

公路桥梁工程施工中的钻孔灌注桩技术

贾明伟

新疆路桥建设集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：钻孔灌注桩技术作为公路桥梁工程的基础核心技术，其施工质量直接影响结构安全与耐久性。本文系统梳理了该技术的工艺原理、施工流程及质量控制要点，结合工程实例分析了常见技术难题的成因与解决策略。研究表明，通过优化泥浆配比、改进清孔工艺、强化混凝土灌注控制等措施，可有效提升桩基承载力，降低施工风险。研究结果为公路桥梁工程中钻孔灌注桩技术的标准化应用提供了理论依据与实践指导。

关键词：公路桥梁；钻孔灌注桩；施工技术；质量控制；泥浆护壁

引言

公路桥梁工程作为交通基础设施的重要组成部分，其基础施工质量对结构安全和使用寿命有着直接影响。钻孔灌注桩技术以其适应性强、承载力高、施工噪音低等优势，在公路桥梁工程中得到了广泛应用。据统计，我国公路桥梁工程中钻孔灌注桩的使用比例已超过75%，尤其在软土地基、深水基础等复杂地质条件下表现出显著优势。然而，该技术施工过程中受地质条件、泥浆性能、混凝土灌注工艺等多种因素影响，桩基质量缺陷时有发生。因此，深入研究钻孔灌注桩技术的施工工艺与质量控制方法，对提升公路桥梁工程建设质量具有重要意义。

1 钻孔灌注桩技术原理与特点

钻孔灌注桩技术通过机械钻孔形成桩孔，在泥浆护壁保护下清除孔底沉渣，随后将钢筋笼吊装入孔并灌注混凝土，最终形成承载力强、稳定性高的桩基础。其技术原理可分解为三个核心环节：（1）泥浆护壁成孔：利用黏土、膨润土等材料配制泥浆，通过泥浆的静水压力平衡土体侧压力，防止孔壁坍塌。泥浆的相对密度、黏度、失水率等指标需严格控制在设计范围内，例如在易坍土层中，泥浆相对密度应达到1.20~1.45，黏度保持19~28秒。（2）钢筋笼制作与吊装：钢筋笼采用分段制作、整体吊装工艺，主筋接长采用机械连接或焊接，箍筋间距误差需控制在±20mm以内^[1]。吊装过程中需设置导向装置，确保钢筋笼垂直度偏差不超过1%。（3）水下混凝土灌注：采用导管法灌注混凝土，首批混凝土需满足埋管深度不小于1米的要求，后续灌注过程中导管埋深控制在2~6米，防止混凝土离析或断桩。

该技术相比其他基础形式具有显著优势：其一，施工噪音低于85分贝，抗震性能强，适用于城市密集区施工；其二，桩径可达2~3米，单桩承载力超过5000吨，

满足特大型桥梁需求；其三，通过调整桩长、桩径及嵌岩深度，可灵活适应软土、岩层、砂层等复杂地质条件。天峨县二桥工程中，设计采用直径2米的嵌岩桩，单桩承载力达8000吨，成功穿越强风化岩层，验证了该技术的适应性。

2 钻孔灌注桩施工工艺流程

钻孔灌注桩作为桥梁、建筑等工程中的核心基础形式，其施工流程涵盖场地准备、护筒埋设、泥浆制备、钻孔成孔、清孔、钢筋笼吊装及混凝土灌注等多个精密环节。每个环节的技术参数控制直接关系到成桩质量与工程安全，需通过系统化管理和精细化操作确保规范执行。

2.1 场地准备与护筒埋设

施工前，场地处理是保障钻机稳定作业的基础。需对场地进行整平压实，确保地基承载力满足钻机工作要求（通常 $\geq 0.2\text{MPa}$ ）。对于软弱地基，需采用换填、夯实或铺设钢板等加固措施，防止钻机作业时因不均匀沉降导致孔位偏移或设备倾覆。护筒作为孔口保护装置，其制作与埋设质量直接影响成孔垂直度与孔壁稳定性。护筒通常采用3~5mm厚钢板卷制，内径比桩径大20~30cm，以提供足够的操作空间并防止孔口塌陷。埋设深度需根据土层特性调整：黏土层中不小于1m，砂土层中不小于1.5m；若遇淤泥质土层，需加深至2m以上或采用局部换填黏土处理。埋设过程中，需严格控制护筒中心与桩位中心的偏差（ $\leq 5\text{cm}$ ）及倾斜度（ $\leq 1\%$ ），可通过全站仪定位和水平尺校准实现^[2]。某高速公路桥梁工程中，护筒埋设倾斜度达1.5%，导致钻孔偏斜量超标（0.6%）。施工方未及时纠偏，继续钻进至设计深度后，发现钢筋笼无法顺利下放。最终通过回填黏土并重新钻孔处理，延误工期7天，增加成本约12万元。此案例表明，护筒埋设的微小偏差可能引发连锁反应，需在初始阶段严格把控。

2.2 泥浆制备与循环系统

泥浆是维持孔壁稳定的关键介质，其性能指标需根据土层特性动态调整。在一般土层中，泥浆相对密度控制在1.05-1.20，易坍土层提升至1.20-1.45，以平衡土体压力并防止塌孔；黏度在一般土层中为16~22秒，易坍土层需达到19~28秒，确保泥浆携带钻屑的能力；含砂率不超过8%，胶体率大于96%，以减少沉渣堆积。泥浆循环系统通过沉淀池、循环池及泥浆泵实现闭路循环，需定期检测泥浆性能并补充新鲜泥浆，避免劣化。某跨海大桥工程中，针对海域高渗透性土层，采用聚丙烯酰胺（PAM）作为增黏剂，将泥浆失水率从25mL/30min降至10mL/30min。通过实验室配比试验确定PAM最佳掺量（0.05%~0.1%），显著减少了孔壁渗水现象，降低了塌孔风险，同时减少了泥浆排放量，符合环保要求。

2.3 钻孔成孔与垂直度控制

钻孔过程中，垂直度控制是确保桩体承载力的核心。需通过测斜仪或超声波测壁仪实时监测钻杆垂直度，偏差超过0.5%时立即停钻调整。调整方法包括：调整钻机平台水平度、加设导向装置或局部回填黏土重钻。在软硬土层交界处，钻进速度需降至0.5m/min以下，避免钻头因受力不均发生偏移。此外，钻压与转速需根据土层硬度动态调整，防止因过度施压导致孔壁失稳。某山区桥梁工程中，钻进至岩层界面时未减速，导致钻孔偏斜量达0.8%。施工方采用高强度水泥砂浆灌注纠偏，但处理后桩体完整性检测仍显示局部缺陷，最终通过补桩措施解决，增加成本约15%。此案例表明，岩层界面是钻孔偏斜的高发区，需提前制定专项控制方案。

2.4 清孔与沉渣控制

清孔质量直接影响桩端承载力。首次清孔采用换浆法，通过注入相对密度1.1-1.2的稀泥浆置换孔内高密度泥浆，同时利用钻杆反向旋转辅助排渣。二次清孔在钢筋笼吊装后进行，采用气举反循环工艺，通过压缩空气形成泥浆上升流，高效清除孔底沉渣。清孔后需检测沉渣厚度（≤5cm）及泥浆性能，确保符合灌注要求^[3]。某特大桥工程中，因清孔不彻底导致沉渣厚度达8cm，成桩后静载试验显示桩端阻力降低20%。施工方采用高压注浆补强处理，但补强效果受沉渣分布不均影响，最终通过增加补桩数量解决，增加成本约20万元。此案例表明，清孔是成桩质量的“最后一道防线”，需通过多级清孔与严格检测确保达标。

2.5 混凝土灌注与导管控制

混凝土灌注是成桩的关键环节，导管作为输送通道，其性能直接影响灌注质量。导管采用无缝钢管制

作，内径≥250mm，每节长度2~3m，连接处设橡胶密封圈防止漏水。使用前需进行水密试验（压力≥孔底静水压力1.5倍），确保密封性。首批混凝土灌注桩需满足埋管深度不小于1米的要求，计算公式为：

$$V = \frac{\pi D^2}{4} (H_1 + H_2) + \frac{\pi d^2}{4} h_1$$

其中，D为桩径，d为导管内径，H₁为孔深，H₂为导管底口至孔底距离，h₁为导管内混凝土高度（通常取1.5m）。计算时需考虑混凝土扩径系数（1.1-1.2），避免因量不足导致导管埋深过浅。某工程因首批混凝土量计算错误，实际灌注量仅满足埋深0.5米的要求，导致混凝土离析形成断桩。施工方采用冲击钻清除断桩后重新灌注，但处理周期长达15天，增加成本约30万元。此案例表明，首批混凝土量计算需结合现场实际参数复核，严禁凭经验估算。

3 施工质量控制关键技术

3.1 泥浆性能动态调控

以某长江大桥工程为例，其覆盖层厚度达35m，流速2.5~3.6m/s。施工中采用PHP泥浆（聚丙烯酰胺-膨润土复合泥浆），通过实时监测调整配比^[4]。膨润土掺量8%~10%，PHP掺量0.05%~0.1%，碳酸钠掺量0.3%~0.5%。该配方使泥浆黏度稳定在25~28s，失水率≤12mL/30min，有效防止了孔壁坍塌。

3.2 缩孔问题防治

在塑性土层中，缩孔率可达15%~20%。可采取多种防治措施，如采用双底捞砂钻头，每钻进1m回旋扫孔0.5m；钻头直径比设计桩径大20~30mm；掺入10%~15%的塑性指数较高的粘土改良地层。

3.3 断桩事故预防

某高速公路工程中，因导管埋深过大（达8m）导致混凝土离析，形成1.2m断桩。改进措施包括建立导管深实时监测系统，采用超声波测厚仪每10min检测一次；严格控制混凝土坍落度18~22cm，扩展度≥500mm；制定应急预案，当导管堵塞时采用二次插管法处理。

4 工程实例分析

4.1 项目概况

天峨县二桥工程全长1.2km，主桥为（120+220+120）m预应力混凝土连续刚构，基础采用Φ2.0m钻孔灌注桩，桩长65~85m，嵌岩深度≥5m。地质条件复杂，覆盖层为第四系冲积层，基岩为灰岩，局部存在溶洞。

4.2 技术难点

该工程面临多个技术难点。溶洞地层成孔方面，溶洞高度1.5~3.0m，充填物为软塑状粘土；深水桩施工

时,水深12~18m,流速1.2m/s;大直径桩垂直度控制要求桩径2.0m,垂直度偏差≤0.5%。

4.3 解决方案

针对溶洞处理,采用“钢护筒跟进+混凝土回填”工艺,钢护筒直径2.2m,壁厚16mm,分节接长至溶洞底部以下2m。深水平台采用Φ820mm钢管桩基础,平台标高比最高水位高3.0m,设置双层导向架控制桩位。垂直度控制采用超声波测斜仪实时监测,偏差超限时采用导向钻具纠偏。

4.4 实施效果

实施上述方案后取得了良好的效果。成桩质量方面,经超声波检测,I类桩占比98.5%,II类桩1.5%,无III类桩。承载力上,单桩竖向承载力特征值达12000kN,满足设计要求。经济效益方面,较冲击钻成孔工艺提高工效40%,降低材料损耗15%。

5 常见质量问题及防治措施

5.1 孔壁坍塌

孔壁坍塌的成因主要是泥浆性能不合格、护筒埋设过浅、钻进速度过快。防治措施包括控制泥浆黏度≥20s,相对密度≥1.20;护筒埋深进入不透水层≥1.0m;在砂层中钻进速度≤0.3m/h。

5.2 钢筋笼上浮

钢筋笼上浮的成因有混凝土灌注速度过快、导管埋深过大、钢筋笼固定不牢。防治方法为控制混凝土上升速度≤2.0m/h;导管埋深控制在2~4m;钢筋笼顶部采用Φ25mm钢筋焊接固定于护筒。

5.3 桩身夹泥

桩身夹泥的成因是清孔不彻底、混凝土离析、拔管过快。防治措施包括清孔后沉渣厚度≤50mm;控制混凝土坍落度18~22cm;拔管速度≤0.5m/min。

6 技术创新与发展趋势

6.1 智能化施工装备

智能化施工装备不断发展。自动调垂系统采用液压缸+传感器实现钻杆垂直度实时调整,偏差控制在±0.1%

以内。泥浆性能在线监测通过电导率、流变仪等传感器实现泥浆参数自动调控。混凝土灌注监控采用压力传感器+流量计实现灌注速度、埋深等参数自动控制。

6.2 绿色施工工艺

绿色施工工艺逐渐兴起。泥浆零排放技术采用压滤机+离心机组合工艺,实现泥浆循环利用率≥95%。低噪音钻机采用电动驱动+消声装置,施工噪音≤65dB。太阳能供电系统在偏远地区采用光伏发电满足施工用电需求。

6.3 新型桩型开发

新型桩型不断涌现。变截面桩上部直径2.5m,下部直径2.0m,可提高桩端承载力。多支盘桩在桩身设置2~3个承力盘,单桩承载力提高30%~50%。钢管混凝土复合桩外径2.0m钢管内灌注C60混凝土,适用于超深基础。

7 结论与展望

钻孔灌注桩技术作为公路桥梁工程的核心基础形式,其施工质量控制涉及多个环节。通过研究可知,泥浆性能调控是维持孔壁稳定的关键,需根据地层变化动态调整配比;清孔质量直接影响桩端承载力,应采用多种方法联合清孔;混凝土灌注过程控制是防止断桩的核心,需建立导管埋深实时监测系统。未来研究应重点关注基于BIM技术的施工全过程模拟与优化、人工智能在桩基质量预测中的应用以及超长桩基施工装备研发与工艺创新。通过技术创新与标准化管理,钻孔灌注桩技术将在公路桥梁工程中发挥更大的作用,为交通基础设施建设提供可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]张理智.钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁施工中的运用分析[J].时代汽车,2025,(20):189-191.
- [2]冯杭杭.高速公路桥梁施工中钻孔灌注桩技术研究[J].交通科技与管理,2025,6(16):32-34.
- [3]陈才刚.新形势下高速公路桥梁施工中钻孔灌注桩技术的应用[J].汽车周刊,2025,(09):100-102.
- [4]任柯翰.钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁施工中的应用分析[J].时代汽车,2025,(16):193-195.