

基于动力弹塑性分析在某超高层项目 抗震超限设计中的运用

王永

贵州大学勘察设计研究院有限责任公司

摘要：随着城市建筑的发展，处于城市中心地段的老旧或工业厂区是城市更新的重要内容，这些地段土地价值大、人口聚集、商业繁荣，在更新过程中主要新建高层和超高层建筑。本文针对某棚改厂区超高层公寓楼，采用多软件分析和性能化设计，完成了小震弹性、弹性时程、中震弹性分析。采用SAUSAGE 软件对结构进行动力弹塑性时程分析，分析结构动力性能，找寻结构薄弱部位并采取加强措施，对类似项目具有一定的参考意义。

关键词：超限高层；性能化设计；动力弹塑性分析
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.12.089

一、工程概况

本工程位于贵阳市某棚改厂区内，场地地势比较开阔，场地稳定，其中1号楼建筑面积约为9.1万 m^2 ，地下3层，地上53层，塔楼结构总高189.70m，属B级高度超高层建筑。主要建筑功能为车库、商业、公寓。塔楼高宽比5.75，其中核心筒高宽比为11.7。建筑立面效果图见图1.1。



图1.1 建筑立面效果图

主楼采用现浇框架-核心筒结构，地下室全埋不设缝，嵌固端设在地下一层楼面。设计使用年限50年，结构安全等级二级，场地类别II类，抗震设防烈度6度，设计地震分组第一组，设计基本地震加速度0.05g，抗震设防类别标准设防类，基础等级甲级，基本风压 $W_0=0.35kN/m^2$ ，场地地面粗糙度C类。塔楼标准层典型结构布置见图1.2。

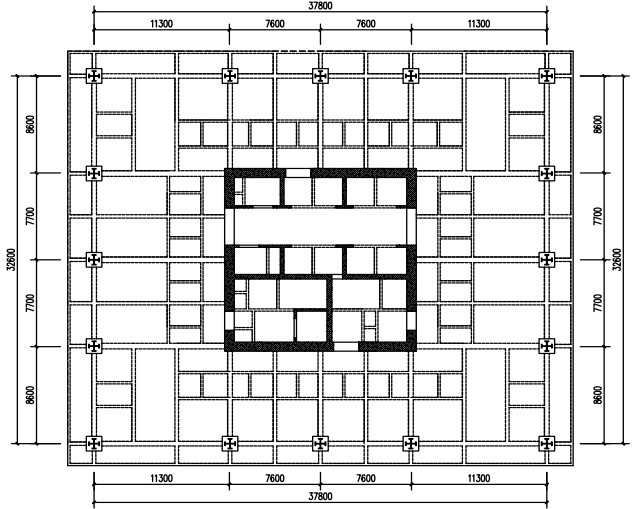


图1.2 结构标准层典型平面布置图

二、结构布置和选型

本工程为避免刚度突变，框架柱尺寸收进、剪力墙厚度收进和砼强度等级变化，二者或三者之间均错开一层以上。竖向构件砼强度等级C60~C40，梁板混砼等级C40，底部框架柱内嵌十字型钢均采用Q420-B。钢筋砼核心筒周围墙厚度沿高度按900mm~400mm逐渐均匀减小。整体模型示意图见图2.1。

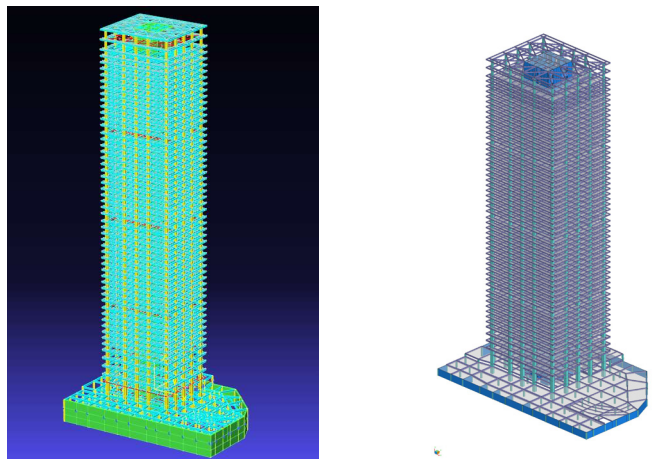


图2.1 静力和动力弹塑性整体模型示意图

三、抗震设防要求和性能目标

本项目存在建筑高度超限（超过A级高度限值约26.5%）、规则性超限（扭转不规则、局部楼板错层），根据《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》，按C级性能目标设计进行抗震超限专项设计，具体性能指标见表3.1。

表3.1 构件及位移角抗震性能指标

构件类型	构件位置	小震	中震	大震
普通竖向构件	剪力墙、柱（非底部加强区）	弹性	抗剪弹性、抗弯不屈服	部分构件屈服，受剪截面满足截面限制要求
关键构件	剪力墙（底部加强区）	弹性	抗剪弹性、抗弯弹性	抗剪、抗弯不屈服
	型钢砼柱（底部加强区）	弹性	抗剪弹性、抗弯弹性	抗剪、抗弯不屈服
耗能构件	剪力墙连梁	弹性	抗剪不屈服，部分构件屈服	大部分构件屈服
	框架梁	弹性	抗剪不屈服，部分构件屈服	大部分构件屈服
关键楼层楼板	地下一层~5层楼板	弹性	弹性	轻度损坏（抗剪、抗弯不屈服）
位移角限制		1/646	1/323（取小震的2倍）	1/162（取小震的4倍）

四、弹性计算分析

采用 YJK和MIDAS两个分析程序进行计算分析。主要计算结果差异均在10%以下（见表4.1），主体结构周期、位移、刚度等指标满足规范要求，说明计算结果合理、有效，计算模型符合结构的实际工作状态。弹性时程分析显示楼层剪力平均值在塔楼顶部个别楼层（41层~屋面层）大于CQC法结果，对相应楼层地震剪力进行放大。中震作用下，结构最大位移角为1/641，小于预设中震位移角限值1/323，符合“中震可修”的预期。各层楼板平均拉应力小于 $f_{tk}=2.39\text{MPa}$ ，平均剪应力小于 $0.7f_{tk}=1.673\text{MPa}$ （砼C40），最大拉、剪应力出现在核心筒剪力墙开洞处、错层边缘处，设计中通过加大楼板厚度和配筋，错层位置设置梁和楼板加腋，满足楼板中震弹性的性能要求。

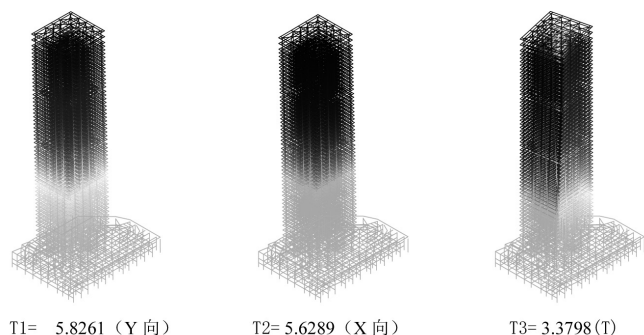


图4.1 YJK前三周期振型示意图

表4.1 整体电算结果对比表

计算软件		YJK	Midas
第1扭转/第1平动周期		0.580	0.575
结构总质量 (T)		173004.4	175307.985
首层地震下剪力墙倾覆弯矩百分比	X	75.5%	78.8%
	Y	72.9%	78.6%
地震荷载下最大层间位移角 (层号)	X	1/1791 (39)	1/1901 (54)
	Y	1/1671 (36)	1/1810 (35)
规定水平力下位移比 (层号)	X	1.29 (4)	1.218 (5)
	Y	1.20 (4)	1.148 (2)
地震荷载下最大位移 (mm)	X	91.4	85.96
	Y	95.45	86.47
风荷载下最大位移 (mm)	X	108.92	100.60
	Y	123.73	114.88
楼层受剪承载力与上层75%的比值 (层号)	X	1.105 (16)	1.182 (1)
	Y	1.088 (16)	1.188 (27)

五、罕遇地震下弹塑性动力时程分析

为了分析结构在罕遇地震作用下的抗震性能、动力响应、变形形态以及整体结构的弹塑性行为，分析构件（特别是关键部位、关键构件）的塑性及其损伤情况，判断结构薄弱部位所在位置，采用 SAUSAGE 软件，选

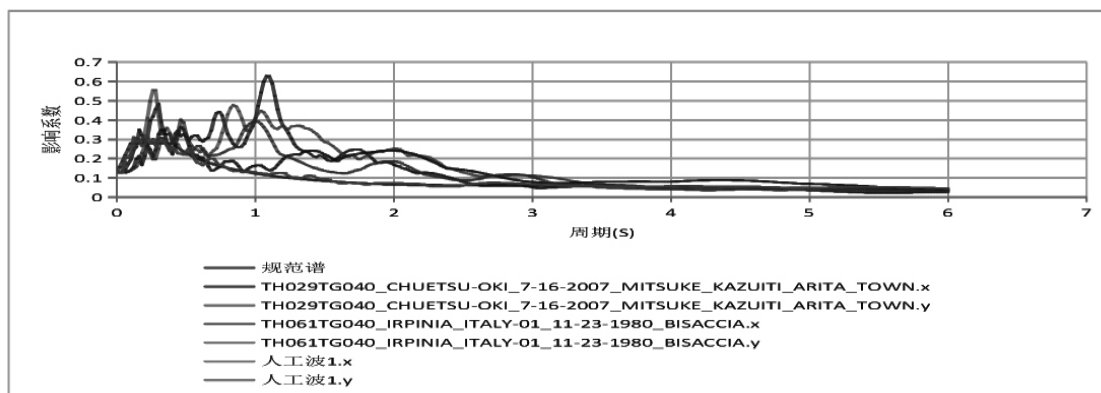


图5.1 地震波谱与规范谱对比图（罕遇地震）

取2条天然波TH029、TH061和1条人工波（见图5.1）进行罕遇地震作用下动力弹塑性分析。

罕遇地震下各地震波基底剪力见表5.1。X向最大层间位移角为1/229（55层），Y向最大层间位移角为1/339（46层）。X向顶点最大位移623mm，Y向顶点最大位移302mm，满足“大震不倒”的设防要求。各条波作用下的楼层位移曲线的变化形式以及大小基本一致，曲线平滑，没有明显突变。

表5.1 弹塑性大震基底剪力计算结果

工况	主方向	小震CQC剪力 (MN)	大震弹塑性剪力 (MN)
TH029-X	X主向	8.3	63.4
TH-61-X	X主向	8.3	58.4
人工波-X	X主向	8.3	54.4
X主向平均值		8.3	21.5
TH029-Y	Y主向	8.1	57.7
TH061-Y	Y主向	8.1	55.5
人工波Y	Y主向	8.1	40.7
Y主向平均值		8.1	51.3

核心筒刚度较大，水平地震力通过梁板主要传递给核心筒，核心筒内与周边的部分楼板有损伤。通过设置合理的剪力墙开洞形成连梁，连梁在大震下损伤耗能效果明显，从而保护了主承重墙肢，主承重墙未出现明显的损坏，核心筒关键构件及竖向构件最大限度地损坏均为轻度损坏。框架柱在底部加强区部分局部有轻微损坏、个别柱轻度损坏，底部加强区以上框架柱基本完整。底部加强区部分框架梁有轻度到轻度的损坏，底部加强区以上框架梁与核心筒相交的位置出现中度损坏，框架梁在大震情况下有效的参与了耗能。通过计算分析可见，核心筒剪力墙和框架满足性能水准C的要求。（见图5.2）

六、抗震超限技术措施及对策

对框架部分承担的地震剪力进行提高，框筒协同，形成双重抗侧力体系。按弹性时程分析结果，放大顶部个别楼层地震剪力。控制底部剪力墙轴压比，提高加强区剪力墙配筋率，提高剪力墙的延性和耗能、变形能力。设置过渡层，避免边缘构件配筋急剧变化。外框架柱在底部采用延性好的型钢砼柱，对于剪跨比小于2的短柱，箍筋全高加密，保证其进入屈服阶段的延性。跨高比 ≤ 2 时设置交叉钢筋， ≤ 1 时设交叉暗撑，提高连梁的耗能能力。

七、结论

通过以上计算分析，本工程虽然属于B级高度的超限高层建筑，但结构形式较简单，体型较规则，竖向构件连续。在设计中充分利用概念设计方法，对关键构件设定抗震性能化目标。采用多种程序对结构进行细致分析，按《高层建筑砼结构技术规程》，对结构在设防地震和罕遇地震下进行了详尽的性能分析，得出相应的性能目标。结果表明，各项指标均表现良好，满足规范的有关要求。对关键、重要构件和薄弱部位作了适当加强，以保证在地震作用下的延性。本工程能够实现“小震不坏，中震下主要构件不屈服、震后可以修复，大震不倒塌”的抗震设防目标，结构抗震设计安全可行。

参考文献

- [1] 国家标准《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）；
- [2] 行业标准《高层建筑砼结构技术规程》JGJ3-2010；
- [3] 《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）；
- [4] 《建筑结构专业技术措施》北京市建筑设计研究院有限公司；
- [5] 《高性能非线性分析软件SAUSAGE 2019用户手册》广州建研数力建筑科技有限公司等；

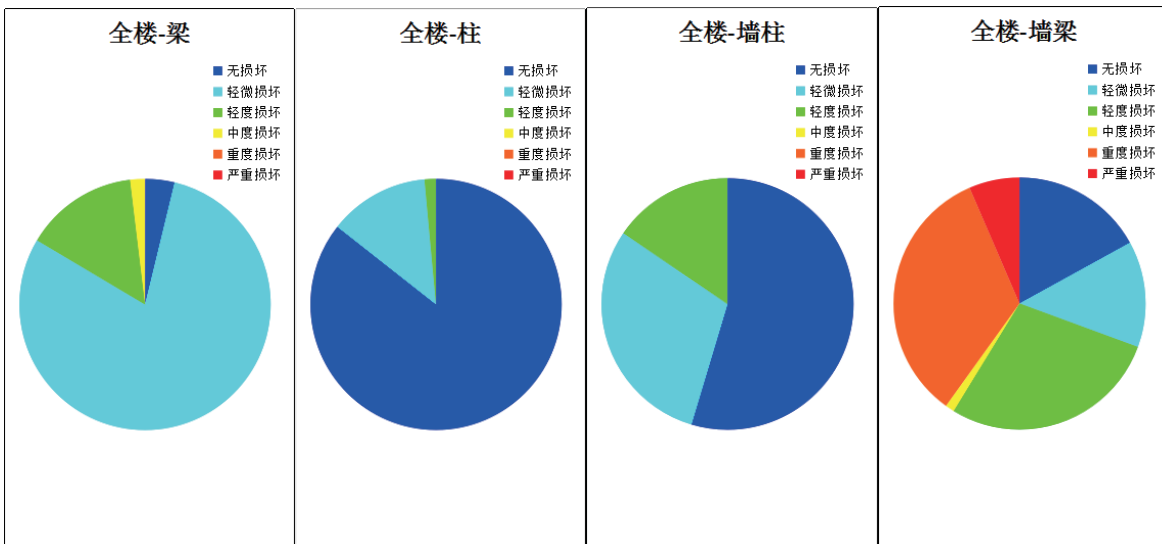


图5.2 全楼构件性能统计