

福州未来城T1塔楼结构设计分析

薛 耀

华东建筑设计研究院有限公司 上海 200001

摘 要: 福州未来城T1塔楼采用混凝土框架-核心筒结构体系, 采用YJK和ETABS对该结构进行小震和风荷载下的结构设计。采用Paco-SAP对结构进行大震弹塑性时程分析, 结果表明该塔楼的结构布置满足预设的性能目标要求, 并利用弹塑性时程分析找出结构的薄弱点, 并针对性的采用设置型钢的方式予以补强。塔楼在F31由于功能转换, 结构采用型钢混凝土梁抬柱的方案进行竖向构件转换, 分析结果表明该方案是可行的。塔楼的形体和由风荷载控制的特殊情况, 使得连梁设计成为本项目的关键点和难点, 采用结合建筑布置区别化设计连梁, 强化隐藏连梁, 弱化公区连梁的方案, 达到控制结构周期比和指标的同时, 实现连梁配筋的可行性。

关键词: 超高层结构; 框架-核心筒体系; 抗震设计

中图分类号: TU973

Structural design analysis of T1 tower of Fuzhou Future City

Yao XUE

East China Architectural Design and Research Institute Co., Ltd Shanghai 200001

Abstract: The T1 tower of Fuzhou Future City adopts the concrete frame-core tube structural system, YJK and ETABS are used to design the structure under frequent seismic and wind loads, and the results show that the structure meets the requirements of the specification. The elastic-plastic time history analysis of the structure under large earthquake was carried out by Paco-SAP, and the results showed that the structural layout of the tower met the preset performance target requirements, and the weak points of the structure were identified by the elastic-plastic time history analysis, and targeted by setting steel way to be reinforced. Due to the functional conversion of the tower in F31, the structure adopts the scheme of lifting columns of section steel concrete beams for vertical member conversion, and the analysis results show that the scheme is feasible. The shape of the tower and the special situation controlled by wind load make the design of lintel become the key point and difficulty of this project, and the scheme of differentiated design of lintel combined with architectural layout is adopted, strengthening hidden lintel, weakening the lintel in the public area, so as to control the structural period ratio and indicators while realizing the feasibility of connecting beam reinforcement.

Key words: Super high-rise structure; frame-core tube system; seismic design

1 工程概况



图1 建筑效果图

福州未来城位于福州市长乐区福海路、漳江路、纵一路

和支一路之间, 其中T1塔楼建筑高度约为213.8m, 结构高度约198.3 m, 地下2层, 地上48层。塔楼二层挑空, F1、F2为办公和酒店大堂; F3~F30层为办公区, 层高4.2m; F31~F47层为酒店及相应配套设施区, 层高为3.8m; F48层为观光层, 顶部为塔冠。如图1所示, 塔楼造型采用福建特产寿山石的意向, 线条柔和, 立面曲线凹凸有致。T1塔楼与裙房在首层设置抗震缝, 切割为独立的抗震单元。

T1塔楼建筑结构安全等级为二级, 结构设计工作年限为50年, 抗震设防类别为丙类, 抗震设防烈度为7度(0.1g), 设计地震分组为第三组, 场地类别为Ⅲ类, 小震特征周期为0.65s。50年一遇基本风压为 0.80kN/m^2 , 距离海岸线1km, 地面粗糙度类别为A类, 根据《福州滨海未来城二区综合体项

目风洞测压试验报告》，塔楼的建筑造型对于抗风有利，体型系数为1.15。

2 结构体系

T1塔楼平面呈现圆角正方形，底部平面尺寸为54.92m×54.92 m，中部平面尺寸为45.00m×45.00 m（按角部外凸尺寸为51.51 m×51.51 m）；酒店高区层平面尺寸为37.22 m×37.22 m。塔楼高宽比为3.6，核心筒高宽比为8.68。塔楼核心筒有两次收进，第一次为最右侧剪力墙在F22层截止，第二次为核心筒在F33收小，同时转换部分框架柱。

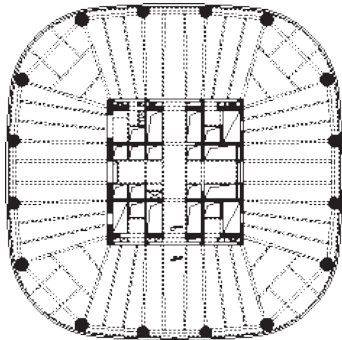


图2 低区办公标准层结构平面图

T1塔楼采用钢筋混凝土框架-核心筒体系。根据建筑需求，框架柱采用圆柱，采用SRC柱，内插“王”字或工字型钢，提高延性和减小柱截面尺寸，柱截面直径从首层至屋面层由2000mm变化至800mm。核心筒外墙由首层至F31从800mm变化至400mm，核心筒内墙从首层至屋面层由400mm变化至300mm。框架柱和核心筒混凝土强度等级由首层至屋面从C60过渡至C40。

外框柱随建筑形体整体变化，底部略向外倾斜，至顶部向内倾斜。由于办公采用10.5m柱网，酒店采用9m柱网，外框柱还存在环向的倾斜变化。

楼盖采用现浇混凝土楼板，办公标准层核心筒外板厚110mm，核心筒内板厚130mm；酒店标准层全楼面板厚120mm；设备层、避难层全楼面板厚140mm；21F核心筒收进层和31F转换层板厚180mm。

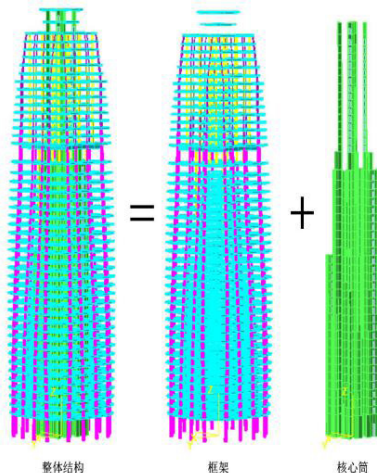


图3 塔楼结构抗侧力体系

3 基础设计

T1塔楼核心筒下为桩筏基础、框架柱下为独立桩基承台基础，底板为防水板。桩基采用钻孔灌注桩，桩径为1200mm，持力层为⑫中~微风化岩层，入岩深度≥1000mm，岩石单轴饱和抗压强度标准 $f_{rk}=105.6\text{MPa}$ ，按嵌岩桩设计，桩身混凝土强度等级为水下C50单桩承载力特征值为18000kN。本工程塔楼的承台、筏板混凝土强度等级均为C50，基础底板抗渗等级P10。对筏板进行抗剪、抗冲切以及抗弯设计要求，桩基承台厚度为4000mm，筏板厚度为3000mm。

塔楼沉降呈锅底型分布，核心筒下沉降大，框架柱下沉降较小，最大沉降值约9.399mm，小于规范规定的基础平均沉降量200mm；结构整体倾斜为1/60440，小于规范规定的2/1000；故基础变形符合《建筑地基基础设计规范》GB50007-2018的有关要求。

4 结构抗震性能设计

4.1 超限情况

根据《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》（建质[2015]67号），T1塔楼主要屋面高度为198.3m，超出7度区钢筋混凝土框架-核心筒结构的高度限值。塔楼同时存在刚度突变、尺寸突变、构件间断（F31梁抬柱转换）和斜柱等三项不规则，属于高度超限的超B级复杂高层建筑。

4.2 性能目标

塔楼抗震性能满足“小震不坏，中震可修，大震不倒”的整体结构抗震性能目标。根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2010（2016修订版），各构件的抗震性能目标如下表1所示。

表1 各构件抗震性能目标

设防水准	小震	中震	大震
层间位移角限值	1/620		1/100
核心筒墙肢、框架柱	首层	弹性	斜截面不屈服
	其他关键区域		允许进入塑性，抗剪截面满足控制条件
	一般区域		斜截面不屈服
转换梁		弹性	斜截面不屈服
转换层楼板		不屈服	轻微损坏
连梁		允许进入塑性	允许进入塑性，不得脱落
框架梁		斜截面不屈服	允许进入塑性

注：其他关键区域为：除首层外底部加强区、转换层及其相邻层、收进层及其相邻层。

5 弹性计算

采用ETABS和YJK软件对塔楼进行小震计算。模型输入时梁、柱采用杆单元模拟，楼板、剪力墙和连梁采用壳单元模拟，连梁刚度折减系数0.7（风荷载下为1.0），周期折减系数0.85，阻尼比取0.05。两个软件弹性计算结果如下。

表2 结构周期和振型

振型	YJK			ETABS		
	周期/s	平动系数(X+Y)	扭转系数	周期/s	平动系数(X+Y)	扭转系数
1	4.289	1.00 (1+0.00)	0.00	4.239	1.00 (0.99+0.01)	0.00
2	3.891	1.00 (0+0.94)	0.06	3.829	1.00 (0.01+0.99)	0.00
3	3.405	0.00 (0+0)	1.00	3.345	0.00 (0+0)	1.00
T _t /T ₁	0.789			0.789		

表3 最大层间位移角和位移比

作用	指标	YJK	ETABS
X向地震作用	最大层间位移角（楼层）	1/918（F30）	1/894（F30）
	最大位移比（楼层）	1.22（F1）	1.23（F1）
Y向地震作用	最大层间位移角（楼层）	1/788（F31）	1/815（F31）
	最大位移比（楼层）	1.21（F2）	1.22（F2）
X向风	最大层间位移角（楼层）	1/700（F21）	1/708（F21）
Y向风	最大层间位移角（楼层）	1/755（F19）	1/773（F20）

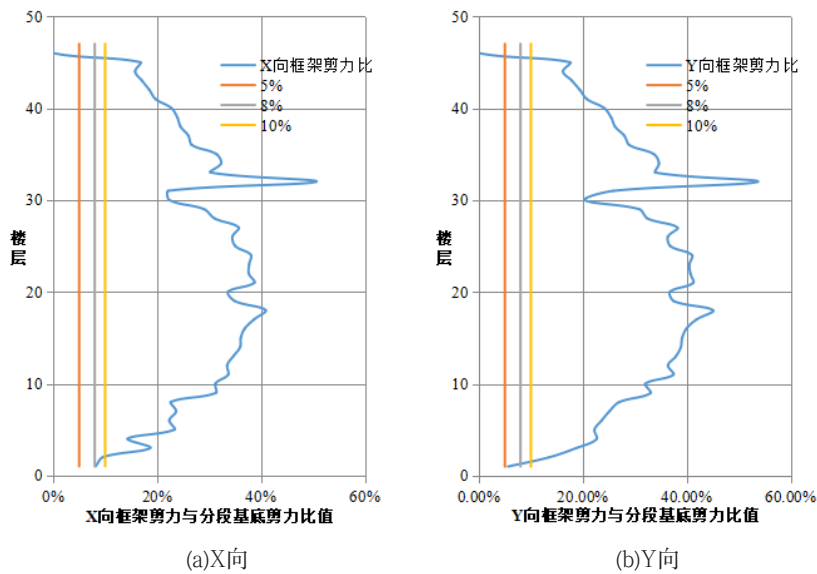


图4 框架剪力与分段基底剪力比值

由表2、表3和图7可得，两个分析软件计算的振型、周期、最大层间位移角、最大层间位移比基本一致；扭转周期均小于0.85，满足规范要求。框架柱除个别楼层外，楼层地震剪力均不低于分段基底剪力的8%。满足《抗震审查要点》的要求。

X向最小剪重比为为1.37%，Y向最小剪重比为1.25%，满足《建筑抗震设计规范》要求。

综上所述，T1塔楼结构在小震和风作用下，整体结构及构件满足规范要求。

6 大震弹塑性时程分析

采用Paco-SAP对塔楼进行大震弹塑性时程分析。弹塑性分析初始阻尼比取0.05。其中梁、柱、斜撑等杆件的非线性模型采用纤维束模型；剪力墙和楼板采用弹塑性分层壳单元。Paco-SAP模型与YJK模型的质量、周期对比见表4，可见两个模型总质量和各周期基本一致。

表4 塔楼小震和大震模型比较

项目		YJK	Paco-SAP
质量	恒载/kN	135486.5	140273
	活载/kN	13681.5	13666.6
	重力荷载代表值/kN	149168	153940
周期/s	1(X向)	4.289	4.440
	2(Y向)	3.891	4.023
	3(扭转)	3.405	3.681

选择3组地震波进行时程分析。在小震弹性时程下，各地震波结构基底反力与反应谱结果的比值最大值为130.86%，均介于65%~135%之间；平均值为113.62%，平均值与反应谱结果均介于规范限值80%~120%范围内，满足规范要求。在大震时程下，弹塑性结构在X、Y两个主方向基底剪力平均值分别为138.9MN和147.5MN。相对于弹性时程分析结果，各组地震波作用下，弹塑性结构的基底剪力均有

一定程度的降低。弹塑性结构基底剪力平均值与弹性分析结果比值分别为66.26%和63.33%。结构在大震弹塑性时程下的层间最大位移角如分别为1/112和1/102,均满足规范要求。

大震弹塑性时程分析的主要目的是找出结构的薄弱点,以针对性的采取措施对其进行补强,使结构满足预设的大震下的性能目标。经分析,核心筒的塑性发展为:连梁首先出现损伤,主体墙肢几乎未产生损伤;连梁损伤首先出现在上部楼层,中下部楼层连梁相继开始损伤,随后连梁损伤逐渐发展。连梁损伤,刚度退化,形成耗能机制,保护了主体墙肢。外框架基本处于无损伤和轻微损伤的状态,构件性能保持良好,外框架在大震作用下的承载力仍有富余,核心筒发生损伤之后,外框架可以起到抗震二道防线的作用。

7 连梁分析与设计

如图2、图3所示,由于本项目特殊的建筑体型,在结构角部存在较大的悬挑,酒店区剪力墙减少较多,使得结构整体抗扭刚度若,扭转周期偏大,周期比较难控制。经分析,塔楼建筑走道和设备出管主要集中在上下两片X向剪力墙上,对于X向剪力墙高度限制较大,而对于Y向剪力墙无需求,因此尝试将Y向中部连梁高度由800加高至1200,对比结果如下表7所示,可见增加Y向梁高能够有效的控制Y向和扭转,进而使周期比满足规范要求

表5 大震弹塑性时程结构层间位移角最大值

	连梁高度800	连梁高度1200
T1	4.416(Y)	4.289(X)
T2	4.325(X)	3.891(Y)
T3	3.802(T)	3.405(T)
T3/T1	0.861	0.789

根据表3结果,结合计算结果分析,本项目水平控制作用为风荷载,《高层建筑混凝土结构技术规程》不考虑风荷载下连梁折减,初步分析结果表明采用常规的设计方式,较多楼层连梁配筋率在2.75%以上,且有较多连梁计算配筋率

在2.5%以上,不满足规范要求。对于大部分超筋的连梁,其截面高度为800mm,宽度在300~400mm,采用设置型钢的方案对解决超筋作用不大并且经济性不佳。结合建筑布置,本项目采用弱连梁(变截面连梁)+采用HRB500高强钢筋的方案,解决这一问题。如图2、图3和图4所示,本项目X向和Y向中间“十字”区域内墙肢均退回约1/2个建筑电梯间或走道等长度,退回区域内连梁高度为1200mm,公区连梁高度为800mm,该变截面连梁同时又削减了墙肢的协调作用。计算结果表明,采用该方案对结构整体指标有一定的削减,但同时可以有效的降低连梁根部风荷载控制作用下的弯矩,进而使得连梁配筋设计具备可行性。

8 结论

(1)通过小震下YJK和ETABS的分析,塔楼采用混凝土框架-核心筒的结构体系均能满足规范的要求。

(2)结构通过大震分析后,构件损伤均控制在预设性能目标之内,大震弹塑性时程下结构X方向和Y方向最大层间位移角分别为1/112和1/102,均小于规范位移角限值1/100的要求。

(3)塔楼的形体和由风荷载控制的特殊情况,使得连梁设计成为本项目的关键点和难点,采用结合建筑布置区别化设计连梁,强化隐藏连梁,弱化公区连梁的方案,达到控制结构周期比和指标的同时,实现连梁配筋的可行性。

参考文献

- [1]建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].2016年版,北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2]高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3]滨海未来城二区地块A T1塔楼超限高层建筑抗震设计可行性论证报告[R].上海:华东建筑设计研究院有限公司,2021.
- [4]福州滨海未来城二区综合体项目风振分析报告[R].北京:中国建研院检验科技股份有限公司,2020.