

基于有限元的水库大坝安全鉴定分析评价

杨 萌^{1,2}, 许尚杰^{1,2}, 王志真^{3*}

¹山东省水利科学研究院, 山东 济南

²山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南

³山东省农业交流合作中心, 山东 济南

收稿日期: 2025年6月27日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月29日

摘 要

水库大坝作为国家现代水网体系的核心控制性工程, 在流域防洪安全保障体系和水资源战略配置中发挥着关键作用。本文聚焦大坝安全评估中的渗流与稳定核心环节, 以胶东半岛某水库土石坝为研究对象, 基于有限元数值模拟技术构建坝体渗流场与抗滑稳定性耦合分析模型。研究结果表明: 在设计洪水位、正常蓄水位等多种运行工况下, 坝体渗流场最大水力梯度均低于临界阈值, 背水侧未出现渗流出逸现象, 渗透稳定性满足工程安全标准, 各典型工况下的抗滑稳定安全系数均高于现行规范限值。研究验证了参数敏感性分析方法在坝体安全评估中的适用性, 可为同类工程安全评价提供技术参考。

关键词

有限元法, 大坝, 安全鉴定, 评价

Safety Assessment and Analysis of Reservoir Dams Based on the Finite Element Method

Meng Yang^{1,2}, Shangjie Xu^{1,2}, Zhizhen Wang^{3*}

¹Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan Shandong

²Shandong Provincial Laboratory of Water Resources and Environment, Jinan Shandong

³Shandong Agricultural Exchange and Cooperation Center, Jinan Shandong

Received: Jun. 27th, 2025; accepted: Jul. 15th, 2025; published: Jul. 29th, 2025

Abstract

As core controlling structures in national modern water network systems, reservoir dams play

*通讯作者。

文章引用: 杨萌, 许尚杰, 王志真. 基于有限元的水库大坝安全鉴定分析评价[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1778-1787.
DOI: 10.12677/hjce.2025.147192

pivotal roles in watershed flood control and safety assurance systems as well as strategic water resources allocation. This study focuses on the critical aspects of seepage and stability in dam safety evaluation, taking a typical large-scale earth-rock dam in the Jiaodong Peninsula as the research object. A coupled analysis model integrating seepage field and anti-sliding stability was established using finite element numerical simulation technology. The results demonstrate that under various operational conditions including designed flood level and normal pool level, the maximum hydraulic gradient in the dam's seepage field remains below the critical threshold without seepage exfiltration observed at the downstream slope, satisfying engineering safety standards for permeability stability. The anti-sliding safety coefficients under all typical working conditions exceed current code requirements. The research validates the applicability of parameter sensitivity analysis methodology in dam safety assessment, providing technical references for safety evaluations of similar projects.

Keywords

Finite Element Method, Dam, Safety Assessment, Evaluation

Copyright © 2025 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

作为国家水资源战略管理与生态安全体系的核心基础设施,水库大坝在统筹解决中国水资源时空分布不均、构建防洪减灾体系、提升水旱灾害防御能力等重大民生问题上具有不可替代的作用。据统计,我国现有水库大坝 9.5 万座,总库容超 1 万亿立方米[1],形成覆盖全国的水资源调配网络。在防洪减灾方面,水库大坝通过拦蓄洪水、削峰错峰调控,使长江、黄河等七大流域重点河段的防洪标准从不足 10 年一遇提升至 50~100 年一遇,2020 年汛期全国水库累计拦蓄洪水逾 1,680 亿立方米,避免人员转移 2148 万人,降低受灾经济损失超 3,000 亿元[2],成为推动水利高质量发展、保障我国水安全的重要支撑[3]。

在此背景下,大坝安全鉴定工作已成为保障水库大坝工程全生命周期安全的核心技术手段,基于《水库大坝安全鉴定技术导则》(SL 258-2017)框架,通过利用渗流场-应力场耦合作用下的坝体稳定性评价方法,创新性引入非饱和渗流理论与机器学习驱动的风险预警模型,以解决传统安全鉴定中参数滞后性、工况覆盖不足等瓶颈问题,为提升大坝在复杂环境下的韧性提供理论支撑与技术路径。

2. 大坝概况

水库位于山东胶东半岛威海市小落河下游入海口处,濒临黄海,主要为当地城区提供城市生活用水及水库周边农田灌溉用水,是城市重要供水水源地。水库大坝枢纽工程由主坝、副坝、溢洪道(闸)三部分组成,工程等级为 II 等,主要建筑物为 2 级。根据山东省水库资料汇编,水库控制流域面积 256 km²,总库容 1.0438 亿 m³,调洪库容 8560.0 万 m³,兴利库容 7105.0 万 m³,死库容 1145.0 m³;校核洪水位 7.23 m,设计洪水位 6.36 m,正常蓄水位 6.10 m,死水位 1.90 m,汛期限制水位 2.5 m。水库为 50 年一遇洪水设计,三百年一遇洪水校核。

主坝坝顶长 2622.50 m,最大坝高 13.23 m。桩号 0+000~0+216.75、0+324.09~0+344.48、2+555~2+622.49 等三部分坝段为壤土心墙风化石料砂壳坝,心墙顶宽 3.0 m,心墙上下游边坡为 1:1;其余坝段为风化石料均质坝,主坝 2+622.49~副坝 0+000 段为一山体。副坝为复合土工膜风化石料均质坝,全长 2027

m，坝顶高程 9.0 m，坝顶宽 6.0 m，最大坝高 9.5 m。

3. 渗流稳定分析

3.1. 断面选择及计算参数

根据结构特征，选取重壤土填筑心墙的主坝桩号 0+200 断面，复合土工膜——搅拌桩连续墙坝基防渗——弱透水性淤泥质粘土隔水层的主坝 1+400 断面，以及复合土工膜埋入混凝土齿槽——混凝土齿槽基岩直连的副坝桩号 1+000 等 3 个断面，作为典型断面进行稳定渗流计算分析。

结合该水库开展安全鉴定出具的《工程地质勘察报告》，并参照近十年该水库大坝各类型勘察及分析成果，综合分析确定大坝各部位土工参数见表 1。

Table 1. Geotechnical parameters summary for dam calculations

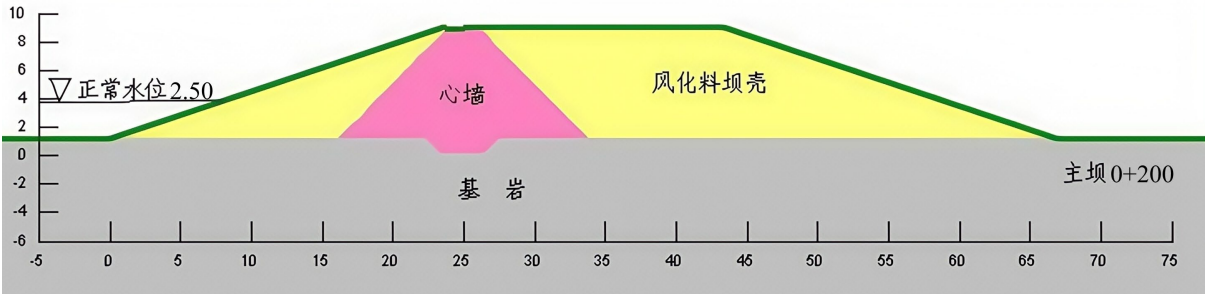
表 1. 大坝土工指标

断面桩号	指标部位	干密度 ρ_d (g/cm ³)	湿密度 ρ (g/cm ³)	饱和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	三轴固结排水剪 C/ϕ (kPa/度)	渗透系数(cm/s)
主坝 0+200	壤土心墙	1.7	1.97	2.06	24/16	1.5×10^{-6}
	风化料坝壳	1.73	1.81	2.08	3.3/32.6	1.1×10^{-3}
主坝 1+400	风化料坝体	1.73	1.81	2.08	3.3/32.6	1.1×10^{-3}
	砂	1.44	1.86	1.9	4/25.6	3.5×10^{-3}
	淤泥质土	1.17	1.54	1.74	14/3.4	8.5×10^{-6}
	松散层	15.8	20	20	0/34	8.8×10^{-3}
副坝 1+000	风化料坝体	1.72	1.80	2.07	3.3/32.0	1.56×10^{-3}
	坝基中细砂	1.54	1.90	1.96	11.0/22.6	1.9×10^{-6}
	坝基粘土	1.24	1.59	1.78	17.5/20.3	3.4×10^{-6}
	复合土工膜	1.60	1.97	2.01		1.0×10^{-11}
	搅拌桩防渗墙	1.6	2.0	2.01		1.0×10^{-6}
	堆石体	1.8	1.85	2.1	0/45	1.0

3.2. 计算条件

3.2.1. 坐标选择

在大坝渗流计算中，一般采用笛卡儿直角坐标系[4]。大坝选择典型断面二维计算，以垂直于坝轴线的 0.0 m 高程水平线为 x 坐标轴，以过上游大坝迎水面坡脚的铅垂线为 y 轴，3 个断面的计算坐标系如下图 1 所示。



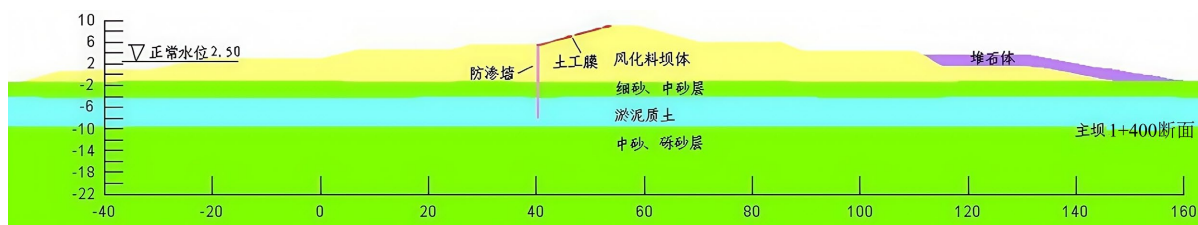


Figure 1. Computational model for typical dam cross-sections

图 1. 大坝典型断面计算模型

3.2.2. 单元网格划分与材料分布

首先选择计算区域, 坝体顶宽 6.0 m, 坝底 0.0 m 高程处坝体宽度为 200.0 m, 从该高程计算坝体高度 9 m。从坝体迎水面坝脚向上游延伸 100 m, 从坝体背水面坝脚向下游延伸 100 m, 从坝底 0.0 m 高程线处向地下延伸 30 m。

渗流计算中涉及到 8 种材料,在模型中分别用不同的颜色表示,它们分别为:坝体填土(风化料)、复合渗透体、搅拌桩防渗墙、堆石体、坝基中细砂壤土、坝基淤泥层、坝基中粗砂、基岩,其分布情况见图 1。所谓复合渗透体,是指计算中将防护层和复合土工膜当成一个复合渗透体,用解析方法先计算出复合渗透体的渗透系数,再进行有限元网格剖分。

由于坝体结构中复合土工膜的厚度相比坝体很小,若对其进行单元划分,将导致当前计算机无法承受的计算量,同时由于各单元矩阵的主元相差很大,也容易导致有限元解的不稳定。因此,计算中将护坡混凝土块、垫层、复合土工膜料当成一个复合渗透体,对复合渗透体整体进行单元划分。复合渗透体的渗透系数按照土力学中有关成层土竖直方向的渗透系数的计算公式 $k_v = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \frac{H_3}{k_3} + \frac{H_4}{k_4} + \frac{H_5}{k_5}}$ 进行求取

$$= \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \frac{H_3}{k_3} + \dots} \text{ 进行求取}$$

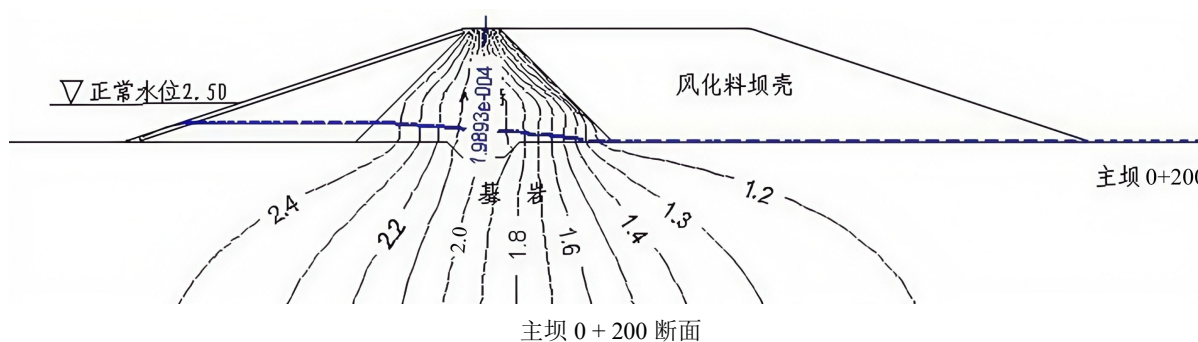
[5]。根据该水库大坝工程的设计方案,土工膜厚度为 0.5 mm, 渗透系数为 1×10^{-13} m/s, 护坡及垫层厚 0.30 m, 计算中复合渗透体的厚度取 0.5 m, 经计算得复合渗透体的渗透系数为 1×10^{-10} m/s。

3.2.3. 稳定渗流计算

Table 2. Seepage discharge calculation for dams (Unit: $\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$)

表 2. 大坝渗流计算渗透流量(单位: $\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$)

断面桩号水位	主坝 0 + 200	主坝 1 + 400	副坝 1 + 000
正常蓄水位(2.50 m)	2.0e-4	1.3e-2	8.1e-3
设计洪水位(P = 2%) (4.43 m)	8.3e-4	4.1e-2	1.5e-2
校核洪水位(P = 0.33%) (5.61 m)	1.5e-3	6.3e-2	3.5e-2



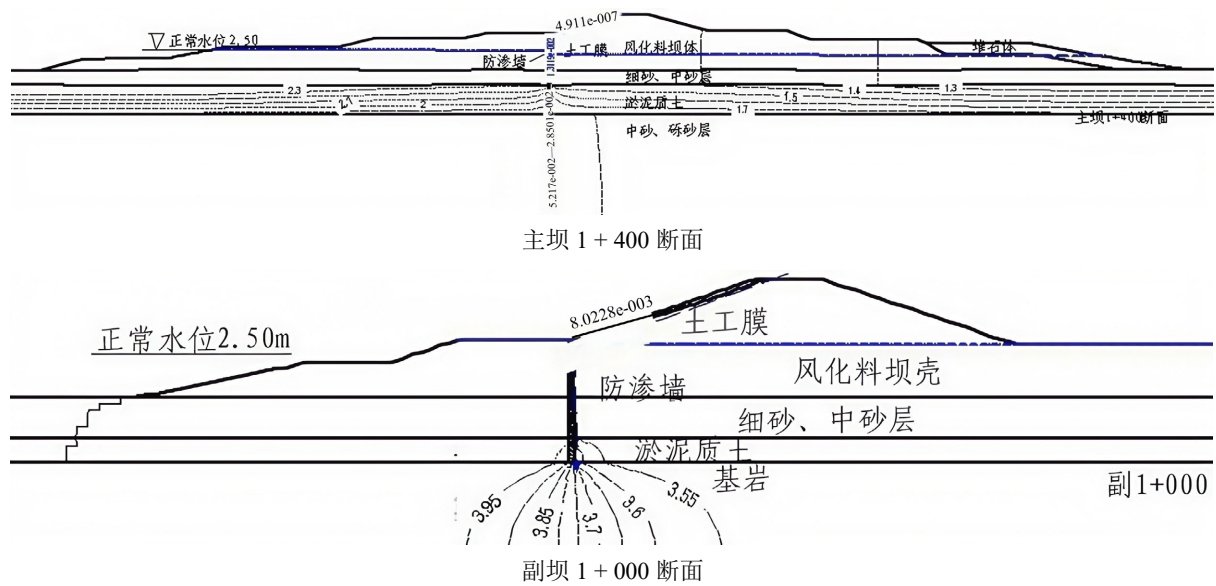


Figure 2. Phreatic Line and Equipotential Lines of Dam Seepage under Normal Pool Level

图 2. 正常水位下大坝渗流浸润线及等势线

渗流计算采用有限单元法[6]，计算工况为水库现状正常蓄水位 2.5 m、设计洪水位($P=2\%$) 4.43 m 及校核洪水位($P=0.33\%$) 5.61 m，下游水位平下游地面(主坝 1+400 断面下游水位为 1.9 m)。

3 处断面在三种工况下，通过计算得到的每延米渗流量见表 2。

由表 2 可知，在正常蓄水位水位条件下，大坝每年渗漏量约 8.2 万 m^3 ，占水库兴利库容的 0.11%，渗漏量较小，不会影响水库的正常蓄水。3 处断面在各种工况条件下，计算得到的浸润线及等势线见图 2。

3.2.4. 渗透变形判断

(1) 反滤层判断

在建坝时，在坝体过渡地带均进行了过渡层和反滤层设计，但现状坝后坝脚没有设过渡层或反滤层，一旦坝后出逸点过高，容易产生出逸破坏[5]。

(2) 渗透变形类型

① 砂性土的渗透变形类型

砂性土的管涌和流土应根据土的细粒含量，采用下列方法判断[7]：

$$\text{管涌: } P_c < \frac{1}{4(1-n)} \times 100; \text{流土: } P_c \geq \frac{1}{4(1-n)} \times 100$$

式中： P_c ——土的细粒颗粒含量，以质量百分率计(%)；

n ——土的孔隙率(%)。

流土型渗透变形临界水力坡降采用下式计算：

$$J_{cr} = (G_s - 1)(1 - n)$$

式中： J_{cr} ——土的临界水力坡降；

G_s ——土粒比重。

土的允许比降 $J_{\text{允许}} = 0.5 J_{cr}$

管涌型渗透变形临界水力坡降采用下式计算：

$$J_{cr} = 2.2(G_s - 1)(1 - n)^2 \frac{d_5}{d_{20}}$$

式中： d_5 、 d_{20} ——分别占总土重的 5%和 20%的土粒粒径(mm)。

土的允许比降 $J_{允许} = 0.67 J_{cr}$

坝体和坝基土料的基本参数见表 3；根据土料的基本参数判断的渗透变形类型及计算的临界水力比降值见表 4。

Table 3. Geotechnical properties of dam body fill material
表 3. 坝体土料基本参数

部位 \ 项目	不均匀系数 Cu	细颗粒含量 P_c (%)	孔隙率(%)	比重 G_s	d_5 (mm)	d_{10} (mm)	d_{20} (mm)
坝体	23.34	20	42.0	2.65	0.1	0.155	0.4
坝基细砂	11.6	70	45.0	2.67	0.002	0.01	0.026

Table 4. Types of seepage failure modes and hydraulic gradients
表 4. 渗透变形类型及水力坡降

部位 \ 项目	渗透变形类型	临界水力坡降	允许水力坡降
坝体	管涌	0.52	0.35
坝基细砂	流土	0.82	0.41

② 粘土的渗透变形类型

部分为淤泥质粘土，渗透变形类型为流土，根据规范可知：下游有保护的情况下，粘土的允许水力比降为 4~5，渗流出口处无反滤层时的容许坡降经验值为 0.5~0.6。

(3) 渗透坡降计算

发生在 3 处断面坝体内的最大坡降和位置、出逸点的最大坡降和位置见表 5。

Table 5. Hydraulic gradient values for dam seepage
表 5. 大坝渗透坡降值

断面桩号	坝体内 J_{max}				出逸点 J_{max}	
	坝体内 J_{max}		坝基 J_{max}			
	数值	位置	数值	位置	数值	位置
主坝 0 + 200	0.1	心墙 底部	0.1	坝基 基岩接触带	0.02	坝脚
主坝 1 + 400	0.01	坝体 底部	0.1	坝基 淤泥	0.1	坝脚
副坝 1 + 000	0.01	坝体 底部	0.01	坝基 砂内	0.02	坝脚

由上述表 5 结果可知：由于大坝坝体防渗质量较好，坝后坡出逸点低，且渗透坡降小于允许水力比降，均不会发生渗透变形。

3.3. 库水位骤降时渗流计算

计算工况有两种：

- (1) 溢洪闸自由泄流，由上游设计洪水位($P = 2\%$) 6.40 m 降至死水位 1.9 m。
- (2) 溢洪闸自由泄流，由上游校核洪水位($P = 0.33\%$) 7.23 m 降至死水位 1.9 m。

由上游校核洪水位($P = 0.33\%$) 7.23 m 降至死水位 1.9 m 工况情况下，坝体中浸润线随时间变化过程见图 3。

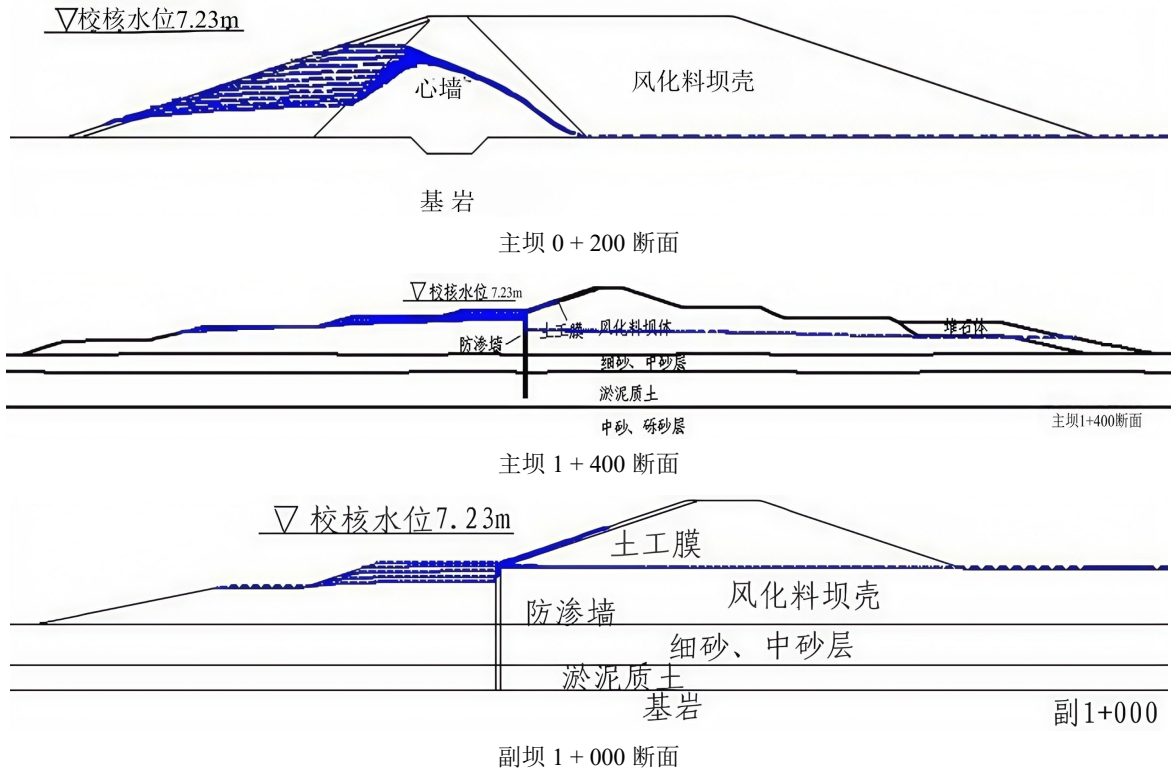


Figure 3. Time-dependent variation of the phreatic line in dam embankments
图 3. 时间作用下坝体浸润线变化过程

4. 大坝边坡稳定分析

4.1. 计算条件

4.1.1. 采用的坐标

在大坝边坡稳定计算中，采用有效应力分析法，即以相同工况时的渗流分析结果为基础，调入渗流分析所得到的浸润线，浸润线以下各种材料采用有效力学参数，浸润线以上用天然力学参数[8]。根据地层结构形式，选择主坝桩号 0 + 200、1 + 400，副坝桩号 1 + 000 等 3 处断面为典型断面进行二维稳定计算，坐标系同渗流计算模型。

4.1.2. 材料分布

与对应的渗流分析计算区域的选择相同，见图 1。

4.1.3. 计算用材料参数

各种材料参数的数据见表 1。

4.2. 坝坡静力稳定计算与分析

4.2.1. 稳定渗流期的上、下游坝坡稳定计算

采用简化毕肖普法，对 3 处断面在现状正常蓄水位 2.5 m、设计洪水位(P = 2%) 4.43 m 和校核洪水位 (P = 0.33%) 5.61 m 三种工况时的上、下游坝坡稳定进行计算，各工况下最小抗滑稳定安全系数见表 6。

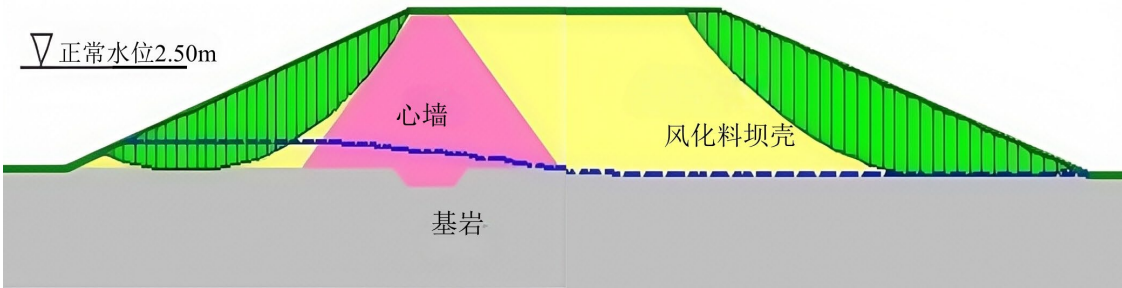
Table 6. Minimum safety factor for slope stability of dams under static water level conditions

表 6. 静水位工况下坝坡最小抗滑稳定安全系数

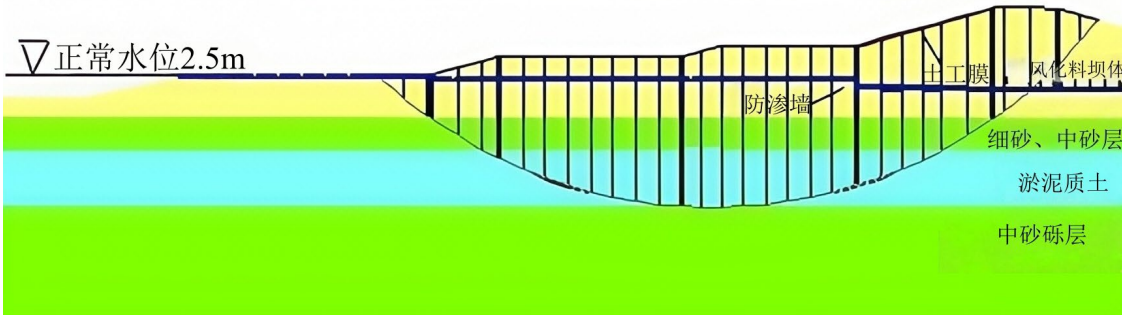
断面桩号	计算工况	简化毕肖普法		
		上游坡	下游坡	规范值
主坝 0 + 200	正常蓄水位 2.50 m	1.587	1.724	1.35
	设计洪水位(P = 2%)	1.625	1.723	
	校核洪水位(P = 0.33%)	1.706	1.722	1.25
主坝 1 + 400	正常蓄水位 2.50 m	2.015	1.544	1.35
	设计洪水位(P = 2%)	2.113	1.544	
	校核洪水位(P = 0.33%)	2.127	1.544	1.25
副坝 1 + 000	正常蓄水位 2.50 m	1.817	1.753	1.35
	设计洪水位(P = 2%)	1.873	1.753	
	校核洪水位(P = 0.33%)	2.033	1.753	1.25

II 级建筑物正常运用条件下，简化毕肖普法计算坝坡抗滑稳定最小安全系数为 1.35，非常运用条件下，简化毕肖普法计算坝坡抗滑稳定最小安全系数为 1.25。从表 6 中可以看出，3 处断面在正常运用和非常运用情况下，计算的上下游坝坡最小安全系数均大于规范值，因此上下游坝坡不存在滑坡隐患。

典型断面在兴利水位时的最危险滑弧见图 4。



主坝 0 + 200 断面



主坝 1 + 400 断面

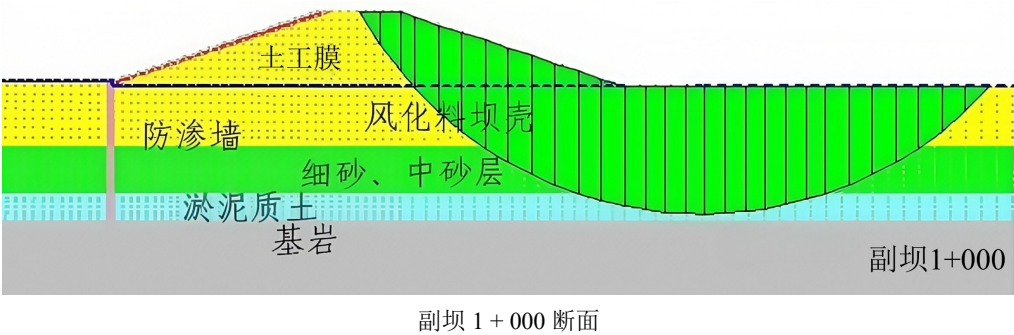


Figure 4. Critical slip surface location of downstream slope under beneficial water level conditions
图 4. 兴利水位工况下游坝坡最危险滑弧位置

4.2.2. 水库水位降落期的上游坝坡稳定计算

计算工况有两种：

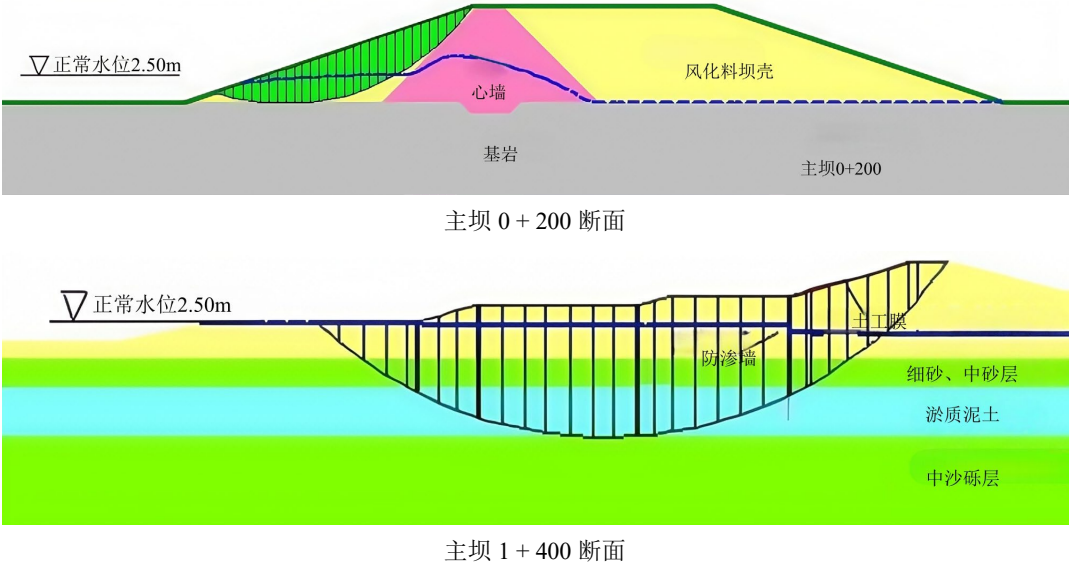
(1) 上游设计洪水位($P = 5\%$) 4.43 m 自由泄流降至坝后正常水位 1.90 m。

(2) 上游校核洪水位($P = 0.33\%$) 5.61 m 自由泄流降至坝后正常水位 1.90 m。

3 处断面在以上两种水位骤降工况下，用简化毕肖普法计算的上游坝坡最小抗滑稳定安全系数见表 7，系数均满足规范值，最危险滑弧圆心位置和滑弧半径分别见图 5。

Table 7. Minimum safety factor for upstream slope stability under rapid drawdown conditions
表 7. 水位骤降时的上游坝坡最小抗滑稳定安全系数

桩号	水位	工况	
		降至 1.90 高程	规范规定值
主坝 0 + 200	设计洪水位($P = 2\%$)	1.562	1.35
	校核洪水位($P = 0.33\%$)	1.528	1.25
主坝 1 + 400	设计洪水位($P = 2\%$)	1.864	1.35
	校核洪水位($P = 0.33\%$)	1.822	1.25
副坝 1 + 000	设计洪水位($P = 2\%$)	1.694	1.35
	校核洪水位($P = 0.33\%$)	1.669	1.25



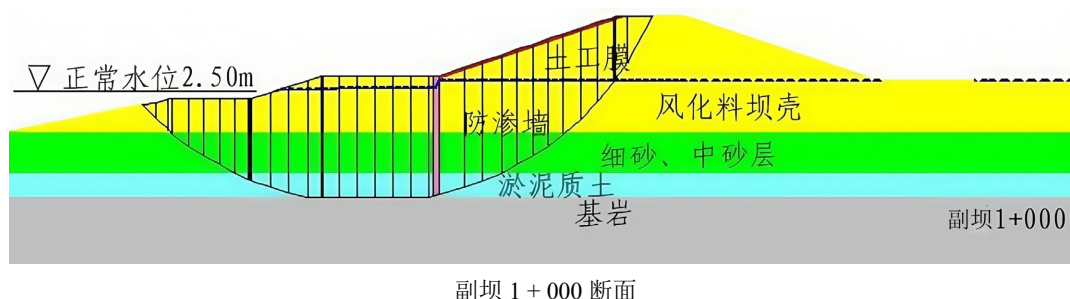


Figure 5. Critical slip surface location of upstream slope under rapid drawdown conditions
图 5. 水位骤降时上游坝坡的最不利滑动面位置

5. 结论

渗流稳定计算，对大坝安全鉴定具有至关重要的作用[9]。渗流场形态与边坡稳定安全系数的协同分析，是大坝安全鉴定的核心方法论。

(1) 渗流稳定性是安全鉴定的关键基准。在设计洪水位、正常蓄水位等多工况模拟中，坝体渗流场最大水力梯度均显著低于临界阈值，背水侧未出现渗流逸出。这表明坝体防渗系统有效性达标，渗透稳定性满足规范要求。

(2) 边坡抗滑稳定性决定工程风险底线。各工况下坝坡抗滑稳定安全系数均高于规范限值。尤其在库水位骤降极端工况下，上游坡最小安全系数仍高于临界安全阈值，证实坝体具备抵御突发水力荷载的能力。

(3) 有限元耦合模型具工程普适价值。所建立的渗流 - 应力耦合模型成功复现土石坝水力 - 力学相互作用机制，其分析及安全鉴定流程可直接迁移至同类填筑坝工程的安全评价，提供了技术范式。

未来，应重点关注高水位长期运行下的材料老化效应，并将人工智能算法融入大坝参数反演体系，推动大坝安全鉴定从“被动防御”向“主动预警”转型。

参考文献

- [1] 王浩, 游仪, 邓剑洋. 我国水库总库容约 1 万亿立方米, 大坝类型、大坝数量、高坝数量等位居世界第一[EB/OL]. <https://app.www.gov.cn/govdata/gov/202506/03/530268/article.html>, 2025-06-03.
- [2] 叶建春. 水利部水旱灾害防御及灾后重建新闻发布会[EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-09/26/content_5547350.htm#1, 2020-09-24.
- [3] 李国英. 进一步全面深化水利改革, 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献——在 2025 年全国水利工作会议上的讲话[EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202501/t20250117_1726514.html, 2025-01-13.
- [4] Karl, T. (1947) Theoretical Soil Mechanics. 4th Edition, Wiley.
- [5] SL 274-2020 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [6] 安盛勋, 郑建波, 国家电力公司水电建设工程质量监督总站, 等. 水电工程设计基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [7] GB 50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [8] 邬爱清. 三峡工程中的岩石力学理论与实践[M]. 武汉: 长江出版社, 2009.
- [9] 张军. 克拉玛依绿化水库渗流及稳定计算分析[J]. 水科学与工程, 2019(6): 41-43.