

大型复杂建筑结构创新与实践

INNOVATION AND PRACTICE OF LARGE SCALE AND
COMPLICATED BUILDING STRUCTURE

傅学怡 著



中国建筑工业出版社

大型复杂建筑结构创新与实践

傅学怡 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大型复杂建筑结构创新与实践/傅学怡著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-112-17352-5

I. ①大… II. ①傅… III. ①建筑结构-研究 IV.
①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 241604 号

本书以“结构设计”为主题, 结合笔者近几年所主持设计的国内外重大建筑工程, 在系统介绍各项目的结构设计过程及技术难点, 包括结构体系与方案、分析计算方法、关键技术问题、主要构造措施等的基础上, 重点突出其中采用的新结构体系、新结构设计方法、新分析计算技术等。

本书适合建筑结构设计人员阅读, 也可供建筑结构科研、教学及施工人员参考。

* * *

责任编辑: 武晓涛 王 梅

责任设计: 李志立

责任校对: 张 颖 陈晶晶

大型复杂建筑结构创新与实践 傅学怡 著

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京画中画印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 36 $\frac{1}{4}$ 字数: 878 千字

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月第一次印刷

定价: 99.00 元

ISBN 978-7-112-17352-5
(26131)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

笔者长期从事高层、大跨空间建筑结构的设计与研究，并有幸与国内外同行专家经常广泛切磋探讨有关高层、大跨建筑结构的一些关键技术问题。实践使我们一致深感，在科学技术尤其是计算机科学技术高度发展的今天，在各种计算机软件已广泛应用于高层、大跨空间建筑结构设计计算的今天，在新型复杂高层、大跨建筑不断涌现的今天，如何从概念和整体上把握住高层、大跨空间建筑结构的基本力学特性、设计方法，如何去理解并掌握新型建筑结构设计技术，进而达到使高层、大跨建筑结构设计得更加经济合理，乃是当前高层、大跨建筑结构设计迫在眉睫的重大课题。

本书以“结构设计”为主题，结合笔者近几年所主持设计的国内外重大建筑工程，在系统介绍各项目的结构设计过程及技术难点，包括结构体系与方案、分析计算方法、关键技术问题、主要构造措施等的基础上，重点突出其中采用的新结构体系、新结构设计方法、新分析计算技术等。

同时在多年的理论研究成果和实际设计经验的基础上，提出并解答了下列一些新课题：

1. 整体结构总装分析技术
2. 结构包络设计技术
3. 结构施工全过程模拟控制技术
4. 超长结构温度收缩效应分析控制技术
5. 结构线性屈曲稳定与构件计算长度分析确定技术
6. 结构非线性屈曲稳定与极限承载力分析技术
7. 结构精细化分析技术
8. 索结构与预应力技术
9. 超高层建筑混凝土长期徐变收缩效应分析与控制技术

为便于读者理解和掌握这些新颖结构体系和设计方法，同时为帮助读者拓宽结构设计思路，了解当前国内外新颖、复杂建筑结构设计发展的最新动态，所提出的创新设计理念和方方法均结合国内外六个典型工程结构设计实例予以展开。

本书所选的实例均来自 CCDI 悉地国际设计顾问有限公司（原中建国际设计顾问有限公司）和深圳大学建筑设计研究院所承担的工程设计项目。在本书撰写过程中，学生和助手吴兵、高颖、吴国勤、杨想兵、周颖、冯叶文、邸博、黄船宁、刘平、许鸿珊等同志和中科建设计顾问有限公司的 4 位同志都作出了无私的奉献，并付出了辛勤的劳动，在此表示衷心的感谢。

由于笔者水平有限，书中内容缺点错误在所难免；笔者在此热忱地欢迎专家同仁批评指正。

目 录

第 1 章 卡塔尔多哈塔	1
1.1 项目背景	1
1.2 结构方案	2
1.2.1 结构方案概述	2
1.2.2 原标书结构设计存在问题及隐患	3
1.2.3 对原标书设计的调整和改进	4
1.3 项目结构设计的创新	4
1.4 结构整体计算分析	5
1.4.1 设计规范及依据	5
1.4.2 主要结构材料	5
1.4.3 荷载作用及其效应组合	6
1.4.4 结构整体计算模型及分析	10
1.5 钢筋混凝土徐变及收缩影响分析	22
1.5.1 混凝土徐变机理	22
1.5.2 目前国际上常用的徐变及收缩的结构分析方法及规范	24
1.5.3 对原结构模型的徐变和收缩影响分析	27
1.5.4 对原结构模型改进及改进后的徐变和收缩影响计算结果分析	30
1.5.5 考虑徐变收缩效应后结构构件内力的变化	31
1.5.6 结论	33
1.6 斜柱交叉节点设计与试验研究	33
1.6.1 标书中原结构节点的承载力复核	33
1.6.2 节点加强措施	36
1.6.3 节点加强后的弹性状态下有限元 (FEM) 分析	36
1.6.4 加强后斜柱节点的承载力	38
1.6.5 塑性状态下的斜柱节点有限元分析	39
1.6.6 试验验证	42
1.6.7 施工图设计	51
1.7 屈曲稳定分析	51
1.7.1 结构稳定的概念及屈曲分析理论	51
1.7.2 本工程结构线性屈曲稳定分析	53
1.7.3 结论	60
1.8 预应力混凝土环梁分析	61
1.8.1 环梁部分预应力设计	61
1.8.2 环梁预应力整体结构计算分析	64

1.8.3	预应力环梁非预应力筋设计	69
1.8.4	典型楼层环梁预应力及非预应力钢筋配置	70
1.8.5	结论	70
1.9	结构抗连续倒塌设计	71
1.9.1	抗连续倒塌研究现状	72
1.9.2	抗连续倒塌设计方法	72
1.9.3	一对交叉斜柱破坏的抗连续倒塌设计研究	73
1.9.4	结语	78
1.10	其他专项设计	78
1.10.1	开孔工字钢梁组合楼盖有限元分析	78
1.10.2	钢结构穹顶分析	79
1.10.3	钢结构雨棚分析	79
1.10.4	温度效应全过程施工模拟分析	80
1.11	结语	81
第2章	深圳大梅沙万科中心	83
2.1	工程概况及结构构成	83
2.1.1	工程概况	83
2.1.2	主体结构选型	84
2.1.3	结构构成	85
2.2	设计标准及荷载作用	88
2.2.1	结构设计标准	88
2.2.2	重力荷载	88
2.2.3	地震作用	88
2.2.4	风荷载	88
2.2.5	温度作用	89
2.3	工程复杂性和超限情况	90
2.3.1	平面不规则	90
2.3.2	大悬挑结构	90
2.3.3	大跨度连体结构	90
2.4	针对超限情况采取的相应措施	91
2.4.1	针对平面不规则的措施	91
2.4.2	针对大悬挑结构的措施	92
2.4.3	针对大跨连体结构的措施	92
2.5	结构设计理念	92
2.5.1	结构自平衡自配重	92
2.5.2	索张拉应力控制	93
2.5.3	采用部分钢套管	93
2.5.4	关键点位移控制	96

2.5.5	成品索检验及其耐久性	97
2.5.6	施工顺序确定	97
2.6	节点设计与试验研究	101
2.7	舒适度分析与控制	103
2.8	结构的抗震性能	104
2.9	温度应力分析	105
2.9.1	温度作用取值	105
2.9.2	桩基刚度计算	106
2.9.3	施工期间温度效应	106
2.9.4	使用期间温度效应	108
2.9.5	温度荷载组合及结构验算	108
2.10	结构动力弹塑性时程分析	109
2.10.1	分析方法及软件	110
2.10.2	构件模型及材料本构关系	110
2.10.3	构件配筋参数	112
2.10.4	计算模型及结构分析过程	113
2.10.5	地震波的选择及输入	113
2.10.6	计算分析结果	113
第3章	深圳北站	126
3.1	工程概况	126
3.2	结构体系	127
3.2.1	站房下部结构	127
3.2.2	站房屋盖结构	129
3.2.3	站台雨棚	129
3.2.4	结构特点	131
3.3	设计标准及荷载作用	132
3.3.1	结构设计标准	132
3.3.2	重力荷载	132
3.3.3	地震作用	133
3.3.4	风荷载	133
3.3.5	温度作用	133
3.3.6	城市轻轨荷载	134
3.4	计算模型、计算内容、计算假定及计算边界条件	134
3.4.1	计算模型	134
3.4.2	柱底嵌固端确定	135
3.4.3	站房单独下部结构	137
3.4.4	站房单独上部钢结构	137
3.4.5	站房总装结构	137

3.4.6 站台雨棚结构	137
3.5 工程地质概况与基础设计	138
3.5.1 工程地质概况	138
3.5.2 工程地质的地震影响	138
3.5.3 站房基础与地铁 5 号线、平南铁路及新区大道关系	138
3.5.4 基础设计	138
3.6 主要计算结果	142
3.6.1 站房单独下部结构	142
3.6.2 站房单独上部钢结构	144
3.6.3 站房总装结构	149
3.6.4 站台雨棚	157
3.7 四边形环索弦支结构创新体系研究	159
3.7.1 四边形弦支结构体系工作原理及创新性体现	159
3.7.2 建筑钢结构拉索预应力施加仿真分析方法	160
3.7.3 预应力张拉控制原则及张拉预应力方案	161
3.7.4 弦支体系应力控制分析	163
3.7.5 施工张拉模拟分析	167
3.7.6 雨棚结构试验研究	172
3.8 超长无缝结构设计分析研究	172
3.8.1 结构设缝对比分析研究	172
3.8.2 超长结构温差收缩效应计算分析	179
3.9 高架车站振动分析研究	197
3.9.1 研究工作内容	198
3.9.2 计算条件	199
3.9.3 评判标准	201
3.9.4 步骤一计算结果及分析	202
3.9.5 步骤二计算结果及分析	206
3.9.6 结论	217
3.10 楼盖人行舒适度研究	217
3.10.1 评价标准	218
3.10.2 楼盖刚度简化计算	218
3.10.3 楼盖竖向振动频率计算分析	219
3.10.4 人行走引起的楼盖振动加速度	220
3.11 大跨组合钢梁受弯承载力计算及稳定验算分析	230
3.11.1 组合梁截面分类	230
3.11.2 组合梁受弯承载力、侧扭屈曲的抵抗弯矩验算 Matlab 程序	232
3.11.3 组合梁弹性屈曲计算分析	233
3.11.4 组合梁腹板开孔局部有限元分析	236
3.12 屈曲稳定分析及结构杆件计算长度系数确定	239

3.12.1	站房线性、非线性屈曲稳定分析及结构杆件计算长度系数	239
3.12.2	站房雨棚线性、非线性屈曲稳定分析及结构杆件计算长度系数	240
3.13	整体结构风洞试验及风荷载数值模拟研究	243
3.13.1	风洞试验概况	243
3.13.2	参考风速和参考风压	245
3.13.3	数值风洞模拟	245
3.13.4	平均风压特性	245
3.13.5	有火车工况与无火车工况下风压系数对比	246
3.13.6	开洞位置风速放大效应研究	246
3.13.7	等效风荷载	247
3.13.8	高速火车入站时行人风环境分析研究	254

第4章	济南奥林匹克体育中心主体育场	262
4.1	工程概况及结构构成	262
4.1.1	工程概况	262
4.1.2	结构构成	263
4.2	设计标准及荷载作用	267
4.2.1	重力荷载分析及取值	267
4.2.2	风荷载	269
4.2.3	温度作用分析及取值	275
4.2.4	地震作用分析及取值	277
4.3	结构设计理念	279
4.3.1	总装分析设计方法	279
4.3.2	钢结构创新采用空间性能优良的折板型悬挑空间桁架结构体系	284
4.4	大跨空间结构包络分析	287
4.5	超长结构施工及使用全过程温度分析	288
4.5.1	上部钢结构温度作用分析	288
4.5.2	下部混凝土结构温度分析结果	290
4.6	结构整体稳定验算	295
4.6.1	线性屈曲分析	295
4.6.2	非线性屈曲分析	297
4.7	关键节点精细设计及试验验证	299
4.8	整体结构抗连续倒塌分析与控制	307
4.8.1	倒塌假定1	307
4.8.2	倒塌假定2	308
4.8.3	倒塌假定3	309
4.9	钢结构施工安装及支撑卸载全过程模拟分析与控制	310
4.10	子结构整体振动台试验	316
4.11	节点模型试验研究	319

第 5 章 深圳平安金融中心	323
5.1 工程概况	323
5.2 主要设计准则	324
5.2.1 结构设计使用年限	324
5.2.2 建筑安全等级	324
5.2.3 抗震等级	324
5.2.4 设防烈度	324
5.2.5 地基基础设计等级	324
5.2.6 结构位移控制	324
5.2.7 抗震设计准则	325
5.2.8 舒适度准则	325
5.2.9 结构受弯构件挠度控制	325
5.2.10 楼面振动控制标准	325
5.3 岩土工程分析	326
5.3.1 工程地质概况	326
5.3.2 地质灾害危险性评估	327
5.3.3 地震效应	329
5.4 结构主要材料	329
5.4.1 混凝土	329
5.4.2 钢筋	330
5.5 荷载与地震作用	330
5.5.1 重力荷载	330
5.5.2 塔楼风洞试验结果及设计	331
5.5.3 地震作用	334
5.5.4 其他荷载及作用	335
5.5.5 荷载组合	335
5.6 抗震性能化设计	336
5.6.1 地震作用参数	336
5.6.2 性能目标和设计指标	337
5.7 地基基础设计	339
5.7.1 塔楼桩基础概述	339
5.7.2 单桩竖向承载力确定	340
5.7.3 筏基设计	341
5.7.4 基础沉降分析	342
5.7.5 基坑支护挡土墙及临时支撑	343
5.8 结构体系概述	345
5.8.1 抗侧力体系	345
5.8.2 重力体系	351
5.8.3 塔尖部分	353

5.8.4 阻尼器介绍及平安金融中心阻尼装置选择的考虑	354
5.9 超限抗震设计	359
5.9.1 超限情况判别	359
5.9.2 针对超限情况的结构设计和相应措施	360
5.10 结构分析主要结果汇总及比较	363
5.10.1 概述	363
5.10.2 主要分析结果	364
5.11 构件设计	383
5.11.1 构件设计	383
5.11.2 楼面组合梁设计及验算	406
5.11.3 塔尖结构分析结果	408
5.12 罕遇地震下弹塑性时程分析	413
5.12.1 输入地震波分析及选用	413
5.12.2 结构动力弹塑性分析的目的	420
5.12.3 计算分析方法	420
5.12.4 动力弹塑性分析结果及分析	426
5.13 全过程施工模拟及非荷载作用分析	441
5.13.1 分析的必要性	441
5.13.2 施工考虑	442
5.13.3 施工阶段结构控制	445
5.13.4 竖向变形分析	446
5.14 关键节点设计	461
5.14.1 节点设计原则及目标	461
5.14.2 节点设计要求	461
5.14.3 节点分析所用软件及材料属性	461
5.14.4 节点设计	462
第6章 天津响螺湾中钢广场	468
6.1 工程概况	468
6.2 工程场地地质概况	469
6.3 结构设计标准	470
6.3.1 设计使用年限/设计基准期	470
6.3.2 结构安全等级/结构重要性系数	470
6.3.3 底部加强区高度	470
6.3.4 抗震性能目标	470
6.3.5 抗震等级	471
6.3.6 抗震设防类别	471
6.3.7 整体结构控制指标	471
6.4 荷载分析与效应组合	472

6.4.1	重力荷载	472
6.4.2	风荷载	472
6.4.3	地震作用	474
6.4.4	温度作用	475
6.4.5	效应组合	475
6.5	结构材料	477
6.6	结构构成	477
6.6.1	T2 结构构成	477
6.6.2	T1 结构构成	486
6.6.3	T2/T1 竖向构件地下室部分	489
6.6.4	裙房构成	489
6.7	超限情况判别及针对超限的相应措施	490
6.7.1	T2 高度及高宽比	490
6.7.2	塔楼结构规则性	490
6.7.3	嵌固端的确定	491
6.7.4	针对超限的主要抗震措施	491
6.8	结构计算模型及分析软件	493
6.9	结构设计策略	494
6.9.1	六边形网格结构性能研究	494
6.9.2	六边形横梁合理刚度	495
6.9.3	六边形斜柱倾斜角度优化	497
6.9.4	施工措施优化外筒角部斜柱和楼板受力	500
6.9.5	楼板局部有限元分析	508
6.9.6	楼板刚度退化影响分析	510
6.9.7	杆元壳元对比及杆元模型节点刚域合理取值	511
6.9.8	延性设计	518
6.10	T2 结构设计	519
6.10.1	模态分析	519
6.10.2	刚重比	519
6.10.3	重力荷载作用内外筒分担比例	520
6.10.4	规范风荷载效应分析	520
6.10.5	风洞实验分析	521
6.10.6	小震反应谱作用效应分析	522
6.10.7	结构构件设计	525
6.10.8	线性屈曲稳定分析	533
6.10.9	非线性屈曲稳定分析	536
6.11	T2 抗连续倒塌分析	537
6.11.1	失效工况	537
6.11.2	荷载组合	540

6.11.3	材料参数选择	540
6.11.4	分析结果	540
6.11.5	结论	542
6.12	混凝土长期徐变收缩效应影响分析.....	542
6.12.1	混凝土徐变收缩模型	542
6.12.2	本工程徐变收缩效应相关参数取值	542
6.12.3	收缩徐变分析主要计算结果	543
6.12.4	主要结论	549
6.13	整体结构温差效应及施工全过程模拟.....	550
6.13.1	气象统计资料	550
6.13.2	施工全过程模拟	550
6.13.3	温差取值	551
6.13.4	桩基有限刚度	553
6.13.5	整体结构温差收缩效应分析结果	554
6.13.6	主要结论	561
参考文献		563

第1章 卡塔尔多哈塔

- ◆ 实现世界首创现浇混凝土交叉柱外网筒结构；
- ◆ 首次引入混凝土徐变收缩模式计算分析重力荷载下结构长期变形，揭示原标书设计将导致新“比萨斜塔”出现；
- ◆ 创新提出交叉柱节点核心区钢板凳加强；
- ◆ 创新提出考虑结构自重、温度、混凝土收缩徐变、预应力、后浇带全面施工模拟技术；
- ◆ 创新提出并采用了整体结构线性屈曲稳定分析确定受压构件计算长度的方法；
- ◆ 创新提出预应力张拉施工模拟的设计方法；
- ◆ 创新提出和采用了保留施工模拟重力荷载下结构实际工作状态，引入“倒塌荷载”的结构抗连续倒塌设计方法。

1.1 项目背景

卡塔尔多哈塔位于卡塔尔首都多哈，南邻多海湾，地下4层，地面以上44层钢筋混凝土主体结构，顶盖为一直径36m钢结构穹顶，上设27m高桅杆，总高231m，总建筑面积约10万 m^2 ，由世界著名建筑师法国人John Novel创意设计，整体建筑形态简洁淳朴，富有阿拉伯民族特色（图1.1.1、图1.1.2）。2008年底项目结构主体施工封顶，2010年3月整个项目竣工。

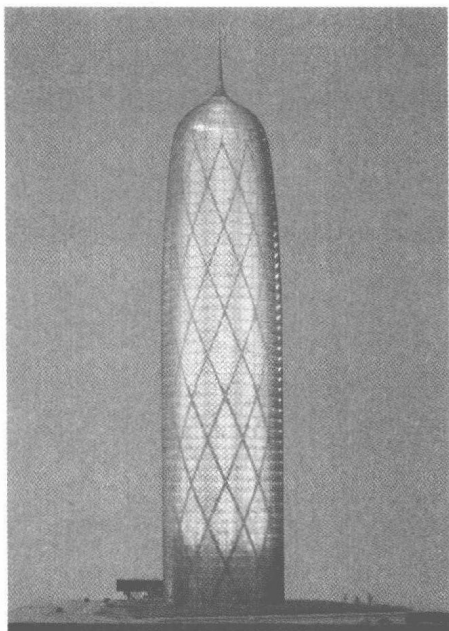


图 1.1.1 卡塔尔多哈塔立面效果

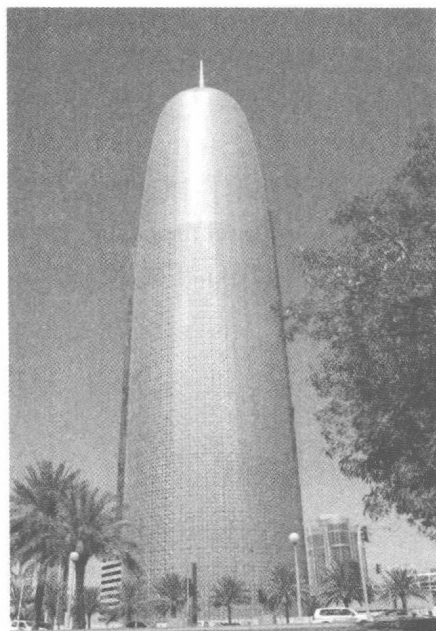


图 1.1.2 卡塔尔多哈塔实景照片

该建筑采用了世界首创钢筋混凝土交叉柱外网筒结构,项目的结构标书设计由法国工程师完成。受总承包方中国建筑工程总公司委托,中建国际设计顾问有限公司与深圳大学土木工程学院联合团队于2005年12月开始介入该项目,通过对该项目标书结构设计文件的详细分析和研究,发现项目结构标书设计不仅不经济,而且存在交叉柱节点承载力不足、混凝土斜柱变形差异将引起主楼倾斜、影响电梯运行等重大安全隐患。项目团队对该结构设计的理念、混凝土徐变、施工模拟、部分预应力、连续倒塌、交叉柱节点、温度收缩效应及屈曲稳定等多方面开展研究分析,提出了多项重大结构调整和优化建议如下:

(1) 进行结构自重下完整的全过程施工模拟,逐层找平,逐层找正。计算表明,总重力荷载标准值作用下环梁最大拉力可由原标书设计未做施工模拟的7500kN降到3698kN。

(2) 将原标书设计楼盖与外网筒脱开改为恢复楼盖与网筒连接,提高结构整体性,楼盖参与环梁共同工作,环梁最大拉力进一步减小20%左右。

(3) 将原标书设计环梁超预应力设计(无拉应力)改为环梁设计采用部分预应力适度强化的理念,允许环梁出现适量拉力,允许环梁在正常工作状态出现裂缝,控制裂缝宽度 $<0.1\text{mm}$,即BS8110 CLASS3的标准,从而使环梁预应力筋数量大幅度减小90%左右,预应力筋可只布置在环梁截面内,悬臂采用梁板结构,板厚调整为130mm,悬臂结构自重大为减小,仅此一项,全楼结构总重减小可达70MN,有利于减小南侧斜柱的轴力及其与北侧斜柱轴力的差异。

(4) 将北侧下部1~28层柱实心圆截面改为空心圆截面。在保留建筑师同层斜柱截面相同和清水混凝土的设计要求前提下,平衡南、北两侧斜柱重力荷载作用下的压应力水平的差异;在满足承载力要求前提下,调整斜柱配筋率,从4.5%下调至2.77%,与此同时,北侧28层以上斜柱配筋率适当调低至2%。徐变效应计算分析表明,20年后结构顶点的水平位移可由282mm降至145mm;南北侧斜柱顶点竖向位移差可由114mm降至64mm,巧妙地解决了结构南倾的重大隐患。

调整设计不仅消除了结构安全隐患,还取得了很好的经济效益,大大方便了施工,获得了业主、原标书设计法国工程师、审查单位独立复核第三方中国建筑科学研究院的认可。

该项目获2009年第六届全国优秀建筑结构设计一等奖、2010年国际混凝土协会FIB特别贡献大奖(Outstanding Structure Special Mension Awards)、2011年华夏建设科学技术二等奖、2012年国际高层建筑都市委员会杰出大奖。

1.2 结 构 方 案

1.2.1 结构方案概述

该工程主抗侧力结构为世界首创现浇混凝土交叉柱外网筒结构,由交叉斜柱、部分预应力环梁和楼板构成,内设偏北布置较小的核心筒,平面呈圆形,底部直径约45m,顶部直径约35m,楼层半径沿高度不断缩小。每根斜圆柱沿半径不断递减的螺旋线曲折攀升。层内直线,截面直径由底层的1.7m变化到0.9m。交叉斜柱每4层相交一次,柱中心线

交叉点位于楼面标高，夹角约为 48° ，环梁、楼板层层与斜柱连接。

北入口大厅 1~28 层楼板掏空，为观光电梯中庭，南半部分采用腹板开孔工字钢梁组合楼盖，混凝土板厚 130mm，内筒东西两侧采用厚 300mm 现浇钢筋混凝土平板。楼板圆心相对于外网筒中心南移 1.25m，南面楼盖悬臂 3.5~5.0m，北面楼盖无悬臂，南悬北不悬。典型楼层结构平面见图 1.2.1。

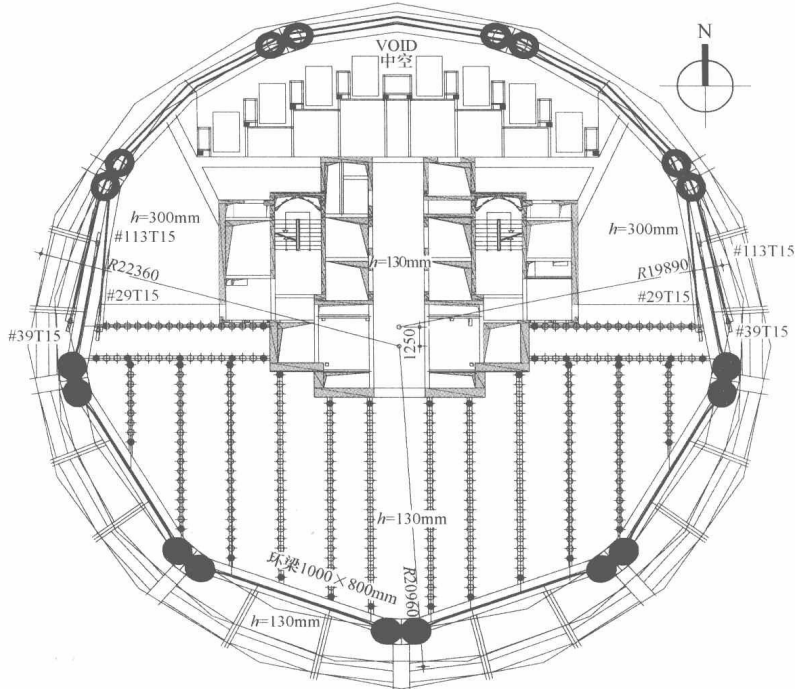


图 1.2.1 典型楼层结构平面图

1.2.2 原标书结构设计存在问题及隐患

(1) 原标书设计未考虑结构自重下施工模拟

原标书的结构设计未考虑施工模拟及施工的实际工序，而本工程结构自重占建筑总重的 70% 以上，且结构自重下南北侧斜柱轴力差异极大，结构刚度一次成形，一次加载，造成重力荷载下结构内力畸形，尤其是上部楼层环梁拉力偏大，上部柱出现受拉。

(2) 原标书设计理念过度强化环梁

原标书结构设计强化环梁设计，楼盖与外网筒断开。考虑混凝土徐变收缩影响，环梁及相连的网筒将不断向内缩小，为避免开孔工字钢梁压屈，标书设计将组合楼盖与其周边的网筒环梁断开，设滑动支承，进一步削弱了结构整体性和楼盖协同受力性能。采用 BS8110 CLASS1 的标准，试图消除环梁中弯曲拉应力，对环梁施加超预应力，所取预应力值为被放大环梁轴拉力的 2 倍，导致大量的预应力筋不得不布置在环梁外侧的悬挑板内，迫使悬挑结构楼板板厚采用 400mm，进一步加大了南侧斜柱轴力。

(3) 未考虑重力载荷与网筒中心偏心

重力荷载作用下南北两侧斜柱轴压力差异显著，由于相比结构侧向刚度中心建筑物重心南移，南侧斜柱轴压力约为北侧斜柱的 2 倍。重力荷载作用下，柱轴力间的巨大差异将

引起南北侧斜柱较大的差异压缩变形并引发结构南倾。

南北斜柱采用同样的截面尺寸和同样的高配筋率 4.5%，只是一味强化环梁，经过补充考虑施工模拟计算和分析，对原标书设计结构分析徐变效应计算表明，重力荷载作用下，20 年后该结构顶层的水平位移值将可能达到 282mm；南北侧斜柱顶点竖向位移差将可能达到 114mm。整个结构将明显南倾。这个倾斜是伴随基本不变的长期重力荷载和混凝土徐变逐渐发展而成，不可能恢复，完全不同于概率很小的风、地震动力作用引起的瞬间可恢复的弹性变形，大于电梯运行最大间隙 150mm，将严重影响建筑物竖向交通正常使用，并造成结构安全隐患。

(4) 交叉柱节点承载力不足

斜柱交叉节点交界面水平面积仅为两个交叉斜柱横截面之和的 70%，轴力作用下节点交界面承载力低于交叉柱承载力，且交界面阴角处短纤维汇交点应力集中，结构存在重大安全隐患。

1.2.3 对原标书设计的调整和改进

通过对原标书结构设计研究，并在大量的计算分析基础上，对原结构设计提出以下改进和优化建议：

①进行结构自重下完整的全过程施工模拟，逐层找平，逐层找正。计算表明，总重力荷载标准值作用下环梁最大拉力可由 7500kN 降到 3698kN。

②恢复楼盖与网筒、内筒连接，提高结构整体性。楼盖参与环梁共同工作，环梁最大拉力进一步减小 20% 左右。

③提出环梁设计采用部分预应力适度强化的理念，允许环梁出现适量拉力，允许环梁正常工作状态出现裂缝，控制裂缝宽度 $< 0.1\text{mm}$ ，即 BS8110 CLASS3 的标准，同时使环梁具有适宜的延性，从而使预应力筋数量大幅度减小 90% 左右，预应力筋可只布置在环梁截面内，悬臂采用梁板结构，板厚调整为 130mm，悬臂结构自重大为减小，全楼结构总重因此减小可达 70MN，有利于减小南侧斜柱的轴力及其与北侧斜柱轴力的差异。

④将北侧下部 1~28 层柱实心圆截面改为空心圆截面。在保留建筑师同层斜柱截面相同和清水混凝土的设计要求前提下，平衡南、北两侧斜柱重力荷载作用下的压应力水平的差异；在满足承载力要求前提下，调整斜柱配筋率为 2.77%，与此同时，北侧 28 层以上斜柱配筋率适当调低至 2%。徐变效应计算分析表明，20 年后结构顶层的水平位移 $\Delta_{y,\max}$ 可降至 145mm；南北侧斜柱顶点竖向位移差 Δ_z 可降至 64mm，巧妙地解决了结构南倾的重大隐患。

⑤优化核心筒，对核心筒的内墙进行了优化和精简，并分段平缓地改变核心筒墙体的厚度，在减轻结构自重同时，方便施工，节约造价。

1.3 项目结构设计的创新

卡塔尔多哈外交大楼的结构设计，在保障结构安全的前提下，通过技术创新和突破，成功地实现了建筑师的设计思想，实现了建筑之美和建筑功能。本工程结构设计上的创新包括：