

简龙骥,宋菲菲,黄元松.西北农居震害构成及抗震性能综合影响因素分析[J].地震工程学报,2020,42(5):1256-1261.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1256
JIAN Longji, SONG Feifei, HUANG Yuansong. Seismic Damage Composition of Rural Houses in Northwest China and Factors Influencing Their Seismic Performance[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1256-1261. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1256

西北农居震害构成及抗震性能 综合影响因素分析

简龙骥^{1,2}, 宋菲菲², 黄元松²

(1. 西华大学土木建筑与环境学院, 四川 成都 610039;

2. 四川清和科技有限公司, 四川 成都 610025)

摘要: 整理西北地区部分地震的震害资料,对西北五省的主要农居进行震害总结,分析不同结构农居震害和抗震性能,发现不同结构的抗震性能差别较大,并针对不同结构提出相应的防震减灾措施。从地震动特性、场地和地基基础、结构的自身特性等方面分析影响农居民居的抗震能力,并根据西北农居震害特点给出了防震减灾方面的一些建议。

关键词: 西北地区; 抗震措施; 震害分析

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1256-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1256

Seismic Damage Composition of Rural Houses in Northwest China and Factors Influencing Their Seismic Performance

JIAN Longji^{1,2}, SONG Feifei², HUANG Yuansong²

(1. College of Civil Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China;

2. Sichuan Qinghe Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610025, Sichuan, China)

Abstract: This paper summarizes the seismic damage data of some earthquakes in northwest China and the earthquake damage of rural houses in northwest China. Through an analysis of the seismic damage and seismic performance of different structures of rural houses, the seismic performances of different structures were found to be significantly different. Meanwhile, we propose the corresponding aseismic measures for different structures. The seismic capacity of rural houses was analyzed from the aspects of ground-motion characteristics, site and foundation, and structural characteristics. Then according to the earthquake damage characteristics of rural houses in northwest China, some recommendations on earthquake prevention and disaster reduction are presented.

Keywords: Northwest China; aseismic measure; earthquake damage analysis

收稿日期: 2020-07-14

基金项目: 四川省重大环保专项项目(2018SZDZX0021)

第一作者简介: 简龙骥(1963-), 男, 四川宜宾人, 讲师, 研究方向: 土木工程。E-mail: xwllm7687@sina.com。

通信作者: 宋菲菲(1990-), 女, 湖北襄阳人, 硕士, 工程师, 研究方向: 民居水环境。E-mail: xsongfeif@163.com。

0 引言

从历史地震来看,地震造成的建筑物破坏中农村民居占了很大比例,伤亡人员绝大部分也是农村居民。不进行抗震设防的农村民居成为危害农村居民生命安全、造成重大财产损失的重要隐患。

我国是世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一,中国地震活动频率高、强度大、震源浅、分布广。我国农村人口占总人口的 50.23%,其中 80% 居住在地震峰值加速度大于 0.05g 地震危险区^[1],而西北地区农村人口所占比例为 62.56%。据统计,我国地震平均造成的 50% 以上的经济损失和 60% 的人员伤亡在农村。历次中强地震中,农居的抗震能力都较差,农村人员伤亡十分惨重,财产等损失相当重大。王兰民等^[2-3]从农村地区防震减灾和抗御地震灾害的能力为目标,论述了在农村地区实施地震安全农居工程的必要性、可行性和重要性。张守洁等^[4]通过分析总结甘肃省农居主要结构类型和抗震性能,从震害防御技术的研究开发、知识宣传、组织领导等软实力方面提出了为实施农村民居地震安全工程的建议。何萍等^[5]建立起简单的群体农居抗震性能指数模型,对广州市各区的农村民居抗震性能进行了估算。近年来越来越多的学者运用数值模拟来研究农居的地震响应,孙军杰等^[6]运用有限元的方法研究了土坯房地震响应特征,得出影响土坯房抗震能力不佳主要是因为墙体抗剪能力差和屋盖与承重体系之间稳定性不高的结论。马宏旺等^[7]运用 Abaqus 有限元软件建立砌体结构非线性有限元模型,采用时程分析法,得出圈梁和构造柱可以有效提高砌体结构整体抗震性能。

青海玉树地震、新疆巴楚—伽师地震、甘肃岷县—漳县地震都清楚地表明,房屋破坏是造成地震损失和人员伤亡的主要原因,而村镇农居的抗震能力普遍低于城市,地震造成的破坏和人员伤亡均大于城市。从震害调查及农居抗震现状调查表明:目前我国农居没有纳入规范的规划和建设管理,大多数农居未经正规规划选址、设计、施工,所以农居的抗震能力非常差,农村民居基本上处于不设防的状态。村镇农居抗震起点低,需求迫切,量大面广,并且有区域特点。随着城镇化建设和地震安全农居工程的开展,全国部分地区的农居抗震水平得到了很大提高,但是我们还应该看到全国还有很多地区的农居抗震水平较差,还属于抗震薄弱区域。因此,我国农村地区的地震安全问题不容忽视。虽然前人做了很多农村民居抗震的

研究工作,但是仍有很大的研究空间。本文拟通过对西北地区农村民居进行分类讨论其抗震性能和震害防御水平,给出农村民居震灾防御的措施。

1 西北地区地震构造背景

西北地区行政区划包括陕西、宁夏、甘肃、青海和新疆五个省(区),约占中国国土总面积的 32%,人口接近一亿。西北地区包括了青藏高原、黄土高原、内蒙古高原以及塔里木盆地,被南北地震带、青藏高原地震带、西北地震带所挟持,是我国强震多发的地区,历史震害严重。境内地质构造复杂,地震活动分布广、频度高、强度大、震源浅、震害重,是中国大陆地震活动最强烈的地区之一^[4]。图 1 描述了西北地区主要地震带和 2000 年以来部分 5 级以上地震的分布,可以发现大部分地震都发生在新疆地区,西昆仑与阿尔金—塔里木盆地—天山—准噶尔盆地—阿尔泰山是新疆最典型地貌与构造区域,新疆强烈地震活动与其特殊的构造区位密切相关。

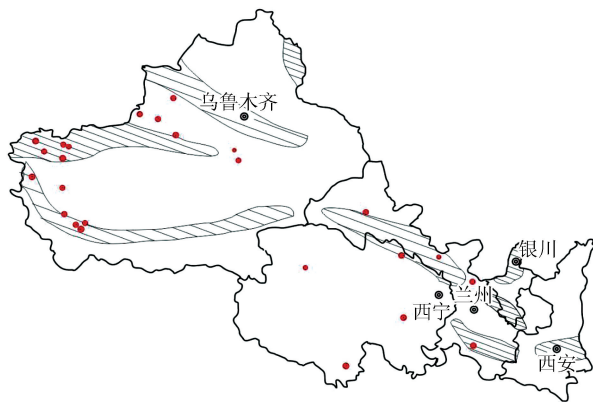


图 1 西北地区地震带及部分地震分布

Fig.1 Distribution of seismic belts and some earthquakes in northwest China

2 近年来西北农居的震害

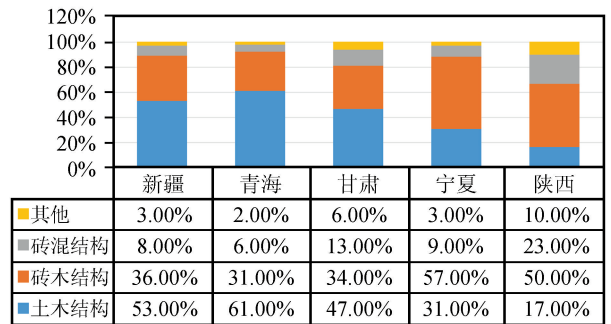
农村民居主要的结构形式有土木结构、砖木结构、砖混结构、框架结构,因框架结构在西北农村地区所占比例很少,本文不再讨论。表 1 描述了西北地区五省农居结构比例,可以看出西北地区土木结构和砖木结构所占比例最大,其次为砖木结构。农村民居的结构形式很大的程度上决定了震害的严重与否。

小震致灾,中震大灾的现象普遍现象。表 2 统计了 2000 年以来西北地区部分 $M_s \geq 5.0$ 的地震灾害损失情况。从表 2 来看一次 5 级左右的地震,在农村地区就会造成一定的房屋倒塌、人员伤亡和经

济损失。2000年以来,西北地区因地震灾害死亡人数就达3 169人,直接经济损失达530多亿元。其中2003年新疆巴楚—伽师6.8级地震死亡268人,9万多人受灾,经济损失13.7亿多元。2010青海玉树7.1级地震,震中烈度达Ⅷ度,2 698人遇难,倒塌房屋15 000户,经济损失达288亿元。玉树地震经济损失严重主要是因为房屋倒塌所造成的人员伤亡和财产损失,次生灾害较少。2013年甘肃岷县—漳县6.6级地震直接经济损失近176亿元,地震区黄土、山地广泛分布,滑坡、崩塌众多,大量房屋倒塌,地震次生灾害严重。

表1 西北地区农居不同结构比例

Table 1 The proportion of different structures of rural houses in northwest China

表2 2000—2016年西北地区地震灾害损失^[8]Table 2 Earthquake disaster loss in northwest China from 2000 to 2016^[8]

序号	时间	地点	震级/ M_s	死亡/人	受伤/人	受灾/人	直接经济损失/亿元
1	2000-06-06	甘肃景泰	5.9		5		0.719 8
2	2000-09-12	青海兴海	6.6		6 911	660 000	0.054 2
3	2002-12-14	甘肃玉门	5.9	2	350	6 000	0.700 0
4	2002-12-25	新疆喀什	5.7		1	33 889	0.304 5
5	2003-02-24	新疆巴楚—伽师	6.8	268	4 853	92 004	13.713 0
6	2003-10-25	甘肃民乐	6.1/5.8	10	46	173 079	7.300 0
7	2003-12-01	新疆昭苏	6.1	10	46	190 101	1.802 6
8	2007-07-20	新疆特克斯	5.7			115 845	1.106 0
9	2008-10-05	新疆乌恰	6.8			12 756	0.672 8
10	2009-08-28	青海海西	6.4			15 000	1.108 0
11	2010-04-14	青海玉树	7.1	2 698	11 000	200 000	228.474 1
12	2011-06-08	新疆托克逊	5.3		7	16 174	0.922 5
13	2011-08-11	新疆阿图什	5.8		21	47 600	1.832 2
14	2011-11-01	新疆尼勒克	6			450 000	6.780 0
15	2011-12-01	新疆莎车	5.2			72 576	0.485 9
16	2012-03-09	新疆洛浦	6			116 200	5.230 0
17	2012-06-30	新疆新源	6.6	1	51	838 600	19.900 0
18	2012-08-12	新疆于田	6.2	81		1 990 000	0.500 0
19	2013-03-11	新疆阿图什	5.2			3 168	0.239 7
20	2013-07-22	甘肃岷县—漳县	6.6	95	2414	780 000	175.880 0
21	2014-02-12	新疆于田	7.3			45 000	10.800 0
22	2015-06-25	新疆托克逊	5.4			1 200	0.0400 0
23	2015-07-03	新疆皮山县	6.5	3	260	653 608	54.300 0
24	2016-01-21	青海门源	6.4			1 222	0.044 3
25	2016-11-25	新疆阿克陶	6.7	1		18 000	0.360 0

大量震灾表明,村镇地区房屋抗剪和抗弯强度均较低,结构设计不合理,选址和地基处理随意性强等因素,导致震灾非常严重。西北地区农村民用建筑以土木结构为主,其中木柱土坯房占大多数,从农村破坏的建筑物类型来看,该类房屋破坏最严重,原因在于该类房屋在结构上不完善,作为支承的木柱质量差,数量少,横梁和屋顶直接承担在土坯墙上,没有连接措施,加重了土坯墙的承载力,加之屋顶多以泥浆抹顶,放置瓦防雨,使屋顶整体承载加重,房

屋抗震性能大大降低。从场地环境来看,西北地区多为山地,房屋场地选取不良,许多农居依山而建,建立在边坡上,随意性较高,未做安全性评价分析。在遭受地震作用时容易发生滑坡、土体和岩体崩塌的现象。其次地基未作处理或处理不当,在地震作用下,地基承载力下降、不均匀沉降、软土震陷、地基失效和地基液化,导致建筑物倾斜、破坏甚至倒塌。表3总结归纳了不同烈度下的不同结构农居的震害特征。

表 3 不同烈度下不同结构的震害特征^[9]Table 3 Seismic damage characteristics of different structures under different intensities^[9]

结构类型	地震烈度				
	V	VI	VII	VIII	IX
土木结构	梁、檩条下方出现裂缝和掉泥皮,纵横墙交接处出现裂缝	梁、檩条下方和墙角等部位出现较大的竖向裂缝	承重墙体出现破坏,甚至局部塌落	严重破坏或倒塌局部屋顶落地	大量房屋倒塌,少部分严重破坏
砖木结构	基本完好	轻微破坏,墙体洞口处出现轻微裂缝,瓦片错动,檐口掉瓦	窗间墙、应力集中部位、墙角出现裂缝,屋面变形,瓦片脱落	墙底出现水平和 X 形裂缝,屋顶局部坍塌,烟囱倒塌	墙体普遍出现贯通裂缝,梁檩脱落,屋顶整体坍塌,墙体局部倒塌
砖混结构	完好	墙体出现轻微裂缝,屋盖基本完好	墙体出现裂缝,少数出现 X 形裂缝,个别墙体外闪;多数屋盖完好	墙体出现明显裂缝,预制板屋盖下方出现裂缝,木屋盖大面积落瓦	墙体出现贯通裂缝,墙体外闪局部倒塌或全部倒塌,少数预制板屋盖塌落

3 西北农居的结构特点及其抗震措施

3.1 西北地区的土木结构

土木结构农居:这类房屋可以分为墙体承重、混合承重和木架承重三种类型。

墙体承重房屋和混合承重房屋是由土坯墙或夯土作为墙体,屋架直接搭接在横墙上,承重结构主要是墙体。混合承重结构中木柱或者砖柱也分担了部分屋盖和楼板的重量。墙体承重房屋虽然有足够的承载力,但是抗剪、抗拉强度低,容易出现脆性破坏。同时用来制作墙体的土质量差,黏结强度低,导致墙体的整体性较差。对于土坯墙,土坯质量随黄土原料不同而承载力不同,整体性不如夯土墙。屋盖系统一般为木屋盖,加瓦防雨,甚至有些用泥抹顶,加重了屋盖系统的质量,不利于此类房屋的抗震。还有些生土房屋屋顶未做任何檐口,墙体直接裸露在外,易受到雨水侵蚀,大大地减少了房屋的使用年限。

木架承重结构主要是由木构架承重,墙体作为围护结构只承受部分重量,屋架一般采用木屋架,在西北地区多为两坡水屋面。木架一般由梁、柱、檩通过榫卯结构连结在一起,某些关键部位加以铆钉加固,组成房屋的承重体系。此类结构的农居具有较高的抗震能力,主要是因为木材具有很大的弹性形变,增加了房屋的柔度,将地震时的能量转化为弹性势能,不至于发生脆性破坏。但是木构架承重房屋不适用于雨水较多的潮湿地区,容易受到雨水侵蚀腐朽以及虫蛀,导致木构架节点松动,整体抗震性能降低。同时欠发达地区农村往往采用劣质木材,也是震害严重的原因之一。

3.2 西北地区的砖木结构

砖木结构在我国西北农村地区是分布最广的一

种结构类型,其主要承重结构为黏土烧结砖与砂浆砌筑的墙体,部分房屋也采用墙体和木构架共同承重。此类房屋墙体承受屋顶、楼板传递的荷载。多层砖木结构中,木质的梁板体系也是承重构件之一。砖砌墙体强度大,抗压能力强,抗剪能力取决于砌筑砂浆的强度,抗拉强度较弱。而其中的木构架具有较好的整体性和变形能力,弥补了砖木结构农居柔度不够的缺点。根据震害分析,此类房屋因为其整体性相比土木结构好,所以在地震时倒塌较少,震害较轻。

3.3 西北地区的砖混结构

砖混结构在西北地区分布较少,主要分布在陕西,但随着地震安全农居工程的开展和经济发展,此类房屋在农村地区呈增长趋势。砖混结构一般设置用钢筋混凝土制作的构造柱和圈梁等构造措施,大大地增强了房屋的整体性和变形能力,房屋开间更大,门窗洞口的开设也会更加方便。其楼板、屋面板采用钢筋混凝土预制或现浇而成。通常隔墙、填充墙也用黏土砖砌筑,但不起承力作用。但是要避免强梁弱柱,保证在房屋遭受地震作用破坏时不会整体塌落。

3.4 西北地区农居抗震措施建议

根据西北地区地质背景 and 经济发展情况,提出了不同结构农居加强防震减灾的一些措施。表 4 从地基基础、墙柱和屋顶等方面给出提高房屋抗震性能的措施。

4 影响抗震性能的因素

我国针对农村民居抗震设计和施工的政策法规相对滞后,农村民居建设仍没有纳入政府管理,农村建房的管理体制基本处于空白的状态;农民自主建房缺乏整体规划;农村工匠管理水平不高,水平参差

不齐,建房质量难以保证;农民为了追求房屋造价低廉盲目减少替换建筑材料,降低抗震性能和房屋质量的现象依然普遍,这些都对提高农村民居的抗震

能力造成了不利影响。而西北五省农村的人均纯收入均低于全国农村平均水平,低收入贫困人口比例较高,投入在房屋建设方面的资金有限。

表4 不同农居结构的抗震措施^[10-11]

Table 4 Aseismic measures of different rural structures^[10-11]

	结构类型		
	土木结构	砖木结构	砖混结构
地基基础	避免使用不良场地;采用石砌基础,注意防潮	采用钢筋混凝土条形基础;在柱、墙角处加大基础挖深	不均匀地基、黄土地基可以先对地基进行加固处理,防止地基不均匀沉降、湿陷性沉降
墙柱	夯土墙体时,做好纵横墙的拉结;墙体中添加秸秆;加固山墙	墙体拉筋;设置圈梁、构造柱;砌筑时用较高强度砂浆并保持灰缝饱满;山墙不宜过高	采用横墙承重;合理布置构造柱,且在柱高三分之一处加密箍筋;
屋顶	避免使用泥抹面;选择材质较好的梁、檩母材;做好屋顶与承重墙的连接	选用质量较好的母材,榫卯联结,	采用现浇屋盖,并合理布置屋盖下的梁;预制板做屋盖时注意搭接在墙体上时的长度要满足要求

从地震事件本身和房屋结构来说影响农居民房抗震性能的主要因素有地震动特性、场地条件、结构自身特性等方面。

4.1 地震动特性

地震动特性主要分为时域特性、频域特性和空间特性这三个方面。西北地区是我国构造运动活跃地带,地震活动频繁。地震动强度和持续时间最直接的影响到了地震破坏大小,地震动强度越大造成的破坏越大;其次,地震动持时对结构屈服进入塑性变形后作用明显,持时越长,结构累积变形越大,造成的破坏也越严重。不同地震产生的波频复杂,长、短周期普遍存在,地震动的卓越周期与建筑物的自振周期相近的可能性大,容易引起共振,加重结构的破坏。对于农村民居的震害分析,由于结构本身所占面积不大,一般认为基底与地震动均匀一致,不考虑结构基地的时空相关性。

4.2 场地和地基条件

西北地区居住地主要以高原和山地为主,大部分都是第四纪形成的沉积层,土体和岩体多为半固结未固结的松散状态,不利于工程建设。很多房屋就建在活动断层上面或者离断层很近,及高坡、山谷盆地等不利场地。一旦地震发生,坡体和山体容易产生滑坡、崩塌等地质灾害。在西北地区复杂的地理环境,地震动易产生盆地效应,使地震波能量积聚在盆地内部,导致地震动明显加剧。其中2013年甘肃岷县漳县地震就发生大量的滑坡和崩塌,造成了巨大的人员伤亡和经济损失。历史地震资料和现场调查报告显示,建筑场地不良、地基承载力下降、地基失效失稳和砂土液化等地基基础灾害对房屋的稳定性造成了致命的影响。填筑地基相比开挖地基

差,由于填筑地基土质较为松散,地震时容易起到放大效应,也加剧了地震灾害。

4.3 结构自身特性

西北地区农居主要以土木结构、砖木结构和砖混结构为主,其中以土木结构居多,此类结构经济成本低,抗震性能差。有些农居为了追求采光和使用方便,设置过多的门窗、造成窗间墙太窄,同时横墙间距很大,易造成平面外失稳,并没有经过强度验算,这些都会削弱墙体的强度,使墙体抗剪能力大大降低,地震作用下容易造成墙体出现水平裂缝、“X”型裂缝,极大的威胁房屋的整体稳定性。还有房屋的平面布置不合理,没有经过专业设计,随意性大,平面刚度不均匀,在地震作用时,容易发生扭转,从而导致房屋破坏。房屋砌筑质量差,门洞边缘、纵横墙交接处砂浆强度低、砌筑灰缝不饱满不均匀、砌筑时未咬槎、缺乏可靠拉结措施,导致纵横墙连接不牢,外墙在水平方向的地震作用下容易外闪。

5 结论及建议

(1) 西北地区农村震害呈现小震致灾、中震大灾的特点,原因是西北五省农村人均纯收入均低于全国农村平均水平,低收入贫困人口比例较高,受经济和社会发展水平的制约,防震减灾意识淡薄,建房一般不考虑抗震因素。投入在房屋建设方面的资金有限,施工技术不高,不进行住宅抗震设计,容易出现材料、施工、设计等方面问题。结构设计不合理,施工质量差是西北地区农居抗震性能弱的主要因素。

(2) 西北地区农居结构主要以土木结构者居多,此类结构抗震性能差。有些农居为了追求采光

和使用方便,设置过多的门窗、造成窗间墙太窄,同时横墙间距很大,这些会削弱墙体的强度,使墙体抗剪能力大大降低,地震作用下容易造成墙体出现水平裂缝、“X”型裂缝,严重的造成直接倒塌破坏。

(3) 没有经过专业设计,平面刚度不均匀,地震作用时容易发生扭转,从而导致房屋破坏。

(4) 房屋砌筑质量差,门洞边缘、纵横墙交接处砂浆强度低、砌筑灰缝不饱满不均匀、砌筑时未咬槎、缺乏可靠拉结措施,导致纵横墙连接不牢,外墙在水平方向的地震作用下易外闪。

(5) 建议多加强地震安全知识的普及,增强居民防震减灾意识,并组织建筑工匠学习防震减灾的知识以及建筑技能是有效地减轻地震灾害的途径。

感谢郭安宁研究员、彭立顺对本文的指导与协助!

参考文献(References)

- [1] 兰日清,丰彪.芦山地震农居房屋震害启示与建议[J].地震工程与工程振动,2013,33(6):138-143.
LAN Riqing, FENG Biao. Inspiration and Advice on Earthquake Damage to Rural Buildings in Lushan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(6):138-143.
- [2] 王兰民,林学文.农村民房的地震破坏特征与震害预测[J].震灾防御技术,2006,1(4):337-344.
WANG Lanmin, LIN Xuewen. Destructive Characteristics of Rural Buildings by Earthquakes and Seismic Damage Prediction[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(4):337-344.
- [3] 王兰民,陶裕禄,袁一凡,等.中国地震安全农居示范工程综述[J].西北地震学报,2005,27(4):305-311.
WANG Lanmin, TAO Yulu, YUAN Yifan, et al. Summary of the Seismic Safe Rural Houses Project[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(4):305-311.
- [4] 张守洁,王兰民,吴建华,等.甘肃省农村民居抗震设防现状与地震安全农居示范工程对策[J].震灾防御技术,2006,1(4):

345-352.

ZHANG Shoujie, WAN Lanmin, WU Jianhua, et al. Present Situation of Seismic Safe Rural Project and Countermeasures of Earthquake Resistance Protection for Village Buildings in Gansu Province[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(4):345-352.

- [5] 何萍,王挺,傅冠华.广州市农居建筑物现状及抗震能力分析[J].华南地震,2010,30(3):63-68.

HE Ping, WANG Ting, FUGuanhua. The Present Situation of Rural Buildings and Its Earthquake Resistance Capability in Guangzhou[J]. South China Journal of Seismology, 2010, 30(3):63-68.

- [6] 孙军杰,徐舜华,王兰民,等.基于有限元法的土坯民房地震响应分析研究[J].防灾减灾工程学报,2010,30(1):64-70.

SUN Junjie, XU Shunhua, WANG Lanmin, et al. Seismic Response Analysis of Rural Adobe-Structure Buildings Using the Finite Element Method[J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Eng, 2010, 30(1):64-70.

- [7] 马宏旺,王兰民,陈龙珠,等.农村住宅砌体结构地震破坏数值模拟研究[J].地震工程学报,2013,35(2):232-239.

MA Hongwang, WANG Lanmin, CHEN Longzhu, et al. Numerical Simulation of Earthquake Damage in Rural Masonry Buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2):232-239.

- [8] 中国地震局官网,地震频道,历史地震目录[EB/OL].http://www.cea.gov.cn/

- [9] 王兰民,袁中夏.西北农居抗震设防技术指南[M].北京:地震出版社,2011.

- [10] 吴韬,王浩,易苗苗,等.村镇建筑砌体结构的动力特性分析[J].地震工程学报,2016,38(6):877-882.

WU Tao, WANG Hao, YI Miaomiao, et al. Dynamic Characteristics of Masonry Structures in Villages and Towns[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(6):877-882.

- [11] 华建兵,吴韬,蒋敏,等.大震下村镇建筑砌体结构的抗震性能数值分析[J].地震工程学报,2017,39(1):52-57.

HUA Jianbing, WU Tao, JIANG Min, et al. Numerical Analysis of Seismic Behaviors of Masonry Structures in Village Buildings during Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1):52-57.