

文章编号: 1002-0268 (2008) 06-0049-05

# 日照作用下钢管混凝土构件 截面温度场有限元分析

刘振宇, 陈宝春

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 提出日照作用下钢管混凝土构件截面温度场的有限元计算方法。日照作用下钢管混凝土构件表面的热流考虑钢管外表面与周围大气之间的对流换热、太阳辐射引起的钢管表面的辐射换热和钢管表面吸收的太阳辐射能, 从而将边界条件简化为用牛顿传导定律表达的第 3 类边界条件。通过将构件表面分成 4 个区域来实现日照边界条件中太阳辐射强度的简化计算。其中, 竖立构件表面可分为东、西、南、北朝向面上的太阳辐射; 横放构件表面可分为东、西、水平面上的太阳辐射和仅与大气产生对流换热的一面。算例分析表明, 有限元计算结果与实测结果吻合良好, 可供今后研究和工程应用参考。今后有必要对通用程序进行二次开发, 以简化目前复杂的太阳辐射作用的计算。

**关键词:** 桥梁工程; 钢管混凝土; 有限元; 温度场; 日照

**中图分类号:** U448.34

**文献标识码:** A

Finite Element Analysis on Temperature Field of CFST Members under Solar Radiation

LIU Zhen-yu, CHEN Bao-chun

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China)

**Abstract:** A finite element method to calculate the temperature field of Concrete Filled Steel Tubular (CFST) members under solar radiation was presented. The convection heat flux between the surface and the air, the heat flux caused by solar radiation and the heat flux absorbed from the sun were taken as the heat flux of CFST members under solar radiation. The solar radiation was simulated by the third boundary condition which was expressed by Newton's convection law when considering the solar radiation. The CFST member surface was divided into four areas to realize the calculation of solar radiation, for the vertically placed member, the surface of member can be divided into face of east, west, south and north; and for the horizontally placed member, the surface of member can be divided into the face of east, west, horizontal surface, and the face where only heat convection happens. Case study shows that the calculating results agree well with the test results and can be a reference for further research and application for engineering. It is necessary to carry out secondary development of general program in the future to simplify the complicated solar radiation calculation.

**Key words:** bridge engineering; concrete filled steel tube; finite element analysis (FEA); temperature field; solar radiation

## 0 前言

日照作用下, 钢管混凝土构件截面的温度场为非

线性瞬态温度场, 其基本方程为偏微分方程, 由于问题的非线性, 很难得到解析解, 因此多采用数值方法来求得近似解。温度场的数值解法主要有边界单元

收稿日期: 2007-03-21

基金项目: 福建省重大科技项目 (2003F007)

作者简介: 刘振宇 (1980 -), 男, 福建仙游人, 博士研究生, 研究方向为桥梁工程. (99rufeng@163.com)

法、有限差分法和有限元法<sup>[1]</sup>。边界单元法最适合实际条件,求传热问题最精确,但对物性值变化的问题,没有很好的解决办法;有限差分法采用数值近似的来求解热传导问题,在细分了截面单元和时间步长后,精度可以保证,但一般需自编程序,功能与前后处理均不如大型通用程序,主要局限于理论研究,难以推广应用;有限元法有广泛的适用性,目前工程实际中应用的结构分析通用程序基本上都采用有限元法。

文献[2]采用有限差分法自编程序求解截面温度场,文献[3]采用通用有限元计算程序ANSYS对仅受环境温度作用的钢管混凝土构件温度场进行了计算,计算结果与实测结果吻合较好,但文献[3]没有考虑日照的作用。

文献[4]考虑了日照作用,自编了有限元程序进行计算,计算时将构件表面分为向阳面和背阴面,向阳面采用第1类边界条件、背阴面采用第3类边界条件来计算。这种算法存在以下的问题:(1)随日照方位的变化,构件的向阳面和背阴面也随之变化,计算中需不断改变边界条件,这给计算带来麻烦;(2)需已知向阳面上物体边界处的温度函数,所以它只能应用于进行了温度测试的构件,无法应用于实际工程中;(3)向阳面的钢管表面各点的温度实际上是不同的<sup>[5]</sup>,按同一公式计算不能准确反应实际情况。此外,自编程序主要局限于理论研究,功能与前后处理均不如大型通用程序,难以推广应用。本文在进行日照作用下钢管混凝土构件温度场计算时,将钢管表面分为4个区域,对日照作用采用第3类边界条件,日照方位的变化通过边界上太阳辐射强度的变化来体现。同时,以通用有限元程序为基本分析手段,在文献[3]的基础上,进行日照作用下钢管混凝土截面温度场的计算,以便于实际工程的应用。

## 1 有限元计算方法

钢管混凝土构件截面的温度场是一个复杂的三维瞬态温度场,为简化分析,假定沿着构件长度方向没有热传导,可将复杂的三维空间温度场简化为二维平面温度场<sup>[1]</sup>。在无日照作用时,温度场只与直径有关而与极角无关,在极坐标中可以进一步简化为一维的温度场<sup>[1]</sup>,然而有日照作用时,不能作此简化,只能采用二维平面的温度场。

有限单元法求解平面瞬态温度场时,在空间上通过对连续求解域单元离散,将温度场离散到各个节点上,再通过整体合成,形成计算温度场的有限元格

式;在时间域上则采用差分法推进,从而求得任意时刻的温度场。

为得到温度场的唯一解,必须确定温度场的初始条件和边界条件。初始条件是指选择作为计算的初始时刻截面温度的分布规律,一般是选择截面温度分布比较均匀的时刻。对于边界条件,假定管内混凝土与钢管接触良好,接触面上温度和热流是连续的,为完全接触边界条件(第4类边界条件);受大气温度影响的钢管外表面的边界条件为热传导边界条件(第3类边界条件),见文献[3]。

## 2 日照作用的边界条件

日照作用下钢管混凝土构件截面温度场有限元计算的主要问题是边界上的太阳辐射作用的考虑。文献[6]详细地论述了太阳辐射对桥梁结构的影响,认为日照作用下结构物表面主要存在着7种热流,其中最主要的是3种热流<sup>[7,9]</sup>。对于钢管混凝土构件表面的太阳辐射作用来说这3种热流为:钢管外表面与周围大气之间的对流换热 $q_c$ ;太阳辐射引起的钢管表面的辐射换热 $q_r$ ;钢管表面吸收的太阳辐射能 $q_s$ 。

由于辐射换热比较复杂,常将辐射换热作线性化处理,转换成与对流换热相同的形式来考虑<sup>[10]</sup>。因此,日照作用下钢管混凝土构件表面总的热流为可表示为:

$$q_n = q_c + q_r - q_s = h[T - (T_a + I_n/h)], \quad (1)$$

式中, $q_n$ 为钢管表面总的热流密度; $T_a$ 为大气温度; $T$ 为钢管外表面温度; $h_c$ 为钢管表面与大气之间的换热系数; $h_r$ 为辐射引起的换热系数; $I_n$ 为钢管表面对太阳辐射的吸收系数; $I_n$ 为太阳辐射强度; $h$ 为总的换热系数, $h = h_c + h_r$ 。

日照作用下的边界条件可表示为:

$$-\left[\frac{\partial T}{\partial t}\right] = q_n = h(T - T_a) - I_n, \quad (2)$$

式(2)可改写成:

$$-\left[\frac{\partial T}{\partial t}\right] = h[T - (T_a + T_f)], \quad (3)$$

式中, $h$ 为导热系数; $T_f$ 为综合大气温度, $T_f = I_n/h$ 。

由式(3)可见,太阳的辐射作用可等效成为大气温度的升高,并与大气温度叠加,定义为综合大气温度<sup>[11]</sup>。因此,受日照作用的钢管混凝土构件表面的边界条件可简化为第3类边界条件。

日照作用下边界条件的计算中,太阳辐射强度 $I_n$ 的确定是一个关键。由于日照方位和强度均随时间的变化而变化,因此,日照作用如何模拟是关键,文献

[12]论述了如何由气象站得到的太阳辐射数据来计算构件表面太阳辐射强度,并指出钢管混凝土拱肋一般为圆形截面,圆形截面构件表面的法线方向是变化的,太阳辐射强度如果按公式来计算就比较复杂。因此,文献[12]参考文献[13]对构件表面的太阳辐射作用做了简化。

对于竖立构件,将构件表面简化为东、西、南、北朝向,并按各朝向上的太阳辐射强度来近似构件表面的太阳辐射作用;对于横放构件,朝上的圆周面  $hb$  可近似认为受水平面上的太阳辐射;在圆周面  $fd$ ,由于离地面较近,且没有受到日照的作用,因此,假定在该段表面上仅与大气温度之间存在对流换热;圆周面  $hf$  则简化为朝东面;圆周面  $bd$  则简化为朝西面。图 1 是构件朝向简化示意图。通过对构件表面朝向的简化,构件表面的太阳辐射作用也就简化成各朝向垂直面上的太阳辐射作用,因此,只需计算各朝向垂直面上的太阳辐射作用,各朝向上太阳辐射强度的计算详见文献[12]。

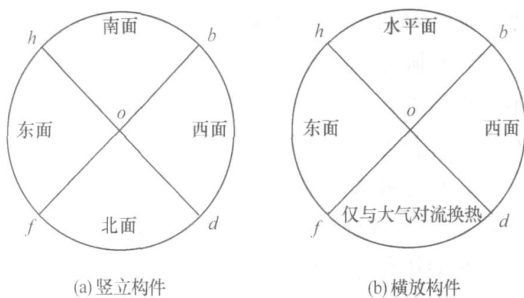


图 1 构件表面朝向简化示意图  
Fig. 1 Division of member's surface

### 3 算例分析

#### 3.1 算例简介

算例取文献 [5] 的试验构件为分析对象,即一个竖立、一个横放的  $550 \times 8 \text{ mm}$  的钢管混凝土构件,长  $1.5 \text{ m}$ 。管内采用 C40 混凝土,其配合比见表 1。

表 1 C40 混凝土配合比  
Tab. 1 Mix rate of concrete C40

材料	水泥	砂	石子	水	合计
重量/kg	446	577	1 172	205	2 400
百分比/%	18.5	24.1	48.8	8.5	100

试验的详细信息见文献 [5]。试验实测了夏季高温情况下连续多天截面的温度场。不失一般性时间选取 2005 年 7 月 15 日截面的温度场来计算。

假定沿着构件长度方向没有热传导,将温度场简

化成平面二维温度场,因此,取构件一半高度截面作为计算模型。采用 plane35 单元对截面进行单元划分,该单元为三角形 6 节点单元,每个节点只有一个温度自由度,整个截面划分为 1 200 个节点和 571 个单元,在建立有限元模型时,钢管与混凝土之间设定为完全粘结在一起,截面的划分情况见图 2。选取上午 5:00 时截面的温度分布为计算的初始条件,边界条件通过定义综合换热系数和综合大气温度来施加。

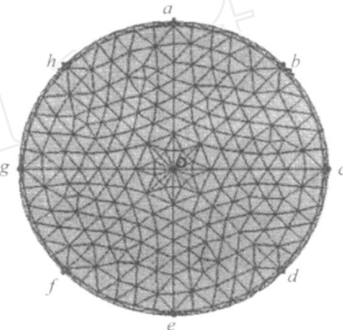


图 2 有限元计算模型图  
Fig. 2 Finite-element model

钢管和混凝土热工性能参数见表 2。混凝土的热工性能与其组成材料的热工性能相关,算例中的混凝土热工性能,根据表 1 的配合比采用各组分的重量百分按加权平均法进行计算。钢材的热工性能参数则参考文献 [14] 取用。

表 2 钢管、混凝土热工性能参数表  
Tab. 2 Thermal parameters of steel tube and concrete adopted in the present study

材料	温度/ ( $^{\circ}\text{C}$ )	比热/ ( $\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
钢	0	469	51.8	7 850
	200	510	48.1	7 850
混凝土	常温	980	2.45	2 400

#### 3.2 换热系数的计算

采用第 3 类边界条件求解时,需要计算构件表面的换热系数。日照作用下构件表面的换热系数包括对流换热系数  $h_c$  和辐射换热系数  $h_r$ 。对流换热系数主要受风速的影响,7 月 15 日平均风速为  $3.12 \text{ m/s}$ ,根据文献 [15] 提供的不同风速情况下固体表面在空气中的换热系数  $h_c$ ,插值得到对流换热系数  $h_c$  为  $17.962 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

由于缺少钢管混凝土结构的辐射换热系数的计算公式,本文参考文献 [16] 提供的混凝土结构的计算公式来近似计算。

$$h_r = [4.8 + 0.075(T_a - 5)], \quad (4)$$

式中,  $T_a$  为大气温度;  $\epsilon$  为钢管的辐射率, 参考文献 [17] 取 0.84。

7 月 15 日实测大气温度的平均值为 34.426, 代入式(4) 算得辐射换热系数  $h_r$  为 5.886 W/(m<sup>2</sup> · )。

因此, 总的换热系数  $h = h_c + h_r = 17.962 + 5.886$

$= 23.848$  W/(m<sup>2</sup> · )。

### 3.3 太阳辐射强度的计算

根据本文第 2 节提供的太阳辐射强度的计算方法求得算例 7 月 15 日的太阳辐射强度, 见表 3。

表 3 7 月 15 日计算的太阳辐射强度表

Tab. 3 Solar radiation intensity in July 15

朝向	太阳辐射强度/(W·m <sup>-2</sup> )												
	6 00	7 00	8 00	9 00	10 00	11 00	12 00	13 00	14 00	15 00	16 00	17 00	18 00
东	168	313	385	398	354	261	128	132	126	111	88	55	16
西	5	24	48	73	97	115	128	298	463	607	707	728	505
南	5	24	48	107	171	221	250	252	223	163	88	55	16
北	44	61	54	73	97	115	128	132	126	111	100	141	132
水平面	35	152	305	468	619	740	818	843	810	715	561	354	105

### 3.4 计算结果

应用 ANSYS 程序对 7 月 15 日构件截面温度场进行计算, 计算结果与实测结果见图 3 和图 4。

从图 3 和 4 可以看出, 有限元的计算结果与实测结果吻合良好, 表明本文提出的有日照作用的钢管混凝土构件温度场的计算方法是可行的。

应该指出的是, 在计算太阳辐射作用时, 要对气象部门提供的太阳辐射资料进行较为复杂的计算。因此, 今后的工作中, 应对通用程序进行二次开发, 使这些计算工作通过自编程序来实现, 以简化计算, 便于工程实际应用和研究分析。

## 4 结论

### (1) 日照作用下钢管混凝土构件截面温度场计算

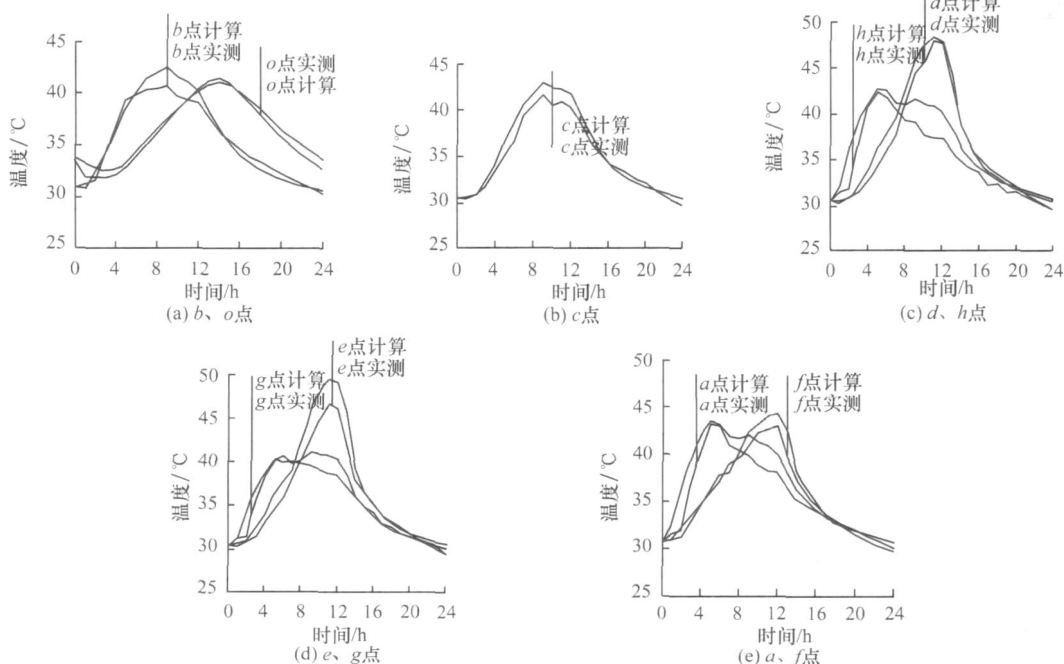


图 3 竖立构件截面各点温度曲线

Fig. 3 Temperature curve of vertically placed member

的主要问题是边界条件如何考虑, 即构件表面的太阳辐射作用的计算问题。本文在计算温度场时, 对于竖立构件, 将构件表面的太阳辐射作用简化为东、西、南、北朝向上的太阳辐射作用, 对横放构件, 则简化为东、西、水平面上的太阳辐射作用及仅与大气产生对流换热的一面, 并分别计算各朝向面上的太阳辐射强度, 从而将边界条件简化为第 3 类边界条件。

(2) 有限元的计算结果与实测结果吻合良好, 表明本文提出的日照作用下钢管混凝土构件截面温度场的有限元计算方法是可行的。

(3) 在计算太阳辐射作用时, 要对气象部门提供的太阳辐射资料进行较为复杂的计算, 今后的工作中, 应对通用程序进行二次开发, 使这些计算工作通过自编程序来实现, 以简化计算, 便于工程实际应用

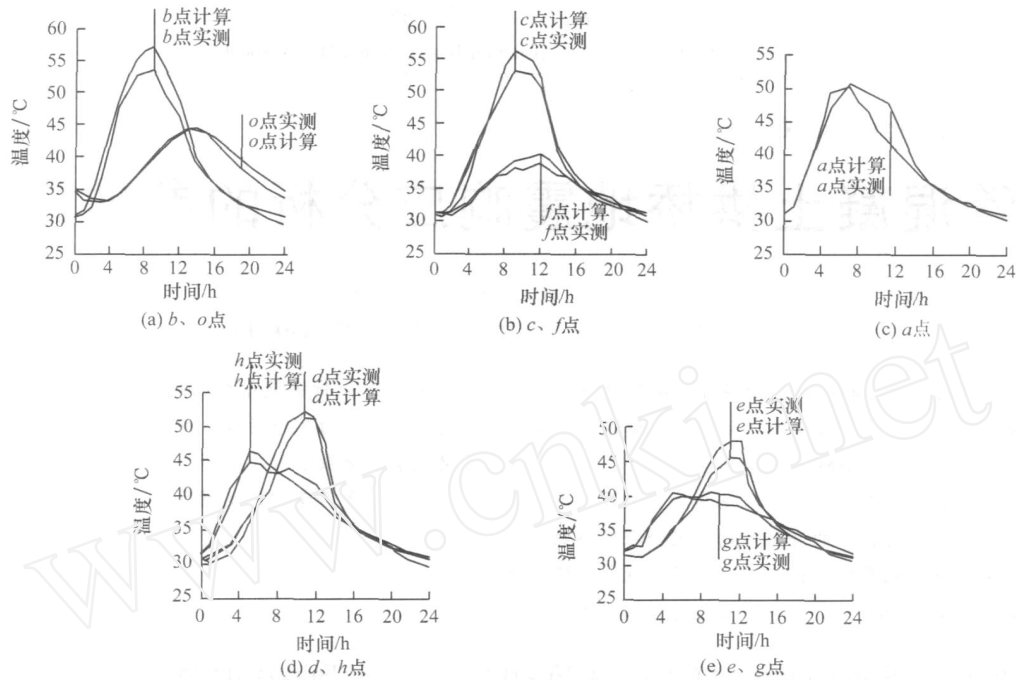


图 4 横放构件截面各点温度曲线

Fig. 4 Temperature curve of horizontally placed member

和研究分析。

参考文献:

References:

[1] 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), 1999, 27 (3): 15 - 18.

[2] 陈宝春, 徐爱民, 孙潮. 钢管混凝土拱桥温度内力计算时温差取值分析 [J]. 中国公路学报, 2000, 13 (2): 52 - 56.  
 CHEN Bao-chun, XU Ai-min, SUN Chao. Analysis of Thermal Difference Magnitude in Thermal Inner Force Calculation of CFST Arch Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13 (2): 52 - 56.

[3] 刘振宇, 陈宝春. 钢管混凝土拱肋施工过程截面温度特性分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (5): 48 - 51.  
 LIU Zhen-yu, CHEN Bao-chun. Thermal Property Analysis on Concrete Filled Steel Tubular Arch Rib during Construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (5): 48 - 51.

[4] 范丙臣. 中承式钢管混凝土拱桥的温度评价及试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.

FAN Bing-chen. Thermal Effect Value and Test Study of Half-through CFST Arch Bridge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.

[5] 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, (待刊).  
 CHEN Bao-chun, LIU Zhen-yu. Analysis on Temperature Field Tests of CFST Members under Solar Radiation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, (to be published).

[6] F 凯尔别克. 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. Effect of Solar Radiation on Bridge Structure [M]. Translated by LIU Xing-fa. Beijing: China Railway Press, 1981.

[7] 姜全德, 蒋鸿. 钢筋混凝土箱形梁桥日照温度场和温度应力平面有限元数值分析方法 [J]. 桥梁建设, 1990 (3): 34 - 48.  
 JIANG Quan-de, JIANG Hong. Numerical Analysis Methods of Thermal Field and Thermal Stress of Reinforced Concrete Box Girder Bridge Caused by Solar Radiation [J]. Journal of Bridge Construction, 1990 (3): 34 - 48.

[8] 李全林. 日照下混凝土箱梁的温度场和温度应力研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004.  
 LI Quan-lin. Research of Temperature Field and Temperature Stress of Concrete Box Girder Caused by the Solar Radiation [D]. Changsha: Hunan University, 2004.

(下转第 69 页)

- Lag Effect of High-Strength Concrete Thin-Walled Box Continuous Grder [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2007, 29 (3): 103 - 107.
- [4] LEE C K, WU G J. Shear Lag Analysis by the Adaptive Finite Element Method [J]. Thin-Walled Structures, 2000, 38 (3): 311 - 336.
- [5] 张士铎. 箱形薄壁梁剪力滞效应 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 8 - 9.  
ZHANG Shi-duo. Shear Lag Effect on Box Grder with Thin-Wall [M]. Beijing: China Communications Press, 1998: 8 - 9.
- [6] 罗旗帜. 薄壁曲箱梁桥剪力滞效应分析 [J]. 铁道学报, 1999, 21 (5): 88 - 93.  
LUO Qi-zhi. Analysis of Shear Lag Effect on Curved Box Grder Bridges with Thin-Wall [J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21 (5): 88 - 93.
- [7] SHIH T C. Shear Lag Effect in Simply Supported Prestressed Concrete Box Grder [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2004, 9 (2): 178 - 184.
- [8] 吴幼明, 罗旗帜, 岳珠峰, 等. 多因素分析薄壁曲线箱梁剪力滞效应的力学模型 [J]. 中南公路工程, 2007, 32 (3): 42 - 45.  
WU You-ming, LUO Qi-zhi, YUE Zhu-feng, et al. A Mechanical Model of Thin Walled Curved Box Grder with Shear Lag Effect Based on Multi Factor Analysis [J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32 (3): 42 - 45.
- [9] 熊稚军, 罗旗帜, 杜宏彪, 等. 弯、扭、剪力滞耦合的曲箱梁剪力滞效应力学模型 [J]. 四川理工学院学报, 2006, 19 (4): 5 - 10.  
XIONG Zhi-jun, LUO Qi-zhi, DU Hong-biao, et al. Mechanical Model of Thin-walled Curved Box Grders with Shear-lag Effect Based on the Coupled Relationship of Bend, Torsion and Shear-lag [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering, 2006, 19 (4): 5 - 10.
- [10] 倪元增. 弹性薄壁梁桥分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 90 - 94.  
NI Yuan-zeng. Analysis of Elastic Grder Bridge with Thin Wall [M]. Beijing: China Communications Press, 2000: 90 - 94.
- [11] 姚玲森. 曲线梁 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1989: 7 - 11.  
YAO Ling-sen. Curved Grder [M]. Beijing: China Communications China, 1989: 7 - 11.
- [12] ZHANG S H, LYONS L P R. A Thin-walled Box Beam Finite Element for Curved Bridge Analysis [J]. Computers & Structure, 1984, 18 (6): 1 035 - 1 046.

## (上接第 53 页)

- [9] 韩先科. 斜拉桥桥塔温度场的有限元分析及其影响评价 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.  
HAN Xian-ke. Temperature Field Finite Element Analysis and Thermal Effect Value on Bridge Tower of Cable-stayed Bridge [D]. Harbin: Harbin Industry University, 2002.
- [10] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.  
LIU Xing-fa. Thermal Stress Analysis on Concrete Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 1991.
- [11] 朱伯芳. 大体积混凝土的温度应力与温度控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.  
ZHU Bo-fang. Thermal Stress and Temperature Control of Mass Concrete [M]. Beijing: China Electricity Press, 1999.
- [12] 刘振宇. 钢管混凝土拱肋截面温度场研究 [D]. 福州: 福州大学, 2006.  
LIU Zhen-yu. Research on Temperature Field of Concrete Filled Steel Tubular Arch Rib [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [13] GB50176-93, 民用建筑热工设计规范 [S].  
GB50176-93, Code for Thermo Technical Design of Civil Building [S].
- [14] 大中逸雄. 计算机传热凝固解析入门——铸造过程中的应用 [M]. 许云祥, 译. 北京: 机械工业出版社, 1988.  
OHNAKA I. Introduction of Computer Analysis of Heat Transfer and Solidification: Application in Foundry [M]. Translated by XU Yun-xiang. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [15] 龚召熊. 水工混凝土的温控与防裂 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.  
GONG Zhao-xiong. Temperature Control and Crack Prevention of Hydraulic Concrete [M]. Beijing: China Waterpower Press, 1995.
- [16] FERNANDO A B, PEDRO A M. Thermal Actions for Concrete Bridge Design [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (8): 2 313 - 2 331.
- [17] FU H C, NG S F, CHEUNG M S. Thermal Behavior of Composite Bridges [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116 (12): 3 302 - 3 323.