

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.023

基于长期监测的山区扁平钢箱梁横向温度梯度研究

杨文甫¹,陈鑫^{2,3}

(1.广东盛翔交通工程检测有限公司,广东广州 511400;2.中铁大桥科学研究院有限公司,湖北武汉 430034;

3.桥梁结构健康与安全国家重点实验室,湖北武汉 430034)

摘要:为实现桥梁结构温度场和温度效应的准确描述和预测,对某山区扁平钢箱梁横向温度梯度特征进行分析。首先,基于某山区悬索桥扁平钢箱梁结构温度场的长期监测数据,进行横向温差极值分析,采用聚类分析得到结构温度场的不对称分布特征;然后,通过统计分析建立钢箱梁顶、底板横向温差的概率密度模型,并以50年为重现期,计算钢箱梁顶、底板的横向温差标准值;最后,将不同位置处的横向温差按照最不利状况进行组合,得到顶、底板横向温度梯度模式。结果表明:钢箱梁横向温差受季节变化影响较小。受山区地貌影响,结构温度场具有明显的非对称分布特征。钢箱梁顶、底板横向温差的概率统计模型与双高斯模型吻合较好。由于顶板直接被太阳辐射,其横向温差明显大于底板横向温差。以50年为重现期计算钢箱梁顶、底板横向温差标准值的最大绝对值分别达到37.68℃和13.37℃。山区扁平钢箱梁顶板具有M形、W形、斜N形3种横向温度梯度模式,底板具有V形、倒V形、直线形3种横向温度梯度模式,顶、底板横向温度梯度模式均具有明显的不对称性。

关键词:山区悬索桥;扁平钢箱梁;横向温度梯度;长期监测

中图分类号:U446

文献标志码:A

0 引言

由于日照强度差异,钢箱梁温度场分布不均匀,使得结构产生较大变形和附加应力,影响结构长期性能^[1-3]。在一些超静定结构中,温度梯度应力甚至高于活载效应^[4-7]。因此,钢箱梁温度场的准确分析是桥梁力学行为预测和全寿命评估的重要前提和基础。

近年来,桥梁结构温度场的分布规律得到了广泛关注。Mirambell等^[8]采用热传导方程建立了混凝土箱梁温度和应力的解析模型,并分析了截面形状对温度场分布的影响;葛耀君等^[9]基于傅立叶热传导理论,提出了一种适用于工程设计的混凝土斜拉桥温度场实用二维差分计算方法;叶见曙等^[10]、雷笑等^[11]对混凝土箱梁温度场进行长期监测,提出了适用于混凝土箱梁的概率统计模型和温差特征值;汪剑等^[12]引入对流换热理论,采用数值方法预测混凝土

箱梁温度场,并通过实测结果进行了验证;曾庆响等^[13]基于实测温度,提出了混凝土箱梁的改进温度梯度模式,计算了该温度梯度作用下结构的应力与变形规律,并与现有规范值进行了比较;Lee^[14]分析了混凝土箱梁在桥面铺装之前的横向及竖向温度梯度,提出了4个标准梁截面的季节温度梯度模型;顾斌等^[15-16]分析了气象参数对混凝土箱梁温度场的影响,提出了一种考虑气象参数的温度梯度模式,同时,分析了大尺寸混凝土箱梁的温度梯度变化规律,提出了一种适用于大尺寸混凝土箱梁的温度梯度修正方法;陶翀等^[17]采用二维传热理论,通过实测气温、太阳辐射理论值计算混凝土箱梁的竖向温度梯度,通过将计算值与实测值进行比较,验证了该方法的准确性;刘江等^[18]分析了不同地区混凝土箱梁温度梯度模式,针对不同城市地理环境和气象参数差异,提出了混凝土温差代表值的计算公式,并对各个城市温度代表值进行了分区。众多研究成果表明,日照作用下,箱梁竖向温度梯度显著,但对横向温度

收稿日期:2023-06-20(修改稿)

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(编号:科技-2017-02-015)

作者简介:杨文甫,男,硕士,高级工程师.E-mail:ccpa2020@163.com

梯度研究较少。大量研究成果主要集中在混凝土箱梁温度场的分布规律,对于扁平钢箱梁温度场分布研究较少。丁幼亮等^[19-20]研究了沿海地区钢箱梁的温度场分布,但由于山区日照强度差异及地形地貌影响,其钢箱梁温度场分布规律与沿海地区存在差异。

本文基于某山区悬索桥扁平钢箱梁结构温度场的长期监测数据,分析温度横向分布规律。通过对横向温差长期监测数据进行统计分析,建立钢箱梁顶、底板横向温差的概率密度模型。以50年为重现期,计算钢箱梁顶、底板的横向温差标准值,并将不同位置处的横向温差按照最不利状况进行组合,得到顶、底板横向温度梯度模式。研究成果可为山区扁平钢箱梁温度场和温度效应研究提供数据支撑。

1 工程概况

1.1 山区扁平钢箱梁温度监测系统

云南山区某悬索桥主梁采用扁平流线形钢箱梁。钢箱梁宽33.5 m,高3.5 m,桥面板为正交异性板,桥面板及底板均布置U形加劲肋。为分析钢箱梁温度横向分布特征,跨中截面处置有结构温度测点(图1),结构温度采用光纤光栅温度计监测。光纤光栅温度计监测数据由现场布置的光纤光栅解调仪进行解算后,传输至监控室服务器进行存储、分析。结构温度监测数据连续采集,连续存储,采样率为0.016 7 Hz。

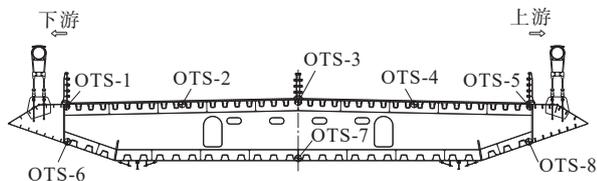


图1 钢箱梁结构温度测点布置图

1.2 典型结构温度监测结果

2019年6月23日,钢箱梁跨中顶、底板结构温度监测结果如图2所示。该日天气晴,环境温度为17~30℃,桥面风速较低。

由图2可知:钢箱梁顶、底板温度白天升高,夜晚降低,均呈类似正弦曲线变化。顶、底板横向不同位置温度变化曲线的幅值和相位差异明显,钢箱梁顶、

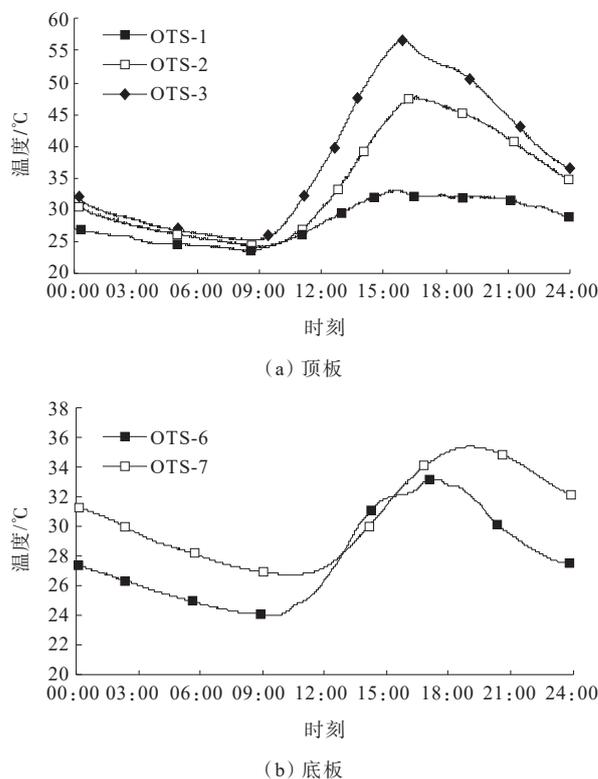


图2 钢箱梁顶、底板温度的日典型监测结果

底板横向温差显著。由于顶板直接经受太阳辐射,其横向温差明显大于底板横向温差。

2 钢箱梁温度横向分布特征

2.1 横向温差极值特征

采用2019年2月至7月的结构温度监测数据,计算钢箱梁顶、底板不同测点在同一时刻的温度差值,结果如图3所示。图中, $T_{i,j}$ 为OTS- i 温度测点与OTS- j 温度测点的实测温度差值典型横向温差。

由图3可知:钢箱梁横向温差随季节变化具有一定的随机性,二者无明显变化规律,表明钢箱横向温差受季节变化影响较小。

经统计分析得到钢箱梁顶、底板横向温差的极值,如表1、2所示。

由表1、2可知:钢箱梁顶板横向温差最大达23.93℃,底板横向最大温差达9.89℃。较底板相比,钢箱梁顶板横向温差更为显著。

2.2 温度横向对称性特征

将对称温度测点OTS-1、OTS-2、OTS-4、OTS-5、OTS-6、OTS-8的实测温度数据进行聚类分析,结果如图4所示。

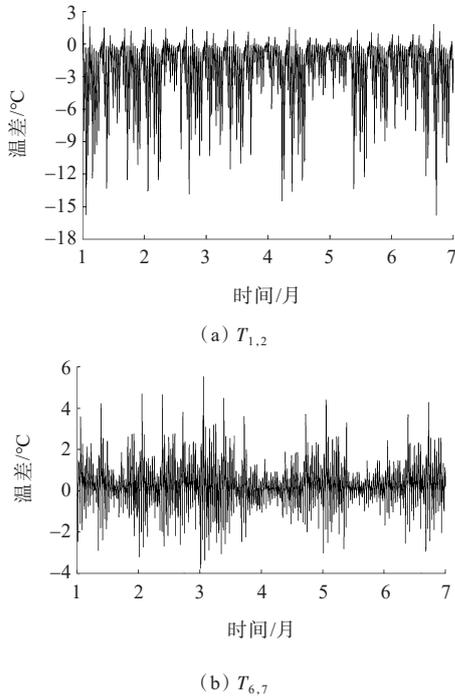


图3 钢箱梁横向温差典型监测结果

表1 顶板横向温差极值

温差样 本编号	温差极值/°C		温差样 本编号	温差极值/°C	
	极大值	极小值		极大值	极小值
T _{1,2}	1.83	-15.83	T _{2,4}	10.98	-1.63
T _{1,3}	1.96	-23.93	T _{2,5}	9.39	-7.27
T _{1,4}	3.54	-6.76	T _{3,4}	20.09	-9.19
T _{1,5}	6.86	-7.83	T _{3,5}	9.74	-5.13
T _{2,3}	4.99	-10.66	T _{4,5}	1.63	-8.88

表2 底板横向温差极值

温差样 本编号	温差极值/°C		温差样 本编号	温差极值/°C	
	极大值	极小值		极大值	极小值
T _{6,7}	5.52	-3.75	T _{7,8}	7.96	-3.11
T _{6,8}	9.89	-4.41			

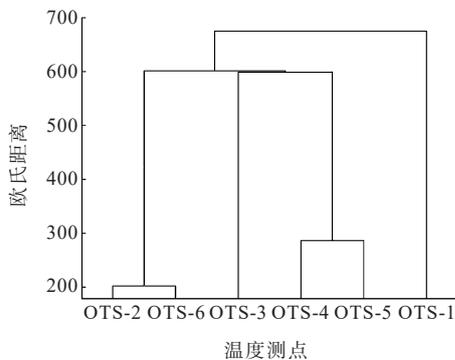


图4 温度样本的聚类分析

由图4可知:结构温度测点中仅OTS-2、OTS-6和OTS-4、OTS-5被归为一类,但归为一类的测点并非对称测点。

同时,比较顶、底板对称温度测点横向温差($T_{1,5}$ 、 $T_{2,4}$ 、 $T_{6,8}$)可知:顶板对称温度测点最大温差达 $10.98\text{ }^{\circ}\text{C}$,底板对称温度测点最大温差达 $9.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表明,受山区地貌影响,山区扁平钢箱梁温度场具有明显的非对称分布特征,对称位置结构温度的统计特性差异明显。

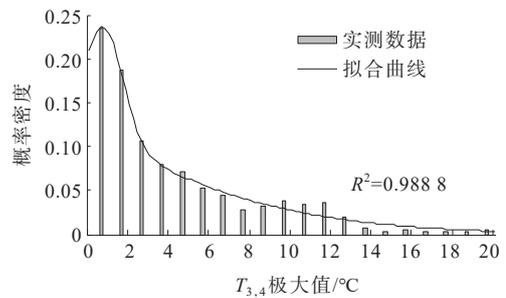
2.3 横向温差概率统计特征

采用2019年1月至6月的结构温度监测数据,研究钢箱梁横向温差日的概率统计特性。通过比较多种概率密度函数拟合效果,最终选用双高斯模型来描述横向温差的概率统计特性,双高斯模型的函数表达式如式(1)所示:

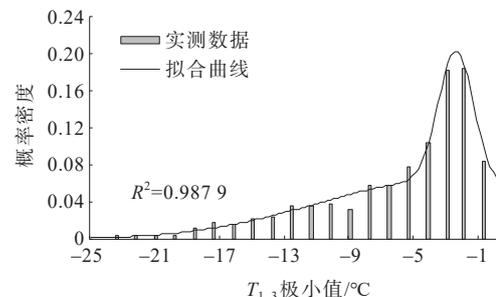
$$f(T) = a_1 \exp\left\{-\left[\frac{(T - b_1)}{c_1}\right]^2\right\} + a_2 \exp\left\{-\left[\frac{(T - b_2)}{c_2}\right]^2\right\} \quad (1)$$

式中: a_1 、 a_2 为幅值参数; b_1 、 b_2 为位置参数; c_1 、 c_2 为尺度参数; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 均为待估计参数。

根据实测横向温差数据,采用最小二乘法对待估计参数 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 进行拟合,得到不同测点间横向温差的概率统计模型。典型横向温差的概率统计模型如图5、6所示。图中, R^2 为概率统计模型的



(a) T_{3,4}极大值



(b) T_{1,3}极小值

图5 顶板典型横向温差概率统计模型

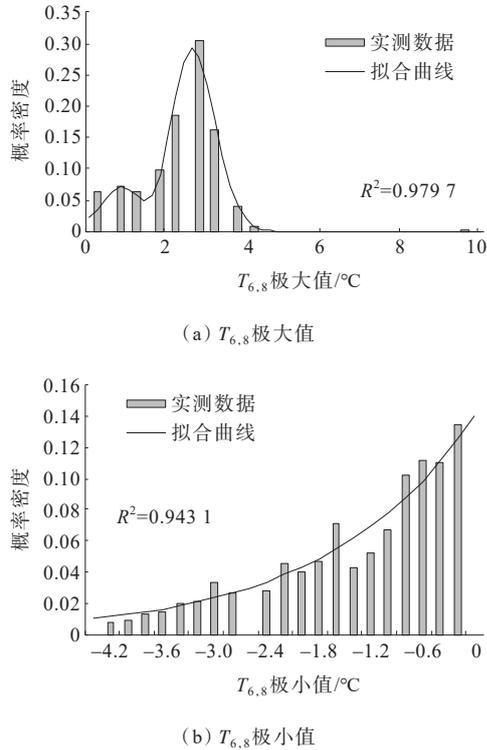


图 6 底板典型横向温差概率统计模型

确定系数。

由图 5、6 可知：钢箱梁顶、底板横向温差的概率统计模型与双高斯模型吻合较好，不同测点横向温差概率统计模型的确定系数均达到 0.94 以上。通过对钢箱梁横向温差进行概率统计分析，可以从概率统计的角度把握钢箱梁横向温差的长期变化。

3 横向温差标准值及梯度模式

3.1 横向温差标准值

根据中国规范，桥梁设计基准期为 100 年。在设计基准期内，钢箱梁横向温差超过标准值次数的数学期望为 2 次。以 50 年为重现期，令超越概率 P 为横向温差 T 大于温差标准值 T_0 的概率，则 P 可由式 (2) 计算：

$$P = \frac{2}{100 \times N} \times 100\% \quad (2)$$

式中： N 为样本总量。

则，钢箱梁横向温差标准值 T_0 可由式 (3) 计算：

$$P = 1 - F(T_0) = \int_{T_0}^{+\infty} f(T) dT \quad (3)$$

式中： $F(T)$ 为自变量 T 的累加分布函数； $f(T)$ 为自变量 T 的概率密度函数。

根据实测数据，建立横向温差原始分布函数 $H(x)$ ，从原始温差中抽取 n 个样本，其极大、极小值可表示为：

$$\text{极大值: } x_{\max} = \max\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (4)$$

$$\text{极小值: } x_{\min} = \min\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (5)$$

根据极值分布理论，极大值与极小值的分布函数可由原始分布函数 $H(x)$ 确定，即：

$$H_{\max}(x) = P(x_{\max} < x) =$$

$$P(x_1 < x, x_2 < x, \dots, x_n < x) =$$

$$P(x_1 < x)P(x_2 < x), \dots, P(x_n < x) = \quad (6)$$

$$H_1(x)H_2(x), \dots, H_n(x) = [H(x)]^n$$

$$H_{\min}(x) = P(x_{\min} < x) =$$

$$1 - P(x_1 \geq x, x_2 \geq x, \dots, x_n \geq x) =$$

$$1 - [1 - P(x_1 < x)][1 - P(x_2 < x)], \dots, \quad (7)$$

$$[1 - P(x_n < x)] = 1 - [1 - H(x)]^n$$

极大值与极小值的分布函数代入式 (2)，得到钢箱梁横向温差标准值如表 3、4 所示。

表 3 顶板横向温差标准值 $^{\circ}\text{C}$

温差样本编号	正温差标准值	负温差标准值
$T_{1,3}$	3.29	-37.68
$T_{2,3}$	8.49	-18.23
$T_{4,3}$	15.08	-31.32
$T_{5,3}$	8.32	-16.27

表 4 底板横向温差标准值 $^{\circ}\text{C}$

温差样本编号	正温差标准值	负温差标准值
$T_{6,7}$	8.89	-6.38
$T_{8,7}$	13.37	-5.13

由表 3、4 可知：钢箱梁顶、底板横向温差标准值的最大绝对值分别达到 37.68 $^{\circ}\text{C}$ 和 13.37 $^{\circ}\text{C}$ 。表明山区悬索桥钢箱梁顶、底板横向温差较大，在设计与监测时，应充分考虑钢箱梁顶、底板的横向温度梯度效应。

3.2 横向温度梯度模式

根据实测顶、底板横向正温差和负温差，按照最不利情况进行组合，确定横向温度梯度模型。将正温差和负温差进行两两组合，根据组合得到的横向温度梯度模式形状，进一步进行分类、归纳，以钢箱

中心测点温度为基准 0°C ,最终分别得到顶板、底板3种最不利的温度梯度模式,如图7、8所示。

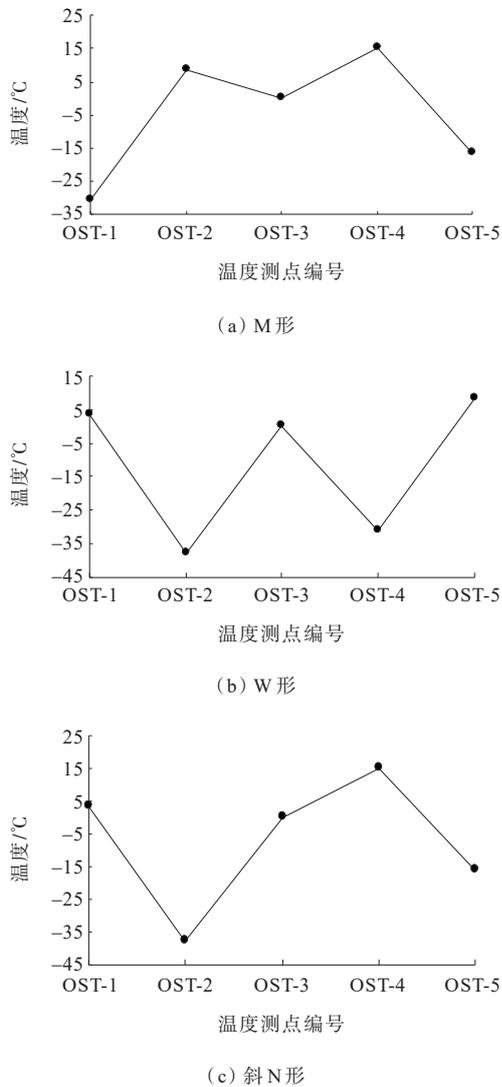


图7 顶板横向温度梯度模式

由图7、8可知:山区扁平钢箱梁顶板具有M形、W形、斜N形3种横向温度梯度模式,底板具有V形、倒V形、直线形3种横向温度梯度模式,顶、底板横向温度梯度模式均具有明显的不对称性。在实际工程中,可按照几种横向温度梯度模式的最不利状况进行设计、计算。

4 结论

本文基于云南山区某悬索桥扁平钢箱梁结构温度场的长期监测数据,分析山区扁平钢箱梁横向温差分布规律,得到以下结论:

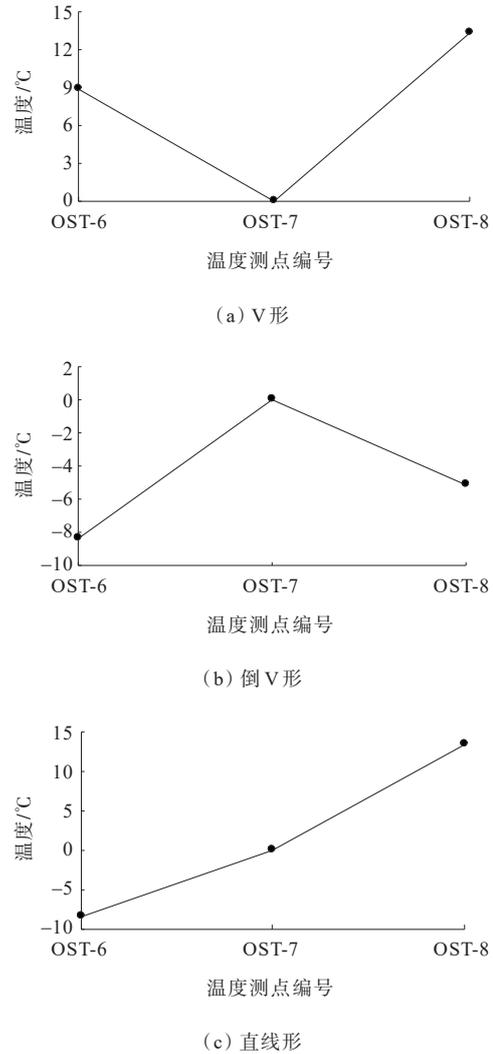


图8 底板横向温度梯度模式

(1) 受山区地貌影响,扁平钢箱梁结构温度场具有明显的非对称分布特征,其横向温差受季节变化影响较小。

(2) 山区扁平钢箱梁顶、底板横向温差的概率统计模型与双高斯模型吻合较好。由于顶板直接接受太阳辐射,其横向温差明显大于底板横向温差。

(3) 山区扁平钢箱梁顶、底板横向温差较大,在设计及监测时,应充分考虑钢箱梁顶、底板的横向温度梯度效应。以50年为重现期计算钢箱梁顶、底板横向温差标准值的最大绝对值分别达到 37.68°C 和 13.37°C 。

(4) 山区扁平钢箱梁顶板具有M形、W形、斜N形3种横向温度梯度模式,底板具有V形、倒V形、直线形3种横向温度梯度模式,顶、底板横向温度梯度模式均具有明显的不对称性。

(5) 本文结论均基于云南某山区悬索桥钢箱梁温度场的实测数据得出,对于其他太阳辐射地区及山区其他地形、地貌处钢箱梁温度场还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 方金,范亮. 高温混合料摊铺过程中的扁平钢箱梁温度效应分析[J]. 中外公路,2021,41(2):214-219.
- [2] 陈想军. 等效加劲板单元在U形加劲板稳定性计算中的应用研究[J]. 中外公路,2023,43(2):144-149.
- [3] 赵晨晨. 大跨径连续钢箱梁桥高温摊铺下的结构受力研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.
- [4] XIA Y, CHEN B, ZHOU X Q, et al. Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20(4):560-575.
- [5] 李晓超. PC梁截面温度梯度对钢绞线预应力影响规律研究[J]. 中外公路,2021,41(2):172-176.
- [6] 姜竹昌,高华睿,曹洪亮,等. 大跨径波形钢腹板箱梁桥截面竖向温度梯度研究[J]. 中外公路,2021,41(4):125-130.
- [7] 蒋赣猷,周群,陈光辉. 大跨PC连续刚构桥主梁温度梯度下的应力分析[J]. 中外公路,2019,39(3):143-147.
- [8] MIRAMBELL E, AGUADO A. Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(9):2388-2409.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 雷笑,叶见曙,王毅. 日照作用下混凝土箱梁的温差代表值[J]. 东南大学学报(自然科学版),2008,38(6):1105-1109.
- [12] 汪剑,方志. 混凝土箱梁桥的温度场分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2008,35(4):23-28.
- [13] 曾庆响,韩大建,马海涛,等. 预应力混凝土箱梁桥的温度效应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41(6):2360-2366.
- [14] LEE J H. Investigation of extreme environmental conditions and design thermal gradients during construction for prestressed concrete bridge girders[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(3):547-556.
- [15] 顾斌,陈志坚,陈欣迪. 基于气象参数的混凝土箱梁日照温度场仿真分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2012,42(5):950-955.
- [16] 顾斌,陈志坚,陈欣迪. 大尺寸混凝土箱梁日照温度场的实测与仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(3):1252-1261.
- [17] 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(工学版),2014,48(8):1353-1361.
- [18] 刘江,刘永健,白永新,等. 混凝土箱梁温度梯度模式的地域差异性分区研究[J]. 中国公路学报,2020,33(3):73-84.
- [19] 丁幼亮,王晓晶,王高新,等. 珠江黄埔大桥钢箱梁温度长期监测与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2012,42(5):945-949.
- [20] 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.