girder cross-section of cable-stayed bridge over north sea based on long-term monitoring[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(5): 65-72.(in Chinese))
- [16] 钱鲲, 陆永强, 黄应彬, 等. 多塔斜拉桥钢箱梁结构温度梯度实测与分析[J]. 公路, 2016, 61(10): 129-133. (QIAN Kun, LU Yong-qiang, HUANG Ying-bin, et al. Measurement and analysis of temperature gradient in steel box girder of multi tower cable stayed bridge[J]. Highway, 2016, 61(10): 129-133.(in Chinese))
- [17] 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, 2015. (CCCC Highway Consultants CO., LTD.. General code for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [18] Institution B S. Steel, concrete and composite bridges part 2: specification for loads: BS5400[S]. British Standards Institution, 1978.
- [19] 刘扬, 张海萍, 邓扬, 等. 基于实测数据的悬索桥钢箱梁温度场特性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 56-64. (LIU Yang, ZHANG Hai-ping, DENG Yang, et al. Temperature field characteristic research of steel box girder for suspension bridge based on measured data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 56-64.(in Chinese))
- [20] 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. (LIU Si-qin, Li Chuan-xi, Li Tao, et al. Temperature gradient mode of steel box girder based on probability analysis[J]. Journal of Highway and Transport, 2018, 34(2): 45-51.(in Chinese))

- Si-qin, LI Chuan-xi, LI Tao, et al. Study on temperature gradient of steel box girder without pavement based on probability analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 45-51. (in Chinese))
- [21] 郑宏利. 寒旱区正交异性板连续钢箱梁桥日照温度场研究[J]. 钢结构, 2017, 32(6): 52-58, 76. (ZHENG Hong-li. Research on sunlight temperature field of continuous steel box girder bridge with orthotropic plates in cold and arid region[J]. Steel Construction, 2017, 32(6): 52-58, 76. (in Chinese))
- [22] 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, 2020: 1-10.
- [23] 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. (LIU Yong-jian, LIU Jiang, ZHANG Ning. Review on solar thermal actions of bridge structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 59-78. (in Chinese))
- [24] Zhou L R, Xia Y, Brownjohn J M W, et al. Temperature analysis of a long-span suspension bridge based on field monitoring and numerical simulation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(1): 04015027.
- [25] 郝增恒, 王滔, 王民, 等. 钢桥面铺装温度场分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(11): 36-43. (HAO Zeng-heng, WANG Tao, WANG Min, et al. Analysis on temperature field of steel bridge deck pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(11): 36-43. (in Chinese))
- [26] 陆亚群. 混凝土温度作用中的气象因素分析[D]. 上海: 同济大学, 2007. (LU Ya-qun. Research for meteorological phenomena on the thermal load of concrete[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [27] 赵人达, 王永宝. 日照作用下混凝土箱梁温度场边界条件研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 52-61. (ZHAO Ren-da, WANG Yong-bao. Studies on temperature field boundary conditions for concrete box-girder bridges under solar radiation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 52-61. (in Chinese))
- [28] 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. (PENG You-song. Studies on theory of solar radiation thermal effects on concrete bridges with application[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [29] 李威. 沥青混凝土铺装层PK断面钢箱梁温度梯度研究与效应分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019. (LI Wei. Temperature gradient study and effect analysis of PK section steel box girder in asphalt concrete pavement[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. (in Chinese))
- [30] 刘江, 刘永健, 房建宏, 等. 高原高寒地区“上”形钢-混凝土组合梁的竖向温度梯度模式[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 32-44. (LIU Jiang, LIU Yong-jian, FANG Jian-hong, et al. Vertical temperature gradient patterns of 上-shaped steel-concrete composite girder in arctic-alpine plateau region[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 32-44. (in Chinese))
- [31] Fu Y D, Dewolf J T. Effect of differential temperature on a curved post-tensioned concrete bridge[J]. Advances in Structural Engineering, 2004, 7(5): 385-397.