

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.09

基于深部位移监测的滑坡形成机制分析与稳定性评价

薛涛¹,王振华²,孙萍¹,王博超³

(1. 金陵科技学院,江苏南京 211169;2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司,陕西西安 710032;3. 西安中地环境科技有限公司,陕西西安 710054)

摘要:采用钻孔深部位移监测法,结合工程地质调绘、地表变形监测和室内土工试验,研究了某金矿堆渣体引起潜在滑坡的形成机制,对该潜在滑坡的稳定性进行了分析评价。监测和分析结果表明:该潜在滑坡体存在浅层和深层两个潜在滑动面,潜在滑动面呈弧状,埋深从坡体后缘到前沿逐渐减小;厂区岩土体条件较差,地下水位埋深较浅以及厂房后缘大量堆渣体是发生潜在滑坡体的主要原因;监测结果揭示潜在滑坡体后部变形明显,累计变形量较大,处于加速变形阶段,中部虽未表现出加速变形状态,但变形速率比较大,前部变形速率较小,整体处于极限平衡状态,与稳定性定量计算结果相符。该方法更加清晰地揭示了潜在滑坡体的变形特征,与实际情况比较吻合,可为潜在滑坡稳定性评价与滑坡灾害防治提供科学依据,对类似工程也具有一定的借鉴意义。

关键词:潜在滑坡;深部位移监测;成因分析;稳定性评价

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0053-09

Analysis of a landslide mechanism and its stability evaluation based on subsurface displacement monitoring

XUE Tao¹, WANG Zhenhua², SUN Ping¹, WANG Bochao³

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211169, China; 2. Northwest Electric Power Design Institute LTD of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an, Shaanxi 710032, China; 3. Xi'an Zhongdi Environmental Science and Technology Company Limited. Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: This paper using deep displacement monitoring, combining with engineering geological mapping, surface deformation monitoring and soil test, research of the formation mechanism of a potential landslide in a gold mine, evaluating it's stability. Monitoring and analysis results show, the landslide has deep and shallow sliding surfaces, and the slip surface rendered as arc shape, the burial depth gradually decreases from trailing edge to leading edge; The bad rock and soil conditions, shallow groundwater level and large number of slag pile behind factory buildings are the main reasons of the potential landslide; Monitoring results shows that it has obvious deformation at the rear of the landslide, the cumulative deformation are larger, in a deformed acceleration phase, the central not showing accelerated state, but it has larger deformation rates, the front part has smaller deformation rates, overall are in limit equilibrium state, the results are consistent with the stability calculation. This method to more clearly reveal the deformation characteristics of the potential landslide, it has a good match with the actual situation, This reseach method not only provide a scientific basis to the stability evaluation and prevention of the potential landslide, but also will be having some references significance to similar projects.

Keywords: potential landslide; subsurface displacement monitoring; cause analysis; stability evaluation

收稿日期: 2016-06-14; 修订日期: 2016-08-04

基金项目: 金陵科技学院人才引进项目(Jit-rcyj-201501)

第一作者: 薛涛(1966-),女,山西万荣人,博士,副教授,主要从事岩土体及地基基础安全监测研究。E-mail: xuetao@jit.edu.cn

0 引言

中国是世界上滑坡灾害最为严重的国家之一,特别近几十年来采矿行业的兴起与飞速发展,矿山滑坡灾害显得尤为严重,如1997年我国福建某矿山排弃场堆渣体引发滑坡事故^[1],造成矿山下整个自然村被毁于一旦;2011年11月26日广西苍梧县非法采稀土矿引发大型山体滑坡^[2],造成9人死亡;2011年12月10日贵州长顺矿山发生山体滑坡^[3],造成多人死亡。滑坡灾害严重威胁到人类生命财产安全,因此,对矿山滑坡的稳定性进行预测与评价至关重要。目前,国内外对矿山滑坡灾害的研究虽然取得了丰硕的成果^[4-6],但研究方法局限于地表变形监测法、工程地质类比法和模型模拟法等,不能对潜在滑坡体的变形和稳定性进行精确和系统的分析,也不能为灾害的防治和预警提供可靠的依据。

本文采用深部位移监测法,结合工程地质测绘、地表变形观察和室内土工试验等手段,通过对滑坡体布置监测孔,监测滑面的变形深度、地表变形、深孔侧向位移、地下水位以及滑坡周界的变形情况,相比较于传统方法,该方法能够更加清晰地了解滑坡体不同部位、不同深度的变形滑动特征,监测数据能够用于对滑坡变形等特征进行较准确地定量分析,对滑坡及滑坡区的岩土工程条件有了全面的认识,为潜在滑坡稳定性评价与滑坡灾害防治提供科学依据,对类似工程也具有一定的借鉴意义。

1 工程概况

某矿区位于秦岭山脉南麓,由于弃渣在斜坡上的不合理堆放,加之岩土体本身的工程地质条件较差,致使在渣体内部和斜坡体中形成了浅层和深层的潜在滑移面。2010年3月监测发现磨矿间、自动化操作室、浮选间、精矿间南侧、粉矿间及后部堆渣体均发生变形迹象,严重威胁厂区工程经济活动及人类生命财产安全。

1.1 地形地貌

潜在滑坡区地处秦岭山脉南麓,海拔高度985.0~1193.0 m,相对高差208 m,属构造剥蚀低中山型沟谷地貌。选矿厂、生活区及辅助设施场地分布在东沟的斜坡地带,地形坡度 $10^{\circ} \sim 38^{\circ}$,坡底较平缓,上部较陡,总体地势西高东低(图1)。

厂区原为一自然斜坡,坡度约 20° ,由于厂区建设需要,已按照不同的标高进行了场地平整,形成了台阶状地形。根据现有地形厂区可大致分为两级台阶状,一级



图1 滑坡全貌图

Fig.1 Panorama of landslide

平台宽约100 m,厂区主要厂房、食堂、办公大楼以及公路均位于该平台,该平台上公路高程最低约为1023 m,粉矿仓底面高程最高为1031 m,其间有3个2~3 m的小台阶;二级平台宽30~50 m,平台高度1044~1050 m,为矿石运输通道。滑坡平面图见图2。

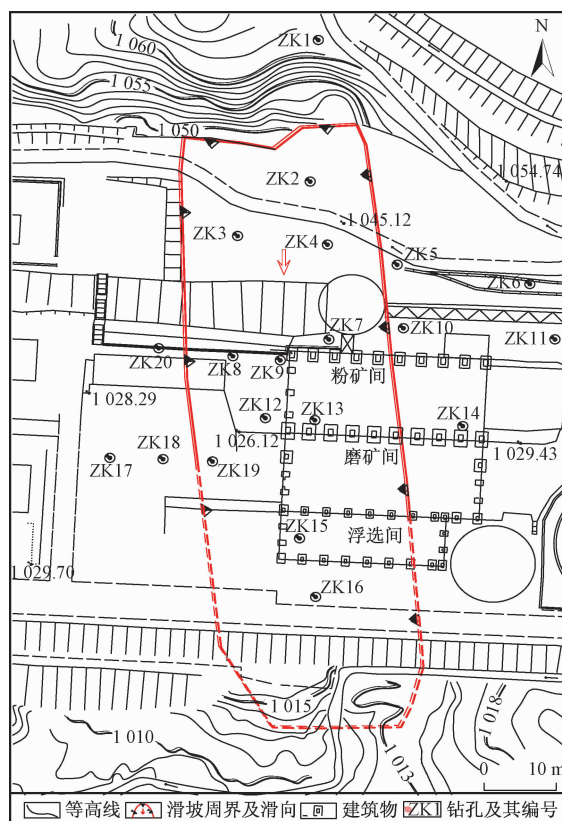


图2 滑坡平面图

Fig.2 Plane of landslide

1.2 地层岩性

场地地层主要由第四系全新统人工堆积物(Q_4^{al})、坡积物(Q_4^{dl})及中石炭系四峡口组(C_2s)炭质页岩组成。第四系全新统人工堆积物(Q_4^{al})主要分布在选矿厂以及粉矿仓后部,以堆渣为主,堆渣母岩岩性以灰色炭质页

岩为主,堆渣厚度介于 3 ~ 17 m。第四系全新统坡积物 (Q_4^{all}) 主要以粉质粘土、碎石以及含碎石粉质粘土为主,厚度介于 3 ~ 18 m,多呈可塑 - 硬塑状。中石炭系四峡口组 (C_2s) 炭质页岩为黑色或者黑褐色,泥炭质结构,页理构造,局部夹炭质灰岩及方解石岩脉,节理裂隙发育,岩芯主要呈土柱状,强度相对较低。

1.3 水文地质条件

矿区地下水类型主要为基岩裂隙水及第四系松散岩类孔隙水。基岩裂隙水主要靠大气降水以及后部山体裂隙水的补给,水量丰富。第四系松散岩类孔隙水主要赋存于堆积体中,主要接受大气降水和基岩裂隙水补给,水量较为丰富,地下水位的深度受大气降雨影响变化幅度介于 0.5 ~ 1 m。厂区内地下水位埋深浅。地下水位与滑坡体的关系为:地下水位沿坡体向下水位埋深逐渐降低,滑坡体后部地下水位埋深最高,中部次之,前部最低;滑坡体中后部地下水位水力梯度较大,对滑坡稳定性影响较大(图 3)。

2 滑坡体特征及形成机制

2.1 潜在滑坡体特征

(1) 形态特征

为查明潜在滑坡体变形情况,对厂区范围内进行了地表变形监测和深孔侧向位移监测。测区内共布设 4 个基准点以及 6 个变形监测点,变形监测点分别位于粉矿仓、厂房以及扶壁式挡墙上,主要用于监测构筑物平面位移以及竖向沉降。

平面变形观测于 5 月 25 日开始观测,截止 6 月 15 日共完成变形观测 6 期,其观测点位累积变化见表 1。

从目前的形变资料来看,位于粉矿仓顶部的两个观测点存在较为明显的下沉,其最大沉降量已达 3.2 mm,其它各点没有明显沉降;各变形观测点呈现方向较为一致的水平位移,方向为东南。

表 1 某金矿滑坡第 1 ~ 6 期点位累积变化表
Table 1 A metal landslide cumulative change in the 1-6 points

点名	1 ~ 6 期点位累积变化量/mm				分布位置
	D _x	D _y	D _p	D _h	
G01	0.3	-2.0	2.0	-0.6	位于厂房后部北侧扶壁式挡墙上
G02	-1.5	-4.1	4.4	-0.8	位于厂房后部北侧扶壁式挡墙上
G03	-0.5	-3.9	3.9	-3.2	位于厂房后部西北侧粉矿仓上
G04	0.5	-4.7	4.7	-2.3	位于厂房后部西北侧粉矿仓上
G05	1.5	-0.4	1.6	-1.0	位于厂房后部西北侧
G06	-0.8	-5.4	5.5	-0.9	位于厂房后部西北侧

深孔侧向位移用来查明潜在滑坡变形体变形深度以及变形速率,在勘察区范围内共布设了 16 个深孔监测孔。通过对 2011 年 5 月 17 日 ~ 6 月 18 日各钻孔的监测结果进行整理分析得出:厂房后部堆渣体最大变形深度为 17.2 m,平均变形速率达到 0.29 ~ 0.5 mm/d,厂区范围内水平变形速率稍缓,达到 0.03 ~ 0.28 mm/d,目前潜在滑坡体前缘剪出口尚未形成,根据监测结果判断整个潜在滑坡体尚处于挤压变形状态。但是随着雨季的到来,粉矿仓后部的 ZK4 钻孔表现出变形加速的迹象。7 月 8 号再次对钻孔进行测斜,由于粉矿仓南部的堆渣体进行了少量的卸载,变形速度有所降低,但粉矿仓后部的 ZK4 号钻孔变形速度较前期快。ZK8 号钻孔前期监测变形不明显,根据此次测斜该钻孔在 12 m 位置处变形明显为滑动带。ZK2 号钻孔在 10 m 附近有少量变形,初步判断为滑动带。各钻孔深孔监测结果见表 2。

表 2 深孔侧向位移监测成果表
Table 2 Deep hole lateral displacement monitoring results

钻孔编号	测孔深度/m	监测变形深度/m	滑面累积位移/mm	变形速率/(mm/d)
ZK1	11.5	不明显		
ZK2	19.5	10.0(变形量较小)		
ZK3	23.5	5.5(浅层)17.2(深层)	17.9(浅层)19.2(深层)	0.38(速度减慢)
ZK4	29.5	9.5(浅层)深层尚不明显	16.2(浅层)	0.34(速度加快)
ZK5	29.5	不明显		
ZK6	23.5	不明显		
ZK7	15.5	不明显		
ZK8	12.5	12.0	6.21	0.16
ZK9	20.5	13.0	9.59	0.22
ZK10	11.5	不明显		
ZK11	8.5	不明显		
ZK12	19.5	16.0	5.30	0.12
ZK13	14.5	11.0	6.06	0.12
ZK14	12.0	不明显		
ZK15	14.5	9.0	2.58	0.07
ZK16	12.5	不明显		

依据实测数据绘制如图 2、图 3、图 4,根据第 1~6 期点位累积变化量、深孔侧向位移监测成果、变形体变形深度以及变形速率综合分析,坡体具有浅层和深层两个潜在滑动面,见图 2、图 4,平面形态呈长舌状。

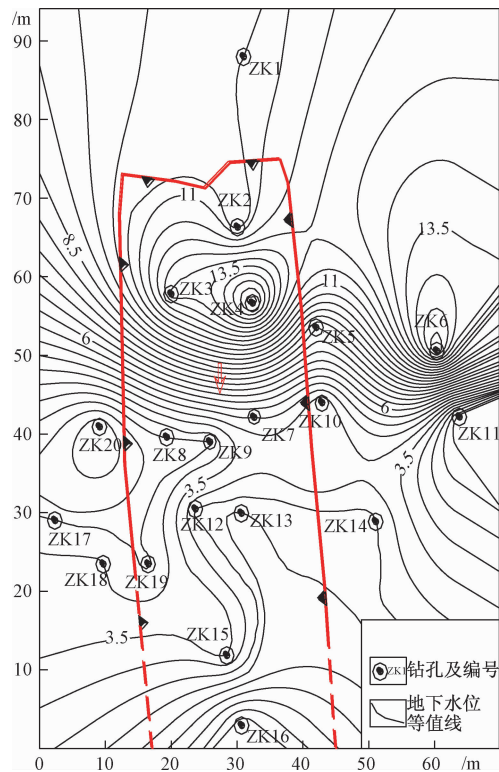


图 3 地下水位等值线图

Fig. 3 Groundwater contour map

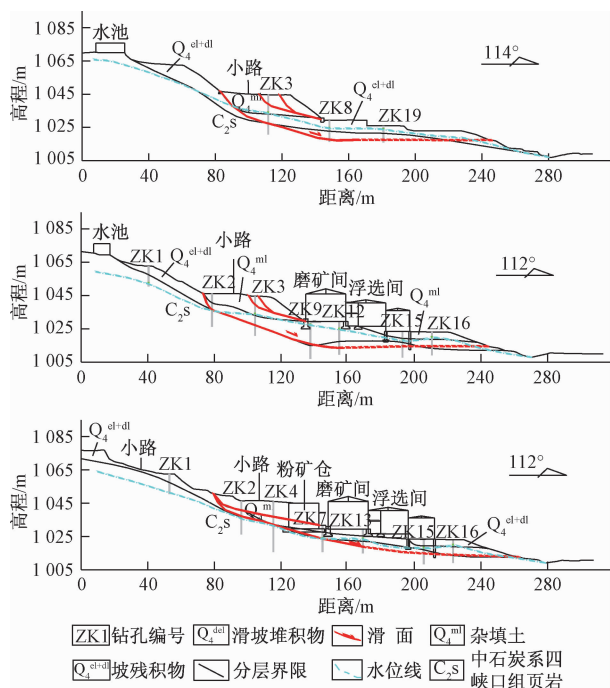


图 4 滑坡剖面图

Fig. 4 Profile of landslide

①浅层的变形是在堆渣体的内部形成的变形,坡脚已有挤出迹象,总仓库后部坡脚挡墙出现鼓胀开裂,变形深度根据监测结果介于 5~10 m,剪出口位于堆渣边坡坡脚。

②潜在滑坡体深层滑动面深度介于 9~17.2 m,由于目前处于挤压变形状态,且填渣较为松散,因此在后缘尚未形成明显的变形开裂。根据现场地形地貌以及深孔测向位移监测结果推测滑坡后缘位于堆渣体边缘与后方自然坡体接触处。根据监测结果以及裂缝调查情况判断,潜在滑坡体前缘变形发展至精矿间附近,由于精矿间采用了桩基础,能够形成较大的抗力,故滑动面尚未能完全贯通;推测若继续发展,剪出口将位于厂区公路的下方冲沟附近。潜在滑坡体左侧界位于粉矿仓北侧的边缘与扶壁式挡墙接触处,从厂房的中部斜穿而过;右侧边界不清晰且变形相对较小,推测其位于总仓库的中部附近地面开裂位置,该处为强风化基岩与覆盖层的接触部位。

(2) 潜在滑坡体结构特征

根据深孔测向位移结果显示,潜在滑坡体最大变形深度在 ZK3 为 17.2 m,平均厚度约 10 m,体积约 $11 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于中型土质滑坡。

①结构特征:根据工程地质钻探结果,潜在滑坡体主要由上部的堆渣以及下部的残坡积覆盖层组成。堆渣主要分布在选矿厂以及粉矿仓后部,其母岩岩性以灰黑色炭质页岩为主,厚度介于 3~17 m,松散,该层物理力学性质较差。其下伏的残坡积覆盖层主要以粉质粘土、含碎石粉质粘土为主,厚度介于 3~5 m 之间,该层多呈可塑~硬塑状,局部层位由于粘粒含量较高且地下水丰富处于软塑状态;中前部的滑坡体主要物质组成为粉质粘土、碎石和含碎石粉质粘土,厚度一般介于 6~12 m 之间,最深位置为厂房西角处,厚度达 13.8 m。由于地下水位较高,地层多呈可塑状,与基岩接触部位多呈软塑状。

②滑带(面):潜在滑坡体滑动面多位于覆盖层与风化炭质页岩的接触部位,由于地下水的浸润多呈可塑~软塑状,力学性质差。根据深孔侧向监测资料, ZK8、ZK12、ZK13 和 ZK15 变形深度位于强风化炭质页岩内,通过剖面形态判断主要由于该处基岩突出,在上部较大的推力作用下致使突出部分基岩发生滑动。

③滑床:潜在滑坡体滑床为强风化的炭质页岩,黑色泥炭质结构,页理构造,岩芯主要呈土柱状,强度较低。

(3) 变形特征

根据对潜在滑坡体变形破坏特征分析,主滑方向为 112°。目前厂房地面以及墙体出现开裂现象,由于

粉矿仓后部堆载影响,粉矿仓后部厂房变形出现加剧迹象,与柱相接的地面出现明显的鼓胀现象。裂缝多位于厂房的南侧,裂缝走向介于 $65^{\circ} \sim 100^{\circ}$,分布于柱脚的东侧,裂缝宽度介于 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 。扶壁挡墙顶部目前出现外倾的现象,外倾幅度达 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 。

2.2 潜在滑坡体活动性分析

为查明潜在滑坡体变形情况,同时为下一步设计工作提供依据,对厂区范围内进行了地表变形监测和深孔侧向位移监测。

从地表形变资料来看,位于粉矿仓顶部的两个观测点存在较为明显的下沉,其最大沉降量已达 3.2 mm ,其它各点没有明显沉降;各变形观测点呈现走向较为一致的水平位移,走向 SE,但由于量值不大,需要进一步的观测。深孔侧向位移用来查明潜在滑坡体的变形深度及变形速率,在该矿区滑坡体上共布设了 16 个监测孔,各深孔监测结果见图 5 ~ 图 7。

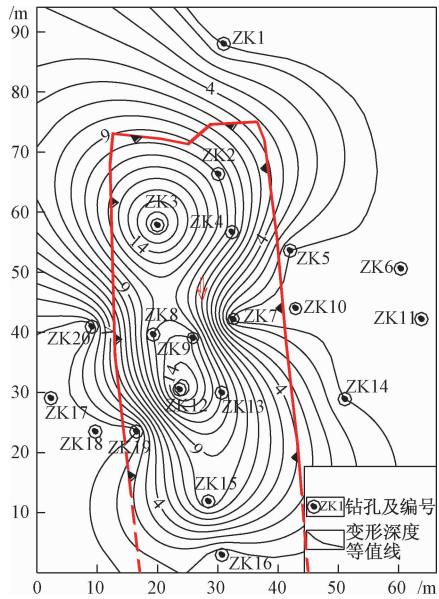


图 5 深孔侧向位移监测变形深度等值线图
Fig. 5 Deep hole lateral displacement monitoring deform depth contour map

通过对各钻孔的监测结果进行整理分析,结合图 3 ~ 图 7 得出,浅层滑面高程 $1\ 030 \text{ m}$ 左右,深层滑面高程 $1\ 015 \sim 1\ 025 \text{ m}$,地下水位线高程 $1\ 028 \sim 1\ 030 \text{ m}$ 。

深层滑面埋深为 17.2 m ,滑面位于地下水位之下,滑动变形明显,累计变形量较大,达到 $16 \sim 19 \text{ mm}$,变形速率较大,且变形处于加速阶段;滑坡体中部滑面平均深度为 12 m ,滑面位于地下水位之下,累计变形量达到 $6 \sim 10 \text{ mm}$,变形速率虽未表现出加速状态,但变形速率比较大;滑坡体前部滑动带平均深度为 9 m ,

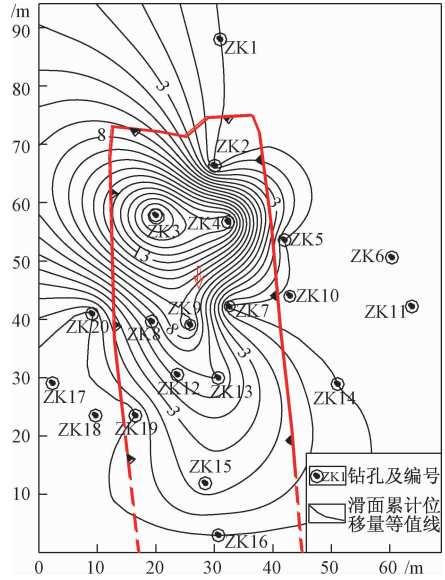


图 6 深孔侧向位移监测滑面累计位移量等值线图
Fig. 6 Deep hole lateral displacement monitoring cumulative amount of displacement contour map

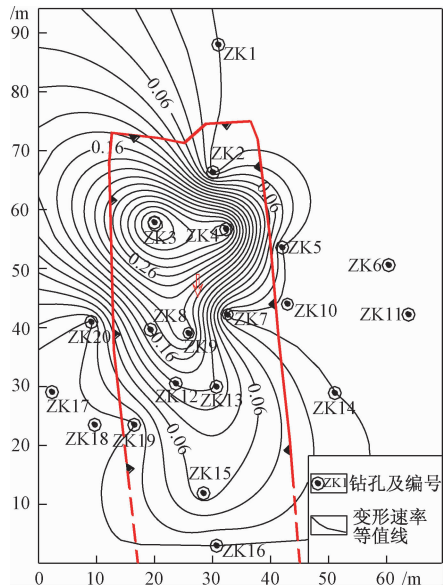


图 7 深孔侧向位移监测变形速率等值线图
Fig. 7 Deep hole lateral displacement monitoring deformation rate contour map

滑面位于地下水位之下,变形速率较小;滑坡体两侧滑面埋深较浅,且变形不明显,目前滑坡体滑面尚未完全贯通,滑坡体前缘剪出口尚未形成。由于深层滑面位于地下水位以下,滑带土长期处于饱和状态,坡体的稳定性主要受坡体后方堆渣体堆载的影响,根据监测结果,粉矿仓后部表现出变形加速的迹象,滑坡判定为推移式滑坡,目前处于挤压变形状态。

浅层滑动面位于坡体中后部,滑面深度介于 $5 \sim$

10 m,滑坡规模较小,滑面深度中后部较深,前部较浅,总之,目前整个潜在滑坡体尚处于挤压变形状态。

3 滑坡成因机制分析

滑坡的形成机制主要受工程地质条件的影响^[7-8],本文主要从裂缝特征、变形特征、地基岩土性质、沉降和地下水条件等方面进行分析。

3.1 裂缝特征

(1)裂缝产生的时间因果关系分析:上边坡弃渣堆载在前,下部边坡厂房地面裂缝在后,且时间关系极为吻合,因此裂缝的产生与厂房后部堆载有关。

(2)裂缝分布范围分析:根据调查裂缝主要分布在磨矿间、自动化操作室和浮选间,而精矿间地表裂缝较少。分析厂房基础设计资料,磨矿间、自动化操作室和浮选间均采用了扩大基础,基础地面位于滑动面之上,而精矿间采用了桩基础,基础埋深达 11 m,位于滑动面以下,桩基提供了较大的水平抗力,阻断了边坡推力的传递路径。因此变形开裂主要分布在磨矿间、自动化操作室和浮选间,而精矿间和厂房前部的混凝土路面没有出现明显变形迹象。

(3)裂隙力学性质关系分析:由于厂房基础多为扩大基础,基础尺寸大,且埋深相对较深,因此基础能够提供较大的抗力。在上部坡体挤压基础的作用下,基础前部形成了较高的压应力区,而厂区内地表为混凝土,抗压性最强,抗剪性次之,抗拉性最差,因此在基础传递的推力作用下,桩间混凝土地面产生了以张性和剪性为主的裂缝。根据变形监测结果推力方向约为 115° ,而裂缝走向多介于 $70^\circ \sim 100^\circ$,与推力方向呈 $15^\circ \sim 45^\circ$ 的夹角,根据力学关系可知张性裂缝与推力方向基本相同,而剪切裂缝与推力之间的夹角为 $45^\circ - \varphi/2$,因此可判断厂房内裂缝主要由边坡推力产生。

3.2 变形特征

通过已有深孔测斜资料分析,目前位于堆渣体后部的 ZK3、ZK4 分别在 17.2 m 以及 9.5 m 处均出现了明显的变形,且平均变形速率达到 $0.29 \sim 0.5 \text{ mm/d}$ 。而厂房附近的 ZK9、ZK12、ZK13 分别在 13 m、16 m 和 11 m 也出现了明显的水平向位移,变形速率达到 $0.16 \sim 0.28 \text{ mm/d}$,从变形深度和变形速率说明上边坡堆渣是产生推力的主因。

3.3 地基岩土性质

滑坡工程地质剖面图揭示,出现裂缝厂区正好处于松散层堆积在基岩凹形槽内顶部,两侧基岩埋深很浅,没有发生开裂。凹形槽内堆积的松散地层均匀性、

固结性很差。在受到边坡堆载推力的作用下,相对于基岩更容易产生位移和不均匀沉降。

3.4 沉降

根据工程地质剖面图揭示,主厂房地基为土岩组合地基,松散覆盖层最大厚度可达 13 m,虽然主要构筑物以及设备的基础采用了扩大基础甚至桩基础,但构筑物基础持力层的不同以及构筑物和附属设施之间持力层的不同均易产生不均匀沉降而出现变形开裂。主厂房西侧总仓库基础亦位于土岩组合地基上,根据其前部挡墙开挖断面揭示基础一半位于风化基岩上,一半位于松散堆积层上。目前在土岩结合部位房屋出现了明显的变形开裂,由此可见基底岩土不均引发的不均匀沉降也是出现变形开裂的原因之一。

3.5 地下水条件

地下水位较浅,位于滑面之上,滑带土长期处于饱和状态,力学性能降低,加快了滑坡体的变形和发展(图 3)。

综上所述,潜在滑坡体的形成机理为:厂区岩土体工程地质条件不良是发生潜在滑坡体的前提条件,堆渣是滑坡加剧变形的最主要原因,厂房以及总仓库均建设在土岩组合地基上,不均匀沉降也对厂房的变形开裂造成一定的影响,而厂区范围内地下水极为丰富,地下水的作用加快了潜在滑坡体的变形和发展,各种因素之间的相互影响将会导致滑坡的变形失稳。

4 潜在滑坡体稳定性评价

由于潜在滑坡体具有浅层和深层两层滑动面,深层滑面长期处于地下水位以下,滑带土长期处于饱和状态,因此降雨工况对滑坡体深层滑面滑动的影响不大;磨矿间后部堆渣体内部形成的浅层滑面位于地下水位以上,受降雨的影响较大。滑坡稳定性评价方法主要有定性评价和定量评价两种方法,本文主要通过定性定量相结合的方法对滑坡稳定性进行评价。

4.1 定性评价

通过上述滑坡体定性分析可知:目前钻孔揭示潜在滑坡体均处于挤压变形状态,中后部变形量大,前部变形量小,处于极限平衡状态,随着连续降雨或暴雨和后部堆渣体的继续堆载,变形将进一步加剧,若不进行治理潜在滑坡体有可能进一步发展进而发生滑动形成滑坡威胁厂房和矿区工程经济活动。

4.2 定量评价

4.2.1 试验数据统计

根据室内岩土测试成果依据《岩土工程勘察规范》,按如下公式进行数理统计:

平均值： $f_m = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n}$ 标准差： $\sigma f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n f_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n f_i)^2}{n} \right]}$ 变异系数： $\delta = \frac{\sigma f}{f_m}$ 标准值： $f_k = \gamma_s \cdot f_m$ $\gamma_s = 1 \pm \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta$

式中： f_i ——岩土的物理力学指标数据；
 n ——数据的个数；
 γ_s ——修正系数。
由于勘察区地下水位较高，滑动面一般位于地下水位以下，且整个潜在滑坡体处于挤压变形状态，故剪切试验选取液限状态下的峰值强度作为剪切强度。将各钻孔中的相应的试验数据进行统计，其结果见表 3。

表 3 各钻孔中的相应的试验数据
Table 3 Each borehole corresponding test data

钻孔编号	取样深度/m	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	钻孔编号	取样深度/m	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
ZK3	7 ~ 7.15	11.0	8.0	ZK3	11.5 ~ 11.65	16.0	5.0
ZK3	15 ~ 15.15	14.0	8.0	ZK3	16 ~ 16.15	12.0	5.0
ZK7	5.8 ~ 5.95	10.0	5.0	ZK9	11.0 ~ 11.15	11.0	7.0
ZK12	6.5 ~ 6.65	13.0	8.0	ZK13	6.0 ~ 6.15	12.0	7.0
ZK13	8.0 ~ 8.15	12.0	7.0	ZK18	6.6 ~ 6.75	10.0	8.0
ZK18	8.6 ~ 8.75	11.0	6.0				
平均值		12.00	6.73	平均值		12.00	6.73
变异系数		1.79	1.27	变异系数		1.79	1.27
标准差		0.15	0.19	标准差		0.15	0.19
统计修正系数		0.95	0.93	统计修正系数		0.95	0.93
标准值		11.35	6.27	标准值		11.35	6.27

4.2.2 计算参数综合选定

稳定性计算公式中需要确定的指标有：土体的容重(γ)和滑动面(带)的粘聚力(C)和内摩擦角(φ)。根据土工实验测定潜在滑坡体容重为 19 ~ 20.5 kN/m³ 之间，计算中取天然容重为 20.0 kN/m³，饱和容重为 21.0 kN/m³。

滑带土参数选取是滑坡体稳定性计算的重点，理应采用试验数据的统计结果，考虑到试验值仅是对局部点位强度指标的测试，且剔除了试样中的大量粗颗粒(>2 mm)物质，因此仅采用试验数据计算出潜在滑坡体的稳定性偏小。根据对潜在滑坡体的定性分析以及对稳定性进行反演分析，结合试验数据统计结果综合确定出潜在滑坡体滑动带的物理力学参数见表 4。由于地下水位埋深很浅，滑动面位于地下水位以下，因此暴雨或者连续降雨工况对滑动带物理力学参数影响不大，仅考虑地下水位的升高造成滑坡体重度加大作用的影响。

表 4 各断面滑带土物理力学参数
Table 4 Physical and mechanical parameters of soil in each section sliding zone

断面编号	容重 γ /(kN/m ³)		粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
	天然状态	饱水状态		
I - I'	20	21	11.3	6.8
II - II'	20	21	11.3	7.1
III - III'	20	21	11.3	7.3

4.2.3 潜在滑坡体稳定性计算

根据上述滑面抗剪强度选取参数，按照《岩土工程勘察规范》GB50021—2001 推荐的公式对滑坡体的稳定性进行验算。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j) + T_n}$$

式中： K ——稳定系数；
 T_i ——作用于第 i 块滑面上的滑动分力(kN/m)，出现与滑动面方向相反的滑动分力时， T_i 取负值； $T_i = W_i \sin \alpha_i + E_{hi} \cos \alpha_i$ ；
 R_i ——作用于第 i 段的抗滑力(kN/m)； $R_i = (W_i \cos \alpha_i - E_{hi} \sin \alpha_i) \tan \varphi_i + c_i l_i$ ；
 E_{hi} ——作用于第 i 块滑体上水平地震力， $E_{hi} = C_i C_z K_h W_i$ ；
 l_i ——第 i 条块滑面长度/m；
 α_i ——第 i 条块滑面倾角/(°)；
 c_i ——第 i 条块滑体的粘聚力标准值/kPa；
 φ_i ——第 i 条块滑体的内摩擦角标准值/(°)；
 C_i ——重要性修正系数，取 $C_i = 1.3$ ；
 C_z ——综合影响系数，取 $C_z = 0.25$ ；
 K_h ——水平地震系数，按基本烈度Ⅶ度考虑，取 $K_h = 0.05$ ；

ψ_i ——第 i 块段的剩余下滑力传递至第 $i+1$ 块时的传递系数($j=i$)。

$$\psi_i = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \varphi_{i+1}$$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \psi_j = \psi_i \cdot \psi_{i+1} \cdot \psi_{i+2} \cdots \psi_{n-1}$$

计算时选定下面三种工况:

工况 I: 正常工况; 工况 II: 暴雨或连续降雨工况;
工况 III: 地震工况。

剩余下滑力计算公式按照《建筑地基基础设计规范》推荐的公式进行计算, 公式如下:

$$F_n = F_{n-1} \psi + \gamma_i G_{nt} - G_{nn} \tan \varphi_n - c_n L_n$$

$$\psi = \cos(\beta_{n-1} - \beta_n) - \sin(\beta_{n-1} - \beta_n) \tan \varphi_n$$

式中: F_n , F_{n-1} ——第 n 块和 $n-1$ 块滑体的剩余下滑力;

ψ ——传递系数;

γ_i ——滑坡推力安全系数;

G_{nt} 、 G_{nn} ——第 n 块滑体自重沿滑动面、垂直滑动面的分力;

φ ——第 n 块滑体沿滑动面内摩擦角标准值;

C_n ——第 n 块滑体沿滑动面土的粘聚力标准值;

L_n ——第 n 块滑体沿滑动面的长度;

考虑到滑坡体一旦发生滑动将造成较大的危害, 设防安全系数采用 1.2。

各断面稳定性计算简图见图 8, 经计算各断面稳定性结果见表 5。

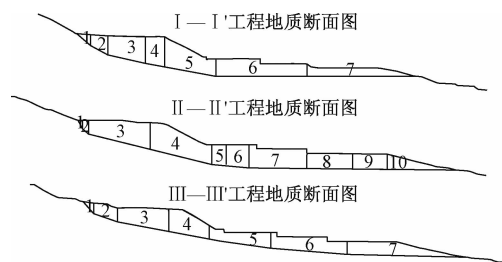


图 8 各断面稳定性计算简图

Fig. 8 Each section stability calculation diagram

表 5 稳定系数计算结果表

Table 5 Stable safety factor calculation result

计算断面	工况	稳定系数	稳定性评价
I - I' 断面	工况 1	1.01	欠稳定
	工况 2	1.00	极限平衡
	工况 3	0.925	不稳定
	工况 1	1.015	欠稳定
II - II' 断面	工况 2	1.00	极限平衡
	工况 3	0.926	不稳定
	工况 1	1.025	欠稳定
	工况 2	1.01	欠稳定
III - III' 断面	工况 2	1.01	欠稳定
	工况 3	0.930	不稳定

根据定量分析结果可知, 暴雨或连续降雨工况下稳定性系数介于 1.0 ~ 1.01 之间, 处于极限平衡状态, 随着后部堆渣体继续堆载, 坡体变形将进一步加剧, 有可能发展形成滑坡而威胁厂房和矿区工程经济活动。

4.3 潜在滑坡体稳定性评价

根据滑坡的定性分析以及定量计算的结果可知: 潜在滑坡体目前处于挤压变形状态, 目前滑动面尚未完全贯通, 降雨工况下稳定性系数介于 1.00 ~ 1.01; 随着雨季的来临, 连续降雨或后部堆渣体继续堆载, 变形将进一步加剧, 若不进行治理潜在滑坡体, 一旦滑动面完全贯通, 滑坡将发生推移式破坏, 严重威胁坡体下方厂房及矿区人类工程经济活动。

5 结论

(1) 根据深部钻孔变形监测显示, 该潜在滑坡体存在浅层和深层两个潜在滑动面, 潜在滑动面呈弧状, 埋深从坡体后缘到前沿逐渐减小。

(2) 潜在滑坡体后部变形明显, 累计变形量较大, 处于加速变形阶段; 中部虽未表现出加速变形状态, 但变形速率比较大; 前部变形速率较小。潜在滑动面(深层滑面)尚未完全贯通, 整体处于挤压变形状态。

(3) 厂房后部堆渣体、场地岩土体条件较差和地下水埋深较浅是该潜在滑坡产生的主要原因。滑坡监测结果表明, 厂房以及粉矿仓出现的变形开裂主要由于后部堆渣加载引发; 厂区内地下水位位于滑动面之上, 对滑带土的物理力学性质影响较大, 加快了滑坡的变形发展。

(4) 监测结果揭示潜在滑坡体变形量中后部大、前部小, 处于极限平衡状态, 随着连续降雨或暴雨和后部堆渣体的继续堆载, 变形将进一步加剧; 滑坡稳定性计算结果表明, 潜在滑坡在暴雨或连续降雨工况下稳定性系数 1.00 ~ 1.01, 处于极限平衡状态。稳定性分析结果与监测结果相符。

本文应用的深孔位移监测方法更加清晰地了解滑坡体不同部位、不同深度的变形滑动特征, 对滑坡及滑坡区的岩土工程条件有了全面的认识, 并且该方法监测到的滑坡变形特征与实际情况比较吻合, 可为潜在滑坡稳定性评价与滑坡灾害防治提供科学依据, 对类似工程也具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 黄茹莘. 矿山排弃场滑坡事故的预防和治理[J]. 安全技术, 2006.

- HUANG Ruxin. The landslide accident prevention and treatment of the mine disposal field [J]. An Quan Ji Su, 2006.
- [2] 赵能浩, 易庆林. 三峡库区黄泥巴蹬坎滑坡渗流稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015 (3): 10 - 16.
- ZHAO Nenghao, YI Qinglin. Stability analysis of seepage stability of yellow mud in the Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2015 (3): 10 - 16.
- [3] 张伟, 赵刚. 贵州长顺山体滑坡事故[EB]. 中国新闻网, 2011.
- ZHANG Wei, ZHAO Gang. The mountain landslide accident in Guizhou Changshun [EB]. China News Network, 2011.
- [4] 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, 32 (5): 1437 - 1451.
- 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, 32 (5): 1437 - 1451.
- [5] 蒋树, 文宝萍, 赵成, 等. 甘肃舟曲泄流坡滑坡活动机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013 (3): 1 - 7.
- JIANG Shu, WEN Baoping, ZHAO Cheng, et al. Analysis on the mechanism of the landslide in Zhouqu, Gansu [J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2013 (3): 1 - 7.
- [6] Tatiana Rotonda, Paolo Tommasi, and Daniela Boldini. Characterization of the Volcaniclastic Material Involved in the 2002 Landslides at Stromboli [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136 (2): 389 - 401.
- [7] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (3): 433 - 454.
- HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in china since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (3): 433 - 454.
- [8] 孙树珩. 滑坡破坏机制及稳定性评价[J]. 铁道建筑, 2011 (9): 87 - 89.
- SUN Shuheng. The failure mechanism and stability evaluation of landslide [J]. Railway Engineering, 2011 (9): 97 - 89.

(上接第 29 页)

- [11] YUAN Lifeng, ZHANG Youshui. Debris flow hazard assessment based on support vector machine [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11 (4): 897 - 900.
- [12] 吴强, 徐林荣, 陈宏伟, 等. 基于故障树分析法的亚热带地区泥石流危险性评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34 (6): 316 - 320.
- WU Qiang, XU Linrong, CHEN Hongwei, et al. Hazard assessment of debris flow in subtropical area based on fault tree analysis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34 (6): 316 - 320.
- [13] 杜国梁, 高金川, 胡新丽. 基于 GIS 和组合赋权的岷县板达沟泥石流危险性评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23 (4): 235 - 241.
- DU Guoliang, GAO Jinchuan, HU Xinli. Debris flow hazard assessment of Banda Gully in Minxian Country based on GIS and combination weighting method [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23 (4): 235 - 241.
- [14] Fanstò Guzzentti, Alberto Carrara, Mauro Cardinali, et al. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study central Italy [J]. Geomorphology, 1999, 31 (1 - 4): 181 - 216.
- [15] 任启龙, 王利, 杜鹏. 大连市北部水源地泥石流危险性评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23 (3): 250 - 256.
- REN Qilong, WANG Li, DU Peng. Hazard assessment of debris flows in Dalian City's northern water head site [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23 (3): 250 - 256.