



# 库区码头加筋岸坡稳定性的可靠度分析

邓方明

(四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017)

**摘要:** 以一座向家坝库区码头的加筋岸坡稳定性为研究对象, 根据简化 Bishop 理论, 建立了加筋岸坡的稳定性极限状态函数, 并采用 Monte Carlo 模拟法对土体密度  $\rho$ 、抗剪强度  $c$  和  $\varphi$  值、加筋材料强度及水位等参数进行随机抽样和岸坡的可靠度分析, 最后分析了土体抗剪强度  $c$ 、 $\varphi$  值的相关系数对岸坡安全系数均值和可靠度指标的影响, 得出了一些有益的结论。

**关键词:** 加筋岸坡; Monte Carlo 模拟法; 标准差; 可靠指标; 失效概率

**中图分类号:** U 656.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2016)11-0099-06

## Reliability analysis of reinforced slope stability of wharf in reservoir area

DENG Fang-ming

(Sichuan Communication Surveying & Design institute, Chengdu 610017, China)

**Abstract:** The reinforced slope stability of a wharf in Xiangjiaba reservoir was taken for research. Based on simplified Bishop theory, the reinforced slope stability limit state function was build, and the Monte Carlo simulation was used in soil density  $\rho$ , shear strength  $c$ ,  $\varphi$ , reinforced material strength and water parameters such as random sampling and reliability analysis of slope. Finally, the influence analysis of values of the mean slope safety factor and reliability index by the soil  $c$ ,  $\varphi$  affect the correlation coefficient was done, which obtained some useful conclusions.

**Keywords:** reinforced slope; Monte Carlo simulation method; standard deviation; reliability index; failure probability

金沙江是长江的上游河段, 属山区型河流, 河道狭窄, 滩多流急, 随着金沙江下游规划的 4 个梯级开发建设, 该段航道将形成 735 km 库区深水航道, 航运条件得以根本改善, 其中向家坝枢纽是最下游一个梯级, 上距溪洛渡枢纽坝址 157 km, 下距宜宾市 33 km, 也是唯一一个修建通航建筑物的梯级。2012 年 10 月, 向家坝枢纽蓄水后, 航道条件得到极大改善, 港口码头建设加速, 然受施工条件限制, 多数码头岸坡回填料都是就地取材, 一般多采用岸边冲积而成的砂砾土石, 为了提高这类回填料的抗剪强度, 增加岸坡的整体稳定性,

最简单经济的方法就是在填料中铺设加筋材料。因此, 研究库区大变幅水位作用加筋岸坡稳定性成为这类码头设计关注的重点。

岸坡稳定性的分析方法有基于极限平衡理论的定值分析法和可靠度分析法, 前者一般通过瑞典条分法、毕肖普法等计算出一个定值安全系数, 只要计算结果大于 1, 即认为岸坡稳定, 但实际工程中出现了安全系数大于 1 的岸坡失稳。后者通过分析水位、土体  $c$  和  $\varphi$  值、密度等变量的随机性质, 从概率的角度来进行统计分析, 运用可靠度分析法来与安全系数法作补充, 以此来

**收稿日期:** 2016-04-08

**作者简介:** 邓方明 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程设计及研究工作。

评价岸坡的稳定性。

笔者根据一座向家坝库区的斜坡码头工程实例,通过 geo-slope 软件,建立基于简化 Bishop 理论的加筋岸坡极限状态函数,利用 Monte Carlo 模拟法进行抽样,对该码头的加筋岸坡进行可靠度分析。

### 1 基本原理

#### 1.1 岸坡的失效概率及可靠度指标

岸坡可靠度<sup>[1]</sup>是指在规定的条件下和规定的使用期限内,岸坡稳定系数或安全储备大于或等于某一规定值( $F=R/S>1.0$  或  $Z=R-S>0$ )的概率,即岸坡保持稳定的概率。其中,规定的条件是指设计所预计的环境条件、指定的施工条件以及正常使用条件,而规定的使用期限,则是指岸坡工程的设计使用年限。

根据《港口工程结构可靠度统一标准》可知<sup>[2]</sup>,用来分析岸坡稳定性或者表征其安全性的函数,可以用极限状态函数  $Z$  表示:

$$Z=g(X_1,X_2,\dots,X_n) \quad (1)$$

式中: $Z$  可以是安全系数或安全储备等,在定值分析方法中是常量,可靠度分析中  $Z$  为随机变量; $X_1,X_2,\dots,X_n$  表示影响岸坡稳定的变量,如密度  $\rho$ 、粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、地下水位等,这些变量也是具有一定分布规律的随机变量。常见的  $Z$  及  $X$  变量分布形态有正态分布、对数正态分布、平均分布、三角形分布、广义样条分布。通常情况下,采用正态分布。

正态分布的概率密度函数:

$$f(z)=\frac{e^{-\frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}}}{\sigma_z\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

岸坡的可靠概率为:

$$P_s=P(Z>0)=\int_0^{+\infty} f_z(z) dz \quad (3)$$

岸坡的失效概率为:

$$P_f=P(Z<0)=\int_0^{+\infty} f_z(z) dz \quad (4)$$

可靠概率与失效概率关系:

$$P_s+P_f=1 \quad (5)$$

岸坡可靠度指标为:

$$\beta=\frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (6)$$

式中: $Z$  为变量; $\mu_z$  为均值; $\sigma_z$  为标准差。

由上式可以看出,岸坡可靠度分析的实质就是计算概率密度函数在失效域上的积分,规范上采用一次二阶矩法近似地求出可靠度指标,但该方法计算过程较复杂,因此,规范建议可以用 Monte Carlo 法直接进行模拟。

#### 1.2 Monte Carlo 模拟法<sup>[3]</sup>

Monte Carlo 模拟法又称随机抽样法或统计试验法,基本原理是:若已知状态变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的概率分布及极限状态函数方程  $Z=g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , 根据各随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的分布,利用 Monte Carlo 法产生符合状态变量概率分布的一组随机数  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 将这组随机数代入极限状态方程  $Z=g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , 计算得到极限状态函数的一个随机数。如此用同样的方法产生  $N$  个极限状态函数的随机数。如果在  $N$  个状态函数的随机数中有  $M$  个小于或等于 0(或 1), 当  $N$  足够大时,根据大数定律,此时的频率已近似于概率,因而可得失效概率:

$$P_f=P\{g(X_1,X_2,\dots,X_n)\} \quad (7)$$

也可由已得的  $N$  个  $g(x)$  值来求均值  $\mu_g$  和标准差  $\sigma_g$ , 从而得到可靠指标  $\beta$  和破坏概率  $P_f$ 。

由上文可知, Monte Carlo 模拟法是通过大量简单的重复抽样来实现的,因此,这种方法省却了繁复的数学推导和演算过程,具有简单、快速和精确等优点,适合在计算机上模拟。

#### 1.3 加筋岸坡的稳定性极限状态函数<sup>[4]</sup>

根据 Bishop 极限平衡法理论,式(1)的加筋岸坡极限状态函数可以表述为以下形式:

$$Z=\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \tan\varphi + cb_i) \varepsilon_i + \sum_{i=1}^m T_{ai} \cdot \frac{y_i}{R} \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n W_i \sin\theta_i} \quad (8)$$

其中 
$$\varepsilon_i = \frac{1}{\cos\theta_i + \frac{\tan\varphi\sin\theta_i}{z}} \quad (9)$$

式中： $W_i$ 为条块重力(kN)，浸润线以上取天然密度 $\times g$ ，以下取饱和密度 $\times g$ ； $\varphi$ 为土体内摩擦角； $c$ 为土体粘聚力； $b_i$ 为单个土条的宽度(m)； $\theta$ 为条块的重力线与通过此条块底面中点半径之间的夹角( $^\circ$ )； $T_{ai}$ 为筋带水平拉力； $y_i$ 为滑弧圆心至 $T_{ai}$ 的垂直距离。

## 2 实例分析

本文加筋岸坡可靠度分析采用 geo-slope 边坡稳定分析软件，该软件不仅可以利用极限平衡法计算出加筋岸坡的安全系数，还可以对荷载、水位、岩土体力学参数等随机变量指定概率分布，然后利用 Monte Carlo 计算出安全系数的概率分布，最后通过安全系数的数字特征计算出失效概率和可靠度指标。

### 2.1 工程概况

该码头位于向家坝库区中游，上距绥江县城约 15 km，下距向家坝枢纽坝址约 85 km，建设 500 吨级(兼顾 1 000 吨级)散货泊位一个，设计年吞吐量为散货 30 万 t。码头前沿结构采用架空斜坡道，斜坡道底高程 371.00 m，坡顶高程 381.50 m，纵坡坡比为 1:4。码头后方陆域平台高程为 381.50 m，总长 150 m，纵深 70 m，平台下部由

土工格栅+砂砾土石按 1:2 坡度回填形成，顶部浇筑 3 m 高 C20 混凝土挡土墙(图 1~2)。



图 1 蓄水至 370 m 在建中码头



图 2 蓄水至 380 m 建成后码头

### 2.2 模型建立及参数选取

#### 2.2.1 计算模型

码头场地土层自上而下由粉黏土夹砾石、砂卵砾石和泥岩组成，泥岩埋深超过 40 m，设计时挖除上层粉黏土夹砾石，换填砂砾土石，并在回填区中部增设 8 层土工格栅，土工格栅分层厚度为 50 cm，计算断面选斜坡道处岸坡断面(图 3)，建模时忽略斜坡道桩基对岸坡的影响，计算模型见图 4。

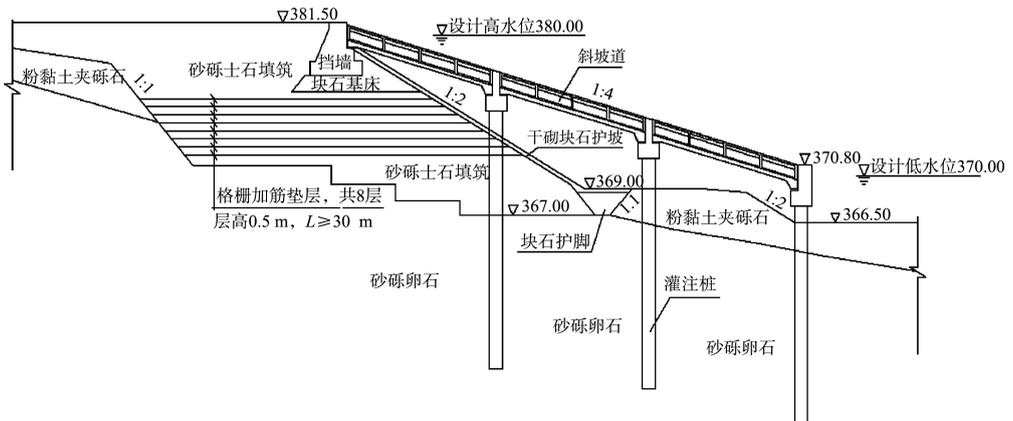


图 3 计算断面(单位: m)

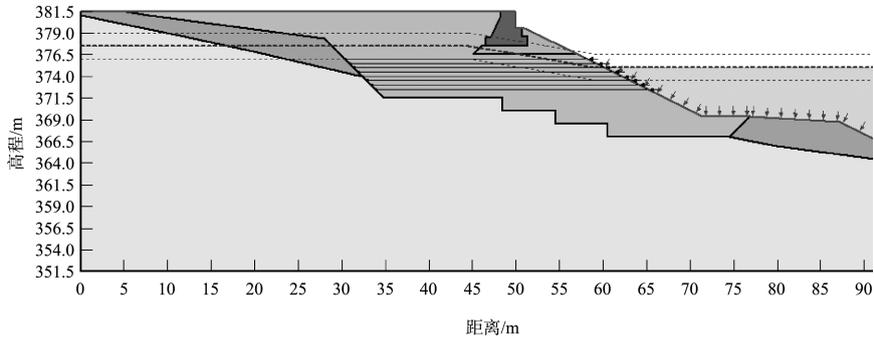


图4 计算模型

### 2.2.2 岩土体计算参数

计算分析时主要考虑土体密度  $\rho$ 、抗剪强度  $c$  和  $\varphi$  值、土工格栅强度、水位等参数对岸坡可靠

度的影响，并假定这些参数服从正态分布的独立随机变量。根据设计资料，计算模型土体及土工格栅计算参数见表1、2。

表1 土体计算参数指标

土体参数	砂砾卵石			砂砾土石			粉黏土夹砾石		
	$\rho/(t/m^3)$	$c/kPa$	$\varphi/(\circ)$	$\rho/(t/m^3)$	$c/kPa$	$\varphi/(\circ)$	$\rho/(t/m^3)$	$c/kPa$	$\varphi/(\circ)$
均值	22	0	29	21	10	35	20	12	17
标准差	0.1	1	8	0.1	3	10	0.1	3	5

表2 土工格栅计算参数

纵向抗拉强度/(kN/m)		似摩擦系数	
均值	标准差	均值	标准差
60	20	0.4	0.1

### 2.2.3 作用荷载

陆域堆场荷载 30 kPa，地震动峰值加速度 0.1g。

### 2.2.4 计算工况

向家坝枢纽正常蓄水位 380 m、死水位 370 m，各计算工况中坡后水位根据坡前水位增加 0.5~3 m，具体计算工况见表3。

表3 计算工况

工况	水位均值/m	标准差/m	水位差/m
1	370	0.3	3.0
2	375	0.3	2.0
3	380	0.3	0.5

## 2.3 可靠度计算结果分析

### 2.3.1 安全系数和可靠指标

为了便于比较分析，本文计算了加筋前和加筋后的岸坡可靠度。将上述参数代入极限状态函数模拟 3 000 次，得到岸坡安全系数均值和可靠指标，结果见表4。

表4 岸坡可靠度计算结果

水位/m	安全系数均值		可靠指标	
	加筋前	加筋后	加筋前	加筋后
370	1.201	1.342	3.351	4.803
375	1.189	1.330	2.606	4.094
380	1.255	1.411	4.011	5.507

从表4中可以看出，在各工况下，加筋前岸坡的安全系数均值和可靠指标均小于加筋后岸坡。在最危险水位为 375.00 m 时，加筋前岸坡的安全系数均值为 1.114，可靠度指标为 2.606；加筋后岸坡的安全系数均值为 1.330，可靠度指标为 4.904。《港口工程地基规范》<sup>[5]</sup> 中规定：“持久状况下，采用直剪固结快剪强度指标时，抗力分项系数(等同安全系数)最小值不小于 1.3”；《港口工程可靠度指标统一标准》规定：“安全等级为二级的结构可靠度指标 3.5，因土坡及地基抗力变异性较大，其可靠指标值较低”。因此，加筋前岸坡的安全系数均值不满足规范要求，而加筋后岸坡的安全系数均值和可靠指标均满足规范要求。

### 2.3.2 失效概率

在最危险水位 375.00 m 时，加筋前岸坡和加筋后岸坡的安全系数概率密度及分布函数见图5~8。

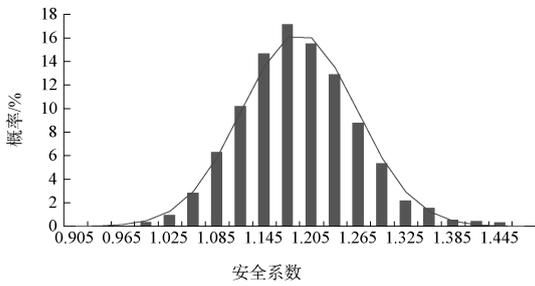


图 5 加筋前岸坡的安全系数概率密度

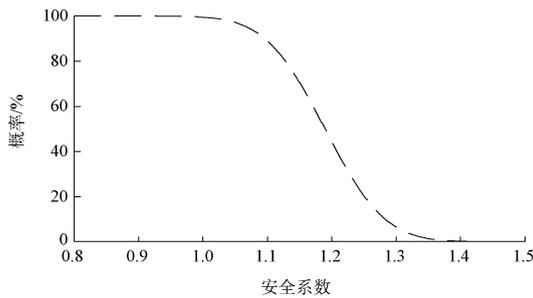


图 6 加筋前岸坡的安全系数概率分布

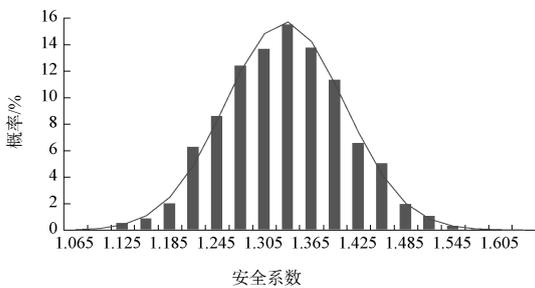


图 7 加筋后岸坡的安全系数概率密度

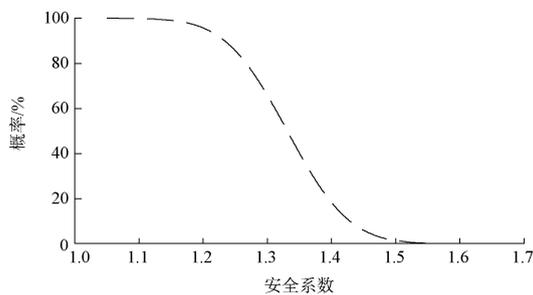


图 8 加筋后岸坡的安全系数概率分布

从图 5、6 可以看出，加筋前岸坡的安全系数最小值 0.965，最大值 1.489，安全系数小于 1 的概率为 0.45%。

从图 7、8 可以看出，加筋后岸坡的安全系数最小值 1.090，最大值 1.609，安全系数小于 1 的概率为 0。

综上分析，安全系数均值、可靠指标和失效概率的计算结果均表明：通过铺设加筋材料，码头回填区的岸坡稳定性及可靠度可以得到有效提高。从码头建成后运行情况来看，该岸坡至今未出现任何失稳迹象。

### 2.4 c、φ 值相关性对可靠度的影响

上述计算结果的前提是假定各随机变量互相独立，但各种土的室内试验表明，土体剪切强度是密切相关的，其相关系数将影响岸坡的概率分布。大量的土工试验研究表明土体剪切强度  $c$ 、 $\varphi$  值的相关系数在 -1 到 0 之间，本文计算了在 375 m 水位时，相关系数从 -1 变化到 0 时，加筋岸坡的可靠度，并绘制出安全系数均值和可靠度指标随相关系数变化曲线，见图 9、10。

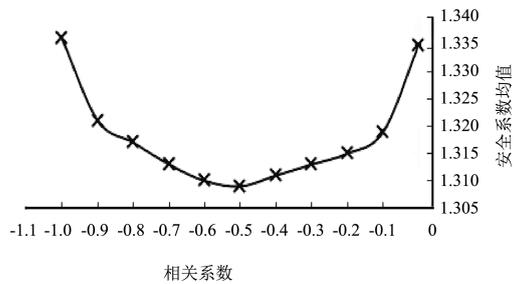


图 9 安全系数均值随相关系数变化曲线

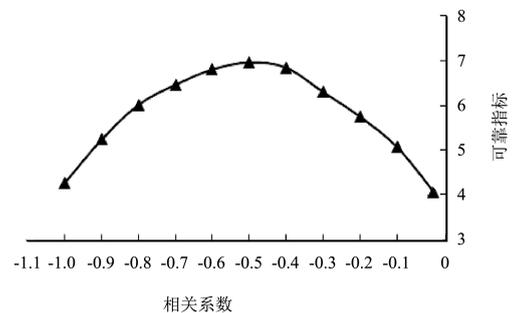


图 10 可靠指标随相关系数变化曲线

由图 9 可知，安全系数均值随相关系数呈凹型抛物线变化，安全系数均值最小值出现在相关系数为 0.5 时，最大值出现在两端，其他值基本沿 0.5 轴线对称分布，最大值 1.331 仅比最小值 1.304 大 2%。

由图 10 可知，可靠指标随相关系数呈凸型抛物线变化，与安全系数变化规律恰好相反，可靠

指标最小值出现在两端,最大值出现在相关系数为 0.5 时,最大值 6.93 比最小值 4.094 大 69%。

### 3 结论

1) 在库区修建码头时,受施工、地质等条件限制,陆域回填岸坡通过铺设加筋材料来增强土体抗剪强度,可以有效地提高岸坡整体稳定性的可靠概率。

2) 对于库区水位变幅大,地质复杂的码头岸坡,运用基于 Monte Carlo 模拟法的可靠度分析,采用安全系数均值、可靠指标和失效概率能较全面地评价岸坡的稳定性。

3) 在可靠度分析中,土体剪切强度  $c$ 、 $\varphi$  值

的相关性对加筋岸坡的安全系数均值影响较小,但对可靠指标影响较大,因此,计算分析时不能忽视相关系数的影响。

### 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: 8-11.

[2] GB 50158—2010 港口工程结构可靠度统一标准[S].

[3] 傅旭东,赵善锐.用蒙特卡洛方法计算岩土工程的可靠度指标[J].西南交通大学学报,1996,31(2): 164-168.

[4] 赵明阶,何光春,王多垠.边坡工程处治技术[M].北京:人民交通出版社,2003: 168-169.

[5] JTS 144-1—2010 港口工程地基规范[S].

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 76 页)

### 4 结论

1) 对于仅考虑自重和撞击力的工况组合,高水位的撞击力作用于最边跨排架的工况为变形的最不利工况,应作为变形验算的控制工况。

2) 框架码头不同排架的刚度差距较大时,刚度差大的排架易产生较大的位移差,对码头的空间整体性不利。

3) 对于设置有固定吊机的框架码头,固定吊机工作时会产生较大的水平力及弯矩,因此吊机基础需要较粗壮的立柱或加密的框架结构,造成位于码头中心附近的吊机所在的排架结构强度及刚度均大于其他一般排架,码头在最不利工况下会呈现出“平面上绕固定吊机基础为基点旋转”的位移趋势。

4) 竖向斜撑的设置增大了排架的刚度,使得

码头空间整体性增强,尤其对于设置有固定吊机的框架码头,能有效减小与吊机所在排架的刚度差距,对设置有固定吊的变刚度框架码头十分必要。

### 参考文献:

[1] 李鹏飞,刘明维,彭华君,等.纵撑对框架码头水平力分配系数的影响[J].中国科技论文,2014(10): 1 247-1 251.

[2] 刘明维,舒丹,吴林键,等.基于单位力法的内河框架直立式码头三维空间结构计算中作用效应组合分析[J].水运工程,2014(10): 47-52.

[3] 姚迪,冯伟.高桩码头前后沿同时系靠泊 ROBOT 数值模拟[J].水运工程,2011(5): 75-79.

[4] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)