

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^[1]。

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^[2]。

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（Na₂CO₃）调节pH值至8-10，使泥浆比重控制在1.15-1.25，粘度20-25s，失水量≤15ml/30min。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0.5-1m/min，在硬岩中钻速降至0.1-0.3m/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≤10mm）。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±5mm以内，箍筋加密区长度误差≤±3mm。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2m），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1.5m，厚度20mm），确保钢筋笼与孔壁间隙控制在50-70mm，保证桩身摩阻力。

3.2.3 机械化焊接与质量检测

采用CO₂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^[3]。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400kg/m³降至320kg/m³），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180-220mm，扩展度≥500mm，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250-300mm的无缝钢管作为导管，使用前进行水压试验（压力≥0.6MPa）。浇筑时，导管底部距离孔底300-500mm，首灌量需满足导管埋深≥1m；浇筑过程中，每浇筑3-5m³测量一次混凝土面高度，调整导管埋深至2-6m；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^3 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^[4]。

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 $200\text{--}300\text{m}^3/\text{h}$ ，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^3 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.