

台州市羊平鸟尾矿库坝体稳定性分析

武孟飞*, 童柳华

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年4月6日; 发布日期: 2025年5月14日

摘要

尾矿坝的稳定性对于尾矿库运行安全至关重要, 本文以台州市羊平鸟尾矿库为例, 通过室内试验获得堆积层的基本物理力学参数, 采用瑞典圆弧法和Geo-Studio软件, 建立了尾矿库在正常、洪水和地震三种工况下的坝体模型, 计算和分析了大坝的稳定性问题。分析结果为: 瑞典圆弧法和Bishop法得到的安全系数均满足规范要求, 具体表现为洪水工况条件下坝体处于稳定状态, 在地震工况条件下坝体处于基本稳定状态。

关键词

尾矿坝, 稳定性, Geo-Studio, 安全系数

Stability Analysis of Dam Body of Yangpingniao Tailings Pond in Taizhou City

Mengfei Wu*, Liuhua Tong

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Apr. 6th, 2025; published: May 14th, 2025

Abstract

The stability of the tailings dam is very important for the operation safety of the tailings pond. This paper takes Yangpingniao tailings pond in Taizhou City as an example. The basic physical and mechanical parameters of the accumulation layer were obtained through laboratory tests, and the finite element calculation model of the tailings dam under normal, flood and seismic conditions was established by using the Swedish strip division method and Geo-Studio software, and the stability of the dam was calculated and analyzed. The results show that the safety factors obtained by the Swedish strip division method and the Bishop method meet the requirements of the code, which is

*通讯作者。

manifested in the stable state of the dam under flood conditions and the basic stable state under seismic conditions.

Keywords

Tailings Dam, Stability, Geo-Studio, Safety Factor

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

尾矿坝作为矿山工程重要的配套设施, 它的稳定关系到下游居民的生命和财产的安全, 还关系到周围良好的生态环境, 在自然因素及人为因素的干预下, 尾矿库坝体的稳定性面临诸多挑战[1][2]。尾矿库溃坝事故时有发生[3][4], 为降低或杜绝类似事件的再次发生, 有必要对尾矿库坝体进行多工况稳定性评价, 以确保大坝是安全有效的。

本文以台州市羊平鸟尾矿库坝体作为工程实例, 分析了该尾矿库坝体的稳定性[5]-[7], 采用瑞典圆弧法和 Geo-Studio SLOPE/W 软件相结合的研究方法, 对三种不同工况下的抗滑稳定性系数进行计算。通过本次研究, 可以为该类尾矿库的安全运营提供技术支持, 为尾矿库的安全性评价提供理论依据, 对同类尾矿库的设计具有一定借鉴意义。

2. 尾矿库概况

2.1. 工程地质概况

该尾矿库坐落在台州市仙居县, 研究区出露的地层主要有侏罗纪火山岩系、下白垩纪、上白垩纪及第四系, 该地层属于火山沉积岩系, 走向呈北东-南西向带状展布。岩性以火山碎屑岩为主, 其中有含角砾流纹岩、凝灰岩、夹晶屑玻屑熔结凝灰岩、凝灰质砂岩夹层。尾矿库选址底部沟内出露有白垩系下统馆头组(k1gt)凝灰质砾岩、第四系残坡积层(el-dlQ), 下部地层为强风化凝灰岩和中凝灰岩。

库区地层构造所在区域位于衢兴-天台大断裂的南侧、鹤溪-奉化大断裂的东南侧、温州-镇海大断裂的西北侧、淳安-温州大断裂。从第三系开始, 该地区的新构造运动呈现出振荡上升和下降的特征, 发生了多期的隆升与沉降。结合现场地质调查, 库区工程地质构造较为简单, 并未发现明显的断层迹象, 区域地质构造整体较稳定, 库区两侧自然边坡倾角较小, 不易发生崩塌、滑坡等不良地质作用。

2.2. 尾矿库现状

羊平鸟尾矿库为山谷型尾矿库(图 1 所示), 初期坝体用透水堆石坝建立, 坝底标高 52 m, 坝顶标高 68 m, 坝轴线长 90 m, 坝顶宽度 3 m, 初期坝外侧标高 57 m 以下为干砌石坝, 外坡比 1:1, 外侧标高 57 m 以上外坡比 1:1.75, 标高 57 m 处坝顶宽 1 m, 初期坝内侧内坡比 1:1.6。初期坝以上共修筑了 5 级子坝, 采用上游式尾矿筑坝方式(图 2 所示), 堆积坝顶标高 79.5 m, 堆积坝高 11 m, 每级子坝堆高 1 m, 子坝内外坡比为 1:1, 每隔三级子坝设置有 8 m 宽的平台, 在平台内侧设置有坝面排水沟, 堆积坝平均外坡比为 1:4, 堆积坝中轴线长 120 m, 堆积坝的上游面、坝基均设置反滤层, 上游反滤层的表面用干砌块石作保护层, 堆积坝外坡已覆土种草进行绿化。

尾矿坝东侧紧邻朱溪, 直线距离约为 40 m, 尾矿坝地势高于朱溪, 受其影响较小, 尾矿库位于三面环山的沟谷中, 山体切割较明显, 存在一定季节性溪沟, 库区外地表水基本无上游补给, 主要以大气降雨和选矿厂排放尾矿补给, 地表水的径流沿河沟排泄, 库区汇水面积不大, 地表水径流不活跃, 依据《矿区水文地质工程地质勘探规范》(GB 12719-91), 库区水文地质条件简单。尾矿排放采用坝前分散放矿, 总库容 77.44 万 m^3 , 总坝高 40 m, 依据《尾矿设施设计规范》(GB 50863-2013)对尾矿库进行分级, 确定羊平鸟尾矿库属于四等尾矿库。按照《构筑物抗震设计规范》(GB 50191-2012)要求, 对羊平鸟尾矿库进行了 6 度抗震设防, 用 0.05 g 作为基础地震加速度计算值。

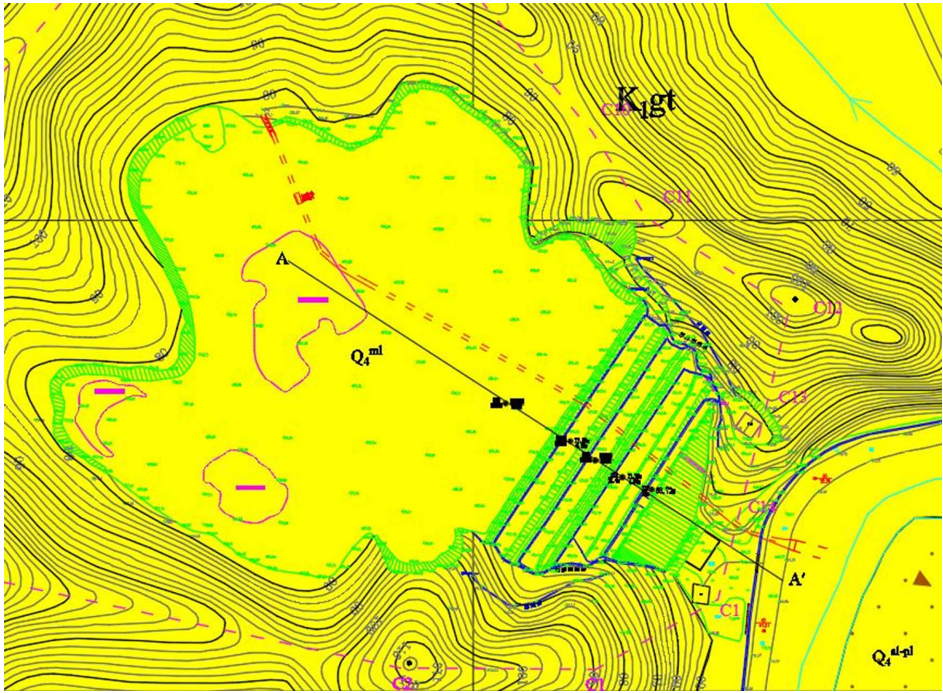


Figure 1. Floor plan of the tailings pond
图 1. 尾矿库平面布置图

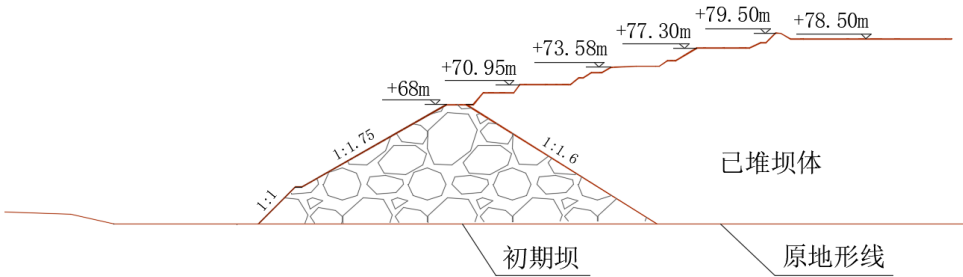


Figure 2. Typical cross-sectional diagram of the current status of tailings dam
图 2. 尾矿坝现状典型断面图

3. 理论分析

3.1. 稳定性分析的基本理论

在工程实践中, 通常需要对某一类边坡进行稳定分析, 采用的主要方法有极限平衡法和数值分析法[8]。

本文利用极限平衡理论对边坡稳定进行分析,其主要优点是计算简便,大多数堤坝稳定性研究和分析都采用了该方法,极限平衡分析中最典型的有瑞典圆弧法[9]和简化 Bishop 法,不仅可以用于坝体的静力分析,还可以用于坝体的抗震稳定分析。

瑞典圆弧法

瑞典圆弧法采用圆弧滑移分析方法,不考虑条块之间的相互作用,基于平面应变,假设滑动面为圆弧面,滑坡面定为连续面,在进行数值模拟时,将被研究物体剖分成 n 个纵竖条,每个纵条为一单元,对作用在各个土条上的受力进行受力与力矩平衡分析。根据“各滑裂面受力等效,且方向与滑移面平行”的原则,确定滑裂面的抗滑力和滑动力,并用二者之比作为滑裂面的安全系数。

4. 数值模拟

Geo-Studio 是一款可以用于矿山、岩土等领域的综合性分析软件,具有操作简单,界面直观等特点。该软件具有多种功能,适合于大坝稳定分析的软件有 SLOPE/W (边坡稳定分析)、渗透分析(SEEP/W)、应力与变形分析(SIGMA/W)及 QUAKE/W (地震动反应分析)等多个函数模块紧密相连,可进行综合模拟分析。SLOPE/W 软件以极限平衡理论为基础,能够对不同类型岩体、不同土层、不同赋存状态下的孔压分布进行数值仿真,实现对不同类型岩体、不同土层、不同赋存状态下的孔压分布状态的仿真。因此,本次研究拟采用 SLOPE/W 模型对尾矿坝稳定性进行数值模拟,并与瑞典圆弧法进行相比较,综合判断尾矿坝的稳定性。

4.1. 尾矿库岩土体力学参数

通过室内试验,得出了尾矿库不同岩土层的力学参数指标如表 1 所示。

Table 1. Geotechnical mass parameters of tailings pond

表 1. 尾矿库岩土体力学参数

岩土名称	饱和重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数 $K_{20}/(\text{cm/s})$
尾中砂	19.6	0.05	38	8.5×10^{-3}
尾砂质粉土	19.42	10	35	1.2×10^{-4}
尾粉砂	19.14	9	36	7.5×10^{-4}
坝体碎石	23.7	3	38	3.0×10^{-2}
强风化凝灰岩	24.1	25	37	5.2×10^{-3}
中风化凝灰岩	24.5	130	45	/

4.2. 尾矿库坝体剖面模型的建立

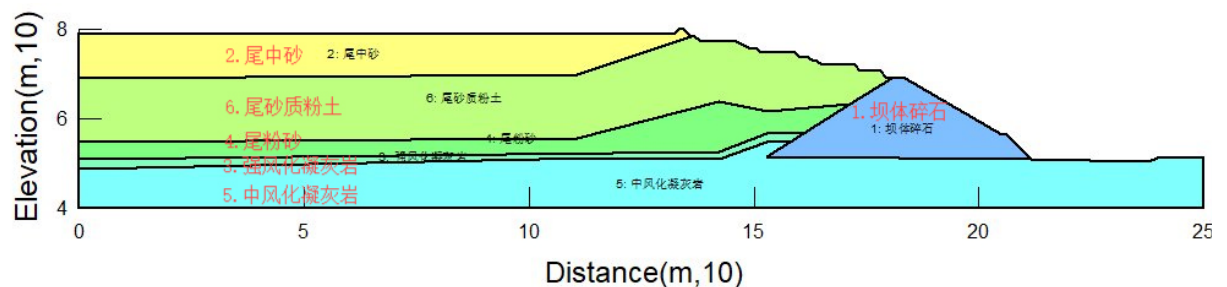


Figure 3. Tailings dam section model and material area division diagram

图 3. 尾矿库坝体剖面模型及材料区域划分图

建立模型前, 先根据尾矿库勘察报告得知坝体结构、几何尺寸和堆积坝水位埋深等情况, 以及尾矿库总体呈上游高、下游低, 库内高、坝前低的特点, 选择中轴线 A-A'截面作为计算剖面(图 1 所示)。根据不同的物理力学特性, 结合堆积体的堆积特征, 将其分为 5 个区段: 尾中砂、尾砂粉土、尾粉砂、坝砾层、强风化凝灰岩、中风化凝灰岩(图 3 所示)。然后模拟分析正常、洪水工况下尾矿坝的浸润线埋深情况, 依据规范标准衡量尾矿库的浸润线埋深是否超出标准, 从而评估尾矿坝的安全状态。在此基础上, 又利用极限平衡法进行坝体稳定分析, 最后综合判断尾矿坝的安全状态。

4.3. 浸润线计算

浸润线是尾矿坝上游面通过大坝向下游渗入而产生的自由液面与坝身断面相交线。浸润线的埋深位置和形态决定了尾砂的承载力和饱和度, 它对尾矿坝的稳定性影响较大, 因此, 在进行稳定性分析时, 准确地计算在不同工况条件下的浸润线分布情况至关重要(图 4、图 5 所示)。该尾矿库堆积坝高小于 30 m, 根据 GB 50863-2013《尾矿设施设计规范》中的规定, 浸润线最小埋深为 2 m。

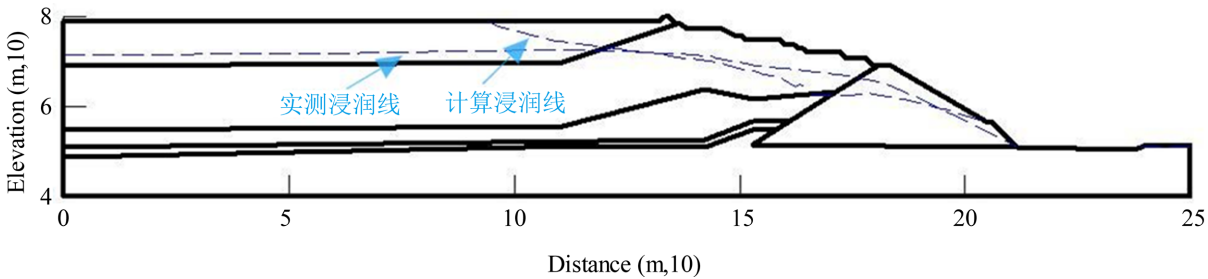


Figure 4. Result of normal operation wetting line calculation
图 4. 正常运行浸润线计算结果

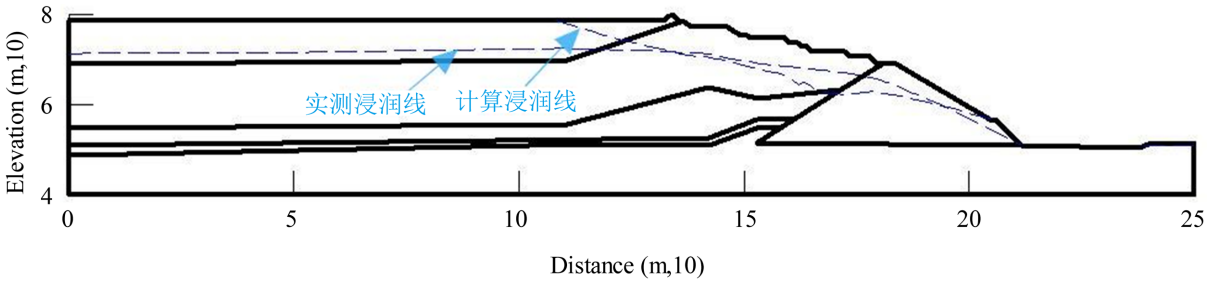


Figure 5. Flood run infiltration line calculation results
图 5. 洪水运行浸润线计算结果

Table 2. Calculate the results of the depth of the infiltration line
表 2. 计算浸润线埋深结果

工况	埋深(m)				
	1 级子坝	2 级子坝	3 级子坝	4 级子坝	5 级子坝
正常运行	9.21	11.12	10.25	8.75	10.34
洪水运行	8.32	9.53	9.26	7.56	8.37

正常运行最小埋深为 8.75 m, 洪水运行最小埋深 7.56 m(表 2 所示), 规范值为 3 m, 故可知, 该模型设定条件下尾矿库浸润线埋深处于正常工作状态和洪水工作状态时, 符合规范要求, 尾矿库在此条件下安全。

4.4. 坝体稳定性分析

查阅相关资料可知, 我国尾矿库坝体抗滑最小安全系数如表 3、表 4 所示, 根据 GB50330-2013《建筑边坡工程技术规范》, 边坡稳定性状态分为稳定、基本稳定、欠稳定和不稳定四种状态。

Table 3. Minimum safety factor of anti-slip dam body of tailings dam (Swedish arc method)

表 3. 尾矿库坝体抗滑最小安全系数(瑞典圆弧法)

尾矿库坝体等级	正常运行	洪水运行	特殊运行
3	1.20	1.15	1.15
4	1.15	1.05	1.05
5	1.15	1.05	1.05

Table 4. Minimum safety factor of anti-slip dam body of tailings dam (simplified Bi Xiaopu)

表 4. 尾矿库坝体抗滑最小安全系数(简化毕晓普法)

尾矿库坝体等级	正常运行	洪水运行	特殊运行
3	1.30	1.20	1.15
4	1.25	1.15	1.10
5	1.25	1.15	1.10

4.4.1. 正常运行时计算结果分析

现有尾矿库坝体工程静力稳定性计算结果分析如图 6、图 7 所示。

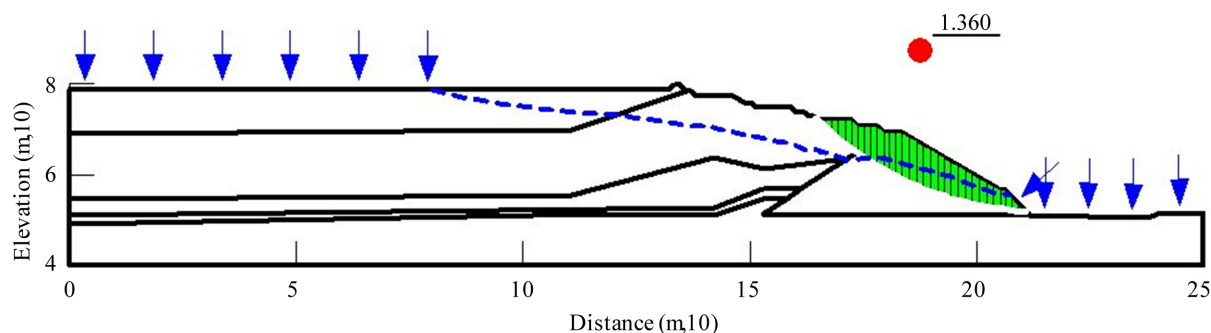


Figure 6. Swedish arc method (Normal operation)

图 6. 瑞典圆弧法(正常运行)

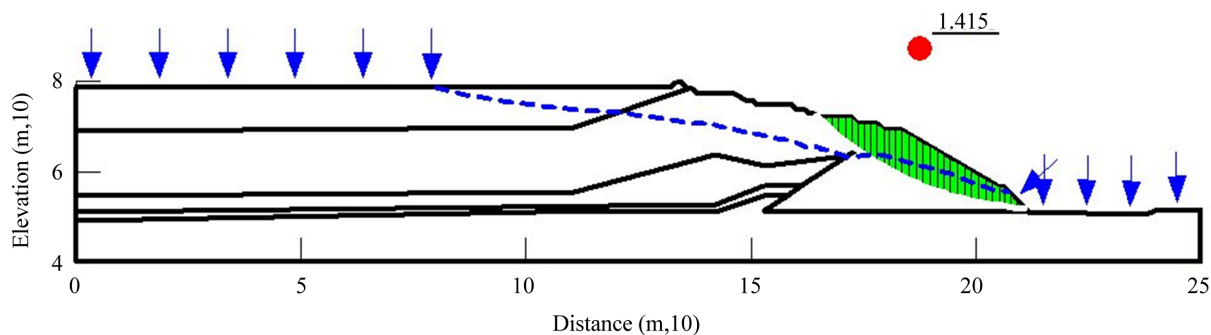


Figure 7. Bishop method (Normal operation)

图 7. Bishop 法(正常运行)

4.4.2. 洪水运行时计算结果分析

洪水工况下运行结果分析如图 8、图 9 所示。

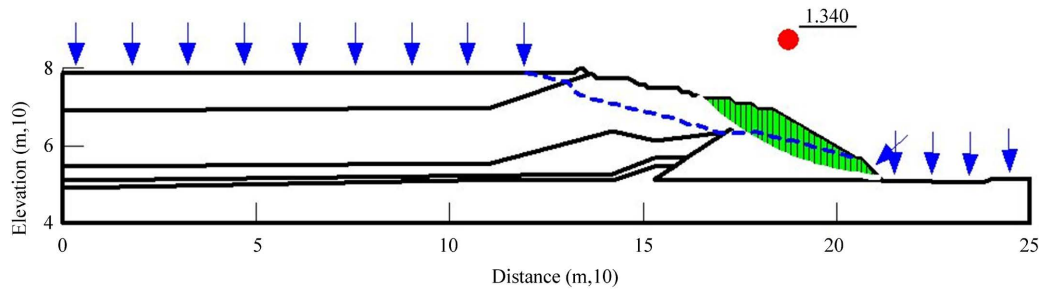


Figure 8. Swedish arc method (Flood operation)
图 8. 瑞典圆弧法(洪水运行)

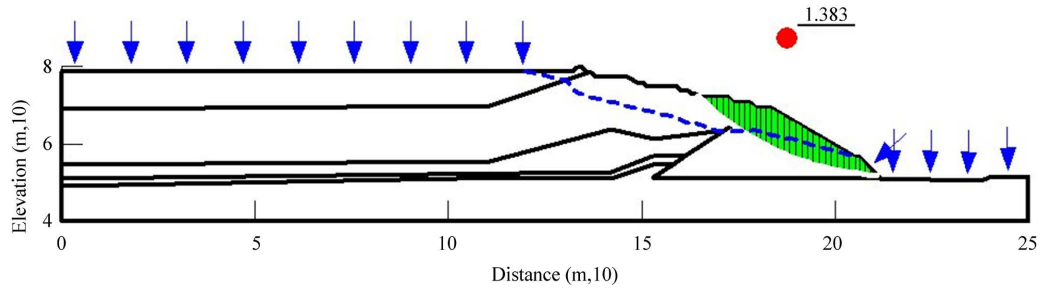


Figure 9. Bishop method (Flood operation)
图 9. Bishop 法(洪水运行)

4.4.3. 特殊运行时计算结果分析

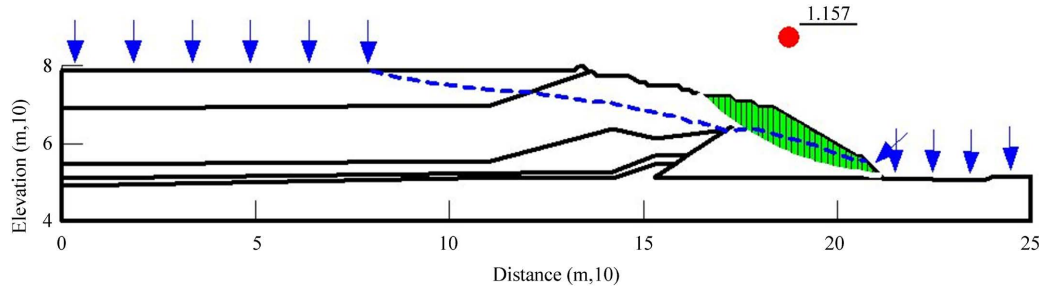


Figure 10. Swedish arc method (Special operation)
图 10. 瑞典圆弧法(特殊运行)

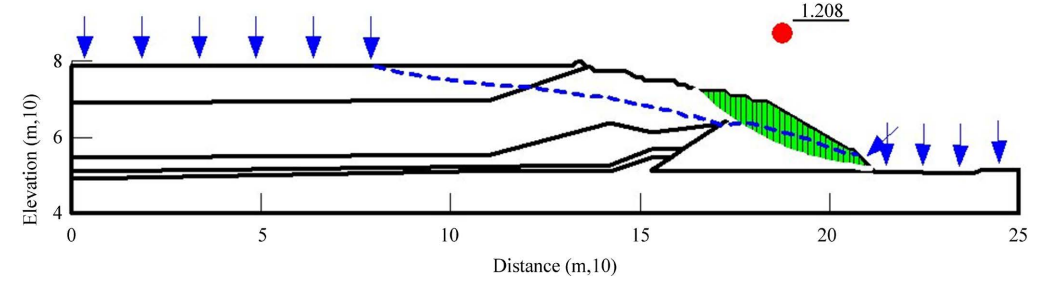


Figure 11. Bishop method (Special operation)
图 11. Bishop 法(特殊运行)

特殊工况下运行结果分析如图 10、图 11 所示。

5. 结果分析

先后对大坝进行了三种情况下的抗滑稳定性分析，计算得出的抗滑稳定性系数见表 5 所示。两种理论方法下的计算结果相接近，从规范标准上看，在三种工况条件下其安全系数均满足要求，根据 GB50330-2013《建筑边坡工程技术规范》，该坝体处于稳定状态。

Table 5. Calculation results of dam stability of tailings dam
表 5. 尾矿库坝体稳定性计算成果

运行工况		安全系数规范值	安全系数计算值
瑞典圆弧法	正常运行	1.15	1.360
	洪水运行	1.05	1.340
	特殊运行	1.05	1.157
Bishop 法	正常运行	1.25	1.415
	洪水运行	1.15	1.383
	特殊运行	1.10	1.208

6. 结论与建议

- 1) 运用两种不同理论方法计算得到的抗滑稳定性系数均满足规范要求，说明大坝在三种工况条件下是安全的。
- 2) 在梅雨季节来临时应重点关注，加强巡查，防止库内周边发生崩塌、滑坡引发次生灾害。
- 3) 加强对库区排水沟的巡查和管理，以保证排涝设施的安全运行，定期清理沟渠周边的杂草和枯枝，避免堆积而产生淤堵。

参考文献

[1] 李欣潼. 红透山尾矿库坝体稳定性分析研究[J]. 有色矿冶, 2024, 40(6): 57-59.

[2] 孙笑微. 基于 Autobank 的尾矿库坝体稳定性分析[J]. 有色矿冶, 2023, 39(4): 57-61.

[3] 梅国栋, 王云海. 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] 梁远骥. 基于 Geo-Studio 的降雨条件下尾矿坝体稳定性分析[J]. 现代矿业, 2022, 38(12): 141-144.

[5] 王峰, 杨勇, 王宇驰, 等. 基于 Geo-Studio 的尾矿库加高扩容后坝体稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(5): 90-98.

[6] 杨清峰, 陈玉明. 基于 Slide 的尾矿库坝体稳定性分析[J]. 煤矿机械, 2017, 38(6): 164-167.

[7] 王明辉, 康志强, 李蕾. 唐山某尾矿库坝体稳定性数值模拟研究[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(11): 30-32.

[8] 周宝俊. 基于极限平衡法原理的下游法堆筑尾矿坝稳定性分析[J]. 化工矿物与加工, 2015, 44(7): 40-42.

[9] 马跃, 赵建洲. 基于瑞典圆弧法的尾矿库坝体稳定性评价[J]. 科技展望, 2016, 26(6): 25.