

Construction Process and Key Techniques of
Concrete-filled Steel Tubular
Arch Bridges

钢管混凝土拱桥施工 全过程与关键技术

王玉银 惠中华 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

钢管混凝土拱桥施工 全过程与关键技术

王玉银 惠中华 著



机械工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢管混凝土拱桥施工全过程与关键技术/王玉银,
惠中华著. —北京: 机械工业出版社, 2010. 5
ISBN 978-7-111-30565-1

I. ①钢… II. ①王…②惠… III. ①钢管结构: 混
凝土结构-拱桥-工程施工 IV. ①U448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 080538 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 马宏 责任编辑: 马宏

版式设计: 张世琴 责任校对: 张莉娟

封面设计: 路恩中 责任印制: 杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2010 年 6 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm×239mm · 21.25 印张 · 414 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-30565-1

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者服务部: (010)68993821

序

众所周知，1990年建成的四川旺苍县东河大桥是国内第一座钢管混凝土拱桥。由于施工时先是空钢管拱成桥，随后再浇灌管内混凝土，减轻了施工时的起重量，同时，钢管混凝土抗压承载力高，使拱桥的跨越能力大大提高。由此，我国进入了钢管混凝土拱桥迅速发展的阶段，建成了世界跨度最大的重庆巫山长江大桥，跨度460m。迄今，全国已建成通车的钢管混凝土拱桥达三百多座，并且还在不断发展中。

随着钢管混凝土拱桥跨度的不断增大，对施工方法、施工机械、施工技术也提出了更高的要求。在钢管混凝土拱桥施工过程中，结构体系在不断变化，施工过程中施工方案选择、拱肋吊装与线型控制、钢管拱肋混凝土灌注、拱肋稳定性分析与抗风分析、施工过程监测与监控等均是影响钢管混凝土拱桥施工安全、工程进度和经济性的关键技术问题，也是近年来工程技术人员和学者们的研究热点问题。

本书作者先后完成了东莞水道特大桥、广东金山大桥等多座钢管混凝土拱桥的施工，并开展了相关施工关键技术问题研究，积累了丰富的经验和研究成果。其中，广东金山大桥主桥全长580m，为五跨连续无风撑斜靠式钢管混凝土拱桥，主跨160m，是国内已建成的跨度最大的无风撑钢管混凝土拱桥，且其桥址地处台风区，施工难度大。作者在该工程施工过程中，每一步都进行了分析、计算和监测，充分保证了拱桥的施工质量、施工安全和施工工期，并在成桥后，进行了静、动载试验，验证了结构的安全性、可靠性。本书中所总结的施工过程分析方法、关键技术与研究成果，是钢管混凝土拱桥施工中宝贵的参考资料，可供有关技术人员和研究人员参考。

钟吕桐

前言

钢管混凝土具有抗压性能好,承载力高,施工方便等优点,将钢管混凝土应用于拱桥,很好地解决了制约拱桥向大跨度发展的两大问题——材料自重大和施工困难。钢管混凝土拱桥自重轻,强度高,用料省,施工简便,桥型美观,经济性好,是比较理想的大跨度桥梁结构形式之一。钢管混凝土拱桥的上述优势使其特别适合我国国情,自1990年第一座钢管混凝土拱桥——四川旺苍大桥建成后,钢管混凝土拱桥在我国得到了快速发展,至今,全国已建成各类钢管混凝土拱桥达三百多座。目前世界上跨度最大的上承式、中承式、下承式等各类钢管混凝土拱桥几乎全部建在我国,且纪录仍在不断刷新,已建成的巫山上长江大桥跨径达460m,已通过设计审查的合江长江一桥主跨预计达500m,将创造钢管混凝土拱桥单跨跨径新的世界之最。

国内外学者对钢管混凝土结构进行了大量研究,特别是我国的钢管混凝土基本理论研究位于世界前列。但相对于钢管混凝土拱桥在工程应用上的迅猛发展,作为一种应用新材料的桥型,钢管混凝土拱桥的理论研究尚不成熟和完善,目前,国内外均未颁布专门针对钢管混凝土拱桥设计与施工的规程和规范。与此同时,随着钢管混凝土拱桥在国内应用的日益广泛,其跨径不断增加,规模日益增大,桥型也越来越多样化和富于个性化,加之每座桥梁所处的地质条件和周围环境千差万别,促使钢管混凝土拱桥的施工方法和施工技术不断推陈出新,由此,几乎每座钢管混凝土拱桥在施工环节上都有创新和特殊之处。在当今市场经济的大环境下,对施工成本和施工工期的要求日益苛刻,这就对施工企业的施工技术和研发能力提出了更高的要求。特别是钢管混凝土拱桥施工工序多,结构体系随施工的进行不断变化,且受现场气候条件、水文地质条件影响非常大,进行施工过程分析尤为必要。在施工过程中施工方案的选择、拱肋吊装与线型控制、混凝土灌注、施工稳定性分析、施工阶段抗风分析、施工监测监控等均是影响钢管混凝土拱桥施工安全、进度和经济性的关键技术问题,也是近年来工程技术人员和学者们的研究热点问题。

作者近年来先后主持完成了东莞水道特大桥(2005年)、广东金山大桥

(2007年)和吉林伊通河大桥(2009年)等多座钢管混凝土拱桥的施工建设,并在国家自然科学基金、中国博士后特别基金、中国博士面上基金、中铁十三局集团有限公司科技攻关项目等基金的资助下,对钢管混凝土拱桥施工全过程与关键技术进行了较为系统的研究,研究成果先后获得了2008年度吉林省科技进步二等奖和2009年度“中国公路学会科学技术三等奖”。

在上述工程实践和研究成果的基础上,作者针对钢管混凝土拱桥的施工全过程与关键技术撰写了本书。全书共分6章:

第1章钢管混凝土拱桥概述,介绍了钢管混凝土拱桥的发展与应用,钢管混凝土拱桥施工方法以及施工过程对钢管混凝土拱桥力学性能的影响。

第2章多跨连续拱桥施工顺序分析与全过程模拟,以钢管混凝土拱桥广东金山大桥为例,介绍了如何建立多跨拱桥施工过程有限元分析模型,对施工顺序进行优化分析,并结合施工监测数据提出安全、可行的施工方案。

第3章拱肋吊装及施工过程拱肋稳定性分析,介绍了拱肋线型控制分析方法,拱肋吊装阶段扣索索力优化,拱肋吊装阶段稳定性分析和拱肋混凝土浇筑施工顺序及稳定性分析。

第4章施工过程抗风分析,介绍了钢管混凝土拱桥拱肋吊装过程中抗风静力分析和抗风动力分析方法,并结合工程实例,提出了抗风措施及模拟分析方法。

第5章施工监测与分析,介绍了如何制订施工监测方案和实施监测工作,以及如何进行有限元模拟计算结果与施工监测数据的对比分析。

第6章成桥荷载试验与分析,介绍了成桥静、动载试验方案的制订,成桥试验过程,试验结果对比分析等。

作者在从事钢管混凝土拱桥的施工建设、研究以及本书的撰写过程中得到了哈尔滨工业大学钟善桐教授、张素梅教授、盛洪飞教授,中铁十三局集团有限公司张新高工、王守国高工、赵智强经理等专家和同行的帮助与鼓励。研究生耿悦参加了第2章的部分科研工作,研究生王晓璐参加了第3章的部分科研工作,研究生张涛参加了第4章的部分科研工作,研究生刘昌永及汪永田工程师参加了第5章和第6章的部分科研工作。特别是哈尔滨工业大学钟善桐教授精心审阅了本书原稿,提出了宝贵意见并为之作序,在此一并表示感谢。

书中存在的缺点或错误,尚祈读者指正。

目 录

序

前言

第1章 钢管混凝土拱桥概述	1
1.1 钢管混凝土的应用与发展	1
1.1.1 钢管混凝土的特点	1
1.1.2 钢管混凝土在国外的应用与发展	3
1.1.3 钢管混凝土在国内的应用与发展	6
1.2 钢管混凝土拱桥的应用及关键技术	8
1.2.1 钢管混凝土拱桥在国内的典型桥例	8
1.2.2 钢管混凝土拱桥设计与施工的关键技术	20
1.3 钢管混凝土拱桥的研究综述	23
1.3.1 钢管混凝土构件基本性能研究	23
1.3.2 钢管混凝土拱桥静力性能研究	24
1.3.3 施工过程模拟与施工方案优化研究	25
1.3.4 拱肋吊装线型控制与施工稳定性研究	27
1.3.5 钢管混凝土拱桥抗风性能研究	29
1.3.6 钢管混凝土拱桥抗震性能研究	30
1.3.7 钢管混凝土拱桥长期性能研究	32
1.3.8 钢管混凝土拱桥工程研究的发展方向	35
1.4 本书的目的与主要内容	36
第2章 多跨连续拱桥施工顺序分析与全过程模拟	38
2.1 概述	38
2.2 分析模型的建立	40
2.2.1 典型工程实例概况	40
2.2.2 拱肋的有限元模拟	44
2.2.3 边界条件的选取	50
2.2.4 几何非线性的影响	59
2.3 施工全过程与模拟分析	63
2.3.1 施工过程模拟	63
2.3.2 出平面预拱度的设置及影响分析	70
2.3.3 临时支撑对结构的影响分析	77
2.3.4 施工方案的可行性验证	82

2.4 施工方案比选	85
2.4.1 应力历史对结构的影响分析	86
2.4.2 金山大桥施工方案比选	91
2.4.3 金山大桥实测数据与计算结果的对比分析	98
2.5 本章小结	110
第3章 拱肋吊装及施工过程拱肋稳定性分析	112
3.1 概述	112
3.2 钢管混凝土拱肋的施工方法	112
3.2.1 支架施工法	112
3.2.2 转体施工法	113
3.2.3 缆索吊装施工法	116
3.2.4 混合施工法	117
3.3 缆索吊装斜拉扣挂体系设计与施工	118
3.3.1 工程概况	119
3.3.2 方案比选及关键问题	120
3.3.3 塔下张拉斜拉扣挂体系的设计	122
3.3.4 扣挂体系结构计算分析	124
3.3.5 斜拉扣挂安装定位钢管拱肋	129
3.4 拱肋吊装阶段扣索索力优化	133
3.4.1 确定扣索索力的一阶优化方法	134
3.4.2 拱肋吊装阶段的有限元模拟	139
3.4.3 一阶优化方法确定扣索初始索力及拱肋预抬高量	149
3.4.4 拱肋吊装阶段静力分析	156
3.4.5 小结	158
3.5 施工过程拱肋稳定性分析	158
3.5.1 施工阶段有限元模型的建立	159
3.5.2 拱肋吊装阶段稳定性分析	160
3.5.3 风缆对斜靠式拱桥拱肋吊装阶段的影响	166
3.5.4 拱肋合龙后不同施工顺序下的稳定性分析	169
3.6 本章小结	181
第4章 施工过程抗风分析	183
4.1 概述	183
4.2 三维脉动风场模拟分析	183
4.2.1 风荷载基本理论及其主要研究方法	183
4.2.2 脉动风的模拟方法及过程	189
4.3 金山大桥动力特性分析	196
4.3.1 全桥成桥状态动力特性分析	197

4.3.2 钢管合龙前最大悬臂状态动力特性分析	203
4.3.3 全桥空钢管架设完毕状态动力特性分析	206
4.4 静动力风荷载下结构响应分析	208
4.4.1 动力计算的分析方法	208
4.4.2 金山大桥成桥状态风振动力分析	217
4.4.3 钢管合龙前最大悬臂状态风振动力分析	223
4.4.4 全桥空钢管施工状态风振动力分析	228
4.4.5 研究结论及控制措施	233
4.5 本章小结	234
第5章 施工监测与分析	236
5.1 概述	236
5.2 施工监控方案	237
5.2.1 监控项目	237
5.2.2 监测方法及仪器	237
5.3 施工监测数据及分析	244
5.3.1 第一阶段即拱肋吊装阶段监测结果	244
5.3.2 第二阶段即自裸拱焊接完成至成桥阶段监测结果	258
5.4 本章小结	279
第6章 成桥荷载试验与分析	280
6.1 概述	280
6.2 成桥静载试验方案	281
6.2.1 静载试验内容	281
6.2.2 测点布置	282
6.2.3 试验加载原则	285
6.2.4 试验加载车辆与加载图示	285
6.3 成桥动载试验方案	288
6.3.1 动载试验内容	288
6.3.2 测点布置	288
6.4 静载试验结果分析	293
6.4.1 A跨静载试验及测试结果分析	293
6.4.2 西B跨静载试验及测试结果分析	298
6.4.3 西C跨静载试验及测试结果分析	302
6.5 动载试验结果分析	306
6.5.1 自然激励动力测试	306
6.5.2 强迫激励动力测试	309
6.6 本章小结	319
参考文献	321

第 1 章 钢管混凝土拱桥概述

1.1 钢管混凝土的应用与发展

1.1.1 钢管混凝土的特点

钢管混凝土 (Concrete-filled Steel Tubes) 是指在钢管中填充混凝土而形成的构件, 是在劲性钢筋混凝土结构、螺旋配筋钢筋混凝土结构及钢管结构的基础上演变和发展起来的一种新型结构^[1]。钢管混凝土利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用, 即在轴向荷载作用下钢管对核心混凝土的径向约束作用使混凝土处于复杂应力状态之下, 从而使钢管中核心混凝土的强度得以提高, 塑性和韧性大为改善; 同时, 由于混凝土的存在可以避免或延缓钢管发生局部屈曲, 从而保证其材料性能的充分发挥^[2]。与钢筋混凝土相比, 在钢管混凝土的施工过程中, 钢管可以作为浇筑其核心混凝土的模板, 可节省模板费用, 加快施工进度; 与钢结构相比, 可以显著减小所需板材厚度, 取材容易, 制造和安装方便, 同时耐火、耐腐蚀性能好, 抗震和抗冲击性好, 从而降低了工程造价^[3]。总之, 通过钢管和混凝土组合而成的钢管混凝土, 不仅可以弥补两种材料各自的缺点, 而且能够充分发挥二者的优点, 使钢管混凝土结构具有一系列优越的性能。

钢管混凝土的优点主要表现在以下几个方面^[1,3,4,5]:

1. 抗压和抗剪性能好, 承载力高

对于薄壁钢管来说, 其临界承载力极不稳定, 对局部缺陷很敏感。试验证明, 薄壁钢管的实际承载力往往只有理论计算值的 $1/3 \sim 1/5$, 当有残余应力存在时, 影响将更大。在钢管中填充混凝土形成钢管混凝土后, 核心混凝土的存在可以避免和延缓薄壁钢管过早地发生局部屈曲。同时钢管约束了混凝土, 在轴心受压荷载作用下, 混凝土处于三向受压状态, 延缓了受压时的纵向开裂。两种材料互相弥补了彼此的弱点, 充分发挥了彼此的长处, 从而使钢管混凝土具有很高的承载力, 大大高于组成钢管混凝土的钢管和核心混凝土单独承载力之和, 产生了所谓“ $1+1>2$ ”的“组合”效果。

2. 塑性和韧性好, 抗冲击性能和抗震性能好

混凝土脆性较大, 对于高强混凝土更是如此, 除密筋混凝土外, 不能直接用

于结构构件。而钢管混凝土是比较公认的可以改善高强混凝土延性的有效手段之一。将混凝土灌入钢管中形成钢管混凝土,核心混凝土在钢管的约束下,不但在使用阶段改善了其弹性性能,而且在破坏时具有很大的塑性变形。试验结果表明,圆钢管混凝土轴心受压短柱破坏时往往可以被压缩到原长的 $2/3$,仍没有呈现脆性破坏的特征^[1]。由于钢管混凝土具有良好的塑性和韧性,因而抗震性能优越,在历次地震中钢管混凝土结构均表现出良好的抗震性能,特别是在2008年发生的四川汶川大地震中震区大量的钢管混凝土拱桥首次经历了大地震的考验,并表现突出,均未发生损坏和破坏。

3. 施工方便

与钢筋混凝土柱相比,采用钢管混凝土柱没有绑扎钢筋、支模和拆模等工序,施工简便;因管内无钢筋,混凝土浇筑容易,振捣密实,特别是目前采用泵送混凝土、高位抛落不振捣混凝土和免振自密实混凝土等施工工艺,更可加速钢管混凝土构件的施工进度。与预制钢筋混凝土构件相比,不需要构件预制场地。与钢结构构件相比,钢管混凝土构件的构造更为简单,焊缝少,易于制造,特别是组成钢管混凝土构件的钢管壁厚都较小,一般不超过40mm,现场拼接对焊简便快捷,完全可以国产化生产。在建筑结构中,采用钢管混凝土柱以后,建筑的地下部分和基础开挖可实行逆作法施工。这样,建筑的地下和地上结构可同时并行施工,从而节省大约半年的基础开挖和地下室施工时间,并可相应解决在大城市繁华地段因施工场地狭窄所带来的交通、安全、噪声、环境污染等一系列问题。在桥梁工程中采用钢管混凝土拱桥,先期架设的空钢管可以作为浇筑拱肋核心混凝土的支架和模板,且钢管混凝土具有抗压性能好、承载力高的优点,从而很好地解决了制约拱桥向大跨度发展的两大问题——材料自重和施工困难。

4. 耐火和耐腐蚀性能较好

由于组成钢管混凝土的钢管和核心混凝土之间具有相互贡献、协同互补、共同工作的特点,使其具有较好的耐火性能^[5,6]。如1992年初,南方某玻璃厂熔窑发生了出液口崩裂事故,超过1200℃的熔液倾泻到熔窑外并包裹窑底钢管混凝土柱高达3m,在利用高压水枪降温救护3~4h后温度才降到100℃,由于采用了钢管混凝土柱,虽然柱子局部发生了屈曲,但避免了熔窑崩塌的严重事故^[1]。在钢管内灌注混凝土后可以防止钢管内部锈蚀,如1879年英国建设的赛文(Severn)铁路桥墩采用的是在钢管墩内灌注混凝土,其初衷便是为了防止钢管内部锈蚀并承受压力^[1]。

5. 经济效益好

如前所述,作为一种较为合理的结构形式,采用钢管混凝土可以很好地发挥钢材和混凝土两种材料的特性和潜力,使材料得到更为充分和合理地应用,因此,钢管混凝土具有良好的经济效益。大量工程实践表明:采用钢管混凝土的承

压构件比普通钢筋混凝土承压构件约可节省混凝土 50%，减轻结构自重 50% 左右，钢材用量略高或相同；与钢结构相比，可节约钢材 50% 左右^[4]。

1.1.2 钢管混凝土在国外的应用与发展

钢管混凝土在土木工程中的应用已有 100 多年的历史，1879 年英国建设的赛文（Severn）铁路桥墩是最早采用钢管混凝土的土木工程之一，当时在钢管中灌注混凝土的初衷是为了防止钢管内部锈蚀并承受压力^[1]。1897 年，美国人 John Lally 在圆钢管中填充混凝土作为房屋建筑的承重柱（称为 Lally 柱），并获得专利^[7]。20 世纪 20 年代前后，在美国的波士顿、纽约和芝加哥等地，曾将其用作单层和多层厂房建筑（最高到六层）的承重柱^[7]。1930 年，在法国巴黎郊区的 Ibis 地方用其建造过一座 9m 跨度的上承式拱桥^[8]。1937 年，在前苏联列宁格勒（现俄罗斯圣彼得堡）用集束的小直径钢管混凝土作为拱肋，建造了横跨涅瓦河（Нева）101m 跨度的下承式拱桥——沃洛达斯基拱桥^[9]（图 1-1）。1939 年，在西伯利亚依谢季河（Исеть）上建成了跨度 140m 的上承式钢管混凝土铁路拱桥^[10]（图 1-2），与钢拱桥相比，节约钢材 52%，降低造价 20%；但受当时施工方法的限制，施工时是在现场将钢管拱架分段预制并浇灌混凝土形成钢管混凝土构件后，在满堂红的支架上拼装成桥，因此钢管混凝土在施工安装方面的优越性能未得到发挥。

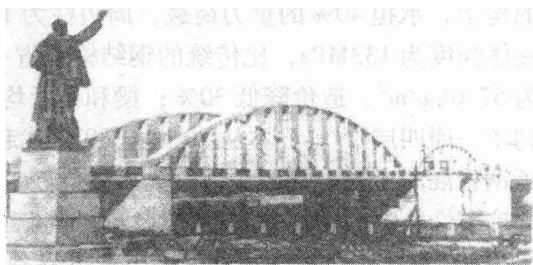


图 1-1 前苏联沃洛达斯基拱桥^[4]

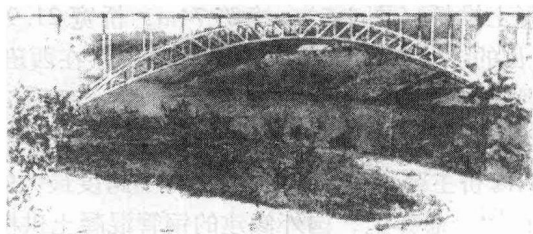


图 1-2 前苏联跨依谢季河拱桥^[4]

20 世纪 60 年代前后，钢管混凝土结构技术在前苏联、西欧、北美和日本等工业发达国家受到重视，曾在一些厂房建筑、个别的多层建筑和立交桥以及特种结构工程中加以应用，如 1979 年建设的诺里尔工业中心和惹列士诺伏斯克市疗养院等多种建筑中采用了很多钢管混凝土，还在一些起重机栈桥中（跨度达 48m）采用，比全钢结构节约钢材 12% ~ 28%，降低造价 28%，比钢筋混凝土结构节约钢材 9%，降低造价 56%^[1]。此外，美国旧金山市采用钢管混凝土建造了一栋 50 层办公楼。但是由于管内混凝土浇筑工艺未得到很好解决，现场的施工操作显得繁琐，使钢管混凝土

土在施工方面的潜在优势未能得到应有的发挥。

20 世纪 80 年代后期, 由于先进的泵送混凝土工艺的发展, 解决了现场管内混凝土浇筑的工艺问题, 加之现代高强混凝土需要钢管套箍以克服其脆性, 因而在美国、澳大利亚等国的一些高层建筑工程中, 钢管混凝土结构技术又悄然兴起, 如美国西雅图的联合广场大厦 (Two Union Square)、Pacific First Center 大厦和 Gateway Tower 大厦^[11,12], 墨尔本公共卫生中心办公大楼^[13]。其中, 西雅图联合广场大厦, 58 层, 总高 219.5m, 核心筒是用四根 3m 直径的钢管混凝土柱组成的构架, 承担 40% 的重力荷载, 周边柱为 14 根较细的钢管混凝土柱, 混凝土圆柱体强度为 133MPa, 比传统的钢结构节省一半的钢材, 钢材用量从 122kg/m² 降为 57.6kg/m², 造价降低 30%; 梁和楼板均为钢—混凝土组合结构, 建造速度达到了一周四层^[11]。日本从 20 世纪 80 年代起在很多 10 层左右的多层建筑中采用了钢管混凝土柱, 在经历地震灾害的严峻考验后, 进一步证明了钢管混凝土优良的抗震性能, 因而在日本的多层、高层和超高层建筑中得到广泛应用。

20 世纪 90 年代后, 钢管混凝土在世界各地的多层、高层、超高层建筑, 工业厂房, 输变电塔等特种结构中得到了广泛应用。钢管混凝土拱桥也在一些国家得到应用, 如 1994 年建成的法国 Antrenas 桥 (图 1-3) 采用了钢管混凝土空间桁架组合拱, 主跨 56m, 下弦杆为直径 1.2m 的钢管, 为防止车辆撞击在拱脚段钢管内灌注了混凝土^[13]。1996 年在捷克建成了一座横跨布尔诺—维也纳高速公路的拱桥 (Arch bridge crossing Brno Vienna expressway), 跨度为 67.5m^[14], 如图 1-4 所示。1998 年建成通车的美国芝加哥 Damen Avenue 桥为无风撑中承式钢管混凝土拱桥 (图 1-5), 净跨 74m, 桥宽 21.9m, 拱肋中心间距 16.3m, 拱脚处 8m 长的拱肋内灌有混凝土^[15]。2001 年在西班牙建成的主跨为 126m 的上承式钢管混凝土拱桥——Arco del Escudo 桥 (又称 Escudo Viaduct 桥), 由两个钢管混凝土双拱肋组成, 矢高为 15.3m 高, 如图 1-6 所示^[16]。2005 年建成的日本长崎新西海桥主跨 240m, 是目前世界上跨度最大的无风撑钢管混凝土拱桥, 如图 1-7 所示^[17]。总体上, 国外修建的钢管混凝土拱桥跨径较小, 数量也不多。

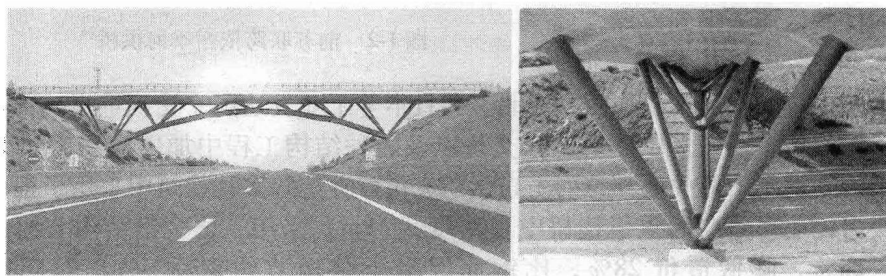


图 1-3 法国 Antrenas 桥^[13]

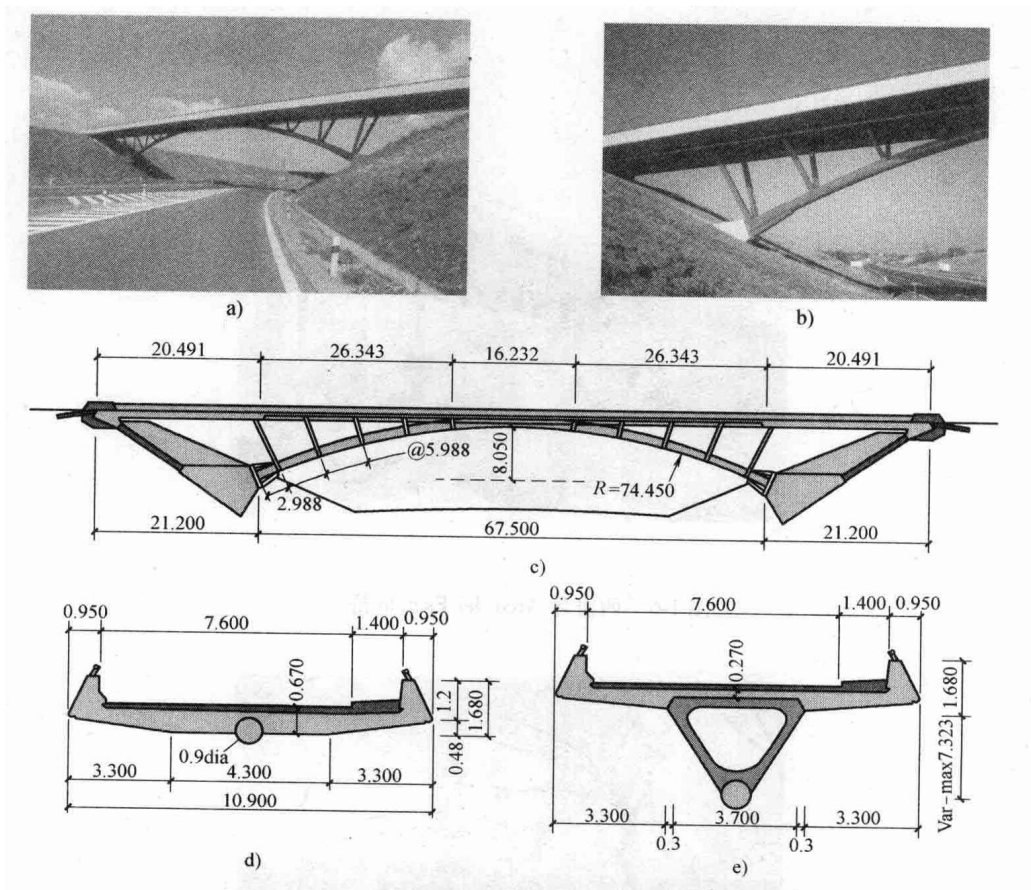


图 1-4 捷克跨布尔诺—维也纳高速公路拱桥^[14]

a) 拱桥全貌 b) 拱脚 c) 拱桥立面图 d) 跨中横截面 e) 拱脚横截面

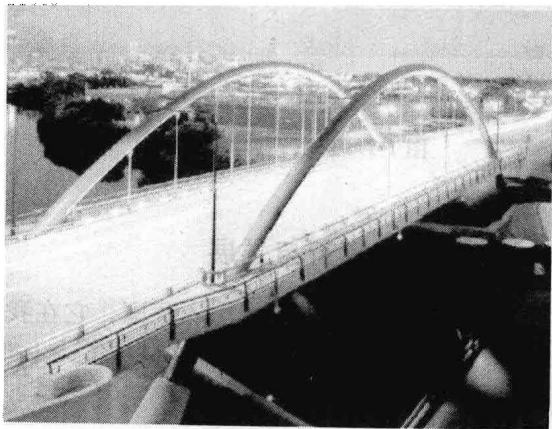


图 1-5 美国芝加哥 Damen Avenue 桥^[15]

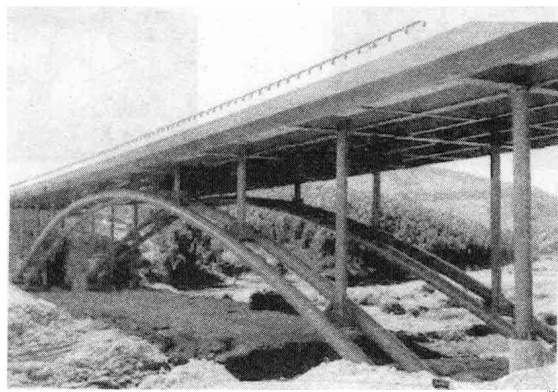


图 1-6 西班牙 Arco del Escudo 桥^[16]

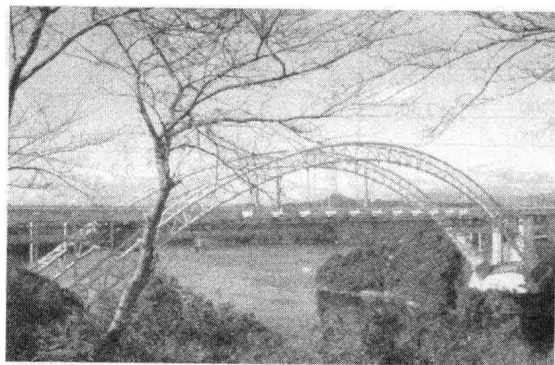


图 1-7 日本新西海大桥^[17]

1.1.3 钢管混凝土在国内的应用与发展

从 20 世纪 60 年代中期钢管混凝土开始引入我国，它在我国的发展与应用经历了两个阶段：从 20 世纪 60 年代中期到 20 世纪 80 年代中期为应用推广阶段，从 20 世纪 80 年代中期迄今为提高发展阶段^[18]。

1.1.3.1 应用推广阶段

1966 年我国成功地将钢管混凝土柱用于北京地铁 1 号线北京站和前门站两

个站台工程中,这是我国最早应用的钢管混凝土工程项目^[4]。1968年建成的辽宁鞍山市第三冶金建筑工业公司下属的预制构件厂的制管车间,是我国第一个采用钢管混凝土柱的工业建筑,选用了三肢钢管混凝土柱。1972年建成的本溪钢铁公司铸锭模车间是我国第一个采用钢管混凝土柱的重工业厂房,选用了四肢钢管混凝土柱。1982年建成的上海国棉31厂的机修车间是第一个采用钢管混凝土柱的多层工业建筑。1972年建成的首钢2号高炉是第一个采用钢管混凝土柱的高炉构件,此后全国各大钢厂新建高炉时多数都采用了钢管混凝土柱替代钢柱。1981年建成的吉林省松蛟线路上的220kV输电杆塔是第一个采用钢管混凝土的输电、变电杆塔。此外,全国很多20世纪七八十年代建造的发电厂,其加热器平台全部采用了钢管混凝土,很多钢厂中的热风炉构件也采用了钢管混凝土。还有一些支架和设备构架也采用了钢管混凝土。钢管混凝土在应用推广阶段,在工业厂房中应用最多,其次是高炉、锅炉构件和输电、变电构架^[18]。

1.1.3.2 提高发展阶段

从20世纪80年代中期开始,钢管混凝土在我国的应用开始进入高层建筑领域和桥梁工程领域^[18]。1992年建成的福建泉州市邮电局大楼是我国在高层建筑中第一个采用钢管混凝土柱的工程,地下层和地上一、二层采用了钢管混凝土柱,为局部采用钢管混凝土的工程。1994年建成的厦门阜康大厦(采用框架结构体系,地下2层、地上25层,高86.5m)是我国第一个大部分采用钢管混凝土柱的高层建筑,地下2层到地上12层采用了钢管混凝土柱。1997年建成的厦门金源大厦是全部柱子采用钢管混凝土柱的第一个高层建筑,地下2层、地上28层,高96.1m。1999年建成的深圳赛格广场是我国全部采用钢管混凝土柱最高的超高层建筑,也是我国第一座自行投资、自行设计、全部国产钢材、自行加工制作及自行安装施工的超高层建筑,地下4层、地上72层,结构高291.6m,如图1-8所示。

随着现代高性能混凝土的不断发展和现代混凝土泵送技术的广泛应用,钢管混凝土所具有的抗压承载力高、钢管混凝土拱肋可兼作施工骨架的突出优点,正在被越来越

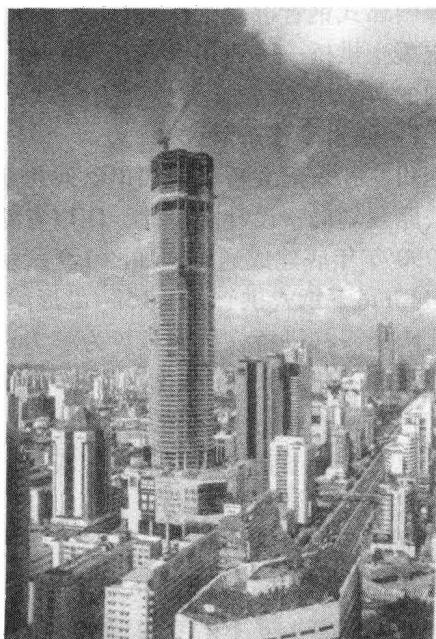


图1-8 深圳赛格广场

多地应用到拱桥中。钢管混凝土拱桥具有自重轻、强度高、延性好、施工便捷、桥型美观、经济性好等优点。虽然我国不是世界上第一个采用钢管混凝土建造拱桥的国家,但我国自1990年第一座钢管混凝土拱桥——四川旺苍东河大桥建成以来,迄今为止,据不完全统计已建成钢管混凝土拱桥300余座,其中跨度大于或等于50m的钢管混凝土拱桥229座,跨度达200m及以上的有约40座,最大跨度的钢管混凝土拱桥已达460m^[19]。因此,现代钢管混凝土拱桥真正的发展与应用是在中国。

1.2 钢管混凝土拱桥的应用及关键技术

1.2.1 钢管混凝土拱桥在国内的典型桥例

如前所述,现代钢管混凝土拱桥真正的发展与应用是在中国。中国不仅已建成世界上跨度最大的上承式钢管混凝土拱桥——湖北支井河大桥(主跨430m)、中承式钢管混凝土拱桥——重庆巫山长江大桥(主跨460m)、下承式钢管混凝土拱桥——广西南宁永和大桥(主跨380m),而且还修建了许多富有创意的钢管混凝土拱桥,如400m跨的斜拉钢管混凝土拱桥——湖南湘江四桥,主跨158m的飞燕式异型钢管混凝土拱桥——吉林伊通河大桥,主跨160m的五连跨无风撑斜靠式钢管混凝土拱桥——广东金山大桥,正在建设的世界上跨度最大的钢管混凝土拱桥——四川合江长江一桥(主跨500m)。以下为钢管混凝土拱桥在国内的典型桥例。

1.2.1.1 四川旺苍东河大桥

四川旺苍东河大桥位于四川盆地北部边缘旺苍城郊,跨越东河,由四川省交通厅公路规划勘察设计院设计,四川省路桥工程公司承建,1988年11月开工建设,1990年年底建成通车,如图1-9所示。旺苍东河大桥的桥型为 $2 \times 16\text{m}$ (T形梁)+115m(下承式拱)+ $2 \times 16\text{m}$ (T形梁)+50m弯桥,主桥为1孔净跨115m的下承式刚架系杆拱桥,桥面布置为净7m+ $2 \times 3.0\text{m}$ 人行道。主拱轴线为悬链线,拱轴系数 $m=1.543$,矢跨比为 $f/L=1/6$;拱圈采用双拱肋,拱肋之间设有8道单圆管横撑,拱肋由上弦圆钢管($\phi 800 \times 10\text{mm}$)、下弦圆钢管($\phi 800 \times 10\text{mm}$)以及由焊接在上下弦管间的两块腹板(10mm厚,间距380mm)形成的“腹腔”共同组成了“哑铃形”拱肋,并在上下弦管和腹腔内灌注C30混凝土^[20]。钢管混凝土拱肋分成5段制作和吊装,采用无支架缆索吊装斜拉扣挂法安装拱肋^[21]。每隔5.0m设置2根直径32mm精轧螺纹钢,全桥共44对吊杆;吊杆上端采用钻孔锚于上部钢管上,下端穿过横梁,横梁下设有一锚板,每对吊杆外套直径为70mm的钢管,并进行灌浆。主桥桥面系由横梁、纵梁、行车道主梁、人行道板