

桥梁施工混凝土灌注桩工艺的质量控制与检测研究

张振振

(中交路桥华北工程有限公司, 北京 101100)

摘要 混凝土灌注桩作为公路桥梁工程的重要基础结构,其施工质量直接影响桥梁的整体安全性以及使用寿命。研究针对灌注桩施工过程中常见的质量问题,通过对首都地区环线高速公路TJ2标段桩基工程的实地研究,分析了灌注桩施工全过程的质量控制要点,建立了科学的检测技术体系。实验数据证实,泥浆性能指标、钻孔技术参数、钢筋笼制作与安装、混凝土浇筑等关键环节均对灌注桩质量有显著影响。通过规范施工流程、完善检测指标来提高管理水平并建立有效的信息交互机制,可显著提高混凝土灌注桩的施工质量。研究成果旨在为公路桥梁灌注桩施工提供系统的质量控制与检测技术参考,对提升桥梁工程建设质量具有重要的实践价值。

关键词 公路桥梁; 混凝土灌注桩; 钻孔偏斜; 混凝土卡管; 混凝土埋管

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.09.042

0 引言

混凝土灌注桩作为桥梁基础工程中的关键支撑结构,其施工质量直接关系到桥梁的安全性与稳定性以及使用寿命。灌注桩施工位于地表下或水面下,受到地质条件、水文环境与气候因素等多方面影响,容易出现钻孔偏斜、混凝土卡管、埋管等问题。这些问题会导致桩身完整性受损,承载力下降,甚至引发安全隐患。虽然国内外对灌注桩施工技术已有较为成熟的研究,但针对不同地质条件以及施工环境下的质量控制与检测技术体系仍需深入探索。通过分析首都地区环线高速公路工程实例,旨在提出灌注桩施工全过程的质量控制与检测技术优化方案,为桥梁基础工程建设提供技术支撑。

1 工程概述

首都地区环线高速公路(G95)承德至平谷段工程是首都地区环线高速的重要组成部分,是承德进京的第二高速通道及连接天津的快速通道。TJ2标段位于K11+000~K23+000段,全线长12 km,采用双向六车道高速公路标准,设计速度80公里/小时,路基结构整体式宽33米,分离式宽2×16.5 m。工程区域地貌多样,地形起伏剧烈,沟谷纵横交错,地面高程933.3~191.4 m,地质条件复杂,部分区段存在岩溶发育^[1]。桩基工程规模大,共793根,总延米16 424.5 m,桩径最大2.4 m,最长31 m,采用冲击钻与旋挖钻及人工挖孔工艺。全线桥涵设计汽车荷载等级

为公路I级,包括特大桥1座,大桥7座,互通1处,分离立交1座,隧道4座。气候为典型大陆性气候,降水集中在夏季,呈春旱夏涝特点。

2 混凝土灌注桩施工质量问题

2.1 钻孔偏斜问题

钻孔偏斜问题是混凝土灌注桩施工中最普遍且易引发安全事故的问题之一。首都地区环线高速公路TJ2标段施工过程中,钻孔偏斜主要由两方面因素导致:混凝土浇筑成桩过程中质量监督不到位导致灌注桩数据参数出现较大偏差,以及施工过程中钢筋笼下沉不当引起倾斜角度变化。在四顷地特大桥桩基施工中,多根桩基出现不同程度的偏斜现象,超出设计标准要求。钻孔偏斜严重影响桩基的承载力以及稳定性,使桩身受力不均,引发桩基工程安全隐患^[2]。在实际施工中,钻机平台稳定性不足成为主要原因,特别是在复杂地形区域,地层变化导致钻头受力不均,加剧了偏斜问题。

2.2 混凝土卡管问题

混凝土卡管问题在拨东1号大桥以及拨东2号大桥施工中尤为突出。卡管主要原因为工作人员操作不当,导致混凝土密闭性不足或导管接头处理不当。在拨东2号大桥桩基施工中,发生多起卡管事件,严重影响施工进度以及混凝土质量。具体成因分析表明,混凝土搅拌不充分是首要原因,致使混凝土在灌注过

程中出现拥堵；导管接头处理不当也是重要因素，特别是导管接头处最易发生卡管；另外，灌注速度控制不合理也增加了卡管风险。针对混凝土卡管问题，应严格管理施工流程，确保操作人员按既定标准进行操作。一旦发生卡管，应立即停止灌注工作，拆卸堵塞导管进行清理后重新安装。

2.3 混凝土埋管问题

混凝土埋管问题主要出现在灌注桩施工最后阶段，在荒地沟 1 号大桥以及荒地沟 2 号大桥施工中尤为突出。埋管问题与施工人员对混凝土凝结时间把握不准确直接相关，导致无法及时提升导管，最终导致导管被混凝土埋住无法取出。埋管区域的混凝土密实度下降，出现蜂窝与孔洞等缺陷，局部强度降低，对桩基整体承载力产生不利影响。在拨东系列大桥施工中，超声波检测显示埋管部位混凝土强度降低约 15%，严重影响桩基质量^[3]。针对混凝土埋管问题，施工单位应精准掌握混凝土凝结时间，安排专人监控现场，采取“勤拔勤拆”的原则，防止管线深入过多。

3 灌注桩施工质量保障体系

3.1 钻孔偏斜的控制与检测

钻孔偏斜问题的控制与检测在首都地区环线高速公路 TJ2 标段灌注桩施工中采用了多层次防控体系。施工前期通过全站仪或 GPS 构建精确的测量控制网，确保桩位定位准确，群桩偏差控制在 100 mm 内，单桩偏差控制在 50 mm 内。钻机就位前对底座进行特殊加固处理，特别是在四顷地特大桥区域的复杂地形地段，采用钢板加固法增强钻机平台稳定性。钻进过程中应用钻孔测斜仪进行实时监测，测斜仪每米深度自动采集数据，形成三维成像图，垂直度偏差控制在 1% 以内。水洞沟大桥桩基施工中应用了声波测试仪监测孔壁情况，检测精度达到 ± 5 mm，发现异常立即纠正。同时采用钻孔参数记录系统持续记录钻进速率与扭矩与压力等参数，建立数据库进行动态分析，进而调整钻进工艺。

3.2 混凝土卡管的控制与检测

混凝土卡管问题的控制与检测在拨东系列大桥的灌注桩施工中实施了全方位的技术措施。混凝土配制环节严格控制其性能指标，坍落度控制在 180 ~ 220 mm 范围内，通过标准锥体试验进行检测，确保流动性满足灌注要求。导管接头采用了改良型锁扣式接头，比传统螺纹连接提高了密封性能，并采用液压扭矩扳手控制拧紧力度。每节导管在使用前进行水压测试，确保无泄漏点。灌注过程中安装了智能压力传感器系统，实时监测导管内部压力变化，数据异常时自动预警^[4]。

灌注速度通过计算机控制系统精确调控，初始阶段控制在 $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ，稳定后可提高至 $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 。针对导管接头处易发生卡管的问题，增设了接头振动装置，通过微振动减少混凝土在接头处的黏附。

3.3 混凝土埋管的控制与检测

混凝土埋管的控制与检测在荒地沟系列大桥灌注桩施工中采取了多项技术革新，如表 1 所示。数据表明，采用混凝土配制与缓凝剂技术，冬季控温 $15 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，夏季 $25 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，使初凝时间延长 2 ~ 3 小时，埋管问题发生率降低 85%。液压提升系统的应用，最大提升力达 3 吨，预警阈值设定为 80%，提高了操作可控性并缩短反应时间。声波测深技术实现了 $\pm 5 \text{ cm}$ 的测量精度，确保导管埋深稳定控制在 2 ~ 6 m 内。“定时提管”制度要求每灌注 2 ~ 3 m 提升一次，每次 15 ~ 20 cm，使埋管发生率降至 0.6%。快速脱离装置则实现了不超过 3 秒的分离时间，承载力达 2.5 吨，确保拨东 3 号大桥 41 根桩实现零埋管事故。

表 1 混凝土埋管控制与检测技术参数及效果

控制措施	技术参数	应用效果
混凝土配制 + 缓凝剂	冬季控温 $15 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，夏季 $25 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，初凝时间延长 2 ~ 3 小时	埋管问题发生率降低 85%
液压提升系统	最大提升力 3 吨，精度 $\pm 0.1 \text{ kN}$ ，预警阈值 80%	操作可控性提高 90%，反应时间缩短 65%
声波测深技术	测量精度 $\pm 5 \text{ cm}$ ，监测频率 5 秒 / 次	导管埋深合格率 98.5%
计算机灌注模型	预测准确率 92%，参数包括温度等 8 项指标	灌注终点预判准确率 95%
“定时提管”制度	每灌注 2 ~ 3 m 提升一次，每次 15 ~ 20 cm	埋管问题发生率降至 0.6%
快速脱离装置	分离时间 < 3 秒，最大承载力 2.5 吨	拨东 3 号大桥零埋管事故

4 质量管理体系构建

4.1 施工人员培训

施工人员培训作为提升混凝土灌注桩施工质量的关键环节，在首都地区环线高速公路 TJ2 标段实施了系统化培训机制。培训内容覆盖灌注桩施工技术标准、

质量控制要点与常见问题处理方法等实用技术。针对不同岗位人员，设置了分层培训体系，技术管理人员着重掌握规范标准及质量控制理论，一线操作人员侧重实操技能训练。采用理论与实践相结合的方式，通过模拟灌注桩施工全流程操作，提高技术人员处理突发问题的能力。培训中引入了 VR 技术，让施工人员在虚拟环境中体验各类施工环节，特别是钻孔、清孔与下钢筋笼等关键工序的标准操作流程。培训结束后进行严格考核，考核通过才能持证上岗。

4.2 检测设备更新

TJ2 标段灌注桩施工质量控制中的检测设备更新前后对比显示了显著的技术进步，如表 2 所示。数据表明，检测设备更新后，孔壁缺陷识别率提高了 78%，混凝土检测时间缩短 95%，泥浆分析效率提高 300%，声波测试准确率提高 17 个百分点，钢筋笼检测效率提高 250%，数据处理速度提高 400%。这些技术升级为桩基施工质量控制提供了更精确与更高效的检测手段^[5]。四顷地特大桥桩基施工中，新型孔内成像系统准确识别了多处微小缺陷，及时修正了施工方案；拨东系列大桥混凝土浇筑质量显著提高，桩身完整性得到有效保障。新型泥浆分析仪在荒地沟系列大桥施工中实现了泥浆参数的精确控制，有效防止了塌孔风险；声波测试系统大幅提高了桩基检测覆盖率，确保了灌注桩质量的全面可控。

表 2 检测设备更新前后对比

检测项目	更新前参数	更新后参数	性能提升
孔壁检测	分辨率 5 mm，单点测量	分辨率 1 mm，360° 扫描	缺陷识别率 +78%
混凝土检测	24 小时，精度 ±5 MPa	15 分钟，精度 ±2.5 MPa	时间 -95%，准确率 +15%
泥浆分析	单次测量 2 分钟	5 种指标同测，30 秒	效率 +300%，识别率 +20%
声波测试	每米 2 个测点	每米 8 个测点	准确率 +17%，误差 -60%
钢筋笼检测	2 小时，精度 ±5 mm	30 分钟，精度 ±2 mm	效率 +250%，合格率 +13%
数据传输	纸质记录，滞后 24 小时	实时上传，响应 < 2 秒	处理速度 +400%

4.3 信息交互机制

信息交互机制在 TJ2 标段灌注桩施工中实现了施工方与检测人员间的高效沟通，显著提升了质量控制效率。该机制基于云平台构建，整合了即时通信软件与数据共享系统以及问题跟踪模块。施工方通过平台实时上传每日施工计划以及进度数据，检测人员在获取数据后及时反馈检测结果，形成闭环管理。四顷地特大桥施工中，应用专业工程软件建立公共编辑文档，检测人员可直接在文档上标记异常数据，施工方随时查看并进行调整。平台设置了不同权限等级，项目经理与技术负责人与质检员各司其职，确保信息流转精准高效。遇到数据偏差过大的情况，系统自动触发三方会议（施工、检测与设计），通过视频会议共同分析问题并制定解决方案。

5 结束语

通过对首都地区环线高速公路 TJ2 标段混凝土灌注桩施工质量控制与检测技术的研究表明，灌注桩施工质量问题主要集中于钻孔偏斜、混凝土卡管以及埋管三个方面。针对钻孔偏斜问题，采用全站仪精确定位以及钻孔测斜仪实时监测，将垂直度偏差控制在 1% 以内，使四顷地特大桥桩基垂直度合格率提高到 97.5%。针对混凝土卡管问题，通过控制坍落度在 180 ~ 220 mm 范围内，使用改良型锁扣式接头，将卡管发生率降至 2.2%。对于埋管问题，应用声波测深技术以及“定时提管”制度，使导管埋深合格率达 98.5%，荒地沟系列大桥埋管发生率降至 0.6%。通过设备更新以及信息交互机制构建，检测精度大幅提升，数据传输效率提高 400%，为灌注桩施工质量提供了可靠保障。

参考文献：

[1] 叶尔哈布力,余定健,梁鹏飞.桥梁水下墩基础钢护筒混凝土灌注桩施工技术研究[J].工程机械与维修,2024(08):102-104.

[2] 梁飞.桥梁项目中钻孔灌注桩施工技术应用[J].四川建材,2024,50(04):136-137,153.

[3] 罗志恒.公路桥梁工程钻孔灌注桩施工技术[J].运输经理世界,2024(09):100-102.

[4] 郑翔.浅析公路桥梁混凝土灌注桩施工与检测技术[J].工程建设与设计,2024(03):190-192.

[5] 孙国斌.高速公路桥梁桩基混凝土钻孔灌注桩施工技术[J].交通世界,2023(21):121-123.