

公路软土路基处理中的水泥搅拌桩施工工艺及质量控制措施研究

孙晓斌

陕西路桥集团有限公司 陕西 西安 710000

【摘要】：公路软土路基以其压缩性、含水量高，抗剪强度低等特性，容易引起路基失稳、沉降等病害。水泥搅拌桩技术通过将水泥与软土强制搅拌形成复合地基，可显著提升路基承载能力与稳定性，是软基处理的核心技术之一。本文基于软土路基工程特性及水泥搅拌桩加固原理，对深层搅拌法（湿法）与粉体喷射搅拌法（干法）的施工工艺及技术要点展开探讨，在此基础上，提出了涵盖事前、事中、事后的全流程质量控制措施，并总结了常见质量问题及处理对策，旨在为公路软土路基处理提供技术参考。

【关键词】：软土路基；水泥搅拌桩；施工工艺；质量控制；复合地基

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.053

引言

在公路建设中，软土路基受其自身特性影响，容易引发沉降超标、边坡失稳等病害，在降低道路耐久性的同时，不利于其安全运行。水泥搅拌桩技术通过将水泥与软土原位强制搅拌形成复合地基，能显著提升地基承载力、减少工后沉降，是解决软基问题的核心手段。本文围绕该技术，系统分析软土特性与加固机理，详解深层搅拌法与粉体喷射法的工艺要点，构建全流程质量控制体系，为公路软土路基处理提供技术支持。

1 软土路基工程特性及水泥搅拌桩加固原理

1.1 软土路基工程特性

公路软土路基的组成部分主要有淤泥、淤泥质土、泥炭等组成，其形成与河流沉积、湖泊沼泽化等地质过程密切相关，核心特性如下：

大孔隙比与高含水量：孔隙比 1.0~1.5，含水量多在 35%~70%，土体呈流塑或软塑状态，颗粒间联结微弱，结构性差。此类土体在荷载作用下易发生显著变形，且变形持续时间长。

高压缩性：压缩系数 α_{1-2} 多大于 0.5MPa^{-1} ，在路堤荷载作用下易产生较大沉降。根据工程实测数据，未经处理的软土路基在自重及路堤荷载作用下，沉降量可达 1~3m，远超公路工程允许的工后沉降限值（通常 $\leq 30\text{cm}$ ）。

低渗透性：渗透系数多在 $10^{-6}\sim 10^{-8}\text{cm/s}$ ，排水固结过程缓慢。若仅依靠自然排水，地基强度增长周期过长，无法满足工程建设进度要求^[1]。

低抗剪强度：不排水抗剪强度小于 20kPa，承载力基本值通常低于 80kPa，难以满足路基荷载要求。在路堤填筑过程中，易因抗剪强度不足发生侧向滑移，导致路基失稳。

这些特性导致软土路基在施工及运营阶段易出现边坡失稳、不均匀沉降、路基滑移等病害，必须通过地基处理技术改善其工程性能。

1.2 水泥搅拌桩加固原理

水泥搅拌桩将水泥（或水泥浆液）通过特制搅拌机械在原位强制搅拌，利用水泥与土的物理化学反应形成具有一定强度的复合地基，其加固机理可分为三个阶段：

水泥水化反应阶段：水泥遇水后迅速发生水解反应，生成水化硅酸钙（C-S-H）、氢氧化钙（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）、水化铁酸钙（C-F-H）等凝胶体。这些产物填充土颗粒间隙，形成初期胶结结构，使土体开始失去流动性。氢氧化钙的生成使土体 pH 值升高至 12 以上，为后续化学反应创造碱性环境。

离子交换与团粒化作用阶段：水泥水化产生的钙离子（ Ca^{2+} ）与软土颗粒表面吸附的钾离子（ K^+ ）、钠离子（ Na^+ ）发生交换，降低土颗粒表面双电层厚度，使分散的土颗粒聚集形成稳定的团粒结构。这一过程使土体塑性指数降低，透水性增强，为后续硬凝反应奠定基础。

硬凝反应阶段：随着水化反应持续进行，凝胶体不断生成并结晶硬化，形成空间网状结构，将土颗粒牢固胶结为整体。最终形成的水泥土加固体无侧限抗压强度可达 1.0~2.5MPa，显著提升地基承载能力^[2]。同时，加固体与周围土体协同工作，通过置换、加筋效应限制土体侧向变形，增强路基整体稳定性。

2 水泥搅拌桩施工工艺分类及技术要点

2.1 深层搅拌法（湿法）

深层搅拌法适用于含水量较高（50%~70%）的软土地层，尤其适用于淤泥、淤泥质土等饱和软土。其以水泥浆液为固化剂，通过搅拌桩机将浆液与软土强

制搅拌。

2.1.1 施工流程

①场地平整与桩位放样：清除地表杂物、杂草及大块障碍物，并用素土回填低洼区域至设计高程，压实度控制在85%以上；根据设计图纸，采用全站仪精确放样桩位，桩位偏差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 内，并用竹签标记，同时设置控制桩以便复核。②桩机就位：移动搅拌桩机至桩位，调整机身水平度（偏差 $\leq 5\text{mm/m}$ ），通过导向架校正搅拌轴垂直度，确保垂直度偏差 $\leq 1\%$ ；将搅拌头对准桩位中心，误差不得超过10mm。③预搅下沉：启动搅拌桩机，搅拌头以0.5~1.0m/min的速度沿导向架下沉，下沉过程中可注入少量清水（流量 $\leq 10\text{L/min}$ ）润滑土体，便于钻进。若遇硬土层，可适当降低下沉速度，避免搅拌轴过载损坏。④提升喷浆搅拌：搅拌头下沉至设计深度后，暂停下沉并开启压浆泵，将水泥浆液（水灰比1.0~1.5）通过管道压入地基，浆液压力控制在0.4~0.6MPa；同时搅拌头以0.3~0.8m/min的速度匀速提升，确保浆液与土体充分混合。喷浆过程需连续，不得中断。⑤重复搅拌：为保证搅拌均匀，当搅拌头提升至地面以下1.0m时，再次下沉搅拌至设计深度（下沉速度0.5~0.8m/min），而后以0.5~1.0m/min的速度提升至地表，完成单桩施工。

2.1.2 关键参数控制

①水泥掺量：通常为土体重的10%~15%，具体需要根据软土性质确定。每延米水泥用量可按公式计算： $Q = \pi r^2 L \rho k$ （其中 r 为桩半径， L 为桩长， ρ 为软土天然密度， k 为水泥掺量）。例如，直径500mm的桩体，在软土天然密度 1.7g/cm^3 、水泥掺量12%的条件下，每延米水泥用量约为100kg。②浆液比重：控制在1.4~1.6g/cm³，通过比重计实时监测，确保浆液浓度均匀。若比重偏低，需增加水泥用量；若偏高，适当加水调整。③搅拌次数：每桩需至少完成“一次下沉、两次提升”的搅拌过程，保证桩体上下部水泥分布均匀，避免出现“夹心”现象。

2.2 粉体喷射搅拌法（干法）

粉体喷射搅拌法以水泥粉为固化剂，通过压缩空气将粉体喷入软土并搅拌，适用于含水量较低（30%~50%）的软土地层，如泥炭质土、冲填土等。

2.2.1 施工流程

①场地准备与桩位放样：同深层搅拌法，但需特别清理地下障碍物（如石块、树根），避免损坏搅拌叶片。对地表承载力不足的场地，铺设30cm厚级配砂石垫层作为作业平台。②桩机就位与调平：桩机定

位后，调整钻杆垂直度（偏差 $\leq 1\%$ ），检查空压机、粉体发送器等设备工作状态，确保空压机风压稳定在0.3~0.5MPa，粉体发送器压力正常。③钻进喷粉：搅拌头以0.5~0.8m/min的速度旋转下沉至设计深度，同时启动粉体发送器，将水泥粉按设计掺量喷入土体。喷粉过程需均匀，避免出现断粉、堵管。④提升搅拌：到达设计深度后，停止喷粉，搅拌头以0.5~1.0m/min的速度匀速提升，继续搅拌至地表，使粉体与土体充分混合。提升过程中若发现搅拌不均匀，可在局部区域重复搅拌。⑤补喷处理：若提升过程中发现粉体喷射量不足（低于设计值的95%），需在原位重复喷粉搅拌，补喷量按不足部分的1.2倍控制，确保单桩水泥用量符合设计要求。

3 水泥搅拌桩施工质量控制措施

3.1 事前控制（施工准备阶段）

（1）地质勘察复核：在进行施工作业前，详细复核软土分布范围、含水量、厚度、有机质含量等参数。一旦发现实际地质与设计不符，如软土厚度增加、有机质含量超过5%等情况，需及时与设计单位沟通，调整水泥掺量，通常增加2%~3%，或桩长，确保加固效果。

（2）材料检验：水泥选用严禁使用受潮结块水泥，通常使用32.5级及以上普通硅酸盐水泥。进场时需查验出厂合格证，并按规定每200t为一批次进行强度、安定性等指标抽检，不合格材料严禁使用^[3]。

（3）设备校验：标定搅拌桩机的深度计、流量计、压力表，确保计量误差 $\leq 2\%$ ；检查搅拌叶片角度和磨损情况，叶片长度磨损超过5cm时及时更换，保证搅拌均匀性。

（4）试桩施工：在正式施工前，需完成3~5根试桩，确定搅拌速度、最佳水泥掺量、喷浆（粉）压力等参数。试桩结束后，需进行28天无侧限抗压强度试验，若强度达标且施工参数稳定，方可大面积施工。试桩结果需经监理验收合格后存档。

3.2 事中控制（成桩过程阶段）

（1）桩位与垂直度控制：采用全站仪实时校核桩位，偏差不得大于50mm；通过桩机自带垂直度仪表监控钻杆垂直度，每桩施工前校准一次，确保偏差 $\leq 1\%$ 。对已施工的桩位，每日随机抽查5%进行复核。

（2）水泥用量控制：采用自动计量装置控制喷浆（粉）量，每桩施工过程中实时记录水泥用量，不足设计值的桩需返工处理。对计量装置每台班进行一次校验，确保数据准确。

(3) 搅拌均匀性控制: 严格控制下沉与提升速度, 确保搅拌头在软土层中每点搅拌时间 $\geq 30\text{s}$; 对桩顶以下 1.0~1.5m 范围 (通常为软弱夹层) 进行多次复搅, 提升速度降低至 0.3m/min, 保证该区域桩体强度。

(4) 断浆 (粉) 处理: 若施工过程中出现断浆 (粉), 需立即停止提升, 待恢复供料后下沉至断浆 (粉) 点以下 0.5m 处重新喷料搅拌, 确保桩体连续。断浆 (粉) 时间超过 30min 的桩, 需作为废桩处理并补打新桩。

(5) 桩顶处理: 桩顶设计标高以上需超打 50~100cm, 超打部分在基坑开挖时凿除, 保证桩顶强度符合设计要求。凿除过程需采用人工或机械缓慢进行, 避免损伤有效桩体。

3.3 事后控制 (检测与验收阶段)

(1) 外观检查: 桩体成型后对桩位、桩径、桩顶标高等各项参数进行全面检查, 确保桩顶平整度偏差 $\leq 50\text{mm}$, 桩径偏差不得小于设计值。对外观不合格的桩体, 需分析原因并采取补救措施。

(2) 强度检测: 成桩 28 天后, 采用钻孔取芯法检测水泥土无侧限抗压强度, 每 500 根桩不少于 1 组 (3 个试块), 每组试块强度平均值不得低于设计值 (通常 $\geq 1.0\text{MPa}$)。取芯过程中需观察桩体完整性, 芯样连续、完整段长度应 $\geq 90\%$ 桩长。

(3) 完整性检测: 采用低应变反射波法对桩体完整性进行检测, 抽检数量不少于总桩数的 10%。检测结果分为 I、II、III、IV 类桩, III 类及以上桩需采取补桩处理, 确保 I、II 类桩占比 $\geq 95\%$ 。

(4) 复合地基承载力检测: 成桩 60 天后 (淤泥质土) 或 90 天后 (泥炭土), 对复合地基承载力用平板载荷试验方法进行检测, 抽检数量每 2000 m^2 不少于 1 点, 承载力需满足设计要求^[4]。载荷试验最大加载量为设计承载力的 2 倍, 稳定标准为连续 1h 沉降量 $\leq 0.1\text{mm}$ 。

参考文献:

- [1] 伍太航. 公路软土路基沉降分析与处理对策探讨[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(06): 114-116.
- [2] 刘楚, 文琰. 软土地区公路路基设计及地基处理技术研究[J]. 交通世界, 2022, (09): 67-68.
- [3] 邹立家. 公路工程软土路基处理技术探讨[J]. 住宅与房地产, 2021, (05): 222-223.
- [4] 于鸿熙, 胡卉. 软土路基处理技术在公路施工中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(07): 128-131.
- [5] 陈正昆. 水泥搅拌桩在公路工程软基施工中的应用[J]. 交通世界, 2020, (19): 56-57.
- [6] 陈乔娜. 公路软土路基处理中水泥搅拌桩施工工艺及质量控制[J]. 建材与装饰, 2020, (15): 234+237.

4 常见质量问题及处理对策

4.1 桩体强度不足

成因: 对强度不足的桩, 采用高压注浆 (压力 1.5~2.0MPa) 补强或在其周边补打新桩, 间距控制在原桩距的 1/2; 软土有机质含量过高、水泥掺量不足、搅拌不均匀、养护龄期不够。对策: 严格控制水泥计量装置精度, 每日校验确保掺量符合设计; 增加复搅次数 (不少于 2 次), 降低提升速度至 0.3~0.5m/min; 成桩后覆盖土工布洒水养护, 保持桩体湿润, 确保 28 天龄期后再进行强度检测; 对有机质含量超过 5% 的软土, 采用水泥+石灰复合固化剂 (石灰掺量 3%~5%), 激发水泥活性^[5]。

4.2 桩体断桩或缩颈

成因: 施工中断浆 (粉)、提升速度过快、软土含水量过高 ($> 70\%$)、邻桩施工扰动。对策: 施工前复核桩位布置, 确保桩间距符合设计; 严格控制桩长, 通过深度计与钻杆标记双重校验, 确保桩端进入设计要求的持力层; 加强桩体质量检测, 对不合格桩及时处理; 对桩间土可采用轻型碾压或注浆等方式进行加固, 提高复合地基整体承载力。对承载力不足的区域, 需补打加密桩或调整桩长、桩径, 直至满足设计要求^[6]。

5 结语

总之, 水泥搅拌桩技术的核心在于通过精准工艺控制与全流程质量管控, 实现软土地基的高效加固, 为公路软土路基处理提供了有效解决方案。实践中, 需结合软土特性选择适宜工艺, 严格把控水泥掺量、搅拌均匀性等关键参数, 针对常见质量问题采取预防与补救措施。未来通过智能化监测与工艺优化, 可进一步提升加固效果与工程效益, 为公路工程安全耐久性提供坚实保障。