

GAOLOU GANG JIEGOU SHEJI

高楼钢结构设计

(钢结构、钢—混凝土混合结构)

刘大海 杨翠如 编著

● 中国建筑工业出版社

高楼钢结构设计

(钢结构、钢-混凝土混合结构)

刘大海 杨翠如 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

高楼钢结构设计/刘大海,杨翠如编著. —北京:中国建筑工业出版社,2003

ISBN 7-112-05779-5

I. 高... II. ①刘...②杨... III. 高层建筑-钢结构-结构设计 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 026276 号

高楼钢结构设计

(钢结构、钢-混凝土混合结构)

刘大海 杨翠如 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 35 字数: 850千字

2003年9月第一版 2003年9月第一次印刷

印数: 1-3000册 定价: 44.00元

ISBN 7-112-05779-5

TU·5076(11418)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

钢结构具有承载力高、截面尺寸小、建筑总重量轻等优点,最适宜建造高层建筑。与钢筋混凝土结构相比,它具有更大的韧性、延性、变形能力和耗能容量,是地震区高层建筑的首选结构类型。钢-混凝土混合结构是近期发展起来的高层建筑新型结构,它兼收钢结构与钢筋混凝土结构两者的优点,取得了良好的经济效果。

本书针对这两类结构的高层建筑,给出适用于不同高度、多种情况的结构体系和工程实例,剖析其结构受力特点,列出其抗风、抗震计算结果,以及构件截面尺寸,供工程设计借鉴。并按照各结构设计规范、技术规程 2002 年新版,给出结构抗风、抗震设计的计算步骤和公式,梁、柱、支撑、墙板等构件及其节点的一般和抗震构造要求和强度验算。

本书供建筑设计、施工、科研人员及土建专业师生阅读。

* * *

责任编辑:咸大庆 王 梅

责任设计:崔兰萍

责任校对:王 莉

前 言

随着我国经济建设的快速发展,各大、中城市高层建筑的兴建日益增多。尽管钢筋混凝土结构由于造价较低仍是高层建筑的主要结构类型,但随着钢结构设计和制造技术的进步,在高层建筑领域,二者造价上的差距日渐缩小。加之,钢结构由于材料强度高,构件截面尺寸小,减小了结构占用面积,使建筑有效使用面积相对增大,增加了建筑的经济效益;钢结构的工厂化生产,使其建造速度高于钢筋混凝土结构,建筑的提前投入使用又增加建筑的收益。此外,高层建筑特别是超高层建筑,基础费用约占建筑总造价的1/3,钢结构由于自重轻,使基础费用较大幅度地降低,特别是沿海一带的深厚软土地区,经济效益更加显著。以上种种情况,使钢结构与钢筋混凝土结构高层建筑在综合经济效益方面的差距进一步缩小。

我国是一个多地震国家,百万以上人口的大城市多数位于6度以上地震区,抗震能力成为高层建筑的一个重要课题,墨西哥地震、日本阪神地震、美国北岭地震的高层建筑震害调查资料表明,钢结构的破坏率和震害程度均远低于钢筋混凝土结构,而且震后的修复工作也简单、快捷。说明,地震区特别是8度及以上高烈度区的高层建筑宜采用钢结构。

20世纪70年代以来,北京、上海、深圳等地相继建成一批钢结构高楼,其优越性日益显露。随着我国钢产量跃居世界前列,发展钢结构建筑、特别是钢结构高层建筑,已成为工程建设的一项基本政策。

高层建筑设计的关键是结构方案的合理性,本书第一章从多方面系统地阐述结构的概念设计,以期使结构方案从根本上得以优化。用于高层建筑的结构钢有其特定要求,本书第二章着重列出行业标准YB 4104—2000对高层建筑结构用钢板的力学性能和化学成分所作的规定。本书第五章,系统地阐述各种结构体系的受力特点、变形属性和适用高度,并逐一给出多项工程实例,列出其结构平、剖面,抗风、抗震计算结果,构件截面尺寸和经济指标,供工程设计时借鉴。

钢结构由于材料强度高,构件截面尺寸小,抗推刚度相对较弱,抗风设计的关键是结构风振加速度的控制,本书第三章对此给出实用计算方法。1995年日本阪神地震和1994年美国北岭地震表明,高层建筑钢结构的震害主要发生在构件节点和杆件连接处。为此,本书第七章着重探讨钢杆件的连接问题,从结构震害原因剖析入手,给出框架节点的合理构造细部,进一步提高钢结构的抗震可靠度。

试验和实践结果表明,高层建筑钢结构采用偏心支撑要比采用中心支撑具有更大的结构延性和抗震可靠度。为此,本书第六章以较大篇幅来阐述偏心支撑的构件截面设计、承载力验算及杆件连接的构造细部。

刘大海 杨翠如

中国建筑西北设计研究院

目 录

第一章 结构概念设计	1	二、倾覆稳定性验算	60
第一节 结构类型和特点	1	三、 $P-\Delta$ 效应	61
一、钢结构	1	第七节 地下结构	61
二、“钢-混凝土”结构	3	一、主楼	61
三、型钢混凝土结构	7	二、地基与基础	62
四、钢管混凝土结构	8	三、基坑支护	64
第二节 房屋体形	9	第八节 高楼结构发展趋势	68
一、建筑平面形状	9	一、材料高强度	68
二、建筑立面形状	11	二、建筑轻量化	69
第三节 房屋高度和高宽比	13	三、构件立体化	69
一、钢结构高楼	13	四、巨柱周边化	69
二、混合结构高楼	16	五、支撑大型化	70
第四节 承重构件的布置	18	六、体形圆锥化	71
一、竖向承重构件	18	七、结构混合化	73
二、楼盖结构	20	八、动力反应智能化	75
第五节 抗侧力结构体系	24	第二章 结构材料	77
一、基本情况	24	第一节 结构钢	77
二、框架体系	27	一、钢材性能	77
三、框架-墙板体系	30	二、国产钢材	78
四、框-撑体系	31	三、国外钢材	93
五、框架-支撑芯筒体系	35	第二节 钢材连接件	98
六、支撑芯筒+刚臂体系	36	一、焊接材料	98
七、框筒体系	39	二、高强度螺栓	100
八、筒中筒体系	44	三、圆柱头栓钉	106
九、支撑框筒体系	45	四、锚栓	107
十、框筒束体系	46	第三节 钢筋混凝土材料	107
十一、支撑筒体系	49	一、钢筋	107
十二、巨型框架体系	50	二、混凝土	107
十三、悬挂体系	53	第三章 抗风计算	110
十四、承力幕墙体系	55	第一节 风速和风压	110
十五、芯筒-框架体系	56	一、近地风特性	110
第六节 结构稳定	59	二、风对结构的作用	112
一、结构整体稳定	59	三、基本风速	115

四、基本风压	117	第四节 水平地震作用	173
第二节 风荷载	118	一、地震作用计算	173
一、风荷载标准值	118	二、底部剪力法	175
二、风压高度变化系数	118	三、振型分解反应谱法	176
三、风荷载体型系数	121	四、时程分析法	179
四、风振系数(顺风向)	125	五、结构分析	181
五、围护结构阵风系数	131	第五节 竖向地震作用	185
第三节 横风向振动响应	132	一、高层建筑	185
一、结构横风向风振	132	二、大跨度结构	186
二、旋涡脱落响应	133	第六节 抗震验算	186
三、横风向风振计算	136	一、第一阶段抗震设计	186
四、计算方法	137	二、第二阶段抗震设计	190
五、避免共振	138	第五章 钢结构体系和工程实例	194
六、风振总效应	138	第一节 框架体系	194
第四节 风振不适感的控制	139	一、结构特征	194
一、衡量尺度	139	二、框架设计要点	195
二、风振加速度限值	139	三、工程实例	196
三、风振加速度的计算	140	第二节 框架-支撑体系	201
四、减小风振加速度的途径	141	一、结构特征	201
第五节 风洞模型试验	143	二、工程实例	204
一、风洞试验要素	143	第三节 支撑芯筒-刚臂体系	218
二、风洞试验模型	144	一、结构特征	218
第六节 荷载效应计算	147	二、工程实例	219
一、重力荷载	147	第四节 框架-墙板体系	224
二、风荷载效应	149	一、结构特征	224
三、荷载效应组合与验算	152	二、工程实例	224
第四章 抗震计算	155	第五节 框筒体系	231
第一节 抗震概念设计	155	一、结构特征	231
一、避免地面变形的直接危害	155	二、工程实例	231
二、减少地震能量输入	157	第六节 筒中筒体系	237
三、消减地震反应	159	一、结构特征	237
四、抗侧力结构的优化	159	二、钢框筒工程实例	238
第二节 抗震设防标准	164	三、墙板内筒工程实例	242
一、设防烈度	164	四、支撑内筒工程实例	247
二、建筑分类和设防标准	165	第七节 框筒束体系	249
第三节 地震反应谱	168	一、结构特征	249
一、地震影响	168	二、工程实例	250
二、加速度反应谱	169	第八节 支撑框筒体系	256
三、《规范》反应谱	170	一、结构特征	256

二、工程实例	257	四、强度验算	334
第九节 巨型框架体系	260	第七节 钢板剪力墙	338
一、结构特征	260	一、构造要求	338
二、工程实例	260	二、强度验算	338
第十节 大型立体支撑体系	274	第八节 内藏钢板支撑	
一、结构特征	274	剪力墙	340
二、工程实例	274	一、设计要点	340
第十一节 悬挂体系	281	二、构造要求	341
一、结构特征	281	三、墙板刚度计算	343
二、工程实例	281	四、强度验算	343
第十二节 承力幕墙体系	283	第九节 带竖缝混凝土墙板	344
一、结构特征	283	一、墙板工作性能	344
二、工程实例	283	二、墙板几何尺寸	345
第六章 钢构件的计算和构造	286	三、承载力验算	346
第一节 钢梁	286	四、水平荷载下墙板的	
一、构造要求	286	变形和承载力	347
二、钢梁强度验算	289	五、构造要求	349
三、钢梁整体稳定	290	六、例题——带竖缝混凝土剪力	
第二节 连续梁塑性设计	294	墙板的计算	350
一、设计原则	294	第七章 钢构件节点和	
二、构件承载力	295	钢杆件连接	353
三、构造要求	296	第一节 基本要求	353
第三节 轴心受压柱	297	一、设计原则	353
一、构造要求	297	二、杆件连接	353
二、强度验算	298	三、吊装件	355
三、稳定性验算	299	第二节 梁-柱节点	355
第四节 框架柱	304	一、节点类型	355
一、构造要求	304	二、梁端、柱端承载力	355
二、强度验算	307	三、节点域强度验算	357
三、构件稳定性	309	第三节 梁与柱的连接	360
第五节 中心支撑	313	一、刚性连接构造要求	360
一、构造要求	313	二、半刚接、铰接构造要求	368
二、杆件内力	320	三、强度验算	371
三、杆件承载力	321	第四节 梁与梁的连接	379
四、支撑连接的承载力验算	323	一、构造要求	379
第六节 偏心支撑	325	二、强度验算	384
一、支撑特点	325	第五节 柱与柱的连接	386
二、构造要求	326	一、构造要求	386
三、杆件内力	332	二、强度验算	391

第六节 钢梁与混凝土 构件的连接	393
一、简支连接	393
二、刚性连接	394
第七节 钢柱柱脚	394
一、柱脚的形式	394
二、埋入式柱脚	394
三、外包式柱脚	401
四、外露式柱脚	406
第八节 框架节点抗震 设计新发展	407
一、震害概况	407
二、钢材脆断原因剖析	418
三、抗震构造措施	420
第八章 钢杆件的板件连接	432
第一节 焊缝连接	432
一、焊接方法	432
二、焊接材料选用	432
三、焊缝类型	433
四、焊缝强度设计值	436
五、对接焊缝的计算和构造	437
六、角焊缝的计算与构造	443
七、低温脆断防治	453
八、焊接施工技术要求	453
第二节 焊缝符号表示法	457
一、国家标准	457
二、焊缝形式及标注方法	457
第三节 高强度螺栓连接	467
一、连接类型	467
二、材料及强度设计值	468
三、高强度螺栓连接的构造要求	469
四、摩擦型连接的计算	472
五、承压型连接的计算	481
六、接头设计	486
七、制作与安装	489

第九章 “钢-混凝土”结构体系 和工程实例	494
第一节 结构特征	494
一、混合结构的构件	494
二、混合结构性能	494
三、结构设计要点	495
第二节 “混凝土芯筒-钢框架” 体系	497
一、结构体系的组成	497
二、工程实例	497
第三节 “混凝土偏筒-钢框架” 体系	522
一、结构特征	522
二、工程实例——深圳发展 中心大厦	522
第四节 “混凝土内筒-钢外筒” 体系	524
第五节 芯筒悬挂体系	526
一、结构特征	526
二、工程实例	528
第六节 多筒悬挂体系	530
一、结构特征	530
二、工程实例	531
第七节 多筒钢梁体系	533
一、结构特征	533
二、工程实例	534
第八节 “混凝土框筒-钢框架” 体系	536
一、结构特征	536
二、工程实例	537
第九节 支撑筒体系	539
一、结构特征	539
二、工程实例	541
第十节 大型支撑体系	546
参考文献	548

第一章 结构概念设计

第一节 结构类型和特点

据统计,1991年前建成的全世界最高的100幢建筑中,采用全钢结构的为58幢,采用“钢-混凝土”混合结构或型钢混凝土结构的为28幢,采用钢筋混凝土结构的仅为14幢。

前一时期,我国建造的高楼,数量较少,层数也不太多;加之钢结构的用钢量较大,造价较高,设计、施工技术比较复杂,配套轻质材料不全等原因,高楼均采用钢筋混凝土结构。20世纪80年代末,特别是近十年来,情况有所改变,北京、上海、深圳等地,相继兴建了钢结构(S)、“钢-混凝土”混合结构(S-RC)、型钢混凝土(SRC)结构和钢管混凝土(CFT)结构高楼30余幢,在钢结构高楼的设计和施工方面积累了一定的经验,为钢结构高楼在我国的发展,奠定了基础。

随着经济的发展、技术的进步,钢结构高楼的优点日益显露出来,不足之处正在减退。从用钢量、面积利用系数、基础费用、工期等多方面的综合经济效益来看,在高空这一领域,钢结构与钢筋混凝土结构的差距正在缩小,即使在我国当前的经济和技术条件下,钢结构高楼也存在着较大、较快发展的可能。

一、钢结构

(一)结构造价

1. 用钢量

(1)据不完全统计,我国近期兴建的几十幢高度在100m以上的30~62层钢筋混凝土高楼,其用钢量约为 $90\text{kg}/\text{m}^2$ 。分级统计数字列于表1-1。

30层以上钢筋混凝土高楼的结构用钢量

表 1-1

用钢量(kg/m^2)	60~69	70~79	80~89	≥ 90
在统计总数中所占比例	11%	11%	56%	22%

(2)我国近期兴建的36幢钢结构(含钢-混凝土混合结构)高楼,其中有10幢,高度超过了200m。不同时期建造的高楼,其平均用钢量列于表1-2^[25]。

我国200m以上钢结构高楼的结构用钢量

表 1-2

建造时期	统计的总幢数	高200m以上的幢数	总建筑面积($\times 10^4\text{m}^2$)	总用钢量($\times 10^4\text{t}$)	平均用钢量(kg/m^2)
20世纪80年代	11	1	73.4	9.0	123
20世纪90年代	15	5	140.8	11.4	95
建造中	10	4	120	4	83

(3)从表 1-2 中的数字可以看出,随着建筑技术的进步,钢材力学性能的提高,结构体系的改进,计算理论的发展,钢结构高层的用钢量有逐年下降的趋势。

(4)美国的情况也是一样,以 50 层钢结构楼房为例,1962 年以前建成的,用钢量为 $130\text{kg}/\text{m}^2$;而 1971 年在阿里阿波利斯建成的 54 层 I.D.S 大楼,用钢量降为 $87\text{kg}/\text{m}^2$ 。又如 1931 年在纽约建成的 102 层帝国大厦,用钢量为 $206\text{kg}/\text{m}^2$;而 1968 年在芝加哥建成的 100 层汉考克大厦,用钢量仅为 $146\text{kg}/\text{m}^2$ 。

(5)上海建筑设计研究院搜集、整理了美国不同年代、不同层数钢结构楼房的用钢量,其平均值列于表 1-3。统计数字表明,随着时代的前进,40 层以上楼房的用钢量,约下降了 43%^[28]。

美国不同年代钢结构楼房用钢量的比较

表 1-3

房屋层数 建造年代	31层~42层			43层以上		
	幢数	用钢量(kg/m^2)	相对值	幢数	用钢量(kg/m^2)	相对值
1965年以前	14	144	100%	14	163	100%
1966年以后	6	93	65%	12	93	57%

2. 上部结构造价

(1)工程实践表明,单就楼房的上部结构造价而言,由于型钢价格较高,纯钢结构的造价,约为钢筋混凝土结构造价的两倍。

(2)就一幢高楼而言,上部结构造价约占整个结构造价的 60%;而结构造价则仅占包括装修、设备在内的工程造价的 30%;在工程总投资(含土地、动迁)中,工程造价又仅占 50%。据此,上部结构造价约占工程总投资的 9%,钢结构与钢筋混凝土结构的差价则仅占 4.5%。

(3)若是考虑到钢结构的自重轻、地震力小、结构面积小,基础造价少、工期短、提前使用等情况后的综合效益,钢与混凝土结构差价在工程总投资中所占比例将进一步下降。

(二)综合经济效益

1. 自重轻 钢结构高层的自重约为 $8\sim 11\text{kN}/\text{m}^2$,钢筋混凝土高层的自重约为 $15\sim 18\text{kN}/\text{m}^2$,前者比后者减轻自重 40%以上(表 1-4)。

43层希尔顿酒店三种结构类型方案的比较

表 1-4

结构类型	建筑总重 (kN)	单位面积自重 (kN/m^2)		基底压力 (kN/m^2)	结构面积 (m^2)	结构面积 建筑总面积
钢筋混凝土结构	941000	18.0	100%	770	4700	9%
钢结构	546000	10.5	58%	450	1320	2.5%
钢-混凝土结构	664000	12.8	71%	550	1730	3.3%

建筑自重减轻,地震作用变小,使构件内力进一步减小。此外,对于软弱地基,上部结构减轻 40%还可使基础造价出现较大幅度的降低。

2. 结构面积小 由于钢结构强度高,钢柱截面的外轮廓面积仅为钢筋混凝土柱的 1/3(表 1-4)。据统计,钢柱和钢筋混凝土柱的结构面积分别约占建筑面积的 3%和 7%。现以 8 万平方米的楼房为例,若采用钢结构,可增加有效使用面积 3200m^2 。

3. 工期短 钢结构由于工厂化程度高,施工速度比钢筋混凝土结构约快 1.5 倍。一般钢结构高楼,每 4 天完成一层;钢筋混凝土高楼,则需 6 天才能完成一层。一幢 40 层楼房,若采用钢结构,工期可缩短 3 个月。

高档办公楼一般是三年左右收回投资,若提前 3 个月投入使用,节省下的贷款利息相当于减少投资 8%。

4. 降低层高 高层建筑内部管道较多,混凝土梁一般不能开洞,管道只好从梁下通过。而钢梁允许在腹板上开洞,用以穿越管道,层高得以降低。在建筑总高度相同的情况下,采用钢结构,可以多出两三层建筑面积。

5. 工程造价 根据我国某些高楼的经济分析,对于 50 层左右的高楼,考虑了综合效益后,采用钢结构与采用钢筋混凝土结构,两者的工程投资基本上持平。层数再多,钢结构将显现出更加经济。

(三)结构性能

1. 延性大 与钢筋混凝土结构相比较,钢结构的延性大,耐震性能好,特别适用于地震区的高层建筑。

1976 年我国唐山地震、1985 年墨西哥地震和 1995 年日本阪神地震,钢结构房屋的破坏率和破坏程度均远低于钢筋混凝土结构房屋。

2. 柱网大 钢结构的承载能力大,梁截面高度相同的情况下,钢结构的柱网尺寸可以比钢筋混凝土结构加大 50% 左右,提高了建筑布置的灵活性。

3. 自重轻 钢结构高楼的自重约为钢筋混凝土结构的 60%,由于自重较轻,更易于采用调频质量阻尼器等消能装置,以减弱结构振动,提高楼房的抗震可靠度。

二、“钢-混凝土”结构

(一)结构组成

目前在高层建筑中应用较多的“钢-混凝土”混合结构,有如下两种结构体系:

1. 芯筒-框架体系

(1)此种结构体系一般是由钢筋混凝土芯筒(核心筒)与外圈钢框架组合而成。图 1-1 为上海浦东世界金融大厦的典型层结构平面,大厦平面呈梭形,地下三层,地上 44 层,总高 168m。

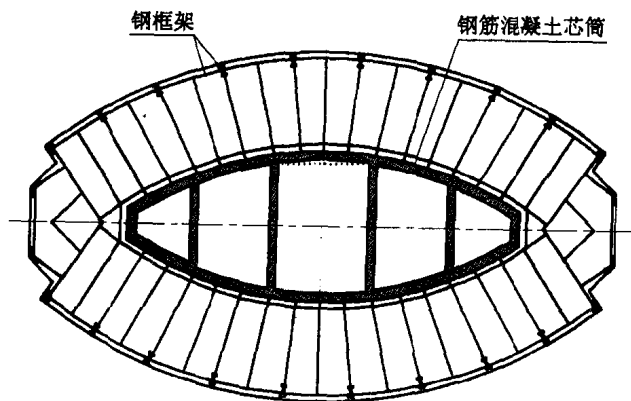


图 1-1 “混凝土芯筒-钢框架”结构体系典型层平面

(2) 芯筒主要是由四片以上的钢筋混凝土墙体围成的方形、矩形或多边形筒体, 内部设置一定数量的纵、横向钢筋混凝土隔墙。当楼房很高等某些情况下, 芯筒墙体内可能设置一定数量的型钢骨架。

(3) 外圈钢框架是由钢柱与钢梁刚接而成, 其平面形状和柱距大小, 均按照建筑平面布置要求而定。

(4) 某些工程根据结构内力分析和侧移计算结果, 在结构顶层以及每隔若干层的楼层内, 设置若干道由芯筒外伸的纵、横向刚臂(伸臂桁架)及与之配套的外圈带状钢桁架。

2. 筒中筒体系

(1) 此种结构体系一般是由钢筋混凝土芯筒(或型钢混凝土芯筒)与外圈钢框架组合而成(图 1-2)。它适用于层数很多的超高层建筑。

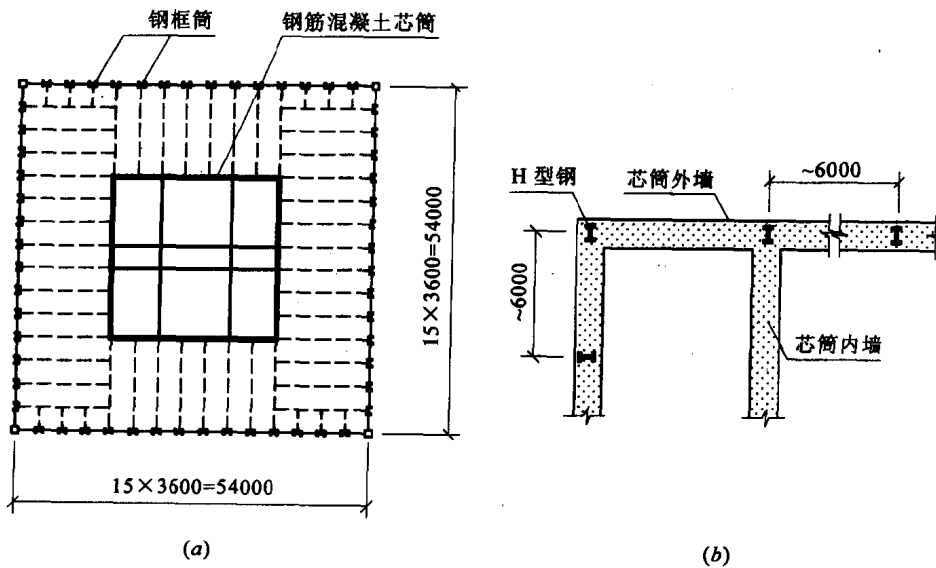


图 1-2 混合结构筒中筒体系典型层平面

(2) 外圈钢框架筒是由密柱、深梁刚接而成, 钢柱的柱距一般在 4m 以下, 钢梁的截面高度也较大, 以尽量减小其剪力滞后效应, 使外框筒形成一个有效的立体构件, 充分发挥其整体抗弯作用, 减小整个结构的侧移。

(3) 芯筒的构造以及是否设置刚臂和外圈带状桁架, 与上述的芯筒-框架体系大致相同。

(二) 工程实例

1. 非地震区

高楼采用“钢-混凝土”混合结构始于 1972 年, 第一幢此类结构的楼房是建在美国芝加哥市的 Gateway 大厦。此后, 又相继建造了几幢, 其中具有代表性的几幢楼房的概况列于表 1-5。

2. 地震区

(1) 日本 1992 年日本神奈川县先后建成了两幢“钢-混凝土”混合结构楼房, 一幢是“日本碳素横滨工厂再开发计划”办公楼, 地上 18 层, 高 78m; 另一幢是“第一人寿保险公司”大厦, 地上 26 层, 高 107m。

国外“钢-混凝土”混合结构高楼概况

表 1-5

序号	建成时间	地点	建筑名称	层数	高度 (m)
1	1972 年	芝加哥	Gateway III Building	36	137
2	1973 年	巴黎	Mantparmasse	64	229
3	1978 年	新加坡	新州财政大楼	52	235
4	1985 年	西雅图	Columbia Center	76	291

(2)国内 高楼采用“钢-混凝土”混合结构,同样具有全钢结构的自重轻、施工速度快的特点,这是优于混凝土结构的重要方面;而在造价方面又低于全钢结构。也就是说,混合结构兼有钢和混凝土两类结构的优点。单就经济效益而言,它是一种优化的结构类型。我国建筑界也正是着眼于此,使混合结构成为当今我国高楼建设中的主导结构类型,已建成和正在筹建中的高度超过 150m 的高楼近 20 幢。

(三)结构性能

1. 受力特点

(1)在“钢-混凝土”混合结构中,①利用抗推刚度(侧向刚度)很大的钢筋混凝土芯筒来承担水平荷载;②利用材料强度很高的外圈钢框架来承担竖向荷载;③利用能跨越较大跨度的钢梁,作为芯筒与外框架之间楼盖的承重构件,使不同类型的构件均能发挥各自的特长。

(2)在芯筒-框架体系中,钢筋混凝土芯筒的抗推刚度远远大于外圈钢框架,几乎全部承担了作用于高楼上的水平荷载,钢框架主要承担竖向荷载及分担少量的水平荷载。

(3)在筒中筒体系中,外圈钢框架已成为具有空间受力特性的立体构件,具有较大的抗推刚度,因而除了承担竖向荷载之外,还将分担 30%~40%的水平荷载。

2. 抗风能力

(1)全钢结构,由于抗推刚度较小,高楼的横风向振动加速度有可能超过容许值,引起楼内人员产生风振不适感,需要采取附加的减振措施。

(2)高楼若采用“钢-混凝土”混合结构,由于钢筋混凝土墙筒的巨大抗推刚度,从而具有较大的抗风能力,其顺风向、横风向振动加速度均较易于控制在容许限值以内。

3. 抗震能力

(1)基本属性

a. 混合结构的芯筒-框架体系,主要是依靠钢筋混凝土芯筒来抵抗侧力,因此,其耐震性能和抗震能力仅稍强于钢筋混凝土结构。

b. 混合结构的筒中筒体系,因为外圈钢框架承担了一大部分地震倾覆力矩和一部分水平地震剪力,不仅使芯筒所受地震剪力得以减小;更主要的是,芯筒承担的地震倾覆力矩较大幅度地削减后,受压区压应力的下降减少了受压墙肢发生脆性压剪破坏的危险性;受压墙肢和受拉墙肢应力差的减小,改善了地震剪力在墙肢间的不均匀分配,从而提高了芯筒的总体受剪承载力。所以,筒中筒体系的耐震性能介于全钢结构与混凝土结构之间。

(2)国外经验

a. 1964 年美国阿拉斯加地震,采用“混凝土芯筒-钢框架”混合结构的楼房,曾发生严重破坏甚至倒塌。据此,美国工程界一些人士认为,混合结构不宜用于地震区的高楼。

b. 1992年前,日本神奈川县建成了高度分别为78m和107m、采用“混凝土芯筒-钢框架”的两幢混合结构高楼。之后,日本学者开展了讨论,认为需要对这类结构进行深一层的研究。现阶段,若再建造高度超过45m的混合结构高楼,需报送建设大臣审批,采取了谨慎对待的态度。

(四)抗震措施

对于采用“钢-混凝土”混合结构的高楼,结合工程条件采取下列抗震措施,将有助于改善高楼的耐震性能。

1. 对于房屋高宽比大于4的高楼,宜采用筒中筒体系,即内部采用钢筋混凝土芯筒,外圈采用钢框架。

2. 在钢筋混凝土芯筒内配置型钢构架(图1-3),于墙体转角、纵横墙交接处,以及洞边设置钢柱,实体墙内的钢柱间距一般不大于6m,钢梁间距不大于层高和6m;必要时,还可在钢柱间增设交叉斜撑。此外,于洞口处的连梁内配置斜向交叉钢筋骨架,并使截面上、下纵向钢筋骨架封闭箍筋的纵、横向间距均不大于200mm(图1-4),以提高芯筒的延性和整体受弯、受剪承载力。

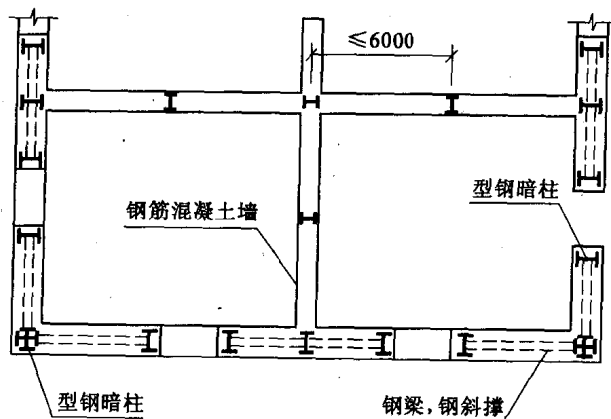


图 1-3 钢筋混凝土芯筒内埋设钢柱

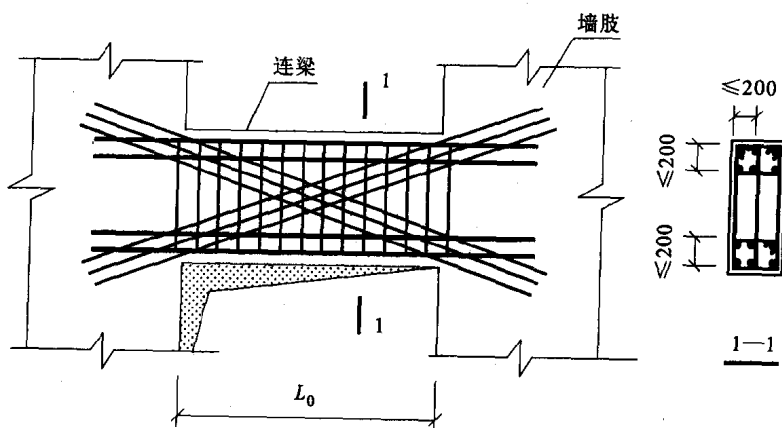


图 1-4 混凝土芯筒连梁的交叉斜筋

3. 对于“芯筒-框架”体系,当抗震设防为 7 度时,混凝土芯筒的高宽比不宜大于 10。超过时,宜在结构顶层以及每隔 15 层左右的楼层内,设置若干道纵、横向刚臂(由芯筒伸出的一层或两层楼高的钢桁架)和周边钢桁架,使周边钢框架各柱均参与抵抗倾覆力矩,以减小芯筒的整体弯曲应力。

三、型钢混凝土结构

(一)结构组成

1. 型钢混凝土(SRC)结构是由型钢混凝土柱、型钢混凝土梁所组成。在某些高楼中,也设置型钢混凝土墙或型钢混凝土墙筒。

2. 型钢混凝土柱是在钢筋混凝土柱内埋设型钢芯柱。型钢芯柱可以是:①热轧或焊接 H 型钢(图 1-5a);②由钢板或剖分 T 型钢焊接成的十字形截面(图 1-5b);③方钢管(图 1-5c);④圆钢管(图 1-5d);⑤由工字形型钢和剖分 T 型钢焊接成的 T 形截面(图 1-5e)。

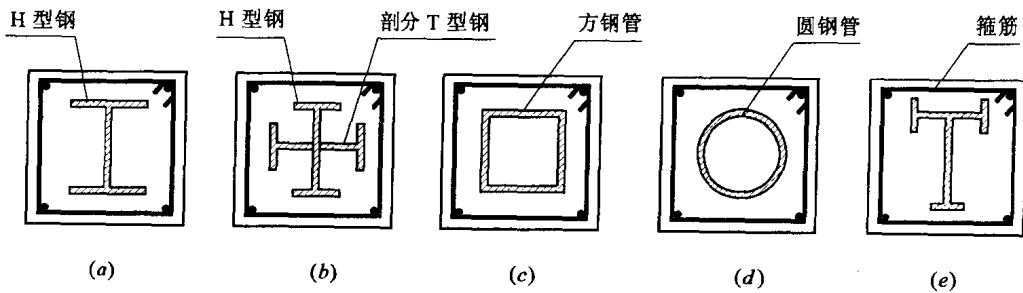


图 1-5 型钢混凝土柱的芯柱截面形式

(a)H 型钢;(b)十字形截面;(c)方钢管;(d)圆钢管;(e)T 形截面

3. 型钢混凝土梁是在钢筋混凝土梁内埋设工字形型钢(图 1-6a)或型钢桁架(图 1-6b)。后者仅用于大跨度梁。

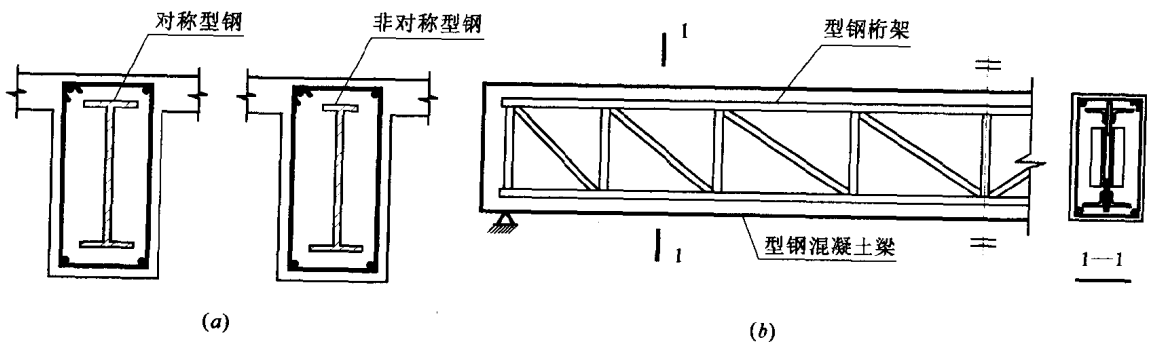


图 1-6 型钢混凝土梁的构成

(a)实腹钢梁;(b)型钢桁架

(二)应用情况

1. 在日本,型钢混凝土结构的应用最为广泛。1921 年在东京建成的海上大厦,高 30m,采用了型钢混凝土结构,1923 年东京大地震时几乎没有损坏,显示了型钢混凝土结构的良好耐震性能。自此,型钢混凝土结构成为地震区高楼的主要结构类型。据统计,1981 年至 1985 年间建造的 16 层以上的高楼中,采用型钢混凝土结构的占 50%;此外,采用钢结构的

其余高楼中,其底部 1~5 层也多采用型钢混凝土结构。

2. 在我国,型钢混凝土结构应用到高楼中始于 20 世纪 80 年代末。到目前为止,已有数十幢高楼采用或部分采用型钢混凝土结构。

例如,采用型钢混凝土柱的工程有:广州国际汽车大厦(40 层,高 142m);上海世界金融大厦(43 层,高 174m);西安信息中心大厦(52 层,高 189m);上海森茂大厦(48 层,高 198m);厦门远华国际中心(88 层,高 390m);上海金茂大厦(88 层,高 421m);上海环球金融中心(95 层,高 460m)。

(三)结构特点

1. 截面尺寸小 钢筋混凝土柱受到配筋率限值的制约,提高承载力的惟一途径是加大截面尺寸;而型钢混凝土柱可以不受含钢率的限制,承载力相同的情况下,截面面积可以减小一半。

2. 构件延性好 由于柱内型钢的作用,型钢混凝土柱的延性远高于钢筋混凝土柱。1995 年日本阪神地震,与钢筋混凝土结构高楼的破坏率高、破坏程度严重形成对照的是,采用型钢混凝土结构的高楼,破坏轻微。

3. 耐火度高 型钢芯柱有较厚的混凝土保护层,因而其耐火度和防腐蚀性均高于钢结构。

4. 兼作模板支架 型钢混凝土结构中的型钢,在混凝土尚未浇灌之前即已形成钢构架,已具有相当大的承载力,可用作其上若干层楼板平行施工的模板支架和操作平台,因而施工速度仅稍慢于全钢结构。

(四)适用范围

1. 要求柱具有高承载力的大柱网高层建筑。
2. 转换层下面扩大柱网的楼层柱及转换层的托柱大梁。
3. 地震区超过钢筋混凝土结构适用最大高度限值的高楼。
4. 抗震设防的楼房结构类型高位转换时的底部框支层结构。
5. 高楼钢结构向地下室混凝土结构过渡的地上一、二层的框架柱,以避免钢柱与混凝土柱的复杂连接,并缓解结构底部楼层刚度的突变。

四、钢管混凝土结构

(一)杆件组成

1. 钢管混凝土(CFT)杆件是指在薄壁圆钢管、方形或矩形钢管内灌填素混凝土所形成的组合杆件(图 1-7)。

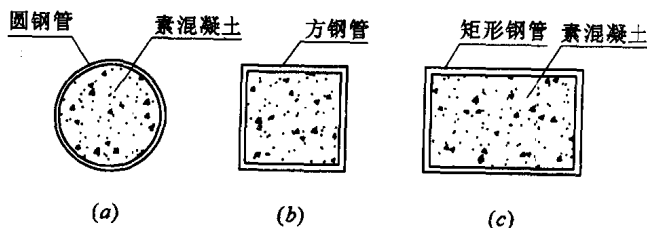


图 1-7 钢管混凝土杆件的截面形式

(a)圆管;(b)方管;(c)矩形管