
基于有限元的尾矿库坝体稳定性分析

——以大冶丰山铜矿为例

杨骐瑛¹

(武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

【摘要】: 我国有大小不同的尾矿库上万座, 一旦发生溃坝事故, 不仅会对周边和下游环境造成不可逆转的危害, 而且会给人民生命财产造成巨大损失。本文以湖北省大冶市丰山铜矿尾矿库为例, 结合有限元分析的方法对尾矿库坝体稳定性进行评估, 对于矿山企业安全生产具有重要意义。

【关键词】: 尾矿库 有限元分析 坝体稳定性

【中图分类号】: TB **【文献标识码】:** A

0 引言

尾矿库既是一个具有高势能、高危害性的危险源以及环境风险源, 也是矿山选矿厂以及矿山企业安全生产开发的重要生产设施, 尾矿库的稳定性、安全性和可行性对矿山企业的正常运转、当地的环境以及生命财产安全极为重要。

有限元分析是一种常用的数学模拟的方法, 在工程稳定性分析方面具有广泛的应用。周忠群等采用有限元 ABAQUS 结合强度折减法, 分析了含双承压水地层中地连墙槽壁稳定性; 黄佩兵以某钢管桁架整体吊装工程为例, 介绍了吊装节点受力的有限元分析过程; 张伟星以唐山某白云石矿露天采场为研究对象, 通过有限元法以及极限平衡法模拟了该采场边坡在正常工况、洪水(降雨)工况以及地震工况下的稳定性。基于此, 本课题采用有限元分析的方法, 对大冶丰山铜矿尾矿库坝体稳定性进行分析是可行的。

1 研究区域概况

1.1 地理位置

丰山铜矿位于湖北省黄石市阳新县富池镇丰山村, 向东 25km 至江北武穴市, 向西北 110km 至黄石市, 向西 40km 至阳新县城, 向北 2km 濒临长江, 东南毗邻江西瑞昌县。地理坐标为东经 $115^{\circ} 25' 56''$ 至 $115^{\circ} 27' 39''$, 北纬 $29^{\circ} 48' 42''$ 至 $29^{\circ} 50' 13''$, 矿区面积 2.3534km^2 。经富池镇有公路与阳新县、黄石市相通。水路沿江而上可至重庆, 沿江而下可达上海, 交通十分便利, 如图 1 所示。

作者简介: 杨骐瑛(1977-), 男, 汉族, 广东梅州人, 硕士研究生, 主要研究方向:安全与环境工程、环境安全管理。



图 1 大冶丰山铜矿尾矿库地理位置图

1.2 气象条件

阳新县属北温带温暖潮湿大陆型气候，四季分明。年平均降雨量 1680.3mm，年最大降雨量 2402.8mm，最大量多集中在 3~8 月份，年均蒸发量达 1297.2mm，最大年蒸发量为 1546.3mm。

1.3 地质构造

矿区位于淮阳山字型构造弧顶偏西部位，矿区北部受淮阳山字型构造西翼影响，形成了北西西走向的紧密线状倒转褶皱(如凤凰山倒转向斜)和近于平行或部分平行褶皱轴的走向冲断层。矿区附近受印支至燕山期的南北向挤压作用，形成了一系列平行展布的近东西向紧密倒转背斜和向斜构造(如苗母山-鸡笼山复式倒转向斜、码头富池倒转背斜)断裂以冲断层为主，多平行岩层走向，同时发育着北东及北西两组张扭性断层。

尾矿库场地位于码头-富池倒转背斜南翼，岩层呈近单斜状构造产出，其倾向介于 185° 至 200° ，倾角介于 30° 至 52° ，浅部岩性为中三迭统嘉陵江组白云质灰岩，深部为下三迭统大冶组灰岩，场地内未发现断裂构造。

2 基于有限单元的尾矿库坝体稳定性分析

考虑库内正常水位、洪水水位、地震+洪水水位三种工况条件，计算坝体内浸润线位置、水力坡降。正常水位以目前该库库内水位为准，即水位为 62m，干滩长度为 370m；洪水水位以《尾矿设施设计规范》(GB50863-2013)中规定的三等库满足最小安全超高的条件下的最高水位为准，即保证最小安全超高为 0.7m 时的最高水位，即 65.07m，最小干滩长度为 70m；该尾矿库场地地震烈度为 6 度，因此模拟计算时取地震加速度为 0.05g。

2.1 渗流分析

本课题采用有限元集成模拟代替连续渗流场，通过有限元方法计算渗透率，设置边界条件，计算渗透线位置，单元之间的连

接点称为节点，坝体与坝基的渗流，坝体出逸段的水力坡度。渗流计算的控制微分方程如公式(1)所示。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1)$$

其中，H为总水头， k_x 为x方向渗透系数， k_y 为y方向渗透系数，Q为边界流量， Θ 为微元体积变化量，t为时间。

渗流控制方程表示在同一时间内，流入和流出微元体积的流量差值等于该微元体积的变化量。进行平面分析时，在x方向和y方向的流量改变速率的总和加上边界流量就等于相应时间的微元体积的变化量。

在稳态条件下，相同时间内流入和流出单元体积的流量是相等的，故方程可以简化如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2)$$

总水头H定义如下：

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

其中， u_w 为孔隙水压力， γ_w 为水的容重，y为高程。稳定渗流有限元计算方式如下：

$$[K] \{h\} = \{F\} \quad (4)$$

其中，[K]为有限元系统的渗透矩阵，为各单元渗透矩阵求和，{h}有限元系统的节点水头列阵，{F}常数列阵，由已知水头节点得出。

2.2 稳定性分析

根据《尾矿堆积坝岩土工程技术规范》(GB50547-2010)规定，尾矿库坝坡静力稳定性分析应采用简化毕肖普法或者瑞典圆弧法。根据《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013)规定，计算土质边坡、极软岩边坡、破碎或极破碎岩质边坡的稳定性时，可采用圆弧形滑面。当采用圆弧滑动法时，边坡稳定性系数 K_s 计算方式如下：

$$K_s = \frac{\sum R_i}{\sum T_i} \quad (5)$$

其中， T_i 为第i计算条块单位宽度重力及其外力引起的下滑力，计算方法如下：

$$T_i = (G_i + G_M) \sin \theta_i + P w_i \cos (\alpha_i - \theta_i) \quad (6)$$

公式(5)中， R_i 为第i计算条块单位宽度重力及其外力引起的抗滑力，计算方法如下：

$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i l_i \quad (7)$$

3 丰山铜矿尾矿库坝体稳定性分析

丰山铜矿尾矿库是一座三面环山、一面筑坝的山谷型尾矿库，尾矿库初期坝坝长 725.0m，坝顶坝底标高 16.0m，坝顶标高 25.0m，坝高 9.0m，为均质土坝，设有上游反压层，厚 3.5m；下游反压层，厚 4.0m，坝体坐落在高压压缩性软塑土地基上。目前，尾矿库堆积至第十八级子坝，总坝高 49.77m，其中初期坝坝高 9m，堆积子坝坝高 40.99m，堆积坝坝顶宽度为 4m。

3.1 参数选择

本课题选取的计算介质包括基岩、尾矿、初期坝、堆积坝等，根据现有的工勘数据，参考相关规范要求和岩土力学边坡稳定性分析理论。

通过理正岩土计算 6.5 版软件进行自动搜索，自动搜索最不利圆弧，其稳定系数为 1.182；对堆积坝采用指定出入口搜索最不利圆弧，其稳定系数为 1.726，具体验算结果如表 1 所示。

根据《尾矿堆积坝岩土工程技术规范》(GB50547-2010)有关标准，按三等库考虑，正常运行状态的最小安全系数为 1.20，该堆积坝处于稳定状态，但坝体下段稳定性系数偏低，需考虑对初期坝段进行适当处理及专门设计。

表 1 圆弧滑动法验算结果

序号	圆心坐标	半径	最小稳定性系数
1	(58.962, 7.290)	22.511	1.182
2	(287.426, 71.397)	87.245	1.726

3.2 计算断面

丰山铜矿尾矿库坝体底部高程为 16m，设计坝顶高程为 68m，设计最大坝高为 52m，目前子坝堆筑标高为 65.77m，最大坝高为 49.77m，选取最大坝高截面作为计算剖面，如图 2 所示。

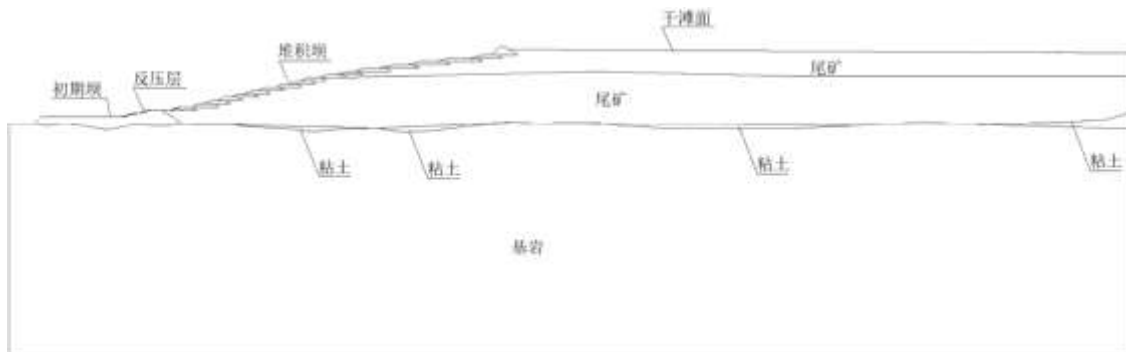


图 2 坝体截面图

为方便进行渗流稳定性分析，根据丰山铜矿尾矿库堆存现状，从尾矿库现状地质地形图中截取坝体剖面，对选取的坝体截面进行简化处理，处理所得的计算剖面。通过 Autobank 水工结构分析系统建立的有限元网格模型。

3.3 计算结果与分析

3.3.1 正常运行

尾矿库在正常运行状态下，计算所得的浸润线和抗滑稳定系数分别如图 3 和图 4 所示。

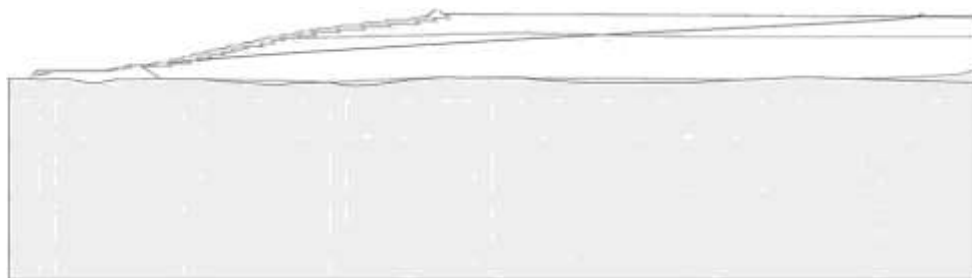


图 3 正常运行时的浸润线

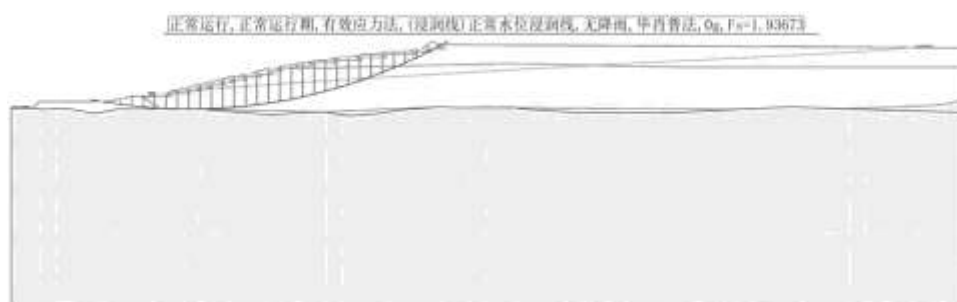


图 4 正常运行时的安全系数

3.3.2 洪水运行状态

尾矿库在洪水运行状态时，计算所得的浸润线和抗滑稳定系数分别如图 5 和图 6 所示。



图 5 洪水运行时的浸润线

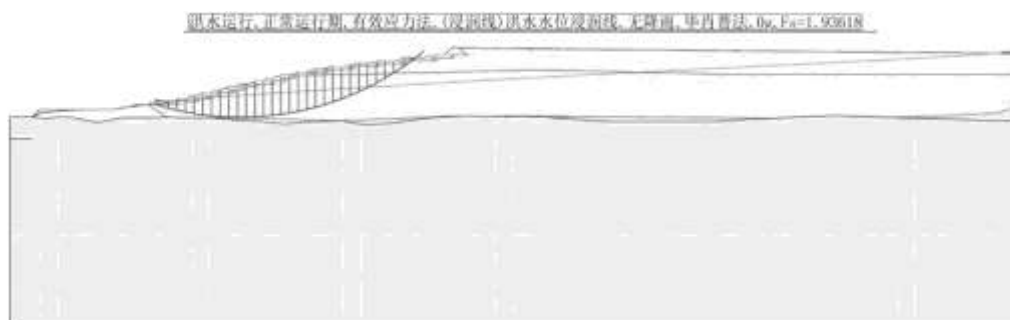


图 6 洪水运行时的安全系数

3.3.3 洪水和地震运行状态

丰山铜矿尾矿库所处位置区域地震烈度为 6 度，模拟时取地震加速度为 0.05g。尾矿库在洪水和地震运行状态时，计算所得的浸润线和抗滑稳定系数分别如图 7 和图 8 所示。



图 7 洪水和地震运行时的浸润线

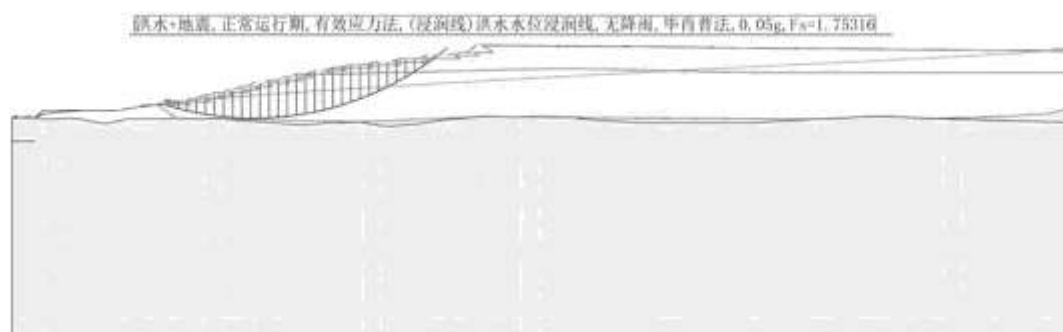


图 8 洪水和地震运行时的安全系数

4 结论

根据《尾矿设施设计规范》(GB50863-2013)及《构筑物抗震设计规范》(GB50191-2012)对坝体抗滑稳定最小安全系数的规定，

丰山铜矿尾矿库坝体各工况条件下的安全系数如表 2 所示。

表 2 坝体各工况下的安全系数

序号	运行情况	安全系数	
		规范值	计算值
1	正常运行	1.30	1.93673
2	洪水运行	1.20	1.93618
3	洪水和地震运行	1.15	1.75316

根据计算所得丰山铜矿尾矿库在正常运行、洪水运行、洪水+地震运行时的浸润线、安全系数，总结如下：

(1) 当前丰山铜矿尾矿库坝体各工况条件下的安全系数均满足法规要求。

(2) 稳定性计算时发现第一至第三级堆积坝浸润线较高，建议结合现场浸润线监测情况，采取适当的排渗措施，结合现场坝体位移监测情况，采取适当的坝体加固措施。

参考文献：

[1] 郑重，张敬东，杜建华，等. 基于 RCP 的尾矿库监测点故障诊断方法研究[J]. 现代商贸工业，2017, (36):195-198.

[2] 周忠群，张孟喜，王鑫，等. 含双承压水地层中地连墙槽壁稳定性有限元分析[J]. 水力发电，2021, (7).

[3] 黄佩兵. 钢管桁架吊装节点受力有限元分析[J]. 机电工程技术，2021, 50(9):193-195.