

文章编号: 1009-6094(2001)05-0045-04

汛期尾矿坝溃坝事故树分析*

李夕兵 蒋卫东 赵伏军

(中南大学资源环境与建筑工程学院, 长沙 410083)

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, 对汛期尾矿坝溃坝事故进行了研究。结果表明, 可以选择由滑坡量大、超出正常设计的降雨、未采取有效的排洪措施、大于设计烈度的地震4个事件构成的最小径集作为控制汛期尾矿坝溃坝事故发生的途径。未采取有效的排洪措施是这一途径中的控制重点, 可以通过修复或增设排洪设施、汛前降低库水位等措施来实现。这对指导尾矿坝防洪渡汛有重要意义。

关键词: 尾矿坝; 溃坝; 事故树; 防洪渡汛

中图分类号: TD7; X928 **文献标识码:** A

1 引言

尾矿库是矿山的重要设施, 它的安全状况关系到矿山生产建设能否顺利进行和库区下游群众生命财产的安全。在尾矿库的各类事故中, 汛期溃坝事故时有发生, 且其后果十分严重^[1~3]。如1962年9月26日, 云南锡业公司火谷都尾矿库发生溃坝事故, 死伤263人, 直接经济损失达2 000多万元^[4]。为了防止汛期尾矿库溃坝, 各矿山都为尾矿坝的安全渡汛投入了大量的人力、物力和财力。如1998年, 德兴铜矿为了4#尾矿坝的安全渡汛, 不得不停产10多天, 集全矿之力维护该坝的稳定。由此可见, 研究如何有效地防止汛期尾矿库溃坝是十分有意义的。

导致汛期尾矿库溃坝有许多因素, 如自然因素、管理因素等。这些因素不仅互相交叉, 而且往往只能作定性的描述, 不能方便地用于分析汛期尾矿坝溃坝事故的原因或者指导尾矿坝防洪渡汛。本文根据国内外8例典型汛期尾矿坝溃坝事故概括出导致汛期尾矿坝溃坝的基本事件, 运用安全系统工程中的事故树分析法对汛期尾矿坝溃坝事故进行了研究。这项工作是尾矿坝管理技术研究领域的一个尝试, 对指导尾矿坝的防洪渡汛有重要意义。

2 汛期尾矿坝溃坝事故树分析

2.1 汛期尾矿坝溃坝的基本事件

汛期导致尾矿坝溃坝的因素很多, 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溃坝这一事件。为此, 本文着重考察了以下典型尾矿坝溃坝事故^[1]: 云南锡业公司火谷都尾矿坝溃坝事故; 柿竹园有色金属矿牛角垅尾矿库溃坝事故; 岢岚山尾矿库洪水漫顶事故; 银山铅锌矿尾矿坝决口事故; 郑州铝厂灰渣库溃决事故; 智利埃尔尾矿坝溃坝事故; 美国布法罗河尾矿坝溃坝事故; 南斯拉夫兹莱托沃铅锌矿尾矿库溃坝事故。根据文献^[1~7], 概括出导致汛期尾矿坝溃坝事故(T)的因素。

(1) 自然灾害(A_1)。a 库区山体滑坡(A_3)。相关事件是滑坡量大(X_3)、事先不知道(A_8)、不知道存在危岩体(X_1)及未对危岩体作监测(X_2)。b 降雨过大(A_4)。在超出正常设计的降雨(X_4)的条件下, 未能及时预报降雨(X_5)及预报后未采取有效的排洪措施(X_6)。c 发生大于设计地震烈度的地震(X_7)。

(2) 非自然灾害(A_2)。a 排洪设施无法满足要求(A_5)。相关事件有未采取有效的排洪措施(X_6)、排洪设施设计不当(X_8)及排洪设施已损坏(X_9)。b 坝体质量差(A_6)。相关事件有坝体设计不当(X_{12})、坝体施工质量差(X_{13})、未对坝体进行日常维护(X_{14})、工程地质条件差(X_{15})。c 坝体存在隐患(A_9)。存在溃坝隐患(X_{16})的条件下未找出坝体隐患(X_{17})及找出了隐患但未在汛前进行治理(X_{18})。d 管理不当(A_7)。相关事件是没有防洪组织机构(X_{10})、未采取有效的排洪措施(X_6)及没有足够的防洪物质(X_{11})。

2.2 汛期尾矿库溃坝的事故树建造

* 收稿日期: 2001-05-28

作者简介: 李夕兵(1962-), 男, 教授, 博导, 博士, 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授, 从事安全工程、岩土动力学研究。

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,一直追查至那些不需再深究的因素为止。图1为汛期尾矿坝溃坝事故树。

2.3 事故树的分析

2.3.1 最小割集的求解

根据图1,可以求出11个最小割集

$K_1 = \{X_7\}; K_2 = \{X_3, X_4\}; K_3 = \{X_4, X_5\}; K_4 = \{X_1, X_3\}; K_5 = \{X_2, X_3\}; K_6 = \{X_6, X_8, X_9, X_{12}\}; K_7 = \{X_6, X_8, X_9, X_{13}\}; K_8 = \{X_6, X_8, X_9, X_{14}\}; K_9 = \{X_6, X_8, X_9, X_{15}\}; K_{10} = \{X_6, X_8, X_9, X_{16}, X_{17}\}; K_{11} = \{X_6, X_8, X_9, X_{16}, X_{18}\}。$

汛期尾矿坝溃坝事故树中,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只有11个。

图1 汛期尾矿坝溃坝事故树分析图

Fig 1 Fault tree analysis of tailings dam break during flood season

2.3.2 最小径集的求解

在尾矿坝防洪渡汛中,最关心的是如何才能控制尾矿坝溃坝事故的发生,以便进行有效的坝体管理。因此,采用最小径集分析。事故树的成功树见图2所示,其逻辑函数为

$$\begin{aligned} T &= A_1 A_2 = A_3 A_4 X_7 (A_5 + A_6 + A_7) \\ &= (X_3 + X_{12}) (X_4 + X_5 X_6) X_7 [(X_6 + X_8 + X_9) + X_{12} X_{13} X_{14} X_{15} (X_{16} + X_{17} X_{18}) + X_6 X_{10} X_{11}] \\ &= (X_7 X_3 X_4 + X_7 X_3 X_5 X_6 + X_7 X_{12} X_4 + X_7 X_{12} X_5 X_6) (X_6 + X_8 + X_9 + X_{12} X_{13} X_{14} X_{15} X_{16} + \\ &X_{12} X_{13} X_{14} X_{15} X_{17} X_{18}) \end{aligned}$$

将上式展开后,并利用布尔代数进行化简,可以得出图1的12组最小径集

$P_1 = \{X_3, X_4, X_6, X_7\}; P_2 = \{X_3, X_4, X_7, X_8\}; P_3 = \{X_3, X_4, X_7, X_9\}; P_4 = \{X_3, X_4, X_7, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}\};$
 $P_5 = \{X_3, X_4, X_7, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{17}, X_{18}\}; P_6 = \{X_3, X_5, X_6, X_7\}; P_7 = \{X_1, X_2, X_4, X_6, X_7\}; P_8 = \{X_1, X_2, X_4,$
 $X_7, X_8\}; P_9 = \{X_1, X_2, X_4, X_7, X_9\}; P_{10} = \{X_1, X_2, X_4, X_7, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}\}; P_{11} = \{X_1, X_2, X_4, X_7, X_{12}, X_{13},$
 $X_{14}, X_{15}, X_{17}, X_{18}\}; P_{12} = \{X_1, X_2, X_5, X_6, X_7\}。$

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12组。

2.3.3 结构重要度分析

因为 X_1, X_2 同属于 $P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}; X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}$ 同属于 $P_4, P_5, P_{10}, P_{11}; X_{17}, X_{18}$ 同属于 $P_5, P_{11}。$

所以, $I_{\Phi(1)} = I_{\Phi(2)}$; $I_{\Phi(12)} = I_{\Phi(13)} = I_{\Phi(14)} = I_{\Phi(15)}$; $I_{\Phi(17)} = I_{\Phi(18)}$ 。因此只要判断 $I_{\Phi(1)}$ 、 $I_{\Phi(3)}$ 、 $I_{\Phi(4)}$ 、 $I_{\Phi(5)}$ 、 $I_{\Phi(6)}$ 、 $I_{\Phi(7)}$ 、 $I_{\Phi(8)}$ 、 $I_{\Phi(9)}$ 、 $I_{\Phi(12)}$ 、 $I_{\Phi(16)}$ 、 $I_{\Phi(17)}$ 的大小即可。

根据下式计算结构重要度^[8]

$$I_{\Phi(i)} = \sum_{X_i \in P_j} \frac{1}{2^{n_j-1}}$$

式中 $I_{\Phi(i)}$ 为第 i 个基本事件的结构重要度系数; X_i 为第 i 个事件; P_j 为第 j 个径集; n_j-1 为第 i 个基本事件所在 P_j 中各基本事件总数减去 1。

可以得出 $I_{\Phi(1)} = 0.255859375$; $I_{\Phi(3)} = 0.51171875$;
 $I_{\Phi(4)} = 0.580078125$; $I_{\Phi(5)} = 0.1875$; $I_{\Phi(6)} = 0.375$;
 $I_{\Phi(7)} = 0.767578125$; $I_{\Phi(8)} = 0.1875$; $I_{\Phi(9)} = 0.1875$;
 $I_{\Phi(12)} = 0.017578125$; $I_{\Phi(16)} = 0.01171875$;
 $I_{\Phi(17)} = 0.005859375$ 。

所以, 结构重要度大小的排列顺序为

$I_{\Phi(7)} > I_{\Phi(4)} > I_{\Phi(3)} > I_{\Phi(6)} > I_{\Phi(1)} = I_{\Phi(2)} > I_{\Phi(5)} = I_{\Phi(8)} = I_{\Phi(9)}$
 $> I_{\Phi(12)} = I_{\Phi(13)} = I_{\Phi(14)} = I_{\Phi(15)} > I_{\Phi(16)} > I_{\Phi(17)} = I_{\Phi(18)}$

3 汛期尾矿坝管理模型

汛期尾矿坝溃坝事故树最小割集有 11 组, 相比其他工程事故, 这个数量较少, 由此可见, 汛期尾矿坝溃坝事故易于分析。这棵事故树最小径集有 12 组, 从 12 组最小径集看, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_6 的基本事件最少, 所以选择这 4 组之一作为控制汛期尾矿坝溃坝的途径是比较合理的。这 4 组最小径集共设计到 7 个基本事件, 分别是滑坡量大(X_3)、超出正常设计的降雨(X_4)、未能及时预报降雨(X_5)、未采取有效的排洪措施(X_6)、发生大于设计地震烈度的地震(X_7)、排洪设施设计不当(X_8)及排洪设施已损坏(X_9)。从结构重要度分析结果看, P_1 中的基本事件是所有基本事件中结构重要度最大的 4 个, 所以, 选择 P_1 (即滑坡量大 X_3 、超出正常设计的降雨 X_4 、未采取有效的排洪措施 X_6 和大于设计烈度的地震 X_7) 进行控制是正确的。即只要使 $P_1 = \{X_3, X_4, X_6, X_7\}$ 中的 4 个事件都不发生, 就可以确保尾矿坝不在汛期溃坝。

在 P_1 中, X_4 、 X_7 属于自然灾害, 除了在设计时应尽可能考虑这些因素外, 更重要的是对其进行科学预报。目前, 对降雨能够做到较精确的预报; 但对地震, 目前的技术尚难做到, 不过它可以视为小概率事件。 X_3 可以通过汛前尾矿坝周围危岩体治理解决。因此, $P_1 = \{X_3, X_4, X_6, X_7\}$ 可以简化为 $P_1 = \{X_6\}$, 这是一单事件的最小径集, 是最适合于进行控制的。未采取有效的排洪措施(X_6)可以通过科学的汛期管理——采取有效排洪措施来解决。

要采取有效的排洪措施, 首先要对尾矿库的排洪能力、排洪形势有比较科学的分析——这种分析是建立在正确的计算和实际调查上, 然后才能进行^[7]。目前比较有效的排洪措施有: (1) 修复或增设排洪设施; (2) 汛前降低库水位; (3) 其他应急措施。图 3 为汛期尾矿坝管理模型。

4 结 语

从结构重要度分析结果看, 给汛期尾矿坝稳定带来较大影响的几个事件依次是: 大于设计地震烈度的地震、超出正常设计的降雨、规模较大的岩体滑坡及未采取有效的排洪措施。综合其他分析, 可以得到: 为确保汛期尾矿

图 2 图 1 的成功树图

Fig 2 Successful tree of Fig 1

图 3 汛期尾矿坝管理模型

Fig 3 Management model of tailings dam during flood season

坝稳定, 汛前危岩体治理、准确气象预报是重要的; 同时更重要的是及排洪状况的了解, 通过对降雨量与排洪能力之间关系的计算分析, 科学地决策汛前的排洪措施。这应是尾矿坝防洪渡汛的重中之重, 也是本文的核心思想。

目前, 我国不少大中型尾矿坝在汛前管理上未能抓住这个中心点。虽然投入大量人力、物力、财力, 但往往每年都忙于抢险, 有时还不免发生事故, 这种教训是深刻的。汛期尾矿坝溃坝是一个危险性较大的系统, 为了便于分析, 本文作了适当简化, 但并不影响本文的结论。

References

- 1 The Tailings Reservoir Generality of Non-ferrous Metal of China Compiler Group. The Tailings Reservoir Generality of Non-ferrous Metal of China[M] (in Chinese). 1992
- 2 Peng Chengying. The accident and prevention measures of tailings reservoir[J]. Non-ferrous Metal (in Chinese), 1996, 5: 38~40
- 3 Li Junchun. Analysis for causes of the dam failure of Gouhou reservoir[J]. Journal of Geotechnical Engineering (in Chinese), 1994, 16(6): 1~14
- 4 Li Qijiang. Discussing the content and method of risk evaluation of dam break of reservoir engineering[J]. The Design of Hydroelectric Plant (in Chinese), 2000, 16(3): 108~112
- 5 Chen Qingsheng and Sun Jianhua. Calculation of tailings flow due to dam break[J]. Journal of Hehai University (in Chinese), 1995, 23(5): 99~105
- 6 Wang Yongxing. Study on the flood resulting from the landslide dam break[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control (in Chinese), 1995, 6(1): 15~23
- 7 Wang Bingrong and Qiu Jiakui. Investigation on the measures for flood prevention in flood season of Xishimen Iron Mine's tailings reservoir[J]. Metal Mine (in Chinese), 1995, 3: 43~47
- 8 Shen Feimin. The Fundament and Practice of Safe System Engineering[M]. Beijing: Coal Industry Press (in Chinese), 1991

FAULT TREE ANALYSIS OF TAILINGS DAM BREAK DURING FLOOD SEASON

LIXi-bing, JIANG Weidong & ZHAO Fu-jun

(College of Resources, Environment and Civil Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China)

Abstract: Based on several typical examples of tailings dam break during flood season, the relevant basic events of tailings dam break, such as seismic intensity beyond the designing value and ineffective discharging flood measures, are summed up. Accordingly, the accident of tailings dam break during flood season is studied by applying fault tree analysis that includes minimum cut sets, minimum path sets and structure importance. The results show a minimum path sets which consists of a big landslide, rainfall beyond normal design, ineffective discharging flood measures and seismic intensity beyond the designing value. These factors can be selected to act as approaches to control tailings dam break during flood season. The controlling emphasis, which is on the basis of the scientific understanding of the ability and the position of discharging flood of tailings reservoir, is ineffective discharging flood measures that can be realized by renovating or adding discharging flood establishment and taking from the water level of the tailings reservoir before flood season, etc. It is concluded that putting the emphasis on taking effective discharging flood measures is the key to flood prevention in flood season. And it has an important significance to guide flood prevention in flood season.

Key words: tailings dam; dam break; fault tree; flood prevention in flood season

CLC number: TD7; X928 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2001)05-0045-04

(Journal of Safety and Environment 2001, Vol 1, No 5)