

# 尖山排土场滑体位移监测及滑坡预报

攀钢(集团)公司矿山设计研究院 钟长江 李 林

本文在尖山排土场滑坡位移监测资料的基础上,从岩土流变特性出发,探讨了应用位移监测结果进行排土场滑坡灾害暴发时间预报的理论性和实用性。并用位移监测资料,通过分析计算,对该排土场的另两次滑坡进行了预报,预报的滑坡暴发时间与实际滑动时间非常吻合

**关键词** 排土场 位移监测 滑坡预报

## The Slipping Body Displacement Inspection and Slipping Slope Prediction in Jianshan Dump

Zhong Changjiang Li Ling

On the basis of the inspection data of slipping slope displacement of Jianshan Dump and starting from the rheological characteristics of the rock-earth body, the paper discusses the theory and practicality of making use of the displacement inspection results to predict the occurrence time of the dump slope slipping disaster. Two occurrences of the dump slope slipping have been predicted through the analysis and calculation of the displacement inspection data and the predicted time coincided very well with that of the real slope slipping.

攀矿尖山排土场设计有效容积 2 644 万 m<sup>3</sup>,采用汽车排土,最大排土段高 240m,最低排土水平 1 435m 至坡脚段高 110~140m,属典型的高阶段压坡脚式组合台阶排土场。该排土场排弃物料以辉长岩为主(占 80%),其次为第四纪风化岩土(占 20%)。构成排土地基的主要为风化花岗岩,零星分布有昔格达粘土及第四纪坡积表土,昔格达粘土岩遇水软化,是影响排土场滑坡的主要软弱地基。该土场投产二十年来,由于排土不断进行,近几年直接覆盖在较厚的粘土层之上,再加上地下水的长期浸泡,使粘土强度大大降低。于 1987 年下半年排土场 1 480m 排土台阶发生异常沉降及局部滑落,坡脚地面出现裂缝并呈波状隆起。变形范围约 120m×35m×100m(长×宽×高)。为了及时掌握滑体活动规律,对滑体进行了位移监测。

### 1 滑体的位移监测系统及监测结果

针对该排土场的实际情况,在坡脚失稳地基表面较均匀地布置了 10 个位移监测点(图 1),于 1988 年 2 月 12 日起开始了位移监测工作。采用激光测距仪量测各测点的水平位移,然后计算其累计水平位移。第一次滑坡从 1987 年下半年起到 1988 年 5 月中旬结束,监测结果见表 1。

由表 1 可见,从滑坡速率看,该滑坡分别经历了蠕变、加速蠕变、蠕变减退三个历程。滑坡位移量大,累计位移达 10 多米,最大位移速率达 0.5m/d 以上,位移量超过 10m 后,位移速率明显增加,预示作排土场大滑动即将来临。

### 2 位移监测在排土场滑坡预报中的应用

1968 年,日本学者斋藤道孝基于岩体加速蠕变经验微分方程:

$$\ln(t_f - t) = a - b \ln \frac{de}{dt} \quad (1)$$

采用作图法建立了滑坡灾害暴发时间预

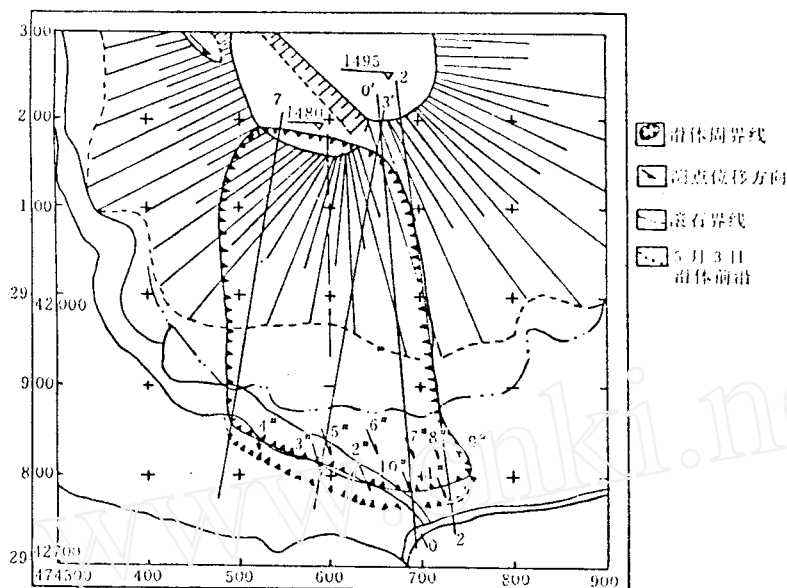


图 1 位移监测点布置

表 1 尖山排土场滑坡位移监测结果

监测日期 (年·月·日)	间隔 时间 d	位移 量 m	速 率 m/d	累 计 位 移 m	累计 时间 d
1988· 2·12~3·16	33	5.570	0.169	5.570	33
1988· 3·17~3·28	12	1.777	0.148	7.347	45
1988· 3·29~4·7	10	1.312	0.131	8.659	55
1988· 4·8~4·11	4	0.895	0.224	9.553	59
1988· 4·12~4·15	4	0.832	0.208	10.386	63
1988· 4·16~4·21	6	2.147	0.358	12.532	69
1988· 4·22~4·29	8	2.185	0.546	14.718	77
1988· 4·30~5·3	4	0.546	0.136	15.263	81

报模型。但由于求解中引入了作图人为插值这一环节,给结果带来了误差,降低了预报的可靠性。

从斋藤的工作可以发现,准确进行滑坡预报的关键在于找出一个能准确反应加速蠕变过程的位移-时间关系式。我们受前人启发,采用蠕变理论,并结合尖山排土场滑坡监测资料,提出了如下四个滑坡预报模型:

$$\text{模型 1 } dt/dy=A_1(B_1-t)t \quad (2)$$

$$\text{模型 2 } dt/dy=(B_2-t)/A_2t \quad (3)$$

$$\text{模型 3 } V=1/[A_3(B_3-t)t] \quad (4)$$

$$\text{模型 4 } V=A_4t/(B_4-t) \quad (5)$$

式中  $y$  ——位移

$t$  ——时间

$V$  ——速率

$A_j, B_j$  ——待定系数,  $j=1\sim4$

## 2.1 滑坡预报模型参数的求解

利用初始条件  $t=t_0, y=y_0$  解模型 1,得如下的一般解:

$$y=y_0+\frac{1}{A_1B_1}\left[\ln\frac{B_1-t_0}{(B_1-t)t_0}\right] \quad (6)$$

同理,可得模型 2 的一般解:

$$y=y_0+A_2(t_0-t)+A_2B_2\ln\frac{B_2-t_0}{B_2-t} \quad (7)$$

由(6)、(7)式可见,当  $t\rightarrow B_j$  时,  $y\rightarrow\infty$ 。所以  $B_j$  即为滑坡暴发时间。我们根据野外实际位

移监测资料可以足够精确地确定模型参数  $A_j$ 、 $B_j$  值。

(6)、(7) 式中,  $A_j$ 、 $B_j$  值我们采用最小二乘法通过如下方程组求得。对模型 1 有:

$$\begin{cases} B_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{A_1} \left( \ln \frac{B_1 - t_0}{(B_1 - t_i)t_i} \right)^2 \right]}{\sum_{i=1}^n \left[ (y_i - y_0) \ln \frac{(B_1 - t_0)t_0}{(B_1 - t_i)t_i} \right]} \\ \sum_{i=1}^n \left[ y_i - y_0 - \frac{1}{A_1 B_1} \ln \frac{(B_1 - t_0)t_0}{(B_1 - t_i)t_i} \right] \cdot \left[ \frac{t_0 - t_i}{(B_1 - t_0)(B_1 - t_i)} - \frac{1}{B_1} \ln \frac{(B_1 - t_0)t_0}{(B_1 - t_i)t_i} \right] = 0 \end{cases}$$

式中  $i$ ——监测次数

模型 2 的  $A_2$ 、 $B_2$  值由如下方程组求得:

$$\begin{cases} A_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_0) (t_0 - t_i + B_2 \ln \frac{B_2 - t_0}{B_2 - t_i})}{\sum_{i=1}^n (t_0 - t_i + B_2 \ln \frac{B_2 - t_0}{B_2 - t_i})^2} \\ \sum_{i=1}^n \left[ y_i - y_0 - A_2 (t_0 - t_i) - A_2 B_2 \ln \frac{B_2 - t_0}{B_2 - t_i} \right] \cdot \left[ \ln \frac{B_2 - t_0}{B_2 - t_i} + \frac{B_2 (t_0 - t_i)}{(B_2 - t_0)(B_2 - t_i)} \right] = 0 \end{cases}$$

对于模型 3、模型 4, 当  $t \rightarrow B_j$  时,  $V \rightarrow \infty$ , 即  $y \rightarrow \infty$ , 方程同样适合于加速蠕变的一般规律,  $B_j$  亦是滑坡的暴发时间。同理, 亦可根据位移监测结果求出  $A_j$ 、 $B_j$  值。

模型 3 的  $A_3$ 、 $B_3$  值满足以下方程组:

$$\begin{cases} B_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{A_3} + t_i^3 \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \\ \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{V_i} - A_3 (B_3 - t_i) t_i \right] (B_3 - t_i) t_i = 0 \end{cases}$$

模型 4 的  $A_4$ 、 $B_4$  值由以下方程组求出:

$$\begin{cases} B_4 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{A_4}{V_i t_i} + \frac{1}{t_i} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{t_i} \right)^2} \\ A_4 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{B_4}{t_i} - 1 \right)^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{V_i} \left( \frac{B_4}{t_i} - 1 \right)} \end{cases}$$

• 32 •

以上四组方程都可将位移监测结果代入后, 用迭代法在计算机上求出  $A_j$ 、 $B_j$  值,  $B_j$  值即为预测的滑坡暴发时间。

## 2.2 滑坡预报模型的预测效果

尖山排土场第一次滑坡后, 我们用本文所述的四种滑坡预报模型对表 1 的位移监测数据进行了最小二乘法回归分析, 应用计算机解上述的四组方程, 分别求出参数  $A_j$ 、 $B_j$  值见表 2, 参数  $B$  值即为预报的滑体发生时间。

表 2 滑坡预报模型参数

模 型	$A$	$B, d$	误 差, d
模型 1	$3.038 \times 10^{-3}$	78.16	0.5
模型 2	$3.278 \times 10^{-3}$	77.35	0
模型 3	$1.656 \times 10^{-3}$	105.66	28
模型 4	0.325	111.30	33

由表 2 可见, 模型 2 精度最高, 模型 1 次之, 而模型 3、模型 4 误差较大。从理论上讲, 模型 1 与模型 3 是等价的, 同理, 模型 2 与模型 4 也等价。那么为什么模型 2 的预报结果符合实际, 而模型 4 误差较大呢? 经过分析, 其原因是, 在用模型 4 求参数时, 我们取了近似计算, 即用平均速率代替了瞬时速率, 由于  $V_i$  用的是  $t_{i-1}$  与  $t_i$  间的平均速率, 而实际数据  $t_{i-1}$  与  $t_i$  间隔较长, 所以造成模型 4 求出的结果误差较大。同理, 模型 1 与模型 3 的差距, 也是这个原因, 要提高模型 3 或模型 4 的精度, 其途径应是加密位移监测次数, 缩短监测的间隔时间。只要解决了此问题, 那么模型 2 与模型 4 都是可以应用的, 其预报值将十分接近。同理, 对于模型 1 与模型 3 也一样。

经过如上分析, 我们选择模型 2 作为尖山排土场滑坡的预报模型, 用于后几次滑坡的时间预报。

## 2.3 尖山排土场滑坡预报

尖山排土场自第一次滑坡后, 又分别于 1989 年 1 月 26 日和 1989 年 7 月 15 日出现了  
(下转第 52 页)

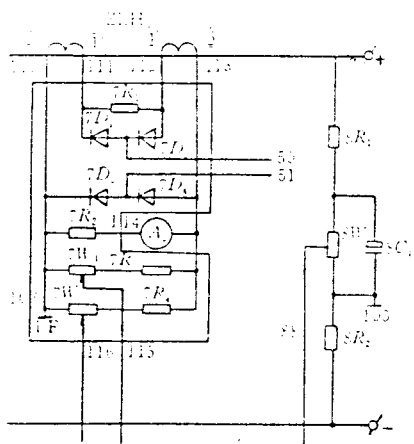


图 8 新型高梯度磁选机采用的直流互感器应用线路  
直流互感器的作用有三点,其一是为了进行直流大电流的测量与调节;其二是便于实现电流的负反馈,由于一次电路与二次电路是隔离的,因而可以方便地取出反馈信号予以综合,它的电流反馈信号由  $7W_2$  取出;其三在过载时进行电流截止负反馈,这一电流信号由  $7W_1$  取出。直流互感器工作的交流电源由 50 和 51 端子引入,它是由一专用的隔离变压器提供的一组单相交流电源,经  $7D_1 \sim 7D_4$  送入互感器的线圈,以提供互感器运行的基本条件。调试时,调节

$7W_1$  的滑动端,使得过流截止保护环节在  $I_s = 1.15I_H = 1.15 \times 1600 = 1840A$  时,发出动作信号。调节  $7W_2$  改变电流反馈信号的强弱,以便选择合适的电流自动调整的深度,一般反馈信号电压在 5V 以内。

## 5 结 语

直流电流互感器的特点是,初级与次级、主回路与控制电源具有电气隔离,次级输出功率大,测量的准确度、线性度较高。线路简单,运行可靠,使用维护简便,因而非常适合大型电磁选矿设备的大电流晶闸管供电控制系统,用于直流大电流的准确测量与调节、系统的自动控制与安全保护等方面。在选用直流互感器时,初级回路额定电流应尽量接近直流互感器初级电流,不宜偏大选用,以保证准确度和线性度。

目前,在它的应用线路里尚有不足之处,这就是在起始位置附近的低电流的测量时存在一个工作盲区,故在对电量小于额定值 5% 以下的测量时,二次仪表的指示无实际意义,故在设计与应用时均应注意的。

(收稿日期 1994 07 28)

(上接第 32 页)

表 3 尖山排土场滑坡预报结果

滑 坡 名 称	监测日期 年·月·日	时间 d	位移量 m	预报滑坡时间 年·月·日
尖 山 排土场	1988·9·17	10	1.042	
	1988·9·27	20	1.428	
	1988·10·7	30	1.750	1989·1·26
	1988·10·27	50	2.043	$B=141.206d$
3# 滑坡	1988·11·26	80	2.230	
	1988·12·27	111	3.328	
	1989·1·26	141	5.287	
	1989·5·10	7	1.931	
尖 山 排土场	1989·5·17	14	3.149	
	1989·5·24	21	3.855	1989·7·15
	1989·5·31	28	4.256	$B=73.104d$
	1989·6·14	42	5.267	
4# 滑坡	1989·7·1	59	8.836	
	1989·7·15	73	10.857	

两次滑坡,我们运用上述方法,通过对位移监测

数据的分析计算,求出了相应的  $B$  值,对这两次滑坡的暴发时间作出了准确的预报。该两次滑坡发生前的位移监测数据及预报结果见表 3。

## 4 结 论

(1) 位移监测是排土场滑坡分析预报的重要手段,以岩土体流变理论为基础,可以启用现场实际位移监测数据建立滑坡的动态预报模型,具有较强的实用性,其结果可满足排土场滑坡预报的精度要求。

(2) 将模型与计算机终端连接可以建立自动预报系统,利用排土场实测的新数据可逐步修正预报结论。

(收稿日期 1994 05 10)