

文章编号:1671-2579(2008)02-0089-08

# 我国混凝土拱桥现状调查与发展方向分析

陈宝春, 叶琳

(福州大学, 福建 福州 350002)

**摘 要:**混凝土(钢筋混凝土和预应力混凝土)拱桥在我国应用广泛,取得了很高的技术成就。然而近期的发展相对缓慢。为促进我国混凝土拱桥的技术进步,该文收集了大量的资料,以跨径不小于100 m的已建和待建的混凝土拱桥为分析对象,对其数量、跨径、结构形式、施工方法、材料等方面进行分析与总结,并提出今后的发展方向。

**关键词:**混凝土;拱桥;现状调查;发展方向;分析

拱桥在我国有着悠久的历史、众多的形式与数量和很高的技术成就。按主拱的主要建筑材料,拱桥可分为圬工拱桥、金属拱桥、混凝土拱桥和钢-混凝土组合拱桥。根据最常用的材料,通常又可分为石拱桥、钢拱桥、钢筋混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥,目前这4种拱桥的世界跨径纪录均在中国,它们分别是主跨径146 m的山西丹河新桥(石拱桥)、主跨径550 m的上海卢浦大桥(钢拱桥)、主跨径420 m的万州(县)长江大桥(混凝土拱桥)和主跨径460 m的巫峡长江大桥(钢管混凝土拱桥)。混凝土拱桥在我国拱桥中的应用最广,积累了丰富的设计与施工经验,取得了很高的技术成就。

然而,拱桥在我国发展了近20年后,与其他现代化桥梁(如斜拉桥、悬索桥、预应力混凝土连续梁和连续刚构桥)相比,拱桥的应用与研究相对落后了。在拱桥之中,近10多年来与钢管混凝土拱桥和钢拱桥相比,混凝土拱桥的技术进步缓慢。虽然拱桥的修建与研究在世界范围内并不活跃,但日本、克罗地亚等国对超大跨径混凝土拱桥还是开展了一系列的研究,走在我国的前面。为促进我国混凝土拱桥技术的进步,使得我国在拱桥领域继续保持世界先进水平,继续为我国的交通事业做出应有的贡献,开展钢筋混凝土拱桥的研究是非常必要的。作为研究基础,本文对我国钢筋混凝土拱桥的发展进行了简要的回顾,在收集大量钢筋混凝土拱桥资料的基础上,从数量、跨径、结构形式、施工方法等方面对这种桥型进行了统计分析与

总结,为深入研究和应用提供参考。

本文的混凝土拱桥指钢筋混凝土拱桥和预应力混凝土拱桥,不包括素混凝土拱桥,实际应用中以钢筋混凝土拱桥为主。

## 1 发展概述

我国的混凝土拱桥首先在铁路桥梁上出现。解放前修建的跨径最大的是粤汉线株韶段五大拱桥中的碓凯冲桥、省界桥和燕塘桥,为各有一主孔跨径达40 m的钢筋混凝土拱桥。20世纪60年代后,钢筋混凝土拱桥在相当一段时期内成为我国的主导桥型,尤其是在公路桥梁中。为减轻自重,节约圬工和钢材,方便施工,我国桥梁工作者对拱桥技术进行了长期不懈的探索,出现了双曲拱、刚架拱和桁架拱以及预应力桁式组合拱等结构形式。这几种桥型跨径纪录分别为:主孔净跨150 m的河南嵩县前河大桥(双曲拱桥,1968年)、主孔净跨130 m的江西德兴太白桥(刚架拱,1993年)、主孔净跨100 m的江苏无锡金城、金匮与下甸3座拱桥(桁架拱,1985~1989年)和主孔净跨330 m的贵州江界河桥(预应力组合桁拱,1995年)。双曲拱、刚架拱和桁架拱属于轻型混凝土拱桥,节省材料,然而费工费时,有些在长期使用中还暴露出整体刚度低、易开裂等缺陷,现已较少采用,跨径也难以再加大。

从20世纪70年代后期开始,我国修建了大量的

收稿日期:2008-03-10(修改稿)

作者简介:陈宝春,男,教授,博士生导师。E-mail:baochunchen@fzu.edu.cn

钢筋混凝土箱拱和肋拱,且在大跨径拱桥中占有多数。比较典型的桥梁有1979年建成的跨径150 m的四川马鸣溪大桥、1982年建成的跨径170 m的四川攀枝花市宝鼎大桥、1989年建成的跨径200 m的四川涪陵乌江大桥、1990年建成的跨径240 m的中承式钢筋混凝土拱桥——四川宜宾小南门金沙江大桥、1996年主跨达312 m的以钢管混凝土为劲性骨架的广西邕宁邕江大桥以及1997年建成的世界上跨径最大的钢筋混凝土拱桥——四川万州(县)长江大桥(420 m)。钢筋混凝土箱拱和肋拱现已成为混凝土拱桥的主导桥型,也是混凝土拱桥向大跨径方向发展最有潜力的桥型。

回顾我国混凝土拱桥的发展历史,其进步主要体现在结构的轻型化和施工方法两方面。早期以结构轻型化为主,近20~30年的进步则更主要体现在施工方法上。在采用缆索吊机吊装的悬臂拼装法方面,大吨位、大跨径缆索吊装系统的开发、千斤顶斜拉扣挂技术

的使用,使施工技术有了很大的进步。劲性骨架施工方法中,劲性骨架从早期型钢向钢管混凝土的发展,是混凝土拱桥跨径取得突破的根本原因。同时,将水平转体应用于拱桥施工,从有平衡重向无平衡重发展,也是我国拱桥施工的特有技术。我国混凝土拱桥跨径位于世界前列,最具特色与优势的方面,在于施工技术。

## 2 数量与跨径

本文分析的对象为我国跨径不小于100 m的混凝土拱桥,调查的截止时间为2007年8月,共收集到桥梁199座,其中跨径不小于150 m的有56座。在后面的分析中,均以跨径不小于100 m的桥梁为基本资料,对于具体统计的数据则以已知的该参数的桥梁为分析对象。表1仅给出了跨径达200 m及以上的8座桥梁的简要情况。

表1 我国跨径不小于200 m的钢筋混凝土拱桥一览表

序号	桥名	建成年份	跨径/m	结构形式	施工方法
1	重庆万州长江大桥	1997	420	上承式空腹无铰拱	劲性骨架
2	贵州江界河大桥	1995	330	桁式组合拱	悬臂桁架
3	广西邕宁邕江大桥	1996	312	中承式无铰拱	劲性骨架
4	贵州赤水大同大桥	1997	280	上承式空腹无铰拱	-
5	四川宜宾小南门桥	1990	240	中承式无铰拱	劲性骨架
6	河南许沟大桥	2001	220	上承式空腹无铰拱	支架浇筑
7	福建宁德行对岔特大桥	2007	205	上承式空腹无铰拱	转体施工
8	重庆涪陵乌江大桥	1989	200	上承式空腹无铰拱	转体施工

注:“-”表示相关资料暂缺

图1给出了不同时期修建的混凝土拱桥的跨径,其中给出桥名的是部分具有代表性的桥梁。从图1可以发现,我国混凝土拱桥的跨径和数量在2000年以前总体上随时间推移呈增大趋势,但进入21世纪以后数量呈下降趋势,跨径则在1997年重庆万州长江大桥达到峰值点(420 m)之后也呈下降趋势。其中,数量的

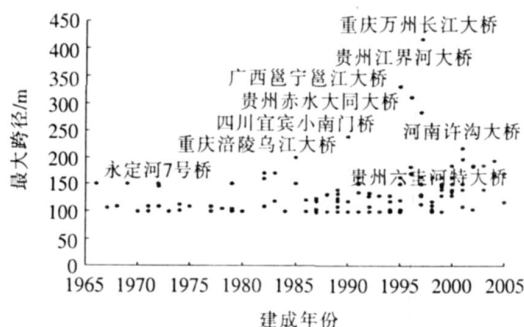


图1 拱桥跨径的变迁

减少,也可能包含有近些年修建的混凝土拱桥未反映在文献资料上的因素。但至少可以说,相对于其他桥型、在拱桥中相对于钢管混凝土拱或钢拱,呈减小的趋势。

从图2可以看出,在跨径不小于100 m的混凝土拱桥中,以跨径100~160 m的最多,共计174座,占总数的87.9%;跨径161~199 m的为16座,占总数的8%;200 m及以上跨径的为8座,占总数的4%,其中200~300 m、300~400 m的分别为5座和2座,大于400 m的则仅有1座。

截止到2003年3月,日本土木学会进行的日本国内跨径不小于100 m混凝土拱桥的调查表明,已建与在建的共38座,跨径100~160 m的为27座,占总数的71.1%;161~199 m的为5座,占总数的13.1%;200 m及以上跨径的为6座,占总数的15.8%。

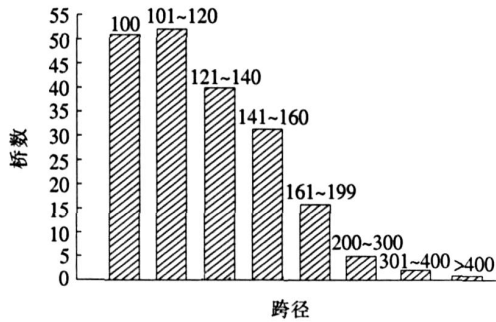


图 2 跨径柱状图

因此,无论是从中国、还是从日本现状来看,跨径在 160 m 及以下跨径的混凝土拱桥已有大量的修建,技术已日趋成熟,在山区中有着良好的经济性,是目前混凝土拱桥最具竞争能力的跨径范围。跨径在 161~199 m 时,有一定的技术难度,但也不难克服,是较具竞争能力的跨径范围。跨径在 200 m 以上时,可

以说有相当的技术难度,其竞争力要依具体的工程情况而定。从世界范围看,跨径大于 300 m 的混凝土拱桥,目前仅有 6 座(其中 3 座在中国),其技术还处于发展之中。

表 2 给出了国外已建和在建的跨径不小于 200 m 的混凝土拱桥一览表。共有 29 座桥梁,分布在 16 个国家,具体是:日本 6 座、克罗地亚 5 座、葡萄牙 3 座、法国与奥地利各 2 座,其他 11 个国家均为 1 座。中国占有 8 座,数量最多。跨径大于 300 m 的桥梁中,中国占了一半,跨径的排名分别为第 1、3、5 名。

因此,从世界范围来说,中国大跨度混凝土拱桥建设无论数量还是跨径均名列世界第一,日本和克罗地亚紧随其后。然而,应该指出的是日本和克罗地亚近期对超大跨径混凝土拱桥的研究十分活跃,我们应该认真学习、加强合作、抓紧研究,努力保持我国在大跨径混凝土拱桥方面的技术优势。

表 2 国外跨径不小于 200 m 的钢筋混凝土拱桥一览表

序号	桥名	跨径/m	建成年份	结构形式	矢跨比	拱圈截面	桥宽/m
1	克罗地亚 Krk 1 号桥	390	1980	空腹无铰	1/6.5	三室箱	11.4
2	美国 Colorado 桥	323	在建	空腹无铰	1/3.8	单室双肋	26.82
3	澳大利亚 Gladesville 桥	305	1964	空腹无铰	1/7.4	四箱肋	27
4	巴西 Amizade 桥	290	1965	空腹无铰	1/5.5	三室箱	13.5
5	葡萄牙 Infante D. Henrique 桥	280	2002	拱梁组合	1/11	单室箱	20
6	南非 Bloukrans 桥	272	1983	空腹无铰	1/4.4	三室箱	16
7	葡萄牙 Arrabida 桥	270	1963	空腹无铰	1/5.2	两个三室箱	26.5
8	日本富士川桥	265	2003	空腹无铰	1/6.5		17.5
9	瑞典 Sando 桥	264	1943	空腹无铰	1/6.7	三室箱	12
10	法国 Rance 河桥	261	1990	空腹无铰	1/7.5	单室箱	15
11	日本天翔大桥	260	2000	空腹无铰	1/8	单室箱	8.75
12	克罗地亚 Sibenik 桥	246	1966	空腹无铰	1/8	三室箱	10.76
13	印尼 Barelang 桥	245	1998	空腹无铰			18
14	克罗地亚 Krk 2 号桥	244	1980	空腹无铰	1/5.2	三室箱	11.4
15	日本别府明矾桥	235	1989	空腹无铰	1/6.4	三室箱	
16	意大利 Fiumarella 桥	231	1961	空腹无铰	1/3.5	箱形	
17	乌克兰 Zaporozhe 桥	228	1952	空腹无铰	1/6.7	三室箱	
18	葡萄牙 Rio Zezere 桥	224	1993				
19	德国 Kyll Valley 桥	223	1999				29.5
20	日本头岛大桥	218	2003		1/8		7.7
21	塞黑 Novi Sad 桥	211	1961	中承式无铰	1/6.5	两个单室箱肋	19.95
22	西班牙 Esla 桥	210	1942	空腹无铰	1/3.4	三室箱	8.74
23	奥地利 Lingenuer 桥	210	1967	空腹无铰	1/4.7		10.3
24	日本宇佐川桥	204	1982	空腹无铰		三室箱	21.9
25	克罗地亚 Krka 桥	204	2004	空腹无铰	1/4	双室箱	22.56
26	法国 Morbihan 桥	201	1995	空腹无铰		单室箱	20.3
27	奥地利 Pfaffenberg Zwenberg 桥	200	1971	空腹无铰		三室箱	10
28	克罗地亚 Maslenica 桥	200	1997	空腹无铰	1/3.1	双室箱	
29	日本池田大桥	200	2000		1/5		10.4

### 3 总体结构

混凝土拱桥的结构类型非常丰富,按车承形式可分为上承式、中承式和下承式;按结构体系可分为简单体系(以拱受力为主,拱又可分为三铰、两铰和无铰)与拱梁组合体系;按截面形式可分为板拱、肋拱、双曲拱和箱形拱等。本文在统计分析中,根据车承与结构体系的组合分类方法,将拱的结构划分为4种结构形式:

上承式无铰拱; 轻型拱(包括双曲拱、桁架拱、刚架拱以及预应力桁式组合拱); 中承式无铰拱; 其他形式。将上承式有铰拱、中承式组合拱、下承式系杆拱等数量较少的桥型,归入其中,在其他形式中既有有推力的拱,也有无推力的拱梁组合结构。

表3给出了按上述4种结构形式划分的199座跨径不小于100m的拱桥分布情况。

表3 调查的拱桥的结构形式

结构形式		桥数/座	百分比/%
上承式无铰拱	箱拱	89	45
	肋拱	21	11
轻型拱	双曲拱	13	7
	刚架拱	5	3
	桁架拱	0	0
	预应力桁式组合拱	32	16
中承式无铰拱	18	9.0	
其他形式	21	10.6	
合计		199	100

从表3中可见,前3种结构共有178座,占总数的89%。这3种都是有推力的拱,再加上其他形式中有推力的拱有13座,这样有推力的拱桥共有191座,占总数的96%,因此,我国混凝土拱桥以有推力拱为主,这与近10多年修建的钢管混凝土拱桥中无推力拱占到45%有很大的不同。

这种不同还导致这两种桥形在地域上的分布有很大的不同,以有推力的上承式与中承式拱为主的混凝土拱桥,适用于山区地形与地质,因此,在199座桥梁中,云贵川西南地区(云南、贵州、四川和重庆)有124座,占总数的62.3%;而从文献[16]所列的钢管混凝土拱桥131座跨径不小于100m的桥梁中,云贵川西南地区仅有26座,占总数的19.8%。混凝土拱桥云贵川加上广西和湖南,则有146座,占总数的73.4%。而钢管混凝土拱桥,跨径不小于100m的桥梁在湖北、浙江、广东、广西有50座,加上云贵川地区,也仅占

总数的58.0%。比较而言,大跨径混凝土拱桥的集中度要大,而大跨径钢管混凝土拱桥的分布范围要广。从大跨径混凝土拱桥的区域分布来看,继续对混凝土拱桥的研究,对西部交通建设,尤其是西南山区的交通建设,具有十分重大的意义。

在3种主要结构形式中,上承式无铰拱的数量最多,有110座,占到所有桥形的55.3%;轻型拱有50座,占25.1%,其中双曲拱、刚架拱和预应力桁式组合拱分别有13座、5座和32座;而中承式无铰拱和其他形式拱分别为18座和21座,占总数的9.0%和10.6%。值得一提的是,虽然双曲拱和预应力桁式组合拱曾在我国拱桥建设中获得较大的应用,不过由于其结构存在着一些问题,如双曲拱的整体性、耐久性较差,预应力桁式组合拱的节点易开裂等,现在已较少修建,而已建的这类桥梁的加固与改造仍是一个较大的课题,应引起足够的重视。

从总体结构来说,所调查的拱桥无实腹拱,均为空腹拱。轻型拱中的桁架拱、刚架拱以及预应力桁式组合拱和其他形式中的少数拱梁组合桥,采用主拱与桥道系共同受力的形式,桥道系纵梁也是总体结构的重要组成部分,一般也都采用钢筋混凝土构件甚至预应力混凝土构件。

对于上承式箱拱和肋拱,桥道纵梁多采用钢筋混凝土梁,跨径一般小于或等于20m;少数采用预应力混凝土梁,跨径较大,最大的为万州(县)长江大桥,为30.688m。早期主拱跨径不大的,也有一些采用拱式拱上建筑。对于中承式有推力拱,桥道系以横梁受力为主,桥面板采用小纵梁或板,跨径为4~12m。

对于双曲拱桥,则基本上都采用拱式拱上建筑,腹拱一般布置在每半跨内不超过主拱跨径 $1/4 \sim 1/3$ 的范围内,跨径多为2.5~5.5m,且不大于主拱圈跨径的 $1/8 \sim 1/15$ 。腹拱通常也采用双曲拱,且为等跨,矢跨比一般为 $1/4 \sim 1/8$ 。主拱跨径小的采用墙式腹拱墩,主拱跨径大的采用柱式腹拱墩,以减轻自重。

国外近年来为减轻拱上建筑自重,新建的混凝土拱桥中开始采用钢-混凝土组合结构。如克罗地亚的Krka桥,拱上立柱均采用薄壁空心箱形结构,桥道系采用跨径为28和32m的钢-混凝土组合梁,比同等桥宽、跨径为200m的旧Maslenica混凝土拱桥自重降低了近35%。最近正在修建的美国Colorado桥,主跨达323m,采用了跨径为36.92m的钢-混凝土组合梁作为桥道梁。

## 4 主拱构造分析

### 4.1 矢跨比

矢跨比是拱结构一个重要的结构参数,它不但影响拱的内力,还影响拱施工方法的选择。同时,对拱桥的外形是否与周围景物相协调,也有很大的关系。实际的矢跨比,主要根据线形规划、地形条件等决定。

从目前已建混凝土拱桥统计结果可知,矢跨比与跨径之间的关联度总体来说并不大,但是对于大跨径的上承式拱桥,一般来说随着跨径的增大,为了降低立柱的高度会倾向于选择较小的矢跨比。我国混凝土拱桥的矢跨比多为  $1/5 \sim 1/8$ ,以  $1/6$  居多。而对我国钢管混凝土拱桥的调查表明,其矢跨比多在  $1/4 \sim 1/5$  之间,以  $1/5$  最多。总体来说,我国钢筋混凝土拱桥的矢跨比较之钢管混凝土拱桥为小。国外对超大跨径(600 m)混凝土拱桥的研究表明,矢跨比采用  $1/6$  是较为合理的。因此可以认为, $1/6$  附近的矢跨比是混凝土拱桥较为合适的矢跨比。

### 4.2 拱轴线

为最大限度地发挥拱的受压作用,设计中希望拱轴线等于或接近于恒载压力线。从表 4 可知,大多数混凝土拱桥采用悬链线和抛物线,少数采用正弦线及圆弧线等其他曲线。统计的上承式无铰拱和中承式无铰拱几乎全部采用悬链线,抛物线在轻型拱中应用较多。在已知拱轴线的 89 座跨径大于 100 m 的拱桥中,采用悬链线的有 76 座,占总数的 85.4%;抛物线的有 11 座,占 12.4%;仅有 2 座采用其他曲线,占 2.2%。可见悬链线是我国混凝土拱桥最主要的拱轴线。从日本的统计和其他国家的应用情况来看,悬链线也是混凝土拱桥最常用的拱轴线。

表 4 各类结构形式采用的拱轴线形统计

拱轴线形式	上承式无铰拱	轻型拱	中承式无铰拱	其他	合计
悬链线	41	8	13	14	76
抛物线	1	8	2	-	11
其他	-	2	-	-	2
小计	42	18	15	14	89

### 4.3 主拱截面

我国混凝土拱桥按主拱截面形式可分为整体式拱圈和分离式拱肋。整体式拱圈有板拱、双曲拱和箱形拱等(在本文统计的拱桥中,未见板拱截面)。

整体式拱圈有 52 座,占总数的 70.3%,其中箱形

拱 40 座,占 54.1%,双曲拱有 12 座,占到 16%,主要适用跨径分布在 100 ~ 120 m,且从时间上来说,近 20 年已极少新建。拱肋中常见的有箱肋和工字形肋。分离式拱肋有 22 座,占总数的 29.7%。分离式拱肋主要应用于中承式无铰拱中,在设计与施工过程中应注意其横向稳定性问题。因此,拱圈是大跨径拱桥的主要截面形式,尤其是箱形拱。

箱形截面具有效率高、抗扭刚度大、结构整体受力性能好、经济以及施工方便等优点,因此无论是整体式拱圈还是分离式拱肋,箱形截面都是其主要的选择,在表 5 已知拱圈截面的 74 座拱桥中,箱形截面有 61 座,占了 80%以上,且适用的跨径范围很广。

表 5 拱圈截面统计

整体式拱肋		分离式拱肋	
箱形拱	双曲拱	箱肋	工字形肋
40	12	21	1
52		22	

拱在合龙前并不是一个拱结构,因此常需要临时设施或构造帮助其受力。减轻主拱的自重,是降低拱桥施工难度、降低施工费用的根本途径,也是拱桥发展的主要方向。

减轻主拱自重,一是使用高强混凝土材料,比如采用活性粉末混凝土(RPC);二是向宽箱、少箱发展,以减少腹板的体积;三是采用变截面;四是采用钢-混凝土组合结构。近期提出了钢腹板(杆)-混凝土组合拱新桥型,属于上属的第四种,就是将混凝土拱圈中的混凝土用腹板钢构件(波形钢腹板、平钢腹板、钢桁腹杆等)来代替,顶底板仍采用混凝土,这样减轻了拱圈(肋)的自重,也减少了现浇法中现场混凝土浇筑的工作量,缩短了工期。前期的研究工作已为实际工程应用奠定了基础。

## 5 施工方法

### 5.1 概况

拱桥施工根据主拱在施工过程中是否以已完成的结构部分作为支撑体系为判定标准,可分为自架设与非自架设两大类,其中自架设法可细分为悬臂法和劲性骨架法,非自架设法则包括支架法、转体法、缆索吊装法和大节段吊装法等。拱桥的施工方法根据是否有支架可分为支架法和无支架法,根据吊装设备又可分为缆索吊装、浮运吊装、吊机吊装等,根据是否现场制作分为现场浇注和预制安装。本文按混凝土拱桥施工

过程的拱结构的主要受力和成拱原理将施工方法分为悬臂法、劲性骨架法、支架法、转体法等进行统计分析。表6给出了不同桥型所采用不同施工方法的数量。

表6 调查的拱桥所采用的施工方法

施工方法	上承式 无铰拱	轻型拱	中承式 无铰拱	其他 形式	合计
悬臂法	33	26	1	9	69
劲性骨架法	4	1	8	-	13
支架法	3	5	4	4	16
转体法	5	-	1	3	9
小计	45	32	14	16	107

从表6可以看出,在107座已知施工方法的混凝土拱桥中,采用悬臂法的有69座,占到统计桥梁的64.5%,特别在轻型拱中,该方法的采用率达到了81.3%,因此,悬臂法是我国大跨径混凝土拱桥主导的施工方法;其余3种施工方法所占比例大致接近。

## 5.2 悬臂施工法

悬臂施工法适用的桥型范围和跨径范围最广,一直是我国钢筋混凝土拱桥大量使用的施工方法。实际上,劲性骨架法中,劲性骨架本身架设的方法也基本上是采用悬臂法施工的,如果将其加到悬臂施工法中,它所占的比例要达到76.6%。悬臂施工法主要有斜拉悬臂法和悬臂桁架法两种。

斜拉悬臂法又可分为斜拉悬臂拼装和斜拉悬臂浇筑。我国除近期修建的四川白沙沟1号大桥等极少数桥采用斜拉悬臂浇筑法外,基本上均采用斜拉悬臂拼装法。悬臂拼装法施工速度快、预制构件的质量容易得到保证,但它要求缆索吊装能力大、且拼接缝多。缆索吊机是我国公路桥梁最主要的吊装设备,其吊装能力在不断提高,由单跨发展到多跨。在悬臂拼装方面,采用千斤顶斜拉扣挂技术,较之由钢丝绳扣索、卷扬机滑车组组成的扣索系统有了很大的进步,适应的跨径范围不断增大,施工控制能力不断提高。因此,斜拉悬臂拼装技术是我国混凝土拱桥施工的主要技术,也是钢管混凝土拱桥和钢拱桥的主要施工技术。

相比而言,国外在大跨径混凝土拱桥施工中,采用斜拉悬臂浇筑的较多,如克罗地亚跨径246.4m的SIBENIK桥、跨径200m的Maslenica、跨径193.2m的Pag桥、跨径204m的Krka桥等;南非跨径272m的Bloukrans桥;日本跨径为265m的富士川大桥;美国在建的跨径323m的Colorado桥等。斜拉悬臂浇筑法对缆索吊装能力要求很低,整体性好,能适应于陡峭地形无预制场地的桥位,但施工进度慢,需要施工挂

篮等临时设施。

悬臂桁架法利用拱圈、立柱与临时或永久的斜拉杆、上弦杆组成桁架受力结构进行施工,该方法主要应用于上承式组合拱中,其跨径最大的贵州江界河桥(330m)就是采用这种施工方法。我国的悬臂桁架法主要应用于预应力桁式组合拱中,其斜拉杆是结构中的永久杆,这种施工方法与其桥型曾在贵州等山区的桥梁建设中发挥了十分积极的作用,但后期发现其桁架节点易出现开裂。因此,这种桥型也不再新建,悬臂桁架法在我国除个别钢管混凝土拱桥中有应用外,现已较少采用。与之相反,悬臂桁架法在国外主要用于一般的混凝土拱(简单拱),施工中的斜拉杆是临时杆,施工后拆除。一些大跨径混凝土拱桥采用这一方法建成,如跨径达390m和244m的克罗地亚的Krk一号桥和二号桥、跨径为170m的日本外津桥。

## 5.3 劲性骨架法

劲性骨架法可将较重的混凝土拱的架设问题转化为较轻的钢劲性骨架拱的架设问题,大大提高了混凝土拱桥的跨越能力。其关键在于钢骨架耗用的钢材用量和骨架本身刚度和稳定性之间的矛盾。传统的型钢劲性骨架用钢量大且无法像一般支架一样回收,使建桥费用急剧上升,即使在相对人工费用较高、材料费用较低的发达国家也很少采用。在我国,20世纪80年代提出了“半刚性”劲性骨架的施工方法,减少了用钢量,然而如何保证劲性骨架的刚度、现浇混凝土拱圈的线形和施工过程中的安全,并没有得到很好解决。随着钢管混凝土拱桥的出现,我国将钢管混凝土作为劲性骨架的施工方法,才较好地解决了这些问题,也使劲性骨架法成为大跨径混凝土拱桥中最具有竞争力的施工方法。如我国跨径最大与第三的重庆万州长江大桥(420m)与广西邕宁邕江大桥(312m)都采用了这种施工方法。当然,在大跨径混凝土拱桥的施工中,这种方法还存在着现浇混凝土数量较大、施工周期长、人工用量大等缺点,这些问题还有待今后改进。

## 5.4 转体施工法

转体施工法又可分为水平转体施工法和竖向转体法。水平转体法可将桥跨建造转移到岸上拼装或浇筑,然后平转到桥轴线处合龙,最早出现在T构、斜拉桥之中,只有我国将其应用于拱桥之中,因此可以说它是一种极具中国特色的拱桥施工方法,在许多特定条件下能取得很好的效果。

水平转体法又可分为有平衡重和无平衡重两种。有平衡重于跨径不大的混凝土拱桥之中,但是由于

地质条件的限制,其也运用于大跨径混凝土拱桥的施工,9座(跨径大于等于100 m)应用转体施工的拱桥中有4座使用了有平衡重转体施工法;无平衡重用于跨径较大的混凝土拱桥之中,9座(跨径大于等于100 m)应用转体施工的拱桥中有5座使用了无平衡重转体施工法。在7座跨径在200 m以上的钢筋混凝土拱桥中,只有重庆涪陵乌江大桥(200 m)采用了无平衡重的水平转体法。为减轻混凝土拱桥转体的重量,采用了钢筋网片拱,转体时仅转体由钢筋网片制作的很薄的底板和内外侧板,转体合龙后再浇筑底板、填充腹板和浇筑顶板,钢筋网片中混凝土保护层太薄、制作难度较大,所以已较少采用。

竖向转体施工国外主要以拱肋竖向立起拼装或浇筑,然后下放转体到位;我国则主要采用低位拼装或浇筑然后上提到位的方法,且主要应用于钢管混凝土拱桥之中,由于混凝土拱桥自重较大,上提法所需的动力也较大,在我国的混凝土拱桥中还未见应用。

### 5.5 支架法

支架法大都应用于较小跨径、不通航或通航要求不高、水深较浅等条件。20世纪的60、70年代,由于受到经济条件的制约,该方法在我国得到了一定程度的应用,但在现今的大跨拱桥中已较少采用。采用支架法施工的跨径超过200 m的钢筋混凝土拱桥仅有河南许沟大桥,该桥跨径为220 m,由于受到桥址地形、周围环境的制约,无法采用悬臂法和转体法进行施工。

综上所述,斜拉悬臂施工法是我国大跨径钢筋混凝土拱桥施工最主要的方法,但主要采用悬臂拼装法,悬臂现浇法仅有1座采用;劲性骨架法采用钢管混凝土结构后,能适应于较大的跨径,但施工工艺繁琐、施工工期相对较长,文献[23]的分析表明,它在现有技术条件下已较难突破更大的跨径;转体法适应的跨径范围有限;支架法适应的跨径更小,且造价高,施工工期长,人力物力损耗大。

从国外近期对超大跨径混凝土拱桥的研究来看,悬臂施工法还是其主要的选择,但一般考虑了组合的方法,如拱顶段用劲性骨架,边段用斜拉悬臂或悬臂桁架;有时配合主拱圈的构造,边段用全截面,跨中用中截面先合龙等。在悬臂法中,斜拉悬臂现浇法仍然是最主要的方法。因此,在施工方法上,在发扬已有的传统与优势方法的同时,要积极探索斜拉悬臂浇筑方法和组合施工法。

## 6 结论

(1) 我国大跨度混凝土拱桥建设已取得了很高的技术成就,本文收集到的跨径不小于100 m的混凝土拱桥(截止2007年8月)有199座,其中跨径不小于150 m的有56座,不小于200 m的有8座,不小于300 m的有3座。无论数量还是跨径,我国大跨径混凝土拱桥建设成就均名列世界第一。然而,近期混凝土拱桥的研究与应用在国内与其他桥型相比相对落后。日本和克罗地亚等国近期对超大跨径混凝土拱桥的研究十分活跃,我国应该认真学习、加强合作、抓紧研究,努力保持我国在大跨径混凝土拱桥方面的技术优势,努力使混凝土拱桥在我国交通建设中继续发挥其应有的作用。

(2) 我国混凝土拱桥已取得的主要技术成就在结构的轻型化和施工方法的进步上。早期以结构轻型化为主,适应了当时的经济社会形势,但轻型拱在使用中也暴露出结构上的缺陷,加固任务十分繁重。近20~30年大跨度混凝土拱桥主要采用箱形拱和箱肋拱结构,技术进步更是主要体现在施工方法上。大吨位、大跨径缆索吊装系统的开发、千斤顶斜拉扣挂技术;采用钢管混凝土作为劲性骨架;将水平转体应用于拱桥施工,从有平衡重向无平衡重发展等,都是极具中国特色与优势的拱桥施工技术。

(3) 从现有技术条件来看,跨径在160 m及以下跨径的混凝土拱桥已有大量的修建,技术已日趋成熟,在山区中有着良好的经济性,是目前混凝土拱桥最具竞争能力的跨径范围。跨径在161~199 m时,有一定的技术难度,但也不难克服,是较具竞争能力的跨径范围。跨径在200 m以上时,可以说有相当的技术难度,其竞争力要依具体的工程情况而定。从世界范围看,跨径大于300 m的混凝土拱桥,其技术还处于研究阶段。

(4) 混凝土拱桥的结构中,有推力的拱桥占绝大多数,上承式无铰拱要占总数的一半以上。特别适用于山区地形与地质,在西南地区得到大量的应用,在西部交通建设中还将发挥着极其重要的作用。

(5) 在主拱结构中,矢跨比多在 $1/5 \sim 1/8$ 之间,以 $1/6$ 居多,也较合理。拱轴线形多为悬链线和抛物线。上承式无铰拱和中承式无铰拱几乎全部采用悬链线,抛物线在轻型拱中应用较多。主拱截面以箱形为主。

(6) 施工方法中,采用悬臂法的占到60%以上;其

余3种方法(劲性骨架法、支架法、转体法)大致接近。悬臂施工法中以斜拉悬臂法为主,悬臂桁架法主要用于预应力桁式组合拱。斜拉悬臂法中又以斜拉悬臂拼装为主,斜拉悬臂浇筑仅在1座桥中应用。将钢管混凝土作为劲性骨架的施工方法,是目前大跨径混凝土拱桥中最具有竞争力的施工方法。转体法中,水平转体法仅在我国采用,在许多特定条件下能取得很好的效果,但适用跨径范围有限;竖向转体法在我国主要应用于钢管混凝土拱桥之中,在混凝土拱桥中还未见应用。

(7) 拱桥的发展,在结构方面应以减轻结构自重为主要目标。在减轻主拱自重方面,一是使用高强混凝土材料(如RPC材料);二是向宽箱、少箱发展,以减少腹板的体积;三是采用变截面;四是采用钢-混凝土组合结构,如钢腹板(杆)-混凝土组合拱新桥型。在减轻拱上建筑自重方面,可以采用钢-混凝土组合结构作为桥道系。

(8) 在施工方面,悬臂施工法还是其主要的选择,在发扬斜拉悬臂拼装法的传统与优势的同时,要积极探索斜拉悬臂浇筑方法和组合施工法。对于更大跨径的拱桥,应探索组合施工法,如拱顶段用劲性骨架,边段用斜拉悬臂或悬臂桁架;有时还可配合主拱圈的构造,边段用全截面,跨中用中截面先合龙等。

#### 参考文献:

- [1] Chen Baochun. State of the Art of the Development of Arch Bridges in China[C]. Proceedings of the 4th International Conference on New Dimensions of Bridge, 24 - 25 October 2005, Fuzhou, China, 13 ~ 24.
- [2] 陈宝春. 拱桥技术成就与展望[C]. 第二届全国公路科技创新高层论坛论文集, 2004.
- [3] 陈宝健, 许有胜, 陈宝春. 日本钢筋混凝土拱桥调查与分析[J]. 中外公路, 2005(4).
- [4] 袁保星, 陈宝春. 日本上承式500 m混凝土坦拱试设计[J]. 世界桥梁, 2005(4).
- [5] 王远洋, 陈宝春. 1 000 m跨径混凝土拱桥研究[J]. 世界桥梁, 2005(1).
- [6] 陈昫明, 陈宝春, 吴炎海, 等. 432 m活性粉末混凝土拱桥的设计[J]. 世界桥梁, 2005(1).
- [7] 陈宝春, 黄卿维. 600 m跨径混凝土拱桥的试设计研究[J]. 中外公路, 2006(1).
- [8] 中国铁路桥梁史编委会. 中国铁路桥梁史[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987.
- [9] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [10] 项海帆. 中国桥梁[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.
- [11] 楼庄鸿. 楼庄鸿论文集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [12] 中华人民共和国交通部. 中国桥谱[M]. 北京: 外文出版社, 2002.
- [13] 中国大桥编写组. 中国大桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [14] 顾懋清, 石绍甫. (公路桥涵设计手册) 拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [15] 陈宝春, 杨亚林. 钢管混凝土拱桥应用概况分析[C]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会2005年全国桥梁学术会议论文集, 2005.
- [16] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥(第2版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [17] 李晓辉, 陈宝春. 大跨径拱桥的发展[J]. 世界桥梁, 2007(1).
- [18] 陈宝春. 超大跨径混凝土拱桥探索研究[C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会第十七届年会论文集, 2006.
- [19] 陈宝春, 王远洋, 黄卿维. 波形钢腹板混凝土拱桥新桥型构思[J]. 世界桥梁, 2006(4).
- [20] 黄卿维, 陈宝春. 160 m跨径波形钢腹板混凝土拱桥试设计[J]. 中外公路, 2007(2).
- [21] Z. Zhang, X. Niao, D. Nie, W. He and B. Pei. Construction Techniques of the Arch Ring of Panzhuhua Baishagou Bridge[Z]. Proceedings of the Fifth International Conference on Arch Bridge, 12 - 14, Sept. 2007, Madeira, Portugal: 783 ~ 790.
- [22] Jure Radic, Zlatko Savor, Alex Kindij. Development of Arch Bridge[Z]. Proceedings of the 4th International Conference on New Dimensions of Bridges. 24 ~ 25 October 2005, Fuzhou, China, 249 ~ 256.

## 江苏沿海高速通榆河大桥箱梁开始吊装

近日,江苏沿海高速公路阜宁连接线通榆河大桥开始箱梁吊装施工,目前已完成了一孔8片箱梁的吊装任务。通榆河大桥是江苏沿海高速阜宁连接线的控制性工程,桥梁主跨径为86.8 m,全长596.8 m,主桥为下承式钢管混凝土系杆拱,引桥为装配式预应力混凝土组合箱梁。自2007年初开工建设以来,大桥钻孔灌注桩、立柱等下部结构已经全部完工,上部结构已完成箱梁预制30片。

摘自:《中国交通报》2008.02.25