科技创新

采区大规模建筑群快速应力分析及沉陷损害程度评价模型

贾纯雪[1,2]

(1. 山西省交通科技研发有限公司，太原 030032；2. 太原理工大学矿业工程学院，太原 030024)

摘要：针对矿产资源开发引发的岩层移动与地表沉陷问题，以法国Joeuf铁矿为案例，通过平面框架模型简化地面建筑结构，采用有限元法系统分析地表移动、初始荷载及自重荷载作用下的建筑应力响应。创新性开发了适用于村庄尺度的采空沉陷区建筑损害评估MATLAB程序模型，实现了大规模建筑群的快速损害分级。应用结果表明，两层铁矿坍塌导致约43 %的建筑处于高影响等级。通过与现有研究对比，该模型在评估效率与精确度上均表现优异，其建筑群损害等级分布预测的准确率显著提升，为矿区城镇安全规划提供了量化决策工具。

关键词：采空区；建筑群；有限元法；框架结构；建筑物损害评估

中图分类号：TU478 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)04－0031－10

随着经济社会的发展，人类社会对煤炭、石油、钢铁等能源资源的需求将持续增加，资源的安全开发及环境保护问题日趋突出。地下矿产资源的大规模开采，可能会造成地表移动，包括地表水平位移(水平移动、拉伸与压缩变形)和垂直位移(下沉、倾斜、曲率、扭曲)以及地表平面内的剪应变[1-3]。地表移动变形会对采空区建筑物产生附加应力变化，从而引起建筑物各种类型的损害[4-5]。目前，在结构设计中，中国仍然采用建筑上部结构和建筑基础分别计算的设计方法，这类结构设计方法并不能反映沉陷作用下建筑物上部结构的受力分布情况[6]。因此，深入研究采动影响下建筑物基础与地表移动变形的关系及建筑物损害状况等相关问题具有重要的实际应用价值。为对采空区受沉陷影响的建筑进行保护和加固，需对采空区建筑的损害程度进行合理评估。矿山沉陷区建筑物损害的评价方法包括经验方法、数值方法。

经验方法主要采用采矿沉陷值来判断建筑物损害等级[7]。Saeidi等[8]开发了脆弱性曲线判断单个建筑损害的经验方法，其能够处理大量建筑。崔希民等[1]开展了采空区建筑物长度对其损害程度的影响研究，并将建筑物损害分类以预计的地表变形为准。虽然经验方法在处理大规模建筑沉降问题时具备一定优势，但其评价标准往往缺乏准确依据。

数值方法通常用于地表移动的计算、建筑结构内部应力变化的研究以及评估地表移动损害情况[9-10]。Zhao和Konietzky[11]提出了一种考虑复杂地质情况的建模方法来预测煤矿地表移动，再现了过去地表沉降规律并可以预测未来几十年的情况。廖孟光等[12]、Cai等[13]使用有限元软件ANSYS、FLAC3D对地面荷载作用下开采沉陷区地基的沉陷变形进行数值计算。Xu等[14]基于有限差分法对矿区开采引起的地表沉陷进行预测，以判断煤层的开采是否会对水库副坝产生负面影响。Marian等[15]采用有限元方法研究了受地下开采影响的典型建筑物的行为，并建立建筑物结构构件的应力状态模型。Akhaveissy和Milani[16]、Helmerich等[17]使用有限元软件研究个别结构(建筑物、桥梁等)的损坏。Son和Cording[18]利用基于结构变形部分的平均应变状态，同时考虑建筑物剪切刚度对地面沉陷施加剖面变形的影响评价开挖引起的建筑损伤。这些数值方法可以进行复杂的力学分析，但当将它们应用于大规模建筑群的损害评估时，由于计算规模过大造成耗时过长。

除了上述两类建筑物损害评估方法，还有学者提出新的评估方法，如李振发[19]提出熵权-模糊

收稿日期：2025-09-06

基金项目：山西省应用基础研究计划(202203021222100)

作者简介：贾纯雪(1997—)，女，山西忻州人，硕士，助理工程师，研究方向为主要采区沉陷评估。

综合评价法对地表建筑物安全进行评价，确定包括地表移动变形和建筑物自身属性的评价指标体系。脆弱性曲线与脆性曲线也是类似评估建筑物损害的方法[20]，考虑到评估过程中的不确定性，这种方法可以对达到或超过给定的损害水平进行评估。

目前，国内采用常规的数值计算软件构建结构模型评估大规模建筑群受到的应力变化及损害时，虽然力学理论依据充足，但往往计算成本较高（完全符合建筑物结构特征的一栋建筑往往需要几分钟或几小时），无法实现快速评估的目的。针对上述问题，本文基于有限元方法搭建建筑群简化框架模型，实现采空区沉陷引起大规模建筑群损害的快速评估，该模型比传统有限元方法的建筑模型更加简洁高效。

1　地表移动变形预计

Joeuf 市（法国）矿区铁矿大量开采引发了许多环境问题，包括矿区地面建筑的沉陷损害。该地区地表有 1 500 多栋无砌体混凝土材料的建筑，一些小型结构不计入考量范围，共计 1 094 栋建筑被考虑在内。地下分布有石灰岩（38 m），带有薄泥灰岩层的石灰岩（27 m）、泥灰岩（19 m）、“S2-S3”铁矿层（6.5 m）、泥灰岩（5 m）、灰色铁矿层（3.6 m），以及最下层的泥灰岩。表 1 列出了两铁矿层的一些主要开采特征，包括开采深度和厚度。这些开采特征可参考图 1 中的垂直剖意图。灰色铁矿层和“S2-S3”铁矿层开采后，地下矿柱在一段时间后将无法承受上覆地层的重量，地面出现沉陷，建筑物也可能因此产生沉陷，那么建筑物结构可能存在风险。本文地表移动变形预计计算采用中国矿业大学（北京）开发的开采沉陷分析系统软件 MSAS，采用概率积分法模型。

表 1　Joeuf 市下开采矿层主要特征[21]

矿层	开采区域	采出率/%	开采深度/m	开采厚度/m	预计最大下沉/量 m
灰色铁矿层	1/2/3	35	95	3.6	5.506
“S2-S3”层	4/5/6	45	84	6.5	

1.1　地表移动变形预计

图 2(a)表示根据开采两个矿层的共同影响下的地表受采空影响造成的下沉预计，并根据开采范围得出预计下沉等值线图。采空区预计的水平移动量可以分为正东方向和正北方向。图 2(b)表示在正东方向上水平移动预计等值线图。图 2(c)表示在正北方向上水平移动预计等值线图。由预计结果可得，下沉最大值为 5 056 mm，位于矿区中心；正东方向上的水平移动最大值为 921 mm；正北方向上的水平移动最大值为 898 mm。

1.2　任意地表点移动量提取

为精确获取任意建筑物沉陷值，基于开采沉陷分析系统软件 MSAS 得到的地表移动变形等值线图，采用线性插值法编写任意点地表移动提取的 MATLAB 程序。由于需同时考虑建筑物坐标与沉陷量，数据类型为三维数据（X，Y，Z）。因此本文选用 griddata 函数的基于三角剖分的自然邻点插值，支持二维和三维数据插值。如图 3 所示，将等值线图中分散样点的沉陷数据插值到覆盖建筑物的规

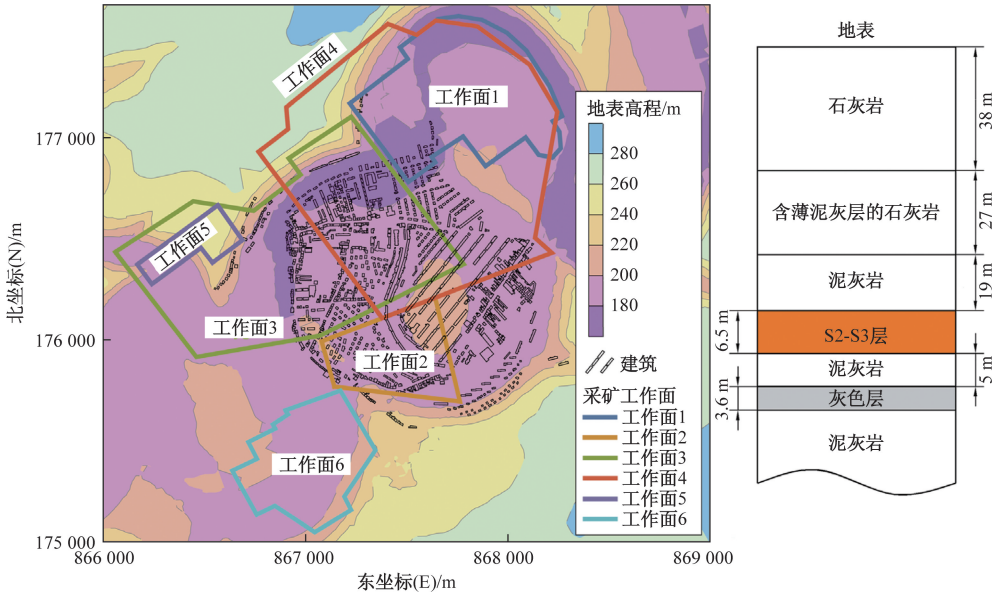
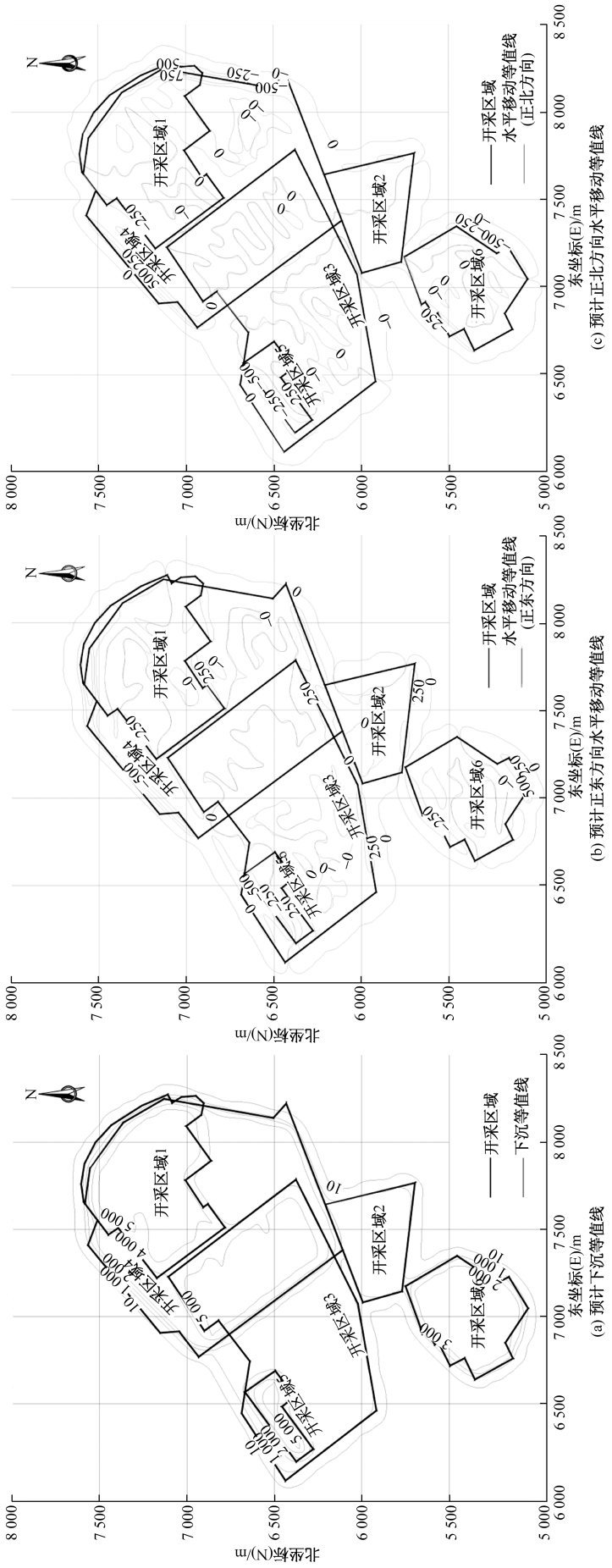
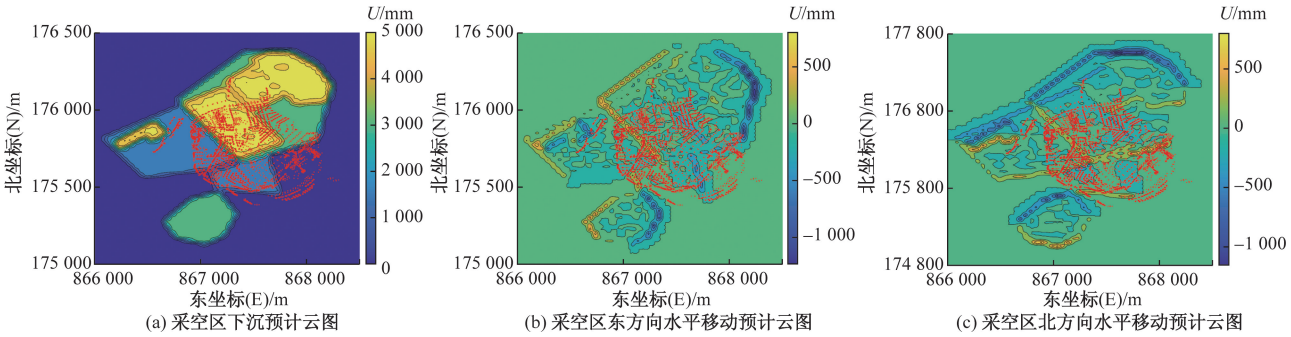


图 1　Joeuf 市矿层开采特征[22]



(a) 预计下沉等值线　(b) 预计正东方向水平移动等值线　(c) 预计正北方向水平移动等值线

图 2　采空区地表移动等值线



(a) 采空区下沉预计云图　(b) 采空区东方向水平移动预计云图　(c) 采空区北方向水平移动预计云图

图 3　采空区任意点地表移动预计云图

则格网角点的沉陷数据中，并根据规则格网的沉陷数据在 MATLAB 中利用三角剖分的自然邻点插值求解任意点处沉陷数据，同时显示建筑物在云图中的位置。

如图 4 所示，以 No. 1796 建筑物为例，建筑物主惯性轴是由建筑物最小外接矩形求解得出，将求得的主惯性轴转化为平面框架中的长短轴。根据规则格网角点的预计沉陷值，采用 MATLAB 中的自然邻近插值计算建筑物主惯性轴角点的沉陷值，包括下沉、正东方向的水平移动和正北方向的水平移动，如图 5 所示。

由于水平移动量方向为正东和正北，因而需要将长短轴角点处的水平位移量投影到长短轴方向上，求解其在长短轴方向上的移动量。根据上述方式计算 No. 1796 建筑物简化框架角点的水平移动量，框架角点为长短轴节点 1 与节点 2，并将该建筑物的下沉，水平移动量汇总在表 2 中。

表 2　长短轴节点处的地表移动量

地表移动量	长轴节点 1/mm	长轴节点 2/mm	短轴节点 1/mm	短轴节点 2/mm
下沉	3 483.90	3 269.80	3 345.90	3 347.30
水平移动(正东)(U_{4e})	−114.96	−6.98	−53.03	−47.88
水平移动(正北)(U_{4n})	−231.51	−26.34	−101.96	−104.07
投影后的水平移动($U'_e+U'_n$)	−252.10	−16.015	−23.28	−102.85

2　基于框架结构模型简化的单体建筑受力

2.1　平面框架模型组建

刚架是由直杆组成的具有刚性节点的结构，具有刚性节点是刚架的主要特点。平面刚架将平面梁单元的交叉点、边界点和集中力作用点定义为节点，节点之间的杆件作为单元，用单元代替经典的位移法中的基本结构。平面框架采用单元、节点和支座三种构件。单元用于表示建筑物的墙壁(柱或杆)和地板(梁)，并考虑弯曲刚度 EI 和轴向刚度 EA，E 为材料弹性模量，A 为截面面积，I 为截面惯性矩。节点是单元之间的连接，限制连接的单元末端平移和旋转。支座用于防止结构及其基础之间的平移和旋转。如图 6(a)所示，将每个建筑物的纵向截面和横向截面分别构建平面框架，利用简化后

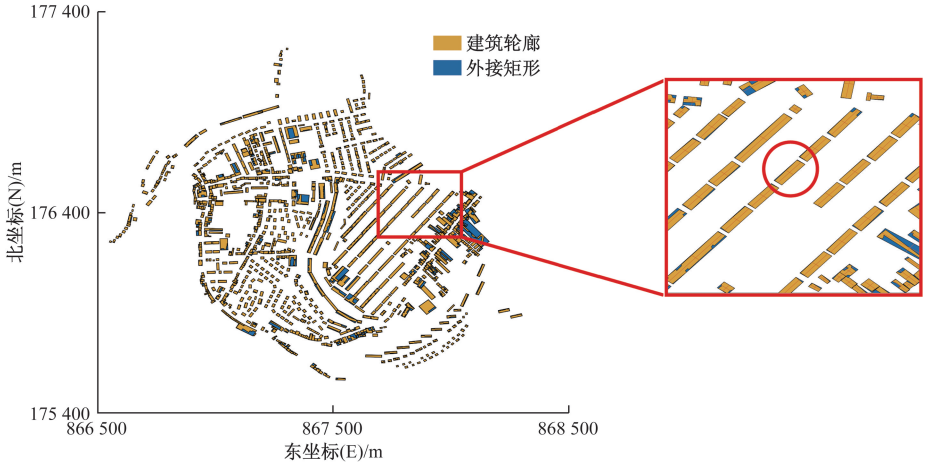
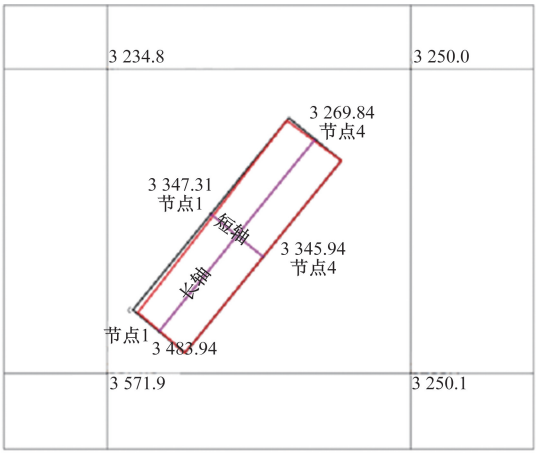


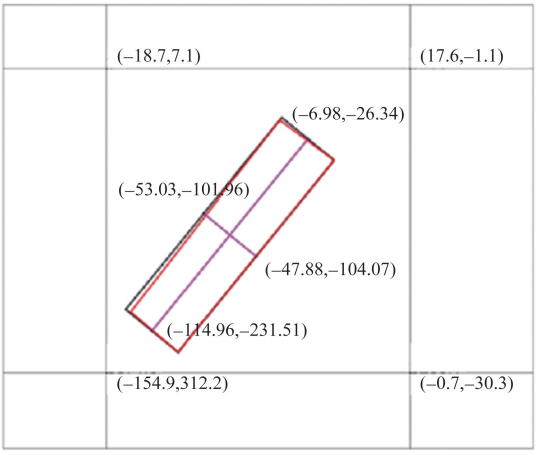
图 4　No. 1796 建筑物所处位置示意图

的平面框架进行位移法计算。根据实地调研地表建筑材料及尺寸特性，梁选取 $EA=2.7\times10^{10}$ N，$EI=1.25\times10^{10}$ N·m^2，除了建筑自重外受到的内部荷载，根据标准选择 2.0×10^{3} N/m，图 6(b)和图 6(c)为框架结构模型受力情况。



单位：mm

(a) 框架支座处下沉量插值结果



单位：mm

(b) 框架支座处水平移动量(东, 北)插值结果

图 5　框架节点处插值结果

2.2　建筑物简化模型应力计算

结构中的所有单元，它们在局部坐标系中的力与位移关系可以表达成一组矩阵，采用坐标变换如图 7 所示。得到整体坐标系下的刚度矩阵。利用 MATLAB 组成结构刚度矩阵，求解总体刚度方程式(1)得到整体坐标系中单元端力和位移。

$$\boldsymbol{K}\cdot\Delta=\boldsymbol{F} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{K}$ 称为结构刚度矩阵；Δ 为节点位移的所有未知量；$\boldsymbol{F}$ 为各已知的节点荷载，与未知节点位移相对应。

通过矩阵位移法进行结构分析的步骤如下：①构建结构标识，其中包括按顺序定义节点，单元编号和坐标系等；②根据单元局部坐标系，计算杆件单元刚度矩阵 $\boldsymbol{K}^e$；③构建坐标转换矩阵；④利用坐标转换矩阵将局部坐标系转换至结构坐标系，组装杆件单元刚度矩阵；⑤生成结构坐标系中的总刚度矩阵和总刚度方程；⑥将位移边界条件引入方程，形成结构刚度矩阵和结构刚度方程；⑦计算结构刚度方程，得未知的节点位移。

选择建筑物 No. 1796 建筑物作为本文框架模型为例，其位置位于建筑群东南位置。建筑物受自重荷载为 2.48 kN/m，建筑物的内部荷载为 2 kN/m，初始荷载是自重荷载和内部荷载的总和 4.48 kN/m，将建筑物的初始荷载定义为均布荷载，施加在梁上。

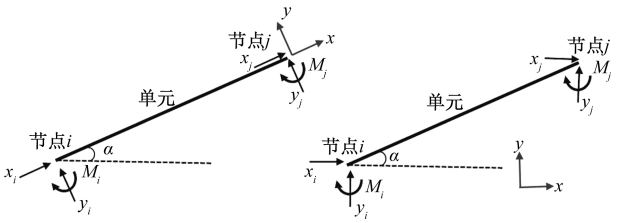
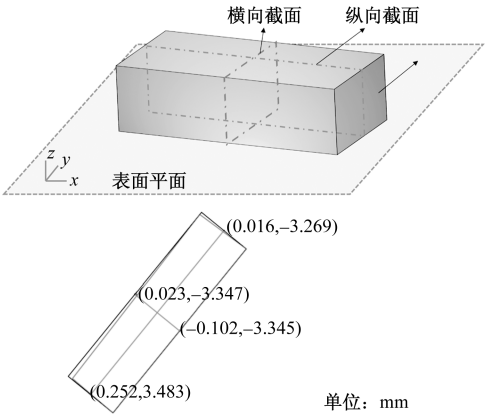
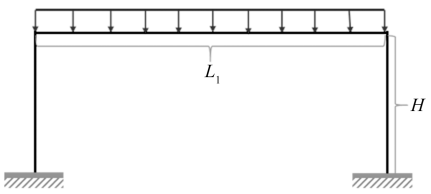


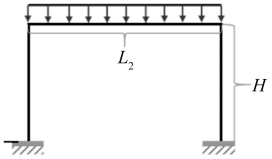
图 7　局部坐标系和单元端力和位移的定义



(a) 建筑物简化及长短轴支座处沉降量(水平移动, 下沉值)



(b) 建筑物长轴简化平面模型



(c) 建筑物短轴简化平面模型

图 6　No. 1796 建筑物简化框架计算实例示意图

考虑到本文选用的建筑物平面框架结构为对称刚架，在受到均布荷载作用下，刚架除了受到轴力和弯矩的杆端力，一般还存在剪力。但通常情况下，在框架结构模型中，剪力对梁的极限荷载影响很小，通常忽略剪力对框架的影响[23]。

图 8(a)为建筑物简化短轴平面框架模型受初始荷载作用下的轴力图，框架高度为 3 m，跨度为 11.3 m。图 8(b)为短轴对应的框架弯矩图。在轴力和弯矩图 8 中，可以看出，短轴框架模型在初始荷载作用下的轴力和弯矩较小。

图 9(a)为简化短轴平面框架模型，在受初始荷载和位移量的共同影响作用下的轴力图，轴力最大为 51.53×10^6 N。图 9(b)为短轴对应的框架弯矩图，最大弯矩为 132.69×10^6 N·m。由图 9 可以明显看出，较未受位移量影响时，框架所受的轴力和弯矩有明显增大，可见建筑物受位移量影响较大。

图 10(a)为长轴平面框架模型在仅受初始荷载作用下的轴力。轴力最大为 -5.79×10^6 N(下侧受压)。与短轴相比，长轴因跨度较长，所受的初始荷载为 184 576 N，约为短轴初始荷载的 4 倍。因而，长轴对应平面框架相较于短轴受压更严重。

图 10(b)为长轴平面框架模型在仅受初始荷载作用下的弯矩，弯矩最大为 -23.89×10^6 N·m。

图 11(a)为简化长轴平面框架模型，在受初始荷载和位移量的共同影响作用下的轴力，受压最大值为 38.31×10^6 N。图 11(b)为简化长轴平面框架模型中，在受初始荷载和位移量的共同影响作用下的弯矩。框架在共同作用下的最大弯矩为 89.65×10^6 N·m，是框架在仅受初始荷载作用下最大弯矩的三倍左右。

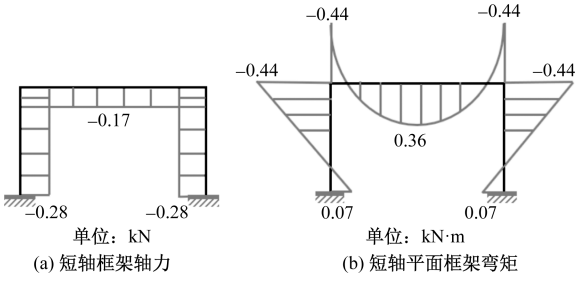


图 8　短轴框架轴力与弯矩

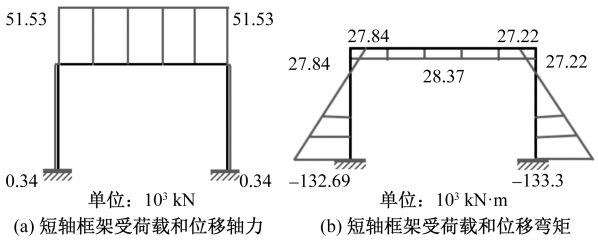


图 9　短轴框架受荷载和位移轴力与弯矩

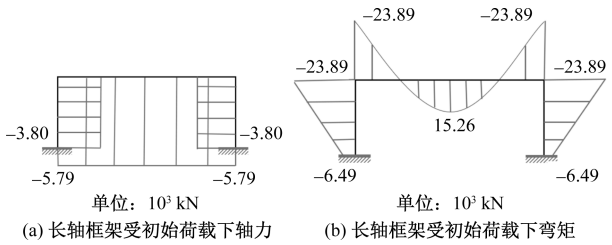


图 10　长轴框架受初始荷载下轴力

3　建筑群损害程度评价

3.1　建筑群应力分布

由于该地区建筑数量较多，且单个建筑重要性一般。因此本文利用平面框架模型简化单个建筑受力，提高计算效率，从而实现对大规模建筑群的快速损伤评估。如图 12 和图 13 所示，以整个建筑群为研究对象，将各单体建筑物在受初始荷载与位移影响下的框架最大轴力及弯矩进行汇总，得到建筑群最大轴力、最大弯矩分布。

3.2　评价标准

为实现大规模建筑群的快速损伤评估，对建筑受力进行合理简化，评估标准为最大拉压应力小于

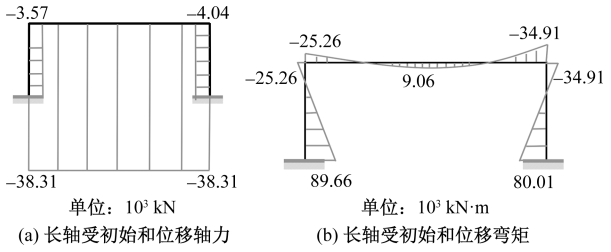


图 11　长轴受初始和位移轴力

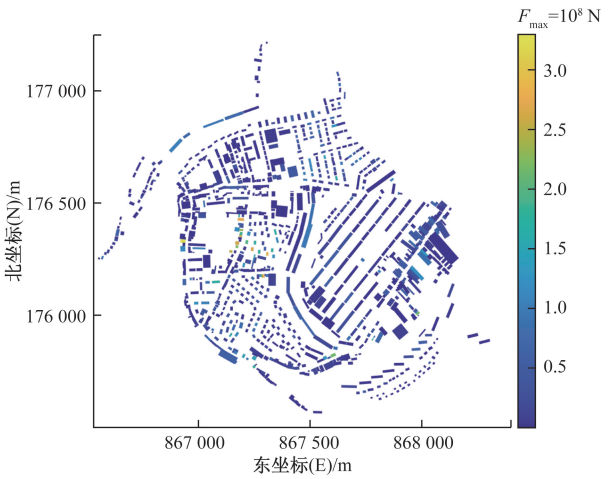


图 12　建筑群各建筑最大轴力示意图

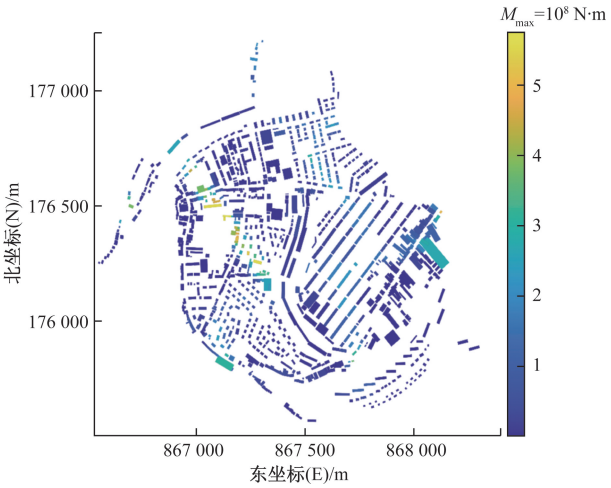


图 13　建筑群各建筑最大弯矩示意

该材料的许用应力时，为安全状态。根据实地调研，该研究区建筑物为无砌体混凝土材料，构件中允许的最大轴力是横截面积和所用材料强度的乘积。主要考虑到建筑物模型的高度为 3 m，也即考虑无砌体混凝土建筑为一层时的情形。Cai 等[22]定义了该类无砌体混凝土建筑在仅受自重作用下的最大允许轴力，如表 3 所示。本文中的矿区建筑与蔡音飞定义的建筑处于同一区域，因而近似采用以下表格内的数据作为本文建筑物模型的最大允许轴力。

表 3　建筑物类型的最大允许轴力[22]

结构梁最大允许应力	无砌体混凝土(106 N)
F_{ten_max}	21.6
F_{com_max}	3.24

注：F_{ten_max}、F_{com_max}分别为最大允许的拉伸力和压缩轴力。

由于最大允许弯矩不容易直接计算，因此采用等效方法进行估算。当仅考虑初始荷载时，即仅受自重作用及内部荷载影响，不考虑受下沉影响的施加力，计算结构模型上的弯矩，并将建筑物内所有构件(一层的柱、梁)的最大弯矩值记为 BM_{ini}。等效最大允许弯矩 BM_{per}即

$$BM_{per}=BM_{ini}\times SF \tag{2}$$

式中：SF 为安全系数。不同建筑类型的不同构件的最大允许弯矩也应有所不同。在实践中，建筑通常使用 2.0 值，本文也采用 2.0 值。因此建筑的最大允许弯矩为建筑内部所有构件中最大弯矩值的两倍。

3.3　损伤评价分级

应力的分级标准用于区分影响等级。当建筑物影响等级较高时，说明其受到损害的可能性高于影响等级较低的建筑物。这些等级是区分建筑物损坏程度的一种方法，也可以通过现场数据或进一步对研究成果进行校准。建筑物内部的最大应力包括建筑物自重作用以及建筑物受到地表移动变形影响后在建筑物内部产生的附加应力的总和。借鉴 Cai 等[22]的做法，确定无砌体混凝土建筑损害程度的阈值范围，对于单元内部，考虑最大允许应力 F_{max}，应力在 F_{max}和 $1.2F_{max}$之间的构件处于临界状态，介于安全与危险之间；力越大的元素影响等级较高；相反，力越小则认为是安全的。详细的分级标准列于表 4。

对于一个结构模型，其不同单元的估计等级可能不相同。在这种情况下，所有单元中的最高等级应被视为模型的等级。同样，横向和纵向模型的最高等级定义为该建筑的等级。由于该方法都涉及弯矩和轴力，它们可以单独或一起达到影响等级。当同时考虑这两种力量时，最终应该采用他们所得到的最高等级。

表 4　建筑损坏评估的最大许用应力的标准[22]

影响等级	颜色标记	取值范围
一级	绿	$<0.8F_{max}$
二级	蓝	$0.8F_{max}\sim1.2F_{max}$
三级	黄	$1.2F_{max}\sim2.4F_{max}$
四级	红	$>2.4F_{max}$

注：F_{max}为最大许用应力，会因不同建筑类型的不同元素而变化。

3.4　单个建筑为例的损害等级划分

以 No.1796 建筑为例，将其长短轴的轴力进行分级，按照分级标准对平面框架各单元进行分级，如图 14 所示。按分类等级 No.1796 建筑物的最大轴力为短轴对应的平面框架单元 2 的两杆端拉应力 51.53×10^6 N，最大许用拉应力 F_{max}为 21.6×10^6 N，因而最大轴力按等级分类位于 $1.2F_{max}\sim2.4F_{max}$中，在轴力图等级类中，归为三等黄色。

No.1796 建筑物对应平面框架等级中，单元最高损害等级为三等黄色，那么该框架的损害等级以及该建筑也定义为三等黄色，如图 15 中放大示意图。

No.1796 建筑物受初始荷载和位移作用下的受力等级图，如图 16 所示。在建筑物受到位移作用下的弯矩分析，按分类等级，No.1796 建筑物的最大弯矩为长轴对应的平面框架的单元 3 的两杆端弯矩 89.66×10^3 N·m，如表 4 中所示，按等级分类位于远大于 $2.4F_{max}$中，其中的 F_{max}表示在仅受初始荷

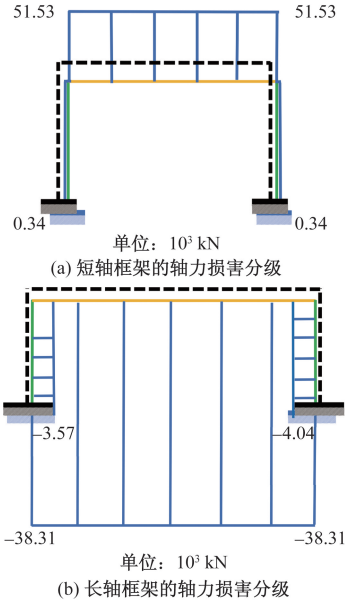


图 14　建筑物受位移量影响的轴力分级及位移变化

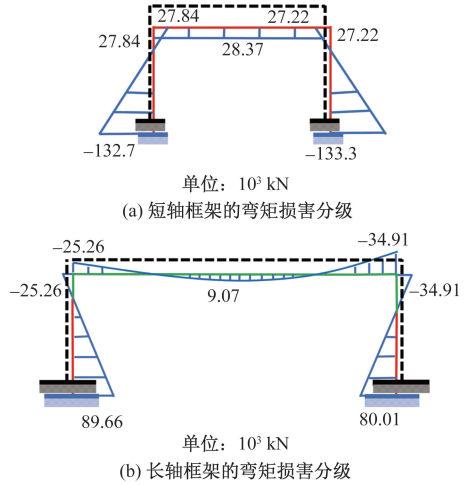


图 16　建筑物受位移量影响的弯矩分级及位移变化

载作用时框架最大弯矩的两倍。在弯矩等级分类中，归为四级，红色。

图 17 表示建筑群受初始荷载和位移作用下的弯矩等级分布。平面框架按照各单元中最高等级定义其损害等级。No. 1796 建筑物对应平面框架弯矩分布等级中，单元最高损害等级为四等红色，那么该框架的损害等级以及该建筑也定义为四等红色，如图 17 中放大示意图。

3.5　建筑群损害评估

本文中建筑群的损害评估分别考虑轴力和弯矩影响分级如图 18(a)和图 18(b)所示，以及综合轴力与弯矩共同影响的损害分级如图 18(c)所示，并根据不同应力影响下的损害结果汇总成柱状图[图 18(d)]。在建筑群损害分级中，仍需满足选用单元内最高损害等级作为该建筑物损害等级这一要求。当综合考虑轴力和弯矩对建筑物损害分级时，仍选用建筑物的最高损害等级作为综合考虑影响下的该建筑物等级。

图 18(a)表示框架结构在仅考虑轴力影响下时，按照分级标准对建筑物进行分级，用绿色表示建筑物分级为 1 级，根据统计结果显示约有 60%左右的建筑物为 1 级，意味着这些建筑物可能为安全的。有 18%左右的红色框架建筑物，其已经为 4 级，且多分布在南部及西北方向局部地区，这意味着建筑物已经受到严重损害。其中，2 级、3 级建筑损害分布较为分散，但也大多位于东南及西南方向。

图 18(b)表示框架结构在仅考虑弯矩影响下时，按照分级标准对建筑物进行分级，根据统计结果显示约有 40%左右的建筑物为 1 级，受损建筑物的比例为 60%，因此通过弯矩评估下的高等级受损建筑物要比由轴力评估的受损等级建筑物要多。

图 18(c)中，由于框架同时考虑轴力和弯矩的影响时，按照两者中最危险等级进行评估，受损建筑

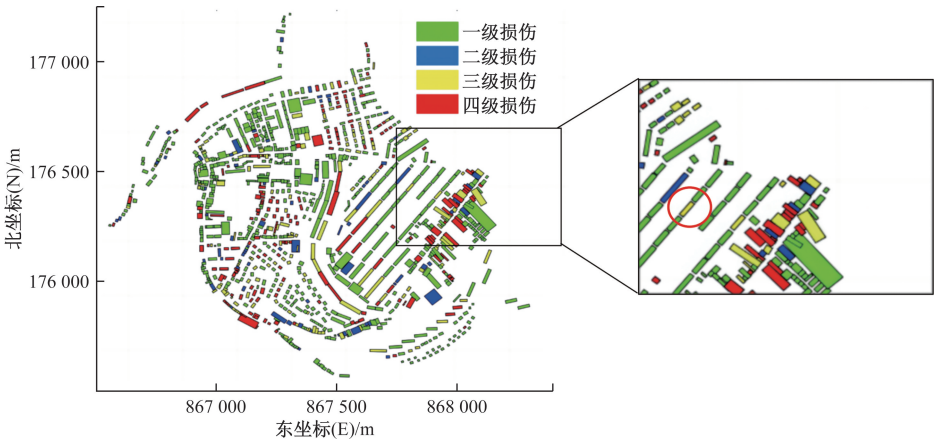


图 15　No. 1796 建筑在全体建筑轴力分级图中分级情况

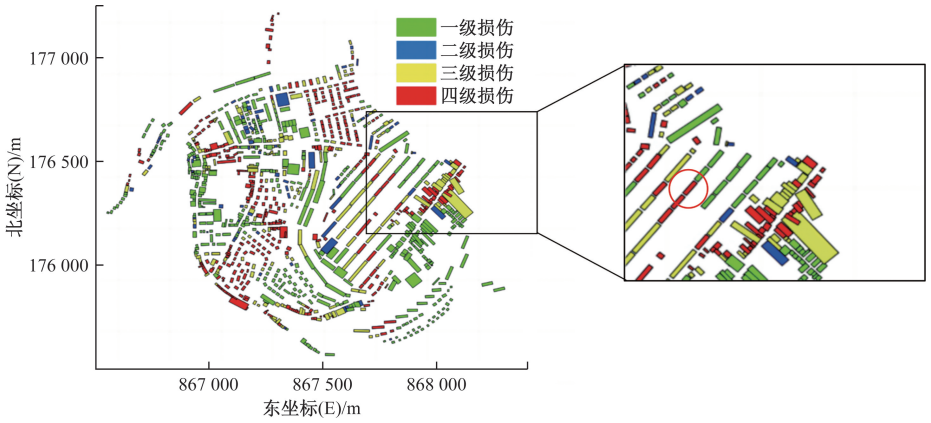


图 17　No. 1796 建筑在全体建筑弯矩分级图中分级情况

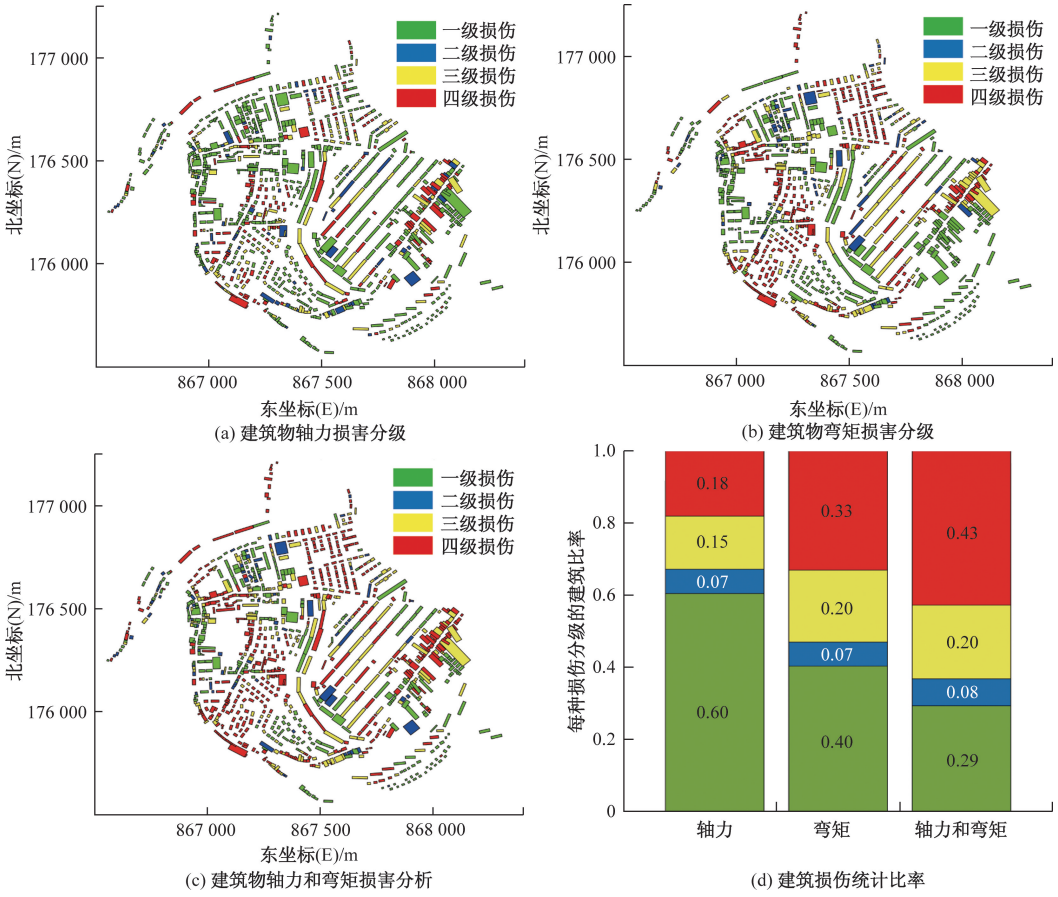


图 18　不同应力影响下建筑损害分级

物的比例为 71%。为验证本文采用的方法是否合理，与 Saedi 等[8]的计算结果进行对比，结果显示两种方法得到的建筑损害程度分布情况接近，但 Saedi 等[8]的方法依赖于建筑结构，工作量较大。

4　结论

本文以沉陷区建筑群为研究对象，利用矩阵位移法在 MATLAB 中编写刚架有限元求解各平面框架模型的轴力和弯矩，实现大规模村庄建筑群的应力分布分析。根据建筑损害划分等级，对轴力及弯矩影响下的建筑损害分级，进行村庄建筑群损害程度进行综合快速评估。评估结果与 Saedi 等[8]对比，该村庄建筑群中大多数建筑的损害等级分布相似，因此本文提出的用于沉陷区大规模建筑群损害快速评估模型有效可靠。

参考文献

[1]　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.

[2] 赵文. 厚松散层条带采空区工后地表变形规律[J]. 科学技术与工程，2025，25(19)：8003-8012.
[3] 赵文. 煤矿厚松散层条带采空区“三带”发育特征探查[J]. 科技和产业，2024，24(22)：340-347.
[4] CAI Y，JIN Y，WANG Z，et al. A review of monitoring，calculation and simulation methods for ground subsidence induced by coal mining[J]. International Journal of Coal Science & Technology，2023，10：32.
[5] 杨绿峰，殷玉琪，柏大炼. 基于平衡向量的钢架结构极限承载力分析的广义塑性铰法[J]. 工程力学，2021，38(12)：49-56.
[6] 易四海，滕永海，唐志新，等. 采煤沉陷区大型建筑物与地基相互作用机理研究[J]. 煤炭科学技术，2020，48(10)：166-172.
[7] 张宏贞，邓喀中，顾伟. 老采空区残留空洞空隙分布规律研究[J]. 采矿与安全工程学报，2016，33(5)：893-897.
[8] 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.
[9] 罗靓，程博汉，吕辉. 钢筋混凝土平面框架结构拟动力有限元分析[J]. 地震工程学报，2021，43(3)：710-719.
[10] 俞然刚，张健，邱世华，等. 采空区地表变形对既有砌体结构影响分析[J]. 科学技术与工程，2012，12(26)：6597-6600.
[11] ZHAO J，KONIETZKY H. Numerical analysis and prediction of ground surface movement induced by coal mining and subsequent groundwater flooding[J]. International Journal of Coal Geology，2020，229：103565.
[12] 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.
[13] CAI Y，LI X，XIAO W，et al. Simulation of mining-induced ground damage using orthogonal experiments to determine key parameters of super-large coalface：a case study in Shendong Coalfield in China[J]. Applied Sciences，2020，10(7)：2258.
[14] XU N，KULATILAKE P H S W，TIAN H，et al. Surface subsidence prediction for the WUTONG mine using a 3-D finite difference method[J]. Computers and Geotechnics，2013，48：134-145.
[15] MARIAN D P，ONICA I，MARIAN R-R，et al. Finite element analysis of the state of stresses on the structures of buildings influenced by underground mining of hard coal seams in the Jiu Valley Basin (Romania)[J]. Sustainability，2020，12(4)：1598.
[16] AKHAVEISSY A H，MILANI G. Pushover analysis of large scale unreinforced masonry structures by means of a fully 2D non-linear model[J]. Construction & Building Materials，2013，41(4)：276-295.
[17] HELMERICH E N，TRELA C，BIE J T，et al. Multi-tool inspection and numerical analysis of an old masonry arch bridge[J]. Structure & Infrastructure Engineering Maintenance，2012，8(1)：27-39.
[18] SON M，CORDING E J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering，2005，131(2)：162-177.
[19] 李振发. 煤矿采动影响下地表建筑物安全评价[J]. 山东煤炭科技，2024，42(12)：141-145.
[20] VERDEL T，DECK O，SAEIDI A. Development of building vulnerability functions in subsidence regions from analytical methods[J]. Geotechnique，2012，62(2)：107-120.
[21] CAI Y，VERDEL T，DECK O. On the topography influence on subsidence due to horizontal underground mining using the influence function method[J]. Computers & Geotechnics，2014，61：328-340.
[22] CAI Y，VERDEL T，DECK O. Using plane frame structural models to assess building damage at a large scale in a mining subsidence area[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering，2017，24(3)：283-306.

Rapid Stress Analysis and Subsidence Damage Degree Assessment Model for Large-scale Building Clusters in Goaf Areas

JIA Chunxue[1,2]

(1. Shanxi Transportation Research Institute Group Co. Ltd.，Taiyuan 030032，China；
2. College of Mining Engineering，Taiyuan University of Technology，Taiyuan 030024，China)

Abstract：To address the issue of strata movement and surface subsidence caused by mineral resource exploitation，the Joeuf Iron Mine in France was token as a case study. By simplifying the ground structure of buildings using a planar frame model，the stress response of structures under surface movement，initial loading and self-weight loading were systematically analyzed through the finite element method. A MATLAB program model was innovatively developed for building damage assessment in mining subsidence areas at the village scale，enabling rapid damage classification for large-scale building clusters. The application results show that the collapse of two iron ore layers leads to approximately 43% of buildings being in a high-impact category. Compared with existing research，the model demonstrates superior performance in both evaluation efficiency and accuracy，significantly improving the prediction accuracy of building cluster damage level distribution. A quantitative decision-making tool is provided for urban safety planning in mining areas.

Keywords：goaf areas；building clusters；finite element method；frame structures；building damage assessment