

尾矿库溃坝砂流在下游的演进运动规律

魏勇^{1,2}, 李梦¹

1. 西南科技大学环境与资源学院, 绵阳 621010

2. 西南科技大学固体废物处理与资源化省部共建教育部重点实验室, 绵阳 621010

摘要 尾矿库溃坝灾害会造成尾矿大量泄漏, 溃坝砂流会淹没农田、污染环境、危害生命财产安全。为研究溃坝砂流演进运动及规律, 基于尾矿库溃坝砂流的流变特性, 构建了尾矿坝溃坝砂流在下游演进运动的数学模型; 采用4次抛物线概化尾矿库溃坝下泄砂流流量过程线, 该方法确定了泄砂总量、溃坝口平均宽度、坝址最大砂流量、坝址流量过程线等溃坝的重要参数; 以某失事尾矿库为例, 利用该数学模型, 从平面堆积范围、堆积纵剖面、堆积横剖面3个方面揭示了溃坝砂流在下游演进运动规律。

关键词 尾矿库; 溃坝; 演进运动规律; 数学模型

中图分类号 X928.03

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.21.010

Tailing Flow Due to Tailing Reservoir Dam-break in Downstream

WEI Yong^{1,2}, LI Meng¹

1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education; Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract The tailing reservoir disaster not only causes a serious leakage, but also the related tailing flow can submerge the farmland, pollute the environment and endanger people's lives and property in the downstream. Therefore, the detailed study of the dam-break flow is important in the design and siting of tailing reservoirs, the disaster prevention and mitigation and the daily safe operation. In this paper, a mathematical model is proposed to describe the routing of the tailing flow in the downstream after tailing dam break based on the rheological properties of the tailing flow. The fourth order parabola is used for the discharged tailing flow process curve of the tailing reservoir dam-break, by which important parameters of the tailing dam break are determined such as the gross leakage of the tailing, the average width of the dam break, the maximum tailing flow at the tailing dam, the flow graph of tailings at the dam. Finally, with a tailing reservoir failure as an example, the mathematical model is used to study the dam-break tailing flow routing and the flow in the downstream in the context of the following three aspects: the plane area of the deposition, the longitudinal profile of the deposition and the cross section of the deposition.

Keywords tailing reservoir; dam-break; routing motion law; mathematical model

尾矿库溃坝事故不仅破坏下游地区的生态环境, 而且可能造成巨大的人员伤亡和财产损失。中国自20世纪50年代以来发生的较严重的尾矿库灾害事故有10余例, 造成重大人员伤亡、财产损失和环境污染。2008年9月8日发生的山西省襄汾县尾矿库事故泄容量为 $2.68 \times 10^5 \text{ m}^3$, 波及下游500 m范围内的矿区办公楼、集贸市场和部分民宅^[1]。2010年9月

21日, 广东省信宜市银岩锡矿高旗岭尾矿库发生溃坝事件, 受溃坝影响, 下游流域范围内交通、水利等公共基础设施以及农田、农作物等严重损毁。因此, 研究尾矿坝溃坝砂流演进规律可为尾矿坝溃坝事故早期预警、下游人员安全疏散提供重要决策依据, 对尾矿库防灾减灾和保护库区下游人民的生命财产安全具有非常重要的意义。

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004014); 西南科技大学博士基金项目(11ZX7116)

作者简介: 魏勇, 博士研究生, 研究方向为尾矿库溃坝致灾机理, 电子信箱: weiyong19800909@sina.com

引用格式: 魏勇, 李梦. 尾矿库溃坝砂流在下游的演进运动规律 [J]. 科技导报, 2014, 32(21): 62-65.

目前,尾矿库溃坝砂流流动及规律研究国外比较少见,Blight^[2]研究了南非5座环形尾矿坝的溃坝情况,得出尾砂流的运移距离和地表的干湿状态有关,尾砂流在湿的地表比在干的地表上运移的距离要长。Paster等^[3]利用弹塑性有限元、质量守恒和动量守恒方程建立了适合滑坡、泥石流以及尾矿坝、煤矿尾矿演进坝等溃坝模型,用于计流体在流动时随时间演进的深度。在国内,对尾矿溃坝砂流研究甚少。其中,汪德耀等^[4]将含水砂体流动假定为流体与散粒体之间的一种特殊运动形式,用类似于流体流动的连续方程和动量方程描述,采用特征线方法求解,为尾矿库溃坝砂流的预测提供了一条新的途径;陈青生等^[5]就溃坝砂流对下游影响提出了一种预测方法,所用控制方程考虑了尾矿砂的物理力学性质及其在流动中的变形,数值计算采用标记网格(mark and cell, MAC)法的交错网格。本文主要是基于尾矿库溃坝砂流的流变特性的分析研究,根据质量守恒和动量守恒原理构建溃坝砂流演进运动的数学模型,揭示溃坝砂流在下游的演进运动规律。

1 数学模型

1.1 基本假定

尾矿库溃坝后尾矿砂下泄引起的砂流本质上属于散状土体流动。散状土体流动可以假定为介于流体和散粒体之间的一种特殊的运动形式,其运动类似于流体流动,故溃坝砂流运动可以用类似于流体流动的方程描述^[6-8]。

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程

根据上述假定,由质量守恒原理和动量守恒原理推导建立二维尾矿砂流演进总的控制方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = gh \sin \theta_x - \frac{\tau_{lx}}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h + gh^2/2)}{\partial y} = gh \sin \theta_y - \frac{\tau_{ly}}{\rho_m} \quad (3)$$

式中, u 和 v 为 x 和 y 方向的砂流平均流速, h 为砂流堆积厚度, t 为时间, θ_x 和 θ_y 为 x 和 y 方向的渠床坡角, τ_{lx} 和 τ_{ly} 为尾矿砂流 x 和 y 方向的底床剪切应力, ρ_m 为尾矿砂流混合体的平均密度, $\rho_m = c(\rho_s - \rho_f) + \rho_f$,其中, ρ_s 为颗粒密度, ρ_f 为尾矿砂流浆体密度, c 为体积浓度。

关于 τ_{lx} 、 τ_{ly} 的选取,采用曼宁阻力公式。作用于单元体的剪切阻力是由原始下垫面边界的剪切力形成,可用曼宁公式表征单元体剪切阻力为

$$\tau_b = \rho g S_f \quad (4)$$

式中, ρ 为流体密度, S_f 为摩擦阻坡降。

S_f 可由二维曼宁公式求得

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (5)$$

1.2.2 定解条件

初始条件:为简化计算,在坝下游计算区域内预设一层薄尾矿砂,其值同总量相比是一个小量,可以略去,这样,初始流速分量 u 和 v 均取为零。

边界条件:尾矿库溃坝处的边界取开边界,此处以下泄砂流流量过程线为边界条件;对于闭边界,法向流速为0^[6,7,9]。

2 溃坝砂流流量过程线

2.1 泄砂总量

泄砂总量计算可按尾矿砂的物理力学性质,利用边坡稳定分析的方法进行估算。由于尾矿坝溃决时往往伴随着暴雨,库区尾矿砂呈饱和状态,为安全起见,往往考虑最不利的情况,即下泄砂流总量为某一高程以上的全部库容^[5,10-12]。

2.2 溃口宽度

根据文献[10]~[12],对于因暴雨洪水使水库超过设计标准而坍塌、滑坡等原因造成的溃坝口门尺寸,根据近50个库容在5.3万~55000万 m^3 、水头在46 m范围内的水库溃坝资料,统计得出溃口宽度计算公式为

$$b = K(W^{1/2} B^{1/2} H)^{1/2} \quad (6)$$

式中, b 为溃口平均宽度,m; W 为溃坝时的可泄库容, $10^4 m^3$; B 为溃坝时坝前水面宽度或坝顶长度,m; H 为溃坝时水头,m; K 为与坝体土质有关的系数,黏土类 $K=0.65$,壤土类 $K=1.3$ 。

2.3 最大下泄砂流流量

计算最大流量的方法很多,如波额流量法、圣维南法、堰流与负波交汇法及经验公式法。对于尾矿坝溃坝,考虑到溃坝时库内水位一般较高,且尾矿砂处于液态,为计算简单安全,建议采用圣维南公式计算最大下泄砂流流量的极限值。

$$Q_M = \frac{8}{27} \left(\frac{B}{b}\right)^{2/5} b \sqrt{g} H_0^{3/2} \quad (7)$$

式中, Q_M 为坝址最大下泄砂流流量, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H_0 为坝前水深(包括行进流速水头),m。

2.4 下泄砂流流量过程线

坝址流量过程线,一般是瞬时从零增至最大,随之很快下降,其线形可概化为4次抛物线,也可概化为2.5次抛物线。工程上多采用4次抛物线概化流量过程线,故本文采用4次抛物线概化尾矿坝溃坝下泄砂流过程线,概化尾矿坝溃坝下泄砂流过程线的4次抛物线如表1所示^[5,10-12]。

表1 下泄砂流流量概化过程

Table 1 Generalized process of discharged tailing flow

| t/T | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
|---------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Q/Q_M | 1.0 | 0.62 | 0.48 | 0.34 | 0.26 | 0.207 | 0.168 | 0.130 | 0.094 | 0.061 | 0.030 | Q_0/Q_M |

注: T 为尾矿库泄空时间, t 为任意时刻, Q_M 为坝址最大流量, Q 为相应于 t 时的溃坝砂流流量, Q_0 为溃坝前下泄流量。

3 模型验证

以文献[5]中的某尾矿库为例,该库于1986年4月30日凌晨在尾矿坝中段发生溃决。坝顶决口宽度为245 m,库内水及尾矿总量为 $8.45 \times 10^5 \text{ m}^3$,绝大部分倾斜下游,据现场调查,溃决剧滑下泄过程历时几分钟。

验证资料的取值为:密度 ρ 为 1.6 t/m^3 ,糙率系数 n 为0.06,下游堆积区坡度为零。根据现场调查,溃坝下泄砂流总量为84万 m^3 ,由式(6)和式(7)计算可得,下泄历时155 s,最大流量为23204 m^3/s 。由于金山尾矿库建在山谷中,取计算区域的上下游断面为开边界,两岸为闭边界,坝体按全溃考虑。

图1给出了各典型时刻尾矿砂流覆盖范围,其中虚线是溃坝后现场观测得到的尾矿砂流覆盖区域,将其与计算所得的 $t=260 \text{ s}$ 的最终覆盖区域对比,两者是吻合的。

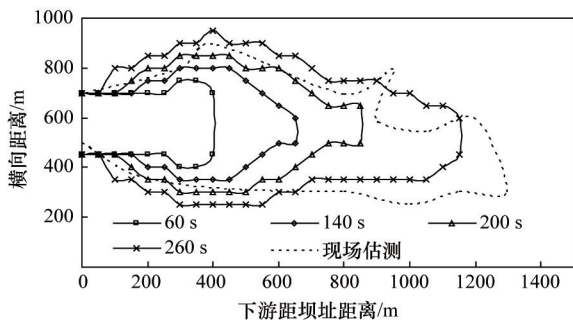


图1 各典型时刻尾矿砂流覆盖范围

Fig. 1 Coverage area of tailing flow at different typical times

溃坝尾矿砂下泄波的传播过程如图2所示,溃坝尾矿砂下泄在坝下游逐渐形成一个“涌波”并向下游传播。图中与 $t=260 \text{ s}$ 相应的是流砂停止运动的后覆盖层的纵剖面,近坝址处尾矿砂的最终覆盖厚度约为1.7 m,距坝址900 m的下游最终覆盖厚度约0.5 m,计算结果与现场观测结果比较吻合。计算及实测得出的覆盖范围和厚度显示,所建控制方程是合理的。

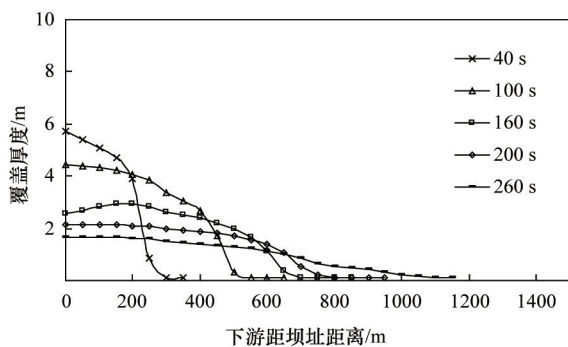


图2 溃坝砂流下泄波的传播过程

Fig. 2 Propagation process of tailing wave caused by dam-break

4 应用实例

北京首云铁矿和尚峪尾矿库位于选矿厂北1 km处山谷中,总库容 $1.35 \times 10^7 \text{ m}^3$,汇水面积 0.47 km^2 ,初期坝分东、西两座,均为透水堆石坝,设计服务年限为20年。

和尚峪尾矿库目前尾矿坝坝顶高达212 m,总库容接近 $1.1 \times 10^7 \text{ m}^3$,东坝与西坝已经连为一体,筑坝总长度约900 m。研究假设邻近村庄、铁路、公路一侧的东坝发生溃坝,取下泄库容为 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$,东坝长度为450 m。

4.1 平面堆积范围

不同时刻尾矿砂流形成的堆积扇如图3所示。由图3可知,无论是在尾矿泄空时间($t=138 \text{ s}$)之前还是之后,尾矿砂流堆积扇在初期扇面发展较快,到一定程度后扇面增加变缓。在泄空时间之前,可以解释为上游边界下泄流量逐渐减少;在泄空时间之后,上游边界无流量,也可认为是等流量(即上游边界流量为零),这是随着堆积扇面积的不断扩大,运动的尾矿砂流不足以扩散到扇的四周的缘故。

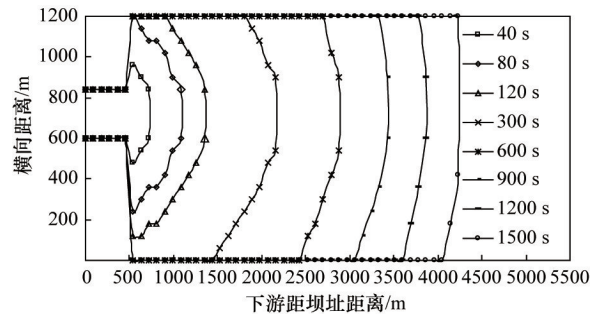


图3 尾矿砂流堆积过程

Fig. 3 Deposition process of tailing flow

4.2 堆积纵剖面

在横向距离720 m处,不同时刻尾矿砂流堆积扇的纵剖面分层结构如图4所示,初始为原始地面。由图4可知,溃坝形成的砂流在坝下形成一个“涌波”,并逐渐向下游传播。尾矿砂流堆积扇的长度和厚度在初期变化大,到一定程度后变化较小,最后趋于稳定。从堆积坡度看,黏性尾矿砂流形成的堆积纵坡大于原始地面的坡度,这是由尾矿砂流体内部液相浆体的黏性以及固体颗粒的摩擦阻力所致;从堆积剖面的形态看,堆积纵剖面均为简单的“直线形”,只是扇边缘与地面交汇处的坡度增大。

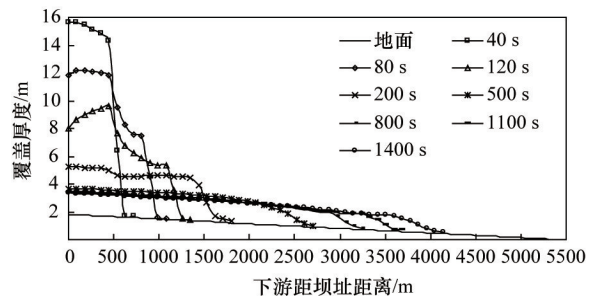


图4 尾矿砂流堆积纵剖面

Fig. 4 Longitudinal profile of tailing flow deposition

4.3 堆积横剖面

图5为溃口下游900 m处不同时刻尾矿砂流堆积扇的横剖面分层结构。由图5可知,溃坝形成的砂流在坝下形成一个“涌波”,并逐渐向下游传播,在大约100 s时到达900 m处,使得900 m处横断面堆积厚度达到最大,之后由于“涌波”的离开,堆积厚度减小,且减小程度逐渐变缓。堆积扇横剖面中部呈弧形隆起,堆积厚度最大,向两侧倾斜,厚度逐渐变薄。从堆积坡形看,横向堆积剖面一般为凸形、凹形或二者结合的复合坡,且扇边缘与地面交汇处的坡角要更大一些。

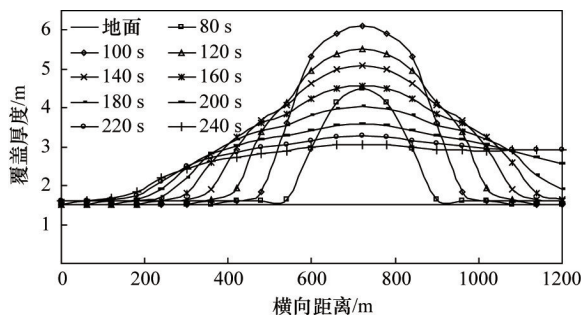


图5 尾矿砂流堆积横剖面

Fig. 5 Cross section of tailing flow deposition

5 结论

1) 用建立的尾矿库溃坝砂流运动控制方程对某失事尾矿坝进行计算模拟,结果表明,计算结果与实际砂流的覆盖范围与厚度是吻合的,证明所建立的控制方程是正确的。

2) 应用所构建的尾矿砂流运动控制方程模拟了和尚峪尾矿库东坝发生溃坝后溃坝砂流在下游的演进运动,从平面堆积范围、堆积纵剖面和堆积横剖面3个方面揭示了尾矿坝溃坝砂流在下游的演进运动规律。

3) 由于尾矿坝溃坝时,尾砂下泄是一个时间非常短的过程,若在溃坝发生时才进行疏散下游人群的工作是完全来不及的,因此,根据预测的溃坝后尾矿的影响范围,进行必要的安全预防措施十分重要。

参考文献 (References)

[1] 门永生, 柴建设. 我国尾矿库安全状况及事故防止措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(1): 48-52.

Men Yongsheng, Chai Jianshe. The current safety situation of tailing reservoir in China and preventive measures[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(1): 48-52.

[2] Blight G E. Destructive mudflows as a consequence of tailings dyke failures[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 1997, 125(1): 9-18.

[3] Pastor M, Quecedo M, Merodo J A F, et al. Modelling tailings dams and mine waste dumps failures[J]. Geotechnique, 2005, 52(8): 579-591.

[4] 中国力学学会办公室, 全国计算流体力学会议组委会编. 计算流体力学的理论、方法和应用[C]//第六届全国计算流体力学会议论文集. 北京: 科学出版社, 1992: 335-338.

Chinese Office of Mechanics Society, the National Computational Fluid Dynamics Conference Organizing Committee. Theory, method and application of computational fluid dynamics[C]//Proceedings of Six National Computational Fluid Dynamics Conference. Beijing: Science Press, 1992: 335-338.

[5] 陈青生, 孙建华. 矿山尾矿库溃坝砂流的计算模拟[J]. 河海大学学报, 1995, 23(5): 99-105.

Chen Qingsheng, Sun Jianhua. Calculation of tailings flow due to dam break[J]. Journal of Hohai University, 1995, 23(5): 99-105.

[6] Yanenko N N. Methode apas fractionnaires[M]. Paris: Armand Colin, 1968, 63-77.

[7] Marchuk G I. Methods of numerical mathematics[M]. Berlin: Springer, 1975: 146-174.

[8] 罗元华. 泥石流堆积数值模拟及泥石流灾害风险评估方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 1998.

Luo Yuanhua. Methodological research on numerical simulation and disaster risk assessment of debris flow deposition fan[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1998.

[9] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into bayesian networks[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 71(3): 249-260.

[10] Brown I, Hung T K. Computational and experimental investigations of two dimensional nonlinear peristaltic flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 33: 249-272.

[11] 袁兵, 王跃飞, 金永健, 等. 尾矿坝溃坝模型研究及应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(4): 169-172.

Yuan Bing, Wang Yuefei, Jin Yongjian, et al. Study on the model for tailing dam breaking and its application[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008, 18(4): 169-172.

[12] Brown C A, Graham W J. Assessing the threat to life from dam failure [J]. Water Resources Bulletin, 1988, 24(6): 72-77.

(责任编辑 王媛媛)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。