



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2407155

引用格式:昌毅,杨仁镪,杨子健,等.基于峰值加速度和最大层间位移角的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析方法;以成都市钢筋混凝土框架结构为例[J].科学技术与工程,2025,25(21):9043-9051.

Chang Yi, Yang Renqiang, Yang Zijian, et al. Seismic vulnerability analysis method for reinforced concrete frame structures combined with grid technology and peak acceleration; take reinforced concrete frame structure in Chengdu as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(21): 9043-9051.

建筑科学

# 基于峰值加速度和最大层间位移角的钢筋混凝土 框架结构地震易损性分析方法:以成都市 钢筋混凝土框架结构为例

昌毅<sup>1,2</sup>, 杨仁镪<sup>1</sup>, 杨子健<sup>1</sup>, 李革新<sup>3</sup>

(1. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 南昌 330013; 2. 名古屋大学环境和建筑学研究所,  
名古屋 4648603; 3. 中交第三航务工程局有限公司湖南分公司, 株洲 412000)

**摘要** 以往的结构地震易损性分析一般是针对结构自身特性进行分析,很少结合研究区域的工程场地的差异性,忽略了城市内不同工程场地的位置差异性,因此,以成都市为研究区域,以三层钢筋混凝土框架结构为例,提出基于峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)和结构最大层间位移角 $\theta_{\max}$ 的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析方法。针对三层钢筋混凝土框架结构,该方法利用层间剪切模型进行动力时程分析,求得各地震响应下的 $\theta_{\max}$ ,再对 $\theta_{\max}$ 及其相对应的地震动进行对数线性拟合得到两者的关系式;针对成都市区域,该方法以成都市历史地震动资料为数据基础,结合PGA计算公式,得到成都市各个工程场地位置的PGA。进而,以最大层间位移角为结构损伤指标,以PGA为地震动强度指标,研究结构在充分运行、基本运行、生命安全和接近倒塌4个不同性能水准下的结构失效概率最高分别为94.1%、89.1%、74.7%和40.8%,且结构各性能水准的结构失效概率的总体变化趋势都是由西部向东部递减,因此可以适当加强西部地区结构的抗震构造要求,适当放宽东部地区的结构的抗震构造要求,以便节约经济成本。所提出的方法对降低地震灾害损失具有一定的应用价值,为建筑结构的抗震设计提供一定的理论依据。

**关键词** 峰值加速度;最大层间位移角;钢筋混凝土框架结构;结构失效概率;网格化;地震易损性分析  
中图分类号 TU375.4; 文献标志码 A

## Seismic Vulnerability Analysis Method for Reinforced Concrete Frame Structures Combined with Grid Technology and Peak Acceleration: Take Reinforced Concrete Frame Structure in Chengdu as an Example

CHANG Yi<sup>1,2</sup>, YANG Ren-qiang<sup>1</sup>, YANG Zi-jian<sup>1</sup>, LI Ge-xin<sup>3</sup>

(1. School of Civil & Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;  
2. Department of Environmental Engineering and Architecture, Nagoya University, Nagoya 4648603, Japan;  
3. CCCC Third Harbor Engineering Bureau Human Branch Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

**[Abstract]** The previous structural seismic vulnerability analysis is generally based on the characteristics of the structure itself, it is rare to combine with the differences of engineering sites in the study area, the location differences of different engineering sites within the city are ignored. Taking Chengdu City as the research area and the three-story reinforced concrete frame structure as an example, an analysis method for the seismic vulnerability of reinforced concrete frame structures based on peak ground acceleration (PGA) and the maximum inter-story displacement angle  $\theta_{\max}$  of the structure was proposed. For three-story reinforced concrete frame structures, this method conducts dynamic time-history analysis using the interlayer shear model to obtain  $\theta_{\max}$  under each seismic response. Then,

收稿日期: 2024-09-24 修订日期: 2025-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(52268020); 中国国家留学基金(202308360115); 中交第三航务工程局有限公司资助项目(2024-三峡锚建综-027)

第一作者: 昌毅(1979—), 男, 汉族, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。研究方向: 工程结构可靠性分析、抗震分析、结构全寿命设计与维护、工程防灾及结构安全等。E-mail: changyi000814@sina.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

logarithmic linear fitting is performed on  $\theta_{\max}$  and its corresponding ground motion to obtain the relationship between the two. For the Chengdu area, this method takes the historical ground motion data of Chengdu as the data basis and combines PGA calculation formula to obtain the PGA of each engineering site location in Chengdu. Furthermore, taking the maximum inter-layer displacement angle as the structural damage index and PGA as the ground motion intensity index, the highest structural failure probabilities of the structure under four different performance levels of full operation, basic operation, life safety and near collapse were studied, which were 94.1%, 89.1%, 74.7% and 40.8% respectively. Moreover, the overall changing trend of the structural failure probability at each performance level of the structure decreases from the west to the east. Therefore, the seismic construction requirements for structures in the western region can be appropriately strengthened, and those for structures in the eastern region can be appropriately relaxed, so as to save economic costs. The proposed method has certain application value in reducing the losses caused by earthquakes and provides a certain theoretical basis for the seismic design of building structures.

[**Keywords**] peak ground acceleration; maximum inter-story displacement angle; reinforced concrete frame structure; probability of structural failure; gridding; seismic vulnerability analysis

地震易损性分析是地震灾害风险分析的重要组成部分,可以预测结构在不同强度地震动作用下达到或超越某种破坏状态的概率<sup>[1]</sup>,从而为有效应对地震灾害、减轻地震灾害损失提供重要依据。钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架结构由于其良好的承载能力和稳定性,被广泛应用于各种建筑工程中。在未来遭遇地震时,为了对 RC 框架结构可能发生的破坏进行评估,对其地震易损性展开研究,对预测结构震后损伤状况和提高结构的抗震能力有着重要实际工程价值和意义<sup>[2]</sup>。

近年来,国内外学者对 RC 框架结构的地震易损性研究已取得大量成果。Dey 等<sup>[3]</sup>在不同的斜坡上建立 RC 建筑框架,通过研究结构的易损性参数,得出以外套管系统加固结构可有效降低结构易损性的结论;Gondaliya 等<sup>[4]</sup>通过一种机器学习法来评估 RC 框架结构的地震易损性,研究发现,基于分类和回归的算法可以较为精准地预测结构的损伤状态;刘巍<sup>[5]</sup>为研究不同高度 RC 框架结构抗倒塌能力,提出了基于结构抗倒塌储备系数(collapse margin ratio, CMR)的 RC 框架倒塌易损性的研究方法;于晓辉<sup>[6]</sup>以 RC 框架结构为例,开展了考虑极限状态模糊性的地震易损性分析。然而,这些研究都仅考虑结构自身特性,并未考虑 RC 框架结构所处地理位置的差异性,一般来说,不同的地理位置受到的地震影响不同,结构的地震易损性也会有所差异。在国内外的地震灾害风险分析相关研究中,通常与地震小区划相结合,从而将地震灾害风险更具体更直观地体现出来,也利于提高风险分析的可靠性。中国学者何芳芳<sup>[7]</sup>按照 5 km × 5 km 的距离对宝鸡市进行等距离划分,以分析宝鸡市的地震危险性;高山等<sup>[8]</sup>基于地震活动资料对大连市普湾新区规划区进行地震小区划,并进行了地震危险性分析。然而,这些方法对研究区域划分的单位网格距离或者小区划范围过大,可能使得分析结果不够精确。

现按照 500 m × 500 m 的网格对研究区域进行更为精细的划分,使得网格区域更符合实际工程中

的工程场地,进一步提高地震易损性分析的准确性。将地震易损性分析与网格化相结合,以基于峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)和最大层间位移角的 RC 框架结构为研究对象,提出结合网格化的 RC 框架结构地震易损性分析方法,并将该方法应用于成都市,验证该方法的有效性和可行性。

## 1 基于 PGA 和最大层间位移角的 RC 框架结构地震易损性分析方法

### 1.1 RC 框架结构地震易损性分析

#### 1.1.1 结构失效概率

结构失效概率表示建筑结构在地震作用下,考虑水平地震动强度参数因素的影响,结构损伤达到或超越结构某一性能水准的概率<sup>[9]</sup>,可由式(1)表示为

$$P_f = 1 - \Phi \left[ \frac{\ln(C) - \ln(DM)}{\sigma_d} \right] = \Phi \left[ \frac{\ln(DM) - \ln(C)}{\sigma_d} \right] \quad (1)$$

式(1)中: $P_f$ 为结构失效概率; $\Phi$ 为标准正态分布; $C$ 为各性能水准对应的结构损伤极限值; $DM$ 为结构损伤指标; $\sigma_d$ 为对数线性回归分析结果的标准差。一般而言,可用标准差  $\sigma_d$  来评判地震动强度参数的有效性,且当标准差  $\sigma_d$  越小,即分析结果的离散性越小,则表示该地震动强度参数的有效性越高。标准差  $\sigma_d$  的计算公式<sup>[9]</sup>为

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\ln(DM_i) - \ln(aIM^b)]^2}{N - 2}} \quad (2)$$

式(2)中: $DM_i$ 为第  $i$  个地震动作用下结构的最大损伤指数; $\sum_{i=1}^N [\ln(DM_i) - \ln(aIM^b)]^2$  为结构地震反应的残差平方和; $N$  为所选地震动数量; $IM$  为地震动强度参数; $a$  和  $b$  为回归系数。

#### 1.1.2 结合区域网格化的结构地震易损性

研究区域网格化,是指把研究区域按照等距离

网格划分成若干区域,从而让每个网格区域代表研究区域范围内的工程场地,进而通过分别对每个网格范围进行分析,最终得到受地震灾害影响的不同程度风险的区域,大大地提高了地震灾害风险分析的准确性。以成都市为例,按照 500 m×500 m 的网格大小进行划分,可得到 56 662 个网格,如图 1 所示。对各网格区域上的结构进行地震易损性分析,得到结构在整个成都地区的结构失效概率,结构在各个网格区域上的失效概率都有所不同,说明结构受到地震灾害影响的风险程度也不同。

在地震易损性分析中,建筑结构在地震作用下的损伤状况可由式(1)中的结构损伤指标 DM 进行评价,结构损伤指标与地震动强度参数成对数线性关系<sup>[10]</sup>,表达式为

$$\ln(\text{DM}) = \ln a + b \ln(\text{IM}) \quad (3)$$

地震动强度参数作为衡量地面运动剧烈程度的重要指标,不同的地震动强度参数对结构易损性分析结果将会有较大影响。采用峰值加速度(PGA)作为地震动强度参数<sup>[11]</sup>,地震动强度参数关系式<sup>[12]</sup>可表示为

$$\lg(\text{PGA}) = 2.387 + 0.645M - 2.416 \lg[R + 2.647 \exp(0.366M)] - k_1 R_1 - k_2 R_2 - k_3 R_3 \quad (4)$$

式(4)中:PGA 为峰值加速度;M 为地震震级;R 为震中距;R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>和 R<sub>3</sub>分别为地震波在基岩、硬土和软土中的传播距离;k<sub>1</sub>、k<sub>2</sub>和 k<sub>3</sub>分别为 3 种传播介质对地震波的吸收系数。

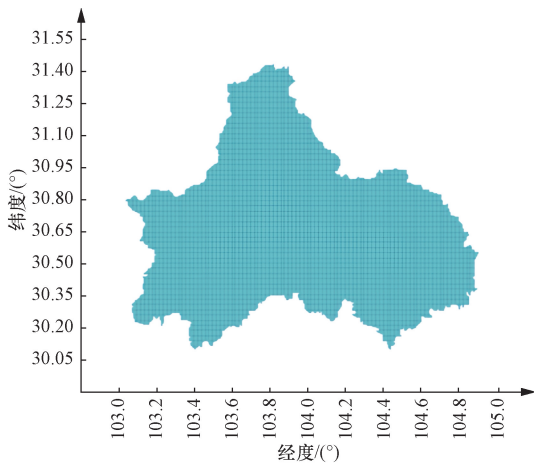


图 1 成都市网格化示意图

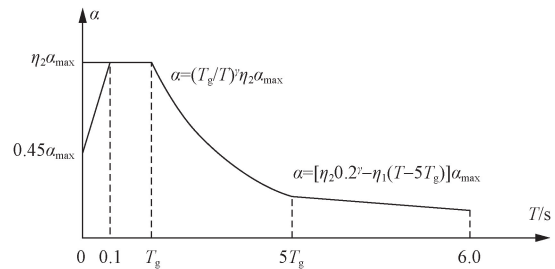
Fig. 1 Schematic diagram of grid transformation in Chengdu City

### 1.1.3 地震动记录的选取方法

结构的地震易损性是考虑地震对结构的影响。输入实际地震动记录对结构进行动力时程分析,以此来表示结构所受到的地震反应。所研究结构的

地震反应,不仅受结构本身的动力特性的影响,同时也受输入地震波的特性的影响。因此,合理选取地震动记录以确保分析结果的合理性非常重要。按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[11]</sup>中的地震影响系数曲线(如图 2 所示)计算生成的符合研究区域的标准反应谱,并以此作为地震动记录选取相匹配的目标谱,从太平洋地震工程研究中心(Pacific earthquake engineering research center, PEER)地震动数据库中选取符合该目标谱的地震动记录作为时程分析的样本<sup>[13]</sup>。并以该样本作为输入地震波,对结构进行动力时程分析和地震反应计算。同时,PEER 地震动数据库的场地类别按照美国标准地表以下 30 m 土层剪切波速指标 V<sub>s30</sub>划分,而《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[11]</sup>采用地表以下 20 m 土层剪切波速 V<sub>s20</sub>和覆盖层厚度双指标进行场地类别的划分,需要将 V<sub>s30</sub>与 V<sub>s20</sub>和覆盖层厚度之间的关系进行转换并将 PEER 地震动记录按照中国场地类别划分标准进行标定,其对应关系如表 1 所示<sup>[14]</sup>。

除有专门规定外,建筑结构的阻尼比 ζ 应取 0.05,此时 γ=0.9,η<sub>1</sub>=0.02,η<sub>2</sub>=1.0<sup>[11]</sup>。



α 为地震影响系数;α<sub>max</sub> 为地震影响系数最大值;η<sub>1</sub> 为直线下降段的下降斜率调整系数;η<sub>2</sub> 为阻尼调整系数;γ 为衰减指数;T 为结构自振周期;T<sub>g</sub> 为特征周期

图 2 地震影响系数曲线

Fig. 2 Seismic impact coefficient curve

表 1 PEER 和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 场地类别对应关系

Table 1 The correspondence between PEER and the site category in “Code for Seismic Design of Buildings” (GB 50011—2010)

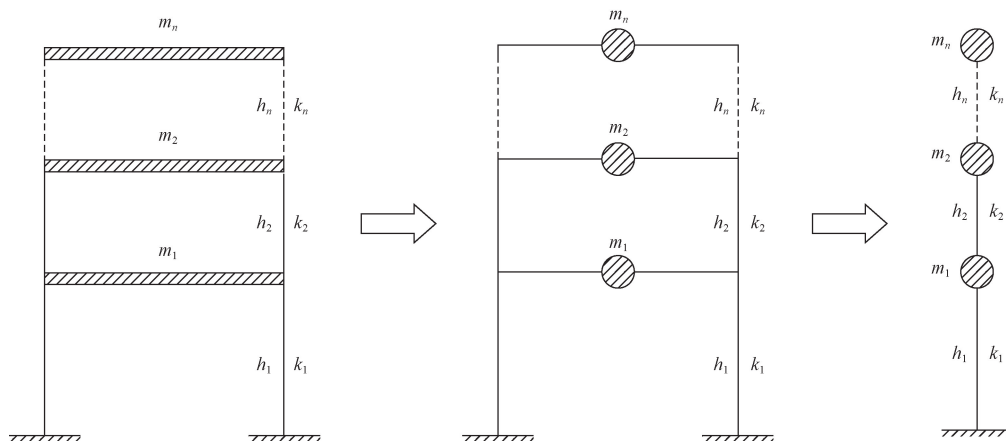
中国规范	I 类场地	II 类场地	III 类场地	IV 类场地
PEER/ (m·s <sup>-1</sup> )	V <sub>s30</sub> > 510	260 < V <sub>s30</sub> ≤ 510	150 < V <sub>s30</sub> ≤ 260	V <sub>s30</sub> ≤ 150

注:V<sub>s30</sub>为地表以下 30 m 土层剪切波速。

## 1.2 RC 框架结构计算模型

### 1.2.1 层间剪切模型

对于多层 RC 框架结构,目前应用最广的模型为层间剪切模型,如图 3 所示。在该模型中,通常假



$m_i$ 为楼层*i*的质量; $h_i$ 为楼层*i*的高度; $k_i$ 为楼层*i*的层间刚度

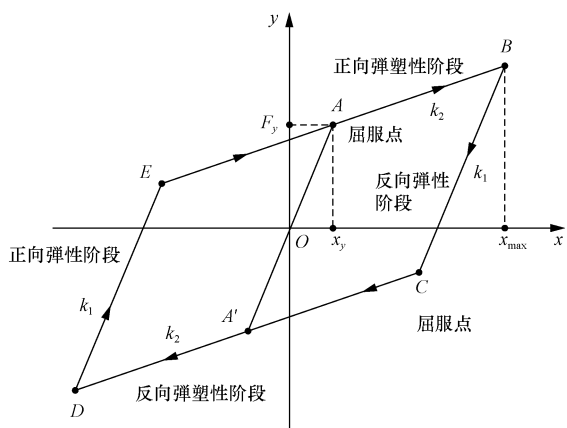
图3 层间剪切模型

Fig. 3 Interlayer shear model

设房屋的质量均集中于各楼层,各楼层在振动过程中始终保持水平,结构的变形为层间错动,且各层的层间位移相互独立,互不影响。

1.2.2 恢复力模型

在结构动力时程分析中,结构或构件的行为特征常用力-变形的关系来描述。其中,双线性恢复力模型作为力和变形关系的最常用数学模型,不仅形式简单,还能够较好描述 RC 结构屈服后的滞回规律<sup>[15]</sup>。因此,也采用双线性恢复力模型,如图 4 所示。



OA 段为结构屈服前的弹性阶段,刚度为  $k_1$ ;  $x_y$  为结构的最大弹性位移;  $F_y$  为结构达到最大弹性位移时所受到的力; AB 段为结构屈服,进入塑性阶段,刚度为  $k_2$ ;  $x_{max}$  为结构在塑性阶段的最大位移; BC 段为构件达到最大位移后卸载,进入弹性阶段,刚度为  $k_1$ ; CD 段为结构反向加载,进入塑性阶段,刚度为  $k_2$ ; DE 段为结构在塑性阶段卸载后进入弹性阶段,刚度为  $k_1$

图4 双线性恢复力模型

Fig. 4 Dual line restoring force model

1.2.3 结构损伤指标的选取

选取结构最大层间位移角  $\theta_{max}$  作为结构的损伤指标,来评价结构性能状态。结构最大层间位移角

可合理地描述整体结构的损伤状况,能较好地反映结构的抗震性能<sup>[16]</sup>。结构在不同强度地震作用下发生破坏,参照《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009)普遍采用的结构破坏等级的划分方法,可分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌 5 个等级<sup>[17]</sup>。当以结构的最大层间位移角  $\theta_{max}$  作为结构损伤指标时,RC 框架结构达到各破坏状态对应的层间位移角范围取值,如表 2 所示<sup>[18]</sup>。

参考以往学者关于结构性能水准的划分<sup>[19]</sup>,将结构的抗震性能水准分为充分运行、基本运行、生命安全和接近倒塌 4 个性能水准。4 个不同性能水准的最大破坏程度与表 2 中结构的 5 个震害等级之间的 4 个临界状态相对应<sup>[20]</sup>。表 3 给出了 4 个性能水准及其相对应的最大层间位移角限值。

表2 钢筋混凝土框架结构的破坏状态与层间位移角限值  
Table 2 Performance level and inter story displacement angle limit of reinforced concrete frame structure

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
$\theta_{max}/rad$	$\theta_{max} \leq 1/450$	$1/450 < \theta_{max} \leq 1/300$	$1/300 < \theta_{max} \leq 1/150$	$1/150 < \theta_{max} \leq 1/50$	$\theta_{max} > 1/50$

表3 钢筋混凝土框架结构各性能水准的层间位移角限值  
Table 3 Limit values of inter story displacement angles for each failure stage of reinforced concrete frame structures

性能水准	充分运行	基本运行	生命安全	接近倒塌
$\theta_{max}/rad$	1/450	1/300	1/150	1/50

1.3 地震易损性分析方法流程图

根据上述步骤,得到基于 PGA 和最大层间位移角的 RC 框架结构地震易损性分析方法的流程图,如图 5 所示。

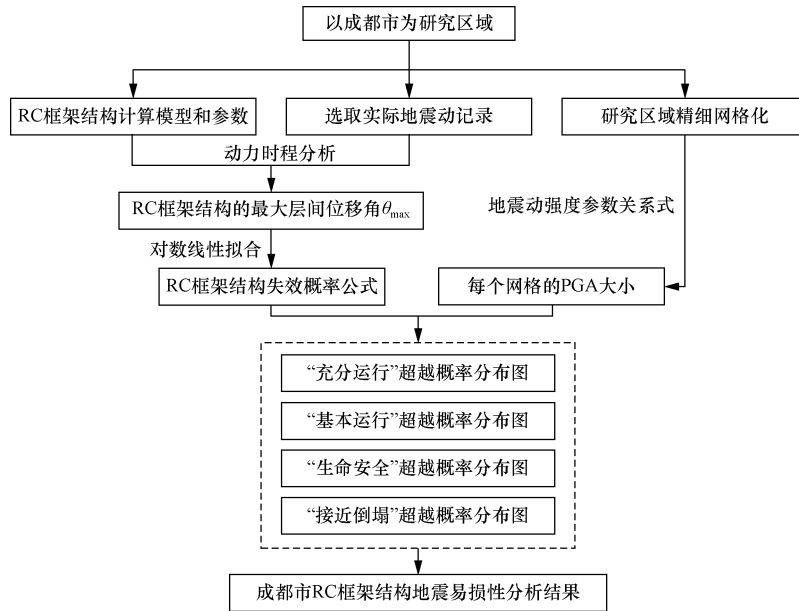


图5 地震易损性分析流程图

Fig. 5 Flowchart of seismic vulnerability analysis

## 2 算例分析

### 2.1 结构模型参数

以一个三层 RC 框架结构为例,将其简化为层间剪切模型,如图 6 所示。结构的特性参数为:第一至第三层高度  $h_1 = 4 \text{ m}$ ,  $h_2 = 3.3 \text{ m}$ ,  $h_3 = 3.3 \text{ m}$ ;第一至第三层质量  $m_1 = 2762 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 2760 \text{ kg}$ ,  $m_3 = 2300 \text{ kg}$ ,第一至第三层的刚度  $k_1 = 2.485 \times 10^4 \text{ N/m}$ ,  $k_2 = 1.921 \times 10^4 \text{ N/m}$ ,  $k_3 = 1.522 \times 10^4 \text{ N/m}$ 。

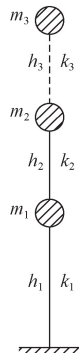


图6 三层钢筋混凝土框架结构层间剪切模型

Fig. 6 Inter story shear model of three-layer reinforced concrete frame structure

### 2.2 求解最大层间位移角

选取地震动记录数据对三层 RC 框架结构层间剪切模型进行动力时程分析,求出各地震作用下结构的最大层间位移角  $\theta_{\max}$ 。选取成都市作为研究区域,其抗震设防烈度为 7 度,场地类别为 II 类,设计地震分组为第三组<sup>[11]</sup>。以此得出符合成都市的目标反应谱,如图 7 所示。

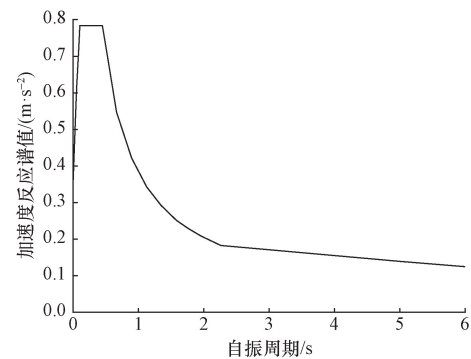


图7 成都市目标反应谱

Fig. 7 Chengdu target response spectrum

从 PEER 地震动数据库中,选取符合图 7 所示的成都市目标反应谱的 100 条实际地震动记录。该 100 条地震动记录的 PGA 的范围在  $0.01g \sim 1.78g$  ( $g$  为重力加速度),覆盖面较广,部分地震动记录如表 4 所示。

对上述 RC 框架结构输入 100 条地震动记录,得到 100 组最大层间位移角。按照最大层间位移角  $\theta_{\max}$  数值从小到大排列,每 20 条地震波为一组,共 5 组。得到该三层结构各楼层的最大层间位移角的变化,如图 8 所示。

从时程分析结果来看,在 100 条实际地震动作用下,该 RC 框架结构  $\theta_{\max}$  的最小值为  $0.00026 \text{ rad}$ ,对应的地震动记录为 RSN6923,此时该结构的性能水准为充分运行。该 RC 框架结构  $\theta_{\max}$  的最大值为  $0.04520 \text{ rad}$ ,对应的地震动记录为 RSN1087,此时该结构的性能水准为接近倒塌。从总体上看,该 RC 框架结构  $\theta_{\max}$  随着地震动 PGA 的增大而增大。

表4 部分地震动记录

Table 4 Partial earthquake motion records

RSN 序号	震级	PGA/g	RSN 序号	震级	PGA/g	RSN 序号	震级	PGA/g	RSN 序号	震级	PGA/g
95	6.2	0.14	569	5.8	0.40	811	6.9	0.05	1087	6.7	1.78
138	7.4	0.13	577	7.3	0.18	963	6.7	0.42	1119	6.9	0.22
147	5.7	0.19	714	5.3	0.07	998	6.7	0.02	4040	6.6	1.09
165	6.5	0.27	739	6.9	0.25	1048	6.7	0.34	6915	7.0	0.58
450	6.2	0.08	802	6.9	0.19	1085	6.7	0.47	6923	7.0	0.05

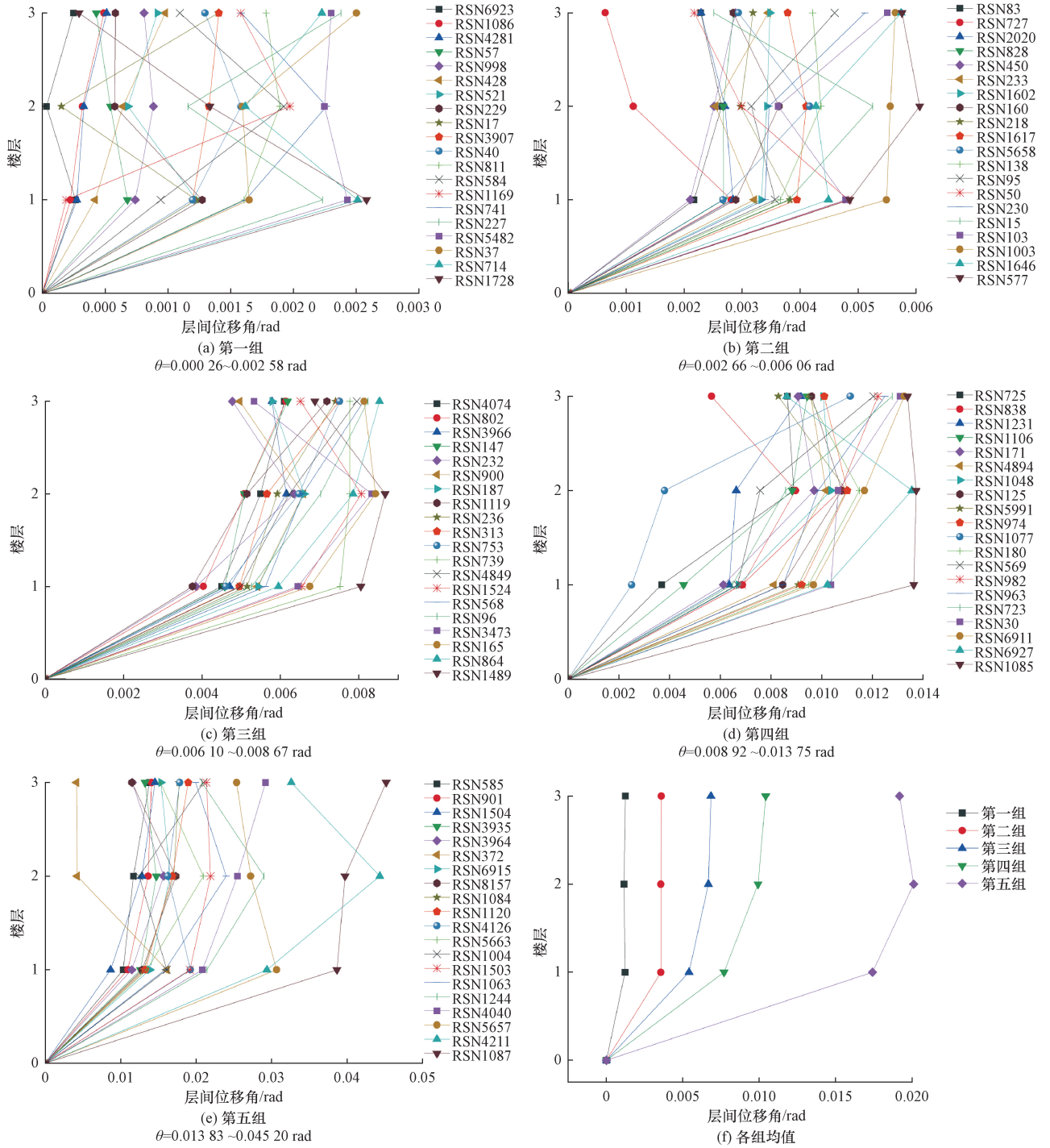


图8 不同地震作用下结构各楼层最大层间位移角曲线

Fig. 8 Maximum inter story displacement angle curve of each floor of the structure under different earthquake actions

### 2.3 地震易损性概率公式

根据动力时程分析结果,以最大层间位移角  $\theta_{\max}$  为结构损伤指标,以峰值加速度 PGA 为地震动强度指标,对其进行对数线性回归拟合分析,建立结构损伤指标和地震动强度指标的关系式为

$$\ln\theta_{\max} = -11.72933 + 0.88373\ln(\text{PGA}) \quad (5)$$

最大层间位移角  $\theta_{\max}$  的实际值与回归方程的关系如图 9 所示。判定系数  $R^2 = 0.92571$ ,拟合效果较好。

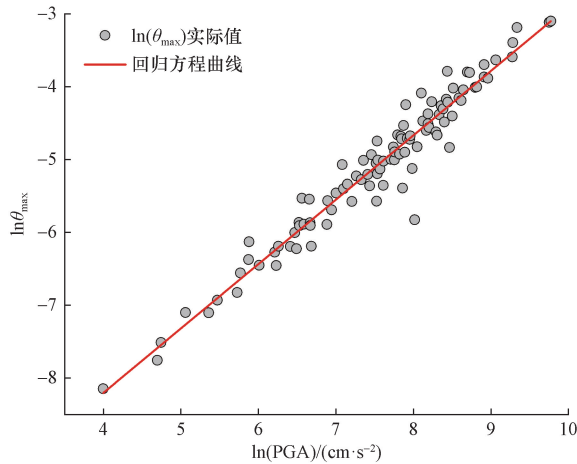


图9  $\theta_{\max}$  实际值与回归方程的关系

Fig. 9 The relationship between the actual value of  $\theta_{\max}$  and the regression equation

通过标准差计算[式(2)]计算出回归分析的标准差  $\sigma_d = 0.23918$ ,再结合结构损伤指标与地震动强度参数对数线性关系[式(5)]代入结构失效概率[式(1)],得到该 RC 框架结构在各级性能水准(充分运行、基本运行、生命安全、接近倒塌)的失效概率公式为

$$P_f = \Phi\left\{\frac{[-11.72933 + 0.88373\ln(\text{PGA})] - \ln\theta_{\max}}{0.23918}\right\} \quad (6)$$

式(6)中: $\theta_{\max}$  为各性能水准对应的结构最大层间位移角。

### 2.4 各性能水准下的结构失效概率分布图

根据资料显示,从公元前 180 年至今,成都市及其周边所发生 4.0 级以上地震有 700 多起<sup>[21-22]</sup>。根据历史地震资料,结合地震动强度参数关系[式(4)],可计算出成都市地区 56 662 个网格内的峰值加速度 PGA,最终可得到以 PGA 为评价指标的成都市地区地震影响分布图,如图 10 所示。

从结果上来分析,在历史地震作用下,成都市最大峰值加速度为 0.736g,集中在成都市的西南部地区,最小峰值加速度为 0.02g,分布在成都市东部

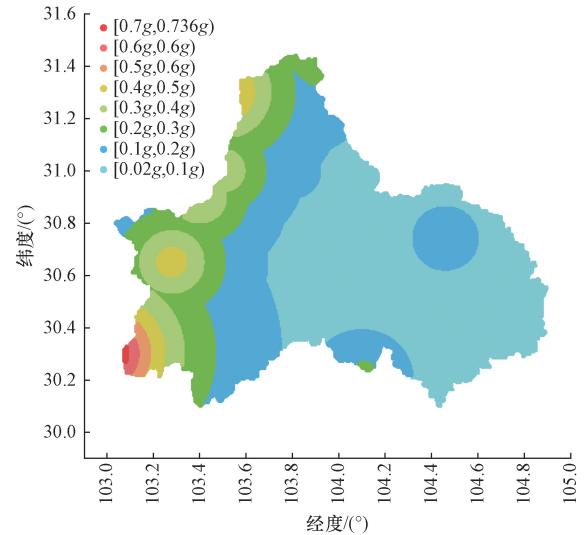


图 10 成都市峰值加速度影响分布图

Fig. 10 Distribution map of peak acceleration impact in Chengdu City

地区。地震对成都市的影响趋势总体上由西部向东部递减。

计算得到历史地震作用下成都市地区每个网格内的峰值加速度 PGA,再结合结构失效概率公式[式(6)],可得到该三层 RC 框架结构在任一网格区域内达到或超越各级性能水准(充分运行、基本运行、生命安全、接近倒塌)的概率,绘制出整个成都市地区的超越概率分布图,如图 11 所示。

通过分析图 10 和图 11 可知,在地震作用下,PGA 在成都市的变化趋势和各级性能水准下超越概率在成都市的变化趋势大致上是相同的。PGA 由西向东递减,各级性能水准下结构的超越概率也逐渐减小,结构也越安全。

对图 11 分析,在地震作用下,同一区域的结构性能水准越接近倒塌,其发生的可能性也越小。如在成都市的西南部位置,对应的地区是成都地区邛崃市。在各级性能水准中,该地区结构的超越概率均最大。在“充分运行”阶段,其超越概率最高可达到 94.1%,在“接近倒塌”阶段,其超越概率最高为 40.8%。在各级性能水准下,成都市的东南部位置,对应的地区是成都地区简阳市,该地区的超越概率都最小,是最安全的区域,该地区的结构在“充分运行”阶段,超越概率最高为 20%,而在“接近倒塌”阶段,超越概率最高仅为 5%。

从整个成都市区域来看,在结构的各级性能水准中,超越概率的总体趋势是由西向东递减,西部地区的结构受地震影响严重,可以适当加强该地区结构的抗震构造措施,而东部地区的结构受地震影响相对较轻,抗震要求可适当放宽,以便节约经济成本。

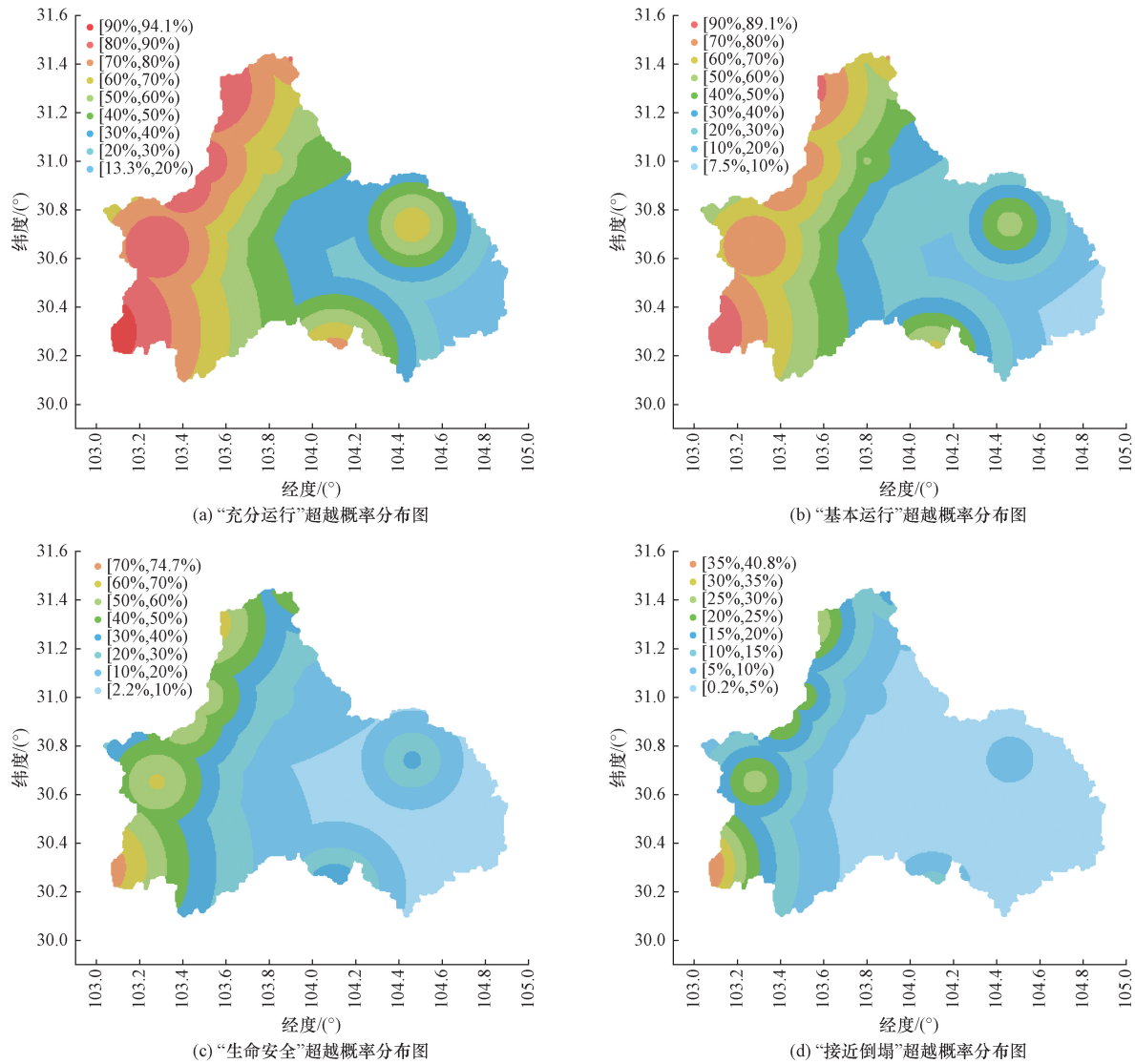


图 11 RC 框架结构达到各性能水准的超越概率分布图

Fig. 11 Probability distribution diagram of RC framework structure exceeding various performance levels

### 3 结论

结合研究区域的工程场地的差异性以及地震易损性理论,提出了基于峰值加速度和结构最大层间位移角的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析方法。并将该方法运用于成都市,通过结构失效概率公式,绘制了地震作用下整个成都市的 RC 框架结构在各级性能水准下(充分运行、基本运行、生命安全、接近倒塌)的超越概率分布图。通过分析可得出以下主要结论。

(1)成都市的钢筋混凝土框架结构达到充分运行、基本运行、生命安全和接近倒塌 4 个性能水准的结构失效概率最高分别为 94.1%、89.1%、74.7% 和 40.8%,各级性能水准下结构的超越概率随着 PGA 由西向东递减而降低,PGA 越小,结构越安全。

(2)同一位置的结构性能水准越接近倒塌,

超越概率越小,发生的可能性也就越小。

(3)从整个成都市区域来看,RC 框架结构受地震影响趋势由西向东递减。对西部和西南部地区的结构,可以适当加强其抗震构造措施,对东部地区的结构,抗震要求可以适当放宽。

(4)结合网格化进行分析,提高了结构地震易损性分析的准确性。对降低地震灾害损失具有一定的应用价值,为建筑结构的抗震设计提供一定的理论依据。

### 参 考 文 献

[1] 黄忠凯,朱锐,张冬梅,等. 软土隧道地震易损性分析中地震动强度参数选取[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(35): 15187-15195.  
Huang Zhongkai, Zhu Rui, Zhang Dongmei, et al. Selection of ground motion intensity measures for the seismic vulnerability assessment of tunnels in soft soils[J]. Science Technology and Engineering

- neering, 2024, 24(35): 15187-15195.
- [2] 刘仲伟. 钢筋混凝土高层建筑结构地震易损性研究[J]. 国际地震动态, 2018(11): 48.  
Liu Zhongwei. Study on seismic vulnerability of reinforced concrete high-rise building structures[J]. Recent Developments in World Seismology, 2018(11): 48.
- [3] Dey M, Chakraborty S. Seismic performance of reinforced concrete building frames on sloping ground retrofitted with steel and reinforced concrete jacketing[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9(11): 441-441.
- [4] Gondaliya K M, Vasanwala S A, Desai A K, et al. Machine learning-based approach for assessing the seismic vulnerability of reinforced concrete frame buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 97: 110785-110785.
- [5] 刘巍. 钢筋混凝土框架结构地震倒塌易损性分析[J]. 低温建筑技术, 2024, 46(5): 79-82.  
Liu Wei. Analysis of seismic collapse vulnerability of RC frame structures[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2024, 46(5): 79-82.
- [6] 于晓辉. 极限状态模糊性对地震易损性分析的影响研究: 以钢筋混凝土框架结构为例[J]. 工程力学, 2021, 38(9): 89-99, 109.  
Yu Xiaohui. Effect of fuzziness at limit states on seismic fragility analysis: reinforced concrete frame cases[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9): 89-99, 109.
- [7] 何芳芳. 宝鸡市地震危险性分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.  
He Fangfang. Analysis of earthquake risk in Baoji City[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [8] 高山, 吕世全, 肖遥. 大连市普湾新区地震小区划研究[J]. 防灾减灾学报, 2019, 35(3): 34-39.  
Gao Shan, Lü Shiquan, Xiao Yao. Study on seismic zoning of Pawan New Area in Dalian[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2019, 35(3): 34-39.
- [9] 张辉. 基于多地震动强度参数的多层厅堂式木结构古建筑易损性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.  
Zhang Hui. Research on the fragility of multi-storey hall style ancient timber structures based on multi-ground motion intensity parameters [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [10] 邓夕胜, 赖馨粤, 袁凯, 等. 罕遇地震下高层 RC 框架结构双地震动强度参数易损性分析[J]. 世界地震工程, 2022, 38(3): 19-28.  
Deng Xisheng, Lai Xinyue, Yuan Kai, et al. Vulnerability analysis of multiple ground motion intensity measure rectors for high-rise RC frame structure under rare earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(3): 19-28.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—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: GB 50011—2010 [S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2010.
- [12] 阳程. 基于精细化网格工程场地及地震联动的地震危险性分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2020.  
Yang Cheng. Seismic risk analysis based on refined grid engineering site and earthquake linkage[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2020.
- [13] 张嘉琦. 时程分析地震记录选择方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.  
Zhang Jiaqi. Study on selection method of ground motion records for time history analysis [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
- [14] 王竞. 中外场地分类研究现状及其应用讨论[J]. 世界地震工程, 2022, 38(3): 236-245.  
Wang Jing. Research progress and application on site classification in the world[J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(3): 236-245.
- [15] Kunnath S K, Chai Y H. Cumulative damage-based inelastic cyclic demand spectrum[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33: 499-520.
- [16] 费扬, 陈龙伟. 基于 OpenSees 的场地条件对 RC 框架结构易损性影响初探[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 724-729.  
Fei Yang, Chen Longwei. Analysis of the influence of site conditions on the fragility of RC frame structures based on OpenSees program[J]. Building Structure, 2023, 53(S2): 724-729.
- [17] 中国地震局. 建(构)筑物地震破坏等级划分: GB/T 24335—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
China Earthquake Administration. Classification of earthquake damage to buildings and special structures: GB/T 24335—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [18] 李应斌, 刘伯权, 史庆轩. 结构的性能水准与评价指标[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 132-137.  
Li Yingbin, Liu Boquan, Shi Qingxuan. Performance levels and estimation indices of structures[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 132-137.
- [19] 林天成, 陈灯红, 刘云龙, 等. 主余震作用下典型六层 RC 框架结构易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1046-1056.  
Lin Tiancheng, Chen Denghong, Liu Yunlong, et al. Vulnerability analysis of typical six-story RC frame structure under mainshock-after shock ground motions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1046-1056.
- [20] 刘晶波, 刘阳冰, 闫秋实. 基于性能的方钢管混凝土框架结构地震易损性分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 39-47.  
Liu Jingbo, Liu Yangbing, Yan Qiushi. Performance-based seismic fragility analysis of CFST frame structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 39-47.
- [21] 李保昆, 陈培善, 刘瑞丰. 《中国数字地震台网观测报告》震级的确定[J]. 地震地磁观测与研究, 2004(4): 8-13.  
Li Baokun, Chen Peishan, Liu Ruifeng. The determination of magnitude in the reports of China National Digital Seismic Network [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2004(4): 8-13.
- [22] 汪素云, 王健, 俞言祥, 等. 基于中国地震台网观测报告的 M<sub>L</sub> 与 M<sub>S</sub> 经验关系[J]. 中国地震, 2010, 26(1): 14-22.  
Wang Suyun, Wang Jian, Yu Yanxiang, et al. The empirical relation between M<sub>L</sub> and M<sub>S</sub> based on bulletin of seismological observation of Chinese stations[J]. Earthquake Research in China, 2010, 26(1): 14-22.