

# 市政桥梁钻孔灌注桩施工工艺优化与质量控制技术研究

朱响亮

432828\*\*\*\*\*3012

**摘要:** 市政桥梁作为城市交通网络的核心节点,其基础工程的稳定性直接决定结构使用寿命与通行安全。钻孔灌注桩因适应性强、承载力高,是市政桥梁基础的主要形式之一,但施工中常面临塌孔、钢筋笼偏位、混凝土离析等质量问题,制约工程品质提升。本文围绕钻孔灌注桩施工工艺优化与质量控制展开系统研究,剖析当前工艺环节的现状问题及根源,针对性提出工艺优化路径,并构建质量控制技术体系,希望研究成果能够为市政桥梁钻孔灌注桩施工提供参考。

**关键词:** 钻孔灌注桩; 施工工艺; 优化; 质量控制; 市政桥梁

**DOI:** 10.64216/3104-9664.25.01.004

## 1 引言

市政桥梁是城市运行的“生命线”,承担着缓解交通拥堵、连接区域功能的重要使命。随着城市规模扩张,桥梁基础需应对复杂地质条件与高承载力要求,钻孔灌注桩因无需预加固、适应地层广等特点,成为当前市政桥梁基础的主流形式。然而,受施工工艺粗放、质量控制不到位等因素影响,钻孔灌注桩施工中常出现塌孔、缩径、钢筋笼偏位、混凝土断桩等问题,导致桩身承载力不足或耐久性下降,后期维修成本高且影响交通通行。笔者系统梳理钻孔灌注桩施工工艺的现状问题,从关键环节提出优化路径,并构建覆盖全流程的质量控制技术体系,旨在解决当前施工中的质量痛点,为同类工程提供参考。

## 2 市政桥梁钻孔灌注桩施工工艺现状与问题剖析

### 2.1 成孔工艺的现状与问题

#### 2.1.1 泥浆护壁效果不稳定

传统泥浆多采用膨润土加清水配制,比重与粘度难以适应复杂地质条件。在高水位软土地区,泥浆易被地下水稀释,导致孔壁坍塌;在硬岩地层,泥浆润滑性不足,钻头磨损加剧,成孔效率低。

#### 2.1.2 钻进参数控制粗放

部分施工单位为追求进度,盲目提高钻进速度,导致孔壁扰动过大,引发缩径或塌孔;在卵石层中,钻头选型不当,易造成孔位偏移。

#### 2.1.3 设备适应性不足

单一设备难以应对多层地质条件,如旋挖钻在软土中效率高,但在硬岩中无法钻进;回旋钻在硬岩中钻进缓慢,影响工期。这些问题导致成孔缺陷率居高不下,据某地区市政桥梁施工统计,塌孔率约为12%,缩径率约为8%,孔位偏移率约为5%。

### 2.2 钢筋笼制作与安装的现状与问题

#### 2.2.1 工厂化预制程度低

多数施工单位在现场制作钢筋笼,受场地与设备限制,钢筋切割、弯曲精度不足,主筋间距误差常超过10mm,箍筋加密区长度不符合设计要求<sup>[1]</sup>。

#### 2.2.2 定位措施不到位

钢筋笼下放时易发生偏位或上浮,传统定位采用单根钢筋固定,稳定性差;部分项目未设置保护层垫块,导致钢筋笼与孔壁间隙过大,影响桩身摩阻力。

#### 2.2.3 焊接质量不稳定

手工电弧焊依赖工人技术水平,焊缝易出现气孔、夹渣等缺陷,焊缝合格率仅为80%-85%;焊接时间长,导致钢筋笼下放效率低。钢筋笼偏位会导致桩身受力不均,焊接缺陷则会削弱钢筋的握裹力,严重时引发桩身断裂。

### 2.3 混凝土浇筑的现状与问题

#### 2.3.1 混凝土配合比不合理

部分项目为降低成本,减少水泥用量,导致混凝土强度不足;砂石含泥量超标(砂含泥量>5%,石子含泥

量 $>2\%$ ),影响混凝土和易性,易产生离析。

### 2.3.2 浇筑工艺不规范

导管埋深控制不当(过浅 $<2$ 米导致泥浆混入,过深 $>6$ 米导致导管拔不出);混凝土供应不及时,造成浇筑中断,形成断桩;浇筑速度过快,导致孔壁侧压力增大,引发塌孔。

### 2.3.3 混凝土性能检测缺失

部分单位未按要求留置试块,或试块制作不规范,无法真实反映混凝土强度;桩身完整性检测仅依赖低应变法,对深层缺陷(如夹泥)识别能力不足。混凝土离析会导致桩身强度不均,断桩则会完全丧失承载力,是钻孔灌注桩最严重的质量问题之一。

## 2.4 清孔工艺的现状与问题

### 2.4.1 清孔方法选择不当

部分项目采用换浆法清孔,仅能清除孔口附近沉渣,孔底沉渣厚度仍超标;反循环清孔设备操作复杂,未得到广泛应用<sup>[2]</sup>。

### 2.4.2 清孔时间不足

为赶工期,清孔时间过短,沉渣未充分排出,导致桩端承载力下降;清孔后未及时浇筑混凝土,沉渣重新沉积,再次超标。沉渣过厚会使桩端无法传递荷载,导致桩顶沉降过大,影响桥梁结构安全。

## 3 钻孔灌注桩施工工艺优化路径

### 3.1 成孔工艺优化

#### 3.1.1 高性能泥浆体系的研发与应用

针对复杂地质条件,优化泥浆配比,采用“膨润土+羧甲基纤维素(CMC)+纯碱+聚合物”复合体系。例如,在软土地区,膨润土用量调整为 $8\%-10\%$ ,CMC添加量为 $0.1\%-0.2\%$ ,纯碱( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )调节pH值至 $8-10$ ,使泥浆比重控制在 $1.15-1.25$ ,粘度 $20-25\text{s}$ ,失水量 $\leq 15\text{ml}/30\text{min}$ 。这种泥浆具有高粘结性与抗剪强度,能有效防止塌孔与缩径;在硬岩地层,添加 $2\%-3\%$ 的金刚砂,提高泥浆润滑性,降低钻头磨损。

#### 3.1.2 钻进参数的动态调控

引入钻进参数监测系统,实时采集钻速、扭矩、泥浆压力等数据,根据地层变化调整参数。例如,在软土中钻速控制在 $0.5-1\text{m}/\text{min}$ ,在硬岩中钻速降至 $0.1-0.3\text{m}/\text{min}$ ;扭矩超过阈值时,自动降低钻速,避免孔壁扰动。

#### 3.1.3 设备组合与智能化改进:采用“回旋

钻+旋挖钻”组合工艺,软土层用回旋钻保证孔壁稳定,硬岩层用旋挖钻提高效率;对钻机进行智能化改造,安装GPS定位系统与自动纠偏装置,确保孔位精度(偏差 $\leq 10\text{mm}$ )。通过上述优化,成孔缺陷率可降至 $3\%$ 以下,孔径合格率提升至 $98\%$ 以上。

### 3.2 钢筋笼制作与安装优化

#### 3.2.1 工厂化预制与数控加工

建立钢筋笼预制工厂,采用数控钢筋弯曲机、切割机进行加工,主筋间距误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内,箍筋加密区长度误差 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。预制完成的钢筋笼采用专用货架存放,避免运输过程中变形。

#### 3.2.2 多重定位与固定措施

设计“十字形定位筋+保护层垫块”双重定位系统。在钢筋笼主筋上焊接十字形定位筋(间距 $2\text{m}$ ),定位筋末端固定于护筒顶部,防止钢筋笼上浮或偏位;沿钢筋笼圆周均匀设置混凝土保护层垫块(间距 $1.5\text{m}$ ,厚度 $20\text{mm}$ ),确保钢筋笼与孔壁间隙控制在 $50-70\text{mm}$ ,保证桩身摩阻力。

#### 3.2.3 机械化焊接与质量检测

采用 $\text{CO}_2$ 气体保护焊代替手工电弧焊,焊接速度提高 $50\%$ ,焊缝气孔、夹渣缺陷率降至 $2\%$ 以下。焊缝采用超声波探伤检测,每根钢筋笼检测 $3-5$ 处,确保焊缝质量符合规范要求<sup>[3]</sup>。工厂化预制与机械化焊接使钢筋笼安装效率提高 $40\%$ ,定位精度提升至 $95\%$ 以上。

### 3.3 混凝土浇筑工艺优化:确保连续性与均匀性

#### 3.3.1 高性能混凝土配合比设计

采用“水泥+粉煤灰+矿渣粉+减水剂”四元体系,降低水泥用量(从 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 降至 $320\text{kg}/\text{m}^3$ ),提高混凝土耐久性。配合比参数:水胶比 $0.42$ ,砂率 $40\%$ ,粉煤灰掺量 $20\%$ ,矿渣粉掺量 $15\%$ ,减水剂掺量 $1.5\%$ 。这种配合比的混凝土坍落度控制在 $180-220\text{mm}$ ,扩展度 $\geq 500\text{mm}$ ,和易性良好,不易产生离析。

#### 3.3.2 导管法浇筑的精准控制

选用直径 $250-300\text{mm}$ 的无缝钢管作为导管,使用前进行水压试验(压力 $\geq 0.6\text{MPa}$ )。浇筑时,导管底部距离孔底 $300-500\text{mm}$ ,首灌量需满足导管埋深 $\geq 1\text{m}$ ;浇筑过程中,每浇筑 $3-5\text{m}^3$ 测量一次混凝土面高度,调整导管埋深至 $2-6\text{m}$ ;混凝土供应采用连续泵送,避免中断时间超过 $30$ 分钟。

### 3.3.3 混凝土性能全程检测

每 100m<sup>3</sup> 混凝土留置一组标准养护试块, 检测 28 天抗压强度; 每根桩制作一组同条件养护试块, 检测桩身早期强度。采用超声波透射法检测桩身完整性, 检测比例为 100%, 对疑似缺陷部位进行钻芯验证, 确保桩身无深层缺陷。通过上述优化, 混凝土断桩率降至 1% 以下, 桩身强度合格率提升至 99% 以上<sup>[4]</sup>。

## 3.4 清孔工艺优化: 彻底清除孔底沉渣

### 3.4.1 反循环清孔技术的应用

采用泵吸反循环清孔设备, 通过砂石泵将孔底沉渣随泥浆抽出。清孔时, 先将导管下至孔底, 启动砂石泵, 控制泥浆循环流量为 200-300m<sup>3</sup>/h, 直至沉渣厚度满足设计要求 (端承桩 $\leq 50\text{mm}$ , 摩擦桩 $\leq 100\text{mm}$ )。反循环清孔效率高, 能清除孔底 50cm 以内的沉渣, 比换浆法效果好 30%。

### 3.4.2 清孔时间的精准控制

清孔时间根据孔深与沉渣厚度调整, 一般控制在 1-2 小时; 清孔后, 立即浇筑混凝土, 避免沉渣重新沉积。若因特殊情况需延迟浇筑, 需重新测量沉渣厚度, 超标时补清孔。优化后的清孔工艺使沉渣厚度合格率提升至 98% 以上, 桩端承载力提高 20% 以上。

## 4 钻孔灌注桩质量控制技术体系构建

### 4.1 成孔质量控制: 全参数检测与实时调整

#### 4.1.1 孔径检测

采用伞形孔径仪, 沿孔壁扫描, 绘制孔径曲线, 判断是否存在缩径或扩径。孔径偏差控制在 $\pm 50\text{mm}$  以内, 缩径率 $\leq 3\%$ 。

#### 4.1.2 孔深检测

用测绳加重锤 (重量 $\geq 5\text{kg}$ ) 测量孔底到孔口的距离, 确保孔深达到设计要求 (偏差 $\leq \pm 100\text{mm}$ )。

#### 4.1.3 垂直度检测

使用电子测斜仪, 从孔口放下, 测量孔身倾斜角度, 垂直度控制在 1% 以内。

#### 4.1.4 沉渣厚度检测

用前端带尖的测锤 (重量 $\geq 3\text{kg}$ ) 轻轻下放, 感觉沉渣的阻力, 或采用声波透射法检测, 沉渣厚度符合设计要求。每根桩成孔后需完成上述 4 项检测, 合格后方可进入下一道工序。

## 4.2 钢筋笼质量控制

### 4.2.1 原材料检测

钢筋进场时需检测力学性能 (屈服强度、抗拉强度、伸长率), 合格率 100%; 焊接材料 (焊丝、焊剂) 需检测熔敷金属力学性能, 符合规范要求。

### 4.2.2 安装精度检测

钢筋笼下放后, 测量其顶面标高与中心位置, 偏差控制在 $\pm 50\text{mm}$  以内; 检查保护层垫块数量与位置, 确保每断面不少于 4 个, 间距 $\leq 1.5\text{m}$ 。

## 4.3 混凝土质量控制: 从原材料到浇筑的全链条管理

### 4.3.1 原材料检测

水泥检测强度等级与安定性, 砂石检测含泥量、颗粒级配, 外加剂检测减水率、凝结时间, 合格率 100%。

### 4.3.2 配合比验证

通过试配确定最优配合比, 检测混凝土坍落度、扩展度、凝结时间, 确保符合浇筑要求。

### 4.3.3 浇筑过程检测

实时监测混凝土面高度, 调整导管埋深; 每浇筑 10m<sup>3</sup> 检查一次混凝土和易性, 避免离析。

## 4.4 常见质量问题预防

### 4.4.1 塌孔预防

控制泥浆比重与粘度, 避免钻进速度过快; 在松散地层中, 增加护筒埋深至 2.5 米以上。

### 4.4.2 钢筋笼偏位预防

采用多重定位措施, 固定钢筋笼顶部; 浇筑时避免混凝土冲击钢筋笼。

### 4.4.3 断桩预防

控制导管埋深, 确保混凝土连续供应; 浇筑前检查导管密封性, 避免漏水。

## 5 钻孔灌注桩施工的保障机制

### 5.1 组织保障: 明确职责与协同机制

成立钻孔灌注桩施工专项小组, 组长由项目负责人担任, 负责统筹协调; 技术负责人负责工艺优化与质量标准制定; 质量员负责过程检测与问题整改; 施工班组负责具体操作。建立周例会制度, 每周总结施工进度与质量问题, 及时调整方案。

## 5.2 技术保障：培训与交底的常态化

开展全员技术培训，内容包括新工艺操作要点、质量标准、设备使用方法；每道工序施工前进行技术交底，明确操作流程与注意事项。定期组织技术交流会议，分享施工经验与问题解决方案。

## 5.3 材料保障：供应链与检验的严格化

选择优质原材料供应商，签订质量保证协议；建立材料进场检验制度，每批材料需提供合格证与检测报告，抽样检测合格后方可使用。对水泥、钢筋等重要材料，实行溯源管理，确保来源可靠。

## 5.4 监督保障：第三方检测与过程验收

引入第三方检测机构，对成孔质量、钢筋笼安装、混凝土强度进行独立检测；实行“三检制”（自检、互检、专检），每道工序验收合格后方可进入下一道工序。建立质量档案，记录施工过程中的所有检测数据，便于追溯与分析。

## 6 结论

市政桥梁钻孔灌注桩施工工艺优化与质量控制是

一项系统性工程，需从成孔、钢筋笼制作、混凝土浇筑、清孔等全流程入手，通过高性能泥浆、工厂化预制、精准浇筑等工艺优化，结合全参数检测、多重定位、全程管控的质量控制技术，才能有效降低施工缺陷率，提升桩基础品质。本文研究表明，工艺优化与质量控制的核心是“协同”与“精准”——协同各环节的工艺参数，精准控制每个步骤的质量。未来，随着数字化技术的应用（如 BIM 模拟成孔、物联网监测混凝土浇筑），钻孔灌注桩施工将更加智能化、精细化，进一步提升市政桥梁的安全性与耐久性。

### 参考文献

- [1] 任杰. 市政道路桥梁工程旋挖钻孔灌注桩施工技术[J]. 科学技术创新, 2024(12): 136-139.
- [2] 胡跃华. 公路桥梁项目中钻孔灌注桩施工技术分析[J]. 四川建材, 2023(2): 121-123.
- [3] 陈振刚. 喀斯特地区公路桥梁钻孔灌注桩施工技术分析[J]. 工程技术研究, 2023(16): 46-48.
- [4] 祖重熙. 桥梁深孔大直径钻孔灌注桩施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2023(4): 156-158.