

土—结构相互作用对煤矿采动损伤建筑的 抗震性能影响分析*

刘书贤^{1,2}, 白 春^{1,3}, 魏晓刚², 刘少栋¹, 麻凤海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. 金诚信矿业管理股份有限公司, 北京 密云 101500; 4. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 1166224)

摘要: 为了探讨土—结构相互作用对煤矿采动损伤建筑地震动力破坏的影响, 基于损伤力学和能量耗散理论, 研究采动区土—基础—上部结构的协同作用, 通过建立考虑土—结构相互作用的煤矿采动损伤建筑的动力学方程, 重点分析了煤矿采动损害影响下的建筑物地震动力灾变演化过程。计算结果表明: 土—结构的相互作用对煤矿采动建筑的地震动力响应影响较大, 不考虑土—结构相互作用是偏于安全的; 煤矿采动作用明显改变了建筑物的结构动力特性, 建筑结构的薄弱层位置改变明显、塑性铰和层损伤分布规律发生改变, 严重降低了建筑物的抗震性能, 对于煤矿采动区建筑应当开展安全损伤评估工作, 以保证矿区工程建设的安全性和可靠性。

关键词: 土—结构相互作用; 损伤力学; 抗震性能; 煤矿采动; 地震动力; 安全评估

中图分类号: T0352

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)02-0272-08

0 引言

我国拥有丰富的煤炭资源, 煤炭资源位居世界首列。对地下的煤炭资源进行开采, 采出空间周围的岩层失去支撑而逐渐向采空区内移动, 导致上覆岩层原有的应力平衡状态被破坏, 采动区的岩层发生应力重分布现象, 采动区周围的岩体会发生移动变形、弯曲等破坏现象, 导致地表发生沉陷破坏现象, 进而对建筑物造成严重的损坏。我国80%以上的矿区位于地震多发带, 采动区建筑物除了要承受开采沉陷的影响, 还要承受地震灾害的影响(刘书贤等, 2013)。因此, 开展地震作用下的煤矿采动损伤建筑的抗震性能的研究工作非常有必要。

随着对煤矿采动建筑保护工作研究的不断深入, 取得了丰硕的研究成果。周长海(2011)从不均匀沉降对建筑物的危害性出发, 以刚性地基假设条件, 建立了层间高层钢筋混凝土框架结构模型, 重点研究了沉降与地震耦合作用下结构构件的内力分布和变化规律; 夏军武等(2007)建

立了地基—独立基础—框架结构共同作用的理论计算模型, 揭示了地表变形对建筑物附加变形和附加内力的关系; 刘书贤等(2011)在分析地震作用下采动区建筑物抗震能力的基础上, 提出了基于建筑隔震技术的抗开采沉陷隔震保护装置。

以上研究对于地震作用下煤矿采动损伤建筑的研究大多是以刚性地基为假设的, 忽略了土—结构相互作用(简称SSI)对建筑物抗震性能的影响。

考虑土—结构相互作用后, 地基的振动特性将对整个结构体系带来影响, 同时土体的滤波效应和耗能改变了地震波的传播途径, 对建筑物的动力效应影响较大。王海等(2012)通过研究发现当考虑土—结构的相互作用后, 随着土体的剪切波速下降, 结构的损伤指数会上升; 曹青和张豪(2011)则认为土—结构相互作用对风力发电机塔架结构的地震动力响应不容忽视; 刘洁平(2009)提出了一种实用的高层建筑土—结构相互作用地震反应整体分析方法, 研究了土—结构相互作用对位于厚和深厚地基土层上高层建筑地震反应的影响。

* 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)联合资助。

笔者针对煤矿采动和地震共同作用下建筑物损伤演化灾变研究的不足,从能量演化和损伤力学的角度分析煤矿采动损伤建筑的灾变演化过程,综合考虑土—结构相互作用对建筑物抗震性能的影响,深入探讨采动、地震对建筑物的不同致灾机理,重点研究了地震作用下考虑土—结构相互作用的煤矿采动损伤建筑的抗震性能。

1 土—结构相互作用影响下煤矿采动建筑的地震动力学方程

考虑到土体非线性对地震波传递的影响以及采动对土层间力学性能和相互作用的影响,土体本构关系采用 Drucker-Prager 理想弹塑性模型。地震作用下,建立考虑土—结构相互作用影响下建筑物的动力学计算模型如图 1 所示。

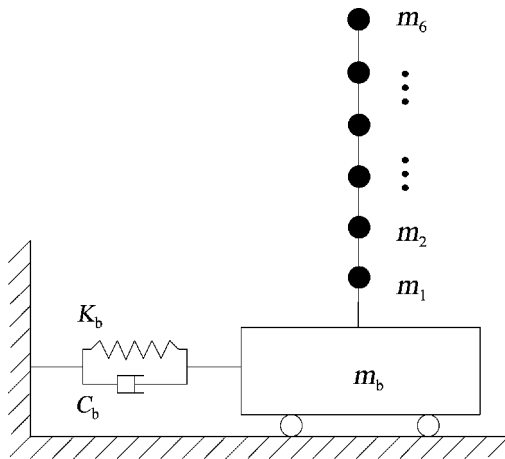


图 1 土—结构相互作用体系计算模型

Fig. 1 The calculating model of the SSI

根据结构动力学理论(克拉夫,彭津,2006),可以建立考虑土—结构相互作用影响下的煤矿采动建筑的地震动力学方程

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{M}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{X}}_g - \mathbf{F}(t). \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}(t)$ 为开采沉陷等效应力, $\ddot{\mathbf{X}}_g$ 为地震加速度, \mathbf{I} 为单位向量, \mathbf{M} 为整体结构的质量矩阵,上部结构采用堆聚质量形式,把每层质量集中在楼层处;只考虑平移运动,即只考虑结构平移运动的质量; \mathbf{C} 为结构整体模型的阻尼矩阵。矩阵具体展开形式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_n & & & \\ & m_{n-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_1 \\ & & & & m_b \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_n & -C_n & & & \\ -C_n & C_n + C_{n-1} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & C_2 + C_1 & -C_b \\ & & & -C_b & C_1 + C_b \end{bmatrix}.$$

由于建筑结构阻尼使振动衰减或振动能量耗散,并且与结构所承受的荷载和时间因素密切相关,基于此上部建筑结构拟采用 Rayleigh 阻尼为

$$[\mathbf{C}] = \alpha[\mathbf{M}] + \beta[\mathbf{K}]. \quad (3)$$

式中, α 、 β 为计算系数,可根据结构的模态分析所得到的圆频率及阻尼比按下式计算求得:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2(\omega_j^2 \omega_i \xi_i - \omega_i^2 \omega_j \xi_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2}, \\ \beta = \frac{2(\omega_j \xi_i - \omega_i \xi_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2}. \end{cases} \quad (4)$$

式中, ξ_i 、 ω_i 和 ξ_j 、 ω_j 分别为第 i 、 j 振型的临界阻尼比和圆频率;

\mathbf{K} 为刚度矩阵,展开为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_n & -K_n & & & \\ -K_n & K_n + K_{n-1} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & K_2 + K_1 & -K_b \\ & & & -K_b & K_1 + K_b \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中, $m_1 \sim m_n$ 、 m_b 分别为各楼层的质量和基础的质量; $C_1 \sim C_n$ 、 C_b 分别为上部结构和地基的阻尼(等效阻尼); $K_1 \sim K_n$ 、 K_b 分别为上部结构和地基的水平刚度(等效刚度)。

2 煤矿采动建筑的地震动力损伤演化分析

煤矿采动引起的开采沉陷作用导致建筑物局

部构件损伤,当地震发生时建筑物的损伤会加剧,由弹性阶段发展为弹塑性损伤阶段。本文采用牛荻涛和任立杰(1996)改进的钢筋混凝土结构的双参数地震损伤模型,来计算建筑结构的楼层损伤值:

$$D = \frac{X_m}{X_n} + 0.1387 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right)^{0.0814}. \quad (6)$$

式中, X_m 为建筑结构层间的最大位移, X_n 为楼层的极限位移, ε 是建筑结构的累积滞回耗能, ε_u 是建筑结构的极限滞回耗能, $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u}$ 、 $\frac{X_m}{X_n}$ 分别表示为耗能与变形单独作用所引起的建筑结构的破损程度, X_m 、 ε 可以由有限元软件 ANSYS 求得。

2.1 建筑结构楼层的极限位移计算分析

由《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)可知,建筑结构的初始刚度为

$$k_{oi} = \sum_{j=1}^m \alpha \frac{12EI_{ij}}{H_i^3}. \quad (7)$$

式中, I_{ij} 为建筑结构第 i 层第 j 根柱的截面惯性矩, m 为第层柱子总根数, α 为框架结构梁柱节点的转动影响系数, H_i 为第 i 层的层高。

建筑结构的层间屈服剪力为

$$f_{yi} = \sum_{j=1}^m f_{yij} = \sum_{j=1}^m \frac{M_{yij}^{\text{上}} + M_{yij}^{\text{下}}}{h_i}. \quad (8)$$

式中, f_{yij} 为第 i 层第 j 根柱的屈服剪力, h_i 为柱子的高度, $M_{yij}^{\text{上}}$ 、 $M_{yij}^{\text{下}}$ 为第 i 层第 j 根柱上、下端部屈服弯矩,其详细计算过程如下:

$$M_{yij} = f_{yk} A_{sj}^{\alpha} (h_0 - \alpha'_s) + 0.5 N_G H_c \left(1 - \frac{N_G}{\alpha_1 f_{ck} b_c h_c} \right). \quad (9)$$

$$M_{yij} = f_{yk} A_{sj}^{\alpha} (h_0 - \alpha_s). \quad (10)$$

(9) 式为强梁弱柱型, (10) 式为强柱弱梁型。式中, f_{yk} 为纵筋强度标准值, f_{ck} 为混凝土轴心抗拉强度标准值, A_{sj}^{α} 为受拉钢筋面积, b_c 、 h_c 分别为构件截面的高度和宽度, N_G 为轴力。

对于强柱弱梁型结构,求得梁端屈服弯矩后,将柱梁端屈服弯矩之和按节点处上、下柱的线刚度之比分配给上、下柱。

$$\text{屈服位移: } x_{yi} = f_{yi} / k_{oi}, \quad (11)$$

$$\text{极限位移: } x_{ui} = \mu_i x_{yi}.$$

式中, μ_i 是第 i 层的延性系数,可近似取为 $\mu_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mu_{ij}$, μ_{ij} 是第 i 层第 j 根柱子的延性系数,计算过程如下(适用于压弯构件配置普通方箍的情况):

$$\mu = \begin{cases} 0.285 \text{Dex} + 3.465 \sigma_U = 0.712 (\text{Dex} \leq -3.4) \\ 2.476 \text{Dex} + 10.890 \sigma_U = 1.622 (\text{Dex} > -3.4) \end{cases}, \quad (12)$$

$$\text{Dex} = \ln \left(\frac{\lambda \rho_w f_c}{\rho f_{ye}} e^{-10n} \right).$$

式中, $\lambda = \frac{H_w}{2h_0}$ 是剪跨比 (h_0 是柱子截面有效高度, H_w 是柱的净高), 当 $\lambda < 1$ 时取 1, 当 $\lambda > 3$ 时取 3; ρ 是受拉钢筋配筋率, ρ_v 是体积配箍率, f_c 是混凝土抗压强度, n 是轴压比。

2.2 建筑结构累积滞回耗能反应计算

地震作用下建筑结构的累积滞回耗能是指建筑结构进入非线性阶段后滞回环所包围面积的累积,结构第 i 层的累积滞回耗能计算如下(杨佑发,崔波,2004):

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \int_{x_{yi}}^{x_{mi}} f_i(t_j) [x_i(t_j) - x_i(t_{j-i})], \\ &\approx \sum_{j=1}^{x_{mi}} f_i(t_j) [x_i(t_j) - x_i(t_{j-i})]. \end{aligned} \quad (13)$$

式中: X_{mi} 和 X_{yi} 分别为第 i 层最大位移反应和屈服位移, $f_i(t_j)$ 为第 i 层 j 时刻的水平剪力, $x_i(t_j)$ 、 $x_i(t_{j-i})$ 分别为结构第 i 层 j 时刻和 $j-1$ 时刻的相对位移。

2.3 建筑结构极限滞回耗能的计算

建筑结构的极限耗能是指结构在给定荷载幅值或变形幅值下循环至破坏的累积滞回耗能,具体计算如下(杨佑发,崔波,2004):

$$\varepsilon_U(\delta) = E_c(\delta) N_f(\delta). \quad (14)$$

式中, $E_c(\delta)$ 为变形幅值为 δ 是每个单循环的滞回耗能,可表示为

$$E_c(\delta) = \begin{cases} F_Y X_Y (0.77\mu - 0.22) & \mu < 1.5, \\ F_Y X_Y (f_1(\mu - 1) + f_2) & \mu \geq 1.5; \end{cases} \quad (15)$$

$$f_1=0.5+2.34X_w/X_y;$$

(16)

$$f_2=0.7-1.54X_w/X_y.$$

(17)

式中， $\mu=\delta/X_y$ ，剪切型结构可近似取 $X_w=0$ ， $N_f(\delta)$ 为结构在幅值 δ 的等幅循环下的循环次数，可近似计算为

$$N_f(\delta)=(9.86/\mu)^{6.4}.$$

(18)

本文以最大位移幅值 X_m 下循环至破坏的累积滞回耗能作为建筑结构的极限滞回耗能。

3 地震作用下考虑土—结构相互作用的煤矿采动建筑物损伤演化致灾分析

3.1 有限元分析模型

某矿区地质条件良好，地基土体主要有砂土、砂岩、煤岩、泥岩，简化处理后各岩体和煤层力学性能参数如表 1 所示（刘刚，2011）。

表 1 岩层力学参数

Tab. 1 The rock mechanics parameters

岩体名称	弹模 /MPa	泊松 比	强度 /MPa	容重 /kNm ³	厚度 /m	粘聚力 /MPa	摩擦角 /(°)
砂土	20	0.29	0.5	19.2	1	0.25	30
粉砂岩	2 010	0.184	44.9	26.5	4	1.35	35
泥岩	2 100	0.226	30.5	26.0	2	2.10	28
煤岩	1 800	0.272	11.8	14.0	2	0.65	28
粉砂岩	2 690	0.184	50.3	24.5	2	2.45	35

该矿区（抗震设防烈度为 7 度）有现浇钢筋混凝土框架结构办公楼（图 1），该楼共六层，底层层高为 4.2 m，其余层高均为 3.6 m，纵向 4 跨，跨度为 4.5 m，横向 2 跨，跨度为 6 m。该建筑物总高度为 4.2 m+5×3.6 m=22.2 m，总宽度为 12 m，总长度为 18 m。柱、梁、楼板、基础均采用 C30 混凝土，弹性模量 $E=30\text{ GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.2$ ，密度取 $2\,700\text{ kg/m}^3$ 。基础为筏板基础，尺寸为 28 m×16 m×1 m，为了更好的模拟土—结构相互作用效应对煤矿采动损伤建筑的影响，地基作用范围选 120 m×60 m×11 m。

纵筋选用 HRB400，根据《混凝土结构设计规范》（GB50010—2010）中规定的框架结构最小配

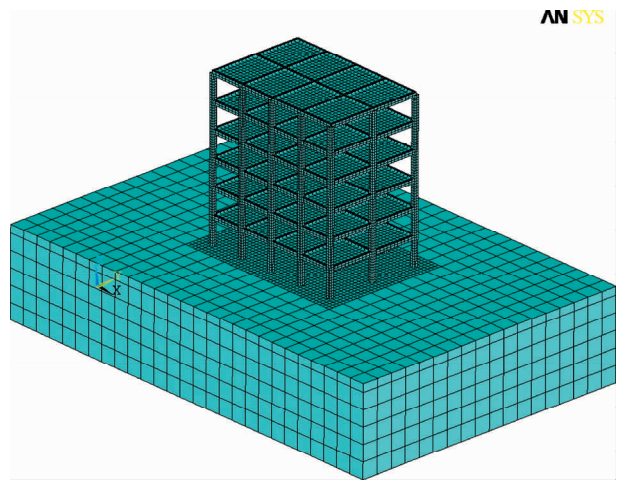


图 2 办公楼的有限元分析模型
Fig. 2 The finite element model of the office building

筋率和最大配筋率的要求，选取柱、梁板的配筋率如表 2 所示。

表 2 建筑物的构件属性

Tab. 2 The attributes of building component

构件	截面尺寸/mm	混凝土等级	配筋率
柱	500 * 500	C30	1.2%
梁	250 * 500	C30	0.8%
板	120	C30	0.2%

基于有限元分析软件 ANSYS 内嵌的 APDL 和 FORTRAN 语言进行二次开发，编制计算程序对建筑结构的梁、柱以及板中钢筋进行处理，采用刚度 EI 等效方法调整弹性模量的整体式建模，整体式的单元刚度矩阵和材料本构矩阵为

$$[K]=\sum\int[B]^T[D][B]dV,$$

(19)

$$[D]=(1-\sum_{i=1}^{N_r}V_i^S)[D_{sp}^C]+\sum_{i=1}^{N_r}V_i^S[D^S]_i.$$

(20)

式中： $[D_{sp}^C]$ 为混凝土弹塑性本构矩阵； $[D^S]_i$ 为各钢筋本构矩阵； V_i^S 为各钢筋的配筋率； N_r 钢筋材料的种数（最大为 3）； $[K]$ 是整体刚度矩阵。

经过上述处理后，不需考虑钢筋和混凝土分离的组合式模型，不仅缩短了计算时间，而且提高了计算精度，满足规范要求（何春林，邢静忠，2007）。

模拟地下煤层开采形成采空区的过程中，在土体和建筑物的自重作用下建筑物发生倾斜，其最大沉降值为 0.038 m，平均沉降值 2 mm/m。采

动引起建筑物产生的附加变形和附加内力,局部结构构件产生初始损伤,如图3所示。

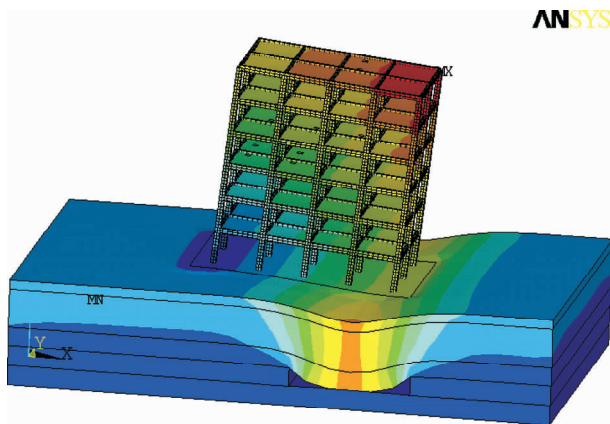


图3 模拟采动作用

Fig. 3 The simulation mining subsidence

通过对比分析图4两种不同结构形式的自振频率可知:刚性地基下建筑结构的前3阶自振频率是考虑土—结构相互作用的1.605倍,由此可知地基土在一定程度上集中了建筑结构有效的地震动力响应,考虑土—结构的相互作用后结构的自振频率大幅度的减小,即延长了结构的自振周期。由此可以判断:对地震作用下的煤矿采动损伤建筑的分析过程中需要考虑土—结构的相互作用,而对地基土体采用刚性地基假设是不完善的。

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中的相关内容,选取的地震波要满足峰值、频谱特性、地震持时的要求,结合该办公楼所处

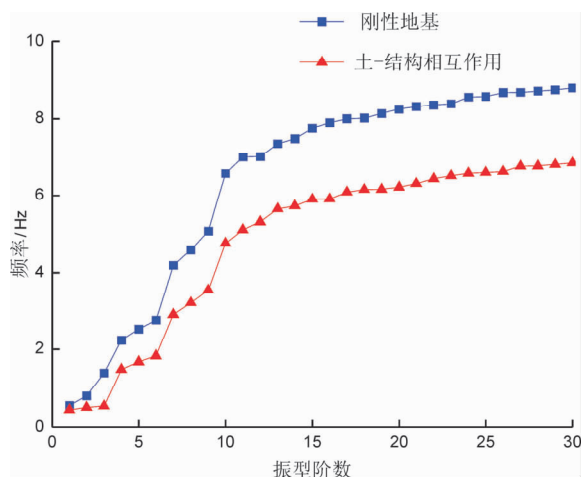


图4 结构自振频率对比

Fig. 4 Natural frequency comparison chart of the structure

工程地质条件及结构的自振周期,为了能够清晰的分析建筑物在采动与地震联合作用下的滞回耗能和损伤的变化过程,需要选取较长时间的强烈地震波。本文选用了20 s的El Centro地震波,满足包含最大幅值及持时 $5T \sim 10T$ (T 为建筑物的自振周期)的要求模拟烈度为7度时的罕遇地震作用,方向为南北向,调整后的最大加速度为 $220 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$,如图5所示。

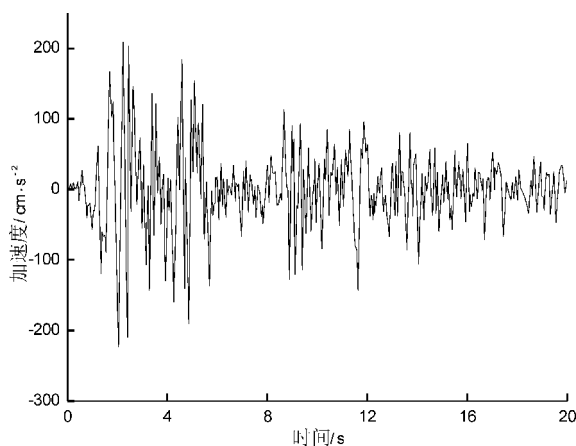


图5 El Centro地震波

Fig. 5 El Centro seismic wave

3.2 数值模拟结果分析

地下煤炭开采的过程中,地表发生移动、曲率变形、不均匀沉降等现象,建筑物发生倾斜,导致局部构件刚度降低,发生损伤破坏(框架结构梁柱节点出现塑性铰)。地震发生时,煤矿采动损伤建筑在地震动力的作用下加剧了破坏程度(刘书贤等,2013,2014)。本文从损伤力学和能

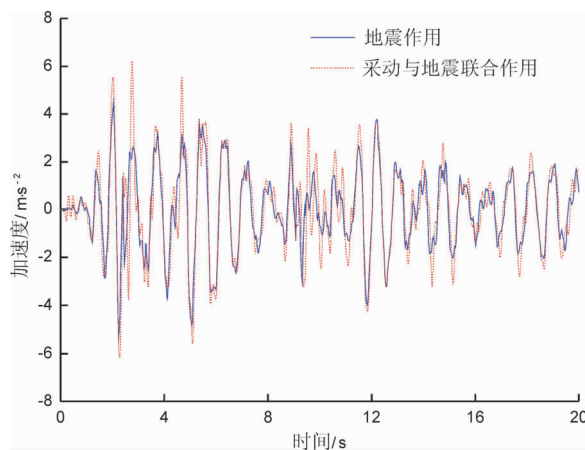


图6 顶层加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration history curve of the top

量耗散理论的角度重点考察了土—结构相互作用对煤矿采动损伤建筑的灾变影响。

分析图6可知：不同工况下的建筑物在地震动力作用下，煤矿采动作用对建筑物影响较大：地震发生2 s后，加速度迅速达到峰值，地震单独作用时为 4.481 m/s^2 ，煤矿采动和地震联合作用时为 6.266 m/s^2 ，较地震单独作用时，结构顶层加速度被放大了1.397倍，这对建筑物的抗震是不利的。

分析图7a的楼层最大加速度可知：地震发生过程中底层和顶层的变化幅值最大，主要是地震发生初期短时间内输入建筑结构能量急剧增大，部分结构构件的能量达到了损伤阈值极限，产生大量的损伤耗散能，致使梁端开裂。随着时间的增加，开裂区向梁柱节点处蔓延，形成塑性铰，降低了建筑物的底层刚度和强度，所以底层加速

度出现增大趋势。说明地震作用下煤矿采动作用加剧了结构的动力反应，导致建筑物底部梁柱节点处形成塑性铰，构件强度减小和刚度退化，严重削弱了建筑物的抗震性能。

分析图7b、7c可知：地震发生后，随着层数的增加煤矿采动建筑物的最大楼层位移也增大，与未受采动影响相比，各层位移增加幅度明显，煤矿采动建筑的顶层最大位移较未采动增大了1.845倍。结合图7c可知：煤矿采动影响下建筑物的最大层间位移增大（其中底层和顶层的最大层间位移增幅最大），较未采动分别增大了2.23倍和2.67倍。煤矿采动作用对建筑物底层的抗震性能的影响最大，顶层次之，中间层最小，同时也明显改变了建筑物的薄弱层位置，有向下发展的趋势（未采动的建筑的最大层间位移发生

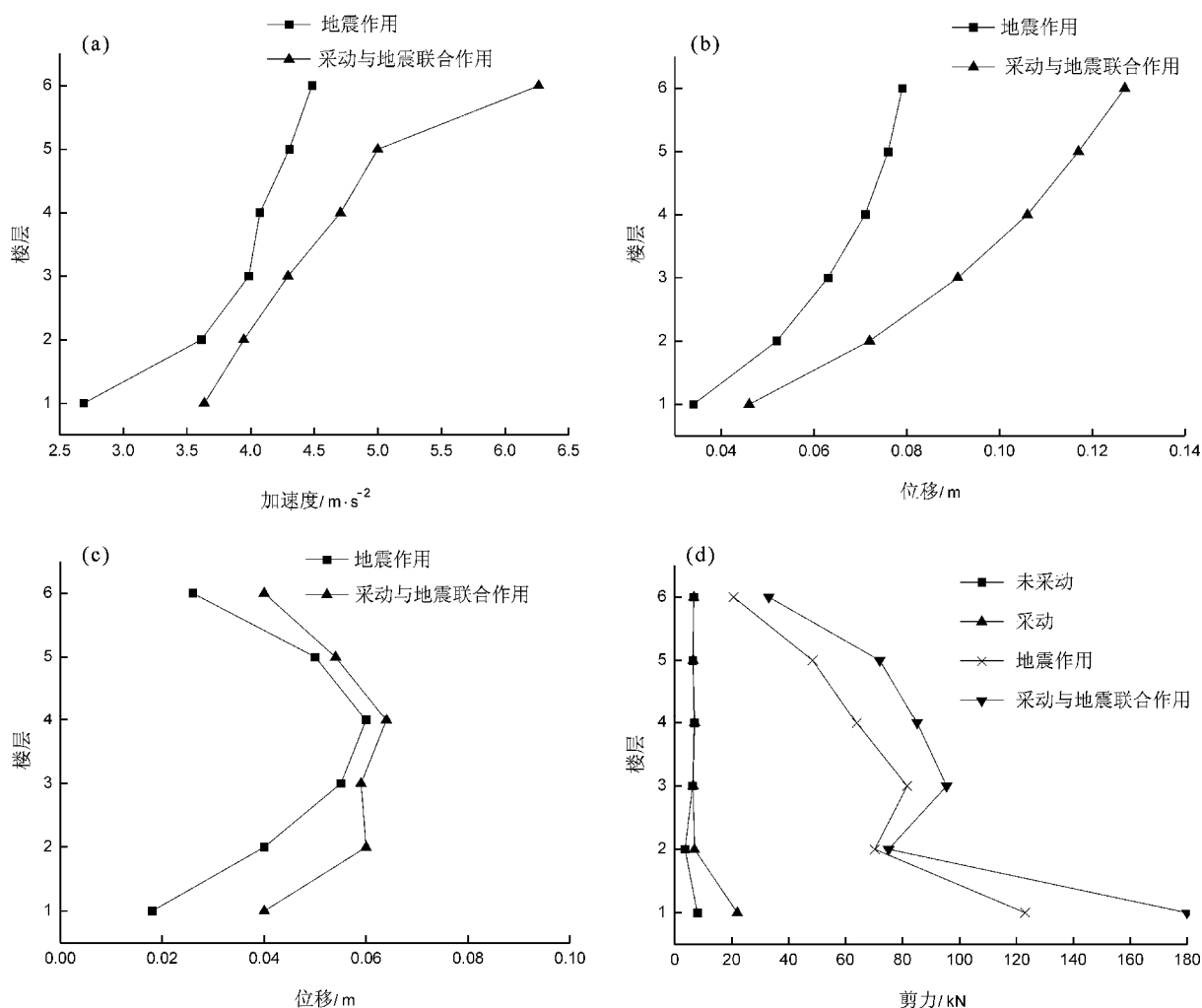


图7 楼层最大加速度 (a)、最大楼层位移 (b)、最大层间位移 (c) 和最大层间剪力 (d)

Fig. 7 The maximum acceleration of floors (a), the maximum displacement of floors (b), the biggest displacement among the floors (c) and the biggest shear among the floors (d)

在3~4层,煤矿采动后建筑的最大层间位移发生在2~3层),在煤矿采动建筑的损伤安全评估工作中必须予以重视。

由图7d可以看出:不考虑地震作用,煤矿采动引起的开采沉陷促使建筑物底部的剪力增大,增幅13.7 kN;建筑物上部的最大层间剪力变化不明显,此时建构处于弹性阶段。地震发

生后建筑物的层间剪力迅速增大,受采动影响的建筑物底部最大层间剪力由143.12 kN增加到179.976 kN,增幅达到36.856 kN,是静力阶段增幅的2.69倍,接近或者超过构件的屈服强度,建筑物的底部损伤演化现象严重,且向薄弱层发展形成多处塑性铰,严重降低了建筑物的抗震性能。

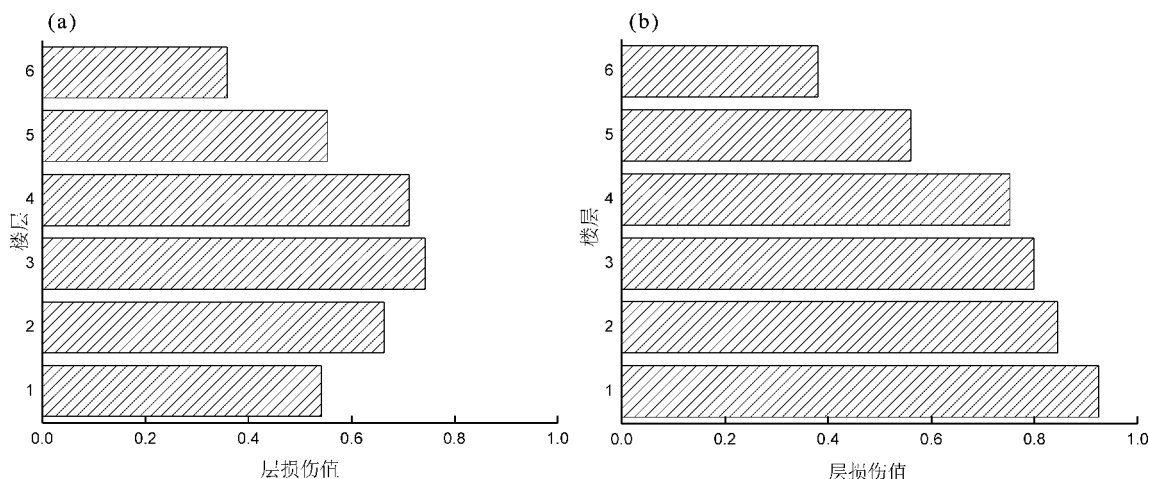


图8 地震作用下(a)和采动与地震联合作用下(b)楼层损伤值

Fig. 8 The floor damage value under the earthquake (a) and under the combined effect of mining and earthquake (b)

分析图8不同工况下建筑物的楼层损伤值图可知:地震发生后,未受采动影响的建筑的楼层损伤集中在3~4层(这两层的层间位移最大),底部和顶部损伤相对较小,由此可以判断3~4层是建筑物的薄弱层,在结构的抗震设计分析时应予以重视;在煤矿采动损害影响下,建筑物的各楼层损伤值均出现明显增幅,且损伤最大值出现在底部,底层损伤急剧增大了1.643倍,说明建筑物底部已经严重破坏,有可能出现倒塌的危险。

对于煤矿采动区的拟建建筑物,采动和地震联合作用加大了结构的位移反应,在结构设计时应考虑这种不利影响可能产生的 $P-\Delta$ 效应,在地震中建筑物容易倾覆,因此需要提高建筑物的抗侧移能力,同时加强结构薄弱层的弹塑性变形验算。

4 研究结论

本文基于损伤力学和能量耗散理论,以有限元软件ANSYS为工具,建立煤矿采动与地震联合作用下的有限元模型,重点研究了土—结构相互

作用对煤矿采动损伤建筑抗震性能的影响,通过分析层间加速度、层间位移、层间剪力、层间损伤得到如下研究成果:

(1) 在煤矿采动建筑的地震动动力灾变演化过程中,如果不考虑土—结构的相互作用,而采用刚性地基假设,使得计算结果过于保守、偏于安全。

(2) 地震作用下煤矿采动作用加剧了结构的动力反应,导致建筑物底部梁柱节点处形成塑性铰,构件强度减小和刚度退化,严重削弱了建筑物的抗震性能。

(3) 地震作用下煤矿采动损伤建筑出现多处塑性铰,且薄弱层位置向下发展,底层损伤相当严重,建筑物由局部构件损伤向结构整体破坏演化发展,增加了震害的影响,建议对煤矿采动建筑进行损伤安全评估时必须予以重视。

参考文献:

曹青,张豪. 2011. 考虑土—结构相互作用的风力发电机塔架地震响应分析[J]. 西北地震学报, 33(1): 62-66.

- 何春林,邢静忠. 2007. ANSYS 对钢筋混凝土结构弹塑性问题的仿真研究[J]. 煤炭工程, (4): 80–82.
- 刘刚. 2011. 条带开采煤柱静态稳定性研究[D]. 西安: 西安科技大学.
- 刘洁平. 2009. 高层建筑土—结构相互作用地震反应分析研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 刘书贤,郭涛,魏晓刚,等. 2014a. 地震作用下煤矿开采损伤建筑的能耗散演化致灾分析[J]. 地震研究, 37(3): 442–449.
- 刘书贤,王春丽,魏晓刚,等. 2014b. 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,胡红珍,魏晓刚,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, 28(4): 526–534.
- 刘书贤,魏晓刚,刘魁星,等. 2011. 基于隔震技术的采动区半主动双重保护装置减震分析[J]. 土木工程与管理学报, 28(4): 1–5.
- 牛荻涛,任利杰. 1996. 改进的钢筋混凝土结构双参数地震破坏模型[J]. 地震工程与工程振动, 16(4): 44–54.
- 王海,刘伟庆,王曙光,等. 2012. 土—结构相互作用下消能减震结构损伤分析[J]. 建筑结构学报, 33(10): 53–58.
- 夏军武,袁迎曙,董正筑. 2007. 采动区地基、独立基础与框架结构共同作用的力学模型[J]. 中国矿业大学学报, 36(1): 33–37.
- 杨佑发,崔波. 2009. 框架结构爆破地震的损伤评估[J]. 振动与冲击, 28(10): 191–194.
- 周长海. 2010. 不均匀沉降对钢筋混凝土框架结构影响的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学.
- 克拉夫 R.,彭津 J. 2006. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社.
- GB50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].

Analysis on Seismic Performance Impact of Soil-Structure Interaction on Coal Mining Damaged Buildings

LIU Shu-xian^{1,2}, BAI Chun^{1,3}, WEI Xiao-gang¹, LIU Shao-dong¹, MA Feng-hai⁴

(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. JCHX Mining Management CO., LTD., Miyun 101500, Beijing, China)

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

Abstract

In order to discuss the influence of the soil-structure interaction on the seismic dynamic failure process of coal mining damaged building, based on damage mechanics and the energy dissipation theory, we study the synergetic effect of soil-foundation-superstructure in mining area. By establishing the dynamics equations of coal mining damaged buildings considering soil-structure interaction, we focus on study seismic dynamic disaster evolution process of the building under the influence of the coal mining damage. The calculation results show that the influence of soil-structure interaction on seismic dynamic response of the coal mining building is larger, without considering soil-structure interaction is safer. Due to coal mining, the structure dynamic characteristics of the building is changed, the position of weak layer of the structure changed significantly and the plastic hinge and the distribution law of layer damage changes, which all seriously reduce the seismic performance of the building. The safety damage assessment should be taken for the buildings in coal mining area, which could ensure the safety and reliability of mining engineering construction.

Key words: soil-structure interaction; damage mechanics; seismic performance; coal mining; seismic dynamic; safety assessment