

现代高层结构最新设计

赵西安 编著



中国建筑科学研究院

现代高层结构最新设计

赵西安 编著



中国建筑科学研究院结构所资科室

一九九九年十一月

前 言

九十年代后期,国内外高层建筑都在迅速发展,尤其是中国,已成为西太平洋沿岸一个新的高层建筑中心,建造数量大,发展速度快,高度已跃居世界前列,而且结构体系之多样,结构布置之复杂,建筑体型之多变,也是国外少见的。新的高层建筑采用了前所未有的新形式、新体系、新材料,也采用了新的结构概念和新的设计方法。

在 21 世纪来临之际,现代高层建筑结构以全新的面貌展示在人们面前,它不同于过去常规高度、常规结构体系的高层建筑结构,所涉及的设计与施工问题,已经远远超出现有高层建筑结构设计规程的适用范围,因此设计人员必须自行考虑合理的结构体系和可靠的结构布置、自行选用适当的设计计算方法、自行采取必要的构造措施,同时,也要自行承担起技术责任。为此,设计人员必须更深刻地了解现代高层建筑结构的进展,更新原有的设计技术,运用最新的设计施工经验和科研成果,以解决现代高层建筑结构设计提出的新任务、新问题。

正由于现代高层建筑结构设计中的大量问题无法从现有的规范、规程中找到技术依据,设计人员在设计中就要运用实际工程中已有的成功经验,从类似的工程中找到解决问题的途径。因此,工程实例成为设计中的最好借鉴。由于本书的目的是为设计人员提供较实用可行的设计方法,因此书中根据国内外现代高层建筑结构的设计经验,较系统、实用地介绍在现代高层建筑结构设计中遇到的新问题和解决的办法,完成手头的实际设计任务。所以本书不着重于理论研究成果,也不再重复常规高层建筑结构的设计,如有需要,读者可参阅其它有关著作。

鉴于上述目的,本书大量引用了实际工程的设计经验,特别引用了国内各设计单位发表的工程设计总结论文,为使设计人员得到借鉴,引用得较为详细,特请有关单位予以支持,并向文章的作者致以深切的谢意,这些实例尽可能在文中标出引文来源,以便读者查阅。

本书从实际出发,引用的文献以中文为主,并多引自历届全国高层建筑结构学术交流会论文集,这些论文集各设计单位均有收藏,容易查找。外文资料仅限于国内较容易找到的国外期刊,设计单位较少收藏的国外研究报告一般不列出。

书中不少内容引自作者所在的中国建筑科学研究院结构所高层研究室的工作成果,此外特向本室同仁郝锐坤教授、吴秀水教授、赵宁、黄宝清、黄小坤、王翠坤高级工程师,王明贵、肖从真博士,刘华锋、刘翔工程师和其它同志表示衷心的感谢。

本书的内容是近几年新出现的工程问题,经验不多,也没有成熟的技术依据,只能提供设计人员参考,读者应根据工程的实际情况判别是否可以采用,或根据自己的经验和判断加以调整。由于作者水平有限,不当之处更是难免,希望广大读者指正和讨论。

赵西安

1999 年 5 月

于中国建筑科学研究院

目 录

第一章 钢筋混凝土超高层建筑

第一节 建筑物向上延伸·····	(1)
第二节 结构选型·····	(10)
第三节 筒中筒结构的结构布置·····	(28)
第四节 框架-筒体结构的布置·····	(38)
第五节 超高层建筑结构设计·····	(44)
第六节 设计实例·····	(67)

第二章 钢结构和钢-混凝土混合结构

第一节 钢结构在高层建筑中的应用·····	(127)
第二节 高层钢结构的结构体系·····	(149)
第三节 钢构件设计·····	(161)
第四节 钢-混凝土混合结构·····	(193)
第五节 工程设计实例·····	(212)

第三章 特殊和复杂结构的设计

第一节 悬挑结构设计·····	(250)
第二节 体型和结构布置复杂的结构·····	(274)
第三节 连体结构和立面开洞结构·····	(299)

第四章 带转换层的高层建筑设计

第一节 结构转换层·····	(338)
第二节 底层大空间剪力墙结构设计·····	(350)
第三节 底层大空间上层鱼骨式剪力墙结构设计·····	(382)
第四节 大底盘大空间剪力墙结构设计·····	(386)
第五节 预应力梁式转换结构·····	(397)
第六节 桁架和斜柱转换层·····	(413)
第七节 箱形或厚板转换层结构·····	(433)
第八节 巨型框架转换层结构·····	(479)
第九节 带转换层结构的一般分析方法·····	(481)
第十节 深梁设计·····	(488)

第五章 高层建筑其它结构的设计

第一节 旋转餐厅设计·····	(501)
第二节 加强层设计·····	(529)
第三节 悬挑构件设计·····	(593)
第四节 屋顶上附属结构·····	(601)

第六章 高层住宅的新结构体系

第一节 短肢剪力墙结构..... (642)

第二节 异形柱框架结构..... (659)

第三节 扁柱-筒体结构 (674)

参考文献..... (681)

第一章 钢筋混凝土超高层建筑

第一节 建筑物向上延伸

一、超高层建筑

“超高层建筑”一词来源于日语,英语中原来并无超高层建筑相应的词条。我国原来也没有这一定义,在工程设计中,8层以上均作为高层建筑。

实际上,作为本词来源的日本,也没有明确的分界线,只是指最高的一些建筑物而言,70年代初,指60m以上的建筑;70年代末,指70m以上的建筑;到80年代,分别提高到90m、100m,目前,日本一般将120m以上的建筑称为“超高层建筑”。从这一历史发展的过程可见,日本的“超高层建筑”一词,完全是人为界定,特指当时日本最高的一些建筑物而言的。应注意的是:日本的划分方法一般是单层建筑(平家建)、多层建筑(重层建筑)、中高层建筑和超高层建筑,较少使用“高层建筑”一词。

相反,欧美等西方国家一般采用 Tall building 或 Highrise building 来代表高层建筑,但是超高层建筑的对应词条:Supertall building 已在1995年出现并应用。

我国自70年代高层建筑迅速发展、高度超过100m后(广州白云宾馆,33层,115m,1975年建成),一直还是沿用“高层建筑”一词,进入90年代,最高建筑已超过200m,只是为了统计方便,每年都将100m以上建筑物予以列表分布,100m成为较高建筑物的标志。但也未冠以特殊的名称。

目前,“超高层建筑”一词流行广泛,但无确切定义,一般泛指国内较高的一些建筑。由于我国《钢筋混凝土高层规程》适用范围上限为150m(抗震设计时最大高度),超过150m高层建筑结构设计已不在《高层规程》适用范围之内,因此,从目前实际情况而言,也可以指高度超过150m的钢筋混凝土高层建筑。

从世界范围而言,可指200m以上的建筑。

二、境外的钢筋混凝土超高层建筑

境外200m以上的高层钢筋混凝土结构多用于非抗震设计(表1.1.1)分布在北美、澳大利亚和东南亚。目前已建成的建筑物中吉隆坡彼得罗纳斯大厦(石油大厦)最高达452m,框架-核心筒结构(图1.1.1),而香港中环大厦(图1.1.2)最为典型。中环大厦不计塔类为72层、301m,三角形筒中筒结构。上部密排柱外筒下部通过转换大梁扩大柱距(图1.1.2b)。美国东海岸纽约、芝加哥等地200m以上的混凝土建筑不少,如芝加哥瓦克大街1号大厦(图1.1.3)为80层、295m高的框架-剪力墙结构,底部至15层混凝土强度为 84N/mm^2 (相当于C80),往上强度逐渐降低至 42N/mm^2 ,楼板为115mm厚。

考虑7度抗震设计的境外较高的混凝土建筑是朝鲜平壤的柳京大厦(102层,305m高,图1.1.4),采用小开间剪力墙结构,间距为4.2m,底层墙厚450mm和400mm,混凝土强度 45N/mm^2 。为减少荷载,上部逐渐内收成锥状。

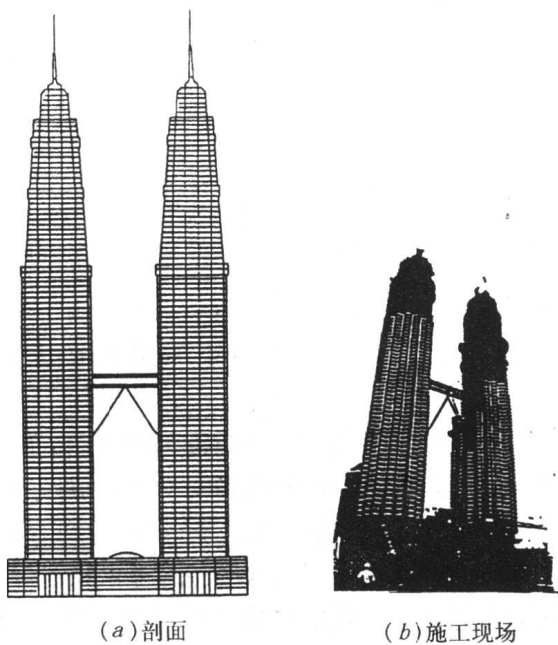


图 1.1.1 彼得罗纳斯大厦(95 层, 452m)

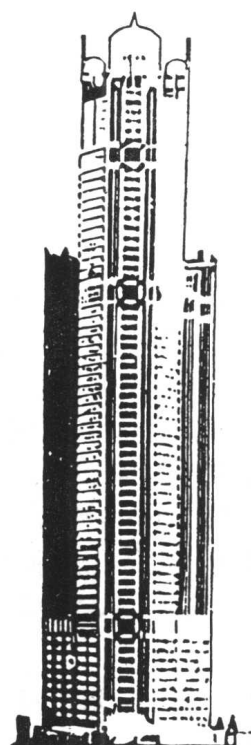


图 1.1.3 芝加哥瓦克大街 1 号大厦

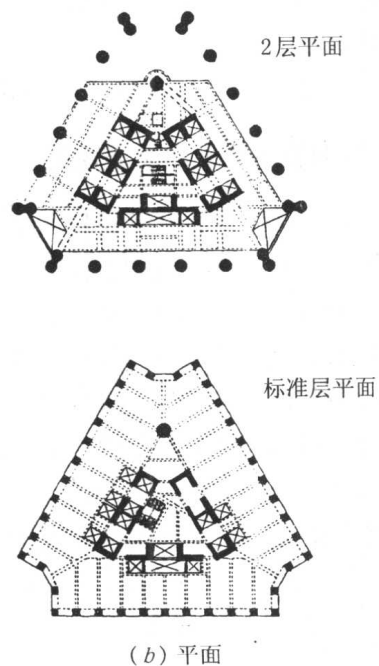
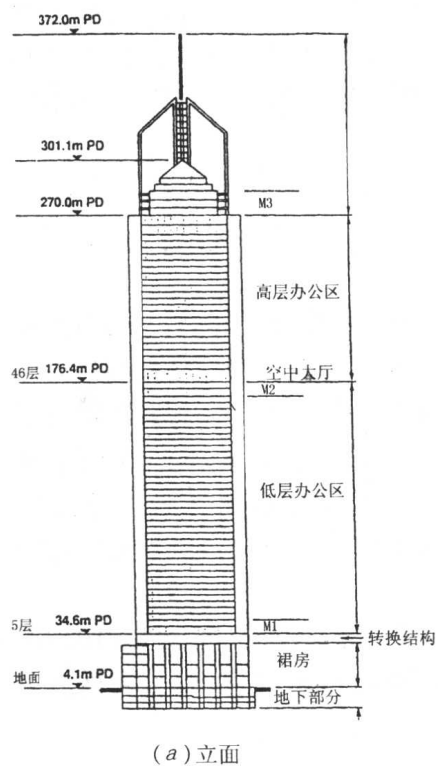


图 1.1.2 香港中环广场大厦

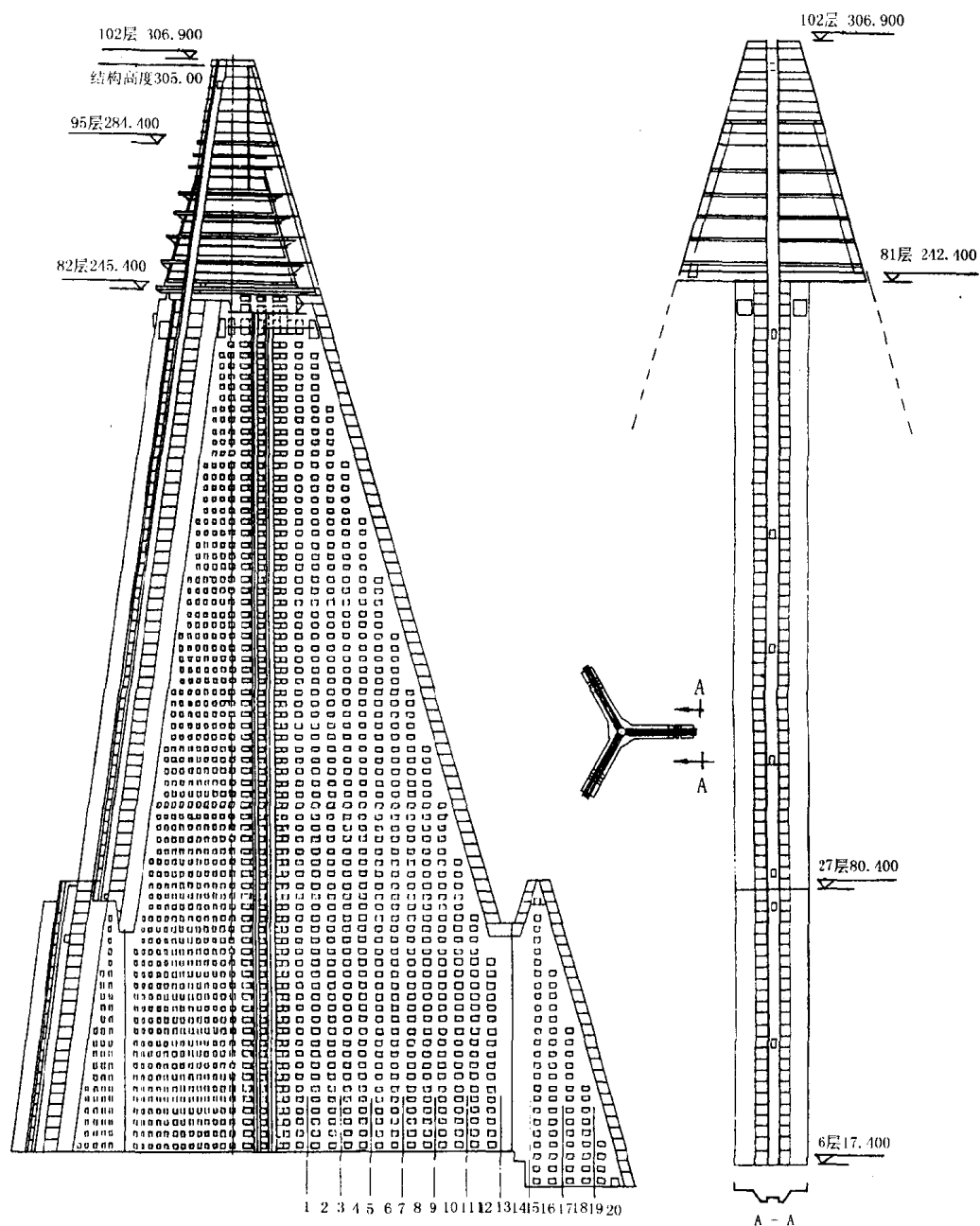


图 1.1.4 平壤柳京大厦(102 层, 结构高度 305m)

图 1.1.5~图 1.1.9 为表 1.1.1-1 中几座 200m 以上钢筋混凝土超高层建筑, 均为非抗震设计。

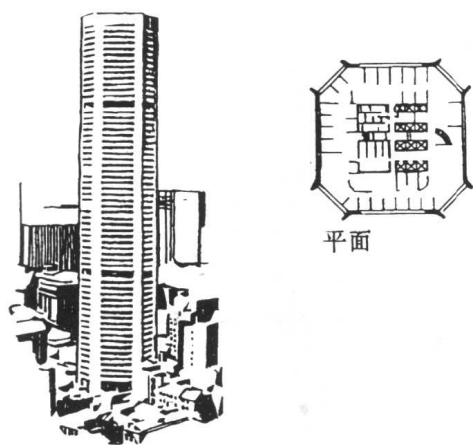


图 1.1.5 悉尼 MLC 中心(70 层, 240m)

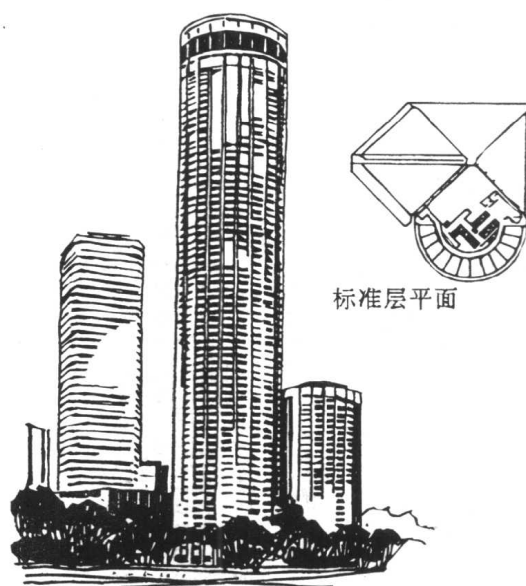


图 1.1.6 新加坡瑞夫城市饭店(70 层, 226m)

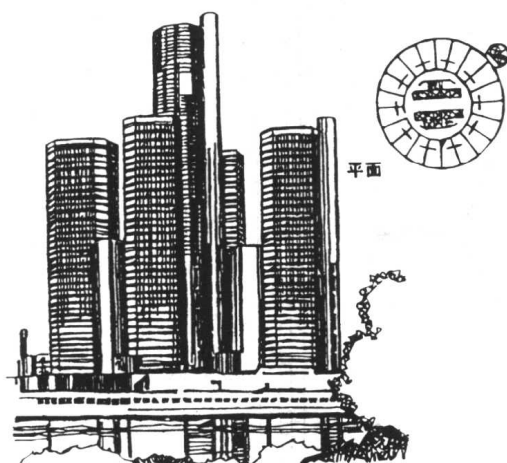


图 1.1.7 美国底特律第一复兴饭店
(72 层, 225m)

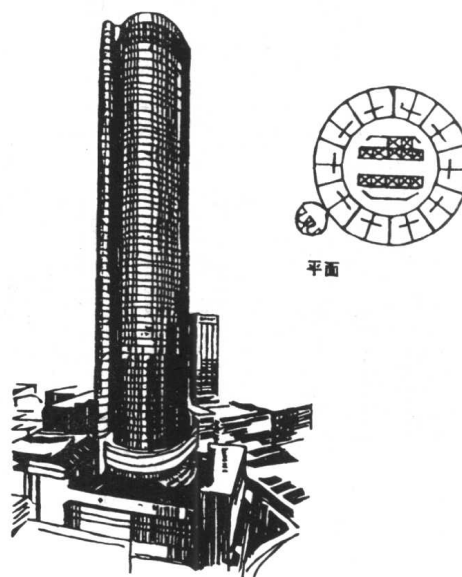


图 1.1.8 美国亚特兰大, 桃树广场饭店
(60 层, 264m)(One Peach Tree Center)

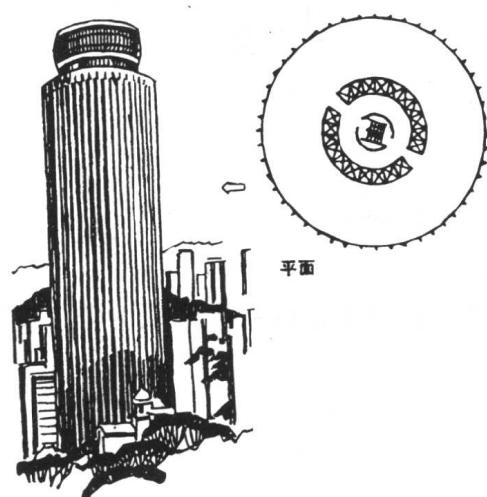


图 1.1.9 香港合和中心(65 层, 216m)

非抗震设计的钢筋混凝土超高层建筑

表 1.1.1

名 称	城市	层数	高度(m)	说 明
Central Station	香港	85	500	框架-核心筒, 建设中, 1999
Petronas Tower	吉隆坡	88	452	框架-核心筒, 1996
Plaza Rakyat	吉隆坡	78	382	框架-核心筒, 1998
中环大厦	香港	78	374, 316 *	筒中筒, 1992
BAiyok Tower II	曼谷	90	320	框架-核心筒, 1998
Two Prudential Plaza	芝加哥	64	298	框架-核心筒, 1990
311 South Wacker	芝加哥	65	296	剪力墙, 1990
1 Wacker	芝加哥	80	295	剪力墙, 1992
水塔广场大厦	芝加哥	74	262	剪力墙, 1993
Natinal Bank	亚特兰大	60	265	框架-核心筒, 1993
One Peach Tree Center	亚特兰大	60	264, 220 *	框架-核心筒, 1993
Messeturm	法兰克福	63	267	框架-核心筒, 1991
城市大厦	纽约	71	248	框架, 1989
里奥托中心	墨尔本	70	243	框架-核心筒, 1985
MLC 中心	悉尼	70	240	框架-核心筒, 1978
Tun Abdul Razjak	马来西亚	65	245	框架-核心筒, 1985
Carnegie Hall Tower	纽约	60	231	框架-核心筒, 1991
Raffles City Hotel	新加坡	70	226	框架-核心筒, 1986
卡尔登中心大厦	约翰内斯堡	50	220	
合和中心	香港	65	216	圆形筒中筒, 1968
第一复兴饭店	底特律	73	225	框架-核心筒, 1974
Olympia Ceter	芝加哥	64	226	筒中筒, 1984
太古中心	香港	56	228	框架-核心筒, 1991

抗震设计的钢筋混凝土超高层建筑

表 1.1.2

金茂大厦	上海	95	420, 395 *	框架-核心筒, 1998
远华大厦	厦门	88	390	框架-核心筒, 2001
中信大厦	广州	80	372, 320 *	框架-核心筒, 1997
邮电大厦	厦门	66	256	框架-核心筒, 2000
中国银行大厦	青岛	58	241	筒中筒, 1998
世界贸易大厦	武汉	58	226	筒中筒, 1998
鸿昌广场大厦	深圳	60	218	筒中筒, 1996
国际贸易中心	武汉	53	212	筒中筒, 1998
金鹰国际商厦	南京	58	206	筒中筒, 1996
森茂大厦	上海	46	201	框架-核心筒, 1996
广东国际大厦	广州	63	199	筒中筒, 1992
大都会大厦	广州	48	199	框架-核心筒, 1996
柳京大厦	平壤	101	305	剪力墙, 1990
Lopez Tower	马尼拉	60	250	框架-核心筒, 1999

说明:带*的高度为结构高度。

三、国内的混凝土超高层建筑

至 1998 年, 国内已建、施工和设计中超过 150m 的混凝土建筑约 60 座, 其中超过 200m 的约 20 座, 最高的广州中信广场大厦 80 层, 322m, 已于 1996 年建成。而型钢混凝土结构的金茂大厦, 95 层, 395m, 于 1998 年建成。

我国水泥、砂石料资源丰富, 劳动力价格低, 采用钢筋混凝土结构有较大的经济效益, 从目前国

内的情况来看,混凝土结构在 70 层以下应用是合理的,可行的。在有充分依据的情况下,还可以略高一些。

内地最早建成的超高层建筑是深圳国际贸易中心(1985),它也是国内第一个筒体结构,塔楼地下 3 层,地上 50 层,高度 160m(图 1.1.10)。平面为 $34.6\text{m} \times 34.6\text{m}$ 的正方形,中央部分为 $17.3\text{m} \times 19.1\text{m}$ 的核心筒,外围是柱距为 3.75m 的外筒,角部为 L 形角墙,顶部外周设置了高度为 6.9m 的环梁。混凝土强度为 C45。楼面梁高 450mm,梁间距 3.75m。国内首次采用三维空间分析程序 SATS(建研院结构所)计算。

九十年代建成的最高的混凝土建筑是广州广东国际大厦,63 层,199m(图 1.1.11)。平面尺寸为 $37\text{m} \times 35\text{m}$,内筒尺寸为 $22.3\text{m} \times 16.8\text{m}$,混凝土强度 C40。楼面为无粘结预应力平板。本工程进行了结构模型试验和风洞试验,并进行了时程动力分析。

进入九十年代,我国混凝土高层建筑已超过 300m 高度,目前已建成最高的建筑是广州中信广场大厦,80 层,322m 高(图 1.1.12)。中信广场大厦采用平面为 $46.3\text{m} \times 46.3\text{m}$ 的正方形框架-筒体结构,下部通过跨度 45m,截面为 $2.75\text{m} \times 7.55\text{m}(h)$ 的巨型大梁进行结构转换,将外框架改为四根巨型 L 形角柱落地,角柱为 $7.55\text{m} \times 7.55\text{m} \times 2.75\text{m}$ 。下部楼层混凝土强度为 C60。

青岛中国银行大厦(58 层,241m)采用 1/4 圆的平面,筒中筒结构(图 1.1.13、图 1.1.14)。外框筒为剪力墙筒,筒身开洞较小,具有较大的侧向刚度。

深圳鸿昌大厦也采用了八角形的剪力墙外框筒。本工程 60 层,高 218m(图 1.1.15),其设计详见本章第四节。

超过 200m 已建工程还有武汉国际贸易中心,53 层,212m(图 1.1.16)。

目前正在设计和基础施工最高的工程还有厦门远华大厦(88 层,390m),为型钢混凝土柱,钢筋混凝土内筒的椭圆形结构(图 1.1.17)。外柱直径为 2600mm,核心筒厚 1200mm~900mm。

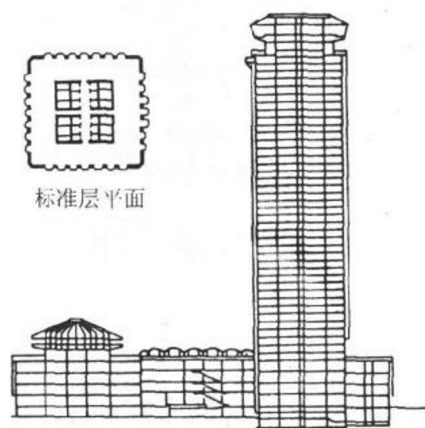


图 1.1.10 深圳国际贸易中心大厦



图 1.1.11 广东国际大厦(63 层,199m)

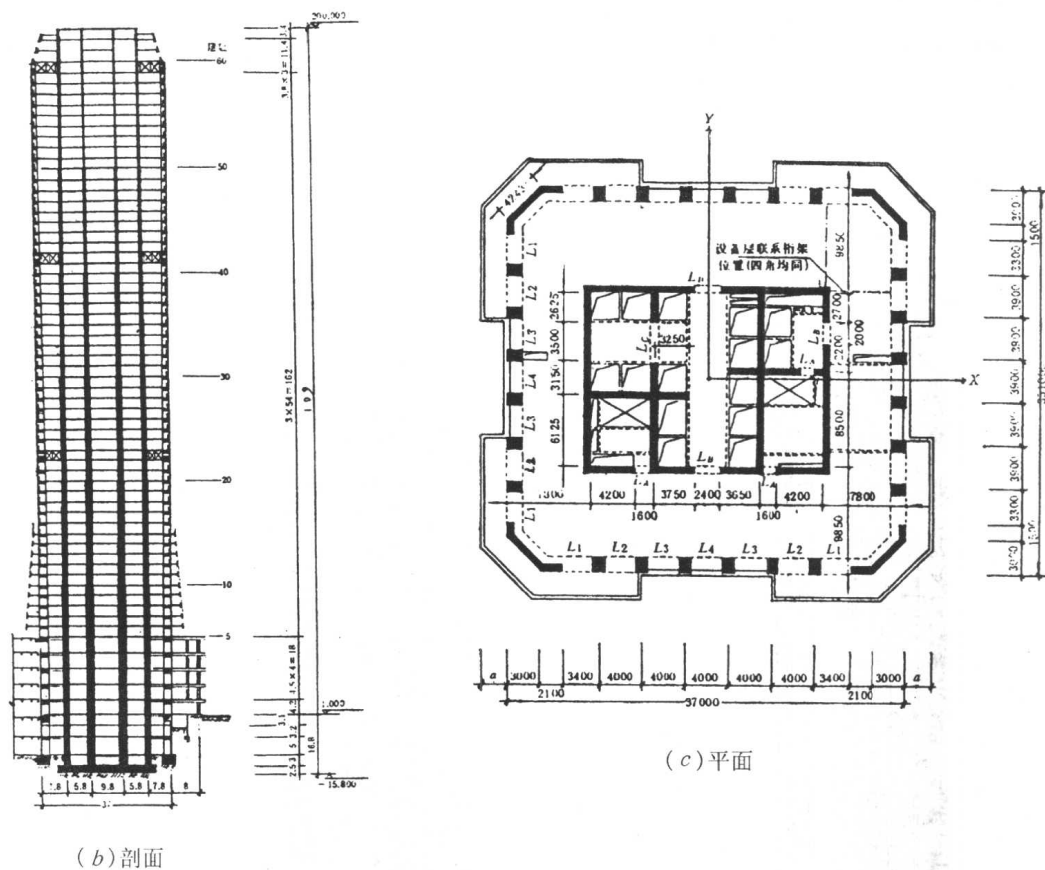


图 1.1.11 广东国际大厦(63 层,199m)

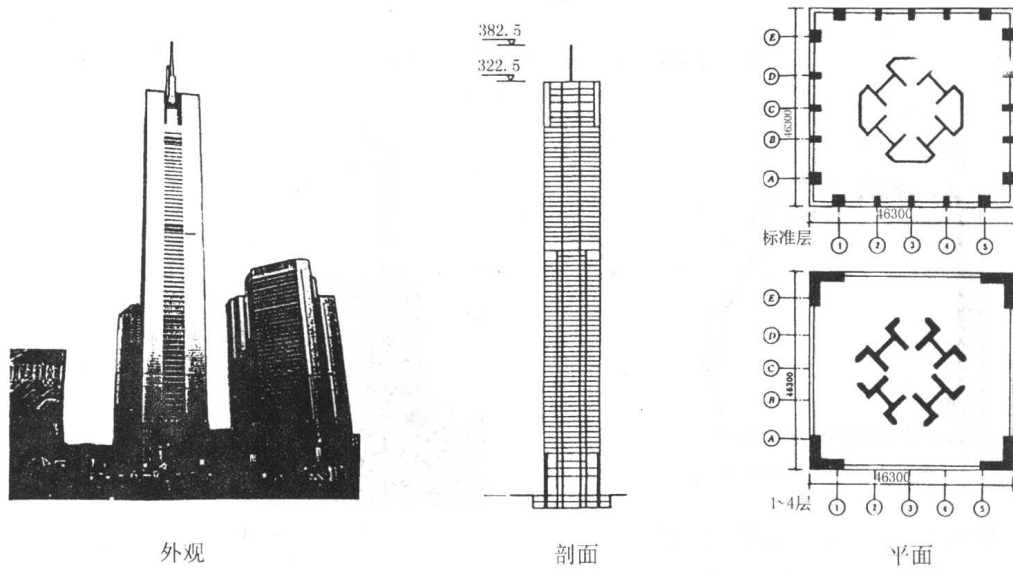


图 1.1.12 广州中信广场大厦(80 层,322m)

上海金茂大厦是已建成的最高的型钢混凝土柱-核心筒结构。外周 8 根型钢混凝土柱(底截面 $1500\text{mm} \times 5000\text{mm}$), 截面型钢含钢率仅为 2%, 基本上是钢筋混凝土柱, 角部 8 根钢柱内充混凝土 (图 1.1.18)。

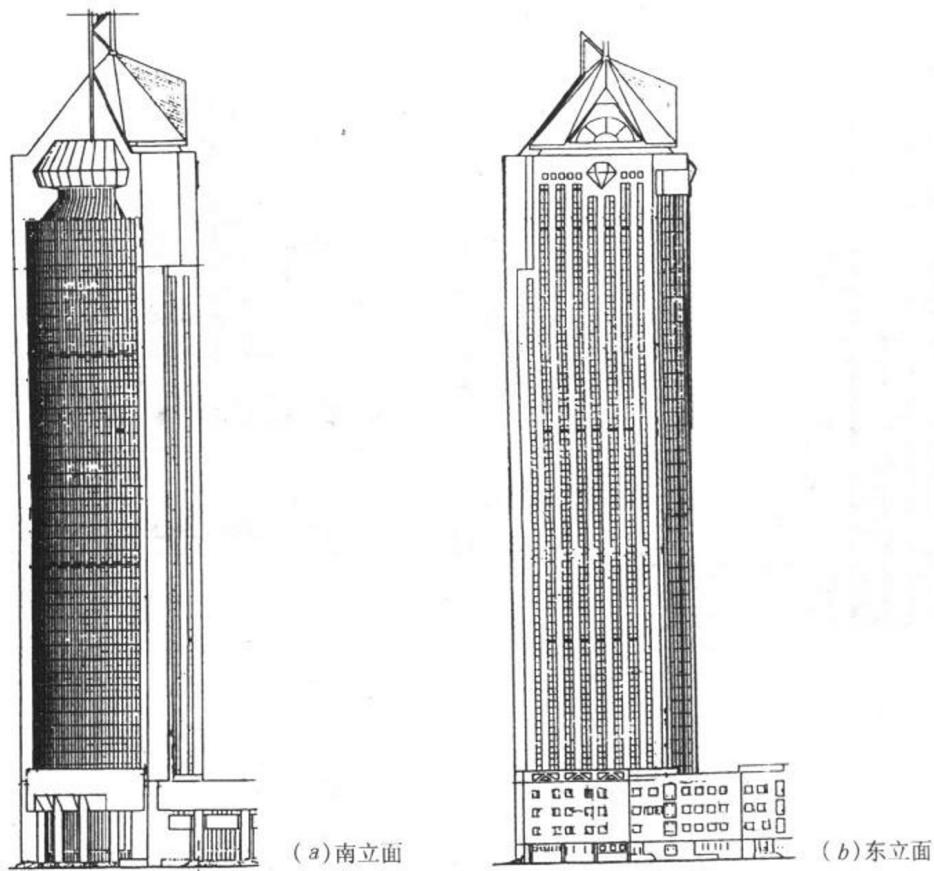


图 1.1.13 青岛中国银行大厦(50 层,241m)

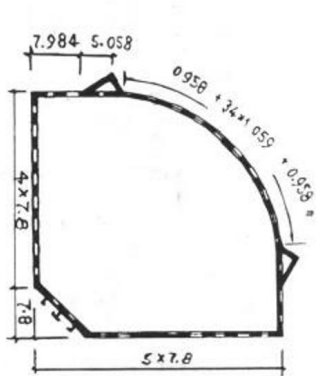


图 1.1.14 青岛中国银行大厦
外框筒示意(单位:m)



图 1.1.15 深圳鸿昌大厦
(60 层,218m)

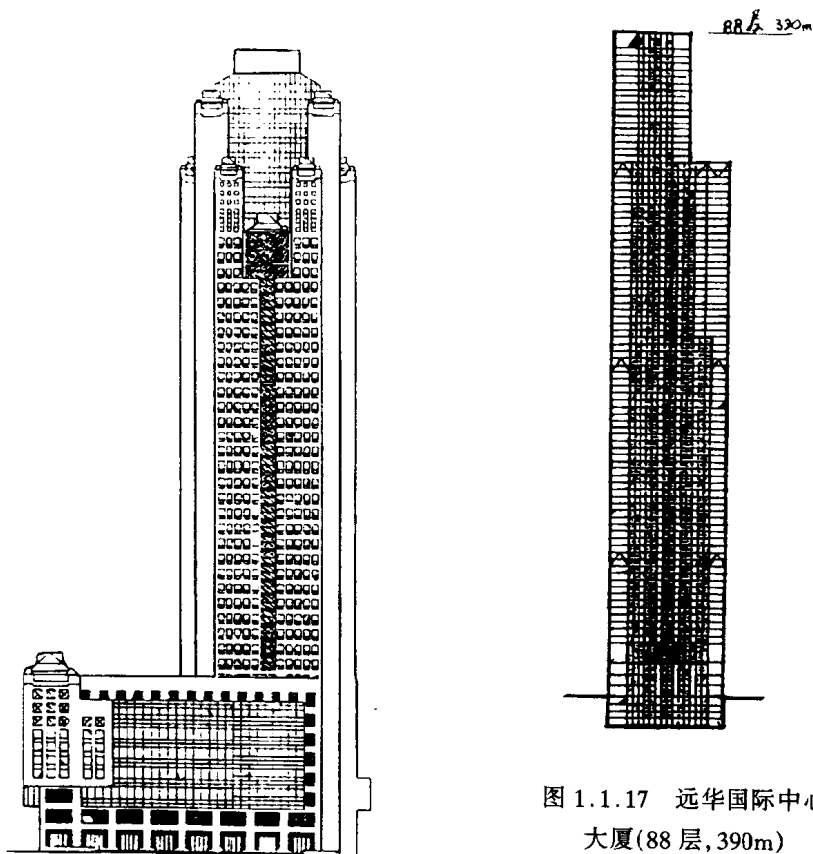


图 1.1.17 远华国际中心
大厦(88 层,390m)

图 1.1.16 武汉国际贸易中心
大厦(53 层,212m)

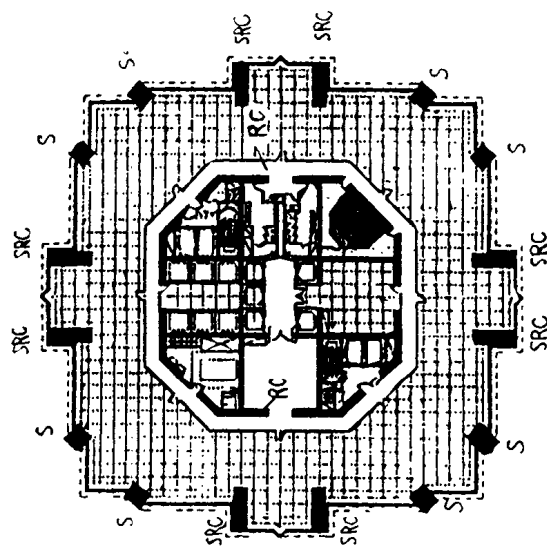


图 1.1.18 上海金茂大厦平面(95 层,395m)

第二节 结构选型

一、剪力墙结构

剪力墙结构有很大的刚度,一些较高的建筑中可以采用,如朝鲜平壤的柳京大厦(102层,305m)、美国芝加哥的水塔广场大厦(74层,262m)。采用剪力墙结构室内空间小,结构自重大,目前国内应用很少。

二、框架-剪力墙结构

框架-剪力墙结构有较大的刚度,也有较灵活的空间,可用于150m~200m范围内的办公建筑和综合建筑。

图1.2.1为香港渣打银行大厦(42层,191m),它邻近汇丰银行大厦,场地狭窄,所以自下而上台阶式内收。

海口海南新时代广场设计方案(图1.2.2为63层、212m高,为三叉形平面框架-剪力墙(筒体)结构,平面外包尺寸42.3m×48.6m, $H/B=5$, 8度抗震设计, II类场地,基本风压 0.7kN/m^2 。构

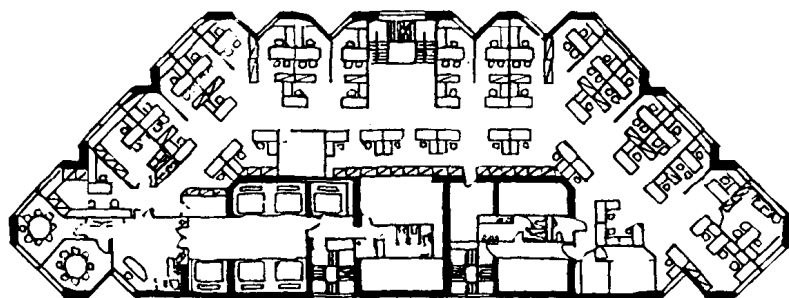


图 1.2.1 香港渣打银行新大厦

件基本尺寸如下:

中都剪力墙壁厚、底层900mm~顶层500mm

边柱截面:1000mm×2000mm~800mm×1200mm

中柱截面:1400mm×1400mm~900mm×900mm 混凝土为C60。计算结果周期 $T_1=3.72\text{s}$,风力作用下最大顶点位移1/950,层间位移1/900;地震作用下最大顶点位移1/850,层间位移1/800。本工程由广东省建筑设计研究院设计。

已建成的沈阳市东北电力负荷预测中心大厦(44层,169.2m)也采用了框架-剪力墙结构(图1.2.3)。

国外超高层钢筋混凝土建筑,采用框架-剪力墙结构也不少。图1.2.4为美国纽约 Cityspire 大厦,75层,248m,按百年一遇,风速47m/s进行设计。基本自振周期 $T_x=5.5\text{s}$; $T_y=5.4\text{s}$; $T_\theta=2\text{s}$ 。在最大风力作用下顶点位移为 $H/500$ 。其基本抗侧力体系为剪力墙和框架,但中部设有外伸大梁组成的加强层,各层楼板厚为216~305mm。楼面梁高508mm。混凝土强度56MPa,空间分析采用SAP4程序。

图1.2.5、1.2.6为纽约 Canegle Hall Tower 大厦,该工程62层,230.7m。按百年一遇最大风

速 47m/s 设计,在这风速下顶点位移要求不大于 $H/500$,为保证使用质量,在该风力作用下,加速度不大于 20gal,楼面梁高 457mm,周边裙梁高 762mm,楼板厚 230mm。混凝土强度 58MPa。

三、筒体结构

1. 筒体结构的特点

筒体结构是超高层建筑最常用的结构形式,目前绝大多数超高层办公、旅馆和综合性建筑采用这种结构体系。

筒体结构宜采用圆形、方形和正多边形平面,矩形平面长宽比不宜大于 1.5。筒体结构宜采用双轴对称的平面布局。

筒体结构的基本特征是:水平力主要由一个或多个空间受力的竖向筒体承受。筒体可以由剪力墙组成,也可以由密柱框筒构成。

筒体结构的类型很多,如图 1.2.7 所示。图中 *a* 为最一般的类型——筒中筒结构,它由中央剪力墙内筒和周边外框筒组成。内筒集中布置楼(电)梯间和服务性房间,由较密集的剪力墙形成一个复杂截面形状的薄壁筒;外周边则由密柱(一般柱距 3m 以内,有些工程柱距甚至为 1.8~2.0m)、高梁所组成的框筒,具有非常大的刚度和承载力。密柱框筒到下部楼层往往要通过转换楼层变为大柱距以形成入口。

当建筑功能不希望外周设置密柱框筒时,外周也可设置大柱距的框架柱,这样,外周柱不再作为一个整体工作,结构只剩一个内筒,此时成为框架-筒体结构(图 1.2.7b)。

某些办公和通讯建筑不希望设置内筒,以产生一个很大的自由灵活布置的空间,这时只保留一个外框筒,而成为单一的框筒结构(图 1.2.7c)。

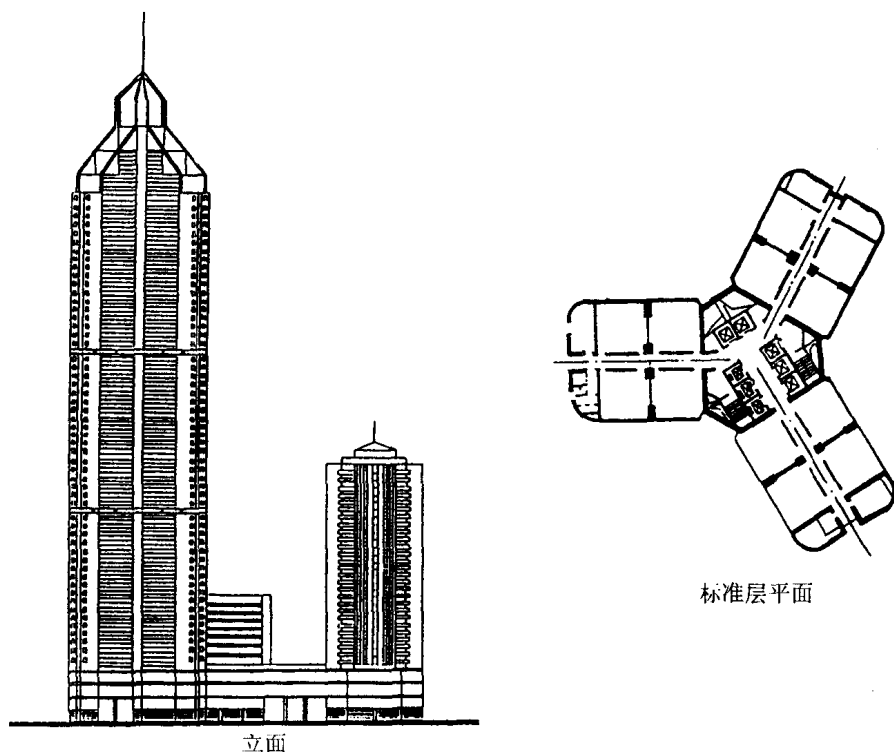


图 1.2.2 海南国际大厦

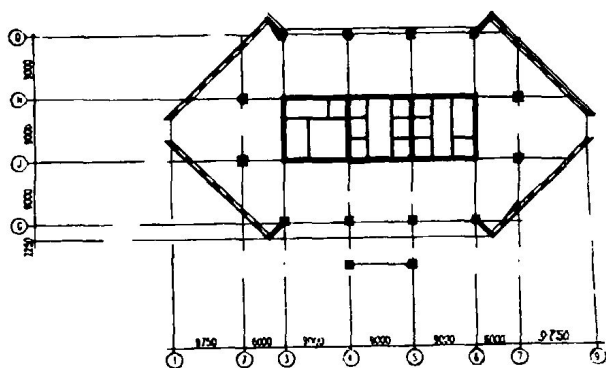


图 1.2.3 东北电力负荷预测中心大厦(44层, 169.2m)



图 1.2.5 纽约 Carnegie Hall Tower 大厦

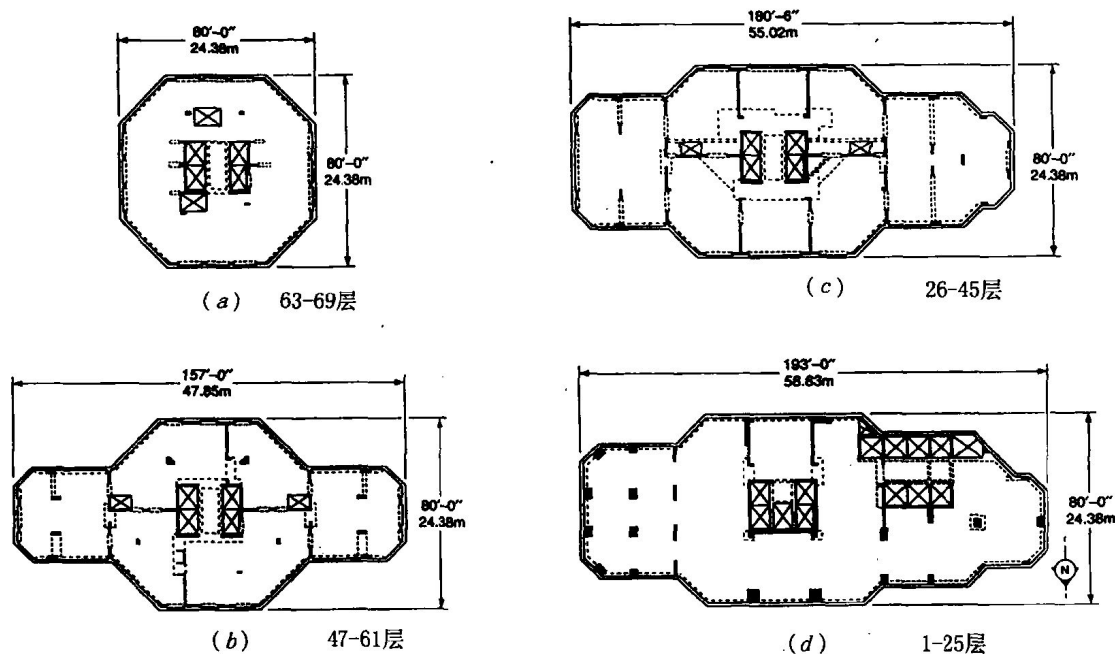


图 1.2.4 纽约 Cityspire 大厦平面

在建筑平面上,也可以多个筒体套叠,成为多重筒结构(图 1.2.7e),或若干个框筒并联,共同工作而采用成束筒结构(图 1.2.7e)。

图 1.2.7f 为多筒体结构,在建筑平面上分散布置多个筒体。

筒体是空间整截面工作的,如同一个竖在地面上的悬臂箱形梁。框筒在水平力作用下,不仅平行于水平力作用方向上的框梁(称为腹板框架)起作用,而且垂直于水平力方向上的框架(称为翼缘