市政桥梁钻孔灌注桩施工技术要点分析

任国庆
浙江瀚通市政园林工程有限公司　浙江 杭州　311203

摘　要　针对跨河桥梁钻孔灌注桩施工中孔壁稳定性不足、钢筋笼安装偏差及水下混凝土灌注连续性难以保障等问题，依托某市政3 m×30 m预应力混凝土连续梁桥工程，结合现场地层条件和临水施工环境，对钻孔、钢筋笼制作安装及混凝土灌注等关键工艺进行分析，融入施工信息化监测与数字化管控手段，并提出相应质量控制措施。

关键词　跨河桥梁；钻孔灌注桩；泥浆护壁；水下混凝土；信息化管控；质量控制

Analysis of Key Construction Technical Points for Bored Cast-in-Place Piles in Municipal Bridges

Ren Guoqing
Zhejiang Hantong Municipal Landscape Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311203, Zhejiang Province, China

Abstract　To address the problems of insufficient borehole wall stability, deviation in reinforcement cage installation, and difficulty in ensuring the continuity of underwater concrete pouring during the construction of bored cast-in-place piles for river-crossing bridges, this paper relies on a municipal 3×30 m prestressed concrete continuous girder bridge project. Combined with the on-site stratum conditions and waterfront construction environment, it analyzes the key processes of drilling, reinforcement cage fabrication and installation, and concrete pouring, integrates construction informatization monitoring and digital control measures, and proposes corresponding quality control measures.

Key words　River-crossing bridge; Bored cast-in-place pile; Mud wall protection; Underwater concrete; Informatization control; Quality control

工程采用GPS-15型回旋钻机成孔，通过护筒防护、泥浆循环、孔斜复核和沉渣控制提高成孔质量；采用分段加工、胎架校正和两点起吊方式控制钢筋笼安装精度；通过首灌方量校核、导管埋深动态控制及连续供料保障水下混凝土成桩质量。同时引入泥浆参数在线监测、钻孔轨迹数字化记录及灌注过程数据采集系统，实现施工全过程信息化管控。48根桩检测结果表明，低应变检测合格47根，超声波透射检测合格48根，成桩质量总体满足设计和使用要求。优化工艺使单桩钻孔、钢筋笼安装及混凝土灌注时间分别缩短16.7%、25%和16.7%，成桩合格率由95%提高至98%。研究成果可为复杂临水环境下钻孔灌注桩施工组织与信息化质量控制提供参考[1]。

1　工程概况

某市政跨河桥梁工程，该桥采用3 m × 30 m预应力混凝土连续梁桥布置形式，下部结构选用钻孔灌注桩基础，桩径1.2 m，桩长35 m，共设置48根桩。桥位横跨既有河道，施工阶段需要同步协调临水作业、河床扰动控制以及成孔稳定性维护，对桩基施工组织和过程质量控制均提出了较高要求。场地地层自上而下依次为厚2 m的杂填土、厚8 m的粉质黏土、厚15 m的中砂层以及厚10 m的砾石层，覆盖层松散性与下伏持力层颗粒级配差异较大，容易在成孔过程中诱发缩孔、塌孔以及沉渣清理困难等问题。

2　钻孔灌注桩关键施工技术要点分析

2.1 钻孔施工工艺与质量控制

本工程把GPS-15型回旋钻机作为成孔主机，主要缘由在于该设备的回转稳定性、扭矩输出以及对中砂层和砾石层的适应能力，能够较好匹配跨河桥梁钻孔灌注桩对连续成孔的需求。钻孔前的现场处理围绕护筒埋设和泥浆储备展开，护筒埋深控制在2.5 m，使其下口稳定进入较完整土层，借助100 m³泥浆池形成连续供浆与沉淀回收条件，从而把孔口坍塌风险和浆液波动幅度压缩在可控范围内。泥浆池旁布设泥浆比重传感器与含砂率在线检测装置，实时采集浆液参数并上传至现场监控终端，替代传统人工定时取样，提高参数响应时效[2]。

泥浆比重的配制与校核采用计算控制思路进行约束。

$$\gamma = \frac{(\rho_s - \rho_w)V_s}{V_m} + \rho_w \qquad (1)$$

式中，γ—泥浆比重；ρ_s—固相密度；ρ_w—水密度；V_s—固相体积；V_m—泥浆体积。

钻进阶段转速稳定在80 r/min，泥浆比重控制在1.2 ~ 1.3，以维持孔壁侧向支护能力以及排渣携带能力之间的平衡。正循

环泥浆系统在此阶段承担关键的循环输送功能，泥渣借助上返流动进入沉淀池后再行净化回用，泥浆含砂率则控制在4%以内，以避免孔底沉渣反复富集。孔斜控制采取过程化监测方式，每钻进5 m即复核一次孔斜状态，一旦误差超过1%，便立即调整钻机垂直度和钻杆受力状态，使钻进轨迹重新回到设计轴线附近。钻孔轨迹数据同步录入信息化管理平台，生成孔斜曲线与钻进参数时序图，便于后续复盘分析。由护筒埋设、泥浆制备、回旋钻进、孔斜复核到清孔验收所构成的流程，在现场形成了连续衔接的质量控制链条。

2.2 钢筋笼制作与安装技术

钢筋笼制作环节需要把尺寸控制前移到下料、成型以及拼装3个工序中，主筋间距误差应控制在 ± 10 mm以内，箍筋间距误差应控制在 ± 20 mm以内，笼体直径误差控制在 ± 5 mm以内，使成品几何尺度与设计桩径保持一致。结合本工程桩长35 m以及临水场地吊装条件受限的现实情境，钢筋笼宜按12 m分段加工，分段接头位置应避开受力集中区，并在胎架上完成放样、校正以及临时固定，减少运输和转运过程中产生的扭曲。主筋连接采用单面搭接焊，焊缝长度不小于10 d，其中d表示主筋直径，焊缝外观应连续饱满、无咬边和夹渣，焊后还需对焊接区进行平直度复核，从源头压缩二次变形空间。每节钢筋笼验收数据录入移动终端，形成可追溯的电子档案。

安装阶段更强调过程配合与空间控制。钢筋笼起吊时采用两点起吊方式，使受力分布保持相对均衡，吊点位置宜对应笼体刚度较强部位，并借助缓起、缓转、平稳下放的操作节奏，将吊装扭摆和局部挠曲控制在较小范围内。钢筋笼入孔后，应持续校核其中心位置及垂直度，垂直度偏差控制在1%以内，避免因偏斜造成保护层厚度不均和桩身受力偏心。保护层控制依靠直径100 mm混凝土垫块进行约束，垫块沿笼体外侧按2 m间距布设，并在同一断面内保持受力均匀，以减弱钢筋与孔壁接触摩擦并为后续混凝土绕流留出稳定通道[3]。

2.3 混凝土灌注施工要点

混凝土灌注环节直接承接清孔验收以及钢筋笼安装质量，其施工控制重点在于把水下混凝土的流动性、抗离析能力以及连续供应状态纳入同一过程进行协调。本工程水下混凝土配合比选用强度等级42.5 MPa的水泥进行设计，水灰比控制为0.5，坍落度控制在180 ~ 220 mm，使拌和物在导管内具备较稳定的下行能力，同时减弱骨料离析对桩身均质性的影响。灌注前需对导管进行密封性以及顺直度复核，导管直径选用250 mm，接口处宜保持连接紧密，底部距孔底控制在30 ~ 50 cm，以便首批混凝土能够较快置换孔底泥浆并形成有效封底状态。首灌方量可按下式进行校核。

$$V=\pi r^2 h+\pi R^2 H \quad (2)$$

式中，V—首灌混凝土方量；r—导管半径；h—导管内混凝土高度；R—桩径半径；H—孔底至导管底部高度。

结合本工程1.2 m桩径以及35 m桩长条件，首灌混凝土方量不宜小于1.5 m³，导管埋深宜在灌注过程中保持2 ~ 6 m，避免埋深不足引起泥浆卷入，也防止埋深过大造成导管提升阻力明显增大。灌注速度控制在3 ~ 5 m³/h较为适宜，现场需将混凝土运输、料斗补料以及导管提升动作进行连续衔接，尽量减少中途停歇对桩身界面质量产生的不利影响。灌注过程中布设混凝土面测绳与数据采集仪，实时记录灌注量、导管埋深及混凝土面上升曲线，并同步上传至信息化管控平台，实现灌注过程可视化追踪。随着孔内混凝土面逐步上升，技术人员应依据实测灌注量和测绳读数同步判断导管埋置状态，并将桩顶超灌高度控制为0.8 m，为后续凿除浮浆层以及露出密实桩身预留空间。若灌注中出现堵管现象，可先采取上下提动导管的方式促使局部堵塞料松动；若提动后仍难以恢复下料，应马上组织更换导管，并控制导管重新插入混凝土面以下，降低断桩以及夹泥风险。

3 施工效果评估与优化建议

3.1 施工质量检测结果分析

结合成桩后的质量验收需求，本工程对48根钻孔灌注桩开展低应变检测以及超声波透射检测。低应变检测主要用于判别桩身完整性及浅部缺陷反射特征，超声波透射检测则借助声时、波幅以及波形变化识别桩身混凝土均匀性。检测资料表明，低应变检测合格47根，合格率为97.9%；超声波检测合格48根，合格率为100%。其中，Z23桩低应变曲线在桩身中下部出现异常反射，结合灌注记录复核发现，该桩在混凝土连续灌注过程中曾出现导管埋深短时不足，泥浆随混凝土界面扰动进入局部桩身区域，形成轻微夹泥缺陷。鉴于超声波检测未发现贯通性缺陷，现场采取钻芯复核以及压力补浆处理后，该桩完整性评价满足承载使用要求。检测数据同步录入桩基信息化档案系统，形成每根桩的完整质量追溯链。整体来看，成孔垂直度、清孔沉渣控制以及水下混凝土连续供应对桩身质量具有直接影响，导管埋深动态复核仍需作为后续同类临水桩基施工的重点控制内容（见表1）。

3.2 施工效率与传统工艺对比分析

鉴于本工程跨河施工场地受水位波动以及作业面受限影响，施工效率评价不能仅停留在机械台班压缩层面，还需将成

孔连续性、钢筋笼衔接效率以及水下混凝土供应稳定性一并纳入分析。由表2可知，优化工艺下单桩钻孔时间由传统工艺的12 h缩短至10 h，时间节省幅度为16.7%，主要得益于GPS-15型回旋钻机连续钻进能力以及泥浆循环参数的过程化控制。钢筋笼制作安装时间由4 h压缩至3 h，节省25%，分段加工、胎架校正以及两点起吊方式将现场调整时间控制在较小范围内。混凝土灌注时间由3 h降低至2.5 h，节省16.7%，导管埋深动态复核以及混凝土运输节奏协调减少了停歇等待。成桩合格率由传统工艺的95%提高至98%，说明效率提升并未削弱质量控制基础，反而借助工序衔接优化和信息化实时监控降低了夹泥、缩孔以及沉渣超限等质量风险。

表1 钻孔灌注桩质量检测结果统计表

桩号	检测方法	缺陷类型	处理措施	结论
Z1 ~ Z22	低应变检测	未见明显完整性缺陷	按常规验收程序归档	合格
Z23	低应变检测	局部夹泥，异常反射位置位于桩身中下部	钻芯复核后开展压力补浆处理，并复测完整性	处理后合格
Z24 ~ Z48	低应变检测	未见明显完整性缺陷	按常规验收程序归档	合格
Z1 ~ Z48	超声波透射检测	未见贯通性缺陷，声时、波幅以及波形变化处于可接受范围	按检测报告进行质量评定	合格

表2 施工效率与质量对比表

工艺类型	单桩钻孔时间	钢筋笼安装时间	灌注时间	合格率
传统工艺	12 h	4 h	3 h	95%
本工程优化工艺	10 h	3 h	2.5 h	98%
节省或提升幅度	16.7%	25%	16.7%	↑ 3%

3.3 施工过程优化建议

鉴于本工程桩位邻近河道且覆盖层松散，后续同类施工可把孔壁稳定控制前移至孔口防护及泥浆参数复核阶段。针对成孔中易出现的孔壁坍塌风险，护筒埋深宜由2.5 m增加至3 m，使护筒下口进一步进入稳定土层，同时把泥浆比重调整至1.3 ~ 1.4，借助较高静水压力增强孔壁支护能力。泥浆指标调整还需同步关注黏度、含砂率以及循环净化状态，避免单一提高比重后影响排渣效率，并可接入在线监测系统实现参数超限自动报警[4]。

钢筋笼安装偏差主要受吊装摆动、孔口定位以及分段接长误差共同影响。结合35 m长桩施工需求，可在孔口设置激光垂准仪辅助定位，把激光基准线作为钢筋笼中心校核依据，并且在每节笼体接长后开展垂直度复测。该方式能够把人工目测转换为连续可读的定位控制过程，有利于减少保护层厚度不均以及笼体贴壁问题。定位数据可同步上传至管理平台，生成钢筋笼安装偏差趋势图。

混凝土灌注阶段需重点压缩堵管诱因。配合比设计宜选用高流动性水下混凝土，并保持坍落度处于180 ~ 220 mm范围内，使混凝土在250 mm导管内维持稳定下行状态。导管使用前应定期开展密封性检查以及接头清理，对胶圈老化、接口渗漏以及管内残浆附着等问题及时处置，同时结合灌注面测读结果动态控制导管埋深，以降低夹泥以及断桩风险。建议后续工程引入灌注参数自动采集与预警系统，当导管埋深或灌注速度偏离设定区间时即时提示，进一步提升信息化管控水平[5]。

4 结束语

本工程实践表明，临水环境下钻孔灌注桩施工应以孔壁稳定、轴线精度和灌注连续性为核心，形成覆盖成孔、钢筋笼安装及水下混凝土灌注的全过程控制体系。护筒埋设、泥浆比重与含砂率控制能够改善孔壁稳定和清孔效果；分段加工、胎架校正及两点起吊有助于降低钢筋笼变形和偏位；首灌方量核验与导管埋深动态调整则是防止夹泥和断桩的关键。同时，泥浆参数在线监测、钻孔轨迹数字化记录、灌注过程数据采集及桩基信息化档案系统的应用，使施工质量控制由经验判断向数据驱动转变。48根桩的检测结果及效率对比表明，优化工艺兼顾了施工速度与成桩质量。后续工程还应强化泥浆指标动态监测、钢筋笼定位复核和混凝土供应组织，并针对异常灌注记录及时开展检测与补强处理，以提升复杂临水桥梁桩基施工的可靠性和信息化管理水平。

参考文献

[1]汪朋.钻孔灌注桩施工技术在水利施工中的应用分析[J].水上安全,2024(24):79-81.

[2]臧国宽.复杂水流条件下桥梁钻孔灌注桩施工工艺优化研究[J].珠江水运,2024(24):123-125.

[3]梁健宇.软土地质下市政管廊明挖法深基坑支护技术[J].中国建筑金属结构,2025,24(22):82-84.

[4]雷虎虎.水利施工钻孔灌注桩施工技术及管理[J].大众标准化,2023(5):45-47.

[5]张崇昌,陈环.水利施工中的钻孔灌注桩施工技术分析[J].中国新技术新产品,2021(8):123-125.

（本文编辑 曹 阳）