

# 格状与层状岩体边坡稳定性分析 的概率方法

张 雷

(同济大学地下建筑与工程系 上海 200092)

**摘要** Jennings 边坡(简称 J-边坡)是一种常见于格状与层状岩体中的典型岩质边坡模型,在岩质边坡中,对 J-边坡运用蒙特卡罗方法进行概率分析,考虑陡、缓倾角两组节理随机组合,对计算范围内节理分布进行位置搜索,并考虑在水压力及地震灾害条件下,计算相应破坏概率及其可靠度指标。使用该方法对江西某铜矿高边坡工程进行了计算,取得令人满意的结果。

**关键词** J-边坡, 概论分析, 稳定性

**分类号** TU 457

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)03-0349-04

## 1 引言

在岩土工程问题中,现行规范对于边坡的稳定分析和边坡安全角设计,通常采用静力平衡分析方法,根据钻孔及有关地质资料确定一个滑面或假定几个滑面进行稳定计算,最终计算危险滑面的安全系数  $K$  [1]。这种方法虽经过了长时间的工程实践应用,积累了丰富的经验。但由于这种方法依靠经验成分较多,对于岩体介质中结构面等大量不确定因素未能加以考虑,不能完全反映实际情况。

对于格状与层状岩体中的典型岩质边坡,通常采用 Jennings 边坡模型(以下简称 J-边坡)。岩体被两组角度不同的节理所切割,一组倾角较陡,一组倾角较缓,因此, J-边坡比平面破坏中单一结构面类型的边坡具有更多的不确定因素,采用现有规范方法进行分析,存在着较大的偏差。

边坡概率分析方法是建立在统计学基础之上,以随机变量与随机过程为研究对象,考虑变量的随机性,因而近十几年来在工程界得到了广泛的应用 [2]。本文试图对 J-边坡的稳定性问题用蒙特卡罗方法进行概率模拟分析,考虑陡、缓两组节理为随机变量,进行节理位置随机搜索,计算其破坏概率及其可靠度指标。对江西某铜矿边坡工程,在大量的

现场统计资料如节理裂隙统计资料、岩石力学资料等条件下,进行概率计算。提出了概率分析方法。

## 2 J-边坡稳定的概率分析

### 2.1 蒙特卡罗方法

对于一个过程,以不同的数据重复模拟计算就可以得到一个统计学上的结论。这一结论在数学上是不确定的,但足以反映该过程。这种应用计算机模拟有关随机因素问题的方法称为蒙特卡罗(Monte Carlo)法,这一方法是由 Stanislan M. Ulam (1909~1984 年)提出的。

从统计的意义上讲,假设岩体节理裂隙分布特征服从一定的规律,可应用蒙特卡罗法对 J-边坡进行分析。根据概率统计原理,当抽样个数  $N$  足够大时,将安全系数小于 1 的次数除以总抽样个数,在  $N$  个安全系数函数的随机值中,  $m$  个  $K \leq 1$  的频率( $m/N$ )可近似于破坏概率。

### 2.2 随机数生成器

对于本文所要研究的问题,需要一种能够方便地被转换为其他概率分布的随机数,即伪随机数。一般来说,  $(0, 1)$  间均匀分布的随机数,可以通过不同的转换公式转换为所需要的具有某种分布的随机数 [3]。

2000 年 6 月 1 日收到初稿, 2000 年 8 月 2 日收到修改稿。

作者 张 雷 简介: 男, 33 岁, 在职博士研究生, 1989 年毕业于同济大学地下建筑与工程系岩土工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程和工程地质方面的教学及科研工作。

产生(0, 1)间均匀分布的伪随机数的方法很多。对于这些方法而言, 产生的随机数周期越长, 均匀性越强, 那么根据制作出来的随机数生成器就越好。本文所采用的算法是:

取一个整数  $l_0$ , 使得  $1 < l_0 < 2^{31} - 1$ , 对于  $I = 1, 2, \dots$  计算:

(1) 将  $2^{31} - 1$  除以  $(7^5 \times l_{i-1})$ , 并把所得的余数付值给  $l_i$ ;

(2) 将  $l_i$  除以  $(2^{31} - 1)$ , 并把所得结果付值给  $X_i$ ,  $X_i$  就是所需要的随机数;

(3) 重复这一过程。

初始整数  $l_0$  称为这一伪随机数序列的种子数, 在本算法中, 1 与  $2^{31} - 1 = 21\ 474\ 836\ 347$  之间的任何一个整数都可以作为种子数。在程序中, 取种子数  $l_0$  为 256。这一伪随机数序列的周期为  $2^{30}$ 。

### 2.3 随机滑动面的产生

在边坡稳定分析中, 如何确定滑面位置并找出最危险滑面是首先要解决的问题。完全可以利用计算机根据 J-边坡陡缓两组节理的长度与倾角的概率分布来大量产生滑面进行计算, 这样就能大大提高计算结果的可靠程度。

计算机对滑裂面的搜索过程与现场量测统计过程正好相反。现场量测统计过程是根据岩体两组节理裂隙发育状况来求得它们的各种几何参数的统计模型, 这些几何参数包括节理裂隙的组数、产状、迹线长度及间距等。而计算机对滑裂面搜索过程则是通过量测到的几何参数分布规律, 在计算机应用蒙特卡罗方法, 按已知密度函数进行随机抽样, 从而得到与实际分布相似或对应的人工随机变量, 进而推算出每一条节理裂隙的端点坐标。根据野外勘察所得的资料, 一般可以划出一个滑面可能存在的范围, 把这一范围称为滑面可行域。如图 1 所示, 当可行域的上下边界线确定后可在滑面可行域内进行滑面搜索, 同时计算相应安全系数  $k_i$ 。由于  $k$  的真实值在计算机随机分析之前是未知的, 取最小的  $k_i$  作为  $k$  的近似值。这一近似值的可靠程度, 随随机生成的滑面而增大, 并趋近于 1。

前面已经介绍了 J-边坡具有两组角度不同的节理, 对其中较缓的节理称为  $\alpha$  节理, 对另外一组较陡的节理, 称为  $\varphi$  节理。一般地, 对于 J-边坡, 认为滑面就是沿这两组节理形迹形成的, 滑面剖面上呈现不规则的齿状或阶梯状。设滑面是沿  $\alpha$  节理方向的线段  $\alpha_e$  与  $\varphi$  节理方向的线段  $\varphi_e$  产生的, 这样就可以利用事先现场实测得到的有关  $\alpha$  节理与  $\varphi$  节理的资料来生成滑面了。

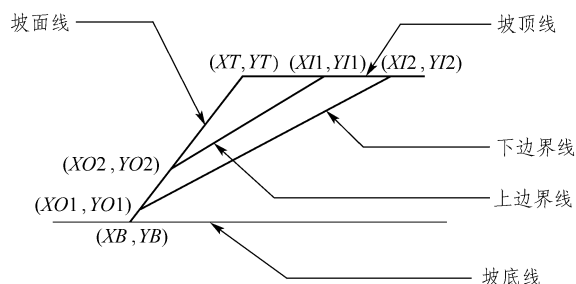


图 1 滑面可行域位置图(理论模型)

Fig.1 Location of feasible field for the slide face with theoretical model

在野外节理调查中, 对节理的迹线长度与倾角进行统计, 当确定优势结构面  $\alpha$ ,  $\varphi$  后, 倾角是区别陡、缓节理的重要判据。首先根据倾角将节理分为  $\alpha$  节理与  $\varphi$  节理, 然后分别对  $\alpha$  节理与  $\varphi$  节理再进行数理统计, 得出各自的长度与倾角统计结果, 包括它们的均值、方差, 并且进行分布拟合, 得出它们的分布规律。这样, 就可利用上面所提到的随机数生成器产生的(0, 1)间分布的伪随机数来进行数学变换, 得到近似符合实际分布的节理长度与倾角的伪随机数, 限于篇幅在此不作进一步说明。

随机滑面的产生大致分为三个步骤: 确定滑面起始位置; 生成滑面线段; 滑面终了。另外, 为了准确地产生符合要求的滑面线段, 还需要对已生成的线段进行检验。因此, 总共要有 4 段相应的程序来完成滑面的随机生成过程。

### 2.4 静力平衡计算公式及各指标的选用

J-边坡属于滑面为折线型的边坡, 《工业与民用建筑工程地质勘察规范》(TJ21-77)中规定, 计算指标宜根据试验结果、反算指标及当地经验数据综合选取进行相关统计。为了解决岩石强度与节理面强度之间差异对平均滑动面的  $c$ ,  $\phi$  值的影响, 在此引入连续率的概念<sup>[4]</sup>。由于  $\varphi$  节理的参与, 滑动方向上裂隙所占的比例较大。将裂隙面在  $AB$  面上所占范围投影到滑动方向平面  $AB'$  上(见图 2), 求得滑面上裂隙的连续率为

$$G = (\Sigma L_{j\alpha} + \Sigma L_{j\varphi}) / AB'$$

式中:  $\Sigma L_{j\alpha}$ ,  $\Sigma L_{j\varphi}$  分别为阶梯状滑面上  $\alpha$ ,  $\varphi$  两组节理裂隙所占范围, 是其在  $AB'$  面上投影面积之总和。

根据以上分析, 假定两组节理裂隙具有相同的  $c_j$ ,  $\phi_j$ , 完整岩石的抗剪强度指标为  $c_r$ ,  $\phi_r$ , 则滑面的平均  $c$ ,  $\phi$  为

$$c = (1 - G)c_r + Gc_j, \quad \phi = (1 - G)\phi_r + G\phi_j。$$

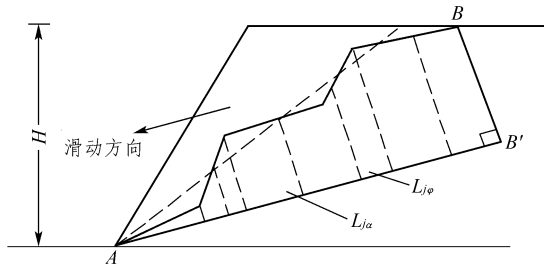


图 2 连续率示意图

Fig.2 Sketch of continuous ratio

同时，在计算中还将考虑地震的影响因素及水的影响因素，将外力作用体现在计算中。

### 2.5 可靠度与破坏概率

岩土工程中的不确定性因素很多，它来自很多方面，比如时空变化带来的不确定性，岩土性质本身的不确定性，计算方法的不确定性以及未来环境变化的不确定性。因此，即使是存在大量现场资料，仍然是由少量的资料来推测全部情况。

可靠性理论就是在岩土工程设计与计算领域中以破坏概率来取代安全系数作为边坡稳定指标，可以方便地反映边坡在人工处理过程中所产生的变化。

一般采用安全余量来替代安全系数，安全余量的表达式为  $Z=R-T$ ，式中  $R$  为抗力， $S$  为滑动力。当  $Z>0$  时，表示结构可靠；当  $Z<0$  时，表示失稳或破坏；当  $Z=0$  时，为极限状态。可靠指标  $\beta$  的定义为标准参数空间中由原点至极限状态面的最小距离，但实际使用上为了简单起见，一般仍以  $\beta=\mu_z/\sigma_z$  作为设计依据。式中  $\mu_z$  为  $Z$  的均值， $\mu_z=\mu_R-\mu_S$ ； $\sigma_z$  为  $Z$  的标准， $\sigma_z=\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2}$ 。只要两个边坡的可靠度指标  $\beta$  相同，它们将具有类似的风险水平，虽然两者的随机变量可变性可能不同。若已知  $\beta$ ，破坏概率也可利用关系式  $P_f=\phi(-\beta)$  求出。

可靠度指标对应着破坏概率，但不一定对应特定的安全系数，只有当分布函数完全确定以后，两者才有对应关系。为了符合工程师的习惯，便于推广概率设计，在程序计算中不但给出了可靠度指标，也给出了安全系数的近似最小值。

## 3 计算实例

对江西某铜矿的西破碎站人工边坡进行了验算。

该铜矿的西破碎站场地主要地层为震旦系双桥山群千枚岩，岩体中节理较为发育，根据需要共对

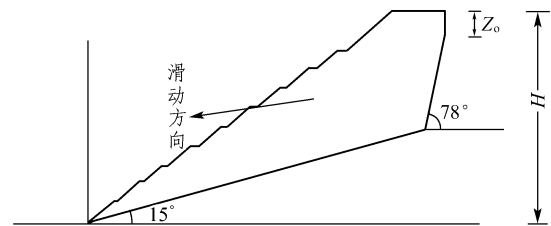
计算剖面附近的 12 个节理调查点进行调查，对近 1 200 条节理进行统计，随着所处部分岩性和构造变化，优势节理一般为 2 组，其中以区域性陡倾角较为发育，节理光滑平直，局部有矿脉充填。该组节理与边坡顺层层面(缓倾角)构成平面滑动破坏模型及 J-边坡模型，同济大学对该 2 组结构面分别在现场和室内进行了多组岩体结构面剪切试验。

选定西破碎站的三个计算剖面进行了验算。分别是 A、B、C 剖面，其中 A、B 位于南东坡，C 位于北西坡。它们的有关数据见表 1。概率计算的计算模型见图 3，图 3(a)为静力平衡计算模型，图 3(b)为概率计算模型，其可能滑面在图中搜索范围内产生。

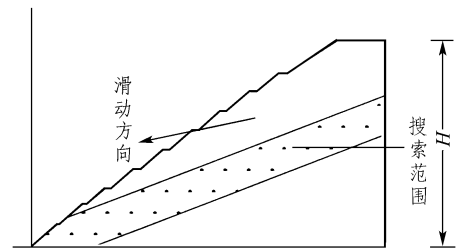
表 1 计算剖面参数表

Table 1 The parameters of calculation profile

剖面	坡高 /m	坡率	位置
A	58.4	1 : 0.84	南东坡
B	38.0	1 : 0.87	南东坡
C	40.0	1 : 0.87	北西坡



(a) 原静力平衡计算模型



(b) 概率计算模型

图 3 计算示意图

Fig.3 Calculation model

陡缓两组节理的长度、倾角及结构面的抗剪指标统计结果见表 2。

在此设定搜索次数为 10 000 次，坡址为坐标原点，岩体容重  $\gamma=27.2\text{ kN/m}^3$ ，水平地震加速度  $a=0.11g$ ，分别取安全系数  $K$  为 1.1，1.2，1.3 进行计算，破坏概率见表 3。

从计算中可得出以下结论：

(1) 三个计算剖面中，在考虑各个不同的影响因素计算时，B 的破坏概率最大，即稳定性都是最

表 2 计算参数统计表

Table 2 Statistics of parameters for calculation

随机变量/数字特征	最大值	最小值	均值	方差
$\alpha_1$ 线段倾角/(°)	42	15	28.5	7
$\phi_1$ 线段倾角/(°)	86	70	78	4
$\alpha_2$ 线段长度/m	7	1	4	2
$\phi_2$ 线段长度/m	9	1	5	2
$c_r$ / MPa	15.7	3.2	11.33	5.2
$c_j$ / MPa	0.9	0.10	0.32	0.2
$\phi_r$ /(°)	45.2	33.8	40.2	8.2
$\phi_j$ /(°)	32.0	20.6	25.0	2.3

表 3 破坏概率计算结果表

Table 3 Calculation results of failure probability

剖面	安全系数			条件
	$K=1.1$	$K=1.2$	$K=1.3$	
A	0.2%	0.3%	0.7%	不考虑静水压力
B	0.2%	0.2%	93.4%	
C	0	0.4%	0.6%	
A	0.6%	0.8%	89.2%	考虑静水压力
B	0.2%	66.2%	99.7%	
C	0.3%	0.6%	47.8%	

差的, A 次之, C 最好, 这一结论与中国有色金属工业总公司长沙勘察院关于“西破碎站人工边坡及深基坑稳定性评价报告”中的结论相一致。

(2) 如果按永久性边坡评价(即安全系数  $K > 1.3$ ), B 坡即使不考虑水的影响, 破坏概率也达到了 93.4%, 即不稳定状态。这与实际情况非常相符。

(3) 对于同一个计算剖面, 当考虑不同安全系数  $K$  时,  $K$  值越大, 破坏概率将相应增大, 但并非非线性放大, 而是在某个  $K$  时发生陡变, 这与通常的计算方法有较大区别。

(4) 计算结果也说明, 有水作用是使边坡破坏

的重要原因。这与通常的计算方法没有出入。如在计算剖面 B 中, 当  $K=1.2$  时, 不考虑水的作用影响, 破坏概率仅为 0.2%, 而考虑水的影响, 破坏概率为 66.2%。

(5) 从算例中可以发现, 破坏概率为现场工程技术人员提供的是边坡可能会产生滑动的可能性指标, 它与通常采用的安全系数在意义上是不同的。

## 4 结 语

文中所提出的边坡概率方法及算例可以说是在前人对 J-边坡研究基础上的进一步深入思考。概率分析方法并不是概率计算方法, 而是从工程角度来讲的, 每一环节中都应贯穿这一思想。如果有一个环节没有考虑到, 那概率分析与设计的依据就毫无意义。J-边坡的稳定计算所得的结果并不是一个确定的值, 而是一个概率结果, “最危险滑面”也并非真正就是破坏面, 它仅仅指的是程序本次运行搜索出的“最危险滑面”。但应当指出, 由于现阶段边坡设计的重要基础仍来自勘察资料及经验判断, 并且考虑的因素有限, 目前它只能为人们作出正确判断提供一定的帮助, 工程实际应用中仍然有许多工作需要去做。

## 参 考 文 献

- 1 Hoek E, Bary J W. 岩石边坡工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983
- 2 包承纲. 谈岩土工程概率分析中的若干基本问题[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 12~15
- 3 包承纲, 于 丽. 土坡在非常条件下稳定分析的概率方法[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5): 23~27
- 4 张文泉, 肖洪天, 刘伟韬. 矿井底板突水路径的搜索方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 46~50

## PROBABILITY ANALYSIS METHOD FOR THE STABILITY OF GRID AND BEDDED ROCK SLOPE

Zhang Lei

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China)

**Abstract** Using the Monte Carlo method, the normal slope model of grid and bedded rocks can be analyzed. With the random combination of steep and flat series of joints in the J-slope, the failure probability and reliability index can be calculated under the action of water and earthquake. The high slope stability of one copper mine in Jiangxi is analysed by the proposed method, and the result is satisfying.

**Key words** J-slope, probability analysis, stability