

# 尾矿库的安全评价和风险管理

徐宏达

(中冶建筑研究总院有限公司)

**摘 要** 尾矿库的风险管理和风险评价仍然缺乏法规条件和技术基础。应该着手建立尾矿库失事概率分析和失事所造成的经济损失和生命损失估算基础上的风险评价体系。不仅论证尾矿库工程安全,而且和下游地区的经济发展、公共安全相联系,把能够降低下游风险的非工程措施放在重要位置。这个体系的主要目标应该是:建立完整的法规体系;逐步研究形成一套系统的、完善的分析理论、方法和技术;建立尾矿库的可接受风险和容忍风险的风险标准;对下游人员、经济、社会、环境损失做出评价,对尾矿库的风险做出判断,给出制定各类预案的指南。

**关键词** 尾矿库 安全评价 风险 风险管理

## Safety Evaluation and Risk Management of Tailings Reservoirs

Xu Hongda

(Central Research Institute of Building and Construction, MCC)

**Abstract** The risk management and evaluation of tailings reservoirs lack both legal conditions and technical basis. A risk evaluation system should be set up based on their failure probability analysis and the economic and life loss of tailings reservoir failures. The engineering safety of tailings reservoirs should be related with the economic development and public safety in the downstream area, and the non-engineering measures capable of reducing the downstream risks should be stressed. The main objectives of this system include: establishing a complete legal system; gradually forming a systematic and perfect system of analysis theory, method and technology; setting up a risk standard for the acceptable risks and tolerable risks of tailings reservoirs; evaluating the losses of downstream personnel, economy, society and environment, judging the risks of tailings reservoirs and working out the guidance for various emergency rescue plans.

**Keywords** Tailings reservoir, Safety evaluation, Risk, Risk management

2003年以来,我国矿业快速发展,扩建、改建、新建的尾矿库增多,尾矿排放量增大。尾矿库的设计、施工、运行、安全监管等方面,均存在适应不了生产需求的问题。生产需求和满足需求能力的不协调,导致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。为了制定有效预案控制这种灾难,应该在改进尾矿库安全评价基础上启动尾矿库的风险管理。

### 1 关于改进尾矿库安全评价

AQ 2006 - 2005《尾矿库安全技术规程》指出,尾矿库安全评价属专项安全评价。包括新建、扩建工程开工前的安全预评价,竣工后的安全验收评价,生产运行期间和闭库前的安全现状评价。

安全验收评价应查看工程施工情况,应该对工程是否满足安全要求做出明确结论。尾矿库工程包括土石坝工程、混凝土工程、土建工程、安装工程等。

都是单位或单项工程,而且多被定义为安全设施。尾矿库施工是非常复杂的过程。相关行业有严格的“施工规范”、“工程质量评定规范”。有代表政府监管部门的工程质量监督站,负责施工过程的质量监管。工程质量评定和竣工验收是权威部门的工作。尾矿库的安全设施验收应该在工程质量合格、竣工验收之后,依据安全验收评价报告进行。

安全现状评价应查看尾矿坝运行情况、排洪设施完好程度等,安全现状评价报告的结论应该有:尾矿坝稳定性是否满足设计要求、尾矿库防洪能力是否满足设计要求、给出尾矿库安全度、讨论尾矿库与周边环境的相互影响、提出安全对策。

徐宏达(1950—),男,中冶建筑研究总院有限公司尾矿坝技术研究室,主任,高级工程师,一级注册岩土工程师,100088北京市海淀区西土成路33号。

安全预评价报告应该对所依据的“可研报告”的可行性做出结论,并对下一步设计提出建议。安全预评价报告是对“可研报告”的一次复核。

这些规定的重点与设计规范类似,主要的论证工作与设计重叠,论证方法提倡采用设计方法。是对设计计算书的复核,既不满足“结构可靠度设计”的要求,也不满足应做“危险度评价”的要求,也达不到“对尾矿设施进行安全评价和危害程度分类”的目标。能按 AQ 2006 - 2005 要求的那样,给出“排洪系统布置的合理性及排洪能力的可靠性和尾矿库监测系统的完整性及可靠性”的报告较少。

评价报告质量不高和中介机构人员组成、技术素质、任务多等因素有关。设计院所出“尾矿库可研报告”的深度和水平,也影响安全预评价报告的水准。

尾矿库的安全设施是传统的单位或单项工程,也是永久性工程。施工记录、施工质量控制、检验、工程质量评定、工程竣工验收等施工环节尚缺乏土建工程那样的过程控制和权威验收。工程安全决定于工程质量,工程的质量和安全应该由设计、施工、监理、业主四家负责。他们的施工成果,应该由主持工程质量评定的单位和主持工程竣工验收的单位做出结论。尾矿库的安全验收评价报告担负不起安全设施验收的责任。有的安全设施验收是在没有法定工程竣工验收的情况下进行的。

安全评价应以社会安全为发展方向。逐步改变目前以工程安全为主要评价内容的状况。避免评价机构和设计院职责混在一起。

## 2 尾矿库风险分析的必要性

尾矿库下游区域的经济越发展,社会越繁荣,溃坝的后果就越严重。我国矿业发达的地区,社会经济也景气。这就要求我们在尾矿库的建设和整个运行管理中,不仅考虑尾矿库的工程安全,还要考虑下游的环境安全和公共安全。重视溃坝对下游生命、健康、财产和环境负面影响的可能性和严重性。

2000 年在北京召开第二十届国际大坝会议,第一次把大坝风险分析作为会议主题。标志着水库大坝工程风险分析已经发展成为体系较完整的决策工具<sup>[1]</sup>。我国水利系统在大坝风险分析方面取得了很多成果,可供尾矿库安全评价借鉴和参考<sup>[1-2]</sup>。

近几年,社会公众对尾矿库安全十分关注,人们希望确保下游的环境安全和公共安全。由于社会的关注,尾矿库的安全就不仅仅是使用者一家的事了。

每一个尾矿库工程技术人员,都应该把传统的工程安全理念转换为工程风险理念。尾矿库安全评价报告应该从工程安全的复核、论证,转向对尾矿库失事分析、生命安全估算及环境和社会安全评价。这才是社会的需要,也是全生产主管部门的要求。

尽管《金属非金属矿山安全标准化规范尾矿库实施指南》要求风险评价和风险管理。但尾矿库的风险管理和风险评价仍然缺乏法规条件和技术基础。我们应该着手建立尾矿库失事概率分析和失事所造成的经济损失和生命损失估算基础上的风险评价体系。主要目标应该是:建立完整的法规体系;逐步研究形成一套系统、完善的分析理论、方法和技术;研究尾矿库的可接受风险和容忍风险的标准;对下游人员、经济、社会、环境损失做出评估,对尾矿库的风险做出判断,给出制定各类预案的指南。在这个体系建立之前,可以先建立经验概率体系,评估失效概率。再逐步完善数值计算和分析方法。

## 3 事件的描述及其经验概率

风险指对生命、健康、财产和环境负面影响的可能性和严重性的度量,是溃坝可能性与产生后果的乘积。

风险管理主要包括建立风险标准、风险确认、风险评价和风险处理的事前处理机制。是建立在尾矿坝失事概率分析和溃坝所造成下游生命损失、经济损失估算基础上的。

众所周知,混凝土结构可靠度设计已经开展多年,水利、铁路、交通、建筑等行业已经制定了专门标准,如 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》和 GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》。单一失效构件和多失效模式的复杂构件都有相对成熟的失效概率的计算方法<sup>[3]</sup>。排洪构筑物等混凝土结构的失效概率可参考使用这些成功方法。

滑坡、洪水漫顶等,都是水库的重大事件。尽管精确计算这类事件的失效概率很困难、繁琐,但已经有不少研究成果和方法<sup>[2,4]</sup>。由于尾矿库不同于水库,各个尾矿库的事故原因和机理相差悬殊,甚至没法给出统一的失事模式。仍然可以借鉴参考水库大坝的溃坝研究方法和经验,开展尾矿库的风险研究。目前精确计算尾矿库的失事概率还是比较困难,可以在初设和初步分析阶段,用经验方法来确定事件的概率。表 1 是文献 [1] 引自澳大利亚风险评价导则的定性描述和事件发生概率的转换关系。有对事

件的定性描述,还有经验概率和判据。表2是我国水利部门的学者建议的<sup>[1]</sup>,把事件描述为五类,每一类都明确、清晰,便于使用。

表1 定性描述和事件发生概率的转换关系 1

定性描述	概率量级	判 据
非常确定	1 (或 0.999)	肯定发生
确定	0.2 ~ 0.9	曾经发生过多次类似事件
非常可能	0.1	曾经发生过一起类似事件
可能	0.01	如果不采取措施可能会发生类似事件
不太可能	0.001	别处近来发生过
非常不太可能	$1 \times 10^{-4}$	别处过去曾经发生过
非常不可能	$1 \times 10^{-5}$	类似事件有发生的记录,但不完全一样
几乎不可能	$1 \times 10^{-6}$	类似事件没有有发生的记录

表2 定性描述和事件发生概率的转换关系 2

定性描述	概率量级	判 据
事件不会发生	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$	针对不同事件,根据历史资料和大坝安全鉴定结果,并结合水库大坝安全管理 and 长期运用情况给出。
事件基本不会发生	$1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$	
事件可能发生	0.01 ~ 0.1	
事件很可能发生	0.1 ~ 0.5	
事件肯定发生	0.5 ~ 1.0	

笔者曾经把我国发生在尾矿库的78个事件,按行业、灾害等统计分类,分别给出了事件的几率<sup>[5]</sup>。按事件发生的几率由高到低排列,并把原描述细分后,稍加修改得到一张新表,见表3。我们可以按表3中11个环节进行安全性分析,在是否满足设计和规范要求的基础上,逐一进行风险确认,再用式(1)、(2)、(3)、(4)得出综合结果。

表3 我国尾矿库事件的几率

序号	病害类型描述	简称	全国范围	损失 10万元
(1)	(2)	(3)	(4) 78件	(5) 45件
1	排洪管、塔、斜槽隧洞构筑物破坏	构筑物	28.2	33.3
2	排渗管破坏	排渗		
3	洪水漫顶	漫顶	25.6	44.4
4	各种原因的溃坝	溃坝		
5	库内滑坡、喀斯特等	环境	14.1	11.1
6	筑坝困难	堆坝		
7	初期坝漏矿	漏矿	5.1	4.5
8	坝坡、坝基、坝肩渗水,流土、坝面沼泽化	渗流	14.1	4.5
9	雨水、尾矿浆造成的坝面拉沟,子坝溃口等	拉沟	9.0	2.2
10	地震引起的液化、裂缝、沉降、位移等	地震	2.6	0
11	坝坡失稳、即各种滑坡	滑坡	1.3	0

$$\bar{P}_i = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{k}, \quad (1)$$

$$P_m = \prod_{i=1}^m \bar{P}_i, \quad (2)$$

$$P_f = \prod_{m=1}^n P_m, \quad (3)$$

$$R = L P_f, \quad (4)$$

式中,  $\bar{P}_i$  为第  $i$  个环节可能发生的概率;  $P_{ij}$  为第  $j$  个专家对第  $i$  个事件的概率赋值;  $k$  为专家人数或专家权重;  $P_m$  为第  $i$  个环节,  $m$  个溃坝路径的概率;  $P_f$  为总溃坝概率。

表3的11个环节可以根据实际工程情况增减,每一个环节的溃坝因子也可以据实增减替换,比如,雨季坝肩山体滑坡、地震引发的坝体滑裂、滑落、震陷等,地震引起排洪塔的结构破坏等。笔者已经整理了11张细分判据,限于篇幅从略。

通过表3的工作,可快速进行尾矿库风险的筛选、排队。有针对性地制定风险对策,实现不同层次的管理,以合理配置人力、物力,减少盲目性,提高安全绩效。

#### 4 风险标准探讨

尾矿库失事造成的损失是多方面的,包括人的生命损失,经济损失,环境损失等。风险管理需要建立相应标准,如生命个体风险标准、生命社会风险标准,经济风险标准,环境风险标准,社会风险标准(评价事件的综合影响)。图1和图2是示例性风险标准( $P_{fcr}$  为临界风险概率,  $P_{focr}$  为超临界风险概率)。重要尾矿库的含义指:工程规模大,位置重要,位于发达地区,位于文物古迹、工矿企业、城市重要设施上游等。

在缺乏风险研究基础和必要的标准条件下,很难进行风险评价,也没法应用评价结果转移风险,分担责任,解决风险问题。目前,相应的保障机制尚未纳入议程,风险评估难以进入实用阶段。

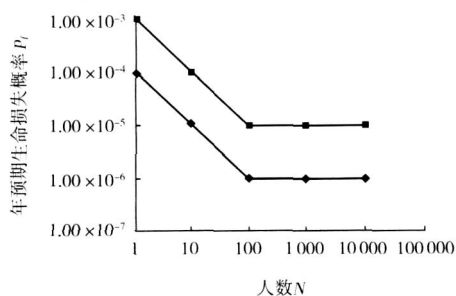


图1 建议探讨的生命社会风险标准

◆— $P_{fcr}$ ; ■— $P_{focr}$

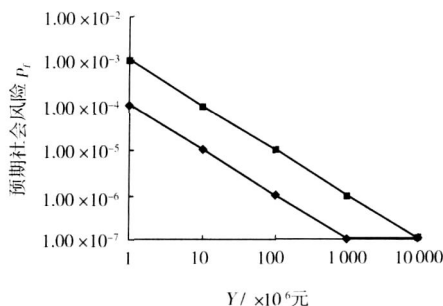


图 2 建议探讨的经济风险标准

◆— $p_{tcr}$ ; ■— $p_{focr}$ 

### 5 尾矿库可靠度设计问题

一般认为,概率法(可靠度法)设计优于定值设计法,极限状态设计法,优于容许应力设计法<sup>[6]</sup>。因此,概率方法与极限状态方法相结合,逐渐引起岩土工程的设计人员的重视。国内混凝土结构设计采用可靠度方法,上海市 1990 年的地基基础设计规范尝试使用概率极限状态方法确定承载力<sup>[7]</sup>,《水工建筑物抗震设计规范》(SL203—97)要求用概率和经验基础上的分项系数方法计算坝坡稳定<sup>[8]</sup>,文献[8]还建议了一种计算边坡可靠性的方法,值得尾矿坝借鉴来研究坝坡失效概率。

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的等同起来使用<sup>[3]</sup>。《选矿厂尾矿设施设计规范》(ZBJ—90),仍使用安全系数定义坝体的抗滑稳定性。从大环境看,结构设计、安全评价、风险评估,具备了以可靠度设计方法为基础的接轨条件。目前有关尾矿库安全评价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)评价法规没有要求,尾矿坝等土工构筑物尚无结构可靠性设计规范;

(2)缺乏尾矿坝等土工结构失效概率控制指标规定;

(3)洪水计算、调洪验算、高精度的坝坡稳定性分析、地震反应分析等描述失效的功能函数难以建立,尚在探索研究阶段。

#### 5.1 安全系数可靠度指标的关联性

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,安全系数  $K = \bar{R}/\bar{S}$ ,通常定义为结构抗力均值  $\bar{R}$  和结构作用均值  $\bar{S}$  的比。已知可靠度指标

$$= \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\frac{\sigma_R^2}{R^2} + \frac{\sigma_S^2}{S^2}}}, \quad (1)$$

把安全系数定义式与可靠度指标建立联系,可得到:

$$= \frac{K - 1}{\sqrt{K^2 \frac{\sigma_R^2}{R^2} + \frac{\sigma_S^2}{S^2}}}, \quad (2)$$

式中,  $\sigma_S$  为结构作用效应的标准差;  $\sigma_R$  为结构抗力效应的标准差。

安全系数、可靠度指标是相互关联的。

#### 5.2 坝坡失稳的风险

如图 3 所示,设  $R$  是抗力,形成抗滑力矩,仍用  $R$  表示。 $S$  是下滑力,形成滑动力矩,仍然用  $S$  表示。

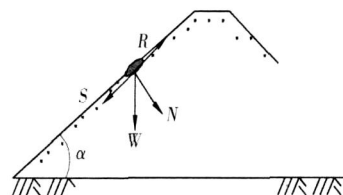


图 3 坝坡上的受力

设功能函数:

$$g(\cdot) = g(R, S) = R - S.$$

坝坡失效概率:

$$p_f = p(S > R) = \int f(R) f(S) dR dS.$$

如果采用瑞典法,按以下步骤就可求解坝坡失稳的风险,即失效概率<sup>[2]</sup>。

(1)确定一个水位,求出浸润线;

(2)取一组参数,计算并记录  $g(\cdot) = S - R < 0$  的次数  $M$ ;

(3)计算随机数并对所使用的不确定量抽样;

(4)对不同分布的变量函数进行转换;

(5)重复 2 ~ 4,累计记录  $g(\cdot) < 0$  的次数  $N$ ;

(6)用  $P_f(h_i) = M/N$  求出水位  $h_i$  的失效概率。

#### 5.3 漫坝风险

漫坝就是水位翻过坝顶流向下游坝坡,土石坝是绝对不允许的。如图 4 所示,  $Z_0$  代表某一水位,  $H_L$  代表各种作用引起的水位升高。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。

作用  $L$  的影响因素,或者说不确定性,主要有:暴雨洪水、风浪爬高、泄洪能力、调洪库容。 $Z_0$  叫汛前限制水位,是一个人为、可控因素。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,通过降低控制水位,可以增大调洪库容。所以,尾矿坝有条件采取强有力措施,降低漫坝风险。

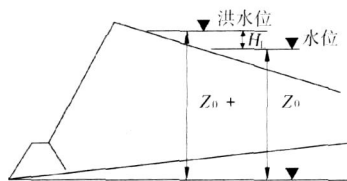


图4 库水位升高

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,水文学有专门算法<sup>[9]</sup>。

风浪爬高与水面面积、风向、风级有关,水库有若干算法<sup>[9]</sup>。对于尾矿库,特别是小库,由于水面小,水深浅,这些算法的适用性缺乏研究。

对于特定的泄洪系统,泄洪能力主要由泻水构筑物类型和断面尺寸决定,流态、水头等计算模型和参数的选取以及适用性等,也有一定的影响。

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、计算方法、滩面的坡度这3个因素影响较大。

如图5(a)  $Q \sim t$  为入库洪水流量曲线,  $q \sim t$  为排洪流量曲线。设库面面积在  $dh$  段为  $A$ , 入库流量和出库流量平衡方程的微分式:

$$Q dt - q dt = A dh,$$

或

$$Q - q = A dh / dt.$$

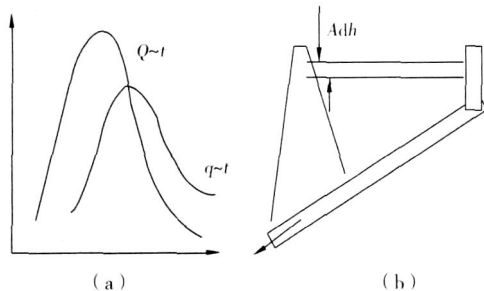


图5 调洪原理

显然,  $dt = 0$  时,就是水位最高的时候,也是泻流量最大的时候。此后,库水位随泄流时间延长而下降。 $Q \sim t$ ,  $q \sim t$  以及库水位  $Z \sim t$  和库面面积  $A \sim t$  都是时间的函数,也是随机变量。欲求某一水位,必须解方程  $Q dt - q dt = A dh$ 。而  $Z \sim t$  不能表示成  $Q, q, A$  的解析式,必须把他们写成差分式,离散成线性方程求解<sup>[2,9]</sup>。

## 6 结论

(1)安全评价应以社会安全为发展方向。逐步改变目前以工程安全为主要评价内容的状况。避免评价机构和设计院职责混在一起。

(2)社会公众对尾矿库安全十分关注,人们希望确保下游的环境安全和公共安全。每一个尾矿库工程技术人员,都应该把传统的工程安全理念转换为工程风险理念。

(3)应进行尾矿库风险分析,逐步健全、完善风险管理机制。

## 参考文献

- [1] 李雷,等. 大坝风险评价与风险管理 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [2] 麻荣永. 土石坝风险分析方法及应用 [M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [3] 贡金鑫. 工程结构可靠度计算方法 [M]. 大连:大连理工大学出版社, 2003.
- [4] 姜树涛, 范子武, 吴时强. 洪灾风险评估和防洪安全决策 [M]. 北京:中国水利水电出版社.
- [5] 徐宏达. 尾矿坝事故分析 [J]. 工业建筑, 2000 (1): 69-71.
- [6] 谢定义,等. 岩土工程学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [7] 黄绍铭,等. 软土地基与地下工程 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [8] 陈祖煜. 土质坝坡稳定分析——原理、方法、程序 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 左东启,等. 水工设计手册 [M]. 北京:水利电力出版社, 1983.

(收稿日期 2009-05-29)

(上接第121页)

场,首先要把握工商企业的物流需求内容和特征,制订物流服务融入到工商企业的物流系统当中去的方针政策,树立以货主为中心的服务理念。使公司在客户服务水平上有一个更好的提高,以高客服水平来赢得更广阔的物流市场,打造铜冠物流品牌。

## 参考文献

- [1] 曹文琴, 胥兵, 朱海燕. 基于核心制造企业的供应链整合研

究 [J]. 商业经济文汇, 2005 (6): 25-27.

- [2] 刘刚, 王景光. 物流企业运作模式整合及分析 [J]. 中国物流与采购, 2005 (3): 90-94.
- [3] 张宇. 企业物流资源整合的对策研究 [J]. 北方经贸, 2006 (2): 47-49.
- [4] 吴晓波, 耿帅. 物流整合与企业竞争能力 [J]. 科研管理, 2004 (9): 35-39.

(收稿日期 2009-06-07)