

# 近远场地震作用下超高层结构多元联合易损性分析

王晓磊<sup>1,2</sup>, 杨煜<sup>1</sup>, 阎卫东<sup>1</sup>, 赵紫旭<sup>1</sup>, 吕大刚<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 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. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要** 目的 研究考虑不确定性和相关性的近远场地震作用下超高层结构抗震能力, 提出超高层结构多元联合易损性分析方法。方法 建立并验证了某超高层结构鱼骨模型, 选取相关性最强的两个最优强度参数进行多元概率地震需求分析, 建立强度参数与工程需求参数间的对数线性关系, 基于最小信息化准则和贝叶斯信息准则判别最优 Copula 函数。结果 采用最优 Copula 函数与蒙特卡洛模拟方法, 生成了结构多元联合地震易损性曲面, 量化了考虑不确定性和相关性的近远场地震作用下超高层结构抗震能力。结论 近场地震动对超高层结构破坏能力较大, 未来超高层抗震设计和评估不能忽视近场地震动影响。

**关键词** 超高层结构; 近远场地震; Copula 函数; 多元联合易损性

中图分类号 TU398+.9

文献标志码 A

**引用格式:** 王晓磊, 杨煜, 阎卫东, 等. 近远场地震作用下超高层结构多元联合易损性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 668-677. (WANG Xiaolei, YANG Yu, YAN Weidong, et al. Multivariate joint fragility analysis for super high-rise structure under near-fault and far-field earthquakes[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(4): 668-677.)

## Multivariate Joint Fragility Analysis for Super High-rise Structure under Near-fault and Far-field Earthquakes

WANG Xiaolei<sup>1,2</sup>, YANG Yu<sup>1</sup>, YAN Weidong<sup>1</sup>, ZHAO Zixu<sup>1</sup>, LYU Dagang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, China, 150080; 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090)

**Abstract:** In order to study the seismic capability of super high-rise structures under near fault and

收稿日期: 2023-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908379); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220943); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2023D19)

作者简介: 王晓磊(1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事工程结构抗震等方面研究。

far field earthquakes with uncertainty and correlation, a multivariate joint fragility analysis method is proposed. A fishbone model of a super high-rise structure was established and verified, and two optimal intensity measures with the largest correlation were selected to conduct multivariate probabilistic seismic demand analysis, and the log-linear relationship between intensity measures and engineering demand parameters was established. Based on Akaike information criterion (AIC) and Bayesian Information Criterion (BIC), the optimal Copula function was identified. The multivariate joint seismic fragility surface of the structure was generated via the optimal Copula function and Monte Carlo simulation method, and the seismic capacity of the super high-rise structure under the near fault and far field earthquakes considering uncertainty and correlation was quantified. The conclusions show near fault ground motions have a great destructive ability to super high-rise structures, and the impact of near fault ground motions cannot be ignored in the future seismic design and evaluation of super high-rise buildings.

**Key words:** super high-rise structure; near fault and far field earthquakes; copula function; multivariate joint fragility

近场地震动与远场地震动具有许多显著不同的特征,且都会对建筑结构产生不同程度的危害。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[1]</sup>规定:在进行结构设计时,要同时考虑近场地震与远场地震的影响。近场地震往往伴随着脉冲效应,对建筑结构的破坏较为显著;而远场地震包含着许多长周期成分,对高层、超高层等长周期结构有较大影响。已有学者对近远场地震动作用下高层和超高层结构的抗震性能进行了众多研究。张令心等<sup>[2]</sup>研究了近远场地震对单自由度体系滞回耗能的影响;艾在军<sup>[3]</sup>研究了近远场地震作用下10层RC框架结构的地震响应;陈铭<sup>[4]</sup>研究了近远场地震作用下某超高层结构的地震响应。

地震易损性分析方法首先来源于核工程<sup>[5-9]</sup>,之后被广泛应用于建筑工程领域,一些研究人员对高层、超高层结构进行了地震易损性研究。M. Z. Esteghamati等<sup>[10]</sup>采用增量动力分析(Incremental Dynamics Analysis, IDA)方法对某RC高层结构进行了地震易损性分析,研究了该结构的抗震性能。J. Lee等<sup>[11]</sup>对33层钢结构进行了地震易损性分析,得到了给定地震烈度下的破坏概率。张令心等<sup>[12]</sup>提出了超高层混合结构地震易损性分析方法,该方法以IDA为基础,并应用

到了实际工程中。

对于高层、超高层结构的地震易损性研究,采用单个地震动强度参数和单个工程需求参数分析得到地震易损性曲线的分析方法得到了广泛应用,在上述易损性曲线研究基础上,一些研究人员采用多个强度参数与多个工程需求参数进行了高层、超高层结构多元联合易损性研究。杨先霖<sup>[13]</sup>采用云图-条带法对主余震作用下的5个12层钢筋混凝土框架-剪力墙结构进行了地震易损性分析,得到了主余震作用下的地震易损性曲面。何益斌等<sup>[14]</sup>采用两参数建立了地震需求模型,对钢框架-混凝土核心筒超高层结构进行了易损性分析,但分析中并未考虑参数间的相关性。周颖等<sup>[15]</sup>以上海中心大厦为分析模型,研究了风荷载与地震荷载耦合作用下结构的安全性能,得到了多灾害易损性曲面。

目前,针对近远场地震作用下超高层结构多元联合易损性研究还较少,基于上述研究背景,笔者采用多元概率地震需求分析和最优Copula函数分析理论,对超高层建筑结构进行了近远场地震动作用下多元联合易损性分析,研究发现近场地震动对超高层结构破坏能力较大,未来超高层抗震设计和评估不能忽视近场地震动影响。

1 基于鱼骨模型的超高层结构数值模型建立与验证

笔者以上海中心大厦为分析对象,该大厦建筑高度 632 m、结构高度 580 m,采用“钢筋混凝土框架-核心筒结构”体系。根据中国建筑科学研究院卢啸<sup>[16]</sup>提供的简化 MSC. Marc 鱼骨模型,采用有限元分析软件 OpenSees 建立了基于 OpenSees 的鱼骨模型。

为保证建立模型的合理性与有效性,笔者以卢啸<sup>[16]</sup>建立的鱼骨模型为参照,进行模型验证,结果见表 1、图 1。

表 1 前 10 阶自振周期  
Table 1 The first 10 natural period

周期	OpenSees 自振 周期模拟结果	Marc 自振周 期模拟结果	相对偏差/ %
$T_1$	9.310	9.302	-0.082
$T_2$	3.333	3.354	0.626
$T_3$	1.566	1.590	1.509
$T_4$	0.950	0.957	0.731
$T_5$	0.644	0.653	1.357
$T_6$	0.589	0.584	0.756
$T_7$	0.471	0.483	2.564
$T_8$	0.379	0.389	2.434
$T_9$	0.322	0.322	-0.102
$T_{10}$	0.297	0.294	-0.919

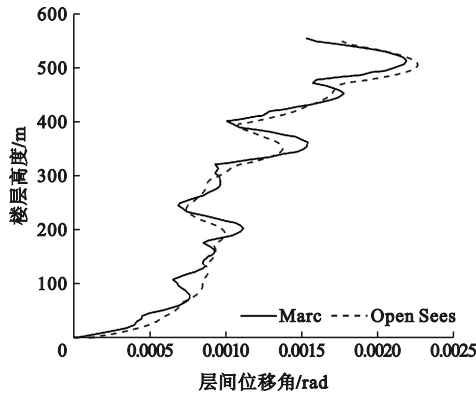


图 1 层间位移角  
Fig. 1 Story drift ratio

从图表结果可以得出,笔者建立的模型模态分析结果与已有研究结果误差均在 3% 以内;同时,模型计算得到的顶底位移和层间位移角与已有模型结果也较为接近。上述结果表明,笔者建立的 OpenSees 鱼骨模型具有良好的有效性和合理性。

2 多元概率地震需求分析

2.1 地震动记录的选取

笔者选取了文献[17]中推荐的 50 组地震动记录,其中包含远场记录 22 组(震中距大于 10 km),近场无脉冲记录 14 组,近场有脉冲记录 14 组。50 组地震动记录中,震级均大于 6.5 级,峰值地面加速度大于 0.2 g,峰值地面速度大于 15 cm/s,强震的有效频率大于 4 s。将上述选取的 50 组地震动记录中的 100 条地震动分量分别做为单向水平地震输入,分析结构的抗震能力。

2.2 地震动强度参数及工程需求参数的选择

中高振型周期的谱加速度  $S_a$ 、谱速度  $S_v$  和谱位移  $S_d$  通常被选为备选强度参数,故笔者选取了 12 个强度参数为备选强度参数进行后续的易损性分析:峰值地面加速度  $PGA$ 、峰值地面速度  $PGV$ 、峰值地面位移  $PGD$ 、第一周期谱加速度  $S_a(T_1)$ 、第二周期谱加速度  $S_a(T_2)$ 、第三周期谱加速度  $S_a(T_3)$ 、第一周期谱速度  $S_v(T_1)$ 、第二周期谱速度  $S_v(T_2)$ 、第三周期谱速度  $S_v(T_3)$ 、第一周期谱位移  $S_d(T_1)$ 、第二周期谱位移  $S_d(T_2)$  和第三周期谱位移  $S_d(T_3)$ 。

将层间位移角  $\theta_s$  和有害层间位移角  $\theta_h$  两个参数选为工程需求参数,其中有害层间位移角计算公式可表示为

$$\theta_{hi} = \frac{\Delta U_{hi}}{h_i} = \theta_{si} - \theta_{i-1} \approx \theta_{si} - \theta_{si-1} \quad (1)$$

式中: $\Delta U$  为第  $i$  层的有害位移; $h$  为层高; $\theta_{si}$  为第  $i$  层的层间位移角; $\theta_{i-1}$  为第  $i-1$  层顶部转角,由于在实际工程中  $\theta_{i-1}$  较难确定,可取第  $i-1$  层的层间位移角。

2.3 概率地震需求分析

地震需求  $D$  在某强度的强度参数条件下服从对数正态分布,即概率地震需求模型

$G_{D|IM}(d|im_1,\cdots,im_n)$  表达式为

$$G_{D|IM}(d|im_2,\cdots,im_n)=P[D\geq d|IM_1=im_1,\cdots,IM_n=im_n]=1-\Phi\left[\frac{\ln(d)-\ln(m_{D|IM})}{\beta_{D|IM}}\right].\tag{2}$$

式中: $\beta_{D|IM}$ 为对数标准差。

结构地震需求中位值  $m_{D|IM}$  与强度参数  $IM$  之间服从幂指数回归关系,可表示为

$$m_{D|IM}=a(IM)^b.\tag{3}$$

对式(3)两边取自然对数:

$$\ln(m_{D|IM})=\beta_0+\beta_1\ln(IM).\tag{4}$$

式中: $\beta_0$  和  $\beta_1$  为回归系数,一般基于回归分析得到。

式(4)为一元强度参数  $IM$  与工程需求参数  $EDP$  对数线性关系模型,二元强度参数  $IM$  与工程需求参数  $EDP$  对数线性关系模型可表示为

$$\ln(m_{D|IM})=\beta_0+\beta_1\ln(IM_1)+\beta_2\ln(IM_2).\tag{5}$$

式中: $\beta_0$ 、 $\beta_1$  和  $\beta_2$  为回归系数。

条带法中对数标准差  $\beta_{D|IM}$  随  $IM$  变化而变化,各条带标准差计算式可表示为

$$\beta_{D|IM}=\frac{\ln(D_{84\%})-\ln(D_{16\%})}{2}.\tag{6}$$

式中: $D_{84\%}$  和  $D_{16\%}$  分别为各条带 84% 和 16% 分位值。

对数线性关系强弱判定系数  $R^2$  (取值范围为 $[0,1]$ ) 可检验线性回归关系的拟合优度,该系数越大表示拟合优度越好。笔者利用云图法进行线性回归分析,建立地震动强度参数  $IM$  与工程需求参数  $EDP$  之间的对数线性关系模型,判决系数  $R^2$  结果见表 2。结果表明, $Sv(T_1)$  与  $Sv(T_2)$  所对应的  $R^2$  最大,故选用二者为地震动强度参数进行后续分析。

表 2 对数线性关系强弱判定系数

$\theta_s$		$\theta_h$	
$IM$	$R^2$	$IM$	$R^2$
$Sv(T_1)$	0.828	$Sv(T_1)$	0.758
$Sv(T_2)$	0.824	$PGV$	0.752
$Sa(T_2)$	0.807	$Sv(T_2)$	0.751
$Sd(T_2)$	0.804	$Sa(T_3)$	0.684
$PGD$	0.723	$Sd(T_3)$	0.684
$PGV$	0.718	$Sv(T_3)$	0.641

基于分析得到的回归系数可确定二元强度参数  $IM$  与工程需求参数  $EDP$  对数线性关系,分析系数见表 3。

表 3 二元回归系数

Table 3 Binary regression coefficient			
回归系数	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
$\theta_s$	-9.172	0.555	0.359
$\theta_h$	-14.016	0.785	0.718

基于式(5)和式(6)可分别求得概率需求模型的对数中位值和对数标准差,将所求得的对数中位  $\ln(m_{D|\theta_s})$ 、 $\ln(m_{D|\theta_h})$  与对数标准差  $\beta_{D|\theta_s}$ 、 $\beta_{D|\theta_h}$  分别代入式(2),计算各  $Sv(T_1)$  与  $Sv(T_2)$  条带下的超越概率,经过曲面拟合,可以得到以  $Sv(T_1)$  与  $Sv(T_2)$  为  $IM$ 、最大层间位移角与有害层间位移角为  $EDP$  的多元概率地震需求模型。远场、近场无脉冲与近场有脉冲地震动作用下,各回归系数见表 4、表 5 和表 6。

表 4 远场地震作用下的二元回归系数

Table 4 Binary regression coefficient of far-field ground motions			
回归系数	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
$\theta_s$	-9.072	0.623	0.269
$\theta_h$	-13.851	0.687	0.780

表 5 近场无脉冲地震作用下的二元回归系数

Table 5 Binary regression coefficient of near-field no pulse ground motions			
回归系数	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
$\theta_s$	-9.255	0.236	0.664
$\theta_h$	-13.902	0.772	0.710

表6 近场有脉冲地震作用下的二元回归系数

Table 6 Binary regression coefficient of near-field pulse ground motions

回归系数	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
$\theta_s$	-9.276	0.703	0.256
$\theta_h$	-14.292	1.155	0.426

基于式(5)和式(6)可分别求得概率需求模型中的对数中位值和对数标准差,将各参数代入式(2),可得到各类型地震动作用下的多元概率地震需求模型。

3 多元联合地震易损性分析

3.1 易损性函数

地震易损性函数可表示为

$$F_R(im_1, \cdots, im_n) =$$
$$p[D \geq C | IM_1 = im_1, \cdots, IM_n = im_n] =$$
$$\Phi\left[\frac{\ln(IM) - \ln(m_R)}{\beta_R}\right] = \frac{n}{N}.$$

(7)

式中: $F_R(im_1, im_2, \cdots, im_n)$ 为多强度参数的易损性函数; $D$ 为地震需求; $C$ 为抗震能力; $m_R$ 为能力中位值; $\beta_R$ 为对数标准差; $N$ 为某地震动强度下结构响应总数; $n$ 为达到或超过某极限状态点的个数。该式为蒙特卡洛模拟方法的分析基础。

3.2 极限状态定义

《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)<sup>[18]</sup>规定:高度大于等于250 m 的高层结构,层间位移角在多遇地震下不超过1/500,在罕遇地震下不超过1/100。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[1]</sup>对极限状态的划分和各极限状态限值的取值原则,进行极限状态的定义,结果如表7所示。

表7 最大层间位移角极限状态

Table 7 Limit state of story drift ratio

极限状态	最大层间位移角
轻微破坏(LS <sub>1</sub> )	0.002
中等破坏(LS <sub>2</sub> )	0.003
严重破坏(LS <sub>3</sub> )	0.006
倒塌破坏(LS <sub>4</sub> )	0.010

笔者选用最大层间位移角与有害层间位移角为EDP进行多元联合地震易损性分析,基于安全考虑,假定结构最大层间位移角与有害层间位移角两者中任一值达到极限状态限值,则该结构达到了极限状态。基于上述假定,笔者对有害层间位移角进行了极限状态的量化,采用动力时程分析的结果,统计出最大层间位移角与有害层间位移角之间的关系 $k$ ,可表示为

$$k = \frac{\theta_s}{\theta_h}.$$

(8)

基于层间位移角 $\theta_s$ 范围, $k$ 取值范围如图2所示。

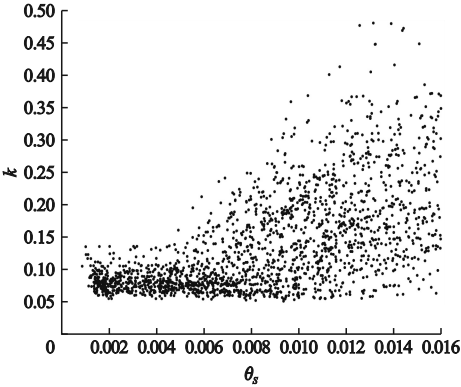


图2 k值分布

Fig. 2 Distribution of k value

图2中的层间位移角与有害层间位移角数据来自同一模型在多条地震动作下的反应,具有一定相关性,为确定模型有害层间位移角极限状态,笔者近似选取各段中位数的近似值为调整系数 $k$ 值;当层间位移角 $\theta_s < 0.002$ 、 $0.002 < \theta_s < 0.003$ 、 $\theta_s > 0.003$ 时,调整系数 $k$ 值取0.08;当层间位移角 $\theta_s > 0.006$ 时,调整系数为0.16。根据此调整系数确定的有害层间位移角的极限状态如表8所示。

表8 有害层间位移角极限状态

Table 8 Limit state of harmful story drift ratio

极限状态	有害层间位移角
轻微破坏(LS1)	0.000 16
中等破坏(LS2)	0.000 24
严重破坏(LS3)	0.000 48
倒塌破坏(LS4)	0.001 60



3.3 最优 Copula 函数

文中最大层间位移角和有害层间位移角之间具有强正相关性,故选取了 5 种适用于正相关性变量的 Copula 函数为备选函数,分别为 Gaussian 函数、Plackett 函数、Frank 函数、Clayton 函数、Gumbel Copula 函数。计算各 Copula 函数的 Kendall 相关系数  $\tau$  和 Pearson 相关参数  $\theta$ ,同时,根据最小信息化准则(Akaike information criterion, AIC)和贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC),确定各 Copula 函数的 AIC 值和 BIC 值,计算结果见表 9。由表可知, AIC 值与 BIC 值最小的最优 Copula 函数为 Gaussian Copula 函数。基于动力时程分析获得的最大层间位移角与有害层间位移角数据,构造经验累积分布函数如图 3 所示。

表 9 各 Copula 函数 AIC、BIC、Kendall 相关系数和 Pearson 相关参数  $\theta$

Table 9 AIC, BIC, Kendall and Pearson correlation coefficients of Copula functions

参数	$\tau$	$\theta$	AIC 值	BIC 值
Gaussian Copula 函数	0.794 3	0.948	-5 582.6	-5 576.9
Plackett Copula 函数	0.794 3	108.121	-5 081.9	-5 076.1
Frank Copula 函数	0.794 3	17.623	-4 808.3	-4 802.5
Clayton Copula 函数	0.794 3	7.722	-4 498.4	-4 492.6
Gumbel Copula 函数	0.794 3	4.861	-5 231.4	-5 225.7

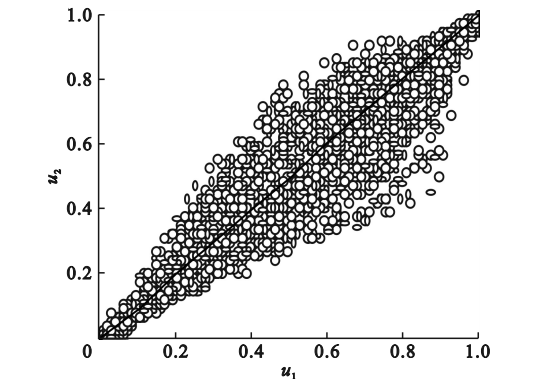


图 3 最大层间位移角与有害层间位移角经验分布

Fig. 3 Empirical distribution of maximum story drift ratio and detrimental story drift ratio

分析得到的最优 Copula 函数为 Gaussian Copula 函数,相关参数  $\theta$  为 0.948。采用蒙特卡洛模拟的方法,随机生成 Gaussian Copula 函数  $u_1$ 、 $u_2$  数据,将其与最大层间位移角和有害层间位移角的实际数据进行对比,结果如图 4 所示。

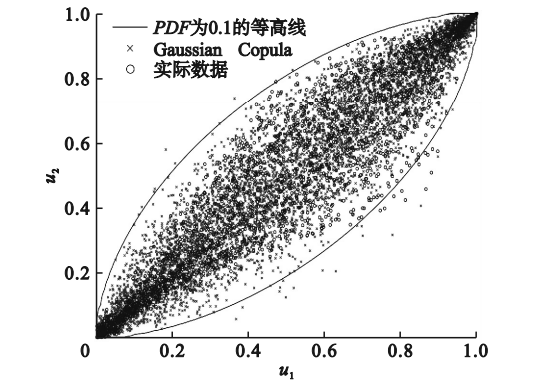


图 4 Gaussian Copula 函数模拟与实际数据散点图

Fig. 4 Scatter diagram of Gaussian Copula function simulation and actual data

由图 3、图 4 可知, Gaussian Copula 函数的概率密度在  $u_1$ 、 $u_2$  同时趋近于 0 和 1 时较大,该 Copula 函数描述的数据在  $u_1$ 、 $u_2$  同时趋近于 0 和 1 时较为集中,与最大层间位移角和有害层间位移角的经验概率分布十分相似。据此可初步验证最优 Copula 函数为 Gaussian Copula 函数。

同时, Gaussian Copula 函数的模拟数据在上尾和下尾较密集,其在上尾与下尾处的趋势也与实际数据接近,即 Gaussian Copula 函数可较为合理地描述实际数据上尾相关性与下尾相关性,故可进一步验证 Gaussian Copula 函数为最优 Copula 函数的合理性。综上,确定 Gaussian Copula 函数为最优 Copula 函数,其 Copula 函数相关参数  $\theta$  的值为 0.948。

3.4 多元联合地震易损性分析

采用最大层间位移角与有害层间位移角为联合工程需求参数的多元联合地震易损性函数的表达式为

$$F_{Lsi}(Sv(T_1), Sv(T_2)) = P[(D_s \geq C_{si}) \cup (D_h \geq C_{hi}) | Sv(T_1)],$$

$S_v(T_2)]$ .

(9)

笔者采用蒙特卡洛模拟进行多元联合地震易损性分析,绘制多元联合易损性曲面,结果如图5~图8所示。

式中: $C_{si}$ 与 $C_{hi}$ 为层间位移角与有害层间位移角各极限状态的能力值。

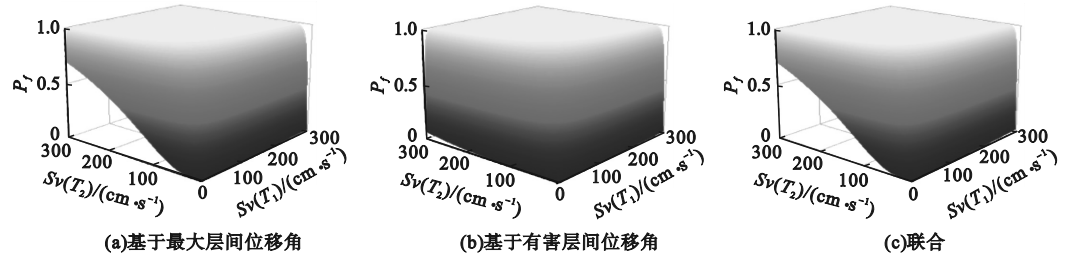


图5 轻微破坏极限状态多元地震易损性曲面  
Fig.5 Multivariate seismic fragility surface of  $LS_1$

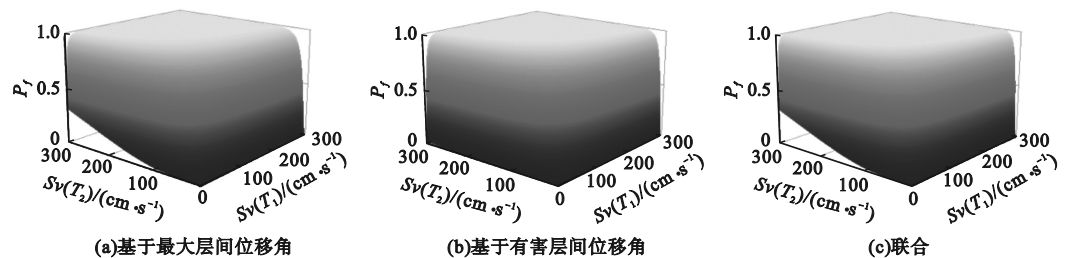


图6 中等破坏极限状态多元地震易损性曲面  
Fig.6 Multivariate seismic fragility surface of  $LS_2$

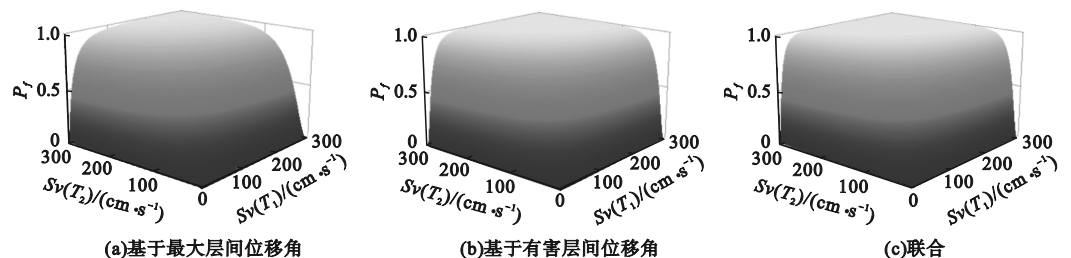


图7 严重破坏极限状态多元地震易损性曲面  
Fig.7 Multivariate seismic fragility surface of  $LS_3$

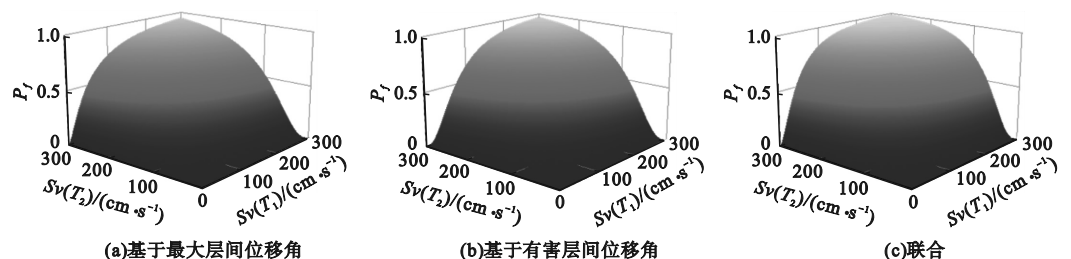


图8 倒塌破坏极限状态多元地震易损性曲面  
Fig.8 Multivariate seismic fragility surface of  $LS_4$

由图5~图8可以看出,在不同极限状态下,分别采用单独考虑最大层间位移角、单独考虑有害层间位移角和联合考虑最大层间位移角与有害层间位移角的多元易损性和多元联合易损性,均满足  $F_{LS1} > F_{LS2} > F_{LS3} > F_{LS4}$  ( $F_{LS1}$  表示轻微破坏极限状态对应的失效

概率,  $F_{LS2}$  表示中等破坏极限状态对应的失效概率,  $F_{LS3}$  表示严重破坏极限状态对应的失效概率,  $F_{LS4}$  表示倒塌破坏极限状态对应的失效概率), 三类易损性变化趋势基本一致, 随着  $Sv(T_1)$  增大或  $Sv(T_2)$  增大, 易损性都将增大。在各个极限状态下, 多元联合地震易损性始终大于单独考虑最大层间位移角的多元地震易损性和单独考虑有害层间位移角的多元地震易损性。

为了更加显著对比多元联合易损性曲面上不同失效概率对应的  $Sv(T_1)$  与  $Sv(T_2)$  变

化情况, 基于多元联合易损性曲面, 得到不同极限状态下易损性等高线 (见图 9)。从图中可以看出, 不同极限状态图上等高线与  $Sv(T_1)$  坐标轴、 $Sv(T_2)$  坐标轴所围成的面积随着结构抗震能力极限状态的提升而增大, 表明结构抗震能力是影响结构易损性的主要因素之一。对于同一条等高线, 无论是在  $Sv(T_1)/Sv(T_2)$  值较大、还是  $Sv(T_1)/Sv(T_2)$  值较小时,  $Sv(T_1)$  与  $Sv(T_2)$  的变化趋势较为一致, 这说明二者对结构易损性的影响较为一致, 与实际情况相符合。

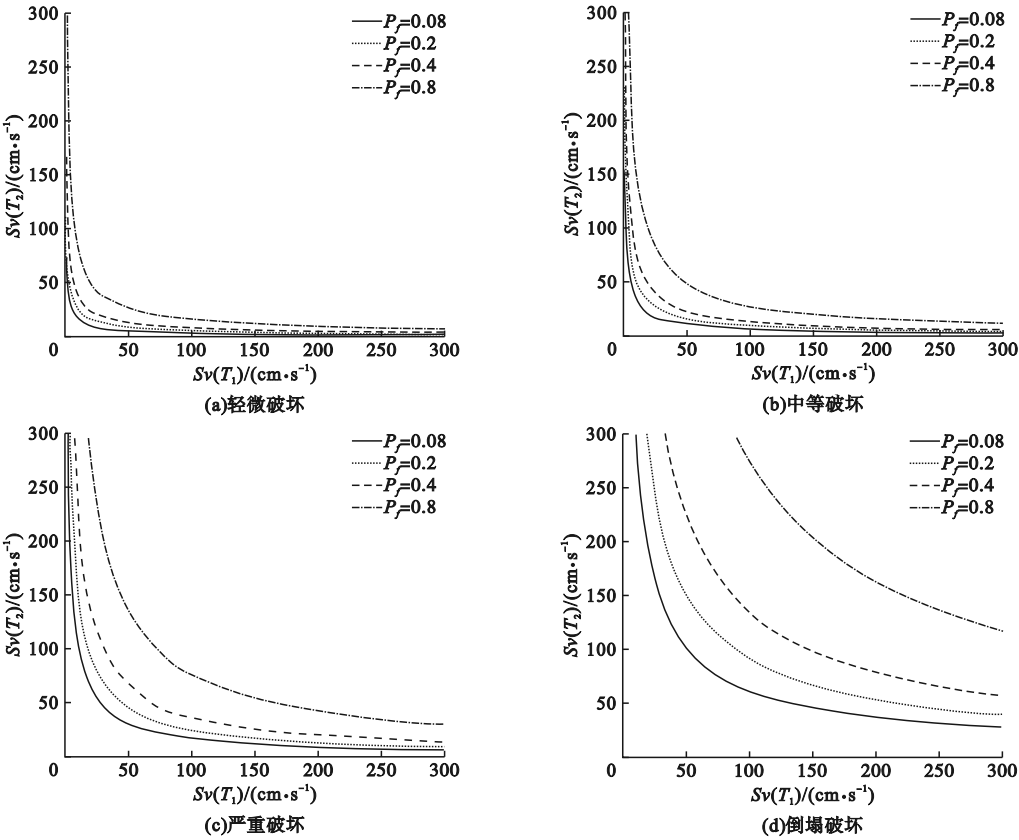


图9 易损性等高线

Fig.9 The contours of fragility

3.5 不同类型地震作用下的多元联合地震易损性分析

根据动力时程分析数据, 采用蒙特卡洛模拟方法, 绘制各极限状态下远场地震动、近场无脉冲地震动和近场有脉冲地震动作用下该结构的多元联合地震易损性曲面 (见图 10)。通过对比图 10 中三类地震易损性曲面可知,

同一极限状态下, 近场地震动作用下易损性曲面基本都高出远场地震动作用下易损性曲面, 表明远场地震动作用下结构的破坏概率小于近场地震动作用下结构的破坏概率, 不同极限状态间呈现出了相同结果, 倒塌极限状态下最为明显。由此可以得出, 同一地震动强度水平下, 近场地震动作用下的结构损坏



概率更高,且对结构的破坏性更强。同时图10显示,近场有脉冲和近场无脉冲对结构破

坏概率无统一规律,即近场有脉冲地震动对该超高层结构破坏概率影响不显著。

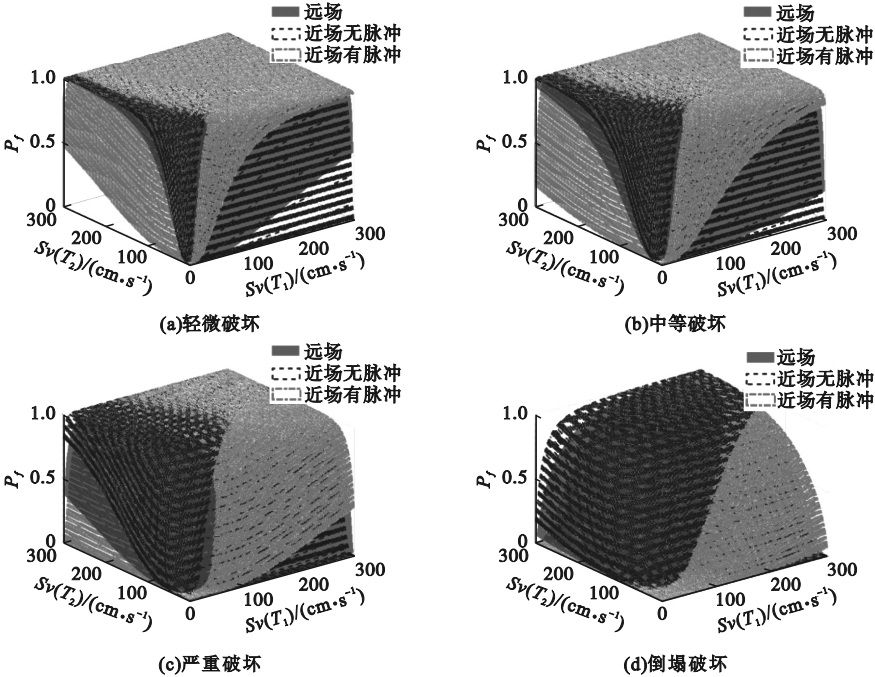


图10 易损性曲面

Fig. 10 The contours of fragility

4 结 论

(1)强度参数  $IM$  与工程需求参数  $EDP$  满足对数线性关系;第一周期谱速度和第二周期谱速度与最大层间位移角和有害层间位移角间的对数线性关系最为显著,故选择二者为后续多元概率地震需求分析的强度参数。

(2)Gaussian Copula 函数是备选函数中描述最大层间位移角与有害层间位移角间相关性的最优 Copula 函数;相较于采用单个强度参数和单个工程需求参数的易损性分析,多元联合地震易损性曲面能够考虑更多参数信息。

(3)由于震源较近,近场地震动作用下,超高层结构损坏概率更高、破坏性更强,虽然远场地震动长周期部分能力对超高层有较大影响,但近场对超高层结构破坏能力不能忽视;近场地震动有无脉冲对超高层结构的破

坏概率影响不显著。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011—2010 [S]. 北京:中国工业出版社,2010.  
(Ministry of Housing and Urban - Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010. )

[2] 张令心,闫嘉,刘洁平. 近远场地震动对单自由度体系滞回耗能需求影响研究[J]. 建筑结构,2017,47(增刊1):678 - 683.  
(ZHANG Lingxin, YAN Jia, LIU Jieping. Study on the influence of near and far site vibration on the energy consumption demand of single-degree-of-freedom system stagnation [J]. Building structures,2017,47( S1 ): 678 - 683. )

[3] 艾在军. 近场脉冲型地震动与远场地震动作用下RC框架结构的反应分析[D]. 太原:太原理工大学,2016.  
( AI Zaijun. Reaction analysis of RC frame structure under the action of near-field pulsed ground vibration and far-field vibration [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. )

[4] 陈铭. 近远场地震动作用下超限高层结构抗

- 震性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.  
(CHEN Ming. Study on the seismic performance of over-limit high-rise structures under the vibration of near and far sites [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. )
- [5] 王晓磊,吕大刚,阎卫东. 基于经验-解析数据的某核电安全壳地震易损性分析[J]. 原子能科学技术,2021,55(5):917-925.  
(WANG Xiaolei, LYU Dagang, YAN Weidong. Seismic fragility analysis of a nuclear power plant containment based on empirical-analytical data [J]. Atomic energy science and technology, 2021, 55(5):917-925. )
- [6] 王晓磊,吕大刚,阎卫东. 考虑竖向地震动影响的某核电安全壳地震易损性研究[J]. 原子能科学技术,2022,56(6):1060-1068.  
(WANG Xiaolei, LYU Dagang, YAN Weidong. Seismic fragility analysis of a nuclear power plant containment considering vertical ground motion effect [J]. Atomic energy science and technology, 2022, 56(6):1060-1068. )
- [7] 王晓磊,阎卫东,吕大刚. 基于广义条件谱的某核电厂安全壳多元地震易损性分析[J]. 原子能科学技术,2023,57(1):175-184.  
(WANG Xiaolei, YAN Weidong, LYU Dagang. Multivariate seismic fragility analysis of a nuclear power plant containment based on generalized conditional spectra [J]. Atomic energy science and technology, 2023, 57(1):175-184. )
- [8] 王晓磊,阎卫东,吕大刚,等. 基于一致风险谱的某核电安全壳地震风险分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(6):1009-1015.  
(WANG Xiaolei, YAN Weidong, LYU Dagang, et al. Seismic risk analysis of a nuclear power plant containment based on uniform risk spectrum [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(6):1009-1015. )
- [9] 王晓磊,阎卫东,吕大刚. 基于中国场地相关谱的核电厂结构地震易损性与风险研究[J]. 工程力学,2024,41(4):222-236.  
(WANG Xiaolei, YAN Weidong, LYU Dagang. Study on seismic fragility and risk of a nuclear power plant structure based on Chinese site-specific spectra [J]. Engineering mechanics, 2024, 41(4):222-236. )
- [10] ESTEGHAMATI M Z, BANAZADEH M, HUANG Qindan. The effect of design drift limit on the seismic performance of RC dual high-rise buildings [J]. The structural design of tall and special buildings, 2018, 27(8):1464.
- [11] LEE J, KONG J, KIM J. Seismic performance evaluation of steel diagrid buildings [J]. International journal of steel structures, 2018, 18(3):1035-1047.
- [12] 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.  
(ZHANG Lingxin, XU Ziyang, LIU Jieping, et al. Seismic vulnerability analysis of super high-rise hybrid structures based on incremental dynamic analysis [J]. Journal of building structures, 2016, 37(9):19-25. )
- [13] 杨先霖. 钢筋混凝土框架-剪力墙结构的主余震易损性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.  
(YANG Xianlin. Fragility analysis of reinforced concrete frame-shear wall structures under main shock-aftershock sequences [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. )
- [14] 何益斌,李艳,沈蒲生. 基于性能的高层混合结构地震易损性分析[J]. 工程力学,2013,30(8):142-147.  
(HE Yibin, LI Yan, SHEN Pusheng. Performance-based seismic fragility analysis of tall hybrid structures [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(8):142-147. )
- [15] 周颖,单慧伟,邢丽丽,等. 地震和风耦合作用下上海中心大厦结构易损性研究[J]. 世界地震工程,2020,36(2):1-11.  
(ZHOU Ying, SHAN Huiwei, XING Lili, et al. Study on vulnerability of Shanghai tower under combined actions of wind and earthquake [J]. World earthquake engineering, 2020, 36(2):1-11. )
- [16] 卢啸. 超高巨柱-核心筒-伸臂结构地震灾变及抗震性能研究[D]. 北京:清华大学,2013.  
(LU Xiao. Study on the collapse simulation and seismic performance of super tall mega column-core tube-outrigger buildings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. )
- [17] FEMA. Quantification of building seismic performance factors: FEMA P-695 [R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: Technical specification for concrete structures of high-rise buildings: JGJ3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. )
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)