

文章编号:1673-0062(2013)04-0023-05

某尾矿坝稳定性的 FLAC 模拟分析

李亚俊, 张志军*, 刘玄钊, 韩艳杰, 常 健

(南华大学 核资源工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:采用 FLAC 软件对湖南某尾矿坝的稳定性进行了数值模拟分析, 绘制出该尾矿坝的位移分布云图, 应力分布云图及剪应变分布云图, 这些模拟分析结果可为综合分析该尾矿坝的稳定性提供参考, 对于确保该尾矿库长期安全运行具有重要的现实意义. 分析结果还显示该尾矿坝的安全系数为 1.25, 在正常状况下尚能安全运行, 但考虑该尾矿库所处地区气候湿润多雨仍存在安全隐患, 为此文章根据分析结果提出了安全保障建议.

关键词:尾矿坝; FLAC; 数值模拟; 稳定性

中图分类号:TD854 **文献标识码:**B

The Simulation and Stability Analysis on a Certain Tailings Dam by FLAC Software

LI Ya-jun, ZHANG Zhi-jun*, LIU Xuan-zhao, HAN Yan-jie, CHANG Jian

(School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The numerical model of a certain tailings dam in Hunan was simulated and its stability was analyzed by FLAC, and the displacement contours, stress contours and shear strain contours of the tailings dam were drawn. These simulation results have a long-term important practical significance and provide a reference for the comprehensive stability analysis of the tailings dam. The analysis result shows that the safety factor of the tailings dam is about 1.25 and it is safe in normal condition. However, the dam break may happen when storm comes in this area. So, according to the analysis result, the suggestion of safety measures for the tailings dam is given.

key words: tailings dam; FLAC; numerical simulation; stability

收稿日期: 2013-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51004067); 教育部重点科研基金资助项目(211126); 环保部科研基金资助项目(监管 1209& 调查 1204); 高校博士学科点专项科研基金资助项目(20104324120001); 湖南省教育厅科研基金(10B091&11C1102); 南华大学“铀矿山岩土工程灾害预测与控制”校级创新团队计划项目联合资助

作者简介: 李亚俊(1991-), 男, 河南驻马店人, 南华大学核资源工程学院硕士研究生. 主要研究方向: 矿山岩土工程灾害预测与控制. * 通讯作者.

0 引言

矿产资源在开采同时产生了大量的废气物,以尾矿废气物为例,我国每年生产尾矿废弃物约 5×10^8 t,这些尾矿除小部分作为矿山充填或综合利用外,绝大部分要堆存于尾矿库,截至2012年底,全国现有尾矿库12273座,且尾矿库的重大事故时有发生,仅2005年到2011年全国尾矿库共发生事故或环境安全事件70起,死亡和失踪353人,尾矿坝的存在对下游居民的生命财产造成严重威胁,尾矿坝一旦出现事故不仅会给企业带来了不可估量的损失,同时还将在社会上造成极坏的影响。

为减少尾矿坝跨坝事故的发生,降低因可能发生的跨坝事故对企业财产造成损失及减少对下游居民安全产生威胁,很多学者针对尾矿坝的稳定性进行了研究.如尾矿砂的液化问题^[1],尾矿坝内渗流场^[2],确定尾矿坝内浸润线的方法^[3],尾矿坝事故调研分析^[4];有限元法尾矿坝的稳定性分析^[5],尾矿坝台阶数量对其安全性的影响^[6]等诸多方面研究.这些研究对丰富尾矿坝稳定性分析理论减少尾矿坝跨坝事故发生都具有重要意义,但不同尾矿坝因选址、结构、浸润线位置、堆坝高度不尽相同,需要有针对性的进行稳定性分析。

本文针对湖南某尾矿库运用FLAC软件进行数值模拟分析并对其稳定性进行了评估,期望能对该尾矿库的安全运行做出指导。

1 工程概况

该库初期坝坝顶标高103.0 m,坝高20.8 m,坝顶宽4.0 m,坝内坡1:2.0,外坡1:1.75,坝型为堆石坝,后期堆积坝为上游式尾矿堆坝,堆积坝顶标高约145.63 m,滩顶标高约145.5 m,堆积坝高42.63 m,总坝高63.43 m.库尾水面标高约139.02 m,沉积滩长约370.0 m,沉积滩坡度约为1.75%;平均堆积边坡约1:4.7.堆积坝坡采用山皮土护坡,表面植物(草)较好.坝肩排水沟除标高110~113 m之间东侧的小部分损毁变形外,其余的排水沟均较好。

各级马道的排水沟现状良好.设计总库容 $526 \times 10^4 \text{ m}^3$ (但是实际征地标高却为145 m,相应库容 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$) 目前该库坝顶标高约145.63 m.根据该企业工勘资料,该库的尾砂从上至下为人工填土(坝坡覆土保护层)、尾粉砂、尾粉土、尾粉质粘土、粉质粘土、强风化砂岩、中风化砂岩等,中间或夹尾粉土、尾粉质粘土,企业工勘测试提供的各土层物理力学指标见表1(本例计算所需)。

表1 尾矿坝各层物理力学指标

Table 1 The physical and mechanical parameters of this tailings dam

	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/($^\circ$)	粘聚力/kPa	剪切模量 G/MPa	体积模量 K/MPa
尾细砂	1 710	35	5	24	83
饱和尾细砂	2 070	30	3	24	83
饱和尾粉土	2 050	18	12	20	92
饱和尾粉质粘土	2 040	13	16	18	83
初期坝	2 100	35	0	346	750
坝基	2 300	30	50	1 200	2 000

2 尾矿坝稳定性的FLAC模拟计算与分析

2.1 模型建立

根据现场勘探得到的剖面图,对其进行简化处理抽象出几何模型,利用FLAC建立模型并生成网格,模型长350 m,高70 m,将模型划分为26 675个单元,27 156个节点,见图1,在建立的模型中,根据实际坝体的实际情况对网格进行分层分区划分,其坝堆内各层材料变化示意如图2。

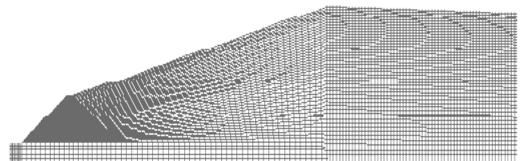


图1 尾矿坝模型网格划分

Fig. 1 The FLAC grid model of this tailing dam

然后给模型施加左右边界水平方向的约束,下边界水平和垂直方向的约束,之后是生成初始应力场,在模拟初始自重应力发展时,采用弹性求

解命令以减少塑性屈服变形值. 对模型求解后将速度场和位移场清零, 赋予材料摩尔库仑模型, 再在尾矿坝中加入浸润线并生成孔隙水压力, 然后对各层岩土赋予材料物理力学特性数值.

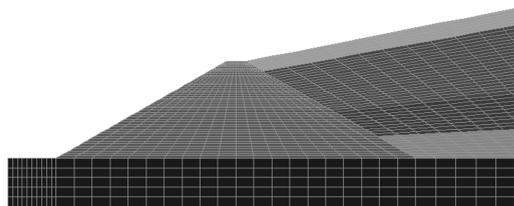


图 2 尾矿坝内各层材料变化示意图
Fig. 2 The material property changes of this tailing dam

FLAC 将固体分为由四边形单元组成的有限差分网格, 在网格内部, 它又将每个单元细分成两组相互覆盖的常应变三角形单元, 共 4 个三角形

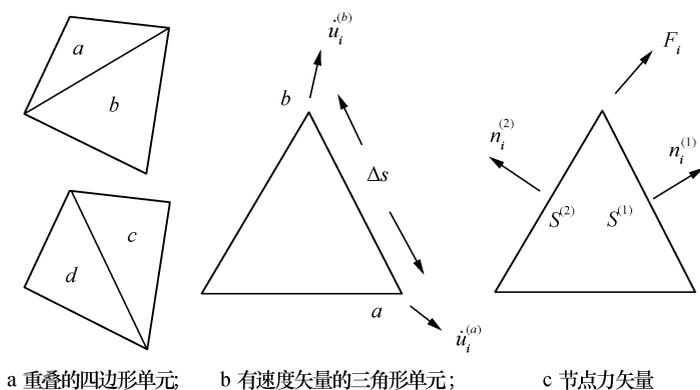


图 3 网格内部计算示意图

Fig. 3 The inside mesh calculation of flac

用每一边速度矢量均值 \dot{u}_i 代替式(4)中的 f , \dot{u}_i 取各条边两端点的结点 a 和 b 的速度平均值, 则

$$\left\langle \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle = \frac{1}{2A} \sum_N [(\dot{u}_{ia} + \dot{u}_{ib}) n_j \Delta s] \approx \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

同理可求出 $\left\langle \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_j} \right\rangle$ 的值. 由几何方程就可以求出其应变率

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

由材料的本构方程和相应的边界条件, 就可以求得应力增量. 对各向同性的材料, 有

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda \delta_{ij} \theta + 3\mu \dot{\epsilon}_{ij} \quad (7)$$

子单元 a 、 b 、 c 、 d , 如图 3 每个三角形单元的偏应力分量相互独立, 共有 16 个应力分量. 每个节点的外力为两个重叠的四边形的两组外力矢量的平均值. 由高斯散度定理有

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{A} \sum_s \langle f \rangle n_i \Delta s \quad (1)$$

定义梯度 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 的平均值为

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{A} \int_A \frac{\partial f}{\partial x_i} dA \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{A} \int_s n_i f ds \quad (3)$$

对一个三角形子单元

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{A} \sum \langle f \rangle n_i \Delta s \quad (4)$$

式中 n_i 为曲面的单位法向量; f 为标量、向量或张量; s 为增量弧长; $\langle \rangle$ 表示求平均值.

式中, λ, μ 为拉梅常数; θ 为体积应变, 当 $i=j$ 时 δ_{ij} 为 1, 否则为 0.

这样通过上述各式的迭代求解, 就可以得出每一迭代时步对应的单元的应力应变值.

2.2 模拟计算与分析

应用 flac 软件对上述尾矿坝模型进行计算. 其水平位移云图及垂直位移云图见图 4, 从图中可看出尾矿坝中部的水平位移最大, 且水平位移以中部为中心水呈环形向四周逐渐减小, 其中的最大水平位移在 8 cm 以上, 靠近尾矿堆积坝的干滩处垂直位移最大, 沿着垂直和坡面方向垂直位移逐渐减小, 最大垂直位移在 12.5 cm 以上.

为了解尾矿坝内的应力分布状况, 更好的分析尾矿库安全状况, 利用 flac 强大的后处理功能

进一步绘制出该尾矿坝的应力云图如图 5。从图中可看出,初期坝右边坝脚处的应力最大,尾矿坝的其他部分基本是随着深度增加,应力增大,且在接近初期坝处的尾矿堆积坝应力呈现出明显的增大趋势。

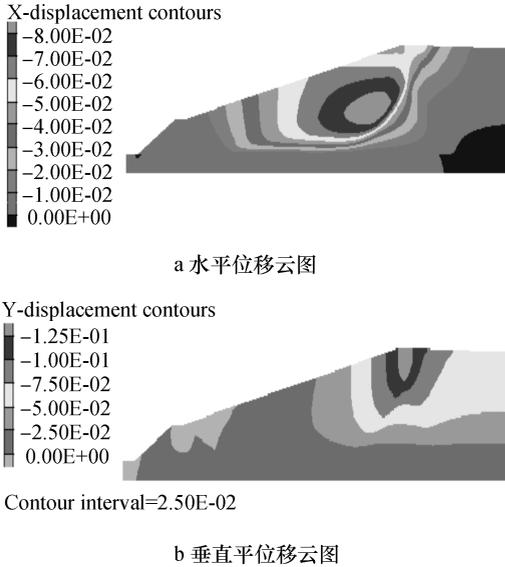


图 4 尾矿坝位移云图

Fig. 4 The displacement cloud picture of this tailing dam

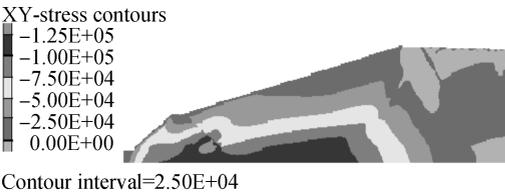


图 5 尾矿坝内应力分布云图

Fig. 5 The stress cloud picture of this tailing dam

FLAC 利用强度折减的原理,将土体的抗剪强度指标粘聚力 c 与内摩擦角 φ 去除一个折减系数 F_s 进行折减得到新的 c' 和 φ' ,用折减后的虚拟抗剪指标来代替原来的抗剪指标,通过不断地改变折减系数进行试算,直到边坡体达到极限状态发生剪切破坏。此时的 F_s 即为安全系数,折减公式为:

$$c' = c/F_s \quad (8)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan\varphi/F_s) \quad (9)$$

因此利用 FLAC 可方便求出该尾矿坝的安全系数,对该尾矿库的状况进行评估,其剪应力分布及安全系数见图 6。

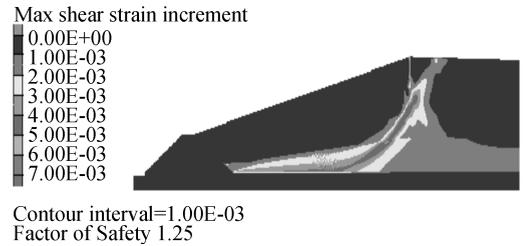


图 6 尾矿坝安全系数及剪应变分布云图

Fig. 6 The safety factor and the shearing strain cloud picture of this tailing dam

从图 6 中可以看出,尾矿堆积坝中存在潜在的破坏区域,潜在破坏区域剪切应变增量的主要范围为 1×10^{-3} 到 5×10^{-3} ,该尾矿坝最大剪切应变增量在 7×10^{-3} 以上;计算结果显示该尾矿坝安全系数为 1.25,根据《选矿厂尾矿设施设计规范》,确定该尾矿坝为 3 级尾矿坝,其坝坡正常运行时抗滑稳定的最小安全系数对照表 2 中指标,该尾矿库安全系数 K 应大于 1.20,模拟分析确定该尾矿坝在正常状况下尚能正常运行。

表 2 坝坡抗滑稳定最小安全系数

Table 2 The min allowed safety factor of the tailings dam

坝的级别	1	2	3	4,5
正常运行	1.30	1.25	1.20	1.15
洪水运行	1.20	1.15	1.10	1.05
特殊运行	1.10	1.05	1.05	1.00

3 结论

本文针对湖南某尾矿库将有限差分软件 FLAC 应用于研究该尾矿坝稳定性的数值模拟计算中,分析尾矿坝体的稳定状况,为综合评价该尾

矿库的安全状况提供了参考,对于确保该尾矿库长期安全运行具有重要的现实意义。

从模拟计算结果分析,该尾矿库的安全系数为 1.25,略高于 3 级尾矿库运行的最小安全系数 1.20,参照中国地震动参数区划图(GB 183062001),库

区所在地震基本烈度为6度,该尾矿库属乙类水工建筑,尾矿库设计烈度为基本烈度,因此在设计承受的地震荷载范围内,尾矿库能处于稳定状态,但考虑到该尾矿库处于湖南省境内,气候长年湿润多雨,强降雨条件下会导致库水位升高,干滩长度变短,尾矿坝浸润线变高,这些因素均会降低尾矿坝的安全系数。综合考虑,该尾矿库仍需采取以下措施保障尾矿坝安全:1)增加排水渠数量保障强降雨条件下排水顺畅;2)对模拟中出现较大位移及应力集中区域采取加固措施;3)加强强降雨下库水位及浸润线高度的监测;4)健全尾矿库安全管理机制并加强监管力度。

参考文献:

- [1] Fourie A B, Blight G E, Papageorgiou G. Static liquefaction a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38: 707-719.
- [2] 路美丽. 尾矿坝渗流场的数值模拟及分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [3] 蒋卫东, 李夕兵. 尾矿坝浸润线时空混沌模型及反分析[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34(6): 704-707.
- [4] Rico M, Benito G, Salgueiro A R. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the world-wide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 846-852.
- [5] 敬小非, 尹光志, 魏作安, 等. 模型试验与数值模拟对尾矿坝稳定性综合预测[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(3): 308-313.
- [6] Song C W, Yu G M, Wang P S. Influence of berm number on safety factor of tailings dam[J]. Advanced Materials Research, 2011, 374-377: 2488-2492.
- [7] 张志军, 丁德馨, 章求才. 某道路边坡稳定性的FLAC^{2D}模拟分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2007, 31(3): 16-19.
- [8] 高振兴. 基于强度折减法的尾矿坝稳定性数值分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [9] 于斯滢, 邵龙潭, 刘士乙. 基于有限元极限平衡法的尾矿坝坝体稳定分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1185-1190.
- [10] 王孟来, 李耀基, 李小双, 等. 尾矿坝溃坝数值模拟研究[J]. 能源技术与管理, 2013, 38(2): 1-3.
- [11] 陈宇龙. 尾矿库混合式筑坝坝体稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [12] 李宏儒, 胡再强, 陈存礼, 等. 金堆城尾矿坝加高方案数值模拟及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1138-1142.
- [13] 邓敦毅, 邵树强, 潘建平. 自然状态下尾矿坝边坡稳定性的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(2): 414-417.