

李广洲,韩俊浩,郭军林,等.高烈度区L型平面不规则多层框架结构隔震设计与研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(3):19-25. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.003

LI G Z, HAN J H, GUO J L, et al. Base Isolation Design and Research for the L-shaped Plane Irregular of Multilayer Frame Structure in High Earthquake Intensity Regions [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(3):19-25. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.003

# 高烈度区L型平面不规则多层框架结构隔震设计与研究

李广洲<sup>1,2\*</sup>, 韩俊浩<sup>1</sup>, 郭军林<sup>1</sup>, 王颖<sup>1</sup>

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子832000;2.华南理工大学土木与交通学院,广东广州510640)

**摘要:**针对高烈度区L型平面不规则多层框架结构采用基础隔震技术进行了研究.采用ETABS软件对我国高烈度区L型平面不规则多层框架结构建立了精细化有限元模型,提出该结构基础隔震设计目标.对L型平面不规则多层框架结构进行了叠层橡胶支座的布置与选型.基于时程分析法,研究基础隔震效果.结果表明:L型平面不规则多层框架采用基础隔震技术能有效地降低上部结构的地震反应,大大提高结构的安全性;单向或者双向地震作用对该L型平面不规则多层框架隔震结构水平向减震系数的影响基本一致;双向地震作用与单向地震作用对比下,隔震层位移、叠层橡胶支座极大面压和极小面压均有所增加,但均满足规范要求.同时,为后续类似工程提供了依据和参考.

**关键词:**高烈度;L型平面不规则;基础隔震;时程分析;减震系数

**中图分类号:**TU246.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)03-0019-07

## Base Isolation Design and Research for the L-shaped Plane Irregular of Multilayer Frame Structure in High Earthquake Intensity Regions

LI Guangzhou<sup>1,2</sup>, HAN Junhao<sup>1</sup>, GUO Junlin<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Research on base isolation design for the L-shaped plane irregular of multilayer frame structure in high earthquake intensity regions is presented. The fine finite element model of the L-shaped plane irregular of multilayer frame structure in high earthquake intensity regions is established by the software of ETABS, and the objective of base isolation design for the L-shaped plane irregular of multilayer frame structure is proposed. Isolators are optimized and arranged for the L-shaped plane irregular of multilayer frame structure herein. Time-history analysis of the isolated L-shaped plane irregular of multilayer frame structure is carried out and control effectiveness of base isolation of the L-shaped plane irregular of multilayer frame structure is evaluated. Results show that base isolation technology can significantly reduce the seismic response of the L-shaped plane irregular of multilayer frame structure and increase the seismic safety reservation of the L-shaped plane irregular of multilayer frame structure. The influence of unidirectional or bidirectional seismic on the horizontal damping

收稿日期:2021-06-16

基金项目:兵团重点领域科技攻关项目资助(2021AB027);石河子大学校级项目资助(ZZZC202004B)

\*通信作者,E-mail: guangzhouli1989@126.com

coefficient of the L-shaped plane irregular of multilayer frame isolated structure is basically unanimously. The displacement of isolation layer and the maximum and minimum surface pressure of laminated rubber bearing are increased under the comparison of bidirectional seismic and unidirectional seismic, but all targets can meet the requirements of the specification. Meanwhile, it provides the basis and reference for the following similar projects.

**Keywords:** high earthquake intensity regions; L-shaped plane irregular structure; base isolation; time-history analysis; damping coefficient

地震时,平面不规则结构发生破坏的可能性远远超过平面规则结构,对于平面不规则结构,为了减少结构的破坏,常见的措施是通过设置防震缝将上部结构分成若干相对独立的单塔结构,而采用基础隔震技术上部结构无需设缝,整体性较好。黄小宁等<sup>[1]</sup>对平面不规则基础隔震结构抗扭设计进行了相关研究;张全伍等<sup>[2]</sup>对某平面不规则结构进行了组合隔震设计研究;尚守平等<sup>[3]</sup>对低层框架结构采用基础隔震技术进行了振动台试验研究,减震效果显著;刘德稳等<sup>[4]</sup>对不规则结构采用基础隔震设计与传统抗震设计等3种方案进行优化分析,得出基础隔震设计最优方案;安徽建筑大学的干洪和雷庆关教授及其研究生等<sup>[5-10]</sup>对不规则隔震结构进行了相关理论及经济性研究;刘德稳等<sup>[11]</sup>对基于 Rayleigh 阻尼模型的层间隔震结构上下部选择进行了对比分析;韩森等<sup>[12]</sup>对近断层地震下层间隔震结构楼层反应谱进行了分析;张亚飞等<sup>[13]</sup>对长周期地震动下框架-剪力墙结构隔震改造进行了相关理论研究和分析;FABIO<sup>[14]</sup>对意大利中部和世界范围内脉冲型地震作用下,隔震不规则结构的抗震需求进行了研究。

本文针对高烈度区 L 型平面不规则多层框架结构采用基础隔震技术进行系统的分析,以伊犁某养老院为例,研究其在单向或双向地震作用下的隔震效果,并对水平向减震系数、隔震层位移以及叠层橡胶支座极大和极小面压进行了分析,从而验证了基础隔震技术对 L 型平面不规则多层框架结构在高烈度寒区进行设计的有效性,为后续其他相似工程提供基础和依据。

## 1 工程基本概况

伊东幸福家园综合楼 B 楼位于新疆维吾尔自治区伊犁州伊宁市伊宁县,使用功能为养老院.平面形状为 L 型,结构类型为钢筋混凝土框架结构,柱子主要尺寸为 800×800,700×700 mm,主梁主要尺寸为 300×600,300×550 mm,次梁主要尺寸为 200×400,200×300 mm,项目其他概况:地上 5 层,无地下室,总高度 20.55 m,长度 60.10 m,宽度 52.40 m,结构类型:框架结构,基础类型为柱下独立基础,基本设计参数如表 1 所示。

表 1 基本设计参数

设防类别	基本风压	地面粗糙度	抗震设防烈度	场地类别	设计地震分组
重点设防	0.6 kN/m <sup>2</sup>	B 类	8 度(0.2)	II 类	第三组

## 2 静力特性计算

### 2.1 叠层橡胶支座的布置及选型

基于高烈度区的特点,经过动力时程多次试算与分析,最终选用了 61 个叠层橡胶支座,本工程选用支座参数及压应力设计值分别如表 2 和表 3 所示。

基于设计目标和使用功能要求,高烈度区 L 型平面不规则多层框架结构隔震设计流程如图 1 所示。

表 2 隔震支座参数

型号	有效直径/mm	橡胶厚度/mm	竖向刚度/(kN/mm)	屈服力/kN
LNR600	600	105.6	2 443.1	/
LRB600	600	105.6	2 872.8	90.4
LNR700	700	120.0	3 228.3	/
LRB700	700	120.0	3 774.6	123.1
LNR800	800	138.0	3 520.2	/

表3 支座压应力设计值

型号	数量	平均压力/kN	最大面压/MPa	平均面压/MPa
LNR600	11	2 002.45	9.64	7.09
LRB600	30	1 674.93	8.89	5.93
LNR700	16	3 533.50	10.28	9.19
LRB700	2	3 451.00	9.23	8.79
LNR800	2	4 466.00	8.93	8.89

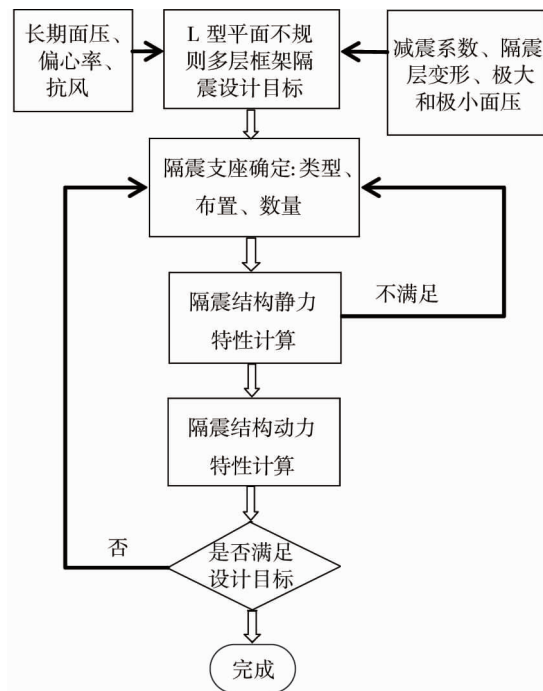


图1 隔震结构设计流程

## 2.2 偏心率计算

经过计算L型平面不规则多层框架隔震结构的质心坐标、刚心坐标、偏心距离、回转半径、偏心率等,得出水平X向偏心率:0.93%,Y向偏心率:0.16%,均小于规范规定的3%,偏心对结构的影响很小,避免了P- $\Delta$ 效应,满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016年版)<sup>[15]</sup>的要求。

## 2.3 结构抗风验算

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016年版)<sup>[15]</sup>第12.2.1条规定进行隔震结构抗风验算。本工程在进行隔震设计后,结构的风荷载验算具体结果如表4所示,由表4可知隔震层的抗剪强度满足规范的要求,无须附加抗风装置。

表4 结构风荷载验算结果

方向	风荷载设计值/kN	总屈服力/kN	是否满足规范要求
X向	1 235	3 854	满足
Y向	4 367	4 454	满足

## 3 隔震结构动力时程分析

### 3.1 计算程序和力学模型

本工程采用国际通用的三维空间弹塑性有限元设计及分析软件ETABS对结构进行建模分析。上部结构及隔震层采用三维模型,上部梁、柱以及楼板只考虑弹性,天然叠层橡胶支座的水平刚度简化为线性,铅

芯叠层橡胶支座的水平刚度简化为双线性的计算模型.隔震结构的三维空间模型如图2所示.

### 3.2 输入地震波的选取

徐朝阳等<sup>[16]</sup>对建筑抗震设计规范中地震动记录选取进行了研究;根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016年版)<sup>[15]</sup>第5.1.2条规定,规定选用适用于II类场地的2组实际强震记录6wave180和9wave90,1组人工波rgb进行结构地震反应分析.由图3可知:3条地震波的平均反应谱与规范的反应谱曲线在统计意义上相符,删除基底剪力对比也满足规范要求.

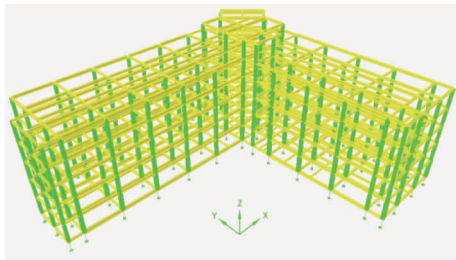


图2 分析模型

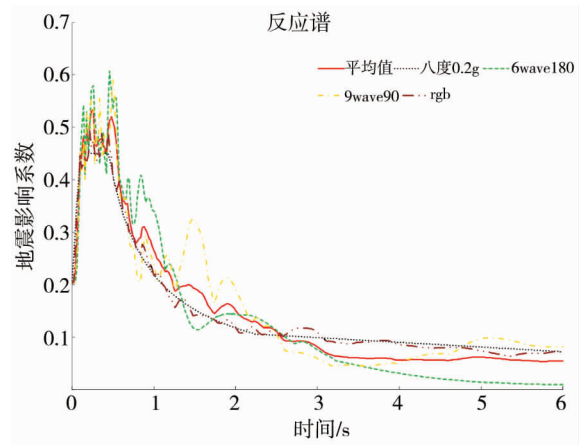


图3 拟合反应谱与规范反应谱曲线

### 3.3 水平向减震系数

L型平面不规则多层框架隔震结构在设防烈度单向地震作用下,隔震前后楼层层间剪力对比如图4所示;双向地震波按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016年版)<sup>[15]</sup>第5.1.2条条文解释:1(水平向1):0.85(水平向2)输入,在设防烈度双向地震作用下,隔震前后楼层层间剪力对比如图5所示.

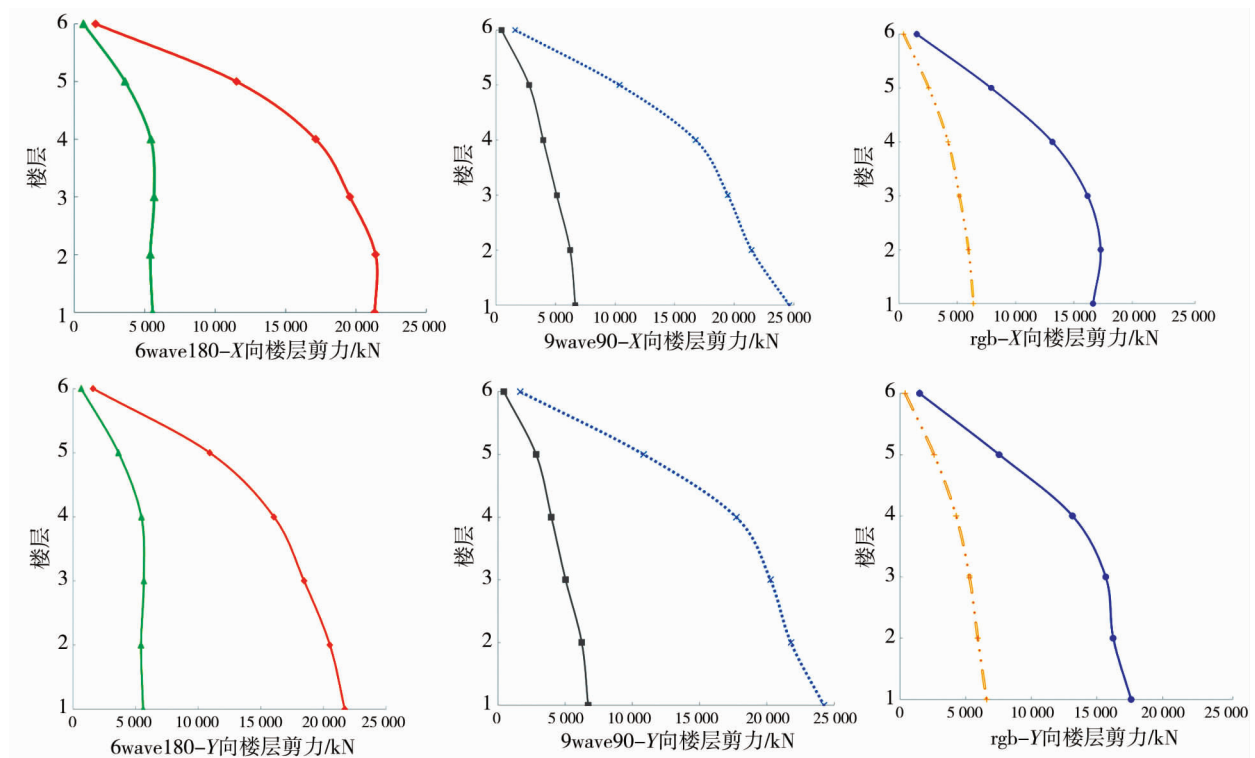


图4 楼层剪力对比

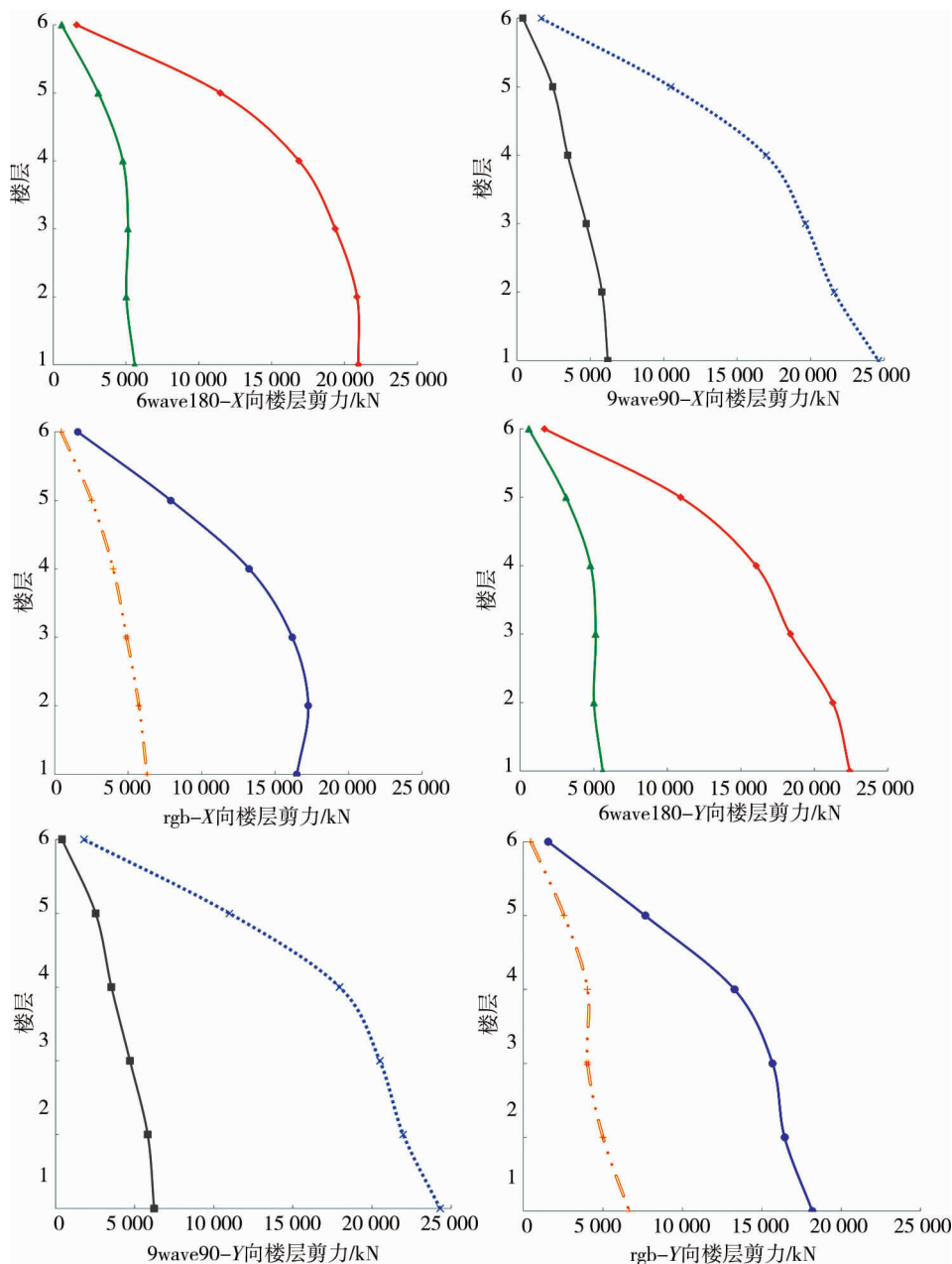


图5 楼层剪力对比

由图4和5分析可知:该L型平面不规则多层框架结构在采用基础隔震技术后,在设防烈度单向地震作用下,水平X向的最大剪力比值0.38,Y向的最大剪力比值0.37;在设防烈度双向地震作用下,水平X向的最大剪力比值0.38,Y向的最大剪力比值0.37.因此,根据规范可知其水平向减震系数为0.38,故隔震后结构的水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max 1} = \beta \alpha_{\max} / \psi = 0.38 \times 0.16 / 0.85 = 0.072$ ,该工程平面形状为L形,考虑5%偶然偏心的影响, $\alpha'_{\max 1} = 1.05 \alpha_{\max} = 1.05 \times 0.072 = 0.076$ ,而7度(0.1g)的水平地震影响系数最大值为0.08,所以上部结构水平地震作用比在传统抗震时减少50%.进而说明,单向或者双向地震作用对该L型平面不规则多层框架隔震结构水平向减震系数的影响基本一致.

### 3.4 罕遇地震作用下,隔震效果分析

#### 3.4.1 层间位移分析

地震加速度峰值按8度罕遇地震( $400 \text{ cm/s}^2$ )调整输入.单向地震作用下,水平X向和Y向楼层层间位移角数值如图6所示;双向地震作用下,水平X向和Y向层间位移角数值如图7所示.从图6和图7中可以看出,基础隔震上部结构楼层的最大层间位移角数值为1/217,小于隔震结构性能目标弹塑性层间位移角限值1/100,均满足规范要求.由此可知:在单向或者双向地震作用下,该L型平面不规则多层框架隔

震结构上部楼层层间位移角变化趋势基本相同,楼层最大层间位移角基本接近,均符合规范要求.

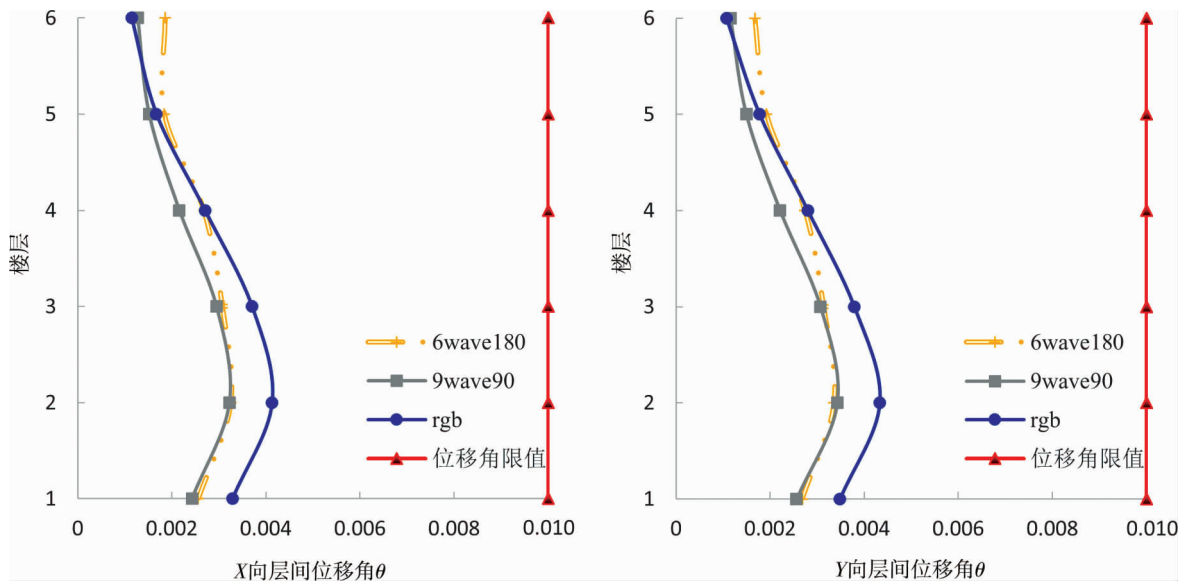


图6 楼层层间位移角对比

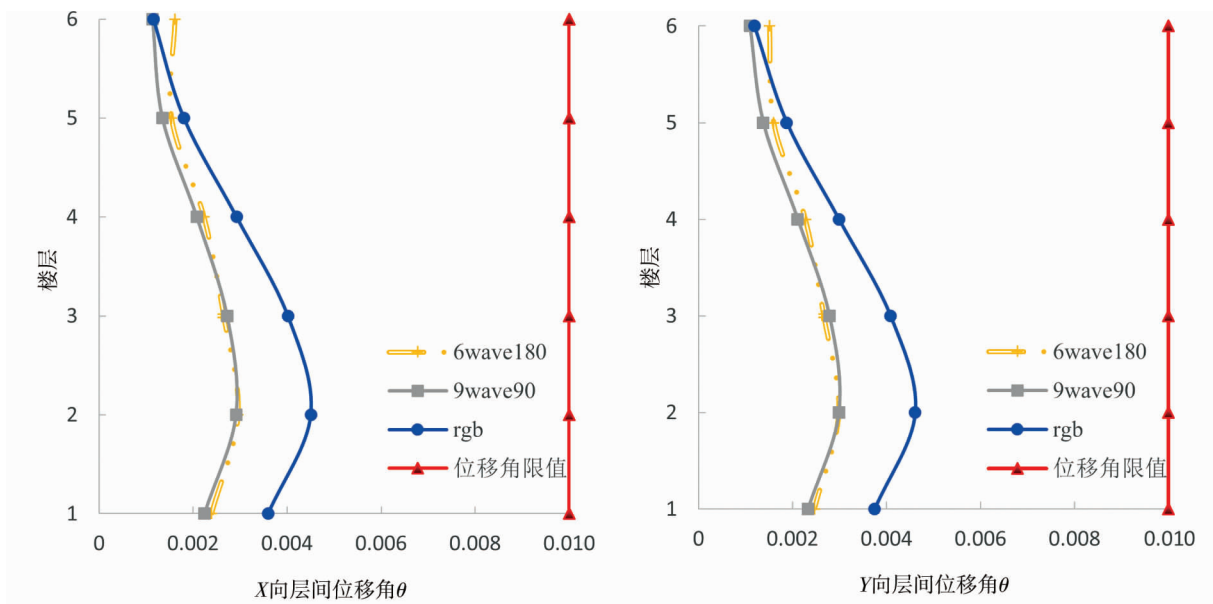


图7 楼层层间位移角对比

### 3.4.2 隔震层最大水平位移校核

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016年版)<sup>[15]</sup>第12.2.6条规定:叠层橡胶支座的最大容许位移不应超过该支座有效直径的0.55倍和支座内部橡胶总厚度3.0倍二者的较小值.该L型平面不规则多层框架隔震结构隔震层最大变形:取 $0.55D=0.5\times 600=330\text{ mm}$ 与 $3Tr=3\times 105.6=316.8\text{ mm}$ 二者较大值,故最大容许位移为316.8 mm.在8度罕遇( $400\text{ cm/s}^2$ )单向地震作用下,隔震层水平X向、Y向最大位移分别为270.9,270.7 mm;在8度罕遇( $400\text{ cm/s}^2$ )双向地震作用下,隔震层水平X向、Y向最大位移分别为304.9,303.6 mm,均小于支座最大容许位移,满足规范要求.由此可知,在双向地震作用与单向地震作用下相比,隔震层位移增加12.6%左右.

### 3.4.3 隔震层橡胶支座拉压应力校核

在8度罕遇( $400\text{ cm/s}^2$ )单向地震作用下,叠层橡胶支座X向、Y向极大面压分别为15.27,15.28 MPa;在8度罕遇( $400\text{ cm/s}^2$ )双向地震作用下,叠层橡胶支座X向、Y向极大面压分别为15.47,15.48 MPa,由此可知,在双向地震作用与单向地震作用下相比,叠层橡胶支座极大面压增加1.3%左右.

在8度罕遇( $400\text{ cm/s}^2$ )单向地震作用下,叠层橡胶支座X向、Y向极小面压分别为0.82,0.82 MPa;在8度罕遇( $400\text{ cm/s}^2$ )双向地震作用下,叠层橡胶支座X向、Y向极小面压分别为0.91,0.94 MPa,由此可知,在双向地震作用与单向地震作用下相比,叠层橡胶支座极小面压增加14.6%左右。

综上所述,在8度罕遇双向地震作用与单向地震作用下相比,隔震层位移增加12.6%左右;叠层橡胶支座极大面压增加1.3%左右;叠层橡胶支座极小面压增加14.6%左右,虽然都有所增加,但经过验算均满足规范限值要求。

## 5 结论

1)针对高烈度区L型平面不规则多层框架结构,采用基础隔震技术进行了设计与研究,隔震效果显著,隔震上部结构水平地震作用比传统抗震设计减少50%,降低了地震作用对隔震上部结构的破坏及影响,确保该结构在高烈度区的安全性。

2)8度设防烈度地震( $0.2g$ )作用下,单向或者双向地震作用对该L型平面不规则多层框架隔震结构水平向减震系数的影响基本一致,进而说明只需验算该结构在单向地震作用下的水平向减震系数并留有一定的富余量即可。

3)8度罕遇地震( $0.4g$ )作用下,双向地震作用与单向地震作用对比,该L型平面不规则多层框架隔震结构隔震层位移增加12.6%左右;叠层橡胶支座极大面压和极小面压分别增加1.3%,14.6%左右;结果均满足规范限值要求。为后续L型平面不规则多层框架采用基础隔震技术进行设计提供了参考,确保结构在单向或双向地震作用下的安全性。

### 参考文献:

- [1] 黄小宁,王威,王宁,等.平面不规则基础隔震结构抗扭设计研究[J].地震工程学报,2020,42(5):1283-1288.
- [2] 张全伍,施卫星.某平面不规则结构组合隔震设计研究[J].低温建筑技术,2017,39(7):32-35.
- [3] 尚守平,张斌,肖逸夫,等.基础隔震低层框架结构振动台试验研究[J].地震工程与工程振动,2019,39(4):30-40.
- [4] 刘德稳,王琼芬,吴跃红,等.不规则结构隔震设计与研究[J].沈阳建筑大学学报,2013,29(6):1041-1046.
- [5] 王俊.不规则基础隔震结构隔震和扭转效应分析[D].合肥:安徽建筑大学,2016.
- [6] 杨丹丹.不规则结构的基础隔震研究[D].合肥:安徽建筑大学,2016.
- [7] 余涛.不规则结构隔震技术的分析及应用[D].合肥:安徽建筑大学,2016.
- [8] 张冉.不规则结构基础隔震性能研究与应用[D].合肥:安徽建筑大学,2017.
- [9] 宋磊.非规则型框剪结构地震反应分析及减隔震研究[D].合肥:安徽建筑大学,2018.
- [10] 胡志.U型平面不规则结构的地震反应分析[D].合肥:安徽建筑大学,2021.
- [11] 刘德稳,招继炳,盛冬发,等.基于Rayleigh阻尼模型的层间隔震结构上下部选择[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(3):27-34.
- [12] 韩森,许浒,杜红凯,等.近断层地震下层间隔震结构楼层反应谱[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):42-49.
- [13] 张亚飞,李利平,刘德稳,等.长周期地震动下框架-剪力墙结构隔震改造[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):13-20.
- [14] FABIO M. Seismic demand of base-isolated irregular structures subjected to pulse-type earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 108: 111-129.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].2016.
- [16] 徐朝阳.建筑抗震设计规范中地震动记录选取的研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2022.