

# 水闸防渗加固工程中的振冲碎石桩技术应用研究

叶劲然 董 婕

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430000

**摘要：**水闸作为水利工程的关键设施，其安全性与耐久性直接关系区域防洪、灌溉及水资源调配功能。随着工程运行年限增长，地基渗漏、土体液化等问题逐渐显现，威胁水闸结构稳定。传统加固方法受限于成本、工期或环境适应性，亟需探索更高效可靠的技术手段。振冲碎石桩技术通过改良地基土体结构与密实度，兼具加固与防渗双重作用，近年来在水闸工程中应用较多。本文聚焦该技术在水闸防渗加固中的应用场景与实施策略，希望为工程实践提供科学指导。

**关键词：**振冲碎石桩技术；水闸工程；防渗加固；地基处理

水利工程中，水闸地基的渗透稳定性与整体结构安全密切相关。在长期水力荷载及环境因素影响下，软弱土层易发生渗透变形或地基沉降，导致闸室位移、止水结构失效等连锁问题。尤其在粉细砂、松散填土等不良地质条件下，常规灌浆或混凝土截渗墙等工艺常因扰动大、成本高或工期受限难以全面推广。振冲碎石桩技术通过振动成孔与级配碎石置换，形成兼具排水通道与抗渗屏障的复合地基体系，其柔性结构特征可协调地基变形，同时降低低渗透破坏风险。

## 1 振冲碎石桩技术概述

振冲碎石桩技术是一种通过振动冲击成孔并回填碎石形成桩体的复合地基处理工艺。核心原理是利用振冲设备的高频振动与水平冲击力穿透软弱土层，在成孔过程中通过挤密周围土体改善土质结构，随后向孔内分层填入级配碎石，经反复振捣密实形成连续桩体。桩体与周边挤密土体共同构成复合地基，能够提高地基承载力，又通过碎石桩的排水效应和桩间土密实化降低渗透系数，增强抗渗能力<sup>[1]</sup>。

## 2 水闸防渗加固工程需求分析

### 2.1 地基渗透稳定性控制需求

水闸地基长期承受水力荷载作用，渗透压力易导致土体内部渗流通道发育，引发管涌或流土等渗透破坏现象。尤其在粉细砂、松散填土地层中，土体抗渗能力弱，渗流路径复杂，直接威胁水闸结构安全。防渗加固需通过改良地基土体结构，降低渗透系数并阻断渗流路径，从而提升地基整体抗渗稳定性。振冲碎石桩技术通过挤密桩间土与碎石桩体的排水效应，可有效协调渗流场分布，减少渗透破坏风险，满足水闸地基渗透控制的核心需求。

### 2.2 地基承载力与变形协调需求

水闸主体结构自重及外部荷载易引起地基不均匀沉降，导致闸室倾斜或止水结构失效。软弱地基承载力不足及压缩性偏高是主要诱因。防渗加固需同步提升地基承载力并改善土体压缩性，确保荷载均匀传递与变形协调。振冲碎石桩形成的复合地基通过桩体分担荷载、桩间土挤密效应，可显著提高地基刚度与承载力，同时碎石桩的柔性特征可适应地基变形，减少差异沉降对上部结构的影响，满足水闸对地基稳定性与变形控制的综合需求<sup>[2]</sup>。

### 2.3 环境适应性与施工可行性需求

水闸工程多位于河流、湖泊等复杂水文地质环境中，加固施工需兼顾技术可行性与环境友好性。传统截渗墙或灌浆工艺可能因施工扰动大、材料成本高或工期受限难以实施。振冲碎石桩技术具有施工灵活、材料易获取、对周边环境影响小等特点，尤其适用于狭窄场地或邻近既有结构的水闸加固场景。其工艺通过原位土体改良，可减少开挖与弃土量，降低生态干扰，同时通过机械化施工提升效率，满足复杂环境下水闸加固的工程实施需求。

## 3 水闸防渗加固工程中的振冲碎石桩技术应用策略

### 3.1 基于地质条件的桩体参数适应性设计

振冲碎石桩技术的应用效果直接取决于对水闸地基地质条件的精准把握。工程实施前需系统开展地基土层的详细勘察，重点分析土层渗透性、软弱夹层分布、地下水位动态及原状土密实度等参数。针对粉细砂层渗透性强、易液化的特点，需缩小桩间距并增加桩体密实度，以强化挤密效果；对于黏性土层渗透性低但承载力不足的区域，可适当扩大桩径并加深桩体穿透深度，确保碎石桩有效嵌入相对稳定地层，形成连续的竖向排水通道。若地基中存在多层软弱夹层或局部渗流集中带，

则需结合渗流场模拟结果调整桩体排布形式,在薄弱区段加密桩位或采用梅花形布桩,利用桩群对渗流路径的切割作用,阻断水力贯通通道<sup>[3]</sup>。

同时,碎石桩的桩径选择需与振冲设备功率匹配,既要避免桩径过大导致土体过度扰动,也要防止桩径过小削弱挤密效应。桩长设计需穿透主要软弱层并深入相对密实持力层,确保桩体在竖向荷载下发挥端承作用。施工过程中,需根据土层变化动态调整振冲能量、成孔速度及填料量。例如,在松散砂土层中宜采用高频低幅振动,逐步提升成孔深度;而在黏性土层中则需加大振冲能量以克服土体黏聚力,同时控制填料速度避免桩体中断,以及时优化参数组合,保障桩体均匀性与连续性。此外,碎石桩的排水能力需与地基渗流特性适配,通过级配碎石的选择优化孔隙结构,既保证渗透水顺畅排出,又避免细颗粒迁移导致的淤堵。施工完成后,需结合原位渗透试验与荷载试验验证桩体参数合理性,重点评估复合地基渗透系数降低幅度及承载力提升效果,为后续类似工程提供设计依据。

### 3.2 基于渗流路径阻断的桩位优化设计

随着水闸运行年限增加,地基渗流路径逐渐发育,渗流集中区易引发局部渗透破坏,威胁结构安全。振冲碎石桩的桩位布置需以渗流场分布规律为导向,通过精准切断水力贯通通道,构建空间连续的抗渗屏障。工程实施前,需依据三维渗流场模拟成果,结合水闸结构特征与地基土层渗透性差异,识别高水力梯度区、渗流溢出点及潜在管涌区域。例如,闸室与翼墙连接处、底板边缘及土层交界面等位置常因应力集中或渗透系数突变成形成渗流优势路径。针对此类区域,需采用加密桩距或梅花形布桩模式,增强桩群对渗流路径的切割能力,形成局部抗渗强化区<sup>[4]</sup>。同时,桩位优化设计需兼顾平面布局与空间协同效应。平面上,沿水闸轴线方向在渗流集中带布置主桩列,并在其上下游侧增设辅助桩列,形成多道横向截渗防线;垂直方向上,通过调整桩体深度,使碎石桩穿透浅层渗流活跃区并深入相对隔水层,实现渗流路径的立体阻断。施工中需根据土层渗透性动态调整桩位密度,例如在粉细砂层中采用小间距桩群,利用碎石桩的排水效应加速孔隙水消散,降低渗透压力;在黏性土层中则以大间距布置为主,侧重通过挤密作用改善土体密实度与抗渗性。

在振冲成孔过程中,若发现局部区域返水浑浊或孔壁坍塌,表明该处土体松散、渗透性强,需立即补充加密桩位。同时,桩体与周边截渗结构(防渗墙、帷幕)的衔接部位需重点处理,采用交错搭接或渐变桩距的

方式,避免因刚度突变成新的渗流薄弱点。施工完成后,通过渗流观测孔与压水试验验证桩位布置的合理性,重点检查原渗流集中区的渗透压力变化及水力梯度分布,确保桩群协同作用有效降低渗流破坏风险。

### 3.3 分层振冲与级配碎石回填工艺控制

随着水闸地基土层特性的多样性显现,单一振冲工艺难以适应不同深度土层的渗透性与力学响应差异。分层振冲技术根据土层竖向分布特征,将地基划分为若干施工段,逐层调整振冲能量与成孔速度。对于浅层松散砂土或填土,采用高频低幅振动逐步挤密土体,避免过度扰动引发孔壁坍塌;对于中深部黏性土层,则切换为低频高能振冲模式,利用持续冲击力穿透致密土层,确保桩体有效嵌入相对隔水层。成孔过程中需实时监测电流变化与贯入速率,当电流值陡增或贯入停滞时,表明遭遇硬夹层或块石障碍,需短暂提升振冲能量或调整桩位,防止设备损坏并保障成孔连续性。

碎石粒径需根据土层渗透系数与地下水流速综合确定,优先选用20-60mm连续级配的硬质碎石,兼顾孔隙连通性与抗冲刷能力。回填时采用“少填多振”原则,每层填料厚度控制在0.5-0.8m,通过振冲器反复提拉振捣,使碎石与孔壁土体充分挤压嵌合。对于渗透性极强的粉细砂层,可掺入10%-15%中粗砂填充碎石孔隙,降低渗透系数并增强桩体整体性;而在黏性土层中,则需减少细料比例,保持碎石骨架的透水性以加速超孔隙水压力消散。施工中需严格控制填料速率,避免因一次性回填过量导致桩体松散或中断。此外,振冲器提升速度与留振时间的匹配需根据地层反馈实时优化:在松散土层中减缓提升速度并延长留振时间,确保挤密效果;在密实土层中则适当加快提升节奏,防止能量过度耗散。同时,采用贯入度仪与密度计对成桩质量进行全过程检测,重点核查桩体中心密实度与边界土体挤密效果。对于检测发现的局部松散段,需及时补填碎石并二次振冲,直至满足抗渗与承载指标,提升桩体与地基土协同抗渗性能,为水闸防渗加固提供可靠保障。

### 3.4 复合防渗体系协同加固技术

在水闸防渗加固工程中,单一技术手段往往难以满足复杂渗流控制需求。振冲碎石桩与帷幕灌浆、土工合成材料等技术的协同应用,可构建多维度防渗体系,兼顾竖向排水与水平截渗功能。工程实施时,首先明确复合体系中各技术的分工:振冲碎石桩作为竖向排水通道,通过挤密桩间土降低渗透系数,加速超孔隙水压力消散;水平向防渗墙或帷幕灌浆则重点阻断浅层渗流路径,形成连续截渗屏障;土工膜、膨润土防水毯等柔性

材料则用于覆盖桩顶区域或结构接缝,防止细颗粒流失与接触渗漏。三者通过空间布局与功能互补,形成“排-截-封”立体防渗网络,系统性提升地基抗渗稳定性<sup>[5]</sup>。

复合体系设计需注重技术接口的衔接性与施工时序的合理性。例如,振冲碎石桩施工应先于帷幕灌浆,避免灌浆浆液堵塞碎石桩孔隙,影响排水功能。桩顶与防渗墙的连接部位需预留过渡区,采用级配砂石或反滤土工布填充,防止渗流集中冲刷。土工合成材料的铺设范围应覆盖碎石桩群边缘外延区域,并与防渗墙顶部锚固连接,确保界面密封性。施工过程中需实时监测复合体系的协同效果,如发现局部渗压异常升高,可针对性补充微型灌浆或调整土工膜搭接长度,动态优化防渗结构。在材料选择与工艺适配方面,振冲碎石桩填料粒径需与土工合成材料透水性匹配,避免细颗粒通过土工织物孔隙流失导致淤堵;帷幕灌浆的浆液黏度与扩散半径需根据地层渗透性调整,确保灌浆体与碎石桩间形成有效搭接。施工阶段需采用交叉检测手段,例如在振冲桩完成后进行渗流试验,验证排水路径的通畅性,再开展帷幕灌浆施工,并根据灌浆压力变化动态调整注浆参数。

### 3.5 施工过程动态监测与质量反馈机制

在水闸防渗加固工程中,振冲碎石桩的施工质量直接影响最终防渗效果与结构安全。动态监测与质量反馈机制贯穿于成孔、填料、振密等全流程,通过实时采集关键参数并分析调整工艺,确保桩体均匀性、密实度及抗渗性能满足设计要求。施工初期,需建立以电流值、贯入速率、填料量为核心的监测体系:振冲器工作电流反映地层阻力变化,用于判断土层密实度与成孔难度;贯入速率监测可识别软弱夹层或硬质障碍,指导振冲能量动态调整;填料量则与桩体体积匹配,避免桩径不足或材料浪费。监测数据通过无线传输系统汇总至管理平台,结合地质勘察结果与设计参数生成实时施工评价曲线,为工艺优化提供依据。

施工过程中,采用孔内摄像或探地雷达对成孔形态进行扫描,检测孔壁坍塌、缩颈等异常现象;每根桩体完成后,通过重型动力触探或静力载荷试验抽检桩身

密实度,重点验证碎石填料与土体嵌合状态。对于桩间土挤密效果,可通过孔隙水压力计与土压力盒监测施工前后土体应力变化,评估挤密范围与密实度提升幅度。若发现局部区域挤密不足或渗透系数未达标,需立即启动补桩或二次振冲程序,确保桩群整体防渗性能的连续性。此外,在质量反馈机制层面,形成“监测-分析-调整-验证”的闭环控制。例如,当振冲器在粉细砂层中电流值持续偏低时,表明土体松散、挤密效果不足,需降低振冲器提升速度并增加留振时间;若黏性土层中贯入速率骤降,则提示振冲能量不足,需切换高频振动模式或局部补孔。施工后期,通过渗流观测孔监测地下水位与渗透压力分布,结合数值模拟反演实际渗流场,验证桩位布置与复合地基渗透特性的匹配度。所有监测数据与调整记录需纳入工程数据库,为后续质量追溯及类似工程提供参考。

### 结束语

振冲碎石桩技术通过挤密桩间土体、优化渗流场分布及构建复合地基体系,为水闸防渗加固提供了高效、经济的解决方案。研究表明,该技术在提升地基承载力、协调变形能力及降低渗透系数等方面具有显著优势,尤其适用于复杂水文地质条件下的水闸工程。通过精准的桩体参数设计、渗流路径阻断及动态施工控制,可有效平衡抗渗与承载需求,减少传统工艺对环境的扰动。

### 参考文献

- [1]沈蔚,庄梦如,颜冲.水闸防渗加固工程中的振冲碎石桩技术实践[J].中国新技术新产品,2024,(24):105-107.
- [2]屠海浪,赵野,王兆富.振冲碎石桩技术在中东地区吹填式岛屿风电工程中的应用[J].珠江水运,2024,(03):79-81.
- [3]潘跃芝.罗浦水闸加固及重建工程布置与设计[J].水利科学与寒区工程,2023,6(05):141-146.
- [4]张金,曹中兴,姚军平.干法下出料振冲碎石桩技术的应用及其环境效应[J].中国港湾建设,2019,39(02):22-25.
- [5]杨在华,杨静宗.振冲碎石桩技术在响水凹水库坝基加固工程中的应用研究[J].中国水能及电气化,2018,(12):36-40.