

Y型平面高层塔楼结构设计

洪海波¹,陈学伟²,郑 宜³

(1、中新广州知识城投资开发有限公司 广州510555;2、WSP科进香港有限公司 香港999077;
3、广东城建达设计院有限公司 广东佛山528200)

摘 要:广州某高层建筑项目为一栋办公及商业类建筑的复杂高层。介绍其塔楼的结构设计,该塔楼结构高度为282.90 m。考虑施工可行性及装配率要求,结构采用钢管混凝土柱框架(钢管混凝土柱+钢梁)-核心筒的结构体系。为了配合建筑功能要求,外框柱中低区采用圆钢管柱,高区采用矩形钢管柱,核心筒低区采用钢管混凝土剪力墙,高区采用钢筋混凝土剪力墙。塔楼平面为Y形平面且面积较大(长边约110 m、短边约100 m),通过对中心区域的结构刚度加强,使3个翼部协调工作,增加了结构抗侧与抗扭刚度。由于局部构件的转换,在46层、47层设置不连续的转换桁架。对结构进行大震性能化分析,使结构构件满足大震性能目标的要求。

关键词:超限高;钢管柱;钢管剪力墙 Y形平面;弹塑性时程分析

中图分类号:TU318+2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-4563(2021)11-025-05

Structural Design of Y-shape Plane High Rise Building in Guangzhou

HONG Haibo¹,CHEN Xuewei²,ZHENG Yi³

(1、Sino-Singapore Guangzhou Knowledge City Investment & Development Co.,Ltd. Guangzhou 510555,China;2、WSP Kejin Hong Kong Co.,Ltd. Hong Kong 999077,China;3、Guangdong Chengjianda Design Institute Co.,Ltd. Foshan 528200,China)

Abstract: A super high-rise tower in Guangzhou is a complex building of office and commercial buildings. Introduces the structural design of tower., the structural height of tower is 282.90 meters. In order to meet the architecture requirements, circular CFT columns are used in middle and low zone of the frame columns, and for the high zone, rectangular CFT columns are used. For core wall system, the low zone of core adopts CFT composite shear walls, and the high zone RC walls. The plane shape of tower is Y - shape and area is greater than normal project (about 110 meters on long side and 100 meters on short side). By strengthening the structural members stiffness in central zone, the three wings work in coordination to resist lateral load. The lateral and torsional stiffness of the structure is increased. Due to local structural member transfer, discontinuous transfer trusses are used on the 46th and 47th floors. The analysis method of the structure with the performance of large earthquakes is used to make the structural members meet the requirements of the performance targets of the large earthquakes.

Key words: ultra-limit high-rise building; CFT column; CFT wall, Y-shape plane; nonlinear time history analysis

1 工程概况

广州某超高层建筑项目包括商业裙房2层、塔楼53层、地下室5层,地下建筑功能主要为车库和机房,塔楼与宴会厅和商业裙房用连廊连接^[1],如图1所示。塔楼与宴会厅和塔楼与商业裙房之间的抗震缝设置

如图2所示。本文介绍Y型平面超高层塔楼的结构设计方法。某塔楼建筑面积为274 137.00 m²,塔楼房屋高度为282.90 m(B1层室外地面至主屋面),超过最大适用高度(190 m)约49%,属于超限高层建筑结构,需要进行超限审查。

本项目位于广州市地区,根据《建筑结构荷载规范:GB 50009—2012》^[2],风荷载基本风压为0.50 kPa,



图1 Y型平面超高层项目效果

Fig.1 Architectural Rendering of Y-shape Tower

作者简介:洪海波(1981-),男,硕士,工程师,主要从事超高层项目设计管理工作。

E-mail:haibo.hong@sagkc.com

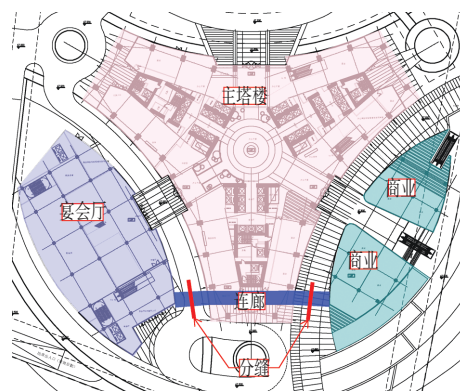


图2 抗震缝设置示意图

Fig.2 Layout of Aseismic Joint

地面粗糙度为C类,风荷载体型系数偏于保守取1.40。由于本工程属于对风荷载比较敏感的高层建筑,承载力设计时按基本风压的1.1倍采用。建筑结构设计使用年限50年,结构安全等级一级。塔楼构单元内经常使用人数超过8 000人,根据《高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010》^[3]和《高层建筑混凝土结构技术规程:广东省标准 DBJ 15-92—2013》^[4],抗震设防类别为重点设防类(乙类),抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度为0.10g,多遇地震下水平地震影响系数最大值为0.08(阻尼比为3.5%),设计地震分组为第一组,场地土类别为Ⅱ类,特征周期为0.35 s。

2 结构体系与布置

本项目综合考虑了施工周期及装配式评分要求,结构采用钢管混凝土柱框架(钢管混凝土柱+钢梁框架)-核心筒的结构体系。塔楼建筑平面为Y形(长边约110 m、短边约100 m),外轮廓按回转半径计算高宽比约为5.74。该建筑由3个核心筒组成,每个核心筒宽约11 m,长约34 m。将Y形平面折分成3个翼部,每个翼部塔楼的高宽比超出文献[4]要求,因此协调3个翼部的变形至为关键,采用大截面箱形梁连接3个核心筒,提高结构的抗侧与抗扭能力。塔楼结构整体模型如图3所示。

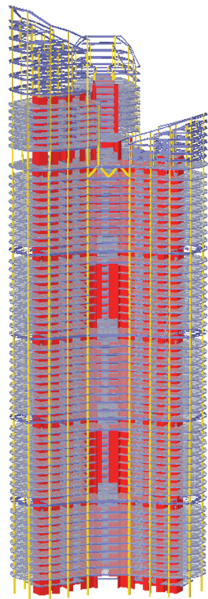


图3 整体计算结构三维模型
Fig.3 3D Model of the Structure

外框柱间距约为10.8 m,外框柱与核心筒距离约为9.7~12.1 m;外框梁和内框梁均采用钢梁,通过计算表明,框筒的连系钢梁即使作为刚接也不能提高抗侧刚度,且由于刚度导致钢结构节点构造复杂,因此连系梁采用铰接处理。楼面钢梁的设计假定为:核心筒与外框柱的连接梁采用两端铰接、外框柱与外框柱的连接梁采用两端刚接、次梁采用两端铰接。

核心筒外楼盖采用钢梁+钢筋桁架楼承板,核心

筒内楼盖采用现浇钢筋混凝土梁板。

低区采用钢管混凝土剪力墙,高区采用钢筋混凝土剪力墙,钢管内混凝土强度等级为C70,钢材强度等级为Q390,从嵌固端到37BF层,柱截面由 ϕ 1 700×40逐步减小至 ϕ 1 300×40;高区由于建筑功能从办公楼变为酒店,外框柱采用圆形钢管混凝土柱和矩形钢管混凝土柱,从38层至顶层,混凝土强度等级由C50逐步减小至C40,办公区外框柱数量为24根,酒店区外框柱数量为20根。在两个区之间的避难层46F和大堂层47F采用斜柱以及转换桁架进行过渡,圆钢管截面按50~100 mm收进。通过计算表明,转换桁架同时具备加强层效应,减少结构的层间位移角。

核心筒材料主要采用钢筋混凝土,从嵌固端到顶层,混凝土强度等级由C70逐步减小至C40,厚度由1.0 m逐步减小至0.5 m。此外,在48F以上,将减少东北位置的1个核心筒。底部加强部位为B1F~6F,为满足抗震性能要求,B2F~8F的核心筒剪力墙内嵌钢管,形成钢管混凝土剪力墙核心筒,以满足轴压比和中大震受拉受剪的要求。

3 结构超限情况及抗震性能目标

3.1 超限内容

按照《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》^[5],塔楼超限内容为:①高度超限,房屋高度为282.90 m,超过了钢管混凝土柱框架-核心筒结构的最大适用高度(7度区最大适用高度为190 m);②扭转不规则,考虑偶然偏心的X向规定水平力作用下最大扭转位移比为1.36;③楼板不连续,大部分楼层存在有效宽度小于50%的情况;④尺寸突变,47F竖向构件缩进位置大于25%;⑤局部不规则,斜柱构件、塔楼存在3个不连续的转换桁架。

3.2 抗震性能目标

结构抗震性能目标取C级,小震、中震和大震下的性能水准分别为1、3、4,即关键竖向构件应保证中震弹性、大震不屈服。各性能水准对应的震后性能状况如表1所示,结构构件抗震性能目标如表2所示。

表1 各性能水准结构预期的震后性能状况

Tab.1 Objectives of Structure under Earthquake for Different Seismic Performance Level

结构抗震性能水准		1	3	4
损坏部位	宏观损坏程度	完好、无损坏	轻度损坏	中度损坏
	关键构件	无损坏	轻微损坏	轻度损坏
	普通竖向构件	无损坏	轻微损坏	部分构件中度损坏
	耗能构件	无损坏	轻度损坏、部分中度损坏	中度损坏、部分比较严重损坏
继续使用的可能性		不需要修理即可继续使用	一般修理后方可继续使用	修复或加固后方可继续使用

表2 结构构件承载力设计要求
Tab.2 Design Requirements of Member Capacity

地震影响		小震	中震	大震
性能水准		1	3	4
关键构件	底部加强部位 剪力墙、转换桁架 及转换柱、斜柱	正截面 弹性设计	不屈服设计	部分屈服设计 (B3,C3,SW3)
		斜截面	弹性设计	不屈服设计
	收进层楼盖及其 下两层和以上连 接部位的框架、核 心筒之间薄弱连 接处的楼盖、三翼 端部单跨框架	正截面	不屈服设计	不屈服设计
		斜截面	弹性设计	不屈服设计
	普通其他部位核心筒 竖向剪力墙、 构件普通框架柱	正截面 弹性设计	不屈服设计	不屈服设计或变 形复核(B4,C4, SW4)
		斜截面	不屈服设计	最小截面设计
耗能构件	普通框架梁、 连梁	正截面 弹性设计	部分屈服设计 不屈服设计	变形复核(B6) 最小截面设计
分析手段	反应谱法、 弹性时程分析		反应谱法	反应谱法、弹塑 性时程分析
分析软件	YJK、ETABS		YJK	YJK、Perform-3D

表2中依据《建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程：广东省标准 DBJ 15-151—2019》^[6]；结合性能水准要求，针对本工程结构的特点和超限内容^[7]，结构构件实现抗震性能要求的层间位移角指标。

4 小震与中震性能分析

4.1 小震与风荷载分析

采用YJK及ETABS软件对结构进行小震及风荷载分析。结构小震反应谱采用规范谱；结构风洞试验在华南理工大学土木与交通学院风洞实验室进行，结构设计风荷载采用规范风荷载和风洞试验提供的等效静力风荷载的包络值。

小震分析结果如表3所示，从表3中可以看出，

表3 小震作用下结构性能分析主要结果
Tab.3 Results of Structural Performance Analysis under Frequent Earthquake

计算软件	YJK	ETABS
自振周期 /s	$T_1=8.77$	$T_1=8.58$
	$T_2=8.21$	$T_2=8.05$
	$T_3=7.71$	$T_3=7.51$
周期比 T_3/T_1	0.88	0.88
X向层间位移角(X向地震作用)	1/560	1/560
Y向层间位移角(Y向地震作用)	1/763	1/555
X向地震剪力/kN	14 175	13 735
Y向地震剪力/kN	16 040	15 023
地面以上结构总质量/t	445 400	444 986

两种软件的计算结果比较吻合，风荷载分析结果如表4所示，各项指标均符合文献[4]的要求。

结构周期比为0.88，小于0.90；结构最大扭转位移比为1.36。

YJK软件计算的层间位移角曲线如图4所示。不同方向地震作用的X、Y向位移角均远小于1/500，说明结构具备足够的侧向刚度，满足文献[4]的要求；层间位移角与位移曲线突变是由剪力墙缩进与转换桁架的加强层效应引起的。

4.2 中震性能分析

采用YJK软件进行中震构件性能分析。底部加强区剪力墙满足中震抗剪弹性性能指标，非加强区剪力墙满足中震不屈服指标。由分析结果可知，在双向水平地震下，由于核心筒占比较大，局部核心筒剪力墙承受偏拉作用，但由轴拉力产生的名义拉应力均小于 $1.0f_{tk}$ ，如图5所示，按计算配置受拉钢筋即可满足偏拉承载力要求。因此，核心筒剪力墙的含钢率由轴压力控制，剪力墙含钢率为1.5%。

5 大震弹塑性时程分析

采用Perform-3D程序^[8]对塔楼进行弹塑性时程分析。通过小震弹性时程分析选取2组人工波和5组天然波(GM1~GM5)，7组地震波作用下的结构基底剪力均在振型分解反应谱法计算基底剪力的65%~

表4 风荷载作用下最大层间位移角、首层剪力

Tab.4 Max Story Drift and Base Shear under Wind Load

参数	风荷载方向	YJK	说明
最大层间位移角	X向顺风	1/871(41F)	风荷载作用下层间位移角≤1/500，满足文献[4]要求。
	Y向顺风	1/903(41F)	
首层剪力/kN	X向顺风	30 118.5	
	Y向顺风	30 489.4	

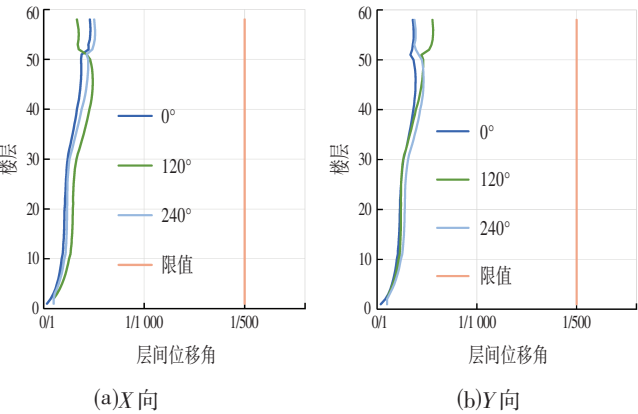


图4 结构在小震作用下的层间位移角

Fig.4 Story Drift of Structure under Frequent Earthquake

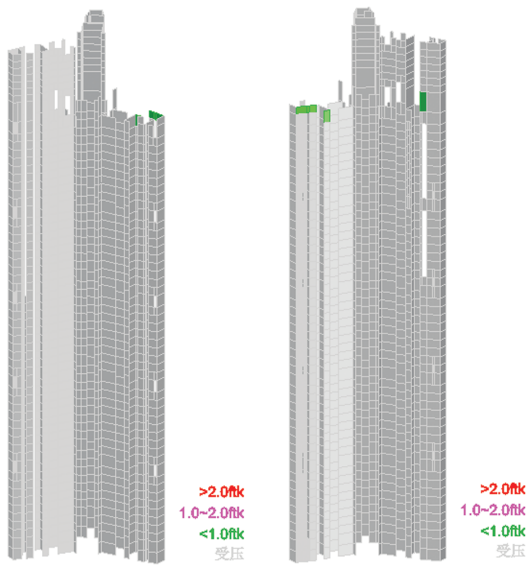


图5 受拉剪力墙构件的分布
Fig.5 Layout of Shear Walls Bearing Tension

135% 范围内,7组地震波作用下的平均基底剪力在振型分解反应谱法计算基底剪力的80%~120%范围内,地震波的反应谱分析结果如图6所示,满足文献[4]关于地震波选取的要求。分别按0°、90°为主方向进行双向弹塑性时程分析,并以结果最大值进行结构抗震性能评估。

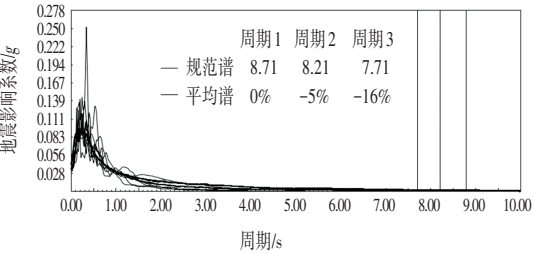


图6 地震波反应谱曲线与规范谱对比
Fig.6 Response Spectrum Comparison from Earthquake Waves and From Code

计算模型仅考虑地上结构,在简化模型中将塔冠质量施加在塔楼屋面,采用 Perform-3D 建立结构三维非线性整体分析模型,该计算模型与弹性计算的 YJK 模型对应,Perform-3D 弹塑性模型如图7所示。

梁和柱采用纤维截面来模拟,梁采用一维纤维单元模拟,柱采用二维纤维单元模拟。梁柱均采用塑性区与弹性杆系拼接形成单元(集中塑性模型)。详细非线性计算分析及假定在韩小雷等人的研究^[9-10]中有详细的描述。经过弹塑性分析所得结构层间位移角曲线如图8所示,最大层间位移角为1/139,满足小于1/100的要求。结构在X方向和Y方向的非线性耗能比例最大值分别为9.90%和10.95%。

X方向大震作用下基底剪力为115 997 kN,Y方向为114 784 kN,大震与小震基底剪力的比值为6.28(X方向)与6.16(Y方向),表明大震达到有效耗能的属性。

对框架梁、钢管柱、剪力墙墙件转换桁架等关键

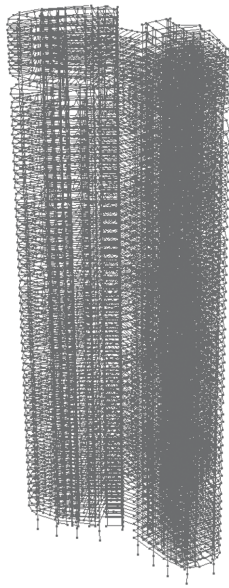


图7 结构 Perform-3D 模型
Fig.7 Perform-3D Structure Model

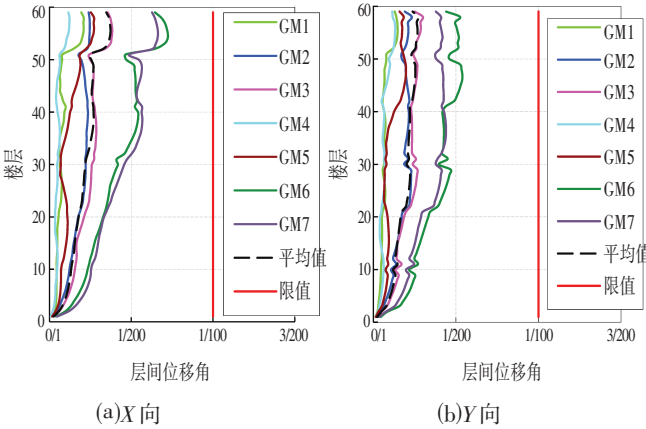


图8 结构在大震作用下的层间位移角
Fig.8 Story Drift of Structure under Rare Earthquake

构件进行弹塑性评估,满足性能目标要求。中上部的核心筒的连梁是主要耗能构件,出了较多的塑性变形仍满足变形要求,如图9、图10所示。柱墙构件处于

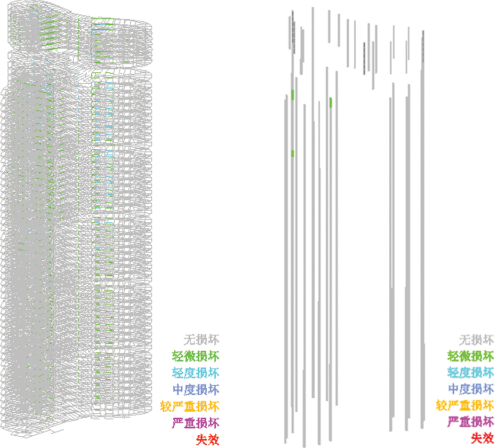


图9 结构梁构件及柱构件在大震下的正截面性能分布
Fig.9 Flexure and Axial Performance of Beams and Columns under Rare Earthquake

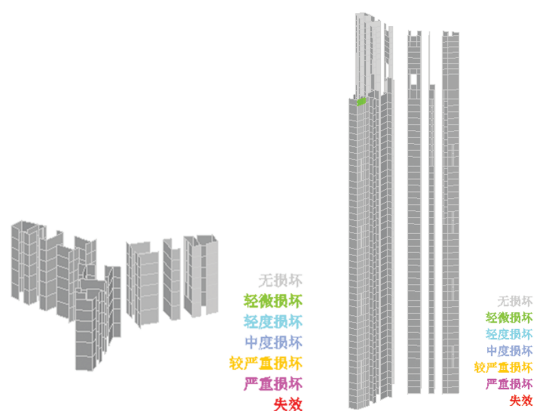


图10 结构剪力墙在大震下的正截面性能分布

Fig.10 Flexure and Axial Performance of Shear Walls under Rare earthquake

未屈服状态,表明关键构件在大震作用下满足性能目标的要求。

6 结论

本文所述塔楼房屋高度超过最大适用高度 190 m、且存在扭转不规则、楼板不连续、尺寸突变、局部不规则(包括穿层柱、斜柱、局部托柱转换、夹层)等4项不规则情况。塔楼采用钢管混凝土柱框架-核心筒结构。结构设计针对其Y形平面的特点及装配率评分标准要求,采用了钢管混凝土框架-钢筋混凝土剪力墙的结构形式,通过在底部采用C70混凝土及钢管混凝土墙来减少底部墙肢厚度。根据建筑功能特点,中低区采用圆钢管混凝土柱,高区采用矩形钢管混凝土柱,对整体结构体系及布置进行钢构件的截面细化,且设置有效的耗能机制,使之具有良好的结构性能。3个核心筒通过大截面箱形截面钢梁相连,保证3个翼部协调工作,提高结构的抗侧及抗扭刚度。

本工程进行了小震中震下的弹性分析,大震下对关键构件进行不屈服及弹性验算,以及采用 Perform-3D 软件进行结构弹塑性分析,完成基于性能的抗震分析。在大量分析的基础上,对结构提出了相应的超限加强措施。目前该工程已通过超限审查。

参 考 文 献

- [1] 陈学伟,黄汉华,等. 中新广州知识城 JLXC-F1-1 地块知识塔项目建筑结构工程抗震设防超限设计可行性论证报告[R]. 广州:科进柏诚工程技术(北京)有限公司广州分公司,2020.
- [2] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [4] 高层建筑混凝土结构技术规程:广东省标准 DBJ 15-92—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [5] 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点:建设部建质[2015]67号[Z],2015.
- [6] 建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程:广东省标准 DBJ 15-151—2019[S]. 北京:中国城市出版社,2019.
- [7] GRAHAM H, POWELL. A state of the art educational event performance based design using nonlinear analysis [R]. Computers and Structures Inc.,2007.
- [8] 倪炜麟. 某超限高层结构性能化设计及弹塑性分析[J]. 广东土木与建筑,2017,24(5):14-19.
- [9] 韩小雷,陈学伟,林生逸,等. 基于纤维模型的超高层钢筋混凝土结构弹塑性时程分析及工程应用[J]. 建筑结构,2010(2):13-16.
- [10] 郑宜,陈学伟,等. 深圳某高层塔楼的钢筋混凝土框筒方案设计[J]. 广东土木与建筑,2021,28(7):26-30.

《广东土木与建筑》关于投稿方式的通知

为了规范审稿流程,提升审稿效率,同时更便于作者投稿、询稿,《广东土木与建筑》编辑部于2019年1月1日起正式启用“期刊在线采编系统”,请作者在中国知网本刊采编平台(<http://gdtm.cbpt.cnki.net>)首页点击“作者投稿系统”,注册账号登录后进行在线投稿,并可在在线实时查询稿件处理状态。自2019年1月1日起,本刊不再接受邮箱投稿。特此通知。