

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.04.019

RC 框架耗能减震结构的地震易损性分析

李罗堂¹, 陈道政^{1,2}

(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)

摘要: 耗能减震结构在减震后需要进行减震结构损伤水平的评估以及结构可靠度和地震易损性的研究。文章以钢筋混凝土框架结构为研究对象, 以黏滞阻尼器为耗能减震装置, 采用有限元分析软件 ETABS 建立耗能减震模型并进行传统的小震作用下的弹性时程分析和基于增量动力分析的地震易损性分析, 参考结构在不同强度的地震动作用下到达各极限状态的量化指标得到其对应的地震易损性概率, 由此确定结构在不同地震动作用下处于各个不同性能水准下的失效概率。结果表明: 在设置黏滞阻尼器之后, 结构的抗震性能得到有效提升, 可以满足“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的性能指标; 同时, 基于增量动力分析的地震易损性分析也可以为实际工程的减震设计、灾害评估和未来的地震损失预测提供简明有力的参考依据。

关键词: 框架结构; 黏滞阻尼器; 耗能减震结构; 增量动力分析; 地震易损性

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)04-0555-07

Seismic vulnerability analysis of RC frame energy dissipation and shock absorption structure

LI Luotang¹, CHEN Daozheng^{1,2}

(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)

Abstract: The energy dissipation and shock absorption structure needs to be evaluated for the damage level of the shock absorption structure and the structural reliability and seismic vulnerability after shock absorption. In this paper, a reinforced concrete(RC) frame structure is used as the research object, and the viscous damper is used as the energy dissipation and shock absorption device. The finite element analysis software ETABS is used to establish the energy dissipation and shock absorption model, and the elastic time history analysis under the traditional minor earthquake and the seismic vulnerability analysis based on incremental dynamic analysis are carried out. Referring to the quantitative index of the structure reaching each limit state under the action of different intensities of ground motion, the corresponding seismic vulnerability probability of the structure is obtained. Accordingly, the probability of failure at various performance levels under the action of different intensities of ground motion is determined. The results show that after setting the viscous damper, the seismic performance of the structure has been effectively improved, which can meet the performance indicators of “no damage under minor earthquakes, no unreparable damage under moderate earthquakes, and no collapse under major earthquakes”. At the same time, the seismic vulnerability analysis based on incremental dynamic analysis can also provide a concise and powerful reference for the shock absorption

收稿日期: 2022-11-08

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: 李罗堂(1996—), 男, 安徽庐江人, 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: 2361601802@qq.com.

design, disaster assessment and future earthquake loss prediction in actual engineering.

Key words: frame structure; viscous damper; energy dissipation and shock absorption structure; incremental dynamic analysis; seismic vulnerability

0 引 言

自 20 世纪 90 年代起,全球由于地震灾害而造成的经济损失逐年增长,地震本身不仅会造成严重的直接破坏,其伴生灾害如海啸等也对人类的生命和财产安全造成严重的威胁。为了抵御和减小地震对建筑物的影响,需要提升其抗震性能和结构本身的安全度。消能减震技术^[1]作为一种结构振动控制的方法也在各种实际工程中得到广泛的应用,其核心思想是通过在结构中设置阻尼器等消能减震装置减轻地震对建筑物本身造成的损害。目前国内外对于消能减震结构的研究主要是在传统时程分析的基础上进行的抗震性能分析,这种方法虽然可以得到结构在特定地震动下的受力及损坏情况,但由于地震是一种随机性较大并且具有突发性的自然灾害,分析得到的结果很大程度上依赖地震波的选择。地震易损性分析方法^[2]作为时程分析方法的一种,通过选择多条强震记录导入结构进行分析,将结构从弹性至塑性状态下到达各极限状态的概率用易损性曲线表示出来,从而在一定程度上减小随机性带来的误差。本文以混凝土框架结构为例,以黏滞阻尼器作为消能减震装置选择多条地震波对减震结构进行地震易损性分析,提出从概率的角度评估结构在设置黏滞阻尼器之后的抗震性能,可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 基于增量动力分析的易损性分析

增量动力分析是一种基于动力弹塑性分析的时程分析方法,能够体现出结构在同一地震动的不同强度作用下的抗震性能,为后续的地震易损性分析提供必要的数据积累。通过选择一定数量的地震波对其进行调幅分析从而得到一系列不同强度的地震动记录,确定地震动强度指标及结构损伤指标,在此基础上对结构进行计算分析,可以得到能够体现结构本身损伤状况的地震动的响应记录。而多条地震波计算分析得到的增量动力曲线能够较好地体现出结构的抗震性能,再通过定义结构的极限状态及损伤状态可以得到结构的易损性矩阵,绘制出结构地震易损性曲线,对结构本

身的抗震性能和损伤程度作出准确的评估。

文献[3]通过对 RC 框架结构进行地震易损性分析,认为对结构的地震易损性进行分析能够对地震的灾害评估给出一定的依据;文献[4]对高烈度区下框架剪力墙结构进行加固易损性分析,证明地震易损性分析为预测重要工程在受到地震作用时的破坏变形和经济损失提供了可靠的科学依据;文献[5]对地铁结构的分析印证地震易损性分析的可行性和广泛适用性,为地下结构的地震防护设计提供直接的案例方法参考。地震易损性分析主要流程如下。

1) 参考规范建立结构分析所需要的弹塑性模型。

2) 选择能够代表结构所处场地的地震动记录,并确定地震动强度参数(IM),本文以地面峰值加速度(peak ground acceleration,PGA)作为地震动强度参数,对一般高层结构而言,需要10~20条地震波进行分析。

3) 将选择的地震波进行调幅,得到同一条地震波在不同强度下的记录,将其输入结构中进行计算。

4) 确定结构性能参数(DM),本文选择最大层间位移角表征结构性能。根据得到的数据绘制DM-IM曲线,即增量动力曲线,得到IDA曲线簇。

5) 定义结构极限状态,将其与结构性能参数相对应。

6) 计算在不同强度的地震动作用下,结构响应超过某一极限状态的概率,并根据正态分布函数绘制出结构响应超过各种极限状态概率的曲线,即地震易损性曲线。

7) 参考得到的地震易损性曲线及规范对结构的抗震性能进行评估。

2 有限元模型的建立

本文以多层钢筋混凝土框架结构作为算例,该结构地上8层,首层层高4.2m,2~8层层高为3.6m,抗震设防烈度为7度,特征周期为0.3s,设计基本地震加速度为0.10g,场地类别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,结构的标准平面布置图如图1所示。

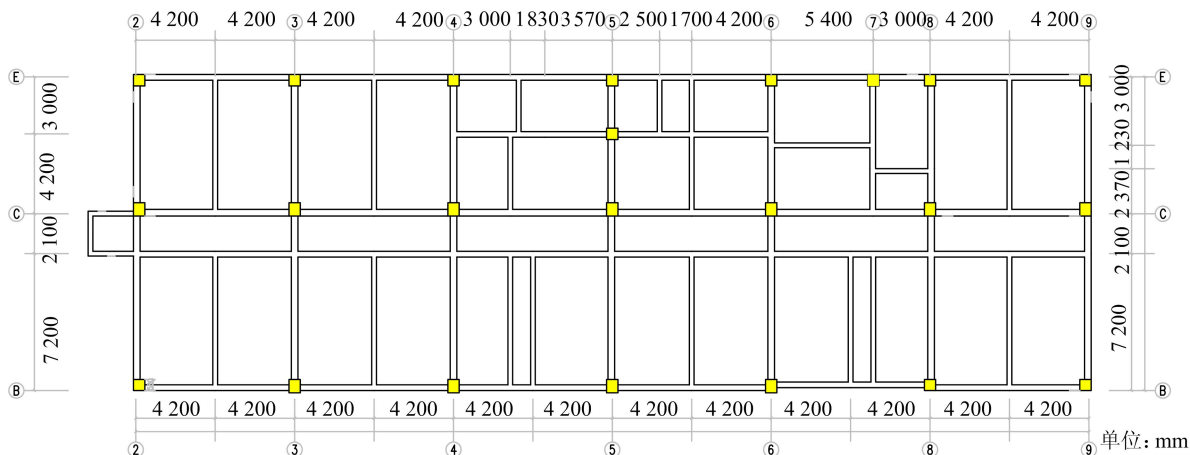


图 1 标准层平面布置图

采用 ETABS 有限元分析软件建立结构模型,如图 2 所示。梁、柱的纵向钢筋采用 HRB400,箍筋采用 HRB335,混凝土板的板厚为 110 mm。柱截面为 600 mm×600 mm,主梁截面为 300 mm×700 mm、350 mm×750 mm,次梁截面主要为 250 mm×500 mm、250 mm×400 mm。设计楼面恒载为 5 kN/m²,活载为 2 kN/m²。本文分别对消能减震结构进行小震作用下的弹性时程分析和弹塑性时程分析,在弹塑性时程分析的基础上再进行基于增量动力分析的结构易损性分析。其中消能减震结构的黏滞阻尼器采用基于 Maxwell 力学模型的非线性连接单元 Damper-Exponential 模拟,弹塑性模型则在已建立的弹性模型的基础上进行修改。结构的主要构件类别为梁、板、柱,楼板采用弹塑性楼板假定,梁和柱的非线性属性通过塑性铰来模拟,梁采用 M 铰,柱采用 PMM 铰。

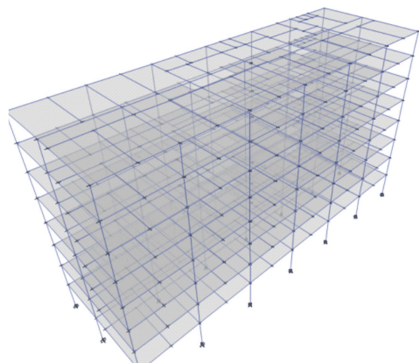


图 2 结构三维有限元分析

3 消能减震结构的弹性时程分析

3.1 消能减震装置的布置

阻尼器作为消能减震的重要装置能够有效地

改善结构的抗震性能,并在一定程度上减小地震带来的结构动力响应,阻尼器根据其动力特性可分为速度相关型和位移相关型。其中,作为速度相关型阻尼器的黏滞阻尼器^[6]具有耗能能力强、稳定性好等优点,并且在消耗地震输入能量的同时不会对结构产生附加刚度,在较小的速度下就能提供良好的减震效果,在小震作用下即可发挥减震作用。

相对于位移型阻尼器在小、中震下提供刚度,大震下屈服耗能;黏滞阻尼器等速度型阻尼器小变形下可产生阻尼耗能,在小震下即发挥减震作用,中震、大震下减震效果更好,被广泛应用于建筑工程的改造和加固中,因此本文选择黏滞阻尼器作为消能减震装置。

黏滞阻尼器的数量、参数和布置方式^[7]对结构的减震性能具有重要影响。阻尼器的布置原则遵循使结构 X、Y 方向动力特性相近、竖向刚度分布均匀、在平面上对称布置。本文所使用的黏滞阻尼器沿着主轴的 2 个方向布置,经弹性地震分析得到结构的变形集中在下部位置,并且楼层的高度越高加速度反应越明显。考虑到对建筑使用的影响和阻尼器应布置在变形较大位置的原则,采用底部 3 层均布而其余楼层于中间两跨布置黏滞阻尼器的方案。

黏滞阻尼器的参数经试算后确定,阻尼系数越高阻尼器的耗能能力越强但造价也越高,而综合阻尼器的减震性能、参数和经济性,本文采用的黏滞阻尼器参数通过布置的点位和以层间位移角为基准的减震效果确定。X 方向布置 4 个阻尼器,Y 方向布置 32 个阻尼器,共使用 72 个阻尼器,阻尼器布置图如图 3 所示。黏滞阻尼器的阻尼系数 $C=300 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$,阻尼指数 $\alpha=1$ 。

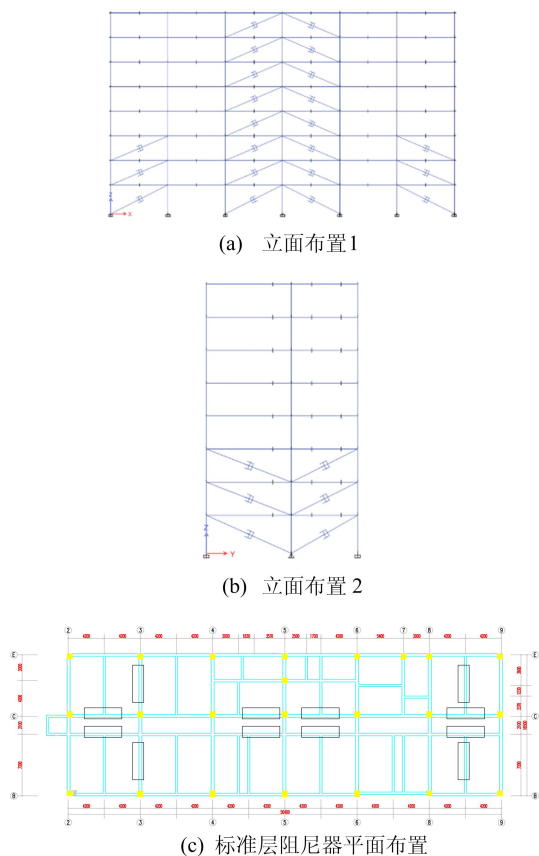


图 3 阻尼器布置图

3.2 弹性时程分析结果

采用 ETABS 有限元分析软件对结构进行小震作用下的弹性时程分析,并选取 2 条实际记录的地震波 RSN83、RSN92 和 1 条人工波 RG1 输入分析,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,各条地震波加速度的反应谱与规范反应谱的对比如图 4 所示。

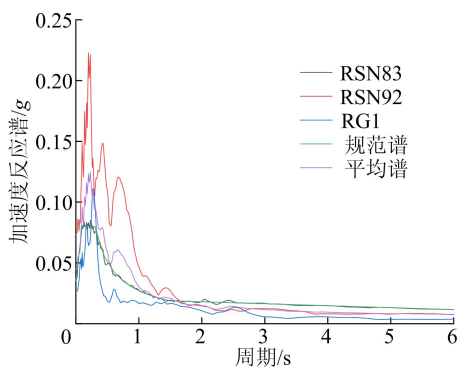


图 4 反应谱图

分别将 3 条地震波的加速度峰值调至 7 度 0.1g 多遇地震加速度时程的最大值 35 cm/s^2 , 导入原结构及减震结构进行时程分析,得到 RSN83、RSN92 和 RG1 减震前后的基底剪力和

最大层间位移角如图 5~图 7 所示。根据图 5~图 7 中数据可得,在 3 条地震波的作用下减震结构及原结构的最大层间位移角均满足框架结构 $1/550 \text{ rad}$ 的限值要求。

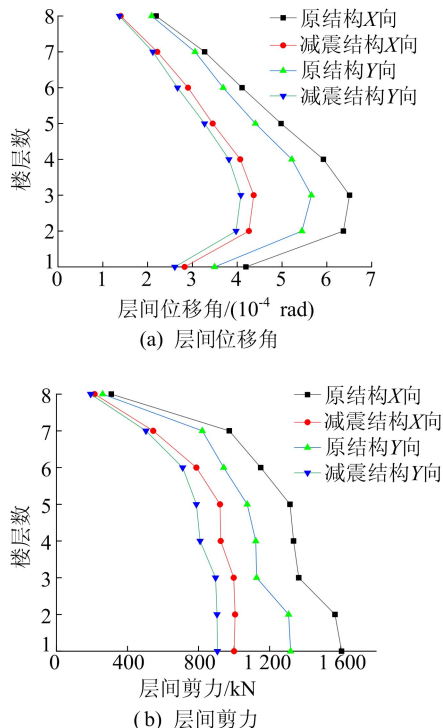


图 5 RSN83 减震前后层间位移角和层间剪力对比

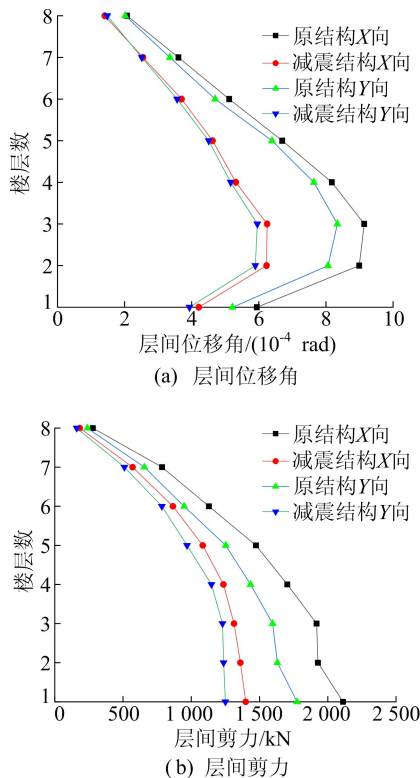


图 6 RSN92 减震前后层间位移角和层间剪力对比

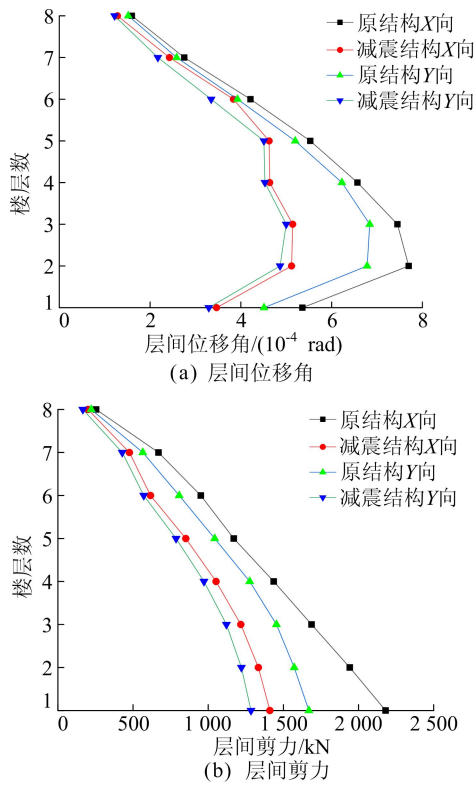


图 7 RG1 减震前后层间位移角和层间剪力对比

比较减震前后的基底剪力和层间位移角变

化情况,原结构在设置黏滞阻尼器后的基底剪力和最大层间位移角均有大幅度减小,减震结构 X 向、Y 向的基底剪力和层间位移角较原结构减少约 30%,黏滞阻尼器对减小楼层的力指标具有明显的作用。因此,在多遇地震作用下,黏滞阻尼器耗能明显,能够有效地减小结构的变形。

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

增量动力分析需要选择大量的地震动记录对结构进行弹塑性时程分析,而选择合适的地震动记录是保证易损性分析准确性的基础,且对一般高层结构而言需要选择 10~20 条地震动进行增量动力分析,因此应选择数量和特性都合适的一组地震动反映地震动的随机性对结构的影响。

本文参考 ATC-63 计划中所给出的建议,根据地震波选取的原则和数据库,选择美国 FEMA-P695 中推荐的 10 条强震记录作为增量动力分析的地震波,地震波参数见表 1 所列。

表 1 增量动力分析的地震波参数

编号	年份	地震名称	台站名称	PGA/g	分量	地震动记录名称
1	1994	Northridge USA	Beverly Hills-Mulhol	0.443	MUL279	RSN953
2	1994	Northridge USA	Canyon Country-WLC	0.404	LOS270	RSN960
3	1999	Duzce	Bolu	0.739	BOL090	RSN1602
4	1999	Hector Mine	Hector	0.265	HEC090	RSN1787
5	1979	Imperial Valley	Delta	0.236	H-DLT352	RSN1148
6	1979	Imperial Valley	El Centro Arroy #11	0.144	H-E11230	RSN1111
7	1995	Kobe Japan	Nishi-Akashi	0.483	NIS090	RSN1116
8	1995	Kobe Japan	Shin-Oaska	0.225	SHI090	RSN900
9	1999	Kocaeli Turkey	Duzce	0.312	DZC270	RSN169
10	1992	Landers	Yemro Fire Station	0.245	YER360	RSN752

4.2 结构性能参数的选择和地震动调幅原则

地震动强度参数是衡量地震动运动强度的指标,常使用的地震动强度参数有地面峰值加速度 PGA、地面峰值速度 (peak ground velocity, PGV)、谱加速度 (spectral acceleration, SA) 等。文献[8]研究表明,对于一般多层框架而言,最大层间位移角能较好地反映结构在受到地震作用后的损伤状态,它与节点转动、楼层层间变形能力是直接相关的,因此本文选择将结构最大层间位移角 θ_{max} 作为结构性能参数 DM;而由于在抗震规范中对于不同烈度的设防地震是采用地面峰值加速度 PGA 来表示的,为了使得易损性分析的结果能够与规范更好地衔接,本文选择将地面峰值加

速度 PGA 作为地震动强度参数 IM。

增量动力分析中地震动的调幅原则可分为等步调幅和不等步调幅,本文选择等步调幅原则,确定一个恒定的步长并依次对所选的地震动进行调幅。等步调幅原则的优势是调幅的步长简单、易于调整修改,在对多条地震动进行调幅分析时能够有效地提升效率。但调幅的步长太大会使得结构在进行增量动力分析时的跨度较大,可能会错过一些重要的性能点。将调幅的步长定为 $0.2g$,并一直计算至 $2.0g$,整体的计算量较为适中,且在增量动力曲线中可以观测到结构的性能点,得到增量动力曲线,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,增量动力曲线在地震动强

度较小时处于线性状态,此时结构为弹性阶段。随着地震动强度的不断增大,结构逐渐向弹塑性阶段转变,此时曲线变为非线性状态。

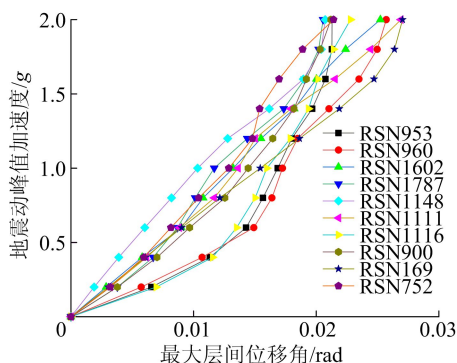


图 8 增量动力曲线

4.3 结构极限状态的定义

目前国内外对于建筑结构的设计依据多数以结构在受到地震动作用下的层间位移控制为基准,通过定义最大层间位移角的限值将建筑结构的破坏状态划分为若干个等级,而每个破坏等级的极限状态被称为结构的极限状态。在基于性能抗震设计中,这种极限状态被称为性能水准,表达结构在给定强度的地震动作用下可能会达到的最大损伤程度。文献[9]使用最大层间位移角为控制基准,量化了高危结构的极限状态并对其进行评估;本文参照《建筑消能减震技术规程》JGJ 297—2013 性能水准和性能目标,采用基于最大层间位移角的极限状态原则,将结构的破坏程度划分为正常使用、轻微损坏、中等破坏及严重破坏 4 种性能水准,将其与层间位移角限值的对应关系表示出来,见表 2 所列。

表 2 结构性能参数

极限状态	层间位移角/rad
正常使用	1/550
轻微损坏	1/250
中等破坏	1/120
严重破坏	1/50

4.4 地震易损性分析

在进行多次调幅的不同强度地震动作用下,结构地震响应超过某一极限状态的概率可以采用条件概率 P 来表达,结构性能参数对地震动强度参数的条件概率分布符合对数正态分布的规律。由于本文采用 PGA 为地震动强度参数,最大层间位移角 θ_{max} 为结构性能参数,结构极限状态采

用层间位移角量化,因此根据增量动力分析结果可计算出当给定 PGA 强度下的最大层间位移角的对数均值 μ 以及对数标准差 σ ,可进一步计算出最大层间位移角超过某一极限状态的概率。设极限状态的层间位移角限值为 θ_i ($i=1,2,3,4,5$),则可以采用式(1)计算在给定 PGA 强度下结构的最大层间位移角超过 θ_i 的概率,并得到结构在各个极限状态下的超越概率曲线。

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

其中: ϕ 为标准正态分布函数; A_{PG} 为给定强度的 PGA。

根据式(1)计算得到结构在不同地震动强度作用下的到达极限状态的概率,得到结构在各个极限状态下的超越概率曲线,如图 9 所示。图 9 中除正常绘制的易损性曲线外,还标注了结构在 7 度多遇、设防以及罕遇地震下的 PGA 等级,分别为 0.035g、0.100g、0.220g,得到结构在这 3 种规范地震动作用强度下到达各个极限状态的超载概率,见表 3 所列。

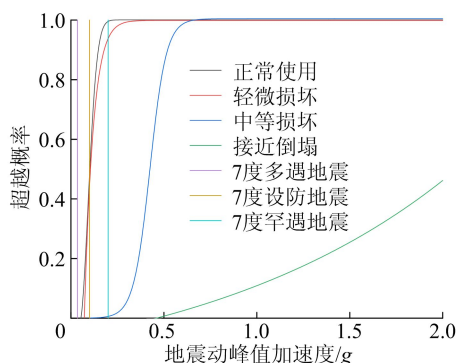


图 9 地震易损性曲线

表 3 减震结构在各极限状态下的超越概率

地震水准	地震动强度/g	状态概率/%			
		正常使用	轻微损坏	中等破坏	严重破坏
7 度多遇	0.035	0	0	0	0
7 度设防	0.100	48.14	10.16	0	0
7 度罕遇	0.200	100.00	93.76	0.60	0

根据表 3 可以计算出消能减震结构的易损性矩阵,本文以设防地震为例介绍计算的过程。消能减震结构在 7 度设防地震作用下处于正常使用状态的概率为 $100\% - 48.14\% = 51.86\%$;处于轻微损坏状态的概率为 $100\% - 10.16\% - 51.86\% = 37.98\%$;处于中等破坏状态的概率为

$100\% - 0 - 51.86\% - 37.98\% = 10.16\%$;处于严重破坏状态的概率为 $100\% - 0 - 51.86\% - 37.98\% - 10.16\% = 0$ 。采用同样的方法计算可得到在7度多遇地震和7度罕遇地震作用下消能减震结构处于各个状态的概率,将得到的数据汇总,见表4所列。

表4 各极限状态下减震结构易损性矩阵

地震水准	地震动强度/ g	状态概率/%			
		正常使用	轻微损坏	中等破坏	严重破坏
7度多遇	0.035	100.00	0	0	0
7度设防	0.100	51.86	37.98	10.16	0
7度罕遇	0.200	0	6.24	93.70	0.60

由表4可知,当消能减震结构在7度多遇地震作用下,结构达到正常使用的概率为100.00%,处于其他状态下的概率均为0;在7度设防地震作用下,结构达到正常使用的概率为51.86%,轻微损坏的概率为37.98%,中等破坏的概率为10.16%,严重破坏的概率为0;在7度罕遇地震作用下,结构达到正常使用的概率为0,轻微损坏的概率为6.24%,中等破坏的概率为93.70%,严重破坏的概率为0.60%。整体来说,消能减震结构基本能够满足抗震规范中“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设防要求。

5 结 论

本文针对某8层框架结构,采用设置黏滞阻尼器的消能减震方法。以消能减震结构为研究对象,基于增量动力分析方法对其地震易损性作出评估,计算出在一定强度地震作用下结构的超越概率,得到以下结论。

1) 相较于原结构,设置黏滞阻尼器的消能减震结构具有良好的减震效果,能够有效地提升结构的抗震能力。在小震作用下,减震结构的层间位移角和层间剪力均减少了约30%,黏滞阻尼器的减震效果显著。

2) 通过IDA分析得到结构的增量动力曲线,得到结构在各个不同地震强度下的最大层间位移角的分布情况。随着地震动强度的逐渐增加,最大层间位移角也逐渐增大,结构从弹性阶段进入塑性阶段,曲线也逐渐呈现出非单调增加的趋势。

趋势。

3) 通过对结构的增量动力曲线分析得到地震易损性曲线,由地震易损性曲线可得到在给定的地震动强度作用下结构处于各个性能状态的概率。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震规范中“小震不坏,中震可修,大震不倒”的要求。

4) 地震易损性能够将结构的破坏状态以概率的形式定量表现出来,从宏观的角度描述地震动强度与结构破坏状态之间的关系。结构的地震易损性分析对于评价结构的安全性能、防灾减灾以及损伤估计具有重要意义。地震易损性分析方法虽然计算量较大,但能够展现出结构从弹性阶段至塑性阶段的性能,是一种用于确定结构在不同强度地震作用下抗震性能的有效手段。

[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] 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.
- [3] 任浩,田勤虎,张炜超,等. 基于IDA方法的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. 建筑结构,2019,49(增刊2):350-355.
- [4] 乔剑,陈鑫,俞伟根,等. 高烈度区既有RC框架剪力墙结构抗震加固易损性分析[J]. 建筑结构,2021,51(10):84-91,79.
- [5] 钟紫蓝,申铁尧,郝亚茹,等. 基于IDA方法的两层三跨地铁地下结构地震易损性分析[J]. 岩土工程学报,2020,42(5):916-924.
- [6] 王军辉,王伟,潘月辉,等. 布置黏滞阻尼器框架结构的抗震分析研究[J]. 建筑结构,2022,52(增刊1):966-970.
- [7] 马振霄,温文露,陈华霆. 黏滞阻尼器参数选取与评估实用分析方法研究[J]. 建筑结构,2020,50(增刊2):330-336.
- [8] 田慧,张海,孟亚翠,等. 框架结构加固后的动力弹塑性分析研究[J]. 工程抗震与加固改造,2020,42(1):18-27.
- [9] 吕西林,苏宁粉,周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(5):19-25.

(责任编辑 张 镛)