

文章编号: 1008-2786(2000)增-0034-05

# 溃屈型滑坡滑动面特征及滑带土强度参数的 关联性分析

李树森, 朱冬林, 符文熹, 任光明, 聂德新  
(地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 论证了溃屈型滑坡顺层滑带和切层滑带形成条件、物质组成、破坏方式的差异性以及强度参数的差异性, 并用力学理论证明了这类滑坡滑动面顺层和切层滑带强度参数的关联性, 其结论为工程实例应用证实。

关键词: 溃屈型滑坡; 顺层滑带; 切层滑带; 强度参数; 关联性

中图分类号: P642.22, P478.06 文献标识码: A

溃屈型滑坡是斜坡岩体变形破坏的一种重要类型。在顺层斜坡中常发育有这种类型的滑坡, 规模一般都较大, 常常成为斜坡稳定性评价的重要对象。

作者们近年来通过这类滑坡成因机制的现场调查及室内物理模型试验, 发现这类滑坡的滑动面具有分段特征, 即滑动面可划分为顺层和切层两段, 而且彼此的强度参数差异较大。由于这类滑坡前缘反翘段常位于河水面附近, 加上滑坡组成物质破碎, 极难取得原状的滑带土来试验、评价滑面的强度参数。本文从溃屈型滑坡滑动面的形成条件、物质组成和破坏特征出发, 既从力学理论上论证了溃屈型滑坡滑动面的顺层和切层强度参数的关联性, 又以现场实际应用的成功事例证实了这一结论。

## 1 溃屈型滑坡滑动面特性的分段性

溃屈型滑坡是层状岩层在斜坡应力作用下, 类似“板梁”的岩层长期流变弯曲, 最后溃屈折断形成的。滑坡的形成经历以下三个主要阶段<sup>[1]</sup>: 1 顺层斜坡岩层在斜坡应力作用下, 板状岩层沿斜坡内层间软弱层带(顺层断层或软弱夹层), 在坡体下部发生剪切蠕变, 坡顶岩层沿软弱层带开启, 岩层发生初始弯曲(图 1); 2 层状岩层沿坡内软弱层带继续蠕变、弯曲, 形成向岸坡外的隆起和向岸坡内的弯曲, 在两个弯曲端形成张裂带(图 2); 3 层状岩体继续变形, 岩层沿张裂带折断, 上部岩体沿顺层的弱面下滑形成滑坡(图 3)。

从上面的分析可知, 溃屈型滑坡的滑动面可以分成两段: 顺层状岩体中软弱层带的顺层段滑面(由于软弱层带大多有泥质物, 因而顺层段滑带大多为粘粒含量较高的滑带土)和沿张裂带切层发育的滑动带(称切层段滑带)。由于切层段滑带正交于岩层且位移量不大, 滑带土多为粗碎屑土。因此含泥质物较多的顺层段滑带和以粗碎屑物质构成的切层段滑带, 不仅破坏方式、物质组成有明显的差异, 而且在强度特性上有明显的区别。

## 2 溃屈型滑坡滑带土强度的关联性分析

溃屈型滑坡顺层滑动面位于滑坡中后部, 由泥质物构成的滑带土易于取样、试验获得强度参数。而

收稿日期: 1999-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助研究项目(49672166)

作者简介: 李树森(1946-), 男(汉族), 重庆涪陵人, 副教授。从事力学教学和岩土工程科研, 曾参加国家科技攻关, 获部二等奖, 在国内发表学术论文 10 余篇。电话: (028)4078874

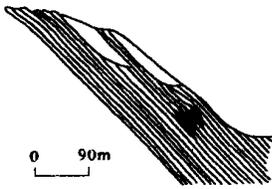
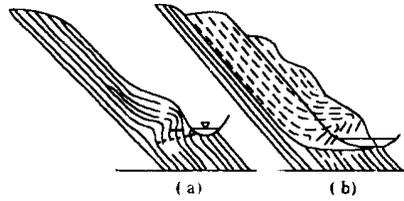


图1 岩层沿软弱层开启, 初始弯曲  
Fig. 1 Layers opened along weak intercalations and bent initially



1. 上部张裂带、岩层折断带; 2. 下部张裂带、岩层折断带。  
图2 两个弯曲端形成张裂带  
Fig. 2 The two bent ends formed the tension crack zone

切层段因位于滑坡前缘地段, 且常位于河水面附近

而无法取样, 因此, 要对粗碎屑土构成的滑带现场取样(尤其原状样) 试验来获得强度参数十分困难。本文结合工程实践, 从力学上来推演切层段的强度参数。

2.1 顺层与切层滑带强度参数关系的力学模式

在研究滑坡稳定性时, 常用一种称为刚体极限平衡的方法。在极特殊情况下, 设存在自重为  $G$  的均质刚性条形块体, 两端  $A$ 、 $B$  分别与铅直面和水平面接触, 刚性条块与水平面夹角为  $\alpha$ , 由理论力学知, 若两面光滑, 刚性条块无法稳定,  $\alpha$  趋于零; 若两面不光滑, 其摩擦系数分别为  $f_A$  和  $f_B$ 。当刚性条块处于临界平衡状态时,  $f_B = 1 / (2 - f_A \cdot \text{ctg} \alpha)$ , 即,  $f_B = \frac{1}{2} (f_A)$ 。

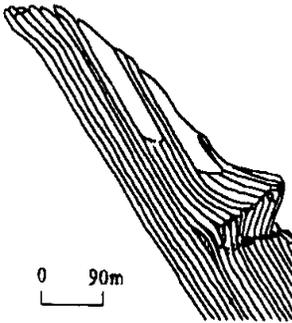


图3 岩层沿张裂带折断滑坡形成  
Fig. 3 Layers snapped along the tension crack zone and formed landslide

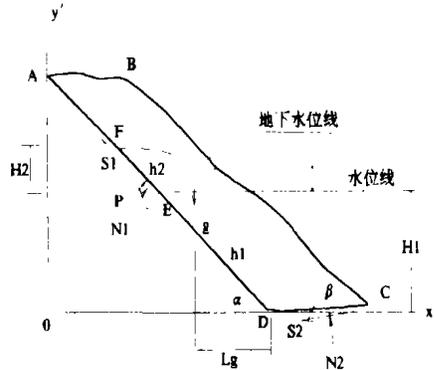


图4 两滑面力学模式示意图  
Fig. 4 Sketch map of mechanical mode of double sliding surfaces

由此得出两滑面摩擦系数相关联的结论。这是在特殊情况下得出的, 不能直接推广到滑坡顺、切层之间强度参数的关联性分析中去。但是它已经预示了不同摩擦面上的  $f_B$ 、 $f_A$  之间存在的某种关系。因此, 只要力学模式接近真实, 考虑到多种主要影响因素, 是可以揭示出上述滑坡顺层和切层强度参数之间的关系。

如图4所示两滑面滑坡力学模式, 滑坡滑动面分顺层段  $\overline{AD}$  和切层段  $\overline{CD}$ 。

滑体分三部分: 库水位线以下部分; 地下水位与库水位线之间部分; 地下水位线以上部分。其容重分别取浮容重、饱和容重和干容重。

滑体三部分重力的合力为  $g$ , 其作用线与  $D$  点距离为  $\overline{Lg}$ , 参见图4。

根据刚体极限平衡原理可得出<sup>[2]</sup>

$$K = \frac{-M \pm (M^2 - 4 \cdot L \cdot N)^{\frac{1}{2}}}{2 \cdot L} \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{K(A+B)}{K(C+D)} \quad (2)$$

$$N_1 = \frac{2}{AD} [g \cdot \bar{L}g - P(h_1 - \frac{h_2}{3})] + \frac{\overline{CD}}{AD} \cdot N_2 \quad (3)$$

式中  $P$  是作用在滑移面上的孔隙水压力,  $10^6 \text{N}$ ;  $g$  是滑坡体的总重量,  $10^6 \text{N}$ ;  $\bar{L}g$  为总重力之重心与  $D$  之距离(m);  $\overline{CD}$  为切层段长度(m);  $\overline{AD}$  为顺层段长度(m);  $N_1$  为顺层段  $\overline{AD}$  边上法向支反力,  $10^6 \text{N}$ ;  $N_2$  为切层段  $\overline{CD}$  边上法向支反力,  $10^6 \text{N}$ ;  $K$  是滑坡体稳定系数:

$$A = \overline{AD} \cdot g \cdot \cos\alpha - 2 [g \cdot \bar{L}g - P(h_1 + \frac{h_2}{3})] - \overline{AD} \cdot P;$$

$$B = c_2 \cdot \overline{CD} \cdot \overline{AD} \cdot \sin(\alpha + \beta);$$

$$C = \overline{CD} + \overline{AD} \cdot \cos(\alpha + \beta);$$

$$D = -f_2 \cdot \overline{AD} \cdot \sin(\alpha + \beta);$$

$$E = 2 [g \cdot \bar{L}g - P(h_1 + \frac{h_2}{3})] \cdot \sin\alpha + \overline{AD} \cdot P \cdot \sin\alpha;$$

$$F = -2f_1 [g \cdot \bar{L}g - P(h_1 + \frac{h_2}{3})] \cdot \cos\alpha - c_1 \cdot \overline{AD}^2 \cdot \cos\alpha - c_2 \cdot \overline{CD} \cdot \overline{AD} \cdot \cos\beta;$$

$$G = \overline{CD} \cdot \sin\alpha - \overline{AD} \cdot \sin\beta;$$

$$H = -f_1 \cdot \overline{CD} \cdot \cos\alpha - f_2 \cdot \overline{AD} \cdot \cos\beta;$$

$$L = A \cdot G + E \cdot C;$$

$$M = A \cdot H + B \cdot G + E \cdot D + C \cdot F;$$

$$N = F \cdot D + B \cdot H;$$

式中  $c_1$  为顺层段的内聚力, MPa;  $f_1$  为顺层段的摩擦系数;  $c_2$  是切层段的内聚力, MPa;  $f_2$  为切层段的摩擦系数。

## 2.2 顺层和切层段强度参数之间的关系

在深入讨论前,先交待一下对滑面强度参数  $f$ 、 $c$  的考虑。

由抗滑力公式

$$S = \frac{f \cdot N + cL}{K} \quad (4)$$

式中  $f$  为摩擦系数;  $c$  为内聚力(MPa);  $N$  是正压力( $10^6 \text{N}$ );  $L$  是滑段长度(m);  $K$  为滑坡稳定系数。

在这类滑坡中,  $\phi$  取  $10^\circ \sim 45^\circ$ , 即  $f = 0.17 \sim 1$  在(4)中,若正压力  $N$  的单位取  $10^6 \text{N}$ , 则  $c$  单位取 MPa, 其量值一般为  $0.01 \sim 0.05$ 。因此,从数值上比较  $f > c$ , 而在滑裂面已经形成的情况下,  $c$  值比土力学实验值更小。因此从数值的影响程度上,  $f$  远较  $c$  大,因而在(1)、(2)、(3)式中我们将研究问题的注意力放在  $f$  上,而  $c$  值可通过其它途径直接给出。

由(1)式,设  $K=1$  时,  $f_1$ 、 $f_2$  的关系

$$f_2 = \frac{C \cdot (E + F) + (A + B) \cdot (G - f_1 \cdot \overline{CD} \cdot \cos\alpha)}{(A + B) \cdot \overline{AD} \cdot \cos\beta + (E + F) [\overline{AD} \cdot \sin(\alpha + \beta)]} \quad (5)$$

由(1)式设  $K$  变化时,  $f_1$ 、 $f_2$  的关系

$$f_2 = \frac{K^2(A \cdot G + E \cdot C) + K(B \cdot G + C \cdot F - A \cdot f_1 \cdot \overline{CD} \cdot \cos\alpha) - B \cdot f_1 \cdot \overline{CD} \cdot \cos\alpha}{K \cdot [A \cdot \overline{AD} \cdot \cos\beta + E \cdot \overline{AD} \cdot \sin(\alpha + \beta)] + \overline{AD} \cdot [F \cdot \sin(\alpha + \beta) + B \cdot \cos\beta]} \quad (6)$$

式(5)、(6) 给出顺、切层之间强度参数  $f_1$ 、 $f_2$  之间的关系。

### 3 工程应用

#### 3.1 通过顺层的 $f_1$ 反算切层的 $f_2$

图 5 是某大型水电站大坝上游约 800 m 处的滑坡体, 其中纵 5 剖面表示一小次滑体, 其工程地质条件如下, 滑体分三部分: 库水位以下部分、地下水水位线至库水位部分、地下水水位线以上部分。容重分别取浮容重  $0.0147 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 、饱和容重  $0.0254 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 、干容重  $0.0245 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ ;  $C_1 = C_2 = 0.019 \text{ MPa}$ ; 取样试验得  $f_1 = 0.3$ 。

计算获得  $f_1$  和  $f_2$  的关系如图 6 所示。

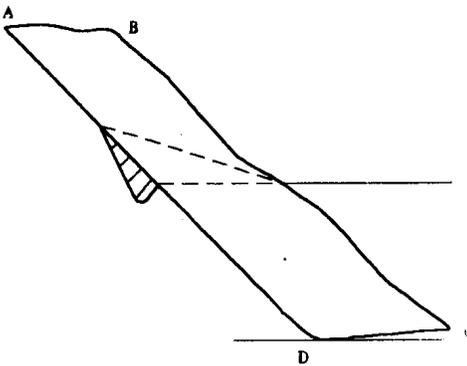


图 5 某滑坡纵 5 剖面图

Fig. 5 Vertical section 5 of certain landslide

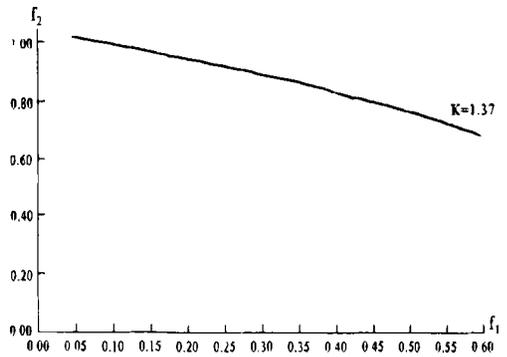


图 6 顺切层强度参数  $f_1$ 、 $f_2$  关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of strength parameters of bedding section ( $f_1$ ) and cutting-bed section ( $f_2$ )

由图 6 可知, 取样试验获得顺层强度参数  $f_1 = 0.3$  时, 对应的切层强度参数  $f_2 = 0.9$ 。从而可求得滑坡体在不同库水位下的稳定系数。

#### 3.2 与实际的符合程度分析

实践是检验理论的最好标准, 已经过实践检验的该工程强度参数见表 1。

表 1 某滑坡纵 5 剖面滑面强度参数

Table. 1 The strength parameters of the sliding surface of a landslide's No. 5 section

天然密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	饱和密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	水位 (m)	滑面强度参数							
			顺层段				切层段			
			$f$	$f_w$	$c$ (MPa)	$c_w$ (MPa)	$f$	$f_w$	$c$ (MPa)	$c_w$ (MPa)
2.5	2.6	2110	0.364	0.333	0.015	0.015	0.875	0.795	0.015	0.015

表 1 所提供的参数成功地分析和预测了该滑坡变形运动特征以及稳定性系数在敏感水位的转异。实践证明这是具有极高水平的研究成果。

本算例所取次滑体,  $f_1 = 0.3$   $f_2 = 0.9$  与表 1 结果接近。可进一步分析, 若该次滑体  $f_1$  实测值为 0.38 则根据式(6)可反演得  $f_2 = 0.85$  与表 1 吻合程度极好。说明(6)式所揭示的顺、切层滑带强度参数的关系是可信的。

本结论是在两滑面情况下推得的, 在工程中如遇曲面、多滑面时应作必要的修正, 关于曲面、多滑面

斜坡顺切层滑带强度参数的关联性分析将另文论述。

参考文献:

- [1] 聂德新, 任光明, 等. 溃屈型滑坡滑面强度特征及在稳定性预测中的意义[J]. 地质灾害与环境保护. 1997, 8(3): 1~5
- [2] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1980. 63~65

**ASSOCIATION ANALYSIS OF SLIDING PLANE  
FEATURE OF OUTBURST LANDSLIDE AND STRENGTH  
PARAMETERS OF SLIDING ZONE SOIL**

LI Shu-sheng, ZHU Dong-lin, FU Wen-xi, REN Guang-ming, NEI De-xing  
(*National Laboratory of Geological Hazard Prevention, Chengdu 610059*)

**Abstract:** The paper demonstrated the formation conditions of the bedding sliding zone and the cutting-bed sliding zone in outburst landslide, material composition, difference of destroying ways, and difference of strength parameters, and then proved the association between strength parameters of bedding section and cutting-bed section in the sliding zone of landslide of this type. The conclusions were proved by project application.

**Key words:** Outburst landslide, Bedding section of sliding zone, Cutting-bed section of sliding zone, Strength parameters, Association.