某露天矿已有老滑坡体边坡勘察及稳定性分析研究*

李青松,黎剑华,董勤喜

(广州铁路职业技术学院, 广东 广州 511300)

摘要:已有老滑坡体边坡作为露天矿采场的重大安全隐患,其稳定性研究对保障露天采场的安全生产具有重要意义。采用多种物探方法+模式搜索法对某露天矿已有老滑坡体的边坡稳定性进行研究。首先,通过地震映像法,并辅以瞬变电磁法及其他物探方法,对已有滑坡体的滑动面进行勘察,获得已有滑动面的位置;然后,采用模式搜索法对整个边坡最危险滑动面进行搜索,再结合毕肖谱法(Bishop法)分析其稳定性。结果表明:地震映像法和瞬变电磁法经过相互验证,均可作为勘察已有滑坡体滑动面的有效方法;已有老滑动面的安全系数均大于1.15,表明滑动面整体较为稳定。通过模式搜索法搜索出了已有滑坡体滑动面以外的潜在最危险滑动面,P1边坡在自重+地震工况下,共搜索出8处不安全滑动面,主要位于已有老滑坡体的外部、坡体的顶部和已有老滑坡体坡脚的下方,即坡度较陡且有变化的位置,以及局部突出的位置;P1边坡在自重+暴雨工况下,共搜索出3处不安全滑动面,主要位于已有老滑动面出口的下部;P2边坡则基本为稳定状态。研究结果可为边坡监测及地质灾害防治提供参考。

关键词:露天矿;边坡勘察;老滑坡体;稳定性分析;模式搜索法

中图分类号:TD854.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0134-09

Investigation and Stability Analysis of Existing Old Landslide Body in an Open-Pit Mine

LI Qingsong, LI Jianhua, DONG Qinxi

(Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 511300, China)

Abstract: The existing old landslide body is a major safety hazard in the open-pit mining field, and its stability research is of great significance to ensure the safe production of the open-pit mining field. The slope stability of an existing old landslide body in an open-pit mine was studied by using multiple geophysical methods + pattern search method. Firstly, through the seismic imaging method, supplemented by transient electromagnetic method and other geophysical methods, the sliding surface of the existing landslide body was investigated to obtain the position of the existing sliding surface. Then, the pattern search method was used to search the most dangerous sliding surface of the whole slope, and the Bishop method was used to analyze its stability. The results show that the seismic imaging method and the transient electromagnetic method can be used as an effective method to investigate the sliding surface of the existing landslide body after mutual verification. The safety factor of the existing old sliding surface is greater than 1.15, indicating that the sliding surface is relatively stable as a whole. The potential most dangerous sliding surface outside the sliding surface of the existing landslide body has been searched by the pattern search method. A total of eight unsafe sliding surfaces have been found in the P1 slope under the condition of self-weight and earthquake, which are mainly located outside the existing old landslide body, at the top of the slope and below the toe of the existing old landslide body, that is, the position where the slope is steep and varied, and the position with local outburst. A total of three unsafe sliding surfaces have been found in the P1 slope under the self-weight and rainfall conditions, which are mainly located at the lower part of the exit of the existing old sliding surface. P2 slope is basically stable. The research results can provide a reference for slope monitoring and geological disaster prevention.

Key words: Open-pit mine, Slope investigation, Old landslide body, Stability analysis, Pattern search method

* **收稿日期**:2024-10-16

基金项目:广州市教育局产学研结合项目(202032798)

作者简介:李青松(1972—),男,湖南郴州人,博士,讲师,主要研究方向为工程监测和检测。E-mail:543800432@qq.com

0 引言

20世纪以来,技术进步和经济发展推动了露天矿产业的迅速发展。随着露天矿产量增加,边坡问题日益突出。边坡的安全性和稳定性是影响露天矿生产安全和经济效益的关键因素之一[1-2]。特别是已有老滑坡体的边坡,其对于露天矿安全生产的影响尤其显著。因此,对已有老滑坡体边坡进行稳定性分析显得尤为紧迫和重要。

常用的边坡稳定性分析方法有数值分析法、组合赋权评价法、安全系数评价方法等。针对数值分析法,吴礼军等[3]使用Geo-Studio软件对高陡边坡下矿体开采对边坡稳定性的影响进行数值模拟,得到了不同开采阶段边坡的稳定性系数。WANG等[4]使用ABQUS模拟软件研究边坡稳定性和岩体渗透系数的关系。任高峰等[5]使用ANSYS/LS-DYNA模拟软件分析有无溶洞条件下爆破对边坡稳定性的影响,发现溶洞的存在会造成应力值的改变和应力集中现象,但产生的有效应力峰值总体远低于岩体的单轴抗压强度。杨明财等[6]采用FLAC3D软件结合强度折减法对某露天矿山边坡稳定性进行分析,发现内摩擦角对边坡稳定性的影响最大,其次为黏聚力,而泊松比的影响最小。刘国寅等[7]采用极限平衡法和FLAC3D数值模拟法分析了终了露天采场边坡稳定性。

针对组合赋权评价法,傅杨攀等[8]将CSMR和卷积神经网络结合进行建模;陈文强等[9]利用TOPSIS方法结合组合权重进行建模;程平等[10]用传统层次分析法结合可拓理论进行建模;程杰等[11]用层次分析法结合模糊数学进行建模;冯忠居等[12]基于熵权-灰关联法进行建模;王其虎等[13]基于博弈论-可拓云模型进行建模;王洪麒等[14]将指标权重与云模型理论相结合进行建模。基于以上方法建立边坡稳定评价模型,并进行边坡稳定性分析。

应用最为广泛的评价方法是安全系数评价方法。陈祖煜[15]和李德林[16]应用单形法、牛顿迭代法、非线性规划法等最优化理论数学方法,研究了如何快速找到最危险滑动面。WANG等[17]、李宁等[18]、刘恺等[19]、邓骐宁[20]为了分析结构面产状与边坡坡面空间关系对边坡稳定性的影响,用聚类法和图形分析法来研究如何确定优势结构面。此外,蚁群算法、粒子群算法、模拟退火算法、鱼群算法、人工蜂群算法、人工仿生算法等启发式群体智能算法[21-28]也被引入到智能优化算法中,并将其应用到边坡临界滑面搜索领域。周亮等[29]、莫海鸿等[30]对搜索者寻优算法进行了改进,突破了传统搜索最危险滑动面方法的束缚,提出了一种运用模式搜索法确定边坡最危险滑动面的方法,并计算出与其对应的最小安全系数。

以上研究主要对新开挖边坡及尾矿库边坡进行分析,而对已有老滑坡边坡稳定性的研究较少。对此,以某露天矿山已有老滑坡为工程背景,首先,采用物探方法对已有老滑坡体不同位置的滑动面进行较为准确的勘察;然后,在勘察出已有滑移面的基础上,对已有老滑坡体进行安全系数法分析;最后,运用模式搜索法对已有老滑坡体滑动面在自重、自重+地震、自重+暴雨3种不同工况下的稳定性进行分析。研究结果可为有效预防已有老滑坡体边坡发生地质灾害提供参考。

1 工程概况

该露天采场呈椭圆形展布,长轴走向约为36°,东西长1 200 m,南北宽500 m。采坑周缘为多台阶岩质边坡,台阶高度为10 m,采坑最大垂直深度近200 m,台阶边坡角为53°～68°,工作帮坡角为40°～55°。采场由北向南依次出露双桥山群变质粉砂岩及泥质板岩、黄龙组白云质灰岩及锡矿山组石英砂岩、砂砾岩。露天采场东南侧因开挖卸荷形成阶梯状边坡,该区域发育两处典型滑坡体,分为P1和P2。

P1边坡最大高程约为333 m,最低高程约为135 m,最大坡高约为198 m,宽度约为200 m,坡面倾向约为299°,边坡坡度为35°～50°。前期滑坡发生于边坡的中上部至坡顶,标高为255～333 m。标高255 m处有一平台,宽度为10～15 m;标高255 m以上坡度稍缓,标高255 m以下坡度稍陡。平台下部呈多级台阶状,坡度为40°～55°。

P2边坡最大高程约为326 m,最低高程约为137 m,最大坡高约为189 m,宽度约为210 m,坡面倾向约为302°,边坡坡度为35°～40°。前期发生滑坡的平面上大致呈梯形,滑坡后壁高程约为325 m,滑动破坏坡脚处高程约为200 m,滑坡中部宽度约

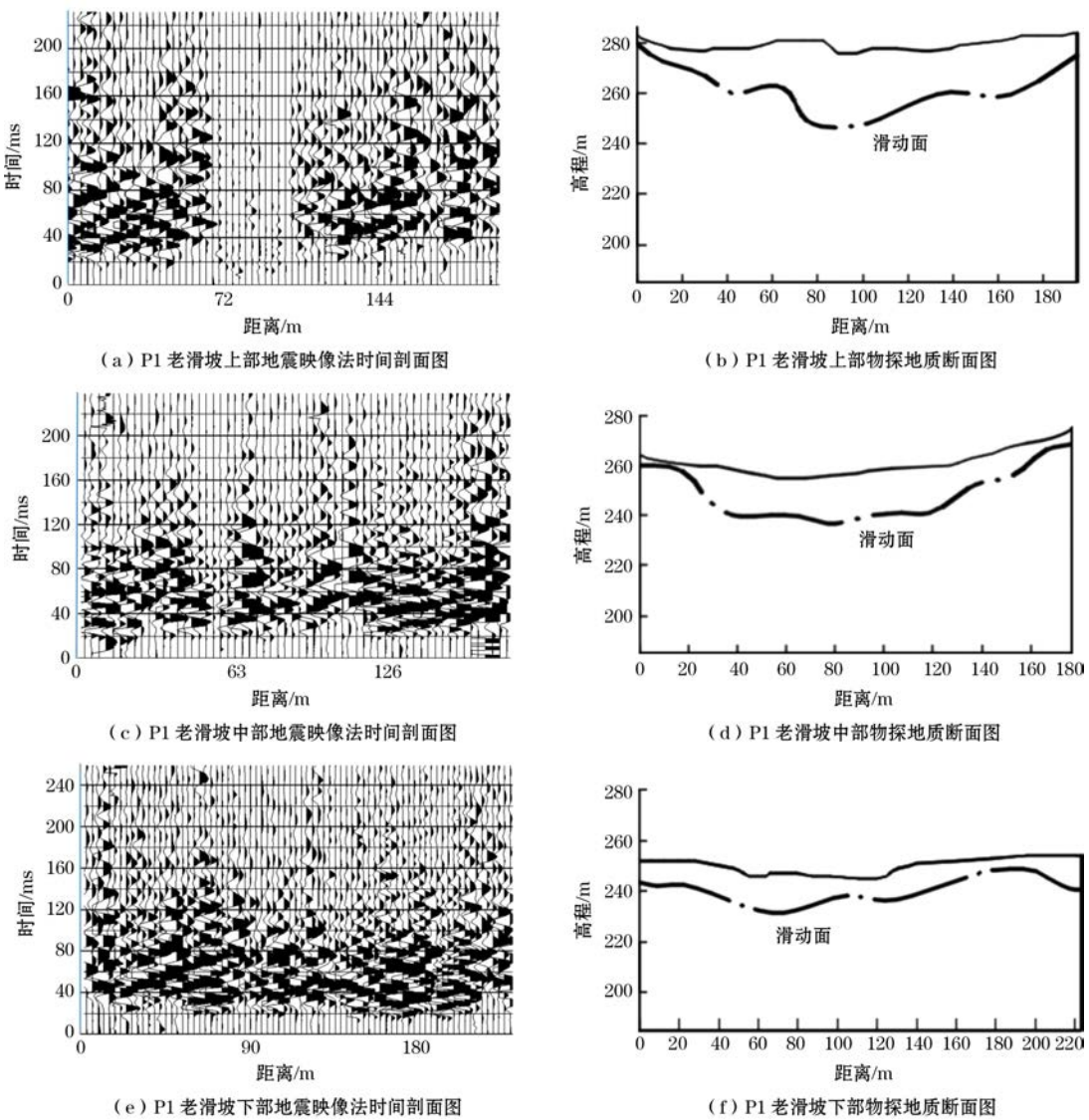
为 170 m。标高 200 m 以上坡度稍缓;标高 200 m 以下坡度稍陡,呈多级台阶状。

P1 和 P2 边坡地层由上到下主要为第四系坡积碎石土、锡矿山组(D_3x)石英砂岩岩组、棋子桥-佘田桥组(D_2q-D_3s)灰岩夹薄层状粉砂岩岩组,下伏双桥山群(Pt_2sh)板岩及变质粉砂岩岩组。

2 物探结果分析

为准确查明 P1 和 P2 滑坡体的滑动面位置,初期采用钻探进行勘察,但由于坡体破碎程度高,护壁泥浆制备较困难,钻孔内泥浆流失速度快,塌孔严重,导致勘察结果并不准确。后期采用高密度电阻率法、地震映像法、瞬变电磁法分别在各滑坡体的上部、中部和下部 3 条水平测线处进行勘察。

由于两处滑坡体表面碎石含量较多,细颗粒含量过少,空隙率较高,含水量很小,在电极位置浇水的匹配性都较差,高密度电阻率法未能取得较好的效果。因此,主要选取了地震映像法对 P1 和 P2 边坡进行测定,得到了 P1 和 P2 边坡的时间剖面图及物探地质断面图,并在 P2 边坡上部测线位置辅以瞬变电磁法进行复核,结果如图 1 和图 2 所示。基于物探分析结果,结合已有地形图等资料,得出两处已有滑坡体边坡滑动面的工程地质剖面图,如图 3 和图 4 所示。由以上勘察结果可以看出,相对于已有滑动面,整体坡体基本稳定,与现状相符。



(a) P1 老滑坡上部地震映像法时间剖面图

(b) P1 老滑坡上部物探地质断面图

(c) P1 老滑坡中部地震映像法时间剖面图

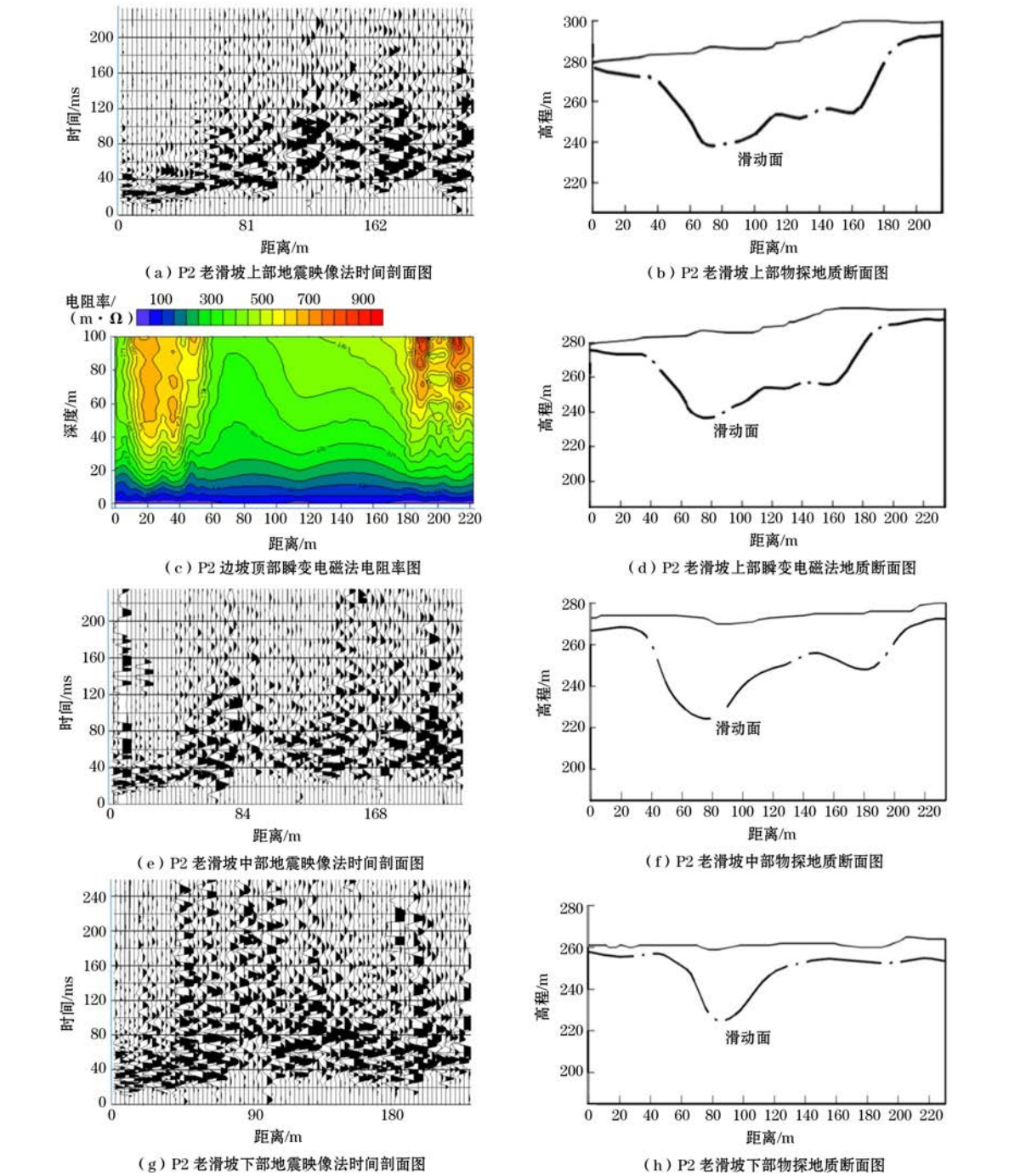
(d) P1 老滑坡中部物探地质断面图

(e) P1 老滑坡下部地震映像法时间剖面图

(f) P1 老滑坡下部物探地质断面图

图 1 P1 边坡时间剖面图及物探地质断面图

Fig.1 Time profile and geophysical geological section maps of P1 slope



(a) P2 老滑坡上部地震映像法时间剖面图　(b) P2 老滑坡上部物探地质断面图

(c) P2 边坡顶部瞬变电磁法电阻率图　(d) P2 老滑坡上部瞬变电磁法地质断面图

(e) P2 老滑坡中部地震映像法时间剖面图　(f) P2 老滑坡中部物探地质断面图

(g) P2 老滑坡下部地震映像法时间剖面图　(h) P2 老滑坡下部物探地质断面图

图 2　P2 边坡时间剖面图及物探地质断面图

Fig.2　Time profile and geophysical geological section maps of P2 slope

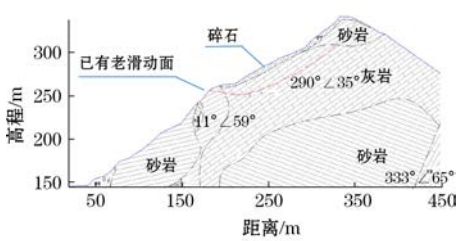


图 3　边坡 P1 工程地质剖面图

Fig.3　Engineering geological profile of P1 slope

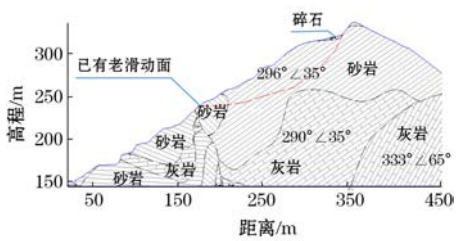


图 4　边坡 P2 工程地质剖面图

Fig.4　Engineering geological profile of P2 slope

3 模式搜索法及其相关原理

模式搜索法是一种最优化计算方法,也称为步长加速法,一般用于求 n 元函数 $f(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n)$的极值。该方法包括探索性移动和模式性移动。前者是为了发现目标函数的变化规律,探索 n 元函数 $f(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n)$的变化方向;后者是为了沿着已探索好的有利方向找到更好的点,可以看成是一种加速。

$$\hat{x}^{(k,i)}=\begin{cases}\widetilde{x}^{(k,i)}=\hat{x}^{(k,i-1)}+a_ie_i\\ \overline{x}^{(k,i)}=\hat{x}^{(k,i-1)}-a_ie_i\\ \hat{x}^{(k,i-1)}\end{cases}$$

式中:$\hat{x}^{(k,i)}$为从迭代点 $x^{(k)}$ 出发,迭代第 $k+1$ 次,按坐标方向 e_i 探索性移动时得到的点;$x^{(k)}$ 为迭代点;k 为不同迭代次数的迭代点的序号,$k=0,1,2,\cdots$;$k=0$ 时,$x^{(0)}=(x_1^{(0)},x_2^{(0)},x_3^{(0)},\cdots,x_n^{(0)})$为初始点;$e_i$ 为坐标方向,$i=0,1,2,\cdots$;a_i 为探索性移动步长,$a_0>0$;$\widetilde{x}^{(k,i)}$、$\overline{x}^{(k,i)}$为中间变量。

以第一个坐标方向为例($i=0$),取 $\hat{x}^{(k,0)}=x^{(k)}$,$\widetilde{x}=\hat{x}^{(k,0)}+a_1e_1$,进行探索性移动,具体步骤如下:

(1) 若 $f(\widetilde{x}^{(k,1)})<f(\hat{x}^{(k,0)})$,则这一维的探索性移动完成,取 $\hat{x}^{(k,1)}=\widetilde{x}^{(k,1)}=\hat{x}^{(k,0)}+a_1e_1$。然后对第二个分量进行探索;

(2) 若 $f(\widetilde{x}^{(k,1)})\geqslant f(\hat{x}^{(k,0)})$,取 $\overline{x}^{(k,1)}=\hat{x}^{(k,0)}-a_1e_1$,再判定,若 $f(\overline{x}^{(k,1)})<f(\hat{x}^{(k,0)})$,则这一维的探索性移动完成,取 $\hat{x}^{(k,1)}=\overline{x}^{(k,1)}=\hat{x}^{(k,0)}-a_1e_1$,然后对第二个分量进行探索;

(3) 若 $f(\overline{x}^{(k,1)})\geqslant f(\hat{x}^{(k,0)})$,则认为这一维的探索性移动完成,取 $\hat{x}^{(k,1)}=\hat{x}^{(k,0)}$,然后对第二个分量进行探索;

(4) 若 $\hat{x}^{(k,n)}=\hat{x}^{(k,0)}$,则缩小步长,再进行探索性移动,如果还是有 $\hat{x}^{(k,n)}=\hat{x}^{(k,0)}$,则继续缩小步长,再进行探索性移动,直至 $\|a\|\leqslant\varepsilon$,此时 $\hat{x}^{(k,0)}$ 为近似极小值点;

(5) 若 $\hat{x}^{(k,n)}\neq\hat{x}^{(k,0)}$,则完成探索性移动,然后进行模式性移动。

模式性移动的公式为:

$$\ddot{x}^{(k+1)}=\hat{x}^{(k+1)}+\lambda_kP_k=$$

$$\hat{x}^{(k+1)}+(\hat{x}^{(k+1)}-\hat{x}^{(k)})=2\hat{x}^{(k+1)}-\hat{x}^{(k)}\quad(2)$$

式中:$\ddot{x}^{(k+1)}$是新的试验点,是从迭代点 $\hat{x}^{(k+1)}=\hat{x}^{(k,n)}$ 出发,沿方向 $P_k=\hat{x}^{(k+1)}-\hat{x}^{(k)}$,步长 $\lambda_k=1$ 求出的新试验点;λ_k 为模式性移动步长;$\hat{x}^{(k+1)}$为模式性移动迭代点,是通过探索性移动得到的点,可以设

探索性移动的公式为:

$$\begin{aligned}&(f(\widetilde{x}^{(k,i)})<f(\hat{x}^{(k,i-1)}))\\&(f(\overline{x}^{(k,i)})<f(\hat{x}^{(k,i-1)})\leqslant f(\widetilde{x}^{(k,i)}))\\&(f(\overline{x}^{(k,i)})\geqslant f(\hat{x}^{(k,i-1)})\leqslant f(\widetilde{x}^{(k,i)}))\end{aligned}\quad(1)$$

$\hat{x}^{(k+1)}=\hat{x}^{(k,n)}$;$P_k$ 为模式性移动迭代方向,可以设 $P_k=\hat{x}^{(k+1)}-\hat{x}^{(k)}$。

$\ddot{x}^{(k+1)}$求出后,从 $\ddot{x}^{(k+1)}$出发,根据式(2)对其进行一次模式性移动,得到点 $\hat{y}^{(k+1)}$,然后进行以下判断:

(1) 若 $f(\hat{y}^{(k+1)})<f(\hat{x}^{(k+1)})$,则令 $x^{(k+1)}=\hat{y}^{(k+1)}$,一次迭代完成,得到新迭代点 $x^{(k+1)}$;

(2) 若 $f(\hat{y}^{(k+1)})\geqslant f(\hat{x}^{(k+1)})$,则令 $x^{(k+1)}=\hat{x}^{(k+1)}$,将步长缩小,重新从式(1)开始探索性移动,当步长足够小时,迭代结束。

按以上模式搜索法,计算出 n 元函数 $f(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n)$的极值,该方法也可以结合到其他计算方法中应用,如结合简步法(Janbu)、毕肖普法(Bishop)等。

4 滑坡体最危险滑面模式搜索法研究结果及分析

根据钻探取样的室内试验成果,结合已有的矿区详细勘探地质报告等相关资料,得出计算分析所需的已有滑坡体边坡岩土介质基本参数,见表 1。

表 1 剖面岩层基本参数

Table 1 Basic parameters of profile rock stratum

剖面岩层	节理起始倾角/(°)	节理终止倾角/(°)	节理内摩擦角/(°)	节理黏聚力/kPa
Q^{ml+dl}碎石	—	—	—	—
Pt_2sh 砂岩	40	40	37	7.5
Pt_2sh 砂岩(饱和)	40	40	30	4.8
D_3s-D_2q 灰岩	35	35	15	4.8
D_3s-D_2q 灰岩(饱和)	35	35	13	2.8
D_3X 砂岩	36	36	37	7.5
D_3X 砂岩(饱和)	36	36	30	4.8

采用模式搜索法与简化毕肖普法(Bishop)对滑坡体的边坡稳定性进行分析,已有滑动面按物探所

得成果给定,其他潜在破坏滑动面通过模式搜索法计算得到。土条宽度设定为 1.0 m,当土条重切向分力与滑动方向相反时,将其等效视为下滑力参与计算,搜索时的圆心步长为 0.5 m,搜索时的半径步长为 0.5 m。自动搜索最危险滑裂面,基于总应力法开展计算,充分考虑渗透力的影响,边坡外侧静水压力暂不考虑,计算边坡安全系数。表 2 为不同工况下的安全系数。

表 2 不同工况下的安全系数

Table 2 Safety factors under different working conditions

工况	模拟因素	安全系数	备注
工况 1	自重	1.35	该工况无地下水作用,不考虑张裂缝,不考虑地震荷载,仅考虑岩体节理的影响,工况阶段为持久设计状况。
工况 2	自重+地震	1.15	该工况无地下水作用,不考虑张裂缝,考虑岩体节理及地震荷载的影响,工况阶段为地震设计状况。抗震设防烈度为 7 度 (0.15g),综合水平地震系数 a_w=0.037 5,地震作用重要性系数 C_i=1.1。
工况 3	自重+暴雨	1.15	该工况考虑地下水作用,考虑张裂缝影响,考虑岩体节理的影响,不考虑地震荷载,工况阶段为偶然设计状况。极端暴雨作用下,岩土体处于饱和状态。

地震荷载标准根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),矿区所在地方抗震设防烈度为Ⅵ度,可不考虑地震荷载作用。进行稳定性分析时将矿区所在地方抗震设防烈度提高至Ⅶ度,地震动峰值加速度为 0.15g,地震动反应谱特征周期为 0.35 s。

根据图 3 和图 4,对 P1 和 P2 边坡已有滑动面进行整体稳定性分析,得出其安全系数,见表 3。

采用模式搜索法对 P1 和 P2 边坡进行稳定性分析,得出不同工况下边坡已有老滑动面以外最危险滑动面,如图 5 和图 6 所示,其对应的安全系数见表 4 和表 5。

表 3 已有滑动面稳定性分析安全系数

Table 3 Safety factors from the stability analysis of existing slip surface

工况	P1 边坡	P2 边坡	稳定性判断
工况 1	2.53	2.55	均大于 1.35,稳定。
工况 2	1.31	1.52	均大于 1.15,稳定。
工况 3	2.13	2.22	均大于 1.15,稳定。

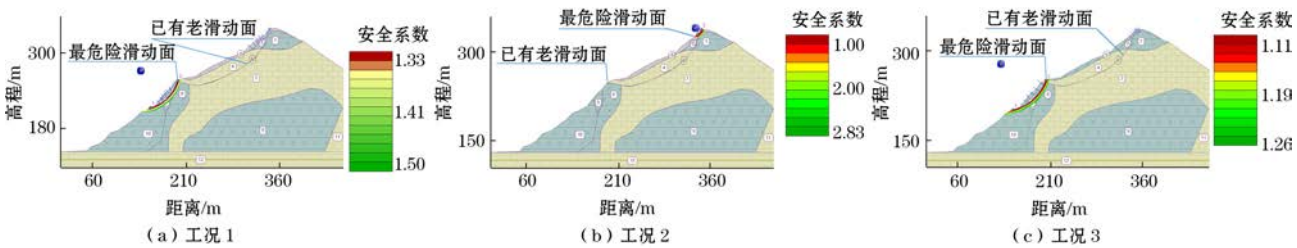


图 5 P1 边坡最危险滑动面示意

Fig.5 The most dangerous slip surface of P1 slope

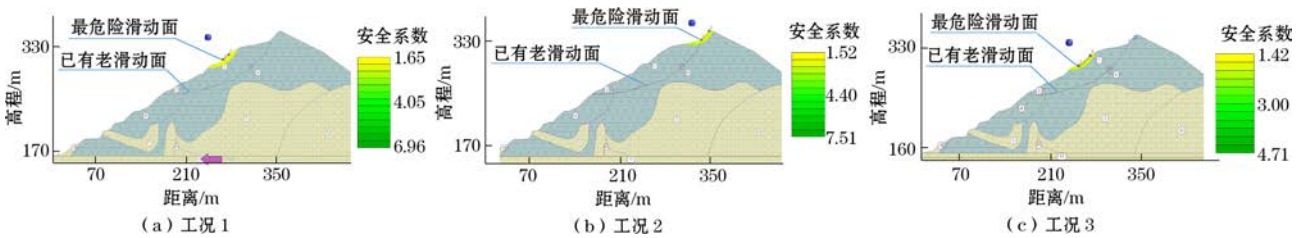


图 6 P2 边坡最危险滑动面示意

Fig.6 The most dangerous slip surface of P2 slope

表 4 P1 边坡最危险滑动面安全系数

Table 4 Safety factors of the most dangerous slip surfaces of P1 slope

工况	安全系数	圆心,半径/m	稳定性判断	备注
工况 1	1.32	(132.5,263.9),61.14	基本稳定	—
工况 2	0.88	(327.98,334.23),11.53	不稳定	共搜索出 8 处不安全滑动面,主要位于已有老滑坡体的外部、坡体的顶部和已有老滑坡体坡脚的下方,即坡度较陡且有变化的位置,以及局部突出的位置。
工况 3	1.10	(124.23,275.95),75.95	基本稳定	共搜索出 3 处不安全滑动面,主要位于已有老滑动面出口的下部。

表 5 P2 边坡最危险滑动面安全系数

Table 5 Safety factors of the most dangerous slip surfaces obtained of P2 slope

工况	安全系数	圆心,半径/m	稳定性判断
工况 1	1.69	(239.43,344.76),42.7	稳定
工况 2	1.42	(240.24,341.77),39.67	稳定
工况 3	1.52	(320.39,365.48),29.06	稳定

由表 3 可知,P1 和 P2 坡体整体在已有滑动面上是稳定的,这一点与该露天矿现状坡体的状态相符。由图 5 和图 6、表 4 和表 5 可知,P1 边坡在工况 1 时基本稳定;在工况 2 时共搜索出 8 处不安全滑动面,主要位于已有老滑坡体的外部、坡体的顶部和已有老滑坡体坡脚的下方,即坡度较陡且有变化的位置,以及局部突出的位置;在工况 3 时共搜索出 3 处不安全滑动面,主要位于已有老滑动面出口的下部。P2 坡体均为稳定状态。该分析结果可为地质灾害监测提供有效参考。

5 结论

本文基于多种物探方法对某露天矿已有老滑坡体不同位置的滑动面进行精准勘察,并通过模式搜索计算方法分析自重、自重+地震、自重+暴雨 3 种不同工况下已有老滑坡体的稳定性,得出以下主要结论。

(1) 通过物探分析方法对已有老滑坡体边坡滑动面位置进行有效勘察,其中,地震映像法和瞬变电磁法的勘察效果较好。勘察发现,相对于已有滑动面,整体坡体基本稳定,与现状相符。

(2) 用模式搜索法对已有滑动面在不同工况下的稳定性进行分析,结果表明,P1 和 P2 边坡已有滑动面在 3 种工况下是稳定的。进一步分析最危险滑动面,发现最危险滑动面分别存在于 P1 和 P2 边坡的不同区域,但其对应的安全系数均略小于通常设定的安全系数,可以认为是基本稳定状态,局部存在较小范围的不稳定状态,与现状相符。

(3) 通过实践再次验证了安全系数评价方法在露天矿边坡已有老滑坡体稳定性分析中的可行性,不仅可以评价边坡的整体稳定性,还可以分析得出可能存在的不稳定区域。研究结果可以为边坡监测及地质灾害防治提供参考。

参考文献(References):

[1] 曹兰柱,王珍,王东,等.含弱层复合煤层露天矿边坡空间形态优化设计[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018,37(3):469-475.
CAO Lanzhu, WANG Zhen, WANG Dong, et al. Optimization design of slope space shape for multiple coal seams surface mine with weak layer[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(3): 469-475.

[2] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011(5):1437-1451+1472.
YANG Tianhong, ZHANG Fengchun, YU Qinglei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend [J]. Rock and Soil Mechanics,2011(5):1437-1451+1472.

[3] 吴礼军,徐文彬.邻近高陡边坡采矿爆破振动规律及边坡稳定性分析[J].工程爆破,2022,28(4):113-119.
WU Lijun, XU Wenbin. Analysis of blasting vibration law and slope stability in mining near high and steep slope[J]. Engineering Blasting,2022,28(4):113-119.

[4] WANG Y Z, LIU X F, ZHANG Z K, et al. Analysis on slope stability considering seepage effect on effective stress[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2016,20(6):2235-2242.

[5] 任高峰,王鑫,周汉红,等.爆破作用下岩溶对边坡稳定性的数值模拟研究[J].爆破,2023,40(4):192-200.
REN Gaofeng, WANG Xin, ZHOU Hanhong, et al. Numerical simulation of karst effect on slope stability under blasting[J]. Blasting,2023,40(4):192-200.

[6] 杨明财,盛建龙,叶祖洋,等.基于 FlAC3D 的露天矿边坡稳定性及影响因素敏感性分析[J].黄金科学技术,2018,26(2):179-186.
YANG Mingcai, SHENG Jianlong, YE Zuyang, et al. Analysis of sensitivity factors of open-pit mine slope stability and impact based on FLAC3D [J]. Gold Science and Technology,2018,26(2):179-186.

[7] 刘国寅,孙发院,丁军明,等.某多金属矿露天开采终了边坡结构参数分析及稳定性验算[J].矿产保护与利用,2024,44(4):74-84.
LIU Guoyin, SUN Fayuan, DING Junming, et al. Structural parameter analysis and stability calculation of end-of-pit slope of a polymetallic mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2024,44(4):74-84.

[8] 傅杨攀,刘勇健,陈贡发,等.基于 CSMR 和卷积神经网络的岩质边坡稳定性分析[J].自然灾害学报,2023,32(1):114-121.
FU Yangpan, LIU Yongjian, CHEN Gongfa, et al. Stability analysis of rock slope based on CSMR and convolution neural network[J]. Journal of Natural Disasters,2023,32(1):114-121.

[9] 陈文强,杨睿孜,赵宇飞,等.基于组合权重-TOPSIS 的岩质边坡稳定性评价[J].安全与环境学报,2022,22(3):1198-1206.
CHEN Wenqiang, YANG Ruizi, ZHAO Yufei, et al. Rock slope stability evaluation based on combined weighted and TOPSIS[J]. Journal of Safety and Environment,2022,22(3):1198-1206.

[10] 程平,王林峰,曾韬睿,等.基于 AHP-可拓理论的消落带岩质边坡稳定性分析[J].人民黄河,2020,42(12):123-128+150.
CHENG Ping, WANG Linfeng, ZENG Taorui, et al. Stability analysis of rock slope in the hydro-fluctuation belt based on AHP-extension theory[J]. Yellow River,2020,42(12):123-128+150.

[11] 程杰,吴贤振,王庆,等.基于 FAHP 模型的边坡稳定性评价[J].矿业研究与开发,2019,39(12):46-50.
CHENG Jie, WU Xianzhen, WANG Qing, et al. Evaluation of slope stability based on FAHP model [J]. Mining Research and Development,2019,39(12):46-50.

[12] 冯忠居,朱彦名,高雪池,等.基于熵权-灰关联法的岩质开挖边坡安全评价模型[J].交通运输工程学报,2020,20(2):55-65.
FENG Zhongju, ZHU Yanming, GAO Xuechi, et al. Safety evaluation model of excavating rock slope based on entropy-grey correlation method [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2020,20(2):55-65.

[13] 王其虎,熊淦麟,叶义成,等.基于博弈论-可拓云模型的尾矿库溃坝后果评价[J].矿业研究与开发,2023,43(11):137-142.
WANG Qihu, XIONG Ganlin, YE Yicheng, et al. Evaluation of the consequences of dam failure in tailings reservoir based on game theory-extendable cloud model[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):137-142.

[14] 王洪麒,张坤,李建华,等.基于改进层次分析法及云模型的边坡稳定性评价[J].建筑安全,2024,39(9):70-74+83.
WANG Hongqi, ZHANG Kun, LI Jianhua, et al. Slope stability evaluation based on improved analytic hierarchy process and cloud model[J]. Construction Safety,2024,39(9):70-74+83.

[15] 陈祖煜.土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
CHEN Zhuyu. Soil slope stability analysis: principle, method and procedure [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press,2003.

[16] 李德林.基于非线性规划法的边坡局部滑动面优化[J].中外公路,2016,36(4):59-63.
LI Delin. Optimization of local slip surface of slope based on nonlinear programming method[J]. Chinese and Foreign Highways,2016,36(4):59-63.

[17] WANG S H, HUANG R Q, NI P P, et al. Advanced discreatization of rock slope using block theory within the frame work of discontinuous deformation analysis [J]. Geomechanics & Engineering,2017,12(4):723-738.

[18] 李宁,王李管,贾明涛,等.改进遗传算法和支持向量机的岩体结构面聚类分析[J].岩土力学,2014,35(增刊 2):405-411.
LI Ning, WANG Liguan, JIA Mingtao, et al. Application of improved genetic algorithm and support vector machine to clustering analysis of rock mass structural plane[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(Suppl.2):405-411.

[19] 刘恺,李启月,李夕兵,等.岩体结构面非典型数据集的优势组提取方法[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊 2):4018-4024.
LIU Kai, LI Qiyue, LI Xibing, et al. A dominant group determination method for atypical data sets of rock joint occurrences[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(Suppl.2):4018-4024.

[20] 邓骐宁.基于运动学分析的露天矿岩质边坡优势结构面确认方法及其工程应用[J].矿业研究与开发,2024,44(7):80-86.
DENG Qining. The method of determining the preferred structural plane of rock slope in open-pit mine bsaed on kinematics analysis and its engineering application [J]. Mining Research and Development,2024,44(7):80-86.

[21] LI X B, WANG Z W, PENG K, et al. Antcolony ATTA clustering algorithm of rock mass structural plane in groups [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(2): 709-714.

[22] 陈昌富,龚晓南.混沌扰动启发式蚁群算法及其在边坡非圆弧临界滑动面搜索中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):2450-2453.
CHEN Changfu, GONG Xiaonan. Heuristic ant colony algorithm involving chaos operator and its application to search for critical slip surface of slope[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(20):2450-2453.

[23] 杨善统,姜清辉,尹涛,等.边坡临界滑面搜索的改进粒子群优化算法[J].岩土工程学报,2015,37(8):1411-1417.
YANG Shantong, JIANG Qinghui, YIN Tao, et al. Search of critical slip surface of slopes using improved particle swarm optimization method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(8):1411-1417.

[24] 胡军,董建华,王凯凯,等.边坡稳定性的 CPSO-BP 模型研究[J].岩土力学,2016,37(增刊 1):577-582.
HU Jun, DONG Jianhua, WANG Kaikai, et al. Research on CPSO-BP model of slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(Suppl.1):577-582.

[25] 王述红,任艺鹏,陈俊智,等.一种改进鱼群聚类算法在结构面分组中的应用[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(3):119-123.
WANG Shuhong, REN Yipeng, CHEN Junzhi, et al. An improved fish swarm clustering algorithm for structural grouping[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2019,40(3):119-123.

[26] 宋腾蛟,陈剑平,张文,等.基于人工蜂群算法的岩体结构面多参数优势分组研究[J].岩土力学,2015,36(3):861-868.
SONG Tengjiao, CHEN Jianping, ZHANG Wen, et al. A method for multivariate parameter dominant partitioning of discontinuities of rock mass based on artificial bee colony algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 861-868.

[27] 戴朝华.搜寻者优化算法及其应用研究[D].成都:西南交通大学,2008.

DAI Chaohua. Seeker optimization algorithm and its applications[D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[28] DAI Chaohua, CHEN Weirong, SONG Yonghua, et al. Seeker optimization algorithm: a novel stochastic search algorithm for global numerical optimization[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2010,21(2):300-311.

[29] 周亮,李刚.改进搜索者算法在边坡稳定分析中的应用[J].中外公路,2022,42(5):12-18.
ZHOU Liang, LI Gang. Application of improved searcher algorithm in slope stability analysis[J]. Chinese and Foreign Highways,2022,42(5):12-18.

[30] 莫海鸿,唐超宏,刘少跃.应用模式搜索法寻找最危险滑动圆弧[J].岩土工程学报,1999,21(6):696-699.
MO Haihong, TANG Chaohong, LIU Shaoyue. Determination of the most dangerous slip surfacewith pattern search method[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1999,21(6):696-699.