

# 基于信息量法的斜坡破坏概率预测与制图\*

汤连生 周萃英

(中山大学地质学系, 广州 510275)

**摘要** 以信息量法为基础,对重庆市中区斜坡空间不稳定性进行预测分区并计算机自动成图.视强度参数  $c, \psi$  值为随机变量,分别选取较不稳定区和不稳定区中具代表性的斜坡段进行滑动面位置的随机搜索及破坏概率预测,并给出它们的斜坡破坏概率值  $FP$ ,迭加于信息量预测分区图上.最后以不同的色块及  $FP$  值综合表示斜坡的不稳定程度.

**关键词** 信息量法,破坏概率,预测,制图

**分类号** P642.22

## 1 预测方法简介

### 1.1 信息量法

信息量法是一种单变量统计分析预测方法,通过计算各影响因素对滑坡所提供的信息,确定各斜坡段产生滑坡的总信息量,以此作为预测的定量依据.当已有滑坡资料很少,不足以代表所研究区的滑坡信息时,笔者认为,可以采用以相对危险区替代滑坡资料的方法来解决.

假定模型区共有单元总数为  $N$ ,已知相对危险的斜坡单元总数为  $S$ ,存在某因素状态标志的单元数为  $N_i$ ,该状态标志条件下的相对危险单元数为  $S_i$ ,则该标志对相对危险斜坡所提供的信息为

$$I_i = \lg \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (1)$$

某一单元的信息总量为

$$I = \sum_{i=1}^m I_i = \sum_{i=1}^m \lg \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (2)$$

$m$  为状态标志总数.

### 1.2 破坏概率法

破坏概率法是直接以斜坡可能发生破坏的百分率来表示斜坡稳定性的一种方法.以

收稿日期:1995-03-01

\*国家自然科学基金资助项目

极限平衡法进行斜坡稳定性分析时,稳定性的评价指标以稳定系数  $K$  表示,  $K$  是一系列计算参数的函数,可表示为<sup>[1]</sup>:

$$K = g(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (3)$$

式中,  $x_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$  大多是符合某种分布的随机变量,相应地  $K$  亦为随机变量.

为了客观而完善地表示斜坡的稳定性,应将各计算参数保持随机变量的特征,计算时参数的选取能反映其分布性质,  $K$  值视为随机变量.

若  $K$  的密度函数为  $f(K)$ , 则斜坡的破坏概率  $P_f$  为

$$P_f(K < 1) = \int_0^1 f(K) dK \quad (4)$$

欲求  $P_f$  必须先解决以下问题:① 确定各参数的分布形式,即确定其密度函数  $f(K)$ ; ② 对呈各种分布的随机变量进行随机抽样; ③ 按计算出的  $K$  样本值,确定破坏概率.

## 2 重庆市地质概况及预测单元的划分

重庆市位于长江与嘉陵江汇合处,是侵蚀等外动力作用强烈的地段,属中切割的丘陵地貌区.区内地层除第四系外均为侏罗系中统上沙溪庙组的地质.岩性主要为红色砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩、泥岩等.断裂及节理裂隙发育,地壳运动表现为大面积的掀斜抬升.地下水以松散堆积层孔隙水及红层基岩裂隙水为主.崩塌、滑坡等物理地质现象发育.

为了确保斜坡的完整性和系统性,笔者采用了任意多边形网格划分方法,即以地形等高线图和岩性分布图为底图,以主要沟谷线为控制边界,参考岩性分布图,尽可能使得不同斜坡结构类型落在不同的斜坡单元中,同时兼顾地形等高线变化情况.这样划分既符合随机抽样条件,又有明确的工程地质意义.依此原则,共分为 191 个单元.

## 3 预测变量的选取

### 3.1 信息量法

变量选取原则:① 在研究区中具有代表性;② 有一定数学依据;③ 在研究区斜坡不稳定性分析中,能够反映该变量对斜坡的敏感性.据此,在统计分析的基础上,分别选取了坡高、坡角、岩层倾角、岩组、河流侵蚀、线性构造等 6 种因素 28 个预测变量进行预测(如表 1).

### 3.2 破坏概率法

本文采用推力算法进行稳定性计算,计算变量包括重力、水力(动、静水压力),块体之间的推力,岩体和不连续面的抗剪强度等.

这里视滑动面位置和强度参数  $c, \tan\varphi$  值为随机变量,将重力、水力、滑坡推力作定值处理.对  $c, \tan\varphi$  值进行随机抽样,对滑动面位置进行随机搜索.

对密度函数已知的随机变量进行抽样,可利用在  $[0, 1]$  区间上均匀分布的特殊性质进行,此性质是:

若随机变量  $\theta$  服从  $[0, 1]$  上均匀分布,对于任意分布函数  $F(x)$ ,  $[F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt]$ , 令  $\xi = F(\theta)$ , 则  $\xi$  就是服从分布函数  $F(x)$  的随机变量,这里  $F(x)$  的反函数为  $F^{-1}(x)$ . 可见,只要能产生  $[0, 1]$  区间上均匀分布的随机变量  $\theta$  的样本,就可以通过  $\xi = F^{-1}(\theta)$  取得

表 1 预测变量总表

Tab. 1 The table of forecasted variables

因素	坡 角/(°)					坡 高/m				
状态	0~7	7.1~14	14.1~21	21.1~28	>28	0~30	30.1~60	60.1~90	90.1~120	>120
变量	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
因素	岩层倾角/(°)			岩性组合*						
状态	内倾	外倾 0~8	外倾>8	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
变量	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
因素	河流侵蚀曲率半径/m				线性构造密度 /10 <sup>-4</sup> 条·m <sup>-2</sup>					
状态	0~1200	1201~1600	1601~2400	>2400	0~1	1~2	2~3	>3		
变量	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$	$x_{26}$	$x_{27}$	$x_{28}$		

\* ①为泥岩 ②为上部泥岩,下部砂岩 ③为中间泥岩,上、底部为砂岩 ④为顶部砂岩,底部为砂、泥岩互层 ⑤为中部夹两层砂,其余均为泥岩 ⑥为第四系松散物

已知分布函数  $F(x)$  的随机变量的样本,  $[0,1]$  区间上均匀分布的随机变量称为随机数.

当密度函数可积,分布函数可用显式表示时,即可用此法确定抽样公式.

对于正态分布,由于其分布函数不能以闭合解的式子表示,逆函数不能确定,因此需要通过其它抽样方法(如变换抽样法)对随机变量抽样<sup>(2,3)</sup>.

对于标准正态分布  $N(0,1)$  的抽样,有变换式

$$V_1 = \sqrt{-2\ln r_1} \cos 2\pi r_2 \quad (5)$$

$$V_2 = \sqrt{-2\ln r_1} \sin 2\pi r_2 \quad (6)$$

$r_1, r_2$  为区间  $[0,1]$  上均匀分布的独立的随机数,  $V_1, V_2$  为相互独立的服从标准正态分布的随机变量样本.

再利用变换式

$$\begin{cases} x_1 = \sigma V_1 + \mu & (7) \\ x_2 = \sigma V_2 + \mu & (8) \end{cases}$$

得到服从均值为  $\mu$ , 均方差为  $\sigma$  的一般正态分布,可记为  $N(\mu, \sigma)$  的随机变量  $x$  的样本,则一般正态分布可进行抽样.

岩土体的强度参数  $c, \tan\phi$  服从截尾正态分布,研究区砂泥岩的  $c, \tan\phi$  值服从此规律,其统计分布图(图 1)表明了这一点.

其密度函数为

$$f(x) = (1/\sigma\sqrt{2\pi}) \exp[-(x-\mu)/2\sigma^2]$$

式中,  $\pi=3.1416, \mu$  为平均数,  $\sigma$  为标准差.按最大似然估计法,其数字特征为:

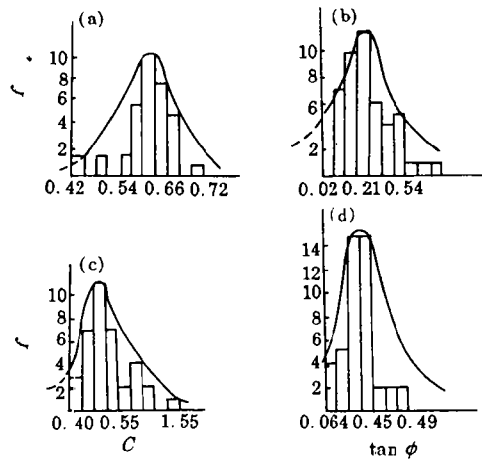


图 1 砂岩  $c, \tan\phi$  (a, b) 及泥岩  $c, \tan\phi$  (c, d) 分布图  
Fig. 1 Distribution map of  $c$  and  $\tan\phi$  of sandstone (a, b) and mudstone (c, d)

砂岩  $c$ :  $\mu=0.4740, \sigma=0.3471$ ;  $\tan\varphi$ :  $\mu=0.6085, \sigma=0.0648$

泥岩  $c$ :  $\mu=0.2819, \sigma=0.1570$ ;  $\tan\varphi$ :  $\mu=0.4994, \sigma=0.0785$

其抽样式分别为

$$\text{砂岩 } c_s: \quad c_s = 0.3471 \sqrt{-2 \ln r_1} \cos 2\pi r_2 + 0.4740 \quad (9)$$

$$\tan\varphi_s: \quad \tan\varphi_s = 0.0648 \sqrt{-2 \ln r_1} \sin 2\pi r_2 + 0.6085 \quad (10)$$

$$\text{泥岩 } c_m: \quad c_m = 0.1570 \sqrt{-2 \ln r_1} \cos 2\pi r_2 + 0.2819 \quad (11)$$

$$\tan\varphi_m: \quad \tan\varphi_m = 0.0785 \sqrt{-2 \ln r_1} \sin 2\pi r_2 + 0.4994 \quad (12)$$

这样,砂、泥岩的强度参数的随机抽样即已实现.滑动面的随机搜索见文献 4.

## 4 预测模型的建立

### 4.1 信息量模型

统计预测遵循类比原则.本文选取具有代表性的 27 个稳定斜坡单元及 34 个相对稳定单元,用以建立预测模型,其余 130 个单元为待测区.

据式(1)及(2)计算各变量信息量的大小,结果如表 2 所示.信息量值越大,提供的滑坡信息越多;反之,亦然.据此,建立信息量模型为

$$I_j = -0.535x_{j,1} - 0.248x_{j,2} + 0.281x_{j,3} + \dots + 0.354x_{j,28} \quad (j=1,2,3,\dots,28) \quad (13)$$

表 2 各变量信息量预测表

Tab. 2 The forecasted table of information values of variables

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
-0.575	-0.248	0.281	0.303	0.053	-0.687	-0.323	0.053	0.178	0.354
$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
-0.053	0.354	-0.850	-0.248	-0.014	-0.123	0.162	0.354	0.287	-0.854
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$	$x_{26}$	$x_{27}$	$x_{28}$		
0.354	0.257	0.354	-0.195	-0.223	0.053	0.180	0.354		

### 4.2 破坏概率模型

当某一条随机复合形状的滑动面生成后,即从斜坡顶部向坡角方向分条,分析其受力,据刚体极限平衡条件,求得第一条块,中间条块及第  $n$  条块的稳定系数表达式分别为:

$$K_1 = \frac{A \tan\varphi_1 + c_1 L_1}{B}, \quad K_i = \frac{D \tan\varphi_i + c_i L_i}{E}, \quad K_n = \frac{(G-N) \tan\varphi_n + c_n L_n}{H-M} \quad (14)$$

其中,  $A, B, D, E, G, N, H, M$  分别为与重力、动水压力、静水压力等因素有关的函数,  $c_1, c_i, c_n$  分别为第 1,  $i, n$  条块的内聚力;  $L_1, L_i, L_n$  分别为第 1,  $i, n$  条块的底边长度;  $\tan\varphi_1, \tan\varphi_i, \tan\varphi_n$  分别为第 1,  $i, n$  条块的内摩擦角值.

据式(14)计算每个条块的  $K$  值,当  $K$  值求得后,每个条块的破坏概率值为

$$P_i = \sum_{k=1}^n N_i(K < 1) / N \quad (15)$$

整个斜坡的破坏概率值的求取可分两步进行:① 求条块破坏概率密度函数;② 密度函数可积,则在斜坡域内积分,其积分值即为整个斜坡破坏概率值:

$$P_{\text{sum}} = \int_D f(P_i) dP_i \quad (16)$$

如果条块划分足够多时,可用近似方法求得

$$P_{\text{sum}} \doteq \sum_{i=1}^n P_i/n \quad (n \text{ 为条块数}) \quad (17)$$

## 5 预测及制图

重庆市斜坡不稳定性综合预测分区图(图 2)采用下列步骤制成.

首先采用信息量模型(式 13)对模型区的 61 个单元及待测区的 130 个单元进行预测,得到各个单元的信息量预测值.以研究区所有斜坡单元的信息量预测值为基础,绘制信息量分布图,寻找其分布图上的突变点,结合已有的滑坡资料进行区间划分.据此可将研究区分为 4 个区,即:  $(-2.25 \sim -1.35)$  为稳定区,  $(-1.35 \sim 0)$  为较稳定区,  $(0 \sim 0.45)$  为较不稳定区,  $(> 0.45)$  为不稳定区,括号内值为斜坡之信息量值.

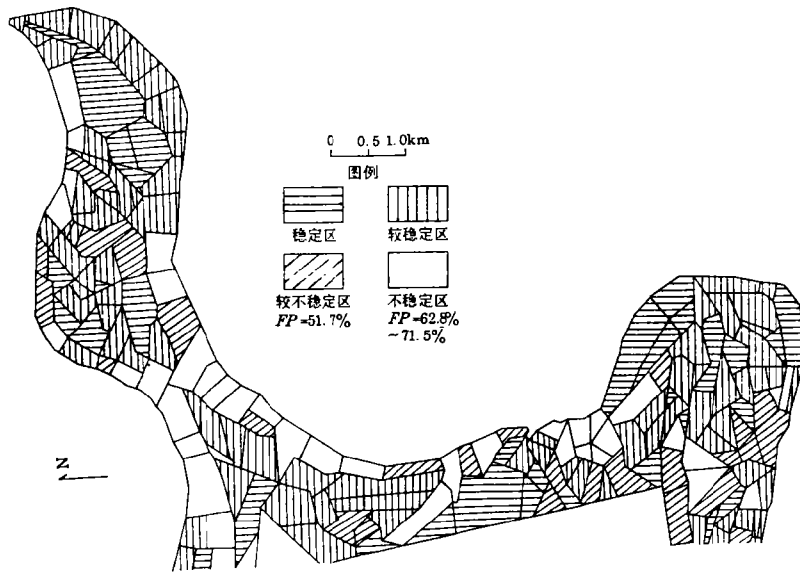


图 2 重庆市斜坡不稳定性预测分区图

Fig. 2 The forecasted division of slope instability in Chongqing city

其次,选取较不稳定区和不稳定区中若干具有代表性的斜坡进行破坏概率预测,式(9)~(12), (14)~(17)给出定量化表示的另一种指标——破坏概率值  $FP$ ,并叠加于信息量预测图上,用以代表此两类不稳定斜坡的破坏概率.

最后编制绘图程序,以不同的彩色块表示斜坡的不稳定性程度,并将计算所得破坏概率值迭加在彩色图上,这样,一张等级分明、破坏概率明确的综合分区预测图就制成了.

## 6 结 论

(1) 在信息量预测的基础上,对研究区具有代表性的斜坡剖面进行破坏概率预测,预测结果吻合好;对于在较大区域内,缩小目标范围,给出定量表达指标的预测,不失为一种可行方法.

(2) 为了客观而完善地表示斜坡的不稳定性,对强度参数  $c, \varphi$  值随机抽样,弥补了视  $c, \varphi$  为定值的不足,随机搜索最危险的滑动面,合理可行.

(3) 斜坡不稳定性综合预测分区图编制合理,直观实用对国土的合理规划和开发具有一定的指导作用.

## 参 考 文 献

- 1 Chowdhury R N. Analysis methods for assessing landslide risk - recent developments, The 5th International symposium of landslide, Lausanne, 1988. 515~524
- 2 小乔治. S. 科克, 理查德. F. 林克著. 地质数据统计分析. 北京: 科学出版社, 1980. 45~59
- 3 徐克林, 周叔举. 德兴铜矿边坡稳定性破坏概率计算与分析. 全国第三次工程地质大会论文选集. 成都: 科技大学出版社, 1988. 469~474
- 4 Zhou Cuiying, Yan Tongzhen. On the random searching for the most dangerous sliding surface and its failure probability prediction. The International Symposium on Landslide and Geotechnics. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990. 135~142

## Failure Probability Prognosis of Slopes Based on the Lnformation Method and Mapping

Tang Liansheng\* Zhou Cuiying

**Abstract** In the paper, based on the prognosis of space instabilities of slopes and their mapping in Chongqing city by information method, the random searching for the location of sliding surfaces and their failure probability prediction are made by selecting typical sections from the two kinds of instable slopes. At the same time, the failure probability values ( $FP_s$ ) for this two kinds of slopes are given. Here, the shearing strength coefficients  $c$  and  $\tan\varphi$  are considered as the random variables. Finally, the  $FP$  values are combined with the colour map which is drawn automatically by computer to show the instability degrees of slopes in Chongqing city.

**Keywords** information method, failure probability, prognosis, mapping

---

\* Department of Geology, Zhongshan University, Guangzhou 510275