

环境工程

尾矿库安全评价初探

徐宏达¹ 谢亦石²

(1. 中冶集团建筑研究总院 北京 100088; 2. 中环冶金总公司 北京 100011)

摘要 尾矿库安全评价应该搞清坝及其附属构筑物的安全状况,评定尾矿库的安全等级,进行危害程度分类,对尾矿库安全生产状况做出综合评价。探讨了尾矿库安全评价应该采用的风险分析方法,建议了一个描述综合评价结果的框架。为了提高尾矿库安全评价质量,应尽快组织编写尾矿库安全评价细则,建立科学、统一、规范、权威的标准。

关键词 尾矿库 安全评价 失效概率 风险

Preliminary Discussions on Safety Assessment for Tailing Pond

Xu Hongda¹ Xie yishi²

(1. Central Research Institute of Building and Construction of MCC Group Beijing 100088)

Abstract Safety assessment on tailing pond should be based on safety conditions of dam and its affiliated construction, safety grade, safety degree and the comprehensive assessment on safety production of tailing pond. Risk analysis method applied in safety assessment on tailing pond is discussed and a frame to describe comprehensive assessment results is suggested. To improve safety assessment quality, detailed rules and regulations on safety assessment for tailing pond should be compiled as soon as possible and standards with science, unity, authoritativeness should be set up.

Keywords tailing pond safety assessment no effectiveness probability risk

1 概述

我国冶金、有色、化工、核工业、建材和轻工业等行业具有一定规模的尾矿库 1 500 座左右,坝高超过 100 m 的有 26 座(其中最大设计坝高 260 m),库容大于 1 亿 m³ 的有 10 座,

多数尾矿库很难避开生态敏感区或人口密集区,有的位于大江、大湖、重要水源地上游,有的位于重要工交设施上游,有的在密集的居民区上游。我国 90 % 以上的尾矿坝,都采用简单易行、便于管理、适应性强、筑坝费用低廉的上游法堆

种植于低浓度污染土壤。它在湖南省分布极广,繁殖快,对环境的适应能力强,管理粗放省工,绿化效果极好。因此,将美人蕉种植在污染较轻的区域,不仅是一种利用价值高的修复植物,同时可获得很好的绿化效果。

3 结论

(1) 在一定低浓度镉处理水平下,即镉质量浓度 5 mg/kg 时可促进美人蕉生长。

(2) 美人蕉对镉的吸收随土壤镉浓度的增大而增强,但在 150 ~ 200 mg/kg 高浓度时镉吸收量下降。

(3) 在所有镉浓度处理上,美人蕉植物体各部分的含镉量以根系最高,茎次之,叶片最低,这与一般植物对重金属的富集规律通常以根 > 茎 > 叶的顺序递减相符。

(4) 美人蕉生长 2 个月时富集能力最强,带走的镉量最大。

(5) 美人蕉较适合于 0 ~ 5 mg/kg 镉污染土壤的植物修复。

参考文献

- 1 刘云国,尹志平.土壤镉污染生物整治研究.湖南大学学报(自然科学版),2000,27(3):34~38
- 2 鲁如坤.关于土壤—植物生态系统中镉的研究.土壤,1992,24(3):129~132
- 3 王凯荣.苕麻对土壤镉的吸收及其生物净化效应.环境科学学报,

1998,18(5):510~515

- 4 韦朝阳,陈同斌.重金属超富集植物及植物修复技术研究进展.生态学报,2001,21(7):1196~1203
 - 5 Nadan Kumar P B A, Dushenkov V, Motto H, et al. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. Environ Sci Technol, 1995,29(5):1233~1238
 - 6 沈振国,陈怀满.土壤重金属污染生物修复的研究进展.农村生态环境,2000,16(2):39~44
 - 7 陈怀满.土壤—植物系统中的重金属污染.北京:科学出版社,1996.1~15
 - 8 Suerbeck D R. Plant, element and soil properties governing uptake and availabilities of heavy metals derived from sewage sludge. Water, Air and Soil pollution, 1991,52~58
 - 9 史瑞和.植物营养原理.南京:江苏科学技术出版社,1989.101~104
 - 10 丁中元.重金属在土壤—作物中分布规律研究.环境科学,1989,10(5):78~84
 - 11 Tang S R, Wilde B M, Huang C Y. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangtze River, The People's Republic of China. Plant and Soil. 1999,209:225~232
- 作者简介 吴双桃,女,1976 年生,湖南益阳人,硕士研究生,助教,主要从事土壤污染治理与水处理研究。

(收稿日期:2005-03-15)

筑。这种坝的沉积密度一般偏低,浸润线偏高。由于各种原因,我国尾矿库的正常运行比例偏低,病害不断,时有重大事故发生,有的引发了巨大的灾害^[1]。因此,对尾矿库进行安全评价尤为重要。尾矿库安全评价的内容可概括为:安全生产条件(包括劳动卫生)和规章制度的建设和执行情况;坝坡构造是否符合规定;坝体抗滑稳定情况;渗流稳定情况;附属构筑物的结构稳定性(包括排洪、回水、输送、排渗等系统)如何;与周边环境、山坡、弃物的关系是否协调;

抗洪水、地震等自然灾害的能力;必要时,做溃坝损失评估;建议、预案。还可以把上述安全评价内容理解为两大块:第一,是行政管理方面的,侧重企业的安全生产条件(包括劳动卫生条件)建设,安全生产制度的完善和贯彻以及企业安全生产文化建设等。第二,是设施系统本身安全,侧重于构筑物 and 工艺技术层面:包括尾矿输送泵站和管路;尾矿坝和坝体防渗、排渗设施;坝面排水、防护和绿化体系;尾矿库的排洪构筑物;尾矿水净化装置和回水系统;库区地质地貌情况;放矿筑坝工艺的适应性,特别是上游法排矿筑坝工艺参数将直接影响沉积尾矿的特性和沉积滩坡度^[2,3]。

2 尾矿库风险分析方法

从 GBJ68 - 84 到 GB50068 - 2001《建筑结构可靠度设计统一标准》,采用以概率论为基础的极限状态设计方法,以结构失效的概率来定义结构可靠度,不再把结构安全系数与结构可靠度简单等同起来。水利、电力等许多部门也有了以概率论为基础的极限状态设计方法的规程^[4,5,6]。尽管尾矿坝的规范(ZBJ - 90)还使用安全系数定义坝体的抗滑稳定性,但从大环境看,安全评价具备了以可靠度设计方法为基础的条件。然而,目前尾矿库安全评价有关的报告还难得见到结构的失效概率、坝下游的灾害评估等内容,主要有3个原因:

- (1) 尾矿坝等土工构筑物尚无可靠性设计规范;
- (2) 有关方面还未制订出土工结构失效概率控制指标;
- (3) 洪水计算、调洪验算、高精度的坝坡稳定性分析、地震反应分析等的功能函数难以建立,尚在探索研究阶段。

2.1 几个术语及其关系

可靠性: 结构(坝体)在规定的时间内和条件下,完成预定功能(抗滑)的能力。

可靠度: 结构(坝体)在规定的时间内和条件下,完成预定功能(不滑动)的概率 P_S 。

失效概率: 结构不能完成预定功能(滑动)的概率 P_f 。

失效概率与可靠度指标 β 有如下关系:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (1)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

可靠度与失效概率的关系:

$$P_S = 1 - P_f \quad (2)$$

可靠度指标 β : 当结构只有作用效应 S 和抗力 R 两个基本变量,且均为正态分布时:

$$\beta = (\mu_R - \mu_S) / \sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)} \quad (3)$$

式中, μ_S 、 σ_S 为结构作用效应的平均值和标准差; μ_R 、 σ_R 为结构抗力的平均值和标准差。

2.2 坝坡失稳的风险分析

设土条上作用的力 R 是抗力,形成抗滑力矩; S 是下滑力,形成滑动力矩。设功能函数

$$g(\cdot) = g(R, S) = R - S \quad (4)$$

则坝坡失效概率

$$P_f = P(S > R) = \int \int_{R_S} f_{RS}(rs) dr ds \quad (5)$$

式中, f_{RS} 表示滑动和抗滑力矩的联合概率密度分布函数,几乎没法确定。但是,若采用瑞典法则可以建立如下功能函数。

定义抗滑稳定系数 $K = R / S$

$$R = \{ \sum [w_i (\cos \alpha_i - ub \sec \alpha_i)] \tan \phi + \sum c_i b \sec \alpha_i \} \quad (6)$$

$$S = \sum w_i \sin \alpha_i \quad (7)$$

式中, w_i 为土条重; b 为土条的宽度; ϕ 为土的摩擦角; c_i 为土的凝聚力; u 为土条底部的孔隙水压力; α_i 为条块重力线与通过此条块底面中点半径之间的夹角。

取 $g(\cdot) = 0$, $g(\cdot) = R - S = 0$

$$\sum [w_i (\cos \alpha_i - ub \sec \alpha_i)] \tan \phi - \sum c_i b \sec \alpha_i = 0 \quad (8)$$

这样,按以下步骤就可求解坝坡失稳的风险,即失效概率。确定一个水位,求出浸润线;取一组参数,计算并记录 $g(\cdot) = R - S < 0$ 的次数 M ; 计算随机数并对所使用的不确定量抽样;对不同分布的变量函数进行转换;重复 ~ , 累计记录 $g(\cdot) < 0$ 的次数 N ; 用 $P_f(h_i) = M / N$ 求出水位 h_i 的失效概率。

2.3 漫坝风险

漫坝就是水位翻过坝顶流向下游坝坡,这对土石坝是不允许的。 Z_0 代表某一水位, H_L 代表各种作用引起的升高,漫坝发生的条件是: $Z_0 + H_L > Z_0$, $Z_0 + H_L$ 就是漫坝水位,其中 H_L 是漫坝作用 L 引起的水位升高,它们都是时间的函数,又是随机变量,可用一个随机过程 $Z(t)$ 表示。

漫坝风险(暂不考虑风险的后果)就是设计基准期 T 内坝前水位超过坝顶的概率,可表示为 $R(T) = P[Z(t) \geq Z]$ 。如果 $Z(t)$ 仅是周期性的随机过程,那么,由一个周期 c 的风险 R_c 可以推求设计基准期 T 内的风险 $R(T)$ 。

$$R(T) = 1 - (1 - R_c)^{T/c} \quad (9)$$

漫坝作用 L 的影响因素或者说不确定性显然不仅仅是周期性的随机过程 c , 还有暴雨洪水、风浪爬高、泄洪能力、调洪库容、汛前限制水位 Z_0 等。

暴雨洪水与若干因素有关,对于漫坝影响大的主要是洪峰流量、洪水总量;风浪爬高与水面面积、风向、风级有关,有若干算法。对于小库,由于水面小,水深浅,故可忽略不计;对于特定的泄洪系统,泄洪能力主要由泻水构筑物的类型和断面尺寸大小决定,计算参数的选取,计算模型的适用性等有一定的影响;调洪库容通常计算误差较大,主要决定于地形图的精度,库面面积、库面以上到坝顶的高度、滩面的坡度这3个因素影响最大。滩面的坡度和库的水位是两个人为控制的要素。从某种意义上讲,对于设计正常的尾矿坝,通过调整放矿而实现滩面坡度的调整^[2],通过降低控制水位,可以增大调洪库容。所以可以采取强有力措施降低漫坝风险。漫坝风险模型的建立和求解请参阅相关文献^[9~11]。

2.4 规定可靠度(允许风险)

允许风险通常以每年每人死亡的概率来描述。设构筑物以年计的允许风险 $P(f)$, 用社会指数 K_s 和受影响人数 N_f 表示为 $P(f) = K_s / N_f$ 。

据报道,南非、荷兰、澳大利亚等国家对大坝允许风险作出了规定^[9],社会指数 K_s 多为 10^{-3} 。对于滑坡的风险,香港地区的允许风险大约在 10^{-3} ,而澳大利亚岩土力学学会建议以年计的允许风险 10^{-4} ^[9]。这个数字对于中国就未见得合适,因为中国人口众多,要达到同一风险水平,分母一大,社会指数 K_s 就应更小。

对永久工程,我国《建筑结构可靠度设计统一标准》要求承载力极限状态可靠度指标 β 不小于表 1 规定,正常使用极限状态的可靠度指标 β 一般可取 0 ~ 1.5。水利部门对大坝也采用了相同要求。

表 1 结构允许可靠度指标 β

结构安全级别	级	级	级	破坏类型
一类破坏	3.7	3.2	2.7	延性破坏,非突发性破坏,渐进。
二类破坏	4.2	3.7	3.2	脆性破坏,突发性破坏,难修

当功能函数为正态分布的时候,可靠度指标 β 与失效概率 P_f 的关系如表 2 所示。这样可靠度指标就与失效概率建立了关系,提供了用安全系数及其概率密度函数求坝坡风险的途径。

表 2 可靠度指标 β 与失效概率 P_f 的关系

失效概率 P_f	0.5	0.25	0.1	0.05	0.01	0.001	10^{-5}	10^{-6}
可靠度指标 β	0	0.67	1.28	1.65	2.33	3.1	3.72	4.25

2.5 坝坡失效概率的另一种算法

直接利用抗滑稳定安全系数 F 定义功能函数,极限状态方程可以直接写成 $F(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) - 1 = 0$, 或者 $\ln F(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) = 0$ 。这里 F 是不同方法求得的安全系数,原有计算方法不需要做任何改动就可进行坝坡可靠度分析。2.2 中介绍的方法虽然国内已有规范,但由于边坡分析中的有些因素,如重力、地震惯性力,它们既是作用力,又是抗力,很难分开,所以不少学者并不主张使用 2.2 中建立功能函数的方法,而建议使用本节方法^[9]。笔者曾经用过这一方法^[12]。求风险的步骤如下:

- (1) 使用勘测资料或沉积规律进行尾矿沉积分层确定坝体代表断面;
- (2) 研究各类尾矿特性及其变异性,得出各种尾矿的指标均质和偏差;
- (3) 进行洪水 and 调洪计算确定最高允许水位和正常水位;
- (4) 用三维或二维的渗流分析,确定浸润线,可用电模拟试验,计算机仿真模拟,数值计算,也可以使用实测资料;
- (5) 最后,至少采用瑞典法或毕肖甫法计算稳定性,对可能的浸润线和其他变异性参数也计算最小的安全系数 F ;
- (6) 求出均值 μ_F 、标准差 σ_F 和变异性 $v = \sigma_F / \mu_F$;
- (7) 用 $\beta = (\mu_F - 1) / \sigma_F$ 计算可靠度指标,确定风险级别;

(8) 可按式 $\beta = (F - 1) / \sqrt{F^2 \delta_R^2 + \delta_S^2}$ 建立可靠度指标与安全系数的关系;

(9) 假定安全系数为对数正态分布,计算坝坡失效概率, $P_f = 1 - \Phi(\beta)$;

(10) 与规定风险比较,确定工程的风险级别。

3 安全评价的具体问题

3.1 尾矿坝静力和计算指标

静力稳定分析一般可以按 ZBJ1 - 90 规范要求做。为了得到分析依据,需安排工程地质勘察。勘察资料的整理,特别是尾矿的分层、各层尾矿的强度指标和取得这些指标的试验方法、试验数量等将对稳定分析结果带来较大影响。为了降低安全评价经费,缩短时间,充分使用已有资料,借鉴类似工程的资料是一个有效途径。最好由主管部门组织有关人员,把各类尾矿坝的资料整理出来,形成典型的断面和使用说明。

3.2 动力分析

动力分析的目的是了解尾矿坝抵抗地震灾害的能力,20 世纪 80 年代以来,有好几个尾矿坝作了这方面的工作。主要的不足是拟静力法的结果不能准确预测地震破坏,不能模拟远震。例如,拟静力法预测某坝遭遇地震烈度 7 时不破坏,实际在烈度 6 时发生了滑坡。国内 20 世纪 80 年代以来常见的地震反应分析成果都用时程法取得,其分析结论往往表达含糊,不确切,有的给不出抗滑稳定安全系数。当然,有人不太了解 GB50191 - 93《构筑物抗震设计规范》这个强制性标准,有的很大的项目不按这一标准要求工作,各行其事,业主说了算的情况也有。解决办法首先是技术进步,但仍需加强立法宣传,明确抗震方面的工作要求,提高自觉执行规范的意识。

3.3 防洪标准

ZBJ1 - 90 中后期设计标准在 GB5201 - 94 中当作校核标准使用。前一个规范是把初期坝和后期坝分段设计,或者干脆理解为初期和后期是两个库,故设计标准不同,无校核标准;后一规范似乎没有初期、后期概念,采用了设计和校核两级标准。

ZBJ1 - 90 的做法,还隐含了一个重大思想,即由于尾矿坝不象水工坝那样一次性修到设计标高,而是逐年升高,初期和后期的工程等别相差很大。可以逐年分段分等考虑采用不同防洪标准,因此,安全滩长和超高也可以分段要求。但对于校核洪水起控制作用的工程,少了校核标准,就等于降低了设防标准,这里有两个标准的协调问题。

3.4 洪水计算资料

计算洪水的方法目前有两种,频率计算法和水文气象法。频率计算法的基本依据是暴雨洪水资料,基本工具是数理统计,资料数据系列越长,据此按 P - 曲线外延获得的频率也就越符合实际。我国大部分雨量站水文站建于解放后,各地区水文水利部门按规定颁布的水文手册,近年这些资料不易取到。笔者曾见到有人仍用 1973 年的水文资料。用这些资料推断稀遇洪水是有较大误差的,有时可能出现错误。目前我国实行市场经济,水文资源共享的程度较低,有

各部门和单位应该重视这一关系到安全评价质量和价格的水文资料问题。

3.5 关于安全度

按《尾矿库安全管理规定》,尾矿库的现状按“安全度”分为危库、险库、病库和正常库 4 类。除正常库外,前 3 类从文字上看,只是程度有所不同。这里没有用“可靠度”或“失效概率”表示安全度,也没有用传统的抗滑稳定安全系数来描述安全度。其实,尾矿库安全评价需要搞清坝及其附属构筑物的安全状况,也需要对尾矿库进行安全等级的评定,前劳动部曾要求对一旦失事的危害程度进行分类,还应该对尾矿库的使用管理者的安全生产状况作出综合评价。可以尝试如下方法表达综合评价结果。

坝坡可以按安全系数分为 3 类:(A)满足规范规定者;(B)小于规定但大于 1 者;(C)小于 1 的。

抗洪能力也可以表述为:(a)达标;(b)淹没部分滩面或占用部分安全超高;(c)无安全滩长(d)既无安全滩长,又无安全超高。

坝坡绿化、放矿筑坝工艺的适用性,排洪构筑物 and 排渗防渗的可靠性等也给出分级。用它们的组合表示尾矿库的安全状态。库的安全状态加上管理评分是企业的安全现状表述。对于安全度比较低的库,再按前劳动部的要求,给出危害程度分类。

3.6 关于安全评价细则

近 10 年来由政府发布一些安全评价文件,如安监管字(2003)112 号文件,20 号令,9 号令等多数都有效。由于要求各有侧重,执行中难免混乱。有不少省和地方也出台了一些非煤矿山企业的安全评价标准,这种标准多数内容是管理性的。其中关于尾矿坝的部分,多从 20 号令等文件中摘录诸如“尾矿库应有足够的安全超高和安全滩长”这样的条款。照这样的标准评价尾矿坝难以得出全面准确的结论,也算不上“权威、科学”。为了提高尾矿库安全评价质量,通过评价工作真正搞清尾矿库的安全问题,改善管理,建议有关部门组织编写出台尾矿库安全评价细则,建立科学、统一、规范、权威的标准。

3.7 安全培训

不少人已经通过培训取得了 APR 证书,加盟中介机构的安全评价工作。其中有的机构并没有尾矿库设计研究工作的履历和经验。国内具有尾矿库建造管理经验的人极少具有 APR 证书或者在安全评价中介机构工作。这就使“需求”和“能力”产生了一种不平衡。另一个问题,是缺乏有经验的从业人员。培训是达到供求平衡和改变现状的有效途径。这种培训不是取证培训,是“结构可靠度设计和风险分析”“尾矿库洪水风险分析”“尾矿坝静力动力安全度分析”等专题或专业的高端培训。培训对象是从事尾矿库安全评价的 APR 人员。

4 结论

(1)尾矿库安全评价需要搞清坝及其附属构筑物的安全状况,也需要对尾矿库进行安全等级的评定和危害程度分类,还应该对尾矿库的安全生产状况做出综合评价,有关部

门可通过编写细则明确安全评价内容,完善本文推荐的综合评价结果表述方法。

(2)尾矿库的安全评价应该采用风险分析的方法和理论进行,本文的方法仅是初步尝试,尚需进一步健全、完善,以便推荐使用。

(3)为了提高尾矿库安全评价质量,通过评价工作真正搞清尾矿库的安全问题,改善管理。建议有关部门组织中介机构 APR 人员进行尾矿库专业技术高端培训,确保评价结果科学、统一、规范、权威。

参考文献

- 1 徐宏达.尾矿坝事故分析.工业建筑,2000(1)
- 2 徐宏达.上游式尾矿坝的沉积规律.有色矿山,2003(5)
- 3 徐宏达.细粒尾矿冲填筑坝的沉积规律初探.中国矿山工程,2004(1)
- 4 GB50199-94.水利水电工程结构可靠度设计统一标准.北京:中国水利水电出版社,1998
- 5 GB50068-2001.建筑结构可靠度设计统一标准北京:中国建筑工业出版社,2001
- 6 SL203-97.水工建筑物抗震设计规范.北京:中国水利水电出版社,1998
- 7 陈祖煜.土质坝坡稳定分析——原理、方法、程序.北京:中国水利水电出版社,2003
- 8 麻荣永.土石坝风险分析方法及应用.北京:科学出版社,2003
- 9 姜树涛、范子武、吴时强.洪灾风险评估和防洪安全决策.北京:中国水利水电出版社,2005

作者简介 徐宏达,山东滨州人,注册土木(岩土)工程师,长期从事尾矿筑坝技术研究和工程技术安全管理工作,现任中冶集团建筑研究总院高级工程师。

(收稿日期:2005-05-11)

荷兰:心理疾病也算工伤

荷兰有世界上最吸引人的休假制度,只要是全职雇员,每年都可享受至少 24 个工作日的带薪年假,有些公司的假期甚至长达一个多月。

除了休假制度,荷兰政府还从立法的角度给予雇员多方面的权益保证。从 1998 年起,每个企业都必须聘请医疗顾问,负责检查和监督雇主为员工提供符合人体健康要求的工作场所及相应设备。像办公家具的尺寸,椅子的角度,电脑与人的距离等等,都有详细规定。员工不可以在电脑前连续工作 6 h 以上,每工作 2 h 必须休息 10 min。

荷兰人对于“工伤”的理解也与中国不同。在荷兰,除了肢体重复性劳损算工伤外,因工作压力过大而引起的抑郁、忧虑、烦躁、失眠等心理疾病都可以算工伤。生病的员工可以在家休息,也可要求雇主进行内部工作调整及改善工作条件。如果因此而完全无法工作,第一年的休养期,雇主要继续向员工支付全额工资;一年后,经医疗机构评估,如果员工身体仍然无法适应工作要求,则可进入社会福利系统,领取生病前工资额的 70%。