

# 国外大跨度混凝土拱桥的应用与研究进展

韦建刚<sup>1,2</sup>, 陈宝春<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 介绍了近 10 年(1999 年以来)国外 8 座具有代表性的混凝土拱桥, 在此基础上分析了国外大跨度混凝土拱桥的发展趋势与研究进展。

**关键词:** 拱桥; 混凝土结构; 桥例; 研究; 发展

**中图分类号:** 448. 22

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671 - 7767(2009)02 - 0004 - 05

## 1 概述

在山区、海岛等地形地质条件合适的桥位处, 混凝土拱桥具有很强的竞争力。从国内外的调查来看, 跨度在 200 m 以下的混凝土拱桥已有大量的修建, 技术已日趋成熟, 有着良好的经济性, 是目前混凝土拱桥最具竞争能力的跨度范围<sup>[1,2]</sup>。跨度 200 m 时, 其技术难度较大, 其竞争力要依具体的工程情况而定。跨度 300 m 的混凝土拱桥, 目前仅有 6 座, 其技术还处于发展之中。因此, 本文将研究的对象集中在跨度不小于 200 m 的混凝土拱桥, 并为叙述方便, 称之为大跨度混凝土拱桥。对于跨度超过现有最大跨度 420 m(我国的万州长江大桥)的混凝土拱桥称之为超大跨度混凝土拱桥。

图 1、图 2 统计了世界范围内大跨度混凝土拱桥修建的时间与数量情况。从图 1 可见, 1942 年, 西班牙跨度 210 m 的埃斯拉(Esla)桥建成, 混凝土拱桥跨度首次跃上 200 m 大关; 此后, 1965 年修建的澳大利亚悉尼的格莱兹维尔(Gladesville)桥, 跨度达 305 m, 为第一座跨度上 300 m 大关的混凝土拱桥。1997 年中国万州长江大桥建成, 主跨达 420 m。与埃斯拉桥相比, 格莱兹维尔桥在 23 年后将混凝土拱桥的跨度增大了 95 m(平均每年 4.13 m), 万州长江大桥在 55 年后将跨度增大了 210 m(平均每年 3.82 m)。每年的增长速度在 4 m 左右。然而, 从 1997 年万州长江大桥建成以来, 这一跨度至今没有新的突破。

从建造的年代来看, 大跨度混凝土拱桥的修建数量, 最多的是近 10 年(1999~2008 年), 随后是前一个 10 年(1989~1998 年)和 20 世纪 60 年代。虽然二战以后斜拉桥与现代混凝土梁桥的技术发展很

快, 挤占了混凝土拱桥的空间, 然而大跨度混凝土拱桥的本身技术也得到不断的发展, 应用的数量也越来越多。但近 10 年(1999 年以来)我国仅修建了 2 座大跨度混凝土拱桥, 占全世界总数 14 座的 14%。相对于前一个 10 年(1989~1998 年)来说, 我国大跨度混凝土拱桥所占的比例越来越小<sup>[3]</sup>。

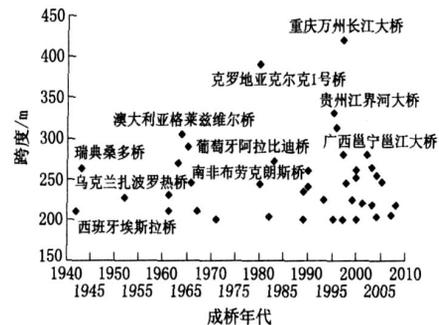


图 1 大跨度混凝土拱桥发展时间

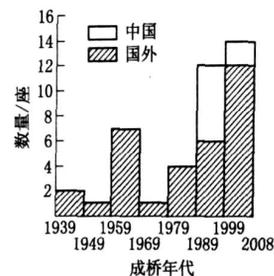


图 2 大跨度混凝土拱桥数量

## 2 国外近 10 年大跨度混凝土拱桥桥例简介

### 2.1 德国维尔德格拉桥和基尔河谷高架桥

维尔德格拉(Wilde Gera)桥是德国跨度最大的混凝土拱桥, 主跨为 252 m, 为公路桥, 跨越维尔德格拉河, 2000 年建成, 如图 3 所示。主拱由双室箱组成, 采用斜拉悬臂法施工。总长 552 m、宽 25.5

收稿日期: 2009 - 01 - 04

基金项目: 福建省科技厅资助项目(JA07014)

作者简介: 韦建刚(1971 - )男, 副研究员, 1994 年毕业于上海交通大学工民建专业, 工学学士, 2002 年毕业于福州大学结构工程专业, 工学硕士, 2007 年毕业于福州大学结构工程专业, 工学博士, 2009 年同济大学土木工程专业博士后(E-mail: weijg @fzu.edu.cn)。

m 的桥道系采用钢 - 混凝土组合结构,由梯形钢箱和厚 20~44 cm 的混凝土桥面板组成。桥道系施工时,钢箱采用顶推法架设。



图3 德国维尔德格拉桥

德国 1999 年建成的混凝土拱桥——基尔河谷 (Kyll Valley) 高架桥见图 4,主拱跨度为 223 m,矢高为 56 m,由 2 个分离的实体矩形截面拱肋组成,截面尺寸从拱脚的 7 m × 3.5 m 减小到拱顶的 7 m × 1.5 m。拱上立柱为分离的双立柱,桥道系为高 1.5 m 的预应力混凝土板梁。上部结构宽 30 m。拱采用有临时支撑加斜拉悬臂进行现浇施工<sup>[4,5]</sup>。



图4 德国基尔河谷高架桥

## 2.2 西班牙洛斯蒂洛斯桥

西班牙洛斯蒂洛斯 (Los Tilos) 桥位于加那利岛,2004 年建成(见图 5)。拱的跨度为 255 m,矢高为 50 m。由于采用了高强混凝土 (C75),拱肋的截面仅为 6 m × 3 m。为了进一步减小自重,立柱采用了同样强度的高强混凝土,12 m 宽的桥道系采用了高 1 m 的钢箱梁和厚 26 cm 的混凝土桥面板的组合结构。桥梁采用悬臂桁架法施工,由每个节间的 2 道临时斜拉索将拱肋、立柱和钢纵梁组成 Pratt 桁架。立柱采用滑模施工,桥道系钢纵梁在已完成的桥面上运输、由移动吊机起吊、旋转 180° 后安装就位<sup>[6]</sup>。

## 2.3 连接挪威与瑞典的斯维纳松德二号桥

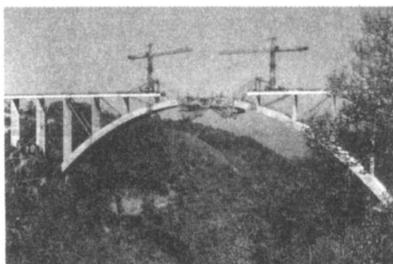


图5 西班牙洛斯蒂洛斯桥施工

斯维纳松德 (Svinesund) 二号桥建成于 2005 年(见图 6),总长 704 m 的桥梁由 1 根细长的混凝土拱肋和悬挂于两侧的 2 个钢箱桥道梁组成。拱的跨度为 247 m,矢高为 30 m。拱肋为箱形截面,拱脚处为 6.27 m × 4.2 m,拱顶处为 4.0 m × 2.7 m。采用斜拉悬臂法施工,每个节段长 5.5 m。钢箱桥面梁采用正交各向异性桥面板,高约 3 m,宽约 11 m,由 6 对吊杆悬挂于拱上,吊杆间距 25.5 m。桥道梁总长 128 m,重达 1 400 t,由船运到工地吊装就位<sup>[7,8]</sup>。



图6 连接挪威与瑞典的斯维纳松德二号桥

## 2.4 克罗地亚斯科拉丁桥

斯科拉丁 (Skradin) 桥,也叫克尔卡 (Krka) 河桥,位于克罗地亚的希贝尼克,跨越克尔卡河,建成于 2005 年(见图 7)。桥梁总长 360 m,宽 22.5 m。钢筋混凝土主拱肋跨度为 204 m,采用了单箱双室截面,高 3 m、宽 10 m,采用 C55 混凝土。除了在拱顶截面附近的 2 个拱上立柱采用实体结构外,其余的拱上立柱均采用薄壁的空心箱形结构。

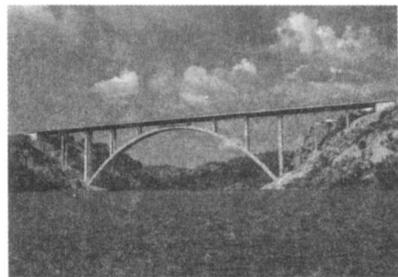


图7 克罗地亚斯科拉丁桥

由于斯科拉丁桥桥址位于高活动地震带上,因此桥道系采用了钢 - 混凝土组合结构,即由高 1.7 m 的 2 根纵向加劲钢梁、顺桥向每隔 4 m 布置 1 根钢横梁以及 25 cm 厚的现浇混凝土桥面板所构成,以减轻结构自重,并有效地减小了拱肋的截面尺寸。全桥(包括基础和桥台)的总重量仅为 22 910 t,比同等桥宽、跨度为 200 m 的旧马斯利尼察 (Maslenica) 混凝土拱桥自重降低了近 35%<sup>[9]</sup>。

## 2.5 葡萄牙亨利克桥

亨利克 (Infant Henrique) 桥全长为 371 m,跨径布置为 (28 + 35 + 280 + 28) m,桥面为双向 4 车

道,总宽为 20 m,见图 8。该桥主跨为 280 m,矢高为 25 m,矢跨比为 1/11.2,其拱轴线由几段直线段组合而成,是一座刚性梁柔性拱的上承式拱梁组合坦拱桥。主拱圈为等高变宽的箱形结构,高度仅为 1.5 m,结构异常轻巧纤细。拱圈宽度从拱脚处的 20 m 线性变化到拱顶处的 10 m,主梁为刚度非常大的预应力混凝土单室箱梁,梁高 4.5 m。在 70 m 长的跨中节段,主拱圈与主梁结合在一起,形成 1 个 6 m 高的箱形结构,该结构的侧面被挖成槽状,从而给人以主梁与拱圈连续的感觉。

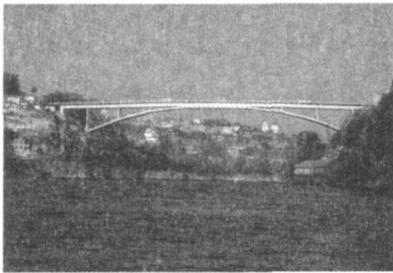


图 8 葡萄牙亨里克桥

该桥采用桥道主梁与拱肋同时施工的悬臂桁架法,为了缩短施工中临时桁架的悬臂长度,在河的两岸各修建了 1 个临时墩,从而使拱桥的施工跨径从 280 m 降低到 210 m。与以往的悬臂桁架施工不同的是,该桥作为刚梁柔拱结构,施工时先施工主梁,然后再利用支承在主梁上的挂篮进行拱圈的悬臂施工<sup>[10]</sup>。

## 2.6 日本富士川桥

富士川桥位于东京以西约 150 km 处,是新东名高速公路工程的一部分,2005 年竣工通车(见图 9)。该桥分为 A 线桥(365 m)及 B 线桥(381 m),桥宽 18.5 m,都为钢筋混凝土固端拱,拱圈采用高强混凝土(50 MPa),上部结构采用双钢梁预应力混凝土桥面板。其最大跨度为 265 m,矢高 40.5 m,矢跨比 1/6.5,拱肋截面为一个三室箱,拱顶高 5 m、宽 15.5 m,拱脚高 3 m、宽 15.5 m,为变截面拱。与一般的临时索塔安置在桥台上的桥墩顶部不同,该桥将临时索塔设在河中,这不仅能减小悬臂长度,而且可以将后锚索锚固在桥台上,在施工阶段利用桥台作为平衡重(极大地节省了临时材料的用量),使富士川桥相对于其它采用这种施工方法的拱桥更加经济合理<sup>[11,12]</sup>。

## 2.7 美国科罗拉多桥

美国科罗拉多(Colorado)桥跨越亚利桑那州和内华达州交界的布莱克峡谷,连接著名的胡佛水坝的两岸(图 10)。该桥全长 578 m,主拱净跨 323 m。



图 9 日本富士川桥

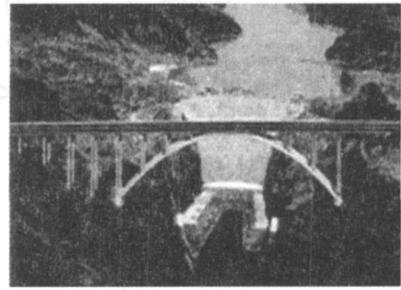


图 10 美国科罗拉多桥效果图

大桥建成后将作为北美最大跨度、世界第四大跨度的钢筋混凝土拱桥。

该桥采用了双肋拱的形式,并且独创性地在双肋之间用空腹桁架连接,增加了结构的延展性,能够有效地抵抗施工时的横向荷载及地震荷载。该结构形式不仅加快了施工速度,而且还有效地增加了拱肋的横向稳定性。上部结构采用钢-混凝土组合结构以减轻自重。施工采用斜拉悬臂浇筑法<sup>[13]</sup>。

## 3 国外大跨度混凝土拱桥发展趋势

除实桥建设外,近 10 年来国外一些专家学者对修建超大跨度混凝土拱桥提出了一些设想,并开展了相应的研究。主要研究工作有:克罗地亚学者开展了跨度达 432 m 的巴卡尔(Bakar)桥的设计研究和跨度分别达 500 m、750 m 和 1 000 m 混凝土拱桥的系列研究<sup>[14~16]</sup>;日本土木学会组织的跨度达 600 m 的钢筋混凝土拱桥可行性研究<sup>[17~19]</sup>;法国米约高架桥(Millau Viaduct)国际方案竞标中,主跨 602 m 的混凝土拱桥方案的研究<sup>[20,21]</sup>。

### 3.1 材料

混凝土拱桥自重较大,是制约大跨度混凝土拱桥应用与发展的一个主要因素。一个解决的方法是采用高强混凝土。如西班牙洛斯蒂洛斯桥,主拱圈与拱上立柱均采用了 C75 的高强混凝土。1992 年建成的西班牙巴克塔(Barqueta)桥,主跨 270 m,宽 43 m,主拱采用 C75 混凝土、桥道系采用 C60 混凝土。

在探讨混凝土拱桥向更大跨度发展时,日本在跨度达 600 m 的钢筋混凝土拱桥可行性研究中,拱

圈采用了设计强度为 100 ~ 120 MPa 的高强混凝土。克罗地亚在跨度达 432 m 的巴卡尔桥的设计构思和跨度达 500 m、750 m 和 1 000 m 混凝土拱桥的系列研究中,提出采用超高强混凝土——活性粉末混凝土(RPC)的设想。

RPC 是一种新型水泥基复合材料,它是通过提高组分的细度与活性,使材料内部的缺陷减小到最少,以获得由其组分材料所决定的最大承载力和良好的耐久性。1997 年建成的加拿大舍布鲁克人行自行车桥是世界上第一座 RPC 桥,桥面板和上、下弦杆均由 RPC 制成,其抗压强度达到了 350 MPa。2000 年韩国仙游桥建成,它是首座采用 RPC 建造的拱桥<sup>[23]</sup>。尽管 RPC 具有很多优点,但目前还处于研究与试应用阶段。

### 3.2 结构形式及构造

#### 3.2.1 桥道系

国内大部分拱桥的桥道系采用简支梁形式。而国外大跨度拱桥大多采用连续梁或连续刚构-连续梁的组合结构,以减少立柱、减轻拱上建筑的自重,也便于施工与养护。近 10 年来,更有相当一部分拱上建筑采用钢-混凝土组合结构,以进一步减轻自重。

对比分析表明,克罗地亚斯科拉丁桥整个结构的自重比该国跨度为 200 m 的旧马斯利尼察桥减轻了 35 %<sup>[15]</sup>。此外,早些时候的法国沙托布里扬(Chateaubriand)桥(跨度 260 m,1991 年建成)和莫比昂(Morbihan)桥(跨度为 201 m,1996 年建成),桥道系采用的也是钢-混凝土组合梁<sup>[4]</sup>。个别桥梁,如斯维讷松德二号桥,甚至采用了钢桥道系,以减轻拱上建筑的自重。

对于超大跨度拱桥来说,桥道系等拱上建筑采用与拱圈一样的高强和超高强混凝土、或采用钢-混凝土组合结构甚至钢结构,则是一种必然的选择。

#### 3.2.2 主拱结构形式

国外近期修建的大跨度混凝土拱仍以有推力的上承式拱为主,不过,对于超大跨度混凝土上承式拱来说,一个突出的问题是拱上立柱很高。当跨度达到 600 m,若矢跨比为 1/6,其拱脚立柱将高达 100 m,这是桥梁设计与施工中一个要面对的问题。

由于桥道系多采用连续结构,所以桥道系也参与了全桥的受力,但一般还是以主拱受力为主,只有个别桥梁,如葡萄牙亨里克桥是以梁受力为主。

对于近期修建的大跨度混凝土拱,主拱的矢跨比从 1/3.8 到 1/11,变化范围较大,主要依具体的

地形与结构形式而定。对于超大跨度混凝土拱的一些研究表明,1/6 矢跨比是大跨度桥梁比较合适的一个指标,可以作为今后试设计研究的参考。

至于主拱的截面形式,除极个别采用了实体矩形肋外(德国基尔河谷高架桥),均采用了箱形截面。在超大跨度混凝土拱桥研究方案中,也都沿用了箱形截面,但为了减少侧向风荷载的影响,提出了采用流线型、八角形、六角形等符合空气动力学特性的外形。拱圈除了采用单箱多室断面外,近期修建的大跨度混凝土拱桥中,有些采用了分离式双箱的方案。

### 3.3 施工方法

大跨度混凝土拱桥常用的施工方法有以下 4 种:劲性骨架法、悬臂扣挂法、悬臂桁架法和悬臂施工+劲性骨架组合施工法。悬臂扣挂法和悬臂桁架法是国内外大跨度拱桥使用最为广泛的施工方法,近期修建的大跨度混凝土拱桥采用的都是这两种方法,且为悬臂现浇。其中,日本富士川桥、葡萄牙亨里克桥在拱脚附近使用了支架,以缩短悬臂长度。

对于未来超大跨度混凝土拱桥的可能的施工方法,研究中比较倾向于采用悬臂施工+劲性骨架的组合施工方法,即拱脚段采用悬臂施工,拱顶段采用劲性骨架法的组合施工方法。该方法不但可以缩短结构悬臂的长度、减轻悬臂的重量,还可以大大减少劲性骨架的用钢量,而且易于控制拱轴线形,可尽快形成拱结构、减少施工风险、缩短工期,是最具发展前景的施工方法。法国米约 602 m 拱桥方案与日本 600 m 混凝土拱桥试设计采用的就是这种方法。

此外,对于多室箱、分离式肋的拱结构,还可以考虑横向的分阶段施工(如克罗地亚的 1 000 m 拱桥试设计)。对于超大跨度拱桥来说,若能采用分阶段的横向施工,其悬臂结构的自重必然大大减轻,对于平衡悬臂结构倾覆力的临时结构的受力是有利的。

## 4 结 语

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度均名列第一,日本和克罗地亚紧随其后。然而,应该指出的是我国近 10 年来大跨度混凝土拱桥的技术没有实质性的突破,修建数量也呈相对下降趋势。另一方面,国外(主要是日本和克罗地亚)近期对超大跨度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度混凝土拱桥方面的技术优势。

我国有大面积的山地,劳动力价格也较低,目前还仍处于大规模的基础设施建设时期,混凝土拱桥

的应用仍有着广阔的前景,尤其是在我国的西南山区。混凝土拱桥的技术创新是必要的,也是有潜力和大有可为的。

### 参 考 文 献:

- [1] 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,2008,28(2):89-96.
- [2] 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,2005,25(4):99-101.
- [3] Bao-chun CHEN, Lin YE. An Overview of Long Span Concrete Arch Bridges in China [C]// Proceedings of Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges. Brijuni Islands, Croatia, 2008.
- [4] Zlatko ŠAVOR, Jelena BLEIZIFFER. Long Span Concrete Arch Bridges of Europe [C]// Proceedings of Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges. Brijuni Islands, Croatia, 2008.
- [5] Jure RADIC, Alex KINDIĆ & Ana MANDIĆ. History of Concrete Application in Development of Concrete and Hybrid Arch Bridges [C]// Proceedings of Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges. Brijuni Islands, Croatia, 2008.
- [6] Santiago Pérez-Fadón, José Emilio Herrero Benítez, Juan José Sánchez. Los Tilos Arch on La Palma Island (Canary Islands) [R]. Hormigón y Acero, 2005.
- [7] GJames, R Karoumi. Monitoring of the New Svinesund Bridge (Report 1) [R]. KTH, Sweden, 2003.
- [8] 余巧宁. 新斯维纳松德桥的设计与施工[J]. 世界桥梁, 2008,(2):6-9.
- [9] Zlatko ŠAVOR, Nijaz MUJKANOVIC & Gordana HRELJA. Design and Construction of Krka River Arch Bridge [C]// Proceedings of Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges. Brijuni Islands, Croatia, 2008.
- [10] 陈宝春,黄卿维. 葡萄牙亨里克拱桥的设计与施工[J]. 世界桥梁,2006,(3):1-4.
- [11] S Takahashi, K Osada, M Sadamitsu, et al. Design and Construction of Fujikawa Concrete Arch Bridge [C]// Third International Arch Bridge Conference. Paris, 2001.
- [12] 范瑛,梅利芳. 日本富士川混凝土拱桥的设计与施工[J]. 世界桥梁,2002,(2):14-16.
- [13] <http://www.arch-bridges.cn/>
- [14] 陈昀明,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):1-4.
- [15] Jure Radic, Zlatko Savor, Alex Kinkij. Development of Arch Bridge [C]// Proceedings of the Fourth International Conference on New Dimensions of Bridges. Fuzhou, China, 2005.
- [16] 王远洋,陈宝春. 1 000 m 跨径混凝土拱桥研究[J]. 世界桥梁,2006,(1):1-3.
- [17] 日本土木学会. コンクリート長大アーチ - 支間 600 m クラス 4 の設計施工 [M]. 东京:日本土木学会, 2003.
- [18] 王加迫,陈宝春. 600 m 跨径钢筋混凝土拱桥地震响应分析[J]. 中外公路,2006,26(4):111-114.
- [19] 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):5-8.
- [20] 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,2006,26(1):80-82.
- [21] J Muller. On Design and Construction of Long Span Concrete Arch Bridge [C]// Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge. Paris, France, 2001.
- [22] 陈宝春. 超大跨径混凝土拱桥的研究进展 [C]// 第十七届全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2006.
- [23] 安蕊梅,段树金. 韩国首尔仙游人拱桥[J]. 世界桥梁,2006,(3):8-10.

## Application and Research Advancement of Long Span Concrete Arch Bridges Abroad

WEI Jian-gang<sup>1,2</sup>, CHEN Bao-chun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** This paper introduces eight typical long span concrete arch bridges having been built abroad in the recent ten years (since 1999). Further to the introduction, the paper also analyzes the development trend and research advancement of the type of the bridges.

**Key words:** arch bridge; concrete structure; bridge example; research; development