

铁岭柴河1[#]尾矿坝数值模拟及其稳定性分析

樊跃武¹⁾, 信文山²⁾, 周志广²⁾

1) 吉林铁道勘察设计院有限公司, 吉林省吉林市, 132001;

2) 辽宁有色勘察研究院, 沈阳, 110013

内容提要: 铁岭柴河1[#]尾矿坝位于辽宁省开原市靠山镇猴石社区的关门山沟内, 由初期坝和尾矿堆积坝组成。本文在该尾矿坝现场勘察的基础上, 将坝体实测主轴剖面进行合理地概化和延伸, 建立有限差分数值模型, 并以Duncan—Chang双曲线模型来反映尾矿坝岩土体应力—应变本构关系, 对处于正常运行条件下的坝体进行数值分析, 从而揭露坝体内部应力状态, 同时在数值分析结果的基础上, 采用基于极限平衡理论的条分法——Fellenius法和Bishop法对尾矿坝的稳定性进行计算, 从而实现对尾矿坝稳定性的定量分析, 对尾矿库的安全生产具有重要指导意义。

关键词: 尾矿坝; 数值模拟; 稳定性分析; 有限差分法

中国是个矿业大国, 目前有大约1500座尾矿库, 其中处于正常运行的不足70%, 有些行业44%的尾矿库处于险、病或超期服务状态, 情况非常不利(李明等, 2005)。尾矿库一旦出现问题不仅涉及到矿山自身的生产安全, 而且关系到周边及其下游居民生命财产的安危。目前国内外对尾矿坝的研究主要集中在砂土物理力学性质与颗粒粒度的关系(张建隆, 1995; 徐进, 2007)、尾矿库的筑坝技术对尾矿坝稳定性的影响(李建荣, 2002)、尾矿坝渗流分析(路美丽, 2002; 赵坚等, 2003; 路美丽等, 2004)、变形监测(贺跃光等, 2006)和坝体动、静力稳定性分析(徐志英等, 1981; 胡明鉴等, 2004; 楼建东等, 2005; 刘才华, 2007; 柳厚祥等, 2008)以及环境污染与防治(Chandler and Tosati, 1995; Vick, 1996)等方面。而在尾矿库的安全问题中, 尾矿坝的稳定性问题是其中重要的一方面, 目前, 关于尾矿坝稳定性分析的方法主要包括极限平衡分析方法和数值分析法, 其中, 极限平衡分析法主要是基于刚体极限平衡理论的条分法, 如Fellenius法、Bishop法、Janbu法和Mogenson—Price法等等; 数值分析法主要是有限元法(李明等, 2005)、有限差分法、变分法(柳厚祥等, 2003)以及离散元法等等。

基于极限平衡理论的极限平衡法虽然能够对尾矿坝的稳定性作出一个量化的评价, 但是, 它没有

考虑土体内部的应力应变关系, 无法分析尾矿坝坝体破坏的发生和发展过程, 无法考虑变形对坝体稳定的影响。在求取安全系数时, 通常需要预先假定滑裂面的形状, 或者折线形, 或者圆弧形; 数值分析法虽然能够比较真实地反应坝体内部应力应变关系, 但是并不能给出一个易于接受的明确的量化指标。在本文中, 将采用有限差分法对该尾矿坝进行有限差分数值模拟, 并在此基础上, 分别采用Bishop法和Fellenius法对坝体的稳定性作出分析, 从而实现数值分析法和极限平衡分析法的耦合。这种耦合分析方法同时具备了数值分析法和极限平衡分析法的优点, 不仅给出了尾矿坝坝体内部应力应变关系, 同时给出了坝体最小稳定性系数, 对尾矿库的安全生产具有重要指导意义。

1 工程概况

铁岭柴河1号尾矿坝位于辽宁省开原市靠山镇猴石社区的关门山沟内, 该沟纵向呈“U”字型, 沟底宽70.0~120.0m。该尾矿坝由初期坝和后期尾矿堆积坝组成, 总坝高为56.0m, 库容量约320万m³, 其中初期坝为透水堆石坝, 最大坝高约10.5m, 上、下游坡比均为1:1.7, 且上游坡面设置反滤层; 后期尾矿堆积坝采用上游式筑坝, 由四级子坝组成, 平均坡比约1:4.0, 最大坡长约225.0m。

2 稳定性分析基本原理

2.1 Duncan—Chang 双曲线模型

土体应力—应变关系重要特征之一是其强烈的非线性特性。在本文的静应力分析中,采用增量法考虑这种土料的非线性性质。土料的应力—应变关系采用工程上广泛应用的 Duncan—Chang 双曲线模型的 E—B 模式。该模型假设土体的应力—应变关系可用双曲线来表达,由此得到土的线弹性模量表达式为:

$$E_t = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n (1 - R_t S_t)^2 \quad (1)$$

式中 R_t 为土体破坏比, S_t 是土体单元的应力水平, σ_3 为围压, P_a 是大气压强, K 、 n 分别是变形模量系数和模量指数。

$$F_s = \frac{\sum \{ c_i L_i + [(W_i \pm Q') \cos \alpha_i - Q \sin \alpha_i - U_i L_i] \tan \varphi_i \}}{\sum [(W_i \pm Q') \sin \alpha_i + \frac{M_c}{r}] \quad (4)$$

式中: i 为第 i 条块; r 为圆弧半径; α_i 为条块底面中点切线与水平线夹角; U_i 是条块底面中点处孔隙水压力; W_i 为条块重量; Q_i 为作用在条块重心处的水平向地震惯性力, Q' 为作用在条块重心处的垂向地震惯性力(向下为正), M_c 为 Q_i 对圆心的力矩之和; L_i 为条块底部长度; c_i 和 φ_i 是条块底面中点处的内聚力和内摩擦角。在不考虑地震影响时,公式中的 Q_i 、 Q' 和 M_c 均取为零。

2.3 Bishop 法

Bishop 法是一种改进的条分法,该法假定条块间有水平力的存在,但条块间不存在剪应力。整个边坡的安全系数为:

$$k = \frac{\sum [c_i l_i + (W_i \sec \alpha_i - U_i) f_i] \frac{k}{k + f_i \tan \alpha_i}}{\sum Q_i \cos \alpha_i + \sum W_i \sin \alpha_i} \quad (5)$$

式中: i 为第 i 条块; α_i 为条块底面中点切线与水平线夹角; U_i 是条块底面中点处孔隙水压力; W_i 为条块重量; Q_i 为作用在条块重心处的水平向地震惯性力; l_i 为条块底部长度; c_i 和 f_i 是条块底面中点处的内聚力和内摩擦系数。在不考虑地震影响时,公式中的 Q_i 取为零。

3 尾矿坝稳定性分析

3.1 数值模型的建立

受尾矿库放矿位置、尾矿沉积环境等因素的影响,尾矿坝结构复杂,透镜体数量多且互相穿插,剖

卸荷、再加荷条件下土体的应力—应变关系采用线弹性模型近似模拟,卸荷—再加荷变形模量为:

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

式中 K_{ur} 为卸荷—再加荷变形模量系数,其它变量符号代表意义同前。

体积变形模量 B 可以表示为:

$$B = K_b \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (3)$$

式中 K_b 和 m 分别为体积模量系数和模量指数。

2.2 Fellenius 法

该法假设条块之间的作用力对圆弧形滑动面上的法向应力分布没有影响,其抗滑力与下滑力之比即为安全系数 F_s :

面形状十分复杂。根据工程地质勘察结果剖面图,要对剖面形状如此复杂且透镜体相互穿插的尾矿坝进行抗滑稳定性计算,其计算程序要求很高且工作量很大,而且往往造成计算不收敛,因此,可以先在室内试验的基础上进行一定条件下的简化:总的原则是保留较大的透镜体,去掉小的透镜体;当透镜体强度比周围土体强度高时,用周围土体替代之;当透镜体强度比周围土体强度小时则保留。本文以此为原则,对坝体主轴剖面进行合理地概化和延伸,得到长约 429.8m,高约为 54.5m 的地质模型,然后采用三角形单元对模型进行离散化,形成数值计算模型,该模型由 5535 个三角形单元和 1857 个节点构成(图 1)。

3.2 参数的选择及边界条件的确定

本文稳定性分析所用岩土物理力学参数是按照室内土工试验结果并结合以往经验综合选取,其计算参数如表 1。

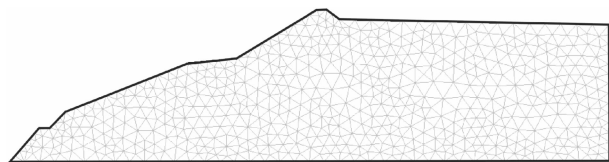


图 1 铁岭柴河 1# 尾矿坝有限差分数值计算模型
Fig. 1 Numerical model about the Finite Difference of the No. 1 tailing dam in Chaihe, Tieling city

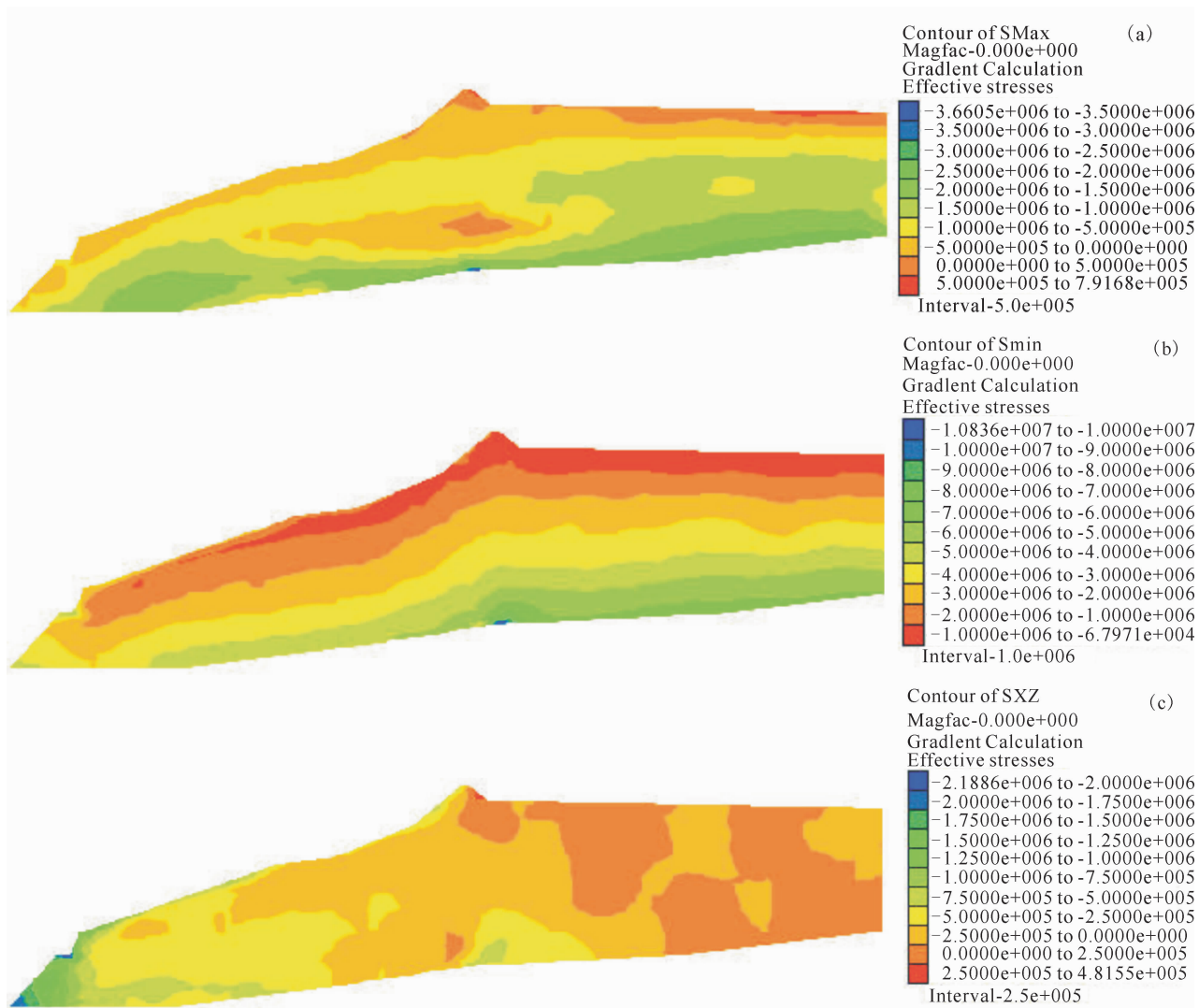


图 2 铁岭柴河 1# 尾矿坝应力等值线云图

Fig. 2 the contour chart of the stress from the No. 1 tailing dam in Chaihe, Tieling city

(a) 最大主应力 σ_1 等值线云图(有效应力);(b)最小主应力 σ_3 等值线云图(有效应力);(c)剪应力 τ_{xy} 等值线云图
(a) the contour chart of the maximum effective principle Stress σ_1 ; (b) the contour chart of the minimum effective principle Stress σ_3 ; (c) the contour chart of the shear Stress τ_{xy}

表 1 铁岭柴河 1# 尾矿坝坝体稳定性分析所选计算参数表

Table 1 Parameter for Stability Analysis of the No. 1 tailing dam in Chaihe, Tieling city

材料名称	天然重度 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	内聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	泊松比 μ	变形模量系数 K	变形模量指数 n	土体破坏比 R_f	体积模量系数 K_b	体积模量指数 m
素填土	19.60	17.00	37.00	0.25	700.00	0.500	0.800	200	0.40
尾细砂	14.70	7.84	33.00	0.33	141.00	0.450	0.509	150	0.39
尾粉土	19.11	9.80	28.00	0.33	81.51	0.577	0.822	57	0.23
尾粉砂	16.66	9.80	30.00	0.33	128.28	0.913	0.793	62	0.25
尾粉质粘土	18.62	10.30	17.00	0.33	80.00	0.513	0.506	50	0.21
碎石	19.60	15.00	37.00	0.25	750.00	0.550	0.750	180	0.40

边界条件:模型左右两侧加水平向约束;模型底部加竖直方向约束。

4 计算结果及其分析

本文通过对尾矿坝坝体的数值分析,得出该坝体处于正常运行条件下,坝体内部的应力变化状态如图2,并在数值分析的基础上,采用条分法计算出了坝体的稳定性系数(图3)。

由图2a可以看出,该坝体内最大主应力整体上呈压缩状态,仅坝顶和滩面呈拉张状态,且其最大压应力出现在坝体与基岩接触处中央位置,其值为3.66MPa,最大张应力发生在坝顶处,其值为0.79MPa,不会对坝体产生张性破坏;由图2b可以看出,该坝体最小主应力均呈压缩状态,其最大值发生坝体与基岩接触处中央位置,其值为10.8MPa。

由图2c可以看出,坝体内最大剪应力主要分布在初期坝及坝体与基岩接触处,其值在2.19MPa左右,剪应力总体水平不高,不会对坝体产生剪切破坏。

计算结果显示,坝体稳定性系数均在2.0以上,远大于规范要求的最小安全系数,而且从两种方法确定坝体潜在滑动面的位置可以看到,其最危险滑动面位置基本相同,因此,从计算结果上来看,该尾矿坝在正常运行条件下是安全稳定的。

5 结论

尾矿坝稳定性问题是尾矿库安全的重要方面,

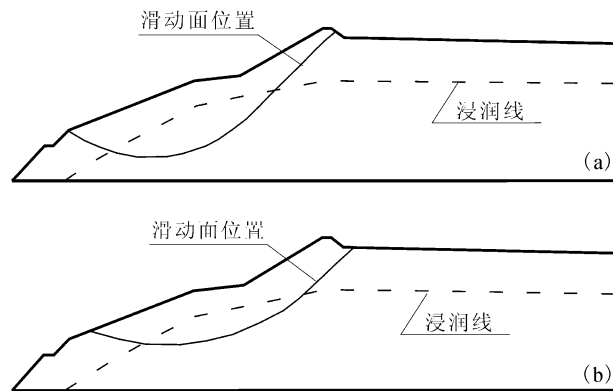


图3 铁岭柴河1#尾矿坝坝体潜在滑动面位置及 Fellenius 安全系数 $F_s = 2.23$ (a) 和 Bishop 安全系数 $F_s = 2.33$ (b)

Fig. 3 Latent failure plane location of the No. 1 tailing dam in Chaihe, Tieling city, and its safety factor by Fellenius method $F_s = 2.23$ (a) and by Bishop method $F_s = 2.33$ (b)

只要保持尾矿坝的稳定性,才有保证尾矿库安全的可能。本文在现场勘察的基础上,对处于正常运行条件下的坝体进行了二维有限差分数值模拟,模拟结果显示坝体总体上在主应力坐标内呈压缩状态,仅最大主应力在坝顶和部分滩面位置呈拉张状态,其最大拉张应力为0.79MPa,不会对坝体产生拉张破坏;而最大剪应力主要分布在初期坝及坝体与基岩接触处,其值在2.19MPa左右,剪应力总体水平不高,不会对坝体产生剪切破坏。基于极限平衡理论的条分法对坝体的稳定性计算结果反映,处于正常运行条件下的坝体最小稳定性系数均在2.0以上,远大于规范所要求的安全系数,因此该坝体在正常运行条件下是安全稳定的。

参 考 文 献 / References

- 胡明鉴,郭爱国,陈守义. 2004. 某上游法尾矿坝抗滑稳定性分析的几点思考. 岩土力学, 25(5): 769~773.
- 贺跃光,方武生,曾向农. 2006. 尾矿坝安全监测阈值及监测实例. 矿业工程, 26(6): 13~15.
- 李建荣. 2002. 德兴铜矿4号尾矿库尾矿堆积坝边坡稳定性分析. 有色冶金设计与研究 23(4): 62~63.
- 李明,胡乃联,于芳,何煦春. 2005. ANSYS 软件在尾矿坝稳定性分析中的应用研究. 金属矿山, (8): 56~59.
- 刘才华. 2007. 大尖山尾矿坝稳定性分析. 四川建材, (2): 172~173.
- 柳厚祥,裘家葵. 2003. 变分法在尾矿坝稳定性分析中的应用研究. 工程设计与建设, 35(1): 9~14.
- 柳厚祥,廖雪,李宁,余志江,潘旭东. 2008. 高尾矿坝的有效应力地震反应分析. 振动与冲击, 27(1): 65~72.
- 楼建东,李庆耀. 2005. 某尾矿坝数值模拟与稳定性分析. 湖南科技大学学报(自然科学版), 20(2): 58~61.
- 路美丽. 2002. 尾矿坝渗流场的数值模拟及分析. 大连: 大连理工大学, 1~73.
- 路美丽,崔莉. 2004. 影响尾矿坝渗流场的因素分析. 中国安全科学学报, 14(6): 17~20.
- 王文星. 2007. 尾矿坝稳定性分析及安全对策的研究. 长沙: 中南大学, 1~73.
- 徐进. 2007. 尾矿料物理力学性质试验研究及尾矿坝动力稳定性分析. 长沙: 中南大学, 1~106.
- 徐志英,沈珠江. 1981. 高尾矿坝的地震液化和稳定分析. 岩土工程学报, 3(4): 22~32.
- 张建隆. 1995. 周期荷载下尾矿砂动力特性初探. 西北水资源与水工程, 6(1): 66~72.
- 张建隆. 1995. 尾矿砂力学特性的试验研究. 武汉水利水电大学学报, 28(6): 685~689.
- 赵坚,纪伟,刘志敏. 2003. 尾矿坝地质剖面概化及其对渗流场计算的影响. 金属矿山, (12): 24~28.
- Chandler R J, Tosati G. 1995. The Stava tailings dams failure, Italy, July 1985. Geotechnical Engineering, 113(2): 67~79.
- Vick S G. 1996. Tailings dam failure at Omai in Guyana. Mining Engineering, 48(11): 34~37.

Numerical Simulation and Analysis of Stability of the No. 1 Tailing Dam in Chaihe, Tieling City

FAN Yuewu¹⁾, XIN Wenshan²⁾, ZHOU Zhiguang²⁾

1) *JiLin RailwayL Survey & Design Institute Co. , Ltd, Jilin City, Jilin Province, 132001;*

2) *Survey Institute of Liaoning Nonferrous Metals Geological Bureau, Shenyang, 110013*

Abstract: The No. 1 Tailing Dam in Chaihe, Tieling City, lies in Guanmen mountain ditch in Houshi community, Kaoshan town, Kaiyuan city, Liaoning province, which is composed of starter dam and embankment. On the basis of the on-the-spot investigation about the dam, in text the finite difference numerical model is builded through reasonably generalizing and extending the actual principal section of the dam. Then, Duncan—Chang model is used for disclosing the relative between stress and strain of the tailing dam, and the tailing dam in a existing state is analysed for exposing the stress condition in the dam, at the same time, the stability analysis of the tailing dam is proceeded through the slice method based on the limiting equilibrium theory like Fellenius method and Bishop method to realize the quantitative analysis for the tailing dam stability, which is the very significant guiding for the safety of the tailing pond.

Key words: Tailing Dam; Numerical Simulation; Analysis of Stability; the Finite Difference Method