

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901024

芦山地震单开间砌体结构房屋震害特征*

朱占元^{1,2}, 陈婷婷^{1,2}, 邹祖银^{1,2}, 阙明阳^{1,3}

(1. 四川农业大学土木工程学院, 四川 都江堰 611830; 2. 四川农业大学村镇建设防灾减灾四川省高等学校工程研究中心, 四川 都江堰 611830; 3. 四川农业大学建筑与城乡规划学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 4.20芦山地震灾区临街自建单开间砌体结构房屋震害特别严重, 本文基于现场调查研究该类特殊房屋的建造习惯、震害特征与损伤机理, 研究表明: 单开间砌体房屋是芦山地震灾区等四川小城镇比较常见的临街建筑模式, 其平面狭长, 建造随意, 结构体系不合理, 构造措施不到位, 抗震能力弱; 芦山地震地震烈度8、9度灾区单开间砌体房屋底层纵墙剪切破坏, 普遍出现严重的贯通整片墙体的斜裂缝或X形裂缝。底层前部房间横墙无纵向支撑, 独立墙段过长, 横墙压弯破坏出现贯通整片墙体的水平裂缝, 并且墙体外鼓; 结构刚度中心与质量中心严重偏离, 房屋扭转震动加剧墙体裂缝开展, 相邻建筑反复碰撞作用是上部楼层震害的主要原因; 鞭梢效应加重突变楼层结构损伤, 引起出屋面附属建筑严重破坏甚至倒塌, 横墙端部剪切断裂乃至溃散。据此, 提出了既有单开间砌体房屋加固工作的建议。

关键词: 砌体结构; 单开间房屋; 震害调查; 建造习惯; 芦山地震

中图分类号: TU362 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0203-08

Analysis on Damage Characteristics of Single-bay Street Farmhouses in Lushan Earthquake

ZHU Zhanyuan^{1,2}, CHEN Tingting^{1,2}, ZOU Zuyin^{1,2}, QUE Mingyang^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China;

2. Sichuan Higher Education Engineering Research Center for Disaster Prevention and Mitigation of Village Construction, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China;

3. College of Architecture and Urban-Rural Planning, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: The damage of single-bay street farmhouses built with masonry is especially heavy during Lushan earthquake disaster. Based on field investigation, this paper studies the construction habit and earthquake damage characteristics of this type of special buildings. The research shows that the construction of single-bay masonry houses is relatively common in Lushan earthquake-stricken area and other small cities in Sichuan. The unreasonable house length, arbitrary construction, chaotic structural system and the absence of constructional measures should be responsible for the weakness of earthquake-resistant capacity of the house. The shear failure at the bottom of the longitudinal wall of single-bay houses results in oblique cracks or X-shaped cracks that cut through the entire wall in the areas

* 收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-04-04

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2021YJ0073)、四川省教育厅科研创新团队项目(16TD0006)、四川省教育厅青年基金项目(15ZB0001)资助

作者简介: 朱占元(1974—), 男, 教授, 博导。主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: zhuzyuan910@163.com

with earthquake intensity between 8 and 9. The cross wall of the ground floor is relatively long without longitudinal support, which leads to the cross wall cracks and protrudes outward due to press-bend failure. Structural stiffness center and mass center deviate seriously, hence the effect of torsion and vibration aggravates the development of wall cracks. The repeated collision of adjacent buildings is the main cause for the damage of the upper floor. The whiplash effect aggravates the damage of the floor structure, causing the upper accessory structure severe damage or even collapse. Besides, the end of the cross wall suffers fracture or collapse for the shear failure. Accordingly, suggestions for strengthening existing single story masonry buildings are put forward.

Keywords: masonry structure; single-bay street farmhouses; seismic damage investigation; construction habit; Lushan earthquake

引言

近20年来,国内外重大地震造成的重大人员伤亡多为非正规设计施工的自建类房屋倒塌所致,我国广大农村地区自建房屋(简称农房)也是历次地震中遭受破坏最严重、数量最多、造成人员伤亡最大的工程群体^[1]。4.20芦山地震农房震害尤其突显,芦山地震震级7.0级,震源深度13 km,震中烈度9度,造成196人死亡,21人失踪^[2];雅安市倒塌房屋农村18.63余万间(97%)、城镇0.67余万间(3%),严重受损房屋农村43余万间(84%)、城镇8.0余万间(16%)^[3];毁坏房屋约94%为木、砖木和砖砌体等自建房屋,其中不乏2008年汶川地震之后的新建房屋^[1]。

自建类房屋的抗震性能与社会经济等众多因素有关。在经济贫困的尼泊尔地区,由于材料劣质、施工质量欠缺、无构造措施等造成砌体结构震害严重^[4-6]。在南亚、中亚、南美洲等经济水平较低的国家砌体结构地震易损比较普遍^[7-8],而经济较为发达的土耳其、意大利,砌体结构震害较轻^[9-10]。

农村自建房屋损毁是人员伤亡和巨大经济损失的主要因素,终止农村不断重复出现的地震灾害是当今村镇建设的迫切需求。芦山地震掀起了农房震害调查的热潮。谭浩等^[11-12]调查指出砌体结构震害集中在墙体、楼梯间、屋盖等部位;杨永强等^[13]提出场地选址不合理、承重材料不达标、构造柱设置不当、防震缝宽度不够、建筑形体不规则是芦山地震震害的主要原因。陆鸣等^[1]详细分析了木、砖木、砖砌体、底框砌体等各类建筑结构的特点及震害特征,发现设置构造措施的房屋抗震效果显著,底框砌体房屋、砖砌体房屋与砖木房屋的抗震能力依次降低,年久失修的木房屋的抗震能力低于砖木结构;周铁钢等^[2]对比2008年汶川地震农村建筑,提出当地农户恢复重建抗震防灾意识有所增强,新建农房的抗震性能有所提高,但是,质量与安全意识依然薄弱,农村抗震防灾工作依然任重道远,未来政府应加强技术支持和行政监管。

芦山地震后,课题组多次调查发现自建临街单开间砌体房屋震害非常严重,图1(a)、(b)整条街道被摧毁,损毁率达100%。这种房屋均是2000年后修建,具有商业、居住等功能,建筑性价比较



图1 芦山地震单开间临街砌体房屋震害照片(2013年)

Fig.1 Seismic damage of single-bay street farmhouses built with masonry in Lushan earthquake (2013)

高,是芦山地震灾区比较常见的临街建筑模式,广泛分布于四川小城镇街道。临街(公路)交通便利,宅基地每户一个开间,为免邻居纠纷习惯单独修建且不共用墙体,且为了增加建筑面积而一味增加进深和层数,形成单开间、深进深、多楼层的特殊自建砌体结构。这种结构体系不合理,至今无文献专门研究。鉴于此,本文总结自建临街单开间砌体房屋的建造习惯与震害特征,并探讨其震害产生的原因,为单开间砌体房屋的抗震设计和加固提供参考。

1 临街单开间砌体房屋建造习惯

单开间砌体房屋在四川、重庆等省市的小城镇极其普遍,如图2所示,其常见平面布局如图3所示。底层为商铺(或堂屋)、楼梯间、卫生间和厨房,

二楼为客厅和卧室,三楼及以上为卧室或者储藏间。房屋的开间和进深取决于宅基地的大小,一般开间为3.0~4.5 m,进深为10~20 m;层数为3~6层,底层层高3.6~4.2 m,二层及以上3.0~3.3 m;二层前后各悬挑0.9~1.2 m,以增加建筑面积并兼做底层雨篷。为解决进深过大采光不足的问题,常在临街侧底层设大开间卷帘门,其他层开大窗户,三跑楼梯间内设置天井。

单开间砌体房屋常采用横墙承重方案,其墙体厚度、构造措施与所在地区的建造习惯、建造年代有关,一般承重横墙180 mm厚,纵墙为隔墙,120 mm厚;预应力空心楼板,楼梯间现浇;地圈梁必设,其他层圈梁根据业主经济状况而定,构造柱则少有设置。因地震较多,随着政府引导及管理的加强,近三年新建房屋横墙普遍采用240 mm厚,楼板现浇,构造柱设置意识增加。



图2 四川开江县任市镇自建单开间砌体房屋(2015年)

Fig.2 The self-built masonry buildings with single bay at Renshi town, Kaijiang county, Sichuan (2015)

2 临街单开间砌体房屋震害分析

2.1 纵墙震害

芦山地震纵墙震害照片如图4所示,主要是剪切破坏,8、9度烈度区普遍出现严重的贯通整片墙体的斜裂缝或X形裂缝,且裂缝局部酥碎。对比可见裂缝的大小和形状与地震烈度、洞口尺寸、墙体厚度、开间、层高等密切相关;墙体越厚、洞口越小(少),震害则越轻,如图4(a~e)所示;图4(a)中120 mm的普通砖墙与图4(b)中开设两个洞口的190 mm多孔砖墙,其裂缝发育程度显著高于其他墙体;外纵墙开大窗洞,窗边墙更易损坏,如图4(f)所示。从图3可以看出,单开间砌体结构房屋纵向仅靠内

部隔墙承受水平地震作用,纵墙间距较大且墙体厚度薄,尤其是底层商铺内纵墙从属荷载面积大,纵向刚度较差,抗剪承载力不足是其震害的主要原因。

2.2 底层横墙震害

横墙是单开间砌体房屋的承重墙,最不利墙段为底层商铺,农民为扩大商业面积而增大房间进深,导致横墙无纵向支撑,独立墙段过长,甚至达到10 m以上,如图3所示。芦山地震横墙典型震害如图5所示,墙体抗弯刚度小,稳定承载能力有限^[14],地震作用下8、9度烈度区底层普遍出现严重的贯通整片墙体的水平裂缝,并且墙体外鼓,表现为压弯破坏。对比可见,图5(a)墙厚180 mm,4层房屋荷

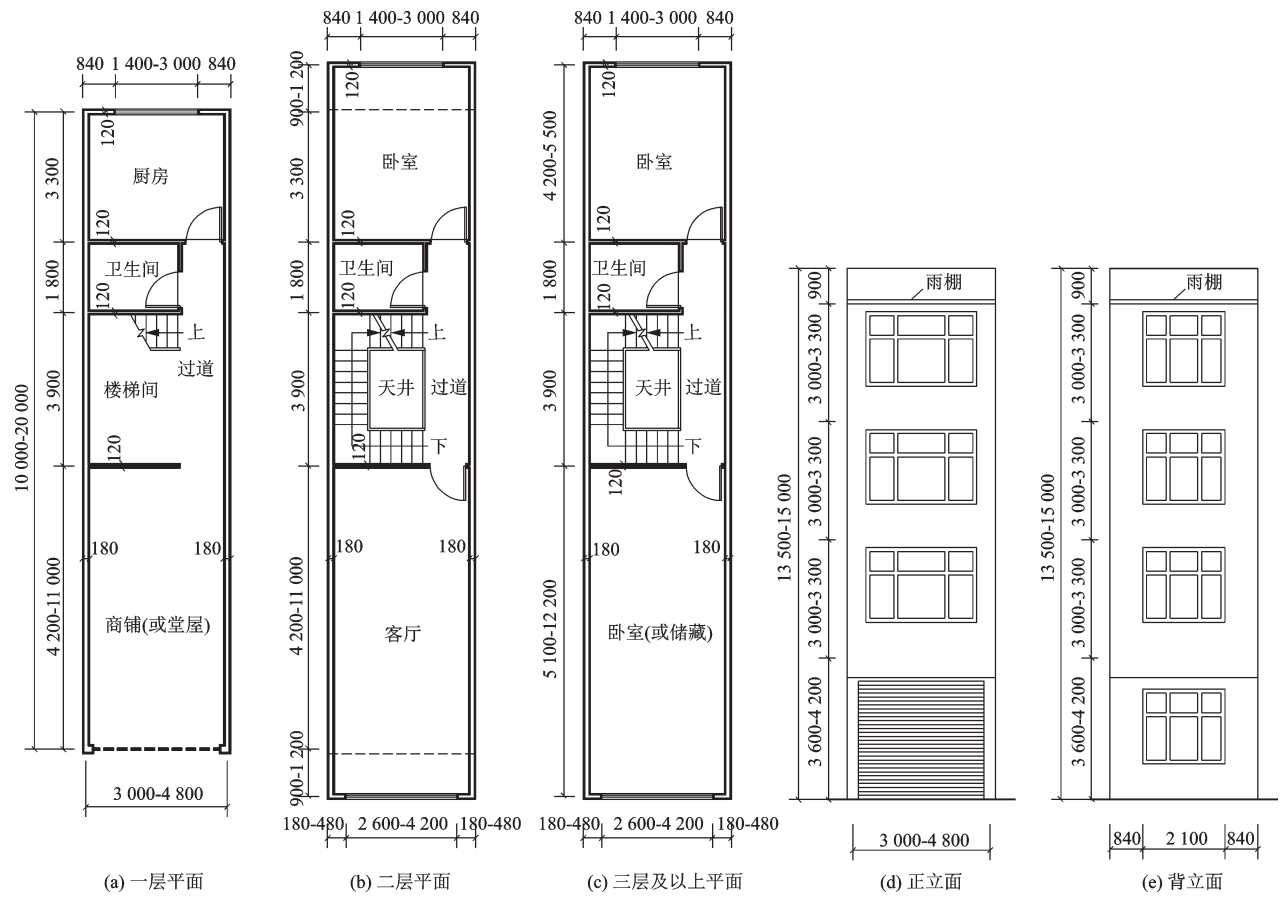


图3 常见单开间砌体房屋功能布置平面和立面

Fig.3 Functional layout and elevation plan of the common single-bay street farmhouse



图4 纵墙震害现场照片

Fig.4 The on-site photos of earthquake damage of longitudinal wall

载致使横墙外鼓,墙面装饰层剥离,卷帘门侧柱脚局部压碎;图5(b)、5(c)墙体厚度增加,裂缝略有减轻,底层层高中部墙体反复弯曲致使装饰层剥离。由于芦山地震最高烈度为9度,上述现象表明墙体稳定承载力严重不足,故该类建筑横墙考虑竖向地震作用的墙体稳定承载能力验算不容忽视。

2.3 扭转震动效应

图6为芦山县龙门乡某二层单开间农房震害照片和平面布置。可见在现浇刚性楼盖、屋盖的约束扭转剪切作用下,窗下角墙体剪碎,横墙出现严重的贯通整片墙体的水平裂缝。底层左侧墙体由于楼梯中间平台的支撑导致水平裂缝发生在半层高附近并向门洞上下延伸,墙体外鼓且裂缝局部酥碎;二层左侧横墙由于楼梯间纵墙的支撑作用,裂缝从窗下角水平延伸一段后,再向后上部延伸,如图6(a)所示。底层右侧水平裂缝位于墙底和墙顶;二层右侧横墙直接从窗下角向后部水平延伸,如图6(b)所示。从平面布置图可见,该房屋楼梯间放置

在端部,底层只有尽端一片纵墙,二层两片纵墙也靠近房屋后侧布置,前端开大洞口,结构刚度中心与质量中心严重偏离,房屋的扭转震动是震害的主要诱因。

2.4 相邻房屋碰撞效应

如图1、2所示,农民建房时不愿共墙,但又紧邻修建,两栋之间的间隙远远无法满足抗震缝宽度要求。图7为芦山县9度烈度区三层单开间砌体房屋的碰撞震害。可见无论单侧不等高、双侧不等高还是等高建设,单开间砌体房屋都会发生严重碰撞损伤。房屋撞击加速上部楼层扭转震动反应,刚性屋盖建筑的顶层外纵墙窗洞口处剪坏,横墙扭转剪切出现通缝且前端局部剪出,单侧不等高碰撞损伤严重于两侧均有建筑,如图7(a~c)所示;柔性木檩屋盖结构约束作用弱,导致屋盖倒塌,如图7(d)所示。碰撞损伤主要在碰撞部位相邻楼层,单开间房屋平面狭长,侧向刚度弱、变形大,墙体扭转震动和相邻建筑的碰撞冲击效应是主要诱因,刚性屋盖震害相对较轻。



图5 底层横墙震害现场照片

Fig.5 Earthquake damage at the bottom of cross wall

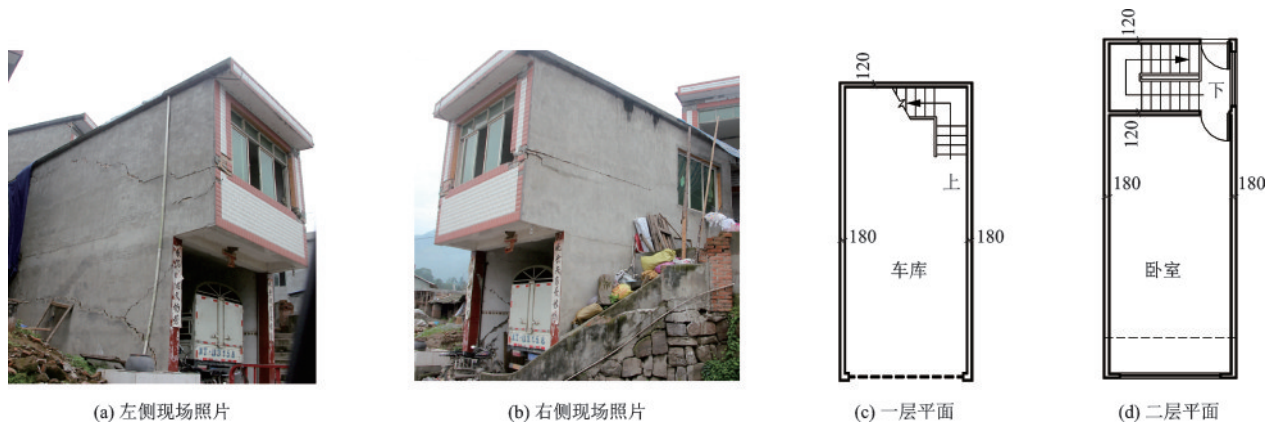


图6 两层单开间砌体房屋震害(龙门乡9度)照片和平面布置

Fig.6 The earthquake damage of two-story masonry building with single bay in the intensity 9 area of Longmen



图7 芦山县9度区三层单开间砌体房屋碰撞震害照片

Fig.7 The collision damage of three-story masonry buildings with single bay in the intensity 9 area of Lushan

图8为宝兴县灵关镇8度烈度区单开间砌体房屋碰撞震害。可见左右撞击加速上部楼层扭转震动,5层无构造柱建筑顶层倒塌,屋顶扭转撞击震动使横墙出现水平通缝,局部墙体扭剪破坏崩塌,如图8(a~b)所示。图8(c)中两栋5层单开间砌体房屋均采用现浇楼盖并设置构造柱,可以看出左侧房屋横墙厚180mm有撞击,建筑局部突出、屋顶倒塌,三层楼面碰撞相邻构造柱断裂(图8(d)),构造柱约束墙体并没有溃散,但结构严重损坏而拆除重建;与之相邻的5层240mm厚新建墙体建筑,由于墙体厚度增加,构造柱大,结构中等损坏,目前加固后仍在继续使用。

2.5 鞭梢效应

单开间砌体房屋的鞭梢效应最容易引起出屋面附属建筑严重破坏甚至倒塌,如图1、图8所示。图9(a)的建筑为1、2层双开间,为了增加建筑面积加建3、4层为单开间,未设构造柱,鞭梢效应造

成屋顶倒塌,3楼横墙端部应力集中处溃散。图9(b)中虽仅在2层局部突出增加一层单开间房屋,鞭梢效应仍然造成横墙端部剪切断裂,如图9(c)所示。

3 既有单开间农房加固建议

基于芦山地震现场的调查表明,7度烈度区三层单开间农房横墙、窗洞墙角就有明显剪切裂缝。选图1(a)的三层单开间农房为原型,模型参数设置、材料本构关系选择等详见参考文献[16],采用ABAQUS有限元分析0.10g(7度设防)El Centro波作用下房屋受拉损伤云图,如图10所示。可见房屋损伤与图4(e)、4(f)等震害现象吻合,即使结构布置均匀的3m开间3层楼房屋在没有碰撞的作用下,7度地震门窗洞口墙角破坏也比较显著,如果结构布置不均匀引起扭转与碰撞作用,房屋震害将更加严重。



图8 宝兴县灵关镇8度区单开间砌体房屋碰撞震害照片

Fig.8 The collision damage of masonry buildings with single bay in the intensity 8 area of Lingguan town, Baoxing county



图9 鞭梢效应(龙门乡9度)

Fig.9 The whiplash effect of buildings in the seismic intensity 9 area of Longmen

基于上述震害特征,建议对设防烈度7度以上地区三层以上的既有单开间农房采取必要的加固措施。结合“经济、合理、有效、实用”的原则^[15],建议单开间农房加固应重点关注以下几点:(1)在纵墙与外横墙交接处、楼梯四角等采用钢筋网片现浇砂浆带或者其它方式增设构造柱,约束墙体增强整体性;(2)底层墙厚为120~180 mm的内纵墙采用钢筋网片现浇砂浆加固增厚至240 mm,提高其抗剪承载能力,减少层间位移;(3)外纵墙门洞和窗洞附近加厚墙体或增加抗侧力构件,调整房屋刚度中心与质量中心尽量重合,减轻扭转震动;(4)横墙厚度为180 mm,层数超过四层的建筑必须设法将底层墙厚增加至240 mm,保障其稳定承载能力;(5)加强局部突出屋顶连接构造,提高承载力,减少鞭梢效应损伤。

比较常见的临街建筑模式,广泛分布于四川、重庆等省市小城镇街道。该类房屋平面狭长,建造随意,结构体系不合理,构造措施不到位,地震时易遭受重创。

(2)8、9度烈度区单开间砌体房屋底层纵墙剪切破坏,普遍出现严重的贯通整片墙体的斜裂缝或X形裂缝;底层前部房间横墙无纵向支撑,独立墙段过长,横墙压弯破坏出现严重的贯通整片墙体的水平裂缝,并且墙体外鼓。

(3)结构刚度中心与质量中心严重偏离,房屋扭转震动加剧墙体裂缝开展,相邻建筑反复碰撞导致上部楼层震害也十分严重;结构竖向刚度突变,鞭梢效应加重突变楼层结构损伤,引起出屋面附属建筑严重破坏甚至倒塌,横墙端部剪切断裂乃至溃散。

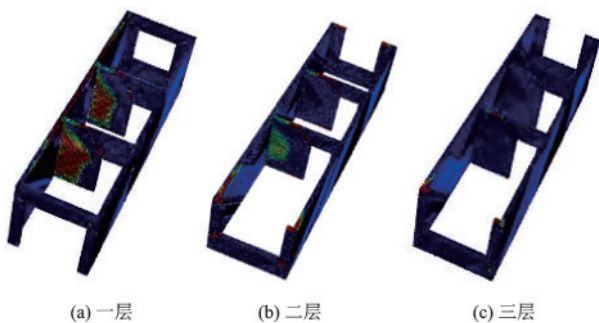


图10 0.10g三层单开间房屋受拉损伤云图(开间3 m)

Fig.10 Distribution of tensile damage of a three-storey house with 3-meter single bay space under earthquake acceleration of 0.1g

4 结 论

(1)自建临街单开间砌体房屋是芦山地震灾区

参考文献:

- [1] 陆鸣, 邢珏蕙, 喻焜, 等. 非正规设计施工建筑及芦山7.0级地震震害调查[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 131-137.
Lu M, Xing J H, Yu T, et al. The investigation and analysis on the damage of non-engineered buildings in Lushan earthquake with Ms 7.0 [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(6): 131-137. (in Chinese)
- [2] 周铁钢, 钱相博, 张冰冰. 芦山地震农村房屋震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 53-58.
Zhou T G, Qian X B, Zhang B B. Investigation and analysis of damage to rural houses in Lushan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(3): 53-58. (in Chinese)

- [3] 吴斌, 常雪梅. 国务院新闻办在京举行“4·20”芦山7.0级强烈地震新闻发布会[N/OL]. 人民网, 2013-04-26. <http://cpc.people.com.cn/n/2013/0426/c64387-21298200.html>.
Wu B, Chang X M. The State Council Information Office held a press conference on the "4·20" Lushan 7.0 earthquake in Beijing [N/OL]. People's network, 2013-04-26. <http://cpc.people.com.cn/n/2013/0426/c64387-21298200.html>. (in Chinese)
- [4] 潘毅, 王忠凯, 时胜杰, 等. 尼泊尔8.1级地震加德满都—樟木沿线居民震害调查与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 35-44.
Pan Y, Wang Zh K, Shi Sh J, et al. Investigation and analysis on seismic damage of residential buildings along the highway from Kathmandu to Zhangmu in Ms 8.1 Gorkha Earthquake [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 35-44. (in Chinese)
- [5] Sharma K, Deng L, Noguez C C. Field investigation on the performance of building structures during the April 25, 2015, Gorkha earthquake in Nepal [J]. Engineering Structures, 2016, 121: 61-74.
- [6] Pan Y, Wang X, Guo R, et al. Seismic damage assessment of Nepalese cultural heritage building and seismic retrofit strategies: 25 April 2015 Gorkha (Nepal) earthquake [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 87: 80-95.
- [7] Villar-vega M, Silva V. Assessment of earthquake damage considering the characteristics of past events in South America [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 99: 86-96.
- [8] Lang D H, Kumar A, Sulaymanov S, et al. Building typology classification and earthquake vulnerability scale of Central and South Asian building stock [J]. Journal of Building Engineering, 2017, 15: 261-277.
- [9] Bayraktar A, Coşkun N, Yalçın A. Damages of masonry buildings during the July 2, 2004 Doğubayazıt (Ağrı) earthquake in Turkey [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(1): 147-157.
- [10] Sorrentino L, Cattari S, Porto F D, et al. Seismic behaviour of ordinary masonry buildings during the 2016 central Italy earthquakes [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(10): 5583-5607.
- [11] 谭皓, 张电吉. 芦山地震底部框架砌体房屋震害分析[J]. 世界地震工程, 2015, 31(1): 76-81.
Tan H, Zhang D J. Seismic damage analysis of masonry structures with ground RC frame building during Lushan earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(1): 76-81. (in Chinese)
- [12] 谭皓, 卢海林, 吴巧云, 等. 芦山地震砌体结构震害分析[J]. 世界地震工程, 2016(1): 59-64.
Tan H, Lu H L, Wu Q Y, et al. Damage and analysis of masonry structure in Lushan earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2016(1): 59-64. (in Chinese)
- [13] 杨永强, 公茂盛, 谢礼立, 等. 芦山M7.0级地震中砖混结构民居震害特征分析[J]. 建筑结构, 2014, 44(18): 68-70.
Yang Y Q, Gong M Sh, Xie L L, et al. Analysis on seismic damage characteristics of masonry-concrete structure dwellings in Lushan M7.0 earthquake [J]. Building Structure, 2014, 44(18): 68-70. (in Chinese)
- [14] 魏智辉, 潘毅, 邱洪兴, 等. 勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 184-188.
Wei Zh H, Pan Y, Qiu H X, et al. Experimental study on compressive behavior of masonry walls strengthened with pointing mortar [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 184-188. (in Chinese)
- [15] 赵世春, 潘毅, 高永昭, 等. 《四川省建筑抗震鉴定与加固技术规程》编制要点[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(增2): 310-311.
Zhao S C, Pan Y, Gao Z Y, et al. The key point of Technical specification for seismic appraisal and reinforcement of buildings in Sichuan [J]. Journal of civil Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32 (Sup 2): 310-311. (in Chinese)
- [16] 陈婷婷. 自建无构造柱单开间农房振动台试验与有限元分析[D]. 成都: 四川农业大学, 2018.
Chen T T. The unstructured column single-bay street farmhouse of shaking table test and finite element analysis [D]. Chendu: Sichuan Agricultural University, 2018. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)