

# 中国钢拱桥发展现状调查与分析

陈宝春<sup>1</sup>, 陈康明<sup>2</sup>, 赵秋<sup>1</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002; 2. 长崎大学 工学部社会开发工学科)

**摘要:** 该文简要回顾了我国钢拱桥的发展历程, 收集了大量中国已建和在建的钢拱桥的基本资料, 对其数量、跨径、结构形式、主拱构造、施工方法等方面进行分析与总结, 并将其与混凝土拱桥、钢管混凝土拱桥进行对比。分析结果表明: 2000年以来中国钢拱桥发展很快, 数量迅速增加, 且以大跨径为主。从总体数量来看, 跨径在200 m以下的建得最多, 但与钢管混凝土拱桥和钢筋混凝土拱桥相比, 跨径350 m以上有较强的竞争力。结构方面基本上为无铰拱, 中下承式达80%以上。矢跨比以1/4~1/5最多, 拱肋以箱形为主, 桁肋为辅, 桁肋的杆件也以箱形截面为主, 没有型钢或钢管杆件。施工方法以悬臂和支架法为主, 也发展了其他的施工方法。

**关键词:** 钢拱桥; 现状; 调查; 分析; 结构; 跨径; 施工; 中国

拱桥在中国有着悠久的历史。由于其结构形式多样、造型美观、刚度较大等特点, 长期以来是中国主要桥型之一, 即使在桥型选择日益丰富的近30年大建设时期, 拱桥在中国仍有大量的修建, 并在设计、施工等方面取得了举世瞩目的成绩。按主拱的建筑材料划分的4类拱桥的跨径纪录均在中国, 它们分别是主跨径146 m的山西丹河新桥(石拱桥)、主跨径420 m的万州(县)长江大桥(钢筋混凝土拱桥)、主跨径460 m的巫峡长江大桥(钢管混凝土拱桥)和主跨径552 m的重庆朝天门大桥(钢拱桥)。在拱桥施工技术方面, 世界上各种拱桥施工方法在中国几乎均有应用, 其中水平转体施工、大跨径和大吨位的悬臂拼装等技术为中国特有的施工技术。

2000年以前, 钢拱桥在中国修建较少。2000年以后, 钢拱桥的应用日益增多。相比于其他拱桥, 钢拱桥在中国大量应用的时间还较短, 设计、制作与架设等方面的经验积累与总结还不够, 理论研究 with 规范制定还有许多工作要做。有鉴于此, 笔者正组织国内外专家学者编写《钢拱桥》一书, 分别对美国、日本、欧洲和中国的钢拱桥设计施工进行介绍。在该书编写过程中, 收集了大量的钢拱桥资料。应用这些资料, 该文对中国钢拱桥的发展进行了简要的回顾, 从数量、跨径、结构形式、施工方法等方面, 对钢拱桥进行统计分析, 为钢拱桥的进一步研究和应用提供参考。资料收集截止时间至2010年7月, 分析的对象为跨径不小于100 m

的钢拱桥, 以收集到的数据作为统计分析的依据。

由于社会的发展与桥梁技术水平的提高, 曾经是主要桥型的石拱桥在中国的修建日益减少, 钢拱桥与钢管混凝土拱桥和混凝土拱桥(包括钢筋混凝土拱桥和预应力混凝土拱桥), 已成为中国近几十年来拱桥的3大主要桥型。文献[3]、[4]分别以2005年3月和2007年8月为截止时间, 对中国钢管混凝土拱桥和钢筋混凝土拱桥进行了技术统计分析, 分析的对象也是跨径不小于100 m的桥梁。该文将在文献[3]、[4]的基础上, 通过补充近几年的资料, 开展钢拱桥与钢管混凝土拱桥和混凝土拱桥的对比分析。

## 1 发展概述

拱桥的发展与建筑材料的发展紧密相关。在铁和钢得到工业化生产后, 在桥梁中都是以拱桥的应用为开始, 因为拱桥是当时大跨径桥梁的最主要桥型。世界上第一座铸铁拱桥出现在英国(Iron Bridge, 建成于1779年), 第一座钢拱桥出现在美国(Eads桥, 建成于1874年)。期间在欧洲还修建了许多锻铁拱, 比较著名的有埃菲尔(Gustave Eiffel)和他的学生设计建造的埃菲尔拱, 如位于法国马塞夫(Massif)的盖拉比特(Garabit)桥, 跨径165 m, 建成于1884年; 位于葡萄牙的玛丽亚·皮亚(Maria Pia)桥, 跨径160 m, 建成于1877年。

Eads 桥建造成功之后, 钢拱桥在世界范围内得到了较大的发展。1916 年美国建成了主跨 298 m 的纽约狱门(Hell Gate)桥。1932 年澳大利亚建成了主跨 503 m 的悉尼港(Sydney Harbor)桥。之后, 美国又修建了主跨 504 m 的培虹(Bayonne)桥和主跨 518.3 m 的新河谷桥(New River Gorge)。

与国外钢桥相比, 中国钢拱桥起步较晚。中国最早出现的钢拱桥可能是天津的大红桥。1887 年该桥由原木桥改为单孔钢拱桥, 1924 年被洪水冲走。1933 年筹建新的大红桥, 1937 年建成。新大红桥共 3 孔, 主孔为 57.37 m 的下承式钢拱桥, 至今仍在使用。

长期以来, 由于材料短缺与工业化落后的原因, 钢拱桥在中国较少建造。为数不多的钢拱桥以跨大江大河的铁路桥为主。在建国初期, 武汉长江大桥钢结构使用苏联进口钢材建造, 当时中国还没有能力生产合格的桥梁用钢, 后来为南京长江大桥的修建开发了 16Mn 钢, 也称为“争气钢”。但 16Mn 钢的板厚效应很大, 钢材的强度、韧性随板厚的增加下降很快。1976 年在沙通线白河桥试用了新开发的 15MnVNq 钢材建造, 由于 15MnVNq 钢材(屈服强度 420 MPa)可焊性差, 后来仅在 1992 年京九线上的九江大桥(连续刚性钢桁梁与柔性钢拱)上使用, 形成了中国桥梁用钢仅有 16Mnq 可用的被动局面。

公路钢拱桥修建更少, 早期比较有代表性的有攀枝花 2 号桥和 3 号桥。前者又叫渡口大桥, 为钢箱拱, 1966 年建成, 主跨 180 m。后者又叫密地大桥, 为钢桁拱, 主跨也是 180 m, 1969 年建成。这两座桥的拱肋均采用 16Mn 钢。

改革开放以来, 中国的钢产量不断增加, 现已成为世界第一。与此同时, 钢材的种类也逐渐丰富起来。目前, 中国桥梁用钢以 Q345q 和 Q370q 为主流钢种, Q420q 钢材使用逐渐增多, 有向高强度钢材发展的趋势。在大规模的基础设施建设中, 钢桥的修建日益增多, 在大跨径的钢斜拉桥、悬索桥的应用不断增多的同时, 也开始了在钢拱桥中的应用。这与国外钢桥的发展过程有所不同。

2003 年, 上海在黄浦江上建成了大跨径的钢拱桥(卢浦大桥), 一下子将中国钢拱桥跨径的纪录跃升到世界第一。卢浦大桥的主桥为一跨过江的中承式全钢结构的系杆拱桥, 全长 750 m, 中跨 550 m, 中跨矢跨比  $f/L=1/5.5$ , 两边跨为 100 m 的上承式拱梁结构。主桥钢结构采用德国可焊接细晶粒钢工业标准(DIN10113—1993 标准)生产的 S355N 正火结构钢。

在卢浦大桥建成之后, 又有几座大跨径的钢拱桥相继建成, 如主跨 428 m 的广州新光快速路的江海特大桥(钢桁拱, 2007), 主跨 420 m 的重庆菜园坝长江大桥(钢箱拱, 2007), 现在拱桥跨径世界第一的主跨 552 m 的重庆朝天门大桥(钢桁拱, 2007), 主跨 400 m 的沪蓉西高速公路大宁河特大桥(钢桁拱, 2010)等。

表 1 为跨径不小于 150 m 的 27 座钢拱桥的简要情况。

表 1 主跨不小于 150 m 的钢拱桥一览表

序号	桥名	主跨/ m	建成 年份	结构 形式
1	广州珠江白沙河大桥	150	2008	中承式
2	台 4 线茨津大桥	150	2002	下承式
3	屏东东港进德大桥	155	2001	下承式
4	台北关渡大桥	165	1983	中承式
5	台北基隆河大桥	166	—	双层
6	台北梦帅一桥	170	2001	双层
7	宁波姚江大桥(湾头大桥)	180	2009	下承式
8	攀枝花 2 号桥(渡口大桥)	180	1966	上承式
9	攀枝花 3 号桥(密地大桥)	180	1969	上承式
10	台湾桃园县巴陵大桥	185	2005	中承式
11	福厦客专线闽江特大桥	198	2009	中承式
12	厦门钟宅湾大桥	208	2004	中承式
13	杭州九堡大桥	210	在建	下承式
14	台北市梦帅二桥	210	1996	下承式
15	九江长江大桥	216	1992	双层
16	厦深客专线榕江特大桥	220	在建	中承式
17	武广客专线珠江东平水道桥	242	2009	中承式
18	南宁大桥	300	2009	中承式
19	佛山东平大桥	300	2006	中承式
20	京沪高速南京大胜关长江大桥	336	2009	中承式
21	宜万铁路万州长江大桥	360	2005	中承式
22	沪蓉西高速大宁河特大桥	400	2010	上承式
23	重庆菜园坝长江大桥	420	2007	中承式
24	广州新光大桥	428	2006	中承式
25	宁波东外甬江大桥	450	在建	中承式
26	上海卢浦大桥	550	2003	中承式
27	重庆朝天门大桥	552	2007	中承式

注: “—”表示相关资料暂缺。

## 2 数量与跨径

该文共收集了 65 座钢拱桥的资料, 其中跨径不小于 100 m 的有 52 座, 清楚建成年份(包括正在建设中)

的共有46座。图1给出了不同时期修建的钢拱桥跨径,其中给出的桥名是部分具有代表性的桥梁。图2为在各分段跨径范围内钢拱桥建造的数量(包括了中国台湾地区的钢拱桥)。虽然台湾与大陆的钢拱桥发展历程并不完全一致,但由于台湾钢拱桥总量并不多,对于统计分析的总体趋势影响不大。

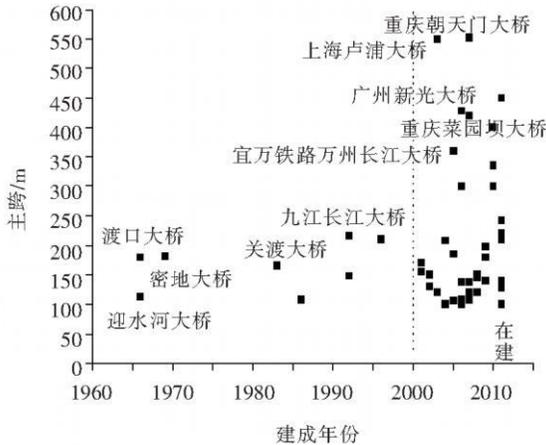


图1 钢拱桥跨径及修建年份图

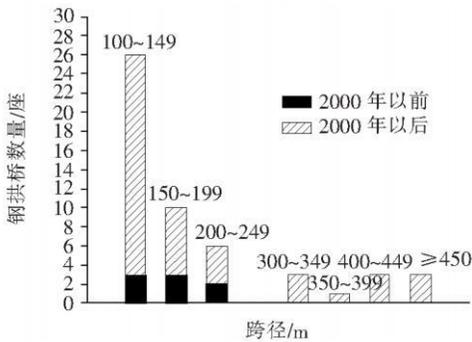


图2 跨径分布柱状图

从图1可以看出,中国钢拱桥的发展可以以2000年为界。在2000年以前调查到的钢拱桥只有8座,最早的建成时间为1966年,历时35年,所建造数量占总数的17.4%;最大跨径的是九江长江大桥,主跨216m,还是钢桁梁为主的梁拱组合桥,与国外钢拱桥、中国的钢筋混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥相比,均落后许多。

2000年以后,中国钢拱桥建造数量迅速增加,短短10年,已建成和在建的跨径不小于100m的钢拱桥有38座,占总数的82.6%,且以大跨径为主,平均跨径达到216m。2003年卢浦大桥的建成通车,将中国钢拱桥的跨径提高到550m,成为当时世界上最大跨径的钢拱桥。2007年重庆朝天门大桥又将这一纪录刷新成了552m。

从图2可见,就跨径来说,中国钢拱桥跨径100~149m范围内建造的数量最多,共计26座,占总数的50.0%;跨径150~199m范围内的钢拱桥共10座,占总数的19.2%;跨径200~249m范围内的钢拱桥共6座,占总数的11.5%;跨径250~299m范围内的钢拱桥目前空白;跨径300~349m、400~449m范围内及大于等于跨径450m范围内的钢拱桥各3座,各占总数的5.8%;跨径350~399m范围内的钢拱桥共1座,占总数的1.9%。

总体来看,可以以250m为跨径的分界线。跨径在250m以下的应用较多,共有42座,占总数的80.8%。250m及以上跨径的,应用较少,共计10座,仅占19.2%。

为了进行中国钢拱桥、钢管混凝土拱桥和混凝土拱桥的建造数量和跨径两方面的对比分析,截止2010年7月,以跨径不小于100m的拱桥为分析对象,共收集到钢拱桥52座,钢管混凝土拱桥180座,混凝土拱桥203座。其中上述所收集到的桥梁资料中清楚具体建成年份,但不包括在建项目在内,钢拱桥有39座,钢管混凝土拱桥158座,混凝土拱桥为148座。以上述资料作为分析对象,绘制了上述3类拱桥建造数量和建造跨径的发展趋势图(图3、4)。

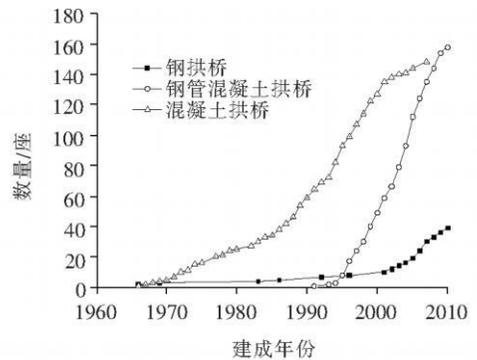


图3 3类拱桥建造数量发展趋势图

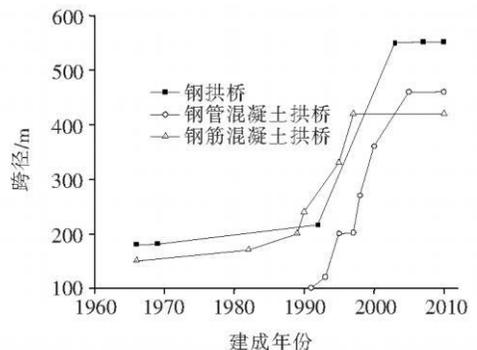


图4 3类拱桥跨径发展趋势图

由图 3 可知,从建造时间来说,混凝土拱桥自 1965 年(指跨径突破 100 m)以来,修建数量不断上升,尤以 1985—1998 年期间发展最为迅速,此后数量增长趋势放缓。钢管混凝土拱桥从 1990 年以来,短短 20 年时间修建了 300 多座,平均每年建造有 10 座以上,发展速度在这 3 类拱桥中速度最快,而且增长率为均匀。钢拱桥在 2000 年以前发展缓慢,而在 2000 年以后,有明显的增加,但总量与其他两种拱桥相比,还较少。

由图 4 可知,在跨径方面,混凝土拱桥 1965 年建成的文本经渡桥突破了 100 m,次年北京永定河 7 号桥跨径已达 150 m。从 1966—1989 年重庆涪陵乌江大桥的建成,经 23 年的时间跨径仅增长 50 m,增速较缓慢,主要受制于施工方法和建筑材料的紧缺。而前南斯拉夫(今克罗地亚)早在 1966 年和 1967 年就修建了跨径分别达 246.4 m 和 193.2 m 的 Sibenik 桥和 Pag 桥。1979 年建成的 Krk1 号桥和 2 号桥组成跨径分别达到 390 m 和 244 m。相比较而言,在 1990 年之前,中国虽然混凝土拱桥修建数量较多,但跨径不大,技术水平不高。20 世纪 90 年代以后,中国混凝土拱桥的技术进入快速发展时期,1997 年重庆万县长江大桥建成,跨径达 420 m,一跃而成为世界第一,8 年时间跨径增大了 220 m。1997 年之后随着混凝土拱桥建造数量的减小,跨径也没有新的突破。近期在铁路上有数座跨径在 400 m 以上的混凝土拱桥正在设计之中,将有力地推动中国混凝土拱桥的技术进步。与此同时,为提高混凝土拱桥的跨越能力,目前正在进行活性粉末混凝土(RPC)、钢腹板(杆)混凝土箱形拱新材料、新结构的研究,能有效地降低结构(特别是主拱)的自重,有望使中国混凝土拱桥的跨越能力得到明显的提高。

钢管混凝土拱桥发展的时间虽然较短,但其跨径增大的速度一直很快。2005 年建成的四川巫山长江大桥,将钢管混凝土拱桥的跨径推到 460 m。目前正在建的一座跨径已超过了 500 m,其跨径发展还有相当的空间。

对于钢拱桥,1966 年攀枝花 2 号桥(渡口大桥)跨径已达 180 m,到 1992 年九江长江大桥的建成,经过 26 年的时间跨径增长 36 m,跨径增速相对缓慢。2003 年上海卢浦大桥建成,经 11 年时间跨径增长 234 m,属于跳跃式发展。根据理论推算,按现有的材料技术水平,钢拱桥的极限跨度可达 1 200 m。因此钢拱桥的跨径还有较大的发展空间。

图 5 为 3 类拱桥在各跨径区间内分布的数量。从图 5 可以看出,跨径 100~200 m 范围内,这 3 类拱桥均占比较大的比重,数量顺序从大到小为混凝土拱桥、钢管混凝土拱桥和钢拱桥。在 200~349 m 跨径范围内,钢管混凝土拱桥数量最多,竞争力最强,另二类拱桥数量相当。在 350~499 m 跨径范围内,钢拱桥与钢管混凝土拱桥数量相当,均为 5 座,而混凝土拱桥修建较少,只有 1 座。

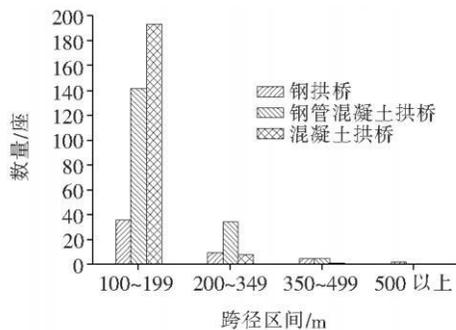


图 5 3 类拱桥跨径区间分布比较

从统计资料来看,跨径 200 m 以下,混凝土拱桥竞争力最强;200~349 m 之间,钢管混凝土拱桥竞争力最强;350~500 m 之间,钢管混凝土拱桥与钢拱桥竞争力相当;跨径在 500 m 以上,钢拱桥竞争力最强。

## 3 结构与构造

### 3.1 总体结构形式

钢拱桥结构形式丰富。按主拱结构的受力特点,它可分为三铰拱、无铰拱(固定拱)、单铰拱、二铰拱。单铰拱与三铰拱在跨中有铰,拱顶的下沉会加剧桥梁在车辆冲击下的损坏,而且跨中铰的维修和构造均较困难,国外少有修建,中国则没有修建。国外钢拱桥较常见的是二铰拱和无铰拱,其中二铰拱修建的年代一般较早。中国由于钢拱桥起步较晚,二铰拱除了较早的几座小跨径人行桥和管道桥外,基本上均采用无铰拱。

根据桥面系与主拱结构的相对位置,钢拱桥可分成上承式、下承式、中承式以及双层式(双层桥面)。在中国 45 座钢拱桥中,上承式拱 3 座,占总数的 6.7%;中承式 28 座,占总数的 60.0%;下承式 12 座,占总数的 26.6%;另双层式有 3 座,占总数的 6.7%。

上承式拱由主拱圈(肋)和拱上建筑(拱上立柱和桥道系)组成。为了与主拱的轻型高强相适应,钢拱桥的拱上建筑以钢结构为主,桥道系有时也采用钢—混凝土组合结构。由于在适合修建上承式钢拱桥的地

方,若不考虑施工条件及工期等的影响,通常都会采用更为经济的钢筋混凝土拱桥或钢管混凝土拱桥形式,因此,在中国已建的钢拱桥中,上承式钢拱桥较少。

平原地区修建的拱桥多采用中下承式,钢拱桥由于自重轻,相比于混凝土拱有较大的优势,因此修建得较多。从统计资料看,中国钢拱桥中承式和下承式合计占总数的88.9%,特别是中承式比较多。这与钢管混凝土拱桥相似,在钢管混凝土拱桥中,上承式仅占8%,中、下承式占了82%。而混凝土拱桥中,上承式占了半数以上。

著名的结构专家林同炎曾经说过“拱是结构也是建筑”。拱桥总是能令人赏心悦目而又清晰地表达出它的功能,它极易融入环境和满足大众的审美习惯与需求。因此,拱受到广大桥梁设计师尤其是建筑师的喜爱。钢拱桥的高强轻型等特性更能满足建筑师们对建筑结构造型的追求,促使钢拱结构的形式不断变化与翻新,如斜靠拱、蝶形拱等,但这些桥梁多出现在规模较小或荷载较轻的中小跨径道路桥梁或人行桥中。

中国在钢拱桥的应用中也出现了追求造型的趋势,主要实现手段有:1)拱肋反常规的直立或内倾为外倾,通过斜靠或吊杆拉索以求得平衡;2)大小拱的空间组合;3)拱轴线的变形。应用较多的有斜靠拱、蝶形拱、新月形拱等。在这些造型中,存在着以下几个主要问题:1)以模仿为主,原创性的造型不多,如斜靠拱在中国的滥用;2)将应用于人行桥中、结构受力不尽合理的结构,盲目地照搬到大规模的交通桥梁之中,如广西的南宁大桥的蝶形拱;3)以求异为主要目的,没有从美学与结构的基本受力原理出发,结果造型不见得美观,而结构性能却不好,费用却是惊人地增加。

### 3.2 主拱矢跨比

矢跨比是拱结构一个重要的结构参数。对已收集到的中国钢拱桥的矢跨比进行统计分析,矢跨比的使用情况见图6。

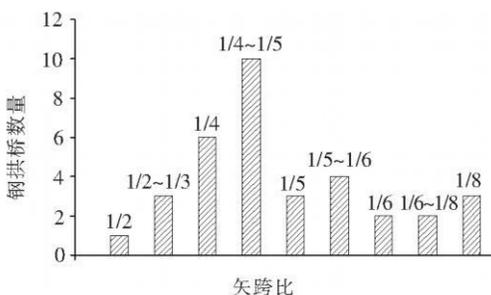


图6 钢拱桥矢跨比分布

由图6可知,中国钢拱桥矢跨比分布为1/2~

1/8,分布范围较宽,其中以1/4~1/5(含1/4)最多,超出此范围的矢跨比(如1/2或1/8)多在小跨径拱桥中使用。矢跨比与跨径之间没有直接联系(图7)。

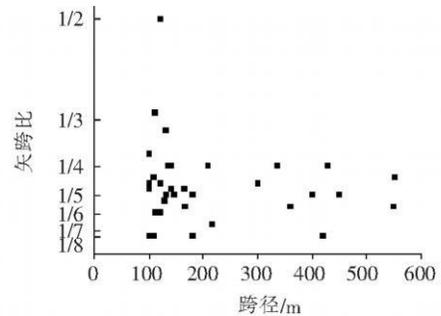


图7 矢跨比与跨径关系

在中国,混凝土拱桥的矢跨比多在1/5~1/8之间,以1/6居多。而钢管混凝土拱桥,其矢跨比多在1/4~1/5之间,以1/5最多。相比较而言,钢拱桥的矢跨比略高些。对于抛物线拱,文献[18]以在主拱上的恒载与活载的比值作为参数,利用变分法来分析,得到如图8所示的钢重与f/L及g/p的关系(图8)。可以看出,当矢跨比在1/5~1/6.5范围内变化时,钢材用量较小,其用钢量的变化受恒载与活载的比值影响较大。中国钢拱桥常用的矢跨比是否合理,还有待进一步的研究。

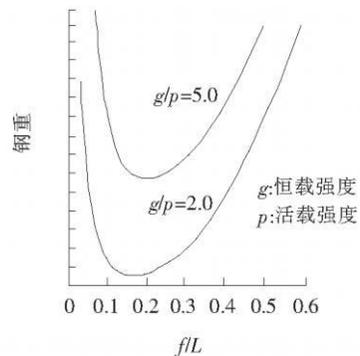


图8 钢重与 f/L 及 g/p 的关系

### 3.3 拱轴线

为最大限度地发挥拱的受压作用,设计中常希望拱轴线等于或接近于恒载压力线。在收集到的52座跨径大于100m的钢拱桥中,扣除几座未知拱轴线的拱桥和一些提篮拱、异形拱,共有24座已知拱轴线形式(表2)。

由表2可知,大多数钢拱桥采用抛物线和悬链线,少数采用圆曲线、椭圆曲线或圆曲线与抛物线相结合等其他曲线。其中采用抛物线的有14座,占总数的58.3%;悬链线的有6座,占总数的25%;仅有4座采

表 2 钢拱桥拱轴线统计

拱轴线形式	数量/座	百分比/%
抛物线	14	58.3
悬链线	6	25.0
其他	4	16.7

用其他曲线,占 16.7%,可见抛物线是中国钢拱桥最主要的拱轴线。混凝土拱桥大多数采用悬链线和抛物线,以悬链线为主,少数采用圆弧线等其他曲线。钢管混凝土拱桥的拱轴线同样大多数为悬链线和抛物线,以悬链线最多,但悬链线所占比例小于混凝土拱桥。然而在钢拱桥中,由于上承式钢拱桥较少,且拱上建筑轻型化,恒载更接近于均布,因此抛物线用得更多。

### 3.4 主拱截面

拱肋断面可分为实肋和桁肋。实肋与桁肋的区别在于后者有腹杆,而前者没有。对已知截面形式的 39 座跨径大于 100 m 的钢拱桥进行分类,简单地将其截面形式划分为箱拱与桁拱,其中箱肋拱 25 座,占总数的 64.1%;桁拱 14 座,占 35.9%。可见中国钢拱桥的拱肋截面以箱形为主。

实肋构造简单,免除了节点问题,杆件少,造型简洁。但跨径大时,腹板的材料性能没有得到充分发挥,且由于拱以受压为主,板的局部屈曲问题会导致加劲材料用量较大,同时,施工节段吊装重量较大,因此实肋一般应用于跨径较小的拱桥中。

实肋截面常用的形式有工字与 H 形、圆管和箱形。国外中小跨径的钢拱桥有用工字形和圆管截面的,但中国基本上没有采用。实肋拱应用于跨径较大时,一般用箱形截面。中国的箱形拱肋以矩形箱为主,个别采用了八边形(西安市灞河 1 号桥)和椭圆形(中山市长江大桥、拉萨市柳梧大桥),跨径更大的有时采用双室箱,如上海卢浦大桥(跨径 550 m)、宁波市东外甬江大桥(跨径 450 m)。

桁式拱肋能充分发挥钢弦杆的高强性能,截面效率高且刚度大,重载交通的公路桥和活载较大的铁路钢拱桥多采用这种拱肋形式。同时,桁式拱肋各个构件较之实体肋要小,因此其制作、运输和安装都较实体肋更为方便,但施工工序多,杆件杂可能影响美观。

桁肋的弦杆截面形式与实肋截面相似,也常用有工字与 H 形、圆管和箱形。中国近几年修建了几座钢桁拱桥,跨径均较大,因此多采用箱形截面作为桁肋的构件,而采用工字、H 形和圆管截面的极少(圆管均内填混凝土成为钢管混凝土结构)。

## 4 结构与构造

与钢管混凝土拱桥和钢筋混凝土拱桥相似,支架法、悬臂施工法和转体施工法也是中国钢拱桥最常用的施工方法。除上述 3 种方法外,由于构件自重相对较轻、刚度较大,还有一些其他施工方法,如整体顶推法和大节段吊装法等。对已收集到的桥梁资料进行统计分析,各施工方法所占的比例见表 3,施工方法与跨径之间的关系见图 9。

表 3 钢拱桥施工方法统计

施工方法	数量/座	百分比/%
支架	13	41.9
悬臂拼装	14	45.2
转体施工	2	6.5
其他	2	6.4

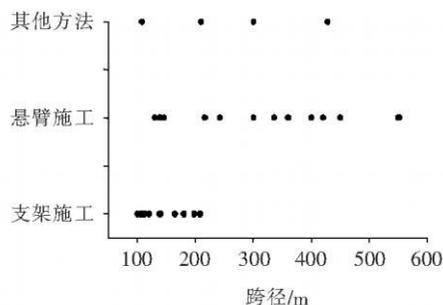


图 9 施工方法与跨径的关系

从表 3 可知,支架施工法占有相当的比例(41.9%)。它主要用于跨径不大的桥梁(图 9),特别是刚梁柔拱的铁路桥,其加劲梁采用一般梁桥的架设方法完成后,再在其上面搭设支架架设拱肋部分。对于水深较浅、航运要求不高的小跨径钢拱桥,也有采用临时支架的施工方法。

悬臂施工法比支架法应用略多(45.2%),且可适用于大跨径。除了与钢管混凝土拱桥和钢筋混凝土拱桥一样,常用斜拉悬臂方法外,钢桁肋拱有时还采用自由悬臂法。斜拉悬臂施工法中合龙之前的拱肋需要较高较强的扣塔和较强的斜拉索与其共同受力,并且有很强的背索与锚固装置;而自由悬臂法中,这种辅助结构相对较少。京沪高速铁路大胜关特大桥的施工采用了自由悬臂法,中墩不设扣塔靠两主跨对拉悬臂,边墩的扣塔很矮、拉索只有两组。

悬臂与支架施工法,占中国钢拱桥施工方法的主

导地位,共计87.1%,与钢管混凝土拱桥和钢筋混凝土拱桥中这两种施工方法所占的比例相当(分别为82.5%和79.4%)。

尽管中国拱桥的转体施工法是一种具有特色的施工方法,但在应用上总量不是很多,这一方法在钢管混凝土拱桥和钢筋混凝土拱桥中应用分别为14.6%和8.4%,在钢拱桥中的应用比例更小一些,仅占6.5%。

此外,收集到的资料中,有2座采用了其他方法施工。一座是广州新光大桥,采用大段吊装方法施工;另一座是在建的杭州九堡大桥,采用整体顶推法施工。虽然钢拱桥采用其他方法施工的数量不是很多,但它表明钢拱桥由于构件刚度大、相对自重轻,有条件在施工方法上有所创新,以推动拱桥施工技术的进步。

## 5 结语

钢拱桥在中国起步较晚,应用规模还比较小,但是近几年来数量不断增多,钢拱桥跨径不断增大,设计、制作、架设等经验不断积累,研究工作也相应有了进展。中国目前仍处于大规模的交通基础设施建设时期,钢拱桥还有着较大的应用前景。特别对于大跨、高速铁路桥梁对刚度与跨越能力的要求,钢拱桥较之其他桥型有着较大的竞争力。笔者通过对收集到的实际资料进行分析总结,以期对中国钢拱桥的应用现状有一较全面的了解,同时通过对结构主要参数和施工方法等方面的参数分析,为今后这类桥梁的实际应用提供参考。

## 参考文献:

- [1] 陈宝春. 拱桥技术的回顾与展望[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2009(1).
- [2] Baochun CHEN, Construction Methods of Arch Bridges in China[C], Construction of Arch Bridges—Proceedings of 2nd Chinese—Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges, Fuzhou, China, October 5—9, 2009: 1—186.
- [3] 陈宝春, 叶琳. 我国混凝土拱桥现状调查与发展方向分析[J]. 中外公路, 2008(2).
- [4] 陈宝春, 杨亚林. 钢管混凝土拱桥调查与分析[J]. 世界桥梁, 2006(2).
- [5] 陈宝春, 高婧, 吴庆雄. 钢拱桥发展概况[J]. 北京交通大学学报, 2006(S).
- [6] 项海帆, 潘洪萱, 张圣诚, 等. 中国桥梁史纲[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- [7] 陈伯鑫. 中国焊接钢桥的发展[J]. 电焊机, 2007(3).
- [8] 交通部公路局. 中华人民共和国公路桥梁画册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1978.
- [9] 上海市建设和管理委员会科学技术委员会. 卢浦大桥工程[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- [10] 陈宝春, 李生勇, 余健, 等. 大跨度活性粉末混凝土(RPC)拱桥试设计[J]. 交通科学与工程, 2009(1).
- [11] 陈宝春, 余健, 吴庆雄. RPC箱型拱桥设计420m跨径桥梁的地震响应分析[C]. 第四届全国防震减灾工程学术研讨会会议论文集, 2009.
- [12] 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).
- [13] 黄卿维, 陈宝春. 160m跨径波形钢腹板混凝土拱桥试设计[J]. 中外公路, 2007(2).
- [14] 韦建刚, 牟廷敏, 缪锋, 等. 钢腹杆混凝土新桥组合箱拱桥试设计研究[J]. 交通科学与工程, 2009(2).
- [15] 韦建刚, 缪锋, 陈宝春, 等. 钢腹杆混凝土拱桥设计160m跨径桥梁的地震响应分析[C]. 第四届全国防震减灾工程学术研讨会会议论文集, 2009.
- [16] 陈宝春. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [17] 林同炎. 拱是结构也是建筑[J]. 土木工程学报, 1997(3).
- [18] 小西一郎. 钢桥第四分册[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1981.
- [19] 徐伟. 钢桁架刚性拱桥的设计[J]. 桥梁建设, 2006(S1).
- [20] 万鹏, 郑凯锋. 国内外钢拱桥面外稳定检算的相关规定比较[J]. 中外公路, 2005(6).