

文章编号: 0559-9350(2009)08-0989-06

尾矿库溃坝风险指标体系及风险评价模型研究

李全明¹, 张兴凯¹, 王云海¹, 张丙印²

(1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029; 2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:运用相关性分析,将与尾矿坝安全有关的参数和设计指标进行归类,建立了相互独立指标的尾矿库溃坝风险指标体系,并应用模糊理论建立了尾矿库溃坝风险评价模型。随后通过国内尾矿库专家系统对体系各指标进行的评估,结合层次分析法,得到了各指标的权重,并将指标分成 4 个级别,建立了分级标准,从而提出尾矿库运行期安全等级的划分方法。实例分析表明,本文建立的尾矿库溃坝风险指标体系和风险评价模型,可以应用于评估尾矿库运行期的安全等级。

关键词:尾矿库;风险指标体系;模糊理论;溃坝风险评价模型

中图分类号:TV698.2

文献标识码:A

1 研究背景

经过近 60 年的发展,我国已成为世界矿业大国,而金属、非金属矿山大都拥有尾矿设施^[1]。经初步统计^[2],我国现有尾矿库 12 655 座,尾矿堆积量达 80 亿 t。自 2001 年以来,全国共发生 53 起尾矿库事故,死亡 351 人,事故起数和死亡人数呈逐年上升态势,安全形势十分严峻。例如,2008 年 9 月 8 日,山西省襄汾县新塔矿业公司“9.8”特别重大尾矿库事故,造成 281 人死亡,震惊全国。经调查统计,我国尾矿库存在数量多、规模小、安全度水平低及较多中小尾矿库未经过正规设计等特点,并且绝大多数尾矿库下游为生活区、工矿企业或重要城镇,确保尾矿库安全运行十分重要。

我国尾矿库运行期安全等级划分按照《尾矿库安全技术规程》(AQ2006 - 2005)执行,规程根据尾矿库防洪能力和尾矿坝坝体稳定性,分为危库、险库、病库、正常库四个等级。除正常库外,前三类从文字上看,只是病险程度有所不同^[3]。目前,我国尾矿库管理中安全度的划分方法属于定性的判别方法,而在实际的尾矿库工程风险管理过程中不容易对尾矿库工程的安全状况给出准确而清晰的定义,安全监管部或评价机构在开展尾矿库安全评价过程中难以准确判断尾矿库的安全度,评价结果往往具有人为性^[4]。因此,为进一步完善尾矿库运行期安全评估标准和评估方法,本文建立了尾矿库溃坝风险指标体系和风险评价模型,其对于减少及防止尾矿库溃坝事故的发生,确保尾矿库安全运行等方面都具有重要意义。

2 尾矿库溃坝风险指标体系建立

2.1 溃坝模式研究 溃坝模式分析是尾矿坝风险分析中的重要环节,根据各种可能出现的外荷载,分析在荷载作用下,坝体会出现的破坏形式,并分析其可能发展成为溃坝事件,最终形成荷载 - 建筑物 -

收稿日期:2009-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(50709031);清华大学水沙科学及水电工程重点实验室基金(skhse-2007-C-01)

作者简介:李全明(1979 -),男,河北沧州人,博士,工程师,主要从事尾矿库和非煤矿山安全技术研究。

E-mail:liqm@chinasafety.ac.cn

破坏 - 溃坝的途径。尾矿坝的溃坝是由内部薄弱环节和外部荷载共同作用下产生的,其产生的可能方式较多。内部薄弱环节的存在具有一定的不确定性,外部荷载的出现也同样具有不确定性,不同的荷载组合将会出现不同的溃决模式。在通过分析历史资料后认为尾矿库溃坝可分为^[5]:非汛期尾矿坝溃决;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;汛期由于结构破坏引起溃决;汛期坝体、坝基或坝下埋管渗透破坏导致溃决;地震引起尾矿坝溃坝等 5 类溃坝模式,具有 23 种溃坝路径。

2.2 体系的初步建立 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。尾矿库溃坝风险指标体系应遵循以下原则: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。

2.3 指标相关性分析 为保证指标间的独立性和可比性,根据国家安全监管总局尾矿库管理信息系统,从辽宁、河北、湖南等省尾矿库数据库中分别随机抽取 13 座尾矿库样本,采用指标相关性数值分析方法^[5],对各个指标之间的相关性进行了分析,其中,辽宁省的计算结果见表 1。

从表 1 可以看到,浸润线高度和排渗完好系数两个指标之间的相关性系数为 0.90,两个指标之间具有较大的正相关特性,对于某一个尾矿坝来说,浸润线过高与排渗设施破损、堵塞并不能发挥正常功能有较大的关联。此外,其他省尾矿库的计算结果也说明两个指标具有较大相关性,故将排渗完好系数删除,不纳入尾矿库溃坝风险指标体系中。此外,通过样本中各指标的相关性分析,其他指标之间不存在较大的相关性。

2.4 体系的最终建立 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^[5],如图 1 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。

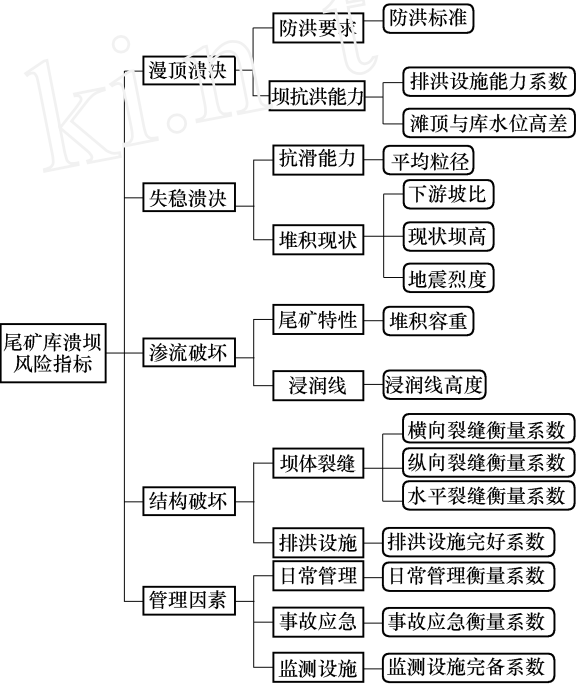


图 1 尾矿库溃坝风险指标体系

表 1 辽宁省 13 座尾矿库溃坝风险指标的相关性分析

	防洪标准	滩顶与库水位高差	平均粒径	下游坡比	现状坝高	地震烈度	堆积容重	浸润线高度	横向裂缝系数	纵向裂缝系数	水平裂缝系数	排洪完好系数	排渗完好系数
防洪标准	1.00												
滩顶与库水位高差	0.29	1.00											
平均粒径	-0.19	-0.37	1.00										
下游坡比	0.03	0.08	0.13	1.00									
现状坝高	0.34	0.57	-0.30	0.20	1.00								
设计地震烈度	0.30	0.07	0.43	0.08	0.05	1.00							
堆积容重	-0.20	-0.43	0.14	-0.41	-0.44	0.02	1.00						
浸润线高度	0.50	0.36	-0.45	-0.25	0.16	0.21	-0.49	1.00					
横向裂缝系数	0.25	0.21	-0.08	-0.05	-0.10	-0.06	-0.37	0.40	1.00				
纵向裂缝系数	0.36	0.17	0.03	-0.24	0.60	0.09	-0.36	0.25	0.35	1.00			
水平裂缝系数	0.29	-0.05	0.19	0.41	-0.14	0.01	-0.40	0.02	0.61	0.10	1.00		
排洪完好系数	0.28	0.63	0.08	-0.09	0.14	0.11	-0.34	0.22	0.41	0.08	0.35	1.00	
排渗完好系数	0.34	0.50	-0.40	-0.16	0.08	0.14	-0.54	0.90	0.45	0.10	0.03	0.40	1.00

3 尾矿库溃坝风险评价模型研究

3.1 基本方程 为描述尾矿坝样本与溃坝风险等级的亲疏关系,引入尾矿坝样本与溃坝风险等级的“距离”的概念。每个事物可用若干种指标来表征。设有 $1, 2, 3, \dots, n$ 个样本,每个样本有 $1, 2, 3, \dots, m$ 个指标,则用 x_{ij} 代表第 i 个样本的第 j 个指标。本文采用的尾矿坝溃坝风险指标体系包含较多的指标,属于多指标的事物,可分别将这些事物视为多维坐标系统上的一点,用点与点之间的距离来描述尾矿坝样本与风险等级的亲疏关系。因此,设每个样本有 m 个指标,把每个样品看成 m 维空间中的一个点,在尾矿库溃坝风险评判过程中,参考数学中定义多维空间点距离的定义方法^[6-7],绝对值距离和欧式距离可写成如下公式:

$$d_{ij}(1) = \sum_{k=1}^m |x_{ik} - x_{jk}| \quad (1)$$

$$d_{ij}(2) = \left[\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

3.2 评价模型 样本集依据 m 个指标按 c 个状态或级别的已知指标标准特征值进行识别,则有 $m \times c$ 阶指标标准特征值矩阵。

$$Y = (y_{ih}) \quad (3)$$

式中: y_{ih} 为状态或级别 h 指标 i 的标准特征值; $i = 1, 2, \dots, m$; $h = 1, 2, \dots, c$ 。

通常按 $1 \sim c$ 级指标标准特征值的增减将指标分为递减型(从 1 级至 c 级指标标准特征值减小)与递增型(从 1 级至 c 级指标标准特征值增加)两类,以递减型指标为例,其指标相对隶属函数分别为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} = y_{ic}) \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & (y_{i1} > x_{ij} > y_{ic}) \\ 1 & (x_{ij} = y_{i1}) \end{cases} \quad (4)$$

$$s_{ij} = \begin{cases} 0 & (y_{ih} = y_{ic}) \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & (y_{i1} > y_{ih} > y_{ic}) \\ 1 & (y_{ih} = y_{i1}) \end{cases} \quad (5)$$

利用相对隶属函数可以把指标与标准特征值矩阵分别变换为所选指标与标准特征值的相对隶属度矩阵:

$$R = (r_{ij}) \quad (6)$$

$$S = (s_{ij}) \quad (7)$$

将样本 j 的 m 个指标相对隶属度 $r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj}$ 分别与矩阵 S 的第 1、第 2、直至第 m 行的行向量: $(s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1c}), (s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2c}), (s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mc})$, 逐一地进行比较,可得到样本 j 的级别上限值 b_j 和级别下限值 a_j 。设样本 j 隶属于级别 h 的相对隶属度为 u_{hj} , 指标权向量为 $\omega = (\omega_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。则样本 j 与级别 h 之间的差异可用加权广义欧式权距离表示:

$$D_{hj} = u_{hj} d_{hj} = u_{hj} \sqrt{\sum_{i=1}^m [\omega_i (r_{ij} - s_{ih})]^2} \quad (8)$$

式中: d_{hj} 为欧氏权距离。

为求解样本 j 级别 h 对于 A 的最优相对隶属度,建立目标函数:

$$\min \left\{ F(u_{hj}) = \sum_{h=a_j}^{b_j} D_{hj}^2 \right\} \quad (9)$$

满足约束条件：
$$u_{hj} = 1, 0 \leq u_{hj} \leq 1, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n$$

通过求解目标函数,得到模糊模式识别模型:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & (h < a_j \text{ 或 } h > b_j) \\ \frac{1}{\left(\frac{\sum_{i=1}^m [r_{ij} - s_{ih}]^p}{\sum_{i=1}^m [r_{ij} - s_{ik}]^p} \right)^{\frac{2}{p}}} & (a_j \leq h \leq b_j, d_{hj} = 0) \\ 1 & (d_{hj} = 0) \end{cases} \quad (10)$$

式中: P 为距离参数, $P = 1$ 为海明距离, $P = 2$ 为欧式距离。

3.3 指标权重 为了准确得到尾矿库溃坝风险指标体系中各指标的权重,本文利用国内尾矿库专家系统对各指标对尾矿库运行期安全的影响程度进行了评估,并结合层次分析法,最终得到各个指标的权重,如表 2 所示。

3.4 指标分析 根据大量的有关尾矿坝溃坝事故案例及尾矿坝工程力学特性分析,并利用国内尾矿库专家系统和结合工程使用中可操作性,将尾矿坝溃坝风险指标进行分级,共分成 4 个级别,指标体系的分级结果如表 3 所示。在尾矿坝溃坝风险指标体系的 16 个指标中,除现状坝高属于递增型指标外,其它指标均属于递减型指标。

表 2 各个指标的权重计算结果

溃坝模式	指标	权重
漫顶溃决	防洪标准	0.036
	排洪设施能力系数	0.036
	滩顶与库水位高差	0.036
失稳溃决	平均粒径	0.034
	下游坡比	0.027
	现状坝高	0.024
	地震烈度	0.029
管理因素	日常管理衡量系数	0.221
	事故应急衡量系数	0.140
	监测设备完备系数	0.167
渗流破坏	堆积容重	0.020
	浸润线高度	0.100
结构破坏	横向裂缝衡量系数	0.025
	纵向裂缝衡量系数	0.032
	水平裂缝衡量系数	0.027
	排洪设施完好系数	0.044

表 3 尾矿坝溃坝风险评判分级标准

评判指标	A 级	B 级	C 级	D 级
防洪设计标准(年一遇)	> 500	100 ~ 500	50 ~ 100	< 50
排洪设施能力系数	> 0.75	0.50 ~ 0.75	0.25 ~ 0.50	< 0.25
滩顶与库水位高差/m	> 1.5	1.0 ~ 1.5	0.5 ~ 1.0	< 0.5
平均粒径/mm	> 0.50	0.20 ~ 0.50	0.05 ~ 0.20	< 0.05
下游坡比(1:n)	> 5.0	3.0 ~ 5.0	1.0 ~ 3.0	< 1.0
现状坝高/m	< 20	20 ~ 50	50 ~ 80	> 80
设计地震烈度/(°)	> 8.0	6.5 ~ 8.0	5.0 ~ 6.5	< 5.0
堆积容重/(t/m³)	> 2.0	1.7 ~ 2.0	1.4 ~ 1.7	< 1.4
浸润线高度/m	> 8.0	6.0 ~ 8.0	5.0 ~ 6.0	< 5.0
横向裂缝衡量系数	> 0.75	0.50 ~ 0.75	0.25 ~ 0.50	< 0.25
纵向裂缝衡量系数	> 0.75	0.50 ~ 0.75	0.25 ~ 0.50	< 0.25
水平裂缝衡量系数	> 0.75	0.50 ~ 0.75	0.25 ~ 0.50	< 0.25
排洪设施完好系数	> 0.75	0.50 ~ 0.75	0.25 ~ 0.50	< 0.25
日常管理衡量系数	> 0.75	0.50 ~ 0.75	0.25 ~ 0.50	< 0.25
事故应急衡量系数	> 0.75	0.50 ~ 0.75	0.25 ~ 0.50	< 0.25
监测设施完备系数	> 0.75	0.50 ~ 0.75	0.25 ~ 0.50	< 0.25

4 尾矿库运行期安全等级划分

4.1 等级数量确定 聚类分析动态分级法的实质是先给出一个粗糙的初始分级,然后按某种原则进行

反复修改,直到分级合理为止^[8]。将用尾矿坝溃坝风险指标体系描述的尾矿坝溃坝风险定义为全域,将域中一部分称为集合。则尾矿坝溃坝风险相近的集合可以定义为尾矿坝溃坝风险的类,类应当是一种最佳集合,这种最佳状态对于每个抽样总体应是客观存在的。采用聚类动态分级方法,对尾矿库运行期安全等级的可能划分方法进行计算,计算结果表明,尾矿库运行期安全评估可划分为4、5、6三个等级,由于长期以来尾矿库划分为危库、险库、病库和正常库,故尾矿库运行期安全等级选择为4等。

4.2 安全等级划分方法 尾矿库运行期安全等级根据尾矿坝坝体稳定性、防洪能力及其它影响尾矿库安全运行的因素综合确定,分为4个等级,分别为A等库、B等库、C等库、D等库。进行坝体稳定性和防洪能力验算时,滩顶标高应取该库下次(一般为3年)安全评价时的滩顶标高;当本次安全评价时,该库剩余服务年限不足3年者,取最终坝顶标高。A等库为具备安全运行的条件。可发放安全生产许可证;B等库为存在轻微病害,且正在采取措施予以消除,基本具备安全运行条件。可暂发安全生产许可证;C等库为存在重大隐患,但尚未达到即将发生事故的严重程度。不具备安全运行的条件,不能发放安全生产许可证。须暂时停产,由企业主管下令限期治理,治理合格并经验收后,可发放安全生产许可证;D等库为存在严重病害,已达到即将发生事故的严重程度。应由安全生产监管机构下令立即停用。经彻底整治验收合格后,才发放安全生产许可证。

在应用上述基于模糊理论的尾矿库溃坝风险评价模型时,得分90分以上的尾矿库为A等库;70分以上为B等库;50分以上为C等库;50分以下为D等库。

5 应用实例

北京首云铁矿和尚峪尾矿库,位于矿区西北约1km沟谷中。库区基岩为古老的片麻岩,沟底为第四系覆盖层,坝址处覆盖层最厚为16m。上部以洪积亚黏土为主,中部以坡积碎石和含土碎石为主,底部为碎石层。尾矿库由前冶金部鞍山黑色冶金矿山研究院设计。建有两座初期坝,均为透水堆石坝。西坝底标高149.3m,东坝底标高143.5m。坝顶标高都是163.5m,最终堆积坝标高220m,总库容约1350万m³。库区纵深约300~800m,库内两条小沟,纵坡较陡,现汇水面积约为0.47km²。设计采用塔-管式排洪系统。排洪塔直径2m,侧壁溢洪孔直径0.35~0.30m,排距0.65m,每排6孔。排洪管埋于东坝下,直径1m。目前,尾矿堆积坝顶达196m标高。东坝与西坝已经连为一体,筑坝总长度900m。173.5m标高以下平均坝坡为1:4.5,标高191m以下已经覆盖、绿化。现滩面干坡段长度可达90m,水位在194m。当堆积坝高程达203.5m(坝高H=60m),或者210m(库容V=1000万m³)时,尾矿库由四等升为三等。全尾矿颗粒比较粗,常规分散放矿可以得到比较陡的滩面坡度。据勘察报告剖面,坝前50m和100m的坡度分别是3.04%和2.69%。

从全国尾矿库普查系统中,可以得到和尚峪尾矿库上述16个指标参数,见表4所示。

最终计算得到北京首云和尚峪尾矿库最终得分为91分,为A等库,具备安全运行条件。扣分项主要集中在尾矿库安全管理上,因此,企业应进一步加强尾矿库的安全管理,同时完善尾矿坝下游的预警和应急救援措施。

6 结论

尾矿库风险评价应研究坝及其附属构筑物的安全状况,评价尾矿库运行期的安全等级。本文基于理论分析、聚类理论及相关性计算方法,建立了尾矿库溃坝风险指标体系,并应用多层模糊模

表4 和尚峪尾矿库的指标参数

溃坝模式	指标	参数
漫顶溃决	防洪标准	500
	排洪设施能力系数	0.8
	滩顶与库水位高差	1.5
失稳溃决	平均粒径	0.3
	下游坡比	4
	现状坝高	60
	地震烈度	7
管理因素	日常管理衡量系数	0.7
	事故应急衡量系数	0.8
	监测设备完备系数	0.9
渗流破坏	堆积容重	1.7
	浸润线高度	11
结构破坏	横向裂缝衡量系数	0.7
	纵向裂缝衡量系数	0.8
	水平裂缝衡量系数	0.92
	排洪设施完好系数	0.9

式识别理论建立了尾矿库溃坝风险评价模型,并针对我国现行尾矿库运行期危库、险库、病库和正常库划分方法,分析了更为合理和具有操作性的尾矿库运行期安全等级的划分方法。建立的风险指标体系和风险评价模型,可同国家安全监管总局尾矿库普查和管理系统结合,用于尾矿库运行期安全等级的划分。将研究成果应用于北京首云和尚峪尾矿库的风险评估中,计算并确定了和尚峪尾矿库运行期的安全等级,实例分析表明,本文建立的尾矿库溃坝风险指标体系和风险评价模型,可以较好地评估尾矿库运行期的安全等级。

参 考 文 献:

- [1] 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[J]. 中国安全生产科学技术,2006,2(6):53-57.
- [2] 国家安全生产监督管理总局. 尾矿库普查与管理系统[M]. 2007.
- [3] Li Quanming, Zhong Maohua, Wang Yunhai, Zhao Jun. Conditions of tailing ponds distribution and risk management in China[J]. Progress in Safety Science and Technology,2008, :2290-2294.
- [4] 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.
- [5] 李全明,王云海,张兴凯,杨丽红. 尾矿库溃坝灾害因素分析及风险指标体系研究[J]. 中国安全生产科学技术,2008,4(3):50-54.
- [6] 袁兵,王飞跃,金永健,赵望达. 尾矿库溃坝模型研究及应用[J]. 中国安全科学学报,2008,4:167-172.
- [7] 陈青生,孙建华. 矿山尾矿库溃坝砂流的计算模型[J]. 河海大学学报,1995,5:99-105.
- [8] 王德意,杨国清,姚李孝,王涛. 模糊聚类在水轮发电机模糊神经励磁控制器设计中的应用[J]. 水利学报,2003,3:115-119.

Risk index system and evaluation model for failure of tailings dams

LI Quan-ming¹, ZHANG Xing-kai¹, WANG Yun-hai¹, ZHANG Bing-yin²

(1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100029, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the correlation analysis method the design and operation parameters and indexes related to the safety of tailings dams are classified to establish the index system for evaluating the risk of dam failure. The fuzzy clustering identification theory is applied to establish the model for evaluating the failure risk of dams. The weights of the indexes affecting the safety of dams are determined by experts and combining with hierarchy analysis method. On this basis, the method for classifying the safety grades of dams and corresponding standard are proposed accordingly. The application indicates that the proposed model and index system are feasible.

Key words: tailings dam; risk index system; fuzzy identification theory; evaluation model; dam failure

(责任编辑:韩 昆)