

文章编号:1671-251X(2024)S2-0068-04

露天煤矿滑坡机理分析与监测技术

许晨¹, 周亚森², 宋雷同²

(1. 国家能源集团准能集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010399;

2. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘要:以安家岭露天煤矿北帮滑坡为研究对象,为了揭示其滑坡成因和演变机制,分析了滑坡区的地质、水文条件;采用 FLAC3D 完成了滑坡应力分布和破坏过程的数值模拟;通过极限平衡法计算了稳定系数,得到了软岩层、降雨量、破碎带对滑坡形成的作用因素,以及安家岭露天煤矿北帮滑坡的演变机理,据此,设计了边坡在线监测多级预警系统,分析了在线监测系统的结构、多级预警系统阈值的选择,系统根据监测数据自动向企业发出预警等级信息,并给出具体的治理方案,通过历史数据测试,证明该方法能够对监测数据进行判断并发出正确的预警信号。

关键词:露天煤矿;滑坡机理;稳定系数;监测技术;多级预警

中图分类号:TD824.71

文献标志码:A

Mechanism analysis and monitoring technology of landslide in open-pit coal mine

XU Chen¹, ZHOU Yasen², SONG Leitong²

(1. CHN Energy Zhunneng Energy Group Co., Ltd., Ordos 010399, China;

2. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

0 引言

安家岭露天煤矿是中煤平朔集团重要的煤炭开采矿田,矿田地质构造简单,三面环山,中间为黄土覆盖的丘陵,目前原煤年产量 2 000 万 t 以上^[1],经过勘查,安家岭北帮各区段历年出现多次滑坡事件,较为典型的如 2006 年 11 月,坡体平盘出现大面积变形裂缝,2007 年 4 月,E8500 区段二次滑坡事件,坡体前移约 25 m,2012 年 10 月,1375 平盘、1360 平盘出现裂缝,局部片帮,环形裂缝等现象^[2],一系列的滑坡失稳事件对企业的经济效益和人员安全造成重大打击。探索边坡破坏原因、分析边坡滑坡机理、建立边坡预警机制,有利于企业及时准确掌握边坡状况,提早制定方案措施,避免矿场灾害的发生。

露天煤矿的采出率和边坡稳定性是一对矛盾关系^[3],如何平衡两者的关系,在保证边坡稳定性的前提下,提高煤炭的开采效率是当前工业和学术界关注的热点领域。丁新启等^[4]针对安家岭露天煤矿东排土场平盘裂缝的问题,分析了其破坏机理,提出了停止排土,设置监测点预警等治理措施。侯成恒^[5]采用数值模拟方法计算内排压脚高度,追踪距离与

边坡稳定性的关系,总结了煤炭资源高效利用的方案。王燕涛等^[6]为了确保露天煤矿陡坡开采过程中边坡的稳定和人员的安全,引进雷达系统监测边坡,利用监测数据,结合实地巡检,准确及时掌握变形原因。李荟等^[7]使用多源信息融合技术精准描述矿山滑坡演化过程,并进行了总结与展望,从监测方法、信息融合流程、信息融合方法 3 个方面总结了现阶段边坡位移监测和风险评估机制的现状,从优化监测手段、统一标准接口、开发新的灾害分析方法、优化关联挖掘算法 4 个方面,指出了研究发展趋势。

本文针对安家岭露天煤矿北帮滑坡问题,结合滑坡地区的地质、水文和岩性参数,基于有限元理论和 FLAC3D 软件描述了滑坡演变过程及其应力的分布,同时解释了北帮滑坡出现的破坏机理。在此基础上,设计了边坡在线监测多级预警系统,大幅度提高预警精准性,系统在发送预警信号的同时,根据预警等级,自动给出治理建议,为及时准确制定治理方案提供辅助。

1 工程概况

安家岭露天煤矿位于平朔煤矿中部位置,毗邻

收稿日期:2024-09-07;编辑:郑海霞。

作者简介:许晨(1986—),男,安徽淮南人,高级工程师,硕士,研究方向为露天煤矿生产与技术管理,E-mail:1363312694@qq.com。

太原市和大同市,距离均在 300 km 以内,地势呈起伏不平的丘陵地带,地表覆盖黄土,植被稀少,由于水土流失严重,该地区地表沟壑纵横^[8]。安家岭露天煤矿构造简单,目前在矿区内仅出现少量断层、陷落柱等现象,不会对采煤工作面的连续推进造成重大影响,煤田含水层之间隔水性能良好,排水系统完备。北帮滑坡区位于安家岭露天矿矿坑北,根据记录显示,在 2020 年 6—9 月期间,北帮 E13170~E13295 段多次发生滑坡事件,滑体总长 210 m,滑体面积达到 270 000 m²,事件导致北帮 1330、1375 路面出现大量裂缝,平盘运输通道被毁。

对安家岭露天煤矿北帮滑坡区域的岩土做了多次物理学参数测试,如单向抗拉、含水量、弹性测试等,收集整理到实验参数,结合滑坡区域课理分析,确定岩土体物理参数(表 1)。

表 1 安家岭露天煤矿北帮滑坡岩土体物理参数

地层 岩性	密度/ (g·cm ⁻¹)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ 10 ³ MPa	泊松比	含水率/ %
泥岩	2.35	981.67	24.12	2.47	0.26	1.56
砂岩	2.45	984.89	24.77	2.80	0.31	2.13
粉土	1.88	22.00	24.32	1.20	0.42	0.98
黏土	2.18	66.98	14.2	3.45	0.39	1.01
煤料	1.71	102.12	15.23	2.19	0.26	3.11

2 滑坡机理分析

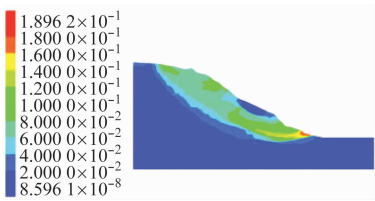
2.1 北帮滑坡 3D 模型模拟分析

为了准确掌握北帮滑坡内部应力分布和破坏演变机理,结合现场测绘数据和滑坡岩土体物理特性,利用 FLAC3D,ANSYS 软件建立北帮滑坡 3D 地质力学模型,模拟边坡最大剪切应力分布、水平应力分布和垂直应力分布的特征,数值仿真结果如图 1 所示。

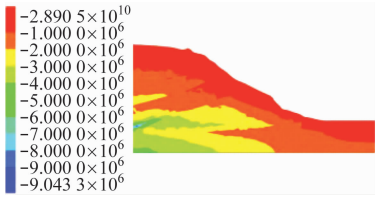
由图 1 可知,软岩层处是最大剪切力集中分布的区域,最大剪切力会对边坡临界稳定状态造成严重破坏,形成边坡蠕动变形的特性,模拟结果与历史记录情况基本一致,说明软岩层处蠕动是导致边坡失稳的原因之一。此外,水平应力沿着坡面向内部逐步降低,垂直应力沿着坡面分层分布,每层之间应力分布均匀,外层到内层逐步增长。

2.2 边坡稳定性分析

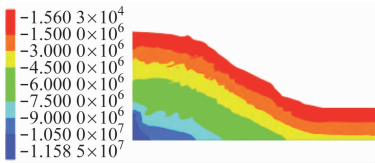
Bishop 法是目前实际边坡稳定性计算工程应用最为广泛的一种极限平衡理论方法,该方法假定土体单元滑动底面的稳定性近似与边坡整体的稳定性系数相同。Bishop 法边坡稳定性为



(a) 最大剪切应力分布



(b) 水平应力分布



(c) 垂直应力分布

图 1 北帮滑坡应力分布

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_a} ((W_i - p_i l_i \cos \alpha_i) \tan \alpha_i + c_i l_i \cos \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$

(1)

式中: W_i 为单元岩土重量; p_i 为单元岩土所受膨胀力; l_i 为单元面长度; α_i 为单元岩土面倾斜角。

其中

$$\begin{cases} m_a = \cos \alpha_i + \frac{1}{K} \tan \alpha_i \sin \alpha_i \\ W_i = T_i \cos \alpha_i + N_i^* \cos \alpha_i - p_i \cos \alpha \end{cases}$$

(2)

式中: T_i 为单元岩土强度与剪应力之比; N_i^* 为单元岩土受到的法向压力。

$$\begin{cases} T_i = \frac{1}{K} \tau_i l_i \\ N_i^* = \frac{(\tau_i - c_i) l_i}{\tan \alpha_i} \end{cases}$$

(3)

式中 τ_i 为单元岩土强度。

利用 Bishop 极限平衡法对安家岭露天煤矿作稳定性分析,在北帮区域的东部、中部、西部分别选取 3 个剖面进行计算,剖面编号为 D0、D1、D2、Z0、Z1、Z2、X0、X1、X2,典型剖面如图 2 所示。根据 GB 50197—2005《煤炭工业露天矿设计规范》^[9] 要求,结合滑坡岩层情况,稳定系数取 1.25。计算出南帮 9 个剖面的稳定系数,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,安家岭露天煤矿北帮区域除了 X0、X1、X2、Z2 4 个剖面安全系数接近或低于极限稳定值 1.00,其他剖面安全系数均在 1.00 以上,部

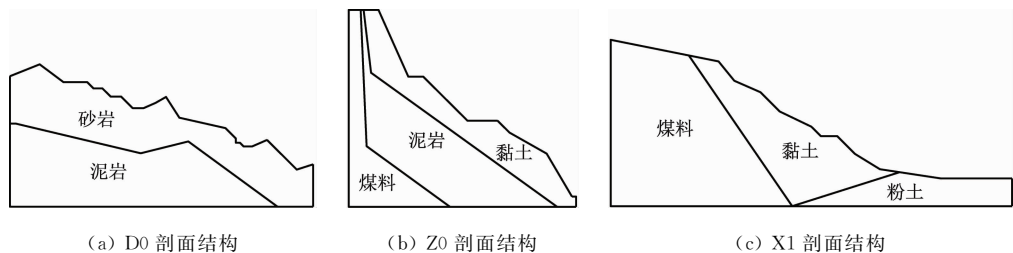


图 2 典型剖面结构

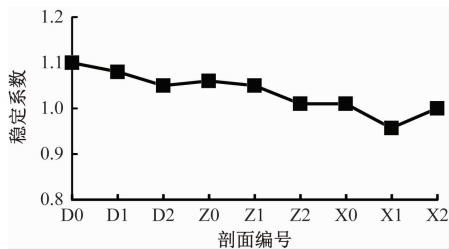


图 3 各剖面稳定系数统计结果

分达到 1.15,说明西部区域的边坡非常不稳定,极易发生滑坡。结合地质剖图可知,西部区域覆盖黏土、粉土、碎岩等物料,属于破碎带影响区域,砂土风化严重,极易滑动,导致垮塌、滑坡事件频发。

2.3 滑坡成因分析

软岩层是导致边坡失稳的主要原因之一。北帮滑坡岩性多样,其中存在 6 层泥岩层,厚度约为 3.3~13.5 m,泥岩层质地松软、含水率高,上部覆盖煤层,下部为隔水层,阴雨天气,在渗入水和地下升高水位的长期浸润作用下,泥岩层上下表面发展成为软弱层,受到最大剪切力的推动,内部缓慢蠕动直至边坡失稳,发生滑坡。

降雨、地下水浸润导致滑坡事件发生。安家岭露天煤矿北帮滑坡事件发生于 6~9 月,期间历经多次降雨,降雨的渗入增加了覆盖层的重量,增加的重力势能作用在坡角处,重力势能形成剪应力集中在软弱的结构面,导致滑坡事件的发生,降雨从裂隙渗透,增加裂隙的水压同时导致地下水位上升,导致泥岩的强度,滑动面的滑动系数降低,加剧滑坡的形成。

破碎带是导致多次滑坡事件的诱因之一。马熹焱等^[10]分析了断裂破碎层对边坡稳定性的影响,结果表明,随着台阶深入,断层破碎带的结构稳定性逐步减小。现场调研发现安家岭露天煤矿北帮滑坡含有大量的风化泥岩砂,破碎严重,属于逆断层破碎区,原始单台坡脚约 78°,破角较大,由于破碎区岩土性质疲软,黏聚力小,容易形成滑动面,加上破角陡峭,内部受到的剪应力较大,一旦出现软弱结构,导致剪应力集中,极易导致点连面式大面积滑坡事件。

2.4 滑坡演变机理分析

由东部代表性剖面 D0 结构稳定性和 3D 应力云图分布可知,东部边坡岩体为砂岩和泥岩结构,剪应力分布较为均匀,其安全系数为 1.10,结构较为稳定,历史记录数据表明该区域滑坡的位移量较小,模拟计算的结果与历史记录基本一致;中部滑坡区域剖面结构包括 Z0、Z1 和 Z2,历史记录其垂直落差较大,推测可能由于上部挤压和下部塌陷造成,竖直应力和剪应力分布集中在泥岩层,水平应力均匀分布,安全系数约在 1.00 左右,处于极限平衡状态,应力的分布证明了泥岩层结构的软弱是导致滑坡事件发生的原因之一;西部区域属于破碎带影响区域,其剖面结构为 X0、X1、X2,安全系数在 0.95~1.00 之间,属于不稳定状态,应力分布较为混乱,此处多次发生滑动,水平位移较大,说明在水平应力的作用下,加速了破碎带岩土的风化、碎化,土体内物理学参数减弱,导致结构弱化,受到雨水冲刷和地下水浸润以后,内部失稳,岩体发生大面积坍塌、滑动。结合上述分析,安家岭露天煤矿北帮区域的东部结构比较稳定,需要定时巡检,及时排查,中部和西部区域岩体结构脆弱,随时有发生滑坡的可能,应立即治理,提前防范。

3 在线监测多级预警系统设计

安家岭露天煤矿北帮坡在线监测系统需要设计的功能包括:高采样率、短延时,系统每 1 min 刷新一次数据;精准提供预警类型,快速制定治理方案,设计 I-V 级预警机制,数据异常时第一时间将异常类型通知值班人员;为工作人员提供决策辅助,针对报警类型,提供对应治理措施建议;为用户提供数据记录及分析报告,为后续事件分析、学习、对比提供依据。

3.1 线监测系统结构设计

监测的主要内容包括边坡表面和内部的水平及竖直位移,水位监测、土压监测和雨量监测,利用埋设、打孔安装传感器、测试仪的方法实现。使用 485 总线连接数据采集终端和各传感器设备,将采集到的数据通过 4G 无线网络发送给监测中心。系统设计的主要设备物料表及监测内容见表 2。

表 2 主要设备物料表以及检测内容		
物料	监测内容	安装方法
表面位移传感器	边坡表面位移	用水泥将两头固定
测斜仪	边坡内部位移	钻孔埋设
水位传感器	边坡表面水位	钻孔埋设,孔内放置 PVC 管
土压计	边坡垂直应力	钻孔埋设,孔内放置石块
自动采集箱	—	—
无线传输模块	—	—

表 3 预警类型、标准、应急建议		
预警等级	预警标准	应急建议
I 级	滑坡事件发生可能性特别大	立即启动滑坡应急预案,向应急管理部门汇报,停止一切作业活动,矿田附近人员立即疏散,各级领导 24 h 在岗,组织人员准备抢险,密切关注滑坡迹象。
II 级	滑坡事件发生可能性非常大	暂停一切作业活动,矿田附近人员立即疏散,各级领导 24 h 在岗,组织人员准备抢险,密切关注滑坡迹象。
III 级	滑坡事件发生可能性比较大	暂停一切作业活动,矿田附近人员立即疏散,密切关注滑坡迹象。
VI 级	滑坡事件发生可能性小	加强矿田监测和巡查,按照矿田常规管理方式进行管理
V 级	滑坡事件发生可能性非常小	按照矿田常规管理方式进行管理

实际情况,给出了预警阈值指标(表 4)。

表 4 预警阈值设置				
预警等级	水位距离地表距离/mm	土压值/KPa	位移量/mm	注液量/(m ³ ·d ⁻¹)
I 级	≤25	≥180	≥180	≥140
II 级	55~26	130~179	130~179	90~139
III 级	95~56	80~129	80~129	60~89
VI 级	150~96	50~79	50~79	30~59
V 级	≥151	≤49	≤49	≤29

3.3 系统测试

选取了 1 组安家岭露天煤矿监测数据,水位距离地表 112 mm,土压值为 65 KPa,位移量为 57 mm,注液量为 34 m³/d,进行滑坡预警测试。按照系统预警标准计算,系统应该发出 VI 级预警,实际发出 VI 级预警。

4 结语

通过模拟分析和理论计算得出安家岭露天煤矿北帮坡滑坡的主要原因和滑坡机理,对此设计了滑坡在线监测系统,并验证了其准确性。

参考文献:

[1] 陈鹏飞. 安家岭露天矿西排土场边坡稳定性分析及安全评价[J]. 露天采矿技术,2022,37(1):36-38.

3.2 多级预警系统设计

1) 结合上述分析,根据岩体稳定程度划分等级和《崩塌滑坡泥石流监测规程》^[11],按照滑坡事件的危害程度、发展态势和影响范围,将系统预警等级划分为:I 级—紧急预警,II 级—普通预警、III 级—注意预警、VI 级—注意预报、V 级—正常运行,5 级预警类型对应的标准和应急建议见表 3。

2) 结合《崩塌滑坡泥石流监测规程》^[12]和煤矿

[2] 张吉,郭夏飞. 安家岭露天矿北帮失稳分析及治理方案研究[J]. 露天采矿技术,2022,37(1):101-104.

[3] 邓焱,郝喆,尹亮亮,等. 露天矿逆层高边坡稳定性及滑坡机理分析[J]. 采矿技术,2021,21(3):73-76.

[4] 丁新启,乔兰. 安家岭矿高陡边坡滑动破坏机理分析[J]. 中国矿业,2009,18(12):91-95.

[5] 侯成恒. 安家岭矿端帮煤开采边坡稳定性分析与控制[J]. 煤矿安全,2022,53(7):235-240.

[6] 王燕涛,邓增兵,左荣虎. 边坡形变监测雷达在安家岭露天煤矿边坡安全监测中的应用[J]. 现代矿业,2020,36(1):167-171.

[7] 李荟,韩晓飞,朱万成,等. 基于多源信息融合的矿山边坡滑坡灾害研究现状与展望[J]. 工矿自动化,2024,50(6):6-15.

[8] 马熹焱. 安家岭露天矿北帮边坡稳定性研究[J]. 露天采矿技术,2017,32(5):8-11,15.

[9] 孙光林,陶志刚,杨军,等. 平庄西露天煤矿断层滑坡监测预警研究[J]. 金属矿山,2016(2):51-55.

[10] 马熹焱,缪海宾. 安家岭露天煤矿断层破碎带影响下边坡稳定性研究[J]. 露天采矿技术,2020,35(5):13-15.

[11] 李保生,杨程烨,韩流. 来露天煤矿北帮边坡滑坡机理分析[J]. 露天采矿技术,2022,37(4):82-86.

[12] 乔东亮,张永贵,郑开慧. 魏家峁露天煤矿工作帮边坡滑坡机理研究[J]. 露天采矿技术,2021,36(5):24-26,30.