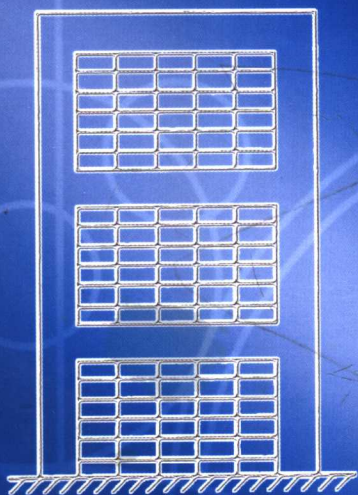




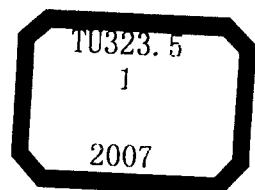
新型高层结构系列

巨型框架结构设计 与施工

沈蒲生 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



新型高层结构系列

巨型框架结构设计与施工

沈蒲生 编著

机械工业出版社

本书为新型高层结构系列丛书中的一本。

全书除了介绍巨型框架结构的定义、类型、特点与发展简况以外,还对巨型框架结构在静力荷载下内力与变形的计算方法、几种巨型框架结构的受力特性、主次框架连接方式对结构内力与变形的影响、施工过程对结构内力与变形的影响、混凝土收缩、徐变对结构内力与变形的影响、地震作用下巨型框架结构的动力性能进行了介绍与分析。书中还介绍了巨型框架结构设计施工的实例,并且对巨型框架结构的设计与施工提出了建议。在附录中,给出了三个巨型框架结构的计算程序。

本书可供从事建筑工程设计、施工等技术人员使用,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

巨型框架结构设计与施工/沈蒲生编著. —北京:机械工业出版社, 2007.5

(新型高层结构系列)

ISBN 978-7-111-21310-9

I. 巨… II. 沈… III. ①巨型-框架结构-结构设计②巨型-框架结构-工程施工 IV. TU323.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第054725号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张晶 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2007年6月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.875印张·360千字

标准书号:ISBN 978-7-111-21310-9

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68327259

封面无防伪标均为盗版



作者简介

沈蒲生, 湖南大学教授, 博士生导师。1961年7月湖南大学土木工程系毕业, 1965年7月湖南大学结构工程研究生毕业, 1981年9月至1983年9月美国威斯康辛大学访问学者, 1990年8月至1991年2月丹麦奥尔堡大学高级访问学者。曾任国务院学位委员会学科评议组成员、全国土木工程专业指导委员会委员、全国土木工程专业评估委员会委员、湖南大学学位委员会副主席、湖南大学土木系主任兼结构工程研究所所长等职。

长期从事混凝土结构基本理论及高层建筑结构的教学与科研, 出版专著、译著、教材20多本, 发表论文200多篇, 多项教学和科研成果获得国家及省、部级奖励。

前 言

高层建筑是社会需求与经济繁荣和科技进步的产物。随着对高层建筑使用功能要求的日趋复杂，高层建筑在数量日渐增多的同时，结构形式也在不断地变化。巨型框架结构便是顺应这种变化而发展起来的新的结构形式之一。

巨型框架结构由巨型梁和巨型柱组成的主框架以及由普通梁和普通柱组成的次框架构成。框架结构中，一部分梁、柱截面尺寸的如此改变，将导致结构的内力与变形性能发生很大的变化。迄今为止，国内外已经有一部分学者对巨型框架结构进行过研究，但是还没有一本专门地、比较系统地介绍它的书籍。本书便是为此目的而编写。

本书除了介绍巨型框架结构的定义、类型、特点与发展简况以外，还对巨型框架结构在静力荷载下内力与变形的计算方法、几种巨型框架结构的受力特性、主次框架连接方式对结构内力与变形的影响、施工过程对结构内力与变形的影响、混凝土收缩徐变对结构内力与变形的影响、地震作用下巨型框架结构的动力性能进行了分析。书中还介绍了部分巨型框架结构设计施工的实例，并且对巨型框架结构的设计与施工提出了建议。在附录中，给出了三个巨型框架结构的计算程序。书中除了介绍国内外学者的部分研究成果之外，还介绍了我和我的研究生谭征、廖超等人最近几年所做的一些工作成果。

本书是作者所写新型高层结构系列书籍之一。由于我们的水平所限，错误和不妥之处，欢迎批评指正。

沈蒲生

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 巨型框架结构的定义	1
1.2 巨型框架结构的类型	1
1.3 巨型框架结构的特点	7
1.4 巨型框架结构的发展简况	12
第2章 静力荷载下内力与变形的计算方法	15
2.1 分析模型	15
2.2 计算机程序编制	18
2.2.1 计算简图	18
2.2.2 巨型框架结构单元刚度矩阵	19
2.2.3 等效节点荷载	24
2.2.4 巨型框架结构杆系模型有限元程序的编制	26
第3章 几种巨型框架结构的受力特性	28
3.1 规则巨型框架结构的受力特性	28
3.1.1 规则巨型框架结构在竖向荷载下的受力特性	28
3.1.2 巨型框架结构在水平荷载下的受力特性	33
3.1.3 主框架梁数量与布置对巨型框架结构受力性能的影响	37
3.1.4 主、次框架刚度比对巨型框架结构受力性能的影响	39
3.2 带大开间巨型框架结构的受力特性	49
3.2.1 竖向荷载下内力和变形的特点	49
3.2.2 水平荷载下内力和变形的特点	51
3.2.3 竖向荷载下主、次框架刚度比对结构内力分布的影响	51
3.3 空腹巨型框架结构的受力特性	54
3.3.1 钢筋混凝土空腹巨型框架的等效截面高度系数	54
3.3.2 空腹巨型框架的受力性能	56
第4章 主、次框架连接方式对结构内力与变形的影响分析	66

4.1 概述	66
4.2 半刚性连接框架有限元分析	67
4.2.1 连接的分类界定	67
4.2.2 半刚性连接的 $M-\theta$ 模型	67
4.2.3 局部坐标下的单元刚度矩阵	68
4.2.4 非节点荷载处理	70
4.2.5 有限元程序编制	72
4.2.6 程序验证	72
4.3 主、次框架连接方式的影响分析	74
第5章 施工过程对结构内力与变形的影响分析	84
5.1 概述	84
5.2 模拟施工过程的计算方法	85
5.2.1 普通框架模拟施工过程的计算方法	85
5.2.2 巨型框架自身的特点	88
5.2.3 巨型框架三种模拟施工过程的计算模型	89
5.3 巨型框架模拟施工过程程序编制	94
5.3.1 程序概述	94
5.3.2 程序段的分析与设计	94
5.3.3 程序的调试和验证	101
5.3.4 算例计算	103
5.4 施工过程对主次框架半刚性连接巨型框架受力性能的影响	115
第6章 混凝土收缩、徐变对结构内力与变形的影响分析	120
6.1 混凝土徐变与收缩的一般理论	120
6.1.1 混凝土的徐变	121
6.1.2 混凝土的收缩	139
6.2 高层建筑考虑施工过程和收缩、徐变的简化分析方法	143
6.2.1 徐变应变的计算	143
6.2.2 收缩应变的计算	145
6.2.3 配筋率对钢筋混凝土结构徐变、收缩的影响	145
6.2.4 高层建筑各楼层柱和剪力墙徐变、收缩竖向变形的计算	149
6.2.5 竖向变形差对水平构件的影响	151
6.3 巨型框架考虑收缩、徐变模拟施工过程的程序编制	152
6.3.1 概述	152
6.3.2 程序框图	152

6.3.3 程序的调试和验证	152
6.4 算例计算	153
6.4.1 内部次框架为混凝土框架的算例	154
6.4.2 内部次框架为钢框架的算例	159
第7章 地震作用下巨型框架结构的动力性能	166
7.1 概述	166
7.2 巨型框架结构的动力试验	166
7.2.1 部分预应力混凝土巨型框架结构的低周反复试验	167
7.2.2 巨型框架结构的振动台试验	171
7.2.3 高层住宅钢筋混凝土巨型框架节点试验	174
7.2.4 巨型钢柱空间滞回特性试验	181
7.3 结构的自振周期和振型	185
7.3.1 计算方法	185
7.3.2 计算模型	193
7.4 巨型框架结构的推覆分析	194
7.4.1 结构抗震分析发展简况	194
7.4.2 侧向力分布模式综述	199
7.4.3 巨型框架结构静力推覆下的受力特性	201
第8章 巨型框架结构设计施工建议	218
8.1 设计建议	219
8.1.1 一般性建议	219
8.1.2 几个问题的讨论	236
8.2 施工建议	254
8.2.1 合理施工方案的选择	254
8.2.2 减少混凝土收缩、徐变影响的措施	256
8.2.3 转换层钢桁架组合吊装技术	257
附录	262
附录 A 巨型框架结构静力计算程序	262
附录 B 巨型框架结构考虑施工进度影响的平面框架结构计算程序	277
附录 C 巨型框架结构考虑混凝土收缩、徐变以及钢筋效应的计算程序	298
参考文献	303

第1章 绪 论

1.1 巨型框架结构的定义

在普通框架结构中，梁和柱的截面尺寸比较均匀，内力相差也较小。如果将普通框架中一部分框架的梁、柱截面尺寸加大，使之成为巨型梁和巨型柱，其余框架的梁、柱截面尺寸保持不变，如图 1.1 所示，框架的受力状况将会发生很大的变化。这种框架结构被称为巨型框架结构。

由此可见，巨型框架结构由两类框架结构组成：一类是由巨型梁和巨型柱组成的框架结构；另一类是由普通梁和普通柱组成的框架结构。有人将前者称为主框架，将后者称为次框架。也有人将前者称为一级框架，将后者称为二级框架。本书将采用主框架与次框架的称呼。

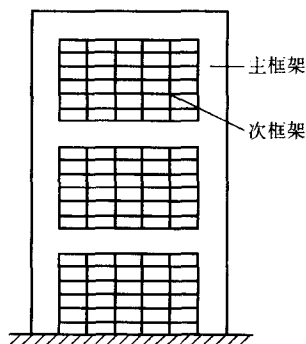


图 1.1 巨型框架结构

1.2 巨型框架结构的类型

制作巨型框架结构的材料可以是钢，也可以是混凝土、型钢混凝土或几种材料的组合。主框架柱可以是巨大的实腹钢筋混凝土柱、钢柱或型钢混凝土柱，也可以是空间格构式桁架、钢筋混凝土剪力墙或筒体。主框架梁可以是巨大的实腹梁，也可以是箱型梁或格构式桁架。根据制作巨型框架结构所采用材料的不同，巨型框架结构可以分为以下三种主要的类型：

1. 钢巨型框架结构

钢巨型框架结构中，主框架的梁和柱大部分是空心的空间构件，一般有以下三种类型：

(1) 桁架型：主框架的“梁”是由四榀桁架围成的空间桁架；主框架的“柱”是由四片支撑围成的空间支撑柱（图 1.2a）。

(2) 斜格型：主框架的“梁”和“柱”都是由四片斜格式多重腹杆桁架围

成的空间杆件（图 1.2b）。

（3）框筒型：主框架“柱”是由一个小框筒构成；主框架“梁”则是由空间桁架构成（图 1.2c）。

该种结构的典型例子是日本神户的 TC 大厦。日本神户市的 TC 大厦是一座高层办公楼，地下 3 层，地上 25 层，高 103m，建筑平面接近正方形，平面尺寸为 33m × 32m。该大楼采用钢巨型框架体系。平面的四个角柱均采用 4 片人字形竖向支撑与柱距为 5.7m 的 4 根钢柱所围成的、边长约 6.5m 的钢支撑筒体结构。在顶层（第 25 层）和第 14 层，沿楼层平面四边，设置一根由 4 榀

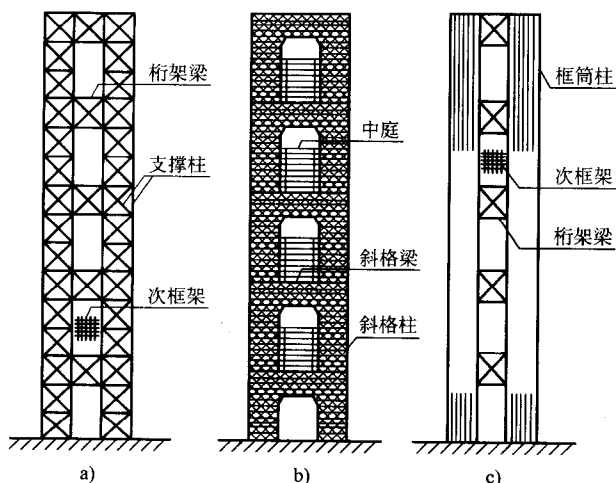


图 1.2 钢巨型框架的基本形式

a) 桁架型 b) 斜格型 c) 框筒型

桁架围成的、高约 4m、宽约 6m 的空间桁架梁，作为空间主框架的大梁。此 4 根巨型柱与两层各 4 根巨型梁共同组成一个空间的单跨双层主框架，作为该大楼的主体结构，承担各楼层的重力荷载和风、地震引起的全部水平荷载。图 1.3a、b 分别为该大楼主框架的结构平面和结构剖面。

日本东京市政厅大厦（东京都厅舍），地上 48 层，高 243m。也采用钢巨型框架体系，整个结构是由 8 根巨型柱与 6 层巨型梁所组成的多跨主框架。其中，巨型柱是由 4 根角柱与 4 片竖向支撑围成的边长为 6.4m 的支撑竖筒；巨型梁则是由 2 榀竖向放置桁架与 2 榀水平放置桁架围成的空间桁架。图 1.4 为该大厦巨型框架体系的结构平面和结构剖面。

这种主框架结构具有很大的抗推刚度和水平承载力，并具有良好的延性，用作大楼的主体结构，承担大楼的全部水平荷载和竖向荷载。东京市的地震烈度大致相当于我国地震烈度表中的 8 度。此一巨型框架结构体系成功地应用于高烈度区内 48 层高的厦，足见主框架的良好耐震性能和强大的抗震能力。

在主框架各个节间的区段内，设置次框架或大梁，以分别承担各区段内若干楼层的竖向荷载和局部水平荷载，并把它传给主框架。

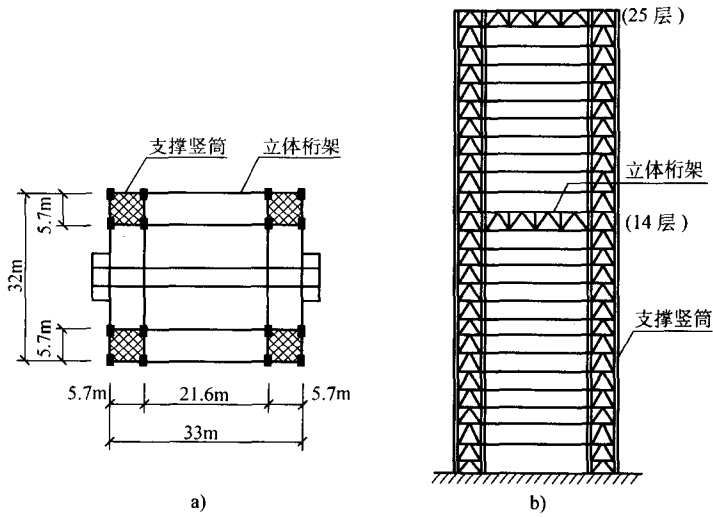
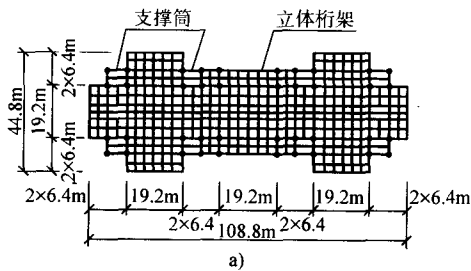
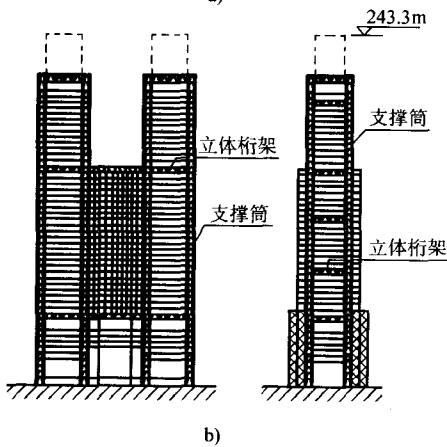


图 1.3 日本神户 TC 大厦

a) 结构平面 b) 结构剖面



a)



b)

图 1.4 日本东京市政厅大厦

a) 结构平面 b) 结构剖面

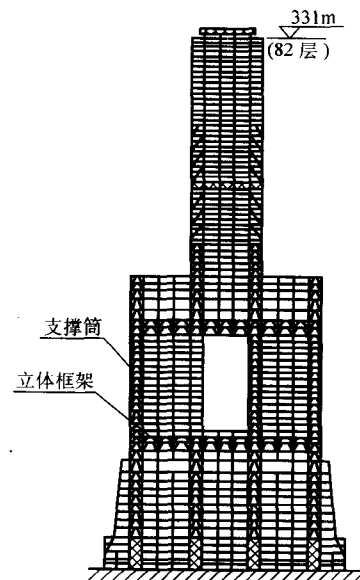


图 1.5 台湾高雄市银行大厦

台湾高雄市银行大厦，地上 82 层，高 331m。主结构也是采用钢的巨型框架体系，主框架柱是由 4 根钢柱与 4 片支撑围成的支撑竖筒；主框架梁则是由两榀竖向放置桁架和两榀水平放置桁架围成的空间桁架。主框架承担整个大楼的全部水平荷载和竖向荷载。在主框架的各层巨型梁之间，另立次框架来承担此区段内的若干楼层的重力荷载和局部水平荷载，并把它传给主框架。由于此幢大楼采用了巨型钢框架作为主体结构，因而在大楼立面的中部开设一个透空大洞是很方便的。图 1.5 为该大楼的结构剖面。

1985 年建成的香港汇丰银行大楼，地面以下四层，基础埋深为 20m；地面以上 43 层，高 175m，采用矩形平面，底层平面尺寸为 55m×72m（图 1.6）。建筑规划要求大楼底层为全开敞式大空间，与前面的皇后广场自然地连成一片。由于开敞底层限制了上部框架落地，最后确定采用钢结构悬挂体系。由八根“格构柱”和五层纵向、横向桁架梁组成悬挂体系的主框架（图 1.6），承担着整个大楼的全部水平荷载和竖向荷载。每根格构柱是由两个方向间距分别为 4.8m 和 5.1m 的四根圆形钢管，以及沿高度每隔 3.9m 的四根纵向、横向变截面箱形梁所组成。

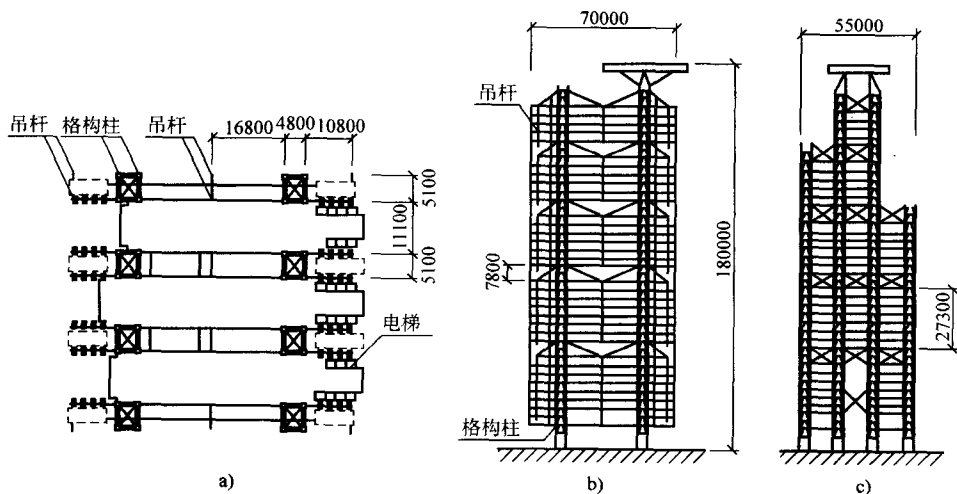


图 1.6 香港汇丰银行大楼

a) 结构平面 b) 结构纵剖面 c) 结构横剖面

沿房屋的横向，格构柱的净距为 11.1m；沿房屋的纵向，一对格构柱之间的净跨度为 33.6m，两端悬臂长度为 10.8m。4~7 层楼板之间的各道桁架梁，通过吊杆悬挂在上一层的桁架梁上。

风荷载作用下的结构分析结果表明,在纵向或横向水平力作用下,结构体系的侧移曲线均属剪切型变形。结构的动力分析结果显示,沿房屋纵向(东西方向),结构的基本周期为4.5s,第二和第三扭转振型的周期分别为3.7s和3.1s。比其他结构体系的自振周期稍长。整座大楼钢结构的总用钢量为25000t。

2. 钢筋混凝土巨型框架结构

我国的高层建筑多为钢筋混凝土结构,因此,已建成的巨型框架结构亦多为钢筋混凝土结构。这种结构体系的构成方式有以下两种:

(1) 由钢筋混凝土墙围成的芯筒与外圈的主框架和次框架组成。主框架各层巨梁之间设置小型的次框架,承担各个分区段内楼层的竖向荷载。深圳新华大厦和厦门国际金融大厦均属此类。

深圳新华大厦采用正方形平面,边长28.8m,地面以上共35层。主体结构采用钢筋混凝土巨型框架体系,由芯筒和外圈主框架组成。芯筒平面呈矩形,外包尺寸为12m×9.7m,在芯筒内部,设4道横隔墙和2道纵隔墙。楼层平面的外圈为钢筋混凝土框架,由主框架和次框架组成。平面四角的大截面双肢柱作为四边主框架的四根角柱,沿楼房高度从下到上分别每隔3层、9层、10层设置钢筋混凝土大截面梁,与4根角柱一起构成主框架,在主框架的各层大梁之间设置3~10层次框架,分别承担各区段内的竖向荷载和局部水平荷载。图1.7a和图1.7b分别为该大厦的结构平面和主次框架结构的立面。

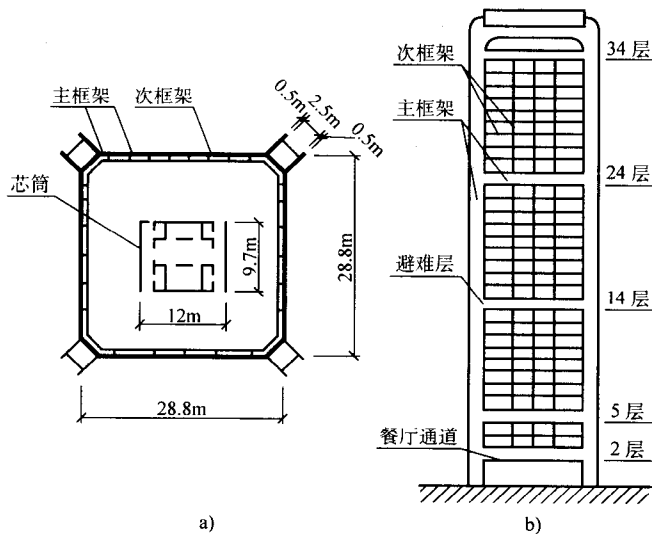


图 1.7 深圳新华大厦

a) 结构平面 b) 结构立面

(2) 由几个分开布置的钢筋混凝土筒体直接充当主框架的巨型柱，每隔 6~10 层设置的巨型梁就直接搁置在墙筒之上，从而形成主框架。每层巨型梁之上另设 6~10 层的次框架，承担这些中间楼层的竖向荷载。深圳亚洲大酒店即采用该种结构体系。

深圳亚洲大酒店主楼，地下 1 层，埋深 5.5m，地上 33 层，高 114.1m，平面为 Y 形。按 7 度进行抗震设防，场地属 II 类。主楼结构采用钢筋混凝土巨型框架体系，是利用建筑平面中心部位的三角形芯筒和三个翼肢的端筒作为主框架的 4 根立柱，与每隔 6 个楼层设置的箱形楼盖作为大梁，来构成平面为 Y 形的大型主框架。在主框架的每层大梁上设有一个 6 层的次框架，作为其间 6 个楼层的局部承重结构。次框架的柱距为 4.0m，跨度为 4.2m + 5.6m + 4.2m，层高为 2.9m。在每榀次框架的顶层，所有中柱均在第 6 层楼板处中止，为第 6 楼层制造出一个全楼面的无柱大空间，方便了该楼层使用上的合理布局。图 1.8 为该大楼的结构平面和剖面。

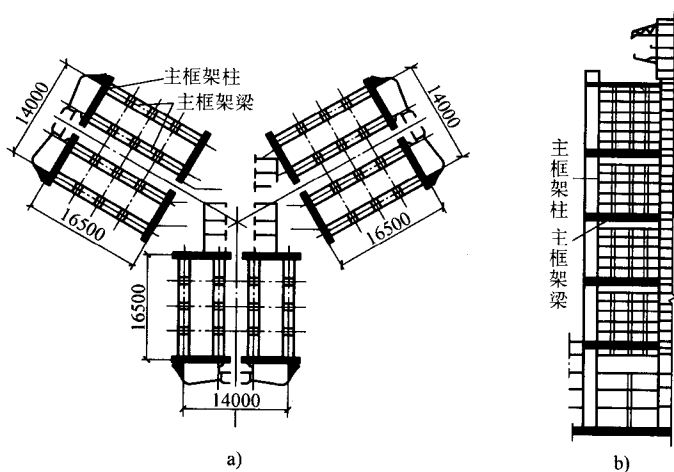


图 1.8 深圳亚洲大酒店

a) 结构平面 b) 结构剖面

3. 混合巨型框架结构

混合巨型框架结构的种类很多。例如，主框架为混凝土或型钢混凝土框架，次框架为钢框架的巨型框架结构；又如，主框架柱为混凝土或型钢混凝土柱，主框架梁为钢桁架，次框架为钢框架的巨型框架结构等。

新加坡华侨银行以两端半圆形的混凝土电梯井作为主框架柱，除第一层外，每隔 14 层设置钢巨型转换桁架，组成单跨四层主框架，其他楼层框架只承受自

重、活荷载，并传递到主框架上（图 1.9）。

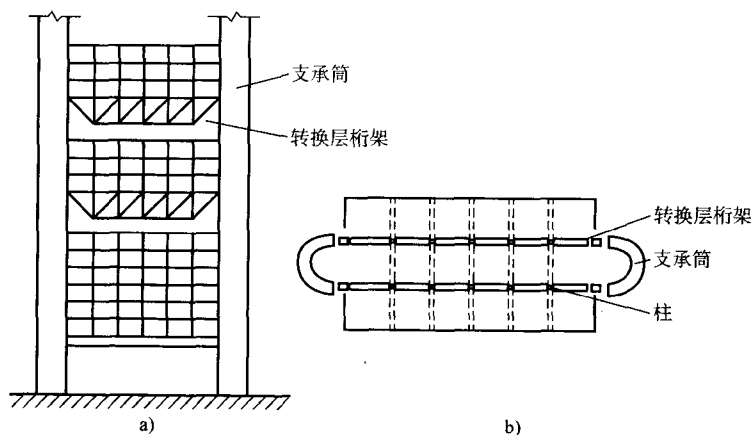


图 1.9 新加坡华侨银行
a) 结构示意图 b) 标准层平面

另外一例为美国明尼苏达州联邦储备银行大楼（图 1.10），其主框架为单层单跨巨型框架，巨型柱为钢筋混凝土筒体，次框架为悬索桥形式的悬挂结构。

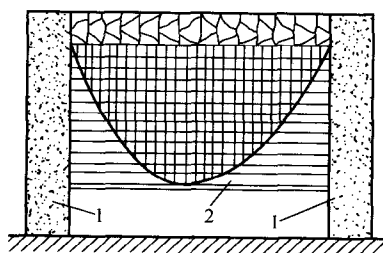


图 1.10 美国明尼苏达州联邦储备银行大楼
1—钢筋混凝土筒体 2—刚性悬索

1.3 巨型框架结构的特点

巨型框架结构的主要优点是：

1. 传力明确

巨型框架结构是一种新型结构体系，它的主框架是由不同于通常梁柱概念

的巨型构件—巨型梁和巨型柱组成的巨型框架；次框架则是由常规结构构件组成。主框架本身就可以是独立的结构，其中巨型柱的尺寸很大，有时可以超过一个普通框架的柱距，形式上可以是巨大的实腹钢筋混凝土柱、钢管混凝土柱、空间格构式桁架或者是筒体；巨型梁采用高度在一层左右的预应力混凝土大梁或者格构式桁架，一般隔若干层才设一道。巨型框架结构的主框架通常为主要抗侧力体系，次框架只起辅助作用和大震下的耗能作用，并负责将竖向荷载传给主框架。这样，主次框架组成一种超常规的具有巨大抗侧力刚度及整体工作性能的结构。

2. 能满足建筑功能的要求

现代高层建筑往往在同一竖直线上需要大小不一的室内空间，而且建筑功能往往与结构的正常布置互相矛盾。为了解决这一矛盾，高层建筑中经常在结构出现转换的楼层处设置转换层。巨型框架结构体系的出现使得建筑需要与结构布置不再矛盾，隔若干层设置的巨型梁可以充当转换层作用，使得沿竖向大小不一的空间得以自由布置。巨型结构的小层样式可以千变万化，不仅美观，而且可以不必再为结构的转换而造成结构上的不利而担心。

由于巨型框架结构竖向可以布置数道大梁，小柱不再是主要的抗力构件，故两大层之间的小柱没必要在竖向一定连续，紧贴大梁底下的一层可以不设小柱而做成大空间，布置成商店、会议室、娱乐场所等公共空间，这种大空间沿竖向可以做若干个，以方便人们的各种需要（图 1.11）。

为了模拟自然环境，改善内部办公条件，有效地利用较大的内部空间，需要在建筑内部每隔若干楼层设置一个内庭园，从而在整座建筑中形成多个叠置内庭。能够提供特大空间的巨型框架结构体系就适应了这样的需要。

建筑体量的增大，使高层结构受到的风力作用迅速增长，对于强风地区的高层结构，过大的风力会带来更加不利的影响。对于某些形状的大体量高层结构来说，在建筑的半高处开设一个横穿房屋的洞口，可以大幅度地减小风力。此一开洞的举措在对结构带来好处的同时也要求结构体系进行一定的变革，巨型框架结构便能满足此要求。

3. 整体性能好

中、低层建筑结构通常以抵抗竖向荷载为主，水平荷载（地震作用和风荷

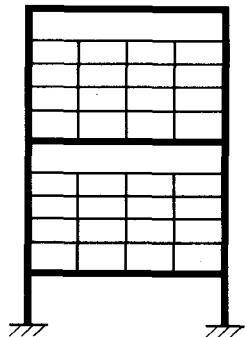


图 1.11 带大开间的巨型框架结构

载)影响较小,它们所产生的内力,往往仅作为一种附加组合进行补充验算。水平荷载所产生的侧移也很小,通常可以不加以验算和限制(吊车和厂房除外)。而在高层建筑中,水平荷载不但是主要作用荷载,而且往往还成为设计中的控制因素。

由于上述原因,应极大重视提高高层建筑的抗侧能力。带刚臂超高层结构体系的广泛应用即缘于此。这种体系通过和技术层(避难层、设备层)设置整层高的巨型梁或桁架(简称刚臂),进一步加强核心筒与周边框架柱的联系,充分发挥周边框架柱的抗侧力作用,能有效地提高结构的抗侧刚度,减小结构的侧移。

巨型框架结构的巨型梁实际上可以充当刚臂,把两边的巨型柱连在一起组成一个巨型框架,共同抵抗水平荷载作用,它的抗侧刚度很大,使得整个结构具有极其良好的整体性,可有效地控制结构侧移。

同时,巨型框架结构是一种大的结构体系,可以在不规则的建筑中采取适当的结构单元组成规则的巨型框架结构,有利于抗震。

4. 可以将多种结构形式及不同材料进行组合

由于巨型框架结构体系是由主框架和次框架组成,主框架和次框架可以采用不同的材料和体系,因此,巨型框架结构体系可以有不同的变化和组合。例如主框架可采用高强材料,次框架可采用普通材料。主框架可采用框架形式,次框架可采用悬挂结构等。

5. 可加快施工进度

建造巨型框架结构时可先施工主框架,待主框架全部或部分完成后,分开各个工作面同时施工次框架,可加快施工进度。

6. 可节约材料,降低造价

巨型框架结构体系中,虽然主框架的截面尺寸大,材料用量也多,但数量较大的次框架只承受有限几层竖向荷载的作用,故其截面尺寸比一般超高层建筑小得多,对材料性能要求也较低,所以总体上来说,可节约材料,降低造价,使建筑物更加经济实用。例如香港的中国银行大厦采用巨型框架体系,节约钢材50%,其经济效益相当可观。

7. 适用于建筑物增层改造

建筑物增层改造是一种常见的工程改造形式。采用外套式巨型框架结构可以使建筑增加较多楼层,能够在不影响原有建筑日常使用的条件下,最大限度地控制建筑层间高度和自重,使普通的多层建筑增层,形成具有一定抗震能力的高层建筑。这对于用地较为紧张的城市市区的旧房改造,是一种经济、实用