

基于流固耦合作用的某尾矿坝渗流稳定性分析

李冰冰^{1,2}, 贺勇^{1,2}, 张可能^{1,2}, 刘强³, 吴开兴³

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 3. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西赣州 341000)

摘要:尾矿坝是矿山重要设施之一,其内部含有大量的水和尾矿,一旦失稳造成的损失不可估量。尾矿坝失稳有众多因素影响,但是坝内浸润线是最活跃的影响因素。本文基于流固耦合理论,建立某尾矿坝有限元计算模型,考虑坝内排水井的存在。模拟坝内不同工况下浸润线分布,对其静力稳定性及流固耦合作用下尾矿坝应力应变场进行分析,并将浸润线模拟位置与实际监测结果进行对比。揭示库内不同工况下浸润线变化规律以及与坝体稳定性之间的关系,并分析评价不同工况下尾矿坝的稳定性。最后,将渗流场与应力场进行流固耦合,模拟出 365 d 坝内应力位移分布,为尾矿坝施工及安全运行提供可靠的依据及技术支持。

关键词:尾矿坝;渗流;流固耦合;稳定性;数值模拟

中图分类号:TD926.4;TV649 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0104-05

Analysis of Seepage Stability of a Tailings Dam Based on Fluid-solid Coupling Effect/LI Bing-bing^{1,2}, HE Yong^{1,2}, ZHANG Ke-neng^{1,2}, LIU Qiang³, WU Kai-xing³ (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: The tailings dam is one of the important mining facilities, and it will cause incalculable losses in case of loss of instability since it contains huge volumes of water and tailings inside. Based on the fluid-solid coupling theory, a finite element calculation model for tailings dams is established while taking into account of the drainage wells in the dam. The distribution of the saturation lines is simulated under different working conditions in the dam. The stress and strain fields of the tailings dam are analyzed under the static stability and fluid-solid coupling. Moreover, the simulated position of the saturation line is compared with the monitoring results. The relationship between the changing rules of the saturation lines the dam stability is also illustrated with the stability of the tailings dam assessed under different working conditions. Finally, fluid-solid coupling of the seepage field and the stress field is carried out to simulate the stress displacement distribution within the dam for 365 days, which provides a reliable basis and technical support for the construction and safety operation of the tailings dam.

Key words: tailings dam; seepage; fluid-solid coupling; stability; numerical simulation

0 引言

尾矿库是矿山重要组成部分之一,其方便快捷存储尾矿渣及空间有效利用等优势,使其在矿山设施中地位突出。然而,尾矿库内部储存大量水及尾矿,含有较大的水动能及重力势能,一旦发生事故,不仅造成财产损失及人员伤亡,对环境的污染更是毁灭性的^[1]。例如,1972年美国布法罗尼河矿尾矿坝溃坝,造成125人死亡,4000人无家可归^[2];1998

年圭亚那与西班牙都发生重大尾矿库溃坝事故,污染了饮用水,直接导致近1000名圭亚那人死亡^[3-4];2008年山西临汾尾矿库发生溃坝事故,造成254人死亡、4人失踪、34人受伤。

据美国公害调查小组表明,尾矿库失稳造成的事故在全球危害中名列第18位^[5]。目前我国尾矿坝数量1.2万多座,其中3000多座为病库、危库^[6]。尾矿库事故基本是由尾矿坝失稳而造成的,而造成

收稿日期:2018-08-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目“红黏土-膨润土工程屏障对重金属污染物的阻滞特性与自修复机制”(编号:41807253)

作者简介:李冰冰,男,汉族,1997年生,硕士研究生在读,主要从事环境工程地质及非饱和土力学研究,122692720@qq.com。

通信作者:贺勇,男,1987年生,副教授,博士,地质工程专业,主要从事环境地质和非饱和土力学方面研究工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号中南大学校本部地学楼132室,heyong18@csu.edu.cn。

尾矿坝失稳的影响因素非常多。而在众多影响因素中,浸润线是尾矿坝失稳最重要的影响因素^[7]。如果能准确预测浸润线变化规律,并及时了解由浸润线变化引起的其他变化,将能对尾矿库安全运行提供重要技术保障。不少学者对此方面有过研究,如齐清兰等^[8]采用有限元分析方法,研究了各种因素对尾矿坝浸润线的影响,对保障各大小尾矿坝的运行提供技术依据。宁民霞等^[9]利用 ANSYS 软件在尾矿坝浸润线中的应用,解决坝体内部复杂的渗流问题,得到不同标高时浸润线的位置,确定容易发生管涌导致倒塌的地方。李强、赵延林、陈庆中等^[10-12]均分析了渗流场与应力场耦合,得到更为符合实际情况的渗流运动规律,揭示了基于流固耦合作用下的尾矿库失稳形态及稳定性。但是对于相对动态变化的环境中,还需模拟出不同工况下尾矿坝的运行情况,保证尾矿坝能在最恶劣的工况下稳定运营。

本文以某尾矿库工程为例,基于 Geo-studio 软件建立本构模型,并考虑坝内排水井的存在,根据不同工况条件下,得出尾矿库内浸润线分布情况。分析浸润线位置与截面渗流量、坝体安全系数、应力场、坝体位移等变化的影响研究,为尾矿库的安全运营提供科学、合理的建议。

1 工程概况

本文以全南县大吉山钨矿 2 号尾矿坝为工程实例,其位于赣粤两省交界之九连山脉中部,行政区划属江西省赣州市全南县,与广东接壤,中心地理位置(图 1)东经 $114^{\circ}31'30''$,北纬 $24^{\circ}34'40''$ 。库区地形地貌以山地为主,平均海拔约 360 m。地势西南高、东北低,中部隆起。库区东面多见滑坡危险面,北面为环山水库,西面环山,南面为农田种植地。矿区属于中亚热带季风气候,雨量充沛,但降水的时空分布不均匀,容易发生干旱和涝灾。年平均降水量 1653.5 mm。矿区为中、低山地貌,地势总体南东高、北西低,最高点为南东角的大吉山峰,海拔标高 1043.10 m。本区位于南岭东西向构造带中段中部,一组十分发育的北东向断裂带斜贯全区。矿区出露地层较单一,主要为寒武系浅变质岩,次为泥盆系中、下统桂头群下亚群的碎屑岩及第四系残坡积物组成。



图 1 大吉山钨矿地理位置图

大吉山 2 号尾矿库位于选矿厂北面 1.5 km 的山谷中,为东南向延伸的山谷型尾矿库。尾矿坝采用上游法堆坝,该法工艺简单,管理方便,运行和维护费用低,浸润线高。该坝总高 53 m,总库容 858 万 m^3 ,根据《尾矿设施技术规范》(GB 50863—2013)和《尾矿库安全技术规程》(AQ 2006—2005)规定(见表 1),该尾矿库为四等尾矿库。

表 1 尾矿库设计级别和关键参数

级 别	库容 V / (万 m^3)	坝高 H / m	防洪标 准/年	最小干滩 长度/m	最小安全 超高/m
一	二等库具备提 高等级条件者		5000	150	1.5
二	$V \geq 10000$	$H \geq 100$	1000	100	1.0
三	$1000 \leq V < 10000$	$60 \leq H < 100$	500	70	0.7
四	$100 \leq V < 1000$	$30 \leq H < 60$	200	50	0.5
五	$V < 100$	$H < 30$	100	40	0.4

2 计算模型及参数

2.1 计算原理

实际工程中大多数渗流问题都可以近似平面问题,尾矿坝的渗流问题也常按二维渗流问题进行分析。根据达西(Darcy)定律,二维渗流表达式为^[13]:

$$v = Q/A = KJ \quad (1)$$

式中: v ——截面流速; Q ——渗流量; A ——截面面积; K ——渗透系数; J ——水力坡度。Richard 于 1931 年在达西定律的基础上,得出了非饱和渗流的基本微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

式中: h ——总水头; k_x 、 k_z ——分别为 x 、 z 轴上的水力传导率; Q ——流量边界; θ ——单位体积含水量; t ——时间。

有限元法主要技术路线是将微分方程所研究的连续空间划分为有限离散的部分单元。每个离散单元内部所有的变量都用结点变量来表示,相邻单元之间的共同结点与结点变量相关联^[14]。结点变量是要计算的量,通过正确的理论数值求解方法,将描述为无穷多个自由度场的偏微分方程转化为节点处有限自由度的代数方程(组)。本文将渗流场划分为有限个单元,定义初始条件和边界条件,通过有限元软件迭代出各单元及结点有限元方程及其解。

2.2 模型及参数

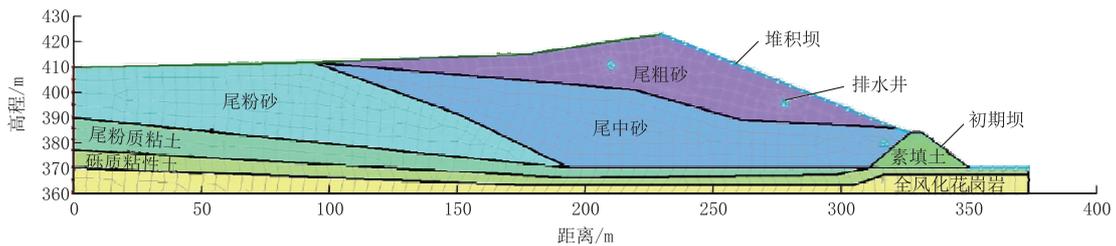


图2 地质结构及网格

表2 尾矿坝各岩土层渗流及静力学参数取值^[15]

编号	岩土名称	干密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	摩擦角/ ($^\circ$)	弹性模量/ MPa	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
① ₂	尾粗砂	19.5	1.0	29.0	12.0	8.2×10^{-5}
① ₃	尾中砂	19.5	4.0	26.0	18.0	2.5×10^{-5}
① ₄	尾粉砂	19.5	10.0	23.0	3.7	3.8×10^{-5}
① ₆	尾粉土	16.4	22.0	11.0	10.0	3.1×10^{-6}
① ₇	素填土	19.3	52.5	38.0	120.0	2.1×10^{-6}
②	砾质粘性土	19.5	41.9	18.9	10.0	4.2×10^{-7}
③	全风化花岗岩	19.8	18.8	33.0	120.0	2.3×10^{-8}

计算模型以全南县大吉山钨矿2号尾矿库为实例,选取尾矿库中心最大截面为计算模型。选取剖面底部高程为360 m,最高处高程为422 m,选取截面总长为360 m。坝基由砾质粘性土和全风化花岗岩组成,初期坝为素填土组成,堆积坝成分由上向下为尾粗砂、尾中砂、尾粉砂组成。堆积坝上有4个内径为2 m的排水井,现将整个区域划分为803个节点和745个单元,尾矿库计算模型及网格划分如图2所示。坝内各岩土层参数如表2所示。

标高及分别对应不同的干滩长度,来模拟其坝内浸润线分布情况,并与15 d实时监测的坝内浸润线位置进行对比。15 d内尾矿坝运行情况与正常水位①工况一致,具体工况情况见表3。

表3 不同工况具体情况

工况类型	水位标高	干滩长度	安全超高
正常水位①	410	230	13
正常水位②	412	136	11
洪水水位①	415	53	8
洪水水位②	418	34	5

3 渗流及稳定性分析

3.1 渗流分析

为了研究不同水位和不同干滩长度条件下对坝内浸润线位置的影响,本文选取了4组不同的水位

利用Geo-studio软件,通过赋予不同的边界条件,来模拟不同工况条件下尾矿坝渗流情况,不同工况下尾矿坝浸润线分布如图3所示。

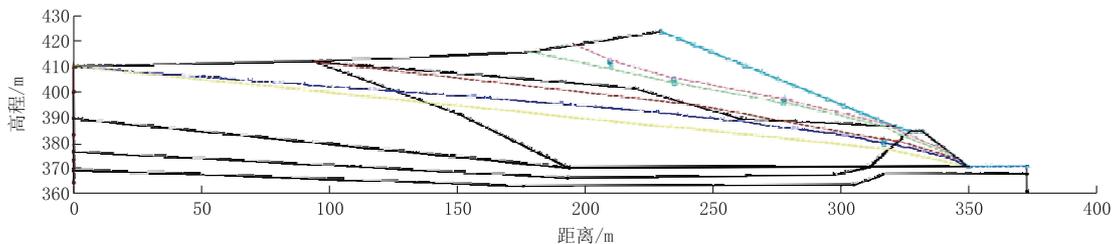


图3 不同工况下与实际浸润线分布图

由上往下依次为洪水水位②、洪水水位①、正常水位②、正常水位①和15 d实测浸润线位置。由图3可以看出,随着水位的增高,干滩长度的缩短,浸润线

位置不断抬高,由正常水位至洪水阶段抬高最为明显。软件模拟的15 d实测浸润线位置与实际情况接近,且模拟结果略高于实际浸润位置,说明模拟拟结

果更加保守、安全。

为观测不同工况条件下,各截面下渗流量情况,选取了“坝顶中、坝中中、初期坝顶中”3 处竖向垂直截面,分别模拟不同工况下渗流量,模拟结果如图 4 所示。

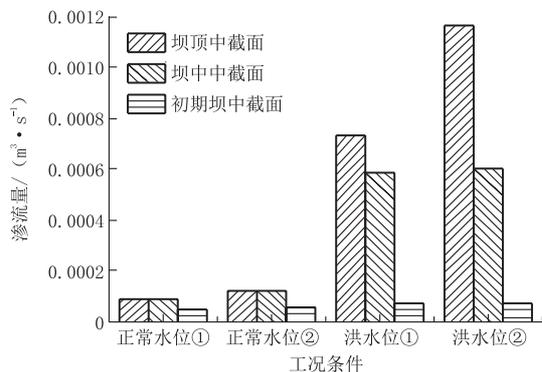


图 4 各工况下各截面渗流量

随着水位的抬升坝内渗流水流量明显升高。并且可以发现当水位到达洪水水位时,坝顶中截面渗流量最高可达 $1.16 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 。当水位不断的增高,排水井能有效分担初期坝截面中渗流量,导致初期坝内渗流量较低。

3.2 静力稳定性分析

尾矿坝的稳定性分析对其正常运行及生产管理中起到重要的作用,这项工作属于事前预测及防范工作。我国安全生产监督管理总局^[16]对尾矿坝坝稳定性规范做过详细的规定,可见这项工作的重要性及规范性^[17]。尾矿坝稳定性分析采用的方法与边坡稳定性分析方法类似,不过坝内水的渗流对尾矿坝的稳定性影响非常大。基于前文不同工况下浸润线分布,利用 SLOPE/W 模块采用不同的极限平衡方法计算尾矿坝的安全系数,计算结果如图 5 所示。

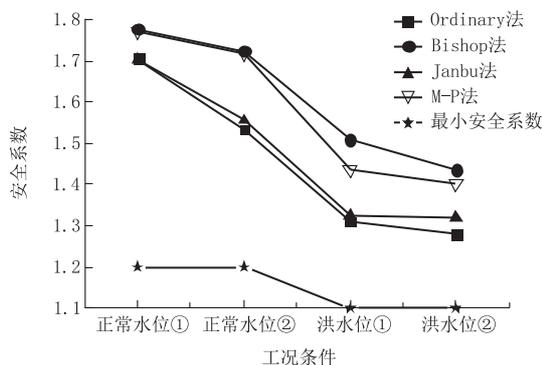


图 5 各工况下安全系数

由图 5 计算结果汇总可知,随着水位不断增高及干滩长度的不断缩短,尾矿坝坝坡安全系数均呈下降趋势,并且在正常水位到洪水水位之间变化尤为明显。4 种极限平衡算法中,毕肖普法(Bishop)计算结果最高,瑞典条分法(Ordinary)最低。但是从数据来看,尾矿坝安全系数总体较高,各工况下均比规定最小安全系数高了 0.2~0.6。

3.3 流固耦合下应变分析

在岩土介质中,渗流场与应力场共同存在,二者相互联系、影响共同作用^[18]。尾矿坝中应力场主要决定竖向位移,渗流场主要决定横向位移,在两者共同作用下往往更能精确的反映尾矿坝的 X-Y 方向的应变。如果能用软件较准确地模拟出位移应变的大小及方向,做出预防措施,对矿山的稳定能提供较好的技术支持。

本文采用 SIGMA/W 模块模拟尾矿坝一年的应力应变云图。随着时间的推移,得出在渗流场与应力场的共同作用下,尾矿坝 X-Y 方向上的位移变化量及尾矿坝屈服状态下的形状。图 6、图 7 分别为 365 d X-Y 方向变化云图和尾矿坝屈服状态的形变图。

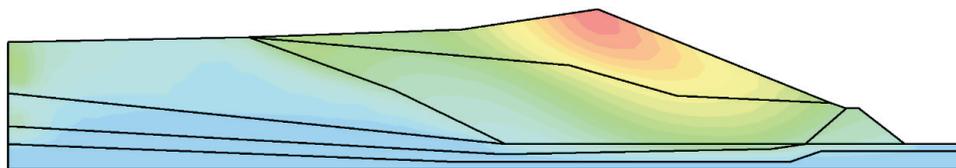


图 6 坝内 365 d X-Y 方向上位移变化云图

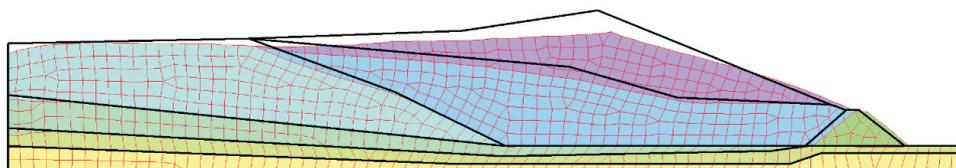


图 7 尾矿坝屈服状态下形变图

由图6、图7模拟结果可知,位移变化主要发生在子坝坡面处,由坝顶内部向母坝方向推移下滑。通过屈服状态下形变图可知,应对尾矿坝形变严重位置及时进行防护及加固措施。

4 结论

本文通过基于流固耦合理论,采用Geo-studio有限元软件对大吉山2号尾矿坝进行分析,得到如下几点结论。

(1)模拟浸润线位置与实际监测浸润线位置相差不大,模拟结果比实测略高,软件模拟结果准确性较高且较保守、安全。

(2)随着水位的不断升高,干滩长度的缩短,浸润线明显抬高,可见浸润线高度的变化与水位变化成正相关,与干滩长度成负相关。

(3)随着水位的增加,库内各截面水流量明显增加,当水位到达415~418 m时,排水井起到较好的排水作用,能有效降低坝内浸润线位置。

(4)随着水位升高,浸润线抬升,尾矿坝的安全系数逐渐降低。尾矿坝各工况下安全系数均满足规定最小安全系数,目前大吉山2号尾矿坝稳定性较高。

参考文献:

- [1] 束永保,李仲学.尾矿库溃坝灾害事故树分析[J].黄金,2010,31(6):54-56.
- [2] kiss-off D, Dubbin W E, Alredsson M, et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation[J]. Applied Geochemistry, 2014,51:229-245.

- [3] J McDermott R K, Sibley J M. The Aznalcollar tailings dam accident—A case study[J]. Mineral Resources Engineering, 2000,9(1):101-118.
- [4] Kemper T, Sommer S. Estimate of heavy metal contamination in soils after raming accident using reflectance spectroscopy [J]. Environmental Science Technology, 2002,36(12):2742-2747.
- [5] 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.
- [6] 全国尾矿库综合治理行动2013年工作总结和2014年重点工作安排[EB/OL].[2014-07-07]. www.Chinasafe-ty.Gov.cn.
- [7] 胡明鉴,郭爱国,陈守义.某上游法尾矿坝抗滑稳定性分析的几点思考[J].岩土力学,2004,25(5):769-773.
- [8] 齐清兰,张力霆,谷芳,等.影响尾矿库渗流场的因素及降低浸润线的措施[J].金属矿山,2009(12):35-37,102.
- [9] 丁民霞,王振伟,殷新宇.水对尾矿坝的稳定性影响研究[J].矿业快报,2000,(5):43-44.
- [10] 李强,张力霆,齐清兰.基于流固耦合的尾矿库三维失稳形态及稳定性分析[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(3):558-567.
- [11] 赵延林,曹平,赵阳升,等.双重介质温度场-渗流场-应力场耦合模型及三维数值研究[J].岩石力学与工程学报,2007,(S2):4024-4031.
- [12] 陈庆中,张弥,冯星梅.应力场、渗流场、流场耦合系统问题[J].工程力学,2000,(6):53-58.
- [13] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [14] 冷纪桐,赵军,张娅.有限元技术基础[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [15] 核工业赣州工程勘察院.大吉山钨矿2号尾矿库隐患综合治理工程地质勘察报告[R].2010.
- [16] AQ 2006-2005,尾矿库安全技术规程[S].
- [17] 金永健.尾矿坝二维固结渗流模型研究及坝体稳定性分析[D].湖南长沙:中南大学,2009.
- [18] 李雪梅.基于流固耦合作用的尾矿坝稳定性研究[D].云南昆明:昆明理工大学,2017.