

# 钢管混凝土拱桥温度应力数值分析

徐爱民, 陈宝春

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 以钢管混凝土拱桥的温度应力为分析对象, 编制了钢管混凝土构件截面热传导差分计算程序. 在此基础上, 编制求解钢管混凝土拱肋温度应力的有限元程序, 定性分析了钢管混凝土拱桥的温度特性.

关键词: 钢管混凝土; 拱桥; 温度; 应力

中图分类号: U441.5

文献标识码: A

钢管混凝土拱桥拱肋截面上温度场为非均匀温度场, 可分解为等效的线性温度场和非线性温度场<sup>[1]</sup>. 非线性温度场会引起截面自应力; 线性温度场变化在常用的超静定拱桥中产生内力. 钢管混凝土拱桥温度应力计算, 未见文献报道. 本文采用 Fortran 语言利用数值方法, 编制了钢管混凝土构件受均匀大气温变和内热源共同作用下的温度场变化情况的计算程序, 并建立有限元程序计算线性温度场引起的拱肋内力、应力和变形, 以及非线性温度场引起的截面自应变和自应力. 根据计算结果, 初步分析了钢管混凝土拱桥按现行桥规分析时的合拢温度、年温差温度的取值问题, 并讨论了拱肋截面非线性温度场的自应力问题.

## 1 钢管混凝土拱肋截面温度场差分计算

### 1.1 计算基本假定

1) 钢管混凝土拱肋为细长结构物, 假定沿拱肋轴向大气温场均匀, 并视拱肋与墩台接触面为绝热边界. 则沿拱轴方向无热传导, 钢管混凝土拱肋温度场为断面上的平面问题.

2) 作为初步分析, 不考虑日照影响以简化分析, 即认为环境温度场环绕着拱肋断面为均匀温度场, 则钢管混凝土拱肋断面温度场是平面轴对称问题.

3) 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 (第四类边界条件); 钢管外表面的边界条件为热传达边界条件 (第三类边界条件).

### 1.2 热传导差分方程

由文献 [2] 可得圆坐标系下导热方程:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial Q'}{\partial t} \right)_t \quad (1)$$

根据 1.1 节中的假定, 钢管混凝土拱肋的传热问题可简化为圆截面的一维问题, 上述导热方程可简化为:

收稿日期: 1998 - 12 - 31

作者简介: 徐爱民 (1975 - ), 男, 助教, 硕士.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial Q'}{\partial t} \tag{2}$$

式中:热扩散率  $\alpha = \lambda / C_p$ ;  $Q'$  为  $t$  时刻单位体积混凝土累积水化热;  $\lambda$  为导热系数;  $\rho$  为材料密度;  $C_p$  为材料比热;  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $r$  为离圆心距.

钢管混凝土构件初始条件为  $t = 0, T = T_0$  ( $T_0$  为定值);或假设温度分布为  $t = 0, T = f(x)$ . 边界条件有热传达边界条件(第三类边界条件)、相接触边界条件(第四类边界条件). 由于环境温度随时间的变化规律很难用连续函数表示, 而钢管混凝土拱肋温度场是环境温度的函数, 所以钢管混凝土拱肋温度场相对时间也很难用解析解求得连续函数. 对于大气温度传热问题, 实用求解方法常用数值解法. 主要有有限元法、边界单元法、有限差分法等. 文献 [3] 指出, 边界单元法最符合实际条件, 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. 有限元法有广泛的适用性, 但划分单元多, 计算量大, 适用于热边界条件复杂的对象. 有限差分法容易理解, 在细分了截面单元和时间步长后, 精度完全可以保证. 综上所述, 由于本文所考虑的钢管混凝土拱桥拱肋断面温度场对称, 所以在求解钢管混凝土构件温度场时采用有限差分法.

将钢管混凝土拱肋断面划分为一个钢环(钢管)和有限个混凝土圆环和一个核心混凝土小圆, 共  $n$  个小区段, 每段间距  $r$ , 计算模型见图 1. 对钢管混凝土拱肋温度场在时间长度上进行差分, 由文献 [4] 可得差分方程式.

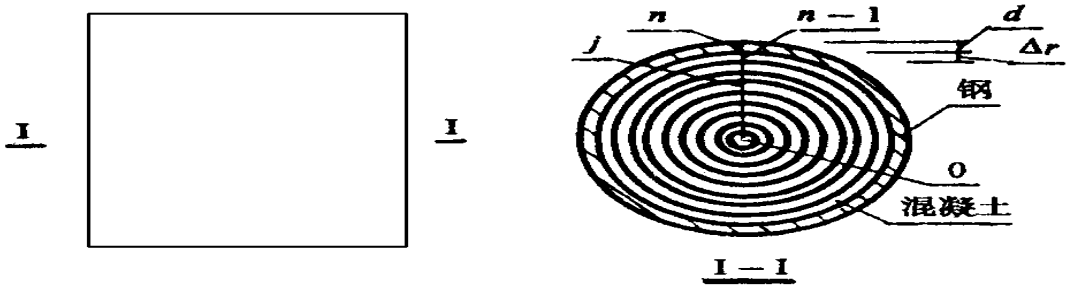


图 1 钢管混凝土构件计算模型图

### 1.3 程序框图

根据上述分析, 用差分法编制了受环境温度和管内混凝土水化热影响的钢管混凝土拱肋截面温度场计算程序. 程序框图见图 2.

## 2 钢管混凝土拱桥温度内力与应力计算

钢管混凝土拱肋截面温度场属非线性温度场, 可分解为“等效非线性温度场”和“等效线性温度场”. 前者引起正截面的非线性变形, 这种变形由于受到平截面假定的约束而在截面上产生自相平衡的约束力, 称为温度自应力, 它对整个结构不产生内力和变形; 后者会引起结构的位移, 在超静定结构中, 由于多余约束存在而产生温度次内力, 引起截面上的温度次应力.

本文将拱肋离散为直梁单元, 单元刚度根据施工至成桥过程中钢管混凝土的组成成分与材料的变化求取. 即空钢管、随混凝土强度增大而增大刚度的钢管混凝土、混凝土强度达到

28 天强度的钢管混凝土. 应用文献 [5] 提供的平面刚架有限元程序, 考虑温度影响, 求取线性温度场引起钢管混凝土拱桥的内力、应力、应变. 截面非线性温度应力的计算, 按文献 [6] 提供的方法计算. 钢管混凝土拱桥温度内力、应力计算程序见图 3.

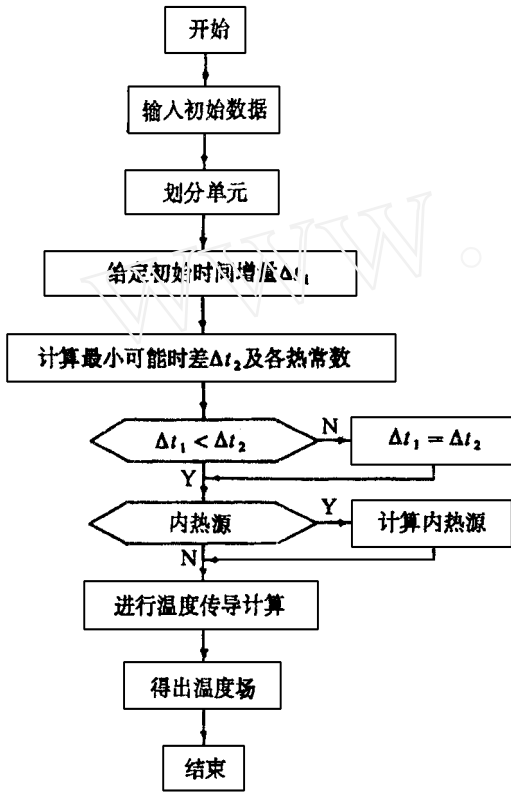


图 2 热传导程序框图

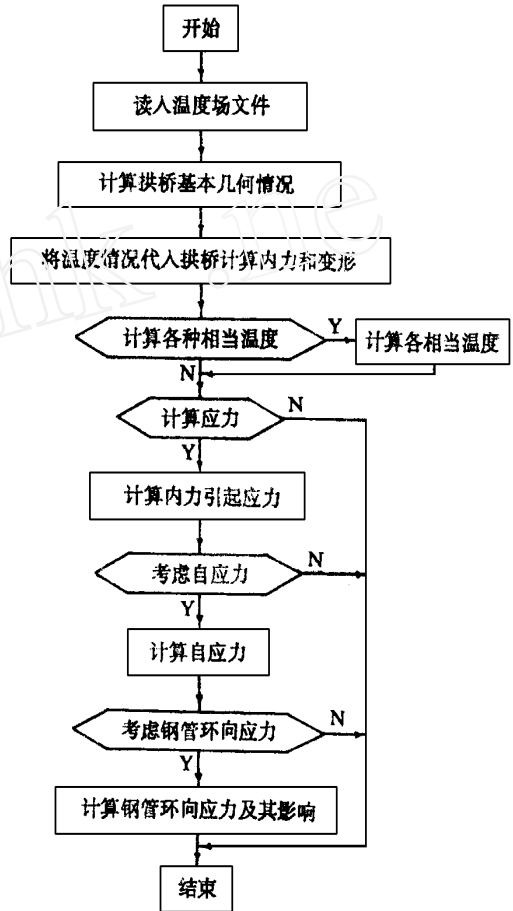


图 3 钢管混凝土拱桥温度应力计算框图

### 3 算例

算例 1 为福建闽清石潭溪大桥, 该桥为单跨 136 m 的钢管混凝土桁肋中承拱, 主拱肋弦杆为 550 mm × 8 mm 的钢管内灌 C40 混凝土, 详见文献 [7]. 算例 2 为福建福安群益大桥, 该桥为单跨 46 m 的钢管混凝土单圆管中承式肋拱, 主拱肋弦杆为 800 mm × 14 mm 的钢管内灌 C30 混凝土, 详见文献 [8].

大气温度采用福建省气象中心提供的福州市典型 1 月和 7 月的大气温度以及 1998 年 9 ~ 10 月实测的大气温度资料<sup>[9]</sup>, 应用本文计算程序分析发现, 由于钢管混凝土拱肋截面为钢—混凝土组合材料, 大气温度影响钢管较快、而对核心混凝土的影响较慢. 2 个算例中, 截面上钢管壁和核心混凝土中心温差值最大可达 3 ~ 5 左右. 此非线性温度场对结构内力没有影响, 但产生的自应力则相当大. 表 1 列出 2 个算例中年均温差线性温度应力、拱肋自重应力以及截面非线性温度应力值.

表 1 线性、非线性温度最不利应力值与自重应力值比较 (单位: kPa)

项目	群益大桥			石潭溪大桥		
	线性温度应力	拱肋自重应力	非线性温度应力	线性温度应力	拱肋自重应力	非线性温度应力
最大值	1 873	5 581	4 283	955	19 376	3 578
最小值	- 3 478	5 581	- 3 175	- 1 791	19 376	- 2 154

## 4 结语

编制了钢管混凝土拱桥拱肋截面温度场的差分计算程序和拱肋线性温度内力、应力与截面非线性温度应力的有限元计算程序,且进行了钢管混凝土桁拱和单圆管肋拱 2 座桥例的分析。计算结果表明,钢管混凝土拱桥线性温度应力与非线性温度应力接近或超过拱肋自重产生的应力,应引起设计者的注意。

### 参考文献

- [1] 杨高中. 桥梁非线性温度与收缩内力的一个解法[J]. 公路工程, 1979(3): 6~12.
- [2] 朱伯芳, 王同生, 丁宝瑛, 等. 水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1976.
- [3] 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.
- [4] 邱明广, 钟善桐. 钢管混凝土轴压柱耐火性能的理论研究[A]. 全国钢协钢—混凝土组合结构协会第六届年会论文集[C]. 福州: (出版者不详), 1998. 83~87.
- [5] 赵振铭, 陈宝春. 杆系与箱型梁桥结构分析及程序设计[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1997.
- [6] 陈宝春, 郑振飞. 拱桥非线性温差的应力计算[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1990, 18(3): 75~81.
- [7] 陈宝春, 郭金琼, 毛承宗, 等. 316 国道福建石潭溪大桥优化设计[A]. 全国钢协钢—混凝土组合结构协会第六届年会论文集[C]. 福州: (出版者不详), 1998. 157~161.
- [8] 张思伟. 福安群益大桥设计与施工[J]. 福建建筑, 1998(3): 52~53.
- [9] 徐爱民. 钢管混凝土拱桥温度特性研究[D]: [学位论文]. 福州: 福州大学土木建筑工程学院, 1999.

## Value Analysis of CFST Arch Bridge's Temperature Stress

XU Ai - min , CHEN Bao - chun

(College of Civil and Architectural Engineering , Fuzhou University , Fujian Fuzhou 350002 , China)

**Abstract :** The temperature stress of the concrete - filled - steel - tubular (CFST) arch bridge is analyzed and a program for calculating temperature conduction of CFST element is made. Based on that , a finite element program which solves temperature stress of CFST arch rib is made so that the temperature stress of CFST arch bridge is analyzed qualitatively.

**Key words :** CFST ; arch bridge ; temperature ; stress