



21世纪技术与工程著作系列·土木工程

Composite Structures of Steel and Concrete:
Theory and Practice

钢-混凝土组合结构 原理与实例

聂建国 著



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



钢-混凝土组合结构 原理与实例

聂建国 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者从事钢-混凝土组合结构研究部分成果的总结。书中阐述了作者所提出的几种新型组合结构的研究背景和工程应用价值,重点介绍了有关试验研究的具体内容和主要结果,同时对计算模型、数值模拟、理论分析和设计方法等进行了详细介绍。本书主要内容包括混合结构体系的抗震性能、组合楼盖对结构抗震性能的影响、双向大跨组合楼盖的空间受力性能、钢梁翼缘贯通式组合节点、格构式钢管混凝土柱、钢与混凝土组合转换结构、组合梁的抗扭性能、槽形钢-混凝土组合梁以及钢-混凝土组合加固技术等,同时包括了多项组合结构的工程应用实例。本书侧重于揭示组合结构构件及体系的受力机理和规律,同时兼顾其在工程应用中的实际需求和可操作性,并给出了相关实用的设计计算方法。

本书可供土木工程领域从事科研和设计的工程技术人员、高等院校相关专业教师及研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

钢-混凝土组合结构原理与实例/聂建国著. —北京:科学出版社,2009
(21世纪技术与工程著作系列·土木工程)

ISBN 978-7-03-021236-5

I. 钢… II. 聂… III. 钢结构; 混凝土结构; 组合结构 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 034361 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:刘彦妮

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

※

2009年4月第一版 开本:787×1092 1/16

2009年4月第一次印刷 印张:28 1/4

印数:1—2 000 字数:620 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

结构材料的发展是推动结构工程学科发展的重要力量，但在现有材料的基础上优化挖潜，也可以促进结构性能的显著提升。对于钢材和混凝土这两种典型的传统建筑材料，如何通过组合技术使二者各自的性能优势得到更充分的发挥，是国内外近年来研究和应用的热点方向。

作者在 20 多年的研究和工程实践中，深感我国当前的建设规模为结构工程学科的发展提供了广阔的舞台，同时广大工程技术和科研人员也创造性地建成了一大批具有世界先进水平的作品。为适应现代土木结构工程的发展方向并满足工程建设的实际需求，作者结合多年研究及工程实践的经验，在传统钢-混凝土组合结构的基础上提出了几种新的组合结构形式和结构体系，通过较为系统的试验和分析来研究这些结构的综合性能，并根据实际工程需求进行改进，其成果已得到工程界的认可或采纳。例如，超高层建筑结构中普遍采用转换层来将上部结构的荷载传递至跨度较大的下部结构，传统的梁式转换层多采用预应力混凝土转换梁或型钢混凝土转换梁，此类转换构件为了解决刚度不足和抗裂的问题，不得不采用比较大的截面，并导致转换层的质量和刚度偏大，影响结构的整体抗震性能和施工进度。作者提出的钢-混凝土组合转换梁，通过在正弯矩区和负弯矩区采用不同的组合形式，从而在受力和施工上取得了良好的综合性能，并已经被试验所证实。再如，我国经过几十年的大规模建设，存在大量因老化、劣化或改变用途而需要加固的混凝土结构。粘贴钢板、加大截面、预应力、FRP 等既有加固技术虽有各自的优点，但也存在各自一定的不足。针对结构加固改造领域的现状并结合实际工程的需求，作者提出了钢-混凝土组合加固技术，通过一系列试验和分析提出了设计方法。这些组合加固的成果在建筑结构、桥梁结构、地下工程、国防工程、特种结构等工程的加固改造中得到了成功的应用，并得到国内外同行的认可和推广。

全书共分 11 章，较为系统地总结了作者近年来在钢-混凝土组合结构体系和新型钢-混凝土组合结构方面的一些研究成果。各章首先介绍了研究对象的工程背景和现存的问题，然后对相关的试验方案及结果、计算模型和分析结论以及设计方法等进行了阐述。第 1 章绪论对组合结构的发展历史和当前的研究及应用现状进行了简要综述。根据钢-混凝土组合结构的发展趋势和应用现状，提出在设计时应综合考虑材料和构件的结构性能以最有效地发

挥各种材料和构件的优势，并对新型组合构件的研发、组合结构体系的创新、组合加固技术的发展以及组合结构在其他领域内的研究和应用进行了展望。第2章通过建立框架-混凝土核心筒混合结构的地震反应分析模型，阐述基于刚度的结构破损评价方法、混合结构的抗侧刚度及位移限值，并给出了混合结构的抗震安全评价方法。第3章通过大比例的钢框架和组合框架模型的对比试验，重点分析了混凝土组合楼盖对框架抗震性能的影响，并给出了考虑组合楼盖空间效应的抗震计算方法。第4章对不同支承形式的双向组合梁板体系在竖向荷载作用下的受力和变形性能进行了研究，提出了双向组合梁板体系在弹性阶段的内力和变形计算方法以及极限承载力计算方法。第5章对方钢管混凝土柱与钢-混凝土组合梁连接节点抗弯、抗剪承载力以及变形性能进行了系统论述，并提出方钢管混凝土柱节点的设计方法。第6章详细介绍对一系列不同长度的钢管混凝土格构柱进行的试验研究，在试验的基础上并结合计算分析，给出了轴压钢管混凝土格构柱的剪力计算方法。第7章在2榀组合转换框架结构试验的基础上，介绍了组合转换梁及框架在静载和地震作用下的受力性能，与有限元数值计算结果进行了对比分析，并给出了组合转换梁的选型原则及设计方法。第8章在总结现有抗扭研究成果的基础上，对钢筋混凝土板、I形组合梁、箱形组合梁的抗扭性能进行了系统阐述，给出了相应的数值求解方法和设计方法。第9章在总结钢筋混凝土槽形梁研究应用成果的基础上，提出了槽形钢-混凝土组合梁，进行了试验研究和数值分析，取得了有实用参考价值的成果。第10章重点叙述了组合加固技术的主要原理和方法，并对组合加固梁的试验进行了详细介绍；在试验和分析的基础上，给出了组合加固梁开裂荷载、屈服荷载和极限状态下的承载力计算方法，同时对正常使用极限状态下加固界面的受力性能进行了分析。第11章对作者完成的20个工程试验和设计实例进行了简要介绍，工程类型包括高层及超高层建筑、大跨建筑、桥梁结构、结构加固改造和其他结构。

本书的出版是作者及其研究团队的共同研究成果，既包括老一辈学者多年的关怀和指导，也包括实验室同事以及国内外高校和工程界广大专家学者的支持和参与。除本书所列的参考文献外，研究工作中还广泛参考和借鉴了国内外大量的研究成果和经验，这些扎实的工作和成果都是促进组合结构研究不断发展的推动力，也是本书所依赖的基础，在此对其相关作者一并表示感谢。此外，需要特别说明的是，博士后及博士、硕士研究生吴丽丽、陈戈、温凌燕、秦凯、徐桂根、田淑明、唐亮、朱喻之、赵洁、廖彦波、吕坚锋、黄远、卜凡民、张晓光等在相关课题研究过程中出色地完成了大量的试验、计算及分析工作，他们对本书的完成做出了重要的贡献。樊健生副教授

为本书的出版做了大量工作。在此，向他们表示衷心感谢。

本书的研究工作曾先后得到国家杰出青年科学基金（项目编号：50025822）、国家自然科学基金（项目编号：50438020，50578084，50778103，59778038）、国家科技支撑计划（项目编号：2006BAJ03A03—02）、铁道部科技研究项目（项目编号：2006G029）、北京市自然科学基金（项目编号：80710003）等资助，在此表示衷心的感谢。

在我国当前正在进行大规模基本建设的背景下，对结构综合性能的要求越来越高。其中，钢-混凝土组合结构在很多情况下能够产生显著的综合经济技术效益。但是，目前对钢-混凝土组合结构的特点和受力规律尚没有完全认识清楚，针对不同的要求还需要进一步研发更合理的组合结构形式。同时，随着新型材料、分析手段和试验能力的不断发展以及组合结构应用的日益广泛，也给组合结构特别是组合结构体系的研究和应用提出了新的挑战。希望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用，从而吸引更多的研究及工程技术人员在组合结构领域内开展更深入的研究，以促进这种结构形式的不断发展。

限于作者的水平，书中的不足之处在所难免，均需要在今后的科研工作中不断加以改进和完善，同时敬请专家和读者批评指正。

聂建国

2008年12月于清华园

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 组合结构的历史回顾和发展现状	2
1.2.1 钢-混凝土组合构件和节点	3
1.2.2 钢-混凝土组合结构体系	5
1.3 组合结构研究及应用展望	6
1.3.1 新型组合构件	6
1.3.2 超高层与大跨组合结构体系	7
1.3.3 新型组合结构在隧道、深井、海洋平台等领域的应用	8
1.3.4 组合加固技术	8
1.4 小结	9
参考文献.....	9
第 2 章 高层混合结构的抗震性能	11
2.1 引言.....	11
2.2 混合结构的地震反应分析模型.....	12
2.3 框架-混凝土核心筒结构的抗侧刚度解析	23
2.3.1 带加强层结构的抗侧刚度解析	23
2.3.2 无加强层结构的抗侧刚度解析	31
2.3.3 统一刚度比参数及合理取值范围	34
2.4 钢框架-混凝土核心筒结构的位移限值	36
2.4.1 带加强层钢框架-混凝土核心筒结构	36
2.4.2 无加强层钢框架-混凝土核心筒结构	39
2.4.3 位移角限值取值方法探讨.....	41
2.5 混合结构的抗震安全评价.....	43
2.5.1 抗震安全评价流程	43
2.5.2 结构算例及可比性分析	46
2.5.3 方法验证.....	47
2.5.4 混合结构的安全性能比较.....	51
参考文献	56
第 3 章 考虑组合楼盖作用的框架抗震性能	60
3.1 引言.....	60
3.2 钢-混凝土组合框架的试验研究	60
3.2.1 试验概况	60

3.2.2	弹性试验结果及分析	64
3.2.3	破坏试验结果及分析	74
3.3	钢-混凝土组合楼盖面内作用分析	78
3.3.1	几何模型	79
3.3.2	参数分析	79
3.3.3	刚度比 R	82
3.4	钢-混凝土组合楼盖面外作用分析	83
3.4.1	简述	83
3.4.2	钢-混凝土组合梁的 $M-\varphi$ 关系	84
3.4.3	组合框架静力弹塑性分析	85
3.5	钢-混凝土组合框架计算方法	89
3.5.1	简述	89
3.5.2	组合楼盖层剪力分配的简化计算	89
3.5.3	框架组合梁的混凝土翼缘有效宽度	91
3.5.4	框架组合梁刚度的近似计算	94
3.6	小结	95
	参考文献	96
第4章	双向钢-混凝土组合梁板体系	98
4.1	引言	98
4.2	双向组合梁板体系的试验研究	98
4.2.1	试验概况	98
4.2.2	简支双向组合梁板体系的弹性试验结果及分析	103
4.2.3	简支双向组合梁板体系的塑性试验结果及分析	105
4.2.4	钢梁铰接混凝土板连续双向组合梁板体系的弹性试验结果	107
4.2.5	钢梁铰接混凝土板连续双向组合梁板体系的塑性试验结果	108
4.3	简支双向组合梁板体系混凝土板有效翼缘宽度分析	110
4.3.1	分析模型	110
4.3.2	双向组合梁板体系中组合梁抗弯刚度	111
4.3.3	膜应力分析	111
4.3.4	弯曲应力分析	113
4.3.5	剪切有效翼缘宽度分析	114
4.3.6	弯曲有效翼缘宽度分析	116
4.4	双向组合梁板体系的弹性分析	117
4.4.1	简支双向组合梁板体系的弹性分析	118
4.4.2	钢梁铰接混凝土板连续双向组合梁板体系的弹性分析	120
4.4.3	角点支承双向组合梁板体系的弹性分析	125
4.5	双向组合梁板体系的极限承载力分析	126
4.5.1	简支双向组合梁板体系极限承载力分析	127
4.5.2	钢梁铰接混凝土板连续双向组合梁板体系极限承载力分析	132

4.6	小结	138
	参考文献	138
第5章	方钢管混凝土-组合梁节点的抗震性能	139
5.1	引言	139
5.2	试验研究	139
5.2.1	试验方案	139
5.2.2	试验结果	145
5.3	节点抗弯承载力分析	159
5.3.1	节点抗弯承载力分析	159
5.3.2	试验验证	166
5.4	节点抗剪性能分析	169
5.4.1	剪力-剪切变形曲线的恢复力模型	169
5.4.2	方钢管混凝土柱节点的抗剪承载力分析	174
5.5	节点变形分析	176
5.5.1	梁端变形分析	176
5.5.2	试验验证	184
5.6	方钢管混凝土柱节点的设计方法	184
5.6.1	节点的抗弯承载力设计方法	184
5.6.2	节点的抗剪承载力设计方法	186
5.6.3	节点的构造措施建议	186
	参考文献	188
第6章	钢管混凝土格构柱受力性能研究	190
6.1	引言	190
6.2	钢管混凝土格构柱轴压试验研究	191
6.2.1	试验概况	191
6.2.2	试验方案	191
6.2.3	双肢钢管混凝土格构柱试验结果	196
6.2.4	三肢钢管混凝土格构柱试验结果	202
6.2.5	四肢钢管混凝土格构柱试验结果	208
6.3	轴心受压钢管混凝土格构柱剪力计算	214
6.3.1	剪力计算公式推导	214
6.3.2	参数分析与公式回归	216
6.3.3	结语	218
6.4	小结	218
	参考文献	218
第7章	组合转换框架的试验研究与分析	220
7.1	引言	220
7.2	钢-混凝土组合转换梁的受力性能	222
7.2.1	正截面承载力分析	222

7.2.2	考虑滑移效应时组合转换梁的刚度	226
7.3	钢-混凝土组合转换框架的试验研究	233
7.3.1	试验概况	233
7.3.2	试验设计及试验内容	233
7.3.3	试验结果分析	235
7.4	钢-混凝土组合转换框架有限元分析	247
7.4.1	试验模型有限元分析	247
7.4.2	转换梁刚度对转换框架受力性能的影响	251
7.4.3	转换梁刚度对转换框架破坏机制的影响	253
7.5	转换梁选型及设计方法	255
7.5.1	转换梁选型建议	255
7.5.2	组合转换梁设计方法	256
	参考文献	259
第8章	组合梁的抗扭性能研究	261
8.1	引言	261
8.2	钢筋混凝土板式构件的抗扭分析	262
8.2.1	试验研究概况	263
8.2.2	钢筋混凝土变角软化桁架模型	265
8.2.3	板式构件抗扭机理分析	272
8.2.4	对 Marti 等人试验的进一步分析	274
8.3	钢-混凝土组合 I 形梁的抗扭分析	276
8.3.1	试验研究概况	276
8.3.2	扭转中的组合作用	284
8.3.3	抗扭分析模型	285
8.3.4	简化分析模型	292
8.3.5	弯扭相关强度	292
8.4	钢-混凝土组合箱梁的抗扭分析	294
8.4.1	试验研究概况	294
8.4.2	抗扭分析模型	300
8.4.3	讨论	306
8.4.4	弯扭相关强度	306
	参考文献	307
第9章	槽形钢-混凝土组合梁	309
9.1	引言	309
9.1.1	城市轨道交通高架桥上部梁结构形式	309
9.1.2	钢筋混凝土槽形梁	311
9.2	一种新型的 U 形截面 (槽形) 钢-混凝土组合梁	313
9.3	槽形组合梁基本受力性能初探	315
9.3.1	单元类型	315

9.3.2	线路和轨道条件	316
9.3.3	荷载类型	316
9.3.4	槽形组合梁的有限元计算模型	316
9.3.5	槽形组合梁的非线性弹性分析	317
9.4	槽形组合梁的试验研究	319
9.4.1	构件设计	319
9.4.2	材料性能	325
9.4.3	试验装置及加载方案	326
9.4.4	测点布置方案	327
9.4.5	槽形组合梁试验结果	328
9.4.6	试验与计算结果的对比	336
9.5	小结	340
	参考文献	341
第 10 章	钢板-混凝土组合加固技术	343
10.1	引言	343
10.2	钢板-混凝土组合抗弯加固的试验研究	345
10.2.1	试验概况	345
10.2.2	构件设计	345
10.2.3	构件制作	347
10.2.4	材料性能	348
10.2.5	试验装置及量测方案	348
10.2.6	钢板-混凝土组合梁试验结果及分析	350
10.2.7	钢板-混凝土组合抗弯加固梁试验结果及分析	355
10.3	钢板-混凝土组合抗弯加固承载力的理论分析	360
10.3.1	二次受力构件滞后应变计算	360
10.3.2	开裂荷载	361
10.3.3	截面抗弯承载力	362
10.3.4	界面剥离破坏荷载	364
10.4	钢板-混凝土组合抗弯加固正常使用极限状态分析	367
10.4.1	组合抗弯加固的挠度计算	367
10.4.2	组合抗弯加固的裂缝宽度计算	371
10.5	钢板-混凝土组合抗弯加固界面受力分析	373
10.5.1	简述	373
10.5.2	组合抗弯加固中栓钉的实际承载力	374
10.5.3	组合抗弯加固新老混凝土界面承载力	377
10.6	小结	382
	参考文献	383

第 11 章 组合结构工程实例	385
11.1 高层及超高层建筑	385
11.1.1 北京财源国际中心西塔	385
11.1.2 天津津塔	388
11.1.3 广州合景大厦	391
11.1.4 东莞青少活动中心	393
11.2 大跨建筑	395
11.2.1 武昌火车站	395
11.2.2 吴江大厦	399
11.2.3 北京大屯路下穿隧道工程	402
11.3 桥梁结构	405
11.3.1 潍坊市跨济青高速立交桥	405
11.3.2 河南漯河平高速甘刘立交桥	406
11.3.3 厦门圆博园 11 号桥	409
11.3.4 重庆观音岩长江大桥	411
11.3.5 青岛海湾大桥	415
11.4 结构加固改造	417
11.4.1 工型混凝土梁组合加固	417
11.4.2 T 型混凝土梁组合加固	419
11.4.3 箱形混凝土梁组合加固	422
11.4.4 混凝土桥梁组合加宽	424
11.4.5 地下通道组合加固	428
11.4.6 既有建筑增层改造	430
11.5 其他结构	433
11.5.1 大型烟囱组合结构隔板	433
11.5.2 铁路隧道组合结构衬砌	434
参考文献	437

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

根据使用材料的不同,结构工程师习惯于把结构体系分为砌体结构、木结构、钢结构、混凝土结构、钢-混凝土组合结构等。钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土两种材料组成,从广义上讲也属于组合结构。随着结构工程的不断发展,钢筋混凝土已经成为当今应用最广泛的结构形式之一,并发展成为一门独立的结构学科。目前仅将含有钢-混凝土组合构件的结构称为钢-混凝土组合结构。通常将 composite structure 翻译为组合结构,而把 hybrid structure 翻译为混合结构。前者指两种或多种材料组合在一起而形成的结构形式,后者则指两种或多种结构体系组合在一起的结构形式。狭义的组合结构仅包括由钢和混凝土两种材料组成的组合柱、组合梁、组合板等。随着社会的发展,对结构物使用功能的要求越来越高,传统的组合结构已经不能完全满足不断增长的功能要求。这里的广义组合结构是指将不同材料或构件组合在一起的结构形式,同时在设计时应将不同材料和构件的性能纳入整体进行考虑,以最有效地发挥各种材料和构件的优势,从而获得更好的结构性能和综合效益^[1]。

组合结构在材料使用上具有更广的范围。除了传统的钢材与混凝土,各种新型材料的发展为组合结构的发展提供了更多的选择。例如,FRP 材料具有高强、低密度和很强的抗腐蚀能力等一系列优点,与混凝土等材料组合后可以获得良好的长期费效比。此外,玻璃、轻合金材料、工程塑料等与钢材、混凝土和木材等传统材料组合,也可进一步发挥出各自的材料优势,形成不同类型的组合构件。

组合结构具有多种多样的组合方式和途径,如材料间的粘结力、机械连接件的抗剪抗拔力、构件或材料间的相互约束与支持等。合理运用各种组合方式,可以使各种材料扬长避短,获得一系列性能优越的组合构件或体系。例如,钢-混凝土组合梁 (steel-concrete composite beams) 通过抗剪连接件将钢梁与混凝土翼板组合,充分发挥了混凝土抗压强度高和钢材抗拉性能好的优点^[2],而钢管混凝土 (concrete filled steel tubes) 则将钢管与混凝土组合,钢管的约束作用使混凝土处于三向受压从而提高了混凝土的强度和延性,混凝土对钢管的约束则防止了钢管的屈曲^[3,4,5]。此外,钢板混凝土剪力墙、钢板混凝土组合井壁等也都使两种或多种结构材料通过不同的方式进行有效组合,可以获得更高的性能。

组合结构还包括多种结构体系之间的组合,如组合筒体与组合框架所形成的组合体系、巨型组合框架体系等。将钢筋混凝土核心筒或剪力墙与钢框架联合使用,使具有较大抗侧移刚度的钢筋混凝土核心筒或剪力墙主要承受水平荷载,而具有较高材料强度的钢框架主要承受竖向荷载,这样可利用轻巧灵活的钢框架做成跨度较大的楼面结构,避

免了单一结构体系带来的弊端^[6,7]。

应用组合概念,还可以增强结构构件的局部性能,或在构件中形成部分组合作用。例如,利用钢板对混凝土的约束作用可以提高预应力锚具位置或其他集中荷载作用处混凝土的局部抗压强度,利用混凝土对钢板的约束作用提高钢箱梁在负弯矩作用下底板和腹板的局部稳定性。通过对构件的局部或部分组合作用,能够在基本不改变原结构方案的前提下使结构的某项性能获得显著提高。

组合结构将多种材料或构件通过某种方式组合在一起共同工作,组合后的整体工作性能要明显优于各自性能的简单叠加。经过几十年的研究及工程实践,组合结构已经发展成为既区别于传统的结构形式,又与之密切相关和交叉的结构形式,其结构类型和适用范围涵盖了结构工程应用的很多领域。随着我国国民经济的快速发展和基础建设规模的不断扩大,对各种能够满足超高、大跨以及其他特殊要求的结构形式提出了越来越高的要求。同时,新材料、新技术的出现,也为结构体系的创新与发展创造了条件。现代广义组合结构应进一步开发对高性能材料的有效利用,并使结构形式和体系更加合理化和多样化。深入理解广义组合结构的特性和原理,可以开发出更高性能的组合结构形式并建立新的设计概念,使组合结构的设计更趋于合理、可靠、经济、耐久。

1.2 组合结构的历史回顾和发展现状

组合结构的雏形最早于 1894 年出现于美国,当时出于防火的需要,在钢梁外面包上了混凝土,但并未考虑混凝土与钢的共同受力^[8]。具有现代意义的钢-混凝土组合梁出现于 20 世纪 20 年代,并在 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。1908 年美国首先对外包混凝土的钢柱进行了试验,此后的一系列研究证明混凝土的存在可以提高柱的承载力。60 年代后当钢管结构得到应用后不久,又出现了在钢管内填充混凝土的钢管混凝土结构。由于两种材料之间的相互约束作用,钢管混凝土的性能比外包混凝土柱显著增强。早期的组合结构主要采用钢材与混凝土两种材料,将钢梁、混凝土板、钢管、钢管等构件单元组合在一起共同工作。随着压型钢板、玻璃、FRP 等新型材料以及高强度合金、高性能混凝土的开发应用,近年来组合结构的类型也在不断扩大。

随着组合结构的推广应用,在相关研究工作的基础上,各国也制订了多部有关组合结构的设计规范。1944 年,美国 AASHTO 规范首次列入了有关组合梁的设计条文。美国 AISC、加拿大建筑设计规范、德国 DIN1078 分别在 1952 年、1953 年和 1954 年首次列入了有关组合梁的设计条文。1981 年由欧洲国际混凝土委员会 (CEB)、欧洲钢结构协会 (ECCS)、国际预应力联合会 (FIP) 以及国际桥梁与结构工程协会 (IABSE) 共同组成的组合结构委员会颁布了组合结构规范 (Composite Structures, Model Code)^[9]。以该规范为基础进行修订和补充,欧洲标准委员会 (CEN) 于 1994 年颁布了欧洲规范 4 (EC4)^[10],这是目前世界上关于钢-混凝土组合结构最完整的一部设计规范,为组合结构的研究和应用作了比较全面的总结,并指出了今后的发展方向^[11]。

我国在 1974 年颁布的《公路桥涵设计规范 (试行)》第五章中首次提到了组合梁的

设计概念,并于1986年颁布的《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025—86)^[12]中对有关组合梁的内容进行了完善和补充。1988年,我国《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)^[13]首次列入了一章“钢与混凝土组合梁”的内容,标志着钢-混凝土组合梁在我国的应用开始受到广泛的重视。随后,《钢-混凝土组合楼盖结构与施工规程》(YB 9238—92)^[14]、《钢管混凝土结构与施工规程》(CECS 28:90)^[15]、《钢管混凝土结构设计规程》(YB 9082—98)^[16]、《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T 5085—1999)^[17]等一系列规程的颁布对促进组合结构在我国的发展起到了重要作用。2003年颁布实施的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)^[18]中有关组合梁一章的内容,在原规范基础上得到了进一步的充实和拓宽,增加了有关叠合板组合梁、连续组合梁等设计内容,吸收了我国近年来在钢-混凝土组合梁研究和应用领域的最新成果,并首次采用了较为精确的折减刚度法来计算组合梁的刚度^[19]。

1.2.1 钢-混凝土组合构件和节点

钢-混凝土组合构件是目前应用最广泛、研究最成熟的组合结构形式,包括钢-混凝土组合柱、钢-混凝土组合梁、钢-混凝土组合楼板和钢-混凝土组合剪力墙等。

组合柱包括钢管混凝土柱和钢管混凝土柱两类。这两类组合柱所利用的组合概念有所不同,其主要截面形式如图1-1(a)~(d)所示。钢管混凝土柱主要利用混凝土对钢柱的支持^[20,21],而钢管混凝土则同时利用了钢管对混凝土的横向约束作用提高了后者的强度和延性^[3,5]。钢管混凝土由于能够同时提高钢材和混凝土的性能并方便施工而成为研究和应用的热点。钢管混凝土与泵送混凝土、逆作法、顶管法施工技术相结合,在我国超高层建筑以及桥梁建设中已取得了相当多的成果。与钢管混凝土柱(CFT)的原理不同,国外学者还提出了仅利用钢管对混凝土横向约束作用的套管混凝土柱(tubed column)以提高短柱的延性,这也是对组合概念的灵活运用^[22]。

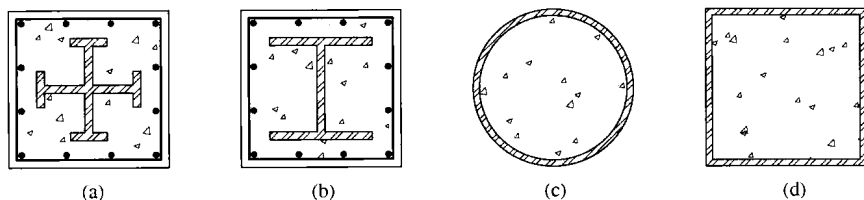


图 1-1 组合柱的截面形式

组合梁是重要的横向承重构件,通过抗剪连接件把楼板或桥面板与钢梁连成整体共同工作,充分利用了钢材的抗拉强度和混凝土的抗压强度,并提高了钢梁的稳定性。采用不同的结构材料并通过不同的组合方式,可以形成多种多样的组合梁。早期的组合梁将钢梁包裹在混凝土内(钢管混凝土梁),自重较大,并存在裂缝问题。将钢梁与混凝土翼板组合在一起的组合梁[图1-2(a)],减轻了自重,并避免了混凝土开裂等问题。采用预制钢筋混凝土板与钢梁的组合梁[图1-2(b)],则较现浇翼板的组合梁能加快施工进度,减少混凝土收缩等不利因素的影响。采用叠合板混凝土作为翼板的组合梁[图1-2(c)],在保留预制板组合梁优点的基础上,进一步保证了施工质量,降低了施

工难度。此外，将木材或 FRP 等材料与混凝土组合亦可形成新型组合梁 [图 1-2 (e)、(f)]；而将压型钢板、波纹钢板、钢管混凝土等材料与混凝土组合 [图 1-2 (d)、(g)、(h)、(i)]，则可以在提高施工性能、减少预应力损失、减小结构高度等方面获得优势。在组合梁中，抗剪连接件是保证钢和混凝土共同工作的关键元件。早期的抗剪连接件形式主要为弯筋及槽钢，目前则多采用栓钉。

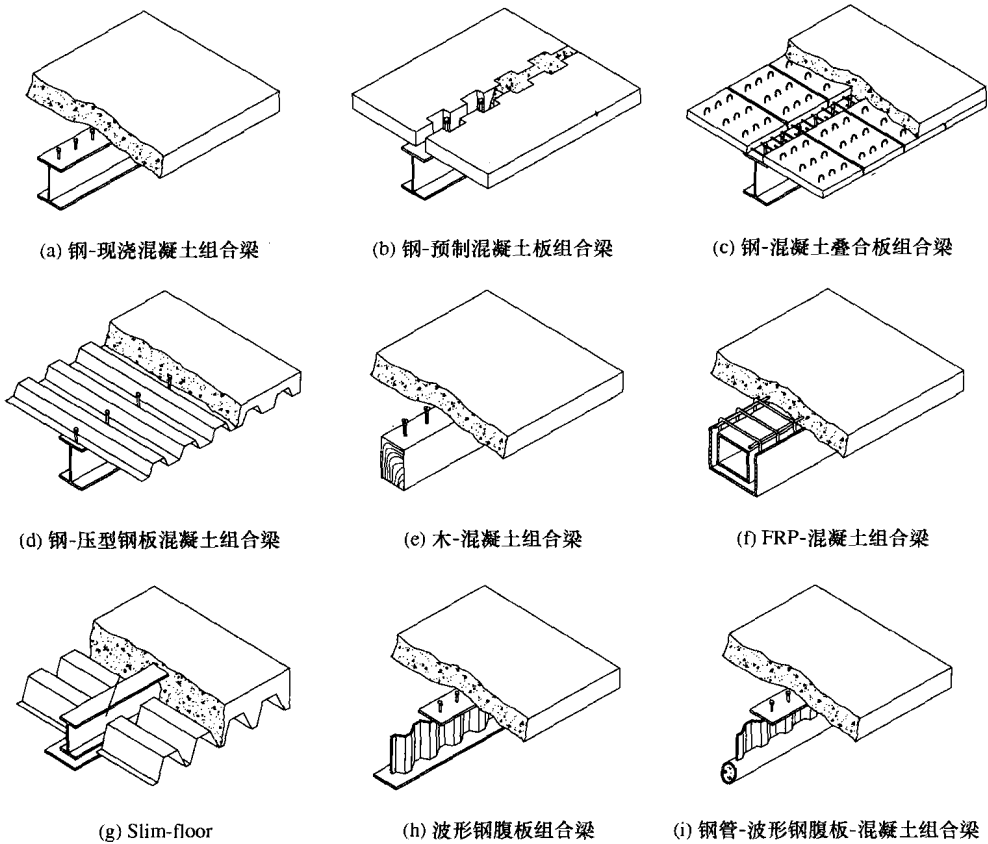


图 1-2 组合梁的结构形式

此外，压型钢板混凝土组合楼盖、钢板混凝土组合剪力墙、钢-混凝土组合桁架、离心钢管混凝土等也根据不同的组合概念和组合方式，在刚度、强度、延性和稳定性等方面发挥出了各种材料的优势，并得到了不断发展。

组合节点是指连接两种不同类型构件的节点，其内力传递路径及可能产生的破坏模式要比纯钢结构或钢筋混凝土节点复杂得多。组合节点可以连接不同形式的混凝土梁柱、钢结构梁柱或组合结构梁柱，框架结构中常见的组合节点形式如图 1-3 所示。目前在框架设计时通常将节点理想化为刚度无穷大的刚性节点或刚度为零的铰接节点。但工程中实际使用的组合节点多属于典型的非线性半刚性连接。这种节点降低了梁单元对柱单元的约束刚度，节点耗能性能较强，是一种理想的抗震节点形式。Northridge 地震和阪神地震后，国外的研究多集中于节点在强震作用下的性能和设计方法，在非地震作用下的研究则主要集中于各种形式的半刚性节点^[23]。国内根据工程建设的需要，组合节

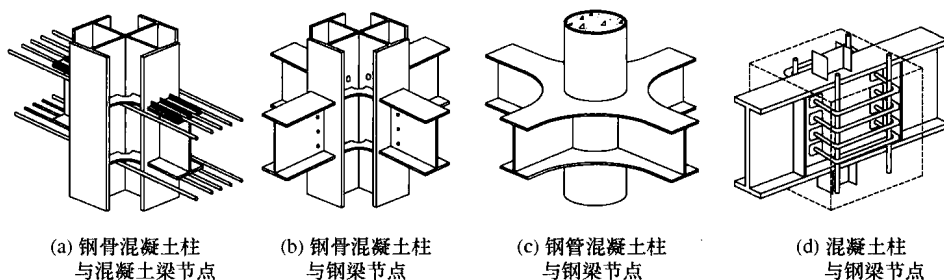


图 1-3 组合节点的形式

点设计和研究的难点及重点则主要集中在钢管混凝土柱与钢梁或钢筋混凝土梁相连的节点。

1.2.2 钢-混凝土组合结构体系

随着建筑材料、设计理论和设计方法的发展,组合结构也由构件层次向结构体系方向发展。组合结构体系是由组合承重构件或组合抗侧力构件形成的结构体系,可以充分发挥不同材料和体系的优势,克服传统结构体系的固有缺点。例如,纯钢结构随着建筑高度的增加,存在侧向刚度小、抗侧移能力差的问题,难以避免在地震和强风作用下产生过大的振动,影响正常使用的舒适度等。同时,钢结构抗火能力相对较差、防腐代价相对较高。对于钢筋混凝土结构而言,随着建筑高度的增加和柱网尺寸的增大,单柱荷载的提高使得柱截面不断加大,从而形成对抗震不利的短柱。而且混凝土本身延性较差,为提高结构安全性所采取的很多构造措施大大增加了施工的难度和成本。通过组合概念则可以充分发挥钢材和混凝土的材料特性,形成一系列新颖、高效的结构体系。目前,我国已建成的上海环球金融中心(492m)、金茂大厦(421m)、深圳地王大厦(384m)、赛格广场(292m)等超高层建筑以及上海杨浦大桥(602m)、东海大桥(420m)、芜湖长江大桥(312m)、深圳彩虹桥(150m)等大跨度桥梁都全部或部分采用了组合结构。

在高层与超高层结构领域,日本曾于1992年建造了两幢高度分别为78m和107m的钢框架-混凝土核心筒组合(混合)结构的高层建筑,并结合这两幢建筑对这种结构形式开展了研究工作。近年来,钢-混凝土组合结构体系开始大量用于我国高层建筑特别是超高层建筑结构,其中已建或在建的一百多幢高层钢结构建筑中,一半以上都全部或部分采用了组合结构体系^[24]。组合结构体系兼有钢结构施工速度快和混凝土结构刚度大、成本低的优点,在很多情况下被认为是一种符合我国国情的超高层建筑结构形式。

在解决了钢材与混凝土之间抗剪连接的疲劳问题后,组合结构在桥梁结构领域获得了迅速发展。简支组合梁桥能够充分发挥不同材料的性能,是一种得到广泛应用的桥梁结构形式。随着技术不断发展,组合梁的应用范围也扩展到连续梁桥、拱桥和斜拉桥等多种复杂体系^[25]。组合梁桥中的钢梁也由早期单一的钢板梁拓展到钢箱梁、钢槽形梁和钢桁梁等。与此同时,采用体外预应力来改善组合梁的受力性能也是一个发展方向。