

文章编号:1673-2049(2018)05-0170-09

严寒地区矩形钢管混凝土截面温度分布试验

田智娟,刘永健,马印平,刘江

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为研究严寒地区钢-混凝土组合结构的温度荷载,以西宁市作为严寒地区的代表,在现场进行了水平放置带加劲肋的矩形钢管混凝土构件截面温度场测试试验,对日照作用下钢管混凝土构件截面温度分布进行了研究。同时还将矩形钢管混凝土构件的三维温度场简化为二维温度场,建立了ABAQUS有限元热力学分析模型,在考虑太阳辐射、风速以及环境温度等参数的作用下提出了构件截面温度场有限元计算方法。结果表明:钢管混凝土构件钢管测点及管内混凝土测点温度的实测值均与有限元计算值吻合良好;考虑日照作用的矩形钢管混凝土截面温度场为非均匀温度场,构件截面存在着明显的温度梯度;钢管温度受到环境温度的直接影响,其温度变化略微滞后于环境温度变化,温度极值明显大于环境温度极值;管内混凝土的温度则受到环境温度的间接影响,其温度变化明显滞后于环境温度变化,温度极值则小于钢管温度极值;矩形钢管混凝土截面温度分布还会受到管内纵向加劲肋的影响,该加劲肋增大了其与混凝土的接触面积,减少了管内混凝土温度变化的滞后程度,降低了构件截面的梯度温差。

关键词:桥梁工程;严寒地区;矩形钢管混凝土;温度场;太阳辐射

中图分类号:U441.5

文献标志码:A

Experiment on Temperature Distribution of Rectangular CFST Cross Section in Severe Cold Areas

TIAN Zhi-juan, LIU Yong-jian, MA Yin-ping, LIU Jiang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to research the thermal load of steel concrete composite structures in severe cold areas, Xining was taken as a representative city in severe areas and the field test of temperature distribution of horizontal arranged rectangular concrete filled steel tube (CFST) member with longitudinal stiffeners was performed, the temperature field of CFST under solar radiation was researched. The three dimensional temperature field of CFST member was simplified to two dimensional temperature field, subsequently the thermal analysis model was built based on ABAQUS software, the finite element simulating method for temperature field of CFST member was presented considering the parameters of solar radiation, wind speed and atmosphere temperature and etc. The results show that the calculating results of steel tube and in-filled concrete coincide well with the test data. The temperature field of rectangular CFST member under solar radiation is unsymmetrical, and there exists obvious thermal gradient. The temperature of steel tube is affected by the atmosphere temperature directly, thus causing the

收稿日期:2018-07-06

基金项目:青海省重点研发计划项目(2017-SF-137)

作者简介:田智娟(1989-),女,山西朔州人,工学博士研究生,E-mail:tianzjuan@foxmail.com。

通信作者:刘永健(1966-),男,江西玉山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lyj_chd@gmail.com。

temperature variation of steel tube lag behind the atmosphere temperature, and the temperature extreme value is much higher than atmosphere temperature. The temperature of in-filled concrete is affected by atmosphere temperature indirectly, which has a higher level of variation lag and the temperature extreme value is lower than that of the steel tube. The temperature of rectangular CFST member can also be affected by the longitudinal stiffeners in the steel tube, the stiffeners increase the contact area between steel tube and in-filled concrete, relieve the temperature variation lag of in-filled concrete and decrease the gradient temperature difference on the cross section of CFST members.

Key words: bridge engineering; severe cold area; rectangular CFST; temperature field; solar radiation

0 引言

钢材和混凝土 2 种材料的线膨胀系数相近,但钢材的导热系数约为混凝土的 33 倍,因此在太阳辐射下钢-混凝土组合构件截面的温度分布呈非线性。截面的温度梯度会导致构件内力产生温度自应力,而对于有多余约束的超静定结构还有可能产生温度次内力。对于组合结构桥梁而言,其活荷载所占荷载比例要高于混凝土桥梁,其温度效应更为显著,因此对这种组合结构截面温度场的分布特点进行研究是十分有必要的。

国内外有众多学者对钢管混凝土构件的温度荷载及温度效应开展了研究。刘江等^[1-3]对“上”字形钢-混凝土组合梁的竖向温度梯度模式进行了分析,还对高原高寒地区钢-混凝土组合梁斜拉桥温度效应进行了研究。刘永健等^[4]则通过理论研究对钢混组合梁的温度效应进行了研究。陈宝春等^[5-9]对圆形钢管混凝土截面温度场的研究则最为系统,其在文献^[5]中系统总结了钢管混凝土在施工以及成桥阶段温度场特点方面的研究,对于截面温度场的数值模拟方法也进行了论述,在文献^{[6]~[8]}中则对竖立、横放的 2 个试件在日照作用下的截面温度场进行了分析,给出了截面温度分布以及温度梯度曲线,还在文献^[9]中对温度效应引起的钢管混凝土截面脱黏进行了研究。张后举^[10]对中承式的钢管混凝土拱桥拱肋的温度场进行了分析,结果表明,桥面系对拱肋的温度场影响显著,桥面以上的拱肋受太阳辐射的影响显著大于桥面以下的拱肋,且靠近桥面系以上的拱肋部分还会受到桥面系反射辐射的影响。彭友松等^[11-12]建立了有限元模型,对不同钢管表面涂装的太阳辐射吸收率进行了研究。柯婷娴等^[13]对哑铃形钢管混凝土拱肋截面的温度场进行了有限元分析,徐爱民等^[14]则对钢管混凝土的温度

效应进行了计算。

既有文献中对圆形钢管混凝土构件截面的温度分布研究较多,对于矩形截面温度场的研究较少,而针对特定气候地区温度效应的研究则更为少见。中国幅员辽阔,不同桥梁所处地理位置与气象条件差异巨大,现行钢管混凝土相关规范^[15]中对不同气候区域内的桥梁采用相同温度梯度模式的方法有欠妥当。鉴于此,本文以西宁市为严寒地区的代表,对严寒地区日照作用下的矩形钢管混凝土构件截面温度分布进行了试验和有限元研究。

1 试验简介

本文试验待测试件为一与实桥拱肋尺寸接近的矩形钢管混凝土构件,长度为 2.33 m,横截面尺寸为 350 mm×250 mm×16 mm。矩形钢管内设置 2 道宽 16 mm、高 70 mm 的通长纵向加劲肋。钢管采用 Q345d 钢材,表面为灰色涂装,管内填筑 C50 微膨胀混凝土。

试件水平放置于西宁市一可充分接收日照的平坦场地,轴线与正南-正北方向平行。由于本文将构件的三维温度场简化为二维的截面温度场进行分析,故将待测试件两端采用白色不透明隔热塑料泡沫包裹,并选取试件跨中断面作为测试断面,以减少长度方向的热传递。试件底部放置低导热系数的木质垫块,防止试件与地面接触引起热传递。试件的布置及照片分别如图 1,2 所示。

为能全面反映试件截面温度场变化情况,共布置了 23 个温度测点,其中管内混凝土布置了 13 个测点(C1~C13),钢管外表面布置 8 个测点(S1~S8),试件附近无日光直射区域布置 2 个环境温度测点(T1~T2),试件全部测点布置如图 3 所示。采用热电偶传感器测量温度,其测量精度为 0.1℃,量程为-50~200℃,满足试验需要。管内混凝土测点

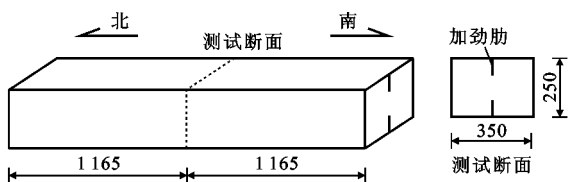


图 1 试件布置 (单位:mm)

Fig. 1 Arrangement of Specimen (Unit:mm)



图 2 试件照片

Fig. 2 Photo of Specimen

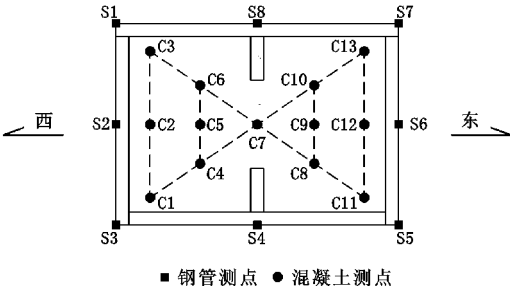


图 3 测点布置

Fig. 3 Arrangement of Measure Points

的传感器绑扎于定位钢筋骨架上,先行浇筑钢管内混凝土至测试截面位置,再放入定位钢筋骨架继续浇筑管内混凝土直至完成。定位钢筋骨架及混凝土传感器照片如图 4 所示。



图 4 混凝土测点及钢筋骨架照片

Fig. 4 Photo of Concrete Measured Points and Steel Skeleton

2 测点温度数据分析

本文试验选择在严寒地区环境温度变化较大的冬季进行。考虑到试验现场的实际条件,6:00~次日 2:00 每间隔 2 h 采集 1 次。2:00~6:00 之间无日照且环境温度变化较小,故对测量工作进行适当精简,不进行数据采集。数据采集工作从 2015 年 12 月 10 日~2015 年 12 月 20 日持续进行 10 d。对采集得到的数据进行初步分析后发现 12 月 13 日 8:00~12 月 17 日 8:00 的数据完整性较好且具有代表性,因此选取这一时间段内的数据进行分析,其中环境温度测量数据如表 1 所示。

由表 1 可知,13 日、14 日天气晴朗,环境温度较高,试件截面温度场受到太阳辐射的作用较为明显,15 日下午出现多云天气,环境温度下降,太阳辐射

表 1 环境温度测量数据

Tab. 1 Measured Data of Ambient Temperature

测量时间段	12 月 13 日 8:00~12 月 14 日 8:00	12 月 14 日 8:00~12 月 15 日 8:00	12 月 15 日 8:00~12 月 16 日 8:00
天气	晴	晴	多云
最高环境温度及时刻	-1.0℃, 14:00	-2.0℃, 14:00	-4.0℃, 16:00
最低环境温度及时刻	-7.0℃, 8:00	-11.0℃, 24:00	-13.0℃, 次日 8:00
日平均环境温度/℃	-5.0	-6.8	-8.8
日最大环境温度差/℃	6.0	9.0	9.0

作用减弱。环境温度在 14:00 左右达到最高值,在 24:00~8:00 期间达到最低值且温度变化较为稳定,其中 12 月 15 日在 16:00 达到环境最高温度,这是由于当日下午出现了多云天气导致的,当日的平均温度也随之降低。在 12 月 13 日 8:00~12 月 16 日 8:00 测试时间段内环境总平均温度为 -6.9℃, 单日最大环境温差为 9.0℃,钢管测点和混凝土测点的单日最大温差则分别为 17.9℃和 15.2℃。图 5~9 给出了试件不同测点温度曲线。

图 5 给出了环境温度、钢管 S7 测点和管内混凝

土中心 C7 测点的温度变化曲线。由图 5 可知,受日照的影响,钢管及管内混凝土测点的温度均显著高于环境温度。环境温度测点在 14:00 达到峰值 0.5℃;S7 测点位于钢管表面,直接受到太阳辐射,滞后环境温度 2 h,在 16:00 达到峰值 8.2℃;C7 测点位于混凝土中心,未直接受到日照影响,温度变化曲线较 S7 测点滞后 2 h,在 18:00 达到峰值 6.8℃,低于钢管 S7 测点温度峰值。在温度测量前 24 h 的时间段内(12 月 15 日 8:00 之前)这种滞后现象非常明显,而在 12 月 15 日 8:00 之后的测量中由于出

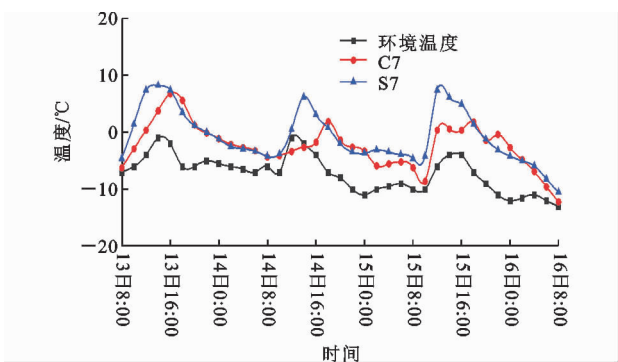


图 5 环境温度、S7 及 C7 测点的温度变化曲线
Fig. 5 Temperature Curves of Ambient Temperature and S7, C7 Measure Points

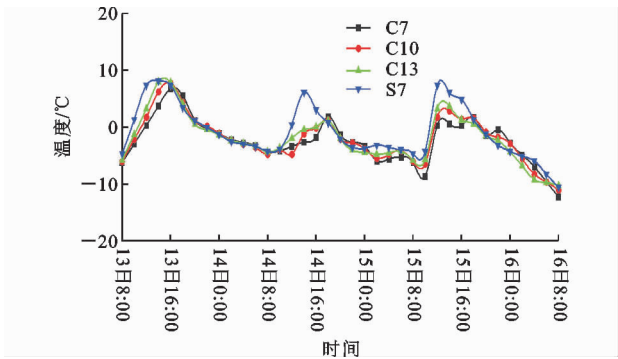


图 6 C7,C10,C13 及 S7 测点的温度变化曲线
Fig. 6 Temperature Curves of C7, C10, C13 and S7 Measure Points

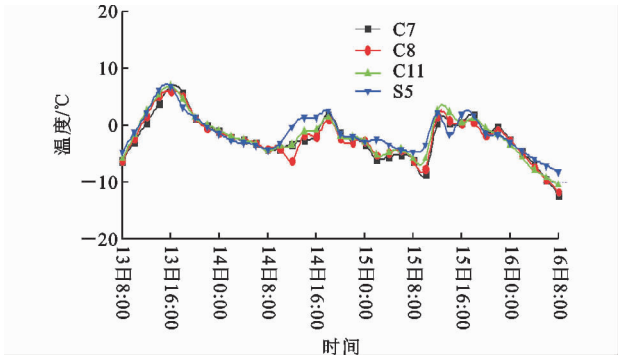


图 7 C7,C8,C11 及 S5 测点的温度变化曲线
Fig. 7 Temperature Curves of C7, C8, C11 and S5 Measure Points

现了多云天气,日照作用有所减弱,温度测点的滞后现象不明显。

图 6 为管内混凝土中心至钢管右上角(东侧)连线上测点的温度曲线。由图 6 可知:混凝土测点的温度变化曲线滞后于钢管测点的现象在晴天较为明显。最外侧钢管测点 S7 温度变化最快,先于其他混凝土测点达到峰值 9.0°C (14:00 左右),且明显大于混凝土测点的温度峰值;混凝土测点 C13,C10,

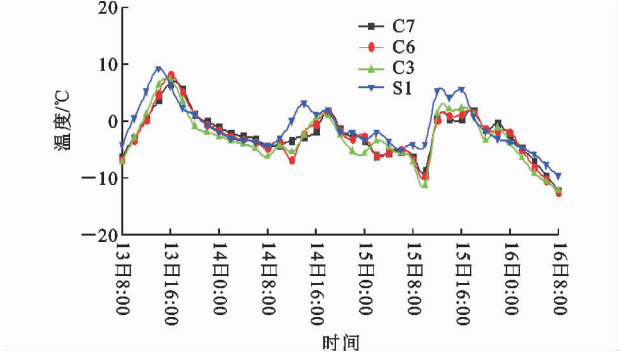


图 8 C7,C6,C3 及 S1 测点的温度变化曲线
Fig. 8 Temperature Curves of C7, C6, C3 and S1 Measure Points

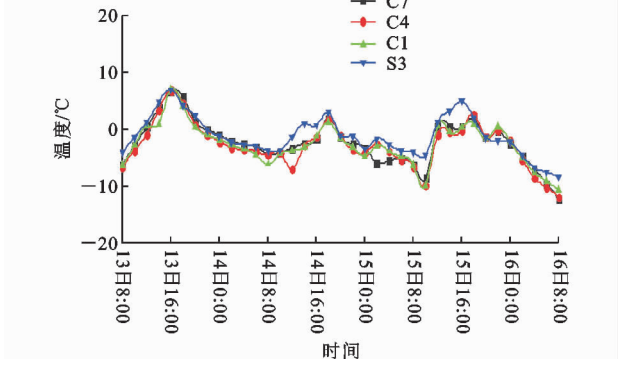


图 9 C7,C4,C1 及 S3 测点的温度变化曲线
Fig. 9 Temperature Curves of C7, C4, C1 and S3 Measure Points

C7 的温度变化依次滞后,越靠近混凝土中心的测点温度曲线滞后现象越明显,峰值温度也在下降,但相互之间的差距不大。

图 7 为管内混凝土中心至钢管右下角(东侧)连线上测点的温度曲线。由图 7 可知,在连续测量的 72 h 内,各测点的温度曲线相似,均未出现明显的温度变化滞后现象,且温度峰值相差不超过 1.0°C (S5,C11,C8 和 C7 测点的温度峰值分别为 6.6°C , 6.9°C , 6.1°C 和 6.8°C)。说明构件截面在该方向上的温度场对太阳辐射作用的敏感程度较低。

由图 6 和图 7 可知:太阳辐射是导致试件截面温度场呈现出非线性特征的主要因素,位于试件截面上缘的测点受太阳辐射影响最大,测点由管内混凝土中心至钢管表面温度变化呈现出不同程度的滞后现象且温度峰值外高内低;位于截面下缘的测点受太阳辐射较少,对应钢管和管内混凝土测点的温度变化曲线较为接近,未出现明显的滞后现象。

图 8,9 为试件测试断面西侧测点的温度曲线。由图 8 与图 9 可知,靠近截面上缘的区域呈现出了较为明显的混凝土测点温度变化曲线滞后钢管测点

的情况,截面下缘区域中各测点温度变化曲线未出现明显的滞后现象。由图 6,7 可知,尽管试件靠近西侧区域的测点受到太阳辐射的作用迟于截面靠近东侧区域的测点,但仍然呈现出了相似的温度曲线滞后变化规律,即靠近截面上缘的测点温度变化曲线滞后现象较为明显,靠近截面下缘的测点温度变化曲线较为相近。

3 有限元模拟

由于 12 月 13 日 8:00~次日 8:00 天气以晴朗为主,试件受到了充分的太阳辐射,各测点的温度变化规律也较为明显。因此,该时间段内测点的温度测量数据最具代表性,可以充分反映出严寒地区日照作用下钢管混凝土截面温度分布的特点。第 3 节

表 2 钢材与混凝土热工参数

Tab. 2 Thermal Parameters for Steel and Concrete

材料	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	比热容/[J·(kg·℃) ⁻¹]	吸收率	辐射率
混凝土	2 500	2.40	950.8	0.50	0.88
钢	7 850	58.20	480.0	0.75	0.84

采用 ABAQUS CAE 建立试件测试断面的二维有限元模型。将钢管及混凝土分别进行网格划分,其中混凝土网格尺寸为 10 mm×10 mm,钢管网格尺寸为 8 mm×8 mm(图 10,11)。钢管及混凝土模型统一采用 DC2D4 单元,该单元为 4 节点线性单元,广泛用于热力学分析中。钢管与混凝土单元采用绑定(Tie)连接,保证在钢-混凝土接触面上可以进行热流传递。

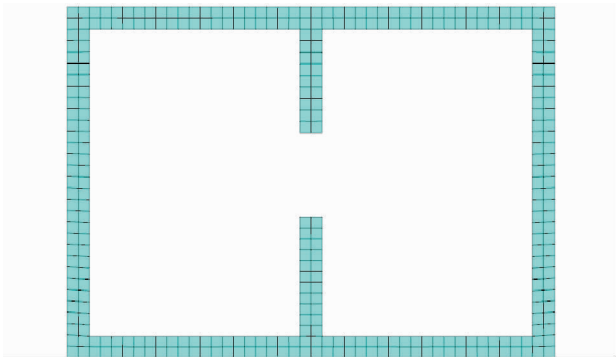


图 10 矩形钢管网格划分

Fig. 10 Mesh Generation for Rectangular Steel Tube

本试验的试件摆放位置位于西宁市东经 101.78°、北纬 36.21°,海拔 2 300 m,相对大气压为 0.75。试件摆放位置为南北方向,东西腹板的面方位角分别为-90°和 90°,根据文献[17]可计算得到试件各表面上的太阳辐射强度,如图 12 所示。钢管表面对太阳辐射的短波吸收率主要与钢管表面涂装

将以实测温度数据为基础,建立试件截面的二维有限元模型,进一步对严寒地区的矩形钢管混凝土截面温度场进行数值模拟研究。

3.1 有限元模型

本文对矩形钢管混凝土试件的数值模拟基于以下 2 点假设进行简化:①假定钢管与管内混凝土接触良好(不存在脱空现象),接触面上温度与热流密度连续,即满足第 4 类边界条件;②假定钢管沿轴线方向不存在热传递,仅在截面进行热量传递,即试件沿轴线方向各横截面的温度场均相同。基于上述假定,便可将待测构件的三维温度场简化为二维平面温度场进行研究。

试件采用 C50 混凝土,根据文献[16]可计算得到对应混凝土的热工参数,如表 2 所示。

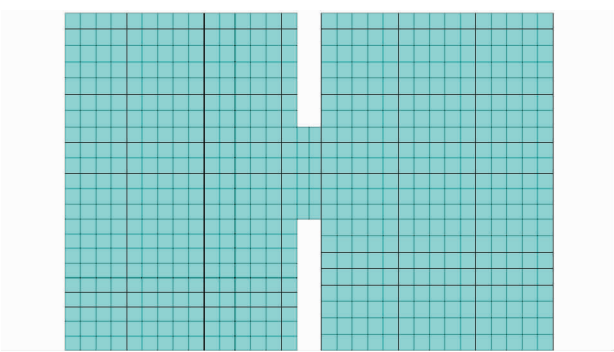


图 11 管内混凝土网格划分

Fig. 11 Mesh Generation for Concrete in Steel Tube

的颜色有关,本试验试件为灰色涂装,按 0.75 计取[18]。由于现场条件的限值,试验过程中每 2 h 采集 1 次数据,数据量较少不能满足有限元分析的要求,因此本文根据 12 月 13 日实测的环境温度最值(最小值-7℃和最大值-1℃),采用 Kreith 等[19]提出的温度插值公式[式(1)]得到当日的温度变化曲线,如图 13 所示。

$$T_a = \frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min}) + \frac{1}{2}(T_{\max} - T_{\min}) \cdot \sin\left[(t-9)\frac{\pi}{12}\right]$$

(1)

式中: T_{\max} , T_{\min} 分别为当日的最高和最低环境温度; t 为时刻; T_a 为 t 时刻插值得到的环境温度。

采用文献[20]中给出的公式计算对流换热系数,其与环境风速直接相关。本文根据试验现场实

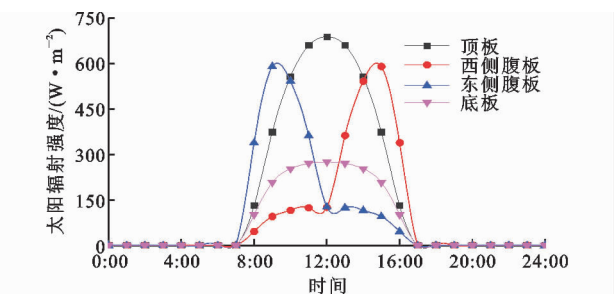


图 12 构件各表面接受的太阳辐射强度

Fig. 12 Solar Radiation Intensities in Component Surface

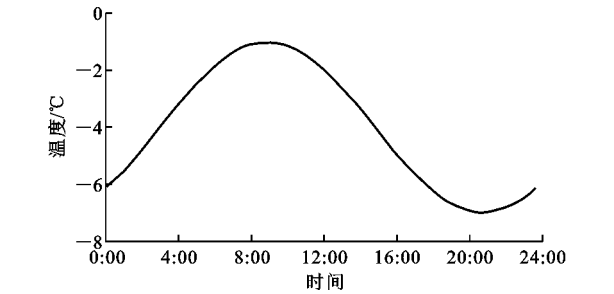


图 13 环境温度变化曲线

Fig. 13 Ambient Temperature Curve

际情况在 6:00~20:00 按风速 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 计算, 20:00~次日 6:00 按风速 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 计算, 计算结果见表 3。

表 3 对流换热系数计算结果

Tab. 3 Calculation Results of Convective Heat Transfer Coefficient

构件表面	对流换热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$	
	$4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速	$0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速
顶面	19.99	6.585
侧面	18.99	4.085
底面	17.49	5.585

根据上文的参数计算结果在模型中建立热边界条件,对试件 24 h 内的截面温度场变化进行了数值模拟计算。有限元模型选取早晨 6:00 作为初始时刻进行 24 h 的构件温度场计算,并以计算结果作为模型初始条件进行反复迭代计算。当计算得到的截面温度场与模型输入的初始温度场相符时,计算结束。本文连续进行了 3 次迭代计算,结果收敛良好,因此以第 3 天的数据作为最终计算结果。

3.2 有限元计算结果

西宁桥址位于东经 101.8° ,通过换算得到西宁当地时间与北京时间相差 1.22 h。为方便在相同条件与其他试验结果对比分析,第 3.2 节所提及时刻均为当地太阳时刻,即西宁时刻。

图 14 为钢管表面 S1~S7 测点温度实测值与有

限元计算值的对比。由图 14 可知,除 S2 与 S3 测点的温度曲线最大值与计算值存在 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的偏差外,各测点的温度曲线均与数值模拟曲线较为吻合。

图 15 选取试件测试断面上一条对角线上的 4 个混凝土测点 C1,C4,C7,C10 温度实测值与有限元计算值的对比。由图 15 可知,管内混凝土测点的实测、计算温度变化曲线比钢管测点的吻合程度更高,这是由于管内混凝土在试验过程中处于封闭状态,受到外界扰动较少,更加接近于理想情况。

钢管及管内混凝土测点的实测温度曲线与有限元计算曲线均较为吻合,证明了本文提出的数值模拟方法的可靠性。根据有限元计算结果,提取 24 h 的模拟时间段中 9 个具有代表性时刻的试件截面温度分布云图来对矩形钢管混凝土构件温度场特点进行进一步研究。

图 16 为不同时刻典型截面温度分布云图。由图 16 可见,试件测试断面底板附近区域测点温度梯度较小,且温度整体偏低,这与第 2 节通过实测数据得出的结论相符。通过与陈宝春等^[6]、刘振宇等^[8]以及闫雯^[21]对圆形钢管混凝土截面温度分布的研究结果对比可知,圆钢管径向尺寸均匀而矩形钢管混凝土截面宽度和高度的尺寸不一,核心混凝土的温度分布受到来自短边方向太阳辐射的影响更大。当矩形钢管设置加劲肋之后,由于钢材的导热系数较高且加劲肋深入混凝土内部,钢材与混凝土接触面积增大,核心混凝土受到更多来自钢管加劲肋的热传递,使得钢管和管内混凝土的温差缩小,混凝土温度变化滞后于钢管温度变化的程度也有所减弱。由图 16 还可以看出,管内混凝土等温线由于加劲肋的存在,呈现出明显的哑铃形,这导致了构件钢管表面与核心混凝土温差的降低。这也成为带肋矩形钢管混凝土截面温度场与圆管截面温度场的显著区别。

4 结 语

(1)可将矩形钢管混凝土构件的三维温度场简化为二维温度场进行计算,建立了相应的有限元模型,计算值与实测值吻合良好,确立了适用于矩形钢管混凝土截面温度分布的可靠数值模拟方法。

(2)严寒地区日照作用下的矩形钢管混凝土截面温度场呈现出明显的非线性特征。

(3)钢管温度受到环境温度的直接影响,其温度变化滞后于环境温度变化;管内混凝土的温度则受到环境温度的间接影响,其温度变化相对于环境温度滞后程度更大。

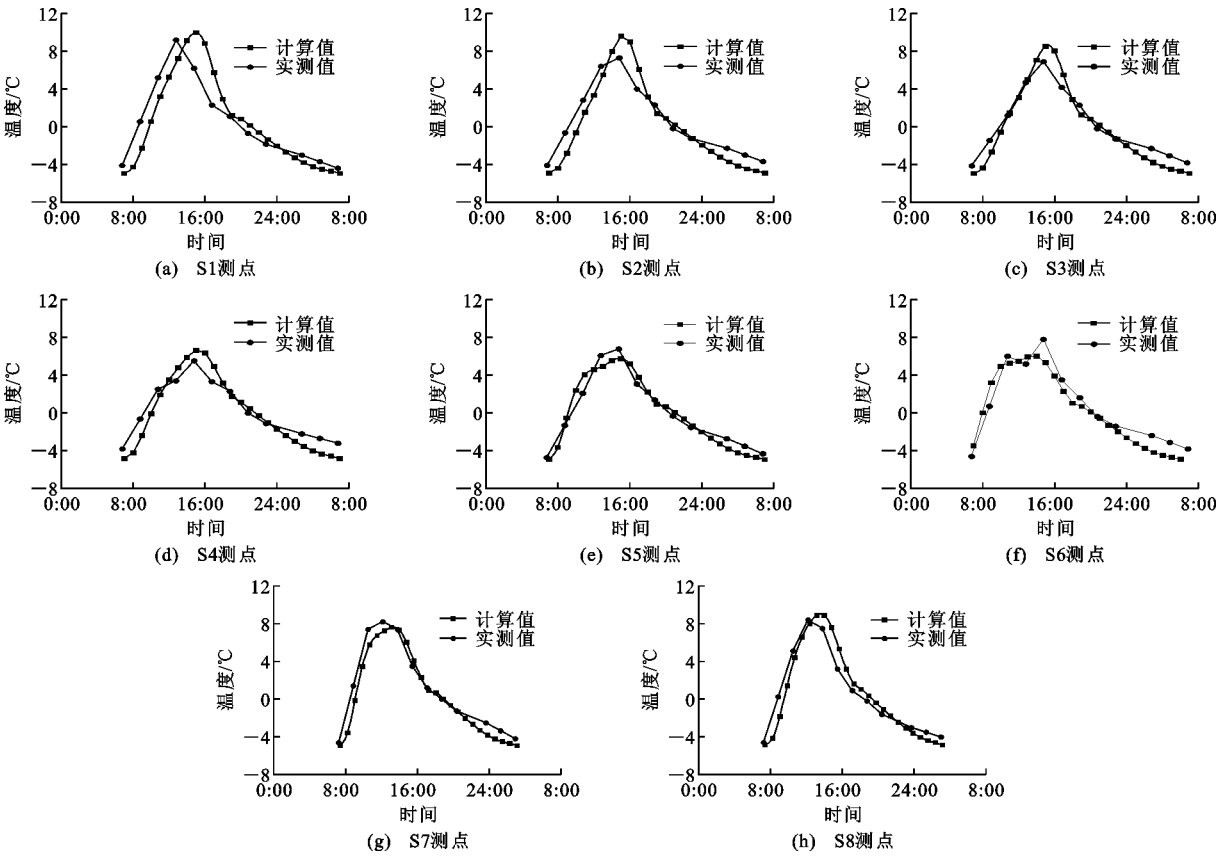


图 14 钢管测点温度实测值与计算值对比

Fig. 14 Comparisons Between Measured Values and Calculated Values of Measured Point Temperature of Steel Tube

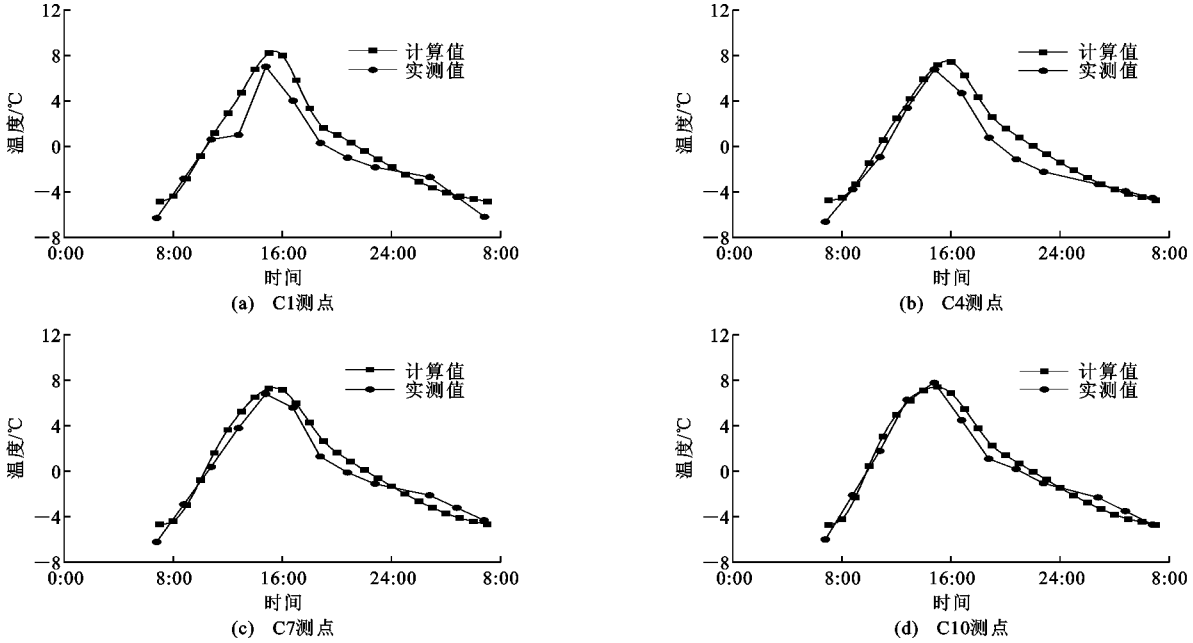


图 15 管内混凝土测点温度实测值与计算值对比

Fig. 15 Comparisons Between Measured Values and Calculated Values of Measured Point Temperature of Concrete in Steel Tube

(4)矩形钢管内设置纵向加劲肋后可增大其与混凝土的接触面积,减少管内混凝土温度变化的滞后程度,降低构件截面的梯度温差。

参考文献:

References:

[1] 刘江,刘永健,房建宏,等. 高原高寒地区“上”形钢-

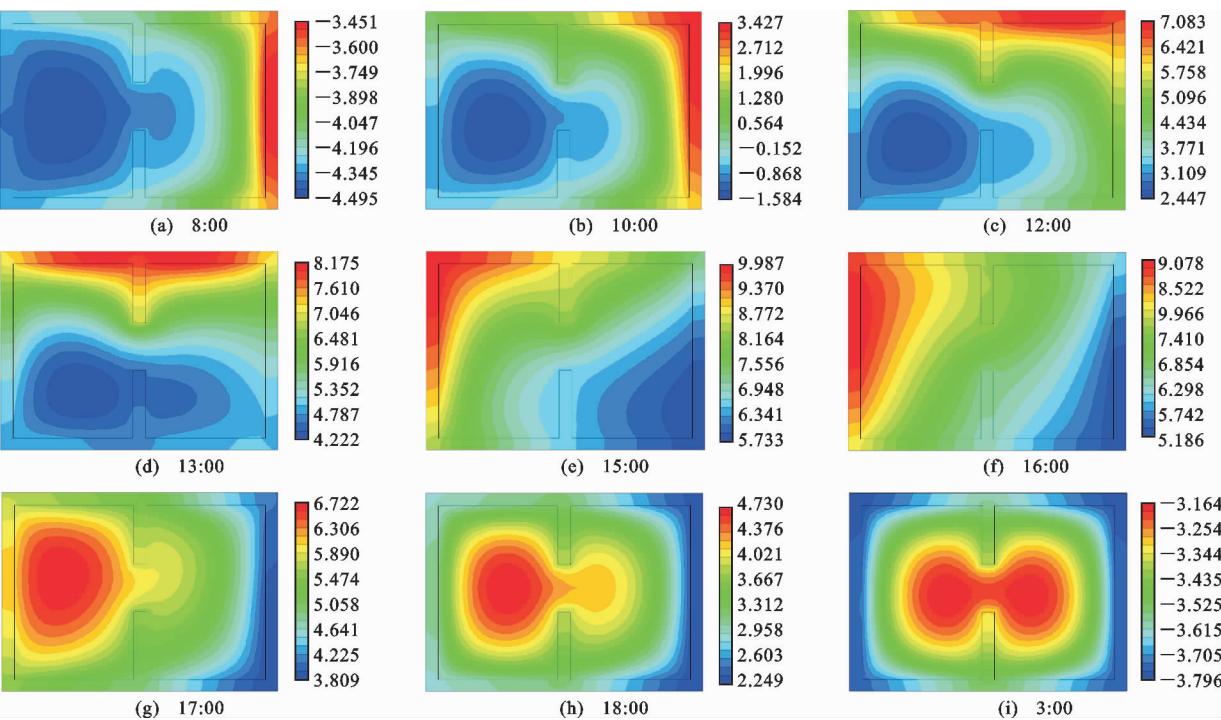


图 16 不同时刻典型截面温度分布云图(单位:℃)

Fig. 16 Temperature Distributions Nephograms of Typical Cross Sections in Different Time Intervals (Unit:℃)

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.

[2] 季德钧,刘 江,张瑜芳,等. 高原高寒地区钢-混凝土组合梁斜拉桥温度效应分析[J]. 建筑科学与工程学报,2016,33(1):113-119.

JI De-jun, LIU Jiang, ZHANG Zhuan-fang, et al. Temperature Effect Analysis of Steel-concrete Composite Girder Cable-stayed Bridge in Arctic-alpine Region[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2016,33(1):113-119.

[3] 张 宁,刘永健,刘 江,等. 高原高寒地区 H 形混凝土桥塔日照温度效应[J]. 交通运输工程学报,2017,17(4):66-77.

ZHANG Ning,LIU Yong-jian,LIU Jiang,et al. Temperature Effects of H-shaped Concrete Pylon in Arctic-alpine Plateau Region[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2017,17(4):66-77.

[4] 刘永健,刘 江,张 宁,等. 钢-混凝土组合梁温度效应的解析解[J]. 交通运输工程学报,2017,17(4):9-19.

LIU Yong-jian,LIU Jiang,ZHANG Ning,et al. Analytical Solution of Temperature Effects of Steel-concrete Composite Girder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2017,17(4):9-19.

[5] 陈宝春,刘振宇. 钢管混凝土拱桥温度问题研究综述[J]. 福州大学学报:自然科学版,2009,37(3):412-418.

CHEN Bao-chun,LIU Zhen-yu. A State-of-art of Research on Temperature Problem of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Journal of Fuzhou University:Natural Science Edition,2009,37(3):412-418.

[6] 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,2011,24(3):72-79.

CHEN Bao-chun,LIU Zhen-yu. Research on Thermal Field Test of Concrete Filled Steel Tubular Truss Arch Under Solar Radiation[J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(3):72-79.

[7] 陈宝春,刘振宇. 日照作用下钢管混凝土构件温度场实测分析[J]. 公路交通科技,2008,25(12):117-122.

CHEN Bao-chun,LIU Zhen-yu. Analysis on Temperature Field Test of CFST Members Under Solar Radiation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2008,25(12):117-122.

[8] 刘振宇,陈宝春. 日照作用下钢管混凝土构件截面温度场有限元分析[J]. 公路交通科技,2008,25(7):49-53,69.

LIU Zhen-yu,CHEN Bao-chun. Finite Element Analysis on Temperature Field of CFST Members Under

- Solar Radiation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(7): 49-53, 69.
- [9] 刘振宇, 陈宝春. 钢管混凝土桁拱热脱粘及温度应力分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(7): 67-72.
LIU Zhen-yu, CHEN Bao-chun. Analysis on Thermal Debonding and Stress of CFST Truss Arch[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(7): 67-72.
- [10] 张后举. 中承式钢管混凝土拱桥温度场及温度效应分析[D]. 西安: 长安大学, 2009.
ZHANG Hou-ju. Temperature Field and Temperature Effect Analysis of Half-through Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [11] 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.
- [12] 彭友松, 强士中, 李 松. 圆形空心墩日照温度效应分析[J]. 桥梁建设, 2006(4): 74-77.
PENG You-song, QIANG Shi-zhong, LI Song. Analysis of Sunshine Thermal Effect of Cylindrical Concrete Hollow Pier[J]. Bridge Construction, 2006(4): 74-77.
- [13] 柯婷娴, 陈宝春, 刘振宇. 日照下钢管混凝土哑铃形拱肋截面的温度场有限元计算[J]. 长沙交通学院学报, 2008, 24(4): 12-17.
KE Ting-xian, CHEN Bao-chun, LIU Zhen-yu. FE Calculation on Temperature Field in Dumbbell-shaped Section of CFST Arch Under Solar Radiation[J]. Journal of Changsha Communications University, 2008, 24(4): 12-17.
- [14] 徐爱民, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥温度应力数值分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 1999, 27(3): 15-18.
XU Ai-min, CHEN Bao-chun. Value Analysis of CFST Arch Bridge's Temperature Stress[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 1999, 27(3): 15-18.
- [15] JTG/T D65-06—2015, 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
JTG/T D65-06—2015, Specifications for Design of Highway Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridges[S].
- [16] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
ZHU Bo-fang. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [17] 向学建, 董 军, 刘昊苏, 等. 高原冬季环境下桥梁温度场各参数的确定[J]. 公路交通科技, 2012, 29(3): 58-63, 85.
XIANG Xue-jian, DONG Jun, LIU Hao-su, et al. Determination of Parameters of Temperature Field of Box-girder Bridge in Winter Weather of Plateau[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(3): 58-63, 85.
- [18] 陈志华, 陈滨滨, 刘红波. 钢结构常用涂料太阳辐射吸收系数试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 81-87.
CHEN Zhi-hua, CHEN Bin-bin, LIU Hong-bo. Experimental Research on Solar Radiation Absorbance of Commonly Used Coatings for Steel Structures[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 81-87.
- [19] KREITH F, KREIDER J F. Principles of Solar Engineering[M]. Washington DC: McGraw-Hill, 1978.
- [20] KEHLBECK F. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 刘兴法, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
KEHLBECK F. Influence of Solar Radiation on Bridge Structures[M]. Translated by LIU Xing-fa. Beijing: China Railway Publishing House, 1981.
- [21] 闫 雯. 钢管混凝土拱肋截面温度场及温度效应分析[D]. 西安: 长安大学, 2008.
YAN Wen. Analysis on Temperature Field and Its Effect of Concrete Filled Steel Tubular Rib Section[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.