

某尾矿坝渗流场和耦合渗流场的对比分析研究

谢 潇^{1,2,3,4,*}, 齐 丽^{1,2,3,4}

¹陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

²陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2022年3月12日; 录用日期: 2022年4月14日; 发布日期: 2022年4月21日

摘 要

尾矿坝是矿山的一个重要设施, 同时也是危险性较大的设施。在尾矿坝的破坏中, 渗流破坏是一个很重要的原因。为研究尾矿坝的渗流状态, 对尾矿坝进行合理的设计及管理, 以某尾矿坝为例, 采用Geo-Slope软件, 考虑正常蓄水位、校核洪水位、水骤降至死水位三种不同的工况, 对其进行渗流场与耦合渗流场的对比分析, 模拟出了工程中的实际渗流问题, 分析了孔隙水压力、渗流速度、总水头等变化规律。该研究可为尾矿坝的稳定性分析提供依据。

关键词

尾矿坝, 渗流, Geo-Slope软件

Comparative Analysis of Seepage and Coupled Seepage Field of a Tailings Dam

Xiao Xie^{1,2,3,4,*}, Li Qi^{1,2,3,4}

¹Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 12th, 2022; accepted: Apr. 14th, 2022; published: Apr. 21st, 2022

*通讯作者。

Abstract

Seepage damage is one of the main causes of tailings dam failures. In order to study the seepage state of the tailings dam and carry out reasonable design and management of the tailings dam, a tailings dam was taken as an example. Geo-Slope software is used to consider the normal water level, check the flood level, and the water suddenly drops to death. The seepage field and the coupled seepage field were compared and analyzed for three different working conditions of water level, the actual seepage problem in the project was simulated, and the variation laws of pore water pressure, seepage velocity, and total water head were analyzed. This study can provide a basis for the stability analysis of tailings dams.

Keywords

Tailings Dam, Seepage, Geo-Slope Software

Copyright © 2022 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

尾矿坝是由尾矿堆积碾压而成的坝体,是储存尾矿的重要结构。随着我国经济社会的发展,矿物的需求数量和要求也不断提高。由此促进了矿业生产的快速增长与采矿规模的加大,因而尾矿产量也不断增加。尾矿坝作为储存尾矿的重要设施,其规模与数量也在增大。而尾矿坝同时也是重大的危险源和污染源,失稳破坏性大[1][2]。一旦发生溃坝事故,极有可能引发泥石流[3]、滑坡[4]、水土污染[5]等次生灾害,从而加剧事故隐患。在尾矿坝的破坏中,尾矿坝的渗流稳定性是影响其安全性的重要因素之一,有很大一部分是渗流问题引起的[6]。分析尾矿坝的渗流问题,有利于了解尾矿坝的渗流场变化情况,有利于控制渗流破坏的发生。尾矿坝渗流分析与稳定性的研究一直是矿山安全领域的研究热点与难点。学者们从水流作用、尾矿坝渗流场、坝体稳定性分析等方面进行了诸多研究[7][8]。

2. 区域地质概况

2.1. 地形地貌

研究尾矿坝位于秦岭山脉东。按照成因类型,研究区地貌主要可划分为构造侵蚀地貌、构造剥蚀地貌、流水地貌及人工堆积地貌四种。构造剥蚀地貌的岩性组成主要为黑云母安山玢岩、花岗岩、石英岩;人工堆积地貌主要是尾矿坝。

2.2. 地层岩性

1) 初期坝

研究尾矿坝分为初期坝和堆积坝。初期坝坝高 80 m,底宽 1800 m,顶宽 20 m,坝顶高程 120 m,是采用定向爆破由块石、碎石堆积而成的透水坝。初期坝坝基的岩性组成主要为板岩,坝东侧及坝轴线以北可见混积的角砾、亚粘土含角砾层。块石碎石层由硅质灰岩、石英岩、板岩碎块组成,块石层无充填物,厚度 1~1.5 m,最厚 2 m,粒径 220~350 mm,最大 500 mm;碎石层的粒径主要为 70 至 150 mm,

最大 500 mm, 该层无明显的规律性, 密实状态为松散~稍密。角砾层的粒径在 5 至 10 mm 之间, 最大可达到 20 mm, 主要由硅质灰岩、板岩碎块组成, 其中充填有约 20% 粘性土, 密实状态为中密, 该层层厚约 1.7 m。亚粘土层中角砾的含量约为 35%, 层厚 3.6 m。组成坝基的板岩为细粒变晶结构, 其构造为板状~块状构造, 节理较发育, 多呈闭合状。

2) 堆积坝

尾矿坝的堆积坝是在初期坝的基础上由尾矿充填材料堆筑而成。研究尾矿坝的堆积坝主要组成物质是各类尾矿砂土。在研究堆积坝区勘探深度内, 堆积坝主要组成物质是尾中砂、尾细砂、尾粉砂。

2.3. 水文地质

尾矿坝库区水位和坝体浸润水位的变化都与大气降水有很大的关系[9]。水的主要类型为潜水。潜水赋存于尾矿砂和块石碎岩层内, 受库水位的补给, 方向通常是自北往南。尾矿坝库区水位受降雨、排矿、回水方式等因素影响变动范围很大, 水位不平衡。一般来看, 堆积坝段的水力坡度降低了百分之二十三至二十五, 而中间剖面的水力坡降达到了百分之四十五。但从浸润线至最初期坝址段后, 水位降低更加迅速, 坡降达到了百分之一百零五。

同时在尾矿堆积坝局部地段尚赋存上层滞水。据观察, 上层滞水与下部潜水无任何水力联系, 是大气降水通过尾矿砂时, 遇到透水性较弱地层而形成的暂时性地下水。在枯水季节, 上层滞水会消失。

3. 计算模型及参数确定

本文拟对尾矿坝的渗流场和耦合渗流场进行分析, 计算断面为尾矿坝中心最大断面。尾矿坝下层的未风化基岩在本次计算中不考虑。计算时以底面高程为 0 m, 则顶部为 120 m。计算区域的水平距离为 1200 m, 尾矿库滩面选取长度为坝顶后 100 m。选用 Geo-Slope 软件将选取的计算区域离散为四边形单元, 总计划分单元数为 1935 个, 单元结点总数为 2080 个, 由此得到尾矿坝的计算模型如图 1 所示。

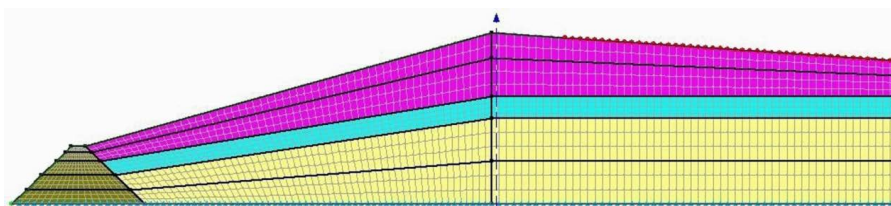


Figure 1. Dam model
图 1. 大坝模型

本文在计算时, 将尾矿库土层简化为尾中砂、尾粉砂和尾细砂三层。计算时尾矿库内土层和初期坝选用线弹性本构模型, 初期坝的弹性模量 $E = 8 \times 10^4$ kPa, 波松比 $\nu = 0.35$ 。各层选用参数如表 1 所示。

Table 1. Calculation parameters of soil layer of tailings dam
表 1. 尾矿坝土层计算参数

	渗透系数 k (m/s)	饱和容重 γ (kN/m ³)	粘聚 c (kN)	摩擦角 Φ (°)	K (load)	K (bulk)
尾中砂	6e-6	21.4	4	32	227	68
尾细砂	4.8e-7	19.3	14	26	214	107
尾粉砂	5.8e-8	21.2	9	30	222	155
块石	2e-4	25				

根据尾矿坝工程特点及本文的研究需求, 基于以上的计算模型及参数, 运用数值计算对研究尾矿坝渗流场情况、耦合渗流场情况进行分析。

4. 渗流场与耦合渗流场对比分析

4.1. 渗流场分析

渗流问题可以用平面模型计算, 故建立二维尾矿坝模型, 利用软件中的 SEEP/W 模块进行不考虑应力场的渗流场数值模拟。数值模拟时干滩长度取为 100 m, 模型上边界加上水头为 116.36 m 的边界条件, 初期坝左下角点为零水头点, 模型右侧和底边都是不透水面。通过数值模拟及计算, 得到研究尾矿坝地下水渗流区域内的水头分布及渗流路径分布等, 结果见图 2。

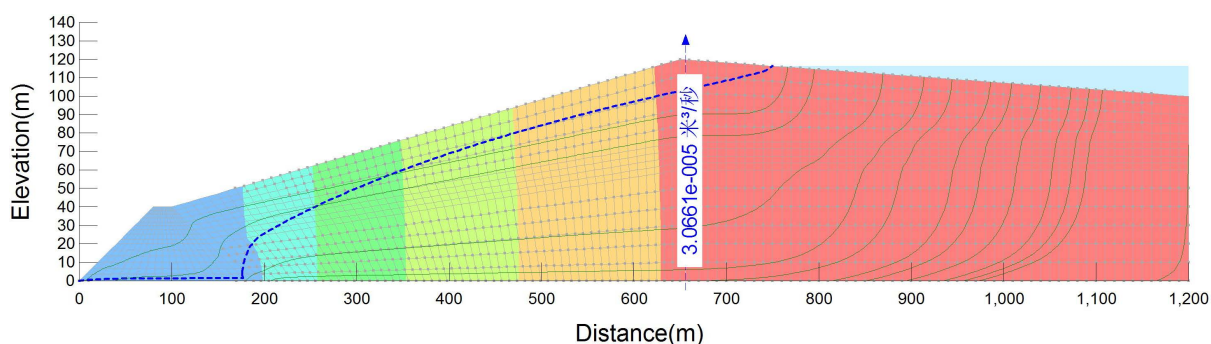


Figure 2. Groundwater seepage path

图 2. 地下水渗流路径

从计算结果可以看出, 在横坐标为 350~550 m 段浸润线比较接近坝坡面, 但并未溢出坝坡面。在接近初期坝附近, 浸润线急剧降低。根据第二节的介绍可知, 初期坝由块石、碎石堆积而成, 透水性强, 因而浸润线很低。

在渗流稳定的情况下, 尾矿库每天渗向初期坝的流量为 $2.699 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 。

在 x 坐标为 650 m 处(即尾矿坝初达最终高程处), 沿坝体不同高程处的压力水头变化如图 3 所示, 沿坝体不同高程处 y 方向流速随高度变化曲线如图 4 所示, y = 0 平面各点总水头变化如图 5 所示, 渗流场 y 方向的渗流速度分量等值线如图 6 所示。

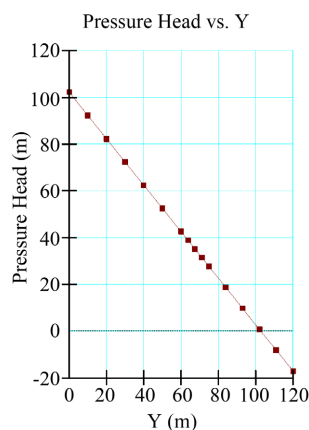


Figure 3. Pressure head changes with height

图 3. 压力水头随高度变化

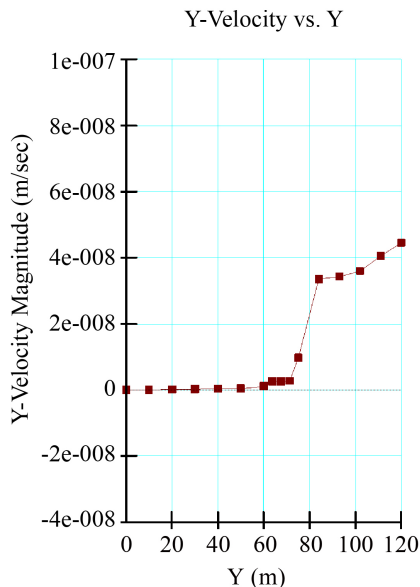


Figure 4. Variation of flow velocity in y direction with height
图 4. y 方向流速随高度变化图

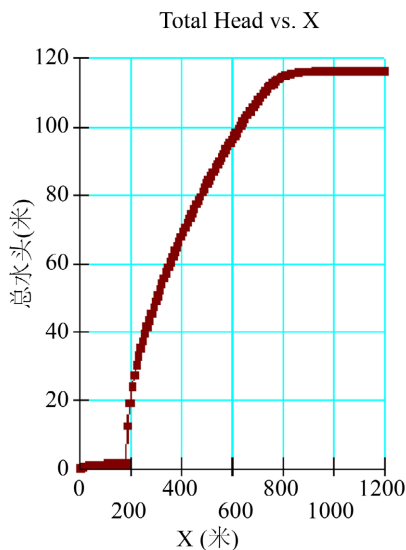


Figure 5. Variation of total water head at each point on the y = 0 plane
图 5. y = 0 平面各点总水头变化

由图 4 可以看出, 随着高程的降低, y 方向的流速逐渐减小, 而且同一土层的不同高度处流速也不同。这是因为深度愈深, 土层的固结度愈大, 其所受土压力愈大[10] [11], 导致其孔隙比变小, 渗透系数减小。在高程从 71.25~84.00 m 之间, y 方向的速度陡增, 这与尾中砂与尾细砂的渗透系数变化较大有关系。

由图 6 可以看出, 在 y = 0 平面上, 因为位置水头为零, 故压力水头等于总水头, 在 x 坐标在 0~200 m 处, 因为初期坝材料是块石, 渗透性比较大, 浸润线很低, 总水头接近零, 当横坐标超过 200 m 时, 总水头急剧增大, 在 x = 800 m 以后逐渐趋于平稳。

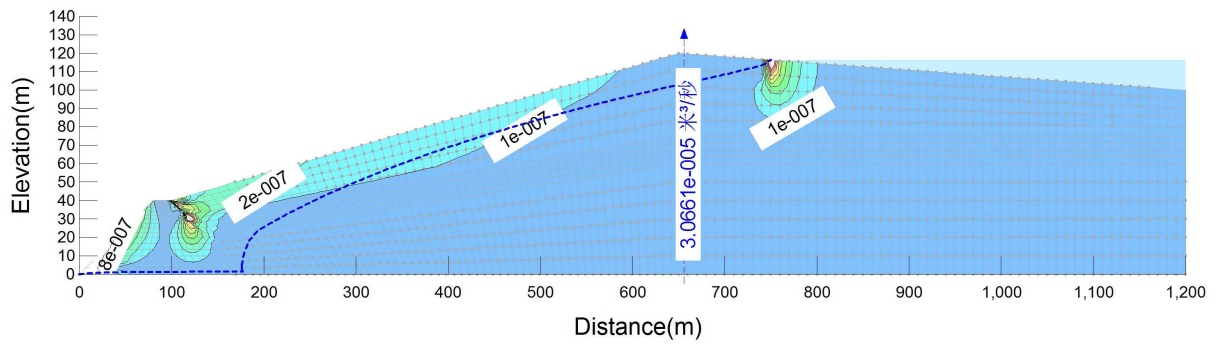


Figure 6. The contour of the seepage velocity component in the y direction

图 6. y 方向的渗流速度分量等值线

根据上游水头高度, 将渗流分为正常蓄水位、校核洪水位、水骤降至死水位三种工况, 不同工况下的渗流分析结果分别见图 7~9。

1) 正常蓄水位

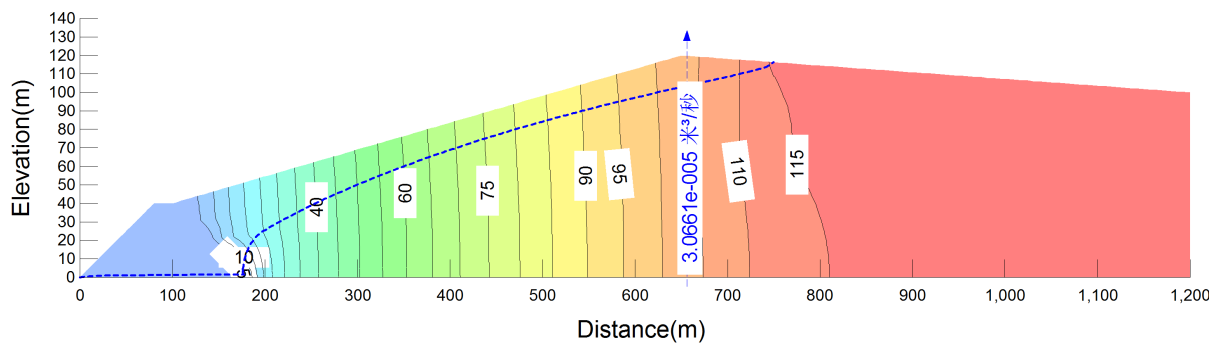


Figure 7. Results of seepage analysis of tailings dam (normal water level)

图 7. 尾矿坝渗流分析结果(正常水位)

(2) 校核洪水位

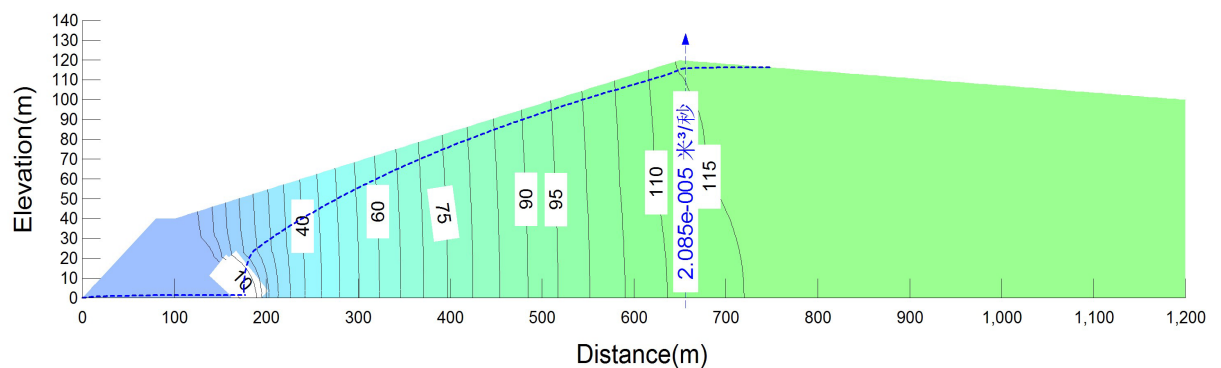


Figure 8. Results of seepage analysis of tailings dam (check flood level)

图 8. 尾矿坝渗流分析结果 (校核洪水位)

(3) 库水位骤降至死水位

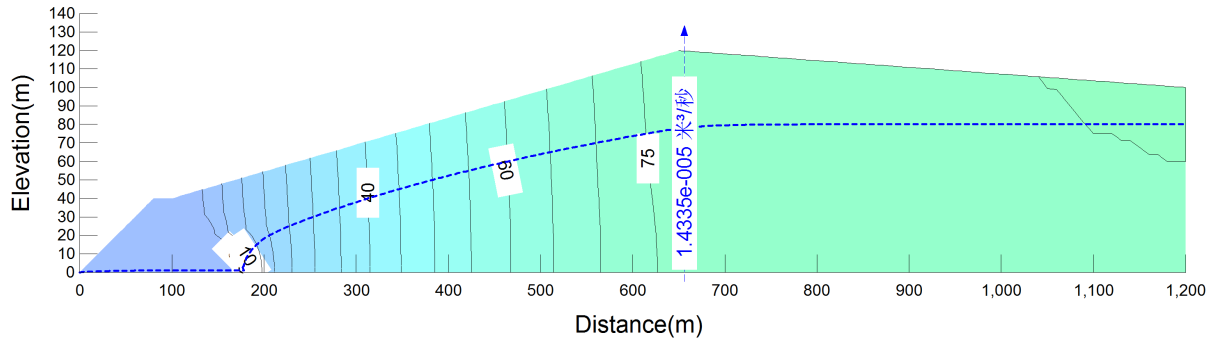


Figure 9. Results of tailings dam seepage analysis (down to dead water level)

图 9. 尾矿坝渗流分析结果(降至死水位)

将计算结果统计如下表 2:

Table 2. Calculation result

表 2. 计算结果统计

序号	工况	蓄水位(m)	X = 500 浸润线高低	单宽渗流量(m ³ /d·m)
1	正常蓄水位	116.36	84	3.1244
2	校核洪水位	118.18	90	3.3428
3	死水位	100	43.9	1.6447

将不同工况下的孔隙水压力随高程变化曲线、y 向速度随高程变化曲线、总水头随 x 变化曲线绘制如下图 10~12。

从软件模拟计算的结果可以看出, 本次研究选取的三种工况下的单宽渗透流量都随着水位的逐渐升高而增大。由此说明坝体渗流量受到上游水位升降变化的影响较大。单宽渗流量与水位的变化密切相关。表明在有效的防渗措施下, 水位变化和渗流量成正相关。

从分析计算的浸润线位置可以看出, 浸润线将坝体分为上下两部分, 校核洪水位工况下, 浸润线位置相对坝体较高, 说明上游相对渗透水压力较大, 渗流明显, 大坝存在安全隐患, 安全可靠较低; 在正常蓄水位和水位骤降至死水位两种工况下的浸润线位置相对于校核洪水位工况下浸润线位置来说有明显降低, 且下游与坝脚线相交, 符合正常规律, 说明大坝安全性较高, 有效渗透水压力也相对较低。

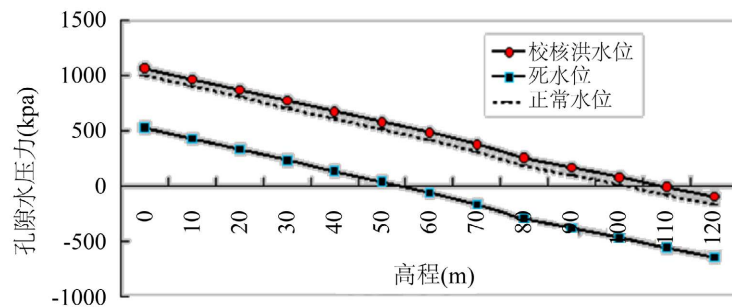


Figure 10. Variation curve of pore water pressure with elevation under different working conditions

图 10. 不同工况下孔隙水压力随高程变化曲线

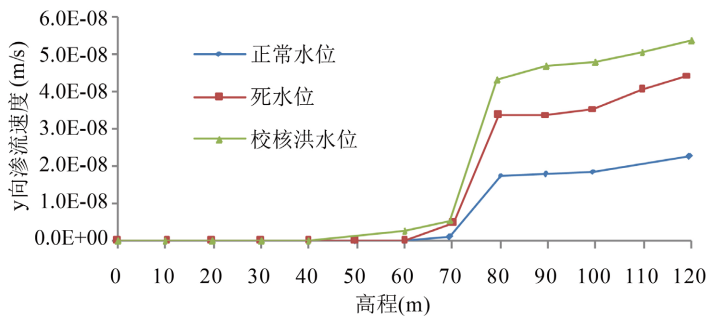


Figure 11. The curve of y-direction seepage velocity with elevation
图 11. y 向渗流速度随高程变化曲线

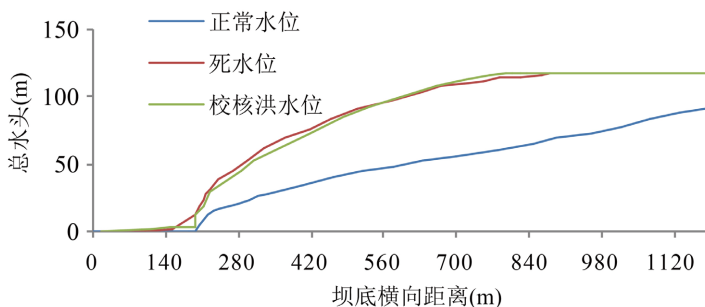


Figure 12. The curve of total water head versus x-axis
图 12. 总水头随 x 轴变化曲线

通过对比三种不同工况下的孔隙水压力、y 向渗流速度、总水头的变化,可以看出,在校核洪水工况下,孔隙水压力、y 向流速、总水头都要大于正常水位和水位降至死水位时的情况,说明在洪水工况下,坝体存在极大的安全隐患,也表明了上游水头位置对渗流场的影响。

从以上分析得知,在计算分析大坝渗流时选取合适的计算荷载工况对方案选择、坝体结构设计以及采用何种防渗措施都有很大影响,因而在实际工程中应慎重考虑。

4.2. 耦合渗流场结果及分析

在进行耦合渗流场分析时,主要使用的 SEEP/W 和 SIGMA/W 两个模块。针对已经建立的尾矿坝模型,利用 SIGMA/W 对其进行应力场分析计算,得到研究对象的孔隙水压力分布状况;随后将上一步的计算结果代入 SEEP/W 进行渗流场计算,由此得到耦合情况下的渗流场情况。

根据 Geo-Slope 的计算结果,得出地下水渗流区域内的渗流路径及水头分布,分别见图 13、图 14。

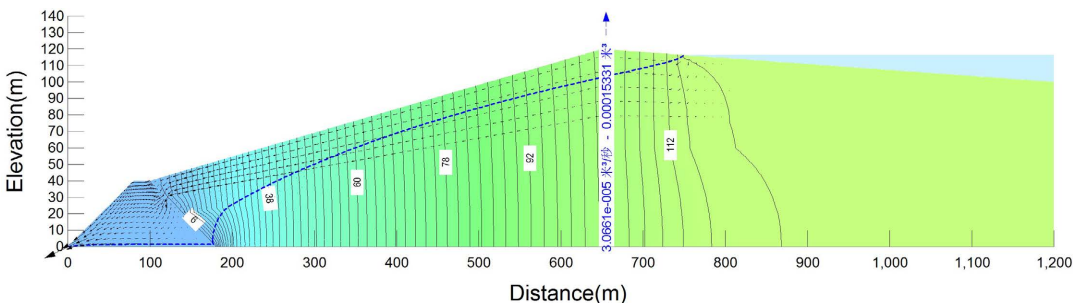


Figure 13. Groundwater seepage path diagram
图 13. 地下水渗流路径图

在渗流稳定的情况下, 尾矿库每天渗向初期坝的流量为 $2.811 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 。

在 x 坐标为 650 m 处(即尾矿坝初达最终高程处), 沿坝体不同高程处的压力水头变化如图 14 所示。

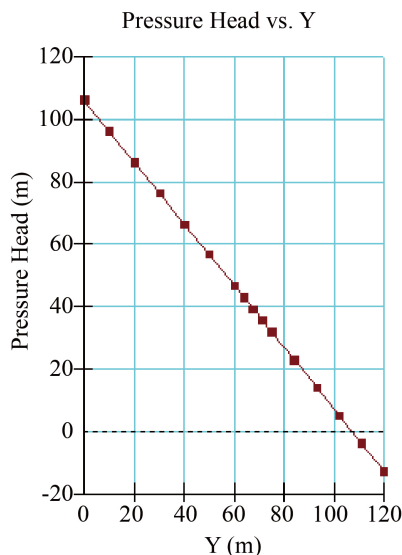


Figure 14. Pressure head as a function of height

图 14. 压力水头随高度变化

渗流场 y 方向的渗流速度分量等值线如图 15 所示。

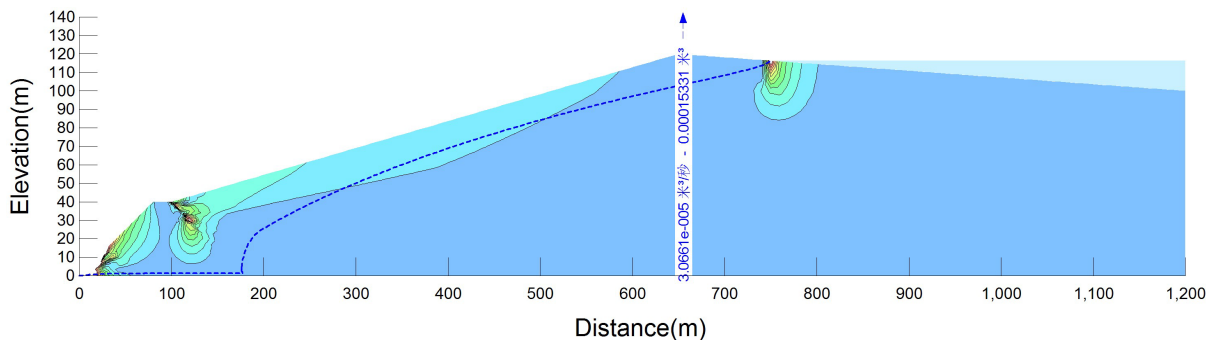


Figure 15. Contour diagram of seepage velocity in y direction of seepage field

图 15. 渗流场 y 方向渗流速度等值线图

在 x 坐标为 650 m 处(即尾矿坝初达最终高程处), 沿坝体不同高程处 y 方向流速随高度变化曲线如图 16 所示; 尾矿坝底部各点($y = 0$)总水头变化如图 17 所示。

4.3. 对比分析

(1) 渗流量对比分析

根据前述模拟计算的结果, 对单独考虑渗流场和渗流场与应力场耦合情况下尾矿坝的渗流量进行对比, 见表 3, 可以看出后者比前者少 $0.1112 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 。由应力场对渗流场影响的机理[12], 在应力场作用下, 岩土体的孔隙率变小, 从而引起渗透系数的变小, 理论上考虑耦合情况的渗流量应比单纯考虑渗流场情

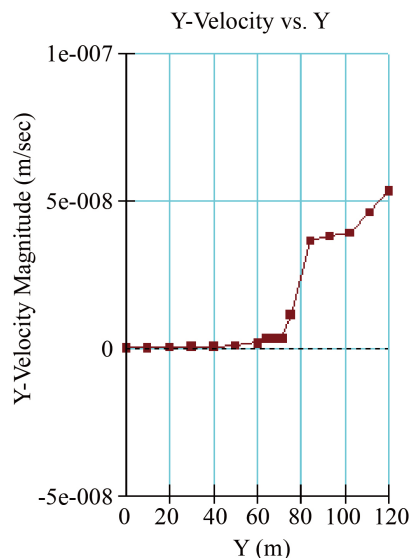


Figure 16. Variation of flow velocity in y direction with height

图 16. y 方向流速随高度变化图

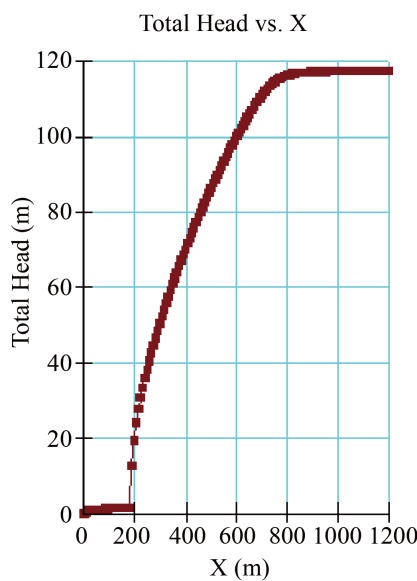


Figure 17. Variation of total water head at each point on the y = 0 plane

图 17. y = 0 平面各点总水头变化

Table 3. Seepage flow comparison

表 3. 渗流量对比

分类	渗流	耦合渗流
单宽渗流量(m ³ /d·m)	2.699	2.811

况的渗流量小。分析本次模拟计算中出现这种“反常”现象，是因为在进行单独的渗流场计算时，认为从开始就已经达到现有高度的固结状态，固结度较大，从而渗流量较小；而在耦合计算中，却是考虑尾

矿坝实际的堆积过程, 逐层堆积, 逐层加载, 所以从下至上其固结度逐渐变小, 而且就总体固结度而言, 要比单独考虑渗流场情况的固结度为小, 从而出现了耦合情况下的渗流量比单独渗流场情况为大的结果。

2) 地下水头等值线对比分析

根据前面的计算结果, 将二者的地下水头等值 8 线图进行对比, 根据图 5 和图 17 可以看出, 二者等水头线的趋势比较接近, 量值也没有太大的差别。

3) $x = 650 \text{ m}$ 处 y 方向流速对比情况

将上面的计算结果用折线图表示出来, 如下图所示:

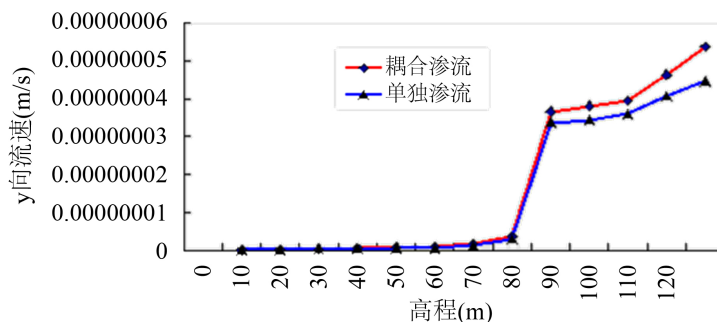


Figure 18. Comparison of coupled and uncoupled y-direction flow velocity
图 18. 耦合与非耦合 y 向流速对比图

从图 18 可以看出, 在 $x = 650 \text{ m}$ 处沿坝体不同高度处 y 方向的流速比较接近, 差别不大, 图形的走势也基本相似。只是在高程 $y = 102 \text{ m}$ 以上二者相差较大, 这是由于该处位于浸润线附近。 y 方向速度的这种变化规律在图 6、图 15 的 y 向速度等值线图中也可以看出来。

5. 结论

本文以某尾矿坝为研究对象, 采用 Geo-Slope 软件, 考虑了正常蓄水位、校核洪水位、水骤降至死水位三种不同的工况, 对其进行渗流场与耦合渗流场的对比分析, 根据模拟计算与分析的结果, 具体得出以下结论:

1) 考虑正常蓄水位、校核洪水位、水骤降至死水位三种工况对尾矿坝进行渗流分析。通过对比孔隙水压力、 y 向渗流速度、总水头的变化, 发现在洪水工况下, 坝体存在极大的安全隐患, 也表明了上游水头位置对渗流场的影响。

2) 考虑耦合情况下每天通过尾矿坝的渗流量要比仅考虑渗流场情况下的渗流量要多, 对出现这一现象的原因进行了分析讨论。

参考文献

- [1] 苏振宁, 邵龙潭. 基于有限元法的尾矿坝边坡三维稳定分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(4): 8-13.
- [2] 郝喆, 侯永莉, 陈娜, 滕达. 尾矿库渗流及抗滑稳定性综合评价[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2020, 47(2): 180-187. <https://doi.org/10.16197/j.cnki.lnurse.2020.02.013>
- [3] 陈春利, 余洋. 尾矿坝溃决泥石流及其防范[J]. 城市与减灾, 2019(3): 41-45.
- [4] 朱远乐, 王涛, 孙昱. 基于 GIS 尾矿库滑坡地质灾害危险性研究[J]. 采矿技术, 2018, 18(4): 50-54. <https://doi.org/10.13828/j.cnki.ckjs.2018.04.016>
- [5] do Carmo, F.F., Kamino, L.H.Y., Junior, R.T., et al. (2017) Fundo Tailings Dam Failures: The Environment Tragedy of the Largest Technological Disaster of Brazilian Mining in Global Context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15, 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>

-
- [6] 周永喜. 病险水库土石坝渗漏原因分析及防渗处理措施[J]. 大坝与安全, 2009(2): 77-79.
- [7] 曹林卫, 彭向和, 李德, 等. 变形场和渗流场耦合作用下的尾矿坝静力稳定性分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(5): 112-118.
- [8] Wang, G.J., *et al.* (2021) Seepage Field Characteristic and Stability Analysis of Tailings Dam under Action of Chemical Solution. *Scientific Reports*, **11**, Article Number: 4073. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83671-6>
- [9] 张军. 栗西沟尾矿坝工程地质特征及其稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2006.
- [10] 张钦喜. 土质学与土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [11] 忤彦卿. 岩土水力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 靳德武, 牛富俊, 陈志新, 倪万魁. 土体冻融过程中渗流场、应力场、温度场耦合作用机理研究[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(5): 40-42.