

基于事故树法的土坝综合风险计算模型研究

罗志雄,简鸿福,孙军红

(江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029)

摘要:事故树法是工程风险评估中重要分析方法之一,它能对各种系统的危险性进行辨识和评价,不仅能分析出事故的直接原因,而且能深入地揭示出事故的潜在原因;用它描述事故的因果关系直观、明了,思路清晰,逻辑性强,既可定性分析,又可定量分析.本文通过对月塘水库大坝进行实例分析,建立事故树模型,确定大坝破坏的风险失事概率,为大坝管理者提供合理的加固依据.

关键词:事故树法;定性分析;定量分析;事故树模型;失事概率

中图分类号:TV641.2 **文献标识码:**B **文章编号:**1004-4701(2016)06-0410-05

1 研究目的

我国土坝大部分建于20世纪六七十年代,已经服役了几十年,由于年代久远和当时条件的影响,致使现在大部分土坝存在安全问题,影响着工程效益的发挥,威胁着下游人民的生命和财产安全。要对土坝风险做出综合分析,需要全面考虑各个影响因素,并计算不同风险因素对系统破坏的失事概率,从而给每个对象做出一个综合评价,据此对研究对象做出合理的风险分析。21世纪是土坝工程除险加固的高峰期,本文通过运用事故树法建立土坝综合风险计算模型,为中小型水库大坝除险加固提供科学依据,具有重大的理论意义和实际意义。

2 计算理论

水利工程失事风险概率^[1]计算的方法有很多,主要分为两大类:单一失事模式和系统失事模式下的计算方法。对于单一失事模式的失事概率计算,目前已经提出了多种计算方法,如重现期法、直接积分法、Monte-Carlo法、MFOSM法、JC法等;对于系统失事模式的失事概率计算,主要包括事故树法和事件树法等。本文为了对土坝的整体安全性进行考虑,分析各种失事因素对坝体安全性的影响,采取事故树法进行分析计算。

2.1 事故树法

2.1.1 事故树定性分析与定量分析

事故树是一种演绎的系统安全分析方法^[2]。它是从要分析的特定事故或故障开始层层分析其发生的原因,一直分析到不能分解为止。将特定的事故和各层原因之间用逻辑门符号连接起来,得到形象、简洁地表达其逻辑关系的逻辑树图形,即故障树。通过对故障树简化、计算达到分析、评价的目的^[3]。

事故树^[4-6]的分析计算主要包括定性分析和定量计算两个部分。在事故树中凡能导致顶上事件发生的基本事件的集合称作割集,事故树定性分析的目的就是找出系统的全部最小割集,常用的计算方法为上行法和下行法,本文采用下行法进行定性分析计算;事故树定量分析的主要任务是求顶事件发生的概率,从而对系统的失事概率和可靠性做出评价,有时还需评估底事件对系统的重要度。

2.1.2 最小割集重要度

一个最小割集代表系统的一种事故模式,一般需要逐个检测最小割集来搜寻事故源。事故树最小割集重要度^[7]是指最小割集在事故树中的重要性,即对顶事件的影响程度。通过计算出事故树各最小割集的重要度,对那些重要度数值很大的最小割集,应进行重点监测和研究,可以更快的发现事故源来应对可能产生的危险。

可定义最小割集重要度 P_{MT} 为:

$$P_{MT} = P_M / P_T \quad (1)$$

式中: P_M 为最小割集 M 的失事概率; P_T 为事故树顶事件的失事概率。最小割集重要度 P_{MT} 实际反应了最小割集概率占事故树顶事件概率的百分比,即重要程度。

2.2 土坝风险等级划分

风险等级的划分涉及到多方面,如现行的规范、人们的经验判断、心理活动等多方面的复杂问题。如果划

分的过细,不仅使得计算工作量加大,还会难以界定风险等级的界限;但划分太少,就不能准确的反映大坝的安全状态,本文采用介于三级法和五级法之间的四级法对土坝安全状况进行分析,即评价等级集合为:

$V = [V_1, V_2, V_3, V_4] = [健康, 亚健康, 病变, 病危]$ 。通常采用的评判区间有 $[0, 1]$ 、 $[0, 10]$ 和 $[0, 100]$,本文采用容易被人们理解和接受的 $[0, 1]$ 作为评判区间。

表 1 土坝工程风险分级

风险水平	含义	失事概率值	安全性
I 级	运用指标无法达到设计标准,技术状态差,建筑物存在严重安全问题,可降低标准运用或报废重建。	>0.5	病危
II 级	运用指标达不到设计标准,建筑物或设备存在一定损坏,经对建筑物大修、加固或对主要设备进行大修、更新改造后,能保证安全运行。	$(0.2, 0.5]$	病变
III 级	运用指标基本达到设计标准,建筑物和设备存在一定损坏,按常规维修养护即可保证安全运行。	$(0.1, 0.2]$	亚健康
IV 级	运用指标能达到设计标准,无影响正常运行的缺陷。	$[0, 0.1]$	健康

3 实例分析

3.1 工程概况

本文以江苏省仪征市月塘水库大坝作为实例,其工程概况为:月塘水库大坝始建于 1958 年,位于仪征市月塘镇境内的胥浦河上游,总库容为 1789.5 万 m^3 ,死库容为 72.0 万 m^3 ,兴利库容为 910.0 万 m^3 ,正常蓄水位 32.00 m(废黄河高程系,下同),设计洪水位 32.902 m,校核洪水位 34.088 m,防洪限制水位 31.000 m。月塘水库是一座以防洪、灌溉为主,兼顾水产养殖、旅游等综合利用的中型水库。月塘水库主要建筑物为:均质土坝,放水涵洞和溢洪道。放水涵洞位于大坝右坝端,为坝下涵洞。溢洪道位于大坝左岸,由进水渠、溢洪闸、泄槽段、消力池、下游渠道组成。

3.2 构建事故树模型

以月塘水库为例,月塘水库破坏风险事故树分析模型见图 1,基本事件见表 2。

3.3 底事件概率计算结果

根据月塘水库破坏风险事故树分析模型,各底事件的失事值、权重及其相应失事概率见表 3。

3.4 顶事件概率计算结果

根据已知各底事件的失事概率(见表 3),进行顶事件的失事概率计算,各项事件的失事概率见表 4。

表 2 月塘水库破坏风险基本事件表

事件名称	事件含义	事件名称	事件含义
T	土坝工程破坏风险	X_{16}	泄洪闸闸墩保护层厚度
M_1	土坝风险	X_{17}	泄洪闸闸墩结构病害
M_2	建筑物风险	X_{18}	泄洪闸排架混凝土强度
M_3	漫顶失事	X_{19}	泄洪闸排架碳化深度
M_4	渗透破坏	X_{20}	泄洪闸排架保护层厚度
M_5	坝坡失稳破坏	X_{21}	泄洪闸排架结构病害
M_6	泄洪闸	X_{22}	泄洪闸工作桥大梁混凝土强度
M_7	输水涵洞	X_{23}	泄洪闸工作桥大梁碳化深度
M_8	保护情况	X_{24}	泄洪闸工作桥大梁保护层厚度
M_9	荷载作用	X_{25}	泄洪闸工作桥大梁结构病害
M_{10}	坝体渗流	X_{26}	泄洪闸闸门混凝土强度
M_{11}	坝基渗流	X_{27}	泄洪闸闸门碳化深度
M_{12}	上游坝坡稳定	X_{28}	泄洪闸闸门保护层厚度
M_{13}	下游坝坡稳定	X_{29}	泄洪闸闸门结构病害
M_{14}	泄洪闸混凝土结构	X_{30}	泄洪闸消力池长度
M_{15}	泄洪闸消能防冲能力	X_{31}	泄洪闸消力池深度
M_{16}	泄洪闸抗渗稳定性	X_{32}	泄洪闸消力池厚度
M_{17}	泄洪闸整体稳定性	X_{33}	泄洪闸海漫长度
M_{18}	输水涵洞进水塔	X_{34}	泄洪闸过流能力
M_{19}	输水涵洞抗渗稳定性	X_{35}	泄洪闸防渗长度
M_{20}	泄洪闸闸墩	X_{36}	泄洪闸最大水平坡降
M_{21}	泄洪闸排架	X_{37}	泄洪闸出口坡降

续表2 月塘水库破坏风险基本事件表

事件名称	事件含义	事件名称	事件含义
M ₂₂	泄洪闸工作桥大梁	X ₃₈	泄洪闸闸室抗滑稳定性
M ₂₃	泄洪闸闸门	X ₃₉	泄洪闸闸室不均匀系数
M ₂₄	泄洪闸闸室	X ₄₀	泄洪闸闸室地基承载力
M ₂₅	泄洪闸上游翼墙	X ₄₁	泄洪闸上游翼墙抗滑稳定性
M ₂₆	泄洪闸下游翼墙	X ₄₂	泄洪闸上游翼墙不均匀系数
X ₁	坝顶高程	X ₄₃	泄洪闸下游翼墙地基承载力
X ₂	工程等级	X ₄₄	泄洪闸下游翼墙抗滑稳定性
X ₃	抢险条件	X ₄₅	泄洪闸下游翼墙不均匀系数
X ₄	洪水位	X ₄₆	泄洪闸下游翼墙地基承载力
X ₅	地震烈度	X ₄₇	输水涵洞进水塔混凝土强度

续表2 月塘水库破坏风险基本事件表

事件名称	事件含义	事件名称	事件含义
X ₆	坝体渗流量	X ₄₈	输水涵洞进水塔碳化深度
X ₇	坝体最大出逸比降	X ₄₉	输水涵洞进水塔保护层厚度
X ₈	坝基渗流量	X ₅₀	输水涵洞进水塔结构病害
X ₉	坝基最大出逸比降	X ₅₁	输水涵洞过流能力
X ₁₀	上游坝坡有汽车荷载稳定	X ₅₂	输水涵洞防渗长度
X ₁₁	上游坝坡无汽车荷载稳定	X ₅₃	输水涵洞最大水平坡降
X ₁₂	下游坝坡有汽车荷载稳定	X ₅₄	输水涵洞出口坡降
X ₁₃	下游坝坡无汽车荷载稳定		
X ₁₄	泄洪闸闸墩混凝土强度		
X ₁₅	泄洪闸闸墩碳化深度		

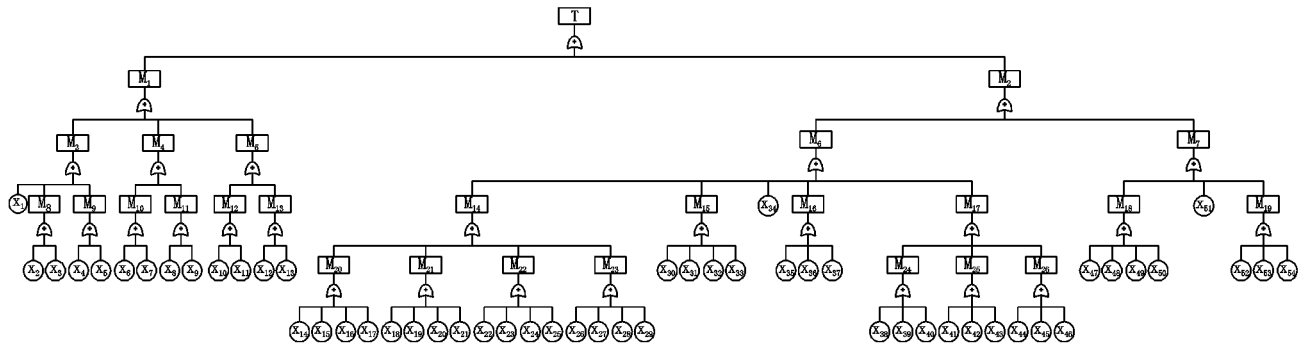


图1 月塘水库破坏风险事故树分析模型

表3 底事件概率计算成果表

底事件	失事值 (RI) _j	权重	底事件失事概率 p(x _i)
x ₁	(RI) ₁₁	0.338 9	0.088 8
x ₂	(RI) ₂₁	0.200 0	0.057 5
x ₃	(RI) ₂₂	0.250 0	0.031 3
x ₄	(RI) ₃₁	0.521 8	0.017 1
x ₅	(RI) ₃₂	0.500 0	0.027 3
x ₆	(RI) ₄₁	0.000 0	0.042 9
x ₇	(RI) ₄₂	0.720 1	0.068 2
x ₈	(RI) ₅₁	0.000 0	0.038 9
x ₉	(RI) ₅₂	0.000 0	0.072 2
x ₁₀	(RI) ₆₁	0.000 0	0.043 2
x ₁₁	(RI) ₆₂	0.000 0	0.030 8
x ₁₂	(RI) ₇₁	0.117 4	0.086 4
x ₁₃	(RI) ₇₂	0.089 6	0.061 7
x ₁₄	(RI) ₈₁	0.717 1	0.003 5
x ₁₅	(RI) ₈₂	0.771 1	0.002 3

续表3 底事件概率计算成果表

底事件	失事值 (RI) _j	权重	底事件失事概率 p(x _i)
x ₁₆	(RI) ₈₃	0.374 4	0.002 8
x ₁₇	(RI) ₈₄	0.200 0	0.002 5
x ₁₈	(RI) ₉₁	0.712 0	0.003 5
x ₁₉	(RI) ₉₂	0.589 5	0.002 6
x ₂₀	(RI) ₉₃	0.000 0	0.002 7
x ₂₁	(RI) ₉₄	0.200 0	0.002 4
x ₂₂	(RI) ₁₀₁	0.000 0	0.003 8
x ₂₃	(RI) ₁₀₂	0.706 9	0.002 4
x ₂₄	(RI) ₁₀₃	0.411 1	0.002 5
x ₂₅	(RI) ₁₀₄	0.700 0	0.002 4
x ₂₆	(RI) ₁₁₁	0.372 3	0.003 7
x ₂₇	(RI) ₁₁₂	0.189 7	0.002 4
x ₂₈	(RI) ₁₁₃	0.000 0	0.002 7
x ₂₉	(RI) ₁₁₄	0.700 0	0.002 3
x ₃₀	(RI) ₁₂₁	0.722 8	0.010 8

续表 3 底事件概率计算成果表

底事件	失事值 (RI) _j	权重	底事件失事概率 p(x _i)
x ₃₁	(RI) ₁₂₂	0.000 0	0.012 7
x ₃₂	(RI) ₁₂₃	0.765 2	0.010 5
x ₃₃	(RI) ₁₂₄	0.740 9	0.010 4
x ₃₄	(RI) ₁₃₁	0.000 0	0.044 4
x ₃₅	(RI) ₁₄₁	0.000 0	0.018 5
x ₃₆	(RI) ₁₄₂	0.000 0	0.013 0
x ₃₇	(RI) ₁₄₃	0.000 0	0.013 0
x ₃₈	(RI) ₁₅₁	0.000 0	0.009 2
x ₃₉	(RI) ₁₅₂	0.070 7	0.006 5
x ₄₀	(RI) ₁₅₃	0.000 0	0.006 5
x ₄₁	(RI) ₁₆₁	0.000 0	0.004 6
x ₄₂	(RI) ₁₆₂	0.062 7	0.003 3
x ₄₃	(RI) ₁₆₃	0.000 0	0.003 3
x ₄₄	(RI) ₁₇₁	0.000 0	0.004 6
x ₄₅	(RI) ₁₇₂	0.062 7	0.003 3
x ₄₆	(RI) ₁₇₃	0.000 0	0.003 3
x ₄₇	(RI) ₁₈₁	0.717 1	0.012 0
x ₄₈	(RI) ₁₈₂	0.763 2	0.008 1
x ₄₉	(RI) ₁₈₃	0.761 9	0.008 1
x ₅₀	(RI) ₁₈₄	0.200 0	0.008 7
x ₅₁	(RI) ₁₉₁	0.702 6	0.036 9
x ₅₂	(RI) ₂₀₁	0.424 7	0.015 1
x ₅₃	(RI) ₂₀₂	0.000 0	0.010 9
x ₅₄	(RI) ₂₀₃	0.000 0	0.010 9

表 4 顶事件失事概率成果表

基本事件		顶事件失事概率	
T	0.211 0	M ₁₄	0.018 0
M ₁	0.129 6	M ₁₅	0.023 4
M ₂	0.093 5	M ₁₆	0.000 0
M ₃	0.070 1	M ₁₇	0.000 9
M ₄	0.049 1	M ₁₈	0.022 5
M ₅	0.015 6	M ₁₉	0.006 4
M ₆	0.041 8	M ₂₀	0.005 8
M ₇	0.054 0	M ₂₁	0.004 4
M ₈	0.019 2	M ₂₂	0.004 4
M ₉	0.022 5	M ₂₃	0.003 5
M ₁₀	0.049 1	M ₂₄	0.000 5
M ₁₁	0.000 0	M ₂₅	0.000 2
M ₁₂	0.000 0	M ₂₆	0.000 2
M ₁₃	0.015 6		

由表 3、4 可知,影响月塘水库安全的因素复杂多样,各底层因素的失事概率与失事值和权重有关,失事值越大,权重越大,此因素对系统安全的影响越大。月

塘水库破坏风险失事的概率为 0.211 0 > 0.2,根据土坝工程风险分级,该水库大坝风险水平为 II 级,处于病变状态。因此月塘水库需要尽快进行除险加固以确保大坝运行安全。

3.5 最小割集重要度

当顶事件发生时,各最小割集重要度计算成果表见 5。

表 5 最小割集重要度

最小割集	最小割集重要度	最小割集	最小割集重要度
{x ₁ }	0.142 7	{x ₂₉ }	0.007 8
{x ₂ }	0.054 5	{x ₃₀ }	0.036 9
{x ₃ }	0.037 1	{x ₃₁ }	0.000 0
{x ₄ }	0.042 3	{x ₃₂ }	0.038 2
{x ₅ }	0.064 7	{x ₃₃ }	0.036 6
{x ₆ }	0.000 0	{x ₃₄ }	0.000 0
{x ₇ }	0.232 6	{x ₃₅ }	0.000 0
{x ₈ }	0.000 0	{x ₃₆ }	0.000 0
{x ₉ }	0.000 0	{x ₃₇ }	0.000 0
{x ₁₀ }	0.000 0	{x ₃₈ }	0.000 0
{x ₁₁ }	0.000 0	{x ₃₉ }	0.002 2
{x ₁₂ }	0.048 1	{x ₄₀ }	0.000 0
{x ₁₃ }	0.026 2	{x ₄₁ }	0.000 0
{x ₁₄ }	0.011 9	{x ₄₂ }	0.001 0
{x ₁₅ }	0.008 5	{x ₄₃ }	0.000 0
{x ₁₆ }	0.005 0	{x ₄₄ }	0.000 0
{x ₁₇ }	0.002 3	{x ₄₅ }	0.001 0
{x ₁₈ }	0.011 6	{x ₄₆ }	0.000 0
{x ₁₉ }	0.007 1	{x ₄₇ }	0.040 7
{x ₂₀ }	0.000 0	{x ₄₈ }	0.029 3
{x ₂₁ }	0.002 3	{x ₄₉ }	0.029 2
{x ₂₂ }	0.000 0	{x ₅₀ }	0.008 3
{x ₂₃ }	0.007 9	{x ₅₁ }	0.123 0
{x ₂₄ }	0.004 9	{x ₅₂ }	0.030 3
{x ₂₅ }	0.007 9	{x ₅₃ }	0.000 0
{x ₂₆ }	0.006 6	{x ₅₄ }	0.000 0
{x ₂₇ }	0.002 1		
{x ₂₈ }	0.000 0		

从计算数据可见不同最小割集的重要度值相差很大,如取最小割集的重要度值 ≥ 0.05 的最小割集,这时真正的危险源及其重要度的大小依次排序为:

$$\{x_7\} > \{x_1\} > \{x_{51}\} > \{x_5\} > \{x_2\}$$

事件名称依次是:坝体最大出逸比降、坝顶高程、输水涵洞过流能力、地震烈度、工程等级。

根据计算出的结构重要度可以知道:坝体最大出逸

比降是导致月塘水库破坏的重要原因,因此,对月塘水库进行防渗处理是防止事故发生的重要途径,另外根据重要度排序,可以依次采取相应有效的工程措施来降低水库破坏风险概率。

4 结论

(1)运用事故树法建立事故树模型对月塘水库进行分析计算,同时根据土坝风险等级划分标准,最终确定月塘水库风险水平为Ⅱ级,处于病变状态。为避免水库发生更大破坏,应对其尽快进行加固处理。

(2)坝体最大出逸比降是导致月塘水库破坏的重要原因,因此,对月塘水库进行防渗处理是防止事故发生的重要途径,另外根据重要度排序,可以依次采取相应有效的工程措施来降低水库破坏风险概率。

(3)事故树法是目前分析计算土坝安全系统问题的方法之一,依据它建立的土坝综合风险分析模型使许多复杂的工程安全问题变得易于求解,计算效率较高,

实际应用广泛。在实际的工程运用中,能够帮助管理单位更快找到危险事故源,及时对工程采取合理的措施。

参考文献:

- [1] 许淑莲. 小型水库溃坝风险探析[J]. 才智, 2012(21): 246.
- [2] 邵延峰, 薛红军. 故障树分析法在系统故障诊断中的应用[J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(1): 72~74.
- [3] 王文才, 岑旺, 巴蕾. 矿山冒顶片帮灾害事故树分析[J]. 金属矿山, 2010(3): 142~144.
- [4] 余建星. 工程风险评估与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [5] 罗文广, 鲁曦卉, 吴震宇, 等. 某大坝失事故障树的建立与应用[C]. 中国水力发电工程学会大坝安全监测专委会年会暨学术交流会, 2012.
- [6] 杨梦云. 基于事故树分析法的重大险情溃口事故防范分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 55~57.
- [7] 王兴华. 大中型泵站工程运行风险分析研究[D]. 长沙: 扬州大学, 2012.

编辑: 张绍付

Study on the comprehensive risk calculation model for earth dam based on fault tree method

LUO Zhixiong, JIAN Hongfu, SUN Junhong

(Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: Fault tree method is one of the important analysis methods in project risk assessment which can identify and assess risks in various system and not only finds out the direct reason, it deeply reveals the potential causes of the accident. The cause and effect can be described in an intuitive, clear, straight forward and logical way and both qualitative analysis and quantitative analysis can be made. This paper establishes fault tree model for the Yuetang dam to determine the factor of risk of the dam failure so as to provide reasonable grounds of reinforcing for the managers.

Key words: Fault tree method; Qualitative analysis and quantitative analysis; Failure probability

翻译: 邹晨阳