

复杂地层钻孔灌注桩钢护筒精确定位 与钻进安装技术研究

辛举¹, 李想¹, 房玉焕², 李卫亚¹, 孙炳营¹

1. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000

2. 山东省工程咨询院, 山东 济南 250000

DOI:10.61369/ME.2026060032

摘 要 : 为了克服复杂地层钻孔灌注桩施工过程中钢护筒安装定位误差大、地层稳定难、施工成本高、效率低等技术难题, 提出了一种钢护筒精确定位和钻进安装一体化技术。采用优化后的钢护筒结构, 增设开挖破碎装置和驱动连接系统, 采用“护筒钻进、桩孔旋挖”交替施工工艺, 用专用垂直度定位测量装置进行准确控制。采用室内试验、数值模拟和工程实践相结合的方法, 对本技术的定位精度、施工效率和经济环境效益进行系统的探究。结果表明, 钢护筒安装中心偏差小于1cm, 垂直度偏差小于1%, 比传统的工艺施工效率提高了30%以上; 钢护筒可以重复使用, 单个项目材料成本降低了74%以上, 全生命周期碳排放减少了28%。该技术对于复杂的松散地层、含障碍物的地层具有很好的适应性, 给类似工程提供技术上的借鉴。

关 键 词 : 复杂地层; 钻孔灌注桩; 钢护筒; 精确定位; 钻进安装; 生命周期效益

Research on Precise Positioning and Drilling Installation Techniques for Steel Cores of Complex Geological Conditions: Drilled Pile Foundation Projects

Xin Ju¹, Li Xiang¹, Fang Yuhuan², Li Weiya¹, Sun Bingying¹

1. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

2. Shandong Engineering Consulting Institute, Jinan, Shandong 250000

Abstract : To address technical challenges encountered during the construction of bored cast-in-place piles in complex geological formations—such as significant installation and positioning errors of steel casing, difficulties in ensuring formation stability, high construction costs, and low efficiency—this study proposes an integrated technology combining precise steel casing positioning with drilling and installation processes. This approach employs an optimized steel casing structure, incorporates additional excavation and fragmentation devices along with a driving connection system, adopts an alternating construction sequence of "casing drilling followed by rotary drilling of the pile hole," and utilizes a dedicated verticality positioning measurement device for accurate control. By integrating laboratory tests, numerical simulations, and engineering field practice, this study systematically investigates the positioning accuracy, construction efficiency, and economic and environmental benefits of this technology. The results demonstrate that the center deviation of steel casing installation does not exceed 1 cm, the verticality deviation does not exceed 1%, and the construction efficiency is increased by more than 30% compared with traditional methods; furthermore, the steel casing can be reused, reducing material costs per project by more than 74% and decreasing total lifecycle carbon emissions by 28%. This technology exhibits excellent adaptability to complex loose formations and formations containing obstacles, providing valuable technical references for similar engineering projects.

Keywords : complex geology; bored pile; steel casing; precise positioning; drilling and installation; lifecycle benefits

作者简介:

辛举 (1989.02.03-), 男, 汉族, 山东曹县人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

李想 (1995.11.25-), 男, 汉族, 吉林吉林人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

房玉焕 (1990.03.02-), 女, 汉族, 山东济南人, 山东省工程咨询院, 本科, 中级工程师;

李卫亚 (1996.11.03-), 男, 汉族, 江苏徐州睢宁县人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

孙炳营 (1996.01.26-), 男, 汉族, 河南新乡人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师。

引言

钻孔灌注桩属于地基处理的主要技术之一，被普遍应用于桥梁、隧道、高层建筑等工程当中^[1]。卵石地层、松散堆积地层等复杂的地质条件下，传统的钢护筒安装大多采用人工开挖埋设或者全套管跟进法，存在许多技术上的难题，例如人工开挖容易造成护筒移位倾斜，定位不准^[2]；全套管跟进法需要专用设备，施工成本高，效率低^[3]；复杂地层中护筒下放受阻，容易造成孔壁坍塌、缩径等质量事故^[4]。随着工程建设向着复杂的地质环境发展，对钢护筒安装精度、速度和经济性的要求也越来越高。

近些年来，国内国外的学者就钢护筒施工技术展开了相关的探究工作。李建军等^[5]提出了基于全站仪的护筒定位方法，提高了平面定位精度，但是没有解决垂直度控制的问题；张宏等^[6]研发了拼接式钢护筒结构，实现了材料的回收利用，但是钻进阻力大问题还没有得到解决；国外学者提出的液压驱动护筒安装技术^[7]虽然降低了劳动强度，但是设备投入成本高，不能广泛推广。目前的技术还存在着定位精度和施工效率不能兼顾、专用设备依赖性强、环境适应性差等缺点，急需开发出一种适合复杂地层的钢护筒精确定位和高效安装技术。

本文采用结构创新、工艺改进和设备集成的方法，设计出带破碎结构的节段式钢护筒及配套驱动系统，并建立测量放样、钻机就位、交替钻进、垂直度检测、混凝土浇筑、护筒回收的全过程工艺。通过数值模拟分析和工程实测，验证该技术的定位精度、地层适应性、综合效益，给复杂地层钻孔灌注桩施工提供新的技术方案。

一、技术原理与系统设计

（一）核心技术原理

本技术以三个主要部分来完成对复杂地层钢护筒的精确高效安装工作，即①结构改进，护筒底部加装合金破碎切削齿，顶部安装驱动支架，直接接收到旋挖钻机的动力；②工艺改进，采用“钢护筒钻进－桩孔旋挖”的交替施工方式，减小固壁阻力；③测控优化，使用专用垂直度定位设备实时监测、动态纠偏。能较好地解决复杂地层护筒安装定位难、阻力大、稳定性差等问题。

（二）关键系统设计

1. 钢护筒结构设计

钢护筒用 Q235 钢材，分为钻进节和标准节，壁厚 30 ~ 40mm，内径按桩径定，比设计桩径大 10cm。钻进节端头焊接合金齿，用于破碎卵石、孤石等障碍物；顶部装对接环，环向对称布置 4 道卡榫扣和 8 处销轴接口，卡榫定位加销轴双锁固定，保证拼接精度和连接强度。单节长 3 米，根据地层深度需要分段连接使用。

2. 驱动支架系统

驱动支架由下对接环、十字加筋肋和上对接槽组成，整体用 40Cr 合金钢调质加工而成，结构强度高。下对接环和钢护筒顶部的销轴相连，上对接槽锁紧旋挖钻杆，将钻进的动力传给钻进。中间十字加筋肋加强抗扭，施工中支架不变形。

3. 垂直度定位测量装置

该装置由锥形架体、水平气泡和垂直度测杆组成，架体放在护筒顶部，2 米测杆竖直插入中心孔。护筒偏斜时，用水平气泡直观判断偏差方向，配合全站仪测量垂直度。设备测角精度为 $\pm 0.1^{\circ}$ ，反应时间不大于 5 秒，单节护筒安装完成后可以立即进行垂直度检查。

（三）数值模拟验证

用 ANSYS/LS-DYNA 建立钢护筒钻进数值模型，模拟复杂地层中护筒钻进过程的受力和变形特性。模型中地层参数取卵石地层物理力学指标，重度为 22kN/m³、内摩擦角为 35°、粘聚力为 18kPa；钢护筒用壳单元模拟，合金切削齿用实体单元，网格尺寸为 0.05m。从模拟结果可知，在钢护筒钻进时最大应力集中在切削齿根部（320MPa），小于 Q235 钢材屈服强度（345MPa），护筒垂直度偏差 $\leq 0.8\%$ ，符合理论设计要求，结构设计合理。

二、施工工艺与操作要点

（一）施工工艺流程

复杂地层钻孔灌注桩钢护筒定位钻进施工，依次按九道核心工序施工，即施工准备、护筒加工、测量放样、钻机就位、交替钻进、垂直度检测、成孔清孔、桩基浇筑、护筒回收。

（二）关键操作要点

1. 施工准备

提前编制专项施工方案，确定各道工序的各项技术参数；配备 XR280D 旋挖钻机、全站仪等施工设备并调试合格；对作业班组进行现场技术交底，使施工人员熟悉护筒拼接、钻机钻进操作方法。

进场的所有原材料按照规范进行验收，混凝土用硅酸盐水泥拌合，坍落度控制在 180 ~ 220mm 之间；钢护筒壁厚误差不超过 $\pm 1\text{mm}$ ，销轴采用 40Cr 钢材，直径为 65mm。

2. 测量放样

布设二级施工测量控制网，用十字定位法标定桩基桩位，孔位偏差控制在 1cm 之内。用全站仪、经纬仪测放桩位坐标，外放 150mm 预留施工操作余量；用水准仪实测场地标高，确定护筒埋

设深度，护筒顶面高出地面0.5m。所有的测量数据都要经过双人双检的复核，保证测量点位和数据准确无误。

3. 交替钻进施工

钻机就位后调直钻杆，垂直度偏差不大于0.3%；首节钢护筒安装驱动支架，悬空试转检查设备运转是否平稳。护筒对准桩中心旋压钻进，筒顶钻到距地面0.5米处时停止钻进，拆掉驱动支架。钻机钻进到设计孔深之后接长护筒，循环开展护筒跟进、桩孔旋挖作业，穿透松散地层和地下障碍物，保证护筒嵌入稳定的持力层。每接装一节护筒就复测垂直度，偏差大于1%时立即校正调直。

4. 桩基浇筑与护筒回收

成孔后及时清孔，孔底沉渣厚度 $\leq 100\text{mm}$ ；下放钢筋笼，主筋间距偏差 $\pm 10\text{mm}$ 。安装灌注导管，导管底口离孔底30~40cm，用快速螺纹接头连接牢固。混凝土连续不间断灌注，导管埋深控制在2~4m，桩顶浇筑标高比设计值大1m。

护筒回收按照减少混凝土扰动的原则，入土 ≤ 4 节护筒，浇筑完成后一次性拔出；入土 > 4 节护筒分次拔出，每次拔筒数量不大于4节。回收工序为安装驱动支架、旋转提升护筒、分段拆分拆卸、清洗养护护筒、分类堆放备用，护筒实际回收率大于95%。

三、性能测试与工程验证

（一）室内性能测试

1. 定位精度测试

用1:5的比例缩小的缩尺试验模型来还原卵石地层的实际施工条件，做钢护筒安装定位的专项试验。实测结果表明钢护筒中心偏差最大值为0.8cm，均值为0.5cm；垂直度偏差最大值为0.9%，均值为0.6%，各项指标均满足并且优于《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）规范限值（中心偏差 $\leq 5\text{cm}$ ，垂直度偏差 $\leq 1\%$ ）。

2. 连接强度测试

对钢护筒节段拼接节点做拉伸、扭转力学性能试验，加载120kN拉伸荷载时节点无滑移，5kN·m扭矩作用下扭转角度 $\leq 3^\circ$ ，符合现场实际施工受力条件。经过20次反复拆装测试之后，连接结构强度衰减率不大于5%，说明该钢护筒具有较好的循环周转复用条件。

（二）工程应用实例

1. 工程概况

案例一为大成路快速化工程新华路至走马塘西路标段，线路全长2.29km，隧道围护结构施工钻孔灌注桩共1306根，场地内地层以松散堆积土、卵石层为主，局部有孤石。使用该种钢护筒施工技术能很好地解决传统工艺护筒下放卡住、钻孔孔壁塌陷等施工中的常见问题。

案例二312国道无锡凤翔路至广石路段工程FG11标段，主线

高架桥总长1309m，施工钻孔灌注桩381根（含1.2m桩304根、1.5m桩77根），桩基设计桩长48~68m，场区为粉质黏土夹卵石复合不良地层。应用本技术后可以顺利穿过复杂的地层，保证桩基成孔、成桩施工质量达标。

2. 应用效果

施工效率，案例一单桩平均施工时长为12h，比传统全套管跟进法缩短了4h，施工效率提高了25%；案例二复杂地层施工效率提高32%，项目总工期缩短15天。

施工质量两项目桩基完整性无损检测合格率均为100%，桩位偏差 $\leq 3\text{cm}$ ，垂直度偏差 $\leq 0.9\%$ ，均满足设计及规范要求。

从成本控制角度来说，案例一1306根桩基所用钢护筒的回收利用率达到了96%，节约材料成本98万元，案例二累计节省了32万元，具有较好的经济效益。

四、效益分析

（一）技术效益

施工定位精度明显提高，钢护筒中心偏差 $\leq 1\text{cm}$ ，垂直度偏差 $\leq 1\%$ ，解决了复杂地层钢护筒安装定位施工难题；适应各种地质条件，配合金破碎切削齿和交替钻进工法，可以穿透卵石、孤石、松散等复杂的地层，从根本上避免了孔壁坍塌的风险；施工工艺操作性强、改良完善到位，不需要配备专门的设备，使用常规旋挖钻机就可以完成钢护筒钻进和安装作业，摆脱了施工对专项设备的依赖。

（二）经济效益

100根 $\Phi 1.5\text{m}$ 、平均埋深10m的桩基工程中，用传统一次性钢护筒施工总费用为90万元，本项目采用节段式可回收钢护筒施工成本为15.6万元，直接减少材料费74.4万元，降低成本率为82.7%。施工效率提高约30%、减少机械租赁费和人工费等费用，取得较好的经济效益。

（三）环境效益

钢护筒循环使用，减少钢材消耗，降低钢铁冶炼加工全过程碳排放；抛弃传统的泥浆护壁施工方式，没有泥浆污染隐患，不需要另外处理废浆。经过计算可知，100根桩基施工可以减少碳排放86t，折合成标准煤30t，符合国家双碳战略的发展要求^[9]。

五、结论与展望

（一）结论

本次研发带破碎结构节段式钢护筒及配套驱动系统，适配旋挖钻机直接动力驱动，有效解决复杂地层钢护筒钻进阻力大问题，产品结构合理、拼装连接牢固稳定；配套形成护筒钻进、桩孔旋挖交替施工工法和垂直度实时监测措施，切实保证钢护筒安装施工精度，施工达标中心偏差 $\leq 1\text{cm}$ 、垂直度偏差 $\leq 1\%$

的管控标准；

该技术不需要专用设备，钢护筒可以回收再利用，施工效率提高25% ~ 32%，材料成本降低80%以上，具有明显的经济效益和技术、环境效益；

工程应用验证结果表明，该技术可以用于复杂松散堆积地层、卵石地层和含有障碍物地层的钻孔灌注桩施工，有很好的推广前景。

(二) 展望

可以对钢护筒结构进行改进，采用高强轻质合金材料减小自重，开发智能化垂直度检测系统，实现偏差自动纠偏，扩大技术应用范围，研究在深海、岩溶等地层中适用性，为复杂地质条件下桩基施工提供技术支持。

参考文献

[1] 交通运输部公路科学研究院 . JTG/T 3650-2020 公路桥涵施工技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.

[2] 刘金龙, 陈永辉, 王建华 . 复杂地层钻孔灌注桩护筒安装技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (S1): 189-193.

[3] 张宏, 李明, 张伟 . 拼接式钢护筒在松散地层中的应用研究 [J]. 施工技术, 2022, 51 (8): 67-70.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . GB 50202-2018 建筑地基基础工程施工质量验收规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[5] 李建军, 王鹏, 刘敏 . 基于全站仪的钢护筒精确定位技术 [J]. 测绘通报, 2020 (7): 145-148.

[6] 张宏, 赵刚, 陈晓 . 可回收拼接式钢护筒结构设计与应用 [J]. 钢结构, 2021, 36 (5): 102-106.

[7] Smith J, Johnson M, Brown K. Hydraulic-driven casing installation technology for complex strata [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145 (8): 04019065.

[8] 中国建筑科学研究院 . GB/T 51366-2019 建筑碳排放计算标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.