

复杂地质条件下水利水电工程基础处理方案优化探讨

郭留术 王玉潇

中国水利水电第十一工程有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6340

[摘要] 水利水电工程是国家能源与水资源调配的核心基础设施,然而复杂地质条件给工程基础处理带来严峻挑战。本文围绕复杂地质条件下水利水电工程基础处理方案优化展开研究,首先剖析软土、岩溶、膨胀土、湿陷性黄土等典型复杂地质条件的分类及特点,揭示其对工程稳定性、渗流安全与耐久性的影响;继而系统阐述换填法、挤土法、灌浆加固等常见基础处理方法的技术原理与适用场景;最后从地质勘察数据整合、多技术组合应用、定制化设计、施工技术管理优化以及技术经济效益平衡五个维度,深入探讨基础处理方案的优化策略,并结合西南水电站、东北调水工程等实际案例验证其有效性。

[关键词] 复杂地质条件; 水利水电工程; 基础处理; 方案优化; 适用性分析

中图分类号: TV 文献标识码: A

Discussion on Optimization of foundation treatment scheme for water conservancy and hydropower projects under complex geological conditions

Liushu Guo Yuxiao Wang

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd

[Abstract] Water Conservancy and hydropower projects are the core infrastructure for the allocation of national energy and water resources. However, the complex geological conditions bring severe challenges to the engineering foundation treatment. Firstly, the classification and characteristics of typical complex geological conditions, such as soft soil, karst, expansive soil and collapsible loess, are analyzed to reveal their impact on engineering stability, seepage safety and durability; Then the technical principles and application scenarios of common foundation treatment methods such as replacement method, soil compaction method and grouting reinforcement are systematically described; Finally, from the five dimensions of geological survey data integration, multi technology combination application, customized design, construction technology management optimization and technical and economic benefit balance, the optimization strategy of foundation treatment scheme is discussed in depth, and its effectiveness is verified by combining with the actual cases of Southwest hydropower station and northeast water transfer project.

[Key words] complex geological conditions; Water conservancy and hydropower projects; Foundation treatment; Scheme optimization; Applicability analysis

引言

水利水电工程作为国家能源与水资源调配的关键基础设施对经济社会发展意义重大,然而复杂地质条件常给工程基础处理带来诸多难题,直接影响工程的安全性、稳定性与耐久性。深入探讨复杂地质条件下基础处理方案的优化,不仅能为工程建设提供技术支撑也对推动行业可持续发展具有重要现实意义。

1 复杂地质条件对水利水电工程基础处理的影响

1.1 地质条件分类及特点

复杂地质条件可依据成因、物质组成及力学特性分为软土、

岩溶、膨胀土、湿陷性黄土等典型类型。软土地基以高含水量、高压缩性和低强度为特征,其孔隙比常大于1.0压缩模量低于4MPa,在自重应力或外荷载作用下易产生蠕变变形;岩溶地基受碳酸盐岩长期溶蚀作用影响,形成复杂地下空洞网络岩体完整性指数普遍低于0.3,存在显著的强度离散性;膨胀土地基矿物成分中蒙脱石含量超过15%时,其自由膨胀率可达40%-90%,遇水膨胀力最高可达200-500kPa;湿陷性黄土则呈现独特的架空孔隙结构,当饱和度超过23%后湿陷系数大于0.015,自重湿陷性黄土在自重应力下浸水可产生5-15cm的沉降。

1.2 复杂地质条件对工程稳定性与安全性的影响

复杂地质条件从力学稳定性、渗流安全性和耐久性三个维度威胁工程安全，在力学稳定性方面软土地基的抗剪强度指标（粘聚力 $c < 10 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi < 15^\circ$ ）难以满足水工结构承载要求，易诱发整体滑动失稳；岩溶地基的空洞削弱效应使地基刚度分布不均，导致基础差异沉降超过允许值（ $> 5 \text{ cm}$ ）。渗流安全层面岩溶裂隙的渗透系数可达 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ ，较完整岩体高3~5个数量级，易形成集中渗漏通道；膨胀土遇水软化后渗透系数激增，可引发基础周边水土流失。耐久性方面湿陷性黄土浸水后的结构性破坏使地基承载力骤降60%~80%，膨胀土的胀缩循环则导致基础与土体间产生持续的摩阻力变化加速基础结构的疲劳损伤。

2 常见基础处理方法及其适用性分析

2.1 地基加固技术

地基加固技术通过物理或化学手段改善土体力学性能提升地基承载能力与稳定性，换填法通过置换软弱土层，以级配砂石、灰土等高强度材料构建新持力层，适用于处理5米以内浅层软土、湿陷性黄土及膨胀土地基。强夯法利用重锤高势能产生的冲击荷载，使土体颗粒重新排列孔隙水压力消散后实现密实加固，对砂土、粉土及非饱和黏性土处理深度可达10米以上，能显著提高地基压缩模量。振冲法根据土体性质差异分为挤密与置换两类：在砂土中振动使颗粒相互错动达到密实；在黏性土中，以碎石桩体置换软弱土形成复合地基，有效改善土体抗剪强度与变形特性。

2.2 挤土法与沉井法

挤土法通过预制桩或灌注桩的贯入过程挤压土体提升地基承载力，静压桩依靠机械静力压入，施工低噪、无振动，但需关注挤土效应导致的土体隆起与周边位移；锤击桩借助冲击力快速成桩适用于硬土层，但噪声污染与桩身完整性控制是技术要点。两类方法均通过桩土相互作用，将上部荷载传递至深层稳定土层适用于多种地基条件。沉井法采用钢筋混凝土井筒结构，通过井内取土形成重力下沉最终作为永久基础或地下构筑物。该方法在软土、高水位复杂地质中优势显著。

2.3 灌浆加固技术

灌浆加固技术通过压力灌注将浆液注入土体孔隙、裂隙，实现物理填充与化学胶结双重作用。水泥灌浆以硅酸盐水泥为基料适用于岩溶地基、破碎岩体的防渗加固，通过填充空洞与裂隙提升岩体完整性降低渗透系数达3~5个数量级。化学灌浆采用环氧树脂、聚氨酯等材料，可渗入微米级裂缝在细微裂隙处理与混凝土结构补强中发挥关键作用。高压喷射注浆利用高压射流切割土体并混合浆液，形成桩体或连续墙适用于软土地基加固，通过调整喷射参数可控制加固体强度与范围。不同灌浆工艺通过精准调控浆液扩散半径、凝结时间与压力参数，实现地基抗渗性与承载能力的协同提升。

2.4 软基处置技术

针对高压缩性、低强度的软土地基，软基处置技术以排水固结与土体增强来实现工程性能的优化。其中排水固结法借助砂井或塑料排水板构建竖向排水通道，结合堆载预压加速孔隙水

排出，让土体有效应力增加、强度得以提升。而土工合成材料加筋法凭借土工格栅、土工织物与土体的摩擦咬合作用，对土体侧向变形予以约束增强整体稳定性。土工格栅的高抗拉强度可承担部分荷载，土工织物的过滤排水功能可防止土颗粒流失，该方法适用于对变形敏感的水利结构基础，其施工便捷性可显著缩短工期但需综合考虑材料耐久性与经济性。

2.5 其他基础处理方法

深层搅拌法利用固化剂与软土强制搅拌形成水泥土桩体，通过水化反应生成胶凝物质显著提升土体强度。该方法适用于淤泥、淤泥质土等软基处理，形成的复合地基承载力可提升1~2倍尤其适用于对环境扰动要求严格的区域。强夯置换法则在夯击过程中同步填入碎石等骨料，形成复合地基对饱和软土处理效果显著。此外高压旋喷注浆与树根桩技术常用于既有建筑地基加固，前者通过高压喷射形成桩体，后者采用小直径灌注桩群提高地基承载力，这些技术通过精细化施工控制满足复杂工况下的地基处理需求。

表一 常见基础处理方法及适用范围

方法	技术要点	适用范围
地基加固	换填、强夯、振冲	软土、膨胀土、湿陷性黄土
挤土与沉井	静压桩、锤击桩	多种地基，软土、高水位
灌浆加固	水泥灌浆、化学灌浆	岩溶地基、软土地基
软基处治	排水固结、加筋	高压缩软土地基
其他方法	深层搅拌、强夯、旋喷	淤泥、旧建筑地基

3 复杂地质条件下水利水电工程基础处理方案优化策略

3.1 综合分析地质勘察与现场测试数据

以地质勘察与现场测试数据作为制定基础处理方案的核心依据，其准确性直接关乎工程设计的科学性与可靠性。在勘察阶段要综合采用遥感解译、地质测绘、钻探取样、地球物理勘探等多手段协同开展作业的情况，其中遥感技术借助卫星影像和航空照片对区域地质构造、地层分布予以宏观识别，地质测绘依据实地观测精确绘制地质剖面图，钻探技术通过岩芯获取直观地层信息来测定土体物理力学参数，地球物理勘探可快速查明隐伏构造与地下空洞分布。在现场测试方面，标准贯入试验、静力触探、十字板剪切等原位测试技术能够获取地基土在天然状态下的强度、压缩性等参数。到数据处理阶段需运用统计学方法评估参数离散性并结合数值模拟预测地基变形与稳定性，进而形成多维度的地质分析成果。

3.2 多种处理方法的组合应用

在复杂地质条件下单一处理技术往往难以满足工程需求，需通过技术组合来发挥协同效应，其组合方案设计要遵循“因地制宜、优势互补”原则，针对不同地质问题选取匹配技术。

东北某跨流域调水工程的渠道穿越多种地质区域，其中5公里段落同时存在季节性冻土、膨胀土和粉砂层。设计阶段经地

质勘察确定冻土最大冻结深度1.8米,膨胀土自由膨胀率达65%粉砂层标贯击数仅8击。为此制定组合处理方案:针对冻土区采用聚氨酯保温板包裹渠道侧壁,并换填50cm厚砂砾石层;膨胀土段铺设三层双向土工格栅,格栅间距40cm形成加筋土复合结构;粉砂层则采用振冲碎石桩处理,桩径80cm、间距1.5m呈正三角形布置。施工时先完成振冲碎石桩,再进行膨胀土换填与格栅铺设最后实施冻土防护。监测数据显示,运行三年后渠道最大沉降量仅12mm,未出现因冻胀或膨胀变形导致的结构破坏验证了组合方案的有效性。

3.3 依据工程特点和环境条件进行定制化设计

工程类型、规模及环境条件是基础处理方案定制化设计的核心要素,大坝工程因承受高水头压力,需着重提升基础抗滑稳定性与防渗性能;水闸工程则需兼顾抗冲刷与地基不均匀沉降控制;渠道工程对变形控制要求严格需确保输水功能长期稳定。环境因素方面地震区需强化基础抗震构造,寒冷地区需防治冻胀破坏,水域环境需考虑水流冲刷与水位波动影响。

西北某高土石坝工程坝高138米坝基穿越断层破碎带,且位于Ⅷ度地震区。设计团队采用“三维有限元动力分析+地质力学模型试验”的方法,针对断层带提出“混凝土置换塞+预应力锚索”加固方案置换深度达12米,锚索间距3m、长度45m设计锚固力3000kN。在抗震设计中引入隔震层技术,在坝体与基础间设置铅芯橡胶支座,通过数值模拟验证可降低地震响应30%以上。施工过程中采用微震监测系统实时追踪断层带应力变化,动态调整锚索张拉顺序与预紧力。工程运行五年后坝基最大位移仅8mm,地震工况下结构响应远低于设计限值充分体现定制化设计的有效性。

3.4 施工技术与管理的优化

在复杂地质条件下,基础处理要依托先进施工技术以及科学管理体系来保障实施效果,在施工技术层面新型设备与工艺的应用能够显著提升施工效率与质量;在施工管理方面,则需构建“进度-质量-安全”三维管控体系,运用BIM技术优化施工组织,采用物联网传感器实现关键工序实时监测,还通过风险矩阵对高边坡、深基坑等危险源分级管控,以确保工程高效、安全推进。

南方某深水码头工程基础施工需穿越15米厚淤泥层与强风化岩层,传统沉桩工艺受淤泥层扰动影响,桩身垂直度难以控制且岩石层成孔效率低。工程团队引入液压步履式全回转钻机,该设备通过360°全断面切削在淤泥层施工速度达1.2m/h,进入

岩层后切换旋挖模式成孔效率较传统工艺提升40%。施工管理中运用BIM-4D技术模拟施工流程,优化桩机行走路线与混凝土浇筑顺序减少设备碰撞风险;在灌注桩施工中部署智能监测系统,实时采集孔深、泥浆比重、混凝土灌注量等参数,自动生成质量追溯报告。最终工程基础施工工期缩短22%,灌注桩Ⅰ类桩比例达98%创同类工程质量新高。

3.5 基础处理技术与经济效益的平衡

基础处理方案经济性优化需统筹初始投资、施工成本及全生命周期费用,技术选择阶段应经成本-效益分析对比不同方案直接成本(材料、设备、人工)与间接成本(工期延误、维护费用),施工中靠精细化管理降低资源损耗比如采用数字化物料管理系统减少材料浪费,全生命周期视角下要考虑基础耐久性对后期维护成本影响,并优先选择可靠性高、维护需求低技术方案,以实现技术可行性与经济合理性最优解。

华北某中型水库除险加固工程原大坝基础存在渗漏通道与局部软弱夹层,方案比选阶段对“高压旋喷桩防渗墙”与“混凝土防渗墙”两种方案进行经济分析。经全生命周期成本计算,混凝土防渗墙方案在40年运营期内总费用较旋喷桩方案低12%。施工过程中采用“泥浆不落地”循环系统减少废弃物处理成本,运用无人机测绘优化土石方开挖量,节约成本约150万元。工程竣工后渗漏量由处理前的25L/s降至0.3L/s,实现了技术可靠性与经济效益的双重目标。

4 结语

在分析地质条件影响、梳理常见处理方法基础上提出优化策略且结合实例加以验证。研究表明综合运用多种技术手段、定制化设计及科学管理的方式乃是应对复杂地质的有效途径。未来随着技术创新,基础处理朝着智能化、绿色化方向发展进而持续为水利水电工程安全建设与运行提供支撑。

[参考文献]

- [1]李琪,何华灿,张绍槐.复杂地质条件下复杂结构井的钻井优化方案研究[J].石油学报,2004,25(4):4.
- [2]杨秀权,平正杰.复杂地质条件下长大隧道施工安全管理对策探讨[J].隧道建设,2009(S2):6.
- [3]周云.复杂不良地质条件下超长隧道施工关键技术 with 通风方案优化[J].建筑机械,2024(9):40-45.

作者简介:

郭留木(1979--),男,汉族,河北石家庄人,本科,高级工程师,研究方向:水利水电施工。