

# 堆积体滑坡稳定性的实时定量评价法

李迪<sup>1</sup>, 张漫<sup>1</sup>, 李亦明<sup>1</sup>, 李运栋<sup>2</sup>

(1. 长江科学院 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430019;

2. 长江水利委员会 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 介绍一种以钻孔倾斜仪深部变形监测为基础的评价堆积体滑坡完整性程度(破坏程度)的完整性指标  $S_i$ (破坏性指标  $S_p$ )的方法, 该方法可以在施工过程中根据孔口累计变形中滑带和滑坡体累计变形的各自变化关系计算出  $S_i$  和  $S_f$  指标值, 实时定量评价滑坡施工过程中滑带自下而上渐进破坏过程中稳定性的变化。破坏采用相对变形峰值标准, 根据这种破坏标准可以看到, 滑坡以滑带破坏为标志, 滑带破坏则以滑带上盘破坏为标志。滑坡完整时对应  $S_i = 1$ ,  $S_f = 0$ ; 滑坡完全破坏时  $S_i = 0$  和  $S_f = 1$ , 不同破坏程度对应于[0, 1]之间的某一值。工程实例表明, 该方法不仅行之有效, 而且非常方便。

**关键词:** 边坡工程; 堆积体滑坡; 稳定性; 实时定量评价; 深部变形; 监测

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)10 - 2146 - 07

## REAL-TIME QUANTITATIVE ASSESSMENT METHOD OF STABILITY FOR TALUS LANDSLIDE

LI Di<sup>1</sup>, ZHANG Man<sup>1</sup>, LI Yiming<sup>1</sup>, LI Yundong<sup>2</sup>

(1. *Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430019, China*; 2. *Changjiang Institute of Survey, Planning and Research, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei 430010, China*)

**Abstract:** The mechanical parameters and boundary conditions of landslide often change with time during the process of construction. Traditional quantitative assessing methods of landslide stability, such as limit equilibrium method, finite element method etc., are pretty difficult to simulate the dynamic mechanical behavior of landslide during the process of construction at the present time, so it cannot achieve the real-time quantitative assessment for landslide stability. A real-time quantitative assessing method of landslide stability in period of constriction is proposed. The new method based on deformation monitoring at depth of landslide may avoid the errors caused by the no determinacy of calculating models, mechanical parameters and boundary conditions etc. According to the respective relationship of the accumulated deformation of sliding surface and slip mass, by calculating the value of  $S_i$  and  $S_f$ , the real-time quantitative assessing the stability of sliding surface from below to above in the progress of construction is conducted. The failure criterion is the peak value of relative deformation. According to the criterion, the symbol of landside instability is the failure of sliding zone which is marked by the destroy of sliding zone's hanging wall. When  $S_i = 1$  or  $S_f = 0$ , the landside is complete stability; when  $S_i = 0$  or  $S_f = 1$ , the landslide is eventual failure. Different destructive correspond a value between 0 and 1. Moreover, it shows that the method is easy to use and very efficient in application.

**Key words:** slope engineering; talus landslide; stability; real-time quantitative assessment; deformation of landslide in depth; monitoring

**收稿日期:** 2008 - 06 - 12; **修回日期:** 2008 - 07 - 28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40772193); 中央级公益科研院所基金资助项目(YWF200817)

**作者简介:** 李迪(1937 -), 男, 1961年毕业于武汉大学数学系, 现任教授级高级工程师, 主要从事岩石力学试验和大坝安全监测方面的研究工作。E-mail: zhangmancky@163.com

## 1 引 言

定量评价边(滑)坡稳定性的分析方法很多, 以物理意义直观、评价方法简单的刚体极限平衡方法出现最早, 虽然不能考虑介质变形, 但至今仍被岩土工程界广泛应用<sup>[1, 2]</sup>。20 世纪 60 年代末 70 年代初, 在我国发展起来的有限元法可以将研究的介质由刚体发展到变形体, 并在嗣后的 40 多年经历了数值模拟由连续介质发展到非连续介质, 由小变形分析发展到大变形分析, 由二维分析发展到三维分析的飞速发展的阶段<sup>[3~8]</sup>。边(滑)坡稳定性的定量评价方法随数值模拟方法的发展而不断发展。近几年来, 根据 O. C. Zienkiewicz 等早年提出的抗剪强度折减概念发展起来的有限单元或有限差分强度折减法为更多的从事工程应用的人们所青睐, 并逐步应用于边(滑)坡的稳定性评价中<sup>[9~12]</sup>。大量的边(滑)工程实践表明, 处于施工过程中的堆积体滑坡, 其滑带的滑动面通常是自滑带的下盘向上盘逐渐变化的<sup>[13~15]</sup>, 因此力学参数也随滑动面的变化而变化, 变化着的参数(如抗剪强度参数  $c$  和  $f$ )一般很难使上述传统的数值模拟方法跟随施工过程动态进行。

本文要介绍的基于堆积体滑坡深部变形监测的稳定性评价方法, 可以作为工程施工阶段评价滑坡稳定性动态变化的方法, 该方法不仅可以避免上述计算方法由于在计算模型、物理力学参数和地质边界条件方面的不确定性带来的误差, 而且可以做到实时和定量。同时, 文中给出了一个符合工程实际、不具随意性的破坏标准, 以及对施工过程长达 4 a 的堆积体滑坡的稳定性进行评价的工程实例。

## 2 滑坡深部变形监测

### 2.1 监测方法

本文采取铅直向活动式钻孔倾斜仪, 测量不同深度的水平变形(挠度), 探头长 50 cm, 铝合金质测量套管, 套管穿过滑坡滑带 3~5 m。通常每月观测 1 次, 变形加速时加密。观测顺坡向(用  $A$  表示)和顺河流向(与顺坡向垂直, 用  $B$  表示)2 个方向。实践证明, 钻孔倾斜仪测量资料丰富, 成果连续、稳定, 受外界环境影响少, 能及时发现滑坡深部滑带的发生、发展、滑带的位置和厚度, 有其他地表测量仪器难以替代的优点, 是一种监测边(滑)坡稳定性行

之有效的方法。

### 2.2 监测成果

通常根据监测数据整理成累计变形 - 深度曲线、相对变形 - 深度曲线、相对变形过程线和累计变形过程线, 供分析变形空间、时间变化的规律。累积变形过程线常整理分析孔口高程的, 相对变形过程线常整理分析滑带各高程的, 必要时也可整理其他有关高程的各种曲线, 甚至变形方向随深度的变化曲线等。但本文只涉及顺坡向( $A$ )的累计变形 - 深度曲线、相对变形 - 深度曲线、累计变形 - 时间曲线和相对变形 - 时间曲线, 本文称后二者分别为累计或相对变形过程线。

#### (1) 累计变形 - 深度曲线

倾斜孔测点  $i$  ( $i$  由孔底向上依次记为 0, 1, ...,  $n$ ,  $n$  为孔口总数, 下同)某时刻  $t$  的累计变形  $W_i^t$  是指该点在该时刻相对孔底(不动点 0)初始时刻  $t_0$  水平变形的变化, 假定倾斜仪孔铅直, 初始时刻倾斜孔每点变形  $W_i^{t_0} = 0$ , 则  $W_i^t - W_i^{t_0} = W_i^t$ , 简记为  $W_i$ 。累计变形沿深度的分布曲线即累计变形 - 深度曲线。顺坡方向常记以  $A^+$ , 逆坡向记  $A^-$ ; 顺河流向常记以  $B^+$ , 逆河流向记以  $B^-$ , 以下同。没有标明“+”, “-”时, 则一般表示顺坡向和顺河流向。本文只研究顺坡( $A$ )方向的变形特性。

#### (2) 相对变形 - 深度曲线

倾斜孔某点  $i$  某时刻  $t$  的相对变形  $\Delta W_i$  是指两相邻测点  $i$  与  $i-1$  在  $t$  时刻累计变形之差。因此, 相对变形就是水平向剪切变形, 相对变形沿深度的分布曲线即相对变形 - 深度曲线。相对变形  $\Delta W_i$  可表示为

$$\Delta W_i = W_i - W_{i-1} \quad (1)$$

$$W_i = \sum_{j=1}^i \Delta W_j \quad (2)$$

孔口累计变形可表示为

$$W_n = \sum_{j=1}^n \Delta W_j \quad (3)$$

孔口累计变形是自孔底不动点至孔口之间各测点相对变形的总和。

某点  $i$  (含孔口  $n$ ) 某时刻  $t$  的累计变形是该点以下自孔底向上各点相对变形累加的总和。

#### (3) 相对变形过程线

相对变形随时间的变化曲线, 简称相对变形过

程线，有时也以相对变形 - 时间曲线来表示。

(4) 累计变形过程线

累计变形随时间的变化曲线，简称累计变形过程线，有时也以累计变形 - 时间曲线来表示。

### 3 滑坡稳定性评价的 $S_i(S_f)$ 指标分析法

#### 3.1 评价稳定性的客观基础

本文研究的堆积体滑坡主要指存在顺层缓倾角潜在滑带的基岩滑坡。在深部变形监测中遇到的长江干流上的黄腊石滑坡、清江干流上的茅坪滑坡以及鄂西水布垭电站近坝区的多个滑坡都属这类滑坡。

在利用铅直向活动式钻孔倾斜仪进行顺层缓倾角堆积体滑坡深部变形监测时可以看到，滑坡破坏以潜在的滑带破坏为标志，滑带破坏以滑带上盘破坏为标志。进一步监测过程中发现，滑带的破坏首先在滑带的下盘(主滑面)发生，然后自下盘向上盘逐渐发展。这种现象在水布垭电站近坝区出现滑动的3个滑坡上都可以观测到。在既有开挖又有加固的滑坡施工过程中，滑带的上述过程有时长达数年<sup>[13-15]</sup>。在分析节2.2整理出的4类曲线成果中发现，相对变形 - 深度曲线是确定滑动发生、滑带位置及厚度的依据；滑带各高程相对变形过程线是分析滑带变形破坏发生原因和发展过程的有效手段；而孔口累计变形 - 深度曲线提供了实时定量评价堆积体滑坡稳定性评价的  $S_i(S_f)$  指标分析法的可靠基础。

#### 3.2 累计变形 - 深度曲线的概化

堆积体滑坡的孔口累计变形的形式一般如图1(a)所示。孔口累计变形是滑带下盘以下至孔底不动点、滑带(上、下盘之间)和滑带以上至孔口(滑坡地表)相对变形的总和。为便于分析，它可以概化为由3段折线组成，如图1(b)所示，横坐标  $W$  表示孔口累计变形，纵坐标  $H$  表示滑坡地表(钻孔孔口)以下的深度，向下为正。概化曲线的组成和含义<sup>[15]</sup>如下：

- (1) 在  $W-H$  平面坐标系中，概化曲线由  $AB$ ， $BC$  和  $CN$  三段折线组成。
- (2) 点  $B$  表示滑带的下盘，点  $C$  表示滑带的上盘，折线  $BC$  表示滑带段变形曲线； $W_B$ ， $W_C$  分别为点  $B$ ， $C$  的累计变形。

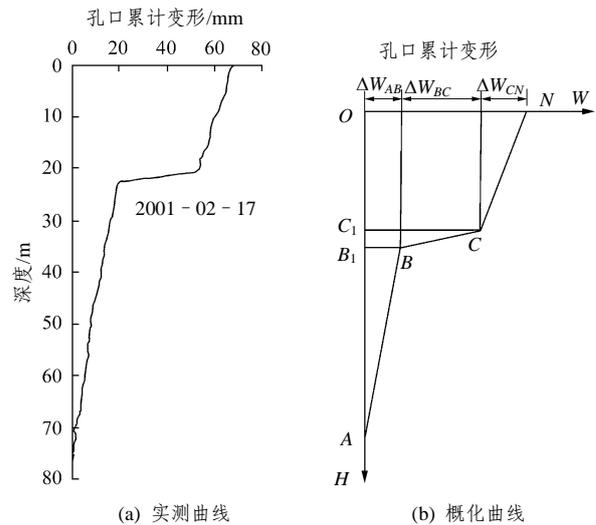


图1 孔口累计变形 - 深度分布概化曲线

Fig.1 Relation between accumulative deformation of the hole entrance and depth

(3) 点  $N$  表示孔口地表，折线  $CN$  表示滑带上盘以上直至地表滑坡段的变形曲线。

(4) 点  $A$  表示钻孔孔底，为变形参考点(不动点)，折线  $AB$  表示滑带下盘(主滑面)以下直至孔底滑坡段的变形曲线。

(5) 点  $B$ ， $C$  在纵轴( $OH$ )上的投影  $B_1$ ， $C_1$  分别代表滑带下、上盘在地表以下的位置， $\overline{C_1B_1}$  表示滑带的厚度。

(6) 以  $W_N$ ， $W_C$ ， $W_B$  和  $W_A$  分别表示  $N$ (孔口)、 $C$ (滑带上盘)、 $B$ (滑带下盘、主滑面)和  $A$ (孔底)的累计变形， $A$  为相对不动点，则有

$$\Delta W_{BC} = W_C - W_B \tag{4}$$

$$\Delta W_{CN} = W_N - W_C \tag{5}$$

$$\Delta W_{AB} = W_B - W_A = W_B \tag{6}$$

式中： $\Delta W_{BC}$ ， $\Delta W_{CN}$ ， $\Delta W_{AB}$  分别为滑带、上盘以上滑坡体和下盘以下滑坡体的累计变形。由式(4)~(6)可得

$$\Delta W_{BC} + \Delta W_{CN} + \Delta W_{AB} = W_N \tag{7}$$

由式(7)可以看出，式(7)与图1(b)表示的几何含义一致，即孔口累计变形为式(4)~(6)左边3部分各自累计变形的总和，右边为  $ON$  线段的长度。并且可以看到，孔口累计变形 - 深度曲线是整个滑坡体变形性状的反映。

#### 3.3 $S_i(S_f)$ 指标分析法

如节 3.1 中指出的, 滑坡的破坏是以滑带的破坏为主要标志, 在开挖与加固同时的滑坡施工过程中, 存在顺层缓倾角滑带的滑坡破坏过程可能很长, 而且, 在滑带破坏过程中, 滑带变形  $\Delta W_{BC}$  逐渐增加, 而滑带以上滑坡体的变形  $\Delta W_{CN}$  逐渐减少。为了按此规律找到一个衡量滑带破坏程度的定量指标, 并根据该指标的变化实时评价滑坡稳定性的定量变化, 定义:

$$S_i = \frac{\text{滑带上盘以上至孔口的累计变形}}{\text{滑带下盘以上至孔口的累计变形}} = \frac{\text{孔口的累计变形} - \text{滑带上盘的累计变形}}{\text{孔口的累计变形} - \text{滑带下盘的累计变形}} = \frac{\Delta W_{CN}}{\Delta W_{BC} + \Delta W_{CN}} \quad (8)$$

$$S_f = \frac{\text{滑带上盘的累计变形} - \text{滑带下盘的累计变形}}{\text{滑带下盘以上至孔口的累计变形}} = \frac{\Delta W_{BC}}{\Delta W_{BC} + \Delta W_{CN}} = 1 - S_i \quad (9)$$

$S_i$ ,  $S_f$  的物理意义和特性如下:

(1)  $S_i$ ,  $S_f$  都分别为一个比值, 分母为滑带下盘与孔口之间的累计变形;  $S_i$  的分子为滑带上盘以上滑坡体的累计变形  $\Delta W_{CN}$ ,  $S_f$  的分子为滑带的滑动变形  $\Delta W_{BC}$ , 当滑带下盘滑动变形尚未产生即  $\Delta W_{BC} = 0$  时, 则  $S_i = 1$ ,  $S_f = 0$ , 视滑带完整, 滑动尚未开始; 当滑带上盘达到破坏即  $\Delta W_{CN} = 0$  时,  $S_i = 0$ ,  $S_f = 1$ , 视滑带和滑坡达到破坏, 并分别称  $S_i$  和  $S_f$  为滑坡完整性指标和破坏性指标,  $S_i$ ,  $S_f$  的变化区间分别为  $[1, 0]$  与  $[0, 1]$ 。

(2) 根据式(5)和(6)定义的  $S_i$ ,  $S_f$  指标不仅有上述 0 和 1 两个极端情况下明确的物理意义, 而且  $S_i$ ,  $S_f$  两个比值的分子和分母都分别是两个累计变形之差, 这样可以消除观测中同时发生的相同观测误差, 突出滑带及上盘以上至孔口间变形的变化和  $S_i$ ,  $S_f$  的变化规律。

(3) 根据每次钻孔倾斜仪的观测值, 可以很快计算出一对  $S_i$ ,  $S_f$  值, 对比前后  $S_i$ ,  $S_f$  值的变化, 就可以实时、定量评价滑坡稳定性的变化。

(4) 与传统的滑坡稳定性定量评价法相比, 它避免了确定计算模型、计算参数、滑坡边界与实际不一致所带来的误差, 这是一个突出的优点, 当前的所有数值计算模型是很难做到这一点的。

## 4 工程实例

### 4.1 工程概况

水布垭电站坝址区下游顺层堆积体滑坡位于左岸大崖以东脚下, 上距坝轴线 800 余米, 距溢洪道挑流鼻坎 300 余米, 距最深冲点 60 余米。由主滑坡体及东、西两级滑坡体经过局部解体而成, 结构较复杂。滑坡总面积  $0.196 \text{ km}^2$ , 滑体厚度 25~40 m, 最厚约 64.8 m。总体积约  $5.88 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

该滑坡边界较清楚, 西侧为大崖陡壁, 东侧以榨房沟为界; 后缘高程 430 m, “圈椅”状地形明显; 滑体前缘呈向南突出的弧形, 剪出口高程 200~210 m。滑坡在平面形状上呈一长形的喇叭, 东西宽 130~370 m, 最宽 460 m, 南北长 870 m。在滑坡两侧发育有东西 2 个次级滑体, 在平面形态上皆呈扇形分布。

主滑体和东西两侧的次级滑体地表主要为砾质黏土夹少量碎石, 厚度 1~10 m, 黏土含量多, 结构较密实; 滑体中部为基岩解体大块体夹黏土及碎石、碎屑或黏土夹碎石、块石, 分布连续。滑体中上层为大块石、块石夹碎石及黏土, 厚度 5.3~40.7 m; 滑带主要分布于滑体与基岩之间, 厚度 0.1~9.5 m, 呈带状展布; 次滑带主要分布于滑体中部, 厚度 0.20~3.15 m, 连续性、完整性略差(见图 2)。

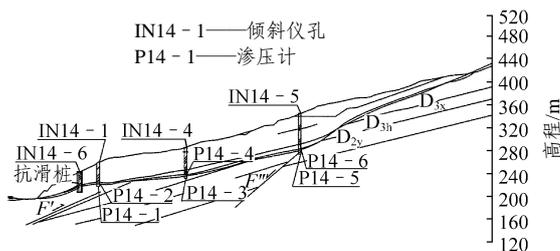


图 2 水布垭滑坡深部变形监测断面布置图

Fig.2 Layout diagram on monitoring section of a landslide's deep deformation of Shuibuya slope

### 4.2 滑坡稳定性评价的 $S_i(S_f)$ 指标分析法

#### (1) 基本资料

本文根据前缘埋设的 IN14-6 孔自 2002 年 5 月~2006 年 3 月期间观测计算的  $S_i$  指标变化过程线进行分析(见图 3(a)), 也可根据相应的  $S_f$  变化过程线进行评价。为节省篇幅,  $S_f$  指标变化过程线未予同时列出。

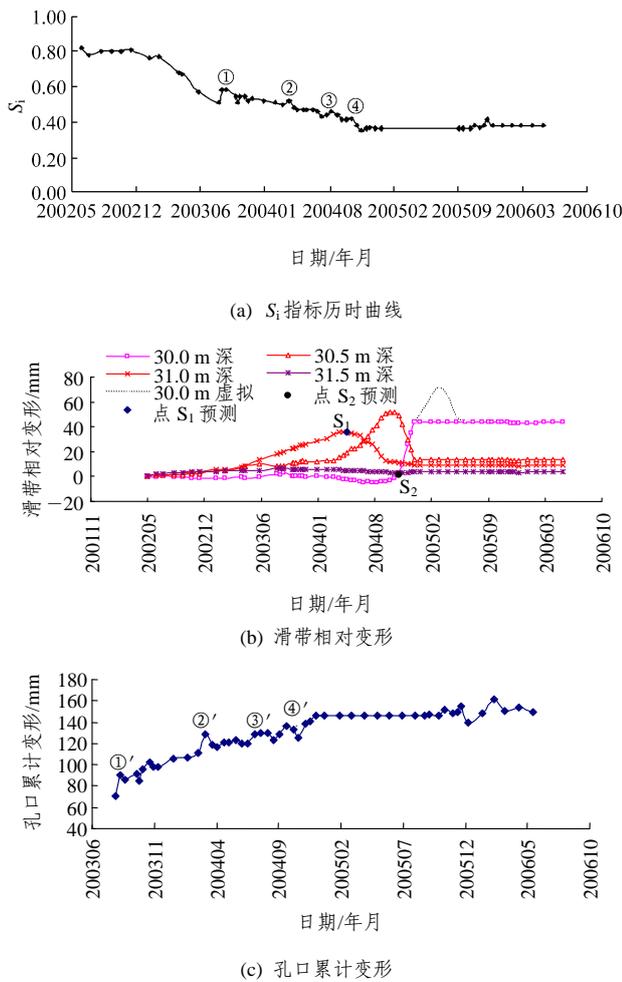


图3 水布垭滑坡 IN14-6 孔  $S_i$  指标及其变形过程线

Fig.3 Relation of index  $S_i$  and deformation process of Shuibuya landslide for the hole of No. IN14-6

为清楚了解滑带的具体破坏过程，配合分析  $S_i$  指标的变化原因，更有利于评价滑坡稳定性的变化，图 3(b)给出了滑带相对变形过程线，表 1 对破坏过程中发生的某些特征事件作出了文字纪要。图 3(c)给出了相应  $S_i$  指标变化过程的孔口累计变形过程线。

(2) 稳定性评价

堆积体滑坡稳定性评价的  $S_i(S_f)$  指标分析法是适用于滑坡施工期的实时定量方法，它是在视建立观测初始值时滑坡完整性指标  $S_i = 1$ ，相应的破坏性指标  $S_f = 0$  的前提下，告诉人们在施工影响条件下某时刻滑坡完整性(破坏性)的变化，而这种变化是以  $S_i(S_f)$  的变化定量表征的，方法行之有效，非常方便，水布垭电站近坝区上述滑坡稳定性变化具体评价如下：

① 从图 3(a)和表 1 可以看出，位于滑坡前部的 IN14-6 孔，2002 年 5 月 12 日建立基准值，2002 年

表 1 滑坡前缘  $S_i(S_f)$  指标(部分)变化表

Table 1  $S_i(S_f)$  index (the part) in front edge of landslide

| 日期/年月日   | $S_i$ | $S_f$ | 历时(前后相隔)/d | 孔口累计变形/mm | 备注                                  |
|----------|-------|-------|------------|-----------|-------------------------------------|
| 20020623 | 0.82  | 0.18  | 42         | 15.3      | 2002 年 4 月前部开挖，2002 年 5 月 12 日建立基准值 |
| 20020823 | 0.80  | 0.20  | 104(62)    | 27.2      |                                     |
| 20030220 | 0.77  | 0.23  | 285(181)   | 50.0      |                                     |
| 20030501 | 0.67  | 0.33  | 355(70)    | 65.5      |                                     |
| 20030824 | 0.51  | 0.49  | 470(115)   | 71.1      | 下盘 31.5 m 破坏                        |
| 20030903 | 0.58  | 0.42  | 480(10)    | 89.8      | 31.5 m 扩容                           |
| 20040327 | 0.52  | 0.48  | 685(205)   | 128.8     | 破坏到 31.0 m 深，31.0 m 扩容(点 $S_1$ )    |
| 20040425 | 0.47  | 0.53  |            | 116.7     |                                     |
| 20040723 | 0.44  | 0.56  | 803(118)   | 128.2     | 30.0 m 扩容 - 压密转折                    |
| 20040923 | 0.41  | 0.59  | 865(62)    | 128.6     | 破坏到 30.5 m                          |
| 20041010 | 0.41  | 0.59  | 882(17)    | 136.0     | 30.5 m 扩容                           |
| 20041027 | 0.38  | 0.62  |            | 132.6     | 上盘变形加速(点 $S_2$ )                    |
| 20041124 | 0.36  | 0.64  |            | 138.8     |                                     |
| 20050108 | 0.36  | 0.64  | 972(90)    | 145.9     | 2005 年 1 月 21 日 30 m 处卡孔观测停止        |
| 20050908 | 0.36  | 0.64  | 1215(243)  | 145.9     | 2005 年 9 月 8 日恢复观测                  |
| 20051025 | 0.38  | 0.62  |            | 146.4     |                                     |
| 20051125 | 0.38  | 0.62  |            | 154.5     |                                     |
| 20051220 | 0.38  | 0.62  | 1318(103)  | 139.7     | 30.5 m 扩容停止                         |
| 20060422 | 0.38  | 0.62  | 1441(123)  | 153.4     |                                     |
| 20060526 | 0.38  | 0.62  | 1462(21)   | 149.3     |                                     |

注：历时指相隔建立基准值日的天数；前后相隔指相邻 2 次计时间隔的天数；备注中的 31.5、31.0、30.5 m 均指地表以下的深度。

6 月 23 日的  $S_i = 0.82$ ， $S_f = 0.18$ 。这是由于 230~234 m 高程的上坝公路、抗滑桩早在同年 4 月以前开始施工开挖，由于施工的影响，在 40 d 左右的时间内测孔所在部位的完整性降低了 18%，如果有关各方能共同努力，尽早实施监测，尽早掌握施工对滑坡稳定性的影响，采取相应的防护措施，将更有利于工程的建设。

② 到 2004 年年底，随 230 m 高程抗滑桩加固完成，220~230 m 高程挡土墙发挥作用，208 m 高程的 4 排固结灌浆和帷幕完成等，滑坡前部基本稳定，稳定时的  $S_i = 0.36$ ，相应  $S_f = 0.64$ 。也就是说，从 2002~2004 年 3 a 间由于施工的影响，滑坡的完整性指数由 0.82 降低到 0.36，相对 2002 年 5 月 12 日的完整性降低了 64%。

③  $S_i$  从 0.82 降低到 0.36 历经了约 2 年 7 个月的时间, 期间  $S_i$  呈持续递降变化过程; 递降变化的原因清楚地表明是滑带自下盘 31.5 m 到滑带上盘 30.0 m 的依次破坏过程所致(见图 3(b)), 相应该过程发生的主要事件简要记录于表 1 中。如滑坡下盘(地表以下 31.5 m)破坏发生于 2003 年 9 月 3 日, 相隔 2002 年 5 月 12 日建立初始值时 480 d, 相应  $S_i = 0.58$ , 指标降低 0.24。地表以下 31.0m, 30.5 m 处先后于 2004 年 3 月 27 和 9 月 23 日达到破坏, 破坏时  $S_i$  分别为 0.52 和 0.41。这里所说的破坏标准是指相对(剪切)变形达到峰值。滑带上盘(30.0 m)于 2004 年 9 月左右开始加速变形(见图 3(b)上点  $S_2$ ), 2005 年 1 月 8 日相对变形达到 43.29 mm, 随即发生“卡孔”, 即测量探头不能通过上盘下放, 观测被迫停止。卡孔前  $S_i$  降低到最低点 0.36。根据图 3(b)的 31.0, 30.5 m 测点的相对变形 - 破坏全过程线的形式和 30.0 m 测点变形已经加速启动的部分曲线段可以推断, 如果不是因为卡孔导致观测中断, 连续发展的变形曲线将如图 3(b)上的虚线所示。

上面关于滑带破坏的标准与判断被 2005 年 9 月该孔的钻孔彩色录像和同年年底紧邻该孔的竖井中的地质调查和抗剪试验资料所验证。主滑面在井口以下 31.0 m 处左右, 混凝土抗滑桩明显开裂, 主滑面上有数毫米厚的黏土, 面连续平整, 有明显擦痕, 沿该面的现场大型直剪试验得到的峰值  $f = 0.27$ 。与事前的分析基本一致。

④ 图 3(a)中的  $S_i$  过程线递降趋势与滑带完整性受施工开挖影响逐渐恶化相一致, 可以看出, 每逢相对变形(见图 3(b)中的 31.5, 31.0, 30.5 m 处)达到峰值(破坏)后都伴有一个扩容过程<sup>[15]</sup>, 分别对应图 3(a)的点①, ②, ④有  $S_i$  曲线上的一个波动, 对应图 3(b)上的点③的波动, 则是滑带上盘的扩容 - 压密过程的转折(变形由递减到递增), 对应点③发生的时间是 2004 年 7 月 23 日。图 1(a)曲线上的点①, ②, ③, ④在图 1(c)上分别对应点①', ②', ③', ④', 后者在累计变形过程线上同样呈波动起伏。

以上看到的堆积体滑坡、滑带的破坏过程是岩体渐近(进)破坏的具体形式,  $S_i$  变化过程线是描述这种渐进破坏过程的实时定量方法。不仅如此, 由于从表 1 中还可知道引起滑坡稳定性变化的原因和破坏阶段, 因此可以提前发出安全预警, 预警时间

一般可以提前数十天或数月不等<sup>[13]</sup>。

⑤ 自 2005 年 1 月 20 日卡孔停测到 2005 年 9 月 8 日恢复观测期间, 图 3(b)上假定变形、 $S_i$  不变。2005 年 9 月 8 日恢复观测到 2006 年 5 月期间的观测资料表明, 实际上孔口累计变形和  $S_i$  的变化甚小, 前者增加约 10 mm(139.7~149.3 mm), 后者增加约 0.02(0.36~0.38), 表明滑坡前缘已处于基本稳定状态。

## 5 结 论

(1) 堆积体滑坡完整性(破坏性)评价的  $S_i$  ( $S_f$ ) 评价法可以根据  $S_i$  和  $S_f$  过程线确定滑带完整(破坏)性程度和相应的时间, 根据相对变形过程线可以确定破坏到达的位置。

(2)  $S_i$  ( $S_f$ ) 指标分析法不仅可以避免传统数值计算定量评价方法中计算建模、参数选择、边界确定时的不确定性带来的误差, 而且行之有效、操作方便。

(3) 岩土体沿最不利的弱面首先破坏是岩土力学的一个公认的普遍规律, 堆积体滑坡沿着滑带下盘最先启动是这个规律在滑坡体中的具体表现。堆积体滑坡的破坏是以滑带的破坏为标志, 滑带自下盘向上盘依次破坏的过程是堆积体滑坡渐进破坏的具体形式。

(4) 在开挖和加固并存的顺层缓倾角堆积体滑坡的施工过程中, 滑带的破坏过程可能很长, 配合滑带各高程相对变形过程线的分析, 可以根据破坏的不同阶段, 有足够的时间供提前发出安全预警, 采取必要的安全措施, 减少或避免灾害的损失。

(5) 滑带的破坏 - 扩容 - 压密过程是滑坡累计过程线上下波动和累计变形 - 深度曲线左右摆动的一个原因。

(6) 深部变形监测孔宜在工程施工前安装就绪和建立观测基准值, 发现卡孔(特别是关键部位的测孔)后, 宜及时修复或重建, 以便全过程连续评价滑坡稳定性的变化, 监控滑坡的安全。

## 参考文献(References):

- [1] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525 - 529. (CHEN Zuyu, MI Hongliang, WANG Xiaogang. A three-dimensional limit equilibrium method for

- slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 525 - 529.(in Chinese))
- [2] 黄梦宏, 丁桦. 边坡稳定性分析极限平衡法的简化条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 529 - 2 536.(HUANG Menghong, DING Hua. Some assumption conditions of limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 529 - 2 536.(in Chinese))
- [3] 史贵才, 葛修润, 姜清辉, 等. 水布垭水利枢纽古树包滑坡三维稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(5): 58 - 61.(SHI Guicai, GE Xiurun, JIANG Qinghui, et al. 3D stability analysis in Gushubao Landslide in Shuibuya Hydropower Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(5): 58 - 61.(in Chinese))
- [4] 郑宏, 田斌, 刘德富, 等. 关于有限元边坡稳定性分析中安全系数的定义问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 225 - 2 230.(ZHENG Hong, TIAN Bin, LIU Defu, et al. On definitions of safety factor of slope stability analysis with finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2 225 - 2 230.(in Chinese))
- [5] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626 - 632.(ZHENG Hong, LI Chunguang, LEE C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 626 - 632.(in Chinese))
- [6] 许建聪, 尚岳全, 陈侃福, 等. 顺层滑坡弹塑性接触有限元稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 231 - 2 236.(XU Jiancong, SHANG Yuequan, CHEN Kanfu, et al. Elastoplastic contact finite element analysis of bedding landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2 231 - 2 236.(in Chinese))
- [7] 汤明高, 黄润秋, 许强, 等. 开挖边坡潜在不稳定范围的预测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 190 - 1 197.(TANG Minggao, HUANG Runqiu, XU Qiang, et al. Instable zone analysis of high slope after excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 190 - 1 197.(in Chinese))
- [8] 邬爱清, 丁秀丽, 李会中, 等. 非连续变形分析方法模拟干将坪滑坡启动与滑坡全过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 297 - 1 303.(WU Aiqing, DINGXiuli, LI Huizhong, et al. Numerical simulation of startup and whole failure process of Qianjiangping Landslide using discontinuous deformation analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 297 - 1 303.(in Chinese))
- [9] 李同录, 王艳霞, 邓宏科. 一种改进的三维边坡稳定性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 611 - 614.(LI Tonglu, WANG Yanxia, DENG Hongke. An improved method for three-dimensional slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 611 - 614.(in Chinese))
- [10] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407 - 411.(LIAN Zhenying, HAN Guocheng, KONG Xianjing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 407 - 411.(in Chinese))
- [11] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求解边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 - 346.(ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis of safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 - 346.(in Chinese))
- [12] 邓建辉, 陈菲, 尹虎, 等. 泸定县四湾村滑坡的地质成因与稳定评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 1 945 - 1 950.(DENG Jianhui, CHEN Fei, YIN Hu, et al. Geological origin and stability evaluation of Siwancun Landslide in Luding County[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 1 945 - 1 950.(in Chinese))
- [13] 李迪, 李亦明, 张漫. 堆积体滑坡滑带启动变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3 879 - 3 884.(LI Di, LI Yiming, ZHANG Man. Analysis of original deformation for sliding zone of talus landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 879 - 3 884.(in Chinese))
- [14] 李迪, 张保军, 张漫. 堆积体滑坡滑带渐进破坏分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 151 - 156.(LI Di, ZHANG Baojun, ZHANG Man. Analysis of progressive failure for sliding zone of talus landslide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 151 - 156.(in Chinese))
- [15] 李迪, 马水山, 张保军, 等. 工程岩体变形与安全监测[M]. 武汉: 长江出版社, 2006.(LI Di, MA Shuishan, ZHANG Baojun, et al. Deformation of engineering rock masses and safety monitoring[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2006.(in Chinese))