

拱桥技术的回顾与展望

陈宝春

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 对石拱桥、钢拱桥、混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥简要回顾了其发展, 介绍了应用现状, 分析了应用前景. 对混凝土拱桥, 介绍了国外在大跨径混凝土拱桥的研究现状, 对材料、结构构造以及施工架设方法等方面的发展方向进行了展望, 并重点介绍了波形钢腹板 - 混凝土拱桥新桥型的试设计研究. 对钢管混凝土拱桥, 介绍了应用与理论研究进展, 对结构与构造、设计计算理论的发展提出了看法.

关键词: 石拱桥; 钢拱桥; 混凝土拱桥; 钢管混凝土拱桥; 回顾; 展望

中图分类号: **文献标识码:** A

View and review of arch bridge technology

CHEN Bao - chun

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Development of stone arch bridge, steel arch bridge, concrete arch bridge and concrete filled steel tubular (CFST) arch bridge has been reviewed briefly. The present status and the foreground of arch bridge application (emphasis on concrete and CFST arch bridges) is introduced and analyzed. For concrete arch bridge, a state of art of the research on super - long span concrete arch bridge abroad is carried out; the tendency of its material, structure as well as construction method is respected; a new type bridge, concrete arch ring with corrugated steel webs is high light introduced. For CFST arch bridge, the application and theoretical research are described; point views on the structure, constitution and design calculation theory are presented.

Keywords: stone arch bridge; steel arch bridge; concrete arch bridge; CFST arch bridge; review; view

1 概述

拱是人类在结构领域最早和最伟大的发明. 木梁或石梁桥可能更早得到应用, 但它们仅仅是利用天然材料, 在结构上没有什么创新. 有人认为悬索桥是与拱桥同时代的发明, 但实际上, 通过两点悬挂起来的绳子会自动形成悬链线型, 所以悬索桥也并非结构上的一种创新. 然而拱完全是人类创造的, 它只能根据人们对其受力特征的构想来建造, 任何材料都不可能自动形成拱的形状^[1].

桥梁工程的发展与材料的发展息息相关, 人类修建桥梁从利用天然材料开始, 随着人工材料的发明与发展, 桥梁技术也不断进步. 从早期的砖, 到 18 世纪的铁、钢和混凝土, 最早应用于桥梁结构之中时, 都是先用于拱桥. 因此, 拱桥在桥梁发展史上具有极其重要的地位. 按照主拱结构主要材料, 拱桥主要分为石 (圬工) 拱桥、钢 (金属) 拱桥、混凝土拱桥和钢管混凝土 (组合) 拱桥.

拱桥在我国的应用有着悠久的历史, 取得过辉煌的成就. 建于公元 605 年左右的赵州石拱桥, 跨径达 37.4 m, 采用了空腹式圆弧拱, 彪炳于世界技术发展桥梁史. 解放后, 特别是改革开放以来, 我国的拱桥技术不断创新, 不断进步, 继续保持着世界先进水平. 目前, 石拱桥、钢拱桥、钢筋混凝土拱桥和钢管混

收稿日期: 2008 - 12 - 12

作者简介: 陈宝春 (1958 -), 男, 教授, 博导.

基金项目: 交通部西部交通科技资助项目 (2008 - 318 - 000 - 13)

混凝土拱桥跨径的世界纪录均在中国，它们分别是主跨径 146m 的山西丹河新桥（石拱桥）、主跨径 550m 的上海卢浦大桥（钢拱桥）、主跨径 420m 的万州（县）长江大桥（混凝土拱桥）和主跨径 460m 的巫峡长江大桥（钢管混凝土拱桥）^[2]。

我国著名的桥梁设计大师林元培院士指出：“改革开放以来，我国桥梁事业突飞猛进，中国的斜拉桥与拱桥已进入国际先进行列”^[3]。日本东京大学名誉教授、原国际桥梁协会主席伊藤学在 2006 年接受《桥梁》杂志记者采访时说：“中国的拱桥水平非常高，我对拱桥的技术十分钦佩。这点可能与中国拱桥悠久的历史渊源有关。中国的石拱桥、混凝土拱桥、钢拱桥，都是世界第一。这些桥在设计、施工上都下了很大工夫”^[4]。

我国已修建了大量的拱桥，目前仍处于大规模的基础设施建设时期，拱桥的应用仍有着广阔的前景。拱桥的技术创新是必要的，也是有潜力和大有可为的。本文将对石拱桥、钢拱桥、钢筋混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥的技术发展进行简要的回顾，指出其存在的主要问题，并对今后的发展提出看法，以期今后拱桥技术的研究与发展提供参考。

2 石（圻工）拱桥

石拱桥较之石梁桥不需大条石，可以使用石块建造，不仅取材方便，而且跨越能力强。拱桥还能采用砖这种人工材料建造，较之木梁桥和藤索桥，不仅取材方便，而且耐久。因此，有人认为拱桥的发明与轮子的发明一样让人感到惊奇^[5]。著名的古代石拱桥有古罗马的输水桥，如 Pout - du - Gard 桥（加尔输水桥）、西班牙的 Alcantara 桥、中国的赵州石拱桥等。大量历史久远的石拱桥流传至今，许多已成为人类重要的文化遗产。

工业发达国家在十九世纪下半叶和二十世纪上半叶大规模修建的铁路中，大量应用了圻工拱桥。2002 年世界铁路协会（UTD）为完成铁路石拱桥的“技术状况”报告，成立了研究小组。该项目最先由匈牙利的铁路部门发起的，此后德国、法国、英国、澳大利亚、瑞士、挪威、捷克、葡萄牙、瑞典、日本、波兰、印度等 12 个国家的铁路机构先后参与。第一阶段的调查表明，参与项目各国的铁路圻工拱桥和涵洞（以砖拱桥为主）共计超过 200 000 座，约占铁路桥梁总数的 60%^[6]。此后，随着钢铁、混凝土材料在桥梁中的应用，机械的应用，劳动生产率的提高，圻工拱桥在欧美较少修建。

与国外铁路桥中有大量的石拱桥和砖拱桥相比，我国的圻工拱桥在铁路中较少应用，主要是应用在公路桥梁中，且无论是古代还是近、现代，都是以石拱桥为主，砖拱桥较少。在修建年代上，除了古代拱桥外，大量修建的是在上个世纪的下半叶，尤其是 1950 ~ 1970 年代，这与我国当时的国情有关。以福建省为例，截止 2002 年底，专养公路 3 729 座桥梁中石拱桥占 1 936 座，达桥梁总数的 52 %；而 1960 ~ 1970 年代修建的达 1 152 座，占石拱桥总数的 60%^[7]。

在我国的当代，石拱桥不仅修建的数量较多，而且跨径也不断增大。从 606 年赵县安济桥的 37.4 m，到 1956 年完成铁路松树坡桥的 38 m，历经 1350 年才得以突破。然而，此后石拱桥跨径纪录的改写速度极快，并迅速越过百米大关。1972 年建成的四川九溪沟大桥 116 m 的跨径保持了 18 年后，120 m 跨径的鸟巢河大桥将其打破。时隔不到 10 年，146 m 丹河新桥又刷新了记录。尽管如此，应该看到，进入 1980 年代以来，由于石拱桥劳动生产率低、支架费用大、对地质条件要求高、修建时间长等原因，在许多情况下其经济性较其它桥梁已从过去的优势变为劣势，因而在我国石拱桥修建日少，丹河新桥的修建并不具有普遍意义也不代表着拱桥的发展方向。

2007 年 8 月 13 日，我国在建的湖南凤凰堤溪大桥倒塌。事故调查组分析该桥倒塌的原因是：由于主拱圈砌筑材料未满足规范和设计要求，拱桥上部构造施工工序不合理，主拱圈砌筑质量差，降低了拱圈砌体的整体性和强度，随着拱上施工荷载的不断增加，造成 1 号孔主拱圈靠近 0 号桥台一侧约 3 - 4 m 宽范围内砌体强度达到破坏极限而坍塌，受连拱效应影响，整个大桥迅速坍塌^[8]。

事故发生后，网络上出现了一些人对石拱桥桥型的质疑。从收集到的资料看，质疑的人基本上不属于桥梁技术人员。湖南湘西山区石料丰富，地质条件较好，劳动力费用低，且有着修建石拱桥的传统，在凤凰古城与周边地区有许多精美和技术水平相当高的古代和现代的石拱桥，如凤凰县城内的虹桥、城外的

鸟巢河大桥. 因此, 该桥选择石拱桥本身并不值得质疑. 该桥的倒塌是质量事故, 并不是桥型本身的问题. 在地形地质条件适合的山区, 石拱桥仍是一种具有一定经济竞争力的桥型.

无论是国内还是国外, 对于目前在役的以石拱桥为主的圬工拱桥, 全部拆除是不现实也是不必要的. 从 1995 年开始, 以欧洲国家为主, 每三年举办一次国际拱桥大会 (International Conference on Arch bridges), 现已举办五届, 分别是 1995 - 1st Conference - UK, 1998 - 2nd Conference - Italy, 2001 - 3rd Conference - France, 2004 - 4th Conference - Spain, 2007 - 5th Conference - Portugal 每届大会上都有大量的论文是关于在役拱桥的检测、维修、加固的内容, 在 2007 年的第五届国际拱桥大会上更是专门开辟了一个专题“拱桥的动力测试”. 然而, 圬工拱桥因其自重和刚度均较大, 结构损伤对动力特性的影响不敏感, 在国际上比较热门研究的结构损伤识别等方法较难在圬工拱桥中得到应用. 前述介绍的世界铁路协会 (UTD) 开展的专项研究、我国 2004 年西部交通建设科技项目设立了“服役石拱桥可靠性评估与加固改造技术研究”项目等都说明了在役圬工拱桥的评估、养护、维修、加固与改造已引起高度重视. 但这方面还有大量的工作要做.

3 钢(金属)拱桥

18 世纪英国的工业革命后, 钢铁开始被应用于桥梁结构之中. 第一座铸铁拱桥是由 Thomas Pritchard 设计的塞文 (Severn) 桥, 建于 1779 年, 由 5 个半圆弧拱肋并列组成净跨度 100 英尺 (30.5 m) 的单拱的铸铁拱桥. 钢铁首次大量应用于桥梁的是 1874 年修建的美国 Missouri 跨越 St. Louis 的 Eads 桥, 它是一座三跨 (153 m + 158 m + 153 m) 的钢桁拱桥, 采用了悬臂架设法. 该桥为双层桥面, 上层公路, 下层双轨铁路. 此后, 许多精美的钢拱桥先后建成, 跨径也不断刷新^[9].

在我国, 长期以来钢桥不是发展的重点. 在为数不多的钢桥中, 大部分都是跨大江大河的铁路桥, 公路桥很少. 在桥梁结构形式方面, 以钢板梁和钢桁梁为主, 钢拱桥修建很少. 上个世纪我国建成跨径最大的钢拱桥, 公路桥为跨径 180 m 的攀枝花 2 号桥与 3 号桥, 铁路桥为九江长江大桥, 它的主孔是三跨刚性梁柔性拱, 跨径组合为 180 m + 216 m + 180 m. 随着我国经济和交通的发展、钢产量的提高, 我国陆续修建了一些大跨径钢斜拉桥、钢悬索桥. 2003 年上海建成了大跨径的钢拱桥——卢浦大桥 (550 m), 将我国钢拱桥的纪录从 200 m 左右一下子跃升到世界第一. 近年来, 我国又相继建成了主跨 428 m 的广州星光大桥、主跨 420 m 的重庆菜园坝大桥, 在建的还有主跨 552 m 的朝天门铁路桥和主跨 336 m 的南京大胜关高速铁路桥等^[10-11].

钢拱桥的技术进步, 从其跨径来看, 从 1874 年跨径 158.6 m 的 Eads 桥到 1916 年跨径 298 m 的狱门桥, 42 年中跨径增加 88%; 到 1931 年跨径 503.6 m 的培虹桥, 15 年中又增加了 69%; 再到 1976 年跨径 518.3 m 的新河谷桥, 45 年仅增加 3%; 2003 年中国上海建成跨径达 550 m 的卢浦大桥, 27 年跨径增加了 6%.

钢拱桥由于钢材强度较高, 使得拱圈自重减小、而且其架设方便, 因此较之于石拱桥和混凝土拱桥具有更大的跨越能力. 在考虑桥梁建造形式、结构因素以及施工材料等主要技术因素的情况下, 钢拱桥的最大跨径可达 1 000 m 以上^[12]. 当斜拉桥跨径越过千米后, 开展千米级钢拱桥的研究具有理论意义.

在近现代, 高强钢材在索结构中的应用, 桥梁的跨径在不断地增大, 而拱以受压为主, 稳定 (包括整体稳定与局部稳定) 问题成为主要矛盾, 高强材料的性能不能得到充分发挥, 需耗费大量的材料在增强结构的刚度上. 另一方面, 主拱在合龙以前并不是拱结构, 要有其它辅助措施, 施工难度比悬索桥与斜拉桥相比困难. 在 300 ~ 500 m 跨径内, 与斜拉桥相比, 其施工架设困难且费用高, 经济指标已不如钢斜拉桥, 因而它向更大跨径的发展所遇到的是难以逾越的经济竞争力. 这也是为什么在最近的几十年内, 国外钢拱桥跨径的增加十分缓慢, 新桥修建也很少的重要原因. 从这个意义上来说, 尽管金属拱桥曾在历史上起到极其重要的作用, 但从大跨度桥梁这个角度来说, 现在我们所处的是索结构的时代, 拱桥的时代已经过去. 但是, 对于铁路桥来说, 当需要较大跨度时, 由于索结构刚度较柔, 拱梁组合结构是一种具有较大优势的结构. 对于公路与市政桥梁来说, 除了特殊情况, 一般来说大跨度钢拱桥竞争力并不强, 单纯为了追求一种桥型而不顾经济的做法是不值得提倡的.

4 混凝土拱桥

4.1 发展回顾

早在公元前的古罗马就已经使用混凝土建筑拱券结构, 当时应用的是天然混凝土, 这种技术在中世纪失传。1759年波特兰水泥出现后, 混凝土开始在拱桥中应用, 为拱桥的发展注入了新的生机和活力。1875年, Monier建成了第一座混凝土拱桥 - Tili ôe de Chazelet Marquis 宫殿花园里面的一座步行桥。到了1904年, Hennebique 利用工业进步的契机, 成功地建造了跨径超过了 100 m 的拱桥——罗马的 Risorgimento 桥。此后, 混凝土拱桥在世界各地得到大量修建^[13]。

拱桥在垂直荷载作用下有水平反力, 需要较好的地质条件, 因此, 在岛国和山地修建较多。日本所作的一项调查表明, 截止 2003年 3月, 已建的跨径在 100m 以上的混凝土拱桥共 38座, 此外还有 13座正在设计, 最大跨径是 265 m 的富士川桥^[14]。克罗地亚也是一个岛国, 修建了大量的混凝土拱桥, 早在 1966年和 1967年就修建了跨径分别达 246.4 和 193.2 m 的 Sibenik 桥和 Pag 桥, 1979年又建成了 KRK 大桥 I 号桥和 II 号桥, 跨径分别为 390 和 244 m^[15]。

随着计算理论、结构和施工技术的进步, 混凝土拱桥的跨径记录也在不断地突破。1930年建成的法国布鲁格斯藤 (Plugastel) 桥, 跨径为 180 m; 1942年, 西班牙跨径 210 m 的艾斯拉 (Esla) 桥建成; 次年, 瑞典建成了桑多桥 (Sando), 将跨径提升到了 264 m, 与法国布鲁格斯藤相比, 13年跨径增加了 46.7%。1963年, 葡萄牙在波尔图的杜罗 (Douro) 河上建成主跨 270 m 的阿拉比迪 (Arrabida) 桥, 将该记录打破。1965年修建的澳大利亚悉尼的格拉特斯维尔桥, 跨径达 305 m, 与桑多桥相比, 23年跨径增加 15.5%。1979年前南斯拉夫 (现克罗地亚) 建成的 KRK 大桥 I 号桥, 主跨 390 m, 14年跨径增加了 27.9%。此后, 国外少有大跨径混凝土拱桥的修建。

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确凯冲桥、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世纪六七十年代后, 钢筋混凝土拱桥长期成为我国的主导桥型^[16]。

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, 双曲拱桥、桁架拱和刚架拱就是这一探索的结果。1980年代, 将预应力技术引入桁架拱, 建成了一系列预应力桁式组合拱, 成为大跨径拱桥的一个重要桥型。1995年建成的贵州江界河大桥, 主跨达 330 m, 在这一桥型中跨径最大, 也是当时国内跨径最大的拱桥^[17]。然而这类桥梁的节点开裂问题突出, 现在已基本上没有新建的。为此, 2005年西部交通建设科技项目设立了“桁式组合拱病害的成因, 加固方法的研究”, 从桁式组合拱桥病害成因分析、加固方法研究和设计施工技术的改进等 3个方面进行了研究, 以消除桥梁安全隐患, 确保桥梁的承载力和耐久性, 保证其在营运期内具有良好的使用性及可靠的安全性, 延长桥梁的使用寿命, 减少和节约运营维护成本。

1980年后, 我国修建了许多大跨径的钢筋混凝土箱拱桥和肋拱桥。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、1990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——重庆万洲 (万县) 长江大桥 (420 m)。

我们对我国跨径大于或等于 100 m 的混凝土拱桥进行了一次调查分析, 时间截止到 2006年 3月, 共收集到 151座桥梁的资料, 其中跨径达 150 m 及以上的有 53座。结果表明, 我国混凝土拱桥的数量在 2000年以前总体上随时间推移呈增多趋势, 但进入 21世纪以后数量有下降的趋势。这种下降趋势可能是实际性的, 也可能是由于新建桥梁资料反映不足引起的^[18]。

应该指出, 拱桥跨径的增大, 是与施工技术的进步分不开的。从有支架施工到无支架施工, 无支架施工从缆索吊装、转体施工、悬臂拼装到劲性骨架施工等方法的应用与进步, 使我国拱桥跨径越上一个又一个台阶。而前述几座世界级拱桥, 如邕宁邕江大桥、四川万县长江大桥等, 则是将钢管混凝土作为劲性骨架建成的。因此, 这一方法是使中国混凝土拱桥跨径取得重大突破、从一直落后到一跃而成为世界第一的

关键所在。

应用钢管混凝土作为劲性骨架施工的钢管混凝土拱桥已达 10 余座。然而,这一桥型中的钢管混凝土劲性骨架主要用于施工过程的受力,成桥以后所起的作用很小。为了减少这一部分的材料,有效的途径是加大劲性骨架的刚度,如增大高度,但这样做在增大劲性骨架刚度的同时也增大了后期成型后混凝土拱圈的重力,这使得增大拱肋截面高度的作用并不明显。同时,混凝土浇筑的时间很长,施工复杂、工序繁多,混凝土收缩徐变的时效作用问题突出。因此,采用钢管混凝土劲性骨架修建的钢筋混凝土拱桥,目前修建得较少。探求新的施工方法成为拱桥向大跨度发展的一个重要研究课题。

拱桥因以受压为主,所以将抗压强度高、抗拉强度低的混凝土材料应用于拱桥之中从结构上来说合理的。然而,其施工难度较大,特别是当跨径增大以后。二战以后,随着预应力技术的发展,悬臂节段施工方法的应用,使得预应力连续梁、连续刚度等桥型在 100~200 m 的跨径范围内具有很强的竞争能力。当跨径更大一些后,混凝土斜拉桥施工难度较小的优势,也挤占了混凝土拱桥的应用范围,使得大跨度混凝土拱桥的应用越来越少。

4.2 国外超大跨径混凝土拱桥研究进展

尽管近几十年来,混凝土拱桥的修建在世界范围内不是很多,对混凝土拱桥的研究也不是很活跃,然而,还是有一些国外的专家提出修建超大跨径混凝土拱桥的设想,并开展了相应的研究。

克罗地亚近年提出了巴卡尔(Bakar)桥的设计构思^[19-20]。该桥主跨达 432 m,超过我国万县长江大桥跨径 12 m,矢高为 72 m,矢跨比为 1/6。主拱圈和桥面连续梁完全由 RPC200 预制构件组装而成,极大地减小了结构的自重。主拱圈拟采用预制悬臂斜拉拼装法施工。

除巴卡尔预设计外,克罗地亚还开展了跨径为 500、750 和 1 000 m 混凝土拱桥的系列研究。它的基本构思很大程度上沿袭了巴卡尔桥的构思。以 1 000 m 混凝土拱桥为例,取矢跨比 1/6,除了基础和两侧桥台,其他所有承重构件都采用 RPC。主拱圈为等截面八边形断面。拟采用悬臂桁架施工方法,临时斜拉索采用碳纤维复合材料^[21-22]。

日本是一个山地岛国,在修建了大量的大跨径悬索桥和斜拉桥的同时,也修建了大量的钢筋混凝土拱桥。日本土木学会于 1999 年就已开始组织力量开展了跨径达 600 m 的钢筋混凝土拱桥可行性研究,于 2003 年出版了《600 m 跨径级的混凝土长大拱桥的设计与施工》一书^[23]。

跨径达 600 m 混凝土拱桥的试设计方案采用上承式有推力的拱梁组合体系,对不同矢跨比研究的结果认为 1/6 最合适。拱轴线采用悬链线。拱圈为单箱三室截面。主拱圈截面为变宽度和变高度。试设计提出两种施工方案,即劲性骨架法和组合施工法。后一种先在拱脚段采用斜拉扣挂悬臂施工,然后在拱顶段用劲性骨架合龙,而后在成拱的骨架上现浇混凝土。此外,由于日本地震频发,因此抗震性能是试设计研究中的一个重点^[24]。

在日本,为了跨越河流和连接岛屿,选择一个桥址来修建跨径 600 m 长的其它桥梁是不难的,但要选择一个适合大跨径拱桥的架设桥址,要考虑矢高问题而找一处适合修建高度达 100 m 桥梁的桥址就比较难了,所以上述的 600 m 混凝土拱桥的试设计在考虑施工方案时以我国的万县长江大桥桥址为假想地。为了讨论大跨径混凝土拱桥在日本实现的可能性,在日本土木学会组织的研究中,选择了伊唐大桥的桥址作为大跨径混凝土拱桥试设计的桥址。试设计拱桥的跨径为 500 m、矢高为 40 m,矢跨比为 1/12.5,是一座典型的坦拱。拱圈也采用单箱三室截面,与 600 m 试设计的相似。计算分析表明,拱圈应采用设计强度为 100~120 MPa 的高强混凝土。施工拟采用悬臂拼装与米兰拱(劲性骨架)相结合的方法^[25]。

2004 年 12 月建成的法国米勒高架桥(Millau Viaduct),主桥为 204 m + 6 × 342 m + 204 m 的单索面斜拉桥,桥面最高点离地面有 270 m,号称世界第一高桥。该桥在 1996 年国际方案竞标中,曾有一主跨 602 m 的混凝土拱桥方案,气势磅礴、雄伟壮观,与周围环境极为协调。主拱圈采用等高变宽度的混凝土箱形截面。施工方法拟采用拱脚段悬臂架设、拱顶段使用劲性骨架合龙的组合施工方法。跨中劲性骨架合龙段的长度有 260 m,结构自重高达 2 300 t,因此其施工难度很大^[26-28]。可惜该方案未能中标,因此也未对其进行深入的研究,但方案中的一些构思对于大跨径混凝土拱桥还是具有很大的借鉴意义。

4.3 超大跨径混凝土拱桥的发展

混凝土拱桥向大跨径发展要克服的主要问题有减轻自重、结构优化和施工方法的改进。

4.3.1 材料

减轻自重最有效的方法是采用高强度的混凝土。在高性能混凝土中，活性粉末混凝土 (Reactive Powder Concrete, 简称 RPC) 是最具潜力的一种。前述提到的克罗地亚的大跨径混凝土拱桥的试设计研究中均采用了 RPC 作为拱肋和其它主要构件的材料。然而，尽管 RPC 混凝土有很多优点，但目前还处于研究阶段，仅在小跨径和人行桥中得到应用。它在大跨径拱桥的应用，主要有以下一些问题：一是它的养护需采用蒸汽或高温，这增加了施工难度；二是它的破坏是脆性的、爆炸性的，材料的延性很差；三是造价很高。因此，将 RPC 200 混凝土应用于大跨径拱桥的实际工程之前，还有许多研究工作要做。

控制大跨径拱桥设计的除强度外，另一个极为重要的是稳定问题。稳定与混凝土的长期弹性模量有关。由于普通混凝土弹性模量的增长远远落后于其强度的增长 (抗压强度增大一倍时，弹性模量仅仅增加 50%)，因此需要研制出新型的高强轻质、高弹模的材料，以期将来能应用于超大跨径混凝土拱桥中，推动拱桥长大化进程。

4.3.2 结构形式及构造

超大跨径的混凝土拱，由于自重较大，适于具有良好地基条件的山区 U 型或 V 型峡谷，只能采用有推力的上承式拱或中承式拱。上承式拱构造简单，桥道系支承于立柱上，整体性、横向稳定性均较好，而且其管理养护也较为方便，绝大部分的大跨径混凝土拱桥都采用上承式，前述的试设计研究也都是上承式拱。不过，当上承式拱跨径很大时，一个突出的问题是拱上立柱也较高。当跨径达到 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的一个要面对的问题。

中承式拱桥则可以利用高强材料的吊杆来代替厚重的立柱，大大地减少立柱数量，另外还可以降低立柱的高度，从而使结构的自重减轻。虽然，前述国外的超大跨径混凝土拱桥的研究中没有采用中承式，不过从钢拱桥和钢管混凝土拱桥的纪录保持者来看，上海的卢浦大桥和巫峡长江大桥都是中承式，因此，中承式在超大跨径混凝土拱桥中也有应用的可能。然而，中承式也存在着一些问题：如拱肋与桥道系相接处的构造复杂、桥道系上承部分与下承部分的关系、肋间横撑的布置、长吊杆的振动等等。

对于超大跨径混凝土拱桥而言，拱上结构的自重越轻，拱肋的受力越有利，变形也越小，因此拱上建筑结构形式的选取也是拱桥设计中非常重要的工作之一。在国内大部分的上承式拱桥中，桥道系主梁大多数为简支梁，跨越能力有限，立柱较多，不仅增加了结构自重，还造成了施工上的诸多不便，也影响了耐久性。而国外大跨径拱桥大多考虑主拱和桥道系的共同作用，桥道主梁采用连续刚构——连续梁的组合结构，即长立柱与主梁刚接，形成连续刚构；而短立柱则铰接于主梁，形成连续梁结构。该方法不仅大大增大了主梁的跨越能力，减轻了结构自重，减少了支座布设、维修更换，便于施工与养护，另一方面也使长柱两端固结，稳定性能提高，因此立柱可以采用较小的截面。

除了结构形式外，拱上建筑采用钢——混凝土组合结构也是减轻结构自重的一个有效途径。2004 年克罗地亚建成的跨径为 204 m 的 Krka 桥，桥道系采用了钢——混凝土组合结构，整个结构的自重比同在克罗地亚的跨径为 200 m 的原 Maslenica 桥减轻了 35%^[15]。同样，拱上立柱也可以采用钢管混凝土或钢立柱，尤其是靠拱脚处的长立柱，这对于减轻拱上建筑的重量是有效的一个方法。

对拱桥的主拱圈而言，设计中要考虑的主要问题有矢跨比、拱轴线和拱圈截面形式等。已有的研究表明，1/6 矢跨比是大跨度拱桥比较合适的一个指标，可以作为今后试设计研究的参考。此外，前述的日本伊唐大桥拱桥试设计方案采用了 1/12.5 的矢跨比，2002 年葡萄牙建成的主跨为 280 m 的 Infante D. Henrique 桥矢跨比为 1/11^[29]。相比较而言，我国拱桥的矢跨比稍大，采用 1/5 的居多，在今后的超大跨径混凝土拱桥的研究中应注意这个问题。在拱轴线选取方面一般要考虑与恒载压力线尽量吻合，除目前常用的二次抛物线、悬链线外，还可以考虑高次抛物线和样条函数。

至于主拱圈的截面形式，由于箱形结构具有抗扭刚度大、结构整体受力性能好、经济以及施工方便等方面的优点，因此经常被应用于大跨径拱桥的拱圈结构，超大跨径混凝土拱桥方案也将继续沿用这种拱圈结构。随着拱桥跨径的增大，拱圈轻型化问题日益突出。除了使用高强材料使得箱形结构可以做得更薄外，还有从单箱多室向具有很强横向联系的分离双箱的方向发展，如美国在建的科罗拉多拱桥。为了减少侧向风荷载的影响，拱圈断面宜采用了符合空气动力学特性的外形，如流线型、八角形及六角形等。另

外,在拱脚处应对拱圈进行加高、加宽和加厚,以提高其横向稳定性和抗震能力。

4.3.3 施工方法

拱桥的施工方法是影响拱桥方案能否成立、能否被采用的最关键技术问题,对于超大跨径混凝土拱桥更是如此。大跨径混凝土拱桥常用的施工方法有 4 种: 劲性骨架法; 斜拉悬臂法; 悬臂桁架法; 悬臂施工 + 劲性骨架的组合施工法。

采用劲性骨架法修建超大跨径混凝土拱桥,其耗用的钢材量很大,经济性能较差,采用钢管混凝土作为劲性骨架使得这一方法的经济性得到改善,这也是我国的邕宁邕江大桥和万州长江大桥跨径能有较大突破的一个重要原因。然而,当跨径继续增大后,单纯采用这一方法将有很大的局限性。

悬臂扣挂法和悬臂桁架法是国内外大跨径拱桥使用最为广泛的施工方法,其施工经验较为成熟,若使用的是 RPC 200 材料,结构自重的大幅度降低使施工的悬臂长度可以获得较大的增加,应用于超大跨径混凝土拱桥的施工具有相当的可行性。这两种施工方法中都要用到斜拉索,高强钢索的垂度与自重问题在拱的跨径很大时,也会成为突出的问题。如果能采用轻质高强的碳纤维复合材料拉索,运输和安装都会方便得多。

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,不但可以缩短结构悬臂的长度,减轻悬臂的重量,又可以大大减少劲性骨架的用钢量,而且易于控制拱轴线形,可以尽快形成拱结构,从而减少施工风险,缩短工期,是上述四种施工方法中最具发展前景的施工方法。法国米勒 602 m 拱桥方案与日本 600 m 混凝土拱桥试设计采用的都是这种施工方法。

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。对于超大跨径拱桥来说,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,不过它也引出了一些问题,如施工过程的横向稳定问题更为突出,还有横向结构的连接问题等。因此,需要进行分析比较,以选取合适的施工方法。在克罗地亚的 1 000 m 拱桥试设计中,就提出了横向分阶段施工的方案。

4.4 钢腹板混凝土拱桥新桥型研究

采用钢 - 混凝土组合结构是减轻混凝土结构自重的另一个有效途径。为此,我们提出了钢腹板(杆) - 混凝土组合拱新桥型。也就是将混凝土拱圈中的混凝土腹板用钢构件(波形钢腹板、平钢腹板、钢桁腹板等)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。

首先开展了波形钢腹板 - 混凝土拱桥的研究^[30]。波形钢腹板已在结构工程中得到了广泛的应用。用轻质高强的波形钢板代替厚重的混凝土腹板而成的波形钢腹板 PC 组合箱梁桥,能有效地减轻自重,提高预应力的效率,减少下部结构的工程量,方便施工,进而降低工程总造价。因此,自 1986 年法国修建了 Cognac 高架桥以来,它在国外发展得很快,近年在我国也开始得到应用。在日本,波形钢腹板 PC 组合箱梁还被推广应用到部分斜拉桥和斜拉桥中去^[31-32]。然而,除作者外,迄今还未见到将波形钢腹板应用于拱桥的提法。

为了探讨这种新桥型是否可行,以已建成的重庆万州长江大桥(净跨 420 m)和在建的福建宁德岭兜大桥(净跨 160 m)为原型,进行波形钢腹板 - 混凝土拱桥的试设计,对该新桥型采用劲性骨架法与斜拉悬臂法施工进行了探讨^[33-34]。

重庆万州长江大桥试设计结构主要尺寸与原桥相同,所不同的是将原混凝土腹板用波形钢腹板代替,拱轴线仍采用悬链线,拱轴系数选取 $m = 1.64$ 。从拱圈的主要工程数量比较可知,波形钢腹板 - 混凝土拱桥的混凝土数量比万州桥减少了 31%; 劲性骨架钢材用量 2 487 t, 较之万州桥增加 19%。主拱圈自重从原桥的 29 730 t, 减小到 21 597 t, 减轻自重达 27%。

与原桥相比,试设计桥梁拱圈各截面在自重作用下轴力都显著降低,拱脚轴力为 297 300 kN, 降低了 18%, 水平推力为 224 253 kN, 比原桥降低了 17%, 且由于拱圈刚度的减小,温度变化和混凝土收缩产生的附加内力也下降了。试设计桥梁采用与原桥相同的劲性骨架施工方法。比原桥相比,试设计桥梁的劲性骨架略重(从 60 t 增加到 69 t),但仍可满足缆索吊装要求。由于波形钢腹板代替了混凝土腹板,试设计桥

梁可免除了腹板模板的布设、浇筑混凝土等施工工序,可缩短近三分之一的拱圈浇筑的施工周期(从 224 d 降为 144 d)。

岭兜大桥净跨径为 160 m,净矢跨比为 1/4。拱圈采用等宽变高度的单箱三室截面。试设计中也仅改变主拱肋结构,采用波形钢腹板-混凝土组合箱拱桥。对比拱圈的主要工程数量可以看出,波形钢腹板-混凝土拱桥的混凝土数量为 912 m³,比原桥的 1 354 m³减少 33%;钢材用量为 149 t,比原桥增加了 38 t。主拱圈自重从原桥的 3 496 t,减小到 2 428 t,自重减轻近 31%。

与原桥相比,试设计桥梁拱圈各截面在自重作用下轴力都显著降低,拱顶轴力为 28 990 kN,比原桥的 34 930 kN减小了 17%;拱脚轴力为 43 810 kN,与原桥的 51 570 kN相比,降低了 15%。大部分控制截面的弯矩都有不同程度的降低。试设计采用斜拉悬臂法,对悬臂拼装和悬臂现浇进行了比较,结果表明两种方法都可行。与原桥相比,若采用预制悬臂法施工时,预制节段的吊装重量从 65 t降低为 60 t,节段数量也从 7段减为 6段,并节省了浇筑了一根横梁系梁与腹板混凝土的施工工序,缩短了施工周期。若采用悬臂浇筑法施工,与钢筋混凝土拱桥相比,可省去腹板现浇混凝土的工序,方便了施工、加快了施工进度。

钢腹板-混凝土箱形拱桥研究目前已获 2008年西部交通建设科技项目资助。在大跨度混凝土拱桥研究方面,我们还与广西路桥承担了广西区交通厅的科研项目。此外,我们还开展了钢桁架腹杆混凝土组合拱、混凝土(RPC)在大跨径拱桥中应用的研究。在中国与克罗地亚政府科技合作计划的支持下,我们与克罗地亚萨格勒布大学开展了混凝土拱桥极限跨径的研究,于 2008年 7月在克罗地亚召开了中克大跨度拱桥学术研讨会(CCJC),并将于 2009年 10月在福州召开以拱桥施工为主要议题的第二次会议。

5 钢管混凝土拱桥

5.1 发展现状

1937年和 1939年,前苏联建成了两座跨径分别为 110和 140 m的钢管混凝土拱桥。此后的相当长时间内,世界范围内未见有这种桥梁修建的报道。1990年,中国第一座钢管混凝土拱桥——旺苍东河大桥在四川建成。由于钢管混凝土拱桥具有材料强度高、施工方便、造型美观等优点,又适逢我国大规模的交通基础设施建设时期,钢管混凝土拱桥便在我国得到迅速的发展。随着数量的增多,跨径与规模也不断增大,分布区域也越来越广^[35]。

截止到 2005年 3月,我们收集到的资料,跨径大于或等于 50 m的钢管混凝土拱桥有 230座,其中跨径达 100 m及以上 的 132座,跨径达 200 m及以上 的有 33座。将钢管混凝土拱桥的结构型式分为(有推力)上承式、中承式、(下承式)拱梁组合式、飞鸟式(中承式刚架系杆拱)和下承式刚架系杆拱 5大类,再加上一类“其他”,共 6类。

调查结果表明,1995年前较少修建跨径大于 100 m的钢管混凝土拱桥。此后,随着计算理论的完善和施工技术的进步,钢管混凝土拱桥的跨径和数量随着时间的推移在不断地增大。各个时期具有代表性的桥梁有:1990年建成的四川旺苍东河桥,跨径 115 m;1995年建成的广东南海三山西大桥,跨径 200 m;2000年建成的广东丫髻沙大桥,跨径 360 m;2005年建成的重庆巫山长江大桥,跨径 460 m。

5种主要结构形式已建成桥梁的跨径纪录分别为:上承式拱——主跨为 288 m的重庆奉节梅溪河桥,有推力中承式拱——主跨为 460 m四川巫山长江大桥,飞鸟式——主跨为 368 m的湖南茅草街大桥,下承式拱梁组合拱——主跨为 190 m的杭州钱江四桥,下承式刚架系杆拱——主跨为 280 m的湖北武汉汉江三桥。目前,在建的跨径较大的钢管混凝土拱桥有湖北支井河大桥、浙江绍兴袍江曹娥江大桥、河南岭南高速蒲山特大桥等。

近几年,在国外修建的钢管混凝土拱桥有法国跨径为 56 m的 Antrenas桥、跨越 Escudo河主跨跨径为 126.4 m的上承式钢管混凝土拱桥、捷克跨径为 60.75 m跨越 B mo - Vienna高速公路的地方道路桥梁、美国跨径为 74 m的 New Damen Avenue(新达门大街)桥、日本主孔跨径为 240 m的长崎西海二桥,还有越南三座跨径为 990 m的南西贡大道芹玉桥、大翁桥和森举桥(我国设计与施工)等^[36-37]。但总的来说,钢管混凝土拱桥在国外的应用较少,它是极具中国特色的桥型。

5.2 研究现状

钢管混凝土应用于主拱之中,较之混凝土拱强度大、较之钢拱刚度好,在施工方面优于其它拱桥,因

此是合理的。然而, 钢管混凝土拱桥在我国的应用发展太快, 理论研究相对滞后, 迄今还没有专门的设计与施工规范。

除众多实桥为保证顺利建成所进行的研究课题、省级和其它各级各类的研究课题外, 2000 年以来国家自然科学基金资助了《钢管混凝土拱桥抗震理论研究》、《大跨度钢管混凝土拱桥施工过程变形及应力模拟》、《核心混凝土收缩、徐变对钢管混凝土拱桥静力性能影响研究》等项目。西部交通科技项目 2003 年为此专门安排了“钢管混凝土拱桥设计、施工、养护关键技术研究”等课题。然而, 钢管混凝土拱桥的研究目前还主要是基础性的带有补课性质的工作, 在这种情况下, 虽然这种桥型仍具有相当的应用前景, 但在实际应用中应不断地完善设计理论, 加强施工质量控制和使用阶段的管理与养护。

在标准方面, 《公路桥涵施工技术规范 JTJ - 41 - 2000》^[38]、《公路工程质量检验评定标准 JTJ - 071 - 97》^[39]分别增加和修订了有关钢管混凝土拱桥的内容。此外, 由重庆交通科研院主编的交通部规范《钢管混凝土拱桥设计规范》、《钢管混凝土拱桥施工技术规范》于 2004 形成了报批稿。交通西部课题已于 2007 年通过验收与鉴定, 并形成了有关钢管混凝土拱桥设计、施工和养护的指南。

我国钢管混凝土拱桥的有关应用与研究成果, 除了有大量的论文在专业刊物和学术会议上发表外, 在一些论著中得到了反映^[40-44]。此外, 以钢管混凝土拱桥为主要研究对象, 对钢管混凝土某些专题研究也取得了可喜的成果, 如《钢管混凝土徐变》^[45]、《钢管混凝土》^[46]等。

我国仍处于大规模的基础设施建设时期之中, 钢管混凝土拱桥的应用有着广阔的前景, 加之已建成的桥梁, 对其开展更为深入系统的研究是非常必要的。

5.3 对结构与构造的思考

钢管混凝土拱桥在使用过程中, 出现了一些质量问题。比较突出的主要是索构件的安全性与耐久性问题, 如吊杆与系杆的腐蚀锈断。重庆宜宾小南门桥(中承式钢筋混凝土拱)的吊杆拉断事故、广东佛陈大桥的系杆锈断、武汉汉江三桥(晴川大桥)的系杆破断等事故, 都产生了巨大的损失, 带来极坏的影响, 也给钢管混凝土拱桥的结构安全与耐久敲响了警钟。在吊杆与系杆的耐久性、可更换性的构造上有了许多改进。

西部交通建设科技项目 2003 年立项开展“拱桥吊杆健康诊断技术研究”, 2007 年通过了验收。在对拱桥吊杆损伤及其成因分析的基础上, 研发出光纤光栅自监测智能吊杆和在役吊杆损伤监测的光纤光栅传感技术、吊杆损伤的声发射检测技术和磁通量监测技术; 编制了《拱桥吊杆健康诊断技术指南》。但该方法费用较高, 影响了推广应用。钢管混凝土拱桥中下承式吊杆的更换近年来越来越多, 随着经验的积累与技术的进步, 更换技术也越来越成熟, 但目前还缺乏相关的标准^[47-51]。

出于经济方面的考虑, 我国钢管混凝土拱桥的桥道系基本采用混凝土结构, 少量采用钢-混凝土组合结构。对于中下承式拱桥, 早期修建的悬吊部分以横梁为主的桥道系, 横梁之间缺乏强有力的纵梁联系, 整体性较差, 在车辆作用下的变形和振动较大; 另外它的抗风险能力也极差, 一旦吊杆断了, 桥道系极容易落入河中, 造成严重的事故。认识到这个问题, 近几年修建的桥, 大多在横梁之间加纵梁相连。对于钢筋混凝土或预应力混凝土横梁, 纵梁如何架设, 构造上如何处理, 如何施工, 需要技术创新。对于采用钢-混凝土横梁的桥梁, 如丫髻沙大桥, 采用钢纵梁联系比较容易, 但在长期荷载作用下相连处的疲劳问题也应引起重视。对于大量已建的钢管混凝土中下承式拱, 对现有悬吊桥道系的维修改造, 是一个值得研究的课题。文献[52]对中、下承式钢管混凝土拱桥的悬吊桥道系结构进行了分析, 对悬吊桥道系的常见病害进行了调查分析; 选取了 3 座典型桥例, 建立了有限元模型, 分析了不同桥道系结构对行车性能的影响; 在对桥梁活载挠度限值研究综述的基础上, 对目前设计中常用的挠度限值问题进行了分析; 并以石潭溪大桥为主要分析对象, 提出对其现有桥道系的维修改造方案, 其维修加改造工作已取得预期的效果。

在钢管混凝土拱桥的结构型式方面, 除了有推力的上承式、中承式、飞鸟式、拱梁组合下承式和下承式刚架系杆拱五大类外, 还有一些归入“其他”类的, 其中(简支)系索拱属应用稍多的结构。它是一种介于下承式拱梁组合桥与刚架系杆拱之间的桥型。系索拱中拉索采用高强钢索, 仅承受拉力, 不受弯。由于拉索的强度高, 抗拉刚度小, 因此, 它是靠主动施加预拉力来平衡拱的水平推力, 这样活载产生的水平推力主要由拱肋承担, 也会在两拱脚间产生较大的向外水平的变形, 这样伸缩缝的伸缩量除考虑温度变化

外,还要考虑活载因素,伸缩量较大,而且在日常的活载变化中会发生变化,这是不合理的.在施工方面,架设拱肋时,因拱与墩(台)之间有支座,不象刚架系杆拱那样是固结的,所以要临时锚固,还要考虑临时拉杆平衡水平推力,所以施工难度很大.因此,这种桥型的应用应十分慎重.

在其它类中,还有一种钢管混凝土桁式组合拱,它是从过去的预应力桁式组合拱发展过来的,所不同的是拱肋用钢管混凝土代替混凝土,拉杆用斜杆采用柔性拉索(钢绞线、钢丝束或粗钢筋)代替预应力拉杆.它的应用数量不多,修建的时间也不长,其效果还有待观察,不宜过早推广.重点要关注的问题是拉杆和锚固点的耐久性.

除此之外,斜拉与钢管混凝土拱的组合、连续刚构与钢管混凝土拱的组合等,总体上说结构过于复杂,其组合的必要性有时显得勉强,也是有值得商榷的地方.

在拱肋方面,常用的有单管、哑铃形和多管桁式.在单圆管中,宜以圆管.在哑铃形中,腹腔不一定要填混凝土,以方便施工,避免爆管事故发生.在桁式中,以全桁为好,横哑铃形受力不尽合理,加工也困难,用钢量大.在管数方面,宜用四管,三管与六管慎用.另外,集束管拱肋结构受力不合理,构造复杂,应慎重采用.

在拱肋的材料选择上,大部分钢管混凝土拱桥采用 Q235 钢配 C30 或 C40 级混凝土; Q345 钢配 C40, C50 级混凝土.采用强度很高的钢管和强度很的混凝土一般来说是不必要和不合理的.

5.4 关于设计计算理论

由于钢管混凝土拱肋由钢管和管内混凝土组成,目前工程界存在着两种设计计算方法.一种是从架设钢管拱肋开始,采用应力叠加法分别计算钢管和管内混凝土的应力,分别对钢管和混凝土的应力采用容许应力法进行验算.另一种方法,则是在施工阶段进行应力验算,而对成桥后的受力视钢管混凝土为整体采用内力叠加法计算内力,然后进行整体和局部构件的承载力验算.

按共同受力计算,对钢管混凝土轴压短柱,是混凝土容许应力控制设计.在实际工程中,考虑施工初应力和徐变后,往往倒过来是钢管的容许应力控制设计.这两种情况,钢管混凝土构件的承载力要小于钢+混凝土的承载力,也就是说连钢筋混凝土的作用也达不到,更不用说组合作用的提高部分了,这显然是不合理的.

施工过程验算,在钢管混凝土形成前以钢结构进行验算,可采用容许应力法;钢管混凝土拱肋形成后的施工过程和成桥,均宜以钢管混凝土结构采用极限状态法进行验算,考虑初应力与徐变等因素的影响.

对钢管混凝土拱的面内极限承载力,国内外已进行了十余个单圆截面拱的试验^[53-58].在此基础上提出了考虑钢管混凝土拱材料非线性和几何非线性性能的有限元计算方法,编制了相应的程序,进行了参数分析,提出了计算钢管混凝土单圆管拱极限承载力的等效梁柱法^[59-61].

对于哑铃形拱,我们开展了轴压短柱、偏压短柱、梁、轴压长柱、偏压长柱和拱的系列试验研究,建立了有限元计算方法,在大量参数分析的基础上,提出了哑铃形构件、拱的极限承载力计算方法^[62-67].

对于桁式拱,同样从基础构件着手,我们开展了钢管混凝土格构柱轴压柱、偏压柱、桁梁的系列试验研究,建立了有限元计算方法,在大量参数分析的基础上,指出现有规程存在的问题,提出了格构柱、桁梁的极限承载力计算方法^[68-73].对于钢管混凝土桁拱,已提出了初步的双重有限元分析方法,对其极限承载力的研究还在开展之中.

对钢管混凝土拱的横向(空间)稳定,西南交大与福州大学已进行了组拼平行拱、提篮拱和单肋拱空间受力试验与双重非线性有限元分析^[74-76],但试验模型数量有限,有限元与试验结果的吻合还不够好,关键是扭转刚度的计算精度问题;哑铃形拱和桁拱的试验还在进行中.

对使用极限状态中的变形限制问题,文献[77]选取的 3 个桥例分析表明,挠度值并不能有效地反映桥梁结构在活载作用下的实际振动和振感.新颁的公路桥梁规范 JTG D62 - 2004 已取消了拱桥挠度的限值.所以,钢管混凝土拱桥设计计算时可不考虑挠度限值的验算.而以振动速度和振动加速度等动力参数可以较好地反应汽车荷载通过时的振动情况与振感.因此,建议在设计计算和规范制订中,可将其引入.

此外,初应力、收缩徐变、温度变化对钢管混凝土拱桥受力性能的影响已进行了一些研究,主要集中于应力方面,对变形与稳定的影响研究还不够深入.对钢管混凝土拱桥拱肋设计刚度取值研究,也取得了

初步的成果. 钢管混凝土桁拱节点疲劳问题、结构抗震、车振性能等问题也都取得了可喜的进展. 这里不再详述, 文献 [35] 有较详细的介绍.

6 结语

跨径是桥梁结构最重要的技术指标之一, 材料的发展是推动桥梁跨径发展的重要因素之一. 历史上, 相当长时期内拱桥是跨越能力最大的桥型, 且混凝土、铁、钢等新材料在桥梁中的应用都首先在拱桥中实现. 随着高强、大跨索结构的发展, 拱桥的跨越能力已相对下降. 在跨径超过 300 m 的桥梁中, 一般情况下斜拉桥具有更强的竞争能力. 在 200 m 跨径以下, 现代预应力梁桥因其施工优势而受到欢迎. 因此, 拱桥的竞争能力已较过去有很大的削弱. 应该说, 拱桥作为引领桥梁技术进步的桥型的时代已经过去.

然而, 拱桥仍然是重要的桥型之一. 对于活载比重较大、动力问题较为突出的铁路桥, 钢拱桥 (主要是拱梁组合桥) 仍是大跨径铁路桥梁的主要型式之一. 对于广大的山区、海岛等地区, 混凝土拱桥仍是具有很强竞争力的桥型. 在跨径方面, 拱桥是缆索结构桥梁 (悬索桥、斜拉桥) 跨径可达千米以上的另一种可能的桥型. 另外, 拱具有极高的美学价值, 拱桥也有可能因其优美的造型而被选用. 更不用说大量的还在使用之中的拱桥, 它们的评估、维修、加固、改造等, 还需要我们大量的研究与实践.

在跨径发展方面, 石拱桥因其强度低、自重大、施工费用高, 向更大跨径发展已无意义. 对于钢拱桥来说, 理论跨径可达千米以上. 当斜拉桥跨径越过千米后, 开展千米级钢拱桥的研究具有理论意义. 然而, 钢拱桥在目前的最大跨径范围除铁路桥外, 在公路与市政桥梁中已丧失经济上的竞争力, 因此在实际工程应用时, 对超越现在的跨径应持慎重的态度, 为记录而记录的倾向应该制止. 对于混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥来说, 它们还具备向更大跨径发展的潜力和必要性, 关键要在材料、结构和施工方法方面有所创新.

我国拱桥从古到今都有大量的修建, 也取得了极大的成就, 交通部正组织编写《中国拱桥谱》. 2010 年第六届国际拱桥大会 (6th International Conference on Arch Bridges, Arch '10) 由福州大学承办, 将于 2010 年 10 月 11 - 13 日在福州召开. 为此, 我们专门建设了中英文的拱桥网站 (<http://www.arch-bridges.cn>). 我们希望能借此大会, 对外宣传我国的拱桥技术, 学习借鉴国外先进经验, 推动我国拱桥技术持续不断地向前发展.

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, 拱桥 (主要是混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥) 的应用仍有着广阔的前景, 尤其是在西部. 拱桥的技术创新是必要的, 是有潜力的, 也是可以有所作为的.

参考文献:

- [1] Leonardo Fernandez Troyano. Bridge engineering - a global perspective [M]. London: Thomas Telford, 2003.
- [2] Chen Baochun. State-of-the-art of the development of arch bridges in China [A] // Proceedings of the 4th International Conference on New Dimensions of Bridge (Keynote paper) [C]. Fuzhou: CI-Premerier Pte Ltd, 2005: 13 - 24.
- [3] 陈宝春. 桥梁工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [4] 于抒霞. 创新不是刻意的、重要的是总结——访国际著名桥梁专家伊藤学先生 [J]. 桥梁, 2006(4): 22 - 24.
- [5] Favre R, De Castro San Roman J. The arch: enduring and endearing [A] // Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge [C]. Paris: Presses de l'école nationale des Pontes et chaussées, 2001: 3 - 16.
- [6] Orban Z U C project on assessment, inspection and maintenance of masonry arch railway bridges (invited lecture) [A] // Proceedings of the Fifth International Conference on Arch Bridge [C]. Madeira: Multicomp Lda, 2007: 3 - 12.
- [7] 郑瑞清. 福建省公路石拱桥调查分析与加固技术研究 [D]. 福州: 福州大学, 2004.
- [8] 陈明究. 从凤凰堤溪大桥事故谈石拱桥 [C] // 第 18 届全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2008: 39 - 50.
- [9] 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, 30(增刊): 22 - 30.
- [10] CHEN Bao-chun. Long Span arch bridges in China [C] // Proceedings of Chinese - Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges Brijuni Islands: [s n], 2008: 119 - 134.
- [11] Tian Zhongchu, Zhang Lianying. Construction and construction monitoring of steel box arch bridges [C] // Proceedings of Chi-

- nese - Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges Brijuni Islands: [s n], 2008: 455 - 462
- [12] 戴 竟. 大跨径桥梁桥型比较 [J]. 公路, 2000 (4): 1 - 6
- [13] Muller J. On design and construction of Long Span concrete arch bridge [A] // Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge [C]. Paris: Presses de l'école nationale des Pontes et chaussées, 2001: 17 - 26
- [14] 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): 99 - 101.
- [15] Radic J, Savor Z, Kinkij A. Development of arch bridge [A] // Proceedings of 4th International Conference on New Dimensions of Bridges [C]. Fuzhou: CI- Premier Pte Ltd, 2005: 249 - 256
- [16] 《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.
- [17] 陈天本. 桁式组合拱桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [18] 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
- [19] 陈昫明, 陈宝春, 吴炎海, 等. 432m 活性粉末混凝土拱桥的设计 [J]. 世界桥梁, 2005 (1): 1 - 4
- [20] Candrljic V, Bleiziffer J, Mandic A. Bakar bridge in reactive power concrete [A] // Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge [C]. Paris: Presses de l'école nationale des Pontes et chaussées, 2001: 695 - 700.
- [21] 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): 1 - 3.
- [22] Candrljic V, Radic J, Gukov I. Research of concrete arch bridges up to 1 000 m in Span [A] // Proceedings of the Fourth International Conference on Arch Bridge [C]. Barcelona: CMNE, 2004: 538 - 547.
- [23] 日本土木学会. コニクリ 4 ト長大 ア 4 ナ - 支間 600m クラス 4 の設計施工 [M]. 东京: 日本土木学会, 2003.
- [24] 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 (4): 111 - 114.
- [25] 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
- [26] 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
- [27] Muller J. On design and construction of long span concrete arch bridge [A] // Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge [C]. Paris: Presses de l'école nationale des Pontes et chaussées, 2001: 17 - 26
- [28] SpieImann A. Un arc de 600 metres [A] // Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge Paris: Presses de l'école nationale des Pontes et chaussées, 2001: 683 - 692
- [29] 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.
- [30] 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): 10 - 14.
- [31] 陈宝春, 黄卿维. 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述 [J]. 公路, 2005 (7): 45 - 53.
- [32] 陈宝春, 黄玲, 吴庆雄. 波形钢腹板部分斜拉桥 [J]. 世界桥梁, 2004 (4): 5 - 8
- [33] 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): 10 - 14.
- [34] 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): 78 - 83.
- [35] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [36] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集 (二) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008
- [37] 余 索. 越南南西贡大道钢管混凝土拱桥水平系杆张拉技术的研究及应用 [J]. 世界桥梁, 2005 (2): 1 - 3.
- [38] JTJ 041 - 2000 公路桥涵施工技术规范 [S].
- [39] JTJ 071 - 97 公路工程质量检验评定标准 [S].
- [40] 刘吉士, 阎洪河, 李文琪. 公路桥涵施工技术规范实施手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [41] 王国鼎, 钟圣斌. 桥梁计算示例集: 拱桥 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [42] 交通部第一公路工程总公司主编. 公路施工手册: 桥涵 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [43] 王庭英, 金志展. 钢管混凝土桥梁钢 (管) 结构制造与安装 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [44] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集 (一) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [45] 王元丰. 钢管混凝土徐变 [M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [46] 胡曙光, 丁庆军. 钢管混凝土 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [47] 严 军, 朱万旭, 易著炜, 等. 一种钢管混凝土拱桥吊杆更换的新方法 [J]. 预应力技术, 2008 (1): 29 - 32
- [48] 单成林. 拱桥吊杆的更换设计及施工方法 [J]. 中外公路, 2006 (4): 151 - 153.
- [49] 程志求. 某拱桥吊杆更换施工浅析 [J]. 安徽建筑, 2007 (04): 159 - 160, 168
- [50] 彭春晖, 李 宸. 内江提篮拱桥吊杆更换维修工程 [J]. 西南公路, 2007 (3): 20 - 24.
- [51] 李飞泉, 杜德灿, 李承昌. 系杆拱桥吊杆更换工艺研究 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2006 (9): 110 - 112
- [52] 袁保星. 钢管混凝土拱桥悬吊桥道系维修改造技术研究 [D]. 福州: 福州大学, 2007.
- [53] 陈宝春, 陈友杰. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程试验研究 [J]. 工程力学, 2000, 17 (2): 44 - 50

- [54] 陈宝春, 韦建刚, 林英. 管拱面内两点非对称加载试验研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 43 - 49.
- [55] 陈宝春, 韦建刚. 管拱面内五点对称加载试验研究 [J]. 工程力学, 2007, 24(6): 73 - 78.
- [56] 日野伸一, 劉玉擎, 山口浩平, 等. コンクリート充填鋼管アチリブの耐荷特性および弾塑性挙動に関する研究 [A]//第 5 回複合 造の活用に関するシンポジウム講演論文集 [C]. 东京: JSCE, 2003: 125 - 130.
- [57] 曾国锋. 钢管混凝土系杆拱桥极限承载力研究 [D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [58] 陈宝春, 秦泽豹, 彦坂熙, 等. 钢管混凝土拱(单圆管)面内受力双重非线性有限元分析 [J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 80 - 84.
- [59] 陈宝春, 秦泽豹. 钢管混凝土(单圆管)肋拱面内受力性能分析 [J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 87 - 92.
- [60] 陈宝春, 秦泽豹. 钢管混凝土(单圆管)肋拱面内极限承载力计算的等效梁柱法 [J]. 铁道学报, 2006, 28(6): 99 - 104.
- [61] 韦建刚. 管拱面内非线性失稳临界荷载研究 - 从有限元程序、判断准则到等效梁柱法 [D]. 福州: 福州大学, 2007.
- [62] 陈宝春, 黄福云, 盛叶. 钢管混凝土哑铃形轴压短柱试验研究 [J]. 工程力学, 2005, 22(1): 187 - 194.
- [63] 陈宝春, 肖泽荣, 韦建刚. 钢管混凝土哑铃形偏压构件试验研究 [J]. 工程力学, 2005, 22(2): 89 - 95.
- [64] 陈宝春, 盛叶, 韦建刚. 钢管混凝土哑铃形梁受弯试验研究 [J]. 工程力学, 2005, 22(4): 119 - 125.
- [65] 陈宝春, 盛叶. 钢管混凝土哑铃形轴压长柱的试验研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(4): 121 - 127.
- [66] 盛叶, 陈宝春, 韦建刚. 新型钢管混凝土哑铃型偏压短柱试验研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 276 - 280.
- [67] 盛叶. 钢管混凝土哑铃形拱极限承载力研究 [D]. 福州: 福州大学, 2007.
- [68] 陈宝春, 欧智菁. 钢管混凝土格构柱长细比影响试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 73 - 79.
- [69] 欧智菁, 陈宝春. 钢管混凝土格构柱偏心受压面内极限承载力分析 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 80 - 83; 102.
- [70] 陈宝春, 欧智菁. 钢管混凝土偏压格构柱偏心率影响试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(增刊): 184 - 191.
- [71] 陈宝春, 欧智菁. 钢管混凝土格构柱试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 32 - 41.
- [72] 陈宝春, 欧智菁. 钢管混凝土格构柱极限承载力计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 55 - 63.
- [73] 陈宝春, 黄文金. 圆管截面桁梁极限承载力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 31 - 36.
- [74] 杨永清. 钢管混凝土拱桥横向稳定性分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 1998.
- [75] 陈宝春, 韦建刚, 林嘉阳. 钢管混凝土(单圆管)单肋拱空间受力试验研究 [J]. 工程力学, 2006, 23(5): 99 - 106.
- [76] 陈宝春, 林嘉阳. 钢管混凝土单圆管拱空间受力双重非线性有限元分析 [J]. 铁道学报, 2005(6): 77 - 84.
- [77] 陈宝春, 韦建刚, 王加迫. 钢管混凝土拱桥挠度限值研究 [J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 56 - 60.

(责任编辑: 王阿军)