

# 富贵鸟1号尾矿库坝体稳定性数值模拟

乔云航

(辽宁有色勘察研究院, 辽宁 沈阳 110013; 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室东北中心, 辽宁 沈阳 110013)

**摘要:** 基于富贵鸟1号尾矿库现有岩土工程地质条件, 采用有限元法对该尾矿坝进行渗流稳定性及静力有限元数值模拟分析. 结果表明坝体在正常运行工况以及洪水运行工况下, 尾矿堆积坝坝坡浸润线埋深满足规范要求. 坝体浸润线沿初期坝坝坡出逸, 系透水堆石坝正常排水现象, 不会对坝坡产生如管涌、流沙和表面沼泽化等渗流破坏. 并在此基础上, 采用毕肖普法和瑞典圆弧法对坝体进行正常水位工况、洪水水位工况和洪水水位及地震作用工况下的稳定性计算, 得到尾矿坝坝体内部应力应变关系, 以及坝体最小稳定性系数. 结果表明坝体的稳定性系数大于规范要求的最细小安全系数, 坝体是安全稳固的.

**关键词:** 尾矿坝; 极限平衡法; 毕肖普法; 瑞典圆弧法

**中图分类号:** TD926.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2016)01-0058-05

## Numerical simulation of stability of 1<sup>#</sup> Fuguiniao Tailing Dam

QIAO Yunhang

(Liaoning Non-ferrous Institute of Geological Exploration and Research, Shenyang 110013, China;  
State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering in Northeast Center, Shenyang 110013, China)

**Abstract:** Based on the geological conditions of geotechnical engineering for 1<sup>#</sup>Fuguiniao Tailing Dam, this paper takes the finite element method for the tailing dam to percolate stability and make the finite element numerical simulation of stress-strain. Based on this, it takes the Bishop method and the Sweden Arc methods to analyze the stability of dam body respectively, so as to realize the coupling of numerical analysis and limit equilibrium method. The coupled analytic method displays not only the internal stress-strain relation of tailing dam body, but also the minimum stability coefficient of it. Result shows that the dam body is safe when the stability coefficient of dam body is more than the limited weensiest safety factor.

**Key words:** tailing dam; limit equilibrium method; Bishop method; Sweden Arc method

我国是世界上矿产资源丰富的国家之一, 矿产体系完善, 品种齐全, 在储量和年产量上都处于世界领先地位. 尾矿库是矿山企业生产设施的重要组成部分, 专门作为堆存尾矿的特殊建筑物, 也是重大危险源<sup>[1]</sup>. 据不完全统计, 目前我国共有尾矿库 12 655 座, 其中危库 613 座, 险库 1 265 座, 病库 3 032 座<sup>[2]</sup>, 堆存各类尾矿约  $70 \times 10^8$  t. 然而我国尾矿库的安全程度处于较低水平, 尾矿库的重大事故时有发生: 1962 年 9 月, 云南省火谷都尾矿库事故造成 171 人死亡、92 人受伤, 受灾人口 13 970 人<sup>[3]</sup>; 2008 年, 山西襄汾特大尾矿库溃坝事故造成了 279 人遇难<sup>[4]</sup>, 使下游居民流离失所, 严重威胁到人民生命和财产的安全, 同时也给企业带来难以弥补的经济损失. 由此可见保证尾矿库的安全稳定尤为重要, 必须要从观念上有所增强, 确保在生产过程中尾矿坝能够可靠稳定运行. 因此, 为了避免同类尾矿坝事故的发生, 需要对尾矿坝展开更加深入的研究, 从根本上降低事故发生的风险, 这对促进尾矿坝的发展意义重大<sup>[4]</sup>.

## 1 富贵鸟1号尾矿库简介

富贵鸟1号尾矿库位于北票市龙潭乡西马架子村西北约2.0 km。尾矿库坝体由初期坝和后期尾矿堆积坝组成,其中初期坝为透水堆石坝,尾矿库初期坝现状坝顶标高495.0 m,坝底标高457.5 m,坝高37.5 m,平均外坡比1.0 : 2.4。后期堆积坝系上游式尾矿筑坝而成,坝上分散放矿,机械筑子坝,尾矿堆积坝现状标高551.3 m,堆积高度56.3 m,平均外坡比为1 : 3.8。堆积坝沿坝高每隔10 m左右设1平台,平台宽约8.0 m,且于平台内侧设排水沟。

库区所在区域地处华北地区边缘,二级构造单元内蒙地轴东段,库区西北约10 km为赤峰-开原大断裂,总体走向北东东,向南南东陡倾,具长期多次活动历史。尾矿库的地层结构主要有以下3个层次,分别为天然地层、人工堆积层、尾矿堆积层。从三者的结构方面来看,天然地层、人工堆积层相较于尾矿堆积层在结构方面更易辨析,而尾矿堆积层的结构组成以及分布状况等比较复杂。在分布韵律上,主轴剖面和辅助剖面解释的尾矿堆积整体上一致性较强,按照排列顺序,尾矿沉积分别为尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土,分布规律,满足“上粗下细”的尾矿分布要求。

## 2 尾矿坝渗流稳定性及静力分析

为了进行理论计算,首先需要对模型进行必要的简化。由于受放矿的影响,库内钻孔中水位偏高,因此在本次计算中按照坝体渗流规律对实测浸润线进行适当调整。坝体地质结构分层图及计算模型如图1所示,模型总长约为471.0 m,高约为110.0 m。

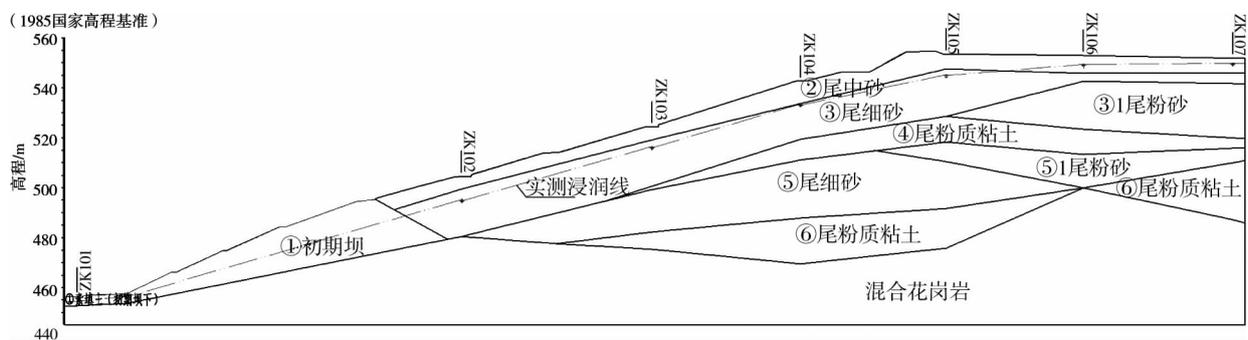


图1 矿尾库地质结构模型层次示意图

基于二维模型进行具体问题运算,在进行分析和研究的过程中将该问题转化平面应变问题,采用的单元均为三角形单元,并通过网格检验达到网格最优化。最终,坝体计算模型被划分为3 376个三角形单元,1 813个节点,生成的有限元模型及坐标位置如图2所示。

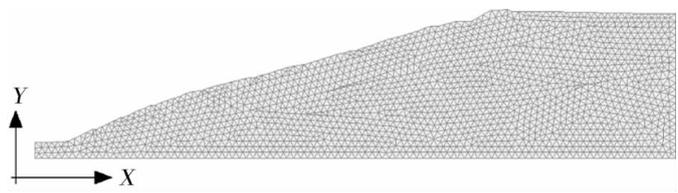


图2 有限元计算网格图

本次渗流计算和稳定性研究选取的岩土物理学参数是由室内试验得到的,同时也考虑了已有的实践工程经验,并综合分析各种因素,从而获得更加客观准确的计算结果。在进行渗流计算时,对计算浸润线与实测浸润线经过反复的对比拟合,以及反复的验证和反演,最终确定其渗流参数,为进一步稳定性计算提供合理的数据支持。其计算参数详见表1。

**渗流边界条件:**保证模型基岩为不透水基岩,建坝起始阶段为堆石透水坝,并且根据实际测量使水头边界不断增加,所形成的堆积坝平面是自由透水面。

**静力边界条件:**在模型中,从左右2个方面形成对模型水平方向的动态约束,对于模型底部,则形成固定约束。

表1 岩土体物理力学参数推荐值

项目	天然重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	渗透系数 $Kv/(\text{cm}/\text{s})$	内聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
初期坝	22.00	60.00	0.27	$2.8 \times 10^{-3}$	0.00	35.00
①素填土	21.00	50.00	0.27	$2.8 \times 10^{-3}$	0.00	33.00
②尾中砂	18.50	6.50	0.34	$5.5 \times 10^{-3}$	7.00	29.00
③尾细砂	21.50	9.00	0.33	$9.5 \times 10^{-4}$	7.00	30.00
③1尾粉砂	21.50	8.50	0.32	$4.0 \times 10^{-3}$	8.00	29.00
④尾粉质粘土	21.00	7.00	0.35	$4.5 \times 10^{-6}$	16.50	19.00
⑤尾细砂	22.00	9.50	0.32	$3.2 \times 10^{-4}$	7.50	31.00
⑤1尾粉砂	22.00	9.00	0.33	$2.0 \times 10^{-4}$	6.50	29.00
⑥尾粉质粘土	21.00	5.50	0.35	$4.0 \times 10^{-6}$	17.00	25.00
基岩	25.00	20 000.00	0.25	--	20.00	40.00

为了模拟现场实际情况,反映实际浸润线高度,在本次渗流计算中,滩面按钻孔实测水位加设水头边界来反映放矿水入渗条件,水头标高+549.20 m(埋深3.50 m),以现状干滩长度对应水位为正常运行工况水位,采用 GEOSLOPE - SEEP 进行二维有限元数值分析计算,计算结果如图3所示。

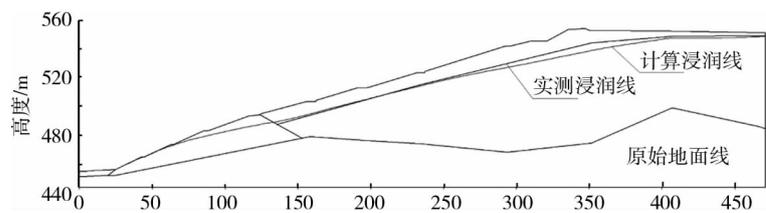


图3 正常工况下坝体渗流计算结果(考虑放矿水入渗)

由图3可以看出,实测浸润线与计算浸润线总体变化趋势一致,说明渗流计算参数选择合理,可为正常工况下渗流计算使用。由上述计算结果可以看出,该坝体在正常运行工况下,堆积坝坡浸润线埋深均在6 m以上,满足规范要求。坝体浸润线沿初期坝坝坡出逸,系透水堆石坝正常排水现象,因此不会对坝坡产生如管涌、流沙和表面沼泽化等渗流破坏。

在洪水工况下的渗流计算,以规范要求的最小干滩长度70 m对应水位为最高洪水位,同时考虑到一旦库内水位达到最高洪水位,尾矿库处于警戒状态,此时尾矿库必须停止生产,采取排险措施。因此,洪水工况下的渗流计算未考虑放矿水的入渗补给对坝体浸润线的影响,即计算模型未加设水头边界。计算结果如图4所示。

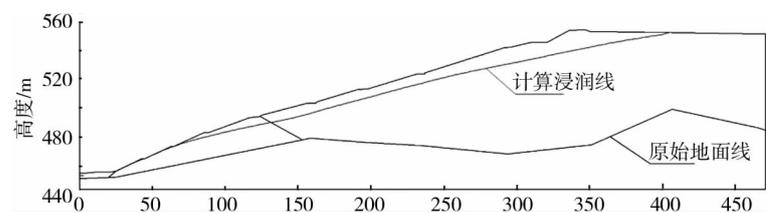


图4 洪水运行工况下坝体渗流计算结果

由上述计算结果可以看出,坝体在洪水运行工况下,尾矿堆积坝坝坡浸润线埋深也基本在6 m以上,同样满足规范的规定。坝体浸润线沿初期坝坝坡出逸,系透水堆石坝正常排水现象,因此也不会对坝坡产生如管涌、流沙和表面沼泽化等渗流破坏。

### 3 坝体应力应变及稳定性分析

首先进行计算参数的选取。考虑综合因素后,选取表1数据作为计算参数,采用有限元计算软件 GEOSLOPE 进行具体计算。在应用 GEOSLOPE 软件进行稳定性计算时,采用的计算方法通常有2种,一种是极限平衡法<sup>[5]</sup>,另一种是有限单元法。经过学者的不断努力和不断改进,前者的完善程度更高,被广泛应用于工程实践<sup>[6]</sup>。本文选用在尾矿坝稳定计算中经常使用的瑞典圆弧法和毕肖普法。首先对坝体内的应力变化情况与位移分布情况进行分析和计算,随着应力张量的变化,在滑动面上的应力分布情况也随之变化,而后引入极限平衡法,获得该滑动面上的稳定性系数。在坝体处于正常水位工况条件下进行稳定性

的分析计算,其分析结果如图 5 和图 6 所示.

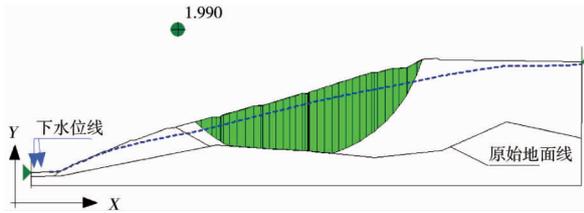


图 5 坝体潜在滑裂面位置及毕肖普法稳定性系数  
 $F_s = 1.990$  (正常水位工况)

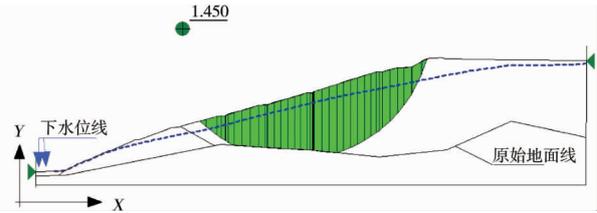


图 6 坝体潜在滑裂面位置及瑞典圆弧法稳定性系数  
 $F_s = 1.450$  (正常水位工况)

由上图计算结果表明坝体通过计算确定的稳定性系数相较于最小安全系数要大,其中最小安全系数在毕肖普法中是 1.30;而在瑞典圆弧法中则为 1.20. 由此可知该尾矿坝处于正常水位工况条件下,在正常运行时,尾矿坝是安全稳固的.

在处于洪水位环境条件时,选取最危险地段的剖面,即坝体主轴剖面为计算对象,以表 1 中提供的参数为计算参数,采用有限元法对坝体进行洪水位工况下的应力应变分析,以及稳定性的计算,其分析的结果如图 7 和图 8 所示.

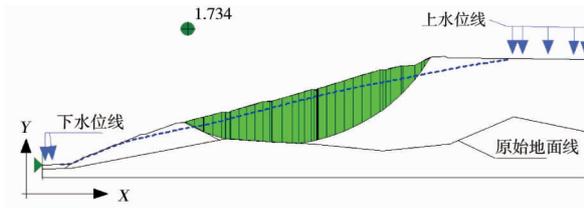


图 7 坝体潜在滑裂面位置及毕肖普法稳定性系数  
 $F_s = 1.734$  (洪水位工况)

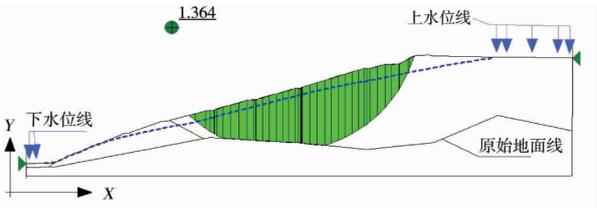


图 8 坝体潜在滑裂面位置及瑞典圆弧法稳定性系数  
 $F_s = 1.364$  (洪水位工况)

以上计算结果表明,在处于洪水位环境条件时,对坝体稳定性进行分析得到稳定性系数相较于最小安全系数要大,其中最小安全系数在毕肖普法中是 1.20;而在瑞典圆弧法中则为 1.10,因而可以判断滑动面位置最危险地段的剖面位置相一致. 由此可知该尾矿坝处于洪水位工况下,在正常运行时,在尾矿坝稳定性方面也是安全稳固的.

对于该尾矿库坝体洪水位及地震作用条件下的稳定性计算,本文考虑地震力所产生的影响,采用拟静力法<sup>[7]</sup>进行分析. 由于在地震时产生地震惯性力,故以地震惯性力来替代地震作用下对坝体所产生的影响. 在分析过程中,所需解决的核心问题是如何确定地震加速度. 基于我国《水工建筑物抗震设计规范》<sup>[8]</sup>中的相关规定,作用于条块重心处的水平向地震惯性力代表值为  $F_n = W_i a_h \xi \alpha_i / g$ , 竖向地震惯性力代表值为  $F_v = 1/3 W_i a_h \xi \alpha_i / g$ , 其中  $a_h$  为水平向设计地震加速度代表值,本库区为 VII 度区,  $a_h = 0.10g$ ;  $\xi$  为地震作用的效应折减系数,一般取  $\xi = 0.25$ ;  $\alpha_i$  为质点  $i$  的动态分布系数,其中  $\alpha_m = 3.0$ ;  $g$  为重力加速度;  $W_i$  为条块重力标准值. 则  $F_n = 0.025 \alpha_i W_i$ ,  $F_v = 0.0083 \alpha_i W_i$ . 本次计算仍使用洪水位环境条件下渗流计算所得浸润线结果. 如图 9 和图 10 所示.

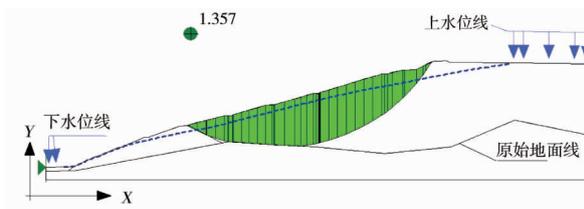


图 9 坝体潜在滑裂面位置及毕肖普法稳定性系数  
 $F_s = 1.357$  (洪水位及地震作用工况)

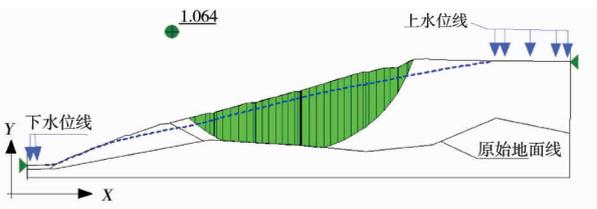


图 10 坝体潜在滑裂面位置及瑞典圆弧稳定性系数  
 $F_s = 1.064$  (洪水位及地震作用工况)

上述计算结果表明,在洪水位及地震作用条件下的稳定性计算中,稳定性系数相较于最小安全系数要大,其中最小安全系数在毕肖普法中是 1.15;而在瑞典圆弧法中则为 1.05,满足(AQ2006-2005)<sup>[9]</sup>的规定,因而可以判断滑动面位置最危险地段的剖面位置相一致.该尾矿坝处于地震条件下,尾矿坝是安全稳固的.

## 4 结论

1) 富贵鸟 1 号尾矿库在正常和洪水运行工况下坝体浸润线埋深均较大,基本都在 6 m 以下,浸润线于初期坝坡出逸,系透水堆石坝正常排水现象,因此,该尾矿库坝体不会发生如管涌、流土等渗流破坏现象.

2) 该尾矿库坝体在正常、洪水及特殊运行状态下均处于稳定状态,不会发生坝体失稳破坏现象.

### 参考文献:

- [1] 于斯滢. 基于有限元极限平衡法的尾矿坝坝体稳定性分析[J]. 岩石力学, 2013, 34(s4): 85-90.
- [2] 于广明. 尾矿库安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(s1): 38-48.
- [3] 梅国栋. 我国尾矿库事故统计分析与对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(3): 211-213.
- [4] 吴启明. 某尾矿坝的稳定性计算与分析[J]. 有色金属, 2010, 62(2): 63-66.
- [5] 周志广. 桓仁矿业选矿厂尾矿坝数值模拟及其稳定性分析[J]. 矿业工程研究, 2010, 25(2): 33-36.
- [6] 高倩. 基于 Gep-Slope 的坝坡稳定计算[J]. 人民黄河, 2012, 34(5): 129-133.
- [7] 楼建东. 某尾矿坝数值模拟与稳定性分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(2): 58-61.
- [8] DL5073-2000. 水工建筑物抗震设计规范[S].
- [9] AQ 2006-2005. 尾矿库安全技术规程[S].