

# 土石坝渗流场与稳定性耦合计算及施工防渗措施优化研究

叶聪

中国葛洲坝集团股份有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6626

**[摘要]** 文章立足于土石坝渗流场与稳定性耦合计算理论,先阐述渗流场、稳定性及两者耦合机制的理论基础。再以长江中游某中型土石坝为实例,建立模型、确定参数与边界条件,完成多工况耦合计算,揭示耦合作用对安全评估的影响。在此基础上,梳理坝体与坝基防渗措施,提出基于数值模拟与多因素权衡的优化策略,旨在为土石坝安全设计与施工提供技术支持。

**[关键词]** 土石坝; 渗流场; 稳定性; 耦合计算; 防渗措施优化

**中图分类号:** TV641.1 **文献标识码:** A

Coupling calculation of seepage field and stability of earth-rock dam and optimization of seepage control measures in construction

Cong Ye

China Gezhouba Group Co., Ltd.

**[Abstract]** Based on the coupling calculation theory of seepage field and stability of earth-rock dam, this paper first expounds the theoretical basis of seepage field, stability and their coupling mechanism. Then, taking a medium-sized earth-rock dam in the middle reaches of the Yangtze River as an example, the model is established, the parameters and boundary conditions are determined, and the multi-condition coupling calculation is completed to reveal the influence of coupling on safety assessment. On this basis, the anti-seepage measures of dam body and dam foundation are sorted out, and the optimization strategy based on numerical simulation and multi-factor trade-off is put forward, aiming at providing technical support for the safety design and construction of earth-rock dams.

**[Key words]** earth-rock dam; Seepage field; Stability; Coupling calculation; Optimization of seepage control measures

## 引言

土石坝在水利工程施工中较为常见,因土石坝渗流容易引起失稳风险。面对这种情况,对土石坝渗流与稳定性的计算如果用传统分析方法,评估结果易产生偏差。随着数值技术发展水平的快速发展,耦合计算成为精准判断坝体安全的关键,而施工防渗措施合理性直接决定渗流控制效果。本文通过“理论-实例-优化”的研究路径,构建技术体系,解决耦合计算与防渗优化难题,助力提升土石坝工程安全水平。

### 1 土石坝渗流场与稳定性耦合计算理论基础

#### 1.1 渗流场计算理论

##### 1.1.1 渗流基本方程

土石坝渗流计算遵循达西定律,三维非稳定渗流基本方程如公式(1)所示,该方程反映渗流水头在空间与时间上的变化规律,是渗流场数值计算的核心依据。

公式(1):

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

其中,  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  分别为x、y、z方向渗透系数(cm/s),  $h$  为渗流水头(m),  $S_s$  为储水率(1/m),  $t$  为时间(s)。

#### 1.1.2 渗流计算方法

当前,有限元法是渗流计算的主流方法,通过将坝体与坝基离散为有限单元,代入材料渗透参数与边界条件,求解渗流方程获得浸润线位置、渗流量及孔隙水压力分布。该方法能灵活处理复杂几何形态与非均质材料,适应不同工况模拟,计算精度满足工程需求,是耦合计算中渗流场分析的首选方法。

#### 1.2 稳定性计算理论

##### 1.2.1 极限平衡法

对坝体稳定性的分析,常用极限平衡法,核心是假设坝体沿某一滑裂面滑动,通过平衡滑裂面上的抗滑力与滑动力计算安

全系数。常用方法包括瑞典条分法、毕肖普法,其中毕肖普法考虑条间作用力,计算精度更高,适用于土石坝坝坡稳定性分析,能直接利用渗流场计算得到的孔隙水压力数据,为耦合计算提供便利。

### 1.2.2有限元强度折减法

有限元强度折减法通过逐步降低材料抗剪强度参数(黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\phi$ ),直至模型出现塑性贯通区,此时的强度折减系数即为安全系数。该方法无需预设滑裂面,能直观反映坝体应力应变分布与潜在滑动区域,与渗流场计算结合时,可同步考虑渗流对坝体应力状态的影响,进一步提升稳定性评估精度<sup>[1]</sup>。

### 1.3渗流场与稳定性耦合机制

#### 1.3.1耦合作用原理

渗流场与稳定性的耦合作用互为影响:渗流通过改变坝体孔隙水压力,影响有效应力分布,进而改变抗剪强度,最终作用于稳定性;而坝体稳定性变化(如产生微小变形)可能导致孔隙结构改变,影响渗透系数,反作用于渗流场。工程分析中,重点关注渗流场对稳定性的单向主导影响,即通过渗流计算获取孔隙水压力,作为稳定性分析的关键输入参数,实现两者动态关联。

#### 1.3.2耦合计算模型

耦合计算模型以渗流场与稳定性计算理论为基础,采用“渗流计算→数据传递→稳定性计算”的流程。先通过有限元法完成渗流场计算,提取各单元孔隙水压力;再将孔隙水压力代入极限平衡法或有限元强度折减法,计算坝体安全系数;若安全系数不满足要求,反推渗流控制需求,形成计算闭环。该模型避免独立计算的误差,能更真实反映坝体实际工作状态。

## 2土石坝渗流场与稳定性耦合计算实例分析

### 2.1工程概况

该土石坝位于长江中游支流,为中型水利枢纽核心建筑物,坝顶高程128.5m,最大坝高42m,坝顶长度680m,坝体采用黏土心墙防渗,坝基为粉质黏土层,含少量砂夹层。工程主要功能为防洪与灌溉,正常蓄水位122.0m,设计洪水位125.3m,校核洪水位126.8m,对区域防洪安全与农业生产具有重要意义。

### 2.2模型建立与参数选取

#### 2.2.1几何模型建立

依据设计方案采用FLAC3D软件建立三维几何模型,模型范围包括坝体、坝基及上下游一定范围的地基(纵向延伸至坝轴线下游50m,纵向取坝体典型断面)。考虑计算效率与精度平衡,对坝体心墙、坝基砂夹层等关键区域加密网格,对远离坝体的地基区域简化网格,模型单元总数约8.2万个,能准确反映坝体结构与地质条件。

#### 2.2.2材料参数确定

通过现场钻探取样与室内土工试验获取材料参数,坝体分为坝壳(砂卵石)、心墙(壤土),坝基分为粉质黏土与砂夹层,各材料物理力学参数如表1所示。试验过程中,渗透系数采用变水头渗透仪测定,抗剪强度参数通过直剪仪完成固结快剪试验获取,确保参数真实可靠。

表1 土石坝各材料物理力学参数表

材料类型	天然重度 ( $\gamma$ )/(kN/m <sup>3</sup> )	饱和重度( $\gamma$ sat)/(kN/m <sup>3</sup> )	渗透系数(k)/(cm/s)	黏聚力 ( $c$ )/(kPa)	内摩擦角 ( $\phi$ )/(°)
坝壳砂卵石	19.5~20.5	21.0~22.0	$1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$	5~8	32~35
心墙壤土	18.0~19.0	19.5~20.5	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$	25~30	18~22
坝基粉质黏土	18.5~19.5	20.0~21.0	$5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$	18~23	15~18
坝基砂夹层	19.0~20.0	20.5~21.5	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	3~5	28~32

### 2.2.3边界条件设定

渗流场边界条件:上游面设定为水头边界(正常蓄水位122.0m、设计洪水位125.3m、校核洪水位126.8m),下游面及坝基底部设定为渗流逸出边界(水头为地面高程),坝体侧面设定为不透水边界(无横向渗流)。稳定性计算边界条件:坝基底部设定为固定约束,侧面设定为水平约束,模拟坝体实际受力状态<sup>[2]</sup>。

### 2.3耦合计算结果与分析

#### 2.3.1渗流场计算结果

正常蓄水位下,坝体浸润线顶点位于心墙顶部(高程119.8m),沿心墙向下游倾斜,至下游坝壳逸出点高程108.5m;渗流量主要来自坝基砂夹层,约为0.025m<sup>3</sup>/(m·d),心墙防渗效果良好。设计洪水位下,浸润线整体抬高3.2m,渗流量增至0.041m<sup>3</sup>/(m·d),坝基砂夹层渗流流速最大达0.018cm/s,需重点关注渗透稳定。

#### 2.3.2稳定性计算结果

正常蓄水位下,坝体下游坡最小安全系数为1.38(毕肖普法),滑动面位于坝体下部与坝基接触面;设计洪水位下,安全系数降至1.25,滑动面向上游延伸,接近心墙底部;校核洪水位下,安全系数进一步降至1.18,虽满足规范要求( $\geq 1.15$ ),但需通过防渗措施提升稳定性。

#### 2.3.3耦合作用分析

对比不考虑耦合作用(假设孔隙水压力为0)与考虑耦合作用的计算结果,正常蓄水位下安全系数差值为0.12,设计洪水位下差值为0.15,校核洪水位下差值为0.17。可见耦合作用使安全系数显著降低,忽略耦合作用会高估坝体稳定性,因此工程分析中必须纳入耦合计算。

## 3土石坝施工防渗措施

### 3.1坝体防渗措施

#### 3.1.1防渗墙技术

混凝土防渗墙适用于坝体深厚渗漏层处理,采用冲击钻成槽工艺,墙厚0.8m,混凝土强度等级C25,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6}$ cm/s,施工时需控制槽壁垂直度(偏差 $\leq 1/500$ ),防止墙体绕渗。塑性混凝土防渗墙适用于软土地基,弹性模量低,能适应地基变形,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s,但成本高于普通混凝土防渗墙<sup>[3]</sup>。

#### 3.1.2黏土斜墙/心墙防渗

黏土心墙是该工程原设计防渗结构,选用黏粒含量35%~45%的壤土,压实度控制在96%以上,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s。施工时采用分层碾压,层厚20cm,碾压遍数8~10遍,通过环刀法检测压实度,确保心墙连续性,避免因压实不足产生渗漏通道。

### 3.1.3 坝体裂缝防渗处理

坝体施工中若产生裂缝(宽度 $>0.2\text{mm}$ ),采用灌浆法处理:宽度 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 的裂缝采用水泥浆灌浆,水灰比 $0.8:1\sim 1:1$ ;宽度 $>0.5\text{mm}$ 的裂缝采用水泥黏土浆灌浆,黏土掺量 $15\%\sim 20\%$ 。灌浆压力控制在 $0.2\sim 0.3\text{MPa}$ ,灌浆后通过压水试验检测防渗效果,透水率需 $\leq 1\text{Lu}$ 。

### 3.2 坝基防渗措施

#### 3.2.1 截水槽防渗

针对坝基表层粉质黏土渗漏,设置截水槽,槽底深入不透水层 $0.5\text{m}$ ,槽宽 $3\sim 5\text{m}$ ,采用黏土回填,压实度 $\geq 95\%$ 。施工时先开挖至设计高程,清除槽底浮土,再分层回填黏土,碾压参数与心墙一致,截水槽与心墙连接部位需加强碾压,确保防渗连续。

#### 3.2.2 帷幕灌浆防渗

坝基砂夹层采用帷幕灌浆处理,灌浆孔沿坝轴线布置,孔距 $2.5\text{m}$ ,排距 $2.0\text{m}$ ,梅花形排列,灌浆深度深入砂夹层以下 $5\text{m}$ 。灌浆材料选用水泥浆,水灰比 $1:1\sim 0.5:1$ ,采用自上而下分段灌浆法,段长 $3\sim 5\text{m}$ ,灌浆压力 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ 。灌浆后通过压水试验检测,透水率 $\leq 5\text{Lu}$ 为合格。

#### 3.2.3 坝基反滤层与排水减压

在坝基下游设置反滤层,采用“砂-砾石”双层结构,砂层厚 $0.3\text{m}$ (粒径 $0.5\sim 2\text{mm}$ ),砾石层厚 $0.5\text{m}$ (粒径 $5\sim 20\text{mm}$ ),反滤层与排水棱体连接,将坝基渗水导入下游。排水棱体采用块石堆砌,顶宽 $2\text{m}$ ,边坡 $1:1.5$ ,确保排水通畅,降低坝基孔隙水压力。

## 4 土石坝施工防渗措施优化研究

### 4.1 基于数值模拟的优化方法

为精准对比不同防渗方案的优化效果,依托FLAC3D软件构建涵盖坝体、坝基及各类防渗结构的三维耦合优化模型,标识了三种方案的核心防渗构件及网格加密区域(如图1所示)。

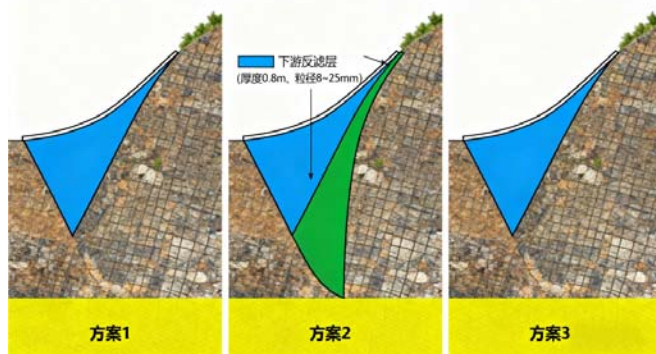


图1 土石坝渗流-稳定性耦合优化模型示意图

模拟过程中,保持材料参数、边界条件与实例计算一致,重点对比三种防渗方案的渗流控制效果与稳定性提升幅度:

方案1(原设计):黏土心墙+坝基帷幕灌浆,仅保留基础防渗体系;

方案2:黏土心墙+坝基帷幕灌浆+下游反滤层加密(反滤层厚度增至 $0.8\text{m}$ ,砾石粒径优化为 $8\sim 25\text{mm}$ );

方案3:黏土心墙+坝基帷幕灌浆+上游防渗墙(墙厚 $0.6\text{m}$ ,渗透系数 $\leq 1\times 10^{-7}\text{cm/s}$ ,嵌入坝基不透水层 $1.0\text{m}$ )。

数值模拟结果显示,方案3在设计洪水位下渗流量降至 $0.028\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ,较方案1减少 $31.7\%$ ;坝体下游坡最小安全系数提升至 $1.32$ ,较方案1提高 $21.6\%$ ,较方案2(安全系数 $1.28$ )提升 $3.1\%$ ,防渗与稳定优化效果最为显著,确定为最优方案。

### 4.2 多因素综合优化策略

综合考虑工程地质、施工与运维因素:坝基砂夹层分布不均,帷幕灌浆需加密局部孔段(孔距调整为 $2.0\text{m}$ );施工工期紧张,上游防渗墙采用液压抓斗成槽工艺,提高施工效率;运维阶段需定期监测渗流量与浸润线,因此在下游坝体设置渗压计与量水堰。通过多因素权衡,最终形成“黏土心墙+分区帷幕灌浆+上游防渗墙+监测系统”的综合防渗体系,兼顾安全性、经济性与可操作性<sup>[4]</sup>。

## 5 结束语

本文通过理论分析、实例计算与措施优化,系统研究土石坝渗流场与稳定性耦合计算及施工防渗措施。耦合计算实例表明,考虑渗流与稳定性的动态关联能更精准评估坝体安全;防渗措施优化结果显示,综合运用多种防渗技术并结合数值模拟与多因素权衡,可有效提升渗流控制效果与坝体稳定性,为水利工程高质量发展提供技术保障。

### [参考文献]

- [1]张文健.土石坝渗流场与电流场耦合正演与关联响应分析[D].中南大学,2024.
- [2]储成洲.防渗墙参数对大坝渗流稳定性影响研究[J].水利技术监督,2023,(10):223-225+240.
- [3]孟源.不良地质条件下的土石坝渗流稳定性分析[J].黑龙江水利科技,2023,51(06):31-33+61.
- [4]华维.土石坝渗流稳定性数值模拟研究[J].水利技术监督,2023,(06):177-180.

### 作者简介:

叶聪(1984—),男,汉族,宁夏固原市人,本科,2009年毕业于武汉大学;现就职中国葛洲坝集团股份有限公司,高级工程师,项目总工程师。研究方向:水电工程设计、技术创新及施工技术管理方向。