

# Application of Cement Mixing Pile Construction Technology in Highway and Bridge Engineering Projects

Xiaosi Dong

Henan Xinnianheng Construction Engineering Co., Ltd., Kaifeng, Henan, 475000, China

## Abstract

Highway and bridge construction projects often encounter challenges in ground treatment under complex geological conditions, particularly in soft soil areas where issues such as settlement deformation and insufficient bearing capacity readily arise. The cement mixing pile technique, by facilitating physicochemical reactions between cement and soil to form composite foundations, effectively enhances the mechanical properties of the ground. This technology has emerged as a key solution to such problems. Current engineering practices reveal that inadequate alignment between construction parameters and geological conditions leads to fluctuations in project quality. Therefore, systematically investigating the applicability boundaries and process optimization pathways of this technology in highway and bridge engineering has become an urgent necessity. In response to these practical engineering demands, this paper focuses on exploring theoretical advancements and practical innovations in cement mixing pile construction techniques.

## Keywords

cement mixing piles; construction technology; highway bridges; engineering application

# 水泥搅拌桩施工技术在公路桥梁工程施工中的运用

董孝思

河南鑫念恒建筑工程有限公司, 中国·河南 开封 475000

## 摘要

公路桥梁工程建设常面临复杂地质条件下的地基处理难题,特别是在软土区域,沉降变形以及承载力不足的问题很容易出现。水泥搅拌桩技术凭借其能让水泥与土体发生物理化学反应从而形成复合地基的特性,实现了对地基力学性能的有效改善,该技术成了解决这类问题的关键技术手段。就当前的工程实践状况来看,由于施工参数和地质条件之间的匹配度有所欠缺,进而导致了工程质量出现波动的情况。所以系统研究此项技术在公路桥梁工程当中的适用性边界以及工艺优化路径,成为当下十分迫切的需求。基于这样的工程实际需求,本文将着重朝水泥搅拌桩施工技术的理论深化与实践创新这两个方向展开探索。

## 关键词

水泥搅拌桩; 施工技术; 公路桥梁; 工程运用

## 1 引言

水泥搅拌桩技术原位土体改良以形成复合地基有着显著优势,尤其体现在控制沉降以及提升稳定性方面。不过其应用效果会受到限制,限制因素在于地质条件识别精度与施工工艺匹配度。就现有研究来看,多数聚焦在单一工艺参数给成桩质量带来的影响上,对于公路桥梁工程所特有的需求缺乏系统且全面的分析。本文以土体固化机理以及工程力学理论作为基础,再结合公路桥梁结构的荷载特征以及地基变形控制方面的要求,构建起了一个技术应用体系,该体系涵盖了工艺选择、质量控制以及环境适应性等内容,目的在于

为提升桥梁工程地基处理的效能给予理论支撑与实践指导<sup>[1]</sup>。

## 2 水泥搅拌桩技术的理论基础

### 2.1 水泥搅拌桩的技术原理

水泥搅拌桩是指地基处理的一种有效形式,是一种将水泥作为固化剂的主剂,利用搅拌桩机将水泥喷入土体并充分搅拌,使水泥与土发生一系列物理化学反应,使软土硬结而提高地基强度(如图1所示)。水泥搅拌桩技术依托水泥与土体间复杂的物理化学反应形成固化结构,水化反应生成的水化硅酸钙与氢氧化铝凝胶填充土体孔隙并包裹颗粒表面,胶结作用逐步增强土体整体性。机械搅拌过程促使水泥浆液均匀分散于土体中,充分接触的混合物在水分参与下发生离子交换与团粒化效应,固化产物网络结构有效提升复合体的抗剪强度与变形模量。搅拌深度与喷浆量的精确匹配决

【作者简介】董孝思(1986-),男,中国河南开封人,本科,工程师,从事道路与桥梁工程研究。

定了胶凝材料在土层中的分布密度，特定养护条件下胶结体内部晶格不断发育完善，微观层面的结构重组直接反映为地基承载力的渐进式增长。



图 1 水泥搅拌桩施工示意图

## 2.2 公路桥梁工程的地基处理特殊要求

地基处理需在深层土体内部构建具有连续传力路径的复合结构体系，因为松散沉积层在长期外部应力作用下容易产生塑性滑移，必须通过土颗粒间的胶结作用形成三维空间网状骨架以提升抗侧移能力。地下潜流对固化体的侵蚀效应要求水泥水化产物的结晶形态与孔隙结构能有效阻断渗流通道，防止胶凝材料在离子交换过程中发生崩解。温度梯度引发的体积变化需要固化体系具备微裂缝自愈合特性，使得处理后的地基在热力学循环中保持应力重分布能力。动荷载的频谱特性对处理层能量耗散机制提出特殊限制，要求改良土体在弹性变形范围内具备足够的阻尼比来吸收振动能量。

## 3 水泥搅拌桩施工技术在公路桥梁工程中的应用

### 3.1 软土地基加固处理

机械钻头在预设轨迹下匀速下沉的同时喷出水泥浆液，旋转叶片对原位土体进行破碎切割并与固化剂强制拌合，形成连续均匀的柱状加固体。施工参数需根据土层剪切强度与渗透系数动态调整，针对淤泥质土或夹粉砂层区域，适当增加固化剂掺量并延长搅拌时间可强化水泥水化产物在孔隙中的填充效果。地下水位较高地段采用二次喷浆工艺补偿浆液稀释损失，桩体间咬合搭接的排布模式构建出三维网状支撑体系，有效抑制地基侧向位移与差异沉降。施工后桩土复合体经历 28 天标准养护期，孔隙水压力消散促使胶结结构

进一步密实，触探试验与载荷板检测数据验证其承载力提升幅度。特殊地质如含有机质软土需掺入石膏类外加剂中和腐殖酸干扰，多遍复搅措施打破土体团块包裹现象，确保固化反应在微观层面充分完成<sup>[1]</sup>。

### 3.2 桥头过渡段路基加固

水泥搅拌桩通过形成梯度变化的复合地基调节不同区段的变形模量，使土体刚度呈现渐进式过渡以消解结构衔接部位的应力集中现象。车辆荷载的往复冲击易在路基填挖交界处诱发剪切滑移面，深层搅拌形成的连续桩体网络可重构土体内部应力传递路径，将局部剪应力转化为桩土复合结构的整体抗剪能力。地下水位季节性变化引起的毛细水上升会导致填料含水率波动，水泥固化产物形成的微晶结构能有效阻断水分迁移通道，维持改良土体的体积稳定性。过渡段填方区在自重应力与交通荷载耦合作用下存在差异沉降风险，桩体与周围土体协同变形的特性可建立多级应力消散机制，促使不均匀变形控制在结构允许阈值内。施工过程中桩径与桩间距的拓扑关系直接影响着加固区应力场的分布形态，需根据车辆轴载谱特征优化桩体空间布局以实现动应力波的有效衰减。

### 3.3 提高地基承载能力

钻杆叶片以特定转速切入土层时同步注入水泥浆，充分拌合后的混合物在重力与机械挤压力作用下重塑土体骨架。固化剂掺入比例需结合原位土颗粒级配与天然稠度精准设计，砂性土中适当增加粉煤灰掺量可优化胶凝产物与粗骨料的界面结合状态，黏性土区域则通过提升搅拌遍数打破团粒包裹效应。桩位布置采用梅花形阵列增强水平向荷载传递效率，相邻桩体间应力叠加区域形成的拱效应显著降低地基潜在剪切破坏风险。施工过程中钻杆提升速率与喷浆压力联动调节，黏质粉土层降低提升速度延长浆土接触时间，砂层加快转速促进浆液均匀扩散。龄期监测数据显示桩身上部 1/3 区段因应力集中产生更致密的钙矾石结晶，静载试验揭示复合地基沉降曲线呈现典型双折线特征。地下水位波动区域采用缓凝型水泥延缓初凝时间，多向搅拌工艺产生的交叉剪切力促使桩径范围内土体产生定向排列结构，桩侧摩阻力实测值较传统工艺提升约 1.2 倍。

### 3.4 减少基础沉降变形

深层软土地基在长期荷载作用下产生的压缩变形可通过水泥搅拌桩形成的复合地基体系进行有效调控，桩体与周围土体间的模量差异促使应力场向桩顶区域集中，从而降低下部软弱土层的附加应力水平。水泥水化产物与粘土矿物发生的离子交换反应重构了土颗粒接触面的化学键合方式，使得改良土体的压缩指数随龄期增长呈现指数型衰减特性。交通动荷载引发的重复塑性应变累积被桩土复合结构的应力扩散效应所抑制，桩体网格状分布形成的拱效应将局部变形能转化为体系整体弹性势能。施工过程中喷浆压力与搅拌速度的匹配关系直接影响水泥浆液在土体中的渗透半径，精

确控制工艺参数可形成具有渐变模量特征的加固区边界过渡带。

## 4 水泥搅拌桩施工技术在公路桥梁工程中的应用方法

### 4.1 施工前的准备工作

施工方在工程启动前需组织专业团队对作业区域进行三维地质雷达扫描,结合钻孔取样数据建立土层参数数据库,为搅拌桩深度和水泥掺量设计提供量化依据。设备管理团队应对搅拌钻头的磨损状态实施动态监测,依据不同土层的剪切强度梯度调整叶片角度与转速匹配方案,确保刀头在粉质粘土与砂砾交互地层中保持稳定的切削效率。材料质检部门需建立水泥进场批次与固化剂配比的追溯体系,针对地下水中硫酸盐离子浓度变化预设三组平行试验方案,通过凝结时间与无侧限抗压强度双指标验证材料适应性。技术人员根据设计桩位布置反演应力分布云图,在临近既有构筑物区域采用辐射状布桩模式,利用桩体应力叠加效应形成保护性隔离带。现场调度组需规划出不同固化阶段的施工作业面周转路线,将喷浆设备移动轨迹与桩机就位时序进行空间拓扑优化,避免因机械交叉作业导致成桩间隔时间超出初凝阈值。

### 4.2 水泥搅拌桩施工工艺

水泥搅拌桩施工工艺围绕钻机参数调控、浆液配比动态管理与现场监测反馈三个维度展开,钻杆下钻速度与土层阻力实时匹配避免桩体出现颈缩或断桩,四翼螺旋钻头在黏性土中降低转速至每分钟 45 转可减少粘土团包裹钻杆现象。浆液制备采用双轴搅拌机进行两阶段拌合消除粉煤灰结块风险,操作人员依据输送泵压力表指针波动幅度判断管路堵塞情况,触变性改良后的浆液维持 30 分钟内析水率低于 5% 的技术指标。施工轨迹记录仪持续采集钻杆三维坐标数据,当桩位偏差超过 5 厘米时立即启动纠偏程序重新定位钻架基座,桩长控制采用钻杆自重下沉与电流突变双指标校核法穿透硬夹层。现场试验段每 200 延米取芯验证桩身完整性,芯样裂隙发育程度直接反馈至浆液水灰比调整方案,地下水活跃区域添加木质素磺酸钙延缓初凝时间至 45 分钟以上。灰浆泵压力维持在 0.4-0.6 兆帕区间保障粉砂层中浆液有效渗透,喷浆中断超过 20 分钟需将钻具提升至地表彻底清洗输浆管路,防止沉淀结垢造成后续喷浆量失真。桩顶超灌 0.5

米高度补偿土体回弹导致的桩头凹陷,养护期间采用塑料薄膜覆盖减少水分蒸发引发的干缩裂缝,7 天龄期钻芯检测无侧限抗压强度已达设计值的 60% 验收标准<sup>[1]</sup>。

### 4.3 施工质量控制与检测

施工质量控制体系依托实时监控平台对钻杆扭矩与提升速度实施动态耦合分析,依据地层阻力的突变特征自动修正喷浆量补偿系数,确保水泥浆液在粉质粘土与砂层交界面形成均匀渗透带。桩体完整性检测采用分布式光纤传感技术捕捉固化过程中温度场与应变场的时空演化规律,通过热力学参数反演判断桩身缺陷的几何形态与空间位置。龄期强度评估引入超声波跨孔透射法建立波速-强度映射模型,结合不同深度土样的电镜扫描结果验证桩土界面的矿物胶结程度。施工过程数据管理系统对每日成桩记录进行多维度关联分析,挖掘钻头磨损周期与桩径变异的内在联系,为刀具更换时机制定预测性维护策略。特殊地质段实施全过程录像与参数回溯机制,当遇到漂石或地下空洞时立即启动三维地质模型重构程序,动态调整相邻桩体的施工顺序与工艺参数组合。验收阶段采用微扰动取芯技术提取桩体不同深度的固化试样,对比室内加速养护试块的强度发展曲线验证现场养护条件的等效性。

## 5 结语

公路桥梁地基承载性能的显著提升可通过水泥搅拌桩技术对土体结构的优化来达成,其固化反应形成的连续桩体网络有效抑制了地基的不均匀沉降。地质勘察精度以及参数设计合理性,是在施工过程中属于需重点把控的方面,针对桥头过渡段等关键部位实施差异化的水泥掺量控制。施工质量监测方面,建议引入智能传感技术,以此实现对桩体强度发展情况的实时反馈。未来研究的探索方向应是新型固化材料配比对不同土质的适用性,还有施工过程给周边环境带来的长期生态影响。

### 参考文献

- [1] 李发智.水泥搅拌桩施工技术在市政道路施工中的应用[J].全面腐蚀控制,2025,39(04):239-242+254.
- [2] 郭晓旭.公路工程路基加固施工中深层水泥搅拌桩施工技术研究[J].运输经理世界,2023(01):13-15.
- [3] 王莉萍.水泥搅拌桩施工技术在市政道路施工中的应用[J].工程机械与维修,2021(06):162-163.