

高度超限工程

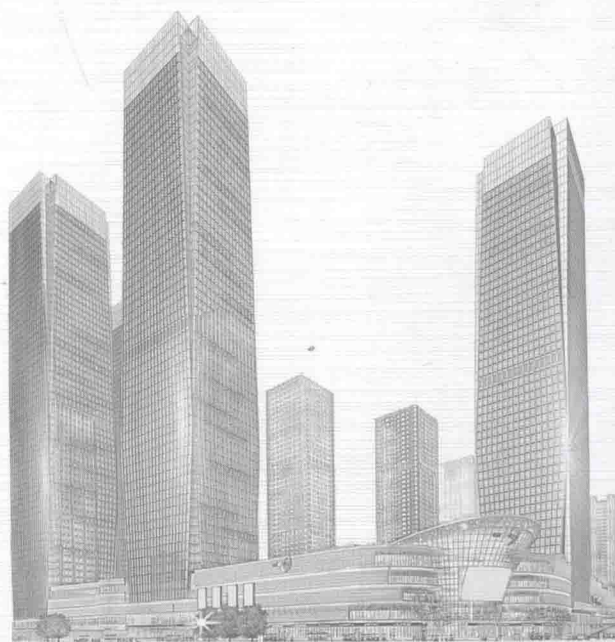
超限高层建筑工程抗震设计汇编

COLLECTION OF SEISMIC DESIGN OF TALL BUILDINGS BEYOND CODE LIMITS



北京市建筑设计研究院有限公司
BEIJING INSTITUTE OF ARCHITECTURAL DESIGN

(上册)



中国建筑工业出版社

BIAD 超限高层建筑工程 抗震设计汇编

(上册)

北京市建筑设计研究院有限公司

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

BIAD 超限高层建筑工程抗震设计汇编 (上册) / 北京市建筑设计研究院有限公司编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016.2

ISBN 978-7-112-18891-8

I. ① B… II. ① 北… III. ① 高层建筑 - 防震设计 IV. ① TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 306664 号

随着技术进步和经济发展, 我国超高层建筑不断突破新的高度, 各种新型复杂体型及复杂结构体系大量出现, 越来越多的结构工程师开始接触到复杂高层、超高层及其他超限工程的设计。这些超限工程, 无一例外, 给设计工作尤其是抗震设计带来了难度和挑战。

北京市建筑设计研究院有限公司 (BIAD) 自成立以来的 60 多年中, 承担并完成了全国范围内许多重要的设计项目, 在超限工程方面积累了丰富的技术经验, 享有极高的行业声誉。本书为 BIAD 近年来参与的超限高层建筑工程实例汇编, 分上下两册出版, 上册为高度超限工程 (包括 28 个工程实例), 下册为特别不规则及大跨屋盖超限工程 (包括 27 个工程实例)。每个工程的介绍包括四个方面: (1) 工程概况与设计标准; (2) 结构体系及超限情况; (3) 超限应对措施及分析结论; (4) 专家审批意见。

本书作为超限高层建筑工程的设计经验总结, 对未来同类型工程具有重要的参考价值及借鉴意义, 同时, 有助于广大结构设计人员深入了解超限工程, 进一步提高专业技术能力, 并带动行业整体技术水平的提升。

责任编辑: 刘瑞霞 刘婷婷 辛海丽

责任校对: 陈晶晶 刘梦然

BIAD 超限高层建筑工程抗震设计汇编 (上册)

北京市建筑设计研究院有限公司

*

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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京缤索印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24 字数: 596 千字

2016 年 2 月第一版 2016 年 2 月第一次印刷

定价: 196.00 元

ISBN 978-7-112-18891-8

(28098)

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)

《BIAD 超限高层建筑工程抗震设计汇编》编委会

主 任：齐五辉

委 员：张 青 沈 莉 龙亦兵 袁立朴 张京京 盛 平
李伟政 徐 斌 周 笋 张 徐 王志刚 束伟农
肖 青 张 俏 于东晖 雷晓东 高建民 马敬友
甘 明 苗启松 朱忠义 薛慧立 孙宏伟 伍炼红
陈彬磊 朱兴刚 杨蔚彪

前 言

PREFACE

随着我国建筑业的蓬勃发展,建筑高度不断增加,建筑形式也越来越多样化。高度和规则性超出规范适用范围的超限工程不断出现,在对结构工程师们提供面对挑战、不断创新机会的同时,也对结构工程师的设计能力提出了更高的要求。本书编写的目的是希望通过介绍一些不同抗震设防烈度、不同抗震设防类别、不同超限类型的超限工程设计实例,能够让结构工程师们从中有所借鉴,对超限工程的设计有所帮助。

本书收录了55项超限工程,这些工程选自BIAD自2001年至2015年完成设计的项目。结构的超限类型包括高度超限、规则性超限、屋盖超限以及特殊类型的高层、屋盖体型特别复杂的大型公共建筑。工程的建设地点遍及全国多个城市,设防烈度从6度到8度均有涉及。

全书按超限类型分为上、下两册。上册共收录了28项工程,均为高度超限或高度和规则性都超限的高层建筑。下册共收录了27项工程,均为规则性超限或特殊类型的高层建筑以及屋盖超限或屋盖体型特别复杂的大型公共建筑。文中对每项工程均从工程概况、结构超限类别及程度、针对超限采取的措施、结构计算结果及分析、超限论证等方面进行详细介绍,并附有专家组的抗震设防专项审查意见,工程的彩色效果图或建成后的实景照片。

本书的内容十分丰富,很适合结构工程师在设计超限工程时参考使用。

编委会主任 齐五辉

2015年11月17日

目 录

CONTENTS

乌鲁木齐宝能城 1-02 号塔楼	1
石家庄华润中心	21
东港区 C05 地块	42
乌鲁木齐宝能城公寓楼	52
安泰广场 (1 号楼)	65
汇能鼎兴大厦 B 座塔楼 (北京丽泽商务区 E 区 13/14 地块)	78
重庆中渝国际都会 4 号地块 4-3C、4-4D 写字楼	90
包商银行商务大厦	100
呼市鄂尔多斯广场南塔楼	118
中国人寿保险股份有限公司山东省分公司营业用房	131
北京望京绿地 625 号地块 3 号楼	147
济南浪潮科技园 S01 科研楼	157
沈阳世茂五里河商业广场 T3T4T5 及 S3 商业	166
成都丽都国际中心 1 号、2 号楼	181
福州三迪·联邦大厦	197
鞍山皇冠假日酒店	209
天津经济开发区会展酒店	218
天津中航响螺湾 B-02 号地块	233
成都金牛万达广场甲级写字楼	251
北京大族环球科研办公楼	260
鄂尔多斯国泰商务广场 (T3、T4 塔楼)	270
天津于家堡金融区起步区 03-22 地块	285
海控国际广场	298
青岛国际贸易中心 A 塔	307
沈阳世茂五里河项目 T6 酒店	317
深圳南山商业文化中心区 T106-0028 地块	329
沈阳世茂五里河项目 1 号~5 号住宅楼	348
青岛万邦中心	359

乌鲁木齐宝能城 1-02 号塔楼

袁林华, 伍炼红, 朱忠义, 周忠发, 王毅, 卜龙瑰,
张贺超, 齐五辉, 柯长华

1 工程概况与设计标准

项目地处乌鲁木齐市经济技术开发区二期延伸区, 玄武湖路以东, 岳麓山街以南, 天柱山街以北, 东临高铁片区卫星路(在建), 由 4 座超高层办公楼、1 座超高层酒店、2 座超高层公寓楼及底部大型商业裙房组成, 为集办公、酒店、商业和公寓等多项功能于一体的超大型超高层综合体, 占地面积 18 万 m^2 , 总建筑面积 170 万 m^2 , 地上建筑面积 131 万 m^2 , 地下建筑面积 39 万 m^2 。

所有塔楼与裙房在地下室连为一体, 地上部分以伸缩缝、抗震缝完全断开。超高层办公楼(1-01 号、1-02 号、2-01 号、2-02 号)与超高层酒店(2-03 号)主体结构主要采用钢结构, 其中 1-02 号塔楼高度最高, 建筑高度 285.4m, 建成后将成为中亚第一高楼, 本文仅对 1-02 号塔楼(以下简称塔楼)的结构设计与分析进行介绍。

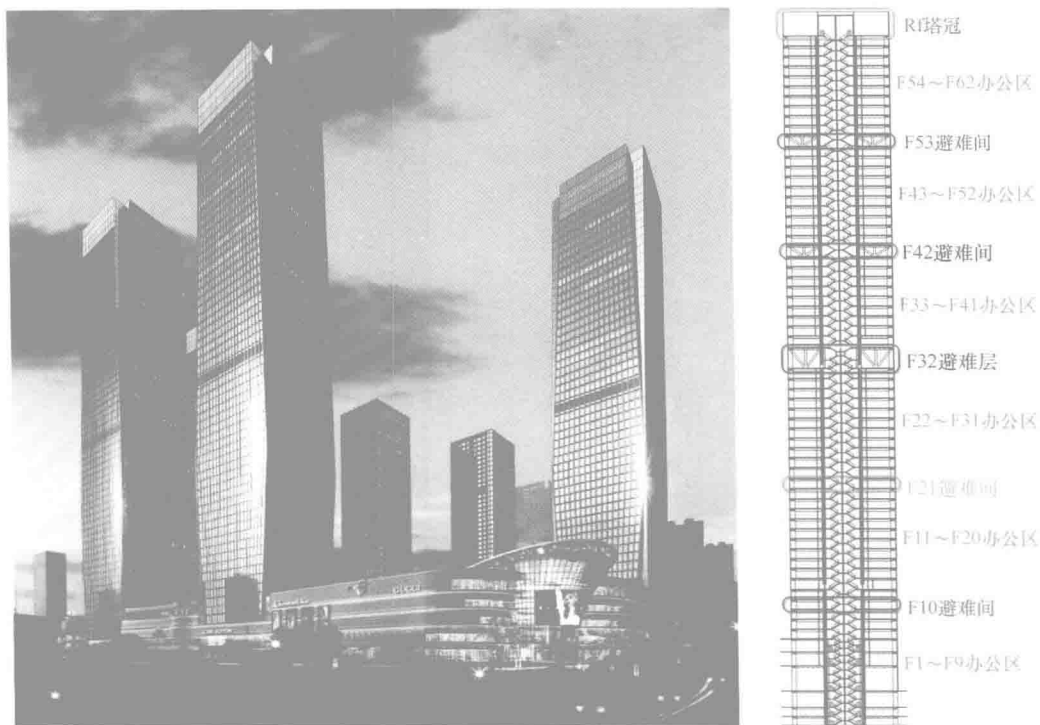


图 1.1 建筑总效果图、剖面图

塔楼结构屋面高度 275.4m, 建筑总高度 285.4m, 地上单体建筑面积约 13.6 万 m^2 ; 地上 64 层、地下 4 层, 标准层层高 4.2m, 避难层层高为 8.75m、4.8m。结构平面轮廓为带凹角的矩形, 外轮廓尺寸为 52m $\times$ 43.6m, 核心筒尺寸为 23m $\times$ 15m; 外轮廓高宽比 6.2 超出规范要求, 核心筒高宽比 15.7; 平面四个角部的凹角随高度变化, 从 20 层开始往上下楼层扩大, 屋顶最大凹角尺寸为 4.3m $\times$ 4.3m。

工程设计使用年限为 50 年, 建筑结构安全等级为二级。拟建场区抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度值为 0.20g, 设计地震分组为第二组, 场地类别为 II 类。地基基础设计等级为甲级, 基础设计安全等级为二级; 建筑抗震设防类别为标准设防类, 即丙类。

2 结构体系及超限情况

2.1 结构体系

1-02 号塔楼采用钢结构框架-筒体结构, 外框为钢管混凝土柱+钢梁框架, 内筒为钢管混凝土柱-钢支撑体系, 以地下一层顶板作为上部结构嵌固部位。核心筒在 X 向的③轴、⑤轴, Y 向的③轴、④轴、⑤轴、⑥轴布置中心支撑; X 向支撑均为非跨层的层间支撑, Y 向 1~6 层布置层间支撑, 7~顶层布置跨层支撑。

为加强结构的整体抗侧刚度、减小外框的剪力滞后效应, 在 10 层、32 层、42 层、53 层设置加强层, 其中 10 层、32 层、53 层设置伸臂桁架, 32 层、42 层、53 层设置环桁架。

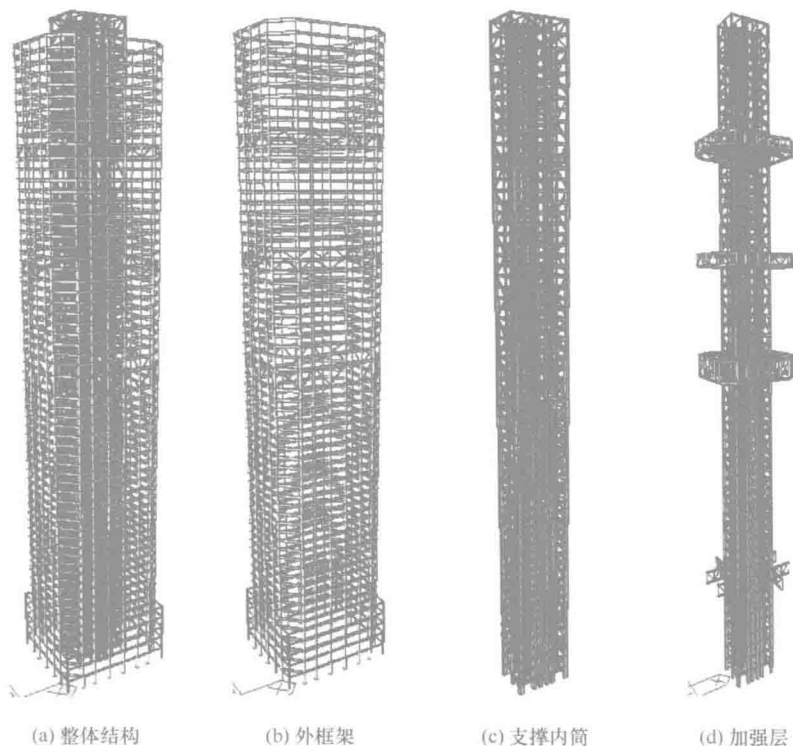


图 2.1 结构抗侧体系

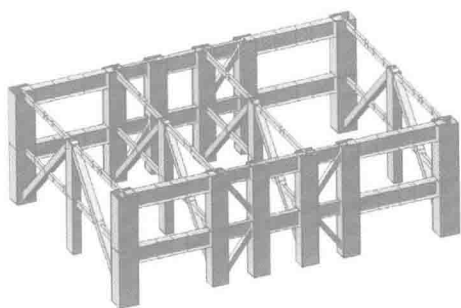


图 2.2 内筒结构布置轴测图

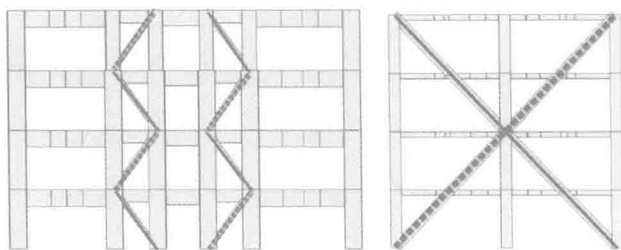


图 2.3 内筒 X 向、Y 向支撑布置图

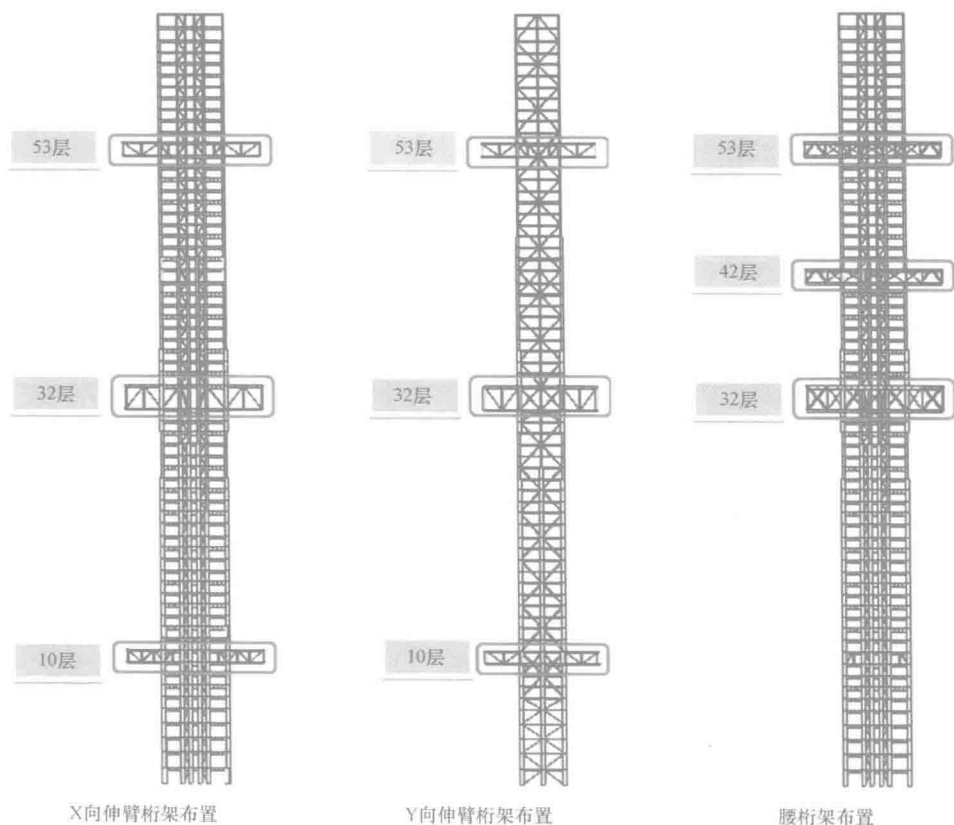


图 2.4 加强层结构布置图

为提高结构底部的耗能能力，使结构在大震中的刚度有序逐步退化，保证关键构件的性能，X 向、Y 向 1 ~ 6 层中心支撑均采用屈曲约束支撑（BRB）；X 向 6 ~ 20 层设置连梁阻尼器。加强层与上下楼层存在较大的刚度突变，为减小加强层的刚度、减少刚度突变与内力剧增，加强层伸臂桁架的斜腹杆采用 BRB。

楼面采用钢-混凝土组合楼板，梁跨度为 9 ~ 13m，工字钢梁与外框、内筒均为铰接，梁高一般为 500mm；板跨约 3m，板厚取 120mm，加强层上下楼层取 160mm。角部凹角处由于建筑要求无法布置竖向构件，采用双向悬挑的形式，悬挑长度为 3.5 ~ 7.9m。

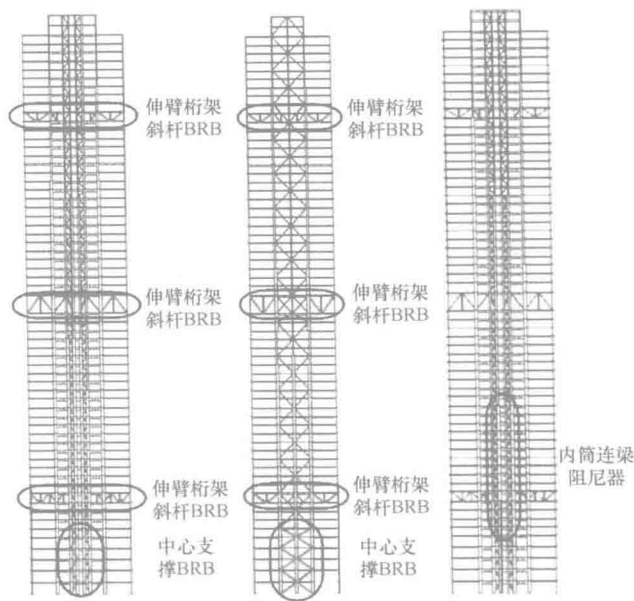


图 2.5 内筒支撑与耗能构件布置

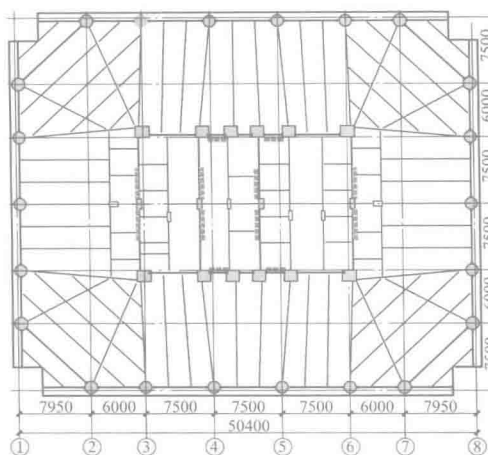


图 2.6 塔楼 1-33 层结构平面布置图

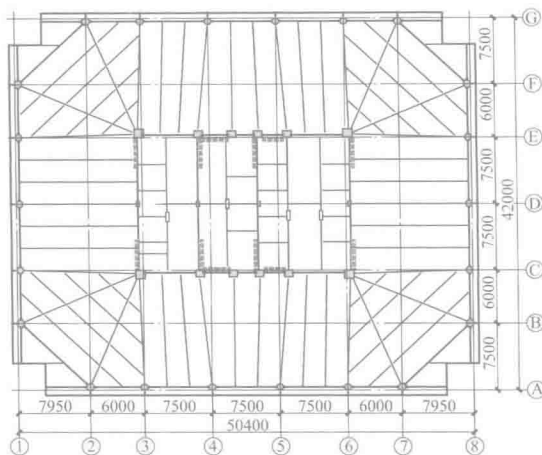


图 2.7 塔楼 34 ~ 顶层结构平面布置图

外框柱柱距为 6.0 ~ 7.95m，采用圆形钢管混凝土柱，可以充分发挥圆钢管的套箍作用与混凝土的抗压能力，外框柱之间采用工字梁刚接；内筒由于建筑的要求，采用矩形钢管混凝土柱，支撑采用矩形钢管；具体截面尺寸与材料见表 2.1。

主要构件尺寸

表 2.1

构 件		截 面 尺 寸	材 料
外框	钢管混凝土柱	○ 1500 × 35 ~ ○ 800 × 20	Q345GJC+C50
	钢梁	H1200 × 350 × 22 × 24 ~ H800 × 300 × 15 × 20	Q345B
内筒	钢管混凝土角柱	□ 1600 × 1300 × 100 × 100 ~ □ 800 × 700 × 25 × 25	Q390GJC+C60
	钢管混凝土其他柱	□ 1400 × 1300 × 60 × 60 ~ □ 800 × 700 × 25 × 25	Q390GJC+C60

续表

构 件		截 面 尺 寸	材 料
内筒	钢梁	H1200 × 500 × 22 × 35 ~ H700 × 300 × 14 × 20	Q345B
	支撑	□ 550 × 550 × 30 × 30 ~ □ 300 × 300 × 12 × 12	Q345B

2.2 结构的超限情况

本工程根据建质〔2010〕109号《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》，对规范涉及结构不规则性的条文进行了检查，存在扭转不规则、楼板不连续、刚度突变、构件间断等不规则项，属超高、特别不规则超限高层建筑。见表2.2～表2.5。

建筑结构高度（m）超限检查

表 2.2

结构类型		6 度	7 度 (含 0.15g)	8 度 (含 0.30g)	9 度	高度	是否超限
混凝土 结构	框架	60	55	45	25	—	—
	框架-剪力墙	130	120	100	50	—	—
	抗震墙	140	120	100	60	—	—
	部分框支抗震墙	120	100	80	不应采用	—	—
	框架-核心筒	150	130	100	70	—	—
	筒中筒	180	150	120	80	—	—
	板柱-抗震墙	40	35	30	不应采用	—	—
	较多短肢墙		100	60	35	—	—
	错层的抗震墙和框架-抗震墙		80	60	不应采用	—	—
混合 结构	钢框架-钢筋混凝土筒	200	160	120	70	—	—
	型钢混凝土框架-钢筋混凝土筒	220	190	150	70	—	—
钢结构	框架	110	110	90	50	—	—
	框架-支撑（抗震墙板）	220	220	200	140	—	—
	各类筒体和巨型结构	300	300	260	180	275.4	是

注：平面和竖向均不规则，或Ⅳ类场地，按减少20%控制；6度的短肢墙、错层结构，高度适当降低。

建筑结构一般性超限检查

表 2.3

序	不规则类型	涵 义	计算值	是否超限
1	扭转不规则	考虑偶然偏心的扭转位移比大于1.2	1.24 (Y向底部4层)	是
2	偏心布置	偏心距大于0.15或相邻层质心相差较大	无	否
3	凹凸不规则	平面凹凸尺寸大于相应边长30%等	无	否
4	组合平面	细腰形或角部重叠形	无	否
5	楼板不连续	有效宽度小于50%，开洞面积大于30%，错层大于梁高	首层顶板大开洞	是
6	刚度突变	相邻层刚度变化大于70%或连续三层变化大于80%	加强层刚度突变	是
7	尺寸突变	缩进大于25%，外挑大于10%和4m	无	否
8	构件间断	上下墙、柱、支撑不连续，含加强层	存在加强层	是
9	承载力突变	相邻层受剪承载力变化大于80%	无	否

建筑结构严重规则性超限检查

表 2.4

序	不规则类型	涵 义	计算值	是否超限
1	扭转偏大	不含裙房的楼层扭转位移比大于 1.4	无	否
2	抗扭刚度弱	扭转周期比大于 0.9, 混合结构扭转周期比大于 0.85	无	否
3	层刚度偏小	本层侧向刚度小于相邻上层的 50%	无	否
4	高位转换	框支转换构件位置: 7 度超过 5 层, 8 度超过 3 层	无	否
5	厚板转换	7 ~ 9 度设防的厚板转换结构	无	否
6	塔楼偏置	单塔或多塔与大底盘的质心偏心距大于底盘相应边长 20%	无	否
7	复杂连接	各部分层数、刚度、布置不同的错层或连体结构	无	否
8	多重复杂	结构同时具有转换层、加强层、错层、连体和多塔类型的 2 种以上	无	否

其他类型高层超限检查

表 2.5

序	类 型	涵 义	是否超限
1	单跨高层建筑	高度超过 28m 的单跨框架结构	否
2	特殊类型 高层建筑	抗震规范、混凝土和钢结构高层规程暂未列入的其他高层建筑结构、特殊形式的大型公共建筑及超长悬挑结构, 特大跨度的连体结构等	否
3	超限大跨 空间结构	屋盖的跨度大于 120m 或悬挑长度大于 40m 或单向长度大于 300m, 屋盖结构形式超出常用空间结构形式的大型列车客运候车室、一级汽车客运候车楼、一级港口客运站、大型航站楼、大型体育场馆、大型影剧院、大型商场、大型博物馆、大型展览馆、大型会展中心, 以及特大型机库等	否

3 超限应对措施及分析结论

本工程抗震设防类别为丙类, 抗震措施按 8 度要求, 根据新疆防御自然灾害研究所编制的《“宝能城”项目工程场地地震安全性评价报告》以及超限审查论证预审会专家的意见, 鉴于安评提供的加速度与规范一致, 本工程设地震动参数按规范执行, 并考虑周围断裂带的不利影响, 对小震、中震、大震的加速度值进行调整, 调整系数取 1.1。阻尼比取值 0.02。风荷载按重现期 50 年进行取值, 为 0.60kN/m^2 , 地面粗糙度为 C 类; 风荷载体型系数和风振系数依据荷载规范、风致振动分析报告按包络取值; 雪荷载按重现期 50 年进行取值, 为 0.35kN/m^2 。

3.1 超限应对措施

3.1.1 分析模型及分析软件

(1) 本工程采用 3 个计算软件 ETABS (2013 版)、YJK (6.2 版) 和 MIDAS/GEN8.3.5 对主楼进行计算分析, 采用考虑扭转耦联的振型分解反应谱法, 并考虑双向地震和偶然偏心的影响, 考虑施工模拟。

(2) 采用 YJK 软件进行弹性时程分析补充计算, 并根据计算结果, 根据时程结果的平均值将上部结构地震力放大, 计算调整构件。

(3) 采用 YJK 软件进行中震下的性能化设计, 计算中震不屈服和中震弹性工况下相

关构件的响应情况。

(4) 采用通用有限元软件 PERFORM-3D 进行动力弹塑性分析, 分析结构在大震下的响应情况, 验算结构大震不倒, 并寻找结构的薄弱部位进行加强; 同时分析结构构件在大震工况下的损伤情况。

3.1.2 抗震设防标准、性能目标及加强措施

(1) 抗震设防标准 (表 3.1)

抗震设防标准

表 3.1

建筑结构安全等级	二级 ($\gamma_0=1.0$)	
建筑设计使用年限	50 年	
建筑抗震设防标准	丙类: 地震作用按 8 度、抗震构造措施按 8 度	
地基基础设计等级	甲级	
基础设计安全等级	二级	
结构抗震等级	加强层及上下各一层	一级
	其他	二级

(2) 抗震设防性能目标及加强措施

① 性能目标 (表 3.2 ~ 表 3.4)

构件多遇地震抗震设计指标

表 3.2

构件类型		设计控制指标
内筒柱	非底部加强区	正截面承载力和抗剪承载力按弹性设计
	底部加强区	正截面承载力和抗剪承载力按弹性设计
外框柱		正截面承载力和抗剪承载力按弹性设计
伸臂桁架	弦杆	正截面承载力和抗剪承载力按弹性设计
	斜腹杆 BRB	按弹性设计
环桁架	弦杆、腹杆	正截面承载力和抗剪承载力按弹性设计
支撑		正截面承载力和抗剪承载力按弹性设计
框架梁		正截面承载力和抗剪承载力按弹性设计
内筒 BRB、连梁阻尼器		按弹性设计

构件设防地震抗震设计指标

表 3.3

构件类型		设计控制指标
内筒柱	非底部加强区	正截面承载力按不屈服设计 抗剪承载力按弹性设计
	底部加强区	正截面承载力按不屈服设计 抗剪承载力按弹性设计
外框柱	非底部加强区	正截面承载力和抗剪承载力按不屈服设计
	底部加强区	正截面承载力和抗剪承载力按不屈服设计
伸臂桁架	弦杆、直腹杆	正截面承载力和抗剪承载力按不屈服设计
	斜腹杆 BRB	进入塑性

续表

构件类型		设计控制指标
环桁架	弦杆、腹杆	正截面承载力和抗剪承载力按不屈服设计
支撑		正截面承载力按不屈服设计
框架梁		允许进入塑性,形成塑性铰
内筒 BRB、连梁阻尼器		进入塑性

构件罕遇地震抗震设计指标 表 3.4

构件类型		设计控制指标
内筒柱	非底部加强区	允许进入塑性
	底部加强区与支撑连接的柱子	正截面承载力允许进入塑性 抗剪承载力按不屈服设计
	底部加强区其他柱子	允许进入塑性
外框柱	非底部加强区	允许进入塑性
	底部加强区	允许进入塑性
伸臂桁架	弦杆、直腹杆	允许进入塑性
	斜腹杆 BRB	进入塑性
环桁架	弦杆、腹杆	允许进入塑性
支撑		允许进入塑性
框架梁		允许进入塑性
内筒 BRB、连梁阻尼器		进入塑性

② 其他加强措施

针对整体结构的加强措施:采取双重抗侧力结构体系,有利结构抗震。提高结构整体性,控制小震、中震、大震作用下位移角。

针对楼板的加强措施:控制结构楼层加速度,满足舒适度要求。适当增加核心筒周围楼板及屋面板的厚度。适当增加开洞周围楼板的板厚及配筋。加强洞口周围梁截面及配筋。

3.2 计算分析结论

3.2.1 多遇地震反应谱分析结果

见表 3.5。

多遇地震反应谱分析结果 表 3.5

			ETABS		YJK		MIDAS	
周期	T_1 (s)	振型系数	7.062	Y 向平动	7.113	Y 向平动	7.092	Y 向平动
	T_2 (s)	振型系数	6.654	X 向平动	6.714	X 向平动	6.860	X 向平动
	T_3 (s)	振型系数	4.473	扭转	4.428	扭转	4.701	扭转
	T_i/T_1		0.633		0.622		0.663	
剪重比	X 向		2.31%		2.35%		2.29%	
	Y 向		2.24%		2.24%		2.29%	

续表

		ETABS	YJK	MIDAS
质量参与系数	X 向	99%	99%	99%
	Y 向	98%	99%	98%
X 向地震	最大层间位移角	1/332	1/336	1/329
	位移比最大值	1.14	1.12	1.15
Y 向地震	最大层间位移角	1/302	1/305	1/301
	位移比最大值	1.24	1.23	1.22
X 向风载	最大层间位移角	1/465	1/453	1/462
	位移比最大值	1.14	1.13	1.14
Y 向风载	最大层间位移角	1/379	1/386	1/377
	位移比最大值	1.14	1.15	1.14
底部框架倾覆弯矩百分比	X 向	53.9%	52.6%	52.9%
	Y 向	50.8%	51.3%	50.2%

3 个程序的结果基本相符, 故而认为计算模型正确有效。在后续的设计阶段中, 按照多个程序结果的包络进行设计, 能够保证结构的安全。

3.2.2 弹性时程分析

本工程采用 YJK 程序进行弹性时程分析。参照抗震规范 (GB 50011—2010), 选用 7 条地震波进行时程分析, 7 条波均由震泰公司提供, 5 条天然波和 2 条人工波。主方向峰值加速度取 70cm/s^2 , 次方向峰值加速度取为主方向的 0.85 倍, 地震波的有效持续时间均大于结构基本自振周期的 5 倍, 时间间隔为 0.02s, 满足规范的要求。主要周期点比较见图 3.1。弹性时程分析计算结果分别见表 3.6。

以上表明, 每条时程曲线计算所得结构底部剪力不小于振型分解反应谱法计算结果的 65%, 7 条时程曲线计算所得的结构底部剪力平均值不小于振型分解反应谱法计算结果的

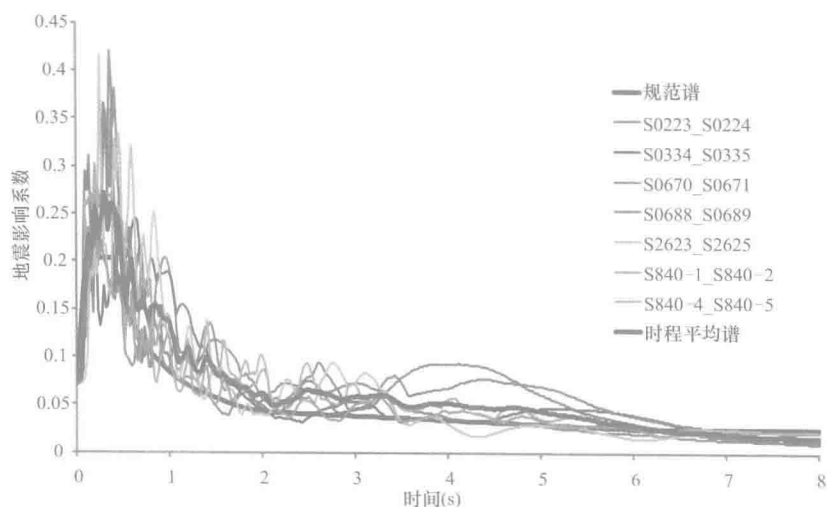


图 3.1 选用时程波与规范谱比较

弹性时程分析计算结果 表 3.6

工况	方向	基底剪力 (kN)	时程 / 反应谱
反应谱	X 向	35082	
	Y 向	34431	
天然波 1	X 向	29276	83.5%
	Y 向	38062	110.5%
天然波 2	X 向	37785	107.7%
	Y 向	31161	90.5%
天然波 3	X 向	38849	110.7%
	Y 向	30660	89.0%
天然波 4	X 向	36021	102.7%
	Y 向	31410	91.2%
天然波 5	X 向	37338	106.4%
	Y 向	36173	105.1%
人工波 1	X 向	43065	122.8%
	Y 向	37514	109.0%
人工波 2	X 向	34509	98.4%
	Y 向	33853	98.3%
时程波平均值	X 向	36692	104.6%
	Y 向	34119	99.1%

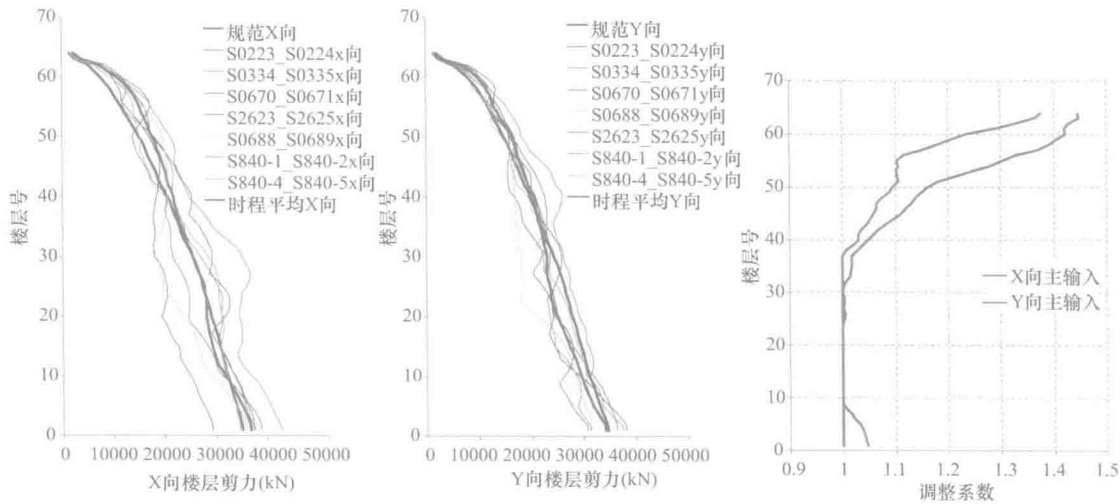


图 3.2 时程楼层剪力分布及楼层放大系数

80%，均满足规范的要求。根据计算结果，顶部楼层剪力和弯矩，时程分析结果略大于反应谱计算方法结果，对于这些楼层可取反应谱和时程分析结果的包络作为结构设计依据。取时程剪力与反应谱剪力的比值作为放大系数，进行结构验算。

3.2.3 主要构件性能化验算

构件计算参数见表 3.7。

构件计算参数

表 3.7

计算参数	非地震组合	小震	中震弹性	中震不屈服	大震不屈服
结构重要性系数 γ_0	√				
$P-\Delta$ 效应	√	√	√	√	√
楼层活荷载折减	√				
荷载分项系数	√	√	√		
材料强度	设计值	设计值	设计值	标准值	标准值
承载力抗震调整系数 γ_{RE}		√	√		
考虑风荷载组合	√	√			
楼层剪力调整	重力二阶效应	重力二阶效应；剪重比调整；外框剪力调整；薄弱层调整	重力二阶效应	重力二阶效应	

(1) 中震下钢管混凝土柱拉应力验算

小震下外框柱恒载 + 活载的内力占控制作用，内筒柱底部地震力比例较大，随着高度逐渐减小；中震下底层内筒角柱混凝土最大拉应力略大于 $2f_{tk}$ 。见表 3.8。

钢管混凝土柱拉应力验算

表 3.8

内筒柱编号	轴向力 (kN)		剪力 (kN)		按组合截面计算		按纯钢计算 (轴压)				按纯钢计算 (抗剪)	
	最大轴拉力	最大轴压力	X 向剪力	Y 向剪力	混凝土拉应力 (MPa)	$2f_{tk}$ (MPa)	拉应力 (MPa)	应力比	压应力 (MPa)	应力比	剪应力 (MPa)	应力比
1	53042	193090	6421	2639	8.06	5.7	61	0.13	222	0.6	13	0.1
2	29865	130998	5233	2122	5.86	5.7	47	0.1	205	0.6	16	0.1
3	16363	100664	4007	1722	4.50	5.7	41	0.1	253	0.7	21	0.1

(2) 钢管混凝土柱轴压比控制

图 3.3 为小震弹性与中震不屈服组合下，外框柱、内筒柱轴压比验算结果。小震下均控制在 0.8 以下；中震下均控制在 1.0 以下，满足规范要求。

(3) 钢管混凝土柱轴拉比控制

中震下，柱的拉力全由钢材承担；内筒柱在底部 15 层左右存在拉力；外框柱的角柱以及加强层局部存在拉力，拉力的应力比均较小。见图 3.4。

(4) 关键节点有限元分析

根据节点的具体连接情况，建立三维实体有限元模型，考察构件的屈服状态和屈服区域。

① 加强层内筒角柱节点 (图 3.5 ~ 图 3.7)

② Y 向跨层支撑交叉节点 (图 3.8 ~ 图 3.10)

③ 外框环桁架节点 (图 3.11 ~ 图 3.13)