

公路桥梁桩基施工工艺优化与成桩质量控制研究

郭志炜

杭州市交通工程集团有限公司 浙江 杭州 310024

摘要: 本文聚焦于当前公路桥梁建设中应用最为广泛的钻孔灌注桩技术,系统性地探讨了其施工工艺的优化路径与成桩质量的全过程控制策略。文章首先剖析了影响成桩质量的核心要素,继而从施工准备、成孔作业、钢筋笼安装到水下混凝土灌注等关键环节,深入阐述了各阶段精细化的质量控制要点。在此基础上,重点论述了如何通过优选施工设备、优化泥浆性能、严控清孔标准、规范混凝土灌注流程等手段,有效预防塌孔、缩径、断桩、钢筋笼上浮等常见质量通病。最后,前瞻性地提出了构建以BIM技术为支撑、融合全过程质量追溯与动态风险预警的现代化质量管理体系,旨在为提升我国公路桥梁桩基工程的整体质量水平提供一套系统化、可操作的理论框架与实践指南。

关键词: 公路桥梁; 桩基施工; 钻孔灌注桩; 工艺优化; 成桩质量

引言

在现代交通基础设施体系中,公路桥梁作为连接地域、疏导交通与推动经济发展的重要纽带,其结构安全与服役寿命直接关乎公共安全和社会经济的稳定运行。桩基作为桥梁的根基,承担着将上部巨大荷载可靠传递至深层稳定地基的关键使命,其施工质量堪称整个桥梁工程的生命线。然而,桩基工程属典型的地下隐蔽工程,施工过程深埋于土体或水下,难以直观监控,且工序复杂、环环相扣,任一环节失误均可能引发不可逆的质量隐患。随着我国公路网不断向软土、岩溶、高地震烈度等复杂地质区域延伸,对桩基的承载力、变形控制及耐久性提出了更高要求,传统施工方法与质量管理模式已难以为继。尤其在广泛应用的钻孔灌注桩工艺中,如何应对多变地质条件、精准控制成孔质量、确保水下混凝土连续密实灌注,成为突出技术瓶颈。

1 公路桥梁桩基施工质量的影响因素分析

1.1 地质与水文条件的复杂性

地质与水文条件是桩基施工面临的首要外部变量。不同的土层性质(如粘性土、砂土、卵石层、基岩)对成孔的稳定性、钻进效率及孔壁保护提出了截然不同的要求。在松散的砂层或流塑状淤泥中,孔壁极易发生坍塌;在含有孤石或硬夹层的地层中,钻头易发生偏斜或磨损;在岩溶发育地区,则存在漏浆、卡钻甚至地面沉降的风险。同时,地下水位的高低、水流速度及水质成分,直接影响泥浆护壁的效果和混凝土的凝结硬化过程。高压水会加剧孔壁失稳的风险,而腐蚀性地下水则可能侵蚀钢筋,影响桩身的长期耐久性。因此,详尽、准确的地质勘察报告是制定合理施工方案和质量控制措施的前提。

1.2 施工设备与工艺的适应性

施工设备的选型与工艺参数的设定,是连接设计意图与实体工程的桥梁。面对不同的地质条件,必须选用匹配的成孔设备。例如,在粘性土或粉土中,旋挖钻机因其高效、环保而被广泛采用;在含有大粒径卵石或基岩的硬地层中,冲击钻机凭借其强大的冲击破碎能力更具优势;而在对孔壁扰动要求极小的城市密集区,则可能采用全套管跟进的全回转钻机^[1]。若设备选型不当,轻则导致施工效率低下、成本增加,重则因无法有效成孔或造成过大扰动而引发周边环境问题。此外,钻进速度、泥浆比重、导管理深等工艺参数的细微调整,都会对成孔质量和混凝土灌注效果产生决定性影响。

1.3 材料性能与配合比设计的合理性

桩基工程所用材料,尤其是混凝土和泥浆,其性能直接决定了最终的成桩质量。水下灌注混凝土必须具备优异的和易性、流动性、保水性和抗离析性,以确保其在水下环境中依靠自重流动并填充整个孔隙,包裹住钢筋笼。这要求对其原材料(水泥、骨料、外加剂)进行严格筛选,并通过科学的配合比设计,将坍落度精确控制在180-220mm的范围内。泥浆作为成孔过程中的“血液”,其性能指标(如比重、粘度、含砂率、胶体率)必须根据地层特性进行动态调整。优质的泥浆不仅能有效悬浮钻渣、冷却钻头,更能形成一层致密的泥皮,对孔壁起到关键的支撑和保护作用,防止塌孔。

2 桩基施工关键环节的工艺优化与质量控制

2.1 施工准备与场地处理

周密的施工准备是成功的一半。首先,必须对施工场地进行彻底清理和平整压实,确保钻机等重型设备能够平稳就位,防止因地面沉降导致钻机倾斜,进而影响

桩位和垂直度精度。对于水上或近水区域的桩基施工,需根据水深和流速,采用筑岛法、钢板桩围堰或钢套箱平台等方式,创造一个稳定、干燥的作业面。其次,精确的测量放样至关重要,应采用高精度全站仪进行桩位定位,并设置牢固的护桩,以便在施工过程中随时复核。最后,护筒的埋设是保障孔口稳定的第一道防线。护筒内径应比设计桩径大200~400mm,其埋设深度在粘性土中不应小于1米,在砂土或杂填土中不应小于1.5米,且护筒中心与桩位中心的偏差不得大于50mm,倾斜度不得大于1%。

2.2 成孔工艺的选择与优化

成孔是桩基施工的核心工序,其质量直接决定了桩的有效直径和侧摩阻力。针对不同地质,应采取差异化的成孔策略。对于旋挖钻机,在软弱地层中应采用较小的钻压和较快的转速,避免扰动过大;在硬岩层中,则需增大钻压,降低转速,并适时补充优质泥浆。对于冲击钻机,冲程和频率的控制尤为关键,过大的冲程易导致孔壁坍塌,过小则效率低下^[2]。在整个钻进过程中,必须对泥浆性能进行实时监测与动态调整。在易塌孔的砂层中,应适当提高泥浆比重(1.2~1.4)和粘度(20~28s),并加入适量的增粘剂;在粘性土地层中,则可适当降低比重(1.05~1.2),以防泥皮过厚影响桩土结合。同时,应严格控制钻杆的垂直度,利用钻机自带的电子调平系统或经纬仪进行实时校正,确保成孔垂直度偏差满足规范要求(通常小于1%)。

2.3 清孔与终孔验收

清孔是承上启下的关键步骤,其目的是清除孔底沉渣,为后续混凝土灌注创造良好条件。清孔不彻底,残留的沉渣会在桩底形成一层软弱夹层,严重削弱桩端承载力。常用的清孔方法有换浆法、抽浆法和气举反循环法。无论采用何种方法,都必须确保清孔后的泥浆性能指标(比重 ≤ 1.15 ~1.20,含砂率 $\leq 2\%$,粘度 $\leq 20s$)和孔底沉渣厚度(端承桩 $\leq 50mm$,摩擦桩 $\leq 100mm$)满足设计及规范要求。终孔验收应在清孔后立即进行,由监理工程师、施工单位技术负责人共同参与,对孔深、孔径、孔形、垂直度及沉渣厚度进行全面检测,确认合格后方可进入下一道工序。

2.4 钢筋笼制作、吊装与定位

钢筋笼是桩身的骨架,其制作与安装质量直接关系到桩的结构强度和耐久性。钢筋笼应在专用的胎架上制作,确保主筋间距、箍筋间距、加强箍位置及焊接/机械连接质量符合设计要求。为保证钢筋保护层厚度,应在主筋外侧均匀设置高强度的混凝土垫块或定位器。吊装是高风险作业,必须制定详细的吊装方案,采用多点吊

装法,防止钢筋笼在空中发生过大变形。入孔后,应通过护筒上的定位标记,利用四根对称的吊筋将钢筋笼精确、牢固地悬挂在设计标高位置,并与孔口固定,严防在后续混凝土灌注过程中发生上浮或偏移。

2.5 水下混凝土灌注

水下混凝土灌注是成桩的最后一道、也是最关键的工序,其成败直接决定了桩身的完整性和密实度。灌注前,必须对导管进行水密承压试验,确保其连接密封、无渗漏。初灌量的计算至关重要,必须保证首批混凝土灌入后,能将导管底端一次性埋入混凝土中至少1米以上,形成可靠的隔水栓。灌注过程中,必须保持连续、匀速,严禁中途停顿^[3]。导管的埋深是核心控制参数,应始终保持在2~6米之间。埋深过浅,易导致泥浆混入混凝土形成夹泥;埋深过深,则会增大混凝土的流动阻力,可能导致堵管或钢筋笼上浮。应安排专人负责测量混凝土顶面标高,并据此指导导管的适时提升与拆除。整个灌注过程应全程旁站监督,并详细记录灌注时间、混凝土方量、导管埋深等数据,确保充盈系数(实际灌注量/理论计算量)大于1.05,以验证桩身的完整性。

3 常见成桩质量缺陷的成因分析与防治对策

3.1 塌孔与缩径

塌孔通常发生在松散、饱和的砂层或流塑状淤泥中,主要成因是泥浆护壁失效或钻进扰动过大。防治的关键在于维持孔内外压力平衡,即通过配制高性能泥浆形成稳定的泥皮,并严格控制钻进参数。一旦发生轻微塌孔,可立即加大泥浆比重和粘度,并向孔内回填粘土球进行护壁;若塌孔严重,则需回填至塌孔位置以上1~2米,待沉积密实后再重新钻进。缩径则多因钻头磨损未及时修补,或在遇水膨胀的软粘土地层中钻进所致。防治措施包括定期检查并修复钻头尺寸,以及在易缩径地层中采用上下反复扫孔的方法扩大孔径。

3.2 钻孔偏斜

钻孔偏斜会严重影响桩的承载性能。其成因主要有:钻机底座不稳、钻杆弯曲、地层软硬不均或遇到孤石。预防措施包括确保钻机安装稳固、使用合格的钻具、在软硬交界处低速慢钻。若已发生偏斜,可在偏斜处回填片石和粘土混合物,待其沉积密实后,以低冲程反复冲击,迫使钻头回到正确轨迹。

3.3 钢筋笼上浮

钢筋笼上浮是灌注过程中的常见问题,主要发生在混凝土面接近或刚超过钢筋笼底部时。其机理是混凝土从导管流出后向上顶升,对钢筋笼产生向上的浮力。防治的关键在于控制导管埋深和灌注速度。当混凝土面接

近钢筋笼底部时,应适当放慢灌注速度,并将导管底端提至钢筋笼底端以上一定距离(约2米)^[4]。此外,可在钢筋笼底部主筋上焊接“倒刺”或增设压重,增加其抗浮能力。

3.4 断桩与夹泥

断桩是最严重的质量事故,指桩身混凝土不连续,中间被泥浆或沉渣隔断。其根本原因是灌注过程中导管脱离混凝土面,导致泥浆涌入。这通常由导管提升操作失误、混凝土供应中断或导管堵塞引起。防治的核心是确保灌注的绝对连续性,并由专人精确计算和控制导管埋深。一旦发生堵管,应迅速尝试疏通;若短时间内无法疏通,则需在混凝土初凝前将导管拔出,按断桩事故处理,通常需采用压浆补强或重新补桩。

4 现代化桩基施工质量管理体系的构建

4.1 以BIM技术为核心的全过程协同管理

建筑信息模型(BIM)技术为桩基工程管理带来了革命性的变革。在设计阶段,可通过BIM模型进行地质三维建模,直观展示地层分布,辅助优化桩长和桩位布置。在施工准备阶段,利用BIM进行施工模拟,可以预先发现场地布置、大型设备进场路线等方面的冲突。在施工过程中,将进度、质量、安全等信息与BIM模型关联,可实现对每根桩的全过程动态追踪。管理人员可通过移动终端,随时调取某根桩的设计参数、地质剖面、施工日志、检验报告等全部信息,极大地提升了管理的透明度和决策效率。

4.2 构建全过程质量追溯与动态预警系统

利用物联网(IoT)技术,在关键工序部署传感器,可实现对施工过程的实时、自动监控。例如,在泥浆池安装传感器,可实时监测泥浆比重、粘度等参数,并在超标时自动报警;在导管上安装倾角和深度传感器,可实时反馈导管状态,防止误操作。所有采集的数据汇入云端项目管理平台,与BIM模型集成,形成完整的质量追溯链条。一旦系统识别出潜在风险(如清孔后沉渣厚度缓慢增加、混凝土灌注速度异常波动),可立即向相关人员发出预警,实现从“事后检验”到“事前预防、事中

控制”的根本转变。

4.3 强化标准化与预防性质量控制

建立企业级的桩基施工工艺标准库和质量通病防治手册,将成功的经验和失败的教训固化下来,形成标准化的作业指导书。大力推行“首件制”和“样板引路”制度,在大规模施工前,先完成一根试验桩,验证施工方案和工艺参数的合理性,并以此统一后续施工的标准。同时,建立完善的质量巡检和考核机制,将质量责任层层分解,落实到每一个岗位和个人,通过正向激励与负向约束相结合的方式,营造全员参与、全过程控制的质量文化氛围。

5 结语

公路桥梁桩基施工质量控制是一项集地质学、材料学、机械工程与管理科学于一体的综合性系统工程。其核心在于深刻理解地质条件的复杂性,精准把握施工工艺的内在逻辑,并通过严格的全过程管理,将各项质量控制措施落到实处。从施工准备的精细策划,到成孔、清孔、钢筋笼安装、混凝土灌注等关键工序的精准把控,再到对塌孔、偏斜、断桩等质量通病的有效防治,每一个环节都容不得丝毫懈怠。展望未来,随着BIM、物联网、大数据等新一代信息技术的深度融合,桩基施工质量管理必将朝着更加可视化、智能化、精细化的方向发展。唯有持续推动技术创新与管理升级,构建起一套科学、高效、适应时代发展的现代化质量管理体系,才能真正筑牢公路桥梁的根基,为国家交通基础设施的百年大计提供最坚实的保障。

参考文献

- [1]程辉.公路桥梁桩基础施工工艺及质量控制研究[J].汽车周刊,2024,(10):154-156.
- [2]罗谦.公路桥梁桩基础施工工艺和质量控制措施[J].交通科技与管理,2024,5(15):65-67.
- [3]张谦.公路桥梁桩基工程施工技术要点分析[J].汽车周刊,2026,(4):258-260.
- [4]刘攀.公路桥梁桩基施工技术创新与应用[J].时代汽车,2026,(6):130-132.