

# 百米级超限高层住宅装配式剪力墙结构设计

钱耀华 芮静文

上海建筑设计研究院有限公司 上海 200041

**摘要:**上海市某百米级超限高层剪力墙住宅项目,最大高度为97m,地上最高31层,地下室三层。塔楼为装配式整体剪力墙结构,存在预制结构高度超限、结构平面不规则、高得房率要求等问题,通过优化结构平面布置、采用高强混凝土材料(C60~C40),百米级住宅塔楼剪力墙典型厚度做到200mm,剪力墙墙率控制在5%~5.5%,有效地提升得房率,增加住宅的经济性。抗震设计方面,通过YJK和ETABS两种不同软件对比,验证了力学分析结构的可靠性。结构整体抗震新能目标设定为D级,对各栋塔楼进行静力弹塑性分析,分析结构性能点的变形、损伤顺序与程度,确保满足“两阶段”和“三水准”的设计要求。针对装配式结构的特点采取“计算分析+构造加强”相结合的措施,确保装配方案的合理性与安全性。

**关键词:**装配式住宅;抗震性能化设计;装配式整体剪力墙;剪力墙墙率

## 1 工程概况

项目位于上海市静安区,该地块是南静安片区仅有的待开发成片商住办公综合地块,随着闸北、静安两区“撤二建一”后,新静安版图的延伸,该地块所处的苏州河“一河两岸”区域将成为新静安的核心区域之一。本项目拟建一幢160米高办公塔楼(办公为主,少量商业),六幢地面上相互独立的住宅楼32米~97米高,以及三层地下室,埋深15米~17米,其中地下一层为商业/地下车库,地下二层、三层为地下车库和设备用房,人防区域位于地下三层和地下二层部分区域<sup>[1]</sup>。

本文主要分析研究1#楼~4#楼,6#楼住宅主体结构。其中最高的是6#楼,建筑高度97.2m,4#楼高度91m;1#楼建筑高度77.5m,2#3#楼轴对称,建筑高度64.05m,建筑层数20~31层。

项目设计基准期为50年,建筑结构的安全等级为二级,地区抗震设防烈度为7度(0.10g)。1#楼、4#楼、6#楼剪力墙抗震等级二级(B1层以下逐层降低),2#楼、3#楼抗震等级三级(B1层以下逐层降低)。抗震设防类别为丙类,设计地震分组为第二组,场地类别为IV类,特征周期为0.9s,地面粗糙度为D类。本项目住宅塔楼高度均大于60m,承载力校核时,风荷载按照1.1倍基本风压计算,建筑50年一遇基本风压为0.61 kN/m<sup>2</sup>。

## 2 基础设计

基础采用钻孔灌注桩基础,由于1#~4#、6#住宅塔楼荷载较大,结合桩的平面布置、沉降、筏板造价等各方面因素,持力层选择在承载力较高的⑨1层土(灰色粉砂),灌注桩主要直径为800mm,单桩抗压承载力特征值为5160kN;纯地下室区域仅三层,所以此区域的桩基设计原则应由抗浮工况控制。该区域以⑦2灰黄色粉砂为持力层,灌注桩主要直径为600mm,在桩身长度保持一致的情况下直径越小,抗拔桩经济性较好,单桩承载力特征值为660kN。

地下室主要采用现浇钢筋混凝土框架结构,层数三层,梁板结构可以更好地提供灵活的开洞条件,且具有很好的刚度条件,可作为嵌固层楼面。因此,地下室顶板层可以采用现浇混凝土梁板结构,按照《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)嵌固要求,室内板厚取180mm,室外板厚取250mm。地下室外墙、底板按照规范要求采用P8抗渗混凝土<sup>[2]</sup>。

## 3 结构体系设计

### 3.1 建筑特点与结构体系

根据建筑的使用功能,预制装配式率等要求,住宅塔楼体系均采用装配整体式剪力墙结构体系。

钢筋混凝土剪力墙抗侧力体系因其建筑布局灵活性而被采用在本项目中。结构竖向荷载、水平荷载由楼面系统均匀地传递给剪力墙竖向构件,逐层传递至基础构件。

表1 塔楼主要参数表

楼号		1#	2/3#	4#	6#
结构体系		装配式整体剪力墙			
高度	总高	77.50m	64.05m	91m	97.2m
	级别	A级	A级	A级	A级

续表:

标准层平面尺寸 (m)	50.6x 17.6	28.7x15.75	21 x 17.3	22.2 x 16.5
结构高宽比	4.4	4.1	5.3	5.9
底部加强区	L1-L3	L1-L2	L1-L3	L1-L3
标准层墙率	5.50	5.34	5.20	5.55

由于住宅品质及得房率要求很高,因此剪力墙的厚度与布置是本项目重点研究内容,剪力墙通过优化结构平面布置、采用高强混凝土材料(C60~C40),百米级住宅塔楼剪力墙典型厚度做到200mm,低区首层局部剪力墙增厚至250mm或300mm,通过设置翼墙等措施满足墙肢稳定性要求。剪力墙墙率控制在5%~5.5%,有效提升住宅的得房率,增加住宅的经济性。各塔楼主要信息见表1所示。

关于2#、3#、4#、6#塔楼,设置设备夹层(-1.650标高),合并设备夹层和首层,首层层高按5.850m考虑。标高0.000楼板与结构主体竖向构件不相连,其目的是为了不传递水平荷载到竖向构件,仅作为荷载进行结构分析。结构上对0.00标高楼板/梁与墙周围留出约50mm空间。

### 3.2 结构超限判断与抗震性能目标

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-

2010),剪力墙结构在7度区的最大适用高度为120m。根据上海市沪建管【2014】954号文规定,本项目7度区装配式整体剪力墙结构塔楼屋面高度均大于60m,因此属于高度超限结构<sup>[3]</sup>。本工程5幢住宅存在以下不规则项,具体如下:

- 1) 1#4#塔楼位移比超过1.2,属于扭转不规则;
- 2) 2#3#塔楼偏心率大于15%限值,属于偏心布置超限;
- 3) 1#塔楼存在凹进深度,属于凹凸不规则;
- 4) 1#塔楼大堂跨两层高,二层楼板开洞有效宽度超限,属于楼板不连续;
- 5) 2#~4#、6#塔楼首层与二层剪切刚度比值小于上海规范限值,属于刚度不规则;

根据本建筑超限情况、结构特点和社会影响,以4#塔楼为例,结构整体抗震性能目标确定为D级<sup>[4]</sup>,主要构件的抗震性能目标如表2所示。

表2 结构抗震性能目标

抗震烈度		多遇地震	设防地震	罕遇地震
层间位移角限值		1/1000	-	1/120
关键构件	底部加强区剪力墙	弹性	抗剪不屈服	大震下满足剪压比要求,允许进入塑性
普通构件	底部加强区以上剪力墙	弹性	允许进入塑性	允许进入塑性,控制混凝土压应变和钢筋的拉应变在极限应变内
耗能构件	连梁/框架梁	弹性	允许进入塑性	允许进入塑性,破坏程度可修复并保证生命安全

## 4 结构计算与分析

### 4.1 多遇地震分析结果

本工程采用YJK软件为建筑结构设计软件为主要分析

软件,ETABS软件作为另一种力学模型进行结构内力、位移计算。图1为以4#塔楼的结构计算模型,表3为两个软件主要计算结果对比。

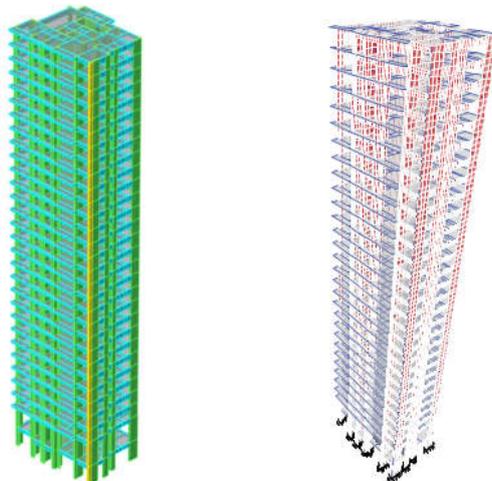


图1 4#塔楼结构计算模型(左:YJK;右:ETABS)

表3 4#塔楼小震弹性主要计算结果汇总

计算软件		YJK	ETABS	限值
结构前三 自振周期/s 及平动系数	T1	2.51、1.0	2.388、1.0	前两周期宜为平动
	T2	2.31、1.0	2.167、1.0	
	T3	1.53、0.0	1.320、0.0	
扭转/平动周期T3/T1		0.61	0.55	≤ 0.85
最大位移/层平均位移		1.10(X)1.22(Y)	1.19(X)1.23(Y)	≤ 1.4
最大层间位移/平均层间位移		1.23(X)1.16(Y)	1.24(X)1.20(Y)	≤ 1.4
X、Y向底层剪重比		2.723、2.67%	2.78、2.73%	抗规5.2.5
地震最大层间位移角及楼层	X向	1/1034(19层)	1/1036(20层)	≤ 1/1000
	Y向	1/1022(17层)	1/1059(21层)	
风荷载最大层间位移角及楼层	X向	1/3172(16层)	1/3231(17层)	≤ 1/1000
	Y向	1/2650(14层)	1/2739(18层)	
X、Y向地震基底剪力(kN)		4211、4130	4379、4300	
X、Y向受剪承载力比		1.0、0.97	1.0、0.97	≥ 0.80
结构总重量/t		16147.1	15753.4	

根据表4的计算结果，YJK与ETABS两种模型的计算结果指标基本一致，位移角、周期比、受剪承载力等均符合规范要求，符合小震的弹性的要求。

#### 4.2 罕遇地震分析结果

对各塔楼采用静力时程弹塑性分析方法，验算结构在罕遇地震作用下的抗震性能是否满足结构“大震不

倒”的抗震设防目标。

根据能力谱与需求谱曲线分析结果表明，4#塔楼能达到罕遇地震作用下，性能点层间位移角最大为1/198，均小于1/120的规范限值，符合《高层建筑混凝土结构工程》第3.7.5条的规定。

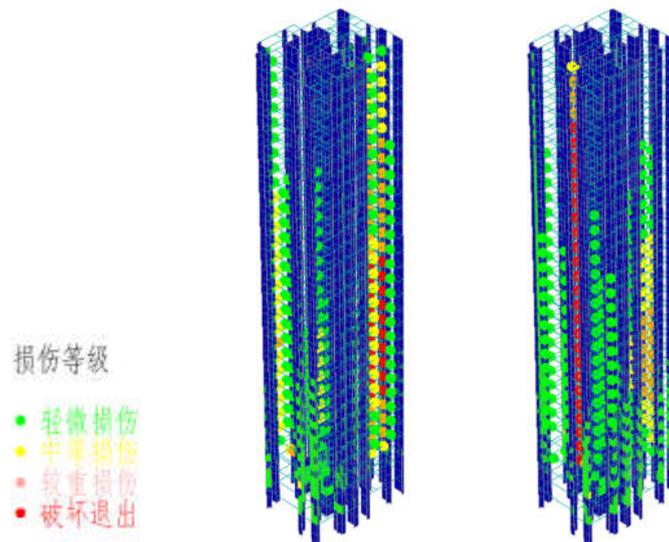


图2 X+、Y+方向推覆性能状态

图2反映了4#塔楼性能点时出现的塑性铰，在X、Y向推覆下的结构损伤顺序基本相同，塑性铰首先出现在剪力墙墙体的连梁上，随着荷载的增加，部分与剪力墙相连的框架梁梁端部出现塑性铰。下部部分的墙体局部发生开裂，但损伤有限。剪力墙抗震概念设计的第一道

防线是连梁，先开始出现塑性铰，在大震下剪力墙是保证结构安全的第二道安全防线。

综上所述，大部分核心筒连梁都形成了弯曲塑性铰，起到了关键的耗能作用，保证了结构的延性。各楼剪力墙在性能点处仅出现轻微损伤，轻微损伤剪力墙

主要位于结构底部。各构件完全达到了抗震性能目标要求，结构实现了大震不倒的设计要求。

## 5 预制装配式结构设计

### 5.1 预制装配式方案与预制率计算

本工程住宅部分采用装配整体式剪力墙结构，预制构件拆分原则按有外架考虑，重量原则不超过5t。

预制率计算采用沪建建材(2016)601号文方法一计算，PC构件包括：预制剪力墙、预制围护墙、预制叠合板、预制楼梯。单体预制率为40.50%~41.11%。

### 5.2 预制剪力墙倾覆力矩及墙肢拉应力分析

根据《上海建筑抗震设计规程》(DGJ08-9-2013) 7.1.2条，规定水平力下结构预制墙承受的地震倾覆力矩与结构总倾覆力矩的比值如表6所示。预制剪力墙部分预制剪力墙所占的倾覆力矩大于结构总倾覆力矩的40%，为预制混凝土结构。

选取预制剪力墙与现浇剪力墙连接处，计算墙肢于小震工况下(考虑双向地震)的平均拉应力，宜控制 $1.0(DL + SDL) + 0.5LL \pm 1.0 E$ (小震)工况下预制剪力墙与现浇剪力墙连接处不出现拉应力，个别墙肢拉应力与混凝土抗拉强度标准值的比值最大值不超过0.2。

### 5.3 装配式结构设计要点与加强措施

本工程是预制墙与现浇墙并存的装配整体式剪力墙结构，现浇墙肢的水平地震作用弯矩和剪力乘以1.1的放大系数。

预制剪力墙竖向钢筋连接采用灌浆套筒，水平钢筋在套筒及套筒上方300mm范围内加密。预制剪力墙的侧面留设键槽、顶面和底面留设粗糙面与现浇混凝土连接，加强结构整体性。

预制楼梯两端采用固定铰支座与梯梁连接，梯段侧边通过拉杆与剪力墙铰接。钢筋套筒灌浆前，应在现场模拟构件连接接头的灌浆方式，每种规格钢筋制作不少于3个套筒灌浆连接接头，进行灌注质量以及接头抗拉强度的检验；经检验合格后，方可进行灌浆作业。

抗震方面装配式结构采取的措施如下：

(1) 对结构底部加强区竖向构件、屋面板及楼电梯间四周剪力墙尽量采用现浇的方式施工，提高结构的整体性<sup>[5]</sup>。

(2) 对暗柱尽量采用现浇的方式施工，保证预制剪力墙在小震下不出现偏拉；对预制墙板的水平缝采取构造加强。

(3) 墙体连接构造设计严格按装配式规范执行，同时加强施工要求管控，保证构件连接的可靠性。剪力墙预制部分竖钢筋采用全灌浆套筒连接。

(4) 对现浇墙体按多遇地震作用放大1.1倍进行竖向构件设计，提高现浇墙段的安全储备。

## 6 结论

本工程住宅塔楼采用较为成熟并被广泛采用的剪力墙抗侧力体系，弹性分析结果表明，整体结构均能满足风荷载及地震作用下的刚度要求。通过采用高强混凝土材料(C60~C40)，百米级住宅塔楼剪力墙典型厚度做到200mm，剪力墙墙率控制在5%~5.5%，有效提升住宅的得房率，增加住宅的经济性。

结构整体设计采用常规的设计方法进行设计，部分构件采用基于性能的抗震设计方法进行设计，满足“两阶段”和“三水准”的设计要求。针对装配式结构的特点采取“计算分析+构造加强”相结合的措施，确保装配方案的合理性与安全性。

## 参考文献

- [1] 静安72号街坊商住办新建项目超限高层抗震审查报告, 2019.12
- [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] 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,2010.
- [4] 杨杰,樊云龙,王毓麟.某大高宽比剪力墙结构超高层建筑抗震性能分析[J].建筑结构,2015,45(07):48-54+63.
- [5] 刘开强,蒋媛.某较大高宽比超高层住宅结构设计常见问题及对策研究[J].建筑结构,2020,50(S2):8-12.