

基于模糊数学的农村砖木民房震害预测研究

王 强^{1,2,3}, 王兰民^{1,2,3}, 袁中夏^{1,2,3}, 王 峻^{1,2,3}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局黄土地震工程开放实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 基于模糊数学方法及其应用理论对农村地区砖木民房进行震害预测研究。建立了适用于砖木民房的震害影响因子集及其与震害等级的模糊关系, 进一步研究出基于模糊综合评价方法的砖木民房震害预测模型。初步研究表明, 该震害预测模型条理清晰, 计算简便, 可进一步研究推广应用。

关键词: 砖木民房; 震害预测; 影响因子; 震害等级; 模糊综合评价

中图分类号: P315.941

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)03-0279-05

Study on Earthquake Damage Prediction of the Rural Brick-wood Building Based on Fuzzy Mathematics

WANG Qiang^{1,2,3}, WANG Lan-min^{1,2,3}, YUAN Zhong-xia^{1,2,3}, Wang Jun^{1,2,3}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Open Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Geotechnical disaster prevention engineering technology Research Center of Gansu Province, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on fuzzy mathematics method and its application, the seismic damage prediction of rural brick-wood building is studied. The fuzzy relations are established between the affecting factors and seismic damage rating of the brick-wood building, and a new prediction model on seismic damage of the brick-wood building is put forward based on the method of fuzzy synthetic evaluation. The result indicates that the model is reasonable and simple, and could be studied for further application.

Key words: Brick-wood building; Seismic damage prediction; Affecting factors; Seismic damage rating; Fuzzy synthetic evaluation

0 引言

我国是世界上地震灾害最为严重的国家之一。农村是历次地震受灾最为严重的地区, 其中, 民房震害占地震总损失的很大比例。例如: 2003 年民乐—山丹 6.1、5.8 级地震造成直接经济损失 5.01 亿元, 其中一般民用房屋损失 2.44 亿元, 占总损失的 48.7%^[1]。2008 年汶川 8.0 级地震造成甘肃地震灾区直接经济损失 593.32 亿元, 其中农村民房损失 276.06 亿元, 占总损失的 46.5%^[1]。以此看出, 农

村民房存在严重的地震安全问题, 抗震设防水平急需得到提高。对农村地区砖木民房开展震害预测研究, 可以为房屋的抗震性能评价和抗震加固提供方法和依据。

国内外关于震害预测的研究始于上世纪 70 年代, 研究方法可分为两大类, 即经验分析法和理论分析法。经验分析法是在分析、统计、总结大量震害资料的基础上, 得出震害预测指标与震害等级之间的

收稿日期: 2010-10-01

基金项目: 科技部社会公益专项(2004DIB3J130); 甘肃省地震局青年地震科学基金(201002); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2010056

作者简介: 王 强(1983—), 男(汉族), 山东单县人, 研究实习员, 主要从事工程抗震与防震减灾研究。

关系,进而预测建筑物震害。理论分析法是通过震害资料、理论分析和模型试验,建立结构易损性指数与震害等级的预测模型,或是分析结构反应与震害等级的关系进而判别建筑物的震害等级^[3-5]。上述震害预测研究方法虽已取得进展和应用,但是各种预测方法的研究资料、方法和适用范围都有其局限性。而且上述震害预测研究多用于城市住房和重要建筑,如多层砌体、单层厂房等,缺少对农村民房的震害预测研究。本文选取砖木民房为研究对象,基于震害资料和已有研究成果,建立震害影响因子与震害指数的对应关系,应用模糊综合评价方法给出砖木民房的震害预测模型。

1 模糊综合评价模型理论^[6]

模糊综合评价方法是一种基于模糊数学的方法,该方法应用隶属度理论将单因素定性评价转化为定量评价,并对单因素评价结果加权求和,取得综合评价结果。在实际工作中对一个事物做出评价时,常常涉及多个因素或多个指标,模糊综合评价方法对此类问题可以提供较为理想的解决方法。

设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为 n 种因素(或指标), $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为 m 种评价,综合评价结果为 $\tilde{B} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$, 其中 $b_j (1, 2, \dots, m)$ 表示 U 上的模糊集 $\tilde{B}$ 对 v_j 的隶属度。具体步骤如下:

第一步:建立评价事物合理的影响因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$;

第二步:评价集(评判集、决断集) $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$;

第三步:单因素评判,根据单因素评判结果建立

单因素评判矩阵 R : $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$, 式中

r_{ij} 为影响因素 u_i 对评语集 v_j 的隶属度。

第四步:综合评判,求得权重 $A^T = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, 通过某种类型的合成运算即可得出综合评判结果 $\tilde{B}$:

$$\tilde{B} = A^T \circ R =$$

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (1)$$

式(1)中“ $\circ$ ”表示某种合成运算。一般有4种不同的模糊综合计算模型,即主因素决定型、主因素突出型、不均衡平均型和加权平均模型。

2 砖木民房震害预测

2.1 震害等级及震害预测评语集

对建筑物进行震害预测和震害评估中,通常划分为5个震害等级:基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌。对砖木民房的震害等级划分如下:

(1) 基本完好:房屋承重砖砌墙体完好,屋顶系统和附属构件基本完好;

(2) 轻微破坏:房屋承重砖砌墙体轻微裂缝,屋顶系统瓦片错动,少量掉瓦,附属构件存在明显裂缝;

(3) 中等破坏:房屋承重砖砌墙体裂缝增多,且延伸,屋顶系统瓦片震害加剧,波浪形屋面,瓦片局部或大面积滑脱或局部小面积坍塌;

(4) 严重破坏:房屋承重砖砌墙体严重裂缝,局部开裂,出现通缝,墙体倾斜,屋顶系统震害严重,瓦片大面积滑脱,局部坍塌;

(5) 倒塌:墙体部分或整体严重倒塌,屋顶系统部分或整体坍塌。

震害预测和评估中震害本身是模糊事件,如将震害描述为“轻微破坏”和“中等破坏”,它们之间没有明确的边界,判定上存在很大的模糊性。基于模糊综合评价法的震害预测研究方法将预测结果看成是论域上的概率性事件,对处理这种模糊事件具有很好的合理性。本文将震害指数论域 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} = \{0, 0.1, \dots, 1\}$ 作为震害预测评语集,震害等级可视为 V 上的模糊子集

$$\begin{aligned} \tilde{O}_1 &= \text{“基本完好”} = (1, 0.7, 0.2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \\ \tilde{O}_2 &= \text{“轻微破坏”} = (0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0, 0, 0, 0, 0) \\ \tilde{O}_3 &= \text{“中等破坏”} = (0, 0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0, 0, 0) \\ \tilde{O}_4 &= \text{“严重破坏”} = (0, 0, 0, 0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0) \\ \tilde{O}_5 &= \text{“倒塌”} = (0, 0, 0, 0, 0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 震害影响因子及单因素预测结果

在选取震害影响因子时,应考虑以下方面:(1)影响因子能反应地震作用或建筑物抗震性能;(2)影响因子的物理概念明确,易于定性或定量分析评价;(3)基于震害资料,可以建立所选取影响因子与震害等级的关系。对于砖木房屋,通过分析其抗震性能

影响因素和震害特征^[8-11],选取以下5个震害影响因素:

(1) 地震烈度

地震烈度是地震对地表及工程建筑物影响的强弱程度。地震发生后,烈度评定主要根据建筑物破坏的程度和地表面变化的情况进行评定。因此,地震烈度可以直接反应房屋的震害程度。通过统计整理大量砖木房屋的历史震害资料(详见文献[12]),得出Ⅶ~Ⅸ度区的砖木房屋地震破坏矩阵,见表1。由此砖木民房与烈度可建立如表2所示模糊对应关系。

表1 砖木房屋地震破坏矩阵(单位:%)

烈度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
Ⅸ度	0	7	30	46	17
Ⅷ度	10	27	40	18	5
Ⅶ度	27.5	39	24.5	9	0

表2 地震烈度与震害等级间模糊关系

烈度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
震害等级	基本完好~ 中等破坏	轻微破坏~ 中等破坏	中等破坏~ 严重破坏

根据式(2)和表2中震害指数、震害等级和烈度的关系,烈度因子震害预测在震害指数论域 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} = \{0, 0.1, \dots, 1\}$ 的模糊集合如表3所示。

(2) 墙体抗震强度系数

墙体抗震强度系数是墙体水平截面抗剪力与地震作用剪力比值随墙体高度变化的均值,见式(3)。墙体抗震强度系数大小反应墙体的抗震强度好坏,

表4 K值与震害等级间模糊关系

震害	基本完好	基本完好~轻微破坏	轻微破坏~中等破坏	中等破坏~严重破坏	严重破坏~倒塌
K值	≥ 2.5	1.5~2.5	1.05~1.5	0.8~1.05	≤ 0.8

根据式(2)和表4中震害指数、震害等级和K值的关系,K值因子的震害预测在震害指数论域V

表5 K值震害预测结果

K值	K值对论域V的模糊集
≥ 2.5	(1, 0.7, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)
1.5~2.5	(0.7, 1, 0.7, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)
1.05~1.5	(0.0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0.0, 0.0)
0.8~1.05	(0.0, 0.0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0.0)
≤ 0.8	(0.0, 0.0, 0.0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0.0)

表6 屋顶系统与震害等级间模糊关系

屋顶系统评语	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
梁、檩、墙连接措施完善	基本完好	基本完好	轻微破坏
梁、檩、墙连接措施一般	基本完好	轻微破坏~中等破坏	中等破坏
梁、檩、墙连接措施较差	轻微破坏~中等破坏	中等破坏~严重破坏	严重破坏~倒塌

根据式(2)和表6中震害指数、震害等级和屋顶

表3 地震烈度震害预测结果

烈度	烈度因子对论域V的模糊集
Ⅶ度	(0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0)
Ⅷ度	(0.0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0.0, 0.0)
Ⅸ度	(0.0, 0.0, 0.2, 0.7, 1, 0.7, 0.2, 0.0)

是砖房震害预测的重要因子。文献[13-15]中提出了多层砖房的抗震强度系数,应用唐山地震中多层砖房的震害资料,研究了抗震强度系数与震害的关系,并将其应用于多层砖房的震害预测,具有较好的可靠性。

$$K = \frac{\int_0^{h_0} k(h) dh}{h_0} = \alpha \cdot \frac{\int_0^{h_0} F(h)/V(h) dh}{h_0} \quad (3)$$

式(3)中: $F(h)$ 为墙体 h 高度截面的墙体抗剪力,砂浆砌筑墙体受剪承载力按文献[16]的受剪构件最大承载力计算;泥浆砌筑墙体抗剪力取 h 高截面以上房屋重力的0.5倍;另含圈梁构造柱墙体抗剪力增大1.3倍。 $V(h)$ 为墙体 h 高度截面处的地震剪力,计算按文献[17]的底部剪力法; α 为调整系数,无圈梁构造柱时取1,有圈梁构造柱时取1.3; h 为房屋墙体高度,单位:m; h_0 为房屋墙体总高,取纵墙高度,单位:m。

王兰民等^[18]对主要类型的民房进行了抗震性能评价研究,分别计算了240个砖墙、370个砖墙的单层砖房和其他类型民房的安全系数 K 值,并结合震害资料,总结了 K 值与震害等级的模糊关系,见表4。

的模糊集合见表5。

(3) 屋顶系统

屋顶系统是屋顶与承重墙体之间的连接性能,主要考虑梁、檩和墙体间的连接措施是否完善。该项指标是造成梁檩与墙体滑脱、屋顶坍塌、塌陷变形、落瓦等震害的主要原因,基于震害资料统计(详见文献[12]),建立Ⅶ度~Ⅸ度时屋顶系统定性评语与震害等级间的模糊关系,见表6。

系统的关系,屋顶系统因子在震害指数论域V的模

糊集合见表7。

表7 屋顶系统震害预测结果

屋顶系统抗震性能	烈度	屋顶系统对论域V的模糊集
梁、檩、墙 连接措施完善	Ⅶ度	(1,0.7,0.2,0,0,0,0,0,0,0)
	Ⅷ度	(1,0.7,0.2,0,0,0,0,0,0,0)
	Ⅸ度	(0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0,0,0)
梁、檩、墙 连接措施一般	Ⅶ度	(1,0.7,0.2,0,0,0,0,0,0,0)
	Ⅷ度	(0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0,0)
	Ⅸ度	(0,0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0)
梁、檩、墙 连接措施较差	Ⅶ度	(0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0,0)
	Ⅷ度	(0,0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0)
	Ⅸ度	(0,0,0,0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0)

表8 质量状况与震害等级间模糊关系

质量状况	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
结构完好的房屋(使用少于30年)或新建房屋	基本完好	基本完好~轻微破坏	轻微破坏
主体结构损坏的房屋或者老旧房屋(使用多于30年)	轻微破坏~中等破坏	中等破坏~严重破坏	严重破坏~倒塌

表9 质量状况震害预测结果

质量状况	烈度	质量状况对论域V的模糊集
结构完好的房屋 (使用少于30年) 或新建房屋	Ⅶ度	(1,0.7,0.2,0,0,0,0,0,0,0)
	Ⅷ度	(0.7,1,0.7,0.2,0,0,0,0,0,0)
	Ⅸ度	(0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0,0,0)
主体结构损坏的 房屋或者老旧房屋 (使用多于30年)	Ⅶ度	(0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0,0)
	Ⅷ度	(0,0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0)
	Ⅸ度	(0,0,0,0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0)

(5) 门窗间墙宽

门窗间墙宽是门窗间墙体和门窗洞口至墙体端部墙体长度的平均值(单位:m)。门窗间墙体过窄时,地震作用下该部位易先于其它部位破坏,造成房屋破坏,是抗震的薄弱部位。农村砖木民房由于门窗间墙体过窄而造成的房屋破坏较为常见,是震害预测中需要考虑的因子。基于大量的震害资料统计(详见文献[12]),给出Ⅶ度~Ⅸ度时门窗间墙宽与震害等级的模糊关系见表10。

表10 门窗间墙宽与震害等级间模糊关系

烈度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
Ⅶ度	大于0.625	0.375~0.625	小于0.375	无	无
Ⅷ度	大于1.0	0.7~1.0	0.5~0.7	小于0.5	无
Ⅸ度	大于1.3	1.0~1.3	0.7~1.0	0.4~0.7	小于0.4

根据式(2)和表10中震害指数、震害等级和门窗间墙宽的关系,门窗间墙宽在震害指数论域V的模糊集合见表11。

表11 门窗间墙宽震害预测结果

Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度	门窗间墙宽对论域V的模糊集
大于0.625	大于1.0	大于1.3	(1,0.7,0.2,0,0,0,0,0,0,0)
0.375~0.625	0.7~1.0	1.0~1.3	(0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0,0,0)
小于0.375	0.5~0.7	0.7~1.0	(0,0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0,0,0)
/	小于0.5	0.4~0.7	(0,0,0,0,0.2,0.7,1,0.7,0.2,0)
/	/	小于0.4	(0,0,0,0,0,0,0.2,0.7,1,0.7,0.2)

2.3 权重值的确定方法

(4) 质量状况

质量状况是指房屋的结构完好性与新旧程度,它反应了房屋抗震能力随使用时间增加而降低的性质。显然,结构完好新房相对老旧民房具有相对较好的抗震性能。基于震害资料的统计分析和已有研究(详见文献[12]),建立质量状况评语与震害等级之间的模糊关系见表8。

根据式(2)和表8中震害指数、震害等级和质量状况的关系,屋顶系统因子在震害指数论域V的模糊集合见表9。

权重值的大小反应了各个因素在综合评价中所起作用的大小,直接影响到综合决策的结果,对模糊综合评价决策结果至关重要。层次分析法是一种确定权重值的有效方法,但它确定权重的过程中没有考虑单因素变化对决策结果的影响。但是在震害预测中,单因素的变化对震害程度的影响较大,这里采用层次分析法^[6]初步确定权重值,并根据震害影响因子的实际情况进行调整。首先,应用层次分析法求得权重向量 $\alpha^T = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$;然后根据各影响因子的实际情况,按照影响因子性能越差则权重越大的原则,应用层次分析法求得权重向量 $\beta^T = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$;最后,求得最终权重向量 $A^T = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$,其中, $\alpha_i = \frac{\alpha_i \beta_i}{\alpha^T \cdot \beta^T}$ 。如果各影响因子的性能均一,则 $A^T = \alpha^T$ 。

2.4 算例

为了能有效验证该方法的合理性,算例选用《甘肃省村镇抗震农宅设计图集》Ⅷ度抗震设防砖木民房。房屋平面两间,开间3.3m,进深4.2m,檐口高3.0m,门高2.5m,墙体砌筑砂浆M5,圈梁构造柱,240墙体,构件连接措施良好。

Ⅷ度区,对该房屋进行震害预测如下:首先分析计算评价震害影响因子求得:Ⅷ度、 $K=1.43$ 、梁檩墙连接措施完善、新建房屋结构完好、门窗间墙宽0.98m;然后,查表3、表5、表7、表9、表11中的单因素震害预测结果,得单因素震害预测矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

然后,求得权重向量 $A^T = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) =$ 加权平均模型计算:

$(0.10, 0.57, 0.21, 0.06, 0.06)$;最后,按式(1)进行

$$\begin{aligned} \tilde{B} = A^T \circ R &= (0.10, 0.57, 0.21, 0.06, 0.06) \circ \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= (0.26, 0.38, 0.61, 0.72, 0.48, 0.13, 0, 0, 0, 0, 0) \end{aligned}$$

则Ⅷ度时,该房屋的震害预测结果可描述为

$$\tilde{B} = \frac{0.26}{0} + \frac{0.38}{0.1} + \frac{0.61}{0.2} + \frac{0.72}{0.3} + \frac{0.48}{0.4} + \frac{0}{0.5} + \frac{0}{0.6} + \frac{0}{0.7} + \frac{0}{0.8} + \frac{0}{0.9} + \frac{0}{1.0}$$

按照上述步骤,对该房屋在Ⅶ度区、Ⅸ度区分别进行震害预测,结果如下:

Ⅶ度区,该房屋震害预测结果可描述为

$$\tilde{B} = \frac{0.75}{0} + \frac{0.87}{0.1} + \frac{0.57}{0.2} + \frac{0.18}{0.3} + \frac{0.02}{0.4} + \frac{0}{0.5} + \frac{0}{0.6} + \frac{0}{0.7} + \frac{0}{0.8} + \frac{0}{0.9} + \frac{0}{1.0}$$

Ⅸ度区,该房屋震害预测结果可描述为

$$\tilde{B} = \frac{0.05}{0} + \frac{0.19}{0.1} + \frac{0.28}{0.2} + \frac{0.37}{0.3} + \frac{0.58}{0.4} + \frac{0.71}{0.5} + \frac{0.48}{0.6} + \frac{0.13}{0.7} + \frac{0}{0.8} + \frac{0}{0.9} + \frac{0}{1.0}$$

上述震害预测结果表达式中,“——”和“+”是一种记号,无符号意义,“——”下面是震害指数,上面是对应震害指数的隶属度。

根据最大隶属度原则,该Ⅷ度抗震设防房屋Ⅶ度区的震害指数为0.1,Ⅷ度区的震害为0.3,Ⅸ度区的震害指数为0.5。该预测结果很好地反应了Ⅷ度抗震设防房屋的抗震能力,取得较理想的结果。

3 结语

算例初步验证该震害预测模型具有较理想的效果。但是,农村砖木民房的震害预测研究开展较少,震害资料统计缺乏系统性,部分砖木房屋震害资料来源于文献,砖木房屋结构类型存在的区域和年代差异,可能造成震害影响因子与震害等级间模糊关系的不准确性。另外权重值的确定中存在较大的主观性。下一步将通过补充砖木房屋震害考察资料、增加震害实例验证调整、实现软件编程界面化以增加方法的可靠度和实用性。

致谢:本文得到林学文、石玉成、莫庸的审阅指导,特此致谢!

【参考文献】

- [1] 马尔曼,石玉成,高晓明,等. 2003年民乐—山丹6.1、5.8级地震灾害损失评估[J]. 西北地震学报,2007,29(1):64-68.
- [2] 石玉成,卢玉霞. 汶川8.0级地震甘肃灾区震害特点及恢复重建对策[J]. 西北地震学报,2009,31(1):1-7.
- [3] 赵桂峰,马玉宏. 建筑结构震害预测研究进展[J]. 广州大学学报,2005,4(5):441-447.

- [4] 崔玉红,邱虎,聂永安,等. 国内外单体建筑物震害预测方法评述[J]. 地震研究,2001,24(2):175-179.
- [5] 姜淑珍. 砖砌体房屋震害预测方法[A]//防震减灾工程研究与进展——全国首届防震减灾工程学术研讨会论文集[C]. 2004,62-65.
- [6] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2008.
- [7] 刘锡荟,王孟玫,汪培庄. 模糊烈度[J]. 地震工程与工程振动,1983,3(3):62-75.
- [8] 刘玮,吴志坚,马宏旺,等. 汶川8.0级地震甘肃陇南地区建筑震害调查[J]. 西北地震学报,2010,32(2):179-185.
- [9] 武玉柱. 山西中部地区农村民居震害特征及抗震对策[J]. 山西地震,2006,(2):12-15.
- [10] 马生龙. 青海农村平房住宅的抗震问题浅议[J]. 工程抗震,1995,(1):28-30.
- [11] 张启福,兰青龙,孟雁英. 河北张北6.2级地震中农村房屋破坏特征分析[J]. 山西地震,1999,(2):36-38.
- [12] 王强. 砖木结构房屋抗震性能评价方法研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所,2009.
- [13] 杨玉成,杨柳,高云学,等. 唐山地震多层砖房震害与强度的关系[J]. 地震工程与工程振动,1981,1(1):21-33.
- [14] 杨玉成,杨柳,高云学,等. 现有多层砖房震害预测的方法及其可靠度[J]. 地震工程与工程振动,1982,2(3):75-86.
- [15] 蓝贵禄,杨玉成. 砖房的震害经验及其应用[J]. 地震工程与工程振动,1990,10(4):91-100.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB 50003—2001 砌体结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [17] 龚思礼. 建筑抗震设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [18] 王兰民,林学文. 农村民房抗震理论与技术[M]. 兰州:甘肃省科学技术出版社,2006.