

# 基于水泥搅拌桩的市政道路软弱地基加固施工

薛宇

(上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200030)

**摘要** 软弱地基具有含水率高、压缩性大、承载力低等特点,是市政道路工程中常见的工程难题,易引发路基沉降、路面开裂等病害。水泥搅拌桩凭借施工速度快、加固效果好、对周边环境影响小等优势,已成为软弱地基加固的主流技术。本文从物理化学反应、力学性能改善、排水固结三个方面阐述水泥搅拌桩加固机理,论述桩位定位、桩机就位、搅拌下沉、提升搅拌、二次搅拌及桩头处理等全流程施工工艺,并针对桩体强度不足、桩头松散、桩体垂直度超标等常见质量问题提出控制措施,以期为市政道路软弱地基水泥搅拌桩加固施工提供技术参考。

**关键词** 市政道路; 软弱地基; 水泥搅拌桩

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.035

## 0 引言

随着我国城市化进程加快,为满足日益增长的交通运输需求,新建大量市政道路工程、城市路网体系愈发完善,有助于缓解交通拥堵问题和促进国民经济发展。但在工程建设阶段,常遇到软土分布区域,软弱地基天然承载力低、压缩性高、稳定性差,若处理不当,极易造成路基不均匀沉降、路面破损、结构失稳等问题,严重影响道路使用寿命与行车安全。水泥搅拌桩凭借工艺成熟、适用范围广、施工经验丰富、技术标准明确的突出优势,成为软弱地基首选加固技术,加固效果完全满足市政道路地基质量要求,对保障道路长期安全稳定运行具备重要的现实意义。

## 1 软弱地基水泥搅拌桩加固机理

### 1.1 物理化学反应

软弱地基具有高压缩性,其由大量松散土体组成,密集分布孔隙,实际含水率偏高,在上部荷载作用下,持续压缩土层体积,最终出现整体沉降、局部差异沉降问题。在水泥搅拌桩加固期间,以水泥干粉或水泥浆作为固化剂,搅拌成桩后持续喷射固化剂,强制搅拌土体颗粒与固化剂,二者进行一系列物理化学反应,以氢氧化钙、硅酸钙、铝酸钙作为水化产物,水化产物和土体本身含有活性成分进行二次反应,最终生成大量稳定胶凝体来填充土层孔隙,将松散土体颗粒胶结形成整体结构,带动地基土体强度、抗渗性和稳定性全面提升<sup>[1]</sup>。

### 1.2 改善力学性能

软弱地基力学性能明显差于普通地基,其抗剪强度不足,实际承载力普遍低,在施工荷载作用下,出

现局部剪切破坏、整体剪切破坏、地基滑动失稳等问题。同时,软弱地基还存在压缩性大、变形量大、工后沉降超标、稳定性差等问题。水泥搅拌桩加固期间,通过改善地基力学性质,彻底解决上述问题,从源头上消除地基不均匀沉降隐患,确保地基长期稳定状态。一方面,水泥土搅拌桩具备较高强度,包括抗弯强度、抗压强度以及抗剪强度,作为复合地基体系,桩体承受绝大多数竖向荷载,桩间土体仅承受少量荷载,显著改善地基土体受力状态,预防剪切破坏和压缩变形问题发生,进而提升地基承载能力。另一方面,水泥搅拌桩长效约束周边土体侧向变形,保证地基整体沉降量和局部差异沉降量不超出允许值。

### 1.3 排水固结

软弱地基含水率过高,内部存有大量难排出的孔隙水,在上部施工荷载与交通荷载长期作用下,孔隙水与空气被持续挤出,地基缓慢持续沉降,最终引发工后沉降超标问题。在水泥搅拌桩加固期间,可以提前加速完成固结沉降过程,预计可以减少 80% 以上的工后沉降量。具体来讲,搅拌桩机运行期间,搅拌叶片高速切削地基土体,破坏原状结构,形成大量排水通道,叠加桩机自身重量与其他施工荷载,引导地基孔隙水向外排出,直至地基土体彻底固化。

## 2 市政道路软弱地基水泥搅拌桩加固施工关键技术

### 2.1 桩位定位

桩位定位环节,现场架设全站仪和水准仪,查阅设计图纸,确认桩基整体布局方案和已知坐标控制点,现场建立测量控制网,逐一测设各处桩位,桩位中心

作者简介:薛宇(1992-),男,本科,工程师,研究方向:市政道路。

点插入短钢筋作为施工标志, 周边放置标识牌, 标注桩位编号、桩长、桩径、固化剂用量等施工信息。全部桩位测设完毕后, 对照控制网坐标, 复核确认放线定位成果是否有误, 以桩位偏差、间距、排列形式作为复核内容, 及时调整不合格桩位, 如要求所有桩位的位置偏差小于 50 mm<sup>[2]</sup>。

## 2.2 桩机就位调整

桩位定位完毕后, 现场配备深层搅拌桩机, 按照软弱地基深度来选择桩机型号, 软基厚度不足 15 m 和超出 15 m 时, 分别配备单轴搅拌桩机与双轴搅拌桩机, 并在狭窄路段等特殊位置选用小型搅拌桩机。确认水泥土搅拌桩成桩顺序, 桩机部署在首处桩位, 提前对施工场地进行平整硬化处理, 桩机位置上浇筑混凝土刚性基础或是摆放厚钢板来分散受力, 测量调整桩机位置, 以安装位置、水平度和垂直度作为调整内容, 初步调整支撑腿高度来保持机身水平状态, 桩机两侧架设经纬仪, 继续调整桩架垂直度, 要求桩架和地面相互垂直, 最终复核确认桩机位置是否准确无误。正常工况下, 以搅拌头和桩位中心点完全重合、桩机垂直度误差小于 1%、水平度误差小于 0.3% 作为合格标准。

## 2.3 搅拌下沉

搅拌下沉环节, 确认各项准备工作完成后, 启动深层搅拌桩机, 向下强制搅拌地基土体, 破坏土体原状结构, 一次性完成单桩搅拌下沉作业, 下沉深度误差不超过  $\pm 50$  mm, 搅拌头彻底穿越软弱土层并抵达设计持力层位置。为实现精细化施工目标, 确保地基土体充分破碎, 严格控制施工参数, 核心参数包括下沉速度、搅拌速度和下沉深度, 控制方法如下。第一, 下沉速度。根据岩土勘察报告来掌握地质构造情况, 确认不同地层分界位置, 按照地层种类, 动态调整桩机下沉速度, 整体下沉速度保持在 0.5 ~ 1.0 m/min, 穿越淤泥层和淤泥质土层时的下沉速度放缓至 0.5 ~ 0.8 m/min, 穿越含砂层时把下沉速度提升至 0.8 ~ 1.0 m/min。如果中途穿越 10 cm 以上厚度硬夹层, 单纯提升下沉速度, 无法有效穿越硬夹层, 暂停下沉作业, 使用小型破碎锤强制破除硬夹层, 搅拌头在硬夹层上方 1 m 位置重新开展旋转下沉作业<sup>[3]</sup>。第二, 搅拌速度。搅拌头下沉期间, 始终保持旋转状态, 整体旋转速度保持在 20 ~ 30 r/min, 中途根据土层性质进行调整, 穿越淤泥/淤泥质土层和含砂层时, 分别把旋转速度控制在 25 ~ 30 r/min 和 20 ~ 25 r/min, 搅拌转速和地层含水率呈反比例关系。第三, 下沉深度。施工人员提前在桩架上涂刷红色油漆来标记设计桩长刻度, 搅拌下沉过程中, 安排专人跟踪观察刻度变化情况, 周边架设水准仪辅助测量搅拌头下沉深度, 确认实际下沉

深度即将抵达刻度值后, 酌情放缓下沉速度, 深度偏差不得超过  $\pm 50$  mm, 并控制搅拌头在设计持力层位置预停留 30 ~ 60 s, 原位保持旋转状态, 同步向周边土体喷射 1.5 ~ 2 g/cm<sup>3</sup> 浓度的水泥浆。

## 2.4 提升搅拌

提升搅拌环节, 同步控制搅拌头匀速向上提升并连续喷射水泥浆, 强制混合固化剂与土体颗粒, 为二者进行物理化学反应创造良好条件。在正常工况下, 将提升速度精准控制在 0.8 ~ 1.2 m/min, 搅拌转速保持在 20 ~ 30 r/min, 持续提升至桩顶设计标高上方 0.5 ~ 1.0 m, 要求中途不得中断作业, 并把每米桩长水泥浆用量误差限制在 5% 以内。从现场实操角度来看, 确认搅拌头下沉就位并原位搅拌 30 ~ 60 s 后, 衔接开展提升搅拌作业, 水泥浆保持 0.4 m<sup>3</sup>/min 速度输送至搅拌头, 控制搅拌头向上旋转提升, 提升旋转方向和下沉旋转方向保持一致, 中途定期检查浆液浓度, 要求浓度误差不超过 0.1 g/cm<sup>3</sup>, 并在搅拌头提升到桩顶上方 0.5 m 位置后暂停提升, 持续输送 30 ~ 60 s 水泥浆, 保证桩顶部分浆液充足, 避免后出现桩顶松散病害。

## 2.5 二次搅拌

结合往期市政道路工程施工案例来看, 软弱地基加固效果和搅拌成桩速度有着密切联系, 如果采取单次搅拌工艺, 极易出现水泥浆局部富集现象, 未能彻底破碎桩周土体结构, 伴随出现桩身夹泥、局部水泥用量不足等多项缺陷病害, 实际成桩强度和结构整体性达不到设计预期。为解决上述问题, 必须采取二搅二喷工艺, 首次搅拌结束后, 重复操作过程, 再次控制搅拌头旋转下沉至桩底持力层位置, 提升搅拌至桩顶上方 0.5 ~ 1.0 m 位置, 全程连续作业, 严禁中途停止。从现场实操角度来看, 二次下沉搅拌速度、提升搅拌速度和第一次保持一致, 搅拌转速同样保持在 20 ~ 30 r/min, 首次提升搅拌结束后, 立即关闭水泥浆输送泵和开展二次搅拌下沉作业, 前后次搅拌间隔时间不超过 30 min, 并在二次提升步骤再次启动水泥浆输送泵, 输送量保持在 0.3 ~ 0.5 m<sup>3</sup>/min。如果中途因设备故障等突发情况导致二次搅拌作业中断, 等待问题妥善解决后, 搅拌头保持在中断部位下放 1.5 m 位置, 重新开展二次搅拌作业<sup>[4]</sup>。

## 2.6 桩头处理

二次搅拌结束后, 静置一段时间, 等待水化反应进行, 并在施工结束 24 ~ 48 h、确认桩体强度超过 30% 设计值后, 着手凿除桩头超高部分, 把桩顶修整成光滑、平整和坚实状态。从实操角度来看, 组合采取机械清除和人工清除方式, 现场准备小型破碎锤和风镐作为工器具, 轻轻铲除桩头超高部分, 单次清除厚

度控制在 50 ~ 100 mm, 完整露出内部坚实水泥土。周边架设水平仪, 测量桩头表面平整度, 要求平整度误差小于 5 mm, 使用 1:2 水泥砂浆对偏差部位进行修补找平处理, 以桩头标高误差小于  $\pm 20$  mm 作为合格标准。

### 3 市政道路软弱地基水泥搅拌桩加固施工控制策略

#### 3.1 桩体强度不足

软弱地基核心问题在于强度水平不足, 如果桩体强度低于设计值, 将会直接影响到软基加固处理效果, 无法稳定承受上部荷载, 最终引发道路不均匀沉降等质量病害发生。根据现场施工情况来看, 桩体强度不足主要由于土体颗粒与固化剂搅拌不均匀, 未能保持混合状态, 不同部位的水泥水化进程存在显著差异, 局部缺少足够胶凝体来胶结土体颗粒, 形成原因包括搅拌速度超标、下沉提升速度不匹配、搅拌时间鼻祖、省略二次搅拌步骤。为预防此项问题发生, 严格控制搅拌参数, 正常工况下, 把搅拌头旋转速度固定保持在 20 ~ 30 r/min, 搅拌下沉速度和提升速度分别保持在 0.5 ~ 1.0 m/min 和 0.8 ~ 1.2 m/min, 要求各根桩身实际搅拌时间必须超过 95% 设计时长<sup>[5]</sup>。同时, 强化二次搅拌工序, 以桩体中部、底部作为易搅拌不充分区域, 重点开展二次搅拌作业, 彻底消除蜂窝、离析缺陷。

#### 3.2 桩头松散

桩头松散问题表现为桩头水泥土软弱松散, 伴随出现裂缝、蜂窝等质量病害, 且桩头实际强度水平低于设计值, 后续在上部荷载作用下, 桩头部位破损失效, 致使传力路径中断。此项问题的核心主因在于养护不到位, 形成原因包括养护时间滞后、总体养护时长不足、受外力干扰导致养护措施失效, 因胶凝体形成数量不足而导致桩头强度下滑。为预防桩头松散问题发生, 等待桩头处理完毕后, 要求施工人员即刻开展养护作业, 在桩身外部部位上完整覆盖湿润土工布或是塑料薄膜, 不得存在裸露部位, 顶部覆盖重物压实保湿材料。常温环境和低温环境下的养护时间分别超过 7 d 与 14 d, 如果环境温度超过 30 °C, 中途多次开展洒水作业, 洒水频率保持在 12 h/次。

#### 3.3 桩体垂直度超标

桩体垂直度超标问题表现为桩体向一侧倾斜, 垂直度误差大于 1%, 致使复合地基体系受力失衡, 因局部集中受力而引发桩体断裂等一系列问题。此项问题的核心主因在于桩机就位错误, 随意把深层搅拌桩机摆放在各处桩位上, 未能严格遵循操作规范来校准机身水平度与桩架垂直度, 因机身倾斜、桩架偏移而导致桩体倾斜。针对此项问题, 一方面, 复核确认桩机位置姿态是否正确, 操控水准仪校准机身水平度, 操

控经纬仪校准桩架垂直度, 支撑底部垫设钢板分散受力, 确认桩机位置无误后, 才能开展搅拌成桩作业。另一方面, 优化施工场地条件, 正式开工前, 彻底平整施工场地, 清理淤泥、回填土等易沉降区域, 对桩机摆放位置的表层场地进行夯实处理, 要求场地承载力满足桩机运行要求, 避免后续出现地基沉降、桩机倾斜失稳问题。

#### 3.4 桩身断浆与夹泥

桩身断浆、夹泥是一种典型的连续破坏形式, 其产生的主要原因是桩身承载力急剧下降和整体受力不连续, 且在后期容易发生不均匀沉降。其原因是注浆管路堵塞、浆液供给中断、下沉与提升速度过快、土体搅拌不彻底, 造成桩身出现无浆段、夹泥层、蜂窝松散等现象, 严重影响桩基整体性能。为此, 在注浆之前, 要对注浆泵、管道和搅拌头密封性进行检查, 以保证灌浆顺利进行; 同时严格按照“二搅二喷”流程进行, 不能在施工过程中随意中断; 控制下沉、提升速度与注浆量的配合, 确保浆液和土体的充分混合<sup>[6]</sup>。如遇突发情况, 应将其搭接长度控制在 1.5 m 以内, 以保证上下桩段有效连接。通过对注浆的连续性和均匀性的全程控制, 可以有效消除断浆和夹泥的隐患, 确保桩身的完整性和密实度。

### 4 结束语

水泥搅拌桩技术特征高度契合市政道路软弱地基加固需求, 大幅强化地基承载能力和解决工后沉降问题的同时, 还能缩短工期时间和保护周边环境免遭严重扰动。施工单位应大力推广水泥搅拌桩技术, 主动贴合软弱地基加固需求, 量身定制市政道路软基水泥搅拌桩加固施工方案, 主动采取技术措施来解决桩体强度不足、桩头松散、桩体倾斜等常见问题, 为软基加固效果提供技术保障。

### 参考文献:

- [1] 刘然. 水泥搅拌桩在城市道路软基处理中的应用分析[J]. 中华建设, 2024(01):111-113.
- [2] 荣伟. 水泥搅拌桩在市政道路软基施工中的标准化应用实践[J]. 中国水泥, 2025(02):106-108.
- [3] 孙国著. 水泥搅拌桩在道路软基施工中的应用实践[J]. 运输经理世界, 2025(15):22-25.
- [4] 林铨. 水泥搅拌桩在道路软基处理中的应用[J]. 大众标准化, 2025(23):146-148.
- [5] 李建辉. 基于水泥搅拌桩的高效市政道路软弱地基加固技术研究[J]. 建筑机械, 2025(12):324-327.
- [6] 赵迪. 水泥搅拌桩在高速公路软土地基处理中的应用与质量检测[J]. 运输经理世界, 2025(35):13-15.