

文章编号: 1001-7372(2000)02-0052-05

钢管混凝土拱桥温度内力计算时温差取值分析

陈宝春, 徐爱民, 孙 潮

(福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 提出钢管混凝土拱桥计算合拢温度的概念, 进行了钢管混凝土构件截面温度场测试和钢管混凝土拱桥温度变化值的计算机分析。分析结果认为, 钢管混凝土拱桥的计算合拢温度主要取决于管径和管内混凝土浇筑后一个月内的平均温度以及空钢管合拢温度。钢管混凝土拱桥的计算温度取日平均温度较为合理。

关键词: 钢管混凝土; 拱桥; 温差

中图分类号: U 441.5 **文献标识码:** A

Analysis of thermal difference magnitude in thermal inner force calculation of CFST arch bridge

CHEN Bao-chun, XU A im in, SUN Chao

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

Abstract: The concept of calculation closure temperature of CFST arch bridge is presented, the tests of the thermal field of CFST columns and computer numerical analysis of the thermal change magnitude of CFST arch bridges are carried out. With the results amplified, the calculation closure temperature of CFST arch bridge depends mainly on the diameter of the tube, the average temperature of the month after the concrete in the tube is filled as well as the closure temperature of the hollow steel tube arch. The daily average temperature is cooperated well with the calculation temperature.

Key words: CFST; arch bridge; thermal difference

钢管混凝土拱桥基本上是超静定结构。超静定结构在温度变化影响下会产生附加内力。一般桥梁结构在计算温度变化影响产生的附加力时, 基准温度取结构的合拢温度, 计算温度根据建桥地区的气温条件确定。钢结构可按当地最高和最低气温确定; 砖、石、混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土结构一般按当地月平均最高和最低气温确定。计算温度减去合拢温度(基准温度)即温度变化值。钢管混凝土拱桥因其材料、截面构成和施工方法等与一般结构不同, 采用上述方法确定温度变化值并不合适。

首先, 钢管混凝土拱桥施工采用自架设方法, 先合拢空钢管, 再浇筑管内混凝土, 截面刚度与强度是逐步形成的。温度变化计算所对应的结构是成桥后

的钢管混凝土结构, 因此, 空钢管的合拢温度不能直接作为钢管混凝土拱桥的合拢温度。当混凝土达到强度形成钢管混凝土结构时, 受水泥水化热影响和环境温度的影响, 已在钢管内和混凝土内积累了应力。所以钢管混凝土拱不存在实际的合拢温度。温度变化计算时, 应以管内混凝土形成强度时截面的平均温度值和此时对应的截面内力反算截面内力为零时的温度值作为基准温度, 为与一般桥梁结构温度变化值计算中合拢温度相对应, 笔者称此基准温度为计算合拢温度。钢管混凝土拱桥的计算合拢温度迄今未见研究报告。

其次, 钢管混凝土拱桥为组合结构, 组合材料的传热性能、截面的构成等不同于圬工拱桥、钢筋混凝

收稿日期: 1999-08-03

作者简介: 陈宝春(1958-), 男, 福建罗源人, 福州大学副教授



土拱桥和钢拱桥, 其计算温度值的取值也有待于研究。

为此, 笔者利用数值方法建立了钢管混凝土拱受均匀大气温变和内热源共同作用下的温度场和由此产生的温度内力的计算程序, 进行了钢管混凝土构件温度场实测。根据实验与计算机计算结果, 分析了钢管混凝土拱桥温度内力计算中计算合拢温度、计算温度的取值问题。

1 钢管混凝土构件温度场计算

钢管混凝土构件温度场计算采用如下基本假定:

(1) 钢管混凝土拱肋为细长结构物, 在均匀的大气温度场中, 认为沿拱轴方向的热传导可以忽略, 其温度场看成是断面上的平面问题。

(2) 作为初步分析, 不考虑日照等因素引起的非均匀温度情况以简化分析, 认为环境温度场在拱肋断面方向也为均匀温度场, 则钢管混凝土断面温度场是轴对称问题, 即由二维问题简化为一维问题。

(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; 钢管外表面的边界条件为与空气接触的热传导边界条件。

由以上基本假定, 根据热传导原理, 可设圆截面轴对称问题的一维导热方程和边界条件, 应用有限差分方法, 将钢管混凝土断面划分为一个钢环(钢管)和每环间距 Δr 的 n 个混凝土圆环和一个核心混凝土小圆, 计算模型见图 1。根据传热问题的有限差分法容易得到各节点温度差分方程及稳定准则, 编制计算机程序进行求解^[1,2]。

由差分方程求得的钢管混凝土拱桥截面温度场属于非线性温度场, 可分解为“等效的非线性温度场”和“等效的线性温度场”^[3]。前者引起正截面的非线性变形, 这种变形由于受到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, 对超静定结构由于多余约束的存在而产生温度内力, 文中仅考虑温度内力, 重点分析温度变化值的取值问题。

对于线性温度场引起的温度内力, 可利用杆系有限元程序求解^[4]。

2 试验分析

2.1 试验构件设计和测试方法

选用某钢管混凝土桁拱的弦杆为测试温度场的

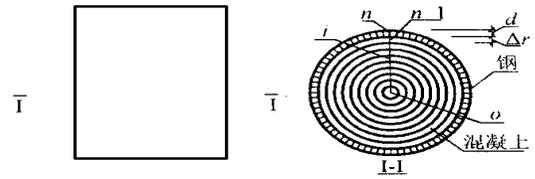


图 1 钢管混凝土构件计算模型

构件, 为 $\Phi 550 \times 8$ mm 钢管, 内灌 C30 混凝土, 每立方米混凝土用灰量 350 kg, 水泥水化热 420 000 J/kg。构件长度以纵向热传导影响可以忽略为原则。参考文献[1], 编制空间问题计算程序, 经分析, 当长度为 1.5 m 时, 纵向热传导误差仅为 2.85%, 故取构件长度为 1.5 m, 且将构件一端立于地上, 另一端用细砂覆盖, 以加强隔热效果。

温度场测试采用铜-康铜热电偶, 如图 2 所示分别在 a、b、c、d、e 点布置测点。

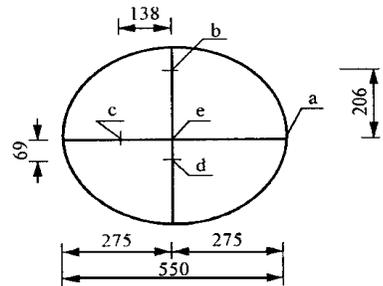


图 2 构件截面测点布置/mm

在测定空钢管的温度场时, 测点较少, 采用手动测量, 在测定浇筑混凝土至混凝土结硬后的温度场时, 测点较多, 时间较长, 采用 MP 数据采集系统采集数据。共测试得 1998 年 9 月 9 日至 10 月 23 日共 44 d 钢管混凝土温度场及大气温度值。

2.2 测试结果

2.2.1 空钢管温度场测试

测量结果显示由于钢材导热系数大, 比热较小, 空钢管对大气温度敏感, 与大气温度变化基本同步, 在有日照时钢管温度略高于大气温度。

2.2.2 混凝土水化热影响阶段的钢管混凝土断面温度场测试

三根试件于 9 月 16 日 11 时开始浇筑混凝土, 图 3、4 给出其中一根 9 月 16 日至 18 日的测试结果和计算结果(16 日至 17 日天气晴转多云; 17 日至 18 日晴, 风速 0.5 m/s)。

由图 3、4 可见, 混凝土浇筑数小时后由于受水泥水化热影响, 截面总体温度高于大气温度, 在混凝土浇筑后 15 h 左右达到峰值。截面温度在径向呈现内高外低现象。这一现象还受到大气温度的影响, 一

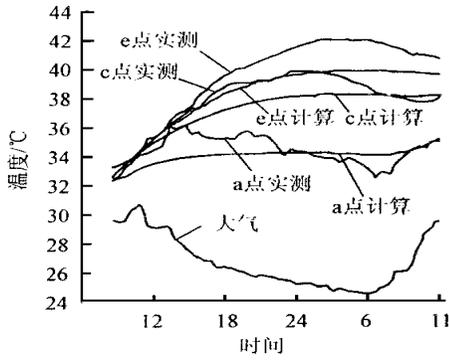


图3 浇混凝土时温度场曲线(9月16~17日)

天中截面温度梯度在凌晨时最大,在正午时最小。随着时间的推移,水化热放热反应趋缓,内热不断向外传导。截面温度内高外低的现象也随之趋缓,直至消失。计算值与实测值总体吻合较好,在截面温度达到峰值时存在一定的差异,计算值明显小于实测值,经分析主要原因是日照影响(特殊对于a点)和混凝土加入早强剂,这两个因素在程序中没有得到反映。

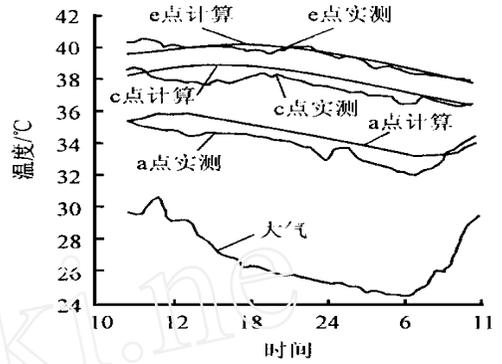
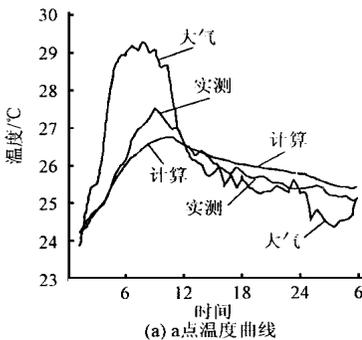


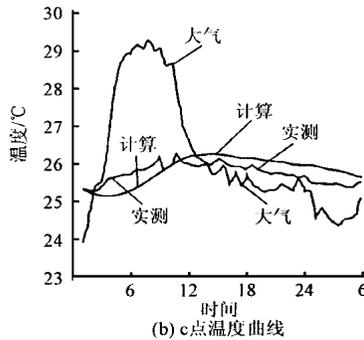
图4 浇混凝土时温度场曲线(9月17~18日)

2.2.3 钢管混凝土构件使用时温度场测试

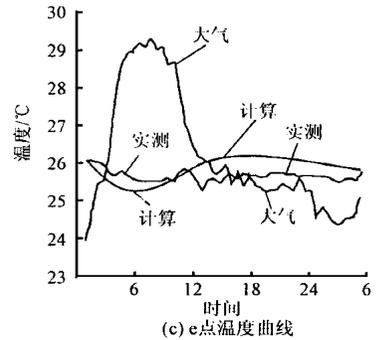
一般情况下,混凝土浇筑20d后水化热已释放99.9%以上^[1],忽略水化热影响,此时钢管混凝土的温度场只与大气温度有关。这一时段给出10月6日至7日、15日至16日的实测值和计算值,见图5、6(10月6日至7日天气晴,风速0.3m/s;15日至16日天气多云转阴,风速0.5m/s)。



(a) a点温度曲线

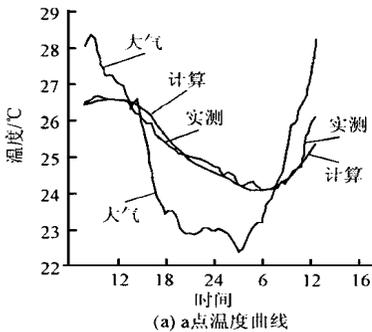


(b) c点温度曲线

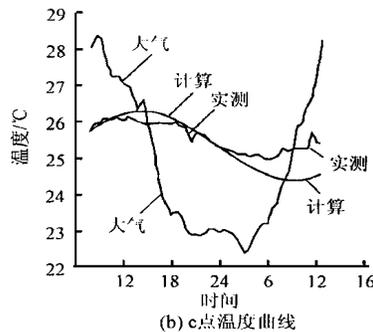


(c) e点温度曲线

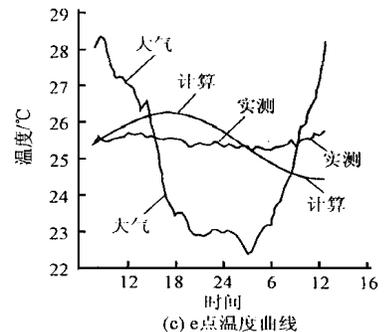
图5 10月6~7日混凝土结硬后温度场曲线



(a) a点温度曲线



(b) c点温度曲线



(c) e点温度曲线

图6 10月15~16日混凝土结硬后温度场曲线

由图5、6可见,实测值与计算值符合较好。水泥水化热放热结束后,钢管混凝土构件温度场相对于大气温度明显滞后,且在截面上越靠中心滞后越明显,但截面温度梯度没有前一阶段明显,也不总是呈内高外低或外高内低,主要看季节和大气温度的变化规律。大气温度变化幅度远大于钢管混凝土构件

温度场变化幅度。

3 温差取值分析

3.1 分析算例

以两座钢管混凝土实桥为算例。

算例一为福建福安群益大桥^[5],该桥为单跨46

m 的钢管混凝土单圆管中承式肋拱, 主拱肋为 $\Phi 800 \times 14$ mm 的钢管内填 C30 混凝土。算例二为福建闽清石潭溪大桥^[6], 该桥为单跨 136 m 的钢管混凝土桁肋中承拱, 主拱肋弦杆为 $\Phi 550 \times 8$ mm 的钢管内填 C40 混凝土。

分析采用的大气温度分别为福建省气候中心提供的福州市 1997 年 1 月份、7 月份的大气温度以及笔者 1998 年 9~10 月份自测的大气温度。

3.2 计算合拢温度 t_1 取值分析

影响计算合拢温度 t_1 值的主要因素有大气温度 (28 d 大气平均温度 t_y)、空钢管合拢温度 t_g 、混凝土入仓温度 t_c 、水泥水化热 (用灰量 G) 和钢管直径 D 等。

3.2.1 28 d 平均气温 t_y

取用灰量 G 为每立方米混凝土水泥用量 465 kg, 空钢管合拢温度 t_g 和混凝土入仓温度 t_c 为 20, 将不同月份的大气温度代入两个算例中, 计算结果见表 1。

表 1 28 d 平均气温 t_y 影响

月份	28 d 平均气温 t_y /	计算合拢温度 t_1 /	
		群益大桥	石潭溪大桥
1 月	13.735	20.302	18.411
7 月	28.106	29.292	28.376
9 月	27.809	29.237	28.326
10 月	24.033	26.897	25.729

3.2.2 空钢管合拢温度 t_g 与混凝土入仓温度 t_c

以 1998 年 9 月份为计算月份, 用灰量 G 为 465 kg, 28 d 平均气温和混凝土入仓温度为 27.809, 取不同的空钢管合拢温度 t_g , 代入两个算例, 计算结果见表 2。取空钢管合拢温度为 27.809, 其他条件同上, 将不同的混凝土入仓温度 t_c , 代入两个算例, 计算结果见表 3。

表 2 空钢管合拢温度 t_g 影响

空钢管合拢温度 t_g /	计算合拢温度 t_1 /	
	群益大桥	石潭溪大桥
0	22.710	22.500
10	26.118	25.463
27.809	32.187	30.739

3.2.3 用灰量 G

同样以 1998 年 9 月份为计算月份, 28 d 平均气温 t_y 、空钢管合拢温度 t_g 和混凝土入仓温度 t_c 为 27.809, 取不同的用灰量 G (每立方米混凝土中的水泥用量) 代入两个算例, 计算结果见表 4。

表 3 混凝土入仓温度 t_c 影响

混凝土入仓温度 t_c /	计算合拢温度 t_1 /	
	群益大桥	石潭溪大桥
0	31.172	30.387
10	31.172	30.513
27.809	32.187	30.739

表 4 用灰量 G 的影响

用灰量 G /kg	计算合拢温度 t_1 /	
	群益大桥	石潭溪大桥
0	27.823	27.813
100	28.760	28.441
200	29.701	29.070
300	30.641	29.699
465	32.187	30.739

3.2.4 管径 D

从表 1~4 可以看出, 由于管径不同, 群益大桥 ($D = 800$ mm) 和石潭溪大桥 ($D = 550$ mm) 在其它条件相同时计算合拢温度 t_1 不同, 前者一般高于后者。为进一步分析, 以石潭溪大桥为例, 以 1998 年 9 月为计算月份, 28 d 平均气温 t_y 、空钢管合拢温度 t_g 和混凝土入仓温度 t_c 取 27.809, 用灰量为 465 kg, 取管径分别为 400、550、800 和 1 000 mm (壁厚均为 10 mm), 计算得计算合拢温度 t_1 分别为 29.260、30.739、32.692 和 34.673。

3.2.5 综合分析

从以上分析可以看出, 在三个与温度有关的参数中, 28 d 平均气温 t_y 对计算合拢温度 t_1 影响最大, 空钢管合拢温度 t_g 次之, 混凝土入仓温度影响很小。

由于钢管混凝土截面中混凝土对刚度的贡献很大, 而混凝土的强度与刚度是逐步形成的, 一般需 28 d, 所以 28 d 平均温度对计算合拢温度影响很大。而在 28 d 之中, 由于混凝土的强度与刚度在前面几天增长最快, 所以第一周平均气温的影响最大。为方便分析, 也可以将 28 d 平均气温称为月平均气温。空钢管也是钢管混凝土截面的重要组成部分, 所以其合拢温度对计算合拢温度也有较大的影响。然而由于钢管混凝土拱桥中一般采用薄钢管, 所以它对截面刚度的贡献较混凝土小, 所以其影响不及 28 d 平均气温, 从算例分析来看, 只有 28 d 平均气温影响度的一半左右。由此可以看出, 目前常用的将空钢管的合拢温度作为钢管混凝土拱桥温差内力计算的基准温度的做法是不合理的。

混凝土入仓温度是大体积混凝土温度问题的重要因素。然而在钢管混凝土拱桥中,管内混凝土体积不大,水化热影响不是很大。对于这里研究的温度内力问题,更主要的是结构的刚度问题,由于混凝土的刚度是随强度逐步形成的,所以混凝土的入仓温度对其影响不大,在简化计算时可以忽略不计。

钢管混凝土拱桥的计算合拢温度除受上述三个与温度有关的参数 t_y 、 t_g 、 t_c 的影响外,还受到混凝土的水化热影响,计算合拢温度均较 t_y 、 t_g 、 t_c 为高。然而对于一定的混凝土强度等级,水泥用量的变化范围有限,所以间接地可以说受到混凝土强度等级的影响。

钢管混凝土管径对计算合拢温度的影响主要体现在两个方面,一是管径大小影响混凝土的用量,即水化热热能的大小;二是管径大小对水化热的散发和大气温度的传导的影响。

3.3 计算温度 t_2 取值分析

管内混凝土形成设计强度与刚度,水泥水化热基本释放完毕后的钢管混凝土拱肋在大气温度环境中的截面线性温度场即为计算温度 t_2 。也就是说钢管混凝土拱桥在 t_2 平均温度作用下的温度内力是与实际温度场的温度内力相同的。对于拱桥一般一年中需取最高最低二个计算温度值。根据上述原理,将 1997 年福州地区 1 月、7 月的大气温度值代入上述两个算例,计算结果见表 5。

表 5 计算温度 t_2 取值分析

月份	月平均温度 /	极值温度 /	日平均极值 温度/	计算温度 t_2	
				群益大桥	石潭溪大桥
1 月	13.735	4.1	9.47	9.037	8.17
7 月	28.106	36.3	30.0	39.674	31.136

表 5 中除月平均温度外,其余温度 1 月份取最低值,7 月份取最高值。

从表 5 可以看出,钢管混凝土拱肋断面较小,热传导性能较好,对大气温度反应速度较快,沿用钢筋混凝土拱桥、圬工拱桥那样取月平均温度作为计算温度 t_2 ,则偏于不安全;但另一方面,某一天中的瞬时极限温度持续时间不久,钢管混凝土结构截面温度明显滞后于大气温度,所以计算温度象钢结构那样取瞬时极值温度则偏于保守。从表 5 看,计算温度取日平均极值温度较为合理。

4 结 语

温度内力是超静定拱的重要内力之一,温度变

化取值的确定是温度内力计算的关键。笔者应用经过实测验证的计算程序对钢管混凝土拱桥温度内力计算温度变化值取值问题进行了分析。分析主要结果如下:

(1) 钢管混凝土拱桥不存在实际的合拢温度,温度内力计算时的基准温度应采用计算合拢温度。

(2) 计算合拢温度主要影响因素是管径大小和管内混凝土浇筑后一个月内的平均气温。空钢管合拢温度对计算合拢度有一定的影响,但并不是唯一的因素,也不是最重要的因素,现行钢管混凝土拱桥设计中将其做为基准温度(合拢温度)的算法是不合理的。影响计算合拢的还有用灰量的大小和混凝土入仓温度,前者影响较大,后者影响较小。

(3) 由于受水泥水化热的影响,钢管混凝土的计算合拢温度高于月平均温度,管径大,水化热影响也大。在水化热释放结束后,截面温度场仅受大气温度的影响,但截面温度变化滞后于大气温度变化,滞后现象越靠截面的中心越明显,取截面的平均温度场来看,它接近于日均温度。所以钢管混凝土拱的计算温度不应取月平均温度,也不应取极值温度,而应该取日平均温度。

(4) 拱桥计算中常以温降为控制,与圬工拱桥或钢筋混凝土拱桥相比,钢管混凝土拱桥基准温度(计算合拢温度)取值较高,计算温度取值又较低,所以温降值较大,温度内力在荷载组合中所占的比重也相应上升,这一点应引起注意。

(5) 对于具体的钢管混凝土拱桥,管径和混凝土强度一般由结构设计确定,为减小温降内力值,除象其它拱桥一样选择较低的空钢管合拢温度外,还应注意选择温度较低的时期浇筑管内混凝土。

参考文献:

- [1] 朱伯芳,王同生,丁宝瑛,郭之章 水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M] 北京:水力电力出版社,1976
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 张思伟 福安群益大桥设计与施工[J] 福建建筑,1993,(3):51—53
- [6] 陈宝春,孙 潮 石潭溪大桥施工受力分析[J] 中国公路学报,1998,11(4):51—57