

## 考虑参数空间变异性的尾矿坝可靠度及稳定性分析

夏源 王学良

云南省设计院集团有限公司, 云南 昆明 650100

**[摘要]**尾矿库一旦垮坝会对下游居民的生命财产安全造成巨大的损失, 因此尾矿库的安全管理尤为重要。大塔冲尾矿库现对其进行增容改造, 增容后设计标高较原设计增加 12 米, 为保证尾矿库的安全稳定, 对其稳定性进行研究。分析尾矿坝稳定性的有稳定分析法及有限元强度折减法, 有限元强度折减法虽克服了极限平衡法将岩土体看作刚体的缺陷, 但其忽略了尾矿坝在运行中岩土体的变异性和离散性。为更好地评价尾矿坝的稳定性, 论文对坝体建立三维模型, 采用有限元强度折减法进行分析其稳定性, 又以遗传算法和空间变异理论为基础, 对尾矿沉积后的物理力学参数进行空间变异性分析, 使用可靠度原理对尾矿坝的稳定性作评价。通过多方法的分析研究, 确保分析结果更为准确、安全可靠。

**[关键词]**尾矿库; 强度折减法; 遗传算法; 空间变异理论; 可靠度理论

DOI: 10.33142/ec.v6i4.8081

中图分类号: TU470

文献标识码: A

## Analysis of Reliability and Stability of Tailings Dams Considering Spatial Variability of Parameters

XIA Yuan, WANG Xueliang

Yunnan Design Institute Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650100, China

**Abstract:** Once the tailings pond collapses, it will cause huge losses to the life and property safety of downstream residents, so the safety management of the tailings pond is particularly important. The Datachong Tailings Pond is now undergoing capacity expansion and reconstruction. After capacity expansion, the design elevation is increased by 12 meters compared to the original design. In order to ensure the safety and stability of the tailings dam, its stability is studied. There are stability analysis methods and finite element strength reduction methods for analyzing the stability of tailings dams. Although the finite element strength reduction method overcomes the defect of the limit equilibrium method in treating rock and soil as rigid bodies, it ignores the variability and dispersion of rock and soil during the operation of tailings dams. In order to better evaluate the stability of tailings dams, the paper establishes a three-dimensional model of the dam body, uses the finite element strength reduction method to analyze its stability, and based on genetic algorithms and spatial variation theory, conducts spatial variability analysis of physical and mechanical parameters after tailings deposition, and uses the reliability principle to evaluate the stability of tailings dams. Through multi method analysis and research, it ensures that the analysis results are more accurate, safe and reliable.

**Keywords:** tailings pond; strength reduction method; genetic algorithm; spatial variation theory; reliability theory

### 引言

目前对尾矿稳定性的数值模拟方法是极限平衡法和有限元法强度折减法, 极限平衡法忽略将岩土体看作刚体, 忽略了岩土体的散粒性, 而有限元强度折减法忽略了岩土体的变异性和离散性<sup>[1]</sup>。实际上尾矿坝由于筑坝类型、排放方式、生产周期及尾矿原材料不同, 尾矿材料的岩土参数会呈现出显著的空间变异性。大量研究表明岩土参数的空间变异性对尾矿坝的可靠度与稳定性影响显著<sup>[1-3]</sup>。合理地分析和考虑岩土参数空间变异性, 可以较为准确地分析尾矿坝的可靠度。论文采用两种方法对尾矿坝进行稳定性分析, 第一种是采用强度折减法进行稳定性分析, 第二种是基于空间变异理论建立尾矿坝土体力学参数的变异函数, 并对其估值, 再使用可靠度理论对尾矿坝进行分析, 得出尾矿坝的失效概率, 再将来只能各种方法进行对比分析, 为尾矿坝的稳定安全分析提供一种新的分析方法和思路。

### 1 分析方法概述

#### 1.1 有限元强度折减法

有限元强度折减法是以前加荷步骤为准则, 分析过程中不断调整加载在计算模型上的荷载, 从而得出计算结果的一种通常意义上的弹塑性有限元分析法。有限元强度折减法的基本原理是先选定一折减系数  $F_m$ , 然后分别输入式 (1) 和式 (2), 再将折减后的黏聚力  $c_f$  值和内摩擦角  $\varphi_f$  值输入式 (3), 直至得出的抗剪力  $\tau_f$  达到尾矿坝的临界破坏值, 此时的折减系数  $F_m$  即为尾矿坝的安全系数。

$$c_f = c / F_m \quad (1)$$

$$\varphi_f = \arctan(\tan \varphi / F_m) \quad (2)$$

$$\tau_f = c_f + \sigma \tan \varphi_f \quad (3)$$

## 1.2 空间变异理论

空间变异理论是研究地质统计学的主要工具,尾矿材料的岩土参数同样也具有空间变异性,地质统计学是一种比较有效可行的方法,它采用随机场分析方法,可以反映堆积体参数的空间变异二重特性。现采用地质统计学的方法,对尾矿材料的岩土参数的空间变异性进行分析。

### 1.2.1 变异函数的定义

变异函数是研究在空间上有随机性和结构性的数据的方法<sup>[4]</sup>,用该方法对这些数据进行最优无偏内插估计。由于变异函数 $\gamma(h)$ 是未知的,必须通过样本数据进行预估,所以需要寻找一个有效的理论模型模拟合成变异函数 $\gamma(h)$ 。经研究,通过球状模型模拟合成变异函数 $\gamma(h)$ 是一种有效的方法。

球状模型亦称马特隆模型,它的一般公式如式(4)所示。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ c_0 + c\left(\frac{3}{2} \times \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \times \frac{h^3}{a^3}\right) & 0 < h \leq a \\ c_0 + c & h > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $c_0$ —块金值;

$c$ —拱高;

$c_0 + c$ —基台值;

$a$ —变程。

## 1.3 遗传算法原理

遗传算法是一种自适应优化搜索法<sup>[5]</sup>,其基本步骤如下所示:

(1) 编码与解码。编码过程和解码过程如式(5)和式(6)所示。

$$\begin{aligned} 000000 \cdots 0000 &= 0 \rightarrow a_1 \\ 000000 \cdots 0001 &= 1 \rightarrow a_1 + \delta \\ \vdots & \\ 111111 \cdots 1111 &= 2^k - 1 \rightarrow a_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$a_1 + \left(\sum_{i=1}^k b_i \cdot 2^{i-1}\right) \cdot \frac{a_2 - a_1}{2^k - 1} \quad (6)$$

(2) 个体适应值计算及优劣评价: 适应度函数值越大,个体对环境的适应能力越强,适应度函数值越小,个体对环境的适应能力越弱。

(3) 选择运算: 将适应能力强的个体选中并保留,将其优良基因遗传给下一代。

(4) 交叉运算: 将上一步运算中留下的优良个体随机配对,使它们作交叉运算,形成更优良的个体。

(5) 变异运算: 随意选中一部分个体,使其发生变异,然后通过一系列的运算繁殖出下一代群体。

(6) 终止条件判断: 如果某一代的进化代数没有达

到最大进化代数,则转到第二步骤,继续计算;如果某一代的进化代数超过了最大进化代数,则将进化过程中具有最大适应度的个体作为最优解输出,计算终止。通过以上计算可以对变异函数的参数进行求解。

## 1.4 克里金估值方法

如果变量只满足固有假定条件而不满足二阶平稳时,就可以使用普通克里金估值法进行估值<sup>[4]</sup>,普通克里金估值法的估计公式如(7)所示。

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (7)$$

式中,  $Z^*(x_0)$ 为估值点的估计值;  $\lambda_i$ 为某一个估值点的权重;  $Z(x_i)$ 为观测点的观测值。

普通克里金估值法估计误差的平均值如式(8)所示。

$$E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = E[Z(x_0)] \cdot \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1\right) \quad (8)$$

为了保证无偏估值,令  $E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0$ ,于是可以得到式(9)。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (9)$$

根据式(9),可以将估计值误差的方差简化如式(10)所示。

$$S = \text{Var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) \quad (10)$$

因为式(9)的限制,求估计方差的极小值时须引入一个拉格朗日乘数 $\mu$ ,如式(11)。

$$S = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) - 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1\right) \quad (11)$$

使估计方差最小,并根据这一条件推导出计算权重的克里金的线性方程,如式(12)所示。

$$\frac{\partial S}{\partial \lambda_1} = 0, \frac{\partial S}{\partial \lambda_2} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial \lambda_n} = 0 \quad (12)$$

根据式(12)可得式(13)。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_j - x_0), & j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (13)$$

转换成行列式,如(14)所示。

$$\begin{vmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma_{01} \\ \vdots \\ \gamma_{0n} \\ 1 \end{vmatrix} \quad (14)$$

解此方程组,可得所有的权重  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  以及拉格朗日乘数  $\mu$ 。最后可得克里金估值的公式和方差的计算公式,分别如(15)和(16)所示。

$$S = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) + \mu \quad (15)$$

$$\sigma_{OK}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_0 - x_i) + \mu \quad (16)$$

### 1.5 可靠度分析 JC 法原理

从国内外研究成果看,用于岩土工程可靠度分析中较为成熟的方法主要有:一次二阶矩法、改进一次二阶矩法、JC 法、蒙特卡罗法和协方差转换法等。JC 法因国际安全度联合委员会(JCSS)推荐采用此方法而得名。

JC 法可考虑非正态的随机变量,在计算工作量增加不多的条件下可对可靠度指标  $\beta$  进行较高精度的近似计算,且分析过程相对简单,收敛速度较快<sup>[6]</sup>,故在工程中应用性较强。结构的极限状态一般由两个及两个以上的变量组成,因此极限状态方程可以写为:

$$Z = R - Q - G = 0 \quad (17)$$

极限状态方程可写为:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (18)$$

方程(17)既可以是线性的,也可以是非线性的,表示的是坐标系  $X_1, X_2, \dots, X_n$  中的一个曲面,该曲面把  $n$  维空间一分为二,形成安全区和失效区两个部分。

JC 法的主要计算步骤如下:

建立极限状态方程  $Z = R - Q - G = 0$ 。

计算正态随机变量  $X_i$  的均值  $\mu_{x_i}$  和标准差  $\sigma_{x_i}$ 。

假设验算点  $P^*$ , 按照公式  $-\frac{\partial g}{\partial R} \Big|_{P^*} \sigma_R = A$ ,

$-\frac{\partial g}{\partial G} \Big|_{P^*} \sigma_G = B$ ,  $-\frac{\partial g}{\partial Q} \Big|_{P^*} \sigma_Q = C$  进行计算。

按照  $\cos\theta_R = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$ ,  $\cos\theta_G = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$ ,

$\cos\theta_Q = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$  计算。

按照  $R^* = \mu_R + \beta\sigma_R \cos\theta_R$ ,  $G^* = \mu_G + \beta\sigma_G \cos\theta_G$ ,

$Q^* = \mu_Q + \beta\sigma_Q \cos\theta_Q$  计算验算点,再将验算点值代入极限状态方程计算可靠度指标  $\beta$  值。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

大塔冲尾矿库 1987 年建成,为适应生产需要需对其进行增容改造,由原来的 930 万  $m^3$  增扩为 1300 万  $m^3$ ,由四等库升为三等库。尾矿库有主坝和四个副坝,主坝和 3<sup>#</sup>副坝位置关系见总平面图 1。3<sup>#</sup>副坝初期坝高 3.5m,坝顶标高是 1364.1m,坝长 127m。3<sup>#</sup>副坝增容改造后的设计标高为 1386.0m,其剖面图如图 2 所示。



图 1 总平面图

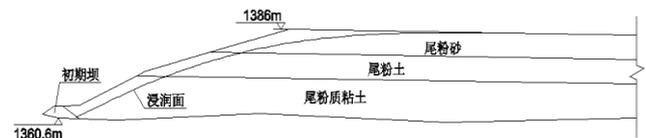


图 2 3<sup>#</sup>副坝洪水工况剖面图

### 2.2 稳定性分析

采用 Midas GTS 建立 3<sup>#</sup>副坝的三维分析模型,模型整体尺寸为 350m×300m×25.4m,共建立 257465 个单元,49776 个节点,土体根据地质条件分为 7 层土层,整体模型图如图 3 所示,各土层的计算参数选取见表 1。

以 Mohr-Coulomb 准则为基础,采用强度折减法对正常工况和洪水工况的条件下的 3<sup>#</sup>副坝进行坝体的稳定性分析。其在正常及洪水工况下的整体位移、X 向位移、Y 向位移、Z 向位移和潜在滑裂面位置的计算结果如图 4、图 5 所示,计算结果对照表如表 2 所示。

表 1 各土层材料参数

土层种类	$\gamma$ /kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_s$ /kN/m <sup>3</sup>	c/kPa	$\phi$ /°	c (水下) /kPa	$\phi$ /° (水下)	e/MPa	$\mu$	$k_v$ / $10^{-4}$ /cm/s
尾粉土	20.00	16.40	12.85	11.26	10.28	9.01	29.00	0.40	$4.61 \times 10^{-6}$
尾粉质黏土	20.40	15.80	10.22	6.42	8.18	5.14	26.00	0.40	$1.80 \times 10^{-12}$
尾粉砂	15.90	15.00	5.75	5.32	4.60	4.26	30.00	0.41	$2.13 \times 10^{-6}$
初期坝	21.00	14.00	15.00	36.00			60.00	0.32	$5.00 \times 10^{-4}$
红黏土	19.00	15.00	50.00	13.00			350.00	0.38	$1.00 \times 10^{-7}$
泥灰岩	19.50	14.00	170.00	15.00			500.00	0.35	$1.00 \times 10^{-10}$
石灰岩	23.00	16.00	150.00	38.00			2000.00	0.28	$1.00 \times 10^{-10}$

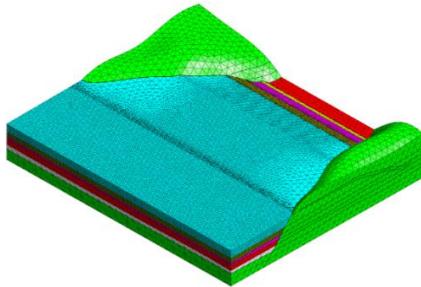


图3 3#副坝三维模型

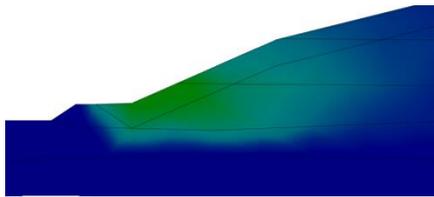


图4 正常工况滑裂面

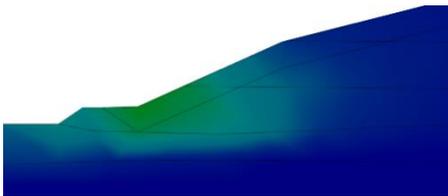


图5 洪水工况滑裂面

表2 位移及安全系数结果表

工况	整体位移/cm	安全系数	规范要求	结论
正常	21.62	1.12	1.20	安全储备不足
洪水	21.45	1.05	1.10	安全储备不足

由表2可以看出,在正常工况和洪水工况下,3#副坝的整体位移和Z向位移都不是很大,X向位移和Y向位移都很小,均在正常范围内;正常工况下3#副坝的安全系数为1.12,洪水工况下的为1.05,均大于1而小于规范规定的值,说明在两种工况下3#副坝的安全储备度均不足。

### 2.3 可靠性分析

#### 2.3.1 遗传算法拟合参数

根据遗传算法拟合3#副坝尾矿层的球状模型参数,计算的球状模型参数表3所示。

表3 球状模型参数

参数	土类											
	尾粉砂				尾粉土				尾粉质黏土			
	C <sub>0</sub>	a	C	C <sub>0</sub> +C	C <sub>0</sub>	a	C	C <sub>0</sub> +C	C <sub>0</sub>	a	C	C <sub>0</sub> +C
c	2.38	60.0	32.2	34.66	30.1	60.7	58.3	88.49	2.07	62.3	100.	102.9
	15	231	827	42	858	399	087	45	24	299	903	754
φ	40.4	37.7	21.4	61.95	2.10	50.0	3.20	5.300	44.0	63.2	13.0	57.00
	868	985	648	16	04	793	03	7	002	389	026	28
γ	0.01	40.1	0.31	0.329	0.01	30.0	0.70	0.719	0.02	50.0	0.60	0.620
	16	201	78	4	63	746	30	4	01	000	00	1
γ <sub>d</sub>	0.04	49.5	0.33	0.372	0.01	40.0	1.84	1.857	0.49	62.2	0.41	0.904
	13	948	16	9	38	072	32	0	33	848	10	3

将尾矿土层的球状模型参数代入式(4)得尾矿土层的变异函数,如尾粉砂的变异函数式见式(19)所示,其余参数的变异函数式也同理可得。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 2.3815 + 32.2827 \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{60.0231} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{60.0231^3} \right) & 0 \leq h \leq 60.0231 \\ 34.6642 & h > 60.0231 \end{cases} \quad (19)$$

#### 2.3.2 尾矿力学参数估值及可靠度计算

使用克里金估值方法对大塔冲3#副坝的三层尾矿进行估值,将得到的参数的平均值μ和标准差σ整理成表,分别如表4和表5所示。

表4 抗剪强度指标平均值表

类别	γ /kN/m <sup>3</sup>	γ <sub>d</sub> /kN/m <sup>3</sup>	γ <sub>sat</sub> /kN/m <sup>3</sup>	c /kPa	φ 正切值	c/kPa (水下)	φ 正切值 (水下)
尾粉砂	15.998	15.104	25.104	30.879	0.560	24.703	0.432
尾粉土	20.130	16.149	26.149	26.797	0.614	21.437	0.471
尾粉质黏土	20.390	15.741	25.741	34.928	0.453	27.943	0.353

表5 抗剪强度指标标准差表

类别	γ /kN/m <sup>3</sup>	γ <sub>d</sub> /kN/m <sup>3</sup>	γ <sub>sat</sub> /kN/m <sup>3</sup>	c /kPa	φ 正切值	c/kPa (水下)	φ 正切值 (水下)
尾粉砂	0.302	0.327	0.327	3.903	0.076	3.122	0.055
尾粉土	0.507	0.815	0.815	7.131	0.034	5.705	0.024
尾粉质黏土	0.358	0.503	0.503	6.254	0.089	5.004	0.067

将表4和表5中的数据输入到JC法中进行计算,得出大塔冲3#副坝在正常工况和洪水工况下的可靠度指标及失效概率,如表6所示。

表6 可靠度指标及失效概率

工况	失效概率 P <sub>f</sub>	可靠度指标 β	规范要求	结论
正常工况	1.70 × 10 <sup>-4</sup>	2.93	3.2	可靠度储备不足
洪水工况	1.29 × 10 <sup>-1</sup>	1.13		可靠度储备不足

由表6可以看出在正常工况下,3#副坝的可靠度指标为2.93,在洪水工况下的可靠度指标为1.13,均大于1并且小于规范<sup>[20]</sup>所规定的值,说明在两种工况下,大塔冲3#副坝的可靠度储备均不足。

### 3 结论

以可靠度理论对3#副坝进行稳定性分析,可得到如下结论:

(1) 采用有限元强度折减法分析 3<sup>#</sup>副坝的稳定性, 克服了极限平衡法将岩土体看作刚体的缺陷。但以强度折减法评价尾矿坝的稳定性, 其结果不精确, 因其忽略了尾矿参数的变异性和离散性。

(2) 采用遗传算法拟合岩土体力学参数, 可以得到其全局最优解, 因为遗传算法具有搜索全局最优解的特性; 同时也可以较好地拟合岩土体力学参数, 得到其变异规律的变异函数模型

(3) JC 法的分析结果和有限元强度折减法基本一致, 但因 JC 法进行可靠度分析时, 把尾矿参数的空间变异性考虑进行可靠度分析, 分析结果更为客观、可靠。且该方法简便、高效快捷、计算精度较高, 在实际工程中较易推广实施。

#### [参考文献]

[1] 陈鹏, 魏作安, 夏丽媛. 考虑土性空间变异的尾矿坝失稳概率分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015(1): 66-70.

[2] 张超, 杨春和, 徐卫亚. 尾矿坝稳定性的可靠度分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1706-1711.

[3] 郑颖人, 张玉芳, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法在元磨高速公路高边坡工程中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(21): 14-19.

[4] 张仁铎. 空间变异理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[5] 吕文杰, 李晓军, 朱合华. 基于遗传算法的边坡稳定分析通用算法 [J]. 岩土工程学报, 2005(5): 595-599.

[6] 谭晓慧, 王建国. 改进的响应面法及其在可靠度分析中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(24): 5874-5879.

作者简介: 夏源 (1993. 2-), 云南玉溪, 研究方向: 尾矿坝及边坡可靠度分析, 职位: 云南省设计院工程师; 王学良 (1990. 11-), 云南昆明, 研究方向: 道路工程边坡稳定分析, 职位: 云南省设计院工程师。