

# 基于气象参数的闽南地区水泥混凝土 铺装箱梁温度场研究

郑庆平

(福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004)

**摘要:** 现行桥梁规范对单层混凝土铺装桥梁提供了单一的梯度温度参数,难以适应全国不同地域。为探究一种更符合闽南地区水泥混凝土铺装箱梁的温度场计算公式和参数,以闽南地区五地市近30年的气象数据,拟合出主要气象参数的超越概率曲线,计算得到各气象参数50年一遇标准值;利用GeoStudio的TEMP/W模块进行温度场有限元数值分析,得出水泥混凝土铺装箱梁的温度梯度曲线公式,为闽南地区水泥混凝土铺装箱梁的温度场选定提供参考。

**关键词:** 桥梁;气象参数;水泥混凝土铺装;梯度温度

中图分类号: U448.21<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0115—06

## Temperature Field of Cement Concrete Pavement Box Girder in Southern Fujian Based on Meteorological Parameters

ZHENG Qingping

(Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350004, China)

**Abstract:** The current bridge code provides a single gradient temperature parameter for single-layer concrete paved bridges, which is difficult to adapt to different regions in China. In order to explore a more suitable formula and parameters for temperature field calculation of cement concrete paving box girder in Southern Fujian, the exceeding probability curve of main meteorological parameters was fitted based on the meteorological data of five cities in Southern Fujian in recent 30 years, and the standard values of meteorological parameters with 50 year return period were calculated. The temperature field finite element numerical analysis was carried out by using the TEMP/W module of GeoStudio, and the cement concrete pavement was obtained. The temperature gradient curve formula of box girder can provide reference for temperature field selection of cement concrete paving box girder in Southern Fujian.

**Keywords:** bridge; meteorological parameters; cement concrete pavement; gradient temperature

水泥混凝土铺装的混凝土桥梁结构长期暴露在自然环境中,时刻受到气温变化、太阳辐射等气象因素影响,在梁体受墩台支座约束后,梁体内部会产生较大的温度内力<sup>[1-2]</sup>。我国现行《公路桥涵设计通用规范》<sup>[3]</sup>(JTG D60—2015)(简称《公桥通规》)在大区域调查研究基础上,规定了梁体竖向梯度温度模式和计算参数见图1(a),以计算此类温度效应。

然而我国地域辽阔,东西部、南北方各地地形复杂、气候条件差异大,因此国内众多学者对温度场展

开了大量研究。贺小春等<sup>[4]</sup>针对东莞水道大桥各截面的温度实测数据进行分析,发现混凝土箱型截面的温度场与现行规范规定的温度场存在较大差异。房永祥等<sup>[5]</sup>依托鄂尔多斯某刚构桥寻找到一种更加符合严寒地区混凝土箱梁温度梯度的模式,对严寒地区工程实际具有指导意义。刘江等<sup>[6]</sup>基于青海省海黄大桥,以极值统计方法给出了50年一遇气象参数代表值下不同沥青混凝土铺装厚度的“上”形组合梁最不利竖向温度梯度模式,为高原高

寒地区温度梯度模式取用提供了有效参考。陶翀等<sup>[7]</sup>以浙江省内一座大跨度连续刚构桥梁温度场检测数据为基础,分析了对箱梁的竖向最大正温差与环境气温之间的关系,根据极值统计理论提出箱梁的正温度梯度曲线,对现行规范做了较好的补充。

《公桥通规》也在条文说明中作出释疑,当利用梁顶一部分混凝土铺装层参与梁的抗弯计算时,被利用的那部分厚度作为梁高的一部分,该厚度的顶面就是梁高顶面, $T_1$  为该顶面处温度<sup>[3]</sup>,如图 1(b)所示。显然此时作用于实际梁顶面的温度  $T$  小于图 1(a)所示  $T_1$ ,但目前对参与计算的铺装厚度如何取值尚无相关规定。

温度场参数的选用对桥梁结构的安全计算具有很大影响,如以本文依托工程为例,计算表明,温度效应在上部跨中下缘产生的应力接近车辆效应的 80%,若在刚构体系情况下其影响程度比车辆荷载产生的效应还大。由于目前针对水泥混凝土铺装箱梁的温度场研究很少,因此,在工程实践中,除参照规范按条件选定温度场参数外,以基于区域气象参数概率统计成果为基础,研究建立桥址地区适用的温度场参数具有更大的创新价值和实际意义。

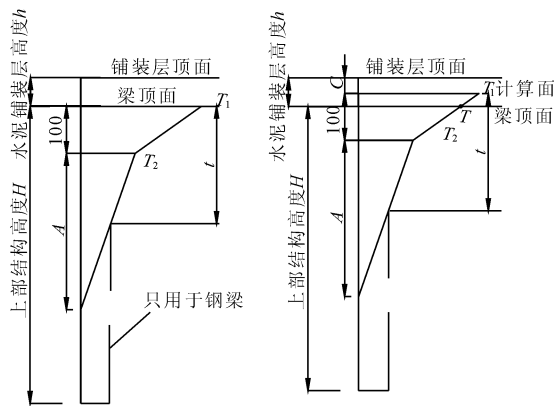


图 1 竖向梯度温度(尺寸单位:mm)

# 1 气象参数

## 1.1 箱梁温度场影响参数

桥梁温度场主要受大气温度、太阳辐射、辐射热、风速、桥梁所处的地理位置、材料热工参数等因素影响<sup>[8-9]</sup>。其中高太阳辐射、高结构大气温差、低风速是混凝土结构处于最不利温度效应的三个主要气象条件<sup>[10]</sup>。

太阳辐射:闽南地区位于北纬 23° ~ 25° 间,北回归线穿过底部,夏季太阳高度角大,辐射量较大,

加之亚热带季风性气候,夏季高温,晴朗无云。桥梁结构在此时容易遭受高太阳辐射,从而引起桥梁结构温度场的明显变化。

结构大气温差:结构大气温差与大气极值温度相关,年最高温度或年最低温度下结构将出现结构大气温差最大值。闽南地区气候呈现夏有酷暑冬无严寒的特点,夏季极值温度相对较高。

风速:闽南地区东临台湾海峡,夏季受台风天气影响显著,高风速下,大气流动快,有利于大气与结构的对流换热。与温差及太阳辐射相比,风速对结构温度效应的影响较小。最不利温度效应下应取较小风速值,一般可用年平均风速作为计算取值。

## 1.2 参数统计分析

屠其璞等<sup>[11]</sup>在应用气象学领域内针对气象参数的研究已经较为成熟,应用概率统计方法可以获取不同情况下的气象参数取值。本文从中国气象网获取 1981 年—2010 年闽南地区(以厦门市、漳州市、东山县、惠安县、晋江市为代表)年最高气温、年最低气温、年最高日平均气温、年最低日平均气温、年最大日辐射、年平均风速等参数历年数据,剔除个别缺失年份后各参数约 150 个数据点,以此统计、分析、拟合各参数的超越概率函数曲线见图 2—图 7。

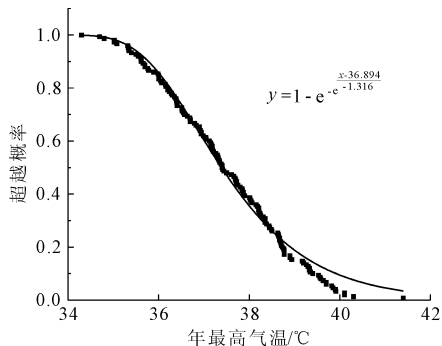


图 2 年最高气温超越概率

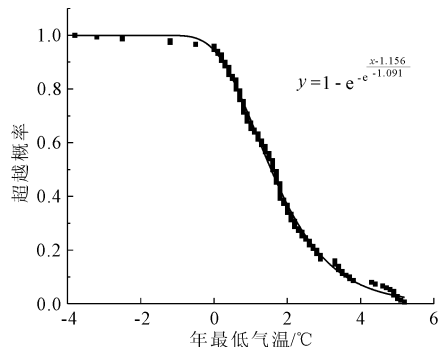


图 3 年最低气温超越概率

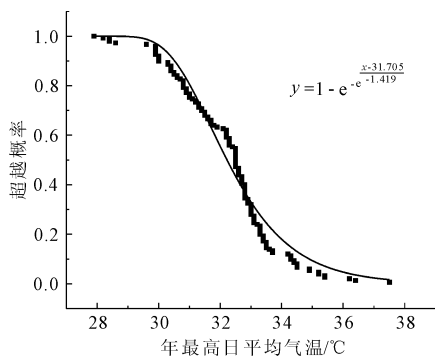


图 4 年最高日平均气温超越概率

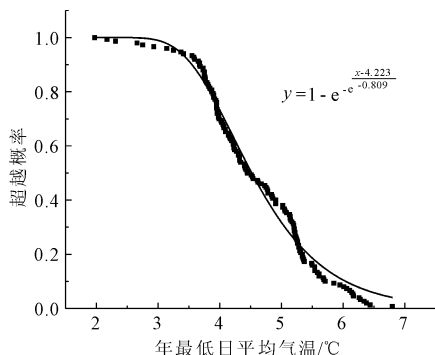


图 5 年最低日平均气温超越概率

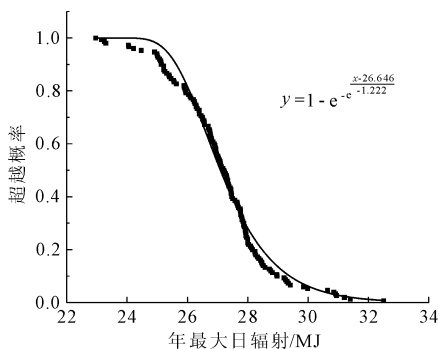


图 6 年最大日辐射超越概率

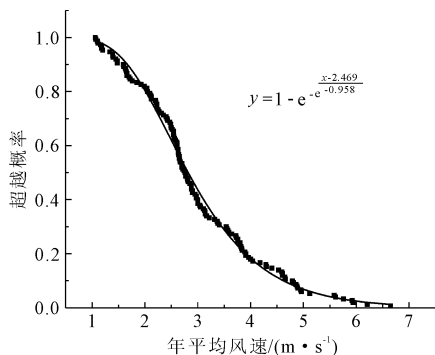


图 7 年平均风速超越概率

由 Gumbel 函数拟合曲线,得到闽南地区年气象参数的超越概率函数方程,按 50 年一遇取箱梁温度场影响不利值,即年最高气温、年最低气温、年最

高日平均气温、年最低日平均气温、年最大日辐射、年平均风速超越概率分别取为 2%、98%、2%、98%、2%、98%,计算得到相关气象参数 50 年一遇标准值。气象参数 50 年标准值见表 1。

表 1 气象参数 50 年一遇标准值

气象参数	50 年一遇标准值
年最高日气温/°C	42.03
年最低日气温/°C	-0.33
最高日平均温度/°C	32.00
最低日平均温度/°C	3.10
年最大日辐射/(MJ·m <sup>-2</sup> )	31.41
年平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.16

## 2 温度分布规律数值模拟

### 2.1 温度作用基本原理

国内外众多学者对此展开了研究,凯尔别克<sup>[12]</sup>总结了不同气象因素下,结构温度场的变化规律,并以矩阵表示温度函数; Priestley<sup>[13]</sup>以傅里叶导热方程为基础建立起 5 次抛物线函数的一维导热模型; Elbadry 等<sup>[14]</sup>较全面地考虑了各影响因素,建立二维导热模型。

假定混凝土箱梁是一个各向均质、同性的物体且在常温状态下内部没有热源,大量现场实测数据表明,温度分布在桥梁纵向基本一致,根据传热学原理,桥梁温度场可简化为二维非稳态热传导微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: $\rho$  为物体的质量密度,kg/m<sup>3</sup>;  $c$  为物体的比热容,J/(kg·°C);  $\lambda$  为物体的导热系数,W/(m·°C);  $t$  为时间,s。箱梁与外界的热交换示意图如图 8 所示。

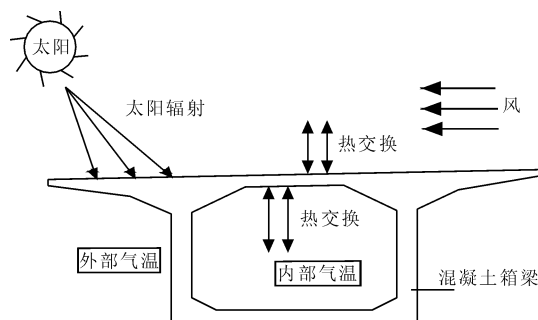


图 8 箱梁与外界的热交换示意图

## 2.2 有限元模型

本文利用 GeoStudio 的 TEMP/W 热力学分析模块针对闽南地区某箱梁桥进行有限元分析,采用的计算模型及尺寸如图 9 所示。混凝土铺装层采用包括气温、大气辐射、风速等在内的气象边界;其余边界忽略侧向日照辐射、风速等影响,只考虑气温的变化对其影响,采用气温边界,边界条件主要参数见表 1。混凝土铺装层厚度分别取 8 cm、10 cm、12 cm、14 cm、16 cm、18 cm、20 cm 七个不同工况。

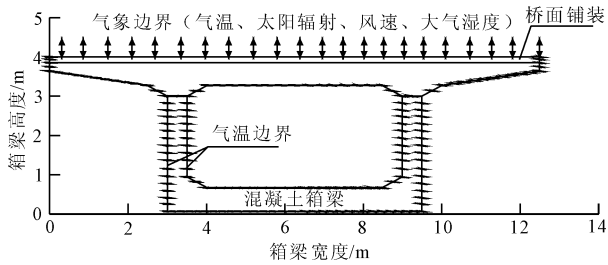


图 9 计算模型

混凝土铺装及箱梁材料均采用 C50 混凝土,材料热特性主要参数根据相关文献[8-10,15]计算取值见表 2。

表 2 材料热特性主要参数

参数	取值
导热系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	2.4
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2500
比热容 $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	900
综合传热系数 $h / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	16.14
太阳辐射吸收系数 $\alpha$	0.65

### 2.2.1 混凝土箱梁有效温度标准值计算

结构的有效温度可通过计算梁体在气温变化影响下的最高温度曲线,沿梁体竖向一定深度范围,取其温度变化平缓时的梁体平均温度作为结构的有效温度。

根据表 1 所得的年最高日气温和年最低日气温数据,经计算不同铺装层厚度下腹板最高或最低温度结果如图 10、图 11 所示。

根据图 10、图 11 温度曲线可得,对梁高超过 140 cm 的水泥混凝土桥梁,腹板深度 140 cm 以下部位,梁体温度变化已趋平缓,在不同铺装层厚度下,有效温度标准值取值基本相同。由图 10、图 11 得到闽南地区最高有效温度为 33.51°C、最低有效温度为 7.22°C。

将表 1 中统计分析得到的闽南地区最高日平均气温、最低日平均气温分别代入《公桥通规》<sup>[3]</sup> 计算

公式  $T_e = 24.14 + (T_l - 20)/1.4$  和  $T_d = (T_l + 1.85)/1.58$  中,计算可得有调查资料最高有效温度标准值  $T_e$  为 34.2°C,最低有效温度标准值  $T_d$  为 3.13°C。不同计算方式最高(低)有效温度标准值比较见表 3。

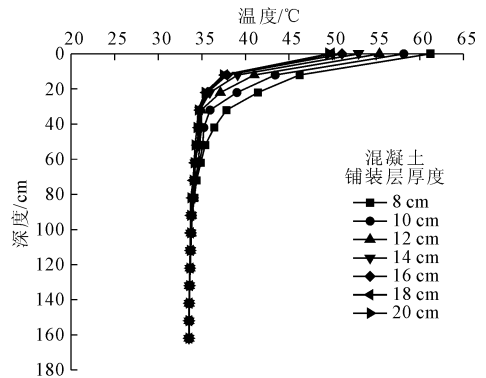


图 10 最高日平均气温月最高温度曲线

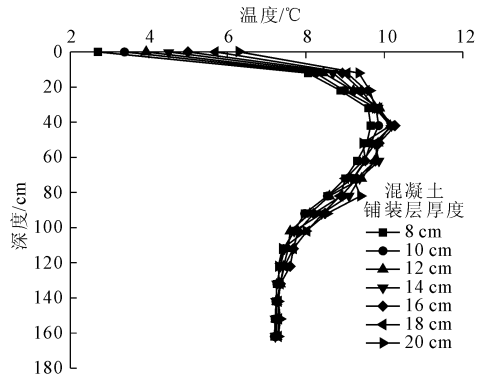


图 11 最低日平均气温月最低温度曲线

表 3 不同计算方式最高(低)有效温度标准值

计算类型	最高有效温度标准值/°C	最低有效温度标准值/°C
无调查资料	34.00	0.00
有调查资料	34.20	3.13
数值模拟	33.51	7.22

表 3 最高有效温度标准值的数值模拟计算结果接近于规范有、无调查资料时规定的取值。而最低有效温度标准值与规范取值相差较大,这是由于闽南地区位于温热带地区,同时纬度相对较低,又受海洋性气候影响,冬季极低温度较少出现,也反映了地域环境对有效温度取值存在较大影响。

### 2.2.2 混凝土箱梁竖向梯度温度计算

计算日照正温差时,上边界为考虑年最高日气温、年最大日辐射、年平均风速五十年一遇标准值的气象边界,其他边界为仅考虑年最高日气温五十年一遇标准值,结构物初始温度假定为最高有效温度

标准值 33.51℃。混凝土铺装层厚度分别取 8 cm、10 cm、12 cm、14 cm、16 cm、18 cm、20 cm 时计算正温差随深度变化曲线见图 12。

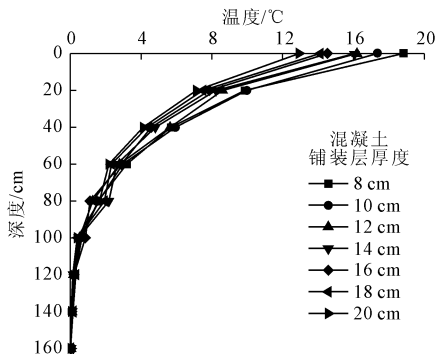


图 12 正温差随深度变化曲线

假定桥面板处温差值为  $T_1$ , 桥面板以下 10 cm 处温差值为  $T_2$ , 8 cm 厚度水泥混凝土铺装最大正温差  $T_1$  位于顶板位置,  $T_1 = 18.84^\circ\text{C}$ , 板下 10 cm 处温差值  $T_2 = 14.12^\circ\text{C}$ , 以  $0.5^\circ\text{C}$  为影响深度判定温差, 影响深度为 105.2 cm。不同铺装层厚度梯度温度计算参数见表 4。

表 4 不同铺装层厚度下梯度温度计算参数

铺装层厚度 $h/\text{cm}$	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	影响深度 $H/\text{cm}$
8	18.84	14.12	105.20
10	17.23	13.86	104.40
12	16.78	12.63	101.72
14	16.03	12.02	98.44
16	14.53	11.74	99.30
18	14.11	11.16	97.42
20	12.93	9.83	92.19

不同水泥混凝土铺装层厚度下, 梯度温度基数取值不同, 呈现较为明显的线性负相关, 水泥混凝土铺装层越厚, 各参数取值越小。铺装层厚度与梯度温度基数关系可以参考以下拟合公式:

$$\begin{cases} T_1 = 22.33 - 0.47h \\ T_2 = 16.98 - 0.34h \\ H = 113.66 - 0.99h \end{cases} \quad (2)$$

比较水泥混凝土铺装的竖向温度梯度基数, 《公桥通规》<sup>[3]</sup> 不考虑铺装层厚度影响时, 其规定取值单一, 其中  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 6.7^\circ\text{C}$ 。最大负温差按最大正温差的  $-0.5$  倍计算。根据上述计算结果, 数值模拟  $T_1$  较《公桥通规》小  $6^\circ\text{C} \sim 12^\circ\text{C}$ ,  $T_2$  较《公桥通规》<sup>[3]</sup> 大  $2^\circ\text{C} \sim 7^\circ\text{C}$ 。可见闽南地区气象参数计算模拟得到的竖向温度梯度曲线更为平缓, 同时影响深度也更深。

### 3 实例分析

#### 3.1 工程概况

某大桥位于福建省闽南地区, 其主桥长 300 m, 为五跨(42 m + 3 × 72 m + 42 m) 预应力混凝土变截面连续箱梁, 上部根部梁高 3.9 m, 跨中梁高 1.8 m, 箱梁顶宽 12.5 m, 底宽 6.5 m, 两翼悬臂长 3.0 m。主梁采用 C50 混凝土挂篮现浇施工。桥面铺装采用 10 cm 厚 C40 防水混凝土。采用 MIDAS/Civil 建立主梁有限元计算模型见图 13。

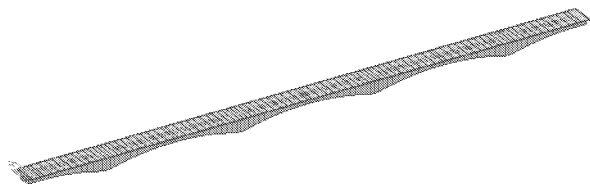


图 13 主梁计算模型

#### 3.2 不同温度模式下的内力比较

##### 3.2.1 温度参数

本桥位于福建漳州, 属温热地区, 由《公桥通规》<sup>[3]</sup> 表 4.3.12-2 可查得, 有效温度标准值  $T_{\text{max}} = 34^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{min}} = 0^\circ\text{C}$ 。本文模拟计算有效温度标准值为  $T_{\text{max}} = 33.51^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{min}} = 7.22^\circ\text{C}$ 。设计合拢温度按  $14^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  考虑。不同温度模式下均匀升降温见图 14。不同温度模式下竖向温度梯度见图 15。

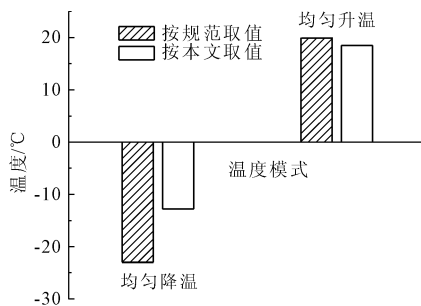


图 14 不同温度模式下均匀升降温

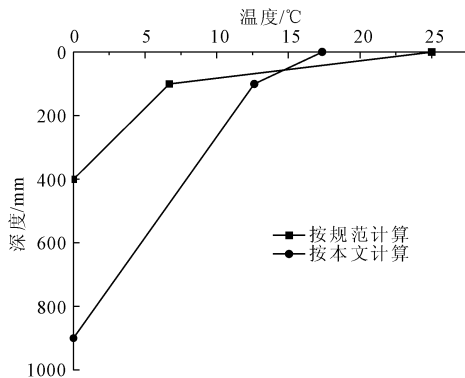


图 15 不同温度模式下竖向温度梯度

### 3.2.2 内力计算结果

仅改变上述两种温度参数,得到两种温度参数作用下主梁内力比较见表 5、表 6。

表 5 中墩支点处内力比较

荷载组合	参数类型	按规范计算值	按本文计算值	本文计算较规范/%
整体升温 + 梯度正温差	剪力/kN	-29.9	-25.4	-15.1
	弯矩/(kN·m)	-2738.8	-2492.8	-8.9
整体降温 + 梯度负温差	剪力/kN	26.0	22.6	-13.1
	弯矩/(kN·m)	5142.2	4704.4	-8.5
恒载作用	弯矩/(kN·m)	-12638.2	—	—

表 6 中跨跨中内力比较

荷载组合	参数类型	按规范计算值	按本文计算值	本文计算较规范/%
整体升温 + 梯度正温差	剪力/kN	-29.9	-25.4	-15.1
	弯矩/(kN·m)	7701.0	6044.2	-21.5
整体降温 + 梯度负温差	剪力/kN	26.0	22.6	-13.1
	弯矩/(kN·m)	-4090.3	-3233.6	-20.9
恒载作用	弯矩/(kN·m)	29214.3	—	—

上述计算结果表明,采用本文温度场模式计算得到的内力较《公桥通规》<sup>[3]</sup>模式计算结果小,跨中弯矩减小约 20%,支点弯矩减小约 10%。若可适当加厚铺装厚度,温度效应降低更为明显。

## 4 结 论

本文基于闽南地区气象数据,采用有限元模拟分析方法,探讨水泥混凝土铺装箱梁桥温度场分布规律,提出适合本区域桥梁结构的有效温度标准值和梯度温度基数,得出以下结论:

(1) 闽南地区混凝土桥梁最低有效温度标准值受地域环境影响较明显,不可忽视。

(2) 数值模拟分析表明,在水泥铺装层强度等级与梁体协调情况下,设有单层不同厚度水泥混凝土铺装的水泥混凝土梁桥竖向梯度温度基数  $T_1$ 、 $T_2$  与《公桥通规》相比,存在较大差别,且合理的铺装厚度可以较大降低桥梁温度效应。因此对于单层水泥混凝土铺装的大跨径桥梁,建议通过专题研究以选定更为贴切的温度场模式和基数。

(3) 本文在数值模拟研究过程中,未考虑混凝

土箱梁箱内气温变化、混凝土早龄期的水化热等因素影响,因此闽南地区水泥铺装混凝土桥梁梯度温度场基数采用文中建议公式计算时,应根据实际情况对公式计算结果予以适当修正。

### 参考文献:

- [1] 辛明奇,陈建荣,贾金青. 某独塔不等跨斜拉桥温度效应研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):23-29.
- [2] 亢景付,赵蒙蒙,蒋元成,等. 约束程度与温度应力之间的关系研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(6):21-25.
- [3] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015:34-35.
- [4] 贺小春,袁建伟. 砼箱梁截面的实测温度场及其分析[J]. 公路与汽运,2013,36(5):177-179.
- [5] 房永祥,赵君委. 严寒地区箱梁温度梯度模式研究及分析[J]. 北方交通,2017,15(9):6-9.
- [6] 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.
- [7] 陶 翀,谢 旭,申永刚,等. 基于概率分析的混凝土箱梁温度梯度模式[J]. 浙江大学学报,2014,48(8):1353-1361.
- [8] 王 毅. 预应力混凝土连续箱梁温度作用的观测与分析研究[D]. 南京:东南大学,2006:88-96.
- [9] 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.
- [10] 林建萍. 异形截面混凝土箱梁温度效应分析[D]. 上海:同济大学,2003:27-30.
- [11] 屠其璞,王俊德,丁裕国. 气象应用概率统计学[M]. 北京:气象出版社,1984:93-102.
- [12] F. 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,1981:48-53.
- [13] Priestley M J N. Design of concrete bridges for temperature gradients[J]. American Concrete Institute,1978,75(5):209-217.
- [14] Elbadry M, Ghali A. Temperature variations in concrete bridges [J]. Structural Engineering, 1983, 109(109):2355-2374.
- [15] 姚晓琴,陈祖鑫. 福建省典型花岗岩残积土路堤温度场特征研究[J]. 福建工程学院学报,2012,10(6):559-566.