

文章编号: 1007-2993(2023)03-0357-04

有限元分析在尾矿库渗流及抗滑稳定工程实践中的应用

宁皓 张向阳 牟宗琪

(建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007)

【摘要】 某新建尾矿库初步设计拟采用一次性筑坝, 坝型为碾压式土石坝, 为评价设计方案的合理性以及尾矿库的安全性, 采用有限元方法对尾矿库渗流稳定性和抗滑稳定性分析计算, 结果表明, 尾矿坝采用的渗控体系能够满足大坝的防渗要求, 坝体上游侧的 HDPE 土工膜起到了较好的截渗效果, 库内浸润线分布规律合理, 下游设计排渗系统起到了较好的排渗效果; 在正常蓄水位、最高洪水位和地震等 3 种工况下, 尾矿坝下游边坡的抗滑稳定性均满足规范要求, 设计方案合理可行。

【关键词】 尾矿库; 渗流场; 抗滑稳定性; 有限元分析

【中图分类号】 TD 167

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.03.017

Application of Finite Element Analysis in Seepage and Anti-slip Stability of Tailings Pond

Ning Hao Zhang Xiangyang Mu Zongqi

(CIGIS(CHINA) LIMITED, Beijing 100007, China)

【Abstract】 In the preliminary design of a proposed tailings pond, one-time dam construction is adopted, and the dam type is roller compacted earth rock dam. In order to evaluate the rationality of the design scheme and the safety of the tailings pond, the seepage and anti-slip stability of the tailings pond were calculated by the finite element method. The results show that the seepage control system adopted by the tailings dam can well meet the seepage control requirements. The HDPE geomembrane on the upstream side of the dam has played a good seepage interception effect, and the distribution law of the infiltration line in the reservoir is reasonable. At the same time, the drainage system designed for the downstream has played a good seepage effect. Under the three conditions of normal storage level, maximum flood level and earthquake, the sliding stability of the downstream slope of tailings dam meets the specification requirements, proving that the design scheme is reasonable and feasible.

【Key words】 tailings pond; seepage field; anti-slip stability; finite element analysis

0 引言

尾矿坝是工业重大危险源, 近年来国内外发生多例尾矿库溃坝事故, 如 2015 年巴西 Samarco 尾矿库、2014 年加拿大 Mount Polley 尾矿库等, 造成了生命财产损失和对自然环境的破坏^[1-4]。尾矿库的溃坝风险主要源自坝体的渗流破坏和边坡失稳, 因此坝体的渗流稳定性和抗滑稳定性成为尾矿库安全评价的核心内容。

针对尾矿坝渗流和边坡稳定性问题, 国内外开展了一系列的分析和研究^[5-8]。李强等简化了尾矿

坝浸润线计算模型, 并分析了尾矿砂各向异性、尾矿砂地质分层和尾矿坝底坡地形对尾矿坝浸润线分布的影响, 还进行了尾矿坝基于流固耦合-强度折减的三维稳定性分析, 指出尾矿坝内三维滑移面的空间分布与库区地形有着密切联系^[9-10]。杨春和等^[11]进行了尾矿材料的渗透的研究, 指出粗颗粒尾矿内会形成大孔隙渗流通道, 而细颗粒尾矿内为四散的渗流模式。魏作安等^[12]对尾矿库在不同条件下的渗流进行了模拟计算, 指出采取坝体排渗措施能使坝体中的地下水

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102310938); 河南省高等学校重点科研项目(22B560010); 中国煤炭科工集团双创资金重点项目(2022-ZD002)

作者简介: 宁皓, 男, 1972 年生, 汉族, 北京人, 大学本科, 工程师, 从事岩土工程勘察、岩土工程治理、岩土工程监测等相关工作。E-mail: 13701317370@163.com

顺利导出,从而有效降低坝体浸润线的位置,有利提高尾矿坝的稳定性。张超等^[13]开展了粒径对坝体稳定性影响的研究,指出尾矿坝稳定性随粒料加权平均粒径的减小而降低。尹光志等^[14]研究发现地震作用下尾矿坝的最小安全系数随干滩面长度的增大而增大,随坝高和地震加速度的增大而减小,并基本呈线性关系。Yaya等^[15]采用数值模拟和地球物理探测相结合的方法评估了尾矿坝结构和稳定性,尾矿坝的电阻率存在垂直变化,表明坝体具有多层结构,数值计算安全系数远高于最小建议值1.5。

某新建尾矿库工程初步设计拟采用一次性筑坝,设计坝型为碾压式土石坝,为了评价设计方案的合理性和尾矿库安全性,采用有限元方法开展尾矿库渗流和抗滑稳定性研究。

1 尾矿库工程概况

某矿山选厂设计服务年限为9年,选厂产生尾

矿总量约为 5.52×10^6 t,经现场调研,拟在选厂东北侧直线距离约1.0 km处的天然沟谷内建设尾矿库,沟谷三面临山,地势南高北低。经初步设计,该尾矿坝采用一次性筑坝,坝型为碾压土石坝,坝高74 m,坝顶标高为180.00 m,坝底标高为106.00 m,坝长198 m,坝顶宽8 m,坝内坡比为1:2.5,外坡比为1:3.0。当尾矿堆积至标高178.00 m标高时,可形成总库容约 4.81×10^6 m³,有效库容 4.09×10^6 m³,属于三等库,可满足矿山9年的尾矿堆存需求。在坝外坡标高170.00 m、160.00 m、150.00 m、140.00 m、130.00 m、120.00 m、110.00 m和100.00 m处设置马道,顶宽4 m;在坝内坡标高170.00 m、160.00 m、150.00 m、140.00 m、130.00 m、120.00 m、110.00 m和100.00 m处设置平台,顶宽2 m。坝外坡设0.3 m厚干砌块石护坡;内坡铺设砂砾石垫层(300 mm)、一层土工布(500 g/m²)、防渗层(2 mm HDPE膜)、一层土工布(500 g/m²)、砂砾石垫层(300 mm)、一层土工布(500 g/m²)。坝体结构如图1所示。

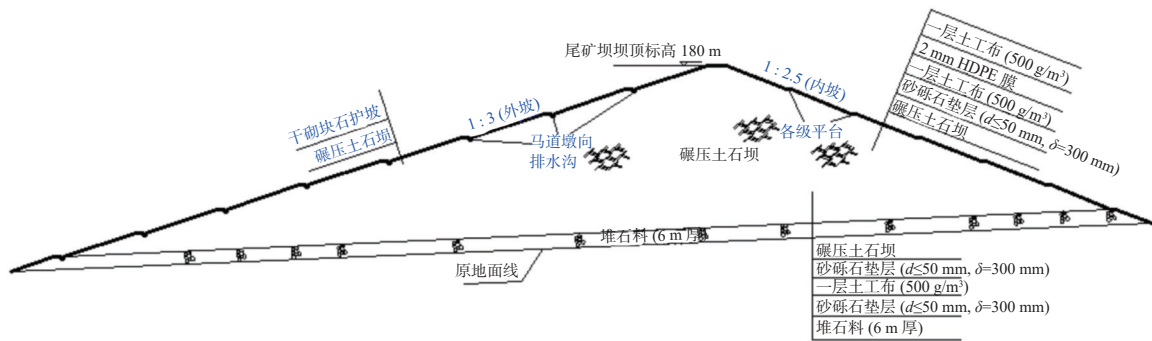


图1 尾矿坝坝体结构

2 尾矿坝渗流安全性分析

2.1 计算原理

二维渗流问题的基本方程和边界条件为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{在} \Omega \text{内} \quad (1)$$

$$H(x, y)|_{S_1} = f(x, y) \quad \text{在} S_1 \text{上} \quad (2)$$

$$H(x, y)|_{S_3+S_4} = y(x) \quad \text{在} S_3 \text{和} S_4 \text{上} \quad (3)$$

$$k_x \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + k_y \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) - q = 0 \quad \text{在} S_2 \text{上} \quad (4)$$

式中: H 为水头函数; k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 主方向渗透系数,坐标轴方向与渗透方向一致; Ω 为渗流区域; S_1 为已知水头值的边界曲线; S_2 为给定流量边界曲线; S_3 为浸润线; S_4 为逸出段; q 为边界上的单宽流量,这里 $q=0$ 表示为不透水边界; n 为边界的法线方向。对于

各向同性的介质即 $k_x=k_y=k$,式(4)可简化为 $\frac{\partial H}{\partial n} = 0$ 。对于所研究的稳定渗流场,根据变分原理,上述定解问题的求解等价于求下列泛函的极值问题,即:

$$[H(x, y)] = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 dx dy = \min \quad (5)$$

$$H(x, y) = f(x, y) \quad \text{在} S_1 \text{上} \quad (6)$$

2.2 模拟计算

参考同类型尾矿坝施工、运行情况,同时考虑工程长期安全有效运行,本次二维渗流有限元计算设置两种工况。

工况1:重点考虑水库正常运行方案,即正常蓄水位(178.00 m)运行条件下坝体和坝基的渗流场特性,给出和分析渗流场水头分布以及渗透梯度和渗流量的大小;

工况 2:同时考虑水库蓄水位达到最高洪水位(178.50 m)时大坝及坝基的渗流特性。

选用 GEO-SLOPE 公司岩土工程计算分析软件包系列中的 SEEP/W 软件对坝体中的主要水工结构物进行了渗流有限元计算。计算模型主要包含坝体结构(碾压土石料、底部碾压堆石料);防渗层为 HDPE 土工膜,铺设在上游坝坡;坝基主要为强风化基岩;库内尾矿砂包括尾粉土、尾粉质黏土和尾黏土,尾矿坝典型材料分区如图 2 所示。计算时所采取的各种材料的渗透系数根据工程勘察资料、尾矿排放和输送条件,并参考规范和工程经验进行取值^[16],具体情况如表 1 所示,模型主要由四边形 4 结点等参元和局部区三角形 3 结点过渡性等参元组成,以前者为主,共有 19215 个单元和 19498 个结点。

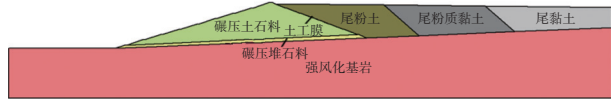


图 2 尾矿坝典型材料分区

表 1 二维渗流有限元计算参数取值

材料名称	渗透系数/(m·s ⁻¹)	
	k_x	k_y
碾压堆石料	3.00×10^{-4}	3.00×10^{-4}
碾压土石料	3.00×10^{-6}	3.00×10^{-6}
尾粉土	1.25×10^{-6}	1.25×10^{-6}
尾粉质黏土	3.00×10^{-8}	3.00×10^{-8}
尾黏土	2.00×10^{-9}	2.00×10^{-9}
HDPE 土工膜	1.00×10^{-12}	1.00×10^{-12}
强风化基岩	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}

各工况下关键部位水头计算结果如图 3、图 4 所示。可以看出,整个渗流场的水头分布规律合理,水头等值线形态、走向和密集程度都较准确地反映了相应区域防渗或排水渗控措施的特点、渗流特性和边界条件。

拟建尾矿库工程通过在碾压土石坝上游铺设截渗效果较好的 HDPE 土工膜(渗透系数为 1.0×10^{-12} cm/s),防止库内积水向土石坝内渗流,土石坝能够维持初始的较低含水率状态,同时由于尾矿坝坝基为强风化基岩,其渗透系数为 1.0×10^{-4} cm/s,在大坝建成之后,其地基整体渗透性较弱,因此坝体底部的碾压堆石料成为主要的渗流通道。

上游水头在到达土石坝前有较小的跌幅,库水入渗至坝体底部碾压堆石料后水头大幅度削减,工

况 1、工况 2 下分别削减约 58.0 m、58.1 m,之后库水从坝体底部碾压堆石料中排向下游,正常水位和设计洪水位两种工况下逸出点的最大水力比降均小于 0.1,说明目前采用的渗控体系能够较好地满足大坝的防渗要求。

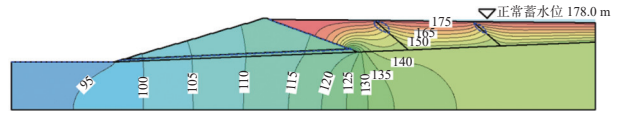


图 3 工况 1 下水头等值线分布图(单位:m)

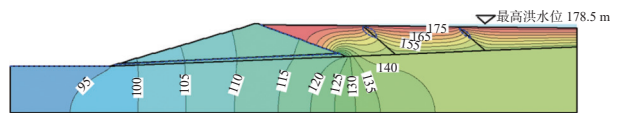


图 4 工况 2 下水头等值线分布图(单位:m)

3 尾矿坝边坡稳定分析

尾矿坝工程等级为 III 等,设计地震烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 0.20g。针对尾矿坝典型剖面,以渗流分析结果为基础,分别计算正常运行、洪水运行、特殊运行 3 种工况下的大坝下游边坡的整体稳定性,评价坝体边坡的安全性。

选用 GEO-SLOPE 公司岩土工程计算分析软件包系列中的 SLOPE/W 软件对坝体边坡进行了渗流有限元计算,采用简化 Bishop 法开展边坡稳定计算分析,各材料力学特性参数根据工程勘察资料、尾矿排放和输送条件,并参考规范和工程经验进行取值^[16],具体如表 2 所示。

表 2 主要材料力学特性指标

材料种类	天然重度 γ /(kN·m ⁻³)	抗剪强度	
		c/kPa	ϕ (°)
碾压堆石料	22.0	0.0	41.0
碾压土石料	18.5	26.0	24.0
尾粉土	20.0	9.8	28.0
尾粉质黏土	19.5	10.8	16.0
尾黏土	18.0	13.7	8.0

依据《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013),该库总坝高 $H=74$ m,总库容 $V=481 \times 104$ m³,属于三等库,采用简化毕肖普法分析坝坡抗滑稳定性时,正常运行、洪水运行、特殊运行条件下的最小安全系数分别为 1.30、1.20、1.15。典型剖面在 3 种工况下的最危险滑裂面位置见图 5—图 7,安全系数计算值及规范允许值如表 3 所示。可以看出在正常运行、洪水运行、特殊运行 3 种工况下,尾矿坝下游边坡的抗滑稳定性均满足规范要求。

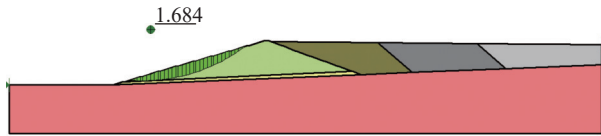


图5 工况1正常蓄水位下边坡稳定性计算结果

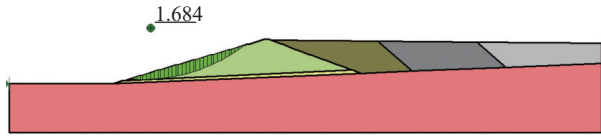


图6 工况2最高洪水水位下边坡稳定性计算结果

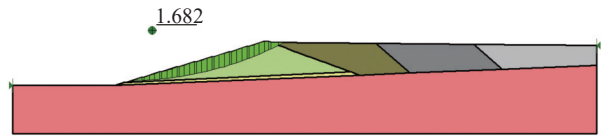


图7 工况3正常蓄水位+地震下边坡稳定性计算结果

表3 大坝稳定计算结果(Bishop)

计算剖面	工况编号	计算条件	安全系数	允许值
典型剖面	1	正常运行	1.68	1.30
	2	洪水运行	1.68	1.20
	3	特殊运行	1.16	1.15

4 结论

为了评价某拟建尾矿库工程设计方案的合理性和尾矿库安全性,采用有限元方法开展尾矿库渗流和抗滑稳定性研究,得出以下结论:

(1)通过正常蓄水位、最高洪水水位等工况的二维渗流计算分析,上游水头在到达土石坝前有较小的跌幅,库水入渗至坝体底部碾压堆石料后水头大幅度削减并排向下游,表明采用上游侧HDPE土工膜渗控体系能够较好地满足大坝的防渗要求。

(2)采用简化毕肖普法分析尾矿库大坝在正常运行、洪水运行、特殊运行3种工况下的抗滑稳定性,所得边坡安全系数分别为1.68、1.68、1.16,满足《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)的相关规定。

参考文献

[1] 王 昆,杨 鹏,HUDSON-EDWARDS K,等.尾矿库溃坝灾害防控现状及发展[J].工程科学学报,2018,40(5):526-539.

[2] 刘嘉欣,阎志坤,钟启明,等.尾矿库漫顶溃坝机理与溃

坝过程数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2694-2708.

- [3] 吴帅峰,严 俊,蔡 红,等.尾矿管涌溃坝模式及下泄冲击特性试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(11):2134-2141.
- [4] 刘 磊,张红武,钟德钰,等.尾矿库漫顶溃坝模型研究[J].水利学报,2014,45(6):675-681.
- [5] 时悦琪,李长洪,龙大愚.细粒尾矿砂渗透破坏细观结构特征研究[J].西安交通大学学报,2020,54(4):155-164.
- [6] 路瑞利,孙东坡,位 伟.排渗系统对尾矿库填筑期渗流场的影响[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(3):532-543.
- [7] 王文松,尹光志,魏作安,等.高烈度地震区细粒尾矿上游法筑坝动力反应与稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1201-1214.
- [8] 王文松,尹光志,魏作安,等.基于时程分析法的尾矿坝动力稳定性研究[J].中国矿业大学学报,2018,47(2):271-279.
- [9] 李 强,高 松,牛红凯,等.尾矿库浸润线解析解及适用性分析[J].岩土力学,2020,41(11):3714-3721,3756.
- [10] 李 强,张力霆,齐清兰.基于流固耦合的尾矿库三维失稳形态及稳定性分析[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(3):558-567.
- [11] 杨春和,张 超,李全明,等.大型高尾矿坝灾变机制与防控方法[J].岩土力学,2021,42(1):1-17.
- [12] 魏作安,陈宇龙,李广治.中线法尾矿坝地下渗流场的数值模拟[J].重庆大学学报,2012,35(7):89-93.
- [13] 张 超,马昌坤,杨春和,等.粒径对尾矿抗剪强度及坝体稳定性影响[J].岩土工程学报,2019,41(S1):145-148.
- [14] 尹光志,王文松,魏作安,等.地震作用下高堆尾矿坝永久变形与稳定性分析[J].岩土力学,2018,39(10):3717-3726.
- [15] YAYA C, TIKOU B, CHENG L Z. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(4): 701-710.
- [16] GB 50863—2013 尾矿设施设计规范[S].

收稿日期:2022-09-01