

基于地表敏感变形和房屋因素的矿区建筑物损坏评价方法

廖孟光^{1,3}, 戴华阳², 李梦涛¹, 阎跃观², 龙四春¹

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 针对目前建筑物采动损坏评价因素的不尽合理与区域性评判结果的局限性, 提出基于地表敏感变形和房屋因素的矿区建筑物采动损坏评价方法。采用理论分析、数值模拟和现场调查等方法对建筑物采动损坏评价进行了研究与探讨。首先, 采用数值模拟方法, 揭示地表变形、建筑物结构类型、主变形方向与建筑物长轴的夹角等因素对建筑物损坏影响规律, 模拟结果表明: ①当沿建筑物长轴的变形增大时, 建筑物的损坏程度增大, 得出了平房建筑加速损伤的地表变形临界值为曲率 $K=0.6 \text{ mm/m}^2$, 水平变形 $\varepsilon=6 \text{ mm/m}$; ②不同结构的建筑物损坏程度不同, 其中具有圈梁或构造柱的建筑物抗变形能力强, 研究并确定了二层砖混结构(圈梁和构造柱)损坏程度的地表临界变形值; ③建筑物对其长轴方向的地表变形较为敏感, 影响损坏大, 但对其长轴的垂直方向的变形不太敏感, 而变形与建筑物斜交方向的建筑物损坏程度介于2者之间。其次, 基于地表敏感变形因素、主变形方向、房屋因素共选取7个评价指标, 建立建筑物采动损坏评价的未确知测度模型, 根据各评价指标对建筑物的重要程度, 采用层次分析法定权; 最后, 应用于峰峰矿区和徐州矿区3个村庄的建筑物损坏实例, 结果表明: 在选取的50户140余栋建筑物评价中, 预测准确率在80%以上, 预测精度高于传统方法, 且预测效果良好, 弥补了传统评价方法的不足, 验证了评价指标选取和评价模型的可靠性。

关键词: 建筑物采动损坏; 地表敏感变形; 评价指标; 建筑物长轴

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)05-2445-17

Mining-induced damage evaluation method of buildings based on surface sensitive deformation and housing factors

LIAO Mengguang^{1,3}, DAI Huayang², LI Mengtao¹, YAN Yueguan², LONG Sichun¹

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology -Beijing, Beijing 100083, China; 3. National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-Spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In view of unreasonable evaluation factors and limitations of regional evaluation results of the current mining-induced building damage, a method is proposed for assessing building damage based on surface sensitive deformation and

收稿日期: 2023-04-04 修回日期: 2023-08-07 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0429

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604108); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30254); 湖南省教育厅基金资助项目(19C0744)

作者简介: 廖孟光(1985—), 男, 湖南安化人, 副教授, 硕士生导师。Email: liomengguang@163.com

通讯作者: 戴华阳(1964—), 男, 湖南湘阴人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: dhy@cumtb.edu.cn

引用格式: 廖孟光, 戴华阳, 李梦涛, 等. 基于地表敏感变形和房屋因素的矿区建筑物损坏评价方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2445-2461.

LIAO Mengguang, DAI Huayang, LI Mengtao, et al. Mining-induced damage evaluation method of buildings based on surface sensitive deformation and housing factors[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2445-2461.



移动阅读

housing factors. Mining-induced building damage evaluation is studied by means of theoretical analysis, numerical simulation and field investigation. Firstly, numerical simulation method is used to reveal the influence rule of surface deformation, building structure type, the angle between the main deformation direction and the long axis of the building on the building damage. The results show that ① when the deformation along the long axis of the building increases, the degree of damage to the building increases. It is obtained the critical value of surface deformation for the accelerated damage of one-story bungalow building is curvature $K=0.6 \text{ mm/m}^2$ and horizontal deformation $\varepsilon=6 \text{ mm/m}$. ② The damage degree of buildings with different structures is different, in which the buildings with ring beams or structural columns have a strong deformation resistance. This study has determined the critical surface deformation value of the damage degree of the two-story brick-concrete structure with ring beams and structural columns. ③ The building is more sensitive to the surface deformation in the direction of its long axis, affecting the damage is large. However, the deformation of the perpendicular direction to the long axis of the building is not very sensitive, and the damage degree at the oblique intersection of principal deformation direction and the long axis of houses is in between the two. Secondly, the unascertained measure model of mining-induced building damage is established, and a total of 7 evaluation indicators are selected based on surface sensitive deformation factors, principal deformation direction, and house factors, then the weight is assigned to each indicator using the Analytic Hierarchy Process (AHP) according to its importance. Finally, it is applied to the building damage cases of three villages in the Fengfeng Mining Area and the Xuzhou Mining Area, and the application shows that the prediction accuracy is above 80% in the evaluation of more than 140 buildings in 50 households selected. The prediction accuracy is higher than the traditional method, and the prediction effect is good, which makes up for the shortcomings of traditional evaluation methods and verifies the reliability of the evaluation index selection and the evaluation model.

Key words: mining-induced damage of buildings; ground sensitive deformation; evaluation index; long axis of buildings

我国煤炭资源量大面广,在建(构)筑物、铁路、以及水体下(简称“三下”)压占着大量煤炭资源,其中建筑物下压煤多达86.7亿t,且东部和部分中部矿区的建筑物压煤占比更高,为了延长东部矿井的服务年限,建筑物下采煤不可避免^[1]。因此,建下压煤开采势必造成建筑物损坏,由此产生的工农纠纷影响矿区的和谐与稳定,采动区建筑物损坏评价是建筑物开采损坏鉴定的重要依据。为准确预测建筑物的损坏等级,评价方法的适用性和评价指标的合理选取是提高模型预测精度的关键^[2]。

适用的评价方法是建筑物损坏评价的关键。前苏联采用总变形指标,与建筑物的高度、长度和地表变形有关,波兰采用水平变形与倾斜,英国采用水平变形等^[3]。2017年国家安监总局等4部门联合修订并出版的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[4](简称《规范》)根据地表倾斜、曲率、水平变形的分界值确定建筑物的损坏等级,但也存在临界值附近的建筑物损坏等级难以确定,文献建议将倾斜、曲率、水平变形作为评价因子,分别建立了模糊评价模型^[5]、物元模型^[6]和云模型^[7],虽然较好的解决了临界点的损坏等级的跳跃问题,但没有考虑不同建筑物的抗变形能力;郭文兵^[8-9]从地质采矿因素和房屋因素出发,引入模糊聚类法、BP神经网络技术,

建立相应的建筑物损坏评价模型;随后部分学者在此指标分类的基础上,相继结合多元判别分析模型^[10]、模糊模式识别^[11]、熵权法^[12]等理论进行研究,但存在模糊评价结果一致性差,网络结构难以确定,熵权法需要大量的样本数据等等缺点。国外学者采用GIS技术^[13]、脆弱性曲线^[14-15]、分类与回归树^[16]及Winkler模型^[17-18]、贝叶斯概率模型^[19]等方法进行建筑物损坏评价,为建筑物损坏评价提供了有利的探索。

针对评价指标的合理选取,《规范》将地表倾斜、曲率、水平变形作为评价因子,根据临界变形值硬性划分建筑物的损坏等级,只能按区域评判,没有考虑到建筑物自身的抗变形能力;郭文兵等^[8-9]从地质采矿条件和建筑物自身属性方面,将影响因素划分成8类,舍弃地表变形的直接影响,转而选取地质采矿因素;文献[20]选取曲率、水平变形、建筑物结构、建筑物面积、建房时间为评价指标,没有选取倾斜变形等传统指标,实例应用预测准确率为70%左右;STRZAŁKOWSKI^[21]选取采动变形因子和振动因素等;也有学者考虑建筑物结构长度和挠度比^[18, 22]、相对刚度系数^[23]、地基极限承载力^[24]等建筑物自身属性,造成建筑物分类指标众多,不成体系等问题,无法形成系统的、科学的指标体系;针对众多的影响因素,文献[25]针对采空区建设用地的稳定性,从水文地质因

素、建设场地自身因素、外界环境因素3个方面海量选取,采用R聚类和变异系数方法进行有效的筛选,但存在影响因素机理不明等问题。

综上所述,影响矿区建筑物损坏的因素主要分2个方面:①地表敏感变形。不同的地表移动变形指标对建筑物的敏感程度是不同的^[26],如水平变形对建筑物的长度较为敏感等。此外,在实际地下开采导致的地表主变形方向并不是完全沿建筑物长轴或建筑物短轴分布,而是与建筑物长轴具有一定的角度,不同角度的变形对建筑物损坏也是不同的,学者研究任意布置的建筑物采动附加载荷的计算原理^[27]、主变形值和主变形方向的计算方法^[28],为建筑物空间布置的研究提供了有利的思路,郑刚等^[29]对建筑物与基坑的坑角效应进行数值模拟分析,得出建筑物纵墙与基坑边界平行或垂直对建筑物损害程度不同。②房屋因素。不同结构与质量的房屋决定了抗变形能力,主要体现在建筑物的修建时间、尺寸^[30]与结构^[31]以及抗变形措施^[32]。因此,应当从地表敏感变形与房屋因素2个方面选取建筑物采动损坏的评价指标较为合理。

笔者以峰峰矿区某村庄建筑物为研究对象,采用实地调查、数值模拟和理论分析等多种研究手段,从

地表敏感变形大小、主变形方向和房屋因素3个方面,建立建筑物损坏评价的指标体系,科学合理的评价房屋的损坏等级,为矿区村庄建筑物损坏技术鉴定提供技术指导与借鉴,也为地下开采设计优化和建筑物损坏防护提供参考和依据,对村庄下采煤具有重要的参考价值和指导意义。

1 采动影响下建筑物损坏的主要影响因素模拟分析

为分析采动影响下建筑物损坏的主要影响因素,拟通过ANSYS数值模拟方法,探讨不同的影响因素作用下建筑物的损坏规律。

1.1 三维有限元模型的建立

通过峰峰矿区村庄房屋损坏现场调查可知,村庄中心区域以砖木结构的老旧建筑物为主,村庄边缘以1层和2层的新建砖混结构建筑物为主,均带有圈梁,部分建筑物带有圈梁和构造柱。笔者基于现场建筑物开间类型,选取较为理想的两开间房屋进行建模,模型沿建筑物长轴中线左右对称。因此,通过对1、2层建筑物的砖木、砖混(圈梁)和砖混(圈梁和构造柱)结构,共建立6个三维模型,对不同结构的建筑物进行模拟对比分析,如图1所示。

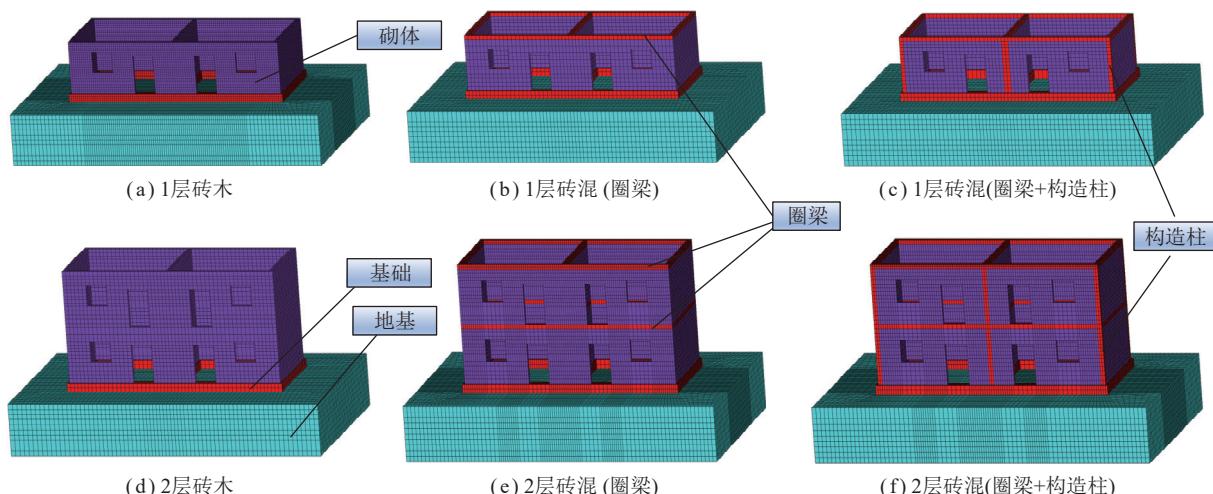


图1 不同结构建筑物的模型

Fig.1 Modeling of buildings with different structures

采用ANSYS软件对村庄房屋的地基、基础和上部房屋结构建立不同结构建筑物的三维模型。模型尺寸为12 000 mm×5 000 mm,层高3 000 mm,墙厚240 mm,建立不同建筑物结构的三维有限元模型,如图1所示。墙体类型为砌体结构,建筑物基础厚度一般大于墙体厚度,为方便网格划分,基础厚度为480 mm,采用SOLID65单元可以模拟砌体等材料的开裂、压碎以及失效现象,对应的材料模型为Con-

crete模型;地基土采用SOLID45单元进行模拟,对应的材料模型为Druker-Prager模型。

本文的研究对象为矿区农村的自建房,为普通简易房,圈梁结构类别比较单一,圈梁参数圈梁的横截面积根据砌体确定(如240 mm×240 mm),钢筋混凝土强度大多为农村房屋建房经验数据。为模拟地基-基础-上部结构作用机理,夏军武^[33]模拟地基-基础-上部结构作用机理,通过现场试验和参考资料确定了模

型的力学参数,文献[34-35]针对农村砌体结构试件的防震模拟,确定砌体结构的力学参数,笔者参考和借

鉴相关资料与文献,确定建筑物地基、基础和上部结构有限元模型材料参数,见表1。

表1 有限元模型材料参数

Table 1 Material parameters of finite element model

材料	选择单元	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa
地基土	SOLID45	1 800	30	0.25	—	—
基础	SOLID65	2 500	30 000	0.20	22.98	2.10
砌体	SOLID65	2 000	2 200	0.15	11.50	0.11
圈梁	SOLID65	2 500	30 000	0.20	22.98	2.10
构造柱	SOLID65	2 500	30 000	0.20	22.98	2.10

1.2 不同角度效应下荷载加载方法

建筑物采动损坏程度影响因素十分复杂,其中地表变形值和建筑物的抗变形能力是关键因素,而地表变形在不同方向上的变形值分量不同,建筑物不同朝向和长宽尺寸对变形的敏感响应程度不同,这就需要讨论建筑物本身状态和地表变形方向之间的关系。

经查阅文献发现^[36],地表变形对建筑物的影响在数值分析中通常是与建筑物长轴平行或垂直,而与建筑物长轴斜交却鲜有研究。建筑物所在采空区中所受到的变形中对其影响最大的是主变形值,主变形方向与建筑物本身大都存在斜交的相对位置关系。

为模拟不同主变形方向对建筑物的影响,由于模型沿建筑物长轴中线左右对称,则只需模拟主变形方向与建筑物长轴夹角为0°~90°即可分析其损坏规律,而主变形方向与建筑物长轴夹角为90°~180°时建筑物损坏程度相同,仅建筑物裂缝位置不同。因此,在实际应用中只需判断主变形方向与建筑物长轴的锐角即可。

(1) 垂直方向的载荷加载。垂直方向的变形指标有倾斜变形*i*,曲率变形*K*,当主变形方向与建筑物长轴平行时,可根据位移量直接进行加载;当主变形方向与建筑物长轴斜交角度θ时,在空间直角坐标系X,Y,Z(变形位移量)下,等同原有变形沿Z轴旋转θ角度,即荷载曲面绕Z轴旋转了θ角度,根据曲面三维空间旋转的原理,可以计算新曲面的曲面方程,其转换过程如式(1)和图2(c)所示。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 水平方向的载荷加载。水平方向的变形指标为水平变形 ε ,包括水平拉伸变形和水平压缩变形。当主变形方向与建筑物长轴平行或垂直时,可直接加载在建筑物地基的两侧,如图2(b)所示;当主变形方

向与建筑物长轴斜交θ角时,根据力学中力的分解原理,可将斜交时的变形沿着与建筑物长轴平行和垂直2个方向进行分解,计算公式如式(2)和图2(d)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_{\max} \cos \theta \\ \varepsilon_y = \varepsilon_{\max} \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

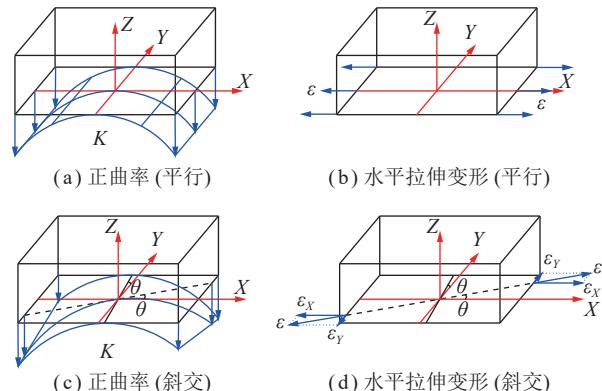


图2 不同角度变形的位移加载示意

Fig.2 Displacement loading with different angle deformation

1.3 建筑物损坏的模拟结果分析

1.3.1 不同结构建筑物损坏的模拟结果分析

从砖木、砖混(圈梁)、砖混(圈梁和构造柱)结构建筑物分1、2层共6种房屋结构类型进行模拟,以水平拉伸变形为例,均用4 mm/m的水平拉伸变形值进行加载,以建筑物长轴的前墙为研究对象,第1层建筑物门窗上方进行分析。弹性应变值表达的是模型的变形特征,采用弹性主应变作为参考量,得出如下结果:

(1) 第一主应变最大值的位置是决定建筑物较易产生裂缝的主要因素之一,应力集中区域均分布在建筑物门窗洞口附近区域,其中具有圈梁的建筑物主应变最大值靠近建筑物中间,具有圈梁和构造柱的建筑物主应变最大值向建筑物两侧,较易产生“倒八字”裂缝。说明具有圈梁或构造柱的建筑物,较易产生裂缝

的位置不同。

(2) 针对不同结构建筑物, 在相同地表变形指标的作用下, 不同结构的建筑物的损坏程度是不同的, 从图3可看出, 砖木结构房屋影响最大, 砖混结构(带圈梁)房屋次之, 砖混结构(带圈梁和构造柱)房屋影响最小。因此, 不同结构的建筑物, 其抗变形能力不同, 建筑物的损坏程度也是不同的。

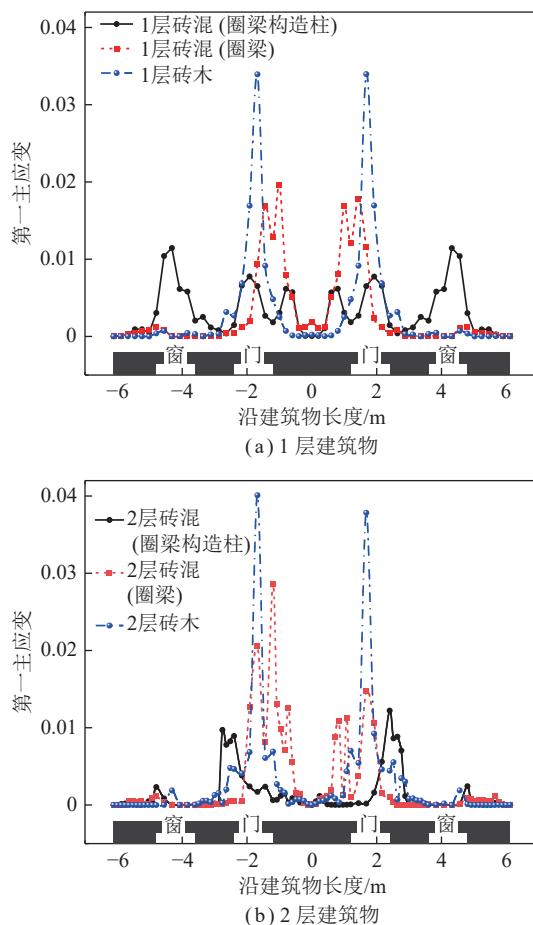


图3 水平拉伸变形对不同结构建筑物的影响

Fig.3 Influence of horizontal tensile deformation on buildings with different structures

(3) 针对相同结构、不同层高的建筑物, 2层比1层建筑物应变值大, 说明随着层高的增加, 建筑物损坏程度越大, 建筑物的层高是影响建筑物损坏的主要因素之一。

1.3.2 不同变形大小对建筑物损坏的影响

随着社会经济的发展, 我国村庄房屋的质量和抗变形能力有了较大的提高, 如新建的2层砖混结构楼房, 均设有圈梁和构造柱, 而目前尚无有圈梁和构造柱2层楼房损坏的评定标准^[37], 均参考砖石结构房屋的评定标准进行采动区建筑物损坏等级预测, 与实际损坏等级相比, 导致预测结果偏大。

为研究地表不同大小的变形量对建筑物的损坏,

针对1层砖木结构和2层砖混结构(圈梁和构造柱)建筑物, 分别采用倾斜变形3~15 mm/m, 正曲率变形0.2~0.8 mm/m², 水平拉伸变形2~8 mm/m进行模拟。结果表明: ①随着地基变形值的增加, 房屋局部变形量增大; 2层砖混结构房屋比平房的局部变形量小, 说明2层楼房的抗变形能力强; ②得出了平房建筑加速损伤的地表变形临界值为曲率K=0.6 mm/m², 水平变形ε=6 mm/m, 如图4所示; ③对低矮层建筑物, 倾斜变形对建筑物的影响较小, 主要对建筑物使用功能造成影响。

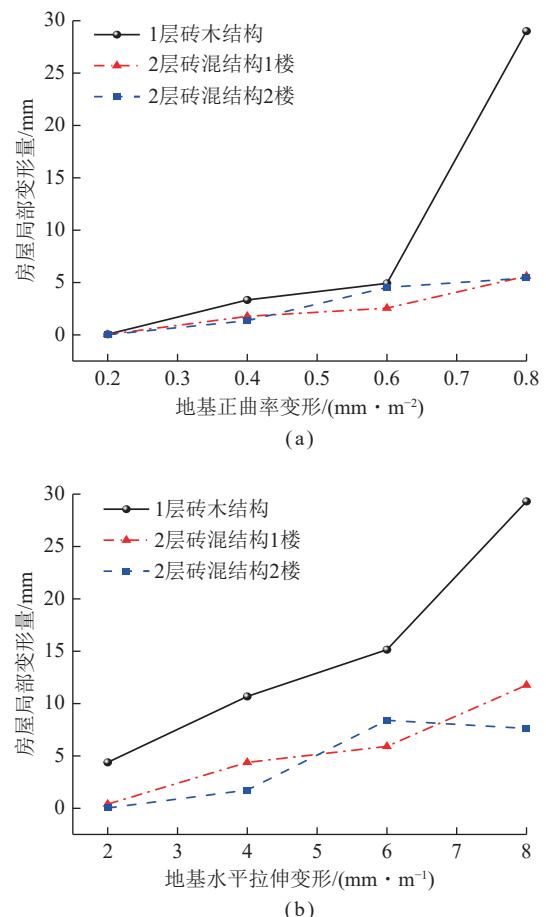


图4 不同变形值对房屋门窗上角的最大局部变形量

Fig.4 Maximum local deformation of the doors or windows of building due to different deformation values

以《规范》中砖石平房的损坏标准为依据, 通过线性插值的方法, 计算2层砖混结构楼房(圈梁构造柱)损坏程度的地表临界变形, 其中倾斜变形指标以《规范》为依据, 由表2可知, 研究确定了有圈梁和构造柱的2层砖混结构建筑物各级损坏程度的地表临界倾斜、水平变形和曲率变形值。

1.3.3 不同主变形方向对建筑物损坏的影响

本文通过主变形方向与建筑物长轴夹角(0°~90°)模拟不同主变形方向对建筑物损坏的影响。

表 2 建筑物不同损坏等级的地表临界变形值

Table 2 Surface deformation critical values of different damage grades of building

损坏等级	平房据《规范》				二层楼房(圈梁和构造柱)			
	建筑物类型	I 级	II 级	III 级	IV 级	I 级	II 级	III 级
水平变形/(mm·m ⁻¹)	2.0	4.0	6.0	> 6.0	4.0	7.0	9.0	> 9.0
曲率变形/km ⁻¹	0.2	0.4	0.6	> 0.6	0.2	0.5	0.8	> 0.8
倾斜变形/(mm·m ⁻¹)	3.0	6.0	10.0	> 10.0	3.0	6.0	10.0	> 10.0

以正曲率为例,以 0.4 mm/m^2 对建筑物地基进行加载变形量,自变量为主变形方向与建筑物长轴角度,分别为主变形方向与建筑物长轴平行(0°)、斜交和垂直(90°)3个方案进行模拟,模拟结果如下:

(1) 从应变分布云图可知(图5),当主变形方向与建筑物平行时,应变集中分布在门窗上方,且基本呈左右对称分布;当主变形方向与建筑物斜交时,建筑物左侧房间的损坏程度比右侧大,随着斜交角度的增大,到斜交 60° 时,左右2个房间的左侧墙角较易产生裂缝,且左侧房间损坏程度大于右侧。

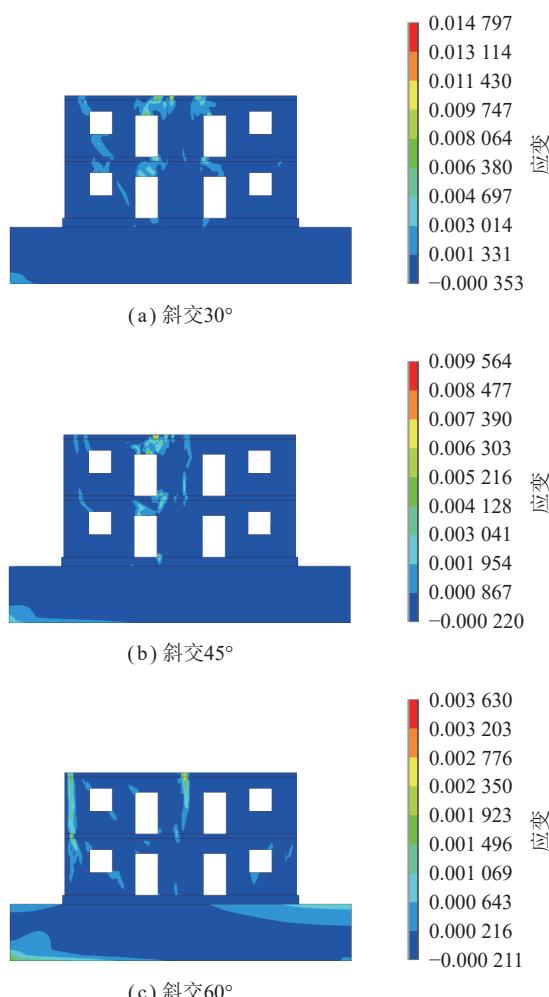


图 5 正曲率变形对不同建筑物方位的应变分布

Fig.5 Strain distribution of positive curvature deformation on different building orientations

(2) 由图6(a)可知,主变形方向与建筑物长轴平行时,应变数值最大,其次是斜交,随着斜交角度的增大,第一主应变也随之减小,最后与建筑物长轴垂直时最小。因此,随着主变形方向与建筑物长轴夹角的增加,对建筑物的损坏减弱。

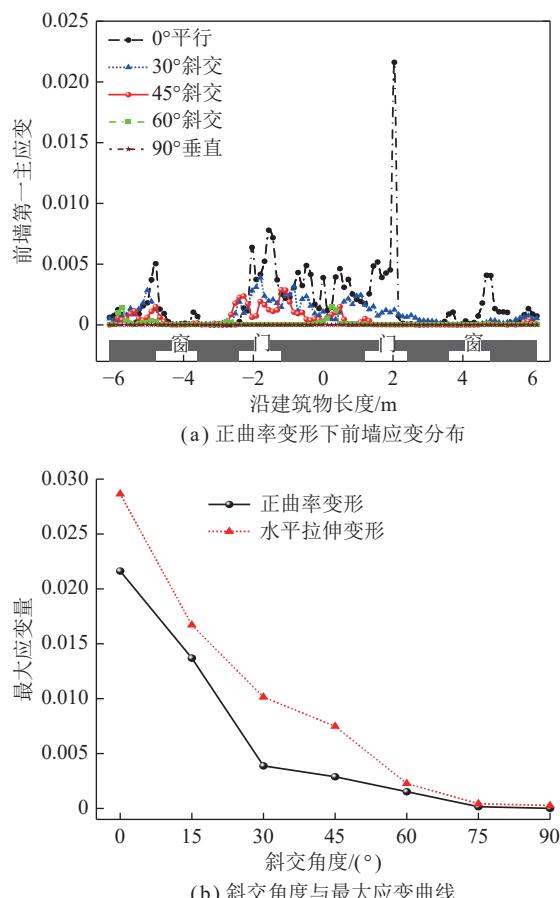


图 6 多角度主变形方向对建筑物损坏的影响

Fig.6 Influence of building damage on principal deformation direction with different angles

(3) 通过斜交角度每增加 15° 提取建筑物前墙门窗上方的应变最大值作为参考,随着斜交角度的增大,最大应变量变小,初步确定建筑物损坏程度由重至轻为 $0^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 75^\circ$ 、 $75^\circ \sim 90^\circ$ 等4个阶段,如图6(b)所示。

以水平变形为例,以 4 mm/m 对建筑物地基进行加载变形量,当建筑物受不同斜交角度的水平拉伸变

形作用时,应变峰值在建筑物左侧门附近,通过提取左侧门上部节点的最大主应变值可知,水平拉伸变形与建筑物长轴平行时,水平拉伸变形对建筑物的损坏最大,与建筑物长轴垂直时影响最少,斜交对建筑物的影响位于2者之间,如图6(b)所示。

2 评价方法与评价指标体系的建立

2.1 未确知测度简介

评价对象空间 $\mathbf{R}=\{\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n\}$, 对每个评价对象 $\mathbf{R}_i(i=1, 2, \dots, n)$ 有 m 个单项评价指标空间, 评价指标空间记为 $X=\{X_1, X_2, \dots, X_m\}$, 则 m 维向量 $\mathbf{R}_i=\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$, 其中 x_{ij} 表示评价对象 \mathbf{R}_i 关于评价指标 X_j 的测量值。

对每个 x_{ij} 有 p 个评价等级, 则评价空间 $\mathbf{U}=\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$, 设 C_k 为第 k 级评价指标, 如果 k 级比 $k+1$ 级评价等级高, 记为 $C_k > C_{k+1}$ 。若 $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 满足

$$C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_p$$

$$\text{或 } C_1 < C_2 < C_3 < \dots < C_p$$

则称 $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 为评价空间 \mathbf{U} 的一个有序分割类。

(1) 单指标测度。如果 $\mu_{ijk}=\mu(x_{ij} \in C_k)$ 表示测量值 x_{ij} 属于第 k 个评价等级, 应满足以下条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \\ \mu(x_{ij} \in U) = 1 \\ \mu\left[x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l\right] = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l), (k = 1, 2, \dots, p) \end{array} \right. \quad (3)$$

故称 μ_{ijk} 为未确知测度, 简称测度, 矩阵 $(\mu_{ijk})_{m \times p}$ 称为单指标测度评价矩阵。

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \cdots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \cdots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \cdots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(2) 多指标综合测度评价向量。设 $\mu_{ik}=\mu(\mathbf{R}_i \in C_k)$ 为评价样本 \mathbf{R}_i 属于第 k 个评价类 C_k 的程度, 有

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk}, (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

显而易见, $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$ 且 $\sum_{k=1}^p \mu_{ik} = 1$, 则认为 μ_{ik} 为未确知测度, 称 $\{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ip}\}$ 为 \mathbf{R}_i 的多指标综合测度评价向量。

(3) 置信度识别准则。引入置信度识别准则对评价对象作最终的评价结果, 一般置信度 $\lambda \geq 0.6$ 。如果 $C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_p$, 且

$$k_0 = \min \left\{ k : \sum_{l=1}^k \mu_{il} \geq \lambda, (k = 1, 2, \dots, p) \right\} \quad (6)$$

则对评价样本 \mathbf{R}_i 评判为第 k_0 级评价类 C_{k_0} , 即评价样本的评价等级为 C_{k_0} 。

2.2 评价指标的选取

经现场建筑物损坏调查发现, 位于相同损坏等级的地表变形区域, 不同方位的建筑物损坏程度不同。以建筑物为研究对象, 顾及主变形方向对建筑物的影响, 从地表敏感变形因素、主变形方向和房屋因素3个方面选取建筑物损坏的评价指标。

(1) 地表敏感变形因素。煤矿开采必然会导致地表的移动变形, 产生的倾斜、曲率、水平变形等变形量都会对建筑物产生不同性质和程度的影响, 而不同的地表移动变形指标对建筑物的敏感程度是不同的, 如倾斜变形对建筑物的高度较为敏感, 水平变形对建筑物的长度较为敏感, 曲率对建筑物长度和高度都敏感等。因此, 选取倾斜、曲率和水平变形作为地表敏感变形指标。

(2) 主变形方向与建筑物长轴的角度关系。在实际开采过程中, 地下开采导致的地表最大移动变形方向并不是完全沿建筑物长轴或建筑物短轴分布, 大部分房屋处在斜交位置, 即地表最大变形值方向与建筑物长轴是有一定的角度, 不同角度的变形对建筑物损坏也是不同的, 结合数值模拟分析结果, 沿建筑物长轴方向时建筑物损坏最大, 其次是斜交, 随着斜交角度越大, 损坏程度越小, 最后与建筑物长轴垂直时最小, 即主变形方向与建筑物长轴夹角也是影响建筑物损坏的重要评价指标之一。

(3) 房屋因素。不同结构与质量的房屋因素也决定了其抗变形能力, 主要体现在建筑物的修建时间、尺寸与结构, 一般来说, 建筑物修建较早, 使用时间较长, 其抗变形能力弱; 不同的建筑物结构类型, 其抗变形能力是不一样的, 而建筑物通过圈梁或构造柱加固会提高其抗变形能力; 建筑物尺寸与地表敏感变形指标有关, 且建筑物长轴的抗变形能力弱于短轴, 且长轴方向带有门窗洞口, 进一步削弱其抗变形能力, 建筑物长轴可作为建筑物尺寸的重要参数。

因此, 选取地表最大变形指标、主变形方向以及房屋因素共7个评价指标, 其指标的重要程度见表3。

2.3 评价指标的量化与分级

针对评价指标的量化与分级, 参考《规范》对砖混结构建筑物的评判依据, 对建筑物采动损坏程度的评价等级定义为4级, 即I级轻微损坏(C_1)、II级轻度

损坏(C_2)、Ⅲ级中度损坏(C_3)、Ⅳ级严重损坏(C_4)，评价空间 $U=\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ 。

为了使评价指标的量化较为科学合理，参考国内外煤矿建筑物下采煤经验以及数值模拟结果，初步确

定各项评价指标的分级标准，见表4，其中水平变形、曲率和倾斜按照《规范》的评判标准，主变形方向与建筑物长轴的夹角按照数值模拟结果，建筑物质量参考《规范》中针对建筑物折旧率进行划分。

表3 评价指标

Table 3 Evaluating indicators

地表变形因素			主变形方向与 建筑物长轴夹角	房屋因素		
水平变形	曲率	倾斜		建筑物结构	建筑物尺寸	建筑物质量
随着变形的增大， 建筑物损坏越严重	随着斜交角度的增大， 对建筑物的损坏程度 减小			抗变形由强至弱将结构分 为砖混结构(圈梁构造柱)、 砖混结构(圈梁或浇筑楼板)、 砖混结构(楼板)和砖木结构	建筑物尺寸越大，抗变形能 力越弱，对地表变形较敏感	以建筑物修建时间为重要参 考，使用年限越久，其抗变 形能力降低

表4 评价指标分级标准

Table 4 Hierarchical standard of evaluation factors

评价指标	C_1	C_2	C_3	C_4
水平变形 X_1	[0,2]	(2,4]	(4,6]	> 6
曲率变形 X_2	[0,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,0.6]	> 0.6
倾斜变形 X_3	[0,3]	(3,6]	(6~10]	> 10
与建筑物长轴方向夹角 X_4	(75°,90°]	(45°,75°]	(15°,45°]	[0°,15°]
建筑物结构 X_5	砖混(圈梁构造柱)，赋值1	砖混(圈梁)，赋值2	砖混(楼板)，赋值3	砖木，赋值4
建筑物尺寸(长轴) X_6	[0,10]	(10,15]	(15,20]	> 20
建筑物质量(年限) X_7	[0,5]	(5,10]	(10,20]	> 20

2.4 权重的确定

目前确定各评价指标权重的方法很多，主要分为主观赋权法和客观赋权法，其中主观赋权法的特点是专家可以根据各影响因素的重要程度，合理确定各评价指标的顺序，但主观随意性较大；客观赋权法为克服主观赋权法的不足而提出的，权重系数取决于样本数据的统计分析，具有绝对的客观性，但也出现权系数与客观实际不符的情况。

在采动影响下建筑物损坏评价模型中，权重方法的确定直接影响建筑物损坏评价精度的优劣，是模型的重要组成部分。文献[6, 38-39]确定水平变形、曲率、倾斜的权系数为0.297、0.540、0.163；文献[20]选取曲率、水平变形、建筑物结构、建筑物面积、建房时间为评价指标，其权重为0.23、0.28、0.07、0.26、0.16，此外，主变形方向与建筑物长轴的角度关系对建筑物损坏影响很大。因此，为防止评价指标权系数与事实相悖，根据评价指标的重要程度，从重要到轻微依次为主变形方向与建筑物长轴的夹角、水平变形、曲率、倾斜、建筑物尺寸、建筑物质量和建筑物结构。

据评价指标的重要程度，采用层次分析法定权，通过1~9标度方法，建立判断矩阵，见表5。

表5 判断矩阵

Table 5 Judgment matrix

项目	X_4	X_1	X_2	X_3	X_6	X_7	X_5
X_4	1	3	4	5	7	8	9
X_1	1/3	1	2	3	4	5	6
X_2	1/4	1/2	1	2	3	4	5
X_3	1/5	1/3	1/2	1	2	3	4
X_6	1/7	1/4	1/3	1/2	1	2	3
X_7	1/8	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
X_5	1/9	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1

采用求积法计算判断矩阵的特征向量，从而求取各评价指标的权重 w_i ，计算公式为

$$\begin{cases} \bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, & i = 1, 2, \dots, n \\ w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \end{cases} \quad (7)$$

通过式(7)计算，判断矩阵的特征向量和最大特征根： $\mathbf{w}=(0.212, 0.143, 0.094, 0.423, 0.028, 0.060, 0.040)^T$, $\lambda_{\max}=7.2104$ ，并对判断矩阵进行一致性检验，

经计算得 $CI=0.035$, $CR=0.027 < 0.1$ 。因此, 判断矩阵符合一致性条件, 即特征向量 w 的各分量 w_i 可作为各影响因素的权重分配是合理的, 权重系数反映了实际情况, 具有一定的可靠性。

3 实例应用

3.1 实例 1: 峰峰矿区韦武庄村

3.1.1 工程概况

以峰峰矿区韦武庄村房屋损坏为例, 村庄位于煤矿井田范围的西北部, 村庄受护面积为 47.5 万 m^2 , 建筑物占地面积 9 万 m^2 , 人口约 2 500 人, 住户 600 余户, 井田内 2 号煤压煤量 335.9 万 t。2 号煤层煤厚 3.0 m, 煤层倾角 15°, 截止建筑物损坏调查为止, 村庄压煤已开采 182203、182204、182210 和 182212 等 4 个综采工作面, 工作面标高为 $-602 \sim -290$ m, 地表标高为 $+110 \sim +198$ m, 冲积层厚度薄, 局部仅 0.5 m。上覆岩层为中硬, F25 断层横跨村庄。

为便于评价方法的研究, 笔者选取采空区边缘有代表性的 5 户损坏严重的建筑物, 每户均有多处房屋, 根据房屋所处方位, 特命名为北房、南房、西房、东房, 分布位置如图 7 所示, 图中箭头表示建筑物所在位置的主变形方向。

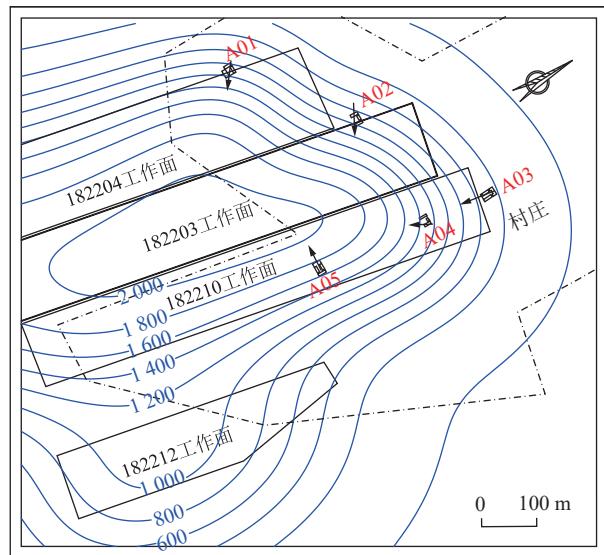


图 7 韦武庄村井下开采与损坏严重的房屋分布

Fig.7 Underground mining and distribution of severely damaged houses in Weiwuzhuang village

3.1.2 现场房屋损坏调查

村庄压煤的开采导致房屋损坏严重, 截止到调查时间村庄内 IV 级破坏房屋达 78 户, 地表裂缝分布于采空区边缘, 最大裂缝宽度为 80 mm, 涉及本文选取的建筑物损坏调查数据见表 6。

表 6 村庄房屋现场调查实测结果
Table 6 Field survey results of village houses

户	建筑物	地表变形			建筑物结构	《规范》预测等级	现场评判等级	IV 级损坏裂缝描述
		倾斜/ ($mm \cdot m^{-1}$)	曲率/ km^{-1}	水平变形/ ($mm \cdot m^{-1}$)				
A01	北房	11.2	-0.06	-4.2	砖木	IV	II	西房: 南墙斜缝 4 mm, 西墙斜缝 4 mm, 北墙与东墙和西墙裂开 42 mm
	南房	11.2	-0.07	-4.4	砖混	IV	II	
	西房	10.8	-0.06	-4.9	砖木	IV	IV	
A02	北房	10.6	0.08	4.3	砖木	IV	IV	北房: 北墙斜缝 25 mm, 整体向东错位 32 mm
	西房	10.0	0.08	4.3	砖混	IV	II	
	东房	10.1	0.07	3.5	砖混	IV	II	
A03	北房	4.4	0.06	2.8	砖木	II	II	西房: 东外墙 31 mm, 地面缝 35 mm; 东房: 东墙 32 mm 坚缝贯通, 南墙斜缝 20 mm, 地面缝 27 mm, 门顶缝 30 mm
	西房	5.1	0.05	3.0	砖木	II	IV	
	东房	5.6	-0.09	3.0	砖木	II	IV	
A04	北房	8.7	-0.02	-5.0	砖木	III	II	东房: 西墙 40 mm, 东墙 42 mm, 西窗下 13 mm, 墙体碎裂
	西房	8.6	-0.03	-5.0	砖混	III	III	
	东房	8.7	-0.02	-6.0	砖木	III	IV	
A05	北房	8.1	-0.02	-1.3	砖木	III	IV	北房: 南外墙 35 mm, 北墙 12 mm, 窗上 25 mm, 地板上错 90 mm; 南房: 东北角 35 mm, 西 0.5 mm
	南房	8.5	-0.02	-1.3	砖木	III	IV	
	西房	8.7	-0.02	1.2	砖木	III	I	

(1) 不同因素影响下建筑物损坏特征。由图 8(a)可知, 针对不同的地表变形类型, 建筑物损坏裂缝形

态不同。当地表受地表水平压缩变形时, 建筑物墙体挤压变形、墙体碎裂甚至墙皮脱落、地表隆起等裂缝

形态,如住户 A03;当建筑物受地表拉伸变形时,地表扒裂,建筑物墙体出现墙体竖向裂缝、门窗上角斜向裂缝,如住户 A04。当地表变形对不同结构建筑物损坏的影响,如图 8(b) 所示,建筑物结构包括砖木结构、砖混结构(楼板或浇筑)2 种,选取相同损害的建筑物,

其中砖木结构房屋损坏比较严重,为贯通裂缝,容易形成危房,严重时造成房屋倒塌,在损害防护时需要重点关注,而砖混结构建筑物表现为宽裂缝,建筑物的抗变形较好,可在采取补救措施后(如裂缝修复)继续使用。



图 8 不同地表变形与结构对建筑物的影响

Fig.8 Impact of different surface deformations and structures on buildings

(2) 地表变形预测等级的局限性。村庄建筑物现场评判等级基于《规范》表 3 中“建筑物损坏程度”,根据建筑物自然间砖墙裂缝宽度、梁柱裂缝长度、梁端抽出长度、柱水平错动、门窗变形等方面对建筑物损坏现状进行评判;《规范》预测等级是基于开采沉陷预计所得地表移动变形指标(即水平变形、倾斜、曲率)的临界变形值进行的预判或预测。

由于建筑物所在地表实测变形值难以获取,拟通过概率积分法进行预测,根据矿区实测数据和现场开采经验,确定预计参数为:下沉系数 $q=0.8$, 水平移动系数 $b=0.3$, 主影响角正切 $\tan \beta=2.0$, 开采影响传播角 $\theta_0=90^\circ-0.6\alpha$ (α 为煤层倾角), 拐点偏移系数 $k_s=0.04$, 通过预测获得各建筑物的地表移动变形值见表 6, 根据《规范》的评判标准,只能笼统的判断某一区域的损坏等级,与实测等级相比,15 栋建筑物仅有 4 栋准确,如 A01 户为Ⅳ级损坏,但实际上仅 A01 户的西房为

Ⅳ 级损坏,北房和南房均为 I 级轻微损坏;A03 户评判为 I 级损坏,但西房和东房达到Ⅳ 级损坏,显然预测结果与现场实测等级不符。故简单的通过 3 个地表变形指标来评判建筑物的损坏等级,不具有合理性。

3.1.3 构建建筑物损坏的未确知测度模型

(1) 构建单指标测度评价矩阵。针对各评价指标赋值,其中倾斜、曲率、水平变形为概率积分法预测的最大值;主变形方向的计算方法见文献^[25],与建筑物长轴斜交方向如图 7 所示;建筑物质量为建房时间至建筑物损坏调查时的之间的服务年限。通过工程实例,确定评价指标的量化值见表 6。

根据评价指标的定义和分级标准(表 4),由小到大分别给 a 、 b 、 c 分级赋值,构建单指标测度函数,其中倾斜、曲率、水平变形、建筑物尺寸和建筑物质量为极大值指标单指标测度函数构造,与建筑物长轴夹角为极小值指标单指标测度函数构造,建筑物结构为

定性指标单指标测度函数构造(图9)。

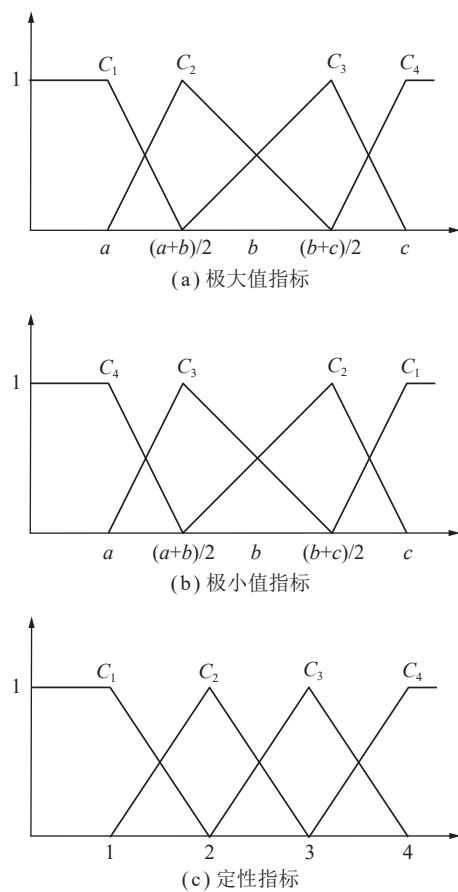


图9 单指标测度函数

Fig.9 Single-index measure function

为验证未确知测度方法的可行性,以建筑物A01北房(A01NF)为例,将表6中房屋损坏实例的评价指标的数值,通过图9中单指标测度函数进行计算,样本A01北房的单指标测度评价矩阵 $(\mu_{A01NFjk})_{7 \times 4}$ 为

$$(\mu_{A01NFjk})_{7 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.73 & 0.27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.84 & 0.16 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(2) 多指标综合评价向量的计算。通过2.4节计算的评价指标的权重为 $w=(0.212, 0.143, 0.094, 0.423, 0.028, 0.060, 0.040)^T$,通过式(5)计算多指标综合评价向量为 $R_{A01NF}=\{0.167, 0.482, 0.230, 0.122\}$,通过同样的计算方法得出A~E建筑物的多指标综合评价向量,见表7。

(3) 置信度识别与综合评判。根据多指标综合评价向量,取置信度 $\lambda=0.6$,通过式(6)对各建筑物的损坏程度进行综合判断,如建筑物A01北房,从小到大得 $k_0=0.657 \geq 0.6$,故判断A01北房的评价等级为Ⅱ级。同理,可评判出其余各建筑物的评价等级,评价结果见表7。

3.1.4 预测结果分析

通过综合考虑采动影响下建筑物损坏的影响因素,合理选取建筑物评价指标,综合判断其损坏等级,评价结果见表7,对预测结果分析如下:

表7 实例1~3村庄损坏严重房屋损坏评价指标的赋值及评价结果

Table 7 Evaluation index of village building damage assignment and evaluation result of cases 1 to 3

矿区村庄	住户	房屋	评价指标							多指标综合评价向量 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$	模型 预测等级	现场 评判等级
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7			
A01	A01	北房	-4.2	-0.06	10.2	52	4	13.3	6	{0.167, 0.462, 0.250, 0.122}	Ⅱ	Ⅱ
		南房	-4.4	-0.07	10.2	52	2	14.6	6	{0.167, 0.453, 0.287, 0.094}	Ⅱ	Ⅱ
		西房	-4.9	-0.06	9.8	38	4	14.3	20	{0.143, 0.247, 0.449, 0.162}	Ⅲ	Ⅳ
A02	A02	北房	4.3	0.08	9.6	25	4	9.7	24	{0.203, 0.074, 0.392, 0.331}	Ⅲ	Ⅳ
		西房	4.3	0.08	9.0	65	2	14.3	9	{0.284, 0.455, 0.168, 0.094}	Ⅱ	Ⅱ
		东房	3.5	0.07	10.1	65	2	13.7	9	{0.284, 0.462, 0.160, 0.094}	Ⅱ	Ⅱ
实例1: 峰峰矿区 韦武庄村	A03	北房	2.8	0.06	4.4	78	4	15.4	32	{0.615, 0.283, 0.035, 0.068}	I	Ⅱ
		西房	3.0	0.05	5.1	12	4	16.6	32	{0.143, 0.298, 0.068, 0.491}	IV	IV
		东房	3.0	-0.09	5.6	12	4	14.0	32	{0.143, 0.314, 0.053, 0.491}	IV	IV
A04	A04	北房	-5.0	-0.02	8.7	66	4	6.0	10	{0.372, 0.281, 0.181, 0.166}	Ⅱ	Ⅱ
		西房	-5.0	-0.03	8.6	24	2	14.5	30	{0.143, 0.045, 0.422, 0.391}	Ⅲ	Ⅲ
		东房	-6.0	-0.02	8.7	24	4	12.6	30	{0.143, 0.031, 0.302, 0.524}	IV	IV
A05	A05	北房	-1.3	-0.02	8.1	12	4	11.9	18	{0.369, 0.046, 0.072, 0.513}	IV	IV
		南房	-1.3	-0.02	8.5	12	4	11.9	8	{0.369, 0.083, 0.034, 0.514}	IV	IV
		西房	1.2	-0.02	8.7	78	4	15.2	8	{0.778, 0.068, 0.054, 0.103}	I	I

续表

矿区村庄	住户	房屋	评价指标							多指标综合评价向量 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$	模型预测等级	现场评判等级
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7			
实例2: 峰峰矿区 北神岗村	B01	北房	5.4	0.02	2.0	80	1	15.3	8	{0.636, 0.255, 0.109, 0}	I	I
		南房	5.4	0.02	2.0	80	1	15.3	8	{0.636, 0.255, 0.109, 0}	I	I
		院墙	4.8	0.02	2.0	10	3	20.4	2	{0.242, 0.240, 0.095, 0.423}	IV	IV
	B02	北房	5.8	0.02	2.3	80	2	15.6	10	{0.755, 0.201, 0.044, 0}	I	I
		南房	5.8	0.02	2.4	80	3	15.9	10	{0.755, 0.170, 0.076, 0}	I	I
		东房	5.2	0.02	2.3	10	2	19.4	10	{0.291, 0.193, 0.032, 0.483}	IV	IV
	B03	北房	5.9	0.06	2.5	82	2	14.5	20	{0.672, 0.226, 0.062, 0.040}	I	I
		院墙	5.9	0.06	2.5	8	4	19.7	20	{0.249, 0.226, 0.062, 0.463}	IV	IV
实例3: 徐州矿区 某村	B04	北房	1.8	-0.02	2.3	39	4	14.6	31	{0.449, 0.127, 0.296, 0.128}	III	III
		南房	1.5	-0.03	2.1	39	4	15.7	30	{0.449, 0.332, 0.152, 0.068}	II	II
		东房	1.5	-0.02	2.1	52	4	14.0	30	{0.449, 0.361, 0.123, 0.068}	II	II
	B05	北房	1.0	-0.02	0.1	8	4	14.2	30	{0.291, 0.206, 0.039, 0.463}	IV	III
		南房	1.0	-0.02	0.1	8	4	14.3	30	{0.291, 0.205, 0.040, 0.463}	IV	III
		东房	1.0	-0.02	0.1	82	4	9.7	30	{0.932, 0, 0, 0.068}	I	I
	B06	北房	0.8	-0.02	0.1	8	4	14.8	30	{0.449, 0.033, 0.028, 0.491}	IV	IV
		西房	0.8	-0.02	0.1	82	4	14.7	30	{0.872, 0.061, 0.026, 0.040}	I	I
		东房	0.8	-0.02	0.1	82	4	13.9	30	{0.872, 0.071, 0.017, 0.040}	I	I
实例3: 徐州矿区 某村	C01	主房	6.6	0.16	7.8	69	2	14.0	22	{0.397, 0.244, 0.107, 0.252}	II	II
		配房及院墙	6.2	0.15	7.6	21	2	14.8	22	{0.143, 0.042, 0.239, 0.576}	IV	IV
	C02	主房	6.0	0.2	8.2	66	3	13.9	22	{0.368, 0.322, 0.057, 0.252}	II	II
		配房及院墙	5.8	0.19	8.9	24	2	13.9	22	{0.143, 0.103, 0.277, 0.478}	IV	IV
	C03	主房	5.5	0.08	10.1	61	2	13.9	22	{0.171, 0.498, 0.078, 0.252}	II	II
		配房及院墙	5.4	0.10	10.2	29	3	14.8	22	{0.143, 0.071, 0.505, 0.281}	III	IV
	C04	主房	5.5	0.24	7.5	72	1	13.8	22	{0.509, 0.140, 0.205, 0.146}	II	II
		配房及院墙	5.5	0.22	8.0	18	3	14.2	2	{0.183, 0.052, 0.293, 0.472}	IV	IV
	C05	主房	6.0	0.11	11.1	69	2	13.8	22	{0.424, 0.233, 0.091, 0.252}	II	II
		配房及院墙	6.0	0.12	10.9	21	3	14.1	22	{0.143, 0.060, 0.291, 0.506}	IV	IV
实例3: 徐州矿区 某村	C06	主房	7.2	0.19	9.5	74	1	14.0	15	{0.538, 0.086, 0.165, 0.212}	II	II
		配房及院墙	7.2	0.20	9.2	16	3	14.0	15	{0.143, 0.030, 0.221, 0.607}	IV	IV
	C07	主房	6.8	0.15	10.5	72	1	14.0	15	{0.509, 0.125, 0.154, 0.212}	II	II
		配房及院墙	6.7	0.14	10.6	18	3	14.4	15	{0.143, 0.037, 0.270, 0.551}	IV	IV
	C08	主房	7.0	0.26	9.8	76	1	14.3	15	{0.594, 0.032, 0.162, 0.212}	II	I
		配房及院墙	7.1	0.26	9.8	14	3	14.0	15	{0.143, 0.032, 0.190, 0.635}	IV	IV
	C09	主房	6.6	0.06	10.3	74	1	11.0	15	{0.601, 0.090, 0.096, 0.212}	I	I
		配房及院墙	6.5	0.09	10.4	16	3	14.4	4	{0.183, 0.045, 0.165, 0.607}	IV	IV

(1) 与《规范》评价方法相比。《规范》将倾斜、曲率、水平变形的临界变形值划分建筑物的损坏等级，仅笼统的判断该建筑物区域的损坏等级，没有区分不同结构建筑物的抗变形能力。与现场评判等级相比，15栋建筑物仅有4栋一致，预测精度较低，导致预测结果与实际损坏现状差异较大，难以进行针对性的预

防与维护。

(2) 与其他综合评价结果相比。文献[8-10]考虑了建筑物自身因素，能区分不同结构建筑物的损坏等级，如A03户的建筑物，地表变形因素和房屋因素相近，损坏等级理应相同，但实测结果显示，朝南北向的A03户北房为Ⅱ级损坏，朝东西向的西房和东房为Ⅳ

级损坏,造成损坏程度差异的原因是没有考虑建筑物的空间布局,与实际损坏调查结果不符。

(3)本文的评价指标充分考虑了地表敏感变形大小、方向、以及房屋因素3个方面,评价指标的选取较为合理。结果显示,5户15栋建筑物,12栋建筑物预测结果与实测等级相符,仅3栋建筑物损坏等级与调查等级相差1级,具体为A01西房和A02北房预测等级为Ⅲ级,实测等级为Ⅳ级损坏,A03北房预测等级为Ⅰ级,实测等级为Ⅱ级。因此,预测结果与现场损坏程度基本一致,取得了较为良好的预测效果。

3.2 实例2:峰峰矿区北神岗村

该村庄全村324户,房屋结构为砖结构和填充土坯结构,木架顶,抗变形能力参差不齐。2012—2014

年期间村庄下开采182207和182107工作面。其中工作面采深870 m,松散层厚129 m,煤层倾角16°,采厚3.5 m,采用走向长壁后退式采煤法,垮落法管理顶板。根据建筑物损坏程度,共选取村庄6户损坏较为严重的房屋,B01~B03户位于村庄北部边缘,为新建住宅,房屋质量较好,其中B01有圈梁和构造柱,B04~B06户位于旧房区,房屋质量较差,如图10所示。

现场调查结果可知,B01~B03北房为Ⅰ级轻微损坏,院墙为Ⅳ级损坏,其中B01北房与院墙连接处约40 mm裂缝,B02东侧院墙裂缝70 mm,地面有东西向地面裂缝30 mm;B04户北房后墙东侧墙角有25 mm斜向裂缝,B05户北房西起第2间墙角裂缝15 mm,均为Ⅲ级损坏等。

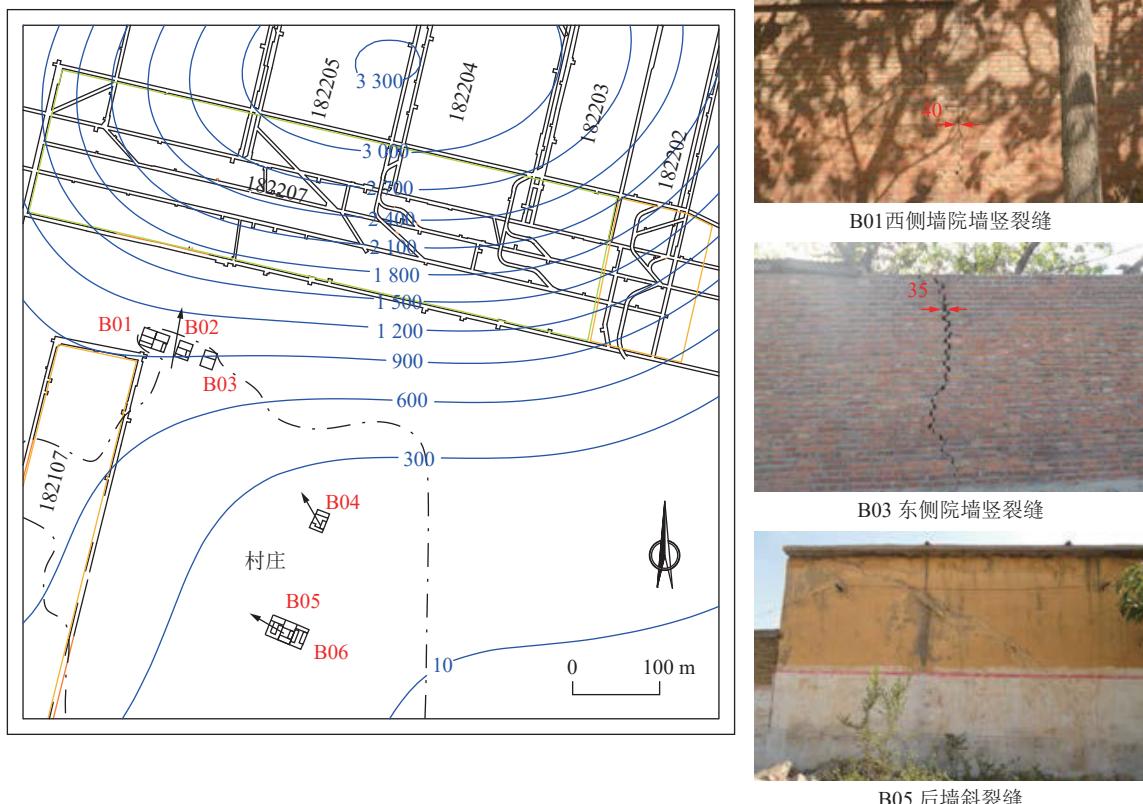


图10 北神岗村井下开采与建筑物损坏现状

Fig.10 Status of underground mining and building damage in Beishenggang Village

通过概率积分法预计可知,B01~B03均为Ⅲ级损坏,B04~B06为Ⅰ级损坏,明显与现场损坏现状不符。采用本文方法对房屋损坏进行评价,评价指标的取值见表7,其中B03院墙与北房墙体为整体墙,院墙的建筑尺寸应作包含北房建筑长度。模型预测结果表明,6户17栋建筑物,14栋建筑物预测准确。

3.3 实例3:徐州矿区某村

徐州矿区某村庄东部建筑物损坏严重,区域内共

调查房屋259户,建筑物类型为三开间或四开间,楼层最大为2层,正房与配房等通过院墙连成一个整体,图11中粗线区域为就地重建抗震抗变形结构试验房屋,建房时间为1990—1992年,抗变形能力高;粗线外为扩建房屋,房屋为普通的砖石结构住宅,抗变形能力一般。

选取村庄Ⅳ级损坏范围内9户进行分析,其中C01~C05户主房为抗变形结构房。通过现场损坏调

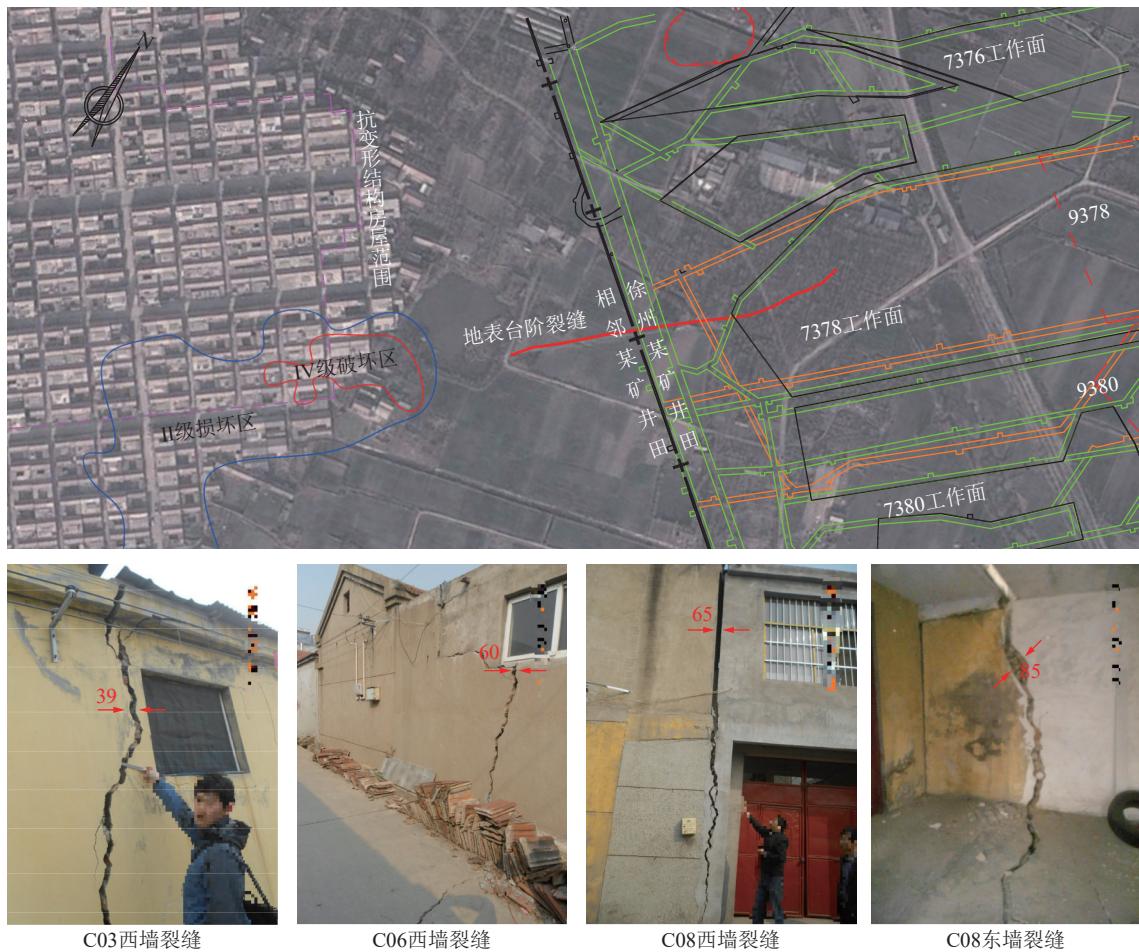


图 11 徐州矿区某村建筑物损坏裂缝

Fig.11 Damage crack of houses in a village of Xuzhou mining area

查可知,主房损坏程度轻微,最大为Ⅱ级损坏,为轻度损坏,损坏严重位置为主房和配房相连的院墙连接处,如图 11 所示,最大裂缝宽度达 85 mm。

通过开采沉陷预计可知,范围内均为Ⅲ级损坏以上,房屋损坏严重。考虑到房屋的抗变形能力和建筑物的不同方位,将主房、配房及院墙分开进行分析,评价指标取值见表 7,应用表明:9 户 19 栋建筑物预测结果与现场评判结果基本一致,说明在徐州矿区预测效果较好,准确率较高。

3.4 应用推广及预测结果分析

上述 3 个应用实例主要考虑损坏较严重房屋的评价分析,没有考虑损坏较轻微的房屋。因此,3 个实例均新增损坏等级为 I ~ Ⅲ 级的建筑物样本数据,扩大评价方法的推广应用,见表 8。

(1) 实例 1。针对损坏不严重的房屋进行分析,另选取 15 户 49 栋建筑物进行预测,预测结果表明,15 户中 46 栋房屋预测准确,其中 3 户预测出现偏差,究其原因可知,A08 西房由于地形坡度较陡的原因,加剧了西房的损坏程度;A15 无人居住,维护较差;A19 维护较好,墙面重新粉刷,裂缝宽度没有反映

实际损坏程度,见表 8。因此,韦武庄村共选取 20 户 64 栋房屋,其中 53 栋建筑物预测准确,准确率达 82.8%。

(2) 实例 2。北神岗村村庄煤柱边缘有开采活动,截止至房屋损坏调查时间,村庄煤柱开采较少,村庄房屋采动影响轻微,且村庄中央的旧房区无人居住,无法入户调查,导致样本数据有限,故新增 5 户 13 栋房屋进行分析。应用表明,10 栋房屋预测准确,出现偏差的原因是 B07 带有圈梁和构造柱,房屋质量较好,损坏轻微,损坏严重的位置为院墙与房屋搭接处,宽度达 20 mm;B10 北房预测等级为Ⅱ级,实际调查等級为Ⅲ级,原因是与 B05 连排,造成实际房屋墙体长度与预测选取长度不符。本村共选取 10 户 30 栋房屋(包括院墙),25 栋房屋预测准确,准确率达 83.3%。因此,评价结果与现场房屋损坏调查结果基本一致,准确反映了村庄房屋的损坏程度。

(3) 实例 3。本村庄新增样本 11 户,与实测结果相比,出现偏差的原因 C10、C12、C15 为独栋建筑物,无人居住,房屋维护较差,墙皮脱落,但内墙无明显裂缝;C19 损坏严重位置为院墙与房屋的搭接处。

表8 实例1~3新增样本数据评价结果与原因分析

Table 8 The evaluation results and reason analysis of the added sample data of cases 1 to 3

矿区村庄	住户 编号	房屋 数量	最大损坏 等级房屋	调查 等级	预测 等级	损坏现状	偏差原因
实例1: 峰峰矿区韦武庄村	A06	4栋	西房	Ⅲ	Ⅲ	北外墙竖缝16 mm	
	A07	4栋	北房	I	I	南外墙横缝3 mm	
	A08	4栋	西房	II	III	北墙斜缝6 mm, 地面扒裂8 mm	西房外地形较陡
	A09	4栋	西房	III	III	南墙斜缝17 mm	
	A10	4栋	北房	III	III	南墙斜缝17 mm, 地面扒开12 mm	
	A11	4栋	西房	II	II	东墙竖缝5 mm, 西墙竖缝2 mm	
	A12	4栋	西房	II	II	顶与北墙西墙南墙扒开6 mm	
	A13	2栋	西房	III	III	西墙斜缝22 mm	
	A14	3栋	北房	II	II	北墙竖缝8 mm	
	A15	1栋	北房	III	II	西墙竖缝18 mm, 南墙斜缝23 mm	独栋, 无人居住
	A16	2栋	东房	III	III	西墙斜缝3 mm, 地面向西扒开17 mm	
	A17	3栋	西房	II	III	东墙斜缝2 mm, 北墙竖缝8 mm	
	A18	2栋	北房	III	III	东墙与南墙扒开28 mm, 地面扒开斜缝3 mm	
	A19	4栋	北房	II	III	北墙竖缝5 mm	维护较好
	A20	4栋	西房	II	II	北墙斜缝10 mm	
	B07	2栋	围墙	II	IV	围墙与主屋间裂缝宽20 mm	砖混(圈梁), 与B01连排, 裂缝最宽为院墙与北房搭接处
实例2: 峰峰矿区北神岗村	B08	3栋	围墙	III	III	北房与西侧围墙裂开15 mm	
	B09	3栋	北房	III	III	后墙东侧梁角宽裂缝30 mm	
	B10	4栋	北房	III	II	西墙斜竖裂缝15 mm	与B05连排, 实际房屋尺寸较长
实例3: 徐州矿区某村	C10	1栋	北房	III	II	砖缝驳实, 内外墙无损伤	独栋, 且无人居住
	C11	3栋	院墙	II	II	西外墙竖向裂缝宽4 mm; 与主房搭接处裂缝4 mm	
	C12	1栋	北房	II	I	前墙连通裂缝宽12 mm	独栋, 且无人居住
	C13	3栋	北房	III	III	主房西1间后墙窗台裂缝11 mm; 前墙角裂缝12 mm	
	C14	1栋	北房	III	II	后墙裂缝8 mm; 门上角裂缝5 mm	独栋, 且无人居住
	C15	3栋	配房	III	III	东房斜裂缝10 mm; 房顶裂缝18 mm	
	C16	3栋	全部	III	IV	北房东墙裂缝35 mm; 东房地面裂开35 mm; 院墙西侧裂缝40 mm	
	C17	3栋	围墙	II	II	二层门楼外侧裂缝宽5 mm	
	C18	3栋	围墙	II	II	与配房搭接处裂缝宽8 mm; 东围墙有错动20 mm	
	C19	3栋	围墙	III	II	地面扒裂10 mm; 与配房搭接处裂缝宽25 mm	裂缝位于北房与配房搭接处
	C20	3栋	院墙	III	III	地面扒裂15 mm; 与配房搭接处裂缝宽15 mm	

因此,包括院墙在内,共选取20户46栋建筑物,与实测相比,42栋预测准确,预测精度较高。

因此,笔者共选取3个村庄50住户,包括院墙在内,共计140余栋建筑物,与现场评判结果相比,预测准确度均高于80%。说明从地表敏感变形因素、主变

形方向、房屋因素等方面建立建筑物损坏的评价指标体系是合理的,弥补了传统评价方法的不足。

4 结论与讨论

(1) 通过现场调查、数值模拟和综合分析,揭示了

地表变形、建筑物结构类型、主变形方向与建筑物长轴的夹角等因素对建筑物损坏影响规律;得出了平房建筑加速损伤的地表变形临界值为曲率 $K=0.6 \text{ mm/m}^2$, 水平变形 $\varepsilon=6 \text{ mm/m}$ 。

(2) 研究确定了有圈梁和构造柱的二层砖混结构建筑物各级损坏程度的地表临界倾斜变形、水平变形、曲率变形, I 级: $i=3.0 \text{ mm/m}$ 、 $\varepsilon=4.0 \text{ mm/m}$ 、 $K=0.2 \text{ mm/m}^2$; II 级: $i=6.0 \text{ mm/m}$ 、 $\varepsilon=7.0 \text{ mm/m}$ 、 $K=0.5 \text{ mm/m}^2$; III 级: $i=10.0 \text{ mm/m}$ 、 $\varepsilon=9.0 \text{ mm/m}$ 、 $K=0.8 \text{ mm/m}^2$; IV 级: $i > 10.0 \text{ mm/m}$ 、 $\varepsilon > 9.0 \text{ mm/m}$ 、 $K > 0.8 \text{ mm/m}^2$, 为补充“三下开采规范”的指标数据提供参考与借鉴。

(3) 基于地表敏感变形因素、主变形方向、房屋因素共 7 个影响因素,建立了建筑物采动损坏评价的未知数测度模型。应用于峰峰矿区和徐州矿区的 3 个村庄建筑物损坏实例,应用表明,在 50 户 140 余栋建筑物损坏预测评价中,预测准确率在 80% 以上,高于传统方法的预测结果,且预测效果良好,验证了评价指标选取和评价模型的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 王金庄, 郭增长. 我国村庄下采煤的回顾与展望[J]. 中国煤炭, 2002, 28(5): 28–31.
WANG Jinzhuang, GUO Zhengchang. Coal mining under villages in China: A review and outlook[J]. *China Coal*, 2002, 28(5): 28–31.
- [2] 崔希民, 张兵, 彭超. 建筑物采动损害评价研究现状与进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1718–1728.
CUI Ximin, ZHANG Bing, PENG Chao. Current status and progress on the estimation of mining-induced building damage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1718–1728.
- [3] 煤炭科学研究院北京开采研究所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [4] 国家安监总局, 国家能源局, 国家煤监局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [5] 胡炳南. 建筑物采动破坏程度的模糊综合评判[J]. 煤矿开采, 1993(3): 23–27.
- [6] 刘立民, 刘汉龙, 连传杰. 建筑物采动损坏等级评定的物元模型及其应用[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 17–21.
LIU Limin, LIU Hanlong, LIAN Chuanjie. Matter-element model for buildings' damage grade evaluation and its application caused by mining subsidence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(1): 17–21.
- [7] 邱清辉, 黄海隆. 基于云模型的煤矿采动对地表建筑物损害评价[J]. 煤炭技术, 2021, 40(12): 67–69.
QIU Qinghui, HUANG Hailong. Damage assessment of surface buildings caused by coal mining based on cloud model[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(12): 67–69.
- [8] 郭文兵, 刘义新, 李小双. 采动影响下建筑物损害程度的模糊聚类分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 288–292.
GUO Wenbing, LIU Yixin, LI Xiaoshuang. Fuzzy clustering analysis of mining induced damages of buildings[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(3): 288–292.
- [9] 郭文兵, 吴财芳, 邓喀中. 开采影响下建筑物损害程度的人工神经网络预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 583–587.
GUO Wenbing, WU Caifang, DENG Kazhong. Artificial neural network prediction model of mining-induced damage of buildings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 583–587.
- [10] 魏威, 李夕兵. 地采诱发建筑物损害识别的多元判别分析模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3335–3343.
WEI Wei, LI Xibing. Identification of building damage induced by underground mining using multivariate discriminant analysis model[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(8): 3335–3343.
- [11] 连增增, 谭志祥, 邓喀中, 等. 基于模糊模式识别的采动区建筑物损害等级预测[J]. 煤矿安全, 2013, 44(2): 219–221.
LIAN Zengzeng, TAN Zhixiang, DENG Kazhong, et al. Damage grade forecast of buildings in mining area based on fuzzy pattern recognition[J]. *Safety in Coal Mines*, 2013, 44(2): 219–221.
- [12] 王正帅, 韩奎峰, 邓喀中. 建筑物采动损害的熵权模糊识别模型[J]. 煤矿开采, 2013, 18(5): 17–20.
WANG Zhengshuai, HAN Kuifeng, DENG Kazhong. Entropy-weight fuzzy recognition model of buildings influenced by mining[J]. *Coal Mining Technology*, 2013, 18(5): 17–20.
- [13] MALINOWSKA A, HEJMANOWSKI R. Building damage risk assessment on mining terrains in Poland with GIS application[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(2): 238–245.
- [14] SAEIDI A, DECK O, VERDEL T. Development of building vulnerability functions in subsidence regions from empirical methods[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(10): 2275–2286.
- [15] SAEIDI A, DECK O, AL HEIB M, et al. Development of a damage simulator for the probabilistic assessment of building vulnerability in subsidence areas[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 73: 42–53.
- [16] MALINOWSKA A. Classification and regression tree theory application for assessment of building damage caused by surface deformation[J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(2): 317–334.
- [17] DECK O, SINGH A. Analytical model for the prediction of building deflections induced by ground movements[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012, 36(1): 62–84.
- [18] BASMAJI B, DECK O, AL HEIB M. Analytical model to predict building deflections induced by ground movements[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 23(3): 409–431.
- [19] RUSEK J, TAJDUŚ K, FIREK K, et al. Score-based Bayesian belief network structure learning in damage risk modelling of mining areas building development[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126528.
- [20] 王文娜, 吴侃, 陈冉丽, 等. 基于 GIS 和随机森林的采动区建筑物损害综合评价[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 201–207.

- WANG Wenn, WU Kan, CHEN Ranli, et al. Comprehensive evaluation of building damage in mining area based on GIS and random forest[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(3): 201–207.
- [21] STRZALKOWSKI P. Some remarks on impact of mining based on an example of building deformation and damage caused by mining in conditions of upper Silesian coal basin[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, 176(6): 2595–2605.
- [22] 崔希民, 车宇航, 赵玉玲, 等. 采动地表移动变形与建筑物损坏程度评价的再认识[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 145–153.
- CUI Ximin, CHE Yuhang, ZHAO Yuling, et al. Further discussion on mining deformation and building damage classification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 145–153.
- [23] SON M, CORDING E J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(2): 162–177.
- [24] EL KAHI E, DECK O, KHOURI M, et al. A new simplified meta-model to evaluate the transmission of ground movements to structures integrating the elastoplastic soil behavior[J]. *Structures*, 2020, 23: 324–334.
- [25] 王亮, 郭庆彪, 王磊, 等. 采空区建设场地稳定性评价指标体系构建研究[J]. *金属矿山*, 2022(8): 245–253.
- WANG Liang, GUO Qingbiao, WANG Lei, et al. Study on construction of stability evaluation index system of construction site on the goaf[J]. *Metal Mine*, 2022(8): 245–253.
- [26] COOPER A H. The classification, recording, databasing and use of information about building damage caused by subsidence and landslides[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2008, 41(3): 409–424.
- [27] 仲继寿. 采动区砌体结构房屋变形控制设计 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [28] 李培现, 谭志祥. 开采影响地表点变形状态分析及主变形值计算[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(1): 96–102.
- LI Peixian, TAN Zhixiang. Mining influenced ground deformation state analysis and principal deformation calculation[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(1): 96–102.
- [29] 郑刚, 李志伟. 坑角效应对基坑周边建筑物影响的有限元分析[J]. *天津大学学报*, 2012, 45(8): 688–699.
- ZHENG Gang, LI Zhiwei. Finite element analysis of adjacent building response to corner effect of excavation[J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(8): 688–699.
- [30] ANASTASOPOULOS I. Building damage during nearby construction: Forensic analysis[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 34: 252–267.
- [31] LIAN X, DAI H. Mapping the degree of damage to houses of Paifang Village, Anhui, China, caused by underground coal extraction[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(3): 182.
- [32] KAPUSTA L, SZOJDA L. The role of expansion joints for traditional buildings affected by the curvature of the mining area[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 128: 105598.
- [33] 夏军武, 常鸿飞. 采动区地基—基础—钢框架结构空间协同作用的机理研究[C]//第二届结构工程新进展国际论坛. 大连, 2008.
- [34] 马宏旺, 王兰民, 陈龙珠, 等. 农村住宅砌体结构地震破坏数值模拟研究[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(2): 232–239.
- MA Hongwang, WANG Lanmin, CHEN Longzhu, et al. Numerical simulation of earthquake damage in rural masonry buildings[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(2): 232–239.
- [35] 缪志伟, 杨冬梅, 马栋梁, 等. 基于数值模拟的村镇典型砌体结构地震抗倒塌性能分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(3): 506–515.
- MIAO Zhiwei, YANG Dongmei, MA Dongliang, et al. Analysis on seismic collapse resistance performance of typical rural masonry structures based on numerical simulation[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2022, 52(3): 506–515.
- [36] 廉旭刚, 陈胜云, 胡海峰. 地表曲率变形对房屋墙体损坏的数值模拟研究[J]. *煤矿开采*, 2016, 21(2): 33–36, 52.
- LIAN Xugang, CHEN Shengyun, HU Haifeng. Numerical simulation of wall damage by surface curvature deformation[J]. *Coal Mining Technology*, 2016, 21(2): 33–36, 52.
- [37] 徐乃忠, 高超, 刘贵, 等. 采动影响区房屋损害地表移动变形临界值研究[J]. *煤矿开采*, 2017, 22(4): 65–69.
- XU Naizhong, GAO Chao, LIU Gui, et al. Study of surface movement deformation critical value of house damage in mining influence area[J]. *Coal Mining Technology*, 2017, 22(4): 65–69.
- [38] CHUANJIE L, LIMING L, CHUANG G. Fuzzy mathematical evaluation for masonry structure buildings' damage grade caused by coal mining[J]. *Journal of Coal Science & Engineering(China)*, 1999(1): 33–37.
- [39] 何荣, 王斌. 基于层次分析法的矿区建筑物损害程度模糊评价[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(1): 32–37.
- HE Rong, WANG Bin. Fuzzy evaluation of damage degree of buildings based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2017, 36(1): 32–37.