

水利水电工程复杂地质条件下综合防渗技术体系研究与应用

陈孟强

广东省水利水电第三工程局有限公司, 广东省东莞市, 523710;

摘要: 随着我国水利水电事业向西部深山峡谷地区推进, 工程所面临的地质条件愈发复杂, 断层破碎带、强烈卸荷裂隙、深厚覆盖层、岩溶系统以及高地下水压力等不良地质体普遍存在, 由此引发的渗漏问题已成为制约工程建设安全、进度与投资的关键技术难题。传统单一的防渗措施往往难以应对此类多因素耦合、各向异性显著的复杂渗控场景。本文立足于系统工程理论, 系统阐述了复杂地质条件下综合防渗技术体系的内涵, 构建了涵盖勘察评价、设计优化、材料研发、施工工艺及过程控制的全链条技术架构。文章深入分析了帷幕灌浆、高压旋喷、混凝土防渗墙、复合土工膜及新型化学灌浆等核心技术的适用性边界与协同作用机理, 探讨了基于地质精细建模的渗流场分析与防渗参数动态优化方法, 并结合典型工程案例, 验证了“上截下排、刚柔相济、多维协同、动态控制”的综合防渗策略的有效性。研究表明, 构建科学、系统、适应性强的综合防渗技术体系, 实现防渗结构与围岩介质的协同工作, 是确保复杂地质条件下水利水电工程深基坑安全、坝基稳定及长期渗流稳定的根本途径, 对于提升我国重大水利水电工程建设的风险防控能力具有重要的理论价值与工程指导意义。

关键词: 水利水电工程; 复杂地质条件; 综合防渗技术

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.034

引言

水利水电工程是国家基础设施重要组成部分, 其建设质量与运行安全关乎国计民生。近年来, 我国水电开发重心转移至西南高山峡谷地带, 这些区域地质复杂, 工程场址常遇多重不良地质条件叠加的极端工况。如深厚覆盖层透水性强且不均, 高坝大库区对防渗系统要求严苛。在此背景下, 工程渗漏问题演变为“体状”系统性问题。传统防渗技术处理复杂地质条件时适应性不足、可靠性下降。因此, 需从系统工程视角构建集勘察、设计、材料、工艺、监测于一体的综合防渗技术体系。该体系核心是“综合”, 强调优势互补、协同工作与动态反馈, 目标是建立具有自适应性和容错能力的渗流控制系统。本文旨在梳理综合防渗技术的理论框架、核心方法与工程实践, 探讨破解复杂渗控难题, 为同类工程提供参考。

1 复杂地质条件下渗流特性分析与防渗理念革新

构建综合防渗技术体系前, 需认知复杂地质条件下渗流场特殊性与演变规律。复杂地质下渗流具非均质性、各向异性、非连续性与时空变异性, 断层破碎带等地质界面是渗流主控通道, 形成“优势流”; 高地应力区开

挖卸荷产生“卸荷渗流”耦合; 深厚覆盖层渗流有多元介质特征; 岩溶地区渗流系统隐蔽、随机、突变, 常规勘探难揭露。

基于这些渗流特性, 传统“截断式”防渗理念面临挑战, 追求绝对防渗技术难实现、经济不合理, 还可能引发问题。因此, 防渗理念要从“单一截断”向“截排结合、刚柔并济、动态调控”转变。

“截排结合”是设防渗系统截断渗流通道, 同时设排水系统导出绕渗或剩余水头, 降低防渗结构渗透压力。

“刚柔并济”是刚性结构与柔性材料协同应用, 刚性结构提供抗渗能力, 柔性材料适应地基变形。“动态调控”是防渗设计基于全过程监测信息动态优化, 通过监测设备掌握渗流场态势, 评估防渗效果, 调整施工参数或启动加固措施, 形成闭环控制。

2 综合防渗关键技术及其协同作用机理

构建综合防渗技术体系, 核心在于对各类防渗技术的深刻理解与合理集成。每种技术都有其独特的工作原理、适用条件与技术瓶颈, 通过科学组合, 实现“1+1>2”的协同效应。

帷幕灌浆是坝基和地下工程常用防渗手段, 通过压力注浆液封堵渗流通道。传统纯水泥浆液有稳定性差等缺陷, 为此发展出水泥-黏土浆等。采用“分级、分

序、动态变浆”工艺，先灌水泥 - 黏土浆填充大裂隙，再灌化学浆液封堵细微裂隙。帷幕灌浆还常与混凝土防渗墙联合，形成“墙 - 幕”体系。

高压旋喷技术适用于松散地层，通过高压喷射流与土体混合形成固结体。在复杂覆盖层中，单一旋喷难成连续墙，可结合抓斗成槽或冲击钻工艺，形成“钻 - 喷”防渗墙。旋喷桩还可与灌注桩等结合形成复合结构。

混凝土防渗墙是深厚覆盖层地基处理关键技术，开挖槽孔浇筑形成墙体。复杂地层技术难点在于槽壁稳定等。采用“上墙下幕”结构，上部为防渗墙，下部基岩帷幕灌浆。为适应变形，采用塑性混凝土等，实现与地基“柔性”协同。

复合土工膜防渗性能好、适应变形能力强，用于库盆等防渗。可与帷幕、防渗墙形成立体防渗格局。如围堰工程用“土工膜 + 碎石土”心墙结构，水下铺设需与混凝土趾板等可靠连接形成封闭系统^[1]。

新型化学灌浆材料与技术是处理微细裂隙、动水封堵及结构缝渗漏的利器。环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸盐等化学浆液具有黏度低、可灌性高、凝胶时间可调、固结体强度高特点。其协同作用体现在作为“最后一道防线”，专门用于解决常规水泥灌浆无法处理的难题。例如，在高流速地下水条件下，可通过“双液法”灌浆，将主剂与固化剂在孔口混合，实现瞬间凝胶，有效抵抗水流冲刷；对于结构缝或伸缩缝的渗漏，可灌注弹性聚氨酯材料，既能止水，又能适应结构的热胀冷缩。化学灌浆通常作为综合性防渗处理中的“精细修补”环节，与宏观的帷幕灌浆、防渗墙形成层次分明、功能互补的技术体系。

3 基于地质精细建模的防渗系统优化设计

综合防渗技术体系的成效，高度依赖于对地质条件认知的准确性与防渗方案设计的针对性。传统基于二维地质剖面 and 宏观统计参数的防渗设计，往往难以准确刻画复杂地质体的三维空间分布与渗流参数的非均匀性。因此，引入地质精细建模与三维渗流场分析，是实现防渗系统优化设计的关键路径。

地质精细建模的核心在于“融合多源数据，重构地质结构”。这需要整合工程地质勘探、现场试验、施工先导孔资料以及三维激光扫描、无人机摄影等多源异构数据。通过地质统计学方法或基于离散光滑插值（DSI）的三维建模软件，建立能够真实反映断层、破碎带、风

化卸荷分带、岩溶管道等关键地质要素空间形态与拓扑关系的三维地质模型。该模型不仅展现地质体的几何形态，更重要的是能够赋予不同岩体以基于实测数据反演的渗透张量属性，构建三维非均质、各向异性的渗流场数值模型。

基于上述精细模型，开展三维渗流场分析，是防渗方案优化的核心依据。传统设计往往依据经验公式确定帷幕深度、厚度及延伸范围，带有一定的保守性与盲目性。而通过三维渗流有限元分析，可以精确模拟在天然状态下、施工期基坑开挖工况下、以及运行期各种库水位工况下的渗流场分布^[2]。分析的关键在于：模拟不同防渗方案对渗流量、渗透坡降、下游浸润线位置及坝基扬压力的影响。通过多方案比选，可以识别出对控制渗流起关键作用的“敏感区域”与“薄弱环节”，从而摒弃“一刀切”的均匀布孔方式，转向“差异化的非均匀布置”。例如，在断层交汇部位或岩体透水性突变的界面附近，加密灌浆孔距、加大灌浆压力、采用特殊浆材；在相对完整且透水性低的岩体区域，则可适当放宽孔排距。这种基于渗流场分析结果指导的“靶向”设计，能够在保障防渗效果的前提下，显著优化工程量，提高经济性。

此外，地质精细建模与渗流分析也是评估防渗体系长期安全性的基础。运行期，库水位的周期性变动、水化学作用的长期侵蚀、以及地应力的缓慢调整，都可能导致防渗结构或围岩介质的渗透特性发生演变。通过建立流-固-化多场耦合模型，可以预测防渗体系的时效演化过程，评估帷幕耐久性 & 防渗墙的长期应力应变状态，为制定科学的运行管理方案和必要的补强加固预案提供依据。这一过程实现了防渗设计从“静态经验”向“动态智能”的跃升。

4 全过程动态控制与质量保障体系

复杂地质条件下，地质体的揭露具有渐进性，施工过程中实际揭露的地质条件往往与前期勘探成果存在偏差。因此，再完美的设计方案，若缺乏与之匹配的施工过程动态控制与质量保障机制，也难以落地生根。全过程动态控制是综合防渗技术体系成功实施的组织保障与技术灵魂。

这一体系首先体现在“动态勘察与信息化施工”的深度融合。在防渗工程施工前，应充分利用先导孔、勘探平洞等施工通道，对关键防渗轴线部位的地质条件进行复核^[3]。在帷幕灌浆施工中，通过“孔序法”的现场试

验,第一序孔的灌浆资料本身就是极为宝贵的地质信息。现场技术团队需实时分析这些数据,动态调整后续孔序的孔距、终孔深度及灌浆参数。例如,若发现某一区域第一序孔的单位注灰量远超预期,表明该区域存在预期外的宽大裂隙或破碎带,应立即加密第二序孔,并考虑采用更适宜的浆液材料。这种“边施工、边分析、边调整”的反馈机制,能够有效应对地质条件的复杂性,确保防渗帷幕的连续性与密实性。

对于混凝土防渗墙,全过程质量控制则贯穿成槽、泥浆护壁、清孔换浆、混凝土浇筑、接头处理等每一道工序。成槽过程中,需利用超声波槽壁探测仪实时监测槽壁的垂直度与稳定性,防止因塌孔导致墙体缩颈或夹泥。在复杂地层中,一旦发现槽段局部坍塌,需立即调整泥浆比重或采取槽壁加固措施。清孔换浆后,必须严格检测孔底淤积厚度,确保防渗墙底部与基岩或相对不透水层的可靠嵌固。混凝土浇筑时,需通过水下混凝土灌注监控系统,严格控制导管埋深与浇筑速度,防止混凝土离析或形成冷缝。墙段接头是防渗墙最薄弱的环节,需根据地质条件与施工设备,选用铰接法、接头管法或钻凿法等可靠的接头形式,并辅以接头处的高压喷射灌浆进行强化处理,确保墙体的整体性。

质量检测是全过程控制的关键环节,需构建“点-线-面”相结合的立体检测体系。“点”上,通过钻孔取芯、压水试验、钻孔电视等手段,对帷幕或墙体特定位置的密实性、抗渗等级、与基岩的接触情况进行精确检测。“线”上,利用跨孔声波CT、地质雷达等地球物理方法,对墙体或帷幕的连续性、是否存在空洞或离析等隐患进行断面探测^[4]。“面”上,则通过布设长期监测仪器,结合蓄水期和运行期的观测数据,对防渗体系的整体效能进行综合评价。这种多层次、多手段的检测方法,能够全面、客观地评估防渗工程质量,及时发现隐蔽缺陷并为后续处理提供精准定位。

此外,建立严格的信息化管理平台是实现全过程动态控制的必要手段。该平台应集成地质数据、设计参数、施工记录、质量检测结果及安全监测数据。通过数据的实时上传、共享与分析,实现参建各方的协同工作,确保任何重大技术决策都有充分的数据支撑。当监测数据出现异常时,能够迅速调取该部位的施工历史与地质背

景,进行联合诊断,并迅速启动应急预案,如补充灌浆或化学灌浆处理。这种基于大数据与信息化技术的动态控制模式,将传统的事后验收转变为全过程主动式、预防性的质量保障,显著提升了复杂地质条件下防渗工程的可控性与可靠性。

5 结语

水利水电工程是人类改造自然的伟大实践,而复杂地质条件下的渗流控制则是这一实践中最具挑战性的课题之一。本文讨论发现复杂地质条件下的渗流问题具有高度的系统性与非线性特征,任何单一技术或局部措施均难以独立解决全部问题。构建科学有效的综合防渗技术体系,首先,必须摒弃“绝对截断”的传统思维,树立“截排结合、刚柔并济、动态调控”的系统防渗理念,尊重地质体的客观规律,寻求工程结构与自然环境的和谐共生。其次,技术层面需实现从“单一应用”到“协同耦合”的跨越,深刻理解帷幕灌浆、高压旋喷、混凝土防渗墙、复合土工膜及化学灌浆等技术的互补优势,通过“墙幕联合、钻喷结合、刚柔相济”等技术组合,构建层次分明、功能互补的立体防渗屏障。再者,设计方法上需实现从“经验类比”向“数字驱动”的转变,依托地质精细建模与三维渗流场分析,实现防渗方案的靶向优化与精准布设。最后,工程实施上必须坚持全过程动态控制,通过信息化施工与多维度质量检测,建立“勘察-设计-施工-监测-反馈”的闭环管理体系,确保防渗体系在复杂且不断变化的地质与荷载环境下具备足够的可靠性、耐久性与适应性。

参考文献

- [1]何莹呼.试析综合防渗技术在小型水库除险加固工程中的应用[J].水上安全,2024,(09):184-186.
- [2]吴胡强.综合防渗技术在小型水库除险加固工程中的应用[J].水利科学与寒区工程,2023,6(07):146-149.
- [3]徐晓兵,韩小凡,邓彪,等.渠式切割水泥土连续墙(TRD)在赣江某综合整治工程中的应用[J].建筑结构,2023,53(10):144-151.
- [4]刘田田.农田水利工程中防渗渠道施工技术的综合研究[J].新农业,2022,(13):98-99.