

文章编号: 0451-0712(2005)11-0021-04

中图分类号: U448.222

文献标识码: A

# 飞燕式钢管混凝土拱桥的计算图式

程翔云

(湖南大学土木工程学院 长沙市 410082)

**摘要:** 结合桥梁的受力特点和施工方法,提出了飞燕式钢管混凝土拱桥在不同阶段的计算图式和拱肋等代截面的计算公式。这些对于设计人员来说是有参考意义的。

**关键词:** 飞燕式;钢管混凝土;等代截面;自锚式拱桥;计算图式;中承式拱桥

## 1 主孔拱肋的受力特点

飞燕式(自锚式)的中承式钢管混凝土拱桥,一般多采用缆索吊装系统进行施工。其主孔拱肋在整个受力过程中存在以下几个方面的特点。

(1)主孔拱肋的钢管借肋扣索和风缆系统的支持和稳定作用,成为压注管心混凝土阶段的一个天然的而永不拆卸的拱架。待混凝土达到设计强度以后,二者便形成一个组合截面,共同担负着主要承重结构的一部分。

(2)锚固在两边飞燕(悬半拱)上端之间的钢绞线(又称系杆),是随着吊杆、横梁、立柱及桥面结构等重量的不断增加而逐次对它施加张拉力的,通过钢筋混凝土悬半拱拱肋与群桩基础共同来平衡主孔拱肋的水平推力,如图 1(2)所示。

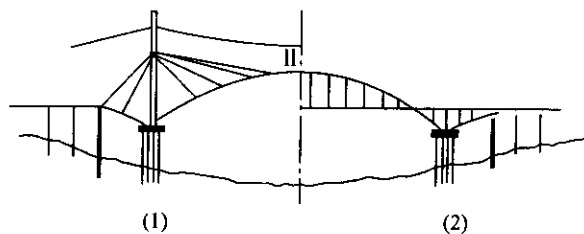


图 1 飞燕式的中承式钢管混凝土拱桥施工布置及立面

(3)在桥面连续构造完成以前,结构的传力途径是:桥道板(梁)→横梁或盖梁→吊杆或拱上立柱→主拱拱肋、悬半拱及系杆→桥墩(台)及基础等。此时的桥道板(梁),横梁及盖梁不能参与整体结构的受力,而只能作为外荷载作用于吊杆下端及立柱的顶端。当桥面连续构造完成以后,桥面结构才能参与整

收稿日期:2005-03-18

## Structure Compacative Analysis of Partially Cable-Stayed Bridges

ZHENG Yi-feng<sup>1,2</sup>, HUANG Qiao<sup>1</sup>, ZHANG Lian-zhen<sup>1</sup>

(1. School of Science and Engineering on Communication, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Jilin Provincial Highway Reconnaissance and Design Institute, Changchun 130021, China)

**Abstract:** Partially cable-stayed bridge is a bridge structure style in between continuous beam bridge and cable-stayed bridge. This type of bridge possesses the characters of the two kinds of above bridges, and it also has oneseft characters. Partially cable-stayed bridge, continuous beam bridge and cable-stayed bridge are calculated and compared in this paper, and the calculation results such as internal force and displacement are compared. The mechanics character of partially cable-stayed bridge is drawn out lastly. All of above provide the theory reference to engineering design.

**Key words:** partially cable-stayed bridge; continuous beam bridge; cable-stayed bridge; structure analysis

体结构受力。

(4) 由于管心混凝土的重力在压注过程中是由钢管拱承担, 而钢管拱本身是会产生徐变变形的, 故主孔拱肋的自重(钢管和管心混凝土二者)对整个结构的徐变变形以及徐变次内力不产生影响。换句话说, 使主孔拱肋产生徐变影响的长期恒载是除了本身自重以外的所有恒载。

掌握了上述的几个主要特点以后, 才能合理地建立成桥过程中不同阶段的计算图式, 来分析这类桥型的结构受力状况。因此, 本文将对不同阶段计算图式中的若干具体问题提出浅见, 供参考。至于钢管在悬臂拼装、接长和合拢过程中的标高和扣索索力控制问题, 均与施工方案密切相关, 本文不打算讨论。

## 2 不同阶段的计算图式

### 2.1 计算图式 I —— 压注管心混凝土阶段

如图 2(1)所示, 现对该图式的要点说明如下。

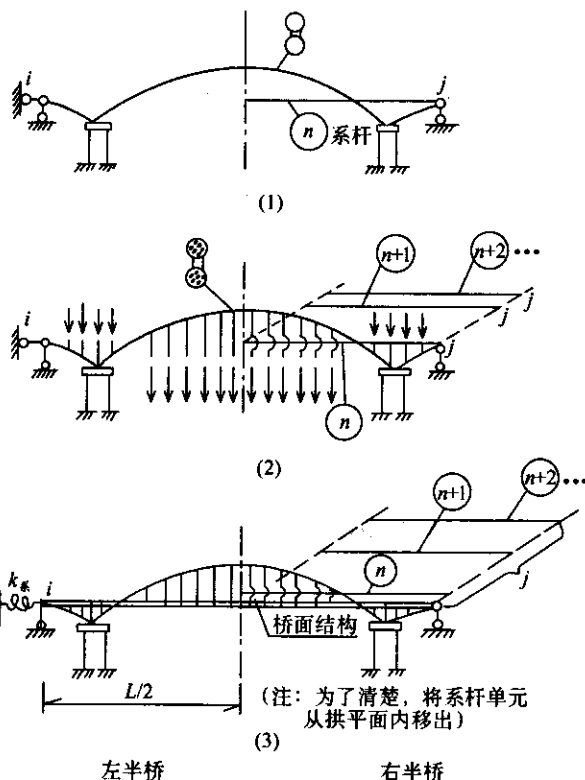


图 2 不同阶段的计算图式

(1) 为了计算的简化, 将支承主拱拱脚的两座群桩基础, 按照文献[1]中的方法模拟为双柱加刚性盖梁的等代“□”形结构。

(2) 主孔管心混凝土是假设在下述条件下进行压注的: ①悬半拱(飞燕)的混凝土已经达强, 且拆除

了模架(也有放在完成桥面结构以后才拆除, 此时, 则令悬半拱的容重 $\gamma=0$ ); ②钢管拱的拱轴线经过调整后, 将合拢段及拱脚予以焊牢和封固, 形成无铰拱; ③主拱圈上的扣索是随压注过程逐步拆除; ④按照计算, 张拉第 1 批锚于 2 个悬半拱上端之间的钢绞线(系杆)。

(3) 系杆的作用可采用两种方法处理: ①水平链杆(图 2(1)左端), 其支反力便是所需要施加的张拉力; ②当计算程序具有能设置斜拉桥拉索的初张力的功能时, 则将第 1 批钢绞线用一个独立的单元 $n$ 进行编号, 此单元两端的结点编号 $i, j$ 就是两端锚固点的编号(图 2(1)两端)。第一种方法较简单, 但不能马上了解到各批张拉索在加载过程中的索力变化。第 2 种方法则相反, 但其初始张拉力需要先通过试算或用第 1 种方法求出以后, 再编到输入文件中。

(4) 主孔拱肋的内力在该阶段完全由钢管承受。

### 2.2 计算图式 II —— 安装吊杆、立柱及桥面结构阶段

如图 2(2)所示, 它与计算图式 I 的差别有以下几点。

(1) 该阶段的主孔拱肋为组合截面, 它需要先进行等代, 换算为同一材性的截面, 具体方法后面将会谈到。

(2) 根据前面谈到的第 3 个受力特点, 所有桥面结构(二期恒载除外)均以集中力形式、分别对称地作用于吊杆下端和立柱的顶端。

(3) 此时由于荷载不断地增大, 必须不断增加钢绞线束数及其张拉力。若采用上述的第 2 方法时, 则需在同样的 $i, j$ 两个结点(锚固点)之间, 根据需要再增加若干个系杆单元( $n+1, n+2, \dots$ )。若需对先期张拉的某根钢丝束补充张拉力, 则可补充一个新的系杆单元, 其张拉力为此时实际承受的张拉力与补充张拉力之和, 并且将原来的系杆单元同时拆除。若采用上述的第 1 种方法时, 则需将当前阶段水平链杆支反力的增量, 按照钢丝束之间的面积比例进行分配(图 2(2)左端)。

(4) 系杆不承担垂直集中力, 因此, 它不能与吊杆直接连接。

### 2.3 计算图式 III —— 二期恒载施工阶段

如图 2(3)所示, 此时桥面连续构造已经完成, 该计算图式的要点说明如下。

(1) 若此时各批钢丝束的锚固端均用混凝土封固, 则计算图式 I、II 中原来用水平链杆(图 2(1)、图 2(2)的左端), 现应改为水平弹簧支承, 水平向弹簧

支承刚度  $k_{\text{系}}$  可表示为:

$$k_{\text{系}} = \frac{2E_j A_j}{L} \quad (1)$$

式中:  $E_j$ 、 $A_j$  分别为每片拱平面内的系杆中, 钢丝束的弹性模量和总截面面积;  $L$  为介于两岸锚固端之间的系杆长度。

若采用上述第 2 种方法的话, 则系杆端部的支承条件不变, 即在悬半拱的上端, 仍采用水平向为自由的活动铰支座(见图 2(3)右端)。

(2) 此时桥面连续的结构被弹性支承在所有的横梁和盖梁上, 从原理上属于空间受力状态。但是为了能够应用平面杆系有限元程序, 可以取一半桥宽的桥道板(梁)结构, 视作为对称地扣挂在吊杆的下端或者铰支在拱上立柱上。这样处理, 对于二期恒载来说是可行的, 但对车道荷载来说是近似的。好在飞燕式钢管混凝土拱桥一般用在大跨径的桥梁上, 汽车荷载内力所占的比例相对较小, 这样的处理也是可行的。

(3) 桥面结构的单元划分应注意使结点位置与吊杆、立柱吻合。这样, 两端的单元总有一个结点编号与系杆的结点编号相同。不过作用的荷载只能落在桥面结构的单元上, 而不能落在系杆上。对于汽车荷载来说, 还应乘以按杠杆原理法求得的荷载横向分布系数。

## 2.4 几点说明

(1) 上述 3 种计算图式, 是根据不同施工阶段的结构受力特点拟定的。但是在实际应用中, 可以根据所使用程序的功能(指可以分阶段来装、拆任意单元或任意支座等功能), 将这些计算图式纳入到同一个输入文件中去, 以方便计算。

(2) 一般桥梁结构分析程序常将单元结点截面内力按阶段进行累计(叠加), 这样, 对于本文中主孔拱肋截面就不合理了。为了解决这个问题, 可以这样处理, 即将任意阶段的累计内力减去压注混凝土阶段全由钢管承担的内力, 便得到纯由组合截面承担的内力(弯矩、轴力), 然后按照同一截面相对于同一中和轴各自所占的抗弯刚度比( $E_i I_i / \sum E_i I_i$ )和抗压刚度比( $E_i A_i / \sum E_i A_i$ )进行内力分配。最后按钢管和管心混凝土分别叠加内力, 再按材料力学的公式计算二者各自的最大或最小应力值。如果程序不具有这个功能时, 那么就只能用手算法来校核几个控制截面的应力值。

(3) 桥面结构(横梁、桥道板及纵梁)开始属简支

体系, 并以集中力的形式作用于吊杆和立柱上, 因此, 它们的内力还需单独进行分析计算。

## 3 钢管混凝土拱肋截面形状的等代

在程序运算中, 单元的截面特性一般是按截面节线的宽度和高度逐次输入的, 这对钢管混凝土截面说来十分不便。为了输入的简化, 可以按照截面积  $A$  和抗弯惯矩  $I$  相等以及中和轴不变的原理, 将它们等代为矩形箱的截面形状。现仅列出单圆管和哑铃形两类截面的等代公式, 其余可照此类推。

### 3.1 单圆管截面

参见图 3 中所定义的截面尺寸符号, 可以写出等代箱形截面尺寸的计算公式为:

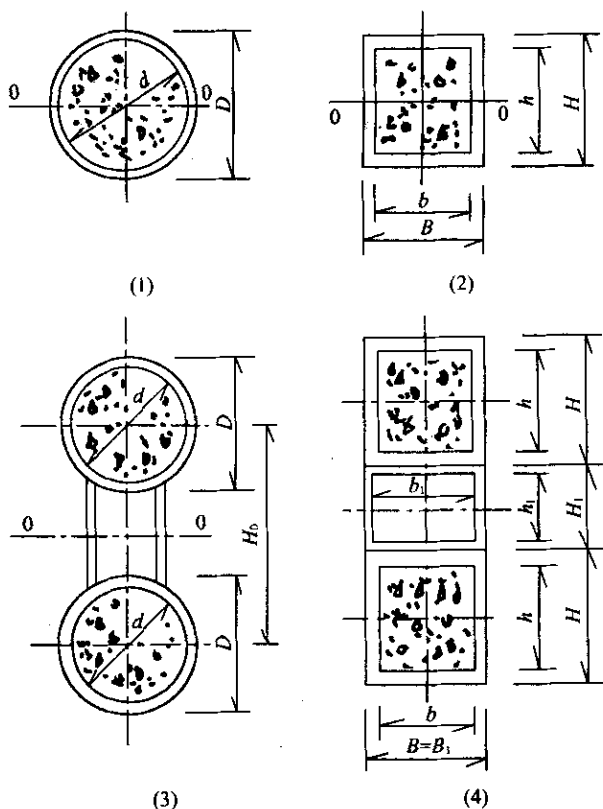


图 3 钢管混凝土拱肋的等代截面示意

$$\left. \begin{aligned} \text{等代宽度} \quad B &= \frac{\pi D}{2\sqrt{3}} & b &= \frac{\pi d}{2\sqrt{3}} \\ \text{等代高度} \quad H &= \frac{\sqrt{3}}{2} D & h &= \frac{\sqrt{3}}{2} d \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $D$ 、 $d$  分别为钢管的外径和内径。

### 3.2 哑铃形截面

参见图 2 中所定义的截面尺寸符号, 同样可以确定出等代三室箱形截面的细部尺寸。其中上、下圆

管的等代公式与式(2)相同。关于联接上、下圆管的 2 片腹板(缀板),当忽略不计其间的混凝土作用时,则其尺寸计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} \text{等代宽度 } B_1 &= B & b_1 &= \frac{(BH_1 - A_w)^{3/2}}{\sqrt{BH_1^3 - 12I_w}} \\ \text{等代高度 } H_1 &= H_0 - H & h_1 &= \sqrt{\frac{BH_1^3 - 12I_w}{BH_1 - A_w}} \end{aligned} \right\} (3)$$

式中:  $H_0$  为上、下圆管圆心之间的距离;  $A_w$ 、 $I_w$  分别为两侧腹板截面的总面积和总抗弯惯矩;  $B$  为按式(2)算得的圆管等代宽度。

### 3.3 等代公式的应用

根据所使用程序的功能,可以分为以下两种情况编制截面输入文件。

(1)当程序具有输入组合截面并能进行换算的功能时,则可按照等代截面逐节线地输入,并同时输入相应的材料弹性模量(参见相应程序的说明)。

(2)当程序不具有输入组合截面的功能时,则需选取任意一种材料作标准,仿效容许应力法中的截面等效方法,将另一种材料的宽度乘以弹性模量比。例如,当取钢管材料作标准,则将同一节线上混凝土的宽度尺寸乘以  $E_{\text{混}}/E_{\text{钢}}$  ( $E$  为弹性模量);反之,则对同一节线上钢管的宽度尺寸乘以  $E_{\text{钢}}/E_{\text{混}}$ 。

用手算方法将它们换算成同一种材料性质的截面以后,然后再进行数据文件的输入。

### 4 结语

(1)本文所讨论的问题仅仅是一种构思的浅见。由于程序的功能各异,加之这类桥型的构造设计与施工方法常常存在较大的差别,因此,本文意见仅作参考,并有待读者指正和加以完善。

(2)关于这类桥型的徐变分析问题比较复杂,限于篇幅,将另文讨论。

### 参考文献:

- [1] 杨高中,等. 连续刚构桥在我国的应用和发展[J]. 公路,1998,(6,7).
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥的设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [3] 陈明宪. 茅草街大桥的总体设计与创新技术[A]. 第十六届全国桥梁学术会议论文集(上)[C]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 崔剑峰,李瑜,王甜. 茅草街大桥主桥结构分析[A]. 第十六届全国桥梁学术会议论文集(下)[C]. 北京:人民交通出版社,2004.

## Calculation Schemes for Flying Swallow Type of Concrete-Filled Steel Tubular Arch Bridges

CHENG Xiang-yun

(Civil Engineering College, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In connection with the characteristic in forces and the construction technique of bridges, the calculation schemes of structure in different stages and the equivalent section formulas of arch rib for flying swallow type of concrete-filled steel tubular arch bridge are proposed. It has referential significance for designers.

**Key words:** flying swallow type; concrete-filled steel tubular; equivalent section; self-anchoring arch bridge; calculation scheme; half-through arch bridge