

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220121001

# 主余震作用下典型六层RC框架结构易损性分析\*

林天成<sup>1,2</sup>, 陈灯红<sup>1,2</sup>, 刘云龙<sup>1,2</sup>, 贺路翔<sup>1,2</sup>, 潘子悦<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 为研究RC框架结构在主余震作用下的易损性,以一典型六层RC框架结构为例,基于增量动力分析法和易损性分析,进行不同主余震作用下RC框架结构不同性能状态下超越概率的对比分析。选取10条满足场地条件的地震记录作为输入,分别以反应谱加速度为强度指标(IM)、最大层间位移角为损伤指标(DM),对IDA曲线簇进行分位分析。依据地震强度指标建立概率地震需求模型,并根据已定义的结构性能水准对框架结构进行易损性分析。结果表明:双向地震和主余震作用相对于单向主震作用都会增加结构的易损性指数;结构在遭遇地震强度 $S_a(T_1, 5\%)=0.5g$ 时,余震造成易损性指数的上限值、平均值和下限值分别增幅6.3%、8.5%、11.5%;双向地震相对于单向地震造成易损性指数的上限值、平均值和下限值分别增幅15.5%、20.1%、32.5%。

**关键词:** 钢筋混凝土框架结构; 主余震序列; 增量动力分析; 地震易损性; 地震动强度

**中图分类号:** TU375.4; TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1046-11

## Vulnerability Analysis of Typical Six-story RC Frame Structure under Mainshock-aftershock Ground Motions

LIN Tiancheng<sup>1,2</sup>, CHEN Denghong<sup>1,2</sup>, LIU Yunlong<sup>1,2</sup>, HE Luxiang<sup>1,2</sup>, PAN Ziyue<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to study the vulnerability of the RC frame structure under the influence of mainshock-aftershocks, a typical six-story RC frame structure is taken as an example. Incremental dynamic analysis and vulnerability analysis are used to compare and analyze the transcendental probability of the RC frame structure under different performance states and various mainshock-aftershocks effects. 10 seismic records have been selected as the seismic input based on site conditions. The response spectrum acceleration is used as the intensity measure (IM), while the maximum interlayer displacement angle is used as the damage measure (DM). The IDA curve cluster is analyzed by quantization, and a probabilistic seismic demand model is established using the seismic intensity measure. The vulnerability analysis of the frame structure is performed according to the defined structural performance level. The results show that the bidirectional earthquake and the main-aftershocks increase the vulnerability index of the structure compared to the one-way mainshocks. When the structure encounters an earthquake intensity  $S_a(T_1, 5\%) = 0.5 g$ , the upper limit, average value, and lower limit of the vulnerability index caused by aftershocks increase by 6.3%, 8.5% and 11.5%, respectively. Compared with the

\* 收稿日期:2022-01-21;修回日期:2022-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(52079072)、土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地项目(2021EJD026)资助

作者简介:林天成(1998—),男,硕士研究生。主要从事混凝土结构抗震性能方面的研究。E-mail:1208074073@qq.com

通讯作者:陈灯红(1983—),男,教授,博导。主要从事混凝土结构抗震性能方面的研究。E-mail:d.chen@ctgu.edu.cn

one-way mainshocks, the vulnerability index caused by two-way earthquake exhibits an increase of 15.5%, 20.1% and 32.5%, respectively.

**Keywords:** reinforced concrete frame structure; mainshock-aftershock sequence; incremental dynamic analysis; seismic vulnerability; earthquake intensity

## 0 引言

主震会改变地壳的应力场从而引发余震甚至触发周边主震,统计资料表明,主震地震后会伴随大量余震,使得结构破坏程度加剧。由于主震和其后续余震之间的间隔时间较短<sup>[1]</sup>,余震会使主震所造成的结构损伤程度加剧,产生“二次损伤”。因此,结构在主余震作用下的性能需要更充分的研究。

国内外学者针对主余震地震动作用下 RC 框架结构的动力响应进行了研究。如 G. Abdollahzadeh 等<sup>[2]</sup>基于神经网络方法和主震加速度谱生成人工余震地震动,对三种不同结构(柱、钢筋混凝土结构和钢筋混凝土桥)进行动力响应分析。S. Amiri 等<sup>[3]</sup>以单自由度双线性体系为研究对象,研究了在主余震序列作用下结构残余位移比。K. Goda 等<sup>[4]</sup>对主震和余震地震动进行了随机组合,运用增量动力分析法(Incremental Dynamic Analysis,简称 IDA)和云图法对木框架结构进行了非线性分析。M. Shokrabadi 等<sup>[5]</sup>通过合成不同的主余震序列地震动,评估五个不同高度的延性钢筋混凝土结构的抗震性能。毛晨曦等<sup>[6]</sup>对两层框架结构进行了主余震作用下的振动台试验。贺路翔等<sup>[7]</sup>对我国西南地区一混凝土高坝进行了地震易损性分析。杨福剑等<sup>[8]</sup>研究了主余震序列型地震动作用下 RC 框架结构损伤耗能。温卫平<sup>[9]</sup>分析了主余震序列型地震动的损伤累积效应。陈清军等<sup>[10]</sup>以 98 m 高的复杂高层结构为研究对象,对比分析了主余震序列地震动作用下复杂高层结构的响应特征。籍多发<sup>[11]</sup>通过余震与主震谱加速度放大系数比值的衰减关系,提出了基于  $S_a$  放大系数的主余震序列构造方法。上述文献主要研究了在主余震序列作用下 RC 结构的动力响应,对于主余震作用下 RC 结构的易损性分析方面则缺少相关资料。

本文基于增量动力分析法和易损性分析,以一典型六层钢筋混凝土框架结构为研究对象,根据场地条件选择地震记录,合理选择地震强度指标和损伤指标,分析结构在主余震序列地震动作用下的抗震性能。

## 1 基于 IDA 的地震易损性分析方法

基于增量动力分析方法的地震易损性分析步骤如下:

(1)以六层钢筋混凝土框架结构为分析模型,确定 IDA 分析的结构性能指标(DM)为最大层间位移角  $\theta_{\max}$ <sup>[12]</sup>,地震强度指标(IM)为  $S_a(T_1, 5\%)$ <sup>[13]</sup>。

(2)根据场地条件合理选择地震动记录,将调幅后的地震记录作为输入对 RC 框架结构进行增量动力分析。

(3)将结构性能指标设为  $x$  轴,地震强度指标设置为  $y$  轴,通过拟合得到 IDA 曲线簇。

(4)对数据进行回归分析,根据定义的结构性能极限状态,建立概率地震需求模型并绘制结构的地震易损性曲线。

以已建立的一栋六层 RC 框架结构为研究对象,选用 10 条与场地特性及设计反应谱匹配较好的实测地震记录,运用地震波分析处理软件进行处理。从选取的不同主余震地震动中选取合适的余震地震动合成新的主余震地震动,对结构进行增量动力分析和易损性分析。

## 2 RC 框架结构的有限元建模

### 2.1 有限元模型

参照《建筑抗震设计规范》<sup>[14]</sup>,建立了一个典型六层的 RC 框架结构的有限元模型。场地的特征周期  $T_g=0.40$  s,建筑结构为 7 度设防烈度,设计分组是第二组,场地类别为 II 类。结构总高度 21.8 m,结构层高为 3.3 m,水平  $x$  和  $y$  向的长度分别为 18 m 和 13.8 m,均为三跨布置。梁的截面尺寸为 0.3 m  $\times$  0.6 m,柱截面尺寸为 0.6 m  $\times$  0.6 m。

梁柱部分的网格划分采用了八节点六面体等参单元(C3D8R),板采用壳单元(S4R)模拟,钢筋单元采用 Rebar Layers(T3D2)单元实现。梁和柱采用 Merge 方式连接,板和梁、柱采用 Tie 约束绑定,通过 Embedded 设置方式来考虑钢筋和混凝土的相

互作用。考虑到本文采用的混凝土本构模型能较好地模拟地震作用下混凝土的刚度退化作用,由于钢筋与混凝土之间的相互作用机理较复杂<sup>[15]</sup>,本文暂忽略钢筋和混凝土之间的黏结滑移的影响。混凝土部分共计 76 822 个结点,55 728 个单元,其中 28 800 个 C38DR 单元,26 928 个 S4R 壳单元;钢筋部分共计 44 640 个结点,91 248 个 T3D2 单元;三维有限元模型如图 1 所示。



图1 有限元模型  
Fig.1 Finite element model

## 2.2 材料本构

为更好地模拟反复荷载作用下混凝土的变形,混凝土塑性损伤模型综合了 J.Lubliner 等<sup>[16]</sup>提出的塑性损伤模型(CDP 模型),以及 J.Lee 等<sup>[17]</sup>提出的往复荷载塑性损伤模型,往复荷载作用下的混凝土应力—应变曲线如图 2 所示。

规范中的单轴本构损伤演化参数  $D$  不能直接用于软件,将其转化为可用于 Abaqus 的塑性损伤因子  $d$ 。C30 混凝土的拉伸因子—开裂应变和拉应力—开裂应变曲线如图 3 和图 4 所示。为了钢筋本

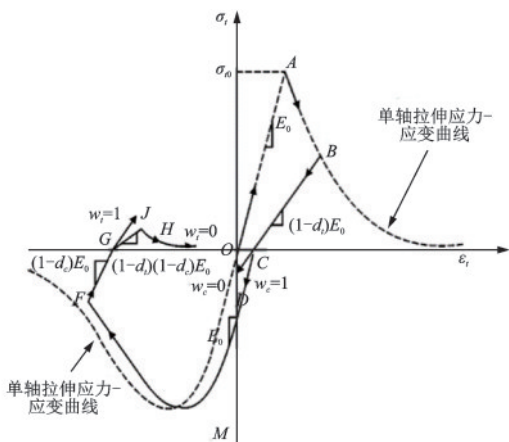


图2 应力—应变曲线  
Fig.2 Stress-strain curves

构以及相关参数的实际地震输入的计算简便,将钢筋本构简化为双斜线模型(钢筋简化为线性强化弹塑性材料),如图 5 所示,计算参数见表 1。

采用 ABAQUS 软件对结构进行模态分析,得到六层建筑结构振型频率和自振周期等信息,见表 2。

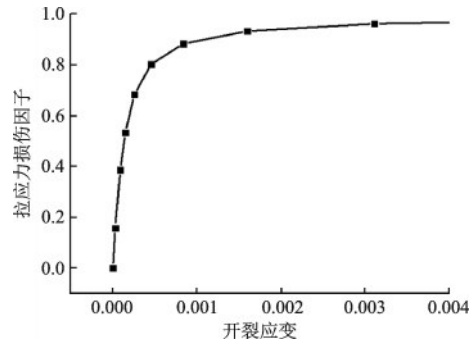


图3 拉伸因子—开裂应变曲线  
Fig.3 Curve of tensile damage-cracking strain

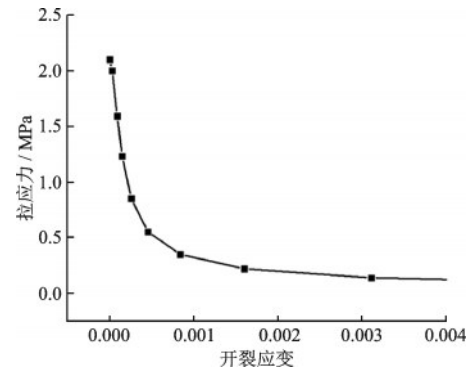


图4 拉应力—开裂应变曲线  
Fig.4 Curve of tensile stress-cracking strain

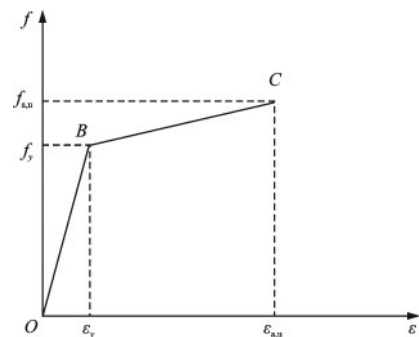


图5 钢筋双斜线模型  
Fig.5 Constitutive model of steel bars

表1 钢筋计算参数

Table 1 Calculation parameters of steel bars

钢筋等级	弹性模量 $E_s$ /MPa	泊松比 $\nu$	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_{a,u}$ /MPa	伸长率 $N/\%$
HRB335	200 000	0.3	335	455	14
HPB300	210 000	0.3	300	420	14

表2 框架结构自振周期

Table 2 Natural vibration periods for frame structures

振型	1	2	3	4	5	6	7	8	9
频率/Hz	0.759 8	0.761 7	0.880 9	2.564 6	2.590	2.751	4.310	4.669	4.841
周期/s	1.316 2	1.312 8	1.135 2	0.389 9	0.386	0.363	0.232	0.214	0.206

### 3 主余震作用下的增量动力分析

#### 3.1 地震记录的选取与合成

构造主余震序列的方法有重复法、随机法和衰减法三种。采用前两种方法构造的主余震序列高估了余震强度<sup>[18]</sup>,使得结构在地震作用下的破坏过大。因而本文采用衰减法构造主余震地震动,根据文献[4]中余震震级和峰值地面加速度(PGA)相较于主震的关系,本文的主余震序列型地震动构造步骤为:(1)选取矩震级 $M$ 大于或等于5.0、水平向PGA平均值大于或等于0.1g、水平向PGV大于或等于1.0 cm/s、平均剪切波速 $600 \text{ m/s} \geq V_{s30} \geq 100 \text{ m/s}$ 的地震记录。(2)基于PGA衰减关系选取余震峰值强度最大的地震动,中间施加20 s的时间间隔<sup>[19]</sup>,与主震合成主余震序列型地震动。

根据文献[20],选取10~20条地震波即可较为准确地评估出结构的抗震需求。考虑场地条件选取的10条地震记录见表3,反应谱与规范谱如图6所示。选取的地震动的持时有差异性,对本文的地震动记录进行标准化处理。合成的水平 $x$ 向和 $y$ 向的加速度时程曲线如图7所示。

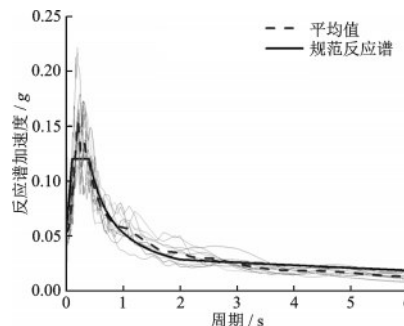


图6 地震反应谱加速度曲线

Fig.6 Acceleration curves of seismic response spectrum

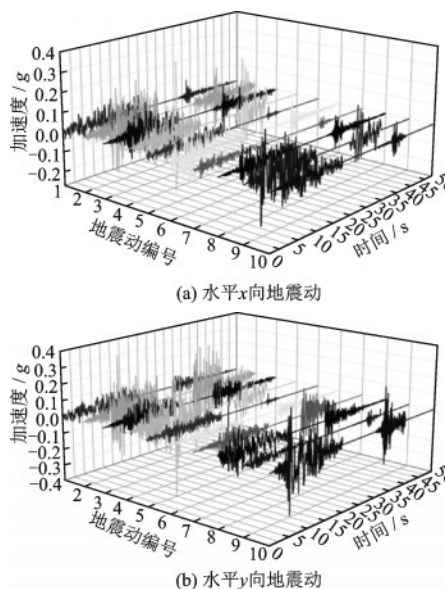


图7 合成的水平向主余震地震波

Fig.7 Synthetic horizontal main aftershock seismic waves

表3 选取的地震记录

Table 3 Selected earthquake records

编号	地震记录台	年份	$V_{s30}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	震级	实测地面峰值加速度/g		
					X向	Y向	Z向
1	San Onofre-So Cal Edison	1968	442.88	6.63	0.131	0.152	0.116
2	Isabella Dam (Aux Abut)	1971	591	6.61	0.091	0.067	0.054
3	San Onofre-So Cal Edison	1971	442.88	6.61	0.107	0.092	0.105
4	Whittier Narrows Dam	1971	298.68	6.61	0.108	0.101	0.033
5	Delta	1979	242.05	6.53	0.235	0.349	0.142
6	El Centro Array #12	1979	196.88	6.53	0.144	0.118	0.069
7	Niland Fire Station	1979	212	6.53	0.109	0.069	0.034
8	Parachute Test Site	1979	348.69	6.53	0.112	0.205	0.161
9	Sturno (STN)	1980	382	6.9	0.216	0.314	0.235
10	El Centro Imp. Co. Cent	1987	192.05	6.54	0.357	0.259	0.127

### 3.2 增量动力分析

以最大层间位移角  $\theta_{\max}$  作为损伤指标,反应谱加速度  $S_a$  作为强度指标。采用 Hunt&Fill 变步长法以结构基本周期  $T_1=1.316$  s 对应的谱加速度  $S_a(T_1, 5\%)$  对地震动进行调幅。确定极限破坏状态  $\theta_{\max} \geq 4\%$ 、初始值  $0.05g$ 、调幅增量  $0.05g$  以及调幅步长  $0.2g$ , 根据计算结果的收敛性,运用倒推和回插的方法来逼近结构发生倒塌破坏的地震动强度调幅系数。对 RC 框架结构进行增量动力分析。选取的结构响应指标体现水平方向的损伤指标,这里提取了水平  $x$  向和  $y$  向的最大层间位移角。对提取结果进行拟合,得到不同结构性能指标下的 IDA 曲线簇,如图 8 所示。

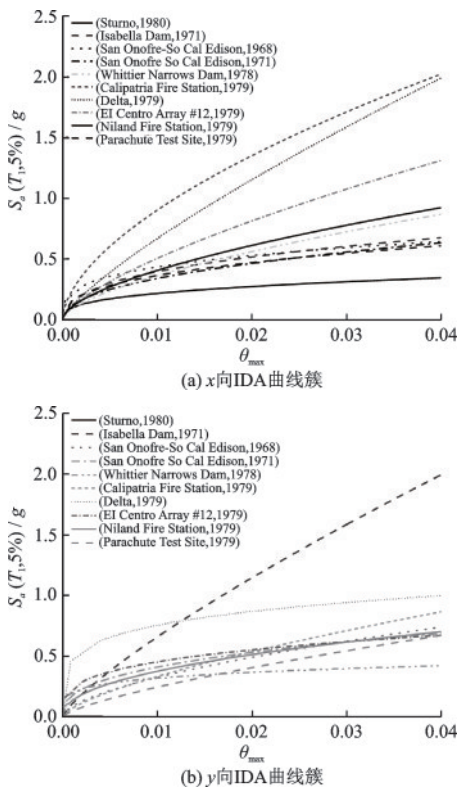


图 8 IDA 曲线簇  
Fig.8 IDA curve cluster

假设地震反应参数 DM 服从正态分布<sup>[21]</sup>,通过分位分析得到 16%、50% 和 84% 三个分位数所对应的分位曲线,以谱加速度  $S_a$  为  $y$  轴,最大层间位移角为  $x$  轴,分别绘制出水平  $x$  向和  $y$  向的分位线如图 9 所示。

三条分位线可以反映 IDA 曲线的离散性,由图可知水平  $x$  向的 IDA 曲线簇的离散性大于水平  $y$

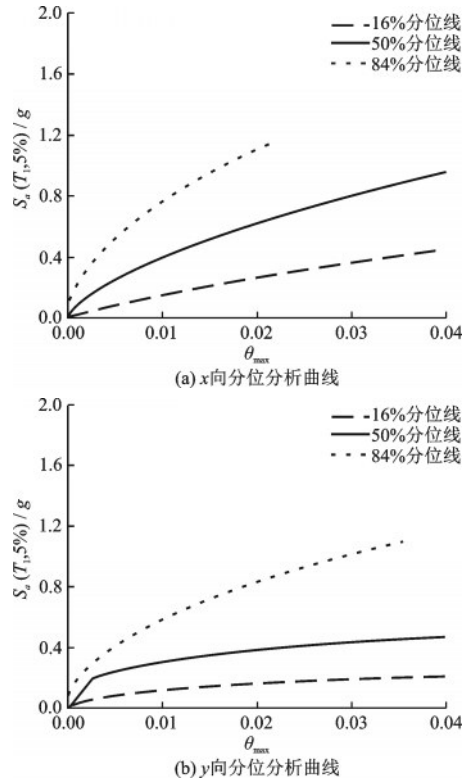


图 9 水平向最大层间位移角  $\theta_{\max}$  的分位分析曲线  
Fig.9 Quantitative analysis curves of the maximum horizontal displacement angle ( $\theta_{\max}$ )

向的 IDA 曲线的离散性。随着地震强度谱加速度  $S_a$  的增加, $y$  向最大层间位移角的增长速度快于  $x$  向。

主余震作用下结构水平向的 16%、50% 和 84% 分位曲线如图 10 所示。规范<sup>[14]</sup>采用层间位移角  $1/550$  和  $1/50$  作为钢筋混凝土框架结构弹性极限和塑性极限,同时根据文献<sup>[22]</sup>给出了钢筋混凝土框架结构四种界限的  $\theta_{\max}$  限值(表 4)。在四种破坏界限状态所对应的谱加速度  $S_a$  的强度,见表 5。

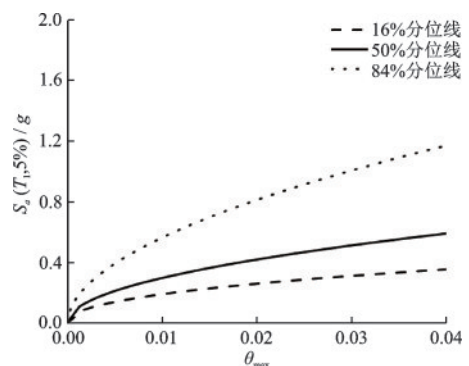


图 10 最大层间位移角  $\theta_{\max}$  的分位曲线  
Fig.10 Quantile curves of the maximum displacement angle ( $\theta_{\max}$ ) between layers

表 4 基于  $\theta_{\max}$  的结构损伤状态界限值

Table 4 Critical values of structural damage state based on  $\theta_{\max}$

界限损伤状态	充分运行	立即占用	生命安全	防止倒塌
$\theta_{\max}/\%$	0.18(1/550)	1	2	4

表 5 水平向不同界限状态对比

Table 5 Horizontal comparison of different boundary states

界限状态	主余震/g			主震/g		
	16%	50%	84%	16%	50%	84%
充分运行 OP	0.054	0.145	0.249	0.086	0.127	0.229
立即占用 IO	0.125	0.302	0.592	0.292	0.207	0.559
生命安全 LS	0.168	0.378	0.825	0.255	0.417	0.807
防止倒塌 CP	0.221	0.468	1.472	0.352	0.586	1.165

由表 5 可以看出,在同一破坏界限状态下,主余震地震强度  $S_a$  明显小于单主震地震强度。使结构到达某一界限状态,结构所需要的主余震地震强度更小。在两组地震动的同一地震强度  $S_a(T_1, 5\%)$  的不同地震作用下,主余震地震动造成的损伤高于单主震地震动。

## 4 地震易损性分析

### 4.1 概率地震需求模型

地震易损性  $F_R$  的表达式为<sup>[23]</sup>:

$$F_R(a) = P(\text{LS} | \text{IM} = a) = \int_y^{\infty} f_{R|A}[r|a] dr \quad (1)$$

式中,LS 为结构性能水准;IM 为地震强度指标;P 为对应结构性能水准的超越概率; $f_{R|A}[r|a]$  为结构需求的概率密度函数。

$$\ln R = m + n \ln(\text{IM}) \quad (2)$$

式中,  $m$  和  $n$  为常数项,可以由多条地震动的 IDA 计算曲线经回归分析得到。

分析 IDA 曲线簇得到线性回归方程。基于层间位移角的概率地震需求模型回归方程为:

$$\ln(\theta_{\max}) = 1.2524 \ln(S_a) - 3.0129 \quad (3)$$

$$\ln(\theta_{\max}) = 1.2446 \ln(S_a) - 2.5015 \quad (4)$$

式(3)和式(4)分别为  $x$  向和  $y$  向的基于最大层间位移角  $\theta_{\max}$  的概率地震需求模型回归方程,拟合系数分别为  $R^2=0.7375$  和  $R^2=0.6737$ 。

文献[22]给出了钢筋混凝土框架结构的基本

完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏五种状态。以及对应的四种界限损伤状态是  $\text{LS}_1$  充分运行 1/550、 $\text{LS}_2$  立即占用 1/100、 $\text{LS}_3$  生命安全 1/50 和  $\text{LS}_4$  防止倒塌 1/25。

结构需求  $D$  超越结构性能  $C$  的条件概为:

$$P_f = P(C|D \leq 1) \quad (5)$$

地震作用下的结构超越概率  $P_f$  为:

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln(e^m \text{IM}^n / C)}{\sqrt{\beta_a^2 + \beta_b^2}}\right) \quad (6)$$

式中,  $\Phi$  为标准正态分布,以  $S_a(T_1, 5\%)$  为地震强度参数时,  $\sqrt{\beta_a^2 + \beta_b^2} = 0.633$ 。

根据式(3)、(4)所求的概率需求模型,当极限状态为  $C$  的取值为四种性能水准时,得到不同地震强度作用不同性能状态的超越概率,绘制出来的双向主震易损性曲线如图 11 所示。

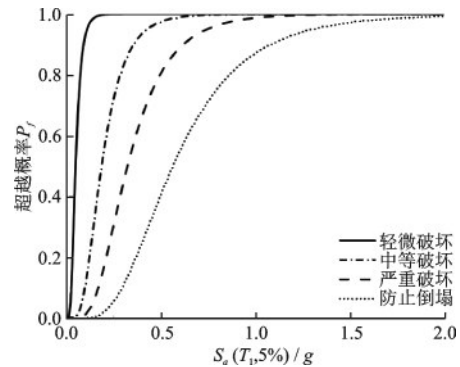


图 11 双向主震易损性曲线

Fig.11 Vulnerability curves of bidirectional main earthquake

当地震强度  $S_a(T_1, 5\%) = 0.5g$  时,四种破坏状态的超越概率表现轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌从大到小依次排列,这也符合规范中结构抗震设计的原则。

不同性能状态的超越概率的增长速率各不相同;结构处于充分运行结构性能水平,曲线的斜率很大,谱加速度轻微的增加会使结构进入塑性阶段。随着谱加速度增长,结构的损伤累计,结构依次进入轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏四个等级。曲线斜率逐渐减小。根据规范<sup>[14]</sup>,确定 7 度多遇、7 度设防和 7 度罕遇三类设防标准的第一周期谱加速度对应的谱加速度强度分别为  $0.04g$ 、 $0.12g$ 、 $0.25g$ 。在三类设防标准下四种性能水准的超越概率见表 6,计算出的地震易损性矩阵见表 7。

表6 各性能水平下的超越概率

Table 6 Exceeding probabilities at each performance level  
单位: %

性能水平	设防水准		
	7度多遇	7度设防	7度罕遇
轻微破坏	42.3	99	99
中等破坏	3	50.3	76.3
严重破坏	2	13.8	35.3
倒塌	0.1	1.4	17

表7 地震易损性矩阵

Table 7 Seismic vulnerability matrices  
单位: %

性能水平	设防水准		
	7度多遇	7度设防	7度罕遇
基本完好	57.7	1	1
轻微破坏	39.3	48.7	22.7
中等破坏	2	36.5	41
严重破坏	0.9	12.4	28.3
倒塌	0.1	1.4	17

采用特大地震倒塌率与倒塌储备系数(CMR)相结合作为评判不同地震强度作用下的倒塌率的依据<sup>[24]</sup>。CMR为地面地震强度与最大考虑地震强度在倒塌率为50%时的比值。可以接受的CMR大致在2.7左右<sup>[25]</sup>。本文超越率为50%的倒塌地震强度 $S_a$ 为0.553g,建筑结构场地加速度设计为0.15g,7度罕遇地震第一周期谱加速度强度值为0.25g,两者比值为2.22,在其左右范围内。

分析主余震地震动作用下结构的响应,拟合地震响应参数对数离散点数据得到线性回归方程,如图12所示;基于最大层间位移角的概率地震需求模型回归方程为:

$$\ln(\theta_{\max}) = 1.072 \ln(S_a) - 2.3583 \quad (7)$$

根据式(7)已知地震需求概率模型的回归方程,代入式(6)中可以求出地震作用下不同性能状态的结构超越概率 $P_f$ ,从而得到关于地震强度 $S_a(T_i, 5\%)$ 和结构超越概率 $P_f$ 地震易损性曲线,如图13所示。

将选取的10条地震记录进行单向水平处理后从地基边界输入,对结构进行动力时程分析得到IDA曲线簇。拟合地震响应参数对数离散点数据,

得到线性回归方程,如图14所示;基于最大层间位移角的概率地震需求模型回归方程为:

$$\ln(\theta_{\max}) = 1.3629 \ln(S_a) - 2.818 \quad (8)$$

根据式(8)已知地震需求概率模型的回归方程,可以得到关于地震强度 $S_a$ 和结构超越概率 $P_f$ 地震易损性曲线;水平单向地震作用下的结构四种性能指标的地震超越概率曲线,如图15所示。

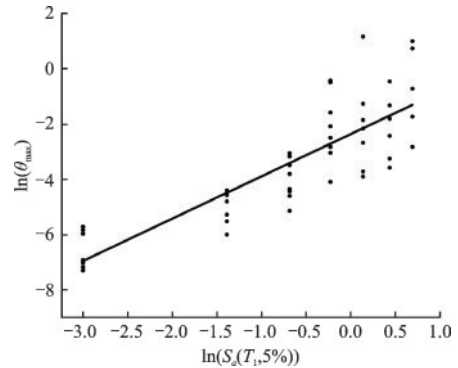


图12 主余震Y向地震需求回归方程

Fig.12 Y-direction earthquake demand regression equation for main aftershocks

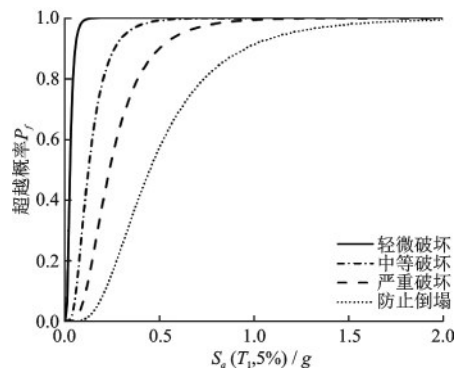


图13 主余震地震易损性曲线

Fig.13 Seismic vulnerability curves of main aftershocks

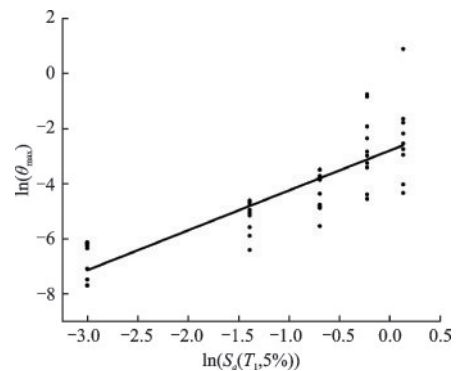


图14 单向地震需求回归方程

Fig.14 One-way seismic demand regression equation

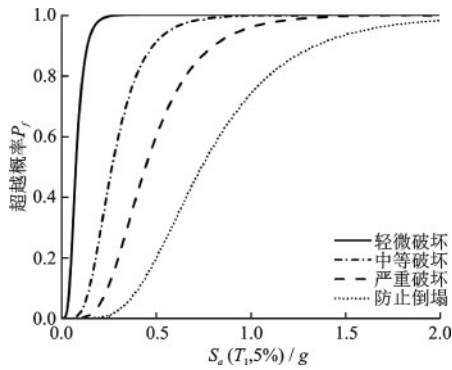


图 15 单向地震易损性曲线

Fig.15 One-way seismic vulnerability curves

#### 4.2 地震易损性指数分析

两种地震作用下的结构四种性能指标的地震超越概率曲线如图 16 所示。从整体分析,各性能水平的超越概率随着地震强度的增大而增大;四种不同性能状态的主余震地震超越概率曲线斜率均小于单主震的超越概率曲线。随着地震强度不断增大到达某一界限值时,两者的超越概率趋于一致。临界值所对应地震谱加速度  $S_a$  分别为  $0.2g$ 、 $1.1g$ 、 $1.6g$ 、 $2.0g$ 。

对比防止倒塌性能的两种地震超越概率曲线,主余震地震动强度  $S_a$  所对应的曲线斜率增长的更快;地震的谱加速度  $S_a$  产生细微的变化,结构的倒塌状态就会急剧增加。按照主余震设计谱设计的结构在主余震作用下的倒塌概率大于按照规范设计的结构在主震作用下的倒塌概率。

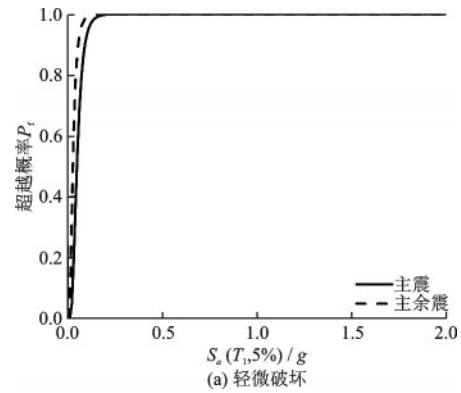
使用易损性指数(VI)<sup>[26]</sup>计算震害指数的数学期望,结构五种性能水平下的震害指数见表 8。将结构的破坏状态概率与震害指数连乘求和,得到 VI 的数学表达式为:

$$VI = \sum_{i=1}^4 DF_i \times P(DS_i | S_a) \quad (9)$$

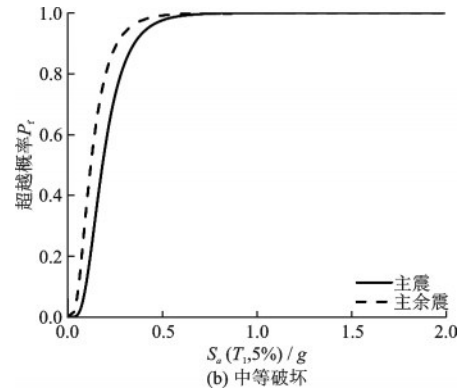
式中,  $DF_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$  为结构五种破坏等级的震害指数;  $P(DS_i | S_a)$  为结构第  $i$  个破坏状态对应的失效概率。

依据输入的调幅后不同的地震强度  $S_a$  得到不同性能状态下的超越概率,将易损性指数离散点拟合成曲线如图 17 所示。其中  $VI_U$ 、 $VI_M$  和  $VI_L$  分别表示震害指数取上限值、平均值和下限值时易损性指数的计算结果,上下限之间的部分表示结构的损伤区间。

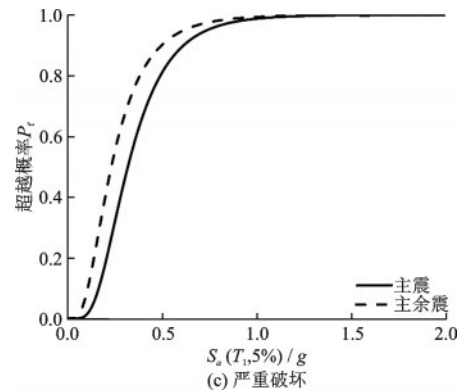
结构在不同地震作用下考虑不同设防标准的



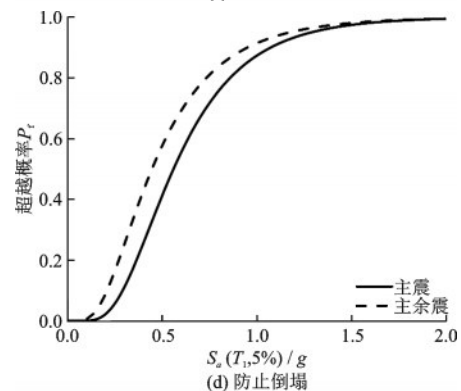
(a) 轻微破坏



(b) 中等破坏



(c) 严重破坏



(d) 防止倒塌

图 16 两类地震作用下各性能水平易损性曲线对比

Fig.16 Comparisons of vulnerability curves at various performance levels under two types of earthquakes

易损性指数见表 9。结果表明:多向地震和主余震都会使结构的易损性指数有所增加。对于结构遭遇地震强度为  $S_a(T_1, 5\%) = 0.5g$  时,在主余震作用

表8 震害指数  
Table 8 Indices of earthquake damage

震害指数	破坏状态				
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
上下限	[0, 10]	[10, 30]	[30, 55]	[55, 85]	[85, 100]
平均值	5	20	42.5	70	92.5

单位: %

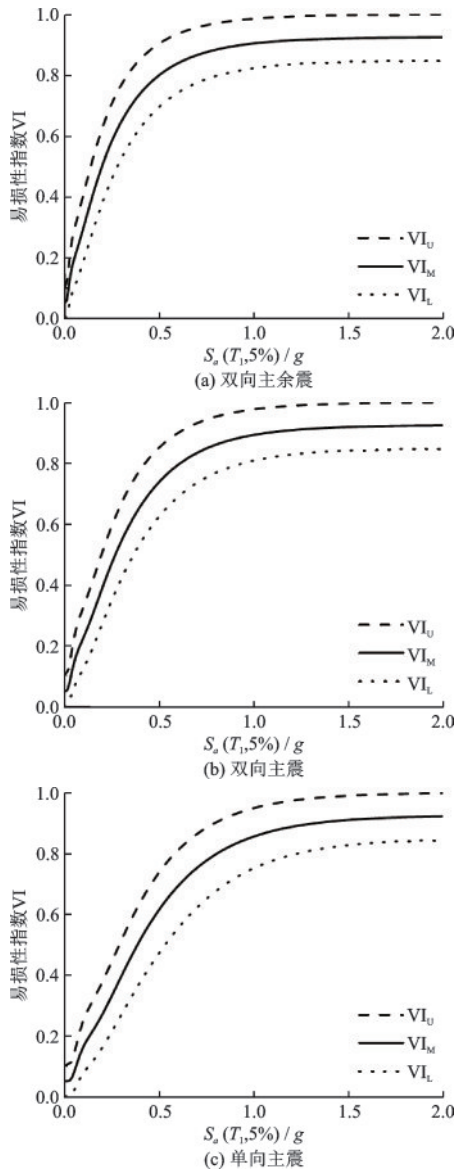


图17 不同地震作用下结构的易损性指数曲线

Fig.17 Vulnerability index curves of structures under different earthquakes

下易损性指数的上限值、平均值、下限值相比于主震作用下的增幅分别为6.3%、8.5%、11.5%。只考虑结构的单、双向主震地震作用,双向地震相对于单向地震增幅造成易损性指数的上限值、平均值和下限值分别增幅15.5%、20.1%、32.5%。

表9 不同地震作用下结构易损性指数

Table 9 Structural vulnerability indices under different earthquakes

	设防水准	7度多遇	7度设防	7度罕遇
双向主余震	下限值	0.085	0.232	0.461
	平均值	0.175	0.346	0.584
	上限值	0.265	0.460	0.698
双向主震	下限值	0.042	0.149	0.347
	平均值	0.114	0.253	0.469
	上限值	0.185	0.358	0.591
单向主震	下限值	0.008	0.092	0.252
	平均值	0.062	0.185	0.331
	上限值	0.116	0.278	0.442

## 5 结论

针对典型六层RC框架结构,基于增量动力分析和地震易损性分析,进行不同地震作用下的结构不同性能状态下的超越概率对比分析,主要结论如下:

(1)对于同一破坏界限状态,主余震地震强度 $S_a$ 明显小于单主震地震强度,即使结构到达某一界限状态,结构所需要的主余震地震强度更小。

(2)结构在主余震作用下的倒塌概率大于结构在单主震作用下的倒塌概率。双向主余震地震动 $S_a$ 所对应的曲线斜率增长的最快,双向主震地震动 $S_a$ 所对应的曲线斜率次之,单向主震地震动 $S_a$ 所对应的曲线斜率最慢。主余震地震动的谱加速度产生细微的增长,结构的倒塌状态就会急剧增加。

(3)双向地震和主余震相对于单向主震都会增加结构的易损性指数。当地震强度 $S_a(T_1, 5\%) = 0.5g$ 时,主余震作用下易损性指数的上限值、平均值、下限值相比于主震作用下的增幅分别为6.3%、8.5%、11.5%;双向地震相对于单向地震增幅造成易损性指数的上限值、平均值和下限值分别增幅15.5%、20.1%、32.5%。

## 参考文献:

- [1] 于晓辉,代旷宇,周洲,等.主余震序列作用下钢筋混凝土框架结构损伤分析[J].建筑结构学报,2019,40(3): 127-133.  
Yu X H, Dai K Y, Zhou Z, et al. Damage assessment of a reinforced concrete frame structure subjected to

- mainshock-aftershock sequences[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 127-133. (in Chinese)
- [2] Abdollahzadeh G, Omranian E, Vahedian V. Application of the artificial neural network for predicting mainshock-aftershock sequences in seismic assessment of reinforced concrete structures [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2021, 25(2): 210-236.
- [3] Amiri S, Bojórquez E. Residual displacement ratios of structures under mainshock-aftershock sequences [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 121: 179-193.
- [4] Goda K, Taylor C A. Effects of aftershocks on peak ductility demand due to strong ground motion records from shallow crustal earthquakes[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(15): 2311-2330.
- [5] Shokrabadi M, Burton H V, Stewart J P. Impact of sequential ground motion pairing on mainshock-aftershock structural response and collapse performance assessment [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(10): 4018177.
- [6] 毛晨曦,常旭.主余震作用下自复位钢筋混凝土框架结构抗震性能振动台试验研究[J].自然灾害学报,2019,28(4):1-12.  
Mao C X, Chang X. Shake table tests of a self-centering RC frame structure under mainshock-aftershock ground motions[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(4): 1-12. (in Chinese)
- [7] 贺路翔,陈灯红,杨紫辉,等.基于IDA的重力坝三维系统抗震性能研究[J].自然灾害学报,2019,28(4): 159-168.  
He L X, Chen D H, Yang Z H, et al. Study on seismic performance of three dimensional concrete gravity dam system based on IDA[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(4): 159-168. (in Chinese)
- [8] 杨福剑,王国新.主余震序列型地震动作用下RC框架结构损伤耗能研究[J].世界地震工程,2019,35(1): 45-52.  
Yang F J, Wang G X. Damage energy dissipation analysis of RC frame structure under mainshock-aftershock sequence-type ground motions [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(1): 45-52. (in Chinese)
- [9] 温卫平.基于主余震序列型地震动的损伤谱研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.  
Wen W P. Damage spectra based on mainshock-aftershock sequence-type ground motions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [10] 陈清军,李文婷.序列地震动作用下复杂高层结构的反应特征分析[J].力学季刊,2014,35(2):308-320.  
Chen Q J, Li W T. Response characteristics analysis of complex high-rise buildings under seismic sequence [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2014, 35(2): 308-320. (in Chinese)
- [11] 籍多发.主余震地震动特征及结构地震反应分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
Ji D F. Mainshock-aftershock ground motion characteristics and seismic response analysis of structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] 张望喜,熊浩,刘有,等.施工误差对RC框架结构层间位移角限值可靠度的影响研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):432-440.  
Zhang W X, Xiong H, Liu Y, et al. Research on influence of construction error on reliability of threshold limits for inter-story drift angle of RC frame structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 432-440. (in Chinese)
- [13] 周颖,苏宁粉,吕西林.高层建筑结构增量动力分析的地震动强度参数研究[J].建筑结构学报,2013,34(2): 53-60.  
Zhou Y, Su N F, Lyu X L. Study on intensity measure of incremental dynamic analysis for high-rise structures [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 53-60. (in Chinese)
- [14] 建筑抗震设计规范:GB50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [15] 金浏,苏晓,李冬,等.地震作用下钢筋混凝土悬臂梁抗弯性能及尺寸效应试验研究[J].振动与冲击,2017,36(13):19-26.  
Jin L, Su X, Li D, et al. Tests for flexural behavior and size effects of RC cantilever beams subjected to seismic loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 19-26. (in Chinese)
- [16] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [17] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structure [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [18] 周洲,于晓辉,吕大刚.主余震序列作用下钢筋混凝土框架结构的易损性分析及安全评估[J].工程力学,2018,35(11):134-145.  
Zhou Z, Yu X H, Lyu D G. Fragility analysis and safety evaluation of reinforced frame structures subjected to mainshock-aftershock earthquake sequences [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(11): 134-145. (in Chinese)
- [19] 于晓辉,乔雨蒙,代旷宇,等.主余震序列作用下非线性

- 单自由度体系的增量损伤分析[J].工程力学,2019,36(3):121-130.
- Yu X H, Qiao Y M, Dai K Y, et al. Incremental damage analysis of nonlinear single-degree-freedom systems subjected to mainshock-aftershock earthquake sequences [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (3) : 121-130. (in Chinese)
- [20] Shome N, Cornell C A. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [R]. Stanford, California: Stanford University, 2004: 16-50.
- [21] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526-533.
- [22] Vision S. Performance based seismic engineering of buildings [R]. Sacramento, California: Structural Engineers Association of California, 2000.
- [23] 白国良, 王世振, 成羽. 多类型地震动作用下高层结构的易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 669-676.
- Bai G L, Wang S Z, Cheng Y. Seismic fragility analysis for high-rise structures under multi-type ground motions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 669-676. (in Chinese)
- [24] 刘艳, 张磊, 顾栋炼, 等. RC 框架结构倒塌风险近似评价方法的精度对比[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 768-772.
- Liu Y, Zhang L, Gu D L, et al. Comparison study on the accuracy of different simplified evaluation methods for seismic collapse risks of RC frames [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 768-772. (in Chinese)
- [25] 王亚勇, 高孟潭, 叶列平, 等. 基于大震和特大震下倒塌率目标的建筑抗震设计方法研究方案[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 33(增2): 291-297.
- Wang Y Y, Gao M T, Ye L P, et al. Research plan for seismic design method of buildings based on the target of collapse rate under large and large earthquakes [J]. Civil Construction and Environmental Engineering, 2010, 33(Sup2): 291-297. (in Chinese)
- [26] 于晓辉, 吕大刚, 范峰. 基于地震易损性指数的钢筋混凝土框架结构地震损伤评估[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 69-100.
- Yu X H, Lyu D G, Fan F. Seismic damage assessment of RC frame structures based on vulnerability index [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 69-100. (in Chinese)
- ( 本 文 编 辑 : 池 营 营 )



**(上接第 1023 页)**

- [14] 李刚. 桩-土动力相互作用的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- Li G. Research on pile-soil dynamic interaction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [15] 桂仲柏, 吴晓飞, 桂仲花, 等. 人工边界动力反应分析研究[J]. 21世纪建筑材料, 2010, 2(3): 58-61.
- Gui Z B, Wu X F, Gui Z H, et al. Research on dynamic response of artificial boundary [J]. 21<sup>st</sup> Century Building Materials, 2010, 2(3): 58-61. (in Chinese)
- [16] Joyner W B, Chen A T F. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1315-1336.
- [17] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-01—2008 [S]. 重庆: 人民交通出版社, 2008.
- [18] 谢丰蔚. 地震动记录选择和调幅方法的研究及评价 [D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- Xie F W. Research and evaluation of ground motion record selection and amplitude modulation Method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [19] FEMAUS (2019). HAZUS-MH (Hazard United States-Multi-Hazard), Model Item, OpenGMS, <https://geomodeling.njnu.edu.cn>
- [20] 何浩祥, 陈奎, 范少勇. 基于弹塑性耗能差率的地震损伤评估模型及分析方法[J]. 振动工程学报, 2018, 31(3): 382-390.
- He H X, Chen K, Fan S Y. Based on elastic and plastic energy dissipation rate of seismic damage evaluation model and analysis method [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31 (3): 382-390. (in Chinese)
- [21] 赫传凯, 陈静. 空心高墩铁路桥梁地震易损性分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(3): 32-39.
- He C K, Chen J. High hollow pier railway bridge seismic vulnerability analysis [J]. Journal of Engineering and Seismic Strengthening Transformation, 2021, 43 (3): 32-39. (in Chinese)