

# 组合结构设计原理

刘 清 主编  
阿肯江·托乎提 副主编

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书简要介绍了钢—混凝土组合结构的发展简史及相关材料的一些机械性能,重点阐述了钢管混凝土构件、钢筋混凝土结构构件和钢—混凝土组合楼盖的设计方法,以及施工原理与计算理论。

本书是基于中华人民共和国行业标准《钢筋混凝土结构设计规程》(YB9082—97)、冶金工业出版社出版的行业标准《钢—混凝土组合楼盖结构设计施工》以及国家建筑材料工业局于1989年颁布的《钢管混凝土结构设计和施工规程》等编写而成的。在编写过程中,力求反映出我国现阶段有关组合结构设计的基本概念、基本理论以及基本方法。

本书是高等学校土木工程专业及相关专业的本科教材,也可供从事土木工程设计、施工、科研的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

组合结构设计原理/刘清主编. —重庆:重庆大学出版社,2002.11

土木工程专业本科系列教材

ISBN 7-5624-2389-X

I. 组 ... II. 刘 ... 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(2002)第 009549 号

## 组 合 结 构 设 计 原 理

刘 清 主 编

阿肯江·托乎提 副主编

责任编辑:曾显跃 版式设计:曾显跃

责任校对:蓝安梅 责任印制:张永洋

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鹤盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400044

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:[fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn)(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆华林印务有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:11.25 字数:280千

2002年11月第1版 2002年11月第1次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2389-X/TU·88 定价:15.00元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

# 前言

本书是《钢结构基本原理》的后续课程教材。全书内容共分为4章。第1章主要介绍组合结构的发展简史及相关材料的一些特性;第2章介绍钢管混凝土的计算和设计方法;第3章介绍钢骨混凝土结构构件的计算方法及设计原理;第4章介绍钢—混凝土组合楼盖结构设计方法、施工原理及计算方法。

本书是高等学校土木工程类专业的本科教材,力求反映出我国现阶段有关组合结构设计的基本概念、基本理论以及基本方法。

本书是基于中华人民共和国行业标准《钢骨混凝土结构设计规程》(YB9082—97)、冶金工业出版社出版的行业标准《钢—混凝土组合楼盖结构与施工》以及国家建筑材料工业局于1989年颁布的《钢管混凝土结构设计和施工规程》等编写而成的。在编写过程中,力求重点突出、概念清晰、理论联系实际。

参加本书编写工作的有:刘清、阿肯江·托乎提、赵惠敏(第4章)和王文达(第2章)。全书由刘清任主编,阿肯江·托乎提任副主编。

本书适合在建筑工程学院学习的专科生、本科生、研究生以及从事建筑结构工程设计的技术人员。

由于本书是第一次编写和出版,加上编者水平有限,书中难免有不足之处,恳请专家、教师和读者提出宝贵的意见。

在编写本教材的过程中,参考了许多相关书籍和文献,在此向这些书籍的作者们表示诚挚的感谢!

编者  
2002年8月

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 组合结构的一般概念及其特点 .....	1
1.1.1 组合楼板 .....	2
1.1.2 组合梁 .....	2
1.1.3 钢管混凝土柱 .....	2
1.1.4 钢骨混凝土构件 .....	3
1.2 国内外组合结构的发展及应用 .....	4
1.2.1 国外的发展情况 .....	4
1.2.2 国内的发展情况 .....	6
1.3 组合结构材料 .....	8
1.3.1 组合楼板和组合梁结构材料 .....	8
1.3.2 钢骨混凝土组合构件材料 .....	8
1.3.3 组合结构构件中混凝土及钢筋材料 .....	9
<b>第2章 钢管混凝土基本计算理论</b> .....	12
2.1 概述 .....	12
2.2 轴心受压构件的基本工作性能 .....	14
2.2.1 弹性工作阶段 .....	15
2.2.2 弹塑性工作阶段 .....	15
2.2.3 强化阶段 .....	15
2.3 轴心受压构件的强度及稳定计算 .....	16
2.3.1 钢管混凝土轴心受压短柱承载力计算 .....	16
2.3.2 钢管混凝土柱的抗拉强度 .....	16
2.3.3 轴心受压构件的稳定计算 .....	17
2.4 偏心受压构件的承载力计算 .....	17
2.4.1 基本工作性能 .....	17
2.4.2 计算方法 .....	17
2.4.3 钢管混凝土偏压柱强度计算的流程图 .....	19
2.4.4 例题解析 .....	21
2.5 钢管混凝土格构柱的承载力计算 .....	25
2.5.1 基本计算原则 .....	25
2.5.2 例题解析 .....	30
2.6 钢管混凝土在桥梁中的应用 .....	32
<b>第3章 钢骨混凝土构件设计与计算</b> .....	36
3.1 概述 .....	36
3.1.1 钢骨混凝土结构与组合结构 .....	36

3.1.2	钢筋混凝土结构的特点 .....	37
3.1.3	钢筋混凝土构件的力学特性与计算的基本原则 .....	38
3.2	钢筋混凝土梁 .....	39
3.2.1	钢筋混凝土梁正截面承载力 .....	39
3.2.2	钢筋混凝土梁斜截面承载力 .....	44
3.2.3	梁上开洞与补强 .....	48
3.2.4	钢筋混凝土受弯构件的变形和裂缝宽度计算 .....	50
3.3	钢筋混凝土柱 .....	53
3.3.1	钢筋混凝土柱正截面的受力性能与破坏形态 .....	53
3.3.2	钢筋混凝土柱正截面承载力计算 .....	56
3.3.3	斜截面的破坏形态 .....	66
3.3.4	钢筋混凝土柱斜截面承载力计算 .....	68
3.3.5	钢筋混凝土柱截面限值 .....	69
3.4	钢筋混凝土剪力墙 .....	71
3.4.1	有边框与无边框钢筋混凝土剪力墙 .....	71
3.4.2	钢筋混凝土剪力墙正截面承载力计算 .....	72
3.4.3	钢筋混凝土剪力墙斜截面承载力计算 .....	73
3.5	钢筋混凝土框架梁柱节点 .....	78
3.5.1	框架梁柱节点的受力性能与破坏形态 .....	78
3.5.2	影响钢筋混凝土框架梁柱节点承载力的主要因素 .....	79
3.5.3	框架梁柱节点抗剪度验算 .....	80
3.5.4	框架梁柱节点核心区内力的传递 .....	83
3.6	钢筋混凝土柱脚 .....	87
3.6.1	柱脚的分类与主要力学特性 .....	87
3.6.2	非埋入式柱脚 .....	88
3.6.3	埋入式柱脚 .....	90
3.7	钢骨的拼接 .....	96
3.7.1	钢骨拼接的基本要求 .....	96
3.7.2	钢骨拼接处的内力计算 .....	97
3.7.3	钢骨拼接处的补强 .....	101
3.8	钢筋混凝土构件的构造要求 .....	106
3.8.1	一般构造要求 .....	106
3.8.2	梁 .....	108

3.8.3	柱	109
3.8.4	剪力墙	110
3.8.5	框架梁柱节点	111
3.8.6	柱与柱的连接	114
3.8.7	梁与墙的连接	115
3.8.8	柱脚	116
3.8.9	钢骨拼接	118
<b>第4章</b>	<b>组合楼盖设计</b>	<b>119</b>
4.1	组合楼板与非组合楼板的设计	119
4.1.1	组合楼板与非组合楼板的应用特点	119
4.1.2	压型钢板及栓钉的强度设计值和板型选用	121
4.1.3	压型钢板在施工阶段的受弯承载力及挠度计算	123
4.1.4	压型钢板组合楼板的承载力计算	124
4.1.5	组合楼板的挠度、裂缝及自振频率验算	127
4.1.6	组合楼板的构造要求	128
4.2	组合梁设计	129
4.2.1	组合梁的特点及类型	130
4.2.2	组合梁的基本设计原则	131
4.2.3	简支组合梁设计	135
4.2.4	连续组合梁设计	142
<b>附录</b>		<b>145</b>
附录 1	国标及国内已生产的 H 型钢	145
附录 2	冶标规定的焊接 H 型钢	153
附录 3	柱的计算长度系数	157
附录 4	碳素结构钢、低合金结构钢的牌号和化学成分	168
附录 5	焊顶用钢材的化学成分	168
附录 6	碳素结构钢、低合金结构钢的物理力学性能	169
附录 7	压型钢板、钢梁和焊钉的强度设计值	169
<b>参考文献</b>		<b>171</b>

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 组合结构的一般概念及其特点

广义上讲,所有高层建筑结构都是组合结构,因为一个功能性建筑不可能只用钢或只用混凝土建造。

两种不同性质的材料组合成为一个整体而共同工作的构件称为组合构件。组合结构是由组合构件组成。例如,钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种物理力学性能完全不同的材料组合而成。混凝土的抗压强度高而抗拉强度低。钢材的抗拉和抗压强度都较高。为了充分利用材料的力学性能,把混凝土和钢筋这两种材料组合在一起共同工作,使混凝土承受压力而钢筋主要承受拉力以满足工程结构的安全、经济、适用等要求。两种不同性质的材料扬长避短,各自发挥其特长,因此具有一系列的优点。

组合结构依据组成材料的不同有诸多类型。实际上有些已经普及应用的结构也是组合结构。例如,人们早已熟悉的钢筋混凝土结构就是由钢筋与混凝土组合而成,并形成一种独立的建筑结构类型。组合墙梁是砌体与钢筋混凝土的组合。本书主要叙述钢与混凝土组合而成的组合结构,钢筋混凝土结构不在讨论的范围内。

50 多年来,组合结构的研究与应用得到迅速发展,至今已成为一种公认的新的结构体系,与传统的四大结构,即钢结构、木结构、砌体结构和钢筋混凝土结构并列,已扩展成为五大结构。

钢与混凝土组合结构依照钢材形式与配钢方式不同又有多种类型,并且一些新的结构形式仍在不断出现。目前研究较为成熟与应用较多的主要有以下几种钢与混凝土组合构件:

- ①组合楼盖;
- ②组合梁;
- ③钢管混凝土柱;
- ④钢骨混凝土构件。

### 1.1.1 组合楼板

在高层建筑结构中,采用高强、轻规格的压型钢板楼盖,上面浇筑混凝土面层。这种做法已成为标准的楼板构造做法。压型钢板是将薄钢板压成各种形状,可和浇注的混凝土面层形成组合作用。

在压成各种形式的凹凸肋与各种形式槽纹的钢板上浇筑混凝土而制成的组合楼盖,依靠凹凸肋及不同的槽纹使钢板与混凝土组合在一起。由于钢板中肋的形式与槽纹图案的不同,钢与混凝土的共同工作性能有很大区别。在与混凝土共同工作性能较差的压型钢板上可焊接附加钢筋或栓钉,以保证钢材与混凝土的完全组合作用。

组合楼盖的特点就是利用混凝土造价低、抗压强度高、刚度大等特点作为板的受压区,而受拉性能好的钢材放在受拉区,代替板中受拉纵筋,使得两种材料合理受力,各得其所,都能发挥各自的优点。其突出的优点还在于受压型钢板在施工时先行安装,可作为浇筑混凝土的模板及施工平台。这样不仅节省了全部昂贵而稀缺的木模板,获得一定的经济效益,而且使施工安装工作可以数个楼层立体作业,大大加快了施工进度。因此,近年来组合板应用发展很快,已在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。

形成的组合楼盖可作为水平隔板,在每个楼层上将所有的竖向构件联系在一起,将剪力水平传递到各个支承构件上。此外,它还可以作为钢梁受压翼缘的稳定性支撑。

由隔板剪力产生的剪应力大部分由组合楼盖中的混凝土板承担,因为组合楼盖中的混凝土板在平面内的刚度比压型钢板大许多。因此,水平力必须通过焊接的栓钉从楼板传递到梁的上翼缘。组合楼盖除承受重力荷载外,还作为传递水平荷载的构件。在组合结构的抗震设计中,组合楼盖的抗震设计是一个重要的内容。

### 1.1.2 组合梁

将钢梁与混凝土板组合在一起形成组合梁。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。钢梁可以用轧制或焊接钢梁。钢梁形式有工字钢、槽钢或箱形钢梁。混凝土板与钢梁之间用剪切连接件连接,使混凝土板作为梁的翼缘与钢梁组合在一起,整体共同工作形成组合 T 形梁。其特点同样是使混凝土受压,钢梁主要是受拉与受剪,受力合理,强度与刚度显著提高,充分利用了混凝土的有利作用。并且由于侧向刚度大的混凝土板与钢梁组合连接在一起,很大程度上避免了钢结构容易发生整体失稳的弱点。在一定的条件下,组合梁的整体稳定与局部稳定可以不必验算,这也省去了相当一部分钢结构为保证稳定所需要的各种加劲肋的钢材。与传统的非组合梁的应用相比,降低了梁的高度以至建筑物的层高与总高。

### 1.1.3 钢管混凝土柱

在钢管中填充混凝土的结构称为钢管混凝土结构。一般在混凝土中不再配纵向钢筋与钢箍,所用钢管一般为薄壁圆钢管,方钢管混凝土结构应用较少。

在钢管混凝土受压构件中,钢管与混凝土共同承担压力。但就薄壁圆钢管而言,在压力的作用下,容易发生局部屈曲,是很不利的。而在管中填充混凝土,大大改善了管壁的侧向刚度,因此对钢管的受压极为有利。钢管混凝土构件受力性能的优越性更主要地表现在合理的应用

了钢管对混凝土的紧箍力。这种紧箍力改变了混凝土柱的受力状态,将单向受压改变为三向受压,混凝土的抗压强度得到了很大程度上的提高。使混凝土的抗压性能更为有利地发挥,从而构件断面可以大大减小。

钢管的主要作用是约束混凝土,所以圆形钢管是最理想的。钢管主要承受环向拉力,恰好发挥钢材受拉强度高的特长。钢管虽然也承受纵向与径向压力,但是钢管中被混凝土充填,所以对防止钢管失稳极为有利。钢管混凝土柱充分发挥了混凝土和钢材各自的优点,特别是避免了薄壁钢材容易失稳的缺点,所以受力非常合理,大大节省材料。据资料分析,其与钢结构相比可节省钢材 50%左右,降低造价 40%~50%;与钢筋混凝土柱相比,还节省水泥 70%左右,因而减轻自重 70%左右。钢管本身就是浇筑混凝土的模板,故可省去全部模板,并不需要支模、钢筋制作与安装,简化了施工。比钢筋混凝土柱用钢量约增加 10%。钢管混凝土柱的另一突出优点是延性较好,这是因为一方面其外壳是延性很好的钢管;另一方面约束混凝土比混凝土单向受压的延性要好得多。

由于钢管混凝土主要是利用强度很高的混凝土受压,所以这种构件最适用于作轴心受压与小偏心受压构件。由于它是圆形截面,而且断面高度较小,所以在受弯为主的结构转变为受压为主。钢管混凝土不适用于受弯构件,故梁一般采用其他结构形式。钢管混凝土结构的最大弱点是圆形截面的柱与矩形截面的梁连接较复杂,节点的施工处理较为复杂。这是影响钢管混凝土结构进一步推广的一大障碍。此外,钢管的外露,使其也具有般钢结构防锈、防腐蚀及防火性能较差的弱点。

#### 1.1.4 钢管混凝土构件

钢管混凝土构件是在混凝土中主要配置轧制或焊接型钢。在配置实腹型钢的构件中还配有少量钢筋与钢箍。这些钢筋主要是为了约束混凝土,是构造需要。既配有钢筋,在计算中亦可考虑其辅助受力。

钢管混凝土构件主要有两种类型:一种是钢管混凝土柱,另一种是钢管混凝土剪力墙。

钢管混凝土构件的特点是在混凝土中配置的是型钢,这些型钢可以是轧制的也可以是焊接的。一般在大型建筑中经常配置焊接型钢,可以根据构件截面大小、受力特点,考虑到受力的合理性,灵活地选择焊接型钢各个板件宽度与厚度。所配型钢的形式有角钢、工字钢、宽翼缘工字钢、双工字钢、双槽钢、十字型钢和箱形方钢管等。由于截面增加了房间的使用面积,也使房间中的设备、家具更好布置。由于梁截面高度的减小而增加了房间净空,还降低了房屋的层高与总高。强度与刚度的显著提高,使其可以应用于大跨、重荷、高层及超高层建筑中。在大跨、重荷和超高层建筑中,若使用钢管混凝土构件,构件断面很大,或是影响工艺布置,或是影响使用,勉强采用钢筋混凝土构件实际上已成为不可能或非常不合理。钢管混凝土柱不仅强度、刚度明显增加,而且延性获得很大的提高,从而成为一种抗震性能很好的结构,所以尤其适用于地震区。在高烈度地震区的超高层建筑中若再采用钢管混凝土构件,整个结构的延性实际上达不到“大震不倒”的要求。比起钢结构建筑,采用钢管混凝土构件节省了大量钢材,降低了造价,而且避免了钢结构刚度较小,侧向位移较大,而钢管混凝土构件则侧向刚度较大,侧向变形较小,因此,也往往将钢管混凝土构件用于高层建筑的下面数层。钢管混凝土构件的另一优点是,在施工安装时,梁柱内型钢骨架本身构成了一个强度、刚度较大的结构体系。可以用为浇筑混凝土时挂模、滑模的骨架,不仅大量节省了模板支撑,也可以承担施工荷载。由于

没有模板支撑,大大简化了支模工程,而且也创造了较大的工作面,不受梁柱模板支撑的影响。

钢骨混凝土构件中配置的型钢形式总的可分为实腹式型钢与角钢骨架的桁架式配钢两大类。前者的强度、延性很高,远比后者优越,可用于大型、中型及很高的建筑,但是配角钢骨架比配实腹钢可更多地节省钢材,其含钢量比钢筋混凝土结构稍大或基本相当,而其强度、刚度和延性则比钢筋混凝土结构有较大提高,所以常在荷载、跨度、高度不是特别大的结构中采用。钢骨混凝土构件可以用做梁、柱、节点、框架剪力墙及筒体等各种结构中。

除了以上主要的组合结构形式以外尚有一些其他的组合结构。在火电厂等厂房中常用一种外包钢结构,即在混凝土柱四角配以角钢。其受力性能和计算方法类似于配置角钢骨架的型钢混凝土柱,主要优点是型钢外露,便于和各种中、小的钢附件相连接,可以省去许多预埋件,而且比较灵活。因此,适用于管道多、附件多、预埋件多的工业厂房,例如火电厂、化工厂等。但是由于角钢外露,带来的缺点是防锈、防腐蚀、防火性能较差,需要保持日常维护。外包钢混凝土的另一优点是还可以用于旧厂房的加固,实际上这在加固工程中早已普遍应用。此外,外包钢筋混凝土柱因为角钢外露,对其外观有影响,所以目前主要局限于用于工业厂房,在民用建筑、公共建筑中尚难推广。

钢纤维混凝土是近几十年出现的有别于钢筋混凝土和型钢混凝土的新型结构形式。它具有良好的抗拉、抗弯、抗冲切、抗折及耐疲劳的特性。因为钢纤维在混凝土中的分布不是定向的,而是在各向随机分布,从宏观角度来说,近乎各向均匀分布,因此,它不仅能提高结构的抗拉、抗弯、抗剪和抗冲击强度,而且更适合于应力复杂的部位。钢纤维混凝土的冲击韧性明显提高,不仅能提高构件强度,还可使构件的脆性破坏形态得到改善。由于钢纤维分布在混凝土内部的各部分及各方向,因此,对防止裂缝(例如干缩裂缝)的开展具有独到的功效。但是,因为目前钢纤维价格比较昂贵,因而不可能大量地、全面地使用,主要用于桥面、路面、机场道路、节点等结构的关键部位。

此外,在混凝土中加配玻璃纤维或加配植物纤维能改善构件的受力性能。

钢筋混凝土外包钢板箍构件特别是外包碳纤维是近年来出现的一种组合结构形式。它可以用于兴建工程,也可以用于旧房屋结构加固。构件(梁、柱)端部或跨间包钢板箍后,不仅能局部提高构件抗压强度与抗剪强度,而且能改善构件与结构延性,钢板箍常加于柱端及梁的剪力较大区等。

方钢管混凝土构件逐渐在工程中更多地被采用。它与圆形钢管混凝土相比,由于具有平面的外表,克服了钢管混凝土与梁柱连接复杂的弱点,从而使节点构造大为简化,并省工省料,但是它对混凝土的约束能力显然不如圆钢管。除此之外,它还具有钢管混凝土的各种优点。

## 1.2 国内外组合结构的发展及应用

### 1.2.1 国外的发展情况

由于组合结构的一系列优点,西方国家及日本等国在 20 世纪初即开始应用。开始采用组合结构时,人们并没有意识到这些结构的突出优点。例如,开始采用钢骨混凝土构件时,并没有考虑混凝土对构件承载能力的提高,因此仍按钢结构来计算,只是认为在型钢外包了混凝土

外壳能对钢结构起到防火与防护作用。在高层建筑中采用钢骨混凝土结构,可以减少高层钢结构的侧向位移,亦即仅仅利用其刚度。1905年日本的田岬旧东京仓库,1918年的东京海上大厦,1921年设计建成的日本兴业银行(是一幢面积14 000m<sup>2</sup>,高约30m的型钢混凝土建筑),这些是早期采用钢骨混凝土结构的一批建筑。随着工程应用的实践及科学研究的深入进行,发展组合结构还具有更多、更突出的优点。尤其是日本经历了1923年的关东大地震,1968年的十胜冲地震以及1995年的孤神地震后,发现在地震中大量房屋建筑遭受破坏,但少量组合结构受到的破坏却很轻微,这就掀起了日本研究与应用组合混凝土结构的热潮。因此,近30年来日本是世界上应用组合结构最多的国家,也是研究组合结构较多、较深入的国家之一。

在欧美,1908年Burr做了空腹式配钢(即配角钢空间桁架)的钢骨混凝土柱的试验,已经发现混凝土的外壳能使柱的强度和刚度明显提高。1923年加拿大开始做空腹式配钢的型钢混凝土梁的试验,其后英国的R. P. Johnson、美国的John P. Cook等学者进行了大量试验研究。1928年日本的齐田时术郎做了中心受压柱试验,1929年浜田稔做了偏心受压柱试验,1932年内藤多伸做了梁柱节点试验,1937年棚桥凉做了梁的试验。20世纪30年代开始建造了一批组合结构建筑。

关于组合结构,欧美最初研究配空腹式角钢架型钢混凝土结构,而后来主要着重研究应用配实腹钢骨的结构。日本在1930—1970年期间建造的组合结构以配空腹式钢骨为主要形式,1970年以后建成的建筑是以配实腹式型钢为主要形式。1964年前组合结构主要用于建造6~10层的建筑物。1964年以后开始就用于高层、超高层建筑中。日本是一个多地震国家,按照日本抗震规范规定,高度在45m以上的建筑即不允许采用钢筋混凝土结构。因此,在日本6层以上建筑,采用型钢混凝土结构的约占45.2%,10~15层的建筑约有90%采用型钢混凝土结构;16层以上的建筑则约有50%采用型钢混凝土结构,50%采用钢结构。

关于型钢混凝土结构的设计计算理论,国际上主要有三种。欧美的计算理论基于钢结构的计算方法,考虑混凝土的作用,在试验基础上将试验曲线进行修正,突出反映在组合柱的计算上。前苏联关于型钢混凝土结构的计算理论是基于钢筋混凝土结构的计算方法,认为型钢与混凝土是完全共同工作的,有些试验证明,前苏联计算方法在某些方面偏于不安全。第三种类型是日本建立的叠加方法。通过比较证明,日本的计算方法偏于安全。

目前国外已应用组合结构建成了大量的高层、超高层建筑以及一些工业建筑。国外建成的典型的型钢混凝土建筑有:美国休斯顿第一城市大厦,49层,高207m;休斯顿得克斯商业中心大厦,79层,高305m;达拉斯第一国际大厦,72层,高276m;休斯顿海湾大楼,52层,高221m;日本北海饭店,36层,高121m;新加坡财政部办公大楼,55层,高242m;雅加达中心大厦,21层,高84m;悉尼款特斯中心,高198m。

压型钢板混凝土组合楼盖最早应用于欧美国家,当时把压型钢板主要作为浇筑混凝土的永久性模板及施工操作平台,并能数楼层立体作业,加快施工进度。为了使其能以承受施工时混凝土的自重及施工活荷载,压型钢板必须保证一定的强度与刚度,因此压制成带凹肋形。而使用阶段结构的承载及变形仍只考虑钢筋混凝土板的作用。但是,随着应用与研究的深入,发现压型钢板的存在能提高板的承载能力。如果能保证压型钢板与混凝土结合得更好,两者基本能组合成整体,共同工作,压型钢板能代替钢筋承受拉力,这样可节约大量钢筋,相应地减少了钢筋的制作安装等施工费用。因此,作为一种新的结构形式,组合楼盖的研究日益深入广泛地开展。组合楼盖设计计算的关键问题是解决压型钢板与混凝土之间的组合剪切计算。美国

Kberg 教授、Porter 教授等首先在试验的基础上,提出了组合面纵向剪切承载能力的计算方法,使得组合楼盖的设计计算理论推进一步,并进一步推广至世界其他国家。

钢梁支承钢筋混凝土板的结构很早就已应用,但未考虑它们的组合作用,而是各自作为单独构件进行设计计算。美国最早考虑两者的组合:连接成整体,把混凝土板视为梁的一部分(翼缘),将节省大量钢材与造价,因而其很快兴起应用于桥梁中,并推广应用于房屋建筑中。德国在二次世界大战以后百废待兴,急需加速恢复建设,因此,将组合梁大量用于桥梁工程与房屋建筑,与用混凝土结构相比不仅节省大量钢材、资金,而且大大加快了建设进度。组合梁的大量应用,推动了组合梁的试验研究工作迅速发展。研究应用较早的英国、美国很快推广到日本、印度、前苏联等国。因此,与设计理论发展的同时,许多学者对连接件的试验研究、设计计算方法以及施焊专用机具进行了广泛的研究。美国、英国等首先用试验得出了剪力件强度计算公式,并纳入英国规范 CP110;同时,焊接带头栓钉的栓焊机等专业机具的问世,大大简化并加速了焊接连接件的施工作业,使组合梁的推广应用更具前景。

钢管混凝土结构是在型钢混凝土结构、配螺旋箍混凝土结构以及钢管结构的基础上发展起来的。早在 19 世纪英国赛文铁路桥中采用了钢管桥墩,并在管中浇灌了混凝土,但是其目的是防止钢管内部锈蚀。真正应用钢管混凝土结构是在钢管结构采用以后,发现在钢管中填筑混凝土,不仅可防止钢管内部锈蚀,增强钢管的稳定性,而且抗压强度大大提高。

前苏联的罗斯诺夫斯基等在试验研究方面做了大量工作。英国的聂基(Neogi P. K.)等人研究了钢管内混凝土三向受压的强度提高。近年来,英国曼彻斯特大学一直在从事着钢管混凝土柱的受力性能的试验与研究,同时研究钢管混凝土柱与钢梁的连接节点这一关键问题。最近他们主要集中研究方钢管混凝土柱。美国的费隆、克劳尔和派克等学者自 20 世纪六七十年代以来,对钢管混凝土结构的研究进行了大量的工作。

鉴于组合结构的应用日趋广泛,研究工作也逐步完善、配套。因此,各国相继制定与颁发了各种组合结构规范或专项结构的设计规程,或在国家设计规范中纳入组合结构设计部分。在美国混凝土协会制定的规范 ACI—318 中列入了钢骨混凝土柱、钢管混凝土柱的设计部分。早在 1944 年美国颁发的《公路桥涵设计规范》,1946 年颁发的《房屋钢结构设计、制造和安装规范》均纳入了组合梁设计部分。1979 年美国钢结构学会(AISC)颁布了《钢与混凝土组合柱设计规范》。在英国的标准规范和桥梁法规等都纳入了有关组合柱、组合梁的设计部分。前苏联电力建设部在 1951 年即出版了《劲性钢筋混凝土设计规范》,1978 年又出版了《劲性钢筋混凝土结构设计指南》(CH3—78)。欧洲钢结构协会(ECCS)1981 年出版了《组合结构规程及说明》,1985 年欧洲经济共同体(EEC)建筑与土木工程部制定了统一标准规范《钢与混凝土结构》。德国早在 1945 年即制定了《桥梁组合梁标准》(DIN—1078),1956 年制定了《房屋建筑组合梁标准》(DIN—4239)。在日本,建筑学会 1958 年颁发了《型钢混凝土结构计算标准》,后来经历了 1968 年的十胜冲地震和 1978 年的宫城县冲地震之后,对原有的计算理论又作了进一步的研究、改进与完善,分别于 1975 年修订颁发了第二版,1987 年又经筹备组三次修订颁发。

### 1.2.2 国内的发展情况

我国在组合结构方面的研究与应用始于 20 世纪 80 年代。西安建筑科技大学与原冶金部建筑研究总院最早开始进行组合结构的研究。继而有西南交通大学、重庆建筑大学、中国建筑科学院、华南理工大学、东南大学、清华大学等高等院校、科研单位也展开了广泛的研究。西安

建筑科技大学系统地研究了各种配钢方式的型钢混凝土梁、柱、节点等各种构件的基本性能。进而在20世纪90年代又进行了钢骨混凝土框架结构的模拟地震动态试验、拟动力试验,应用结构的静、动力特性与分析方法,在我国自己的试验研究基础上制订了一套完整的设计计算理论。1989年曾提出了《型钢混凝土结构的设计建议》。1997年原冶金工业部主要参考日本规程,编制并颁发了行业标准《钢筋混凝土设计规程》。

在我国还应结合我国的国情,虽然我国的钢产量位居世界第一,但是钢材的价格还是相对较高,因此,空腹式配钢混凝土结构仍具有推广应用前景。目前在我国主要是在超高层建筑中应用配实腹钢的型钢混凝土结构。

20世纪80年代中期,我国开始引进与研究组合楼盖这种结构形式,由于这种结构既省去全部模板工程,又可以立体作业,不但省去了大量木材与人力,而且大大加快了施工进度,很快受到许多建设者的欢迎。较早采用这种结构作为楼板的典型建筑有:上海锦江饭店、静安饭店、深圳发展中心大厦、北京香格里拉饭店、京城大厦、长富宫中心等高层建筑;采用组合楼盖的工业厂房有沈阳海热电厂等。

我国从20世纪50年代开始,首先在桥梁中应用组合梁结构,也进行过少量试验。真正深入研究、广泛应用还是在20世纪80年代以后,主要研究单位有北京钢铁设计研究总院、哈尔滨建筑大学、清华大学等大专院校、科研设计单位。组合梁的计算与应用中的一个关键问题是连接问题。

我国对钢管混凝土结构的研究始于20世纪80年代,主要研究它的受力性能、设计计算方法,并日臻完善。对其研究较早的有原中国科学院哈尔滨土建研究所、哈尔滨建筑大学、中国建筑科学研究院、苏州混凝土与水泥制品研究院等高等院校和科研院所。

20世纪80年代以来,在我国北京、上海等地相继建成了一批组合结构的高层建筑。典型的建筑有北京香格里拉饭店,高24层;北京长富宫饭店,地上25层,地下3层;上海瑞金大厦,地上27层,地下一层,高107m;广州、重庆也先后建成一批型钢混凝土结构高层建筑。采用配空腹式角钢骨架型钢混凝土柱的典型建筑有:江苏太仓俞山饭店、北京王府井大街的SRC柱升板建筑。用于工业建筑的有某电厂房、郑州铝厂蒸发车间等。

近几十年来,特别是近20年来在大量学者的研究成果与应用基础上,各部陆续制定与颁发了一些专项规程(行业标准)。1990年国家建材工业局颁发《钢管混凝土结构设计与施工规程》(JCJ101—89)。中国工程建设标准化协会1991年制定了《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS28—90)。随后,原能源部电力规划设计管理局于1992年颁布了《火力发电厂主厂房钢—混凝土结构设计暂行规定》(DLGJ99—91),内容包括钢管混凝土结构、外包钢混凝土结构和组合梁结构。1997年原冶金工业部颁发了《钢骨混凝土结构设计规程》,这个规程主要是参考日本标准编制的。此外,现行国家标准《钢结构设计规范》(GBJ17—88)中已将组合梁列为一章,但是比较简单。这些规程、规范的颁发,一方面推动了组合结构在我国的推广应用,另一方面也说明了目前工程界急切需要有一部完整的、统一的组合结构设计规范,可供设计者遵循。这部规范应当是主要建立在我国研究成果的基础上,比较成熟、完善,又适合于我国国情的规范,这应该是我们工程界的研究、设计、施工人员及有关学者共同完成的一项有意义的任务。

### 1.3 组合结构材料

#### 1.3.1 组合楼板和组合梁结构材料

##### (1) 压型钢板

压型钢板采用现行的国家标准《碳素结构钢》(GB700)中规定的 Q215、Q235 牌号钢,其化学成分与物理性能见附录 4 中的附表 4.1 与附录 6 中的附表 6.1,钢材强度设计值见附录 7 中的附表 7.1。当有可靠试验依据或实践经验时,也可采用具有材质相似的其他材料。

组合板用压型钢板,应保证抗拉强度、延伸率、屈服点、冷弯试验合格以及硫、磷的极限含量。焊接应保证碳的极限含量。

##### (2) 组合梁

组合梁中钢梁的材质宜采用 Q235 沸腾钢或镇静钢、16Mn 和 15Mn 钢,其质量应分别符合现行的国家标准《碳素结构钢》(GB700)和《低合金结构钢》(GB1519)技术要求。若采用相似质量的其他材料,应符合国家标准的相关技术要求。

组合钢梁的材质应按结构重要性、荷载特征、工作环境等不同的条件和情况进行选择。钢材的机械性能应保证抗拉强度、延伸率、屈服点、冷弯试验合格以及硫、磷的极限含量。焊接应保证碳的极限含量。钢梁、钢材的强度设计值,根据钢材的厚度分组,见附录 7 中的附表 7.2 和附表 7.3。

##### (3) 抗剪连接件

组合楼盖用抗剪连接件有焊钉、槽钢弯筋等。焊钉应采用优质 DL 钢,其化学成分、机械性能以及其抗拉强度设计值分别见附录 5 中的附表 5.1、附录 7 中的附表 7.4。对于重要建筑物或受动荷载作用的焊钉应选用镇静钢,并保证其冷拉和冷拔性能。

槽钢弯筋应选用符合现行国家标准 GB700 中 Q235 牌号钢,其化学成分、机械性能以及其抗拉强度设计值分别见附录 4 中的附表 4.1、附录 6 中的附表 6.1 和附录 7 中的附表 7.2。

#### 1.3.2 钢筋混凝土组合构件材料

1) 钢筋混凝土构件的钢筋材料可采用国产钢材。国产钢材宜用 Q235B、Q235C、Q235D 等级的碳素结构钢,质量标准应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》(GB700)及《低合金高强度结构钢》(GB/T1591)的要求。

2) 钢筋构件钢材应按现行国家标准保证抗拉强度、伸长率、屈服强度、冷弯试验、冲击韧性合格及硫、磷和碳含量的限制值,钢材的强度比不应低于 1.2,应具有可焊性。采用现行国家标准的国产结构钢材的力学性能及强度设计值见表 1.1。钢材的弹性模量  $E_{ss} = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

当采用国外钢材时,钢材化学成分及其含量、力学性能、强屈比及可焊性等均应符合我国标准的规定。

3) 构件上的钢板厚度等于或大于 36mm,并承受沿厚板方向的拉力作用时,附加板厚方向的断面收缩率要求其值不得小于现行国家标准《厚度方向性能钢板》(GB5313)Z15 级规定的容许值。

4) 钢骨部分的焊接材料应符合下列要求:

① 手工焊接用的焊条应符合现行国家标准《碳素焊条》(GB5117)或《低合金钢焊条》(GB5118)Z15级规定,选用的焊条型号应与主体金属相匹配。

② 自动焊接或半自动焊接采用的焊丝和焊剂应与主体材质相匹配,焊丝应符合现行标准《焊接用钢丝》(GB1300)的规定。

表 1.1 国产 Q235 及 Q345 钢材的力学性能及强度设计值

钢号	钢材厚度/mm	极限抗拉强度最小值 $f_{tm}/(N\cdot mm^{-2})$	屈服强度 $f_{sy}/(N\cdot mm^{-2})$	强度设计值/( $N\cdot mm^{-2}$ )		
				抗拉、抗压、 抗弯 $f_m$	抗剪 $f_{sv}$	端面承压 (刨平顶紧) $f_{ce}$
Q235	$\leq 16$	375	235	215	125	320
	16 ~ 40		225	205	120	320
	40 ~ 60		215	200	115	320
	60 ~ 100		205	190	110	320
Q345	$\leq 16$	470	345	315	185	410
	16 ~ 35		325	300	175	410
	35 ~ 50		295	270	155	410
	50 ~ 100		275	250	145	410

注:  $f_{tm}$  钢结构惯用符号为  $f_u$ ;  $f_{sy}$  钢结构惯用符号为  $f_y$ ;  $f_m$  钢结构惯用符号为  $f$ ;  $f_{sv}$  钢结构惯用符号为  $f_v$ 。

5) 焊缝的强度设计值应按现行的国家标准《钢结构设计规范》(GBJ17)及现行的标准《高层民用建筑钢结构设计规范》(JGJ99)采用。

6) 钢骨部分适用的高强螺栓应符合现行国家标准《钢结构高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈与技术条件》(GB/T1228 ~ 1231)或《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》(GB/T3632 ~ 3633)的规定。高强度螺栓的设计预拉力值、摩擦面抗滑移系数值按现行国家标准《钢结构设计规范》(GBJ17)的规定采用。

7) 钢骨混凝土构件中使用的栓钉应符合现行国家标准《圆柱头焊钉》(GB10433)的规定。栓钉的直径规格宜选用 19mm 和 22mm,其长度不应小于 4 倍栓钉直径(常用生产规格宜选用 80mm、85mm、100mm、120mm、130mm、150mm)。栓钉的力学性能可采用制作栓钉材料的力学性能,但不应低于表 1.2 所列的要求。

表 1.2 栓钉力学性能要求/( $N\cdot mm^{-2}$ )

抗拉强度最小值 $f_u^a$	屈服强度 $f_y^a$
$\geq 400$	$\geq 240$

### 1.3.3 组合结构构件中混凝土及钢筋材料

1) 在钢骨混凝土构件中,混凝土的强度等级不应小于 C25 级,钢筋混凝土部分的钢筋及混凝土材料的强度标准值、强度设计值和弹性模量分别按表 1.3 ~ 表 1.9 采用。

2) 组合梁和组合板翼缘的混凝土、钢筋材质及强度设计值应按现行的国家标准《混凝土结

## 组合结构设计原理

构设计规范》(GBJ10)的规定。组合板与组合梁翼缘板采用轻集料混凝土时,应遵守现行建设部标准《轻集料混凝土技术规程》(JGJ51)的规定,并应有专门试验依据。

表 1.3 混凝土强度标准值/(N·mm<sup>-2</sup>)

强度种类	符 号	混凝土强度等级							
		C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心抗压	$f_{ck}$	17	20	23.5	27	29.5	32	34	36
抗拉	$f_{tk}$	1.75	2	2.25	2.45	2.6	2.75	2.85	2.95

表 1.4 混凝土强度设计值/(N·mm<sup>-2</sup>)

强度种类	符 号	混凝土强度等级							
		C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心抗压	$f_c$	12.5	15	17.5	19.5	21.5	23.5	25	26.5
抗拉	$f_t$	1.3	1.5	1.65	1.8	1.9	2	2.1	2.2

表 1.5 混凝土弹性模量/(N·mm<sup>-2</sup>)

混凝土强度等级	弹性模量 $E_c$	混凝土强度等级	弹性模量 $E_c$
C25	$2.80 \times 10^4$	C45	$3.35 \times 10^4$
C30	$3.00 \times 10^4$	C50	$3.45 \times 10^4$
C35	$3.15 \times 10^4$	C55	$3.55 \times 10^4$
C40	$3.25 \times 10^4$	C60	$3.60 \times 10^4$

表 1.6 钢筋强度标准值/(N·mm<sup>-2</sup>)

种 类		$f_{yk}$
热轧钢筋	I 级(Q235)	235
	II 级(20MnSi、20MnNb(b)) $d \leq 25$ $d = 28 \sim 40$	335
		315
	III 级(20MnSiV、20MnTi、K20MnSi、25MnSi)	400
	IV 级(40Si2MnV、45SiMnV、45Si2MnTi)	540

表 1.7 钢筋强度标准值/(N·mm<sup>-2</sup>)

种 类		$f_{yk}$
冷拉钢筋	I 级 $d \leq 12$	280
	II 级 $d \leq 25$ $d = 28 \sim 40$	450
		430
	III 级	500

注: $f_{yk}$ 在混凝土结构中的惯用符号为 $f_{yk}$ 。

表 1.8 钢筋强度设计值/( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )

种 类		抗拉强度 $f_{sy}$	抗压强度 $f_{sy}'$
热轧钢筋	I 级 (Q235)	210	210
	II 级 (20MnSi、20MnNb(b))		
	$d \leq 25$	310	310
	$d = 28 \sim 40$	290	290
冷拉钢筋	III 级 (20MnSiV、20MnTi、K20MnSi、25MnSi)	360	360
	IV 级 (40Si2MnV、45SiMnV、45Si2MnTi)	500	400
	I 级 $d \leq 12$	250	210
	II 级 $d \leq 25$	380	310
	$d = 28 \sim 40$	360	310
	III 级	420	360

注： $f_{sy}$ 、 $f_{sy}'$ 在混凝土结构中的惯用符号分别为  $f_y$ 、 $f_y'$ 。

表 1.9 钢筋弹性模量/( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )

种 类	弹性模量 $E_s$
I 级钢筋、冷拉 I 级钢筋	$2.1 \times 10^5$
II 级钢筋、III 级钢筋、IV 级钢筋	$2.0 \times 10^5$
冷拉 II 级钢筋、冷拉 III 级钢筋	$1.8 \times 10^5$