

某复杂商业综合体抗震性能化设计

曾 滢

中南建筑设计院股份有限公司 湖北武汉 430071

摘 要: 4号楼商业地上结构较为复杂, 存在多项不规则, 需进行性能化设计, 采用多种软件对4号楼商业结构进行小震、中震和大震作用下的弹性时程分析、等效弹性分析和弹塑性静力分析, 分析结果能较好的满足预设的抗震性能目标C的各项要求。

关键词: 性能化设计; 等效弹性分析; 弹塑性静力分析

一、工程概况

本工程位于武汉市中南路和丁字桥路交汇处, 主要包括五层地下室及以上的3栋超高层建筑、1栋6层商业裙房。各栋单体建筑在地面以上以防震缝分开, 各楼栋平面布置示意如图1所示。本文探讨的为4号楼商业结构的抗震性能化设计。

二、地震作用参数取值

拟建建筑按6度抗震设防, 设计基本地震加速度值为0.05g, 设计地震分组为第一组。建筑场地类别为Ⅲ类, 设计特征周期为0.45s。安评报告提供的地震动参数大于规范地震动参数。所以, 对多遇地震、设

防地震、罕遇地震, 地震作用动参数统一采用建设场地地震安全性评价报告提供的参数。本工程抗震计算的主要地震作用参数为: 小震 $A_{max}(\text{gal})=30.3$, $\alpha_{max}=0.0772$, $T_g=0.45\text{s}$, 阻尼比0.05; 中震 $A_{max}(\text{gal})=82.3$, $\alpha_{max}=0.2097$, $T_g=0.45\text{s}$, 阻尼比0.05; 大震 $A_{max}(\text{gal})=145.3$, $\alpha_{max}=0.3703$, $T_g=0.5\text{s}$, 阻尼比0.07。其中 A_{max} 为设计峰值加速度, T_g 为设计反应谱特征周期。

三、结构抗震规则性判断

根据相关超限审查技术要点规定, 当建筑结构布置有多项指标超过规范要求或特别不规则时, 以及高度超过规定时, 属超限高层建筑工程。本工程结构不规则及

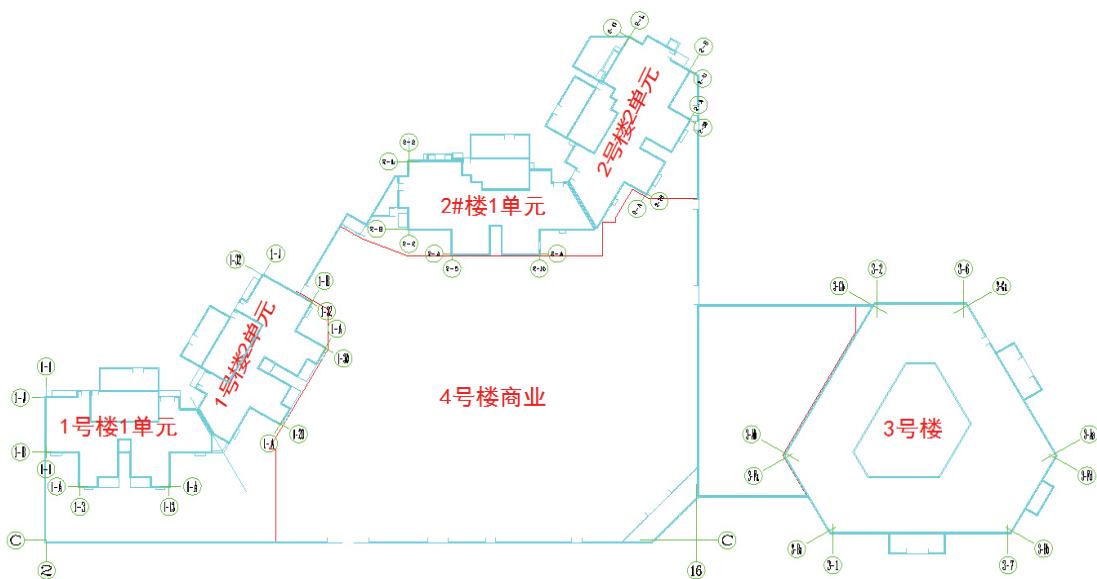


图1 平面布置示意图

作者简介: 曾滢 (1982.9——), 男, 汉族, 湖北潜江人, 工学硕士学历, 高级工程师, 一级注册结构工程师, 主要从事钢筋混凝土及复杂结构的研究工作。

超限情况如下：1) 扭转不规则，在不能忽略偶然偏心的情况下，扭转位移比没有小于1.2，但小于1.4。2) 楼板不连续，有效宽度没有大于50%，开洞面积没有小于30%。3) 抗侧力构件不连续、构件间断，6层电影院有梁上柱。4) 楼层承载力突变，底层抗剪承载力与相邻上一层抗剪承载力比0.71小于0.8。5) 其他不规则，有电影院夹层。

通过上述可以看出，4号楼不规则性达到五项，属于同时具有三项及以上不规则的超限高层建筑工程，必须作建筑结构工程超限设计的可行性论证。

四、抗震等级及性能目标

1. 抗震等级

4号楼的嵌固端放在地下室顶板面。根据《高规》(JGJ3—2010)及《分类标准》(GB50223-2008)，本工程按本地区抗震设防烈度提高一度的要求采取抗震措施，框架抗震等级为二级，转换梁、柱抗震等级提高至一级。

2. 性能目标

结合本工程结构的具体情况，按《技术要点》要求，根据《高规》(JGJ3-2010)中关于结构抗震性能分析的相关要求，按高规3.11节结构抗震性能设计方法，本工程建筑高度未超过A级高度，但不规则性超过规范规定适用范围较多，且抗震设防类别为乙类，故综合考虑，设定该结构抗震性能目标为C。其中在预估的罕遇地震作用下，关键构件按“结构抗震性能水准4”的要求进行设计。

本工程中各构件性能分类如下：

关键构件：转换柱、楼梯间框架柱、角柱、5层大跨度转换梁；

普通竖向构件：除关键构件以外的其余框架柱；

耗能构件：框架梁；

根据《高规》^[3](JGJ3-2010)第3.11.3条及第3.7.5条的规定，在预估的大震（即罕遇地震）作用下，对于框架结构，其结构薄弱部位的层间弹塑性位移角限值取1/50，由于本工程性能目标为C，结构薄弱部位的层间弹塑性位移角限值可偏严取为1/100。《高规》(JGJ3-2010)的3.11.3条在中震（即设防烈度地震）作用下没有对结构的层间位移角给出要求。参考《抗规》附录M表M.1.1-2及条文说明的有关规定，在设防烈度地震作用下，结构的最大层间位移角不应超过弹性位移限值的2倍，取限值为1/250。具体设计指标，不同抗震水准下结构性能目标细化如下：小震下结构宏观损坏程度为无损

坏，层间位移角限值1/550，关键构件小震弹性，普通竖向构件小震弹性，耗能构件小震弹性；中震下结构宏观损坏程度为轻度损坏，层间位移角限值1/250，关键构件正截面承载力不屈服受剪承载力弹性，普通竖向构件正截面承载力不屈服受剪承载力弹性，耗能构件部分进入屈服阶段受剪承载力不屈服；大震下结构宏观损坏程度为中度损坏，层间位移角限值1/100，关键构件大震不屈服，普通竖向构件部分竖向构件屈服满足受剪截面限制条件，耗能构件大部分耗能构件进入屈服阶段，形成充分塑性铰。

五、结构弹性时程分析

按照规范要求，本工程采用了天然波和人工波，其中天然波5组，人工波2组，进行小震弹性时程分析，并与反应谱分析进行对比，进一步验证弹性分析结果的正确性，保证工程的结构安全、可行。只截取地下室顶板以上、不要地下室部分的结构模型进行弹性时程分析，鉴于本工程上部结构的平面不规则，本工程弹性时程分析采用单点双向输入地震作用，也就是沿结构首层底部，X、Y两个方向输入地震作用，其地震动参数取值为水平主方向：水平次方向=1：0.85。

规范反应谱与地震波反应谱的对比及本工程前三阶振型周期点的地震影响系数比较如图2所示。从图中可以看出，在前三个周期点对应的地震影响系数，平均谱和规范谱相差均能够满足规范的要求。

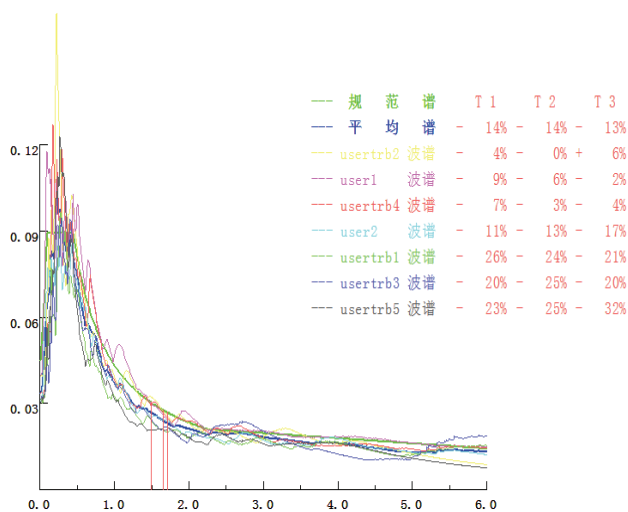


图2 规范反应谱与地震波反应谱对比图

时程分析计算所得的结构顶点位移、速度、加速度详下列表格1所示。

时程分析的层间位移角平均值的最大值为1/1143，符合规范要求。

表 1

| 地震波 | X方向 | | | Y方向 | | |
|----------|---------|-----------|--------------------------|---------|-----------|--------------------------|
| | 位移 (mm) | 速度 (mm/s) | 加速度 (mm/s ²) | 位移 (mm) | 速度 (mm/s) | 加速度 (mm/s ²) |
| USERTRB1 | 23.14 | 68.8 | 510.1 | 23.24 | 70.9 | 524.7 |
| USERTRB2 | 22.8 | 111.4 | 541.8 | 25.44 | 103.1 | 581 |
| USERTRB3 | 25.74 | 98.8 | 591.8 | 23.01 | 101.7 | 540.6 |
| USERTRB4 | 22.70 | 86.7 | 580.2 | 24.46 | 101.8 | 655.9 |
| USERTRB5 | 24.08 | 88.6 | 510.1 | 22.51 | 83.0 | 509.2 |
| USER1 | 24.72 | 111.1 | 798.2 | 23.39 | 110.7 | 798.5 |
| USER2 | 23.92 | 112.0 | 587.3 | 24.75 | 111.1 | 601.5 |

六、中、大震等效弹性分析

采用SATWE进行等效弹性分析，在中震作用下，关键构件和普通竖向构件的正截面承载力都可以实现预设的不屈服的要求，水平长悬臂结构和大跨度结构中的关键构件正截面承载力可以实现预设的不屈服的要求，其受剪承载力可以实现预设的中震弹性的要求，个别框架梁出现抗弯屈服，但其受剪承载力未出现屈服。说明结构抗震性能符合第3性能水准的规定。

从SATWE内力输出文本文件中提取底层框架柱在恒载、活载及地震作用下调整前标准内力，考虑偶然偏心地震作用及双向地震作用按照高规3.11.3-2式验算框架柱是否为受拉构件。4号楼底层绝大部分框架柱处于受压状态，仅有一根框架柱出现拉应力，但拉应力比混凝土抗拉强度标准值要小。因此，可以确保其在中震作用下不出现受拉通缝，保证了框架柱刚度不退化。设计时对出现偏心受拉的框架柱采用特一级抗震构造措施。

中震作用下结构X向最大层间位移角为1/418，2层，Y向最大层间位移角为1/400，3层。

按照等效弹性方法分析的中震作用下的层间位移角均满足小于1/250的要求。

采用SATWE对结构进行大震不屈服分析。在预估罕遇地震作用下，关键构件的抗震承载力应满足不屈服的要求，水平长悬臂结构和大跨度结构中的关键构件正截面承载力可以达到预先设置的不屈服的要求，部分竖向构件及大部分耗能构件进入屈服阶段，但钢筋混凝土竖向构件的受剪截面应满足截面限制条件，防止构件发生脆性受剪破坏。说明结构抗震性能符合第4性能水准的规定。

大震作用下结构X向最大层间位移角为1/231，2层，Y向最大层间位移角为1/227，3层。

按照等效弹性方法分析的中震作用下的层间位移角

均满足小于1/100的要求。

七、中、大震下结构弹塑性静力分析

采用MIDAS Gen进行大震下结构弹塑性静力分析，MIDAS软件中提供了三种加载模式：水平推覆力分布采用模态分布、静力荷载分布、加速度常量分布三种形式。本次分析在X向和Y向分别采用三种加载模式，每种加载模式分别沿X、Y轴正负两个方向，共计12个工况，通过对结构荷载-位移曲线转化建立结构的能力谱曲线，由抗震规范中的反应谱曲线变换为结构中、大震作用下的弹塑性需求谱曲线，将能力谱曲线和需求谱曲线绘制在同一图中，两曲线的交点即为结构在相应地震作用下的“抗震性能点”。

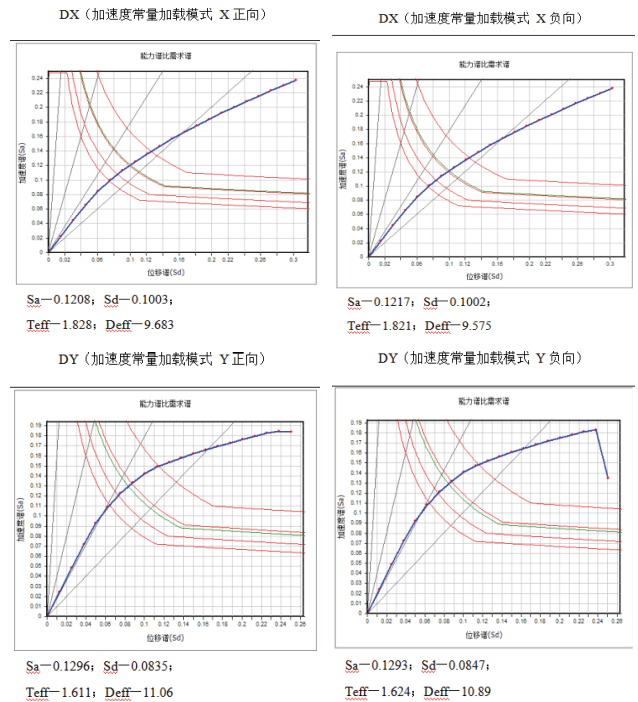


图3 加速度常量加载模式下，X、Y正向和负向能力谱-需求谱曲线

经对比分析发现,在12个工况中,以加速度常量加载模式下结构表现最为不利,因此,下面仅给出加速度常量加载模式下结构的大震弹塑性分析结果。图3分别列出了加速度常量加载模式下,X、Y正向和负向能力谱-需求谱曲线及性能点状态。

在各工况下能力谱曲线均能与需求谱曲线相交得到性能点。各工况下结构整体性能定性判断如下:中震下,4号楼结构总体均表现为弹性,部分耗能构件表现为轻微的塑性;大震下4号楼大部分工况表现为塑性,少数工况下表现为弹性,结构总体承载力留有较大的富余。

表2和表3分别给出了结构在中震和大震下的最大层间位移角以及最大层间位移角出现的楼层。

表2 中震作用下的结构最大层间位移角

| 加载方式 | DX+ | DX- | DY+ | DY- |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 4号楼 | 1/430 (2) | 1/426 (2) | 1/440 (2) | 1/441 (2) |

注:括号中表示出现最大层间位移角的楼层号

表3 大震作用下的结构最大层间位移角

| 加载方式 | DX+ | DX- | DY+ | DY- |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 4号楼 | 1/188 (2) | 1/189 (2) | 1/189 (2) | 1/185 (2) |

注:括号中表示出现最大层间位移角的楼层号

从表2和表3可以看出,中震下结构弹塑性层间位移角均没有超过1/250。大震下的结构弹塑性层间位移角均没有超过1/100。进一步查看其他工况,中、大震作用下结构弹塑性层间位移角均满足规范之要求。因此,可以判断所有工况下的层间位移角均能满足本工程所设定的性能目标的要求。

结论

采用多种软件对4号楼商业结构进行小震、中震和大震作用下的弹性时程分析、等效弹性分析和弹塑性静力分析,分析结果能较好的满足预设的抗震性能目标C的各项要求。

参考文献

- [1]建筑抗震设计规范[S].北京,中国建筑工业出版社,2016年版
- [2]混凝土结构设计规范[S].北京,中国建筑工业出版社,2015年版
- [3]高层建筑混凝土结构技术规程,北京,中国建筑工业出版社