

露天矿排土场高边坡动力稳定性研究

刘寒鹏^{1,2}, 毛彦龙³

(1. 天津城市建设学院, 天津 300384; 2. 天津软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;
3. 长安大学地测学院, 西安 710054)

[摘 要] 露天矿生产采用爆破手段, 除采矿形成边坡外, 废矿堆积也常常形成排土场高边坡, 现场实测露天矿排土场在生产爆破作用下的振动速度, 将实测加速度数据推导得到的水平加速度值, 线性插值到每一个土条中, 利用等效静力法对边坡在爆破动力作用下的稳定性进行了计算及评价, 与传统等效静力法相比, 此方法更接近实际振动加速度分布情况。同时, 采用模态叠加法, 通过有限元动力响应分析的手段, 对露天矿排土场高边坡表面不同部位土体位移分布规律进行了分析, 最终得到研究边坡在生产爆破动荷载作用下不会产生整体滑移, 但在坡面顶部表层或浅层会产生一定深度的拉张裂缝, 在重力和爆破动力的作用下裂缝逐渐加深, 到一定深度时, 表层矿渣会顺坡滑下产生表面滑塌型破坏的结论。

[关键词] 露天矿 排土场 稳定性 动力响应

[中图分类号] P642 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2010)04-0728-05

Liu Han-peng, Mao Yan-long. A study on dynamic stability of slopes at dump sites of open-pit mines[J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46(4): 0728-0732.

0 引言

边坡稳定的重要性在矿产资源开发中, 无论是金属矿或非金属矿, 一直是被关注的重要问题(李文秀, 1985), 如海州露天煤矿、平庄西露天煤矿、元宝山露天煤矿、伊敏河露天煤矿、扎赉诺尔露天煤矿、抚顺露天煤矿等先后发生过若干次大滑坡; 另一方面, 许多露天矿排土场如: 平庄西露天煤矿、平朔安太堡露天煤矿等矿场的排土场也都发生过大滑坡, 造成了严重的经济损失, 危害极大(杨丽萍, 2006), 排土场的边坡稳定性引起人们的高度重视, 由于露天矿生产采用爆破技术, 爆破振动产生地震波构成复杂, 动力荷载作用下排土场边坡稳定性评判的理论亦尚不成熟(刘寒鹏等, 2007), 针对动荷载作用下边坡稳定性研究具有实践和理论意义。

1 边坡动力稳定性分析研究概况

边坡在静力条件下可采用的稳定性分析方法较多, 大体可分为定量分析和定性分析(靳付成, 2007), 由于工程设计计算需要, 定量分析的方法得

到广泛发展及应用。定量分析方法分为确定性分析方法和不确定性分析方法, 确定性分析方法主要包括极限平衡分析法和数值分析方法。其中极限平衡法中的条分法及改进条分法(Fredlund, 1981; Bishop, 1995; Greco, 1996)普遍应用于工程中; 数值分析方法主要包括: 有限元法、边界元法、离散元等方法, 多用于科研课题当中。而不确定性分析方法(贺可强等, 2001)主要包括灰色系统评价法、可靠度分析方法、模糊综合评价法、人工神经网络法等。

相对来说, 边坡在动力条件下可采用的稳定性分析方法少且不成熟, 其主要原因是: 动载荷的影响因素多, 如运动参数、力学参数、振动作用时间及频谱等。

边坡动力稳定性评价常用计算方法为等效静力法, 利用极限平衡分析方法, 把爆破(地震)产生的动载荷折算成等效静载荷来考虑, 用惯性力的方法参与边坡的稳定性计算, 在计算中没有考虑频谱结构、加速度衰减及尺度效应等因素, 计算结果相对粗略(朱传云等, 1997), 但是该方法简单实用, 在实际工程中应用广泛, 积累了大量的经验, 在边坡地震稳

[收稿日期] 2009-08-26; [修订日期] 2010-06-18; [责任编辑] 郑 杰。

[基金项目] 天津市科委岩土工程重点实验室建设基金项目(编号: 06SYSYJC14900)资助。

[第一作者简介] 刘寒鹏(1970年-), 男, 主要从事地质工程及软基处理研究工作, Email: hanliu@tjuc.edu.cn。

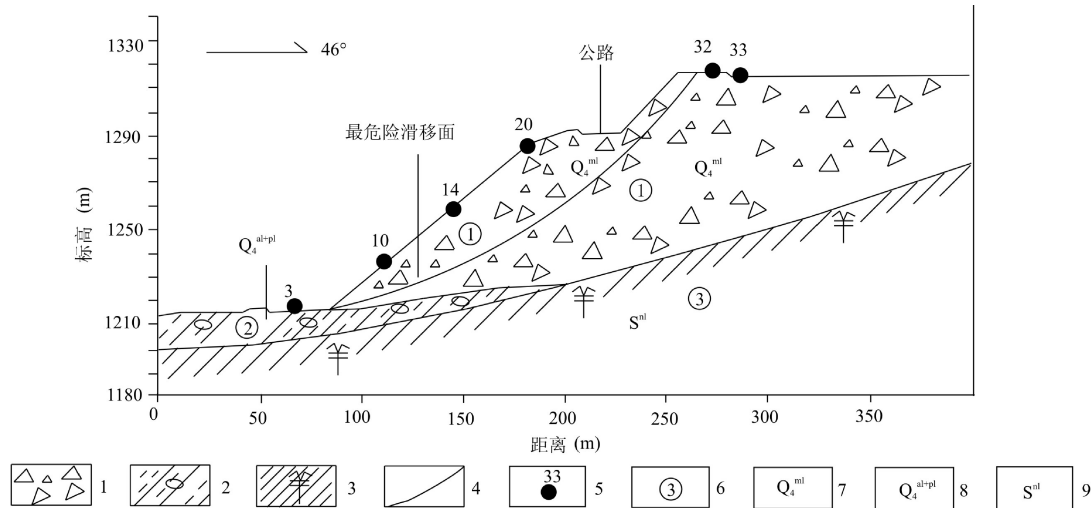


图 1 排土场研究剖面工程特性示意图

Fig.1 Sketch cross section showing geological characters of a dump site
1-人工填土;2-含粉质粘土的碎石土;3-中等风化板岩;4-最危险滑移面;5-有限元分析节点位置及编号;6-层号;7-第四系人工填土;8-第四系冲积及坡积物;9-震旦系
1-artificial fill;2-gravel soil with silty clay;3-medium weathered slate;4-the most dangerous sliding surface;5-the node location and number of FEM;6-layer number;7-artificial fill of quaternary;8- alluvium and slope deposits of Quaternary;9-Sinian

定性分析中纳入规范(湖南水利水电勘测设计院,1983)中。

有限元分析是另一种常用的边坡动力稳定性研究手段,目前的研究主要集中在采用动力有限元进行边坡稳定性或动力响应分析(李祥龙等,2006)、在等效静力法中考虑频谱结构(李彤华等,2000;张林等,2005)、加速度衰减(卢文波等,1996;张晓晖,2009)及尺度效应等方面。

2 研究边坡场地及地层概况

研究边坡位于陕西省华县金堆镇,为金堆城铝业公司排土场(见图 1),坡高 130m,坡角约 36.5°;取排土场典型剖面为研究对象,自上而下其地层岩性为:①层(Q_4^{ml})第四系人工填土(矿渣)-以碎石土为主(主要粒径 2~5cm,密实);②层(Q_4^{al+pl})第四系含粉质粘土的碎石土,密实,稍湿;③层(S^{nl})为震旦系中等风化板岩。

场地地层物理力学性质指标:通过现场颗粒分析、密度、剪切试验,结合地球物理勘探手段测试(刘寒鹏,2003),确定物理力学性质指标见表 1。

3 研究边坡动力稳定性分析

本文采用等效静力法进行计算,结合有限元动力响应分析的方法对研究边坡进行稳定性分析。

表 1 物理力学性质指标一览表

Table 1 Physical and mechanical property parameters

层号	材料类型	内聚力(kPa)	内摩擦角(°)	泊松比	密度(kN/m³)
1	矿渣	30	26	0.33	23.2
2	碎石土	32	25	0.35	22.8
3	基岩	2000	40	0.24	25

表 2 实测各点爆破震动参数最小、最大统计结果表

Table 2 The maximum and minimum vibration reference of each observation point

测试地点	测试方向	震速(10^{-3} m/s)		加速度(10^{-3} m/s²)	
		最小	最大	最小	最大
坡脚	垂直	0.08	1.153	0.015	0.163
	水平	0.023	0.46	0.01	0.28
坡中	垂直	0.039	1.05	0.03	0.12
	水平	0.016	0.661	0.03	0.36
坡顶	垂直	0.027	1.43	0.18	0.539
	水平	0.0129	0.63	0.12	0.70

3.1 爆破震动现场检测

在研究边坡现场,分别在坡脚、坡中、坡顶设置测点,在各监测点处开挖一定深度的测试坑,然后用水泥砂浆浇筑并在顶面找平,以使拾震器与观测介质充分接触。监测采用成都拓普电子技术研究所生产的 TOPBOX 便携式测振记录仪,配金桥传感器厂

生产的速度传感器进行 30 余次观测(表 2),通过 TOP VIEW2000 分析资源库对测振数据进行计算得到监测点 1、2、3 水平向最大加速度值分别为 $0.28\times10^{-3}\text{ m/s}^2$ 、 $0.36\times10^{-3}\text{ m/s}^2$ 、 $0.70\times10^{-3}\text{ m/s}^2$ 。

3.2 等效静力法边坡稳定评价

研究边坡虽然斜坡表面矿渣有一点分选性,但总体来看还是比较均匀的,其中又没有明显的破坏面存在,利用自行编制的 slp 边坡稳定性分析软件,采用 Bishop 法(潘家铮,1980;钱家欢,1996)进行搜索和计算(见图 2),计算原理如下:

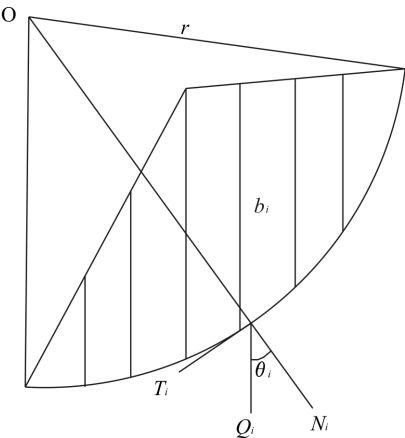


图 2 圆弧搜索法计算示意图

Fig.2 Sketch showing calculation by the arc searching method

(1) 先根据勘察所得滑动面剪出口位置,用作图法求得滑弧的圆心 O,并进行土条划分,一般根据坡面的形状,每条宽度取半径的 1/10。

(2) 计算每块体的重力 Q_i ,作为平面问题,按垂直于图面取 1 m 考虑,则: $Q_i = h_i b_i \gamma$

式中:

Q_i —第 i 块滑体所产生的重力 (kN/m); h_i —第 i 块滑体的平均高度 (m); b_i —第 i 块滑体的宽度 (m); γ —土体的平均天然重度 (kN/m^3)。

(3) 通过计算,求得每个块体的 θ 角,按下式计算垂直于滑动面的法向分力 N 和滑动分力 T :

$$N_i = Q_i \cos \theta_i$$

$$T_i = Q_i \sin \theta_i$$

式中:

θ_i —第 i 块滑体垂直于滑动面的法向分力与铅直线之间的夹角,亦即滑面弦线与水平线之间的夹角 ($^\circ$)。

(4) 由法向分力引起的摩阻力为 $N \tan \theta$,起抗

滑作用;滑动分力 T 根据所处位置可为下滑,也可抗滑作用。

(5) 滑动面上的抗滑力为土的粘聚力 c 与整个滑动面弧长 L 的乘积。

(6) 根据公式 $F_i = \frac{a_i}{g} Q_i$,计算爆破振动荷载(水

平向)静力等效值 F_i

式中:

F_i —爆破振动荷载(水平向)静力等效值; a_i —第 i 条土体实测爆破振动水平向最大加速度(天然状态下取 0,考虑爆破动力作用时,按各土条在坡面位置,根据实测值差值确定); g —重力加速度。

(7) 根据上述力系对滑弧圆心 O 点取力矩的静力平衡条件,可按下式计算整个滑坡的稳定系数 K :

$$K = \frac{r \left[\sum (N_i - F_i \sin \theta_i) \tan \varphi + cL \right]}{r \sum (T_i + F_i \cos \theta_i)}$$

式中:

K —滑坡稳定系数; r —滑动圆弧的半径 (m); N_i —作用于第 i 块滑动面上的法向分力 (kN/m); T_i —作用于第 i 块滑动面上的滑动分力 (kN/m),出现于与滑动方向相反时取负值; φ 、 c —圆弧滑动面上的综合内摩擦角 ($^\circ$)和综合粘聚力 (kPa); L —整个圆弧滑动面的长度 (m)。

重复以上步骤,至找到稳定系数为最小的圆弧,该圆弧即为潜在的滑动面。本方法将不同土条分配加速度不同,与所有土条均一个水平向加速度相比,更接近实际情况,稳定系数结果如表 2:

表 3 边坡稳定性计算结果

Table 3 Calculation result of slope stability

斜坡状态	稳定系数(K)
天然	1.24
爆破	1.22

计算结果中可以看出,研究边坡在爆破动荷载作用下是稳定的。

3.3 边坡有限元动力响应分析

采用 MSC. Nastron 有限元软件,利用模态叠加法(MSC. software 中国分公司,2001),结合爆破实测数据及频谱分析,本文对研究剖面进行动力响应数值模拟,假设人工填土为均质、各向同性的弹性连续介质,参考纽马克法时间步长的确定方法,时间步长为 0.01 秒;时间步为 3000 步。因质点水平方向振

动对边坡稳定性影响最大,将坡脚实测振动速度计算出的水平向加速度时程曲线(图 3)分段输入,采用实测波延时间。

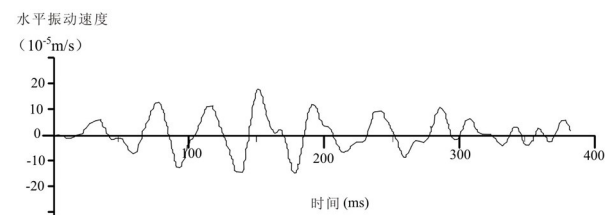


图 3 水平向爆破振动加速度波形图

Fig.3 Acceleration waves produced by horizontal blasting vibration

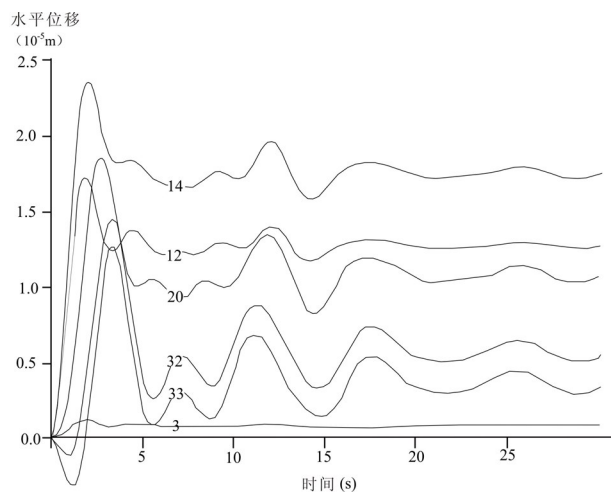


图 4 坡面位移时程曲线

Fig.4 Temporal process curves of displacement on the slope

计算结果曲线(图 4)表明:边坡各节点位移沿爆破地震波传播方向由大变小,沿边坡坡面取一组节点(如图 1 所示),从坡脚(3、10 号节点)向边坡中部(14 号节)水平位移逐步变大,然后逐渐减小直至坡顶(20、32、33 号节点),详见图 4;同时,图中可见坡面以坡顶为主的一定范围内的质点产生了向坡体外方向的水平向位移(32、33 节点),由于矿渣为离散介质,抗拉强度很小,当向坡体外方向位移足够大时,在坡面顶部表层或浅层会产生一定深度的裂缝。

4 结论

将实测水平向加速度值(坡脚、坡中、坡顶),线性插值不同土条中,采用等效静力法计算,计算模型中的振动加速度更符合实际分布情况。

通过编程序及边坡有限元动力响应分析,研究

边坡在自然状态下及生产爆破动荷载作用下不会产生整体滑移,但在坡面顶部表层或浅层会产生一定深度的拉张裂缝,在重力和爆破动力的作用下裂缝逐渐加深,到一定深度时,表层矿渣会顺坡滑下产生表面滑塌型破坏。

[References]

Bishop A W. 1955. The use of slip circle in the stability analysis of slopes [J]. Geotechnique,5(1):7-17

Fredlund D G,Krahn J,Pufahl D E. 1981. The relationship of limitequilibrium slope stability methods[A]. In:Proc. the 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. [C]. Stockholm Sweden:409-416

Greco V R. 1996. Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface[J]. Geotech. Engrg, ASCE,122(7):517-525

He Ke-qiang,Lei Jian-he. 2001. Apredication of the slope stability based on neural network[J]. Geology and Prospecting,(6):72-75 (in Chinese with English abstract)

Hunan water conservancy and hydropower survey and design institute. 1983. Slope engineering geology [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press:89-97 (in Chinese)

Jin Fu-cheng. 2007. Research status and development of slope stability analysis method[J]. Western Exploration Engineering,4:5-9

Li Wen-xiu. 1985. Discussion drilling and hydrophobic of slope stability in open-pit mine[J]. Geology and Prospecting,(8):63-67 (in Chinese with English abstract)

Liu Han-peng,Hu Gao-she,Shi Yan-jiao. 2007. Ground vibration characteristics of a high fill slope in duced by blasting[J]. Journal of Engineering Geology,15(02):263-267 (in Chinese with English abstract)

Li Xiang-long,Miao Yan-gang,Yang Yi,Zhang Zhi-yu,Wang Guo-hua. 2006. Slope stability analysis under influence of blasting vibration[J]. Blasting,23(4):15-29 (in Chinese with English abstract)

Li Tong-hua,Tang Chun-hai,Yu Ya-lun. 2000. Spectrum characteristic of blasting vibration and its engineering application[J]. Engineering Blasting,6(2):1-5 (in Chinese with English abstract)

Lu Wen-bo,Lai Shi-xiang,Zhu Chuang-yun. 1996. Analysis of the dynamic stablity of rock slopes under blastiong vibration conditions [J]. Minning and Metallurgical Engieering,6(1):4-7 (in Chinese with English abstract)

Liu Han-peng. 2003. Study about high filled slope dynamic stability due to blasting vibration in JinDui Cheng[D]. Changan university:19-22 (in Chinese with English abstract)

MSC. software filiale in China. 2001. Cultivate tutorial of MSC. nastron [M]. MSC. software filiale in China:43-52 (in Chinese)

Pan Jia-zheng. 1980. Analysis of stability against slide of Buildingand Landslide[M]. Beijing: China Water Conservancy Press:23-41 (in Chinese)

Qian Jia-huan,Yin Zong-ze. 1996. Geotechnical theoryand calculation (Second Edition) [M]. Beijing:China Water Power Press:308-327 (in Chinese)

Yang Li-ping. 2006. Analysis the slope stability inner spoil dunmp of Zhuange'er Heidaigou open-pit coal mine[D]. Liaoning Engineer-

ing Technology University;3-5 (in Chinese with English abstract)

Zhu Chuan-yun, Lu Wen-bo, Dong Zhen-hua. 1997. Safety summary of rock slope blasting vibration [J]. Blasting, 14 (4): 13 - 17 (in Chinese with English abstract)

Zhang Lin, Lin Cong-mou. 2005. Study about soil slope dynamic stability due to blasting vibration [J]. Rock and Soil Mechanics, 126 (9): 1499-1501 (in Chinese with English abstract)

Zhang Xiao-hui, Zhang He, Mao Yan-long. 2009. Vibration characteristics of a high complex fill slope in duced by blasting of open-pit mine [J]. Subgrade Engineering, 06;38-40 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

贺可强,雷建和. 2001. 边坡稳定性的神经网络预测研究 [J]. 地质与勘探, (6): 72-75

湖南水利水电勘测设计院. 1983. 边坡工程地质 [M]. 北京:水利电力出版社:89-97

靳付成. 2007. 边坡稳定性分析方法的研究现状与展望 [J]. 西部探矿工程, (4): 5-9

李文秀. 1985. 浅谈露天矿山边坡稳定性研究中的钻探与疏水问题 [J]. 地质与勘探, (8): 63-67

刘寒鹏,胡高社,史艳娇. 2007. 人工填土高边坡爆破振动动力响应分析研究 [J]. 工程地质学报, 15 (02): 263-267

李祥龙,庙延钢,杨 溢,张智宇,王国华. 2006. 爆破振动对边坡稳定性影响分析 [J]. 爆破, 23 (4): 15-29

李彤华,唐春海,于压伦. 2000. 爆破振动的频谱特征及其工程应用 [J]. 工程爆破, 6 (2): 1-5

卢文波,赖世骧,朱传芳. 1996. 岩石高边坡爆破振动动力稳定分析 [J]. 矿冶工程, 6 (1): 4-7

刘寒鹏. 2003. 金堆城排废场人工填土高边坡动力稳定性研究 [D], 长安大学: 19-22

MSC. software 中国分公司. 2001. MSC. nastron 培训教程 [M]. MSC. software; 43-52

潘家铮. 1980. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析 [M]. 北京:水利出版社:23-41

钱家欢,殷宗泽. 1996. 土工原理与计算 (第二版) [M]. 北京:中国水利水电出版社:308-327

杨丽萍. 2006. 准格尔黑岱沟露天煤矿内排土场边坡稳定性分析 [D]. 辽宁工程技术大学: 3-5

朱传云,卢文波,董振华. 1997. 岩质边坡爆破振动安全评判综述 [J]. 爆破, 14 (4): 13-17

张 林,林从谋. 2005. 爆破震动对土质边坡动力稳定性影响研究 [J]. 岩土力学, 126 (9): 1499-1501

张晓晖,张 和,毛彦龙. 2009. 露天矿复合高边坡爆破振动响应特征研究 [J]. 路基工程, (06): 38-40

A study on Dynamic Stability of Slopes at Dump Sites of Open-Pit Mines

LIU Han-peng^{1,2}, MAO Yan-long³

(1. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristic and Engineering Environment Tianjin, Tianjin 300384; 3. Chang' an University, Xi' an 710054)

Abstract: The blasting is a common way adopted in open-pit mines, where high-angle slopes of waste rock are often formed at dump sites during production. In this study, vibration velocity, which is produced by production blasting, is measured at the dump site in an open-pit mine, and the horizontal acceleration value is derived. Then this acceleration value is interpolated linearly to each soil strip, and the slope stability is calculated and evaluated by the equivalent static force method. Compared with the traditional equivalent static method, the result by this approach can better simulate the actual distribution of vibration accelerations. Besides, using the mode superposition and finite element method, the soil displacements at varied places of the slope surface are analyzed. It is concluded that the slope will not slide down as a whole due to the dynamic loading of production blasting, but some tensile cracks would be produced and developed on the top surface or shallow subsurface. These cracks will become deep under gravity and later blasting, and finally collapse failure will happen when the surface slag slides down along the slope.

Key words: open-pit mine, dump site, stability, dynamical response