

大连世界贸易大厦 钢结构设计与施工

大连世界贸易大厦有限公司 编著

中国建筑工业出版社

编辑委员会名单

名誉主任委员：金德一

名誉副主任委员：王心明 金德珠

主任委员：包立军

副主任委员：林述清 侯忠良 葛恩江

主 编：侯忠良

副 主 编：林述清 贺贤娟 刘 钢 贾 春

委 员（按姓氏笔画排序）：

王清良 刘治国 孙继勇 闫兴华 安杰民

张向群 李晓纯 陈晓萍 李秀梅 邹祥芹

赵海涛 柳 民 袁辉毅 胡善东 徐长胜

前 言

大连世界贸易大厦，坐落于大连市的金融和商贸中心地带——中山广场北侧，是大连市的标志性建筑之一。

大厦塔楼为 54 层，其中地下 4 层，地上建筑总高度 242m，为钢框架-混凝土核心筒体系。引以为豪的是：本工程的设计、施工、监理和钢结构制作，均是国人自己完成的，钢材也是选用（舞阳钢厂和鞍钢）国产的。大厦的钢结构工程，经我国知名专家组成的评审组验收，评定意见如下：

“该工程的钢结构设计，结构方案合理，平面规则，竖向刚度和承载力分布均匀。在 30 层和 45 层设置加强层，增强了结构刚度，有效地减小了侧向位移。下部结构采用钢骨混凝土结构是合理的。框架节点设计合理，便于制作和安装。结构分析采用国内外通用的设计软件，整体设计可靠，达到了国内先进水平。”

“该工程按构件受力状态合理地选用了国产 Q235B 和 Q345B 钢材，满足了工程需要，保证了结构安全。”

“评审组听取了监理单位关于钢结构制作项目的评估汇报，抽查了部分质量评定资料，认为该工程的钢结构制作符合国家标准有关优良等级的规定，达到了国内先进水平。”

“该工程的钢结构安装，采用了相对标高控制，设计标高复核的方法；柱的垂直度校正采用临时耳板微调法取代缆风绳法。这些方法施工简便、安全，有效地保证了安装精度。该工程的安装工程质量达到了国家标准有关优良等级的规定，安装技术达到国内领先水平。”

“本工程主要采用国产钢材，由国内单位设计，国内单位制作和安装，国内单位监理，为发展我国的超高层钢结构建筑提供了新的范例。”

“本工程采用的先进技术和方法，为今后类似工程建设积累了宝贵经验。”

工程实践表明，国人完全有能力用自己的双手建成世界一流的钢结构大厦，并结合国情和工程特点创造新的设计、施工技术和经验。

21 世纪，是我国推广应用钢结构的世纪，原建设部总工程师姚兵说：“21 世纪就建筑结构来讲是钢结构的世纪”，中国建筑金属结构协会会长杜宗翰说：“2001 年是建筑钢结构的普及发展的‘元年’”。

伴随我国钢结构建筑体系的兴起，作为大厦的业主，我们愿将本工程有关钢结构的设计、制作、安装和监理等方面的经验和成果整理出来，献给钢结构建筑业的同仁以及有志

于从事钢结构建筑业的朋友们。

谨借本书出版之际，向所有参与大连世界贸易大厦建设、审评和管理的专家、学者、工程技术人员和工人，以及关心支持本工程的朋友们，致以衷心谢意。

大连世界贸易大厦有限公司

董 事 长 金德一

副董事长 王心明

总 经 理 包立军

2001 年 8 月

序 言

大连世界贸易大厦，建筑造型优美，塔楼结构的平面布置规则性好，在地震烈度7度区选用钢-混凝土混合结构是经济合理的，结构高度（242m）也符合建设部关于高层建筑高度放宽的规定。在1999年我应邀主持大厦钢结构工程的评审验收工作，对其结构设计、钢结构选材、制作和安装工程进行了评审和验收，评审验收组给予了较高的评价。在此竣工之际，谨致以热烈的祝贺。

该工程的设计始于1996年，当时国家行业标准《高层民用建筑钢结构技术规程》（JGJ 99—98）尚未颁布，但设计者在结构方面做到了精心设计，合理选材，结构的平面布置规则，竖向刚度和质量分布较均匀，构造合理，基本上满足了国家行业标准的要求。

该工程在高层钢结构的材料选用、制作、安装和工程监理等方面，得到了国内在高层钢结构方面具有丰富经验的专家们的大力支持和参与，使本工程完成得既顺利又出色，并积累了新经验。

更可贵的，是该工程在总承包、钢材、设计、制造、安装和监理方面，做到了全盘国产化，是国内又一幢全面实现国产化的高层钢结构工程。经国内专家核查和评定，认为该工程的高层钢结构设计和施工都达到了国内先进水平，其中，钢结构安装采用了相对标高控制和设计标高复核的方法，施工简便，安装精度高，创造了新经验，达到了国内领先水平。

本书内容丰富、详实、具体，既是实际工程经验的总结，又是极好的行业教材。在设计和施工方面都有一些特色和值得借鉴的地方。特别是本书以很大篇幅介绍了高层钢结构制作、安装、监理，包括智能化和工程档案管理等方面的实践和宝贵经验，对于从事这方面工作的专业技术人员和管理人员是一本不可多得的教材。相信大专院校的师生们也会从中受益。

蔡益燕

2001年8月

大连世界贸易大厦简介

大连世界贸易大厦，是一座具有商都特色和现代化风格的超高层钢结构建筑，是集办公、商务、金融、证券、会所为一体的商贸大厦。

大厦工程自 1997 年 1 月 8 日开始建设，于 2001 年 7 月底投入使用。大厦占地 7 000m²，总建筑面积 100 000m²，塔楼地上 50 层，地下 4 层，建筑总高度为 242m；裙楼 8 层，局部 9 层，裙楼顶面高度为 39.2m，与塔楼连为一体。

大厦的结构形式为钢框架-混凝土核心筒体系，地下的框架梁柱和地上 9 层的框架柱为钢筋混凝土结构，裙楼为钢骨混凝土框架-混凝土剪力墙体系。塔楼平面尺寸为 37.4m × 38.3m，标准层高为 3.8m，内筒与外柱之间形成南北向跨度 9.9m、东西向跨度 12.6m 的大空间办公区。第 15 层、30 层和 45 层为防灾避难层，层高 5.1m。裙楼为金融、商业区，层高 4.5m，首层为写字楼大堂、银行营业厅和商场等，2~8 层为商贸交易厅，中厅设计为 8 层高的共享大厅，设有空中行人廊桥和自动扶梯等。地下 1 层~4 层设有停车库、设备用房、储水池、休息室、浴室等各类附属用房，有 2 个坡道与地面连通。

大连世界贸易大厦，是目前东北地区最高的建筑。在建筑造型和装饰方面，充分体现现代商务写字楼的风格，与城市环境十分协调，并成为大连市新世纪的象征。在使用功能和管理上，采用国际上最先进的设备和控制系统，充分满足现代商贸活动——通信自动化、办公自动化、楼宇控制自动化、消防自动化和保安管理自动化等 5A 智能化管理，达到世界一流的高智能商务写字楼标准。

1999 年 3 月 23 日，世界贸易组织副总干事长为大厦亲笔题字命名。原大连市委书记、市长薄熙来称赞大连世界贸易大厦的落成“为大连城建史上写下光彩一笔”；在 2000 年元旦时，为大厦题词“愿世贸大厦成为大连新世纪的象征”。

参与大连世界贸易大厦钢结构设计与施工的主要单位，除建设单位一大连世界贸易大厦有限公司之外，尚有美国纳德尔建筑设计公司、中国建筑东北设计研究院、中国建筑第二工程局一公司、中国建筑第八工程局、中国第三冶金建设公司金属结构制造公司、大连新船重工有限公司、北京市远达建设监理有限责任公司、大连正信土木监理工程有限公司等。

大连世界贸易大厦有限公司总经理 包立军

目 录

结构设计	1
高层建筑中钢结构的施工详图设计	30
高层建筑钢结构制作	37
焊接 H 形梁制作	46
高层钢结构箱形柱制作	51
钢结构桁架箱形节点制作	62
箱形柱管状熔嘴电渣焊	70
高强度螺栓摩擦面抗滑移系数的控制	79
钢结构制作监理的质量控制	83
钢结构安装技术	98
钢结构安装测量控制技术	107
高强度螺栓施工技术	114
压型钢板和栓钉施工技术	118
钢结构安装监理的质量控制	120
钢结构柱安装精度的控制	126
钢结构柱的安装与接头形式	130
钢结构焊接技术	134
K50 /50 塔吊爬升工艺及实施	140
地下钢结构工程施工工艺	145
施工缝取代后浇带的施工	172
钢筋混凝土施工监理的质量控制	178
遥控导轨式附着升降脚手架	185
楼板混凝土随打随压光施工技术	191
智能化系统介绍	196
工程档案的编制与管理	236

结 构 设 计

目前世界已建的高层建筑中，最高的是马来西亚吉隆坡的石油大厦，建筑总高度 452m，采用钢-钢筋混凝土混合结构。高度处于世界前 100 名高层建筑中，采用全钢结构的有 46 栋，采用钢筋混凝土结构的有 17 栋，采用钢-钢筋混凝土混合结构的有 34 栋。国内已建的高层建筑中，最高的是上海金茂大厦，建筑总高度 420m，采用的也是钢-钢筋混凝土混合结构。高度处于国内前 100 名的高层建筑中，采用全钢结构的有 2 栋，采用钢筋混凝土结构的有 80 栋，占绝对多数，采用钢-钢筋混凝土混合结构的有 18 栋。从以上统计中看到：全钢结构建筑在国外用的较多，特别是早期的高层建筑几乎全部采用全钢结构，钢筋混凝土结构在国内用的较多；而近年来，不少设计采用了钢-钢筋混凝土混合结构。钢-钢筋混凝土混合结构充分发挥了钢结构及混凝土结构各自的优点，适合目前我国经济与技术水平，在我国高层建筑结构中的应用日益增多。大连世界贸易大厦在设计中采用了钢-钢筋混凝土混合结构的型式，较好地满足了使用功能的要求，同时也取得了很好的经济效益和社会效益。大连世界贸易大厦是目前由国内独立完成设计的采用钢-钢筋混凝土混合结构的最高建筑。本文将对这一工程的设计工作进行总结，重点介绍结构设计。

1. 工 程 概 况

大连世界贸易大厦（以下简称大厦）总高度 242m，有北方珠穆朗玛之称，是目前大连市最高的建筑。大连世界贸易大厦的方案设计由中国建筑东北设计研究院、韩国熙山建筑师事务所、美国纳德尔建筑师事务所合作完成。扩大初步设计、施工图设计由中国建筑东北设计研究院独自完成。该工程采用钢筋混凝土核心筒-钢框架结构体系，通过在第 30 层、第 45 层设置钢结构外伸刚臂及腰桁架和帽桁架，将钢筋混凝土内筒与钢框架连为一个整体，形成共同抵抗水平荷载的弯曲型变形为主的结构体系，有效地降低了结构的侧移。由于结构构件是由两种不同材料组成，整个结构的受力状态和变形十分复杂。设计中首先要求我们建立一种正确的设计概念，确定符合结构实际受力状况的计算理论及计算方法。结构体系要具备必要的承载能力及合理的侧移刚度。结构构件的设计要满足受力的合理性及施工的可行性，同时应考虑所用材料和加工设备的发展状况，采用的材料应满足承载能力的强度要求及材料的可加工性，连接节点要传力合理又要便于安装。所有这些要求我们在设计中应用已掌握的科学知识和基本原理，进行综合分析，解决工程中存在的问题；设计中还借鉴、吸收了国内外同类建筑中成功的经验。设计中所采用的钢-钢筋混凝土混合结构体系，经结构分析、比较、优化，不但满足了结构承载能力的要求，也具有合理的侧移刚度，并达到了较好的经济技术指标。结构分析采用国内分析软件 SATWE 及 SAP' 84。结构用钢采用国产钢材 Q235B 和 Q345B，板材最大厚度为 45mm。钢结构加

工、安装均为国内施工单位。大连世界贸易大厦的建设是完全依靠国内的资源完成的。应用国内的技术和国产钢材，由国内加工和国内安装队伍安装，这对国内建筑行业是一件有积极意义的事情。通过这一工程的设计，提高了我们的设计水平，对由不同材料组成的复杂结构的设计，从受力分析、节点构造、选材等各个方面都取得了一定的经验，对相关分析软件的进一步完善也是一个促进，并推进了国产钢材在高层民用建筑中的应用。

大厦建筑高度超过 200m，业主要求建造一座在大连领先、国内一流的建筑，“要建就建最好的，要有特点”。这是业主要求，也是我们在设计中努力争取的。大厦建筑设计美观、富于时代感，这就给结构设计提出了更高的要求，同时也给结构工程师提供了一个创新的机会。大厦塔楼 50 层，其上有一小塔楼，塔楼顶面高 201.90m。裙楼为 8 层，局部 9 层，裙楼顶面高度为 39.20m。塔楼与裙楼连为一体不设缝。在塔楼顶设有钢管结构装饰塔架，塔架与主塔楼采用相同装饰材料，为主楼向上部空间的延伸，塔顶高度为 243.00m。塔楼平面最外侧轴线尺寸为 37.40m×38.30m，塔楼 9 层以上主要使用功能为写字楼，标准层高 3.80m。塔楼中间为 18.20m×13.30m 的核心筒，塔楼沿四周外部设框架柱，内筒与外柱之间形成大的办公空间，其南北方向跨度 9.90m，在东西方向跨度 12.60m。15 层、30 层、45 层为防灾避难层，层高 5.10m。在第 30 层、第 45 层设有外伸刚臂及腰、帽桁架，形成结构加强层。大厦裙楼含塔楼 9 层以下主要为商用公共建筑，层高为 4.50m。地上 1 层设有写字楼大堂、银行营业厅、商场等。2~6 层为商场，7~8 层为美食街、餐厅等。在裙楼中部设有 8 层高的共享大厅，其间设有行人廊桥及自动扶梯等。大厦设有 4 层地下室，基础底板埋深 -21.00m。地下 1 层设有商场，有 2 部自动扶梯与地上 1 层商场相连。地下 2 层、3 层为停车库，有 2 个车道与地面相连。地下室还有员工食堂、休息、洗浴等附属用房。地下 4 层设有储水池，另外在地下室各层还有设备用房。大厦的使用功能较复杂，由于受场地限制，简单地采用内筒-外框架结构还不能满足结构设计的要求。设计中的结构选型、结构布置、材料选用、结构分析、构件设计、节点处理等方方面面，由于采用了钢-钢筋混凝土混合结构而变得复杂。在设计中，如何与建筑专业、设备专业紧密配合，对于复杂的结构，如何应用相关的力学、材料、施工方面的知识是我们在设计中要不断学习并掌握的，这一点对结构工程师也是至关重要的。

2. 设计条件

(1) 设计规范

本工程结构设计采用现行的国家规范及规程有：

- 《建筑结构荷载规范》(GBJ 9—87)
- 《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)
- 《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89)
- 《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)
- 《钢结构设计规范》(GBJ 17—89)
- 《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规程》(JGJ 3—91)
- 《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—98)
- 《高层建筑箱形与筏形基础技术规范》(JGJ 6—99)

● 《钢筋混凝土结构设计规程》(YB 9082—97)

参照规范：日本建筑学会《钢骨钢筋混凝土结构设计标准·同解说》(1987)。

(2) 自然条件

● 基本风压值： $w_0 = 0.6 \text{ kN/m}^2$ 。

● 基本雪压值： $S_0 = 0.40 \text{ kN/m}^2$ 。

● 标准冻结深度：0.70m。

(3) 使用荷载

根据国家标准《建筑结构荷载规范》(GBJ 9—87)规定，采用的活荷载标准值如下：

● 不上人屋面： 0.7 kN/m^2 。

● 上人屋面： 1.5 kN/m^2 。

● 客房： 1.5 kN/m^2 。

● 办公、会议、写字间： 2.0 kN/m^2 。

● 餐厅、冷饮： 2.5 kN/m^2 。

● 商场、多功能厅： 4.0 kN/m^2 。

● 厨房、车库： 4.0 kN/m^2 。

● 走廊、厕所、浴室： 2.0 kN/m^2 。

● 电梯机房、设备用房等按实际荷载取值。

风荷载按公式 $w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$ 计算。考虑结构的重要性，基本风压增大系数取 1.2，即按 $w_0 = 0.72 \text{ kN/m}^2$ 取用。地面粗糙度按 C 类考虑。

本工程按基本烈度 7 度计算地震作用。地震反应计算采用振型分解反应谱法，弹性时程分析时，峰值加速度取 35gal。

(4) 地基

大厦建设场地位于大连市中山广场的北侧。周边为大津街、民意街、同兴街等。根据大连市测绘研究院提供的有关“岩土工程勘察报告”表述：建设场地地貌单元处在坡洪积裙的前缘与海积阶地交互地段，地形较平坦，地层分布层次清晰。场地土层分布自上而下依次为：

1) 杂填土层。

2) 素填土层：厚度 2.10~4.00m。

3) 粉质粘土及粘土层：层厚 1.70~6.10m ($f_k = 240 \text{ kPa}$)。

4) 残积土层：层厚 0.80~3.00m ($f_k = 180 \text{ kPa}$)。

5) 全风化板岩：层厚 0.90~4.90m ($f_k = 250 \text{ kPa}$)。

6) 强风化板岩：层厚 8.50~42.50m ($f_k = 500 \text{ kPa}$)。

7) 中风化板岩：勘探控制厚度 2.80~12.20m ($f_k = 1500 \text{ kPa}$)。

8) 微风化板岩：勘探控制厚度 7.4m ($f_k = 2500 \text{ kPa}$)。

场地地下水水位埋深 -4.50~-4.80m，水量较丰富，地下水对混凝土无腐蚀性。

地震基本烈度为 7 度。建设场地为抗震有利地段。场地土属中硬土，建筑场地类别为 II 类。

本工程基底埋深为 -21.00m，在此标高处土层分布为强风化板岩与中风化板岩相互

交错。中风化板岩承载力标准值 $f_k = 1500\text{kPa}$ ，强风化板岩承载力标准值 $f_k = 500\text{kPa}$ ，经深度、宽度修正后，强风化板岩承载力设计值能够满足承载力要求，故本工程采用天然地基。

3. 结 构 选 型

(1) 地上结构

1) 结构体系

众所周知，高层建筑结构同时承受垂直荷载与水平风荷载及地震的共同作用。其高度越高，水平作用的影响就越大。对大连世界贸易大厦的结构设计来讲，选用一种具有适当刚度的结构体系则成为设计的关键。在结构设计中，究竟选用哪一种结构体系是我们在设计中必须解决的问题。从国内现有的设计与施工水平的实际状况来看，如下几种结构体系有可能在设计中被采用：钢筋混凝土结构；钢结构；钢-钢筋混凝土混合结构。但究竟选用哪一种结构体系？让我们比较一下这几种结构体系各自的特点，综合其他方面因素，通过比较结构的受力特点与结构刚度的大小，所采用结构技术的先进性，考虑建筑材料、施工技术等因素及每种结构体系对建筑使用功能的适用性，并考虑建筑的社会效益和经济性等，选出最适应本建筑的结构型式。

①钢筋混凝土结构体系 钢筋混凝土结构是目前在我国高层建筑结构中最广泛采用的一种结构体系。从 20 世纪 80 年代的深圳国贸大厦（50 层）到 90 年代的广州中信广场（80 层）。都是采用的这种结构。钢筋混凝土结构具有取材方便，易于施工，结构刚度大，造价低等优点。但是这种结构自重大，占地面积多，工业化程度低，施工速度慢，抗震性能差。这些弱点随着建筑的增高而更加明显、突出。对本工程而言，若采用钢筋混凝土结构可采用的中筒结构，即内部采用核心筒外部采用框筒。外框架若形成框筒，则需加密柱距，这与建筑师的想法是相矛盾的。在本工程的设计中，建筑师想创造出一种轻巧、明快、具有时代感的建筑，要求具有比较开阔的使用空间。另外，若采用钢筋混凝土结构，则梁、柱的截面都会有所增大，增大的梁会占掉更多的使用空间，增大的柱截面将会占用更多的使用面积。采用钢筋混凝土结构会大量增加结构自重，导致基础荷载大量增加，地基处理趋于复杂。钢筋混凝土结构施工速度慢，抗震性能差，结构型式一般化等等弊端也是业主所不能接受的，因为业主想要建“与众不同、领先时代”的建筑。采用钢结构或部分采用钢结构能够使大厦在公众眼里树立一种新型的标志性的形象。随着经济的发展、技术的进步，采用钢结构或部分采用钢结构建造高层建筑的优点日益显著，不足之处减少。从综合效益来看，在高层建筑中，采用钢结构或部分采用钢结构与钢筋混凝土结构的差距正在缩小，采用钢结构或部分采用钢结构正在得到更广泛的应用。

②钢结构体系 钢结构具有承载力高，自重轻，占地面积小，使用空间大，工业化程度高，施工速度快，抗震性能好，基础费用省等优点。钢结构在发达国家应用的较多，特别是早期的高层建筑，几乎都采用钢结构。国内采用钢结构的高层建筑有北京长富宫中心（24 层），为框架结构，北京国贸大厦（39 层）为筒中筒结构。本工程若采用全钢结构，可采用钢框架-支撑结构体系或筒中筒结构体系。钢结构的显著特点是结构承载力高，结构安全性好。但相应的缺点是结构刚度小、造价较高。大连地区风荷载较大，风荷载在决

定结构抗侧力刚度时起控制作用。本工程若全部采用钢结构抵抗水平荷载，将大大增加结构用钢量，全面提高工程造价。因此，全钢结构的方案未被采用。在分析了钢筋混凝土结构与钢结构的优缺点之后，让我们再来分析一下结合了钢筋混凝土结构与钢结构优点的混合结构体系，也就是我们在实际工程中采用的结构体系。

③钢-钢筋混凝土混合结构体系 钢-钢筋混凝土混合结构由钢结构与钢筋混凝土结构构件混合组成。这一结构体系发挥了钢结构自重轻、强度高、使用空间大、施工速度快与钢筋混凝土结构刚度大、造价低等优点。是一种很好的结构体系，在高层建筑结构设计中得到越来越广泛的应用，这种结构体系适合于目前我国经济发展水平。本工程采用钢筋混凝土核心筒-钢框架结构，同时设置钢结构外伸刚臂及腰桁架、帽桁架加强层。本工程采用这样一种结构形式，有如下优点：

- 采用钢筋混凝土剪力墙为主要抗侧力结构，充分发挥了钢筋混凝土结构刚度大的优点来抵抗水平作用。核心筒内部墙体较多，相互连接形成整体性能好的空间结构。在水平荷载作用下为竖向弯曲型构件，结构空间刚度好。

- 采用钢框架结构有利于增加使用面积，满足大空间的使用功能要求。采用钢柱可减少柱截面面积，增加有效使用面积。采用钢梁能有效增加跨度，设备管道可在钢梁腹板穿过，增加有效使用空间。

- 钢柱、钢梁可在工厂加工。工业化程度高，焊缝质量好。楼板采用压型钢板做模板，可多层同时操作，施工速度快。

- 采用钢框架结构可减轻结构自重，有利于结构抗震，由于有效地减轻了结构自重，可采用天然地基作持力层，减少基础的建造费用。

- 利用避难-设备层设置钢结构外伸刚臂及腰桁架和帽桁架，使内筒剪力墙与外框架协同工作，在不加大内筒面积情况下满足结构刚度要求。

在高层建筑中采用混合结构体系，不仅可以形成高效的抗侧力体系，且相对地降低用钢量，降低造价。

2) 结构布置及截面尺寸

高层建筑的结构平面布置应力求简洁、均匀、对称。图 1 为塔楼标准层的结构平面布置图。

塔楼核心部分为钢筋混凝土内筒剪力墙，内筒平面尺寸为 $18.20\text{m} \times 13.30\text{m}$ 。筒内为电梯、楼梯等竖向交通面积及设备、电信竖向管井、通风井、卫生间的面积。内筒周边剪力墙墙厚从上到下为 $400 \sim 600\text{mm}$ 变化。筒内剪力墙厚度为 $200 \sim 400\text{mm}$ 。塔楼外圈为钢框架结构，塔楼平面最外侧轴线尺寸为 $37.40\text{m} \times 38.30\text{m}$ 。外框架柱双向与框架梁刚性连接，钢柱为双向压弯构件，7 层以上采用焊接箱形截面钢柱。钢柱截面尺寸为 $700\text{mm} \times 700\text{mm}$ ，并保持这一尺寸上下不变。钢柱钢板厚度从上到下采用 $22 \sim 45\text{mm}$ 。框架梁采用焊接工字形钢梁，框架钢梁截面高度取 700mm 。框架钢

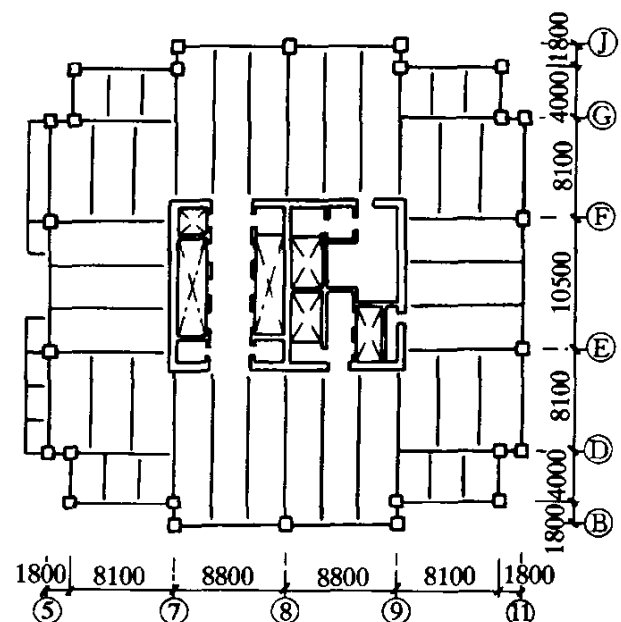


图 1

柱为双向压弯构件，7 层以上采用焊接箱形截面钢柱。钢柱截面尺寸为 $700\text{mm} \times 700\text{mm}$ ，并保持这一尺寸上下不变。钢柱钢板厚度从上到下采用 $22 \sim 45\text{mm}$ 。框架梁采用焊接工字形钢梁，框架钢梁截面高度取 700mm 。框架钢

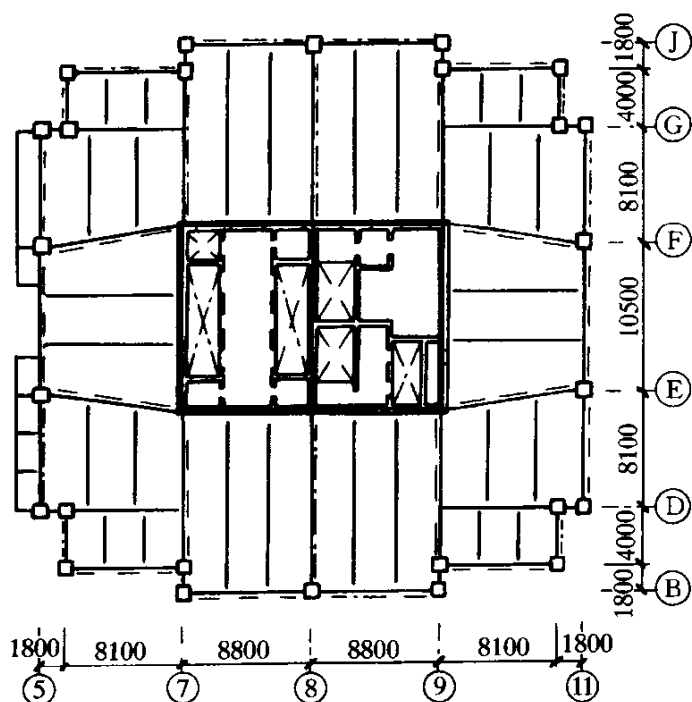


图 2

不同业主的需要，建筑师希望创造一个较大的、可自由分隔的使用空间，在使用中有更大的灵活性。在设计中采用内筒-外框架结构较好地满足了大进深、大空间的使用要求。结构平面布置中，对梁的布置尽可能使各梁的受力均匀，避免梁的局部受力过大或受力集中，尽量将力分散传递。塔楼标准层高为 3.80m。为方便设备管道的穿过，在钢梁的腹板中开设洞口，有效地节省了空间。办公写字间在内装修完成后，地面到吊顶的净高达到 2.70m，较好地满足了使用要求，有效地增加了使用空间。从图 1 中可以看到，内筒在短边方向尺寸较小，仅为 13.30m，其高宽比达到 15。而建筑平面中，横向边轴线间的最大尺寸为 38.30m。由于受建设场地的条件限制，上下边轴线不能外扩。内筒在满足交通面积及设备、电气管井面积要求的前提下，应尽可能做到面积最小，以便得到尽可能多的使用面积。基于这种考虑，我们看到塔楼平面形成了一种典型的内筒-外框架结构。在水平荷载作用下，内筒几乎承担了全部的倾覆力矩。内筒在水平荷载作用下，为一竖向悬臂杆件，受力变形为弯曲型构件。其侧移主要是由于构件在拉区的拉伸及在压区的压缩，导致了楼层发生倾斜而产生的。位移值的大小由内筒剪力墙的弯曲刚度决定。由于内筒在上下方向的长度较小，即高宽比较大，这种状况由于受建设场地条件的限制而无法改变。这种条件的限制在设计中就产生了一个问题，即在风荷载作用下，内筒不能提供足够的侧移刚度。因此在结构设计中，为了增加结构的侧移刚度，采用了增加连接内筒剪力墙与外框架柱的外伸刚臂，同时设置腰桁架（或帽桁架）来增强外伸刚臂的效果。设置外伸刚臂及腰桁架（或帽桁架）的楼层，我们简单地称之为结构加强层。结构加强层设在第 30 层及第 45 层。结构加强层的平面布置见图 2。结构加强层中的加强结构由贯穿内筒剪力墙的钢结构桁架组成的外伸刚臂及沿外圈框架布置的腰帽钢桁架所构成。外伸刚臂双向设置，在图 2 中上下方向沿⑦、⑧、⑨轴设置三道，在左右方向沿⑤、⑪轴设置两道。⑧轴处的外伸刚臂布置见图 3。

外伸刚臂贯通内筒剪力墙与框架柱相连，因此要求外伸刚臂具有足够的竖向刚度。在水平荷载作用下，内筒主要产生弯曲变形。此时，与之相连的外伸刚臂也随着内筒的变形而产生转动，由于外伸刚臂在竖向有很大的刚度，迫使与之相连的外柱随之受力，使一侧

梁与框架柱采用刚接，与核心筒剪力墙采用铰接。钢梁翼缘宽度为 150~250mm，翼缘板厚度为 12~25mm，钢梁腹板厚度为 12mm。次梁均采用焊接工字形钢梁。次梁与主梁采用铰接，次梁高 350~700mm。核心筒内楼板采用现浇钢筋混凝土楼板，楼板厚度 120mm。其他楼板采用压型钢板做模板，上浇钢筋混凝土楼板。楼板跨度为 2.70~3.50m，楼板厚度为 100mm。压型钢板采用波高 75mm 的镀锌钢板，压型钢板厚为 1.0mm。核心筒外边墙与外框架柱之间的跨度在南北方向（图 1 中左右方向）为 9.90m，在东西方向（图 1 中上下方向）为 12.60m。

塔楼主要使用功能为办公写字楼。为适应不

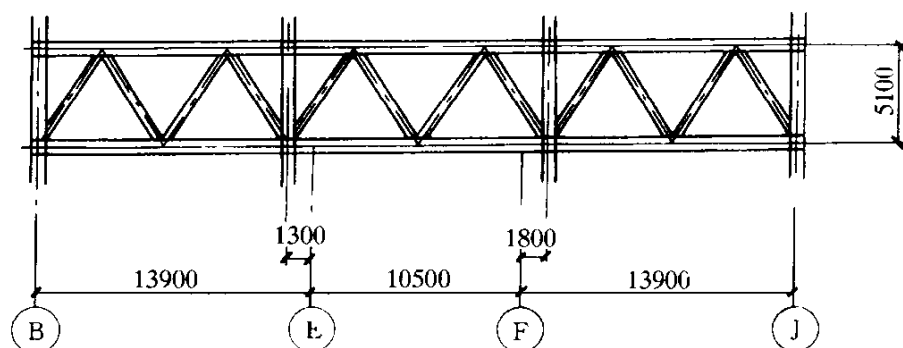


图 3

外柱受拉，一侧外柱受压，参与结构的整体抗弯。加强层的作用就是利用外伸刚臂的竖向刚度及外柱的轴向刚度来增大结构的整体刚度，减小楼层的侧向位移。同时，外柱的压力与拉力形成了反力偶，通过外伸刚臂施加于内筒，从而减小了内筒所需承担的倾覆力矩。外伸刚臂由钢桁架组成，

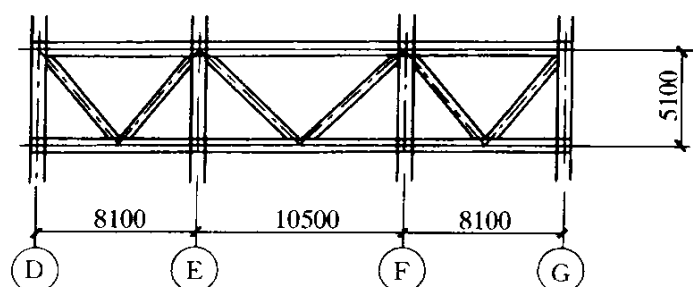


图 4

其上下弦分别位于上下楼层内，同时也是支撑楼板的钢梁，上下弦杆采用工字形截面，截面尺寸为 mm: $300 \times 700 \times 20 \times 30$ 。腹杆采用焊接箱形截面，截面尺寸为 mm: $300 \times 400 \times 45 \times 45$ 。腰桁架（或帽桁架）沿外框架布置，⑤轴钢桁架布置见图 4。

⑤轴钢桁架弦杆及腹杆均采用焊接工字形截面，上、下弦杆截面尺寸为 mm: $350 \times 700 \times 20 \times 30$ ，腹杆截面尺寸为 mm: $350 \times 350 \times 16 \times 30$ 。由于外框架梁的竖向刚度不足，难以充分协调周边框架各柱的轴向变形。为了让周边所有框架柱都能参与结构体系的整体抗弯，提供更大的外柱轴向刚度，增大外伸刚臂的效果，比较经济有效的方法是在设置外伸刚臂的楼层内，沿周边框架设置一层楼高的桁架，形成一道加劲的钢桁架环箍。利用周边桁架的强大竖向刚度充分协调周边各柱的轴向变形，使未与外伸刚臂直接相连的柱一同参与工作。由于外柱参与整体抗弯，加大了抗侧力体系的高宽比值，提高了结构的侧移刚度，有效地减小了结构的侧移。结构加强的作用是十分明显的，本工程中，结构加强层的设置使结构较大位移方向的顶点位移减少了 29%，层间位移减少了 25%。

首层结构平面布置见图 5。

图 5 中右侧为塔楼部分，左侧为裙楼部分。裙楼采用框架-剪力墙结构，裙楼柱网为 $8.10\text{m} \times 8.10\text{m}$ ，其中间跨度为 10.50m 。裙楼结构与主楼结构连为一体不设缝。为增加裙楼结构的侧移刚度，在①~②轴之间与④~⑤轴及⑥~⑦轴相交形成封闭的钢筋混凝土剪力墙。剪力墙内部为楼梯间及设备用房；剪力墙厚度为 300mm 。与剪力墙相交处的钢梁改为 SRC 梁。裙楼框架柱采用钢骨混凝土柱（简称为 SRC 柱），裙楼框架梁采用焊接工字形钢梁。框架柱与框架梁双向刚性连接。裙楼 SRC 柱截面尺寸为 $800\text{mm} \times 800\text{mm}$ ，SRC 柱采用十字形钢骨，截面尺寸 $550\text{mm} \times 550\text{mm}$ 。十字形钢骨由双工字形钢交叉组成，工字形钢骨为 mm: $200 \times 550 \times 9 \times 12$ 。边柱的 SRC 柱采用 T 字形钢骨，截面尺寸 $425\text{mm} \times 550\text{mm}$ 。裙楼框架梁采用 700mm 高的焊接工字形钢梁。工字形钢梁翼缘宽 $200 \sim 250\text{mm}$ ，翼缘板厚 $12 \sim 25\text{mm}$ ，工字形钢梁腹板厚

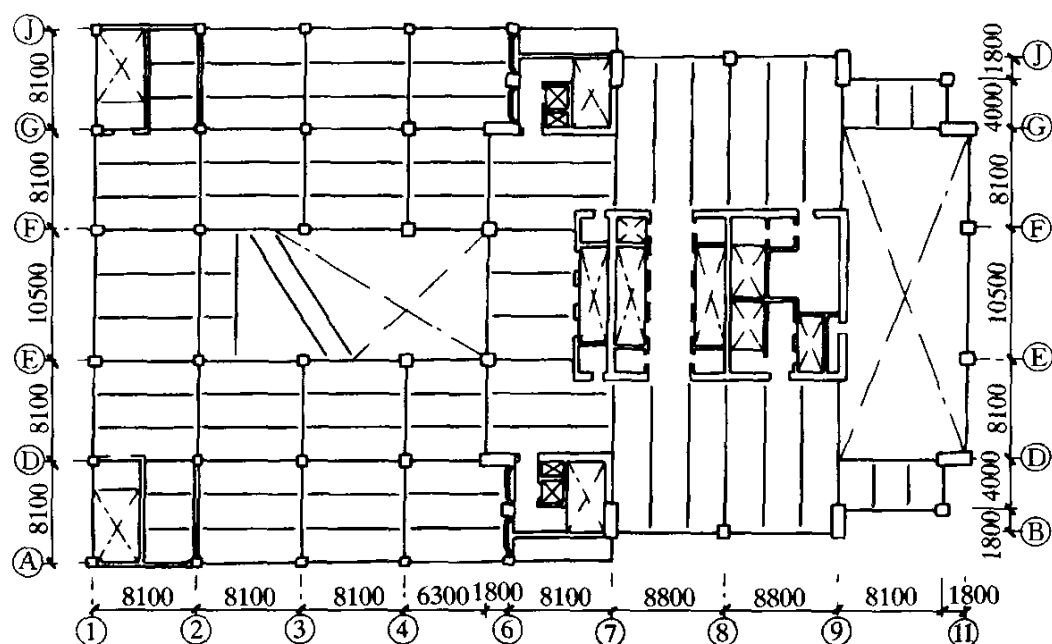


图 5

12mm。次梁采用焊接工字形钢梁，次梁高 300~700mm，钢板厚 6~25mm。由于裙楼框架钢梁截面大于柱截面，梁的钢板厚度大于柱钢板厚度，为保证钢梁的连续性，裙楼框架节点采用梁贯通型。塔楼部分的内筒剪力墙及框架梁采用与塔楼上部相类似的结构布置。塔楼柱在 7 层楼面处由箱形截面钢柱变为钢骨混凝土柱，即 7 层以下塔楼柱采用 SRC 柱。塔楼 SRC 柱截面为 1000mm×1000mm~1000mm×1200mm。SRC 柱内钢骨采用十字形截面，钢骨截面尺寸为 mm：350×700×19×45。SRC 柱中十字形钢骨与上部箱形截面柱在连接处设过渡段。在过渡段内，SRC 柱中钢骨十字形腹板伸入箱形钢柱内。SRC 柱为箱形钢柱与钢筋混凝土基础的过渡，使柱的刚度在竖向平稳过渡。本工程设置了 7 层 SRC 柱是为了方便柱与钢筋混凝土剪力墙的连接，使柱与剪力墙的连接牢固，构造处理简单，施工方便。内筒剪力墙对于塔楼是均匀、对称的，而对首层平面则刚度中心向右偏心。为改善这种情况，除在①~②轴处设置钢筋混凝土剪力墙外，在⑥~⑦轴上下两边 A~D 轴及 G~J 轴间的楼、电梯间增设钢筋混凝土剪力墙，墙厚 600mm。另外，本工程抗震设防烈度为 7 度，从结构抗震设计的概念中知道，在水平地震作用下，底部产生最大的倾覆力矩及底部剪力，由于上部结构的侧移刚度与地下结构侧移刚度相比较小，在首层结构刚度突变。在大震作用下，核心筒剪力墙在首层根部为易破坏部位。本工程结构抗侧力刚度由风荷载控制，但从抗震设计的概念出发，采取必要的构造措施能够有效减轻地震的危害。因此，在⑥~⑦轴间增设较厚的钢筋混凝土剪力墙能够有效地增加底部结构的刚度，增加结构抵抗底部地震作用的能力，有效地增加结构的安全性。裙楼在使用功能上主要为商业等公共建筑，楼层高度为 4.5~5.10m。在内筒剪力墙围成的内部及其他剪力墙围成的楼电梯间处采用现浇钢筋混凝土楼板，楼板厚度为 120mm。一般楼面采用压型钢板做模板，上浇 100mm 厚钢筋混凝土楼板。

(2) 地下结构

本工程有 4 层地下室，各层高度 3.80~5.10m。地下二层结构平面布置见图 6。

地下结构与首层结构相比，在左右和上下边局部的轴线外伸 5.40~9.40m。地下室使

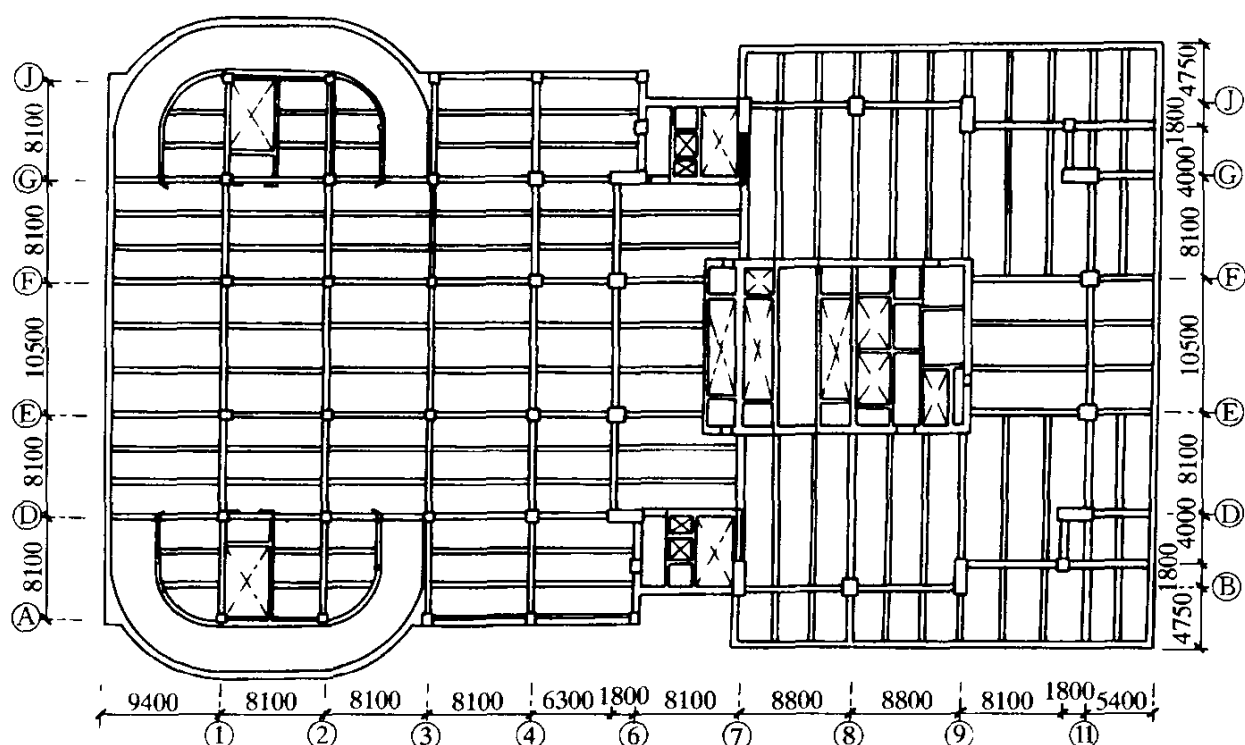


图 6

用功能为停车库、商场，设备用房及其他附属用房。地下结构采用框架-剪力墙结构。其内筒剪力墙及楼梯间处剪力墙的布置同首层结构，柱的布置亦同首层结构。另外，在车道两侧增加钢筋混凝土剪力墙。车道两侧剪力墙厚为 300mm。在地下室周边设钢筋混凝土外墙，地下室外墙在竖向承受构件自重及部分地下室楼板和次梁传来的荷载。在水平方向承受土压力及水压力的作用，地下室外墙按竖向连续板计算配筋。地下室外墙从底到顶的厚度分别为 600、500、400mm。地下结构承受较大的使用荷载，另外，在地下室环境中，通风不畅且宜受潮。因此，地下室框架梁、框架柱均采用钢骨混凝土结构。钢骨混凝土结构不但有较高的承载能力，由于钢骨外侧有较厚的混凝土保护层，解决了钢结构构件的防腐及防火问题。地下室 SRC 框架柱的截面形式同地上结构。地下 SRC 柱最大截面为 1200mm×1200mm，其中钢骨同地上结构。SRC 柱采用外包式柱脚，SRC 柱中钢骨直接放在筏板基础上，与设置于筏板基础中的预埋锚栓相连。地下第 4 层的层高为 5.10m，在此层内 SRC 柱按柱脚考虑，按钢筋混凝土结构计算柱的截面，最大的截面为 1400mm×1400mm。为了使 SRC 柱中钢骨更好地与混凝土共同工作，满足传力的需要，在地下 4 层 SRC 柱钢骨架上设置剪力栓钉。地下结构中框架梁采用钢骨混凝土梁（SRC 梁），SRC 梁采用两种截面，即 450mm×900mm 及 500mm×900mm。次梁采用钢筋混凝土梁，截面为 300mm×600mm 至 300mm×800mm。楼板采用钢筋混凝土楼板，楼板厚度 150~200mm。SRC 框架梁中钢骨采用焊接工字形钢梁，工字形钢梁高 600mm，翼缘板宽 200~300mm，板厚 9~28mm，腹板厚 9mm。SRC 梁与框架柱及钢筋混凝土剪力墙均采用刚性连接，为便于 SRC 梁与剪力墙的连接，在剪力墙中设置了 300mm 高的宽翼缘工字钢。地下室结构埋置较深，墙体众多，结构刚度大，整体性能好，为地上结构提供了稳固的下部基础。对上部的抗侧力结构，起到了很好的嵌固作用。

基础采用现浇钢筋混凝土筏板基础，筏基的板厚满足冲切承载力的要求。筏板按受力不同而采用不同厚度。塔楼下筏板厚度取 2700mm，在核心筒及其周围则加厚到 3300mm。裙楼筏板厚度取 1500mm。主楼与裙楼单位面积上所承受的荷载有较大的差异，考虑到两

者之间可能出现的沉降差，设计中在④～⑤轴之间设置一道 1000mm 宽的后浇带，要求在主楼结构封顶后再浇筑。此后浇带同时也起减少结构温度收缩区间长度的收缩缝作用。但在实际施工中，并未留这一道后浇带，因为在基坑开挖后发现，实际地质情况比地质勘察报告所述地质条件要好，即中风化板岩的分布比原分析的要广一些。裙楼的大部分落在中风化板岩上，主楼基础也有部分落于中风化板岩上。一条约 40m 宽的强风化板岩带斜穿过主楼底板，对这一强风化板岩带的现场载荷试验表明：强风化板岩的承载力较高，压缩量小。本工程基坑较深且地下水位较高，施工中采用集水井降水。由于建设场地地势较低，又面临雨季的到来，基坑补水较充分，如后浇带长期不浇注会给施工带来许多不利影响。经业主、设计、施工、监理、勘察单位的共同研究，并请专家论证，最终决定取消此后浇带。为解决大体积混凝土的收缩变形，采取了掺加膨胀剂，减小水灰比，降低水化

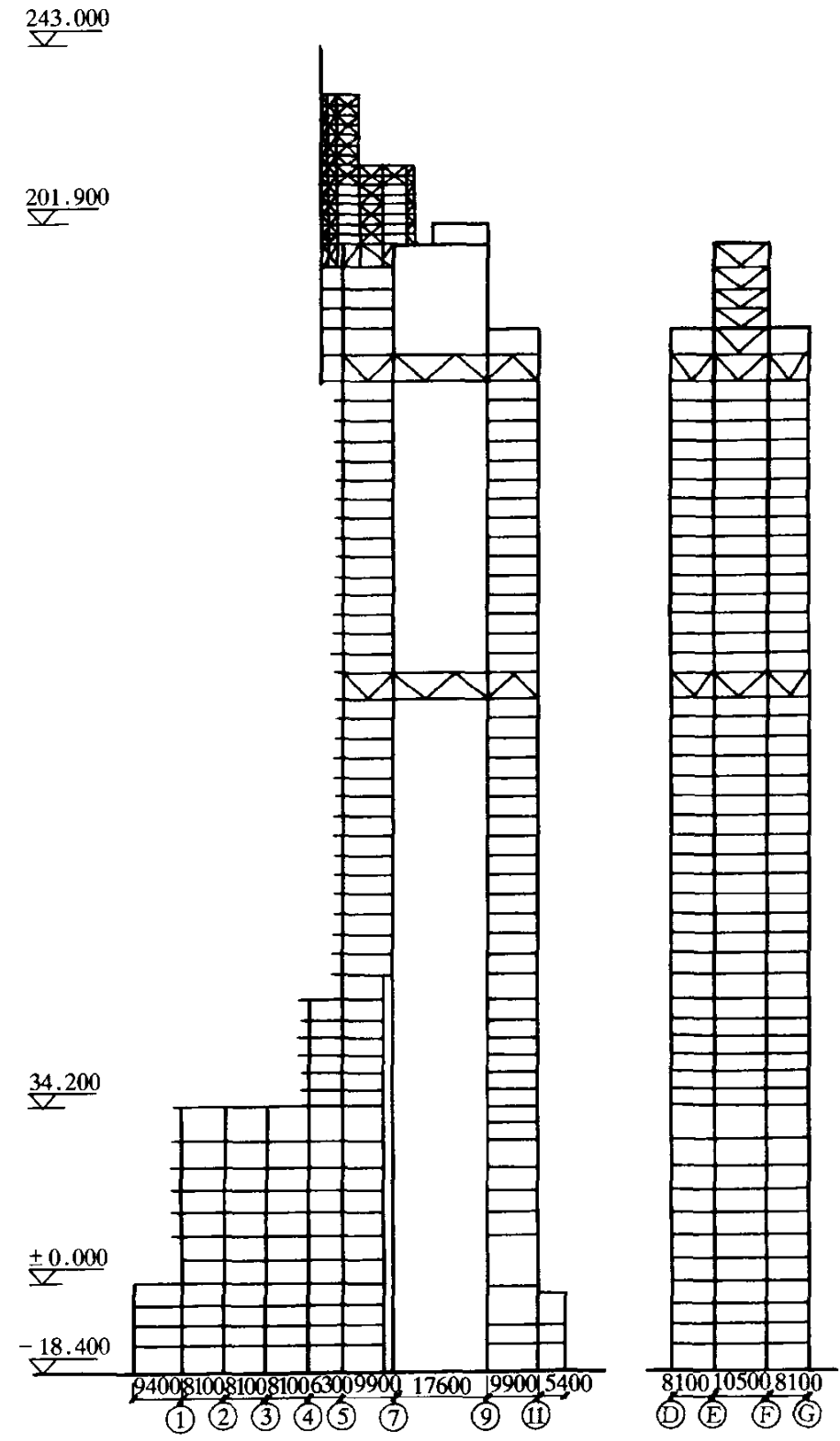


图 7