

尾矿坝漫顶溃坝事故树分析

魏 勇, 许开立, 郑 欣

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 根据汛期尾矿坝溃坝的一些典型事例, 概括出了导致尾矿坝漫顶溃坝的基本事件。应用事故树分析中的最小割集、最小径集及结构重要度, 对尾矿坝漫顶溃坝事故进行了研究。结果表明: 导致尾矿坝漫顶溃坝的最小割集含有 54 个, 说明尾矿坝漫顶溃坝容易发生; 防止尾矿坝漫顶溃坝的最小径集含有 4 个; 通过计算基本事件的结构重要度表明, 存在坝体隐患、坝体设计不当、坝体施工差、未作日常维护、地质条件差等都是控制尾矿坝漫顶溃坝事故发生的关键。

关 键 词: 尾矿坝; 漫顶; 溃坝; 事故树; 基本事件

中图分类号: X 928.03

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2010)06-0890-04

Fault Tree Analysis of Tailing Dam Break Due to Overtopping

WEI Yong, XU Kai-li, ZHENG Xin

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: WEI Yong, E-mail: weiyong19800909@sina.com)

Abstract: Based on several typical cases of tailing dam break during flood periods, the basic events relevant to the accidents of tailing dam break due to overtopping were clarified and generalized, such as seismic intensity beyond the designed value and ineffective flood discharging measures taken. The accidents of tailing dam break due to overtopping were studied introducing fault tree analysis including minimum cut sets, minimum path sets and structural importance. The results showed that the number of minimum cut sets that causes the accidents of tailing dam break due to overtopping is 54, thus revealing that such accidents are easy to take place; the number of minimum path sets that implies the prevention of such accidents is 4; and the calculated structural importance of relevant basic events means that hidden danger, poor design and inferior construction of dam, lack of routine maintenance and poor geological conditions, etc, all are crucial to the control and prevention of such accidents especially during flood periods.

Key words: tailing dam; overtopping; dam break; fault tree; basic event

事故树分析法又称故障树分析, 是一种逻辑演绎系统安全分析方法。它是从要分析的特定事故或故障开始, 层层分析其发生原因, 一直分析到不能再分解为止; 将特定的事故和各层原因(危险因素)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(因果关系)的逻辑树图形, 即事故树。通过对事故树简化、计算, 达到分析、评价的目的。

在尾矿库的各类事故中, 漫顶溃坝事故时有发生, 其后果十分严重。导致尾矿库漫顶溃坝有许多因素, 如自然因素、管理因素等^[1]。这些因素不

仅相互交叉, 而且往往只能作定性的描述, 不能方便地用于分析尾矿坝漫顶溃坝事故的原因或者指导尾矿坝防洪渡汛。运用安全系统工程中的事故树分析法对尾矿坝漫顶溃坝事故进行了研究, 希望对指导尾矿坝防洪渡汛有重要意义。

1 尾矿坝漫顶溃坝事故树分析

1.1 漫顶溃坝的基本事件

导致尾矿坝漫顶溃坝的因素很多, 包括自然因素、设计因素、施工因素、管理因素、社会因素及技术因素。这些因素又涉及许多下一级事件, 而

收稿日期: 2009-10-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAK04B01)。

作者简介: 魏 勇(1980-), 男, 四川绵阳人, 东北大学博士研究生; 许开立(1965-), 男, 山东郓城人, 东北大学教授, 博士生导师。

且各因素之间又互相交叉 因此,必须从中概括出主要的易于分析的因素——基本事件,才有利于研究汛期尾矿坝漫顶溃坝这一事件.为此,本文着重考察了一些典型尾矿坝溃坝事故^[2-9],概括出导致尾矿坝漫顶溃坝事故(T)的因素.

- 1) 水位超过坝顶(A_1).
库区发生滑坡或泥石流(B_1):
a. 滑坡泥石流量大(X_1);
b. 事先不知道(C_1),与之相关的事件有不知周围情况(X_2),未作监测(X_3).
降雨量超过正常设计(B_2),与之相关的事件有未能预报降雨(X_4),没有排洪设施(X_5),隐患判断处理不当(X_6),设计考虑不周(X_7).
排洪设施无法满足要求(B_3):
a. 排洪能力过小(C_2),与之相关的事件有没有排洪设施(X_5),隐患判断处理不当(X_6),设计考虑不周(X_7);
b. 排洪设施发生故障(C_3),与之相关的事件

- 有隐患判断处理不当(X_6),管理不善(X_8),泄洪排水构筑物破坏(X_9),泄洪排水构筑物堵塞(X_{10}).
- 2) 坝体质量差(A_2).
坝体设计不当(X_{11}),
坝体施工差(X_{12}),
未作日常维护(X_{13}),
地质条件差(X_{14}),
坝体隐患(B_4),与之相关的事件有存在坝体隐患(X_{15}),未找出隐患(X_{16}),找出但未治理(X_{17}).

1.2 尾矿坝漫顶溃坝事故树

事故树分析是把所研究系统的最不希望发生状态作为分析的顶上事件,然后寻找直接导致这一顶上事件发生的全部直接因素,并逐次下推,一直追查到那些不需要再深究的因素为止.

根据事故发生的逻辑关系,构造出如图 1 所示的事故树图.

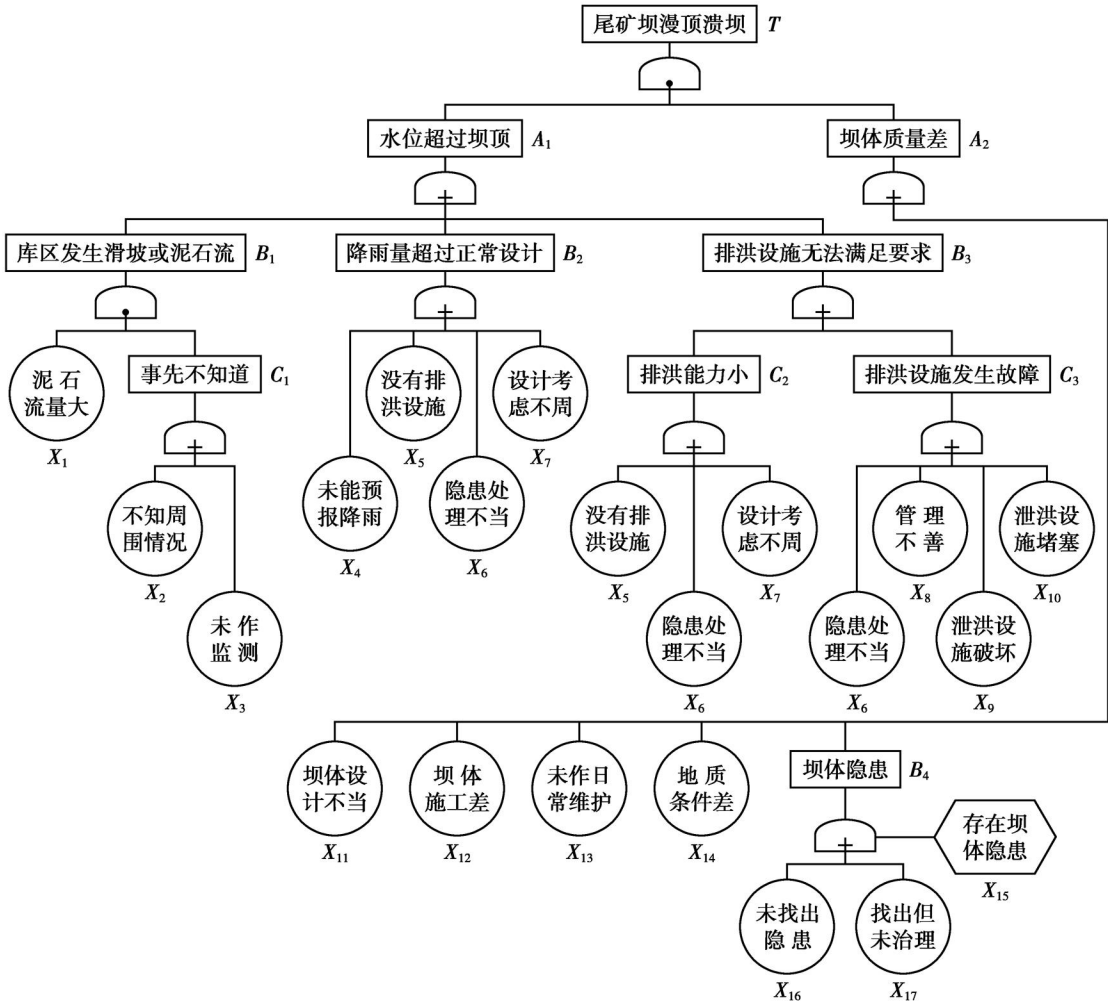


图 1 尾矿坝漫顶溃坝事故树分析

Fig. 1 Fault tree analysis of tailing dam break due to overtopping

2 漫顶溃坝事故树计算分析

2.1 求最小割集

最小割集表示系统的危险性,每个最小割集都是顶上事件发生的一种可能渠道.最小割集的数目越多越危险.现用布尔代数法求最小割集,由图 1 可得出该事故树的结构函数:

$$\begin{aligned} T &= A_1 A_2 = (B_1 + B_2 + B_3) \times \\ &(X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + B_4) = \\ &(X_1 C_1 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + C_2 + C_3) \times \\ &[X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15}(X_{16} + X_{17})] = \\ &[X_1(X_2 + X_3) + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + \\ &X_6 + X_7 + X_6 + X_8 + X_9 + X_{10}] \times \\ &[X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15}(X_{16} + X_{17})]. \end{aligned}$$

将上式经逻辑化简后求得最小割集共有 54 个,即

$$\begin{aligned} K_1 &= \{X_1, X_2, X_{11}\}, K_2 = \{X_1, X_2, X_{12}\}, \\ K_3 &= \{X_1, X_2, X_{13}\}, K_4 = \{X_1, X_2, X_{14}\}, \\ K_5 &= \{X_1, X_2, X_{15}, X_{16}\}, \\ K_6 &= \{X_1, X_2, X_{15}, X_{17}\}, \\ K_7 &= \{X_1, X_3, X_{11}\}, K_8 = \{X_1, X_3, X_{12}\}, \\ K_9 &= \{X_1, X_3, X_{13}\}, K_{10} = \{X_1, X_3, X_{14}\}, \\ K_{11} &= \{X_1, X_3, X_{15}, X_{16}\}, \\ K_{12} &= \{X_1, X_3, X_{15}, X_{17}\}, \\ K_{13} &= \{X_4, X_{11}\}, K_{14} = \{X_4, X_{12}\}, \\ K_{15} &= \{X_4, X_{13}\}, K_{16} = \{X_4, X_{14}\}, \\ K_{17} &= \{X_4, X_{15}, X_{16}\}, K_{18} = \{X_4, X_{15}, X_{17}\}, \\ K_{19} &= \{X_5, X_{11}\}, K_{20} = \{X_5, X_{12}\}, \\ K_{21} &= \{X_5, X_{13}\}, K_{22} = \{X_5, X_{14}\}, \\ K_{23} &= \{X_5, X_{15}, X_{16}\}, K_{24} = \{X_5, X_{15}, X_{17}\}, \\ K_{25} &= \{X_6, X_{11}\}, K_{26} = \{X_6, X_{12}\}, \\ K_{27} &= \{X_6, X_{13}\}, K_{28} = \{X_6, X_{14}\}, \\ K_{29} &= \{X_6, X_{15}, X_{16}\}, K_{30} = \{X_6, X_{15}, X_{17}\}, \\ K_{31} &= \{X_7, X_{11}\}, K_{32} = \{X_7, X_{12}\}, \\ K_{33} &= \{X_7, X_{13}\}, K_{34} = \{X_7, X_{14}\}, \\ K_{35} &= \{X_7, X_{15}, X_{16}\}, K_{36} = \{X_7, X_{15}, X_{17}\}, \\ K_{37} &= \{X_8, X_{11}\}, K_{38} = \{X_8, X_{12}\}, \\ K_{39} &= \{X_8, X_{13}\}, K_{40} = \{X_8, X_{14}\}, \\ K_{41} &= \{X_8, X_{15}, X_{16}\}, K_{42} = \{X_8, X_{15}, X_{17}\}, \\ K_{43} &= \{X_9, X_{11}\}, K_{44} = \{X_9, X_{12}\}, \\ K_{45} &= \{X_9, X_{13}\}, K_{46} = \{X_9, X_{14}\}, \\ K_{47} &= \{X_9, X_{15}, X_{16}\}, K_{48} = \{X_9, X_{15}, X_{17}\}, \\ K_{49} &= \{X_{10}, X_{11}\}, K_{50} = \{X_{10}, X_{12}\}, \end{aligned}$$

$$K_{51} = \{X_{10}, X_{13}\}, K_{52} = \{X_{10}, X_{14}\},$$

$$K_{53} = \{X_{10}, X_{15}, X_{16}\}, K_{54} = \{X_{10}, X_{15}, X_{17}\}.$$

尾矿坝漫顶溃坝事故树中,任何一组最小割集的基本事件同时发生,顶上事件就必然发生,说明顶上事件发生的途径有 54 个.

2.2 求解最小径集

将事故树图 1 中的“或”门用“与”门代替,“与”门用“或”门代替,并将全部事件符号加上“'”,变成事件补的形式,这样便可得到与原事故树对偶的成功树,求成功树的最小割集便是原事故树的最小径集(每个最小径集为预防顶上事件发生的一条途径),即

$$\begin{aligned} T' &= A'_1 + A'_2 = B'_1 B'_2 B'_3 + X'_{11} X'_{12} \times \\ &X'_{13} X'_{14} B'_4 = (X'_1 + C'_1) X'_4 X'_5 X'_6 \times \\ &X'_7 C'_2 C'_3 + X'_{11} X'_{12} X'_{13} X'_{14} (X'_{15} + \\ &X'_{16} X'_{17}) = (X'_1 + X'_2 X'_3) X'_4 X'_5 \times \\ &X'_6 X'_7 X'_8 X'_9 X'_{10} + \\ &X'_{11} X'_{12} X'_{13} X'_{14} (X'_{15} + X'_{16} X'_{17}). \end{aligned}$$

上式展开经逻辑化简,求得该成功树共有 4 个最小割集,即原事故树共有 4 个最小径集:

$$\begin{aligned} P_1 &= \{X_1, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}\}, \\ P_2 &= \{X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}\}, \\ P_3 &= \{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}\}, \\ P_4 &= \{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}. \end{aligned}$$

其中任何一组最小径集的基本事件都不发生,顶上事件就不可能发生,因此,这个系统的控制途径有 4 组.

2.3 结构重要度分析

基本事件的结构重要度取决于它们在事故树结构中的位置.基本事件在事故树结构中位置的不同,对顶上事件的作用也不同.评价基本事件结构重要度的方法有如下几种:

1) 在由较少基本事件组成的最小割集合(或最小径集合)中出现的基本事件,其结构重要度较大;

2) 在不同最小割集合(或最小径集合)中出现次数多的基本事件,其结构重要度大.

于是,可以按下式计算第 i 个基本事件的结构重要度:

$$I_{\Phi}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_j}.$$

式中: k 为事故树包括的最小割集合(或最小径集合)数目; m 为包含第 i 个基本事件的最小割集合(或最小径集合)数目; R_j 为包含第 i 个基本事件的第 j 个最小割集合(或最小径集合)中基本事件

的数目。

所以,结合尾矿坝漫顶溃坝事故树的54个最小割集合,按上式计算各基本事件的结构重要度:

$$\begin{aligned}
 I_{\phi}(1) &= \left(\frac{1}{3} \times 8 + \frac{1}{4} \times 4 \right) \times \frac{1}{54} = 0.068, \\
 I_{\phi}(2) &= I_{\phi}(3) = \left(\frac{1}{3} \times 4 + \frac{1}{4} \times 2 \right) \times \frac{1}{54} = 0.034, \\
 I_{\phi}(4) &= I_{\phi}(5) = I_{\phi}(6) = I_{\phi}(7) = I_{\phi}(8) = I_{\phi}(9) = \\
 I_{\phi}(10) &= \left(\frac{1}{2} \times 4 + \frac{1}{3} \times 2 \right) \times \frac{1}{54} = 0.049, \\
 I_{\phi}(11) &= I_{\phi}(12) = I_{\phi}(13) = I_{\phi}(14) = \\
 &\left(\frac{1}{2} \times 7 + \frac{1}{3} \times 2 \right) \times \frac{1}{54} = 0.077, \\
 I_{\phi}(15) &= \left(\frac{1}{3} \times 14 + \frac{1}{4} \times 4 \right) \times \frac{1}{54} = 0.105, \\
 I_{\phi}(16) &= I_{\phi}(17) = \left(\frac{1}{3} \times 7 + \frac{1}{4} \times 2 \right) \times \frac{1}{54} = 0.052.
 \end{aligned}$$

显然各基本事件的结构重要度系数顺序为

$$\begin{aligned}
 I_{\phi}(15) &> I_{\phi}(11) = I_{\phi}(12) = I_{\phi}(13) = \\
 I_{\phi}(14) &> I_{\phi}(1) > I_{\phi}(16) = I_{\phi}(17) > I_{\phi}(4) = \\
 I_{\phi}(5) &= I_{\phi}(6) = I_{\phi}(7) = I_{\phi}(8) + I_{\phi}(9) = \\
 I_{\phi}(10) &> I_{\phi}(2) = I_{\phi}(3).
 \end{aligned}$$

从对事故树分析结果看,给尾矿坝漫顶溃坝带来较大影响的事件依次为存在坝体隐患、坝体设计不当、坝体施工差、未作日常维护、地质条件差、库区滑坡泥石流流量大、未找出坝体隐患、找出坝体隐患未治理、未能预报降雨、没有排洪设施、隐患判断处理不当、设计考虑不周、管理不善、泄洪排水构筑物破坏、泄洪排水构筑物堵塞、不知道周围情况、未作监测等,都是导致尾矿库发生事故的主要原因。

3 结 语

为确保汛期尾矿坝稳定,加强管理、汛前危岩

体治理、准确气象预报是重要的;同时更重要的是了解排洪状况,通过对洪峰流量、洪水总量、洪水过程线计算分析以及调洪演算,科学地采取汛前的排洪措施,应是防止尾矿坝汛期漫顶溃坝的重中之重。

参考文献:

- [1] 李夕兵,蒋卫东,赵伏军. 汛期尾矿坝溃坝事故树分析[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(5): 45 - 48.
(Li Xi-bing, Jiang Wei-dong, Zhao Fu-jun. Fault tree analysis of tailing dam break during flood season[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2001, 1(5): 45 - 48.)
- [2] Scott M D, Lor C. Optimal tailing management at Highland Valley Copper[J]. *CIM Bulletin*, 1992, 85(962): 85 - 88.
- [3] Dobry R, Alvaz L. Seismic failures of Chilean tailings dams [J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation*, 1967, 93(4): 237 - 260.
- [4] Oksa S, Anma S. Slope failures and tailing dams damage in the 1978 Izuoshima-Kinkai earthquake [J]. *Engineering Geology*, 1980, 16(3/4): 195 - 224.
- [5] Harper T G, McLeod H N, Davies M P. Seismic assessment of tailings dams[J]. *Civil Engineering*, 1992, 62(12): 64 - 66.
- [6] Vick S G. Tailings dam failure at Omai in Guyana [J]. *Mining Engineering*, 1996, 48(11): 34 - 37.
- [7] Harder L F J, Stewart J P. Failure of Tapo Canyon tailings dam[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1996, 10(3): 109 - 114.
- [8] Marcus W A, Meyer G A, Nimmo D R. Geomorphic control of persistent mine impacts in a Yellowstone Park stream and implications for the recovery of fluvial systems[J]. *Geology*, 2001, 29(4): 355 - 358.
- [9] 魏勇,许开立,郑欣. 浅析国内外尾矿坝事故及原因[J]. 金属矿山, 2009(7): 139 - 142.
(Wei Yong, Xu Kai-li, Zheng Xin. Discussion on the causes for tailings dam accidents at home and abroad [J]. *Metal Mine*, 2009(7): 139 - 142.)