

文章编号: 1000-7598-(2008)12-3427-04

水库边坡稳定的可靠度分析

谭晓慧¹, 余兵², 王茂松³, 潘文¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽省水利厅, 合肥 230022; 3. 安徽省水利水电勘测设计院, 合肥 230022)

摘要: 根据水库边坡的勘察资料, 确定了边坡稳定性分析的力学模型, 推导了滑面面积的计算公式, 采用不平衡推力传递法进行了边坡稳定的定值法分析和可靠度分析。可靠度分析中, 分别讨论了滑面强度参数及几何参数的变异性对边坡稳定性的影响。计算结果表明, 不考虑参数变异性的定值法分析结果所得边坡的安全系数过高, 偏于危险。水库边坡的可靠度分析结果表明: 滑面几何参数的变异性对边坡稳定的可靠指标或失效概率影响很大。因此, 对于岩质边坡的稳定性分析, 不仅要重视研究滑面强度参数的变异性, 也要重视研究滑面几何参数的变异性。

关键词: 边坡稳定; 可靠度分析; 水库; 不平衡推力传递法

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Reliability analysis of reservoir slope stability

TAN Xiao-hui¹, YU Bin², WANG Mao-song³, PAN Wen¹

(1. School of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Provincial Department of Water Resources, Hefei 230022, China; 3. Anhui Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Hefei 230022, China)

Abstract: Based on the investigation data of the reservoir, the mechanical model of slope stability of the right bank dam shoulder is set up; and the computational formulas are deduced for calculating the cross-sectional area of each slip block. Then, slope stability analyses of both definite method and reliability method are carried out by using unbalance thrust force transfer method. The influences of the variability of shear strength parameters and geometric parameters of slip surfaces on slope stability are discussed in the reliability analysis. It is demonstrated that the variability of geometric parameters of slip surfaces has large effect on the reliability index and failure probability. Therefore, it is necessary to pay much attention to the variability of geometric parameters of slip surfaces as well as the variability of slip surface shear strength parameters.

Key words: slope stability; reliability analysis; reservoir; unbalance thrust force transfer method

1 引言

水库边坡的稳定性分析是水库工程中十分重要的问题。水库边坡一旦失稳, 将造成重大灾难。世界各国曾多次发生因边坡失稳而造成水库破坏事件^[1]。由于影响边坡稳定性的因素是不确定的, 例如: 地层剖面与边界条件的不确定性, 现场与实验室测定的岩土性质指标的不确定性, 土的性质天然(固有)可变性, 勘探取样方法与试验方法的误差, 试验数量与勘探数量的不足, 外加荷载大小与分布的不确定性, 计算模式的不确定性等等, 都可造成边坡稳定分析结果的误差^[2]。因此, 应进行水

库边坡稳定的可靠度分析。

在边坡稳定的可靠度分析方面, 已有很多学者从不同角度进行了研究。对于土质边坡, 研究方法主要是将某种边坡稳定性分析的极限平衡条分法(如: 简化的 Bishop 法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法等)与某种可靠度分析方法(如: 中心点法、验算点法、蒙特卡罗模拟法等)相结合, 从而进行边坡稳定的可靠度分析^[3-7]。近年来, 也有学者研究了边坡稳定的有限元可靠度分析方法^[8, 9]。对于岩质边坡, 文献[10]研究了平面滑动多滑面边坡的系统可靠性分析; 文献[11]利用电子表格法研究了楔形体边坡的可靠度分析方法。

收稿日期: 2007-02-28

基金项目: 安徽省教育厅青年基金项目(No.2005jq1021)。

作者简介: 谭晓慧, 女, 1971年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学与工程的教学与研究工作。E-mail: tantan9666@126.com

综观上述研究不难发现, 现有的边坡可靠分析主要研究的是岩土体的强度参数对边坡稳定性的影响。但是对于岩质边坡, 由于其潜在滑动面常常是各种类型的结构面, 因此, 滑面几何参数 (结构面的倾角) 对岩质边坡的稳定性应该有较大影响。鉴于这一原因, 本文拟对一在建水库边坡进行可靠度分析, 重点研究滑面几何参数对边坡稳定性的影响。

2 边坡稳定的定值法分析

本分析以某水库右岸坝肩边坡为例。由勘察资料可得影响该边坡的主要结构面是两个侧向切割面 (见图 1 中线 AB 及 EC) 和一个底部滑移面 (见图 1 中线 BD), 边坡稳定性问题可简化为平面滑动。

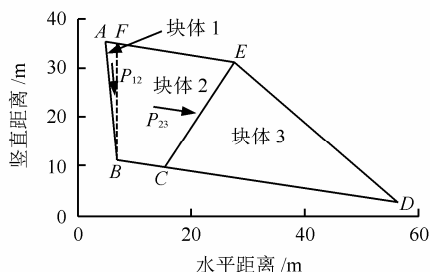


图 1 边坡剖面图

Fig.1 Section of the slope

2.1 安全系数的求解

对于图 1 所示的边坡, 其潜在滑动面是 AB 、 BC 、 CD 和 CE 面。本文采用岩体工程中常用的不平衡推力传递法来进行边坡的稳定性分析^[12]。

假定过 B 点的垂线 BF 将 $ABCE$ 分为两块, 其中 BF 为假想滑移面, 则该边坡岩体可分为 ABF (块体 1)、 $BCEF$ (块体 2)、 CDE (块体 3) 三块。设块体 1 对块体 2、块体 2 对块体 3 分别作用有不平衡力 P_{12} 和 P_{23} , 它们分别平行于滑面 AB 及 BC 。则由块体 1~3 的平衡条件可得安全系数 F_s 的计算公式为

$$F_s = \frac{[W_3 \cos \alpha_3 + P_{23} \sin(\alpha_2 - \alpha_3)] \tan \varphi_3 + c_3 l_3}{P_{23} \cos(\alpha_2 - \alpha_3) + W_3 \sin \alpha_3} \quad (1)$$

其中:

$$P_{23} = P_{12} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + W_2 \sin \alpha_2 - [(W_2 \cos \alpha_2 + P_{12} \sin(\alpha_1 - \alpha_2)) \tan \varphi_2 + c_2 l_2] / F_s \quad (2)$$

$$P_{12} = W_1 \sin \alpha_1 - (W_1 \cos \alpha_1 \tan \varphi_1 + c_1 l_1) / F_s \quad (3)$$

式中: c_i , φ_i , l_i ($i=1, 2, 3$) 分别为滑面 AB , BC , CD 上的黏聚力、内摩擦角及长度, W_i ($i=1, 2, 3$)

为块体 1~3 的重力。可见, 为了求解安全系数, 关键是求解各块体的重力。对于平面问题, 关键是求解各滑块的面积。当面积求得以后, 乘以对应的岩体重度, 即可得单位厚度上各滑块的重力。

2.2 滑块面积的求解

对于图 1 所示的边坡, 记 $S_1 \sim S_3$ 分别为面 ABF 、面 $BCEF$ 及面 CDE 的面积, $l_1 \sim l_5$, $\alpha_1 \sim \alpha_5$ 分别为 AB , BC , CD , BF , CE 的长度及倾角, θ_1 , θ_2 分别为 AE 和 ED 的倾角, 则当 AB 和 AE 的长度、 θ_1 和 θ_2 及各滑面的倾角已知时, 可推导得 $l_1 \sim l_5$ 的计算式如下:

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= AB \\ l_4 &= l_1 \sin(\alpha_1 - \theta_1) / \cos \theta_1 \\ l_2 &= BE \sin(\alpha_5 - \omega) / \sin(\alpha_2 + \alpha_5) \\ l_5 &= BE \sin(\alpha_2 + \omega) / \sin(\alpha_2 + \alpha_5) \\ l_3 &= l_5 \sin(\alpha_5 + \theta_2) / \sin(\theta_2 - \alpha_3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} BE &= \sqrt{GE^2 + GB^2} \\ GE &= (AE - l_1 \cos \alpha_1 / \cos \theta_1) \cos \theta_1 \\ GB &= l_4 - (AE - l_1 \cos \alpha_1 / \cos \theta_1) \sin \theta_1 \\ \omega &= \arctan(GB / GE) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

BE , GE , GB , ω 的含义如图 2 所示。

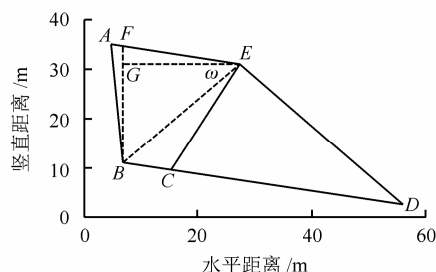


图 2 滑块面积的求解

Fig.2 Solution of areas of slip blocks

当长度 $l_1 \sim l_5$ 求得后, 可按下列公式求各滑块的面积:

$$S_1 = \frac{1}{2} \frac{l_1^2 \cos \alpha_1}{\cos \theta_1} \sin(\alpha_1 - \theta_1) \quad (6)$$

$$S_2 = \left[\frac{l_1 \sin(\alpha_1 - \theta_1)}{\cos \theta_1} \left(AE - \frac{l_1 \cos \alpha_1}{\cos \theta_1} \right) \cos \theta_1 + l_2 l_5 \sin(\alpha_2 + \alpha_5) \right] / 2 \quad (7)$$

$$S_3 = l_3 l_5 \sin(\alpha_3 + \alpha_5) / 2 \quad (8)$$

2.3 水库边坡稳定的定值法分析

对于本例, 由勘察报告可得图 1 中 $AB = 24$ m,

$AE = 23 \text{ m}$, $\theta_1 = 10^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$, $\alpha_5 = 60^\circ$, 其他计算参数见表 1。

表 1 边坡的计算参数

Table 1 Computation parameters of the slope

编号	滑面	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	倾角 $\alpha/^\circ$
1	AB	20	20	85
2	BC	500	40	10
3	CD	500	40	10

根据上述计算参数, 可得该边坡的安全系数 $F_s = 11.2$ 。因此, 定值法分析认为该边坡是很稳定的。但是, 上述分析结果是在特定的参数下求得的, 而边坡岩体的力学性质及几何性质都有很大变异性。因此, 下面进行该边坡的可靠度分析。

3 边坡稳定的可靠度分析

3.1 可靠度分析的基本原理

设结构的功能函数为

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (9)$$

式中: $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为结构的 n 个基本变量。

记 X_i 的均值及均方差分别为 μ_{X_i} 和 σ_{X_i} 。在中心点 $M = (\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})$ 将结构的功能函数展开成泰勒级数, 并只取到一次项, 即

$$Z \approx Z' = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{X_i}) \frac{\partial g(\mu_x)}{\partial X_i} \quad (10)$$

则 Z 的统计参数为

$$\mu_Z \approx g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) \quad (11)$$

$$\sigma_Z \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial g(\mu_x)}{\partial X_i} \frac{\partial g(\mu_x)}{\partial X_j} \rho_{X_i X_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \quad (12)$$

从而可得可靠指标的计算公式为^[13] (中心点法):

$$\beta \approx \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial g(\mu_x)}{\partial X_i} \frac{\partial g(\mu_x)}{\partial X_j} \rho_{X_i X_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}}} \quad (13)$$

式中: $\frac{\partial g(\mu_x)}{\partial X_i}$ 为在中心点 μ_x 处功能函数对基本变量的导数; $\rho_{X_i X_j}$ 为变量 X_i 和 X_j 的相关系数。

对于正态基本变量, 可由下式求解相应的失效概率:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (14)$$

3.2 水库边坡稳定的可靠度分析

对于水库边坡稳定的可靠度分析, 可取其功能

函数型式为

$$Z = g(X) = F_s(X) - 1 \quad (15)$$

式中: F_s 为边坡的安全系数, 它是基本变量向量 X 的函数, 其值可由式 (1) ~ (8) 求得。由此可知, F_s 是 $c_1 \sim c_3$, $\varphi_1 \sim \varphi_3$, $\alpha_1 \sim \alpha_5$ 的函数。由于 $c_2 = c_3$, $\varphi_2 = \varphi_3$, $\alpha_2 = \alpha_3$, $\alpha_4 = \pi/2$ 为定值, 因此, 可取 $c_1, c_2, \varphi_1, \varphi_2, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_5$ 这 7 个参数为基本变量。式 (1) ~ (8) 表明, F_s 为 X 的隐函数, 因此, 本文由式 (1) ~ (8) 求 $g(\mu_x)$; 采用差分法求功能函数对基本变量的导数^[14], 再由式 (13) 求可靠指标。

根据勘察资料, 可得滑面强度参数的均值及变异系数, 其中均值与表 1 中的相应值相等, 变异系数如表 2 所示。由于滑面几何参数 (滑面倾角) 的变异性未知, 本文假定滑面 1~5 的变异系数 δ_α 相等, 其变化范围分别为 0~0.4。为讨论滑面几何参数的相关性对计算结果的影响, 设滑面 1, 2, 5 的相关系数 ρ_α 相等并分别为 0.3 及 -0.3。

表 2 滑面强度参数的变异性

Table 2 Variations of strength parameters

编号	滑面	变异系数	
		黏聚力 δ_c	内摩擦角 δ_φ
1	AB	0.3	0.25
2	BC	0.4	0.33
3	CD	0.4	0.33

3.3 计算结果及分析

根据上述数据, 本文进行了该边坡的可靠度分析, 可靠度分析的计算结果如图 3 和图 4 所示。图 3 为可靠指标 β 与滑面倾角变异系数 δ_α 及滑面倾角间互相关系数 ρ_α 的关系, 图 4 为破坏概率 P_f 与 δ_α 及 ρ_α 的关系。

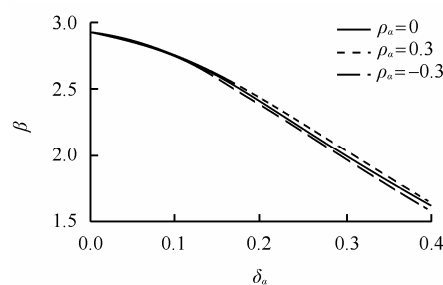


图 3 可靠指标与滑面倾角变异系数的关系

Fig.3 Relationship between reliability indices and variation coefficient of inclinations

由图 3 和图 4 可知, 当只考虑滑面强度参数的变异性时 ($\delta_\alpha = 0$), β 相对较大, P_f 相对较小。若

在考虑滑面强度参数的变异性的同时,也考虑滑面几何参数的变异性,则随着 δ_α 的增加, β 减小而 P_f 增加。当 $\delta_\alpha > 0.3$ 时, P_f 增加的速率更快。根据表3的规定^[1],此时边坡是不稳定的。由图3和图4还可以看出,滑面倾角间的相关系数 ρ_α 对 β 或 P_f 的影响不明显。

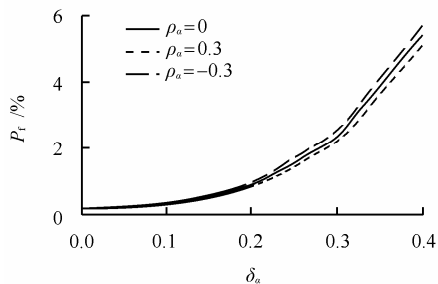


图4 破坏概率与滑面倾角变异系数的关系

Fig.4 Relationship between failure probabilities and variation coefficient of inclinations

表3 水工规范规定的持久结构承载能力允许可靠指标 β ^[1]

Table 3 Allowable reliability index of bearing capacity of permanent structure (Hydraulic engineering standard)

结构安全级别	I 级	II 级	III 级
一类破坏	3.7	3.2	2.7
二类破坏	4.2	3.7	3.2

由以上分析可知:在岩质边坡稳定的可靠度分析中,除了要重视滑面强度参数的变异性,也要重视滑面几何参数的变异性;滑面倾角的变异性对可靠度计算结果影响较大,而滑面倾角间互相关性对可靠度计算结果的影响较小。因此,在滑面几何参数的统计分析中,研究滑面倾角的变异性非常重要。

4 结 语

本文根据工程实际资料,对某水库坝肩右岸边坡进行了定值法分析及可靠度分析。定值法分析表明,该边坡是稳定的。但由于定值法分析没有考虑参数的不确定性,因而计算结果偏于危险。可靠度分析结果表明,参数的随机变异性对边坡的安全水平影响很大。本文重点讨论了滑面几何参数(滑面倾角)的变异性对可靠指标及破坏概率的影响。结果表明,随着滑面倾角变异系数的增加,边坡的可靠指标明显减小,而破坏概率则显著增加;滑面倾角间的互相关性对可靠指标及破坏概率的影响不明显。因此,对于水库岩质边坡,在勘察阶段除了要研究岩体强度参数变异性,还必须认真调查研究各种结构面的倾角的变异性,否则就无法正确研究边

坡的失稳风险。

参 考 文 献

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] 包承纲. 谈岩土工程概率分析法中的若干基本问题[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 94—98.
- [3] DUNCAN J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(6): 307—316.
- [4] MALKAWI A I H, HASSAN W F, ABDULLA F A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability[J]. *Structural Safety*, 2000, 22: 161—187.
- [5] AUVINET G, GONZALEZ J L. Three dimensional reliability analyses of earth slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2000, 26: 247—261.
- [6] BHATTACHARYA G, JANA D, OJHA S, et al. Direct search for minimum reliability index of earth slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30: 452—462.
- [7] 陈晓平, 孙慕群, 吴起星. 软基上复杂土坡稳定可靠度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 925—929. CHEN Xiao-ping, SUN Mu-qun, WU Qi-xing. Reliability study of complex slope stability on soft soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6): 925—929.
- [8] 刘宁. 可靠度随机有限元法及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 76—105.
- [9] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(5): 507—518.
- [10] 谭晓慧. 多滑面边坡的可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 822—825. TAN Xiao-hui. The reliability analysis of a slope with several slide planes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 822—825.
- [11] LOW B K. Reliability analysis of rock wedges[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(6): 498—505.
- [12] 肖树芳, 杨淑碧. 岩体力学[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [13] 贡金鑫著. 工程结构可靠度分析方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003.
- [14] 谭晓慧, 王建国, 王印. 边坡稳定的非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2 047—2 050. TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo, WANG Yin. Nonlinear finite element analysis of slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2 047—2 050.