

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.02.019

基于 Copula 函数的框支剪力墙基础隔震 结构地震易损性分析

孙倩龙, 何沛祥

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对经典构件地震易损性分析方法的不足,文章将 Copula 函数引入到构件地震易损性分析中,提出一种基于 Copula 函数的构件地震易损性分析方法。在地震易损性分析框架的基础上,通过引入非参数核密度估计和 Copula 函数建立地震动强度和构件地震需求的联合概率分布函数,使地震易损性分析无需人为假定易损性函数分布形式。以某框支剪力墙基础隔震结构为工程背景,基于 Copula 函数的地震易损性分析方法建立结构各构件的易损性曲线,并与常用构件易损性分析方法的计算结果进行比较,验证了该方法的可行性。研究表明,该方法有助于优化框支剪力墙隔震结构易损性曲线的建模过程,为地震易损性研究提供新的思路和方法。

关键词:框支剪力墙;基础隔震;地震易损性;Copula 函数;核密度估计

中图分类号:TU311.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)02-0267-07

Seismic fragility analysis of frame-supported shear wall base-isolated structures based on Copula function

SUN Qianlong, HE Peixiang

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the inadequacies of the classical seismic fragility analysis method of components, the Copula function is introduced to analyze the seismic fragility of components in this work. Then a seismic fragility analysis method of components based on Copula function is proposed. On the basis of the seismic fragility analysis framework, the joint probability distribution function of ground motion intensity and seismic demand of components is established by introducing nonparametric kernel density estimation and Copula function, which makes the distribution form of the fragility function that needs to be artificially assumed unnecessary. Taking a frame-supported shear wall base-isolated structure as the engineering background, Copula function are used to establish the fragility curve of each component. Compared with the calculation results of the common component fragility analysis methods, the feasibility of the proposed method is verified. The results show that the proposed method is helpful to optimize the modeling process of the fragility curve of frame-supported shear wall isolation structure, which provides a new idea and method for the research of seismic fragility.

Key words: frame-supported shear wall; base isolation; seismic fragility; Copula function; kernel density estimation

收稿日期:2023-03-01;修回日期:2023-03-20

基金项目:安徽省自然科学基金杰出青年基金资助项目(2208085J20);合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2020JSFW0263)

作者简介:孙倩龙(1998—),男,安徽阜阳人,合肥工业大学硕士生;

何沛祥(1965—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:hpxwt@hfut.edu.cn.

0 引 言

随着建筑业的迅猛发展,建筑的多功能化需求日益体现,底部大空间用于商业,上部小空间用于住宅、办公的框支剪力墙结构在实际工程中大量应用。这些建筑往往下部墙少柱多,上部墙多柱少,结构竖向构件不连续,需要设置转换层进行过渡。然而这种转换层的结构在地震作用下,由于结构竖向不规则,使得在转换层附近的层间位移角和层间剪力容易发生突变,给结构的抗震带来不利的影响^[1]。而隔震技术可以通过在建筑物中设置隔震层来吸收和耗散地震能量,避免或减少地震对建筑的其他部分造成损伤,目前已经逐渐应用于高层建筑结构中。然而,当隔震结构遭遇强震时,隔震层由于吸收大部分地震能量也会发生一定损伤。隔震支座可能会发生较大的剪切变形导致承载力下降,从而影响结构整体的抗震性能。因此,研究框支剪力墙基础隔震结构的抗震性能显得尤为重要。

在结构抗震性能的研究中,地震易损性分析是地震风险评估的重要组成部分。其可以理解为建筑在遭受某种地震强度时所遭受的损失,用数值形式来表征结构抗震能力的退化过程,为结构的震前灾害预测和震后损失评估提供了有利手段。文献[2-3]基于增量动力分析方法,对普通和带耗能腋撑型钢混凝土转换框架结构进行易损性分析,研究表明防屈曲耗能腋撑可有效降低转换框架结构在不同损伤状态下的超越概率;文献[4]考虑转换层位置不同对结构地震易损性的影响,发现高低位转换结构在轻微破坏和中等破坏的超越概率基本相同,但高位转换结构相较于低位转换结构更容易发生倒塌;文献[5]对型钢混凝土框支剪力墙结构的易损性曲线进行研究,以层间位移角为损伤指标,通过增量动力分析表明这种结构在强震作用下的可靠性是可以保证的;文献[6]考虑转换层刚度比、肋柱数量、砌块强度等不同参数变化来研究对结构地震易损性的影响,结果表明砌块强度对结构抗震性能影响较大,在实际应用中应选择强度较大的混凝土。上述对带转换层结构的地震易损性研究中,往往假设易损性函数服从对数正态分布函数,然后通过地震时程分析的结果计算对数正态分布函数的未知参数来建立易损性曲线。但文献[7-8]研究表明,结构各构件的易损性曲线大多数只是近似服从对数正态分布假设。此时,若易损性曲线仍然按对数正态分布

来建立,则会导致结构的破坏概率不准确。

因此,为使地震易损性曲线更加真实可靠的,本文基于描述变量之间的相关关系的 Copula 函数,在不假设易损性函数形式的基础上,建立一种基于 Copula 函数的构件易损性分析方法。以某框支剪力墙基础隔震结构为研究对象,运用 Copula 函数积分方法建立框支剪力墙隔震与抗震结构的易损性曲线,研究基础隔震对带转换层的框支剪力墙抗震性能的影响作用。

1 基于 Copula 函数的联合分布

设 n 维随机变量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的边缘分布分别为 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$ 。根据 Sklar 定理^[9], n 维随机变量的联合分布与边缘分布存在以下关系:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \quad (1)$$

其中, $C(\cdot)$ 称为 $F(\cdot)$ 的 Copula 函数。若边缘分布是连续的,则 Copula 函数是唯一的。相应地,以 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$ 为边缘分布的联合概率密度函数可表示为:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \prod_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (2)$$

其中: $f_i(x_i)$ 为边缘分布 $F_i(x_i)$ 的概率密度函数; $c(\cdot)$ 为 Copula 函数的概率密度函数。

Copula 函数可作为刻画变量之间相依关系的工具,而构件地震易损性分析考虑地震动强度和构件地震需求 2 个量之间的相关关系,则二维随机变量 (x_1, x_2) 的联合分布函数和联合概率密度可表示为:

$$F(x_1, x_2) = C(F_1(x_1), F_2(x_2); \theta) \quad (3)$$

$$f(x_1, x_2) = f_1(x_1)f_2(x_2) \times c(F_1(x_1), F_2(x_2); \theta) \quad (4)$$

其中, θ 为 Copula 函数的相关参数。在已知变量 x_1 和 x_2 的边缘分布函数和 Copula 函数的条件下,通过式(3)可以考虑随机变量之间的相关性,将联合分布与边缘分布连接起来,进而建立变量 x_1 和 x_2 的二维联合分布函数模型。

Copula 函数的相关参数 θ 可采用极大似然估计法估计,只需建立 Copula 函数的似然函数,将变量的边缘分布代入似然函数中,进而可求出相关参数 θ 为:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax} \sum_{i=1}^2 \ln c(u_{1i}, u_{2i}) \quad (5)$$

其中, u_{1i}, u_{2i} 为随机变量 x_1, x_2 在观测数据 x_{1i}, x_{2i} 的边缘分布值。

二维 Clayton Copula 分布函数表达式为:

$$C(u_1, u_2) = (u_1^{-\theta} + u_2^{-\theta} - 1)^{-1/\theta} \quad (6)$$

二维 BB7 Copula 分布函数表达式为:

$$C(u_1, u_2) = 1 - \{1 - [(1 - (1 - u_1)^\theta)^{-\delta} - (1 - (1 - u_2)^\theta)^{-\delta} - 1]^{1/\delta}\}^{1/\theta} \quad (7)$$

2 Copula 函数法构件易损性分析

2.1 构件易损性分析的 Copula 函数积分方法

地震易损性是指在某特定强度地震作用下, 结构在不同损伤状态下的超越概率, 从概率统计的角度出发属于条件概率问题。根据上述描述可得到地震易损性曲线计算公式^[10]为:

$$P_f = P[D \geq C | I_{IM}] \quad (8)$$

其中: P_f 为构件在某特定损伤状态下的超越概率; D 为构件地震需求值; C 为构件抗震能力值; I_{IM} 为地震动强度值(intensity measure, IM)。

将构件地震需求的条件概率密度函数 $f_{D,IM}$ 代入式(8), 则易损性曲线计算公式可进一步表示为:

$$P_f(a, C) = P[D \geq C | I_{IM} = a] = \int_C^{+\infty} f_D(c | I_{IM} = a) dc \quad (9)$$

根据概率统计分析理论^[11]可得构件地震需求的条件概率密度函数计算公式为:

$$f_D(c | I_{IM} = a) = \frac{f_{D,IM}(c, a)}{f_{IM}(a)} \quad (10)$$

其中: $f_{D,IM}(\cdot)$ 为地震需求和地震动强度的联合概率密度函数; $f_{IM}(\cdot)$ 为 IM 的概率密度函数; 其他符号同上。从式(10)可以看出, 若要求解构件地震易损概率, 则需要对二元联合概率密度函数进行计算。由于 Copula 函数能够灵活方便地对多维联合分布概率进行求解, 本文采用 Copula 函数求解构件地震需求和地震动强度的联合概率分布函数。

根据 Copula 理论可知二维联合分布函数可以分解为 2 个一维边缘分布函数和 1 个描述变量之间相关性的连接函数, 则构件地震需求和地震动强度的联合分布函数计算公式为:

$$F_{D,IM}(c, a) = C(F_D(c), F_{IM}(a)) \quad (11)$$

其中: $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; $F_{D,IM}(\cdot)$ 为构件地震需求和地震动强度的联合分布函数; $F_{IM}(\cdot)$ 为地震动强度 IM 的边缘分布函数; $F_D(\cdot)$ 为构件地震需求 D 的边缘分布函数; 其他符号同上。

对 c 和 a 进行求导, 即可得到联合分布函数的概率密度函数:

$$f_{D,IM}(c, a) = c(F_D(c), F_{IM}(a)) f_D(c) f_{IM}(a) \quad (12)$$

其中, $c(u_1, u_2) = \frac{\partial^2 C(u_1, u_2)}{\partial u_1 \partial u_2}$ 表示 Copula 的密度函数。将式(12)代入式(10)中, 则构件地震需求的条件概率密度函数为:

$$f_D(c | I_{IM} = a) = c(F_D(c), F_{IM}(a)) f_D(c) \quad (13)$$

因此, 地震易损性曲线计算公式可改写为:

$$P_f(a, C) = P[D \geq C | I_{IM} = a] = \int_C^{+\infty} c(F_D(c), F_{IM}(a)) dF_D(c) \quad (14)$$

2.2 Copula 函数的地震易损性曲线建立流程

本文所提方法的基本流程如图 1 所示。主要步骤如下:

1) 确定地震需求和地震动强度的边缘分布函数。根据统计分析的基本要求, 建立一定数量的结构地震动分析样本, 进行动力时程分析。利用时程分析的结果, 对构件地震需求和地震动强度指标的边缘分布函数进行核密度估计。

2) Copula 函数优选及参数估计。基于构件地震需求和地震动强度指标的边缘分布函数, 采用赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)计算各备选 Copula 函数的 AIC 值, 选择最优的 Copula 函数, 并对 Copula 函数进行参数估计。

3) 积分求得结构的地震易损性曲线。利用构件易损性分析的 Copula 函数积分方法, 将各级损伤状态的限值 C 与地震动强度 IM 代入式(14)进行积分即可得到框支剪力墙基础隔震结构的地震易损性曲线。

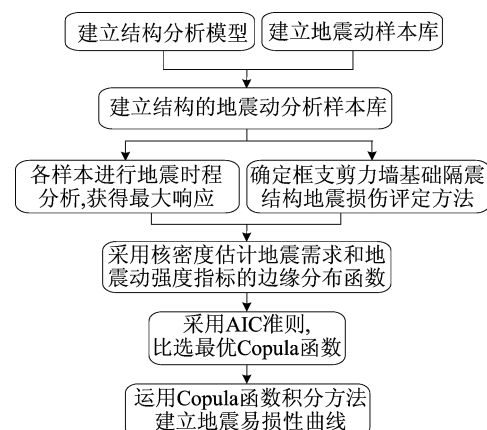


图 1 基于 Copula 函数的地震易损性分析流程

3 框支剪力墙隔震结构易损性分析

3.1 工程概况

本文以 15 层钢筋混凝土框支剪力墙隔震结构为例进行仿真分析,结构总高度为 53.4 m。结构抗震设防烈度为 7 度,二类场地,场地特征周期 $T_g=0.4$ s。第 1~第 5 层层高 4.2 m,第 6~第 15 层层高 3.6 m,结构采用梁式转换,转换层设置于第 5 层。转换层以下为框架剪力墙结构,转换层以上为剪力墙结构,各层楼板厚度均为 200 mm,剪力墙厚度均为 300 mm。其中,转换层以下墙柱采用混凝土强度等级均为 C50,梁则采用 C45 的混凝土;转换层以上墙和梁分别采用 C45 和 C40 的混凝土。结构平面布置图如图 2 所示,图 2a 括号内为转换层下部框架梁的尺寸。

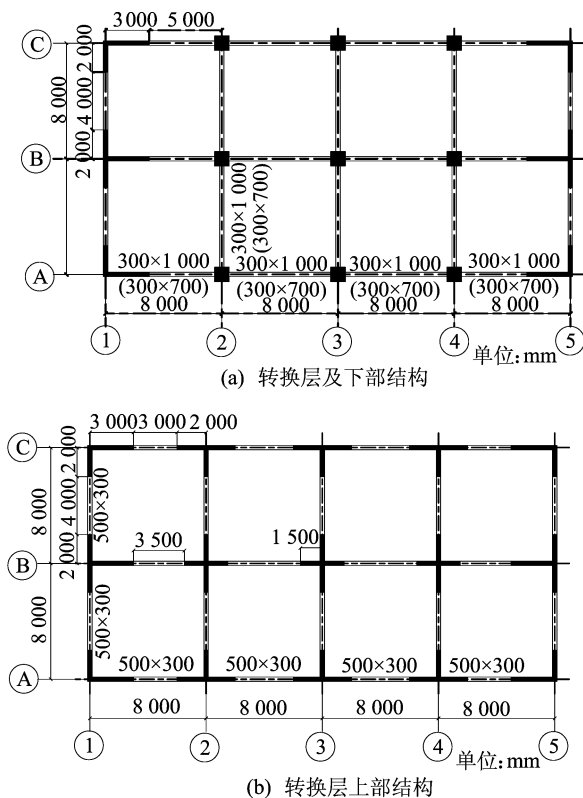


图 2 结构平面布置图

隔震支座采用某厂家生产的铅芯橡胶隔震支座 GZY800 与 GZY500 以及天然橡胶隔震支座 GZP1100 与 GZP800。其中:GZY800 与 GZY500 用于剪力墙共 20 个;GZP1100 与 GZP800 用于柱端共 9 个。结构采用基础隔震,T 形剪力墙底部设置 4 个 GZY800 隔震支座,L 形剪力墙底部设置 3 个 GZY500 隔震支座,框架柱四角设置 GZP800 隔震支座,其余柱底均采用 GZP1100 隔

震支座。隔震支座的详细参数见表 1 所列。

表 1 隔震支座性能参数

支座型号	GZY500	GZY800	GZP800	GZP1100
设计承载力/kN	1 963	5 026	7 535	14 248
竖向刚度/(kN/m)	1 802	4 022	4 200	6 841
橡胶厚度/mm	96	160	147	202
铅芯直径/mm	100	160		
屈服前刚度/(kN/m)	5 187	7967		
屈服后刚度/(kN/m)	798	1 226		
屈服力/kN	65.4	167.5		
水平等效刚度/(kN/m)			1 875	2 560

采用 OpenSees 有限元软件,对框支剪力墙结构进行地震时程分析,采用基于位移的梁柱单元(dispBeamColumn)模拟结构的梁、柱构件;采用弹性壳单元(ShellMITC4)模拟剪力墙构件。在 OpenSees 中采用零长度单元模拟支座,其中铅芯橡胶隔震支座恢复力模型可以看作双线性模型^[12],用非线性单轴材料 Steel02 进行模拟。

3.2 地震波的选择

震源、场地条件和震中距等均能对地震动产生影响,且这些因素具有较大的随机性。在进行时程分析时,结构的响应会因选取的地震动不同造成很大的差异。根据工程资料,本文从太平洋地震工程研究中心数据库选取 50 条断层距大于 30 km、震级在 5.5~8.0 之间的远场场地震动来进行易损性分析,选取的地震动加速度反应谱如图 3 所示。对 50 条地震动在 0~1.0g 之间随机 10 次调幅,分别得到 10 个峰值加速度(peak ground acceleration,PGA)等级,生成 500 组地震分析样本。

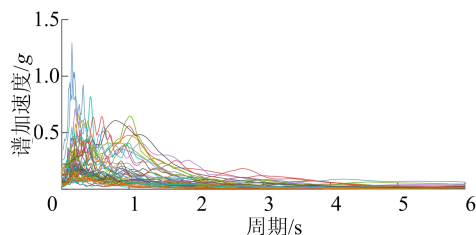


图 3 地震动加速度反应谱

3.3 结构损伤指标

为了评估隔震结构在各种破坏状态下的地震易损性,需要定义隔震结构抗震性能水平。隔震结构由上部结构和隔震层 2 个不同部分组成,需要分别定义这 2 个部分抗震性能水平,来区别两者抗震性能的差异。

3.3.1 上部结构损伤指标

上部结构为框支剪力墙结构,本文参考文献[13]以最大层间位移角作为结构的损伤指标,将上部结构的损伤等级划分为 5 类,5 个损伤等级对应的最大层间位移角范围见表 2 所列。

表 2 上部结构的损伤指标

损伤状态	层间位移角
基本完好	$\theta \leq 1/1\ 000$
轻微破坏	$1/1\ 000 < \theta \leq 1/500$
中等破坏	$1/500 < \theta \leq 1/250$
严重破坏	$1/250 < \theta \leq 1/100$
完全破坏	$1/100 < \theta$

3.3.2 隔震层损伤指标

隔震结构在遭受地震作用时,隔震层会吸收和耗散地震向结构输入的能量,因此隔震支座会产生很大的水平位移。根据以往研究,活动支座一般选取相对水平位移作为损伤指标,橡胶支座选取剪应变作为损伤指标,对于隔震支座本文参考文献[14]选用相对水平位移作为损伤指标,通过隔震支座的剪应变公式变形得到,具体公式为:

$$\gamma = \frac{\delta}{\sum t_r} \times 100\% \quad (15)$$

$$\delta = \gamma \sum t_r \quad (16)$$

其中: γ 为隔震支座的剪应变; δ 为隔震支座的相对水平位移; t_r 为隔震支座橡胶层总厚度。5 个损伤等级对应的隔震支座剪应变范围见表 3 所列。

表 3 隔震支座的损伤指标

损伤状态	剪应变
基本完好	$\gamma \leq 100\%$
轻微破坏	$100\% < \gamma \leq 150\%$
中等破坏	$150\% < \gamma \leq 200\%$
严重破坏	$200\% < \gamma \leq 250\%$
完全破坏	$250\% < \gamma$

3.4 基于 Copula 函数的地震易损性分析

3.4.1 边缘分布函数

根据 500 组地震样本的分析结果对构件地震需求和地震动强度指标进行非参数核密度估计。因为在估计之前对边缘分布函数类型不作具体假设,所以得到的边缘分布更符合实际,具体计算公式为:

$$\hat{f}_{IM}(a) = \frac{1}{nh_{IM}} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{a - I_{IM,i}}{h_{IM}}\right) \quad (17)$$

$$\hat{f}_D(c) = \frac{1}{nh_D} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{c - D_i}{h_D}\right) \quad (18)$$

其中: $\hat{f}_{IM}(a)$ 和 $\hat{f}_D(c)$ 分别为地震动强度指标和构件地震需求的核密度估计值; n 为样本点的个数; h 为带宽参数; $K(\cdot)$ 为核函数。

文献[15]研究表明,虽然目前常用核函数的形式有很多,但是在样本点充足的情况下,选择不同的核函数对核密度估计的精度影响不大,因此本文采用高斯核函数进行估计,即 $K(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$ 。限于篇幅,本文仅给出隔震结构层间位移角和支座位移的概率密度分布函数,如图 4、图 5 所示。

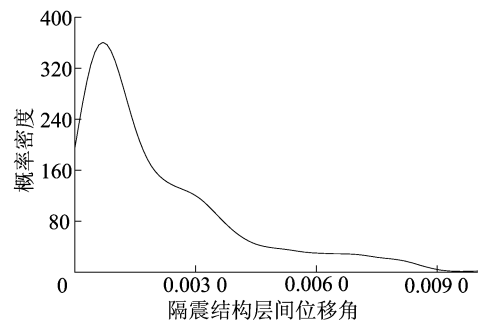


图 4 隔震结构层间位移角概率密度分布

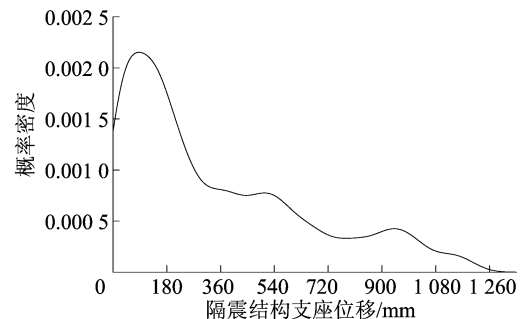


图 5 隔震结构支座位移概率密度分布图

3.4.2 Copula 函数的选择及拟合优度检验

在已知层间位移角、支座位移和 PGA 边缘分布函数的基础上,本文采用基于似然函数的最小 AIC,对 Copula 函数的拟合优度进行检验,确定最优 Copula 函数,描述构件地震需求与地震动强度指标之间的相关结构。AIC 值定义如下:

$$I_{AIC} = -2 \ln L + 2k \quad (19)$$

其中: $\ln L$ 为 Copula 函数的极大似然估计值; k 为惩罚因子项,表示模型中参数个数。极大似然估计值越大,模型参数个数越少,则 AIC 值越小,此时模型拟合优度越高。基于式(19)计算各备选 Copula 函数的 AIC 值,见表 4 所列。

表 4 备选 Copula 函数 AIC 值

损伤指标	Gaussian	t	Clayton	Gumbel	Frank	BB1	BB7
隔震结构层间位移角	-407.86	-405.74	-509.61	-297.87	-392.27	-507.82	-508.00
隔震结构支座位移	-466.91	-465.57	-534.22	-370.47	-427.23	-539.45	-543.33
抗震结构层间位移角	-450.92	-456.01	-572.49	-343.11	-443.07	-570.76	-570.92

根据 AIC 准则,拟合后的模型 AIC 值越小,代表拟合效果越好。从表 4 可以看出,隔震和抗震结构层间位移角与 PGA 之间采用 Clayton 函数拟合效果较好,隔震结构支座位移与 PGA 之间采用 BB7 函数拟合较好。采用 AIC 准则计算出各构件的最优 Copula 函数及其相关参数见表 5 所列。

表 5 最优 Copula 函数及其参数

损伤指标	函数名称	参数 1	参数 2
隔震结构层间位移角	Clayton	2.77	
隔震结构支座位移	BB7	1.45	2.83
抗震结构层间位移角	Clayton	3.01	

3.4.3 基于 Copula 函数的结构易损性曲线建立

将表 5 中 Clayton Copula 函数和 BB7 Copula 函数的参数估计值代入式(6)和式(7),即可得到构件地震需求与地震动强度之间的相关结构;在获得各构件的最优 Copula 函数的基础上,将各级损伤状态的限值 C 与 IM 代入式(14)进行积分即可得到构件在某个损伤状态下,地震动强度为 IM 时构件的失效概率。

为了验证基于 Copula 函数的结构构件易损性分析方法所建立易损性曲线的正确性,本节将其与基于概率地震需求模型(probabilistic seismic demand model,PSDM)的易损性计算方法进行对比,各构件在不同损伤状态下 2 种方法所得易损性曲线的对比如图 6~图 8 所示。

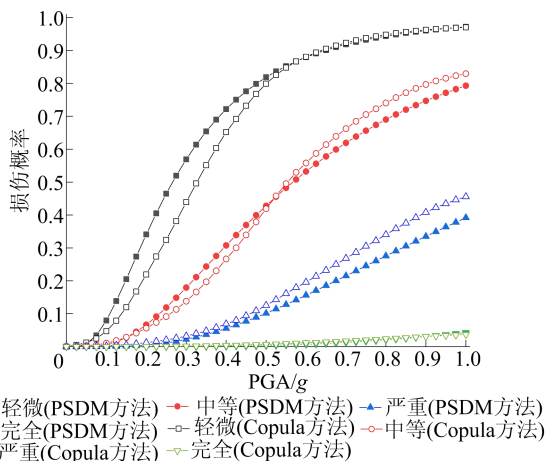


图 6 隔震结构层间位移角易损性曲线

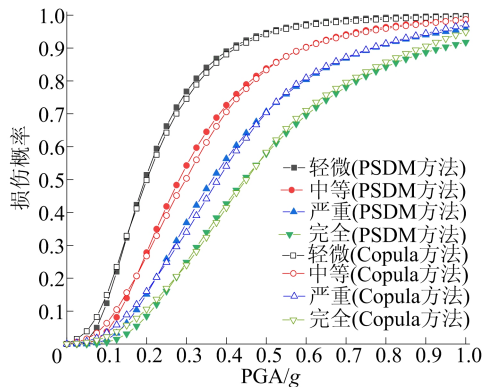


图 7 隔震结构支座位移易损性曲线

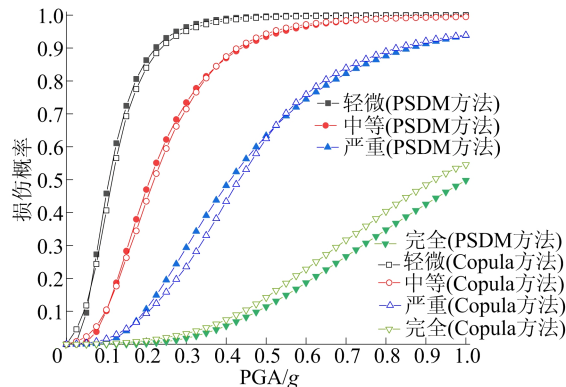


图 8 抗震结构层间位移角易损性曲线

从图 6~图 8 可以看出,采用 Copula 函数计算出的构件易损性曲线和采用 PSDM 法计算出的构件易损性曲线的变化趋势相同。在 4 种不同损伤状态下,隔震结构层间位移角使用 2 种计算方法所得的易损性曲线最大差值分别为 14.1%、5.1%、7.3%、0.6%;隔震结构支座位移用 2 种计算方法所得的易损性曲线最大差值分别为 5.7%、6.5%、7.3%、5.8%;抗震结构层间位移角使用 2 种计算方法所得的易损性曲线最大差值分别为 5.1%、3.5%、6.2%、5.9%。

从上述分析可知,采用 Copula 函数和 PSDM 法计算的构件易损性曲线相差不大,表明本文方法能正确建立构件易损性曲线,且基于 Copula 函数的方法不需假定结构各构件的易损性曲线满足对数正态分布,分析结果更符合实际情况。

3.5 框支剪力墙隔震结构构件易损性对比分析

由图 6~图 8 可知,各破坏状态易损性曲线

趋势相同,限于篇幅,仅列出在 PGA 达到 0.5g 时隔震和抗震结构在不同破坏状态的损伤概率如图 9 所示,其他 PGA 情况结果类似,不再赘述。

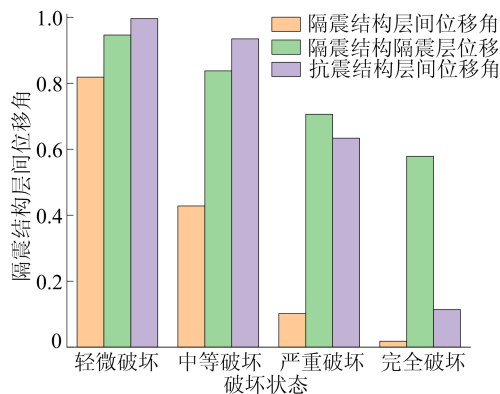


图 9 构件在各破坏状态下的损伤概率

根据隔震和抗震结构的损伤概率可知:① 隔震结构在 4 种破坏状态下的损伤概率相较于抗震结构均存在显著降低,说明隔震层能有效吸收和耗散大部分地震能量,减少地震能量向上部结构传输,避免地震对建筑的其他部分造成损伤;② 隔震与抗震结构在轻微、中等、完全破坏状态下的损伤概率差值分别 19.3%、51.2%、49.7%,且隔震结构几乎不会发生完全破坏,说明隔震层对于防止结构发生较严重的破坏更有效;③ 隔震结构在 4 种破坏状态下隔震层的损伤概率均大于上部结构,说明在框支剪力墙基础隔震结构体系中,隔震层比上部结构更容易发生破坏,应当在结构后期养护和类似工程设计中给予重点关注。

4 结 论

针对现有地震易损性分析方法的不足,本文提出构件地震易损性分析的 Copula 函数积分方法,并用所提方法实现了框支剪力墙基础隔震结构的地震易损性分析,主要结论如下。

1) 本文提出一种新型的地震易损性分析方法,推导了基于 Copula 函数积分方法的构件易损性分析公式,通过建立地震需求与地震动强度指标的联合概率分布,克服了经典构件易损性分析方法中需要人为假定易损性函数形式的不足。

2) 对于框支剪力墙基础隔震结构,Clayton Copula 函数和 BB7 Copula 函数能够较准确地描述层间位移角、隔震层位移与地震峰值加速度之间的相关结构,优化地震易损性的求解,并建立隔

震和抗震结构在不同损伤状态下的易损性曲线。

3) 隔震结构在 4 种破坏状态下的损伤概率均明显小于抗震结构,说明隔震层能有效降低框支剪力墙结构的破坏概率,且对于防止结构发生较严重的破坏更有效。在隔震结构中,隔震层比上部结构更容易发生破坏,应当在结构后期养护和类似工程设计中给予重点关注。

[参 考 文 献]

- [1] 胡云富. 带梁式转换层结构受力性能分析[D]. 成都:西南交通大学,2010.
- [2] 何铭基,吴轶,蔡健,等. 基于 IDA 的带耗能腋撑转换框架地震易损性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011,39(12):144-151.
- [3] 吴轶,何铭基,蔡健,等. 带耗能腋撑型钢筋混凝土转换框架结构地震易损性分析[J]. 工程力学,2012, 29(10):184-192.
- [4] 周姗姗. 考虑不同转换层位置的框架结构地震易损性分析[D]. 南宁:广西大学,2012.
- [5] 吴轶,林柱帆,杨春,等. 型钢混凝土框支剪力墙结构地震易损性分析[J]. 建筑结构,2017,47(增刊 2):345-350.
- [6] 孙静,吴君怡,卢啸. 框支密肋复合墙结构地震易损性研究[J]. 工程力学,2023,40(6):61-72.
- [7] NIELSON B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones[D]. Atlanta:GA Georgia Institute of Technology,2005.
- [8] 袁万城,袁新哲,庞于涛,等. 非线性参数拟合的桥梁概率地震需求模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015,36(9): 1212-1216.
- [9] SKLAR A. Fonctions de repartition an dimensions et leurs marges[J]. Publications de l'Institut de Statistique de l'Universite de Paris,1959,8:229-231.
- [10] 陈力波. 汶川地区公路桥梁地震易损性分析研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [11] DEGROOT M H, SCHERVISH M J. Probability and statistics[M]. Englewood Cliff: Pearson Higher Isai Education,2010.
- [12] 方圣恩,唐永久. 隔震与非隔震支座对混凝土箱梁桥地震易损性的影响[J]. 地震工程学报,2021,43(6):1368-1376.
- [13] 李瑞生. 建筑结构隔震对带转换层的框支剪力墙结构抗震性能的影响[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
- [14] 陈嘉佳,马玉宏,黄金,等. 基于天然橡胶支座老化时变规律下近海隔震桥梁时变易损性分析[J]. 科学技术与工程, 2020,20(9):3699-3706.
- [15] WAND M, JONES M C. Kernels moothing[M]. London: Chapman & Hall,1995:100-212.

(责任编辑 吴 亮)