DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.007

基于风险的病险水库除险决策技术

盛金保[1],赫 健[2],王昭升[1]

(1.南京水利科学研究院,江苏 南京 210029;2.浙江省水利厅,浙江 杭州 310009)

摘要 利用风险分析及风险管理技术,研究群坝风险排序技术、单座水库大坝风险要素排序技术,以河南省安阳市的 10 座小型水库为例进行风险排序,以江苏省某水库东副坝为例进行风险要素排序,探讨在资金有限条件下确保最大可能地降低病险水库风险的技术。研究成果可应用于目前正在开展的病险水库除险加固决策。

关键词 病险水库;风险排序;溃坝后果综合评价;除险决策技术

中图分类号:TV62;TU311.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2008)02-0025-05

Decision-making for reservoir danger removal based on risk analysis//SHENG Jin-bao[1], HE Jian[2], WANG Zhao-sheng[1]

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*; 2. *Water Resources Department of Zhejiang Province*, *Hangzhou* 310009, *China*)

Abstract: Based on the risk analysis and risk management technology, methods for risk ranking of dam groups and risk factors ranking of a single reservoir dam were studied. Risk ranking of 10 small-scale reservoirs in Anyang City of Henan Province and risk factors ranking for the east auxiliary dam of a reservoir in Jiangsu Province were performed to minimize risk with a limited budget. The results of this research can be applied to decision-making for danger removal and reinforcement of dangerous reservoirs.

Key words: dangerous reservoir; risk ranking; comprehensive evaluation of dam failure; decision-making technology for danger removal

病险水库严重威胁下游生命财产安全和经济社会的可持续发展,已经成为全社会高度关注的公共安全问题。自 1999 年以来,国家加大了对病险水库的除险加固投资力度,但在当前经济条件下,短期内对所有病险水库都采取加固除险措施是不可能的,病险水库数量巨大与除险加固资金严重短缺的矛盾将长期存在。因此,在病险水库数量巨大的情况下进行科学决策,研究保证风险高的病险水库优先得到加固,以及在地方配套资金难以足额到位的情况下保证水库大坝的主要风险部位得到加固是很有必要的。

1 群坝风险排序技术

目前,我国主要依据工程安全性决定水库大坝是否需要除险加固。一些水库大坝尽管工程安全性差,但因溃坝后果较轻,风险不大却优先得到加固处理;有的水库大坝虽然安全性稍好,但对下游影响大,潜在风险很高,却迟迟得不到加固除险;还有一些水库大坝虽然工程安全状况相近,但由于库容、高程、坝高以及下游社会经济发展水平、防洪保护对象等条件不同,对下游造成的风险差别很大,决策时却无法定量考虑这些因素。因此,现行的病险水库除险加固决策机制很难区别轻重缓急,科学合理地安排除险加固计划,确保风险巨大的病险水库优先得到加固。笔者认为按风险大小进行除险加固排序才是更加合理和科学的方法。

1.1 溃坝后果综合评价方法

溃坝风险计算中的溃坝后果包括生命损失、经济损失及社会与环境影响,三者的单位不同,无法直接叠加,因此需要综合考虑三者的影响,引入溃坝后果综合评价函数 L,建立溃坝后果综合评价方法[1]。

溃坝后果综合评价函数 L 体现了溃坝生命损失、经济损失及社会与环境影响的综合影响,采用如下线性加权和法构造:

$$L = \sum_{1}^{3} S_i F_i = S_1 F_1 + S_2 F_2 + S_3 F_3 \qquad (1)$$

基金项目:科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB2J059);"十一五"国家科技支撑计划(2006BAC14B05)

作者简介:盛金保(1966—),男,安徽青阳人,高级工程师,硕士,从事大坝安全评估与管理工作。E-mail:jbsheng@nhri.cn

式中：S_1，S_2，S_3 分别为生命损失、经济损失和社会与环境影响的权重系数；F_1，F_2，F_3 分别为生命损失、经济损失和社会与环境影响的严重程度系数。

李雷等[2]、王仁钟等[3]、王昭升等[4]研究认为 S_1，S_2，S_3 分别取 0.737，0.105，0.158 比较适合我国现阶段国情与经济社会发展水平，而溃坝后果严重程度系数 F_i 采用图 1 所示的归一化函数模型确定，其中

$$F_1 = r_1 = \frac{1}{5^{0.1}}(\lg x_1)^{0.1} \tag{2}$$

$$F_2 = r_2 = \frac{1}{5^{b}}[\lg(\frac{x_2}{10})]^{b} \tag{3}$$

$$F_3 = r_3 = \frac{1}{4}\lg f \tag{4}$$

式中：x_1 为生命损失，人；x_2 为经济损失，万元；$b = 0.1$ 或 $b = 0.2$；f 为社会与环境影响系数[5]。

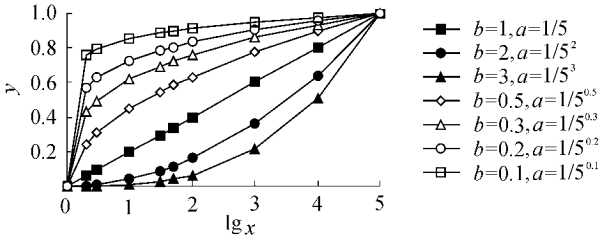

图 1　归一化函数模型（$y = a(\lg x)^b$）

在求得溃坝后果综合评价函数 L 后，即可按式(5)计算水库的风险指数 R：

$$R = 1000 P_f L \tag{5}$$

式中：P_f 为溃坝概率。P_f 一般是很小的数，而溃坝后果综合评价函数 L 小于 1，因此，为直观起见，式(5)中乘以放大倍数 1000。

根据大坝破坏事件发生的定性描述和概率对应表（表 1）[6]，当 $R < 0.1$ 时，溃坝概率小于 10^{-4}，风险很低，无需采取除险措施；当 $R > 10$ 时溃坝概率大于 10^{-2}，风险极高，不可容忍，需立即采取除险措施降低风险；当 $0.1 \leqslant R \leqslant 10$ 时风险不可忽视，需根据 ALARP 原则进行风险处理。

对一系列需要除险加固的病险水库分别计算其风险指数 R，然后按大小排序即可确定需要优先加固的水库。

表 1　我国大坝破坏事件发生的定性描述及其相应概率

定性描述	相应概率
事件极不可能发生	0.000001～0.0001
事件基本不可能发生	0.0001～0.01
事件可能发生	0.01～0.1
事件很可能发生	0.1～0.5
事件极有可能发生	0.5～1.0

1.2　河南省安阳市10座小型水库风险排序

河南省安阳市 10 座小（1）型水库的基本情况如下：

a. 团结水库。总库容 125 万 m^3，大坝为砌石溢流坝，最大坝高 25.8 m。水库下游影响 2 个村庄、人口 800 人、耕地 40 hm^2。存在的主要问题：防洪标准低；大坝右坝头渗水；坝顶砌石冻蚀松动。

b. 大峪水库。总库容 157 万 m^3，大坝为砌石溢流坝，最大坝高 10.7 m。水库下游影响 3 个村庄、人口 3000 人。存在的主要问题：1975 年 8 月大洪水，坝顶溢洪造成揭顶，副坝局部被淘空；现水库淹没区渗漏严重。

c. 罗圈水库。总库容 144.0 万 m^3，大坝为均质土坝，最大坝高 15.0 m。水库下游影响 3 个村庄、人口 1200 人、耕地约 333.33 hm^2。存在的主要问题：溢洪道断面偏小，防洪标准低。

d. 北采桑水库。总库容 267.50 万 m^3，大坝为均质土坝，最大坝高 18.5 m。水库下游影响 3 个村庄、人口 4000 人、耕地约 333.33 hm^2。存在的主要问题：溢洪道断面偏小，防洪标准低。

e. 磊口水库。总库容 251.5 万 m^3，大坝为均质土坝，最大坝高 16.0 m。水库下游影响 3 个村庄、人口 600 人、耕地 10 hm^2。存在的主要问题：防洪标准低；主溢洪道下游出口防冲槽冲毁，副溢洪道无消能设施。

f. 合山水库。总库容 116 万 m^3，大坝为均质土坝，最大坝高 23.0 m。水库下游影响 2 个村庄、人口 70 人。存在的主要问题：防洪标准低；库区属喀斯特地貌，漏水严重；1977 年 7 月大坝发生沉陷裂缝，坝左端输水洞上部与山坡衔接部位发生管涌流土。

g. 石门翁水库。总库容 182.5 万 m^3，大坝为均质土坝，最大坝高 19.0 m。水库下游影响 1 个村庄、人口 380 人、耕地 40 hm^2。存在的主要问题：防洪标准低；溢洪道出口无消能设施；坝后曾发生管涌流土。

h. 何坟水库。总库容 137.3 万 m^3，大坝为均质土坝，最大坝高 20.5 m。水库下游影响 3 个村庄、人口 4300 人。工程未出现过严重问题。

i. 小坟水库。总库容 105.7 万 m^3，大坝为黏土斜墙土坝，最大坝高 19.6 m。水库下游影响 2 个村庄、人口 2300 人。存在的主要问题：坝顶存在严重裂缝、沉陷。

j. 上天助水库。总库容 135.5 万 m^3，大坝为均质土坝，最大坝高 15.75 m。水库下游影响 3 个村庄、人口 4000 人、耕地约 253.33 hm^2。存在的主要问题：防洪标准低；坝体部分滑坡；输水设施损坏；无溢洪道。

表 2 是利用溃坝后果综合评价方法对上述 10 座小型水库进行除险排序的分析计算结果。该结果表明：上天助水库的风险最高，风险指数达 3.527，需优先加固；何坟水库的风险最低，风险指数

仅为 0.094,无需进行处理。

表 2　安阳市 10 座小(1)型水库的风险排序

编号	水库名称	溃坝概率	L	风险指数	风险排序
1	团结水库	0.00090	0.79902	0.715	5
2	大峪水库	0.00159	0.81490	1.298	4
3	罗圈水库	0.00046	0.80398	0.368	9
4	北采桑水库	0.00046	0.81837	0.374	8
5	磊口水库	0.00268	0.79448	2.132	2
6	合山水库	0.00189	0.76356	1.440	3
7	石门翁水库	0.00085	0.78826	0.670	6
8	何坟水库	0.00011	0.82183	0.094	10
9	小坟水库	0.00050	0.81469	0.407	7
10	上天助水库	0.00430	0.81938	3.527	1

2　单座水库风险要素排序技术

我国现行的病险水库除险加固资金筹措,需要各级财政承担一定的比例。中西部地区由于财政困难,地方配套资金往往难以足额到位,除险加固资金短缺的矛盾比较突出。在除险加固经费有限的情况下,需要确保水库的主要风险要素得以处理,将大坝溃决概率降低到可以接受的水平。

对某一单座水库来说,溃坝后果是一定的,只需根据溃坝概率分析中不同事件(要素)的定性或定量分析结果进行排序,即可确定不同风险要素的重要性程度,供下一步决策使用。

FMECA (failure mode, effects and criticality analysis)即是适用于单座水库风险要素排序的定性分析方法[7],该方法首先由加拿大 BC.HYDRO 公司的专家提出,是破坏模式影响分析和危害性分析的组合分析方法。

2.1　风险要素识别

a. 系统定义。明确分析范围,把大坝作为一个系统,包括所有水工建筑物及影响大坝性能的上下游地区。

b. 系统识别。收集水库的设计、施工及运行资料,或通过与设计、施工、管理人员进行座谈,了解水库建设和运行的详细情况,对系统有一个全面的认识。

c. 系统分解。把系统分解成若干子系统,再把子系统分解成若干要素,至于分解到何种程度取决于系统的复杂程度、系统破坏后果的严重程度、要素的危害程度及分析范围。一般将其分解为 1 级子系统、2 级子系统和要素。对复杂或关键要素,通常还要在 2 级子系统和要素之间插入一级,称为"模块"级。对系统进行分解时,子系统和要素是根据它们的主要功能来定义的。

d. 要素功能分析。要素是构成水库大坝的有一定功能的最小单元。大部分要素不仅有主要功能,还有次要功能。对一个大坝系统来说,系统最终会分解成大量的要素,每个要素又有许多不同的功能,为实现不同要素及同一个要素的不同功能的区分,可采用数字编码的方法,如 11223344,其中 11 代表 1 级子系统,22 代表 2 级子系统,33 代表要素,44 代表要素功能。

e. 要素筛选。对每个要素破坏后对系统性能的影响进行初步评估,把那些对系统性能影响不大的要素剔除掉,而把那些对系统性能起关键作用的要素留下来做进一步的分析研究。

筛选过程的主要工作如下:①评估每个要素"最坏情况下"的破坏后果;②分析每个要素可能的破坏模式;③确定哪些要素需要做进一步的详细分析;④筛选出不重要的要素。

筛选过程是分析人员的主观判断过程,因此,如果难以确定某个要素功能对系统性能的重要性,则应保留作进一步的分析。

f. 要素破坏模式识别及相互作用分析。对通过筛选的所有要素需要识别其破坏模式。某个要素的破坏可能对整个系统没有直接的影响,但可能是一系列要素破坏中的某个环节,而这一系列要素破坏对系统会有严重的影响。因此,在识别要素破坏模式过程中,需要考虑要素之间的相互作用。通常可以通过事件树或故障树来分析要素之间的相互作用以及一系列要素之间的破坏顺序。

g. 要素破坏后果分析。要确定要素破坏的程度,就必须确定要素破坏的直接影响和最终影响(即后果)。通常,一个要素的破坏可能不会直接影响其他要素或要素所属子系统的功能,但可能会间接影响其他要素,或直接影响系统的运行,或直接影响系统以外的对象。

确定要素破坏的最终影响需要考虑以下情形:①某种影响可能是多种要素破坏后造成的;②某种要素破坏可能会造成多种影响;③某种要素破坏可能会触发一系列要素破坏;④某种要素破坏可能不会直接影响其他要素,但可能会增加这些要素破坏的可能性。

有些要素破坏的直接后果比较明显,如供电线路和通讯设备。但由于要素的相互作用,有些要素的破坏后果则不容易判断。对每个要素破坏模式,重点放在要素破坏模式的直接影响上,同时尽量考虑最终影响。

2.2　要素危害程度分析

危害程度是在难以计算溃坝概率的情况下对风险的一种定性度量方法,与要素破坏模式发生的可能性、破坏后果的严重程度、人工干预成功的可能性

有关，是这三者的乘积。

2.2.1 要素破坏模式发生的可能性

要素破坏模式发生的可能性是由专家根据经验确定的，判别标准见表 3。

表 3 系统要素破坏模式可能性赋值

破坏可能性因子	年发生概率	判别标准
极不可能	< 1/5 000	在工程寿命周期中极不可能发生，如遭遇最大可信地震或 PMF 洪水
不可能	1/500 ~ 1/5 000	在工程寿命周期中非常不可能发生
基本不可能	1/50 ~ 1/500	在工程寿命周期中有可能发生，但不期望发生
可能	1/5 ~ 1/50	在工程寿命周期中可能阶段性发生
极有可能	> 1/5	经常性发生，或在近 5 年内如果不处理会发生

2.2.2 后果严重程度

可以采用不同的标准评估每个要素破坏模式后果的严重程度和对系统的影响。由于是定性评估，只需要考虑后果的相对重要性。如果采用 5 级标准，其判别标准参见表 4。

表 4 后果严重程度赋值

后果严重因子	判别标准
很小	经济损失不超过 5 万元，无人员伤亡，无环境影响，无外部影响
较小	工程经济损失 5 万 ~ 100 万元，无人员伤亡，或下游财产损失 2.5 万 ~ 50 万元，或下泄具有永久影响的污染物对农业无明显影响，或无环境影响，或无较严重的外部影响，或加固经费 2 万 ~ 20 万元，或以上各种的组合
严重	工程经济损失 100 万 ~ 1 000 万元，多起人员严重伤害或致命伤亡，或下游财产损失 50 万 ~ 500 万元，或下泄具有永久影响的污染物造成长期环境或农业危害，或以上各种的组合
非常严重	工程经济损失 1 000 万 ~ 10 000 万元，有明显人员死亡，或下游财产损失 500 万 ~ 5 000 万元，或造成大范围的环境或农业危害，或以上各种的组合
极其严重	工程经济损失超过 1 亿元，大量人员死亡，或下游财产损失超过 5 000 万元、对环境或下游农业产生重大长期危害，或以上各种的组合

2.2.3 后果发生的可能性

从要素破坏模式至最终破坏导致严重后果之间，需要衡量其发生的可能性。如采用 5 级标准，其发生可能性的判别标准参见表 5。其中包含了人工干预的成分，如果事件发生过程中得到及时的人工干预，则其发生严重后果的可能性将有所降低。

2.2.4 危害性指标

每个要素破坏模式的危害性指标是要素破坏模式发生的可能性、破坏后果严重程度、破坏后果发生的可能性三者的共同组合，其赋值标准见表 6。由表 6 可见，危害性指标值变化范围为 1 ~ 20，1 表示要素破坏可能性及破坏后果均极小，且破坏后果不可能发生；20 表示要素极有可能破坏，且破坏后果极其严重与可能发生。

表 5 后果发生的可能性赋值

后果可能性因子	可能性估计/%	判别标准
极不可能	< 5	破坏模式能导致影响，但后果很不可能发生
基本不可能	5 ~ 25	破坏模式能导致影响或后果，但预期不会发生
可能	25 ~ 75	预期破坏模式能导致影响或后果，发生或不发生的机会相当
非常可能	75 ~ 100	预期破坏模式导致影响或后果
一定发生	100	破坏模式必导致影响或后果的情形确定发生

表 6 危害性指标赋值

后果		要素破坏可能性				
严重性	可能性	极不可能	非常不可能	基本不可能	可能	极有可能
很小	极不可能	1	2	4	5	7
	基本不可能	2	3	5	7	8
	可能	3	5	7	8	9
	非常可能	4	5	7	9	10
	一定发生	4	5	7	9	10
较小	极不可能	3	5	7	8	9
	基本不可能	5	6	8	9	11
	可能	6	8	9	11	12
	非常可能	6	8	10	11	13
	一定发生	7	8	10	11	13
严重	极不可能	6	8	10	11	12
	基本不可能	8	9	11	13	14
	可能	9	11	12	14	15
	非常可能	9	11	13	14	16
	一定发生	10	11	13	15	16
非常严重	极不可能	9	11	13	14	15
	基本不可能	11	12	14	16	17
	可能	13	14	16	17	19
	非常可能	13	14	16	17	19
	一定发生	13	14	16	18	19
极其严重	极不可能	11	13	14	16	17
	基本不可能	12	14	16	17	18
	可能	14	15	17	19	20
	非常可能	14	16	18	19	20
	一定发生	14	16	18	19	20

计算出每个要素破坏模式危害性指标后，统计每种要素的危害程度、在子系统中所占的比重和在系统中所占比重，统计各个子系统的危害程度及其在系统中所占的比重。每个要素的危害程度为该要素的各种破坏模式危害程度的简单相加，子系统的危害程度为该子系统各个要素危害程度的简单相加。

根据危害程度的大小对每种破坏模式、每个要素危害程度和每个子系统的危害程度进行排序，危害程度越大则风险越大，从而确定大坝主要的破坏模式及主要风险要素，在除险加固资金有限的情况下确保主要风险要素得以加固处理。

表 7　江苏省某水库东副坝坝体破坏模式、影响和危害性分析结果

要素/功能编号	风险要素	破坏模式	直接影响	后果（最终影响）	破坏模式可能性	后果可能性	后果严重性	关键度
01020101	上游砌石护坡	砂浆失效	雨水渗入	破坏护坡，导致边坡失稳	经常发生	不可能	严　重	14
01020102	上游砌石护坡	波浪作用/砂浆失效	表面局部破坏	边坡失稳	极不可能	极有可能	非常严重	14
01020201	上游垫层	局部侵蚀	护坡失效	破坏护坡，导致边坡失稳	可　能	不可能	严　重	12
01020301	均质坝体填土	地震引起失稳	大坝坍塌	库水无控制下泄	极不可能	肯　定	灾难性	16
01020302	均质坝体填土	上游护坡失效引起侵蚀	降低大坝强度	大坝表面滑坡	不可能	不可能	中　等	8
01020303	均质坝体填土	排水引起下游面破坏	降低大坝强度	大坝表面滑坡	不可能	可　能	中　等	9
01020304	均质坝体填土	管　涌	内部侵蚀	大坝坍塌	不可能	可　能	灾难性	17
01020305	均质坝体填土	动物洞穴引起破坏	内部侵蚀	大坝坍塌	可　能	可　能	灾难性	19
01020401	下游草坡	表面冲刷	坝体土出露	大坝表面局部滑坡	不可能	不可能	中　等	8
01020501	木　桩	人为破坏	蚁　穴	内部侵蚀	不可能	极不可能	严　重	10
01020601	下游砌石护坡	局部滑坡	垫层出露	垫层表面侵蚀	极不可能	可　能	不严重	5
01020701	下游垫层	雨水冲刷	砌石护坡失效	大坝表面局部滑坡	不可能	可　能	不严重	7
01020801	变形标点	人为故意破坏	丢失测量数据	数据不连续	经常发生	肯　定	不严重	10
01020901	渗压计	导管堵塞	无法读数	数据不连续	不可能	肯　定	不严重	7
01021001	下游反滤	管　涌	坝体管涌	大坝坍塌	不可能	极不可能	灾难性	14

2.3　江苏某水库东副坝风险要素排序

江苏省某大(2)型水库东副坝为均质土坝，最大坝高 17.3 m，其典型断面见图 2。

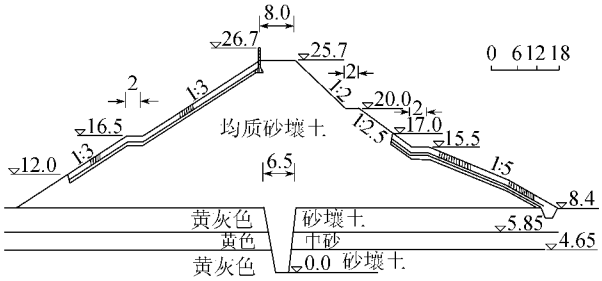

图 2　江苏省某水库东副坝典型断面示意图(单位：m)

该副坝是水库枢纽的一级子系统，可编号为 01。二级子系统包括坝顶(0101)、坝体(0102)、坝基和坝肩(0103)、下游坝脚及附近地面(0104)等。每个二级子系统下都有多个要素。

每个要素都有一种或多种破坏模式。针对每种破坏模式，分析发生的可能性、导致后果的严重性和后果发生的可能性，得到如表 3、表 4、表 5 中所示的分级。根据分级情况，依据表 6 可得到要素的危害性程度指标(坝体分析结果见表 7)。可见，坝体白蚁危害、管涌破坏以及地震作用下的坝坡失稳是危害程度高的破坏模式，也是采取工程措施或工程管理中需要认真对待的主要问题。

3　结　语

对适合选择工程措施进行加固除险的病险水库，应按照风险指数大小进行排序，确保风险高的水库优先得到加固处理，然后再根据除险资金决定是彻底加固还是部分加固。对只能进行部分加固的病险水库，可通过 FMECA 分析，确保水库的主要风险要素得以处理。

参考文献：

[1] 李雷，王仁钟，盛金保. 溃坝后果严重程度评价模型研究[J]. 安全与环境学报，2006，6(1)：1-4.

[2] 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，2006：88-95.

[3] 王仁钟，李雷，盛金保. 病险水库判别标准体系研究[J]. 水利水电科技进展，2005，25(5)：5-8.

[4] 王昭升，盛金保，李雷，等. 中国大坝风险管理现状及风险管理主要问题探讨[J]. 水利建设管理，2006，26(2)：41-46.

[5] 盛金保，彭雪辉. 中国水库大坝风险标准的研究[C]//中国水利学会青年科技工作委员会. 中国水利学会首届青年科技论坛论文集. 北京：中国水利水电出版社，2003：476-480.

[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，2006：116.

[7] SHAW G H. Ruskin and Blind Sloigh Dams failure modes, effects and criticality analysis[R]. Vencouver, Canada：B C Hydro，2006：5-12.

(收稿日期：2007-06-12　编辑：高建群)