

上海某超限高层建筑的结构分析及其措施

陈 嫣¹, 陈有亮¹, 陈 璞²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041)

摘要: 超限高层结构在某一方面或多个方面存在与抗震概念设计不相符合的情况. 塔楼存在扭转不规则、楼板不连续、塔楼偏置等问题, 属于超限高层. 本项目采用 SATWE 和 PMSAP 两个不同力学模型, 对上海浦东新区某高层建筑的塔楼进行计算和对比分析. 结果表明, 两种模型计算得出的结构指标基本一致, 刚重比、周期比、剪重比等均满足规范要求, 并针对塔楼扭转不规则、偏心布置、楼板不连续、体型收进、超长结构等超限情况给出了具体措施.

关键词: 超限高层建筑; 结构体系; 扭转不规则; 塔楼偏置; 楼板不连续

中图分类号: TU 973

文献标志码: A

Structural Analysis and Measures for an Out-of-code Super High-rise Building in Shanghai

CHEN Yan¹, CHEN Youliang¹, CHEN Ying²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Institute of Shanghai Architectural Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract: Out-of-code super high-rise buildings generally in one or some pects do not conform to the seismic concept design. The tower of such structures usually is of the features of torsional irregularity, tower bias, floor discontinuities, etc. The analysis of a certain out-of-code super high-rise building in Shanghai was carried out by using the programs of SATWE and PMSAP. The results show that the structural parameters calculated by either program are basically the same. The parameters of rigidity-weight ratio, period ratio and shear-weight ratio satisfy the requirements of the codes. Detailed measures were provided aiming at dealing with the out-of-code factors, such as the torsional irregularity, tower bias, floor discontinuities, setback and super-long structure.

Keywords: out-of-code super high-rise building; structural system; torsional irregularity; tower bias; floor discontinuities

收稿日期: 2017-06-24

第一作者: 陈 嫣(1993-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 高层结构. E-mail: chinecy@foxmail.com

通信作者: 陈有亮(1966-), 男, 教授. 研究方向: 岩土和混凝土材料力学性能研究. E-mail: chenyouliang@yahoo.com.cn

1 工程概况

本项目位于上海浦东新区,北临耀体路,东临平家桥路,用地面积 $14\,679.1\text{ m}^2$,地上总建筑面积 $88\,791.4\text{ m}^2$,地下总建筑面积 $38\,083.6\text{ m}^2$. 本项目的地块平面如图 1 所示,主要由塔楼 T3、T4 及其裙楼组成,形成大底盘双塔楼的高层结构. 塔楼 T3 地上主体结构 15 层、地下 3 层,结构主屋面高度为 66.00 m ;塔楼 T4 地上主体结构 24 层、地下 3 层,结构主屋面高度为 106.50 m . 塔楼 T3 和 T4 由位于裙楼的抗震缝分开,抗震缝宽度为 150 mm . 塔楼采用钢筋混凝土框架—核心筒结构. 本文对塔楼 T4 进行超限分析及论述.

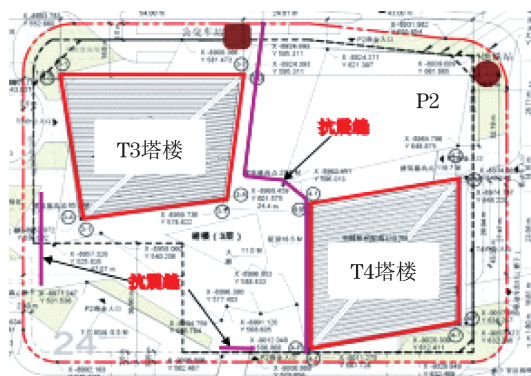


图 1 本项目地块平面

Fig.1 Plot plan

2 有关设计计算指标和参数取值

a. 设计使用年限及结构安全等级:本工程设计使用年限为 50 年. 裙楼地下一层及塔楼的一至四层的建筑结构安全等级为一级,建筑抗震设防类别为标准设防类(乙类);塔楼五层及以上的建筑结构安全等级为二级,建筑抗震设防类别为标准设防类(丙类).

b. 基本风压:50 年重现期的基本风压为 0.55 kN/m^2 . 根据《高层建筑混凝土结构技术规程》^[1],本塔楼工程结构超过 60 m ,属于对风荷载较敏感的高层建筑,风荷载按照 1.1 倍基本风压进行计算. 地面粗糙程度为 C 类.

c. 设防烈度:本工程设计采用的基本地震加速度值为 0.10 g (相当于抗震设防烈度 7 度),设计地震分组为第二组,水平地震影响系数最大值在多遇地震时取 0.08 ,在罕遇地震时取 0.50 ,场地类别为 IV.

3 结构抗震性能目标

本项目的抗侧力体系为:框架—核心筒. 核心筒剪力墙作为最重要的抗震防线,承担大部分的水平剪力及倾覆弯矩. 布置于周边的框架结构也为整体结构提供了较大的抗剪及抗弯刚度. 通过混凝土楼板相连,核心筒剪力墙与框架共同工作,以控制层间位移,满足规范对层间位移角的限值. 结构分别采用 SATWE 和 PMSAP 两种不同力学模型的三维空间分析软件进行整体计算,采用弹性方法计算结构荷载和多遇地震作用下内力和位移,并考虑 $P-\Delta$ 效应,采用弹性时程分析法进行补充验算. 图 2 为塔楼 T4 的计算模型.

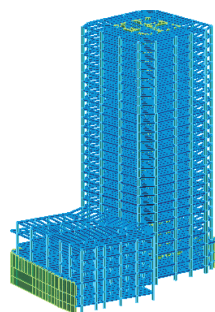


图 2 3D 计算模型

Fig.2 3D computing model

a. 楼板分析设计的目标.

多遇地震下(小震),框架梁处于偏心受拉工作状态,按偏心受拉构件进行设计,根据地震作用下,弯矩、轴力通过承载力计算确定梁内的纵筋,同时满足正常使用状态下最大裂缝宽度 $w_{\max} < 0.3\text{ mm}$ 的要求. 设防烈度地震下(中震),通过承载力计算,梁内配置足够的钢筋以满足中震钢筋不屈服.

为满足规范^[2-9]对楼层位移角的要求,结构将用表 1 层间位移角限值设计.

表 1 层间位移角限值

Tab.1 Limit value of the story drift ratio

设计项目	层间位移角限值
重现期为 50 年的风荷载作用下的层间	1/800
重现期为 50 年的风荷载作用下 嵌固端上一层塔楼层间	1/2 000
多遇地震作用下的层间	1/800
多遇地震作用下嵌固端上一层塔楼层间	1/2 000

b. 为满足规范^[2-9]对楼层位移角的要求,混凝土结构将用表 2 受弯挠度限值设计. 混凝土受弯构件的挠度应按荷载效应的准永久组合并考虑荷载长期作用影响进行计算. 其中 l_0 为混凝土受弯构件跨度.

表 2 混凝土结构受弯挠度限值

Tab.2 Bending deflection limit value of the concrete structure

构件计算跨度 l_0 /m	受弯挠度限值/mm
$l_0 < 7$	$l_0/200$
$7 \leq l_0 \leq 9$	$l_0/250$
$l_0 > 9$	$l_0/300$

c. 为满足规范^[2-9]对楼层位移角的要求,钢结构将用表 3 受弯挠度限值设计. 其中 l 为受弯构件跨度,悬臂梁为悬伸长度的 2 倍.

表 3 钢结构受弯挠度限值

Tab.3 Bending deflection limit value of the steel structure

	永久荷载 + 可变荷载下的 受弯挠度限值 l /mm	可变荷载受 弯挠度限值 l /mm
主梁/桁架	400	500
其他	250	350

表 4 T4 塔楼结构一般规则性超限检查

Tab.4 General regularity transfinite checks of the T4 structure

序号	不规则类型	判断依据	超限判断	备注
1a	扭转不规则	考虑偶然偏心的扭转位移比大于 1.2	超限	
1b	偏心布置	偏心率大于 0.15 或相邻层质心相差大于相应边长 15%	超限	
2a	凹凸不规则	平面凹凸尺寸大于相应边长的 30%	未超限	
2b	组合平面	细腰型或角部重叠型	未超限	
3	楼板不连续	有效宽度小于 50%, 平面面积大于 30%, 错层大于梁高	超限	
4a	刚度突变	相邻层刚度变化大于 70%	未超限	具有 4 项 不规则的 高层建筑
4b	尺寸突变	竖向构件收进位置高于结构高度 20% 且收进大于 25%, 外挑大于 10% 和 4 m	未超限	
5	构件间断	上下墙、柱、支撑不连续, 含加强层、连体类	未超限	
6	承载力突变	相邻层受剪承载力变化大于 80%	未超限	
7	局部不规则	如局部的穿层柱、斜柱、夹层、个别构件错层或转换, 或个别楼层扭转位移比略大于 1.2 等	超限	

表 5 T4 塔楼结构严重规则性超限检查

Tab.5 Serious regularity transfinite checks for the T4 structure

序号	项目	判断依据	超限判断	备注
1	扭转偏大	裙楼以上的较多楼层考虑偶然偏心的扭转位移比大于 1.4	无	
2	扭转刚度弱	扭转周期比大于 0.9, 超过 A 级高度①的结构扭转周期比大于 0.85	无	
3	层刚度偏小	本层侧向刚度小于相邻上层的 50%	无	
4	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的 20%	有	有 1 项 严重 不规则
5	高位转换	框支转换构件位置: 7 度时超过 5 层, 8 度超过 3 层	无	
6	厚板转换	7~9 度设防的厚板转换结构	无	
7	复杂连接	各部分层数、刚度、布置不同的错层, 连体两端塔楼高度、体型或沿 大底盘某个主轴方向的振动周期显著不同的结构	无	
8	多重复杂	结构同时具有转换层、加强层、错层、连体和多塔等复杂类型的 3 种	无	

4 超限判断

4.1 超限判断

对照《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》^[11], 本项目存在扭转不规则、偏心布置、楼板不连续、尺寸突变、局部穿层柱等多项不规则类型. 其结构超限判断如表 4 和表 5 所示. 本项目属于 A 级高度的高层建筑. 根据《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》, 对于 7 度抗震设防烈度区 ($0.10 g$), 采用框架—核心筒体系时, 建筑高度小于 130 m 为 A 级建筑.

表 4 中可知, 裙楼以上部分的最大扭转位移比为 1.29, 含裙楼部分的最大扭转位移比为 1.41, 属扭转不规则超限. 4 层以上塔楼偏心率小于 0.15; 2~4 层由于裙楼偏置, 偏心率大于 0.15 (最大偏心率在 2 层

为 0.16)。裙楼层面缩进处,塔楼上部质心与下部底盘的质心差与底盘相应边长的比值分别为 3.2% 和 24.1%,属偏心布置超限.建筑二、三层存在平面开洞,属楼板不连续超限.塔楼不发生尺寸突变,尽管裙楼屋面收进尺寸大于 25%,裙楼高度为塔楼高度的 15.5%.局部有穿层柱,属局部不规则超限.

5 超限设计的措施和对策

本项目采用了两个不同力学模型的结构分析软件(SATWE,PMSAP)进行了整体计算分析,以保证力学分析的可靠性.从其后的分析结果可知,PMSAP 和 SATWE 的分析结果基本一致.

5.1 针对扭转不规则的措施

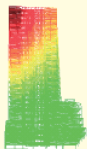
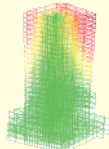
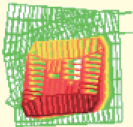
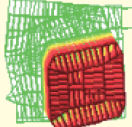
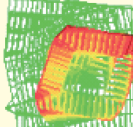
高层建筑扭转不规则的判断,主要从刚重比、周期比、位移比、剪重比等方面考虑^[12].结构高度越高,平面扭转效应的控制越严.《高层建筑混凝土结构技术规程》中 3.4.5 条规定^[1],一般情况下,应控制各楼层,考虑偶然偏心的扭转位移比不大于 1.5.

结构扭转为主的第一振型周期 T_t 与平动为主的第一振型周期 T_1 之比,A 级高度高层建筑不应大于 0.9.《高层建筑混凝土结构技术规程》中 5.3.7 条规定^[1],高层建筑结构计算中,当地下室的顶板作为上部结构嵌固端时,地下室结构的楼层侧向刚度不应小于相邻上部结构楼层侧向刚度的 2 倍.剪重比是反映地震作用大小的重要指标,它可以由“有效质量系数”来控制,当“有效质量系数”大于 90% 时,可以认为地震作用满足规范要求.

SATWE 和 PMSAP 建模的结构动力特性见表 6 和表 7,塔楼 T4 的 X 向与 Y 向嵌固层下层与上层的刚度比均大于 2,满足规范要求.表 6,第一振型 T_1 以 X 向为主、第二振型 T_2 以 Y 向为主,第三振型以扭转为主,两个软件计算的周期比 $T_t/T_1 < 0.90$,满足规范要求,扭转刚度强.根据结构布置,塔楼 T4 在考虑偶然偏心时,裙楼以上部分的楼层最大扭转位移比为 1.29,小于 1.4;含裙楼部分的楼层最大扭转位移比为 1.41,小于 1.5;满足规范要求.塔楼 T4 在 X 向和 Y 向有效质量系数均大于 90%,满足规范要求.

表 6 SATWE 和 PMSAP 计算模型振型指标

Tab.6 Vibration mode index by calculation model SATWE and PMSAP

	T_1 (s)	T_2 (s)	T_t (s)
立面			
平面			
SATWE 模型	2.67	2.44	2.21
PMSAP 模型	2.56	2.34	2.12

在设计中,若存在扭转不规则,主要从刚重比、周期比、位移比、剪重比等指标考虑.通过对整体结构的平面布置的调整,合理调整整个结构体系的刚度(包括抗扭刚度),结构的扭转效应减小至最小,从而增强整个结构体系的抗震性能,并严格控制结构的周期.

5.2 针对偏心布置的措施

为了减少结构的扭转振动反应,上部塔楼结构

的综合质心与底盘结构质心的距离不宜大于底盘相应边长的 20%.底盘屋面楼层宜连续,不宜出现大开洞、错层、连接薄弱等不规则类型.

塔楼 T4 上部质心与下部底盘的质心差为 3.2%,其质心距离为底盘相应边长的 24.1%.塔楼由于偏心体型收进,上下质心的偏移超过 20%,引起结构竖向不规则,需要对塔楼、裙楼周边竖向构件以及裙楼屋面加强,来弥补超限带来的不利影响.

表 7 SATWE 和 PMSAP 计算模型结构技术指标
Tab.7 Structure technical index by calculation model SATWE and PMSAP

计算软件		SATWE		PMSAP	
		X 向	Y 向	X 向	Y 向
风作用	刚重比	3.32	3.74	4.47	5.08
	结构总质量/t	100,244		100,354	
	有效质量系数	98.64%	99.21%	98.67%	99.02%
	总倾覆弯矩/kN·m	467,926	402,254	525,051	450,399
	总剪力/N	6,761	5,697	6,761	5,697
	最大层位移角	1/2736	1/3809	1/2764	1/3844
地震作用	总倾覆弯矩/kN·m	1,144,950	1,214,036	1,178,566	1,249,136
	总地震剪力/kN	16,997	18,576	17,414	19,014
	最大层位移角	1/848	1/1107	1/906	1/1168
	扭转位移比	裙楼(L4)以上楼层		1.29	
		含裙楼的楼层		1.41	
	剪重比	2.05%	2.24%	2.51%	2.75%
嵌固层下层与上层的刚度比		3.41	2.59	3.59	3.18
本层侧刚与上层 90%,110% (本层层高大于相邻上层层高的 1.5 倍时)的比值(最小值)		1.16	1.16	1.16	1.16
楼层受剪承载力与上层的比值(最小值)		1.00	1.00	1.01	0.99
规定水平力作用下结构底层框架部分承受的地震倾覆力矩与总倾覆力矩的比值		39.89%	38.11%	39.20%	37.60%

具体加强措施如下:

- a. 裙楼屋面收进部位的楼板(L4)加厚至 150 mm,楼板双层双向通长配筋. 体型收进部位上、下结构的楼板也应加强构造措施.
- b. 体型收进部位上、下各两层塔楼周边竖向结构构件(如图 3 所示)的抗震等级宜提高一级. 体型收进部位下两层塔楼周边竖向结构构件的抗震等级由一级提高至特一级,而体型收进部位上两层塔楼周边竖向结构构件的抗震等级由二级升到一级.

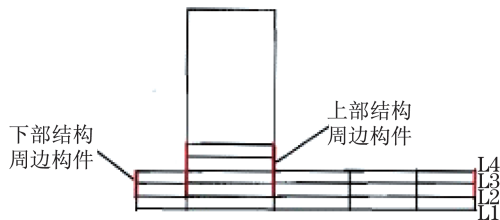


图 3 结构加强部位
Fig.3 Structural reinforcement site

- c. 由于塔楼 T4 为偏心收进,加强收进部位以下 2 层结构周边竖向构件的配筋构造措施. 例如,柱纵向钢筋的最小配筋率宜适当提高(宜提高 10% 以上),柱箍筋在加强范围内加密等.

5.3 针对楼板不连续的措施

对楼面平面开大洞的情况,大洞口周边宜设钢筋混凝土梁,并加强洞口周围楼板的厚度及配筋. 对由于楼面开洞形成的狭长板带传递水平力时,周边梁的拉通钢筋及腰筋应予以加强,并可靠锚固.

- a. 针对 L2,L3 层建筑平面大开洞的情况,在设计时考虑对该层楼板整体加厚为 130 mm,楼板双层双向通长配筋. 对 L2,L3 层楼板进行抗侧力分析,将洞口周边一跨范围的楼板可定义为弹性膜单元,其余楼板仍按刚性楼板处理. 考虑地震组合工况下 1.0(DL+0.5LL)+1.0EL 的正常使用极限状态下,除极少区域外,均小于混凝土抗拉强度标准值 2.2 N/mm² (C35 混凝土). 超出的部分区域将通过额外钢筋加强以抵抗相对较高的拉应力水平.
- b. 顶板开洞边设置抗震墙,确保水平地震力的可靠传递,墙体均调整为带端柱和有转角翼墙,避免单肢墙和短肢墙.
- c. 开大洞边缘的框架柱箍筋全高加密,抗震构造措施提高一级.
- d. 开大洞四周的顶板加强配筋,尤其是开洞阴角处,采用钢筋网进行加强.

5.4 针对体型收进的措施

《高层建筑混凝土结构技术规程》中 10.6.5 规定^[1],收进处上部结构的底部楼层层间位移角不宜大于相邻下部区段最大层间位移角的 1.15 倍.收进部位的楼板厚度不宜小于 150 mm,并应加强配筋构造,每层配筋不小于 0.25%.

塔楼 T4 在第四层存在体型收进问题.应加强上部收进结构底部的侧向刚度和承载力.底盘高度与塔楼高度比约为 16%,体型缩进约为 50%.第五层的最大层间位移角和相邻下部区段最大层间位移角的比值为 0.92 (X 向)和 1.04 (Y 向).对于塔楼 T4,满足要求.

体型缩进部位的楼板(L4)加厚至 150 mm,楼板双层双向通长配筋.目前的楼板满足在小震作用下(正常使用极限状态下)不会出现裂缝.

5.5 针对超长结构的措施

由于抗震缝的设置,塔楼 T4 及其相连裙楼,在南北方向最长约为 90 m,在东西方向最长约为 60 m;塔楼 T3 及其相连裙楼,在南北方向最长约为 90 m,在东西方向最长约为 75 m.《混凝土结构设计规范》建议室内框架结构伸缩缝最大间距为 55 m^[6].两座塔楼的伸缩缝最大间距均超过了规范建议范围.有如下建议措施:

a. 后浇带是避免施工期收缩裂缝的有效措施,后浇带浇筑注时的温度宜低于主体混凝土浇筑时的温度,最好是室外温度为 15~18℃.浇筑时间尽量靠后,宜在主体混凝土浇筑 2 个月后进行;

b. 应规范和监督混凝土的养护,以减少塑性收缩引起的裂缝;

c. 可以采用含减少收缩添加剂的混凝土或纤维混凝土,以减少收缩或控制裂缝的进展;

d. 增加楼板的配筋率或者采用纤维钢筋;

e. 在温度变化较大的现浇板区域,例如,裙楼屋面,应在板的表面双向配置防裂构造钢筋.

6 结束语

T4 塔楼抗侧力体系主要为框架—核心筒结构.对照《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》,塔楼 T4 存在扭转不规则、楼板不连续、塔楼偏置等超限问题,本项目提出一系列措施:

a. 超限高层存在扭转不规则时,从刚重比、周期比、位移比、剪重比等方面考虑,调整平面布局,合理调整结构体系刚度,减小扭转效应,严格控制结构周期等.

b. 高层存在大开洞、错层等偏心布置的超限情况,需加强塔楼、裙楼周边竖向构件及裙楼屋面的构造措施等.

c. 针对楼板不连续的超限情况,需在大洞口设置钢筋混凝土梁,加强楼板厚度及配筋.洞边可增设抗震墙,洞边框架柱可加密箍筋,提高抗震构造措施等.

d. 针对体型缩进的超限情况,可加厚楼板,双层双向通长配筋等.

e. 针对超长结构的超限情况,适温适时浇筑后浇带,规范混凝土养护,减少混凝土收缩增加剂,可采用纤维钢筋等.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范(2016 年版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局. GB 50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50223—2008 建筑工程抗震设防分类标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范(2015 版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50016—2014 建筑设计防火规范[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- [8] 中华人民共和国建设部. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [9] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [10] 胡淑辉,孙鹏,刘钢. 上海某项目超限高层结构设计[J]. 建筑结构,2014,44(24):59-64.
- [11] 中华人民共和国住房与城乡建设部. 建质[2015]67 号 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点[S]. 北京:中华人民共和国住房与城乡建设部,2015.
- [12] 杨学林. 复杂超限高层建筑抗震设计指南及工程实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

(编辑:董 伟)