

# 土石坝渗流特性与防渗体优化分析

任盼盼

当阳市河道堤防管理局 湖北 宜昌 444100

**【摘要】**：土石坝在水利工程中应用广泛，其渗流安全直接关系到工程稳定与运行寿命。围绕土石坝渗流特性与防渗体优化这一核心问题，系统分析坝体材料组成、结构分区及水力条件对渗流场分布的影响，揭示不同防渗体型式在控制渗流量与降低浸润线方面的差异机理。在此基础上，对比心墙、斜墙及复合防渗结构的适用条件与经济技术指标，提出以材料性能匹配与结构协同为导向的防渗体优化思路，以实现安全性与经济性的统一。

**【关键词】**：土石坝；渗流特性；防渗体优化；渗流控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.079

## 引言

土石坝因取材便利、结构灵活而成为水利枢纽工程的重要坝型，但其渗流问题始终是影响工程安全的关键因素。渗流场分布不合理会抬高浸润线，还可能诱发管涌、渗透变形等风险。防渗体作为控制坝体渗流的核心结构，其布置形式与材料选择直接决定整体防渗效果。围绕渗流机理与结构优化之间的内在联系展开系统分析，有助于提升土石坝设计的科学性与针对性，并为工程实践提供更加可靠的技术依据。

## 1 土石坝渗流特性及影响因素分析

### 1.1 坝体结构分区对渗流场分布的影响

土石坝通常由坝壳区、过渡区、反滤层及防渗体等不同功能分区构成，各分区渗透系数与压缩模量存在显著差异，导致坝体内部形成非均质渗流场。心墙或斜墙所在区域因渗透系数较低，在水头作用下承担主要水力梯度，渗流线在此发生明显转折，等势线分布趋于密集，局部水力坡降增大。坝壳区多采用级配砂砾或堆石材料，其渗透能力较强，承担排水与稳定作用，但若分区衔接处理不当，易在接触面形成集中渗流通道。过渡区与反滤层的合理设置能够缓和渗流突变，减小渗透变形风险，对控制浸润线高度具有重要意义。

在实际工程中，坝体结构分区的几何尺寸与布置形式直接影响渗流场的空间分布特征。心墙厚度不足或与坝基接触不严密时，易出现绕渗现象，改变原有流线形态并抬升下游逸出点位置；斜墙结构则通过延长渗流路径降低水力坡降，但对施工质量要求较高。分区界面的压实度与接触条件同样关系到渗流连续性，界面渗透系数突变会引发局部渗流集中。通过数值模拟与现场监测资料对比可以发现，合理的分区比例与连续的渗透过渡能够使渗流场分布更加均衡，为防渗体优化提供基础条件。

### 1.2 坝料物理力学性质与渗透参数关系

坝料的颗粒级配、孔隙比及压实程度决定其渗透系数与渗流稳定特性。细粒含量较高的黏性土具有较低渗透系数，在防渗体中发挥阻水作用，但其抗剪强度受含水率影响明显，渗流

作用下孔隙水压力变化可能削弱有效应力<sup>[1]</sup>。砂砾与堆石材料孔隙结构较为开放，渗透系数较大，能够形成良好的排水通道，却需要配合反滤结构以防止细粒流失。坝料在填筑过程中形成的各向异性也会改变渗透张量特征，使水平与竖向渗透能力存在差别，从而影响整体渗流路径。

工程实践表明，压实功与含水率控制对坝料渗透性能具有决定性作用。压实度不足会导致孔隙比偏大，水力坡降集中区域更易发生渗透变形；过度压实则可能产生结构性裂隙，对长期防渗效果产生不利影响。通过室内渗透试验与三轴试验获取渗透系数及抗剪强度参数，可建立坝料物理指标与渗透参数之间的定量关系，为防渗体材料选择与参数优化提供依据。材料性能与结构布置相匹配，才能在控制渗流量时维持坝体稳定，实现土石坝渗流安全与结构安全的协调统一。若材料渗透系数、压缩模量及抗剪强度等指标与防渗体厚度、分区比例及排水体系设置不协调，易造成水力坡降集中或不均匀沉降，进而影响整体受力状态。通过参数优化与结构协同设计，可提升防渗效果与长期运行可靠性。

### 1.3 水位变化条件下渗流稳定性特征

库水位的周期性波动改变坝体内外水头差分布格局，使渗流场处于非稳定渗流状态。水位上升阶段，上游水头迅速抬高，坝体内部孔隙水压力逐步增大，浸润线向下游侧推进，渗流路径延长且水力梯度重新分配；水位骤降时，下游水头下降速度往往滞后于坝体内部水压消散过程，形成暂态高孔压区，易导致有效应力降低并影响边坡稳定。非稳定渗流条件下，坝体内部存在明显的时空变化特征，渗透流速与流向呈动态调整状态，局部区域可能出现短时高梯度现象，对防渗体与反滤结构提出更高要求。

实际运行中，水位频繁调节会引起坝体内孔隙水压力循环变化，长期作用下可能诱发渗透疲劳与细颗粒迁移。对土石坝进行非稳定渗流数值分析，可获得瞬态渗流场分布、孔压消散曲线及安全系数变化趋势，从而判断防渗体在不同水位工况下的适应能力。若防渗体厚度、渗透系数及与坝壳过渡关系设计不合理，水位快速变化将放大渗流不均匀性，增加渗透破坏风

险。优化防渗结构型式与排水系统布置,提高坝体在复杂水位条件下的渗流稳定性,是保障工程长期安全运行的重要技术路径。合理选择心墙、斜墙或复合防渗体系,并结合反滤层与排水棱体的科学配置,可有效分散水头压力,降低浸润线抬升幅度,减缓孔隙水压力波动对结构的不利影响,从而增强坝体整体抗渗稳定能力与耐久性能。

## 2 防渗体结构形式与渗流控制机理

### 2.1 心墙与斜墙防渗结构特性比较

心墙防渗结构通常布置于坝体中轴线位置,以低渗透黏性土或黏土心墙为主体,依靠较小的渗透系数形成稳定的阻水屏障。该结构受力对称,渗流路径在心墙处被显著压缩,等势线密集分布于心墙上游侧,能够有效降低下游逸出坡降。心墙厚度与坝高之间存在一定比例关系,厚度不足易导致水力梯度集中,厚度过大则增加填筑量与沉降差异风险。斜墙结构多布置于上游坡面,延长渗流路径与增大水头损失实现防渗目的,其防渗材料常与上游护坡结合设置,形成整体防护体系。斜墙在高坝工程中具有较好的施工分段性,但对基础处理与连接部位的密实度要求较高。

两种结构在渗流控制机理与结构受力状态上存在明显差异。心墙承担主要水力落差,对坝体沉降协调能力提出更高要求,若沉降不均匀可能产生裂隙,影响防渗连续性;斜墙通过改变渗流方向降低坡降,对坝壳稳定性具有一定有利作用,但其抗滑稳定需与上游坡比综合考虑。在复杂地基条件下,心墙更利于与截水墙形成整体防渗体系,而斜墙适用于地基变形较小且施工条件受限的场合。结合工程规模、坝高及材料来源进行结构比选,有助于实现渗流安全与经济投入之间的协调配置。在高坝或水头差较大的工程中,应优先考虑防渗能力强、稳定性高的结构形式;在材料运输条件受限或填筑料来源单一的地区,则需兼顾施工可行性与成本控制。对不同方案的技术指标与造价水平进行综合分析,可在满足规范安全要求的前提下,优化资源配置,提高工程整体效益。

### 2.2 复合防渗体系的协同作用机制

复合防渗体系通常由心墙、混凝土面板、帷幕灌浆或防渗膜等多种措施共同构成,通过多道阻水单元分担水头压力,形成分级消减的防渗格局。不同材料在渗透系数、变形模量及耐久性能方面存在差异,合理组合可在空间上构建梯度过渡结构,使水头沿坝体厚度方向逐级衰减<sup>[2]</sup>。复合体系中各防渗单元并非孤立存在,其协同作用体现在水力坡降重新分配与渗流路径延伸上,当某一单元出现局部渗透能力下降时,其余单元能够发挥补偿功能,提高整体防渗可靠性。这种多道防线的组合形式能够分担水头压力,降低单一结构失效对整体安全的不利影响。合理控制各单元的渗透系数与变形协调关系,可形成稳定连续的防渗屏障,增强坝体在复杂工况下的抗渗稳定能

力。

协同机制的实现依赖于结构布置的连续性与材料性能匹配程度。心墙与帷幕灌浆相结合,可在坝体与坝基之间形成封闭防渗环;面板与垫层结构共同作用,能够吸收局部变形并保持防渗面完整。各单元之间的接缝处理、变形缝设置及止水构造直接影响体系整体效果,若衔接处理不当,可能形成薄弱环节并引发集中渗流。通过渗流有限元分析与现场监测数据校核,可评估复合体系在不同水位与荷载条件下的工作状态,为防渗体优化提供技术依据。数值计算能够反映孔隙水压力分布、水力坡降变化及浸润线演变趋势,现场监测资料则用于验证模型参数与计算精度。二者相互印证,有助于及时发现薄弱环节,调整结构参数与材料配置,从而提升防渗体系的整体安全储备与运行可靠性。

### 2.3 防渗体与坝壳过渡衔接的技术要点

防渗体与坝壳之间的过渡区域是渗流控制与结构稳定的关键部位。该区域通常设置反滤层与过渡料层,以调节渗透系数差异并防止细颗粒迁移。若防渗体与坝壳直接接触,渗透参数突变可能引发局部水力坡降集中,增加管涌风险。过渡料级配设计需满足反滤准则,使细粒不被渗流带走,保证排水通畅。压实质量与层间结合状态对界面渗流连续性具有重要影响,施工过程中应控制填筑含水率与碾压遍数,确保结构整体密实。

工程实践显示,防渗体与坝壳的沉降差异是影响衔接稳定性的主要因素。不同材料的压缩性差异可能在运行期形成附加应力与裂缝,对防渗连续性产生不利影响。设置柔性过渡区或采用变形协调材料,可缓解应力集中问题。对衔接区域进行长期监测,包括孔隙水压力观测与位移监测,有助于及时掌握渗流与变形发展趋势。优化过渡衔接技术,能够提升防渗体整体性能,还能增强土石坝在复杂工况下的安全储备。

## 3 防渗体优化配置与工程适应性分析

### 3.1 材料性能匹配与防渗效率提升路径

防渗体性能的发挥依赖于材料物理指标与坝体整体结构条件之间的协调关系。低渗透黏性土在形成阻水屏障方面具有显著优势,但其塑性指数、压缩系数及抗剪强度指标必须与坝高及应力水平相适应,否则易在运行期产生拉裂或剪切破坏。砂砾料与堆石料承担排水与支撑功能,其渗透系数与级配曲线应与防渗材料形成合理梯度过渡,以避免界面处水力坡降突变。通过室内渗透试验、击实试验与强度试验建立材料参数数据库,可以对不同材料组合的防渗效率进行量化评估。

在工程优化过程中,将渗透系数、变形模量与抗渗稳定系数作为综合指标进行匹配分析,有助于提升防渗体整体工作效能。选用塑性适中且抗裂性能良好的黏土材料,可增强防渗连续性;结合反滤层与排水体设计,能够有效分散水头压力并降低渗流集中程度。通过数值模拟对不同材料参数组合进行敏感性分

析,可以明确关键控制指标,进而优化材料配比与填筑工艺,实现防渗效率与结构稳定性的同步提升。

### 3.2 结构参数调整对浸润线控制效果

防渗体厚度、倾角及布置位置等结构参数对坝体浸润线形态具有直接影响。厚度增加可延长渗流路径并降低单位长度水力坡降,但过大的断面尺寸会提高填筑成本并加大沉降差异。合理控制防渗体在坝体中的相对位置,有助于优化渗流线分布,使浸润线保持在安全范围内<sup>[3]</sup>。倾斜布置结构能够改变流线走向,使水头逐步衰减,对高坝工程具有一定适应性。建立二维或三维渗流模型,可以分析不同参数组合对浸润线抬升幅度与逸出点位置的影响规律。

在运行期监测资料基础上,对浸润线实测数据与计算结果进行对比,可检验结构参数设置的合理性。若浸润线接近坝坡表面,应调整防渗体厚度或增加排水设施来改善渗流条件。对参数进行优化时,需要综合考虑坝体应力分布与变形协调问题,避免因局部加厚或局部削减引发新的不均匀沉降。结构参数的科学调整能够有效控制浸润线高度,降低渗透破坏风险,为土石坝长期稳定运行提供保障。

### 3.3 安全性与经济性协调下的优化策略

防渗体优化涉及技术性能指标,还需要在安全储备与投资

成本之间取得平衡。提高防渗等级可以显著降低渗流量与水力坡降,但材料用量与施工难度随之增加,可能导致工程造价上升。对不同防渗方案进行寿命周期分析,可评估其在设计期内的维护成本与风险损失,从而选择综合效益更优的结构形式。将渗流稳定安全系数、抗渗稳定系数与工程造价进行多目标分析,有助于形成量化决策依据。

优化策略的实施需要结合坝址地质条件、材料来源及施工技术水平进行综合论证。地基渗透性较高区域可加强帷幕灌浆或增设截水设施,而地质条件较好的工程可适当简化结构形式以降低成本。建立技术经济评价模型,对不同方案进行比选,可以在满足规范安全要求的前提下实现投资合理化。安全与经济之间的协调配置,是土石坝防渗体优化设计实现工程价值最大化的重要途径。

## 4 结语

本文围绕土石坝渗流特性与防渗体优化问题,系统分析了坝体结构分区、材料性能及水位变化对渗流场与浸润线分布的影响机理,探讨了心墙、斜墙及复合防渗体系的结构特征与协同作用,并从材料匹配、结构参数调整及技术经济协调等方面提出优化路径。相关分析为提升土石坝渗流控制能力与整体安全水平提供了理论依据与实践参考。

## 参考文献:

- [1] 田振宇,董安雨.深覆盖层上不同材料防渗墙的土石坝应力变形分析[J/OL].水利水电快报,1-10[2026-02-27].
- [2] 何金文,张诗瑶,潘春玲,等.堤坝水泥土桩防渗墙渗透系数的概率分布类型研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(03):36-42.
- [3] 高尚,郑汉种,薛磊磊,等.基于反演法的土石坝渗流分析计算[J].水利技术监督,2024,(10):203-205+262.