

基于模糊综合评判法的辽宁省 老旧砌体房屋震害预测^{*}

臧石磊, 冯 石, 李玉森, 李东春

(辽宁省地震局, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 对辽宁省老旧砌体房屋现状及抗震能力进行分析, 基于模糊综合评价法计算分析得到地震易损性矩阵, 根据辽宁省地震震害实例对预测结果进行了验证和分析。结果表明: ①辽宁省农村民居中的砌体结构总数量占房屋总数量比例超过95%, 2000年以前所建房屋总数量占比76%。②由预测结果可知, 辽宁省老旧砌体房屋在Ⅵ, Ⅶ, Ⅷ, Ⅸ度烈度下产生严重及以上破坏等级的房屋数量占比分别为6.5%, 17.0%, 53.5%, 65.9%。③震害实例验证结果表明预测结果与实际震害结果之间差异性较小。

关键词: 模糊综合评判法; 震害预测; 农村民居; 老旧砌体房屋; 地震易损性

中图分类号: P315.945

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)02-0166-06

0 引言

建筑物震害预测的主要工作是对单个或群体建筑物在预期地震强度下的破坏程度进行估计。常见的震害预测方法主要包括历史震害统计法、半经验半理论法、模糊类比法、强度判别法、专家评估法、结构计算法、动态分析法(邵峰等, 2016), 半经验半理论法又可细分为易损性概率分析法、超越强度倍率法、修正的超越强度倍率法等。按照预测范围和对象的不同, 震害预测方法一般分为单体震害预测方法和群体震害预测方法。

群体震害预测方法通常包括两类: ①对区域内建筑物进行抽样, 针对样本中不同类型的建筑物分别采用对应的震害预测公式进行计算, 并统计单体建筑物的震害预测结果得到群体震害易损性矩阵。该类方法计算过程物理意义明确, 所考虑的单体建筑物结构特征具有多样性, 但需要耗费大量的人力、物力和时间进行样本资料的调查和分析, 计算结果的准确度对震害预测计算公式的依赖度较高。②基于实际震害统计得到的标准震害矩阵, 考虑目标区域内建筑物结构特征的不同, 采用科学的数学模型对标准震害矩阵进行修

正, 得到预测区建筑物震害矩阵(张桂欣, 孙柏涛, 2010, 2018; 孙柏涛等, 2013; 明小娜等, 2018)。该类方法计算效率高, 样本数据统计简单, 但对标准震害矩阵的要求高。

辽宁省是中国重要的经济发展区之一, 同时也是中国地震多发省份之一。自有记录以来, 辽宁省境内累计发生5.0级及以上破坏性地震20余次, 其中影响最大的地震为1975年2月4日海城7.3级地震。辽宁省境内的海城、岫岩、营口、开原、沈阳、熊岳、铁岭、丹东、金州、朝阳以及邻近的渤海、黄海、辽蒙交界等地区均属于地震多发区(刘永强等, 2018)。

辽宁省老旧砌体房屋数量在建筑总数量中占比较大, 且此类房屋在地震动作用下震害极其严重, 因此做好老旧砌体房屋的震害预测工作对当地防震减灾工作的有效开展十分重要。本文基于辽宁省房屋建筑数据, 采用模糊综合评判法, 得到未考虑抗震设防的老旧砌体房屋震害预测结果, 并以2017年12月19日辽宁海城4.4级地震为算例, 对震害预测结果进行验证分析。

1 概况

根据2007—2011年开展的《辽宁省农村民居

^{*} 收稿日期: 2019-02-14.

基金项目: 辽宁省科学技术计划项目“辽宁区域1:100万数字地震构造图编制”(20180550531)资助.

抗震性能普查》项目调查结果可知,辽宁省14个地级市中的1 134个乡镇农村民居总数量约为2 177万间,其中砖木结构房屋占比为44.9%,砖石结构房屋占比为50.5%,土坯结构房屋占比为3.5%,其他结构房屋占比为1.1%。不同建造年代民居总数量占比分别为:1980年以前为21.5%,1980—1989年为25.2%,1990—1999年为30.2%,2000年以后为23.1%。根据上述统计数据可知,辽宁省农村民居中的砌体结构房屋总数量占比超过95%,2000年以前所建房屋总数量占比超过76%(宋思然,2016)。而大部分农村民居的砌体结构房屋均为未经正规抗震设防的自建房屋,材料多为普通烧结黏土砖、石块、黏土、水泥砂浆和木材。近年新建砌体结构房屋逐渐变为混凝土现浇楼板、彩钢瓦、钢筋混凝土构件以及配筋砌体。但因气候和经济条件的约束,大部

分建筑材料存在强度等级偏低、实际强度离散性较大、耐久性不够等缺陷,砌体墙体虽然较厚但向阳侧纵墙窗洞尺寸相对较大。省内山区现存的砖石砌体房屋中,所用石块多采用毛石,且毛石一般采用黏土或石灰砂浆砌筑,结构抗震性能普遍较差。综上,辽宁省农村民居抗震性能处于一个较差的水平。

以辽宁省营口、鞍山两地的农村民居为例进行说明,农村民居总数量为2 996 396间,其中砖木结构房屋总数量为1 311 366间,砖石结构房屋总数量为1 557 842间,土坯结构房屋总数量为101 784间,其他结构房屋总数量为25 404间。两地农村民居中未考虑抗震设防老旧砌体房屋所占比例较大,1990年以前所建老旧砌体房屋数量占比达51.5%。图1为辽宁省典型老旧砌体房屋结构形式。



(a) 典型砖木结构房屋



(b) 典型砖石结构房屋

图1 辽宁省典型老旧砌体房屋照片

Fig. 1 The photos of typical old masonry buildings in Liaoning Province

2 模糊综合评判法

2.1 方法概述

基于模糊综合评判法进行老旧砌体房屋震害预测时,首先应确定震害预测目标区域不同烈度所对应的震害指数,然后根据房屋结构特征和震害特征确定震害影响因素,采用模糊数学理论确定各影响因素的权重,并考虑不同影响因素的耦合关系以及

地理空间差异对震害的影响,据此对所确定的影响因素权重进行修正,接着利用综合加权平均方法得到房屋综合影响因子数值,最后计算得到预测的震害指数以及对应的震害等级(张桂欣,孙柏涛,2018)。计算公式为:

$$D = K \times R \quad (1)$$

式中: D 为预测得到的建筑物震害指数矩阵; K 为加权平均修正系数矩阵; R 为不同烈度所对应震害

指数与震害影响因素之间的模糊关系矩阵。

2.2 影响因素及影响因子

金国梁等（1985）基于唐山地震震害资料，统计分析得到老旧砌体房屋的震害影响因素为：结构总长度、建筑老旧程度、结构层数。结构总长度可细分为 10，30，50，70 和 90 m 等 5 个等

级；建筑老旧程度可细分为 1 类完好新房、2 类基本完好旧房、3 类已有较大损坏旧房、4 类严重损坏旧危房等 4 个等级；结构层数可细分为 1 层、2 层、≥3 层等 3 个等级。以Ⅶ度地震烈度为例，在不同地震破坏等级下 3 个影响因素的影响因子见表 1。

表 1 Ⅶ度时不同地震破坏等级 3 个影响因素的影响因子

Tab. 1 Influencing factors of three influencing elements in different seismic damage grade under Ⅶ intensity

破坏等级	影响因素											总体
	结构总长度/m					建筑老旧程度			结构层数			
	(0, 10]	(10, 30]	(30, 50]	(50, 70]	(70, 90]	2 类	3 类	4 类	1 层	2 层	≥3 层	
基本完好	0.37	0.21	0.27	0.11	0.07	0.15	0.12	0	0.36	0.15	0.11	0.17
轻微破坏	0.46	0.41	0.41	0.25	0.2	0.32	0.27	0.04	0.42	0.3	0.25	0.3
中等破坏	0.11	0.27	0.22	0.31	0.31	0.32	0.31	0.17	0.13	0.3	0.31	0.28
严重破坏	0.01	0.06	0.04	0.21	0.26	0.15	0.19	0.35	0.01	0.16	0.21	0.15
倒塌	0	0.01	0	0.08	0.12	0.03	0.07	0.31	0	0.04	0.07	0.04

注：“建筑老旧程度”二级影响因素中的“1 类”特指“完好的新房”，此类震害资料样本相对较少，其震害影响因子无法确定，故表中未体现。

在Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅸ度等烈度下进行老旧砌体房屋震害的预测工作时，采用对表 1 所示Ⅶ度烈度下预测结果进行修正的方法，具体如下：

①取基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌 5 个地震破坏等级所对应的震害指数 i 的中分位值，分别为：0，0.25，0.5，0.75，1。

②假定所有烈度下老旧砌体房屋的不同地震破坏等级所对应房屋数量的占比服从正态分布，即：

$$P(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(i-i_0)^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

③按照式（1）和表 1 确定出为Ⅶ度烈度时所对应的震害指数矩阵 D ，得到Ⅶ度时的震害指数矩阵所对应的平均值 $i_{0.7}$ 和标准差 σ_7 ；

④根据历史震害经验，可确定烈度为Ⅵ，Ⅷ，Ⅸ度时震害指数矩阵所对应的平均值 i_0 和标准差 σ ，如表 2 所示。

⑤基于式（2）计算出Ⅵ，Ⅷ，Ⅸ度时的各个地震破坏等级所对应的震害指数，最终得到老旧砌体房屋的震害预测矩阵（王明振，孙柏涛，2015）。

表 2 不同地震烈度震害指数平均值及标准差

Tab. 2 The mean value of the seismic index and the standard deviation revision in different intensity

烈度	平均值	标准差
Ⅵ度	$i_{0.7} - 0.231$	$\sqrt{ \sigma_7^2 - 0.039 }$
Ⅷ度	$i_{0.7} + 0.326$	$\sqrt{ \sigma_7^2 - 0.012 }$
Ⅸ度	$i_{0.7} + 0.428$	$\sqrt{ \sigma_7^2 - 0.028 }$

2.3 预测结果

对于辽宁省老旧砌体房屋，本文设定其震害影响因素为结构总长度、建筑老旧程度、结构层数，将建筑地震破坏等级分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌 5 个等级，则可知在不同地震烈度时 R 矩阵为 3×5 。矩阵的行向量表示 3 个震害影响因素在不同破坏等级条件下的影响因子大小，列向量表示 5 种破坏等级条件下不同震害影响因素所对应的影响因子大小， R 矩阵表示为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \end{bmatrix} \tag{3}$$

加权平均修正系数矩阵取值为 $K = [0.10 \ 0.45 \ 0.46]$ (金国梁等, 1984)。

以实地调查所得的 293.8 万 m^2 的 (合计 1 762 栋) 辽宁省老旧砌体房屋为样本, 按照式 (1) 和表 1, 计算可得Ⅶ度烈度时地震易损性矩阵为:

$$D_i = \begin{bmatrix} i_0 & i_{0.25} & i_{0.5} & i_{0.75} & i_1 \\ 5.7\% & 40.2\% & 37.1\% & 15.7\% & 1.3\% \end{bmatrix} \quad (4)$$

对应 $i_{0.7} = 0.417$, $\sigma_7 = 0.214$ 。

根据表 2 和正态分布概率密度函数公式可得辽宁省老旧砌体房屋的地震灾害易损性矩阵, 如表 3 所示。

3 算例分析

2017 年 12 月 19 日辽宁省海城市孤山镇与岫岩满族自治县偏岭镇交界发生 4.4 级地震, 震源深度 10 km。此次地震构造背景为海城河断裂, 断裂走向为 NW 向。小偏岭村地震烈度达到Ⅵ度, 民居房屋出现不同程度的破坏。图 2 为此次地震的烈度分布图。

表 3 辽宁省老旧砌体房屋地震灾害易损性矩阵 (%)

Tab. 3 The seismic disaster vulnerability matrix of the old masonry structure buildings in Liaoning Province (%)

烈度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
Ⅵ度	32.5	39.0	22.0	5.8	0.7
Ⅶ度	5.7	40.2	37.1	15.7	1.3
Ⅷ度	6.5	15.1	24.9	29.2	24.3
Ⅸ度	2.4	9.3	22.4	33.9	32.0

注: 按照正态分布概率密度函数直接计算出来的表中每行数值总和不为 100% 时, 按照 100% 进行归一化处理。

按照建筑的结构类型、建造年代、建筑材料等分类, 震中区内房屋主要包括土、石、砖墙建造的旧式房屋、未经抗震设防的砖砌房屋, 在孤山镇和偏岭镇政府所在地还有政府办公楼、学校等个别经过正规抗震设防的钢筋混凝土框架结构和多层砖混结构房屋。图 2 中标明了调查点的房屋受损情况, 可看出各村组房屋受损情况大致相同。表 4 列出了Ⅵ度烈度区老旧砌体房屋地震破坏调查信息。

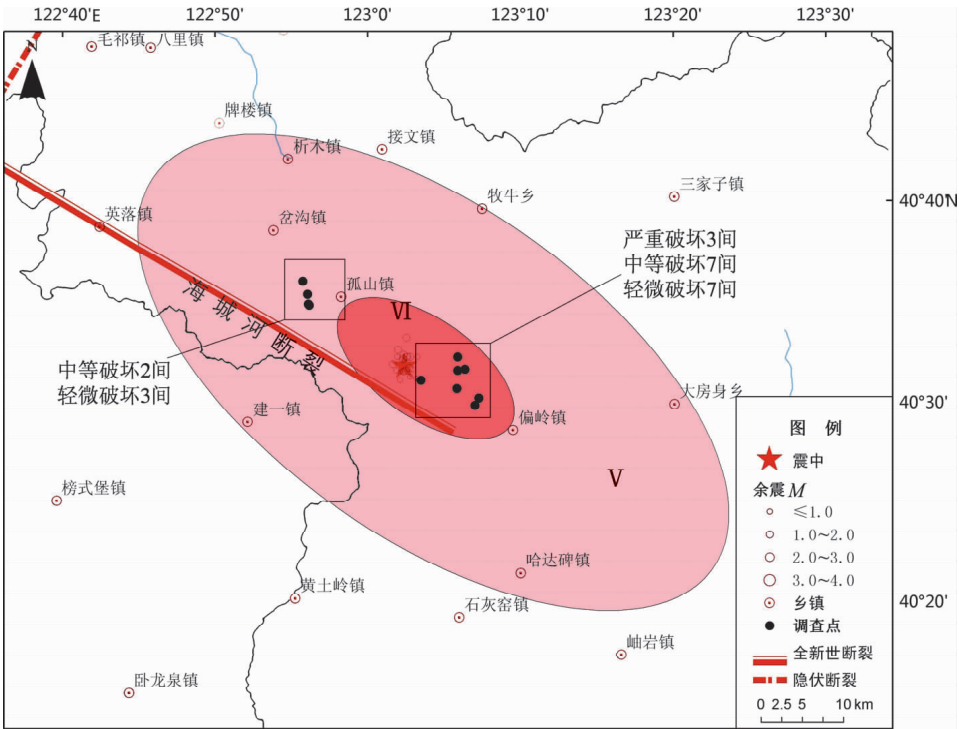


图 2 2017 年辽宁海城 4.4 级地震的烈度分布及老旧砌体房屋受损情况

Fig. 2 Distribution map of seismic intensity of Liaoning Haicheng $M4.4$ earthquake in 2017 and damage of the old masonry buildings

表4 2017年辽宁海城4.4级地震Ⅶ度烈度区
老旧砌体房屋地震破坏调查数据

Tab.4 The seismic damage investigation data of the old
masonry buildings in Ⅶ area of Liaoning Haicheng

M4.4 earthquake in 2017 (单位: m²)

序号	抽样点	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
1	小偏岭村包家堡组	105	130	75	0	0
2	小偏岭村三道沟组	70	0	65	0	0
3	小偏岭村瓦房店组	120	140	80	0	0
4	细玉沟村石家沟组	150	140	210	70	0
5	细玉沟村罗家堡组	70	70	60	60	0
总面积		515	545	485	130	0
占比 (%)		30.7	32.5	29.0	7.8	0

由表4可知,在此次地震中老旧砌体房屋的平均震害指数为0.285。表3所示的基于模糊综合评判法所得辽宁省地震高危区老旧砌体房屋在Ⅶ度烈度下的基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏5个破坏等级占比分别为32.5%,39.0%,22.0%,5.8%,0.7%,平均震害指数为0.186。预测结果与实际震害结果之间的各破坏等级破坏比最大差值为7%,平均震害指数相差0.099。预测结果与实际震害结果之间差异较小,基本符合预测要求(陈洪富等,2013)。

4 结论

本文以辽宁省农村老旧砌体房屋为研究对象进行震害预测研究。主要结论如下:

(1) 基于已有调查数据,辽宁省农村民居中的砌体结构总数量占房屋总数量比例超过95%,2000年以前所建房屋总数量占房屋总数量比例超过76%,大部分农村民居属于未经正规抗震设计

的老旧砌体房屋。

(2) 采用模糊综合评判法,建立了Ⅵ,Ⅶ,Ⅷ,Ⅸ度等烈度下老旧砌体房屋的地震易损性矩阵。

(3) 使用2017年12月海城4.4级地震的震害资料,对震害预测矩阵进行了验证,验证结果表明预测结果与实际震害结果之间差异性较小。

(4) 近年来,辽宁省未发生Ⅶ,Ⅷ,Ⅸ度等烈度地震事件,因此,缺少相应的老旧砌体房屋震害样本数据,故无法对本文所建立的震害预测矩阵进行全面的检验和修正,希望下一步基于新的震害资料进行进一步的研究。

参考文献:

- 陈洪富,孙柏涛,陈相兆,等. 2013. HAZ - China 地震灾害损失评估系统研究[J]. 土木工程学报,46(增刊2):294-300.
- 金国梁,郭刚平,齐洪波. 1984. 老旧砖房的震害预测[C]//中国地震学会地震工程专业委员会. 全国地震工程会议论文集.
- 金国梁,齐洪波,郭纲平. 1985. 老旧民房地震破坏预测的方法[J]. 工程抗震,(2):17-22.
- 刘永强,李伟,索锐,等. 2018. 辽宁省地震高危区农村民居防震减灾能力调查[J]. 防灾减灾学报,34(3):13-17.
- 明小娜,周洋,卢永坤,等. 2018. 云南省砖混结构房屋震害矩阵修正研究[J]. 地震研究,41(4):605-612.
- 邵峰,周强,宋固全,等. 2016. 砌体结构单体震害预测方法评述[J]. 自然灾害学报,25(6):58-68.
- 宋思然. 2016. 辽宁省农村民居地震安全管理对策研究[D]. 沈阳:沈阳师范大学.
- 孙柏涛,张桂欣,邓宏宇,等. 2013. 考虑设防水准的群体建筑物震害预测方法[J]. 土木工程学报,46(5):117-121.
- 王明振,孙柏涛. 2015. 考虑二次震害的单层砖柱厂房震害快速评估新方法研究[J]. 土木工程学报,48(7):12-19.
- 张桂欣,孙柏涛. 2010. 多因素影响的建筑物群体震害预测方法研究[J]. 世界地震工程,26(1):26-30.
- 张桂欣,孙柏涛. 2018. 基于模糊层次分析的建筑物单体震害预测方法研究[J]. 工程力学,35(12):185-193.

Seismic Damage Prediction of Old Masonry Buildings in Liaoning Province Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

ZANG Shilei, FENG Shi, LI Yusen, LI Dongchun

(*Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, Liaoning, China*)

Abstract

Firstly, we analyzed the current situation and seismic capacity of old masonry buildings, and obtained the seismic vulnerability matrix of the old masonry buildings in Liaoning Province by the fuzzy comprehensive evaluation method. Then according to the actual earthquake in Liaoning Province, we verified and analyzed the predicted results. The results show that: ① The number of the masonry houses in rural areas of Liaoning Province accounts for more than 95% of the total number. The number of the buildings built before 2000 accounts for more than 76% of the total number. ② From the prediction results, it can be seen that the proportion of old residential buildings with serious damage and above damage grade under the earthquake intensity of VI, VII, VIII, IX is 6.5%, 17.0%, 53.5% and 65.9% respectively. ③ The verification results of earthquake damage examples show that there is little difference between the prediction and the actual earthquake damage results.

Keywords: fuzzy comprehensive evaluation method; seismic damage prediction; rural houses; old masonry buildings; seismic vulnerability