

水利工程软基处理中的振冲碎石桩施工技术研究

文 / 杨 洋 广东省水利水电第三工程局有限公司

摘要: 针对滨海软土地基条件下水利工程基础稳定性差、沉降控制难等问题, 本文以广东某水利枢纽工程为依托, 开展了振冲碎石桩施工技术研究。通过理论分析与工程实测相结合的方法, 系统阐述了振冲碎石桩的工艺原理、施工设备配置、关键参数控制与复合地基结构设计, 并构建了全过程施工流程与质量控制机制。现场监测结果表明, 该技术能有效提升地基承载力至 268.4kPa, 最大沉降控制在 74.2mm 以内, 各项指标均满足设计要求。研究成果为软基地区水利工程地基处理提供了切实可行的技术支持。

关键词: 振冲碎石桩; 软土地基; 水利工程; 复合地基; 施工技术; 加固效果

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.089

引言

我国滨海地区水利基础设施建设日益增多, 而软弱地基在高水位、高压缩性及低强度条件下, 常导致基础不均匀沉降和承载力不足, 严重制约工程安全与耐久性^[1]。传统换填法、强夯法在高饱和淤泥地层中加固效果有限, 已难以满足复杂地基处理需求。振冲碎石桩作为一种兼具挤密、置换与排水功能的复合地基处理技术, 在水利工程中具有良好的适应性与可控性。其施工过程可调节性强、适应范围广, 且对原状地基扰动较小, 特别适用于填土层厚、软土厚度大的区域。本文基于广东某典型软基水利工程, 围绕振冲碎石桩的施工工艺流程、关键控制参数与成桩质量保障措施开展研究, 并结合现场监测数据评估其加固效果, 旨在为类似工程提供技术参考与实践依据, 推动软基处理在水利工程领域的标准化与精细化发展。

一、工程概况

本文以广东某水利枢纽配套设施建设项目为例, 该项目位于珠江三角洲冲积平原地带, 总占地面积约 24.7 万 m², 主要建设内容包括引排水渠、泵站基础、闸门与护岸结构。场地地质勘察显示, 地基土主要由淤泥质粉质黏土和饱和粘性土组成, 地下水位高, 常年埋深约 1.0m, 软弱土层厚度普遍在 5.2 ~ 10.8m 之间, 部分区域超过 12m, 呈中高压缩性特征。原状土的地基承载力特征值约为 70 ~ 85kPa, 标准贯入击数 N 值多数低于 4, 存在较明显的沉降风险和侧向位移隐患。为满足泵站与闸体结构基础稳定性及工后变形控制的要求, 项目设计选用振冲碎石桩复合地基进行软基加固, 设计加固区面积约 16.9 万 m², 桩长控制在 4.5 ~ 9.5m, 布置方式采用等边三角形, 桩距 1.3m, 复合地基承载力设计值提升至 160kPa, 变形控制目标为最大沉降不超过 90mm、不均匀沉降小于 1/600, 以确保结构长期运行的安全性与耐久性。

二、振冲碎石桩施工工艺流程

(一) 工艺原理与适用条件

振冲碎石桩是一种通过高频振冲器下沉至设计深度后投放级配碎石, 并借助振动作用形成柱状桩体, 从而

实现地基加固的复合处理技术。其作用机制包括: (1) 通过振动挤密与侧向扩张作用, 形成高强度桩体和致密的桩周土层, 提升整体承载性能; (2) 增强地基的排水和固结条件, 促进软土应力再分布与抗剪强度恢复, 广泛适用于淤泥、淤泥质粉质黏土、饱和填土等高压缩性地基^[2]。

在复合地基中, 桩体与桩间土共同承担荷载, 其承载力特征值可采用应力分担法计算:

$$q_d = \eta_r \cdot q_s + (1 - \eta_r) \cdot q_c \quad (1)$$

式中, q_d 为复合地基承载力特征值, η_r 为桩土应力比, q_s 为碎石桩桩体承载力特征值, q_c 为桩间土承载力特征值。以本工程泵站区典型段设计参数计算如下:

$$q_d = 0.7 \times 350 + 0.3 \times 80 = 245 + 24 = 269 \text{ kPa}$$

该结果显著高于设计控制标准 160 kPa, 满足桩基稳定性与工后沉降控制的技术要求, 具备良好的安全储备。

(二) 施工设备与技术参数配置

本工程选用的主要施工设备为 CXZ-300 型高频电动振冲器, 额定功率 55kW, 工作频率 32Hz, 激振力为 280kN, 具备高频、强振、适应软土沉入特性的技术优势。振冲器配合 QUY50 履带式起重机进行垂直提升与定位, 具备良好的吊载精度与作业稳定性^[3]。碎石投料采用 ZDJ120 型螺旋加料机, 可在淤泥中稳定下料, 有效控制进料节奏与桩径成型。碎石材料选用 20 - 40mm 级配花岗岩碎石, 压碎值小于 15%、含泥量不大于 2%, 符合《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012) 要求。桩长根据分区地质条件设置于 4.5 - 9.5m 之间, 桩径随振动扩径形成约为 0.6 - 0.9m, 施工过程中进桩速度控制在 1.0 - 1.5m/min, 提升速度不超过 2.0m/min, 投料节段为 0.5 - 1.0m, 并结合振动电流反馈系统实施实时调整, 确保成桩密实度和轴线稳定性达到设计要求。

(三) 施工流程与工序控制要点

振冲碎石桩的标准施工流程包括测量放样、振冲器定位下沉、分段碎石投料、同步提升与振实、桩顶补料复振、桩头整修与验收等环节。施工前须进行精确桩位放样, 误差控制在 ±30mm 范围, 采用全站仪结合 RTK 定

位系统实施高精度布桩。振冲器采用恒压推进方式沉至设计深度，遇局部密实砂层时应采用间歇振沉法防止桩孔偏移^[4]。投料与提升必须同步进行，每提升0.5-1.0m即投一次碎石并振实，控制提升速度在2.0m/min以内，确保桩体密实、均匀、连续。出桩后应立即进行补料复振，以防桩顶虚松，影响桩一垫层整体协同效果。施工全过程需实时记录每根桩的深度、投料量、振动电流曲线与时间节点，形成完整的质量追踪体系。同时，结合电流-沉力双曲线分析法，对施工工况异常进行识别与调整，实现成桩质量与现场控制的闭环保障。施工流程见下图1：

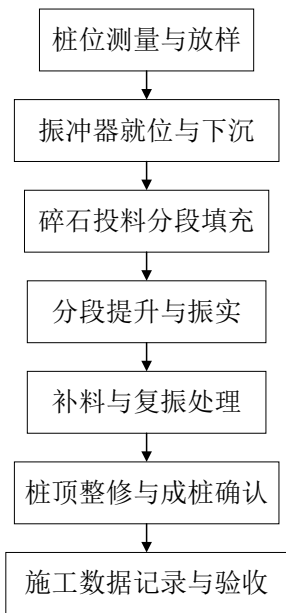


图1 施工流程图

该流程适配珠三角软基水利工程特点，通过精准设备控制与工序闭环设计，可有效提升桩体密实度与地基承载性能，为后续闸体、泵站等结构基础的稳定运行提供坚实保障。

三、振冲碎石桩施工关键技术研究

(一) 桩位布置与复合地基结构设计

1. 布桩形式确定

结合场地地质勘察成果，软土层厚度分布在4.5-10.8m之间，依据地基荷载等级与沉降控制要求，采用等边三角形布桩形式，并结合有限元模拟比选不同布桩间距。最终确定泵站区间桩距为1.3m，闸室区域因基础荷载集中，采用1.2m桩距密排布置，有效提升复合地基等效模量并抑制不均匀沉降。

2. 桩径与复合地基承载力匹配

桩体设计直径控制在 0.8 ± 0.1 m，施工中通过分段振实与加料调控桩径形成。桩长则根据不同分区软土厚度设置在4.5-9.5m之间。复合地基结构按“三明治”布置：碎石桩体、中粗砂垫层（厚度0.5m）、C25素混凝土垫层（厚度0.2m），以增强桩-基础荷载传递连续性。

设计目标为复合地基承载力特征值不低于160kPa，最大沉降不超过90mm，不均匀沉降小于1/600。

3. 测量定位控制

桩位放样采用全站仪配合RTK系统，误差控制在±30mm，关键部位控制在±20mm以内。放样完成后进行不少于50%的复测，确保桩距与位置准确。设专用控制桩与高程桩，构建统一基准体系，为成桩作业提供定位支撑。

(二) 振冲参数优化与碎石填料控制

1. 振冲器参数设定

使用CXZ-300型高频振冲器，额定功率55kW，激振频率32Hz，激振力达280kN。在施工过程中，依据沉入深度与电流反馈调整振动力与振沉时间，进桩速度控制在1.2m/min以内，提升速度不得超过2.0m/min，确保桩体致密性和对桩间土的侧向挤密效果。为适应不同深度土层刚度变化，施工中设置动态参数调节程序，在进入粉质黏土与淤泥夹层区段时适当降低激振频率，避免桩孔偏斜及石料外逸。

2. 投料节奏与段长控制

采用ZDJ120型螺旋加料装置进行碎石填充，分段距控制在0.5-1.0m之间，每段料量约0.15-0.25m³，保证桩体分段密实。为防止架空、夹芯、孔壁塌落，施工采用“加料-提升-振实-监测”一体化流程，形成均质稳定桩体结构。每根桩投料量均通过电子计量控制系统累计监测，避免过量填料造成上拱或振沉障碍，并定期核对桩长与入料量关系，构建工况反馈曲线^[5]。

3. 碎石材料控制

碎石选用粒径20-40mm的花岗岩碎石，干净坚硬、级配合理，压碎值不大于15%，含泥量不超过2%。现场设碎石料场及筛分洗选设备，对进场材料进行批次取样检测，确保桩体承载力基础条件稳定可靠。各施工区按施工进度建立碎石供应台账，并由第三方检测机构定期进行颗粒级配与含泥量抽检，杜绝不合格物料进入成桩系统，有效提升成桩一致性与复合地基稳定性。

(三) 成桩质量控制与沉桩稳定性

1. 振沉过程监测与控制

振沉过程中使用电流监测系统实时记录振动电流曲线，典型成桩电流曲线应呈“缓升-平台-衰减”趋势，平台段对应碎石填料密实临界状态。通过电流变化判断是否存在沉桩阻滞、空腔形成等质量隐患，并结合施工日志进行人工复核。若电流波动异常，应立即暂停作业并排查振冲器是否卡阻、料源是否连续、孔壁是否塌陷等问题，确保施工连续性和桩体完整性。

2. 出桩与补振技术措施

完成主桩段后，立即进行补料复振，提升段控制在0.2-0.3m，振冲器慢速提拔并同步投料，使桩顶密实均匀，保证桩一垫层协同传力连续性。补振后应进行桩头平整与沉降监测基点布设，确保桩体上承面标高一致、

工后变形可监控。为增强桩体顶面强度，必要时在桩头加设 0.2m 厚级配碎石回填层，以提升顶面抗剪承载力和施工便捷性。

3. 质量验收与稳定性评估

每施工完一作业区段，应抽查 10% 的桩位进行取芯检测与贯入试验验证密实度。复合地基整体变形稳定性采用静载试验与多点沉降计综合评估，确保各关键部位地基沉降控制目标满足设计限值要求，为结构基础施工提供质量支撑。对重点区段如泵站基础，应增加荷载级

别，验证地基极限承载状态下的变形响应，并建立桩体—地基系统完整的力学性能数据库，用于施工反馈与经验积累。

四、现场应用与效果评估

(一) 成桩质量与施工监测

为验证振冲碎石桩施工过程中桩体成型质量与施工参数控制效果，在广东工程现场选取典型作业段开展电流曲线、进桩深度、桩径及碎石投料量的全过程监测，重点考察桩体密实性、施工稳定性及技术参数的一致性。

表 1 成桩过程关键参数监测结果

监测项目	设计指标	实测均值	标准差	合格率 (%)
桩长 (m)	4.5 - 9.5	7.8	±0.32	100
桩径 (m)	0.8±0.1	0.82	±0.05	96.7
单桩投料量 (m ³)	≥ 1.1	1.25	±0.12	98.5
振沉电流 (A)	180 - 230	205	±8.4	100
提升速度 (m/min)	≤ 2.0	1.76	±0.15	100
桩位偏差 (mm)	≤ ±30	±18.6	±5.7	100

监测数据表明，所有桩长均满足设计要求，桩径控制稳定，偏差小于 ±6%。投料量分布均匀，95% 以上桩体密实饱满，未发现夹芯或架空现象。电流曲线波动范围在合理区间内，平台段对应成桩关键控制阶段，说明振冲器运行状态稳定。桩位偏差控制良好，全部桩点在 ±30mm 以内，体现出测量放样与设备施工精准对接的协调效果。

(二) 加固效果与变形控制

为验证振冲碎石桩复合地基的加固效果与变形控制能力，施工完成后在泵站基础及闸室区布设静载试验桩位 6 处，并设置 10 个沉降监测点，对复合地基承载性能与工后变形开展实测评估。

表 2 地基承载力与沉降监测结果

监测项	设计值	实测均值	最大值	标准差	合格率 (%)
地基承载力 (kPa)	≥ 160	268.4	282	±9.2	100
最大沉降 (mm)	≤ 90	63.7	74.2	±6.5	100
不均匀沉降比值	≤ 1/600	1/832	1/712	—	100

实测承载力平均值达到 268.4kPa，远高于设计值 160kPa，说明复合地基承载性能显著提升；工后沉降控制良好，所有监测点沉降量均小于设计限值 90mm，不均匀沉降比最大为 1/712，优于规范控制标准。监测期内未出现异常沉降突变，验证了振冲碎石桩在软基条件下的有效加固能力和工后稳定性。综合来看，施工质量控制体系与施工工艺参数的精准匹配，是确保复合地基性能达标的关键技术基础。

结语

通过对广东滨海软土地区典型水利工程的振冲碎石桩施工应用研究，本文系统分析了工艺原理、施工流程、关键技术及现场应用效果。研究表明，合理布置桩位与复合地基结构，优化振冲参数与填料控制，并实施全过程监测与质量管理，能有效提高软基承载性能，满足严苛的沉降控制要求。现场监测数据显示，桩体成型质量稳定，地基承载力平均提升至 268.4kPa，最大沉降控制在 74.2mm 以内，验证了振冲碎石桩在高地下水位、厚软弱土层条件下的适用性与工程可靠性，为类似区域水利

基础工程软基处理提供了可行技术路径与实践依据。

参考文献

- [1] 周燕国, 王训阳, 姚鹏飞, 等. 振冲碎石桩地基处理物理模拟相似性初步研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, (S1): 5-9.
- [2] 刘彬, 杨磊, 忽彦鹏, 等. 围堰地基超深振冲碎石桩试验研究 [J/OL]. 中国农村水利水电, 1-10 [2025-07-28].
- [3] 付孟知. 关于振冲碎石桩复合地基在不均匀地层的应用研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (16): 147-149.
- [4] 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.
- [5] 陈建明. 振冲碎石桩在公路软弱地基加固处理中的应用和效果评价 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (24): 4-6.

作者简介: 杨洋 (1995-09), 男, 贵州省黔东南苗族侗族自治州人, 侗族, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为水工施工。