

水利堤防工程富水砂层地层适应性三轴搅拌桩施工方法研究

姜海浪 徐红林 贾康

淮安市淮河水利建设工程有限公司，江苏淮安，223400；

摘要：堤防基础富水砂层渗透性强，含水量高，采用传统统一参数的三轴搅拌桩工艺易导致成桩质量不均、止水效果不理想及水泥浪费等问题。本文提出一种地层适应性的三轴搅拌桩施工方法。该方法核心在于依据地质勘探资料，沿桩身深度方向对地层进行精细化分段，针对不同分段层（如水位上加固区、水位下加固区、弱加固区及入岩区）的地质特征与工程要求，设定差异化的施工参数（包括水灰比、下沉/提升速度、注浆流量、高压送风量及水泥掺量）。施工前通过试桩取芯验证参数合理性，并在钻杆导轨设置分区标识以实现施工参数的精准切换。工程实践表明，该方法通过“分层识别、参数适配、过程控制”的技术路线，显著提升了在富水砂层等复杂地层中三轴搅拌桩的成桩均匀性、止水可靠性及桩体强度，同时通过优化水泥用量实现了经济效益的提升，为同类堤防基础防参加固工程提供了系统的解决方案。

关键词：堤防工程；富水砂层；三轴搅拌桩；分层施工；参数优化；质量控制

DOI： 10. 69979/3060-8767. 26. 04. 054

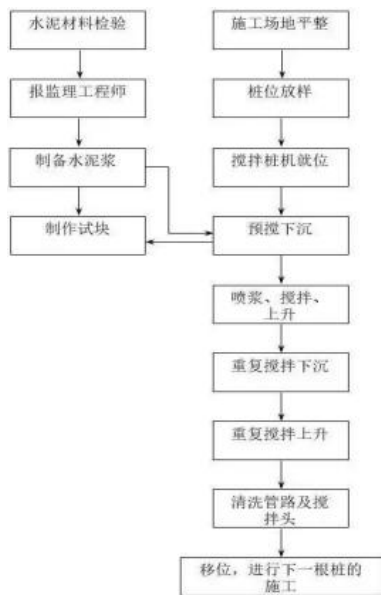
引言

三轴水泥土搅拌桩（SMW工法）因其施工效率高、止水效果好，已成为水利工程堤防、围堰等构筑物基础防参与加固的常用技术^[1,2]。然而，当应用于堤防基础下的富水砂层时，传统采用固定施工参数的模式面临严峻挑战。富水砂层具有孔隙率大、渗透系数高、内聚力低等特点^[3]，地下水活动强烈。采用不变的施工参数，往往导致浅部土层水泥掺量过剩，而深部富水砂层或桩底入岩部位因浆液稀释、流失或难以搅拌密实，形成薄弱环节甚至渗流通道，严重影响防渗帷幕的整体性与止水效果^[4,5]。这不仅造成水泥材料的浪费，也增加了工程风

险。

现有研究多集中于设备改进或单一参数（如水泥掺量、水灰比）对成桩质量的影响^[6,7]，缺乏针对桩身穿越多层异质地层（特别是水上、水下及岩土交界面）时，施工参数应随深度动态调整的系统性方法。为实现精细化施工、保证全桩长质量均匀并控制成本，本文提出一种“基于地层分段的自适应参数”三轴搅拌桩施工方法。该方法强调施工前的地质精细化分析、施工中的参数动态适配与施工后的效果科学验证，形成了一套完整的适用于堤防基础富水砂层的质量控制流程。

1 地层适应性施工方法原理与流程



1.1 核心原理

本方法的核心理念是摒弃“一刀切”的施工参数模式，转而根据三轴搅拌桩桩身穿越的不同地质单元（分层）的物理力学特性、水文地质条件及工程功能要求，为其“量身定制”最适宜的施工参数组合。通过参数差异化设置，实现：①在稳定性较好的上层减少资源投入；②在富水、易扰动的关键层位加强加固；③在难以搅拌的岩层界面确保有效结合，从而在保证整体工程质量的前提下，实现技术经济性的最优化。

1.2 施工流程

完整的施工流程如图1所示，主要包括三个阶段：准备阶段、实施阶段和验证阶段。

• 准备阶段：

1. 地层分段分析：详细研析地质勘察报告，结合钻孔资料，沿桩身深度方向划分地质分段层。典型分段模型包括：a) 两段模型：水位上加固区（地下水位以上）、水位下加固区（地下水位以下的砂层）；b) 三段或四段模型：在以上基础上，增加靠近地表的“弱加固区”（稳定土层，可适度降低加固标准）和桩底“入岩区”（需确保与基岩结合密实）。

2. 分区参数设定：为每个分段层初步设定差异化的施工参数，主要控制参数包括：水灰比、钻进/提升速度、注浆流量、高压空气送风量、水泥掺入比等。

3. 试桩与参数验证：在工程现场进行工艺试桩。待试桩养护至规定龄期（富水砂层建议45-60天）后，在桩体特定位置（如相邻桩非重叠区的半径1/2处）钻取芯样，进行无侧限抗压强度、完整性及水泥分布均匀性检测。根据芯样结果验证并优化各分层参数。

4. 设置分区标记：根据最终确定的分层深度，在三轴搅拌桩机的钻杆或导轨上设置清晰、准确的分区标识，作为施工时切换参数的视觉依据。

• 实施阶段：

5. 测量定位与导沟开挖：按设计进行精确测量放样，并开挖导向沟槽。

6. 桩机就位与垂直度控制：桩机移至桩位，采用悬挂铅垂与经纬仪联校的方法，确保钻杆垂直度误差小于0.5%。

7. 浆液拌制：按照验证后的参数要求，集中拌制水泥浆液。

8. 注浆搅拌成桩（关键步骤）：启动桩机。操作

人员根据钻杆上标识，实时判断钻头所处地层分段，并手动或通过预设程序自动切换至对应的施工参数组。严格执行“两喷两搅”或优化工艺，完成整桩施工。

9. 施工记录：详细记录每根桩各分层的实际施工参数、深度、时间及异常情况。

• 验证阶段：

10. 质量检测与评估：工程桩施工后，按规范要求进行取芯、标贯、抽水试验等，综合评价帷幕的整体防渗性能与加固效果。

2 关键分层参数设定策略

基于富水砂层地质特点及工程经验，推荐以下分层参数设定策略（具体数值需经试桩验证调整）：

2.1 水位上加固区

• 地质特征：位于地下水位以上，土体通常为稍湿~湿的粉土、黏性土或砂土，含水量相对较低，可钻性较好。

• 参数策略：以保证桩体连续性和一定强度为主，可适度节约水泥。建议参数范围：水灰比1.5~2.0，下沉/提升速度0.5~0.8 m/min，水泥掺量18%~22%，高压送风正常。较高的水灰比和较快的速度有助于提高工效。

2.2 水位下加固区（富水砂层核心区）

• 地质特征：饱和砂层，渗透性强，地下水活动活跃，水泥浆易被稀释和冲走。

• 参数策略：需重点加强，确保形成密实、高强度的水泥土体。建议参数范围：水灰比降低至1.2~1.5以提高浆液稠度；下沉/提升速度减慢至0.3~0.6 m/min以延长搅拌时间，确保充分混合；水泥掺量提高至35%~40%以补偿可能的水泥流失；高压送风量可适当减小，以避免过度扰动导致浆液沿孔隙通道优先流失。

2.3 弱加固区（可选）

• 地质特征：靠近地表，多为力学性质相对较好的硬塑黏土层或密实填土，本身稳定性高，防渗要求相对较低。

• 参数策略：以满足最小强度要求为目标，大幅节约成本。建议参数范围：水泥掺量可降至10%~15%，水灰比和速度可适当放宽。

2.4 入岩区（桩底接触段）

• 地质特征：搅拌桩需进入或接触下部基岩（风

化岩)的区段,目的在于形成可靠的止水底塞,防止绕渗。

• 参数策略: 确保水泥浆与岩面及裂隙充分结合。建议参数: 在钻至设计入岩深度后, 停止喷气(避免气体阻碍浆液渗入裂隙), 进行“原位复搅”, 即钻头在桩底位置持续搅拌至少10分钟, 同时保持注浆, 使稠浆(水灰比1.2~1.5)在压力下挤入岩石表层缝隙。水泥掺量维持高位(38%~40%)。

3 质量控制与实施要点

3.1 精准的地层识别与标记

施工前, 必须依据详勘资料绘制每个桩位的地层柱状图。将分层深度信息准确转换并标记在钻杆导轨上, 这是实现参数动态调整的前提。标记应清晰、牢固, 便于操作手在施工中快速识别。

3.2 严格的试桩与参数验证

试桩是连接设计与施工的关键环节。对于富水砂层, 由于地下水影响, 水泥土强度发展较慢, 建议将取芯验证时间延长至施工后45-60天。取芯位置应避开桩间重叠区域, 选择能真实反映单桩成桩质量的部位。芯样应进行强度、均匀性及桩底结合情况检查, 据此对预设参数进行最终校准。

3.3 过程监控与记录

推广使用配备自动监测系统的三轴搅拌桩机, 实时记录并存储每延米的深度、注浆压力、注浆量、搅拌转速、升降速度等参数。这些数据可与地层分层信息关联, 形成数字化施工档案, 便于质量追溯和问题分析。

3.4 桩机垂直度与定位精度控制

采用“定位钢筋+麻绳标尺”进行平面定位, 结合“铅垂-经纬仪”法控制垂直度, 将钻杆垂直度偏差严格控制0.5%以内, 这是保证相邻桩体有效搭接、形成连续帷幕的基础。

4 工程应用优势分析

与传统固定参数法相比, 本方法具有以下显著优势:

1. 质量提升: 针对性地解决了富水砂层浆液流失、

桩底结合不良等质量通病, 提高了桩身强度均匀性和止水帷幕的可靠性。

2. 经济节约: 通过在上部稳定地层减少水泥用量, 在关键部位重点加强的优化策略, 可在保证整体质量的前提下, 有效降低水泥总用量, 节约工程成本约10%-20%。

3. 适应性强: 方法框架具有普适性, 可根据不同工程的具体地质条件灵活调整分段方案和参数值, 适用于各种复杂地层条件下的三轴搅拌桩施工。

4. 管理精细化: 促进了施工从“经验驱动”向“数据驱动”的转变, 提升了施工过程的可控性与质量管理的精细化水平。

5 结论

本文针对堤防基础富水砂层的地质特点, 系统提出了一种地层适应性的三轴搅拌桩施工方法。该方法通过施工前的地层精细化分段与参数预设、施工中的基于视觉标识的参数动态适配、以及施工后的科学验证与反馈, 实现了施工工艺与地层条件的精准匹配。工程实践表明, 该方法能有效克服富水砂层中成桩质量不均衡、材料浪费及止水效果不佳等技术难题, 在显著提升工程质量的同时取得了良好的经济效益。该方法的成功应用, 为在复杂水文地质条件下进行高效、经济、可靠的地基加固与防渗施工提供了有益的技术途径和理论支持。未来, 可进一步探索将BIM技术与自动化控制系统结合, 实现分层参数的全自动智能化切换, 进一步提升施工精度与效率。

参考文献

- [1] 叶书麟, 韩杰, 叶观宝. 地基处理与托换技术(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 建筑基坑支护技术规程: JGJ120-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [4] 刘松玉, 钱国超, 章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.