

文章编号: 0253-9993(2013)S2-0304-08

## 扰动岩质边坡强震作用下动力响应分析

张 燕<sup>1</sup> 纪洪广<sup>1</sup> 叶剑红<sup>2,3</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 3. 英国邓迪大学 土木工程系, 邓迪 DD1 4HN)

**摘 要:** 煤层露天转地下开采会扰动和弱化高边坡内岩土体, 使边坡安全性降低。采用数值方法研究受地下开采扰动的露天高边坡的强震动力反应。以抚顺东露天矿扰动岩质边坡为工程背景, 以有限元程序 FSSI-CAS 2D 数值计算为分析手段, 研究东露天边坡强震作用下的动力响应规律。研究发现: ① 东露天矿坑下覆岩体, 对地震波的放大效应明显低于两帮边坡的放大效应; 两侧边坡对地震波的放大效应与所处位置的高度成正相关关系, 高度越高对地震波的放大效应越明显。② 对于处在同一边坡高度的点, 由于右侧边坡扰动岩体性较弱, 右侧边坡上对地震波的放大效应明显要高于左侧边坡的放大效应。③ 计算区域内的任何位置, 对入射地震波大水平放大效应要永远高于竖向放大效应。无论是加速度响应、速度响应还是位移响应, 受开采扰动影响越大的区域, 加速度、速度响应和位移响应越剧烈。加速度、速度响应和位移响应剧烈的区域与扰动岩体损伤程度较大的区域一致。

**关键词:** 扰动岩质边坡; 强震作用; 边坡动力响应; 地震载荷; FSSI-CAS 2D

中图分类号: P315.9 文献标志码: A

## Dynamic response analysis of disturbed rock slope under strong earthquake loading

ZHANG Yan<sup>1</sup>, JI Hong-guang<sup>1</sup>, YE Jian-hong<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Division of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee DD1 4HN, United Kingdom)

**Abstract:** The underground coal mining following a open-pit mining leads to disturbances of the rock mass, and weakening of the strength of rock mass in the high slope. As a result, the safety of the high slope would further deteriorate. In this study, the seismic dynamics of a high slope under strong earthquake loading was numerically investigated, under which a underground coal mining is being done following a open-pit mining. Taking the rock slope disturbed by coal mining at Fushun East Open-Pit as an engineering background, the dynamic response of the disturbed rock slope under a strong earthquake loading was investigated in this study using the finite element program FSSI-CAS 2D as the numerical modeling tool. The study demonstrates that the amplification effect of seismic wave in the rock mass under the East Open-pit is significantly lower than that in the rock mass at the disturbed slopes. There is a highly positive relationship between the height of rock position and the seismic wave amplification effect. The higher the rock position, the greater the amplification effect of seismic wave in the disturbed rock slope; At the points with the same height on the disturbed rock slopes, the effect of seismic wave amplification at the right slope is significantly stronger than that at the left slope because the rock physical property at the right side slope is much weaker than that at the left side due to the underground coal mining; And at any position on the disturbed rock slopes, the horizontal amplification effect for the incident

收稿日期: 2012-08-08 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家重大基础研究发展计划(973) 资助项目(2010CB226803, 2010CB731501); 国家自然科学基金资助项目(51174015)

作者简介: 张 燕(1984—), 女, 山东菏泽人, 博士研究生。E-mail: yanzhang2009@gmail.com

seismic wave is always greater than the vertical amplification effect. In the zones where the disturbance to the rock mass due to coal mining is more serious, the dynamic response to the incident seismic wave, including displacement, velocity and acceleration, is stronger. The zones where the displacement, velocity and acceleration strongly responding to incident seismic wave are basically consistent with the zones where the rock mass is seriously disturbed by the coal mining.

**Key words:** disturbed rock slope; strong earthquake; dynamic slope response; seismic loading; FSSI-CAS 2D

最早关于边坡动力响应及稳定性的研究开始于 20 世纪 20 年代,但初始的研究主要集中在土质边坡动力响应及稳定性问题。对岩质边坡动力响应及稳定性的研究则开始于 20 世纪 70 年代。岩质边坡地震稳定性的研究成果主要集中在定性分析、现场观测及震害经验总结、理论分析及模型试验<sup>[1-2]</sup>等几个方面。定性分析方面,张倬元<sup>[3]</sup>、Kramer L<sup>[4]</sup>等对滑坡的地震失稳机制进行过定性分析。刘红帅等<sup>[5]</sup>研究了边坡失稳机制和位置。震害资料总结方面,Keffer<sup>[6]</sup>、王余庆<sup>[7]</sup>、孙进忠<sup>[8]</sup>、辛鸿博<sup>[9]</sup>等根据地震后边坡破坏(滑坡)的统计数据,提出了自己的岩质边坡在地震作用下崩滑的标准。理论分析方面,Ling<sup>[10]</sup>、姚爱军<sup>[11]</sup>、Siad<sup>[12]</sup>、CHEN<sup>[13]</sup>等采用拟静力法对岩质边坡地震稳定性进行研究;王思敬<sup>[14]</sup>、祁生文<sup>[15]</sup>、吴兆营<sup>[16]</sup>等采用动力学分析方法对岩质边坡稳定性进行评价。室内相似模拟试验方面,Tsesarsky 等<sup>[17]</sup>采用振动台试验研究层状结构岩质边坡的破坏机理,王存玉<sup>[18]</sup>在二滩拱坝动力模型试验中发现了岩石边坡对地震加速度的放大作用,王思敬等<sup>[19]</sup>通过振动台模拟试验研究单一滑动面的摩擦特性。上述关于边坡动力响应的研究,无论是针对土质边坡还是岩质边坡,都是在原岩(土)质边坡基础上展开的。本文对边坡动力响应的研究,则是在经受过地下开采扰动的非原岩质边坡,即扰动岩质边坡的基础上展开。由于地下开采扰动,使原岩物理力学性质发生变异<sup>[20]</sup>,强震作用下的扰动岩质边坡动力响应和稳定性必与原岩质边坡不同。因此,对强震作用下的扰动岩质边坡动力响应和稳定性的研究是必要和重要的。

### 1 工程背景

抚顺煤田位于辽宁省抚顺市区南部,东露天矿坑位于抚顺煤田的东部,东西长 6 km,南北宽 2.5 km,面积约为 12 km<sup>2</sup>。东露天矿的整个开采工程,包括爆破工程、边坡工程都处于老虎台矿采动影响范围之内。地下老虎台矿现开采水平-780 m,平均煤层开采厚度约 60 m,规划可采 5~7 个分层。工作面长 90~160 m,每分层厚度 10~15 m。煤层倾角 30°~

40°,属急倾斜煤层。目前东露天矿坑北帮边坡完全处于老虎台矿采动影响之下,两矿相对空间位置如图 1 所示。由于地下开采扰动,扰动边坡岩体力学性能发生变异,给扰动边坡稳定性分析及动荷载作用下的动力响应研究带来一定的难度。

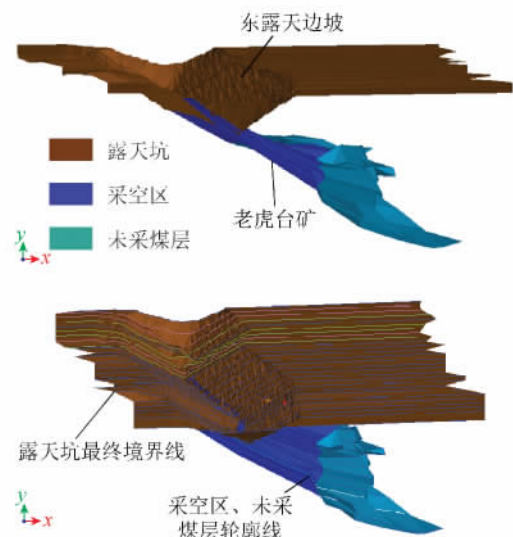


图 1 东露天矿与老虎台矿相对位置  
Fig. 1 Relative location between Donglutan open pit and Laohutai Mine

由于老虎台矿的开采在东露天矿的右侧边坡内部形成扰动“三带”<sup>[20]</sup>:垮落带、断裂带和弯曲下沉带(图 2)。因此在进行强震响应计算中,东露天矿的右侧边坡的岩体应采用扰动的岩体力学参数。

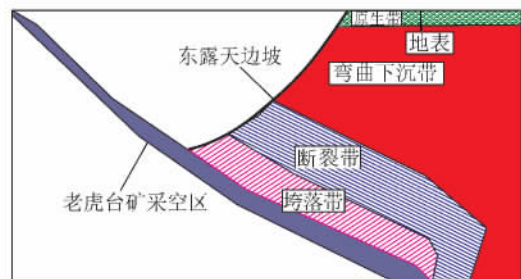


图 2 东露天边坡特征区域划分示意  
Fig. 2 Characteristics region in Donglutan open pit slope

通过现场高密度电阻率探测,对开采扰动后的地层电阻率与原始地层电阻率进行对比,得到原始地层电阻率与扰动地层电阻率的比值(图 3)。

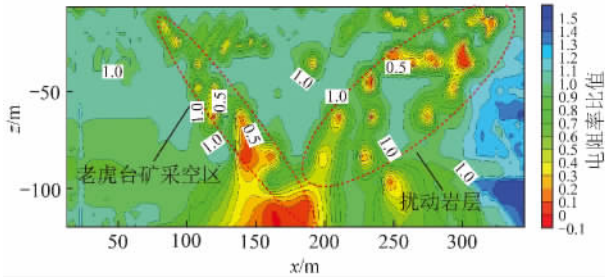


图 3 E7000 剖面地层损伤电阻率对比

Fig. 3 Resistance rate comparison chart of E7000 section

通过室内单轴压缩试验,三轴全应力应变试验,以及电阻率检测,得到岩石试件损伤过程中抗剪抗压强度与电阻率的变化关系。通过岩石损伤力学中“损伤因子”的概念<sup>[21]</sup>,将扰动岩体电阻率与损伤岩体力学参数建立直接关系,并以此为判据,对扰动岩层力学参数进行折减,扰动岩体力学参数见表 1。

## 2 计算模型及监测点布置

以东露天矿扰动边坡为工程背景,以有限元程序

表 1 扰动岩体力学参数<sup>[21]</sup>

Table 1 Mechanical parameter of disturbed rock<sup>[21]</sup>

岩性	损伤程度	抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	黏聚力 $c$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)
煤	未损伤	10.62	1.84	2.40	23.0
	垮落带	6.33 ~ 8.68	0.65 ~ 1.03	1.11 ~ 1.69	15.3 ~ 16.9
	断裂带	8.68 ~ 10.40	1.03 ~ 1.49	1.69 ~ 2.18	16.9 ~ 18.2
油母页岩	未损伤	28.63	8.42	3.00	22.5
	垮落带	17.08 ~ 23.40	2.99 ~ 4.70	1.38 ~ 2.11	14.9 ~ 16.5
	断裂带	23.40 ~ 28.03	4.70 ~ 6.84	2.11 ~ 2.72	16.5 ~ 17.8
绿色泥岩	未损伤	9.54	2.39	3.00	16.0
	垮落带	5.69 ~ 7.79	0.85 ~ 1.33	1.38 ~ 2.11	10.6 ~ 11.7
	断裂带	7.79 ~ 9.34	1.33 ~ 1.94	2.11 ~ 2.72	11.7 ~ 12.7
凝灰岩	未损伤	35.83	11.38	5.00	25.0
	垮落带	21.38 ~ 29.83	4.04 ~ 6.35	2.31 ~ 3.52	16.5 ~ 18.3
	断裂带	29.28 ~ 35.09	6.35 ~ 9.25	3.52 ~ 4.53	18.3 ~ 19.8
底板砂岩	未损伤	32.74	16.32	5.00	22.5
	断裂带	26.75 ~ 32.06	5.79 ~ 13.27	3.52 ~ 4.53	16.5 ~ 17.8

FSSI-CAS 2D<sup>[22]</sup>为分析手段研究扰动边坡在强震作用下的动力响应。由于裂隙岩体内部在一定深度范围内通常都含有地下水,地下水所引起的孔隙水压力需要予以考虑。在之前的大部分地震响应分析中,对于地下水的孔隙压力都予以忽略。所以在控制方程中考虑地下水的影响也是本研究的一个独特之处。计算模型为线弹性模型,控制方程由平衡方程和地下水流动质量守恒方程组成。

$$\frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_z}{\partial z} + \rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$k \nabla^2 p - \gamma_w n \beta \frac{\partial p}{\partial t} + k \rho_f \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} = \gamma_w \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3)$$

在方程(1)~(3)中, $u, w$ 为裂隙岩体在 $x, z$ 方向的位移; $\sigma'_x$ 和 $\sigma'_z$ 为水平和竖直方向的有效应力; $\tau_{xz}$ 为剪应力; $p$ 为孔隙流体的孔隙压力; $n$ 为岩体的平均孔隙率; $\rho$ 为裂隙岩体的平均密度;其中 $\rho_f$ 为孔隙流体密度, $\rho_s$ 为岩体密度; $g$ 为重力加速度; $\gamma_w$ 为孔隙

水的单位重度; $k$ 为裂隙岩体的等效渗透系数。

根据东露天矿和老虎台矿目前的地形和地质条件(图4),所选择的计算区域为横向2000m,竖向1125m(图5)。采用四边形9节点等参单元(完全3次单元)离散计算区域,共计20000个单元60000个计算节点。计算过程对计算区域内13个典型位置的地震动反映进行监测。

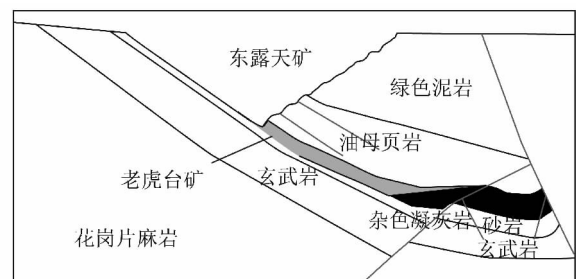


图 4 东露天矿-老虎台矿的典型地质剖面

Fig. 4 Geological section of the Donglutan-Laohutai Mine

## 3 计算结果分析

在数值计算中采用莫尔-库仑准则描述裂隙岩

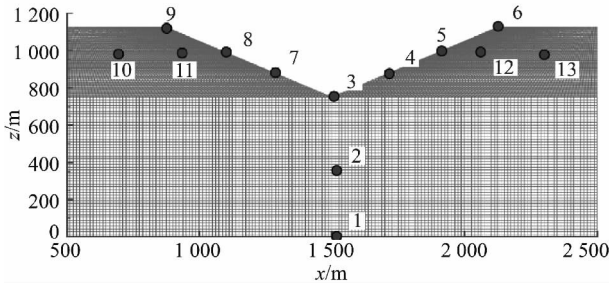


图 5 计算模型和监测点布置

Fig. 5 Numerical model and monitoring points position

体在地震作用下的动态反映。所以在计算东露天矿的强震响应之前,计算模型在地震波到达之前的初始应力场分布应首先确定。

图 6 为在有限元计算程序 FSSI-CAS 2D 采用裂隙岩体等效渗透的概念确定的计算区域内在地震波到达之前的地下水的水面线分布。该地下水的水面线分布表明东露天矿的开挖对该研究区内的地下水的分布是有较大影响的。在东露天矿区,地下水的水面线明显下降。

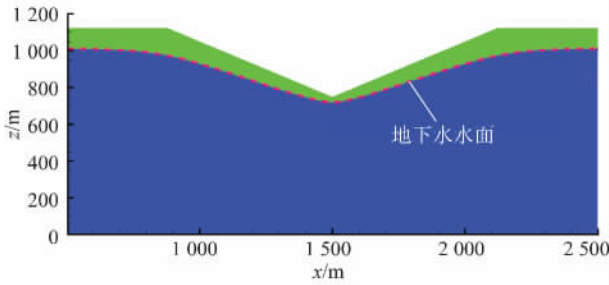


图 6 计算模型地下水分布

Fig. 6 Computational model of groundwater distribution

图 7 为 FSSI-CAS 2D 程序计算确定的研究区内在地震波到达之前的初始应力场分布情况。从图 7 可以看出,由于东露天矿的开采,对原有的自重应力场有显著影响。具体表现为: ① 在东露天矿底部,由于煤炭开采卸载,两侧边坡向临空面运移,使矿坑下方横向应力急剧增大。② 在右侧边坡的坡顶处出现了横向拉应力。这种横向拉应力的出现往往是边坡失稳,后缘出现拉裂隙的直接原因。

初始应力分布确定之后,采用 FSSI-CAS 2D 的计算模块和地震波输入模块进行东露天矿边坡的地震响应分析。所采用的地震波形如图 8 所示,该地震加速度波形记录于 2011-03-11 日本太平洋大地震,记录台站位于日本东北部距震中 200 km 处。为方便分析,将横向方向标为 E-W, 竖直方向标为 U-D。此次地震波形的横向最大地震加速度为  $1.33 \text{ m/s}^2$ , 竖向最大地震加速度为  $1.21 \text{ m/s}^2$ 。在计算过程中,地震波从计算模型的左右边界和底边界同时入射。

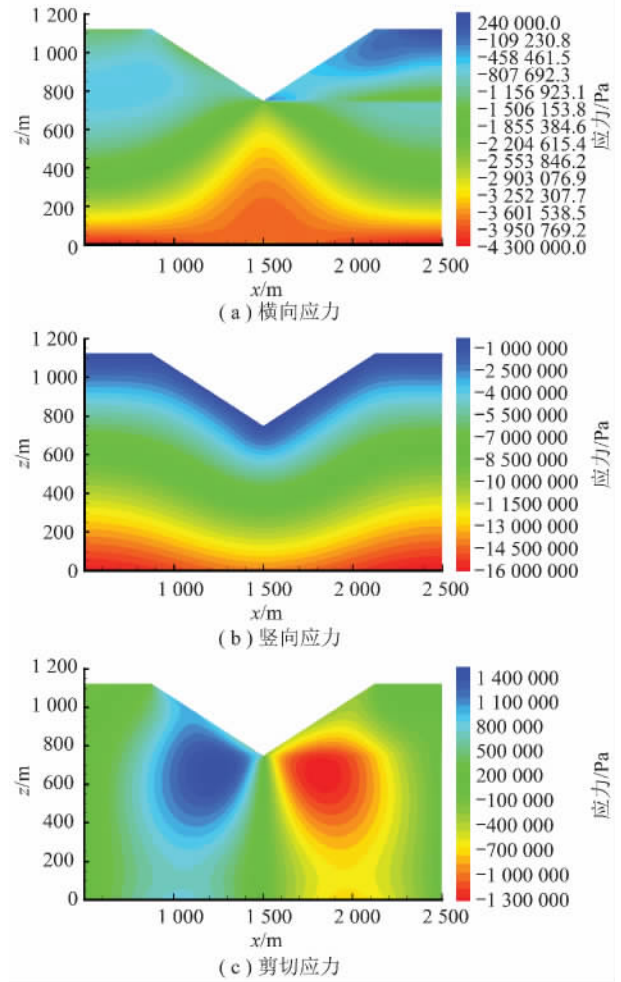


图 7 地震波到达之前计算模型应力场分布

Fig. 7 Stress distribution prior to the arrival of seismic waves

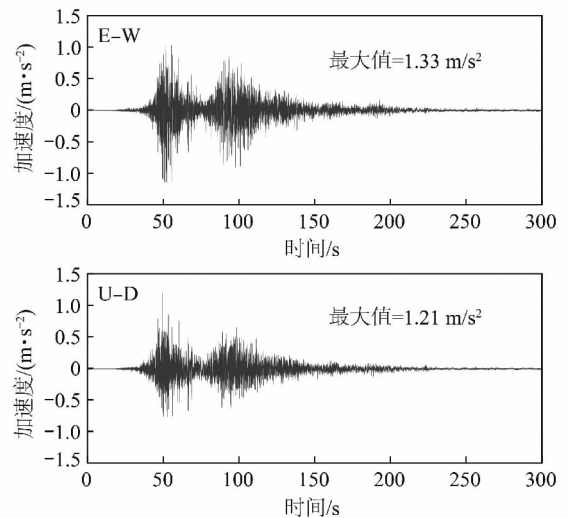


图 8 用于计算的入射强震地震波形

Fig. 8 Earthquake seismic waveform applied in calculation

由于篇幅所限,本文只展示典型监测点 3 和 6 的地震响应时程曲线,其中监测点 3 位于扰动边坡底部,监测点 6 位于扰动边坡顶部(图 9)。图 9 为监测点 3(位于矿坑底部)的横向和竖向加速度响应时程

曲线。发现最大横向响应加速度为  $2.26 \text{ m/s}^2$  ,最大竖向响应加速度为  $1.62 \text{ m/s}^2$  。与入射加速度相比,发现横向和纵向最大响应加速度都有一定幅度的放大。图 10 为监测点 6(位于东露天矿右侧边坡坡顶)的横向和竖向加速度响应时程曲线。与入射地震加速度相比,发现东露天矿右侧边坡对入射加速度有明显的放大效应;最大横向响应加速度达到  $6.49 \text{ m/s}^2$  ,最大竖向响应加速度为  $3.55 \text{ m/s}^2$  。从 3 号和 6 号监测点的地震响应来看,发现右侧边坡对地震波的放大效应是极为明显的,在坡顶放大倍数可以达到 4.88 (E-W 方向)和 2.91 (U-D 方向),其中横向的放大效应比竖向更为明显。两方向放大效应的不同应归因于在竖直方向上岩体重力对岩体的竖向运动的压制作用。

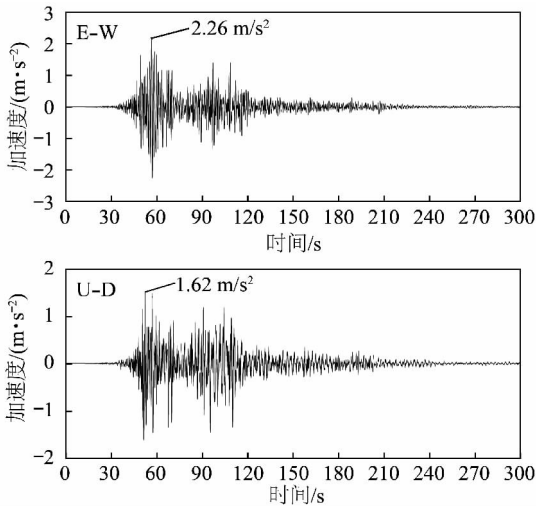


图 9 3 号监测点的横向和竖向响应加速度时程曲线  
Fig. 9 Horizontal and vertical acceleration-time curve of No. 3 point

从这 13 个监测点的分布位置和最大横向和竖向响应加速度量级来看,可以发现东露天矿对入射的地震波响应有如下规律:① 在东露天矿坑下岩体,对地震波的放大效应明显低于两帮边坡的放大效应。② 两侧边坡对地震波的放大效应与所处位置的高度成正相关关系,高度越高对地震波的放大效应越明显。③ 扰动边坡受扰动影响越大的地方,对地震波的放大效应越大。④ 对于计算区域内的任何位置,对入射地震波大水平放大效应要永远高于竖向放大效应。图 11、12 分别为 6 号监测点横向和竖向速度响应时程曲线和位移响应时程曲线。结果表明,最大的响应速度为  $180 \text{ cm/s}$  (E-W)和  $135 \text{ cm/s}$  (U-D),最大的响应位移为  $91 \text{ cm}$  (E-W)和  $78 \text{ cm}$  (U-D)。东露天矿对入射强地震波的响应较为剧烈。东露天矿两帮边坡若遭遇强震,边坡上碎石滚落,崩塌不可避免。

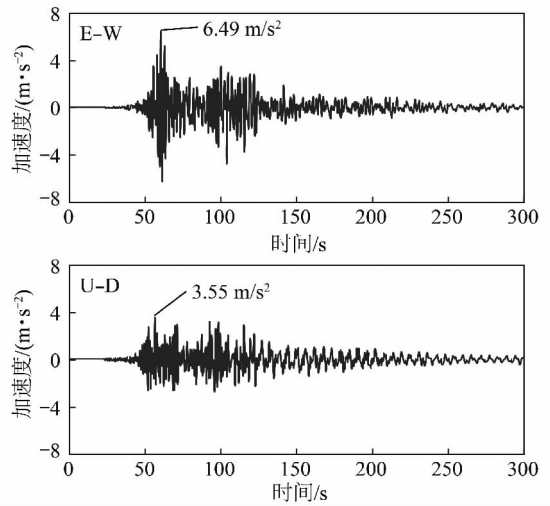


图 10 6 号监测点的横向和竖向响应加速度时程曲线  
Fig. 10 Horizontal and vertical acceleration-time curve of the 6th point

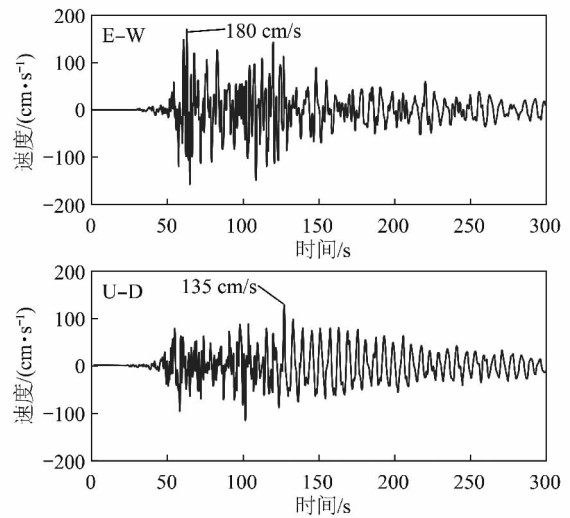


图 11 6 号监测点的横向和竖向速度响应时程曲线  
Fig. 11 Horizontal and vertical velocity-time curve of No. 6 point

以某一时刻为例,分析计算区域内在某时刻的地震响应分布情况。图 13~15 分别为东露天矿计算区域内在  $t=50 \text{ s}$  时的加速度、速度和位移响应的分布。从这 3 幅图可以发现以下规律:边坡内的响应加速度和速度要明显大于露天矿坑底的响应加速度和速度,右侧边坡内的地震响应加速度和速度分布明显要比左侧边坡内的响应要复杂得多,而且右侧边坡内的地震响应加速度和速度也要明显普遍大于左侧边坡内的,这与右侧边坡的岩体由于地下开采扰动,岩体力学强度变小有关。如图 4 所示,右侧边坡位于老虎台矿采空区正上方,属于扰动岩质边坡。而左侧边坡位于东露天矿采空区下方部,属未扰动岩质边坡。 $t=50 \text{ s}$  时的位移响应分布更明显地表明了右侧边坡的地震响应要比左侧边坡要剧烈得多。右侧边坡的最

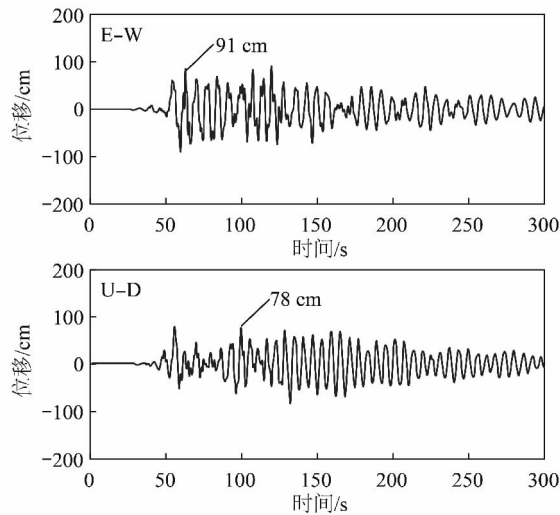


图 12 6号监测点的横向和竖向位移响应时程曲线

Fig. 12 Horizontal and vertical displacement-time curve of No. 6 point

大横向和竖向位移达到 0.4 m (E-W 方向) 和 0.6 m (U-D 方向), 然而左侧只有 0.05 m (E-W 方向) 和 0.15 m (U-D 方向)。结果表明, 无论是加速度响应、速度响应还是位移响应, 右侧边坡的响应程度明显比左侧边坡强烈, 受开采扰动影响越大的区域, 加速度、速度响应和位移响应越剧烈。加速度、速度响应和位移响应剧烈的区域与扰动岩体损伤程度较大的区域一致(图 13 ~ 15 分别和图 3 对比)。

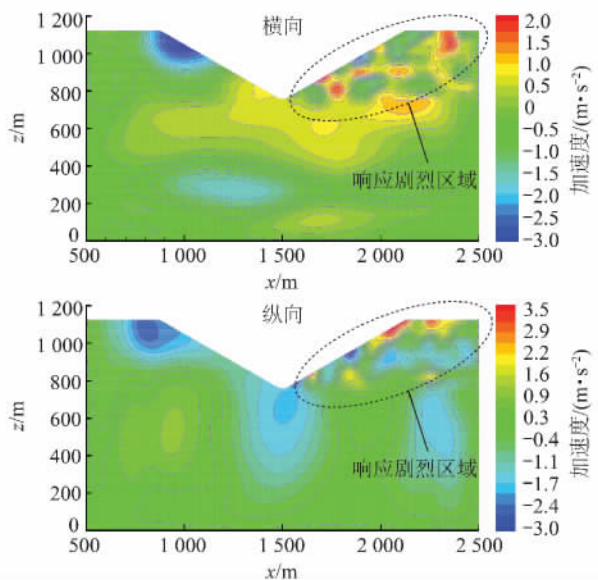


图 13 计算区域内时间  $t=50\text{ s}$  时的加速度响应分布

Fig. 13 Acceleration response distribution at  $t=50\text{ s}$

#### 4 加速度响应谱分析

加速度响应谱是工程抗震设计中的一个重要设计依据, 其可以直接确定工程结构和工程支护的抗震设计的设防加速度值。图 16 和 17 为露天矿左右边

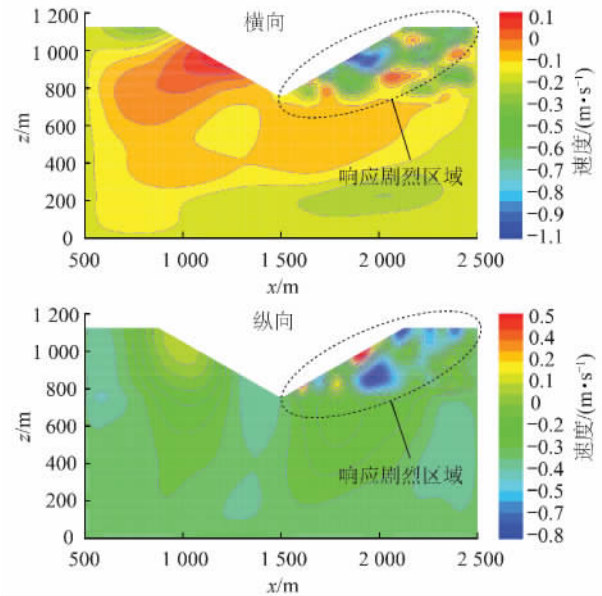


图 14 计算区域内时间  $t=50\text{ s}$  时的速度响应分布

Fig. 14 Velocity response distribution at  $t=50\text{ s}$

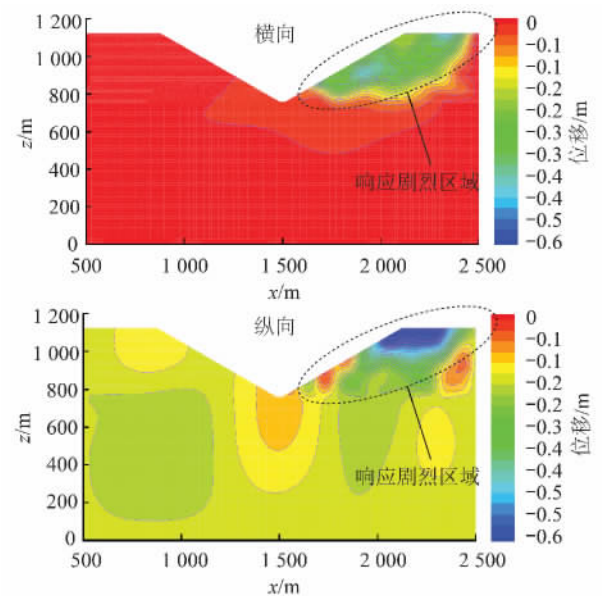


图 15 计算区域内时间  $t=50\text{ s}$  时的位移响应分布

Fig. 15 Displacement response distribution at  $t=50\text{ s}$

坡坡面上和坡内典型位置对入射强地震波的加速度响应谱。

从图 16 左侧边坡的横向加速度响应谱可以看出, 对于坡面上的点 7~9 而言, 他们对入射地震波放大效应是比较明显的, 尤其是左侧坡顶 9 号点, 其在所有频率范围内对入射地震波都存在放大。而 7, 8 号点的放大效应主要集中在频率小于 3 Hz 的波成分。对于左侧坡内部点 10, 对频率在 0.4~3 Hz 的横向入射波成分放大很明显, 而对竖向入射地震波放大效应不胜明显, 主要对频率为 1~1.2 Hz 的波成分具有一定的共振效应出现。总体而言, 从图 16 可以

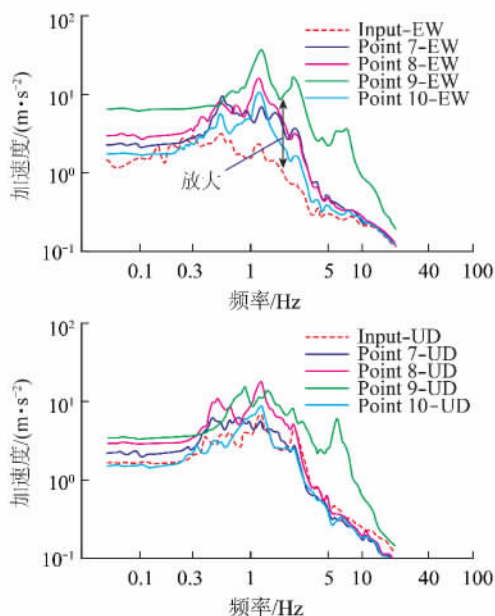


图 16 左侧边坡典型点的加速度响应谱

Fig. 16 Acceleration response spectrum of typical points in left side slope( damping ratio=5%)

明显看出东露天矿左侧边坡对横向地震波的放大要强于对竖向地震波的放大。发生共振的波频率是 1.2 Hz。

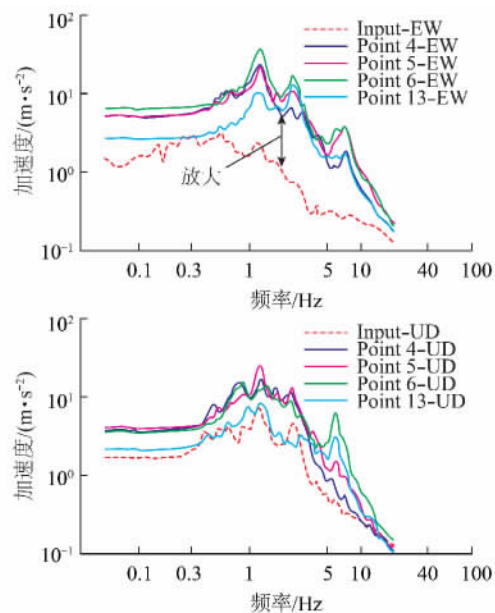


图 17 右侧边坡典型点的加速度响应谱

Fig. 17 Acceleration response spectrum of typical points in right side slope( damping ratio=5%)

对比图 17 和图 16 展示的左右侧边坡的横向加速度响应谱可以明显发现,右侧坡对于同一入射地震波的反应还是明显不一样的。右侧坡坡面上的点和内部点的地震响应明显强于左侧边坡。图 17 显示,坡面上的点 4~6 对所有的入射波成分都有放大效应,而且这一放大效应要明显大于左侧坡的放大效

应。与左侧坡内点 10 不同,右侧坡内点 13 也对所有的横向入射波成分都有放大,而对竖向入射波的放大主要集中在频率大于 3 Hz 的波成分。同样发现右侧坡对横向波的放大要明显强于对竖向波的放大。右侧坡同样对波成分为 1.2 Hz 波成分发生共振。从整个加速度响应谱来看,支护设计时应尽量使东露天矿左右边坡的自振频率小于 1 Hz 为佳。

## 5 结 论

(1) 通过对扰动边坡强震作用下的动力响应分析,发现:① 在东露天矿坑下岩体,对地震波的放大效应明显低于两帮边坡的放大效应。② 两侧边坡对地震波的放大效应与所处位置的高度成正相关关系,高度越高对地震波的放大效应越明显。③ 对于处在同一边坡高度的点,由于右侧边坡扰动岩体性较弱,右侧边坡上对地震波的放大效应明显要高于左侧边坡的放大效应。④ 计算区域内的任何位置,对入射地震波大水平放大效应要永远高于竖向放大效应。

(2) 无论是加速度响应、速度响应还是位移响应,右侧边坡的响应程度明显比左侧边坡强烈,受开采扰动影响越大的区域,加速度、速度响应和位移响应越剧烈。加速度、速度响应和位移响应剧烈的区域与扰动岩体损伤程度较大的区域一致。所以老虎台矿地下开采可能会直接导致其上方的东露天矿右侧高边坡在地震事件发生失稳。

## 参考文献:

- [1] 于 龙. 含软弱夹层顺层岩质边坡地震响应与变形破坏机理研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所 2010: 2-3.  
Yu Long. Study on seismic response and deformation failure mechanism of bedding rock slopes within weak interlayer[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010: 2-3.
- [2] 孙玉科, 姚宝魁. 我国岩质边坡变形破坏的主要地质模式[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, 2(1): 67-75.  
Sun Yuke, Yao Baikui. Main geological model of the rock slope deformation and failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983, 2(1): 67-75.
- [3] 张倬元, 王世天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社 2009.  
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Engineering geological analysis and principle[M]. Beijing: Geology Press 2009.
- [4] Kramen S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1996.
- [5] 刘红帅, 薄景山. 岩土边坡地震稳定性分析研究评述[J]. 地震工程与工程振动 2005, 20(1): 164-171.  
Liu Hongshuai, Bao Jingshan. Review on study of seismic stability analysis of rock-soil slopes [J]. Earthquake Engineering and Engi-

- neering Vibration 2005 20(1):164-171.
- [6] Keefer D. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution—the 1989 Loma Prieta California event[J]. Engineering Geology 2000 58:231-249.
- [7] 王余庆, 辛鸿博, 高艳平, 等. 预测岩土边坡地震崩滑的综合指标法研究[J]. 岩土工程学报 2001 21(3):311-314.  
Wang Yuqing, Xin Hongbo, Gao Yanping, et al. Study on comprehensive index method for predicting earthquake-induced landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2001 21(3):311-314.
- [8] 孙进忠, 陈 祥, 王余庆. 岩土边坡地震崩滑的三级评判预测[J]. 地震研究 2004 27(3):256-264.  
Sun Jinzhong, Chen Xiang, Wang Yuqing. Geotechnical slope seismic slump—the three judge forecast [J]. Journal of Seismological Engineering 2004 27(3):256-264.
- [9] 辛鸿博, 王余庆. 岩土边坡地震崩滑及其初判准[J]. 岩土工程学报 1999 21(5):591-594.  
Xin Hongbo, Wang Yuqing. Earthquake-induced landslide and avalanche[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 1999 21(5):591-594.
- [10] Ling H I, Mohri Y L D. Soil slopes under combined horizontal and vertical seismic accelerations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1997 26(12):1231-1241.
- [11] 姚爱军, 苏永华. 复杂岩质边坡锚固工程地震敏感性分析[J]. 土木工程学报 2003 36(11):34-37.  
Yao Aijun, Su Yonghua. A method for stability of slope engineering with complicated rock mass [J]. China Civil Engineering Journal, 2003 36(11):34-37.
- [12] Siad. Seismic stability analysis of fractured rock slopes by yield design theory[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2003, 23(3):203-212.
- [13] Chen Jian, Y J H, Lee C F. Stability analysis of the permanent shiplock slopes of the TGP under seismic action [A]. 13WCEE [C]. Vancouver, B. C., Canada 2004 Paper No. 350.
- [14] 王思敬, 张菊明. 层状边坡岩体滑动稳定的三维动力学分析[J]. 工程地质学报 1994 2(3):1-12.  
Wang Sijing, Zhang Juming. 3-D Dynamic analysis of rock sliding on the layered rock slope [J]. Journal of Engineering Geology, 1994 2(3):1-12.
- [15] 祁生林, 祁生文, 伍法权, 等. 基于剩余推力法的地震滑坡永久位移研究[J]. 工程地质学报 2004 12(1):63-68.  
Qi Shenglin, Qi Shengwen, Wu Faquan, et al. On permanent displacement of earthquake induced slide based on residual pushing force method [J]. Journal of Engineering Geology 2004 12(1):63-68.
- [16] 吴兆营, 薄景山, 刘红帅, 等. 岩体边坡地震稳定性动安全系数分析方法[J]. 防灾减灾工程学报 2004 24(3):228-241.  
Wu Zhaoying, Bo Jingshan, Liu Hongshuai, et al. A method for evaluating dynamic safety factor rock slope seismic stability analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004 24(3):228-241.
- [17] Tsesarsky M, Hatzor Y H, Sitar N. Dynamic displacement of a block on an inclined plane: analytical, experimental and DDA results [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering Geology 2005 38(2):153-167.
- [18] 王存玉. 边坡模型振动试验研究岩体工程地质力学问题(七) [M]. 北京: 科学出版社, 1987:65-74.
- [19] 王思敬, 张菊明. 边坡岩体滑动稳定的动力学分析[J]. 地质科学 1982(4):162-170.  
Wang Sijing, Zhang Juming. Dynamic analysis of slope rock stable slide [J]. Geological Sciences 1982(4):162-170.
- [20] 钱鸣高, 石平五, 许家林, 等. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2003.  
Qian Minggao, Shi Pingwu, Xu Jialin, et al. Ground pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press 2003.
- [21] 纪洪广, 向 鹏, 张 磊, 等. 开采扰动岩体力学性质变异性试验研究与探测分析[J]. 岩石力学与工程学报 2011 30(11):2352-2359.  
Ji Hongguang, Xiang Peng, Zhang Lei, et al. Experimental study and detection analysis of mechanical properties variability of rock mass in excavation disturbance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011 30(11):2352-2359.
- [22] Ye Jianhong. Numerical analysis of wave-seabed-breakwater interactions [D]. Dundee: University of Dundee 2012.