

文章编号:1001-7372(2001)02-0033-03

## 圣维南原理在钢管混凝土拱桥分析中的应用

谢肖礼, 彭文立, 秦 荣

(广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘 要:**针对钢管混凝土桁拱钢—混凝土结构,对圣维南原理的应用进行了一些探讨,获得了一些有益的结论,可供工程设计人员参考。

**关键词:**圣维南原理;钢管混凝土拱桥;有限单元法;局部分析

**中图分类号:**U448.22 **文献标识码:**A

### Application of SAINT-VENANT principle in analysis of CFST arch bridge

XIE Xiao-li, PENG Wen-li, QIN Rong

(School of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In this paper, SAINT-VENANT principle is used in the research and discussion of the application of concrete filled steel tube (CFST) braced arch, a kind of steel-concrete structure, and have got some useful conclusions which are appreciated for reference.

**Key words:** SAINT-VENANT principle; CFST arch bridge; finite element method; local analysis

近年来,钢管混凝土结构以其特有的优点在结构工程中应用越来越广。大量的工程实践表明,在自重相近和承载力相同的条件下,与钢结构相比,钢管混凝土可节省钢材50%,并减少大量的焊接工作,提高结构的耐火性、动力性和稳定性;在承载力相同的条件下,与普通钢筋混凝土结构相比,可减少自重50%,构件截面面积可减少约一半。在大跨度拱桥中,钢管混凝土解决了材料高强度和施工无支架的两大难题<sup>[1~3]</sup>,国内学者还开发了千斤顶斜拉扣挂悬拼架设骨架新工艺<sup>[4]</sup>等先进技术。因此,钢管混凝土拱桥在中国发展迅猛。据有关部门统计,到目前为止,已建成钢管混凝土拱桥100多座。然而,钢管混凝土拱桥结构目前尚无设计与施工规范,很多问题急待研究。圣维南原理作为工程分析的一种手段,在单一材料结构分析中经常采用且非常有效,但圣维南原理应用于由多种材料构成的组合结构就较为少见,笔者针对钢管混凝土拱桥这种钢—混凝土组合结构,就此问题进行了一些探讨。

## 1 理论与方法

### 1.1 基本假设

(1)设钢和混凝土皆在弹性范围内工作,钢管混凝土桁拱变形满足平截面假设,钢管与混凝土粘结良好;

(2)按压弯结构分析,忽略扭转的影响;

(3)不考虑徐变、收缩、温度和初应力的影响。

### 1.2 钢管混凝土拱桥拱肋任意形状截面应力分布

设 $\bar{A}_s$ 、 $\bar{I}_s$ 分别为换算成钢管的横截面等效面积和等效惯性矩, $\bar{A}_c$ 、 $\bar{I}_c$ 分别为换算成混凝土的横截面等效面积和等效惯性矩。

$$\text{设} \quad \bar{A}_s = A_s + \frac{A_c}{n} \quad (1)$$

$$\bar{A}_c = A_c + nA_s \quad (2)$$

$$\bar{I}_s = I_s + \frac{I_c}{n} \quad (3)$$

收稿日期:2000-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(50068001);广西自然科学基金项目(9912002)

作者简介:谢肖礼(1963-),男,广东南海人,广西大学副研究员,工学博士研究生。

$$\bar{I}_y = I_y + \frac{I_y^c}{n} \quad (4)$$

$$\bar{I}_x = I_x + nI_x^c \quad (5)$$

$$\bar{I}_y = I_y + nI_y^c \quad (6)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (7)$$

$$\text{利用关系} \quad EA = E_s A_s + E_c A_c \quad (8)$$

$$EI = E_s I_s + E_c I_c \quad (9)$$

可得在短期荷载作用下任意形状截面应力分布的半解析公式

$$\sigma_x^s = N \left( \frac{1}{A_s} + \frac{e_y y}{\bar{I}_x} + \frac{e_x x}{\bar{I}_y} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_x^c = N \left( \frac{1}{A_c} + \frac{e_y y}{\bar{I}_x} + \frac{e_x x}{\bar{I}_y} \right) \quad (11)$$

式中:  $e_x = \frac{M_y}{N}$ ;  $e_y = \frac{M_x}{N}$ 。

将式(10)和式(11)相比得

$$\sigma_x^c = n\sigma_x^s \quad (12)$$

### 1.3 利用圣维南原理求解概述

对钢管混凝土拱桥的分析,目前主要采用有限元法。对于桁拱,一般有三种分析方法:第一种是按梁单元进行分析,这种做法计算简便,但结果粗糙且不能反映局部变形和应力状态;第二种是对整个结构进行三维有限单元离散化,可以求得钢管混凝土拱桥全部的精细解,但显而易见,其工作量非常巨大;第三种方法是第二种方法的改进,即采用子结构技术,将节点处理为子结构,可使工作量减少许多,但仍然相当繁重,不够灵活。因此,有必要采用圣维南原理进行局部分析,从而求得局部的应力和变形状况,具体做法是:把用梁单元作整体计算所得内力和位移作为局部切开处的外力和位移边界条件。这种做法有很大的灵活性,且工作量很少。

## 2 分析实例

对钢管混凝土桁架拱按三维实体模型进行弹性分析时,将整个拱肋按节点分块,用三维单元分别对节点进行剖分。由于钢管属薄壁结构,采用壳单元,为较好地模拟圆管,选择了8节点的二次单元;考虑混凝土与钢管变形协调,与8节点壳单元对应,选择20节点的实体单元来模拟混凝土。

图1是某钢管混凝土桁架拱的典型节点。该节点为桁拱跨中上弦节点,T型,其弦杆长为12m,为哑铃形截面,圆管外径为 $\Phi 1220$ mm、壁厚16mm,两圆管间缀板钢板厚16mm;腹杆长3.89m,为平

行的两根圆钢管,钢管外径为 $\Phi 610$ mm、壁厚12mm,其它材料参数见表1。单元剖分图如图2所示,由于该节点为对称结构,可取一半进行计算。

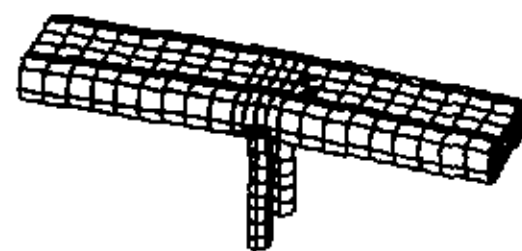
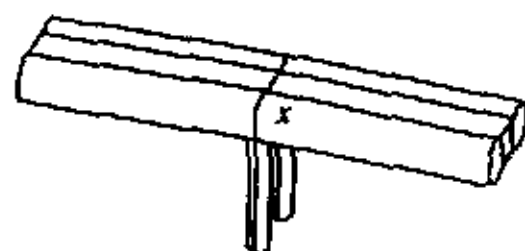


图1 典型节点(跨中上弦节点)

图2 单元剖分图

表1 材料参数

材料	弹性模量/MPa	密度/kg·m <sup>-3</sup>	泊松比μ
Q345钢材	$2.06 \times 10^5$	7850	0.28
C40混凝土	$3.30 \times 10^4$	2550	0.167

众所周知,将每个节点作为一个子结构,利用子结构方法对钢管混凝土桁架拱进行弹性分析,可以得到较为精确的结果。因此可将子结构法计算结果作为参考,以判断其它方法所得结果的准确性。

在某工况下,按梁单元进行整体分析所得典型节点边界的主要内力和位移如表2所示,表中所列项目为该节点的主要内力和位移,其它的内力和位移的数值较小,表中未列出。把梁单元整体计算所得内力和位移施加在局部切开处。由于节点各构件截面均对称,很容易满足圣维南原理所要求的静力等效。在施加轴力时,有两种做法,一种是选用公式(10)、(11)对钢管和混凝土分别加上各自应受的面力(以下称为分配法),另一种做法是不考虑钢管和混凝土之间的受力差别(实际上钢管轴向应力比混凝土轴向应力大得多),即不对轴力进行再分配,而直接将轴力平均加在节点的边界面上(以下称为平均法)。

表2 典型节点边界的主要内力和位移

位置	主要位移			主要内力	
	水平 $U_x$ /mm	垂直 $U_y$ /mm	转角 $\theta$	轴力/kN	弯矩/kN·m
弦杆	-0.92619	-80.342	0.000192	-19584	256.08
腹杆	0	-81.060	0	86.662	0

### 2.1 应力的比较

以弦杆的轴向应力为例。在弦杆上任取一截面,取该截面上钢管与混凝土交界处4个典型点,如图3所示。各点处的轴向应力见表3,其中 $\sigma_x^s$ 、 $\sigma_x^c$ 分别为钢管和混凝土的轴向应力。由表3可知,三种方法的数值相差不大。在图4~6的左图分别为子结构、分配法和平均法的计算结果,可以看出,在节点弦杆

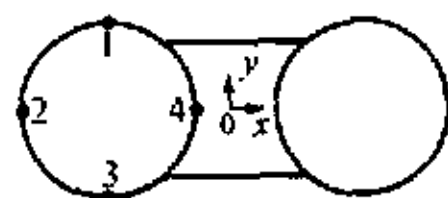


图3 典型点位置



边界处,后两种结果与子结构结果不大相同。圣维南原理指出,在一个物体内部,距离外加荷载作用部位相当远处的各点,其应力与所实际施加荷载的细节关系不大,即把物体的一小部分边界上的面力,改变为具体的分布不同、但静力等效的面力,则仅影响近处的应力分布,而对远处影响很小。因此,可利用圣维南原理,不考虑节点边界影响区,再查看结果,见图4~6的右图,可以看出,三者应力情况很相似。

表3 弦杆某截面上典型点的轴向应力比较/MPa

应力		点号			
		1	2	3	4
$\sigma_x$	子结构	-37.140	-31.883	-26.965	-31.940
	分配法	-36.348	-31.830	-30.921	-33.616
	平均法	-36.827	-31.672	-29.537	-33.088
$\sigma_y$	子结构	-6.185	-5.360	-4.552	-5.363
	分配法	-5.514	-4.984	-4.716	-5.160
	平均法	-5.448	-4.962	-4.647	-5.099

