

# 某超高层结构含设备层的方案比选及抗震分析

林宝新<sup>1, 2</sup>, 朱甜甜<sup>1</sup>, 贾鑫<sup>2</sup>

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽建筑大学设计研究院有限公司, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 以合肥市某超高层框架-核心筒结构为例, 对比分析两种设备层方案对总体结构的影响, 采用 PKPM 及 Midas Building 软件进行小震下的弹性分析及大震下的弹塑性分析, 并应用 Abaqus 软件对设备夹层剪力墙进行细部分析。计算结果表明: 该框架-核心筒结构选取设备层作为单独结构层, 能达到抗震性能目标确定的各项抗震性能要求, 是安全、合理的。

**关键词:** 框架-核心筒; 设备夹层; 罕遇地震; 动力弹塑性分析; 抗震性能

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)02-001-06

## Mechanical Floor Design Comparison and Seismic Analysis of A Super High-Rise Structure

LIN Baoxin<sup>1, 2</sup>, ZHU Tiantian<sup>1</sup>, JIA Xin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. Anhui Jianzhu University Design and Research Institute Co.Ltd., Hefei 230022, China)

**Abstract:** Taking a super high-rise frame-core tube structure in Hefei as an example, the influences of two mechanical floor designs on the overall structure were compared. PKPM and Midas Building softwares were used to perform elastic analysis under small earthquake and elasto-plastic analysis under large earthquake. The Abaqus software was used to perform the detail analysis of the equipment sandwich shear wall. The calculation results show that this frame-core tube structure is safe as the mechanical floor is divided into a separate structure layer, which can achieve all seismic performance requirements of the Seismic Performance Objectives.

**Keywords:** frame-core tube; equipment sandwich; rare earthquake; dynamic elastic-plastic analysis; seismic performance

在超高层建筑中, 因为建筑功能的需要而导致楼层层高随高度变化, 层高较小的设备层作为单独结构层, 可能导致该楼层侧向刚度发生突变, 造成超短柱、矮墙效应及柔软层转移问题。因此, 在满足建筑功能及结构要求的条件下, 对设备层层高的处理尤为重要。在实际工程中, 除了将设备层作为独立的一层外, 还存在将设备层与相邻层合并为一层的做法。故本文为设备层层高设计两种方案, 进

行多遇地震下的对比分析, 综合考虑并选取适合本工程方案。在此基础上, 对结构进行抗震性能分析, 验证设备层层高方案的可行性<sup>[1]</sup>。

### 1 工程概况

本工程为合肥市某超高层框架-核心筒结构办公楼, 地上总建筑面积 84 220 m<sup>2</sup>, 建筑总高度为 175.95 m, 地下 3 层, 地上 42 层, 嵌固端设置

收稿日期: 2021-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0701500)

作者简介: 林宝新(1966-), 男, 正高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 工程防震减灾理论与应用。



### 3.2 楼层侧向刚度比

根据《建筑抗震设计规范》(以下简称《抗规》)第 3.4.3-1 条<sup>[2]</sup>计算,两种方案楼层侧向刚度比分布详见图 4。方案 A 在设备层处 X、Y 向侧向刚度比最小值分别为 0.88、0.91,均小于 1.0,不满足《抗规》<sup>[2]</sup>规定。但根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(以下简称《高规》)第 3.5.2-2 条<sup>[3]</sup>计算,该层 X、Y 向侧向刚度最小值分别为 1.11、1.16,可满足《高规》<sup>[3]</sup>要求;方案 B 各楼层侧向刚度比值均不小于 1.0。方案 A 侧向刚度比虽满足《高规》<sup>[3]</sup>要求,但不满足《抗规》<sup>[2]</sup>,可认为侧向刚度不规则。

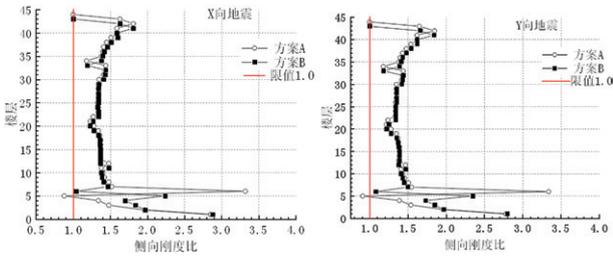


图 4 两种方案结构楼层侧向刚度比分布

### 3.3 楼层受剪承载力比

根据《高规》第 3.5.3 条<sup>[3]</sup>规定,由图 5 可看出:方案 A 的 X、Y 向各楼层受剪承载力比最小发生在第一层,分别为 0.88、0.84,均满足要求;而方案 B 的 X、Y 向各楼层受剪承载力比最小发生在第六层,分别为 0.73、0.72,不满足规范要求。

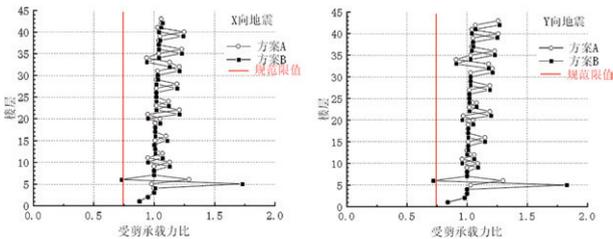


图 5 两种方案结构楼层受剪承载力比值分布

### 3.4 结构变形

由图 6 可看出:方案 A 与方案 B 的结构楼层最大位移及层间位移角的分布趋势、数值大小基本一致,最大顶点位移为:X 向 123.41 mm、Y 向为 136 mm(方案 A),X 向 124.51 mm、Y 向为 137.15 mm(方案 B);最大层间位移角为:X 向 1/1 085、Y 向 1/993(方案 A);X 向 1/1 081、Y 向 1/984(方案 B),均满足规范小于 1/800 的要求。

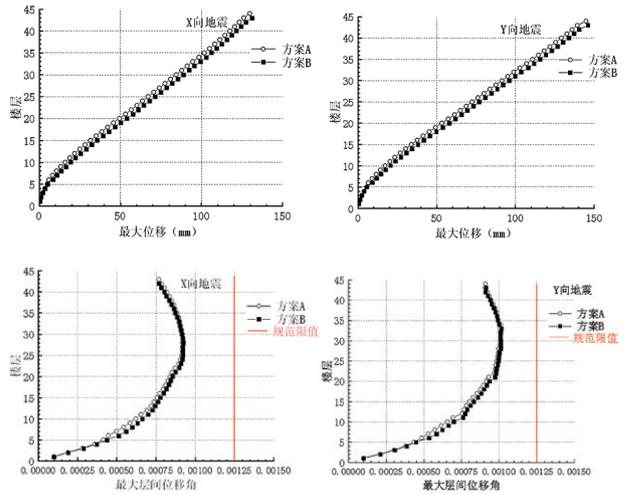


图 6 两种方案结构楼层位移及层间位移角分布

由上述在小震作用下对两种设备层方案结构计算的对比分析可以得出:两种方案在结构的自振特性、顶点位移以及层间位移角的最大值等方面均无明显影响。

方案 B 在含设备层的上一楼层处存在受剪承载力突变,受剪承载力比不满足规范要求,且考虑到方案 B 在使用过程中会增加检修难度,且层高大于 2.2 m 将算入计算面积,影响经济指标。虽然方案 A 的结构设备层层高突变,导致楼层侧向刚度不满足《抗规》<sup>[2]</sup>要求,但概念设计认为,方案 A 设备层层高虽比正常值小,但考虑核心筒整体悬臂受弯,剪力墙无反弯点,模型计算侧向刚度与核心筒剪力墙的层高关系不大,故为研究设备层层高过小可能造成的超短柱、矮墙效应及柔软层转移问题,拟采取进一步分析。

## 4 结构弹性时程分析

根据《高规》第 5.1.13 条<sup>[3]</sup>,该结构为 B 级高度,应进行弹性时程分析的补充计算。计算时,调整各地震波的有效峰值为 0.035 g,并分别沿两个方向加载。进行双向弹性动力时程分析时,主分量与次分量峰值的加速度比为 1:0.85,地震波振型阻尼比  $\xi$  为 5%,每条地震波持时均大于规定 15 s 和 5T 最大值,地震波的时间间隔  $\Delta t$  为 0.02 s。

由表 3 可看出,所选七条地震波满足《抗规》第 5.1.2 条<sup>[2]</sup>要求。X、Y 向各地震波下最大楼层剪力如图 7,楼层顶点最大位移及层间位移角如图 8。可以看出,七条地震波下的楼层最大顶点位移

及层间位移角包络图与 CQC 法基本相同,最大顶点位移为 145.52 mm,最大层间位移角为 1/958,满足规范要求。本工程选取时程法的平均值与反应谱法的较大值进行设计<sup>[4]</sup>。

表 3 弹性时程分析与 CQC 方法下基底剪力值 (kN) 计算结果比较

地震波	X 向	Vx/Vcx	Y 向	Vy/Vcy
TH002TG035	14 503.33	0.86	14 103.26	0.85
TH010TG035	15 807.76	0.94	12 321.42	0.74
TH057TG035	17 412.02	1.03	18 432.40	1.11
TH067TG035	12 533.79	0.74	13 238.05	0.79
TH072TG035	17 967.84	1.06	17 729.77	1.06
RH1TG035	18 494.88	1.09	17 743.57	1.06
RH4TG035	14 028.48	0.83	13 830.75	0.83
平均值	15 821.1	0.94	15 342.75	0.92
CQC 法	16 900.3	1.00	16 668.43	1.00

注:Vx/Vcx、Vy/Vcy—分别为各地震波及平均值的基底剪力与振型分解反应谱法的基底剪力比值。

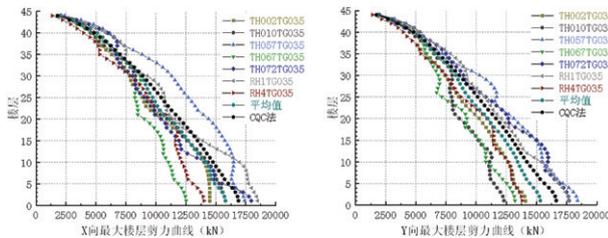


图 7 X、Y 向各地震波时最大楼层剪力

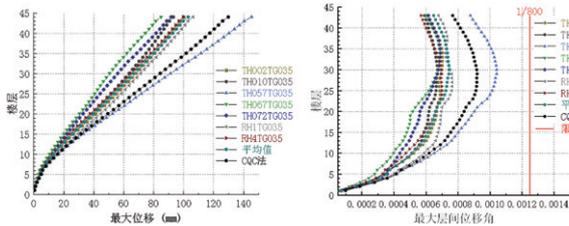


图 8 弹性时程分析计算结果曲线

## 5 结构动力弹塑性分析

根据《高规》第 5.1.13 条<sup>[3]</sup>要求,该结构为 B 级高度,宜采用弹塑性动力分析补充计算。

### 5.1 分析方法

本工程采用 Midas building V2020 来完成弹塑性动力时程分析。其中,混凝土选用单轴受压应力—应变本构,钢筋选用双折线本构,剪力墙采用理想

弹塑性剪切本构模型;梁、柱采用弯矩—旋转角单元,剪力墙采用非线性纤维墙单元,滞回模型选用修正武田三折线模型<sup>[5]</sup>。

### 5.2 地震波的选取

大震分析时,选用一组人工模拟和两组实际强震记录的加速度时程曲线,如图 9。计算分析时,将所采用各条地震波的地震有效峰值调整为 0.220 g,即 220 cm/s<sup>2</sup>;余同上文弹性时程分析。地震波振型阻尼比  $\xi$  为 7%。

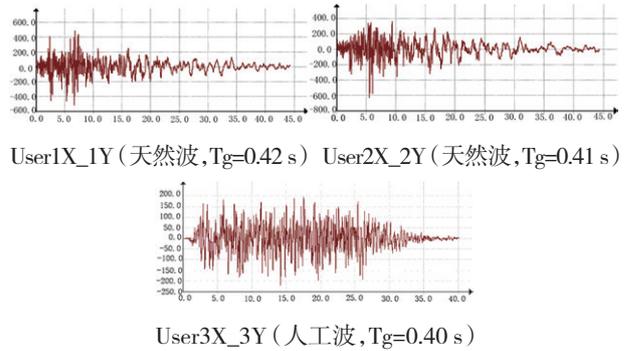


图 9 各地震波波图形

### 5.3 结构整体抗震性能指标

由图 10 可以看出,该结构在 X、Y 向的最大层间位移角分别为 1/200 (25F)、1/186 (23F),均小于 1/100,满足“大震不倒”的设防目标。结构 X 向底部平均剪力与规范反应谱法底部剪力之比为 76 824.36 kN/16 900.35 kN=4.55,Y 向底部平均剪力为与规范反应谱法底部剪力之比为 66 756.77 kN/16 668.43 kN=4.00,表明地震作用量级合理<sup>[6]</sup>。

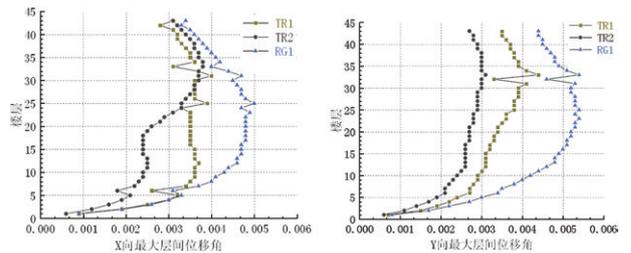


图 10 X、Y 向最大层间位移角

### 5.4 结构构件损伤情况

#### 5.4.1 框架铰状态

Midas Building 软件分析,框架柱采用延性系数 (D/D1) 来表述弹塑性状态,图例中的数值为该项上发生第一屈服的铰数量与分配给构件的该类型铰总数的比值<sup>[7]</sup>。由图 11(a)看出,地震持续加载到最后,框架柱的最大变形值 D 与第一屈服变

形值 D1 的比值  $D/D1$  的最大值为 0.437 78。不大于 1,说明框架柱未发生屈服,处于弹性状态,具有足够的强度。

框架梁采用三折线铰类型构件上的铰状态来表述弹塑性状态,图示用圆点显示输出三种状态:第一个是开裂及开裂到屈服前状态(蓝色),第二个是屈服及屈服后状态(绿色),第三个是完全破坏状态(红色)。图例中的数值为处于该状态铰的数量与分配给构件该类型铰总数的比值。由图 11 (b) 看出,地震持续加载到最后,65.9% 的框架梁进入屈服,而框架梁从始至终未进入第三状态。

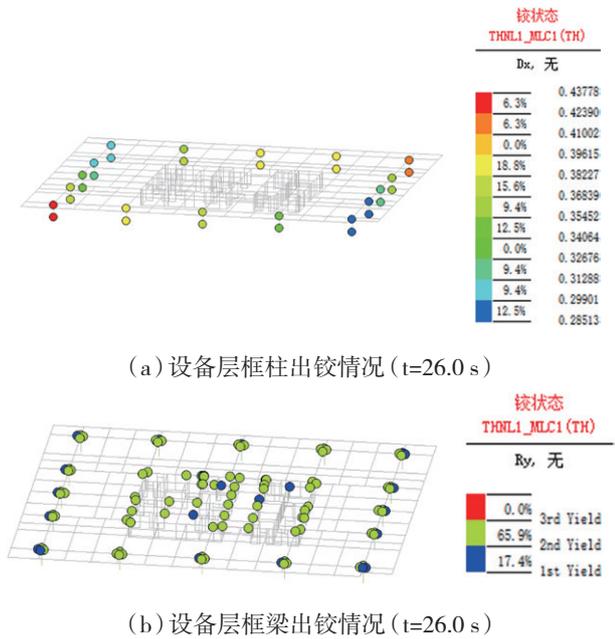


图 11 设备层框架铰分布图

### 5.4.2 墙铰状态

对剪力墙非线性纤维模型,从混凝土的压应变、钢筋的拉压应变、以及剪力墙的剪切应变与各极限应变的比值来评估剪力墙的破坏程度。其中,混凝土的抗压破坏等级和剪切破坏等级达到 3 级;钢筋拉压破坏等级达到 2 级时定义为屈服状态。且等级越高,破坏程度越大。

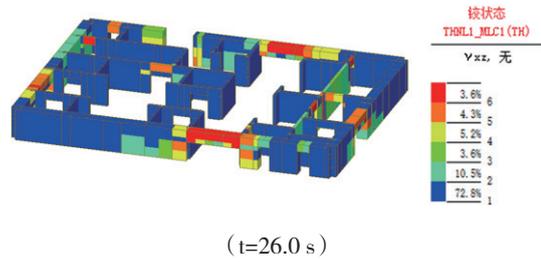
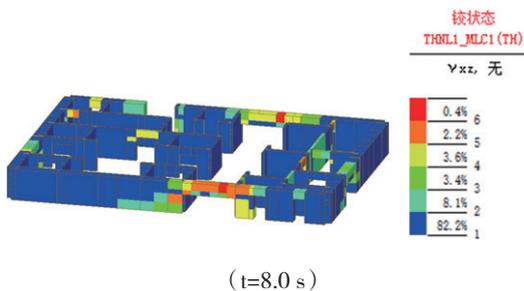


图 12 设备层剪力墙混凝土剪切破坏等级分布图

由图 12 可看出,设备层核心筒之间的连梁最先出现塑性铰。随着地震的持续,部分连梁进入屈服状态,极少部分连梁破坏严重。随着连梁的破坏逐渐加剧,洞口周边少数剪力墙开始逐步屈服、开裂,与连梁交接部分的混凝土跟随连梁一起破坏,但未出现整面剪力墙全截面进入破坏状态。整个过程中,连梁起到了较好的耗能作用<sup>[8]</sup>。

## 6 设备层局部墙肢有限元分析

根据 Midas Building 分析结果,选取结构设备层损伤相对严重的剪力墙采用 Abaqus CAE 2020 软件进行有限元分析。混凝土材料 C60,单元类型为 C3D8R<sup>[9]</sup>,采用《混凝土结构设计规范》<sup>[10]</sup> 中损伤模型;钢筋为 HRB400,单元类型为 T3D2,采用双折线弹塑性本构模型。分析时,约束剪力墙墙底位移,并约束剪力墙仅在平面内平动转动,荷载取大震下动力弹塑性分析内力<sup>[11]</sup>。根据 Midas Building 分析结果可得出:该部分墙体内力为  $N=4\ 413.83\ \text{kN}$ 、 $V_x=2\ 287.06\ \text{kN}$ 、 $V_y=13\ 865.52\ \text{kN}$ 、 $M_x=77\ 438.75\ \text{kN}\cdot\text{m}$ (采用整体坐标系)。

如图 13 为所选设备层剪力墙肢示意及其有限元模型(采用局部坐标系)。该模型计算结果如图 14、15,可看出:混凝土最大受压损伤因子为 0.492,墙角个别单元达到中度破坏;钢筋最大应力为 442.1 MPa,最大塑性应变为  $0.21 \times 10^{-3}$ ,主要集中在剪力墙墙角处<sup>[12]</sup>。

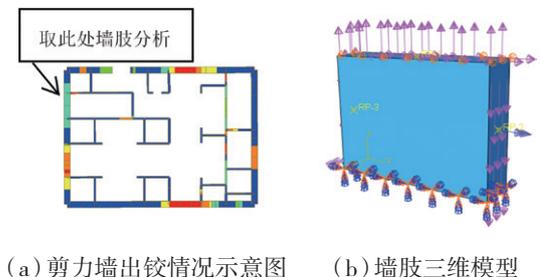
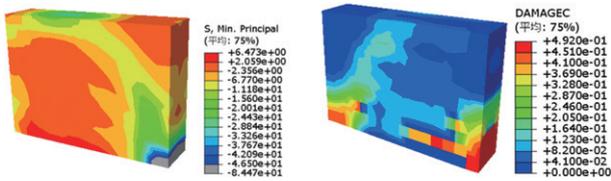
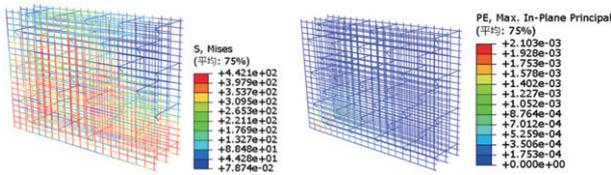


图 13 设备层剪力墙有限元分析模型



(a) 应力云图 (MPa) (b) 损伤云图

图 14 设备层混凝土及受压损伤云图



(a) 应力云图 (MPa) (b) 塑性应变云图

图 15 设备层剪力墙钢筋应力及塑性应变云图

## 7 抗震加强措施

通过以上分析,本工程选取设备层作为单独结构层,应采取加强措施如下<sup>[13]</sup>:

(1) 设备层层高小,该层框架柱均为超短柱,采用型钢混凝土柱且加大框柱箍筋的措施。

(2) 由于设备层侧向刚度较大,为避免柔软层转移,应加强设备层的上下相邻层的楼板、墙和柱。

(3) 本工程核心筒整体悬臂受弯,矮墙效应不明显,但设备层也应作为底部加强区的延伸部分进行设计。

## 8 结论

(1) 方案 A、B 对比分析看出,两种方案对结构整体影响不大。方案 A 在设备层处侧向刚度不满足《抗规》<sup>[2]</sup>,应采取适当的抗震加强措施。

(2) 利用 Midas Building 软件对结构整体和构件的抗震性能分析表明,结构满足抗震性能目标要求。

(3) 利用 Abaqus 软件对设备夹层剪力墙局部墙肢进行细部分析表明,仅所选墙肢角部个别单元

发生中度破坏,其余部分均保持弹性。

(4) 设备层作为单独结构层可满足工程使用安全。

### 参考文献:

- [1] 王绍合,徐自国,肖从真,等.高层建筑设备层结构方案对结构抗震性能的影响研究[J].建筑科学,2011,27(5):6-11.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.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,2011.
- [4] 王宇,束天明,祖青.某超限高层结构设计与分析[J].建筑结构,2020,50(5):66-70,57.
- [5] 徐晓珂,安新,姜安庆,等.建滔广场抗震性能分析[J].建筑结构,2019,49(15):53-58.
- [6] 林宝新,杨阳.某超高层框筒结构的抗震性能分析[J].安徽建筑大学学报,2016,24(3):1-7.
- [7] 林宝新,贾鑫.某带斜柱框剪结构的抗震性能分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(6):713-719.
- [8] 林宝新,石楷锋,贾鑫,等.合肥某超限框架-核心筒结构外框柱设计[J].建筑结构,2017,47(23):37-42,91.
- [9] 张劲,王庆扬,胡守营,等.ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J].建筑结构,2008,38(8):127-130.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [11] 丁世伟,张慎,王杰,等.基于损伤的构件抗震性能评价方法研究与软件开发[J].建筑结构,2016,46(6):36-42.
- [12] 张慎,王杰,程明,等.方正金融中心超限高层混合结构动力弹塑性时程分析[J].建筑结构,2020,50(S1):428-434.
- [13] Taranath BS.Reinforced concrete design of tall buildings[M].Florida:CRC Press,2010.