

基于模糊层次分析法的大坝风险评价方法研究

周端祺¹, 周志维²

(1. 万安县芦源水库管理局, 江西 万安 343800; 2. 江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029)

摘 要: 本文通过构建大坝风险指标体系, 提出了基于层次分析法, 以脆弱度为依据, 以模糊数学为工具的大坝风险评价方法, 最终通过隶属度确定水库的风险分类. 对大余县 4 座水库开展风险分析, 计算结果表明, 大中型水库的风险属于较低风险, 而小型水库属于高风险. 研究表明, 利用脆弱度建立的模糊评价方法能够较为客观反映水库的风险状况, 为大坝风险评价提供新途径.

关键词: 脆弱度; 模糊数学; 指标体系; 风险评价

中图分类号: TV697.1

文献标识码: B

文章编号: 1004-4701 (2019)04-0235-06

0 引言

传统大坝安全评价主要从工程安全的可靠度考虑^[1], 通过质量检测、地质勘查、观测资料分析以及必要的结构计算等, 综合分析确定大坝的安全等级. 该安全等级为定性描述, 无法准确解释大坝的风险程度.

大坝风险分析以概率统计理论为基础, 将关注的安全或其他特征以定量方式呈现. 由于分析指标的复杂多样性、评价标准的不确定性以及评价术语的模糊性等, 大坝风险评价结论存在一定差异. 因此, 若将模糊数学与风险评价联系起来, 将风险评价术语模糊化, 具有可行性和有效性. 近年来已有不少相关研究^[2-4], 尝试建立风险与模糊属性之间的关系. 本文以脆弱度为依据, 建立了大坝风险模糊评价方法, 并以大余县水库为例, 进行了风险评价.

1 大坝风险指标

1.1 风险指标体系的建立

进行模糊评价之前必须明确因素集(指标集). 将风

险评价作为分析目的时, 有必要建立大坝风险指标体系, 将因素集与风险要素联系起来. 报告^[5]指出, 大坝安全要素主要涉及安全性态、基础设施、监控维护的有效性, 将风险要素分为工程风险与 OMS 程度风险(管理风险)等. 工程风险主要指可能导致溃坝的工程质量风险, 如大坝压实度不合格而产生的坝体渗流破坏风险, 溢洪道泄洪能力不足而引起的漫顶风险等; 管理风险^[6]主要指管理活动中存在的不足, 如人员数量是否满足要求、操作流程是否满足规范要求、调度方案是否合理、是否按照有关预案执行等. 根据以上分析, 查阅国内外相关统计成果, 拟将风险指标体系划分为 2 项一级指标, 8 项二级指标, 19 项三级指标, 具体见图 1.

图 1 中, 机构设置指管理机构是否健全, 技术人员配备是否满足需求; 岗位职责指是否存在无事设岗或岗位设置不合理等现象; 操作规程指操作流程是否科学合理; 安全鉴定是指大坝是否按照规程规定要求定期开展安全鉴定, 以及鉴定的结论是否整改落实; 应急预案指是否制定应急预案, 预案是否完善, 以及能否按照预案进行演练; 运行调度指是否制定相关的调度规程, 调度方案是否科学合理; 安全监测指监测设施是否可靠, 能否正常开展监测等; 经费落实指维修养护经费是否足额配套下达; 经

费使用指维修经费及管理支出费用使用是否合理等。工程风险指数方面,可通过可靠度进行量化^⑥。

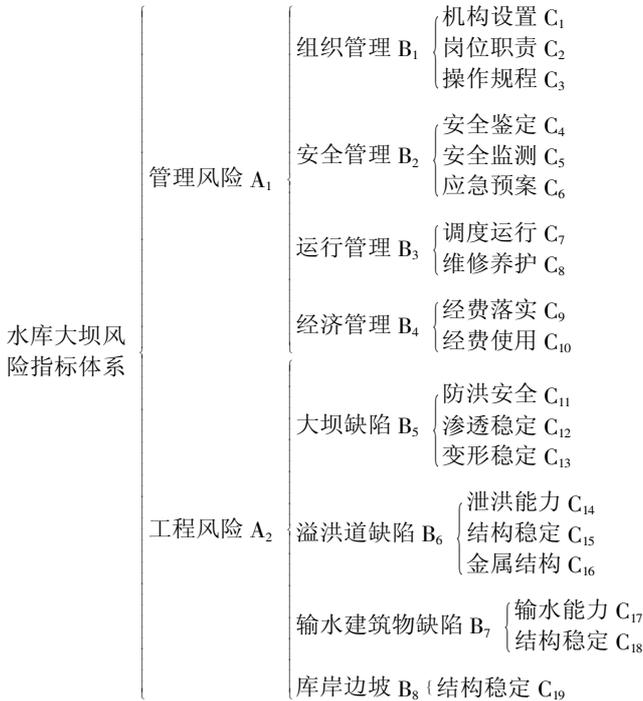


图1 水库大坝风险指标体系

1.2 基于层次分析法的指标权重确定

采用层次分析法确定各评价指标的权重时,首先利用1~9标度法^⑦分别以上一层次的某一要素为评价准则对下一层要素进行两两比较,确定判断矩阵的元素值,从而建立判断矩阵^⑧。

由于指标较多,难以量化,且进行重要性比较具有一定主观性,故本文通过历史统计法、专家经验法确定各级指标间的重要性标度。如,管理风险和工程风险的重要性根据历年水利工程管理考核发现的问题、大坝失事统计资料进行比较。据有关记载,由于管理不当引起的大坝失事比例占20%左右^⑨,工程管理安全风险指标的标度可定为8,显然 $(w_{A1}, w_{A2}) = (0.2, 0.8)$, w_1 表示第1指标层的权重向量。

然后,按式(1)确定第2层指标的权重向量^⑩:

$$\begin{cases} w_{2i}^0 = \left(\prod_{j=1}^{n_b} a_{ij} \right)^{\frac{1}{n_b}} \\ w_{2j} = \frac{w_{2j}^0}{\sum_{j=1}^{n_b} w_{2j}^0} \end{cases} \quad (1)$$

式中, w_{2i}^0 为第2层指标的权重, $i=1,2,\dots,8$,对应指标为 $(w_{B1}, w_{B2}, \dots, w_{B8})$; w_{2i} 为归一后的权重; n_b 为指标数量, a_{ij} 为标度大小。

经计算,第2层的指标权重以向量形式表示为: $(w_{B1}, w_{B2}, w_{B3}, w_{B4}) = (0.07, 0.50, 0.16, 0.27)$ 、 $(w_{B5}, w_{B6}, w_{B7}, w_{B8}) = (0.50, 0.09, 0.28, 0.13)$ 。

2 模糊综合评价

2.1 评价集的确定

现行安全评价体系以部颁导则为依据^⑪,对防洪安全、结构安全、渗流稳定及金属结构等指标的安全性给出定量或定性标准,分为“A、B、C”三级,将管理行为评价为“规范、较规范、不规范”三级;在确定模糊评价集时,为便于考虑风险因素,必须建立模糊关系式及构建隶属函数。加拿大等国家以脆弱度VI作为判断依据,从风险要素为出发点,在考虑后果系数的前提下,将大坝风险分为“极低风险、低风险、高风险和极高风险”四级^⑫,为此,本文将模糊评价集选为“极低风险、低风险、高风险、极高风险”四级。

2.2 综合评判矩阵的确定

根据上述分析,评价集是基于脆弱度确定的,在建立相关隶属函数进行单因素模糊评价时,可将脆弱度作为判断因素。脆弱度类似于距离判别分析法,通过分析与设计要求的差距,确定该指标导致事故发生的容易程度,该方法特别注重安全检查过程中找出的各种隐患,发现已表现出或潜在的缺陷,减少了风险分析过程中的复杂性及不确定性,可操作性较好(见图2)。综上所述,模糊综合评价的具体步骤如下:

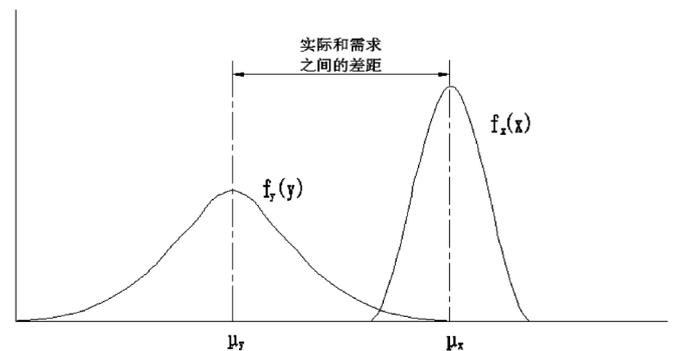


图2 差距的大小

(1) 脆弱度值 VI 计算过程如下^[11]。

$$VI=CR \times (1-0.1 \times \ln \frac{1}{AEF}) \tag{2}$$

$$CR=C \times \sqrt[3]{S_1 S_2 S_3} \tag{3}$$

$$SF=1-0.1 \times \ln \frac{1}{AEF} \tag{4}$$

式中： VI 为脆弱度； CR 为不安全等级； C 为常数，对实际缺陷， C 的取值为 10；对于潜在缺陷， C 的取值为 5； S_1 表示差距的大小。根据达到该指标的标准或设计要求确定，取值范围 $[0, 1]$ ； S_2, S_3 分别表示指标的关键度和临时风险防控措施有效程度，取值为 0 或 1； SF 为受力频率， AEF 为年超越频率，具体取值见表 1。

表 1 受力频率

重现期	年超越频率 AEF	受力频率 SF
1	1.00	1.00
2	0.50	0.93
10	0.10	0.77
20	0.05	0.70
50	0.02	0.61
100	0.01	0.54

(2) 确定综合评判矩阵。隶属函数在 $[0, 1]$ 闭区间中取值，本文选择正态分布作为隶属密度函数，以脆弱度值作为均值，公式如式 (5)~(8)：

$$\mu_1(VI_i) = \begin{cases} 1 & VI_i \leq 0.25 \\ e^{-\left(\frac{VI_i-0.25}{\sigma}\right)^2} & VI_i > 0.25 \end{cases} \tag{5}$$

$$\mu_2(VI_i) = e^{-\left(\frac{VI_i-0.25}{\sigma}\right)^2} \tag{6}$$

$$\mu_3(VI_i) = \begin{cases} 1 & VI_i \leq 0.75 \\ 1-e^{-\left(\frac{VI_i-0.75}{\sigma}\right)^2} & VI_i > 0.75 \end{cases} \tag{7}$$

则该指标对应的隶属度值 r_i 为：

$$r_{ij} = \int_i^{i+1} \mu_i(VI_i) dVI_i \tag{8}$$

式中： $\mu_i(VI_i)$ 为对应 VI_i 的隶属函数； σ 为方差，取值为 1； a 为过渡点，将 $[0, 1]$ 分成四等分，则相应的 a 可取为 0.25~0.75； VI_j 为对应第 j 个指标的脆弱度； r_{ij} 为第 j 个指标对应第 i 个评价集的隶属度；

根据模糊关系式 r_{ij} ，得到该指标的评判矩阵 $R_i = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}]^T$ ，综合该层指标的评判矩阵，获得综合评判矩阵 R ：

$$R = [R_1, R_2, \dots, R_m]^T = \begin{bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1m} \\ r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2m} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \\ r_{n1}, r_{n2}, \dots, r_{nm} \end{bmatrix}$$

(3) 建立评判模型，进行综合评判。根据权向量 W 和模糊评价矩阵 R ，评判模型 B 为：

$$B=W \circ R \tag{9}$$

式中： B 为综合评判向量； R 为综合评判矩阵； W 表示该层指标的权向量；运算符“ \circ ”为模糊算子。

计算时，从因素层开始，逐层向上综合，最终得到最顶层的总体评价向量 $B=(b_1, b_2, \dots, b_n)$ ，如果 B 不满足归一化条件，需进行归一化处理：

$$b'_i = b_i / \sum_{i=1}^n b_i \tag{10}$$

式中： b_i 为第 i 个位置评价值； b'_i 为归一后的评价值。

最后按最大隶属度原则确定大坝评价的总体结论。

3 案例分析

3.1 工程概况

大余县水库工程管理局负责管理 4 座土石坝，分别是油罗口水库 (大(2)型)、跃进水库 (中型)、石门口水库 (小(1)型)、合江水库 (小(1)型)，水库均位于赣江支流章江河水系，座落在大余县的东北方向及西南方向。

3.2 脆弱度计算

对水库开展现场检查、管理现状调查评估，确定管理缺陷及工程缺陷，限于篇幅有限，仅列出油罗口水库现场检查及管理情况详见表 2~3。

根据现场缺陷调查情况，分析判断各指标的脆弱度，并规格化后，见表 4~5。

表2 油罗口水库现场检查情况

一级指标	二级指标	三级指标	脆弱度	
大坝破坏因素	防洪安全	坝顶超高 2.47m, 漫顶风险极低	0.01	
		下游坝坡常年存在湿润点, 面积大约 20m ²	0.04	
	渗透稳定	排水棱体较平整, 有少量杂草	0.03	
		坝肩及山体无明显渗水现象	0.01	
		小面积的草皮高度超过 20cm	0.02	
		无白蚁活动现象	0.02	
	变形稳定	上游坝坡预制块局部破损; 下游坝坡存在 5~6 处隆起现象, 隆起高度 20cm 左右, 面积共约 10m ² 。	0.04	
		坝顶路面较平, 无损坏, 但存在少数纵向裂缝, 缝宽 5mm 以内。	0.05	
	溢洪道破坏因素	泄洪能力	进口段及控制段几乎没有阻碍行洪物	0.03
			据安全鉴定, 泄洪能力完全满足设计要求	0.03
泄槽段、消力池有少量杂草及垃圾			0.02	
结构稳定		底板及边墙结构稳定, 但局部老化破损	0.04	
		进水渠右侧翼墙局部存在砂浆脱落	0.02	
金属结构		闸门及钢绳存在轻微锈蚀	0.02	
		闸门止水密封较好, 漏水现象不明显	0.03	
		钢闸门埋件无明显变形	0.02	
		启闭机外观完好	0.02	
		传动部件较润滑	0.01	
输水建筑物破坏因素	输水能力	引水段有少量杂物堵塞	0.05	
		据安全鉴定, 输水能力满足设计要求	0.07	
	结构稳定	出口段无垃圾杂物	0.01	
		控制段无明显开裂、脱落等现象	0.04	
库岸边坡破坏因素	结构稳定	洞身或涵身无明显渗水	0.05	
		未发生过滑坡、崩岸等现象	0.03	

表 3 油罗口水库管理情况

一级指标	二级指标	三级指标	脆弱度
组织管理	机构设置及运行机制	岗位设置合理	0.03
		规章制度健全	0.03
		工作职责、任务明确	0.03
	岗位设置	职工年培训率达到 30%	0.03
		技术人员经培训上岗	0.03
操作规范	操作手册较为齐全,能够按章操作	0.04	
安全管理	安全运行可靠	工程达到防洪标准	0.03
		定期开展安全鉴定	0.03
		落实防汛和安全责任制	0.04
	安全责任事故	未发生工程安全或其他重大安全责任事故	0.04
运行管理	调度运行	巡查频次符合规范要求	0.03
		巡查记录规范,有处理意见	0.05
		技术操作规程健全、按章操作	0.04
	工程养护质量	按规定及时上报有关报告、报表	0.04
		基本能够开展维养	0.05
		维养记录规范	0.04
定期开展金属结构、机电设备维护考核	0.04		
经济管理	管理经费落实	积极推行管养分离及购买服务	0.01
		维修养护、运行管理费用来源渠道畅通,两费及时足额到位,维养经费略显不足	0.02
	经费使用	未开展工程测算,有批准的年度预算计划	0.02

表 4 管理风险指标脆弱度

水库名称	组织管理	安全管理	运行管理	经济管理
油罗口水库	0.19	0.13	0.31	0.06
跃进水库	0.20	0.15	0.35	0.08
合江水库	0.21	0.14	0.51	0.14
石门口水库	0.30	0.34	0.49	0.17

表5 工程风险各指标脆弱度

水库名称	大坝缺陷	溢洪道缺陷	输水建筑筑缺陷	库岸边坡
油罗口水库	0.24	0.24	0.20	0.03
跃进水库	0.35	0.27	0.23	0.04
合江水库	0.42	0.28	0.36	0.08
石门口水库	0.38	0.41	0.38	0.09

表6 综合指标隶属度

水库名称	极低风险	低风险	高风险	极高风险
油罗口水库	0.467	0.205	0.167	0.161
跃进水库	0.327	0.293	0.245	0.135
合江水库	0.168	0.237	0.444	0.151
石门口水库	0.157	0.192	0.498	0.153

从表4~5可知,由于大中型水库无论从工程质量及管理的技术水平,都明显高于小型水库,因此,从脆弱度可以看出,油罗口水库与跃进水库的脆弱度整体偏低,而合江水库和石门口水库的脆弱度相对偏高,这与水库现场检查结论及管理条件等相符合。

根据最大隶属度原则,隶属度的大小表示与该评价语的接近程度,其值越高,表示属于与相应的评价语接近程度越明显。从表6可知,油罗口水库及跃进水库属于极低风险,而合江水库和石门口水库属于高风险,应引起重视。

4 结 语

本文通过建立大坝风险指标体系,以风险指标作为因素集,基于脆弱度的概念,提出了大坝风险分析隶属函数的确定方法。通过对大余县4座水库进行模糊评价,结果表明,大中型水库的风险属于极低风险,而小型水库属于高风险。模糊数学评价方法可用于评价水库风险,并根据脆弱度的分布提出针对性的风险防控措施。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 水库大坝安全评价导则:SL258-2017[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.

- [2] 田林钢,王洁. 基于三角模糊数的大坝安全风险综合评判研究[J]. 中国农村水利水电,2013(02):101~103.
- [3] 刘云,王亮,申林方,等. 大坝安全风险评的模糊层次综合模型[J]. 水科学与工程,2005(1):26~29.
- [4] 田林钢,黄香,高海伟. 溪洛渡电站施工进度风险模糊综合评判[J]. 人民黄河,2011,33(5):89~91.
- [5] 彭雪辉. 风险分析在我国大坝上的应用[D]. 南京:南京水利科学研究院硕士论文,2003.
- [6] 李雷,王仁钟,盛金保,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.
- [7] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及基应用研究[J]. 数学的实践和认识,2012(7):93~100.
- [8] 陈曦,曾亚武. 基于层次分析法和模糊理论水库大坝安全综合评价[J]. 水利与建筑工程学报,2017(6):96~100.
- [9] 中华人民共和国国务院. 生产安全事故报告和调查处理条例[Z].
- [10] 彭雪辉,蔡跃波,盛金保,等. 中国水库大坝风险标准研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [11] 楼渐逵. 加拿大BC Hydro公司的大坝安全风险[J]. 大坝与安全,2004(4):7~11.

编辑:张绍付

(下转第246页)