

文章编号: 1673 - 193X(2008) - 03 - 0050 - 04

尾矿库溃坝灾害因素分析及风险指标体系研究^{*}

李全明,王云海,张兴凯,赵 军

(中国安全生产科学研究院,北京 100029)

摘 要:我国尾矿库数量多、规模小、安全度水平低,较多中小尾矿库未经过正规设计,并且绝大多数尾矿库下游为生活区、工矿企业或重要城镇等,因此加强尾矿库风险管理,建立尾矿库溃坝风险指标体系和风险评判模型,对于减少和防止尾矿库溃坝事故的发生,确保尾矿库的安全运行,使之更好地为矿山安全生产服务,为国民经济健康持续快速发展服务等方面都具有重要意义。本文在总结国内外尾矿库事故特点的基础上,系统研究了尾矿坝的溃坝模式和溃坝路径,并基于尾矿坝指标的工程性质分析和相关性分析,研究并建立了尾矿库溃坝风险指标体系,该体系的建立为尾矿坝溃坝风险评判模型及评判方法的研究提供前提条件,可为尾矿库运行期的安全监管提供依据。

关键词:尾矿库;溃坝模式;溃坝路径;风险指标体系

中图分类号: X924.2

文献标识码: A

Analysis of disastrous factors concerning tailing dam failing and research on risk index system

LI Quan-ming, WANG Yun-hai, ZHANG Xing - kai, ZHAO Jun

(China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: It is imperative to strength risk management of the tailing ponds and establish tailing dam failing risk index system and risk evaluation model, which will play a significant role in reducing and preventing the occurrence of tailing dam failing accident, ensuring safe operation of the tailing ponds, making them to better serve safe production of the mines as well as healthy, steady and rapid development of the national economy, etc. This article provided a summary of the characteristics of tailing pond related accidents both in China and abroad, based on which a systematic research was conducted on the dam failing pattern and dam - failing path. It also studies and establishes a dam failing risk index system for the tailing ponds based on engineering analysis of the dam pond indexes as well as correlation analysis. The establishment of this system provides a precondition for the research of tailing dam failing risk evaluation model and evaluation method, providing a basis for safety supervision and management of the tailing ponds during their operations.

Key words: tailing reservoir; failing patterns; failing paths; risk indexes system

收稿日期: 2008 - 03 - 03

作者简介: 李全明,男,博士,工程师。

^{*} 基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(编号: 2006BAK04B01 - 1);国家自然科学基金项目(编号: 50709031);中国安科院基本科研业务费专项资金项目(编号: 2007JBKY02);清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金项目(编号: sklhse - 2007 - c - 01)

1 引言

尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的用以堆存金属非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿的场所,是维持矿山正常生产的必要设施,但也是金属非金属矿山的重大危险源^[1]。我国政府一直重视尾矿库的安全监管,特别是2007年全国范围内的尾矿库专项整治行动开展以来,尾矿库安全已得到全社会的共同关注。

目前,我国尾矿库安全管理主要存在以下5个方面的问题^[2]:(1)尾矿库许可工作的问题较多。全国尚有3675座尾矿库,即占58.7%的尾矿库未取得安全生产许可证。(2)尾矿库基础工作薄弱。我国大部分尾矿库规模小、条件差,且多数小尾矿库是后来为了获取安全生产许可证而补做的设计。(3)尾矿库设计和安全评价工作质量差。部分中介评价机构和设计单位技术质量不能满足规范要求,甚至违规评价和设计。(4)未按规定履行闭库程序。一些停用多年的尾矿库一直未按规定履行闭库程序,而安全监管部门也未依法进行相应的处理。(5)尾矿库专业人员严重不足。一些安全监管人员也存在不熟悉相关业务,以致日常检查中看不出尾矿库存在的隐患。

当前,我国在水库大坝等水利工程的大坝风险管理领域开展了大量的研究工作。例如,李君纯提出了水库大坝总体安全度法,并将大坝风险划分为防洪、抗滑、抗裂、抗渗、抗震及抗生物破坏等6大类^[3]。吴世伟分析了重力坝可能的破坏模式,并提出了重力坝最大可能破坏模式^[4]。李雷按照USBR现场评分法和葡萄牙综合风险指数法对江西省29座大中型水库进行了风险排序^[5]。王仁钟等建立了基于风险评价技术的中国病险水库大坝判别标准体系^[6]。在水库大坝的安全评价中,风险理论得到了较大的发展,并取得了较多成果,然而在尾矿库安全领域,有关风险理论的研究工作开展较少,尚未取得公认的研究成果。

本文研究并建立了尾矿库溃坝风险指标体系,为尾矿坝溃坝风险评判模型及评判方法的研究提供前提条件,可为尾矿库运行期的安全监管提供依据。

2 尾矿库事故类型分析

1994年美国大坝委员会(USCOLD)针对世界范围内的尾矿坝事故进行了统计,包含了1917年至1989年之间185个发生了溃决、渗漏以及其它破坏类型的尾矿库。此后,美国环境保护部门(UNEP)又在185个尾矿库事故案例的基础上增加了26个事故案例,USCOLD、UNEP/ICOLD的统计结果可以汇总于图1,图中横坐标以每5年为一个单位。

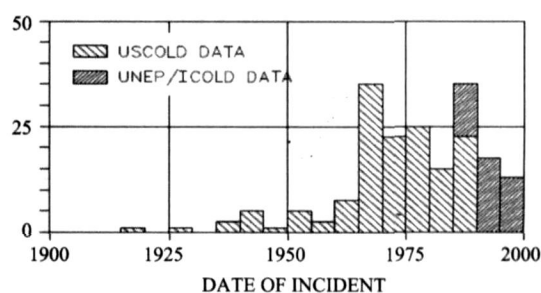


图1 世界范围内尾矿库事故数量统计表

图1表明,从20世纪60年代中期开始,世界尾矿库事故发生数量急剧增加,原因之一是60年代开始,尾矿库建设和运行的数量急剧增多。

2001年以来我国尾矿库溃坝事故数量见图2所示。从图中可以看出,我国尾矿库事故从2003年以来逐年增加。图3给出了这些尾矿库溃坝事故成因分析结果,洪水漫顶、坝坡失稳、渗流破坏、结构破坏是我国尾矿库溃坝的主要类型。

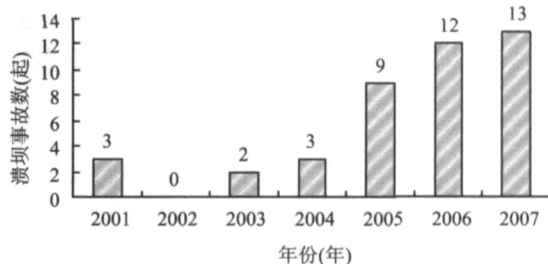


图2 2001年以来我国的尾矿库事故

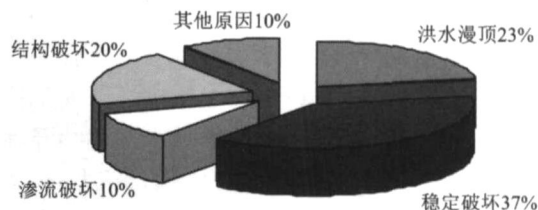


图3 2001年以来我国尾矿库溃坝事故类型

3 尾矿库溃坝模式和溃坝路径研究

溃坝模式分析是尾矿坝风险分析过程中的重要环节,根据各种可能出现的外荷载,分析在荷载作用下,大坝各组成部分可能出现的破坏形式,并分析是否可能发展成为溃坝时间,最终形成荷载-建筑物-破坏-溃坝的途径。如果在尾矿坝发生溃决事故前就能够分析出可能发生的溃决方式和可能性,则对于尾矿坝溃坝事故的预警和应急起到决定性的作用,可以针对性地预防溃坝灾害的发生和减少溃决带来的损失。根据上述对国内外已溃坝情况的分析,可以总结出尾矿坝主要溃决模式如下。

(1)非汛期尾矿坝的溃决:坝体填筑高度增加-滑动力增加-局部滑动或深层滑动-干预无效-大坝溃决。坝体集中渗漏-管涌-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。坝基集中渗漏-管涌-深层滑动或整体滑动-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。坝下埋管发生接触冲刷破坏-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。坝体渗流管涌破坏-坝体失稳-坝顶(或滩顶)高程降低-漫顶+管涌-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。坝体裂缝-受力引起裂缝扩展-坝坡失稳-干预无效-大坝溃决。

(2)汛期由于无排洪设施、排洪设施泄量不足、安全超高或最小安全滩长不足引起洪水漫顶:超标准洪水-排洪设施正常-漫顶-干预无效-溃决。超标准洪水-无排洪设施-安全超高或最小安全滩长不足-调洪库容不足-漫顶-干预无效-溃决。洪水⁴/排洪设施正常⁴/安全超高或最小安全滩长不足-漫顶-冲刷坝体-整体滑动-干预无效-溃决。洪水-无排洪设施或排洪设施泄量不足-安全超高或最小安全滩长不足-不能及时加高坝顶-漫顶-冲刷坝体-干预无效-溃决。洪水+持续降雨-无排洪设施-库内近坝岸坡滑塌-涌浪-漫顶-冲刷坝体-干预无效-大坝溃决。

(3)汛期由于结构破坏引起溃决:洪水-坝体深层横向贯穿性裂缝-集中渗流破坏-人工抢险干预-干预失效-大坝溃决。洪水-持续降雨-上部坝体饱和-纵向裂缝-坝体局部失稳-坝顶(滩顶)高程降低-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。洪水-排洪设施破坏-排洪能力不足-

漫顶-冲刷坝体-干预无效-大坝溃决。洪水-洪水不能安全下泄-截洪沟冲毁-冲淹截洪沟基础-库水无控制下泄-回流冲刷下游坝脚-下游坡滑动-大坝溃决。

(4)汛期坝体、坝基或坝下埋管渗透破坏导致溃决:洪水-坝体集中渗漏-管涌-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。洪水-坝基集中渗漏-管涌-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。洪水-坝下埋管发生接触冲刷破坏-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。洪水-下游坡大范围散浸-浸润线抬高-坝体失稳-坝顶(滩顶)高程降低-漫顶-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。洪水-坝体渗流管涌破坏-坝体失稳-坝顶高程降低-漫顶+管涌-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。

(5)由地震引起的尾矿坝溃坝:地震-坝体水平裂缝-漏水通道-管涌-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。地震-坝体纵向裂缝-坝体滑动-坝顶(滩顶)高程降低-漫顶-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。地震-尾砂液化-坝坡失稳-尾砂下泄-人工抢险干预-干预无效-大坝溃决。

经上述研究,对尾矿坝可能的溃坝模式进行了归类分析,共得到 5 大类溃坝模式和 23 种可能的溃决路径。但对于某一特定尾矿坝来说,尾矿坝堆筑方式不同、周边边界条件不同、内部薄弱环节不同,因此,溃决模式和破坏路径都会有所区别。

4 尾矿库溃坝风险指标体系研究

根据尾矿库溃坝的主要因素分析、溃坝模式和溃坝路径的分析和研究,可以将与尾矿库安全有关的参数和设计指标进行归类,初步建立尾矿库溃坝风险指标体系。

建立准确、全面、有效的指标体系是溃坝风险评判的关键。确定每一个具体的影响因素,需要广泛征求专家的意见,并参考相关的规章制定,再进行整理、分类和综合。尾矿库溃坝风险指标体系的确定应遵循了以下原则:(1)理论服务于实践的原则;(2)系统性原则;(3)可操作性原则;(4)简明性原则;(5)独立性原则;(6)可比性原则。

为保证指标间的独立性和可比性,从国家安全监管总局尾矿库管理信息系统中,从某省尾矿库数据库中随机抽取了 13 个样本,采用指标相关性数值

分析方法,对各个指标之间的相关性进行了分析。

4.1 尾矿库溃坝风险指标间相关性分析方法

为了使被分类对象分得合理,必须描述指标之间的亲疏关系,通常认为用“距离”这个名词最形象。每个事物可用若干种变量来表征。设有 1、2、3... n 个样品,每个样品有 1、2、3... m 个变量,则可用 x_{ij} 来代表第 i 个样品的第 j 个变量。相关是研究两事物之间有无关系的数学名词。为了使相关的程度定量化,常使用相关系数。

求取相关系数的过程如下:

(1) 列出数据矩阵。

(2) 计算各指标的平均值:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$$

(3) 计算各指标的方差:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$$

(4) 计算各指标的标准差:

$$s_j = \sqrt{s_j^2}$$

(5) 计算两个指标的协方差,协方差不但反映两个指标各自的离散程度,且还反映两指标间的相关关系:

$$s_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)$$

(6) 计算相关系数 r :

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} = \frac{s_{jk}}{s_j \cdot s_k}$$

4.2 尾矿库溃坝风险指标体系的建立

通过尾矿库溃坝风险指标的相关性分析,删除具有较大相关性的风险指标,最终形成了具有相互独立性的风险指标体系,如图 4 所示,指标共分为 5 大类,包括漫顶溃决、失稳溃决、渗流破坏、结构破坏和管理因素。5 大类共包含 16 个指标。该指标体系可为尾矿坝溃坝风险评判模型及评判方法的研究提供前提条件,可为尾矿库运行期的安全监管提供依据。

5 总结

本文在总结国内外尾矿库事故特点的基础上,系统研究了尾矿坝的溃坝模式和溃坝路径,并基于尾矿坝指标的工程性质分析和相关性分析,研究并

建立了尾矿库溃坝风险指标体系,该体系的建立为尾矿坝溃坝风险评判模型及评判方法的研究提供前提条件,可为尾矿库运行期的安全监管提供依据。

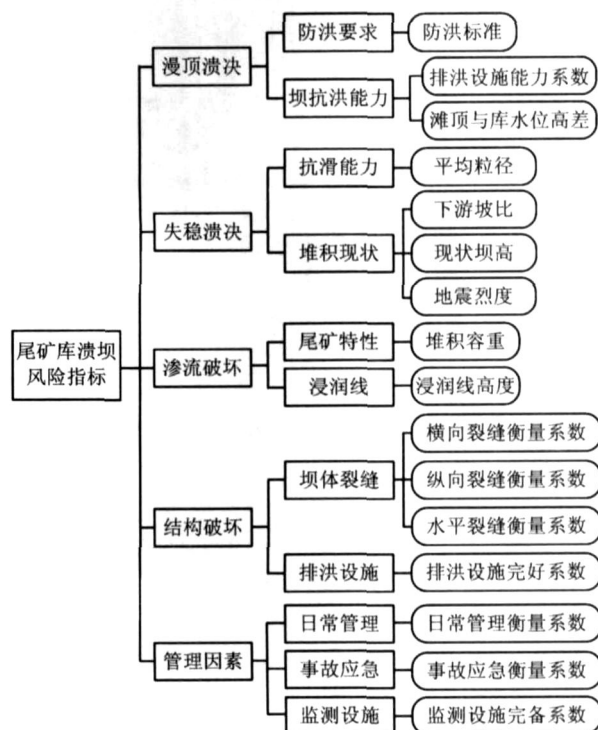


图 4 尾矿库溃坝风险指标体系

参考文献

- [1] 彭承英. 尾矿库事故及预防措施 [J]. 有色矿山, 1996, (5): 38~40
- [2] 宁丙文, 冯瑾. 稳步推进尾矿库专项整治行动 [J]. 劳动保护, 2007, (12): 10~13
- [3] 李君纯, 李雷, 盛金保. 水库大坝安全评判的研究 [J]. 水利水运科学研究, 1999, (1): 79~85
- [4] 吴世伟, 李同春. 重力坝最大可能破坏模式的探讨 [J]. 水利学报, 1990, (8): 20~28
- [5] 李雷等. 江西省部分大中型水库安全现状调研报告. 2000
- [6] 王仁钟, 李雷, 盛金保. 病险水库风险判别标准体系研究. 水利水电科学进展, 2005, (5): 9~12
- [7] 李全明, 王云海, 付士根, 等. 有限元数值计算方法在赤泥堆场安全评价中的应用. 轻金属, 2007, (6): 12~16
- [8] 李全明, 王云海, 廖国礼. 尾矿库安全评价中的科学问题及评价方法探讨. 中国安全生产科学技术. 2006, 2 (6): 53~57.
- [9] 王云海. 铁矿区采空区勘测及其危害评价研究. 中国安全生产科学技术, 2006, (1): 59~63