

高等结构力学丛书之一

Gaoceng Jianshu Jiegou Fenxi

高层建筑结构分析

李君如

詹肖兰

欧阳炎

人民交通出版社

高等结构力学丛书之一

Gaoceng Jianshu Jiegou Fenxi

高层建筑结构分析

李君如

詹肖兰

欧阳炎

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为《高等结构力学丛书》的一个分卷。本卷根据国内外高层建筑结构方面的研究成果及工程实践经验，比较系统地阐述了高层建筑结构的各种分析方法。

全书共九章，包括绪论、荷载、高层框架结构的近似计算、剪力墙结构分析、框架-剪力墙结构分析、筒体结构分析、高层建筑结构考虑空间协同工作的矩阵位移法、高层建筑结构的三维空间分析，高层建筑结构的弹塑性动力分析。

本书可作为土木工程类的研究生教材，也可供从事建筑结构工程工作的技术人员、研究人员以及高等院校土木类各专业师生参考。

参加本书编写工作的有：李君如（第一、二章）、詹肖兰（第三至六章、第九章）、欧阳炎（第七、八章）。

高等结构力学丛书之一

高层建筑结构分析

李君如 詹肖兰 欧阳炎

责任编辑 张征宇

人民交通出版社出版发行

（北京和平里东街10号）

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 $\frac{1}{16}$ 印张：13.375 插页：1 字数：345千

1990年2月 第1版

1990年2月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2400册 定价：10.50元

02-209-169-8

ISBN7-114-00774-4

U·00462

序

结构力学是固体力学的一个分支。任何工程结构物的设计和建造，都会遇到结构力学问题。进入20世纪后，随着生产的发展和科学技术的进步，结构物的形式更加多样，受力体系更加复杂，这就要求有相应的理论分析方法和实用而有效的计算手段，编写高等结构力学丛书的着眼点即在于此。丛书在介绍力学的基本理论方面，重点突出了弹性理论和塑性理论。20世纪中期以后，复合材料结构和高层结构以及非线性结构的分析研究，取得了可喜的成果。随着电子计算机的广泛应用，在结构分析中普遍采用矩阵法，并进一步建立了有限元法。有了有限元法的分析方法和电子计算机的计算工具，人们便可以对工程结构物的设计由先设定结构方案，后进行综合考虑多方面的因素，以求得最优结构方案的设计，即所谓的结构优化设计。如上所述的有限元法和结构优化设计使结构力学走向计算机化，通称计算结构力学，从而开拓了新的结构力学领域。

本丛书在“结构力学基础”一卷里对杆系结构的经典理论先作概括性的论述，而后重点讲述分析杆系结构的矩阵方法和在电子计算机上实现该法的程序设计问题，在“高层建筑结构分析”一卷里也是在论述经典理论之后，主要讲述程序设计问题。经典的杆系结构和拱结构各设专卷讲述其稳定与振动，板壳结构中也都包括稳定与振动的论述。关于振动加“随机振动”，另有专卷论述。当代工程中遇到的曲线梁和薄壁杆件问题，亦有专卷论述。当代的复合材料结构和非线性结构的分析，以及结构优化设计，也都各列专卷。至于“有限元法”则另编一书以资配合。

对结构力学专业和各类结构工程专业的研究生来说，上述广泛范围内的结构力学分支有些是必修的专业基础课程，如板、壳

结构（包括稳定与振动），和结构的塑性分析和张量分析在弹性力学中的应用等课程中的一至二门；有些是不同专业的专门课程，如曲线梁、复合、高层、优化、非线性和随机振动等课程中的一门（根据研究方向所需的非力学课程不在此列）；还有些是需要开列出来由学生选修的课程。当然，反映当代力学计算方法的有限元法，包括加权残数法及其计算机程序设计也应是必修的。若采用各个分支的专著作教材，学时是不够的，适当精简以适应研究生学习的需要是我们编写这套丛书的第一个目的。

结构力学按专业来划分可分为：房屋结构力学、桥梁结构力学、隧道结构力学、飞机结构力学、车辆结构力学、船舶结构力学和水工结构力学等等。而这些不同专业的结构力学都有共同的基本理论。为各个专业的结构力学奠定共同的理论基础是我们编写这套丛书的第二个目的。

随着时代的推移，新的结构形式将不断涌现。工程师们为创造新的结构形式，往往需要广泛的结构力学知识，熟悉新结构的受力图式和掌握分析方法。为工程技术人员提供参考资料是我们编写这套丛书的第三个目的。

当今大学本科的结构力学教材所涉及的范围仅仅局限于杆系结构，有些内容需要提炼和概括以便增加课外阅读学时数；同时也有些内容（如稳定与振动）则需要抽出来单独设课，这是当前结构力学内容改革的趋向。丛书对杆系结构中的基本内容作了提炼和概括的尝试，以供学生参考；对于专题的内容则抽出来单独编辑成册，虽内容较深，但可供教师因材施教，培养拔尖学生之用。

既要传授知识，也要培养智能，这是当今高等学校的教学工作中应该大力提倡的。培养学生自学能力是培养智能的一个重要方面。我们安排学生自学，除必须给学生有足够的课外学时数外，最根本的一条就是要调动学生自学的主动性和积极性。为了做到这一点，除教师的引导和启发外，还必须恰当地提供自学的内容。根据本人三十年代学习结构力学的经验，我认为最好是超

越本科教材的范围，提供广泛的结构力学分支学科，让学生去涉猎，使学生学然后知不足，这样学生就会在教师的诱导和鼓舞下，有更加自觉地去挤时间钻研较高深理论的积极性，并写出有一定水平的论文来。因此，我们编写的这套丛书亦可供培养学生自学能力之用。

如上提出的三个目的和两个作用，是我们的主观愿望，目的是否能达到，作用是否有成效，有待于今后的长期教学实践来检验。

本丛中各个结构力学分支将单独成册，初步安排陆续出版15卷，将来再根据结构力学的新进展进行扩编。

由于工作需要，脱稿时间仓促，更重要的是限于水平，缺点和错误在所难免，望海内外同行专家不吝赐教，批评指正。

王朝伟

1986年1月

高等结构力学丛书

- | | |
|-----------|-------------|
| 结构力学基础 | 王朝伟、李廉锟 |
| 拱结构的稳定与振动 | 项海帆、刘光栋 |
| 曲线梁 | 姚玲森 |
| 结构动力学 | 杨第康 |
| 结构随机振动 | 陈英俊、甘幼琛、于希哲 |
| 杆系结构稳定 | 刘光栋 罗汉泉 |
| 板结构 | 黄与宏 |
| 壳结构 | 薛大为 |
| 薄壁杆件 | 陆 楸、汤国栋 |
| 弹性工程力学 | 何福照 |
| 结构塑性分析 | 熊祝华 |
| 非线性结构分析 | 万 虹、梅占馨 |
| 高层建筑结构分析 | 李君如、詹肖兰、欧阳炎 |
| 复合材料结构力学 | 蔡四维 |
| 结构优化设计 | 李炳威 |

目 录

第一章 绪论	1
第一节 高层建筑的发展.....	1
第二节 高层建筑的结构体系.....	2
第三节 高层建筑结构分析的基本概念.....	10
第四节 高层建筑结构分析方法简述.....	16
第五节 结构分析有限元软件简介.....	33
第二章 荷载	37
第一节 风荷载.....	37
第二节 地震荷载.....	48
第三章 高层框架结构的近似计算	57
第一节 框架在竖向荷载作用下的近似计算 ——分层法.....	57
第二节 框架在水平荷载作用下的近似计算 ——D 值法.....	60
第三节 框架在水平荷载作用下侧移的近似计算.....	84
第四节 壁式框架在水平荷载作用下的近似计算.....	90
第四章 剪力墙结构分析	110
第一节 概述.....	110
第二节 整截面剪力墙和小开口整体墙的计算.....	116
第三节 双肢剪力墙的计算.....	123
第四节 多肢剪力墙的计算.....	146
第五节 底层大空间剪力墙结构分析.....	160
第五章 框架—剪力墙结构分析	188
第一节 概述.....	188
第二节 框架—剪力墙结构内力与位移分析的	

	侧移法·····	189
第三节	框架—剪力墙结构内力与位移分析的 转角法·····	203
第四节	框架、剪力墙及框架—剪力墙结构考 虑扭转的计算·····	208
第五节	计算实例·····	214
第六章	筒体结构分析 ·····	224
第一节	概述·····	224
第二节	薄壁筒体的分析·····	227
第三节	框筒结构的简化分析·····	239
第四节	筒中筒结构的简化分析·····	264
第七章	高层建筑结构分析的计算机方法(一)	
	—— 槊空间协同分析 ·····	271
第一节	空间协同工作分析的计算原理·····	271
第二节	平面抗侧力构件的矩阵分析·····	274
第三节	结构体系的整体分析·····	283
第四节	结构体系的弹性地震反应·····	290
第五节	杆件内力计算·····	302
第六节	槊空间协同分析的程序设计·····	305
第八章	高层建筑结构的计算机方法之(二)	
	—— 三维空间分析 ·····	319
第一节	薄壁杆件的计算理论·····	320
第二节	空间杆单元刚度矩阵·····	332
第三节	位移与内力计算·····	351
第四节	三维空间分析的程序设计·····	355
第九章	高层建筑结构的弹塑性动力分析 ·····	363
第一节	概述·····	363
第二节	输入地震波的选择·····	365
第三节	结构和构件的恢复力特性·····	367
第四节	结构的计算模型·····	371

第五节	基本动力方程的求解.....	384
第六节	结构弹塑性地震反应计算实例.....	392
第七节	土—结构体系的动力分析.....	397
参考文献	403

第一章 绪 论

第一节 高层建筑的发展

高层建筑不仅在层数和总高度上超过一般建筑物，而且在功能、防火、竖向通道、环境影响、对于动力、温度作用的反应等诸方面具有显著的特点。但是现在还没有为大家一致公认的严格的定义和判别准则。我国目前通常把层数不少于8层，总高度不低于24m的楼房称作高层建筑。

近代高层建筑的发展开始于19世纪末期。1879年和1883年在美国芝加哥先后建造了一座7层货栈和一座10层家庭保险公司大楼。到了20世纪初，随着工业技术的进步，高层建筑有了较快的发展，以美国的高层建筑数量最多。例如1902年建造的87m高的Flatiron建筑；1904年建造的纽约Times Square Tower(114m)；1909年建造的Metropolitan Tower (200m)；1913年建造了234m的Woolworth Building；1929年建造了319m的Charysler Building。1931年又在纽约建造了有名的102层帝国大厦(Empire State Building)，总高度为381m。在第二次世界大战期间，高层建筑的发展稍有停顿。到了50年代，由于建筑材料、设计理论的发展，电子计算机的应用和施工机械、施工技术的提高，为高层建筑的发展提供了条件。许多国家和地区的城市人口密度剧增，地价昂贵，亦迫使房屋建筑向空间发展。1972年纽约建造了两幢110层的世界贸易中心姊妹楼，高达412m，两年后芝加哥市建造了Sears Tower，地上110，地下3层，高达443m，成为70年代世界最高建筑。1981年英国建造了139层550m的利物浦塔楼。拟建的美国洛杉矶和平大厦则达203层610m。日本的高层建筑是从六十年代开始迅速发展起来的，在地震区建造了近50幢100m

以上的高层建筑。此外在加拿大、法国、荷兰、比利时、罗马尼亚、南斯拉夫、墨西哥、委内瑞拉、澳大利亚、苏联、南非、新加坡和香港等地，近20年来也兴建了一大批高层建筑。

我国自50年代末开始自行设计建造现代高层建筑。例如1959年北京国庆工程，建造了13层67m高的民族文化宫；12层47m高的民族饭店。1964年建成了15层61m高的北京民航大楼。1968年广州建成的27层88m高的广州宾馆是我国60年代最高的楼房。到了70年代，随着国际交往、旅游、电讯和居民住宅的发展，我国高层建筑的建设步伐显著加快。尤其是进入80年代以后，发展速度更为惊人。1980年至1984年五年期间兴建的高层建筑相当于解放后三十年的总和。不仅数量剧增，而且层数增多，高度加大，体型复杂，结构多样。截至1987年初，我国已建成高度超过100m的高层建筑有14幢。其中最高的是深圳国际贸易中心，50层160m，而26层120m的北京彩电中心则是地震区的最高建筑。展望未来，高层建筑的发展速度近期内将有增无减。

第二节 高层建筑的结构体系

早期的高层建筑多采用砖混结构或混合承重结构。砖混结构是以砌体为其竖向承重构件，而混合承重结构则是带有钢筋混凝土内框架的砖混结构。由于砌体的自重大、强度低、延性差、使用空间小，从而使其在高层建筑中的应用受到限制。尽管欧美一些国家对砖混结构高层建筑进行过一些有益的研究，认为在非地震区建造25层或更高的砖混结构高层建筑是可行的，但目前一般只用在非地震区10层以下的住宅、旅馆等建筑中。

与砖混结构相比较，钢筋混凝土结构的强度高、刚性大、且具有较好的延性和可塑性，而且比钢结构取材容易，造价低廉，耐火性强。因此钢筋混凝土结构在世界各国的高层建筑中得到广泛应用。即使是习惯使用钢结构的日本，在高层住宅中钢筋混凝土结构亦占70%以上。目前最高的钢筋混凝土建筑是芝加哥的水

塔广场大楼76层262m。最高的轻混凝土结构则是休士顿贝壳广场大楼52层215m。

钢结构的强度高，延性好，自重较小，因而其能建高度最大。国外的超高层建筑多采用钢结构。国内自1985年开始出现钢结构高层建筑以来，目前在北京、上海、深圳等地已兴建了十余幢建筑。对高层钢结构设计方法的研究亦有进展，正在编制“高层钢结构房屋设计规定”。但由于钢结构高层建筑造价高，专用型钢来源困难，施工技术要求较高，故采用尚不普遍。当前，钢筋混凝土结构仍是我国高层建筑的重要结构类型。本书亦以钢筋混凝土结构高层建筑为主要研究对象。

80年代以前我国高层建筑采用的结构体系有：

框架体系；

框架—剪力墙体系；

剪力墙体系。

进入80年代以后，由于层数和高度的增加，功能、造型、抗震要求的提高，上述三种常规结构体系已难适应，筒体结构体系有了迅速的发展。

一、框架体系

框架体系由梁、柱等线形构件在节点处连接而成（图1-1）。框架梁、柱承受全部垂直荷载和水平力。

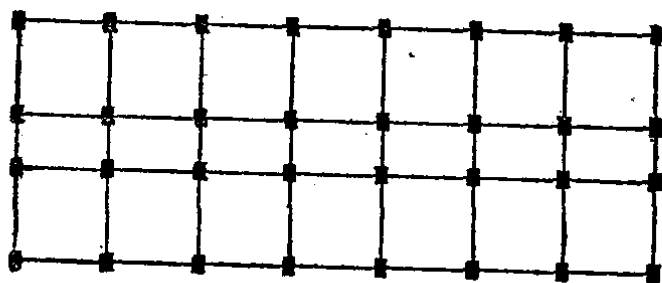


图 1-1

框架在水平力作用下的内力如图1-2所示。由图可知，梁、柱端弯矩值沿竖向的变化很大，边柱的轴力比中柱大。框架的水平

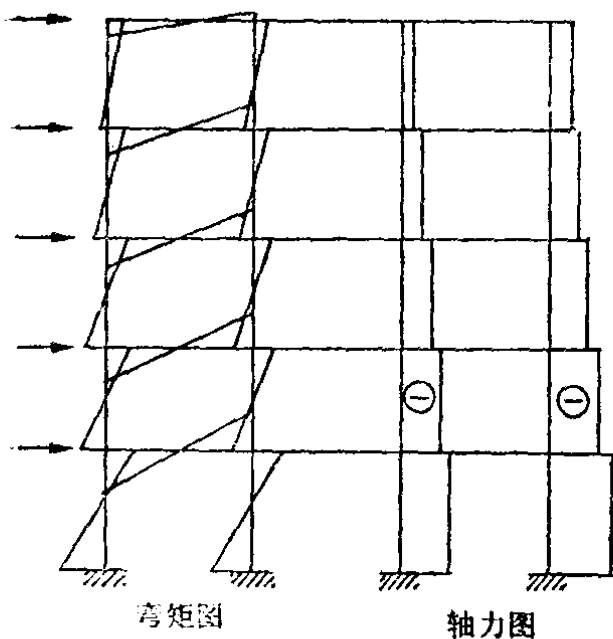


图 1-2

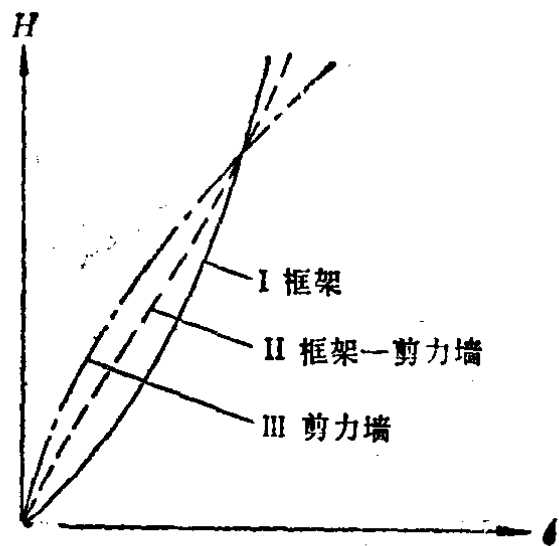


图 1-3

位移曲线一般呈剪切型，其特点是层间相对位移愈往建筑物顶部愈小（见图1-3曲线 I）。

与其它结构体系比较，框架结构的侧向刚度较小，属柔性结构。

框架体系具有平面布置灵活、易于满足大空间要求、自振周期长、自重轻、地震力较小等优点。但随着建筑物高度的增加，底部各层梁柱内力迅速增长，不仅结构占用的空间加大，而且经济上亦趋于不合理。同时由于高层框架的侧向刚度小，在水平力作用下顶点侧移和层间相对位移过大，将会影响高层建筑的正常使用或造成严重的非结构破坏。因此，框架体系的层数受到限制，通常仅用于地震区10层、非地震区13层以下的办公楼、医院、旅馆等建筑。目前国内最高的框架体系是北京民航大楼，地上部分15层，60.8m。

二、框架—剪力墙体系

当框架体系的强度和刚度不能满足要求时，往往需要在建筑平面的适当位置设置刚度较大的剪力墙来代替部分框架(图1-4)，便形成了框架—剪力墙体系 (Frame Shear Wall)。

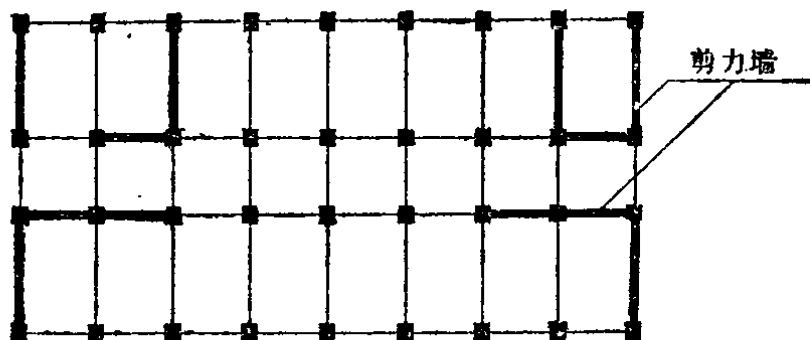


图 1-4

在承受水平力时，框架和剪力墙通过有足够刚度的楼板和连梁组成协同工作的结构体系。在体系中框架主要承受垂直荷载，剪力墙主要承受水平剪力。

单片剪力墙相当于一根竖向悬臂梁，在水平力作用下，位移曲线呈弯曲型（图1-3曲线III）。而框架的位移曲线则呈剪切型。当它们共处于同一结构体系中协同工作时，结构的位移曲线介于两者之间呈弯剪型或剪弯型（图1-3曲线II）。框架—剪力墙体系的刚度亦介于框架体系与剪力墙体系之间，属中等刚性结构。

由于上述位移曲线的特性，在框架—剪力墙体系中，剪力墙所承受的水平剪力愈接近建筑物的底部愈大；而在顶部，框架的侧移通常比剪力墙小，剪力墙受到框架的支撑作用，承受来自框架约束的负剪力。图1-5为倒三角形荷载作用下框架—剪力墙体系的剪力分布图形。

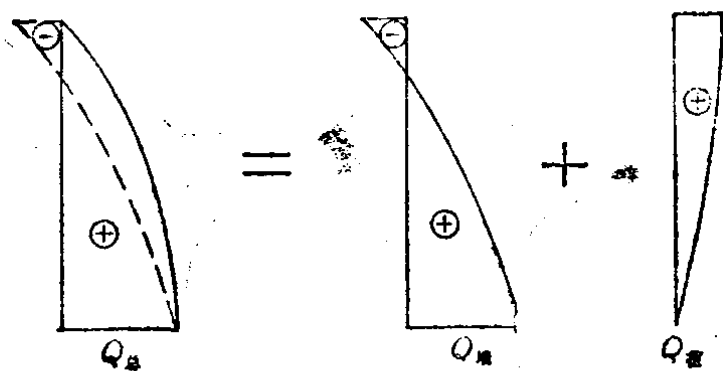


图 1-5

剪力墙的设置，增大了结构的侧向刚度，使建筑物的水平位移减小；同时框架承受的水平剪力显著降低且内力沿竖向的分布趋于均匀，使框架受力状态得到改善。所以框架—剪力墙体系的能建高度要大于框架体系。我国10~20层的办公楼、旅馆、医院和科研教学楼等多采用框架—剪力墙体系。目前最高者是上海宾馆（27层）和武汉晴川饭店（26层），高度均为90m。

三、剪力墙体系

当受力主体结构全部由平面剪力墙构件组成时，即形成剪力

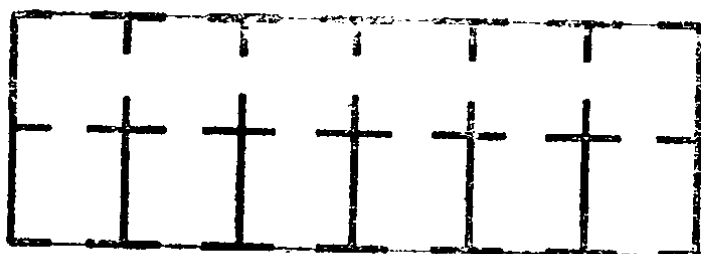


图 1-6

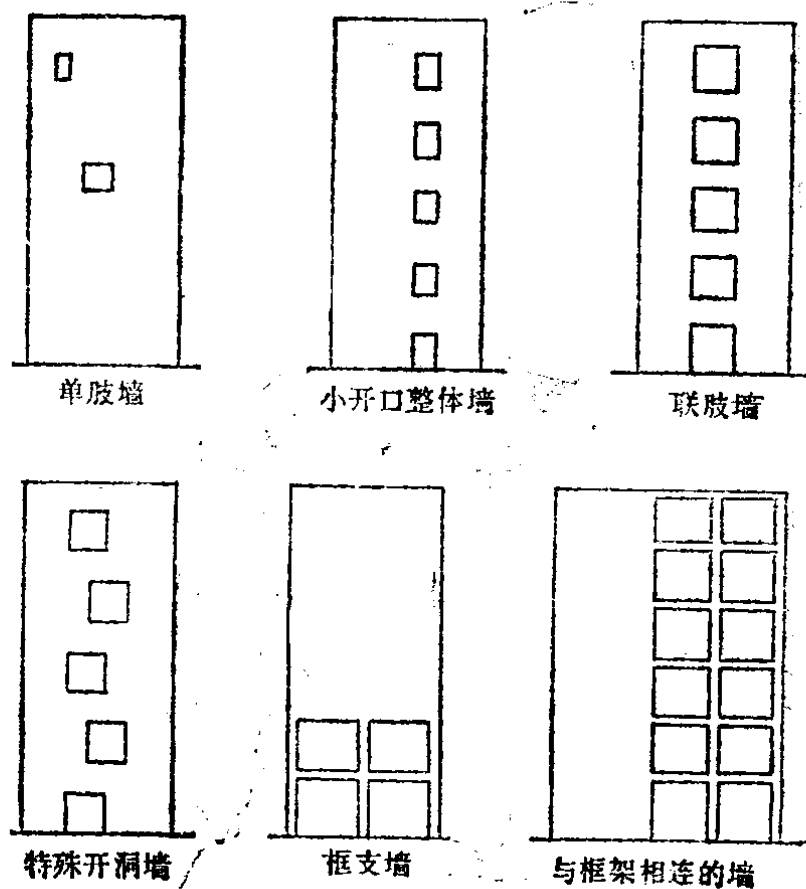


图 1-7

墙体系 (Shear Wall) (图1-6)。在剪力墙体系中, 单片剪力墙承受了全部的垂直荷载和水平力。

由于建筑和使用上的要求, 实际工程中的单片剪力墙的形式是多种多样的, 图1-7是几种常见的形式。

相对于框架体系和框架—剪力墙体系而言, 剪力墙体系属刚性结构。其顶点侧移与层间相对位移通常都较小。在水平力作用下, 剪力墙的水平位移由弯曲变形和剪切变形两部分组成。高层剪力墙体系多以弯曲变形为主, 位移曲线呈弯曲线, 其特点是层间相对位移愈往顶部愈大 (图1-3曲线III)。

剪力墙体系的强度和刚度都比较高, 有一定的延性, 传力直接均匀, 整体性好, 抗倒塌能力强, 是一种良好的抗震结构体系。能建高度大于框架或框架—剪力墙体系。特别适用于隔墙较多的高层住宅及高层旅馆建筑。作为结构主体的剪力墙与建筑的分隔墙合为一体, 房间内无梁柱外露。国内已建的高层住宅中剪力墙体系约占80%, 高层旅馆建筑采用剪力墙体系的亦很多。包括北京国际饭店 (26层) 和广州白云宾馆 (33层), 高度均达112m。

为了满足建筑使用的要求, 近年来底层大空间剪力墙体系有了较快发展。这是一种由落地剪力墙和框支剪力墙组合而成协同工作的结构体系。这种体系的上部各标准层为一般剪力墙体系。在底层或底部1~3层把部分剪力墙改为框架, 其余剪力墙仍落至基础, 以减少竖向刚度的突变。还可以根据需要下部几层扩大, 形成大底盘、大空间剪力墙体系。

四、筒体体系

凡采用筒体为抗侧力构件的结构系统称为筒体体系, 包括单筒体、筒体—框架、筒中筒、多束筒等多种型式。

筒体是一种空间受力构件, 分实腹筒和空腹筒两种类型。

实腹筒 (图1-8a) 是由平面或曲面墙围成的三维竖向结构单体。水平截面常呈薄壁箱形, 多用作电梯井、楼梯间、管道井或服务间。实腹筒一般位于建筑物中心部位, 故亦称内筒或核心筒