

【摘要】本文以广州市地铁黄沙车站上盖商住楼发展项目这一超限工程为工程背景。此工程集超高、扭转不规则、竖向构件不连续（转换层）等超限情况于一体。通过对其进行整体结构的静力弹塑性分析 Pushover，得到该结构的地震反应破坏机理，对该结构的整体抗震性能进行了评估。

【关键词】静力弹塑性 超限高层 振型

1 工程概况

本项目地下3层，地上50层，地上高度168m，高宽比为4.3。裙楼部分二层层高为6.0m，三、四层层高均为5.5m，标准层层高3.1m。结构为框支剪力墙体系，核心筒落地，上部其余剪力墙通过梁式转换层由底部8根框支柱支撑，如图1所示。建筑的转换层以上部位的建筑功能为住宅，转换层以下部位作为商场及花园。

2 结构的设计和弹性分析

落地剪力墙厚1000mm，框支柱截面尺寸，矩形柱为2500×3000mm，圆形柱直径为 $\phi 2350\text{mm}\sim\phi 3050\text{mm}$ 。转换梁设在建筑5层楼面（结构的第4层）。转换梁截面尺寸为600×3000mm~3900×3000mm。转换梁底、面分别设置厚度为300mm及500mm的楼板以提高转换梁的抗扭刚度，减少剪力墙相对于转换梁偏心所带来的影响。框支柱、落地剪力墙及转换梁的混凝土强度等级为C60，抗震等级为特一级。落地剪力墙、框支柱、转换层上两层的剪力墙均作为底部加强区。标准层剪力墙厚度由下而上逐渐收小，由500mm均匀变化至300mm，在保证结构强度和变形的情况下，减轻了结构自重；其混凝土强度等级由C60逐渐收至C40，抗震等级为一级。

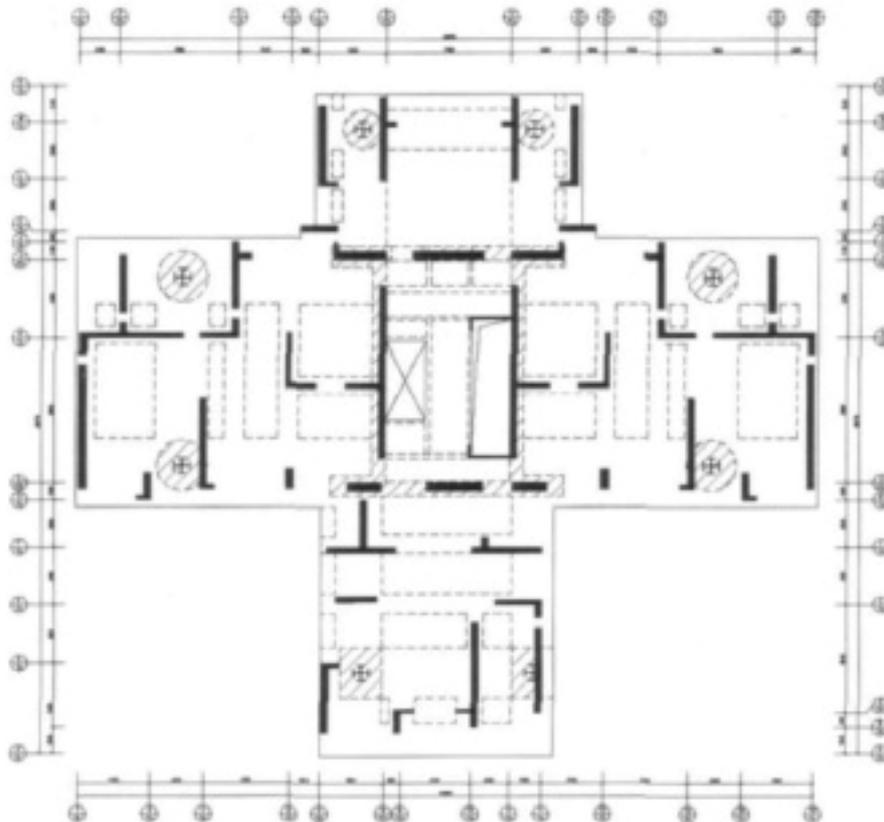


图1 转换层结构平面布置图

本工程采用 P K P M 系列软件中的 SATWE 模块来对结构进行弹性状态下的整体计算分析。本结构考虑扭转耦联, X、Y 方向的平动系数、扭转系数见表 1 所示。

振型号	周期	转角	平动系数 (X+Y)	扭转系数
1	4.0518	170.03	0.97 (0.94+0.03)	0.03
2	3.7857	80.73	1.00 (0.03+0.97)	0.00
3	3.2378	11.20	0.04 (0.04+0.00)	0.96

表 1 考虑扭转耦联时的周期(s), XY 方向的平动系数和扭转系数

结构在多遇地震下 X 向 Y 向的最大层间位移角分别为 1/1006 和 1/1116, 均能满足规范要求; 而在风荷载下则分别为 1/904 和 1/962, 刚好超过规范 1/1000 的要求。结构 X 向 Y 向的最大位移比分别为 1.29 (48 层) 和 1.33 (11 层)。在偶然偏心下的位移比两向均超过高规 1.2 的限值, 属于扭转不规则结构。从表 1 可见, 结构以扭转为主的第一周期为第 3 振型号=3.2378s, 与第一周期=4.0518s 相比为, 小于规范限值 0.85, 说明结构的抗扭刚度足够。另外, 结构的前三振型中, 振型的扭转因子不在 0.35~0.65 之间, 说明结构的质量与刚度分布比较均匀。

3 结构的超限类型及程度

根据结构的自身状况, 结合计算分析, 归纳出结构的超限类型及程度如下:

1. 结构高度为 168m, 超过 B 级高度 120m 限值。2. 扭转不规则, 扭转位移比超过 1.2, 但控制在 1.4 以内。X 向扭转位移比为 1.29(48 层), 相应的地震作用下的最大层间位移角为 1/1550; Y 向扭转位移比为 1.33(11 层), 相应的地震作用下的最大层间位移角为 1/2194。属于 I 类不规则。3. 塔楼设有转换层, 竖向抗侧力构件不连续。属于 II 类不规则。

该结构未有其它错层、连体、多塔和加强层等复杂高层形式, 属于体型“特别不规则”结构。

4 结构的静力弹塑性分析

由于结构集超高、扭转不规则、竖向构件不连续(转换层)等超限情况于一体, 为验算结构的抗倒塌能力, 本文采用 P U S H 程序对结构进行了静力弹塑性分析。

4.1 Pushover 的计算结果

本文分析侧推类型采用“倒三角形”, 基底剪力和重量的比为 1。结构左右基本对称, 所以在 X 方向仅计算一向的 Pushover, 而在 Y 向需计算两向的 Pushover。计算中主要受力构件按实际配筋对模型进行调整, 但未考虑框支柱和落地剪力墙中型钢的有利影响。

图 2、图 3、图 4 分别给出各向 Pushover 的性能点求取曲线。

4.2 对计算结果的分析讨论

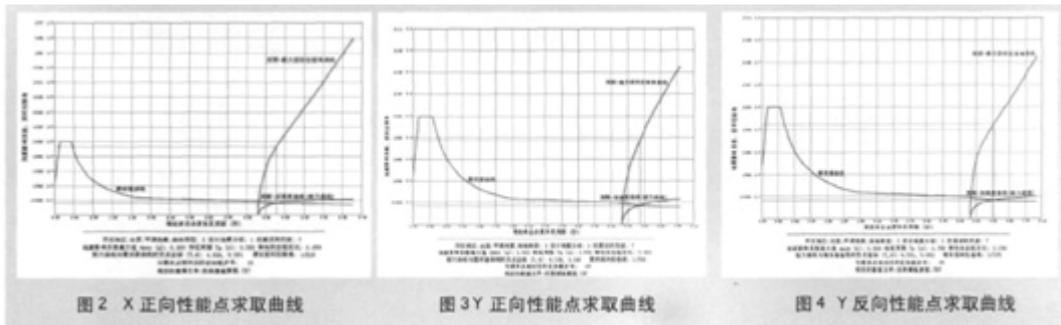
4.2.1 关于 Pushover 可靠性的讨论

在 Pushover 方法可靠性方法, 研究成果较多, 得到的一致结果是 Push-over 方法在低层结构、规则结构中, 此方法能够对结构的最大反映和最大损伤做出合理的估计; 但是在高层结构、复杂结构中, 随着高度的增加、复杂程度的增加、高振型影响程度的增加, 所分析出来的结果误差逐渐增大, 因为 Pushover 的过程都是反应第一振型下的结构特性。

本文计算结果表明第一阶振型虽然对结构起控制作用, 但高阶振型的影响是显著的, 需要用动力时程分析方法对结构进行校核。但利用 Pushover 分析至少具有相当的参考价值。

至于结构的扭转不规则性, Push-over 相关的研究不多, FEMA273 指出, 由 Pushover 分析得到的目标位移要乘以一放大系数以考虑扭转效应, 而国内有学者提出“三维 Pushover”分析技术, 但这些方法在工程界尚未达成统一共识, 还有待进一步的研究。





4.2.2 关于 Pushover 结果的讨论

从图 2、图 3、图 4 得出结构的需求层间位移角分别为 X 正向 1/215、Y 正向 1/258 及 Y 反向 1/235，均满足抗震设计的小于弹塑性层间位移角限值 1/120 的要求。

各向在性能点时的周期分别为 X 正向 4.624s、Y 正向 4.120 及 Y 反向 4.221s，而相应地在弹性状态下的两向周期分别为 4.0518s、3.7857s。可见由于塑性铰的出现，使结构的某些构件退出的刚度减弱，周期变长。

整个推覆过程中，塑性铰始终只出现在转换层以上部位，从概念上来说，这是满足“强转换，弱上部”的结构设计思想。塑性铰首先出现在各层连梁的端部，随着推覆的进行，框架梁端部继而出现塑性铰，再之后转换层以上部位出现裂缝。从塑性铰出现的顺序来看，也是符合设计思想的。

5 结论

本文以广州市地铁黄沙车站上盖商住楼发展项目这一超限工程为工程背景。该工程集超高、扭转不规则、竖向构件不连续（转换层）等超限情况于一体。通过对其进行整体结构的静力弹塑性分析 Pushover，得到该结构的地震反应破坏机理，从而对该结构的整体抗震性能进行了评估。

从 Pushover 各向性能点求取曲线发现：结构各向的弹塑性层间位移角均满足抗震规范中的相关要求。

由于 Pushover 的过程都是反应第一振型下的结构特性，Pushover 方法在低层结构、规则结构中能对结构的最大反映和最大损伤做出合理的估计，而在高层复杂结构中也可为有益参考。

【参考文献】

- [1]徐培福，傅学怡，王翠坤，肖从真：复杂高层建筑结构设计，中国建筑工业出版社，2005.2
- [2]中华人民共和国建设部：超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点，2006
- [3]薛彦涛，徐培福，肖从真，徐自国：静力弹塑性分析(pushover)方法及工程应用，第十八届全国高层建筑结构学术交流会议论文集，2004.8
- [4]Federal Emergency Management Agency, NEHRP Guidelines for the seismic Rehabilitation of Buildings.FEMA356, 1997

