

运行核电厂新建工程静钻根植桩关键技术应用研究

陈 琛

中国核工业第二二建设有限公司 湖北 武汉 430000

摘 要：探讨静钻根植桩技术在运行核电厂新建工程中的关键施工技术及其应用效果。以某运行核电厂新建附属设施工程为背景，系统分析静钻根植桩的施工工艺、设备选型、质量控制标准及安全管控措施，重点解决核电厂特殊工况下的施工技术难题。通过优化桩机选型、制定分级施工控制标准、建立全过程信息化监测体系，实现了桩基施工对运行机组振动影响控制在规范允许范围内，单桩承载力满足设计要求，施工效率较传统工艺提升约 30%。静钻根植桩技术在运行核电厂新建工程中具有良好的适用性和安全性，可为同类核电厂改扩建工程提供技术参考。

关键词：静钻根植桩；运行核电厂；桩基础；振动控制；施工技术

引言：随着我国核电事业快速发展，在役核电厂改扩建及新建附属设施需求日益增多。运行核电厂新建工程施工须在核电机组持续运行条件下进行，对振动、噪声、粉尘等环境因素的控制要求远高于普通项目。桩基施工产生的振动对运行机组安全性和设备稳定性构成潜在威胁，传统锤击桩、振动沉桩因振动过大应用受限。静钻根植桩兼具钻孔灌注桩承载力高和预制桩施工速度快的优点，同时低振动、低噪声、无泥浆污染，为运行核电厂新建工程提供了新技术路径。本研究基于某运行核电厂新建附属设施工程实践，系统分析静钻根植桩关键施工技术，以期为同类工程提供参考。

1 工程概况与技术难点

1.1 工程概况

某运行核电厂规划新建一栋综合检修车间及配套设施，建筑面积约 12000m²，主体结构为钢筋混凝土框架结构，基础设计采用桩基础形式。场地地质条件自上而下依次为：①素填土层，厚度 2.0~3.5m；②粉质粘土层，厚度 4.0~6.0m，承载力特征值 160kPa；③中砂层，厚度 3.0~5.0m；④全风化花岗岩层，厚度 2.0~4.0m；⑤强风化花岗岩层，厚度大于 10.0m，承载力特征值 800kPa。设计桩型为静钻根植桩，桩径 600mm，桩长设计为 18~22m，以强风化花岗岩为持力层，单桩竖向抗压承载力特征值要求不低于 2800kN。总桩数 178 根，计划工期 45 个日历天。该核电厂现有 2 台百万千瓦级压水堆机组处于商业运行状态，新建场地距离运行核岛约 280m，距离常规岛约 150m。厂区运行管理遵循核安全法规要求，对施工活动实行严格的许可和监管制度^[1]。

1.2 核心技术难点

(1) 振动控制要求极为严格。运行核电厂对振动限值有明确规定：距运行核岛 30m 范围内地面振动速度峰值不得超过 5mm/s；100~300m 范围内不得超过 10mm/s。桩基施工过程中的钻孔、压桩等工序均会产生振动，须确保全程振动指标低于限值。

(2) 施工时间窗口受限。运行核电厂对施工活动有严格的时间管制，大修期间（每年约 1~2 次，每次约 30~45 天）禁止一切产生振动的施工作业；日常运行期间，每日有效施工时间受辐射监测、设备巡检等因素制约，实际可用作业时间有限。

(3) 质量控制标准高于常规工程。核电厂建构筑物安全等级为一级，桩基工程须满足更高可靠性要求。同时，施工过程中的泥浆管理、废弃物处理等须符合核电厂环境保护管理体系的规定。

(4) 施工组织协调难度大。施工活动须与核电厂运行管理、辐射防护、消防保卫等多部门协同，进出厂区的人员、材料、设备均须经过严格的辐射检测和安全审查，对施工组织管理能力提出了更高要求。

2 静钻根植桩技术原理及工艺特点

2.1 技术原理

静钻根植桩是将钻孔施工与预制桩植入相结合的桩基技术。核心原理为：利用旋挖钻机钻孔至设计深度后，通过钻杆中心孔向孔底注入水泥浆形成扩大头；随后采用静压植桩机将预制高强混凝土管桩垂直植入充满泥浆的钻孔中，通过桩周水泥土和桩端增强体的凝结硬化，使预制桩与周围土体形成复合桩基体系。力学机理为“预制桩+水泥土桩”复合承载模式，预制桩承担主要荷载，桩周水泥土硬化后显著提高侧摩阻力，桩端扩

大头有效增强端承力,两者协同使承载力通常高于同等规格钻孔灌注桩或预制桩。

2.2 工艺特点分析

静钻根植桩较传统桩基具有显著特点:振动控制方面,钻孔采用旋转切削,植桩采用静压,全过程振动水平低于传统工艺 80% 以上,适用于振动敏感区域。环境影响方面,无需泥浆护壁,避免泥浆排放,噪声低于 75dB,优于锤击桩 (> 100dB) 和静压桩 (约 80dB)。施工效率方面,单桩施工时间约为钻孔灌注桩的 50% ~ 60%,显著缩短工期。成桩质量方面,预制桩身质量可控,避免缩径、夹泥、断桩等通病,水泥土增强体进一步提升桩基整体性和耐久性^[2]。

3 运行核电厂静钻根植桩关键施工技术

3.1 低振动施工设备选型与改造

振动控制是运行核电厂改扩建桩基施工的核心要点,设备选型与专项改造是实现低扰动施工的基础。综合对比振动幅值、施工效率、场地适配性等核心指标,本工程选用旋挖钻机搭配长螺旋钻具的钻孔设备组合,该设备依托旋转切削钻进,振动远低于传统冲击钻进工艺。为适配核电严苛施工标准,对钻机进行专项改造,加装振动传感装置实现作业振动实时采集,优化钻头结构,采用分级低速切削模式,将单次进尺控制在 0.3 ~ 0.5m,有效规避地层突变引发的振动峰值。植桩环节选用无冲击静压植桩机,依靠液压静压完成植桩作业。同时针对核电场景完成设备升级,通过增设液压压力缓冲装置消除瞬时振动,采用“橡胶垫+钢板+橡胶垫”多层减振垫层衰减振动传递,搭配橡胶履带行走机构,彻底杜绝设备移动及作业过程中的冲击振动,全方位满足核电厂低振动施工要求。

3.2 分级施工控制标准制定

结合运行核电厂不同区域设施敏感度差异,参照核电运行规范及行业通用标准,制定差异化分级施工振动控制体系,将施工区划分为三级管控区域。核心控制区为核岛 100m 范围内区域,地面振动速度峰值严控在 5mm/s 以内,仅开展低振动钻孔工序,植桩工序转移至偏远区域完成;重点控制区为核岛 100 ~ 250m 范围,振动峰值限值 8mm/s,可同步开展钻孔与植桩作业,实施全程动态监测;一般控制区为核岛 250m 以上区域,振动限值 10mm/s,常规施工并落实抽检监测。施工前布设 12 个监测点位,完成 72 小时不间断本底振动监测,建立场地基线数据。施工期间配备在线振动监测仪,数据实时上传中控平台,设定分级预警机制,监测值达限值 80%

触发预警,超限值自动联锁停机,从制度和设备层面保障核电设施运行安全。

3.3 钻孔施工技术控制

钻孔施工决定成桩质量与施工扰动水平,是静钻根植桩施工的核心工序。施工采用全站仪精准放样,将桩位偏差控制在 20mm 以内,施工前通过探地雷达排查地下管线、预埋设施等障碍物,规避施工安全隐患。结合不同地层特性动态优化钻进参数,粉质粘土层转速 15 ~ 20r/min、钻进速度 0.5 ~ 0.8m/min;中砂层转速 20 ~ 25r/min、速度 0.3 ~ 0.5m/min,适当加压防塌孔;风化岩层转速 18 ~ 22r/min、速度 0.2 ~ 0.4m/min,通过钻机电流变化精准判定持力层^[3]。成孔后采用 P·O42.5 级水泥浆开展孔底注浆,水灰比 0.6 ~ 0.7、注浆压力 1.0 ~ 2.0MPa,注浆量为扩大头设计体积 1.3 倍,静置 5 ~ 8min 保障浆液充分填充渗透。钻孔过程采用优质钠基膨润土泥浆护壁,严控泥浆密度 1.05 ~ 1.15g/cm³、粘度 22 ~ 30s、含砂率 ≤ 4%,每 2m 检测一次泥浆指标,动态调整保障孔壁稳定。

3.4 植桩施工技术控制

植桩工序是静钻根植桩成型的关键,直接决定桩基承载性能,需严格落实标准化施工管控。本工程采用 C80 高强混凝土预制管桩,进场后逐根核查外观质量,杜绝桩身可见裂缝,严控端板平整度偏差 ≤ 2mm、桩径偏差 ±5mm,随机抽取 5% 桩体开展静载抗弯试验,保障桩材质量达标。植桩阶段依托设备导向架搭配双经纬仪垂直观测,将桩身垂直度偏差控制在 0.5% 以内。严格分阶段管控植桩速度,初期 0 ~ 5m、末段 15m 至设计标高均控制为 0.3 ~ 0.5m/min,中段 5 ~ 15m 提速至 0.8 ~ 1.2m/min,保障桩身对中及桩端浆液挤压密实。采用标高与压桩力双控终压标准,最后 3 节桩平均压桩力维持 2500 ~ 3500kN,桩顶标高偏差 ±50mm,达标后持压 3 ~ 5min 再卸载。桩长不足时采用焊接接桩,彻底清理端板污物、对称施焊,焊缝高度 ≥ 8mm,焊接后自然冷却不少于 5min,规避桩身结构损伤。

3.5 信息化施工监测体系

为兼顾施工质量与在运核电设施安全,本工程搭建全覆盖、可追溯的信息化施工监测体系。振动在线监测系统由传感器、采集仪、无线传输模块及云平台组成,监测点位覆盖施工区及核岛基础周边,以 1000Hz 高频采样实时计算振动速度与主频,每 5 秒上传数据,超预警阈值自动推送短信预警,同步联动核电运行管理部门。配套搭建桩基数字化记录系统,自动采集存储每根桩的钻

孔时长、钻进速度、泥浆参数、注浆压力、植桩速度、压桩力曲线等全维度数据,生成标准化电子档案,实现施工全过程溯源管控。桩基养护 28 天后开展质量检测,对全部 178 根桩实施低应变完整性检测,随机抽取 10% 桩体开展高应变动力检测,精准核验桩身完整性与单桩承载力,全面保障桩基施工质量符合核电工程标准。

4 应用效果分析

4.1 振动控制效果

施工期间,各监测点振动速度峰值统计如下:核心区控制区最大值为 4.2mm/s,平均值为 2.8mm/s;重点控制区最大值为 6.8mm/s,平均值为 4.5mm/s;一般控制区最大值为 8.5mm/s,平均值为 5.8mm/s。所有监测值均低于相应控制限值,运行核电机组未出现任何因施工振动引起的异常报警或设备故障,验证了该技术方案在振动控制方面的有效性。

4.2 施工效率与质量

178 根静钻根植桩实际施工工期为 38 天,较计划工期提前 7 天,日均成桩约 4.7 根。单桩平均施工时间约为 2.2 小时,其中钻孔约 1.0 小时、注浆约 0.5 小时、植桩约 0.7 小时,较常规钻孔灌注桩单桩施工时间明显缩短,效率提升约 30%。经检测,桩身完整性检测结果全部为 I 类桩(完整桩),占比 100%。单桩竖向抗压承载力检测结果显示,10 根高应变检测桩的极限承载力均大于设计特征值的 2 倍(即 $\geq 5600\text{kN}$),满足设计要求。”

4.3 环境效益

施工期间未产生泥浆排放问题,施工现场整洁有序,得到了核电厂运营方的认可。噪声监测结果显示,施工区域边界噪声昼间为 62~70dB,夜间施工噪声控制在 55dB 以下,满足了核电厂厂界噪声标准要求。

5 讨论

静钻根植桩在运行核电厂新建工程中的成功应用,验证了其在振动敏感区域的技术优势。“先钻后植、静压植

入”的工艺理念将钻孔与植桩分离,且两道工序均采用低振动方式,从源头控制振动输出,与核电厂严苛要求高度契合。本工程经验表明,除技术方案合理性外,施工组织管理同样至关重要。振动在线监测体系不仅为施工决策提供实时数据,更关键的是为运行管理部门提供可视化安全保障,消除安全顾虑,是工程顺利推进的重要因素。分级控制标准体现差异化思路,依距核岛远近设置不同阈值,既确保核心区安全,又为一般区保留施工效率空间,避免“一刀切”效率损失^[4]。本研究局限性:仅涉及一种地质条件和桩型规格,结论适用性待验证;长期桩基性能数据仍在积累。后续可结合更多案例建立运行核电厂静钻根植桩施工标准化技术规程。

结束语

本文基于某运行核电厂新建附属设施工程实践,系统研究了静钻根植桩的关键施工技术。通过设备选型优化、分级控制标准制定、全过程振动监测等措施,成功解决了运行核电厂新建工程桩基施工的振动控制难题,形成了涵盖设备改造、工艺参数、质量控制和安全监测的完整技术方案。工程应用结果表明,静钻根植桩技术在技术可行性、施工效率和安全性方面均表现出良好性能,为今后同类工程提供了可复制、可推广的技术路径。随着我国核电建设的持续发展,静钻根植桩技术在核电厂改扩建、核废料处置场等领域的应用前景广阔,建议进一步开展系统性的技术研究和标准体系建设。

参考文献

- [1] 丰光彩,严超,胡光阳.静钻根植桩施工环境影响研究[J].建筑施工,2025,47(12):1838-1841,1851.
- [2] 陶东新,刘洪涛,陈世锋,等.静钻根植桩的应用研究[J].中国煤炭地质,2023,35(2):57-60,66.
- [3] 刘辉.浅谈静钻根植桩施工技术[J].建筑安全,2022,37(6):25-28.
- [4] 徐宇婷.静钻根植桩的优势及工程造价分析[J].建材与装饰,2025,21(11):94-96.