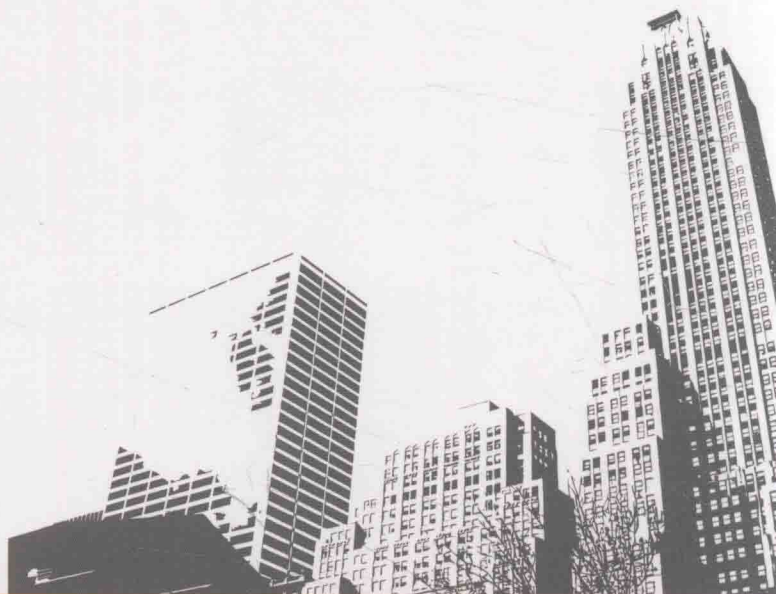




钢—混凝土组合结构 施工技术指南

中国建筑股份有限公司 编写

中国建筑工业出版社

钢-混凝土组合结构施工技术指南

中国建筑股份有限公司 编写

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢-混凝土组合结构施工技术指南/中国建筑股份有限公司编写. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-112-18850-5

I. ①钢… II. ①中… III. ①钢筋混凝土结构-混凝土施工-指南 IV. ①TU755-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 290828 号

本书依托国家十二五科技支撑计划课题“钢-混凝土组合结构现代化施工关键技术研究 2011BAJ09B04”编写, 本书可作为《钢-混凝土组合结构施工规范》GB 50901—2013 配套技术指南使用。主编人为肖绪文院士。分为综合篇、施工技术篇和案例篇。主要内容包括: 组合结构的概念; 组合结构的历史与现状; 组合结构的特点与展望; 组合结构施工技术; 施工与保障; 工程案例等。

本书供施工人员使用, 并可供大中专院校师生参考。

责任编辑: 郭 栋

责任设计: 李志立

责任校对: 张 颖 姜小莲

钢-混凝土组合结构施工技术指南

中国建筑股份有限公司 编写

*

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

北京楠竹文化发展有限公司制版

环球印刷 (北京) 有限公司印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 10½ 字数: 262 千字

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-18850-5

(27984)

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)

本书编委会

编制单位：中国建筑股份有限公司

清华大学

中国建筑第四工程局有限公司

中建三局集团有限公司

中建钢构有限公司

中国建筑第八工程局有限公司

中建一局（集团）有限公司

编写人：肖绪文 张晶波 杨 玮 樊健生 何 瑞
孙 晖 戴立先 薛 刚 瞿海雁 陶慕轩
周鹏华 晏 瑾 李 杰 余地华 艾心荧
周予启 李彦贺 张晓勇 周新军 冯伟东
陈泽熙 李凌峰 吴 江

目 录

第一篇 综合篇

第一章 组合结构的概念	1
第二章 组合结构的历史与现状	4
第一节 组合结构的历史回顾	4
第二节 各类型组合结构的发展及现状	5
一、钢-混凝土组合构件和节点	5
二、钢-混凝土组合结构体系	9
第三章 组合结构的特点与展望	12
第一节 组合结构的特点及优势	12
第二节 组合结构的展望	12

第二篇 施工技术篇

第一章 组合结构中钢结构施工技术	14
第一节 组合结构中钢构件的分类	14
一、组合形式分类	14
二、构件分类	14
第二节 制作安装相关要求	15
一、加工制作	15
二、预拼装	15
三、安装	16
第三节 深化设计	17
一、深化设计概述	17
二、深化设计主要内容	17
三、深化设计主要任务	18
四、深化设计总体工作流程	18
第二章 组合结构中混凝土结构施工技术	19
第一节 组合结构中混凝土的性能要求	19
一、混凝土的性能需求	19
二、混凝土性能控制指标及控制方法	21
第二节 施工工艺	25
一、钢管混凝土施工工艺	25
二、型钢混凝土施工工艺	28

第三节 钢管混凝土柱质量检测	30
一、检测原理与方法	30
二、现状与问题	35
三、研究方向	35
第三章 组合构件施工	36
第一节 钢管混凝土构件	36
一、钢管构件加工制作	36
二、施工配合构造措施	48
三、工序穿插	58
第二节 型钢混凝土构件	60
一、型钢混凝土构件加工制作	60
二、施工配合构造措施	66
三、工序穿插	72
第三节 组合楼板结构	75
一、组合楼板配置	75
二、组合楼板设计	79
三、压型钢板铺设	86
四、栓钉焊接、钢筋铺设及混凝土浇筑	92
第四章 施工组织与保障	99
第一节 施工机械	99
一、塔式起重机	99
二、施工电梯	100
三、顶模桁架体系	101
四、机械设备主要保障措施	103
第二节 测量监测与变形控制	104
一、测量监测	104
二、变形控制	107

第三篇 工程案例篇

第一章 工程简介	120
第一节 工程总体概况	120
第二节 工程周边概况	121
第三节 项目组合结构基本情况	121
一、钢结构概述	121
二、混凝土概述	121
三、组合结构分布	122
第二章 组合结构构件施工	125
第一节 钢管混凝土柱施工	125

目 录

一、钢管混凝土柱分布概况	125
二、施工工艺流程	127
三、主要技术措施	127
第二节 型钢混凝土构件施工	132
一、型钢混凝土构件分布概况	132
二、施工工艺流程	135
三、主要技术措施	135
第三节 组合楼板施工	143
一、施工工艺流程	143
二、主要技术措施	144
第三章 施工组织与质量控制	150
一、施工总体思路	150
二、大型起重设备的选择	150
三、大型构件水平运输路线及存放场地	153
四、质量控制	155

目 录

第一篇 综 合 篇

第一章 组合结构的概念

根据材料的使用不同,结构工程师把结构体系分为木结构、砌体结构、混凝土结构、钢结构和钢-混凝土组合结构等。众所周知,混凝土和钢材是最常用的建筑材料,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。而钢-混凝土组合结构则能将两种材料或构件通过某种方式结合起来,以更有效的方式发挥各种材料及构件的优势,从而获得更好的结构性能和综合效益。需要说明的是,对一种结构形式的评价不能单纯使用力学指标。大量的工程实例表明,组合结构不仅受力性能良好,也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,可以说在综合效益上具有强大的竞争力。随着地球资源的日益枯竭和人口压力的不断增大,环保节能、符合可持续发展的理念也日益深入工程建设领域,组合结构所使用的钢结构部分由工厂预制、施工现场清洁安全、维护成本较传统建筑更低,这都是对环境和资源的保护,因此钢-混凝土组合结构也符合可持续发展要求的特点。

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形式,有效地综合了这两种结构的优点,使得综合性能有进一步的提升。同钢结构相比,钢-混凝土组合结构用钢量减小、刚度增大、结构的稳定性和整体性增加、结构的防火性和耐久性也有显著提高;而相比于混凝土结构,组合结构构件截面尺寸明显减小、结构自重减轻、地震作用减弱、有效使用空间增加、基础造价降低、施工周期缩短。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,应用领域十分广泛。

随着材料科学的发展,各种新型材料也为组合结构的发展提供了更多的选择。比如,FRP材料抗腐蚀能力强、密度低、强度高,与传统的混凝土材料组合后可以获得良好的长期费效比。广义来说,将一些新型的材料如合金、玻璃、工程塑料等与钢材、混凝土等传统材料有效组合也是组合结构的一个发展方向。

巧妙利用材料间的粘结力、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可有效的发挥组合作用。除了利用新型材料进行组合外,采用多种多样的组合方式和途径,灵活运用组合概念,亦是获得一系列性能优越的组合结构的发展方向。

钢-混凝土组合梁(steel-concrete composite beams)将钢梁与混凝土翼板通过抗剪连接件组合,充分发挥了混凝土的抗压能力和钢材的抗拉能力,是一类广泛使用的横向承重组

构件。传统的钢筋混凝土梁在正常使用状态下位于受拉区的混凝土容易开裂。此时，受拉区的混凝土不仅发挥不了作用还增加了结构自重。而钢结构梁通常被设计为薄壁构件，存在构件稳定性差，在缺少侧向约束时容易发生失稳破坏的弊端，导致材料利用率降低。而钢-混凝土组合梁则综合了混凝土梁和钢梁的优势，在受压区使用混凝土翼板而在受拉区则配置钢梁，两者之间通过抗剪连接件组成整体。这样既解决了混凝土受拉开裂的问题，也保证了在正向荷载作用下钢梁不会发生失稳；既提高了梁的整体受力性能，也减轻了结构自重。

需要说明的是，在组合梁的构造中，抗剪连接件是组合梁发挥组合作用的一个重要因素。如果钢梁上翼缘与混凝土板下翼缘之间没有任何构造措施，则两者之间可以发生自由相对滑动。当施加外荷载时，混凝土板与钢梁会分别绕自身中和轴发生变形，整个结构的承载力相当于两者承载力的简单叠加（图 1-1a）。因为混凝土板截面高度较小，开裂弯矩和抗弯承载力都很低，而钢梁则易发生整体及局部屈曲，极限抗弯承载力也往往难以充分发挥。当采取一定的机械或其他构造措施保证钢梁与混凝土板之间的可靠连接时，两者则不发生任何滑移并绕同一中和轴发生变形（图 1-1c）。此时，混凝土翼板基本处于受压状态，钢梁大部处于受拉状态，同时混凝土翼板对钢梁的支撑作用可以防止结构发生失稳，从而使两种材料的力学性能均能够得到充分发挥。在实际中，钢-混凝土组合梁的抗剪构造措施往往很难也没有必要完全避免钢梁与混凝土翼板之间相对滑移的产生，则结构的应变和应力分布介于上述两种情况之间（图 1-1b）。

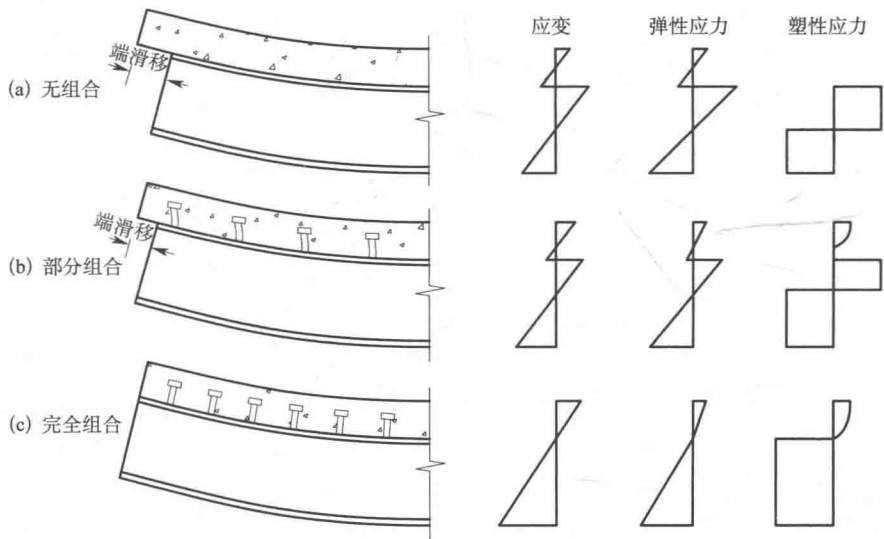


图 1-1 组合作用与截面应变-应力分布的关系

相比于传统的混凝土梁及钢梁，钢-混凝土组合梁具有截面高度小、自重轻、延性好等优点。相比于钢筋混凝土梁，组合梁能有效降低结构高度，减轻自重，缩短施工周期，提高结构的延性；而相比于钢梁，组合梁则能有效增大结构刚度，提高整体稳定性和局部稳定性，改善结构动力性能。除了力学性能有优势外，当采用混凝土叠合板翼板或压型钢板组合板翼板时，组合梁在施工中减少了施工支模工序和模板，提高了施工效率。基于钢-混凝土组合梁的以上特点，在大跨、重载及对结构高度要求较高的条件下，采用组合

梁作为横向承重构件均能够带来显著的经济效益。

型钢混凝土 (steel reinforced concrete) 结构是指在型钢周围配置钢筋, 并浇筑混凝土所组成的结构, 也称劲性钢筋混凝土或钢骨混凝土。试验研究表明, 通过合理的构造措施将型钢与外包的钢筋混凝土形成整体共同受力, 其受力性能要优于型钢与钢筋混凝土的简单叠加。型钢混凝土中需要配置一定数量的箍筋, 一方面是约束外包混凝土, 避免混凝土过早剥落而导致承载力迅速丧失; 另一方面, 箍筋也能有效防止型钢与混凝土界面的粘结破坏, 增强组合作用。相比于钢筋混凝土结构, 型钢混凝土由于配置钢骨使得含钢率大幅度提高, 构件的承载力和延性能有效增强, 改善了结构的抗震性能。另外, 在施工阶段钢骨本身可作为支撑使用, 有效加快施工速度。而相比于纯钢结构, 外包的钢筋混凝土既能解决钢结构防火性能差的问题, 又可以约束型钢防止其发生局部屈曲, 从而提高了构件的刚度及整体承载力, 节省用钢量。

钢管混凝土 (concrete filled steel tubes) 由圆形或矩形截面钢管及内填混凝土组成。混凝土在受力过程中, 钢管对混凝土的套箍作用使混凝土处于多向受压状态从而提高了混凝土的强度和延性, 混凝土对钢管的约束则可以避免或延缓钢管发生局部屈曲, 保证了钢材的性能得以充分发挥。圆钢管混凝土柱在轴压下的受力模式参见图 1-2 所示。

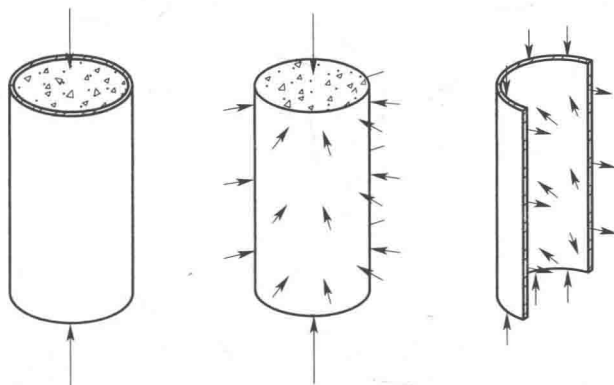


图 1-2 钢管混凝土短柱受力模式

钢管混凝土是在型钢混凝土及螺旋配箍混凝土的基础上发展起来的, 具有承载力高、延性及抗震性能好等优点。但是, 相比于型钢混凝土及螺旋配箍混凝土, 钢管混凝土还具有良好的施工性能, 在施工阶段外侧钢管可以作为耐压模板使用, 提高施工的便捷性。相比于纯钢柱, 在承载力相同的情况下能够有效地节省钢材, 同时大幅度减少焊接工作量。相比于普通钢筋混凝土柱, 在保证用钢量及承载能力相近的情况下, 可有效减小构件截面积, 增大建筑使用面积并减少结构自重。基于上述优点, 在高层建筑、工业厂房、大跨桥梁等领域中, 钢管混凝土均有广泛的使用。

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。经过几十年的科学研究及工程实践的积累, 组合结构的发展十分迅速, 其结构类型和适用范围涵盖了结构工程应用的多个领域, 在建筑、桥梁领域均有大量的工程应用实例。

第二章 组合结构的历史与现状

第一节 组合结构的历史回顾

1894年,美国匹兹堡有一栋建筑出于防火的需要,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,这个可以说是组合结构的雏形。而在20世纪20年代才出现具有现代意义的钢-混凝土组合梁,并在20世纪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,美国哥伦比亚大学首先对外包混凝土的钢柱进行试验,并通过研究证明混凝土的存在可以提高柱的承载力。20世纪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。而相比外包混凝土柱,钢管混凝土由于两种材料之间的相互约束作用使得性能明显增强。早期的组合结构主要采用混凝土与钢材两种材料,将混凝土板、钢梁、钢管、钢管等构件单元组合起来一同工作。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,在相关研究及工程实践的基础上,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)。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),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。

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)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)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设计与施工规程》(YB 9238—92)、《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS 28: 90)、《钢管混凝土结构设计规程》(YB 9082—98)、《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T 5085—1999)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)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。近年来,我国又新编或修订了多部与钢-混凝土组合结构有关的规范、规程,如交

通部《公路钢-混凝土组合结构桥梁设计施工细则》、住房和城乡建设部《钢-混凝土组合结构设计规范》等。

第二节 各类型组合结构的发展及现状

一、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。

组合柱包括型钢混凝土柱和钢管混凝土柱两类。这两类组合柱的组合概念有所差异。型钢混凝土柱是通过外包混凝土对钢柱的支持防止其屈曲起到组合作用，而钢管混凝土则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。

型钢混凝土柱根据内部型钢的布置情况，可分为实腹式和空腹式两种。实腹式型钢包括焊接或轧制的工字形、口字形、十字形截面。由于实腹式型钢抗剪能力强，因此抗震性能较强。而空腹式型钢则采用角钢或小型钢通过缀板连接所形成的格构式钢骨架，其受力性能与普通钢筋混凝土柱相似。因此，目前在抗震结构中多采用实腹式型钢混凝土柱。图 2-1 (a) ~ (d) 为应用于中柱的型钢混凝土柱截面形式，图 2-1 (e) ~ (h) 为应用于边柱或角柱的型钢混凝土柱截面形式，其中图 2-1 (c)、(f)、(h) 为实腹式型钢，其余为格构式型钢。型钢混凝土将钢材置于构件截面内部，因此钢材强度的发挥程度将小于将钢材布置在构件周边的钢管混凝土。当仅依靠型钢与混凝土间的粘结力时，难以充分保证型钢与混凝土的协同工作性能，需要沿型钢周边布置一定数量的构造钢筋，从而给施工带来困难。此外，将型钢混凝土应用于框架梁时，混凝土裂缝宽度有时难以控制，这些弊端在一定程度上影响到型钢混凝土梁的应用。

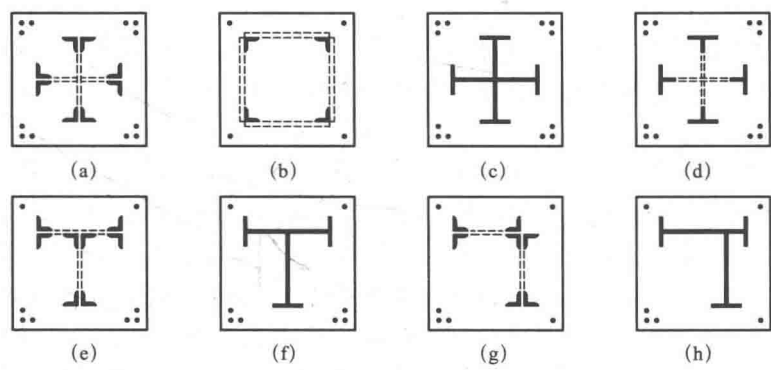


图 2-1 型钢混凝土柱的截面形式

钢管混凝土相比于型钢混凝土则有更多的力学性能及施工性能的优势，能够在提高钢材和混凝土性能的同时方便施工，在工程实践中有更为广泛的应用。按截面形式不同，钢管混凝土可分为圆钢管混凝土、方钢管混凝土和多边形钢管混凝土等（图 2-2）。在一些工程实践中，圆钢管混凝土的应用实例较多，也有部分采用矩形截面的钢管混凝土。与圆钢管混凝土相比，方钢管混凝土在轴压作用下的约束效果降低，但相对圆钢管混凝土的截面惯性矩更大，因此在弯压作用下具有更好的性能。同时，这种截面形式制作比较简单，尤

其是节点处与梁的连接构造比较易于处理，因而在国外的应用较多，在我国的应用也呈上升趋势。对于八角形等多边形钢管混凝土，其工作状态则介于两者之间。目前，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。

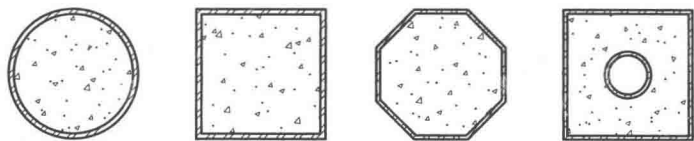


图 2-2 钢管混凝土柱的截面形式

组合梁是一类重要的横向承重组合构件。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。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 2-3 所示。早期的组合梁将钢梁包裹在混凝土内（型钢混凝土梁），自重较大，并难以控制裂缝宽度，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。

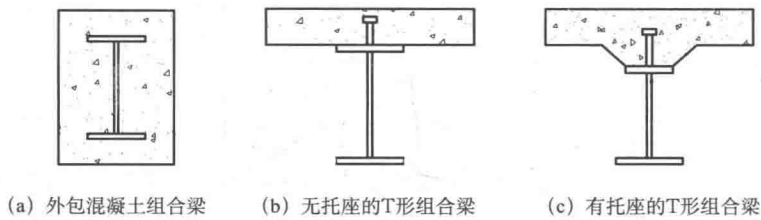


图 2-3 不同的组合梁截面形式

T 型钢-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、预制板翼板组合梁、叠合板翼板组合梁以及压型钢板混凝土翼板组合梁，如图 2-4 所示。现浇混凝土翼板组合梁（图 2-4a）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。而预制混凝土翼板组合梁（图 2-4b）安装施工时仅需要浇筑槽口处的混凝土，可减少现场湿作业工作量，加快施工进度，减少混凝土收缩等不利因素的影响。这种组合梁形式通常应用于桥梁结构，对预制板的加工精度要求高，不仅需要在预制板端部预留槽口，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，因此对施工水平的要求较高。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 2-4c）在保留预制板组合梁优点的基础上，进一步降低了施工难度，提高了施工质量，具有构造简单、施工方便、受力性能好等优点。混凝土预制板在施工时作为施工平台和永久模板使用，在使用阶段则作为楼面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。这种形式的组合梁施工工艺简单，结构性能良好，是对传统组合梁的重要发展。而随着在高层建筑中压型钢板的的应用越来越广泛（图 2-4d），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。

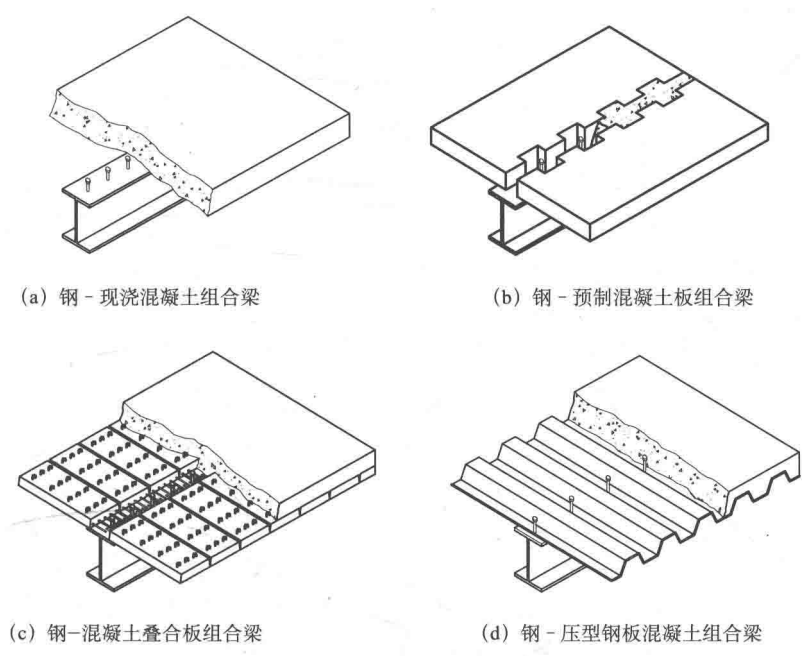


图 2-4 不同混凝土翼板的钢-混凝土组合梁截面形式

组合梁所采用的钢梁形式除了工字形外，还有箱形、钢桁架、蜂窝形钢梁等形式，如图 2-5 所示。箱形钢梁可以包括开口截面和闭口截面两种情况。开口箱梁虽能节省钢材，但是在施工阶段抗扭刚度较小；闭口箱梁在施工阶段的整体性好，抗扭刚度较大，但在正弯矩作用下钢梁上翼缘发挥的作用较小，用钢量相比于开口箱梁略有增加。桁架组合梁则更加适用于大跨度结构，在施工阶段桁架梁的刚度较大，可以分段运输和现场拼装，适用于桥梁结构、大跨连体和连廊结构。而蜂窝形钢梁通常由轧制 I 型钢或 H 型钢先沿腹板纵向切割成锯齿形后再错位焊接相连而成，蜂窝形钢梁能利用开孔腹板进行水平方向的设备及电气管道的布置。一般情况下，蜂窝形钢梁的加工制作工艺复杂，而且由于腹板的抗剪

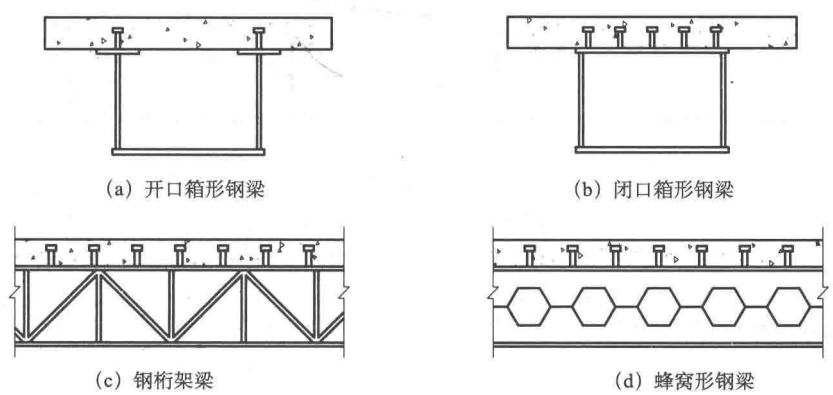


图 2-5 不同形式钢梁的钢-混凝土组合梁

能力的减弱，通常由腹板的抗剪控制设计。因此，当没有加工制作蜂窝形钢梁的专用设备时，采用蜂窝形组合梁的经济效益并不显著。目前，我国有关规范规程与组合梁相关的内容还没有涉及蜂窝形组合梁。

为进一步提高组合梁的力学性能及使用性能，将预应力技术与组合梁相结合可形成预应力组合梁。按照施加预应力目的不同，预应力组合梁可以仅在钢梁内施加预应力，以减小使用荷载下组合梁正弯矩区钢梁的最大拉应力，增大钢梁的弹性范围，满足对钢梁应力水平的控制要求。在组合梁负弯矩区的混凝土翼板中施加预应力，则可以降低组合梁负弯矩区混凝土翼板的拉应力以控制混凝土开裂或减小裂缝宽度。还可以在正弯矩区和负弯矩区均施加预应力，这种方式可以曲线形式布置预应力筋，也可以在正弯矩区和负弯矩区分别布置预应力筋，以同时达到降低正弯矩区钢梁应力和控制负弯矩区混凝土开裂的目的。除了采用张拉钢丝束之外，调整支座相对高程、预压荷载等方法也可以在组合梁内施加预应力。对于是否需要在组合梁内施加预应力，取决于梁的高跨比、荷载大小和结构的使用要求等，设计时需特别注意混凝土收缩、徐变等长期效应所导致的预应力损失问题。预应力钢-混凝土组合梁在桥梁结构中已经得到了较为广泛的应用，在建筑结构中的大跨组合梁中也有应用，具有很好的综合效益。

抗剪连接件是保证钢-混凝土组合梁发挥组合作用的关键元件。抗剪连接件常焊接于钢梁翼缘，通过横向钢筋和混凝土的作用将钢梁内的剪力传递到混凝土翼板相对较宽的范围内。抗剪连接件一方面需要传递混凝土与钢梁间的水平剪力；另一方面，还需要防止翼板与钢梁间竖向分离，起到抗掀起的作用。早期的抗剪连接件形式有弯筋、槽钢和角钢等，其基本形式如图 2-6 (a)、(b)、(c) 所示。相比于栓钉，这些早期连接件的施工工艺均比较复杂，但单个连接件的承载力相对较高。栓钉在各个方向上受力性能相同，焊接质量易于保证，并能透过压型钢板直接进行熔透焊，给设计施工均带来很大方便。自 20 世纪 80 年代中期以后，随着栓钉焊接设备国产化的成功，栓钉成为国内研究及应用的主要抗剪连接件形式。根据大量的试验统计和分析，《钢结构设计规范》GB 50017—2003 放宽了栓钉抗剪连接件承载力的上限值，提高了组合结构设计施工的经济性。

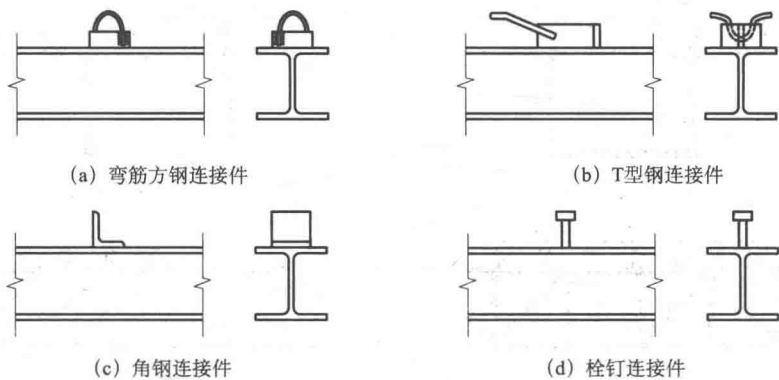


图 2-6 传统抗剪连接件基本形式

组合节点是指连接两种不同类型构件的节点，其内力传递路径及破坏模式要比纯钢结构或钢筋混凝土节点复杂，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 2-7 所示。目前，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，但在工程实际中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。根据工程实际的需要，国内组合节点研究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上并提出了各种节点形式，虽然提出的各种节点形式能满足特定结构设计某些方面的要求，但仍存在一些问题。例如，很难同时满足节点的力学性能和施工的简易性、经济性多方面的要求，而且这些节点形式主要是针对某项具体工程，其应用的普遍性仍受到一定的限制。

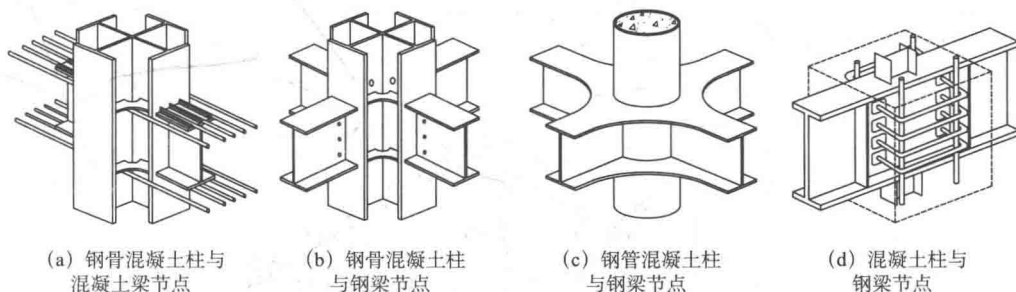


图 2-7 组合节点的形式

二、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。钢筋混凝土结构随着建筑层数的增加和柱网尺寸的增大，为了提高单柱的承载力而必须增大柱截面，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。而纯钢结构随着建筑高度的增加其侧向刚度小、抗侧移能力差等问题则需要重点考虑。此外，钢结构抗火能力较差、防腐代价高等问题也需要解决。而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。

根据结构体系间不同的组合方式，钢-混凝土组合结构体系主要包括以下几个类型：

1) 横向组合结构体系

组合筒体—组合框架结构体系是一种常见的横向组合结构体系。框筒或实腹筒主要承受侧向荷载，一般由钢管混凝土或钢板组合剪力墙形成；外框架主要承担竖向荷载，则由钢-混凝土组合梁与组合柱形成；两者间则通过组合楼盖或伸臂桁架的作用保持协调工作。组合框架柱网间距较大，能满足建筑使用要求，并具有一定的抗侧移刚度；而

组合楼盖空间作用明显,保证筒体和框架能够协同工作,减小剪力滞后效应的不利影响。

2) 竖向混合结构体系

在高层建筑中,各楼层不同的使用功能对结构形式提出了不同的要求。如公共活动区域需要较大空间,对结构提出了大跨度的要求;而居住区域则需要结构外观更加平整。因此,一种合理的做法是沿竖向分别使用不同的结构形式,从而形成了竖向混合的结构体系。另外,从受力的角度出发,高层建筑顶部与底部具有不同的结构性能要求,如顶部需要较轻的自重,底部则需要较强的抗侧移刚度。此时,在下部各层采用钢筋混凝土结构,而在上部各层采用钢结构,则可以获得较好的综合效果。

3) 组合框架结构体系

组合框架体系的构成中包括:钢-混凝土组合梁、钢-混凝土组合板、钢管或型钢混凝土柱。结构中组合框架承受竖向荷载和侧向荷载。而组合楼盖除了作为水平承重构件承担竖向荷载之外,还具有很大的水平刚度以保证各框架间的协同工作,提高结构的抗侧力性能。典型的多层组合框架结构如图 2-8 所示。

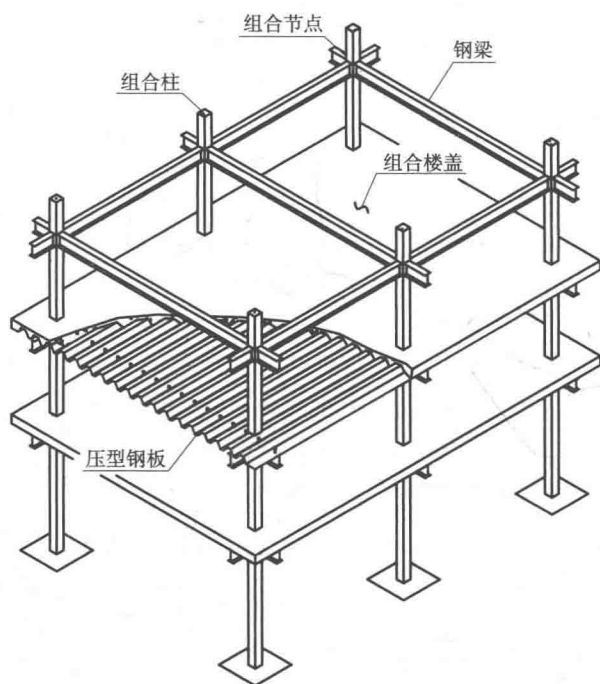


图 2-8 钢-混凝土组合框架体系

4) 巨型组合结构体系

巨型组合结构体系由巨型组合构件组成的桁架或框架作为主体结构,其他结构构件则构成次结构与主体结构共同工作。主结构为主要的抗侧力体系,次结构只承担竖向荷载并将其传递给主结构。巨型组合结构的承重及抗侧力构件都是空心的或格构式的立体构件,截面尺寸通常很大,具有超常规的巨大抗侧移刚度及整体工作性能。巨型柱可以采用格构式钢管混凝土柱或组合筒体,一般布置在结构的四角;巨型梁则采用高度在一层或一层以