

## 薄壁箱形高墩日照温度场及墩顶位移研究

刘治伸<sup>1</sup>,张伊飞<sup>2</sup>,宋飞<sup>2</sup>,苏巨峰<sup>3</sup>,任翔<sup>2</sup>

(1.北京市运输事业发展中心,北京市 100161;2.西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054;

3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**薄壁空心墩在高墩大跨连续刚构桥中得到了广泛应用,日照作用下超高薄壁空心墩的墩顶偏位对于桥墩施工期和成桥后整体结构线形和受力产生不利影响。该文基于陕西省某特大桥180 m高薄壁空心墩,选取施工过程中8月28日至29日和10月11日至12日各24 h的温度场及墩顶位移测试数据,结合有限元分析方法对日照作用下超高薄壁空心墩温度场及墩顶位移随时间的变化规律进行研究。结果表明:南北墩壁温差受环境温度和昼夜温差影响较大,8月环境气温高,昼夜温差小,南北墩壁温差较小,墩顶偏位较小;10月环境气温低,昼夜温差大,南北墩壁温差较大,墩顶偏位大;墩顶位移与日照壁面温差变化规律一致;墩高达到180 m时,在8℃壁面温差下产生最大52.6 mm的墩顶位移。采用实体有限元法分析得到的墩顶位移和规范计算出的墩顶位移与实测值相比均吻合较好,具有较高的精度。

**关键词:**日照作用;薄壁空心墩;温度场;墩顶偏位;数值分析

**中图分类号:**U443.22

**文献标志码:**A

### 0 前言

在中国高山、峡谷、江河、湖海地区,高墩大跨连续刚构桥因其经济、适用而得到了广泛应用。随着墩身朝着高墩、轻型的方向不断发展,温度作用对桥墩的影响越来越显著<sup>[1-5]</sup>。混凝土桥墩受日照作用

时,向阳侧混凝土表面温度迅速升高,背阳侧温度变化较小,由于混凝土材料热传导系数较小,温度从向阳侧向背阳侧的传递过程中有明显的滞后效应,导致桥墩横截面产生由向阳侧向背阳侧的温度梯度,从而使桥墩发生弯曲变形,在桥墩施工节段顶部产生水平向的墩顶位移,且墩越高,这种影响越大,将对桥墩节段施工线形、内力及成桥后整体结构线形

- [6] 郭勤涛,张令弥,费庆国.用于确定性计算仿真的响应面法及其试验设计研究[J].航空学报,2006,27(1):55-61.
- [7] REN W X, CHEN H B. Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method [J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 2455-2465.
- [8] 周林仁,欧进萍.基于径向基函数响应面方法的大跨度斜拉桥有限元模型修正[J].中国铁道科学,2012,33(3):8-15.
- [9] 魏锦辉,任伟新.结构有限元模型修正的自适应响应面方法[J].振动与冲击,2013,32(8):114-119.
- [10] 苏国韶,赵伟,燕柳斌,等.高斯过程动态响应面法及其在悬索桥结构可靠度分析中的应用[J].中国公路学报,2013,26(6):87-95.
- [11] 孙全胜,宫剑.基于响应面法的自锚式悬索桥有限元模型修正[J].中外公路,2014,34(1):153-156.
- [12] SHAN D S, LI Q, KHAN I, et al. A novel finite element model updating method based on substructure and response surface model [J]. Engineering Structures, 2015, 103(15): 147-156.
- [13] PETERSEN Ø W, ØISETH O. Sensitivity-based finite element model updating of a pontoon bridge [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 573-584.
- [14] HESTER D, KOO K, XU Y, et al. Boundary condition focused finite element model updating for bridges [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109514.
- [15] 隋允康,宇慧平.响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M].北京:科学出版社,2011.

收稿日期:2022-06-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51408484);陕西省重点研发计划项目(编号:2018SF-359)

作者简介:刘治伸,男,硕士,高级工程师.E-mail:543952177@qq.com

和内力造成较大的影响。因此,有必要对此问题进行更深入的研究。

目前,国内外对混凝土桥墩日照温度效应的研究较多。吴斌等<sup>[6]</sup>利用有限元程序计算分析了桥墩在温差作用下的温度应力及墩顶水平位移,得出了桥墩温差对墩顶偏位影响较大的结论;戴公连等<sup>[7]</sup>建立有限元模型计算分析薄壁箱形高墩日照温度引起的温度应力和墩顶偏位,结果表明:高墩最大偏位发生在下午 18:00 时刻;任翔<sup>[8-9]</sup>依托某悬索桥混凝土桥塔,测试了不同季节下桥塔温度场和应力场,提出了混凝土柱状箱形结构截面厚度方向、长宽方向温度梯度模式宜采用折线模式;陈建平<sup>[10]</sup>等结合实桥研究了大跨度连续箱梁桥斜交高墩的日照温度效应,得到了桥墩在日照温度场作用下的温度场及温度应力分布特征。从已有空心高墩的温度效应研究看,主要集中在温度场分布及温度导致的应力效应及开裂方面,对于温度引起超高墩偏位的试验研究较少。

本文依托陕西省某特大桥项目,实测超高箱形薄壁空心墩表面向阳侧和背阳侧日照温差及同时刻的墩顶位移,结合理论分析,对日照温度作用下超高桥墩墩顶偏位及其与向阳侧和背阳侧日照温差的关系进行研究。

## 1 工程背景

某特大桥主桥是一座跨径组合为(98+5×185+98)m的超高墩、特大跨双幅预应力混凝土连续刚构桥。主桥主墩编号按里程依次为11#~16#,其中11#、16#主墩为双肢薄壁空心墩,墩高分别为85m和112m;12#主墩为等截面单肢薄壁空心墩,墩高118m;13#~15#主墩为变截面单肢薄壁空心墩,墩高分别为177m、183m和180m。左、右幅主墩间用3道横系梁连接。本文研究依托15#桥墩进行向阳侧和背阳侧日照温差测试及主墩偏位测试。其中15#墩为180m空心薄壁墩,采用从高至低逐渐增大的矩形空心断面,顺桥向按1:80的比例由1000cm变化至1450cm,横桥向为660cm;桥墩壁厚顺桥向按1:80比例从上至下由80cm变化至100cm,横桥向为80cm,墩身截面如图1所示。

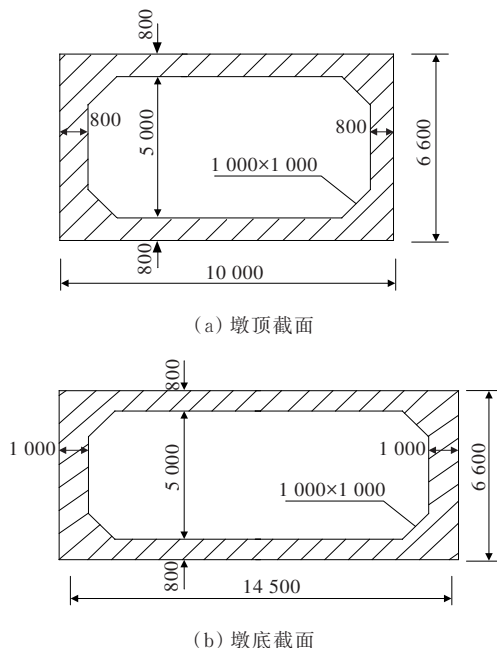


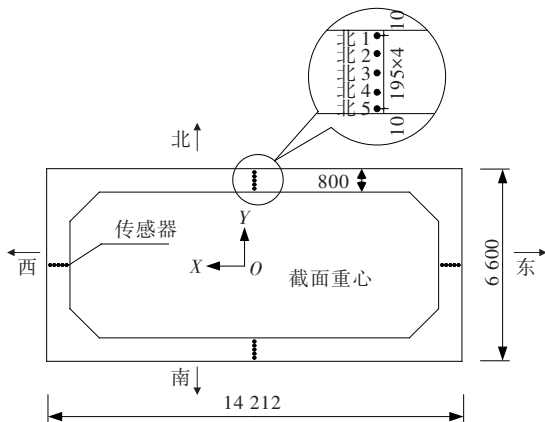
图1 墩身截面(单位:mm)

## 2 测试方法及测点布置

### 2.1 温度场测试

#### 2.1.1 温度场测试截面及测点布置

一般认为温度场在桥墩高度方向变化较小<sup>[11-14]</sup>,所以温度测试截面沿高度选择在15#墩距离承台顶面11.5m处。在测试截面埋置温度传感器,利用温度综合测试仪进行桥墩温度场测试,传感器在每个壁面沿厚度方向各均匀布置5个,每个角隅处布置两个,靠近内外表面处传感器布置在混凝土保护层内,其中心距离混凝土墩壁边缘1cm,其余各点均匀布置,间距为19.5cm。温度测量传感器布置见图2。选取



注:传感器编号每个壁面由外到内依次编排,如北侧墩壁为北1~北5,北1指北侧墩壁最外侧测点,北5指北侧墩壁最内侧测点,其余墩壁同理。

图2 传感器布置图(单位:mm)

8月28—29日和10月11—12日各24 h进行温度场和主墩偏位测试。

### 2.1.2 温度场测试方法

温度场测试采用通用自动化综合测试系统,该系统包括:手机通信模块、手机通信主机、DTU手机上网模块、DSC测试系统软件、综合采集模块、通用信号采集模块、温度采集模块等。这些模块安置在机箱内,通过在手机通信主机上安装电话卡,可以实现远程数据无线传输。

数据设定为每隔0.5 h采集一次,可连续测量。测量精度控制在 $0.1^{\circ}\text{C}$ 和 $1\mu\text{e}$ 范围内。

### 2.1.3 测试结果

由于本文仅考虑空心墩表面向阳侧和背阳侧日照温差对墩顶偏位的影响,且东西侧墩壁刚度较大,墩顶偏位较小,因此仅列出空心墩南北墩壁内外表面1~5号测点日照温度随时间的变化。桥墩温度场测试选取每间隔1 h的测试数据。

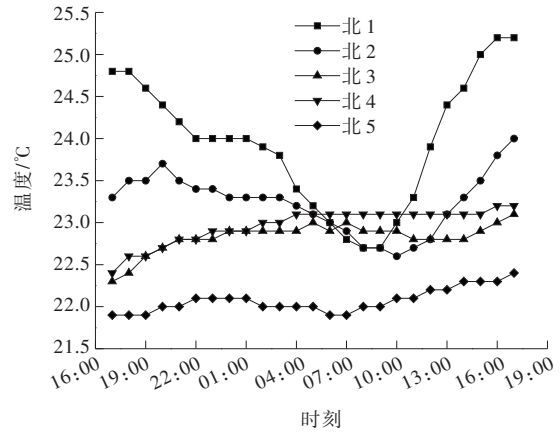
为了分析墩顶偏位与壁面温差之间的关系,需要给出壁面温差的计算方法,首先对沿壁厚的温度数值按照测点距离截面形心大小进行加权,然后将每个壁面上的测点数据进行叠加后求取差值即为计算方向上的计算温差值,作为与墩顶偏位相关性分析的参数。依托工程所在地南北方向为桥梁的横桥向,日照温差在南、北两个墩壁最为显著。南北两个壁面计算温差表达式为:

$$\Delta T = T_S - T_N \quad (1)$$

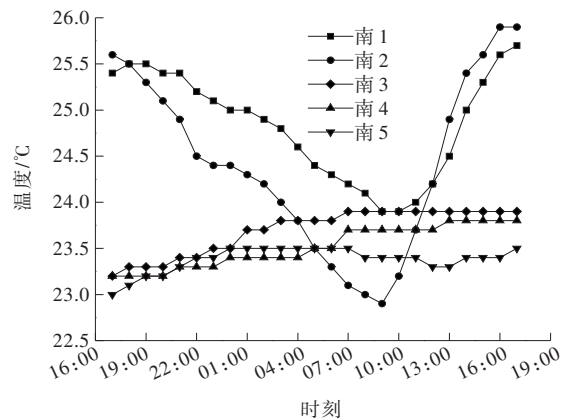
式中:  $T_S = \sum_{i=1}^5 \lambda_i T_{Si}$ ;  $T_N = \sum_{i=1}^5 \lambda_i T_{Ni}$ ;  $T_S$ 、 $T_N$  分别为南、北壁面计算温度;  $T_{Si}$ 、 $T_{Ni}$  分别为南、北侧墩壁第  $i$  测点测试温度值;  $\Delta T$  为南、北壁面计算温差;  $\lambda_i$  为  $L_i/L$ ,  $L_i$  为第  $i$  个测点距形心的距离,  $L$  为墩壁外边缘距截面形心距离。

经计算,  $\lambda_1=0.997$ ,  $\lambda_2=0.938$ ,  $\lambda_3=0.879$ ,  $\lambda_4=0.820$ ,  $\lambda_5=0.761$ 。8月28—29日和10月11—12日15#墩温度场测试结果如图3、4所示。

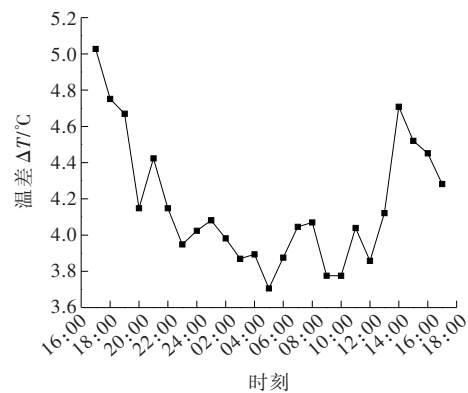
图3显示:在24 h测试时间内,南北墩壁厚度方向温度除了靠近外表面的温度(北1、北2和南1、南2)随时间变化较明显外,其余测点温度变化不明显。由于陕西地区在8月气温较高,昼夜温差较小,因此,南、北墩壁温差较小,图3(c)显示最大温差约为 $5^{\circ}\text{C}$ 。



(a) 北侧墩壁厚度方向温度随时间变化



(b) 南侧墩壁厚度方向温度随时间变化



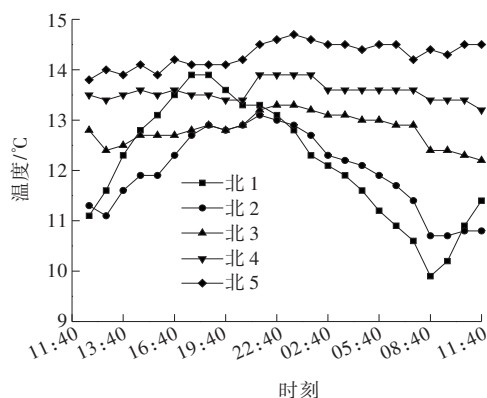
(c) 南、北侧墩壁温差随时间变化

图3 8月28—29日15#墩温度场测试结果

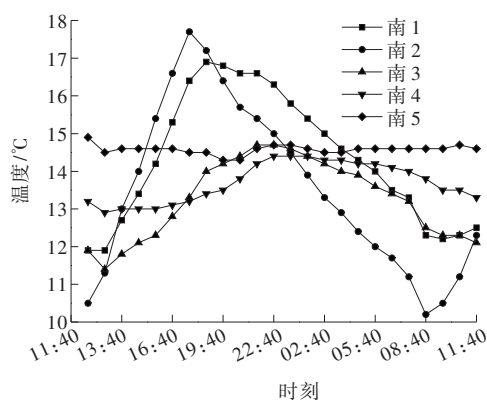
图4显示:在24 h测试时间内,南北墩壁各温度测点随时间变化与图3有相似的规律。但由于陕西地区在10月中旬气温较低,昼夜温差较大,因此,南、北墩壁温差较大,图4(c)显示最大温差接近 $8^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2 墩顶位移测量

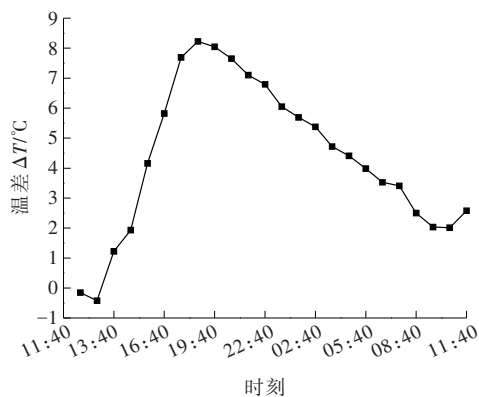
桥墩墩顶位移按桥墩施工高度选取两个典型工况进行测量,墩高分别为132 m和180 m。当桥墩施



(a) 北侧墩壁厚度方向温度随时间变化



(b) 南侧墩壁厚度方向温度随时间变化



(c) 南、北侧墩壁温差随时间变化

图 4 10月11—12日15#墩温度场测试结果

工至这两个高度时,进行桥墩墩顶水平位移测量,同时进行桥墩温度变化测量。墩顶水平位移测试选择桥墩施工节段混凝土浇筑5~6 d拆除模板前进行测试,每隔2 h进行一次测试,连续测试24 h。

墩顶位移用全站仪进行测量,测试墩顶测点的空间坐标。测量时,将棱镜放置在桥墩施工节段顶部,为了避免施工人员、设备对棱镜的影响,用铁丝把棱镜绑扎在下一桥墩施工节段型钢骨架上。将全

站仪放在施工单位提供的一个控制点处,后视棱镜放置于另外一个控制点位置处,桥墩施工节段顶部测试参考坐标值选取温差较小时刻测试值,其余时刻测试值与参考值进行比较,可获得桥墩在一天内不同温度变化时的偏位情况。测试方案示意如图5所示。

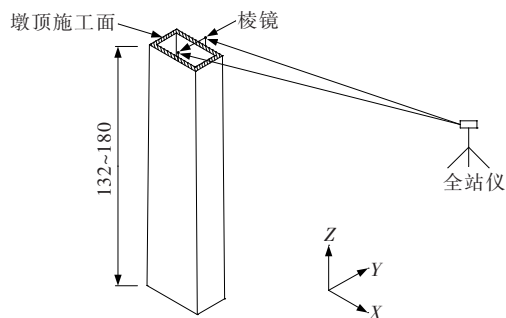
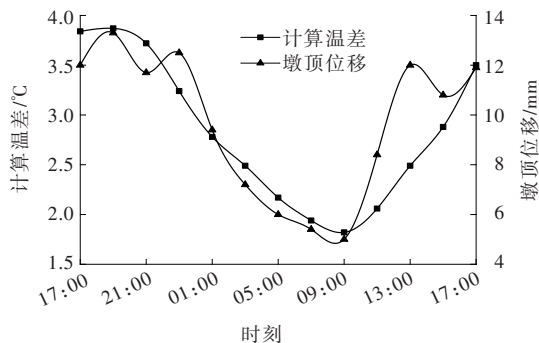


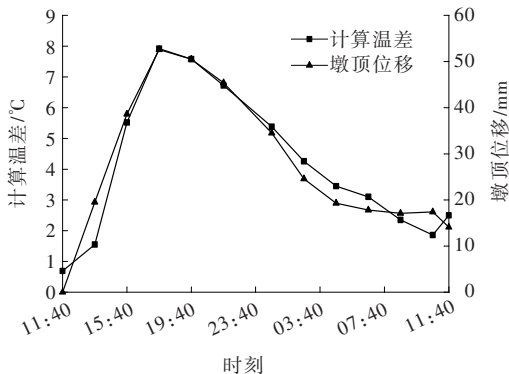
图 5 墩顶位移测试示意图(单位:m)

### 3 实测结果

8月28—29日和10月11—12日分别对墩高为132 m、180 m时墩顶偏位进行了连续测量,墩顶横向位移及壁面温差实测结果如图6所示。



(a) 墩高132 m



(b) 墩高180 m

图 6 墩顶横桥向位移与壁面计算温差

从图6(a)中可以看出:从8月28日17:00至29日09:00墩身南北壁面温差整体呈减小趋势,同阶段墩顶位移在28日17:00至23:00波动后呈持续下降趋势,且墩顶相对位移与温差同时达到最小值。8月29日09:00后,温差开始慢慢增大,此时相对位移相应地开始慢慢增大,最后在29日17:00左右达到最大位移并与28日17:00最大位移值接近,可以看出温差的变化与相对位移变化呈现明显的相关关系。墩高132 m时,29日09:00左右温差最小,在29日17:00时桥墩实际位移最大,为11.9 mm。当墩高到达180 m时,从图6(b)中可以看出:南、北墩壁温差从10月11日11:40起逐渐升高,17:00左右达到最大值,此后温差逐渐下降,墩顶横桥向水平位移与温差变化同样有相同的规律,墩顶实际位移达到最大为52.6 mm。

#### 4 有限元分析

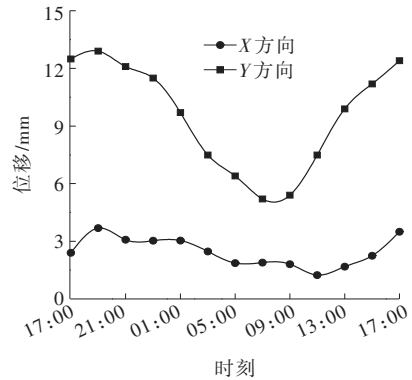
基于桥墩10月11—12日南、北墩壁温度场实测值,采用通用有限元软件建立实体模型,对墩高180 m时不同时刻温度场作用下桥墩的墩顶位移进行计算,并与实测值进行比较,从而验证现有数值分析方法在计算墩顶位移时的适用性。根据图1的几何尺寸建立桥墩的有限元模型。计算模型全部采用六面体实体单元,计算时将实测温度值作为单元温度输入<sup>[15]</sup>。为了体现温度沿厚度方向的分布变化,模型在壁厚方向共建立了4层单元,整个桥墩共离散为138 264个单元。计算参数根据现行设计规范参数取值<sup>[16]</sup>,C50混凝土弹性模量 $E=3.45\times 10^4$  MPa,热膨胀系数 $\alpha=1\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,墩底采用固结约束,墩顶自由无约束,计算考虑结构的重力二阶效应。

在有限元模型中,提取墩高130 m和180 m时东西方向和南北方向的墩顶位移数据对比如图7所示。

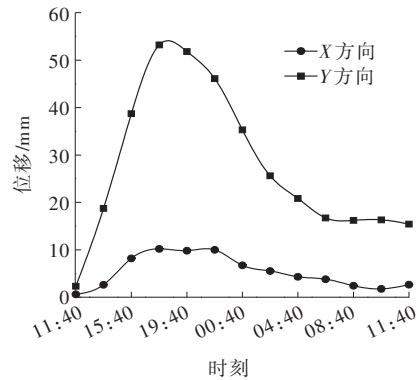
由图7可知:桥墩在X方向即东西方向的位移较小,且在规范<sup>[17]</sup>容许的范围内,因此本文主要对桥墩在Y方向即南北方向的桥墩位移进行研究。

基于桥墩实测温度数据,根据铁路柔性墩桥技术规范<sup>[18]</sup>对墩顶位移进行计算,图8为有限元分析结果、规范计算结果与实测结果的对比。

从图8可以看出:将实测温度场作为荷载作用输入,采用块单元的有限元数值分析方法,按照规范中

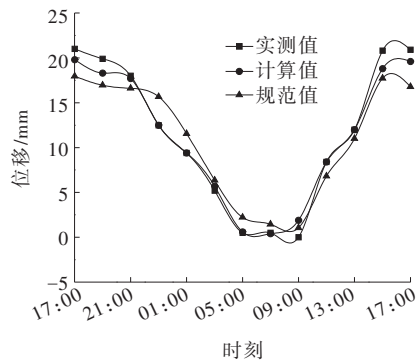


(a) 墩高 132 m

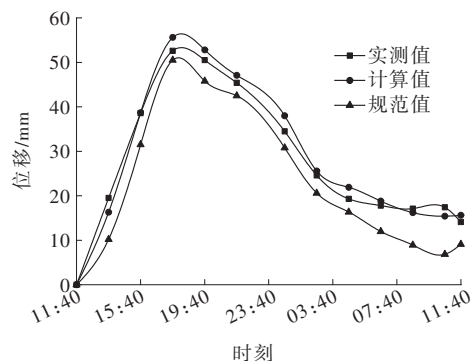


(b) 墩高 180 m

图7 X、Y方向墩顶位移对比



(a) 墩高 132 m



(b) 墩高 180 m

图8 墩顶位移计算值与实测值对比



的设计参数计算得出的墩顶位移与规范计算结果和实测值吻合很好。有限元计算值与实测值相对误差在 20% 内,且比规范值更加接近实测值。基于实测温度场的数值分析方法能够有效计算温度作用下的墩顶位移,该方法可以作为工程设计时考虑温度作用下墩顶位移的分析方法。

## 5 结 论

(1) 采用本文中的温差计算方法得到的壁面温差与墩顶偏位具有很好的相关性,即墩顶偏位与壁面温差的变化规律一致,同时增大或减小。且根据温差计算出的墩顶位移结果较为准确,在温度监控过程中可采用此方法计算温差。

(2) 桥墩向阳面和背阳面的日照温差较大且引起的墩顶位移最大,达 52.6 mm,另一方向墩顶位移较小且在规范容许范围内,因此施工时应重点控制桥墩向阳侧墩顶位移。

(3) 采用实体有限元模型,将实测温度场作为计算依据,选取合理的计算参数计算得出的墩顶偏位具有足够的精度,能够满足工程设计及施工控制的需要。因此,在类似工程施工时,可利用有限元法计算分析墩壁温差与墩顶偏位影响,以修正墩壁温差对桥墩施工线形和受力的影响。

### 参考文献:

- [1] CHEN Z W,ZHAI W M.Theoretical method of determining pier settlement limit value for China's high-speed railway bridges considering complete factors[J]. Engineering Structures,2020,209:109998.
- [2] ZHAO L.Influence of cold wave on temperature and stress fields of cylindrical concrete hollow pier[J].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(3): 032065.
- [3] WANG Y H,ZOU Y S,LI C J,et al.Analytical methods for temperature field and temperature stress of column pier under solar radiation[J]. Mathematical Problems in Engineering,2015,2015(1):278072.
- [4] SUN J C,ZHANG Z L,XIAO Q Y.Experimental research on the temperature field of high and hollow-thin pier[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,256-259:714-718.
- [5] WU Y F, SUN Y Y. Influence of reinforcement on temperature and stress of hollow pier[J].Advanced Materials Research,2012,446-449:1319-1324.
- [6] 吴斌,林志华,曾志平,等. 日温下高铁桥墩位移与钢轨变形的映射关系[J]. 铁道工程学报,2017,34(11):51-56, 75.
- [7] 戴公连,唐宇,梁金宝. 高速铁路高墩极值温度变形研究[J]. 铁道学报,2018,40(7):109-114.
- [8] 任翔. 混凝土桥塔温度场的时变分析及温度梯度模式研究[J]. 铁道标准设计,2012,56(6):40-45.
- [9] 任翔,佟阳,何青,等. 薄壁箱形混凝土桥塔温度应力场分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2011,36(1):121-127.
- [10] 陈建平,戴桂华,李德建. 西水大桥日照温度对斜交高墩施工线形影响及其控制方法研究[J]. 公路工程,2013,38(5):13-17, 66.
- [11] 柏华军. 高速铁路大高差桥墩竖向温度变形对行车舒适性和安全性影响研究[J]. 铁道标准设计,2019,63(10): 81-88.
- [12] 李豪,张方. 薄壁空心高墩日照温度场试验及数值模拟[J]. 西南公路,2018(3):164-169.
- [13] 唐峰,李德建,安里鹏. 日照辐射对高墩桥梁墩身线形影响与控制研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(10): 1970-1976.
- [14] 陈贤俊,姚彬,李国平. 空心高桥墩日照时变温度场及温度效应研究[J]. 上海公路,2019(1):44-48, 55, 5.
- [15] 雷江. 刚构-连续箱形梁特大桥的混凝土箱形截面温度场有限元分析[J]. 公路工程,2018,43(2):187-191, 245.
- [16] 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: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [17] 中交一公局集团有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T 3650—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [18] 铁道部第二勘测设计院. 铁路柔性墩桥技术规范: TB10052—1997[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.