

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.09.018

# 基于 IDA 方法的框架减震结构地震易损性分析

缪琪皓<sup>1</sup>, 陈道政<sup>1,2</sup>, 王伟强<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037)

**摘要:**文章以某框架结构为研究对象,采用屈曲约束支撑为消能减震装置,通过有限元分析软件 ETABS 建立结构的消能减震分析模型,开展结构在多遇和罕遇地震作用下的动力时程分析及基于增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法的地震易损性分析,从概率的角度综合评定消能减震结构在不同强度的地震动作用下达到各个极限状态量化指标的可能性大小。结果表明,合理布置屈曲约束支撑之后,框架结构的侧向刚度增加,小震下结构侧向变形明显降低,大震下支撑屈服耗能,结构具有较好的抗震耗能机制,能够满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的性能目标。同时,该研究采用的基于 IDA 方法的结构地震易损性分析也可为实际工程结构的损失估计和设计提供简明有效的科学参考依据。

**关键词:**框架结构;屈曲约束支撑;地震易损性分析;时程分析;消能减震

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)09-1276-07

## Seismic vulnerability analysis of framed seismic reduction structures based on IDA method

MIAO Qihao<sup>1</sup>, CHEN Daozheng<sup>1,2</sup>, WANG Weiqiang<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Using a frame structure as the research object, this paper adopts flexural restraint bracing as the energy dissipation and shock absorption device, establishes the energy dissipation and shock absorption analysis model of the structure through the finite element analysis software ETABS, carries out the dynamic time history analysis of the structure under the action of multiple and rare earthquakes and the seismic vulnerability analysis based on the incremental dynamic analysis (IDA) method, and evaluates the probability of the energy dissipation and shock absorption structure to reach the quantitative index of each limit state under the action of different intensity of ground shaking from the perspective of probability. The results show that the lateral stiffness of the frame structure increases after the reasonable arrangement of flexural restraint bracing, the lateral deformation of the structure is significantly reduced under small earthquakes, and the bracing yields and dissipates energy under large earthquakes, and the structure has a better seismic energy dissipation mechanism, which can meet the performance target of “no damage under small earthquakes, repairable under medium earthquakes and no collapse under large earthquakes”. At the same time, the seismic vulnerability analysis based on the IDA method can also provide a concise and effective scientific reference basis for the estimation of losses and design of actual engineering structures.

**Key words:** frame structure; flexural restraint bracing; seismic vulnerability analysis; time history analysis; energy dissipation and shock absorption

收稿日期:2023-05-18;修回日期:2023-06-27

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本业务费专项资助项目(220EEEVL0417)

作者简介:缪琪皓(1997—),男,安徽马鞍山人,合肥工业大学硕士生;

陈道政(1964—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:cdztai@163.com.

我国地处两大地震带交汇区域,地震活动具有分布广、震源浅、强度大等特点。为了抵御和降低地震对结构的破坏,消能减震技术<sup>[1]</sup>受到了重视,其核心思想是在原结构的基础上附加阻尼器以耗散地震输入结构的能量,从而减小地震对建筑物的影响。现阶段,国内外对于消能减震结构的研究方法主要是通过时程分析法进行抗震性能研究,而传统的时程分析法仅能得到结构在特定地震动参数下的受力和变形性能,无法分析由于地震动参数不同而造成的结构反应的随机性<sup>[2]</sup>。近年来,随着消能减震技术的发展,地震易损性方法也逐渐被应用到消能减震结构的抗震性能评估中。文献<sup>[3]</sup>对加装阻尼器的框架结构进行地震易损性分析,分析表明 2 种结构均能有效提高结构的抗震性能;文献<sup>[4]</sup>选取 10 条不同地震动对装有 5 种常用阻尼器的结构进行地震易损性分析,分析结果表明黏滞阻尼器结构表现最佳。

目前国内外对于附加屈曲约束支撑结构的地震易损性分析的相关研究还较少,对地震动强度参数的选取存在不确定性,因此本文借助 ETABS 有限元分析软件,建立框架结构的消能减震分析模型,结合结构场地类别及震害信息,确定地震动峰值加速度为地震动强度指标,对减震结构进行基于增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法的地震易损性分析,得出框架结构的损伤数据点图及地震易损性曲线以评估结构的抗震性能,为既有结构减震性能的分析 and 灾害的防治提供直接的技术参考。

## 1 基于 IDA 方法的易损性分析

IDA 方法是一种以动力弹塑性时程分析为基础的参数分析方法。该方法既可以得到结构在不同强度地震动作用下的性能参数变化,还能给出结构在不同地震动输入下的响应差异,并对结构的抗震性能进行评估。增量动力分析的本质是动力弹塑性计算,分析结构在非线状态下的变形程度和破坏情况,了解弹塑性阶段结构的动力响应<sup>[5]</sup>。地震易损性分析<sup>[6]</sup>主要流程为:① 利用有限元软件建立合适的结构模型;② 结合结构场地类别及震害信息,选用足够数量的地震动记录,并确定合适的地震强度指标,本文选用地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)作为地震强度指标;③ 将地震动强度指标按一定步长逐步增强,得到同一条地震波在不同强度下的数据,并将数据输入结构进行分析;④ 选取合适的结构损伤指标,本文选最大层间位移角作为其结构性能参数,对结构进行增量动力分析,得到增量动力曲线;⑤ 划分结构的性能水平,确定结构在不同性能水平下损伤指标的极限状态值;⑥ 基于增量动力分析结果绘制不同性能水平下框架结构的地震易损性曲线,进行地震易损性分析,评价其抗震性能。

## 2 有限元模型的建立

本文算例模型为地上 8 层的钢筋混凝土框架结构,结构的标准平面布置如图 1 所示。

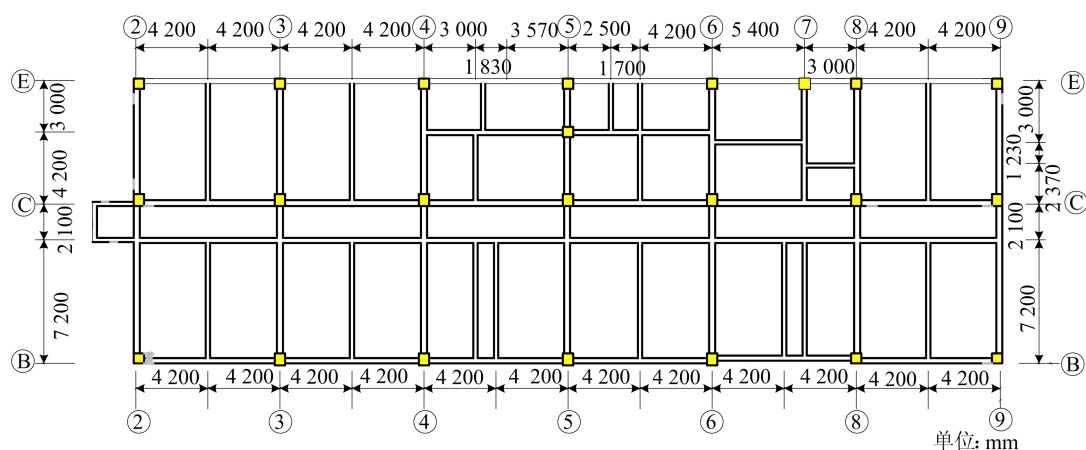


图 1 标准层平面布置图

在该结构中,首层层高为 4.2 m, 2~8 层层高为 3.6 m;模型的主要设计参数如下:抗震设防烈度为 7 度,特征周期为 0.3 s,设计基本地震加

速度为 0.10g,场地类别为 I 类,设计地震分组为第 2 组,设防类别为丙类,抗震等级为 2 级;梁、柱的纵向受力钢筋均采用 HRB400,箍筋均采用

HRB335,各层楼板厚度均为 110 mm,柱截面尺寸为 600 mm×600 mm,主梁截面尺寸为 300 mm×700 mm 和 350 mm×750 mm,次梁截面尺寸为 250 mm×500 mm 和 250 mm×400 mm。设计楼面恒定载荷为 5 kN/m<sup>2</sup>,活动载荷为 2 kN/m<sup>2</sup>。

采用 ETABS 有限元分析软件建立的结构模型如图 2 所示,在 YJK 软件中建立的计算模型如图 3 所示,对比 2 个模型以验证模型的可靠性。选取 2 种软件计算模型的重力荷载代表值及各阶振型的计算周期进行对比验证,见表 1、表 2 所列,结果表明二者的误差值在 5% 以内,符合计算要求。

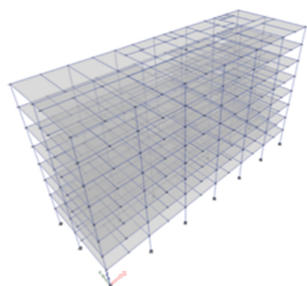


图 2 ETABS 软件三维有限元分析模型

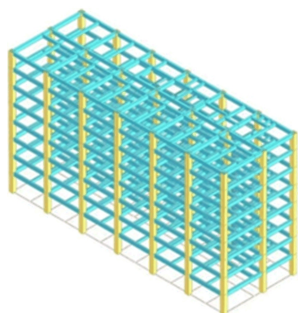


图 3 YJK 软件三维有限元分析模型

表 1 ETABS 和 YJK 软件的重力荷载代表值对比

计算软件	ETABS	YJK
质量/t	12 770.8	13 059.4

表 2 ETABS 和 YJK 计算周期对比

振型编号	计算周期/s		相对差值/%
	ETABS	YJK	
1	1.571	1.609	2.36
2	1.555	1.590	2.20
3	1.371	1.424	3.72
4	0.482	0.494	2.43
5	0.478	0.490	2.45
6	0.421	0.438	3.88
7	0.254	0.260	2.31
8	0.253	0.259	2.32

采用有限元软件 ETABS 对消能减震结构进

行弹性时程分析及弹塑性时程分析,并进行基于增量动力分析法的结构地震易损性分析。本文在运用有限元分析软件 ETABS 进行建模时,利用弹塑性连接单元 Plastic(wen)来模拟屈曲约束支撑。在结构梁柱构件两端设置塑性铰的方式来分析结构的非线性属性,楼板采用弹塑性楼板假定,梁采用 M3 铰,柱采用 P-M2-M3 铰。

### 3 消能减震结构的时程分析

#### 3.1 消能减震装置的布置

结合建筑图,位移型消能部件宜设置在变形较大的位置,采用试算的方式确定屈曲约束支撑的布置楼层。首先,对原结构进行反应谱分析,确定层间位移角最大的楼层为 3 层,将阻尼器布置于该楼层;其次,对布置了屈曲约束支撑结构进行反应谱分析,确定层间位移角最大的楼层为 4 层,再将阻尼器布置于该楼层。再依此方法,依次迭代布置屈曲约束支撑。根据多次迭代分析得到的结果,本文最终选择在每层 8 个位置处布置屈曲约束支撑(单斜撑),总计采用 64 根屈曲约束支撑,屈曲约束支撑的设计参数见表 3 所列,其中屈服指数是用以表示构件耗能能力的参数。屈曲约束支撑标准层平面布置如图 4 所示,每层阻尼器布置均同标准层。

表 3 屈曲约束支撑的参数

布置方向	楼层数	初始刚度 $K/$ (kN/m)	屈服力 $F_y/kN$	屈服后 刚度比	屈服 指数
X 向	1	156 054	485	0.02	2
	2~5	183 289	379	0.02	2
	6~8	144 374	334	0.02	2
Y 向	1	244 563	826	0.02	2
	2~5	251 457	662	0.02	2
	6~8	214 542	493	0.02	2

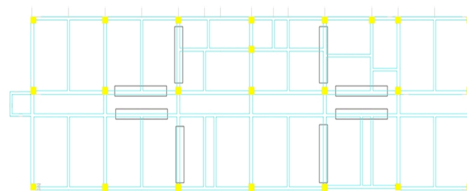


图 4 标准层屈曲约束支撑平面布置图

#### 3.2 地震波的选择

为考虑地震波的随机性,应至少选用 2 条天然波和 1 条人工波(Mml)<sup>[7]</sup>,其中天然波为 RSN21 和 RSN93,并保证所选地震波的频谱特性、幅值和持时与算例中工程特征一致,将地震波加速度反应谱与设计反应谱进行比较,如图 5 所示。

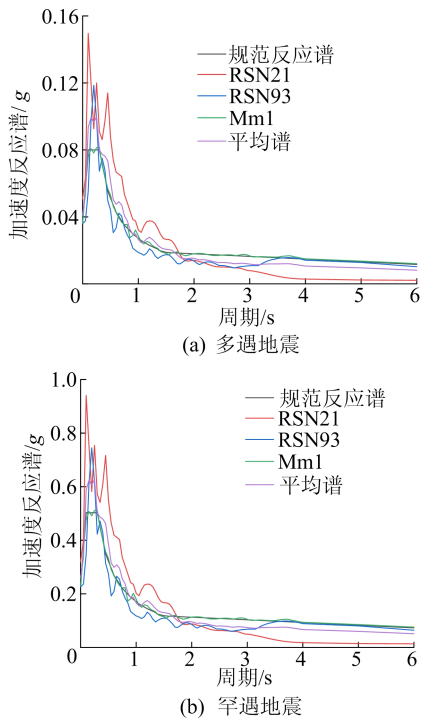


图 5 时程与规范的加速度反应谱对比

### 3.3 弹性时程分析结果

分别将 3 条地震波的地面峰值加速度调至 7 度多遇地震加速度时程最大值  $35 \text{ cm/s}^2$ , 并对减震结构与原结构模型进行分析, 得到减震前、后的各层最大层间位移角如图 6 所示, 减震前、后最大基底剪力见表 4 所列。

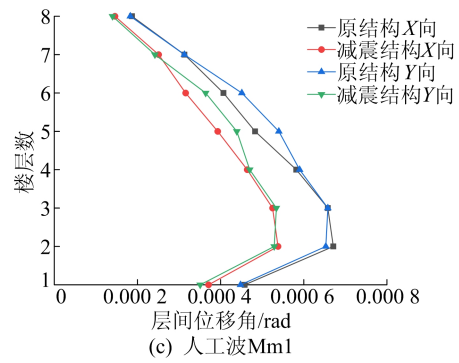


图 6 多遇地震作用下减震前、后层间位移角对比

表 4 原结构与减震结构的最大基底剪力 单位: kN

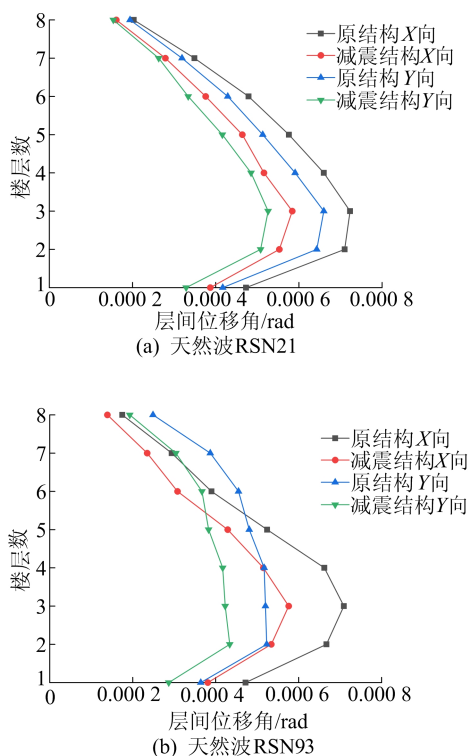
输入方向	地震波	原结构	减震结构
X 向	RSN21	1 883	2 157
	RSN93	1 915	2 294
	Mm1	2 071	2 469
Y 向	RSN21	1 603	1 945
	RSN93	1 615	2 012
	Mm1	1 711	2 083

由图 6 可知, 在多遇地震作用下, 2 种结构的最大层间位移角均在弹性层间位移角限值  $1/550$  内, 但是减震结构的最大层间位移角更小, 较原结构减少约 20%, 具有一定的抗震安全储备。

由表 4 可知, 减震结构的最大基底剪力均大于原结构所对应的最大基底剪力, 这是由于屈曲约束支撑在多遇地震作用下仍保持弹性状态, 未发挥耗能作用, 但起到抵抗侧向地震力的作用, 增加结构的抗侧刚度, 使结构基底剪力增加。因此, 在多遇地震作用下, 屈曲约束支撑对减小楼层的位移指标具有明显的作用, 能够有效地减小结构的变形, 提高结构的刚度、强度和耗能能力。

### 3.4 弹塑性时程分析结果

根据我国《建筑抗震设计规范》<sup>[8]</sup> 要求, 将所选 3 条地震波的地面峰值加速度调至 7 度罕遇地震加速度时程最大值  $220 \text{ cm/s}^2$ , 进行结构在罕遇地震作用下的动力时程分析, 结果如图 7 所示。由图 7 可知, 在罕遇地震作用下, 减震结构的层间位移角最大值均远小于  $1/50$ , 满足规范对于大震不倒的要求。比较减震前、后情况, 原结构在合理布置屈曲约束支撑后的最大层间位移角和基底剪力均有明显减小。与原结构相比, 减震结构的层间位移角和基底剪力平均减少约 20%。可知此时屈曲约束支撑已进入屈服状态, 通过滞回变形发挥耗能作用, 较好地消耗了输入结构的地震能量, 可为结构主体的安全提供有力保证。



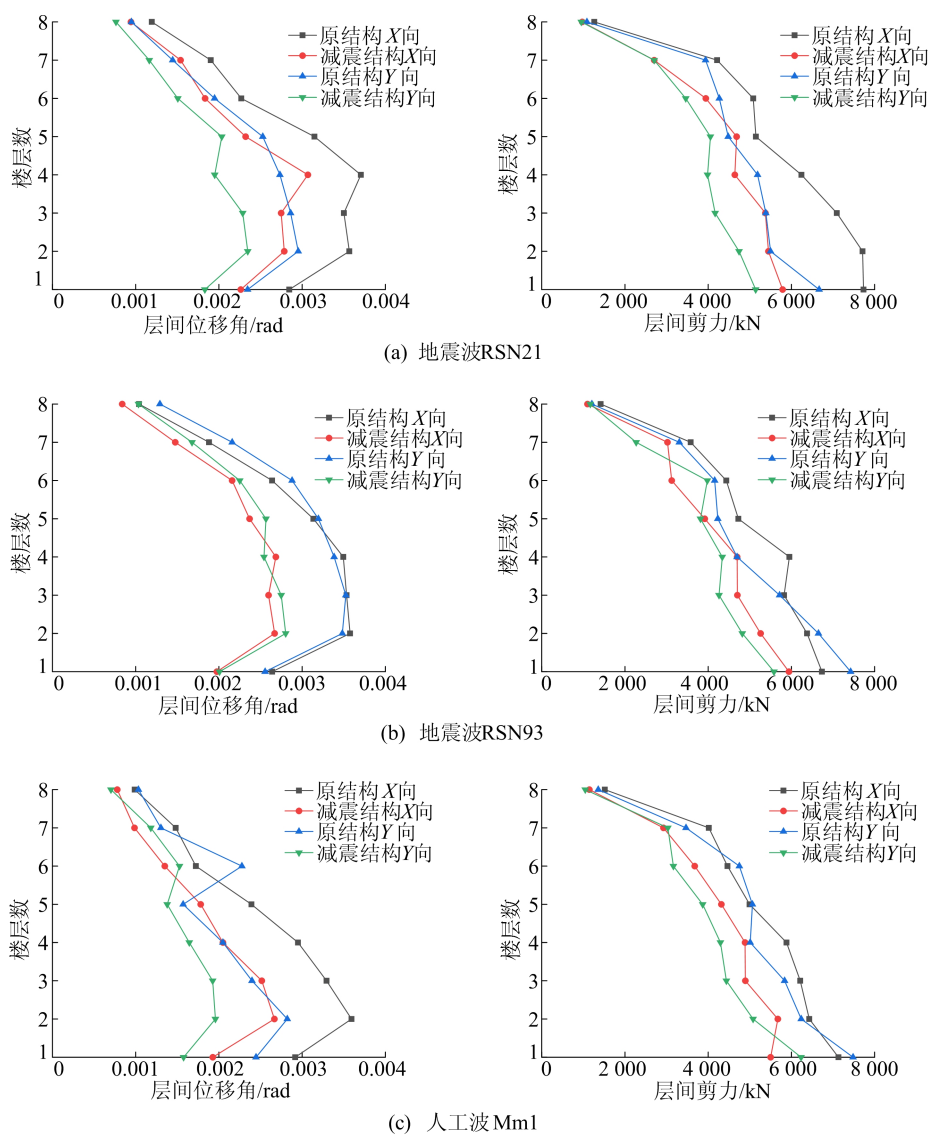


图 7 罕遇地震作用下减震前、后层间位移角和层间剪力对比

## 4 消能减震结构的地震易损性分析

### 4.1 地震动记录的选取

结构地震易损性分析结果不仅与结构不确定性有关,还受到地震动不确定性影响<sup>[9]</sup>。本文根

据 ATC-63 计划的建议,依据给出的地震记录选择原则和数据库,选取美国 FEMA-P695 推荐的 10 条地震动记录进行增量动力分析,并保证选择的地震动记录与结构所处场地特性相适应。所选的地震波基本参数见表 5 所列。

表 5 用于 IDA 结构易损性分析的地震动记录

序号	地震名称	震级	发生年份	地震台	PGA/g	地震动记录名称
1	Superstition Hills	6.5	1987	EI Centro Imp. Co.	0.36	RSN721
2	Superstition Hills	6.5	1987	Poe Road	0.45	RSN725
3	Loma Prieta	6.9	1989	Capitola	0.53	RSN752
4	Loma Prieta	6.9	1989	Gilroy Array # 3	0.56	RSN767
5	Landers	7.3	1992	Coolwater	0.42	RSN848
6	Kobe Japan	6.9	1995	Nishi-Akashi	0.51	RSN1111
7	Kobe Japan	6.9	1995	Shin-Osaka	0.24	RSN1116
8	Kocaeli Turkey	7.5	1999	Arcelik	0.22	RSN1148
9	Duzce	7.1	1999	Bolu	0.82	RSN1602
10	Hector Mine	7.1	1999	Hector	0.34	RSN1787

### 4.2 地震动强度指标及结构性能参数选取

选取合适的地震动强度指标和结构性能参数是结构抗整体性倒塌能力分析 with 评估的重要前提。为充分考虑地震作用下高阶振型对结构的影响,本文选取地面峰值加速度作为地震动强度指标。为综合反映结构响应和损失状况,本文选择最大层间位移角作为结构性能参数<sup>[10]</sup>。

本文参照我国《建筑抗震设计规范》<sup>[8]</sup>中抗震性能水准和性能目标,以最大层间位移角作为结构各水准宏观控制指标,把文中框架结构的性能状态划分为以下 4 个等级,即正常使用(LS1)、轻微损坏(LS2)、中等破坏(LS3)及严重破坏(LS4),并参照文献<sup>[11]</sup>给出结构在 4 种性能状态下对应的层间位移角限值,结果见表 6 所列。

表 6 结构性能参数

极限状态	LS1	LS2	LS3	LS4
层间位移角限值	1/550	1/250	1/120	1/50

### 4.3 增量动力分析结果

本文选取常用的等步长法对结构进行增量动力分析,以 0.2g 为步长对地震波进行调幅,整体的计算量较为适中且在增量动力曲线中可看出结构的性能点,增量动力曲线如图 8 所示。

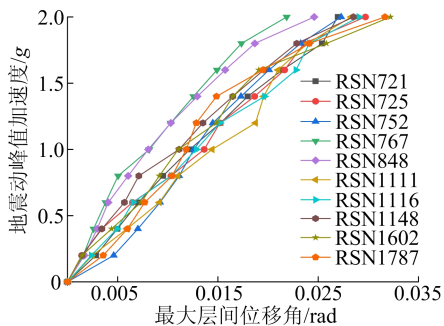


图 8 增量动力曲线

从图 8 可以看出,当 PGA 较小时,结构处于弹性阶段,增量动力曲线呈直线上升的趋势,且离散性较小;随着 PGA 逐渐增大,最大层间位移角也相应增大,曲线斜率逐渐减小,可知结构中已有部分构件发生塑性变形,结构进入弹塑性阶段时增量动力曲线变为非线性状态。为直观表现特定地震动强度作用下结构的动力响应,本文依据增量动力分析结果,得到结构损伤数据点图用来衡量结构的性能,如图 9 所示。

图 9 中共 100 个数据点,每个点均代表增量

动力分析时结构的响应,从图 9 可以看出,在不同强度的地震作用下,结构的最大层间位移角都会呈现一定的离散性。当 PGA 小于等于 0.4g 时,相同 PGA 地震作用下结构的最大层间位移角离散性较小;当 PGA 大于 0.4g 时,结构的最大层间位移角离散性随 PGA 的增大而增大。其中,位于 LS2、LS3 性能水准的数据点较多,说明结构在轻微损坏和中等破坏的性能等级概率较大,具有良好的抗震性能。

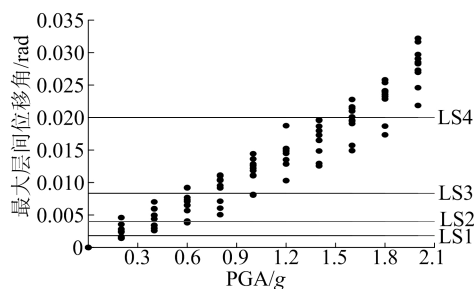


图 9 结构损伤数据点

### 4.4 地震易损性分析

为更加具体地分析结构的性能参数,现用超越概率  $P$  来表达不同强度地震动作用下结构响应超过某一极限状态的概率。假定结构的最大层间位移角和地震动强度指标满足对数正态分布,利用 4.3 节得到的地震动强度指标及结构的最大层间位移角数据,可计算出特定地震动强度下结构最大层间位移角的对数均值  $\mu$  及对数标准差  $\sigma$ ,进而计算出结构在特定地震动作用下的超越概率,并绘制结构地震易损性曲线如图 10 所示。

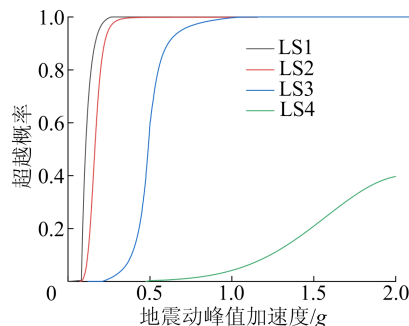


图 10 地震易损性曲线

超越概率  $P$  的计算公式为:

$$P(A_{PG} | \theta_{max} > L_{Si}) = 1 - \phi \left[ \frac{\ln L_{Si} - \mu | A_{PG}}{\sigma | A_{PG}} \right] \quad (1)$$

其中:  $A_{PG}$  为特定强度的地震动;  $\theta_{max}$  为结构的最大

大层间位移角;  $L_{Si}$  为结构各水准量化限值;  $\phi$  为标准正态分布函数。7 度多遇地震、设防地震及罕遇地震所对应的 PGA 分别为 0.035g、0.100g、0.220g。

由图 10 可得消能减震结构在 3 种地震动作用下达到各个极限状态的超越概率,见表 7 所列。

表 7 减震结构在各极限状态下的超越概率 %

地震水准	PGA/g	LS1	LS2	LS3	LS4
7 度多遇	0.035	0	0	0	0
7 度设防	0.100	43.27	4.31	0	0
7 度罕遇	0.220	98.30	89.54	0.28	0

根据表 7 中的数据,可以求出在 7 度多遇及罕遇地震作用下消能减震结构处于各个极限状态的概率,将计算出的数据进行整理,见表 8 所列。

表 8 各极限状态下减震结构的易损性概率 %

地震水准	PGA/g	LS1	LS2	LS3	LS4
7 度多遇	0.035	100.00	0	0	0
7 度设防	0.100	56.73	38.96	4.31	0
7 度罕遇	0.220	1.70	8.76	89.26	0.28

## 5 结 论

本文主要以某 8 层消能框架减震结构为研究对象,采用时程分析法对结构多遇和罕遇地震作用下的减震效果进行评估,在此基础上利用增量动力分析方法对结构进行易损性分析,计算出特定地震动强度作用下结构各极限状态的超越概率,得到如下结论:

1) 在多遇地震作用下,结构保持弹性,屈曲约束支撑未屈服,仅提供附加刚度,并会增大结构的基底剪力;在罕遇地震作用下,屈曲约束支撑进入屈服状态,通过滞回变形耗能,与原结构相比,附加屈曲约束支撑的消能减震结构的层间剪力及层间位移角均减小了约 20%,减震效果显著,具有一定的抗震安全储备。

2) 由增量动力分析方法得到的 IDA 曲线可知,结构的最大层间位移角随地震动峰值加速度的增大而增大,结构由弹性阶段进入弹塑性阶段的过程中,曲线的离散性增加,最大层间位移角逐渐转变为非线性变化,各条地震动曲线间的差异也随之增加,直至结构发生倒塌。

3) 通过对地震易损性曲线分析,计算出在特定地震动强度作用下,结构处于各极限状态的超

越概率,并由此进一步得到各极限状态下减震结构的易损性矩阵。消能减震结构在多遇地震作用下保证了正常使用的功能;在设防地震作用下基本介于正常使用与轻微损坏之间;在罕遇地震作用下处于中等破坏的概率较高,基本不会出现严重破坏的情况。综上所述,消能减震结构满足抗规“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设计要求。

4) 本文采用易损性分析方法能够从宏观的角度反映结构在某种地震强度作用下,超越某种极限破坏状态的条件概率,得到框架结构的地震易损性曲线,以此评估结构的抗震性能,为工程实际的设计和损失估计提供科学参考依据。

## [参 考 文 献]

- [1] 周云,商城豪,张超. 消能减震技术研究与应用进展[J]. 建筑结构,2019,49(19):33-48.
- [2] 张令心,徐梓洋,刘洁平,等. 基于增量动力分析的超高层混合结构地震易损性分析[J]. 建筑结构学报,2016,37(9):19-25.
- [3] IBRAHIM Y E, EI-SHAMI M M. Seismic fragility curves for mid-rise reinforced concrete frames in Kingdom of Saudi Arabia[J]. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering,2011,4(4):213-223.
- [4] GUO W, HU Y, LI Y S, et al. Seismic performance evaluation of typical dampers designed by Chinese Code subjected to the main shock-aftershocks[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,126:105829-105829.
- [5] MEHAIR Y, NELSON L, JOHN W, et al. Seismic response modification factors for buildings featuring a gravity transfer system by incremental dynamic analyses[J]. Journal of Earthquake Engineering,2022,26(14):7444-7468.
- [6] 刘洪波,佟瑶,蒋焱俊,等. RC 框架结构地震易损性分析方法研究进展[J]. 世界地震工程,2020,36(3):141-150.
- [7] 曲哲,叶列平,潘鹏. 建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究[J]. 土木工程学报,2011,44(7):10-21.
- [8] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:31-54.
- [9] 马肖彤,陆华,何妍亭,等. 基于性能的钢筋混凝土框架剪力墙结构地震易损性分析[J]. 地震工程学报,2020,42(6):1386-1390.
- [10] 路沙沙,徐红,张亚楠,等. 基于 IDA 方法的加固震损 RC 框架结构地震易损性分析[J]. 地震研究,2021,44(4):673-681.
- [11] 周佩,王玉山,周力强,等. 粘滞阻尼器耗能减震结构的地震易损性分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2022,40(5):598-603.

(责任编辑 吴 亮)