

高压旋喷桩工艺在水利工程软土地基加固中的应用价值

赵泽彪

云南胜格建设工程有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：为解决水利工作中软土地基承载力不足、沉降量大、防渗性能差等问题，本文系统研究高压旋喷桩工艺的技术原理与应用价值。通过分析该工艺在堤坝、水闸、渠道等水利构筑物地基加固中的实践效果，结合地基承载力、沉降量、渗透系数等核心指标，验证其技术可行性与经济合理性。研究表明，高压旋喷桩可使软土地基复合承载力提升1.5-3倍，沉降量控制在50mm以内，渗透系数降至 10^{-6} - 10^{-8} cm/s；该工艺在水利工程软土地基加固中具有技术可靠、经济高效、适应性强的显著优势，可为类似工程提供参考。

【关键词】：高压旋喷桩；水利工程；软土地基；地基加固；应用价值

DOI:10.12417/2811-0536.26.01.028

1 研究背景与意义

水利工程作为国民经济的重要基础设施，其构筑物（堤坝、水闸、泵站、渠道等）的稳定性直接依赖于地基承载能力。传统软土地基加固方法存在适用范围窄、工期长、成本高、防渗效果有限等不足。高压旋喷桩工艺作为一种新型原位加固技术，通过高压喷射浆液与土体搅拌混合形成固结体，兼具提高地基承载力与防渗止水双重功能，在水利工程中展现出良好的应用前景。因此，系统研究其应用价值，对提升水利工程地基处理质量、保障工程安全、降低建设成本具有重要的理论与实践意义。

2 高压旋喷桩工艺的基本原理与技术特点

(1) 基本原理：高压旋喷桩工艺通过专用钻机将带有喷嘴的注浆管钻入设计深度，利用高压注浆泵将水泥浆液或水泥-水玻璃双液浆从喷嘴高速喷出，形成高压喷射流。该喷射流以巨大的动能冲击、切割、搅拌地基土体，使部分土体被置换、搅碎，与浆液充分混合，经凝固硬化后形成具有一定强度和整体性的柱状固结体。根据喷射管数量与浆液输送方式，工艺可分为三类。①单管法：仅喷射水泥浆液，适用于较均质的软土层；②双管法：同步喷射水泥浆液与压缩空气，空气包裹浆液增强喷射距离与搅拌效果，适用于中厚软土层；③三管法：同时喷射高压水流（压力25-40MPa）、压缩空气与水泥浆液，水流先行切割土体，浆液随后填充混合，适用于含砂量较高或较密实的软土地层。

(2) 技术特点：①适配性强：可适应多种软土地质条件，包括淤泥、淤泥质土、粉质黏土、粉土、砂质粉土等，对含有少量碎石粒径<50mm的地层也能有效处理；同时可根据工程需求调整桩径0.5-2.0m、桩长≤30m及桩体强度C10-C30，满足不同水利构筑物

的地基要求。②功能复合：兼具“加固”与“防渗”双重功能，一方面，旋喷桩与地基土形成复合地基，显著提高承载力；另一方面，多排旋喷桩可形成连续的防渗帷幕，阻断地下水渗透路径，解决水利工程的渗漏问题。③施工灵活：施工设备体积小、机动性强，可在狭窄场地如堤坝迎水坡、水闸底板下方作业；施工过程无需大面积开挖，对既有构筑物的扰动小，适用于新建工程与既有工程的加固改造。

3 高压旋喷桩工艺在水利工程中的应用价值分析

(1) 解决软土地基核心工程问题：①提升地基承载力，保障结构稳定：水利构筑物对地基承载力要求较高，高压旋喷桩通过形成高强度桩体与地基土共同作用，大幅提升复合地基承载力。现场测试数据显示：在淤泥质土地基中，采用直径1.0m、间距1.5m的旋喷桩加固后，复合地基承载力特征值可从天然地基的60-80kPa提升至150-240kPa，满足水闸底板、泵站基础的设计需求。②控制地基沉降，减少结构变形：软土地基的过量沉降是导致水利构筑物开裂、渗漏的主要原因。高压旋喷桩通过挤密、置换、胶结作用降低地基压缩性，将工后沉降量控制在允许范围内。某平原水库堤坝加固工程中，采用三管法旋喷桩处理后，坝体工后沉降量仅35mm，远低于设计允许值，有效避免了坝体裂缝与防渗体破坏。③增强防渗性能，阻断渗漏路径：堤坝、渠道等水利工程对防渗要求严格，高压旋喷桩形成的防渗帷幕可有效降低地基渗透系数。在滨海地区某水闸地基加固中，采用双排旋喷桩形成防渗帷幕，检测显示帷幕渗透系数降至 10^{-7} cm/s以下，远低于设计要求，解决了海水倒灌问题。④适应复杂工况，拓展应用场景：针对水利工程中的特殊工况，高压旋喷桩可与其他工艺结合形成复合方案。例如，在渠道深挖方段软土地基处理中，采用“旋喷桩+钢板桩”的支护体系，既提高了地基承载力，又

有效控制了基坑边坡变形，确保施工安全。

(2) 降低工程成本，缩短建设周期：①减少材料消耗，降低直接成本：与传统换填法相比，高压旋喷桩无需大量开挖与外运软土，也无需回填砂石等置换材料，可节省材料运输与处置费用。某灌溉渠道软土地基加固工程中，采用旋喷桩工艺较换填法减少土方开挖量2万m³，直接成本降低18%；与碎石桩法相比，旋喷桩桩体强度更高，可减少桩体数量30%，水泥用量降低15%。②缩短施工工期，提高建设效率：高压旋喷桩施工机械化程度高，单桩施工时间短，可多机并行作业。某中型水闸地基加固工程中，采用10台旋喷桩机同步施工，仅用25天完成500根旋喷桩施工，较排水固结法缩短工期69%，提前实现水闸蓄水目标，产生显著的经济效益。③降低维护成本，延长工程寿命：高压旋喷桩加固后的地基稳定性好、耐久性强，可减少工程运营期的维护费用。统计数据显示，采用旋喷桩加固的水利构筑物，运营期内地基相关的维护费用较传统工艺降低40%-60%，工程使用寿命延长10-15年。

(3) 提升工程抗风险能力，保障运行安全：①增强地基抗滑稳定性，降低失稳风险：软土地基在地震、洪水等荷载作用下易发生滑动破坏，高压旋喷桩形成的刚性桩体可增强地基抗滑力矩。某河道堤防加固工程中，经旋喷桩处理后，堤防边坡的抗滑稳定安全系数从1.15提升至1.35，满足地震烈度VIII度区的设计要求，有效抵御了2023年汛期的洪水冲击。②避免施工期安全事故，保障施工安全：传统换填法、碎石桩法施工中易出现基坑坍塌、边坡失稳等事故，高压旋喷桩施工无需深基坑开挖，对地基扰动小，施工安全风险显著降低。某泵站扩建工程中，采用旋喷桩处理软土地基，施工期间未发生任何安全事故，较传统工艺减少安全防护费用20万元。③保障下游区域安全，减少灾害损失：水利构筑物的地基失稳可能引发洪水、溃坝等重大灾害，高压旋喷桩通过强化地基稳定性，可有效降低灾害风险。以某小型水库堤坝为例，经旋喷桩加固后，成功抵御了2022年的强降雨引发的坝体渗流，避免了下游村庄被淹，减少直接经济损失超千万元。

(4) 减少生态扰动，符合绿色建设要求：①降低施工扬尘与噪音污染：高压旋喷桩施工无需大规模开挖，减少了土方作业产生的扬尘；施工设备噪音较低，且可通过隔音罩、减震装置进一步控制，符合《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)要求，对周边居民区、农田的影响小。②减少水土资源破坏：传统换填法会破坏原土地层结构，导致水土流失；高

压旋喷桩原位加固土体，无需外运弃土，减少了对土地资源的占用与破坏。某湖泊治理工程中，采用旋喷桩处理湖堤软土地基，避免了2万m³弃土对湖泊生态的影响，保护了水生生物栖息地。③采用环保材料，减少化学污染：高压旋喷桩主要采用水泥浆液作为固化材料，水泥为无机胶凝材料，无有毒有害成分；对于防渗要求高的工程，采用水泥-水玻璃双液浆，水玻璃可快速凝固，减少浆液扩散对地下水的影响，符合水利工程绿色建设的发展趋势。

4 水利工程中的应用实践与效果验证

4.1 工程背景与原地基问题

该均质土坝位于长江中下游平原某灌溉水库，坝长1200m，坝高18m，坝顶宽6m，主要功能为农业灌溉与防洪调度。坝体建成于2005年，运行15年后出现明显病害：一是坝体迎水坡出现3处纵向裂缝（最长15m、宽5-8mm），伴随局部渗湿现象；二是坝顶沉降观测显示，最大累计沉降量达120mm，且仍以每月0.5-1mm的速度持续沉降；三是坝基渗透检测发现，下游坝脚处渗水点的渗透系数达 10^{-3} - 10^{-4} cm/s，远超设计允许值($\leq 10^{-5}$ cm/s)，存在坝体失稳与渗漏溃决风险。经勘察认定，病害根源为坝基下卧3-5m厚的淤泥质土软土层，该层土长期受坝体自重与水压力作用，压缩变形持续发展，同时形成渗透通道，需进行专项加固处理。综合对比换填法、碎石桩法与高压旋喷桩法后，考虑到坝体已建成、施工空间受限且需兼顾加固与防渗双重需求，最终选定三管法高压旋喷桩工艺。

4.2 三管法高压旋喷桩施工方案设计

(1) 加固范围与桩体布置：加固范围覆盖坝体迎水坡脚至坝轴线下方20m区域，沿坝长方向分3段施工，每段400m。采用梅花形布置旋喷桩，桩径1.2m，桩间距1.8m(横向) \times 2.0m(纵向)，桩长18m(穿透②淤泥质土层，嵌入③粉质黏土层3m，确保桩体锚固稳定)，总计施工旋喷桩667根，总桩长12006m。

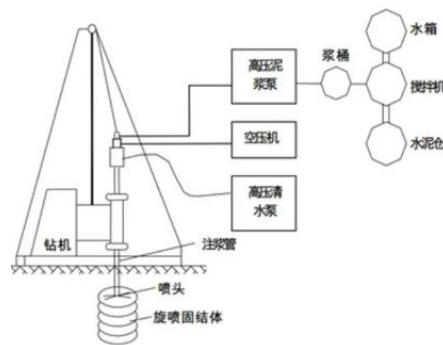


图1 三管法高压旋喷桩

(2) 施工流程与关键控制：清除坝坡表面杂物，平整施工场地，铺设钢板垫层，测量放线确定桩位；采用 XP-30 型旋喷钻机，调平机身，校正钻杆垂直度；采用金刚石钻头钻进至设计深度，钻孔直径 150mm，过程中采用泥浆护壁，防止塌孔；钻至设计深度后，开启高压水泵、空气压缩机与注浆泵，按设定参数自下而上旋转提升喷射，同步记录压力、流量、提升速度等参数；喷射至桩顶设计标高后，停止提升，原地旋转喷射 30s，确保桩顶密实；完成单桩施工后，清理钻杆与喷嘴，移至下一桩位施工。

4.3 施工质量控制措施

水泥进场需提供质量合格证，每 200t 抽样检测强度与安定性；浆液搅拌采用自动计量搅拌系统，确保水灰比偏差 $\leq \pm 0.05$ ；施工前对高压泵、空压机进行压力校准，压力表精度等级 ≥ 1.6 级；钻杆垂直度采用激光投线仪实时监测；安排专人记录每根桩的施工参数，当压力骤降 ($< 30\text{MPa}$) 或流量异常时，立即停止施工，排查喷嘴堵塞或地层异常问题；相邻桩施工间隔 $\geq 24\text{h}$ ，避免窜孔；针对施工中出现的漏浆现象，采用“降低提升速度+增加注浆量”的方式处理；若遇地下障碍物（如块石），采用冲击钻头破碎后继续施工。

4.4 工程效益分析

加固后坝体抗滑稳定安全系数从 1.12 提升至 1.38，满足地震烈度 VIII 度区设计要求，成功抵御 2023 年汛期 3 次超标准洪水冲击，未出现渗漏与变形异常；该工程总投资 860 万元，较换填法（1200 万元）节省成本 340 万元，降低 28.3%；施工工期 45 天，较排水固结法（180 天）缩短 75%，提前恢复水库灌溉功能，新增农业产值 500 万元/年；消除了水库溃坝风险，保障下游 2 个乡镇、1.2 万人口及 3000 亩农田的安全，提升了区域防洪减灾能力。

5 高压旋喷桩工艺的优化建议

(1) 优化施工参数设计：根据地质条件动态调整

参考文献：

- [1] 郑伟,曹宝海.高压旋喷桩作为承载桩技术在水利工程闸基础中的应用[J].水利建设与管理,2013,33(10):5-12.
- [2] 陈智伟,金睿哲,戴国亮,等.考虑射流-土体能量的高压旋喷桩直径计算方法[J/OL].东南大学学报(自然科学版),1-11[2025-09-11].
- [3] 金芝龙,王玉强.沿海地区水闸工程软土地基高压旋喷桩施工方法及质量控制研究[J].科技风,2025,(20):4-6.
- [4] 李胜军.高压旋喷桩工艺在地下建筑渗漏水治理中的应用与效果评估[J].工程技术研究,2025,10(10):85-87.
- [5] 冯满军.高压旋喷桩在抗滑桩穿越不良地质中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(09):21-24.

施工参数：对于高含水量淤泥层，适当降低提升速度、增加注浆量，确保浆液与土体充分混合；对于含砂量较高的地层，提高喷射压力、加快旋转速度，增强土体切割效果。同时，采用数值模拟软件预测柱体形成过程，优化桩径、桩长与间距设计，避免参数冗余导致的成本浪费。（2）改进浆液材料性能：研发新型环保浆液：采用工业废渣替代部分水泥，降低水泥用量，减少碳排放；添加纳米材料改善浆液流动性与固化强度，提高柱体早期强度，缩短养护时间；针对复杂地层，开发抗盐、抗冻专用浆液，适应滨海、寒冷地区水利工程需求。（3）加强施工质量管控：建立“事前-事中-事后”全流程质量管控体系：事前通过地质勘察精准掌握地层分布，制定专项施工方案；事中采用智能监测设备实时监控施工参数，发现异常及时调整；事后通过钻芯取样、声波透射法、载荷试验等多种手段检测柱体质量，对不合格柱体及时进行补桩处理。

（4）推动智能化施工：引入自动化施工设备：采用无人钻机实现精准定位与钻进，提高桩位偏差控制精度；通过物联网技术将施工参数实时传输至监控平台，实现远程监控与智能预警；结合 BIM 技术构建旋喷桩三维模型，实现施工过程的可视化管理，提升施工效率与质量。

6 结论

高压旋喷桩工艺通过高压喷射浆液与土体搅拌混合形成固结体，具有适配性强、功能复合、施工灵活、质量可控的技术特点，能有效解决水利工程软土地基的承载力不足、沉降量大、防渗差等问题。该工艺在水利工程中具有显著的综合应用价值，环境上减少施工污染与资源破坏，符合绿色建设要求。在堤坝、水闸、渠道等水利工程中的实践表明，高压旋喷桩加固效果显著，能满足不同构筑物的地基处理需求，具有广泛的应用前景。