

露天矿顺倾软弱基底内排土场边坡空间形态优化

曹兰柱,李广贺,王 东,关依梦
(辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000)

摘 要:针对顺倾软弱基底内排土场边坡的空间形态问题,以白音华三号露天矿为工程背景,基于刚体极限平衡与三维数值模拟的手段,分析了内排角度及内排土场发展至不同工程位置对内排土场边坡稳定性的影响。研究结果表明:白音华三号露天矿内排土场边坡滑坡机理为基底弱层在排弃物料自身重力作用下产生塑性屈服,与排弃物料内部产生的滑面贯通,形成以剪切圆弧为侧界面、基底弱层为底界面的切层-顺层滑动;内排土场边坡参数为内排推进距离 1 000 m,内排角度 14° ,平盘宽度 67 m 时满足安全要求;顺倾软弱基底内排土场边坡随着内排边坡角的减小及推进距离的增加,内排土场边坡稳定性近线性增加,且内排边坡角对边坡稳定性的影响较显著,据此可确定顺倾软弱基底内排土场边坡的空间形态。

关键词:顺倾基底;内排土场;形态优化;推进距离;内排边坡角

中图分类号:TD804 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)02-0163-05

Optimization on spatial morphology slope of in pit dumping site at inclined weak-basement of surface mine

CAO Lanzhu, LI Guanghe, WANG Dong, Guang Yimeng

(School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: According to the spatial morphology problem of the slope in the in pit dumping site at inclined weak-basement, taking Baiyin-hua No. 3 surface mine as an engineering background, based on the means of the rigid body limit equilibrium and the 3D numerical simulation, the paper had an analysis on the in pit dumping angle and the in pit dumping site development to the different engineering location affected to the slope stability of the in pit dumping site. The results showed that the landslide mechanism of the slope in the in pit dumping site of Baiyin-hua No. 3 Surface Mine was that a plastic yield was occurred in the weak layer of the basement under the self gravity role of the dumping material. And the sliding surface linkage was occurred from the inner of the dumping material and would form a shearing layer-bedding sliding with a shearing arc as the lateral interface and the base floor as a bottom interface. The slope parameters of the in pit dumping site could meet the safety requirements when the in pit pushing distance was 1 000 m, the in pit dumping angle was 14° and the bench width was 67 m. The slope of the in pit dumping site with a bedding inclined weak-basement would be reduced with the in pit dumping slope angle and would be increased with the pushing distance. The slope stability of the in pit dumping site would be increased linearly. The in pit dumping angle would have obvious influences to the slope stability. Therefore, the spatial morphology of the slope in the in pit dumping site at inclined weak-basement could be determined.

Key words: inclined weak-basement; in pit dumping site; morphology optimization; pushing distance; in pit dumping angle

0 引 言

露天矿内排土场边坡空间形态问题既是安全问

题,又是经济问题。内排土场最终帮坡角越大,排弃高度越大,经济效益越好,但滑坡可能性增大,安全性下降,对露天矿安全生产影响较大,反之亦然。随

收稿日期:2017-10-22;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.02.022

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51104084,51474119);国家自然科学基金重点资助项目(U1361211);高等学校博士学科点专项基金资助项目(20122121110003);辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金资助项目(LNTU15KF08)

作者简介:曹兰柱(1962—),男,内蒙古四子王旗人,教授,博士生导师。通讯作者:李广贺,博士研究生。E-mail:lg7118@126.com

引用格式:曹兰柱,李广贺,王 东,等.露天矿顺倾软弱基底内排土场边坡空间形态优化[J].煤炭科学技术,2018,46(2):163-167.

CAO Lanzhu, LI Guanghe, WANG Dong, et al. Optimization on spatial morphology slope of in pit dumping site at inclined weak-basement of surface mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 163-167.

着露天矿产量规模的逐渐加大,外排空间越来越紧张,许多露天煤矿的排弃物料不得不由外排转入内排。由于内排强度的不断增加,内排土场边坡的稳定性日渐凸显,排土场变形及滑坡灾害频频发生。如2005年11月、2006年5月,神华宝日希勒露天煤矿在其首采区剥、采、排工程中,分别发生2次内排土场失稳现象;霍林河北矿一采区东帮内排土场边坡自2005年发生蠕动变形破坏,至今已形成较大范围的变形区域,其三采区东排土场边坡2015年发生了滑坡事故,一、三采区东排土场变形区域均压覆大量煤炭资源。

在20世纪70年代,很多学者结合已有土质边坡分析方法及土力学理论,对排土场边坡的稳定性展开了理论研究及实践探索,取得了一定成果。周昌寿^[1]对露天矿排土场边坡的变形类型、稳定性影响因素及滑坡防治措施进行了分析和论述;曹兰柱等^[2]针对影响排土场稳定的软土基底、泥石流、水等三大灾患,提出了与排土场表土基底作用机制相适应的超高台阶排土场堆高新的计算体系;杨秀^[3]对安家岭露天矿黄土基底排土场进行了数值模拟,研究了基底以及地下水等因素对排土场边坡稳定的影响,为矿山的安全生产提供了依据;王思文等^[4]通过对不同压帮状态下的露天矿边坡稳定性进行数值模拟,揭示内排台阶参数与端帮边坡稳定性系数之间的函数关系。尽管国内外学者对露天矿排土场

边坡进行了大量研究,但对露天矿内排土场边坡稳定性问题研究较少,尤其是顺倾软弱基底内排土场边坡稳定性问题及其边坡空间形态优化设计缺乏研究,导致大量顺倾软弱基底内排土场边坡发生大规模滑坡,造成生产中断及大量压煤^[5-8]。

综上所述,笔者采用刚体极限平衡法与数值模拟相结合的手段,以白音华三号露天矿顺倾软弱基底内排土场边坡为研究对象,分析了内排角度及内排土场发展至不同工程位置对内排土场边坡稳定性的影响,揭示了内排土场边坡变形破坏特征,设计了顺倾软弱基底内排土场边坡空间形态,为类似边坡工程的滑坡防治提供参考。

1 边坡工程地质条件分析

白音华三号露天煤矿位于内蒙古自治区锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗北91 km。该矿地层自旧至新为石炭系,上侏罗统兴安岭群,下白垩统白音华组,新生界古近系,第四系更新统和全新统。白音华三号露天煤矿含煤地层具有含煤层数多,厚度大,含煤系数高,埋藏较浅且连续性好,适宜于大型露天开采。内排土场是由排弃物料、基底及开采现状为边界构成的整体,采场现状边坡为9°,基底倾角为4°,易造成内排土场发生以基底弱层为底界面的切层-顺层滑动。边坡的地层岩性、断面形态等地质因素如图1所示,岩土体物理力学指标见表1。

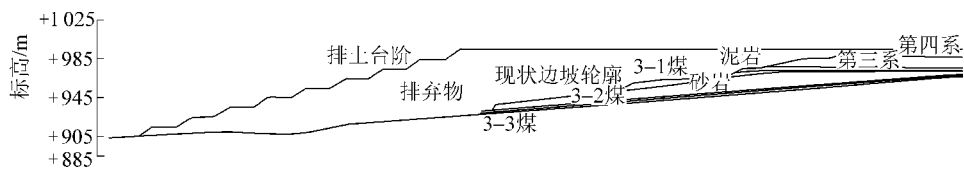


图1 典型工程地质剖面示意

Fig. 1 Geologic profile of typical engineering

表1 岩土体物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

岩石	容重 $\gamma/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
排弃物料	1.76	16.7	20.5	—	—
砂	1.9	0	20.0~27.5	0.03	0.30
粉质黏土	1.98	32.0	16.87	0.25	0.40
黏土	1.98	18.6	16.03	0.42	0.40
黏土弱层	1.98	0~17.0	7.1~8.2	—	—
泥岩	2.0	35.0	23.5	1.8	0.30
砂岩	2.05	65.0	27.5	1.5	0.24
炭质泥岩	1.98	3.5~6.7	6.1~6.6	—	—
煤	1.30	36.0	23.5	0.35~2.0	0.23

2 边坡空间形态优化

目前边坡稳定性定量分析最常用的方法是刚体极限平衡法,该方法本身已经非常成熟,因计算过程简单、结果可靠而在工程界得到广泛应用,且仍是当今解决工程实际问题的基本手段^[9-10]。刚体极限平衡法的基本原理是将岩土体视为刚体,不考虑变形问题,通过分析滑体抗滑力和下滑力之间关系来评价边坡稳定性。目前最常用的边坡稳定性分析方法主要有 Fellenious 法、简化 Bishop 法、Sarma 法、剩余推力法^[11-13]。其中简化 Bishop 法适用于圆弧滑面滑坡,剩余推力法适用于任意滑面的滑坡,因此,本

文基于这2种分析方法自主研发一款刚体极限平衡分析软件用于边坡稳定性定量分析。本节采用刚体极限平衡法,对内排土场边坡角 15° 开始计算,逐次减缓 1° ,同时,对推进距离为200、400、600、800、

1 000 m条件下的不同边坡形态内排土场稳定性进行分析计算,列举边坡角为 15° 、 13° 、 11° 计算结果如图2、图3所示。

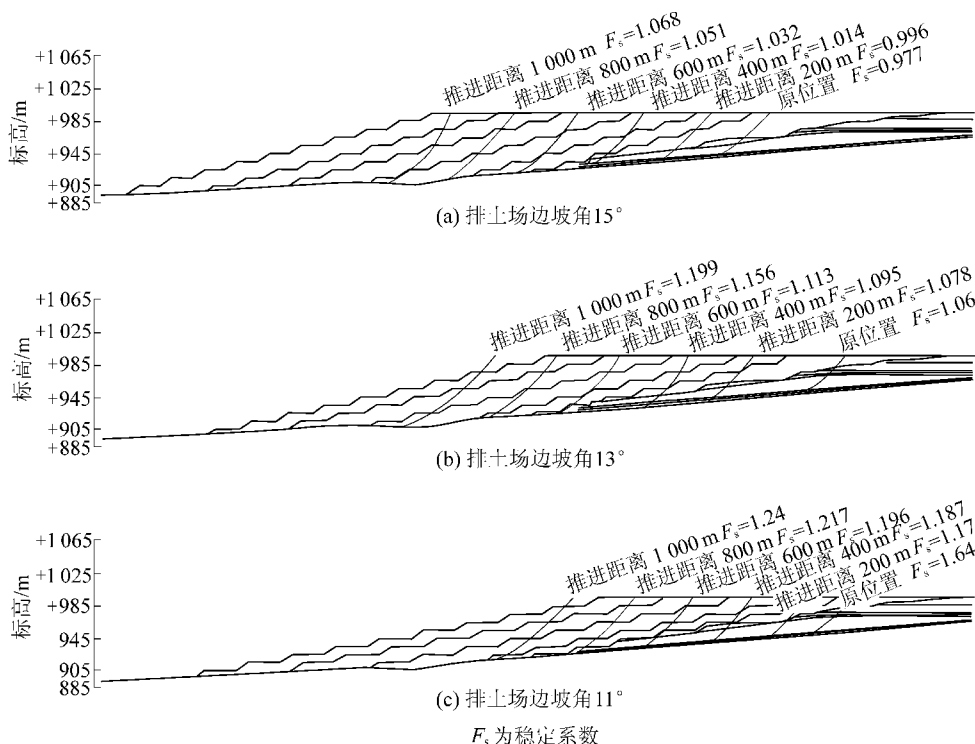


图2 各边坡角的排土场不同推进位置的计算剖面图

Fig. 2 Calculated profile of different engineering positions at each dump slope angle

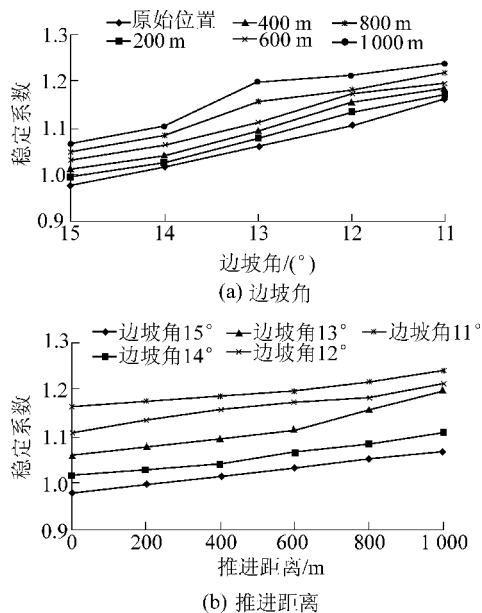


图3 内排边坡角及内排推进距离对边坡稳定性影响

Fig. 3 Effect of inner dump slope angle and inner advancing distance on slope stability

通过图2可知,在同一边坡角的条件下,边坡稳定系数随着推进距离的增加而增大,内排土场边坡稳定性明显提高,当边坡角为 14° ,推进距离为1 000 m时满足安全及最大内排空间要求;通过图3a定量描述了边坡倾角对边坡稳定性的影响,同一推进位置边坡稳定系数与边坡角之间基本呈线性关系,每减缓 1° 稳定系数约提高0.04;通过图3b可知,同一边坡角,随着推进位置的增加,边坡稳定系数也呈线性增大,但要比边坡角提高稳定性的效果差。

3 边坡形态模拟分析

刚体极限平衡法最大缺点是无法分析边坡岩土体内部应力-应变关系,无法深入分析边坡岩土体内部变形的发生与发展过程^[14]。因此,当需要考虑应力变形或复杂的变形破坏机制时,运用数值分析方法进行计算会使结果更加贴切实际^[15]。借助于计算机技术的迅速发展,目前基于有限元

和有限差分等的数值分析方法已在岩土工程领域得到了广泛应用^[16-20]。基于此,本节拟采用大型岩土分析软件FLAC^{3D},研究白音华三号露天矿内排角度及内排推进距离对边坡稳定性的影响。为了达到客观反映白音华三号露天矿内排土场边坡稳定情况,深入系统地分析边坡体内部应力应变关系,笔者选取边坡倾角为 14° ,推进距离为1 000 m进行数值模拟,建立数值模型进行网格划分,其中此模型共划分3 106个节点和9 109个单元,数值模拟模型及计算结果如图4所示。

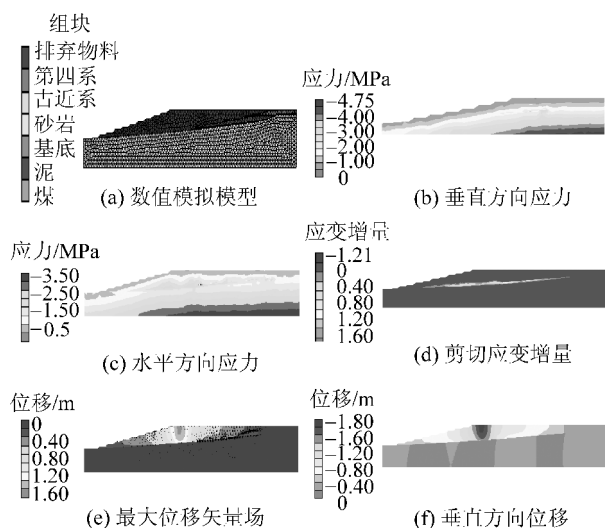


图4 边坡形态数值模拟模型及计算结果

Fig. 4 Numerical simulation model of spatial morphology and calculation results

通过图4b可知,在重力场作用下,边坡开发后其垂直方向应力与边坡表面平行层状分布,随着标高的降低而逐渐增大,可知垂直方向应力分布均匀,未出现应力集中现象;通过图4c可知,水平应力在坡面较低,向坡内逐渐增大,但由于组成边坡体的各岩层力学特征不同,导致内部应力分布不均匀,随着岩层发生变化,最终导致应力分布并未达到平衡,边坡处于不稳定状态;通过图4d可知,排土场边坡破坏主要由剪切应变引起,同时也能看到边坡的破坏形式,在自身重力作用下,发生剪切破坏,并与软弱夹层贯通,形成最危险的滑移面,滑体自坡脚剪出为“切层—顺层”组合式破坏;通过图4e、图4f可知,排土场边坡位移最大的区域集中在坡肩处,垂直方向位移与其接近,表明坡体变形主要为垂直方向;从速度矢量场可以得到滑体滑动的方向符合组合滑动趋势,随时间的不断推移,坡体内形成剪切破坏带与弱层贯通,破坏面形成,此时位移将加速,滑体最终在重力作用下沿

弱层整体剪出,形成切层—顺层式破坏。

4 结 论

1)白音华三号露天矿内排土场边坡滑坡机理如下:基底弱层在排弃物料自身重力作用下产生塑性屈服,与排弃物料内部产生的滑面贯通,形成以剪切圆弧—基底弱层相结合的切层—顺层滑动。

2)白音华三号露天矿内排土场在内排倾角为 14° ,推进距离为1 000 m时能满足安全及技术、经济要求。

3)露天矿内排土场边坡随着内排角度的减小及推进距离的增加,内排土场边坡稳定性近线性增加,其中,内排角度对边坡稳定性的影响较显著。

4)露天矿内排土场边坡稳定性及滑坡模式主要受基底形态和基底顺倾弱层所控制,边坡应力分布主要受岩土体自重应力的影响,其应力呈现与边坡表面平行的层状分布,随埋深增加而逐渐增大,未出现应力集中现象。

参考文献 (References)

- [1] 周昌寿.露天煤矿内排土场的稳定性[J].中国矿业大学学报, 1992, 21(1): 31-36.
ZHOU Changshou. Stability of open-pit mining inner dump[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992, 21(1): 31-36.
- [2] 曹兰柱,李亚雷.软弱基底排土场变形破坏治理措施研究[J].中国安全生产科学技术, 2015, 11(8): 83-89.
CAO Lanzhu, LI Yalei. Research on control measures for deformation and failure of dump with weak basement[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(8): 83-89.
- [3] 杨秀.安家岭露天矿内排土场南帮边坡稳定性研究[D].阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.
- [4] 王思文,才庆祥,舒继森,等.内排台阶参数与边坡稳定性的动态耦合关系[J].化工矿物与加工, 2013(6): 22-24.
WANG Siwen, CAI Qingxiang, SHU Jisen, et al. Dynamic coupling relationship between inner dumping parameters and slope stability[J]. Industrial minerals & processing, 2013(6): 22-24.
- [5] 丰定祥,吴家秀,葛修润.边坡稳定性分析中几个问题的探讨[J].岩土工程学报, 1990, 12(3): 1-9.
FENG Dingxiang, WU Jiaxiu, GE Xiurun. Some problems of slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(3): 1-9.
- [6] 王俊,孙书伟,陈冲.饱水黄土基底排土场地质力学模型试验研究[J].煤炭学报, 2014, 39(5): 861-867.
WANG Jun, SUN Shuwei, CHEN Chong. Geo-mechanical model experiment research of dumping site on loess basement[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 861-867.

- [7] 徐晓惠,姚再兴.内排压脚与边坡稳定性的关系[J].安全与环境学报,2015,15(2):71-76.
XU Xiaohui, YAO Zaixing. Study on the relationship between the slope stability and the pressing foot by using the internal dumping [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(2): 71-76.
- [8] 纪玉石.黄土基底排土场失稳机理与稳定性控制技术研究[D].沈阳:东北大学,2012.
- [9] 董晓红,梁桂兰,许忠厚.边坡稳定分析方法综述及发展趋势研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(5):100-102.
DONG Xiaohong, LIANG Guilan, XU Zhonghou. Summarization for slope stability analysis methods and research on their development trend [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(5): 100-102.
- [10] 丁参军,张林洪,于国荣,等.边坡稳定性分析方法研究现状与趋势[J].水电能源科学,2011,29(8):112-114.
DING Canjun, ZHANG Linhong, YU Guorong, *et al.* Research current situation and development trend of slope stability analysis method[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 112-114.
- [11] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.
- [12] JANBU N. Earth pressures and bearing capacity calculations by generalized procedure of slices [C]//Proceedings of the 4th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. England, 1957.
- [13] 曹平,张科,汪益显,等.复杂边坡滑动面确定的联合搜索法[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):814-821.
CAO Ping, ZHANG Ke, WANG Yixian, *et al.* Mixed search algorithm of critical slip surface of complex slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 814-821.
- [14] 王旭春,管晓明,杜明庆,等.安太堡露天矿边坡蠕滑区滑动机理与稳定性分析[J].煤炭学报,2013,38(S1):312-318.
WANG Xuchun, GUAN Xiaoming, DU Mingqing, *et al.* Analysis of sliding mechanism and stability of creep area of Antaibao Open-Pit Mine slope [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 312-318.
- [15] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):254-260.
ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, DENG Weidong. Stability analysis on jointed rock slope rock slope by strength reduction fem[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 254-260.
- [16] 寇晓东,周维垣,杨若琼.FLAC^{3D}进行三峡船闸高边坡稳定分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(1):6-10.
KOU Xiaodong, ZHOU Weiyuan, YANG Ruofeng. Stability analysis of the high slopes of Three Gorges ship lock using FLAC^{3D} [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 6-10.
- [17] 王东,王珍,曹兰柱,等.断层位置对露天矿顺倾层状边坡稳定性的影响研究[J].中国安全科学学报,2014,24(12):83-89.
WANG Dong, WANG Zhen, CAO Lanzhu, *et al.* Influence of fault's position on stability of dip bedded slope in surface mines[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(12): 83-89.
- [18] 刘波,韩彦辉.FLAC^{3D}原理实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2006.5.
- [19] 曹兰柱,赵立春.含多弱层复合边坡滑坡治理三维数值分析[J].中国安全生产科学技术,2015,11(6):102-107.
CAO Lanzhu, ZHAO Lichun. Three-dimensional numerical analysis on landslide control of composite slope with multiple weak layers [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(6): 102-107.
- [20] 黄润秋,许强.显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,1995,14(4):346-354.
HUANG Runqiu, XU Qiang. Application of explicit lagrangian finite-difference method in rock slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4): 346-354.