

杨娜, 王龙, 刘爱文, 杨理臣, 2018. 青海东南部农村民居结构特点及抗震能力分析. 震灾防御技术, 13 (1): 206—214.  
doi: 10.11899/zzyf20180119

# 青海东南部农村民居结构特点 及抗震能力分析<sup>1</sup>

杨娜<sup>1)</sup> 王龙<sup>1)</sup> 刘爱文<sup>1)</sup> 杨理臣<sup>2)</sup>

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 青海省地震局, 西宁 810001

**摘要** 我国农村民居的抗震能力具有显著的地域特点。本文基于现场调研结果总结了青海东南部黄河流域农村民居的结构特点, 并对其抗震能力进行了评估。庄廓院是调研区内的典型农村民居, 本文对调研区内庄廓院的木构架房屋进行研究, 提出庄廓土墙围护木构架房屋的震害等级分类标准, 根据实际震害资料和类比的方法确定了当地土墙围护木构架结构的震害矩阵和震害指数与峰值加速度的关系曲线。与云南鲁甸农村的土木结构房屋比较, 青海庄廓院民居具有更高的抗震能力; 与未设防的砖混结构比较, 这种土墙围护的木构架结构在高烈度区造成人员伤亡的风险更低。

**关键词:** 青海东南部民居 木构架结构 破坏等级 抗震性能 震害指数

## 引言

我国是世界上地震灾害严重的国家之一。近年来汶川地震、玉树地震、芦山地震、鲁甸地震等多次强震造成了巨大的人员伤亡和经济损失。根据我国大陆地区地震活动性的特点, 我国大多数地震发生在农村地区。因此农村民居的抗震性能是我国防震减灾的关键。农村地区民居所采用的结构类型与当地的经济状况、民俗及传统习惯密切相关, 往往因地制宜、就地取材, 具有明显的区域特点。传统的农村民居多为土、木、石、砖类结构, 如山西的土窑洞、藏族地区的石砌外墙碉房、江南地区的穿斗木结构等。随着经济的发展, 农村地区也大量出现现代钢筋混凝土框架结构和钢结构房屋。房屋结构形式不同, 其抗震能力也不尽相同。国内外大量学者通过对农村地区进行实地调查, 收集现场资料并开展深入的分析研究, 取得了很多有价值的成果(邱舒睿等, 2015; 杨钦杰等, 2016; 郭光玲, 2016)。

根据有关资料统计, 在全国范围内, 砖混结构是农村地区最为普及的住房结构类型, 同时还有大约 22%和 9%的农村家庭分别居住在传统结构和钢混结构的房屋中(李方一等,

**1 基金项目** 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB15C06, DQJB17C03)、国家自然科学基金面上基金项目(51778588)资助

[收稿日期] 2017-06-19

[作者简介] 杨娜, 女, 生于1990年。硕士研究生。主要研究方向为生命线工程抗震。E-mail: yangna0323@163.com

[通讯作者] 杨理臣, 男, 生于1982年。工程师。主要从事地震应急技术系统及震后灾情损失调查、评估等工作。

E-mail: ml8297108539@163.com

2012)。考虑到地震灾区最常见的房屋结构为砖混结构,我国现行的国家标准《中国地震烈度表》(中国地震局,2009),用于评定地震烈度的房屋类型主要以 B 类(未经抗震设防的单层或多层砖砌体房屋)和 C 类(按照Ⅶ度抗震设防的单层或多层砖砌体房屋)为主。由于资料的限制,编制 2008 年版规范时没有充分考虑我国农村民居的地域特点和抗震能力差异。例如,将木构架和土、石、砖墙建造的旧式房屋均归为 A 类(老规范的简易房屋,抗震能力较差)。2014 年发生在云南省的两次地震震害证实了农村民居抗震能力的地域差异特点。两次地震震级相当,但是人员伤亡和经济损失却相差很大:8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震造成 617 人死亡,112 人失踪;10 月 7 日景谷 6.6 级地震造成 1 人死亡,325 人受伤(侯建盛等,2015)。鲁甸地区的农村民居为土木结构,土墙承重,抗震能力差,墙倒屋即塌,容易造成人员伤亡;景谷地区的农村民居结构形式为木构架结构,其中木构架承重,土墙或者砖墙只是起围护作用,在地震中墙倒而屋不塌。这些年来,我国农村民居抗震能力的区域特征越来越受到学者的关注。孙柏涛等(2014)针对南北地震带房屋建筑种类繁多、易损性差异大等特点,提出采用分级分区的思路研究南北地震带各类房屋建筑抗震能力,并以四川省为例给出了地震易损性矩阵(目前正在修编的《中国地震烈度表》也将考虑这一点)。其实,即使是同为木构架结构,在我国各地农村民居也存在显著的差异。

青海东南部主要包括黄南藏族自治州、海南藏族自治州和果洛藏族自治州等 3 个自治州。本文作者于 2017 年 1 月对青海海南藏族自治州的贵德县、黄南藏族自治州的尖扎县和同仁县的农村民居进行了为期一周的实地调研。这些地区以下简称为调研区。本文以青海农村传统的庄廓院民居为研究对象,在实地房屋建筑调查的基础上,分析了当地木构架房屋的抗震性能,并与土木结构以及未设防砖混结构的抗震能力进行了比较,以期对相关标准的修订和当地抗震设防工作及震后应急处置和救援准备工作提供参考依据。

## 1 调研区地震地质及地理地貌特点

调研区位于南北地震带与昆仑山-秦岭断裂带等活动构造交汇的部分,也是北西西向的东昆仑断裂与西秦岭北缘断裂之间的构造转换区。调研区所属的地震活动构造在历史上和近些年来发生了多次破坏性地震,具体见表 1。调研区的地形地貌类型主要为高山盆地地貌和黄河及其支流下切形成的河谷盆地地貌。高原持续的隆升形成的高大山脉之间往往会形成狭长的山间盆地,盆地狭长而窄小,多呈“U”型、“V”型谷地,盆地受区域性断裂强烈活动的控制,造成盆地边缘山体高耸、陡峭且破碎,是崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的易发区。在黄河流域,由于河流的侵蚀深切改造,形成多级河流阶地,阶地陡坎比较高,这些高阶地陡坎也是崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的易发区。河漫滩甚至低阶地上、地下往往含有稳定厚度的粉细砂层和淤泥质粘土层,且地下水水位较浅,是地震砂土液化和软土震陷等地质灾害的易发区。

表 1 调研区及地区破坏性地震情况一览表

Table 1 List of destructive earthquakes in the research area and the whole region

地点	时间	震级	震中烈度
青海托索湖西	1937.01.07	7.5	X
青海阿兰克湖	1963.04.19	7.0	VIII+

续表

地点	时间	震级	震中烈度
青海共和	1990.04.26	6.9	IX
青海玛沁	1999.11.26	5.0	VI
青海玉树	2010.04.14	7.1	XI+
青海门源	2016.01.21	6.4	VIII
青海杂多	2016.10.17	6.2	VII

## 2 调研区农村传统民居的结构特点

青海省传统的农村民居为庄廓院形式，即高大土筑围墙、厚实大门的四合院（崔文河等，2015）。其主要建筑用材为黄土和木材，结构为木梁柱承重。调研区以藏族、回族为主，其民居建筑按人们的生活习俗和宗教需求布局建造。以青海尖扎县措周乡俄什加村为例，该村的地理坐标为  $35^{\circ}57'04''N$ ， $101^{\circ}54'40''E$ ，海拔 2471 米。村民以藏族为主，人口 950 人，人均年收入 3000 元左右。俄什加村共有 201 户，房屋布局大部分为庄廓院形式，24% 的房屋为政府危旧房改造建筑。如图 1 所示，庄廓院的平面布局大多为四合院，其中正房（北房）为核心部分，也是庄廓内的主体建筑，坐北朝南，布置在宅院中轴线上，并通过装修等手段使其更加明确、突出，藏族群众一般在北房内设佛室，供奉佛像等。厢房主要用作杂物间。庄廓院功能分区明确，水平交通通道、垂直交通通道布置合理，利于防火和疏散。庄廓院建筑具有就地取材，构造作法简洁、经济，便于村民参与建筑，与当地高海拔寒冷气候相适应，冬季节约能源等优点（梁琦，2005）。

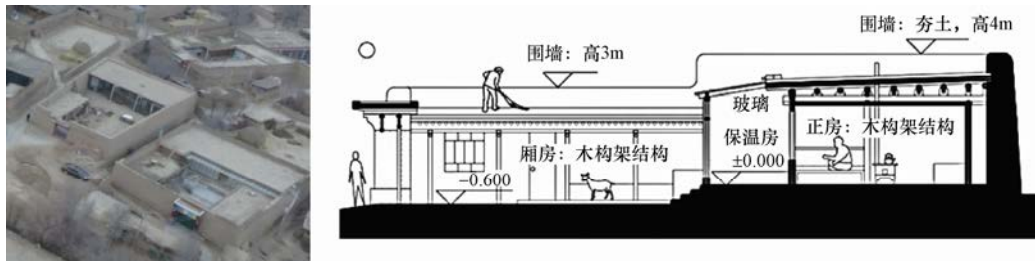


图 1 青海尖扎县俄什加村的典型庄廓院（左为照片，右为布局示意图）

Fig. 1 The typical Zhuangkuo folk house in the Oshi village, Jianzha county, Qinghai Province

庄廓院的夯土围墙一般高 3—5m，厚 50—80cm，其主要建筑用材为当地的黄土。黄土具有很好的可塑性，易成型，便于农民自己动手施工。用黄土夯筑或用土坯砌成的墙具有较好的热稳定性（其导热系数小、热容量大）和良好的防潮隔音性，是理想的天然保温材料；其次黄土无污染，可就地取材，既减少运费又节约能源；材料无需焙烧，节约燃料。因此，它也是一种节能的材料，同时还可重复使用，解决了建筑垃圾的再生性问题。

庄廓院的正房和厢房一般为木构架结构，木柱木梁卯榫结构支撑屋顶重量。围护墙前墙为砖墙，侧墙和后墙为土墙（如图 2），主要起遮风挡雨和保温的作用。由于在建造庄廓时先打起庄廓院的夯土围墙，再砌各房屋木构架的围护墙，即房屋的后墙与相邻的庄廓墙各自独立，从而形成“二张皮”。藏族和当地群众常将这“二张皮”相隔一定距离设置，从而在二者之间形成一个空气层，它对房屋的保温、防寒起到了很好的作用。庄廓院的这种梁柱木构架承重、土墙围护的结构形式具有较好的抗震性，能够做到“墙倒，屋不塌”。



图 2 砖墙和土墙围护的木构架结构（左图为前景，右图为内景）

Fig. 2 The wooden frame structures with brick and earth wall

### 3 调研区房屋结构的分类

从抗震的角度，农村房屋的结构类型应按照其承重的主体分类。此次调研区的农村民居房屋以木构架结构和砖混结构这两类结构形式为主，而钢筋混凝土框架结构、内框架结构、框架-筒体结构、钢结构等结构类型房屋主要存在于城镇地区。

#### 3.1 砖混结构

砖混结构是指由砖墙承重、屋（楼）盖现浇或装配式钢筋混凝土构件的房屋，这类结构是目前我国各地最为普遍的一类房屋。砖混结构房屋的主要震害特点是墙体出现斜裂缝或 X 裂缝，屋檐处、外墙上角部位开裂，纵墙外闪塌落等。砖混结构房屋的抗震能力与墙体的厚度、砂浆的强度、是否有抗震构造措施等有关。地震现场调查表明，采取一定抗震措施（圈梁、构造柱）的砖混结构房屋具有较强的抗震能力。

调研区内砖混结构所占比例约为 45%，其中在城乡结合部发现较多未设防的砖混结构房屋。如图 3 所示，这些房屋以 2—3 层居多，房屋一般由房主自己施工建设，无圈梁或构造柱。经过抗震设防的砖混结构房屋以贵德县河阴镇童家村（ $36^{\circ}01'16''N$ ， $101^{\circ}25'28''E$ ，海拔 2216 米）的房屋为代表（见图 4），该村为新农村建设示范点，房屋由政府组织专业建筑施工单位统一施工建造，一般都设有圈梁、构造柱，抗震性能较好。



图 3 调研区未经抗震设防砖混房屋的典型照片

Fig. 3 The typical unfortified brick-concrete structures in research area



图 4 调研区经抗震设防砖混房屋的典型照片

Fig. 4 The typical fortified brick-concrete structures in research area

### 3.2 木构架结构

木构架结构在我国不同的农村地区形式不同,具有明显的地域特点。如图 5 所示,我国农村地区的木构架结构大致分为 4 类:穿斗木构架、木柱木屋架、平顶木构架、老式坡顶木构架(葛学礼等,2010)。

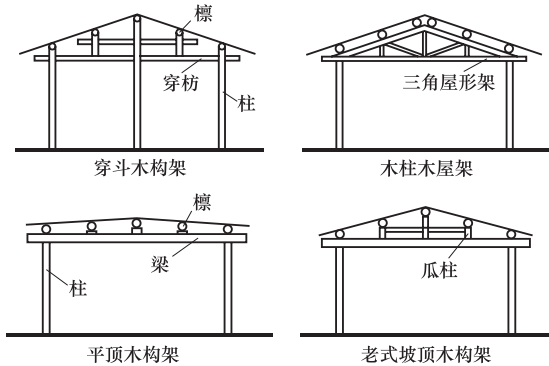


图 5 我国农村地区木构架结构的分类

Fig. 5 Classification of the wooden frame structures in rural areas of China

调研区庄廓院的正房和厢房属于平顶木构架结构,屋盖为平顶形式,方便晾晒。木构架结构主要有以下优点:木材强度高而质量轻,即高“强度/质量”比,一方面可以抵抗较大的地震力,另一方面可以减小地基传到上部结构的地震力,具有良好的韧性;木材的柔韧性明显优于其它混凝土、砖石等材料,能够耗散更多的地震能量;木构架结构具有多重传力体系,合理的木构架可以形成多重抗震体系,增强结构承受地震破坏和消散地震能量的能力;木结构传统的卯榫连接方式,近似于铰接,允许构件产生转动,进而耗散地震能量。此类房屋遭受地震后,大

多是围墙裂缝、倾斜或倒塌,屋顶受木构架支撑并没有倒塌。

## 4 土墙围护木构架结构的震害矩阵

调研区内农村民居的砖混结构与其他地区的类似,其震害矩阵可以参考已有的研究成果。为了评估调研区内的庄廓土墙围护木构架结构的抗震能力,本文收集整理青海省近年来破坏性地震的房屋震害资料,包括门源地震、玉树地震、杂多地震等。根据震害资料,将土墙围护木构架结构的震害等级划分为:基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏 5 个破坏等级。考虑到庄廓的特殊性,各个震害等级的划分标准如表 2 所示。

表 2 庄廓土墙围护木构架结构震害等级分类

Table 2 Earthquake damage classification of the wooden frame structures with earth walls

震害等级	震害描述
基本完好	木构架结构完好,或庄廓院墙轻微开裂,不加修理可继续使用。
轻微破坏	木构架结构出现轻微移位,庄廓院墙有明显裂缝,土墙体局部有少量崩塌,不需要修理或稍加修理即可继续使用。
中等破坏	木构架出现可见移位,庄廓院墙酥裂,裂缝严重,屋顶局部出现滑塌等,需要一般修理后可使用。
严重破坏	木构架移位较严重,木构架出现歪斜、部分断裂,庄廓院夯土院墙局部倒塌,房屋的围护土墙体酥裂、修复困难。
毁坏	木构架严重倾斜折断,房屋濒于崩溃或已倒毁,庄廓院夯土围墙倒塌、已无修复可能。

调研区庄廓院的院墙多为夯土墙或者砖墙,且墙体较高,往往达到 4 米以上,如图 1 所示。从地震现场调查的结果及相关的抗震实验和研究结果来看,土体作为一种离散材料,抗拉和抗弯强度均较低。大部分房屋的夯土墙体无抗震拉结措施,墙体的整体性很差。因此夯

土墙在地震中易发生开裂破坏,甚至局部倒塌。肖梅玲等(2012)对2007年6月3日宁夏6.4级地震造成的典型农村民居震害现象进行了有限元模拟,发现随着土墙高度的增加,地震破坏程度加大。在地震的较高烈度区(VIII度),墙高为3m时,地震会引起墙体中等破坏;大于3m小于5m,地震会使墙体发生严重破坏;墙高大于5m后,地震会造成墙体倒塌。在地震的较低烈度区(VI度),墙高大于3m小于4.5m时,地震可造成墙体中等破坏;当墙高为5m时,地震会造成墙体严重破坏。青海省传统的庄廓院夯土院墙的抗震能力大致如下:VI度时就可造成相当数量的破坏, VII度时有一定数量的严重破坏和倒塌, VIII度时则多数破坏达到不可修复的程度, IX度时则基本全部倒塌。依据震害等级划分标准,利用历史地震震害资料,并参考邱舒睿等(2015)“青海省农居地震灾害易损性研究”中木结构的震害矩阵,结合实地调研,采用类比的方法提出庄廓土墙围护木构架结构的震害矩阵。房屋的抗震性能不仅与房屋结构类型有关,而且与房屋所处的场地条件、地形地貌(如孤突山体、阶地、山腰、坡脚等)、施工质量、建造时间等条件有关。其中,房屋结构类型起主要作用,但房屋建筑所处场地环境中的地质、地形地貌等因素会对地震震害起到放大作用(王强等,2008),不容忽视。由于考虑到青海省东南部农村的房屋坐落于黄河谷地、山腰、山脚、平台或软弱土层等之上的特殊情况,因此结合当地实际情况及调研组相关专家意见,通过考虑各影响因素在震害中所起作用的大小,对原有矩阵做了一定的调整。本文建议庄廓土墙围护木构架结构的震害矩阵如表3所示。

表3 庄廓土墙围护木构架结构震害矩阵(%)

Table 3 Earthquake damage matrix of the wooden frame structures with earth walls

破坏等级	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
基本完好	60	41	10	0	0
轻微破坏	32	30	22	8	0
中等破坏	8	22	42	38	20
严重破坏	0	7	20	42	50
毁坏	0	0	6	12	30
震害指数	0.096	0.197	0.412	0.582	0.73

震害指数是房屋震害程度的定量表示,震害指数范围为0—1,“0”代表基本完好,“1”代表毁坏,中间依次为轻微破坏、中等破坏、严重破坏3种破坏状态。各破坏等级对应的震害指数依次为:0.0;0.2;0.4;0.7;1.0。不同烈度下房屋震害指数 $D$ 可按下式计算:

$$D = \sum_{i=1}^5 d_i \lambda_i \quad (1)$$

式中, $d_i$ 为破坏等级为 $i$ 的震害指数, $d_i = (0, 0.2, 0.4, 0.7, 1)$ ;  $\lambda_i$ 为破坏等级为 $i$ 的房屋破坏比。

通过对比相同烈度地区,比较各类结构房屋震害指数的大小,可以判断各类结构房屋抗震能力的高低。将庄廓土墙围护木构架结构的震害矩阵与未设防砖混结构的标准震害矩阵(参见表4)以及云南地区的土木结构震害矩阵(参见表5)进行比较(孙柏涛等,2014)。考虑

到地震动强度与烈度之间是指数级关系,参考中国地震动参数区划图(中国地震局,2015)给出的各个烈度所对应的峰值加速度(参见表6),可以得到上述3种结构的震害指数与地震动峰值加速度的关系曲线(趋势线)。

表4 未设防砖混结构的标准震害矩阵(%)

Table 4 Standard earthquake damage matrix of unfortified brick-concrete structures

破坏等级	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
基本完好	77	51	13	4	0
轻微破坏	22	29	25	9	0
中等破坏	1	16	36	20	9
严重破坏	0	4	20	52	40
毁坏	0	0	6	15	51
震害指数	0.048	0.15	0.394	0.612	0.826

表5 云南地区土木结构的震害矩阵(%) (1992—2008年模型)

Table 5 Earthquake damage matrix of civil structures in Yunnan province (the model in 1992—2008)

破坏等级	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
基本完好	68.96	38.59	6.91	0	
中等破坏	29.8	53.61	65.41	40.9	
毁坏	1.24	7.8	27.68	59.1	
震害指数	0.132	0.292	0.538	0.755	

表6 地震动峰值加速度与地震烈度对照表

Table 6 Comparison of earthquake peak acceleration and earthquake intensity

地震烈度	VI	VII	VIII	IX	X
地震动峰值加速度/g	$0.04 \leq a_{\max} \leq 0.09$	$0.09 \leq a_{\max} \leq 0.19$	$0.19 \leq a_{\max} \leq 0.38$	$0.38 \leq a_{\max} \leq 0.75$	$a_{\max} \geq 0.75$
平均加速度/g	0.063	0.125	0.25	0.5	1

由图6可见,庄廓土墙围护木构架结构房屋的抗震能力高于土木结构房屋。与未设防的砖混结构比较,在烈度VI度(0.063g)和VII度(0.125g)时,其震害指数相对较高,主要是因为夯土院墙和围护土墙的破坏,但是在烈度IX度(0.5g)和X度(1.0g)时,其震害指数低于未设防的砖混结构,体现了其墙倒屋不塌的特点。

## 5 讨论

通过实地调研可了解到,青海传统的农村民居为了与当地高海拔寒冷气候相适应,庄廓院的黄土院墙就地取材,具有节约能源、环保等优点,但是由于黄土本身的特点加之墙体较高,在地震中庄廓院的院墙极易遭受破坏。但是,庄廓院的主体建筑正房和厢房为木构架结

构、土墙或者砖墙围护, 可以做到墙倒屋不塌。与云南鲁甸农村的土木结构房屋比较, 青海庄廓院民居具有更高的抗震能力。与未设防的砖混结构比较, 这种土墙围护的木构架结构在高烈度区造成人员伤亡的风险更低。同时, 在调研过程中发现, 城乡结合部是抗震的薄弱环节之一。另外, 位于黄河流域特有的河流阶地的农村民居面临地震以及地质灾害的风险。

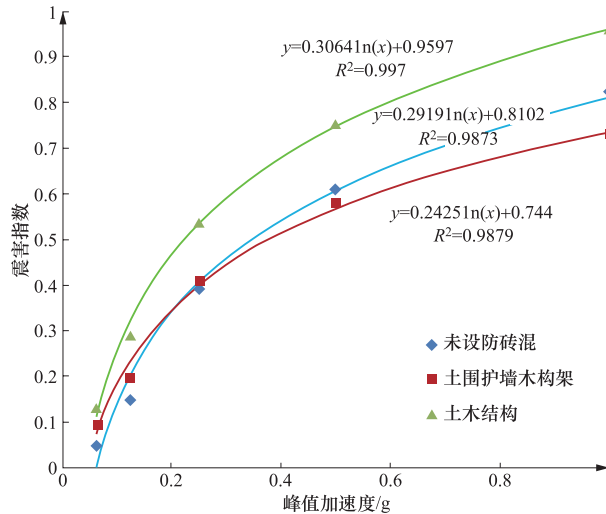


图 6 3 种结构的震害指数曲线比较图

Fig. 6 Comparison of seismic damage index curves of three structure types

**致谢:** 本文在甘青川危险区实地调研资料的基础上形成, 得到了中国地震局地震危险区灾害损失预评估项目的资助。

## 参考文献

- 崔文河, 王军, 2015. 青海藏族庄廓民居及聚落研究——以巴麻堂村为例. 华中建筑, (1): 74—80.
- 葛学礼, 朱立新, 于文等, 2010. 村镇木构架土坯围护墙房屋 1/2 缩尺模型振动台试验研究. 土木建筑与环境工程, **32** (增刊 2): 508—510, 515.
- 郭光玲, 2016. 汉中农村既有砌体房屋抗震加固技术研究. 震灾防御技术, **11** (1): 111—116.
- 侯建盛, 李洋, 宋立军等, 2015. 2014 年云南景谷 6.6 级地震与云南鲁甸 6.5 级地震致灾因素分析. 灾害学, **30** (2): 100—101, 143.
- 李方一, 高晓路, 王英杰, 2012. 中国农村地区住房结构的区域差异及其影响因素. 地理科学进展, **30** (12): 1555—1563.
- 梁琦, 2005. 青海少数民族民居与环境. 西宁: 青海人民出版社.
- 邱舒睿, 高惠瑛, 2015. 青海省农居地震灾害易损性研究. 震灾防御技术, **10** (4): 969—978.
- 孙柏涛, 陈洪富, 闫培雷等, 2014. 南北地震带房屋建筑抗震能力分区特征研究——以四川省为例. 土木工程学报, **47** (S1): 6—10.
- 王强, 王兰民, 袁中夏等, 2008. 陇南地区农村民房遭受汶川 8.0 级地震震害分析及启示. 世界地震工程, **24** (3): 20—24.
- 肖梅玲, 叶燎原, 刘本玉等, 2012. 云南农村土木结构房屋有限元抗震分析. 地震研究, **35** (2): 276—281.



- 杨钦杰, 刘华贵, 高鹏飞等, 2016. 广西农村民居抗震性能调查研究. 震灾防御技术, **11** (1): 100—110.
- 中国地震局, 2009. GB/T 17742-2008 中国地震烈度表. 北京: 中国标准出版社.
- 中国地震局, 2015. GB 18306-2015 中国地震动参数区划图. 北京: 中国标准出版社.

## Structural Characteristics and Seismic Capacity Analysis of Rural Buildings in the Southeast of Qinghai Province

Yang Na<sup>1)</sup>, Wang Long<sup>1)</sup>, Liu Aiwen<sup>1)</sup> and Yang Lichen<sup>2)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China

**Abstract** The anti-seismic capacity of rural buildings in China is of significant regional characteristics. Based on the investigation, this paper summarizes the structural characteristics and evaluates the seismic capacity of rural buildings in the Yellow River Basin in southeastern of Qinghai. Zhuangkuo folk house is a typical rural building in the research area. Through the investigation on the wooden frame structures in the rural buildings, we put forward to earthquake damage classification of the wooden frame structures with earth walls in Zhuangkuo folk house. According to the actual damage information, earthquake damage matrix of the wooden frame structures with earth walls in Zhuangkuo folk house by analogy and the relationship are determined between the earthquake damage index and the peak acceleration. Compared with the civil structure houses in the rural buildings of Ludian in Yunnan province, rural buildings have relative high anti-seismic capacity in Qinghai Province. The wooden frame structures with the earth wall are at a lower risk of casualties than the unfortified brick-concrete structures under the high-intensity condition.

**Key words:** Residential building in southeast of Qinghai; Wooden frame structure; Damage level; Seismic performance; Earthquake damage index