

普通高等教育“十二五”规划教材

组合结构设计

王静峰 主编

种迅 陈安英 副主编

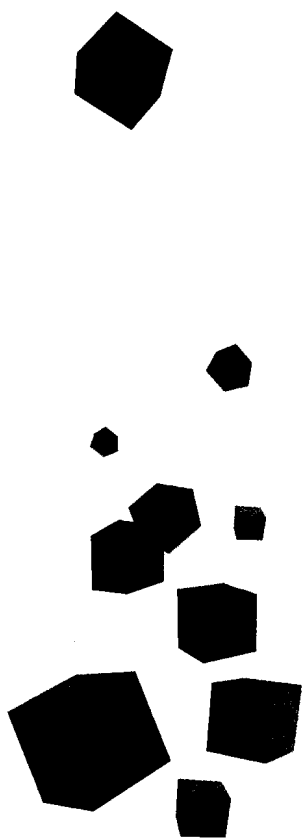
ZUHE JIEGOU
SHEJI



化学工业出版社

组合结构设计

王静峰 主 编
种 迅 陈安英 副主编



化学工业出版社

·北京·

本书是根据土木工程专业指导委员会新制定的“土木工程专业规划”、教育部“卓越工程师计划”和国家及行业现行标准,结合作者多年教学实践经验,吸收国内外最新研究成果编写的,反映了组合结构新进展和可持续发展的要求。可培养学生综合能力和创新意识,注重建立学生的工程概念,提高其应用能力。本书系统地介绍了组合结构的设计原理和计算方法、构造措施和施工方法。书中内容深入浅出,力求理论联系实际,并附有计算例题和复习思考题,便于读者掌握和运用。

本书可供土木工程专业专科生、本科生和研究生作为教材使用,亦可作为土木工程技术人员和研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

组合结构设计/王静峰主编. —北京:化学工业出版社, 2011.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-10942-2

I. 组… II. 王… III. 组合结构-结构设计-高等学校-教材 IV. TU398

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第061947号

责任编辑:满悦芝

文字编辑:韩亚南

责任校对:宋 玮

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张13 $\frac{3}{4}$ 字数348千字 2011年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00元

版权所有 违者必究

前 言

组合结构是在混凝土结构和钢结构基础上发展起来的新型结构，可以充分地发挥钢材受拉和混凝土受压的优点，具有承载力高、塑性和韧性好、抗震性能好、施工方便、耐火性能好和经济效益显著等特点。组合结构的类型较多，主要包括压型钢板-混凝土组合板、钢-混凝土组合梁、型钢混凝土和钢管混凝土等。从 20 世纪 90 年代开始，随着我国经济和建设事业的迅猛发展，组合结构在大跨度空间结构、复杂建筑结构、高层及超高层建筑、工业厂房、桥梁结构、大型综合交通枢纽、千米级输电塔、地下结构及桩基础等实际工程中应用日益增多。当前我国组合结构正处于迅速发展时期。

目前的研究成果和工程经验为组合结构的进一步发展提供了很好的条件和基础。与混凝土结构和钢结构领域相比，国内在组合结构领域的建筑与结构设计人员队伍整体相对较弱，组合结构的迅速推广和应用，使得过去一直以混凝土结构设计为主的设计人员表现出不适应。这也促进高等学校土建类专业课程的教学改革，重视组合结构设计，使学生在校期间就能对组合结构设计有比较全面的掌握，毕业以后能较快胜任组合结构的设计和施工工作，以适应新形势的要求。

“组合结构设计”为高等院校土木工程专业的专业基础课程之一。本书是根据土木工程专业指导委员会新制定的“土木工程专业规范”，结合作者多年来的教学实践经验，吸收国内外组合结构的研究成果编写的。书中与规范有关的内容是按照国家及行业现行标准编写的，反映了我国土木工程领域的组合结构新进展和可持续发展的要求。本书内容按照培养土木工程师的基本要求和教育部“卓越工程师计划”，在培养学生综合能力和创新意识的同时，注重建立学生的工程概念，提高学生的应用能力。本书系统地介绍了组合结构的设计原理和计算方法、构造措施和施工方法。书中内容注意深入浅出，力求理论联系实际，并附有计算例题和复习思考题，便于读者掌握和运用。

全书共分 9 章，包括绪论、组合结构的材料性能、组合结构设计原则、抗剪连接件设计、压型钢板-混凝土组合板设计、钢与混凝土组合梁设计、型钢混凝土设计、钢管混凝土设计及组合结构施工。

本书由王静峰担任主编，种迅、陈安英担任副主编。在全书的 9 章中，第 1、3、4、5、8 章由王静峰编写，第 6、7 章由种迅编写，第 2、9 章由陈安英编写。本书大纲拟定及全书统稿和修改由王静峰负责。此外，对研究生王军、丁伟伟、李金超、李涛、余波为完成本书部分编排及插图的绘制等所做出的努力表示感谢。本书可供大学土木工程专业本科生和研究生作为教材使用，亦可作为土木工程技术人员和研究人员的参考书。

由于编者的水平有限，书中不妥和疏漏之处，敬请读者批评指正，并将意见寄给合肥工业大学土木与水利工程学院建筑工程系。

编 者

2011 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 组合结构的概念和特点	1
1.1.1 组合结构的概念	1
1.1.2 组合结构的特点	1
1.2 压型钢板-混凝土组合板	2
1.2.1 压型钢板-混凝土组合板的特点	2
1.2.2 组合楼板的类型	2
1.2.3 压型钢板-混凝土组合板的发展与 应用	3
1.3 钢-混凝土组合梁	4
1.3.1 钢-混凝土组合梁的特点	4
1.3.2 钢-混凝土组合梁的类型	4
1.3.3 钢-混凝土组合梁的发展和应用	7
1.4 型钢混凝土	8
1.4.1 型钢混凝土的特点	8
1.4.2 型钢混凝土的类型	8
1.4.3 型钢混凝土的发展与应用	8
1.5 钢管混凝土	10
1.5.1 钢管混凝土的特点	10
1.5.2 钢管混凝土的类型	11
1.5.3 钢管混凝土的发展与应用	12
复习思考题	14
第 2 章 组合结构的材料性能	15
2.1 混凝土	15
2.1.1 混凝土的强度	15
2.1.2 混凝土的弹性模量	17
2.1.3 混凝土的应力-应变曲线	17
2.2 钢材	18
2.2.1 钢材的强度	19
2.2.2 钢材的塑性	19
2.2.3 钢材的冷弯性能	20
2.2.4 钢材的韧性	20
2.3 钢材的种类及型号	20
2.3.1 钢筋	20
2.3.2 型钢	21
复习思考题	24
第 3 章 组合结构设计原则	25
3.1 结构极限状态设计	25
3.2 混凝土裂缝宽度限值	26
3.3 变形限值	27
复习思考题	28
第 4 章 抗剪连接件设计	29
4.1 抗剪连接件的概念与类型	29
4.2 抗剪连接件的构造要求	30
4.2.1 基本要求	30
4.2.2 栓钉连接件的构造要求	30
4.2.3 槽钢连接件的构造要求	30
4.2.4 弯筋连接件的构造要求	31
4.3 剪力连接件的受力性能	31
4.3.1 荷载-滑移关系曲线	31
4.3.2 抗剪连接件的破坏形态	32
4.3.3 抗剪连接件的受力性能	33
4.4 抗剪连接件的抗剪承载力计算	34
4.4.1 单个栓钉连接件的抗剪承载力	34
4.4.2 单个槽钢连接件的抗剪承载力	35
4.4.3 单个弯筋连接件的抗剪承载力	36
4.5 抗剪连接件的设计方法	37
4.5.1 组合梁剪跨区的划分	37
4.5.2 弹性设计方法	37
4.5.3 塑性设计方法	39
4.5.4 抗剪连接件布置原则	40
4.6 钢梁与混凝土翼板接触面上的纵向 抗剪计算	40
4.6.1 适用范围	40
4.6.2 纵向界面的分类	40
4.6.3 纵向界面抗剪验算	40
4.6.4 纵向界面单位长度上的纵向剪力 计算	41
4.6.5 纵向界面单位长度上的抗剪 强度计算	41
4.6.6 横向钢筋面积计算	42
复习思考题	42

第 5 章 压型钢板-混凝土组合板设计	44
5.1 压型钢板-混凝土组合板的概念与特点	44
5.1.1 压型钢板-混凝土组合板的概念	44
5.1.2 压型钢板-混凝土组合板的特点	45
5.2 压型钢板的型号与截面特性	46
5.2.1 压型钢板的材料	46
5.2.2 压型钢板的截面特征	46
5.2.3 压型钢板的型号及截面特性	47
5.2.4 压型钢板受压翼缘的有效宽度	51
5.2.5 压型钢板的加劲肋刚度	51
5.2.6 压型钢板的连接方式	52
5.3 组合板的构造要求	53
5.3.1 组合板尺寸及要求	53
5.3.2 组合板中的压型钢板要求	55
5.3.3 混凝土要求	55
5.3.4 栓钉设置要求	56
5.3.5 组合板的配筋要求	57
5.4 组合板的破坏模式	58
5.4.1 纵向水平剪切黏结破坏	58
5.4.2 正截面弯曲破坏	58
5.4.3 斜截面剪切破坏	59
5.4.4 局部冲切破坏	59
5.4.5 压型钢板局部失稳破坏	59
5.5 组合板的设计方法	60
5.5.1 计算方法	60
5.5.2 荷载计算	60
5.5.3 计算原则	61
5.6 组合板的承载力计算	63
5.6.1 施工阶段组合板的承载力计算	63
5.6.2 使用阶段组合板的承载力计算	63
5.7 组合板的挠度、裂缝宽度和自振频率计算	68
5.7.1 组合板的挠度计算	68
5.7.2 组合板的裂缝宽度计算	70
5.7.3 组合板的自振频率计算	71
复习思考题	75
第 6 章 钢与混凝土组合梁设计	77
6.1 钢-混凝土组合梁的概念和特点	77
6.1.1 钢-混凝土组合梁的概念	77
6.1.2 钢-混凝土组合梁的特点	78
6.1.3 组合梁的组成	78
6.2 组合梁的构造要求	79
6.2.1 组合梁截面的混凝土翼板有效宽度	79
6.2.2 组合梁的截面尺寸	80
6.3 组合梁的设计方法	80
6.4 简支组合梁的弹性设计方法	82
6.4.1 基本假定	82
6.4.2 组合梁的换算截面	82
6.4.3 组合梁截面的应力计算	83
6.5 简支组合梁的塑性设计方法	86
6.5.1 组合梁受弯承载力计算	86
6.5.2 组合梁竖向抗剪承载力计算	89
6.6 组合梁的纵向抗剪计算	90
6.7 组合梁的变形计算	91
6.8 连续组合梁设计	94
6.8.1 连续组合梁的受力性能	94
6.8.2 连续组合梁的弹性设计方法	94
6.8.3 连续组合梁的塑性设计方法	95
6.8.4 连续组合梁的变形和裂缝计算	97
复习思考题	98
第 7 章 型钢混凝土设计	99
7.1 型钢混凝土的概念和特点	99
7.1.1 型钢混凝土的概念	99
7.1.2 型钢混凝土的特点	100
7.2 型钢混凝土的构造要求	100
7.3 型钢混凝土结构的设计原则	103
7.4 型钢混凝土梁	103
7.4.1 型钢混凝土梁的正截面受弯承载力	103
7.4.2 型钢混凝土梁的斜截面受剪承载力	107
7.4.3 型钢混凝土梁的裂缝宽度	111
7.4.4 型钢混凝土梁的刚度与变形	113
7.5 型钢混凝土柱	117
7.5.1 型钢混凝土轴心受压柱的承载力	117
7.5.2 型钢混凝土偏心受压柱的正截面承载力	119
7.5.3 型钢混凝土偏心受压柱的斜截面承载力	123
7.6 型钢混凝土剪力墙	125
7.6.1 型钢混凝土剪力墙的类型及构造要求	125
7.6.2 型钢混凝土剪力墙的偏心受压正截面承载力	126
7.6.3 型钢混凝土剪力墙的偏心斜截面	

受剪承载力	127	7.7.2 梁柱节点区的抗剪验算	130
7.7 型钢混凝土结构的节点设计	128	复习思考题	134
7.7.1 梁柱节点的连接构造	128		
第8章 钢管混凝土设计			135
8.1 钢管混凝土的概念和特点	135	8.4.3 三肢斜腹杆柱	148
8.1.1 钢管混凝土的概念	135	8.4.4 格构式钢管混凝土柱的刚度折减	150
8.1.2 钢管混凝土的特点	135	8.5 钢管混凝土轴心受拉构件	155
8.2 钢管混凝土结构的构造要求	136	8.5.1 钢管混凝土轴心受拉构件的承载力	155
8.2.1 材料规定	136	8.5.2 钢管混凝土轴心受拉构件的刚度	156
8.2.2 圆形钢管混凝土构件截面规定	136	8.6 钢管混凝土受弯构件	156
8.2.3 方、矩形钢管混凝土构件截面规定	136	8.6.1 钢管混凝土受弯构件的承载力	156
8.2.4 柱拼接	138	8.6.2 钢管混凝土受弯构件的刚度	157
8.2.5 柱脚连接	139	8.7 钢管混凝土压弯构件	157
8.3 钢管混凝土轴心受压构件	142	8.7.1 钢管混凝土压弯构件的工作性能	157
8.3.1 钢管混凝土轴心受压构件的工作性能	142	8.7.2 钢管混凝土压弯构件的承载力	159
8.3.2 钢管混凝土轴心受压构件的刚度	143	8.8 钢管混凝土受扭构件和受剪构件	160
8.3.3 钢管混凝土轴心受压构件的强度承载力	143	8.8.1 钢管混凝土受扭构件的承载力	160
8.3.4 钢管混凝土轴心受压构件的稳定承载力	144	8.8.2 钢管混凝土受剪构件的承载力	161
8.4 格构式钢管混凝土轴压构件	146	8.8.3 钢管混凝土构件的剪切刚度	162
8.4.1 双肢平腹杆柱	147	8.9 钢管混凝土结构的节点设计	163
8.4.2 双(四)肢斜腹杆柱	147	8.9.1 刚接节点	163
第9章 组合结构施工		8.9.2 铰接节点	166
9.1 组合结构施工特点	168	复习思考题	167
9.2 压型钢板-混凝土组合板施工	168	9.4 型钢混凝土结构施工	178
9.2.1 施工工艺	168	9.4.1 施工工艺	178
9.2.2 施工阶段计算	171	9.4.2 施工阶段计算	181
9.3 钢-混凝土组合梁施工	173	9.5 钢管混凝土结构施工	182
9.3.1 施工工艺	173	9.5.1 施工工艺	182
9.3.2 施工阶段计算	177	9.5.2 施工阶段计算	186
附录		复习思考题	187
附录 A 钢管混凝土构件的轴压弹性模量 E_{sc} 表	188	附录 C 压弯构件承载力计算系数表	207
附录 B 轴心受压构件的稳定系数 φ 值表	192	附录 D 钢管混凝土构件的剪切弹性模量 G_{sc} 表	208
参考文献			212

第 1 章 绪 论

1.1 组合结构的概念和特点

1.1.1 组合结构的概念

根据使用建筑材料的不同,土木工程师习惯把结构体系分为砌体结构、木结构、混凝土结构、钢结构、组合结构等。组合结构的英文名称为“composite structure”,其定义有不同的描述,在土木工程范围内是指由两种或两种以上结构材料组成,并且材料之间能以某种方式有效地传递内力,以整体的形式产生抗力的结构。它不包括两种或两种以上结构材料组成,但各自单独发挥作用、简单叠加、单独承受荷载的结构。钢-混凝土组合结构(steel and composite structure)是土木工程中最常见的组合结构形式,由钢材和混凝土两种结构材料组成。因此,一般组合结构如果没有特殊说明,就指的是钢-混凝土组合结构。

组合结构是在钢筋混凝土结构和钢结构基础上发展起来的一种新型结构,充分利用了钢材受拉和混凝土受压等优点。土木工程中常用的组合结构类型有:压型钢板-混凝土组合板,钢-混凝土组合梁,型钢混凝土、钢管混凝土等组合承重构件,还有组合斜撑、组合墙等组合抗侧力构件。钢-混凝土组合梁是由钢梁和混凝土板通过抗剪连接件形成整体,并共同受力的横向承重构件。钢管混凝土是由钢管和内填混凝土所构成的,钢管混凝土是把型钢放置在钢筋混凝土中,两者都可以作为高层及超高层建筑、桥梁工程的竖向承重构件。

组合结构将多种材料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。经过几十年的研究和工程实践,组合结构的类型和适用范围也在不断扩大,能够满足高层及超高层建筑、大跨度空间结构、桥梁工程和特种结构的发展需要。另外,新材料和新技术的出现也为组合结构的创新与发展创造了条件。可以预见,组合结构以其优越的受力性能和抗震性能、快捷的施工性能和良好的经济效益,将在我国建筑和桥梁等领域具有广阔的应用前景。

1.1.2 组合结构的特点

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、抗震性能好、构件截面尺寸小、施工快速方便等优点。与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。与钢结构相比,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。

另外,采用组合结构可以节省脚手架和模板,便于立体交叉施工,减小现场湿作业量,减轻施工扰民程度。在城市高架桥梁结构中采用组合结构,在施工期间可以不中断交通,缩短施工周期。在建筑结构中采用组合结构,同样可以立体交叉施工,缩短施工周期,减小构件截面尺寸并增大净空和使用面积。多次地震后灾害调查发现,与钢结构和钢筋混凝土结构相比,组合结构的破坏率最低。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,造价甚至还要更低。与混凝土结构相比,组合结构的缺

点是需要采取防火及防腐措施，但是其防火及维护费用比钢结构要低得多。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，这为组合结构的应用提供了有利的条件。

1.2 压型钢板-混凝土组合板

1.2.1 压型钢板-混凝土组合板的特点

压型钢板-混凝土组合板，英文名称“profiled steel sheeting-concrete composite slab”，是指在有凹凸肋或槽纹的钢板上浇筑混凝土而形成的组合板，它通过抗剪连接件将压型钢板与混凝土板连接形成整体。压型钢板除在施工阶段作为模板用外，在使用阶段还可兼作受力钢筋或部分受力钢筋。这种结构在多层高层钢结构建筑中应用较多，是钢结构建筑楼板体系不可缺少的配套技术。

压型钢板-混凝土组合板具有以下特点。

① 施工工期短。压型钢板作为混凝土楼板的永久性模板，取消了现浇混凝土所需的模板与支撑系统及施工时的大部分临时脚手架，与钢筋混凝土结构相比，大大简化了施工工序，加快了施工进度。另外，各楼层可以同时施工，只要整个建筑的楼层施工计划安排得当，就会大大缩短工期。

② 自重轻，节省材料。压型钢板-混凝土组合板自重轻，减少了钢结构梁（柱）的荷载，可以采用经济合理的基础形式。压型钢板不仅是永久性模板，而且在混凝土板中起到受拉钢筋的作用，这使得组合楼板中可少放受力钢筋，仅在楼板跨中处为防止混凝土板开裂，才布置钢筋，节省了钢筋铺设和绑扎工作。

③ 减小楼层结构刚度。由于混凝土楼板作为梁结构的一个组成部分，提高了梁的刚度，可以有效地减小梁的高跨比。

④ 增加结构抗震性能。组合楼板不仅增强了竖向刚度，而且压型钢板和钢梁对混凝土楼板起到加劲肋的作用。每个楼层对整个高层建筑结构形成坚强的水平横隔，有很好的抗震和抗风作用。

⑤ 有效地利用楼层结构的使用空间。不仅可以利用压型钢板在梁上的肋间沟槽，铺设室内电力管线，而且在压型钢板底面可以焊接架设悬吊管道和天花板的轻钢骨架，充分利用了楼层结构中的空间。

1.2.2 组合楼板的类型

压型钢板-混凝土组合板分为两类：压型钢板仅作为施工阶段浇筑混凝土的模板，称为压型钢板-混凝土组合板。它除满足施工荷载外，对板型无特殊要求，施工完成后，全部使用阶段荷载均由混凝土承受，这种板称为非组合板。非组合板中的压型钢板只需进行施工阶段的强度和变形计算，混凝土达到设计强度以后，压型钢板就完成作为模板的任务。这种压型钢板-混凝土板的计算方法和配筋构造可参考《混凝土结构设计规范》，因此，压型钢板交界面不需要设计齿槽。压型钢板除作为施工模板外，在使用阶段还兼作混凝土板的受力钢筋或部分受力钢筋，即压型钢板与混凝土共同工作，这种楼板称为组合板。组合板中的压型钢板表面必须设置抗剪齿槽或采取其他措施来抵抗交界面之间的纵向剪力或垂直掀起力，它对板型有特殊要求以外，对耐久性和防火也有要求。

压型钢板的形状及其凹凸不平的齿槽对组合作用影响很大，组合楼板形式可归纳为以下四类（图 1-1）。

① 通过压型钢板本身的形状提高组合作用。例如将压型钢板的板肋压制成凹凸闭合式或具有棱角的凸肋，见图 1-1(a)。

② 在压型钢板本身的腹板或翼缘上轧制凹凸齿槽，其数量与尺寸对抵抗纵向水平剪力影响很大。这类压型钢板的品种与规格很多，应用也很广，见图 1-1(b)。

③ 采用开口槽的压型钢板，在其腹板内开小孔或在上翼缘上焊接钢筋来抵抗纵向水平剪力，见图 1-1(c)。

④ 支承在钢梁上的压型钢板，是将圆柱头焊钉穿透压型钢板焊于钢梁上，或将压型钢板端部肋压平直接焊于钢梁上，两者都可以提高组合作用，见图 1-1(d)。

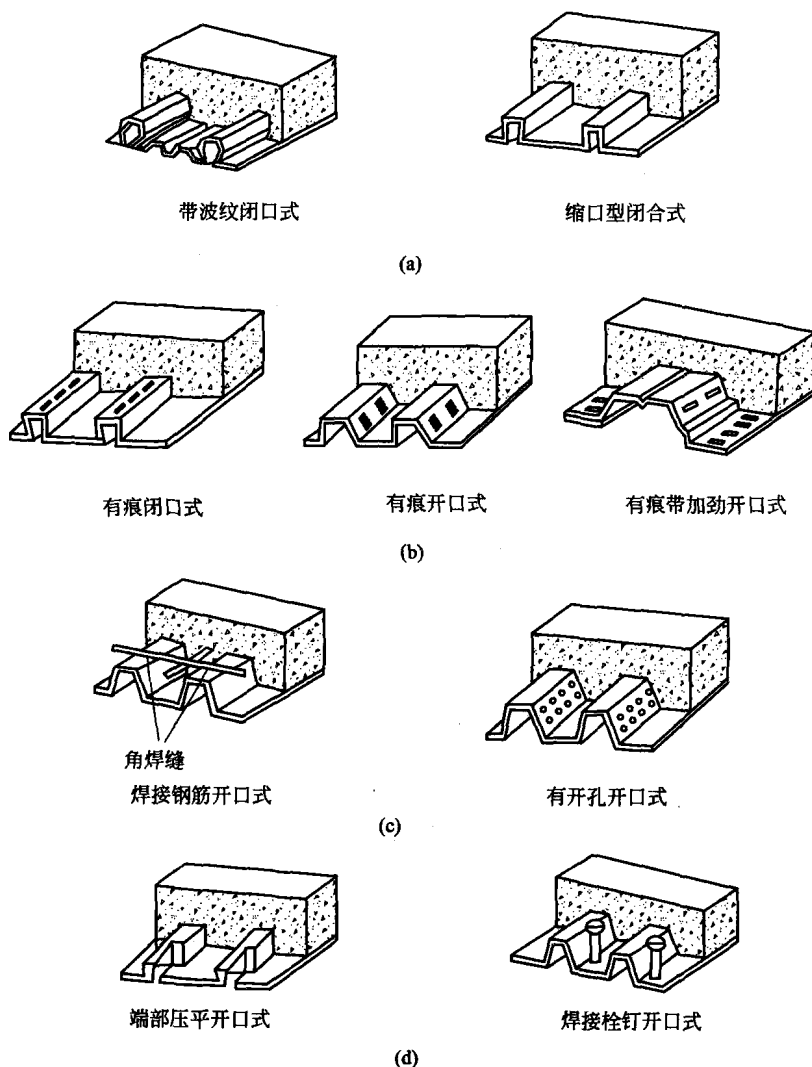


图 1-1 压型钢板-混凝土组合板的类型

1.2.3 压型钢板-混凝土组合板的发展与应用

国外自 20 世纪 60 年代就开始对压型钢板-混凝土组合板进行研究，包括压型钢板-普通（轻骨料）混凝土组合板的抗弯、抗剪及耐火等工作性能，研究成果已被许多国家纳入了设计规范或规程，例如美国 AISC 规范（1978）、加拿大 CSA 规范（1978）、澳大利亚 AS2327

规范(1980)、欧洲规范 EC4(1984)。同时,建设了一批压型钢板-混凝土组合板工程,取得了良好的经济效益和社会效益。

我国对压型钢板-混凝土组合板的研究比较晚,一方面由于薄壁钢材的紧缺,另一方面是压型钢板与连接件的配套技术开发较晚。20世纪80年代,我国开始对压型钢板-混凝土组合板的基本性能进行研究。1985年冶金部建筑研究总院研究了压型钢板与混凝土的组合效应。1992年原哈尔滨建筑大学通过试验提出了组合板的挠度实用计算公式。1998年北京市建筑设计研究院进行了压型钢板-混凝土组合板的耐火性能等系列研究,完善了压型钢板-混凝土组合板的理论体系。我国目前已建成许多采用组合楼板的大跨结构和高层建筑等,例如上海锦江饭店、上海静安饭店、深圳发展中心大厦、北京香格里拉饭店等。

1.3 钢-混凝土组合梁

1.3.1 钢-混凝土组合梁的特点

钢-混凝土组合梁,英文名称“steel and concrete composite beam”,是指通过剪力连接件将钢筋混凝土板与钢梁组合在一起,并共同受力、协调变形的一种梁。它由钢梁、剪力连接件、钢筋混凝土翼缘板或板托等组成。这种梁能够充分利用钢材所具有的良好抗拉性能和混凝土所具有的良好抗压性能,使材料性能得到合理利用。

钢-混凝土组合梁具有如下特点。

① 与钢梁相比,组合梁可以使结构高度降低 $1/4\sim 1/3$,每平方米造价可降低 $10\%\sim 40\%$,刚度增大 $1/4\sim 1/3$ 。整体稳定性和局部稳定性增强,耐久性提高,动力性能改善。例如人行天桥,如果采用钢桥,人行时往往感觉较柔并且伴有颤振,为了解决舒适度问题,不得不增大梁高,增加用钢量。如果采用组合梁桥,人行时就会感觉结构刚度较大,振动较小,舒适度提高。

② 与钢筋混凝土梁相比,组合梁可以使结构高度降低 $1/3\sim 1/2$,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 $1/25\sim 1/35$ 。自重减轻 $40\%\sim 60\%$,施工周期缩短 $1/3\sim 1/2$,同时现场湿作业量减小,施工扰民程度减轻,保护了环境,且延性大大提高,并可自由地焊接固定管线装置。

③ 钢梁可以作为混凝土的模板支承,节省材料简化施工工艺。在城市桥梁中采用组合梁,可以减小对桥下交通的影响。在建筑中采用组合梁,可以多层立体交叉施工,省掉满堂红脚手架,有利于现场文明施工。

④ 组合梁耐火性能差,对耐火性要求较高的结构,需要对钢梁涂防火涂料。

钢-混凝土组合梁可以广泛应用于建筑结构和桥梁结构等领域。在跨度比较大、荷载比较重的情况下,采用组合梁具有显著的技术经济效益和社会效益。在建筑结构领域,组合梁可以用于多、高层建筑和多层工业厂房的楼盖结构、工业厂房的吊车梁、工作平台、栈桥等。在桥梁结构领域,组合梁可以用于城市桥梁、公路桥梁,铁路桥梁等,还可用于大跨拱桥、大跨悬索桥、大跨斜拉桥的桥面结构等。

1.3.2 钢-混凝土组合梁的类型

钢-混凝土组合梁按截面形式可以分为型钢混凝土组合梁、T形组合梁和侧锚混凝土组合梁,见图1-2。型钢混凝土组合梁又称为钢骨混凝土梁或劲性混凝土梁,主要依靠钢材与混凝土之间的黏结力协同工作,T形组合梁则依靠抗剪连接件将钢梁和混凝土翼板结合在一起。

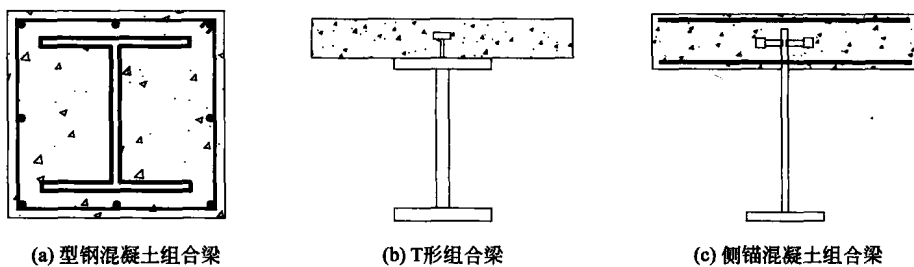


图 1-2 按截面形式分类的组合梁

钢-混凝土组合梁可以分为带托座组合梁和无托座组合梁，见图 1-3。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，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。

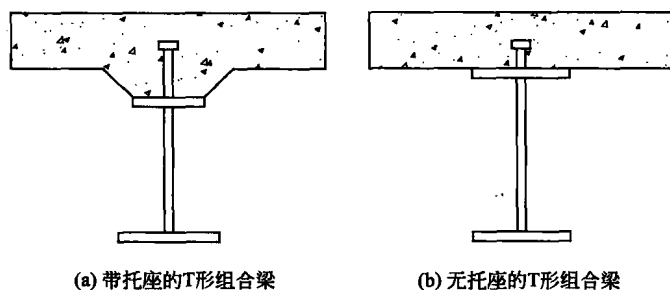


图 1-3 按托座分类的组合梁

钢-混凝土组合梁也可根据混凝土翼板的构造不同分为现浇混凝土翼板组合梁、预制混凝土翼板组合梁、叠合板翼板组合梁和压型钢板混凝土翼板组合梁，见图 1-4。

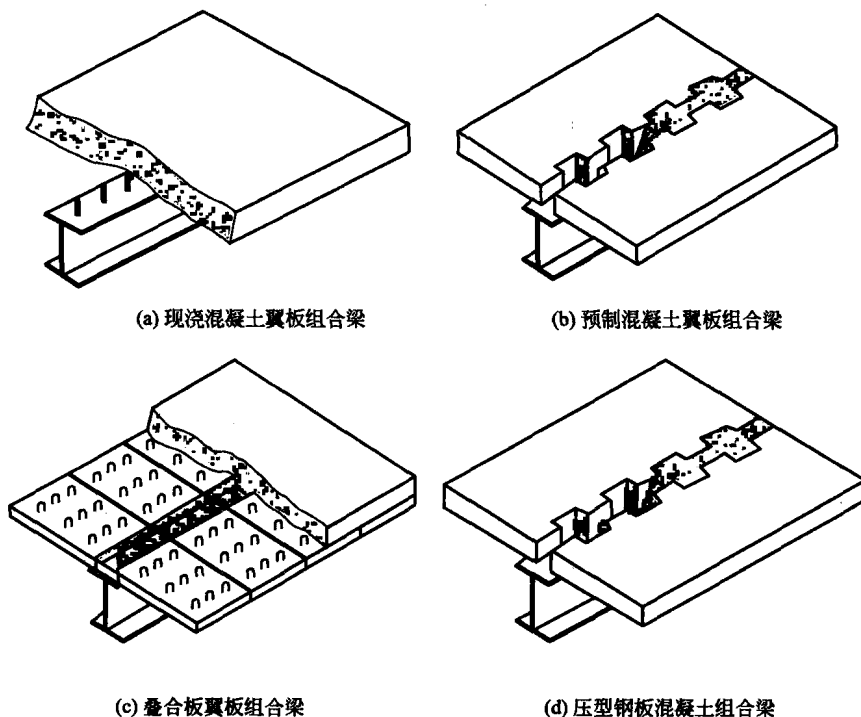


图 1-4 按混凝土翼板构造分类的组合梁

现浇混凝土翼板组合梁 [图 1-4(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 1-4(b)] 的混凝土翼板先预制, 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, 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。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。

叠合板翼板组合梁 [图 1-4(c)] 是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, 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。

压型钢板-混凝土组合梁 [图 1-4(d)] 是在钢梁上翼板铺设压型钢板, 再焊接抗剪连接件, 布设钢筋浇筑混凝土。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、闭口型和缩口型压型钢板, 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只作为永久性模板使用。

钢-混凝土组合梁按照钢梁形式不同又可分为工字形 (包括轧制工字型钢、H 型钢或焊接组合工字型钢) 钢梁组合梁、箱形钢梁组合梁、桁架钢梁组合梁、蜂窝形钢梁组合梁等, 见图 1-5。箱形钢梁可以分为开口截面和闭口截面两类。开口箱梁的优点是节省钢材, 缺点是在施工阶段抗扭刚度较小; 闭口箱形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, 相对于开口箱梁用钢量略有增加。桁架钢梁组合梁在结构跨度较大时具有一定的优越性, 在施工阶段桁架梁的刚度较大、可以分段运输和现场拼装, 适用于桥梁结构和建筑中的大跨连体和连廊结构。蜂窝形钢梁通常由轧制工字型钢或 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, 有时也可以直接在钢梁腹板挖孔而成。采用蜂窝形钢梁的优点是利用钢梁腹板的开孔可以方便地布置设备及电气管道等, 但是腹板的抗剪能力有所削弱, 制作工艺也较为复杂, 经济效益不是非常显著。

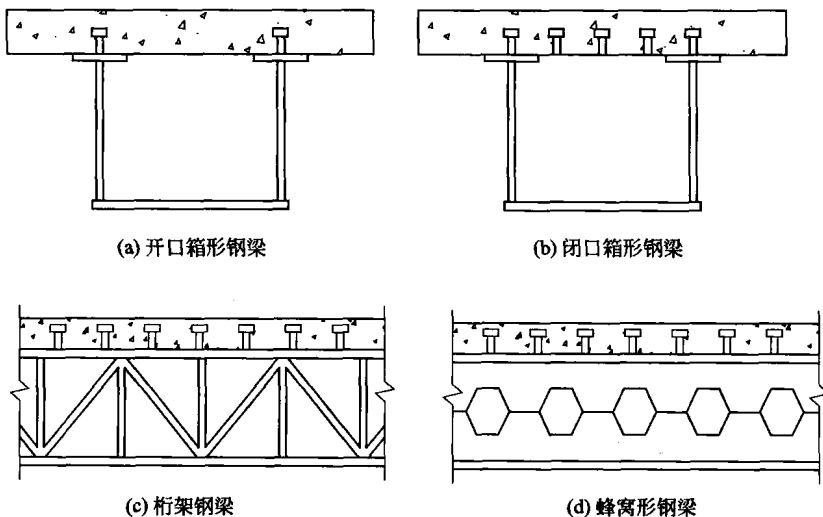


图 1-5 按钢梁形式分类的组合梁

按照是否对组合梁施加预应力，组合梁可以分为非预应力组合梁和预应力组合梁，见图 1-6。预应力组合梁又可以分为：仅在钢梁内施加预应力，目的是减小在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，以满足设计对钢梁应力水平的控制要求；仅在组合梁负弯矩区的混凝土翼板中施加预应力，目的是降低组合梁负弯矩区混凝土翼板拉应力，以控制混凝土开裂或减小裂缝宽度；在正弯矩区和负弯矩区都施加预应力，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，以同时达到上述两种方法的目的。是否需要组合梁施加预应力，取决于梁的高跨比、荷载大小和结构的使用要求等。目前预应力钢-混凝土组合梁在桥梁结构中已经得到了较为广泛的应用。

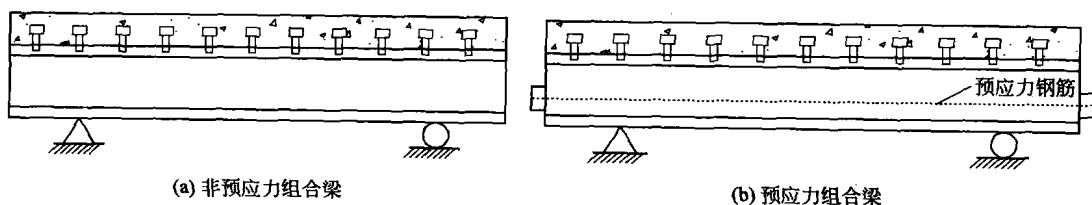


图 1-6 按预应力分类的组合梁

1.3.3 钢-混凝土组合梁的发展和應用

钢-混凝土组合梁研究始于 20 世纪 20 年代初，加拿大 Dominion 桥梁公司进行了 T 形简支组合梁的试验研究，同时美国也做了类似的研究，将工字型钢翼缘两边剪齿成条状，或将钢梁上翼缘表面凿得凹凸不平以增加其黏结力。20 世纪 30 年代末，英国、法国、德国、瑞典等国家也进行了试验研究，首次采用机械剪力连接件。随后，许多欧洲国家制定了有关组合梁的设计规范或规程，在此期间组合梁设计理论逐渐得到完善。在 20 世纪 60 年代以前，基本上是按弹性理论设计组合梁，后逐渐转入了塑性理论分析，主要是研究部分连接组合梁的工作性能。近年来，国外学者还研究了钢与混凝土预应力组合梁的受力性能，包括预应力钢筋类型、布筋方式、预应力钢筋含量及预应力大小等对结构静力性能的影响，低周反复荷载下的组合梁工作性能，混凝土梁效应对组合梁工作性能的影响，体外预应力组合梁的非线性行为等。

同时，组合梁的理论研究也得到相应发展。20 世纪初，Andreas 首先提出换算截面理论，将组合梁看成一个整体，将组合截面换算成同一材料的截面，然后根据初等弯曲理论进行截面计算和设计，这种理论物理意义明确，计算简便，适用于组合梁弹性工作阶段的应力和刚度计算，由于没有考虑交界面相对滑移对组合梁的影响，理论分析与实际受力情况存在一定差距。在 20 世纪 50 年代，Newmark 第一个考虑了交界面相对滑移对组合梁承载力和变形的影响，建立了比较完善的“不完全交互作用”理论，在理论公式推导过程中利用了复杂的微分方程，理论公式比较烦琐，不便于实际应用，但考虑了交界面滑移效应，具有重要的理论意义。在 20 世纪 60 年代初期，Lehigh 大学的 Tharliman 对极限强度理论在组合梁中应用的可行性进行了一系列研究，认为当组合梁达到极限承载力时，中和轴通常在混凝土翼缘板内，并认为钢梁的全截面均已达到了抗拉屈服点（也称屈服强度），这种理论简便适用，目前在世界范围内被广泛采用。

我国从 20 世纪 70 年代末开始研究组合梁，起步相对较晚。20 世纪 80 年代后期开始，国内学者开始了对组合梁进行了较为广泛和系统的试验研究，包括部分抗剪连接组合梁、连续组合梁、压型钢板混凝土组合梁、预应力组合梁、混凝土翼板开洞组合梁等的试验，研究

的内容包括承载力、刚度和裂缝等。

20 世纪 80 年代后期,我国在传统组合梁的基础上,提出了构造简单、施工方便、适合我国国情的叠合板组合梁体系,并对其进行了相关的系列研究,提出了叠合板组合梁的设计计算方法和构造措施,同时近年来高强钢-混凝土组合梁、钢-高强混凝土组合梁成为新的研究热点,有望在桥梁工程和高层建筑中推广和应用。

1.4 型钢混凝土

1.4.1 型钢混凝土的特点

型钢混凝土,英文名称为“steel reinforced concrete”,简称 SRC,是指在钢筋混凝土内部埋设型钢的一种组合结构。型钢混凝土中的型钢除采用轧制型钢外,还广泛使用焊接型钢,并且在型钢周围配置钢筋和箍筋。型钢混凝土也称为钢骨混凝土或劲性混凝土。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。

型钢混凝土结构具有如下特点。

① 承载力高,截面面积小。由于型钢混凝土结构不受含钢率限制,其承载力比相同截面的钢筋混凝土高出一倍以上。

② 节省支模劳动力和材料。型钢在浇筑混凝土以前即形成钢结构,它具有相当大的承载力,能够承受构件自重和施工荷载,并可以将模板悬挂在型钢上而不必为模板设置支柱,从而减少了劳动力和材料。

③ 施工速度快,工期短。型钢混凝土结构的多层及高层建筑不必等待混凝土达到一定强度就可以施工上层,从而缩短了施工工期;另外,由于施工中不必架立临时支柱,留出设备安装工作面,可以使土建和安装工序实行平行作业,缩短了工期。

④ 抗震性能好。由于混凝土内部设置了型钢,提高了结构的延性与耗能能力,使结构拥有良好的抗震性能。

⑤ 抗火与耐蚀性能优良。型钢外的混凝土为结构提供了较纯钢结构优秀的抗火与耐蚀性能。

1.4.2 型钢混凝土的类型

型钢混凝土的类型主要分为实腹式和空腹式。实腹式型钢采用由钢板焊接而成或直接轧制而成的工字形、口字形、十字形截面,见图 1-7。实腹式型钢的腹板可提供很大的抗剪承载力,使构件的抗震性能大为提高。空腹式型钢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。空腹式型钢混凝土构件的受力性能与普通钢筋混凝土构件基本相同。因此,目前在抗震结构中多采用实腹式型钢混凝土构件。

1.4.3 型钢混凝土的发展与应用

型钢混凝土结构在国外发展较早,欧美于 20 世纪初就开始对型钢混凝土结构进行研究,在 20 世纪中期型钢混凝土结构的理论水平日趋成熟。日本非常重视型钢混凝土结构抗震性能的研究和工程应用。1950 年日本公布的建筑基本法明确规定 6 层以上的建筑物采用 SRC 结构。1953 年要求 7 层以上、1970 年要求 8 层以上建筑采用型钢混凝土结构。在日本型钢混凝土结构和木结构、钢结构以及钢筋混凝土结构并称为四大结构。1951—1956 年,日

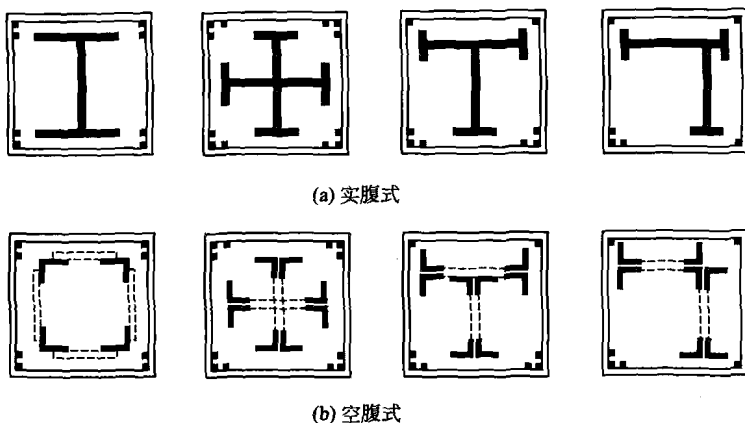


图 1-7 型钢混凝土的柱截面形式

本主要研究了型钢混凝土梁的抗弯性能, 型钢混凝土柱的偏压性能, 梁柱节点抗剪性能及型钢与混凝土的黏结性能等。1958 年制定了以累加强度为基本体系的《钢骨混凝土规范》。到 20 世纪 60 年代, 在地震中发现许多钢筋混凝土柱发生剪切破坏, 而型钢混凝土结构的损坏极其轻微, 由此又促进了对 SRC 构件剪切性能的进一步研究, 并取得了防止剪切破坏的措施。

英国、美国等国家对型钢混凝土结构的研究开始于 20 世纪初, 主要应用在桥梁领域, 通过一系列试验, 研究学者们发现型钢混凝土柱的工作性能主要与轴向荷载稳定系数、长细比、截面特性及荷载有关。在 20 世纪 70 年代中期英国学者验证了利用纯钢柱的压力-弯矩关系曲线并引入新长细比, 可以计算钢骨柱的轴向破坏荷载。英国钢结构规范对型钢混凝土梁按组合截面进行弹性设计, 即取 0.7 倍型钢的屈服强度按弹性方法计算型钢, 然后按组合截面进行修正, 忽略混凝土抗拉强度。欧洲共同体组织 (ECCS-CEB-FIP-IABSE) 建议将型钢混凝土梁按照型钢混凝土腹板以及受压翼缘的钢板是否具有足够的刚度划分为密实截面和纤细截面, 对密实截面梁的正、负抵抗弯矩可以简化为塑性理论计算, 对纤细截面梁的正、负抵抗弯矩可以按弹性理论设计。

我国在国外研究的基础上, 先后进行了型钢混凝土梁的抗裂、抗弯、抗剪性能及刚度等研究, 进行了型钢混凝土构件的轴心受压、偏心受压性能研究, 进行了型钢混凝土边节点、十字形节点及顶层边柱节点的受力机理、抗剪性能、抗震性能的研究, 进行了型钢混凝土剪力墙的工作机理、破坏过程、抗剪强度及抗震性能研究。在实际工程中, 我国在 20 世纪 50 年代从前苏联引进了型钢混凝土结构并首先应用在工业厂房中。20 世纪 80 年代后期, 又逐渐应用于我国建筑业。表 1-1 列出了采用型钢混凝土结构的部分高层建筑。

表 1-1 采用型钢混凝土结构的部分高层建筑一览表

序号	工程名称	地点	高度 /m	层数		建筑面积 / $\times 10^4 \text{m}^2$	总用钢量 /t	结构体系
				地下	地上			
1	环球中心	上海	492	3	101	25.3	26000	筒中筒
2	深圳京基金融中心	深圳	439	4	98	22.1		框架-筒体+钢支撑
3	金茂大厦	上海	420	3	88	17.7	14000	框架-筒体
4	远华国际中心	厦门	390	4	88	28.0		框架-筒体
5	北京国贸中心三期	北京	330	3	73	18.0	40000	框架-钢支撑

续表

序号	工程名称	地点	高度 /m	层数		建筑面积 / $\times 10^4 \text{m}^2$	总用钢量 /t	结构体系
				地下	地上			
6	大连国贸	大连	341	5	78	32		框架-筒体
7	地王大厦	深圳	324.751	3	68	13.8	12000	框架-筒体
8	赛格广场	深圳	278.6	4	70	15.8	10000	框架-筒体
9	上海世贸广场	上海	248	3	60	14	10000	框架-筒体
10	武汉国际证券大厦	武汉	243	3	68	13.0	18000	框架-筒体
11	深圳招商银行大厦	深圳	234	3	54	11		框架-筒体
12	上海交银大厦(北)	上海	230	4	55			框架-剪力墙结构
13	浦东国际金融大厦	上海	230	2	53	11.4	11000	框架-筒体
14	京广中心	北京	208	3	57	13.7	19000	框架-剪力墙结构
15	国际商会中心	深圳	204.5	3	54	12		型钢混凝土框架-筒结构
16	森茂大厦	上海	203	4	46	11.0	8000	框架-筒体
17	大连远洋大厦	大连	201	4	51	7.0	5000	框架-剪力墙结构
18	上海交银大厦(南)	上海	197	2	48			框架-剪力墙结构
19	陕西信息大厦	西安	189	3	52	7.5		型钢混凝土-筒中筒
20	京城大厦	北京	182	4	52	11.0	12000	钢框架-钢支撑
21	上海世界金融大厦	上海	174	3	43	8.44	3300	框架-剪力墙结构
22	海南财政金融中心信托大厦	海口	180	3	54	10.3		型钢混凝土-筒中筒
23	上海力保中心	上海	172	2	40			框架-筒体
24	新金桥大厦	上海	157	2	38	4.0	7000	框架-筒体
25	深圳发展中心	深圳	165	1	43			框架-剪力墙结构
26	期货大厦	上海	157	3	42			框架-筒体
27	国贸大厦二期	北京	156	3	39	8.6	12000	框架-剪力墙结构
28	上海银冠大厦	上海	156	3	38			框架-剪力墙结构
29	北京财富一期	北京	1518	2	40	10	6100	框架-剪力墙结构
30	LG大厦	北京	141	4	31	15.0	14000	框架-筒体
31	深圳华融大厦	深圳	134	3	32	7.35	9810	框架-筒体
32	城市天地广场	深圳	126	3	41	19		钢支剪力墙结构
33	大连森茂大厦	大连	109	2	24	4.6	3530	框架-钢支撑
34	广州远洋公寓	广州	102	2	28	2.5	2000	钢框架-剪力墙结构
35	深圳华侨城天鹅堡	深圳	102		34	8.67	6762	型钢混凝土框支梁柱
36	北京城建大厦	北京	98.4	3	28	12	7000	框架-筒体

1.5 钢管混凝土

1.5.1 钢管混凝土的特点

钢管混凝土，英文名称为“concrete filled steel tubular”，简称CFST，是指在钢管中填