

# 金龙山斜坡中多变形带的稳定性模糊综合评判

孔纪名

(中国科学院—水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 61004)

**摘 要:** 斜坡中发育的多种裂面在滑坡形成过程中将组合成多条变形带, 随着变形的发展, 变形逐渐向最大剪应力处集中, 最终形成滑面。斜坡中多变形带稳定性模糊综合评判是采用数理统计的方法, 将滑坡发育过程中影响变形带的因素作为不同的评判因子, 对其进行模糊综合评判分析, 然后确定最不稳定的变形带。文中最后以金龙山滑坡变形带的稳定性分析为例, 证明该方法的正确性。

**关键词:** 滑坡; 变形带; 稳定性; 模糊综合评判

**中图分类号:** P642

**文献标识码:** A

金龙山斜坡中发育有多个顺坡向裂面, 在滑坡形成过程中将组合成多条变形带, 随着变形的发展, 变形逐渐向最大剪应力处集中, 最终形成滑面。因此, 斜坡中的多变形带是滑坡发育过程中的多个潜在滑面。以往在判别不同变形带是否能最终发育成滑面时, 是通过对滑坡形成条件和不同变形带岩土力学强度参数分析来确定。实践表明这种分析判断与实际情况不一定吻合。斜坡中多变形带稳定性模糊综合评判是采用数理统计的方法, 将滑坡发育过程中影响变形带的因素作为不同的评判因子, 对其进行模糊综合评判分析, 然后确定最不稳定的变形带。

## 1 金龙山斜坡变形中的多变形带特征

金龙山斜坡岩体中发育有多种裂面, 这些裂面的成因类型不同、形态各异, 所组成的变形带也各不相同。据成因类型, 变形带可分为三类, 它基本反映了坡体中不同深度的变形带, 控制了不同类型滑坡的发生<sup>[1]</sup>。

### 1.1 原生裂面组成的变形带

原生裂面是指岩体在形成过程中所生成的不连续界面。常见的原生有在沉积岩中由沉积间断形成的层理面、不整合面。在岩浆岩中由不同期次岩浆侵入所形成的似层面、岩浆冷却收缩时所形成的节理面, 变质岩中的板理、片理等。当裂面或密集发育

裂隙带倾向与坡面一致时, 就构成顺坡向结构的斜坡, 在滑坡发育中形成变形带。

### 1.2 次生裂面组成的变形带

次生裂面是指在外营力作用下形成的裂面。斜坡岩体中常见的次生裂面有卸荷裂面和风化裂面, 通常发育在斜坡浅表层岩体中, 沿坡面分布。次生裂面一个显著的特点是连续性较差、裂面不平整、产状变化受坡面的影响。当次生裂面成组发育时往往构成控制斜坡中浅层滑坡发生的变形带。

### 1.3 构造裂面组成的变形带

构造裂面是指岩体形成后由于构造活动而在岩体中留下的各种破裂面。坡体中常见的构造裂面有断层面、节理面和劈理面等。构造裂面是岩体内一种常见的破裂面, 其分布具一定的区域性, 各裂面间也具有一定的成因联系, 反映出一定的动力作用方式和应力状态。在滑坡形成过程中, 不同裂面被利用形成变形带的可能性不大相同, 这主要取决于裂面的产状、粗糙程度等因素。

## 2 变形带模糊综合评判方法

模糊综合评判是对多因素影响问题进行恰当评价, 区分事物性质综合程度上的好坏差异, 特别是评判因素对事物性质的影响程度不能精确给出、又不能仅凭单因素作出时, 模糊综合评判能较好的解决问题。其方法如下:

收稿日期: 2001-03-10; 改回日期: 2002-03-11。

基金项目: 中国科学院特别支持领域“山地灾害—泥石流、滑坡基础研究”资助项目。

作者简介: 孔纪名(1956-), 男(汉族), 重庆人, 研究员, 主要从事斜坡变形破坏规律研究。

设域  $Y$  代表变形带综合评判因素组成的集合

$$Y = \{y_1, y_2 \cdots y_n\} \quad (1)$$

又设  $P$  为评判所组成的集合

$$P = \{p_1, p_2 \cdots p_n\} \quad (2)$$

对评判中某一单因素  $R_i$  对应于  $P$  上的模糊子集为

$$R_i = \{r_1, r_2 \cdots r_n\} \quad (3)$$

对多种单因素则可组成评判因素模糊矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11}, r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21}, r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & & \\ r_{n1}, r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于因素集中各单因素对变形带的影响程度不一样,其权的大小不同,取权向量模糊子集为  $Q$

$$Q = \{q_1, q_2 \cdots q_n\} \quad (5)$$

对某一变形带模糊综合评判结果为

$$J = Q \circ R \quad (6)$$

该式是一个模糊变换,为评价集上一个模糊子集。

### 3 实例分析

#### 3.1 金龙山斜坡中的变形带

金龙山斜坡从上至下出露地层为上二叠统峨眉玄武岩( $P_2$ )、下二叠统阳新灰岩( $P_{1Y}$ )和梁山组粘土岩( $P_{1L}$ )、石炭系灰岩( $C$ )。坡体结构为顺坡向层状结构,岩层产状  $170^\circ \sim 190^\circ \angle 28^\circ \sim 35^\circ$ ,倾向与坡向( $210^\circ$ )的夹角约  $30^\circ$ 。据金龙山  $V^{\#}$  观测平硐揭示的坡体结构特征,坡体中可明显的划分出五个变形带。第一变形带位于硐内 27.3 m 处,由玄武岩中顺坡向裂隙和卸荷裂隙组成。第二变形带位于硐内 137 m 处,由玄武岩中顺坡向裂隙和风化软弱夹层组成。第三变形带位于硐内 301 m 处,为阳新灰岩中的软弱夹层处。第四变形带位于硐内 309 m 处,为阳新灰岩与粘土岩界面。第五变形带位于硐内 325 m 处,为粘土岩与石炭系灰岩的界面。这五个变形带中变形较为突出的有:玄武岩风化层内的第二变形带,其次为粘土岩顶、底板上第四、五变形带。

#### 3.2 变形带评判因素的选择及参数计算

通常对斜坡变形带稳定性产生影响的因素主要有:变形带岩性强度及风化程度、裂隙的发育密度、裂隙面的连通性、充填程度、裂隙面的粗糙系数( $JRC$ )、裂隙面产状、地下水作用等因素<sup>[2]</sup>。根据不同因素对

金龙山斜坡变形带作用特点,选取变形带综合稳定系数( $GK$ )、变形带岩土综合粘结力( $GC$ )、岩体完整系数( $I_c$ )、裂隙面连通率( $P$ )、变形带变形速率( $V$ )等因素作为变形带稳定性模糊综合评判因子<sup>[3]</sup>。参数计算如下:

##### (1) 变形带综合稳定系数( $GK$ )

设斜坡坡向为  $\varphi_p$ , 坡度为  $\alpha$ , 变形带倾角  $\varphi_b$ , 倾向为  $\beta$ , 摩擦系数为  $\tan \varphi$ 。按极限平衡理论<sup>[4]</sup>, 当  $|\varphi_p - \varphi_b| \leq 30^\circ$ , 且  $\alpha = \beta$  时,其稳定系数为综合稳定系数,取  $K_f = GK$ 。

##### (2) 变形带粘土的综合粘结力( $GC$ )

$$GC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (8)$$

$C_i$  为变形带内各结构面  $C$  值。

##### (3) 岩体完整系数( $I_c$ )

岩体完整系数是指岩体的结构特征以及构成岩体结构的结构面及其组合特征,它由结构面中节理组数、延伸长度、密度、岩层厚度等因素组成,其计算式为

$$I_c = \sum_{i=1}^n b_i g_i(X_i) \quad (9)$$

式中  $g_i(X_i)$  为岩体完整系数,  $X_i$  为岩体完整系数中的各因素,  $b_i$  为各因素权重。

##### (4) 裂隙面相对连通率( $P$ )

在金龙山斜坡中裂隙面连通率为

$$P = L/H \quad (10)$$

式中  $H$  为蠕变岩体相对高度,  $L$  为裂隙面长度。当裂隙面为层面时  $P = 1$ 。

##### (5) 位移速率( $V$ )

计算时取各变形带中沿硐轴方向(即坡向)的年位移量为变形速率。

##### (6) 斜坡变形带各评判因素计算

通过对金龙山斜坡实地调查和取样分析,代入以上各式进行计算,得出变形带各评判因子的指标值(表 1)

#### 3.3 变形带模糊综合评判

根据上述原理,为便于对各因数进行分析,应首先对变形带各因子指标进行变换,变换主要考虑各因子对稳定性影响是否有利或不利。如综合稳定系数在稳定性分析中属有利指标,以最小值为有利指标,其  $r_{\min} = 0.95$ ,故取为 1,指标变换为  $r_H = r_i / r_{\min}$ 。而连通率在定性分析中为不利指标,则应取最大值为有利指标,其  $r_{\max} = 1$ ,指标变换为  $r_{\max} = r_i / r_{\max}$ 。指标变换后即不同因子对变形带稳定性影响的相对强度(表 2),其综合指标可取其和。

表 1 变形带各因子指标值统计<sup>1)</sup>

Table 1 The indexes of different factor with deformation belt

评判因子	第一变形带	第二变形带	第三变形带	第四变形带	第五变形带
综合粘结力 $GC$	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1
综合稳定系数 $GK$	1.5794	0.95	1.4908	1.0305	1.0305
岩体完整系数 $Ic$	10	20	52	50	48
相对连通率 $P$	0.1052	0.2631	0.7	1	1
相对变形速率 $V$	0.09	2.95	2.01	5.76	5.75

1)变形带综合稳定系数( $GK$ )、综合粘结力( $GC$ )引自二滩水利开发可行性研究专题报告。

表 2 变形带各因子相对强度指标

Table 1 The relative intensity indexes of different factor with deformation belt

评判因子	第一变形带	第二变形带	第三变形带	第四变形带	第五变形带
综合粘结力 $GC$	1	1	1	10	10
综合稳定系数 $GK$	1.6625	1	1.5693	1.0847	1.0889
岩体完整系数 $Ic$	0.1923	0.3846	1	0.9615	0.9231
相对连通率 $P$	0.1052	0.2631	0.7	1	1
相对变形速率 $V$	0.0448	1.4677	1	2.8657	2.8607

考虑到各因素在变形带稳定性分析中所起作用的大小,对各因素取评语集为

$V=\{\text{稳定,较稳定,一般,不稳定}\}$

各因素评语的选取不追求普遍适用标准,仅根据各因素实测的数据在稳定性分析中的作用进行综合划分准。通过计算得出各因数评价的模糊子集  $R_i$  和模糊矩阵  $R$ 。

如金龙山斜坡第五变形带的  $R$  为

$$R=\begin{bmatrix}0, & 0, & 10, & 0 \\ 0, & 1.0889, & 0, & 0 \\ 0, & 0.9231, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 1 \\ 0, & 0, & 0, & 2.8607\end{bmatrix}$$

根据各因素在变形带稳定性的作用,对各因子的权分配为

$Q=(0.10,0.25,0.20,0.20,0.25)$

代入公式(6)计算出金龙山第五变形带的模糊综合评判结果  $J$

$J=(0,0.4568,1,0.9168)$

式中  $J$  表示该变形带从稳定到不稳定各评判因子所占的比重。相同方法可计算其他变形带模糊综合评判结果(表 3)。

表 3 变形带模糊综合评判结果

Table 3 Analysis result of synthetically fuzzy juice with deformation belt

评判因子	第一变形带	第二变形带	第三变形带	第四变形带	第五变形带
稳 定	0.4478	0	0.5923	0	0
较稳定	0	0.0526	0.25	0.4635	0.4568
一 般	0.0172	0.6938	0.14	1	1
不 稳	0.1	0.1	0.1	0.9164	0.9168

从表 3 可以看出:金龙山斜坡中第一、第三变形带处于稳定状态,第二变形带处于相对稳定性较差的状态,当外部诱发因素作用时,变形带将向不稳定的状态发展。第四、第五变形带处于不稳定状态性。以后大量观测资料表明,金龙山斜坡变形实际情况确实如此<sup>[5]</sup>,也证明了模糊综合评判对确定变形带稳定性的正确性。

参考文献:

[ 1 ] 孔纪名. 金龙山地区滑坡优势面分析[ J ]. 山地研究(现《山地学报》), 1991, 9(4): 218~ 224.

[ 2 ] 陈永波, 王成华. 滑坡发生的危险边坡判别及预测预报分析[ J ]. 山地学报, 2000 18(6): 559~ 562.

[ 3 ] 林立相, 徐汉斌. 边坡稳定性分析的可靠度方法[ J ]. 山地学报, 1999, 17(3): 235~ 239.

[ 4 ] 任光明, 聂德新, 等. 强度再生效应在大型滑坡稳定性评价中的运用[ J ]. 山地学报, 2000, 18(增刊): 60~ 64.

[ 5 ] 孔纪名. 滑坡稳定性判别的非计算方法[ J ]. 山地学报, 2001, 19(5): 446~ 451.

# The Synthetically Suzzy Juice of the Slope Stability With Multi-Deformation Belt of Jinlongshan

KONG Ji-ming

*(Institute of mountain hazards and environment, Chinese academy of science & ministry of water conservancy, Chengdu 610041 PRC)*

**Abstract:** The multi-rupture plane of slope will make up of multi-deformation belt in the development of landslide, and with the growth of deformation the multi-deformation belt come into being sliding plane finally. In the past we utilized the forming condition of landslide and mechanical parameter of different deformation belt to distinguish whether deformation belt grew into sliding plane. The fact indicated that the result from traditional method wasn't fit well for much actual condition. The synthetically fuzzy juice of the slope is one symbolic statistical method that uses the deformation feature as different differentiating factors to analyze the slope stability, and ascertain the most unstable deformation belt. The paper uses this fuzzy method to analyze Jinlongshan landslide stability and acquire well result.

**Key words:** landslide; deformation belt; stability; synthetically fuzzy juice