

复杂地质条件下水利导流围堰施工技术难点与突破

汤成魁

南通通源建设监理有限公司 江苏 南通 226001

摘要：导流围堰是水利工程中关键的临时构筑物，其施工质量直接影响工程防洪安全与建设进度。复杂地质条件下，软土地基、岩溶发育、断层破碎带等问题频发，导致围堰施工面临勘察精度低、基础处理难、风险管控复杂等挑战。本文以复杂地质为切入点，明确其特征与围堰施工理论，系统分析勘察、基础处理、主体施工及监测管控中的核心难点。提出精准勘察、基础处理优化、智能监测等技术突破路径，构建“勘察-施工-管控”一体化技术体系，为同类工程提供技术参考，助力提升施工安全性与效率，推动水利施工技术创新。

关键词：复杂地质；水利工程；导流围堰；施工技术；难点突破

引言：水利工程作为国家基础设施的核心组成，其建设安全依赖于导流围堰的稳定性。随着工程向山区、河谷等复杂地质区域拓展，软土、滑坡体、溶洞等地质问题频发，围堰施工事故风险显著上升。近年来，多地水利工程因围堰技术缺陷引发溃坝、滑坡等灾害，造成重大经济损失与安全隐患。当前，复杂地质围堰施工技术研究仍呈碎片化，缺乏系统性解决方案。本文聚焦技术痛点，探索突破路径，为提升施工水平、保障工程安全提供理论与实践支撑，具有重要工程应用价值。

1 复杂地质条件下导流围堰施工的理论基础与技术框架

1.1 导流围堰核心理论

导流围堰核心理论以“安全挡水、高效导流、经济合理”为核心，涵盖导流规划、结构设计、稳定性分析三大体系。导流规划理论需结合工程流域水文特征，确定围堰挡水标准与导流流量，通过水文计算预判汛期水位变化，确保围堰高程与断面尺寸满足挡水需求。结构设计理论基于材料力学与土力学，根据地质承载力选择围堰类型，如土石围堰、混凝土围堰等，通过抗滑稳定性、抗倾覆稳定性及渗透稳定性计算，优化结构参数。稳定性分析理论则借助数值模拟与物理模型试验，模拟复杂荷载下围堰变形规律，预判结构失效风险。另外，围堰施工还需遵循“临时工程永久化考量”原则，在满足施工需求的同时，兼顾拆除便利性与环境影响，实现技术与经济的平衡。

1.2 复杂地质条件界定与特征

复杂地质条件指因地质构造运动、外力侵蚀等作用，导致岩土体性质不均、地质缺陷发育，对工程施工造成显著制约的地质环境，主要涵盖四类典型类型。软土地基地质以淤泥质黏土、粉质黏土为主，含水率高

达40%-60%，承载力低且压缩性大，易引发围堰沉降变形。岩溶发育地质存在大量溶洞、溶沟，岩体完整性差，易出现涌水、突泥风险^[1]。断层破碎带地质由破碎岩块与断层泥组成，力学强度低，抗渗性能差，施工中易发生边坡失稳。滑坡体与崩塌堆积体地质则因岩土体松散，内部结构紊乱，受施工扰动易引发整体滑动。此类地质的共性特征表现为不均质性强、力学参数波动大、地质缺陷隐蔽性高，给围堰施工带来极大挑战。

1.3 围堰施工关键支撑技术

围堰施工关键支撑技术体系涵盖地质勘察、基础处理、主体施工及监测预警四大模块。地质勘察技术以钻探与物探结合为核心，通过金刚石绳索取芯钻探获取岩芯样本，结合地质雷达、高密度电法等物探技术，精准探测地下地质缺陷。基础处理技术针对不同地质采用差异化方案，软土地基常用真空预压、水泥土搅拌桩等技术提升承载力；岩溶地质采用充填注浆、桩基跨越等方法处理溶洞。主体施工技术包括土石围堰的分层碾压技术、混凝土围堰的滑模施工技术，确保围堰结构密实与成型质量。监测预警技术依托传感器网络，实时采集围堰沉降、位移、渗流等数据，通过数据可视化平台实现风险动态预警，为施工决策提供数据支撑，各技术模块协同作用保障围堰施工安全。

2 复杂地质条件下导流围堰施工核心难点剖析

2.1 前期勘察与地质研判难点

复杂地质条件下，前期勘察与地质研判面临三大核心难点。一是地质勘察精度不足，复杂地质区域往往存在勘察盲区，如深部溶洞、隐伏断层等隐蔽性地质缺陷，常规钻探手段难以全面覆盖，物探数据易受岩土体不均质性干扰，导致地质信息失真。二是地质参数获取困难，软土地基的含水率、压缩模量等参数随深度变化

显著,岩溶区域岩体完整性系数波动大,现场试验与室内试验数据存在偏差,难以精准反映实际地质条件。三是地质演化预判复杂,水利工程施工周期长,施工过程中易受降雨、地下水渗流等因素影响,引发地质条件动态变化,如软土地基固结沉降、滑坡体复活等,传统静态研判方法无法适应地质动态演化特征,增加施工风险预判难度。

2.2 基础处理施工难点

基础处理作为围堰施工的关键环节,在复杂地质条件下面临多重技术瓶颈。软土地基处理中,因土层承载力低,大型施工机械进场易导致陷机,同时真空预压过程中易出现膜体破损,影响固结效果,若处理不及时会引发围堰后期不均匀沉降。岩溶地质基础施工时,溶洞分布随机性强,部分溶洞内部充填物松散,注浆处理时易出现浆液流失,难以形成有效固结体,而大型溶洞的跨越处理需精准控制桩基定位,施工难度大^[2]。断层破碎带区域则因岩土体力学性能差,基础开挖过程中易发生坍塌,需采取超前支护措施,但支护结构与破碎岩体的结合性差,易出现支护失效问题。

2.3 围堰主体施工技术难点

围堰主体施工在复杂地质条件下的技术难点集中于施工质量控制与效率提升。土石围堰施工中,复杂地质区域的填料来源受限,部分区域需远距离运料,增加施工成本;同时,软土地基上碾压施工易出现“弹簧土”现象,碾压密实度难以达标,而岩溶区域因地表起伏大,填料摊铺厚度不均,影响围堰整体稳定性。混凝土围堰施工面临的难点则体现在模板支护与混凝土浇筑,断层破碎带区域地基变形易导致模板位移,需频繁调整模板位置;岩溶发育区域浇筑过程中易出现混凝土漏浆,形成蜂窝、麻面等质量缺陷,且水下混凝土浇筑时难以控制浇筑高度与密实度,增加施工质量管控难度。另外,汛期施工时,复杂地质区域的围堰合龙难度大,易受水流冲击影响合龙精度。

2.4 施工监测与风险管控难点

复杂地质条件下,围堰施工监测与风险管控的难点主要体现在监测数据精准性与风险响应及时性。监测方面,软土地基的大变形易导致传感器损坏,岩溶区域因岩体空洞多,传感器布设难度大,部分监测点无法有效接触岩土体,导致数据采集失真;同时,复杂地质区域的电磁干扰强,无线监测设备信号不稳定,影响数据传输效率。风险管控中,复杂地质引发的风险类型多且关联性强,如基础沉降可能引发围堰裂缝,进而导致渗流风险加剧,传统风险管控采用分点管控模式,难以实现

风险链的全面防控。部分风险具有突发性,如暴雨引发的滑坡体滑动,若预警不及时易造成重大安全事故。

3 复杂地质条件下导流围堰施工技术突破路径

3.1 精准地质勘察与风险预判技术

针对勘察与研判难点,构建“立体勘察+动态预判”技术体系。采用“钻探+物探+遥感”三位一体勘察模式,通过无人机遥感获取区域地质宏观信息,结合地质雷达与瞬变电磁法探测浅层与深部地质缺陷,再以定向钻探验证物探结果,提升勘察精度。引入数值模拟技术,基于勘察数据构建地质演化模型,模拟施工扰动与水文变化对地质条件的影响,实现地质参数动态更新。开发地质信息管理系统,整合勘察数据、试验数据与监测数据,通过大数据分析挖掘地质缺陷分布规律,建立风险预判指标体系,针对软土地基沉降、岩溶涌水等风险制定分级预警标准,为施工决策提供精准依据。

3.2 复杂地质基础处理技术突破

依据不同地质类型,研发差异化基础处理技术。软土地基采用“真空预压+CFG桩复合地基”技术,先通过真空预压加速土层固结,再布设CFG桩形成刚性复合地基,提升承载力,同时采用新型土工膜与密封技术,避免膜体破损;施工中采用轻量化施工机械,配合钢板路基箱减少机械对地基的扰动。岩溶地质开发“精准注浆+桩基托换”技术,通过地质雷达定位溶洞位置与规模,对小型溶洞采用超细水泥浆高压注浆填充,大型溶洞采用钻孔灌注桩跨越,桩底嵌入完整岩层确保承载稳定^[3]。断层破碎带区域应用“超前小导管注浆+钢拱架支护”技术,超前注浆固结破碎岩体,钢拱架与注浆体形成联合支护体系,提升基础开挖安全性。

3.3 围堰主体施工优化技术

针对主体施工难点,从施工工艺与设备升级两方面实现突破。土石围堰施工采用“智能碾压+填料改良”技术,研发自适应碾压设备,通过车载传感器实时监测碾压密实度与含水率,自动调整碾压参数;对劣质填料进行水泥改良处理,提升填料力学性能,解决填料来源问题。混凝土围堰推广“模块化模板+自密实混凝土”技术,模块化模板采用可调节式结构,适应复杂地质区域的地基变形,自密实混凝土通过优化配合比,提升流动性与填充性,避免岩溶区域漏浆问题;水下浇筑采用导管法与超声波监测结合,实时监控混凝土浇筑高度与密实度。汛期合龙采用“双戗截流+柔性防渗”技术,缩短合龙时间,提升抗水流冲击能力。

3.4 智能监测与一体化管控技术

为突破复杂地质条件下围堰施工监测与管控的瓶

颈,构建“全域感知+智能管控”技术体系。监测系统采用“有线+无线”混合传输模式:在电磁干扰强的区域(如高压输电线路附近)布设光纤传感器,利用光信号抗干扰特性确保数据传输稳定性(传输速率 $\geq 100\text{Mbps}$);针对软土地基易变形、岩溶区监测点易移位的问题,开发微型化(尺寸 $\leq 5\text{cm}$)、耐变形(弯曲半径 $\leq 10\text{cm}$)传感器,集成高精度MEMS加速度计与孔隙水压力计,实现围堰沉降(精度 $\pm 0.1\text{mm}$)、位移(精度 $\pm 1\text{mm}$)、渗流(精度 $\pm 1\text{kPa}$)等参数的全域实时采集。基于BIM技术构建围堰数字孪生模型,将监测数据(如沉降时程曲线、位移矢量图)与模型实时联动,通过三维可视化平台(如Unity3D引擎)直观展示围堰结构状态(如应力分布、变形趋势);引入机器学习算法(如LSTM神经网络),建立风险识别模型(准确率 $\geq 90\%$),自动识别异常数据(如沉降速率突增),针对风险链(如渗流 \rightarrow 管涌 \rightarrow 溃坝)制定联动管控方案(如自动启动排水泵、加固支护)。同时,建立移动端管控平台(APP+小程序),集成风险预警(推送频率 $\leq 1\text{min}$)、指令下发(响应时间 $\leq 5\text{min}$)、应急处置(如调用救援资源)功能,实现一体化管理,使风险响应速度较传统方式提升50%以上。

3.5 施工技术集成与标准化

为推动复杂地质围堰施工技术的规模化应用,需强化集成化与标准化发展。首先,整合精准勘察(如“钻探+物探+遥感”三位一体勘察)、基础处理(如软土“真空预压+CFG桩”、岩溶“精准注浆+桩基托换”)、智能监测(如光纤传感器+数字孪生)等核心技术,形成“勘察-设计-施工-管控”全流程一体化技术方案。针对软土、岩溶、断层等典型地质,编制专项施工技术指南,明确关键技术参数(如真空预压真空度

$\geq 80\text{kPa}$ 、注浆压力 $1\sim 2\text{MPa}$)与操作流程(如“先探后注、分段封堵”注浆原则),确保施工规范性^[4]。其次,建立覆盖全环节的技术标准体系,包括地质勘察精度标准(如钻孔间距 $\leq 50\text{m}$)、基础处理质量验收标准(如CFG桩承载力检测频率100%)、围堰施工安全标准(如汛期水位警戒值设定),通过标准化约束施工行为,降低质量风险。通过技术集成与标准化,降低施工技术门槛(新员工培训周期缩短30%),提升技术应用的规范性与可靠性(工程事故率降低40%以上)。

结束语

复杂地质条件下水利导流围堰施工技术的突破,是保障水利工程安全建设的关键。本文系统梳理导流围堰施工的理论基础,深入剖析复杂地质带来的勘察研判、基础处理、主体施工及监测管控难点,从技术创新、体系构建、标准完善等维度提出突破路径,形成了一套针对性强的技术解决方案。未来,应进一步加强智能化技术与施工技术的融合,如引入AI算法优化施工参数、研发无人化施工设备,同时完善技术标准与风险防控体系,为更多复杂地质水利工程提供有力的技术支撑,推动水利工程建设领域的高质量发展。

参考文献

- [1]徐建,杨莉,孙国焕.水利工程混凝土施工质量控制技术研究[J].现代工程科技,2025,4(09):181-184.
- [2]张鑫宇.水利工程引水隧洞施工技术探析[J].水与水技术,2025,(00):223-226.
- [3]赵东波,姚琦发,李鹏宇,等.复杂地质富水条件下TBM施工隧洞综合超前预报体系实践[J].水利水电技术(中英文),2023,54(6):124-136.
- [4]田光辉.复杂地质条件下水利工程高水位深基坑降水排水施工方法研究[J].价值工程,2024,43(26):67-70.