

墨江 M5.9 地震农危改房屋震害调查与分析

戴必辉^{1,2}, 陶忠^{1,3†}, 叶燎原⁴, 高永林¹, 皇甫双娥¹

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 西南林业大学 土木工程学院, 云南 昆明 650224;
3. 云南省抗震工程技术研究中心, 云南 昆明 650500; 4. 云南师范大学, 云南 昆明 650500)

摘 要: 墨江 M5.9 地震极震区烈度达到Ⅷ度. 地震也是对该地区近年来农村危房改造成效的一次集中检验. 为验证农危改工作实施成效, 总结农房加固改造震害经验, 首先, 根据该区域强震动观测记录, 从地面峰值加速度衰减规律和地震波频谱特性方面对地震动特性进行分析; 然后, 在震害调查的基础上, 结合灾区建筑结构特点对Ⅷ度区、Ⅷ度区农房震害特征进行阐述, 对农危改房屋在地震中的表现进行对比分析并总结震害经验; 最后, 结合本次震害调查从加强地震观测、加大力度推进农村危房改造、推广新技术新材料运用和重视震害调查等方面, 对提高农房抗震防灾能力提出建议.

关键词: 墨江 M5.9 地震; 震害分析; 农房; 抗震加固

中图分类号: P316; TU366

文献标志码: A

Investigation and Analysis of Seismic Damage to the Renovated Rural Dilapidated Residences in Mojiang M5.9 Earthquake

DAI Bihui^{1,2}, TAO Zhong^{1,3†}, YE Liaoyuan⁴, GAO Yonglin¹, HUANGFU Shuang¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Faculty of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
3. Earthquake Engineering Researching Center of Yunnan, Kunming 650500, China;
4. Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: The seismic intensity of the meizoseismal area reached Ⅷ degrees in Mojiang M5.9 earthquake in Yunnan province, which was an intensive inspection to the results of renovation of the dilapidated rural residences. In order to verify the effectiveness of the renovation of dilapidated rural houses and summarize the seismic damage experience of the fortified farmhouses, the following work is done in this paper. Firstly, the ground motion characteristics are analyzed from the attenuation law of ground peak acceleration and the spectrum characteristics of seismic waves according to the observation records of strong vibration in this region. And then, on the basis of seismic damage investigation, combined with the characteristics of the architecture and structure, the characteristics of the seismic damage

* 收稿日期: 2020-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51168025, 51868032), National Natural Science Foundation of China(51168025, 51868032); 国家科技支撑计划资助项目(2013BAK13B01), National Science and Technology Support Program(2013BAK13B01); 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2019J0194), Yunnan Provincial Department of Education Fund Project(2019J0194)

作者简介: 戴必辉(1985—), 男, 云南楚雄人, 西南林业大学讲师, 博士

† 通信联系人, E-mail: tsy0410km@126.com

of rural houses in the areas with earthquake intensities of VII and VIII degrees were elaborated, the performance of the reinforced dilapidated rural houses in the earthquake was compared and analyzed, and the experience of seismic damage was summarized. Finally, combined with the investigations of seismic disasters, some suggestions are put forward to improve the earthquake resistance of rural houses from the aspects of strengthening earthquake observation, increasing efforts to promote the renovation of rural dilapidated houses, promoting the use of new technologies and new materials, and attaching importance to seismic damage surveys.

Key words: Mojiang M5.9 earthquake; seismic hazard analysis; rural houses; seismic reinforcement requirements

我国地震灾害频发,地震区域分布广阔,GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》(以下简称“第五代区划图”)施行后,地震动峰值加速度小于 $0.05g$ (即Ⅵ度)的分区不再出现,设防烈度Ⅶ度及以上的地区占国土面积达58%^[1],其中超过80%的5级以上地震发生在农村地区.由于长期以来农房建设并未完全纳入我国的建筑抗震管理体系,缺乏统一科学的规划、设计、建造和监管^[2],导致现役农房抗震能力普遍较低,这种现象在欠发达的西部地区尤为突出,长期居住使原本抗震性能不佳的农房在环境因素和人为因素的侵蚀及破坏下变成危房,对居民安全造成巨大威胁.当大地震来临时,往往会对这类房屋造成灾难性的破坏,甚至小震发生时在近震区造成“小震大灾”的现象也屡见不鲜^[3].

云南省位于印度洋板块与欧亚板块碰撞带的东侧,以小江断裂带为代表的227条活动断裂带星罗棋布,第五代区划图施行后,地震基本烈度Ⅶ度及以上地区占全省总面积90%以上,Ⅷ度及以上地区占比接近一半,是我国破坏性地震较多、震灾频繁的地区之一.云南省处于横断山脉南段,高山河谷纵横其间,山地面积占全省总面积90%以上.历次震害调查表明,山区地形存在地震动放大效应,加剧房屋震害^[4-5].云南省农村地区经济落后,自建农房抗震防灾能力薄弱,是我国农村危房最多的省份之一,也是地震成灾次数最多的省份^[6].

村镇建筑的抗震水平是一个国家整体抗震能力的重要组成部分,随着社会和经济的快速发展,农村地区对房屋的抗震安全需求不断提高,对经安全性鉴定为C级危房(局部危房)或D级危房(整体危房)的既有农村住房进行加固、维修、拆除、置换或重建,是我国从抗震大国向抗震强国过渡的必然选择.

目前已有诸多学者围绕如何提高农房抗震防灾能力开展研究,在农房加固改造方面获得了经验和

成果.阿肯江·托呼提等^[7]针对新疆农村地区房屋提出木柱梁-土坯组合墙结构体系;王毅红等^[8]通过试验研究了在役生土结构房屋抗震加固改造的技术措施;尚守平等^[9]针对农村民居既有建筑与新建建筑分别提出了HPFL加固技术和钢筋-沥青复合层隔震技术;周铁刚等^[10-11]针对土坯承重民居和木构架承重-空斗墙围护民居提出对应加固措施,通过缩尺振动台试验得出总体上可以满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标和结论.这些农房抗震加固改造措施虽然得到了理论和试验的验证,但在实际地震中的表现却鲜有报道.墨江5.9级地震虽然给人民财产造成了重大损失,但未造成人员死亡,这在云南省历史上同级别地震中较为少见,极大程度上得益于近年大力实施的农村危房改造工作.为进一步验证农危改房屋的抗震加固效果,研究地震中各种结构形式房屋的震害特征,本文根据记录的强震动观测资料,对地震动峰值加速度衰减规律及部分台站地震波进行地震动特征分析,在现场震害调查的基础上结合云南省农村危房改造的实施情况总结震害经验,同时给出相关建议.

1 地震动特性分析

2018年9月8日10时31分29秒,云南墨江县境内发生5.9级地震,震中位于通关镇丙蚌村,震源深度为11 km,发震构造为阿墨江断裂带西支^[12].此次地震是墨江历史上震级最高的一次地震,也是云南省近四年来震级最高的地震,更是2018年中国大陆震级最高的地震.地震造成墨江县15个乡镇,168个村(社区)不同程度受灾,其中:通关、鱼塘、联珠、雅邑、龙潭5个乡镇,33个村严重受灾,受灾人数达10.48万人,受伤28人;因灾受损民房10 989户(因灾倒塌民房673户2 020间,严重损坏民房

4 423 户 13 269 间,一般损坏民房 5 893 户 17 680 间),交通、水利、市政、电力、通讯、教育、卫生等基础设施损毁严重.云南省地震局公布的墨江 5.9 级地震烈度图^[13]显示,此次地震极震区烈度达Ⅷ度,主要涉及普洱市墨江县通关镇、雅邑镇、联珠镇,面积约 32 km²,等震线呈椭圆形,长轴方向呈 NW 向,Ⅷ度区总面积为 438 km²,Ⅵ度区及以上总面积约 5 180 km².

此次震害调查主要针对震灾较严重的Ⅶ度区和Ⅷ度区的农房,重点对农危改中加固和新建农房在地震中的抗震表现进行评估.本文共收集到云南省地震监测中心采集的震中周边 37 个台站 3 个方向的地面加速度峰值和距离震中最近的 3 个台站的强震波形数据,用于此次地震动特性分析.图 1 为地震震中及台站分布示意图.图 2 为调查点位置示意图.

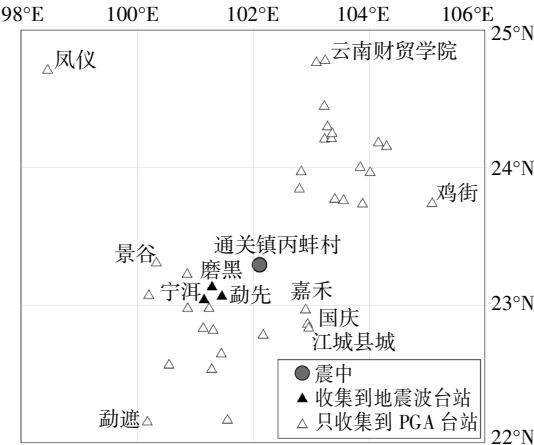


图 1 震中及台站分布示意图

Fig.1 Distribution diagram of epicenter and stations

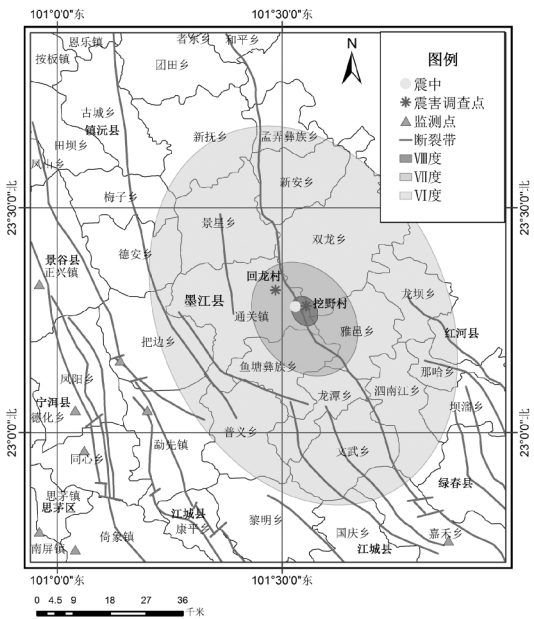


图 2 调查点位置示意图

Fig.2 Locations of investigation sites

表 1 列出了台站及其地震动观测信息,台站震中距为 50~100 km,除国庆、景谷两个台站场地类型为基岩外,其余台站场地类型均为土层.

表 1 震中距 100 km 内强震动记录
Tab.1 Strong motion recordings within
100 km from the epicenter

台站名称	场地类型	震中距/km	地面峰值加速度 PGA/gal		
			EW	NS	V
勐先	土层	48.25	36.8	-35.4	15.2
磨黑	土层	48.94	27.6	-39.2	-9.9
宁洱	土层	62.76	24.1	25.9	-10.0
嘉禾	土层	63.93	5.3	8.1	-4.3
同心	土层	65.71	16.9	11.6	-3.8
正兴	土层	65.72	-20.8	18.2	-9.6
康平	土层	76.89	-7.8	10.2	7.5
国庆	基岩	77.50	-3.3	4.2	-2.5
德化	土层	80.01	10.9	8.6	4.2
江城县城	土层	81.70	14.5	-8.0	4.0
大寨	土层	82.92	-5.6	11.4	-4.1
普洱	土层	85.87	-9.1	7.1	5.3
景谷	基岩	92.23	-2.0	2.5	-1.5

注:EW 为东西向;NS 为南北向;V 为竖直方向.

1.1 加速度峰值衰减特性分析

地震动衰减关系是地震危险性分析和工程抗震设防输入的重要依据.由于区域地震构造活动特征不同,各地区地震动衰减特征差异明显,利用特定区域的强震动观测数据统计得到的衰减规律,才能真实反映该地区的地震动衰减特性.对比表 1 的观测数据,距震中较近的勐先、磨黑和宁洱得到的地面加速度值较大,水平向 PGA(取 EW 和 NS 两个方向中的较大值)最大值为 39.2 gal,竖向 PGA 最大值为 15.2 gal,并随震中距的增加成一定规律衰减.为了分析此次地震的水平向加速度衰减特性,本文选取了 4 组包含该区域的 PGA 衰减关系研究成果与实际观测记录进行对比,分别为汪素云等^[14]的中国西部地区(WSY2000 模型)、崔建文等^[15]的云南Ⅱ区(CJW2006 模型)、刘本玉等^[16]的云南地区(LBY2012 模型)和俞言祥等^[17]的第五代区划图青藏区(YYX2013 模型).从图 3 给出的各模型预测值曲线与地震加速度记录数据可以看出,地震动记录数据为震中距 50~300 km 内,CJW2006 模型对此次地震动 PGA 衰减规律

具有较好的适应性,其余模型在震中距 100 km 内预测值均高于观测值,其中 LBY2012 模型偏离最大.分析原因主要是 CJW2006 模型统计资料区域针对性强,更适合这一地区地震动衰减的预测.

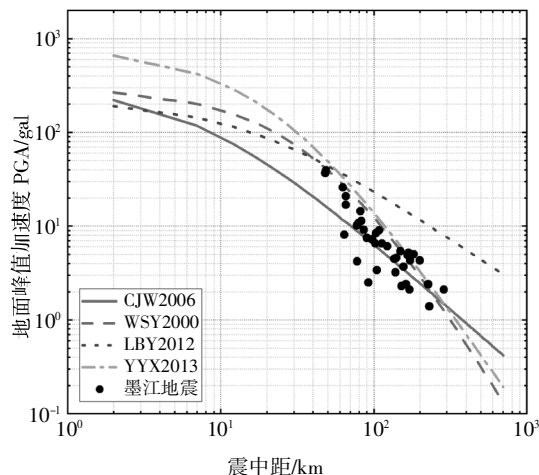


图3 水平向 PGA 衰减特征

Fig.3 Attenuation of the horizontal PGA

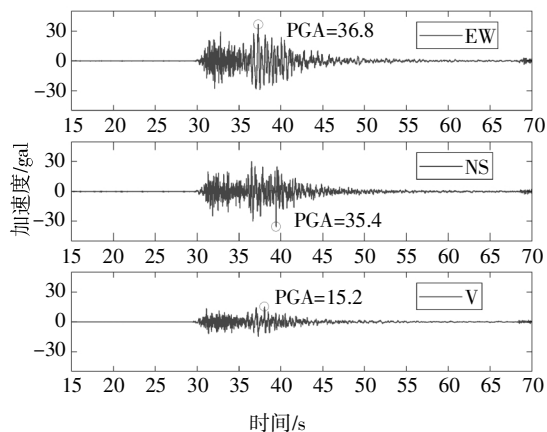
虽然缺乏近震区观测数据,但从预测值看,除 YYX2013 模型偏高外,其余模型极震区内 PGA 值为 200 ~ 300 gal, 由于近断层地震动具有明显的长周期速度和位移脉冲,对砌体、土坯和生土等脆性结构具有较强的破坏性,导致震中大量土木、砖木结构农房破坏、倒塌,极震区烈度达到Ⅷ度.值得注意的是,国庆和景谷台站 PGA 值明显小于同等震中距台站 PGA 值,例如国庆与江城县城相距不到 5 km,水平向 PGA 值相差 3 倍,说明场地条件对地震动的放大效应显著,农村危房改造中拆除重建的房屋应考虑选址的影响.

1.2 频谱特性分析

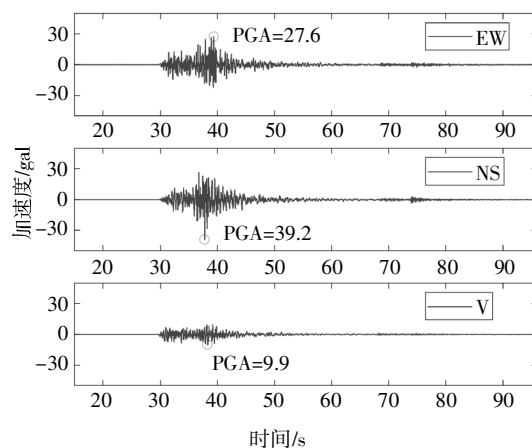
为进一步掌握此次地震的地震动特性,对勐先、磨黑和宁洱台站记录到的强震波形数据进行频谱特性分析.图 4、图 5 分别给出了 3 个台站东西、南北和竖直方向的加速度时程及其频谱分析结果.

由图 4 可知,由于震中距和场地类型较为接近,勐先和磨黑台站的 PGA 相差不大,宁洱台站的 PGA 略小,水平方向地震动水平高于竖直方向.通过计算地震动参数发现,地震波的 Arias 强度与 PGA 值正相关,地震动相对持时($t_5 \sim t_{95}$)在 10 ~ 18 s 之间,并随震中距增加有逐渐增大的趋势,竖直方向持时总体高于水平方向.

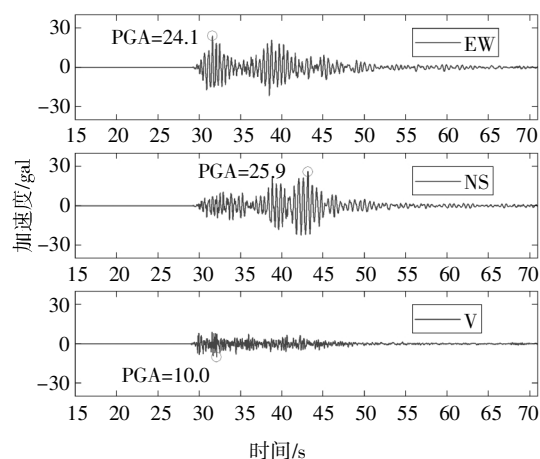
由图 5 可以看出,3 个台站主频成分在 2 Hz 左右,由于水平地面峰值加速度不大,对该地区以土木、砖木、生土和砌体结构为主的刚度大、高度小的农房建筑未造成破坏.



(a) 勐先台站



(b) 磨黑台站



(c) 宁洱台站

图4 台站加速度时程曲线

Fig.4 Acceleration time histories of the ground motion recorded of three seismometer stations

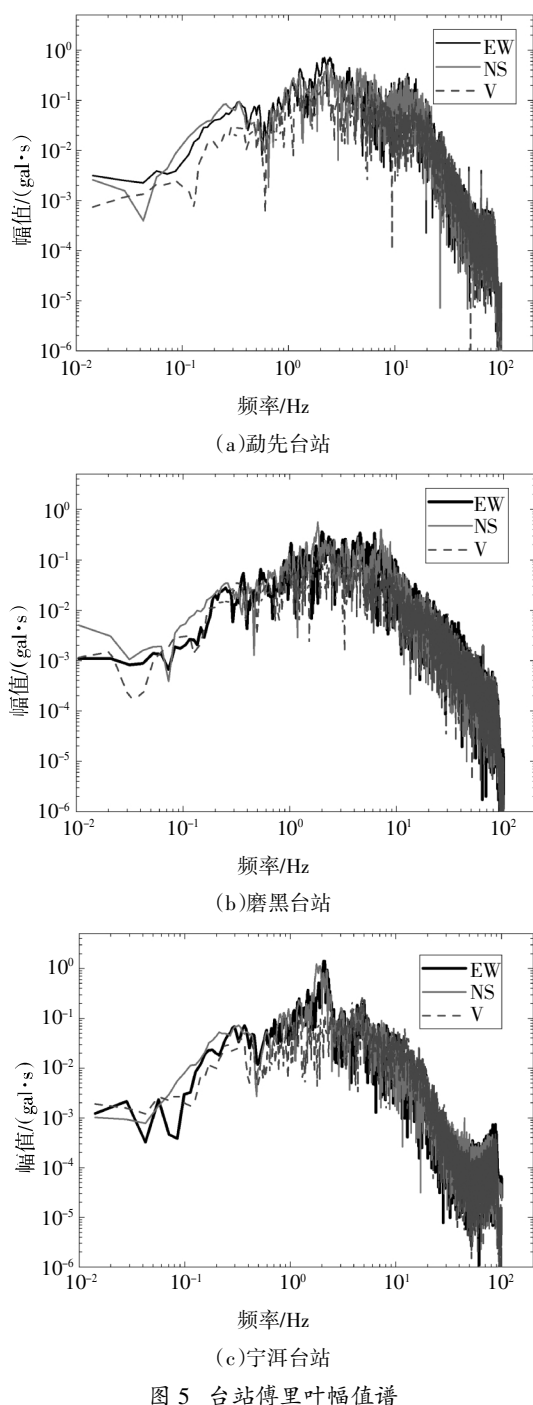


图 5 台站傅里叶幅值谱

Fig.5 Fourier amplitude spectra of three seismometer stations

2 典型震害对比分析

2.1 墨江县农房建筑结构概述

墨江县位于云贵高原西南边缘,地处阿墨江断裂带,同时受哀牢山断裂带、红河断裂带和把边江断裂带的影响,地震频发,境内山谷纵横,山区面积占墨江县总面积的 99.98%。墨江县内有 25 个民族,受经济条件限制,广大农户在自建房屋时首先考虑的

是采用价廉量广的土坯、木材、石材、砖瓦等当地建材。经济条件稍好的农户采用砖混结构。以农村工匠为主体的施工队伍决定了建筑结构形式只能是施工简单的土木、砖木、生土等。为了便于进行震害分析,将灾区建筑分为木结构(土木)、生土结构(土掌房)、砖木结构、砖混结构和简易房等形式,简易房一般作为附属建筑为满足日常储存、饲养等功能,结构形式随意,建筑多以土木、砖木结构为主。墨江县村镇房屋构成占比如图 6 所示,其中农村地区土木结构与砖木结构房屋占比达 80%以上^[13]。

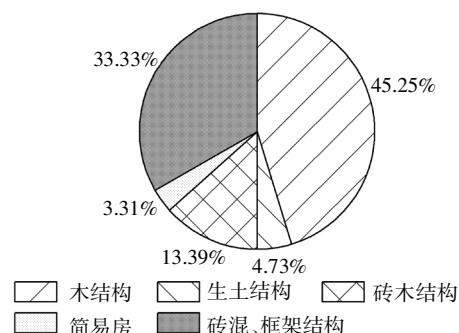


图 6 墨江县村镇房屋构成比例

Fig.6 Composition of rural houses in Mojiang county

木结构以木梁、木柱等作为主要承重构件,采用土坯、生土作为围护和分隔墙体,按照木构架组成又分为穿斗木构式、木柱木屋架和木柱木梁。穿斗式房屋一般为两层独栋建筑,层高 2~3 m,每栋 3~5 间,作为正房或厢房使用,柱脚浮摆平搁于础石之上,横向用梁和梁下穿枋把柱串联成单榀构架,纵向依靠斗枋和搁于柱顶的檩条相连,梁柱间、枋柱间采用榫卯连接,檩条上钉椽子,椽上铺设小青瓦形成人字形瓦屋面,建造时一般先立架后成墙,由于建造简单、取材方便,是这一区域分布最广、数量最多的一种结构形式。这类房屋建造年代跨度较大,服役时间长,现役农房中建于二十世纪七八十年代居多。穿斗木构架柱上承檩,屋面荷载和楼面荷载分别通过椽檩和梁枋由木柱直接传至地面,可以充分利用木材顺纹抗压强度。水平地震作用下木构架产生侧向变形,梁柱构件在榫卯节点处的嵌压和摩擦效应支配节点的半刚性特性,提供转动刚度并消耗部分地震能量,使木构架具有良好的抗震性能,震后“墙倒架不塌”就是证明。同时,木材作为一种有机材料在温湿度变化和长期荷载下容易开裂、变形甚至糟朽,木构架抗侧能力随之下降,在上部荷载和较强的水平

地震作用下房屋可能“架倒墙塌”。该类房屋主要加固其木构架承重结构体系,例如加固木柱柱脚,更换、剔补或墩接加固木柱,采用小斜撑、三角木、铁扒钉、扁钢、角钢等加固梁柱榫卯节点,使穿斗式木构架从松散可变体系变为耗能减震的几何不变体系,同时在纵向柱架增设剪刀撑,楼屋面增设水平支撑,修复加固围护墙体,增强墙体、檩条与木构架的连接,提高房屋整体抗震性能,减轻震害。值得注意的是,近年来在传统木结构梁柱榫卯连接抗震加固研究中使用了许多新材料,例如软钢、纤维增强材料(碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等)、橡胶阻尼器^[18]等,试验表明具有较好的加固效果。

另一类历史更为久远的民居是哈尼族土掌房,这种房屋一般层高较低,多为二层,依山而建,层层叠叠,错落有致。屋顶用圆木按间隔 300~500 mm 一根分档,上铺竹笆或木棍,再垫草或树叶,最上层填 150 mm 左右的泥土夯实,可作为晒场或日常活动场地。土掌房冬暖夏凉,耐久性较好,利于防火,但不利于通风采光。哈尼土掌房是一种独具民族特色的密梁平顶式结构,由木柱和木梁形成内部框架,与土坯或夯土外墙一起承担竖向荷载,属于土木混合承重体系。抗震情况下,地震剪力同样由木框架和土体墙共同承担,因为楼层低、屋顶重、墙体厚且开洞少,哈尼土掌房具有较好的抗震能力。随着农村经济发展,新建农房基本不会采用此类,一户居民土掌房和新式农房混用的现象也很常见。这种混用形式既能增加居住和储物的使用空间,又能兼顾老一辈居民火塘取暖,供祖祭祀等需求,同时也使哈尼族土掌房得到保留。

砖木结构在新建农房中被广泛采用,可分为砖墙承重、木构架承重砖墙围护、木构架与砖墙混合承重三种结构类型。墨江地区的砖木结构房屋建造时多是先砌墙后搭架,墙体材料以空心砖为主,采用硬山搁檩式木屋盖,一般为单层,层高 3~5 m,屋面荷载通过檩条由砖墙传至地面,属于砖墙承重结构体系。砌体墙的抗剪能力普遍高于土坯墙和生土墙,但砌筑砂浆强度低、墙体高厚比过大、纵横墙连接不牢、屋盖与墙体连接缺乏锚固、不设壁柱和圈梁等问题在这类房屋中普遍存在,水平地震作用下常出现墙体灰缝开裂、外墙拉脱外闪、山墙外闪致屋架坍塌等震害。对此,该类房屋主要加固其砖墙承重体系,例如增设砌体抗震墙或混凝土扶壁柱,拆除重砌强度过低的墙体,灌浆修补已开裂的墙体,采用水泥砂浆面层、钢丝网或铁丝网砂浆面层加固墙体的一侧

或两侧,提高墙体的强度、承载能力和抗变形性能。同时采用钢拉杆、外加柱或外加圈梁等措施增强纵横墙连接,增设托梁或扶壁柱以满足木楼屋盖构件墙上支承长度,增设现浇钢筋混凝土外墙圈梁和钢拉杆内墙圈梁,增设木屋盖纵向水平系杆、竖向剪刀撑和水平支承,提高房屋整体抗震性能。近年来,诸如碳纤维布加固、高强钢绞线-聚合物砂浆加固、高延性混凝土加固^[19]、简易隔震等新技术在砌体结构加固研究中取得了一些进展,部分已用于村镇砖木结构房屋的抗震加固中。

框架结构由于造价高,施工难度大,只有县城和乡镇少数公共建筑采用。砖混结构是我国村镇建筑中最常见的结构形式,但在经济条件更为落后的墨江农村地区,只有经济宽裕的家庭自建砖混房,大多都是近几年才建造的。此外,农危改工作中易地重建和震后恢复重建的民居多采用砖混结构。

2.2 典型震害现象

此次地震极震区烈度达到Ⅷ度,超过了当地建筑物抗震设防烈度(Ⅶ度,0.10g),按云南省及墨江县农危改技术标准实施了修缮加固的农房,达到了“中震可修,大震不倒”的设防目标。地震破坏主要集中在Ⅶ度区、Ⅷ度区未经加固的农房,其中Ⅷ度区土木、砖木结构农房震害最为严重。为了与农危改房进行震害对比,主要对Ⅷ度区、Ⅶ度区土木和砖木结构农房震害调查资料进行整理和分析,总结各自震害特点并分析震害原因。

土木结构是极震区采用最多的结构形式,因此震害最为严重,受使用年限、用材、设计水平和施工质量的综合影响,同一区域的震害现象会有差异。调查发现,Ⅷ度区土木结构房屋普遍梭掉瓦,墙体开裂,个别架倒墙塌,如图 7(a)所示。部分墙体外闪或局部坍塌,如图 7(b)所示。Ⅶ度区震害以中等破坏和轻微破坏为主,表现为墙体局部坍塌、梭掉瓦和墙体开裂,如图 7(c)(d)所示,大部分房屋基本完好。



(a)架倒墙塌



(b)墙倒架不塌



(c)外墙局部坍塌



(d)墙体开裂、梭掉瓦

图 7 土木结构农房典型震害

Fig.7 Typical seismic damage of rural raw-soil and timber structure houses

砖木结构和生土结构主要分布在Ⅶ度区,震害相对较轻.未经加固的砖木结构房屋普遍墙体开裂,梭掉瓦,如图 8 所示.调查发现,承重墙体破坏主要是由于墙厚小,砂浆强度低,地震时墙体抗剪承载力不够,或是层高和开间过大、墙体开洞导致侧向刚度不足.



图 8 砖木结构农房典型震害

Fig.8 Typical seismic damage of rural brick and timber structure houses

哈尼土掌房在此次地震中表现出较好的抗震性能,Ⅶ度区少数墙体开裂,大部分房屋基本完好,如图 9 所示.



图 9 哈尼土掌房典型震害

Fig.9 Typical seismic damage of raw-soil structure houses of Hani people

相比于以上结构形式的民居,砖混结构房屋大多数是脱贫工作中拆除重建的民居或政府出资建设的公共用房,经过正规选址和设计,按图施工,因此具有较好的抗震性能.如图 10 所示,丙蚌村(Ⅷ度区)拆除重建的二层砖混结构房屋基本完好.



图 10 砖混结构房屋典型震害

Fig.10 Typical seismic damage of masonry-concrete structure houses

2.3 农危改房屋震害对比分析

2009~2018 年,墨江县结合脱贫攻坚和抗震安居工程对 37 018 户 C、D 级危房实施改造,其中拆除重建 20 629 户,修缮加固 16 389 户,各占总数的 55.7%和 44.3%.地震发生后,应急排查评估专家组对灾区 68 户农房(农危改 40 户,未改造 28 户)进行抽查,结果显示:实施农村危房改造工程的民房震损较轻,砌体承重墙、楼屋盖完好,评估结论绝大多数为 A 类,极少数为 B 类,未实施农危房改造的震损严重,评估结论为 C 类,表明已改造房屋能经受地震的考验.表 2 对未改造房屋与农危改房屋震害进行了对比.

表 2 加固与未加固房屋震害对比

Tab.2 Comparison of seismic damage between reinforced and unreinforced houses

	未改造农房震害	农危改农房震害
Ⅶ度区		
	未加固土木、砖木结构房屋中等破坏	加固的土木、砖木结构房屋基本完好
Ⅷ度区		
	未加固土木、砖木结构房屋严重破坏	加固的土木、砖木结构房屋中等破坏
Ⅷ度区		
	未加固自建砖混结构房屋(未设置圈梁、构造柱)严重破坏	拆除重建和新建村民活动室砖混房屋基本完好
同一地点对比		
	 加固改造(左)房屋震害	 未改造房屋(右)震害

房屋倒塌和破坏是地震造成人员伤亡的主要原因,此次地震未造成人员死亡,受伤人数较少,这在云南历年同级别地震中较为少见.针对地震灾区分布最广、数量最多的土木结构农房,本文将此次地震与其他三次地震在Ⅷ度区震害的统计情况和震害指数进行对比,如图 11 所示.

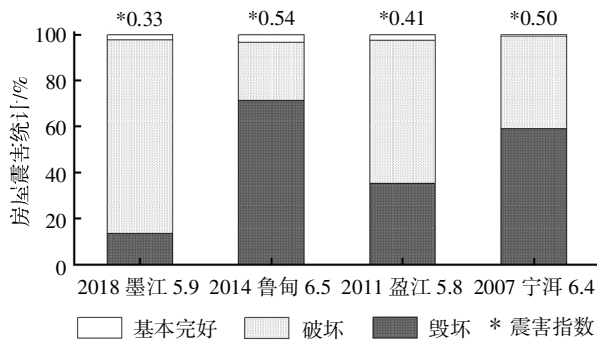


图 11 四次地震Ⅷ度区土木结构农房震害对比

Fig.11 Comparison of seismic damage to rural raw-soil and timber structure houses in the region of Ⅷ intensity of the four earthquakes

为了统一,土木结构农房不同破坏等级的震害指数按简易房屋毁坏、破坏和基本完好分别取 0.65、0.29 和 0,其中 2007 年宁洱 6.4 级地震^[20]距离最近,2011 年盈江 5.8 级地震^[21]震级相当,2014 年鲁甸 6.5 级地震^[22]伤亡最大.由图 11 可以看出,墨江地震中土木结构农房毁坏的比例较低,震害指数最小,说明房屋破坏明显轻于其余地震,抗震加固效果显著.

对既有农房进行抗震加固主要针对大部分 C 级和少量 D 级危房,结构形式以土木结构和砖木结构为主,此次地震中这两类房屋的抗震加固效果也最为明显.墨江地区的土木结构房屋主要以穿斗式木构架为主要受力构件,土坯或夯土墙为围护结构.浮摆柱脚的减隔震以及梁柱榫卯节点的耗能减震使穿斗式木构架具有良好的整体变形能力和抗倒塌能力^[23],但年久失修的房屋在自然侵蚀和人为破坏下,梁柱榫卯节点强度和刚度下降,榫头脱离卯口,木构架变松散,抗震能力降低,水平地震作用下木构架变形,梭掉瓦和墙体开裂现象普遍存在,强震下易造成房屋局部甚至整体坍塌.同时还存在木构架与墙体刚度差异大而变形不协调的问题,当墙体与木构架缺乏足够拉结时易发生相互碰撞,加剧墙体开裂破坏.加固后一方面通过补强木构件和木节点使穿斗

式木构架从松散可变体系变为耗能减震的几何不变体系,抗侧能力提高;另一方面通过增设有效支撑、修复墙体、增强构件连接提高房屋整体抗震性能,减少地震破坏.砖木结构的砌体墙既要承担所有上部荷载,又要作为抗震墙抵抗水平地震作用,部分房屋砌体墙块材使用不当、墙厚度薄、砂浆强度低,导致墙体抗剪承载力不够,或是层高开间过大、墙体开洞导致侧向刚度不足,地震时墙体开裂非常普遍.当墙体平面布局不合理,未设置圈梁,屋盖体系不完整,纵横墙连接或楼屋盖与墙体连接不牢时极易造成坍塌.加固后一方面通过增设、拆除重砌、修补或加固砌体墙,提高抗震墙的强度、承载能力和抗变形性能,减少墙体开裂破坏和变形;另一方面通过增设圈梁、托梁、扶壁柱和各类支撑件,增强构件连接,加固易倒塌部位,完善房屋抗侧力体系,提高房屋整体抗震性能,减轻震害.

震害调查表明,按云南省及墨江县农危改技术标准修缮加固的农房,在Ⅶ度区能做到基本完好,在Ⅷ度区能做到局部可修或不倒塌;拆除重建的农房在Ⅷ度区能做到完好或基本完好;未加固农房在Ⅶ度区表现为中等破坏,在Ⅷ度区表现为严重破坏或倒塌.实践证明,农村危房改造不仅是民心工程,更是群众生命财产的守护工程,是群众的“保命房”.

3 结论与建议

在掌握墨江 5.9 级地震地震动特征的基础上,对农房震害进行了调查,重点分析农村危房改造对提高农房抗震防灾能力的实际效果,得出以下结论和建议:

1)加强地震动观测.利用地震多发的地理优势丰富西南地区地震观测数据资料,为地震危险性分析和工程抗震设防输入提供依据.近年来云南省通过加强地面地震观测台网建设在历次地震中捕捉到了一些非常有意义的地震记录,如 2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震,PGA 高达 948 gal;2018 年 8 月 13 日通海 5.0 级地震,PGA 达到 460.5 gal.相比之下,对建构筑物的强震观测还很少.

2)加大农房抗震加固改造.震后应急排查评估和震害调查结果显示,实施农村危房改造工程的民房震损较轻,在Ⅶ度区能做到基本完好,在Ⅷ度区能

做到局部可修或不倒塌,有效保障了人民生命财产安全,是此次地震损失较轻的重要原因.农村危房抗震加固改造工作是全面提升既有农房抗震防灾能力的有效途径.

3)推广新材料新技术应用.许多新技术新材料已经在城市建筑中取得成功运用,但在村镇建筑方面,因为缺少技术标准的支撑且造价偏高,在缺乏实际地震检验的情况下,新技术新材料的运用推广严重滞后.建议积极引导相关标准制定,解决推广缺乏依据的难题.政策上对新技术新材料应用提供一定时期指导性补贴,解决造价偏高的问题.积极开展相关研究和试点应用,为实际工程应用提供经验和技術支撑.

4)重视震害调查.由于对地震的产生、传播与其对建筑物的影响涉及诸多不确定性,加之地震模拟及实验条件、数值模拟及仿真条件、理论分析及计算方法的局限性,应更加注重地震灾害调查研究,将地震震害作为抗震规范的标准.

调研过程中得到了云南省住房和城乡建设厅、普洱市住房和城乡建设局的支持和配合,感谢墨江哈尼族自治县人民政府提供农危改工作开展情况数据、地震农房受损数据、震后农房排查评估数据以及震害对比图片资料,感谢云南省地震局云南台提供地震动观测数据,在此深表感谢!

参考文献

- [1] 高孟潭. GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京:中国标准出版社,2015:3.
GAO M T. The teaching material of seismic ground motion parameters zonation map of China (GB 18306—2015) [M]. Beijing: China Standard Press, 2015:3. (In Chinese)
- [2] 杨威,王满生,纪晓东,等. 北京农村砖木结构抗震加固动力特性分析[J]. 土木工程学报,2014,47(3):26—32.
YANG W, WANG M S, JI X D, et al. Dynamic characteristic analysis on seismic strengthening of existing rural masonry-timber buildings in Beijing [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 26—32. (In Chinese)
- [3] 白仙富,戴雨芾,戴靖,等. 昭通地区地震灾害区域性特征分析[J]. 地震研究,2013,36(4):514—524.
BAI X F, DAI Y Q, DAI J, et al. Study of the main regional features of earthquake disasters in Zhaotong [J]. Journal of Seismological Research, 2013, 36(4): 514—524. (In Chinese)
- [4] 王永亮,杨巧红,何忠茂,等. 7·22 地震灾后农村房屋震害调查与分析[J]. 工程抗震与加固改造,2014,36(3):128—133.
WANG Y L, YANG Q H, HE Z M, et al. Seismic damage investigation and analysis on rural buildings of 7·22 earthquake [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(3): 128—133. (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 Ms 8.1 gorkha earthquake [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 35—44. (In Chinese)
- [6] 李雯,陈文凯,周中红,等. 中国大陆地震灾害生命损失时空特征分析[J]. 灾害学,2019,34(1):222—228.
LI W, CHEN W K, ZHOU Z H, et al. Analysis of temporal-spatial distribution of life losses caused by earthquake hazards in Chinese mainland [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 222—228. (In Chinese)
- [7] 阿肯江·托呼提,元国庆,陈汉清. 新疆南疆地区传统土坯房屋震害及抗震技术措施[J]. 工业建筑,2008,38(S1):189—193.
AKENJIANG · T, QI G Q, CHEN H Q. Seismic damage and seismic countermeasures of Xinjiang traditional adobe house [J]. Industrial Construction, 2008, 38(S1): 189—193. (In Chinese)
- [8] 王毅红,樊琨,陈全杰,等. 村镇生土结构房屋抗震加固措施试验研究[J]. 工程抗震与加固改造,2011,33(6):77—81.
WANG Y H, FAN K, CHEN Q J, et al. Experimental study on anti-seismic strengthening measures on raw-soil structure houses in villages [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(6): 77—81. (In Chinese)
- [9] 尚守平,姚菲,刘可,等. 一种适合于农村民居的抗震实用技术[J]. 工程力学,2009,26(S2):168—174.
SHANG S P, YAO F, LIU K, et al. A practical technology for seismic resistance of rural residence [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S2): 168—174. (In Chinese)
- [10] 周铁钢,朱瑞召,朱立新,等. 土坯墙承重民居抗震加固振动台试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2016,36(2):181—187.
ZHOU T G, ZHU R Z, ZHU L X, et al. Shaking table test study on a seismic strengthening of adobe wall bearing dwellings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 181—187. (In Chinese)
- [11] 周铁钢,刘博,史庆轩,等. 木构架承重-空斗墙围护民居抗震加固振动台试验研究[J]. 世界地震工程,2019,35(1):17—26.
ZHOU T G, LIU B, SHI Q X, et al. Seismic retrofitted experiment on the timber frame-cavity wall houses by shaking table test [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(1): 17—26. (In Chinese)
- [12] 常祖峰,毛泽斌,马保起,等. 滇西南阿墨江断裂带与 2018 年墨

- 江 M5.9 地震[J]. 地质通报, 2019, 38(6): 967—976.
- CHANG Z F, MAO Z B, MA B Q, *et al.* The Amojiang fault zone and Mojiang M5.9 earthquake in 2018 in southern Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(6): 967—976. (In Chinese)
- [13] 卢永坤, 周洋, 代博洋, 等. 2018 年云南墨江 5.9 级地震房屋震害特征与烈度评定[J]. 地震研究, 2019, 42(2): 172—178.
- LU Y K, ZHOU Y, DAI B Y, *et al.* Building seismic damage characteristics and intensity evaluation of Yunnan Mojiang M5.9 earthquake in 2018[J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(2): 172—178. (In Chinese)
- [14] 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 2000, 16(2): 99—106.
- WANG S Y, YU Y X, GAO A J, *et al.* Development of attenuation relations for ground motion in China [J]. Earthquake Research in China, 2000, 16(2): 99—106. (In Chinese)
- [15] 崔建文, 李世成, 高东, 等. 云南分区地震动衰减关系[J]. 地震研究, 2006, 29(4): 386—391.
- CUI J W, LI S C, GAO D, *et al.* Ground motion attenuation relation in the Yunnan area[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(4): 386—391. (In Chinese)
- [16] 刘本玉, 梁毓桓, 温一波. 云南地区地震动衰减特性的研究[J]. 地震研究, 2012, 35(2): 226—235.
- LIU B Y, LIANG Y H, WEN Y B. Research on attenuation characteristic of seismic motion in Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(2): 226—235. (In Chinese)
- [17] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(1): 24—33.
- YU Y X, LI S Y, XIAO L. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(1): 24—33. (In Chinese)
- [18] 高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 带有黏弹性阻尼器穿斗木结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(1): 240—247.
- GAO Y L, TAO Z, YE L Y, *et al.* Shaking table tests for a Chuan-Dou timber building with viscoelastic dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 240—247. (In Chinese)
- [19] 邓明科, 张伟, 李宁. 高延性混凝土加固砌块砌体墙抗震性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9): 85—93.
- DENG M K, ZHANG W, LI N. Study on seismic behavior of concrete block masonry walls strengthened with high ductile concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(9): 85—93. (In Chinese)
- [20] 施伟华, 陈坤华, 李珊, 等. 2007 年宁洱 6.4 级地震的震害指数与烈度[J]. 地震研究, 2007, 30(4): 379—383.
- SHI W H, CHEN K H, LI S, *et al.* Hazard index and intensity of the 2007 Ning'er, Yunnan, Ms6.4 earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2007, 30(4): 379—383. (In Chinese)
- [21] 周光全, 非明伦, 谢英情, 等. 2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级地震Ⅷ度区烈度评定探讨[J]. 地震研究, 2011, 34(2): 207—213.
- ZHOU G Q, FEI M L, XIE Y Q, *et al.* Discussion of the intensity Ⅷ of the Ms5.8 Yingjiang earthquake on Mar.10, 2011 [J]. Journal of Seismological Research, 2011, 34(2): 207—213. (In Chinese)
- [22] 卢永坤, 张建国, 宋立军, 等. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震烈度分布与房屋震害特征[J]. 地震研究, 2014, 37(4): 549—557.
- LU Y K, ZHANG J G, SONG L J, *et al.* Analysis on intensity distribution and seismic disaster characteristics of building of Yunnan Ludian Ms6.5 earthquake in 2014 [J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(4): 549—557. (In Chinese)
- [23] 薛建阳, 许丹, 任国旗, 等. 穿斗式木结构民居模拟地震振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 123—132.
- XUE J Y, XU D, REN G Q, *et al.* Earthquake simulation shaking table test of column-and-tie wooden structure dwellings[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 123—132. (In Chinese)