

某电厂贮灰坝渗流场研究

苏宇磊, 吴 琦

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年11月5日; 录用日期: 2024年12月1日; 发布日期: 2024年12月9日

摘 要

浸润线是尾矿坝安全关键控制因素之一, 为分析某电厂贮灰坝渗流场状态及浸润线影响因素, 采用GEO-Slope软件渗流模块, 结合勘察资料和监测数据, 选取最不利剖面模拟贮灰坝渗流场及影响坝体浸润线因素。结果表明: 1) 在初期坝排渗设施失效, 干滩长度50米以下时堆积坝不稳定。2) 贮灰坝浸润线的位置随着干滩长度的减小而上升, 随着初期坝渗透系数的减小而上升。研究所得结论能够为电厂贮灰坝的渗流监测及控制提供一定的参考。

关键词

贮灰坝, 渗流场, 浸润线

Study on Seepage Field of Ash Storage Dam in a Certain Power Plant

Yulei Su, Qi Wu

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Nov. 5th, 2024; accepted: Dec. 1st, 2024; published: Dec. 9th, 2024

Abstract

The infiltration line is one of the key control factors for tailings dam safety. In order to analyze the seepage field status and influencing factors of the seepage line of a power plant's ash storage dam, the GEO-Slope software seepage module was used. Combined with survey data and monitoring data, the most unfavorable profile was selected to simulate the seepage field of the ash storage dam and the factors affecting the seepage line of the dam body. The results indicate that: 1) In the initial stage, the dam drainage facilities fail, and the accumulation dam is unstable when the dry beach length is below 50 meters. 2) The position of the infiltration line of the ash storage dam increases with the decrease of the dry beach length and the decrease of the initial dam permeability coefficient. The

文章引用: 苏宇磊, 吴琦. 某电厂贮灰坝渗流场研究[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2190-2198.

DOI: 10.12677/hjce.2024.1312241

conclusions drawn from the research can provide some references for the seepage monitoring and control of ash storage dams in power plants.

Keywords

Ash Storage Dam, Seepage Field, Infiltration Line

Copyright © 2024 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

贮灰坝是指燃煤火力发电厂为堆存废渣(粉煤灰)而修建的挡灰坝,是尾矿库的一种。其作为一个具有高势能的人造泥石流危险源,存在溃坝危险,一旦失事,容易造成重大事故,严重危害环境和人民的生命财产安全。在 2019 年 1 月,巴西的 Brumadinho 淡水谷遭遇了一场大规模的溃坝事故,这已是该地区三年内发生的第二次此类灾难。事故导致的直接和间接经济损失高达 70 亿美元[1]。紧接着,在 2020 年 5 月,美国密歇根州中部的泰塔巴瓦希河上,伊登维尔坝和桑福德坝相继发生溃坝,造成约 2.45 亿美元的经济损失[2]。从 2001 年到 2020 年,在我国境内,共发生了 90 多起尾矿库事件,其中包括 8 起重大的事件[3]。鉴于此,我们必须对尾矿库进行日常的预防工作,并且更应从源头上采取措施,以降低安全事故的发生概率,减少环境污染的风险。

浸润线作为尾矿坝安全的关键控制因素之一,浸润线的位置以及尾矿坝的渗流状态都会对尾矿坝坡的稳定性产生巨大的影响。目前有很多学者对尾矿坝浸润线进行了大量研究。阮顺领等[4]提出卷积神经网络(CNN)与门控循环单元(GRU)融合的尾矿库浸润线安全态势预测方法,通过试验验证表明该方法可以实现对浸润线变化态势快速精准预测。邱俊博等[5]提出了一种极限学习机(ELM)方法,该方法将最小干滩长度、库水位、渗流量、竖直位移、水平位移 5 个主要因素作为 ELM 网络的输入,浸润线埋深作为网络的输出,结果表明 ELM 模型在浸润线短期预测中可行性更高,预测精度佳。李强等[6]采用能量方程和达西渗透定律推导了尾矿库浸润线的微分方程,并通过尾矿库实例求解了尾矿库浸润线的解析解,并与数值模拟结果进行了对比分析验证了浸润线解析解的有效性。王昆[7]通过统计分析初期坝与堆积坝不同渗透系数之比下浸润线的位置,并由此建立了二者的关系函数。高亚伟等[8]通过数值模拟软件 MODFLOW 研究了初期坝对坝体浸润线的影响,发现浸润线会随着初期坝排渗能力的降低而上升,且当初期坝渗透系数降至一定程度时,堆积坝表面出现渗水现象,严重影响坝体的结构稳定性。刘宁等[9]发现地形、入库尾矿等是影响上游式堆积坝浸润线埋深的主要因素,提出了解决方案。尹光志等[10]通过数值模拟方法,研究泥夹层透镜体对尾矿坝浸润线的影响。发现透镜体位于浸润线及其以下附近区域才会对浸润线的埋深和形状产生影响,当透镜体的尺度沿水平方向增大时,对坝体的稳定性影响极大。赵怡晴等[11]通过模型试验,分析了降雨条件下的尾矿库浸润线的变化以及坝体的变形情况。

综上所述,目前有关尾矿库浸润线的研究主要集中在模型试验分析以及数值仿真与人工智能预测上。以某山谷型贮灰坝为例,结合已有坝体浸润线监测数据,采用 GEO-Slope 软件中的渗流模块,进行二维渗流数值模拟分析,考虑初期坝渗透能力及干滩长度等多因素对浸润线分布的影响,这对于多种类型的尾矿库研究以及实际工程应用具有重要意义,对尾矿库的改进优化提供了科学理论依据。

2. 工程概况

电厂贮灰坝位于平顶山市北宝丰县境内, 灰场为水力贮灰场, 汇水面积 5.8 km^2 , 属山谷型灰场。该灰场最终设计灰坝坝顶标高为 300 m , 相应坝高 125 m , 有效库容 $1.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 可供规划装机容量使用 50 年以上。初期坝坝顶标高 224 m , 坝长 825 m , 坝顶宽 5 m , 主要由粘土、亚粘土掺杂少量砾石通过斜坡式分层填筑碾压筑成; 子坝采用上游式筑坝法堆筑, 外坡比为 $1:3.5$, 利用灰场内沉积的粉煤灰分层碾压填筑而成。目前共加筑了三级子坝, 最终坝顶标高 245 m , 坝长 1009 m , 坝顶宽 6.5 m , 贮灰坝坝体总高 71 m , 总库容 3310 万 m^3 。灰坝场区属风化侵蚀中低山及沟谷地貌类型, 场区内无活断层通过, 抗震设防烈度为 6° , 区域地质构造稳定。贮灰坝场区岩土构成: 第四系残坡积层黄土状粉质粘土和碎石土层, 下部基岩为石英砂岩及泥岩。

3. 灰坝计算模型及参数

3.1. 软件介绍

GeoStudio 软件的 SEEP 模块凭借其强大的分析功能、灵活的数据处理和丰富的结果展示方式, 在地下水渗流分析领域具有显著优势。因此文章采用 GeoStudio 软件中的 SEEP 模块来对电厂贮灰坝的渗流场进行模拟。

3.2. 剖面概化

在研究前人关于尾矿坝坝体渗流的文献时, 参考《尾矿坝安全评价与病患治理》[12]一书中的内容, 作者以江西某铜矿尾矿坝的简化二维平面模型为案例, 运用 GeoStudio 软件的 SEEP 模块计算了尾矿坝在正常运行条件下的浸润线位置, 并将其与实际监测结果进行了对比, 发现两者结果相近, 这表明使用 GeoStudio 软件计算尾矿坝浸润线能够满足工程精度的要求。因此, 在不影响模拟计算结果的情况下, 为了缩减计算时间, 本文选择建立简化二维平面模型对贮灰坝进行渗流模拟分析。

结合已有场区勘察资料以及坝体稳定性分析最不利剖面选取原则, 5-5 剖面位于贮灰坝场区河谷中间位置垂直于坝体主轴线方向, 也是贮灰坝坝顶最高, 相对最不稳定的剖面, 与其他剖面相比, 可以更加清楚地观察到坝体整体特征。因此, 选取 5-5 剖面建立二维简化模型, 同时根据现场钻探揭露的地层资料分析, 灰场内粉煤灰上层未完全固结, 上层较松散, 但整体厚度较薄, 下层粉煤灰已完全固结, 相对较密实, 因此利用地质剖面概化的原则, 将本文研究的贮灰坝分为坝内粉煤灰、堆积坝、初期坝以及坝基基岩四种介质, 见图 1。

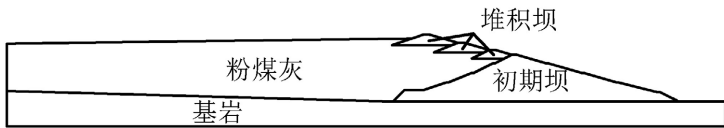


Figure 1. Schematic section of ash storage dam
图 1. 贮灰坝概化剖面

3.3. 建立模型及参数选取

根据地质资料、现场勘查和测压管水位观测资料等综合分析, 对灰坝典型断面和灰场进行模型概化, 其原则是概化模型既能准确反映库区所有地形、地貌和土工构筑物的基本特征, 又便于模型的计算分析。基于此, 在现场勘查、调研和材料综合分析的基础上, 将库区范围内的广泛分布的基岩层视为不透水层。灰场贮灰标高、库水位标高和干滩长度参照勘察报告确定, 坝顶平均高程 242.97 m , 坝体总高 71 m , 库

水位标高为 234.5 m，干滩长度 430 m；下游水位取为 167 m。最大典型断面模型计算区域和网格剖分图见图 2。网格划分共 2541 个节点，2394 个计算单元。

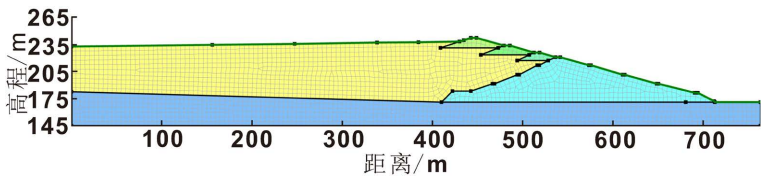


Figure 2. Schematic diagram of ash storage dam model
图 2. 贮灰坝模型示意图

计算参数主要是通过现场实验，室内土工实验以及收集到的相关文献资料综合确定，根据剖面概化模型，渗流计算主要涉及到粉煤灰、堆积坝、初期坝以及坝基基岩四种介质的参数，其具体取值见表 1。文中渗流计算不计降雨等入渗率和表层冲灰量，考虑稳定渗流，水位等边界条件由水头控制。

Table 1. Values of permeability coefficients for various rock and soil layers
表 1. 各岩土层渗透系数取值

岩土层	渗透系数(cm/s)
粉煤灰	6.6×10^{-4}
堆积坝	4.5×10^{-4}
初期坝	6.0×10^{-5}
基岩	1.5×10^{-7}

4. 灰坝渗流计算模拟分析

4.1. 实测浸润线与模拟结果对比分析

在湿式贮灰坝中，由于坝体内浸润线的位置会直接影响到坝体的稳定性，所以对贮灰坝坝体内浸润线做到精确监测就显得尤为重要，目前坝体内浸润线的监测主要通过在坝体内铺设监测仪器，通过仪器来精确测定坝体中浸润线的具体位置。研究的灰坝主要通过在坝体及灰场内布设测压管来对坝体内部水位进行监测，并通过同一剖面上布设的测压管监测数据来精确得到坝体内部浸润线的位置情况。自 2020 年以来，各孔压观测孔的水位观测资料见表 2。

Table 2. Water level elevation of pressure gauge tube in Chengzhaigou ash dam
表 2. 程寨沟灰坝测压管水位高程表

位置	点号	2020.5 月	2020.8 月	2020.11 月	2021.2 月	2021.5 月	2021.8 月
中坝断面	S104	213.787	213.706	213.789	213.746	213.737	213.670
	S204	211.972	212.603	212.813	211.834	211.800	211.869
	S404	202.217	203.371	202.424	202.335	202.532	203.387
	S504	193.851	196.499	194.327	193.485	194.277	201.342
	S603	190.588	192.595	190.995	190.191	191.271	190.823
	S701	183.265	184.482	184.364	184.146	183.550	184.362
	S802	180.841	180.151	179.876	179.706	179.848	179.808

续表

高程 m	点号	2021.11	2022.2	2022.5	2022.8	2022.11	2023.2
中坝断面	S104	213.681	213.022	212.882	212.858	212.858	212.858
	S204	211.425	208.880	208.619	208.530	208.487	208.726
	S404	202.960	202.297	202.373	202.335	200.970	201.438
	S504	201.162	193.208	193.075	193.193	194.238	194.325
	S603	191.478	190.189	189.584	189.463	189.708	189.609
	S701	183.934	182.777	182.833	180.548	181.939	181.950
	S802	180.153	179.593	179.568	179.507	178.831	178.707

从水位观测资料看,近两年灰坝孔压观测孔的水位先是随贮灰标高的增加而平稳增加,但升幅较小;后面观测孔水位逐渐降低,这与电厂排灰水规律一致,由于灰场内灰面高度逐渐接近贮灰标高,电厂减少了灰水的排量,在灰坝排渗设施的有效运行情况下,坝体内的浸润线位置逐渐降低。依据对测压水管水位高程在坝体断面的走势情况可以看出地下水位沿垂直坝轴线方向逐渐降低,符合灰坝渗流的一般规律。由于初期坝坝体的渗透系数小于沉积灰的渗透系数,因此沉积灰内的地下水位在坝前仍保持较高位置。

根据测压管 2023 年 2 月监测数据得到的水位观测值以及现场钻探调查情况得到的灰场内水位数据,可以得到 5-5 剖面浸润线位置图,见图 3。

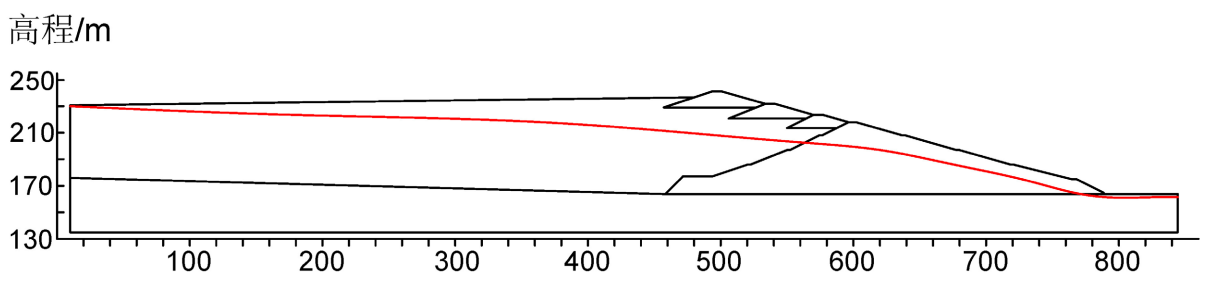


Figure 3. Location map of the measured infiltration line
图 3. 实测浸润线位置图

在简化模型的基础上,对模型边界条件进行设置,根据现场调查测量数据设置上游边界总水头 231 m,下游边界总水头 167 m,其余边界不做设置,软件默认为 0 流量边界。将各个区域材料参数输入后模拟出贮灰坝浸润线位置(见图 4),图中虚线为浸润线。

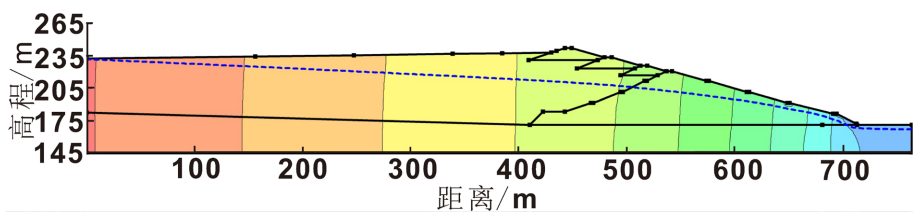


Figure 4. Simulated infiltration line location map
图 4. 模拟浸润线位置图

将实际监测浸润线与模拟计算出来的浸润线进行对比(见图 5),可以发现两曲线基本吻合,说明模拟计算选取的参数以及边界条件的设置与实际情况基本一致,所得到的参数可以运用于下一步渗流模拟分析。

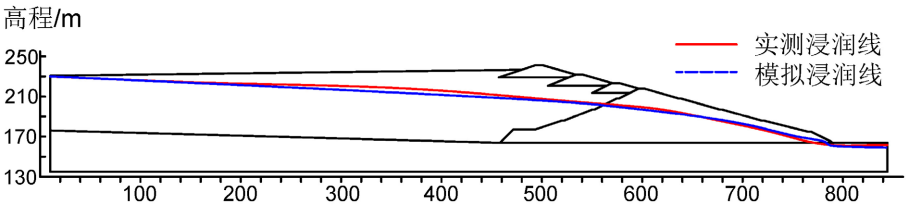


Figure 5. Comparison of infiltration line positions
图 5. 浸润线位置对比图

4.2. 灰坝渗流浸润线影响因素分析

浸润线是指水在坝体内部渗透和饱和的界限，其位置的变化直接关系到坝体的稳定性。根据一般的理论规律，随着浸润线位置的上升，灰坝的稳定性会逐渐降低。这是因为浸润线的抬高会导致坝体内的水压力增大，从而对坝体的结构产生更大的负担，进而可能引发溃坝等安全隐患。因此，浸润线在坝体中的准确位置不仅是灰坝渗流分析的关键指标，也是评估坝体安全性的重要依据。影响坝体中浸润线位置的因素有很多，主要包括贮灰坝库中的干滩长度，库中粉煤灰的渗透性以及初期坝的渗透性等。本文主要在前文模拟计算的基础上研究了不同干滩长度以及初期坝渗透性的变化对灰坝渗流的影响情况。

4.2.1. 灰坝干滩长度对渗流的影响分析

主要对灰坝干滩长度(灰坝坝顶到库内水边线的距离)在 300 m，200 m，100 m，50 m 四种工况下进行计算分析，其边界条件设置方式与前文设置一致，坝内水头按不同干滩长度所在位置设定。运行软件模拟计算后可以得到不同干滩长度下的总水头等值线云图以及浸润线位置图(图中虚线为浸润线)见下图 6~9。

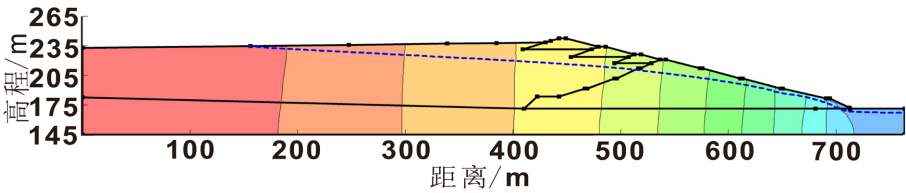


Figure 6. Contour map of total water head at 300 m on dry beach
图 6. 干滩 300 m 时总水头等值线云图

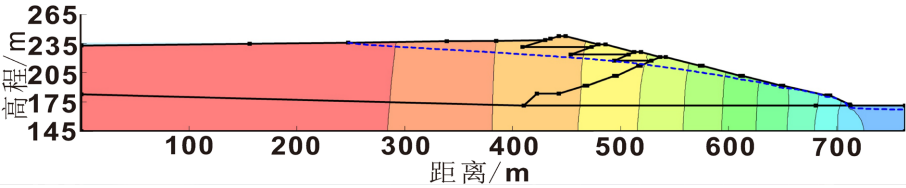


Figure 7. Contour map of total water head at 200 m on dry beach
图 7. 干滩 200 m 时总水头等值线云图

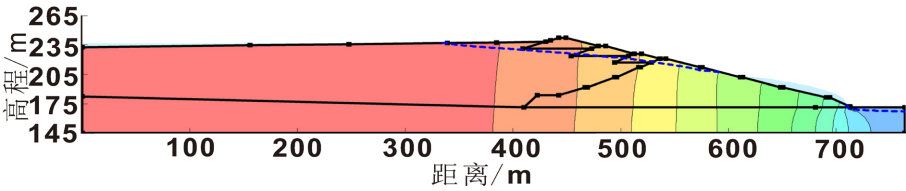


Figure 8. Contour map of total water head at 100 m on dry beach
图 8. 干滩 100 m 时总水头等值线云图

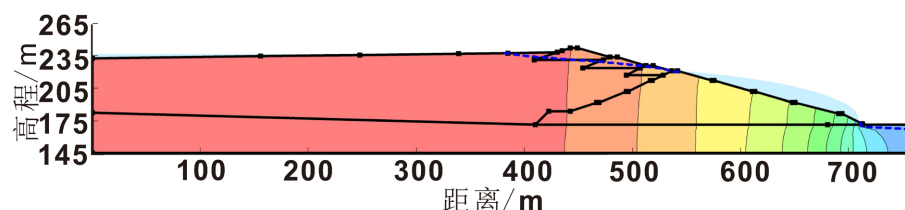


Figure 9. Contour map of total water head at 50 m on dry beach

图 9. 干滩 50 m 时总水头等值线云图

从计算结果可以看出, 当干滩长度为 300 米时, 浸润线呈现出相对平缓的状态, 水头等值线也近似均匀分布, 在初期坝下游坝面上并未出现溢出点, 这说明在正常运行状态下, 300 m 的干滩长度可以满足坝体的渗流安全。然而, 随着干滩长度的不断缩短, 浸润线的位置逐渐抬升, 在干滩长度减少到 200 m 后, 在初期坝下游坝面上开始出现溢出点, 且随着干滩长度的进一步缩短, 浸润线的抬升使得溢出点的高程逐渐增加; 尤其是在干滩长度为 50 米时, 溢出点的位置接近初期坝顶部, 这种变化意味着坝体的上游水位逐渐接近坝顶, 导致溢流现象越来越明显, 水体对坝体的冲击力和渗透压力也随之增加, 进一步加大了坝体的承压情况, 极有可能导致坝体内部的水压力失衡, 从而引发堆积坝的溃坝事故。这种溃坝现象会造成严重的安全隐患, 甚至可能引发下游地区的洪水灾害, 造成不可估量的损失。因此, 可以得出结论: 干滩长度对浸润线的变化有着直接而显著的影响。随着干滩长度的减少, 坝体的浸润线不断上升, 坝体的稳定性和安全性也随之降低。这一发现强调了在坝体设计与管理过程中, 必须重视干滩长度的合理规划, 以确保坝体在各种水位条件下的安全性, 减少潜在的风险。

4.2.2. 初期坝渗透性对渗流的影响分析

初期坝在设计和施工中通常分为两种主要类型: 不透水初期坝和透水初期坝。这两种类型的坝体在材料选择和水力特性上存在显著差异, 从而影响尾矿的排水和固结过程。不透水初期坝是由透水性较小的材料构成, 如粘土或特种合成材料。这种设计虽然可以有效阻止水分的渗透, 确保坝体的稳定性, 但也对尾矿的排水和固结产生不利影响。随着尾矿的逐渐堆高, 坝体内的水位会逐步升高。当浸润线升至坝顶以上时, 可能导致坝坡出现水流逸出, 增加了坝体失稳的风险。因此, 不透水初期坝在管理和监测上需要特别关注浸润线的变化, 以防止潜在的安全隐患。相对而言, 透水初期坝则采用透水性良好的材料, 如砂石或特定的透水混凝土。这种设计使得坝体的排水性能显著提高, 有助于降低坝体的浸润线。这种类型的坝体允许水分通过, 从而加速尾矿的固结过程, 减少水的滞留时间, 降低坝体内部的水压力。这不仅提高了坝体的稳定性, 还能有效减少因水分积聚而导致的环境问题。为了深入了解初期坝的渗透性对渗流的影响, 以图 4 为基本剖面, 表 1 中初期坝渗透系数 $k_{初}$ 为原始渗透系数, 在干滩长度为 400 m, 其他边界条件不改变的基础上, 分别对初期坝渗透系数为 $0.01 k_{初}$ 、 $0.1 k_{初}$ 、 $10 k_{初}$ 、 $100 k_{初}$ 的四种工况进行模拟计算, 得出它们的水头等值线云图如下(图中虚线为浸润线), 见下图 10~13。

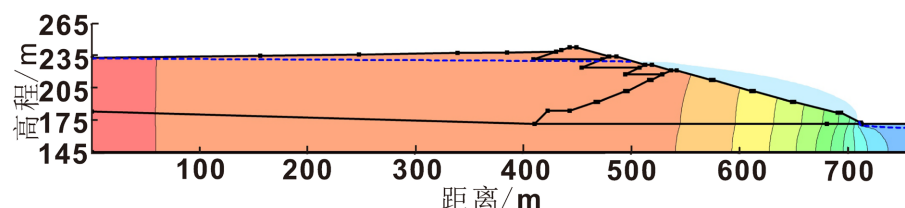


Figure 10. Cloud map of water head values under initial conditions of $0.01 k$

图 10. $0.01 k_{初}$ 条件下水头等值线云图

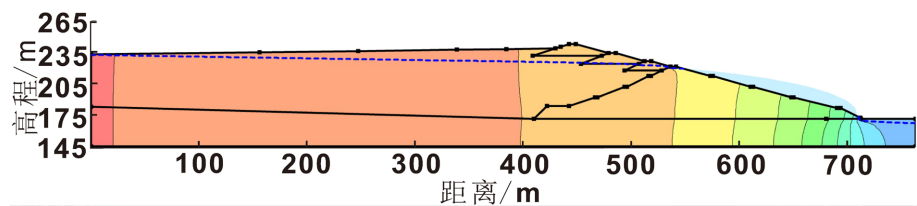


Figure 11. Cloud map of water head values under initial conditions of 0.1 k
图 11. 0.1 k 初条件下水头等值线云图

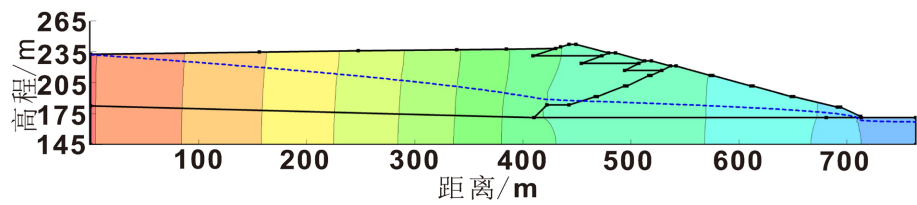


Figure 12. Cloud map of water head values under initial conditions of 10 k
图 12. 10 k 初条件下水头等值线云图

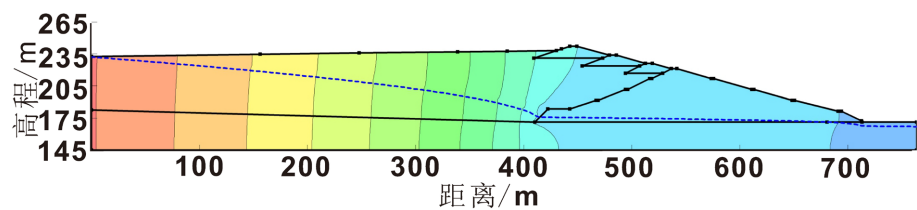


Figure 13. Cloud map of water head values under 100 k initial conditions
图 13. 100 k 初条件下水头等值线云图

根据模拟计算结果可以得到在不同初期坝渗透性条件下坝面渗出点距离坝底的高度, 见表 3, 据表中数据可以作出渗出点距坝底高度折线图, 见图 14。

Table 3. Height of seepage points along the seepage line of the dam body when the permeability of the initial dam is different
表 3. 初期坝渗透性不同时坝体的浸润线渗出点高度

初期坝渗透性	0.01 k 初	0.1 k 初	k 初	10 k 初	100 k 初
渗出点高度(m)	56.235	47.636	0	0	0

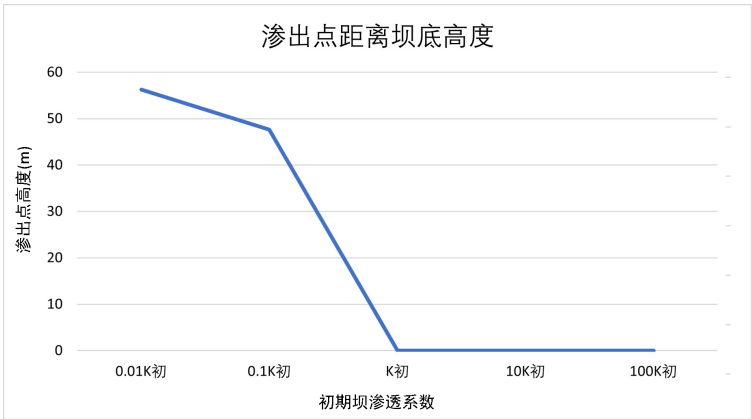


Figure 14. Height of seepage points along the seepage line when the initial dam permeability is different
图 14. 初期坝渗透性不同时浸润线渗出点高度

从图 12 和图 13 中可以看到在渗透系数增大时, 即初期坝渗透性变好, 尤其是渗透系数增大为原来的 10 倍及以上时, 坝体溢出点基本无变化, 坝体内浸润线会快速下降, 坝体浸润线下降使得坝体内部的孔隙水压力减小, 有效应力增加, 在一定程度上有利于坝体的稳定性, 减少了坝体发生滑坡、坍塌等事故的风险。从图 10 和图 11 中可以看到在渗透系数减小时, 即当初期坝的渗透性变差的时候, 尤其是渗透系数缩减为原来的 10 倍及以上时, 坝体内的浸润线会迅速抬高, 并在下游坝面上直接溢出, 且随着渗透系数的减小, 渗出点高度逐渐上升。这增加了坝体发生渗透破坏、滑坡等事故的可能性。特别是当浸润线接近或超过坝体的设计允许高度时, 坝体的稳定性将面临严重威胁。这些现象表明, 初期坝的渗透性影响着坝体的渗流以及浸润线位置, 从而直接影响坝体的稳定性。

根据现场地质调查以及通过对实际案例的分析总结, 认为这一规律形成的原因主要在于: 当初期坝的排渗措施遭到损坏后, 导致库区内的水无法通过初期坝及时排出库外, 从而导致水在初期坝上游坝面堆积最终在堆积坝坡面溢出; 而当排渗良好时, 库内废水能够通过初期坝直接快速排出库外, 从而使浸润线保持在正常状态。

5. 结语

主要在对贮灰坝正常运行工况模拟计算的基础上, 研究了不同干滩长度以及初期坝渗透性的变化对灰坝渗流的影响情况, 得到以下结论:

- 1) 从渗流分析方面看, 贮灰坝在正常运行情况下是稳定的, 但在初期坝排渗失效且干滩长度小于 50 m 时, 堆积坝处于不稳定状态。
- 2) 在保持各分层不变的情况下, 贮灰坝浸润线的位置会随着干滩长度的减小而逐渐抬高, 且在缩减到一定长度时会在下游坝面出现溢出点。
- 3) 初期坝的渗透性对坝体浸润线的影响最为明显, 尤其是初期坝渗透性降低或增大 10 倍时, 浸润线会急剧地抬升或下降。

通过对坝体渗流情况的分析, 可以发现贮灰坝浸润线的位置会随着干滩长度的增加而降低, 随着初期坝的渗透系数增大而降低的变化规律。因此, 对于电厂湿式贮灰坝及类似工程, 可以选择有针对性地设置监测点, 从而确定浸润线的关键位置 and 变化趋势, 实时掌握坝体的渗流状态, 根据分析结果, 可以采取相应的控制措施, 如调整排放方式、改善排渗系统等, 以确保坝体的安全稳定。

参考文献

- [1] 刘瀚和. 巴西 Brumadinho 尾矿库溃坝对上游式堆坝的启示[J]. 有色冶金设计与研究, 2020, 41(4): 49-51.
- [2] 彭之辰, 吴双, 龚士林. 美国伊登维尔坝和桑福德坝溃坝事故反思[J]. 大坝与安全, 2023(4): 63-66.
- [3] 杜艳强, 刘炳君, 谢冰, 等. 金属矿山尾矿库溃坝诱因分析及对策[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(9): 81-83.
- [4] 阮顺领, 韩思淼, 张宁宁, 顾清华, 卢才武. 基于 CNN-aGRU 融合模型的尾矿坝浸润线预测方法[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(S1): 119-127.
- [5] 邱俊博, 胡军. 基于 ELM 的尾矿坝浸润线预测[J]. 有色金属工程, 2021, 11(2): 103-109.
- [6] 李强, 高松, 牛红凯, 尚艳亮. 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.
- [7] 王昆. 初期坝渗透性对尾矿库浸润线位置影响的定量分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(1): 74-78.
- [8] 高亚伟, 孔祥云, 唐永俊. 不同因素对尾矿库浸润线影响的数值模拟研究[J]. 中国锰业, 2017, 35(3): 154-157.
- [9] 刘宁, 罗敏杰. 尾矿堆积坝浸润线影响因素及降低浸润线措施[J]. 现代矿业, 2015, 31(11): 100-101.
- [10] 尹光志, 陈鹏, 魏作安, 曹冠森, 夏丽媛. 尾矿坝内透镜体对浸润线影响的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(3): 64-67.
- [11] 赵怡晴, 汪杰, 钟士照, 等. 降雨条件下尾矿库浸润线变化及坝体变形分析[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(2): 157-162.
- [12] 杨春和, 张超. 尾矿库安全评价与病患治理[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 2006.