



高层房屋结构

〔美〕沃尔夫岗·舒勒尔著 同济大学钢筋混凝土结构教研室译

048150

TU 308.3
8742

高层房屋结构

〔美〕沃尔夫岗·舒勒尔著

同济大学钢筋混凝土结构教研室译

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要介绍高层房屋的结构设计问题,包括荷载、结构设计原则、各种结构方案的形式及受力特点,竖向结构及其近似计算方法,水平向结构、装配式结构及其他形式的结构等。全书共分十章。书末还列有国外著名的高层房屋实例一览。

本书可作为高等院校建筑学专业及其他有关专业的教学参考书,也可供建筑及结构设计人员参考。

HIGH-RISE BUILDING STRUCTURES

WOLFGANG SCHUELLER

SCHOOL OF ARCHITECTURE

SYRACUSE UNIVERSITY

A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION

JOHN WILEY & SONS 1977.

NEW YORK · LONDON · SYDNEY · TORONTO.

高 层 房 屋 结 构

〔美〕沃尔夫岗·舒勒尔著

同济大学钢筋混凝土结构教研室译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 松江科技印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 12 字数 284,000

1981年12月第1版 1984年12月第2次印刷

印数 21531-39,900

统一书号: 15119·2149 定价: 1.15元

前 言

本书旨在对高层房屋结构作系统综述。各种房屋骨架的组织方式是对其结构组成部分进行解剖后得出的。本书对已建成的或计划中的高层结构系统按平面、立面及轴测进行了比较。房屋结构的几何体系是根据它对外力作用的反应来解释的,正如有关文献所述,外力的作用是颇为复杂的。本书对这一结构工程的复杂领域用只要与房屋建筑有关的人都能懂得的简单语言来作说明。

由于高层结构的性能是多次超静定的,因此本书着重于给出直观的和概念性的分析,而定量的计算只是作为一种重要的分析手段、以近似估计房屋结构的定性性能而已。所涉及的数学(计算尺精度)和工程力学的内容是很基本的。各种类型的房屋部件均按美国混凝土学会(American Concrete Institute, ACI)、美国钢结构学会(American Institute of Steel Construction, AISC)和结构粘土制品学会(Structural Clay Products Institute, SOPI)的现行规范简单地作近似设计,这些规范的有关章、节,本书将作简要的回顾。

书中第二章叙述了房屋上荷载作用的复杂性。不熟悉高层房屋结构基本原理的读者,宜先学习一般高层房屋结构的介绍,这一章叙述了有关高层房屋的几何原理、历史渊源和其他设计上的考虑。第四章和第八章研究了房屋承重结构的主要的子系统:房屋的竖向结构(框架和墙)和水平结构(楼面结构)。第五章讨论了一般房屋结构的基本概念。在第七章中近似地设计了几种典型的房屋结构。第六章和第十章研究了房屋的各种形式和不常采用的结构方案。第九章从房屋装配角度及作为施工过程的一部分对预制构件作了简述。

本书的分析部分把结构构件放在整个房屋之中来考虑,这种方法能进一步加强学生对结构性能的了解,因为大专学校的结构课程往往只是分析和设计结构的部件及其联接,而未考虑实际的房屋或者未将房屋结构作为整个结构组成中的一部分来考虑。

本书主要供建筑师参考,他们是房屋型式的主要塑造者。建筑师必须发挥自信心来表现结构和材料的强度及内在的美。为了做到这一点,建筑师必须了解房屋中由于力的作用而反映出来的自然规律。也就是说他需要具备必要的自然科学知识作为决定房屋型式的一个非常重要的因素,同时作为与结构工程师能有建设性协作的必要基础。

拟将本书用作大专学校建筑学或房屋建筑专业学生的结构课课本。学习这本书需要有静力学及混凝土和钢结构构件方面的知识为基础。所列举的许多房屋结构实例应能使本书成为有助于高层房屋设计课程的参考书。再者,本书还可以帮助第一次从事房屋设计的年轻工程师对房屋的整体结构性能有直观的感觉。本书用对比方式列出的房屋实例(象目录一样)及其参考文献,将是结构工程师和建筑设计师在工作实践中的一项宝贵资料。

本书对超高层结构仅作一般介绍,希望通过对不同结构体系的性能的分析,使读者对高层房屋结构得到一个正确的理解,并为今后能适应有关的设计工作以及创造性地进行设计方面奠定基础。

沃尔夫岗·舒勒尔(Wolfgang Schueller)

于纽约 西雷柯斯 1976年11月

致 谢

本书是为1973~1974学年我在西雷柯斯大学建筑学院所开的高层房屋结构专题讲座而写的。我对下列各位学生在我的指导下为本书各个问题所作的详细研究和所绘制的插图表示感谢：鲍多(Nicholas Baldo)，伯尼(Ansar Burney)，巴特纳(Brian Buttner)，洛伦克(Fred Lorenc)，佩克利斯(Joseph Peckelis)，佩蒂(David Petty)，奎恩脱(Andrew Quient)，拉斯金(Samuel Rashkin)，赖斯(Leslie Reiss)，斯特拉托(Michael Stellato)，瓦拉里厄(Lori Vallario)，和怀尔德内奥(David Wildnauer)。

我衷心感谢西雷柯斯大学建筑学院的斯奈德(Siegfried Snyder)教授阅读本书的手稿并提出许多意见和建议。

对我的助手布莱韦特(Pete Blewett)，科雷尔(Richard Correll)和洛莫纳柯(Joe Lomonaco)的帮助深为感谢，他们准备了并修正了许多插图。

我对出版社的编辑和出版部门的工作人员所给予的诚恳支持表示感谢。

我对许多同行的工作成果也表示感谢，他们对许多房屋所进行的设计和研究工作形成了本书的基础。他们的名字已列于本书末的“参考文献”和“高层房屋实例一览”中。因为名字很多，这里就不重复了。

我感谢梅里爱特(Sue Merriett)，她为本书的手稿耐心打字，而本书第一稿是由格威兹(Martha Gerwitz)打字的，非常感谢她的帮助。

沃尔夫岗·舒勒尔

目 录

第一章 绪论	1
第一节 城市中的高层房屋	1
第二节 高层房屋及其承重结构	2
第二章 高层房屋的荷载	3
第一节 恒载	4
第二节 活荷载	4
第三节 施工荷载	6
第四节 雪、雨和冰荷载	6
第五节 风荷载	7
第六节 地震荷载	12
第七节 水压力和土压力	26
第八节 材料的体积变化受到约束时引起的荷载	27
第九节 冲击和动力荷载	32
第十节 爆炸荷载	33
第十一节 荷载组合	33
第三章 高层房屋结构的介绍	34
第一节 高层房屋的发展	34
第二节 普通高层房屋结构	35
第三节 设计总则	38
第四章 竖向的结构平面	41
第一节 竖向力的传递	41
第二节 侧向力的传递	43
第三节 最合适的底层空间	46
第四节 剪力墙的布置	51
第五节 侧向荷载下剪力墙的性能	52
第五章 一般高层房屋结构和它们在荷载作用下的性能	55
第一节 承重墙结构	55
第二节 剪力核心结构	58
第三节 框架体系	61
第四节 墙-梁结构: 间隔和错列的桁架体系	64
第五节 框架-剪力墙房屋体系	65
第六节 平板房屋结构	67
第七节 有刚性条带桁架的框架-剪力墙共同工作体系	68
第八节 筒体体系	69
第九节 组合房屋	74
第十节 高层结构体系的比较	76

第六章 控制房屋侧移的其他设计方法	79
第一节 有效的房屋形式	79
第二节 反作用力或动力反应	81
第七章 房屋结构的近似分析和设计	84
第一节 承重墙房屋的近似分析	84
第二节 框架结构	96
第三节 框架-剪力墙结构	121
第四节 空腹结构	121
第五节 筒体结构	127
第八章 楼面结构或水平向的结构平面	130
第一节 楼面结构体系	130
第二节 水平支撑	136
第三节 组合楼面体系	136
第九章 用成套装配单元的高层房屋	142
第一节 框架结构体系	144
第二节 承重墙板体系	148
第三节 板材-框架体系	150
第四节 多层盒子体系	152
第十章 其他的高层房屋结构	155
第一节 深梁体系	155
第二节 高层悬挂体系	155
第三节 充气高层房屋	160
第四节 用于高层房屋的空间构架	166
第五节 舱体建筑	167
高层房屋实例一览	170
参考文献	178

第一章 绪 论

高层房屋与城市紧密相关,它是人口高度集中、土地不足而且地价高昂的自然产物。高层房屋的体型是由设计者对周围环境的了解和他对房屋用途的考虑而演化形成的。高层房屋可以独自耸立,即竖向纤细的,也可以是横向粗壮的,即直接与其他高层房屋毗邻建造,从而形成密集的建筑群。这两种手法基本上是将房屋作为一个孤立的事物来对待,然而未来的高层房屋可以很好地成为一座大型建筑有机体——城市的组成部分,其中的房屋或活动单元则由多层交通系统互相联系着。

高层房屋的高度范围从少于 10 层~多于 100 层。确定一座房屋的高度或其建筑体型需要颇为复杂的设计过程。要考虑的因素很多,例如用户的需要与所能取得的基地的矛盾,基地的位置与周围环境各方面的关系,例如维护房屋及供应其住户所必需的一些服务设施、房屋对生态学的影响或房屋所在地的自然风景等。

第一节 城市中的高层房屋

高层房屋是紧紧随着城市的发展而发展起来的。城市化过程开始于工业化年代,即使现在,世界上仍有许多地区处于这个过程中。在美国,这个过程开始于十九世纪,人们从乡村迁居到城市,使城市密度增加。针对这一压力,工业技术提供了轻型钢骨架结构、电梯以及高度密集的竖向城市所需要的能源供应系统。

本世纪初,约 20 层高的房屋街区互相对峙而建,彼此仅由狭窄昏暗的街道分隔着,形成了一道一道的城市峡谷。当时首先关切的是要在最小的土地面积上安排最多数量的的人。由此产生的拥挤以及其对人和城市作为相互配合的体系的影响在设计中几乎不予考虑。对于光、空气和作为公共活动空间的开阔地坪的需要,导致了独立式摩天楼的发展。摩天楼非常高,因为它所提供的密集度至少要相当于它所取代的房屋街区。现代技术已进步到足够建造经济可行的单独摩天大楼。

在高层房屋的设计中,技术或者材料的问题已能很好掌握,但从空间效果来考虑,即从人们的需要和空间适应性的一致性来考虑,高层房屋仍然处于发展的早期阶段。高层房屋中住户之间缺少接触、离群索居,与街道生活失去联系,这一些都是设计师正在试图克服的问题。

虽然由于采用分区规划,城市中高层房屋的密集程度目前得到某种控制,但是这样设计并没有考虑城市结构的整体性及其运动规律。高层房屋密集,对城市环境产生的后果极为重大。一些超级摩天楼的规模对城市环境有明显的影响,例如芝加哥 109 层的西尔斯大楼(Sears Tower),其高度超过了 1/4 英里。大楼的电器系统可以为 147,000 人口的城市服务,空调设备可以冷却 6000 户住房。为了把每天约 16500 个使用者输送到大楼的各个部位,总共需要 102 部电梯。可以想象,这许多电梯相当于一条条有尽端的街道系统。一些空中电梯间好似广场,人们在其中既可乘坐直达的双层快速电梯从大楼的这一部分到另一部分,

也可乘坐局部的、低速区间电梯到任何别的空中电梯间。因为大楼内设置所有必需的服务行业和福利设施,从理论上讲,人们可以一直不离开大楼。大楼的附属设施能解决如买东西、宴会、娱乐、卫生、教育、安全、运输、停车、公用事业、垃圾和污水处理,相当于一个小城市所需要的公共设施。这样规模的大楼形成了城市中的城市。设计这样复杂的相互配合作用的体系,需要系统分析社会的、生态的、经济的和政治上的错综关系,这不仅对大楼周围的城市有影响,而且也影响大楼本身的环境。

就许多大城市地区而言,高层房屋是解决人口集中继续增长的唯一办法。不应该由于高层房屋使人与自然环境隔绝而拒绝采用,也不能将高层房屋只作为技术成就的标志而搁置一旁。反之,教育单位和其他研究机关应用更大的首创精神去系统地研究高层房屋的周围环境及其有关内容,以改善居住条件。

第二节 高层房屋及其承重结构

高层房屋不论是作为单一用途的公寓、办公室、学校或医院,还是作为上面描述的规模较大的综合使用系统,其设计都需要与材料加工和房屋施工各种专业协作的一个小组来共同努力解决。建筑师协调这个小组的工作,以便使不同的材料、设备和活动等组成部分形成一个整体。建筑师已不能自由设计了,他不仅受通常摩天楼的封闭形式的限制,并且需要有效地使用材料,他还必须遵守有关安全、防火、健康要求的许多规范的规定。

建筑师必须将房屋设计作为一个总体来处理,其承重结构作为有机的组成部分在设计房屋时逐渐形成;结构不能割离开来单独考虑,而后由工程师作为无关的附件塞进由使用观点构成的空间。虽然这个总体设计方法应该应用于任何房屋建筑的设计,不过从高层房屋的规模着眼则更为必要,因为高层房屋需要相当复杂的结构承重体系,其中物理、环境产生的力也都是设计的主要决定因素。房屋必须抵抗竖向的重力和地面以上风引起的水平力以及地面以下的地震力。房屋外壳必须适应温度差;空气压力及内、外部环境间的湿度差。房屋的结构构件必须承担所有这些力。构件必须布置成相互有联系的形式以吸收这些力,并用最低限度的努力把它们安全地引到地基上去。

对这些力及其来源比较了解并掌握了结构体系性质的建筑师,能在设计的早期阶段就提出合理的布局。他能与结构工程师息息相通,因为他讲的是工程师的语言。也就是说建筑师对工程原理有了基本的了解,才能和结构专家真正合作以取得最优的设计。

结构构件是房屋躯体所必需的骨骼,正是建筑师能够巧妙地运用这些结构构件,并把它们暴露出来以明确地表达房屋的风格,从而说明并反映了作为不同功能系统起相互配合作用的外壳的目的。

第二章 高层房屋的荷载

作用在结构上的荷载是直接由自然力造成的,或是由人本身引起的;也就是说,房屋荷载有两个基本来源:地球物理的和人为的(图 2.1)。

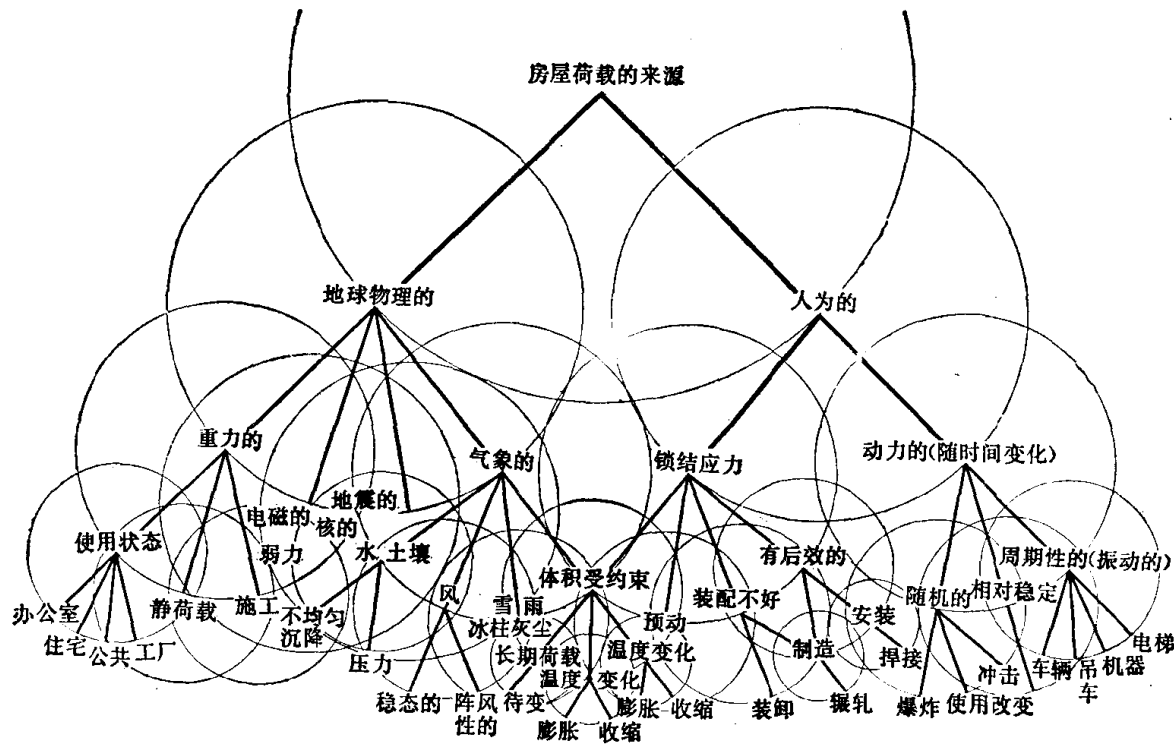


图 2.1

地球物理力是自然界不断演变的结果,它可以进一步划分为重力、气象力和地震力。由于重力作用,房屋本身重量在结构上产生的力称为静荷载,这种荷载在房屋整个存在期间保持不变。房屋内不断改变的使用状态也通过重力作用而产生随不同使用阶段发生变化的荷载。气象荷载随时间和地点而不同,以风、温度、湿度、雨、雪和冰的形式出现。地震力是由于地面的不规则运动(地震)造成的。

人为的荷载可以由车辆、电梯、机器等产生震动而引起的,也可以是人及设备的移动或爆炸及冲击的结果。此外,在制造及施工过程中,可能有各种力在结构中产生。房屋的稳定可能需要预加应力,这也会引起力。

房屋荷载的地球物理来源和人为来源常是相互关连的。房屋的质量、大小、形式和材料影响着地球物理力的作用。例如,假若房屋构件对温度及湿度变化的反应受到约束,那么在房屋中就产生力。

必须从理论上仔细研究房屋在荷载作用下的反应,以保证将来不出问题并使结构经济有效。设计者必须懂得力及其相应的荷载作用,使房屋安全和适用。以下各节将综述力及

其在房屋上引起的荷载作用。

第一节 恒 载

房屋所承受的重力荷载可分为两种不同的类型：静力的和动力的。静荷载是结构中的永久部分。动荷载都是暂时的。它们随时间和季节的变化而改变，或是结构内部或外部空间的函数。

恒载是指由结构物内部每一构件的重量所引起的静力。引起恒载的力包括房屋的承重构件、楼面及天花板装饰、永久性隔墙、立面上的覆盖层、水箱、机械分配系统等等的重量。所有这些构件的综合重量组成房屋的恒载。

确定材料的重量及结构物的恒载似乎是件简单的事情。但是恒载的估算可能有15~20%或者更大的误差，因为要作出荷载的精确分析还存在着各种问题^[2.1a]。在初步设计阶段，结构设计者不可能确切预估还没有选定的建筑材料的重量。需要选定的具体非结构材料包括预制立面镶板、照明设备、天花板系统、管子、管道、电气线路和内部具有特殊要求的部件。钢结构的加劲构件和连接系统的重量仅按百分比作估计。由制造厂或规范提供的材料，其单位重量未必都与成品相符。房屋构件的名义尺寸与实际尺寸可能不同；现浇混凝土的模板可能有半英寸（1.27 cm）的误差。

以上说明，如果没有精确的资料，恒载是不可能准确估定的。

第二节 活 荷 载

活荷载与恒载的性质不同：它是变化的和不可预测的。活荷载不仅随时间发生变化，而且也是位置的函数。变化可能是短期的也可能是长期的，这就使得活荷载几乎不可能用静力方式来预测。

由房屋内部或上面的物体引起的荷载称为使用荷载。这些荷载包括对人、家俱、活动隔墙、保险箱、书籍、档案柜、电气设备、机械设备（例如计算机、商业机器）、汽车、工业设备和所有其他半永久性或临时性荷载的重量所作的考虑。它们作用在房屋体系上，但不是结构物的一部分，并且未在恒载中加以考虑。

由于高层房屋的使用情况多种多样，预言一座结构物将要承受的可能的活荷载情况几乎是不可能的。然而通过经验、调查研究和实践，已制定出各种使用荷载的建议值。建筑规范以表格形式列出了这些荷载的数值，其特点是引用经验性的安全系数以考虑最大的可能的荷载情况。

荷载值采用等效的均布荷载和规定的集中荷载形式。等效均布荷载反映了千变万化的实际使用荷载情况。按实际荷载近似确定的数值显得颇为保守。对各种不同办公楼实际使用荷载的调查表明，最大荷载是 195 kg/m^2 ，而建议采用的设计荷载是 390 kg/m^2 。公寓房屋的荷载调查指出，在十年期间测得的最大荷载约为 127 kg/m^2 ，而通常的设计荷载为 195 kg/m^2 ^[2.1a]。

集中荷载代表在危险位置上可能发生的单独荷载作用，例如在楼梯踏步板上、可进人的吊平顶上、停车库上（例如顶起车子换轮胎）以及其他承受高集中应力的薄弱处。

虽然规范看来太保守，但总有一些不能预测的因素要考虑。规定的最小安全系数是用来保证那种不能控制的特殊情况，如举行典礼、集会和消防演习引起的人群拥挤或由于使

用荷载的改变,如家具及墙壁重新安置致使房屋部分超载,这些都将使某一特定的面积上作用着较大的荷载。

由一根柱子支承的每层楼面上的每平方米面积都同时作用着全部使用荷载的可能性是很小的。实际荷载是由不同面积上的不同荷载组成的。一般面积愈小,可能的荷载强度愈大。楼面上的使用荷载从来不是均匀分布的。建筑规范允许采用活荷载降低系数来考虑这种情况。举纽约州房屋建筑规范(New York State Building Construction Code)^[9,17]为例,将其中有关条文摘录如下:对房屋的顶上三层楼面,允许采用80%的使用荷载,然后每层以5%递减直到最小荷载为假设荷载的50%为止。注意,折减额不得大于每平方米支承面积的0.08%的规定,是考虑了随支承面积的增大须相应地增大折减额的因素。

C304-2 活荷载

C304-2.1 概述

b——结构构件,以及支承于结构构件的楼面,如不发生反常的集中,应按表C304-2.2所示的均布荷载或集中荷载来进行设计,看哪一种会产生较大的应力。

c——对于承受均布活荷载的主梁和次梁(仓库和停车场除外),当支承面积每层等于或大于 14 m^2 的屋面或楼面面积时,荷载可折减如下:

当恒载不大于 122 kg/m^2 时,折减额 R 不应大于20%。当恒载大于 122 kg/m^2 且活荷载不大于 488 kg/m^2 时,折减额不应大于下列三项规定中的最小者:

60%

0.08% 乘每平方米支承面积

100% 乘以(恒载 g 、 kg/m^2 ,加上活荷载 p 、 kg/m^2)除以(4.33乘以活荷载, kg/m^2)。

$$R = 100 \frac{g+p}{4.33p} = 23.1 \left(1 + \frac{g}{p} \right)$$

d——对于柱、主梁、承重墙和基础墙(仓库和停车库除外),当支承面积每层等于或大于 14 m^2 的屋面或楼面面积时,作用在这些构件上的均布活荷载不得小于下列各标高上活荷载总值的下列百分比:

80% 屋面;

80% 屋面下第一层楼面;

80% 屋面下第二层楼面;

对每层楼面递减5%(从屋面下第三层楼面的75%到屋面下第七层楼面的55%);

50% 屋面下第八层、第九层、第十层及以下各层楼面。

规范没有考虑由于房屋构件的连续性,使其在变形时具有荷载重分布的能力,作用在房屋构件上的活荷载会减小。另一方面,由于多年的风荷载作用、振动、温度变化、支座沉陷和周围环境力的连续变化而致的疲劳,房屋的承载能力降低了。但是混凝土及砖石材料的强度具有随时间而增长的优点,因此也增大了承载能力。

从结构观点来分析,选择一个适当的结构体系依赖于对三个因素的认识:

- 承担的荷载。
- 结构材料的性质。
- 荷载力通过构件被传递到地面的结构作用。

结构设计师记住这三个要点,用真实的模式预测材料和结构的性能,而对荷载则采用经

验性的规范值。这看来是矛盾的,因为只在一方面考虑了施工及材料的合理利用,而在另一方面却加以忽视了。通过今后的研究,将有可能更精确地确定实际的荷载值。

第三节 施工荷载

结构构件一般是按恒载及活荷载设计的,但是在建造房屋时构件可能受到比设计荷载大得多的荷载,这些荷载称为施工荷载,在设计结构构件时要予以着重考虑。

每个承包商都制订了经证实对他们经济的施工程序。虽然建筑师可能将房屋设计得与一项特定的施工体系相适应,但他可能不了解承包商的不同施工方法。承包商通常将重型设备和材料堆积在结构物的狭小面积上,其所产生的集中荷载比设计结构物时假定的活荷载要大得多。这种情况曾引起过结构破坏。

混凝土施工中的一个主要问题是承包商没有给予足够养护时间就拆掉支撑和模板。混凝土的强度是随时间而增长的;但是对承包商而言,时间就是金钱,他可能在混凝土达到最小设计强度之前就拆除模板,于是结构物可能承受它承受不了的荷载,结果可能破坏。

在设计与混凝土板起组合作用的梁时,如在施工过程中没有临时支撑,就必须考虑施工荷载。这时,必须对梁在没有组合作用的状态下承担施工荷载的情况进行校核。

对于预制构件,将重型板材构件从模板中吊起时是最危险的时刻。必须知道起吊点的数量和位置。此外,由于构件必须按装卸和安装中可能涉及的任何位置进行设计,所以必须考虑相应的碰撞和应力。

第四节 雪、雨和冰荷载

在对降雪量的厚度和密度经过多年的观察之后,已经能对最大雪荷载作出合理的预测。美国气象局(U. S. Weather Bureau)(图 2.2)定出了不同地区的最小雪荷载,单位是 kg/m^2 ,

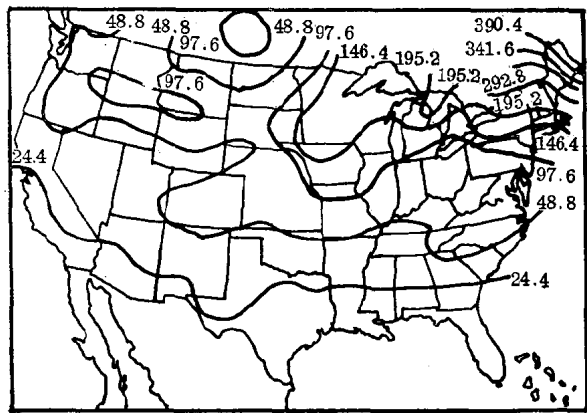


图 2.2 最小雪荷载(kg/m^2)

幅度则是从美国南部的 $24.4 \text{ kg}/\text{m}^2$ 开始到东北部的 $390.4 \text{ kg}/\text{m}^2$ 为止。 2.54 cm 厚的积雪,其重量大约为 $2.44 \sim 3.42 \text{ kg}/\text{m}^2$,这与它的密度有关。可以参考当地规范,得到该地区降雪特征的资料。

雪荷载只需要考虑屋面和房屋其他可能积雪的地方,如高架庭院、阳台、日光浴平台等。规范上规定的雪荷载,其根据是地面上的最大降雪量。

一般说来这往往比作用在屋面上的雪荷载大,因为屋面上松散的雪会被风吹掉或者由于通过屋面外皮散发的热量使雪融化和蒸发。由于坡屋面上的雪很容易下滑,所以规范中一般对坡屋面的雪荷载允许予以折减。但是某些屋面型式在风的作用下,会使雪局部聚集,致使雪荷载提高。

在计算活荷载时虽然往往不会想到水,但在设计时一定要考虑它。雨荷载一般比雪荷载小,不过要记住水的比重为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$,它的聚积会产生相当大的荷载。平屋面由于排水管阻塞将产生较大的荷载。水聚积后,屋面挠曲,能使更多的水聚积,会产生更大的挠度。

这个过程称为“池塘作用”，最后可能使屋面破坏。

冰会在耸突的构件上冻集，特别是在外部装饰性构件上，这种构件除了自重以外不承受其他荷载。所以必需对这类构件进行设计并保证这些构件能承担沉重的冰荷载。此外，开敞式桁架结构上结上冰后，既增加重量又加大面积，致使风压增大。

第五节 风 荷 载

早期建造的摩天楼能经受由风引起的侧向力。砖石承重墙房屋由于重量大，不可能因风力而破坏。即使在十九世纪后期，当承重墙体系被框架结构取代之后，重力仍然是主要的决定因素。只开了些小孔洞的重石墙立面，紧密排列的柱子，粗大的组合框架构件和沉重的隔墙仍然会产生很大的重量，因此风力作用不是主要问题。

1950 年出现了具有内部空间很开敞而重量相对很小的具有大玻璃墙面的摩天楼，第一次接受了风力的考验。随着采用重量轻的钢框架，自重不再是限制房屋高度的因素。但是高层房屋时代还是带来了一些新的问题。为了减轻恒载并形成更大的、更有适应性的空间，很大跨度的梁、可移动的非承重隔墙和非承重幕墙都发展起来了。所有这些革新减弱了结构物的总刚度，现在房屋的侧向刚度（侧向位移）也许比它的强度更需要重视。对高层房屋设计师来说，风力作用已成为一个主要问题。

掌握风并用确切的科学语言来预测它的性能也许是不可能的。风对房屋的作用是动力的，而且受到各种环境因素的影响。例如房屋所在地区地形的高低起伏和粗糙程度，结构物本身的形状、细长度和立面的材质以及相邻房屋的布置等。所有这些因素是怎样影响作用在房屋上的风的速度、方向和性能的呢？

(一) 风速

风的动力特性示于图 2.3 中。在房屋特定高度处记录的风速读数显示出两种现象：一个通常不变的平均风速和一个变化的阵风速度。因此风有两个分量，一个是静力的，另一个是动力的。

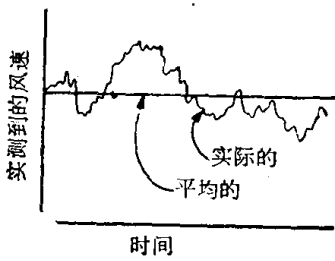


图 2.3

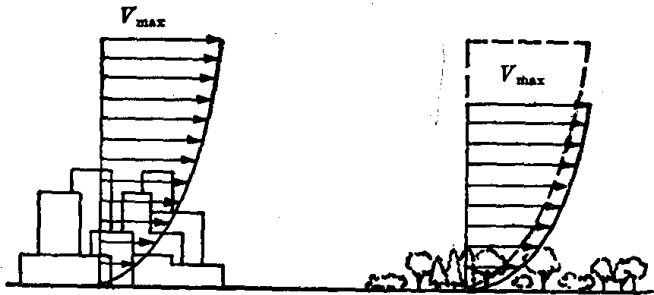


图 2.4

平均风速一般随高度增长，如图 2.4 所示。可是，风接近地面时因受到摩擦而减速，所以平均速度的增长率是地面粗糙度的函数。周围物体干扰愈大（如树、地形、房屋），产生最大风速 V_{max} 的高度就愈高^[2.7]。

(二) 建筑规范规定的风荷载

目前，对高层房屋风作用的测定，正在进行广泛的研究。建筑规范仍是以静力方法反映风的动力作用。风压值由离地面高度为 9.14 m、50 年一遇的、单位为公里/小时的最大年平均风速的函数给出。最大的区域性风压值（图 2.5）由美国气象局公布。

风对房屋产生的压力可按下式计算

$$p = 0.004823(C_D)(V)^2 \quad (2.1)$$

式中: p ——作用在房屋表面上的压力(kg/m^2);

C_D ——体型系数;

V ——最大平均风速(公里/小时)。

体型系数 C_D 与房屋的形状和屋面的坡度有关。对矩形房屋而言 $C_D = 1.3$, 这包括作用在结构物迎风面的压力作用(0.8)和背风面的吸力作用(0.5)。纽约州房屋建筑规范定出以房屋高度为函数的最小风荷载。规范值(图 2.6)是针对矩形房屋并依据离地面 9.14 m 处、平均风速为 120.8 公里/小时而定出的。

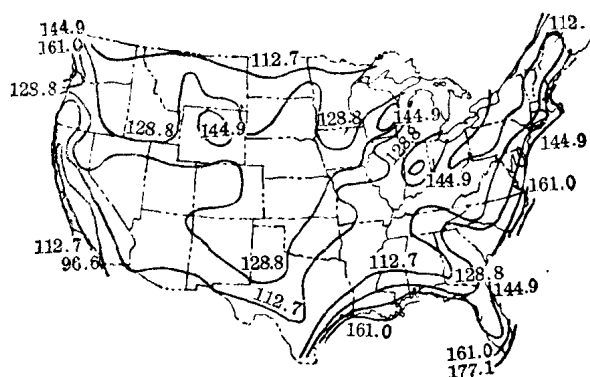


图 2.5 离地面 9.14 m 的最大风速(公里/小时)

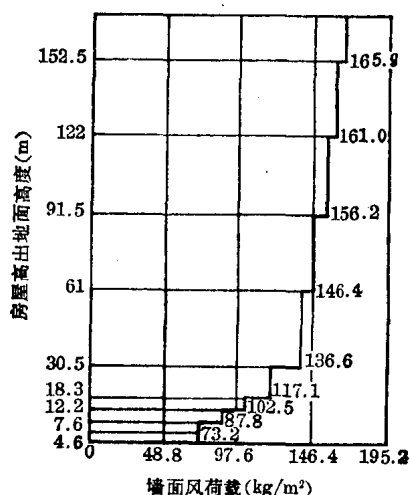


图 2.6 纽约州规范矩形房屋的最小风荷载

按上述公式给出矩形房屋离地面 9.14 m 处当风速 $V = 120.8$ 公里/小时时的风压值:

$$p = 0.004823(1.3)(120.8)^2 = 91.5 \text{ kg}/\text{m}^2$$

此压力值与上述规范所要求的数值差不多。

对于平面为六边形或八边形的房屋, 表格中的数值可减少 20%。对于平面为圆形或椭圆形的房屋, 表格中的数值可减少 40%。

规范中处理风荷载的方法, 不足以预测风作用的实际复杂性, 因为它没有考虑阵风的动力性质或自然构成对风作用的影响。

设计者必须对风的动力特性有较好的概念上的理解。对高层房屋有影响的风作用的各个方面将在下面各节讨论。

(三) 地形作为决定风压的一个因素

对麻省理工学院的地球科学大楼 (Earth Sciences Building) 进行了研究, 揭示了风作用的几个方面, 并深入了解了影响空气流动的地形因素^[9.15]。

麻省理工学院中心大楼位于查理河 (Charles River) 以北一个大庭院的中心。其东、西两面是几排较低的四、五层房屋。即使在大楼还未建造之前, 就已观察到高压气流反复地吹过河流并穿越庭院向北运动(图 2.7)。

自从建成以后, 麻省理工学院中心大楼的上下周围就经受了异乎寻常的大风速。特别

危险的是风全面作用在结构物底部 6.4 m 高的拱廊上。有时风大得使行人感到很难在房屋旁边行走或是把门打开。为了解释这些现象，用按比例缩小的模型做了风洞试验。结果记录如下。

从查理河吹移过来的高压空气团穿越庭院，遇到麻省理工学院中心大楼后，在迎风面形成高压区。风洞试验(图 2.8)证明在迎风面的中心风压最大，该处风流的运动几乎停止，随风速向边缘增大，风压减小(图 2.8b)。

拱廊的位置之所以值得注意，是因为洞口恰好设置在迎风面通常观测到的最大风压的点上(图 2.8a)。此外，洞口对高压空气团提供了一个出口，将其引向通常以低压为特征的位于房屋背风面的区域(图 2.8c)。综合这些研究结果，容易看出为什么在房屋拱廊内部及其四周记录到的风速常常是该地区正常风速的两倍。

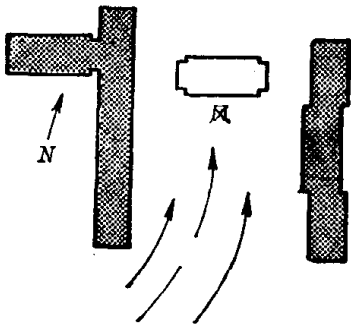


图 2.7 麻省理工学院中心大楼^[2.15]

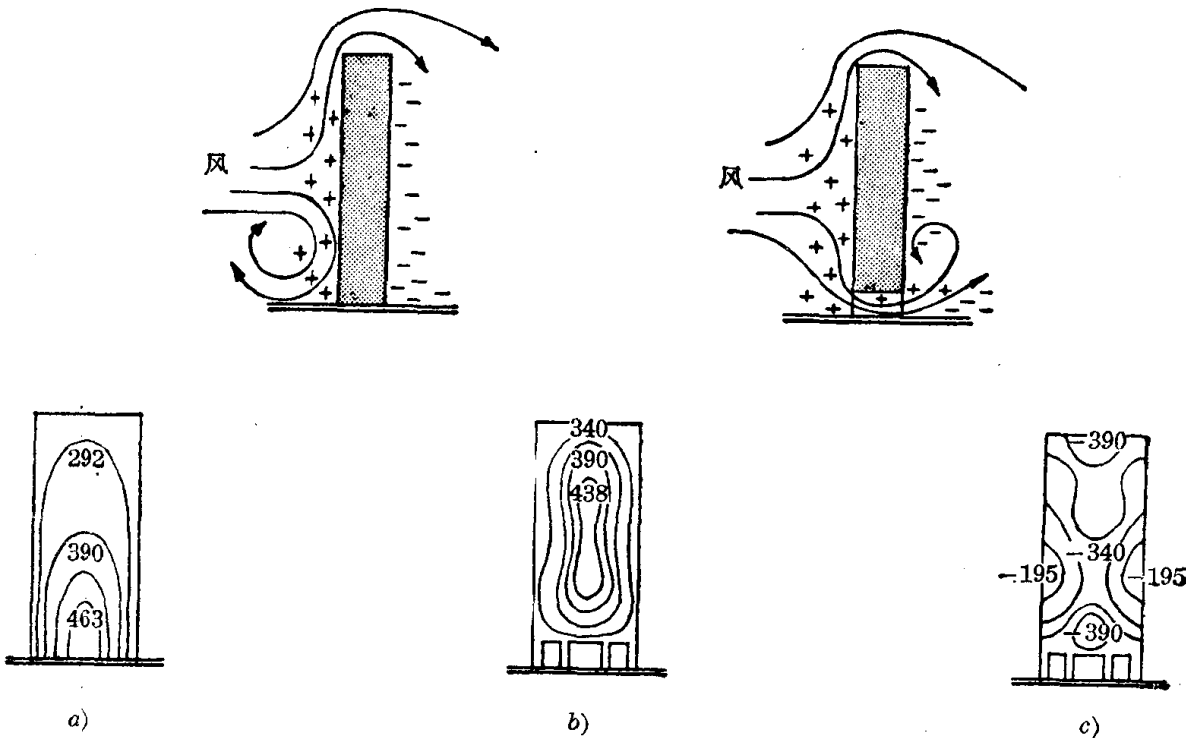


图 2.8 在麻省理工学院中心大楼按等压线记录的风压读数^[2.15]。

可以总结一下，风压未必象建筑规范中设想的那样，一定是随高度而增加的。有拱廊的房屋在高度的一半处压力最大(图 2.8b)，如果没有洞口，则在底部最大(图 2.8a)。

(四) 风向

所有的房屋运动都是与风向对应的。当一股空气团按一定方向流动而碰到房屋的表面时就产生了倾覆力。这个倾覆力就是风压，它随风速或受风面积的增加而加大。

当房屋有一个以上的面受到相当大的风作用时，房屋将产生双向挠曲(图 2.9b)。其主风向可分为两个分量，各代表房屋在一个面上所受到的风作用。

双向挠曲对房屋可以产生正的或负的运动。多向风作用产生的位移可能小于相同气流的单向风作用产生的位移。

房屋的空气动力设计，还可能有助于减少双向挠曲的房屋位移。当风向与房屋表面垂

直时, 风压总是最大。因此当气流不以 90° 袭击房屋表面时, 很多风力就自然消失了。

然而引起双向挠曲的风荷载, 在结构构件中还将产生单向位移中所没有的附加剪应力和扭转应力。

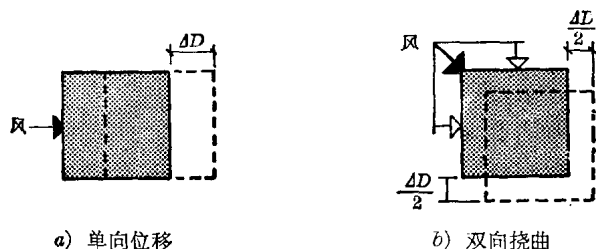


图 2.9

(五) 风压

风压取决于先前明确过的两个因素: 平均速度和阵风速度。因为静力平均速度是在较长时间间隔内的平均值, 最后所得的风压力也是平均压力, 并对房屋产生一个稳态的位移(图 2.10)。动力阵风速度相应产生动力风压, 它所造成的附加位移可能和房屋稳态位移相等; 对于细长的房屋这可能成为控制因素! 这种动力运动称为阵风颤振。由阵风作用产生的随机力通常促使房屋在平行于风的方向振动。

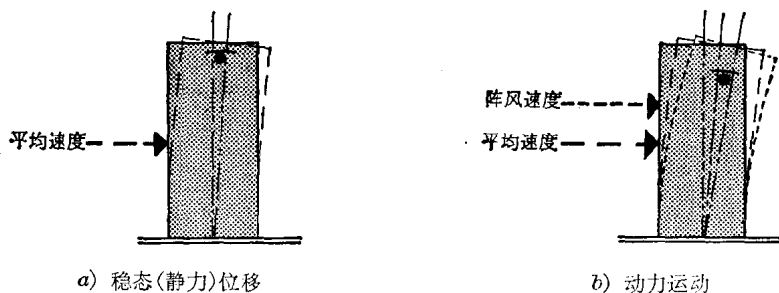


图 2.10

(六) 紊流

当任何流动的空气团遇到一个障碍物, 譬如一座房屋时, 其效应就如任何一种液体那样流向各个侧边, 然后再与主气流会合。当较大的空气团在同一给定时间内通过同样大小的面积时, 风速就增加, 还会发生空气的紊流(图 2.11)。

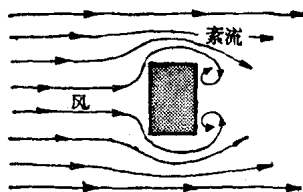


图 2.11

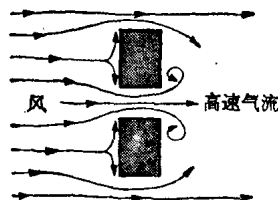


图 2.12

文图里(Venturi)效应, 如图 2.12 所示, 是紊流风作用的一种形式。当流动的空气团汇集流经两座高楼之间的狭窄空间时就产生了紊流。在这个空间内的相应风速超过主气流的风速。