

## 考虑遮挡的钢管混凝土拱桥日照温度场

林春姣<sup>1,2</sup>, 黄家祥<sup>1</sup>, 李翔<sup>3</sup>(1.广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2.工程防灾与结构安全教育国家重点实验室;  
3.日照交通规划设计院有限公司)

**摘要:**为掌握桁式钢管混凝土拱桥各拱肋截面在日照作用下的温度场分布,对一座进藏铁路上的大跨度大管径钢管混凝土拱桥进行了研究,采用数值方法模拟计算了拱肋各弦管在夏季及冬季日照下的温度场。计算结果显示:在该地区环境中,桁式钢管混凝土拱肋的各弦管截面温度场均与日照变化规律一致,并随日照变化呈现明显的非线性特征;上弦管受遮挡作用较小,钢管温度最高升温位置始终位于向阳面,而管内混凝土的温度变化主要受整体环境温度影响,保持比较平稳的变化,受日照影响不明显;下弦管受到遮挡影响,整体温度场低于上弦管,外侧钢管温度变化较内侧明显,管内混凝土对日照作用不敏感。研究结果表明:桁式钢管混凝土拱肋截面上、下弦管的日照温度场有较大差别,设计中应分别取用温度值。

**关键词:**钢管混凝土拱桥;桁式截面;日照;温度场

钢管混凝土拱桥的温度问题一直受到关注,国内外一些学者对这一问题进行了相关的研究。现有研究中,对常见的桁式截面钢管混凝土拱桥,大多以其中一根单圆管作为研究对象分析截面温度场,不考虑各弦管之间相互遮挡的影响,默认各弦管截面温度场一致,但在有日照辐射的情况下,各弦管截面的实际温度场存在一定的差异,忽略这种差异可能导致无法正确分析桥梁的温度效应,尤其是在日照辐射较大的地区。

为了比较准确地确定桁式钢管混凝土拱肋各弦管截面在日照辐射下的温度场,为进一步分析桥梁温度效应提供基础数据,该文对进藏铁路上拉萨至林芝段的一座特大跨径钢管混凝土拱桥建立数值模型,计算夏季和冬季日照辐射下的钢管混凝土拱肋各弦管的截面温度场,分析得到其随日照变化的相应规律,为下一步的研究打下基础。

## 1 工程概况

大桥主跨为430 m的中承式钢管混凝土提篮拱,全桥总长525.0 m,孔跨布置为(39.6+32) m连续梁+430 m中承式钢管混凝土拱桥+(28+34.6) m连续梁。其总体布置如图1所示。

拱肋为拱轴系数2.1的悬链线,计算跨径为430

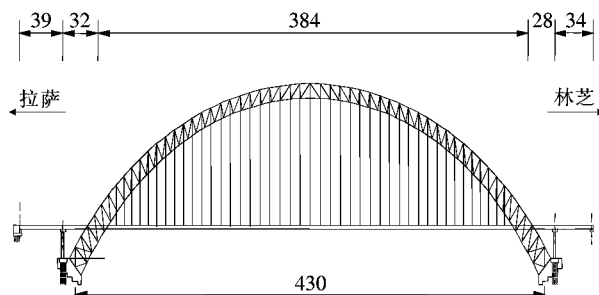


图1 大桥立面布置图(单位:m)

m,矢高112 m,矢跨比1:3.84。拱肋内向倾斜,与垂直平面呈 $4.59^\circ$ 倾角,拱顶处拱肋中心距7 m,拱脚处拱肋中心距25 m。拱肋中弦管直径自拱脚至拱顶从1.8 m变化至1.6 m,管壁厚从拱脚至拱顶为50~28 mm。为了简化分析,以下计算中将钢管统一按照1.6 m管径36 mm壁厚分析结构的温度场。

## 2 日照辐射作用

日照辐射对结构的作用,主要分为太阳辐射、长波辐射和大气温度变化3部分。太阳辐射 $I$ 包括太阳直接辐射强度 $I_2$ 、太阳散射辐射强度 $I_4$ 和地面反射辐射强度 $I_5$ ,长波辐射则主要是地面与大气的辐射。

在计算日照辐射作用下的拱肋温度场时,必须合

收稿日期:2019-04-15

基金项目:四川省科教计划项目(编号:2018GZ0052)

作者简介:林春姣,女,副教授.E-mail:281921219@qq.com

理取用各种参数。该文根据桥梁所处环境,对其中的日照辐射能及换热系数等参考文献[10]进行取用;对大气温度变化,参考文献[12-14],按照式(1)计算日大气温度变化曲线:

$$T_a = 0.5 \times T_1 \sin[(t - t_0) \times 15^\circ] + 0.5 \times T_2 \quad (1)$$

式中:  $T_1$  为一天中最高温度与最低温度之差;  $T_2$  为一天中最高温度与最低温度之和;  $t$  为北京时间;  $t_0$  为影响日大气温度最高温和最低温发生时刻的参数,其数值跟地理位置有关,具体的取值方法可参考文献[14],北京的最高大气温度时间为 15:00 左右,与其同经度地区均可取  $t_0$  为 9,该文桥址与北京约 2 h 时差,可取  $t_0$  为 11。根据相关文献和气象资料,该地区最高月平均气温 25.9 °C(8 月),最低月平均气温 -9.8 °C(1 月)。

根据式(1)得到该地区一天大气温度变化图见图 2。

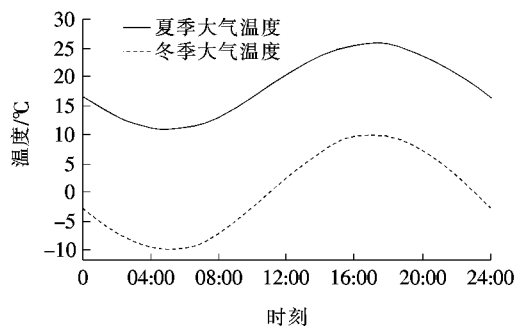


图 2 大气温度变化图

将太阳辐射与大气温度值按照式(2)叠加,得到作用于拱肋截面的综合等效温度值。

$$T_z = T_a + \alpha_s I / h \quad (2)$$

式中:  $h$  为总的换热系数;  $\alpha_s$  为辐射吸收率,取 0.6。

### 3 拱肋截面的计算模型

一天不同时段的光照照射到地面的角度不同,辐射强度也不同。随着阳光入射角度和辐射强度的变化,钢管混凝土拱桥各弦管之间将出现相互遮挡的情况。一般情况下,弦管之间的遮挡只发生在一侧拱肋。取一侧拱肋进行分析,日照下典型的 4 种遮挡情况如图 3 所示。

除了拱桥的横向温度场,日照下拱肋的纵向温度变化情况也是一个受到关注的问题。对于同一地区,由于不同时间的日照强度和方向变化主要表现在东西方向,对于东西走向的拱桥,其拱肋纵向的日照温度场可能存在一定的差别,该文后续将对这一问题进行研究;对于南北走向的拱桥,由于日照引起的拱肋纵向温

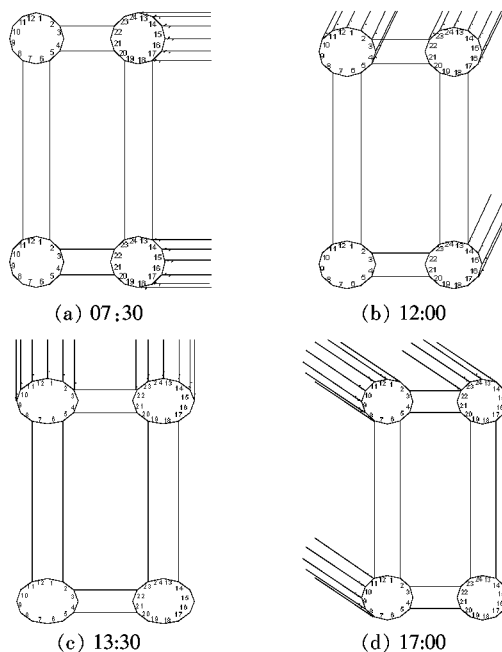


图 3 不同时刻日照辐射光线分布图

度差别较小,可以忽略不计。该文桥梁为东北至西南走向,大体上与南北走向相近,因此,在分析拱肋弦管的日照温度场时,将三维问题简化为二维问题进行。在建模过程中认为弦管之间无温度传递,连接各弦管的腹杆对其影响忽略不计,按照单圆管进行分析。但每根管接受的日照辐射强度和位置不同,为简化起见,分上下管建立弦管模型,将不同时段和方向上综合等效温度值作用于弦管对应的位置上。采用 Ansys 热单元 Plane55 进行模拟,取拱顶处实际管径 1.6 m,壁厚 36 mm,并假设钢管与混凝土无脱空,利用 APDL 进行多天连续分析,得到日照下拱肋上各弦管温度场分布情况。拱肋弦管有限元模型如图 4 所示。

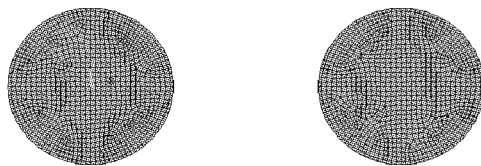


图 4 截面有限元模型

### 4 计算结果及分析

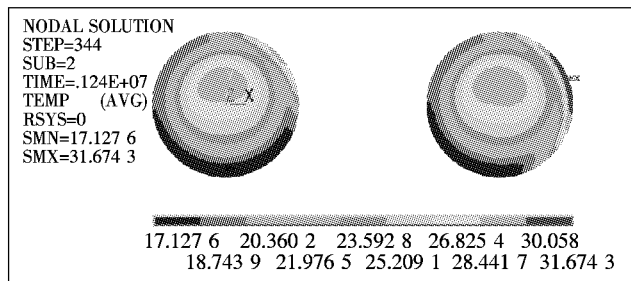
由于遮挡的影响,日照下的桁式钢管混凝土拱肋各弦管截面温度场有一定的差异,以下分上下弦管分别整理计算结果。

#### 4.1 上弦管温度场

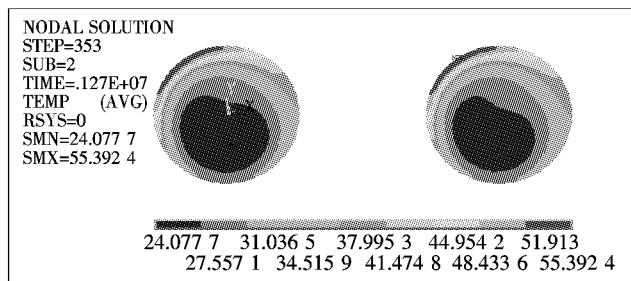
##### 4.1.1 夏季温度场

图 5 为夏季典型日照辐射作用下,拱肋的两根上

弦管在一天各关键时刻的温度分布情况,图 6 为左侧弦管截面上关键点 A、B、C、D、E、F、G 的温度在一天各时刻的变化情况。



(a) 08:00



(b) 17:00

图 5 夏季日照辐射下上弦管温度场分布(单位:℃)

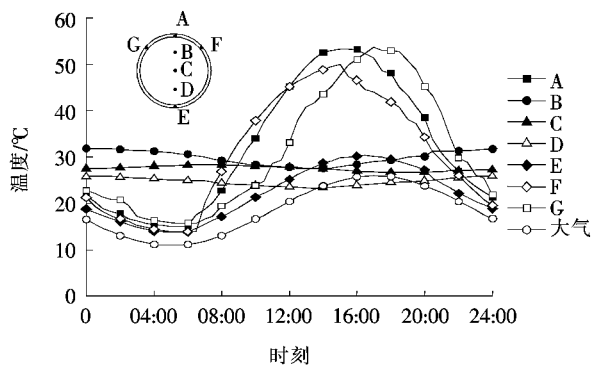


图 6 夏季上弦管截面关键点温度昼夜变化曲线

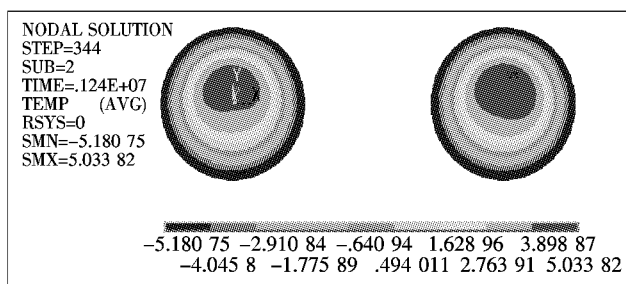
从图 5 可以看出:在日照作用时段,拱肋上弦管的截面温度场均呈现出外高内低的非线性特征,其中钢管表面最高温发生部位随着太阳辐射角度的变化而变化。如早上 08:00 时,太阳主要照射东面弦管,西面弦管被东面弦管部分遮挡,因此,相同位置处东侧弦管比西侧弦管温度高,但此时辐射强度还不是很大,两根弦管的温度相差并不特别大;到 17:00 时,两根弦管相互之间有少部分遮挡,受到的日照辐射强度及照射角度也基本相同,对应的温度场分布也基本接近。17:00 时,截面上太阳照射到的部位最高温度达 55.39℃,同一弦管截面底部附近的内部混凝土为最低温 24.08

℃,单根管截面上的温差最高 31.31℃,但高温主要表现在钢管表面及太阳辐射部位靠近管壁的混凝土。

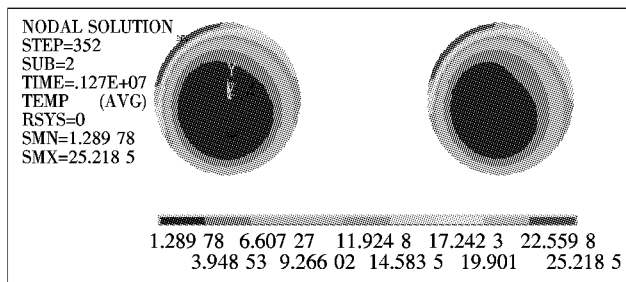
从图 6 可以看出:位于钢管外壁的 A、E、F、G 共 4 点温度曲线的变化趋势与大气温度相似,在白昼日照辐射强烈时段,钢管的温度升高比较明显,对比 A、F、G 这 3 点,可以发现在 07:00 点时,F 点迅速升温,随后是 A 点,最后是 G 点。这是因为该曲线由左侧弦管取得,随着太阳的东升西落,F 点最先接受到太阳直射,随后到 A 点,最后到 G,所以呈现如图 6 的先后顺序。在辐射最强时刻(17:00 时左右),G 点达到最高温度 53℃左右,E 点位于截面底部,其温度较气温高,变化趋势与气温完全一致;管内混凝土 B、C、D 这 3 点的温度则保持比较平稳,波动幅度较小,3 点的温差最大保持为 6℃左右。

#### 4.1.2 冬季温度场

与夏季相比,冬季的日照辐射相对弱,对应的钢管混凝土拱肋上弦管截面上的温度场计算结果如图 7 所示,左侧弦管截面关键点 A、B、C、D、E、F、G 的温度随时间变化如图 8 所示。



(a) 08:00



(b) 16:00

图 7 冬季日照辐射下上弦管温度场分布(单位:℃)

图 7 显示:冬季日照强度尽管较夏季的弱,但拱肋弦管截面上的温度场分布形式与夏季的基本相同,表现为白天外高内低、夜间内高外低。冬季的日照辐射强度最强发生在 16:00 左右,此时上弦管截面最高温 25.2℃,最低温 1.3℃,同一弦管截面温差约 24℃。此时两根上弦管无相互遮挡作用,截面温度分布形式

基本一致,温度值也大致相同。

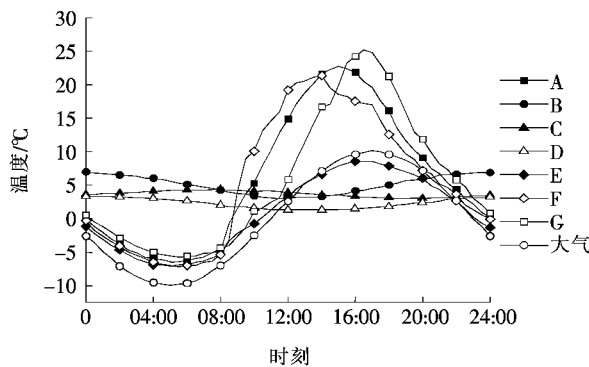


图 8 冬季上弦管截面关键点温度昼夜变化曲线

图 8 显示:冬季的截面温度曲线与夏季的曲线变化趋势大体相同。图 6 及图 8 曲线共同的显著特征是钢管温度随日照变化较大,且有 F 点最先升温,A 点次之,最后到 G 点的现象。管内混凝土的温度均保持基本平稳,且温差较小。

分析出现以上现象的原因:桥址处平均海拔 3 300 m 以上,多年平均气温 9.2℃,极端最高气温和极端最低气温分别为 32.0、-16.6℃,月平均最高和最低气温分别为 16.6、0.3℃;日照辐射强度比相同纬度的中国国内东部平原地区高 2~4 倍。由于钢材导热性能远大于混凝土,白昼日照辐射下钢管由于导热系数大迅速升温,混凝土导热系数小升温缓慢。至夜间无日照辐射后,外界气温急剧降低,钢管与空气产生对流换热迅速降温,内部混凝土由于散热速度慢且散热路径长(管径 1.6 m)降温缓慢。因此,在日照辐射作用下的钢管混凝土拱肋的钢管温度随之变化较大,而管内混凝土的温度则保持相对平稳,直至下一昼夜后再次循环。

上述结果还显示:日照辐射作用下,钢管的温度变化较大,且同一截面的钢管温度不均匀,但管内混凝土温度变化并不能与钢管同步,这可能会引起钢管和混凝土之间产生脱黏。

#### 4.2 下弦管温度场

下弦管在受到日照辐射时,不仅会受到左右弦管的遮挡,还可能受到上弦管及腹杆的遮挡。由于腹杆形式以及分布情况的多样性,不易准确分析,为简化计算,认为下弦管截面被遮挡如图 9 所示。

##### 4.2.1 夏季温度场

考虑上述遮挡作用后,夏季典型日照辐射作用下拱肋两根上弦管一天内的温度变化情况如图 10 所示,单管截面上关键点 A、B、C、D、E、F、G 点的温度随时间的变化曲线如图 11 所示。

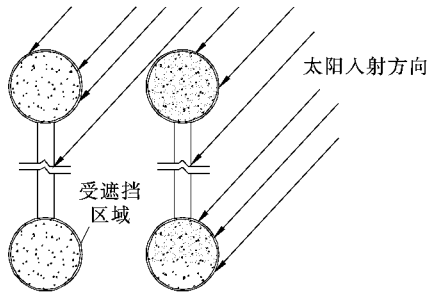
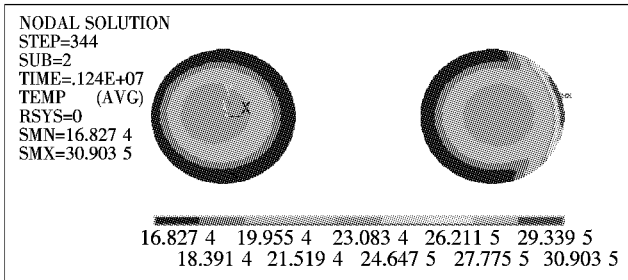
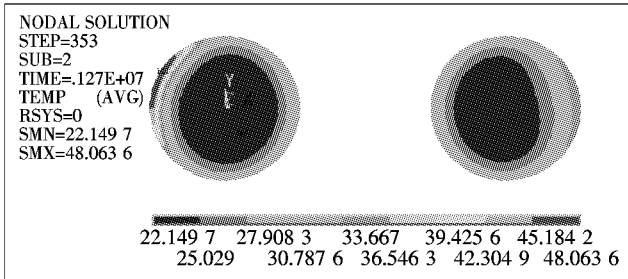


图 9 下弦管受遮挡示意图



(a) 08:00



(b) 17:00

图 10 夏季日照辐射下下弦管温度场分布(单位:℃)

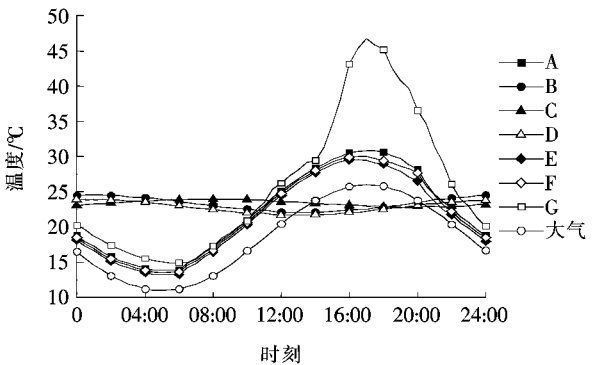


图 11 夏季下弦管截面各点温度昼夜变化曲线

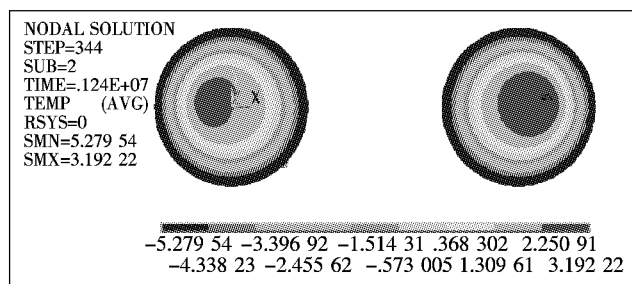
图 10 显示:夏季日照辐射下弦管截面温度场分布也呈现出外高内低的非线性分布特点,两个截面中直接受太阳照射一侧的温度变化比另一弦管大,至太阳照射另一侧后两根弦管截面上的温度分布也逐渐变化。综合分析发现,上、下弦钢管在夏季的最高温均发

生在 17:00 时左右(上弦管最高温 55.39 °C,下弦管最高温 48.06 °C);管内混凝土则一直保持比较稳定的温度,截面上的温差不大。单根管截面上的最大温差为 25.91 °C,小于上弦管单根管截面上的最大温差。

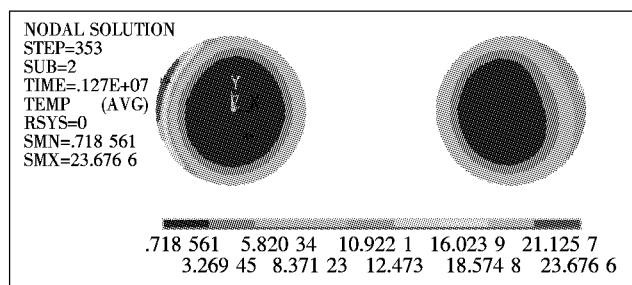
图 11 显示:钢管外壁的 A、E、F、G 这 4 点温度与大气温度变化一致,均高于气温。由于受到上弦管及腹杆的遮挡,左侧下弦管 A、F 两点不受太阳直接辐射,与 E 点的温度也非常接近,与上弦管底部钢管温度基本一致。分析 G 点温度曲线,0:00—12:00 点,其变化与 A、E、F 点相似,在 14:00 时左右, G 点接受太阳直射迅速升温。17:00 时左右,辐射达到最强时刻,此时 G 点达到最高温度 47 °C 左右。管内混凝土 B、C、D 这 3 点的温度波动幅度较小,但较上弦管内混凝土温度低 5~8 °C。

#### 4.2.2 冬季温度场

下弦管在冬季日照辐射作用下的温度变化情况如图 12 所示,单管截面上各关键点的温度随时间的变化曲线如图 13 所示。



(a) 08:00



(b) 18:00

图 12 冬季日照辐射下下弦管温度场分布

图 12 显示:下弦管截面温度场在冬季日照辐射下与夏季的温度场相似,表现为两个截面分布不同,高温区域集中在截面两侧。冬季下弦管截面最高温发生在 18:00 时,截面最高温度为 23.68 °C,最低温度 0.72 °C,温差 22.96 °C。

图 13 显示:同夏季下弦管温度一天变化曲线类似,钢管 A、E、F、G 点温度与大气温度变化一致, G 点

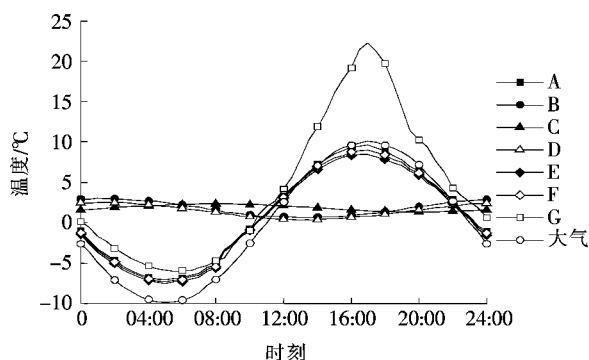


图 13 冬季下弦管截面关键点温度昼夜变化曲线

因为接收太阳直射在 17:00 时左右取得温度最大值,管内混凝土 B、C、E 这 3 点温度仍然比较稳定,中心 C 点变化幅度最小。

分析出现以上现象的原因:随着太阳的东升西落,下弦管在日照条件下钢管部分外表面受到上弦管以及腹杆遮挡作用,没有接受到太阳照射,拱肋弦管截面温度外侧高内侧低;下弦管截面温度整体比上弦管温度低。

## 5 结论

日照作用下,钢管混凝土桁式拱肋的各弦管截面温度场变化规律受太阳运动规律影响,弦管之间的相互遮挡对截面温度场也产生影响。四肢弦管拱肋截面温度场在日照作用下的具体变化如下:

(1) 钢管混凝土桁拱在夏季和冬季日照作用下,拱肋截面温度场均表现为钢管表面温度变化远大于核心混凝土温度变化。

(2) 上弦管受遮挡作用较小,弦管温度受影响不大。日照作用下,向阳面的钢管随着太阳照射有较大的升温,夏季最高升温 30 °C 左右,冬季最高升温 20 °C 左右;管内混凝土的温度主要受整体环境温度影响,日照的影响不明显,温度变化均比较平稳。

(3) 内侧下弦管受遮挡作用明显,外侧管受到一定的遮挡影响。日照作用下,向阳面钢管在夏季可较气温最高升高 20 °C 左右,冬季可较气温最高升高 12 °C 左右;背阴面钢管温度变化与大气接近;管内混凝土的温度受整体环境温度影响,日照影响不明显,温度变化均比较平稳。

(4) 多肢桁式拱肋作为一个整体截面时,弦管之间对日照辐射的遮挡作用主要使截面上、下弦管的钢管存在较大的温差,管内混凝土的温差不如钢管明显。因此,进行该类桥梁设计时,上下弦管应取用不同的温度作用值。

# 融合 BIM 与影像建模技术的桥梁检测方法 及其应用研究

胡兴意<sup>1</sup>, 陈波<sup>2</sup>, 刘国强<sup>2</sup>, 韩达光<sup>1\*</sup>, 吴逸飞<sup>2</sup>, 周银<sup>1</sup>, 颜鲁鹏<sup>1</sup>, 杨宇鹏<sup>3</sup>, 郭彤<sup>4</sup>

(1.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2.重庆建工集团 四川遂资高速公路有限公司;

3.中铁十六局 第五工程公司吴银项目经理部; 4.东南大学 土木工程学院)

**摘要:** 针对目前常用高速公路桥梁检测方法信息零散化、覆盖不全、可追溯性差、准确性不高的问题,提出了一种融合 BIM 与影像建模技术的桥梁检测新方法。在研究高速公路桥梁运维管养 BIM 模型特点、分类和编码规则基础之上,尝试建立了桥梁运维管养 BIM 模型数据库;为丰富 BIM 模型中的病害信息,采用影像建模技术,实现了既有桥梁的运维信息模型的快速重构和基于该模型的桥梁病害快速识别、测量与外观病害信息入库,为将 BIM 与影像建模技术有机融合作为一种新的技术手段高效应用于高速公路桥梁维护和检测中提供了参考与建议。

**关键词:** 运维管养; 桥梁检测; BIM; 影像建模

## 1 前言

截至 2017 年底,中国已建成超 80 万座公路桥梁。

随着时间推移,中国交通基础设施建设速度将放缓,大量公路、铁路桥梁将进入维护管养期。在材料性能不足、设计缺陷、施工不当、维护管养不足等因素的影响下,混凝土桥梁结构将不可避免地产生开裂、蜂窝、麻

## 参考文献:

- [1] JianDan, CongYu, Chang Wu Xu. Experimental Analysis of the Sectional Temperature Distribution of CFST under Variable Temperature Effect[J]. Advanced Materials Research, 2014, 971-973: 249-254.
- [2] Yuan FengWang, Yi ShuoMa, Bing Han, et al. Temperature Effect on Creep Behavior of CFST Arch Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(12).
- [3] 林春姣. 钢管混凝土拱计算合龙温度研究[D]. 广西大学博士学位论文, 2008.
- [4] 林春姣, 郑皆连, 秦荣. 哑铃形钢管混凝土截面水化热温度分布有限元分析[J]. 中外公路, 2007(4).
- [5] 陈宝春, 刘振宇. 日照作用下钢管混凝土桁拱温度场实测研究[J]. 中国公路学报, 2011(3).
- [6] 陈可, 李亚东. 钢管混凝土拱肋截面日照温度场实测及有限元计算[J]. 公路交通科技, 2012(9).
- [7] 何燕, 丁曼, 张千, 等. 日照作用下钢管混凝土构件截面温度场的实验研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2012(3).
- [8] 朱晓文, 宋晓好, 郭春华, 等. 四肢桁式钢管混凝土拱肋日照温度场及温度效应分析[J]. 交通标准化, 2012(13).
- [9] 林春姣, 郑皆连, 秦荣. 钢管混凝土拱桥温度效应研究[J]. 广西科学院学报, 2007(3).
- [10] 张鑫. 矩形钢管混凝土截面的温度场与温度效应研究[D]. 西北农林科技大学硕士学位论文, 2017.
- [11] 季伟强. 混凝土箱梁桥日照温度有限元分析与辐射换热系数研究[J]. 结构工程师, 2015(2).
- [12] 周允华. 青藏高原夏季晴天的大气热辐射[J]. 高原气象, 1984(3).
- [13] 周允华. 青藏高原的大气热辐射和天空有效温度[J]. 太阳能学报, 1984(3).
- [14] 彭友松. 混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2007.

收稿日期: 2019-05-12

基金项目: 重庆建工集团遂宁高速公路公司 BIM+GIS 关键技术研发项目(编号: 建技创第 GS-2017-04)

作者简介: 胡兴意, 男, 硕士. E-mail: 1012208130@qq.com

\* 通信作者: 韩达光, 男, 博士, 高级工程师. E-mail: daguang.han@cqjtu.edu.cn