

煤矿采动与地震联合作用下建筑物 损伤演化致灾分析*

刘书贤^{1,2}, 胡红珍¹, 魏晓刚², 麻凤海³, 薛海波⁴

(1. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000;
3. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 4. 中建六局建设发展有限公司东北分公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 针对煤矿采动区建筑物的地震损伤演化过程尚不明晰的问题, 考虑到煤矿采动与地震联合成灾机制的复杂性, 基于损伤力学理论, 采用地震工程学和开采学理论, 建立煤矿采动损害影响下的建筑物动力损伤判据, 探讨煤矿采动与地震联合作用下建筑物损伤演化灾变过程, 通过有限数值计算分析煤矿采动建筑物地震动力破坏的损伤成灾机制。结果表明: “联合作用”能够更好的描述煤矿采动与地震对建筑的破坏作用, 煤矿采动损害影响下建筑物的次生损伤与其应力成反比, 煤矿采动加剧了建筑的地震动力响应, 所产生的次生损伤不断发展演化, 导致建筑物的薄弱层位置形成塑性铰, 严重削弱了建筑物的抗震性能。

关键词: 成灾机制; 开采; 地震作用; 损伤演化; 采动损伤

中图分类号: TV441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2015)01-0155-06

0 引言

据国有重点煤矿的统计分析, 全国“三下”(建筑物、水体、公路铁路)下压煤约137.9亿吨, 其中建筑物下压煤就高达87.6亿吨(王金庄, 郭增长, 2002)。地下煤炭的开采在地下岩土层形成了一个无实物填充承载力的空间, 破坏了岩土层的完整性, 导致煤矿采动区上覆岩体发生变形、冒落、断裂、弯曲等一系列破坏, 严重威胁了矿区的建筑安全。

目前国内专家学者已经对煤矿采动区建筑物保护问题开展了研究工作: 于广明等(2004)利用有限元软件研究了地震作用下煤矿采动区建筑物的动力灾变问题; 滕永海和黄乐亭(1997)根据现有的实际测量资料库, 指出了抗变形建筑物与其对应地表的下沉值在宏观上是基本一致的; 谭志祥和邓喀中(2006)为受采动影响的建筑物保护设计提供了科学依据, 总结出了不同长高比条件下建筑物变形与地表变形之间的综合关系; 刘书贤等(2010, 2013)提出了煤矿采动区建筑

物抗震抗变形双重保护支座, 对开采变形和地震耦合作用下的建筑物灾变机理进行了探讨。以上研究没有系统地从建筑物损伤的角度, 深入探讨在开采变形和地震联合作用下建筑物的损伤演化灾变过程, 缺乏对建筑物在开采变形和地震联合作用下损伤积累的研究(刘书贤, 2014a, b, c)。

现有的研究对于煤矿开采变形与地震二者之间成灾机理的研究, 更多的是应用“耦合”一词, 由于煤矿采动区工程地质环境的复杂性, 煤矿采动荷载与地震荷载对建筑物所产生的损伤并非简单的叠加, 并且二者之间的成灾机理也不相同, 所以“耦合”一词有失偏颇。笔者针对地下煤炭开采对建筑物抗震性能的扰动研究尚不完善的现状, 基于损伤力学理论, 建立煤矿采动损害影响下的建筑物动力损伤判据, 通过建筑结构内力变化来探讨煤矿采动与地震联合作用下建筑物损伤演化灾变过程。

1 基于损伤因子的煤矿采动区建筑物的损伤本构关系

煤矿采空区的地表移动变形破坏了建筑物与

* 收稿日期: 2014-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474045, 51174038)、辽宁省教育厅科研项目(L2012111)、中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划项目(MTKJ2012-319)和辽宁工程技术大学市场调研信息立项基金(SCDY2012010)共同资助。

地基间的初始平衡状态,在建筑物中产生了附加应力,导致了建筑物变形破坏。

定义张量 $(I-D)$ 为由于损伤而造成的面元 dA^* 的缩减(李兆霞,2002),即

$$dA^* = (I-D)dA. \quad (1)$$

式中: I 为瞬时损伤; D 为损伤张量。

煤矿采动对建筑物的损伤破坏表现在由于建筑自身重力的作用下的徐变损伤过程,而徐变过程中的总损伤包括瞬时损伤和徐变损伤,因此

$$\dot{D}(\sigma, t) = \dot{D}(\sigma, 0) + \dot{D}_{cr}(\sigma, t), \quad (2)$$

式中: $\dot{D}(\sigma, t)$ 为瞬时损伤; $\dot{D}_{cr}(\sigma, t)$ 为徐变损伤; 即

$$\dot{D}_{cr}(\sigma, t) = D_b(\sigma, t) + D_M(\sigma, t). \quad (3)$$

一般的 $\dot{D}_{cr}(\sigma, t) = F(D_{cr}, \sigma, t)$ 。

当应力水平低于长期强度时, $\sigma/f'_c < 0.8$ 徐变最终处于稳定阶段,对于给定的常应力,徐变速率和损伤值都趋于定值。这时, $D_b = 0$, $D_{cr} = D_B$ 。

损伤变化率关于损伤是衰减的,并可认为是损伤和应力的显函数,因此 $\dot{D}_{cr} = -\gamma D_{cr} + f(\sigma)$ 。

边界条件为

$$\begin{aligned} \dot{D}_{cr}(\sigma, 0) &= 0, \\ \dot{D}_{cr}(\sigma, t) \Big|_s &= D_m(\sigma) - D(\sigma, 0). \end{aligned} \quad (4)$$

$D_m(\sigma)$ 是在常应力下界面裂缝损伤 D_m 的最大值。

$$\dot{D}_{cr}(\sigma, t) \Big|_s = [D_m(\sigma) - D(\sigma, 0)](1 - e^{-\alpha}). \quad (5)$$

假设:混凝土是均质、弹性和各向同性的(李杰,杨卫忠,2009)并且徐变损伤是各向同性的,可选取标量 D 作为损伤的度量;对于和时间相关的应力,有效应力相应地为

$$\tilde{\sigma}(t) = \frac{\sigma(t)}{1 - D(t)}. \quad (6)$$

将 Lemaitre 提出的应变等效假设推广到和时间相关的徐变问题,推导出弹性徐变耦合损伤的徐变损

伤本构方程:

$$\varepsilon(t) = \frac{\tilde{\sigma}(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{E(t)} + c(t, \tau) \right] \tilde{\sigma}(\tau) d\tau. \quad (7)$$

由此得采动区建筑物的损伤本构关系为

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{\sigma(t)}{E(t)[1 - D(t)]} - \int_{\tau_1}^t \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{E(t)} + c(t, \tau) \right] \\ &\quad \frac{\sigma(t)}{1 - D(t)} d\tau. \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为钢筋混凝土的应力; $\sigma(t)$ 为钢筋混凝土的应变; $E(t)$ 为弹性模量; $c(t, \tau)$ 为龄期 τ 下的徐变度; $[1 - D(t)] = \frac{\sigma}{\tilde{\sigma}}$, $\tilde{\sigma}$ 为有效应力。

由公式(3)可知:煤矿采动损害影响下建筑物的次生损伤与其应力成反比(克拉夫,彭津,2006)。

耦合性即块间联系,是一种量度,泛指系统结构中各模块间相互联系紧密程度;而联合则是一种新的数据类型,它是一种特殊形式的变量。由于煤矿采动区工程地质环境的复杂性,煤矿采动荷载与地震荷载对建筑物所产生的损伤并非简单的叠加,根据混凝土损伤本构方程,由于二者之间的成灾机理也不相同,所以“耦合”一词有失偏颇,“联合”一词更加准确。

2 地震作用下煤矿采动区建筑物损伤演化的有限元分析模型

2.1 有限元模型的选取

为了探讨地震发生时煤矿采动建筑的次生损伤累积演化过程(杨伟,欧进萍,2009;张春礼,2011),重点分析煤矿采动与地震联合作用下建筑物的损伤演化成灾机制,尤其是建筑物从弹性阶段逐步发展到塑性铰出现的塑性损伤破坏过程,故选取唐山某矿区一框架结构的办公楼(余红发等,2006)。

唐山某矿区地质条件良好,抗震设防烈度为Ⅶ度,该现浇钢筋混凝土框架结构办公楼,楼层层高统一为 3.3 m,纵向 4 跨,横向 2 跨,跨度均为 6 m,该建筑物总高 19.8 m,长 24 m,宽 12 m。柱子截面尺寸均为 600 mm × 600 mm,梁截面均为 300 mm × 650 mm,楼板厚度为 120 mm,梁

柱均采用 C45 混凝土, 弹性模量 $E = 32.5 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.2$, 密度为 2450 kg/m^3 (图 1)。

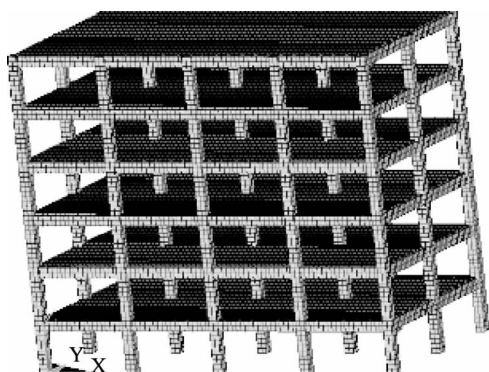


图 1 办公楼有限元模型

Fig. 1 The finite element model of the office building

该矿区由于地下煤炭开采致使地表发生移动和变形 (张永波, 2006), 根据现场监测站的实际监测数据, 由于采煤导致办公楼产生了 2 mm/m 的倾斜 (颜荣贵, 1995)。

2.2 地震波的选取

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 中的相关内容, 要求选取地震波要满足峰值、频谱特性、地震持时的要求, 结合该办公楼所处区域条件及结构的自振周期, 为了能够分析建筑物在采动与地震联合作用下的耗散能量的变化过程, 需要选取较长时间的强烈地震波。本文选用了 15 s 的唐山地震波, 其地震等级为 7 级, 方向为南北向, 最大加速度为 $0.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (图 2)。

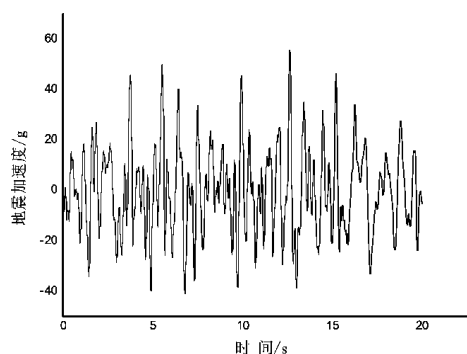


图 2 唐山地震波 (南北向)

Fig. 2 Tangshan earthquake waves (NS direction)

3 有限元数值计算结果分析

煤矿采动区的开采变形是随着开采过程逐渐

发展的, 是长期缓慢发展的过程, 不仅发生在煤炭开采过程中, 而且在开采完成后仍然不断发展, 对煤矿采动区的土地及建筑物损害严重; 煤矿采动区的地震则是一个瞬间剧烈破坏的过程, 在短时间内能量急剧释放, 地表的移动变形强烈, 当地震结束时地表移动变形几乎完全消失, 对建筑物的损伤破坏也仅存在于地震发生的过程中。

通过有限元数值计算, 所得到的不同工况下建筑物的地震动力响应如图 3 所示。工况一为不考虑煤矿采动作用仅考虑地震荷载, 工况二为考虑煤矿采动与地震联合作用。

分析图 3a 可知: 工况 1 建筑物层间位移变化曲线比较平滑, 顶层最大位移为 0.045 m ; 工况 2 建筑物层间位移变化曲线比较层间位移变化急剧, 顶层最大值达到 0.075 m , 是工况 1 的 1.67 倍。由此可以判断: 煤矿采动作用对建筑物所产生的次生损伤对其地震动力响应影响较大, 地震发生时, 建筑物的次生损伤进一步发展演化。地震作用下煤矿采动作用加剧了结构的动力反应, 严重降低了建筑物的抗震安全性能。

分析图 3b 可知: 工况 1 建筑物底层的最大加速度为 $1.225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 顶层的最大加速度为 $7.163 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 工况 2 建筑物的底层最大加速度为 $4.788 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 顶层的顶层为 $17.163 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 分别是工况 1 底层的加速度 3.91 倍, 顶层的加速度 2.5 倍。对于煤矿采动与地震联合作用下建筑的最大加速度曲线在五层六层发生突变现象 (加速度变化较大), 说明在煤矿采动损害影响下建筑物产生损伤, 其强度和刚度都有一定程度的退化, 地震发生时建筑物鞭梢效应明显, 导致其动力响应较大。

分析图 3c 可知: 不考虑煤矿采动对建筑物所产生的次生损伤, 地震作用下建筑物的最大层间剪力曲线变化较为光滑均匀; 而煤矿采动与地震联合作用下建筑物的最大层间剪力曲线变化趋势非常陡峭, 而且其转折点非常明显 (转折点主要集中在楼层的第二层和第五层), 说明这两层为建筑物的结构薄弱处, 煤矿采动作用对建筑物的抗震能力影响较大, 需要根据煤矿采动对建筑物所产生的次生损伤予以控制, 开展建筑物的煤矿采动损伤评估以保证其安全性。

分析图 3d 可知: 在两种不同荷载工况影响下

的建筑物最大层间轴力变化曲线均较为光滑, 最大轴力在底层达到最大 (与最大剪力相似), 说明地震作用下建筑物的底层位置 (与建筑物是否发生次生损伤无关) 需要予以重视, 同时由于地震作用力是按照建筑物的刚度进行分配的, 建筑物底层一旦发生损伤破坏, 建筑物的质量中心和刚度中心不一致会导致建筑物产生扭转效应, 加剧

建筑物的地震动力响应, 加剧建筑的倒塌破坏。

分析图 3e 可知: 随着建筑物高度的增加, 建筑物的弯矩峰值整体上呈现出减小的趋势, 但是在建筑物的第二层却达到最大。结合建筑的层间剪力峰值、层间轴力峰值、位移峰值和加速度峰值可知: 在建筑物的第二层处为该结构的特殊位置 (薄弱层位置)。在煤矿采动损害影响下, 薄弱

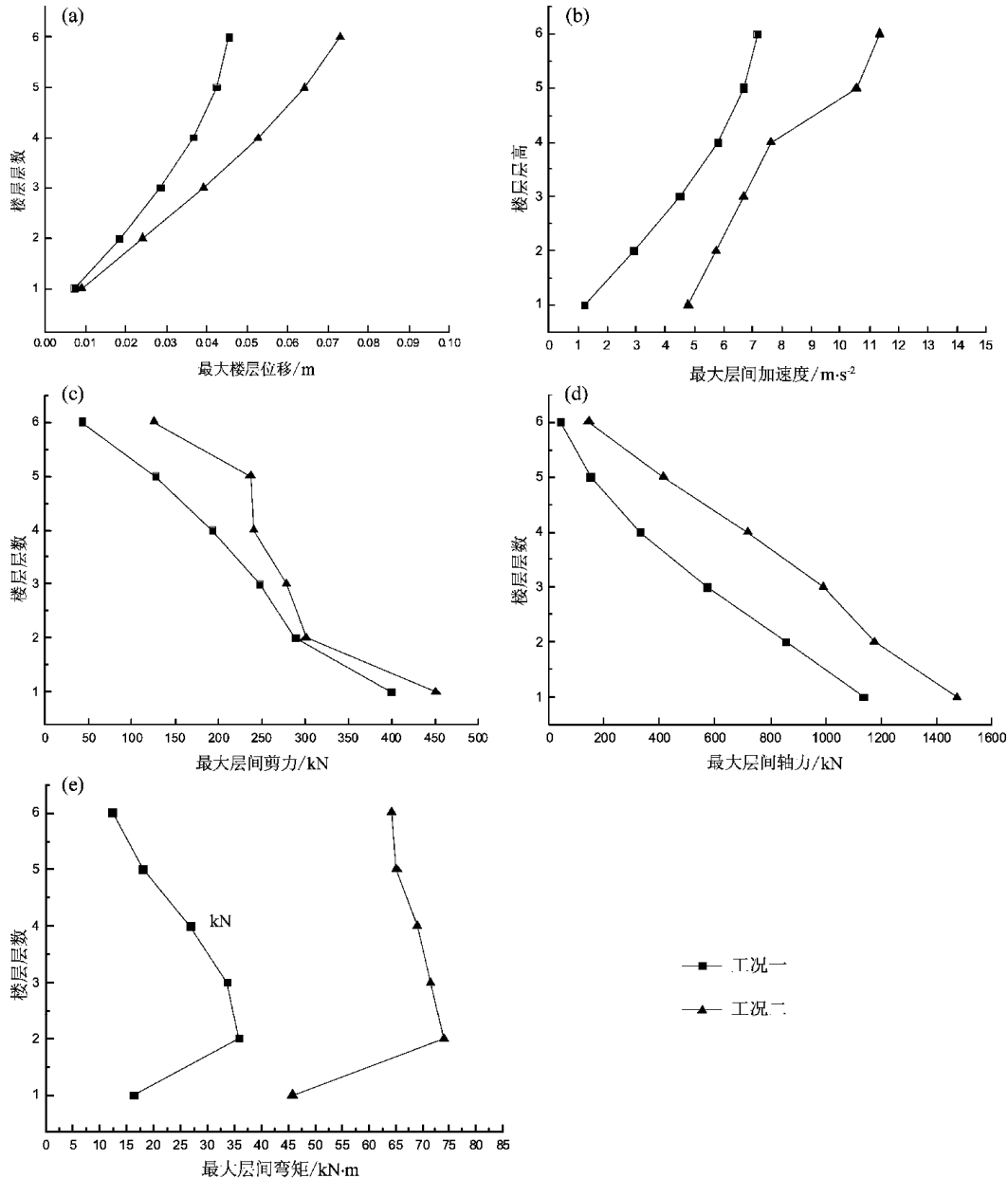


图 3 不同工况下建筑物的地震动力响应 (a)、最大加速度 (b)、最大层间剪力 (c)、最大层间轴力 (d)、最大层间弯矩 (e)

Fig. 3 The seismic dynamic response (a), the biggest acceleration (b), the biggest interlaminar stress (c), the biggest interlaminar axial force (d), the biggest interlaminar bending moment (e) of the building system on different working condition

层位置极易出现大量的塑性铰,尤其是在建筑物底部梁柱节点处形成塑性铰,构件强度减小、刚度退化,严重削弱了建筑物的抗震性能,在煤矿采动建筑的损伤安全评估工作中必须对结构的薄弱层位置予以重视,并采取合理的抗震加固措施。

4 结论

本文从损伤角度出发,基于损伤结构理论,利用有限元计算软件 ANSYS 建立了煤炭开采区建筑物在地震作用和采动地震联合作用下的计算模型,得到各工况下的最大加速度,层间剪力轴力等结果,分析得到如下研究成果:

(1) 由于煤矿采动区工程地质环境的复杂性,煤矿采动荷载与地震荷载对建筑物所产生的损伤并非简单的叠加,并且二者之间的成灾机理也不相同,所以“耦合”一词有失偏颇,“联合作用”能够更好的描述煤矿采动与地震对建筑的破坏。

(2) 基于损伤因子所建立的煤矿采动区建筑物的损伤本构关系为

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)[1-D(t)]} - \int_{\tau_1}^t \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{E(t)} + c(t, \tau) \right] \frac{\sigma(\tau)}{1-D(\tau)} d\tau.$$

该本构关系较好的反应了煤矿采动损害影响下建筑物的次生损伤与其应力成反比,揭示了煤矿采动作用降低建筑物抗震性能的本质原因。

(3) 地震作用下煤矿采动对建筑物所产生的次生损伤不断发展演化,导致建筑物的薄弱层位置形成塑性铰,严重削弱了建筑物的抗震性能,同时煤矿采动也加剧了建筑的地震动力响应,对与煤矿采动建筑必须对煤矿开采变形与地震荷载的成灾机理,以及二者的联合作用成灾机制予以

重视,开展煤矿采动建筑物抗开采变形隔震保护体系相关的研究工作。

参考文献:

- 克拉夫 R.,彭津 J. 2006. 结构动力学[M]. 北京:高等教育出版社.
- 李杰,杨卫忠. 2009. 混凝土弹塑性随机损伤本构关系研究[J]. 土木工程学报,42(2):31-38.
- 李兆霞. 2002. 损伤力学及其应用[M]. 北京:科学出版社.
- 刘书贤,郭涛,魏晓刚,等. 2014b. 地震作用下煤矿开采损伤建筑的能量耗散演化致灾分析[J]. 地震研究,37(3):442-449.
- 刘书贤,王春丽,魏晓刚,等. 2014a. 煤矿采空区的地震动力响应及其对地表的影响[J]. 地震研究,37(4):642-647.
- 刘书贤,魏晓刚,麻风海,等. 2013. 煤矿采动与地震耦合作用下建筑物灾变分析[J]. 中国矿业大学学报,42(4):526-534.
- 刘书贤,魏晓刚,魏亚强. 2010. 采动区建筑物抗震、抗变形双重保护作用机理分析[J]. 防灾减灾工程学报,30(增刊):305-308.
- 刘书贤,魏晓刚,张弛,等. 2014c. 基于隔震技术的桥梁结构抗采动变形抗地震保护[J]. 地震研究,37(1):86-93.
- 谭志祥,邓喀中. 2006. 建筑物下采煤研究进展[J]. 辽宁工程技术大学学报,25(4):485-488.
- 滕永海,黄乐亭. 1997. 抗变形建筑物的采动变形特点[J]. 东北煤炭技术,3(3):13-16.
- 王金庄,郭增长. 2002. 我国村庄下采煤的回顾与展望[J]. 中国煤炭,28(5):28-31.
- 颜荣贵. 1995. 地基开采及其地表建筑[M]. 北京:中国建筑工业出版社.
- 杨伟,欧进萍. 2009. 基于能量原理的 Park & Ang 损伤模型简化计算方法[J]. 地震工程与工程振动,29(2):159-165.
- 于广明,董春胜,潘永战,等. 2004. 混凝土的分形性及其单轴应力下裂纹演化的混沌效应[J]. 青岛建筑工程学院学报,25(1):1-6.
- 余红发,张伟,金祖权,等. 2006. 土木工程结构混凝土寿命预测的损伤演化方程[J]. 东南大学学报(自然科学版),36(增刊):216-220.
- 张春礼. 2011. 采动与地震共同作用下建筑物的破坏过程研究[D]. 青岛:青岛理工大学.
- 张永波. 2006. 老采空区建筑地基稳定性评价理论与方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社.
- GB50011—2010,建筑抗震设计规范[S].

The Catastrophic Analysis of Building Damage under Coal Mining and Earthquake

LIU Shu-xian^{1,2}, HU Hong-zhen¹, WEI Xiao-gang², MA Feng-hai³, XUE Hai-bo⁴

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

(2. College of Civil and Transportation Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

(3. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

(4. China Construction Sixth Engineering Division CORP, LTD, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract

Aim at the vagueness problem of procession of building damage evolution in coal mining area, considering the complexities of coupling catastrophe mechanism of mining subsidence and earthquake, based on damage mechanics theory, we build up the building dynamic damage criterion under the coal mining damage using the earthquake engineering and mining study, and discuss the catastrophe process of building damage evolution under coal mining and earthquake, and analyze the damage catastrophe mechanism of earthquake dynamic damage of buildings in coal mining area by finite numerical calculation. The result shows that the cooperation action could better describe the damage effect of building under coal mining and earthquake. Under the effect of coal mining damage, the secondary damage is inversely proportional to its stress, and the coal mining aggressive the seismic dynamic response of the building. The secondary damage develops and evolves continuously and directly leads plastic hinge in weak-layer and weakens the anti-vibration ability of building.

Key words: disaster mechanism; mining; seismic process; damage evolution; mining damage