

水泥土搅拌桩在水利工程地基处理中的应用

李弦

云南省滇中引水工程有限公司，云南昆明，653100；

摘要：水利工程建设中，地基稳定性直接关系到工程安全与使用寿命。随着软土地基处理技术的不断发展，水泥土搅拌桩因其施工简便、加固效果显著、适用范围广而被广泛应用于堤防、闸基、泵站、渠道等水利基础工程中。本文系统阐述了水泥土搅拌桩的形成机理、施工工艺、技术参数及其在不同类型水利工程中的典型应用，总结了工程实例中的优势与不足，分析了不同施工方法对地基承载力、抗渗性能及沉降控制的影响规律。结合近年来的技术创新与施工装备改进，提出了水泥土搅拌桩在水利工作中推广应用的关键技术要点与发展趋势，以期为类似工程的设计与施工提供参考。

关键词：水泥土搅拌桩；地基处理；软土加固；水利工程；施工技术；工程应用

DOI：10.64216/3080-1508.26.02.075

前言

水利工程通常建设在河湖沿岸、滩地或冲积平原等软弱地基地区，这类地基普遍存在承载力低、压缩性高、渗透性大、稳定性差等问题，若不采取有效加固措施，将导致渗漏、滑塌、沉降等结构性失稳。传统地基加固方法如换填垫层、强夯、堆载预压、振冲碎石桩等在特定地质条件下存在工期长、成本高、施工受限等问题^[1]。

水泥土搅拌桩技术（Cement-Soil Mixing Pile，简称CSM）是一种原位固化地基处理方法，通过搅拌装置将水泥浆液与原状土体混合，使其发生水化反应，形成具有一定强度和防渗性能的复合桩体，从而改善地基力学性质。该技术自20世纪70年代日本首次应用于港湾工程以来，经过四十余年发展，已在我国南方软土区和沿海滩涂水利工程中得到广泛推广。

水泥土搅拌桩具有施工机械化程度高、扰动小、节能环保、可连续施工等优点，尤其适用于饱和软黏土、淤泥质土、砂性土等地层。本文旨在系统梳理水泥土搅拌桩在水利工程地基处理中的理论依据、施工技术、应用实例与发展趋势，以期促进其科学设计与高质量实施。

1 水泥土搅拌桩的加固机理与类型

1.1 加固机理

水泥土搅拌桩的加固作用主要来源于水泥水化反应与土颗粒胶结作用。当水泥浆液注入软土中并经机械搅拌均匀后，水泥中的CaO、SiO₂、Al₂O₃与土体中的活性硅铝成分反应生成水化硅酸钙（C-S-H）及水化铝酸钙（C-A-H）凝胶，这些胶凝产物包裹并连接原状土颗粒，形成强度较高、渗透性较低的水泥土复合体，从而显著提高地基的抗压强度和稳定性。

此外，桩体与周围土体形成桩土复合地基体系，通过复合承载、侧摩阻力和桩间土共同作用，提高整体承

载力与抗剪强度，同时减小地基沉降与变形。

1.2 桩型分类

按施工方式不同，水泥土搅拌桩可分为：

深层搅拌桩（DMM）：采用长钻杆、喷浆搅拌，深度可达15~25m，适用于软黏土及淤泥质地层。

浅层搅拌桩（SMM）：深度一般3~6m，适用于渠道、护坡、岸滩等浅基础。

单轴搅拌桩与双轴、三轴搅拌桩：后者施工效率高，桩径大、重叠密实，适合防渗帷幕与止水墙。

粉喷桩与浆喷桩：区别在于使用干粉或水泥浆；粉喷桩适用于含水量高、饱和度大的软土^[2]。

2 水泥土搅拌桩施工工艺及控制要点

2.1 施工工艺流程

测量放线：依据设计布桩图布设桩位，确保中心偏差≤50mm；

钻机就位与钻进：按规定深度钻至设计标高，保证垂直度偏差≤1.5%；

注浆搅拌：边提升钻杆边注浆搅拌，使浆液与原状土充分混合；

重复搅拌与成桩：重复搅拌2~3次，确保桩体均匀密实；

养护与检测：成桩后静置7~28d，进行强度与完整性检测。

2.2 主要技术参数控制

水灰比：一般控制在0.45~0.6之间；

水泥掺量：视土质与设计强度确定，通常为12%~25%；

搅拌转速：20~60 r/min，保证均匀混合；

桩径与桩距：常用直径0.5~1.0m，桩间重叠率

20%~40%;

施工间歇时间：连续作业，防止浆液分层或固化不均。

2.3 质量检测与评估

水泥土搅拌桩质量检测包括：

无侧限抗压强度试验（取芯法或原位贯入法）；

桩身完整性检测（声波透射或钻芯检验）；

防渗性能检测（渗透系数试验或抽水试验）。

一般要求 28d 无侧限抗压强度 $\geq 0.5\sim 1.5 \text{ MPa}$ ，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ^[3]。

3 水泥土搅拌桩在水利工程中的典型应用

3.1 堤防与护岸工程

在堤防加固中，水泥土搅拌桩常用于防渗墙与加固帷幕的施工。例如，江苏里下河地区堤防加固工程采用三轴深搅桩施工，桩长 18m，桩径 0.85m，防渗系数达 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，有效控制了渗漏量，堤身稳定系数提高约 30%。

在护岸工程中，通过布设搅拌桩复合地基，提高岸坡抗滑稳定性，并防止水流冲刷导致的边坡失稳。

3.2 泵站与闸基工程

泵站基础多建于饱和软土上，对不均匀沉降极为敏感。采用搅拌桩复合地基可显著减小泵房沉降差。以江西某排涝泵站为例，采用双轴搅拌桩布桩，平均桩长 14m，施工后承载力提高至 220kPa，地基沉降量减少 50%以上。

3.3 渠道与水库防渗工程

在渠道防渗中，搅拌桩可形成连续防渗墙，有效阻断渗流通道。云南某中型灌区改造工程采用三轴深搅桩帷幕深度达 12m，替代传统混凝土防渗墙，成本降低约 20%，且施工周期缩短 40%。

水库坝基防渗中，水泥土桩可与帷幕灌浆结合使用，提高止水效果，防止渗透破坏与管涌现象。

3.4 地基承载与滑坡治理工程

在山区小型水库或山塘整治中，边坡软弱层常引发滑塌。通过设置水泥土搅拌桩抗滑桩群，能有效形成桩土共同作用的加筋体，提高边坡抗滑稳定系数^[4]。

4 工程实例分析

以广东惠州潼湖堤防加固工程为例，工程地基为饱和淤泥质粉质黏土，厚度约 18m，天然承载力仅 60kPa。项目采用三轴水泥土搅拌桩加固，桩径 0.85m，桩距 0.7m，设计强度 1.2MPa。经检测，28d 抗压强度达 1.35MPa，渗透系数 $1.2 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，堤身水平位移减少 38%，整体稳定性显著提高。

另在湖南洞庭湖堤防应急加固工程中，采用粉喷桩处理淤泥质土，平均桩长 12m。施工后地基承载力由原 60kPa 提高至 180kPa，单位造价较传统换填方案降低 15%，经济与技术效果均显著。

5 技术优势与存在问题

5.1 主要优势

水泥土搅拌桩作为地基加固与防渗一体化的新型技术，其综合优势明显：

适应性强：能在饱和软黏土、粉质土、淤泥、砂土甚至杂填土等多种复杂地层中施工，尤其适用于高含水量、地下水位高及施工空间受限的场地。

施工效率高：机械化作业程度高，设备机动性好，单桩施工时间短，日均成桩量大，可显著缩短工期，满足抢险加固与应急工程的要求。

环保节能：采用原位搅拌方式，无需大规模开挖与弃土外运，施工噪声和粉尘小，减少对周围环境与生态系统的干扰，符合当前绿色施工理念。

加固与防渗兼顾：水泥水化产物可同时提升地基承载力与抗渗性能，使工程具备“承载—止水”双重功能，特别适合堤坝、闸基与泵站工程。

成本适中且性价比高：与深层搅拌灌浆或钢筋混凝土桩相比，施工设备简便、材料易得，单位造价较低，经济性突出。

可组合应用性强：可与预压排水、砂井、强夯、CFG 桩等方法联合使用，形成复合地基体系，进一步提高整体稳定性。

5.2 存在问题

尽管水泥土搅拌桩应用广泛，但在工程实践中仍存在一些技术与管理方面的不足：

桩体质量不均问题突出：由于地层差异、搅拌均匀性不足或水泥掺量控制不精确，易导致桩体强度离散性大，影响复合地基整体性能。

施工质量控制难度较大：搅拌转速、注浆量、提升速度等工艺参数直接影响桩体成型质量，若监测系统不完善，易出现空洞、夹层、偏桩等隐患。

检测与评价体系不完善：目前工程检测多局限于单桩抗压强度试验，缺乏对群桩协同承载、防渗连续性及长期变形性能的系统性评价标准。

材料适应性不足：在高有机质、高盐分或强酸性土壤中，水泥水化反应受到抑制，桩体早期强度增长缓慢，长期稳定性不足。

耐久性与长期性能研究不足：多数工程仅关注短期强度指标，对桩体在长期浸水、干湿循环或冻融环境下的结构劣化规律研究仍不充分。

施工管理与技术标准有待完善：部分地区缺乏统一

的施工质量验收规范与监测标准，造成不同项目间质量差异较大，难以实现工艺标准化与工程可复制化^[5]。

6 发展趋势与优化方向

6.1 智能化与信息化施工

随着数字孪生、物联网和人工智能技术的迅速发展，水泥土搅拌桩施工正逐步向智能化、精细化和全过程可视化方向迈进。通过引入BIM三维建模、GPS定位、实时监测传感器以及自动控制系统，可实现桩机作业参数（如钻进深度、提升速度、注浆量、搅拌转速等）的实时采集与反馈，从而实现对施工质量的全过程监控。利用数据云平台和大数据分析，可建立“设计—施工—检测”闭环管理体系，自动识别异常工况并进行智能预警，大幅提升施工精度和稳定性。这一趋势不仅减少了人为误差，也为工程质量追溯和后期维护提供了科学依据。

6.2 高性能材料与复合胶凝技术的应用

未来水泥土搅拌桩的发展将更多地依赖材料创新。传统普通硅酸盐水泥在高含水、高盐分或有机质土中性能受限，因此，掺合料和复合胶凝体系的研究成为重点。例如，采用粉煤灰、矿渣粉、偏高岭土、硅灰等材料，可显著改善桩体的早期强度和耐久性；引入纳米材料或化学助剂，则可提高浆液流变性和水化反应速率。此外，绿色低碳材料的发展趋势也愈发明显，部分研究已尝试利用工业固废制备生态型水泥替代品，以降低碳排放和施工能耗，实现绿色地基加固。

6.3 复合地基与多元化加固技术融合

单一的水泥土搅拌桩在某些复杂地质条件下仍存在承载力不足、应力集中等问题，未来将更多采用复合型、多机制协同的地基处理技术。例如，水泥土桩与砂桩、碎石桩、CFG桩或真空预压等联合应用，可充分发挥各类桩体在承载、排水、固结等方面的互补作用，形成“多层次、多功能”的复合地基体系。在山区或高填方水利工程中，还可与抗滑桩、锚固桩联合使用，形成抗滑-防渗一体化结构。

6.4 绿色施工与碳减排方向

当前“双碳”战略背景下，水泥土搅拌桩的节能降碳问题日益受到关注。未来施工应通过优化水泥掺量、改进设备能效、回收利用施工泥浆、减少机械油耗等途径，降低碳排放强度。同时，可推广使用可再生能源驱动的电动桩机与节能注浆系统。结合现场生态修复理念，实施“施工—绿化—监测”同步管理，实现工程与生态的协调共生。

6.5 标准化与全过程质量控制体系建设

目前国内外在水泥土搅拌桩的施工与检测标准上仍存在差异，未来的发展应加强行业规范与标准体系建设，推动施工参数、检测方法、试验标准和验收指标的统一化。通过建立基于工程大数据的质量评价模型，结合人工智能算法，可对不同地层、不同水灰比下的强度增长规律进行预测与优化。与此同时，应推广全过程质量追踪体系，将材料检测、施工监控与桩体性能检测一体化管理，实现地基处理质量的可控、可评、可追溯。

6.6 长期服役性能与耐久性研究强化

未来的技术优化方向还应聚焦于桩体长期服役性能研究。针对水利工程中常见的长期浸水、干湿循环、冻融交替等复杂环境，应建立系统的耐久性试验与数值模拟体系，分析桩体强度衰减、渗透系数变化与结构劣化规律。同时，利用CT扫描、微观结构分析及有限元数值模型，对水泥土微结构演化过程进行量化研究，为材料配比优化与结构寿命预测提供科学依据。

7 结论

水泥土搅拌桩作为一种高效、经济、环保的地基加固与防渗技术，已成为现代水利工程地基处理的重要手段。其通过桩土复合作用，显著提升软弱地基的承载力、抗渗性能与稳定性，广泛应用于堤防、泵站、渠道、水库等领域。尽管仍存在施工质量控制与检测评价方面的挑战，但随着高性能材料与智能化装备的应用，其技术水平与应用深度将持续提升。未来，应加强工程试验研究与长期性能监测，完善设计—施工—检测一体化体系，推动水泥土搅拌桩技术在水利工程中的高质量发展，为基础设施安全与生态可持续建设提供有力支撑。

参考文献

- [1] 林雪松. 水利工程软土地基强度衰减机理及砂层置换强化分析[J]. 中国新技术新产品, 2025, (20): 85-87.
- [2] 呼磊, 郭腾. 水利工程常见不良地基基础施工方法与处理策略探究[J]. 建材发展导向, 2025, 23(20): 133-135.
- [3] 李定. 水利工程不良地基加固技术措施探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (27): 204-206.
- [4] 顾越. 水利工程中水闸泵站施工技术的运用分析[J]. 科技资讯, 2025, 23(18): 156-158+162.
- [5] 张卫华, 王树君. 水利工程中高压喷射灌浆施工技术应用研究[J]. 工程机械与维修, 2025, (09): 88-90.