

文章编号: 1000-4750(2021)12-0107-11

基于 BP 神经网络的 RC 框架结构地震易损性曲面分析: 考虑地震动强度和持时的影响

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, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学防震减灾研究所, 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, 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, 哈尔滨 150090)

摘 要: 与短持时地震动相比, 长持时地震动会加剧结构的损伤, 增加结构的失效概率, 因此有必要更充分地研究地震动持时特性对结构地震易损性分析结果的影响。该文提出了一种基于 BP 神经网络的地震易损性曲面分析方法, 使用神经网络模型, 综合考虑地震动强度和持时特性对结构地震需求的影响, 并进行地震易损性分析, 得到不同损伤水平下考虑地震动持时特性的结构易损性曲面。选用 3 个不同高度的钢筋混凝土框架结构为研究对象, 分别选择具有长、短持时特性的 2 组地震动记录为输入, 采用 BP 神经网络模型建立地震动强度指标与结构响应间的关系, 在此基础上得到目标地震易损性曲面, 并对该方法的有效性进行讨论。分析结果表明, 研究建立的 BP 神经网络模型精度较高, 依据该方法可得到可信的损伤概率分析结果。相比于传统方法, 神经网络可以更为有效和准确地建立持时与结构损伤的相关关系, 得到考虑持时特性的易损性分析结果。该文的方法亦可进一步拓展, 将更多地震动特性纳入地震易损性分析过程, 具有明确的应用前景。

关键词: 地震动持时; BP 神经网络; 向量型强度指标; 地震易损性; 钢筋混凝土框架结构

中图分类号: TU375 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0837

SEISMIC FRAGILITY SURFACE ANALYSIS OF RC FRAME STRUCTURES BASED ON BP NEURAL NETWORKS: ACCOUNTING FOR THE EFFECTS OF GROUND MOTION INTENSITY AND DURATION

CHENG Shi-yan^{1,2}, HAN Jian-ping^{1,2}, YU Xiao-hui^{3,4}, LÜ Da-gang^{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: Comparing with short-duration ground motions, long-duration ground motions may intensify the damage and increase the failure probability of structures. Therefore, it is necessary to thoroughly investigate the influence of ground motion duration characteristics on the seismic fragility analysis results. A seismic fragility surface analysis approach based on back propagation (BP) artificial neural networks was proposed. It can account for the effect of both ground motion intensity and duration. Seismic fragility analysis was conducted to get the fragility surfaces under different damage levels. Three reinforced concrete frame structures with different heights

收稿日期: 2020-11-21; 修改日期: 2021-05-17

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项目(IRT_17R51)

通讯作者: 韩建平(1970—), 男, 甘肃宕昌人, 教授, 博士, 博导, 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).

作者简介: 程诗焱(1993—), 女, 宁夏银川人, 硕士生, 主要从事结构抗震研究 (E-mail: csyy106@163.com);

于晓辉(1982—), 男, 辽宁丹东人, 副研究员, 博士, 硕导, 主要从事地震易损性和概率风险分析研究 (E-mail: yxhhit@126.com);

吕大刚(1970—), 男, 黑龙江铁力人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构可靠度和地震工程研究 (E-mail: ludagang@hit.edu.cn).

were taken as the study cases. Long- and short-duration record sets were selected as the inputs. BP neural network models were employed to build the relationship between the ground motion intensity measures and structural responses, and the seismic fragility surfaces of the investigated structures were obtained. The validity of the proposed approach was discussed. The analysis results show that the accuracy of the established BP neural network model is high. It indicates that the fragility analysis results by this approach is reliable. Comparing with the conventional procedures, the neural network is capable of building more effective correlation models between the ground motion duration and structural damage to obtain fragility analysis results that account for ground motion duration. This approach can be further expanded to include more ground motion characteristics into the program for seismic fragility analysis. It has a definite application prospect.

Key words: ground motion duration; BP neural networks; vector-valued intensity measures; seismic fragility; reinforced concrete frame structures

已有研究表明: 持时对结构损伤的影响显著^[1-2]。Chandramohan 等^[3]、Raghunandan 等^[4]的研究表明, 地震动持时会加速结构损伤的发展, 降低结构滞回耗能能力, 增加了结构倒塌的风险。韩建平等^[5]和孙小云等^[6-8]的研究表明, 具有较长持时特性的地震动会使混凝土框架结构的节点发生严重破坏。基于上述研究, 在结构抗震分析时忽略地震动持时的影响很可能会导致由地震动持时特性引起的明显结构抗震设计与评估结果偏差, 使处于活跃的俯冲地震带(该区域常发生具有较长持时特性的地震事件)附近的结构具有低于预期的安全裕度。因此, 需要进一步讨论如何在结构损伤分析中明确考虑地震动持时特性。

地震易损性分析能够量化结构系统的安全裕度, 并全面地描述地震事件与结构中存在的确定性, 是基于性能地震工程的重要环节之一。于晓辉等^[9]提出了条带-云图易损性分析方法, 用于提高传统云图法的运算能力。Baker^[10]分别针对云图、IDA 和条带法提出了向量型易损性分析方法, 在谱加速度的基础上进一步引入了谱型参数。尽管目前已有许多关于易损性方法的讨论及应用^[11-17], 但涉及的分析方法都要求数据具有较好的稳定性, 而具有离散性的持时数据则无法使用这些方法建立可靠概率模型, 故无法将地震动持时特性定量地考虑到易损性分析中。

近年来, 人工神经网络开始得到了地震工程研究人员的关注。Mitropoulou 等^[18]、Wang 等^[19]使用人工神经网络 (artificial neural networks, ANN) 建立了地震动强度指标 (intensity measure, IM) 与结构损伤指标 (damage measure, DM) 的关系。Papadrakakis 等^[20]提出了基于 ANN 的蒙特卡洛模拟方法, 用于大型混凝土大坝的易损性评估。人

工神经网络可以进行基于大样本的数据分析, 为进一步在易损性分析中考虑地震动持时特性提供了思路。

综上, 本文提出了一种基于 BP(back propagation) 神经网络的地震易损性分析方法, 该方法可以合理考虑地震动持时特性的影响, 获得同时包含地震动持时参数与地震动强度参数信息的地震易损性曲面。分别选用 2 组具有长、短持时特性的地震动记录作为输入, 以 5 层、8 层、10 层钢筋混凝土框架结构作为研究对象, 使用 BP 神经网络建立地震动强度、持时与结构响应间的相关关系并进行结构易损性分析, 获得了不同损伤水平下的地震易损性曲面。进而以此为基础, 对分析方法的有效性进行了讨论。

1 考虑地震动持时的地震动记录选取

地震动持时的定义较多, 包括重要持时 (D_s)、括号持时 (D_b)、一致持时 (D_u) 及有效持时等。对于同一条地震动记录而言, 其调幅前后的 D_b 和 D_u 值并不唯一, 这会进一步增加地震动持时的不确定性^[2]。相比之下, 基于 Arias 强度^[21]的重要持时仅表示地震动加速度时程的累积能量, 地震动加速度幅值对其影响可忽略不计, 具有较好的鲁棒性^[3]。同时, 5%~75% 重要持时 (D_{s5-75}) 在地震工程的研究中应用更为广泛^[3]。

依据文献 [3] 的研究结果, 本文选用 D_{s5-75} 作为地震动持时指标, 使用条件平均谱 (conditional mean spectrum, CMS) 为目标谱, 结合地震动持时特性, 从 PEER NGA-West2、USGS 工程强震数据中心 (Center for Engineering Strong Motion Data, US Geological Survey)、日本 NIED 强震动观测台网 (Strong-motion Seismograph Networks, National

Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)、汶川地震动数据库以及墨西哥地震动数据库中挑选地震动记录^[3]。CMS 的构建方法参见文献^[3, 22]。

文献^[3]收集了全球强震的 2000 组水平分量地震动记录,建立了所有记录的 D_{s5-75} 直方分布图并综合分析,建议若地震动记录两个水平分量中至少有一个分量的 D_{s5-75} 大于 25 s 则认定为长持时地震动记录。采用单个分量的 D_{s5-75} 而不是两个分量 D_{s5-75} 的几何平均,是因为这样做会把一些可行的长持时记录过滤掉。阈值的选取既要考虑持时要长到可以观察其影响,但也不能太长以致于可选的长持时地震动记录数量太少。本文借鉴这一建议,选用 25 s 作为界定长、短持时地震动记录的阈值。

由于地震动幅值和频谱特性会增加易损性分析结果的不确定性,因此本文对 2 组地震动记录进行了谱匹配^[3],以确保每条长持时地震动记录有与其谱型、频率相匹配的短持时地震动记录。该处理方法、误差控制以及调整系数详见文献^[3]。

最终选取 140 条具有长持时特性的地震动记录和 140 条具有短持时特性的地震动记录,地震动信息详见文献^[23]。谱匹配后两组地震动记录的反应谱如图 1 所示,地震动记录的 D_{s5-75} 分布如图 2 所示。

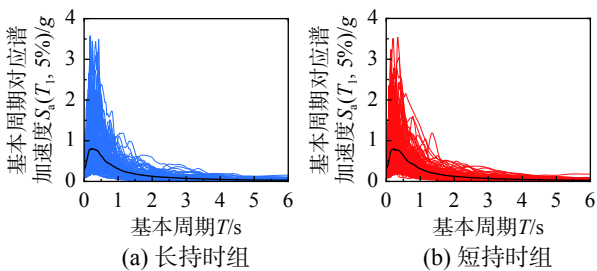


图 1 谱匹配后地震动记录的加速度反应谱
Fig. 1 Spectral acceleration of spectrally matched ground motion records

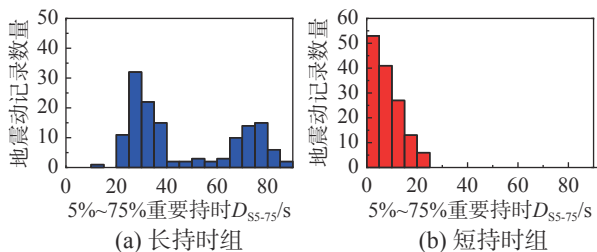
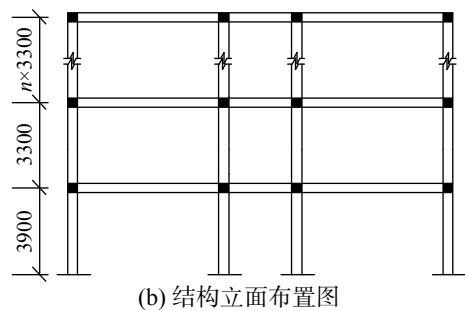
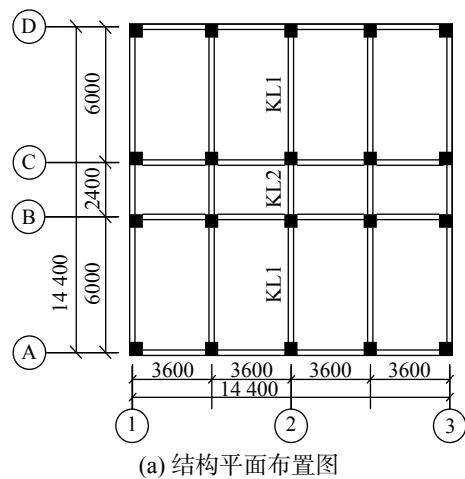


图 2 谱匹配后地震动记录的 D_{s5-75} 分布
Fig. 2 D_{s5-75} distribution of spectrally matched ground motion records

2 RC 框架结构的设计及建模

本文选取 5 层、8 层、10 层 RC 框架结构为研究对象^[24]。5 层 RC 框架结构设防烈度为 7 度,基本设计加速度为 0.15 g; 8 层 RC 框架结构设防烈度为 8 度,基本设计加速度为 0.2 g, 10 层 RC 框架结构设防烈度为 8 度,基本设计加速度为 0.2 g。三个结构采用相同的设计基本资料:基本风压 0.4 kN/m²;地面粗糙度 C 类;基本雪压 0.30 kN/m²;标准层活荷载 2.0 kN/m²;标准层恒荷载 4.5 kN/m²;屋面为不上人屋面,楼板厚 120 mm,屋面恒荷载为 7.0 kN/m²;设计地震动分组为第 1 组, II 类设计场地,场地特征周期为 0.35 s。

梁、柱钢筋选用 HRB335,箍筋选用 HPB235; 5 层结构选用 C30 混凝土, 8 层结构选用 C35 混凝土, 10 层结构选用 C35 混凝土。三个结构的平面布置形式相同,选取 2 号轴线对应的一榀框架作为分析对象。结构平、立面布置如图 3 所示。结构主要梁柱配筋如图 4 所示,图中 5KZ 表示 5 层结构框架柱, 5KL1 表示 5 层结构 1 号框架梁, 5KL2 表示 5 层结构 2 号框架梁,其余编号依此类推。



注:图中 $n=3、6、8$, 分别对应 5 层、8 层、10 层 RC 框架结构
图 3 算例结构的平面及立面布置图
Fig. 3 Plan and elevation view of study cases

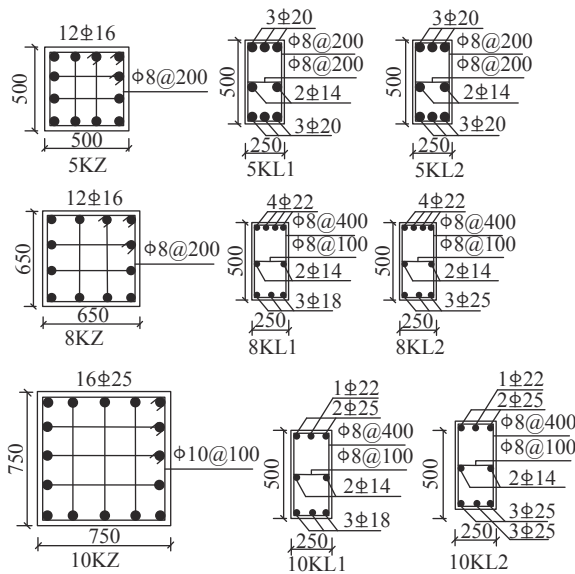


图4 梁、柱截面配筋图

Fig. 4 Reinforcement details of typical beams and columns

使用 OpenSees 作为分析平台构建结构有限元模型,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。建模基本原则为: 1) 考虑梁-柱节点为固接,无特殊定义; 2) 使用 Concrete01 材料模型模拟混凝土材料,考虑箍筋对核心区混凝土的约束效应,不考虑混凝土受拉情况; 3) 使用 Steel02 材料模型模拟钢筋; 4) 考虑了柱单元因自重引起的 $P-\Delta$ 效应; 5) 使用非线性梁柱单元模拟结构非倒塌破坏。

3 基于 BP 神经网络的地震易损性分析

向量型 IM 可以提供更多地震动信息,从而提高结构损伤分析结果的准确性,降低因忽略地震动特性引起的结果偏差。故本文使用向量型 $IM(IM=[IM_1, IM_2])$ 进行易损性分析,其中 IM_1 为主参数, IM_2 为第二参数。

3.1 传统的基于向量型 IM 的地震易损性分析方法

对于条带法,传统的基于向量型 IM 的易损性分析是以 $IM_1=im_1$ 为条件,将 IM_2 作为预测变量进行条件概率分析,即使用逻辑回归计算结构倒塌概率,通过线性回归建立非倒塌结构响应预测模型^[10]。倒塌概率模型如式 (1) 所示:

$$P(C|IM_1 = im_1, IM_2 = im_2) = \frac{e^{a+bim_2}}{1 + e^{a+bim_2}} \quad (1)$$

式中: a 、 b 为经逻辑回归分析得到的系数,受 IM_1 变化的影响; C 为指示变量, 0 表示结构未倒塌, 1 表示结构发生倒塌。

传统方法使用线性回归的方法将 IM_2 引入结构损伤分析^[10]。对 $IM_1=im_1$ 条带,建立 IM_2 与结构损伤需求 D 的关系:

$$\ln D = c \ln IM_2 + z + e \quad (2)$$

式中: c 、 z 为系数; e 为残差。

需要注意的是,上述参数需要随 IM_1 的变化重新估算。在此基础上,结构非倒塌状态的条件超越概率可表示为:

$$P(D > d | im_1, im_2, NC) = \Phi\left(\frac{\ln D - \ln d}{\sqrt{\text{Var}[e]}}\right) \quad (3)$$

式中: d 表示结构损伤水平; $\Phi(\cdot)$ 表示标准正态分布。

这一方法要求数据具有较好的稳定性,离散性较大的数据无法使用该方法建立可靠的线性回归模型。

3.2 基于 BP 神经网络的地震易损性分析方法

BP 神经网络通过寻找输入与输出间的最佳关系建立网络模型,其数学意义及算法步骤明确,被广泛应用于概率统计分析领域。研究使用 BP 神经网络建立 IM 与结构损伤需求 D 的关系模型,为便于表述,记在 $IM_1=im_1$, $IM_2=im_2$ 条件下网络模型的输出为 $D_{ANN,i} | im_1, im_2$ 。

基于 BP 神经网络的地震易损性函数为:

$$P(D \geq d | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2) = \Phi\left(\frac{\ln(D_{ANN,i} | im_1, im_2) - \ln d}{\beta_D}\right) \quad (4)$$

式中: $P(D \geq d | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2)$ 表示引起 d 损伤水平的条件超越概率; β_D 表示对数标准差,其表达式为:

$$\beta_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\ln D_i | im_1, im_2)_i - \ln(D_{ANN,i} | im_1, im_2)]^2}{N-2}} \quad (5)$$

式中: D_i 表示当 $IM_1=im_1$ 、 $IM_2=im_2$ 时的结构损伤需求参数; N 表示输入的地震动记录的数量。

本文使用逻辑回归计算了算例结构的倒塌概率:

$$P(C | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2) = \frac{e^{\beta_1 im_1 + \beta_2 im_2 + \beta_3}}{1 + e^{\beta_1 im_1 + \beta_2 im_2 + \beta_3}} \quad (6)$$

式中, β_1 、 β_2 和 β_3 是对统计结果进行逻辑回归分析得到的相关系数。

依据全概率定理对式 (4) 进行了倒塌修正^[25],考虑倒塌概率的易损性函数模型如下:

$$P(D \geq d | IM_1 = im_1, IM_2 = im_2) = \Phi\left(\frac{\ln(D_{ANN,i} | im_1, im_2) - \ln d}{\beta_D}\right) \times [1 - P(C | im_1, im_2)] + P(C | im_1, im_2) \quad (7)$$

3.3 方法对比

由于结构基本周期 T_1 对应谱加速度 $S_a(T_1, 5\%)$ 在工程领域应用广泛^[10]，且具有很好的有效性及充分性^[26]，故选择 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为主参数 IM_1 。5层、8层和10层RC框架结构的 T_1 分别为0.774 s、1.187 s和1.460 s。

重要持时仅表示时间，不反映地震动记录的强度且具有不可预测性，因此很难建立 D_{55-75} 与 D 的相关关系。此外，Riddell^[27] 的研究表明与能量相关的强度指标可用于反映持时特性，故本文选择均方根加速度 a_{rms} ^[28] 作为第二参数 IM_2 。综上，使用 $IM=[S_a(T_1, 5\%), a_{rms}]$ 作为地震动强度指标，其中 a_{rms} 为：

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt} \quad (8)$$

式中： $a(t)$ 为时刻 t 的地震动加速度； t_1 和 t_2 分别为强震段始、末时刻。

易损性分析中，强度指标与结构损伤需求的关系模型决定了分析结果的准确性，也是区别不同分析方法的标志之一。本节通过对比两种方法构建的关系模型进一步讨论BP神经网络在易损性分析中的应用，使用的数据均源自文献^[2]。限于篇幅，在此列出8层结构 $S_a(T_1, 5\%)=0.29 g$ 、 $S_a(T_1, 5\%)=0.67 g$ 和 $S_a(T_1, 5\%)=0.91 g$ 条带下^[2] 的对数线性回归结果，如图5~图7所示。

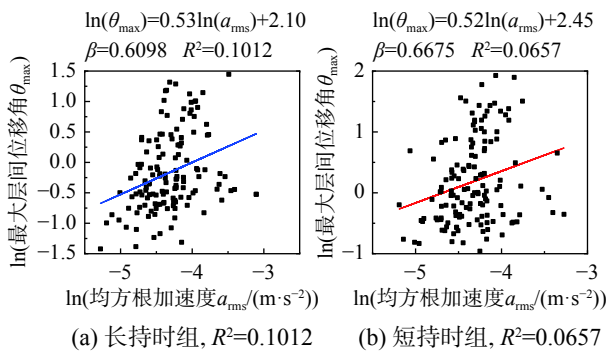


图5 8层结构 $S_a(T_1, 5\%)=0.29 g$ 条带线性回归结果
Fig. 5 Linear regression results of 8-story structure of $S_a(T_1, 5\%)=0.29 g$

关于BP神经网络，Karsoliya^[29] 的研究表明，1层~2层隐含层足以解决工程中复杂的非线性问

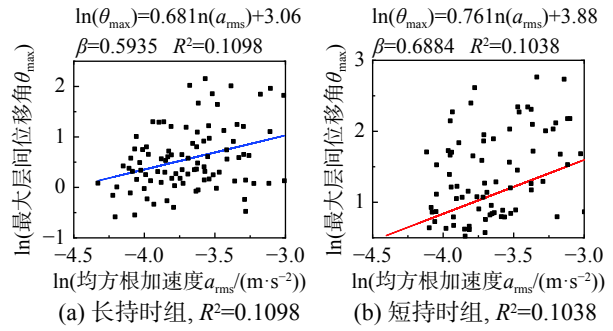


图6 8层结构 $S_a(T_1, 5\%)=0.67 g$ 条带线性回归结果
Fig. 6 Linear regression results of 8-story structure of $S_a(T_1, 5\%)=0.67 g$

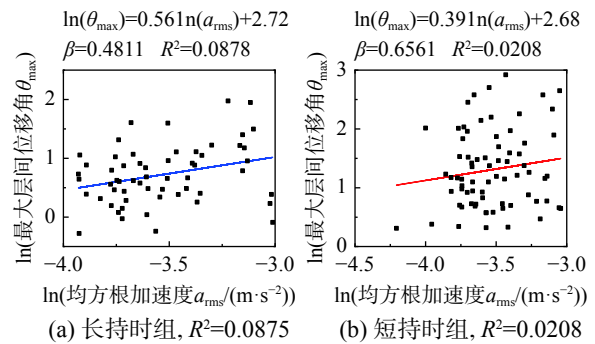


图7 8层结构 $S_a(T_1, 5\%)=0.91 g$ 条带线性回归结果
Fig. 7 Linear regression results of 8-story structure of $S_a(T_1, 5\%)=0.91 g$

题，对精度要求高的网络可设3层隐含层，但不建议使用4层隐含层，因其会导致网络发生局部最优的问题。目前仍未有普适的方法确定隐含层及其神经元数量，因为这些参数不仅受到输入层、输出层的影响，激活函数的复杂程度、神经网络的架构、训练算法和训练样本都会影响参数的选择^[29]。研究^[29-30] 建议在满足精度要求的前提下取最简单的网络结构，经调试确定网络参数。基于上述研究理论及网络调试结果，本文建立了3层（即含一个隐含层）神经网络，网络模型参数如下：

- 1) 输入层含2个神经元，输出层含1个神经元，隐含层含3个神经元；
- 2) 最大迭代步数为1000步；
- 3) 学习速率设置为0.005；
- 4) 误差容许值为0.001；
- 5) 动量常数设置为0.5。

由图8~图9可知，8层结构BP网络模型 R 值为0.8995~0.9321，而传统方法的 R^2 为0.0208~0.1038。通过对比可知，传统方法建立的模型的精度远低于BP神经网络的模型精度，其并不总能建立理想的关系模型。该方法要求数据具有较好的

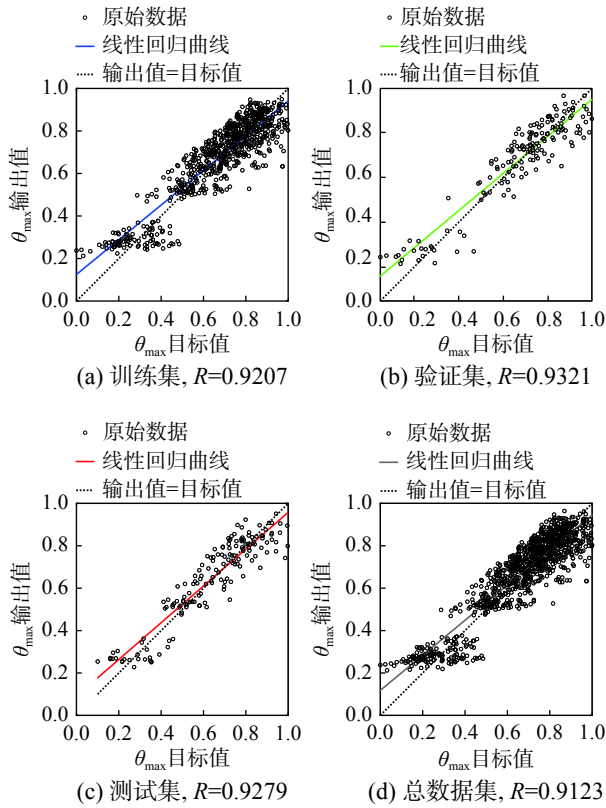


图8 长持时地震动输入下, 8层结构BP神经网络模型回归结果

Fig. 8 BP network model regression results of 8-story structure under long-duration ground motion

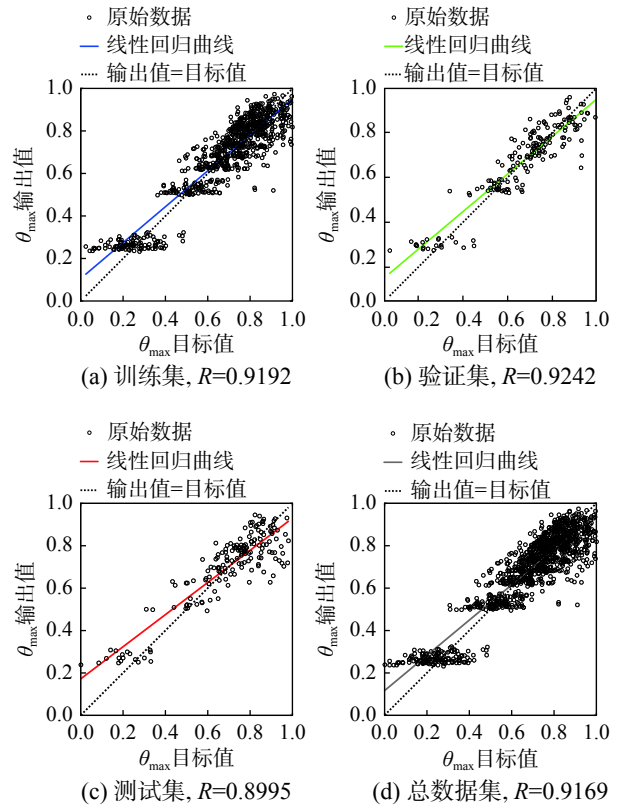


图9 短持时地震动输入下, 8层结构BP神经网络模型回归结果

Fig. 9 BP network model regression results of 8-story structure under short-duration ground motion

稳定性, 也因此限制了在易损性分析中考虑持时特性。而BP神经网络在回归分析中表现良好, 建立的关系模型可靠, 为考虑持时特性的损伤分析提供了可行方案。

4 地震易损性分析

基于文献 [2] 的数据进行易损性分析, 选取最大层间位移角 θ_{max} 作为损伤指标, 依据 FEMA273/356^[31-32] 确定了立即居住 (IO)、生命安全 (LS) 和

倒塌预防 (CP) 的极限状态定义值, 采用条带法进行结构时程分析。其余详细信息及结构响应、极限状态和持时关系的讨论详见文献 [2, 33]。

基于 3.2 节理论, 计算了长、短持时地震动输入下三个结构不同极限状态的易损性曲面, 分别如图 10~图 15 所示。由图 10~图 15 可见, 同一损伤水平下, 各结构长、短持时地震动输入下易损性曲面的形态差异显著。

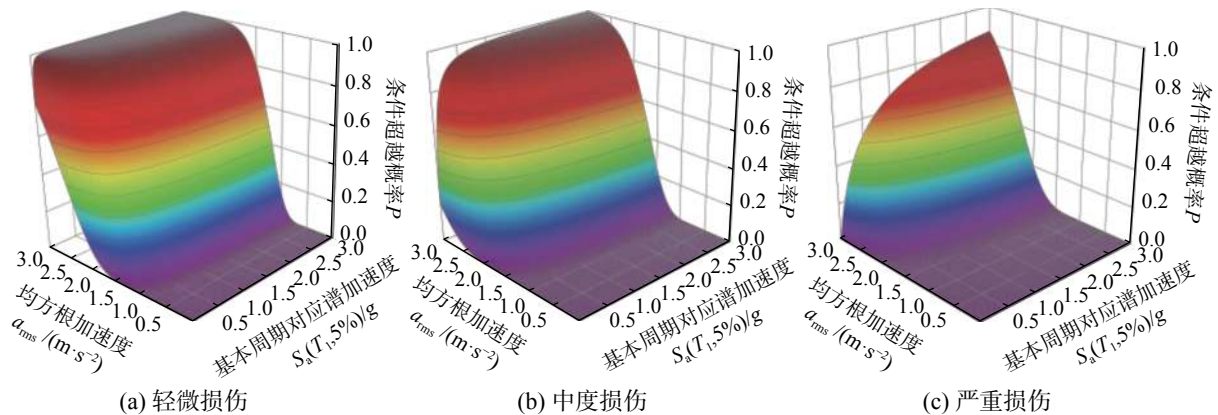


图10 长持时地震动输入下, 5层结构易损性曲面

Fig. 10 Fragility surfaces of 5-story structure under long-duration ground motions

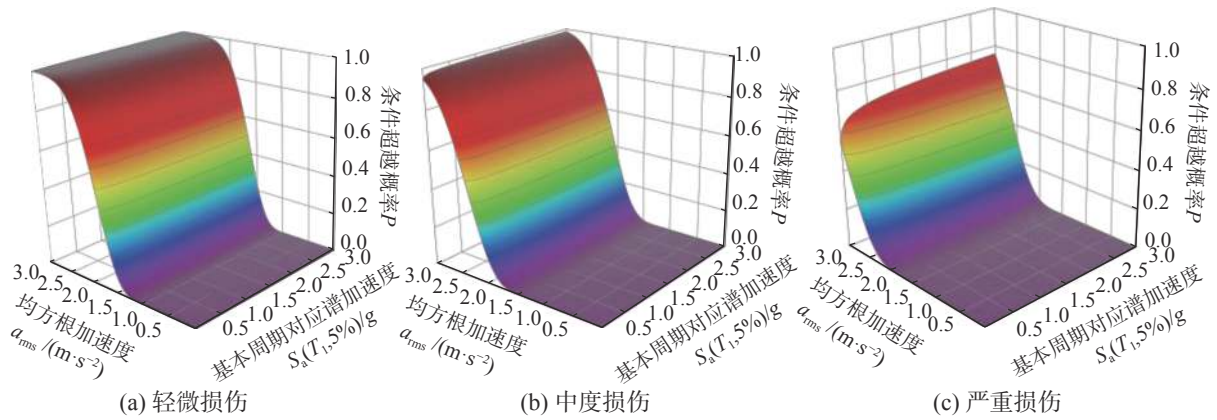


图 11 短历时地震动输入下, 5层结构易损性曲面

Fig. 11 Fragility surfaces of 5-story structure under short-duration ground motions

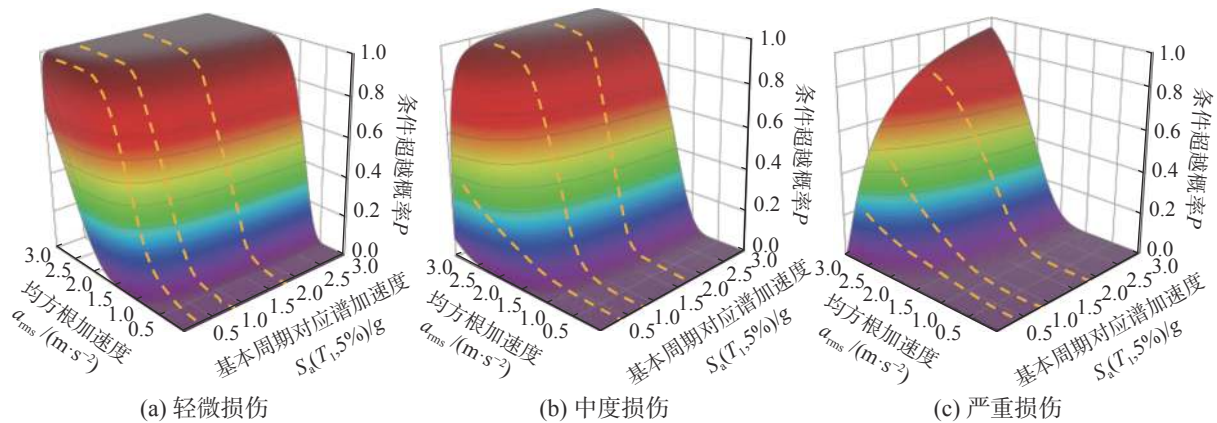


图 12 长历时地震动输入下, 8层结构易损性曲面

Fig. 12 Fragility surfaces of 8-story structure under long-duration ground motions

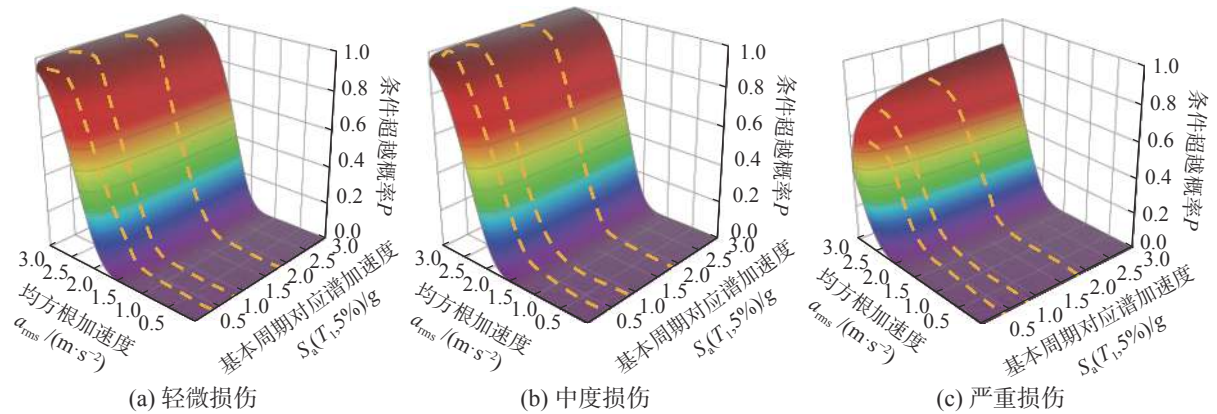


图 13 短历时地震动输入下, 8层结构易损性曲面

Fig. 13 Fragility surfaces of 8-story structure under short-duration ground motions

以 8 层结构为例, 进行具体分析。图 16、图 17 分别为图 12、图 13 易损性曲面在 a_{rms} -条件超越概率平面的投影曲线, 长、短历时概率曲线的整体发展趋势差异显著。图中短历时地震动输入下得到的条件超越概率曲线的分布集中, 不同 $S_a(T_1, 5\%)$ 条件下的损伤概率变化幅度平缓。与此相

比, 长历时地震动输入下得到的条件超越概率曲线的分布则较为分散, 不同 $S_a(T_1, 5\%)$ 条件下的损伤概率变化幅度大。这是因为长历时地震动对结构损伤的影响与地震动强度水平正相关。即当 $S_a(T_1, 5\%)$ 增长到一定水平后, 相比于短历时地震动, 长历时特性会加剧结构损伤的发展, 结构损

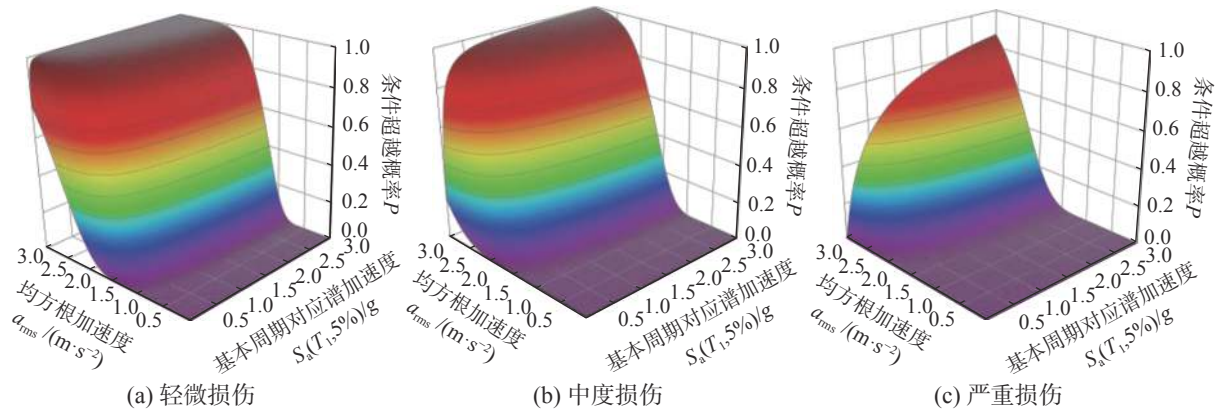


图 14 长历时地震动输入下, 10 层结构易损性曲面

Fig. 14 Fragility surfaces of 10-story structure under long-duration ground motions

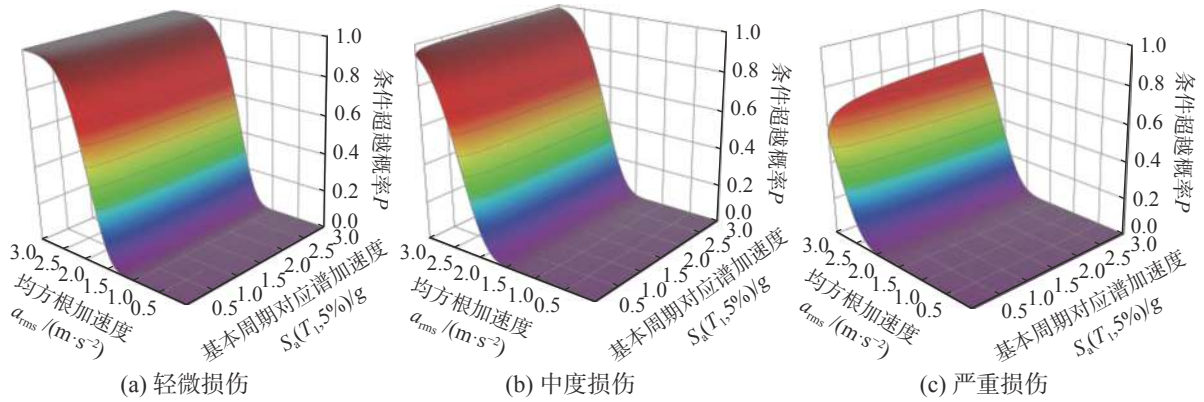


图 15 短历时地震动输入下, 10 层结构易损性曲面

Fig. 15 Fragility surfaces of 10-story structure under short-duration ground motions

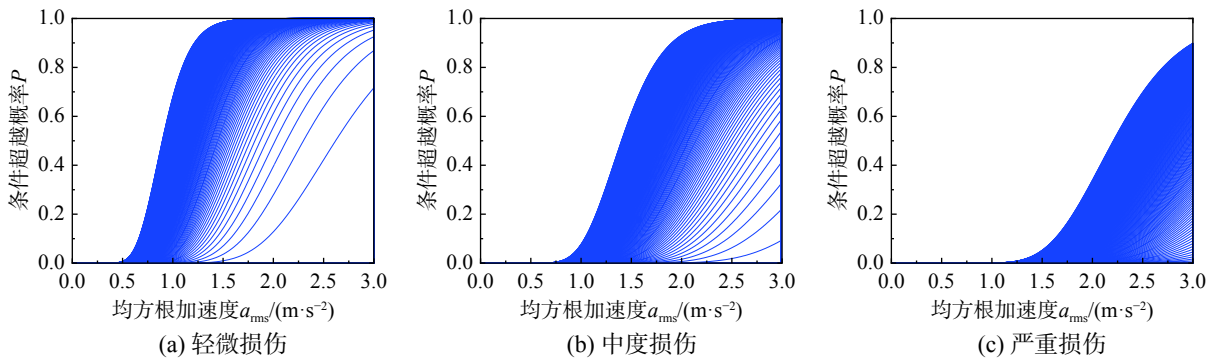


图 16 长历时地震动输入下, 8 层结构易损性曲线

Fig. 16 Fragility curves of 8-story structure under long-duration ground motions

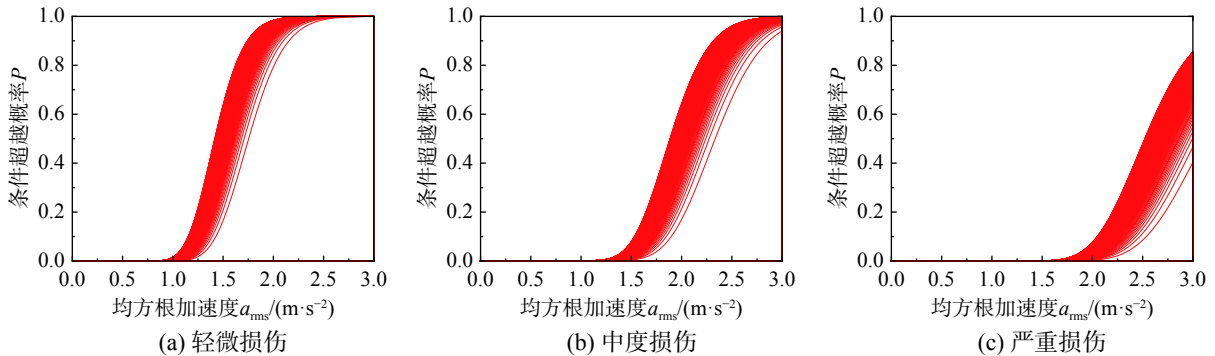


图 17 短历时地震动输入下, 8 层结构易损性曲线

Fig. 17 Fragility curves of 8-story structure under short-duration ground motion

伤风险也较之前有所提高,但在此之前结构的损伤程度由地震动强度水平控制。这一结果与前期研究结论一致^[2,33],可见BP神经网络能够抓取持时对结构响应的影响,建立IM与D的可靠回归模型,据其得到的分析结果是可信的。

对8层结构,分别选取 $S_a(T_1, 5\%)=0.2\text{ g}$ 、 $S_a(T_1, 5\%)=0.7\text{ g}$ 和 $S_a(T_1, 5\%)=1.7\text{ g}$ (图12~图13所示虚线处的数据)条件下的易损性曲线进行进一步讨论,如图18(a)、图18(b)和图18(c)所示。当 $S_a(T_1, 5\%)=0.2\text{ g}$ 时,对应于三种损伤状态,短持时曲线明显高于长持时曲线,此时无论 a_{rms} 取何

值,持时对结构损伤的影响都可忽略不计。当 $S_a(T_1, 5\%)=0.7\text{ g}$ 时,长持时地震动作用下的条件超越概率有不同程度的提高。当 $S_a(T_1, 5\%)=1.7\text{ g}$ 时,对应于三种损伤状态,长持时地震动输入下的条件超越概率基本均大于短持时地震动输入下的条件超越概率。当结构进入非线性阶段,在相同的地震动强度下,长持时地震动会引发更大的结构变形,结构损伤风险也相应提高。上述分析结果与前期研究结果一致^[2],即当地震动强度达到一定水平后,长持时地震动会使结构发生更严重的破坏。

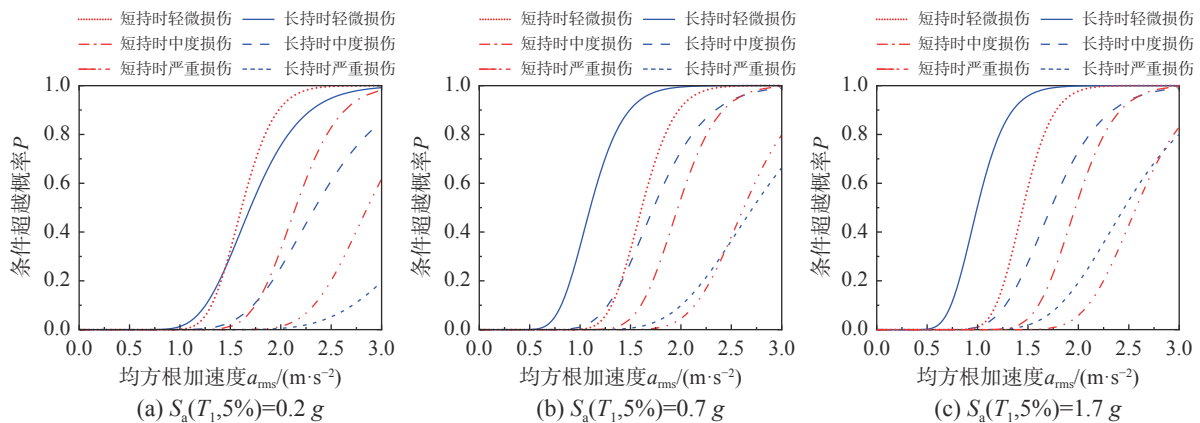


图18 不同 $S_a(T_1, 5\%)$ 时长、短持时地震动输入下8层结构易损性曲线

Fig. 18 Comparison of fragility curves of 8-story structure under long- and short-duration ground motions with different $S_a(T_1, 5\%)$ values

5 结论

本文提出了基于BP神经网络进行易损性分析的方法,该方法易于操作允许使用向量型强度指标作为参数,综合考虑多种地震动特性。研究结果表明:

(1) BP神经网络可以综合考虑地震动强度、持时特性对结构损伤风险的影响,建立可靠的相关关系。引入 a_{rms} 后,数据离散性增大,此时传统方法无法建立可靠的关系模型,亦无法得到可信的损伤分析结果。相比之下,BP神经网络模型在回归分析中表现良好,使用该方法得到的易损性曲面的变化趋势及规律与前期关于持时影响的研究结果一致,其较好的模型精度确保了损伤分析结果的可信度,具有工程应用价值。

(2) 持时对结构损伤的影响与地震动强度水平有关。只有当地震动强度达到一定水平时,才可在结构时程分析中观察到持时的影响,因此研究

中应选取具有足够强度水平的地震动作为输入进行结构时程分析。

参考文献:

- [1] Bommer J J, MartÍnez-Pereira A. The effective duration of earthquake strong motion [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 1999, 3(2): 127 – 172.
- [2] 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]. doi: <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)
- [3] 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.
- [4] Raghunandan M, Liel A B. Effect of ground motion

- duration on earthquake-induced structural collapse [J]. *Structural Safety*, 2013, 41: 119 – 133.
- [5] 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)
- [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] 于晓辉, 吕大刚. 基于云图-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)
- [10] Baker J W. Vector-valued ground motion intensity measures for probabilistic seismic demand analysis [D]. Stanford: Stanford University, 2005.
- [11] 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)
- [12] 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(5): 35 – 40, 47.
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(5): 35 – 40, 47. (in Chinese)
- [13] 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 Zhou, Yu Xiaohui, Lü Dagang. Fragility analysis and safety evaluation of reinforced concrete frame structures subjected to mainshock-aftershock earthquake sequences [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(11): 134 – 145. (in Chinese)
- [14] 刘亭亭, 于晓辉, 吕大刚. 地震动多元强度参数主成分与结构损伤的相关性分析[J]. *工程力学*, 2018, 35(11): 134 – 145.
Liu Tingting, Yu Xiaohui, Lü Dagang. Analysis of correlation between principal components of multivariate earthquake intensity measures and structural damage [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(11): 134 – 145. (in Chinese)
- [15] 吕大刚, 刘洋, 于晓辉. 第二代基于性能地震工程中的地震易损性模型及正逆概率风险分析[J]. *工程力学*, 2019, 36(9): 1 – 11, 24.
Lü Dagang, Liu Yang, Yu Xiaohui. Seismic fragility models and forward-backward probabilistic risk analysis in second-generation performance-based earthquake engineering [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(9): 1 – 11, 24. (in Chinese)
- [16] 吕大刚, 代旷宇, 于晓辉, 等. FRP加固非延性RC框架结构的地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2017, 34(增刊 1): 49 – 53, 70.
Lü Dagang, Dai Kuangyu, Yu Xiaohui. Seismic fragility analysis on non-ductile RC frame structures retrofitted with FRP [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(Suppl 1): 49 – 53, 70. (in Chinese)
- [17] 于晓辉, 吕大刚. HAZUS相容的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(3): 152 – 160.
Yu Xiaohui, Lü Dagang. HAZUS-compatible seismic fragility analysis for RC frame structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(3): 152 – 160. (in Chinese)
- [18] Mitropoulou C C, Papadrakakis M. Developing fragility curves based on neural network IDA predictions [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(12): 3409 – 3421.
- [19] Wang Z, Pedroni N, Zentner I, et al. Seismic fragility analysis with artificial neural networks: Application to nuclear power plant equipment [J]. *Engineering Structures*, 2018, 162: 213 – 225.
- [20] Papadrakakis M, Papadopoulos V, Lagaros N D, et al. Vulnerability analysis of large concrete dams using the continuum strong discontinuity approach and neural networks [J]. *Structural Safety*, 2008, 30(3): 217 – 235.
- [21] Arias A. A measure of earthquake intensity [M]// Hansen R J. Seismic design of nuclear power plants. Cambridge: MIT Press, 1970: 438 – 483.
- [22] Baker J W. Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection [J]. *Journal of Structural Engineering*,

- 2011, 137(3): 322 – 331.
- [23] 程诗焱. 考虑地震动持时影响的RC框架结构易损性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
Cheng Shiyen. Research on seismic fragility analysis of RC frame structures considering the effect of ground motion duration [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 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)
- [26] Xu C, Wen Z. Evaluation of seismic fragility of RC frame structure using vector-valued intensity measures [C]// Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal: International Association for Earthquake Engineering, 2012.
- [27] Riddell R. On Ground motion intensity indices [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 147 – 173.
- [28] Housner G W, Jennings P C. Generation of artificial earthquakes [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1964, 90(1): 113 – 152.
- [29] Karsoliya S. Approximating number of hidden layer neurons in multiple hidden layer BPNN architecture [J]. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2012, 3(6): 714 – 717.
- [30] Boger Z, Guterman H. Knowledge extraction from artificial neural network models [C]// 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation, Orlando, FL: 1997, 4: 3030 – 3035.
- [31] FEMA 273. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington D. C. : Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [32] FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington D. C. : Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [33] 程诗焱, 韩建平, 于晓辉, 等. 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[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(5): 107 – 117.
Cheng Shiyen, Han Jianping, Yu Xiaohui, et al. Investigation on effect of ground motion duration on seismic fragility of structures based on stripe-cloud approach [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(5): 107 – 117. (in Chinese)

(上接第 106 页)

- [20] Tran V H, Vincens E, Morel J C, et al. 2D-DEM modelling of the formwork removal of a rubble stone masonry bridge [J]. *Engineering Structures*, 2014, 75: 448 – 456.
- [21] Gannizzaro F, Panto B, Gaddemi S, et al. A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches [J]. *Engineering Structures*, 2018, 168: 243 – 256.
- [22] 闫炎, 管志川, 徐申奇, 等. 体积压裂过程中固井界面微环隙扩展的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 66 – 73.
Yan Yan, Guan Zhichuan, Xu Sheng, et al. Numerical simulation on micro-annulus propagation of cementing interface during hydraulic fracturing [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2020, 44(3): 66 – 73. (in Chinese)
- [23] Yin A Y, Yang X H, Zhang C C, et al. Three-dimensional heterogeneous fracture simulation of asphalt mixture under uniaxial tension with cohesive crack model [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 76: 103 – 117.
- [24] 杨贞军, 黄宇劫, 尧锋, 等. 基于粘结单元的三维随机习惯混凝土离散断裂模拟[J]. 工程力学, 2020, 37(8): 158 – 166.
Yang Zhenjun, Huang Yujie, Yao Feng, et al. Three-dimensional meso-scale cohesive fracture modeling of concrete using a python script in ABAQUS [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(8): 158 – 166. (in Chinese)
- [25] JTG D61—2005, 公路圬工桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
JTG D61—2005, Code for design of highway masonry bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)
- [26] Zhang Y, Tubaldi E, Macorini L, Izzuddin B A. Mesoscale partitioned modelling of masonry bridges allowing for arch-backfill interaction [J]. *Construction and Building Materials*. 2018, 173: 820 – 842.