

# 钢—混凝土组合结构 与混合结构设计

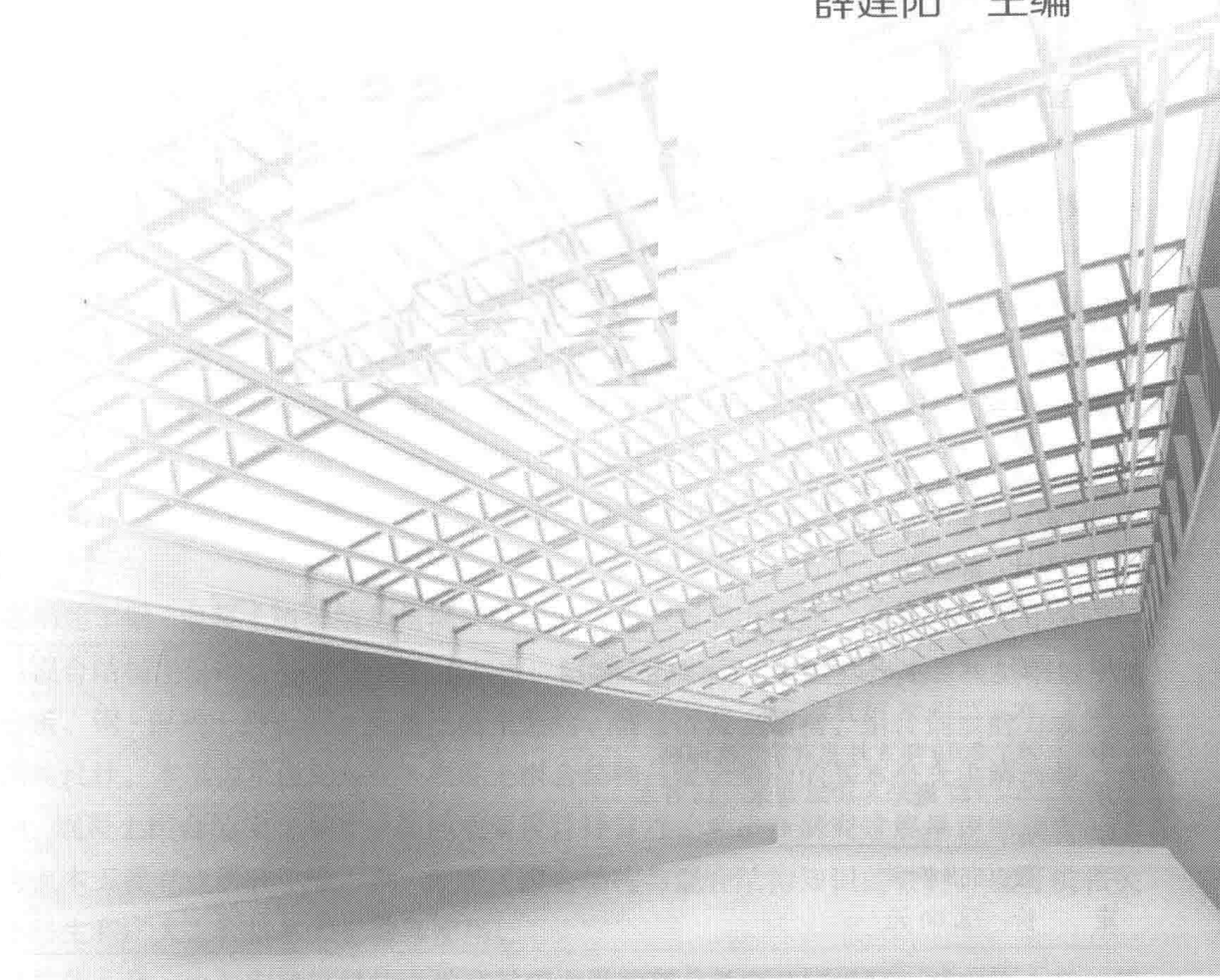
薛建阳 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 钢—混凝土组合结构 与混合结构设计

薛建阳 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书阐述了钢-混凝土组合结构与混合结构的基本受力性能,介绍了国内外有关钢-混凝土组合结构与混合结构的一些主要计算理论、设计方法及发展趋势。全书共分8章,主要内容包括钢与混凝土的组合作用、压型钢板-混凝土组合板、钢-混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构、组合钢板剪力墙结构、混合结构设计等。书中配有必要的例题和小结,便于学生理解相关原理,掌握其工程应用。

本书可作为高等学校土木工程专业研究生教材,也可供本科生和相关专业技术人员在设计、施工和进行科研工作时参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢-混凝土组合结构与混合结构设计/薛建阳主编. —北京:中国电力出版社,2018.10(2019.3重印)

ISBN 978-7-5198-2187-6

I. ①钢… II. ①薛… III. ①钢筋混凝土结构—结构设计 IV. ①TU375.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第142461号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:霍文婵 郑晓萌

责任校对:黄 蓓 郝军燕

装帧设计:郝晓燕

责任印制:钱兴根

---

印 刷:北京传奇佳彩数码印刷有限公司印刷

版 次:2018年10月第一版

印 次:2019年3月北京第二次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:23.75

字 数:553千字

定 价:78.00元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社营销中心负责退换

# 前 言

组合结构与混合结构中主要的建筑材料包括钢、混凝土、木材、玻璃、碳纤维等，而本书主要介绍钢-混凝土组合结构与混合结构。组合结构起源于欧美，与木结构、砌体结构、钢结构、钢筋混凝土结构并称为五大结构。钢-混凝土组合结构利用了钢材与混凝土各自的材料优势，即钢材具有抗拉强度高、延性好，而混凝土具有抗压强度高、耐久性好的特点，两者相结合，实现了材料性能的互补。近年来，还出现了不同结构体系相混合的新型结构，如上部采用 S 结构、下部采用 SRC 结构，RC 柱与 S 梁混合结构，外部采用 S (SRC) 框架、内部采用 RC 核心筒的混合结构。这些组合结构与混合结构具有非常优越的结构性能，在高层、超高层建筑，以及大跨桥梁和工业与民用建筑等土木工程中得到了越来越广泛的应用，取得了显著的经济效益和社会效益。

钢-混凝土组合结构与混合结构在国外的研究较早，并取得了一批有价值的科研成果，欧美、日本和前苏联等先后制定了相应的设计规范或规程以指导工程实践。由于各国国情及认知水平的差异，所采用的计算方法也不尽相同。我国对钢-混凝土组合结构和混合结构的研究起步较晚，主要始于 20 世纪 80 年代，但在各高等学校、科研院所、施工企业等的共同努力下，已取得了较为丰硕的研究成果，对钢-混凝土组合结构与混合结构受力性能及其设计方法的认知也日趋成熟和完善，相继颁布了一些具有我国特色的钢-混凝土组合结构与混合结构方面的设计规范，对于推动我国组合结构与混合结构的普及和发展起到了积极的作用。

本书阐述了钢-混凝土组合结构与混合结构的一些主要受力性能，介绍了国内外关于组合结构与混合结构主要的计算理论和设计方法，包括钢与混凝土的组合作用、压型钢板-混凝土组合板、钢-混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构、组合钢板剪力墙结构和混合结构设计。本书力求做到对钢-混凝土组合结构与混合结构的基本概念讲解清楚，将国内外钢-混凝土组合结构与混合结构的主要设计计算理论和最新研究进展呈现给读者。本书可作为土木工程专业研究生学习钢-混凝土组合结构与混合结构知识的教材，也可供相关专业的本科生和广大工程技术人员参考使用。

全书共分 8 章，由西安建筑科技大学和重庆大学的部分教师共同编写。其中第 1 章、第 2 章由薛建阳编写，第 3 章由杨勇编写，第 4 章由王宇航编写，第 5 章由刘祖强编写，第 6 章由王先铁编写，第 7 章由于金光编写，第 8 章由王威、薛建阳编写。全书由薛建阳统稿并

任主编。

西安建筑科技大学童岳生教授和赵鸿铁教授审阅了全书并提出了许多宝贵的意见。哈尔滨工业大学郭兰慧教授审阅了部分章节并提出有建设性的建议，博士生吴晨伟校对了第3、4章的部分例题，研究生任国旗、浩飞虎、李贺超校对了部分书稿，在此一并表示衷心感谢。

限于作者水平，不妥之处在所难免，恳请广大读者不吝批评指正。

编者

2018年4月

# 目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 组合结构及混合结构的定义及分类	1
1.2 组合结构的发展及其应用	4
1.3 混合结构的历史与发展	15
第 2 章 钢与混凝土的组合作用	16
2.1 组合作用基本原理	16
2.2 钢材与混凝土的相互作用	18
第 3 章 压型钢板 - 混凝土组合板	23
3.1 概述	23
3.2 施工阶段组合板承载力及变形计算	25
3.3 使用阶段组合板承载力计算	28
3.4 使用阶段组合板刚度、变形及裂缝宽度计算	36
3.5 压型钢板 - 混凝土组合板构造要求	39
3.6 组合板设计计算实例	42
第 4 章 钢 - 混凝土组合梁	51
4.1 概述	51
4.2 组合梁的基本受力特征和破坏模式	55
4.3 混凝土翼缘有效宽度	57
4.4 抗剪连接件设计	59
4.5 混凝土翼板的设计及构造要求	74
4.6 收缩徐变对组合梁受力性能的影响	78
4.7 简支组合梁弹性承载力计算	82
4.8 简支组合梁塑性承载力计算	88
4.9 连续组合梁的内力计算	92
4.10 连续组合梁的稳定性及承载力验算	96
4.11 组合梁正常使用阶段验算	104
4.12 组合梁的抗疲劳性能	118
4.13 新型组合梁简介	122

<b>第 5 章 型钢混凝土结构</b> .....	126
5.1 概述 .....	126
5.2 型钢混凝土结构的黏结性能 .....	128
5.3 型钢混凝土梁正截面承载力分析 .....	130
5.4 型钢混凝土梁斜截面受剪承载力分析 .....	136
5.5 型钢混凝土梁裂缝计算 .....	143
5.6 型钢混凝土梁变形计算 .....	145
5.7 型钢混凝土柱正截面承载力分析 .....	150
5.8 型钢混凝土柱斜截面承载力分析 .....	177
5.9 型钢混凝土柱裂缝宽度计算 .....	185
5.10 型钢混凝土梁柱节点.....	186
5.11 柱脚.....	195
5.12 构造要求.....	204
<b>第 6 章 钢管混凝土结构</b> .....	215
6.1 概述 .....	215
6.2 钢管混凝土轴心受压基本性能 .....	215
6.3 钢管混凝土轴心受压时的 $N-\epsilon$ 全过程曲线 .....	219
6.4 钢管混凝土轴心受拉时的 $N-\epsilon$ 全过程曲线 .....	225
6.5 钢管混凝土受剪时的工作性能 .....	228
6.6 钢管混凝土的组合设计指标 (统一理论) .....	234
6.7 混凝土徐变和收缩对钢管混凝土性能的影响 .....	237
6.8 单管钢管混凝土轴心受压构件的稳定 .....	240
6.9 格构式圆钢管混凝土轴心受压构件的稳定 .....	241
6.10 钢管混凝土压弯构件的稳定.....	247
6.11 各国设计规范的设计方法.....	253
6.12 基于统一理论的钢管混凝土轴心受压构件.....	266
6.13 基于统一理论的钢管混凝土轴心受拉构件.....	272
6.14 基于统一理论的钢管混凝土受剪和受扭构件.....	273
6.15 基于统一理论的钢管混凝土受弯构件.....	274
6.16 基于统一理论的钢管混凝土构件在复杂应力状态下的设计.....	278
6.17 高层钢管混凝土结构节点的种类.....	283
6.18 刚接节点的构造与设计.....	286
6.19 铰接节点的构造与设计.....	292
6.20 其他节点的构造与设计.....	295
<b>第 7 章 组合钢板剪力墙结构</b> .....	301
7.1 概述 .....	301
7.2 防屈曲钢板剪力墙结构 .....	303

7.3	外包混凝土组合钢板剪力墙结构 .....	311
7.4	双钢板内填混凝土组合剪力墙结构 .....	321
<b>第8章</b>	<b>混合结构设计</b> .....	<b>328</b>
8.1	概述 .....	328
8.2	混合结构的特点及受力性能 .....	329
8.3	平面由不同结构体系组合而成的混合结构 .....	331
8.4	竖向混合结构体系 .....	343
8.5	混合节点 .....	347
8.6	巨柱构件 .....	351
8.7	混合结构的抗震设计 .....	353
8.8	混合结构的发展趋势 .....	359
<b>附录1</b>	<b>常用压型钢板组合楼板的剪切黏结系数及标准试验方法</b> .....	<b>363</b>
<b>附录2</b>	<b>组合楼盖舒适度验算</b> .....	<b>367</b>
	<b>参考文献</b> .....	<b>370</b>

# 第 1 章 概 述

## 1.1 组合结构及混合结构的定义及分类

### 1.1.1 组合结构及混合结构的定义

组合结构是指由两种及两种以上材料组合而成的结构，一般土木工程中较常使用的承重材料有木材、混凝土、钢材、多种块材、塑料等，本书所介绍的组合结构主要是由钢材和混凝土组成的结构。钢材可分为钢筋和钢骨（型钢）两大类，由钢筋和混凝土组成的钢筋混凝土（简称 RC）结构其实也是组合结构的一种类型，但在建筑结构中，通常将由钢筋、钢骨（型钢）及混凝土，或者由钢骨（型钢）和混凝土组成的结构作为组合结构来考虑。

如图 1-1 (a) 所示的型钢混凝土（简称 SRC）柱是在型钢的周围设置钢筋并浇筑混凝土形成的柱。在钢管中填入混凝土而成的钢管混凝土（简称 CFST）柱，又可分为圆钢管混凝土柱 [见图 1-1 (b)] 和方钢管混凝土柱 [见图 1-1 (c)]。图 1-1 (d) 所示为在型钢梁的外围包裹钢筋混凝土而成的 SRC 梁，图 1-1 (e) 所示为将 RC 板与钢梁以一定的方式结合起来而成的组合梁。图 1-1 (d) 中型钢是埋入式的，图 1-1 (e) 中型钢是非埋入式的，但通常所讲的组合梁是指图 1-1 (e) 所示的梁。

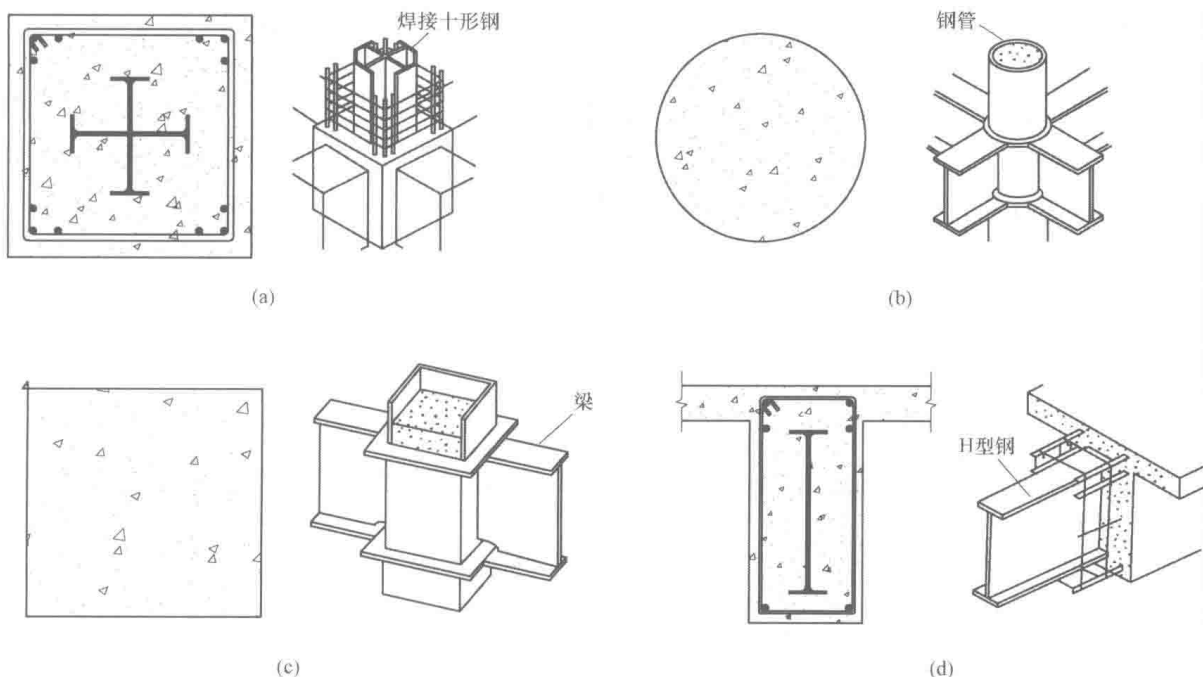


图 1-1 组合结构的定义（一）

(a) SRC 柱；(b) 圆 CFST 柱；(c) 方 CFST 柱；(d) SRC 梁

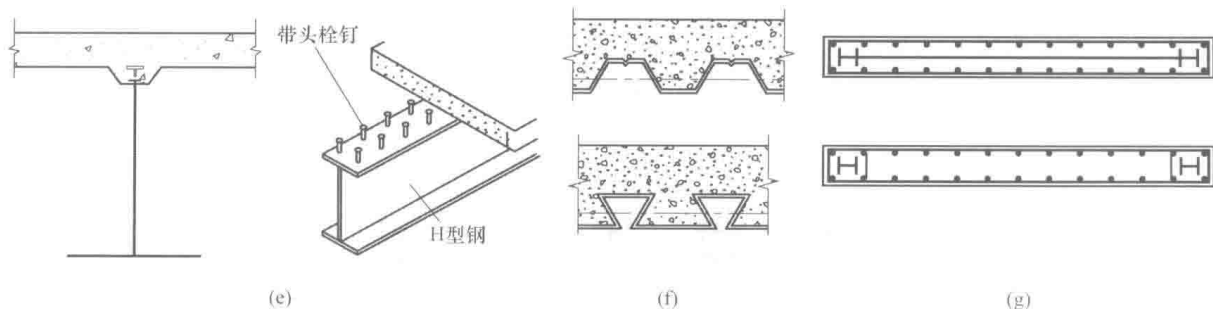


图 1-1 组合结构的定义 (二)  
(e) 组合梁; (f) 组合板; (g) 组合墙

除柱和梁外, 在压型钢板上浇筑混凝土使之一体化而形成的组合板 [见图 1-1 (f)]、在 RC 抗震墙中设置扁钢 (钢板) 或在其中埋入钢骨的组合墙 [见图 1-1 (g)] 等都是组合结构构件的一种形式。

以上所述为一些组合截面或组合构件, 将不同种类的构件组合而成的结构, 以及不同种类的结构系统组合而成的结构, 统称为混合结构; 也就是说, 柱或梁可以采用钢骨 (S)、RC 或 SRC 进行任意的组合, 例如, 可以采用 SRC 柱 - 钢梁、SRC 柱 - RC 梁 (见图 1-2), 或者 RC 柱 - 钢梁 (见图 1-3) 的组合方式, 这些都是所谓的构件组合。而结构系统的组合 (混合), 例如, 高层建筑的上部采用 RC 结构而下部采用 SRC 结构 (见图 1-4), 或者超高层建筑的上部楼层采用钢 (S) 结构, 其余地面以上部分采用 SRC 结构, 地面以下到基础部分采用 RC 结构 (见图 1-5) 等形式, 都是在高度方向上由不同类型的结构进行组合。在高层建筑的外围采用钢 (S) 结构、内部核心筒采用 RC 结构 (见图 1-6), 或者建筑外围采用 RC 结构而内部采用钢 (S) 结构, 是在平面上由不同结构组合而成的结构形式。

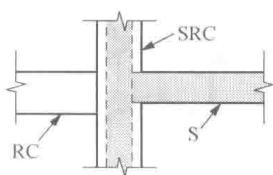


图 1-2 SRC 柱 - S (RC) 梁

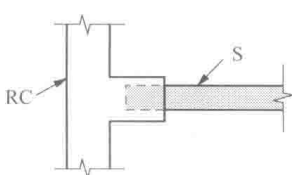


图 1-3 RC 柱 - S 梁

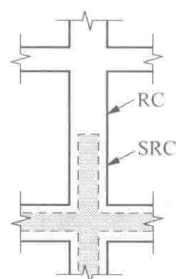


图 1-4 上部 RC 下部 SRC 结构

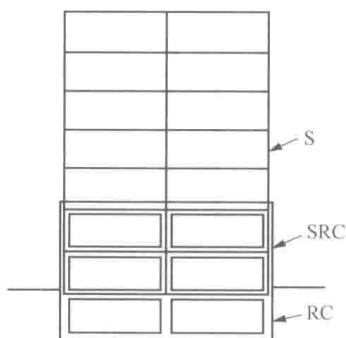


图 1-5 上部 S 下部 SRC 地下 RC 结构

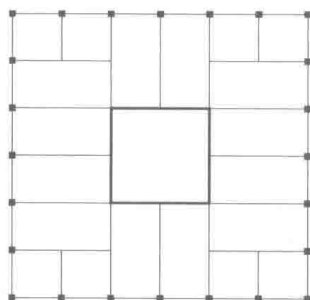


图 1-6 外部 S 框架 RC 核心筒



### 1.1.2 组合结构及混合结构的分类

组合结构或混合结构的本质是不同的材料、构件或结构系统形成共同受力、协调变形的统一整体。组合结构或混合结构与一般由单一材料（结构）组成的结构（系统）不同，它可以充分利用组成结构（系统）的材料（结构）各自的优点，而克服其缺点，具有承载能力高、变形性能好，且受力合理、经济性好等优越性，因而在建筑及土木工程各个领域得到了越来越广泛的应用。图 1-7 为日本若林实（Wakabayashi Minoru）教授等提出的组合及混合结构的分类示意图。它把组合结构分为组合构件和混合结构两部分。组合构件包括广义的组合梁（SRC 梁和一般的组合梁）、组合柱（SRC 柱和 CFST 柱）、组合墙、组合板、组合桁架和组合支撑等构件形式。混合结构包括组合钢结构（含组合梁的钢结构、狭义的 SRC 结构（梁和柱都采用 SRC 的结构）、含 S 梁的 SRC 结构、含 S 梁的 CFST 结构、预制 SRC 结构（HPC）、S 结构-RC 结构-SRC 结构（上部 S 结构、下部 SRC 结构及地下为 RC 的结构等）或者与 CFST 结构相混合的结构、由 RC 墙和 S 框架组成的结构系统、由 RC 核心筒和 S 框架组成的结构系统、由 S 墙和 RC 框架组合的结构系统等。另外，也有将组合构件称为组合结构的，或者将组合结构（由不同种类的结构构件组成的结构）和混合结构（由不同种类的结构构件在平面或立面上进行组合形成的结构）两者统称为组合结构。

现在，所谓的 SRC 结构，不仅是指梁和柱都采用 SRC 的结构，从广义上来讲，它包括 SRC 柱-S 梁、CFST 柱-S 梁、上部 S-下部 SRC 等诸多形式。

从结构受力合理及节约工程造价方面看，今后会有越来越多的组合结构或混合结构涌现出来，而组合结构的定义也会随着组合结构的发展而发生变化。

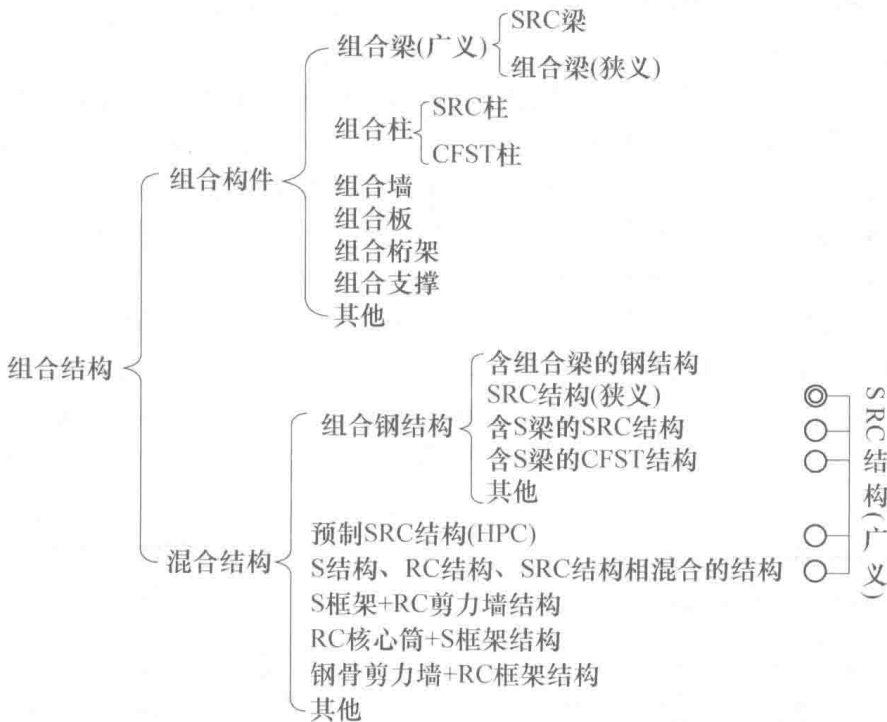


图 1-7 组合及混合结构分类示意图



## 1.2 组合结构的发展及其应用

### 1.2.1 型钢混凝土结构

SRC 结构是在型钢周围布置钢筋并浇筑混凝土而形成的结构，起源于欧美，它最早的形式是在钢构件外包砖或石砌体 [见图 1-8 (a)]，砌体主要作为钢材的防火材料，其后砌体逐渐被钢筋混凝土所取代 [见图 1-8 (b)]，形成了型钢混凝土结构。

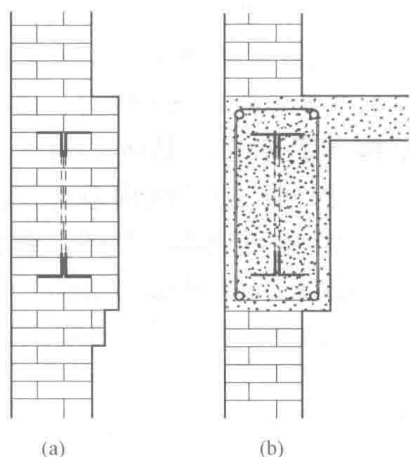


图 1-8 SRC 结构的起源

(a) 砌体包钢结构；(b) 混凝土包钢结构

对于 SRC 结构的研究，自 1910~1920 年，美国哥伦比亚 (Columbia) 大学的 Burr、Mench 及伊利诺伊 (Illinois) 大学的 Talbot 等进行了 SRC 柱的试验研究并发表了相关论文。在美国，混凝土仅作为钢材的防火保护层，在计算柱的轴心抗压强度时仅考虑钢筋对承载力的贡献。在英国，最初也仅考虑混凝土对钢材耐火的保护作用，1940 年以后也承认混凝土对柱刚度的增加及抗屈曲承载力的提高是有作用的，尤其是混凝土的存在增大了柱的受压承载力。1936 年，德国的 Gehler 进行了埋入式槽钢 SRC 短柱的试验研究，检验了累加强度法的适用性。1930 年，欧洲一些国家及美国发表了一系列组合柱的研究论文。在欧美，由于设计用水平力 (如风荷载和地震作用) 较小，因此一般柱都比较细长，针对屈曲性能的研究较为普遍。以 1965 年 Stevens 的研究为先驱，20 世纪 60 年代后半段至 70 年代，Bondale (1966)、Basu (1967)、Roderich、Rogers (1969)、Viridi、Dowling (1973) 等对 SRC 长柱进行了试验和理论研究。1963 年，美国规范 ACI318—1963 中首次列入了 SRC 组合柱的设计公式，其中考虑了混凝土强度的影响。在 ACI318—1971 规范中，对组合柱的设计采用了极限强度设计法。1997 年，美国钢结构协会 AISC 标准中首次纳入组合柱的抗震设计规定，图 1-9 为 AISC 标准中给出的 SRC 柱的截面组成形式。1959 年，英国规范 BS449 中列入了组合柱的设计规定。图 1-10 所示为欧洲常见的 SRC 柱的截面形式，通常仅在 H 型钢的内部浇筑混凝土，而在 H 型钢外部通常不设防火保护层。在型钢翼缘附近配置纵筋和箍筋，设计中考虑 RC 部分对构件承载力的贡献。国外已建成一批高层、超高层 SRC 建筑，典型的工程有印尼雅加达中心大厦，21 层，高 84m；美国休斯顿海湾大楼，52 层，高 221m；达拉斯第一国际大厦，72 层，高 276m；新加坡财政部办公大楼，55 层，高 242m。

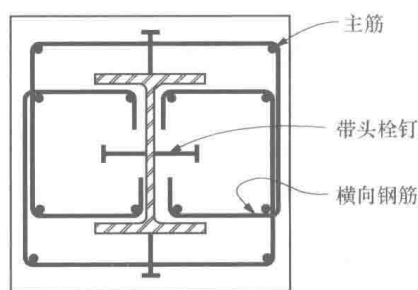


图 1-9 AISC 规范中 SRC 柱的截面形式

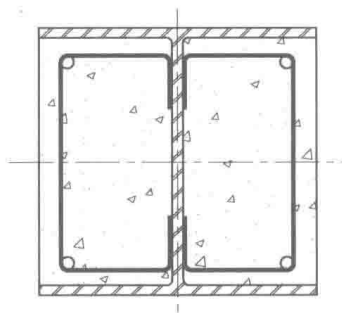


图 1-10 欧洲无保护层的 SRC 柱的截面形式



日本自 20 世纪 20 年代开始推广 SRC 结构并在该时期进行了卓有成效的基础性研究工作。齐田时太郎于 1928 年进行了柱的轴心受压试验，浜田稔于 1928 年和 1929 年分别进行了梁的弯剪试验和柱的轴心受压试验，内藤多伸于 1932 年进行了节点试验，棚桥凉于 1937 年进行了梁的弯曲试验。

以上研究都是针对钢骨采用角钢，或者腹板采用缀件相连的空腹式配钢的 SRC 构件所做的，得出的结论主要有：构件的受弯承载力可采用极限强度式计算；轴心受压柱的承载力可达到累加强度式计算值的 90%；增大横向钢板的用量并不能显著提高构件的受剪承载力；节点的极限承载力可采用累加强度式进行计算。当时，还没有关于 SRC 结构的设计规范，设计者仅能根据自己的设计经验进行判断，主要采用以下三种方法计算：

(1) 钢结构设计法。主要考虑钢骨的作用，混凝土仅是保证钢材的位置并防止钢材发生屈曲，钢骨和钢筋（在计算上可不考虑）都作为钢骨来考虑，按照普通钢结构的设计方法进行计算。计算受剪承载力时，计入钢筋与混凝土的作用。

(2) RC 计算法。钢骨和钢筋都按照钢筋考虑，按照钢筋混凝土的常用设计式进行计算。

(3) 累加强度式计算法。钢骨部分按照钢结构，RC 部分按照 RC 结构计算其容许承载力，两者之和即为 SRC 的容许承载力，此为累加强度式计算法。对梁来讲计算较为简便，对柱而言由于截面上同时存在弯矩和轴向力，如何假定钢骨部分和 RC 部分弯矩和轴向力的分配比例是需要考虑的问题。例如可采用以下方法：钢骨部分仅承受弯矩，RC 部分同时承担弯矩和轴向力，或者混凝土仅承担轴向力，弯矩由钢骨和钢筋来承担。

20 世纪 50 年代，以若林实 (Wakabayashi Minoru)、南宏一 (Minami Koichi) 等为代表的一大批专家学者对 SRC 结构进行了一系列试验研究并取得重要成果，以这些试验研究为基础，1951 年，日本建筑学会成立 SRC 分委员会，开始 SRC 规范的编制工作，1958 年出版了第一部 SRC 结构设计规范，它采用了累加强度式计算法。经历了 1963 年小的修订后，于 1975 年对 SRC 结构设计规范进行了第二次修订，这主要是由于 1968 年发生的十胜冲 (Tokachi) 地震中，RC 结构发生了明显的剪切破坏，因而 SRC 结构的剪切设计法也需要重新修正。在此之后，由于人工费增长，以及实腹式 SRC 结构优越的抗震性能被试验所证实，实腹配钢的 SRC 结构就成为 SRC 结构的主要形式。1980 年，日本修正了建筑基本法，采用了新的抗震设计法，除了容许应力度设计之外，还增加了水平极限承载力（保有水平耐力）设计法，于 1987 年对 SRC 结构设计规范进行了第三次修订，在规范的正文中列出了单纯累加强度式计算法和一般化累加强度式计算法，以及梁柱节点、构件连接、柱脚、抗震墙等构件的设计式，而且给出了钢管混凝土的设计规定。1995 年，阪神大地震中 SRC 结构发生了一定破坏，日本建筑学会经过震害调查和经验总结，于 2001 年对 SRC 结构设计规范进行了第四次修订，调整了构件连接及柱脚的设计规定，补充了诸如 SRC 柱钢骨梁、RC 柱钢骨梁、上部 SRC 结构下部 RC 结构等混合结构形式，使得 SRC 结构的适用性更加广泛。

在 SRC 结构的应用方面，1918 年，内田祥三设计了旧东京海上大楼，它是一幢地上 7 层的建筑，柱和内部大梁的钢骨都被 RC 所包裹。1921 年，由内藤多伸设计的日本兴业银行是一幢地上 7 层、地下 1 层的 SRC 建筑，其梁、柱断面如图 1-11 所示。这幢建筑物于 1923 年建成并经历了同年 9 月发生的关东大地震。地震后的震害调查发现，外包砖钢结构、RC 结构、砖砌体结构都发生了较为严重的破坏，但兴业银行等采用 SRC 结构的建筑物基本没有损坏。从那以后，SRC 结构优越的抗震性能逐渐被认知，并在 6~9 层的高层建筑中得



到应用。从 1991~1995 年 5 年间平均每年建造的建筑物数量来看, 总建筑数为 76.2 万栋, 总建筑面积为 1.87 亿  $\text{m}^2$ , 其中采用 SRC 结构的栋数为 3362 栋, 占总数的 0.44%, 建筑面积为 1634 万  $\text{m}^2$ , 占总面积的 8.7% (木结构为 37.1%, 钢结构为 34.5%, RC 结构为 19.4%), 与其他结构形式相比所占比例并不大, 但从 6 层以上建筑物所占比例来看, SRC 结构的栋数占全部的 27%, 建筑面积占全部的 45%, 可见 SRC 结构已成为日本高层建筑中所采用的主要结构形式。在过去的历次地震中, 很少有 SRC 结构发生破坏的, 而在 1995 年 1 月兵库县南部地震中, 首次有 32 栋 SRC 结构的房屋发生了较为严重的破坏。经调查, 倒塌的房屋都是 1975 年以前建造的采用空腹式配钢柱的 SRC 结构房屋, 而 1975 年以后建造的房屋基本都采用了实腹式配钢的 SRC 结构, 这些房屋没有破坏。目前, 日本的 SRC 结构主要用于高层住宅及办公楼等抗震结构中。

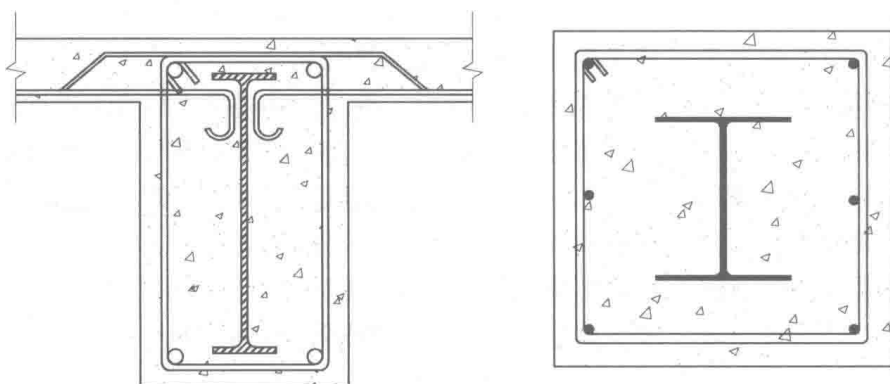


图 1-11 日本兴业银行采用的梁、柱断面

苏联对型钢混凝土结构的研究也相当重视, 并在第二次世界大战后的恢复重建工作中, 大量地使用了型钢混凝土结构建造主厂房。1951 年, 苏联电力建设部颁布了有关型钢混凝土结构的设计规程, 主要给出了空腹式配钢结构的设计规定。1978 年, 出版了《型钢混凝土结构设计指南》(СНЗ—1978), 它主要以实腹式配钢为主要内容, 强调了设置纵向柔性钢筋和箍筋的必要性。

我国最早于 20 世纪 50 年代从苏联引进型钢混凝土结构, 并在工业厂房中得到了应用。这一时期的建筑物多采用空腹式配钢结构形式。后来由于片面强调节约钢材, 型钢混凝土结构的发展较慢, 其研究和应用处于停滞状态。80 年代中期以后, 型钢混凝土结构又一次在我国兴起, 原冶金部建筑研究总院、西安建筑科技大学、西南交通大学、东南大学、华南理工大学、清华大学等高校和科研单位对型钢混凝土结构进行了广泛而深入的研究, 相继颁布了建设部行业标准《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010) 和冶金行业标准《钢骨混凝土结构技术规程》(YB 9082—2006), 2016 年颁布了最新的《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016), 对型钢混凝土结构的工程应用起到了积极的推动作用。20 世纪 80 年代以来, 全国各地相继建造了一批 SRC 结构高层建筑, 如 1987 年建成的北京香格里拉饭店, 地上 24 层, 高度 83m; 1993 年建成的上海浦东国际金融大厦, 地上 53 层, 高度 221m; 1998 年建成的广州汽车大厦, 地上 40 层, 高度 175m; 1990 年建成的香港中银大厦, 地上 70 层, 高度 315m; 2001 年建成的深圳世贸中心大厦, 主楼地上 54 层, 总高 237m。以上高层建筑的主体均采用了 SRC 结构形式。



### 1.2.2 钢管混凝土结构

钢管混凝土结构是指钢管与混凝土或 RC 组合而成的结构形式。钢管的截面形状可以采用方形，也可以采用圆形。钢管混凝土构件的截面可分为仅钢管内填充混凝土形，仅钢管外部包裹 RC 形，以及钢管的内部填充混凝土、同时外部包裹 RC 形三种类型，在日本分别称为充填形、被覆形和充填被覆形，如图 1-12 所示。被覆形与充填被覆形钢管混凝土结构的力学性能与 SRC 结构较为相似，因此可将其归于 SRC 结构。仅钢管内部填充混凝土的钢管混凝土结构，称为 CFST 结构（日本称为 CFT 结构），其结构性能和耐火性能都极为优越，而且施工性能好，因此广泛应用于各种高度的建筑物中。本书主要介绍充填形钢管混凝土结构。

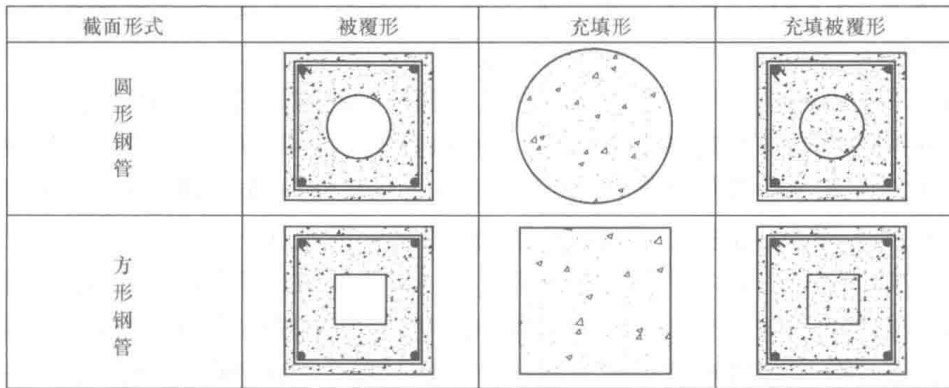


图 1-12 钢管混凝土构件的截面类型

CFST 结构的应用由来已久，1879 年英国 Severn 铁道桥的建造中采用了钢管桥墩，并在钢管内浇灌了混凝土，目的是防止钢管内部锈蚀。Neogi P K 的学位论文及 1902 年 Sewell J S 的研究报告，是有关 CFST 柱最早的研究成果。而对 CFST 结构开展真正系统的研究是在 1957 年，德国的 Kloppel、Goder 等对 CFST 长柱进行了轴心受压试验及长期性能试验。20 世纪 60 年代，Garder、Jacobsen、Furlong、Knowles 及 Park 等对 CFST 结构又进行了大量研究，阐明了套箍作用及其工作机理，并利用极限平衡法推导出钢管混凝土轴心受压短柱承载力计算公式，这些成果分别被美国混凝土学会 ACI 标准和钢结构学会 AISC 标准、英国规程 BS5400、欧洲规范 EC4（Eurocode4）、德国和苏联的设计规范所采纳。日本对于 CFST 结构的研究，最早是由加藤（Kato）等于 1961 年所做的关于 CFST 长柱轴心受压性能的试验研究和理论分析，富井（Tomii）等进行了钢管与混凝土黏结机理的研究，认为两者之间的相互作用较小，在计算中可以忽略；松井（Matsui）等研究了钢管局部屈曲对钢管混凝土构件力学性能的影响。该研究成果最初应用于淡路岛至四国所架设的送电铁塔中，其高度为 140m，架线距离为 1700m。

日本建筑学会于 1964 年成立了钢管混凝土分委员会，1967 年制定了第一部钢管混凝土结构设计规范，其规定仅适用于圆钢管混凝土。1980 年，钢管混凝土结构设计规范进行了修订，其中列入了方钢管混凝土柱的设计规定，并对剪切、黏结及长柱设计方法进行了改定，1987 年，SRC 结构设计规范第 4 次修订中，纳入并整合了钢管混凝土结构设计规定，并对梁柱节点、柱脚及极限强度式进行了完善。1997 年，总结了 CFST 结构性能、耐久性能及施工方面的研究成果，形成了 CFST 结构设计施工指南。2001 年修订的 SRC 结构设计



规范中，也列入了 CFST 结构设计施工指南的内容，考虑了约束混凝土的效果，给出了合理的长柱强度计算式，以及梁柱节点滞回特性的最新研究成果和资料。

研究表明，钢管混凝土构件具有截面小、刚度大、延性好、韧性强、承载力高等诸多优点，其抗震性能也非常优越。日本兵库县南部地震中，在建筑物破坏最严重的神户市三ノ宫地区，至少有 5 栋 7~12 层的 CFST 结构房屋，它们都没有发生破坏。20 世纪 80 年代后期，随着泵送混凝土技术和高强混凝土的出现，对钢管高强混凝土的研究也日益增多，钢管高强混凝土在高层、超高层建筑中的应用也越来越广泛。例如，1989 年，在美国西雅图建成的联盟广场大厦，地上 56 层，高度 226m，采用钢管混凝土柱；1998 年，在日本埼玉县川口市建成的 Lions Plaza，地上 55 层，高 185.8m，其主体结构采用了钢管混凝土柱与钢梁组成的框架体系。CFST 结构在日本非常普及，在东京，进入 21 世纪的前 3 年中，采用 CFST 结构高度在 100m 以上的房屋就有 20 余栋。

在我国，原中国科学院哈尔滨土建研究所（现中国地震局工程力学研究所）和建筑材料研究院（现苏州混凝土与水泥制品研究院）、哈尔滨工业大学和中国建筑科学研究院等单位先后对钢管混凝土基本构件的抗震性能、耐火性能、长期荷载作用下的力学性能和设计方法、采用高强钢材和高强混凝土的钢管混凝土构件的力学性能、节点构造和施工技术 etc 开展了比较系统的研究工作，提出了“钢管混凝土统一理论”，取得了令人瞩目的成绩。20 世纪 60 年代中期，钢管混凝土开始在一些厂房柱和地铁工程中得到采用，例如鞍山第三冶金建设工业公司预制构件厂制管车间和北京地铁工程中的站台柱都使用了钢管混凝土。进入 20 世纪 70 年代后，冶金、造船、电力等行业的工程建设中也开始广泛推广和应用钢管混凝土结构。1978 年，钢管混凝土结构被列入国家科学发展规划，从此这一结构在我国的发展进入一个新的阶段。钢管混凝土结构已发展成为高层、超高层建筑和大跨拱桥结构的一种重要结构形式。例如，1996 年建成的广州好世界广场大厦，地上 33 层，高 116m；深圳地王大厦，地上 79 层，高 325m；1998 年建成的北京世界金融中心大厦，地上 33 层，高 120m；1990 年在四川省旺苍县建成了我国第一座跨度为 115m 的钢管混凝土拱桥，均采用了钢管混凝土结构；1997 年建成的重庆万州长江大桥，跨度达 420m，为当时世界上跨度最大的钢管-钢筋混凝土拱桥；2005 年建成的重庆奉节巫山长江大桥，净跨度更是达到 460m，也创下了钢管混凝土拱桥跨度世界之最。

自 1989 年以来，我国先后颁布了十几部关于钢管混凝土结构设计和施工的技术规程，如《钢管混凝土结构设计规程》(JCJ 01—1989)、《钢管混凝土结构设计规程》(CECS 28: 1990)、《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T 5085—1999) 等都给出了圆钢管混凝土结构设计计算及施工方面的规定。《战时军港抢修早强型组合结构技术规程》(GJB 4142—2000)、《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159: 2004) 给出了方钢管混凝土结构设计方面的规定。福建省地方工程建设标准《钢管混凝土结构技术规程》(DBJ 13-51—2003)、《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016) 可适用于圆形和矩形钢管混凝土结构的设计计算，《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014) 适用于圆形和多边形钢管混凝土构件的计算。此外，天津市工程建设标准《天津市钢结构住宅设计规程》(DB 29-57—2003)、上海市工程建设标准《高层建筑钢-混凝土组合结构设计规程》(DG/TJ 08-015—2004) 也有关于钢管混凝土结构的设计计算条文。



### 1.2.3 钢与混凝土组合梁

钢与混凝土组合梁是将型钢梁和混凝土翼板通过抗剪连接件相连而形成的一种能共同工作的梁，其截面形式如图 1-13 所示。这种梁能充分发挥混凝土抗压强度高和钢材抗拉性能好的优点，提高了梁的承载力、刚度和稳定性。钢与混凝土组合梁不仅重量轻、施工速度快，还可增加房屋的净空高度，获得显著的经济效益和社会效益。

钢与混凝土组合梁的发展大致可分为以下 4 个阶段：

(1) 钢与混凝土组合梁出现于 20 世纪 20 年代，当时主要考虑防火要求在钢梁外包裹混凝土，而未考虑两者的组合效应。随后在 20~30 年代期间，人们开始研究钢梁与混凝土翼板之间多种抗剪连接的构造方法。1926 年，Kahn J 获得组合梁结构的专利权，可以认为是组合梁的初始阶段。

(2) 20 世纪 40~60 年代，是组合梁发展的第二阶段。在这一阶段，美国、英国、德国、加拿大、苏联等一些技术先进的国家对组合梁开展了较为深入的试验研究。例如，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。理论的逐渐完善使得这些国家都制定了相关的设计规范或规程，在应用上也逐渐成熟。

(3) 20 世纪 60~80 年代，是组合梁发展的第三阶段。这一时期组合结构的应用和发展，几乎赶上钢结构的发展，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其动力性能的研究；在钢与混凝土之间完全相互作用的基础上，进一步开展了部分抗剪连接组合梁的研究。

(4) 从 20 世纪 80 年代至今为组合梁发展的第四阶段。这一阶段主要研究预制装配式钢-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组合梁形式。同时，对组合梁在使用中所产生的问题及新材料、新工艺的应用开展了更为细致的研究，并由线性向非线性，由平面向空间结构发展。

大约在 20 世纪 60 年代以前，基本上是按弹性理论分析组合梁，60 年代以后，则逐渐转入塑性理论进行分析。Andreas 首先提出组合梁计算的换算截面法，将组合梁看成一个整体，将组合截面换算为同一材料的截面，然后根据初等弯曲理论进行截面设计。这种方法具有物理意义明确、计算简单、适用于组合梁弹性阶段设计的特点。到了 20 世纪 50 年代，Newmark 等提出了“不完全交互作用”理论，考虑了钢与混凝土交界面相对滑移对组合梁受力性能的影响，但理论公式较为复杂，不便于实际应用。大约在 60 年代初期，里海大学的 Tharliman 建立了组合梁的极限强度理论，认为组合梁达到极限承载力时，钢梁全截面均已达到了抗拉屈服强度。这种理论简单适用，目前已在各国规范中采用。Johnson 等从 70 年代初开始研究组合梁的部分相互作用与延性性能，得到相关参数并提出了相应的设计方法。

在国外，钢与混凝土组合梁最早应用于桥梁结构中。苏联于 1944 年建成了第一座组合公路桥，瑞典于 1955 年建成跨径为 182m 的斯曹松特桥，德国于 1956 年建成跨径为 58.8m

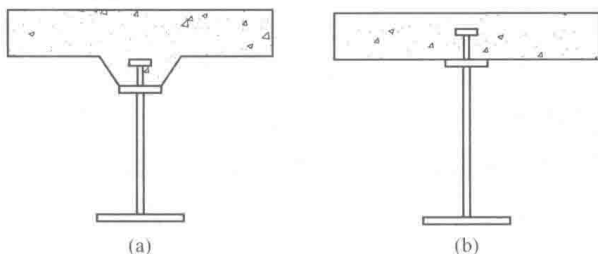


图 1-13 钢与混凝土组合梁的形式  
(a) 带板托的组合梁；(b) 无板托的组合梁