

某超限高层项目抗震性能化分析结果的思考

卢心龙

基准方中建筑设计股份有限公司, 广西 南宁 530000

[摘要]通过对 5 栋不同高度、不同平面形状的超限高层建筑进行罕遇地震作用下的弹塑性时程分析, 明确了各楼栋的薄弱环节。相对于建筑高度而言, 平面形状的不规则对结构在地震作用下的损害作用更加突出。对于平面形状较为不规则的建筑, 其周边支撑强连梁为整体结构提供抗扭刚度的剪力墙垛或独立柱在大震作用下更容易发生损坏, 实际施工图设计时如出现此类构件, 应采取一定的加强措施。

[关键词]超限; 平面规则性; 弹塑性分析; 性能化

DOI: 10.33142/aem.v7i2.15766

中图分类号: TU318

文献标识码: A

Thoughts on the Seismic Performance Analysis Results of a Certain Over Limit High-rise Project

LU Xinlong

Jizhun Fangzhong Architectural Design Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract: Through the elastic-plastic time history analysis of five high-rise buildings with different heights and plane shapes exceeding the limit under rare earthquake action, the weak links of each building were identified. Compared to the height of the building, the irregularity of the planar shape has a more prominent damage effect on the structure under earthquake action. For buildings with irregular planar shapes, shear wall piers or independent columns that provide torsional stiffness to the overall structure through peripheral support beams are more prone to damage under large earthquakes. If such components appear in actual construction drawing design, certain reinforcement measures should be taken.

Keywords: exceeding the limit; planar regularity; elastic plastic analysis; performance

引言

众所周知,我国城市化进程在近些年飞速发展,大量人口涌入城市,使得城市土地日益紧缺,加之当今工程科技的进步,共同催生了一系列高层建筑的施工建造。根据世界高层建筑与都市人居学会的统计资料显示,在我国超过 150m 的建筑已有三千多栋。本人从事结构设计工作以来也亲身参与了部分超高层住宅和办公楼的结构设计工作。建筑功能的需求组合形成了一栋楼最基本的平面布局,该平面布局根据地区政策的不同往往呈现出具有当地特色的做法。本人结合近期参与的某个超高层住宅项目在进行罕遇地震弹塑性分析过程中发现的问题进行总结提炼,以期为其他类似项目提供一定的经验和参考价值。

1 项目概况

该项目位于南宁市,为超高层住宅项目,总计有 10 栋塔楼,所有塔楼通过三层架空车库(裙楼)连成一体,在地面以下有一层全埋地下室。该项目所在地场地类别为 II 类场地、地震设防烈度为 7 度(0.1g)、地震分组为第一组、特征周期为 0.35s、50 年一遇基本风压为 0.35kN/m²、设计使用年限为 50 年。根据住房和城乡建设部 2015 年印发的《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》的规定,本项目所有主楼均存在不同程度的超限项,故本项目施工图设计时进行了性能化设计和超限高层建筑工程抗震设防专项审查。本项目各楼栋基本信息概况统计如下表 1 所示:

表 1 楼栋信息统计表

楼栋号	结构高度（m）	抗震等级	不规则项	结构形式
1#	137.6	一级	高度超限、扭转不规则、平面不规则、楼板不连续、多塔	剪力墙
2#	128.1	一级		
3#	103.8	二级	扭转不规则、平面不规则、楼板不连续、多塔	
5#	111.8	二级		
6#	113.9	二级		
7#	124.9	一级	高度超限、扭转不规则、平面不规则、楼板不连续、多塔	
8#	132.5	一级		
9#	125.5	一级		
10#	130.8	一级		
11#	130.8	一级		

本项目整体结构模型如下:

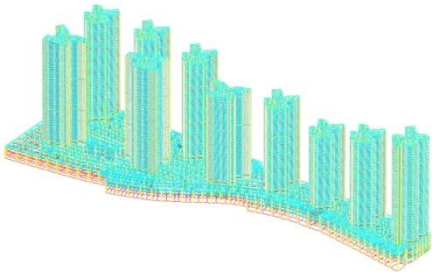


图 1 整体结构模型

2 性能目标的选择

我国将结构抗震性能目标分为 A、B、C、D 四个等级，将结构抗震性能分为 1、2、3、4、5 五个水准。每个性能目标均对应一组特定地震地面运动下的结构抗震性能水准。我国规范规定的结构抗震性能目标^[1]如表 2 所示。

表 2 性能目标及水准对应表

性能目标	A	B	C	D
多遇地震	性能水准 1	性能水准 1	性能水准 1	性能水准 1
设防烈度地震	性能水准 1	性能水准 2	性能水准 3	性能水准 4
预估的罕遇地震	性能水准 2	性能水准 3	性能水准 4	性能水准 5

针对本项目的抗震设防类别、地震设防烈度、场地实际条件、工程的自身特点并结合建造费用、震后的损失和修复的难易程度等各自因素，综合考虑确定本工程的性能目标定为 C 级。对各构件的具体要求和所采用的分析方法汇总如表 3 所示。

3 罕遇地震弹塑性分析

3.1 分析对象

本项目总计 10 栋塔楼，本文以其中具有代表性的 5 栋塔楼（1#、2#、3#、5#、6#楼）进行对比分析。该项目楼栋在方案配合阶段进行了大量的结构试算工作，以最大程度满足建筑功能和营销部门提出的需求，经各方最终确认达成一致意见后的各楼栋结构平面布置图如图 1~图 5。

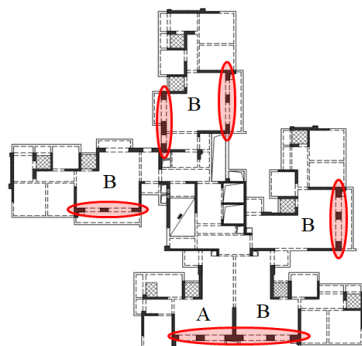


图 1 1#楼结构平面布置图

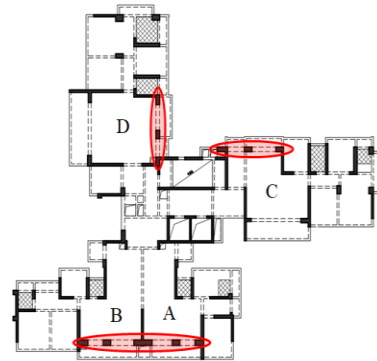


图 2 2#楼结构平面布置图

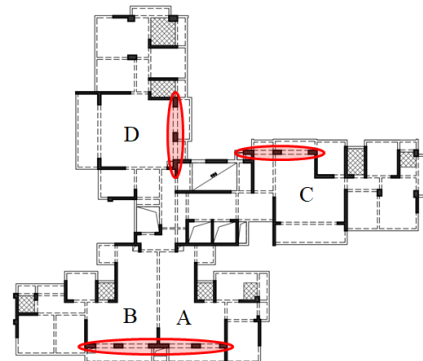


图 3 3#楼结构平面布置图

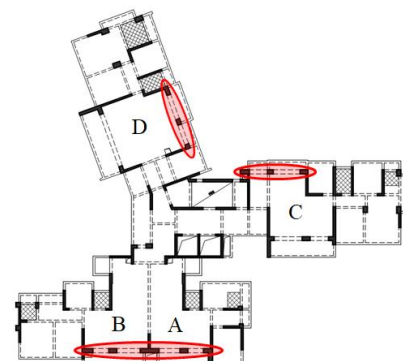


图 4 5#楼结构平面布置图

表 3 C 级性能目标对应各构件设计要求及分析方法

构件类型		多遇地震（小震）	设防烈度地震（中震）	预估的罕遇地震（大震）
性能水准		1	3	4
宏观损伤程度		完好、无损害	轻度损坏	中度损坏
继续使用的可能性		不需修复即可继续使用	一般修理可继续使用	修复或加固后可继续使用
关键构件	底部加强区剪力墙	弹性	抗剪弹性，抗弯不屈服	抗剪截面满足要求：抗剪不屈服（弹塑性）； 抗弯不屈服（弹塑性）
	转换梁	弹性	抗剪弹性，抗弯弹性	抗剪截面满足要求：抗剪不屈服（弹塑性）； 抗弯不屈服（弹塑性）
普通竖向构件	除底部加强区外的剪力墙	弹性	抗剪弹性，抗弯不屈服	抗剪截面满足要求：允许部分抗弯屈服
耗能构件	剪力墙连梁	弹性	抗剪不屈服，抗弯可屈服	抗剪截面满足要求：允许大部分抗弯屈服
	框架梁			
主要计算方法		弹性反应谱法，弹性时程分析	等效弹性（规范反应谱）	采用规范反应法谱保证抗剪截面、动力弹塑性分析进行不屈服判别

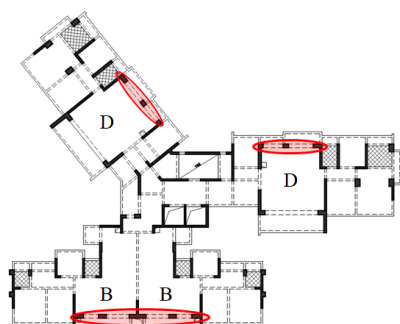


图5 6#楼结构平面布置图

注：图1~图5中椭圆形框线围合区内为客厅出阳台处的强连梁，A、B、C、D代表不同户型，字母一样表示户型基本一致或仅有较小差异。

以上结构平面布置特点总结评价如表4所示。

表4 各楼栋平面整体评价

楼栋号	结构高度(m)	地面以上楼层数	平面布置整体评价
1#	137.6	43	①各楼栋核心筒未严格用剪力墙围合封闭，均存在一定的“缺口”，角部均无竖向构件围合，为悬挑形式；②客厅出阳台处通过一系列的强连梁为结构提供一定抗扭刚度；③剪力墙错位多，对齐少；④各楼栋平面均较为异形，但5#、6#号楼平面异形程度更严重，有一肢分别有20°、39°的转角；⑤2#、3#楼平面组成基本一致，仅核心筒有所差别。
2#	128.1	40	
3#	103.8	32	
5#	111.8	35	
6#	113.9	36	

3.2 分析方法

对上述1~6#楼分别采用SAUSAGE软件进行罕遇地震作用下的弹塑性时程分析。分析模型中，塔楼梁、柱构件的非线性模型假定采用纤维束模型（图6），剪力墙、楼板采用分层壳单元进行模拟。

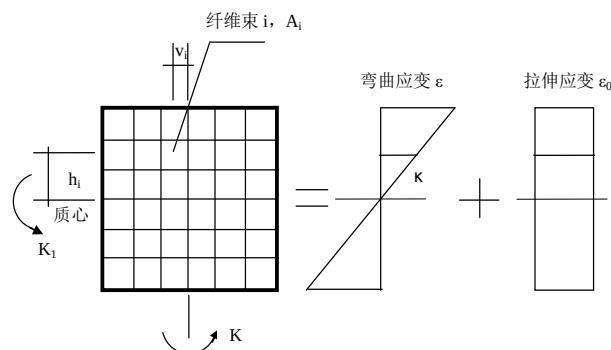


图6 纤维束单元示意

钢材的非线性材料模型采用双线性随动硬化模型（图7），混凝土单轴受拉、受压的应力-应变曲线方程按照文献^[2]附录C中的公式C2.3-1~C2.3-4、C2.4-1~C2.4-5计算。混凝土材料在外力作用下进入塑性状态时会出现刚度损伤（即刚度降低、退化），用 d_t 和 d_c 这两个参数分别来表达混凝土进入塑性变形状态后受拉、受压刚度的损

伤程度。当受力单元由受拉状态变为受压状态时，混凝土原有的裂缝会发生闭合，抗压刚度恢复至原有抗压刚度，当受力单元由受压状态转为受拉状态，混凝土的抗拉刚度不再恢复（图8）^[3]。

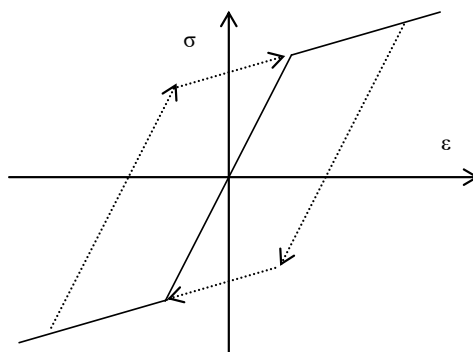


图7 钢材材料本构

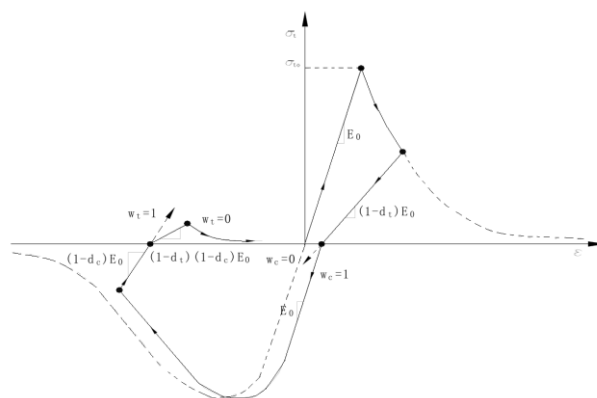


图8 混凝土受拉、受压刚度恢复示意图

在进行弹塑性动力时程分析时，阻尼对结构动力方程的求解有较为明显的影响。在SASUAGE软件中为了充分考虑各阶阵型对结构动力响应的影响，采用了拟模态阻尼体系^[3]（通常认为该阻尼体系优于常规的瑞利阻尼），其完整的时域阻尼振可简化表示为： $[C]=[M][\Phi][\xi][\Phi]^T[M]$ 。

$$[\xi] = [\bar{M}]^{-1} \cdot [\bar{C}] \cdot [\bar{M}]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2\zeta_1\omega_1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{2\zeta_2\omega_2}{M_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{2\zeta_n\omega_n}{M_n} \end{bmatrix}$$

其中 $[M]$ 为质量矩阵的逆矩阵， $[\bar{M}]$ 为广义质量矩阵的逆矩阵， $[\Phi]$ 为振型矩阵， $[C]$ 为时域阻尼矩阵。

在SAUSAGE中构件的损坏以混凝土的受压和受拉损伤因子、钢材（钢筋）的塑性应变程度作为评价标准^[4]，其与上文表格中列举的各性能水准下不同构件的损坏程度对应如表5所示。

表 5 各性能水准对应的损伤程度

序号	性能水平	颜色	混凝土 S_d	钢筋 (钢材) $\varepsilon/\varepsilon_y$
1	无损坏	蓝色	-1	0
2	轻微损坏	青色	-0.2	1
3	轻度损坏	绿色	0	3
4	中度损坏	黄色	0.2	5
5	中度损坏	橙色	0.5	7
6	严重损坏	红色	0.75	12

注：混凝土受压退化系数 $S_d = \pm(1 - \sigma_c/f_c)$ ，压应力未达到峰值取负值，压应力超过峰值取正值。 $\varepsilon/\varepsilon_y$ 为钢筋 (钢材) 塑性应变与屈服应变的比值。墙构件性能水平取各单元性能水平的最大值，并根据损伤范围进行修正。

3.3 计算结果

在进行罕遇地震作用下的弹塑性时程分析时，地震波按照规范要求选取 2 条天然波，1 条人工波，且符合：(1) 时程曲线的平均地震影响系数与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符；(2) 每条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不小于振型分解反应谱法计算结果的 80%；(3) 地震波持续时间不小于结构基本自振周期的 5 倍和 15s；(4) 对于 7 度 (0.10g) 区输入的地震加速度最大值不小于 220cm/s^2 。

根据以上假定和输入条件，对每栋楼的三条地震波计算结果进行包络统计，各楼栋位移角、大震弹塑性基底剪力与小震弹性基底剪力比值分别汇总如下表 6：

表 6 各楼栋位移角及基底剪力统计

楼栋号	位移角		基底剪力比值 (大震/小震)	
	X	Y	X	Y
1#	1/263	1/272	5.2	5.6
2#	1/283	1/235	5.1	5.5
3#	1/302	1/259	4.8	4.8
5#	1/201	1/246	5.0	5.0
6#	1/263	1/174	5.6	5.1

由上表可看出大震与小震作用下的基底剪力比值均在 5.0 左右，说明各楼栋选择的地震波能量相对于小震反应谱设计的要求基本相当，各楼栋的地震力水平对于不同的结构形式基本是匹配的，位移角也能满足规范 1/120 的要求。各楼栋的墙柱和连梁损伤占比情况统计如下表 7：

表 7 各楼栋墙体损伤统计

楼栋号	墙 (连梁) 性能统计					
	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	重度损坏	严重损坏
1#	46% (10%)	45% (40%)	6% (6%)	1% (2%)	1% (9%)	1% (33%)
2#	37% (7%)	59% (28%)	3% (23%)	0.5% (17%)	0.5% (17%)	0% (7%)
3#	40% (10%)	57% (48%)	2% (11%)	0.3% (8%)	0.4% (11%)	0.3% (12%)
5#	15% (1%)	61% (21%)	12% (11%)	4% (5%)	4% (17%)	4% (45%)
6#	18% (1%)	62% (16%)	10% (16%)	3% (8%)	3% (25%)	4% (34%)

各楼栋按照构件性能统计的损伤位置分布如图 9~

图 13 所示 (篇幅所限，每栋楼仅选择一个代表性楼层进行示意)。

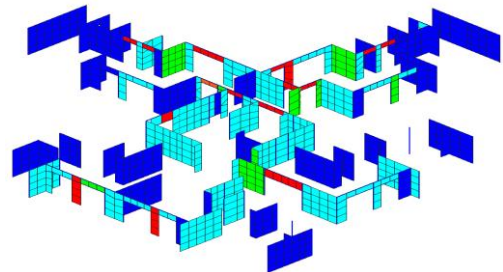


图 9 1#楼构件损伤分布示意图

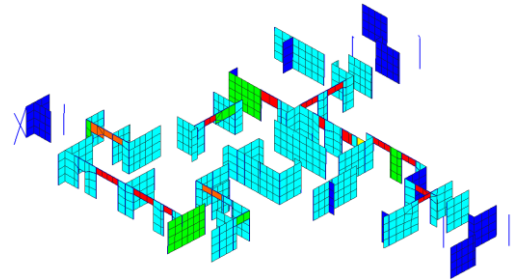


图 10 2#楼构件损伤分布示意图

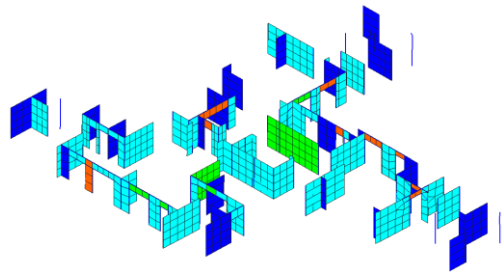


图 11 3#楼构件损伤分布示意图

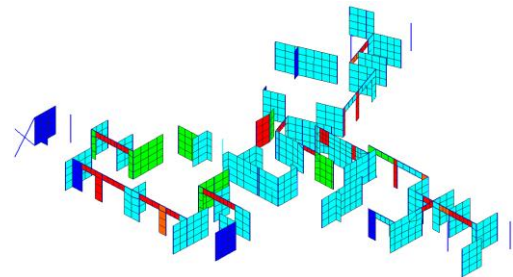


图 12 5#楼构件损伤分布示意图

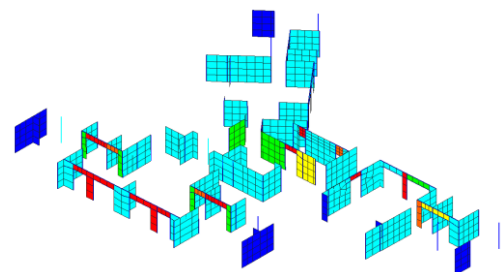


图 13 6#楼构件损伤分布示意图

从以上损伤统计和其分布的位置可以得出如下结论:

(1) 1~6#楼墙柱发生中度以上损伤占比分别为 2%、0.5%、0.7%、8%和 7%,且这些损伤基本发生在普通竖向构件上,符合预先设定的普通竖向构件允许发生部分抗弯屈服的性能要求。作为耗能构件的连梁发生中度以上的损伤占比分别为 42%、34%、23%、62%和 59%,这说明连梁起到了很好的耗能作用,起到了保护竖向构件的作用,从而达到了大震不倒的第三阶段设防水准要求。

(2) 将平面规则性与损伤程度进行对比不难发现,对于平面越不规则(有转角、局部户肢伸出过长和异形等)的建筑,地震作用下损伤越厉害。如 2#(3#)楼整体平面在 5 栋楼中相对最为规则,发生损伤也最少。而平面存在转角对于结构是最为不利的,如 5#、6#楼的损伤计算结果就是一个很好的例证。

(3) 1#楼比 5#、6#楼分别高出 23%和 21%,但其整体损伤程度比 5#、6#好很多,这说明平面规则性对结构安全的影响比高度更为明显。

(4) 通过各楼栋的损伤分布示意可以发现,分布在建筑周边支撑强连梁的剪力墙垛(柱)(如各楼栋的客厅出阳台处连梁和剪力墙垛)在大震作用下更容易发生损坏。

4 结论

本文通过对 5 栋超限高层住宅进行罕遇地震作用下的弹塑性分析,研究了平面规则性、楼层高度等对结构整

体受力的影响,并通过分析总结了本项目各楼栋的薄弱部位,得到以下结论:

(1) 平面越不规则的建筑对结构地震作用下的受力越不利,这种不规则可以通过平面某一支的外伸长度或转角度数来进行宏观判断;

(2) 相对于建筑高度而言,平面的规则性对结构安全的影响更加突出。因此在结构设计中,越是高的建筑越应注意平面设计简单、对称和规则。

(3) 对于平面不规则的建筑,在地震作用下,建筑周边支撑强连梁的剪力墙垛尤其是独立柱更容易发生震害,设计过程中应采取适当的加强措施,如抗震等级提高一级、配筋率相应提高等措施来对这些薄弱部位进行加强。

[参考文献]

- [1] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 动力弹塑性时程分析技术在建筑结构抗震设计中的应用[S]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.

作者简介: 卢心龙(1990—), 男, 工程师, 主要从事民用建筑结构设计工作, 当前就职单位: 基准方中建筑设计股份有限公司南宁分公司。