



# 钢—混凝土 组合梁结构

—— 试验、理论与应用

聂建国 著



# 钢-混凝土组合梁结构

——试验、理论与应用

聂建国 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书总结了有关钢-混凝土组合梁的系列研究成果,包括组合梁的力学性能、设计理论和设计方法等,并对部分工程实例进行了介绍。书中介绍的研究内容包括简支组合梁的承载力及变形计算,组合梁的受剪、受扭性能,连续组合梁及预应力组合梁的性能,混凝土翼板开洞组合梁,抗剪连接件的性能及设计方法,组合梁的疲劳性能、抗震性能以及高强混凝土组合梁的性能等。

本书侧重对试验结果的描述和对组合梁受力机理及设计方法的阐述,可供从事土木工程专业的广大科技工作者和设计人员参考,也可以作为研究生和本科生的学习参考书使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢-混凝土组合梁结构:试验、理论与应用/聂建国著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015289-1

I. 钢… II. 聂… III. 钢结构:混凝土结构-组合梁-结构设计 IV. TU375.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 026908 号

责任编辑:童安齐 沈 建 何舒民 彭明兰/责任校对:柏连海  
责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 4 月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—2 500 字数:575 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

(销售部电话:010—62136131 编辑部电话:010—62137026)(BA03)

## 前 言

钢-混凝土组合结构是在钢结构和混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构。同钢结构相比可以节省用钢量和增强耐久性等,同混凝土结构相比可以大大减轻自重、减小结构尺寸、方便施工等。近十几年来,钢-混凝土组合结构在我国发展很快。应用实践表明,这种结构形式综合了钢结构和混凝土结构的优点,具有“轻型大跨”、“预制装配”、“快速施工”等优点,能够满足现代结构对功能的需求,具有显著的技术经济效益和社会效益,适合我国基本建设的国情,已成为结构体系的重要发展方向之一。作为组合结构体系中重要横向承重构件的钢-混凝土组合梁在建筑结构及桥梁结构等领域具有广阔的应用前景。

尽管钢-混凝土组合梁的研究在国外已有 80 余年的历史,但在设计理论及工程应用中仍存在诸多亟待解决的理论问题和技术难题,例如:研发适合我国国情的新型钢-混凝土组合梁;考虑滑移效应及剪力滞后效应的组合梁实用设计计算方法和构造措施;组合梁负弯矩区的抗裂度及裂缝宽度计算方法;组合梁的刚度和延性计算方法;组合梁在弯、剪、扭等复杂受力状态下的性能及设计方法;新型及特殊构造组合梁的受力性能与设计方法;组合梁在动力荷载和疲劳荷载下的设计方法等。针对上述问题,课题组近十几年来综合运用数学、力学和现代试验技术及计算分析技术,对钢-混凝土组合梁的设计理论和关键技术进行了系列研究,完成了大量的试验研究和工程应用,并进行了深入的理论分析、模型试验和数值计算,建立了一系列实用的设计计算方法,研究成果丰富了组合梁结构的设计内容,拓展了组合梁结构的应用范围,促进了钢-混凝土组合结构的新发展。

作者及其课题组完成的工作和取得的成果主要包括:

(1)钢-混凝土组合楼盖体系的系列研究。研发了钢-混凝土叠合板组合梁,建立了相关的设计计算方法,提出了简单实用的构造措施;创建了考虑滑移效应的钢-混凝土组合梁变形计算的折减刚度法;建立了考虑滑移效应的组合梁抗弯强度的实用计算方法和公式;对多种形式组合梁中栓钉抗剪连结件的实际承载力进行了大量的试验研究;建立了钢-混凝土组合梁的长期刚度计算方法和公式,同时考虑了滑移效应、混凝土徐变和收缩的影响;研究了组合楼盖的抗震性能。此外,对钢-高强混凝土组合梁、预应力及预应力加固组合梁、压型钢板组合楼盖、连续组合梁、混凝土翼板开洞组合梁,以及组合梁的组合抗剪、裂缝控制、裂缝宽度计算等问题开展了一系列试验研究。

(2)钢-混凝土组合桥梁的研究。课题组承担完成了多项组合桥梁的科研任务,在预应力空心叠合板组合桥梁和钢-压型钢板混凝土组合桥梁的研发、组合梁在弯、剪、扭等复合作用下的受力性能、组合梁的疲劳性能等领域均开展了试验研究工作,并提出了相应的实用设计计算方法和构造措施。

全书共分为11章,系统总结了有关钢-混凝土组合梁的研究成果。各章首先对课题组完成的相关试验工作进行详细的描述,然后对组合梁的受力机理、力学性能、设计理论和设计方法等进行阐述。第1章绪言介绍组合梁的特点、应用范围以及部分典型应用实例,旨在帮助读者直观地了解这种结构形式的发展过程、研究和应用现状。第2章简支组合梁的承载力及变形计算,通过试验研究介绍组合梁受弯及纵向抗剪的基本力学性能和相关设计方法,并通过考虑组合梁滑移效应的分析,给出了计算组合梁变形的折减刚度法。第3章组合梁的竖向抗剪性能,介绍考虑钢梁与混凝土翼板共同作用的竖向组合抗剪设计方法以及弯、剪相关承载力计算方法。第4章组合梁的抗扭性能,介绍组合梁开裂扭矩、极限扭矩、弯剪扭复合作用下的相关性计算方法以及扭转刚度计算方法。第5章连续组合梁的性能,介绍负弯矩作用下的简支组合梁以及连续组合梁的设计理论和设计方法,包括内力分析和承载力、挠度、裂缝计算等。第6章预应力组合梁的性能,介绍预应力组合梁及预应力加固组合梁的受力机理、内力重分布特征以及承载力和变形计算方法等。第7章混凝土翼板开洞组合梁,研究翼板开洞组合梁的破坏特征和受力机理,介绍翼板开洞组合梁的整体刚度计算方法和极限抗弯承载力计算方法。第8章抗剪连接件,介绍栓钉抗剪连接件的受力性能和抗剪承载力计算,压型钢板对栓钉性能的影响以及部分抗剪连接组合梁的设计方法等。第9章组合梁的疲劳性能,介绍组合梁在重复荷载作用下的受力机理、组合梁疲劳变形计算方法以及疲劳寿命计算方法。第10章组合梁的抗震性能,介绍组合梁在反复荷载作用下的滞回性能及其影响因素,以及组合梁的抗震设计方法。第11章高强混凝土组合梁,研究高强混凝土组合梁的受力机理和破坏形态,介绍高强混凝土组合梁的基本设计方法。

近十几年来,研究工作所取得的成果陆续在国内外重要学术期刊和学术会议上发表,受到了国内外同行的关注与肯定。部分研究成果已经被我国《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99-98)以及《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T 5085-1999)等所采纳。有关研究成果已成功地应用于北京银泰大厦、深圳华润中心、深圳中兴通讯研发大楼、广州合景大厦、厦门希尔顿饭店、西安海汇商务公寓等多项高层建筑,以及深圳彩虹桥和丽水桥、广西南宁竹溪路立交桥、北京国贸立交桥、江苏盐城通

榆河桥等数十座大跨桥梁,取得了显著的技术经济效益和社会效益。

本书的研究工作曾先后得到国家杰出青年科学基金(50025822)、国家自然科学基金(59778038,59978021)、北京市自然科学基金(8992013,8002011)、北京市科委项目(951630803,953300802,955320100,954031200)、教育部高等学校博士点基金(2000000344)等资助,还得到了众多的工程界技术人员的大力支持,他们提供了大量的工程背景和宝贵的研究机会,在此表示衷心的感谢。

在课题研究过程中,博士及硕士研究生胡少伟、樊健生、张眉河、王洪全、崔玉萍、余洲亮、谭英、熊辉、王挺、周天然、陈林、朱林森、李绍敬、高瑾旭、吴洪、李建军等协助作者完成了大量的试验、计算及分析工作,他们均对本书的完成做出了重要贡献。樊健生对本书的编辑付出了大量心血并进行了卓有成效的工作。在此,向为本书面世付出劳动和做出贡献的同仁和朋友们表示诚挚的感谢。

钢-混凝土组合结构是一门正在蓬勃发展的学科,并展示了广阔的应用前景。本书是在作者多年研究工作基础上完成的,由于结构工程学科本身的复杂性和作者认识能力的局限性,本书难免存在很多不足之处,某些观点和结论也不够完善,需要在今后的研究工作中加以改进,欢迎广大读者提出宝贵的批评和指正。

聂建国

2004年12月于清华园



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪言</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 钢-混凝土组合梁的特点及分类 .....	2
1.3 钢-混凝土组合梁的研究概况 .....	6
1.3.1 抗剪连接件研究 .....	7
1.3.2 组合梁基本性能研究 .....	12
1.3.3 连续组合梁研究 .....	16
1.3.4 预应力组合梁研究 .....	19
1.4 钢-混凝土组合梁工程实例 .....	21
1.4.1 组合楼盖在多层及高层建筑中的应用 .....	21
1.4.2 组合梁在桥梁结构中的应用 .....	30
参考文献 .....	36
<b>第 2 章 简支组合梁的承载力及变形计算</b> .....	43
2.1 引言 .....	43
2.2 简支组合梁弯曲试验研究 .....	44
2.2.1 普通组合梁试验 .....	44
2.2.2 叠合板组合梁试验 .....	46
2.2.3 压型钢板混凝土组合梁试验 .....	52
2.3 组合梁的滑移效应及计算 .....	57
2.3.1 考虑滑移效应的短期刚度及变形计算 .....	57
2.3.2 考虑滑移效应的长期刚度及变形计算 .....	62
2.3.3 组合梁挠度实用计算方法 .....	64
2.4 简支组合梁承载力分析及计算 .....	65
2.4.1 滑移效应对组合梁抗弯强度的影响 .....	65
2.4.2 完全抗剪连接组合梁抗弯承载力分析 .....	69
2.4.3 抗剪连接程度对组合梁抗弯承载力的影响 .....	73
2.4.4 横向配筋率对组合梁抗弯性能的影响 .....	75
2.5 组合梁纵向抗剪分析及计算 .....	76
2.5.1 混凝土翼板纵向开裂的原因及影响因素 .....	76
2.5.2 混凝土翼板纵向开裂的计算方法 .....	78
2.5.3 混凝土翼板横向钢筋计算及构造 .....	84

2.6	钢-压型钢板混凝土组合梁的刚度及承载力计算	85
2.6.1	钢-压型钢板混凝土组合梁的刚度分析	85
2.6.2	钢-压型钢板混凝土组合梁抗弯承载力分析	92
2.7	小结	99
	参考文献	99
<b>第3章</b>	<b>组合梁的竖向抗剪性能</b>	<b>101</b>
3.1	引言	101
3.2	组合梁竖向抗剪的试验研究	101
3.2.1	试件设计及制作	101
3.2.2	试验程序	103
3.2.3	试验结果及分析	103
3.3	组合梁竖向抗剪承载力计算	113
3.3.1	试验分析	114
3.3.2	抗剪承载力理论分析	121
3.3.3	抗剪塑性分析	124
3.4	组合梁弯-剪相关承载力计算	128
3.4.1	现行规范关于弯剪相关的考虑	128
3.4.2	弯剪相关分析	129
3.5	组合梁负弯矩区的抗剪性能	133
3.5.1	试验研究	133
3.5.2	抗剪能力分析	135
3.6	小结	135
	参考文献	136
<b>第4章</b>	<b>组合梁的抗扭性能</b>	<b>138</b>
4.1	引言	138
4.2	开口截面组合梁纯扭与复合受扭试验	138
4.2.1	试验设计及参数	138
4.2.2	试验装置与试验方案	139
4.2.3	纯扭试验结果及分析	140
4.2.4	弯扭试验结果及分析	144
4.3	闭口截面组合梁纯扭与复合弯扭试验	148
4.3.1	试验设计及参数	148
4.3.2	纯扭试验结果及分析	149
4.3.3	弯扭试验结果及分析	152
4.4	组合梁开裂扭矩和极限扭矩计算	156
4.4.1	纯扭作用下开口截面组合梁的开裂扭矩和极限扭矩	156
4.4.2	复合弯扭作用下开口截面组合梁的极限扭矩	159
4.4.3	闭口截面组合梁的开裂扭矩和极限扭矩计算	160



4.5	组合梁抗扭刚度计算 .....	166
4.5.1	组合梁开裂前的弹性抗扭刚度 .....	166
4.5.2	组合梁开裂到极限状态的抗扭刚度 .....	167
4.5.3	组合梁在承载力极限状态时的抗扭刚度 .....	168
4.5.4	用扭矩-扭率曲线几何关系表示的抗扭刚度 .....	169
4.6	组合梁在弯、剪、扭作用下的相关性分析 .....	170
4.6.1	开口截面组合梁弯扭作用下的理论分析 .....	171
4.6.2	开口截面组合梁的弯扭相关曲线 .....	173
4.6.3	闭口截面组合梁的弯剪扭相关性分析 .....	175
4.7	小结 .....	176
	参考文献 .....	177
<b>第5章</b>	<b>连续组合梁的性能</b> .....	<b>178</b>
5.1	引言 .....	178
5.2	连续组合梁试验研究 .....	178
5.2.1	试验概况 .....	178
5.2.2	实板组合梁试验结果及分析 .....	182
5.2.3	负弯矩下压型钢板混凝土组合梁试验结果 .....	185
5.2.4	压型钢板混凝土连续组合梁试验结果及分析 .....	188
5.3	组合梁负弯矩区刚度及承载力计算 .....	191
5.3.1	负弯矩作用下滑移及变形分析 .....	191
5.3.2	负弯矩作用下的弹性抗弯承载力 .....	198
5.3.3	腹板弹性屈曲分析 .....	201
5.3.4	负弯矩下组合梁的塑性抗弯承载力 .....	203
5.4	连续组合梁滑移特征及变形计算 .....	206
5.4.1	连续组合梁滑移分析 .....	206
5.4.2	连续组合梁挠度计算 .....	210
5.5	连续组合梁承载力计算 .....	211
5.5.1	组合梁塑性极限转角 .....	211
5.5.2	连续组合梁调幅系数分析 .....	213
5.6	连续组合梁裂缝控制和计算 .....	217
5.7	小结 .....	224
	参考文献 .....	225
<b>第6章</b>	<b>预应力组合梁的性能</b> .....	<b>227</b>
6.1	引言 .....	227
6.2	预应力组合梁的试验研究 .....	227
6.2.1	预应力简支组合梁试验概况 .....	227
6.2.2	预应力简支组合梁试验结果 .....	230
6.2.3	预应力连续组合梁试验概况 .....	233
6.2.4	预应力连续组合梁试验结果 .....	236

6.2.5	预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁试验概况	240
6.2.6	预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁试验结果	242
6.3	预应力简支组合梁承载力分析	245
6.3.1	预应力简支组合梁的弹性承载力分析	246
6.3.2	预应力加固简支组合梁的弹性承载力分析	249
6.3.3	预应力简支组合梁的极限承载力分析	252
6.3.4	预应力加固简支组合梁的极限承载力分析	254
6.3.5	承载力简化计算公式	254
6.4	预应力简支组合梁的刚度分析	258
6.4.1	预应力简支组合梁的弹性挠度分析	258
6.4.2	预应力简支组合梁的弹性刚度简化计算	260
6.4.3	预应力简支组合梁的极限挠度分析	261
6.5	预应力连续组合梁的受力机理	263
6.5.1	预应力等效荷载	263
6.5.2	次弯矩、主弯矩及综合弯矩	264
6.6	预应力连续组合梁的内力重分布研究	264
6.6.1	内力重分布过程	265
6.6.2	极限弯矩调幅系数的影响因素	266
6.6.3	普通连续组合梁极限弯矩调幅系数	267
6.6.4	预应力连续组合梁极限弯矩调幅系数	268
6.6.5	预应力连续组合梁在任一荷载下的弯矩调幅系数	270
6.7	预应力空心叠合板组合梁的受弯全过程分析	271
6.7.1	基本假定和计算条件	271
6.7.2	受力分析	273
6.7.3	塑性铰及卸载处理	274
6.7.4	计算流程	275
6.7.5	试验验证	277
6.7.6	简化计算模型	278
6.8	小结	278
	参考文献	279
<b>第7章</b>	<b>混凝土翼板开洞组合梁</b>	<b>280</b>
7.1	引言	280
7.2	混凝土翼板开洞组合梁的试验研究	280
7.2.1	试验概况	280
7.2.2	主要试验结果与破坏特征	282
7.3	混凝土翼板开洞组合梁刚度分析	286
7.3.1	组合梁弹性刚度计算	286
7.3.2	混凝土翼板开洞组合梁的整体刚度	287

7.4	混凝土翼板开洞组合梁抗弯承载力分析 .....	291
7.4.1	弹性抗弯承载力计算 .....	291
7.4.2	极限抗弯承载力计算 .....	292
7.4.3	三参数线性回归分析 .....	294
7.4.4	两参数线性回归分析 .....	295
7.5	小结 .....	296
	参考文献 .....	296
<b>第8章</b>	<b>抗剪连接件</b> .....	<b>298</b>
8.1	引言 .....	298
8.2	抗剪连接件推出试验研究 .....	298
8.2.1	试验概况 .....	298
8.2.2	主要试验结果 .....	300
8.2.3	试验结果分析 .....	302
8.3	抗剪连接件承载力计算 .....	304
8.3.1	试验研究 .....	304
8.3.2	各种计算公式的比较和讨论 .....	307
8.3.3	部分抗剪连接组合梁中栓钉的承载力 .....	309
8.3.4	算例比较 .....	310
8.4	压型钢板对抗剪连接件的影响 .....	310
8.4.1	抗剪连接件破坏机理 .....	310
8.4.2	压型钢板和栓钉布置方式对承载力的影响 .....	313
8.4.3	防止混凝土板肋破坏的措施 .....	314
8.5	《钢结构设计规范》(GB50017-2003)对栓钉承载力的规定 .....	314
8.6	小结 .....	315
	参考文献 .....	316
<b>第9章</b>	<b>组合梁的疲劳性能</b> .....	<b>317</b>
9.1	引言 .....	317
9.2	推出试件疲劳性能的试验研究 .....	317
9.2.1	试验概况 .....	317
9.2.2	主要试验结果与破坏特征 .....	319
9.3	组合梁疲劳性能的试验研究 .....	321
9.3.1	试验概况 .....	321
9.3.2	主要试验结果与破坏特征 .....	323
9.4	常幅疲劳荷载作用下组合梁变形计算 .....	329
9.4.1	组合梁疲劳刚度 .....	329
9.4.2	承受动荷载组合梁的挠度计算 .....	331
9.5	常幅疲劳荷载作用下组合梁疲劳寿命计算 .....	332
9.5.1	推出试件中栓钉的疲劳寿命计算 .....	333

9.5.2	组合梁疲劳寿命计算模型	334
9.5.3	组合梁疲劳寿命计算式	335
9.6	小结	336
	参考文献	337
<b>第10章</b>	<b>组合梁的抗震性能</b>	<b>338</b>
10.1	引言	338
10.2	组合梁抗震性能的试验研究	338
10.2.1	试验概况	338
10.2.2	往复加载试验结果及讨论	341
10.2.3	反向重复加载试验结果及讨论	344
10.2.4	试验小结	345
10.3	组合梁延性及耗能能力分析	346
10.3.1	组合梁的延性	346
10.3.2	组合梁耗能特性分析	347
10.4	组合梁数值分析方法与计算	348
10.4.1	材料本构关系	348
10.4.2	接触单元理论及应用	349
10.4.3	非线性分析的数值处理	352
10.4.4	数值分析结果与比较	354
10.4.5	小结	355
10.5	组合梁恢复力模型	356
10.5.1	恢复力模型的建立	356
10.5.2	恢复力模型数值实现与应用	358
10.6	小结	359
	参考文献	360
<b>第11章</b>	<b>高强混凝土组合梁</b>	<b>361</b>
11.1	引言	361
11.2	高强混凝土组合梁的试验研究	361
11.2.1	高强混凝土组合梁试验概况	361
11.2.2	高强混凝土组合梁试验结果	363
11.2.3	抗剪连接件推出试验概况	366
11.2.4	抗剪连接件推出试验结果及分析	367
11.3	高强混凝土中抗剪连接件的承载力	369
11.3.1	栓钉连接件工作机理	369
11.3.2	栓钉抗剪承载力的计算	371
11.3.3	小结	373
11.4	高强混凝土组合梁承载力计算	374
11.4.1	基本假定和计算方法	374

11.4.2	计算结果分析 .....	375
11.4.3	抗弯承载力计算方法 .....	378
11.4.4	高强混凝土组合梁的延性分析 .....	380
11.5	高强混凝土组合梁纵向抗剪计算 .....	383
11.5.1	翼板纵向抗剪机理 .....	383
11.5.2	试验结果与分析 .....	385
11.6	小结 .....	387
	参考文献 .....	388

# 第 1 章 绪 言

## 1.1 概 述

钢-混凝土组合结构是在钢结构和钢筋混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构。组合结构利用了钢结构和混凝土结构的优点,以达到充分利用材料特性的目的。经过几十年的研究及工程实践,钢-混凝土组合结构已经发展成为既区别于传统的钢筋混凝土结构和钢结构,又与之密切相关和交叉的一门结构学科,其结构类型和适用范围涵盖了结构工程应用的各个领域。由于组合概念的应用非常广泛灵活,既可以包括不同材料之间的组合作用,也可以包括不同结构体系之间的组合作用,因此在实践和研究中产生了多种组合结构类型。目前钢-混凝土组合结构的主要形式包括组合梁、组合楼板、组合桁架、组合柱等组合承重体系以及组合斜撑、组合剪力墙等组合抗侧力体系,应用领域包括高层及超高层建筑、大跨桥梁、地下工程、矿山工程、港口工程以及组合加固和修复工程等<sup>[1~8]</sup>。

钢-混凝土组合梁是一种重要的横向承重组合构件,通过抗剪连接件将钢梁和混凝土板组合成整体共同受力,从而能够充分发挥钢材抗拉、混凝土抗压性能好的优点。组合梁自 20 世纪 20 年代出现以来,在桥梁结构中的大跨桥面梁、工业建筑中的重荷载平台梁和吊车梁以及对结构高度和自重都有较高要求的民用建筑组合楼盖中已得到广泛应用,其基本发展过程可以简单分为以下四个阶段<sup>[9]</sup>:

(1) 钢-混凝土组合梁出现于 20 世纪 20 年代,随后在 30 年代中期出现了钢梁和混凝土翼板之间的多种抗剪连接构造方法,这一时期是组合梁处于萌芽状态的初始阶段。1922 年, Macking 在加拿大 Domion 桥梁公司试验了两根外包混凝土钢梁,在同一时期英国国家物理实验室也进行了外包混凝土钢梁的试验。1923 年 Caughen 首次进行 6 根 T 型组合梁试验,建议可以根据材料力学方法进行设计。1933 年 Maning 等第一次研究了采用机械抗剪连接件的组合梁。1933 年 Ros 首次设计了推出试验来研究抗剪连接件,该方法行之有效,一直沿用至今。

(2) 20 世纪 40 年代到 60 年代是组合梁发展的第二阶段。在这一阶段,许多技术先进的国家对组合梁开展了比较深入的试验研究,并制定了相关的设计规范或规程,使得组合梁的应用在科学指导下逐渐普及。如 1943 年里海大学对使用槽钢连接件的组合梁进行了试验,1954 年 Viest 对栓钉抗剪连接件进行了研究。

(3) 20 世纪 60 年代到 80 年代是组合梁发展的第三阶段。这一阶段在总结以往研究和应用成果的基础上,进一步改进和完善了组合梁的有关设计规范或规程,组合结构的应用和发展逐步成熟,几乎日趋赶上钢结构的发展,并受到广泛重视。例如,连续组合梁在简支组合梁的基础上得到了研究和发展,在组合梁静力性能研究的基础上开展了动力性能的研究,在钢与混凝土之间的完全交互作用基础上进一步研究了部分抗剪连接组合梁等。

(4) 从 20 世纪 80 年代初至今为组合梁应用和发展的第四阶段。这一阶段,相继出现

了预制装配式钢-混凝土组合梁、叠合板组合梁、预应力钢-混凝土组合梁、钢板夹心组合梁等多种新的结构形式。同时,对组合梁在使用中所产生的问题以及新材料、新工艺的应用开展了更加细致的研究,并由线弹性向非线性,由平面结构向空间结构的方向进行了发展。

我国自 20 世纪 50 年代开始,在交通、冶金、电力、煤矿等系统中就已经开始应用组合梁。早期的应用主要集中于桥梁结构,例如 1957 年建成的武汉长江大桥,其上层公路桥的纵梁(跨度 18m)采用了组合梁。但当时在应用中并未考虑钢与混凝土材料之间的组合效应,而仅仅将其作为强度储备以提高安全度或者是为了方便施工。自 20 世纪 80 年代初以来,随着我国经济建设的快速发展、钢产量的大幅度提高、钢材品种的增加、科研工作的深入、应用实践经验的积累,钢-混凝土组合梁结构得到了迅速的发展和越来越广泛的应用,应用范围已涉及建筑、桥梁、高耸结构、地下结构、结构加固等领域。例如,我国已建成或在建的上海环球金融中心(492m)、金茂大厦(421m)、深圳地王大厦(384m)、深圳赛格广场(292m)等超高层建筑都采用了组合楼面;上海杨浦大桥(602m)、东海大桥(420m)、芜湖长江大桥(312m)、深圳彩虹桥(150m)<sup>[10]</sup>以及北京等城市的大量立交桥也都使用了钢-混凝土组合梁作为桥面系。此外,组合梁在结构加固领域也显示出优良的性能,如北京市机场路苇沟桥改造工程以及紫竹桥改造工程,通过采用组合梁及混凝土叠合技术,成功地实现了减轻结构自重和提高荷载等级的设计要求<sup>[11,12]</sup>。工程应用实践证明,钢-混凝土组合梁综合了钢梁和钢筋混凝土梁的优点,可以用传统的施工方法和简单的施工工艺获得优良的结构性能,技术经济效益和社会效益显著,非常适合我国基本建设的国情,是具有广阔应用前景的新型结构形式之一。

## 1.2 钢-混凝土组合梁的特点及分类

钢-混凝土组合结构充分利用了钢材和混凝土各自的材料性能,具有承载力高、刚度大、抗震性能和动力性能好、构件截面尺寸小、施工快速方便等优点。同钢筋混凝土结构相比,组合结构可以减小构件截面尺寸、减轻结构自重、减小地震作用、增加有效使用空间、降低基础造价、方便安装、缩短施工周期、增加构件和结构的延性等;同钢结构相比,可以减小用钢量、增大刚度、增加稳定性和整体性、提高结构的抗火性和耐久性等。

一般情况下,钢-混凝土简支组合梁的高跨比可以做到  $1/16 \sim 1/20$ ,连续组合梁的高跨比可以做到  $1/25 \sim 1/35$ 。如珠海清华大学科技园连体结构,跨度 35m,采用未施加预应力的钢-混凝土简支组合梁,截面高度 1.52m,跨高比为 23;北京某人行天桥,采用三跨连续组合梁,中间主跨 26m,结构高度仅 0.62m,跨高比为 42.3;江苏盐城通榆河大桥,采用了跨度 60m 的简支组合梁,结构高度 2.2m,跨高比为 27.3。同钢筋混凝土梁相比,组合梁可以使结构高度降低  $1/3 \sim 1/4$ ,自重减轻  $40\% \sim 60\%$ ,施工周期缩短  $1/2 \sim 1/3$ ,同时现场湿作业量减小,保护了环境,并且延性大大提高。同钢梁相比,组合梁同样可以使结构高度降低  $1/3 \sim 1/4$ ,刚度增大  $1/3 \sim 1/4$ ,整体稳定性和局部稳定性增强,耐久性提高,动力性能改善。对于大跨度人行天桥,如果采用钢桥,人行时往往感觉结构刚度不足并且伴有颤振,为解决舒适度问题不得不增大梁高和用钢量。如果采用组合梁桥则可以在相同的结构高度条件下大幅度减轻振动并提高使用舒适度。对北京某人行天桥方案的动力性能进



行分析表明,在跨高比为 42.3 时,其自振频率为 3.3Hz,仍可满足相关设计规范的要求。组合梁另一个显著优点是当采用压型钢板或混凝土叠合板翼板时,可以节省支模工序和模板,应用于城市桥梁时可以减小施工时对桥下交通的影响,用于建筑时则可以多层立体交叉施工,省掉满堂红脚手架,有利于改善现场施工条件,加快施工进度。

组合结构的造价介于钢筋混凝土结构和钢结构之间,如果考虑到因自重减轻而带来的竖向构件截面尺寸减小、地震作用减小、基础造价降低、施工周期缩短等有利因素,组合结构比钢筋混凝土结构的造价甚至还要略低。如北京国际技术培训中心的两幢塔楼采用轻钢筋混凝土组合楼盖,因自重减轻、节省模板等产生的综合效益使总造价降低约 5%。相对于混凝土结构,组合结构的缺点是需要采取防火及防腐措施。但组合结构的防火及维护费用比钢结构低,并且随着科学技术的发展,防腐涂料的质量和耐久性也在不断提高,为组合结构的应用提供了有利条件。

实际使用的楼盖结构和桥面结构,通常由钢筋混凝土板与工字形或箱形钢梁组成。当钢梁与混凝土翼板之间没有抗剪连接时,组合梁截面的刚度等于钢梁的刚度和混凝土翼板刚度的简单叠加。由于混凝土的抗拉强度很低,并且截面高度相对较小,所以其抗弯刚度可以忽略不计,整个截面的刚度近似等于钢梁的刚度。如果通过抗剪连接件将钢梁与混凝土翼板连成整体共同受力,则组合梁截面整体受弯,其弯曲刚度比钢梁的刚度一般要提高一倍以上,同时抗弯承载力也显著提高。抗剪连接件能够传递钢梁与混凝土翼板交界面的剪力,抵抗钢梁与混凝土翼板之间的相对滑移和防止掀起,以保证钢梁与混凝土翼板整体受力,是保证组合梁组合作用发挥的关键部件。

组合梁按照截面形式可以分为外包混凝土组合梁和 T 形组合梁,如图 1-1 所示。外包混凝土组合梁又称为劲性混凝土梁或钢骨混凝土梁,主要依靠钢材与混凝土之间的粘结力协同工作,T 形组合梁则依靠抗剪连接件将钢梁与混凝土翼板组合在一起。大量的研究和实践经验表明,T 形组合梁更能够充分发挥不同材料的优势,具有更高的综合性能,是组合梁应用和发展的主要形式,本书将主要介绍此类组合梁的研究成果及有关设计方法。

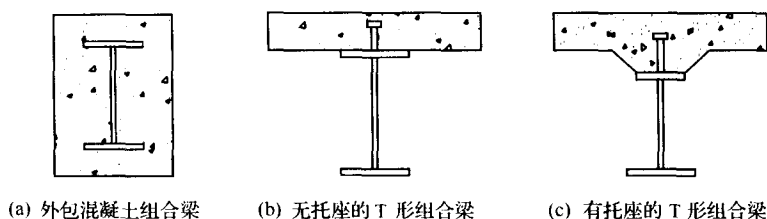


图 1-1 不同的组合梁截面形式

T 形钢-混凝土组合梁按照混凝土翼板的构造不同又可以分为现浇混凝土翼板组合梁、预制混凝土翼板组合梁、叠合板翼板组合梁以及压型钢板混凝土翼板组合梁,如图 1-2 所示。

现浇混凝土翼板组合梁[图 1-2(a)]的混凝土翼板全部现场浇筑,优点是混凝土翼板整体性好,缺点是需要现场支模,湿作业工作量大,施工速度慢。

预制混凝土翼板组合梁[图 1-2(b)]的特点是混凝土翼板预制,现场仅需要在预留槽口处浇筑混凝土,可以减小现场湿作业量,施工速度快,但是对预制板的加工精度要求高,

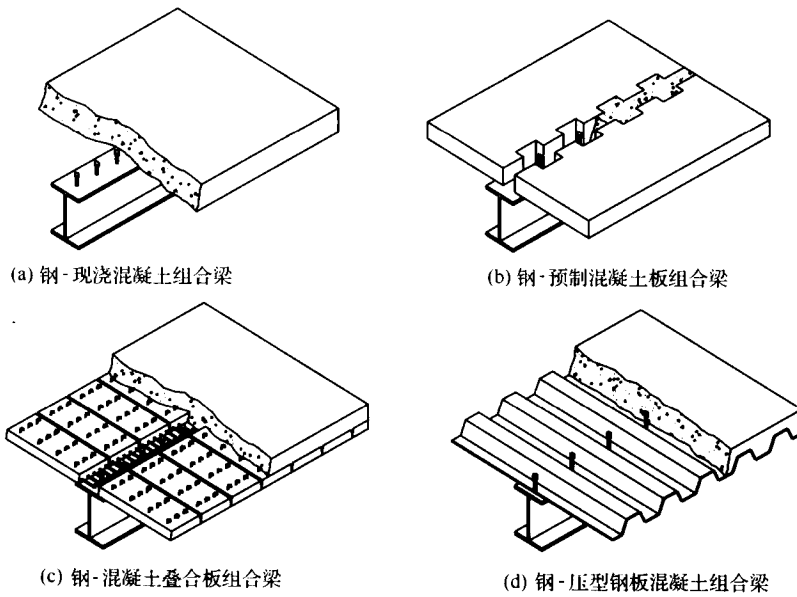


图 1-2 不同混凝土翼板的钢-混凝土组合梁截面形式

不仅需要在预制板端预留槽口,而且要求两板端预留槽口在组合梁的抗剪连接件位置处对齐,同时槽口处需附加构造钢筋。由于槽口构造及现浇混凝土是保证混凝土翼板和钢梁共同工作的关键,因此槽口构造及混凝土浇筑质量直接影响到混凝土翼板和钢梁的整体工作性能。作为大规模推广应用的结构形式,实现预制混凝土翼板组合梁的精确施工并确保其质量尚有一定困难。

叠合板翼板组合梁[图 1-2(c)]是我国科技工作者在现浇混凝土翼板组合梁和预制混凝土翼板组合梁的基础上发展起来的新型组合梁,具有构造简单、施工方便、受力性能好等优点。预制板在施工阶段作为模板,在使用阶段则作为楼面板或桥面板的一部分参与板的受力,同时还作为组合梁混凝土翼板的一部分参与组合梁的受力,做到了物尽其用。这种形式的组合梁可以用传统的简单施工工艺获得优良的结构性能,适合我国基本建设的国情,是对传统组合梁的重要发展。

近年来,随着我国钢材产量和加工技术的提高,压型钢板的 application 越来越广泛,尤其是在高层建筑中的应用越来越多[图 1-2(d)]。压型钢板在施工阶段可以代替模板,在使用阶段的功能则取决于压型钢板的形状和构造。对于带有压痕和抗剪键的开口型压型钢板以及近年来发展起来的闭口型和缩口型压型钢板,还可以代替混凝土板中的下部受力钢筋,其他类型的压型钢板一般则只作为永久性模板使用。

混凝土翼板还有带托座和无托座之分,如图 1-1 所示。带托座的组合梁增大了截面惯性矩,可以获得更大的刚度和承载力,但托座部分的施工和构造较为复杂。从方便施工的角度出发,目前带托座的组合梁应用较少,无托座的组合梁在工程应用中占据了主导地位。

组合梁所采用的钢梁形式有工字形(轧制工字型钢、H 型钢或焊接组合工字形钢)、箱形、钢桁架、蜂窝形钢梁等,如图 1-3 所示。箱形钢梁可以分为开口截面和闭口截面两类。