

土木工程专业研究生系列教材

钢-混凝土组合结构

同济大学 陈世鸣 主编

Master of Civil Engineering

 中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

土木工程专业研究生系列教材

钢-混凝土组合结构

同济大学 陈世鸣 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢-混凝土组合结构/陈世鸣主编. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 11
(土木工程专业研究生系列教材)
ISBN 978-7-112-14924-7

I. ①钢… II. ①陈… III. ①钢筋混凝土结构
IV. ①TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 280573 号

本书共分为 9 章, 第 1 章为绪论, 介绍了钢-混凝土组合结构的分类和基本原理, 并通过部分工程实例回顾和总结了组合结构的发展和应用现状; 第 2~8 章分别为: 设计原则和材料的基本性能、压型钢板-混凝土组合板、界面性能与抗剪连接、钢-混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构、钢-混凝土组合结构节点; 第 9 章为组合结构的抗火性能及设计概要。

本书可作为结构工程和桥梁工程专业本科生、研究生的专业教材, 也可以供工程技术人员参考。

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺 聂 伟
责任设计: 李志立
责任校对: 张 颖 赵 颖

土木工程专业研究生系列教材 钢-混凝土组合结构

同济大学 陈世鸣 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 $\frac{1}{4}$ 字数: 347 千字
2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第一次印刷
定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-14924-7
(22962)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

20 多年前，我在学校图书馆发现了英国皇家工程院院士 Johnson 教授著的《Composite Structures of Steel and Concrete》，全书共二册，一册是《关于钢-混凝土组合结构的基本原理和建筑结构》（1975 年版），另一册是《关于组合结构在桥梁中的应用》（1978 年版）。阅读该书后，我对钢-混凝土组合结构这种新型的结构形式充满了兴趣，并意识到组合结构将会对我国今后的建筑技术产生很大影响。之后，我有幸作为 Johnson 教授的博士生，在英国 Warwick 大学开始了组合结构的研究，并完成了博士论文《Instability of Composite Beams in Hogging Bending》，研究成果被应用于欧洲组合结构规范。2006 年，Johnson 教授荣获英国结构工程师学会（I-Structural E）金奖荣誉（Gold Medal Award），以表彰他在组合结构领域所作出的杰出贡献。

许多刚接触组合结构的人都会以为钢-混凝土组合结构是近几十年才出现的结构形式，实际上组合结构的应用时间非常久远，最早的组合结构可以追溯到 1894 年，美国匹兹堡的一栋建筑中采用了今天称为型钢混凝土的组合梁；在一次大火中，附近的建筑均遭到毁坏，而采用组合梁的建筑结构完好，显然，钢梁外部的混凝土起到了很好的防火保护作用。20 世纪 30 年代建造的纽约帝国大厦，也采用了型钢混凝土柱的组合结构形式。但是组合结构形成规模的应用，并考虑到钢和混凝土的组合作用对结构承载力的贡献，则是在第二次世界大战结束后的欧洲。战后的欧洲，大量建筑的恢复重建，需要组合结构这种新的结构技术。

今天，我们都已经充分认识到钢-混凝土组合结构综合了钢结构和混凝土结构的优点，具有承载力高、刚度大、稳定性能好、施工快速方便等特点，并且已经在我国的工业与民用建筑及桥梁工程等领域得到越来越广泛的应用，显示出了良好的技术经济效益和社会效益。近年来的大量工程实践表明：钢-混凝土组合结构尤其适合我国的国情，其应用前景广阔。

自 2001 年起，同济大学在土木工程专业的本科生和研究生的选修课程中开设了组合结构课程。其目的是想让这些未来的土木工程师充分了解这一新型结构的工作原理和设计方法，使他们能在今后的职业生涯中，利用这些知识，并进一步充分展示自己的智慧。本书是对 10 多年来该课程讲义的总结和梳理，综合并引用了国内外大量的研究及应用成果，特别是国内外组合结构的多部规范、规程的内容，还参考了一些公开出版的教材和著作。

本书共分为 9 章。第 1 章为绪论，介绍了钢-混凝土组合结构的分类和基本原理，并通过部分工程实例回顾和总结了组合结构的发展和应用现状；第 2~8 章分别为：设计原则和材料的基本性能、压型钢板-混凝土组合板、界面性能与抗剪连接、钢-混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢筋混凝土结构、钢-混凝土组合结构节点；第 9 章为组合结构的抗灾性能及设计概要。

本书第 1、2、3、4、5、8 章由陈世鸣执笔，第 6、7、8 章由肖建庄执笔。全书由陈世鸣统稿。

在本书的编写过程中，研究生裘子豪、徐佳为、黄玲、涂天一等做了大量工作，张洁和潘庆祥为本书绘制了部分插图，对他们的帮助和贡献深表感谢。

本书可作为结构工程和桥梁工程专业本科生、研究生的专业教材使用，也可以供工程技术人员参考。受作者水平和编写时间的限制，书中难免存在一些错误和不足之处，敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 组合结构基本构件	2
1.2.1 压型钢板-混凝土组合板	2
1.2.2 组合梁	3
1.2.3 型钢混凝土柱、钢管混凝土柱	4
1.2.4 抗剪连接件	6
1.3 钢和混凝土组合结构的发展与应用	7
1.3.1 早期发展	7
1.3.2 1960 年以后的发展	9
1.3.3 我国组合结构的应用情况	11
1.4 钢和混凝土组合结构的适用范围及特点	14
本章思考题	14
第 2 章 设计原则和材料的基本性能	15
2.1 组合结构的基本设计原则	15
2.1.1 结构的功能要求和极限状态	15
2.1.2 极限状态的设计表达式	16
2.1.3 组合结构基本设计要求和方法	18
2.2 钢与混凝土材料的力学性能	18
2.2.1 混凝土	18
2.2.2 钢材	20
2.2.3 栓钉	21
2.2.4 压型钢板	22
本章思考题	14
第 3 章 压型钢板-混凝土组合板	24
3.1 引言	24
3.2 压型钢板	25
3.3 组合板的纵向抗剪能力	25
3.3.1 组合板粘结-滑移机理	25
3.3.2 组合板的破坏模式	26
3.3.3 纵向受剪承载力	27
3.4 组合板的试验研究	31
3.4.1 受弯试验	31
3.4.2 推出试验	33
3.4.3 抗火试验	36
3.5 组合板的承载力计算	38

3.5.1	施工阶段压型钢板承载力计算	38
3.5.2	使用阶段组合板承载力计算	39
3.6	组合板的挠度和混凝土裂缝宽度计算	42
3.7	组合板的振动特性	44
3.8	组合板的施工和构造要求	45
3.9	组合板计算例题	47
	本章思考题	53
	本章习题	53
第4章	界面性能与抗剪连接	54
4.1	引言	54
4.2	组合梁界面性能与抗剪连接	54
4.3	剪力连接件分类及特点	56
4.4	栓钉剪切-滑移的试验	58
4.5	栓钉连接件承载能力计算	60
4.6	其他种类剪力连接件的承载力计算	63
	本章思考题	64
第5章	钢-混凝土组合梁	65
5.1	引言	65
5.2	组合梁的工作原理和受力特点	66
5.3	组合梁试验研究	68
5.3.1	组合梁正弯矩受弯性能	68
5.3.2	组合梁负弯矩受弯性能	69
5.3.3	局部失稳与组合梁截面分类	70
5.4	组合梁的计算分析方法和设计原则	72
5.5	组合梁的混凝土翼板有效翼缘宽度	73
5.6	简支组合梁承载力计算	75
5.6.1	组合梁的换算截面	76
5.6.2	组合梁弹性承载力	77
5.6.3	组合梁的塑性极限承载力	79
5.7	连续组合梁承载力计算	83
5.7.1	连续组合梁受力特性内力分析	83
5.7.2	负弯矩作用下的承载力计算	85
5.7.3	连续组合梁稳定性验算	88
5.8	组合梁抗剪连接	91
5.8.1	组合梁的剪跨	91
5.8.2	剪力连接件的弹性设计方法	92
5.8.3	剪力连接件的塑性设计方法	93
5.9	组合梁正常使用阶段验算	94
5.9.1	组合梁的挠度变形验算	94
5.9.2	组合梁的混凝土裂缝宽度验算	96

5.10 组合梁施工与构造要求	100
5.10.1 组合梁的施工要点	100
5.10.2 组合梁构造要求	101
5.11 组合梁计算例题	102
本章思考题	112
本章习题	112
第6章 型钢混凝土结构	114
6.1 概述	114
6.1.1 基本概念	114
6.1.2 型钢混凝土结构的优点	115
6.1.3 型钢与混凝土共同工作	116
6.2 型钢混凝土梁	117
6.2.1 构造要求	117
6.2.2 型钢混凝土梁的受弯	118
6.2.3 型钢混凝土梁的受剪	123
6.2.4 型钢混凝土梁的变形计算	125
6.2.5 型钢混凝土梁的裂缝	127
6.3 型钢混凝土柱	129
6.3.1 构造要求	129
6.3.2 型钢混凝土柱的轴压性能	130
6.3.3 型钢混凝土柱的偏压性能	131
6.3.4 型钢混凝土柱的受剪性能	136
6.4 型钢混凝土剪力墙	137
6.4.1 构造要求	137
6.4.2 型钢混凝土剪力墙的受弯	138
6.4.3 型钢混凝土剪力墙的受剪	139
6.5 型钢混凝土施工	141
6.5.1 型钢混凝土组合梁	141
6.5.2 型钢混凝土柱	141
6.5.3 型钢混凝土剪力墙	142
本章思考题	144
第7章 钢管混凝土结构	144
7.1 概述	144
7.1.1 基本概念	144
7.1.2 钢管混凝土结构的优点	144
7.1.3 钢管与混凝土共同工作	145
7.2 钢管混凝土受压破坏机理	146
7.2.1 三种加载方式	146
7.2.2 钢管混凝土受压强度增强机理	146
7.2.3 钢管混凝土受压变形特征	147
7.3 钢管混凝土柱的受压性能	148
7.3.1 钢管混凝土构造的一般规定	148
7.3.2 钢管混凝土短柱的破坏形式	149

7.3.3	钢管混凝土短柱的极限分析	149
7.4	钢管混凝土柱的承载力计算	151
7.4.1	多种截面钢管混凝土构件承载力设计	151
7.4.2	实心圆形钢管混凝土构件承载力设计	154
7.4.3	钢管混凝土构件在复杂受力状态下的承载力计算	160
7.4.4	钢管混凝土构件刚度计算	161
7.4.5	计算例题	163
7.5	不同规范钢管混凝土承载力计算方法	163
7.5.1	短柱极限承载力计算公式	164
7.5.2	压弯构件承载力计算公式	166
7.6	钢管混凝土施工	167
7.6.1	钢管的加工制作	167
7.6.2	钢管长度方向的连接	168
7.6.3	钢管混凝土浇筑	168
7.6.4	钢管混凝土构件的除锈、防腐涂装	170
7.6.5	钢管混凝土结构的防火	171
	本章思考题	171
第8章	钢-混凝土组合结构节点	172
8.1	概 述	172
8.2	型钢混凝土组合结构节点	172
8.2.1	节点构造	172
8.2.2	梁柱节点抗剪	175
8.2.3	梁柱节点抗弯	178
8.3	钢管混凝土组合节点	178
8.3.1	梁柱节点	178
8.3.2	格构柱节点	187
8.3.3	桁架节点	188
8.3.4	柱脚节点	189
第9章	组合结构的抗灾性能及设计概要	190
9.1	引 言	190
9.2	组合结构抗震设计	191
9.2.1	组合结构的震害	191
9.2.2	组合结构构件的抗震性能	191
9.2.3	组合结构体系	197
9.2.4	钢-混凝土组合结构体系整体 抗震性能	199
9.2.5	钢-混凝土组合结构体系的抗震分析	200
9.3	组合结构抗火设计	202
9.3.1	建筑结构的耐火极限	202
9.3.2	高温下钢材和混凝土的性能	204
9.3.3	结构抗火设计的基本要求	207
9.3.4	组合结构抗火设计方法	208
9.3.5	组合结构的防火保护构造	218
	参考文献	220

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

1988 年 8 月 8 日，香港的中国银行大厦落成。这座雄伟的建筑是当时亚洲最高的建筑，建筑采用了钢和混凝土组合结构形式，这是组合结构发展以来重要里程碑。工程师们非常完美地利用了组合结构形式，充分发挥了传统结构材料的优点，如钢材的抗拉强度和混凝土的抗压强度。

什么是组合结构？通俗地讲，由几种不同性质的材料组合成整体共同工作的构件称为组合构件，由组合构件组成的结构体系称为组合结构。目前，国内外工程界对组合结构的表述是：将不同的材料按最佳的集合构造布置，使每种材料因其所在的特定位置而发挥各自的特点。各种结构材料扬长避短，使得结构体系的材料能最大地发挥其性能。

钢和混凝土组合结构就是由钢结构和混凝土结构通过某种方式组合在一起共同工作的结构形式，两者组合后的整体工作性能要明显高于两者的叠加，这种结构形式充分利用了钢结构和混凝土结构各自的优点，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。钢-混凝土组合构件由钢结构和钢筋混凝土构件组合而成，如组合梁、组合楼板、组合桁架、组合柱等组合承重构件，还有在高层和超高层建筑中逐渐采用的组合斜撑、组合剪力墙等组合抗侧力构件。一般来说，含有钢结构和混凝土构件的组合构件的结构，称为钢-混凝土组合结构。当竖向承重构件和横向承重构件都为钢和混凝土组合构件时，可称为全钢-混凝土组合结构。组合结构也可包括多种结构体系的组合，如在高层和超高层建筑中经常采用的组合筒体与组合框架所形成的组合结构体系、巨型组合框架体系等。当采用钢筋混凝土核心筒或剪力墙与组合框架的组合结构时，可使具有较大抗侧移刚度的钢筋混凝土核心筒或剪力墙来主要承受水平荷载，而让具有较高材料强度的钢和混凝土组合框架主要承受竖向荷载。这样采用轻巧、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，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。

常见的组合结构构件包括：①钢-混凝土组合梁（Steel-Concrete Composite Beams）：又称为钢-混凝土组合楼盖结构（Steel-Concrete Floor Composite Structure），包含现浇钢-混凝土组合梁、预制钢-混凝土组合梁和压型钢板-混凝土板组合梁；②压型钢板-混凝土组合板（Composite Slabs）：又称组合板；③型钢混凝土（Steel Reinforced Concrete）：通常缩写为 SRC，包含型钢混凝土梁（Steel Reinforced Concrete Beams）、型钢混凝土柱（Steel Reinforced Concrete Columns）和型钢混凝土墙（Steel Reinforce Concrete Walls）；④钢管混凝土（Concrete Filled Tube）：通常缩写为 CFT，按截面形式不同分为方钢管混凝土、圆钢管混凝土和多边形钢管混凝土等。下面将分别扼要介绍组合结构基本构件的特点以及适用范围。

1.2 组合结构基本构件

1.2.1 压型钢板-混凝土组合板

压型钢板-混凝土组合板是指在冷压成型并具有不同形状凹凸肋与槽纹的钢板上浇筑混凝土形成的组合构件。压型钢板-混凝土组合板是将抗压强度高、刚度大的混凝土放在板的受压区，受拉性能较好的压型钢板放在板的受拉区，代替板中受拉纵筋；两种材料合理受力，发挥各自的优点。近年来压型钢板-混凝土组合板应用发展很快，在国内外许多工程中用作楼板、屋面板以及工业厂房的操作平台板等。压型钢板-混凝土组合板主要有以下优点：

- (1) 压型钢板可作为浇筑混凝土的模板，节省了大量木模板及其支撑。
- (2) 压型钢板非常轻便，因此堆放、运输及安装都非常方便。
- (3) 在使用阶段，压型钢板和混凝土组合作用，可代替受拉钢筋。
- (4) 组合板具有较大的刚度，降低了受拉区混凝土的用量，使组合板的自重减轻。
- (5) 便于敷设通信、电力、采暖等管线。
- (6) 压型钢板可作为浇筑混凝土的模板直接支承于钢梁上，为各种工种作业提供了宽广的工作平台，浇筑混凝土和其他工种均可多层立体作业，加快了施工进度，缩短了工期。
- (7) 压型钢板可直接作顶棚。
- (8) 与使用木模板相比，压型钢板组合楼板施工时，减小了发生火灾的可能性。

由于压型钢板中肋的形式与槽纹形状不同，钢与混凝土的共同工作性能会有较大差异。为加强压型钢板与混凝土板的粘结，一般还可通过焊接附加钢筋或在板的端部放锚固栓钉来增强钢板与混凝土的粘结。组合板是现在钢结构楼板施工中最普遍使用的一种。对其受力性能的研究表明：大部分情况下，组合板的承载力是由混凝土和压型钢板之间的剪切连接强度控制，然而在许多设计和计算方法中，梁端剪力连接件和端部锚固对组合板受力性能的影响都是被忽略的。图 1-1 为压型钢板-混凝土组合板的构造。

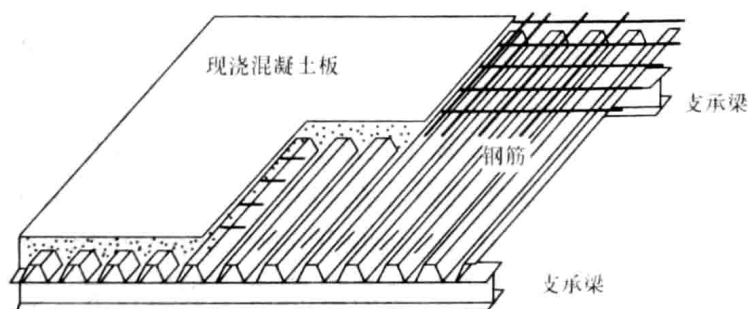


图 1-1 压型钢板-混凝土组合板的构造

组合板应该考虑施工和使用两个阶段的不同要求进行设计。

- (1) 施工阶段，此时混凝土还没结硬，所有施工荷载由压型钢板承担，压型钢板必须承受的施工中的各种荷载，包括混凝土的自重，施工人员以及工具的重量等。
- (2) 使用阶段，此时压型钢板与混凝土共同作用，形成组合板，要验算压型钢板混凝土

土组合板是否可以承受设计的静载与活载，以及组合板的变形是否在允许范围内。

在建筑中，压型钢板-混凝土组合板与支承钢梁又可组成组合梁，这类楼面结构又称为组合楼盖体系。图 1-2 为某建筑的平面图和剖面图，该建筑采用了组合楼盖体系。

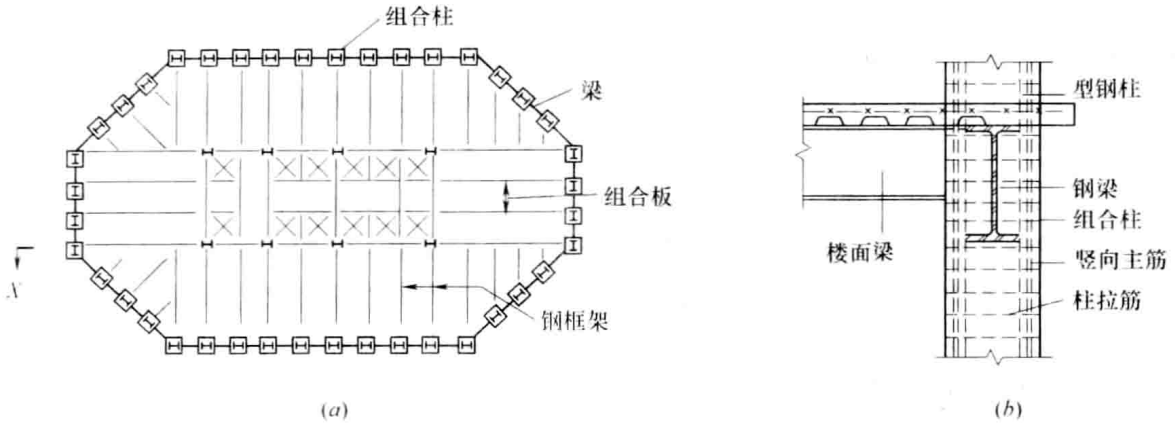


图 1-2 组合楼盖体系在建筑中的应用
(a) 建筑结构平面图；(b) 建筑结构剖面图

1.2.2 组合梁

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 1-3 所示）。

外包混凝土组合梁又称为型钢混凝土梁，主要依靠钢材和混凝土之间的粘结力协同工作。T 形组合梁则是将钢梁与混凝土板组合在一起，混凝土板可以是现浇混凝土板，也可以是预制混凝土板、压型钢板混凝土组合板或预应力混凝土板；另外混凝土翼板还有有托座和无托座之分，从方便施工的角度来讲，无托座的组合梁在工程应用中占据了主导地位。组合梁中的钢梁可以用轧制或焊接钢梁。钢梁截面形式有工字梁、槽钢、蜂窝形或箱形钢梁等。混凝土板和钢梁之间采用抗剪连接件连接，抗剪连接件能够传递钢梁与混凝土翼缘交界面的剪力，抵抗钢梁与混凝土翼板之间的相对滑移和防止掀起，使混凝土板与钢梁组合在一起，整体共同工作形成组合 T 形梁。

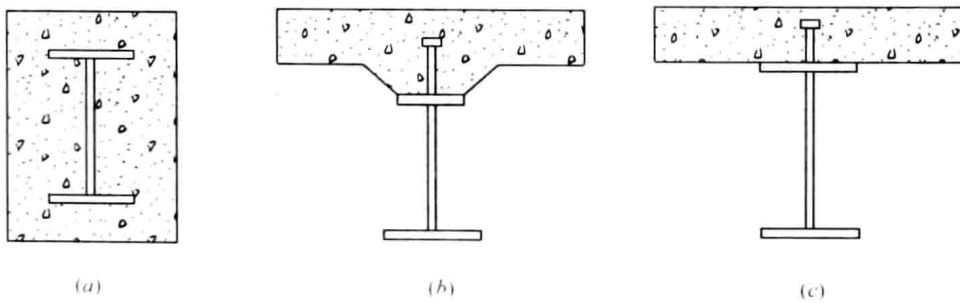


图 1-3 组合梁的截面形式
(a) 型钢混凝土组合梁；(b) 有托座 T 形组合梁；(c) 无托座 T 形组合梁

简支 T 形组合梁的特点是：上部混凝土翼板受压，钢梁主要是受拉与受剪，受力非常合理，组合梁的承载力和刚度与钢梁相比显著提高。这类组合梁充分发挥了混凝土的优势，混凝土板与钢梁组合连接在一起很大程度上避免了钢梁的侧扭失稳与局部失稳。在符合一定条件时，组合梁的侧扭稳定与局部稳定可不必验算，这也省去了相当一部分为防止钢梁局部失稳所需的加劲肋钢材。与非组合梁（钢梁）相比，由于组合梁的强度与刚度较高，一般可

节省钢材 25%~30%。此外，采用组合梁还可降低梁的净高及建筑的层高与总高。

根据混凝土板和钢梁的组合连接程度，组合梁又分为完全抗剪连接组合梁和部分抗剪连接组合梁两大类，简称为完全组合梁和部分组合梁。完全组合梁是指组合梁中配有足够数量的抗剪连接件，承担的极限状态纵向剪力能保证组合梁截面的全截面屈服，达到截面塑性极限弯矩 M_p 。部分组合梁是指抗剪连接件所能承担的剪力小于在截面极限弯矩下所产生的纵向剪力。目前关于部分抗剪连接组合梁的计算方法仅仅使用于跨度不超过 20m，以承受静力荷载为主且没有太大集中荷载的等截面梁的情况。

组合梁同样需要进行施工阶段和使用阶段两部分设计，其验算内容和组合板类似。由于剪切变形影响弯曲应力，混凝土翼板中存在剪力滞后现象，即纵向应力沿混凝土翼板宽度分布不均匀，在钢梁轴线附近的混凝土翼板中纵向应力大，而远离钢梁轴线的翼板纵向应力小。在设计中为简化计算，通常取钢梁和有限混凝土板宽作为构件的有效截面，假设这部分混凝土翼板中纵向应力沿宽度方向均匀分布，即可按照 T 形截面和平截面假定来计算梁的刚度、承载力和变形等。

为了便于敷设通信、电力、采暖等管线，可以在组合梁的钢梁腹板上开孔洞，如图 1-4 所示。近年来，又出现了一种蜂窝孔腹板形式的组合梁（图 1-5），这类组合梁钢梁腹板采用计算机放样切割技术，可以将一块钢板切割为一对单边锯齿形的钢板，错位焊接后成蜂窝孔的腹板。这类组合梁重量更轻，非常有利于设备管线在腹板孔洞中通过。

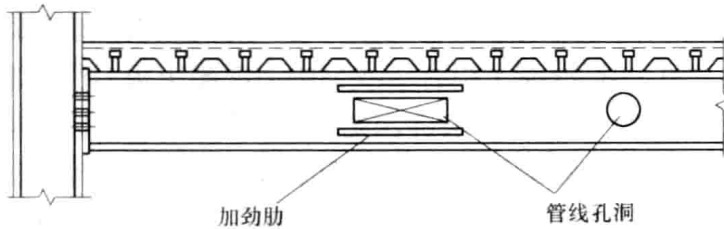


图 1-4 组合梁钢梁腹板开孔洞

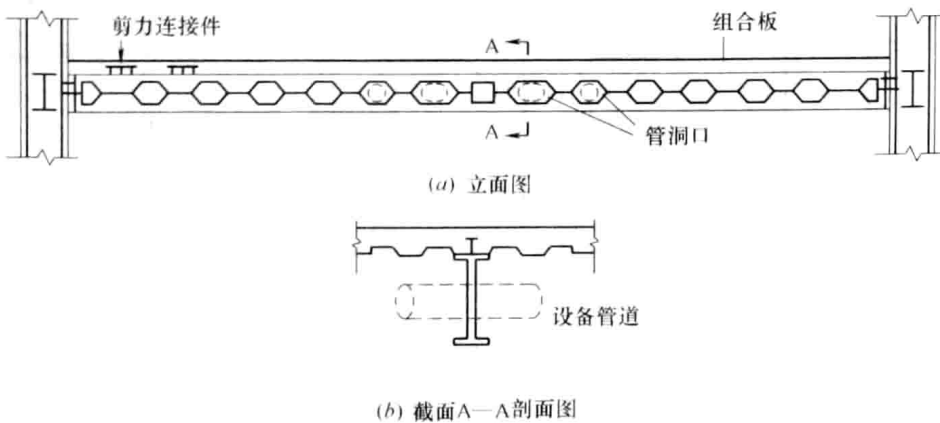


图 1-5 蜂窝孔腹板组合梁

1.2.3 型钢混凝土柱、钢管混凝土柱

按混凝土和钢材的组合形式，组合柱可分为型钢混凝土柱和钢管混凝土柱。

型钢混凝土是指在型钢周围配置钢筋，并浇筑混凝土的结构，又称为钢骨混凝土或劲

性钢筋混凝土。型钢混凝土构件的内部型钢部分与外包钢筋混凝土部分形成整体，共同受力，其受力性能优于型钢部分和钢筋混凝土部分的简单叠加。与钢结构相比，型钢混凝土构件的外包混凝土部分可以防止钢构件的局部屈曲，并能提高钢构件的整体刚度，使钢材的强度得以充分发挥。采用型钢混凝土结构，一般可比纯钢结构节约钢材 50% 以上。其次，型钢混凝土结构比纯钢结构具有更大的刚度和阻尼，有利于结构变形的控制。

型钢分为实腹式和空腹式两种形式。实腹式型钢采用钢板焊接而成或直接轧制而成，其截面形式主要有工字形、矩形、十字形等，如图 1-6 所示。研究表明：在抗震性能上，实腹式吸收的能量是空腹式的 2 倍。与钢筋混凝土柱相比，型钢混凝土柱轴压比高，大大减小了立柱的截面尺寸。型钢混凝土中的型钢在混凝土未浇筑以前即已形成钢结构，具有相当大的承载能力，能够承受构件自重和施工时的活荷载，不必为模板支柱，因而也节省了支设模板的劳动力和材料。采用型钢混凝土柱的多、高层建筑施工时，不必等待混凝土达到一定强度就可以继续施工上一层，所以其施工周期比钢筋混凝土结构短。

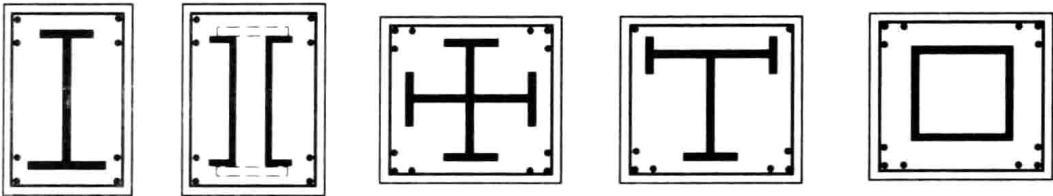


图 1-6 常用实腹式型钢混凝土截面形式

空腹式钢骨是采用角钢或小型钢通过缀板连接形成的格构式钢骨架，有平腹杆和斜腹杆。空腹式钢骨混凝土构件的受力性能与普通钢筋混凝土构件基本相同。在抗震结构中一般多采用实腹式钢骨混凝土构件。

型钢混凝土具有良好的耐火性。但型钢混凝土的节点配筋构造较复杂，工程施工困难。连接构造问题是组合结构中关键技术，还需要深入细致的研究。

钢管混凝土结构是在钢管内填充混凝土而形成的组合结构，按截面形式不同，分为圆钢管混凝土、方钢管混凝土和异型截面（多边形）钢管混凝土等。钢管混凝土可以充分发挥钢管与混凝土两种材料的作用，除了具有套箍混凝土的强度高、重量轻、塑性好、耐疲劳、耐冲击等优点外，还具有的独特优点是：①施工方便；②良好的耐火性能；③经济效益好。

钢管混凝土尤其适合在高层、大跨、重载和抗震、抗爆的建筑结构中，以及在大中城市施工场地狭窄的建筑工程中，能更好地满足设计和施工的一系列要求。

钢管混凝土的出现可以追溯到 1879 年英国赛文（Severn）铁路桥的修建，该桥的桥墩采用了钢管混凝土柱。早期的钢管混凝土使用中一般不考虑钢管对混凝土受压承载力的提高，但事实上由于钢管对混凝土的约束，混凝土处于三向受压状态（图 1-7），使混凝土的抗压强度提高一倍以上，也使原本为脆性材料的混凝土延性显著增强，同时钢管内的混凝土还可避免和延缓钢管过早屈曲，使钢管混凝土构件具有承载力高、塑性和韧性好、经济效果好和施工方便等优点。在承受同样荷载的情况下，与钢柱相比，钢管混凝土柱可节省钢材 50% 左右，降低造价 40%~50%，与钢筋混凝土柱相比，可节省水泥 70% 左右，因而减轻自重 70%。钢管本身还可作为浇筑混凝土的模板，可省去全部模板，并不

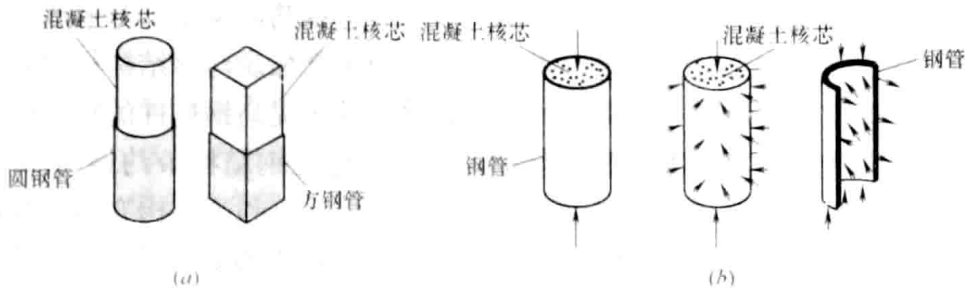


图 1-7 钢管混凝土柱构造及受力分析
(a) 钢管混凝土柱构造；(b) 钢管、混凝土所受应力

需要支模，简化了施工，但其用钢量比钢筋混凝土柱增加约 10%。

1.2.4 抗剪连接件

组合结构发挥了钢与混凝土两种不同材料的优点。两种不同性能的材料所以能够组合在一起，发挥各自的长处，其关键在于“组合”。这种组合作用，主要是依靠两种不同材料之间的可靠连接，有效传递混凝土与钢材之间的剪力，使混凝土与钢材组合成整体，共同工作。混凝土和钢构件之间要实现协同工作共同承担外部荷载和作用必须要有足够的抗剪连接。

在 T 形组合梁中，抗剪连接件一般分为柔性连接件和刚性连接件两种，前者在极限状态时既限制钢梁与混凝土板之间的相对滑移，又允许有一定的相对滑移；而后者完全不允许有相对滑移。常见的抗剪连接件如图 1-8 所示。刚性连接件刚度大，如在钢梁翼缘焊接方钢、型钢，在连接件周围混凝土中易引起较高的应力集中。在保证钢梁与连接件焊接强度的前提下，连接件承载力极限状态是以连接件间的混凝土剪切破坏或连接件间混凝土的局压破坏为标志。柔性连接件的抗弯刚度相对较小，如采用焊接栓钉和弯起钢筋，钢梁与混凝土界面的纵向剪力会使连接件变形。

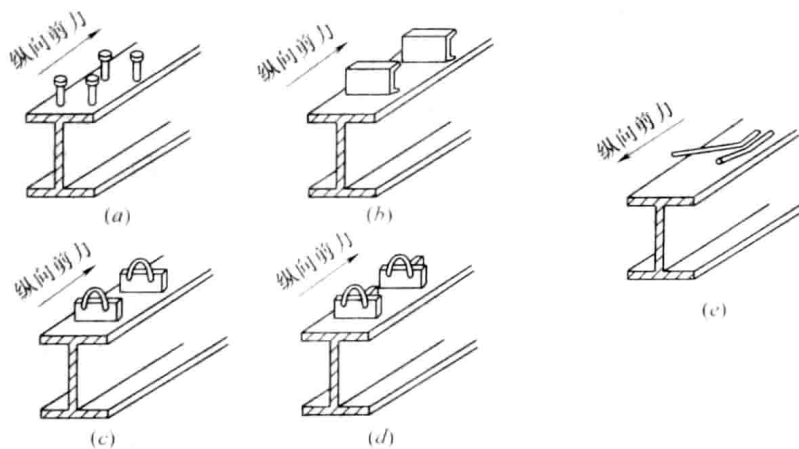


图 1-8 抗剪连接件

(a) 栓钉连接件；(b) 槽钢连接件；(c) 方钢连接件；(d) T 形钢连接件；(e) 弯筋连接件

抗剪连接件的发明，对组合结构的发展起了很重要的贡献。最早的抗剪连接件主要针对组合梁发明的，其发展主要经历了三个阶段：

(1) 最初的机械式连接件

第一项专利申请于 1903 年，第二项专利申请于 1921 年，均为美国专利。这两项专利

都是设法通过机械手段把钢梁与混凝土板连接起来。这些早期的机械式连接件，对组合结构的发展作出了重大的贡献。在早期的研究中，观察到了组合构件在荷载下具有良好的协同性和很高的承载能力。此阶段的代表成果是螺旋式剪力连接件。

(2) 第二代连接件

经过了早期的螺旋式剪力连接件研究之后，欧洲研究协会开始把目光转向两种新型结构：一种是采用加肋钢筋做成钩形或环状的连接件；另一种是由方钢管或轧制型钢焊接成的刚性连接件，可以最大限度提高抗弯能力。这两种类型的连接件经常结合使用，刚性连接件可防止相对滑动，而钩形或圈形连接件防止隆起。这类连接件在公路桥梁上得到应用之后，瑞士和德国也相继开始进行了研究试验。

当欧洲工程师尝试把刚性连接与钩形连接相结合时，美国工程师开始研制更加简便的柔性连接。在栓钉连接件发明之前，美国进行了许多由轧制型钢组成的柔性连接件的试验，主要采用槽钢连接。将槽钢连接件焊接到梁上，一方面可以阻止钢和混凝土之间产生滑移，另一方面可以阻止钢和混凝土脱开。柔性槽钢剪力连接件在很多高速公路桥梁上都有应用。如最早的柔性槽钢剪力连接件被应用在新泽西高速公路上的组合梁桥梁上，后又用在俄亥俄州高速公路的组合梁桥上。但是柔性槽钢剪力连接件很快就被性能更好的栓钉连接件所取代。

(3) 栓钉连接件

机械式抗剪连接最大的革命是焊接栓钉的发明。与其他连接形式相比，栓钉连接件不仅更为经济，而且使组合结构应用于楼面成为可能。最早的栓钉连接的文献资料是美国伊利诺斯大学 1954 年的研究工作文件。该研究主要针对组合梁桥进行了 Nelson 焊接栓钉试验，其中包括 4 种推出试验和栓钉的疲劳试验。之后，里海大学为新泽西 KSM 公司的栓钉产品进行了足尺倒置 U 形截面梁试验和 10 个推出构件试验。20 世纪 50 年代后期，在美国土木工程协会的赞助下，里海大学进行了更多的试验，其目标是针对组合结构在建筑中的应用。1956 年美国建成了采用栓钉连接件的建筑。此后，组合梁和组合楼板在许多建筑中都得到了采用，如 1960 年建造的布鲁克林地方法院的七层建筑和四层的联邦办公楼。

1955 年，伦敦帝国理工学院开始了栓钉连接性能的试验研究。到 1960 年，该学院共进行了 28 个足尺组合梁试验和 66 个连接试件的推出试验。之后，澳大利亚和日本等国家也开始了这方面的研究。最具开创性和影响的一项应用是在法国坦卡维尔悬索桥上采用栓钉连接，该桥跨越法国勒阿弗尔附近的塞纳河，桥面由焊有栓钉的钢板与混凝土面层板组成。今天，世界各国都已认识到组合结构中采用栓钉的优点和其带来的便利。

1.3 钢和混凝土组合结构的发展与应用

钢和混凝土组合结构这门学科起源于 20 世纪初期，在 20 世纪 50 年代基本形成独立的学科体系。至今，组合结构在基础理论、应用技术等方面都有了很大的发展，组合结构在高层建筑、桥梁工程等许多土木工程中得到广泛的应用，并取得了较好的经济效益。

1.3.1 早期发展

组合结构的历史可以追溯到 17 世纪，几乎当钢与混凝土最初作为建筑材料时，就被

用于组合结构，但当时人们并不了解和认识到组合结构的作用原理。据记载，1645年美国第一座高炉和炼铁厂在马萨的索格斯建成，开始了最早的钢铁工业。但在当时和之后的2个世纪，钢材用于民用建筑还是太昂贵了。美国的水泥工业起源于1818年，当时在纽约附近发现了一种可作为天然水硬性水泥的原料，美国工程师 Canvass White 于1819年以此申请了“水石灰”专利，并用来建造伊利运河的石砌墙和渡槽。1871年戴维·塞勒申请了一种“新的改进水泥”的美国专利，并称这种改进的水泥与英格兰的波特兰水泥各方面性能都相同。此后，塞勒在宾西法尼亚州的工厂里，开始生产美国的第一批波特兰水泥。1899年，里海建成了回转窑，这标志着大批量水泥生产工业化的开始。

与此同时，钢材的生产工艺也在进步。19世纪60年代贝赛麦转炉的发明使得大规模生产钢材成为可能。从那时起，钢产量迅速增长。1869年，詹姆斯伊兹在圣路易斯横跨密西西比河的桥上运用了合金钢管，这是美国桥梁史上第一座采用钢材的桥梁。1878年动工建造的格拉斯哥桥则是美国第一座大型全钢桁架桥，该桥跨越密苏里河，分五段桥跨，每跨314英尺(95.7m)。此后，1884年动工建造的芝加哥保险大楼(Home Insurance Building)，底部6层的梁采用熟铁，其他楼层的梁采用了贝赛麦钢^①。

组合结构的雏形最早出现于北美洲。沃德宫是美国第一座资料记载齐全采用型钢混凝土梁的建筑，沃德宫建于1877年的纽约切斯特港。10多年后，这种钢与混凝土的组合得到了更广泛的应用。19世纪80年代后期~90年代，在建筑结构中，混凝土开始替代木头和石材用于楼板施工。1894年建于匹兹堡的卫理工会大楼是最早使用型钢混凝土横梁的结构之一。1897年，卫理工会大楼附近一栋楼起火，蔓延过一条小巷，烧毁了卫理工会内部，但房屋的主体结构未受影响。

1894年，约瑟夫·梅勒申请了一项型钢混凝土的美国专利，此项专利是将许多工字钢梁弯成拱形，并完全埋入混凝土中用于桥梁结构，用此类方法建造的桥梁称为梅勒桥。梅勒称钢与混凝土是协同工作的，并提交了变形计算数据来证明他的观点。同年，第一座采用这种技术的桥在美国爱荷华州建成。次年，又有很多梅勒桥建成。之后又出现了采用轧制或者铆钉固定的桁架梁。

1898年，芝加哥的Druecker仓库也采用了型钢混凝土柱。1901年，华盛顿政府印刷局的建筑采用钢包混凝土的形式，在钢管中填浇混凝土来提高承重能力。

1908年，哥伦比亚大学的W. H 布尔对组合结构进行了首次系统性的研究。1912年，A. N 塔尔伯特等报道了伊利诺斯大学对31根柱的试验结果，其中有21根是组合柱，10根是钢柱。试验表明：组合柱的承载力可以通过单独的钢柱和混凝土柱的承载力叠加来进行计算。最早在美国钢筋混凝土设计规范中就有组合柱的承载力计算方法。但当时规范中仅允许混凝土中产生很低的应力，考虑混凝土对钢柱的侧向约束作用，组合柱还留有较大的安全储备，而且不考虑弯曲。

1922年，加拿大的H. M 麦凯等对两块桥面板进行了承载力试验，每块桥面板由一块混凝土平板和两根工字形型钢混凝土梁组成。在他们的试验研究报告中写到：尽管钢与混凝土组成的组合梁可能真的是协同工作的，但迄今为止的那些试验都是假设所有荷载都由

^①贝赛麦钢是指采用贝塞麦转炉炼的钢，贝塞麦转炉炼钢是现代炼钢法的肇始，它巧妙地利用了鼓风的动力学作用使金属、炉渣和空气处于高度乳化的弥散状态，冶金反应得以高速进行的原理。这种方法在各种现代氧气转炉中仍在广泛应用。