

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230921001

泸定6.8级地震农村居住建筑震害调查与分析*

潘毅^{1,2}, 袁家聪¹, 林拥军¹, 宋杰¹, 朱立新³

(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. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 2022年9月5日, 四川省泸定县发生了6.8级地震, 对泸定、石棉、汉源等地区的农村建筑造成严重影响。为了分析农村建筑的震害, 对评估烈度为VI~IX度区域12个乡镇35个地点的农村建筑进行了现场调查, 总结了砖砌体结构、木结构、石结构和生土结构的典型震害特征, 并对4种结构的震害等级进行了统计和分析。结果表明: 砖砌体结构房屋的严重破坏及倒塌占比为4.2%和3.3%, 且与构造措施有很大关系, 未经正规设计且缺乏构造措施的砌体结构出现屋面破坏、局部甚至整体倒塌, 但设有构造措施的砌体结构房屋保存较好; 木结构建筑整体受损较轻, 但由于本次泸定地震的竖向作用强烈, 木屋盖破坏较为严重; 石砌体结构和生土结构房屋, 发生严重破坏和倒塌的比例较高, 严重破坏占比分别为7.2%和5.1%, 倒塌占比分别为10%和7%, 破坏最为严重。山体滑坡、落石等次生灾害对建筑造成不同程度的损坏, 是此次泸定地震的特征之一。针对此次泸定地震的破坏特征, 建议农村建筑落实抗震措施, 引入适用的新工艺; 灾后恢复过程中, 以房屋震损程度评估为基础, 重建与加固相结合; 同时, 建议注重农村规划、选址的研究, 降低地震次生灾害破坏; 应当进行抗震科普宣传, 加强农村工匠培训。

关键词: 泸定地震; 震害调查; 农村居住建筑; 砖混结构; 木结构; 石结构; 生土结构; 次生灾害

中图分类号: TU352.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1200-15

Seismic Damage Investigation and Analysis of Rural Residential Buildings in M_s 6.8 Luding Earthquake

PAN Yi^{1,2}, YUAN Jiacong¹, LIN Yongjun¹, SONG Jie¹, ZHU Lixin³

(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. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: On September 5th, 2022, a 6.8 magnitude earthquake hit Luding County in Sichuan province, causing extensive damage to rural buildings in Luding, Shimian, Hanyuan, and surrounding areas. A detailed seismic damage investigation covering 35 zones in 12 villages and towns was conducted, revealing varying seismic damage across structures with seismic intensities from VI to IX. The distinct seismic damage patterns were observed in brick masonry, wood, stone, and raw soil structures.

* 收稿日期: 2023-09-21; 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 四川省自然科学基金(2022NSFSC0423, 2022NSFSC0430)资助

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

通讯作者: 林拥军(1974—), 男, 副教授, 博士。主要从事结构工程抗震与加固方面的研究。

E-mail: linyongjun@home.swjtu.edu.cn

Statistical analysis showed varying damage levels among these types. The investigation and analysis revealed that brick masonry structures had a 4.2% severe damage rate and 3.3% collapse rate, with these outcomes closely linked to constructional practices. Masonry structures lacking adequate aseismic design and earthquake-resistant construction measures suffered from roof damage, partial collapse, or complete failure. Conversely, those equipped with appropriate measures demonstrated better structural integrity. Wooden structures showed minor damage overall, with significant roof damage due to vertical earthquake forces. Stone masonry and raw soil structures exhibited elevated rates of severe damage and collapse, with percentages of 7.2% and 5.1% for serious damage and 10% and 7% for collapse, respectively. Secondary disasters like landslides and rockfalls also contributed to the damage, marking a significant aspect of the Luding earthquake's impact. Regarding the damage attributes of the Luding earthquake, it is advisable to integrate earthquake-resistant construction practices and new technologies during the rural residential building construction process. Post-disaster efforts should focus on the combination of the reconstruction and reinforcement, guided by damage assessments, with a focus on rural layout and site selection for future seismic resilience. Additionally, educating rural communities and training artisans in earthquake-related knowledge is crucial.

Keywords: Luding earthquake; earthquake damage survey; rural residential buildings; brick and concrete structures; wooden structures; stone structures; raw soil structures; secondary disaster

0 引言

四川省位于我国西南部,境内分布多条活动的地震断裂带。近年来,四川省强震频发,仅2008~2023年,就发生了汶川8.0级地震(2008年)、攀枝花6.1级地震(2008年)、芦山7.0级地震(2013年)、康定6.3级地震(2014年)、九寨沟7.0级地震(2018年)、长宁6.0级地震(2019年)、泸县6.0级地震(2021年)、芦山6.1级地震(2022年)、马尔康6.0级地震(2022年)、泸定6.8级地震等多次强震,如图1所示。这些强震的震中多位于山高坡地、高差悬殊的地区,且往往山体破碎、岩体裸露。除因强震作用导致的房屋直接破坏外,由于山体滑坡、落石导致了次生灾害,其造成的房屋破坏也占到了相当比例,且场地的不利影响加重了震害。

除镇、村委会所在地及个别集中居住点外,四川省大部分农户基本上以散居为主,几户或十几户为一村民小组,散布建于河谷两岸或山坡上,呈现出“局部集中,整体分散”的特点。农村居住建筑一般为村民自建,未经正规抗震设计,多以砖混(砖

木)结构、木结构为主,也有部分石结构和生土结构。依建造年代和农户经济条件,这几类结构形式农房的震害表现存在明显差异。

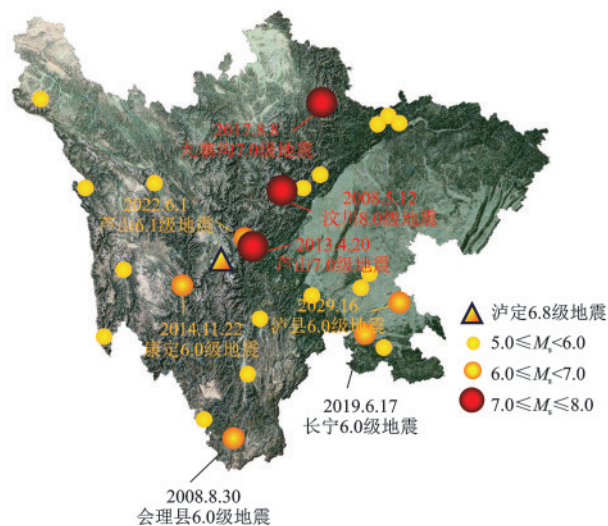


图1 2008~2023年四川省5.0级以上地震分布

Fig.1 Distribution of earthquakes greater than $M_s 5.0$ in Sichuan Province from 2008 to 2023

为掌握农村居住建筑的震害机理和原因,国内学者从直接震害与次生灾害两方面进行了调查与分析。在直接震害调查方面,于文等^[1]调查了汶川

8.0级地震中村镇建筑的震害特征,发现自建房抗震性能差的原因是建造方式不合理、施工质量差。高永武等^[2]对芦山7.0级地震的村镇震害进行了调查,发现木结构建筑震害轻,具有较好的抗震性能。陈相兆等^[3]调查了康定6.3级地震中的建筑震害,发现石木结构房屋抗震性能比砖混、框架等结构差。曲哲等^[4]、潘毅等^[5]对尼泊尔8.1级地震中的片石结构和自建框架结构进行了震害调查,发现多数片石结构损毁严重,抗震性能低于自建框架结构。张令心等^[6]调查了九寨沟7.0级地震中民居中非结构构件的震害,发现吊顶、管线和夹具等破坏严重,易造成人员二次伤害。戴必辉等^[7]对云南漾濞6.4级地震中的砖混结构震害调查,发现圈梁和构造柱的缺失,是导致其破坏的主要原因。潘毅等^[8]总结了泸县6.0级地震中自建农房的震害特征,分析了灾区农房破坏的主要原因,给出了灾后重建的建议。在次生灾害调查方面,王根龙等^[9]对汶川8.0级地震中极震区的次生地质进行调研,分析了地质灾害分布和发育特征,得出了滑坡和崩塌的破坏机理。周铁钢等^[10]对鲁甸6.5级地震中民居震害进行调研,发现灾区多数民居常建在坡地或河谷地带,易受次生灾害影响,对人员安全造成威胁。潘毅等^[11]对长宁6.0级地震的次生灾害进行调研,分析了山体落石和滑坡的形成机理,并对山区次生灾害的监测与防治提出建议。潘毅等^[12]对芦山6.1级地震中对山区的地质灾害和建筑震害进行了详细的调研,并对灾害形成机理进行了分析。

尽管有过多农村居住建筑的震害调查,但由于农村地区经济发展水平不同,农房存在建造时期各异、建造质量不一,建设地点分散,且结构形式多样等特点,导致其震害特征的差异较大,有必要对每次破坏性地震的震害进行详细调查和分析,以为农村抗震防灾建设提供更多基础数据。

针对此次泸定6.8级地震,笔者所在课题组对灾区12个乡镇总计35个村庄的居住建筑直接震害和次生灾害进行了调查,分析了砖混结构、木结构、石结构和生土结构的典型震害特征和破坏原因,并对烈度为Ⅵ~Ⅸ度地区农村居住建筑的破坏等级进行了分类和统计,可为农村居住建筑的抗震性能研究提供参考。

1 地震概况

2022年9月5日12时52分,四川甘孜州泸定县发生6.8级地震,震源深度为11 km。地震震中位于鲜水河断裂带东段磨西断裂附近,为主震-余震型地震序列。依据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015),泸定县的抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度值为0.2g或0.30g,部分地区为Ⅸ度,设计基本地震加速度值为0.40g,地震分组为第二组。其中,位于石棉县新民藏族彝族乡境内,距离震中28.3 km的T2471台站(新乡站)记录到了本次地震动,其东西向峰值加速度为0.64g。该地震动的东西(EW)、南北(NS)和竖向(UD)三个方向拟加速度反应谱与规范设计谱的比较如图2所示。由图2可知,该地震动记录东西向的谱加速度超过Ⅸ度罕遇地震规范反应谱的加速度,且竖向与南北向的拟加速度之比接近0.9,表现出强烈的竖向特性。

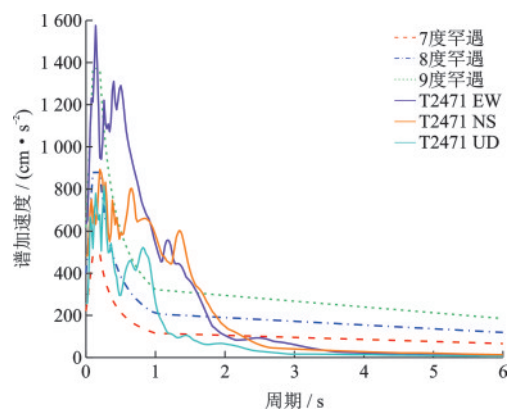


图2 拟加速度反应谱与规范设计谱的比较

Fig.2 Comparison between pseudo acceleration spectra and design response spectra in Code

泸定地震最高烈度为Ⅸ度。其中,Ⅸ度区等震线长轴呈北西走向,长轴195 km,短轴112 km,Ⅸ度区的面积达280 km²。此次地震烈度及影响范围仅次于2008年的汶川地震和2003年的芦山地震。地震发生后,课题组对震区范围内的磨西镇、得妥镇、德威镇等地区进行了调研,覆盖了评估烈度Ⅵ~Ⅸ度区,见图3和表1。

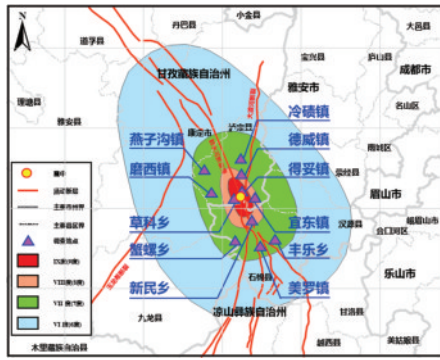


图3 泸定县6.8级地震农村居住建筑的调查点

Fig.3 Investigated locations of rural residential buildings in the Luding Ms 6.8 earthquake

表1 泸定县6.8级地震农村居住建筑震害调研地点

Table 1 Investigated locations of rural residential buildings in the Luding Ms 6.8 earthquake

序号	所属县	所属镇(乡)	调研地点	地震遭遇烈度	地震设防烈度	
1	石棉县	丰乐乡	菜园子村	Ⅶ	Ⅷ度 (0.2g)	
2			高桥村	Ⅶ		
3			蒿子坪	Ⅶ		
4			蜡树村	Ⅶ		
5			三星村	Ⅶ		
6			田坎村	Ⅶ		
7			方元村	Ⅶ		
8		美罗镇	坪阳村	Ⅶ		
9			镇政府	Ⅶ		
10			蟹螺乡	猛种村		Ⅶ
11		新民乡	海子山村	Ⅶ		
12			农乡村	Ⅶ		
13		草科乡	农家村	Ⅶ		
14			田湾河村	Ⅶ		
15		王岗坪乡	挖角村	Ⅸ		
16			跃进村	Ⅸ		
17			爱国村	Ⅸ		
18	汉源县	宜东镇	三交乡	Ⅶ	Ⅷ度 (0.3g)	
19	得妥镇	北头村	Ⅶ			
20		联合村	Ⅶ			
21		南头村	Ⅶ			
22		湾东村	Ⅶ			
23	德威镇	加郡村	Ⅶ			
24		金洞子村	Ⅷ			
25		沙坝村	Ⅷ			
26	寨子坡村	Ⅶ	Ⅸ度 (0.4g)			
27	泸定县	冷碛镇		杵坭村		Ⅶ
28				塘坊村		Ⅶ
29	磨西镇	柏秧坪村		Ⅸ		
30		冈坪村		Ⅸ		
31		共和村		Ⅸ		
32		杉树村		Ⅸ		
33		咱地村		Ⅸ		
34	燕子沟镇	燕子沟村		Ⅸ		
35		跃进坪村	Ⅸ			

2 直接震害特征与分析

2.1 砖砌体结构

泸定地震灾区的农村砖砌体结构主要采用黏土砖墙承担竖向和水平荷载,楼屋面则采用木制构件或现浇、装配式钢筋混凝土板,其屋盖为木制楼盖,即砖木结构;或者为混凝土现浇楼盖,为砖混结构。这些房屋大多是当地居民自建,缺乏抗震措施,抗震能力普遍较低。其震害特征主要表现为整体倒塌、局部倒塌、墙体破坏、砖柱破坏和屋顶破坏。

2.1.1 整体倒塌

本次泸定地震引发了一些砖砌体结构的整体倒塌和局部倒塌,例如,得妥镇湾东村的某单层砖混结构就发生了整体倒塌,如图4所示。这是由于该类砖混结构缺乏圈梁、构造柱等抗震构造措施,纵横墙之间及墙体与楼板之间没有采取可靠的抗震拉结措施,结构整体性差。在地震作用下,由于缺乏平面外的侧向支撑,墙体平面外失稳,导致倾覆,甚至楼屋面板掉落,从而造成房屋倒塌。此外,墙体中的砂浆在外界环境的影响下老化,力学性能下降,削弱砌体的抗剪强度^[13],降低砌体结构抵抗地震水平作用能力。



图4 整体倒塌(新民乡,Ⅶ度)

Fig.4 Overall collapse of the structure (Xinmin Village, intensity of Ⅶ)

2.1.2 局部倒塌

农村地区砌体结构房屋往往未经正规设计,缺乏圈梁与构造柱等抗震措施,导致结构整体性能差,地震作用下出现局部倒塌,如图5(a)所示。而与之相邻的另一栋建筑,因为抗震措施完整,圈梁和构造柱对墙体形成有效的约束,地震后处于基本完好的状态,如图5(b)所示。尽管两栋房屋结构形

式相近,遭遇地震烈度和场地条件也相同,震害特征却大相径庭,可见建筑抗震规范规定的抗震构造措施的重要性和必要性。这些措施能够有效地提升房屋的抗震能力,减轻地震对建筑物的破坏,从而保障人们的生命财产安全。

木屋盖与墙体缺乏可靠的连接,也是结构在地震中发生破坏的原因。这种情况下,砖混结构局部倒塌有两种类型。第一种是两层木楼盖砖混结构的二层倒塌,例如得妥镇某木楼盖砖混结构,如图5(c)所示。第二种是单层木楼盖砖混结构的局



(a) 局部倒塌(草科乡田湾河村, VII度)



(b) 基本完好与局部破坏(草科乡田湾河村, VII度)



(c) 局部倒塌(得妥镇, IX度)



(d) 局部倒塌(磨西镇, IX度)

图5 局部倒塌

Fig.5 Partial collapse of the structure

部坍塌,例如磨西镇某木楼盖砖混结构,如图5(d)所示。这两种局部倒塌的共同特点在于,倒塌位置均出现在木楼盖所在的顶层。造成这种现象的原因是木屋盖与墙体之间的拉结能力较差,对墙体的约束能力较弱。在地震作用下,木屋盖与墙体接触部位容易脱离,形成运动相位差,从而引起梁檩对墙体的碰撞,导致结构发生坍塌^[14]。在开间以及横墙间距较大的房间中,木屋盖的约束是重要的抗震措施。因此,需要加强木屋盖和墙体之间的拉结,增强楼层空间整体性。

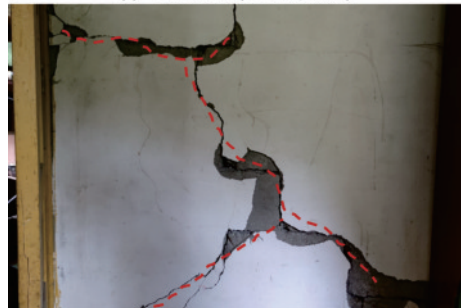
2.1.3 墙体破坏

开裂是砖砌体结构最常见的地震损伤特征,墙体的破坏通常出现在纵横墙面墙体、墙角、纵横墙连接、门窗口上下角和窗间墙等位置。在水平地震作用下,墙体主要受到剪切破坏。当地震剪力超过墙体的抗剪承载力时,墙体会出现水平、垂直、斜向和门窗洞口的裂缝。

墙体斜向裂缝的开展与轴压比有关,在竖向和水平地震作用下,当墙体承受的主拉应力大于砂浆的抗拉强度时,砂浆开裂,裂缝呈阶梯形斜向扩展,最终形成单向斜裂缝或双向形剪切裂缝。砖混结构的墙体抗剪承载力较弱,在水平地震作用下,极易发生剪切错动,形成双向裂缝。例如,美罗镇某砖混结构墙体出现单向斜裂缝,如图6(a)所示,磨西镇某砖混结构墙体出现双向形裂缝,如图6(b)所示。



(a) 单向斜裂缝(美罗镇, VII度)



(b) 双向斜裂缝(磨西镇, IX度)

图6 墙体斜裂缝

Fig.6 Diagonal crack in the wall

对于高宽比较小,砂浆强度低的砌体墙,墙端裂缝呈阶梯状,而墙中间则形成一条水平裂缝。例如,磨西镇砖混结构墙体中下部就出现了水平开裂的现象,如图7所示。这种裂缝分布的形成与墙体在地震作用下所受力的分布情况有关。由于高宽比小,墙的上部受到的压力相对较大,而底部受到的拉力较大,导致墙端产生阶梯状裂缝。而墙的中部则会承受相对均匀的受力,因此容易出现一条水平的裂缝。此外,砂浆强度低也会影响裂缝的形成,当地震作用下砂浆的强度不足以承受墙体的应力时,裂缝就会产生。针对这种情况,可以考虑采取增强墙端约束、加固墙体底部、提高砂浆强度等措施,以减轻裂缝的产生,增强结构的抗震性能。



图7 水平裂缝(磨西镇,Ⅸ度)

Fig.7 Horizontal crack (Moxi town, intensity of IX)

砖混结构中纵横墙的连接处经常出现开裂现象,特别是在地震作用下更为常见。这是由于施工中纵横墙砌筑不规范、缺乏足够的拉结措施,或者在横墙上靠近纵墙处开洞,削弱了纵横墙之间的连接。纵横墙同时承受着地震力的横向和纵向分量,如果纵横墙之间的连接较弱,受到两个方向地震力的复杂作用容易导致应力集中,从而出现竖向的裂缝,甚至可能导致纵墙发生外闪而倒塌。例如,在磨西镇某砖混结构墙体上就出现了竖向开裂的情况,如图8所示。因此,需特别注意纵横墙的连接,确保其足够强固。采取适当的拉结措施,减轻连接处的开裂问题,提高砖混结构的整体抗震能力。

在地震作用下,门窗洞口会受到应力的集中作用,从而容易发生破坏,其中主要表现为沿洞口角部走向的开裂。例如,美罗镇某房屋二楼的窗角出现了斜裂缝,如图9所示。这种现象的发生是由于门窗洞口处的结构变化,导致其在地震作用下承受不均匀的受力分布。门窗洞口的开口部分相对较弱,容易受到地震产生的应力集中,从而引发沿着

洞口角部走向的裂缝。另外,由于洞口处的墙体连接较弱,也会增加开裂的风险。为了减轻这种情况的发生,可以采取一些抗震措施。例如,在门窗洞口周围加强墙体的约束,增加墙体在洞口附近的抗震性能;或者采用适当的加固措施,如设置加固梁、增加加强筋等,以提高门窗洞口处的抗震能力,从而减少裂缝的发生。



图8 竖向裂缝(磨西镇,Ⅸ度)

Fig.8 Vertical Crack(Moxi town, intensity of IX)



图9 墙体裂缝(美罗镇,Ⅶ度)

Fig.9 Cracks of the wall (Meiluo town, intensity of VII)

2.1.4 砖柱破坏

本次地震中,砖混结构中的砖柱遭受了严重的破坏。例如,得妥镇某处砖混结构的剪切破坏裂缝延伸至砖柱,如图10所示。由于砖柱未进行构造配筋,抗剪承载力相对较弱,其无法承受较大的剪切力,难以抵抗由墙体延伸过来的剪切裂缝。为了解决这种问题,需要加强砖柱的抗剪能力。例如,可以在砖柱的四个面上设置竖向和水平向钢筋,形成配筋砖柱,或使用钢筋混凝土构造柱,以提高其抗剪承载能力。



图10 砖柱单段剪切破坏(得妥镇, IX度)

Fig.10 Shear failure of brick column(Detuo town, intensity of IX)

2.1.5 屋面破坏

在地震中,砖混结构房屋的楼板破坏较少,但严重的楼板坠落往往是由于钢筋混凝土预制楼板在墙体上搁置长度不足,或楼板与墙体之间缺乏足够的连接所引起。此外,木屋顶的连接措施常常存在缺陷,例如,有些房屋屋盖处未设置圈梁,有些木屋顶椽檩之间缺乏必要的连接,或者檩条直接搁置在砖墙上,且与砖墙的搭接长度不足。在泸定地震中,砖混结构的屋盖破坏较为普遍。例如,得妥镇某砖混结构的屋面梁从一端支承的墙体上脱离,如图11(a)所示。此外,燕子沟镇某砖混结构的屋盖



(a) 屋面破坏(得妥镇, IX度)



(b) 屋面破坏(燕子沟镇, IX度)

图11 屋盖破坏

Fig.11 Damage of the roof

与山墙变形不协调,导致屋脊被拉裂。与此同时,屋面瓦与椽条之间也缺少有效的连接,导致屋面瓦滑落,如图11(b)所示。

2.2 木结构

木结构建筑的主要承重构件为木柱和木梁,在我国西南地区广泛应用。梁柱节点采用具有半刚性特点的榫卯连接,能起到减震耗能作用,从而使其具有较好的抗震性能。通常情况下,木结构建筑在地震中的可能出现的破坏形式包括榫卯节点松动、柱和梁的倾斜导致整体倾斜或者倒塌,以及屋架的破坏^[4]。在此次地震中,木结构建筑表现出良好的抗震能力,较少出现整体倒塌的现象。震害特征主要表现为木柱倾斜、木构架的倒塌以及屋盖的破坏。

2.2.1 木柱倾斜

木柱倾斜是常见的木结构震害现象。地震作用下木柱上端的榫卯节点松动,和下端的柱脚滑移,发生位移,会造成木柱的倾斜,如图12所示。木柱的倾斜会加大节点的弯矩,加剧结构的变形,从而加快节点失效,降低结构的承载能力与稳定性。这一现象强调了木结构建筑施工中,木柱和榫卯节点连接设计和加固措施的重要性。为了应对地震作用,需要确保榫卯节点的牢固连接,采取适当的防滑措施以防止柱脚滑移,同时考虑到木柱的稳定性,合理选择木柱的截面尺寸和长度。



图12 木柱倾斜(冷碛镇, VII度)

Fig.12 Inclination of wood column(Lengqi town, intensity of VII)

2.2.2 木构架倒塌

木结构建筑的质量主要集中在顶部,由于其重心较高,一旦遭受水平地震作用,动力作用下结构位移过大,在梁柱节点处出现榫头拔出或完全脱离的现象。此外,地震作用下,榫卯节点会受到复杂的力学作用,出现折榫现象,从而导致连接失效、构件过度变形,甚至倒塌。例如,燕子沟镇某单层木结构,由于柱子倾斜导致结构发生局部倒塌,如图 13 所示。这一问题凸显了木结构建筑中连接节点的重要性,尤其是榫卯节点。为提高木结构建筑的抗震性能,需要充分考虑连接节点的强度和稳定性。建议对高烈度地区的木结构采用钢构件^[15-16]、FRP、阻尼器^[17]等方式进行加固,以确保榫卯节点在地震作用下具备足够的承载力和耗能能力,从而减少榫卯节点拔榫和破坏的风险。



图 13 木结构严重破坏(得妥镇,Ⅶ度)

Fig.13 Serious damage of the wooden frame house(Detuo town, intensity of Ⅶ)

2.2.3 屋盖破坏

本次泸定地震中,木结构屋顶的破坏表现为屋面瓦片脱落和屋顶坍塌等情况,如图 14(a)。地震作用下,由于缺乏固定措施,直接将瓦片搁置于檩条上,容易出现脱落现象。此外,木构架的纵向和水平刚度以及空间作用均较差,在地震时易于产生相互碰撞,进而加剧震害。

此外,此次地震的竖向地震动效应明显,加剧了屋架破坏,如图 14(b)。这是因为屋架节点是公母榫的构造,且缺乏有效的固定,在地震动竖向作用下,连接处与柱顶发生碰撞,导致榫卯脱离。

总体而言,本次地震中,农村木结构建筑受损数量相对较少,但在Ⅷ、Ⅸ度区域,仍然出现了倒塌和严重受损的情况。相比之下,在Ⅶ度以下区域,大部分木结构建筑仅出现轻微损坏或基本完好。这表明,在节点连接质量得到保证的情况下,农村

木结构建筑具有相对较好的抗震性能。从抗震性能的角度考虑,农村木结构建筑的节点连接质量显得尤为重要。通过合理的节点设计和施工,可以增强木结构的整体稳定性和抗震能力。对于位于高烈度地震区的木结构建筑,尤其是Ⅷ度和Ⅸ度区域,应进一步强化节点连接的设计和施工,以确保建筑在地震作用下能够保持较好的完整性和稳定性。



(a) 屋面破坏(燕子沟镇,Ⅷ度)



(b) 屋架拔榫(挖角村,Ⅶ度)

图 14 木屋盖破坏

Fig.14 Damage of the wooden roof

2.3 石结构

石结构房屋以石砌体作为主要承重构件,属于砌体结构的一种。通常采用毛石作为基材,利用砌筑砂浆作为粘结材料,按照一定的组砌方式砌筑而成。在此次泸定地震中,由于石墙材料存在缺陷并且砌筑不规范,石结构房屋结构的整体性较弱,抗震性能相对较差,因此出现了不同程度的震害,主要表现为整体倒塌、墙体剥落、墙体开裂和屋盖破坏。

2.3.1 整体倒塌

石结构房屋整体倒塌的主要原因是石墙存在多种缺陷,包括石料级配不良、外形极不规则、纵横墙交接处无有效连接、整体性差、泥浆黏结强度不足以及泥浆缝过厚等。这些缺陷导致了石结构房屋的抗震性能差。在地震作用下,承重石墙首先发生倒塌破坏,进而引起屋盖的坍塌,造成石结构的整体倒塌。例如,泸定县德威镇某石砌体房屋的石

墙由泥浆和不规则石块砌筑而成,且泥浆本身黏结度较差,导致石块之间的抗拉、抗剪能力以及刚度较差,墙体的抗震性能较低。在地震作用下,承重石墙的薄弱处发生局部倒塌,木梁掉落,引起屋盖塌陷,片石滑落,如图 15 所示。这一现象凸显了对石结构房屋的结构和材料质量管理的重要性,需要在建筑过程中严格控制石料的选择和砌筑工艺,采用水泥砂浆砌筑墙体,确保墙体的整体性和稳定性,从而提高整体结构的稳定性和抗震能力。



图 15 整体倒塌(德威镇,Ⅷ度)
Fig.15 Overall collapse of the structure(Dewei town, intensity of Ⅷ)

2.3.2 墙体剥落

石砌墙体在地震中的破坏主要表现为三种形式,即开裂剥落、倒塌和开裂。由于石块之间的黏结性和咬合力较差,在地震作用下,墙体容易发生开裂,随后在剧烈震动下,石块逐渐剥落脱落。例如,磨西镇的某处石砌体民居,其墙体下层采用石砌,上层采用砖砌。毛石砌体的砌筑质量低,其抗剪性能和整体性较砖砌体差,地震作用下石墙体发生开裂剥落,而砖墙则出现局部开裂,如图 16 所示。这一现象凸显了在石砌墙体的设计和施工中,需要充分考虑不同材料之间的相互作用,以及地震作用下的力学响应。



图 16 石墙剥落(磨西镇,Ⅸ度)
Fig.16 Desquamation of stone wall(Moxi town, intensity of IX)

2.3.3 墙体开裂

石砌墙体开裂通常发生在整体性较好的砌筑墙体上。在地震作用下,该类墙体平面外整体性较好,不易倒塌,而平面内则以剪切变形为主。破坏通常是由于砌筑砂浆强度低或灰缝不够饱满所致。门窗洞口周边是外围承重墙的薄弱部位,在地震作用下,门窗洞口角部应力集中,且缺乏有效的抗震防裂构造措施,从而导致了窗口与纵横墙的裂缝。此外,纵横墙裂缝还因其交接处未交错砌筑,不符合砌筑规范,致使接触部位抗剪与抗拉能力差。其破坏形态与砖砌体房屋类似。例如,泸定县德威镇某处石结构窗口与纵横墙交接处出现裂缝,如图 17 所示。



图 17 石墙开裂(德威镇,Ⅸ度)
Fig.17 Crack of stone wall(Dewei town, intensity of IX)

2.3.4 屋盖破坏

石结构房屋楼盖的破坏并非单纯由于承载力不足所致,而是由于承重构件的破坏引起的楼盖损坏和整体倒塌。同时,也不能排除由于支撑长度过小而导致的屋盖在地震中倒塌的现象。例如,燕子沟镇某处石结构房屋,由于下部墙体的倒塌,导致屋盖明显破坏,如图 18 所示。



图 18 屋盖破坏(燕子沟镇,Ⅷ度)
Fig.18 Damage of the roof(Yanzigou town, intensity of Ⅷ)

2.4 生土结构

生土结构是指采用生土墙作为主要承重构件的建筑形式,包括土筑墙和土坯墙结构。生土结构农房屋顶常常采用硬山搁檀或小青瓦,房屋一般为单层,仅有少数为二层,而且二层房屋通常采用木楼盖。生土结构民居凭借其经济、方便取材、施工简单、易于维护以及良好的保温性能等优点,在我国广大农村地区仍然有一定存量。然而,由于材料的力学特性和传统施工工艺等因素的限制,生土结构建筑的抗震性能普遍较差,难以满足抗震要求,其主要的震害特征包括整体倒塌、局部倒塌、墙体破坏和屋盖破坏。

2.4.1 倒塌

生土墙体作为承重构件,其本身具有干缩裂缝等缺陷,抗拉、抗剪能力差。在地震作用下,作为承重构件的生土墙体容易先发生倒塌,然后导致整个结构的倒塌。例如,新民乡发生了大量生土结构的整体倒塌(图 19)以及局部倒塌的现象。



(a) 整体倒塌(新民乡, VII度)



(b) 局部倒塌(新民乡, VII度)

图 19 生土结构倒塌

Fig.19 Partial Damage of soil wall

2.4.2 墙体破坏

生土结构的纵横墙连接处通常缺乏有效的拉结,在地震作用下容易产生连接破坏。例如,宜东镇某生土墙体在墙体连接部位产生了竖向开裂破坏,如图 20(a)所示。此外,生土房屋的材料强度低,容易在水平方向的地震力作用下发生受剪破坏。这种破坏特点是在破坏时会形成两条交叉的

斜裂缝,呈现出“X”形状,如图 20(b)所示。生土墙体本身存在干缩裂缝和抗剪能力差等特性,在地震作用下,裂缝会进一步发育、延伸和扩展,最终形成各种较大、较明显的裂缝。此外,墙体在横、纵墙交界处附近发生破坏会引起墙体外闪,这也是一种常见的破坏形式,如图 20(c)所示。因此,生土结构房屋应加强纵横墙连接,采用有效的拉结措施,提升墙体整体稳定性。同时,优化生土房屋材料选择,增强墙体抗剪性能,减轻地震破坏,定期修复干缩裂缝,强化墙体整体结构性能。



(a) 墙体连接破坏(宜东镇, VII度)



(b) 墙体受剪破坏(新民乡, VII度)



(c) 墙体外闪(新民乡, VII度)

图 20 生土墙体破坏

Fig.20 Damage of soil wall

2.4.3 屋盖破坏

生土结构的屋面破坏,主要表现为屋面塌陷和瓦片滑移脱落等现象。例如,丰乐乡某生土结构的瓦片滑移和脱落现象,由于瓦片直接铺在椽子上,与屋架无连接,两者之间的摩擦力较小,在地震作用下易产生滑移和脱落,如图21(a)所示。新民乡某生土结构屋面中,也出现了屋面塌陷的情况,如图21(b)所示。因此,在设计和施工中应考虑采用轻型屋面材料,例如双坡屋面或弧形屋面,檩条支承处应设垫木。此外,建议采用相互连接的圆钉、扒钉、铁丝等连接木屋盖的各构件。在木屋架和木梁与外墙的连接处应采取满搭,支承处应设置木圈梁或木垫板,其长度、宽度和厚度分别不小于500、370和60 mm。



图21 屋面破坏

Fig.21 Damage of the roof

3 次生灾害特征与分析

本次地震引发了大量的山体滑坡、落石等次生灾害,导致房屋和道路严重破坏,以及人员伤亡^[18]。据统计,81.6%的人员死亡与次生灾害有关,其中Ⅷ区的次生灾害死亡人数最多,占总死亡人数的30.1%,其中17.2%是因为山体掩埋,8.6%是因为落石击垮房屋而致死^[19]。

3.1 山体滑坡

地震作用下,斜坡上的松散土石内部所承受的剪应力可能超过其抗剪强度,导致内部结构发生变形破坏,最终引发滑坡。山体滑坡对建筑物会产生两种不同的影响:第一种是位于坡底的建筑物会受到滑坡土石的冲击而受损。例如,草科乡某山体滑坡情况,如图22(a)所示。第二种情况是房屋下部的地基滑坡,这会破坏地基的承载能力,导致结构产生严重的非均匀沉降,最终导致功能丧失。例如,磨西镇某山体滑坡情况,如图22(b)所示。



图22 山体滑坡

Fig.22 Landslide

3.2 山体落石

在陡峭的斜坡地形中,岩体结构呈现出明显的节理发育,而在坚硬的岩层之下,覆盖着易风化的软弱岩层,从而容易形成未脱离岩体却不稳定的危岩现象。风化作用会导致岩体强度降低,使岩层结构由外至内受到破坏。危岩在受到自身重力和应力重分布等影响时,会发生卸荷裂隙的形成。同时,风化作用会扩大这些裂隙,逐渐加剧破坏过程,最终在地震、降水等外界因素的刺激下,引发山体落石现象^[20]。尤其是,地震的动力作用会显著增加落石的破坏力。这是因为在地震干扰下,岩体可能

会脱离山体,并受到重力作用的影响,导致岩石从陡崖上跌落或沿着斜坡滚落至低洼地区,给下方建筑物带来严重破坏。例如,德威镇、得妥镇某处山体落石就造成了民居的严重受损,如图23所示。因此,农村建筑场地应尽量避免选择可能发生滑坡、落石、地陷、地裂、泥石流等地质灾害的地段。



(a) 德威镇,Ⅷ度



(b) 得妥镇,Ⅸ度

图23 山体落石
Fig.23 Rockfall

4 破坏等级统计与分析

4.1 破坏等级

针对农村建筑,由于其结构形式、建筑材料、施工工艺以及场地条件的差异,在地震中所受的震害程度也有所不同。为了解决这一问题,《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T24335—2009)和《中国地震烈度表》(GB/T17742—2020)提供了类似的建筑破坏等级划分方法。基于以上标准以及对现场震害情况的调查,本次地震灾区的中农村建筑破坏等级被简化为4类。其中,基本完好与轻微破坏被合并为一类,这是因为在实际建筑调查时辨识两者具有一定的难度。为方便现场震害调查和分类,提供了不同结构在不同破坏等级下的典型实例,见表2。

4.2 震害统计

基于实地调查数据,课题组对石棉县和泸定县

农村建筑破坏等级和数量进行了统计,具体数据见表3。针对不同的结构类型进行分类,将两个调查地区不同破坏等级数量相加,再除以两个调查地区建筑数量之和,得到砌体结构、木结构、石结构和生土结构不同地震破坏等级的比例,如图24所示。

根据统计,在此次地震中,石结构严重破坏的比例是木结构的两倍多。生土结构的倒塌占比最大,这是由于生土结构的生土墙体作为承重构件,其本身材料强度低、整体性能差,普遍存在干缩裂缝等质量缺陷。这些因素使生土结构易发生严重破坏或倒塌。木结构在此次地震中表现出较强的抗震性能抗倒塌能力。这是由于木结构梁柱采用榫卯连接,具有半刚性特点,可实现减震耗能作用,从而具备良好的抗震性能。根据研究数据,此次地震中,农村建筑的抗震性能由强到弱依次为:木结构、砌体结构、石结构、生土结构。

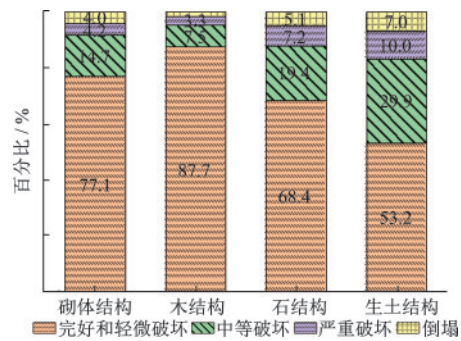


图24 砌体结构、木结构、石结构和生土结构破坏情况对比
Fig.24 Comparison of seismic damages of masonry buildings, timber buildings, stone-masonry buildings and soil buildings

5 结论与建议

对泸定6.8级地震中的农村居住建筑震害以及地质灾害进行了调查,总结了砖砌体结构、木结构、石结构和生土结构的典型破坏特征,统计了4类结构的震害等级,并指出由地震引起的次生灾害也是造成农村房屋破坏的重要原因,主要得出以下结论与建议:

(1)加强建筑抗震措施,引入适用的新工艺。在此次泸定地震中,农村居住建筑的砖砌体结构、石砌体结构和生土结构多数未经正规设计,且缺乏必要的构造措施,在低于设防烈度的地区也出现了不同程度的破坏。因此,建议加强农村建设工程设

表2 砖砌体结构、木结构、石结构和生土结构不同破坏等级的典型实例

Table 2 Typical examples of masonry buildings, timber buildings, stone-masonry buildings and soil buildings with different seismic damage

















结构形式	基本完好和轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
砖砌体结构	 得妥镇某居民建筑,共两层,主体结构基本保持完好	 德威镇某居民建筑,共两层,部分墙体开裂,屋面溜瓦	 得妥镇某居民建筑,共两层,一层右侧承重墙体严重破坏、局部倒塌	 新民乡某居民建筑,共两层,结构已倒塌
木结构	 燕子沟镇某居民建筑,共两层,木架完好	 草科乡某居民建筑,共两层,木架轻度歪斜,部分屋面瓦滑落	 得妥镇某居民建筑,共一层,木架出现严重变形,端跨局部塌落	 燕子沟镇某居民建筑,共一层,结构已全部倒塌
石结构	 燕子沟镇某居民建筑,共一层,主要承重墙基本完好	 德威镇某居民建筑,共一层,部分墙体剥落	 德威镇某居民建筑,共一层,局部倒塌,屋面塌陷	 得妥镇某居民建筑,共一层,结构已全部倒塌
生土结构	 丰乐乡某居民建筑,共一层,主要承重墙基本完好,屋面完好	 新民乡某居民建筑,共一层,外部墙体有明显裂缝	 新民乡某居民建筑,共一层,端部山墙有明显裂缝、破碎	 新民乡某居民建筑,共一层,结构已全部倒塌

表3 砖砌体结构、木结构、石结构和生土结构破坏等级统计

Table3 Statistics of various seismic damage levels for masonry buildings, timber buildings, stone-masonry buildings and soil buildings

调查地区	破坏等级	砖砌体结构/户	木结构/户	石结构/户	生土结构/户
石棉县 (小计:679户)	完好和轻微破坏	231	145	87	51
	中等破坏	28	12	34	38
	严重破坏	11	6	9	10
	倒塌	6	1	4	6
泸定县 (小计:689户)	完好和轻微破坏	229	147	75	56
	中等破坏	60	13	12	22
	严重破坏	14	5	8	10
	倒塌	18	4	8	8

注:小计为完好和轻微破坏、中等破坏、严重破坏以及倒塌的房屋数量之和

防的管理,推进《四川省农村居住建筑抗震技术规程》(51/016—2013)的实施、培训与监督,对未满足抗震设防强制标准的居住建筑加强抗震措施,以提高农村居住建筑的抗震性能。结合当地实际情况,引入适用的新工艺、新材料等手段,建立典型农村建筑抗震安全示范工程,推进农村居民地震安全工程建设。

(2)评估房屋震损程度,重建与加固相结合。此次泸定地震的烈度范围为VI度—IX度,高烈度区与低烈度区的农村居住建筑震害差异较大。建议以震后应急评估为基础,对农村建筑进行地震损伤鉴定,并依据鉴定评估结果,分类、分阶段地对受损建筑进行加固或重建,避免盲目的大拆大建。对在地震中严重破坏或倒塌的农户优先安排重建,尽快满足群众基本生活、生产的需求。对于鉴定结果不满足抗震设防强制性标准的房屋,宜进行必要的加固,并根据实际情况进行宜居性改造。

(3)合理建设用地选址,预防地震次生灾害。此次泸定地震引发的落石、滑坡等次生灾害是造成农村居住建筑破坏的重要原因。因此,在选择建筑场地时,应优先考虑开阔、平坦、密实的坚硬土、中坚硬土地段,避免选择软弱土、孤立的山丘、非岩质的陡坡、河岸和边坡的边缘地段。必要时,可考虑移民搬迁、异地安置和重建。在人口密集的山区,进行灾害风险调查和重点隐患排查,对可能引发地质灾害的危险区域实时监测,对潜在的滑坡、泥石流等区域采取工程防御措施,降低次生灾害带来的破坏。

(4)进行抗震科普宣传,加强农村工匠培训。目前,农村居民抗震防灾意识还相对薄弱,缺乏对地震灾害的科学认知,忽视房屋建筑抗震设防,使得大量既有农房的抗震设防存在短板。在灾后重建的过程中,宜加大抗震防灾知识宣传的力度,引导农民理解和建立抗震安全意识。同时,开展农村工匠技术培训,并编制适合性好、实用性强的抗震技术图集,提供农房建造的技术支持,提高农村建筑的抗震能力。

致谢:感谢四川省住建厅、四川省应急管理厅、四川省减灾专家委员会、四川省地震局、泸定县应急管理局、石棉县应急管理局等单位提供的帮助和部分资料,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,感谢四川省建筑科学研究院高永昭的宝贵建议,感谢在本次震害调查过程中给予支持的乡镇机关!

参考文献:

- [1] 于文,葛学礼,朱立新.四川汶川8.0级地震都江堰周边村镇房屋震害分析[J].工程抗震与加固改造,2008,30(4):45-49.
Yu W, Ge X L, Zhu L X. Damage analysis on buildings in towns and villages around Dujiangyan of Wenchuan M_s 8.0 Earthquake [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(4): 45-49. (in Chinese)
- [2] 高永武,金波,戴君武,等.芦山7级地震村镇木结构震害调查及加固建议[J].地震工程与工程振动,2013,33(3):48-52.
Gao Y W, Jin B, Dai J W, et al. Damage to rural wooden structures in M_s 7.0 Lushan earthquake and reinforcement suggestions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 48-52. (in Chinese)
- [3] 陈相兆,孙柏涛,闫培雷.四川康定6.3级地震灾害分布特点及结构震害简析[J].地震工程与工程振动,2017,37(2):1-9.
Chen X Z, Sun B T, Yan P L, et al. The characteristics of earthquake disasters distribution and seismic damage to structures in Kangding M_s 6.3 earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(2): 1-9. (in Chinese)
- [4] 曲哲,杨永强.尼泊尔自建民居在2015年地震序列中的震害[J].地震工程与工程振动,2015,35(4):51-59.
Qu Z, Yang Y Q. Seismic damages to owner-built dwellings in the 2015 earthquake sequence in Nepal [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(4): 51-59. (in Chinese)
- [5] 潘毅,王忠凯,时胜杰,等.尼泊尔8.1级地震加德满都—樟木沿线民居震害调查与分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(3):35-44.
Pan Y, Wang Z K, Shi S J, et al. Investigation and analysis on seismic damage of residential buildings along the highway from Kathmandu to Zhangmu in M_s 8.1 Gorkha Earthquake [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 35-44. (in Chinese)
- [6] 张令心,朱柏洁,陶正如,等.九寨沟7.0级地震房屋震害现场调查及其破坏特征[J].地震工程学报,2019,41(4):1053-1059.
Zhang L X, Zhu B J, Tao Z R, et al. Field investigation and failure characteristics of buildings damaged by the 7.0-Magnitude Earthquake in Jiuzhaigou [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 1053-

1059. (in Chinese)
- [7] 戴必辉, 陶忠, 徐国林, 等. 云南漾濞 $M_s6.4$ 级地震震中区农房震害调查[J]. 世界地震工程, 2021, 37(3): 9-18.
Dai B H, Tao Z, Xu G L, et al. Investigation of seismic damage to rural houses in the epicenter area of Yangbi $M_s6.4$ earthquake in Yunnan[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(3): 9-18. (in Chinese)
- [8] 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 $M_s6.0$ Luxian earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(5): 47-59. (in Chinese)
- [9] 王根龙, 张军慧, 刘红帅. 汶川地震北川县城地质灾害调查与初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3): 47-51.
Wang G L, Zhang J H, Liu H S. Investigation and preliminary analysis of geologic disasters in Beichuan county induced by Wenchuan Earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(3): 47-51. (in Chinese)
- [10] 周铁钢, 张浩. 鲁甸地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(5): 75-80.
Zhou T G, Zhang H. Damage investigation and analysis of rural buildings in Ludian earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(5): 75-80. (in Chinese)
- [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 $M_s6.0$ Changning earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Sup1): 297-306. (in Chinese)
- [12] 潘毅, 范元青, 任宇, 等. 芦山6.1级地震山区典型震害调查与分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(5): 47-59.
Pan Y, Fan Y Q, Ren Y, et al. Typical seismic damage investigation and analysis in mountain area after $M_s6.1$ Lushan earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(5): 47-59. (in Chinese)
- [13] 俞瑞芳, 谢志强, 彭凌云, 等. 砌体强度对自建民居抗震性能的影响分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11): 6-11.
Yu R F, Xie Z Q, Peng L Y, et al. Effect of masonry strength on aseismic performance of self-built dwellings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11): 6-11. (in Chinese)
- [14] 潘毅, 王超, 季晨龙, 等. 汶川地震中木结构古建筑的震害调查与分析[J]. 建筑科学, 2012, 28(7): 103-106.
Pan Y, Wang C, Ji C L, et al. Investigation and analysis of seismic damage for chinese ancient timber buildings in Wenchuan Earthquake [J]. Building Science, 2012, 28(7): 103-106. (in Chinese)
- [15] 陆伟东, 吴伟强, 施程凯, 等. 含内嵌卯口耗能器的榫卯节点抗震性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(2): 30-37.
Lu W D, Wu W Q, Shi C K, et al. Experimental study on seismic performance of mortise-tenon joint with embedded dampers[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 30-37. (in Chinese)
- [16] 潘毅, 王超, 唐丽娜, 等. 古建筑直榫节点扁钢与阻尼器加固比较研究[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6): 981-986.
Pan Y, Wang C, Tang L N, et al. Comparative research on flat steel and damper strengthening of straight type of tenon-mortise joints[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6): 981-986. (in Chinese)
- [17] Yi D H, Fan Y Q, Pan Y, et al. Seismic behavior of predamaged mortise-and-tenon joints reinforced using viscoelastic dampers[J]. Journal of Structure Engineering, 2023, 149(9): 10.1061/JSENDH.STENG-12395.
- [18] 蔡晓光, 常晁瑜, 李孝波. 四川泸定6.8级地震地质灾害调查[J]. 防灾科技学院学报, 2022, 24(4): 11-22.
Cai X G, Chang C Y, Li X B. Investigation on seismic geological hazards of the Luding, Sichuan $M_s6.8$ Earthquake in 2022[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2022, 24(4): 11-22. (in Chinese)
- [19] 许娟, 赵雪慧, 周琪等. 2022年四川泸定 $M_s6.8$ 地震人员震亡特征分析[J]. 地震研究, 2023, 46(4): 603-610.
Xu J, Zhao X H, Zhou Q, et al. Casualty study of the Luding, Sichuan $M_s6.8$ earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2023, 46(4): 603-610. (in Chinese)
- [20] 向欣. 边坡落石运动特性及碰撞冲击作用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
Xiang X. Research on motion characteristics and impact force of rockfall[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)