

高层建筑筒体结构的计算

王荫长 编著

科学出版社

1988

高层建筑筒体结构的计算

王荫长 编著

科学出版社

1988

内 容 简 介

本书为高层建筑筒体结构静力计算的专著,系统地阐述了典型和复杂形状筒体结构的计算原理。全书共五章,对规则筒中筒的各类简化计算方法和不规则筒体结构的几种一般性计算方法,作了较为详细的论述。

本书可供从事建筑结构和高层建筑结构科学研究的科技人员,以及高等院校建筑结构类专业的师生和研究生参考。

高层建筑筒体结构的计算

王荫长 编著

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1988年8月第一次印刷 印张:8 3/8 插页:1

印数:0001—9,480 字数:187,000

ISBN 7-03-000472-8/TU·11

定价: 3.10 元

序 言

筒体结构抗侧力的刚度较好,可以建造起超高层、大空间的高层建筑,能满足多种不同使用功能的要求。

近些年来,国内修建的高层钢筋混凝土房屋,采用筒体结构的实例逐渐增多。如北京的国际大厦、中央彩电大楼、中国银行大楼,上海的电讯大楼、联谊大厦,南京的金陵饭店,广州的南海石油中心主楼,深圳的国际贸易中心、外贸中心、北方大厦、华联大厦,珠海的蓝天酒家,厦门的福联大厦,烟台的福山酒家,淄博的齐鲁大厦,秦皇岛的物资大厦,大连的国际博览中心,石家庄的工贸中心,大理的华侨饭店等等,分别采用典型的矩形平面筒中筒、筒体-框架,以及圆形、三角形、Y形等筒体结构。

为适应高层建筑结构设计的需要,国内有关单位已编制了高层建筑结构受力分析的电子计算机计算程序^[25,45],一些出版社已出版几部高层建筑结构设计和计算原理的书籍。在已出版的书中,多以剪力墙、框架-剪力墙和壁式框架的计算理论为主,对筒体结构的计算原理缺少全面论述。如参考文献[2,26,42,43]等只是不同程度地讲述一些规则筒中筒的计算方法,参考文献[41]仅介绍组合薄壁杆件的计算理论,没有对筒体结构作讨论,而参考文献[21,40]则没有编入高层筒体结构计算的内容。

因此,目前亟需一本系统地讲述高层建筑筒体结构计算原理和方法的专著。为满足这方面的需要,编者根据本人十年来对高层建筑筒体结构课题的研究,利用西安冶金建筑学

院几届结构力学专业研究生所学“高层建筑结构计算”课程的讲稿和给国内几个单位举办“高层建筑筒体结构受力分析讲座”的讲义,整理编写成本书。

第一章概述典型高层建筑筒体结构的类型和受力性能,便于读者对后面四章的计算原理加深理解。

第二章介绍典型的矩形平面框筒的计算,计算时利用框筒受力变形的对称性,采取近似和简化的算法。其中,有关框筒等效连续化的方法,是简化由离散杆件组成筒体结构受力分析的一种有效措施。

第三章讲述薄壁筒的计算方法。为便于了解有的计算方法中按薄壁杆件计算高层建筑薄壁芯筒,前四节扼要列出薄壁杆件约束扭转理论的主要内容,并对薄壁杆弯曲扭转的单元刚度矩阵作了推导。最后两节有关薄壁筒的框架化解法,对已编有平面框架计算程序的单位有一定参考价值。

第四章讲述矩形平面筒中筒的计算方法,其中近似解法在初步设计时可用来估算结构断面尺寸,利用矩形筒中筒对称性的几种简化算法能满足一般工程的精度要求。

第五章讲述的几种方法,不论高层建筑筒体结构有无对称性,均适用,属于一般性计算方法。由于近年来采用的高层建筑体型日益复杂,常不限于典型的筒中筒结构,故本章内容更为重要。

本书是一本阐述高层建筑筒体结构计算原理和计算方法的书,没有编入计算机计算程序的内容。本书力求文字简明,原理阐述尽量详细。只要具有结构矩阵分析和有限单元法初步知识的读者,均可通过自学理解并掌握本书的计算原理和方法。

在本书的编写过程中,包世华教授审读了手稿,并提出了不少宝贵意见,特此致谢。

目 录

序言.....	iii
第一章 高层建筑筒体结构的类型和受力性能.....	1
§ 1-1 高层建筑中常用的抗侧力结构体系	1
§ 1-2 筒体结构的类型	4
§ 1-3 筒体结构的受力性能	6
第二章 矩形平面框筒的简化计算方法.....	10
§ 2-1 双槽形截面近似算法	10
§ 2-2 等效平面框架法	17
§ 2-3 框筒的等效连续化	25
§ 2-4 能量法 (I): 应变余能驻值条件的应用	30
§ 2-5 能量法 (II): 矩形规则框筒的简化分析	41
第三章 单个薄壁内筒的计算.....	50
§ 3-1 开口和闭合薄壁截面的扇性几何性质	50
§ 3-2 开口薄壁截面杆件的约束扭转	72
§ 3-3 闭合薄壁截面杆件的约束扭转	87
§ 3-4 薄壁截面杆件的单元刚度矩阵	98
§ 3-5 薄壁内筒连系梁的等效连续化	103
§ 3-6 用高次平面应力元分析薄壁内筒	104
§ 3-7 薄壁内筒的框架分析法	118
§ 3-8 薄壁内筒的等效平面框架分析法	130
第四章 矩形平面筒中筒的计算.....	142
§ 4-1 矩形筒中筒弯曲的近似计算	142
§ 4-2 矩形筒中筒弯曲的等效平面框架解法	144
§ 4-3 矩形筒中筒弯曲的能量解法	147
§ 4-4 矩形筒中筒扭转角微分方程的简化分析	155

§ 4-5 矩形筒中筒扭转的等效平面框架解法	161
第五章 高层建筑筒体结构一般计算方法	165
§ 5-1 空间杆件矩阵分析法	167
§ 5-2 平面框架子结构法	188
§ 5-3 平面应力有限条法	212
§ 5-4 样条函数子结构法	232
参考文献	254

第一章 高层建筑筒体结构的 类型和受力性能

§ 1-1 高层建筑中常用的抗侧力结构体系

在设计建筑结构时,要求结构能安全承担竖向荷载(如结构自重和楼面活荷载等)和水平荷载(如风荷载和地震荷载等水平侧力)。高层建筑的特点是水平荷载成为结构设计的主要控制因素。根据使用要求和建筑物总高度,选择经济而有效的抵抗水平侧力的结构体系,并且选取适当方法进行内力和位移计算,是设计高层建筑结构的一项重要内容。

国内建成的高层建筑,多用钢筋混凝土结构。钢结构高层建筑,近两年正开始兴建。钢筋混凝土高层建筑,常用以下几种结构体系。

1. 框架结构

采用框架作承重结构时,梁和柱既承担竖向荷载,也承担水平侧力。高层框架抗侧力刚度比其他结构为小,在强烈地震下水平位移较大,非结构性破坏常较严重,震后修复工程量较大。在需要抗震设防的地区,框架结构以不超过 10 层、高度小于 30 米为宜。设计烈度为 9 度时,最好不采用纯框架结构体系。

由于框架结构具有分间灵活、使用方便的优点,国内已建造几座较高的钢筋混凝土高层框架结构,如北京中国民航局办公楼,地上 15 层总高度为 60 米。北京长城饭店采用延性

框架, 22 层总高度达 80 米^[3]。

2. 框架-剪力墙结构

在框架结构中设置一定数量的剪力墙, 可提高结构体系的抗侧力刚度。由于框架的水平位移曲线为剪切型的, 剪力墙的水平位移曲线为弯曲型的, 两者协同工作后, 结构底部的水平剪力由剪力墙承担, 改善了框架的受力工作, 在结构上部框架对剪力墙有支承作用, 分担一部分水平剪力。

框架-剪力墙结构的抗震性能比纯框架结构好些, 分间比纯剪力墙结构灵活些, 国内多用于 10~20 层的办公楼和旅馆等建筑。框架-剪力墙结构的高度, 在非地震区可达 120 米, 在地震区, 7 度设防时可到 100 米, 8 度设防时可到 90 米, 9 度设防时不宜超过 40 米。北京饭店东楼为 18 层、80 米高, 是我国 70 年代 8 度地震区最高的框架-剪力墙结构。武汉晴川饭店的框架-剪力墙结构, 26 层, 90 米高^[3]。

3. 剪力墙结构

剪力墙结构体系在横向和纵向全都设置剪力墙, 作为承重结构。相对于框架结构和框架-剪力墙结构而言, 剪力墙结构属于刚性结构。剪力墙结构可高于 30 层。过去国内的高层住宅和旅馆采用剪力墙结构的较多, 如沈阳重型机械厂住宅楼 20 层、60 米高; 广州白云宾馆 33 层, 高 112 米, 是 70 年代国内最高的建筑; 白天鹅宾馆 31 层, 高 103 米^[3]。

为满足在房屋底层有较大空间的需要, 高层建筑有时采用“框支剪力墙”结构体系, 即在底层或下部几层把一部分剪力墙中断, 不伸入基础, 代以框架承重, 从而形成较大的房间。如广州花园酒家, 31 层, 109 米高, 下几层为大空间; 深圳国贸公寓, 28 层, 90 米高, 下部 1~3 层为大空间。

这种框支剪力墙结构的抗侧力刚度在底部削弱较大,对抗震很不利。在地震区选用时,宜进行全面地受力和周详的设计。由于房屋使用功能上的需要,国内已有一定数量的高层建筑采用框支剪力墙结构体系。近几年国内对框支剪力墙的受力和设计,有较深入的研究。例如,在《第八届全国高层建筑结构学术交流会论文集》中(会议于1984年5月在安徽屯溪召开),载有十多篇框支剪力墙的论文;在《第三届国际高层建筑会议论文集》中(会议于1984年12月分别在香港和广州召开),也有三篇框支剪力墙的论文。

4. 筒体结构

由结构内部的电梯间、管道设备通路等竖向薄壁筒体和外围具有密柱及深梁的框架筒组成的筒状结构,在各层楼面处用平面内刚度很大的楼板联结成一个空间受力的结构体系,称为筒体结构。筒体结构的抗侧力刚度很大,内部可不设置太多的柱或剪力墙,房间分隔和利用比较灵活。从本世纪60年代初为适应大空间、超高层建筑的需要而形成筒体结构以来,筒体结构平面图形多种多样,比较常用的有单个筒、筒中筒、组合筒等类型(见§1-2)。

国内近几年设计和建造的框架筒结构,有北京的国际贸易信托投资公司办公楼(29层,102米高),北京的长安饭店(26层,88米高)。筒中筒结构也有几座,如北京的中国银行大楼(22层,86米高),上海电讯大楼(原设计20层、125米高,后改为24层、131.8米高),深圳的国际外贸中心办公楼(原设计45层、150米高^[3],施工时设计变更改为地下3层、地上50层^[4],顶部旋转餐厅屋盖上设有直升飞机停机坪,到女儿墙顶总高为159.45米,是目前国内最高的建筑)。

5. 悬挂结构

国外还建造了悬挂结构的高层建筑。其结构形式,有的在 中部设置一个刚度很大的芯筒,各层房间向四面伸出,悬挂在芯筒结构上;有的采用多个承重筒体,用强大的钢索托住各层房间;有的用拱式结构承重。悬挂结构的特点为:自重较轻,基础只设在筒体和拱脚处,基础面积小,地基不均匀沉降影响较小。

§ 1-2 筒体结构的类型

高层建筑使用的筒体结构常由一些薄壁筒和框架筒组成。根据筒体结构的平面布置和设计时水平侧力由哪部分筒体承担,典型的筒体结构有下列几种类型。

1. 单个筒结构

(1) 内简单筒结构。

由电梯井、楼梯间、管道井或服务间等在结构平面的中心部分形成一个由钢筋混凝土墙壁围成的筒状核心,称为内筒。如果在设计时把内筒作为主要抵抗水平侧力的结构,外围框架按承受竖向荷载来设计,就把这样的抗侧力结构体系叫内简单筒结构。图 1.1 为内筒是一个单筒体的示意图,其中外围框架在设计时不承担水平力。

(2) 外简单筒结构。

结构四周的墙壁形成一个筒体,各面墙壁上开有密排的窗洞,或由密柱和深梁组成的筒状空间框架体系,常称为框架筒,简称“框筒”。如果内部电梯井刚度不很大,设计时内筒和少量的内柱只令其承担竖向荷载,水平侧力完全由外框筒

承担，这种抗侧力结构体系计算时就属于外简单筒结构。图 1.2 为一个外框简单筒结构的示意图，其中内筒和内部的柱子在计算时不承担水平侧力。

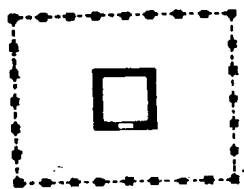


图 1.1 内简单筒结构

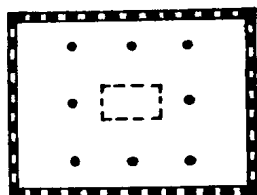


图 1.2 外简单筒结构

2. 筒中筒结构

外筒和内筒共同抵抗水平侧力，各层楼盖把内、外筒联结在一起，形成一个抗侧力刚度比单个筒很多的空间受力的结构体系，称为筒中筒结构。图 1.3 为一个典型的筒中筒结构示意图，其中外筒是框架筒，内筒是由八个薄壁竖筒组成的组合筒体。

3. 三重筒结构

根据房屋的使用要求，在外筒和内筒之间再加设一个中筒，就形成三重筒。通过各层楼盖把外筒、中筒和内筒联结成

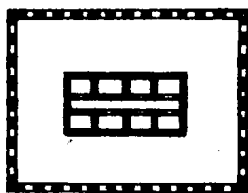


图 1.3 筒中筒结构

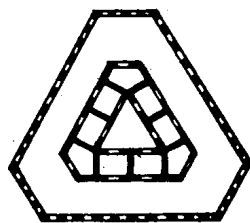


图 1.4 三重筒结构

为整体，共同抵抗水平侧力。三重筒结构的抗侧力刚度一般比筒中筒结构抗侧力刚度更大一些。图 1.4 表示一个平面呈三角形的三重筒结构的示意图。

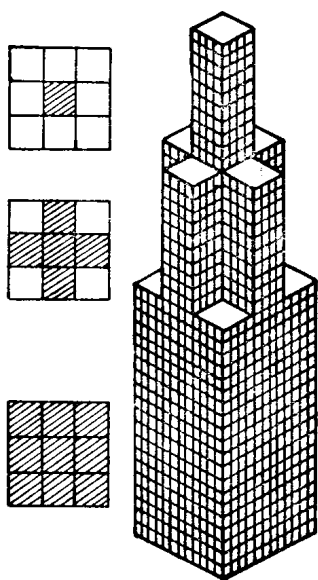


图 1.5 组合筒结构

图 1.5 表示在三个不同高度处陆续中断少数单筒而形成的高层建筑结构示意图。

组合筒还有一个特点，是通过单个筒体的平面组合，可以根据需要形成广阔的楼层面积。

4. 组合筒结构

由若干个单筒集合成一体，形成一个空间刚度极大的结构体系，叫组合筒结构，也叫成束筒，实际上是一组模数化的筒体群。

组合筒的每个单筒都能单独形成一个筒体结构，沿建筑物高度方向从下往上可以中断某些单筒。图 1.5 表示在三个

§ 1-3 筒体结构的受力性能

框架筒高层结构从整体上看，像一根竖立的长悬臂梁。如果按理想的悬臂梁计算，迎风面翼缘框架各柱拉应力最大且数值相等，背风面翼缘框架各柱压应力最大且数值相等，腹板框架各柱的应力按直线变化，在中性轴处的柱轴力为零，如图 1.6(a) 中的虚线所示。

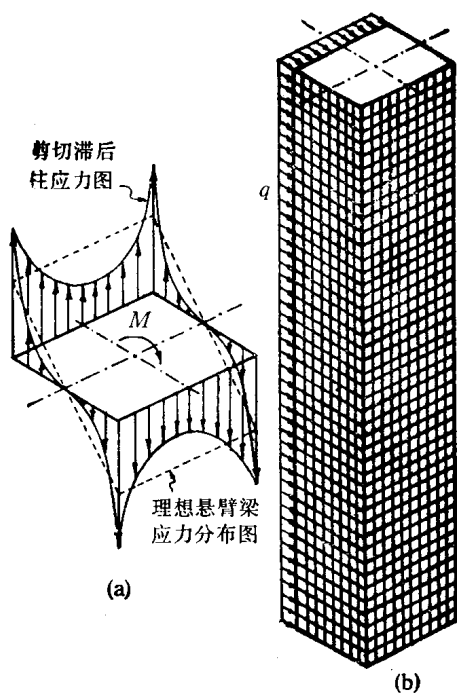


图 1.6 框架筒的剪切滞后

但通过理论计算和模型试验,框架筒在水平侧力下,柱的应力并不像平面弯曲梁的正应力那样按平面规律变化。在框筒结构的底部,四个角柱的应力特大,翼缘框架柱应力越向中部越小,呈正对称曲线形变化;腹板框架柱应力按反对称曲线变化,在靠近整个框筒弯曲的中性轴附近,柱应力小于按斜直线算出的应力,如图 1.6(a) 中的实线曲线所示。

所以出现这种现象的原因,是由于框筒不是一根实心截面的受弯杆件,它作为一个整体有弯曲变形的作用,而腹板框架又有平面框架抵抗水平剪力的作用。由于框架的梁产生弯曲和剪切变形,且楼板在平面外的抗弯刚度较小,不能保证整

个框筒像实心杆件平面弯曲那样,符合平面截面假设。因此,框筒柱的轴向应力出现四角大、中间小的曲线形变化规律。这一现象,在高层建筑结构文献中^[9],称为“剪切滞后”。

在框筒结构中,如果梁的跨度较大、截面高度较小,则剪切滞后现象将更加严重,框筒结构的整体空间抗弯作用将减低。所以,通常要求框筒结构具有密柱和深梁,以便剪切滞后作用减小,增大整体抗弯的能力。

既然框筒中的柱在受力和变形上出现剪切滞后现象,则各层楼板必将发生翘曲,这在设计时应予以考虑。

由于框筒结构的受力性能与实心截面悬臂梁不尽相同,故其水平位移曲线与悬臂梁弯曲型曲线也不相同。

由薄壁墙体围成的单个内筒,当其宽度较大时,在水平荷载下横截面上的正应力也有一些剪切滞后现象。通常电梯并在各楼层都开有门洞,其应力变化规律将更为复杂一些。

筒中筒结构是内、外筒协同工作的结构体系,底部水平剪力主要由薄壁内筒承担,靠近顶部的水平剪力则多由外框筒承担。

组合筒结构,外框筒由于设置了内部双向隔墙或深梁密柱的框架而得到加强,结构的整体受力性能非常好。平行于水平荷载的腹板墙或框架抗剪能力很大,垂直于水平荷载的翼缘墙或框架抵抗弯矩的能力也很强。组合筒的剪切滞后现象比单个框筒要均匀一些。图 1.7(b) 给出由框筒组成的组合筒各柱应力变化规律的示意图。

以上关于矩形平面高层建筑筒体结构的受力变形特性,在组成筒体结构的体型尺寸方面,要符合一定条件,才能出现。比如,矩形框筒的整体空间作用,指翼缘框架和腹板框架的共同工作,即翼缘框架与腹板框架共同担负整体弯矩的作用。这只有在筒体较高、弯矩较大的情况,空间作用才显著。

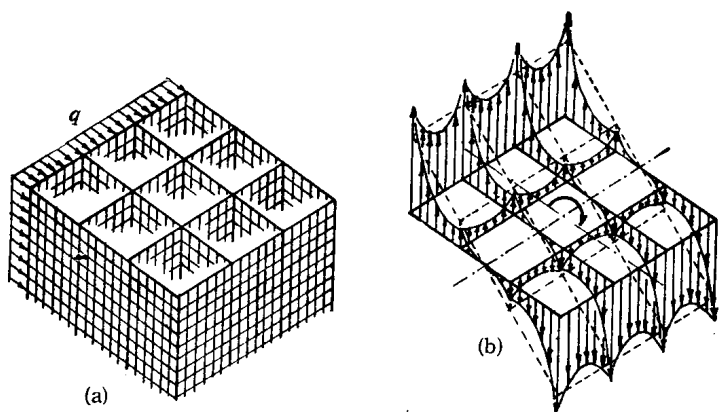


图 1.7 组合筒剪切滞后

如果筒体总高度很低,整体弯矩很小,翼缘框架与腹板框架的共同作用将十分微弱,水平荷载基本上由腹板框架承担。因此,常要求筒体的高宽比为 $H/B \geq 3$ 。

又如,当矩形框筒的长宽比很大时,长边的剪切滞后作用十分严重,中间柱的轴力很小,其空间作用亦将降低。因此,常要求筒体的长宽比为 $L/B \leq 2$ 。

第二章 矩形平面框筒的 简化计算方法

框筒结构是由深的窗裙梁和密排柱组成的空间框架体系,从理论上讲,可用带刚域三维杆件的矩阵位移法计算。但因结点位移未知量太多,需大容量计算机,所费机时也多,不够经济。对于矩形平面的框筒,根据对称条件并考虑剪切滞后现象,可导出一些简化的计算方法。本章选择几种简化算法,供设计高层建筑框筒时应用。其中双槽形截面法,可由人工手算,不过所得结果较粗略,只可供初步设计用。

§ 2-1 双槽形截面近似算法

1. 整体弯曲作用

考虑图 1.6 所示矩形框筒在侧向水平力作用下的剪切滞后现象,框筒翼缘框架中部几个柱承担的轴力较小。为了计算简单,又能保证角柱及其附近各柱的轴力与实际相差较少,可认为翼缘中部某一宽度内的柱不承担轴力。因而将图 2.1(a) 的框筒截面简化为两个等效的槽形截面,如图 2.1(b) 所示。对双槽形截面,按实体悬臂梁弯曲应力公式,计算框筒柱的轴力和窗裙梁的剪力。

根据经验,等效槽形截面的翼缘宽度 b 应不大于下列三个数值中的小者:

- (1) 腹板的全宽 B 的二分之一^[5];
- (2) 建筑物总高 H 的十分之一^[5];