

赵真,郭红梅,张莹,等.基于遥感初判的建筑物震害 Fisher 判别法研究[J].地震工程学报,2024,46(6):1405-1414.DOI:10.20000/j.1000-0844.20221120001

ZHAO Zhen, GUO Hongmei, ZHANG Ying, et al. A Fisher discriminant method for seismic damage of buildings based on preliminary judgment from remote sensing[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1405-1414. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221120001

## 基于遥感初判的建筑物震害 Fisher 判别法研究

赵真<sup>1</sup>, 郭红梅<sup>1</sup>, 张莹<sup>1</sup>, 尹文刚<sup>2</sup>, 鲁长江<sup>1</sup>, 范开红<sup>1</sup>, 张翼<sup>1</sup>

(1. 四川省地震局, 四川成都 610041; 2. 武警警官学院, 四川成都 610041)

**摘要:** 破坏性地震发生后, 迅速准确地预测建筑物破坏程度, 对快速科学地开展地震应急指挥、救援力量部署等工作具有重大意义。针对现有建筑震害预测模型存在的评估结果粗糙、数据获取难度较高、计算工作量大、模型构建难度大、普适性不强等问题, 提出一种基于遥感初判的建筑物震害 Fisher 判别法。首先, 从地震强度和建筑物抗震能力两方面选取震级、震中距、场地条件及建筑物抗震能力 4 种震害作为判别因子; 然后, 基于判别分析理论, 构建建筑物震害 Fisher 判别模型; 最后, 以四川泸定县 6.0 级地震为例, 对文章提出方法进行验证。实验结果表明: 该方法的预测结果与实际震害基本一致, 准确率高达 80% 以上, 证明该方法具有较高的可靠性, 能较准确地对建筑物震害程度进行科学预测。

**关键词:** 遥感初判; 建筑物; 震害预测; Fisher 判别法; 泸定县地震

中图分类号: TU315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1405-10

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221120001

## A Fisher discriminant method for seismic damage of buildings based on preliminary judgment from remote sensing

ZHAO Zhen<sup>1</sup>, GUO Hongmei<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, YIN Wen'gang<sup>2</sup>,

LU Changjiang<sup>1</sup>, FAN Kaihong<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>

(1. Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Officers College of PAP, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** After a destructive earthquake, quickly and accurately predicting the damage degree of buildings is of great importance to quickly and scientifically carry out earthquake emergency command and rescue force deployment. Existing building seismic damage prediction models yield imprecise evaluation results, struggle with data acquisition, and require a large amount of computing power; therefore, they are difficult to construct and lack universality. To address these issues, this paper proposes a Fisher discriminant method for seismic damage of buildings based on preliminary judgment from remote sensing. First, four seismic damage factors, including magni-

收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 四川省重点研发项目(20ZDYF1085); 国家重点研发计划专题(2020YFA07106003-07); 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2019EEEEVL0102-04); 四川地震科技创新团队专项(201901)

第一作者简介: 赵真(1993-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地震灾害风险管理、评估方面的工作。E-mail: 827387315@qq.com。

通信作者: 郭红梅(1984-), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地震灾害风险评估研究。E-mail: 115453242@qq.com。

tude, epicentral distance, site condition, and seismic resistance of the building, were selected as the discriminant factors. Then, based on the discriminant analysis theory, the Fisher discriminant model of building damage was constructed. Finally, the method proposed in this paper was verified by taking the Luxian *M*6.0 earthquake as an example. The experimental results show that the prediction results of the proposed method closely align with the actual earthquake damage, with an accuracy rate of 80%, which proves that this method is highly accurate, reliable, and can accurately predict the earthquake damage degree of buildings.

**Keywords:** preliminary judgment from remote sensing; buildings; seismic damage prediction; Fisher discriminant method; Luxian earthquake

## 0 引言

历次地震灾害经验表明,导致人员伤亡和经济损失最重要的原因是建构筑物破坏及倒塌<sup>[1]</sup>。因此,科学合理地预测建筑物在地震作用下的破坏程度,并将其直观地展示出来,对震后快速了解灾区建筑物详细震害情况,准确定位灾区位置,进行救援力量科学部署等应急处置行为提供可靠的数据支持,从而有效减轻地震造成的损失<sup>[2-3]</sup>。

目前,国内外常用的建筑物震害预测模型主要有经验统计法<sup>[4-8]</sup>、基于力学计算的理论计算法<sup>[9-13]</sup>、半经验半统计法<sup>[14-17]</sup>。经验统计法是基于震害调查资料,运用统计和判别总结得出的震害影响因素与破坏程度之间的关系,从而进行建筑震害预测的方法。该方法直观、简单,便于理解和应用,但评估的结果是各类建筑物群体总体上的破坏情况,并不能反映建筑物破坏的空间分布。基于力学计算的理论计算法是运用地震动参数理论对预先经过结构简化的力学模型进行非线性分析的一种方法<sup>[18]</sup>,该方法可获得单体建筑物破坏详细情况。但在计算过程中,力学模型的构建及其参数的确定,需要单体建筑物详尽的结构性参数及大量实验的累积,前期需耗费大量的人力、物力及财力进行现场调查量测获取数据,后期数据提炼及计算工作量也很大。半经验半理论方法是在基于历史震害资料对同类事物统计分析的基础上,通过理论方法,用严格的数学方法处理各变量之间关系。该方法综合了经验法和理论法各自的优点,拓宽了其应用范围<sup>[19]</sup>。但模型的构建难度非常大,很难同时满足不同结构类型建筑物的要求,普适性差。因此,需探索一种既能充分利用已有的地震现场调查资料,又能够简洁高效地开展评估,且评估结果能准确反映建筑物破坏情况的方法。

Fisher 判别法是根据已有典型样本资料,基于

选取的判别影响因素提取指标统计值,对待测样本属性判别预测的一种统计分析方法<sup>[20-21]</sup>。该方法现已广泛用于人脸识别<sup>[22-23]</sup>、故障诊断<sup>[24-25]</sup>、煤矿工程<sup>[20-21,26]</sup>、水文地质<sup>[27]</sup>等领域,这一方法的优势在于对原始样本整体分布无特殊要求,且能全面考虑影响判别的各种因素,构造简单,预测精度也较高。基于此,本文将 Fisher 判别方法应用于建筑物震害预测,提出了一种建筑物快速震害预测方法。该方法通过归纳总结影响建筑物震害的主要因素,并选取了震级、震中距、场地条件及建筑物抗震能力 4 个震害因子作为判别因子,在此基础上构建了 Fisher 判别函数,建立了适用于不同结构类型建筑的快速便捷的建筑物震害预测方法。

## 1 建筑物震害影响因素分析

建筑物震害是指某一地区建筑物在遭受某一强度地震作用下造成的破坏情况,其震害等级是由多种因素共同决定的,科学地选取震害影响因素是准确评估建筑物震害等级的前提。从建筑物破坏的成因来看,可将其分成两方面:一是建筑物所在场地遭受地震作用的强度,与地震能量大小、工程场地条件等相关;二是建筑物抗震能力的强弱,受建筑结构类型、设防标准、是否加固、建造年代等诸多因素影响。因此,本文主要从这两方面来选择并确定建筑物震害影响因素。

### 1.1 地震强度

地震强度大小既可用震级来表示,其反映地震释放能量的多少,也可用烈度表示,反映地震影响和破坏的程度。它不仅与本次地震的释放能量(即震级)有关,而且和震源深度、距离震中的距离(震中距)、工程地质条件等因素有关。

#### 1.1.1 震级

地震震级是造成建筑物破坏的一个重要因素,

其大小取决于地震时所释放出的能量多少。释放的能量越大,其对应的震级越大,反之,则对应的震级越小。一般而言,地震震级越大,在同一位置的建筑物遭受的破坏程度也就越大。

### 1.1.2 震中距

距离是影响建筑物震害的另一个重要因素,震中距直接影响建筑物遭受地震作用的强度大小,距离震中近的和距离震中远的建筑物在地震中造成的破坏程度具有显著差异。

### 1.1.3 场地条件

通过对历史震害资料进行分析归纳可以发现:在不同的场地条件上,建筑物在遭受相同地震作用时的破坏程度是不同的<sup>[28]</sup>。通常来说,在软弱的地基上,弱性结构易遭到破坏而刚性结构不易受损;而对于坚硬基础而言,则恰恰相反。目前,场地分类主要是根据覆盖土层厚度和场地剪切波速(或场地土类型)两个指标综合确定的,采用的方法主要包括地形坡度法、地质地貌、谱比法等。本文选择 Wald 等<sup>[29]</sup>提出的地形坡度法,利用 DEM 数据提取坡度,然后根据地形坡度、 $v_{S30}$  和场地类型的对应关系(表1),对场地类型进行划分,从而得到场地数据。

表1 坡度范围与  $v_{S30}$  值范围对应表

Table 1 Correspondence between slope range and  $v_{S30}$  value range

场地分类	$v_{S30}$ / (m/s)	坡度 / (m/m)	
		构造活跃地区	稳定大陆地区
E	< 180	< $10^{-4}$	< $2 \times 10^{-5}$
D	[180, 240]	[ $10^{-4}$ , $2.2 \times 10^{-3}$ ]	[ $2.0 \times 10^{-5}$ , $2.0 \times 10^{-3}$ ]
	(240, 300]	( $2.2 \times 10^{-3}$ , $6.3 \times 10^{-3}$ ]	( $2.0 \times 10^{-3}$ , $4.0 \times 10^{-3}$ ]
	(300, 360]	( $6.3 \times 10^{-3}$ , 0.018]	( $4.0 \times 10^{-3}$ , $7.2 \times 10^{-3}$ ]
C	(360, 490]	(0.018, 0.050]	( $7.2 \times 10^{-3}$ , 0.013]
	(490, 620]	(0.050, 0.10]	(0.013, 0.018]
	(620, 760]	(0.10, 0.138]	(0.018, 0.025]
B	> 760	> 0.138	> 0.025

## 1.2 建筑物抗震能力

历史震害统计数据表明,同一地区建筑物在承受相同地震作用强度时,致使其出现不同破坏程度的原因是房屋本身抗震能力的差异。房屋抗震能力强弱受诸多因素影响,主要包括结构类型、设防标准、建造年代、建筑物用途、结构层数、材料强度、砌筑类型等等。这些因素对数据的详细程度要求高,实地调研工作量大,获取难度高,适用于小范围区域,且影响因素是否考虑齐全,数据间是否存在冗余等问题仍需考虑<sup>[30]</sup>。因此,为适用于各类建筑物,并考虑到数据的可获取性及完整性,尽可能选用最

少的因子来解释变量,综合分析下选择建筑物抗震能力这个单因素综合指标。

本文根据建筑物在遥感影像上的光谱特征、纹理特征、几何特征、空间位置特征等对建筑物抗震能力进行描述,并结合实地调研获取的区域房屋结构特点,建立区域房屋遥感影像解译标志,按照建筑物抗震能力良好、建筑物抗震能力一般及建筑物抗震能力较差三个等级,判别房屋的抗震性能。(1)建筑物抗震能力好指经过正规抗震设计的设防砖混、框架、框架-剪力墙及木结构房屋。在影像上表现为屋顶为平顶,色调均匀偏亮,平面呈方形、T形、Y形、十字形等,形状多规则且对称,单体面积大且伴随有较长阴影,单体呈点状分布,多个单体组合呈簇状或团状分布,多分布在市区、各城镇中心临街、临路位置。(2)建筑物抗震能力一般指未经过正规抗震设计的砖混结构房屋。在影像上表现为屋顶一般为平顶,色调不均匀且亮度偏暗,平面多为长方形、偶有L形或井字形,主要分布在老旧的城区、城乡接合部及农村部分道路旁边。(3)建筑物抗震能力较差指老旧的砖混(预制板)、砖木及土木结构房屋等。表现为屋顶多为人字坡顶,屋顶颜色多为深灰色或灰色,单体面积小且无阴影或阴影特征不明显,独立分布或零星分布在农村偏远地区,或房屋紧密相连无法区分边界,呈块状分布。

## 2 基于 Fisher 判别的建筑物震害预测方法

### 2.1 Fisher 判别法基本原理

Fisher 判别法由费歇尔于 1936 年提出,属于多元统计方法中判别分析方法的一种,根据训练样例的多个特征确定待测样本归属类别的一种监督分类方法<sup>[31-32]</sup>。其基本思想是通过寻求一个适当的投影方向,将高维特征空间数据投影到低维空间上<sup>[33-34]</sup>,根据同一类样本间离散度最小、不同类样本间离散度最大的原则构建判别分析函数,根据构建的判别函数,以确定待测样本归属类别的一种方法。

若假定样本类别为  $G_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 分别从各类别中随机抽取样品数为  $k_i$ , 判别函数为  $u(x) = a'x$ , 对于任意给定的一个样本  $x \in G_i$  的情况下, 样本均值  $E_i$ 、样本方差  $D_i$ 、组内距  $B_0$ 、组间距  $C_0$ 。计算如下所示:

$$E_i = E(y | G_i) = E(a'x | G_i) = a'u_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$D_i = D(y | G_i) = D(a'x | G_i) = a'v_i a, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$B_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^{k_i} (a'x_a^i - a'u_i)^2 = a' \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^{k_i} (x_a^i - u_i)(x_a^i - u_i)' \right] a = a'Ba \quad (3)$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^n k_i (a'u_i - a'u)^2 = a' \left[ \sum_{i=1}^n k_i (u_i - u)(u_i - u)' \right] a = a'Ca \quad (4)$$

式中： $u_i$  表示类别  $G_i$  的样本均值，记  $u_i = \frac{1}{k_i} \sum_{\alpha=1}^{k_i} x_a^i$ ； $v_i$  表示类别  $G_i$  的样本协方差； $u$  为总体均值，记  $u = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^{k_i} x_a^i$ ； $B$  为组内离差矩阵，记  $B = \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^{k_i} (x_a^i - u_i)(x_a^i - u_i)'$ ； $C$  为组间离差矩阵，记  $C = \sum_{i=1}^n k_i (u_i - u)(u_i - u)'$ 。

为达到较好的分类效果，应尽可能使组内样本投影点分布集中、间距小，组间样本投影点分布稀疏、间隔距离远，即  $\lambda = \frac{C_0}{B_0} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i (a'u_i - a'u)^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^{k_i} (a'x_a^i - a'u_i)^2}$  达到最大。根据极值存在的必要条件，即对其求导  $\frac{\partial \lambda}{\partial a} = 0$ ，从而转换成求解方程  $|B - \lambda C| = 0$  的最大特征值，而  $a$  则对应最大特征值的特征向量，从而得到判别函数。建立判别函数后，计算待测样本的判别函数值，并与判别界值进行比较，进而判断所属类别。

$$\lambda = \frac{C_0}{B_0} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i (a'u_i - a'u)^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^{k_i} (a'x_a^i - a'u_i)^2}$$

达到最大。根据极值存在的必要条件，即对其求导  $\frac{\partial \lambda}{\partial a} = 0$ ，从而转换成求解方程  $|B - \lambda C| = 0$  的最大特征值，而  $a$  则对应最大特征值的特征向量，从而得到判别函数。建立判别函数后，计算待测样本的判别函数值，并与判别界值进行比较，进而判断所属类别。

## 2.2 建筑物震害 Fisher 判别模型

常用的建筑物震害预测方法是在选取历史震害案例的基础上，基于建筑物的震害影响因子，采用多元统计分析方法对未知建筑物破坏等级做出准确判断。其基本原理与 Fisher 判别法一致，因此，本文将 Fisher 判别法应用到建筑物震害预测中。首先，将选取的建筑物震害影响因子量化后作为震害特征；然后，根据建筑结构的 5 种破坏状态将样本归属类别划分成 5 类，即基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏及毁坏<sup>[35]</sup>；最后，基于获取的具有典型破坏特点的建筑物样本进行训练，从而构建建筑物震害 Fisher 判别模型(图 1)。

根据建筑物震害类别设 5 个母体类别为： $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ 、 $G_5$ ，并分别从各类别中随机抽取样品数

为  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ ，令  $k = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5$ ，则抽样的样品总数为  $k$ 。将上一节确定的建筑物震害影响因素，即建筑物抗震能力  $x_1$ 、场地类型  $x_2$ 、震中距  $x_3$  和震级  $x_4$  作为判别因子，则  $x_a^i = (x_1^i, x_2^i, x_3^i, x_4^i)$  表示第  $i$  个总体的第  $\alpha$  个样本的观测向量。根据式(1) ~ (4) 计算各类别样本均值  $E_i$ 、样本方差  $D_i$ 、组内距  $B_0$ 、组间距  $C_0$ ，进而求得判别函数，依据判别规则来判断待测样本的类别。

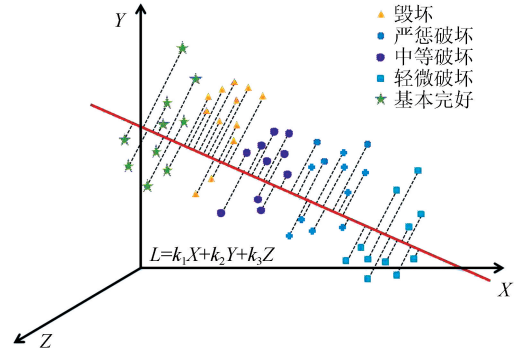


图 1 建筑物震害 Fisher 判别方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of Fisher discriminant method for seismic damage of buildings

## 2.3 判别效果检验

在判别函数构建完成后，还需要对其判别效果进行检验，从而验证建立的判别函数是否具有合理性且符合实际。通常采用回代的方式进行检验，并以误判率进行衡量<sup>[36]</sup>，即误判样本数量与样本总数之间的比值，具体计算如式(5)。如果计算得到的误判率越小，表明该方法判别效果越好，反之，则说明该方法判别效果差。

$$\beta = \frac{t}{k} \times 100\% \quad (5)$$

## 3 以四川泸定县 6.0 级地震为例

本文以 2021 年 9 月 16 日四川泸定县 6.0 级地震为例，此次地震的最高烈度为Ⅷ度，等震线长轴呈 NWW 走向，震害波及四川省 5 个县(市、区)，51 个乡镇(街道)；重庆市 1 个区，10 个乡镇(街道)。泸定县地震发生后，笔者通过整理地震现场调查报告收集了 80 组建筑物震害数据作为样本，在此基础上对本文提出的方法进行验证。

### 3.1 数据预处理

根据前述选取的建筑物震害影响因素，分析本文需要的数据，主要包括：震中位置、样本点、航天雷达地形测绘(SRTM)数据、2020 年四川省地理国情





表 2 样本数据统计表

Table 2 Statistical table of sample data

编号	破坏等级	建筑物抗震能力	场地类型	震中距/m	震级
1	基本完好	抗震能力一般	B	39 050.64	6.0
2	轻微破坏	抗震能力差	C	31 079.60	6.0
3	基本完好	抗震能力好	D	29 411.69	6.0
4	基本完好	抗震能力好	C	31 042.16	6.0
5	基本完好	抗震能力好	C	30 848.84	6.0
6	轻微破坏	抗震能力好	B	31 616.00	6.0
7	轻微破坏	抗震能力一般	C	26 273.85	6.0
8	基本完好	抗震能力好	D	25 912.79	6.0
9	中等破坏	抗震能力一般	B	22 362.80	6.0
10	基本完好	抗震能力好	C	21 008.19	6.0
11	中等破坏	抗震能力差	C	12 993.77	6.0
12	轻微破坏	抗震能力一般	C	9 126.40	6.0
13	中等破坏	抗震能力差	B	12 236.51	6.0
14	轻微破坏	抗震能力差	D	8 898.92	6.0
15	中等破坏	抗震能力一般	B	8 552.81	6.0
16	严重破坏	抗震能力一般	B	8 175.63	6.0

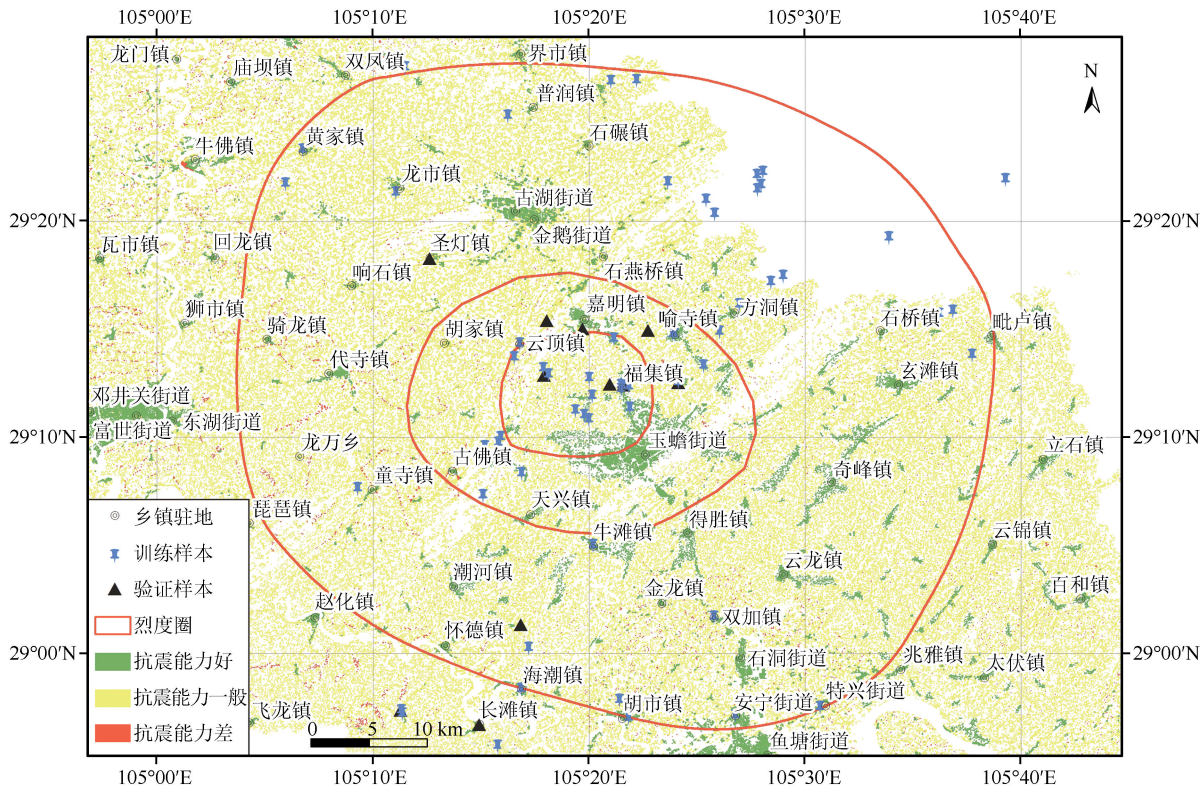


图 4 样本分布

Fig.4 Sample distribution

基本完好,2 代表轻微破坏,3 代表中等破坏,4 代表严重破坏,5 代表毁坏。建筑物抗震能力分为 3 类:1 代表抗震能力好,2 代表抗震能力一般,3 代表抗震能力差;场地类型分为 4 类:4 表示 B 类场地,3 表示 C 类场地,2 表示 D 类场地,1 表示 E 类场地。根据上节构建的建筑物震害 Fisher 判别模型,将处

理完后的 64 组建筑物震害实例作为训练样本建立 Fisher 判别模型,通过训练、学习及计算后得到各 Fisher 判别函数的系数,如表 3 所列。在此基础上,建立的判别函数分别为:

$$y_1 = 1.858x_1 + 0.355x_2 - 1.194x_3 - 2.510 ;$$

$$y_2 = 1.209x_1 - 0.093x_2 + 0.958x_3 - 3.569 ;$$



$$y_3 = -0.232x_1 + 1.349x_2 - 0.064x_3 - 3.109.$$

表 3 Fisher 判别式函数系数

Table 3 Coefficient of Fisher discriminant function

变量	函数 $y$		
	1	2	3
抗震能力 $x_1$	1.858	1.209	-0.232
场地类型 $x_2$	0.035 5	-0.093	1.349
震中距 $x_3$	-1.194	0.958	-0.064
(常数)	-2.510	-3.569	-3.109

表 4 判别函数特征值及组质中心值

Table 4 Eigenvalues of discriminant function and center value of fabric quality

函数	特征值	方差贡献率 /%	组质中心值				
			$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	$G_5$
1	3.244	75.5	-2.640	0.254	1.753	0.876	3.045
2	0.929	21.6	-0.108	0.953	0.251	-1.643	0.460
3	0.123	2.9	-0.024	-0.065	0.539	-0.060	-1.145

明运用这 3 个函数能对所有样本类别进行判别。

### 3.3 判别效果检验

为检查所求判别函数的准确度,以回代的方式进行检验,把参与训练的 64 组样本代入已构建的判别函数中,依据判别准则对其所属类别进行判断,并将预测结果与实际震害进行对比,再利用式(5)计算其误判率,结果如表 5 所列。从表中可以看出,基本完好的误判率为 11.8%,轻微破坏的为 25%,中等破坏的为 36.4%,严重破坏的为 7.7%,其中轻微破坏与中等破坏误判率偏高。从整体来看,有 12 组训练样本出现预判结果与实际震害情况不符,误判率为 18.75%,表明模型整体预测精度较高,证明该方法可以较好地对建筑物震害情况进行预测。另外,从表中可以发现判断结果与实际不符的样本基本都是预判等级偏高的,其原因可能在于建筑抗震能力分类比较粗,同一类抗震能力的建筑物间还是存在较大差异,如均为抗震能力基本达标的设防砖混结构与框架-剪力墙结构。设防砖混结构的抗震设防标准为本地设防烈度,抗震能力良好,而框架-剪力

表 5 建筑物震害预测等级与实际等级对比矩阵

Table 5 Comparison matrix between prediction level and actual level of earthquake damage of buildings

实际等级	预测等级				
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
基本完好	15	0	0	2	0
轻微破坏	0	15	3	1	1
中等破坏	0	1	7	1	2
严重破坏	0	0	1	12	0
毁坏	0	0	0	0	3

从表 4 中可看出:第一个判别函数方差贡献率为 75.5%,表明利用该函数可以对大部分样本进行所属类别判定。当利用第一个判别函数无法进行判断时,可以利用第二个判别函数,联合利用前 2 个判别通过计算可得到各判别函数特征值(表 4)。前两个函数判别时,累积方差贡献率已达 96%以上,已基本能对所有样本类别进行判别。当加入第 3 个判别函数进行判别时,累积方差贡献率已达 100%,表

墙结构其抗震设防标准多高于本地设防烈度,抗震性能明显高于设防砖混,在面对相同地震强度时遭受的破坏程度更轻。

### 3.4 模型精度验证

为进一步验证建筑物震害 Fisher 判别模型的准确性,利用未参与训练的 16 组样本进行验证,并以专题图的形式展示预测结果与实际震害的对比情况(图 5)。从图中可以看出:验证样本的预测结果与实际震害情况基本一致,只有 3 组样本预判结果有误,且存在预判等级均偏高的情况,误判率为 18.75%,准确率达到 81.25%。以上验证表明该模型具有较高的可信度,能对建筑物震害等级进行科学预测。

此外,笔者还收集到 2022 年 9 月 5 日四川泸定 6.8 级地震的 81 组建筑物震害数据,进一步验证本文模型的科学性,具体结果如表 6 所列。从整体来看,有 61 组训练样本出现预判结果与实际震害情况一致,准确率为 75.3%,表明模型整体预测精度较高,证明该方法可以较好地对建筑物震害情况进行预测。

## 4 结论

为震后快速了解灾区建筑物详细震害情况,精准定位受灾位置,进行救援力量科学部署等应急处置提供可靠的数据支撑,本文提出了一种基于遥感初判的建筑物震害 Fisher 判别法,并结合四川泸定县 6.0 级地震案例进行分析,得到结论如下:

(1) 为适用于各类建筑物震害预测,从地震强度和建筑物抗震能力两方面分析影响建筑物震害影

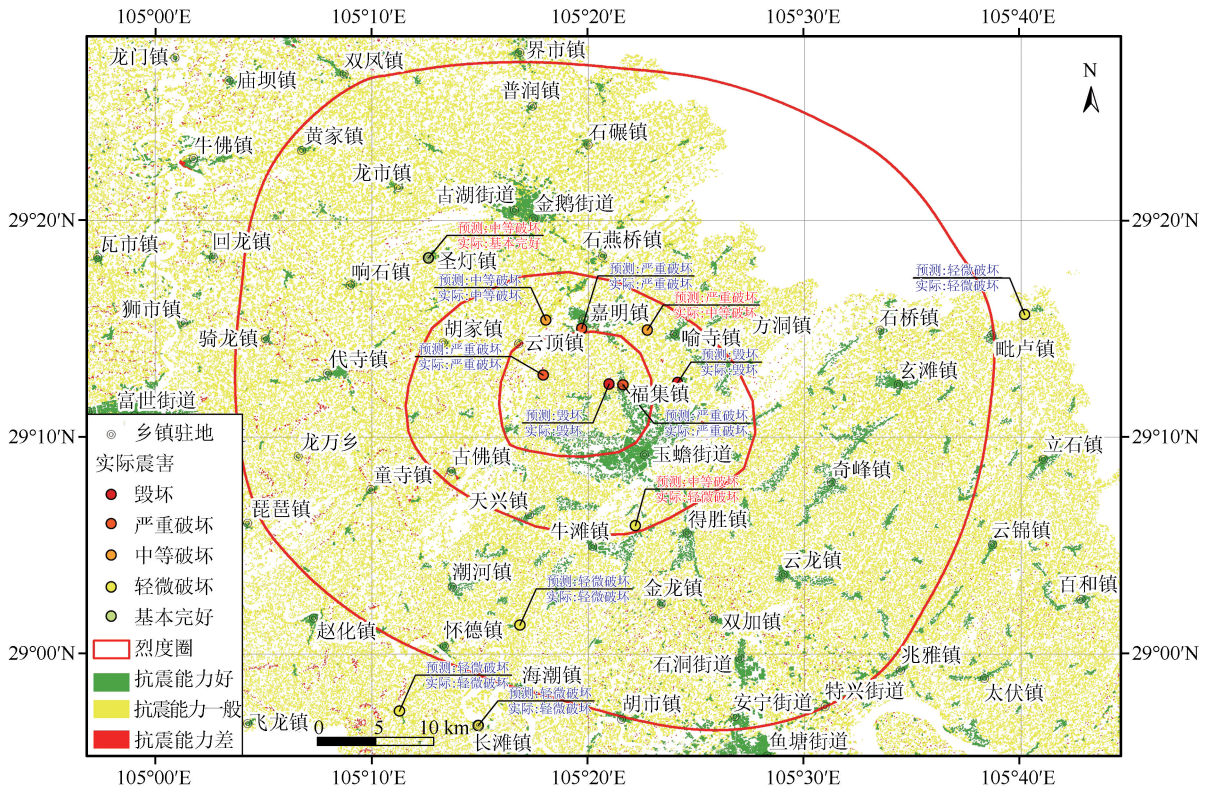


图 5 建筑物震害预测结果与实际震害对比图

Fig.5 Comparison between prediction results of earthquake damage of buildings and actual damage

表 6 建筑物震害预测等级与实际等级对比矩阵

Table 6 Comparison matrix between prediction level and actual level of earthquake damage of buildings

实际等级	预测等级				
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
基本完好	33	3	1	0	2
轻微破坏	1	10	7	0	1
中等破坏	0	2	2	2	0
严重破坏	0	1	0	10	0
毁坏	0	0	0	0	6

响因素,并结合数据的可获取性及完整性,综合选择震级、震中距、场地条件及建筑物抗震能力 4 个指标作为判别因子。

(2) 基于判别分析理论,构建了基于 Fisher 判别的建筑物震害预测模型。利用建立的判别模型对四川泸定县 6.0 级地震收集的 64 组建筑物震害实例进行训练学习得到相应的判别函数,并以回代的方式进行判别效果检验,计算其误判率为 18.75%,说明该方法预测精度较高。利用未参与训练的 16 组样本进行验证,预测结果与实际震害基本一致,准确率高达 80% 以上,证明该方法可靠度较高,能较准确地对建筑物震害程度进行科学预测。

(3) 本文提出的模型造成误差的原因主要在于建筑抗震能力分类比较粗犷,同一类抗震能力的建筑物间存在较大差异,且采用地形坡度法进行场地分区,分区结果比较粗糙等。此外,考虑的影响因素也不全面,如破裂方向、破裂深度等尚未考虑。未来可从上述角度进一步优化模型,以期提高建筑物震害判别的准确性。

参考文献(References)

[1] 刘晶晶, 宁宝坤, 吕瑞瑞, 等.震后典型建筑物倒塌分类及救援特点分析[J].震灾防御技术, 2017, 12(1): 220-229.  
LIU Jingjing, NING Baokun, LÜ Ruirui, et al. Classification of typical building collapse and analysis of rescue characteristics after the earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, 12(1): 220-229.

[2] ZHAI W, SHEN H F, HUANG C L, et al. Building earthquake damage information extraction from a single post-earthquake-PolSAR image[J]. Remote Sensing, 2016, 8(3): 171.

[3] YANG F, WEN X T, WANG X S, et al. A model study of building seismic damage information extraction and analysis on ground-based LiDAR data[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 5542012.

[4] ALGERMISSEN S T, STEINBRUGGE K, LAGORIO H. Estimation of earthquake losses to buildings (except single family



- dwelling)[J].Insurance Services Offices,1978.
- [5] ROSSETTO T, ELNASHAI A. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(10): 1241-1263.
- [6] GAUTAM D, FABBROCINO G, SANTUCCI DE MAGISTRIS F. Derive empirical fragility functions for Nepali residential buildings[J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 617-628.
- [7] ALLALI S A, ABED M, MEBARKI A. Post-earthquake assessment of buildings damage using fuzzy logic[J]. *Engineering Structures*, 2018, 166: 117-127.
- [8] FOYTONG P, ORNTHAMMARATH T. Empirical seismic fragility functions based on field survey data after the 5 May 2014 Mae Lao (Northern Thailand) earthquake[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 42: 101344.
- [9] HOSSEINI HASHEMI B, HASSANZADEH M. Study of a semi-rigid steel braced building damaged in the Bam earthquake[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(6): 704-721.
- [10] NAGASHREE B K, RAVI K C M, VENKAT R D. A parametric study on seismic fragility analysis of RC buildings[J]. *Earthquakes and Structures*, 2016, 10(3): 629-643.
- [11] 于晓辉,吕大刚,范峰.基于易损性指数的钢筋混凝土框架结构地震损伤评估[J]. *工程力学*, 2017, 34(1): 69-75, 100.
- YU Xiaohui, LÜ Dagang, FAN Feng. Seismic damage assessment of RC frame structures based on vulnerability index[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(1): 69-75, 100.
- [12] PALAGALA V Y, SINGHAL V. Structural score to quantify the vulnerability for quick seismic assessment of RC framed buildings in India [J]. *Engineering Structures*, 2021, 243: 112659.
- [13] 吕硕硕,尹训强,王桂萱.基于 OpenSees 的某超高层建筑结构地震响应分析研究[J]. *地震工程学报*, 2023, 45(1): 34-42.
- LÜ Shuoshuo, YIN Xunqiang, WANG Guixuan. Seismic response analysis of a super high-rise building structure based on OpenSees [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(1): 34-42.
- [14] PAMPANIN S, NIGEL PRIESTLEY M J, SRITHARAN S. Analytical modelling of the seismic behaviour of precast concrete frames designed with ductile connections[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2001, 5(3): 329-367.
- [15] 刘章军,叶燎原,潘文.基于模糊贝叶斯的震害预测[J]. *昆明理工大学学报(理工版)*, 2002, 27(6): 108-111.
- LIU Zhangjun, YE Liaoyuan, PAN Wen. Prediction of seismic disasters based on fuzzy-Bayes theory[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 2002, 27(6): 108-111.
- [16] 韩博,熊琛,许镇,等.城市区域建筑物震害预测剪切层模型及其参数确定方法[J]. *工程力学*, 2014, 31(增刊 1): 73-78, 85.
- HAN Bo, XIONG Chen, XU Zhen, et al. A multi-story concentrated-mass shear model for urban regional seismic damage prediction and associated parameter determination [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(Suppl01): 73-78, 85.
- [17] MOYA L, MAS E, KOSHIMURA S, et al. Synthetic building damage scenarios using empirical fragility functions: a case study of the 2016 Kumamoto earthquake [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31: 76-84.
- [18] 崔玉红,邱虎,聂永安,等.国内外单体建筑物震害预测方法研究述评[J]. *地震研究*, 2001, 24(2): 175-182.
- CUI Yuhong, QIU Hu, NIE Yongan, et al. Research review of predictive method about single building in the world [J]. *Journal of Seismological Research*, 2001, 24(2): 175-182.
- [19] 张桂欣,孙柏涛.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*, 2018, 35(12): 185-193, 202.
- ZHANG Guixin, SUN Baitao. Seismic damage prediction for a single building based on a fuzzy analytical hierarchy approach [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(12): 185-193, 202.
- [20] 宫凤强,李夕兵.矿区立井井筒非采动破裂的距离判别分析预测法[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(7): 700-704.
- GONG Fengqiang, LI Xibing. A distance discriminant analysis method of forecast for shaft-lining non-mining fracture of mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(7): 700-704.
- [21] 董陵军,李夕兵,白云飞.急倾斜煤层顶煤可放性分类预测的 Fisher 判别分析模型及应用[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1): 58-63.
- DONG Longjun, LI Xibing, BAI Yunfei. A Fisher discriminant analysis model for classifying top coal cavability of the steep seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(1): 58-63.
- [22] HU W P, HU H F. Heterogeneous face recognition based on modality-independent kernel Fisher discriminant analysis joint sparse auto-encoder [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(21): 1753-1755.
- [23] GU X Q, NI T G, WANG W B, et al. Cross-domain transfer person re-identification via topology properties preserved local fisher discriminant analysis [J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2020(4): 1-11.
- [24] ZHU Z B, SONG Z H. A novel fault diagnosis system using pattern classification on kernel FDA subspace [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(6): 6895-6905.
- [25] MD NOR N, HUSSAIN M A, CHE HASSAN C R. Multi-scale kernel Fisher discriminant analysis with adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in fault detection and diagnosis framework for chemical process systems [J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32(13): 9283-9297.
- [26] CHEN L, WANG E Y, FENG J J, et al. Hazard prediction of coal and gas outburst based on Fisher discriminant analysis [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2017, 13(5): 861-879.
- [27] BI Y S, WU J W, ZHAI X R, et al. Discriminant analysis of mine water inrush sources with multi-aquifer based on multi-variate statistical analysis [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(4): 1176-1188.
- [28] 赵密,贾智富,管子卉,等.不同场地条件下地连墙对地铁车站结构地震动力响应的影响[J]. *地震工程学报*, 2023, 45(2): 270-278, 295.
- ZHAO Mi, JIA Zhifu, ZAN Zhihui, et al. Influence of the diaphragm wall on the dynamic responses of subway station

- structures under different site conditions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 270-278, 295.
- [29] WALD D J, ALLEN T I. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1379-1395.
- [30] 张朝阳, 李雪, 刘珠妹. 遥感自动提取技术在房屋抗震调查中的应用[J]. 地震工程学报, 2023, 45(6): 1478-1484.  
ZHANG Zhaoyang, LI Xue, LIU Zhunmei. Application of the automatic extraction method of remote sensing images to the seismic capacity investigation of buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(6): 1478-1484.
- [31] 钱兆明, 任高峰, 褚夫蛟, 等. 基于 PCA 法和 Fisher 判别分析法的岩体质量等级分类[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 427-432, 441.  
QIAN Zhaoming, REN Gaofeng, CHU Fujiao, et al. Classification of rock mass quality grades based on PCA and Fisher discriminant analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (Suppl02): 427-432, 441.
- [32] ZHANG W Q, WANG Z Y, ZHU X X, et al. A risk assessment of a water-sand inrush during coal mining under a loose aquifer based on a factor analysis and the Fisher model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2020, 25(8): 04020033.
- [33] 胡汉华, 刘征, 李孜军, 等. 硫化矿石自燃倾向性等级分类的 Fisher 判别分析法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1674-1679.  
HU Hanhua, LIU Zheng, LI Zijun, et al. Fisher discriminant analysis to the classification of spontaneous combustion tendency grade of sulphide ores[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1674-1679.
- [34] 赵丽娜. 引入权重因子的 Fisher 判别法的研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2012, 28(5): 24-26.  
ZHAO Li'na. The study on introduction weighting factor of Fisher discriminant [J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2012, 28(5): 24-26.
- [35] 尹之潜. 地震灾害及损失预测方法[M]. 北京: 地震出版社, 1995.  
YIN Zhiqian. Earthquake disaster and loss prediction method [M]. Beijing: Seismological Press, 1995.
- [36] DONG L J, WESSELOO J, POTVIN Y, et al. Discrimination of mine seismic events and blasts using the Fisher classifier, naive Bayesian classifier and logistic regression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(1): 183-211.

(本文编辑:任 栋)

\*\*\*\*\*  
(上接第 1354 页)

- [22] 郭全生, 王向平, 付永刚, 等. 大直径桩波动方程可打性分析及应用[J]. 地震工程学报, 2017, 39(增刊 1): 232-235.  
GUO Quansheng, WANG Xiangping, FU Yonggang, et al. Drivability analysis of offshore large diameter piles using a wave equation analysis program and its application[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(Suppl01): 232-235.
- [23] 王耀存, 李飒, 张培献, 等. 打桩对桩周土体阻尼系数的影响[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 946-951.  
WANG Yaocun, LI Sa, ZHANG Peixian, et al. Influence of piling on damping coefficients of soil surrounding piles[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 946-951.

(本文编辑:贾源源)