

# Multi-scale Vulnerability Analysis Based on Theoretical Mode

Yonghe Zhang<sup>1</sup> Jianchao Cui<sup>2</sup> Liuyang Feng<sup>3</sup>

1. School of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan, 464000, China
2. Urban Construction Engineering Co., Ltd. China Railway 15th Bureau Group, Luoyang, Henan, 471000, China
3. Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd., China Railway 15th Bureau Group, Guangzhou, Guangdong, 510000, China

## Abstract

Under the action of earthquake, the isolation device can significantly improve the safety of the frame structure, so that the function of the superstructure can be fully guaranteed. Especially in high-intensity areas, the selection of reasonable isolation parameters can ensure the safety of the existing main structure to the greatest extent, while the selection of parameters with non-optimal solutions is often difficult to achieve better disaster prevention results. In this paper, the open source finite element program OpenSees is used to analyze the seismic vulnerability of frame structures under different isolation bearing settings, and the coupling relationship between structural damage and bearing parameters is obtained, so as to provide some suggestions and ideas for seismic disaster reduction design of structures.

## Keywords

parameter selection; vulnerability analysis; multi-objective optimization

## 基于理论模型建立的多尺度易损性分析

张永河<sup>1</sup> 崔建超<sup>2</sup> 冯留洋<sup>3</sup>

1. 信阳师范大学建筑与土木工程学院, 中国·河南 信阳 464000
2. 中铁十五局集团城市建设工程有限公司, 中国·河南 洛阳 471000
3. 中铁十五局集团城市轨道交通工程有限公司, 中国·广东 广州 510000

## 摘要

在地震作用下, 隔震装置能够显著地提高框架结构的安全性, 使其上部结构的功能得到充分的保障; 尤其在高烈度地区, 选取合理的隔震参数能够在最大程度上保障现有主体结构的安全, 而非最优解的参数选取往往很难达到较好的防灾效果。论文利用开源有限元程序OpenSees对框架结构进行不同隔震支座设置下的地震易损性分析, 得到结构损伤与支座参数之间的耦合关系, 从而为结构的抗震减灾设计提供一些建议和思路。

## 关键词

参数选取; 易损性分析; 多目标优化

## 1 引言

在地震活动日益频发的今天, 防灾减灾工作在结构控制理论中的应用也显得更加重要, 中国芦山作为纪念强烈地震十周年的主震区, 再次以新的精神面貌展现出蓬勃新气象, 芦山县人民医院在2013年地震发生时, 作为全县唯一未受重大破坏的医疗机构, 始终承担着救死扶伤的重大使命, 为下一步救援力量的到来提供了应急保障。其门诊大楼未遭受破坏的原因主要是因为其采用了隔震设计, 在主体结构

的底部设置了隔震装置, 支座作为减隔震体系的重要耗能构件, 其生产工艺和施工质量往往影响着结构的安全性能。通常情况下, 为了使结构的后期维护成本更小以及降低上部结构加固维修的费用, 一般应使体系的破坏发生在隔震层。这样在大震作用下即便有部分支座发生破坏失效, 更换支座的成本也远远小于上部结构加固的费用。而选择何种隔震装置才能使上部结构的破坏最小且保证隔震层能够充分吸收地震能量则是一个值得研究的问题。

芦山强烈地震纪念馆见图1。

【作者简介】张永河(1986-), 男, 中国四川雅安人, 硕士, 高级工程师, 从事结构减隔震分析研究。



图 1 芦山强烈地震纪念馆

## 2 设计理论

### 2.1 分部设计法

以《抗规》理论<sup>[1]</sup>为基础的分部设计主要是通过轴压比、偏心率、抗风能力、屈重比、总水平力等参数来控制模型的建立，最后通过底部剪力对比来判断上部结构是否满足降一度设计的要求。总体上来看设计的概念清晰，但是缺乏结构体系的耦合，上部结构和隔震层的割裂性较强。

### 2.2 整体设计法

自 2021 年国家推出基于复模态理论<sup>[2]</sup>的《建筑隔震设计标准》（以下简称“隔标”）之后，直接设计法更容易考虑到上部结构与下部结构以及隔震层之间的相互作用，理论上更加的科学合理，通过对隔震结构进行动力弹塑性分析也可知，通常情况下结构的破坏主要集中在隔震层，且体系中不同隔震支座的选取对结构的整体减震性能有着不同影响<sup>[3]</sup>，选取恰当的隔震支座不仅可以节约施工成本，而且还可以使体系的减震效果达到最佳。因为不同的隔震支座对体系的减震效果影响差异较大，如何从多尺度选取合理的支座类型则是论文研究的重点。论文以灾区的实际酒店项目为例，通过设置 13 组不同的支座来研究各工况下结构的减震效果，从而为选择合理的减震方案提供新的思路和理论依据。

## 3 有限元模拟

OpenSees 是一款较为全面且不断发展的开源程序，在模拟结构的地震反应方面有着独特的优势<sup>[4]</sup>。其高效的算法和丰富的材料单元库为结构的数值模拟提供了更为广阔的空间，在采用 SAP2000 和 ETABS 有限元软件<sup>[5]</sup>进行隔振结构的分析时多采用 GAP 单元和 ISOLATOR 单元串联来模拟支座的性能。而 OpenSees 中则可以直接利用零长度单元 Zero Length Element 来模拟隔震支座。

### 3.1 有限元模型建立

论文以目前正在装修的 10 层框架结构为例，具体地址为雅安市芦山县的震中地区，其基本的设防烈度为 8 度（0.2g），场地类别 II 类，地震分组为 3 组。结构的框架等级为二级，结构的长度为 48m，宽度为 18m，高度为

17m。全楼共有 6 层，首层商业层的层高为 5m，其上面的 5 层为标准层，结构层高均为 3m，全楼梁柱板的混凝土强度等级均为 C30。楼板的恒荷载为 2.5kN/m<sup>2</sup>，活荷载为 2.5kN/m<sup>2</sup>。结构的有限分析模型如图 2 和图 3 所示。

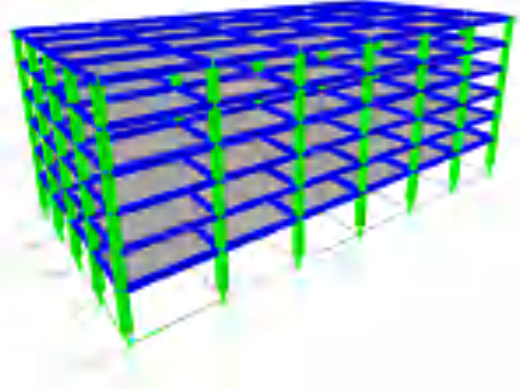


图 2 酒店的 ETABS 模型

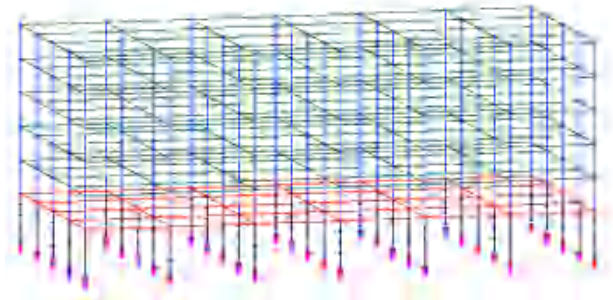


图 3 酒店的 OPENSEES 模型

### 3.2 参数选取与结果分析

依据《叠层橡胶支座隔震技术规程》<sup>[6]</sup>和工程实践中常用的支座类型，论文研究选取的隔震支座参数如表 1 所示。

表 1 13 组隔震支座的主要参数

产品型号 (二次形状系数为 5)	水平初始 刚度 (kN/m)	水平屈 服力 (kN)	等效刚度 (kN/m)
LRB300-5-0.392	5720	16	700
LRB400-5-0.392	7540	27	900
LRB500-5-0.392	9550	40	1120
LRB600-5-0.392	11480	63	1400
LRB700-5-0.392	13300	90	1660
LRB800-5-0.392	15290	106	1830
LRB900-5-0.392	17120	141	2080
LRB1000-5-0.392	18970	203	2460
LRB1100-5-0.392	21350	227	2670
LRB1200-5-0.392	23340	250	2840
LRB1300-5-0.392	25120	350	3280
LRB1400-5-0.392	27040	420	3580
LRB1500-5-0.392	29100	420	3640

由于选取的支座型号不同，结构体系的振型周期也会发生了如图 4 所示的变化。

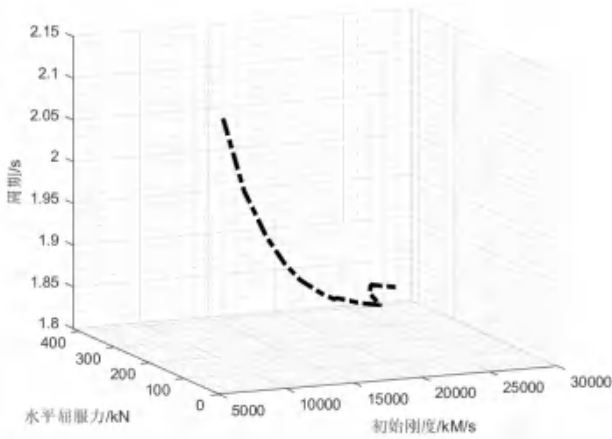


图 4 刚度和屈服力对结构周期的影响

从图 4 中可以看出，随着隔震支座刚度的增大，结构的固有周期减小明显，而随着屈服力的增大，结构的固有周期变化不明显。通过 OpenSees 对不同工况的隔振模型分析可以判定，结构的振型周期主要是由刚度决定，而屈服力对振型周期的影响则相对较小。

### 3.3 易损性分析的原理

增量动力分析是将一组天然地震波，通过不断调幅来

对结构进行动力时程分析<sup>[7]</sup>。得到不同的地震波经过不同的调幅后结构的动力响应，分析时首先需要确定工程需求参数（EDP）和地震动强度参数（IM）。结构工程需求参数体现结构的动力特性，在对支座进行损伤分析时以支座的剪切变形为主，上部结构以层间位移角为主。因为在对结构进行时程分析时地震动强度参数中的峰值加速度 PGA 更能体现出结构在每个时刻的响应。所以本案例利用 huntfill 调幅法<sup>[8]</sup>分别对 13 组不同支座类型的结构模型进行增量分析，得到不同地震强度作用下各工况的响应。

### 3.4 工程需求参数选取

通过施加多组的不同峰值加速度的地震波对结构进行动力弹塑性分析，可以得到结构在不同损伤指标下的破坏概率，进而可以判断出建筑的安全储备是否有富余。结合规范《建筑隔震橡胶支座》5.3 条<sup>[9]</sup>支座极限剪切应变的规定，隔震支座的水平极限变形不应小于橡胶总厚度的 400% 与 0.55D 的限值。同时（“抗规”）规定在计算水平减震系数时橡胶支座在一般的地震作用下剪切应变应不大于 100%，且在大震作用下应不大于 250%。（“隔标”）规定在设防地震作用时支座剪切应变取 100%，罕遇地震作用时支座剪切应变取 250%，极罕遇地震作用时支座剪切应变取 400%。综上所述并结合选取的隔震支座，得到各性能水准目标下支座的剪切应变  $\gamma$  如表 2 所示。

表 2 支座损伤对应的剪切应变  $\gamma$  和位移

指标	位移 /mm				剪切应变			
	轻微	中等	严重	失效	轻微	中等	严重	失效
LRB300	300	525	750	1200	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB400	400	700	1000	1600	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB500	500	875	1250	2000	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB600	600	1050	1500	2400	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB700	700	1225	1750	2800	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB800	800	1400	2000	3200	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB900	900	1575	2250	3600	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB1000	1000	1750	2500	4000	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB1100	1100	1925	2750	4400	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB1200	1200	2100	3000	4800	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB1300	1300	2275	3250	5200	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB1400	1400	2450	3500	5600	1.0	1.75	2.5	4.0
LRB1500	1500	2625	3750	6000	1.0	1.75	2.5	4.0

《建筑抗震设计规范》5.5.5 条明确规定钢筋混凝土框架结构的最大弹塑性层间位移角为 1/50。《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[10]</sup>3.7.5 条规定钢筋混凝土框架结构的最大弹塑性层间位移角为 1/50。以及《建筑结构抗倒塌设计规范》<sup>[11]</sup>的相关规定。所以论文以 1/50 作为框架严重损伤的最大层间位移角，又因为框架结构的弹性层间位移角限值为 1/550。且结构在性能评估时极限状态变形限值一般可取

结构强度极限状态变形限值的两倍。则可以得出上部结构发生轻度破坏的层间位移角为 1/275，中度破坏的层间位移角为 1/138，倒塌破坏的层间位移角为 1/25，所以得到如表 3 所示的上部结构损伤的需求参数指标。

表 3 上部结构层间位移角限值与结构损伤等级

损伤状态	轻度损伤	中度损伤	严重损伤	倒塌
层间位移角	1/275	1/138	1/50	1/25

### 3.5 易损性分析

论文依据《建筑抗震规范》的选波要求和 13 个支座参数下结构的周期特点，论文选取了用于增量动力分析的 20 条天然地震波，其反应谱曲线如图 5 所示。

由于本工程的研究范围是整个结构体系，可以从图 6 中看出随着地震动强度的增大，支座的剪切应变和层间位移角均增大。

通过图 7 还可以看出在地震强度增大的情况下，支座对数标准差的离散性更大，说明隔震层的破坏对地震更敏感。并且由图 8 的地震响应分位曲线也可以看出，当地震动强度逐渐加大时，分位曲线发散，说明结构已经进入塑性破坏状态。

通过对支座和上部结构的数据采样点进行拟合分析得到如图 9 所示的工程需求参数 (EDP) 和地震动强度参数 (IM) 对数拟合曲线，并最终得到如图 10 所示的设置 LRB300 支座的结构易损性曲线。

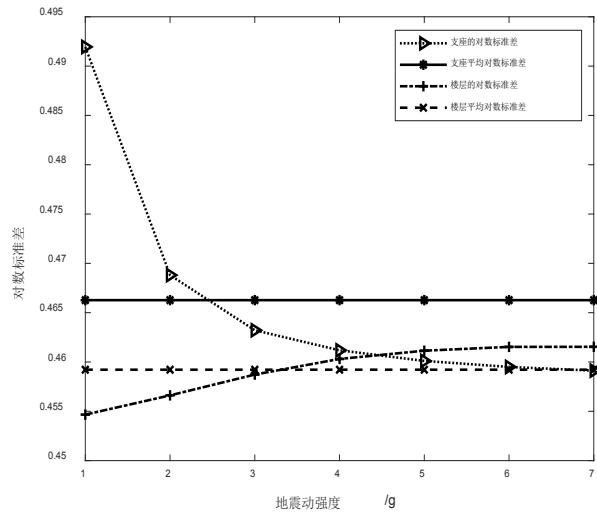


图 7 隔震支座和楼层的地震响应分布

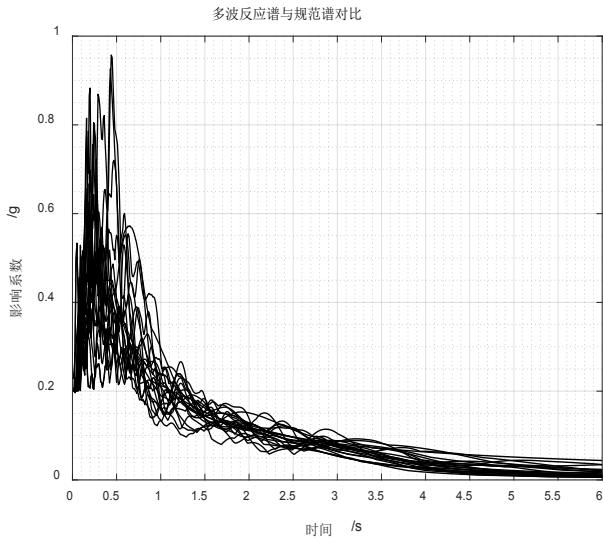


图 5 多波的反应谱曲线对比

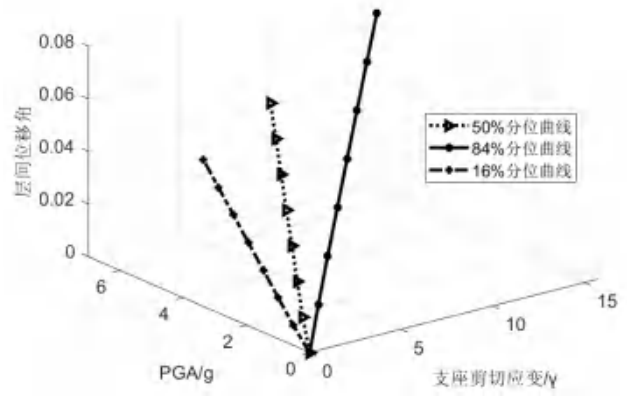


图 8 隔震支座和楼层的地震响应分位曲线

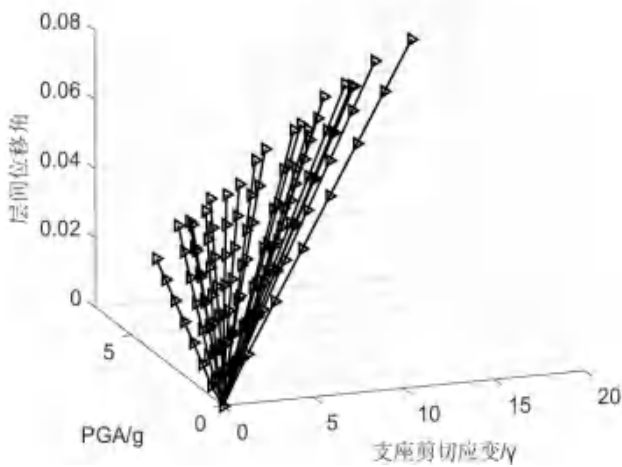


图 6 隔震支座和楼层的 IDA 曲线

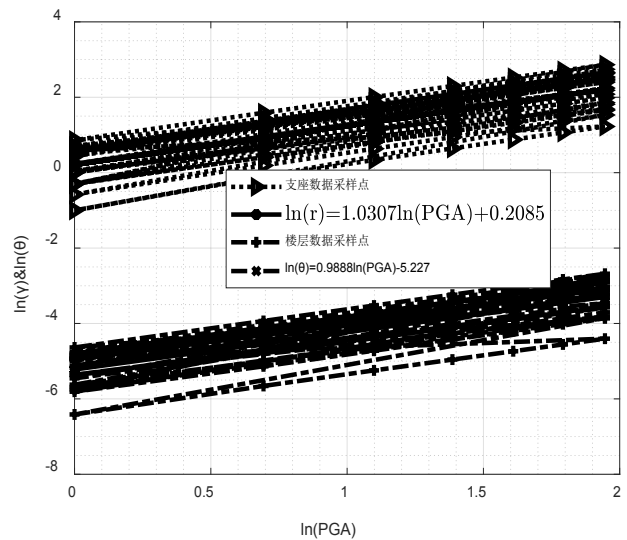


图 9 隔震支座和楼层的地震响应拟合曲线

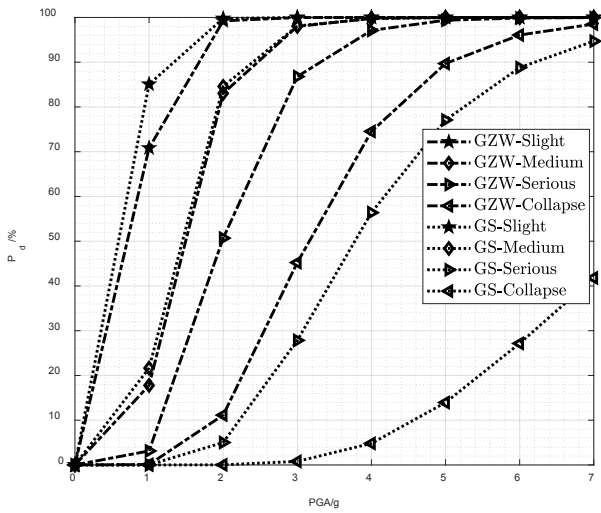


图 10 LRB300 隔震支座和楼层的易损性曲线

### 4 多目标结果优化

论文依据 OPENSEES 有限元软件对 13 组不同参数的隔震结构进行不同地震强度下的增量动力时程分析，可以看出当支座的水平刚度和屈服力较小时，支座的破坏严重于上部的楼层结构，随着支座的水平刚度和屈服力逐渐变大，支座越不容易发生破坏，但是上部结构的破坏趋势略有增加<sup>[12]</sup>，结构的隔震效果有所减弱。图 10 和图 11 分别表示在设置 LRB300 和 LRB1500 支座后整个体系中上部楼层结构和下部支座的易损性曲线响应。

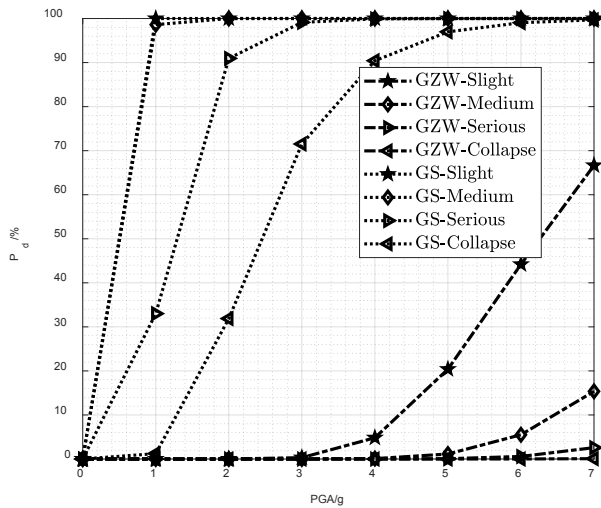


图 11 LRB1500 隔震支座和楼层的易损性曲线

从图 10 和图 11 的对比中也可以看出，上部结构发生破坏的概率随着隔震支座的加大而增加，主要原因是采用较大尺寸的支座后结构体系的整体刚度变大，支座的滞回耗能减弱<sup>[13]</sup>，地震能量传入上部结构。但此时隔震支座发生破坏的概率却可以随着其尺寸的增大而大幅降低。图 12 和图 13 分别为设置 LRB300 和 LRB1500 隔震装置后角部支座在 9 度罕遇地震 (1.4g) 作用下的滞回耗能曲线。

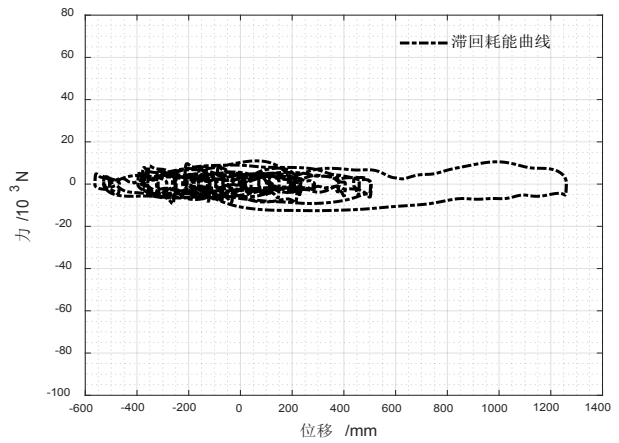


图 12 LRB300 隔震支座滞回耗能曲线

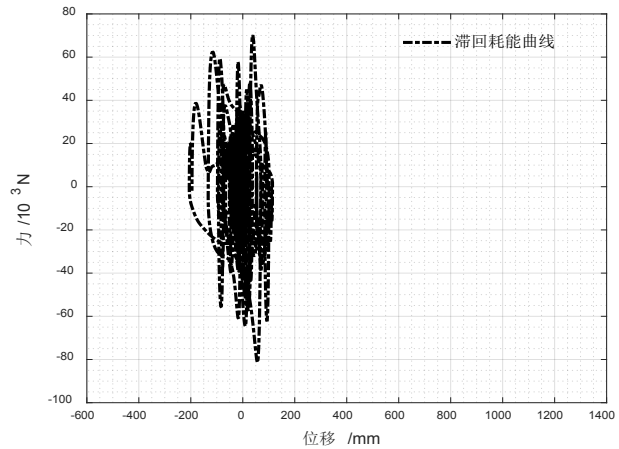


图 13 LRB1500 隔震支座滞回耗能曲线

从图 12 和图 13 中还可以看出，当支座的水平刚度较小时，支座的水平向位移较大，很容易发生破坏。当采用较大尺寸的支座时，虽然支座的水平位移较小但是其所受的剪切力明显增大，导致上部结构的破坏有所增大。这点从图 10 和图 11 的上部结构易损性曲线对比中可以得到印证。如何在保证上部结构有较好减震效果的前提下让支座的选取更为经济，则应在进行结构体系的性能分析时使得上部结构和支座的损伤概率较为接近时最为合理。

所以论文在对 13 组支座工况进行易损性耦合分析后得到的结论是当采用 LRB500、LRB600、LRB700 支座时上部结构和隔震支座损伤的耦合度较高。结构的易损性曲线对比如图 14~图 16 所示。从图中也可以看出当框架结构采用 LRB500 支座时上部结构严重破坏损伤概率和支座的轻度破坏损伤概率接近，上部结构在高烈度区发生罕遇地震时虽然已经处于轻度或中度破坏，但是经过适当的修复加固仍可继续使用。当框架结构采用 LRB600 支座时上部结构发生严重破坏损伤的概率和支座发生轻度破坏损伤的概率接近，上部结构发生倒塌失效的概率和支座发生严重破坏损伤的概率接近，当采用 LRB700 支座时上部结构发生严重破坏损伤的概率略高于支座的轻度损伤<sup>[14]</sup>，上部结构发生的倒塌

破坏损伤与支座发生中度损伤的概率接近。说明随着支座的变大，虽然支座的安全储备能力在增强，但是上部结构的破坏概率也在增大。由于此时支座所耗散的地震能量较多，减震效果也明显优于采用 LRB300 和 LRB1500 时的效果。图 17~ 图 19 分别表示的是采用这 3 种隔震装置时支座的滞回耗能情况。

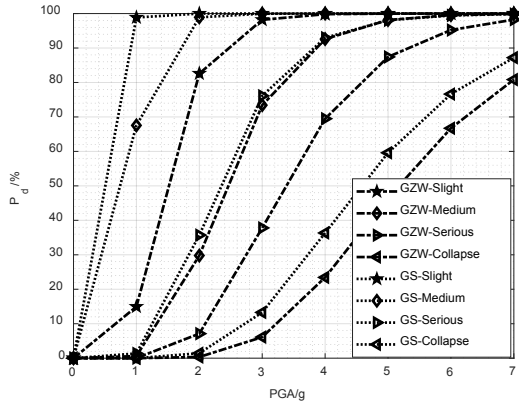


图 14 LRB500 隔震支座和楼层的易损性曲线

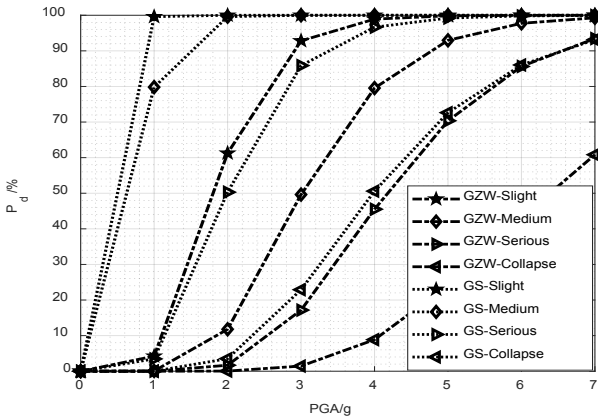


图 15 LRB600 隔震支座和楼层的易损性曲线

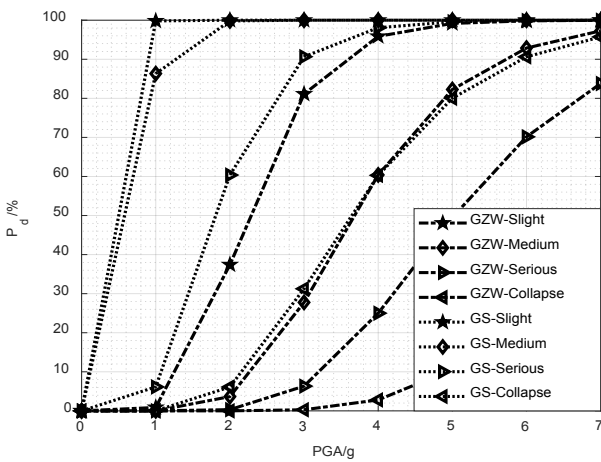


图 16 LRB700 隔震支座和楼层的易损性曲线

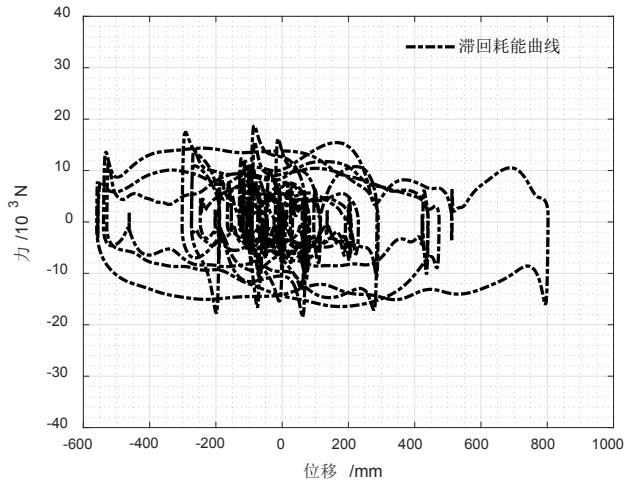


图 17 LRB500 隔震支座滞回耗能曲线

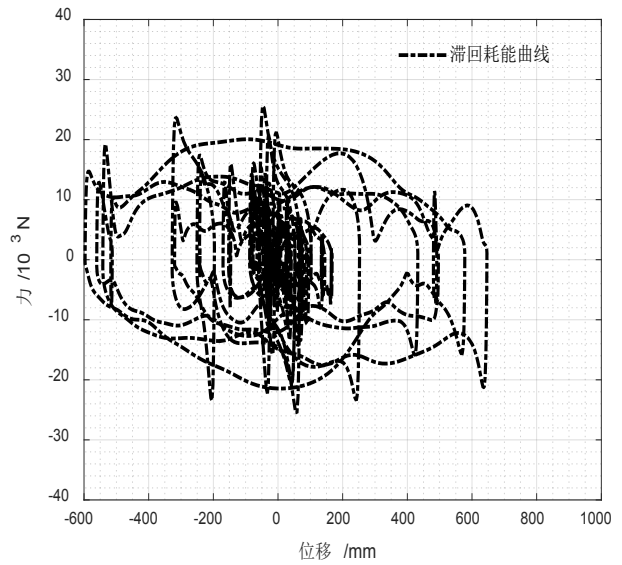


图 18 LRB600 隔震支座滞回耗能曲线

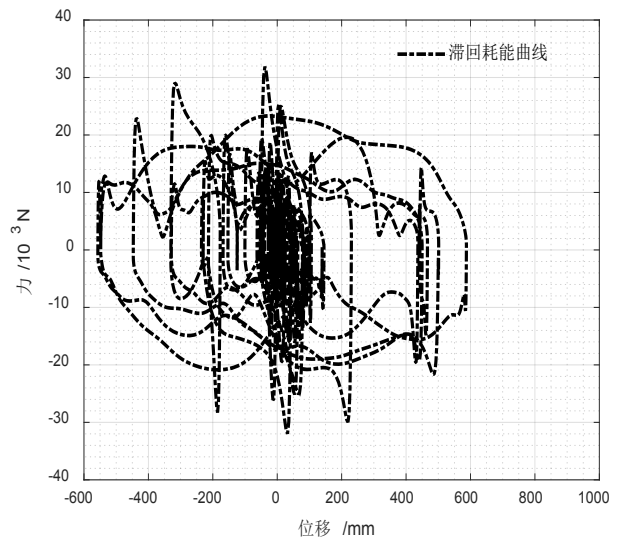


图 19 LRB700 隔震支座滞回耗能曲线

从图 17 至图 19 也可以看出,当尺寸变大后支座的滞回耗能圈形状也由原来的细长扁平状逐渐变得椭圆饱满。说明在发生罕遇地震时采用 LRB700 支座作为隔震装置,不仅能保证上部结构不发生中等以上破坏,而且支座的安全性和经济性也能得到最大限度的保证。

## 5 结语

在建筑结构的震害修复中,人们常常基于现有的结构模型进行修缮加固,尤其在高烈度区域,合理地选取隔震参数能够最大程度上的保障现有主体结构的安全,使其使用功能能够得到充分的保障。显然基于多尺度理论的优化在指导施工时显得更加科学有效。我们不仅在形式上采用更加高效的算法,也可以通过易损性分析和滞回耗能相结合的办法在多组参数中选择更为安全经济的施工方案。

## 参考文献

- [1] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [2] GB/T51408—2021 建筑隔震设计标准[S].北京:中国计划出版社,2021.
- [3] 凤俊,王国平.橡胶隔震支座在房屋隔震工程中的应用[J].山西建筑,2009,35(9):85-87.
- [4] 王辉明,李汝飞,马嘉雪.基于OpenSEES的FRP加固装配式梁柱节点抗震性能研究[J].世界地震工程,2023,39(2):71-81.
- [5] 刘付钧,林绍明,黄忠海,等.高烈度地区某大底盘多塔层间隔震高层建筑结构方案选型及设计[J].建筑结构,2020,50(10):83-89+66.
- [6] CECS126 叠层橡胶支座隔震技术规程[S].北京:中国工程建设标准化协会,2001.
- [7] 杨坤,田石柱,张程.基于IDA方法的RC框架结构倒塌判定准则评估[J].建筑结构,2018,48(3):106-109.
- [8] 杨鹏辉,梁兴文,辛力,等.HPFRC耗能墙-RC框架结构地震易损性分析[J].建筑材料学报,2022,25(3):270-277.
- [9] GB20688.3—2006 橡胶支座第3部分:建筑隔震橡胶支座[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [10] JGJ3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [11] CECS392:2014 建筑结构抗倒塌设计规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [12] 卢嘉茗,解琳琳,李爱群,等.RC框架—核心筒高层隔震结构楼面加速度响应特征研究[J].建筑结构,2019,49(7):133-138.
- [13] JGJ297—2013 建筑消能减震技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [14] 孙逊,方立新,邱一峰,等.人民日报社报刊综合业务楼动力弹塑性时程分析[J].建筑结构,2012,42(9):56-60.