

# 波-桁组合结构桥梁

Corrugated - truss composite structure bridge

李 勇 著



科学出版社

# 波-桁组合结构桥梁

李 勇 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书介绍了波-桁组合结构桥梁的发展现状、应用前景及基本理论,创新性地提出了大跨度波-桁 PC 组合桥梁新结构、钢桁腹 PC 组合桥梁及无弦桁元法等新概念新方法,同时从经济、安全、适用、合理等方面阐述了波-桁组合结构桥梁的优越性,并结合作者不同时期设计施工的各种桥型实例从不同角度加以分析,论证了波-桁组合结构桥梁满足现代桥梁“轻质、高强、大跨、经济、美观”的特点,施工简单方便,具有广阔的应用前景。

本书结合工程实例,简明易读。可作为桥梁工程及相关专业的本科生教材,也可作为研究生的推荐教材,同时还可作为从事桥梁工程设计、施工、科研以及教育工作者的参考资料。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

波-桁组合结构桥梁 / 李勇著. —北京: 科学出版社, 2015.12  
ISBN 978-7-03-043005-2

I. ①波… II. ①李… III. ①组合结构—梁桥—设计 IV. ①U448.21  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 313107 号

---

责任编辑: 余 江 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

<http://www.sciencecp.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 1 月第二次印刷 印张: 12

字数: 285 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 序

本书作者李勇从事桥梁事业 30 余年。长期从事钢-混凝土组合结构桥梁设计与研究，1996 年主持设计首座大跨度全组合结构体系桥梁——深圳彩虹大桥。主编《钢-混凝土组合桥梁设计与应用》，创新性地提出了全组合结构桥梁体系，是我国最早的组合桥梁领域专著之一，提升了我国组合桥梁在国际上的影响。

本书作者首次提出了无弦桁元法，揭示了钢桁腹 PC 梁节点应力形成的力学机理，发明了大跨度波-桁 PC 组合桥梁新结构。采用无弦桁元法，实现了钢桁腹 PC 梁无弦杆、大节段、整体吊装新技术的应用，提高了施工安装效率及关键节点的结构安全性和耐久性，具有重要的工程应用价值。

作者主持或参与多项国家省市重点工程。杭州钱塘江第二大桥，深港西部通道深圳湾跨海大桥，海南三亚西海桥钢管混凝土桁梁桥，深圳大学 1 号桥双层桥面钢桁腹 PC 组合桥梁，国道 107 深圳机场立交桥等工程，技术经济指标优越，对同类桥梁建设具有良好的示范作用。

作者严谨治学，勤奋务实，勇于创新。长期从事第一线工作，在组合结构桥梁领域，力求结构新颖、技术先进、经济合理、施工环保，将组合桥梁设计理论和技术发明成功应用于工程实践。

中国工程院院士 曾庆元

2015 年 5 月 24 日于长沙

# 前 言

钢-混组合结构桥梁,是一种新型绿色环保建筑。基于大跨度钢桁桥梁节点疲劳、局部稳定、经济性问题,发明了钢桁腹 PC 组合结构桥梁、无弦桁元法、波-桁组合结构桥梁等新结构,造型美观,施工环保。

为解决这种新颖的桥梁结构体系其关键节点构造与受力复杂、施工阶段构件离散等技术难题,在国家自然科学基金及省部级科技项目的支持下,通过产学研一体化联合技术攻关,对桁式组合桥梁进行深入的理论与试验研究,发明了桁式组合桥梁新结构、新技术、新工艺。

本书分三大部分,共 9 章。第一部分含第 1 章,组合桥梁基本原理;第二部分含第 2 章~第 7 章,波形钢腹板 PC 组合桥梁及钢桁腹 PC 组合桥梁;第三部分含第 8 章、第 9 章,波-桁 PC 组合桥梁新结构原理及设计方法。

第 1 章 概论。本章主要介绍了钢-混凝土组合结构桥梁的发展概述、主要结构形式及工程应用前景。

第 2 章 PC 桥面板-钢管混凝土桁梁桥。介绍了首座 PC 桥面板-钢管混凝土桁梁桥海南三亚西海桥设计施工方法。

第 3 章 波形钢腹板 PC 组合桥梁。介绍了波形钢腹板桥梁的发展现状、设计理论,提出了形钢腹板 PC 组合桥梁悬臂施工控制方法。

第 4 章 钢桁腹 PC 组合结构桥梁。介绍了钢桁腹 PC 组合梁的发展历史,主要技术特点及设计方法,介绍了悬臂撑-钢桁腹 PC 组合桥梁。

第 5 章 钢桁腹 PC 梁无弦桁元法。简介整体式组合节点,首次提出了无弦桁元法,对组合式节点受力性能作出了详细介绍。

第 6 章 双层桥面钢桁腹 PC 组合桥梁。介绍了双层桥面钢桁腹 PC 组合桥梁基本原理,介绍了双层桥面钢桁腹 PC 组合桥梁设计计算分析。

第 7 章 钢管混凝土索-桁组合拱桥。介绍了索-桁组合拱桥基本原理、设计方法,通过模型试验和施工阶段调索方法确定索-桁组合拱桥优化设计。

第 8 章 大跨度波-桁组合结构桥梁。针对传统预应力混凝土刚构桥梁腹板开裂、跨中下挠,针对波形钢腹板 PC 桥梁跨度受限等问题,首次提出了大跨度波-桁组合结构桥梁新结构。

第 9 章 波-桁-拱组合结构桥梁。首次将大跨度异型组合拱桥及曲线波-桁组合结构桥梁结合于一体,创新性地提出了组合拱桥减小水平推力、提高横向稳定性、方便施工安装的设计方法,实现异型组合拱桥力学与美学的统一。

本书内容包含了作者多年来有关的设计研究成果及在工程应用中的认识和体会,除本书所列的参考文献外,同时还广泛参考和借鉴了国内外大量的研究成果及工程资料。

杜宏彪、王玉银、王宇航、周志祥、龙佩恒、张建东、张承、陈增顺、焦少鹏、李敏、史鸣、胡俊、刘昌永、曹遵津、朱崇利、刘念琴、耿悦、周贇等在相关的理论、试验、设计、计算、施工等研究过程中出色完成了大量的技术工作，许多同行也给予了大力支持与帮助，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此一并向他们表示感谢。

本书得到了方秦汉院士、曾庆元院士、聂建国院士等热情指导与帮助，并在百忙之中对全书进行审阅作序。在此向他们表示衷心的感谢。

作者水平有限，不当之处难免，敬请专家和读者批评指正。

李 勇

2015年10月

# 目 录

序

前言

第 1 章 概论 .....	1
1.1 组合结构桥梁的发展概述 .....	1
1.2 组合结构桥梁的主要形式 .....	2
1.3 波-桁组合结构桥梁的应用前景 .....	8
参考文献 .....	8
第 2 章 PC 桥面板-钢管混凝土桁梁桥 .....	11
2.1 概要 .....	11
2.2 钢管混凝土受力机理 .....	11
2.3 三亚西河景观桥 .....	12
2.4 主梁静力分析 .....	15
2.5 干海子特大桥 .....	20
参考文献 .....	24
第 3 章 波形钢腹板 PC 组合桥梁 .....	25
3.1 波形钢腹板桥梁的发展现状 .....	25
3.2 波形钢腹板 PC 组合桥梁特点与技术优点 .....	31
3.3 波形钢腹板 PC 组合桥梁力学特性与设计计算要点 .....	32
3.3.1 箱梁的竖向弯曲 .....	33
3.3.2 波形钢腹板的剪切屈曲 .....	35
3.3.3 波形钢腹板与混凝土顶底板的连接 .....	37
3.3.4 波形钢腹预应力砼箱形梁的设计计算 .....	40
3.4 波形钢板的制作与波形钢腹板 PC 桥梁的施工 .....	42
3.4.1 波形钢板的制作 .....	42
3.4.2 波形钢腹板 PC 桥梁的悬臂施工 .....	44
3.4.3 悬臂施工波形钢腹板 PC 组合桥梁施工控制 .....	47
3.4.4 波形钢腹板施工控制 .....	48
3.5 波形钢腹板 PC 组合桥梁施工工艺 .....	50
3.6 工程应用 .....	53
参考文献 .....	54

第 4 章 钢桁腹 PC 组合结构桥梁	56
4.1 概述	56
4.2 曲线钢桁腹 PC 组合结构桥梁	58
4.3 悬臂撑-钢桁腹 PC 组合桥梁	62
4.4 工程应用	67
参考文献	69
第 5 章 钢桁腹 PC 梁无弦桁元法	71
5.1 概述	71
5.2 钢桁腹 PC 梁节点应力形成力学机理	72
5.2.1 试验项目概况	72
5.2.2 试验方案	73
5.2.3 桁腹式组合桁梁桥节点有限元非线性分析	82
5.3 整体式组合节点	88
5.4 无弦桁元法	89
5.5 工程应用	90
参考文献	92
第 6 章 双层桥面钢桁腹 PC 组合桥梁	94
6.1 概述	94
6.2 双层桥面钢桁腹 PC 组合桥梁基本原理	94
6.3 无横隔板的抗扭问题	95
6.4 无体外索的抗弯剪问题	96
6.5 钢管混凝土空间放射性 V 墩	98
6.6 理论计算分析	99
6.7 工程应用	113
参考文献	114
第 7 章 钢管混凝土索-桁组合拱桥	115
7.1 概述	115
7.1.1 钢筋混凝土桁架拱桥	115
7.1.2 预应力混凝土桁式组合拱桥	115
7.2 索-桁组合拱桥基本原理	116
7.2.1 钢管混凝土桁式索-桁组合拱桥	116
7.2.2 国内外研究现状	116
7.3 索-桁组合拱桥计算分析	117
7.3.1 组合体系桥梁一般计算原理	117
7.3.2 索-桁拱桥计算原理	119



7.3.3 矩阵方程的求解 .....	121
7.4 索-桁组合拱桥设计 .....	122
7.4.1 工程概况 .....	122
7.4.2 索-桁拱桥施工阶段计算分析 .....	124
7.4.3 钢管混凝土索-桁拱桥索力调整 .....	126
7.4.4 索-桁拱桥参数分析 .....	130
7.5 索-桁组合拱桥模型试验 .....	132
7.5.1 模型试验的目的 .....	132
7.5.2 模型试验方案设计 .....	132
7.5.3 试验测试结果 .....	136
7.6 工程应用 .....	138
参考文献 .....	139
<b>第 8 章 大跨度波-桁组合结构桥梁 .....</b>	<b>140</b>
8.1 概述 .....	140
8.2 波形钢腹板 PC 梁跨度局限性 .....	140
8.3 波形钢腹板力学机理 .....	141
8.3.1 概述 .....	141
8.3.2 基本力学性能 .....	141
8.4 钢管混凝土桁腹力学机理 .....	143
8.5 波-桁共同作用力学机理 .....	144
8.6 大跨度波-桁组合桥梁新结构 .....	144
8.7 工程应用 .....	145
8.7.1 工程 1: 湖南湘西某大桥方案设计 .....	145
8.7.2 工程 2: 老谷高速公路鲍家洲汉江特大桥 .....	146
8.7.3 工程 3: 衡阳县灵瑞寺(清江)大桥 .....	154
参考文献 .....	168
<b>第 9 章 波-桁-拱组合结构桥梁 .....</b>	<b>169</b>
9.1 概述 .....	169
9.2 曲线波-桁组合梁 .....	169
9.3 异型组合结构拱 .....	171
9.4 波-桁-拱组合桥梁新结构 .....	172
9.5 波-桁-拱组合桥梁新空间计算分析 .....	173
参考文献 .....	182

# 第 1 章 概 论

## 1.1 组合结构桥梁的发展概述

钢-混凝土组合结构桥梁,既是一种高强、高性能的材料组合,也是一种高效、经济、环保的先进施工技术<sup>[1]</sup>。近年来,钢-混凝土组合结构在桥梁工程中获得了广泛的应用。随着泵灌技术、高强、高性能、轻质混凝土的研究及应用,新型组合结构体系如钢管混凝土结构<sup>[2,3]</sup>、板-桁组合结构<sup>[4,5]</sup>、组合斜拉结构<sup>[6]</sup>、预应力组合结构桥梁的工程应用,钢-混凝土组合结构有关规范的编制<sup>[7-9]</sup>,钢-混凝土组合结构进入了新的发展时期。

抗拉性能强的钢材、抗压性能强的混凝土,分别合理地用在构件的拉伸区及其压缩区,最大限度地追求高性能、经济性是钢与混凝土组合结构的设计原则。将两种材料合理地加以组合后,从经济性来看要好于钢结构或混凝土结构。组合结构最大的技术特点是组合后的性能已经超过材料各自的力学性能。

组合梁的优点:①抗疲劳性能好,使用寿命长;②稳定性好,承载力高;③冲击系数降低;④降低梁高,增强刚度;⑤施工方便,造型美观;⑥节省钢材,降低造价。综合效益好,特别适合我国国情。

20 世纪 30 年代是欧美各国桥梁技术和设计理论的一个重要发展时期,到 20 世纪 60 年代得到广泛应用,建造了大量的各种形式的组合结构桥梁。进入 20 世纪 80 年代组合结构有了新的发展,法国 1980 年以来建造的公路桥梁以钢-混凝土组合桥梁为主,其最有竞争力的跨径范围为 60~80m,甚至可达 30~110m,以这个跨径范围建设的桥梁有 85%是组合结构桥梁。日本也大力进行基础性理论研究和试验,开发了不同形式的组合结构桥梁,并制定了相应规范。英国大多数 20~160m 跨径及以上的公路桥梁,组合结构桥梁竞争力很强,德国及美国的组合结构桥梁应用更广。

欧美日等发达国家大力开展组合结构桥梁研究开发,目前国外的几个主要规范如 EUROCODE、BS5400、DIN、AASHTO 等都包含组合结构设计部分。在常见的组合钢板梁桥、组合钢箱梁桥获得长足发展的同时,出现了许多有创意的新型组合结构桥梁,如波折腹板组合箱梁桥、钢桁腹杆组合桥等。组合结构桥梁的结构形式与材料指标得以不断优化,新结构与新工艺不断推出。通过更加注意对造价、耐久、美观的全面考虑,组合结构桥梁获得强大的竞争力。在中小跨度的公路桥、铁路桥以及城市桥梁中获得广泛应用,占据绝对比例优势。

欧洲以及日本等大力进行基础性理论研究和试验。近年来,国外的空间非线性有限元分析方法日渐进步与成熟,对结构总体承载性能、桥面板开裂影响、钢梁局部稳定、连接件与结合部的力学特点等可以进行更精确的分析,已经逐步取了解析分析方法以

及基于初等梁理论的简化方法。通过对连接件刚度的模拟,从而更符合实际地采用不完全平截面变形理论进行组合结构桥梁受力分析,通过引入结构与材料本构关系来考虑负弯矩区桥面板开裂影响,以更精确地评估结构从加载开始到破坏过程的非线性行为关系与受力状况。

借助大量研究成果及分析方法的进步,发展了允许混凝土板开裂、用裂缝宽度限值代替拉应力限值的设计方法,从而简化了构造、方便了施工,促进了连续组合结构桥梁的发展。借助新的稳定理论与分析方法进行设计,在结构不同区域变化钢与混凝土连接刚度,达到截面完全组合与不完全组合相结合的设计方法;利用施工手段调节钢梁与混凝土板应力状态的设计方法;连接件以群钉形式间断设置,从而实现有效施加预应力的方法等。在设计和施工密切配合的技术动态下,完善发展了施加预应力的支点升降法、减小中支点负弯矩的间断浇筑法、提高桥面板质量的预制桥面板法以及快速施工的桥面板纵向滑移法等。

钢梁顶推时通常不设临时墩与导梁,为了控制过大变形、减小结构受力,发展了在钢梁上安装吊索支架辅助施工的方法。主跨 213.75m 的 Caroni 河桥,钢梁顶推时,其梁底设有桁架衬托。瑞士主跨为 130m 的 Vaux 桥,顶推时配置了竖向升降量达 4.5m 的可调支承,以适应变高梁的梁高变化。法国于 2000 年前后开发了另一种桥面板顶推施工方法,其分块预制板在浇筑时用钢管连接起来,顶推到位后浇筑混凝土形成整板。

在基础理论研究方面,组合结构桥梁的整体受力性能、负弯矩区的力学性能、桥面板的合理构造、钢与混凝土的连接性能、连接件的滑移影响与力学性能以及钢结构屈服稳定与构造要求等问题。欧美等发达国家在基础理论、分析与设计方法以及施工技术等方面获得了高度发展,设计与施工精细化与相互依存的程度日渐提高,并呈现不断改进与创新的技术动态。

组合结构桥梁在国外发展很快,建设了许多形式新颖、功能合理的桥梁。钢桁腹组合梁桥与波形钢腹板组合梁桥,以节段预制化、架桥机整孔节段拼装或悬臂拼装法施工,既保证了质量又体现了快速施工。合理地使用耐候钢、高强度等高性能钢材,以及轻质混凝土、钢纤维混凝土等高性能混凝土来提高耐久性;巧妙地使用钢管、波形钢板、体外索与混凝土组合来提高构件截面性能;考虑两种材料的组合作用、积极采用厚钢板等来减少加劲肋、横撑等次要承重构件来追求体系的简化。在进行组合截面性能研究的同时,加大结构体系研究有助于推动组合结构桥梁在我国的发展。

## 1.2 组合结构桥梁的主要形式

国内外钢-混凝土组合结构桥梁发展很快,日本大部分公路桥都采用组合结构桥梁,组合结构桥梁在我国也取得了许多新的进展。

其主要结构类型有:钢-混凝土组合梁、波形钢腹板 PC 梁、钢桁腹 PC 组合结构桥梁、钢管混凝土拱桥及其混合结构形式等。

## 1. 钢-混凝土组合梁

将抗拉性能强的钢材、抗压性能强的混凝土，合理地用在构件的拉伸区及其压缩区，追求高性能、经济性是钢-混凝土组合梁的设计原则。

法国于1990年完成的 Hospital 桥，两根主梁的间距为12.6m，通过使用高强度的混凝土桥面板及施工横向预应力钢筋来减少主梁根数。北京国贸桥(图1.1)位于北京市朝阳区，是长安街和北京三环路相交处的一座立交桥，始建于1986年，2000年拆除重建。重庆长江大桥复线桥(图1.2)主跨330m，采用钢与混凝土混合结构<sup>[10-13]</sup>。



图 1.1 北京国贸桥(2002年)



图 1.2 重庆长江大桥复线桥(2006年)

连接件也称剪力件，它保证钢梁与钢筋混凝土板的整体共同工作性能。连接件的形式较多，包括用钢筋制作的柔性连接件和用带加劲肋的角钢制作的刚性连接件。带头栓钉作连接件施工速度快、质量好，使用较为普遍。此外，也可用摩擦型高强螺栓传递剪力。这两种连接件，一般也属于柔性连接件。

许多研究者对焊钉连接件在单个设置时的抗剪承载力进行了研究，依据试验结果也提出了各自的计算方法。Hiragi 等认为主要的影响因素有焊钉的杆部直径、高度及其混凝土的抗压强度，焊钉作为连接件会受到剪力或拉拔力的共同作用。美国最早使用的焊钉直径分别为19mm、22mm，德国焊钉直径为10mm、22mm，日本焊钉直径为13mm、19mm。

Kurita 等进行了焊钉群抗剪强度试验。试验表明：预留孔设置与否都不影响焊钉的抗剪刚度、抗剪承载力、最大滑移量，焊钉都是根部剪切破坏<sup>[14,15]</sup>。通过与单个设置的焊钉比较，焊钉群的每一个焊钉的抗剪承载力并未减小。

开孔钢板连接件的作用机理主要有三个方面：一是依靠孔中混凝土的抗剪作用承担沿钢板的纵向剪力；二是依靠孔中混凝土的抗剪作用承担分离力；三是与型钢连接件相同，钢板受压承担面外的横向剪力。开孔钢板连接件有4种破坏模式：

- ① 两孔之间的钢板发生剪切破坏；
- ② 圆孔中的混凝土发生割裂破坏；
- ③ 圆孔中的混凝土发生剪切破坏；
- ④ 圆孔中的混凝土发生压缩破坏。

### 2. 钢桁腹组合 PC 梁

国外研究认为,把钢桁架的上下弦用钢筋混凝土板代替,节省钢材,减小截面高度,是有意义的探索。

德国于 1984 年建成的 Nesenbach 铁路桥(图 1.3)是一座三跨简支的上承式组合桁架桥,跨径(33.5+43.5+33.5)m。负弯矩区没有设置预应力钢筋,在桥墩附近的两个下弦杆之间浇筑混凝土板,上下弦杆形成组合结构的双重组合体系。

瑞士 1997 年建成的 Lully 高架桥(图 1.4)是一座 23 跨连续的上承式组合桁架,跨径为(29.93+21×42.75+29.93)m,桥面宽 12m,上下线分离式。

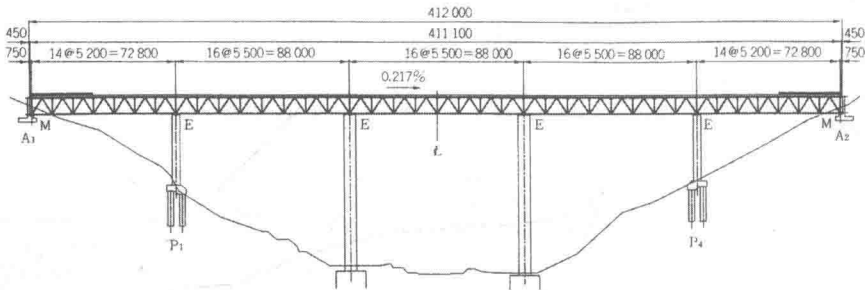


图 1.3 德国 Nesenbach 铁路桥(1984 年)

板桥川公路桥在设计负弯矩区时不考虑与钢桁架的组合,桥面板采用的是组合结构<sup>[16-19]</sup>。日本猿田川桥(图 1.5),桥跨组合为(63×5+2×90+100+2×110+58×5)m。深圳 107 国道桥(图 1.6),桥跨组合为(30+30)m。法国 Bras de la Plaine 桥(图 1.7)为单孔跨径 280m,桥梁全长 305m,腹板为钢桁腹腹杆<sup>[20-23]</sup>。

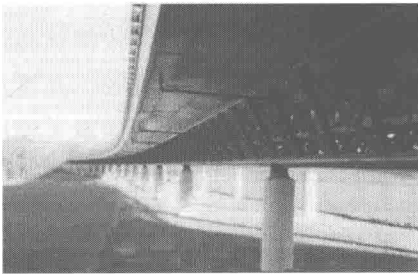


图 1.4 瑞士 Lully 桥(1997 年)

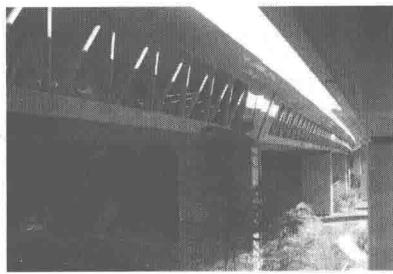


图 1.5 日本猿田川桥(2006 年)

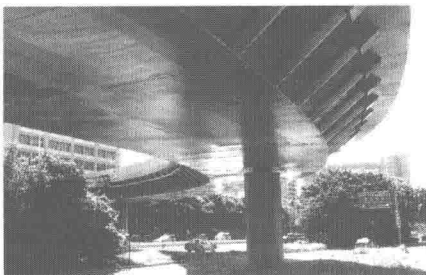


图 1.6 深圳 107 国道桥(2014 年)

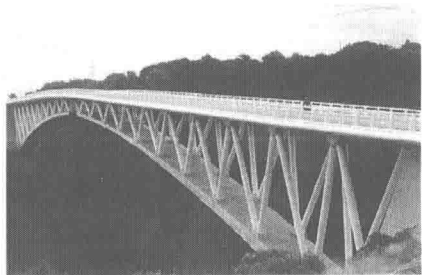


图 1.7 法国 Bras de la Plaine 桥(2001 年)

现代桁架桥基本上都开始采用高强螺栓或焊接进行杆件间的连接,最近建成的芜湖长江大桥采用的就是全封闭焊接整体节点,弦杆之间的连接采用大直径高强螺栓。

钢桁架梁与混凝土桥墩固接,不仅可以减少支座维护费用、减小主桁架的负弯矩,而且伴随着超静定次数的增加,抗震性能提高。椿原桥位于日本东海北路公路干线上,2002年7月建成,为3跨连续组合结构桁架桥。

### 3. 波形钢腹板 PC 梁

1986年,法国完成了一座钢腹板替代混凝土腹板的简支箱梁桥 Cognac 桥,主跨(31+43+31)m,采用体外索施加纵向预应力。1987年法国又修建了 Maupre 高架桥(图 1.8),桥梁跨径布置为(41.0+57.3+53.6+50.4+47.3+44.1+41.0)m,主梁为三角形箱连续梁桥,随后又修建了 Dole 桥、Asterix 桥,桥跨形式包括简支和连续桥梁。

1995年建成的 Dole 桥为波折腹板 7 跨连续组合箱梁桥,其中有 5 跨跨度达到 80m。日本栗东大桥(图 1.9)主跨 170m 双索面低塔斜拉桥,单箱三室波形钢腹板组合梁。

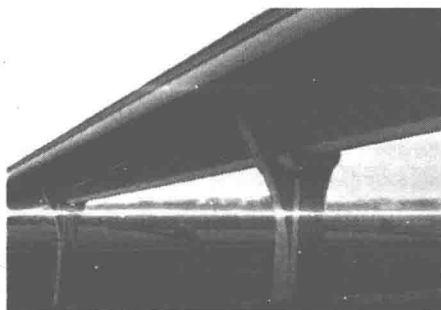


图 1.8 法国 Maupre 高架桥(1987年)

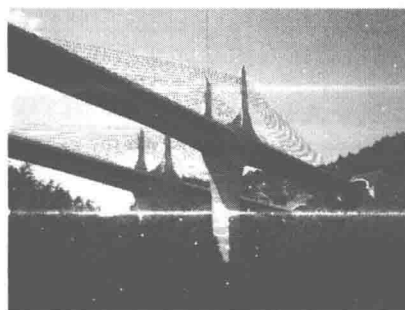


图 1.9 日本栗东大桥(2005年)

波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥,主要具有以下优点。

- (1)用波形钢腹板替代钢筋混凝土腹板,主梁自重可以减轻 20%~30%;
- (2)波形腹板在桥梁纵向刚度几乎为零,大幅度提高了施加预应力的效率;
- (3)波形腹板使上下混凝土翼缘板相互间不受约束,徐变、收缩影响减小;
- (4)波形腹板是利用弯成的波形几何形状代替加劲肋,具有很高的抗剪强度;
- (5)箱梁腹板制作可以实行工厂化,并且伴随着自重减轻,架设施工容易。

波形钢腹板替代混凝土腹板,抗扭刚度及抗剪刚度分别降低到约 40%、10%,纵向及横向抗弯刚度分别降低到约 90%、75%。

2006年,日本完成了一座连续长度超过 1000m 以上的波形钢腹板组合箱梁桥——鬼怒川桥(图 1.10),该桥于 2003年7月24日开始修建,2006年11月4日建成。桥长 1005m,为 16 跨连续梁桥,跨径组合为(45.75+4×46.90+61.70+9×71.90+60.55)m,桥宽 9.65m,根部梁高 5.0m,跨中梁高 4.0m。

2006年,日本矢作川桥(图 1.11)修建完成,其结构形式采用 4 跨预应力斜拉桥,跨径组合为(173.4+2×235.0+173.4)m,采用悬臂施工的方法修建而成。

矢作川桥是一座波形钢腹板箱梁的斜拉桥,跨度布置为(174.7+2×235.0+174.7)m。



图 1.10 日本鬼怒川桥(2006年)

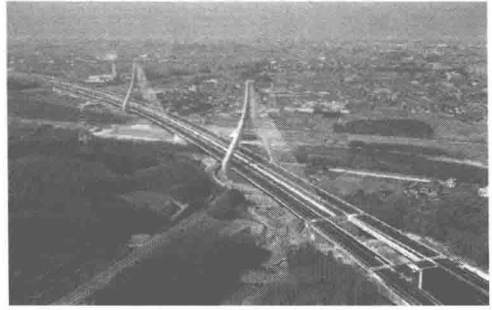


图 1.11 日本矢作川桥(2006年)

波形腹板与混凝土顶、底板之间的连接是最重要的结合部位，两者连接方式大致有两种，即腹板上下端焊接翼缘板并配置连接件的翼缘型、把腹板直接伸入混凝土板中的嵌入型连接。波形腹板与内衬混凝土用焊钉连接，根据分担的剪力，确定腹板及混凝土厚度。用钢管代替底板构成三角形截面，主梁稳定的截面形式对抗扭有利；纵向体外索有利索的维护及更换。采用波形腹板及钢管混凝土作为梁杆件使用，不仅技术含量很高，而且包括桥墩在内的整体造型美观、设计新颖。

#### 4. 钢管混凝土拱桥

钢管混凝土拱桥属于钢-混凝土组合结构中的一种。钢管混凝土拱桥是将钢管内填充混凝土，由于钢管的径向约束而限制受压混凝土的膨胀，使混凝土处于三向受压状态，从而显著提高混凝土的抗压强度。钢管由于混凝土的内衬作用，提高了钢管的压杆稳定性。

钢管混凝土工作特点：①核芯混凝土可以防止管壁丧失局部稳定性，防止钢管内表面锈蚀；②钢管可以阻止核芯混凝土在纵向压力作用下的侧向变形，使其处于三向受压状态，从而提高其抗压强度和抗变形能力<sup>[24]</sup>。

1923年关东大地震后，发现钢管混凝土结构破坏并不明显，故在以后的建筑，大量采用该类结构。1995年阪神地震后，更显示其优越的抗震性能，进一步成为优先考虑的结构。

钢管本身，既是施工模板，又兼有纵向钢筋和横向箍筋作用，同时承担劲性承重骨架，可省去模板。即使管壁无摩擦、无加劲肋的钢管混凝土梁，作为受弯构件使用，局部屈曲后仍有很大的承载力和变形能力<sup>[25]</sup>。

1990年，中国第一座钢管混凝土拱桥，四川的旺苍东河大桥建成，主跨110m。目前，已建成的世界最大跨度组合结构拱桥为巫山长江大桥(图1.12)，主跨492m；非常典型的采用双层桥面的钢管混凝土拱桥，杭州钱塘江四桥(图1.13)，主跨1376m。

钢管混凝土拱桥属于钢-混凝土组合结构中的一种。钢管混凝土拱桥是将钢管内填充混凝土，由于钢管的径向约束而限制受压混凝土的膨胀，使混凝土处于三向受压状态，从而显著提高混凝土的抗压强度。

同时钢管兼有纵向主筋和横向套箍的作用，同时可作为施工模板，方便混凝土浇筑，

施工过程中, 钢管可作为劲性承重骨架, 其焊接工作简单, 吊装重量轻, 从而能简化施工工艺, 缩短施工工期。

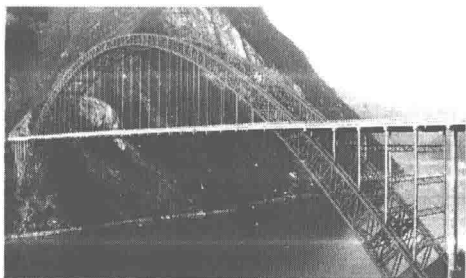


图 1.12 巫山长江大桥(2005 年)

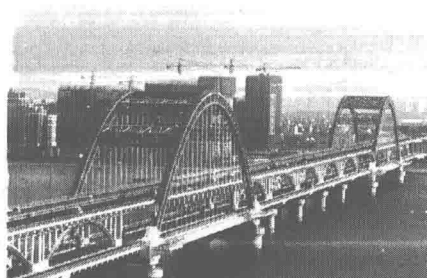


图 1.13 杭州钱塘江四桥(2004 年)

我国钢管混凝土拱桥的应用与发展已引起国外的关注, 钢管混凝土拱桥在我国得以迅速发展, 目前, 我国已经建成的钢管混凝土拱桥超过 200 座, 我国桥梁工作者也通过学术交流将其向海外进行了介绍。

法国一座钢管混凝土拱桥, 位于 Gervaudan 公路上, 跨越 Escudo 河, 长 229m, 宽 30m。其主跨径为 126.4m 的上承式拱。捷克也建成了一座钢管混凝土拱桥, 它是跨越 Brno-Vienna 高速公路的地方道路桥梁。

钢管混凝土内力计算时刚度宜取大值, 即根据中国钢管混凝土结构设计与施工规程 CECS28: 90 和英国 BS5400 标准取钢管与混凝土刚度叠加方法。

德国巴伐利亚艾森木桥位于德国巴伐利亚州艾森(Essing, Bayern), 跨越美因—多瑙河运河(Main-Danube Canal), 是一座波浪形人行木桥。该桥全长 190m, 主跨 74m, 宽 3.2m, 采用木结构桥墩和木梁, 建于 1986~1987 年, 1992 年 9 月维修完成。

海南三亚西河桥建于 2004 年, 为钢管桁架结构形式, 长 245m, 宽 4.6m。共 15 个节段, 主跨 60m, 节段多为双曲线桁架梁, 结构新颖, 如出水蛟龙。

桥梁的安全性、适用性、耐久性、施工要求方面的结构需求, 使得桥梁结构具有如下特点: 不可完全试验, 荷载复杂, 使用环境极端, 使用期限长等。这些特殊要求使得复合材料在桥梁工程中有更好的应用前景<sup>[26,27]</sup>。

FRP 桥梁被各国的研究者认为是 FRP 在结构工程中应用的又一新的发展方向, 并进行了一系列的研究与应用工作。

与初期的 FRP 桥梁应用不同, 近年来的 FRP 桥梁是指采用拉挤、缠绕、RTM 等高性能碳纤维、高性能玻璃纤维、玄武岩纤维等具有稳定力学性能和使用性能的桥梁或桥梁部件, 这些桥梁可称为“高性能复合材料桥梁”。

### 5. 波-桁组合结构桥梁

从目前国内外统计资料显示, 传统的预应力混凝土刚构桥在跨径达到 200m 以上时, 由于结构自重很大跨中下挠问题非常突出, 在设计时为了解决此问题往往增加梁高, 增加梁高带来的问题就是工程成本的增加, 并不经济, 为使桥梁结构能满足强度要求又具有经济性, 国内外工程师提出了一些新的处理措施和新型的桥梁结构<sup>[28]</sup>。



近年来我国高速公路发展迅速,逐渐从城市向山区发展,各地区联系越来越紧密,面对山区大跨V形峡谷,斜拉桥和悬索桥由于成本过高,拱桥、连续梁和混凝土连续刚构桥是工程师选择的常用方案。由于大跨度连续刚构桥存在一些问题,所以提出了把腹板从传统的混凝土改为钢桁或波形钢腹板,提出了一种新的组合桥梁——大跨度波-桁PC组合桥梁,如图1.14所示。

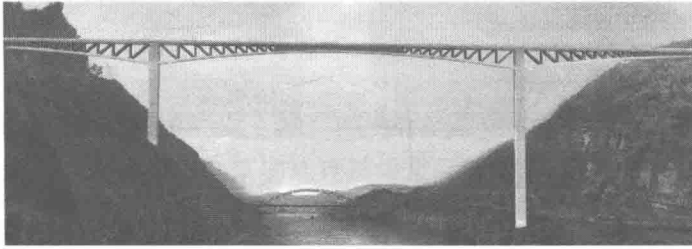


图 1.14 大跨度波-桁 PC 组合刚构桥梁效果图

### 1.3 波-桁组合结构桥梁的应用前景

传统预应力混凝土刚构桥梁自重很大跨中下挠问题非常突出,大跨度波-桁PC组合桥梁充分发挥了钢桁管强度高、通风性能好、波形钢腹板抗剪性能好的优点,不仅造型美观,抗风抗震性能优越,与悬索桥、斜拉桥相比,可降低工程造价,满足工程建设需要。面对国内组合结构桥梁的研究与实践均与其国际发展水平有明显差距的现状,必须充分借鉴国际先进经验、以高起点开展理论研究与工程实践,才能更好地促进组合结构桥梁在我国的健康发展。

我国未来的交通发展仍然需要修建大量桥梁,面对日益缺少的沙、石等天然建筑材料的资源,我国已成为钢材年产量达11亿多吨的产钢大国,混凝土桥虽然短期养护费用低、但存在自重大、工期长、盐害与性能退化等不可避免的问题,钢桥存在疲劳、屈曲、腐蚀、振动及噪声等问题,桥梁建设迫切需提高桥梁耐久性、适用性、环保性、全寿命经济性和景观性<sup>[29,30]</sup>。由于组合结构桥梁整体受力的经济性、充分发挥钢与混凝土各自材料性能优势并弥补各自缺点的合理性,以及便于施工的突出优点,其必将成为中国桥梁建设的重要组成部分。新型大跨度波-桁组合结构桥梁,将成为未来桥梁发展方向之一。这是发达国家桥梁建设的经验,亦是桥梁建设科学发展的必然。

#### 参 考 文 献

- [1] Chen H B, Chen Q, Wang F, et al. Pushing effect analysis and scheme design of closure of long span continuous rigid-frame bridges. Highway, 2009, (7): 209-211.
- [2] Li Y L, Zhou W. Calculation methods and meshanical behavior analysis of jacking force for closure of continuous rigid-frame bridge. Technology & Economy in Areas of Communications, 2007, (5): 6-8.