

# 黄岗水库实时监测大坝稳定性研究

李 想, 李灵杰

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年6月3日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

## 摘 要

大坝的建立为我们带来极大的便利, 但我们也不能忽视大坝所带来的危害。库水位升降被认为是影响大坝稳定的重要原因之一。研究水库水位实时监测数值模拟及机理分析, 为大坝安全稳定和安全性评估研究提供参考。本文将通过运用FLAC<sup>3D</sup>软件对黄岗水库大坝不同水位工况进行实时监测模拟, 通过分析浸润线, 位移, 安全系数, 研究其渗流场特性。在蓄水位升高时, 浸润线有所升高, 且最大位移增大至0.14611 m, 安全系数为1.965, 均在安全范围内。在蓄水位骤降时, 浸润线有所降低, 但最大位移增大为0.024 m, 安全系数为1.996, 对此进行机理分析在安全范围内。并对极端天气下的黄岗水库进行模拟分析, 结果表明该大坝满足渗流稳定要求。

## 关键词

渗流, FLAC<sup>3D</sup>, 黄岗水库

# Study on Stability of Huanggang Reservoir in Real Time Monitoring

Xiang Li, Lingjie Li

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2023; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The construction of the dam has brought us great convenience, but we should not ignore the harm it has brought. The rise and fall of reservoir water level is considered to be one of the important factors affecting dam stability. The numerical simulation and mechanism analysis of real-time monitoring of reservoir water level can provide scientific reference and knowledge basis for dam safety management. In this paper, FLAC<sup>3D</sup> software will be used to conduct real-time monitoring and simulation of different water levels of Huanggang Reservoir dam. After analyzing the infiltra-

tion line, displacement and safety factor, the seepage field characteristics will be studied. When the water level increases, the infiltration line increases to a certain extent, and the maximum displacement increases to 0.14611 m, and the safety factor is 1.965, which is within the safe range. When the water level plummets, the infiltration line decreases somewhat, but the maximum displacement increases to 0.024 m, and the safety factor is 1.996, which is within the safe range for the mechanism analysis. The simulation analysis of Huanggang reservoir under extreme weather shows that the dam meets the requirement of seepage stability.

## Keywords

Seepage, FLAC<sup>3D</sup>, Huanggang Reservoir

Copyright © 2023 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

近十年来,全球自然灾害呈现出发生次数越加频繁化、发生规模出现极端化、发生可能难以预测化、发生后果衍生级联化等新特点,给防灾减灾构成严峻挑战[1]。水库在蓄水运营过程中,水流升降对坝体的渗流特性,会一定程度对坝体渗流与应力变形产生较大的影响,并促进坝体内部渗流活动和增大坝体应力集中,造成坝体失稳。在1928年圣弗兰西斯坝突然溃决约70 min内库水全部泻出,水位骤升坝基内孔隙水压增高,导致溃坝的发生,造成重大损失[2]。因而水利大坝类渗流安全稳定性是水库运营重要关注方面。

截止2009年底,全国已建成各类水库大坝87,151座[3],大坝在防洪、供水、灌溉和发电等方面具有重要的作用,发挥着巨大的经济社会效益[4]。渗透稳定是影响土石坝安全的重要因素[5]。水库大量蓄水会造成局部岩体应力积累、地面沉降以及恢复过程也涉及渗流中的流固耦合问题。在流固耦合中,渗流流体计算和机械力学计算相互影响。王芝银[6],郑会耀[7]通过建立了渗流场与应力场的动态全耦合流变模型,研究不同时间的位移、应力和渗透系数的分布。随着计算机技术的快速发展,大变形数值模拟方法在岩土工程领域有了广泛应用[8]。朱一飞[9]用ANSYS对阜新电厂四灰场主坝进行了数值模拟,对其位移、应力应变等结果,对其精密监测提供依据。黄岗水库位于东南沿海地区,沿海极值水位呈显著增长,更容易造成极端天气和气候所带来的地质灾害,而极端降水的发生又会导致人口较密集的东南沿海城市遭到更严重的洪灾影响。利用FLAC<sup>3D</sup>软件对黄岗水库大坝进行实时监测,及时避免灾害的发生。

近年来,这些问题都会造成巨大的损失,让我们意识到排除这些隐患对社会经济的重大影响,水库的实时监测可以提前预测事故的发生,以达到大大减少人员伤亡和经济损失的目的。

## 2. 工程概况

黄岗水库是一座以灌溉、供水为主,结合防洪、发电、养殖等综合利用的重要中型水库。

黄岗水库位于福建省龙岩市。受地理环境和人类活动等因素的综合作用的影响,我国东南沿海地区沿海极值水位呈现显著增长趋势,且更容易发生由于极端天气和气候事件等带来的各类地质灾害。

水库正常蓄水位457.00 m,库容2520万m<sup>3</sup>。水库由主坝,副坝,溢洪道,放水系统等部分组成。其中主坝为均质土坝,坝顶高程462.00 m,最大高47米,坝顶长115米。副坝为高12米,长50米的土坝,大坝剖面图尺寸如图1所示,右侧建有侧槽式非常溢洪道,遇特大洪水时,最大可下泄384立方米/秒。

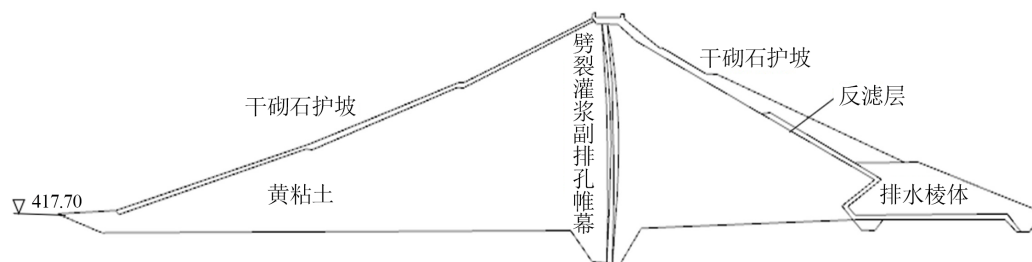


Figure 1. Profile of the dam

图 1. 大坝剖面图

### 3. 模型建立

针对黄岗水库拟建土坝工程渗流场特征计算原则, 水在非饱和土中的渗流也服从达西定律, 采用水头  $h$  作为控制方程的因变量[10]利用  $FLAC^{3D}$  有限差分软件, 建立坝体模型如图 2 所示。该计算模型包括黄粘土坝身, 排水棱体等, 基于微单元网格划分, 共获得 82,584 个单元体, 67,330 个节点, 建立模型长为 115 m, 坝高为 47 m, 上游、下游的坡比均按照实际尺寸进行建模。计算模型中的  $x$ ,  $z$  分别表示下游河流向, 垂直向上方向[11]。边界荷载在坝体四周设置多向约束, 顶部设置自由面, 根据大坝中不同材料进行不同参数的设定。根据尺寸信息在犀牛进行建模, 为了精确度, 在  $FLAC^{3D}$  中进行分组和命名。应用于本次数值模拟计算的所有参数如表 1 所示。

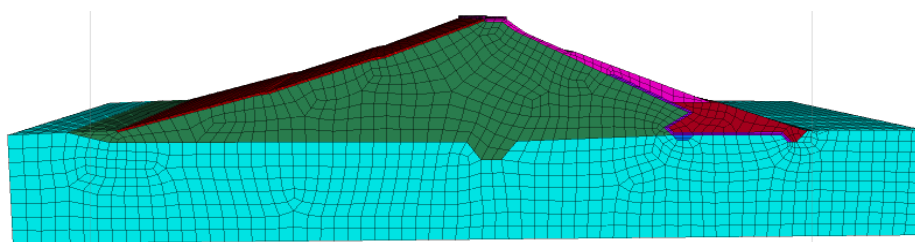


Figure 2. Establishment of finite difference method model

图 2. 有限差分法模型的建立

Table 1. Physical and mechanical parameters of materials

表 1. 材料物理力学参数

名称	体积模量 (MPa)	泊松比 $\nu$	内聚力 $C$ (Pa)	内摩擦角 $\Phi$	渗透系数 $m/s$	孔隙比	剪切模量 (pa)
坝身填土层	8	0.3	28e3	28	2.26e-10	0.2	2e7
护坡	8	0.3	28e3	28	3e-12	0.2	2e7
反滤层	1.3e1	0.25	10e3	28	6.5e-9	0.05	5.3e7
排水棱体	1.3e1	0.2	100e3	30	1e-6	8.64	6.9e6
风化土	1.3e3	0.28	200e5	35	2.2e-9	1.9e9	1.3e9

运用  $FLAC^{3D}$  软件模拟流体在孔隙介质中的流动及其相互的耦合作用, 利用显示差分法研究其渗流过程。当流体在多孔介质中流动时, 主要引起孔隙水压以及饱和状态的变化[12], 这些变化主要由流体质点平衡方程和 Darcy 定律方程式(1)所示之间相互关系来描述流体的流动。

$$v = Q/A = k(dh/ds) = kj \quad (1)$$

其中:  $v$  为断面  $A$  上的平均流速;  $Q$  为流量;  $k$  为渗透系数;  $j$  为渗透坡降。

将犀牛建立的三维模型导入  $FLAC^{3D}$  中, 编辑 fish 语言, 设定渗流参数, 边界条件设置, 进行渗流计算, 得到边坡渗流稳定状态下的孔隙水压分布。随后关闭流体进程, 将流体压缩模量设置为 0, 打开力学进程, 利用强度折减法计算安全稳定系数。

通过在  $FLAC^{3D}$  软件中建立定义方程式(2)来实现水库的实时监测。

$$y = kx + b \tag{2}$$

其中:  $x$  为监测到的库水位的值减去坝底标高 417.7;  $y$  为出水边界;  $k$  为库水位变化处的斜率。

## 4. 计算结果与分析

### 4.1. 孔隙水压的研究

根据渗流场特征计算, 获得坝体静水工况下孔隙水压力特征, 如图 3 所示, 工况 1 (正常蓄水位 457 m 处)其中孔隙水压力整体分布从坝底至坝顶递减, 上游坝底处分布有最大孔隙水压力, 达 431.08 kPa, 坝身各区间孔隙水压力分布呈块状递减式, 上游临水侧孔隙水压力高于下游背水侧, 且在下游背水侧孔隙水压力出现负值, 表明坝身土体处于非饱和状态, 最大负孔隙水压力为 9.928kPa。

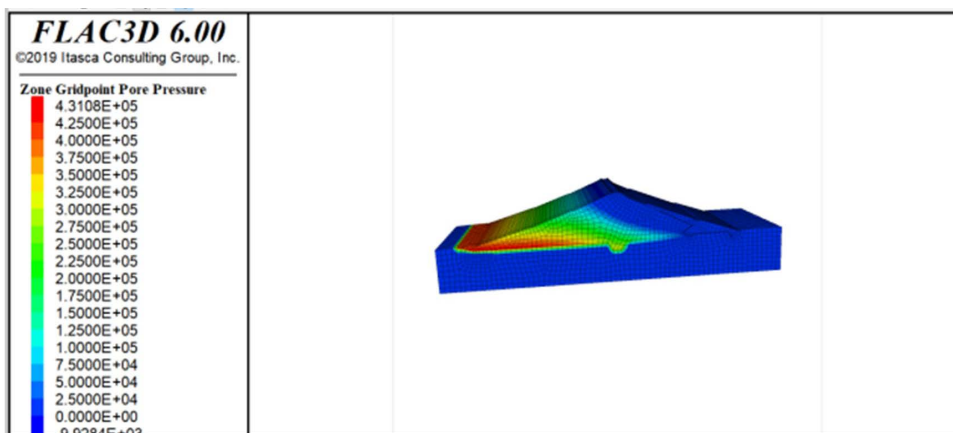


Figure 3. Pore water pressure in working condition 1 (normal water level 457 m)

图 3. 工况 1(正常蓄水位 457 m)的孔隙水压

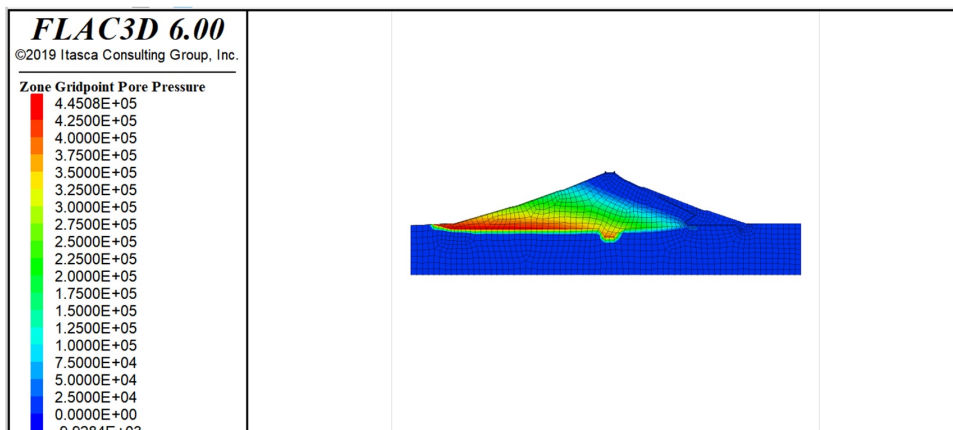


Figure 4. Pore water pressure in working condition 2 (water level rising to 460 m)

图 4. 工况 2 (水位上升至 460 m 处)的孔隙水压

### 1) 水位上升阶段

当水库蓄水位增高后, 此时孔隙水压力分布基本与工况 1 一致, 但量值上出现显著差异, 工况 2 (水位上升为 460 m 处) 如图 4 所示, 上游坝底最大孔隙水压力增大至 445.08 kPa, 从坝底至坝顶依然为递减分布, 局部块状分布形态与工况 1 一致。根据浸润线可以看到浸润线有所升高但并未到达坝体高度, 处于安全状态下。

### 2) 水位下降阶段

根据渗流场特征计算, 获得坝体静水工况下孔隙水压力特征, 工况 3 (库水位骤降至 455 m) 当水库蓄水位降低后的孔隙水压, 如图 5 所示, 此时孔隙水压力分布基本与工况 1 一致, 但量值上出现显著差异, 从坝底至坝顶依然为递减分布。由于水位骤降, 孔隙水压在坝体内逐步蔓延至下游背水侧, 导致背水侧非饱和土体逐步吸收水分, 非饱和土体分布量减小, 进而负孔隙水压有所降低, 工况 3 下游坝底最大孔隙水压力降低至 7.892 kPa。

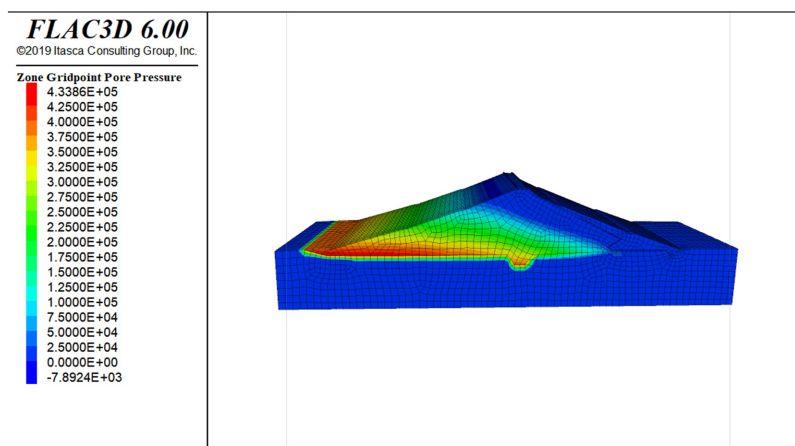


Figure 5. Pore water pressure at working condition 3 (reservoir water level drops 455 m)

图 5. 工况 3 (库水位骤降 455 m) 处孔隙水压

## 4.2. 位移的变化

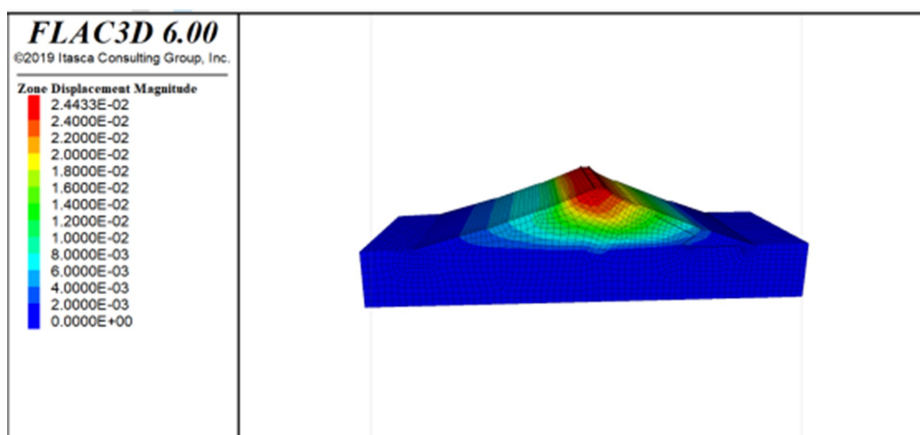


Figure 6. Displacement in working condition 1

图 6. 工况 1 位移

根据渗流场特征计算, 获得坝体静水工况下位移变化特征, 如图 6 所示, 工况 1 中坝体位移从上到

下总体呈逐渐递减的变化规律, 最大的位移集中在坝体的顶部, 最大位移达到 0.024 m。

#### 1) 水位上升阶段

当库水位骤然升高至工况 2 库水位为 460 m 时, 此时位移分布基本与工况 1 一致, 如图 7 所示, 由于库水位上升, 土中的附加应力减小, 地基承载力大幅度下降, 考虑其中水的浮力影响, 上升承载力降低。与工况 1 位移相比, 下滑最大位移有所增大, 增大至 0.146 m。

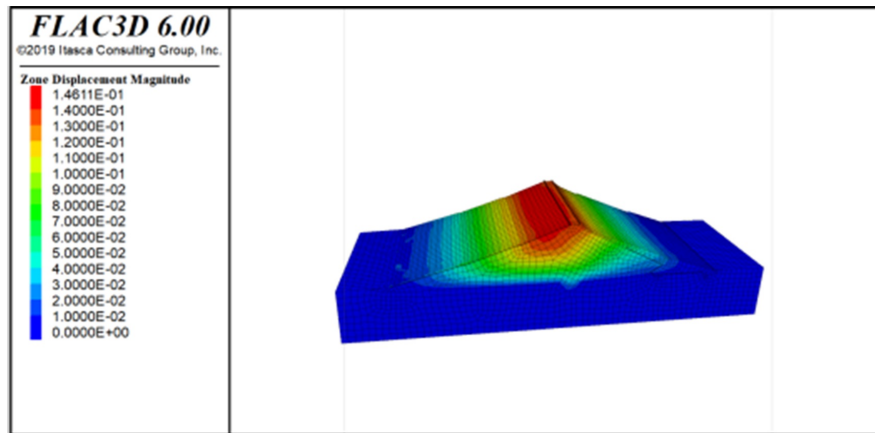


Figure 7. Displacement in working condition 2  
图 7. 工况 2 位移

#### 2) 水位下降阶段

水位降落尤其是骤降于工况 3 至 455 m 处的位移如图 8 所示, 由于水位骤降, 坡体水位高于库水位, 由此产生的渗流作用使潜在滑动面的抗滑能力降低, 滑动位移有所增大。

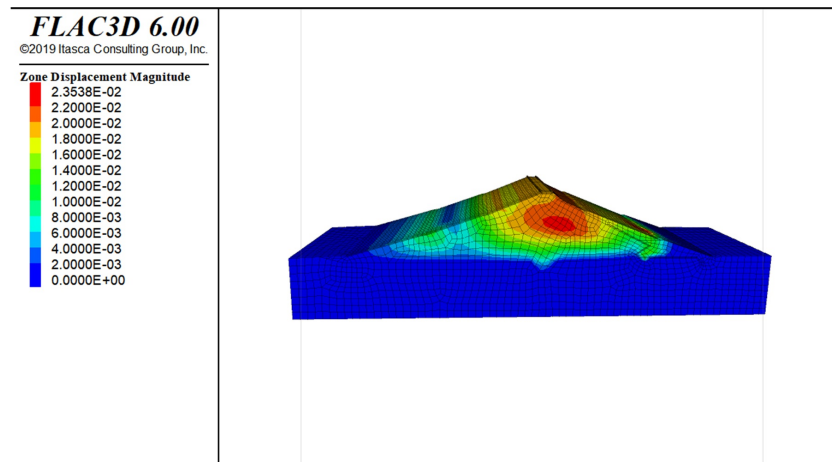


Figure 8. Displacement at working condition 3 (455 m plunge of reservoir water level)  
图 8. 工况 3 (库水位骤降 455 m) 处位移

### 4.3. 应力及安全系数研究

根据渗流场特征计算, 获得坝体静水工况下垂直有效应力变化特征, 如图 9 所示, 整体呈现压应力。在水位为正常水位 457 m 时安全系数为 1.957。根据 GB50330-2013《建筑边坡工程设计规范》[13]中的规定, 如表 2 所示。经分析大坝处于稳定状态。

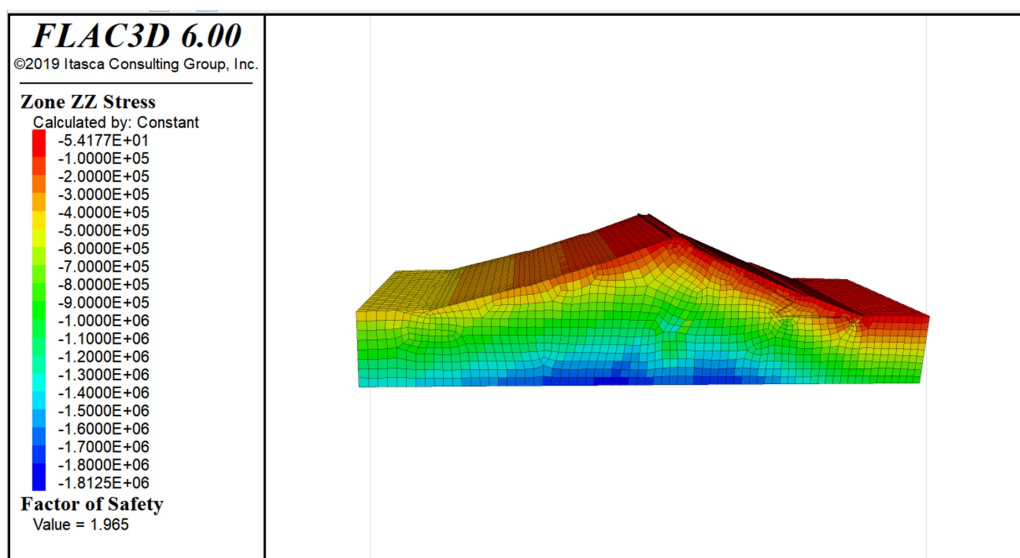
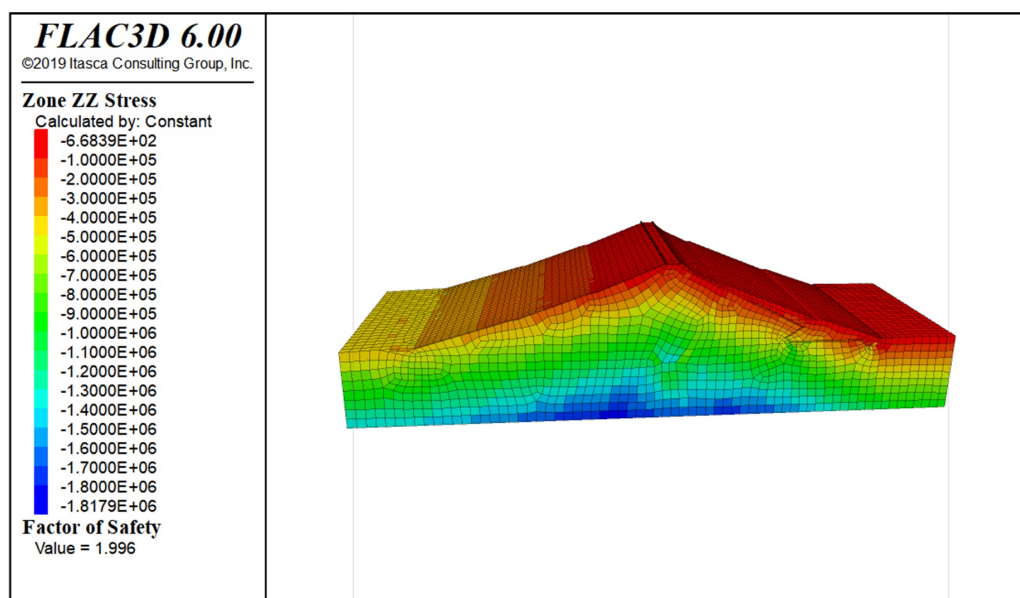


**Table 2.** Classification of slope stability**表 2.** 边坡稳定性划分

边坡稳定性系数 $F_s$	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < F_{st}$	$F_s \geq F_{st}$
边坡稳定性状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

## 1) 上升阶段

当库水位骤然升高至工况 2 库水位 460 m 时, 此时垂直方向应力分布基本与工况 1 一致, 如图 10 所示, 但应力有所增大。其安全系数为 1.996, 根据技术规范中的规定大坝处于稳定状态。

**Figure 9.** Stress and safety factor in vertical direction of working condition 1**图 9.** 工况 1 垂直方向的应力及安全系数**Figure 10.** Stress and safety factor in vertical direction of working condition 2**图 10.** 工况 2 垂直方向的应力及安全系数

## 2) 下降阶段

根据渗流场特征计算, 获得工况 3 坝体静水工况下垂直有效应力变化特征, 如图 11 所示。相对于工况 1 压应力有所增大。降后安全系数为 1.996, 根据技术规范中的规定大坝仍处于稳定状态。

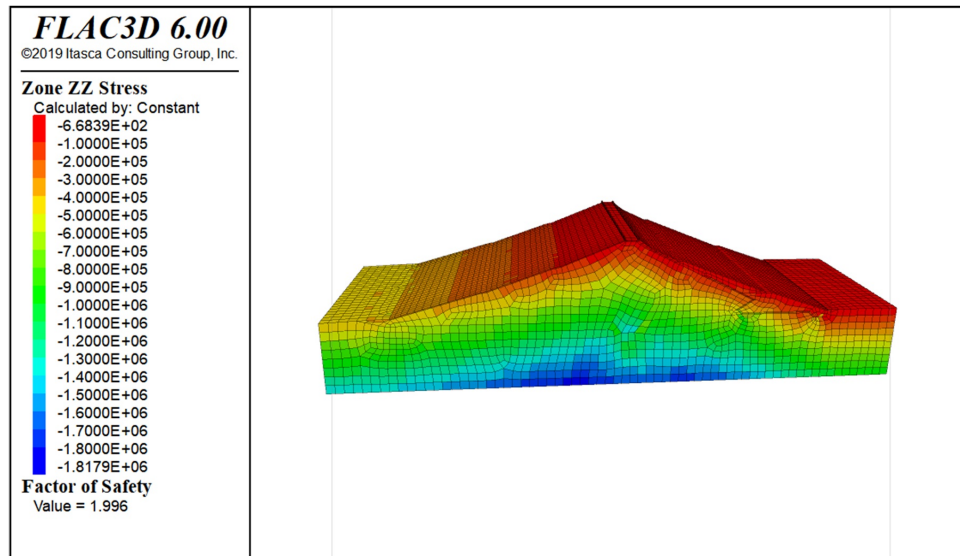


Figure 11. Vertical displacement and safety factor at 3 working conditions  
图 11. 工况 3 处垂直位移及安全系数

## 4.4. 极端天气对大坝稳定性研究

在全球变暖的大环境下, 极端天气发生的频率也逐渐增多, 对极端天气与水文事件精准预测预报, 需要相关领域的科研工作者进行原理性创新, 精细化解析极端天气与水文事件的成因与机理, 提升预测预报技术的精准性[14]。而大坝在时间的推移下存在一些损伤, 遭遇极端天气的影响, 很可能发生溃坝等重大的灾害, 对大坝的稳定性产生极大的威胁。其中洪水, 暴雨的增加也对大坝的防洪能力产生巨大的压力, 大大降低了水库大坝的安全等级。

黄冈水库溢洪道堰型为宽顶堰, 溢洪道泄流能力公式如下:

$$Q = m\varepsilon B(2g)^{1/2} H_0^{3/2} \quad (3)$$

式中  $Q$ -流量;  $B$ -总净宽; 黄冈水库溢洪道总净宽 10.0 m;  $G$ -取 9.8;  $M$ -二元水流宽顶堰流量系数, 与相对上游堰高  $P1/H$  及堰头形式有关;  $E$ -闸墩侧收缩系数;

$$\varepsilon = 1 - 0.2 \left[ \xi + (n-1)\xi \right] H_0 / nb \quad (4)$$

注:  $n$  为闸孔数目。

$H_0 / nb > 1$  时仍取 1。

根据不同的泄流量, 由上述公式得到  $H_0$ 。

对于此情况, 本文将采用数值模拟技术对 100 年一遇、1000 年一遇的洪水进行模拟并进一步分析研究。根据上述式(3), 式(4)综合计算所得 100 年一遇的洪水下泄洪水量为 221 m<sup>3</sup>/s, 库水位为 457.75 m。1000 年一遇的大洪水下泄洪水量为 306 m<sup>3</sup>/s, 库水位为 459.25 m。

由下图 12, 图 13, 图 14 所示 100 年一遇的洪水浸润线, 下滑位移以及安全系数显示, 在安全范围内。



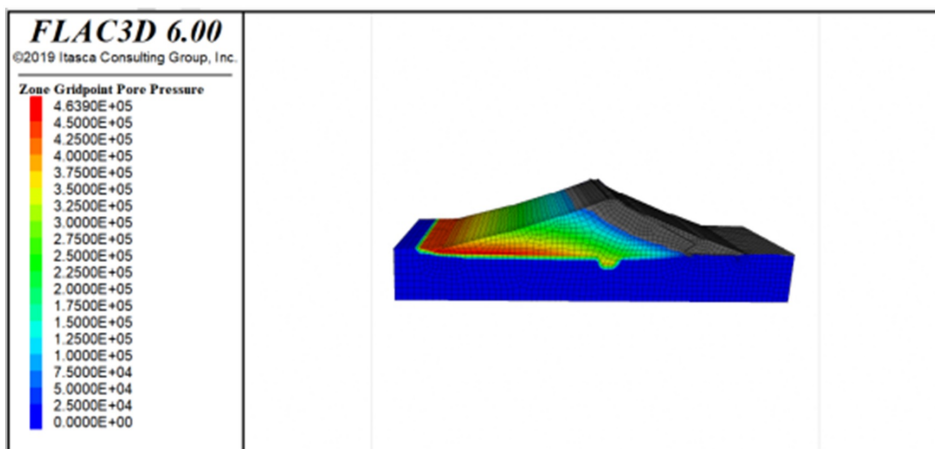


Figure 12. Infiltration line of a 100-year flood  
 图 12. 100 年一遇洪水的浸润线

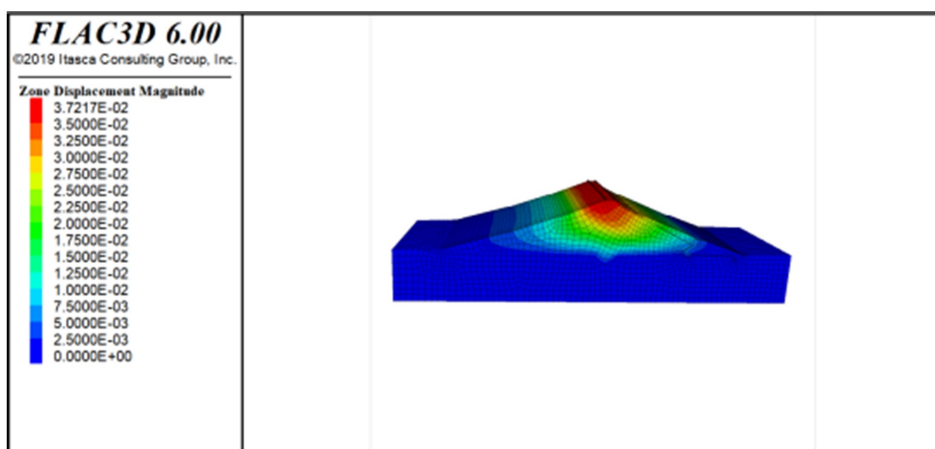


Figure 13. Displacement of a 100-year flood  
 图 13. 100 年一遇洪水的位移

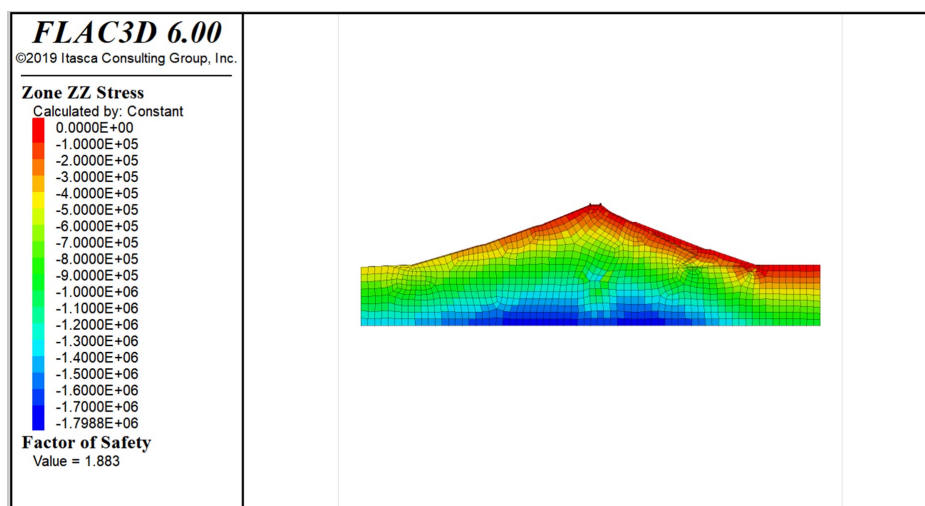


Figure 14. Safety factor and vertical pressure of 100 year flood  
 图 14. 100 年一遇洪水的安全系数及竖向压力

由下图 15, 图 16, 图 17 所示 1000 年一遇的洪水浸润线, 下滑位移以及安全系数显示, 在安全范围内。

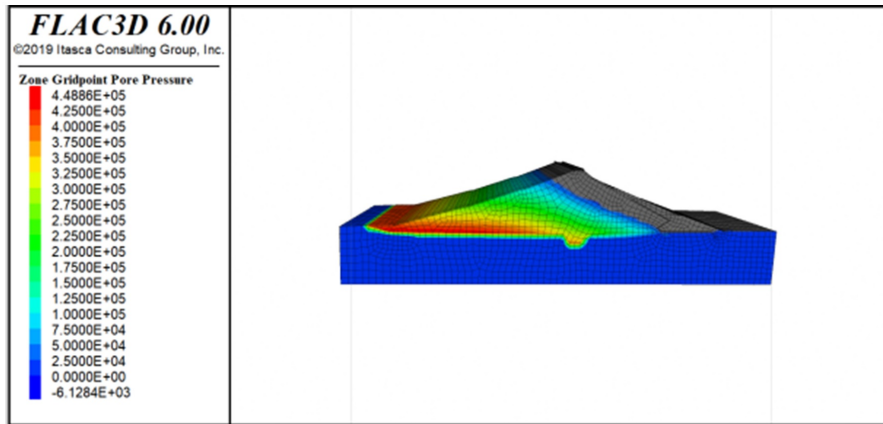


Figure 15. Infiltration line of 1000 year flood  
图 15. 1000 年一遇洪水的浸润线

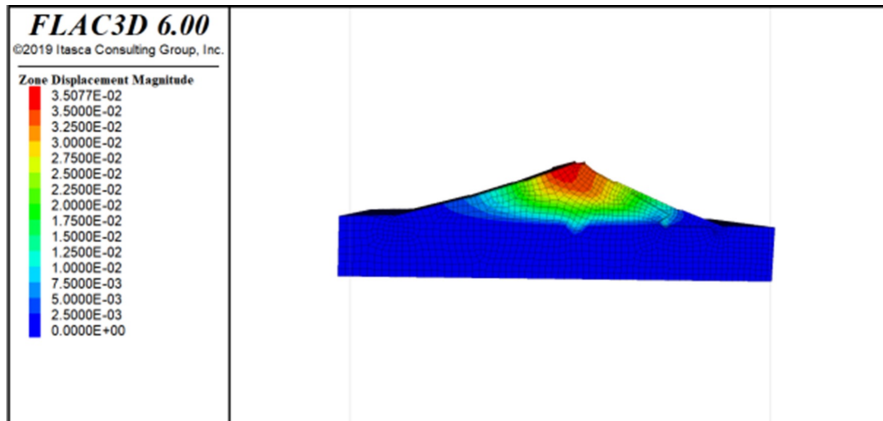


Figure 16. Displacement of a 1000 year flood  
图 16. 1000 年一遇洪水的位移

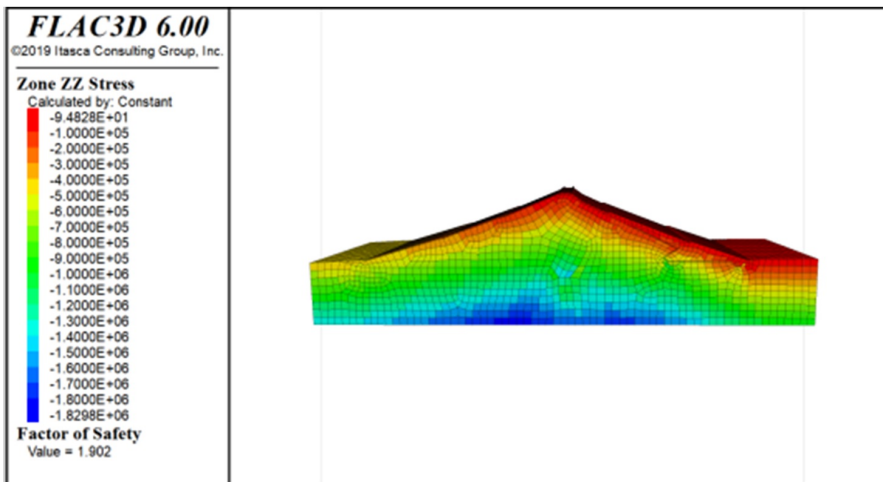


Figure 17. Safety factor and vertical pressure of 1000-year flood  
图 17. 1000 年一遇洪水的安全系数及竖向压力

## 5. 结论

1) 稳定渗流工况下蓄水位上升, 不改变坝身孔隙水压的分布特征, 孔隙水压力均为从坝底至坝顶递减。最大孔隙水压由 431.08 kPa 增大至 445.08 kPa。浸润线又所升高。同时位移分布基本与工况 1 一致, 由于库水位上升, 土中的附加应力减小, 地基承载力大幅度下降, 考虑其中水的浮力影响, 上升承载力降低, 与工况 1 位移相比, 下滑最大位移有所增大, 增大至 0.14611 m。安全系数为 1.965, 经分析均在安全范围内。

2) 稳定渗流工况下蓄水位骤降, 不改变坝身孔隙水压的分布特征, 孔隙水压力均为从坝底至坝顶递减。下游非饱和的负孔隙水压 9.928 kPa 减小至 7.892 kPa。浸润线有所降低。同时位移分布基本与工况 1 一致, 由于滑坡渗流的影响, 滑坡稳定性下降, 与工况 1 位移相比, 下滑最大位移有所增大, 增大至 0.024 m。安全系数为 1.996, 经分析均在安全范围内。

3) 经过对极端天气 100 年一遇洪水和 1000 年一遇洪水的模拟, 检验了大坝在极端天气下的稳定性。验证了该大坝满足渗流稳定要求。

## 参考文献

- [1] 李雪梅. 近十年来发达国家自然灾害治理新趋向及鉴戒[J]. 福建师范大学学报(哲学社会科学版), 2022(4): 43-51+170.
- [2] 张秀丽. 国内外大坝失事或水电站事故典型案例原因汇集[J]. 大坝与安全, 2015(1): 13-16.
- [3] 中华人民共和国水利部. 2009 年全国水利发展统计公报[M]. 北京: 北京中国水利水电出版社, 2010.
- [4] 甘泓, 王芳, 高勇胜, 田克军. 大坝的工程生态要求[J]. 中国水利, 2006(10): 15-17.
- [5] 岳庆河, 郭清华, 张大雷. 老岚水库土石坝渗流数值模拟研究[J]. 水利技术监督, 2022(10): 242-245.
- [6] 王芝银, 郭书太, 李云鹏. 等效连续岩体流固耦合流变分析模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2122-2126.
- [7] 郑会耀. 大坝渗流监测系统设计与渗流计算机模拟研究[J]. 科技与创新, 2015(24): 62-63.
- [8] Wang, J., Apel, D.B., Pu, Y.Y., Hall, R., Wei, C. and Sepehri, M. (2021) Numerical Modeling for Rockbursts: A State-of-The-Art Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **13**, 457-478. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.09.011>
- [9] 朱一飞, 郝哲, 杨增涛. ANSYS 在大坝数值模拟中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 965-968+972.
- [10] 陆璐. 极限平衡法在花田铺滑坡稳定性分析中的应用[J]. 治淮, 2022(8): 47-49.
- [11] Yin, Z.-Y., Jin, Y.-F. and Zhang, X. (2021) Large Deformation Analysis in Geohazards and Geotechnics. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, **22**, 851-855. <https://doi.org/10.1631/jzus.A21LDGG1>
- [12] 陈海波. 流固耦合作用下粗糙裂隙岩体渗流及滑移失稳机理研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [13] 方玉树. 建筑边坡工程技术规范(GB50330-2013)修改建议[M]. 重庆: 重庆出版社, 2020.
- [14] 何亮, 付丽丽. 应对极端天气还要科技“软硬”兼施[N]. 科技日报, 2022-09-30(005).