

某不规则多层商业建筑的结构设计

刘健

上海浦东建筑设计研究院有限公司

摘要: 本文介绍了某不规则多层钢框架商业建筑的结构设计方法和要点。通过两种设计软件进行计算对比, 补充弹性时程分析、温度应力分析、楼板应力分析、静力弹塑性分析和楼板舒适度验算, 分析结构的薄弱部位, 并采取相应的加强措施, 减少了结构超长和不规则带来的不利影响, 保证了结构良好的抗震性能。

关键词: 钢框架; 特别不规则; 两种设计软件; 结构设计; 加强措施

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2023. 02. 095

一、工程概况

森兰国际社区某商业建设项目位于上海市浦东新区。项目总建筑面积101305m², 其中地上面积69300m², 地下建筑面积32005m²。地上建筑由社区服务中心、体育中心和6栋商业楼组成。本文分析的是商业楼部分, 其相互通过室外连廊连接。结构地上4层, 首层层高为6.0m、二层~四层均为5.4m, 房屋高度22.35m, 平面外包尺寸约174mX161m。整体设大底盘地下室一层, 层高5.75m。

二、主要设计参数

设计使用年限50年, 建筑结构安全等级为二级, 建筑重要性系数1.0;

抗震设防烈度7度, 设计基本加速度0.10g, 设计地震分组为第二组;

建筑场地类别为IV类, 抗震设防类别为重点设防类;

多遇地震下特征周期0.9S, 阻尼比0.04;

基本风压为0.55kN/m² 基本雪压为0.20kN/m², 地面粗糙度B类。

三、结构体系

商业楼地上部分采用钢框架结构, 通过连廊整体连接不设缝, 连廊设置于底部3层, 框架抗震等级为三级。结构布置存在很多大悬挑走道(跨度约4.2m~7.8m)和大跨连廊(跨度约18.2m~23.4m)。

框架柱采用箱型柱, 主要截面高度600x600、500x500; 框架梁采用H型钢梁, 主要梁高600~800mm, 钢材牌号Q355B。连廊位置钢梁与柱采用刚性连接, 并向内延伸。楼盖采用钢筋桁架楼承板, 楼层板厚120mm, 局部加强部位板厚150mm, 种植屋面板厚

150mm, 混凝土等级C30。

地下部分采用现浇钢筋混凝土框架结构, 主楼相关范围内抗震等级为二级, 其余部位为三级。结构以地下室顶板作为计算嵌固端。基础采用桩基筏板基础。

四、结构不规则项及设计措施

(一) 结构不规则项

(1) 扭转不规则: 考虑偶然偏心的规定水平地震作用下的扭转位移比大于1.2, 最大为1.37。

(2) 平面凹凸不规则: 平面较多处凹进尺寸大于相应投影方向总尺寸的30%。

(3) 楼板局部不连续: 整体平面布置有多处楼面开洞, 平面有效楼板宽度小于该层楼板典型宽度的50%。

(4) 竖向抗侧力构件不连续及个别斜柱: 平面西侧端部存在两处斜柱。楼层内局部框架柱不落地, 楼面处存在转换。

因此本工程属于特别不规则的多层建筑。

(二) 设计措施

(1) 对于扭转不规则, 采取增加结构抗扭刚度的措施, 适当加大边框梁、柱的截面。

(2) 因楼板开洞削弱较多, 考虑板面内变形对构件位移和内力的影响, 计算时二~四层全层设弹性膜。对相对薄弱的连廊(含适当内伸)区域, 局部加大板厚, 配筋加强。

(3) 对于个别斜柱, 考虑其在地震往复作用下的受力性能变化, 对其进行抗震性能化设计。与斜柱相连的框架梁计入轴力影响, 加强斜柱转折层及上下相邻层楼板的厚度及配筋。

(4) 对于部分不落地框架柱, 其传递给转换梁以及转换柱的地震内力均按相关规范要求放大。

(5) 屋面层呈多塔结构, 其下层楼板配筋双层双向拉通, 配筋加强。屋面体型收进部位下层的结构周边竖向构件适当加强。

(6) 设计时对大跨连廊和大悬挑走道的相关结构考虑竖向地震作用的影响。

五、结构计算及分析

(一) 振型分解反应谱法分析

根据《建筑抗震设计规范》要求, 复杂结构的内力和变形分析应采用两种软件计算对比, 特别不规则的建筑尚应采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算。本

结构计算采用YJK软件，同时采用PMSAP软件进行补充分析。

经反应谱法计算分析，结构主要计算指标分析见表1~表3。

表1 动力特性分析

计算项目		YJK结果			PMSAP结果		
自振周期	振型号	周期 (s)	平动系数 (X+Y)	扭转系数 (T)	周期 (s)	平动系数 (X+Y)	扭转系数 (T)
	T1	1.6008	0.00+0.76	0.24	1.5870	0.00+0.77	0.23
	T2	1.4694	0.86+0.03	0.11	1.4360	0.83+0.04	0.13
	T3	1.4392	0.06+0.21	0.73	1.4248	0.07+0.22	0.71
扭转周期比		Tt/T1=0.8990			Tt/T1=0.8978		
结构总质量 (t)		74785t			74655t		
有效质量系数		X向95.25%	Y向95.04%		X向95.16%	Y向94.96%	

表2 位移角及扭转位移比分析

计算项目		YJK结果		PMSAP结果	
X向		Y向	X向	Y向	X向
楼层最大层间位移角	风荷作用下	1/1962 (4F)	1/1482 (4F)	1/1983 (2F)	1/1493 (2F)
	地震作用下	1/342 (2F)	1/288 (2F)	1/292 (2F)	1/288 (2F)
	30度地震作用下	1/316 (2F)	1/317 (3F)	1/335 (2F)	1/335 (2F)
	60度地震作用下	1/295 (2F)	1/355 (2F)	1/295 (2F)	1/359 (2F)
最大扭转位移比		1.23	1.37	1.20	1.34

表3 底部剪力、刚度比分析

计算项目		YJK结果		PMSAP结果	
X向		Y向	X向	Y向	X向
底部剪力	风荷作用 (kN)	7675	8988	7486	8879
	地震作用 (kN)	48033	39595	50670	41424
剪重比		6.42%	5.29%	6.84%	5.60%
本层与上层等效剪切刚度之比最小值		0.95	0.95	0.92	0.91
楼层的受剪承载力之比最小值		1.06	1.06	1.05	1.05

从计算结果可得，结构各项指标均满足相关规范要求。两种软件计算结果接近，误差在允许范围内，可认定计算结果正确。

(二) 弹性时程补充分析

弹性时程分析选用了三条地震波进行计算，分别为人工波SHW2、天然波SHW3和SHW7。时程分析法与反应谱法分析得到的一~三层楼层剪力对比见表4。

表4 时程分析法与反应谱法剪力对比

层号	楼层剪力 (kN)							
	SHW2		SHW3		SHW7		CQC	
	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向
3F	37444	27233	28162	22022	34336	30852	34439	28521
2F	42787	33819	33065	25181	40017	35059	43459	35805
1F	44743	37187	35391	29866	43683	37846	48100	39651
与CQC之比	93%	94%	79%	75%	91%	95%	/	/

从计算结果可得，时程分析法的基底剪力均不小于反应谱法基底剪力的65%，且平均值不小于反应谱法基底剪力的80%，表明选择的时程记录满足规范要求。设计时楼层内力取时程法结果包络值与反应谱法的较大

值。

六、结构补充分析 (采用YJK计算)

(一) 温度荷载下，钢框架应力比分析

因建筑平面超长，设计时应考虑温度应力作用。本工程按室外升温30度、降温25度，室内升温、降温20度，钢结构合拢温度10~20度计算。

温度荷载单工况下，分别计算各层钢框架应力比可得：二层由于地下室约束作用，在结构长度方向，平面中部的梁和端部的柱的应力比较大，局部梁、柱最大达0.52。对比三层、四层钢结构温度荷载作用，其占比则逐层减小至最大0.19。设计时适当加强应力较大部位梁柱截面。

(二) 温度荷载下，楼板应力分析

由楼板应力计算可得：升温荷载作用下，二~四层楼板应力最大为0.8~1.0N/mm²，主要集中在部分连廊外侧；降温荷载作用下，二层~四层楼板应力最大为0.7~1.4N/mm²，主要集中在悬挑走道位置。

设计时按温度荷载附加组合进行楼板设计，适当加强温度应力较大处的楼板厚度和配筋，控制楼板主拉应力不超过混凝土抗拉强度标准值，并在适当位置设置楼板混凝土后浇带，尽量减少温度作用的不利影响。

(三) 地震作用下，楼板应力分析

由楼板应力计算可得：X、Y向地震作用下，二层最大楼板应力0.7N/mm²，三层最大楼板应力0.5~0.6N/mm²，四层最大楼板应力1.3~1.4N/mm²，应力较大处主要集中在部分连廊区域，设计时板厚和配筋应适当加

强。

本工程楼板设计时应力控制在小震下主拉应力不超过混凝土抗拉强度标准值，并按中震下作楼板钢筋不屈服设计。

(四) 静力弹塑性分析

通过罕遇地震下的静力弹塑性补充分析，计算薄弱层的变形能力，计算时阻尼比取0.05，水平地震影响系数最大值为0.45，场地特征周期为1.1s。采用倒三角形地震力模式与矩形地震力加载模式下进行计算。经验

算，大震作用下整体结构最大层间位移角为1/74，考虑连廊失效后的各分体结构最大层间位移角为1/70，均满足规范规定的1/50限值要求。

对构件塑性铰产生的历程和程度作分析，主要薄弱部位是与连廊大跨梁相连的框架柱，根据分析结果对相应构件作针对性加强，使结构满足强柱弱梁的抗震要求。分析表明，推覆性能点时，连廊位置柱节点未出现破坏，梁节点损伤轻微。连廊在大震作用下未失效，能协调各单体共同作用。全楼损伤等级分布见图1、图2。

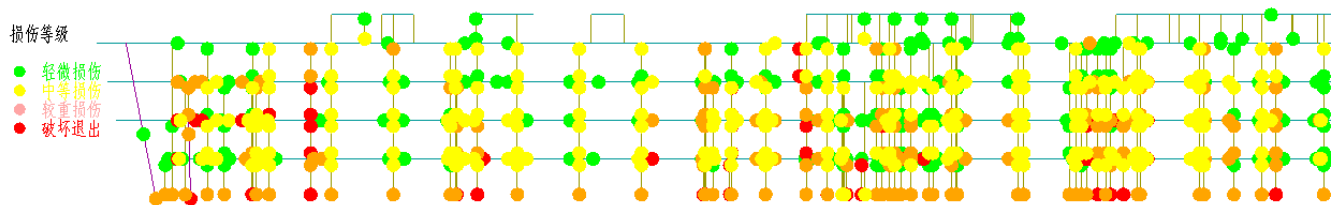


图1 X向推覆全楼损伤等级分布图

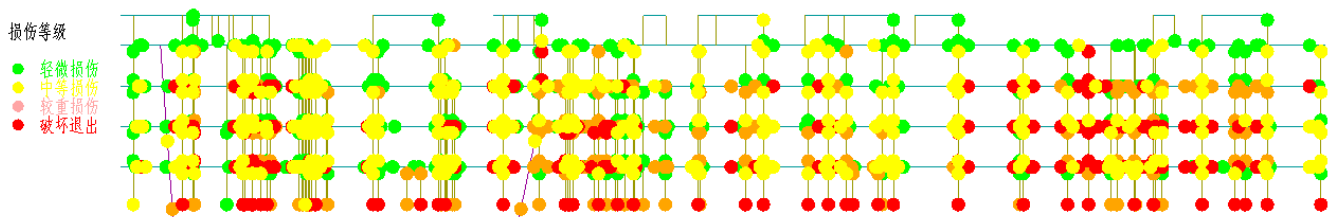


图2 Y向推覆全楼损伤等级分布图

(五) 楼板舒适度验算

对于连廊大跨、走道大悬挑构件的验算，除满足规范要求的挠度限值外，补充在竖向振动下和人流激励下的舒适度验算。

经计算，各层楼盖结构的自振频率在4.0HZ~4.5HZ之间，满足规范不低于3HZ的要求。采用时程分析方法模拟人行走作用，对各层室外悬挑走道和连廊位置进行竖向振动加速度验算。分析表明，楼板竖向加速度在 $0.036\text{m/s}^2 \sim 0.057\text{m/s}^2$ 之间，小于规范限值 0.15m/s^2 ，故结构布置满足要求。

七、结论

本工程为特别不规则的复杂多层结构，通过两种设计软件进行计算对比，补充弹性时程分析、温度应力分析、楼板应力分析、静力弹塑性分析和楼板舒适度验算，对于结构的薄弱部位采取有效加强措施，减少了结构超长和不规则带来的不利影响，保证了结构安全可靠，分析可得如下结论：

(1) 对于本工程结构中各分体通过连廊连接的形式，可采用连廊两端刚接，组成一个不规则结构整体进行考虑，同时应提高连廊的延性措施。

(2) 温度对超长钢结构影响不容忽视，受嵌固端约束影响，首层结构平面中部的框架梁，端部的框架柱

温度应力最大，而楼板的温度应力较大处主要位于部分连廊和悬挑走道区域。设计时对应力较大部位构件应适当加强，并采取设置楼板混凝土后浇带等措施控制温度应力。

(3) 楼板应力分析表明，结构连廊（含适当内伸）区域属于薄弱部位，设计时应加强板厚和配筋。本工程楼板应力控制在小震下主拉应力不超过混凝土抗拉强度标准值，并按中震下作楼板钢筋不屈服设计。

(4) 静力弹塑性分析中，整体结构和考虑连廊失效后的分体结构均应满足大震不倒要求。对构件塑性铰产生的历程和程度作分析，主要薄弱部位是与连廊大跨梁相连的框架柱，通过针对性的调整加强，使结构满足强柱弱梁的抗震要求，并确保连廊在大震作用不失效，能协调各单体共同作用。

(5) 对于连廊大跨和走道大悬挑相关结构，设计时不仅要对其刚度和强度进行有效控制，还要进行楼板舒适度验算，结构应考虑适当冗余度，提高其安全性。

参考文献

- [1] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] DGJ08-9-2013, 建筑抗震设计规程[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2013.