

钢与混凝土组合结构

赵鸿铁 著

科学出版社

钢与混凝土组合结构

赵鸿铁 著



科学出版社

2001

内 容 简 介

本书全面介绍了钢与混凝土组合结构,其中包括型钢混凝土结构、钢管混凝土结构、钢与混凝土组合梁、型钢板与混凝土组合楼板等的基本理论、设计计算方法、基本构造,以及试验方法和实例等,书末附有常用钢材特性选用表。

本书可供建筑领域的科技工作者和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢与混凝土组合结构/赵鸿铁著.-北京:科学出版社,2001
ISBN 7-03-008623-6

I. 钢… II. 赵… III. 钢结构;混凝土结构 IV. TU398

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第 34362 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2001年3月第一次印刷 印张:19 1/2
印数:1—3 500 字数:443 000

定价:39.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

钢与混凝土组合结构具有一系列突出的优点,因此已被广泛采用于高层超高层建筑、高重工业建筑、桥梁结构、地铁站台、高耸结构等建筑与构筑物中。随着经济建设的迅速发展,这类钢与混凝土组合结构的建构筑物数量会迅猛增多,但是目前我国尚无一整套的计算理论与设计方法以及与之相应的设计规范。因此,本书的出版无疑对研究工作者与工程界都是一件大好事,作者做了一件有意义的工作。

我与作者相识已经40多年,作者近20年来主要致力于研究组合结构,以及大量的组合构件和结构的静力试验与抗震试验,并且进行了深入系统的理论研究。十多年来又连续给硕士与博士研究生们讲授组合结构课程。本书作者在总结自己研究成果的基础上,结合国内外的研究与工程实践现状,系统论述了各种类型组合结构的计算理论、设计方法与构造措施。这对于我国今后进一步进行组合结构的深入研究,制定完整的组合结构设计规范,以及指导工程设计与实践具有重要的意义;对于促进结构型式的多样化,适应我国经济建设迅速发展的需要,以及普遍提高我国地震区建构筑物的抗震性能具有积极的作用。

本书可作为研究生教材,供研究人员、工程技术人员参考,亦可作为大专院校师生选修课教材或教学参考。我衷心期盼本书早日问世,并使广大读者受益。

中国工程院院士



2000年12月于上海

前 言

随着我国经济建设的迅速发展,各种新的结构型式不断涌现。钢与混凝土组合结构虽在 20 世纪初国外即已开始研究与应用,但其真正被世界各国比较系统地研究与广泛采用则是在第二次世界大战结束之后。20 世纪 80 年代以来,由于组合结构具有许多突出的优点,高层建筑与大型桥梁等建构物在我国各地大量兴建,各种型式组合结构逐渐被广泛应用。随着对组合结构的全面研究与越来越多地被采用,钢与混凝土组合结构已逐渐形成一个独立的结构体系而成为与传统的四大结构(钢结构、木结构、钢筋混凝土结构、砌体结构)并列的第五大结构。但是,目前我国有关全面介绍组合结构的研究成果与设计计算方法的论著尚少。关于组合结构,虽然我国有一些规程与行业标准出版,但是有些主要是引进国外的标准与计算方法,有的仅限于某一种结构形式;建立在以我国研究成果基础上的全面、系统的组合结构规范、规程尚未颁发。因此,作者感到有责任向读者比较全面地介绍这一较新的结构体系,这是撰写本书的宗旨之一。

作者从 20 世纪 80 年代初以来开始系统研究组合结构,并且不断深化,一直持续至今,进行了梁、柱、节点等各种类型构件的大量静力与动力试验。20 世纪 90 年代以后,作者又进行了三榀组合框架模型的拟动力试验、振动台试验等大型结构的动力试验,并且系统地进行了静力与动力作用下组合结构与构件的理论分析。因此,有必要将本人研究成果结合国内外的研究状况介绍给工程界,这是撰写本书的宗旨之二。

从 20 世纪 80 年代以来,作者为研究生讲授组合结构课程达 10 余年。根据作者给硕士研究生、博士研究生讲授本课程的经验,再三修订讲稿,在此基础上写出一本比较全面系统的研究生教材也是形势所需。

基于上述,也出于作为一名教师与工程结构研究人员的责任感,特写本书,奉献给全国工程界、学术界的同行及大专院校相关专业的师生们。

在研究过程中,我的同事们,包括历届博士研究生与硕士研究生,为此付出了大量辛勤的劳动。国家自然科学基金委员会、原冶金工业部在基金上均给予本课题研究大力支持,在此作者诚挚地表示谢意。在本书的写作过程中,薛建阳博士校对了全部书稿,博士生杨勇与研究生田瑞华完成了全书的绘图与打印工作,在此一并致谢。

由于作者水平有限与时间紧迫,书中难免会有错误与不足之处,恳请读者赐正。

赵鸿铁

2000 年 5 月

于西安建筑科技大学

目 录

序

前言

绪 论	1
0.1 组合结构的类型及特点	1
0.2 组合结构的发展与应用	4
第一章 剪切连接	9
1.1 概述	9
1.2 连接方式	11
1.3 剪切连接件的试验研究	14
1.4 剪切连接件的承载能力计算	16
1.5 剪切连接件的构造要求	21
第二章 压型钢板与混凝土组合楼板	24
2.1 概述	24
2.2 压型钢板的型式及要求	26
2.2.1 压型钢板的型式	26
2.2.2 压型钢板受压翼缘的有效宽度	28
2.2.3 对压型钢板的要求	29
2.3 组合板的承载能力计算	30
2.3.1 组合板的破坏模式	30
2.3.2 组合板的承载能力计算	32
2.4 组合板的变形计算	41
2.4.1 施工阶段变形计算	41
2.4.2 使用阶段变形计算	42
2.5 组合板的振动控制	44
2.6 构造要求	44
第三章 钢与混凝土组合梁	46
3.1 概述	46
3.2 组合梁的试验研究	49
3.3 组合梁施工阶段的计算	53
3.4 组合梁使用阶段承载能力计算	56
3.5 连续组合梁的承载能力计算	62
3.6 组合梁的变形计算	66
3.7 裂缝控制计算	74
3.8 部分剪切连接组合梁的计算	75

3.9	组合梁的构造要求	76
第四章	型钢混凝土结构	77
4.1	概述	77
4.2	型钢混凝土梁正截面承载能力分析	80
4.2.1	试验研究	80
4.2.2	配实腹钢的型钢混凝土梁正截面承载能力计算	85
4.2.3	配角钢骨架的型钢混凝土梁的正截面承载能力计算	94
4.3	型钢混凝土梁斜截面承载能力分析	99
4.3.1	试验研究	99
4.3.2	影响梁抗剪能力的因素	103
4.3.3	配实腹式型钢梁的抗剪承载能力计算	105
4.3.4	配角钢骨架梁的抗剪承载能力计算	111
4.4	型钢混凝土梁的刚度变形计算	113
4.4.1	变形特点及影响因素	113
4.4.2	刚度计算	115
4.5	型钢混凝土梁的裂缝计算	123
4.5.1	抗裂度验算	123
4.5.2	裂缝宽度计算	123
4.6	型钢混凝土柱的正截面承载能力	128
4.6.1	轴心受压柱	128
4.6.2	配实腹型钢偏心受压柱的试验研究	130
4.6.3	配实腹型钢大偏心受压柱的计算	135
4.6.4	配实腹型钢小偏心受压柱的计算	137
4.6.5	配实腹型钢柱界限破坏时的计算	140
4.6.6	配角钢骨架柱的计算	143
4.6.7	其他配钢形式的型钢混凝土柱正截面承载能力计算	146
4.6.8	关于绕“弱轴”方向弯曲的验算	149
4.6.9	双向偏心受压柱的计算	152
4.7	型钢混凝土柱的斜截面承载能力计算	152
4.7.1	短柱的试验研究	153
4.7.2	开裂荷载的计算	156
4.7.3	柱的抗剪承载力计算	157
4.8	型钢混凝土梁柱节点	161
4.8.1	概述	161
4.8.2	节点的试验研究	162
4.8.3	节点的受力机理	168
4.8.4	节点的抗裂计算	170
4.8.5	节点抗剪承载能力计算	171
4.8.6	节点构造	178

4.9 型钢混凝土构件的有限元分析	184
4.9.1 型钢混凝土柱梁的有限元分析	184
4.9.2 型钢混凝土节点的有限元分析	201
4.10 型钢混凝土框架的弹塑性动力分析	212
4.10.1 试验结果概述	212
4.10.2 弹塑性动力分析	215
4.11 构造要求	223
第五章 钢管混凝土结构	227
5.1 概述	227
5.2 材料	231
5.2.1 钢材及其性能	231
5.2.2 混凝土及其性能	234
5.3 钢管混凝土的基本性能	236
5.4 钢管混凝土单肢柱承载能力计算	238
5.5 格构式柱的计算	259
5.5.1 轴心受压格构柱的计算	260
5.5.2 偏心受压格构柱的计算	262
5.6 钢管混凝土结构构造	266
附录一 常用钢材截面特性表	270
附录二 常用焊接工字形钢的截面特性表	284
附录三 常用钢筋截面面积表	295
参考文献	296

绪 论

0.1 组合结构的类型及特点

两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。由组合构件可组成组合结构。由于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。例如钢筋混凝土结构是钢筋与混凝土组合而成,早已普遍应用,并形成一种独立成熟的结构形式,成为用于土木、建筑、水利等工程中最为广泛的结构形式之一。钢木屋架是钢材与木材的组合。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,并且不包括早已成熟应用的钢筋混凝土结构。

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。其与传统的四大结构,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下列各种钢与混凝土组合结构。

1. 压型钢板与混凝土组合板

这是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板,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。目前各国生产的压型钢板的型号很多,便于设计者与使用者采用,并且彩色钢板已普遍应用推广,使得板底具有良好的色彩与造型。

压型钢板与混凝土组合板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。目前我国进一步推广应用的主要障碍是钢材用量稍大,在我国钢材价格仍比较贵。此外,虽然我国已能生产压型钢板,但是所生产的板型尚少,轧制共同工作性能好的比较复杂的压型钢板仍具有困难。压型钢板生产工艺需进一步改进与提高。

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与局部失稳的弱点。在符合一定的条件下,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。与传统的非组合结构相比,由于组合梁的强度与刚度的提高,节省了大量钢材,约节省钢材 25%~30%,并且组合梁的应用降低了梁的高度以至建筑物的层高与总高。组合梁最早开始用于公路、铁路桥梁,很快发展到用于房屋建筑,尤其是钢结构建筑及工业厂房中的工作平台等。

3. 型钢混凝土结构

型钢混凝土结构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。这种结构形式在英国、美国等西方国家称之为“Concrete-Encased Steelwork”或简称“Encased Beams”,“Encased Columns”等,前苏联则称之为劲性钢筋混凝土结构,将置于混凝土中的型钢称为劲性钢;把配置的钢筋称为柔性钢,日本则称为钢骨混凝土(铁骨铁筋,コンクリート,Steel Reinforced Concrete,缩写 SRC)。受到英、美、苏、日等国的影响,我国对这种结构的名称叫法亦很不一致。我们认为对应于钢筋混凝土结构而言,在混凝土中主要配置的是型钢,故称为型钢混凝土结构。这一名称也得到了国内许多学者的认同。

型钢混凝土结构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,箱形方钢管等。由于截面中配置了型钢,使构件承载能力、刚度大大提高,因而大大减小了构件的断面尺寸,明显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,增加房间净空,或降低了房屋的层高与总高。强度、刚度的显著提高,使其可以运用于大跨、重荷、及高层、超高层建筑中。在大跨、重荷和超高层建筑中若使用钢筋混凝土结构,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结构实际上已成为不可能或非常不合理。型钢混凝土结构不仅强度、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筋混凝土结构,整个结构的延性实际上已经达不到“大震不倒”的要求。比起钢结构建筑,采用型钢混凝土结构节省了大量钢材,降低了造价,而且避免了钢结构建筑防锈、防腐蚀、防火性能较差,需要经常性维护等弱点。同时超高层或高耸钢结构刚度较小,侧向位移较大,而型钢混凝土结构则侧向刚度较大,侧向变形较小,因此也往往将型钢混凝土结构用于高层建筑的下面数层。型钢混凝土结构的另一优点是施工安装时梁柱型钢骨架本身构成了一个强度刚度较大的结构体系,可以作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。

型钢混凝土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、刚度、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、延性则比钢筋混凝土结构仍有较大提高,所以常在荷载、跨度、高度不是特别大的结构中采用。型钢混凝土结构可以用做梁、柱、节点、框架剪力墙及筒体等各种结构中。

4. 钢管混凝土结构

钢管混凝土结构(Concrete-filled Steel Tube),指的是圆钢管混凝土结构。在圆钢管中浇筑混凝土,并不另配钢筋。这种结构的主要特点是利用钢管约束混凝土,将混凝土由单向受压转变为三向受压。由于约束混凝土的强度大大提高,因此使构件承载能力显著提高,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。钢管虽然也承担纵向与径向压力,但是钢管中被混凝土充填,所以对防止钢管失稳极为有利。钢管混凝土结构充分发挥混凝土和钢材各自的优点,避免了钢材特别是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,可节省水泥 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%。钢管混凝土的另一突出优点是延性较好,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,所以这种结构最适用于作轴心受压与小偏心受压构件。由于其是圆形截面,而且断面高度较小,所以在受弯矩作用时显然并无优越可言,而且是不利的,因此常常将其作为高层建筑中的下面数层的柱是最合适的。在一些弯矩较大的结构中,可以利用结构形式的改变,把以受弯为主的结构转变为受压为主。例如单层厂房柱可做成双肢柱或多肢柱。在桥梁中可以设计成拱形,利用钢管混凝土作受轴压为主的上弦拱圈,而拉杆仅仅是利用空钢管受拉。钢管混凝土既然不适用于受弯构件,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,也将耗费相当多的钢材,因此近年来众多学者在钢管混凝土梁柱节点的构造研究方面做了许多工作,也得到了许多改进,但是仍然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,也具有一般钢结构防锈、防腐蚀及防火性能较差的弱点。

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,因此在本书中没有专门论述。这种结构形式的主要特点除了和配角钢骨架的型钢混凝土柱类似外,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。其实如果应用配角钢骨架的型钢混凝土柱,只要将施焊处的较薄的混凝土保护层凿去,同样能较灵活地焊接中小附件,管道支架,而且避免了外包钢混凝土柱的上

述缺点。外包钢筋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、抗剪、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(因为应力非常复杂,很难用力学分析精确计算出应力的方向与大小)。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全部体积范围内且各个方向均有,因此对防止裂缝出现与开展也很有意义,尤其是防止那些难以估计的内部微裂缝及板面不规则裂缝(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,因此不可能大量地、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能改善构件的受力性能。在国外,发达国家甚至帮助发展中国家研究与应用在混凝土中加配植物纤维以改善构件受力性能。

钢筋混凝土外包钢板箍构件是近年来研究与应用的一种组合结构形式。可以用于兴建工程也可以用于旧房屋结构加固。在构件(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的延性。钢板箍常加于柱端及梁的剪力较大区等。

近年来国外方钢管混凝土结构逐渐更多地被采用,并已引进到我国的一些高层建筑中。它与圆钢管混凝土相比,由于具有平面的外表,克服了钢管混凝土与梁连接复杂的致命弱点等特点,从而使节点构造大为简化与省工省料,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。

0.2 组合结构的发展与应用

由于组合结构的一系列优点,所以在西方国家及日本等国在 20 世纪初即开始应用。采用组合结构开始时的出发点往往还只是针对这些结构某一被人们意识到的突出优点。例如型钢混凝土结构开始采用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。在高层建筑中采用型钢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 14000m^2 ,高约 30m 的型钢混凝土建筑),这些是最早采用型钢混凝土结构的一批建筑。我国 60 年代初期建造的冶金厂房中炉前型钢混凝土大梁亦只是考虑到混凝土耐高温性能远比钢梁要好,也没有考虑混凝土与钢梁的组合作用,仍按钢梁设计承载能力。随着工程应用的实践及科学研究的深入进行,发现型钢混凝土结构还具有更多、更主要的优点。突出的是日本经历了 1923 年的关东大地震、1968 年的十胜冲地震以及 1995 年的阪神地震,发现在地震中其他大量房屋建筑遭严重破坏的情况下,而型钢混凝土结构建筑几乎未遭破坏,少量的破坏轻微,这就推动了日本研究与应用型钢混凝土结构的热潮。因

此,近 30 年来日本是世界上应用型钢混凝土结构最多的国家,也是研究型钢混凝土结构较多、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)的型钢混凝土柱的试验,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 年日本的齐田时太郎作了中心受压柱试验,1929 年浜田稔做了偏心受压柱试验,1932 年内藤多仲作了梁柱节点试验,1937 年棚桥凉做了梁的试验。近 30 年来,在型钢混凝土结构方面做了大量的试验研究。前苏联在型钢混凝土结构方面应用也是从配角钢骨架的空腹式配钢构件开始,早在 20 世纪 30 年代开始就建造了一批建筑。

关于型钢混凝土结构,欧美最初研究配空腹式角钢骨架型钢混凝土结构,而后来主要着重研究应用配实腹钢的结构。日本在 1930 年至 1970 年建造的型钢混凝土结构以配空腹式型钢为主要型式,1970 年以后建成的建筑是以配实腹式型钢为主要形式。1964 年以前型钢混凝土结构主要用于建造 6~10 层的建筑物,1964 年以后开始应用于高层、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。

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,因此空腹式配钢型钢混凝土结构仍具有推广应用前景。目前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。

关于型钢混凝土结构的计算理论,国际上主要有三种类型。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,因此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在叠加理论基础上的方法,认为型钢混凝土结构的承载能力是型钢与钢筋混凝土两者承载能力的叠加。比较证明,日本的计算方法过于偏于安全。

我国在型钢混凝土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研究。继而西南交通大学、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 年代又进行了型钢混凝土框架结构的模拟地震振动台试验、拟动力试验,深入研究了结构的静、动力特性与分析方法,在我国自己的试验研究基础上制定了一套较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 年主要是参考日本规程,原冶金工业部编制并颁发了行业标准《钢骨混凝土设计规程》。

目前国内外已应用型钢混凝土结构建成了大量的高层、超高层建筑及一些工业建筑。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。20世纪80年代以来在我国北京、上海等地也相继建成了一批利用型钢混凝土结构的高层建筑,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奔山饭店、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汽机间主厂房、郑州铝厂蒸发车间等。

压型钢板混凝土组合楼板开始应用于欧美国家。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刚度,因此压制成带凹凸肋形。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,相应地还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,组合板的研究日益深入广泛地开展。组合板的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Ekberg教授、Porter教授等首先在试验的基础上,提出了组合板纵向剪切承载能力的计算方法,使得组合板的设计计算理论推进一步,并逐步推广到世界其他国家。80年代中期,我国开始引进与研究这种结构形式,由于这种结构可以省去全部模板工程,并可立体作业,不仅节省大量木材与人力,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;采用组合板的工业厂房有沈阳沈海热电厂等。

钢梁支承钢筋混凝土板的结构很早就已应用。但是多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,组合成整体形成组合梁,并将计算方法纳入规范。随后人们发现如将钢筋混凝土板与钢梁组合成整体,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。其后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,不仅节省大量钢材、资金,而且大大加快了建设速度(与用混凝土结构相比)。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。我国从20世纪50年代开始,也是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。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、设计计算方法及施焊专用机具进行了广泛的研究。美国、英国等首先用推出试验得出了剪力件强度计算公式,并纳入英国规范CP110,同时为焊接带头栓钉的栓焊机专用机具问世,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,1879 年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工作,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。我国对钢管混凝土结构的研究始于在 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。

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 中列入了型钢混凝土柱、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 CP110,CP117,BS5400,BS449 和桥梁法规 B116/5 等中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 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》(СНЗ-78)。欧洲钢结构协会(ECCS)1981 年出版了《组合结构规程及其说明》,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《钢与混凝土组合结构》。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、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 年又经第三次修订颁发。

我国至今尚无一部完整的关于组合结构设计的国家规范。但是在近几十年来,特别是近 20 年来在大量学者的研究成果与应用的基础上,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-混凝土组合结构设计暂行规定》(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迫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。

第一章 剪切连接

1.1 概 述

钢与混凝土组合结构,经研究与推广应用,证实它是一种很有发展前景的结构形式。因为组合结构发挥了两种不同材料的优点,避免了或尽可能避免各自的缺点,因此在受力性能及综合指标方面显示了它的优越性。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”。只有将两种不同材料组合成一体才能显示其优越性。这种组合作用,主要是依靠两种不同材料之间的可靠连接。连接必须能有效传递混凝土与钢材之间的剪力,同时能有效抵抗使两者分离的“掀起力”,才能使混凝土与钢材组合成整体,共同工作。

现以最简单的例子来说明组合作用。首先观察无剪切连接的情况。两根材料、断面、刚度完全相同的矩形截面的梁,叠置在一起,中间不设任何连接,而且忽略两梁之间界面上的摩擦力,如图 1.1 所示。

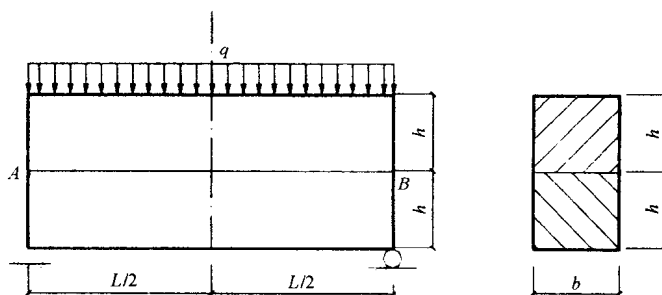


图 1.1 无剪切连接梁

由于上下梁的断面、材料、惯性矩均相等,所以在均布荷载作用下,上下梁各承担二分之一的均布荷载。刚度、荷载相同的上下梁将产生同样的变形曲线。上下梁的挠度处处相同。由于两部分变形协调,所以上下梁能紧密结合在一起。它们的跨中最大弯矩均为 $\frac{ql^2}{16}$ 。按照弹性理论,沿着截面高度,其上应力分布如图 1.2(a)的实线所示。其最大弯应力的值,根据材料力学计算可知

$$\sigma_{\max} = \frac{My_{\max}}{I} = \frac{ql^2}{16} \frac{h}{2} \frac{bh^3}{12} = \frac{3}{8} \frac{ql^2}{bh^2} \quad (a)$$

发生在每个梁的上下边缘纤维处。

梁在支座处剪力最大,其值为 $V = \frac{ql}{4}$ 。同样根据材料力学可知,沿着截面高度的剪应力分布如图 1.2(b)实线所示,每个梁的剪应力分布呈抛物线,最大剪应力发生在中和轴