

# 中储粮大厦新型双层隔震结构地震响应分析

单 航 吕道俊 张 政 张翼飞 陈 冉

中央储备粮驻马店直属库有限公司 河南驻马店 463600

**摘 要:** 新型双层隔震结构是在基础隔震和层间隔震结构的基础上建立的一种新型隔震结构。为研究新型双层隔震结构地震响应,文中建立了中间框架隔震层位置不同的新型双层隔震结构进行分析比。结构表明:隔震层位于结构中部附近,结构隔震效果最佳。

**关键词:** 新型双层隔震结构;非线性时程分析;中央储备粮办公楼;高层建筑

## 引言

近年来,我国地震频发,为保证人民的生命财产安全,人们对结构的隔震技术越来越关注。欧进萍<sup>[1]</sup>研究大位移摩擦摆底层和多层隔震为韧性结构发展提供了结构新体系和关键发展方向;张颖<sup>[2]</sup>建议了一种针对分段隔震结构,如何选择每一隔震层的刚度和阻尼参数的方法,并执行了该分段隔震结构隔震效果的仿真分析;高建平、潘月月<sup>[3-4]</sup>通过参数和能量分析,确定了分段隔震结构的理想参数配置及其能量响应模式,并提出了一种基于能量的分段隔震结构的被动控制参数优化技术;乔丽维<sup>[5]</sup>探究了分段隔震结构隔震层中刚度与阻尼变化如何影响隔震性能。胡宝庆<sup>[6]</sup>研究了分段隔震结构在单向及双向水平地震作用下的地震响应,并进行了相应的分析比较。

## 一、数值模型

### (一) 工程概况

中储粮大厦新型双层隔震结构为18层钢筋混凝土框架-核心筒结构,属于丙类建筑,设计地震加速度为8度。平面图如图1所示,结构的平面尺寸为35m×15m,建筑高度为68.4m,首层层高为4m,标准层层高3.6m,

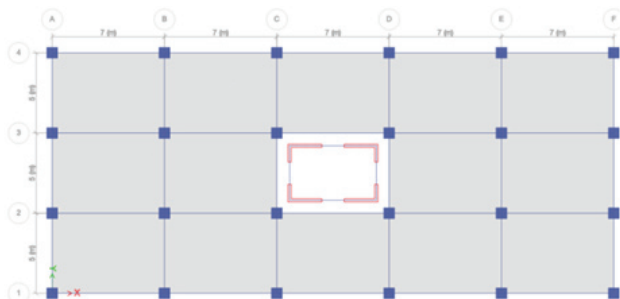
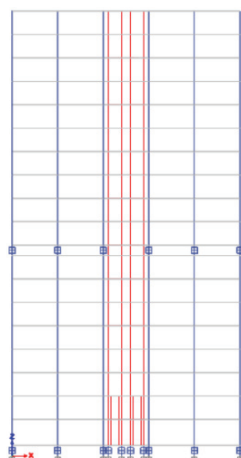
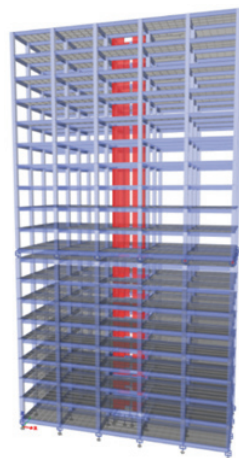


图1 平面图

立面图、三维图如图2所示。框架柱、框架梁和核心筒混凝土强度等级定义为C40,楼板厚度为150mm。梁柱保护层厚度为40mm。纵向受力钢筋采用的型号为HRB400,箍筋采用的钢筋型号为HPB300。框架梁、柱、箍筋信息见表1,核心筒剪力墙信息见表2。



(a) 八层隔震



(b) 八层隔震

图2 立面图、三维图

表1 框架截面信息

截面类型	所在楼层	截面尺寸 (mm)
框架柱	1~8	700×700
	9~18	600×600
框架梁	1~8	700×350
	9~18	600×300
连梁	1~18	400×200

### (二) 模型参数定义

在使用有限元软件ETABS构建新型双层隔震结构的模型过程中,模拟核心筒底部加固区域的方法是:对于约束边缘和非约束边缘的构件剪力墙,采用分层壳元素

表2 剪力墙截面信息

截面类型	截面名称	单元类型	混凝土厚度 (mm)	竖向分布钢筋配筋率
非底部加强区剪力墙	W200	薄壳	200	--
约束边缘构件剪力墙	W200_Layer_Edge	分层壳	200	5%
非约束边缘构件剪力墙	W200_Layer	分层壳	200	0.50%

进行模拟。对于非底部加固区的剪力墙，则使用薄壳元素来模拟。隔震支座则通过 Isolation 元素实现，该元素需考虑两种剪切变形的非线性特性。框架柱应用P-M2-M3铰连接，而框架梁与连梁的两端则采用M3铰连接。材料方面，C40混凝土使用Takeda滞回模型，而HPB300和HRB400级钢筋则采用Kinematic滞回模型。对于结构的分析，采用直接积分法来进行模型的计算。

隔震层设置在框架和核心筒底部，框架中间隔震层以四层隔震、六层隔震、八层隔震、十层隔震和十二层隔震分别代表框架中间隔震层位于四层、六层、八层、十层和十二层顶。隔震层层高1.6m，隔震支座通过固结与立柱连接。框架底部和框架中间隔震层分别装有24个LRB800铅芯橡胶隔震支座，核心筒底部隔震层装有12个LRB900铅芯橡胶隔震支座。LRB800和LRB900铅芯橡胶隔震轴的信息见表3。

表3 隔震支座参数

型号	有效直径 (mm)	橡胶总厚度 (mm)	屈服前刚度 (kN/m)	100%水平剪切变形 (kN/m)	250%水平剪切变形 (kN/m)	竖向刚度 (kN/m)	屈服力 (kN)
LRB800	800	160	13808	2746	1770	4355	167.5
LRB900	900	162	17046	3433	2213	5233	212

### (三) 地震波的选取

为研究新型双层隔震结构的减震效果，选择3条地震波，其中2条天然波，1条人工波。通过调整，将地震波的加速度峰值设定为 $400\text{cm/s}^2$ ，这一数值等同于在罕见地震事件中，基本地震烈度为Ⅷ级时所对应的加速度峰值。地震波的加速度反应谱如图3。

## 二、新型双层隔震结构地震相应研究

### (一) 模态分析

对无隔震、基础隔震和新型双层隔震三种结构体系进行模态分析，前五阶自振周期见表4所示。

从表4的数据可以看出，无论是基础隔震还是新型

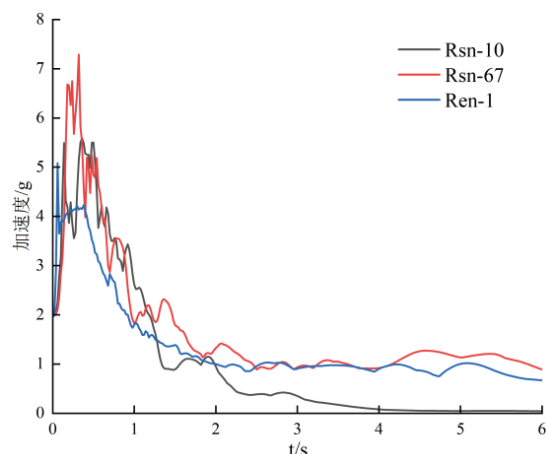


图3 地震波反应谱

双层隔震结构，都显著提升了结构的自振周期。特别是新型双层隔震结构体系，其周期的延长幅度更为显著。这主要得益于新型双层隔震在基础隔震的基础上增加了一个中间隔震层，进一步增加了结构自振周期。新型双层隔震结构体系中四层隔震、六层隔震、八层隔震、十层隔震和十二层隔震的第一阶自振周期与无隔震结构体系的比值分别为2.3、2.218、2.144、2.134和2.111，随着中间隔震层所处位置的提高，其比值有所减少，这表明中间隔震层的具体定位对结构隔震性能具有重要影响。与基础隔震结构相比较，采用新型双层隔震体系的结构在第一、第二和第三阶低阶振型上的增幅更加突出。这种低阶振型自振周期的显著提升，有助于增强隔震结构低阶振型的阻尼作用，进而有效减少地震力对上层建筑的损伤。

表4 三种结构体系的前五阶自振周期 (s)

振型阶数	无隔震	基础隔震	新型双层隔震				
			四层隔震	六层隔震	八层隔震	十层隔震	十二层隔震
1	1.761	3.236	4.051	3.906	3.776	3.758	3.718
2	1.544	3.117	3.743	3.793	3.761	3.638	3.527
3	1.52	3	3.424	3.447	3.428	3.435	3.426
4	0.583	0.972	1.268	1.457	1.589	1.666	1.678
5	0.542	0.853	1.233	1.428	1.555	1.628	1.629

### (二) 基底剪力对比分析

无隔震、基础隔震和新型双层隔震结构的基底剪力对比如图4。由图可见，在三条地震波作用下，基础隔震和新型双层隔震结构的基底剪力值均小于无隔震结构。在Rsn-10和Rsn-67两条地震波的作用下，新型双层隔震结构体系中的四层隔震、六层隔震、八层隔震、十层隔震的基底剪力均小于基础隔震。三条地震波作用下四

层隔震、六层隔震、八层隔震、十层隔震和十二层隔震的基底剪力的平均值比基础隔震结构的基底剪力分别减少了2%、2.8%、5.8%、6.2%和8.4%，说明新型双层隔震结构体系能进一步削弱传入上部结构中的能量，且八层隔震和十层隔震结构的基底剪力较四层隔震和六层隔震结构好。

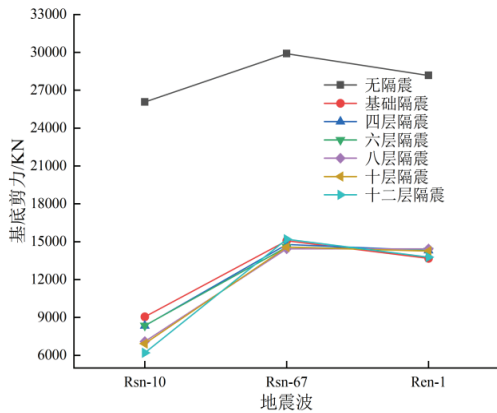


图4 基底剪力

### (三) 顶层加速度对比分析

无隔震、基础隔震和新型双层隔震结构的顶层加速度对比如图5。由图可见，三条地震波作用下新型双层隔震结构中的四层隔震、六层隔震、八层隔震、十层隔震和十二层隔震的顶层加速度的平均值比无隔震结构的顶层加速度分别减少了66.18%、69.07%、73.8%、74.9%和76.1%；比基础隔震结构的顶层加速度分别减少了20.77%、27.54%、38.62%、41.2%和44%，说明新型双层隔震结构体系可以更好的降低结构自身的振动，且八层隔震、十层隔震和十二层隔震结构的顶层加速度较四层隔震和六层隔震结构好，通过设置框架中间隔震层位置可以控制结构顶层加速度，说明选取最佳框架中间隔震层位置是比较重要的。

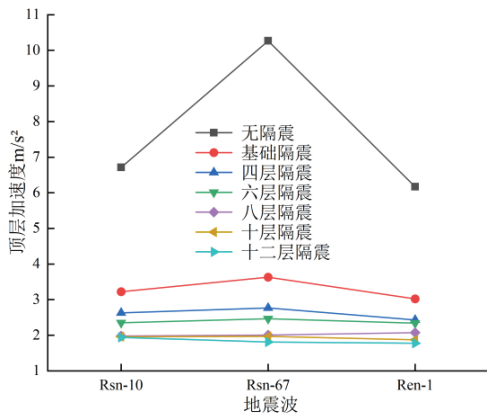


图5 顶层加速度

### (四) 层间剪力对比分析

无隔震、基础隔震和新型双层隔震结构在三条地震波作用下层间剪力平均值如图6，由图可知：新型双层隔震结构和基础隔震结构对比无隔震结构都能有效减小层间剪力，且新型双层隔震结构比基础隔震结构效果更好。新型双层隔震结构中八层隔震和十层隔震结构比四层与六层隔震结构在层间剪力表现良好，这表明在框架结构的中部或稍低于中部安置隔震层能够取得更优的效果。

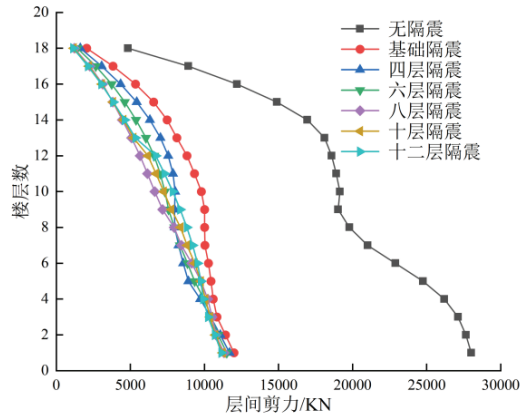


图6 三条地震波作用的层间剪力平均值

### (五) 隔震层位移对比分析

依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)规定<sup>[89]</sup>，在Ⅷ度罕见地震影响下，隔震底座承受的拉力不应超过1MPa，而压力的最大允许值为30MPa。此外，隔震底座的最大水平移动距离不得超出其直径的0.55倍与橡胶层总厚度三倍之间较小的数值。本文采用LRB800支座和LRB900支座，因此隔震支座水平限值为800mm×0.55=440mm和162×3=486mm。由表5、6可知，框架、核心筒基础隔震层和框架中间隔震层拉压应力值和最大位移均未超出规范限制。

表5 隔震支座的应力

支座指标	压应力 (MPa)	拉压力 (MPa)
基础隔震	12.36	0.89
四层隔震	11.52	0.89
六层隔震	10.25	0.85
八层隔震	9.90	0.83
十层隔震	9.89	0.79
十二层隔震	9.99	0.73

### (六) 层间位移对比分析

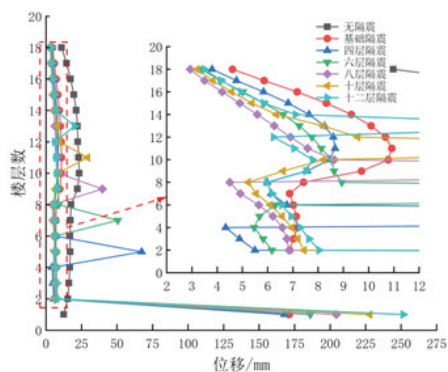
对无隔震结构、基础隔震结构和具有不同中间隔震层布置的新型双层隔震结构分别在两条地震波作用下得

表6 地震作用下隔震层最大位移

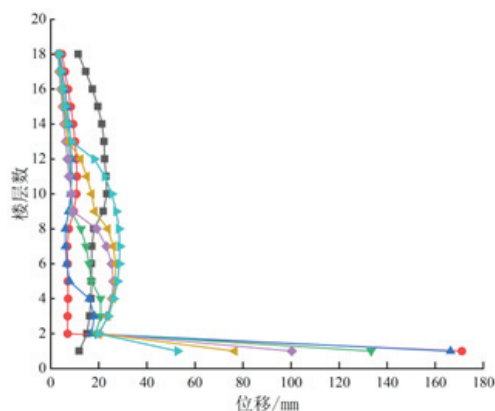
地震波类型		框架基础 隔震层最 大位移 (mm)	核心筒基 础隔震层 最大位移 (mm)	框架中间 隔震层最 大位移 (mm)
Rsn-10	基础隔震	58.007	58.133	--
	四层隔震	53.786	39.415	33.447
	六层隔震	54.632	28.325	41.306
	八层隔震	56.239	11.923	52.689
	十层隔震	52.468	8.336	46.349
	十二层隔震	51.394	6.605	31.809
Rsn-67	基础隔震	170.486	170.693	--
	四层隔震	166.976	165.654	66.156
	六层隔震	182.317	115.358	48.267
	八层隔震	203.492	99.868	38.544
	十层隔震	226.598	73.261	26.659
	十二层隔震	250.402	52.344	19.948
Ren-1	基础隔震	144.979	145.169	--
	四层隔震	160.121	150.931	54.117
	六层隔震	173.598	120.696	39.591
	八层隔震	200.78	91.237	29.534
	十层隔震	207.365	60.582	27.952
	十二层隔震	221.161	36.65	26.512

到结构层间位移, 1两条地震波作用下层间位移如图7~8, Rsn-67和Ren-1波作用下的三种隔震结构形式框架层间位移分别如图7、8的(a), 核心筒层间位移如图7、8的(b)。

图7可知, 在Rsn-67地震波作用下, 基础隔震结构和新型双层隔震结构的非隔震层框架层间位移均小于无隔震结构的框架层间位移。新型双层隔震结构的中间框架隔震层位移随着中间隔震层位置的升高而降低, 且八层隔震和十层隔震结构的框架层间位移要小于四层隔震结构和六层隔震结构的框架层间位移。



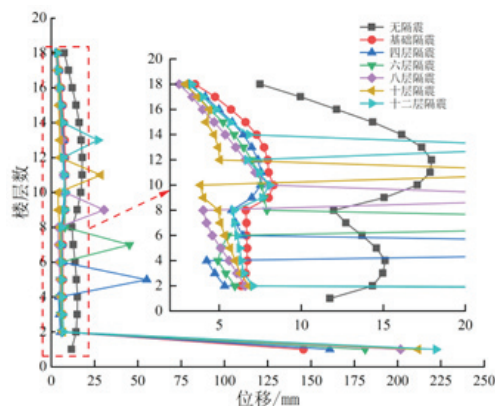
(a) 框架层间位移



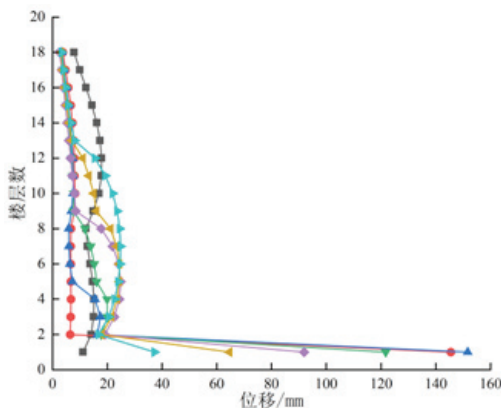
(b) 核心筒层间位移

图7 Rsn-67地震波工况下层间位移

由图8可知, 在Ren-1地震波作用下, 新型双层隔震结构的非隔震层框架层间位移均小于无隔震和基础隔震结构的框架层间位移。新型双层隔震结构的中间框架隔震层位移随着中间隔震层位置的升高而降低, 且八层隔震和十层隔震结构的框架层间位移要小于四层隔震、六层隔震和十二层隔震结构的框架层间位移。



(a) 框架层间位移



(b) 核心筒层间位移

图8 Ren-1地震波工况下层间位移



## 结论

(1) 新型双层隔震结构体系的减震效果好于基础隔震结构, 新型双层隔震体系在延长建筑结构的自振周期方面, 相较于基础隔震结构表现得更为显著。而且, 随着框架中间隔震层设置位置的下移, 自振周期的数值相应增加。

(2) 当在新型双层隔震结构中, 框架的中间隔震层设置在建筑的中段附近, 能够实现较为优异的隔震性能, 四层隔震、六层隔震、八层隔震、十层隔震和十二层隔震比基础隔震结构的顶层加速度分别减少了20.77%、27.54%、38.62%、41.2%和44%, 隔震层位于中部附近时可以有效降低结构的顶层加速度。

(3) 新型双层隔震结构的层间剪力整体要小于基础隔震结构, 且八层隔震和十层隔震要优于四层隔震和六层隔震结构。

## 参考文献

- [1] 欧进萍, 武沛松, 关新春. 大位移摩擦摆底层和多层隔震韧性结构[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(04): 657-676.
- [2] 张颖, 谭平, 周福霖. 分段隔震新体系的参数设计与减震性能研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 270-275.
- [3] 高剑平, 罗丹, 潘月月. 带转换层高层建筑分段隔震体被动控制参数优化[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(04): 23-29+57.
- [4] 潘月月. 基于能量的高层建筑分段隔震体系被动控制参数优化[D]. 华东交通大学, 2011.
- [5] 乔丽维. 分段隔震结构的非线性动力特性分析[D]. 燕山大学, 2013.
- [6] 宝庆, 穆琳, 赵永刚. 高层建筑分段隔震结构双向水平地震作用下的动力时程分析[J]. 甘肃科学学报, 2013, 25(03): 88-92.