

基于条带-云图法的地震动持时对结构地震易损性影响分析

程诗焱^{1,2}, 韩建平^{1,2}, 于晓辉^{3,4}, 吕大刚^{3,4}

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050;
3. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;
4. 哈尔滨工业大学 土木工程学院智能防灾减灾工业与信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 地震动持时对结构损伤的影响显著, 然而目前地震易损性研究中很少考虑地震动持时的影响。本文提出了一种地震易损性分析的条带-云图法, 引入向量型地震动强度指标 $IM = [IM_1, IM_2]$, 利用 IM_1 进行基于条带法的结构时程分析, 然后采用与地震动持时相关的 IM_2 离散化时程分析统计结果, 进行云图法回归分析, 建立合理考虑地震动持时影响的结构概率地震需求模型, 进而分析地震动持时对结构地震易损性的影响。为了说明本文提出的方法, 分别选取具有长、短持时特性的两组地震动作为输入, 对3个高度不同的钢筋混凝土框架结构采用条带-云图法进行了地震易损性分析。分析结果表明: 采用条带-云图法获得的 IM 与结构损伤之间的相关程度明显增加, 可以提高概率地震需求模型的可靠性; 与短持时地震动相比, 长持时地震动可以在更低的强度水平引起更严重的结构损伤, 在易损性分析中需要考虑持时影响; 地震动持时对结构易损性分析结果的影响与选择的地震动强度指标有关, 与能量相关的指标可以更好地反映地震动持时的影响。

关键词: 地震动持时; 向量型强度指标; 条带-云图法; 地震易损性分析; 钢筋混凝土框架结构

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A

Investigation on effect of ground motion duration on seismic fragility of structures based on stripe-cloud approach

CHENG Shiyany^{1,2}, HAN Jianping^{1,2}, YU Xiaohui^{3,4}, LÜ Dagang^{3,4}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Key Lab of Structure Dynamic Behavior and Control of China Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disaster of the Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Ground motion duration has significant influence on the damage of structures. Nevertheless, the impact of ground motion duration was rarely considered in seismic fragility analysis of structures currently. In this paper, the stripe-cloud approach was proposed to investigate the influence of ground motion duration on seismic fragility of structures. Vector-valued intensity measure (IM) of ground motion, $IM = [IM_1, IM_2]$, was introduced. First, IM_1 is used to perform time-history analysis of structures based on stripe method, and IM_2 which relates to ground mo-

收稿日期: 2020-03-30; 修订日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578273); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R51)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51578273); Key Project Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT_17R51)

作者简介: 程诗焱(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事结构抗震及地震易损性分析研究. E-mail: csyy106@163.com

通讯作者: 韩建平(1970-), 男, 教授, 博士, 主要从事结构抗震与减震控制、结构健康监测与损伤诊断研究. E-mail: jphan@lut.edu.cn

tion duration is used to discretize the statistical results of the time-history analysis. Then cloud method is adopted further to establish the probabilistic seismic demand models for structures which can consider the influence of ground motion duration reasonably. Furthermore, two suites of ground motion records with long- and short-duration were chosen as inputs respectively, and stripe-cloud approach was conducted for 3 reinforced concrete frame structures which have varying heights. The results demonstrate that stripe-cloud approach not only dramatically increases the correlation between seismic intensity measures and structural damage measures, but also improves the reliability of the probabilistic seismic demand models of structures. Vector-valued IM can effectively consider the effect of duration on seismic fragility analysis. Long-duration ground motion can cause severer damage at lower intensity levels comparing to short-duration ground motion. It is necessary to explicitly consider the effect of ground motion duration in seismic fragility analysis. The influence of ground motion duration on the seismic fragility analysis results is also related to the IM selected. Energy-related IM s can consider the influence of duration appropriately.

Key words: ground motion duration; vector-valued intensity measure; stripe-cloud approach; seismic fragility analysis; reinforced concrete frame

引言

持续时间是地震动的重要特性之一。已有研究表明:地震动持时会加剧结构损伤的发展,提高结构的损伤风险^[1]。具有长持时特性的地震动会明显降低结构的滞回耗能能力,加剧结构强度和刚度的退化,造成更严重的破坏^[2]。因此,需要在地震易损性分析中明确考虑持时对结构损伤的影响。

目前,国内外研究人员已经开展了一些关于地震动持时对结构损伤影响的研究。Bommer 等^[1]和 Chandramohan 等^[2]研究表明:地震动持时会影响结构的损伤水平,随着地震动持续时间的增加,结构滞回耗能能力明显下降,发生倒塌的风险增大。类似结论也可见于 Raghunandan 和 Liel^[3]对钢筋混凝土结构倒塌风险的研究。韩建平^[4-5]和孙小云等^[6-8]研究了地震动持时对钢筋混凝土框架结构损伤的影响。

地震易损性分析是基于性能地震工程的重要环节,它可以评估建筑结构在不同强度地震作用下的损伤水平。地震易损性分析常用强度指标(Intensity Measure, IM)表征地震动强度。一个好的 IM 应当满足有效性和充分性的要求^[9]。Kiani 等^[10]发现单独采用峰值地面强度(PGA , PGV)或 $S_a(T_1)$ 作为 IM 时,无法有效评价地震动持时对结构抗倒塌性能的影响。然而,使用向量型 IM (Vector-valued IM)时,地震动持时对结构损伤结果的影响更为显著。此外,相关研究表明:标量型 IM 无法全面描述复杂的地面运动,且不可避免地丢失大量地震动信息,并同时增加结构损伤分析的不确定性^[11-12]。Bazzurro 等^[13]提出在分析过程中引入向量型 IM ,即 $IM = [IM_1, IM_2]$,其中 IM_1 为主参数, IM_2 为第二参数。这一方法提高了地震动强度指标的有效性和充分性,并且提供了更多的地震信息。上述研究均表明了向量型 IM 在预测结构地震损伤上的有效性。然而,目前在地震易损性研究中对向量型 IM 的关注还不够,且对地震动持时的影响考虑不足。鉴于上述,有必要通过引入向量型 IM 来进行考虑地震动持时影响的地震易损性研究。

本文提出了基于条带-云图法的地震易损性分析方法,引入向量型 IM ,为分析提供更多地震动特性信息,如持时特性。选取具有长、短持时特性的地震动各 140 条作为地震动输入,以按我国现行设计规范设计的 5、8、10 层钢筋混凝土框架结构作为算例结构,选用 3 组向量型 IM 作为预测变量,对比分析了不同结构、不同预测变量下地震动持时对结构地震易损性的影响。

1 条带-云图法

地震易损性函数 $G_{D|IM}$ 的表达式为^[14-15]

$$G_{D|IM}(d|im) = P(D \geq d | IM = im) = \Phi\left(\frac{\ln m_{D|IM=im} - \ln d}{\beta_{D|IM}}\right) \quad (1)$$

式中, $m_{D|IM=im}$ 表示在给定地震动强度 $IM = im$ 条件下,结构需求参数 D 的数学期望; d 表示不同极限状态对应的结构抗震能力 C 的中位值; $\beta_{D|IM}$ 表示地震需求 D 的对数标准差。 $\beta_{D|IM}$ 的表达式为:

$$\beta_{D|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln D_i - \ln(m_{D|IM})]^2}{N-2}} \quad (2)$$

式中 D_i 表示第 i 条地震动作用下的结构需求; N 表示云图法中作为地震输入的地震动记录的数目。

地震易损性分析的关键是基于结构时程分析统计结果建立结构地震反应与地震动强度参数间的回归关系 即 $m_{D|IM}$ 采用的方法有条带法和云图法。条带法是将若干地震动记录的强度分别调幅至不同的强度 统计不同强度下结构地震反应的分布特性 获得的统计结果呈条带状 故称该方法为条带法(Stripe method) 如图 1 所示。云图法是采用若干地震动记录作为地震输入, 每个地震动记录的 IM 大小不同, 其统计结果大致呈椭圆形, 因此被称为云图法(Cloud method) 如图 2 所示。

根据条带法的原理, 将若干地震动多次调幅至目标强度 IM_i , 对不同地震动强度对应的结构时程分析结果进行统计分析, 获得地震需求中位值 $m_{D|IM_i}$ 和 $\beta_{D|IM_i}$ 。将参数代入式(1), 即可得到基于条带法的地震易损性函数:

$$G_{D|IM_i}(d|IM_i) = \Phi\left[\frac{\ln m_{D|IM_i} - \ln d}{\beta_{D|IM_i}}\right] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

依据条带法得到概率需求模型示例于图 1。

在确定易损性函数参数 $m_{D|IM=im}$ 时, 云图法假定 $m_{D|IM}$ 与 IM 服从对数线性关系^[16]:

$$\ln m_{D|IM} = a \ln IM + b \quad (4)$$

式中 a 和 b 为通过线性回归分析得到的系数。基于云图法得到的概率需求模型示例于图 2。

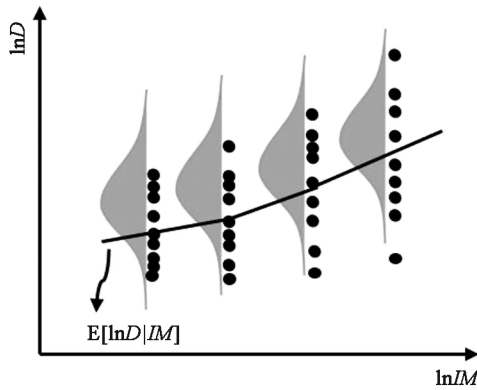


图 1 条带法示意图

Fig. 1 Schematic of stripemethod

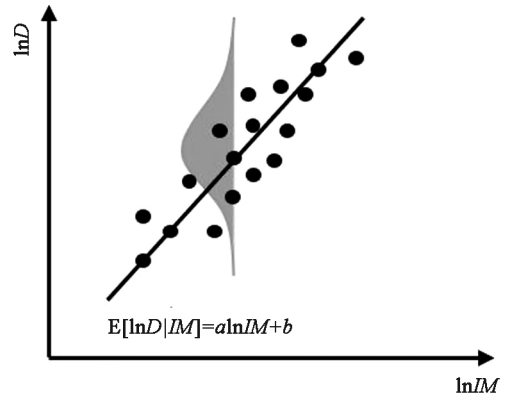


图 2 云图法示意图

Fig. 2 Schematic of cloud method

条带法是针对不同的地震强度所对应的统计结果建立多个概率地震需求模型, $m_{D|IM}$ 和 $\beta_{D|IM_i}$ 会随着地震动强度的变化而变化, 得到的易损性分析结果是离散的^[17]。而云图法则是全部地震强度范围内对应的统计结果建立概率地震需求模型, $m_{D|IM}$ 和 $\beta_{D|IM_i}$ 为一常数, 得到的易损性分析结果是连续的^[17]。通过对比可知, 条带法可以考虑地震动的不确定性, 分析

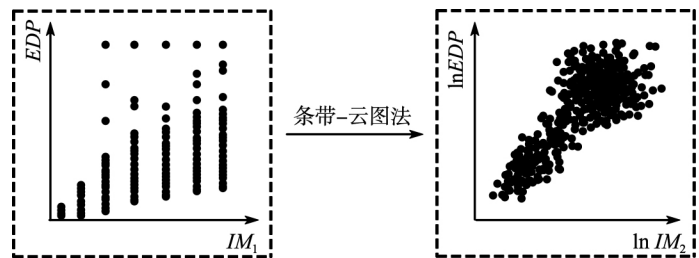


图 3 条带-云图法示例图

Fig. 3 Schematic of stripe-cloud approach

结果更客观, 但需要通过 n 次调幅并进行 $n \times N$ 次结构时程分析, 且随着地震动强度的增大, 结构倒塌点数量显著增加, 使用 IM_2 对单个条带统计结果离散化后, 其数据的离散程度非常大, 难以获得合理的对数线性关系^[17-18]。云图法的假设性更强, 未充分考虑地震动的不确定性, 但其工作量小, 能够节省计算资源^[17-18]。为了能够在进一步考虑地震动持时特性, 本文将两种方法结合, 引入与持时相关的 $IM = [IM_1, IM_2]$, 使用 IM_1 进行基于条带法的结构时程分析, 使用 IM_2 对所得条带法统计结果进行离散化, 通过图 3 所示的数据变换将

条带法的统计结果变为云图状,此时每一个数据点均为在 $[IM_1 = im_1, IM_2 = im_2]$ 条件下的结构需求 D 。为方便叙述,本文将这种方法称为“条带-云图法”。

对于离散化后的统计结果,可采用云图法进行易损性分析,此时的地震易损性函数及其参数如下所示:

$$G_{D|IM}(d | im_1, im_2) = P(D \geq d | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2) = \Phi\left(\frac{\ln m_{D|IM_2=im_2} - \ln d}{\beta_{D|IM_2=im_2}}\right) \quad (5)$$

$$\beta_{D|IM_1=im_1, IM_2=im_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln D_i - \ln(m_{D|IM_1=im_1, IM_2=im_2})]^2}{N-2}} \quad (6)$$

$$\ln m_{D|IM_1, IM_2} = a \ln IM_2 + b$$

为了减小因倒塌点引起的结果偏差,本文根据文献[19]的研究方法进一步考虑了倒塌概率对条带-云图法结果的影响,使用极大似然估计的方法计算了结构模型的倒塌概率^[20]:

$$P(Col | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2) = \frac{e^{\beta_1 im_2 + \beta_2}}{1 + e^{\beta_1 im_2 + \beta_2}} \quad (7)$$

式中 β_1, β_2 是对统计结果进行逻辑回归分析得到的相关系数,它们随 IM_1 大小的改变而改变; Col 为指示变量, 0 表示结构未倒塌, 1 表示结构发生倒塌。

依据全概率定理对式(5)进行考虑倒塌的修正,则最终结构易损性函数表达式如下:

$$G_{D|IM}(d | im_1, im_2) = P(D \geq d | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2)$$

$$= \Phi\left(\frac{\ln m_{D|IM_2=im_2} - \ln d}{\beta_{D|IM_2=im_2}}\right) \times [1 - P(Col | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2)] + P(Col | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2) \quad (8)$$

2 考虑地震动持时特性的地震动记录选取

目前持时的定义主要有四类: 括号持时 D_b ^[21], 一致持时 D_u ^[21], 重要持时 D_s ^[21] 和有效持时 D_e ^[7]。根据 D_u 的定义,地震动持时的长短会跟随地震动幅值的变化而变化,因此它们既可以指原始地震动持时,也可以指经过调幅的地震动持时。对于同一条地震动记录,其调幅前后的 D_b, D_u 并不唯一,这增加了地震动持时的不确定性。相比之下,重要持时仅考虑地震动加速度时程的累积能量,与地震动加速度、速度、位移幅值、频率、PGA、PGV 和 $S_a(T_1)$ 无明显相关性,具有较好的鲁棒性,调幅前后的地震动持时评价结果唯一^[2, 10, 21],且 5-75% 重要持时 D_{s5-75} 被广泛应用于实际研究。因此,本文选用基于 Arias 强度的 D_{s5-75} 作为地震动持时参数。文献[22]分别选用两组长、短持时地震动记录作为输入,研究了地震动持时对结构损伤的影响。

参考文献[2, 22],选择 25 s 作为界定长、短持时地震动组的阈值,分别选择了 140 条具有长持时特性和 140 条具有短持时特性的地震动记录为输入,两组记录的详细信息参见文献[2]。为避免地震动幅值和频谱特性干扰数据结果,对两组地震动记录进行了谱匹配。两组记录的加速度反应谱如图 4 所示。

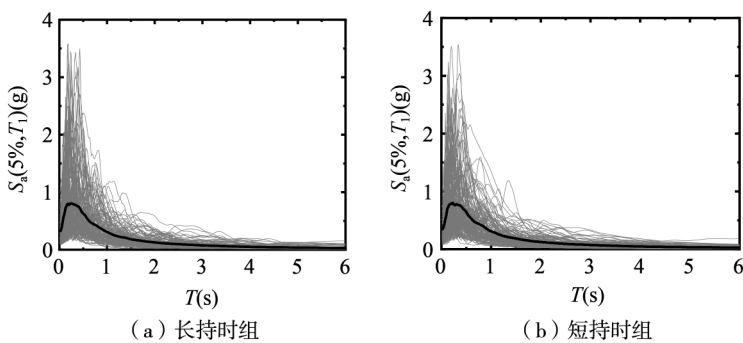


图 4 所选地震动记录的加速度反应谱

Fig. 4 Acceleration response spectra of the chosen ground motion records

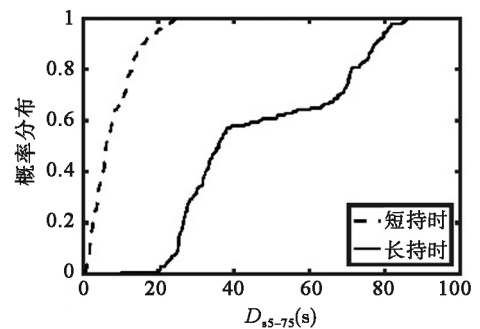


图 5 D_{s5-75} 的累积分布概率

Fig. 5 Cumulative distribution probability of D_{s5-75}

3 钢筋混凝土框架结构的设计与建模

依据文献 [19] 的研究成果 选用 5 层、8 层和 10 层钢筋混凝土框架结构作为算例结构。5 层框架结构所在地抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度为 0.15 g; 8 层、10 层框架结构所在地设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度为 0.2 g。场地类别为 II 类, 设计地震分组为第一组, 特征周期为 0.35 s。楼面永久荷载标准值 4.5 kN/m², 活荷载标准值为 2.0 kN/m²; 不上人屋面永久荷载标准值 7.0 kN/m², 活荷载标准值 0.5 kN/m²; 地面粗糙度 C 类, 基本风压 0.4 kN/m²; 基本雪压 0.30 kN/m²。平、立面布置图见图 6 结构主要梁柱配筋图见图 7。5KZ 表示 5 层结构框架柱, 5KL1 表示 5 层结构 1 号轴线处的框架梁, 5KL2 表示 5 层结构 2 号轴线处的框架梁, 其余编号依次类推。

使用 OpenSees 作为分析平台进行结构有限元建模。选取梁、柱作为结构的基本单元, 并采用杆系模型模拟梁、柱单元; 梁-柱节点为固结; 通过刚性楼板假定考虑楼板的约束作用, 未考虑填充墙的影响; 考虑柱单元因重力荷载产生的 P-Δ 效应; 使用 Concrete01 材料模型模拟混凝土材料, 不考虑混凝土受拉效应, 考虑箍筋对核心区混凝土的约束效应; 使用 Steel02 材料模型模拟钢筋材料; 使用非线性梁柱单元 (Nonlinear Beam-Column Element) 模拟结构非倒塌破坏。

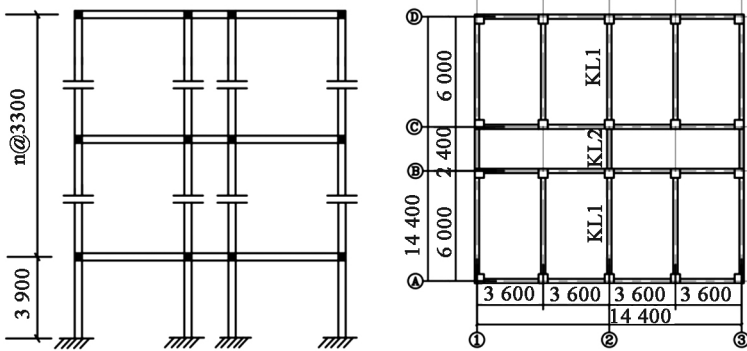


图 6 算例结构的平面及立面布置图

Fig. 6 Plan and elevation view of the case study frame

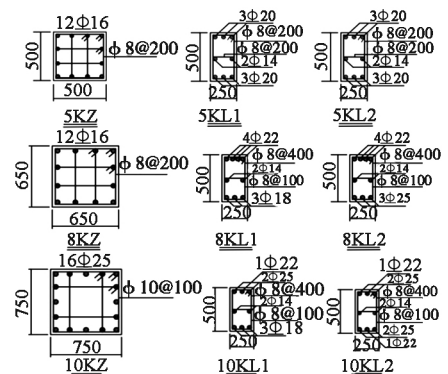


图 7 梁、柱截面配筋图

Fig. 7 Reinforcement details of typical beams and columns

4 基于条带-云图法的地震易损性分析

4.1 地震强度参数的选择

选用 3 组向量型 IM 进行地震易损性分析。由于 $S_a(T_1)$ 在工程领域应用广泛, 且被普遍认为能够满足有效性及充分性要求 [23], 故本文选择 $S_a(T_1)$ 作为第一强度指标 IM_1 。Riddell 等 [9] 认为地震动持时特性与能量具有明显相关性, 故本文选择考虑地震动持时的地震强度参数 a_{rms} 、 CAV [25] 分别作为第二强度指标 IM_2 , a_{rms} 、 CAV 分别如式 (9) 和式 (10) 所示:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt} \quad (9)$$

式中 t_1 、 t_2 表示强震段的起始、结束时间。由于本文采用 5% ~ 75% 重要持时作为持时参数, 故选用 D_{s-75} 表示强震段的持续时间。

$$CAV = \int_0^{t_{max}} |a(t)| dt \quad (10)$$

式中 t_{max} 表示地震动记录的总时长 $a(t)$ 表示 t 时刻地震动加速度值。

作为对比, 也选择与地震动持时无明显相关性的 PGA 作为第二强度指标 IM_2 。因此, 所考虑的 3 组向量型地震动强度指标分别为 $IM = [S_a(T_1, 5\%) \ a_{rms}]$ 、 $IM = [S_a(T_1, 5\%) \ CAV]$ 和 $IM = [S_a(T_1, 5\%) \ PGA]$ 。

4.2 地震易损性分析

采用条带法进行结构时程分析, 以 $S_a(T_1, 5\%)$ 为 IM_1 调幅地震动记录, 得到在 $IM_1 = im_1$ 条件下的结构

地震反应。本文选用10条带划分,每个条带的 $S_a(T_1, 5\%)$ 代表值如表1所示。时程分析统计结果示例于图8和图9。

表1 条带法的 $S_a(T_1)$ (g)
Table 1 Values of $S_a(T_1)$ (g) in strip approach

条带 1	条带 2	条带 3	条带 4	条带 5
0.05	0.17	0.29	0.38	0.47
条带 6	条带 7	条带 8	条带 9	条带 10
0.57	0.67	0.74	0.91	1.07

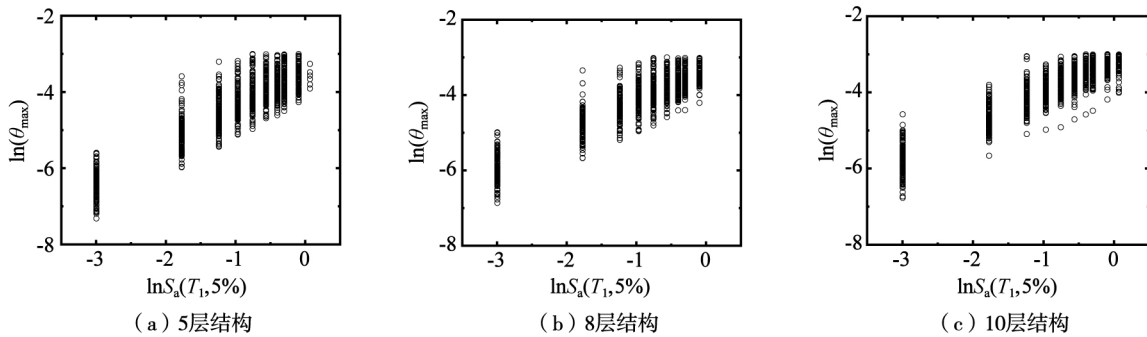


图8 短历时地震动作用下 IM_1 与 θ_{max} 的统计分析结果

Fig. 8 Statistical analysis results of IM_1 and θ_{max} results under short-duration ground motion

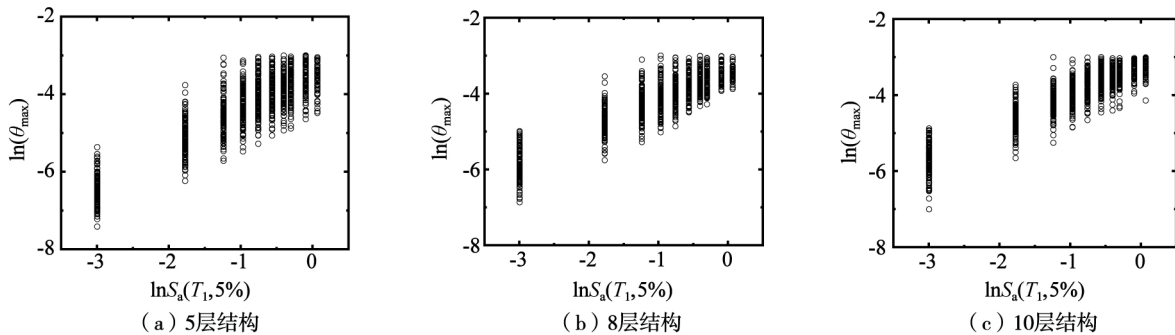


图9 长历时地震动作用下 IM_1 与 θ_{max} 的统计分析结果

Fig. 9 Statistical analysis results of IM_1 and θ_{max} under long-duration ground motion

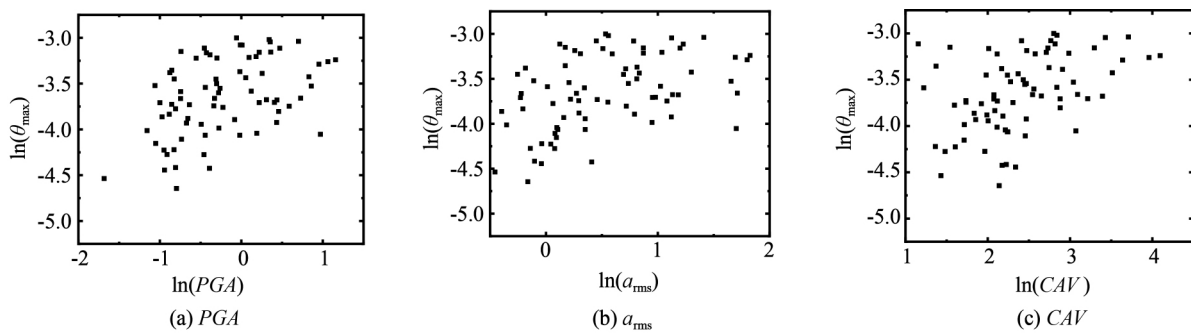


图10 长历时地震动作用下,使用 IM_2 对5层结构第7条带离散化的统计结果

Fig. 10 Discretized statistical results of the 7th stripe of the 5-story structure in terms of IM_2 under long-duration records

使用条带-云图法对图8、图9的统计结果进行离散化,得到的 R^2 范围为 $0.5989 \sim 0.7020$, ρ 范围为 $0.7739 \sim 0.8335$,其中5层结构分析结果如图10和图11所示。通过对比可以看出,当地震动强度较高时,统计结果中的倒塌点数量明显增加,此时使用 IM_2 对单个条带进行数据变换,所得结果的离散性非常大,难以建立 IM_2 与 θ_{max} 间的对数线性关系。然而,当使用条带-云图法对统计结果离散化后,可以依据结构在全

部地震动强度范围内的 θ_{max} 发展趋势建立较为可靠的对数线性关系, 此时 IM_2 与 θ_{max} 的相关性有明显提升。

选取最大层间位移角 θ_{max} 为结构损伤指标, 基于条带-云图法的分析结果, 按照式 (8) 计算结构在立即居住 (IO)、生命安全 (LS) 和倒塌预防 (CP) 的极限状态下的损伤概率。FEMA273/356^[26-27] 针对 IO、LS、CP 给出了极限状态定义值: $\theta_{max} = 1\%$ 、 2% 和 4% 。图 13~图 15 给出了计算获得的易损性曲线。

由图 12~图 14 可见, 随着地震强度水平的增加, 长、短持时易损性曲线间的差距逐渐增大。本文对比分析了图 12~图 14 及文献 [22] 仅使用 $S_a(T_1, 5\%)$ 为地震动强度指标时, 长、短持时地震下不同极限状态相应易损性分析结果, 即对比分析了易损性曲线在 50% 条件超越概率处对应的长、短持时地震动向量型地震动强度指标中的 IM_2 和向量型强度指标 $S_a(T_1, 5\%)$ 。结果列于表 2~表 4, 其中括号内数字表示短持时地震动, 括号外数字表示长持时地震动。

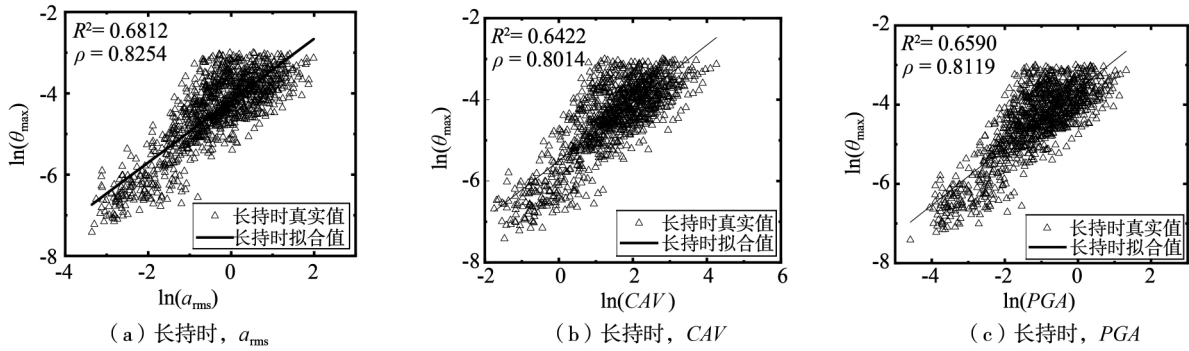


图 11 5 层结构 θ_{max} 与地震动 IM_2 的相关性分析结果

Fig. 11 Correlation analysis results of θ_{max} for the 5-story structure with ground motion IM_2

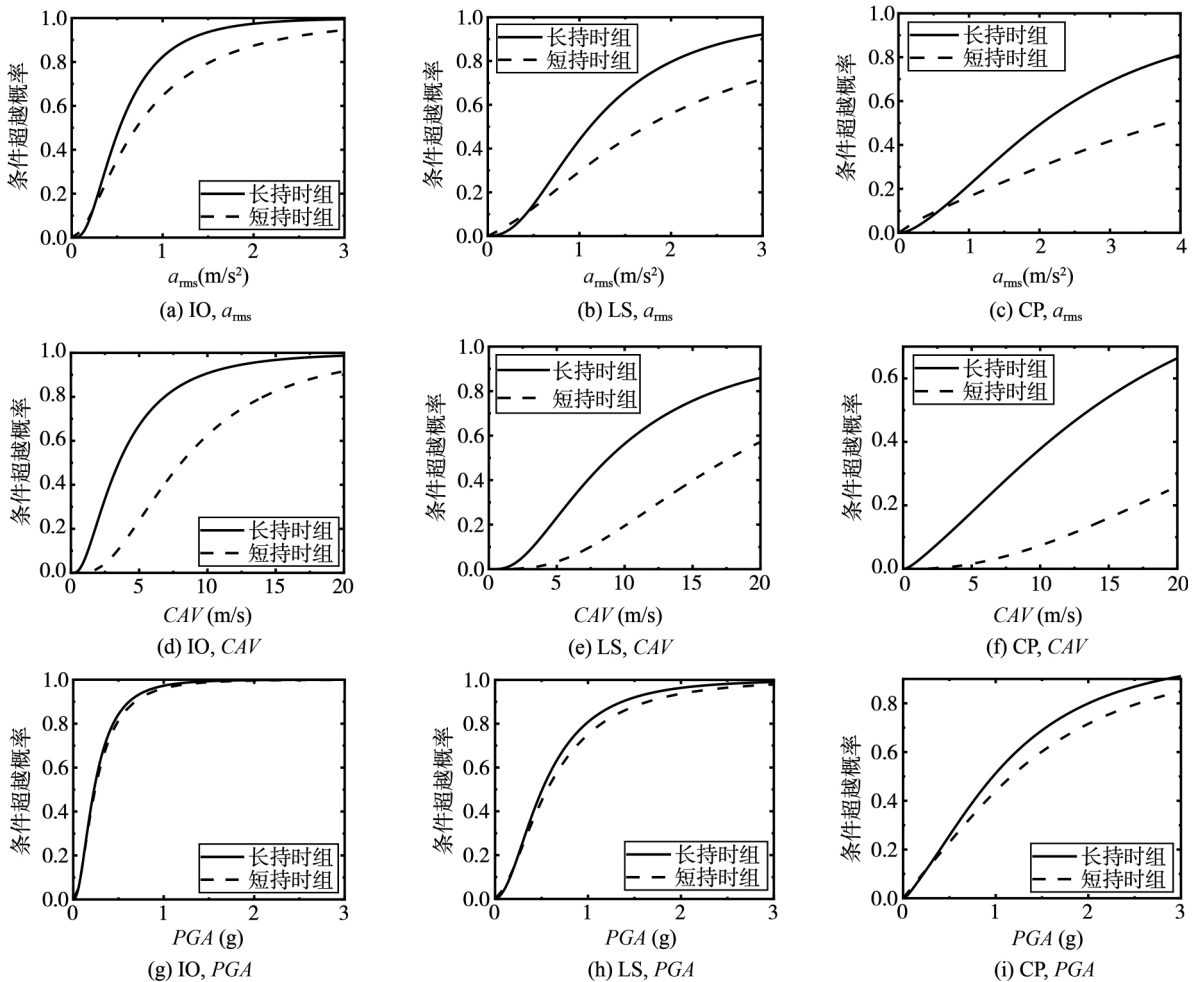


图 12 长、短持时地震作用下 5 层结构地震易损性曲线对比

Fig. 12 Comparison of fragility curves of the 5-story structure under long and short duration ground motion

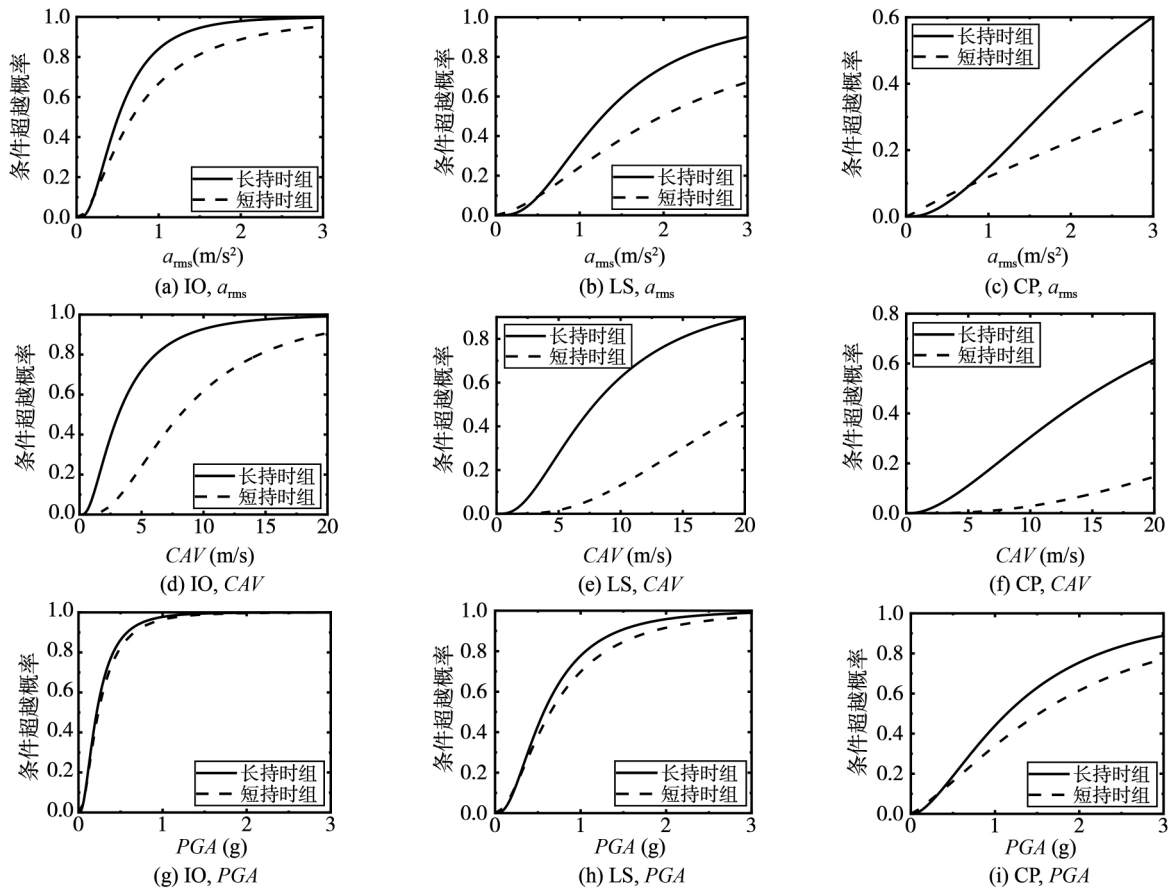


图 13 长、短持时地震作用下 8 层结构地震易损性曲线对比

Fig. 13 Comparison of fragility curves of the 8-story structure under long-and short-duration ground motion

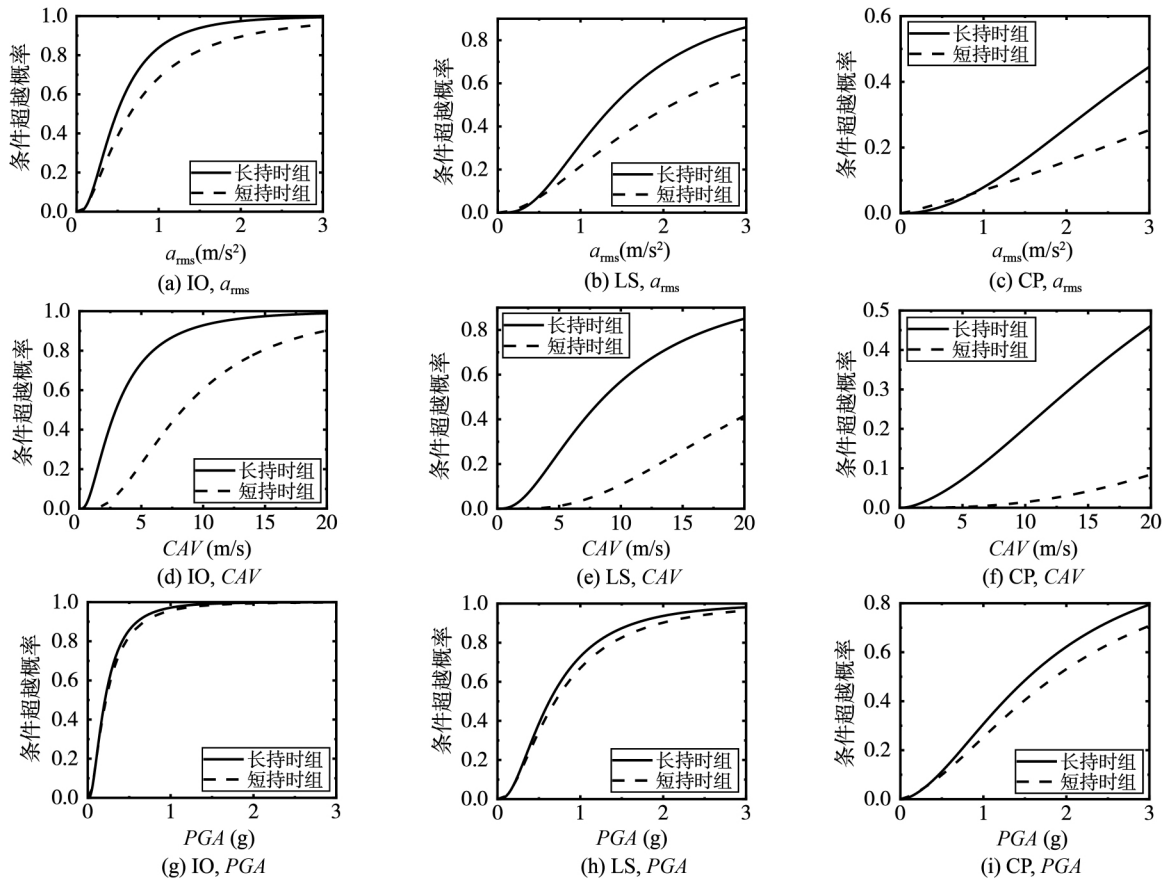


图 14 长、短持时作用下 10 层结构地震易损性曲线对比

Fig. 14 Comparison of fragility curves of the 10-story structure under long-and short-duration ground motion

表 2 长、短持时地震作用下 IO 极限状态 50% 超越概率对应的 IM_2 和 $S_a(T_1, 5\%)$
 Table 2 IM_2 and $S_a(T_1, 5\%)$ corresponding to 50% exceedance probability for IO limit state under long-and short-duration ground motion

结构	IM			
	$[S_a(T_1, 5\%), a_{rms}]$	$[S_a(T_1, 5\%), CAV]$	$[S_a(T_1, 5\%), PGA]$	$S_a(T_1, 5\%)^{[20]}$
5 层	0.53 (0.71)	3.17 (8.09)	0.24 (0.25)	0.27 (0.30)
8 层	0.51 (0.68)	3.00 (8.14)	0.22 (0.24)	0.25 (0.26)
10 层	0.50 (0.65)	2.86 (8.34)	0.22 (0.23)	0.18 (0.19)

表 3 长、短持时地震作用下 LS 极限状态 50% 超越概率对应的 IM_2 和 $S_a(T_1, 5\%)$
 Table 3 IM_2 and $S_a(T_1, 5\%)$ corresponding to 50% exceedance probability for LS limits state under long-and short-duration ground motion

结构	IM			
	$[S_a(T_1, 5\%), a_{rms}]$	$[S_a(T_1, 5\%), CAV]$	$[S_a(T_1, 5\%), PGA]$	$S_a(T_1, 5\%)^{[20]}$
5 层	1.12 (1.74)	7.06 (17.78)	0.51 (0.57)	0.41 (0.45)
8 层	1.28 (1.99)	7.89 (21.11)	0.58 (0.65)	0.42 (0.48)
10 层	1.41 (2.10)	8.67 (23.01)	0.63 (0.70)	0.40 (0.43)

表 4 长、短持时作用下 CP 极限状态 50% 超越概率对应的 IM_2 或 $S_a(T_1, 5\%)$
 Table 4 IM_2 and $S_a(T_1, 5\%)$ corresponding to 50% exceedance probability for CP limit state under long-and short-duration ground motion

结构	IM			
	$[S_a(T_1, 5\%), a_{rms}]$	$[S_a(T_1, 5\%), CAV]$	$[S_a(T_1, 5\%), PGA]$	$S_a(T_1, 5\%)^{[20]}$
5 层	2.04 (3.81)	13.60 (32.34)	0.98 (1.17)	0.50 (0.57)
8 层	2.47 (4.99)	15.65 (42.42)	1.14 (1.52)	0.53 (0.66)
10 层	3.33 (6.03)	21.8 (53.71)	1.55 (1.87)	0.57 (0.67)

表 2 ~ 表 4 结果表明, 在本文考虑的强度范围内, 在结构不同极限状态超越概率为 50% 的条件下, 使用向量型强度指标 $IM = [S_a(T_1, 5\%), a_{rms}]$ 和 $IM = [S_a(T_1, 5\%), CAV]$ 作为预测变量时, 长持时地震动的 IM_2 比短持时地震动的 IM_2 低 23.1% ~ 65.7%, 而仅使用 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为预测变量时, 长持时地震动的 IM 比短持时地震动的 IM 低 3.8% ~ 19.7%。这一结果表明: 相比于短持时地震动, 长持时地震动可以在更低的强度水平引起更高的结构损伤超越概率, 因此有必要在地震易损性分析中明确考虑地震动持时特性, 避免低估结构的损伤风险。此外, 相比于采用 $IM = [S_a(T_1, 5\%), a_{rms}]$ 和 $IM = [S_a(T_1, 5\%), CAV]$ 为预测变量, 选用 $IM = [S_a(T_1, 5\%), PGA]$ 作为预测变量时, 长持时地震动的 IM_2 比短持时地震动的 IM_2 低 4% ~ 25%。这一结果表明: 地震动持时对结构易损性分析结果的影响与选择的地震动强度指标有关, 与能量相关的 IM_2 如 a_{rms} 、 CAV 可以更好地反映地震动持时的影响。

5 结论

本文提出了一种条带-云图法来计算结构的地震易损性。该方法通过将条带法调幅后的时程分析结果进行离散化, 建立地震动持时相关参数与地震需求之间的关系。为了说明该方法的应用, 本文分别选取具有长、短持时特性的地震动记录各 140 条作为输入, 针对 3 个不同高度的钢筋混凝土框架结构进行了条带-云图法分析, 获得了可以考虑地震动持时影响的地震易损性曲线。主要结论如下:

(1) 条带-云图法可以在计算过程中引入向量型 IM , 为易损性分析提供更多的地震动特性信息, 如持时特性, 拓展了传统的条带法分析方法。这一方法可以从整体分析结构最大层间位移角的发展趋势, 获得较为可靠的对数线性关系, 增加了 IM_2 与结构损伤之间的相关性, 解决了传统条带法因倒塌点过多而无法建立合理的 IM_2 与结构损伤的相关关系的问题, 提高了概率地震需求模型的可靠性。

(2) 使用向量型 IM 可以有效考虑地震动持时对地震易损性的影响。相比于短持时地震动,长持时地震动可以在更低的强度水平引起更高的结构损伤超越概率。因此需要在易损性分析中明确考虑持时影响,避免低估结构损伤。

(3) 地震动持时对结构易损性分析结果的影响与选择的地震动强度指标有关,与能量相关的 IM_2 如 a_{rms} 、 CAV 可以更好地反映地震动持时的影响。

参考文献:

- [1] Hancock J, Bommer J J. A state-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(3): 827–845.
- [2] Chandramohan R, Baker J W, Deierlein G G. Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records [J]. *Earthquake Spectra*, 2015, 32(2): 927–950.
- [3] Raghunandan M, Liel A B. Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse [J]. *Structural Safety*, 2013, 41: 119–133.
- [4] 韩建平, 孙小云, 周颖. 基于规范谱拟合的人工地震动持时对 RC 框架结构抗倒塌能力影响[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(7): 121–126.
HAN Jianping, SUN Xiaoyun, ZHOU Ying. Effect of code-spectrum-matched artificial ground motion duration on collapse resistance capacity of RC frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(7): 121–126. (in Chinese)
- [5] 韩建平, 周帅帅. 考虑非结构构件损伤的钢筋混凝土框架建筑多维地震易损性分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(1): 39–48.
HAN Jianping, ZHOU Shuaishuai. Multi-dimensional seismic fragility analysis of reinforced concrete framed building considering damage of non-structural components[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(1): 39–48. (in Chinese)
- [6] 孙小云, 韩建平, 党育, 等. 地震动持时对考虑梁柱节点区不同破坏模式 RC 框架的地震易损性影响[J]. *工程力学*, 2018, 35(5): 193–203.
SUN Xiaoyun, HAN Jianping, DANG Yu, et al. Effect of ground motion duration on seismic fragility of RC frames with different beam column joint failure modes [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(5): 193–203. (in Chinese)
- [7] 孙小云. 地震动持时特性及其对 RC 框架结构非线性地震响应影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
SUN Xiaoyun. Investigation on duration characteristic of ground motion and its effect on nonlinear seismic response of RC frames structures [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] 孙小云, 韩建平. 考虑梁柱节点区非弹性变形评估地震动持时对 RC 框架震后可修复性的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(2): 95–105.
SUN Xiaoyun, HAN Jianping. Effect of ground motion duration on post-earthquake reparability of RC frame considering inelastic deformation of beam-column joint [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2018, 38(2): 95–105. (in Chinese)
- [9] Riddell R. On Ground Motion Intensity Indices [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 147–173.
- [10] Kiani J, Camp C, Pezeshk S. Role of conditioning intensity measure in the influence of ground motion duration on the structural response [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 104: 408–417.
- [11] Shome N, Cornell C A, Bazzurro P et al. Earthquakes, records, and nonlinear responses [J]. *Earthquake Spectra*, 1998, 14(3): 469–500.
- [12] Hwang H H, Huo J R. Generation of hazard-consistent fragility curves [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1994, 13(5): 345–354.
- [13] Bazzurro P. Probabilistic seismic demand analysis [D]. Stanford: Stanford University, 1999.
- [14] Ellingwood B R. Earthquake risk assessment of building structures [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2001, 74(3): 251–262.
- [15] 吕大刚, 于晓辉. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险理论研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(10): 41–48.
LÜ Dagang, YU Xiaohui. Theoretical study of probabilistic seismic risk assessment based on analytical functions of seismic fragility [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(10): 41–48. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 于晓辉, 吕大刚. 基于云图-一条带法的概率地震需求分析与地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(6): 68–76.
YU Xiaohui, LÜ Dagang. Probabilistic seismic demand analysis and seismic fragility analysis based on a cloud-stripe method [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(6): 68–76. (in Chinese)
- [18] 温瑞智, 尹建华, 冀昆, 等. 结构需求概率危险性分析中强震记录选取研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(增刊2): 35–40. #7.
WEN Ruizhi, YIN Jianhua, JI Kun, et al. The research of strong ground-motion records selection for estimation the structural demand hazard curve [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(S2): 35–40+47. (in Chinese)
- [19] 于晓辉. 钢筋混凝土框架结构的概率地震易损性与风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
YU Xiaohui. Probabilistic seismic fragility and risk analysis of reinforced concrete frame structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [20] 吕大刚, 金国庆, 于晓辉. 考虑倒塌概率修正的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(9): 26–32.

- LÜ Dagang , JIN Guoqing , YU Xiaohui. Modified seismic fragility analysis of reinforced concrete frame structures in consideration of collapse probability [J]. *Journal of Building Structures* , 2016 , 37(9) : 26 - 32. (in Chinese)
- [21] Bommer J J , Martinez-Pereira A. The effective duration of earthquake strong motion [J]. *Journal of Earthquake Engineering* , 1999 , 3(2) : 127 - 172.
- [22] 韩建平,程诗焱,于晓辉,等. 地震动持时对 RC 框架结构易损性与抗震性能影响[J/OL]. *建筑结构学报* , 1 - 12 [2020 - 03 - 11]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.0677>.
- HAN Jianping , CHENG Shiyan , YU Xiaohui , et al. Effect of ground motion duration on seismic fragility of RC frame structures [J/OL]. *Journal of Building Structures* , 1 - 12 [2020 - 03 - 11]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.0677>. (in Chinese)
- [23] Baker J W , Cornell C A. Vector-valued ground motion intensity measures for probabilistic seismic demand analysis [R]. PEER Report 2006/08. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center , University of California , Berkeley , 2006.
- [24] Housner G W , Jennings P C. Generation of artificial earthquakes [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division* , 1964 , 90(1) : 113 - 152.
- [25] O' Hara T F , Jacobson J P. Standardization of the cumulative absolute velocity [R]. EPRI-TR-100082. Palo Alto , CA: Electric Power Research Institute , 1991.
- [26] FEMA 273. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington D. C. : Federal Emergency Management Agency , 1997.
- [27] FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington D. C. : Federal Emergency Management Agency , 2000.