水利水电基坑排水施工难点及处置对策

孙鑫旺
河北省水利工程局集团有限公司　河北　石家庄　052360

摘　要：水利水电基坑排水施工易受复杂地质与动态水文环境干扰，各类渗流失稳、涌水倒灌问题制约工程施工稳定性。依托渗流力学理论体系，针对高渗透地层、软弱夹层、断层破碎带三类复杂工况，梳理排水施工核心难点与内在失稳机理。研究融入机器学习预测、双阀联控防控技术，搭配新型改性材料与智能监测装备，构建多维度靶向处置技术体系。通过风险量化评价与经济分析，整合形成标准化施工管控体系，有效解决传统排水施工适配性弱、精度不足的问题，为复杂工况下基坑排水施工提供精细化技术支撑。

关键词：基坑排水；地质失稳；靶向处置；智能监测；工程标准化

引言：水利水电工程基坑施工长期面临地下水渗流扰动、地层结构失稳等典型问题，复杂多变的水文地质条件大幅提升排水施工的管控难度。传统排水工艺模式固化，难以适配动态水文变化与特殊地层的施工需求，易引发管涌、边坡变形、积水倒灌等安全隐患，影响工程施工质量与推进效率。为改善现阶段基坑排水施工的技术短板，从理论机理、施工难点、调控技术、材料装备及标准化管控多个维度开展系统性探究，优化现有排水施工技术体系，提升水利基坑工程施工的安全性与规范性。

1 基坑排水的核心理论与技术体系

1.1 渗流力学基础理论模型

渗流力学为水利水电基坑排水施工提供核心理论支撑，能够揭示水体在岩土孔隙介质中的运移规律。经典达西定律的适用场景局限于均质饱和岩土介质，实际工程场地岩土体存在分层夹杂特征，渗透属性呈现空间不均匀分布。结合非均质岩土体的孔隙结构与渗透阻力特征，可对达西定律参数进行修正，适配复杂地层渗流计算场景。裘布依公式多用于基坑涌水量预测，模型简化的水文边界条件与现场实际工况存在偏差，造成计算数值存在偏差。结合岩土渗透特性、基坑开挖边界与地下水埋深参数建立误差调控机制，能够缩小理论计算与现场实际的数值差距。

1.2 排水系统分类与功能定位

现阶段基坑排水工艺包含明排法、井点降水、帷幕灌浆三类主流形式，不同技术的适用场景与施工效能存在区别。明排法多用于浅层小流量积水处理，井点降水适配松散含水地层水位控制，帷幕灌浆通过浆液固化形成防渗结构阻断渗流通道。结合场地水文地质条件整合各类技术优势，构建组合式排水方案，能够提升排水施工的整体稳定性。

1.3 地质-水文耦合作用基础理论

岩土渗透系数K值直接影响水体渗流速率与排水效率，孔隙结构与密实度变化会造成参数波动。降雨入渗改变地下水赋存状态，岩土渗透阻力会造成地下水位响应滞后，依托耦合规律构建的延迟模型，可以量化极端降雨工况下的水位动态变化特征。

2 复杂地质条件基坑排水施工难点及失稳机理解析

2.1 高渗透地层涌水与管涌失控风险机理

砂砾石高渗透地层孔隙发育、颗粒粘结强度较低，地下水长期渗流产生的渗透力会扰动土体结构，诱发管涌病害。渗透力达到临界数值后会裹挟细小土颗粒持续流失，破坏地层原有稳定性。结合砂砾石层颗粒级配、孔隙尺寸与水力坡度参数，可推导管涌灾害发生的临界水力梯度公式，精准界定地层失稳临界状态。反滤层是防控渗流破坏的重要构造，结构层级搭配失衡会彻底丧失防护功能[1]。利用激光粒度仪完成合规结构与失效结构的颗粒检测，对比级配曲线变化特征，能够明确反滤层失效的内在诱因，划定高渗透地层排水施工的核心管控重点。

2.2 软弱夹层诱发边坡排水失稳机制

淤泥质黏土属于典型软弱地层，天然含水率与压缩性偏高，渗透性能偏弱，土体固结成型存在显著滞后特性。水体排出进度决定土体固结强度的增长速度，固结变形与排水时长的对应关系可转化为时间函数模型，精准刻画软弱夹层的固结演化规律。基坑排水作业会改变土体原有应力场，排水参数设置不合理会引发应力异动，造成边坡变形失稳。建立排水速率与支护结构强度的匹配方程，可以实现排水参数动态精准调控，规避边坡失稳风险，维持基坑施工整体稳定。

2.3 高压富水断层破碎带排水处置难点

断层破碎带岩体破碎、裂隙贯通性强，地下水富集且具备较高承压性，常规施工技术难以实现有效管控。分级压力加载试验可以确定注浆封堵作业的压力阈值，为现场施工提供参数依据。单一排水或封堵工艺无法适配高压富水断层工况，导排限压组合工法可同步完成水体疏导与压力管控。借助COMSOL平台搭建三维数值模型，还原渗流、注浆与压力消散全过程，能够验证组合工法的技术可行性，为复杂断层区域排水施工提供技术参考。

3 动态水文环境下基坑排水主动调控技术体系

3.1 弹性排水容量机器学习预测模型构建

水利水电基坑施工区域的水文状态始终处于动态变化过程，气候更替、施工扰动与地层应力调整都会造成地下水水位、流量与压力参数产生波动。固定化排水运行模式无法适配动态变化的水文工况，难以保障排水作业的精准性与安全性。水文参数变化规律的精准预判，是实现基坑排水主动调控的基础条件[2]。机器学习算法具备优良的数据挖掘与非线性规律拟合能力，依托海量现场水文监测数据完成模型训练，能够精准捕捉水文参数的动态演变特征。搭建包含数据采集、特征筛选、模型训练与趋势预判的完整技术框架，可实现基坑地下水位短中期变化态势的精准预判，为排水设备运行参数调整与设备启停管控提供数据依据。不同区域的气候特征与地质条件存在差异，水文演化规律具备地域独特性，依托现场实测参数完成模型校准，能够消除系统适配偏差，提升预测结果的精准度与泛化能力。

3.2 双阀联控防倒灌靶向控制技术

基坑施工场景中积水倒灌属于高频安全隐患，汛期水位抬升、地下水突发涌水与地表径流汇集均会诱发倒灌问题，对基坑结构体与施工环境造成破坏。水文工况存在极强的不确定性，外部水体涌入会快速改变基坑内部水压分布，扰乱排水系统运行状态，严重时会引发基坑积水漫灌、围护结构受压变形等恶劣工况。传统单阀调控设备的运行精度有限，应对突发水位波动的适配能力不足，难以满足复杂水文工况的防控需求，工况波动剧烈时容易出现启闭滞后、调控失灵等问题，无法实现水体倒灌的前置防控。双阀联控防倒灌系统整合液压阀门与电动执行器的设备优势，搭建双重防护调控架构，补齐传统防控模式的运行缺陷。液压阀门承载性能突出，可适配高压水体的稳定调控场景，能够承受基坑外部水体的高压冲击，维持管路运行稳定。电动执行器调控精度更高，能够完成精细化工况调节，对微小水位、流量变动做出灵敏反馈。依托机械控制逻辑搭建设备联动运行机制，针对高低水位、不同流量工况完成自适应调节，精准适配基坑各类复杂水情变化[3]。室内模拟试验复刻施工现场多元水文工况，持续采集系统运行阶段的压力、流量、响应时长核心参数，积累充足试验数据完成性能校验。试验数据可以客观呈现系统运行状态，高压、大流量的复杂运行条件下，设备始终保持稳定运行状态，调控精准度与反应效率优于传统防控设备。这套全新调控模式打破被动排水的固有模式，整合水文预判、动态调节、风险阻隔多重功能，重塑基坑排水防控逻辑，大幅提升复杂动态水文场景下基坑排水作业的智能管控水准。

4 新型材料与智能装备的排水靶向应用技术

4.1 透水混凝土性能-成本双优配比试验研究

透水混凝土的材料性能直接决定基坑浅层积水疏导与地层渗水管控效果，原材料配比同时影响结构强度、透水性能与工程建设成本。正交试验方法可以实现多变量梯度化试验设计，将骨料掺量、胶凝材料用量、水胶比设置为核心变量，构建多组对照试验方案。通过检测各组试样的透水系数、抗压强度与密实度指标，结合极差分析方法明确各变量对材料性能的影响权重，筛选出性能与成本协同最优的配比方案。优化后的材料配比可在保障结构承载稳定性的前提下，最大化释放透水性能，降低原材料消耗，适配大规模基坑排水工程的推广应用需求。扫描电镜观测手段可以直观呈现透水混凝土内部的孔隙分布、孔径尺寸与孔隙连通状态，从微观角度阐释材料排水机理[4]。合理配比试样的孔隙排布均匀、连通通道完整，水体流通阻力偏小，积水疏导效率更高。配比失衡的试样存在孔隙堵塞、孔径差异过大与闭合孔隙占比偏高的问题，水体流通通道受阻，透水性能大幅下降。结合微观孔隙结构与宏观性能指标的对应关系，可完善透水混凝土的应用理论体系，推动新型透水材料在基坑排水工程的规范化靶向应用。

4.2 LoRaWAN监测网络部署拓扑优化技术

LoRaWAN通信技术适配基坑复杂施工环境的监测网络搭建需求，低功耗、远距离传输与强抗干扰的技术特性可以保障监测系统长期稳定运行。施工场地障碍物遮挡、岩土体电磁屏蔽与设备布设间距都会造成信号衰减，降低水文监测数据的传输精度。结合基坑现场布局优化监测网络拓扑结构，调整节点布设密度与安装点位，实现施工区域监测全覆盖。针对性设计信号衰减补偿算法，依托传输距离、遮挡程度与环境干扰参数修正信号损耗，改善数据传输稳定性。现场实测采集各监测

点位RSSI数值，通过热力图直观呈现信号覆盖与衰减分布特征，依据实测数据完成网络布局二次优化，最大程度弱化环境干扰对监测系统的影响。全天候稳定运行的智能监测网络，可持续采集水位、流量、压力等核心水文参数，为排水参数动态调控、安全风险预判与技术优化提供实时数据支撑，推动基坑排水施工从经验化操作向智能化精准管控转型。

4.3 纳米改性土工布耐酸碱老化性能研究

土工布是基坑排水防护的核心材料，长期接触酸碱水体与腐蚀性岩土介质会出现结构老化，逐步丧失防渗与防护功能。纳米改性处理可以优化土工布分子结构，提升材料耐腐蚀与抗老化能力，延长工程服役周期。依照ASTMD6694标准搭建加速老化试验平台，配置不同浓度酸碱腐蚀溶液模拟现场复杂腐蚀环境，对改性土工布开展持续性老化测试。阶段性采集试样性能参数，拟合腐蚀速率变化曲线，精准刻画不同腐蚀时长与腐蚀环境下的材料性能衰减规律。XRD图谱检测技术可观测老化前后土工布的分子结构变化，明晰化学键断裂与结构演化特征，阐释材料腐蚀老化的微观机理。纳米改性组分可以填充材料内部微小孔隙，稳定分子结构体系，抵御酸碱介质的侵蚀破坏，减缓结构损伤速率，维持材料服役性能。改性土工布的稳定性能可以适配复杂水文地质长期施工场景，减少材料更换频次，控制工程运维成本，实现新型功能材料在排水工程中的靶向高效应用。

5 全流程处置对策集成与标准化体系构建

为提升复杂工况下水利水电基坑排水的施工规范性与管控精度，补齐传统施工管控碎片化、风险把控不足、经济性薄弱的短板，本文整合风险管控、经济优化与数字化应急管理手段，构建全覆盖、标准化的基坑排水施工管控体系，核心内容分为三部分：（1）搭建AHP-熵权法施工风险管理模型，针对基坑排水施工中地质、水文、设备、人员操作等多元风险源，结合主观层次分析与客观熵权计算优势，建立专属风险评价指标体系，通过标准化矩阵校验与权重测算，对各类施工风险分级排序，依托风险矩阵实施分级精准管控，有效规避渗流失稳、设备故障、施工失误等安全隐患，实现风险量化、精准治理。（2）建立抽灌平衡技术工程经济评价模型，针对传统过度抽水导致的地层沉降、水资源浪费及生态破坏等问题，基于净现值理论整合工程建设、运维、病害整改等全周期成本收益参数，构建经济测算体系，通过参数敏感性分析，明确电价、抽水规模、施工周期等因子对工程效益的影响，精准核算项目投资收益，验证抽灌平衡技术在稳压地层、节约资源、控制造价方面的应用价值，为技术规模化推广提供经济支撑。（3）推进平战结合应急管理数字化标准化建设，依托智能监测与大数据预判技术，搭建一体化数字化预警管控平台，整合实时监测数据、风险评价模型与靶向处置方案，实现水情异常、结构失稳等隐患的快速预警处置。兼顾常态化施工管理与突发险情应急抢险场景，优化施工工艺与应急预案，统一现场作业、设备运维、应急处置标准，构建全周期数字化管控体系，全面提升基坑排水施工的安全性、规范性与应急处置能力。

结束语：水利水电基坑排水施工的核心难点与靶向处置技术展开系统性梳理与探究，完善复杂地质与动态水文场景下的排水施工理论与技术体系。通过剖析各类不良地层的失稳机制，优化主动调控技术与新型工程材料的应用方式，搭建量化风险评价与标准化管控平台，形成适配工程实际的全流程处置方案。相关技术成果能够有效解决传统排水施工的各类弊端，为同类水利基坑排水工程的施工设计、现场管控提供成熟的技术参考与实践依据。

参考文献

[1]杜志宇.水利工程深基坑降水施工难点及优化控制策略[J].建筑·建材·装饰,2026(15)：136-138.

[2]牛树军.水利施工中深基坑支护与降水联合施工技术[J].模型世界,2026(12)：202-204.

[3]任忠哲.泵站基坑施工中管井降水技术的应用研究[J].水上安全,2025(5)：112-114.

[4]黄伟,濮苏辉,沈蓉.水利施工深基坑降水难题及新型排水技术对策研究[J].建筑与施工,2026,5(2)：121-123.