

# 振冲碎石桩施工技术在水利水电工程中的应用分析

巩华威

巩中国水利水电第十一工程局有限公司 河南郑州 450001

**摘要:** 水利水电工程建设中会面对各种复杂地质条件, 为了确保地基基础结构的稳固性, 需要合理选择相应的基础处理技术, 以提高地基基础结构的承载力和结构强度。振冲碎石桩施工技术作为一种常见的施工技术, 在工程建设中得到了广泛应用, 文章以金堤河倒虹吸工程为例, 深入分析了振冲碎石桩施工技术的原理以及施工工艺要点, 同时结合水利水电工程的特点提出严格控制垂直度、电流—填料联动和返水管理等质量要点, 为类似水利水电工程建设提供参考。

**关键词:** 水利水电工程; 振冲碎石桩; 技术原理; 施工工艺; 质量控制

## 引言

水利水电工程作为基础设施建设的重要组成部分, 其地基处理的可靠性与安全性直接关系到工程的整体质量和使用寿命。在复杂地质条件下, 如何有效提高地基承载力、消除液化风险成为工程建设的核心问题之一, 振冲碎石桩技术作为一种成熟的地基处理方法, 凭借其施工效率高、适应性强、成本可控等优势, 在水利水电工程中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。因此做好相关施工技术要点的研究, 不断提高施工技术水平和施工质量, 对于水利水电事业的发展具有重要作用。

## 一、工程概况

### 1. 工程背景

引黄入冀补淀工程河南段是解决区域水资源调配的重要工程。其中, 金堤河倒虹吸工程因穿越复杂地质区域, 面临地基液化及承载力不足的问题。原设计采用挤密砂桩处理, 但因施工过程中沉管难度大(套管下沉至43.0~44.0m时受阻), 经专题会论证后调整为振冲碎石桩工艺, 以克服地质条件限制。

### 2. 地质条件与工程难点

场区地层以第四系全新统冲积层为主, 主要分为堤身素填土、轻粉质壤土、中重粉质壤土及粉细砂层。勘探深度内存在以下问题:

#### (1) 液化风险

地表下20m以内土层标贯击数较低(3~5击), 地震基本烈度Ⅶ度, 存在轻微至中等液化问题。

#### (2) 承载力不足

进口段挡墙地基承载力不满足设计要求(需 $\geq 190\text{kPa}$ )。

#### (3) 施工复杂性

原挤密砂桩工艺因土层密实度不均导致沉管失败, 需采用振冲法穿透硬夹层并实现有效挤密。

## 二、振冲碎石桩施工技术原理

振冲碎石桩技术是一种通过振动与水力作用相结合的地基处理方法, 其核心原理在于利用振冲器的水平振动能量和高压水射流的冲击作用, 实现对土体的深层挤密与置换<sup>[2]</sup>。振冲器下沉过程中, 高频振动使周围土体颗粒发生剧烈运动并重新排列, 有效降低孔隙比, 从而提升土体的密实度和抗液化能力, 同时高压水射流(压力200~600kPa, 流量200~400L/min)不仅辅助振冲器穿透硬土层, 还能冲刷孔壁, 形成稳定的桩孔, 随后通过分层填入碎石料, 在振动作用下将填料与周围土体紧密结合, 形成由碎石桩和改良土体共同作用的复合地基。

振冲碎石桩的优势主要体现在以下三个方面:

#### (1) 挤密效应

振动能量传递至土体后, 松散颗粒在动能作用下重新排列, 孔隙体积减小, 密度显著提高。对于液化土层(如本工程中的轻粉质土壤), 挤密效应可将标贯击数从3~5击提升至12~20击, 从而消除地震液化风险。

#### (2) 置换作用

碎石桩作为刚性结构体嵌入软弱土层中, 通过荷载传递机制分担上部结构荷载, 改善地基承载力。例如, 本工程中挡墙部位经处理后的地基承载力从不足190kPa提升至 $\geq 200\text{kPa}$ 。

### (3) 排水通道作用

碎石桩透水性远高于周围黏性土，能够加速地基在荷载作用下的排水固结，减少工后沉降。尤其在饱和粉细砂层中，碎石桩的排水功能可显著缩短固结时间，提升地基稳定性。

此外，振冲碎石桩技术的适应性极强，可通过调整振冲器功率，灵活应对不同地质条件。例如，在硬塑状中重粉质壤土层中，通过提高振冲器下沉速度（0.5 ~ 2.0m/min）和密实电流（≥ 75A），可有效破碎硬夹层并实现深层挤密，因此该技术在复杂地质地基处理中得到了广泛应用。

## 三、振冲碎石桩施工工艺分析

### 1. 振冲碎石桩设计

综合考虑工程的地质条件，工程需求以及施工可行性，工程各项设计参数如下：

#### (1) 桩体布置

桩径统一为0.6m，桩间距根据区域承载要求动态调整，例如进口段挡墙地基承载力不足区域采用1.5m间距（正三角形布置），以提高置换率；常规区域采用1.8m间距（正方形布置），这样就可以兼顾经济性和施工效果。桩位需要覆盖进、出口闸室基础轮廓线外10m，管身平直段外5m，总面积8360m<sup>2</sup>，总桩数1152根，总桩长14656.82m，确保地基处理范围满足荷载扩散要求。

#### (2) 填料要求

填料选择天然级配砂石料，严禁使用风化岩或易碎骨料，粗骨料粒径以20 ~ 50mm为主，最大粒径不超过50mm，含泥量严格控制在≤ 5%，避免杂质影响桩体透水性。同时为了确保桩体的密实度，填料也需满足《建筑地基处理技术规范》（JGJ79-2012）<sup>[3]</sup>级配曲线要求，确保碎石间有效咬合，提升桩体密实度。设计充盈系数暂按1.3取值，实际施工中通过试验段验证调整，确保每延米填料量≥ 0.38m<sup>3</sup>，最终成桩直径达到1.0m以上。

#### (3) 特殊处理

高程43.0m以上桩段采用C15混凝土填充，混凝土配合比按《水工混凝土施工规范》（SL677-2014）<sup>[4]</sup>设计，坍落度70 ~ 90mm，分层浇筑厚度50cm，振捣采用Φ50软轴振捣器，插入间距≤ 40cm，确保混凝土密实度与桩顶结构稳定性。振冲碎石桩施工完成后，使用旋挖钻机（SR220C）对桩顶段进行扩孔（孔径0.8m），清除松散碎石后浇筑混凝土，养护7天以上方可进行后续施工。

## 2. 施工工艺要点分析

振冲碎石桩施工的工艺流程如图1所示

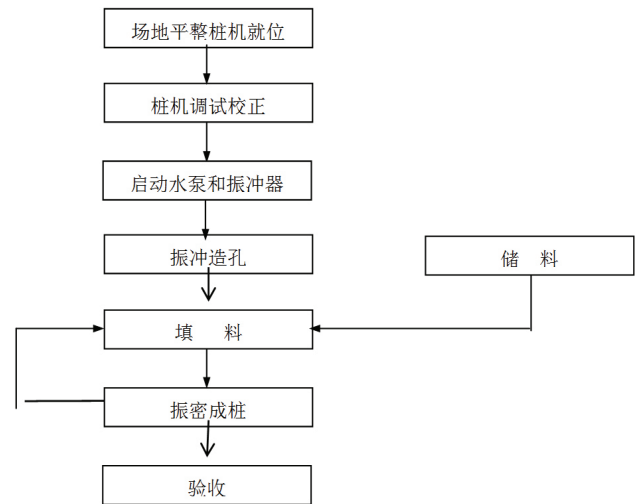


图1 振冲碎石桩施工的工艺流程

#### (1) 施工准备

施工准备是确保振冲碎石桩高效实施的基础环节，主要包括场地处理、设备校验及水电系统布设。首先，需对施工场地进行平整，确保地面标高高于桩顶设计标高1.0m（如本工程桩顶高程43.0m，场地平整至44.0m），以防止地下水位波动影响施工。对于松软区域，需采用压路机或垫渣夯实处理，确保桩机运行稳定。其次，施工用电采用三相380V电源，配备150A以上电流表及500V电压表，并设置独立配电箱；施工用水通过高压水泵（扬程≥ 60m）从储水箱抽取，确保水压稳定在200~600kPa。最后，对振冲器（DJ75型）、吊车（12t）、装载机（DZ500）等设备进行联合调试，检查振冲器空载电流（约50A）、水管密封性及吊装系统安全性，确保设备状态满足施工要求。

#### (2) 测量放线

测量放线是保证桩位精度的关键步骤。采用全站仪（如LeicaTS09）按设计图纸进行桩位放样，首先在施工区域外围设置半永久性控制点（精度± 5mm）和水准基点（精度± 10mm），随后依据桩位布置图（正方形或正三角形网格）逐排定位，桩位标记采用钢钎或洛阳铲中心灌白灰，标记直径≤ 10cm，桩位偏差控制在± 20mm以内。对于加密区（如进口段桩间距1.5m），需增设辅助控制线并插设彩旗标识，防止机械碾压导致桩位偏移。放线完成后，需由监理单位复核桩位坐标、间距及布桩形式，确保与设计一致。

#### (3) 桩机就位与垂直度调整

桩机就位需遵循“对中—调平—固定”三原则。首先，利用吊车将振冲器移动至标记桩位，通过桩机底部的液压支腿调整水平，确保振冲器中心与桩位标记点重合（偏差 $\leq 20\text{mm}$ ）。其次，通过导杆上的垂直度调节装置，结合经纬仪实时监测，调整振冲器垂直度至偏差 $\leq 1.5\%$ ，若场地存在坡度（如管身斜坡段），需在桩机底部加垫钢板或枕木以保持稳定。垂直度调整完成后，锁定桩机行走机构，防止施工中位移。本工程中，每台桩机配备1名测量员全程跟踪，每完成5根桩后复测一次垂直度，确保成桩质量。

#### （4）振冲造孔

振冲造孔是形成桩孔的核心工序，需严格控制下沉速度、水压及电流值。启动振冲器后，以 $0.5 \sim 2.0\text{m}/\text{min}$ 的速度匀速下沉，同时观察控制柜电流表数值，若电流超过额定值（ $50\text{A}$ ），需暂停下沉并上提振冲器 $0.3 \sim 0.5\text{m}$ ，待电流回落至安全范围后继续作业。造孔过程中，高压水射流需保持连续供应，水压根据土层硬度动态调整：在松散轻粉质壤土层中采用 $200\text{kPa}$ 低压冲刷，在密实粉细砂层中提高至 $600\text{kPa}$ 以辅助穿透。在此过程中，需要安排专人记录孔口返水情况，若返水量减少或中断，需立即检查水管是否堵塞或水压是否不足，当造孔至设计深度，本工程桩底高程 $35.0\text{m}$ ，上提振冲器 $0.3 \sim 0.5\text{m}$ ，准备填料。

#### （5）分层填料与振密成桩

填料工序采用“连续填料、分段振密”法。先将振冲器提升至孔底以上 $0.3 \sim 0.5\text{m}$ 处，通过装载机（DZ500）向孔内倒入碎石料，每次填料高度不超过 $0.5\text{m}$ ，填料后，振冲器以 $1 \sim 2\text{m}/\text{min}$ 速度下沉振密，密实电流需达到 $75\text{A}$ （即空振电流 $50\text{A}+25\text{A}$ 增量），留振时间 $30 \sim 60\text{s}$ 。若电流未达标，需补填碎石并重复振密，直至满足要求。每段桩体振密完成后，上提振冲器进行下一段施工，直至桩顶标高达到设计要求（高程 $43.0\text{m}$ ）。本工程中，每米桩长填料量严格控制在 $\geq 0.38\text{m}^3$ ，并通过电子计量系统实时监控，避免填料不足或浪费。

#### （6）桩顶混凝土填充

对于高程 $43.0\text{m}$ 以上需填充C15混凝土的桩段（如进口渐变段护底区域），采用旋挖钻机（SR220C）二次成孔。施工中，先清除桩顶松散碎石至设计标高，随后使用旋挖钻扩孔至直径 $0.8\text{m}$ ，深度 $3.12\text{m}$ 。混凝土采用分层浇筑，分层厚度 $50\text{cm}$ ，每层振捣采用 $\Phi 50$ 软轴振捣器，插入间距 $\leq 40\text{cm}$ ，振捣时间 $20 \sim 30\text{s}$ ，以混凝土表面泛浆无气泡为准，浇筑完成后，覆盖土工布养护7天，确保混凝土强度达到设计值的70%以上。

#### （7）施工质量检测

在工程建设中，需要按照表1中的检测项目和检测要求做好各环节施工质量的检测，一旦出现质量问题，必须经返修再检测合格后才可进入下一环节。

表1 施工质量检测标准

序号	检查项目	允许偏差或允许值		检查方法
1	灌砂量	$\geq 95\%$		实际用砂量与计算体积比
2	挡墙部位地基承载力	$\geq 190\text{kpa}$		静载试验
3	击标贯数	不小于临界标贯击数		标贯试验
4	挡墙部位承载力检测	不小于 $190\text{Kpa}$		静载试验
5	砂料的含泥量	%	$\leq 5$	试验室测定
6	桩位	mm	$\leq 50$	用钢尺量
7	砂桩标高	mm	$\pm 150$	水准仪
8	垂直度	%	$\leq 1.5$	经纬仪检查套管垂直度

### 3. 施工中的质量控制

振冲碎石桩施工的质量与关键技术参数的控制密切相关，在施工中需要围绕以下几点进行严格控制。

第一，垂直度控制。垂直度偏差直接影响桩体受力性能及复合地基均匀性，施工中采用“机械调节+仪器监测”双保险策略，导杆调节装置通过液压系统微调振

冲器角度，同时由经纬仪实时测量垂直度，每 $2\text{m}$ 深度测量一次，偏差超过 $1.5\%$ 时立即停机校正，而对于倾斜地层（如管身斜坡段），可采用预钻孔导向或加重锤配平法，确保成孔垂直。

第二，电流与填料量联动控制。密实电流是判断桩体密实度的核心指标，当密实电流低于 $75\text{A}$ 时，增加填

料量或延长留振时间<sup>[5]</sup>；若电流持续偏高（90A），则需检查是否遇硬层或填料粒径超标，本工程通过试验确定，每延米填料量 $0.38\text{m}^3$ 、留振时间45s为最优参数组合，可平衡效率与质量。

第三，返水管理。返水不仅反映造孔效果，还涉及环保要求。施工中设置环形排水沟与沉淀池（容积 $\geq 20\text{m}^3$ ），将含泥浆的返水集中沉淀后排放，泥浆脱水后外运至指定弃渣场。对于渗透性极低的黏土层，需添加絮凝剂加速泥水分离，防止排水系统堵塞。此外，施工中还需要定期清理振冲器喷水口，确保水射流畅通，避免因堵塞导致成孔效率下降。

### 结语

振冲碎石桩技术本工程中的成功应用，为水利水电

工程在复杂地质条件下的地基处理提供参考借鉴。在具体施工中，不仅需要制定合理科学的施工设计方案，更需要加强对各施工技术要点的管理控制，严格把控各施工环节的质量，这样才能够确保振冲碎石桩施工目标的达成。

### 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] 冯炜壕. 振冲碎石桩在道路工程中的应用研究[J]. 江西建材, 2024, (11): 203-205.
- [3] 侯程, 廖超逸. 大寨水库基础振冲碎石桩施工技术研究[J]. 四川水利, 2024, 45(04): 41-45.