

# 建立在野外地质调查基础上的高速滑坡灰色分析

王效宁 (中国科学院力学研究所)

## 提 要

本文针对各种大型工程论证和设计需要,提出了建立在野外地质调查基础上的高速滑坡灰色分析方法。应用该方法,可在收集滑坡方量、地形、环境等八个因素的基础上,准确预测工程区滑坡灾害性。文中将此方法应用于三峡工程,收到了令人满意的效果。

迄今为止,计算高速滑坡的方法都是建立在详细的野外调查,并进行一系列试验所取得所需的力学参数的基础上完成的。但实际上,对于存在大量滑坡的水电工程、铁道工程等,由于勘察手段、工作量大小以及任务要求等因素限制,我们不可能对每一个滑坡都进行详细的力学试验,因而也就无法取得其力学参数。所以,有必要提出一个建立在一般野外地质调查基础上判断并预测高速滑坡的方法。

这里提出应用灰色系统理论解决上述问题。主要是考虑到在这种情况下,滑坡系统实际上是个灰色系统。因而灰色系统理论具有良好的应用背景。

### 一、判别因子的选择及其白化函数

这里首先需要将高速滑坡分类。作者根据滑坡滑动的最大速度 $V_{max}$ 和平均速度 $V$ 将滑坡分为高速滑坡、中速滑坡和低速滑坡(表1)。一般来讲,最大速度是平均速度的二倍。判断高速滑坡可根据最大速度或平均速度其中一项即可。

表1 滑坡按速度分类

类 型	平均速度 $V$	最大速度 $V_{max}$
高速滑坡	$>10m/s$	$>20m/s$
中速滑坡	$5-10m/s$	$10-20m/s$
低速滑坡	$<5m/s$	$<10m/s$

综合考虑滑坡形态、力学参数、滑动空间条件、环境因素、变形发展过程,我们实际选用以下八项判别因子:1)体积 $V$ , 2)坡度 $\alpha$ , 3)剪出口高度 $h$ , 4)转换角 $\beta$ , 5)地震烈度 $a$ , 6)水因子 $w$ , 7)绝对变形量 $u$ , 8)滑动空间长度比 $K_L$ 。

力学参数 $f$ 在体积 $V$ 中已有反映,因为根据谢德格尔关系式,有

$$\log f = A + B \log V \quad (A, B \text{ 常数}) \quad (1)$$

— 22 —

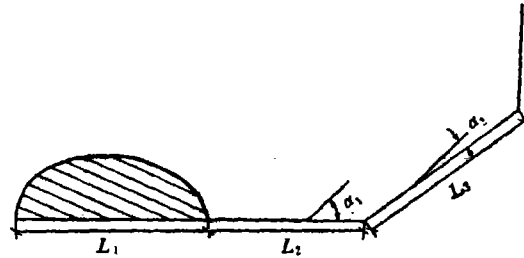


图1 转换角 $\beta$ 和滑动空间长度比 $K_L$ 的定义图

而转换角 $\beta$ 和滑动空间长度比 $K_L$ 的定义如由1所示。

$$\beta = |\alpha_1 - \alpha_2|, \quad K_L = (L_2 + L_3) / L_1 \quad (2)$$

下面分别建立上面八项因子的白化函数。

1. 体积 $V$  建立体积 $V$ 的白化函数,实际上就是建立等价摩擦系数 $f$ 的白化函数。根据经验,当摩擦系数 $f$ 值降低到0.3以下时,滑坡发生高速滑动的可能性很大;当摩擦系数升至0.8以上时,滑坡一般不易发生高速滑动。据此,可建立体积 $V$ 的白化函数。

$$\begin{aligned} \text{高速: } f(V) &= x/7 \quad (x < 7) \\ f(V) &= 1 \quad (x \geq 7) \\ \text{中速: } f(V) &= x/6 \quad (x < 6) \\ f(V) &= (12-x)/6 \quad (x \geq 6) \\ \text{低速: } f(V) &= 1 \quad (x < 5) \\ f(V) &= (12-x)/7 \quad (x \geq 5) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $x$ 为滑坡实际土方量的对数值。当 $\log V$ 值为7、6、5时,分别对应着 $f$ 值为0.3、0.5、0.8。

2. 坡度 $\alpha$  根据斜坡坡角与滑坡、崩塌统计关系可知:当坡度 $\alpha$ 大于 $30^\circ$ 时,崩滑体的数量最多。 $10^\circ$ 以下时,崩塌体很少。根据崩滑体发生数量与高速滑坡发生概率的一致性,可建立其白化函数:

$$\begin{aligned} \text{高速: } f(\alpha) &= \alpha/30 \quad (\alpha \leq 30^\circ) \\ f(\alpha) &= 1 \quad (\alpha > 30^\circ) \\ \text{中速: } f(\alpha) &= \alpha/20 \quad (\alpha \leq 20^\circ) \\ f(\alpha) &= (40-\alpha)/20 \quad (\alpha > 20^\circ) \\ \text{低速: } f(\alpha) &= 1 \quad (\alpha \leq 10^\circ) \\ f(\alpha) &= (30-\alpha)/20 \quad (10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ) \end{aligned} \quad (4)$$

3. 剪出口高度 $h$  根据势能与动能的关系,在不考虑摩擦的情况下,有

— 水文地质工程地质1991年第18卷第1期 —

$$mg\dot{h} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

故可得:  $v = \sqrt{2gh}$  (6)

据此可定出剪出口高度  $h$  的白化函数:

高速:  $f(h) = h/20 \quad (h \leq 20\text{m})$   
 $f(h) = 1 \quad (h > 20\text{m})$   
 中速:  $f(h) = h/5 \quad (h \leq 5\text{m})$   
 $f(h) = (10-h)/5 \quad (5 \leq h \leq 10)$   
 低速:  $f(h) = 1 \quad (h \leq 0.2\text{m})$   
 $f(h) = (5-h)/48 \quad (0.2 < h \leq 5)$  (7)

4. 转换角  $\beta$  根据作者推导, 滑坡在坡道交换处发生碰撞后的速度为:

$$v_1 = v_0(\cos\beta - f\sin\beta) \quad (8)$$

式中  $v_1$  为碰撞后速度,  $v_0$  为碰撞前速度,  $f$  为摩擦系数。

由式(8)可得:

$$\frac{dv_1}{d\beta} = -v_0(\sin\beta + f\cos\beta) < 0 \quad (9)$$

所以  $v_1$  与  $\beta$  成连续递减关系。也就是说, 转换角  $\beta$  越大,  $v_1$  越小。据此并参照坡角白化函数可建立转换角  $\beta$  的白化函数:

高速:  $f(\beta) = 1 \quad (\beta \leq 10)$   
 $f(\beta) = (30-\beta)/20 \quad (10 \leq \beta \leq 30)$   
 中速:  $f(\beta) = \beta/20 \quad (\beta \leq 20)$   
 $f(\beta) = (40-\beta)/20 \quad (20 \leq \beta \leq 40)$   
 低速:  $f(\beta) = \beta/30 \quad (\beta \leq 30)$   
 $f(\beta) = 1 \quad (\beta > 30)$  (10)

5. 地震烈度  $a$  地震烈度  $a$  小于  $5^\circ$  时为有感弱震,  $5^\circ-7^\circ$  时为中等强感地震,  $7^\circ$  以上为强震。据此可建立地震烈度  $a$  的白化函数:

高速:  $f(a) = a/7 \quad (a \leq 7^\circ)$   
 $f(a) = 1 \quad (a > 7^\circ)$   
 中速:  $f(a) = a/6 \quad (a \leq 6^\circ)$   
 $f(a) = (12-a)/6 \quad (6^\circ \leq a \leq 12^\circ)$   
 低速:  $f(a) = 1 \quad (a \leq 5^\circ)$   
 $f(a) = (12-a)/7 \quad (5^\circ \leq a \leq 12^\circ)$  (11)

6. 水因子  $w$  这里水因子  $w$  是综合降雨量、水库水位、地下水位等与水有关因素的判别因子。一般认为当水因子  $w$  为饱和含水量的一倍以上时, 有利于高速滑坡发生, 当  $w$  为饱和含水量的50%时, 不利于高速滑坡发生。据此可建立水因子的白化函数:

高速:  $f(w) = w/w_b \quad (w \leq w_b)$   
 $f(w) = 1 \quad (w > w_b)$   
 中速:  $f(w) = 1.25w/w_b \quad (w \leq 0.8w_b)$   
 $f(w) = 1.25(1.6w_b - w)/w_b$

$$(0.8w_b < w \leq 1.6w_b)$$

低速:  $f(w) = 1 \quad (w \leq 0.5w_b)$

$$f(w) = 2(w_b - w)/w_b \quad (0.5w_b \leq w \leq w_b) \quad (12)$$

7. 绝对变形量  $u$  绝对变形量在没有滑动的情况下, 等于后缘裂隙的最大宽度。在前缘有蠕滑现象的情况下, 等于前缘位移和后缘位移之差。根据经验, 当绝对变形量  $u$  大于1m时, 有利于高速滑坡的形成, 当绝对变形量趋于零时, 不利用高速滑坡的形成。据此, 可建立绝对变形量  $u$  的白化函数。

高速:  $f(u) = u \quad (u \leq 1\text{m})$   
 $f(u) = 1 \quad (u > 1\text{m})$   
 中速:  $f(u) = 2u \quad (u \leq 0.5\text{m})$   
 $f(u) = 2(1-u) \quad (0.5\text{m} < u \leq 1\text{m})$   
 低速:  $f(u) = 1 \quad (u \leq 0.2\text{m})$   
 $f(u) = 1.25(1-u) \quad (0.2\text{m} < u \leq 1\text{m})$  (13)

8. 滑动空间长度比  $K_L$  根据三种滑动空间类型: "L"型、"U"型和"V"型的特点, 可做如下定义:

$K_L \leq 0.5$  时为"V"型  
 $0.5 < K_L < 1.5$  时为"U"型  
 $K_L \geq 1.5$  时为"L"型

所以可建立滑动空间长度比  $K_L$  的白化函数:

高速:  $f(K_L) = K_L/1.5 \quad (K_L \leq 1.5)$   
 $f(K_L) = 1 \quad (K_L > 1.5)$   
 中速:  $f(K_L) = K_L \quad (K_L < 1)$   
 $f(K_L) = 2 - K_L \quad (1 \leq K_L \leq 2)$   
 低速:  $f(K_L) = 1 \quad (K_L \leq 0.5)$   
 $f(K_L) = 1.5 - K_L \quad (0.5 < K_L \leq 1.5)$  (14)

## 二、高速滑坡的聚类分析方法

如图2是各因子白化函数的三种形式。根据灰色系统理论, 给定图2所示的白化函数, 则聚类权  $\eta_{kj}$  为:

$$\eta_{kj} = \frac{\lambda_{kj}}{\sum_{i=1}^8 \lambda_{ij}} \quad (j=1,2,3) \quad (15)$$

第  $i$  个聚类对象对于第  $j$  个灰色数的聚类系数为:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^8 f_{kj}(d_{ik})\eta_{kj} \quad (16)$$

式中  $d_{ik}$  为聚类白化数。

据上面的式子, 可以计算体积等判别因子对于高

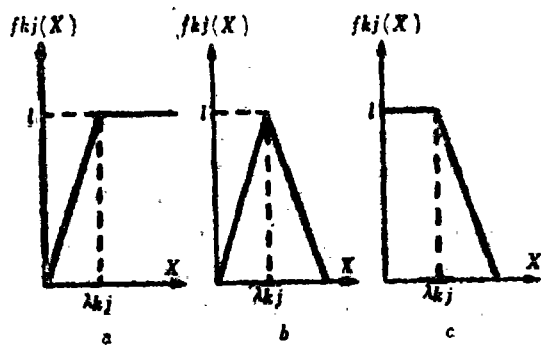


图 2 白化函数的三种形式

速、中速、低速三类滑坡的聚类权。为了消除由于数量级不同而带来的误差，这里将坡度角 $\alpha$ 和转换角 $\beta$ 分别化成弧度后乘以10。而将水因子、绝对变形量和滑动空间长度比 $K_L$ 乘以10。则对于高速、中速、低速三类滑坡，其各因子的聚类权如表2所示。

西北地区是我国典型的高速滑坡多发区。表3为作者收集的西北地区一些滑坡的基本资料。现对其做聚类分析。

根据表3，可以求出每一个滑坡的各判别因子白化函数生成值。并由生成值和聚类权可计算各个滑坡的聚类行向量（表4）。

表4清楚地表明了灰色聚类分析结果与实际均相

表 2 各因子对各类滑坡的聚类权

聚类权	因子	体 积	坡 度	剪出口度	转换角	烈 度	水因子	变形量	长度比
高 速		0.092	0.069	0.2633	0.022	0.092	0.1316	0.1316	0.1974
中 速		0.1278	0.9741	0.1055	0.074	0.1277	0.170	0.1065	0.2129
低 速		0.1714	0.0396	0.007	0.1793	0.1714	0.1714	0.0685	0.1714

表 3 西北地区部分大型滑坡的基本参数

滑 坡	V (万方)	$\alpha$	h	$\beta$	a	W	u	$K_L$
2#	380	30°—45°	0	<10°	<7°	<0.5Wb	<1m	<0.5
龙 羊	8000	30°	0	3°—5°	<7°	Wb	>1m	>1.5
磨 坊	8000	24°	0	0	<7°	<0.5Wb	0	1
查 纳	16000	40°	0	0	<7°	<0.5Wb	>1m	>1.5
查 西	4680	30°—45°	0	0	<7°	<0.5Wb	>1m	>1.5
酒勒山	6000	23°	0	0	<7°	<0.5Wb	1.5m	>1.5

表 4 西北地区一些滑坡的灰色聚类分析结果

滑 坡	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	分析结果	实际结果
2#	0.4642	0.6355	0.7061	低 速	低速
龙 羊	0.7336	0.4827	0.26	高 速	高速
磨 坊	0.4556	0.5716	0.566	中低速	低速
查 纳	0.5988	0.399	0.3936	高 速	高速
查 西	0.554	0.401	0.394	高 速	高速
酒勒山	0.652	0.4721	0.4244	高 速	高速

符。上面的滑坡中，有高速滑坡，也有低速滑坡，代表性比较广泛，说明这里所用的方法具有很好的适用性。

### 三、三峡库区大型滑坡的灰色聚类分析

长江三峡库区内发育有大量的滑坡。据资料介绍：从库首至江津686公里干流段已发现大小滑坡崩塌及斜坡变形体277个，其中体积大于1000万方者有39个。这些崩塌体的存在，不仅对三峡水库库岸稳定有影响，而且对航运、沿岸城镇居民安全也有巨大威胁。研究这些滑坡的稳定性并预测其可能带来的危害，是三峡工程前期论证中一个重要的内容。

对于三峡库区的大型滑坡，如果都要进行一系列的力学试验，一方面国家财力不允许，另一方面时间也不允许。但我们又必须弄清楚库区内高速滑坡的分布及其发育特征，并能较准确的了解其最大滑速和滑程。要进行这方面的工作，除一些重点滑坡外，可资

——水文地质工程地质1991年第18卷第1期——

利用的仅仅是三峡库区的地质调查资料。

作者收集了三峡库区体积超过一千万方以上的大型滑坡资料, 共计21个。原始资料此略。

在分析过程中, 作者从最不利的角度分析。水因子考虑水库蓄水, 连续降雨以及滑坡区的水利设施被毁等情况。地震烈度根据前人研究资料介绍, 一般不超过6度, 所以按6度处理。滑动空间长度比是按滑坡平均长度和三峡库区水面宽取值的。应用前面所建立的方法, 分别对每一个滑坡进行灰色聚类分析, 这里略去具体计算过程。表5为分析结果。

表5 试用灰色聚类分析方法所判断的滑坡类型

滑 坡	聚类行向量			预测 类型
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	
白衣庵	0.4196	0.652	0.6232	中速
茨草沱	0.4496	0.653	0.6232	中速
百换坪	0.462	0.490	0.6371	低速
三蹬子	0.461	0.5964	0.6359	低速
新 尼	0.460	0.5758	0.5153	中速
藕 塘	0.4781	0.5569	0.561	低速
高家嘴	0.4467	0.5573	0.5233	中速
宝 塔	0.438	0.4531	0.518	低速
鸡扒子	0.438	0.542	0.535	中速
西 城	0.438	0.538	0.531	中低速
旧县坪	0.449	0.5484	0.5060	中速
黄腊石	0.615	0.546	0.410	高速
范家坪	0.459	0.562	0.491	中速
坝 脚	0.4242	0.5153	0.609	低速
龙王庙1#	0.4385	0.545	0.551	低速
龙王庙2#	0.430	0.565	0.567	中低速
安东寺	0.596	0.1966	0.539	高速
草衙子	0.427	0.519	0.559	低速
砥把坪	0.426	0.519	0.519	低速
太白崖	0.426	0.508	0.549	低速
吊岩坪	0.445	0.6130	0.619	低速
刘家屋场	0.463	0.635	0.610	中速

上面的分析及其应用表明, 该方法的最大特点是针对我们经常遇到的不能完全获得所需参数的情况而提出的, 但又同时尽可能多的直接或间接地考虑了各种因素, 因此其判别结果是可信的。

三峡库区大型滑坡的灰色分析判别结果, 对于三峡工程的修建具有重要的参考意义, 同时也是该方法的一个很好的应用范例。

## GREY ANALYSIS OF HIGHSPEED LANDSLIDE BASED ON FIELD GEOLOGICAL INVESTIGATION

Wang Xiaoning

### Abstract

In this paper, a grey analyzing method of high speed landslide based on field geological investigation information has been suggested to judge the catastrophe of landslides in project areas. By collecting eight factors, such as the volume, geography, environment, etc. of landslide, its catastrophe could be predicted accurately. The application results of this method in Three Gares Prect are satisfactory.

### “第五环太平洋能源和矿产资源会议”

会议于1990年7月30日至8月3日在夏威夷的火奴鲁市召开。与会代表五百余人来自20多个国家和地区, 地矿部的李慰标、籍传茂等六人参加了会议。会议内容涉及海洋地质、海岛地质、滨海地区的地质, 重点是新生代以来的地质演变和资源、环境等问题。宣读的论文有海下滑塌15篇, 水文地质3篇, 地热5篇, 遥感应用10篇。在展厅中展示了大洋钻探中获得的近代海底沉积中孔隙水的化学特征等重要新资料, 在展出的环太平洋编图计划成果系列图幅中, 有一幅比例尺1:1700万的“太平洋盆地幅自然灾害图”, 该图是美国联邦地质调查局和国家海洋大气管理局联合编制成的。该图反映了地质灾害和气候灾害及当前跨学科大型综合研究的特点。该图被认为是对国际减灾十年的一个贡献。

海下滑塌对海洋石油勘探开发、海底电缆的铺设等都有重要影响, 这方面的调查研究有了很大的进展。

夏威夷群岛主要靠玄武岩中地下水作为生活和工农业供水水源, 玄武岩中孔洞、裂隙发育, 水量丰富, 水质良好。州政府对地下水进行有组织地勘察和开发, 有效地保护了地下水源。

太平洋周边岛弧带的国家, 如日本、印尼、菲律宾、新西兰等国, 地热资源丰富, 勘察和开发工作发展迅速。印尼、菲律宾等国的高级官员应邀在大会上介绍本国能源发展现状和规划时, 均强调了能源构成的多样化, 强调开发地热等新能源的必要性和可能性。

(籍传茂)

更正: 我刊1990.5, 封底“综合技术信息”中地址应为东三环16号, 联系人何庆余, 邮编 100026, 电话 581046, 电挂CAAERU