

回字形平面超限高层结构抗风设计研究

黄元根, 陈晓航, 周定, 蒋珂, 崔济东

(广州容柏生建筑结构设计事务所, 广州 510170)

摘要: 以湛江某 178m 超高层回字形剪力墙结构为例, 基于风洞试验结果分析屋顶中空多个临风面以及中部内压对结构影响, 同时重点阐述超高层回字形平面弱轴变形协同机制及其对结构构件设计影响。考虑到结构弱轴抗侧刚度由风荷载控制, 先通过平面切分后的隔离体模型对比各区域间整体抗侧刚度强弱程度, 然后针对区域间水平/竖向变形差的变形协调机理进行重点剖析, 最后根据构件内力结果给出设计建议。结果表明, 设计时不可忽略中空内压及屋顶多个临风面对结构所产生的不利影响; 楼板设计时, 加强薄弱区域剪切验算以及楼板风荷载组合工况验算。

关键词: 回字形平面; 超高层; 抗风设计; 剪力墙结构

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-848X(2024)S1-0887-05

Research on wind-resistant design of highrise structures with rectangular-ambulatory plane

HUANG Yuangen, CHEN Xiaohang, ZHOU Ding, JIANG Ke, CUI Jidong

(RBS Architecture Engineer Design Associate, Guangzhou 510170, China)

Abstract: Taking the example of a 178m high-rise shear-wall structure with rectangular-ambulatory plane in Zhanjiang, this study analyses the impact of multiple windward surfaces and internal pressure on the structure based on wind tunnel test results. At the same time, this paper focuses on elaborating the collaborative mechanism of plane deformation in super high-rise buildings with rectangular-ambulatory plane. The lateral stiffness of the structure in the weak axis is controlled by wind loads. Firstly, the comparison of lateral stiffness between isolated models of the divided planes is conducted to determine the strength difference. Then, the mechanism of coordination between horizontal/vertical deformation differences caused by lateral stiffness variation is analyzed. Finally, design recommendations are provided based on the internal force results of the components. The results indicate that the adverse effects of hollow internal pressure and multiple windward surfaces on the roof cannot be ignored in the design process; When designing the floor slab, strengthen the shear verification of weak areas and the verification of wind load combination conditions on the floor slab.

Keywords: rectangular-ambulatory plane; super high-rise building; wind-resistant design; shear-wall structure

0 引言

因回字形平面建筑具有较好通风采光优势, 在实际工程中常有应用。从结构角度, 回字形平面意味着存在楼板开洞, 若开洞尺寸或面积过大易引起一项平面不规则项。此外, 结构平面长宽比较大时两端贯通与中部开洞区域存在侧移刚度强弱关系, 在超高层结构中其差异尤为明显, 区域之间仅通过有限宽度楼盖相连, 变形协调机制尚不清晰, 故本文对此开展相应研究。

针对此类建筑, 林宝国等^[1-2]对高层回字形框架结构, 基于抗震计算以分析其整体协调能力; 张宏仁^[3]对回字形建筑物, 基于震害分析以及计算对比提出设计建议; 范士阔^[4]对不同结构体系的立面收进高层回字形建筑分析研究; 夏世群^[5]

等对角部重叠回字形山地建筑进行抗震分析。

本文以湛江某 178m 超高层回字形剪力墙结构为研究对象, 重点对风荷载下弱轴变形协调机制进行研究, 同时结合风洞试验给出设计建议。

1 工程概况

项目位于湛江市赤坎区某临内海区域, 塔楼建筑面积接近 8 万 m^2 , 地上 53 层, 地下 2 层, 结构高度 178m。塔楼主要功能为公寓, 底部裙房功能为商业, 在 13F、28F 和 44F 设置三个避难层。首层层高 5m, 标准层层高 3.1~3.3m。塔楼高宽比约为 5.7, 洞口从下至上完全贯通, 即屋顶中部仍保持开洞, 项目整体效果图如图 1 所示。

2 结构体系

综合建筑功能、结构可行性及经济性等要求,

第一作者: 黄元根, 硕士, 工程师, 主要从事结构设计工作, Email: huangyuangen@gzrbs.com。



图1 项目效果图

塔楼选用钢筋混凝土剪力墙结构体系,如图2所示。建筑平面长宽比接近2:1,楼面中部开洞后Y向弱轴侧移刚度为结构整体刚度控制因素,为提升抗侧效率,利用回字形平面特点在两侧楼板连续区域布置贯通剪力墙且墙体对齐,同时中部开洞区域在隔墙位置布置长墙,图3给出结构平面布置及开洞尺寸。为提升建筑品质,东南向望江大户型角部仅设置两圆柱,内走道与景观阳台采用挑梁形式。整个建筑立面无收进,结构竖向构件上下贯通。结构体型参数及构件尺寸见表1、2。

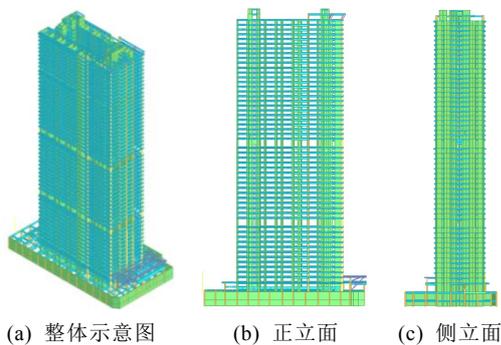


图2 结构整体模型

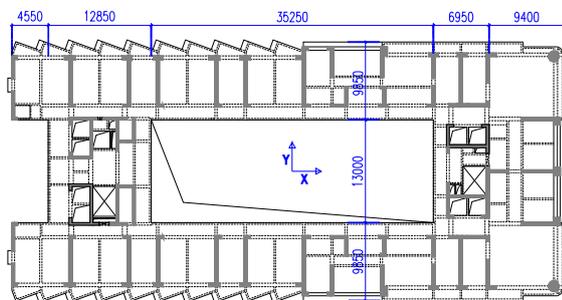


图3 标准层结构平面图

表1 塔楼体型

高度/m	178.4	外轮廓尺寸/m	66.9×32.8
总层数	53	高宽比	5.3
层高/m	6/3.5/3.1	长宽比	2.0

表2 构件截面

构件	构件尺寸/mm
剪力墙	600~200
框架柱	D1300~D700
连梁	墙厚×600~1200
楼板	100/120(楼板加强区域)

3 结构不规则性

(1) 高度超限: 结构高度 178m 大于钢筋混凝土抗震墙体系最大适用高度 120m。

(2) 平面不规则: X 向和 Y 向有效楼板宽度分别为 38%和 59%, 其中 X 向楼板开洞宽度 62%>50%, 楼面开洞面积为 21%<30%。

根据《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》^[6], 结构存在高度超限以及楼板不连续两项不规则项^[7], 属于超限高层建筑。

4 结构抗风设计

4.1 风荷载

本项目东南向临海, 周围分布高层建筑, 建筑分布及高度错综复杂且存在干扰效应, 引起场地风环境复杂; 在三个避难层取消隔墙和门窗等非结构构件以保持建筑通透性, 同时屋顶保持中部贯通开洞, 造成中空内风压不确定性以及屋顶临风面多样性; 此外, 结构高度大于 60m 属于风荷载敏感结构^[8], 风荷载参数取值直接影响结构设计; 综合以上因素, 本项目在广东省建筑科学集团股份有限公司风工程研究中心进行了风洞动态测压试验, 如图 4 所示, 塔楼模型采用 1:250 比例, 模拟周围 500m 范围内建筑, 基本风压按《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)^[8]取为 0.8kN/m²; 项目周围 360 度风向角范围内按每间隔 10 度进行一次测试, 共计 36 次; 根据远场地貌粗糙度分析结果, 0~30 度为 A 类地貌风剖面, 其余角度为 B 类地貌风剖面。



图4 风洞试验模型

风洞模型立面上共布置 14 道测压层, 考虑到中空内压复杂性以及屋顶多个临风面问题, 测压

层优先布置在避难层上下以及屋顶，其余等距布置，如图 5 所示，同时在结构平面周边及内侧均匀布置测压点，如图 6 所示。根据所有风向下风压峰值统计结果以及风洞试验与规范风荷载对比结果（图 7、8）可知：

(1) 中空内仅屋面局部测点存在正压且分布在东/南内侧，在出屋面结构/构架以及周围建筑影响下，屋顶个别风向角内外侧均存在临风面。

(2) 中空贯通内部上下均存在负压，除屋顶局部楼层外压力值相对稳定，其在薄弱楼板内侧产生吸力，结构设计时不可忽略。

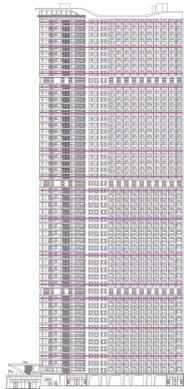


图 5 立面测点分布

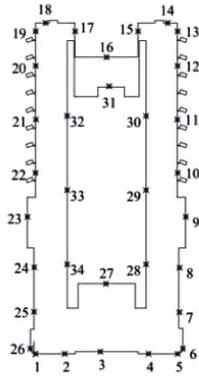
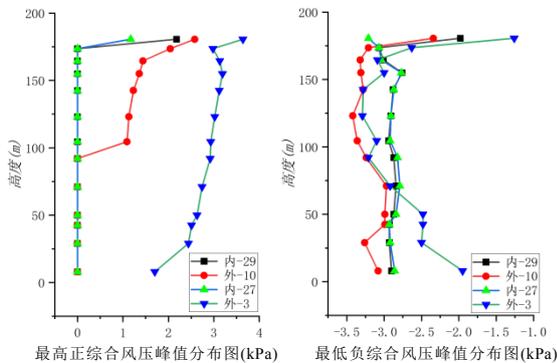
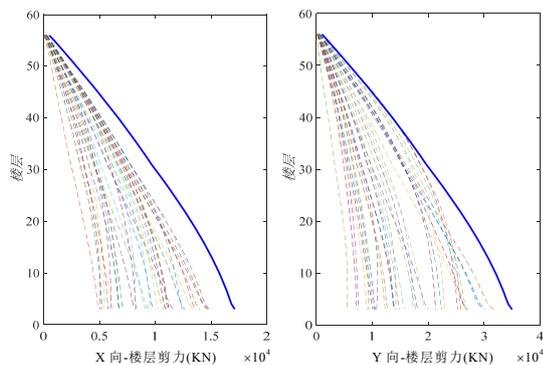


图 6 平面测点分布



注：外表示平面外围测点，内表示平面内侧测点
图 7 所有风向角下测点综合风压峰值



注：图中实线为规范风响应，虚线为 36 个风向角下风洞风响应
图 8 风洞试验与规范风荷载下楼层剪力对比

(3) 个别风洞风向角下顶部个别楼层剪力略大于规范风，两者最大差值 3%；表 3 中 X 向和 Y 向风洞风结构基底剪力和倾覆力矩均不小于规范风的 80%，可满足规范^[9]要求。

表 3 风洞试验和规范风荷载对比

风荷载	弯矩/ (kN·m)		剪力/kN	
	M_x	M_y	F_x	F_y
风洞试验	1529377	3275166	14887	31936
规范顺风向	1839660	3734621	17139	34990
比值	0.83	0.88	0.87	0.91

注：比值=风洞试验结构响应/规范顺风向结构响应。

4.2 楼板模拟对整体指标影响

考虑回字形平面开洞楼板宽度有限，为评估楼板模拟方法对结构整体指标影响程度，表 4 给出楼板采用刚性板和弹性板模拟计算结果。弹性板模拟比刚性板结构刚度略小，结构前三阶自振周期以及水平荷载下结构最大层间位移角均有所减小且幅度在 5% 以内，结构整体指标差异很小，两种楼板模拟形式均满足规范^[8,10]要求。

表 4 塔楼整体指标

整体指标		刚性板	弹性板	弹/刚
自振周期/s	T1(X 向平动)	4.08	4.09	1.00
	T2(Y 向平动)	3.98	4.04	1.02
	T3(扭转)	3.24	3.29	1.02
水平地震作用基底剪力/kN	X 向	19253	19241	1.00
	Y 向	19635	19428	0.99
风荷载基底剪力/kN	X 向	17230	17230	1.00
	Y 向	35394	35394	1.00
水平地震作用倾覆力矩/(kN·m)	X 向	2025312	2035531	0.99
	Y 向	1942495	1947222	1.00
风荷载倾覆力矩/(kN·m)	X 向	1863268	1863268	1.00
	Y 向	3836066	3836066	1.00
风荷载最大层间位移角(限值 1/684)	X 向	1/1515(22F)	1/1501(22F)	1.01
	Y 向	1/723(37F)	1/687(37F)	1.05
水平地震作用最大层间位移角(限值 1/684)	X 向	1/1238(24F)	1/1235(24F)	1.00
	Y 向	1/1196(34F)	1/1160(34F)	1.03

4.3 结构隔离体模型

根据结构弱轴变形特点，将回字型平面切分为四个区域且不考虑区域间协调变形，分别命名为区域 1、区域 2A/2B 和区域 3，如图 9 所示。表 5 给出各区域隔离体结构响应结果，可知：

(1) 相比两侧区域，中部区域迎风面和背风面体型系数偏小，但迎风面宽度偏大，区域间风外力大小较为接近，基底剪力最大差异 25%。

(2) 基于竖向弯曲悬臂梁假定以及倒三角侧向荷载条件^[10]下，侧移刚度与顶点位移之间为反

比例关系,由此推算中部与两侧之间侧移刚度比在16~18之间,楼板开洞引起区域间刚度差异明显。

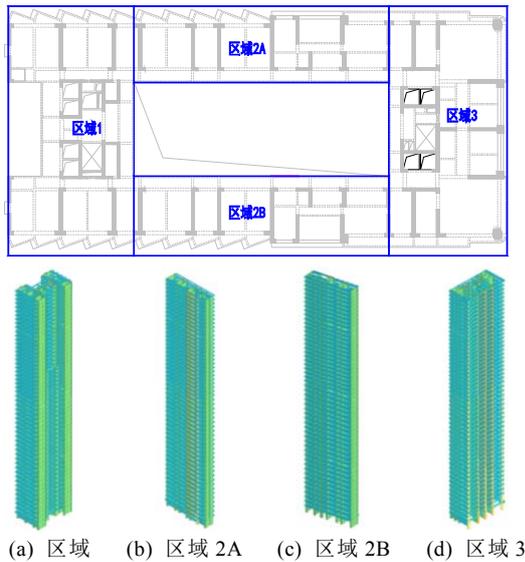


图9 隔离体模型

表5 +Y向规范风荷载下隔离体区域基底剪力和顶部侧移

区域	迎风面宽度/m	体型系数	迎风面宽度×体型系数	基底剪力/kN	顶部侧移/mm
1	18.9	1.4	26.5	9677	109
2A	35.0	0.8	28	10265	2098
2B	35.0	0.6	21	7699	1573
3	15.8	1.4	22.2	8669	103

注:区域2A/2B体型系数未考虑中空负压影响。

4.4 楼盖平面内变形协同机制

两侧连通区域与中部区域组成整体结构时,水平荷载下区域间侧移刚度差异产生了水平变形差,楼盖通过变形协调将部分荷载由中部传递至两侧,在此过程中区域间楼面梁和相邻楼板保证传力可靠性,在区域边界选取附近墙体端部作为变形监测点,如图10所示。楼板采用弹性板模拟,

表6给出节点间水平变形差及变形角结果,可知:
(1)节点间变形差/变形角均随楼层增高而增大,在中高区增速放缓,楼板最大剪切应力水平约1.2MPa。

(2)楼层节点2-3与节点3-4间变形角基本接近,楼板水平变形均匀,边界跨未出现变形集中。

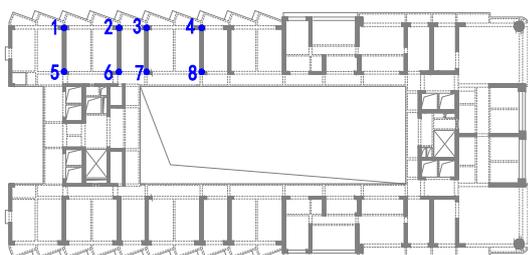


图10 楼面变形监测点示意

表6 +Y向风荷载下监测点水平变形差/变形角

位置	距离L	类型	5层	15层	25层	35层
1-2	7.3	△	0.1	0.9	1.8	2.6
		△/L	1.37×10^{-5}	1.23×10^{-4}	2.47×10^{-4}	3.56×10^{-4}
2-3	3.6	△	0.2	0.5	0.8	1.2
		△/L	5.56×10^{-5}	1.39×10^{-4}	2.22×10^{-4}	3.33×10^{-4}
3-4	7.3	△	0.4	1.0	1.5	2.4
		△/L	5.48×10^{-5}	1.37×10^{-4}	2.05×10^{-4}	3.29×10^{-4}
5-6	7.3	△	0.1	0.9	1.8	2.6
		△/L	1.37×10^{-5}	1.23×10^{-4}	2.47×10^{-4}	3.56×10^{-4}
6-7	3.6	△	0.2	0.5	0.8	1.2
		△/L	5.56×10^{-5}	1.39×10^{-4}	2.22×10^{-4}	3.33×10^{-4}
7-8	7.3	△	0.4	1.0	1.5	2.4
		△/L	5.48×10^{-5}	1.37×10^{-4}	2.05×10^{-4}	3.29×10^{-4}

注:△为节点间变形差,单位为mm,L为节点间距离,单位为m。

4.5 楼盖平面外变形协同机制

塔楼高宽比接近6,结构侧向变形以弯曲变形为主。若将结构平面按5.3节切分,各区域隔离体均绕自身中性轴弯曲变形,如图11所示,在组成整体结构时,中部被两侧带动弯曲变形,其中性轴从平面端部转移至中部,中部墙体变形特性发生变化,结构整体竖向变形如图12所示。以上变形特征可从表7墙肢内力结果反映出来,楼层剪力主要由两侧墙体承担,中部墙体在两侧墙体带动下参与结构整体抗倾覆,墙肢内力以轴向拉/压为主,且墙肢与两侧墙体越近,轴力越大。

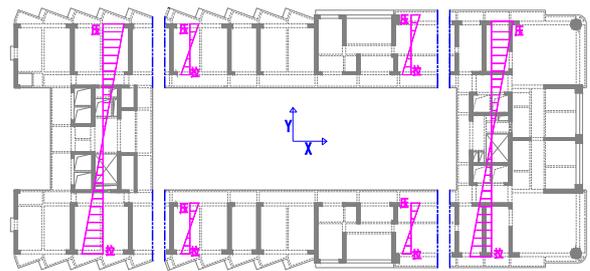


图11 +Y向风荷载隔离体变形模式

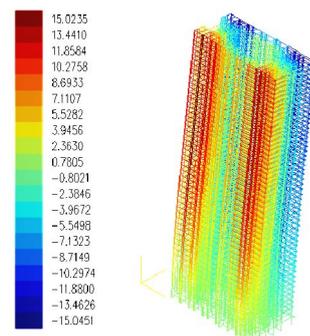


图12 结构整体竖向变形云图/mm

表7 +Y向规范风荷载下墙肢内力/kN

墙体编号	力类型	5层	15层	25层	35层
A	轴力	13669	7576	3530	2235
	剪力	1508	1248	897	713
B	轴力	10184	6493	3413	2132
	剪力	1262	1243	1054	910
C	轴力	7166	5279	3105	2165
	剪力	385	139	91	68
D	轴力	1630	1792	1477	1209
	剪力	379	106	30	3
E	轴力	1363	1527	1278	1090
	剪力	376	88	29	3

按图10所示选取竖向变形监测点位置,基于典型楼层关键节点竖向变形差/变形角统计结果(其中变形角为变形差与板跨度比值),节点间竖向变形差呈现越高越大的规律且增速逐步放缓,同时中高区楼板面外弯矩变化与上述规律一致,边界跨最大弯曲应力约1.4MPa,其余区域均小于1MPa;根据表8统计结果,同一楼层竖向变形角由大至小依次排列为节点2-3、节点1-2和节点3-4,整体呈现边界跨最大、相邻跨逐步减小的现象,表明竖向协调变形相对集中在区域边界。

基于考虑面外变形的弹性板模拟计算,表9给

表8 +Y向规范风楼板平面外竖向变形差及变形角

位置	距离L	类型	5层	15层	25层	35层
1-2	7.3	△	0.51	1.34	1.62	1.64
		△/L	6.99×10^{-5}	1.84×10^{-4}	2.22×10^{-4}	2.25×10^{-4}
2-3	3.6	△	0.75	1.61	1.89	1.77
		△/L	2.08×10^{-4}	4.47×10^{-4}	5.25×10^{-4}	4.92×10^{-4}
3-4	7.3	△	1.19	3.03	4.39	5.00
		△/L	1.63×10^{-4}	4.15×10^{-4}	6.01×10^{-4}	6.85×10^{-4}
5-6	7.3	△	0.51	1.26	1.50	1.52
		△/L	6.99×10^{-5}	1.73×10^{-4}	2.05×10^{-4}	2.08×10^{-4}
6-7	3.6	△	0.88	1.79	2.08	1.91
		△/L	2.44×10^{-4}	4.97×10^{-4}	5.78×10^{-4}	5.31×10^{-4}
7-8	7.3	△	1.13	2.96	4.31	4.92
		△/L	1.55×10^{-4}	4.05×10^{-4}	5.90×10^{-4}	6.74×10^{-4}

注:△为节点间变形差,单位为mm,L为节点间距离,单位为m。

表9 +Y向规范风楼板平面外弯矩/(kN·m)

板端位置	组合	5层	15层	25层	35层
A _#	Comb1	9.37	9.75	9.81	9.88
	Comb2	9.0			
B _#	Comb1	10.38	11.11	11.12	11.01
	Comb2	9.7			
C _#	Comb1	9.79	10.32	10.42	10.32
	Comb2	9.3			
D _#	Comb1	9.45	9.89	10.21	10.35
	Comb2	9.2			

注:工况组合Comb1为1.3恒+1.5活+0.99风,工况组合Comb2为1.3恒+1.5活。

出最不利风荷载组合工况与重力荷载组合工况下楼板端部弯矩对比结果,由此可知楼板设计时仅按重力组合工况偏于不安全,在边界跨及相邻板跨,两者最大差值约20%,设计时加以注意。

5 结论

(1)以某湛江超高层回字形结构为例,以平面洞口上下贯通以及立面部分开敞为特点,风洞试验结果表明不可忽略中空内压对薄弱板带影响,此外对屋顶临风面进行分析评估,为此类结构的风荷载参数取值提供一定参考。

(2)弱轴侧移刚度控制的回字形平面,往往两侧与中部区域间刚度差异明显,风荷载作用下由楼盖协调变形。对楼盖平面内变形,加强楼板剪切应力验算;对楼盖平面外变形,楼板设计注意考虑风荷载组合工况。

(3)结构整体指标计算可采用刚性板假定;结构构件计算需采用弹性板模拟,以考虑楼板平面外变形影响。

参 考 文 献

- [1] 林宝新,张瑞.某平面回字形高层框架结构的抗震性能分析[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2014,22(2):13-18.
- [2] 白晓红,白国良.某平面回字形高层框架结构的抗震性能分析化[J].安徽建筑工业学报,2014,22(2):13-18
- [3] 张宏仁,侯杰.“九寨沟8·8地震”中某回字形平面建筑物的震害分析及结构抗震设计浅论[J].四川建筑,2018,38(5):139-141.
- [4] 范士阔.某回字形平面带桁架且超长结构的优化设计研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [5] 夏世群,戴西行,张光义,等.回字形环山地建筑结构设计[J].建筑结构,2021,51(12):38-43,48.
- [6] 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[A].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2015.
- [7] 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [8] 建筑结构荷载规范:GB50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [9] 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.
- [10] 傅学怡.实用高层建筑结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2010