

# 某露天铁矿冰碛土台阶边坡可靠性分析

徐鼎平

(马鞍山矿山研究院岩土工程研究所, 安徽马鞍山 243004)

**【摘要】** 以某露天矿边坡台阶为研究对象, 提出一种新的可靠度求取方法——简化统计矩法。采用该法对原设计的台阶边坡和本研究所推荐的台阶边坡进行了可靠性分析。分析结果表明, 台阶边坡破坏概率较高, 主要是由冰碛土强度的固有不确定性、抗风化能力以及水理性质决定的, 而边坡结构因素对其影响不显著。建议采取平台宽度 3 m、3 m 和 16 m 的三台阶组方案, 同时采用截洪和护坡等有效措施来提高台阶边坡的稳定。

**【关键词】** 台阶边坡; 冰碛土; 可靠度; 破坏概率

**【中图分类号】** TU 457

## Reliability Analysis of Moraine Soil Bench Slop in an Open Pit

Xu Dingping

(Institute of Geotechnical Engineering, Maanshan Institute of Mining Research, Maanshan Anhui 243004 China)

**【Abstract】** Taking benches of slope in an open pit as the study object, Simplified Rosenbluth method as a new method of reliability analysis is presented and adopted to analyze the reliability of bench slope of primary design scheme and recommendatory scheme. The results indicate that high failure probability of benches is primarily depended on inherent variability of strength, anti-weathering ability and hydro-physical properties of moraine soil. And structure factors of slope bring little effects on it. The scheme of ternary benches whose platform widths are 3 m, 3 m and 16 m is recommended and some effective measures such as holding up flood and revetment are put forward to enhance stability of benches.

**【Key Words】** bench slope; moraine soil; reliability; failure probability

### 1 概述

四川某露天铁矿西帮冰碛土边坡, 据原矿山设计, 边坡总高度 204 m, 单台阶高 12 m, 台阶坡面角  $40^\circ$ , 平台宽度以 6 m、6 m 和 10 m 为一组设置。自开矿以来, 虽鲜见三个台阶以上规模的边坡破坏, 但单台阶边坡和双台阶边坡破坏严重, 据已形成边坡的现状统计, 破坏概率(线性长度破坏比)达 50.7% 以上。这里, 破坏模式有滑坡, 也包括塌落和冲蚀等, 且不时夹杂着大尺寸的漂砾滚落。显见, 台阶边坡稳定性和可靠性直接关系到该矿山的正常生产和员工的人身安全, 也关系到滑坡体清理费用的投入或生产成本的降低。台阶边坡合理设计与管理成为该矿至关重要的研究课题。

本研究旨在提出一个合理的台阶组合结构, 以及简便的稳定性和可靠性评价方法, 以便在边坡修改设计和日常生产管理过程中使用。

### 2 简化统计矩法基本原理

#### 2.1 最小可靠度指标的定义

以往确定最小可靠度指标, 通常按下述步骤<sup>[1]</sup>

进行:

1) 系统地生成一系列试算面, 使用一组确定性的土参数的“设计”值(一般略低于强度参数的均值), 分析每个试算面, 安全系数( $F_s$ )最小者定义为最危险的破坏面;

2) 在这个最危险破坏面基础上, 使用随机的状态变量, 如土体强度均值和标准差, 进行边坡可靠性分析, 求得可靠度指标。

从其确定步骤可以看出, 这个可靠度指标实质上是确定性的最危险破坏面对应的局部最小可靠度指标, 不一定为全局最小的可靠度指标。倘若将其定义为最小可靠度指标, 容易引起误解, 是不合适的。

在简化统计矩法中, 最小可靠度指标的定义为: 以一系列试算面为确定性的破坏面, 进行边坡稳定性概率分析, 获得的所有可靠度指标中的最小值。毫无疑问, 按上述定义的可靠度指标最小值才是真正全局最小的可靠度指标。这样, 其对应的概率破坏面也未必与确定性的最危险破坏面一致。

2.2 可靠度指标的表达式

取状态函数  $F_s - 1$  (安全储备) 和极限状态方程为

$$\beta = \frac{E[F_s] - 1}{\sigma[F_s]} = \frac{F_s(\mu_{X_i}) - 1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F_s}{\partial X_i}\right)^2 \sigma^2[X_i] + 2 \sum_{i,j=1}^n \left(\frac{\partial F_s}{\partial X_i}\right) \left(\frac{\partial F_s}{\partial X_j}\right) \rho \sigma[X_i] \sigma[X_j]}} \tag{1}$$

式中:  $n$  为土参数 ( $c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2, \dots$ ) 的数量;  $E[F_s]$  为  $F_s$  的期望值;  $\sigma[F_s]$  为  $F_s$  的标准差;  $\mu_{X_i}$  为土参数  $X_i$  的均值;  $\sigma[X_i]$  为  $X_i$  的标准差;  $\rho$  为  $X_i$  和  $X_j$  之间的相关系数。

在实际应用中, 定量地计算安全系数对每个土参数的偏导数, 方法是: 采用大于和小于均值 1 个标

$$\beta = \frac{F_s(\mu_{X_i}) - 1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{si}^+ - F_{si}^-}{2}\right)^2 + 2\rho \sum_{i,j=1}^n \left(\frac{F_{si}^+ - F_{si}^-}{2}\right) \left(\frac{F_{sj}^+ - F_{sj}^-}{2}\right)}} \tag{3}$$

若  $F_s$  服从对数正态分布<sup>[3]</sup>, 则可靠度指标<sup>[4]</sup> 为

$$\beta = \frac{E[\ln F_s]}{\sigma_{\ln F_s}} \tag{4}$$

式中,  $E(\ln F_s) = \ln(E[F_s]) - \left(\frac{\sigma_{\ln F_s}^2}{2}\right)$

$$\sigma_{\ln F_s} = \sqrt{\ln \left[ 1 + \left(\frac{\sigma_{F_s}}{E(F_s)}\right)^2 \right]}$$

将式(2)代入式(4), 同样可获得该分布下的可靠度表达式。

2.3 最小可靠度指标 ( $\beta_{\min}$ ) 破坏面的确定

要确定  $\beta_{\min}$ , 必须保证式(3)中  $\beta$  表达式的分母最大, 即要确定安全系数敏感性最大的一个潜在破坏面 (与  $\beta_{\min}$  对应, 本文称之为最小可靠度指标破坏面或最大概率破坏面)。

以二层介质、2 个参数 (粘结力  $c$  和摩擦角  $\varphi$ ) 的情况为例, 说明确定最小可靠度指标破坏面位置的算法:

1) 把强度参数值指定成特定组合, 按顺序地把每个参数调整到弱值 ( $E[X_i] - m\sigma[X_i]$ ), 其中  $m$  为减小  $\sigma$  的倍数, 通常取  $m=1$ , 而其他参数则指定在其均值, 从而获得这些组合:

$$F_{s1} = f(c_1^-, E[\varphi_1], E[c_2], E[\varphi_2])$$

$$F_{s2} = f(E[c_1], \varphi_1^-, E[c_2], E[\varphi_2])$$

$$F_{s3} = f(E[c_1], E[\varphi_1], c_2^-, E[\varphi_2])$$

$$F_{s4} = f(E[c_1], E[\varphi_1], E[c_2], \varphi_2^-)$$

依此 4 种参数组合, 按常规方法, 搜索各自的最危险破坏面 ( $s_i$ ), 求得每种参数组合的最小安全系

$F_s - 1 = 0$ 。按均值一次二阶矩方法 (MFOSM)<sup>[2]</sup>, 若  $F_s$  服从正态分布<sup>[3]</sup>, 其可靠度表达式为

$$F_s(\mu_{X_i}) - 1$$

标准差  $\sigma[X_i]$  的土参数值, 求得相应的安全系数  $F_s^+$  和  $F_s^-$  并代入式(2)

$$\frac{\partial F_s}{\partial X_i} = \frac{F_s^+ - F_s^-}{2\sigma[X_i]} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1), 整理得简化统计矩法的可靠度表达式

数  $F_{s_i}$ 。每种参数组合将得到一个最危险破坏面  $S_i$  和一个安全系数  $F_{s_i}$ 。

2) 采用式(3)对所获得的每个破坏面进行完整计算, 求得各自的  $\beta_i$ 。

$$F_{s1} = f(c_1^-, E[\varphi_1], E[c_2], E[\varphi_2]) \rightarrow S_1, \beta_1$$

$$F_{s2} = f(E[c_1], \varphi_1^-, E[c_2], E[\varphi_2]) \rightarrow S_2, \beta_2$$

$$F_{s3} = f(E[c_1], E[\varphi_1], c_2^-, E[\varphi_2]) \rightarrow S_3, \beta_3$$

$$F_{s4} = f(E[c_1], E[\varphi_1], E[c_2], \varphi_2^-) \rightarrow S_4, \beta_4$$

3) 在步骤 1) 找到的破坏面中, 确认安全系数最小者所对应的破坏面为最小可靠度指标破坏面。

$$F_{s \min} = \min(F_{s_i})$$

由式(3)得知, 对应  $\beta_{\min}$  值的  $\frac{\partial F_s}{\partial X_i}$  必须是最大的。而在所有参数组合的计算结果中,  $\beta_{\min}$  对应的  $F_s^-$  必然是最小的, 相应地, 其所对应的参数  $X_i$  为最敏感参数, 即控制性参数。故此, 通过最敏感参数很容易搜索到  $\beta_{\min}$  所对应的破坏面。反言之, 这一破坏面对应的  $\beta_i$  也必为所有  $\beta_i$  中的最小值。

3 台阶边坡可靠性分析

3.1 组成台阶边坡的冰碛土特性

西端帮冰碛土自身组成和结构具有以下特点:

1) 冰碛土固相可简单地看作由“二元材料”组成, 即软弱的粘质土和坚硬的砾石, 粘质土为基质, 砾石为填充物, 而砾石级配极为宽阔, 粒径从 2 mm 到约 1.5 m;

2) 不同粒径的砾石, 无分选地随机分布在粘土基质中, 就是说, 砾石分布具有强烈的不均匀性和随机性。在沉积过程中, 由于环境的制约, 在局部, 砾

石含量可能相对集中,呈“聚团”状产出,或者粘质土相对集中,形成粘质土夹砾的透镜体,凝视成层,显示出“聚团”状产出、组成多变的特性;

3)砾石与粘质土间的胶结程度决定于含水量和产出部位,一般较弱,特别是裸露在坡面的冰碛土,由于暴雨冲刷、日久风化作用和爆破振动影响,多已失去粘结能力,在很多台阶边坡地段分散地坍塌在平台上,或者平台已被冲蚀。

### 3.2 计算方案

在已发生滑坡、塌落和冲蚀破坏的台阶边坡中,以单台阶、双台阶边坡为主,也有极少量三台阶边坡破坏的情况。因此,在进行设计台阶边坡可靠性分析时,制定了下述三个计算方案:

方案 I :单台阶;

方案 II :双台阶;

方案 III :三台阶。

与此同时,还对结构调整(坡角保持不变,改变台阶平台宽度组合)之后的台阶边坡进行可靠性分析,以便与现有设计方案进行优劣比较,为将来的设计更改提供可靠依据。

### 3.3 参数取值

分析所采用的台阶边坡几何参数见表 1 和表 2。

表 1 原设计方案台阶几何参数

计算方案	台阶数/组	高度/m	坡角/(°)	平台宽度/m
I	单	12	40	6
II	双	24	40	6.6
III	三	36	40	6.6、10

表 2 推荐方案台阶几何参数

计算方案	台阶数/组	高度/m	坡角/(°)	平台宽度/m
I	单	12	40	3
II	双	24	40	3、10
III	三	36	40	3、3、10

在选取强度参数时,考虑到风蚀作用、雨水冲刷作用以及爆破引起的松动作用等会造成边坡表层冰碛土强度的急剧降低,依据相关参数研究实例,对抗剪强度参数<sup>[5]</sup>( $c$ 和 $\varphi$ ,服从正态分布)进行了经验折减。冰碛土体物理力学指标见表 3。

表 3 冰碛土物理力学指标

参数名称	$c$ /kPa	$\varphi$ /(°)	$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
均值	100.0	20.0	18.6
标准差	89.4	2.4	

### 3.4 计算结果

选用 GEOSTUDIO 系列软件中的 SLOPE/W 模块<sup>[6]</sup>,以简化 BISHOP 法<sup>[7]</sup>计算安全系数,以简化统计矩法进行台阶边坡的可靠性分析。原设计方案边坡台阶最小可靠度指标破坏面位置的搜索过程见图 1。

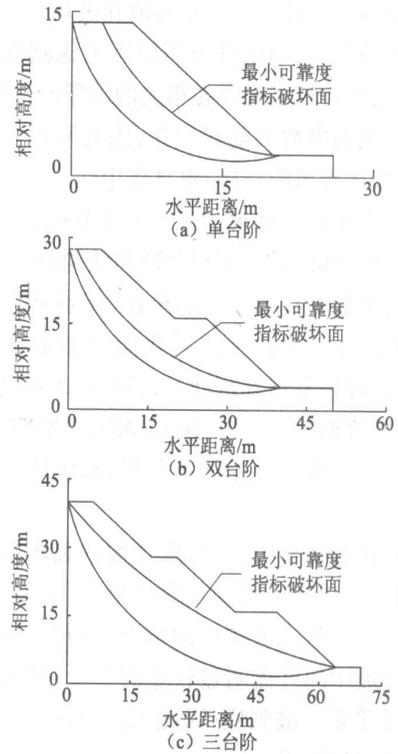


图 1 最小可靠度指标( $\beta_{\min}$ )破坏面位置的搜索过程

在原设计方案和推荐方案下计算得到的可靠度指标、破坏概率以及安全系数见表 4 和表 5。

表 4 原设计台阶边坡可靠性计算结果

计算方案	$\beta$	$p_f$ /%	$\bar{F}_s$
I	0.77	22.06	3.59
II	0.80	21.19	2.53
III	0.56	28.77	2.16

注:  $p_f$  为破坏概率;  $\bar{F}_s$  为以状态参数均值求得的安全系数。

表 5 推荐方案边坡台阶可靠性计算结果

计算方案	$\beta$	$p_f$ /%	$\bar{F}_s$
I	0.99	16.11	4.33
II	0.71	23.88	2.47
III	0.82	20.61	2.44

### 3.5 结果分析

1)从表 4 和 5 中的计算结果来看,以状态参数均值计算的台阶边坡安全系数(并非安全系数均值)

较大,无论是设计边坡,还是本研究所分析边坡;无论是单台阶,还是2或3台阶组合,均在2.16至4.33之间,表明是稳定的。然而,原设计和本研究所分析台阶(组)边坡预计的破坏概率分别高达22.06%~28.77%和16.11%~20.61%,与现状台阶边坡的高破坏概率(为50.7%)相对应,证明了预测结果的准确性。安全系数值和破坏概率值的对比结果充分表明,确定性分析因不考虑状态参数的不确定性,而计算结果存在很大的局限性;可靠度分析考虑了状态参数的随机变化,因而所提供的破坏概率值(即工程风险指标)更具实用性<sup>[8,9]</sup>。

2)冰碛土台阶边坡的破坏概率很高,主要原因是:①冰碛土体组成的不均匀性和结构的多变性,造成其强度参数变化的高度随机性,特别是 $c$ 值变异系数达0.89;②冰碛土抗风化能力和水理性质不良,在暴雨冲蚀和爆破振动下,必然造成强度值急剧降低,进而逐渐导致台阶(组)边坡发生滑坡、塌落和冲蚀等破坏。各种破坏的不断累积,破坏了整个采场的形象。

3)在计算结果中,三台阶边坡的破坏概率同样较高,似乎与现状边坡的观察结果(西端帮边坡中,很少发生三台阶边坡破坏的情况)不符。原因在于原设计边坡中间并无明显较宽的平台(最宽也仅为10m),几乎是一坡到底,因此无法发挥三台阶组合宽平台的工程作用。

4)在保持台阶边坡坡角不变的情况下,将台阶组平台宽度由6m、6m和10m调整为3m、3m和16m后,单台阶和双台阶边坡破坏概率之和有小幅下降,由43.25%(22.06%+21.19%)下降至39.99%(16.11%+23.88%)。这表明单台阶边坡几何因素对可靠度值影响不显著,主要受强度参数控制。而第3台阶的16m宽平台则可以有效降低破坏概率(从28.77%下降至20.61%),且可以全部拦截其上部的单台阶滑坡土体。

#### 4 结论

1)简化统计矩法使用现有的边坡稳定性程序,不需专门的搜索程序,为边坡稳定性分析搜索最小

可靠度指标破坏面提供了一种简单而有效的方法。

2)简化统计矩法实质上是可靠度指标为中心,求取最小可靠度指标的一种方法。就其准确程度而言,势必高于“在最小安全系数破坏面上求取最小可靠度”的方法。

3)受冰碛土固有特性和边坡工作环境的影响,台阶边坡破坏概率较高,预示将来台阶边坡发生一定规模的、甚至超出人们可接受的风险水平的破坏不可避免。为提高台阶边坡的稳定性,保持坡面的美观,建议采用本研究推荐的平台宽度为3m、3m和16m的三台阶组方案,以拦截破坏碎石。同时采用截洪和护坡措施,以有效阻止冰碛土风化和强度衰减。

#### 参 考 文 献

- [1] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京:冶金工业出版社,1993:280-292.
- [2] 王家臣. 边坡工程随机分析原理[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996:51-65.
- [3] 盛 骤,谢式干,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,1989:53-57.
- [4] James M D. The use of back analysis to reduce slope failure risk[J]. Civil Engineering Practice Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Spring-Summer, 1999, 14(1):75-91.
- [5] 徐鼎平. 某露天矿采场边坡冰碛土强度和变形特性的研究[R]. 安徽马鞍山:马鞍山矿山研究院,2006:54-68.
- [6] John K. Stability Modeling with SLOPE/W[S]. Canada: GEO-SLOPE International, LTD, 2004:257-295.
- [7] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996:308-312.
- [8] 罗文强,龚 珏. Rosenblueth方法在斜坡稳定性概率评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):232-235.
- [9] 罗文强,王亮清,龚 珏. 正态分布下边坡稳定性二元指标体系研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(13):2288-2292.

收稿日期:2006-12-04