

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221577

基于 PFC3D 的灰岭尾矿库溃坝三维数值模拟研究

朱远乐^{1,2,3}, 赵新勇⁴, 王淇萱^{1,2,3}, 刘 婷^{1,2,3}

(1. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012; 2. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南长沙 410012; 3. 湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 湖南长沙 410012; 4. 广西华锡矿业有限公司铜坑矿业分公司, 广西南丹 547204)

摘要: 为了研究广西灰岭尾矿库溃坝后对下游区域的影响, 借助 GOCAD 与 Rhino 软件建立符合实际地形的尾矿库区域三维模型, 并利用 PFC3D 三维离散元模拟软件对灰岭尾矿库运行至最终堆积标高+490 m 时的状态进行溃坝模拟, 分析了尾矿下泄可能淹没的范围、尾矿泥石流影响的区域。结果表明, 溃坝后尾矿泥石流演进速度能在较短时间内急速增加到最大值, 之后逐渐消减, 距坝址越远, 尾矿泥石流演进速度消减越快; 溃坝演进时间为 1 100 s 时, 尾矿最远演进距离为尾矿坝脚 1 215 m 处, 下泄体最大宽度约 853 m、最大深度约 30 m, 途中淹没多处敏感点, 该研究为尾矿库失事的早期预警、人员疏散和抗洪救灾等提供了决策信息。

关键词: 尾矿库; 溃坝; 数值模拟; PFC3D; 离散元方法

中图分类号: TV649; TD926

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0094-04

1 工程概况

灰岭尾矿库为典型的“头顶库”, 初期坝原设计坝型为透水堆石坝, 施工时为了减少石方量及加快施工进度, 将初期坝上游部分改为干砌石坝, 上游坡比为 1 : 0.5, 下游为堆石体, 坡比为 1 : 1.6, 中间设天然材料反滤层, 坝底标高 387 m, 坝顶标高 411 m, 坝高 24 m, 顶宽 6 m, 坝轴线长 83 m; 尾矿库采取上游式尾矿筑坝。目前堆积坝顶标高约+486.0 m, 滩顶标高+483.2 m, 堆积坝高 72.2 m, 坝体外坡比为 1 : 6.29。当尾矿堆积至最终设计标高+490.0 m 时, 坝高 103.0 m, 总库容约 $3\ 886.75 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为二等库。灰岭尾矿库主坝下游敏感点情况见图 1。溃坝是尾矿库发生的最严重事故, 尤其是头顶库尾矿库溃坝后下泄的尾矿泥石流会淹没下游一定区域内的居民、建筑物, 造成巨大生命与财产的损失^[1,2]。因此, 对尾矿库进行溃坝模拟研究具有重要的现实意义。毛翼飞等^[3]以湖北省某尾矿库为例, 采用 DAMBRK 模型与 MIKE21 水动力模型相结合的分段模型法, 建立尾矿库溃坝数值分析模型, 模拟下泄砂流演进过程, 重点分析了下泄砂流的淹没

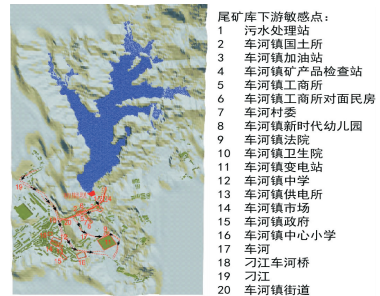


图 1 尾矿库下游 1 km 范围内敏感点具体位置

Fig. 1 Specific location of sensitive points within 1 km downstream of tailings pond

范围、淹没深度及关键位置的流量; 陈俊等^[4]基于水流 N-S 方程和 RNG $\kappa-\epsilon$ 紊流模型建立了三维水动力溃坝模型, 并利用该模型模拟了九江市城门山铜矿拟建尾矿库溃坝情况, 通过设置相应的监测点, 从流速场、水深和尾砂淤积三个方面分析了溃坝水砂对下游村庄的影响; 吕松峰等^[5]利用颗粒流离散元法和 MatDEM 软件建立完整的尾矿库三维实际地形, 并对尾矿库溃坝及尾砂下泄演进过程进行模拟, 研究尾砂浆的锋面速度、分布形状、淹没范围等规律。鉴此, 本文针对灰岭尾矿库工程, 借助 GOCAD 和 Rhino 软件建立符合实际地形的尾矿库区域三维模型, 并利用 PFC3D

收稿日期: 2022-08-01, 修回日期: 2022-09-09

基金项目: 金属矿山安全技术国家重点实验室开放基金(CKY/YJ202101); 湖南省应急管理厅科技专项(2020YJ002)

作者简介: 朱远乐(1987-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为尾矿库安全技术的设计、评价、论证等, E-mail: 717732515@qq.com

三维离散元模拟软件对灰岭尾矿库运行至最终堆积标高+490 m 时的状态进行溃坝模拟分析,旨在为尾矿库失事的早期预警、人员疏散和抗洪救灾等提供决策信息。

2 颗粒离散元方法

离散单元法 (DEM) 是颗粒流计算方法的基础, PFC 颗粒流离散元软件以刚性球体为计算基本单元, 符合尾矿渣的力学特性, 所以用 PFC 软件模拟滑坡和尾矿库溃坝能很好地展现颗粒从坡上滑落的全过程^[6]。

接触模型是 PFC 计算理论的核心, 其中 PFC5.0 中的抗滚动接触模型具有以下优点: ①采用圆形颗粒, 且避免对不规则颗粒间接触反复判断, 可提高计算效率; ②引入具有明确物理意义的形状参数 δ , 表示颗粒间的接触情况; ③引入滚动阻力力矩并与滚动刚度联系。另外, 由于尾砂颗粒具有离散特性及不规则特性, 考虑颗粒间存在的相互作用(咬合、摩擦等)对颗粒滚动产生的阻碍。因此, 溃坝颗粒离散元模拟的接触模型考虑选用抗滚动接触模型。

抗滚动接触模型的接触力 F_c 和力矩 M^c 通过力-位移定律更新:

$$F_c = F^l + F^d \quad (1)$$

$$M^c = M^r \quad (2)$$

式中, F^l 为线性力; F^d 为阻尼力; M^r 为滚动阻力矩。

线性力和阻尼力的更新与线性模型相同, 而滚动阻力矩则通过以下步骤进行更新。首先, 滚动阻力力矩增加为:

$$M^r = M^r - k_r \Delta\theta_b \quad (3)$$

式中, k_r 为颗粒转动刚度, 与切向接触刚度 k_s 相关; $\Delta\theta_b$ 为相对弯曲旋转增量。

另外, 滚动阻力矩没有扭曲分量, 可以在接触平面坐标系中表示为:

$$M^r = M_{bs}^r \hat{s}_c + M_{bt}^r \hat{t}_c \quad (4)$$

滚动阻力刚度定义为:

$$k_r = k_s \bar{R}^2 \quad (5)$$

式中, \bar{R} 为接触有效半径, 定义为:

$$1/\bar{R} = 1/R^{(1)} + 1/R^{(2)} \quad (6)$$

式中, $R^{(1)}$ 、 $R^{(2)}$ 分别为触点的端部(1)和端部(2)的半径(用于球面触点)。

根据阈值极限检查更新的滚动阻力力矩 M^r :

$$M^r = \begin{cases} M^r & \|M^r\| \leq M^* \\ M^* (M^r / \|M^r\|) & \|M^r\| > M^* \end{cases} \quad (7)$$

极限转矩 M^* 定义为:

$$M^* = \mu_r \bar{R} F_n^l \quad (8)$$

式中, μ_r 为滚动摩擦因数; F_n^l 为颗粒间的法向接触力。

滚动滑移状态 s_r 更新为:

$$s_r = \begin{cases} \text{true} & \|M^r\| = M^* \\ \text{false} & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

3 溃坝数值模拟

3.1 溃决工况

为分析溃坝对下游环境的影响, 需假设在某“特殊工况”下尾矿库发生溃坝灾害。假定“特殊工况”为尾矿库堆积至最终设计标高+490.0 m 时, 洪水漫顶导致初期坝顶(+411.0 m 标高)以上堆积坝发生瞬时溃决, 并针对这一“特殊工况”进行数值模拟计算。

3.2 尾矿参数

在 PFC 中需设置颗粒与接触的细观参数来表征岩土体材料的宏观参数, 对于灰岭尾矿库, 尾矿的力学参数可通过工程资料获得, 而抗滚动接触模型中的滚动摩擦系数需要设计数值模拟试验来获取。数值模拟试验为休止角试验, 采用的接触模型与尾矿库数值模型相同, 为抗滚动接触模型。在圆柱形容器中生成球体, 并在重力作用下稳定, 随后匀速提升填充球的容器形成颗粒堆积体, 使堆积体达到所要求的休止角, 试验模型见图 2。在已知杨氏模量、刚度、颗粒密度、孔隙率等条件下, 改变滚动摩擦系数进行试算, 直到休止角接近尾矿的最小休止角 18° , 试验采用参数见表 1。试验表明当滚动摩擦系数为 0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.55 时休止角分别为 18.04° 、 18.42° 、 18.93° 、 19.41° 、 19.72° 、 20.58° 、 20.88° 。

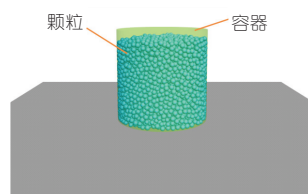


图 2 数值模拟试验模型

Fig. 2 Model of numerical simulation experiment

表 1 数值模拟实验参数

Tab. 1 Parameters of numerical simulation experiment

参数	数值	参数	数值
容器半径/m	2×10^{-2}	颗粒的压缩模量/MPa	8×10^6
容器高/m	4×10^{-2}	刚度比	2.0
颗粒的平均半径/m	1×10^{-3}	法向临界阻尼比	0.2
半径偏移	0.2	切向临界阻尼比	0.2
颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.44×10^3	摩擦系数	0.27
颗粒的初始孔隙率	0.40	滚动摩擦系数	0.25

表明随着滚动摩擦系数增加,休止角增加。其中滚动摩擦系数为 0.25 时,休止角为 18.04°,最接近尾矿的最小休止角,所以滚动摩擦系数取值为 0.25。

表 2 为数值计算采用的物理力学参数,结合工程实际及参数标定试验,基于宏细观参数之间的关系,对细观参数进行取值。其中摩擦系数考虑洪水的原因取修正后的摩擦系数 0.1。

表 2 尾矿物理力学微观参数

Tab. 2 Tailings physical and mechanical micro-parameters

参数	数值	参数	数值
球半径比 R_{max}/R_{min}	1.5	滚动摩擦系数	0.25
球-球弹性模量 E_c/MPa	10	刚度比 k	2
球-墙弹性模量 E_w/MPa	10	孔隙率 n	0.3
球-球摩擦系数 f_c	0.1	阻尼 D	0.5
球-墙摩擦系数 f_w	0.1		

3.3 计算模型

自初期坝坝址向下游延伸约 1.5 km,东西延伸 1.0 km 作为陆地边界,整体模型长约 3.6 km,宽约 2.1 km。根据灰岭尾矿库影响区 1:1 000 地形图,利用 GOCAD 软件对尾矿库地形进行建模。网格按照三角形划分,共划分为 32 768 个单元。再将 GOCAD 网格模型导出成 DXF 格式文件并导入 PFC3D 软件中用墙(wall)生成网格作为地形。并填充球颗粒作为尾矿,颗粒数量为 50 165 个,见图 3。

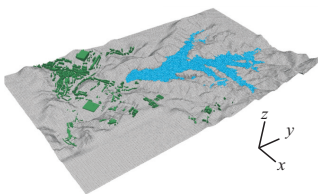


图 3 PFC3D 软件中生成的尾矿库三维计算模型(+490 m 标高)

Fig. 3 3D calculation model of tailings pond generated in PFC3D software (+490 m)

3.4 +490 m 堆积标高时初期坝顶以上坝体溃决计算结果

溃坝属于瞬时行为,溃坝后尾矿泥石流演进速度能在较短时间内急速增加到最大值,之后逐渐消减,距坝址越远,尾矿泥石流演进速度消减越快。本次分析 1 100 s 内灰岭尾矿库+490 m 堆积高度时初期坝顶以上坝体溃决范围情况,通过数值模拟得出尾矿库下游尾矿流速和位移随溃坝时间的分布,库区下游敏感点计算结果见表 3。结果表明,0 s 时,初期坝顶以上坝体发生溃决,库区尾矿泥石流开始向下游宣泄,同时下泄速度逐渐增大;溃坝至 40 s 时,根据最大速度模拟监测数据,此时下泄速度达到峰值 15.1 m/s,最大速度位于尾矿最前端,尾矿最大演进距离达到 291 m,

表 3 尾矿库溃坝风险受体参数计算结果

Tab. 3 Parameters calculation result of tailings dam failure risk receptor

下游敏感点	距离尾矿库坝脚距离/m	地面标高及最高建筑高度/m	最初到达时间/s	最大流速	最大淹没深度/m
污水处理站	159.4	389.86/8.5	30	15.1	30
车河(距坝脚最近距离)	163.5	390.00	30	15.1	30
车河镇街道(距坝脚最近距离)	167.4	389.79	30	15.1	30
车河镇国土所	178.6	390.45/12.5	90	10.4	25
车河镇加油站	188.3	390.11/9.5	30	15.1	30
车河镇矿产品检查站	200.2	392.57/8	30	15.1	30
车河镇工商所	255.0	389.56/17	90	10.4	20
车河镇工商所对面民房	250.44	390.03/17	90	10.4	20
车河村委	318.8	387.85/10	195	8.6	15
车河镇新时代幼儿园	351.4	386.56/8	198	8.6	15
车河镇法院	545.9	382.89/8.2	300	2.8	10
车河镇卫生院	577.5	392.18/27.24	—	—	—
车河镇变电站	585.3	380.82/8	300	2.8	10
车河镇中学	652.2	404.0/10.58	—	—	—
车河镇供电所	725.5	390.44/27	—	—	—
车河镇市场	743.6	391.37/9.67	—	—	—
车河镇政府	803.4	388.50/20.30	—	—	—
车河镇中心小学	833.8	383.77/11.30	696	0.7	5
刁江	430.7	385.10	—	—	—
刁江车河桥	430.7	391.37	—	—	—

注:最大流速单位为 m/s;“—”表示未到达。

此后下泄速度逐渐减小;溃坝 200 s 时,尾矿泥石流淹没至车河村委及新时代幼儿园,最大速度为 8.6 m/s,最大演进距离为 661 m;溃坝 300 s 时,尾矿泥石流淹没至车河镇法院、车河镇变电站,最大速度为 2.8 m/s,最大演进距离为 720 m;溃坝 700 s 时,尾矿泥石流淹没至车河镇中心小学,最大速度为 0.7 m/s,最大演进距离为 1 136 m;溃坝 1 100 s 时,尾矿泥石流未到达刁江,临近初期坝脚最近的刁江车河桥的泥石流基本停止流动;尾矿泥石流未到达车河镇政府(距车河镇政府约 87 m),临近车河镇政府的泥石流基本停止流动;尾矿泥石流向初期坝下游主沟最大演进距离为 1 472 m。

根据+490 m 堆积标高时初期坝顶以上溃决尾矿位移,车河镇卫生院、车河镇中学、车河镇供电所、车河镇市场、车河镇政府、刁江车河桥及刁江均在尾矿库下游 1 km 范围内,但不在淹没范围内。

3.5 溃决影响分析

根据溃坝计算结果可知,在+490 m 堆积标高初期坝顶以上坝体溃决时,尾矿会运移到下游敏感点,影响下游居民及建筑物的安全。因此,分析尾矿库溃坝影响范围,评估周边环境各风险受体情况,结果见图 4、5。由图 4、5 可知:①+490 m 堆积标高初期坝顶以上坝体溃决时,大量尾矿泥石流不断向下游滑移,溃坝演进时间为 1 100 s 时,尾矿泥石流最远演进距离为尾矿坝脚 1 215 m(垂直距离)处,下泄体最大宽度约 853 m(水平距离)、最大深度约 30 m(位于初期坝脚附近),随着下泄距离增大,深度差逐渐趋于平缓,途中淹没

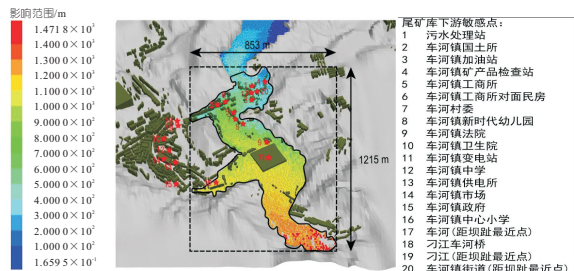


图 4 +490 m 堆积标高时初期坝顶以上溃决影响范围图

Fig. 4 Map of the influence range of the initial dam crest above the collapse at +490 m stacking elevation

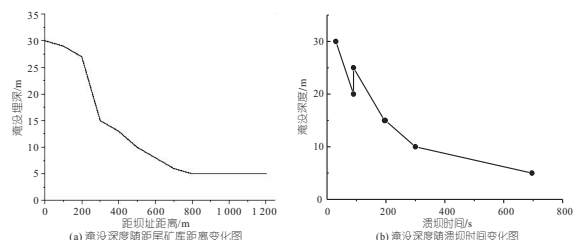


图 5 淹没深度随距尾矿库距离和溃坝时间变化图

Fig. 5 Variation of submerged depth with distance from tailings pond and dam break time

多处敏感点;②受到尾矿泥石流影响的敏感点有污水处理站、车河镇街道、车河、国土所、加油站、产品检验站、工商所、工商所对面民房、村委、新时代幼儿园、法院、变电站和中心小学,上述淹没范围建议作为企业重点监控对象;③溃坝 1 100 s 时,尾矿泥石流未到达刁江(距初期坝脚最近的刁江车河桥约 10 m),临近初期坝脚最近的刁江车河桥的泥石流基本停止流动;尾矿泥石流未到达车河镇政府(距车河镇政府约 87 m),临近车河镇政府的泥石流基本停止流动;尾矿泥石流向初期坝下游主沟最大演进距离为 1 472 m,此时到达模拟边界,数值模拟计算受限,但泥石流整体最大

Research on Three-dimensional Numerical Simulation of Dam Break of Huiling Tailings Pond Based on PFC3D

ZHU Yuan-le^{1,2,3}, ZHAO Xin-yong⁴, WANG Qi-xuan^{1,2,3}, LIU Ting^{1,2,3}

(1. Changsha Mining Research Institute Co., Ltd., Changsha 410012, China; 2. State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha 410012, China; 3. Hunan Engineering and Technology Research Center for Mine Geological Disaster Prevention and Environmental Reconstruction, Changsha 410012, China; 4. Tongkeng Mining Branch, Guangxi Huaxi Mining Co., Ltd., Nandan 547204, China)

Abstract: In order to study the impact of the dam break of the Huiling tailings pond in Guangxi on the downstream region, a three-dimensional model of the tailings pond region conforming to the actual terrain was established with the help of GOCAD and Rhino software. In addition, PFC3D discrete element simulation software was used to simulate the state of dam break when the tailings pond runs to the final accumulation elevation +490 m, and the possible submerged range of tailings discharge and the area affected by tailings debris flow were analyzed. The results show that the evolution rate of tailings debris flow increases rapidly to the maximum value in a short time after dam break, and then decreases gradually. The farther away from the dam site, the faster the reduction of tailings debris flow evolution rate is. When the evolution time of dam break is 1 100 s, the furthest evolution distance of tailings is 1 215 m at the foot of tailings dam, the maximum width of the drainage body is 853 m, and the maximum depth is about 30 m. In the process, many sensitive points are submerged. The research provides decision-making information for early warning, personnel evacuation and flood relief of tailings pond accident.

Key words: tailings pond; dam break; numerical simulation; PFC3D; discrete element method

速度仍有 0.8 m/s,临近模拟边界的最大流速有 0.2 m/s,尾矿库泥石流会进一步向下游演进,扩大淹没范围,但因流速较小,淹没范围有限;④车河镇卫生院、中学、供电所、市场、政府、刁江车河桥及刁江(距坝趾最近点)不在淹没范围内,但考虑到该区域人员密集且区域内人员存在向淹没范围流动的风险,建议将上述敏感点也纳入监控范围。

4 结论

a. 溃坝属于瞬时行为,溃坝后尾矿泥石流演进速度能在较短时间内急速增加到最大值,之后逐渐消减,距坝趾越远,尾矿泥石流演进速度消减越快。

b. 溃坝模拟分析给出了溃坝泥石流到达下游重点建筑物的时间,可为尾矿库制定应急救援预案和应急响应提供技术依据。

参考文献:

- [1] 朱远乐,刘婷,王淇萱,等.某铁矿尾矿库溃坝砂流演进过程数值模拟研究[J].现代矿业,2022,38(4):167-171.
- [2] 刘婷,廖文景,朱远乐.尾矿库溃坝模拟范围及应急预案研究[J].采矿技术,2022,22(1):119-123.
- [3] 毛翼飞,徐力群,史亚旋,等.基于分段模型法的尾矿库溃坝影响预测分析[J].水电能源科学,2019,37(11):100-103,14.
- [4] 陈俊,姜清辉,姚池,等.尾矿库溃坝数值模拟研究[J].水电能源科学,2017,35(10):90-94.
- [5] 吕松峰,张慧颖,王新华,等.基于 MatDEM 的三维实际地形尾矿库溃坝数值模拟[J].铀矿冶,2022,41(2):155-163.
- [6] 王涛,韩彦辉,朱永生,等.PFC2D/3D 颗粒离散元计算方法及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.