

水利水电工程设计中大坝防渗体系稳定性分析研究

李 杨

湖北省长阳土家族自治县大堰乡居溪村二组 湖北 宜昌 443500

【摘 要】：水利水电工程设计中，大坝防渗体系的稳定性取决于坝体分区、坝基渗流通道、垂直防渗帷幕和排水构造之间的连续配合。本文分析坝体防渗结构布置、坝基地质边界、复合防渗方案、渗压场反演和局部风险分区之间的作用关系，识别水头衰减、渗流路径延长、排水释放和节点保护对稳定判断的影响，并把整体渗流稳定、方案抗渗合理性和局部渗透破坏风险纳入同一评价链。上游面板、坝体填筑区、防渗帷幕、反滤排水体和坝基岩体应作为整体校核对象，坝踵、帷幕底端和下游排水出口等部位则是降低渗透变形和集中渗流风险的重点。

【关键词】：水利水电工程；大坝设计；防渗体系；渗流稳定；渗压场

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.012

大坝防渗体系不是单一材料层的封闭问题，而是坝体、坝基、岸坡和排水出口共同形成的渗流控制结构。水利水电工程进入设计阶段后，库水位变化、坝基裂隙发育、填筑料渗透性差异和排水体通畅程度都会改变渗压分布，进而影响防渗帷幕、上游面板和下游反滤排水的协同效果。若只按单个构件验算抗渗能力，容易忽略帷幕底端绕渗、坝踵集中坡降和排水出口局部冲刷等连续性风险。稳定性分析把结构布置、地质边界、计算参数和观测反演统一起来，形成服务设计调整的判断依据。

1 水利水电大坝防渗体系设计条件概况

(1) 坝体防渗结构空间分区布置：坝体防渗结构的空间分区决定水头衰减位置。上游面板承担迎水面阻水作用，坝体填筑区承担结构稳定和渗流缓冲，垂直防渗帷幕向坝基延伸以截断深部渗流，排水棱体把残余渗水导向下游安全出口^[1]。面板、帷幕和排水体在高程或平面位置上出现断点时，库水位升高会在坝踵和坝基接触带形成集中坡降，整体稳定随之降低；面板接缝、帷幕轴线和反滤过渡厚度则共同影响后期检修和细颗粒迁移控制。防渗构件空间衔接关系见图1。

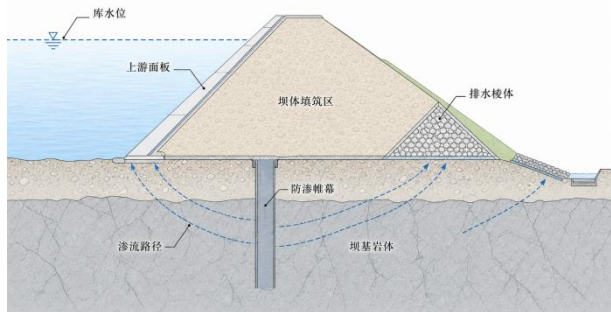


图1 大坝防渗体系剖面关系示意

图1中，上游面板位于迎水面，防渗帷幕向坝基岩体延伸，排水棱体布置在下游坡脚附近，蓝色虚线显示渗流路径被拉长

后再向下游释放，说明防渗体系稳定依赖阻水、截渗和排水三类构造连续衔接。

(2) 坝基地质渗流通道边界条件：坝基地质边界控制防渗体系下限。裂隙岩体、覆盖层夹砂层、断层破碎带和岸坡卸荷带会形成渗流优势通道，平均渗透系数不能替代分区边界判断；防渗稳定分析应把地下水补给、软弱夹层连续性和坝基开挖扰动纳入同一边界描述。坝基下游若存在低强度细粒土或封闭透水层，残余水头不易排出，局部坡降会在排水出口附近放大，岸坡帷幕未闭合时还会产生绕坝渗流。在设计剖面化处理时，透水层连续方向、岩体裂隙倾向和岸坡接触带不能被简化成一个均质底板，否则帷幕深度和排水出口坡降会同时失真。

(3) 垂直帷幕面板复合防渗设计方案：垂直帷幕面板复合防渗方案适合库水位较高、坝基透水性不均和坝体迎水面控制严格的工程。上游面板降低坝体直接入渗量，垂直帷幕截断坝基通道，排水和反滤结构释放残余渗水，三类构造形成从阻水到截渗再到排水的稳定路径。方案稳定性还取决于连接部位的变形协调，面板坝踵、帷幕顶端、底端和相对不透水层之间若存在施工缝或岩面起伏，水头会在节点集中。

2 水利水电大坝防渗体系稳定计算模型

(1) 渗流稳定计算模型及参数取值：渗流稳定计算模型应把坝体填筑区、防渗体、坝基岩体和排水棱体分成不同渗透分区。各分区渗透系数不宜只取经验中值，而要结合压水试验、材料级配、帷幕灌浆成果和运行期渗压观测校核；没有观测资料时，参数组合应覆盖正常蓄水、快速降落和下游排水受阻等不利边界^[2]。局部渗透坡降可作为设计比较指标，水头差沿渗流路径衰减越短，坝基细粒夹层、帷幕底端和排水出口越容易出现颗粒迁移风险。参数取值还要区分设计控制值和运行校核值，前者服务结构尺寸和帷幕下伸范围确定，后者服务蓄水后的渗压复核。

(2) 坝体渗压场分布参数反演方法: 坝体渗压场反演把观测孔水头与计算水头之间的偏差转化为渗透参数修正。上游侧水头衰减过快而下游侧变化不明显时, 防渗体可能有效但排水边界仍要校核。观测孔堵塞、读数滞后、库水位短时波动和温度影响都会改变水头曲线, 分区对比比单点判定更适合识别稳定偏差。反演结果进入设计调整时, 应优先修正高渗区范围、排水边界和帷幕端部连接条件, 而不是直接扩大所有分区的安全系数。连续性参数响应关系见图2。

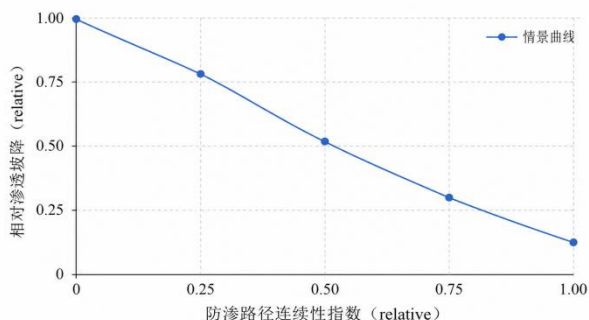


图2 防渗路径连续性与相对渗透坡降情景关系

图2中, 防渗路径连续性提高后, 相对渗透坡降呈下降趋势。该关系提示面板、帷幕和排水路径越连续, 水头集中越容易被分散, 局部渗透破坏风险相应降低。

3 水利水电大坝防渗体系稳定结果分析

(1) 防渗体系整体渗流稳定性分析: 整体渗流稳定性应从水头衰减连续性、排水通畅性和防渗边界闭合性判断。上游面板降低入渗量、垂直帷幕切断坝基主要通道、排水棱体稳定排出残余渗水时, 坝体内部渗压线可保持在设计允许范围内, 坝坡抗滑和坝基渗透稳定具备较好余量^[3]。平均渗流量较小但水头在某一点集中时, 仍可能出现局部管涌或接触冲刷, 设计评价应同时比较渗流量、渗压线位置、出口坡降和反滤保护条件。这一判断还要与蓄水过程相结合, 初期蓄水阶段观察渗压线抬升速率, 正常运行阶段观察下游排水量和浑浊度, 两类响应共同反映防渗体系连续性。

(2) 防渗设计方案抗渗合理性评价: 防渗设计方案的抗渗合理性体现在方案与地质边界的匹配程度。岩溶发育或断层破碎坝基要求帷幕向相对完整岩体延伸, 砂砾石覆盖层较厚时应加强垂直截渗和反滤过渡, 混凝土坝段则关注坝踵接触面和廊道排水系统^[4]。方案选择若脱离这些边界, 即使材料抗渗

等级较高, 也难以形成稳定效果; 灌浆帷幕检查孔、面板止水检修口和排水体浑浊度观测共同构成可维护接口。抗渗合理性评价还应考虑施工质量可验证性, 帷幕灌浆成果、面板接缝止水和反滤料级配均能转化为运行期检查对象。

(3) 坝体局部渗透破坏风险分析: 局部渗透破坏通常发生在水头梯度突变和颗粒保护不足的位置。上游坝踵承受水头进入坝基的起始集中, 帷幕底端存在绕渗和基岩裂隙连通风险, 下游排水出口关系到出逸坡降和细颗粒带出; 这些部位叠加施工缝、弱夹层或排水淤堵时, 局部风险会先于整体失稳出现。高风险区应复查帷幕连续性、接缝止水和反滤保护, 中风险区跟踪渗压变化和排水浑浊度, 稳定区保持常规巡查。局部风险分区完成后, 设计调整应指向节点构造而不是笼统提高防渗等级, 坝踵加强止水和接触灌浆, 排水出口强化反滤保护。局部渗透风险分区见图3。

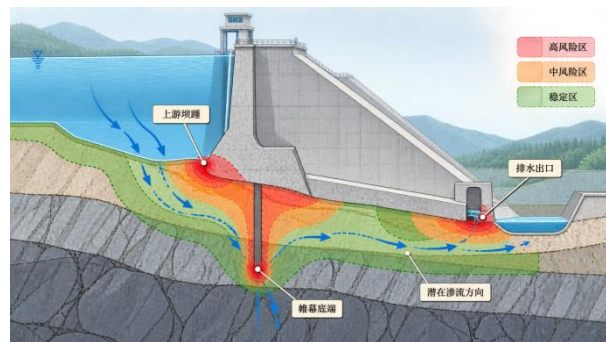


图3 坝体局部渗透破坏风险分区示意

图3中, 高风险区位于上游坝踵、帷幕底端和排水出口附近, 中风险区沿坝基接触带延伸, 稳定区分布在水头衰减较充分的区域。该分区说明防渗体系稳定分析不能停留在整体渗流量判断, 还要把节点水头集中和反滤保护条件纳入设计调整。

4 结语

水利水电工程设计中的大坝防渗体系稳定性, 建立在结构连续、边界清楚和局部风险可识别的基础上。坝体防渗结构空间分区决定渗流路径的基本形态, 坝地质渗流通道决定帷幕下伸范围和封闭范围, 复合防渗方案通过上游面板、垂直帷幕和排水棱体共同降低渗压集中。渗压场反演把设计参数和观测响应连接起来, 使防渗体系从静态布置转向可校核的稳定判断。设计优化宜围绕坝踵、帷幕底端和排水出口等薄弱部位修正参数, 避免局部渗透破坏削弱整体防渗效果。

参考文献:

- [1] 韩保太,王勇博.大坝防渗面板施工关键技术及质量控制要点[J].水上安全,2026,(11):163-165.
- [2] 陈贵波,刘晓斌,李琪.基于岩溶发育特征的水利工程坝基防渗施工技术应用研究[J].水利技术监督,2026,(7):348-351.
- [3] 黄震杰.水利水电工程大坝基础处理施工技术[J].全面腐蚀控制,2026,40(6):90-92.
- [4] 郭力源.碾压混凝土大坝在水利水电工程中的关键技术 with 案例分析[J].陕西水利,2026,(6):165-167.