

张婧, 王东, 郭志学, 等. 基于模糊数学理论的砖混建筑泥石流冲击破坏评价方法[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 127-130.
[Zhang Jing, Wang Dong, Guo Zhixue, et al. Quantitative estimation of the damage of brick and concrete building impacted by debris flow based on Fuzzy Mathematics Theory [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 127-130.]

基于模糊数学理论的砖混建筑泥石流 冲击破坏评价方法^{*}

张 婧^{1,2}, 王 东^{2,3}, 郭志学², 钱 撼^{2,4}

(1. 西华大学 能源与动力工程学院, 四川 成都 610039; 2. 四川大学 水力学及山区河流开发
保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610043;
4. 成都市市政工程设计研究院, 四川 成都 610015)

摘 要: 易损度曲线是泥石流易损度评估的重要方法之一, 但一直缺乏相应的承灾体泥石流冲击破坏的损失等级标准, 定量化评估多采用直接赋值的方法。以西南地震区常用建筑形式——砖混建筑为研究对象, 通过参考其他行业的损坏标准, 结合泥石流冲击荷载实际情况, 确定了砖混建筑受力墙体损坏等级标准。在此基础上, 建立了基于模糊数学理论的砖混建筑泥石流冲击破坏评价方法, 通过单项评判、权重计算和综合评判三个步骤, 可以进行易损度计算。通过实例应用研究的验证, 该方法较传统的直接赋值法定量化程度更高, 能够避免指标在阈值附近的不合理现象。

关键词: 模糊数学; 泥石流; 冲击; 破坏; 西南地区; 砖混建筑; 易损度

中图分类号: P642.22; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)03-0127-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.03.024

近年来由于汶川 8.0 级地震次生地质灾害频发, 尤其是特大山洪泥石流灾害的暴发频率和规模提升, 所以泥石流易损度研究得到了越来越多的关注。根据联合国救灾组织^[1]和国际地质科学联合会^[2]等国际机构报告, 易损度是关于承灾体属性和灾害强度的函数。灾害强度和其对应条件下的承灾体损毁状况可以用一个有限的矩阵甚至函数或曲线来表示。但是目前在地质灾害范围内, 关于易损度曲线的成果大多是地震引发的建筑破坏^[3-4], 对于泥石流灾害的情况只有国外有少量的调查研究和统计分析成果^[5-6], 国内则一般采用多指标综合判断和价值核算的方法估算承灾区域易损度^[7-8]。造成该领域研究成果较少的主要原因为: ①泥石流暴发频率低; ②泥石流灾情调查不及时; ③泥石流冲击破坏建筑破坏的标准缺失。因此, 建立受泥石流冲击建筑破坏标准, 开展相

应的评价方法研究是进行系统性泥石流易损度曲线研究的当务之急。

1 砖混建筑破坏标准

建筑破坏标准的好坏直接影响对建筑损毁状况判断的正确与否, 因此破坏标准要能够较好地反映建筑在泥石流冲击下的破坏特征。但是材料、结构形式、尺寸等属性不同的承灾体, 其受力情况和破坏形态都有一定差异。砖混结构是西南山区普遍采用的房屋建筑型式, 受力墙体的破坏是造成结构坍塌的直接原因。试验研究已验证: 在泥石流正面冲击砖混建筑墙体的情况下, 受力墙在均布泥石流冲击下动静荷载的破坏形态相似, 为平面外受弯破坏^[9], 因此裂缝和倾斜度是考量破坏程度的重要指标。参考《建筑物、水体、铁路

* 收稿日期: 2014-12-01 修回日期: 2015-01-17

基金项目: 四川大学水力学国家重点实验室开放基金(SKHL1312); 国家自然科学基金青年基金(51409224); 西华大学重点科研基金项目(z1320404)

作者简介: 张婧(1986-), 女, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 主要从事泥石流风险分析和水力学及河流动力学研究。

E-mail: phyllis_zj@yeah.net

通讯作者: 钱撼(1989-), 男, 江西樟树人, 硕士, 助理工程师, 主要从事泥石流易损度研究和河道水沙输移规律研究。

E-mail: qianhan555@126.com

表 1 泥石流冲击砖混建筑受力墙体损坏分级

损坏等级	最大裂缝 宽度/mm	多条裂缝 总面积/mm ²	最大裂缝 长度/mm	倾斜度/ (mm/m)	损坏分类	结构处理
I	0~0.2	0~500	0~750	0~1	轻微损坏	简单维修
II	0.2~0.4	500~1 000	750~1 500	1~1.5	轻度损坏	小修
III	0.4~0.7	1 000~2 000	1 500~2 250	1.5~2	中度损坏	中修
IV	>0.7	2 000~3 500	2 250~3 000	2~2.5	严重损坏	大修或拆建

墙体出现严重交叉裂缝、上下贯通裂缝,以及墙体严重外鼓、歪斜

及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》^[10]、《危险房屋鉴定标准》^[11]和《建筑地震破坏等级划分标准》^[12]对于砖混建筑破坏的评判标准,再结合房屋受到山洪泥石流冲击后的实际损毁状况,建立泥石流正面均布冲击荷载作用下砖混建筑受力墙损坏程度分级标准(表1)。表1中根据裂缝和倾斜度将损坏程度分为四级——轻微损坏、轻度损坏、中度损坏和严重损坏。

2 破坏评价方法

根据表1中各级阈值,可初步对受灾体进行简单的判定,但注意结论是定性的,一般采用赋值的方法实现定量化。直接给等级赋值,将阈值两边截然分为不同等级是很不切合实际的,对于接近阈值的损坏情况会产生较大的判断误差。例如:最大裂缝长度 $c \leq 750$ mm时,建筑物损坏等级为I级; $c > 750$ 时,则非I级。假如实际情况中 $c = 749$ mm时,则算I级,而实际情况中 $c = 751$ mm时,则算II级。事实上,749 mm与751 mm差距很小,对建筑物很难产生明显不同的影响。

利用上文确定的分级标准,采用模糊数学理论建立适合泥石流冲击破坏情况下的砖混建筑损坏程度评价体系,为合理确定建筑物破坏等级,顺利指导建筑物的易损度曲线研究提供重要基础。模糊矩阵复合运算的基本步骤是:首先对最大裂缝宽度、多条裂缝总面积、最大裂缝长度和墙体倾斜度等指标进行单项评价;然后,考虑各种变形对建筑物的不同影响,即对变形的贡献大小,配以适当权数;最后,根据单项评价和权重的结果对建筑物保护等级进行综合的评价。

2.1 单指标评价

令 U 为建筑物破坏的影响指标集合 $U = \{a, b, c, d\}$,取 T 为破坏等级集合, $T = \{I, II, III, IV\}$,则指标论域和等级论域之间的模糊关系可用评价矩阵 R 来表示。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $r_{mn} = \mu_{T_n}(U_m)$ ($0 \leq r_{mn} \leq 1, 1 \leq m \leq 4, 1 \leq n \leq 4$),表示从指标 U_m 着眼该事物能被评 T_n 的

隶属程度,则 $R_m = (r_{m1}, r_{m2}, r_{m3}, r_{m4})$ 为 U_m 的单指标评判,是 T 的模糊子集。要确定 R 矩阵,首先应建立隶属函数。参照李映红^[13]提出的方法,在进行等级隶属度的模糊确定时,采用相邻阈值的中间值作为评判参数。各单项指标的隶属函数有式(2)~(5)所示的统一形式。

$$\mu_I(U_m) = \begin{cases} 1, & U_m \leq k_{m1}; \\ (k_{m2} - U_m)/(k_{m2} - k_{m1}), & k_{m1} < U_m \leq k_{m2}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{II}(U_m) = \begin{cases} (U_m - k_{m1})/(k_{m2} - k_{m1}), & k_{m1} < U_m \leq k_{m2}; \\ (k_{m3} - U_m)/(k_{m3} - k_{m2}), & k_{m2} < U_m \leq k_{m3}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{III}(U_m) = \begin{cases} (U_m - k_{m2})/(k_{m3} - k_{m2}), & k_{m2} < U_m \leq k_{m3}; \\ (k_{m4} - U_m)/(k_{m4} - k_{m3}), & k_{m3} < U_m \leq k_{m4}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{IV}(U_m) = \begin{cases} (U_m - k_{m3})/(k_{m4} - k_{m3}), & k_{m3} < U_m \leq k_{m4}; \\ 1, & U_m > k_{m4}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (5)$$

式中:矩阵 $K_m = (k_{m1}, k_{m2}, k_{m3}, k_{m4})$ 表示单指标隶属度的评判参数矩阵,因此有最大裂缝宽度 $K_1 = (0.1, 0.3, 0.55, 0.8)$;多条裂缝总面积 $K_2 = (250, 750, 1500, 2750)$;最大裂缝长度 $K_3 = (375, 1125, 1875, 2625)$;墙体倾斜度 $K_4 = (0.5, 1.25, 1.75, 2.25)$ 。由此,可以通过式(2)~(5)计算矩阵 R 。

2.2 权重计算

在通过多项指标对建筑物状况进行等级评价的过程中,各单项指标对评价结果的贡献是不同的,因此在最终计算中要给予不同的权重数来体现。笔者采用超限加权的方法计算权重数,同时归一化处理数据。指标权重数的计算如式(6)所示。

$$W_{U_m} = \frac{P_{(U_m)}/S_{U_m}}{\sum_{m=1}^4 (P_{U_m}/S_{U_m})}, \quad (6)$$

式中: P_{U_m} 为指标的实测值, S_{U_m} 为指标I~III分级标准值的平均数。例如墙体最大裂缝宽度的分级标准值为0.2 mm、0.4 mm和0.7 mm,则 $S_a = (0.2 + 0.4 + 0.7)/3 = 0.433$ mm。同理可以得到, $S_b = 1167$ mm², $S_c = 1500$ mm, $S_d = 1.5$ mm。

2.3 综合评价

令矩阵 $A = [W_a, W_b, W_c, W_d]$, 将权重矩阵 A 和评价矩阵 R 相乘 $A \cdot R$ 进行复合运算, 计算得到一个 1×4 阶的矩阵 $[x_1, x_2, x_3, x_4]$, 其中 $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1$ 。该矩阵各元素表示单项指标对应各等级的隶属度, 即 I、II、III 和 IV 级破坏隶属度分别为 x_1, x_2, x_3, x_4 。

参照《建筑地震破坏等级划分标准》^[14] 中的有关规定, 并考虑泥石流冲击建筑破坏的实际情况, 确定砖混建筑受力墙破坏等级的损失程度百分比 l_n 分别如下: ① 轻微损坏为 $0 \sim 10\%$, 这里取 10% ; ② 轻度损坏为 $10\% \sim 30\%$, 取 $l_2 = 30\%$; ③ 中等破坏为 $30\% \sim 60\%$, 取 $l_3 = 60\%$; ④ 严重破坏或倒塌为 $60\% \sim 100\%$, 取 $l_4 = 100\%$ 。则综合损失度为:

$$V = \sum_{n=1}^4 (l_n \cdot x_n) \quad (7)$$

3 实例应用

3.1 试验概况

为了获取单层砖混建筑泥石流易损度曲线的所需数据, 笔者开展了原型比尺的受力墙体撞击破坏试验研究。试验中受力墙体正面迎接泥石流均布冲击荷载, 假设墙体在水平荷载下的工作情况为两端铰支, 而加载球体与墙体的撞击是弹性碰撞。

3.2 试验过程

试验采用摆球撞击来模拟泥石流冲击荷载, 如图 1 所示, 通过动力加载系统将铁球拉到操作平台上, 然后关闭系统, 铁球自由摆落, 撞击在墙体前的钢板上。通过钢板及其与墙体之间的垫层, 集中荷载可以较均匀地分散到垫层所覆盖的墙体其他部位。图右边的钢材桁架根据试验需要, 设置 3 m 、 4 m 、 5 m 高的操作平台, 同一摆球从不同高度落下, 撞击墙体前可获得不同的动量。铁链可以根据试验需要收缩长短, 钢板可以根据试验设计改变高度, 用于模拟不同的泥深。试验布置现场图如图 2 所示。试验墙体采用《砌体结构设计规范》^[15] 进行标准尺寸设计和混凝土养护, 底部设钢筋混凝土基础梁。

墙体后侧安装有冲击力传感器 (LSZ-F04 轮辐式称重传感器) 和冲击力测量仪表 (OT-F5H 高速峰值测力仪表), 测量撞击过程中产生的最大冲击力。墙体顶端安装有位移计, 测量墙体的最大动位移和静位移。采用裂缝对比尺测量墙体裂缝的

宽度, 用相机记录整个试验过程。A 组试验共进行三组分为 A1, A2 和 A3, 试验条件见表 2, 其中动量的计算未考虑摆锤运动中的阻力引起的损失。

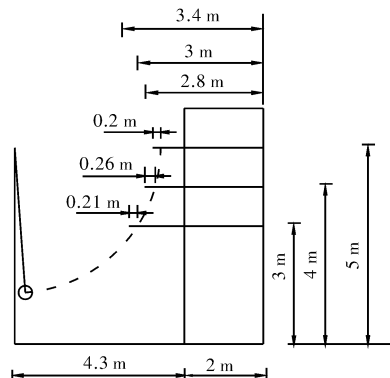


图1 动力加载系统示意图

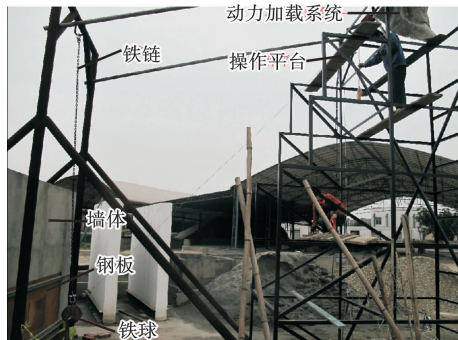


图2 试验布置现场图

表2 A组试验条件一览表

序号	自由落体高度/m	钢板高度/m	球体重/km	动量/(kg·m/s)
A1	3	1	49	329.0
A2	3	1	86	577.4
A3	5	1	86	789.5

3.3 破坏评价

对比 A1、A2 和 A3 工况, 墙体的损坏逐渐加重。A1 工况中实测作用到墙体上的最大冲击力为 39.0 kN , 墙体仅产生轻微裂缝, 受到损失最小; A2 工况中实测作用到墙体上的最大冲击力为 45.2 kN , 墙体在分力钢板范围内出现接近贯穿的横向裂缝, 裂缝发育范围较 A1 工况有所扩展; A3 工况中实测作用到墙体上的最大冲击力为 102.3 kN , 墙体产生大范围裂缝, 并出现竖向及横向贯穿裂缝, 墙体受损严重。测量得到的墙体损坏指标数据整理如表 3 所示。

表3 各工况损坏指标统计表

工况	最大裂缝宽度/mm	多条裂缝总面积/mm ²	最大裂缝长度/mm	倾向/(mm/m)	破坏现象	易损度(模糊数学法)/%	易损度(直接赋值法)/%
A1	0.2	45.1	273	0.89	局部微小裂缝	18.4	10
A2	0.4	611.2	2 022	1.41	横向准贯穿裂缝	48.2	30~60
A3	1	2 944.3	3 267	5.00	竖、横向贯穿裂缝	100.0	100.0

根据上文建立的基于模糊数学理论的砖混建筑破坏评价方法, 逐个利用表 3 中的数据计算各工况的损失度。以 A1 工况为例, 根据式(2)~(5)可以计算出 A1 工况下墙体破坏的隶属矩阵 R_{A1} 为:

$$R_{A1} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.48 & 0.52 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

再根据式(6) 计算权重矩阵 A , 计算如表 4 所示, 则权重矩阵 $A = [W_a, W_b, W_c, W_d] = [0.36, 0.03, 0.14, 0.47]$ 。

表 4 A1 工况模糊矩阵 A 的计算表

	U_m			
	a/mm	b/mm^2	c/mm	$d/(\text{mm}/\text{m})$
P_{U_m}	0.2	45.1	273	0.89
S_{U_m}	0.433	1167	1500	1.5
W_{U_m}	0.36	0.03	0.14	0.47

因此, 最终的评判矩阵为:

$$A \cdot R = [0.36 \quad 0.03 \quad 0.14 \quad 0.47] \cdot \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.48 & 0.52 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.58 \quad 0.42 \quad 0 \quad 0] \quad (9)$$

矩阵内各项元素对应于各项的隶属度, 即 I 级损坏的隶属度为 0.58, II 级损坏的隶属度为 0.42, III 级和 IV 级的隶属度都为 0。根据各个损坏级别的权重, 由式(7) 可得到 A1 工况的易损度 $V_{A1} = 18.4\%$ 。同理, 得到 A2 和 A3 工况的易损度分别为 48.2% 和 100.0%, 并添加于表 3 中。

假如根据指标的情况和表 1 直接赋值, 那么 A1 工况属于 I 级损坏, 易损度应为 10%; A2 工况的最大裂缝长度已进入 III 级损坏的范围, 其他指标接近 II 级损坏的阈值, 易损度应在 30%~60% 之间, 但具体数值难以确定; A3 工况属于 IV 级损坏, 易损度应为 100%。同样将结果添加在表 3 中。

比较分析可以看出, 两种方法得到的易损度结果范围基本一致, 然而基于模糊数学理论的评价方法能够充分考虑各指标数值超出阈值的幅度, 根据各级的隶属度, 综合得出具体数值。总的来说, 模糊数学评价方法得到的结果是比较合理、可靠的。

Quantitative Estimation of the Damage of Brick and Concrete Building Impacted by Debris Flow Based on Fuzzy Mathematics Theory

ZhangJing^{1,2}, Wang Dong^{2,3}, Guo Zhixue² and Qian Han^{2,4}

(1. School of Energy and Power Engineering Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Highway Planning Survey & Design Institute, Sichuan Communications Department, Chengdu 610041, China; 4. Chengdu Municipal Engineering Design And Research Institute, Chengdu 610015, China)

Abstract: Vulnerability curve is one of the most effective methods for the estimation of elements vulnerability in debris flow. Due to the lack of damage standards in debris flow, specific value assigned directly is most used in traditional quantitative estimation. Taking brick and concrete building as the study object, which was widely used in south west region of China, this paper confirmed the damage standard of the wall of brick and concrete building with reference of relevant damage standard files and the real condition of debris flow attack. Then, the quantitative estimation method based on Fuzzy Mathematics Theory was established. With three steps, firstly individual judgment, secondly weight calculation, and thirdly final estimation, the vulnerability can be obtained. The conclusions could be made via the example: the quantitative estimation established in this paper could provide more specific value and avoid unreasonable phenomenon around the critical value comparing with the traditional one.

Key words: Fuzzy Mathematics; debris flow; brick and concrete building; vulnerability

4 结论

参考已有砖混建筑破坏规范标准, 本文以最大裂缝宽度、长度、多条裂缝面积和倾斜度四个指标建立了受泥石流冲击荷载砖混建筑受力墙体损坏的标准分级, 为泥石流易损度研究提供重要参考。直接赋给数值得到的易损度经验色彩太浓, 受人为因素影响大, 对数值的切割过于机械化, 尤其在阈值附近会出现不合理现象。引入模糊数学理论, 建立了砖混建筑泥石流冲击破坏评价方法, 并通过砖混建筑泥石流冲击试验进行实例应用研究。实例研究表明, 基于模糊数学理论的泥石流冲击易损度评价方法的可操作性强, 通过四个指标的测量可以合理地进行易损度评价, 较传统的直接赋值法定量化程度更高。该结论为后续泥石流易损度曲线的研究打下重要的理论基础。

参考文献:

- [1] UNDRO. Mitigation natural disasters: phenomena, effects, and options [C]. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, 1991.
- [2] IUGS. Quantitative risk assessment for slopes and landslides-the state of the art [R]. IUGS, 1997.
- [3] 何玉林, 黎大虎, 范开红, 等. 四川省房屋建筑易损性研究 [J]. 中国地震, 2002, 18(1): 52-58.
- [4] 毕可为. 群体建筑的易损性和地震损失快速评估 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [5] Fuchs S, Heiss K, Hübl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment [J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 2007, 7: 495-506.
- [6] Akbas S O, Blahut J, Sterlacchini S. Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows [C]// Proceedings of Landslide Processes: From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modeling. Strasbourg, France, 2009: 229-233.
- [7] 张一凡. 西南山区城镇地质灾害易损性评价方法研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [8] 唐川, 张军, 周春花, 等. 城市泥石流易损性评价 [J]. 灾害学, 2005, 20(2): 11-17.
- [9] 张宇, 韦方强, 崔鹏. 砖混建筑在泥石流冲击作用下的破坏形态模拟 [J]. 自然灾害学报, 2005, 14(5): 61-67.
- [10] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程 [Z]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [11] 中华人民共和国建设部. JGJ 125-1999 危险房屋鉴定标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB/T 24335-2009 建筑地震破坏等级划分标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [13] 李映红. 关于砖石结构建筑物破坏划分方法的讨论 [J]. 矿山测量, 1993, 5(2): 39-42.
- [14] 中华人民共和国建设部. 建筑地震破坏等级划分标准 [Z]. 1990.
- [15] 中华人民共和国建设部. GB 5007-2011 砌体结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.