

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.179

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于 IDA 的铅黏弹性阻尼减震结构地震易损性研究

黄炜元,张超,周云,石菲

(广州大学 土木工程学院,广州 510006)

摘要:为系统评估铅黏弹性阻尼器(Lead Viscoelastic Damper, LVD)减震设计钢筋混凝土框架结构的抗震性能,设计了 8 度(0.2g)地区的一栋 6 层钢筋混凝土抗震框架结构(Reinforced Concrete Frame, RCF)和铅黏弹性阻尼减震框架结构(LVD-damped Frame, LVDF)。使用 OpenSees 软件建立了 RCF 结构和 LVDF 结构的弹塑性分析模型,采用 ATC-63 推荐的 22 条远场地震动对 RCF 和 LVDF 进行增量动力分析,基于增量动力分析结果对其进行概率地震需求分析和地震易损性分析,定量评估了 RCF 结构和 LVDF 结构超越各损伤状态的概率。研究表明:铅黏弹性阻尼器可以有效控制结构地震动响应,使同一地震作用下 LVDF 结构的地震动响应小于 RCF 结构;由概率地震需求分析结果可知,铅黏弹性阻尼器可以降低因地震动特性差异导致的结构动力分析结果的离散性;由地震易损性分析结果可知, LVDF 结构在不同损伤状态下的超越概率均低于 RCF 结构,表明铅黏弹性阻尼器可以显著降低结构的损伤,提高结构的抗震性能。

关键词:铅黏弹性阻尼器;增量动力分析;易损性分析;抗震性能;钢筋混凝土结构

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)03-0075-08

IDA based seismic fragility analysis of lead viscoelastic damping structure

HUANG Weiyuan, ZHANG Chao, ZHOU Yun, SHI Fei

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China)

Abstract: To systematically evaluate seismic performance of reinforced concrete frame structure designed with lead viscoelastic damper (LVD), a 6-layer RC frame (RCF) and LVD-damped RC frame (LVDF) in 8 degree (0.2g) were designed and established. Finite analysis models of the RCF and LVDF were built using OpenSees. Incremental dynamic analysis (IDA) was conducted to both RCF and LVDF using a total of 22 far field ground motion records as recommended from ATC-63. Based on results of IDA, probabilistic seismic demand analysis followed with the seismic fragility analysis was carried out for RCF and LVDF, and the probability of achieving different damage states of RCF and LVDF were quantitatively evaluated. The analysis results show that lead viscoelastic damper can be used to seismically control structural dynamic

收稿日期: 2020-07-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703600); 长江学者和创新团队发展计划(IRT13057); 广州大学研究生创新能力培养资助计划(2018GDJC-M43); 广州市建筑集团有限公司科技计划(2019-KJ019, 2019-KJ033)

作者简介: 黄炜元(1994-), 男, 主要从事结构减震控制研究, E-mail: 624018677@qq.com.

张超(通信作者), 男, 副教授, E-mail: zhch2013@gzhu.edu.cn.

Received: 2020-07-16

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0703600); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (No. IRT13057); Guangzhou University Postgraduate Foundational Innovation Research Project (No. 2018GDJC-M43); Technology Planning Project of Guangzhou Construction Group Co., Ltd. (No. 2019-KJ019, 2019-KJ033)

Author brief: HUANG Weiyuan (1994-), main research interest: structural control, E-mail: 624018677@qq.com. ZHANG Chao (corresponding author), associate professor, zhch2013@gzhu.edu.cn.

behavior so that structural response of LVDF is smaller than that of RCF under the same earthquake. As shown in results of probabilistic seismic demand analysis, LVD reduce dispersion of structural dynamic analysis results due to differences characteristics of ground motion records. As shown in seismic fragility analysis results, LVDF has lower probability of exceedance under different damage states than that of RCF, indicating that LVD can significantly both release structural damage and improve seismic performance of the structure.

Keywords: lead viscoelastic damper; incremental dynamic analysis; fragility analysis; seismic performance; reinforced concrete structure

历次震害调查发现,钢筋混凝土(RC)框架结构在强地震作用下损伤严重,甚至倒塌^[1]。近年来,消能减震技术的发展和应用于降低主体结构损伤、提高结构抗震抗倒塌性能提供了有效可靠的技术支持^[2]。铅黏弹性阻尼器由于具有铅芯屈服耗能和黏弹性材料剪切滞回耗能双重耗能机制共同耗能的优点,以及铅芯在常温下具备动态回复和再结晶的特点,且黏弹性材料在设计变形范围内具有超弹性的特性^[3],具有优异的耗能能力,在既有建筑的抗震加固和新建建筑的抗震与抗风设计中均有广泛的应用前景。目前,铅黏弹性阻尼器的研究主要集中在阻尼器力学性能和减震结构抗震性能的提升,对铅黏弹性阻尼减震结构抗震性能的系统评估对推动铅黏弹性阻尼器的发展和应用具有重大意义^[4]。

地震易损性作为基于性能的地震工程是重要一环,表征结构在不同强度水平的地震作用下发生不同极限状态破坏的超越概率,可以从概率角度量化地震动和结构的不确定性对结构抗震性能的影响^[5]。

介绍了基于 IDA 方法的地震易损性分析方法,设计并建立了一栋 6 层 RC 抗震结构(RCF)和铅黏弹性阻尼减震结构(LVDF)的有限元模型,采用 ATC-63 推荐的 22 条远场地震动对该结构进行 IDA 分析和地震易损性分析,定量评估该结构达到各极限状态的概率。

1 基于 IDA 的地震易损性分析方法

1.1 IDA 基本原理

增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)广泛用于结构抗震性能评估,可量化评估结构的地震易损性^[6]。IDA 方法通过将一系列按一定比例系数进行缩放的地震动分别作用于结构,得到结

构的非线性时程响应及结构损伤指标(Damage Measure, DM)和地震动强度指标(Intensity Measure, IM)之间的关系曲线,即 IDA 曲线^[7]。

1.2 地震动选取

美国应用技术委员会在 ATC-63 报告^[6]中给出的 22 条远场地震动记录较好地考虑了地震动的峰值、频谱特性和持时等地震动不确定因素对结构响应的影响,因此,选取这 22 条地震动记录对 RCF 结构和 LVDF 结构进行 IDA 分析。

1.3 地震动强度指标和结构损伤指标

合理选取地震动强度指标和结构损伤指标能够更好地反映地震动和结构特性并降低结构分析结果的偏差,更准确地评估结构在动力荷载作用下的抗震性能^[5]。研究表明,最大层间位移角 θ_{max} 可以很好地反映框架结构的整体抗震性能^[6],而且中国抗震规范中采用地震动峰值加速度 PGA 表示不同烈度的设防地震动强度,并使用最大层间位移角 θ_{max} 作为结构整体性能指标^[8]。因此,选取 PGA 和 θ_{max} 作为结构 IDA 分析的 IM 和 DM 指标。

1.4 损伤状态划分

根据文献^[5]可列出 RC 框架结构破坏等级或性能水平与结构响应之间的关系,以 RC 框架结构在小、中、大震下的最大层间位移角限值 $[\theta_{max}]$ 为依据,建立 4 个损伤状态并进行量化,如表 1 所示。

表 1 损伤状态确定

Table 1 Definitions of each damage states

损伤状态	$[\theta_{max}]/\%$
DS1	0.18
DS2	1.0
DS3	2.0
DS4	4.0

1.5 地震易损性分析

地震易损性表示不同强度地震作用下结构动力反应超过某损伤状态的条件概率,计算表达式为^[6]

$$P_f = P(C/D < 1) = 1 - P(D - C > 0) \quad (1)$$

式中:结构反应超过某一损伤状态的概率为 P_f ,文献^[7]研究认为,特定损伤状态下结构抗震能力概率函数 C 和结构反应概率函数 D 满足对数正态分布,根据文献^[9],式(1)可简化为

$$P_f = \Phi \left[\frac{\lambda_D - \lambda_C}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] = \Phi \left[\frac{A + B \ln(\text{PGA}) - \ln \hat{C}}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (2)$$

式中: λ_D 和 β_D 分别为结构反应概率函数 D 的对数平均值和对数标准差; λ_C 和 β_C 分别为结构抗震能力概率函数 C 的对数平均值和对数标准差; $\Phi(x)$ 为标准正态分布累积概率函数;参照文献^[10]的研究结论,当以 PGA 为变量时, $\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}$ 可取为 0.5; \hat{C} 为结构的损伤状态值;式(2)中的参数 A 、 B 按式(3)计算。

$$\ln \hat{D} = A + B \ln(\text{PGA}) \quad (3)$$

式中: $A = \ln \alpha$, $B = \beta$, 系数 A 和 B 通过对结构 IDA 数据进行统计回归分析获得, α 和 β 由式(4)获得^[7]。

$$\theta_{\max} = \alpha(\text{PGA})^\beta \quad (4)$$

1.6 基于 IDA 的地震易损性分析基本步骤

1) 建立合理的结构弹塑性分析模型;

2) 依据相关规范要求选择符合要求的一系列地震动记录,选择合适的地震动强度指标 IM 和结构损伤指标 DM,确定结构损伤状态;

3) 确定地震动调幅原则和步长,得到一系列调幅后的地震动加速度时程记录。为了得到较完整的 IDA 曲线,且获得较精确的不同主震损伤状态所对应的 IM 值,结构 IDA 分析中 IM 增量步长取为 0.01g;

4) 计算结构在该调幅后地震动记录作用下的非线性动力时程响应,记录每次分析中的 IM 和 DM 值,得到 IDA 曲线簇;

5) 统计 IDA 曲线簇的 50%、84%、16% 分位 IDA 曲线;

6) 对 IDA 数据进行线性回归,建立以 IM 指标为自变量的结构概率地震需求模型;

7) 计算不同地震动强度下结构达到损伤状态的失效概率,绘制地震易损性曲线。

2 模型概况

2.1 RC 框架结构设计

根据中国现行建筑抗震设计规范^[11]和混凝土结构设计规范^[12],使用 PKPM 软件对一栋 6 层钢筋混凝土框架结构进行抗震设计并计算截面配筋。结构主要设计参数如下:地震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度 0.2g,场地类别 II 类,设计地震分组第二组,场地特征周期 0.40 s。结构底层层高 4.2 m,其余层为 3.6 m,6 层结构总高 22.2 m,抗震等级二级,建筑设防类别丙类。开间均为 4 m,进深为 6 m 和 2.7 m(走廊处),结构平面和立面图如图 1 所示。楼面永久荷载标准值取 6 kN/m²,楼面可变荷载标准值取 2 kN/m²,走廊可变荷载标准值取 3.5 kN/m²,屋面永久荷载标准值取 7 kN/m²,屋面可变荷载标准值取 0.5 kN/m²,梁上线荷载标准值取 8 kN/m²。梁、板、柱混凝土强度等级均为 C30,梁、柱纵筋和箍筋均选取 HRB400。RC 抗震框架结构(RCF)构件截面尺寸及配筋详分别见表 2 和表 3。

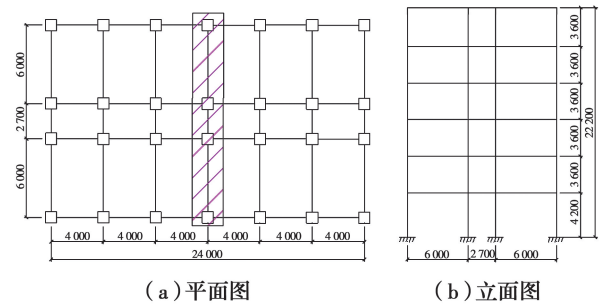


图 1 RC 框架结构布置(mm)

Fig. 1 Structural layout of RC frame (mm)

表 2 RCF 结构和 LVDF 构件截面尺寸

Table 2 Cross-section dimensions of structural components

构件	RCF	LVDF
1~3 层柱	600 mm×600 mm	550 mm×550 mm
4~6 层柱	550 mm×550 mm	500 mm×500 mm
中梁	250 mm×350 mm	250 mm×300 mm
1~3 层边梁	250 mm×500 mm	250 mm×450 mm
4~6 层边梁		250 mm×400 mm

表 3 RCF 结构和 LVDF 结构框架梁柱配筋

Table 3 Reinforcement details of RCF and LVDF

结构	层号	梁端配筋		柱配筋(单侧)	
		上	下	边柱	中柱
RCF	1~3	6C20	2C25	4C20	4C20
	4~6	4C22	2C25	4C18	4C18
LVDF	1~3	6C20	2C25	4C18	4C18
	4~6	4C22	2C25	4C16	4C16

2.2 LVD 减震框架结构设计

铅黏弹性阻尼器主要由约束钢板、黏弹性材料、剪切钢板、铅芯、连接端板等构成^[3],其内部构造如图 2 所示。根据建筑消能减震技术规程^[13],基于与 RCF 结构相同的设计参数,采用铅黏弹性阻尼器设计与 RCF 结构动力特性相近的铅黏弹性阻尼减震框架结构(LVDF)。依据文献^[14]选取 LVD 的力学性能参数为:屈服荷载 60 kN,初始刚度 40 kN/mm,屈服位移 1.5 mm。铅黏弹性阻尼器与主体结构连接方式示意图见图 3, LVDF 结构的梁柱截面见表 1,梁柱配筋见表 2。文中 RCF 结构和 LVDF 结构的反应谱最大层间位移角分别为 1/559、1/564,两者较为接近。

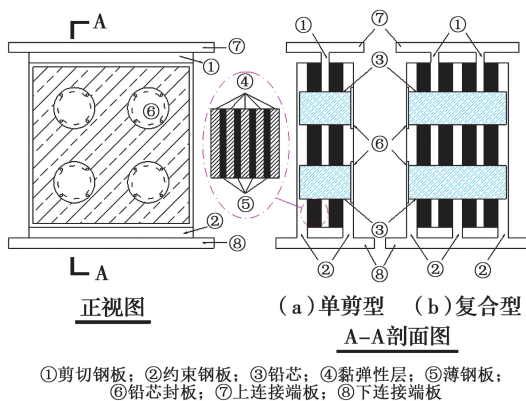


图 2 铅黏弹性阻尼器构造图

Fig. 2 Configurations of lead viscoelastic damper

2.3 OpenSees 有限元模型

使用 OpenSees 软件^[15]建立结构数值分析模型。铅黏弹性阻尼器采用考虑金属材料应变强化和包辛格效应的 Steel02 材料^[16]进行模拟。如图 4 所示,通过与文献^[3]中铅黏弹性阻尼器试件试验的滞回曲线对比可知,模拟得到的阻尼器最大阻尼力与试验结果相差仅 2.47%,屈服前刚度和屈服后刚度基本吻合,说明该单元可以较好地模拟铅黏弹性阻

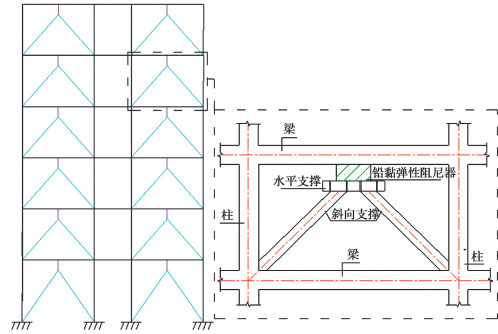


图 3 LVD 安装示意图

Fig. 3 Installation of LVD

尼器的力学特性。

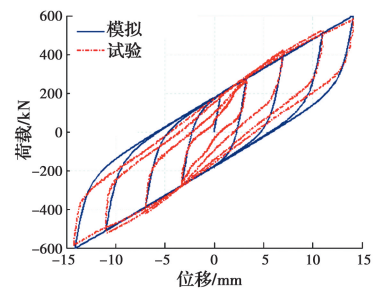


图 4 试验与模拟的铅黏弹性阻尼器滞回曲线

Fig. 4 Experimental and analytical hysteretic curves of LVD

根据文献^[17]的建议,在 OpenSees 模型中使用刚性杆将水平荷载传递给阻尼器,阻尼器单元使用零长度单元模拟,支撑使用 truss 单元模拟,结构在地震动下的变形示意图见图 5。

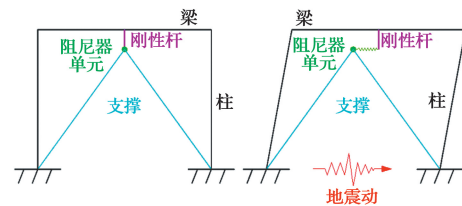


图 5 铅黏弹性阻尼器 OpenSees 模拟示意图

Fig. 5 Sketch of LVD modeling in OpenSees

采用可以有效模拟 RC 构件塑性铰区强度和刚度退化的改进的 IMK 恢复力模型^[18]模拟梁柱构件塑性铰区域的弹塑性力学行为,并将其置于 Joint2D 单元^[19]的弹簧 1~4,根据文献^[20]提出的节点应力-应变模型,Joint2D 节点域的剪切弹簧 5 使用 Hysteretic 模型模拟,使用修正刚度的弹性梁柱单元^[21]模拟 RC 梁柱构件中部未发生塑性变形的部分,使用零长度单元模拟首层柱柱脚的塑性铰, LVDF 结构 OpenSees 模型详见图 6。RCF 结构建模方法与 LVDF 结构的主体框架结构相同。

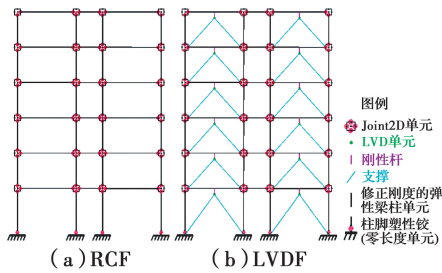


图 6 RCF 结构和 LVDF 结构有限元模型

Fig. 6 Finite analysis model of RCF and LVDF

3 地震易损性分析

3.1 IDA 曲线

基于 1.6 节中的分析步骤,对结构分别输入调幅后的地震动记录进行弹塑性时程分析,得到 IDA 曲线簇如图 7 所示。由图 7 可知,相同最大层间位移下,LVDF 结构的峰值地震动强度需求明显大于 RCF 结构,说明 LVD 对结构进行了有效的振动控制。

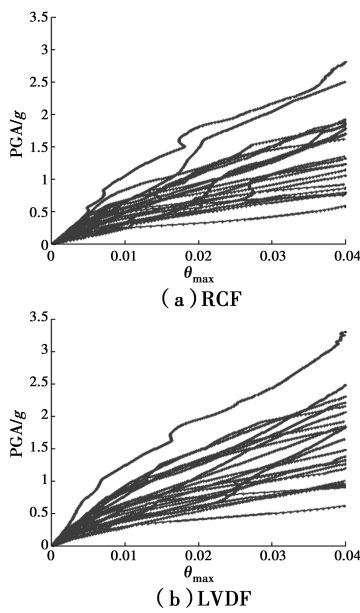


图 7 RCF 结构和 LVDF 结构 IDA 曲线簇

Fig. 7 IDA curves of RCF and LVDF

3.2 IDA 分位曲线

为准确评估结构的地震动响应特性,将 IDA 曲线汇总为可以表征 IDA 曲线簇平均水平和离散性的 16%、50%和 84%IDA 分位曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,LVDF 结构的 50%分位曲线比 RCF 结构低约 3.7%,同一 PGA 下的 LVDF 结构的地震动响应小于 RCF 结构,说明 LVD 对结构进行了有效

的振动控制。此外,RCF 结构和 LVDF 结构的 δ_{IM} 中位数分别为 0.348 5 和 0.338 6,说明 LVDF 结构的地震动响应离散性比 RCF 结构低约 3%,使结构分析结果更加可靠。

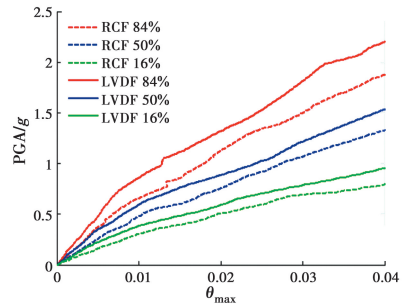


图 8 RCF 结构和 LVDF 结构的 IDA 分位曲线

Fig. 8 IDA fractile curves of RCF and LVDF

3.3 概率地震需求模型

通过对数线性拟合建立结构反应 DM 与 IM 的结构地震需求概率函数关系式,如图 9 所示。

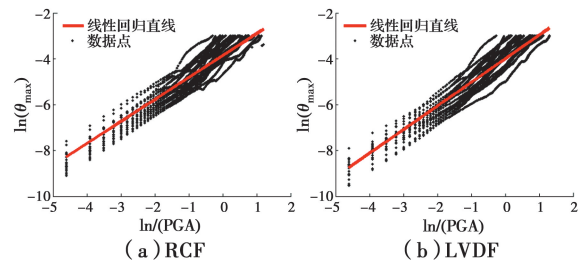


图 9 结构的概率需求分析曲线

Fig. 9 Seismic demand curves of RCF and LVDF

其中,RCF 结构的概率地震需求模型为

$$\ln(\theta_{max}) = 0.9574 \ln(PGA) - 3.8667 \quad (5)$$

LVDF 结构的概率地震需求模型为

$$\ln(\theta_{max}) = 1.0302 \ln(PGA) - 4.0056 \quad (6)$$

RCF 结构和 LVDF 结构线性回归方程的相关系数 R^2 分别为 0.966 2 和 0.970 5,均大于 0.95,表明线性回归方程与数据点之间的相关性较高,拟合效果较好,可以根据 IDA 结果得到的数据对 RCF 结构和 LVDF 结构进行地震易损性分析。此外,LVDF 结构的 R^2 大于 RCF 结构,这与前述 IDA 分位曲线的分析结果吻合,即 LVD 不仅可以降低整体结构的动力响应,还可以降低结构因地震动不确定性导致的动力响应的离散性。

3.4 地震易损性曲线

将式(5)和式(6)分别代入式(2),得到 RCF 结构和 LVDF 结构在各损伤状态的失效概率分别如

式(7)和式(8)所示。

$$P_i = \Phi \left[\frac{-3.8667 + 0.9574 \ln(\text{PGA}) - \ln \hat{C}}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (7)$$

$$P_i = \Phi \left[\frac{-4.0056 + 1.0302 \ln(\text{PGA}) - \ln \hat{C}}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (8)$$

式中： \hat{C} 为结构的损伤状态值，按照表 1 取值。根据失效概率公式即可绘制以 PGA 为横坐标的地震易损性曲线，如图 10 所示。由图 10 可知，各损伤状态下，LVDF 结构在同一地震动强度下的超越概率均低于 RCF 结构，表明 LVDF 结构可以较好地降低结构在各损伤状态下的超越概率，提高结构的抗震性能。

表 4 RCF 结构和 LVDF 结构破坏概率矩阵

Table 4 Damage probability matrix of RCF and LVDF

损伤状态	多遇地震		设防地震		罕遇地震		极罕遇地震	
	RCF	LVDF	RCF	LVDF	RCF	LVDF	RCF	LVDF
DS1	0.386 2	0.149 6	0.960 2	0.877 0	0.999 0	0.995 5	1.000 0	0.999 8
DS2	0.000 1	3.95×10^{-6}	0.046 8	0.011 6	0.371 5	0.206 7	0.700 1	0.539 8
DS3	1.65×10^{-7}	2.4×10^{-9}	0.001 1	0.000 1	0.043 2	0.013 8	0.194 4	0.099 2
DS4	4.25×10^{-11}	2.24×10^{-13}	4.31×10^{-6}	2.3×10^{-7}	0.001 0	0.000 2	0.012 3	0.003 8

由表 4 可见，在 8 度小震作用下，RCF 和 LVDF 均能保证结构的稳定性和安全性，达到损伤状态 DS1 的概率分别为 38.62% 和 14.96%，超越其他损伤状态的概率基本为 0。中震作用下，RCF 结构有明显的损伤，达到损伤状态 DS1 和 DS2 的概率分别为 96.02% 和 4.68%，而 LVDF 结构的超越概率为 87.70% 和 1.16%，均小于 RCF 结构，说明 LVDF 结构的抗震性能优于 RCF 结构。大震作用下，RCF 结构的损伤较为严重，损伤状态 DS1 的超越概率基本为 1，DS2~DS4 的超越概率分别为 37.15%、4.32% 和 0.10%，均明显高于 LVDF 结构的 20.67%、1.38% 和 0.02%，说明 LVDF 结构损伤得到较好的控制，具有较高的抗震性能。巨震作用下，虽然 LVDF 结构在 DS1 的超越概率与 RCF 结构相近，均接近 100%，但 LVDF 在其他损伤状态下的超越概率均远小于 RCF 结构，说明 LVDF 结构即使在 8 度 (0.2g) 的极罕遇地震作用下也有较好的性能表现。

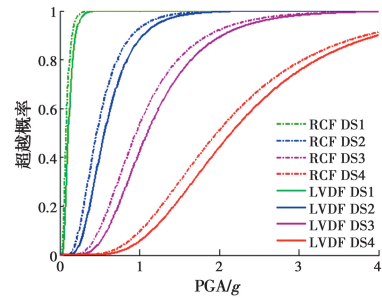


图 10 RCF 结构和 LVDF 结构的地震易损性曲线

Fig. 10 Seismic fragility curves of RCF and LVDF

3.5 结构破坏概率矩阵

根据图 10 的易损性曲线，可以预测量化 8 度 (0.2g) 设防地区的 RCF 结构和 LVDF 结构在小震、中震、大震和巨震^[22]作用下发生不同损伤状态的破坏概率，形成结构破坏概率矩阵，如表 4 所示。

综上所述，由图 10 和表 4 对比可知，在相同地震水平下，LVDF 结构的破坏概率均小于 RCF，平均降低约 21%，即在结构震害评估过程中，LVDF 可以显著降低结构损伤，提高结构的抗震性能。

4 结论

基于相同设计参数分别设计并建立了动力特性相近的 6 层 RCF 结构和 LVDF 结构的有限元模型，对结构进行了增量动力分析和地震易损性分析，得到以下结论：

1) LVDF 结构在同一地震动强度下的地震动响应比 RCF 结构低约 4%，说明 LVDF 可以有效降低结构地震动响应。

2) LVDF 结构在不同地震动记录下地震动响应的离散性比 RCF 抗震结构低约 3%，说明 LVDF 可以降低因地震动特性差异导致的结构动力分析结果的离散性。

3)通过地震易损性分析结果可知,LVDF结构在不同损伤状态下的超越概率比RCF结构平均低约21%,说明LVD可以显著降低结构的损伤,提高结构的抗震性能。

参考文献:

- [1] 潘毅,陈侠辉,赵俊贤,等. 基于剪力比的黏弹性阻尼腋撑-RC框架结构设计方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(Sup1): 79-86.
PAN Y, CHEN X H, ZHAO J X, et al. Seismic design method of RC frame structure with knee brace of viscoelastic damper based on shear ratio [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (Sup1): 79-86. (in Chinese)
- [2] 房晓俊,周云,张超. 采用铅黏弹性连梁阻尼器的框架-核心筒结构减震分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(Sup2): 1-7, 13.
FANG X J, ZHOU Y, ZHANG C. Energy dissipation analysis of a frame-corewall structure equipped with lead-viscoelastic coupling beam dampers [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(Sup2): 1-7, 13. (in Chinese)
- [3] 石菲. 新型(铅)黏弹性阻尼器性能与应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
SHI F. Performance and application research of (lead) viscoelastic damper [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [4] 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.
ZHOU Y, SHANG C H, ZHANG C. Progress in research and application of energy-dissipated technology [J]. Building Structure, 2019, 49(19): 33-48. (in Chinese)
- [5] 国巍,曾晨,潘毅,等. 基于增量动力分析法的高层建筑-阻尼器系统地震易损性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(4): 59-68.
GUO W, ZENG C, PAN Y, et al. IDA based seismic fragility analysis of high-rise building-damper system [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(4): 59-68. (in Chinese)
- [6] Quantification of building seismic performance and factors: FEMA-P695 [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [7] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [8] 潘毅,包韵雷,国巍,等. 摆式电涡流TMD-钢框架结构的耦合计算方法与减震分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 84-93.
PAN Y, BAO Y L, GUO W, et al. Coupling calculation method and seismic analysis of pendulum eddy current TMD-steel frame structures [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 84-93. (in Chinese)
- [9] HUANG W Y, ZHANG C, SHI F, et al. Study on seismic performance and energy demand of RC frame constructed with lead viscoelastic damper under strong earthquake [C]// The 9th Asia-Pacific Young Researchers and Graduates Symposium, Shanghai, China, 2019.
- [10] Earthquake loss estimation methodology: user's manual: FEMA HUZUS99 [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 1999.
- [11] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [12] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 建筑消能减震技术规程: JGJ 297—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Technical specification for seismic energy dissipation of buildings: JGJ 297-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [14] 房晓俊. 功能自恢复连梁抗震性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
FANG X J. Study on seismic performance of self-resilient coupling beam [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [15] OpenSees. Open system for earthquake engineering simulation [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California: Berkeley, CA, 2007.

- [16] FILIPPOU F C, POPOV E G, BERTERO V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 1983.
- [17] MOHAMMADI R K, NASRI A, GHAFARY A, TADAS dampers in very large deformations [J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(2): 515-524.
- [18] IBARRA L F, MEDINA R A, KRAWINKLER H. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(12): 1489-1511.
- [19] CELIK O C, ELLINGWOOD B R. Modeling beam-column joints in fragility assessment of gravity load designed reinforced concrete frames [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2008, 12(3): 357-381.
- [20] TERAOKA M, FUJII S. Seismic damage and performance evaluation of R/C beam-column joints [C]// The Second US-Japan Workshop on Performance-Based Engineering for Reinforced Concrete Building Structures, Hokkaido, Japan, 2000, 379-390.
- [21] IBARRA L F, KRAWINKLER H. Global collapse of frame structures under seismic excitations [R]. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA, 2005.
- [22] 中国震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)

(编辑 胡玲)