



建筑 结构

体系概念和

BUILDING STRUCTURE

SYSTEM CONCEPT AND DESIGN

郭院成
王新玲
蒋晓东
编著

设计

黄河水利出版社

建筑结构体系概念和设计

郭院成 王新玲 蒋晓东 编著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书根据新修订的《混凝土结构设计规范》、《建筑抗震设计规范》、《钢筋混凝土高层建筑结构与施工规程》编写而成。全书共分九章,内容包括:建筑设计和结构概念总论;建筑设计方案阶段的总结构体系的概念设计方法;建筑结构的总体系及主要分体系的方案分析(总作用力估算,建筑结构受力特性,建筑物整体刚度、承载力及倾覆设计);结构上的各种作用、作用效应、组合计算及结构设计规定;建筑结构的水平分体系和竖向分体系的类型、特点及选型;常用的多、高层建筑结构体系(框架、剪力墙、框架-剪力墙、筒体结构)的内力、位移的手算计算方法及框架和剪力墙抗震设计、构造要求。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构体系概念和设计/郭院成等编著. —郑州:
黄河水利出版社, 2001. 6

ISBN 7-80621-479-8

I. 建… II. 郭… III. 建筑结构-结构设计
IV. TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 023352 号

责任编辑: 郭院成, 元静

封面设计: 朱 鹏

责任校对: 杨秀英

责任印制: 温红建

出版发行: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号 邮编 450003

发行部电话 (0371)6022620 传真 (0371)6022219

E-mail yrcp@public2.zz.ha.cn

印 刷: 黄河水利委员会印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 14.875

版 次: 2001 年 6 月 第 1 版

印 数: 1—2 600

印 次: 2001 年 6 月 郑州第 1 次印刷

字 数: 344 千字

定 价: 22.00 元

前 言

一个优秀的建筑物应是建筑师与结构工程师创造性合作的产物。这种创造性的配合应在设计项目的方案阶段就开始。但是,由于原有教学方式存在的问题,往往在建筑师进行方案阶段设计时,结构工程师已把重点转移至具体构件设计上,因而大大限制了结构工程师的创新思想;同时也限制了结构工程师与建筑师之间创造性地相互配合的可能性。使我们的建筑缺乏个性、特色;使我们的结构工程师逐渐变成一个计算机绘图匠。

本书的编著旨在推广及应用先进的设计思想——美国华盛顿国家工程院院士林同炎教授的“概念设计”思想,使我们的建筑师与结构工程师真正达到和谐统一。本书第一章至第五章,重点讲述了概念设计的方法、思想,包括:建筑设计和结构概念总论,建筑设计方案阶段的总结构体系的概念设计方法,建筑结构的总体系及主要分体系的方案分析,结构上的各种作用、作用效应组合计算及结构设计规定,建筑结构的水平分体系和竖向分体系的类型、特点及选型;第六章至第九章,根据新修订的《混凝土结构设计规范》、《建筑抗震设计规范》、《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规程》,对常用的多、高层建筑结构体系(框架、剪力墙、框架-剪力墙、筒体结构)的内力、位移的手算计算方法及抗震设计、构造要求进行了详细介绍,并简述了一些新型的结构体系,供设计人员参考。

本书第一章、第二章、第三章和第八章由王新玲编写,第四章、第五章和第九章由郭院成编写,第六章由王新玲、蒋晓东合作编写,第七章由郭院成、蒋晓东合作编写。全书由郭院成、王新玲统稿,并最后定稿。

本书是在多年教学实践经验及科研工作的基础上,针对高等院校建筑工程专业的教学要求编写的教学参考书。部分内容借鉴了国内外同行专家学者的研究成果,目的在于反映目前国内在该方面的最新研究成果和新世纪高等教育对在校大学生专业素质教育的要求。由于时间紧,水平所限,难免有不足之处,希望广大读者提出宝贵意见。

作 者

于郑州大学工学院

2001年4月

目 录

第一章 建筑设计和结构概念总论	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 建筑和结构设计过程及关系	(2)
第三节 结构教育和设计的总体概念	(3)
第四节 整体建筑物的设计	(5)
第五节 世界著名建筑简介	(6)
第二章 建筑设计方案阶段的总结构体系的概念设计	(12)
第一节 概述	(12)
第二节 建筑结构的总作用力估算	(14)
第三节 各种体型建筑物在水平荷载作用下的受力特性	(15)
第四节 建筑物的倾覆和抗倾覆	(17)
第五节 建筑物的总体承载能力设计	(20)
第六节 建筑物的刚度和变形	(24)
第七节 建筑物的形式(不对称)对结构的影响	(29)
第三章 建筑结构总体系及主要分体系	(32)
第一节 建筑结构总体系作用的层次	(32)
第二节 房屋结构总体系方案分析	(33)
第三节 框架式和筒体式空间结构	(40)
第四节 结构总体系方案实例分析	(46)
第四章 作用效应组合及结构设计规定	(49)
第一节 荷载概率模型及荷载代表值	(49)
第二节 风荷载	(52)
第三节 地震作用	(58)
第四节 作用效应组合	(71)
第五节 结构设计的一般规定	(74)
第六节 结构优化设计概念	(78)
第五章 结构分体系整体设计	(80)
第一节 结构水平分体系及特点	(80)
第二节 结构竖向分体系及特点	(86)
第六章 框架结构体系设计及构造	(100)
第一节 框架结构计算简图及计算方法	(100)
第二节 竖向荷载作用下的近似计算——分层计算法	(102)
第三节 水平荷载作用下的内力近似计算	(104)
第四节 水平荷载作用下侧移的近似计算	(117)

第五节	框架结构梁柱抗震设计和构造	(121)
第六节	梁柱节点区抗震设计	(134)
第七章	剪力墙结构体系的简化设计计算	(140)
第一节	剪力墙结构的力学特性	(140)
第二节	整体墙计算方法	(143)
第三节	双肢墙和多肢墙连续化计算方法	(145)
第四节	小开口整体墙及独立墙肢近似计算方法	(162)
第五节	壁式框架计算方法	(165)
第六节	底层大空间剪力墙结构的内力及位移计算	(169)
第七节	剪力墙承载力计算	(178)
第八章	框架-剪力墙结构的设计计算	(190)
第一节	框-剪结构协同工作原理及计算图形	(190)
第二节	铰结体系协同工作计算	(192)
第三节	刚结体系协同工作计算	(196)
第四节	内力计算	(201)
第五节	框-剪结构截面抗震设计及构造要求	(221)
第六节	框-撑结构体系简介	(221)
第九章	筒体结构设计简介	(225)
第一节	框架-筒体结构体系	(225)
第二节	筒中筒结构体系	(227)
第三节	筒体结构的简化分析方法	(229)
参考文献		(232)

第一章 建筑设计和结构概念总论

第一节 概 述

一个好的建筑物应是建筑师和结构工程师及设备工程师创造性合作的产物。但是这种合作往往是困难的,因为一个有效的建筑要表现空间形式,同时又具有功能性质,以满足使用者的需求,即满足与使用活动有关的和使用者感受的需求。

与活动有关的需求是人类对建筑物最基本的需求。如住宅建筑应提供居住、吃饭及活动场所;办公楼建筑则应满足办公、会议等的要求;而工业厂房建筑须提供设备放置、产品及满足生产要求的大空间。因此设计者必须按照活动内容、场地范围、相互关系、环境气候和服务设施等特定要求进行组织。此外,设计人员还必须考虑未来使用者对建筑物的感受需求,应保证把那些有价值的表现融入他的整个设计方案中,给人们提供一个有某种追求的活动场所,以满足人们的心理需求。

为满足以上需求,建筑师必须着眼于总体,构思一个总体的空间形式,以保证活动功能和感受需求协调一致,然后再通过具体设计和系统去完善这个方案。但是这个方案是否能最终实现,又必须依靠结构。因此在方案阶段必须有建筑师和结构工程师的创造性合作,双方必须能从整体出发考虑技术问题。但是由于结构工程师教育的专门化模式,导致他们常常由细节开始,而对于整体方案缺乏足够关心。如首先考虑柱距引起的梁跨度的大小,柱截面尺寸等问题。或者等待建筑师给出一个空间形式方案(非结构的),然后设法去具体化,充其量是一个东拼西凑的计算机画匠而已,这就限制了结构工程师创造性思维,形成了与建筑师的隔阂,产生了矛盾,因而也影响了方案和初步设计,破坏了建筑师和结构工程师之间创造性的合作。

针对以上隔阂对建筑师和结构工程师的限制作用,一个时期以来许多国内外教育工作者都形成了共识:必须找到一种教育方法,使建筑和结构专业学生学会在总体设计内容中将技术知识概念化——概念设计。美国著名建筑工程院士、伯克利加州大学教授林同炎先生是概念设计的鼻祖。他认为:未来环境设计者们的创造性合作是能够增进总体构思的。而总体构思能力是强调综合的建筑空间设计和更加专业、也更关心具体设计的结构工程师之间的联系的自然桥梁(如图 1-1 所示)。使两种专业人员在同一水平上去认识和解决在广泛的方案上的结构和空间设计的矛盾,使创造性合作在设计的前期阶段成为可能,以有利于总体建筑的形成。

本书旨在使读者能了解并掌握概念设计方法,使结构工程师在设计项目的方案阶段应用整体结构设计的方法,对建筑和结构设计思想的基本一致性打好一个基础,为结构工程师引向一个结构总体方案创造新的天地。

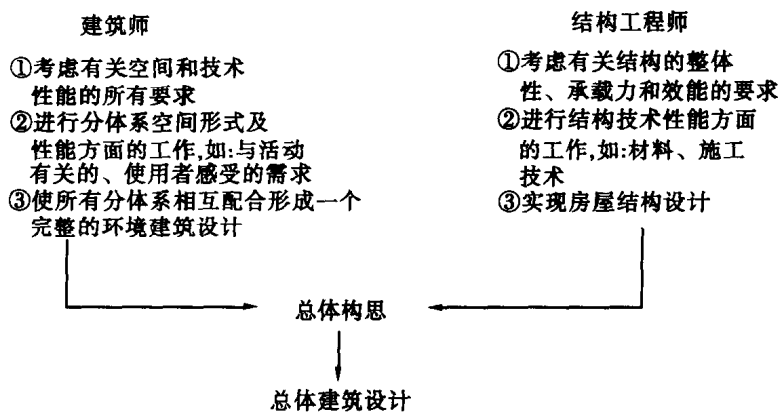


图 1-1 总体构思使建筑师与结构师相结合

第二节 建筑和结构设计过程及关系

如前所述,建筑师将相互关联的空间形式分体系组成的总体系形成一个建筑环境,以满足使用活动的、使用者感受的需求。这是一个复杂的任务,因此建筑师需有分阶段的设计过程,即:方案阶段,初步设计阶段和施工图设计阶段(如图 1-2 所示)。

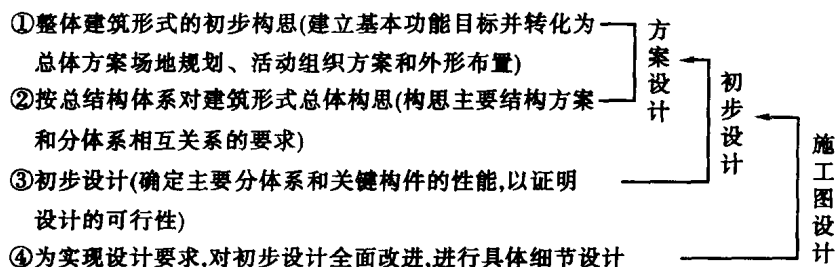


图 1-2 建筑设计过程

方案构思阶段的目的是找出整个场地规划、使用活动相互关系及房屋构建方案。即在方案阶段,建筑师首先要按照基本功能和空间关系设想和模拟一个抽象的建筑物,然后对其内容进行探讨,再根据场地条件进行修改。这个过程需要结构总体构思的合作,结构工程师应能从主体分体系之间的关系去构思总体方案,而不是从部件的细节考虑。这种创造性合作才能产生最优的建筑物。正如清华大学李著璟教授所说的,方案阶段设计是战略性问题,起决定性作用,而施工图设计阶段属于战术性问题。若战略方针有错误,不可能制定出正确的战术。

初步设计阶段,建筑师重点转移到精心改善选定的建筑方案上去。而结构工程师也应转移到做分体系具体方案的近似设计上,并确定控制构件的几何尺寸和相互关系。而这些初步设计所确定的内容仍可反馈回方案阶段,使方案进一步完善。

在施工图设计阶段,设计者和使用者对初步设计方案满意了,重点即转向细部设计。此时各工种设计人员尤其是结构工程师起很大作用,施工中所有细节都必需设计出来。

当然这个阶段的设计也可能反馈到第一、第二阶段,但若第一、第二阶段方案、设计做得较好,则在方案和初步设计阶段做出的各种决定之间的关系,以及施工图阶段的细部设计一般不会有较大的改动;反之,也可能推翻前面设计。总之,整个设计过程应该是一个逐步发展的过程,从创造到改进总体系设计概念,进而做出精确的构件设计和细部构造。在施工图全部完成后,交付施工,在施工中又会对设计进行修改,直至建筑物落成。

上述方法说明整个建筑设计及施工过程中,在各个阶段都需要各工种设计者相互默契的配合。在第一阶段,建筑师和结构工程师必须首先用概念设计方法确定空间形式;在第二阶段,二者针对主要分体系的性能进行初步设计;在第三阶段,则是建筑师、结构工程师和设备工程师的继续合作,直至完成全部施工图设计。

以上观点强调总体形式、功能和实现它的方法是一个整体,最终是整体多于各部分之和,而得到形式与功能统一。反之,设计中若采用拼凑的办法,简单地将各部分相加,只能得到相反的效果(如图 1-3 所示)。

	最小	重视总体设计	最大
设计者态度	拼凑	综合	整体
设计过程特征	看到需要就一部分一部分加上去	协调各部分以优化相互关系	各部分相互联系形成有机的总体系
组织目标	反效果的	功能确定形式	形式与功能统一
	最小	重视分析和反馈	最大

图 1-3 设计者对总体设计、分析和反馈的重要性认识

因此,建筑师和结构工程师只有从全局观点考虑总体空间形式,将形式与功能统一,然后创造性地去探讨总体设计,分体系和构件设计关系,最后才能将专门知识的作用充分发挥出来。

第三节 结构教育和设计的总体概念

建筑的方案设计应使建筑师与结构工程师创造性的合作,因此结构工程师在最早参与设计时需要首先处理的是结构的总体设计,着眼于相互有关的主要分体系,而不是细节(如构件)设计。但是,目前我国建筑工程专业的学生基本上是通过学习基本构件计算及其有关的具体设计和施工要点来学习工程知识的(如图 1-4(a)所示)。而这种学习模式和建筑设计思路的自然流程正好相反,因此常导致学生难以在设计思路形成的阶段应用这些技术知识。

目前,许多教育工作者已意识到这个问题,尤其是提倡素质教育的今天,专门化学习的问题越来越明显,它只能使学生们特别擅长于解决一些明确交给他们的确定性问题,或做一个计算机绘图匠,而不能分析一个复杂的系统问题,不会区分基本问题和细节,不能

很好地与建筑师进行创造性的合作。针对这个严重问题,美国工程院院士、著名教育家林同炎先生提出了对建筑工程专业学生进行教育的独特思路:采用推论式的教育方式,从介绍结构开始,在考虑方案时,将房屋看成一个整体空间形式,然后将那些基本知识做合乎逻辑的推敲。基本思路集中于主要的结构分体系,并分解出关键构件,与此同时仔细推敲为实现总体而需要的细部构造。

a. 构件教育方法

- ①侧重于具体结构构件设计
- ②教育问题:缺乏与总体体系目标有关的基本知识,强调部分而不是总体

b. 总体教育方法

- ①侧重于总体空间形式结构体系的设计
这是加利福尼亚州 Sguaw 谷的 Blyth 剧场的构思
- ②教育的优点:提供一种总的思路去学习结构概念和体系,并将它们应用于建筑设计中,整体决定构件

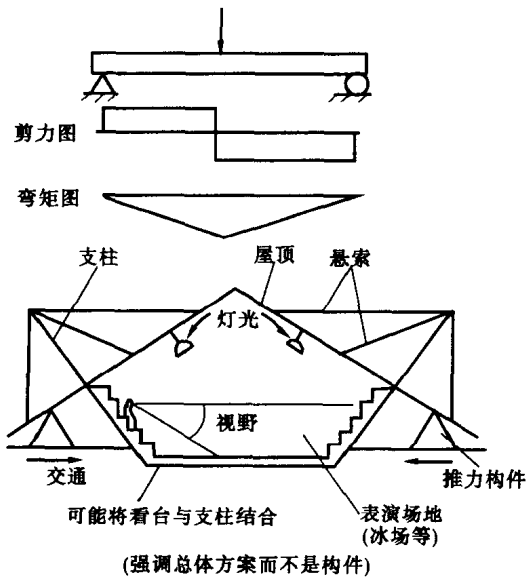


图 1-4 设计中的构件教育方法和总体教育方法的区别

可以想象,按照这个教育模式,可以使学生能够十分生动地考虑被称为“非结构”的空间范围和建筑设计的各个方面;不同性质的活动空间的组成和分割及相邻界面关系。通过楼板、墙体、屋顶这类水平和竖向构件的穿插交接来建立不同程度的空间分隔、封闭单元、通道及建筑物的轮廓、造型。真正实现建筑物自然显示结构,而结构使建筑增添美,把结构形状与建筑空间艺术形象融合起来,使两者成为统一体。如著名的巴黎艾菲尔铁塔(如图 1-5),原设计是 1889 年巴黎博览会临时的标志性建筑,高 320m,用钢 9 000t,它不仅满足了展览功能,并且以其造型优美、结构合理、建筑与结构的完美统一而被世人称颂,一直保留至今。从力学方面分析,铁塔可看成是嵌固在地基上的悬臂梁,对于高耸入云的铁塔来说,风荷载将是其主要荷载。由于铁塔的总体外形与风荷载引起的弯矩图十分相似,因此充分利用了塔身材料的强度和刚度,受力非常合理;塔身底部所设大拱,轻易地跨越了一个大跨度,车流、人流在塔下畅通无阻,更显铁塔的雄伟壮观。艾菲尔铁塔可谓建筑与结构完美统一的代表,人们一看到铁塔,就会想起巴黎,想起法国;一提到法国马上会想起艾菲尔铁塔。如今它已成为巴黎和法国的象征。可见一栋优秀的建筑在社会上政治、经济和文化中所起的重大作用。显而易见,按照这种从总体到具体的教育管理新模式重新设计教育计划和著作,对学生大有益处。

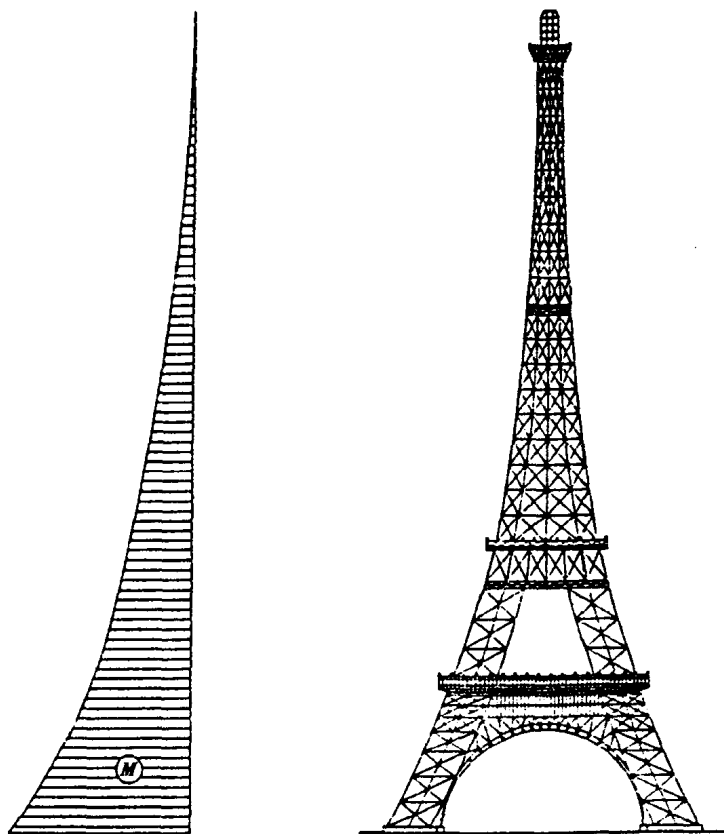


图 1-5 巴黎艾菲尔铁塔

第四节 整体建筑物的设计

一个整体建筑的设计不仅仅是建筑师和结构工程师创造性的结合,而且还需要各工种的和谐统一。如需要为建筑提供水、电力、采暖、通风、空调等设备及机械和环境的服务设施,以保障水平和竖向运输。如图 1-6 所示,为整个建筑设计的所需要的工种。

- | | |
|--|--|
| <p style="text-align: center;">建筑设计</p> <p>①环境、场地、体型</p> <p>②与使用活动有关,空间形式</p> <p>③满足使用者感受的需求</p> | <p style="text-align: center;">结构设计</p> <p>①结构型式</p> <p>②结构材料</p> <p>③结构承载力、刚度、抗倾覆</p> <p>④结构构造和施工方法</p> |
| <p style="text-align: center;">设备设计</p> <p>①供水、排水、水源</p> <p>②照明和动力用电、电源</p> <p>③采暖、空调、通风、热源</p> | <p style="text-align: center;">服务设施</p> <p>①水平运输:走廊、通道</p> <p>②竖向运输:电梯井,楼梯间</p> <p>③污水处理</p> |

图 1-6 建筑设计中各种不同的工种

显然,水、电、暖这些设备需要专门的设备间。若需要大的干管通道,需要和结构合理相结合,既起到不过多破坏结构,又可起到在强震作用下,作为薄弱环节局部破坏而减少整体破坏的作用。竖向运输需要较大的电梯井,在作总体结构时就应考虑作为主要结构分体系。还有音响和照明问题,都应和结构分体系相结合,如图 1-7 所示。这样才能使服务设施与整体结构方案和各主要分体系之间达到最优化的组合。

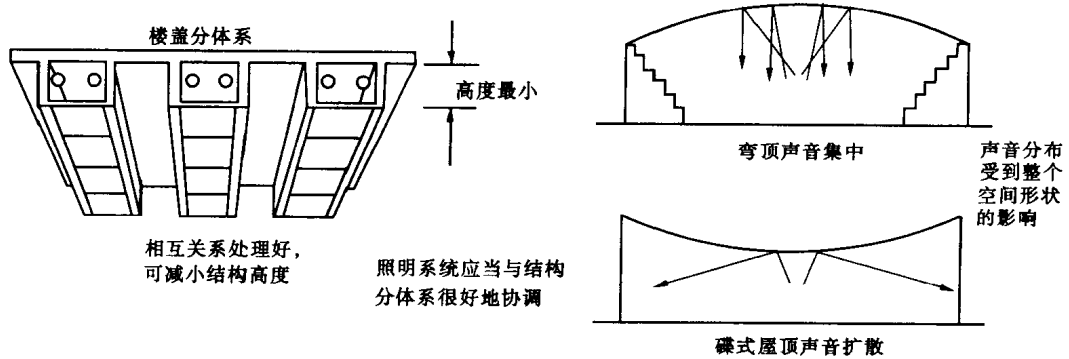


图 1-7 照明、音响与结构分体系统一

如林同炎在尼加拉瓜一座美洲银行大楼设计中,利用高层建筑中部的设备井筒作为抗震作用的结构构件,成功地抵御了 1972 年一次强烈的地震。在那次大地震中,该大楼所在地区一万多栋房屋倒塌,而该大楼却只有一些易于修复的裂缝。这不能不说是一个将建筑、结构、设备统一成一体,从而产生非凡效果的典型。因此,一个好的建筑物落成,必定是建筑师、结构工程师和设备工程师乃至施工工程师和谐结合的产物。

第五节 世界著名建筑简介

(一) 著名高层建筑的结构体系

高层建筑是社会经济发展和科技进步的产物。随着大城市的发展,城市用地紧张,市区地价日益高涨,促使近代高层建筑的出现,电梯的发明更使高层建筑越建越高。宏伟的高层建筑是经济实力的象征,具有重要的广告效应,在日益激烈的商业竞争中,更扮演了重要的角色。20 世纪是高层建筑跨时代的发展阶段。

20 世纪初,随着钢结构的发展,在美国建成了许多超高层建筑,无论在高度、层数和数量上都处于世界领先地位。早在 1913 年纽约就建成了 60 层(高 234m)的 Woolworth 大厦。1931 年在纽约曼哈顿岛的中心区又建成了著名的帝国大厦(Empire State Building),大厦共 102 层,高 381m(楼顶塔尖高 448m),创造了建筑史上的奇迹。帝国大厦的建筑高度作为世界记录保持达 42 年之久。1966 年开始动工的世界贸易中心为两幢外形相同的方形塔楼,于 1973 年 4 月建成,地面以上 110 层,高 412m,每幢大楼底面为 63.5m × 63.5m 的正方形。塔楼采用筒中筒结构体系,受力比框架合理,刚度更大,结构用钢量约为 160kg/m²,比采用框架体系的帝国大厦节省约 20%,降低了结构造价。纽约世界贸易中心不仅在建筑高度上突破了帝国大厦保持了 42 年的世界记录,更以其规模和在世界贸易中的地位成为纽约市的象征。

世界贸易中心大楼的建筑高度纪录只保持不到一年, 1974 年美国芝加哥市建成了西尔斯大厦(Sears Building), 大厦 110 层, 高 443m(包括天线高 500m), 底层平面为 $68.6\text{m} \times 68.6\text{m}$ 的正方形, 由于框筒边长过大, 为减少剪力滞后现象, 采用了将大框筒分为 9 个小框筒的筒束体系, 小框筒为 $22.9\text{m} \times 22.9\text{m}$ 的正方形, 向上在 50 层、66 层和 90 层分别减少 2~3 个小框筒, 最后剩两个小框筒到顶(如图 1-8)。框筒密柱采用 H 形截面, 柱截面底层为 $1\,070\text{mm} \times 609\text{mm} \times 102\text{mm}$ (高 \times 宽 \times 厚), 向上逐渐分段减小, 顶层柱截面为 $1\,070\text{mm} \times 305\text{mm} \times 19\text{mm}$ 。设计总用钢量为 7.6 万 t, 平均用钢量约为 $150\text{kg}/\text{m}^2$, 比高度低约 30m 的世界贸易中心大楼还小, 可见合理的结构体系, 对超高层建筑是十分重要的。

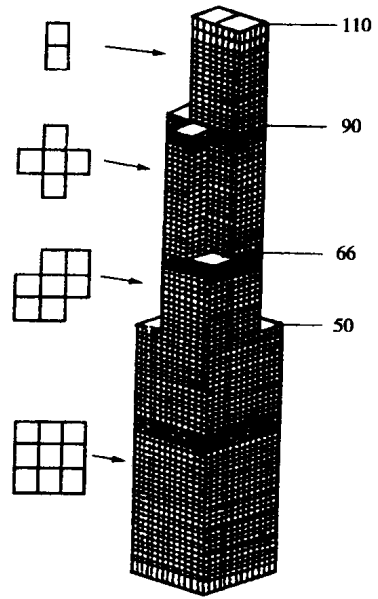


图 1-8 西尔斯大厦

悬挂结构是近年来发展的受力体系, 如南非约翰内斯堡的 Standard Bank 大楼(如图 1-9), 香港汇丰银行(如图 1-10), 均为典型的悬挂体系。这种结构体系以筒体、桁架等作为受力结构, 楼盖以钢丝绳束或预应力混凝土吊杆悬挂在上述结构上。为敞开底部或其他部位的空间创造了有利条件。

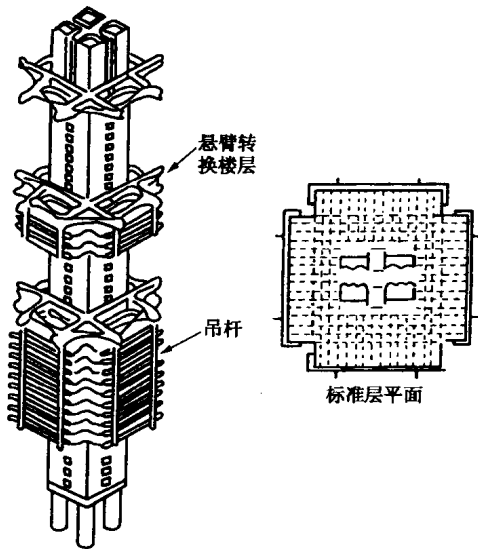


图 1-9 南非约翰内斯堡的 Standard Bank 大楼

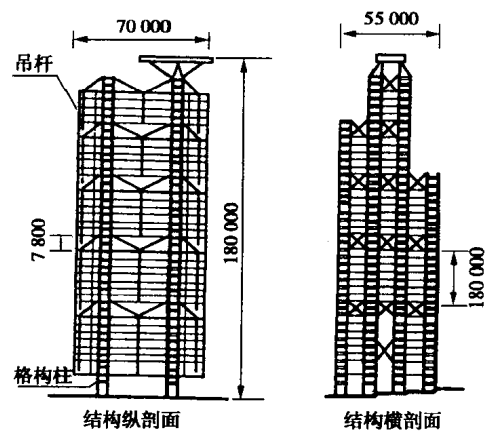


图 1-10 香港汇丰银行

我国在高层建筑方面起步较晚, 解放前留下来的上海国际饭店(24 层楼, 高 78m), 是当时全国最高的建筑。1976 年建成的广州白云宾馆是国内早期的高层建筑(如图 1-11 (a)), 地面以上 33 层, 高 115m, 为剪力墙结构体系。20 世纪 70 年代, 我国高度超过 100m 的高层建筑还不多, 改革开放后的 80 年代, 国内各大城市, 特别是北京、深圳、上海和广州等大城市, 相继建成了一大批高层建筑, 其结构有钢筋混凝土结构、钢结构、组合结构, 如深圳国贸大厦、广州国际大厦、京城大厦和北京国贸中心等。深圳的国贸大厦 50

层,高 150m,为 80 年代国内最高的钢筋混凝土筒中筒结构的建筑(如图 1-11(b));广州国际大厦 63 层,高 200m,为 90 年代初国内最高的钢筋混凝土建筑(筒中筒结构)。90 年代以来,随着国内市场经济的发展,国家经济实力日益雄厚,高层建筑更是遍地开花。这里特别要介绍一下 1998 年在上海浦东新区建成的金茂大厦(如图 1-12)。



(a)广州白云宾馆

(b)深圳国贸大厦

图 1-11 广州白云宾馆,深圳国贸大厦

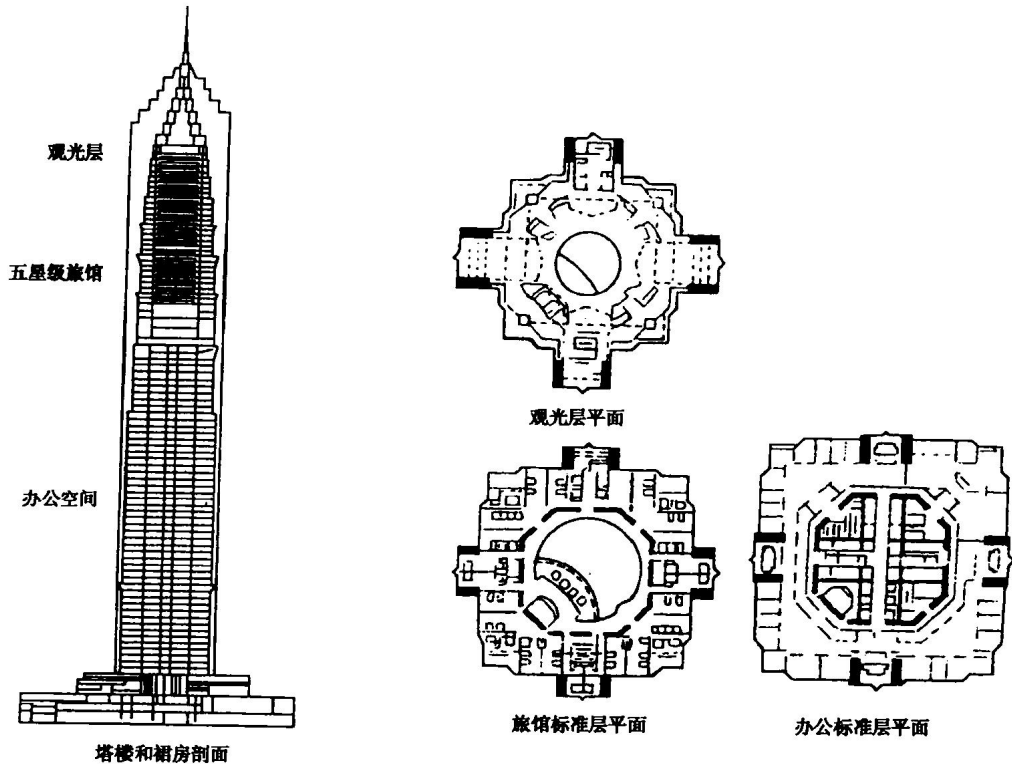


图 1-12 上海金茂大厦

金茂大厦位于上海浦东陆家嘴金融开发贸易区,大厦高 420.5m,建筑面积 29 万 m^2 ,占地 2.3 万 m^2 。大厦地下 3 层,地上主体 88 层,其中 1~52 层为办公,53~87 层为五星级宾馆,88 层为观光层,89~94 层为设备层。大楼平面为八角形,外形轮廓 13 层,每隔若干层渐渐收进,很像中国古代的宝塔,具有独特的民族风格。

金茂大厦主体结构中部为八角形型钢配筋混凝土(SRC)核心筒束,筒壁厚 800~459mm,筒内井字形墙到 56 层结束,然后单筒升到 337.3m,核心筒四周为八根 SRC 大柱,截面由 $1.5\text{m}\times 5\text{m}$ 逐渐收至 $1\text{m}\times 3.5\text{m}$,以适应逐渐收进的外形。上海地区地下淤泥层很深,地基条件较差,金茂大厦采用钢管桩基础,桩深达 82.5m,地下整体桩承台尺寸为 $64\text{m}\times 64\text{m}\times 4\text{m}$,混凝土用量达 13 500 m^3 ,为提高基础整体性,采用整体一次浇注。金茂大厦经国际招标,由曾设计西尔斯大厦的美国芝加哥 SOM 设计事务所中标设计,日本及法国提供了一些设备,大厦的施工由上海建工集团总承包。金茂大厦是目前我国第一高楼,在世界超高层建筑排名中名列第六名。上海另一标志性建筑是位于上海黄浦江畔、浦东陆家嘴尖上的“东方明珠塔”(见图 1-13)。东方明珠塔高 468m,居于亚洲第一、世界第三。该塔由三根直径为 9m 的擎天立柱、太空舱、上球体、下球体、五个小球、塔座和广场组成。其结构为钢筋混凝土薄壁结构及网架结构。

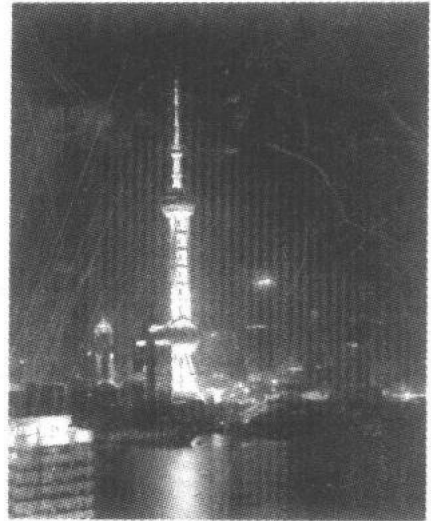


图 1-13 东方明珠塔

上海建筑业又一次历史性的创造已经开始,在上海浦东离金贸大厦不远处,世界最高的建筑——上海环球金融大厦,高 460m(不包括天线),已开工建设,预计 2002 年竣工。该建筑物的建成,标志着我国经济实力的日益增加,高层建筑的设计、施工已达到了世界先进水平。

(二)大跨结构体系

大跨结构一般用于体育馆建筑、展览大厅、歌剧院及桥梁建筑等。世界上著名的体育馆建筑为“美国伊利诺大学体育馆”,跨度为 122m,材料用重度为 $17\text{kN}/\text{m}^3$ 的轻混凝土建成。近年来我国体育馆建筑也在蓬勃发展,尤其是亚运会在北京召开,使我们的体育馆建筑上了一个新台阶。如北京朝阳体育馆是为亚运会排球比赛设计的体育馆,建筑面积 7 880 m^2 ,比赛厅平面为 $78\text{m}\times 66\text{m}$ 的椭圆形,设有 3 384 个座席,场地 $34\text{m}\times 44\text{m}$,略有弧度。朝阳体育馆造型新颖,功能合理,尤以其独特的结构体系,受到工程界的好评。作为一例子进行简单分析,以加深对结构概念设计的理解。

1. 结构体系概况(图 1-14)

在体育馆椭圆形平面中央沿纵向布置由钢管构成的桁架拱作为主要水平结构,桁架拱上部设主悬索及吊索为桁架提供中间(弹性)支座,以减小大跨度拱的内力。主悬索两端锚固在剪力墙顶上,剪力墙为上窄下宽的三角形,上部挖空形成三角形框架。在主悬索水平力作用下框架竖杆受压,框架斜杆受拉,受力明确。斜拉杆采用后张预应力混凝土,

以提高斜拉杆的抗裂性。

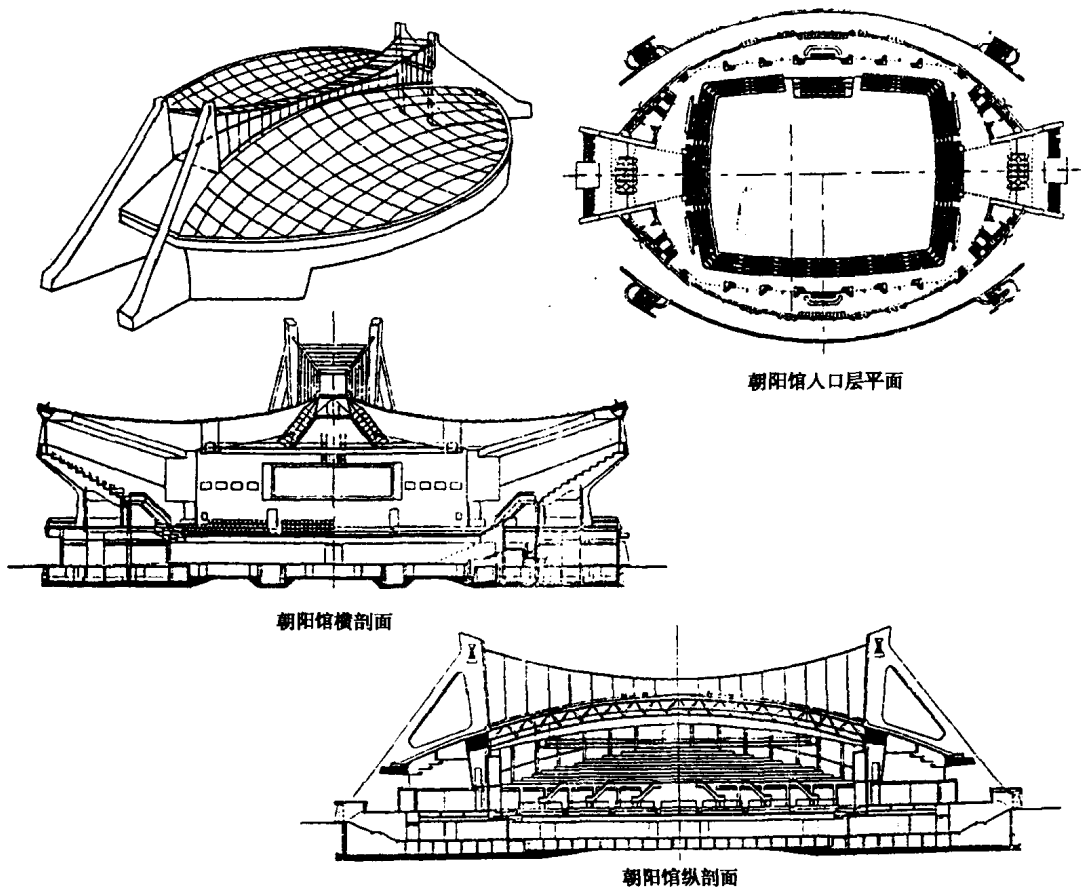


图 1-14 北京朝阳体育馆

沿体育馆纵向边缘与钢管桁架拱相对布置倾斜的钢筋混凝土边拱,在边拱和钢管桁架拱之间布置屋面承重索,主要承受屋面荷载,承重索曲率为正(向上凹);与承重索正交方向布置稳定索,稳定索曲率为负(向下凹),以保持悬索屋盖的稳定性,承受风荷作用下可能产生的向上吸力。

体育馆的主要竖向结构为 4 片八字形分开的剪力墙,主要荷载(包括竖向荷载和水平荷载)都通过它传给基础。另外,看台部分的荷载将由看台下的框架传给基础。

2. 竖向荷载下的受力分析

屋面竖向荷载,由屋面承重索分别传给中央的钢管桁架拱和两侧倾斜布置的钢筋混凝土边拱。桁架拱把一部分荷载通过拱自身的推力传给剪力墙下部,另一部分荷载由上部吊索传给主悬索,再传给剪力墙顶端,由三角形框架的竖向压杆和斜拉杆平衡。竖向压杆把压力直接传到剪力墙下部基础。框架斜拉杆与桁架拱相交在剪力墙下部,它们各自传来的拉力和推力的水平分量在剪力墙底部基本上抵消,所以传给基础的主要是竖向压力,弯矩和水平力都很小。

钢筋混凝土边拱把屋面承重索传来的荷载通过拱推力作用到剪力墙下部,由于两侧

边拱对称布置,边拱推力的水平分量也互相抵消,传给基础的只剩下竖向荷载。屋面承重索与钢筋混凝土边拱平面间有一个夹角(见横剖面),边拱的一部分重力将由屋面承重索平衡掉,减小了边拱对下部看台框架的压力。

3. 水平荷载下的受力分析

纵向水平荷载很明显是由四片剪力墙承受,由于巧妙地采用了在平面上八字形分开的剪力墙和倾斜的桁架拱,大大提高了结构体系的横向刚度。可以看出,横向水平荷载也要通过屋面体系传给桁架拱,拱在平面图上成曲线形,且两拱肢的曲率相反(就像悬索结构中的承重索和稳定索一样),不论哪个方向传来水平力,对拱引起的附加内力正好相反,一肢受拉,另一肢受压,并且通过自身的曲线形传到剪力墙,都成为作用在剪力墙平面内的内力。

4. 结构特点

(1)结构体系与建筑功能协调,室内空间完全满足排球比赛要求。结构体系布局巧妙,受力合理,主要荷载集中在4片八字形分开的剪力墙上,水平分力基本抵消,传给基础的主要是竖向荷载。

(2)以悬索、桁架拱和钢筋混凝土边拱作为主要承重结构,内力以轴力为主,充分利用了结构材料的强度和承载力,自重轻,地震力小,近似圆形的平面减小了风荷载。总体看比较经济合理。

(3)八字形分开的剪力墙和平面上曲线形的桁架拱,使各个方向的水平力最后都转化为作用在剪力墙平面内的荷载,受力合理,刚度好。

(4)马鞍形悬索结构屋盖自重轻,稳定性好,刚度大。屋面承重索平衡掉钢筋混凝土边拱的一部分竖向荷载,大大减轻了看台后部框架的负担。因此,可把下部框架柱内移,看台后部悬挑在外,使体育馆外形更显得轻巧明快。

(5)从上述分析可以看出,朝阳体育馆的结构体系具有较大的承载能力和刚度,可以应用到更大跨度的建筑中去,对于比赛厅平面为 $78\text{m}\times 66\text{m}$ 的排球馆,这种结构体系的潜力似乎还没有被充分利用。

值得一提的大跨结构的例子是法国巴黎国家工业与发展技术展览大厅(如图1-15),平面为三角形,屋盖结构用拱身为钢筋混凝土装配整体式薄壁结构的落地拱,大厅屋顶每平方米面积的折算厚度仅为 180mm ,而跨度为 206m ,厚度与跨度之比小于 $1/1100$ (一般鸡蛋壳的厚度与其跨度之比约为 $1/100$),堪称世界之最,真正体现了建筑师与结构工程师的创造性结合。

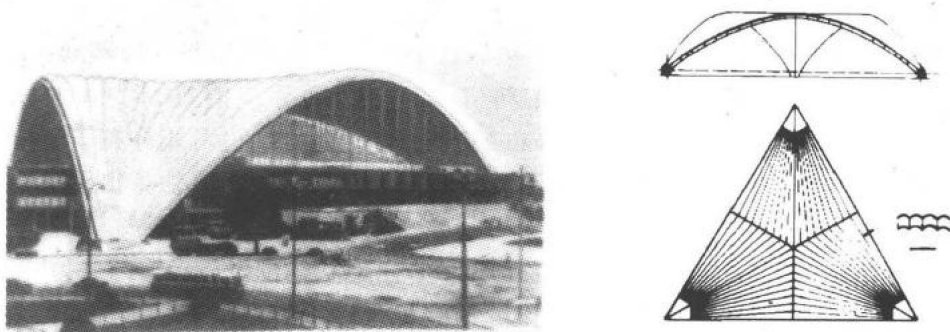


图 1-15 法国巴黎国家工业与发展技术展览大厅