

钟江荣, 张令心, 沈俊凯. 基于震害资料的云南地区砌体结构易损性研究[J]. 华南地震, 2021, 41 (1): 108–116. [ZHONG Jiangrong, ZHANG Lingxin, SHEN Junkai. Study on Vulnerability of Masonry Structure in Yunnan Based on Seismic Damage Data[J]. South China journal of seismology, 2021, 41 (1): 108–116]

基于震害资料的云南地区砌体结构易损性研究

钟江荣^{1,2}, 张令心^{1,2}, 沈俊凯^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘要: 砌体结构房屋是存在于我国的一种量大面广的结构。针对一个地区砌体结构开展结构地震易损性分析, 有利于把握该地区砌体结构整体抗震性能, 对于该地区防震减灾工作的开展有着重要的指导意义。该研究收集整理了 2001 年到 2010 年 10 年间发生于云南地区地震的震后砌体结构震害资料, 并对震后统计得到的震害矩阵进行分析, 发现云南农村地区砌体结构的抗震性能与所在地区的抗震设防标准相关性小, 而城区砌体结构与所在地区抗震设防标准相关性较强; 由于所收集的资料中缺乏 IX、X 烈度区的震害资料, 从而给出了云南农村和城区不完备的砌体结构经验震害矩阵; 进一步采用贝塔概率密度分布函数来拟合震害指数的分布, 并根据标准震害矩阵和某一烈度下建筑物已知的震害分布得出其他烈度下的震害分布, 最后给出了云南农村和城区砌体结构震害矩阵和易损性曲线。该研究可为云南地区的防震减灾规划、地震灾害预测提供参考。

关键词: 砌体结构; 震害矩阵; 结构易损性; 云南地区; 农村和城区

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)01-00108-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.15

Study on Vulnerability of Masonry Structure in Yunnan Based on Seismic Damage Data

ZHONG Jiangrong^{1, 2}, ZHANG Lingxin^{1, 2}, SHEN Junkai^{1, 2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, IEM, CEA, Harbin 150080, China)

Abstract: The masonry is a kind of structure which exists in a large quantity and a wide area in our country. The seismic vulnerability analysis of masonry for a region is helpful to grasp the overall seismic performance of masonry structures and has important guiding significance for the earthquake prevention and disaster reduction work in the region. This paper collects and sorts out the post-earthquake damage data of masonry structures in Yunnan from 2001 to 2010, and analyzes the seismic damage matrix obtained after the earthquake. It is found that there is little correlation between the seismic performance of masonry structures in rural area and the seismic

收稿日期: 2020-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504602); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2017QJGJ08)联合资助

作者简介: 钟江荣(1974-)男, 博士, 副研究员, 主要从事地震灾害预测、风险评估和灾害综合防治对策研究。

E-mail: zjrll@163.com

fortification standards in Yunnan Province, and there is strong correlation between the masonry structure in urban area and the seismic fortification standards in the area. Due to the lack of seismic damage data in the IX and X intensity areas, an incomplete empirical damage matrix of masonry structures in rural and urban areas in Yunnan is given. The tower probability density distribution function is further used to fit the distribution of the seismic damage index, and the seismic damage distribution under other intensities is obtained according to the standard seismic damage matrix and the known damage distribution of buildings under a certain intensity. Finally, the seismic damage matrix and vulnerability curve of masonry structures in rural and urban areas in Yunnan are given. This research can provide reference for earthquake prevention and disaster reduction planning and earthquake disaster prediction in Yunnan Province

Keywords: Masonry structure; Seismic damage matrix; Structural vulnerability; Yunnan region; Rural and urban areas

0 引言

我国素有“秦砖汉瓦”之说,砌体结构在我国历史悠久。砖砌体结构由于造价低、施工简单等特点,目前现有的建筑结构类型中,其仍是主要的结构类型之一,特别是小城镇、农村地区,砌体结构房屋的数量更多,其中,民宅、办公楼、学校等建筑中砌体结构占了大部分。

砌体结构的抗震性能由砌体结构的特点决定。不同地区砌体结构的建筑风格不同,特别是,由于地域的区别,各地气温差别很大,砖砌体结构外墙厚度差别很大,尹之潜将我国砌体结构按地域分为三类:Ⅰ类地区为较寒冷的地区,如黑龙江、新疆等地,砖砌体结构的外墙一般为490 mm厚;Ⅱ类地区,如华北一带,砖砌体结构的外墙一般为370 mm厚;Ⅲ类地区,如华南一带,砖砌体结构的外墙一般为240 mm厚^[1]。由于砖墙厚度的不同和地区建筑材料和建筑风格的差异,决定了砖砌体房屋在抗震性能上有着很强的地域特性。

结构易损性指在不同的强度地震作用下,结构发生各种破坏状态的条件概率。它能从概率意义上定量刻画结构的抗震性能。进行结构易损性分析,对减轻地震灾害十分重要,一方面,通过对损失分析,可以找出造成灾害的薄弱环节,从而制定有针对性的预防措施,提高减灾工作的科学性和合理性。另一方面,能够快速准确地评估出地震灾害,为政府部门应急救援和辅助决策提供强有力的帮助。

现有砌体结构易损性分析方法常用大致可概括为以下几种:历史震害统计法、专家评估法、半经验半理论方法、人工神经网络法、试验法、理论计算等方法。历史震害统计法主要是依据实

际的震害调查结果,通过整理、统计分析得到结构在不同强度地震作用下发生各类破坏等级的比例。孙柏涛,张桂欣^[2]收集了汶川大地震中2782栋砌体房屋的震害资料,统计得到了其地震易损性矩阵。该方法的优点是数据直接来源于震害调查结果,能反映结构的实际情况。缺点是统计样本的选取是否符合实际情况,其中人为因素将直接影响最终的易损性结果。专家评估法是根据地震专家的知识 and 经验对结构进行震害估计的一种方法,杨玉成^[3]等开发出了多层砌体房屋易损性评价和震害预测专家系统PDSMSMB-1。专家评估法简单易行,但对实施人员的要求较高。评估人员需要有一定的专业知识储备和丰富的震害考察经验。由于这种方法非常依赖于地震专家的知识水平和震害经验,所以专家评估法也存在人为因素的影响。半经验半理论的易损性分析方法是一种将震害经验与理论计算相结合的方法。在震害资料缺乏时可以利用理论方法进行补充计算,也可以通过已有的震害资料进行统计分析建立易损性分析模型,预测未知样本的震害。半经验半理论的方法,一方面可以在震害资料缺乏时进行补充计算,另一方面可以通过分析已有的震害资料建立理论分析模型,进行易损性分析,使计算分析更有依据。人工神经网络法是指利用已知样本,在输入参数和输出结果之间建立起一种映射关系,利用这种关系对未知样本进行易损性预测,因此,已知样本的数量和质量对模型的准确性有很大影响。试验法与历史震害统计法类似,可以通过收集大量的试验资料进行易损性分析。试验研究方法的优点是可以基于研究目的合理地设计试验模型。通过试验,可以观察结构的破坏过程,找到结构的薄弱环节,并正确评价结构的实际抗震能

力。但是该方法容易受到试验样本的数量、试件或模型的大小、实验室及试验设备条件等因素的影响。近年来随着各种结构分析软件的推广,基于理论计算分析的易损性分析方法应用越来越广泛,特别是震害资料缺乏的情况下,理论计算方法无疑是一种较好的分析手段。

对于一个地区,一种粗分结构类型的砌体结构,进行易损性分析,由于只给出结构类型,而没有具体的结构层数、年代,结构等等具体数据,实验分析和理论模型很难建立具体的分析模型,另外,由于砌体结构在我国量大面广,震害资料比较丰富,因此,选择基于震害资料的历史震害统计方法,是进行区域砌体结构易损性一种行之有效的办法。云南地区是我国一个地震多发地区,震害资料丰富,所以本文选择云南地区的砌体结构进行相关研究。

1 云南地区砌体结构震害数据收集

云南地区砌体结构的震害数据主要来自于以《2001—2005 年中国大陆地震灾害损失评估汇编》和《2006—2010 年中国大陆地震灾害损失评估汇编》^[4-5]。选择 2001 到 2010 年这十年间的震害资料是考虑到两个方面的因素:2010 年以后的中国大陆地震灾害损失汇编目前还没有出版;2001 年到 2010 年是目前能收集到距离现在最近的资料,因而最能反映目前该地区建筑物地震易损性特征。

通过摘录上述 2 本文献中发生于云南地区的 24 次地震的震害资料,把各次地震各烈度砌体结构按破坏状态(基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏)的统计比例列于表 1。表 1 中,城区数据特别标示出来,其余数据均为农村地区砌体结构震害数据。

表 1 云南地区 2001—2010 年砌体结构震害资料统计
Table 1 Statistics of seismic damage data of masonry structures in Yunnan area from 2001 to 2010

地震事件	烈度	破坏状态				
		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
2001-03-12 澜沧 $M_s5.0$ 级	VI	0.6203	0.3797	0	0	0
2001-04-10 施甸 $M_s5.9$ 级	VI	0.7033	0.2709	0.0226	0.0032	0
	VII	0.3463	0.322	0.2636	0.0497	0.0184
2001-05-24 宁蒗—盐源 $M_s5.8$ 级	VI	0.7033	0.2832	0	0	0
2001-06-8 施甸 $M_s5.3$ 级	VI	0.7478	0.221 2	0.031	0	0
2001-07-10 楚雄 $M_s5.3$ 级	VI	0.8392	0.160 8	0	0	0
2001-07-15 江川 $M_s5.1$ 级	VI	0.9157	0.084 3	0	0	0
2001-10-27 永胜 $M_s6.0$ 级	VI	0.8047	0.195 3	0	0	0
	VII	0.6927	0.215 8	0.0915	0	0
2003-07-21 大姚 $M_s6.2$ 级	VI	0.8122	0.152 6	0.0351	0	0
	VII	0.5738	0.2672	0.1472	0.0115	0
	VIII	0.1092	0.291	0.4643	0.1282	0.007
2003-10-16.大姚 $M_s6.1$ 级	VI	0.7316	0.2073	0.0419	0.0188	0
	VII	0.5347	0.3003	0.0896	0.0753	0
	VIII	0.1956	0.5565	0.1597	0.0743	0.0139
2003-11-01 鲁甸 $M_s5.1$ 级	VI	0.6728	0.272	0.0485	0.0067	0
	VII	0.3769	0.3783	0.0691	0.1735	0.0022
2003-11-26 鲁甸 $M_s5.0$ 级	VI	0.7087	0.2266	0.0515	0.013	0
	VII	0.244 4	0.365	0.2804	0.1102	0
2004-08-10 鲁甸 $M_s5.6$ 级	VI	0.7087	0.2266	0.0515	0.013	0
	VII	0.2444	0.365	0.2804	0.1102	0

(转下表)

(接表 1)

地震事件	烈度	破坏状态				
		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
2004-10-19 保山隆阳 $M_s5.0$ 级	Ⅵ	0.7533	0.2467	0	0	0
	Ⅵ(城镇)	0.876	0.1136	0.0074	0.003	0
2004-12-26 双柏 $M_s5.0$ 级	Ⅵ	0.8385	0.1601	0.0014	0	0
2005-01-26 思茅 $M_s5.0$ 级	Ⅵ	0.7623	0.1928	0.0179	0.0269	0
2005-08-13 文山 $M_s5.3$ 级	Ⅵ	0.8719	0.1174	0.0081	0.0054	0
2006-01-12 墨江 $M_s5.0$ 级	Ⅵ	0.7361	0.2253	0.0386	0	0
2006-07-22 盐津 $M_s5.1$ 级	Ⅵ	0.7386	0.1843	0.0545	0.0225	0
2006-08-25~29 盐津 $M_s5.1$ 、 $M_s4.7$ 级	Ⅵ	0.7946	0.1783	0.0271	0	0
	Ⅶ	0.5185	0.3209	0.116	0.0446	0
2007-06-03 宁洱 $M_s6.4$ 级	Ⅵ	0.7435	0.2565	0	0	0
	Ⅶ	0.1736	0.6473	0.179	0	0
	Ⅷ	0.0826	0.2017	0.3671	0.331	0.0176
	Ⅵ(思茅镇城区)	0.9328	0.0672	0	0	0
	Ⅷ(宁洱镇城区)	0.2256	0.4232	0.2146	0.1184	0.0182
2008-03-21 盈江 $M_s5.0$ 级	Ⅵ	0.8516	0.1352	0.0132	0	0
2008-08-20、21 盈江 $M_s5.0$ 、 $M_s4.9$ 、 $M_s5.9$ 级	Ⅵ	0.7662	0.1571	0.049	0.02	0.0077
	Ⅶ	0.5216	0.2779	0.1367	0.0456	0.0182
	Ⅷ	0.2312	0.3705	0.1503	0.1323	0.1157
	Ⅵ(盈江县城)	0.7453	0.1941	0.0606	0	0
2008-12-26 瑞丽 $M_s4.9$ 级	Ⅵ	0.8172	0.1559	0.0269	0	0
	Ⅵ(瑞丽县城)	0.824	0.1744	0.0014	0.0002	0
2009-07-09 姚安 $M_s6.0$ 级	Ⅵ	0.7758	0.2111	0.0131	0	0
	Ⅶ	0.5205	0.3816	0.0979	0	0
	Ⅷ	0.2836	0.5549	0.1058	0.0557	0
	Ⅵ(大姚县城)	0.8113	0.1887	0	0	0
	Ⅶ(姚安县城)	0.5476	0.26	0.1846	0.0078	0
2010-02-25 元谋 $M_s5.1$ 级	Ⅵ	0.8105	0.1459	0.025	0.0186	0

2 砌体结构震害数据分析

从上表 1 中可以看出,城区砌体结构的抗震性能要明显好于农村地区的砌体结构,所以在以统计数据为基础进行砌体结构易损性分析时,应该按城区和农村地区分开来考虑。从表 1 中统计可知,云南地区从 2001 年到 2010 年,只有Ⅵ、Ⅶ和Ⅷ烈度区的砌体结构震害资料。其中,Ⅵ震害资料最为丰富,农村 25 条,城区 5 条;Ⅶ震害资料农村 10 条,城区 1 条;Ⅷ震害资料农村 4 条,城区 1 条。

由于Ⅵ度震害资料较多,选择Ⅵ度下的震害资料进行统计分析。对农村地区的 25 条震害按照震害发生地区的抗震设防标准分类。发震地区抗震Ⅵ度设防有 1 条数据,抗震Ⅶ度设防有 16 条数据,抗震Ⅷ度设防有 7 条数据,抗震Ⅸ度设防有 1 条数据。具体情况见表 2。

从理论上说,设防烈度越高的地区,其建筑的抗震性能越好,也就是说,在相同的地震作用下,建筑震害程度越轻。以往的震害经验也表明,在地震烈度为Ⅵ度时,砌体结构房屋,尤其是经过正规抗震设计的砌体的结构破坏状态多为基本

完好，有少量的轻微破坏，中等破坏以上的为极少数。将表 1 中的农村Ⅵ度区的 25 条数据，按照地区设防烈度统计震害为基本完好和轻微破坏情况绘制于图 1 和图 2。

从图 1 和图 2 中可以看出，抗震设防烈度为Ⅸ的 1 条数据，本应该基本完好的比例要高于其他所有数据，而轻微破坏比例要低于其他数据，事实上正好相反；Ⅷ度设防的基本完好的比例也没有明显高于Ⅶ度设防地区的。为了更好的研究这种相关性，将 25 条数据经统计分析求得均值和方差列于表 3。

表 2 震害资料所在地区抗震设防烈度

Table 2 Seismic fortification intensity in the area where seismic damage data are located

地区设防烈度	震害资料所在地区	次数
Ⅵ	文山	1
Ⅶ	楚雄、大姚、鲁甸、双柏、墨江、盐津、盈江、姚安、宾川、元谋	16
Ⅷ	施甸、江川、隆阳、思茅、宁洱、瑞丽	7
Ⅸ	澜沧	1

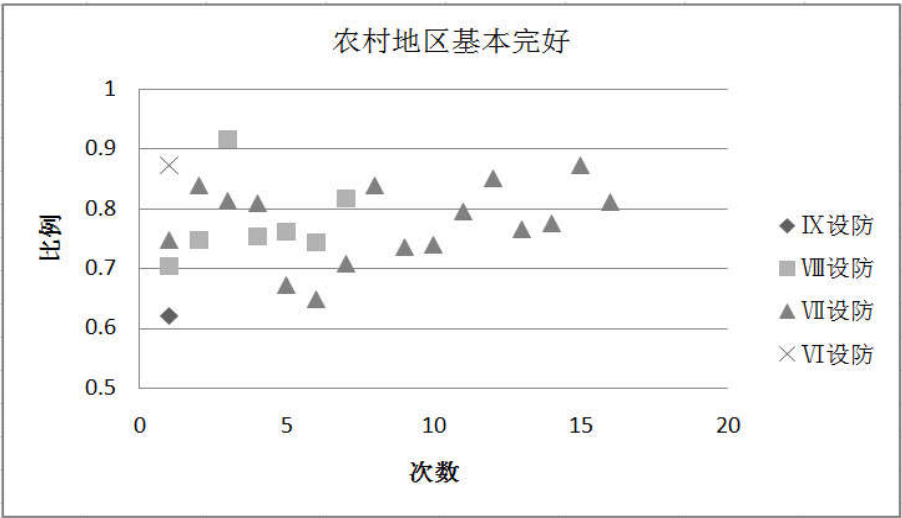


图 1 云南农村地区砌体结构Ⅵ度时基本完好比例

Fig.1 The intact proportion of masonry structure in rural areas of Yunnan at VI degree

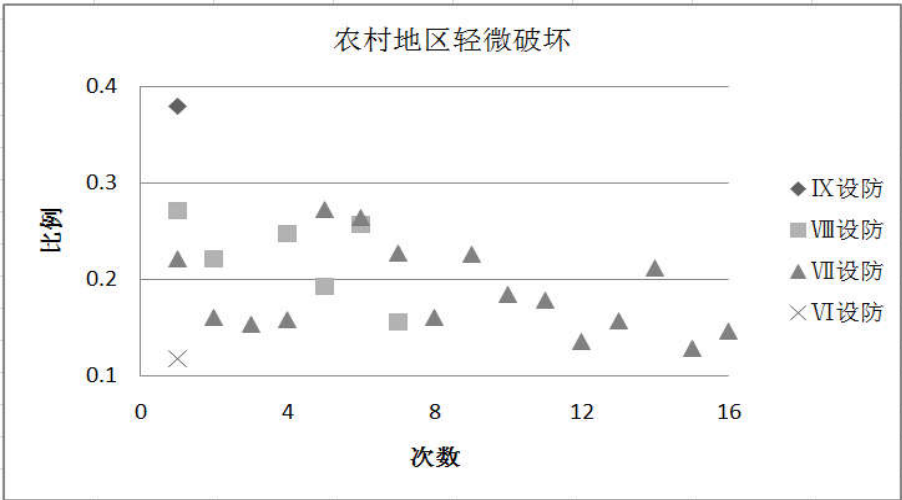


图 2 云南农村地区砌体结构Ⅵ度时轻微破坏比例

Fig.2 The minor damage proportion of masonry structure in rural areas of Yunnan Province at VI degree

从表 3 可以看出，Ⅶ度设防地区、Ⅷ度设防地区的数据和全部 25 条数据，基本完好比例分别为 0.7763，0.7776 和 0.7742，他们的方差分别为：

0.0042，0.6203 和 0.0052；轻微破坏比例分别为：0.1863，0.2040 和 0.1962，方差分别为：0.0020，0.0044 和 0.0041。由此表明：农村地区砌

体结构房屋在地震烈度为Ⅵ度时，基本完好和轻微破坏的比例比较稳定(方差很小)，且与所在地区的抗震设防烈度相关性很少。这可能也跟我国目前农村地区建筑的抗震现状相关，也就是说农村地区砌体结构基本上是未经抗震设防的建筑。城区砌体结构Ⅵ度时的震害资料数据共 5 条。具体见表 4。

表 3 震害资料均值和方差
Table 3 Mean and variance of seismic damage data

破坏等级	Ⅵ	Ⅶ		Ⅷ		Ⅷ	全部	
		均值	方差	均值	方差		均值	方差
基本完好	0.8719	0.7763	0.0042	0.7776	0.0048	0.6203	0.7742	0.0052
轻微破坏	0.1174	0.1863	0.0020	0.2040	0.0044	0.3797	0.1962	0.0041
中等破坏	0.0081	0.0310	0.0005	0.0141	0.0002	0	0.0241	0.0004
严重破坏	0.0054	0.0059	7.3E-05	0.0043	0.0001	0	0.0052	7.27E-05
毁坏	0	0.0005	3.7E-06	0	0	0	0.0003	2.37E-06

表 4 云南地区城区震害资料
Table 4 Seismic damage data in urban area of Yunnan Province

破坏等级	隆阳	宁洱	盈江	瑞丽	姚安
	Ⅷ	Ⅷ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅶ
基本完好	0.876	0.9328	0.7453	0.824	0.8113
轻微破坏	0.1136	0.0672	0.1941	0.1744	0.1887
中等破坏	0.0074	0	0.0606	0.0014	0
严重破坏	0.003	0	0	0.0002	0
毁坏	0	0	0	0	0

虽然数据比较少，但也能看出，地区所在的抗震设防烈度对城区砌体房屋的抗震性能影响明显。设防烈度越高的地区，抗震性能要好于设防烈度低的地区。这也从一个侧面反映出城区的砌体结构按照设防要求建设的建筑比例比农村地区高很多。

3 基于震害统计的砌体结构震害矩阵

前文中给出的 20 多次云南地区地震后砌体房屋震害统计资料中，由于农村地区砌体结构抗震性能与所在地区的抗震设防烈度相关性少，所以，对农村各次地震各烈度下破坏比例数字取均值，得到Ⅵ、Ⅶ和Ⅷ烈度下云南农村地区经验震害矩阵，如表 5 所示。由于城区震害资料较少，这里也对城区各次地震各烈度下破坏比例数字取均值，给出云南城区砌体结构震害矩阵，如表 6 所示。

表 5 云南农村砌体结构统计震害矩阵
Table 5 Statistical seismic damage matrix of masonry structure in rural area of Yunnan Province

破坏等级	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ
基本完好	0.774	0.449	0.178
轻微破坏	0.196	0.339	0.364
中等破坏	0.024	0.159	0.263
严重破坏	0.006	0.048	0.161
毁坏	0	0.005	0.034

表 6 云南城区砌体结构统计震害矩阵
Table 6 Statistical seismic damage matrix of masonry structure in urban area of Yunnan Province

破坏等级	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ
基本完好	0.838	0.548	0.226
轻微破坏	0.148	0.260	0.423
中等破坏	0.014	0.184	0.215
严重破坏	0	0.008	0.118
毁坏	0	0	0.018

4 砌体结构统计震害矩阵完善

由于 2001 年到 2010 年期间, 云南地区没有发生较大震级的地震, 表 5 和表 6 中给出经验震害矩阵只有Ⅵ、Ⅶ和Ⅷ下的破坏比例, 所以, 需要对该震害矩阵进行完善。根据胡少卿^[9]给出对经验震害矩阵不全时, 将地震中某些烈度下建筑物已知的震害程度推演到其他烈度下建筑物未知的震害程度分布的方法, 从而得到这类建筑物在五个地震烈度下的破坏概率分布, 也即完全震害破坏矩阵。

根据该方法, 需要一个标准震害矩阵来推演完全震害矩阵。按文献^[10]中地区分类标准, 云南地区属于Ⅲ类地区。考虑到目前我国农村房屋现状, 农村大部分地区砌体房屋基本上不设防。所以选择Ⅲ类地区基本烈度为Ⅵ和Ⅷ砌体房屋震害矩阵作为标准震害矩阵来推演云南农村和城区的砌体结构震害矩阵。按照文献给出的Ⅲ类地区基本烈度为Ⅵ和Ⅷ的砌体结构震害矩阵如表 7 和表 8 所示。

该方法将各破坏等级对应的震害指数作为一个连续型随机变量 x , 则对应 I 烈度下各个破坏等级下的概率也就等效于 $P(x_i \leq x \leq x_{i+1})/I = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x/I)$, 由此就可将问题转化为求解 $f(\frac{x}{I})$ 的问题, 该方法中即将 I 烈度下各个破坏等级的概率转化为服从 Beta 分布函数。因此, 本文首先计算得到各个矩阵的各烈度下服从 Beta 分布的期望和方差, 如表 9、10 所示。

表 7 Ⅲ类地区基本烈度为Ⅵ的砌体结构震害矩阵

Table 7 Seismic damage matrix of masonry structure with basic intensity VI in Class III area

破坏等级	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	0.6079	0.5264	0.3416	0.1512	0.0243
轻微破坏	0.2923	0.2711	0.2621	0.2107	0.0774
中等破坏	0.0761	0.1301	0.2188	0.2667	0.2038
严重破坏	0.021	0.0569	0.1274	0.2323	0.3315
毁坏	0.0027	0.0155	0.0501	0.1391	0.3630

表 8 Ⅲ类地区基本烈度为Ⅷ的砌体结构震害矩阵

Table 8 Seismic damage matrix of masonry structure with basic intensity Ⅷ in Class III area

破坏等级	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	0.7448	0.7434	0.6399	0.4796	0.2359
轻微破坏	0.2097	0.1708	0.1855	0.1987	0.1858
中等破坏	0.0356	0.0562	0.1049	0.1679	0.2249
严重破坏	0.0087	0.0232	0.0501	0.0992	0.1966
毁坏	0.0012	0.0064	0.0196	0.0546	0.1568

然后, 分别选择Ⅲ类地区基本烈度为Ⅵ和Ⅷ砌体房屋震害矩阵作为标准震害矩阵来推演云南地区农村和城区的砌体结构震害矩阵。假设云南农村和城区砌体房屋震害矩阵的变化趋势分别和Ⅲ类地区基本烈度为Ⅵ和Ⅷ砌体房屋震害矩阵趋势上一致, 即可计算得到云南农村和城市砌体房屋震害指数在Ⅸ和 X 下服从贝塔分布的期望和方差, 如表 11 所示。

表 9 各烈度下震害指数的期望值

Table 9 Expected values of seismic damage index under different seismic intensities

震害矩阵类型	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
Ⅲ类地区基本烈度为Ⅵ震害矩阵	0.143	0.195	0.303	0.459	0.676
Ⅲ类地区基本烈度为Ⅷ震害矩阵	0.107	0.122	0.172	0.260	0.432
云南农村砌体震害矩阵	0.097	0.201	0.343		
云南城区砌体震害矩阵	0.082	0.168	0.292		

表 10 各烈度下震害指数的方差

Table 10 Variances of seismic damage index under different seismic intensities

震害矩阵类型	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
Ⅲ类地区基本烈度为Ⅵ震害矩阵	0.022	0.043	0.071	0.088	0.067
Ⅲ类地区基本烈度Ⅷ为震害矩阵	0.013	0.024	0.044	0.073	0.100
云南农村砌体震害矩阵	0.010	0.035	0.060		
云南城区砌体震害矩阵	0.006	0.025	0.051		

表 11 云南地区各烈度下震害指数的期望值和方差

Table 11 Expected values and variances of seismic damage index under seismic intensities in Yunnan

震害指数	期望值		方差值	
	云南农村统计震害矩阵	云南城区统计震害矩阵	云南农村统计震害矩阵	云南城区统计震害矩阵
Ⅵ	0.097	0.082	0.010	0.006
Ⅶ	0.201	0.168	0.035	0.025
Ⅷ	0.343	0.292	0.060	0.051
Ⅸ	0.499	0.38	0.077	0.08
X	0.716	0.552	0.056	0.107

通过云南地区砌体房屋震害指数Ⅸ和X下的期望和方差,就可以反推出各自贝塔分布的参数,从而,计算得出结构在Ⅸ和X的震害矩阵,如表12、表13所示。

5 砌体结构地震易损性曲线

参照《中国地震烈度表》(GB/T17742—2008)中给出的烈度与峰值加速度和峰值速度之间的对应关系,如表14所示,可进一步给出云南地区砌体结构的易损性超越概率矩阵。

采用对数累计正态分布函数作为易损性函数来拟合砌体结构易损性超越概率矩阵,易损性函数定义为:

$$F(IM=x)=\Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{x}{\theta}\right)}{\beta}\right]$$
 (1)

式(1)中,Φ(·)是标准正态分布函数,θ地震易损性函数的中位值,β为对数标准差(又称为离差)。

表 12 云南地区农村砌体结构震害矩阵

Table 12 Seismic damage matrix of masonry structure in rural area of Yunnan

破坏等级	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	0.774	0.449	0.178	0.085	0.009
轻微破坏	0.196	0.339	0.364	0.203	0.063
中等破坏	0.024	0.159	0.263	0.267	0.169
严重破坏	0.006	0.048	0.161	0.313	0.378
毁坏	0	0.005	0.034	0.132	0.381

表 13 云南地区区砌体结构震害矩阵

Table 13 Seismic damage matrix of masonry structure in urban area of Yunnan

破坏等级	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
基本完好	0.838	0.548	0.226	0.210	0.124
轻微破坏	0.148	0.260	0.423	0.254	0.162
中等破坏	0.014	0.184	0.215	0.241	0.187
严重破坏	0	0.008	0.118	0.221	0.261
毁坏	0	0	0.018	0.074	0.266

由地震烈度与峰值加速度PGA的对应关系以及各破坏等级在不同烈度下的超越概率,可拟合给出对应的θ、β值,如表15所示。

云南地区砖砌体结构震害矩阵基于地震动参数PGA/g的易损性超越概率曲线及拟合点分布图如图3至图4所示。

6 结论

本文以发生于云南地区的2001年到2010年的历次地震中的砌体结构的震害资料数据为基础,通过对其进行统计分析得到如下结论:

(1)农村的砌体结构抗震性能与所在地区的抗震设防烈度相关性较小,城区的砌体结构抗震性能与所在地区的抗震设防烈度相关性较大。

(2)在此基础上给出的云南农村地区 and 城区砌体结构的Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ度的不完备的经验震害矩阵。

表 14 地震烈度与峰值加速度PGA和峰值速度PGV的对应关系

Table 14 The correspondence between seismic intensity and PGA and PGV

地震烈度	PGA/ (m·s ⁻²)	误差范围/ (m·s ⁻²)	PGV/ (m·s ⁻¹)	误差范围/ (m·s ⁻¹)
Ⅵ	0.63	0.45-0.89	0.06	0.05-0.09
Ⅶ	1.25	0.90-1.77	0.13	0.10-0.18
Ⅷ	2.50	1.78-3.53	0.25	0.19-0.35
Ⅸ	5.00	3.54-7.07	0.50	0.36-0.71
X	10.00	7.07-14.14	1.00	0.72-1.41

表 15 云南地区砌体房屋易损性函数参数θ、β值

Table 15 θ and β vaues of vulnerability function parameter of masonry building in Yunnan

破坏等级	农村地区		城区	
	参数θ	参数β	参数θ	参数β
轻微破坏	0.1181	0.8695	0.1523	1.1298
中等破坏	0.2856	0.9400	0.4537	1.3289
严重破坏	0.5602	0.8885	0.9351	1.1069
毁坏	1.3194	0.8376	2.1716	1.0038

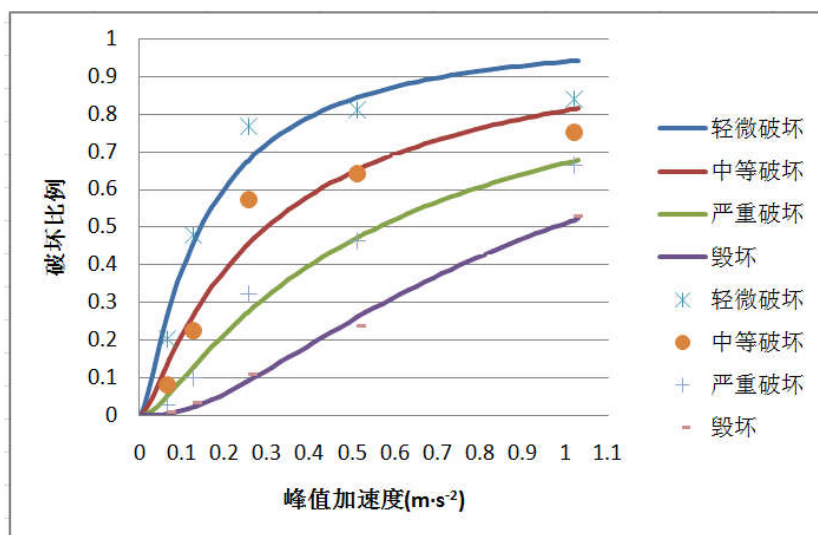


图3 云南省农村砌体结构易损性超越概率拟合曲线

Fig.3 Exceeding probability fitting curve of vulnerability of masonry structure in rural area of Yunnan

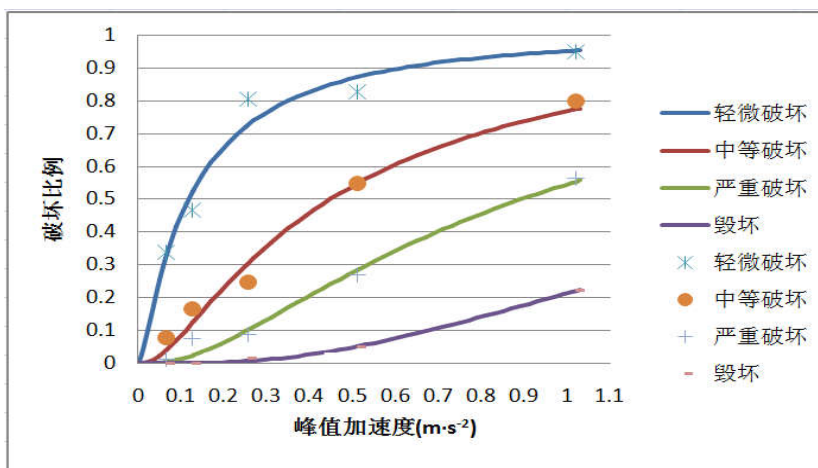


图4 云南城区砌体结构易损性超越概率拟合曲线

Fig.4 Exceeding probability fitting curve of vulnerability of masonry structure in urban area of Yunnan

(3)采用塔概率密度分布函数来拟合震害指数的分布,并根据标准震害矩阵和某一烈度下建筑物已知的震害分布得出其他烈度下的震害分布,从而给出了云南地区农村和城区完备的砌体结构震害矩阵和地震易损性曲线。

本文提出了针对一个地区宏观分类的砌体结构的易损性研究方法,研究从该地区震害资料出发,所以得到的易损性结果能很好地反映该地区的砌体结构的实际抗震能力,在该地区统计震害矩阵不完备的情况下,完成了完备震害矩阵的推演和地震易损性曲线,这些对指导该地区的防震减灾规划、地震灾害预测等工作提供帮助。

参考文献:

- [1] 陈颢,陈鑫连,傅征祥.十年尺度中国地震灾害损失预测研究[M].北京:地震出版社,1995.
- [2] 孙柏涛,张桂欣.汶川8.0级地震中各类建筑结构地震易损性统计分析[J].土木工程学报,2012,45(5):26-30.
- [3] 杨玉成,李大华,杨雅玲等.投入使用的多层砌体房屋震害预测专家系统 PDSMSMB-1[J].地震工程与工程振动,1990,10(3):83-89.
- [4] 中国地震局震灾应急救援司.2001~2005年中国大陆地震灾害损失评估汇编[M].北京:地震出版社,2010.
- [5] 中国地震局震灾应急救援司.2006~2010年中国大陆地震灾害损失评估汇编[M].北京:地震出版社,2015.
- [6] 胡少卿.建筑物的群体震害预测方法研究及基础设施经济损失预测方法探讨[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2007.