

# 钢管混凝土飞鸟式拱桥桥型分析

陈宝春, 郑怀颖

(福州大学, 福建 福州 350002)

**摘 要:** 收集了大量的资料,对钢管混凝土飞鸟式拱桥的发展概况进行了简述。分析了该桥型在恒载作用下结构受力的特点和主要参数之间的相互关系,介绍了有限元计算的方法。对已建和在建实桥的施工方法、结构与构造的主要参数进行了统计分析,并对这类桥梁的应用范围提出了看法。

**关键词:** 桥梁工程; 桥型; 钢管混凝土; 拱桥; 飞鸟式

钢管混凝土拱桥结构形式丰富多样,以桥面位置划分,有上承式、中承式和下承式。以拱肋与墩(台)的联结形式和是否有推力又可分为有推力拱、无推力拱梁组合体系和刚架系杆拱3种,它们相互组合,产生了多种钢管混凝土拱桥纵桥向的结构形式。其中以飞鸟式最具特色。

本文在对这一桥型应用情况资料收集的基础上,对其受力特点、主要技术指标进行分析,以供工程应用参考。

## 1 概述

飞鸟式也称飞燕式,它是指两边跨为半跨悬臂上

承式拱、主跨为中承式钢管混凝土拱,通过锚固于两边跨端部的拉索来平衡主跨大部分水平推力的桥梁结构,也称自平衡式或自锚式。主跨一般为一跨,与两边跨半拱构成三跨连续结构。也有主跨为两跨或三跨的,与两边跨构成四跨或五跨的结构,如江西南昌市生米大桥为四跨式,江西吉安白鹭大桥和浙江绍兴曹娥江大桥为五跨式。

三跨和五跨的飞鸟式结构形式如图1所示。

飞鸟式桥型通过张拉系杆以平衡主拱所产生的大部分水平推力,大大降低了平原地区或软基地区拱桥的下部与基础的工程量与造价。同时,这种桥型造型美观,受到人们的喜爱。广东南海三山西大桥是第一座钢管混凝土飞鸟式拱桥,跨径组合为45 + 200 + 45

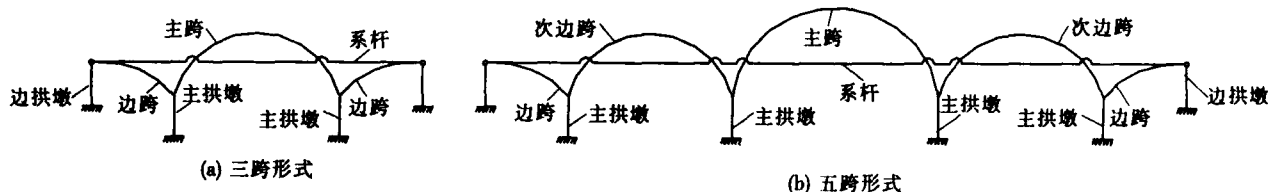


图1 钢管混凝土飞鸟式拱桥形式

m,也是钢管混凝土拱桥中第一座跨径达200m的大桥。2000年建成的广州丫髻沙大桥,跨径组合为76 + 360 + 76 m,则把这一桥型,也可以说把钢管混凝土拱桥的跨径推上了一个新台阶。表1给出了收集到的已建和在建的钢管混凝土飞鸟式拱桥共19座(主拱跨径

从小到大排列)。

由表1可以看出,在19座桥例中,只有2座主拱跨径在100m以下,其余17座中跨径大于或等于200m的有9座,接近总数的一半。说明该桥型的跨径随着时间的延续呈现出增大的趋势。

收稿日期:2006 - 05 - 28

作者简介:陈宝春,男,博士,教授。

表1 钢管混凝土飞鸟式拱桥桥例一览表

桥名	建成年份 /年	跨径组合 /m	边跨/ 中跨	矢跨比	主拱拱轴 线形	主拱肋 截面形式	桥面总宽 /m	主拱肋 施工方法
浙江诸暨西施桥	1996	64		1/4	二次抛物线	竖圆端形	27	
浙江温州瓯江三桥	2000	40 + 98 + 40	0.408				21.4	
天津金钢桥改建工程	1996	25 + 101 + 25	0.247	1/5	二次抛物线	哑铃形	18.4	
北京潮白河大桥	1999	36 + 108 + 36	0.333	1/5	圆弧拱	哑铃形	27	有支架施工
湖北三峡莲沱大桥	1996	48.3 + 114 + 48.3	0.424	1/5	$m = 1.5$ 悬链线	哑铃形	20	竖转施工
辽宁朝阳市东大桥	在建	30 + 120 + 30	0.25	1/4.5	$m = 1.4$ 悬链线	四管桁式	26	
江西筠州大桥	2003	42 + 156 + 42	0.269	1/4.5 (1/6.6)	$m = 1.3$ 悬链线	四管桁式	19.5	缆索吊装
广西梧州桂江三桥	1999	40 + 175 + 40	0.228	1/4(1/6.83)	$m = 1.347$ 悬链线	四管桁式	25.6	竖转施工
浙江绍兴曹娥江大桥	设计	40 + 3 × 185 + 40	0.225	1/4(1/6.22)	二次抛物线	四管桁式	43	缆索吊装
江西吉安白鹭大桥	在建	36 + 138 + 188 + 138 + 36	0.191	1/3.3(1/9.1, 1/4.6)	$m = 1.3$ 悬链线	三管桁式	28	缆索吊装
广东南海三山西大桥	1995	45 + 200 + 45	0.225	1/4.5(1/9)	$m = 1.3$ 悬链线	四管桁式	28	缆索吊装
四川绵阳涪江大桥	1997	46 + 202 + 46	0.228	1/4.5(1/8.3)	六次抛物线	四管桁式	26.5	
四川眉山岷江大桥	在建	206				四管桁式	28	
江西南昌市生米大桥	在建	75 + 2 × 228 + 75	0.164				35	
江苏徐州京杭运河桥	2002	57.5 + 235 + 57.5	0.245	1/4(1/8)	$m = 1.33$ 悬链线	四管桁式	33.5	竖转施工
湖北武汉市汉江五桥	2001	60 + 240 + 60	0.25	1/5	$m = 1.5$ 悬链线	四管桁式	27	缆索吊装
广东东莞水道特大桥	在建	50 + 280 + 50	0.178	1/5 (1/9.82)	$m = 1.5$ 悬链线	四管桁式	52.2	缆索吊装
广东广州丫髻沙大桥	2000	76 + 360 + 76	0.211	1/4.5 (1/5.2)	$m = 2.0$ 悬链线	六管桁式	32.4	平转、竖转
湖南南县茅草街大桥	在建	80 + 368 + 80	0.217	1/5 (1/8.5)	$m = 1.543$ 悬链线	四管桁式		

注:矢跨比一列中括号外数值为主拱矢跨比,括号内为边拱矢跨比

## 2 恒载作用下的结构受力特点

钢管混凝土飞鸟式拱桥主跨、边跨拱脚均固结于桥墩,通过锚固于两边跨端部的系杆(索)来平衡主拱的大部分水平推力。钢管混凝土飞鸟式拱桥由主跨、边跨、主拱墩及系杆四大部分组成,“四位一体”,相互影响、相互依存,密不可分,无论哪一部分都无法独立存在。这种拱桥总体设计的关键是使这四个组成部分形成有机的、受力合理的结构。在大跨径拱桥中,恒载往往在总荷载中所占的比重很大。因此,在结构总体布置中,应尽可能使结构在恒载作用下,主拱的受力与固定拱相似、边跨的受力与半拱结构相似。为此,恒载作用下拱墩结点的位移与转角应该较小,边拱的弯矩也应该较小。

这种桥型的特点是主跨为中承式拱,跨径较大,矢

跨比较大;边跨为上承式半拱,跨径较小,矢跨比较小;边跨的荷载集度较之主跨为大。结构的这些特点,为利用边跨来平衡主跨的水平推力创造了条件。此外,还有边跨端部的端横梁,既是飞鸟式拱与引桥联系、各拱肋联结和拉索锚固的需要,也是平衡主跨水平推力一个十分有利的条件。

作为简化分析,假定主拱的受力为三铰拱,由图2(a)可求得恒载作用下的水平推力。现要求此水平推力全部由系杆承担,即要求恒载作用下的系杆力:

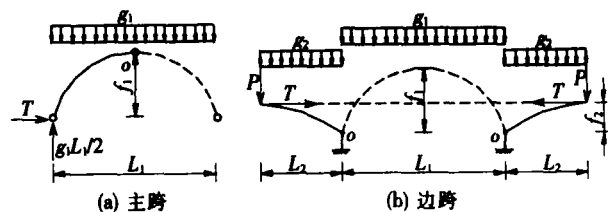


图2 恒载作用下结构受力分析简图

$$T = \frac{g_1 L_1^2}{8 f_1} \quad (1)$$

式中:  $T$  为系杆力;  $g_1$  为主拱恒载集度;  $L_1$  为主跨跨径;  $f_1$  为主拱矢高。

当边拱的受力行为为半拱时,边拱的端部没有支反力(如果有支反力,则受力相当于一端固支一端简支的一次超静定的曲梁)。在边跨恒载和水平系杆拉力的作用下,拱脚的弯矩最大,边拱脚下缘混凝土容易开裂。为使边拱受力合理,假定边拱脚的弯矩为 0,这样边拱的受力就与一个半跨三铰拱的受力相同,见图 2(b),即:

$$M_o = T f_2 - P L_2 - \frac{g_2 L_2^2}{2} = 0 \quad (2)$$

式中:  $M_o$  为边拱脚弯矩;  $L_2$  为边跨跨径;  $f_2$  为边拱矢高;  $g_2$  为边拱恒载集度;  $P$  为边跨端横梁压重;其他符号意义同前。

将式(1)代入式(2)可得:

$$\frac{g_1 L_1^2}{8 f_1} f_2 - P L_2 - \frac{g_2 L_2^2}{2} = 0 \quad (3)$$

式(3)给出了三跨飞鸟式拱恒载作用下结构受力理想状态时主边拱主要技术指标之间的关系。由于式(3)中参数较多,所以在初步设计拟定结构轮廓尺寸时,还要根据工程经验与已建桥梁的资料,在一些参数基本确定后,进行另一些参数的比较。由于影响参数多,它比一般的钢管混凝土拱桥的结构拟定要复杂,也显得更为重要。

### 3 有限元计算方法

飞鸟式拱桥拱脚与墩柱固结,属外部超静定结构。拱肋、系杆、墩台柱、基础和地基土构成一个整体受力体系。结构受力复杂,设计计算时一般都采用有限元方法进行数值分析。数值分析中关键的是结构模型的简化。

在初步设计时,作为简化分析,一般的飞鸟式拱可采用平面有限元模型进行分析。恒载作用下的内力可以通过将恒载均摊到各根拱肋来计算;活载作用时,将活载通过横向分布化成吊杆力作用于拱肋上,来计算总体结构的受力。但平面分析对于拱的空间受力性能,如面外稳定、横向地震作用下的结构反应等,均无法计算。因此,对于施工图设计阶段的计算,一般要进行空间受力分析。此外,对于单肋拱或三肋拱,也不能采用平面分析。

飞鸟式拱在建立全桥有限元模型时,一般要考虑

主拱、边拱、系杆、桥墩、基础以及地基土构成的受力整体。内力计算时,钢管混凝土拱肋可等效为等刚度单一材料单元,然后根据刚度分配计算钢管和管内混凝土的应力。也可采用几何位置相同的双材料单元,直接计算钢管和管内混凝土的内力与应力。对于实体拱肋(单圆管和哑铃形),可采用一根杆单元来模拟拱肋。对于桁式拱肋最好能用四管桁肋单元,在简化计算时可用一根杆单元来模拟整根拱肋。但在施工图计算时应用杆单元模拟桁肋的弦杆、腹杆等,平面单元模型中用平面桁肋,空间单元时用空间桁肋。

边拱肋、主拱肋和边拱肋的横撑、横梁、(加劲)纵梁、桥面板、立柱、桩等可模拟为杆单元。吊杆、系杆截面抗弯刚度较小,可模拟成链杆。地基土作用用弹簧模拟,地基土的水平抗力用  $m$  法计算。

在计算恒载作用下的系杆张拉力时,通常是将系杆的  $EA$  趋于无穷大,  $EI$  趋于无穷小,计算出系杆力。由于飞鸟式拱多采用无支架施工,恒载重量是不断增加的,系杆张拉是随着施工加载过程分批进行的。所以,计算系杆张拉力通常按施工加载程序进行。系杆张拉力计算完成后,将其作为外力,将系杆抗拉刚度置于实际刚度,计算施工过程和成桥后的结构内力和系杆的附加力。

在方案拟定或初步设计中,当以主拱为重点进行计算时,有限元模型也可只考虑主拱部分。因为在飞鸟式拱结构中,边拱肋重量与系杆拉力约束住了主拱拱脚的水平位移与转角,所以可以将主拱视为一无铰拱进行简化计算。

### 4 施工方法

钢管混凝土飞鸟式拱桥主拱拱肋为钢管混凝土,通常采用无支架预制安装方法施工。与其他钢管混凝土拱桥桥型相同,拱肋安装最常用的是缆索吊装和转体施工。表 1 中 19 座桥例中已知 6 座采用缆索吊装,4 座采用转体施工(其中竖转 3 座,平竖转组合 1 座),只有 1 座跨径较小的采用有支架施工(北京潮白河大桥,主跨 108 m),另有 8 座施工方法不详。

主拱采用缆索吊装时,塔架分为扣索索塔和吊索索塔,扣索塔架一般立于主拱座基础上,吊索塔架立于引桥桥墩基础上。竖转施工时,在低矮的塔架上将工厂加工好的拱肋焊接拼装成两个半拱,经对焊接质量、几何尺寸、拱轴线形等验收合格后,由立在主拱座上的塔架伸出的扣索分别将其拉起,在空中对接合龙。平

转施工时,将主拱和边拱作为一个转动单元,利用带悬臂边拱作为平衡重,实现较为经济的无平衡重转体方案。

边拱一般为钢筋混凝土结构,且为主拱的平衡重,通常采用有支架(一般为少支架)现浇方法施工。19座桥例中已知11座采用有支架施工,另有8座施工方法不详。边拱的满堂支架一般在主拱合龙、安装完边主拱立柱及立柱横梁后拆除;而临时支墩一般要到施工最后阶段,系杆全部张拉完成后再拆除。

边拱在系杆张拉前是一根支承在临时支架上的钢筋混凝土曲梁,要防止支架的沉降引起混凝土的开裂。因此,边跨现浇支架要进行超压,以消除边跨支架在边拱肋恒载作用下可能产生的沉降。

柔性系杆在边跨的锚固,一般是在通过边拱肋后,向下弯曲,以争取锚固空间。然而在系杆张拉时,将由于这个弯曲而产生很大的向上的竖向力,它将在边拱肋的拱脚产生附加的正弯矩(系杆的水平力本身在拱脚产生的就是正弯矩)。它有可能造成边拱肋拱脚的下缘开裂,对于有纵坡的飞鸟式拱,如果系杆无法水平贯通,在张拉时会对立柱和吊杆产生向下的分力,对边拱肋而言,这个向下的竖向分力也有可能使边拱肋中段的下缘开裂。这也是边拱肋施工应该注意的问题。此外,系杆张拉要防止绞丝的现象发生,特别是在锚点附近穿过锚孔时,以免系杆的破断事故发生。系杆张拉是两端同时进行的,以控制张拉应力为主和以量测伸长量为辅的“双控”法评价张拉质量。

### 5 总体结构的主要参数

#### 5.1 主边跨跨径比

在其他参数不变的情况下,由式(3)可得边跨跨径  $L_2$  与主跨跨径  $L_1$  的关系,见式(4)。显然,二者呈非线性关系,  $L_2$  随  $L_1$  的增大而增大。表1中,边跨与中跨跨径比 ( $L_2/L_1$ ) 变化范围为 0.164 ~ 0.424 (不含五跨式)。由实桥统计的曲线也基本反映了这一关系(图3)。

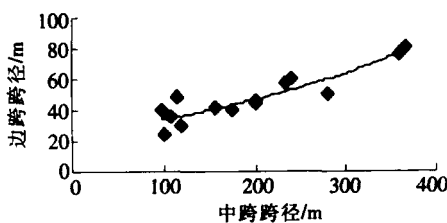


图3 边跨跨径 - 中跨跨径关系曲线

$$L_2 = \frac{\sqrt{4P^2 f_1^2 + g_1 g_2 f_1 f_2 L_1^2}}{2g_2 f_1} - \frac{P}{g_2} \tag{4}$$

#### 5.2 主边跨矢高与矢跨比

从表1可知,边孔与主孔的矢高比 ( $f_2/f_1$ ) 的变化范围是 1/2.73 ~ 1/7.22。19座桥例中,取 1/3.5 ~ 1/4.5 的有6座,取 1/2.7 的有2座,取 1/5.5 和 1/7.2 的各1座,其余9座不详。因此,边孔与主孔的矢高比 ( $f_2/f_1$ ) 最常见的取值为 1/3.5 ~ 1/4.5。由于边孔为上承式、主孔为中承式,所以这个比值反映了主孔桥面系通过主孔拱肋高度的位置。

由表1看出,主孔矢跨比 ( $f_1/L_1$ ) 取值范围为 1/3.3 ~ 1/5。19座桥例中,主孔矢跨比取 1/5 的有6座,取 1/4.5 的有5座,取 1/4 的有4座,只有1座取 1/3.3,另有3座不详。可见,主孔矢跨比 ( $f_1/L_1$ ) 最常见的是 1/4 ~ 1/5。边孔矢跨比 ( $f_2/L_2$ ) 的取值范围为 1/4.6 ~ 1/9.82,显然其值要小于主孔矢跨比。边孔矢跨比与主孔矢跨比之比 ( $f_2/f_1$ ) 的取值范围为 1/1.16 ~ 1/2。

由式(3)可以看出,在其他参数不变时,边跨与主跨的矢高和矢跨比都成正比,即边孔矢高随着主孔矢高的增大而增大,边孔矢跨比也随着主孔矢跨比的增大而增大。由图4的统计曲线也可看出这一点。

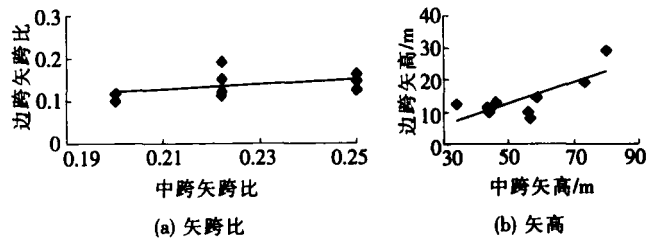


图4 边孔与主孔比值

#### 5.3 主边跨恒载集度与边孔端横梁的压重

飞鸟式拱作为一种自平衡的体系,主边孔大小跨带来的不平衡推力的问题的解决除了边跨采用比主跨小的矢跨比之外,还有一个重要的解决途径是边孔采用比主孔大的恒载集度,如主孔采用钢管混凝土拱肋,边孔采用钢筋混凝土拱肋,这是最常见的做法。除了拱肋自重集度的变化外,恒载还有一个重要的组成是桥面系的自重,如主孔采用钢-混凝土组合结构,边孔采用钢筋混凝土或预应力混凝土结构,但目前尚未见到具体的桥例,它主要涉及到两种桥面结构的连接处理、刚度的匹配(主孔中承式,大部分桥面为悬吊结构、刚度小,边孔为上承式,桥面支承在立柱上,刚度大,如果主边孔采用不同的桥面结构将加剧桥面刚度的差距)、施工与养护等问题。此外,端横梁的压重也是解

决主边孔大小跨带来的不平衡推力问题的一项有力手段。有时还将引桥压在端横梁上,以增加端横梁的压重。

在上文的分析中,假定恒载作用下边拱肋端部处于自由状态。但实际上这里有边墩和支座。桥梁在运营过程中,甚至在施工过程中,边肋的端部实际上是落在边墩的支座上的。边墩支座上的压力不能太大,也不能太小。太大则边拱肋的受力将向弯梁靠近,但如果太小,则边拱肋可能在温度下降等因素作用下引起上翘,引起此处伸缩缝破坏、边跨桥面与结构损坏、行车时受到冲击。如果引桥没有压在边拱肋上,这里还将产生台阶,给行车造成障碍。

## 6 主要构造

### 6.1 主拱肋

主拱拱轴线形多采用悬链线。在 19 座桥例中有 11 座采用悬链线,拱轴系数  $m = 1.3 \sim 2.0$ ,以 1.5 为多。只有 1 座采用圆弧拱,其跨径较小;4 座采用抛物

线,其中 1 座为六次抛物线,其余 3 座均为二次抛物线。另有 3 座拱轴线形不详。

主拱拱肋截面形式多样,主跨小于 120 m 的 5 座桥中,有 3 座采用哑铃形、1 座采用竖圆端形(浙江诸暨西施桥,主跨 64 m),另有 1 座不详;主跨等于和超过 120 m 的 14 座桥中,11 座采用四管桁式、各有 1 座采用三管桁式、六管桁式和不详。可见,在主孔跨径小于 120 m 的桥中,拱肋以哑铃形为主,在跨径大于 120 m 的桥中,拱肋则以四管桁式为主。主拱钢管多采用 Q345;管内灌注 C40 或 C50 混凝土。

根据表 1 收集到的桥例,有关主孔拱肋的几个参数与主跨跨径的关系,见图 5。钢管混凝土飞鸟式拱桥主拱拱肋截面高度/主跨跨径的取值范围为 0.010 9 ~ 0.026 3;主拱管径/主跨跨径的取值范围为 0.002 1 ~ 0.010 5;主拱钢管壁厚/管径的取值范围为 0.011 7 ~ 0.047;肋间中距/主跨跨径的取值范围为 1/4.2 ~ 1/19.1。这些参数基本上都随主孔跨径的增大而呈不同程度的增大趋势。

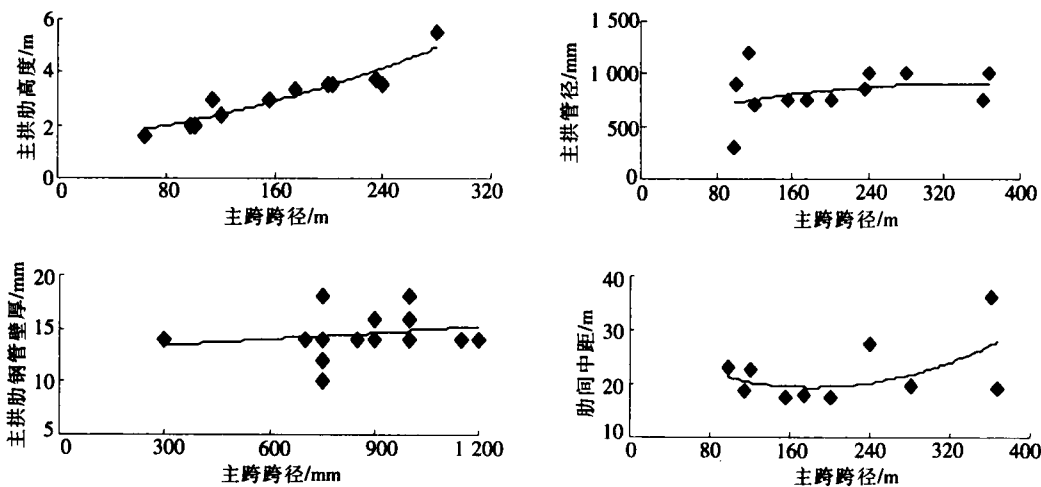


图 5 主孔拱肋参数与主跨跨径关系曲线

桁式主拱肋的肋宽除了考虑横向稳定和横向平联构造需要外,还需要考虑为系杆穿过主拱肋留下一定的空间,尽可能使系杆全部从肋间穿过。当然由于有强大的端横梁,系杆也可以有部分布置在拱肋外侧的人行道上。

桁式主拱肋考虑到增加拱肋的防撞性能并降低钢管应力,有些桥梁在拱肋的拱脚至桥面段(如武汉汉江五桥等)或拱脚至第一根吊杆段(如南海三山西大桥等)做成钢-混凝土实体结构,即上、下弦管间以两块钢腹板连接形成腹腔,腹腔间灌注混凝土,形成空心的

实体段。有时,对可能受到船撞的拱脚段还将整个截面全部灌注混凝土,形成实心段。

为了提高横向刚度,保证拱肋的横向稳定,钢管混凝土飞鸟式拱桥主拱肋之间均设置了横撑(又叫风撑)。横撑的主要形式有一字撑、X 撑和 K 撑。飞鸟式的主拱为中承式拱,位于桥面以下的拱肋间可采用较强的横向联系(如 K 撑、X 撑)、在桥面以上的拱顶则采用较少较弱的横撑,如一字撑或 K 撑或其组合,既能满足横向稳定要求,同时建筑造型也较佳。当然,在主孔跨径较大(大于 200 m)时,则宜采用 K 撑或 X

撑,以保证横向刚度。此外,对于跨径较大的主孔,通常桥面与拱肋相交处的横撑与横梁合二为一,有时称它为肋间横梁,与立柱横梁和吊杆横梁相区别。肋式拱的横向稳定要求除整体稳定应满足要求外,还应注意拱肋局部的稳定要求,尽可能使各横撑间的拱肋段长度基本相等。

### 6.2 边拱肋

表 1 所列的 19 座桥梁中,除湖北三峡莲沱大桥和北京潮白河大桥两座边拱肋为钢管混凝土哑铃形外,其余 17 座的边拱肋均为钢筋混凝土结构,截面多为箱形截面,也有个别为矩形截面。箱形截面效率高,是合理的截面形式。在靠近端横梁处无法设置拱上立柱,桥面横梁直接与拱肋相接,因此,这一段边拱肋常做成实体式。

实体截面施工方便,但截面效率不高,仅适用于跨

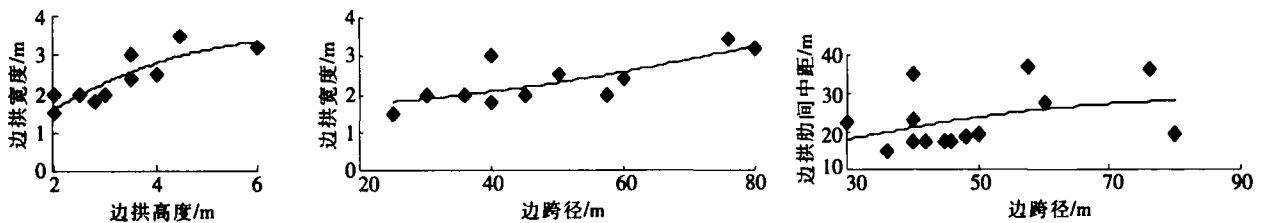


图 6 边拱截面几种关系曲线

### 6.3 系杆

系杆(索)用来平衡主拱推力,在全桥纵向呈自由滑动状态,相当于无粘结预应力筋或体外预应力束。系杆多采用高强度、低松弛、无粘结预应力钢绞线束(表 1 收集到的桥例均采用  $\phi 15.24$  钢绞线),外包 PE 热挤护套,用夹片锚固。为防止夹片在活载反复作用下松脱,近年来普遍采用了防松脱装置。目前,已有针对刚架系杆拱系杆的产品设计。系杆按体外柔性索处理,安全系数必须大于等于 2。作为整体受力构件,系杆受力以恒载为主,活载所占比例较小,与吊杆受力不同,一般情况下疲劳应力不会控制设计,采用过大的安全系数也没有必要,有时反而会造成系杆张力太小使夹片不易夹紧。

系杆在施工过程中,随着加载的进行不断地被张拉。这种不断张拉最好是每根索一次性张拉到位的分批张拉,尽量避免一根索张拉力逐级增加的张拉。所以,在设计计算出施工各阶段系杆张拉力后,一般要从施工方便和受力合理等方面,考虑每根索和分批索的张拉力,而不是直接采用计算结果。由表 1 资料整理得出的每片拱肋下的系杆  $\phi 15.24$  钢绞线股数与主跨

径较小的桥梁。但在飞鸟式桥型中,有时由于边跨布置空间的限制,使得边孔跨径太小无法平衡主孔的恒载水平反力,因此将边拱肋做成实体式,以增加边拱肋的恒载集度,如东莞水道桥。这从造价方面来看,显然是不经济的。边拱肋一般采用二次抛物线或悬链线线形,混凝土多采用 C40、C50。

由于边拱肋为钢筋混凝土结构,自身刚度较大,且有强大的端横梁,所以半跨拱肋的横向稳定性一般较好,可以根据需要设置少量的横撑。如果横撑也采用钢筋混凝土,则可考虑用一字撑,如果也为钢管构造,如广州丫髻沙大桥,则采用 X 撑或 K 撑。

从表 1 的资料分析可知,边拱截面宽度/高度的取值范围是 0.533 3 ~ 1;边拱截面宽度/边跨径的取值范围是 0.034 8 ~ 0.066 7;边拱肋间中距/边跨径的取值范围是 0.241 3 ~ 0.868 8。详细统计分析结果见图 6。

径的关系曲线见图 7。

系杆除湖北三峡莲沱大桥布置在桥面以下外,其余均布置在桥面上,对于平坡的拱桥系杆是架空在桥面上的。对于有纵坡的桥梁,系杆的张拉力将对吊杆产生向下的拉力,设计时应该考虑这一影响。如果系杆根数较多、系杆较长,需在横梁上设置带有滚轮的定位器。大部分桥梁系杆置于系杆箱内,箱内填有黄油、沥青麻絮等。但也有直接暴露在大气之中的,如广州丫髻沙大桥。

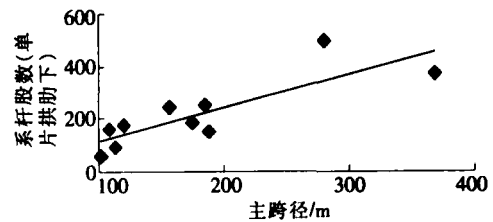


图 7 系杆钢绞线股数 - 主跨径关系曲线

系杆还须在软硬变化处(从桥面上的自由段穿过锚孔或穿过主孔拱肋)设置减震块,以保护系杆。同时,系杆还应具有可换、可调和可检查特性,以满足使用寿命期内的安全要求。

#### 6.4 桥墩及基础

主墩可采用工字形、箱式截面薄壁墩(如湖北三峡莲沱大桥)等钢筋混凝土结构。桥梁高度较低时,主墩可以没有墩身而只有钢筋混凝土拱座。

虽然有系杆的张力,飞鸟式拱的主墩与基础仍承受一定的水平推力,因此主墩与基础应具有较大的抗推刚度,以尽量减小桥墩水平变位在主拱内产生的附加弯矩。当然在总体设计中应尽可能减小不平衡水平力,避免它的长期作用引起地基土的变形。边墩是不承受水平力的结构,它与一般梁式桥的桥墩相同,可采用双柱、三柱式墩身。

飞鸟式拱由于主要应用于平原地质不良地区,基础均为群桩基础,大部分为钻孔灌注桩,也有个别采用钢筋混凝土打入桩或夯扩桩。基础的强弱,对于连续刚构桥一般希望基础抗推刚度小些,以使上部结构接近于连续梁的受力,减小下部结构的受力与结构费用,但拱是有推力结构,加上要考虑系杆安全性,一般希望基础的抗推刚度大些,因此其桩基数量要比一般的梁式桥大许多。

#### 6.5 桥面结构

现有飞鸟式拱的桥面结构均为局部受力构件,不参与总体受力,其单位自重不随桥梁跨径的增加而明显增加,这也是这类拱桥跨径可以较大的原因之一。桥面板(梁)架在横梁上,横梁再由吊杆或立柱吊在或支承在拱肋上。

桥面板视吊杆或立柱的间距(桥面板的跨径)的大小可选用实心板、空心板、形板、槽形板和 T 形板。跨径小于或等于 5 m 时多采用钢筋混凝土实心板,跨径在 5~10 m 时多采用钢筋混凝土空心板、形板或小 T 梁,其中形板由于结构自重较小采用得更多;当跨径大于 10 m 后,桥面板多采用预应力混凝土 T 形板或梁。纵梁可做成简支桥面连续或先简支后连续结构,以后者为优,它可省去许多安装困难、在活载振动下容易移位或滑落的小支座。

横梁的跨度一般等于两拱肋的中距,它与桥面宽(主要是行车道宽)直接相关。横梁材料与结构形式的选用与其跨径有很大的关系。钢管混凝土拱桥在拱肋截面轻型化后,无论是从结构还是从施工方面来说,桥面系的轻型化问题都显得更为重要,横梁的设计要充分考虑到这一点。当横梁跨径在 10 m 左右时,通常采用钢筋混凝土构造;在 20 m 左右时,则应采用预应力构造;跨径更大时,可以考虑采用钢-混凝土或钢-预应力混凝土叠合梁构造。

横梁所承受的恒载在纵桥向是两根吊杆或立柱的间距范围。从图 8 桥例统计给出吊杆间距与主孔跨径的关系可见,飞鸟式拱的吊杆间距为 4~8 m,且吊杆的间距随主孔跨径的增大而呈增大的趋势。由于活载(主要是挂车荷载)在桥面板、横梁、吊杆及其锚具受力中所占的比例很大,在间距为 4~12 m 的范围内,活载作用力并不随着间距的增大而明显增大,所以随主孔跨径的增大适当地加大吊杆间距,总体经济效益是好的,而且也符合审美的需要。

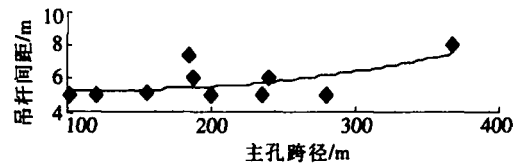


图 8 吊杆间距 - 主孔跨径的关系

飞鸟式拱的主孔为中承式,悬吊的桥面系占了主要部分。以横梁为主靠吊杆悬吊在拱肋的桥面系,其整体性较差,刚度也较小,行车作用下的振动大,在地震力作用下还可能出现纵桥向和横桥向的整体摆动。因此,这部分的桥面结构应参照悬索桥桥面结构的处理方式构造处理。在桥面系与拱肋相交处设置横向限位支座,对桥面系进行横向约束。在吊杆横梁间设置加劲纵梁,以加强其纵向刚度。加劲纵梁的材料一般与横梁相同。当横梁为钢-混凝土组合梁时,加劲纵梁的构造处理较为简单;当横梁为钢筋混凝土或预应力混凝土时,纵梁与横梁的联结构造较难处理。较常见的做法是横梁预制时留有接头,加劲纵梁也采用预制,通过干接或湿接与横梁联结起来。当然,如果桥面系能采用以纵梁为主的结构或纵横梁共同作用的格构式结构,则将能从根本上改变目前这种以横梁为主桥面系的许多弊端,这对混凝土桥面结构来说施工较困难,但对钢-混凝土组合桥面结构来说还是较容易实现的。

对于悬吊式桥面结构中的吊杆,特别是短吊杆的安全问题,已引起了工程界的广泛注意,也出现了一些相应的措施,如上锚头的转动块使其能有一定的转角变位、下锚端用一段钢棒、采用双吊杆,甚至借用悬索桥的吊杆构造等。它不是飞鸟式拱的特有问题,不再详述。

边拱端横梁的两道伸缩缝是不可避免的,但在主孔桥面与拱肋相交处是否设置伸缩缝有不同的做法。大部分桥例在此处设置了伸缩缝,它能够适应上承式桥面与下承式桥面不同的变形要求,也使边跨的端伸

伸缩缝的伸缩量减小。但此处的伸缩缝也给行车和养护带来不利因素,且伸缩缝损坏后对主拱肋的冲击较大。广州丫髻沙大桥和湖南茅草街大桥在这里均不设伸缩缝,桥面结构全桥连续(有四道加劲纵梁)成漂浮体系,立柱上设有抗震支座以适应桥面变形与抗震的需要,也不像其他桥梁那样立柱横梁与立柱现浇成整体。桥面板仅在两端设置支座,其余部分全部与横梁直接接触。

## 7 结语

拱桥具有悠久的历史,许多现存的古代拱桥是人类文明遗产的重要组成部分。在现代,拱桥作为一种经济美观的桥梁形式而得到大量的应用,新结构、新材料、新的施工方法不断推动着拱桥的技术进步。拱桥因其适合于国情与国人的审美习惯而得到充分的发展,创造出令世界瞩目的拱桥技术与文化。近 10 多年来,在中国,钢管混凝土用于拱桥中,为拱桥的发展注入了新的活力,使中国拱桥的发展呈现出勃勃生机。

拱桥作为一种以受压为主的结构,最大的优势在于利用较好的地基基础以获取结构在竖直荷载作用下的压力储备,可以看成是一种不需要高强度钢丝和锚具、不需要张拉的预应力结构。这也是它既经济又受力合理的原因。然而,在我国的拱桥发展过程中,已出现了两种并不合理现象。一方面,在适宜修建拱桥的山区,拱桥在相当程度上受到排斥。现在有些新建的山区公路,无论何种地形与地质条件,一律拒绝拱桥,代之以标准跨径的连续梁或连续刚构,出现大量的高墩,这种做法无疑是不科学与不经济的,同时也是不美观的。这里有设计与施工周期紧的原因,也有认识上的原因。另一方面,在许多平原地区和地质不良地区,拱桥而且是大跨径拱桥被大量修建,为平衡拱的水平推力、为拱桥的施工付出巨大的经济代价。

钢管混凝土飞鸟式拱桥在我国的大量应用和跨径不断增大的趋势,说明这种桥型有其结构内在的合理性、桥梁工程师以及桥梁业主较高的认可度和较强的竞争力。然而,它也是一种在平原地区和地质不良地区应用的拱式桥型。从桥型上说,通过高强度钢丝束或钢绞线来平衡拱的大部分水平推力,加上拱桥施工费用较高,使得其经济性受到很大的影响。同时,由于系杆张拉前和活载作用下拱的水平推力要由拱和下部结构承担,为减小主拱受水平位移影响产生的附加内力,再加上对系杆失效造成严重后果的担心,一般下

部结构与基础都采用了较大的刚度。因此,虽然飞鸟式拱采用了系杆,但墩台与基础的工程量仍然很大。这一点与连续刚构梁桥需要下部结构较柔、工程量较小有很大的不同。此外,飞鸟式桥型在立面上像飞鸟展翅,一般认为造型较佳,但也要注意当桥面高程不是很高,边跨跨径与矢高都受到限制、当边拱肋被悬挑长度较大的人行道或非机动车道道板的阴影遮盖后,这种造型的观赏效果会受到很大的影响。选用飞鸟式桥型时应充分考虑这些不利因素。

钢管混凝土飞鸟式拱桥以三跨为主,但近年也出现了四跨、五跨的桥型。由于多孔连拱,系杆的长度大大增加,系杆失效对结构不利影响也大大上升。在这种桥型中,系杆的拉力需要由边拱传至次边墩,再传至主墩,传力途径不直接,对结构受力显然是不利的。同时,在系杆张拉前各跨拱的不平衡推力均应由桥墩与基础承受,且为保证各跨拱肋的对称施工,施工工作面多,施工程序复杂,多于三跨的钢管混凝土飞鸟式拱桥不应提倡。

## 参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥发展综述[J]. 桥梁建设, 1997(2).
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社, 1999.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥桥例集(一)[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.
- [4] 钟启宾. 钢管混凝土拱竖向转体新技术[C]. 第十四届全国桥梁学术会议论文集, 2000.
- [5] 杨建国,徐君,陈继镇,等. 潮白河大桥主桥设计[J]. 桥梁建设, 2001(2).
- [6] 贾勤波,颜鹏飞,杨志国. 潮白河大桥主桥系杆的安装与张拉[J]. 铁道标准设计, 1999(10).
- [7] 魏立新. 三跨自锚中承式钢管混凝土拱桥设计中的技术处理[C]. 第二届全国城市桥梁青年科技学术会议, 1999.
- [8] 赖泉水. 南海市三山西桥主桥设计——三孔自锚无推力钢管混凝土中承式拱桥的设计[C]. 全国城市桥梁青年科技学术会议论文集, 1996.
- [9] 许晓锋,周汉东,黄福伟. 南海三山西桥主桥拱肋吊装施工控制[J]. 桥梁建设, 1998(1).
- [10] 赖泉水,张靖,傅韵芬,等. 三山西大桥主桥设计简介[J]. 桥梁建设, 1995(4).
- [11] 张靖,傅韵芬,赖泉水,等. 一座三孔自锚无推力钢管混凝土中承式拱桥的设计[J]. 城市道桥与防洪, 1995(3).
- [12] 魏立新. 三跨自锚中承式钢管混凝土拱桥设计中的技术



- 处理[J]. 桥梁建设, 1999(1).
- [13] 庄卫林, 黄道全, 谢邦珠, 等. 丫髻沙大桥转体施工工艺设计[J]. 桥梁建设, 2000(1).
- [14] 徐升桥, 尹浩辉. 丫髻沙大桥的设计与施工[J]. 铁道标准设计, 2000(5).
- [15] 尹浩辉. 广州丫髻沙大桥主拱施工方案的选择[J]. 广东公路交通, 1999(4).
- [16] 王秀伟. 丫髻沙特大桥内力影响面分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2000(1).
- [17] 杨梦纯, 林雄, 王天亮. 广州丫髻沙大桥主拱钢管拱安装施工设计[J]. 桥梁建设, 1999(2).
- [18] 徐升桥. 丫髻沙大桥主桥设计研究[J]. 铁道标准设计, 2001(6).
- [19] 徐升桥, 任为东, 李艳明. 丫髻沙大桥主桥设计[J]. 桥梁建设, 2000(3).
- [20] 王道斌, 彭济南, 陈佑新, 等. 莲沱大桥钢管拱肋竖转吊装的方案设计与施工[J]. 桥梁建设, 1997(2).
- [21] 王道斌, 卢之初, 雷永伟, 等. 莲沱特大桥钢管拱肋竖转吊装技术[J]. 铁道工程学报, 1996(4).
- [22] 陈佑新, 薛继连, 黄立新, 等. 莲沱特大桥钢管混凝土拱混凝土泵送技术[J]. 铁道建筑技术, 1997(3).
- [23] 王一军, 乔建东. 茅草街大桥主桥静、动力计算[J]. 企业技术开发, 2003(5).
- [24] 颜东煌, 赖敏芝, 张克波, 等. 茅草街大桥基于 ANSYS 的空间计算模型[J]. 长沙交通学院学报, 2003(2).
- [25] 颜全胜, 徐升桥. 大跨度钢管混凝土拱桥的稳定承载力分析[J]. 铁道标准设计, 2003(7).
- [26] 倪顺龙. 三跨自锚式钢管混凝土拱桥设计[C]. 第二届全国城市桥梁青年科技学术会议, 1999.
- [27] 彭志苗, 林欢贵. 京杭运河钢管混凝土拱桥的空间分析[C]. 第二届全国城市桥梁青年科技学术会议, 1999.
- [28] 赵雷, 卜一之. 钢管混凝土系杆拱桥施工过程结构行为非线性分析[J]. 西南交通大学学报, 2000(4).
- [29] 刘旭锴, 张振学, 王淑训, 等. 金刚桥改建工程设计与试验研究[C]. 第二届全国城市桥梁青年科技学术会议, 1999.
- [30] 王淑训, 刘旭锴, 张振学. 金刚桥改建工程设计与试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 1998(2).
- [31] 唐建国, 向宝成, 肖仁富, 等. 桂江三桥钢管拱肋提升竖转施工技术[C]. 第十四届全国桥梁学术会议论文集, 2000.
- [32] 钟启宾. 钢管混凝土拱竖向转体新技术[C]. 第十四届全国桥梁学术会议论文集, 2000.
- [33] 胡瑞海. 桂江三桥钢管拱施工技术研究[J]. 国外桥梁, 2002(1).
- [34] 赖泉水, 邓新穗. 广西梧州桂江三桥的设计与施工[J]. 2003(2).
- [35] 宋祥武. 桂江三桥钢管拱竖转施工技术[J]. 铁道标准设计, 2001(1).
- [36] 胡瑞海, 李继平, 李东红, 等. 竖转施工的桂江三桥[J]. 公路, 2001(4).
- [37] 唐黎明, 鲁应慧, 刘新痴, 等. 武汉市江汉五桥的设计[J]. 城市道桥与防洪, 2002(2).
- [38] 刘新痴, 唐黎明. 武汉市江汉五桥的结构计算[C]. 第二届全国城市桥梁青年科技学术会议, 1999.
- [39] 付宇文, 龙斌, 吴腾. 武汉市江汉五桥边跨施工方案设计[C]. 广西公路学会学术论文, 2000.
- [40] 郑献章, 李志胜. 温州瓯江三桥设计[C]. 第十三届全国桥梁学术会议论文集, 1998.
- [41] 孙建渊, 李国平, 石洞, 等. 钢劲性骨架在梁拱组合体系中的作用研究[J]. 公路, 1999(9).

## 西南地区最长公路隧道贯通

日前,在重庆石柱县双笕这样一个毫不起眼的小山村,众多村民集聚在西南地区在建最长公路隧道——方斗山隧道前,庆祝国家高速公路网中沪蓉国道重庆境内忠县至石柱段的重要控制性工程提前 5 个多月实现贯通。

方斗山隧道左右洞平均长 7 600 m,是目前西南地区第一长、全国第三长的在建公路隧道,它的地质结构非常复杂,仅断层就有 4 条,此外还有煤层、采空区两处以及大溶洞群、突水涌泥段等不良地质段。为了安全通过不良地质段,成功穿越 4 大断层,对一些重特大方案和技术难题,建设单位采取专家研讨、技术论证、院校合作等方式加强科研攻关,实行全过程主动管理,组织专家组多次论证后再实施。施工单位还制定各种风险预案,并组织安全作业人员岗前培训和各种突发事件演练,保证了质量、进度和安全全面受控。据悉,该隧道的凿岩台车全断面开挖成型控制 QC 成果还获得了全国工程建设优秀质量管理(QC)大奖。

摘自:《中国交通报》2006. 12. 13