

高重力坝抗滑稳定安全度分析

苏怀智^{1,2}, 刘红萍^{2,3}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要 :为了确保高重力坝的稳定安全,针对高重力坝坝基存在抗剪强度与正应力呈非线性关系的特点,重点研究了二次抛物线形的抗剪强度包络线。在此基础上,建立了基于二次抛物线形抗剪强度包络线的功能函数。结合改进的 JC 法,提出了高坝坝基失稳可靠度的计算方法,并开发了相应的程序。将上述基本原理和方法应用于某高坝工程除险加固后的稳定安全度校核,分析结果表明该坝经过除险加固处理后坝体具备一定的稳定安全储备能力。

关键词 :混凝土坝;高坝;重力坝;稳定安全度;非线性关系;功能函数

中图分类号 :TV642.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)04-0020-04

Stability safety degree against sliding in high gravity dams//SU Huai-zhi^{1,2}, LIU Hong-ping^{2,3}(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract :In order to ensure the stability and safety of high gravity dams, the shear strength envelope curve in the shape of quadratic parabola was studied with regard to the nonlinear relationship between the shear strength and the normal stress for high dam foundations. On such a basis, a performance function based on the shear strength envelope curve in the shape of quadratic parabola was established. Combined with the improved JC method, a method for calculating the reliability of dam foundation failure was proposed, and the corresponding program was developed. The above basic principles and methods were applied to the calibration of safety degree for the stability of a high dam after rehabilitation. The results indicate that the dam has certain reserved capacity of stability safety after rehabilitation.

Key words :concrete dam; high dam; gravity dam; stability safety degree; nonlinear relationship; performance function

近年来,随着筑坝技术的提高,高坝不断增多。这些高坝为国家和人民创造了巨大的财富和经济效益,然而一旦这些高坝发生破坏,除工程本身破坏引起的经济损失以外,其次生灾害带来的后果极其严重,因此对大坝进行安全度的反馈分析意义重大^[1]。反馈高重力坝的稳定安全度是大坝安全度计算的重要部分。高混凝土重力坝滑动失稳实际上就是剪切破坏,SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》规定,大坝稳定分析采用极限平衡法,其抗剪强度包络线采用线性 Mohr-Coulomb 准则^[2]。但是许多试验研究证明,对于混凝土高坝而言,其坝基承受高应力,此时抗剪强度与正应力之间并非呈线性关系,而是随正应力的增加呈非线性关系,所以仍采用传统的线

性 Mohr-Coulomb 准则势必影响分析结果的准确性,而且在不能确定这种线性化处理是偏保守或是偏危险的情况下,研究能反映抗剪强度与正应力关系的非线性模型就十分必要。

1 反馈高坝稳定的安全度

众所周知,评估大坝稳定安全度有 2 种方法:安全系数法和可靠度理论。近几年的工程实践证明,应用可靠度理论评估大坝的安全度比较符合大坝的实际运行情况。在基于可靠度理论的安全度计算中,可靠指标 β 的重要程度可以同基于安全系数法设计中的安全系数 K 相当,目前依据 GB 50199—1994《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》第

基金项目:国家自然科学基金(50809025);“十一五”国家科技支撑计划(2008BAB29B03);国家重点实验室专项(2009586912);中央高校基本科研业务费专项(2010B01414)

作者简介:苏怀智(1973—),男,内蒙古鄂尔多斯人,教授,博士,从事水工结构工程安全监控与服役寿命评估理论和方法的研究及教学工作。E-mail:su_huaizhi@hhu.edu.cn

3.1.6 条及其附录 C 的规定,混凝土重力坝的破坏属第二类破坏,当该大坝的安全级别是Ⅰ级时,可靠指标为 4.2;当该大坝的安全级别是Ⅱ级时,可靠指标为 3.7;当该大坝的安全级别是Ⅲ级时,可靠指标为 3.2^[3]。

1.1 二次抛物线形抗剪强度包络线的建立

试验研究表明,对于高坝来说,其抗剪强度与正应力之间呈非线性关系。因此,下面重点研究二次抛物线形抗剪强度包络线模型,并基于该模型建立大坝的稳定功能函数。

设二次抛物线形抗剪强度包络线方程为

$$\tau_f = \lambda(\sigma + \sigma_t) \tag{1}$$

其中
$$\lambda \approx \frac{\sigma_c^2}{2\sigma_c + 2\sigma_t} \tag{2}$$

式中: τ_f 、 σ 分别为处于极限平衡状态某点的剪应力和正应力; λ 为待定常数; σ_t 为单轴抗拉强度; σ_c 为单轴抗压强度。

将式(2)代入式(1)可得到二次抛物线形抗剪强度包络线为

$$\tau_f = \sqrt{\frac{\sigma_c^2}{2\sigma_c + 2\sigma_t}}(\sigma + \sigma_t) \tag{3}$$

1.2 基于二次抛物线形抗剪强度包络线功能函数的建立

大坝失稳破坏的极限状态用功能函数来描述,功能函数的一般表达式为

$$Z = g(R, S) = R - S \tag{4}$$

式中: R 为抗力(对于稳定条件, R 为沿地基面或软弱夹层面上的抗滑力); S 为大坝滑动面的总剪力。

应指出,计算 R 所用的材料物理力学参数应该用现场和室内试验资料或反演分析成果来确定,计算 S 时,用正分析(即各种监控数学模型)或工程力学的成果。

在大坝的稳定功能函数中,维持大坝稳定的 R 实际就是 τ_f 在滑动面上的面积分,即

$$R = \int_l \tau_f dx = \int_l \sqrt{\frac{\sigma_c^2}{2\sigma_c + 2\sigma_t}}(f(x) + \sigma_t) dx \tag{5}$$

式中: l 为滑动面滑动方向(一般为上下游方向)的长度; $f(x)$ 为滑动面上正应力 σ 的分布。

在高混凝土重力坝分析中,假定坝基滑动面上 σ 为线性分布,设其分布为

$$f(x) = m + kx \tag{6}$$

式中: m 、 k 为待定系数; x 为滑动面上下游方向长度坐标。

在正常荷载组合中, S 主要由上下游水平静水压力、水平淤沙压力以及浪压力等组成,即

$$S = P_{wr1} - P_{wr2} + P_{sk} + P_{wk} \tag{7}$$

式中: P_{wr1} 、 P_{wr2} 、 P_{sk} 、 P_{wk} 分别为上游水平静水压力、下游水平静水压力、淤沙压力和浪压力。

将式(6)代入式(5),再将式(5)和式(7)代入式(4),可得到大坝的稳定功能函数:

$$Z = \int_l \sqrt{\frac{\sigma_c^2}{2\sigma_c + 2\sigma_t}}(m + kx + \sigma_t) dx - (P_{wr1} - P_{wr2} + P_{sk} + P_{wk}) \tag{8}$$

在工程中,常用滑动面黏聚力 c' 和滑动面摩擦因数 f' ($f' = \tan\varphi'$, φ' 为内摩擦角)表示,为此需要进行换算,可按式(9)进行:

$$\begin{cases} \sigma_c = \frac{2c' \cos\varphi'}{1 - \sin\varphi'} \\ \sigma_t = \frac{2c' \cos\varphi'}{1 + \sin\varphi'} \end{cases} \tag{9}$$

将式(9)代入式(8),可得到用 c' 和 f' 表示的大坝稳定功能函数:

$$Z = \int_l \sqrt{\frac{c' \cos\varphi'(1 + \sin\varphi')}{(1 - \sin\varphi')(3 - \sin\varphi')}} \left(m + kx + \frac{2c' \cos\varphi'}{1 + \sin\varphi'} \right) dx - (P_{wr1} - P_{wr2} + P_{sk} + P_{wk}) \tag{10}$$

1.3 高坝失稳的安全度计算

1.3.1 选择主要的影响因素

从大坝的稳定功能函数可以看出,影响大坝稳定的影响因素较多。为了减少工作量,可以在满足安全度估计精度的前提下将影响程度较大或变异性较大的量选为随机变量,其他的作为常量计算。譬如对于混凝土坝,可把上下游水位、扬压力系数、坝基和地基的物理力学参数等作为主要随机变量,把浪压力和坝体几何尺寸等视为常量。

1.3.2 特征值和分布类型的选择

对于上下游水位的特征值的处理办法已有比较充分和深入的研究,具体应用可参考文献[4];抗剪断参数应该综合多个工程的数据,参考其他类似工程并结合具体研究对象的特殊情况分析计算,可参考文献[5];扬压力折减系数应根据具体大坝所观测的历年资料来估计,可参考文献[5]。

一般情况下,高坝都具有比较完备的实测资料,所以影响坝体和坝基性能的主要因素可以采用随机变量的概率分布模型描述。工程上常用的假设检验有 K-S 检验法、 χ^2 检验法、 A^2 检验法,其中以 K-S 检验法比较简单,较为常用。K-S 检验法的基本思路是根据子样得到的经验分布函数 $F_n(x)$ 与原假设的总体理论分布函数 $F(x)$ 做比较,建立统计量 D_n ,即

$$D_n = \max_{-\infty < x < \infty} |F_n(x) - F(x)| = \max_{-\infty < x < \infty} D_n \tag{11}$$

然后,在给定信度 α 下,将计算得到的 $D_n(x)$ 的最大值与科尔莫夫戈罗夫检验的临界值 $D_{n,\alpha}$ 比较,以检验原假设是否不被拒绝:当 $D_n \leq D_{n,\alpha}$ 时,不拒绝接受原假设;当 $D_n > D_{n,\alpha}$ 时,拒绝接受原假设。

1.3.3 采用改进的 JC 法计算

采用改进的 JC 法计算可靠度,并根据结果分析大坝安全状况。计算流程见图 1。

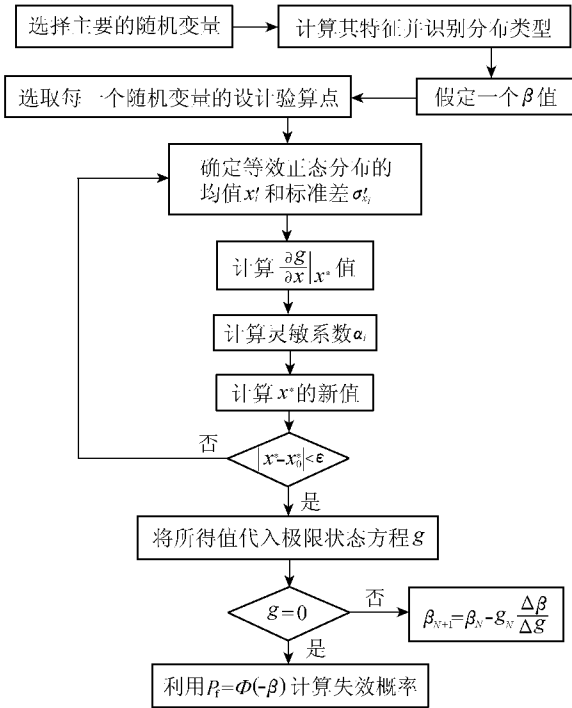


图 1 计算大坝失稳可靠度的流程

2 实例分析

2.1 工程概况

某重力坝为 I 级建筑物,由于历史原因,大坝存在着严重缺陷。大坝坝基 34 ~ 36 号坝段位于 F67 大断层破碎带,施工时已做了深挖回填处理,后又做了防渗处理和预应力锚索加固。1986 年开始对该坝进行全面加固,1997 年加固工程基本结束。取 35 号坝段为计算坝段,计算截面图见图 2。已知混凝土的密度为 23.5 t/m^3 ,泥沙的浮密度为 1.2 t/m^3 ,泥沙的堆积高程为 19.60 m ,坝底宽 $B = 8 \text{ m}$,坝顶宽 $b = 0.75 \text{ m}$,上下游坝面的斜率 $m_1 = 0.05$, $m_2 = 0.75$, $h_3 = 4 \text{ m}$, $h_1 = 74.5 \text{ m}$,排水管距上游坝踵处的

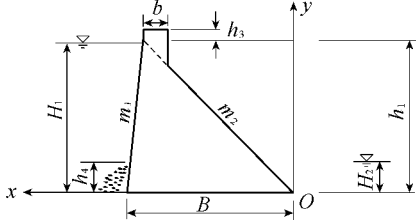


图 2 大坝沿坝基面抗滑稳定计算示意图

距离 $L = 3.9 \text{ m}$ 。

2.2 功能函数的建立

利用计算断面可求出滑动面以上所有荷载的竖向分量之和 $\sum W$ (向下为正),以及所有荷载对滑动面垂直水流流向形心轴的力矩之和 $\sum M$ (逆时针为正)。根据假设,滑动面上的正应力 σ 为线性分布。原点设在下游坝趾处,如图 2 所示,可得到系数 m, k 为

$$\begin{cases} m = \frac{\sum W}{B} - \frac{6 \sum M}{B^2} \\ k = \frac{12 \sum M}{B^3} \end{cases} \quad (12)$$

根据该工程的资料,采用传统的材料力学方法计算结果,在运用期坝基面上游边缘最小正应力大于零,故选取积分限为 $(0, B)$ 。将式(12)代入式(5),由式(5)积分得

$$R = \frac{2}{3k} \sqrt{\frac{c' \cos \varphi' (1 + \sin \varphi')}{(1 - \sin \varphi') (3 - \sin \varphi')}} \cdot \left[\sqrt{\left(Bk + m + \frac{2c' \cos \varphi'}{1 + \sin \varphi'} \right)^3} - \sqrt{\left(m + \frac{2c' \cos \varphi'}{1 + \sin \varphi'} \right)^3} \right] \quad (13)$$

由于浪压力对安全度的影响较小,所以这里视浪压力为常量。在正常荷载下,使大坝滑动失稳的 S 为

$$S = \frac{1}{2} \rho_w g (H_1^2 - H_2^2) + \frac{1}{2} \rho_n g h_4^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right) + P_{wk} \quad (14)$$

式中: ρ_w 为水的密度; H_1, H_2 分别为上、下游水位; ρ_n 为泥沙的浮密度; h_4 为泥沙的淤积深度; φ_n 为泥沙内摩擦角。

因此该大坝的功能函数可以表示为

$$Z = \frac{2}{3k} \sqrt{\frac{c' \cos \varphi' (1 + \sin \varphi')}{(1 - \sin \varphi') (3 - \sin \varphi')}} \cdot \left[\sqrt{\left(Bk + m + \frac{2c' \cos \varphi'}{1 + \sin \varphi'} \right)^3} - \sqrt{\left(m + \frac{2c' \cos \varphi'}{1 + \sin \varphi'} \right)^3} \right] - \frac{1}{2} \rho_w g (H_1^2 - H_2^2) - \frac{1}{2} \rho_n g h_4^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right) - P_{wk} \quad (15)$$

2.3 选取随机变量和判断分布类型

该重力坝的主要影响因素有 $H_1, H_2, h_4, \alpha, c', f', \sigma_1, \sigma_c$ 等。由于在运行过程中该坝经过几次补强加固,并考虑到上述主要影响因素的时效作用^[6],现以加固后的大坝参数作为分析的参考时段。部分

随机变量的统计特征值参考相关文献^[7],表 1 中给出了主要影响因素的分布规律和统计特征值。

表 1 各随机变量及统计特征值

随机变量	均值	标准差	变异系数	分布形式
H_1	72.50	4.60	15.76	正态分布
H_2	7.60	0.77	9.87	正态分布
f'	0.87	0.17	5.12	正态分布
α	0.25	0.066	3.79	正态分布
c'	1.00	0.20	5.00	对数正态分布

2.4 计算大坝稳定的可靠度

对于混凝土和基岩的交界处可以不考虑材料的单轴拉伸强度参数,即 $\sigma_t = 0$ 则

$$\sigma_c = \frac{2c' \cos \varphi'}{1 - \sin \varphi'} = \frac{2c'}{\sqrt{f'^2 + 1} - f'} \quad (16)$$

按照流程图编制相应的 Matlab 程序,并将大坝的基本尺寸和随机变量的统计特征值代入程序中,求得大坝稳定可靠度为 4.33,对应的失稳概率 $P_f = 6.81 \times 10^{-6}$ 。根据《水利水电工程可靠度设计标准》的规定,当大坝属 I 级安全级别时,基本组合要求 β 为 4.2 ± 0.25 。所以,可认为经过补强加固后该坝段不会发生浅层失稳破坏,坝体与基岩的接触面是安全的^[8]。

为了对比分析,校核了该工程 26 号坝段的稳定可靠度为 4.65。可以看出,本文中所提方法的计算结果相对较低。然而 35 号坝段的坝基属于薄弱基础,其稳定可靠度低于 26 号坝段是符合实际情况的。可见,基于二次抛物线形抗剪强度包络线的功能函数能够计算坝基浅层失稳的可靠度。

3 结 语

高混凝土坝的坝基处于高应力状态,而许多试

验表明其坝基的抗剪强度和正应力存在非线性关系。笔者针对高坝的这种特点,提出了计算高坝坝基稳定安全度的相应方法。通过建立基于二次抛物线形抗剪强度包络线的功能函数,体现了高坝坝基存在的非线性关系,并将功能函数运用于改进的 JC 法中,计算求出高坝坝基的稳定可靠度,达到了合理评估高坝坝基稳定性的目的。实例证明这种方法应用于实际工程是可行的。

参考文献:

[1] 顾冲时,苏怀智.综论水工程病变机理与安全保障分析理论和技术[J].水利学报,2007,38(S1):71-77.
[2] 刘文学.新《混凝土重力坝设计规范》的特点与坝工新技术[J].水力发电,2001(5):15-18.
[3] 颜天佑,钮新强,李同春,等.已有裂缝重力坝加高后的工作性态[J].水利水电科技进展,2009,29(1):47-51.
[4] 吴世伟,张思俊,余强.坝上游水位变化规律及统计量[J].华东水利学院学报,1984,12(4):66-70.
[5] 吴熊飞,沈海尧.大坝安全定期检查时的坝工可靠度分折[J].水力发电,1994(6):40-44.
[6] SU Huai-zhi, HU Jiang, WEN Zhi-ping, et al. Evaluation model for service life of dam based on time-varying risk probability[J]. Science in China:Series E:Technological Sciences,2009,52(7):1966-1973.
[7] 姚耀武.丰满大坝可靠度分析[J].大坝与安全,1999(3):40-46.
[8] 冯树荣,肖峰,周跃飞,等.碾压混凝土重力坝层间缺陷对大坝安全的影响[J].水利水电科技进展,2010,30(S1):61-65.

(收稿日期 2010-12-06 编辑 高建群)

· 简讯 ·

陈厚群院士荣获国际大坝委员会荣誉奖

在 2011 年 6 月 1 日召开的国际大坝委员会第 79 届年会上,中国工程院院士、中国水利水电科学研究院教授级高工、河海大学兼职教授和博士生导师、本刊顾问陈厚群获国际大坝委员会荣誉奖。国际大坝委员会荣誉奖于 2000 年 9 月在北京召开的国际大坝委员会第 68 届年会上设立,授予对国际大坝委员会工作做过贡献或在坝工领域有重大成绩的坝工专家,每年 1~3 名。中国有 4 位专家先后获得此殊荣,他们分别是陆佑楣院士、潘家铮院士、朱伯芳院士和陈厚群院士。

(本刊编辑部供稿)