

叶肇恒, 孟凡馨, 杨璐遥. 基于震害资料的四川省藏式房屋地震易损性研究[J]. 华南地震, 2019, 39(1): 40–45. [YE Zhaoheng, MENG Fanxin, YANG Luyao. Research on Seismic Vulnerability of Tibetan Folk Houses in Sichuan Province Based on Seismic Hazard Information[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 40–45]

基于震害资料的四川省藏式房屋地震易损性研究

叶肇恒, 孟凡馨, 杨璐遥
(四川省地震局, 成都 610039)

摘要: 搜集自开展地震灾害直接损失评估以来, 四川境内破坏性地震震害资料, 统计省内藏式房屋在不同烈度不同破坏等级下的破坏比, 给出易损性矩阵; 采用房屋结构整体易损性分析方法, 依据藏式房屋易损性矩阵, 通过烈度与地震动参数的对应关系, 以对数正态分布函数为模型, 对藏式房屋在不同地震动参数(峰值速度)下超越毁坏、破坏、基本完好的概率曲线进行拟合, 给出易损性曲线, 为其他结构类型房屋的易损性研究、灾害损失评估工作及震害预测提供参考。

关键词: 藏式房屋; 易损性; 易损性矩阵地震易损性曲线

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2019)01-0040-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.01.007

Research on Seismic Vulnerability of Tibetan Folk Houses in Sichuan Province Based on Seismic Hazard Information

YE Zhaoheng, MENG Fanxin, YANG Luyao
(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610039, China)

Abstract: Based on the seismic hazard information about destructive earthquakes happened in Sichuan province since the implementation of seismic loss assessment, this article created a vulnerability matrix of Tibetan folk houses by analyzing their destruction ratio under different intensities and damage degrees; adopting methods of analyzing building structure vulnerability and log-normal distribution model, based on vulnerability matrix of Tibetan folk houses and the relationship between seismic intensity scales and ground-motion parameters, this article created a vulnerability curve by doing the probability curve fitting of Tibetan folk houses in the condition of being devastated, damaged and almost unaffected by earthquake under different seismic ground-motion parameters (at peak velocity), which provided references for vulnerability study of other building structures, seismic loss assessment and hazard prediction.

Keywords: Tibetan Folk House; Vulnerability; Vulnerability matrix; Seismic fragility curve

收稿日期: 2018-03-11

基金项目: 地震应急青年重点任务(CEA_EDEM-201712)

作者简介: 叶肇恒(1985-), 男, 工程师, 主要从事地震应急工作。

E-mail: 272266530@qq.com.

0 引言

四川是中国地震频发省份之一，也是我国的第二大藏区。历年来，破坏性地震给四川藏族地区带来了不同程度的经济损失与人员伤亡。藏式房屋的破坏是该地区经济损失的主要原因之一，因此，研究藏式房屋在遭受地震影响或破坏时的状态，特别是开展对藏式房屋的易损性研究，有利于支撑该地区科学高效地开展抗震减灾工作，具有重要的现实意义。

自 1993 年开展地震灾害直接损失评估以来，四川藏族地区遭受多次破坏性地震，这些历史地震给藏式房屋造成不同程度破坏的同时，也累积了许多宝贵的震害资料。这些震害资料较为深刻的反映了藏式房屋在不同烈度、不同破坏等级下的破坏程度和震害特征，是地震对藏式房屋影响的实际结果，同时也反映了该类房屋的抗震性能。因此，本文通过历史震害资料，对四川省藏式房屋进行易损性评价。

1 基于震害资料的统计分析方法

目前，房屋建筑的地震易损性分析方法主要包括经验统计法、经验理论结合法、模糊类比法、结构计算法和动态分析法。虽然四川省藏式房屋主要以木结构为主，但在施工工艺上具有一定的随意性，施工工艺不尽相同。同时，针对该结构类型的房屋积累了较为丰富的震害资料，因此，研究藏式房屋地震易损性时，可采用经验统计法进行研究。通过对藏式房屋历史地震震害资料的统计分析，得出该类房屋在地震烈度Ⅵ~Ⅸ下的破

坏比，按照不同烈度不同破坏等级分别对其破坏比进行统计平均，由此得到该类建筑易损性矩阵。即：

$$P[D_j|I] = \frac{\sum_{K=1}^N P_k[D_j|I]}{N} \tag{1}$$

其中， D_j 表示特定结构类型房屋的不同破坏状态， $j=1,2,3,4,5$ ，分别表示建筑物的基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏五种破坏等级。 I 表示地震烈度， $P_k[D_j|I]$ 是第 K 次地震特定结构类型房屋的易损性矩阵， N 是地震样本数。

2 藏式房屋地震易损性矩阵

2.1 藏式房屋震害资料

传统藏式房屋在藏族地区依旧大量存在，据本课题组成员调查，藏族地区藏式房屋以木结构为主，根据围护结构分类，藏式房屋可分为石维护墙木结构、土维护墙木结构、木片维护墙木结构等。通过实地调查及对相关部门的访问得知，四川省藏式房屋石维护墙木结构占比约为 70%，土维护墙木结构约占 20%，其他结构约占 10%。根据四川省藏式房屋结构占比情况和历史震害资料，本文主要对石维护墙木结构和土维护墙木结构进行易损性分析。

通过搜集自开展地震灾害直接损失评估 (1993 年) 以来四川境内发生的破坏性地震震害资料，统计得出石维护墙木结构和土维护墙木结构在不同烈度不同破坏等级下的破坏比。如表 1、2 所示。

表 1 1993 年至今破坏性地震藏式石维护墙木结构房屋破坏比 (%)
Table 1 The destruction ratio of Tibet timber frame folk houses with stone enclosure wall in destructive earthquakes since 1993(%)

地震 烈度	序号	地震事件			破坏等级				
		时间(年-月-日)	地点	震级	毁坏	严重破坏	破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ度	1	1996-12-21	白玉—巴塘	5.5	0	9	27	40	24
	2	2001-02-14	雅江—康定	5.0	0	1	10	55	34
	3	2001-02-23	雅江—康定	6.0	0	9	22	30	39
	4	2005-01-05	马尔康	4.7	0	0	4.72	34.12	61.16
	5	2005-10-30	道孚	4.7	0	0	0	5	95
	6	2011-04-10	炉霍	5.3		0		20	80
	7	2013-01-08	白玉	5.4		0		19.37	80.63
	8	2014-11-12	康定	6.3		2.28		22.64	75.08
	9	2017-08-08	九寨沟	7.0		0		26.4	73.6

(转下表)

(续表 1)

地震 烈度	序号	地震事件			破坏等级				
		时间(年-月-日)	地点	震级	毁坏	严重破坏	破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅶ度	1	1996-12-21	白玉—巴塘	5.5	3	18	37	27	15
	2	2001-02-23	雅江—康定	6.0	5	18	33	24	20
	3	2011-04-10	炉霍	5.3		2		35	63
	4	2013-01-08	白玉	5.4		1.01		34.55	64.44
	5	2014-11-12	康定	6.3		18.45		39.86	41.69
	6	2017-08-08	九寨沟	7.0		0.45		35	64.55
Ⅷ度	1	2001-02-23	雅江—康定	6.0	15	20	47	14	4
	2	2014-11-12	康定	6.3		26.02		48.85	25.13
	3	2017-08-08	九寨沟	7.0		34.45		65.55	0
Ⅸ度	1	2017-08-08	九寨沟	7.0		50.33		49.67	0

表 2 1993 年至今破坏性地震藏式土维护墙木结构房屋破坏比 (%)
Table 2 The destruction ratio of Tibet timber frame folk houses with soil enclosure wall in destructive earthquakes since 1993(%)

地震 烈度	序号	地震事件			破坏等级				
		时间/(年-月-日)	地点	震级	毁坏	严重破坏	破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ度	1	1993-05-24	德格	5.0	0	5.00	15.00	40.00	40.00
	2	2002-08-08	新龙	5.3	0	1.70	7.53	20.29	70.48
	3	2008-05-12	汶川	8.0		8.86		25.78	65.36
	4	2010-04-14	玉树	7.1		2.94		22.96	74.1
	5	2011-04-10	炉霍	5.3		0		20.00	80.00
	6	2013-04-20	芦山	7.0		2.71		28.17	69.12
	7	2013-08-31	得荣	5.9		3.69		28.98	67.33
	8	2014-08-03	云南鲁甸	6.5		0.16		4.97	94.87
Ⅶ度	1	2002-08-08	新龙	5.3	1.26	4.25	12.69	20.80	61.00
	2	2008-05-12	汶川	8.0		20.06		47.37	32.57
	3	2011-04-10	炉霍	5.3		2.00		35.00	63.00
	4	2013-04-20	芦山	7.0		16.92		57.96	25.12
	5	2013-08-31	得荣	5.9		11.22		47.67	41.11
Ⅷ度	1	2008-05-12	汶川	8.0		68.83		28.19	2.98
	2	2013-04-20	芦山	7.0		26.31		51.89	21.8
	3	2013-08-31	得荣	5.9		25.45		60.35	14.2
Ⅸ度	1	2008-05-12	汶川	8.0		78.75		21.25	0
	2	2013-04-20	芦山	7.0		60.95		36.02	3.03

2.2 地震易损性矩阵

根据统计资料，将基本完好和轻微破坏合并为基本完好，将中等破坏和严重破坏合并为破坏。通过公式(1)计算地震易损性矩阵，计算结果如表 3、4 所示。

表 3 1993 年至今藏式石维护墙木结构房屋易损性矩阵 (%)

Table 3 The vulnerability matrix of Tibet timber frame folk houses with stone enclosure wall since1993

烈度	烈度	破坏等级		
		毁坏	破坏	破坏
Ⅵ度	9	2.36	35.14	62.5
Ⅶ度	6	10.98	44.24	44.78
Ⅷ度	3	31.82	58.47	9.71
Ⅸ度	1	50.33	49.67	0

表 4 1993 年至今藏式土维护墙木结构房屋易损性矩阵 (%)

Table 4 The vulnerability matrix of Tibet timber frame folk houses with soil enclosure wall since1993

烈度	地震事件样 本数	破坏等级		
		毁坏	破坏	破坏
Ⅵ度	11	3.13	26.71	70.16
Ⅶ度	7	11.14	44.30	44.56
Ⅷ度	3	40.20	46.80	13.00
Ⅸ度	2	69.85	28.63	1.52

3 藏式房屋地震易损性曲线

3.1 基于 PGV 的易损性曲线获取

结构地震易损性可表述为在给定强度的地震动作用下, 结构达到或超越特定破坏状态的条件概率。在以往的地震易损性研究中, 大多数是基于烈度进行的, 即表示结构在不同烈度下各破坏状态的概率。而由于烈度本身尺度的较大不确定性, 并且随着地震危险性研究的深入和发展, 迫切需要基于地震动参数的易损性的广泛研究。

目前主要有两种途径可以通过地震动参数得到地震易损性曲线: ①基于 PGA (峰值加速度) 的地震易损性曲线的获取; ②基于 PGV (峰值速度) 的地震易损性曲线获取。本文采用基于 PGV 的地震易损性曲线获取。

3.2 曲线拟合

工程中常用的几种分布函数有泊松分布、指数分布、正态分布、对数正态分布、极值分布等。本文利用不同的分布函数分别对统计到的各类建筑物破坏比均值进行拟合, 发现四川省藏式房屋

在不同烈度下处于某一破坏等级的概率分布比较符合对数正态分布, 其概率密度函数如下:

对数正态分布概率密度函数:

$$y=f(x|\mu,\sigma)=\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中 μ 为对数均值, $\mu=\text{mean}(\log(x))$; σ 为对数标准差, $\sigma=\text{std}(\log(x))$ 。

根据中国地震烈度表 (CB/T17742-2008), 烈度与地震参数对应关系以及易损性矩阵, 列出烈度、峰值速度、易损性矩阵关系如表 5、6。

表 5 烈度、峰值速度与藏式石围护墙木结构易损性关系矩阵

Table 5 The relational matrix between seismic intensity, PGV and vulnerability of Tibet timber frame folk houses with stone enclosure wall

烈度	PGV(m/s)	毁坏 (%)	破坏 (%)	基本完好 (%)
Ⅵ度	0.06	2.36	35.14	62.50
Ⅶ度	0.13	10.98	44.24	44.78
Ⅷ度	0.25	31.82	58.47	9.71
Ⅸ度	0.50	50.33	49.67	0.00

表 6 烈度、峰值速度与藏式土围护墙木结构易损性关系矩阵

Table 6 The relational matrix between seismic intensity, PGV and vulnerability of Tibet timber frame folk houses with soil enclosure wall

烈度	PGV(m/s)	毁坏 (%)	破坏 (%)	基本完好 (%)
Ⅵ度	0.06	3.13	26.71	70.16
Ⅶ度	0.13	11.14	44.30	44.56
Ⅷ度	0.25	40.20	46.80	13.00
Ⅸ度	0.50	69.85	28.63	1.52

由于四川省藏式房屋在不同烈度下处于某一破坏等级的概率分布比较符合对数正态分布, 公式(1)为概率密度函数曲线, 为求得参数 μ 、 σ , 设拟合函数曲线 $y'=f(x|\mu',\sigma')$, (其中 μ' 、 σ' 为 μ 、 σ 的最佳估值)使得曲线 y' 与 y 偏差最小。

设表 5 中的数据为矩阵:

$$M=\begin{bmatrix} 0.06 & 2.36 & 35.14 & 62.50 \\ 0.13 & 10.98 & 44.24 & 44.78 \\ 0.25 & 31.82 & 58.47 & 9.71 \\ 0.50 & 50.33 & 49.67 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$x=M(:,1)$ (第 1 列), $y_i=M(:,i)$ ($i=2,3,4$) (第 2,3,4 列), $b=(b_1,b_2,b_3)^T$, (b 为 μ' 、 σ' 参数

矩阵)。本文以统计的累积概率密度与拟合的累积概率密度之间的均方根误差最小 (M_{in})作为最小二乘法曲线拟合标准。即:

$$M_{in} = \|f(x, b) - y_i\|_2^2 = \sum_i (f(x, b) - y_i)^2 \quad (4)$$

式中 $\|f(x, b) - y_i\|_2$ 为欧式范数。

对表 6 数据采用同样方法, 计算得出下表所示 μ 、 σ 参数。

表 7 μ 、 σ 参数值
Table 7 μ 、 σ parameter values

结构类型	毁坏参数		破坏参数	
	μ	σ	μ	σ
石维护墙木结构	1.2177	0.6148	1.8751	1.0467
土维护墙木结构	1.1691	0.6470	1.7427	0.9724

根据所求结果, 画出拟合曲线如下:

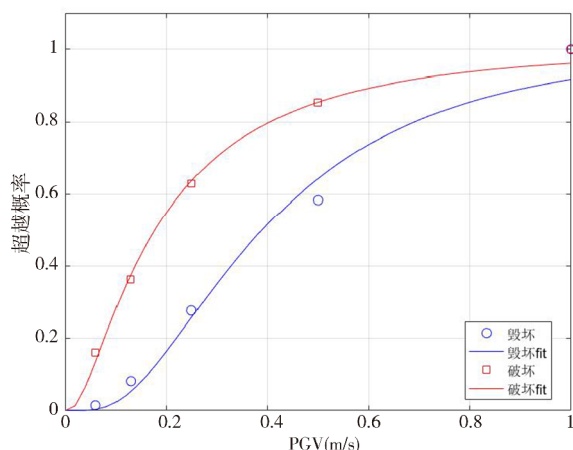


图 1 石维护墙木结构地震易损性曲线

Fig.1 The vulnerability curve of Tibet timber frame folk houses with stone enclosure wall

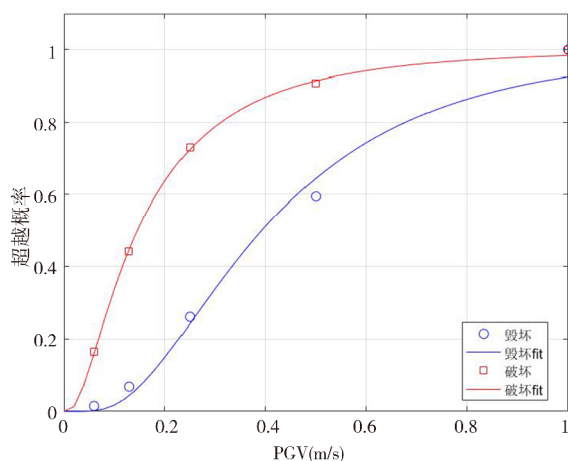


图 2 土维护墙木结构地震易损性曲线

Fig.2 The vulnerability curve of Tibet timber frame folk houses with soil enclosure wall

4 结语

(1) 从图 1、图 2 可以看出, 两种围护墙木结构随着地震动参数的不断增强, 土围护墙木结构超越破坏状态的概率比石围护墙木结构超越破坏状态的概率高, 而超越毁坏状态的概率两者相当。在Ⅵ度区时, 两种维护墙木结构藏式房屋以基本完好为主, 少数破坏; 在Ⅶ度区时, 石维护墙木结构以基本完好为主, 土维护墙木结构基本完好与破坏概率相近, 个别房屋毁坏; 在Ⅷ度区时, 石维护墙木结构房屋处于毁坏、破坏及基本完好状态的概率相近, 土维护墙木结构房屋则以中等破坏为主; 在Ⅸ度区时, 两种维护墙木结构房屋均以毁坏为主, 少数房屋破坏。

(2) 统计结果及易损性曲线分析表明, 藏式土维护墙木结构与藏式石维护墙木结构这两种类型结构在历史破坏性地震中破坏比相近, 表明两者抗震性能差别不大, 在房屋类型统计、灾害损失评估及震害预测中可归并为同类结构房屋考虑。

(3) 文中采用的方法是基于震害资料的房屋地震易损性研究, 在研究Ⅸ度藏式房屋震损时, 地震事件样本数较少, 因此Ⅸ度区只研究了汶川、芦山及九寨沟地震灾区范围内藏式房屋。

5 结语

房屋地震易损性研究是防震减灾工作的重要基础。在社会经济飞速发展的今天, 四川省藏族自治州经过抗震设防的新建藏式房屋数量日趋增长, 然而老旧房屋依然为数众多, 针对民族地区开展防震减灾工作依然任重道远。本文提出的研究方法适用于其他结构建筑物的整体易损性研究, 但必须强调, 本文所统计的震害资料对象仅为四川省内藏式房屋, 对于其他地区该类型房屋或其他类型房屋的易损性研究, 还应以当地历史震害资料为基础进行。

参考文献:

- [1] M. Altug Erberik, Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes[J]. Earthquake engineering and structural dynamics. 2008 (37):387 - 405.
- [2] Elif M.Un, M. Altug Erberik, Aysegul Askan, Performance Assessment of Turkish Residential Buildings for Seismic Damage and Loss Estimation[J], J. Perform. Constr. Facil., 2015, 29(2):04014063.

- [3] 国家质量技术监督局. 中国地震烈度表 (CB/T17742-2008)[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [4] 国家质量技术监督局. 地震现场工作第 4 部分: 灾害直接损失评估(GB/T 18208.4-2011)[S]. 北京:中国标准出版社 2011.
- [5] 温增平, 胡聿贤. 基于震害资料的易损性分析方法[C]//第五届全国地震工程学术会议论文集, 北京:1998:243-248.
- [6] 韩淼, 刘建兵. 典型工程结构地震区划概率水准的研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2009, 25(01): 21-25.
- [7] 刘如山, 胡少卿, 邬玉斌, 等. 基于地震动参数的结构易损性表达方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(06): 102-107.
- [8] 叶肇恒, 宴金旭, 杨璐遥. 四川省藏式民居震害特征研究[J]. 四川地震, 2017, 41(04): 24-29.
- [9] 叶肇恒, 宴金旭, 毛利, 等. 川滇交界东部地区房屋震害特征研究[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 89-96.