

地基处理技术在水利水电工程中的应用研究

董 莹, 孙莹莹

(黄河河口管理局垦利黄河水务局, 山东 东营 257091)

摘 要 为解决水利水电工程中软弱地基承载力不足、沉降变形大及渗透稳定性差等问题, 本文围绕地基处理技术在该类工程中的实际应用展开系统研究, 分析不同类型地基处理方法的技术原理、适用条件及工程效果。通过归纳加固类、排水类、置换类及复合地基等主流处理技术, 提出针对性设计思路与质量控制要点, 强调多因素协同优化在提升处理效率与工程安全性方面的重要作用, 以期对水利水电工程的勘察设计、施工实施及后期监测管理提供参考。

关键词 地基处理技术; 水利水电工程; 加固类处理技术; 排水类处理技术; 置换类处理技术

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.018

0 引言

水利水电工程普遍处于地质条件复杂、环境约束严苛的区域, 地基稳定性直接影响主体结构的安全运行。随着工程规模扩大与荷载标准提升, 传统地基难以满足沉降控制与承载性能的双重要求。为保障工程性能及服役寿命, 需从工程实际出发, 深入探讨各类地基处理技术的适应性、工程性能及设计优化问题, 推动处理体系的系统化与高效化。

1 水利水电工程对地基处理的特殊需求分析

水利水电工程作为集防洪、发电、灌溉等功能于一体的重大基础设施, 其运行安全高度依赖地基的稳定性与承载性能。由于其构筑物具有结构体量大、荷载集中、工况复杂等显著特点, 地基处理不仅需满足高承载力和低变形的基本要求, 还必须兼顾渗透稳定性、长期变形控制及工程整体性协调等多重性能指标。尤其在水压力长期作用下, 地基土体易发生颗粒迁移、渗透破坏及劣化沉降, 进而诱发管涌、渗漏和整体失稳等灾害, 因而要求地基在力学强度、抗渗能力及微观结构稳定性方面显著提升。与此同时, 由于工程常处于高水位、软弱地基、复杂地质构造等特殊环境中, 需根据水文地质参数、地层分布特征及荷载作用方式, 精准选择地基处理方案, 确保土体物理力学性质得到系统改善^[1]。

2 地基处理技术分类及适用条件分析

2.1 加固类地基处理技术

加固类地基处理技术旨在通过改善土体结构、提高其力学性能和变形模量, 以满足工程对承载力和稳定性的要求。该类技术主要包括高压喷射灌浆、劈裂

灌浆、深层搅拌、注浆固结等手段, 适用于存在承载力不足、结构松散或存在软弱夹层的地基土层。高压喷射灌浆通过高速射流将水泥浆液喷入地基土中, 在高能流体剪切与搅拌作用下形成强度较高的固结体, 可将原状软土的抗压强度从原本的 50 ~ 100 kPa 提升至 300 ~ 500 kPa, 显著增强其承载能力和整体稳定性。劈裂灌浆适用于裂隙岩体与砂卵石地基, 通过控制浆液扩散路径和注浆压力 (一般控制在 0.5 ~ 1.2 MPa), 实现定向加固与填隙补强, 显著提高地基的均匀性与抗渗性能。深层搅拌则适用于高压缩性土层, 其通过机械搅拌装置将水泥类固化剂均匀混合入土体, 形成具有一定强度与刚度的复合土柱, 常见单桩抗压强度可达 12 MPa, 变形模量提升数倍。

2.2 排水类地基处理技术

排水类地基处理技术主要通过加速地基土体中孔隙水的排出过程, 促使土体固结沉降并增强其有效应力, 从而提升整体稳定性与抗剪强度, 适用于饱和软土、高含水率粉质土及淤泥质土层。典型方法包括真空预压、堆载预压联合处理、塑料排水板和砂井布设等。真空预压技术通过封闭膜系统和抽真空装置, 在土体内部建立 -80 ~ -90 kPa 的负压场, 使孔隙水产生定向流动, 配合预压荷载作用可在 90 ~ 180 天内将地基沉降度控制在设计值内, 同时将初始孔隙比由 0.9 降低至 0.6 以下。塑料排水板布设时通常间距控制在 1.0 ~ 1.5 m 之间, 深度依据压缩层厚度确定, 一般不超过 20 m, 通过有效缩短排水路径, 显著提升软土层的固结速率与均匀沉降控制能力。砂井处理适用于渗透性较强的土层, 可构成排水通道, 配合表层堆载实现快速沉降, 常见固结系数提升 1.5 ~ 2 倍^[2]。

2.3 置换类地基处理技术

置换类地基处理技术通过将原位承载力不足或压缩性过大的土体部分或全部移除,填入强度更高、压缩性更低的材料,从而构建力学性能优越的承载层。该类技术适用于深厚软土、高有机质土及流塑状淤泥层,常用方法包括强夯置换、砂石桩挤密、碎石垫层与灰土挤淤等方式。强夯置换通常采用 6~25 t 夯锤,夯击能量控制在 2 000~6 000 kN·m,能够将原位土体挤压至侧方,同时形成嵌入性良好的置换体,在夯击深度范围内显著提高地基承载力,压缩模量可由原始的 36 MPa 提升至 20~30 MPa。砂石桩法通过在软土中沉设成孔设备,将砂砾料填入并夯实形成柱状结构,单桩承载力常达 250~400 kN,具备良好的排水与加固双重作用,适于承受中等荷载并控制沉降速率。碎石垫层技术主要用于浅层地基,通过人工或机械铺设碎石材料构建刚性承载平台,有效降低地基整体沉降量。

2.4 复合地基技术

复合地基技术通过在天然软弱地基中构建桩—土共同承担荷载的复合体系,以实现承载力增强、沉降控制及变形协调等综合加固目标。该技术适用于软土层厚度较大、荷载水平较高且沉降敏感性强的工程区域,常用形式包括 CFG 桩复合地基、水泥土搅拌桩复合加固、振冲碎石桩复合地基等。CFG 桩(Cement Fly-ash Gravel)由水泥掺合料和碎石混合形成,桩径通常为 400~800 mm,单桩承载力可达 800~1 200 kN,复合地基的整体变形模量通常提升至 25~40 MPa,有效控制不均匀沉降并提升地基稳定性。水泥土搅拌桩复合技术适用于高含水率土层,通过深层搅拌机械将水泥类固化剂混入原状土体中形成柱状固结体,常规 28 天无侧限抗压强度达到 1.5~3.0 MPa,具备良好的抗渗与抗剪性能。振冲碎石桩适合渗透性中等至高的砂质地基,其桩体填料粒径控制在 20~40 mm,布桩间距通常为 1.5~2.5 m,可形成排水、加密与承载复合作用,显著提升基础整体刚度^[3]。

3 地基处理设计理论与关键参数分析

3.1 地基处理设计的基本原则

地基处理设计需在确保结构安全、控制沉降变形、满足耐久性要求的前提下,实现处理工艺的合理性与经济性的最优平衡。设计过程中应充分遵循“因地制宜、协同工作、结构匹配、系统优化”四项核心原则。在不同地质条件与荷载体系下,应根据地基土的工程性质、水文地质环境及结构对变形和承载性能的敏感程度,选择具备适应性与针对性的处理技术。荷载传递路径必须保持清晰,地基与上部结构之间的接触界

面应具备稳定的应力协调能力,确保在工况变化及施工后期沉降阶段内地基系统性能不发生突变。对于软弱地基,需重点考虑其应力—应变非线性特征和固结延迟行为,在设计中引入时间效应修正模型,以控制次生沉降对结构的不利影响。应采用设计—施工—监测相结合的闭环机制,保证处理效果动态可控。施工扰动影响、结构附加荷载、地下水位变化等环境因子也必须纳入设计边界条件。

3.2 关键设计参数与评价指标

地基处理设计的科学性依赖于对关键参数的准确选取与合理分析,主要涉及地基承载力特征值、压缩模量、变形模量、渗透系数、固结系数、桩土应力比等控制指标。在承载力设计中,应根据标准贯入试验(N 值)、静力触探(qc 值)或室内三轴剪切试验结果,结合岩土本构模型,计算地基土的极限抗剪强度与设计特征值。压缩模量通常通过压板载荷试验确定,其数值范围依土层类型而异,软粘土常为 15 MPa,粉质黏土为 5~15 MPa,砂类地基可达 30 MPa 以上,是评估沉降量和变形速率的重要依据。渗透系数决定了软土中超孔隙水压力的消散速度,一般需通过固结试验获得,饱和软土渗透系数多为 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ m/s;固结系数则用于预测土体压缩沉降的发展过程,常采用 Terzaghi 一维固结理论进行估算。在复合地基设计中,桩土应力比是衡量荷载分配效率的关键指标,合理范围一般控制在 2.5~4.0 之间,确保桩体承载与土体协同变形^[4]。常见地基类型的关键设计参数与典型取值范围如表 1 所示。

4 地基处理施工技术与质量控制

4.1 施工工艺流程与设备配置

地基处理施工的技术路径需依据设计要求、地质条件及工程规模进行系统组织,确保处理效果稳定、结构性能达标。典型工艺流程包括场地清表与放样、地基预处理、主体施工、验收与整平四个阶段。各类处理技术均需配备与其匹配的高精度施工设备,以确保工艺参数控制的连续性与精度。以深层搅拌法为例,施工设备多采用双轴或多轴搅拌桩机,钻进深度控制精度需小于 ± 0.1 m,搅拌速度保持在 30~60 rpm,注浆速率常控制在 30~50 L/min,固化剂掺量需根据土层性质调配在 15%~25%。在高压喷射灌浆施工中,需使用三重管喷射系统,注浆压力应稳定维持在 25~30 MPa,旋转速度约为 10~20 rpm,提升速度不得高于 20 cm/min,以确保固结体成型完整。排水板施工需配置液压插板机,插入深度误差应控制在 ± 5 cm 以内,布设间距需严格依设计图控制在 ± 10 cm 范围内。施

工过程中必须同步进行设备参数记录与动态调整,确保所有工艺步骤按规范执行^[5]。

表1 常见地基类型的关键设计参数与典型取值范围

参数名称	常见地基类型	典型取值范围	测试方法 / 依据
承载力特征值	软粘土	50 ~ 120 kPa	室内三轴试验 / 标贯试验
	粉质黏土	120 ~ 200 kPa	
	中密砂土	180 ~ 300 kPa	
压缩模量 (Es)	软粘土	1 ~ 5 MPa	压板载荷试验
	粉质黏土	5 ~ 15 MPa	
	中密砂土	20 ~ 40 MPa	
渗透系数 (k)	饱和软土	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-9}$ m/s	固结试验
固结系数 (Cv)	饱和粘性土	0.1 ~ 5 m ² /年	固结分析
桩土应力比 (η)	复合地基 (CFG 桩)	2.5 ~ 4.0	数值分析 / 静载试验反演
变形模量 (E)	砂类地基	25 ~ 50 MPa	地基变形观测 / 回弹模量试验

4.2 质量控制要点与监测技术

地基处理的质量控制贯穿施工全过程,需依托标准化流程、参数化指标与多源监测手段协同实施,确保各项工程指标满足设计要求。关键控制环节包括处理深度、加固范围、材料配比、工艺参数一致性及成品验收标准的落实。以搅拌桩为例,入土深度必须达到设计值 ± 0.2 m以内,桩体直径允许偏差不大于 $\pm 5\%$,桩体无侧限抗压强度28天龄期应达到设计强度值的95%以上。在灌浆类处理技术中,应严格控制注浆压力、流量与浆液稠度,灌浆过程采用分段注入法,每段注浆体积误差不得超过 $\pm 10\%$,浆液回流率需低于30%,以防止因过量注浆引发土体扰动或上浮现象。质量监测主要依靠原位检测与物探技术,如动探测试、静力触探、钻芯取样、超声波检测等;其中,动探标准贯入次数应与加固前对比提升50%以上。成桩检测中,采用单桩静载荷试验或平板载荷试验评价承载力及变形模量,数据采集精度需满足0.01 mm位移精度。监测结果应及时反馈至施工控制系统,通过闭环调整施工参数,实现全过程质量可控、处理效果可追溯的技术闭环体系。

4.3 环境因素对施工的干扰与对策

地基处理施工过程中常受多种环境因素干扰,包括地下水位变动、降雨条件、地温波动、地层扰动与周边结构敏感性等,这些因素对施工质量、工艺参数控制及设备运行稳定性构成显著挑战。地下水位变化会导致孔隙水压力动态上升,影响灌浆扩散路径与固结效果,需在施工前进行地下水位监测并设置导排系统以降低水位至安全标高以下,常规控制深度为施工底面以下0.5 ~ 1.0 m。持续降雨可能引发场地软化与设备沉陷,应配置临时排水沟、防渗膜与碎石垫层,确保场地稳定性。地层扰动对浅层置换与挤密施工影响显著,施工时应采用逐段跳打、等距交错布设方式,避免集中扰动形成软弱夹层或扰动区。冬季施工时,地温降低会影响固化剂反应效率与桩体强度增长,应提高水泥掺量10% ~ 15%,并选用低温型添加剂确保水化反应顺利进行。邻近结构施工应采用低噪声、低振动设备,并设置隔振沟或监测装置,控制振速不超过2 cm/s,以防止诱发邻近建构物裂损。针对各类环境干扰因素,应制定专项应急技术方案与动态响应机制,确保施工过程稳定性与处理效果一致性^[6]。

5 结束语

地基处理技术在水利水电工程建设中发挥着不可替代的基础支撑作用,其效果直接关系到工程整体的安全性、耐久性与运行稳定性。面对复杂的地质条件与高标准的结构要求,需科学选择并合理组合各类地基处理方法,以实现承载力提升、渗透控制与沉降协调等目标。持续优化施工工艺与提升设计精度,是推动水利水电工程高质量发展的关键路径。

参考文献:

- [1] 刘思源. 地基处理技术在水利水电工程中的应用探讨[J]. 水上安全, 2025(02):151-153.
- [2] 陈胜森. 防渗处理施工技术在水利水电工程中的应用[J]. 新农村, 2024(04):40-42.
- [3] 罗晓群. 不良地基处理施工技术在水利水电工程中的应用[J]. 四川建材, 2021,47(04):124-125.
- [4] 朱宗洲. 水利水电工程施工中不良地基处理技术分析[J]. 建材发展导向, 2024,22(23):114-116.
- [5] 卢志斌. 水利水电工程施工中不良地基处理技术分析[J]. 黑龙江水利科技, 2023,51(10):80-82.
- [6] 郭海龙. 浅析水利水电工程施工中有关不良地基处理技术[J]. 中华建设, 2023(09):178-180.