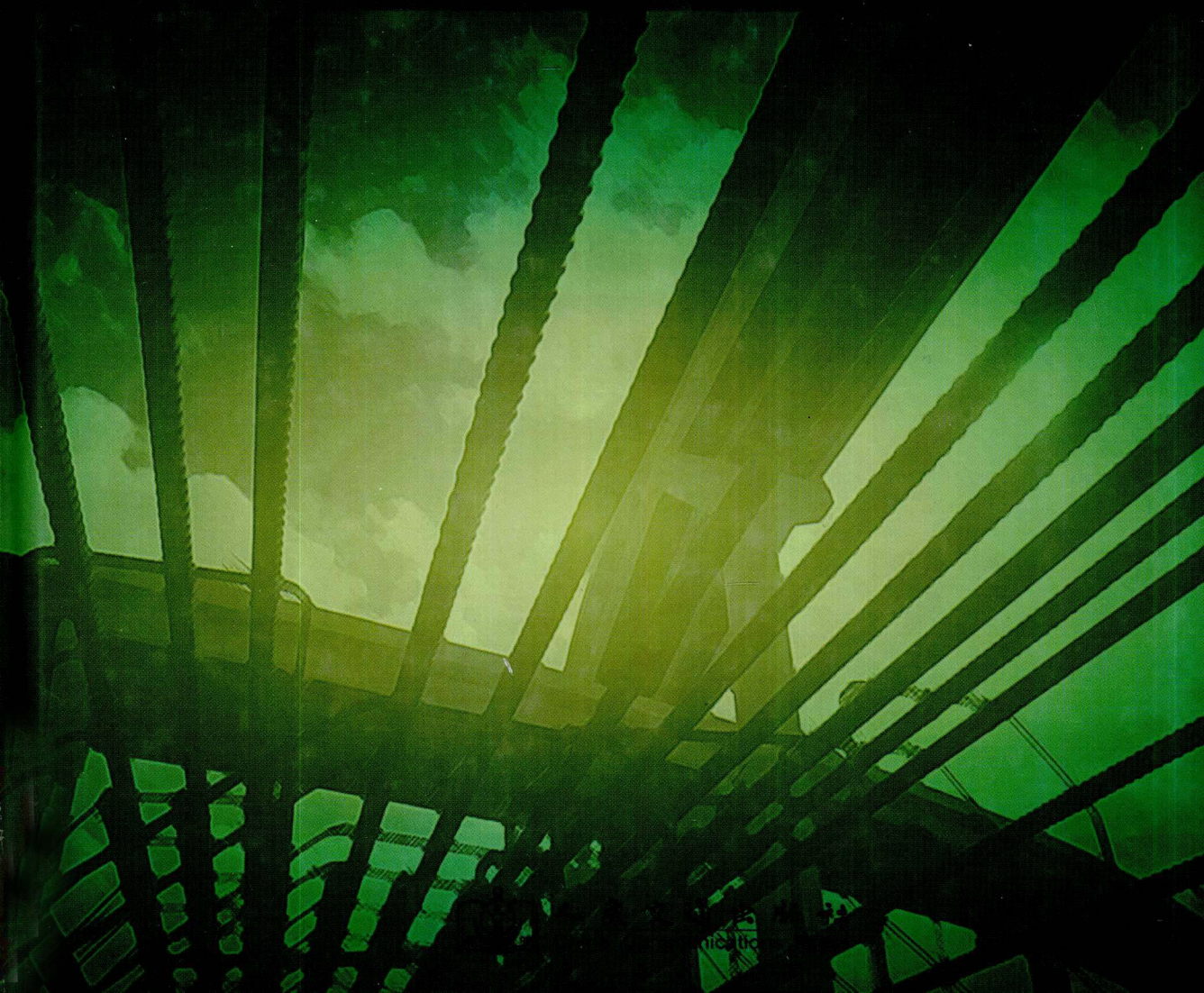




Steel-Concrete Composite Bridges

钢-混凝土组合结构桥梁

◆ 聂建国 编著



国家著作出版基金资助出版

钢-混凝土组合结构桥梁

► 聂建国 编著



人民交通出版社

内 容 提 要

本书首先介绍了钢-混凝土组合结构桥梁的工作机理和基本设计方法,重点介绍了简支组合结构与连续组合结构桥梁的设计方法,同时分析了影响组合结构桥梁受力性能的几个关键问题和相应处理方法。然后,针对组合结构桥梁的发展趋势,对组合桁梁桥、组合刚构桥、混合梁桥和波形钢腹板组合桥的基本原理和设计方法进行了分析说明。最后,介绍了作者所提出的钢-混凝土组合加固技术。书中配合我国以及欧、美、日、等国的主要桥梁规范对组合结构桥梁的基本设计方法进行了讲解,并介绍了各类组合桥桥型的典型工程实例。

本书可供桥梁设计、施工及管理人员使用,也可供相关专业的科研人员及高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

钢-混凝土组合结构桥梁/聂建国编著. —北京:
人民交通出版社,2011.4

ISBN 978-7-114-08899-5

I. ①钢… II. ①聂… III. ①钢结构:混凝土结构—
组合体系桥 IV. ①U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 024530 号

书 名: 钢-混凝土组合结构桥梁

著 者: 聂建国

责任编辑: 杜 琛

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969、59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 23.5

字 数: 581千

版 次: 2011年4月 第1版

印 次: 2011年4月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08899-5

印 数: 0001—3000册

定 价: 72.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

作者简介

聂建国,男,博士,1958年生,湖南衡阳人。现任清华大学土木工程系教授,博士生导师,教育部长江学者特聘教授,结构工程研究所所长、土木工程安全与耐久教育部重点实验室主任、土木工程系和建设管理系学术委员会主任。兼任中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会常务副理事长、中国建筑学会建筑结构分会副理事长等职。已从事钢-混凝土组合结构研究近30年,多项成果被《钢结构设计规范》、《公路钢结构桥梁设计规范》、《钢-混凝土组合桥梁设计施工细则》、《铁路钢-混凝土结合梁设计规范》等规范、规程采用。在 *Journal of Structural Engineering-ASCE*、*Engineering Structures* 等国际期刊发表论文20余篇,在《土木工程学报》、《建筑结构学报》发表论文50余篇。先后主持国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重点项目、北京市自然科学基金重点项目等40余项科研项目,完成包括重庆观音岩长江大桥、青岛海湾大桥、厦门园博园大桥、深圳北站大桥、南宁竹溪大道—民族大道立交桥、北京紫竹院立交桥加固等一批组合结构桥梁的科研或设计工作。已授权发明专利10项。曾获国家科技进步二等奖1项,获省部级科技进步一、二等奖11项,连续获首届和第二届中国百篇最具影响国内学术论文奖,获全国优秀博士后等荣誉称号。

序

近一百多年是桥梁工程技术迅速发展的时期。桥梁工程师为满足交通发展的需求,不断挑战更大的跨度和更高的难度,在桥梁创新和技术进步等方面做了大量工作。钢-混凝土组合结构桥梁的发展和逐渐成熟,就是其中有代表性的成果和未来的重要发展方向之一。

现代桥梁所采用的主要结构材料无外乎钢材与混凝土两类,这是由材料的性能和价格等多方面因素所共同决定的。目前看,在可以预见的未来很长一段时期内,钢材与混凝土仍将是建造桥梁的主要结构材料。钢材和混凝土具有各自不同的特性,最典型的就是混凝土抗压强度高而抗拉强度低,在自重和施工方面存在一些不足,但价格相对低廉;钢材则具有优良的力学性能,但由于截面通常较小,在某些受力状态下的稳定问题可能比较突出,而且造价相对昂贵。那么,从改善或提高结构性能、降低造价的角度出发,很自然就会想到的一条途径,即如何将这两种材料进行优化组合,设法发挥各自的优势而抑制其缺点。19世纪下半叶发展起来的钢筋混凝土结构,就是这种思想的体现。当然,钢筋混凝土现在已经被视为一种非常普通的结构形式,而将各类钢构件通过机械连接或约束等方式与混凝土相组合所形成的结构称为钢-混凝土组合结构。组合结构经过几十年的发展,形成了以组合梁、钢管混凝土等为代表的各类结构形式,在桥梁中的应用也越来越多。组合结构桥梁设计的核心问题就是通过将钢结构与混凝土进行优化组合,使之充分发挥各自材料性能潜力的同时能够降低造价、加快建造速度,并更多地考虑结构使用性能、安全性、耐久性,推进施工先进性,并确保使用寿命期内的科学管理和可持续使用的可靠性,这也是当前桥梁工程发展的趋势。

自20世纪50年代以来,欧洲各国、美国和日本等国已在多类桥梁中较为广泛地应用了组合结构。与之配套的各类抗剪连接件、施工架设技术和分析方法也不断发展,并编制了以欧洲规范4等为代表的组合结构桥梁设计规范。20世纪80年代以前,我国受制于钢材产量不足,组合结构桥梁的研究和应用相对落后。近20年来,随着国家经济实力的迅速提升,为满足交通建设的巨大需求,我国科研及工程技术人员通过不断努力,在理论和方法上对组合结构桥梁进行了深入的研究,通过大量的设计和工程实例,对其进行了创新和发展。在很多大中城市的高架立交桥、中小跨径的公路桥和铁路桥以及大跨度斜拉桥、悬索桥、拱

桥中,组合结构都获得了很好的应用效果。

这本书对组合结构桥梁的基本原理和设计方法进行了较详细深入的讨论,既包括组合梁桥、组合桁梁桥、组合刚构桥等在内的多种组合结构桥梁结构形式,也包括作者提出的钢-混凝土组合加固技术等很新颖的内容。本书还对组合结构桥梁的长期效应、抗疲劳性能、耐久性、预应力计算等设计人员所关心的问题进行了说明,同时列举了大量的国内外工程实例。

据我所知,聂建国教授已经在组合结构桥梁领域进行了近30年的研究和工程应用,完成了包括组合梁、组合柱等在内的数百个试验,参加了很多工程科研项目和规范编制工作,提出了比较系列的组合桥梁设计方法,也曾经设计过多座很有特点的组合结构桥梁。因此可以说,无论是从基本原理、设计方法以及工程经验上,作者对组合结构桥梁有更深入的认识。本书是他多年工作的积累,也是相关成果的反映。目前,我国桥梁界工程技术人员对组合结构桥梁的认识停滞不前,导致实践经验偏少。从这一点上讲,相信本书对提高组合结构桥梁的设计施工水平具有很高的参考价值和促进作用。

王 强

2009年12月9日

前 言

钢-混凝土组合结构桥梁是当前桥梁工程中的一个重要分支,无论是跨越深阔海峡的特大跨桥梁,还是解决城市交通的各类中小跨径桥梁,组合结构桥梁都大有用武之地。由于能够充分发挥不同材料或体系各自的优点,组合结构技术也是当前桥梁创新体系的重要方向之一。

近30年来,组合结构桥梁在我国得到了迅速发展,已经建成了多种类型的组合桥,相应的设计方法和施工技术也在研究和应用的过程中得到了不断发展与完善。本书在总结国内外已有成果的基础上,力求能够较为系统地介绍钢-混凝土组合结构桥梁的基本工作机理、具体设计方法以及发展趋势。书中包括了目前常用的各类组合结构桥梁的结构形式,给出了典型的工程实例介绍,并配合我国以及欧、美、日等国的主要桥梁规范,对有关设计和施工方法进行了讲解。全书共分为14章,各章节的主要内容如下:

第1章组合结构桥梁概述,介绍了组合结构桥梁的特点、发展历史以及主要结构形式和选型原则。

第2章组合结构桥梁设计原则和一般规定,介绍了组合结构桥梁的材料、荷载和基本设计方法,重点说明了混凝土桥面板的剪力滞效应和有效宽度计算方法。

第3章抗剪连接件设计,介绍了抗剪连接件的受力特征、主要类型以及相应的设计计算方法。

第4章简支组合梁桥设计,介绍了简支组合梁桥的抗弯、抗剪、稳定及变形计算方法,并说明了横向联结系的构造要求及设计方法。

第5章连续组合梁桥设计,给出了连续组合梁桥的内力分析和变形及承载力验算方法,重点介绍了负弯矩区的受力性能以及构造和施工措施。

第6章组合结构桥梁混凝土桥面板设计,介绍了各类混凝土桥面板的构造特点 and 设计方法,重点说明了纵向抗剪的受力特征及其相应计算方法。

第7章组合梁桥的温度、收缩、徐变效应,介绍了温度效应和混凝土收缩徐变效应对组合梁桥的影响以及相应的分析计算方法。

第8章组合桥疲劳及耐久性设计理论及方法,讨论了有关桥梁疲劳和耐久性的设计理论及方法,介绍了与组合结构桥梁相关的最新研究成果和设计方法。

第9章预应力组合梁桥设计,介绍了预应力技术在组合结构桥梁中的应用形式和工程实例,并分别说明了预应力简支组合梁桥和预应力连续组合梁桥的设计方法。

第10章组合桁梁桥设计,介绍了组合桁梁桥的发展概况、结构形式和受力特征,并给出了相应的设计方法和施工技术措施。

第 11 章组合刚构桥设计,介绍了组合刚构桥的结构形式及受力特点,重点说明了墩-梁结合部的设计方法,并给出了多个组合刚构桥的工程实例。

第 12 章混合结构桥梁设计,介绍了混合梁桥的受力特点和布置方式,重点说明了钢-混凝土结合段的构造形式和设计方法,并对混合结构桥塔进行了简要介绍。

第 13 章波形钢腹板组合梁桥设计,介绍了波形钢腹板组合梁桥的基本原理、结构形式和基本设计方法,并通过多个工程实例说明了这类组合结构桥梁的构造特征与施工方法。

第 14 章桥梁组合加固及改造技术,介绍了作者所提出的桥梁组合加固及加宽改造技术,通过工程实例说明了利用组合结构技术提高既有桥梁性能的实用设计方法。

本书包含了作者多年来有关钢-混凝土组合结构桥梁的科研工作成果及工程应用中的认识和体会,同时也参考了国内外大量的研究成果及工程资料。限于篇幅或者本人疏漏,有些参考资料未能一一注明出处,请见谅或予以指正。在编写过程中,许多同行给予了大力支持,并提出了很多宝贵的建议,作者对此表示衷心的感谢。樊健生副教授为本书的编写做了大量工作,研究生李法雄、陶慕轩、唐亮、王宇航、卜凡民、聂鑫、张晓光、胡红松、李泉、赵洁、周慧、吕坚锋及博士后逯彦秋等也为本书的编写做出了贡献,在此一并向他们深表感谢。

由于作者认识和经验的局限性,书中难免存在一些不足甚或谬误,诚望读者批评指正。

聂建国

2010 年 1 月于清华园

目 录

第 1 章 组合结构桥梁概述	1
1.1 组合结构桥梁的受力特点及发展历史	1
1.2 组合结构桥梁的经济性及选型原则	4
1.3 钢-混凝土组合梁桥设计方法的发展	7
1.4 组合结构桥梁的结构形式	8
参考文献	17
第 2 章 组合结构桥梁设计原则和一般规定	19
2.1 组合结构桥梁设计方法	19
2.2 组合结构桥梁所采用的材料	23
2.3 组合结构桥梁设计所考虑的荷载	34
2.4 混凝土桥面板有效宽度	35
参考文献	41
第 3 章 抗剪连接件设计	43
3.1 抗剪连接件的基本受力性能	43
3.2 抗剪连接件的形式及特点	49
3.3 抗剪连接件承载力计算	58
3.4 抗剪连接件的构造要求	64
3.5 抗剪连接件的布置方式	68
参考文献	74
第 4 章 简支组合梁桥设计	76
4.1 简支组合梁桥构造与设计要点	76
4.2 简支组合梁桥抗弯承载力验算	78
4.3 简支组合梁桥竖向抗剪验算	85
4.4 简支组合梁桥的稳定性验算	91
4.5 简支组合梁桥正常使用状态验算	96
4.6 组合梁桥横向联结系设计	103
4.7 简支组合梁桥设计示例	106
参考文献	113
第 5 章 连续组合梁桥设计	115
5.1 连续组合梁桥概述	115
5.2 连续组合梁桥的内力计算	117

5.3	连续组合梁桥正常使用阶段验算	120
5.4	连续组合梁桥承载能力计算	128
5.5	提高负弯矩区受力性能的措施	134
	参考文献	140
第6章	组合结构桥梁混凝土桥面板设计	143
6.1	混凝土桥面板的特点及类型	143
6.2	混凝土桥面板基本设计方法	147
6.3	混凝土桥面板纵向抗剪验算	151
6.4	钢板-混凝土组合桥面板设计	158
6.5	混凝土桥面板的构造要求	160
	参考文献	162
第7章	组合梁桥的温度、收缩、徐变效应	164
7.1	概述	164
7.2	组合梁桥温度效应分析	164
7.3	组合梁桥收缩、徐变效应分析	169
7.4	减少混凝土收缩、徐变影响的措施	177
	参考文献	180
第8章	组合桥疲劳及耐久性设计理论及方法	182
8.1	组合桥疲劳设计理论及方法	182
8.2	组合桥耐久性设计理论及方法	197
	参考文献	208
第9章	预应力组合梁桥设计	211
9.1	概述	211
9.2	施加预应力的方式	215
9.3	预应力简支组合梁桥设计	220
9.4	预应力连续组合梁桥设计	229
9.5	预应力组合梁桥实例	231
	参考文献	235
第10章	组合桁梁桥设计	236
10.1	组合桁梁桥的发展概况	236
10.2	组合桁梁桥的分类及其受力特点	248
10.3	组合桁梁桥的设计方法	252
10.4	组合桁梁桥施工方法	258
	参考文献	263
第11章	组合刚构桥设计	266
11.1	概述	266
11.2	组合刚构桥结构形式及特点	269
11.3	墩-梁结合部设计	271
11.4	组合刚构桥施工方法简介	277

11.5 组合刚构桥实例·····	279
参考文献·····	283
第 12 章 混合结构桥梁设计 ·····	285
12.1 混合梁桥发展概述·····	285
12.2 混合梁桥总体布置·····	286
12.3 混合梁桥结合段设计·····	287
12.4 混合桥塔设计·····	291
12.5 混合结构桥梁实例·····	293
参考文献·····	303
第 13 章 波形钢腹板组合梁桥设计 ·····	305
13.1 波形钢腹板组合梁桥的发展过程及特点·····	305
13.2 波形钢腹板组合梁桥的构造·····	315
13.3 波形钢腹板组合梁桥设计要点·····	318
13.4 波形钢腹板组合梁桥施工方法·····	325
13.5 波形钢腹板组合梁桥实例·····	329
参考文献·····	336
第 14 章 桥梁组合加固与改造技术 ·····	338
14.1 概述·····	338
14.2 组合加固桥梁设计方法·····	341
14.3 利用组合梁进行桥梁加宽·····	350
14.4 利用组合梁进行桥梁提级改造的实例·····	360
参考文献·····	361
跋 ·····	363

第 1 章

组合结构桥梁概述

1.1 组合结构桥梁的受力特点及发展历史

众所周知,混凝土和钢材是最常用的建筑材料。漫步在城市街头,鳞次栉比的高楼大厦,或徜徉于郊野乡村,跨江越海的桥梁隧道,几乎都是由这两种材料所构成。究其原因,就是混凝土与钢材既具备良好的力学性能、适宜的施工性能和耐久性,同时也具有较为低廉的价格,能够适应现代社会发展的条件和需求。因此,混凝土结构和钢结构相对于砖石结构和木结构等形成了压倒性的优势。需要看到的是,随着近代材料科学的不断发展,出现了包括复合材料、高性能金属在内的一系列新型材料。这些新型材料具有传统材料所不可比拟的优越力学性能和耐久性能,但受其高昂价格的限制,在可以预见的未来,还不可能代替钢材和混凝土而成为量大面广的主流建筑材料。因此,现代桥梁工程学科,应当依托这两种主要建筑材料,结合现代计算方法和信息技术,通过合理配置和优化设计来满足桥梁结构日益增长的使用要求^[1,2,3]。

钢和混凝土是建造桥梁的主要结构材料,这两种材料在物理和力学性能上具有各自的优势和劣势,如果只采用其中一类材料建造桥梁,其结构性能往往受到材料性能的制约而有所不足。通过某种方式将钢材与混凝土组合在一起共同工作,则能够综合传统钢筋混凝土结构和钢结构的优势,同时限制其不利作用的发挥,从而做到物尽其用,扬长避短,进而为桥梁工程师提供更广阔的创作空间。

对于常见的钢筋混凝土梁、钢梁、钢-混凝土组合梁,其基本受力特点可用图 1-1 来简单说明。混凝土材料具有较高的刚度和抗压强度,但存在抗拉强度低的缺点。对于普通的钢筋混凝土梁,在正常使用状态下,其受拉部位的混凝土容易开裂(见图 1-1a 所示)。此时,受拉区的混凝土不仅不能发挥抵抗外力的作用,其自重还作为恒载的一部分增加了结构的负担。钢材则具有强度高、韧性好的优点。但是,为减轻自重并节省材料,钢结构通常设计为薄壁构件。薄壁构件稳定性较差,在缺少侧向约束的条件下易发生失稳破坏而非所希望的强度破坏(见图 1-1b 所示),导致材料利用率降低。20 世纪所发展起来的钢-混凝土组合梁,则通过较为简单的处理方式综合了混凝土梁和钢梁的优势。组合梁保留受压区的混凝土翼板,受拉区则只配置钢梁,二者之间通过抗剪连接件组合成整体(见图 1-1c 所示)。这样,既不会产生混凝土受拉开裂的问题,也不会因钢梁受压侧刚度较弱而发生失稳,同时还具备较高的刚度和较轻的自重。

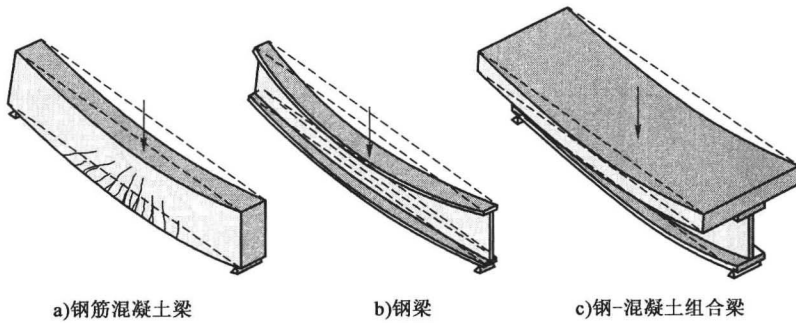


图 1-1 混凝土梁、钢梁和组合梁受力及破坏模式示意图

需要指出的是,一种结构形式的优劣并不单纯表现在力学指标方面。大量的工程实例表明,组合结构不仅具有良好的受力性能,而且继承了钢结构和混凝土结构各自在施工性能、耐久性、经济性等方面的优点,因此可以说在综合效益上具有强大的竞争力。随着地球资源的大量消耗和人口压力的不断增大,环保节能、可持续发展的理念也日益深入工程建设领域^[4]。组合结构所使用的钢构部分由工厂预制,施工现场清洁安全,钢材可部分回收利用,维护成本较传统建筑更低,这都是对地球资源和环境的保护。从这一角度出发,组合结构也是符合可持续发展理念的结构类型。

通常认为,组合结构最早产生于 20 世纪初期^[5]。当时出于抗火的需要,在钢梁外侧包裹有混凝土而形成了钢骨混凝土梁(也称为型钢混凝土、劲性混凝土)。对于钢骨混凝土梁,混凝土与钢结构之间的共同作用主要通过二者间的自然黏结力和摩擦力所形成。由于施工困难,因此随着防火涂料的普及,这种出于抗火目的而外包混凝土的结构形式,已逐渐失去吸引力。而且,在桥梁结构中通常并不需要考虑抗火的要求,且在重载车辆作用下混凝土与钢结构之间的黏结作用易于破坏,因此钢骨混凝土梁在桥梁结构中并未得到发展和应用。由于钢-混凝土组合结构具有很多优点,各国对其开展了大量研究,并于 20 世纪 30 年代产生了通过机械作用将钢梁和混凝土翼板连接成整体的抗剪连接件。采用抗剪连接件的组合梁,即通常所说的 T 形截面组合梁,由于在力学性能、施工性能和经济性上所具有的优势,获得了广泛的应用并不断发展创新^[6]。

组合结构桥自 20 世纪 50 年代之后得到了迅速的发展,从 20~25m 跨径的中小跨径梁桥到跨径近千米的斜拉桥,都有组合梁的应用^[7]。在欧美和日本等国,为降低施工费用,在城市道路和高速公路中大量采用了钢-混凝土组合梁桥。除常用的组合板梁桥和组合箱梁桥之外,相继开发出波形钢腹板组合梁桥、组合桁梁桥等一系列新的结构形式。传统的组合梁桥,出于提高经济性的考虑也在不断改进。例如,法国于 1990 年建成的 Hopital 桥,将钢主梁间距加大,数量减为 2 根,从而降低了工程造价和后期维护的费用。20 世纪 50 年代,瑞典建造了跨径 182m 的 Stromsund 组合梁斜拉桥,德国建造了跨径 58.8m 的 Buchnauer 组合梁斜拉桥。其后,德国著名桥梁专家 Leonhardt 完成了跨径 366m 的美国佛罗里达日照桥的组合梁斜拉桥设计方案,桥面主纵梁采用工字形截面组合梁。该方案虽然没有实施,但被之后的日本腾濑桥(128m)、英国新港桥(152m)、美国锡卡特港桥(137m)、加拿大安纳西斯桥(465m)等多座大跨斜拉桥所采用,并表现出良好的受力性能和经济性。

我国桥梁过去多采用钢筋混凝土和预应力混凝土桥以及圬工拱桥等结构形式,对于荷载

等级较高或跨度较大的一些铁路桥,则可能采用钢桁桥等结构形式。早在20世纪五六十年代,我国建成的武汉长江大桥、衡阳湘江大桥、川黔线乌江桥、东兰红水河桥的桥面结构已开始采用组合梁的构造方式。但当时在设计中并未充分考虑组合作用,而仅仅将其作为强度储备。

随着道路等级的不断提高和建设规模的扩大,桥梁呈现出跨径不断增大、桥型不断丰富、结构不断轻型化的发展趋势,同时对桥梁建设的经济性和综合效益也越来越重视。在这种背景和需求下,传统的桥梁结构形式在许多情况下已经不能满足设计、建造和使用的要求。钢-混凝土组合结构桥梁由于兼有钢桥和混凝土桥的优点,适合我国基本建设的国情,近20年来已得到迅速发展。例如,在城市和公路建设中,为解决大跨度跨线桥及高架桥的施工难题并降低结构高度,我国很多省市开始采用钢-混凝土组合梁桥。已建成的组合梁桥多采用箱形组合梁桥,跨径一般在30~50m范围内,部分跨度接近或超过100m。此外,对一些曲率半径较小的匝道桥,为避免混凝土开裂并减轻结构自重,也开始采用组合梁桥面系。其中,为解决混凝土桥面板高空支模的难题,北京市于1993年在国贸桥首次采用了钢-混凝土叠合板组合梁,既能保证桥面的整体性,同时又能够大大加快施工速度。这种桥面构造方式后来在国内很多组合桥的建造中得到了推广应用。

除实腹式钢-混凝土组合梁桥外,我国于2000年建成的主跨为312m的芜湖长江大桥采用了钢桁混凝土组合结构,这也是我国首座公铁两用斜拉桥。该桥正桥斜拉桥连续钢桁梁均采用混凝土板和主桁上弦结合共同受力的钢桁架-混凝土组合结构。此外,武汉天兴洲公铁两用大桥也采用了这种结构形式,跨度达到504m。

重庆石板坡长江大桥进行复线扩建时,为有效降低主梁的弯矩和剪力,在330m主跨跨中103m范围内采用了钢箱梁,形成了世界上跨度最大的混合梁连续梁桥。钢梁与混凝土梁的结合段采用了开孔板(PBL连接件)加预应力束的锚固方案。为减少维护作业量并改善结构的受力状态,除边墩外,主梁与桥墩均做固结处理。此外,我国还建成了多座混合梁斜拉桥,包括1996年建成的上海徐浦大桥(主跨590m)、1997年建成的香港汲水门大桥(主跨430m)、武汉白沙洲长江大桥、舟山桃夭门大桥等。

2005年,河南省建成了我国第一座波形钢腹板连续箱梁公路桥,即浚河大桥。该桥跨径为 4×30 m,采用先简支后连续装配式体外预应力波形钢腹板组合箱梁结构。此后,山东鄄城黄河大桥等波形钢腹板组合梁桥在我国也陆续开工建设。

1991年上海市建成的南浦大桥是我国第一座钢-混凝土组合梁斜拉桥。该桥借鉴了加拿大安纳西斯桥(Annacis)和美国贝当桥(Baytown)的设计经验,并在桥面板抗裂等方面做了改进^[8]。其后,我国建成的上海杨浦大桥、青州闽江大桥、重庆观音岩长江大桥等均采用了这一桥型。2005年我国建成的东海大桥主航道桥则采用了箱形组合梁斜拉桥的结构形式,主跨跨径420m,主梁由封闭截面的扁平流线型钢箱梁和其上浇筑的混凝土桥面板所构成。

2000年,深圳建成的北站大桥(彩虹桥)则是我国首座采用组合梁悬吊桥面系的钢管混凝土拱桥^[9]。桥面系由横向布置的预应力箱形组合梁所构成。该桥的技术成果后来在多座钢管混凝土拱桥中得到推广应用。2004年,云南建成的祥临澜沧江大桥则是我国首座钢-混凝土组合梁悬索桥(主跨380m)。该桥加劲梁采用纵横梁组合桥面体系结构,由2根梁高1.8m的钢纵梁、纵向分布间距为3m的钢横梁和钢筋混凝土桥面板组成。目前在建的湖南湘西矮寨大桥(主跨1176m)加劲梁主体结构采用钢桁架形式,其桥面系亦采用了组合桥面结构形式。

除新建桥梁外,钢-混凝土组合结构还可应用于桥梁加固和加宽等领域。例如,本书作者提出的钢-混凝土组合加固技术^[10],已成功应用于北京市紫竹院桥等多座桥梁的加固,取得了良好的效果。

组合结构在桥梁中的应用非常广泛,本书难以对其做全面详尽的介绍。仅希望通过对主要组合结构桥梁结构形式的介绍和说明,起到抛砖引玉的作用,供设计和科研人员参考。其中,钢管混凝土拱桥是一类受力性能优越的桥梁结构形式,并在我国获得了大量应用和多项突破。由于国内已有多部专著对钢管混凝土拱桥的设计和施工方法进行介绍,本书暂省略了这种桥型的有关内容。

1.2 组合结构桥梁的经济性及选型原则

钢-混凝土组合梁桥是指将钢梁与混凝土桥面板通过抗剪连接件连接成整体并考虑共同受力的桥梁结构形式。相对于不按组合梁设计的纯钢桥,组合桥可以采用截面较小的钢梁。而组合梁的截面惯性矩较钢梁明显增大,有利于减少结构在活荷载下的挠度。通过抗剪连接件的连接作用,混凝土桥面板对钢梁受压翼缘起到约束作用,从而增强了钢梁的稳定性,有利于材料强度的充分发挥。截面高度的降低,使结构外形更加纤巧,改善桥梁的景观效果,并利于增加桥下净空或降低桥面高程。组合梁桥相对于混凝土桥,其上部结构高度较低、自重减轻、地震作用减小,相应使得结构的延性提高、基础造价降低。同时,组合梁桥便于工厂化生产、现场安装质量高、施工费用低、施工速度快,并可以适用于传统砖石及混凝土结构难以应用的情况。

除优越的力学性能和施工性能外,采用组合梁桥的另一个主要原因是其良好的经济性。相对于钢桥,钢-混凝土组合桥将钢梁与混凝土桥面板组合后,截面惯性矩和抗弯承载力均显著提高,混凝土桥面板对钢梁稳定性的增强使得钢材强度可以充分发挥。绝大部分情况下,焊接抗剪连接件所增加的费用要大大低于减小钢梁用钢量所节省的费用。

组合桥与非组合钢桥用钢量的比较可参见图 1-2^[11]。国外的研究和统计表明,对于跨度超过 18m 的桥梁,组合桥在综合效益上具有一定优势^[12,13]。例如,法国统计资料表明,当跨径为 30~110m,特别是 60~80m 范围内,钢-混凝土组合桥的单位面积造价要比混凝土桥低 18%。在这一跨度范围内,法国近年建造的桥梁中有 85% 都采用了组合技术^[14]。目前,欧美

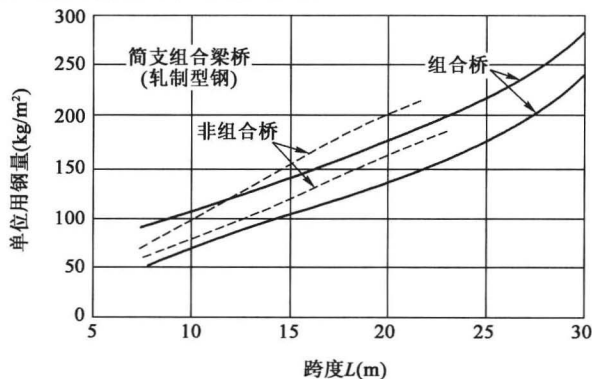


图 1-2 组合桥与非组合桥用钢量范围的比较

等国跨径在 15m 以下的小跨度桥梁多采用钢筋混凝土梁桥,15~25m 跨径则用预应力混凝土梁桥,25~60m 跨径往往采用钢-混凝土组合梁桥。钢梁和桁架梁则一般用于大跨径桥梁。而在大跨度的斜拉桥中,采用组合桥面也可以获得很高的经济效益。通常情况下,钢梁主要承担斜拉桥的桥面弯矩,混凝土桥面板则主要承担轴向力。

根据对国内已建成的多座钢-混凝土组合梁桥的统计,组合梁桥用钢量随跨度变化分布如图 1-3 所示。对于组合梁桥,跨度为 20~30m 时单位面积用钢量约为 $150\text{kg}/\text{m}^2$,跨度为 40~50m 时单位面积用钢量约为 $270\text{kg}/\text{m}^2$ 。随跨度的增加,用钢量的增长幅度(线性关系)要小于跨中弯矩的增长幅度(平方关系),说明在跨度增大时,钢材的利用率更高,组合梁桥相对于混凝土梁桥的优势更为明显。值得指出的是,如果综合考虑因自重引起的基础造价和施工周期等,组合梁桥的综合效益会更明显一些^[15,16]。

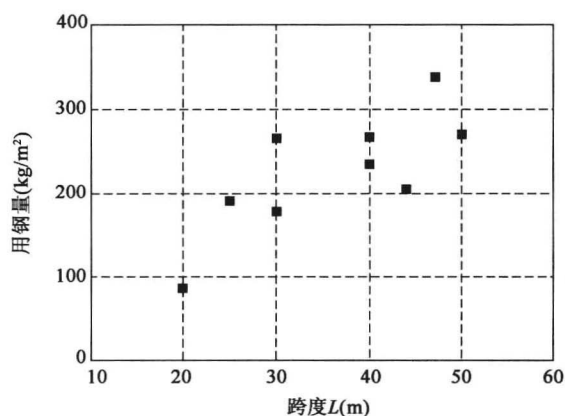


图 1-3 组合梁桥用钢量随跨度变化分布图

由于钢桥通常也需要有混凝土桥面板,因此当跨度超过 10m 时,按组合梁桥设计的桥梁均较纯钢梁桥具有更低的结构自重。图 1-4 为国内 10 余座已建桥梁自重与跨度的分布图。混凝土梁在中小跨径范围内自重约为 $12\sim 20\text{kN}/\text{m}^2$,自重随跨度呈较快的增长趋势。组合梁自重约为 $8\sim 10\text{kN}/\text{m}^2$,随跨度的增加速度要小于混凝土梁桥。因此,随跨度的增大,组合梁桥较混凝土桥在自重上具有更大的优势。组合梁桥上部结构自重的降低,可以减少下部结构的工程量,有利于节省桥梁整体投资。

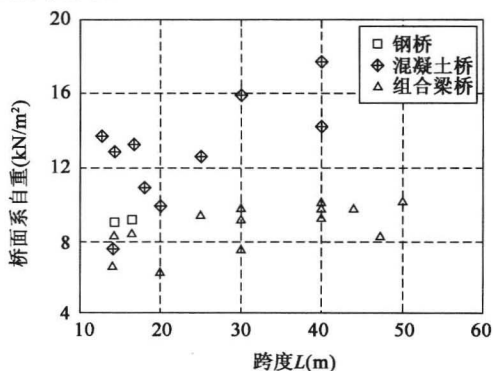


图 1-4 桥面系自重随跨度变化分布图

对一座桥梁是否采用组合结构或采用何种结构形式进行经济性分析时,并不能单纯从节省用钢量的角度来进行考虑,而应对包括施工性能、建设速度、环境影响、下部结构造价、综合受力性能、养护与维修成本、景观效果和整体造价等在内的各个因素进行综合评估。例如,当考虑施工费用之后,用钢量最小的设计方案并不一定是综合造价最低的方案(如有临时支撑的施工方法可减少用钢量,但增加了施工难度和施工时间)。随着劳动力成本的增加以及环保、安全、耐久等要求的提高,更需要对结构的综合受力性能和经济性作更为全面的分析^[17]。

建造成本占桥梁总造价中的很大一部分,设计时应尽量予以降低。除作为主受力构件的钢梁和混凝土桥面板外,桥梁上部结构还包括加劲肋、抗剪连接件、横联梁、横隔板、支座、伸缩缝等。例如,采用等截面钢梁时,钢梁的加工制作费用较变截面钢梁低。但对于连续组合梁,变截面钢梁则可能具有更高的跨越能力并便于保证桥下净空。

钢梁的横向间距也是影响组合梁桥总造价的重要因素。增加钢梁间距可相应减少钢梁的数量,从而降低钢结构加工的费用。例如,曾有研究指出,将钢梁间距由 2.3m 增加到 3.2m,将使纵梁数量由 11 根减为 8 根,并使总的制造成本降低 8%~13%^[18]。数量较少的钢梁同时意味着能够减少支座的数量并节省运输、吊装和养护的费用。虽然主梁间距增加需要较厚的混凝土板,但这对总体造价的影响通常并不明显,因此设计时钢梁间距一般不应小于 2.5~3.0m。对于较大宽度的桥梁,纵梁间距可加大到 6m 以上。随着高强混凝土和桥面横向预应力技术的发展,在桥梁中可以采用更大的钢梁横向间距(也就是更大的桥面板跨度)。例如,法国建造的 Somme 桥,其主梁横向间距达到 10.5m。对于间距更大的纵向钢梁,还可以在横向布置钢梁(次梁),使桥面板支撑于纵、横梁所形成的梁格之上。如我国建成的重庆观音岩长江大桥(斜拉桥),其组合梁桥面系的纵向钢梁间距达到 35.2m,其间每间隔 4m 还布置有横向钢梁。对于通常中小跨度的组合梁桥来说,这种做法会大大增加结构的复杂性并增加用钢量,并不适合布置用于支撑桥面板的横向次梁。

桥跨布置是影响组合梁桥综合造价的另一个重要因素。简单来说,组合梁桥主要有简支梁桥和连续梁桥两类。除受力性能上有所不同之外,连续组合梁桥还能明显减少支座和伸缩缝的数量。例如,2 跨简支梁需要 4 个支座,而 1 联 2 跨的连续梁则只需要 3 个支座。当跨数增多之后,节省的支座数量将会更明显。但是,作为超静定结构的连续组合梁,对强迫位移和约束内力更为敏感,需要下部结构具有更高的受力性能。因此,桥跨布置需要根据实际情况和需求综合考虑,忽视任何一点都可能引起综合成本的上升。

组合桥梁自 20 世纪 50 年代开始应用,常用于跨度 12m 以上的情况。对于跨度小于 12m 的情况,可采用钢筋混凝土桥或圬工拱桥等桥型。但对于结构改造或对结构自重、施工、桥下净空等有特殊要求的情况,小跨径组合桥也是可供选择的方案之一。各类报告和论文已完成了大量有关不同桥型的经济性分析,有经验的工程师也能够根据实践得到很多有价值的规律性结论。通常来说,不同的桥型和结构形式,有其适用的经济跨度范围(见图 1-5 所示)^[19]。相对于其他桥型,组合桥在中小跨度及特大跨度桥梁中都有很好的适用性。再如,美国联邦公路管理局所提出的各钢结构桥型适用跨度如表 1-1 所示^[20],该表也可供设计组合结构桥梁时参考。下部结构的造价对上部结构的布置和选型具有重要的影响。当下部结构建造费用较低时,采用较短的梁跨有可能使整体结构更为经济;反之,当下部结构的建造费用较高时,采用较大的梁跨则可能更为合理。