

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240808004

泸县 6.0 级地震城市建筑群震害模拟与震害机理分析*

潘毅^{1,2}, 张兰林^{1,3}, 林旭川^{4,5}, 张彪¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031; 2. 西南交通大学抗震工程技术四川省重点实验室, 四川成都 610031; 3. 西南交通大学希望学院, 四川成都 610400; 4. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080; 5. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要: 结合建筑群震害调查与精细化数值仿真等手段, 对城市建筑群的震害机理进行研究。首先, 建立了泸县 6.0 级地震中泸县县城的建筑群震害仿真模型, 并采用现场震害调查数据, 从典型小区、城市整体两个层面, 对模型的有效性进行验证。基于震害仿真模型, 选取 4 条具有不同持时和频谱特性的地震动, 比较不同地震动对泸县建筑群的破坏力特征, 研究不同地震动破坏力随时间和峰值加速度(PGA)的演化特征。研究表明: 地震动的频谱特性对不同层数、不同类型建筑具有选择性破坏作用, 进而影响城市建筑群损伤程度与分布; 不同地震动在不同时刻破坏力差异很大, 进而导致建筑群损伤发展速度差异明显, 前期破坏力较低的地震动仍可能对后期对建筑群产生严重破坏; 对地震动的 PGA 进行归一化, 当 PGA 较小时, 不同地震动造成的建筑群损伤程度接近, 随着 PGA 的放大, 不同地震动作用下建筑群损伤差异不断增大, 其损伤指数差异可达数倍。

关键词: 城市震害模拟; 泸县地震; 弹塑性时程分析; 震害机理分析; 震害调查

中图分类号: P315; TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-0977-10

Simulation and Mechanism Analysis of Seismic Damage to Urban Buildings Groups during the M_s 6.0 Luxian Earthquake

PAN Yi^{1,2}, ZHANG Lanlin^{1,3}, LIN Xuchuan^{4,5}, ZHANG Biao¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, ChengDu 610031, China;
2. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. Southwest Jiaotong University Hope Collage, Chengdu 610400, China; 4. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;
5. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: By combining seismic damage investigations with refined numerical simulations, this study explores the damage mechanisms of urban building groups. First, a seismic damage simulation model for building groups in Luxian County during the M_s 6.0 earthquake was established. The effec-

* 收稿日期: 2024-08-08; 修回日期: 2024-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3003604)、国家自然科学基金(52278534)、成都市重点研发项目(2024-YF05-00331-SN)资助

作者简介: 潘毅(1977—), 男, 教授, 博士。主要从事结构工程抗震与加固研究。E-mail: pany@swjtu.edu.cn

通信作者: 林旭川(1984—), 男, 研究员, 博士。主要从事城市地震灾害数字仿真、结构工程抗震研究。

E-mail: linxc03@126.com

tiveness of the model was verified using seismic damage field investigation data from two levels: typical residential areas and the whole city. Based on the simulation model, four sets of ground motions with different durations and spectral characteristics were selected to compare their destructive effects on the building groups in Luxian. The evolution of the destructive forces over time and their relationship with peak ground acceleration (PGA) were studied for different ground motions. The results showed that the spectral characteristics of ground motion had selective damaging effects on different types and heights of buildings, affecting the degree and distribution of damage within urban building groups. The destructive forces of different ground motions varied greatly at different times, leading to significant differences in the damage development speed of buildings. Ground motions with lower initial destructive force could still cause severe damage to buildings in later stages of the earthquake. When normalizing PGA, it was found that for smaller PGAs, the damage degree caused by different ground motions was similar, but as PGA increased, the damage difference between different ground motions increased continuously, with damage indices differing by several times.

Keywords: urban seismic damage simulation; Luxian Earthquake; elastoplastic time-history analysis; analysis of seismic damage mechanism; seismic damage investigation

0 引言

在同一城市中,建筑物的建造年代、结构类型、抗震设防水平等均不相同,导致城市建筑群的震害机理非常复杂。随着中国城镇的不断发展,城市建筑群防灾减灾的重要性也日益凸显。随着计算能力和建模技术的提升,城市震害仿真技术逐渐成为城市震害评估的重要手段。合理的城市震害模拟有助于揭示震害机理,服务震前防灾规划和震后应急救援,对降低城市震害风险具有重要的现实意义。

近年来,国内外学者对城市震害模拟开展了大量研究^[1-3]。X.Z.Lu等^[4]、M.Hori等^[5]基于GIS信息及计算机,采用弹塑性时程分析实现建筑群的地震响应模拟,证明了城市震害模拟具有良好的可行性。基于建筑群震害模拟技术的进一步研究表明,城市震害模拟可用于分析场地类别对建筑震害的放大影响^[6],可以定量评估复杂社区的震后恢复能力^[7]。城市震害模拟最重要的应用之一是评估建筑物抗震性能^[8],更可以探究不同因素对建筑群区域震害及震害风险的影响^[9]。通过城市震害仿真对震害进行评估具有一定的合理性与可行性,但目前城市震害模拟的有效性仍可以在实际地震中得到进一步验证与提升^[10]。同时,通过震害模拟,探究不同地震动对西南地区城市建筑群的破坏特征方面的研究也有待完善。

现场震害调查可为建筑抗震能力评估与地震

灾害预测提供直接而宝贵的数据^[11-12],本文以泸县县城建筑群为原型,建立城市建筑群震害仿真模型,结合现场震害调查数据,从典型小区、城市整体两个层面,对其有效性进行了验证,为城市震害评估和机理分析提供合理有效的仿真模型。为探究不同地震动对建筑群的破坏特征,选取了4条具有不同持时和频谱特性的地震动输入震害仿真模型,分析不同时刻与不同峰值加速度(Peak Ground Acceleration,简称PGA)下建筑群的损伤发展,给出量化后的建筑物破坏差异,得出不同地震动破坏力随时间和PGA的演化特征。本文的研究成果可为城市的抗震防灾提供参考。

1 城市现场震害调查与分析

2021年9月16日04时33分,四川省泸县发生了 M_s 6.0级地震,震源深度10 km。根据地震烈度图^[13],此次地震的最高评估烈度为Ⅷ度。截至2021年9月17日12时,本次地震共导致约2.9万间房屋一般损坏、6 400余间房屋严重损坏、1 400余间房屋倒塌^[14]。震后课题组第一时间赶赴泸县进行震害调查。调查内容包括典型小区的震害详查和城市整体的震害统计。其中,某中学和某酒厂分别作为教育和工业的代表,在一定程度上反映此次地震对人们生活与生产的影响。因此,重点对这两个小区进行了详细的震害调查。参考《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB24335—2009)^[15],并结合现场震害

情况,调查将建筑震害等级简化为轻微、中等、严重、倒塌4个级别。

1.1 典型小区的震害调查

(1) 泸县某中学

根据现场震害调研,该中学区域建筑主要采用砖混结构,部分为框架结构。砖混结构的破坏形式主要为楼板开裂、填充墙破坏、边梁破坏等,破坏等级多为严重破坏;框架结构的破坏形式主要为非

构件破坏,如填充墙开裂、空调外机脱落等,破坏等级多为中等破坏,如图1所示。

(2) 泸县某酒厂

根据调研信息,该酒厂分为旧厂区和新厂区两个部分。其中,旧厂区主要采用砖混结构,破坏形式主要为楼梯间倒塌、填充墙局部倒塌等,破坏等级多为严重破坏;新厂区主要采用框架结构,破坏形式主要为填充墙开裂、非结构构件坠落等,破坏等级多为中等破坏,如图2所示。

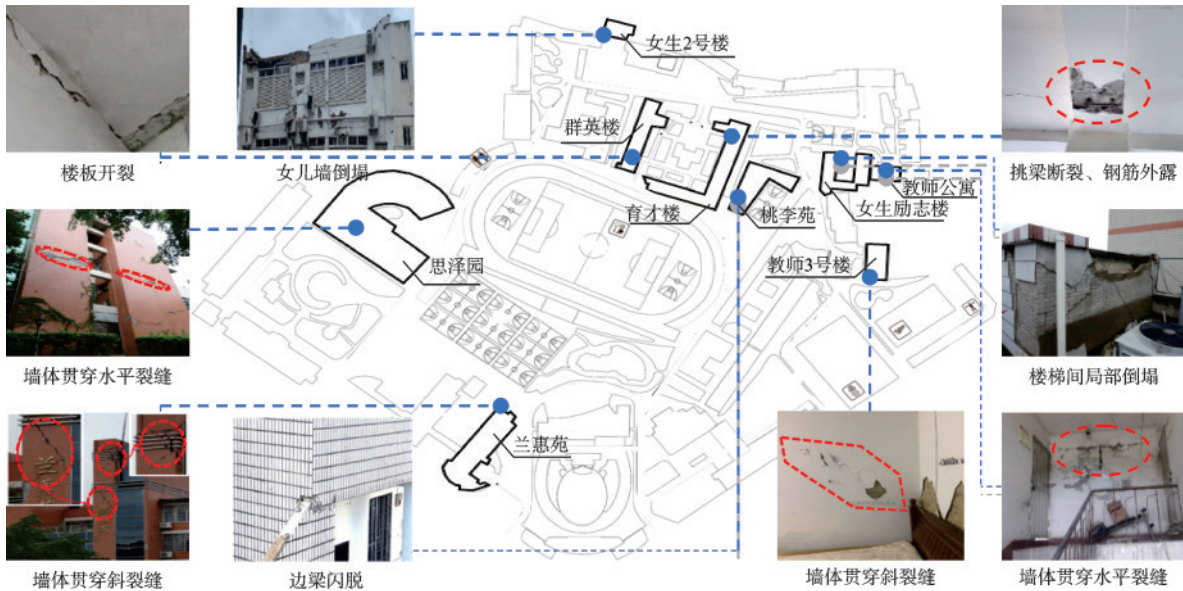


图1 泸县某中学建筑群震害情况

Fig.1 Seismic damage to a middle school building group in Luxian County

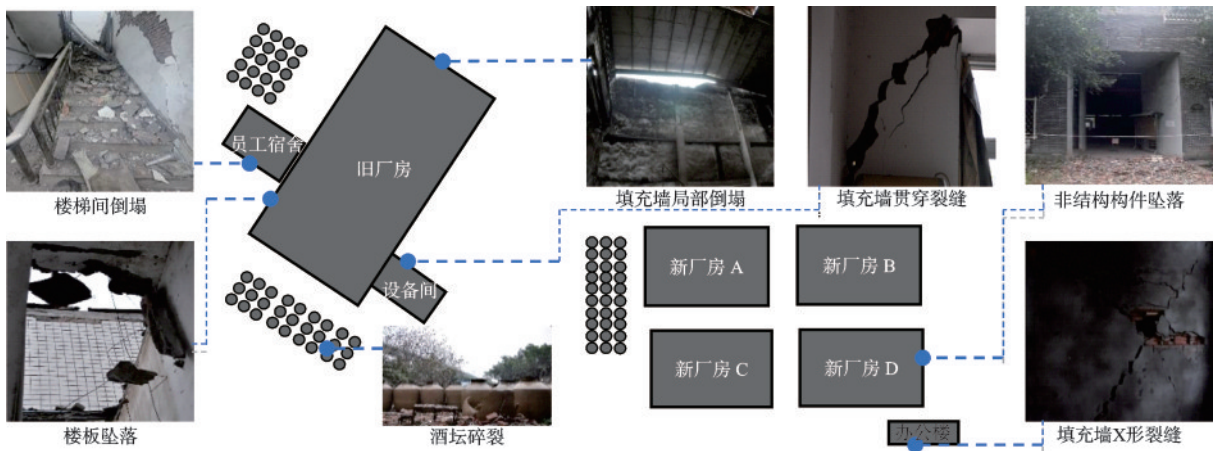


图2 泸县某酒厂建筑群震害情况

Fig.2 Seismic damage to a winery building group in Luxian County

1.2 城市整体震害统计

根据四川省减灾委员会的报告和课题组现场调查结果^[16],对泸县县城的建筑破坏等级和数量进行了

全面统计。结构类型分布方面,泸县县城的砖混结构数量最多,框架结构次之,砖木结构最少,见表1。需要说明的是,由于泸县县城轻微破坏的建筑物数量过大,本次统计只涉及中等及以上破坏等级的建筑。

表1 泸县县城建筑的破坏等级及数量统计

Table 1 Statistics on the level and quantity of damaged buildings in Luxian County

结构类型	破坏等级			总计
	中等破坏	严重破坏	倒塌	
砖混结构(户)	9 613	1 439	0	11 052
框架结构(户)	2 822	118	0	2 940
砖木结构(户)	1 165	266	0	1 431

砖木结构、砖混结构和框架结构破坏等级的比例,如图3所示。其中,砖木结构、砖混结构和框架结构的中等破坏分别占比81.42%、86.98%和95.99%,严重破坏分别占比18.58%、13.02%和4.01%,均无倒塌。由图3可知,框架结构在此次地震中表现出较强的抗震性能和抗倒塌能力,严重破坏占比较小,且无倒塌情况。这是由于框架结构多数为正规设计、正规施工、正常使用的建筑,其整体性能较好,具有较好的延性,结构抗侧向倒塌能力较强。砖木结构的严重破坏占比较高,是框架结构的4.6倍。这是由于砖木结构多是自建房,普遍缺乏足够的抗震构造措施。

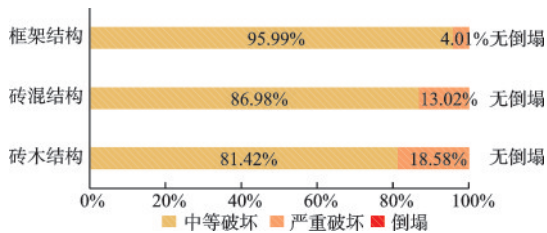


图3 砖木结构、砖混结构和框架结构的破坏情况对比
Fig.3 Comparison of seismic damage to brick-wood, brick-concrete, and frame structures

2 城市建筑群仿真模型的建立与验证

2.1 城市建筑群仿真模型的建立

基于GIS信息建立初始模型,并对建成年代久远、可能存在改建或扩建的建筑物,进行了现场核查。现场核查的信息包括建筑结构类型、高度、层数、建造年代等,并结合当地政府提供的数据,以确保城市震害仿真模型中建筑信息的准确性。

经现场数据的核查后,采用由中国地震局工程力学研究所开发的震害模拟器 YouSimulator,建立

泸县县城的仿真模型。YouSimulator包括自动建模模块、响应计算模块、结果分析模块和三维可视化4个模块^[17]。建筑群震害仿真模型的建模与计算过程如下:①基于城市震害模拟器 YouSimulator的自动建模模块,读取GIS文件中的建筑信息并根据调研结果进行修改与更正,构建建筑群的计算模型和三维可视化模型;②在输入地震动作用下,对建筑群模型进行弹塑性时程分析和震害评估;③利用可视化模块生成建筑群震害损伤分布的可视化模型文件,识别震害严重的区域。

建筑整体破坏等级,定义为各楼层损伤程度最大值,楼层损伤程度由楼层的剪力-层间位移角关系曲线确定。与规范^[15]相对应,破坏未达到楼层名义屈服点的为基本完好,对应的震害指数为0.0~0.1;破坏在名义屈服点与名义倒塌点之间的分为轻微破坏、中等破坏、严重破坏,对应的震害指数分别为0.1~0.3、0.3~0.55、0.55~0.85;破坏高于名义倒塌点的定义为毁坏或倒塌,对应的震害指数为0.85~1.0,如图4所示。

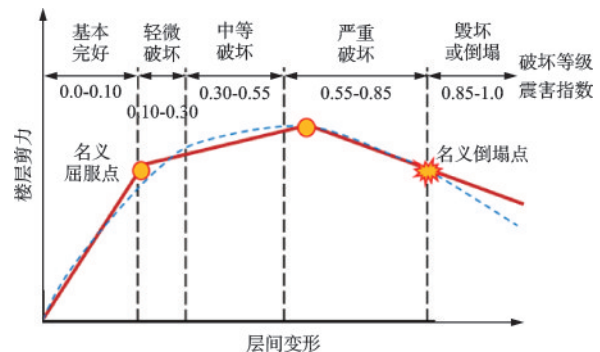


图4 楼层剪力-层间变形关系曲线及破坏等级示意图
Fig.4 Schematic diagram of floor shear-inter-story deformation relationship curve and damage level

2.2 城市建筑群仿真模型的验证

泸县地震的震中(29.20°N, 105.34°E)位于泸县的福集镇^[18],距泸县县城6 km。由于泸县县城没有强震台站,选取距离震中最近的K2803台站地震动记录,该地震动东西(EW)、南北(NS)、垂直(UD)三个方向的拟加速度反应谱以及设计谱,如图5所示。由图5可知,该地震动记录的EW、NS、UD三个分量产生的拟加速度值大于6度罕遇、7度罕遇和8度罕遇地震对应的谱值。根据现场震害调查的结果,从局部的小区建筑和整体的城市群两个层面,来验证该仿真模型的有效性。

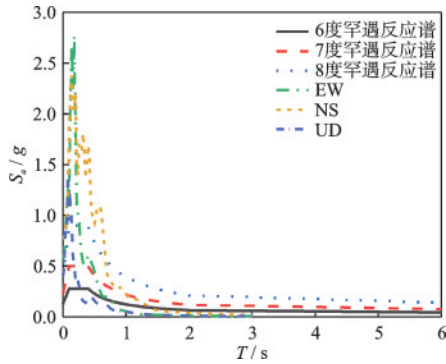


图5 泸县地震K2803台站的地震动反应谱

Fig.5 Ground motion response spectra at station K2803 during the Luxian earthquake

(1) 典型小区震害的验证

泸县某中学的震害模拟结果如图6所示。在城市仿真模型的模拟结果中,泸县某中学区域中的低矮建筑为砖混结构,破坏等级多为严重破坏,框架结构的破坏等级多为中等破坏,未出现倒塌。模拟结果和现场震害调查结果基本一致,见表2。

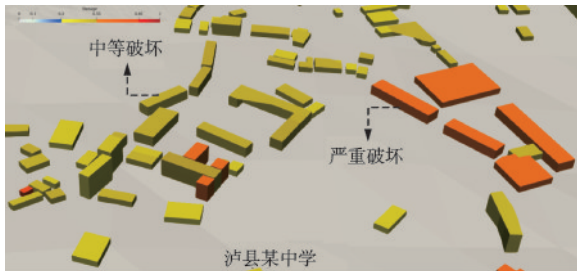


图6 泸县某中学震害模拟结果

Fig.6 Seismic damage simulation results for a middle school in Luxian County

表2 泸县某中学破坏等级的差异

Table 2 Proportion of damage levels in a middle school in Luxian County

单位: %			
破坏等级	现场震害调查	城市震害仿真	差异
中等破坏	73.53	76.67	4.27
严重破坏	26.47	23.33	11.86
倒塌	0.00	0.00	0.00

注: 差异=|城市震害仿真-现场震害调查|×100%/现场震害调查, 当现场震害调查为0时, 取|城市震害仿真-现场震害调查|×100%

由表2可知,中等破坏比例和倒塌比例差异均在5%以内,但严重破坏比例相差较大,达到了11.86%。这是由于目前城市震害模拟器 YouSimulator 只能输入水平两个方向的地震动,未考虑竖向

地震动的作用。因此,震害模拟在一定程度上削弱了地震破坏作用,导致中等破坏的比例上升,严重破坏的比例下降。考虑到所采用的地震动记录并不在震中,且模拟时未考虑场地因素,差异在允许范围内,可证明该区域模拟结果和地震震害调查基本吻合。

泸县某酒厂的震害模拟结果如图7所示。在城市仿真模型的模拟结果中,泸县某酒厂中旧厂区的破坏等级多为严重破坏,新厂区的破坏等级多为中等破坏,未出现倒塌。这和现场震害调查结果基本一致,见表3。

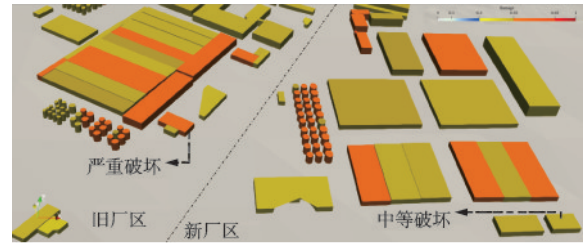


图7 泸县某酒厂震害模拟结果

Fig.7 Seismic damage simulation results of a winery in Luxian County

表3 泸县某酒厂破坏等级的差异

Table 3 Proportion of damage levels in a winery in Luxian County

单位: %			
破坏等级	现场震害调查	城市震害仿真	差异
中等破坏	51.61	61.29	18.76
严重破坏	48.39	38.71	20.00
倒塌	0.00	0.00	0.00

注:同表2

由表3可知,泸县某酒厂倒塌的比例一致,而中等破坏及严重破坏的比例的差异分别为18.76%和20.00%。这是由于该酒厂建筑的结构类型及建筑年代等都更为复杂,且模拟器无法考虑竖向地震动,模拟结果与实际震害的差异在20%的允许范围以内。

(2) 城市整体震害的验证

泸县县城的建筑群整体震害模拟结果如图8所示。在城市仿真模型的模拟结果中,泸县整体震害以中等破坏为主,周边低矮建筑群主要为砖混结构,破坏等级多为严重破坏,县城中心的高层住宅多为框架结构,破坏等级多为轻微破坏,震害模拟现象与现场震害调查结果基本一致。

泸县县城现场调查和城市震害仿真的整体破坏比例见表4。与现场调查的结果相比,城市震害仿真

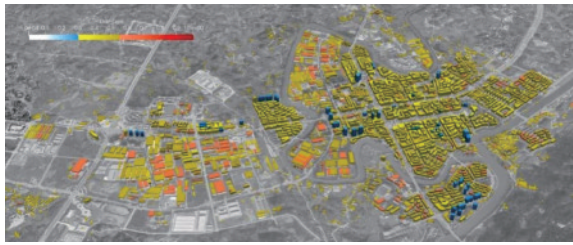


图8 泸县县城的建筑群震害模拟结果

Fig.8 Seismic damage simulation results for building groups in Luxian County

表4 泸县县城整体破坏等级的差异

Table 4 Proportion differences in overall damage levels of buildings in Luxian County

破坏等级	现场震害调查	城市震害仿真	差异
中等破坏	88.22	89.40	1.34
严重破坏	11.78	10.55	10.44
倒塌	0.00	0.05	0.05

单位: %

注:同表2

的中等破坏比例和倒塌比例差异均在5%以内,严重破坏比例相差为10.44%。从泸县县城整体破坏情况可知,模拟结果和现场震害调查结果接近。

综上所述,基于现场震害调查,从局部和整体两个层面验证了城市仿真模型具有合理性,基本满足城市震害机理分析的需求。

3 城市建筑群震害机理分析

3.1 地震动选取

为研究城市建筑群的地震破坏机理,揭示不同地震动特性对建筑群的破坏规律,本文选取4条典型地震动记录输入验证后的泸县县城城市震害仿

真模型。这4条地震动包括Imperial Valley地震中El Centro台站记录的地震动(简称El Centro地震动)、汶川地震中什邡八角台记录的地震动(简称汶川地震动)、长宁地震中51GXT台站记录的地震动(简称长宁地震动)、泸县地震中K2803台站记录的地震动(简称泸县地震动),详见表5。其中,泸县地震动为当地发生的实际地震动。长宁地震动为泸县周边典型地震中记录的实际地震动,其震级与泸县地震动相同。汶川地震动为泸县周边典型地震中记录的实际地震动,其震级较大,有效持时较长。El Centro地震动为国外典型地震动,多次应用于结构工程的抗震性能分析。4条地震动的幅值、持时和频谱特性差异较大,其地震动波形记录如图9所示。

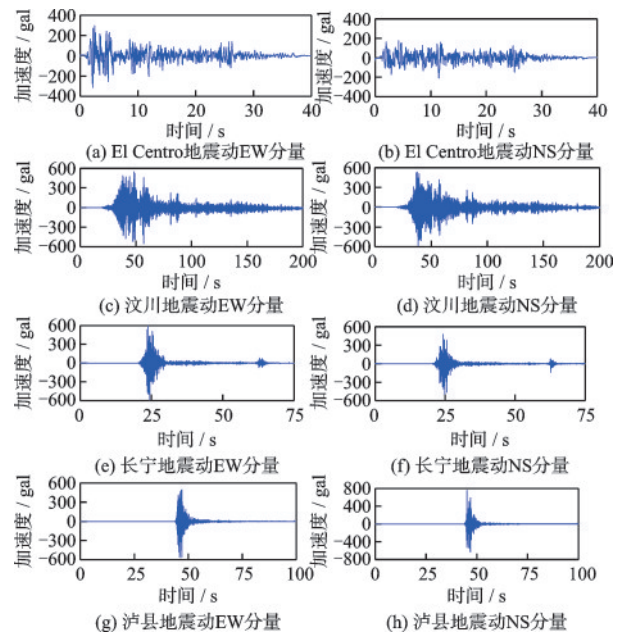


图9 4条典型地震动的加速度时程记录

Fig.9 Acceleration time histories of four typical ground motions

表5 地震动记录信息

Table 5 Information on selected ground motion records

地震事件	发生日期	台站	震级(M_s)	PGA/gal	有效持时/s
Imperial Valley地震	1940年5月19日	El Centro Array #9	7.0	313 (NS)	30.86
汶川地震	2008年5月12日	什邡八角台	8.0	586 (NS)	160.62
长宁地震	2019年6月17日	51GXT	6.0	599 (EW)	42.30
泸县地震	2021年9月16日	K2803	6.0	756 (NS)	6.33

统计泸县建筑群中各类建筑的基本周期分布范围,并与选取的4条地震动的加速度反应谱对比,如图10所示。根据泸县县城建筑群基本周期的分

布,砖木结构基本周期在0.2~0.4 s,砖混结构在0.1~0.36 s,框架结构在0.2~1.8 s。而4条地震动的加速度反应谱展示出截然不同的频谱特性。泸

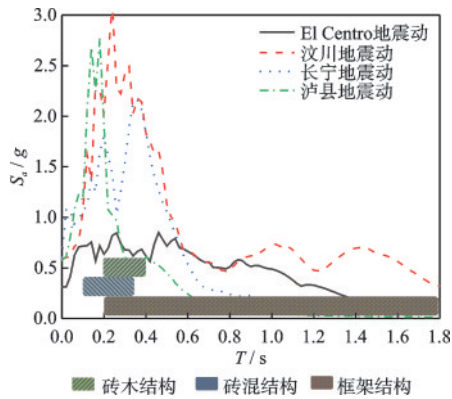


图10 地震加速度反应谱与主要结构类型的基本周期
Fig.10 Acceleration response spectra of selected ground motions and fundamental periods of major structural types

县地震动的谱加速度峰值出现在0.1~0.2 s,接近砖混结构的基本周期,在0.2 s处迅速衰减约60%,中长周期段谱值较低,对砖混结构具有较高的潜在破坏力。长宁地震动的谱加速度较为明显的峰值出现在0.2 s和0.36 s处,从数值上对比,长宁地震动对砖木结构及砖混结构的潜在破坏力较高,但略低于泸县地震动,而中长周期段反应谱值略高于泸县地震动,对框架结构的潜在破坏力略高。El Centro地震动的谱加速度值基本在0.5g水平线上下波动,中长周期段谱值衰减较慢,对框架结构的潜在破坏力较高。汶川地震动的谱加速度峰值约处于0.1~0.4 s,覆盖了砖木结构及砖混结构的基本周期,在中长周期段,谱加速度值依旧高于其他地震动,对泸县建筑群的各类结构均具有较大的潜在破坏力。

3.2 不同地震动对泸县建筑群的破坏力特征

泸县县城建筑群在4条不同地震动作用下的建筑损伤分布,如图11所示。在泸县地震动、长宁地震动、El Centro地震动、汶川地震动作用下,以框架结构为主的泸县县城中心的破坏程度依次加重。在汶川地震动、泸县地震动、El Centro地震动、长宁地震动作用下,以砖混结构为主的泸县某开发区厂房的破坏程度依次减轻,时程分析模拟结果与反应谱分析相吻合。值得注意的是,在El Centro地震动作用下破坏较为严重的县城中心高层框架住宅,在长宁地震动作用下的破坏最为轻微,所有结构在汶川地震动作用下破坏都最为严重。4条地震动的破坏力分布与反应谱分析结果有一定的对应关系,这表明在不同地震动作用下,建筑群中不同类型结构

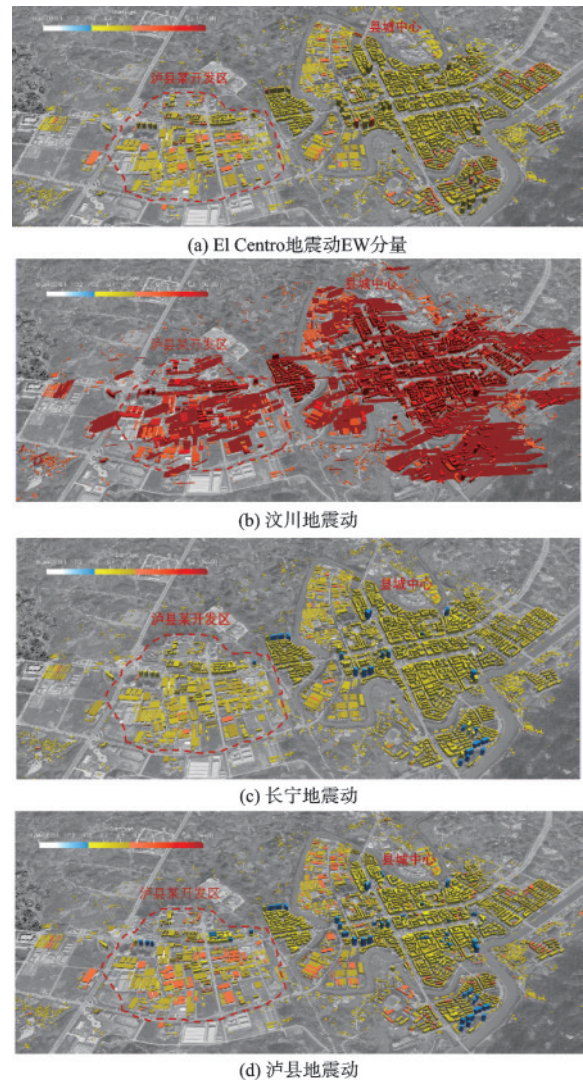


图11 不同地震动作用下泸县县城建筑群的损伤分布
Fig.11 Distribution of building group damage in Luxian County under different ground motions

的地震响应不同,其建筑损伤分布差异较大,即不同地震动对不同类型结构具有选择性破坏。

在不同地震动作用下,泸县县城建筑群损伤程度差异较大,为量化地震动对建筑群的破坏程度的差异,采用区域平均震害指数 R 来分析不同地震动对整个区域的破坏力^[1]。区域平均震害指数 R 以各单体建筑的建筑面积为权重进行加权平均得出,如式(1)所示:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

式中, i 为建筑编号; d_i 为第*i*个单体建筑的震害指数; A_i 为第*i*个建筑的建筑面积。

在4条地震动作用下,泸县县城建筑群的 R 和各破坏等级占比见表6。在汶川地震动作用下,泸

表6 不同地震动下泸县建筑群的R和破坏等级占比

Table 6 R-values and proportion of damage levels of building groups in Luxian County under different ground motions

名称	地震动		破坏等级占比/%					R
	PGA/gal	有效持时/s	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌	
El Centro地震动	313 (NS)	30.86	0.00	0.00	92.84	7.06	0.10	0.44
汶川地震动	586 (NS)	160.62	0.00	0.00	1.35	69.42	29.23	0.75
长宁地震动	599 (EW)	42.30	0.00	0.55	97.67	1.78	0.00	0.43
泸县地震动	756 (NS)	6.33	0.00	1.18	88.35	10.43	0.05	0.45

县县城建筑群的R高达0.75,其中29.23%的建筑倒塌,69.42%的建筑严重破坏。在El Centro地震动、长宁地震动和泸县地震动作用下,泸县县城建筑群破坏相对较轻,R约为0.45,多为中等破坏。因此,单一地震动参数难以代表地震动对建筑群R的影响,为探究建筑群R随时间演化的过程及其与PGA的关系,需要分别从不同时段及不同PGA两方面分析地震动对建筑群的破坏机理。

3.3 不同时段地面运动对泸县建筑群的破坏力特征

一条地震动的不同时段对震害的影响有可能不同,为量化研究建筑群在地震动时程的不同时段作用下破坏的规律,将4条地震动输入泸县县城仿真模型,给出各地震动作用下泸县县城建筑群R随时间t的变化情况。由于每条地震动有效加速度输入时间不同,以地震动加速度首次达到10 gal的时间点为地震动输入的时间起点^[19],对比分析泸县县城建筑群R随时间t变化的关系,如图12所示。

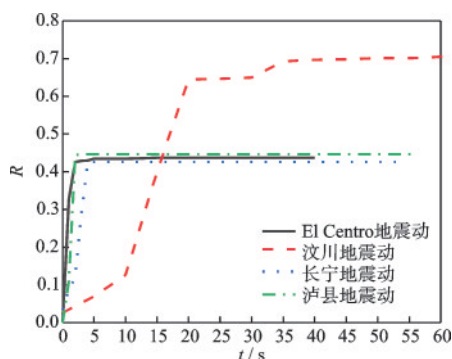


图12 0~60 s泸县县城建筑群R随t的变化关系

Fig.12 R-t relationship of building groups in Luxian County within 0~60s

由图12可知,在长宁地震动、泸县地震动、El Centro地震动作用下,R的增长速率较快,在5 s内达最大值后趋于稳定,约为0.44,泸县县城建筑群最终都为中等破坏。这3条地震动对长周期结构的破

坏力较低,难以对中高层框架结构造成严重破坏,同时都对砖混结构及低矮建筑破坏力较高,导致3条地震动的破坏发展历程与破坏程度接近。在汶川地震动作用下,R的增长速率先快后慢,在0~10 s增长至0.13,此时泸县县城建筑群总体破坏轻微;在10~20 s增长至0.64;在35 s达最大值后趋于稳定,约为0.7,泸县县城建筑群最终在整体上严重破坏。

在汶川地震动作用下,建筑群R随着t的变化过程与另外3条地震动差异明显,损伤增长过程长达35 s,是其余地震动的7倍左右,R是其余地震动的1.6倍左右。一方面是因为汶川地震动对中长周期结构具有较高的破坏力,另一方面是由于汶川地震动有效幅值较高且有效持时较长,建筑群在其作用下经历了更多的循环荷载,从而产生更高的损伤累积。这说明在不同地震动作用下,建筑群不同时间段的震害损伤增长存在差异,建筑群损伤发展较慢的地震动,后期仍可能对建筑群形成持续的破坏力,造成更严重的破坏。

3.4 不同地震动破坏力随峰值加速度的变化特征

为量化研究不同地震动波形在不同峰值加速度(PGA)下的破坏力特征,对所选地震动的PGA进行调幅,使其振幅依次从18 gal(6度多遇)调幅至620 gal(9度罕遇),并按照X向:Y向为1:0.85的比例输入模型^[20]。不同地震动作用下,泸县县城建筑群所对应的R随PGA的变化规律如图13所示,图中横坐标为地面峰值加速度,纵坐标为泸县县城建筑群R。

由图13可知,地震动PGA较小时,不同地震动造成的建筑群整体损伤接近。当R小于0.1时,此时建筑群整体破坏程度与地震动PGA的关联度较大。当R大于0.1时,泸县县城建筑群逐渐进入弹塑性阶段,其自振周期延长。随着PGA的增长,汶川地震动和El Centro地震动对长周期结构的破坏

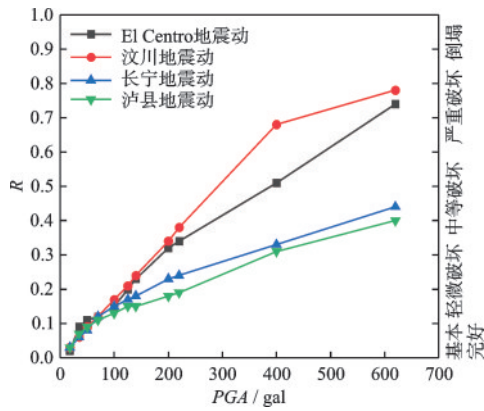


图 13 泸县县城建筑群 R 与地面峰值加速度的关系曲线
Fig.13 Relationship curve between R and ground peak acceleration for building groups in Luxian County

力显著提高,但另 2 条地震动对长周期结构的破坏力提高不明显,导致汶川地震动和 El Centro 地震动作用下建筑群的 R 增长速率较快,长宁地震动和泸县地震动作用下 R 的增长速率较慢。 PGA 为 400 gal 时 4 条地震动 R 相差最大,此时汶川地震动造成的破坏最为严重,其 R 分别为 El Centro 地震动、长宁地震动与泸县地震动的 1.3 倍、2.06 倍、2.19 倍。这表明,相同 PGA 下不同地震动造成的建筑群震害损伤相差可达数倍。

4 结 论

根据泸县县城的震害仿真模型,结合城市现场震害调查结果,验证了模型的有效性,并分析了城市建筑群震害机理,得出主要结论如下:

(1)城市震害仿真结果与实际震害基本相符,城市震害仿真方法具备合理性。其中,某中学震害仿真的中等破坏比例和倒塌比例差异均在 5% 以内,严重破坏比例的差异为 11.86%;某酒厂震害仿真的倒塌比例一致,中等破坏及严重破坏的比例差异分别为 18.76% 和 20.00%;泸县县城震害仿真的中等破坏比例和倒塌比例差异均在 5% 以内,严重破坏比例的差异为 10.44%。

(2)地震动的频谱特性使其对不同结构类型的破坏具有选择性,影响建筑群震后损伤程度与损伤分布。其中,在泸县地震动、长宁地震动、El Centro 地震动、汶川地震动作用下,以框架结构为主的泸县县城中心的破坏程度依次加重;在汶川地震动、泸县地震动、El Centro 地震动、长宁地震动作用下,以砖混结构为主的泸县某开发区厂房的破坏程度

依次减轻。

(3)在不同地震动作用下,建筑群的震害损伤演变存在差异。在汶川地震动作用下,建筑群 R 的损伤增长过程长达 35 s,是其余 3 条地震动的 7 倍左右, R 是其余 3 条地震动的 1.6 倍左右。

(4)在地震动 PGA 较小时,不同地震动造成的建筑群整体损伤接近。随着 PGA 的增长,不同地震动作用下建筑群损伤程度出现差异,相同 PGA 下不同地震动造成的震害损伤相差可达数倍。当 PGA 为 400gal 时,汶川地震动 R 分别为 El Centro 地震动、长宁地震动与泸县地震动的 1.3 倍、2.06 倍、2.19 倍。

致谢:感谢四川省应急管理厅、四川省减灾专家委员会、四川省住房和城乡建设厅、泸县人民政府、泸县应急管理局、泸县住建局等单位 and 同志提供的帮助,感谢中国地震局工程力学研究所为本研究提供强震动数据支持,感谢在本次震害调查过程中给予支持的学校、工厂等单位!

参考文献:

- [1] 林旭川,刘雪艳,胡仁康,等.鲁甸地震宏观震中建筑群震害分析与抗震韧性评估[J].地震研究,2020,43(3):449-455,601.
Lin X C, Liu X Y, Hu R K, et al. Regional damage analysis and resilience evaluation of buildings in the epicenter region of 2014 Ludian earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 229-445, 601. (in Chinese)
- [2] Fujita K, Ichimura T, Hori M, et al. A quick earthquake disaster estimation system with fast urban earthquake simulation and interactive visualization[J]. Procedia Computer Science, 2014, 29(5): 866-876.
- [3] Goodno B J, Gould N C, Caldwell P, et al. Effects of the January 2010 Haitian Earthquake on selected electrical equipment [J]. Earthquake Spectra, 2011, 27(S1): 251-276.
- [4] Lu X Z, Han B, Hori M, et al. A coarse-grained parallel approach for seismic damage simulations of urban areas based on refined models and GPU/CPU cooperative computing[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 70(4): 90-103.
- [5] Hori M, Ichimura T. Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster[J]. Journal of Seismology, 2008, 12(2): 307-321.
- [6] Hassan H, Fasan M, Sayed M, et al. Site-specific ground motion modeling for a historical Cairo site as a

- step towards computation of seismic input at cultural heritage sites[J]. *Engineering Geology*, 2020, 268(2): 1-19.
- [7] Nasrazadani H, Mahsuli M. Probabilistic framework for evaluating community resilience: integration of risk models and agent-based simulation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(11): 1-20.
- [8] 张灿, 陈文凯, 林旭川. 基于地震动参数的城市建筑物震害模拟——以兰州市城关区为例[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(1): 172-182.
Zhang C, Chen W K, Lin X C. Earthquake damage simulation of urban buildings based on ground motion parameters: a case study of Chengguan District in Lanzhou City[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(1): 172-182. (in Chinese)
- [9] 刘雪艳. 龙头山镇建筑群精细化地震破坏模拟及震害风险评估[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.
Liu X Y. Detailed earthquake damage simulation and earthquake damage risk assessment of longtoushan town buildings [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese)
- [10] Tian Y, Sun C J, Lu X Z, et al. Quantitative analysis of site-city interaction effects on regional seismic damage of buildings[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2020, 24(10): 1-22.
- [11] 潘毅, 陈建, 包韵雷, 等. 长宁 6.0 级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(增 1): 297-306.
Pan Y, Chen J, Bao Y L, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in Ms 6.0 Changning earthquake [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup1): 297-306. (in Chinese)
- [12] 潘毅, 袁家聪, 林拥军, 等. 泸定 6.8 级地震农村居住建筑震害调查与分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(6): 1200-1214.
Pan Y, Yuan J C, Lin Y J, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural residential buildings in Ms 6.8 Luding earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(6): 1200-1214. (in Chinese)
- [13] 四川地震局. 四川泸县 6.0 级地震烈度图发布 [EB/OL]. [2021-09-20] http://www.scdzj.gov.cn/xwzx/fzjzyw/202109/t20210920_50116.html.
- [14] 泸州市减灾委员会, 隆昌市应急管理局, 内江市应急管理局. 9.16 泸县 6.0 级地震灾害损失评估工作报告 [R]. 成都: 四川省应急管理厅, 2021.
- [15] 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.
- [16] 潘毅, 易督航, 游文龙, 等. 泸县 6.0 级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(5): 47-59.
Pan Y, Yi D H, You W L, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in Ms 6.0 Luxian earthquake [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(5): 47-59. (in Chinese)
- [17] 林旭川. 城市建筑群地震灾害数值仿真与风险控制 [J]. *城市与减灾*, 2017, 19(3): 18-22.
Lin X C. Earthquake disaster simulations and risk control for city buildings [J]. *City and Disaster Reduction*, 2017, 19(3): 18-22. (in Chinese)
- [18] 中国地震台网中心. 2021. 中国地震台网中心发布 9 月 16 日 4 时 33 分在四川泸州市泸县发生 6.0 级地震 [EB/OL]. [2021-09-16]. <https://www.cenc.ac.cn/eportal/ui?pageId=300453&articleKey=372366&columnId=323877>.
- [19] 王冲, 薄景山, 齐文浩, 等. 输入界面对地表加速度峰值的影响 [J]. *地震工程与工程振动*, 2011, 31(6): 55-61.
Wang C, Bo J S, Qi W H, et al. The effect of inputting interface of earthquake wave on the peak acceleration [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2011, 31(6): 55-61. (in Chinese)
- [20] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(本文编辑: 赵霞)