

# 蓄滞洪区围堤工程渗流稳定数值模拟 与防渗加固技术创新

纪懿珊

天津市水务规划勘测设计有限公司, 天津 300000

DOI:10.61369/WGEST.2025020018

**摘要**：本文聚焦蓄滞洪区围堤工程的渗流稳定与防渗加固问题，系统研究了渗流稳定数值模拟方法及防渗加固技术创新。针对现有防渗技术的局限性，提出“复合防渗、动态调控、智能适配”的创新思路，设计了“深层搅拌桩防渗墙 + 高压喷射注浆搭接”等复合方案。经数值模拟验证，加固后围堤浸润线、渗流量、孔隙水压力等指标显著改善，抗滑稳定安全系数提升，有效解决了渗流风险问题，为蓄滞洪区围堤工程安全保障提供了技术支持。

**关键词**：蓄滞洪区围堤；渗流稳定；数值模拟；防渗加固

## Numerical Simulation of Seepage Stability and Innovation of Anti-seepage Reinforcement Technology in Flood Storage and Detention Area Embankment Project

Ji Yishan

Tianjin Water Planning, Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300000

**Abstract**： This paper focuses on the seepage stability and anti-seepage reinforcement of embankment projects in flood storage and detention areas, and systematically studies the numerical simulation methods of seepage stability and the innovation of anti-seepage reinforcement technology. Aiming at the limitations of existing anti-seepage technology, the innovative ideas of "composite anti-seepage, dynamic regulation, and intelligent adaptation" are proposed, and composite schemes such as "deep mixing pile anti-seepage wall + high-pressure jet grouting lap joint" are designed. After numerical simulation verification, the indicators such as the infiltration line, seepage flow, and pore water pressure of the reinforced embankment are significantly improved, and the safety factor of anti-sliding stability is increased. This effectively solves the problem of seepage risk and provides technical support for the safety of embankment projects in flood storage and detention areas.

**Keywords**： flood storage and detention area embankment; seepage stability; numerical simulation; anti-seepage reinforcement

## 引言

随着防洪标准的提高和工程安全要求的升级，传统经验型设计与单一加固技术已难以应对复杂地质条件下的渗流风险。因此本文聚焦蓄滞洪区围堤工程，系统研究渗流稳定数值模拟方法，通过典型工程案例揭示渗流动态规律，针对现有技术局限性提出创新方案并验证其有效性，旨在为围堤工程渗流控制提供理论支撑与技术参考，助力提升蓄滞洪区防洪安全保障能力。

## 一、渗流稳定数值模拟方法与技术

### （一）数值模拟方法选择

渗流稳定数值模拟的核心是通过数学方法求解渗流控制方程，进而揭示水流在多孔介质中的运动规律。目前工程中常用的数值方法主要包括有限差分法、有限元法、边界元法，其选择需结合工程场景的复杂性、计算精度要求及效率需求综合确定。有限差分法将渗流场离散为规则网格，计算简单、效率高，适合边

界规则场景，但对复杂边界适应性弱。董存军通过有限差分法的理论，模拟分析了围堰施工过程，得出围堰的沉降情况，最终验证了该理论方法的合理性<sup>[1]</sup>。有限元法将渗流场划分为大量单元求解，对复杂几何形状和非均质介质适应性强，能刻画不连续结构渗流特性，但对网格质量敏感，计算量大<sup>[2]</sup>。边界元法仅离散计算域边界，计算量小，适合无限域渗流问题，但处理非线性问题能力有限，多作为辅助手段。实际应用中，复杂地形优先选有限元法；规则区域且求效率可选有限差分法；无限域场景可辅以

边界元法,同时需结合计算资源和技术成熟度选择。

### (二) 模型建立与参数确定

模型建立是数值模拟的基础,需通过几何简化、参数赋值和边界设定,将实际工程场景转化为可计算的数学模型<sup>[3]</sup>。几何模型构建基于工程勘察数据,剔除次要细节、保留关键结构,生成模型后导入模拟软件划分网格,重点区域加密、非关键区域稀疏。参数确定核心是渗透系数,通过“试验获取+反演优化”确定,室内试验获取基本值,现场测试反映原位特性,复杂场景需用参数反演法调整至模拟结果与实测值误差达标。边界条件设定需贴合实际,水头边界依设计工况或监测数据确定,流量边界适用于已知渗流量场景,不透水边界设定为法向流速为零;动态渗流问题需定义时间相关边界。

### (三) 模型验证与敏感性分析

模型验证是确保模拟结果可靠的关键,需通过“数据对比+逻辑校验”实现。数据对比以现场监测数据为基准,验证渗流量、水头分布等指标,缺乏监测数据的新建工程可采用“模型复演法”<sup>[4]</sup>。逻辑校验需判断模拟结果是否符合渗流物理常识,若有矛盾需检查网格划分或控制方程设置。敏感性分析用于识别对模拟结果影响显著的参数,常用单因素分析法和正交试验法。渗透系数、边界水头、孔隙率通常是高敏感参数,其结果可指导工程实践中参数的精度控制与简化。

## 二、典型蓄滞洪区围堤渗流稳定数值模拟分析

### (一) 工程概况与地质条件

典型蓄滞洪区围堤是保障区域防洪安全的关键工程,其主要功能是在洪水期间拦蓄超额洪水,减轻下游防洪压力,在非汛期则需维持堤身稳定以应对日常水流及地质变化。以某平原蓄滞洪区为例,该围堤全长约35km,堤顶高程28.5m,顶宽8m,迎水坡坡比1:3,背水坡坡比1:2.5,采用土石混合结构,堤身填土以粉质黏土为主,局部夹杂砂壤土夹层<sup>[5]</sup>。围堤保护范围内涉及耕地、村镇及工业园区,一旦发生渗流破坏,将造成重大人员伤亡和经济损失,因此渗流稳定分析是其安全评估的核心内容。从地质条件来看,围堤所在区域为第四纪松散沉积层,地层分布具有明显的水平层理特征,自上而下依次为:素填土(0-2m)由黏性土与碎石混合而成,结构松散,渗透系数约 $1.5 \times 10^{-4}$ cm/s;粉质黏土(2-8m)是堤身主要填筑材料,呈可塑状态,渗透系数 $3.2 \times 10^{-6}$ cm/s,透水性较弱;粉细砂层(8-15m)分选性好,颗粒均匀,渗透系数达 $2.8 \times 10^{-3}$ cm/s,是潜在的强透水层;黏土层(15m以下)呈硬塑状态,渗透系数 $5.6 \times 10^{-7}$ cm/s,可视为相对不透水层。此外,勘察发现堤身存在3处明显的纵向裂缝(最长约20m,宽0.5-1.2cm),主要分布在背水坡中上部,可能成为雨水入渗的通道,需在模拟中重点考虑。

### (二) 原状围堤渗流场模拟与分析

原状围堤渗流场模拟以现状为基础,用有限元法建二维模型,沿堤轴取100m典型断面,横向扩展至迎水侧50m、背水侧100m。关键区域网格加密(0.5-1m),其他区域2-5m,

共1260个单元、1892个节点。参数依据勘察数据,粉细砂层渗透系数经校正为 $2.5 \times 10^{-3}$ cm/s,裂缝区等效渗透系数 $5.0 \times 10^{-4}$ cm/s。迎水侧水头边界25.0m,背水侧20.0m,底部为不透水边界,两侧为流量边界<sup>[6]</sup>。结果显示,堤身浸润线最高点高程26.2m,背水坡脚出逸点21.5m,有逸出风险;单宽渗流量 $0.028\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ,粉细砂层占65%,堤身裂缝流速是周边粉质黏土的200余倍;背水坡脚孔隙水压力16.8kPa,抗滑稳定安全系数1.18,略高于规范。主要风险为粉细砂层管涌隐患和背水坡脚逸出破坏,需针对性加固。

### (三) 蓄水-退水过程动态渗流模拟

蓄滞洪区围堤渗流状态随洪水过程动态变化,需通过动态模拟揭示规律。动态模拟采用有限元模型,时间步长12小时,总时长30天(含10天蓄水期、10天高水位稳定期、10天退水期)<sup>[7]</sup>。蓄水阶段水位从19.0m按1.0m/d升至25.0m;退水阶段按0.6m/d降至19.0m;稳定期维持25.0m不变。迎水侧水位随时间动态变化,其他边界条件与原状模拟一致。模拟结果显示,蓄水阶段,堤身浸润线抬升有滞后性,第5天水位24.0m时,浸润线顶点22.8m,滞后1.2m;背水坡孔隙水压力日均增1.2kPa,第10天达20.5kPa,抗滑稳定安全系数降至1.12,低于规范限值。高水位稳定期,第15天浸润线顶点达26.5m,粉细砂层渗流流速稳定在 $4.5 \times 10^{-3}$ cm/s,未超允许渗透比降;背水坡脚出逸流速 $1.2 \times 10^{-3}$ cm/s,接近粉质黏土临界值。退水阶段,浸润线下降滞后,第25天水位22.0m时,顶点仍25.8m,形成“反向水头差”;退水第5天,粉细砂层与堤身填土接触面水力梯度骤增至1.2,超临界值,可能引发管涌<sup>[8]</sup>。结果表明,围堤在蓄水后期和退水中期渗流稳定性最差,需针对性采取措施。蓄水阶段在背水坡增设排水棱体;退水阶段控制水位降幅(建议不超0.5m/d),并在粉细砂层顶部铺反滤层。

## 三、蓄滞洪区围堤防渗加固技术创新研究

### (一) 现有防渗加固技术及其局限性分析

蓄滞洪区围堤防渗加固技术有多种成熟方案,但适用性受地质、工程规模和施工环境制约,存在一定局限性。防渗墙技术是广泛应用的深层防渗手段,适用于10-40m透土层处理。混凝土防渗墙整体性强、渗透系数低,在均质砂层效果好,不过在含孤石或卵砾石地层成槽难、易接缝渗漏,施工周期长且对围堤稳定性临时扰动大<sup>[9]</sup>。高压喷射注浆技术适合5-20m松散地层,在粉细砂层效果较好,但在黏土层易有“空洞”,单桩搭接质量难保证,高水头下可能局部渗漏。浅层防渗技术中,土工膜铺盖成本低、施工便捷,用于堤身表面防渗,却易被刺破,接缝焊接不严密会渗漏,长期暴露易老化,寿命不超15年。帷幕灌浆适用于岩体或坚硬土层,在强透水性砂层中经济性差,还可能污染周边生态。排水减压技术常作为辅助手段,排水棱体在村镇密集区难实施,减压井易淤积需定期维护。总的来说,现有单一技术难适应复杂地层,施工质量受地质条件影响大,多为被动防渗,缺乏对渗流-变形耦合作用的主动调控能力。

## (二) 防渗加固技术创新思路与方案设计

针对现有技术的局限性, 创新思路应聚焦“复合防渗、动态调控、智能适配”三大方向, 通过多技术协同、材料革新与施工工艺优化, 构建适应复杂地质条件的高效防渗体系。复合防渗体系设计是核心创新点, 即根据围堤不同部位的渗流风险组合技术方案。对于堤基强透水层, 采用“深层搅拌桩防渗墙 + 高压喷射注浆搭接”方案<sup>[10]</sup>。对于堤身裂缝, 开发“注浆 - 防渗一体化技术”。材料革新是提升防渗性能的关键, 研发“纳米改性膨润土复合土工膜”, 在传统 HDPE 膜表面复合纳米膨润土涂层, 利用膨润土遇水膨胀特性自动封堵膜体微小破损, 使渗透系数降至  $10^{-8}$  cm/s 以下, 且耐紫外线老化寿命延长至 30 年以上; 在排水系统中采用“透水混凝土 - 土工合成材料复合体”, 透水混凝土作为骨架承载, 内部嵌入三维土工网垫增强排水能力, 其排水效率较传统砂石棱体提升 40%, 且体积缩小 50%, 节省堤后空间。施工工艺优化侧重智能化与微创化, 开发“无人机 - 机器人协同施工系统”, 无人机搭载激光雷达扫描堤身表面, 生成三维模型定位渗漏隐患区; 小型履带式机器人携带微型钻机在堤顶作业, 实现直径  $\leq 10$  cm 的微创钻孔, 减少对堤身结构的扰动。对于深水区防渗施工, 采用“沉管 - 注浆一体化平台”, 通过模块化沉管快速形成施工通道, 同步完成水下防渗墙浇筑与接缝注浆, 将水下施工效率提升 30% 以上。

## (三) 基于数值模拟的防渗加固效果评估

采用有限元模型, 对创新方案的防渗效果进行量化评估, 通过对比加固前后的渗流指标验证技术有效性, 评估指标包括浸润线埋深、单宽渗流量、出逸流速、孔隙水压力及抗滑稳定安全系数。以“深层搅拌桩防渗墙 + 纳米土工膜”复合方案为例, 模拟参数设置为: 防渗墙渗透系数取  $10^{-7}$  cm/s, 插入深度 15 m (穿

透粉细砂层至黏土层); 土工膜铺设于迎水坡及堤顶, 等效渗透系数取  $10^{-8}$  cm/s; 排水棱体采用透水混凝土复合体, 渗透系数取  $10^{-2}$  cm/s。模拟结果显示, 加固后渗流场得到显著改善: 堤身浸润线顶点高程从 26.2 m 降至 23.5 m, 背水坡出逸点高程从 21.5 m 降至 19.8 m, 低于背水侧地下水位 (20.0 m), 消除逸出风险; 单宽渗流量从  $0.028 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{m})$  降至  $0.005 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{m})$ , 降幅达 82%, 其中粉细砂层贡献的渗流量占比从 65% 降至 12%, 防渗墙阻断效果明显; 背水坡坡脚孔隙水压力从 16.8 kPa 降至 8.5 kPa, 抗滑稳定安全系数从 1.18 提升至 1.35, 满足规范要求 ( $\geq 1.25$ )。动态渗流模拟 (蓄水 - 退水过程) 表明, 创新方案对水位变化的响应更稳定: 蓄水阶段背水坡孔隙水压力最大增幅从 1.2 kPa/d 降至 0.5 kPa/d, 抗滑安全系数始终  $\geq 1.3$ ; 退水阶段堤身内部“反向水头差”消失, 粉细砂层水力梯度从 1.2 降至 0.6, 低于临界值 (0.8), 无管涌风险。对比不同方案的模拟结果可知, “复合防渗 + 排水减压”组合方案的效果最优, 其综合防渗效率较单一防渗墙技术提高 25%, 验证了创新方案的技术优势。

## 四、结束语

本文围绕蓄滞洪区围堤工程的渗流稳定与防渗加固问题展开系统研究, 通过理论分析、数值模拟与技术创新相结合的方式, 形成了一套适用于复杂地质条件的渗流控制解决方案。研究成果为蓄滞洪区围堤工程的安全评估与加固改造提供了理论支撑和技术参考, 未来可进一步结合现场监测数据优化数值模型, 并探索智能化防渗系统的动态响应与自适应调控技术, 为防洪工程的长效安全保障持续赋能。

## 参考文献

- [1] 杨也. 暴雨和水位变化联合作用下土堤渗流与边坡稳定数值模拟研究 [D]. 长沙理工大学, 2022. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2022.000566.
- [2] 南浩然. 土石坝稳定 - 非稳定渗流数值模拟及坝坡稳定分析 [D]. 吉林建筑大学, 2020. DOI: 10.27714/d.cnki.gjij.2020.000148.
- [3] 姚富强. 大红沟水库数值模拟计算分析大坝渗流稳定 [J]. 山西水利科技, 2020, (02): 37-39.
- [4] 陈雨瑶, 李爽, 李治军, 等. 八岔段堤防渗流模拟模型分析与构建 [J]. 黑龙江水利, 2016, 2(07): 32-37.
- [5] 唐易民, 赵海涛, 祁潇, 等. 混凝土重力坝稳定渗流场数值模拟研究 [J]. 低温建筑技术, 2014, 36(06): 116-118. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2014.06.001.
- [6] 周乐. 土石坝的渗流特性分析及数值模拟 [D]. 大连理工大学, 2014.
- [7] 王朝江, 刘国强, 杨炳炎. 土石坝堰变饱和和非稳定渗流数值模拟分析 [J]. 水利水电工程设计, 2012, 31(04): 16-18.
- [8] 杨根春. 中小型土石坝渗流数值模拟及边坡稳定分析 [D]. 西华大学, 2010.
- [9] 吴梦喜. 饱和和非饱和非稳定渗流数值模拟的一种有限元方法 [C]// 中国力学学会, 郑州大学. 中国力学学会学术大会' 2009 论文摘要集. 中国科学院力学研究所; 2009: 117.
- [10] 郝立新, 尹小涛, 陈国平, 等. 长江干堤双透水堤基渗流稳定有限元分析 [J]. 中国农村水利水电, 2007, (09): 87-91.