

# 煤矿采空区的地震动力响应及其对地表的影响\*

刘书贤<sup>1,2</sup>, 王春丽<sup>1</sup>, 魏晓刚<sup>2</sup>, 麻凤海<sup>3</sup>, 张 月<sup>4</sup>

(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. 中交一公局重庆永江高速公路投资建设有限公司, 重庆 402160)

**摘要:** 为了研究煤矿采空区的地震动力响应及其对地表的影响规律, 基于工程结构波动理论, 从地震的加速度和位移变化角度, 对煤矿采空区的地震动力响应及其对地表的影响进行系统的定量分析; 得出了煤矿采空区地震波的变化。根据结构动力学理论, 建立煤矿采空区岩层的动力学方程, 利用有限元软件定量地研究了在不同工况下煤矿采空区场地在地震作用下的响应规律, 得出如下结论: 煤矿采空区的存在降低了地表的位移和加速度峰值, 明显改变了场地地表的动力反应特性。岩土介质的松散度和破碎度得到增加, 降低了地表的地震动力响应。

**关键词:** 动力响应; 位移; 地震加速度; ABAQUS; 煤矿采空区

**中图分类号:** TU441

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)04-0642-06

## 0 引言

煤炭资源是我国重要的能源之一, 在能源消耗中占主导位置, 一次能源消耗量达到 70% 以上(刘书贤等, 2010)。随着经济的发展, 煤炭资源的需求总量仍将继续增加, 预计未来 40 年, 煤炭能源在我国一次能源消耗中仍将占到 60% 以上(刘刚, 2011)。随着煤炭资源的开采量以及需求量的日益增加, 矿区留下大量的错综复杂立体分布的采空区, 煤矿开采沉陷对建筑物及地表产生的危害不容忽视, 由于我国是一个地震多发的国家, 80% 以上的矿区位于抗震设防区域, 所以研究地震作用下采空区对土层结构及地表的影响就显得尤为重要(胡聿贤, 1958)。

国内众多专家学者对地震作用下地下结构的抗震性能展开了大量的研究工作, 对于地下结构的地震动力响应研究有了长足发展: 李艳恒(2004)采用波函数展开法, 研究了地下洞室群对地表运动的影响规律, 主要讨论了地震入射波频率、角度、洞室间距和埋深等因素对地下洞室上方地面运动的放大作用; 郑小琼(2012)采用有限元分析软件 ABAQUS 研究了浅埋地铁结构对地

表地震动力响应的影响, 指出地铁结构的存在对地震波的传播和破坏效应具有减弱作用; 李丽(2006)利用有限元与无限元相结合的研究方法分析了高速公路隧道的地震动力响应, 指出隧道结构的衬砌的薄弱位置。

虽然有关地下洞室的复杂场地土层地震反应取得了丰硕的研究成果(朱永生, 2006; 白建方, 2007; 张晓明等, 2013), 但关于煤矿采空区地震响应以及对地表稳定性方面研究则相对较少(Thomas, 1969)。地震波由于不同介质波阻抗的不同及煤矿采空区的存在, 在复杂的地层结构中发生反射、散色、投射等现象, 从而导致煤矿采空区的地震动力响应发生变化(薄景山, 2004)。笔者基于工程结构波动理论, 采用有限元分析软件 ABAQUS, 从地震波的加速度和位移变化角度对不同工况下煤矿采空区地表的地震动力响应进行分析。

## 1 煤矿采空区地震动力学响应的理论分析

地震作用下煤矿采空区的动力响应都涉及到对动力学方程的求解, 采用有限元分析时需要

\* 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。

计算区域进行单元离散化，地震荷载作用下煤矿采空区的动力学方程为

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=\{P(t)\}.$$

(1)

式中， $\{P(t)\}$  为结构体系外力的合力， $\{\ddot{u}(t)\}$  为节点运动的加速度， $\{\dot{u}(t)\}$  为节点运动的速度， $\{u(t)\}$  为节点运动的位移， $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  分别为体系的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵。

阻尼矩阵一般采用瑞利阻尼，其计算公式为

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K].$$

(2)

式中， $\alpha$ 、 $\beta$  为阻尼比例系数。

建立动力方程后，要计算出结构的动力反应值，还得求解动力方程。采用中心差分对速度、加速度进行离散化：

$$\{\dot{u}\}_t=\frac{1}{\Delta t}(\{u\}_t-\{u\}_{t-\Delta t}),$$

(3)

$$\{\ddot{u}\}_t=\frac{1}{\Delta t^2}(\{u\}_{t+\Delta t}-2\{u\}_t+\{u\}_{t-\Delta t}),$$

(4)

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t^2}[M]\{u\}_{t+\Delta t} &= \{P\}_t - ([K] - \frac{2}{\Delta t^2}[M] + \frac{1}{\Delta t}[C])\{u\}_t \\ &\quad - (\frac{1}{\Delta t^2}[M] - \frac{1}{\Delta t}[C])\{u\}_{t-\Delta t}. \end{aligned}$$

(5)

2 有限元计算模型及参数

2.1 有限元分析计算模型

本文以某煤矿的地质条件为原型，模型长（ $x$  方向）300 m，宽（ $y$  方向）130 m，高（ $z$  方向）150 m，模型简化为准三维模型。煤层倾角属于近水平，煤层采高为 5 m，采空区设置在煤层中间部分，单元数为 46 620 个（穆满根，2009）。

土层结构如表 1 所示。本文采用弹塑性本构模型，以摩尔—库仑屈服准则为破坏准则。模型侧边界为法向约束，底面为全固定约束，上表面为自由边界。在进行网格划分时，考虑众多因素，具体有限元网格划分结果见图 1、2。利用有限元分析软件 ABAQUS 对其进行数值模拟，具体的岩土层的力学参数如表 1 所示（刘刚，2011）。

表 1 计算模型岩体力学参数

Tab. 1 Rock mechanios parameter used in numerical analysis

岩体名称	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	厚度 /m	粘聚力 /MPa	内摩擦角 / (°)
砂土	20	0.29	1 920	45	0.25	30
粉砂岩 1	2 010	0.184	2 650	40	1.35	35
中粗砂岩	3 830	0.226	2 790	10	1.7	30
泥岩 1	2 060	0.226	2 600	10	2	28
煤	1 800	0.272	1 400	5	0.65	28
泥岩 2	2 100	0.226	2 600	10	2.1	28
粉砂岩 2	2 690	0.184	2 450	10	2.45	35

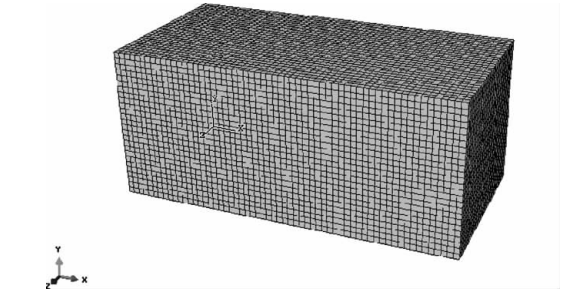


图 1 自然条件下的场地土层模型

Fig. 1 Finite element model of the soil site in natural condition

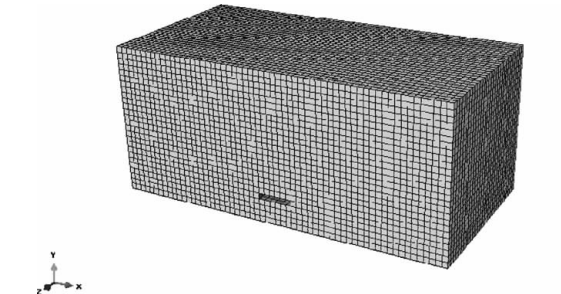


图 2 存在采空区的场地土层模型

Fig. 2 Finite element model of the soil site with goaf

2.2 地震波的选择与输入

为了有效区别煤矿采空区与自由场地的地震动力响应，本文计算所输入的地震波为 Taft 波，地震波的加速度时程如图 3 所示，根据《建筑抗震设计规范》（GB50011—2010）在进行有限元数值计算模拟时分 3 种工况进行计算：工况 1 输入地震波的加速度峰值为 0.1 g；工况 2 输入地震波的加速度峰值为 0.15 g；工况 3 输入地震波的加速度峰

值为  $0.2\text{ g}$  (陈健云等, 2001; 李海波等, 2006)。

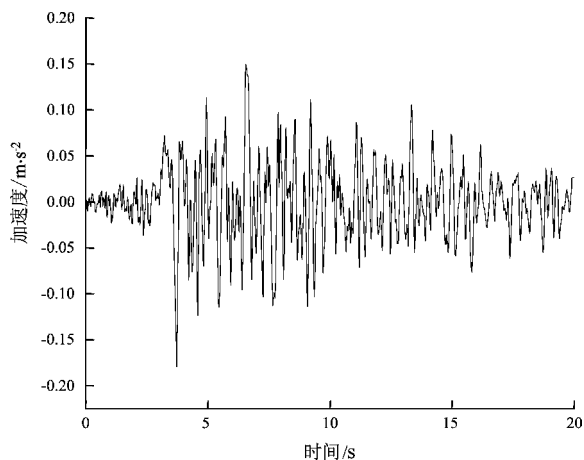


图 3 Taft 地震加速度波

Fig. 3 Seismic wave of Taft earthquake

### 2.3 监测点的设置与选取

在采空区中心正上方地表设置监测点 A, 在采空区边缘正上方距 A 点  $15\text{ m}$ 、 $75\text{ m}$  取监测点 D 和 E, 沿 A 点所在的中心线方向依次设置检测点 B、C, 且与 A 点的距离分别  $45\text{ m}$ 、 $85\text{ m}$ 。自由场监测点位置与煤矿采空区存在时布置相同 (图 4)。

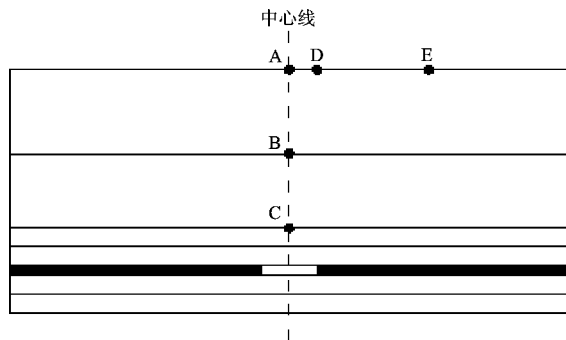


图 4 计算模型

Fig. 4 Computational model

## 3 计算结果分析

### 3.1 自由场的地震响应分析

图 5 给出了在  $0.15\text{ g}$  峰值加速度的 Taft 地震波作用下, 土体纵向 A、B、C 三点的水平加速度时程曲线。由图可知: 自由场地不同埋深点 B、C 两点与表面点 A 以及基岩输入的土体加速度时程曲线的形状大致一样; 表面 A 点的加速度峰值为

$0.27\text{ g}$ , 而 B、C 两点的加速度峰值分别为  $0.18\text{ g}$  和  $0.16\text{ g}$ 。通过数据可以得出, 表面点 A 的地震加速度峰值比 B、C 两点处的加速度峰值要大, 并且都大于输入地震波的加速度峰值。由此可以判断: 随着土层深度的变浅, 地表地震动的加速度放大效应加强, 符合《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 的相关规定, 该有限元分析模型相对比较合理, 其数值计算结果的可靠度也较高。

图 6 是工况 2 (输入地震波的加速度峰值为  $0.15\text{ g}$ ) 自由场地不同埋深监测点的相对位移曲线, 从图中可以看出点 A、B、C 的水平位移分别为  $0.170\text{ m}$ 、 $0.047\text{ m}$ 、 $0.014\text{ m}$ , 位移在正方向和负方向的振幅都随埋深的增加而变小, 在地表处其位移的峰值达到最大, 虽然埋深不同但沿竖直方向上各个点的位移却是同步振动的。

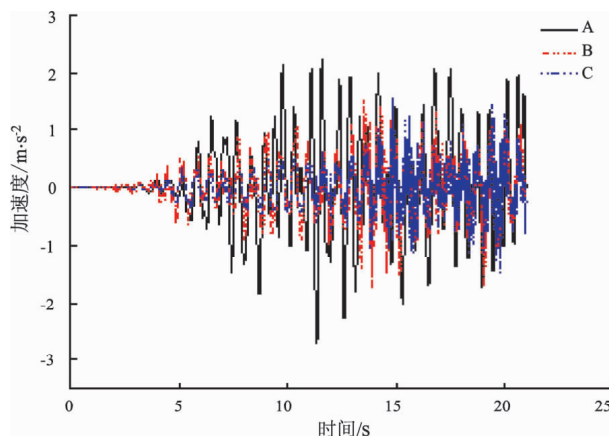


图 5 A、B、C 三点的加速度时程曲线 ( $0.15\text{ g}$ )

Fig. 5 Acceleration time history at points of A、B and C

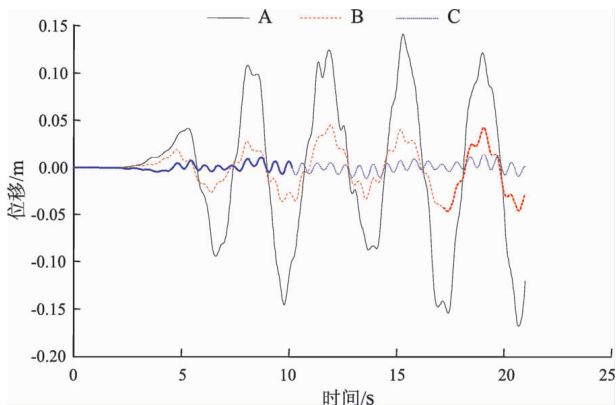


图 6 土体不同埋深点的水平位移时程

Fig. 6 Time-histories of horizontal relative displacement at different depth of soil

3.2 煤矿采空区对地表地震动响应的影响

在 3 种工况的地震波输入下，监测点 A 开采前后的水平方向加速度的时程曲线如图 7 所示，其加速度峰值如表 2 所示。结合图 7 和表 2 分析可知：在 3 种动力荷载工况作用下，随着输入地震波加速度峰值的增加，场地表面的加速度峰值也随之增加。煤矿采空区对地表加速度的地震动力响应影响较大，与自由场地相比，煤矿采空区的存在降低了地表的加速度峰值。

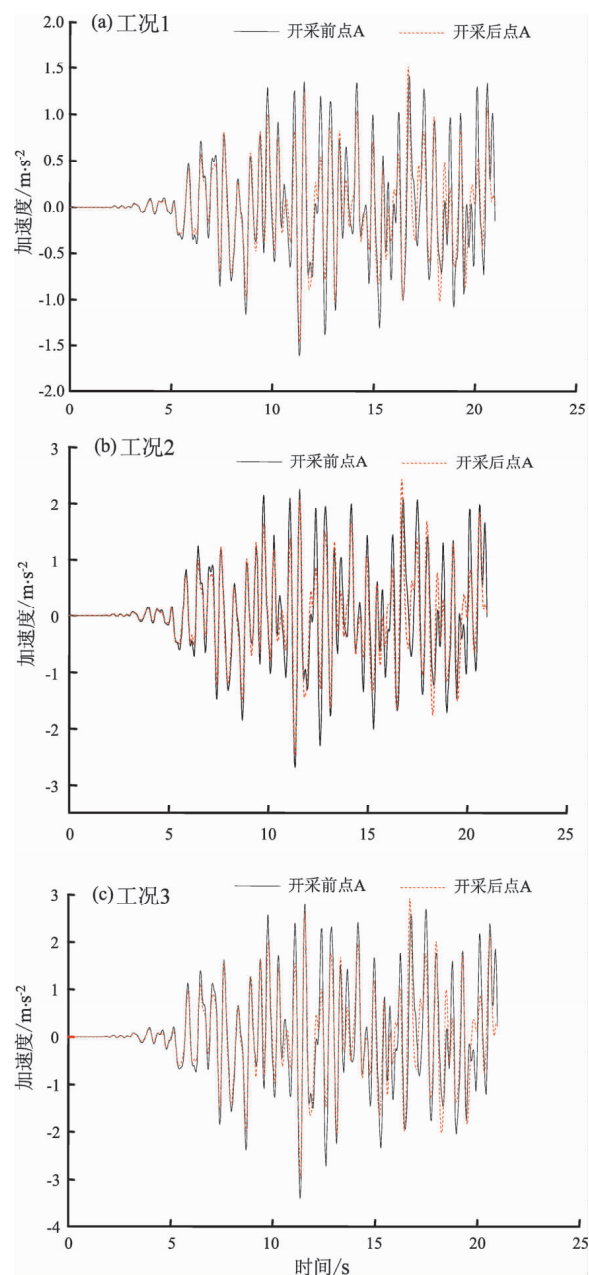


图 7 开采前后地表的加速度对比  
Fig. 7 Comparison of time-histories at surface before and after mining

表 2 不同工况下地表监测点 A 最大加速度值  
Tab. 2 The Maxmumtpeak acceleration of monitoring point A on the ground surface in different conditions

监测点 A	不同工况下最大加速度/g		
	工况 1	工况 2	工况 3
开采前	0.16	0.27	0.34
开采后	0.15	0.25	0.32

3.3 煤矿采空区对地表点位移响应的分析

图 8 为地震波作用下自由场与存在煤矿采空区的土体表面 A 点的水平向位移时程，其最大位移如表 3 所示。分析图 8 与表 3 发现：随着输入地震波加速度峰值的增加，场地表面的位移峰值也随之增加。煤矿采空区对地表位移的地震动力响应影响较大，与自由场地相比，煤矿采空区的存在降低了地表的位移峰值。

表 3 不同工况下地表监测点 A 最大位移

Tab. 3 The biggest layer of monitoring point on the ground surface with A

监测点 A	不同工况下位移/m		
	工况 1	工况 2	工况 3
开采前	0.098	0.168	0.211
开采后	0.077	0.132	0.165
差值	0.021	0.036	0.046

3.4 煤矿采空区地表各点加速度的响应分析

分析图 9 及表 4 可知：煤矿采空区不同位置的地表加速度的动力响应差别较大，其加速度峰值大小的顺序为：煤矿采空区远处 > 煤矿采空区正上方 > 煤矿采空区边缘，由此可以判断：煤矿采空区降低了地表的地震动力响应，这主要是因为煤矿的采动作用破坏了岩（土）层内部结构的完整性，导致其裂缝、空洞等增加，削弱了岩（土）层的强度和刚度，岩土介质的松散度和破碎度得到增加，影响了地震波的传递，耗散了地震波的传播能量，从而降低了地表的地震动力响应。

表 4 煤矿采空区地表各监测点加速度时程

Tab. 4 Peak acceleration history of each monitoring points on the ground surface in goaf

监测点 A	不同工况下最大加速度/g		
	工况 1	工况 2	工况 3
A	0.15	0.25	0.31
D	0.14	0.23	0.28
E	0.17	0.27	0.33

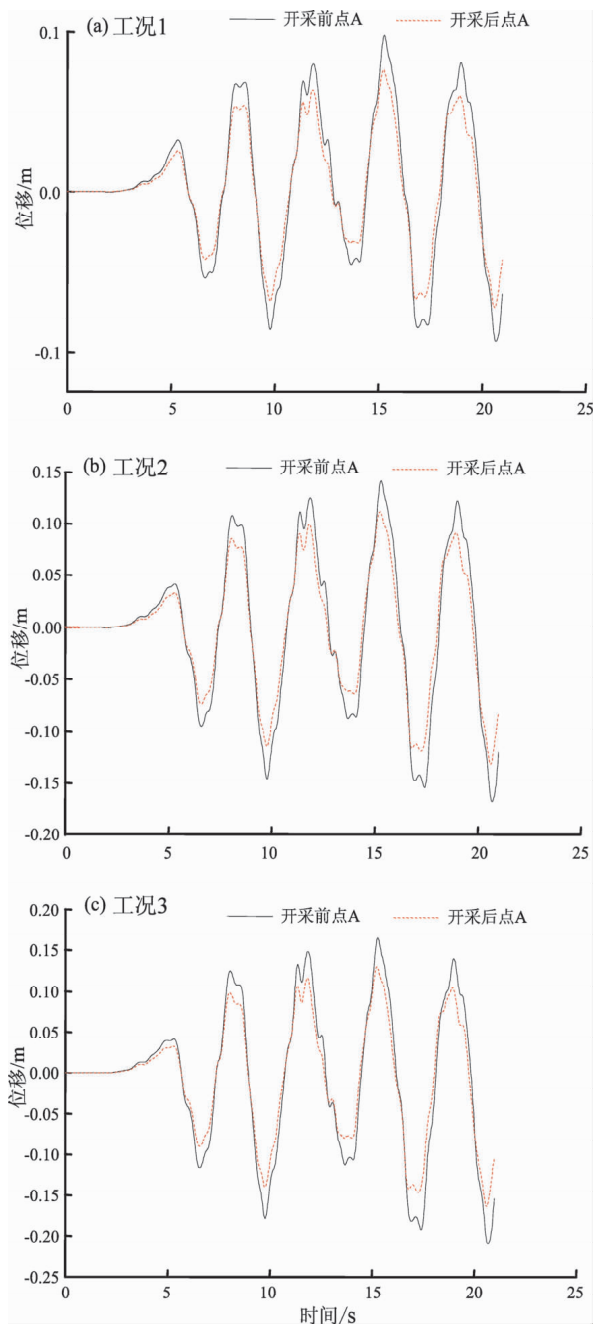


图8 3种工况地震波输入下的水平位移时程

Fig. 8 Time-histories of horizontal relative displacement under the earthquake in three different conditions

#### 4 结论

本文基于有限元分析软件 ABAQUS 探讨了地震作用煤矿采空区对地表动力响应的影响,得到了以下主要结论:

(1) 随着输入地震波的加速度峰值的增加,

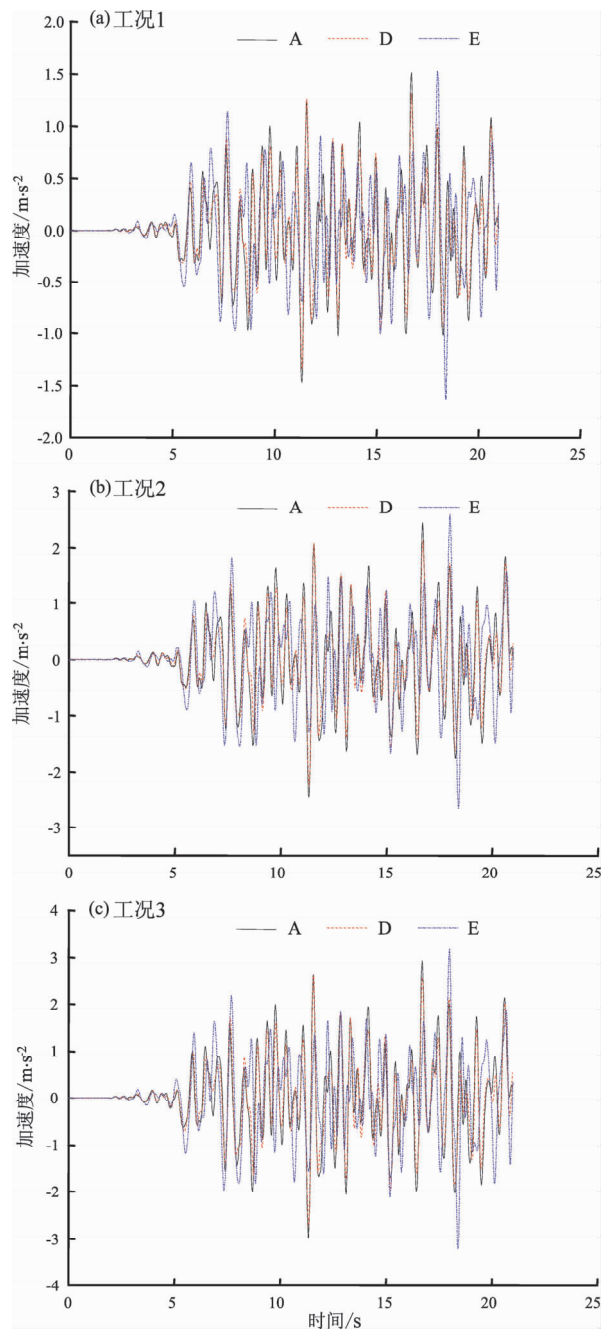


图9 地表各监测点加速度时程

Fig. 9 Peak acceleration of each monitoring points on the ground surface

场地表面的位移和加速度峰值也随之增加。煤矿采空区对地表位移的地震动力响应影响较大,与自由场地相比,煤矿采空区的存在降低了地表的位移和加速度峰值。

(2) 存在采空区的复杂场地,在采空区正上方地表点的加速度和位移均比自由场地时小,说明采空区的动力相互作用明显改变了场地地表的

动力反应特性。采空区对地表的地震响应具有减弱作用。

(3) 煤矿的采动作用破坏了岩(土)层内部结构的完整性, 导致其裂缝、空洞等增加, 削弱了岩(土)层的强度和刚度, 岩土介质的松散度和破碎度得到增加, 影响了地震波的传递, 耗散了地震波的传播能量, 从而降低了地表的地震动力响应。

#### 参考文献:

- 白建方. 2007. 复杂场地土层地震反应分析的并行有限元方法[D]. 上海: 同济大学.
- 薄景山. 2004. 土层地震反应分析方法比较研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 陈健云, 胡志强, 林皋. 2001. 超大型地下洞室群的三维地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 23(4): 494-498.
- 胡聿贤. 1958. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社.
- 李海波, 马行东, 李俊如. 2006. 地震荷载作用下地下岩体洞室位移

- 特征的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 28(3): 358-362.
- 李丽. 2009. 基于 ABAQUS 的高速公路隧道地震动力响应研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- 李艳恒. 2004. 地下洞室群对地面运动的影响[D]. 天津: 天津大学.
- 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]. 防灾减灾工程报, 30(增刊): 305-308.
- 穆满根. 2009. 多层复杂采空区稳定性研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 张晓明, 杨晓晨, 卢刚, 等. 2013. 下伏采空区的煤矿地表地震动力响应模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 32(6): 730-734.
- 郑小琼. 2012. 地下结构地震响应及其对地表的影响分析[D]. 大连: 大连理工大学.
- 朱永生. 2006. 浅埋隧道地震动力响应数值分析及研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- Thomas R. K. 1969. Earthquake design criteria for subways[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 95(6): 1213-1231.
- GB50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].

## Analysis on Seismic Dynamic Response of Coal Mine Gob Area and its Influence on Ground Surface

LIU Shu-xian<sup>1,2</sup>, WANG Chun-li<sup>1</sup>, WEI Xiao-gang<sup>2</sup>, MA Feng-hai<sup>3</sup>, ZHANG Yue<sup>4</sup>

- (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 First Highway Engineering CO., . LTG, Chongqing 402160, China)

#### Abstract

In order to study seismic dynamic response of coal mine gob area and its influence regulation on ground surface, basing on the engineering structure fluctuation theory, we quantitatively analyze the seismic dynamic response of coal mine gob area and its influence regulation on ground surface from the changes of earthquake acceleration and displacement, and obtain the changes of seismic wave in coal mine gob area. According to the theory of structural dynamics, we establish a dynamic equation of the coal mine gob area, and quantitatively study the seismic response regulation of coal mine gob area under the action of earthquake in different work conditions by using the finite element software. The obtained results as follow: the existence of coal mine gob area reduces the surface displacement and acceleration peak value and changes the dynamic response characteristic of the ground surface obviously. Increasing the loose and broken degrees of geotechnical medium could reduce the seismic dynamic response of the ground surface.

**Key words:** dynamic response; displacement; acceleration; ABAQUS; coal mine gob area