

The reinforcement effect of offshore jet grouting pile technology on port foundations

Xing Feng

China Communications Second Highway Engineering Bureau Municipal Construction Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116014, China

Abstract

As an in-situ foundation reinforcement technology, high-pressure jet grouting piles have been widely used in seaport engineering in recent years, especially in the nearshore areas with extensive distribution of soft soil layers, large water depth and complex geology. Based on the Shabao Port wharf project of Zhangzi Island, this paper conducts research on the construction technology of offshore jet grouting piles and systematically analyzes its reinforcement mechanism and implementation effect in the port foundation. Combining design parameters, construction process control, on-site detection data and environmental impact monitoring, the comprehensive advantages of this technology in enhancing the bearing capacity of the foundation, suppressing settlement and reducing environmental disturbance are verified. By comparing with traditional methods, the applicability and technical economy of the promotion of high-pressure jet grouting piles in seaport engineering are summarized, providing feasible technical paths and reference basis for future port foundation engineering.

Keywords

rotary jet grouting pile; Foundation treatment; Harbor engineering; Capacity enhancement; environmental impact

海上旋喷桩工艺对港口地基加固效果

冯星

中交二航局市政建设有限公司, 中国·辽宁·大连 116014

摘要

高压旋喷桩作为一种原位地基加固技术,近年来在海港工程中得到广泛应用,尤其适用于软土层分布广、水深大、地质复杂的近海区域。本文以獐子岛沙包港码头工程为基础,围绕海上旋喷桩施工技术展开研究,系统分析其在港口地基中的加固机理与实施成效。结合设计参数、施工过程控制、现场检测数据和环境影响监测,验证该技术在提升地基承载力、抑制沉降、降低环境扰动方面的综合优势。通过与传统方法比较,总结高压旋喷桩在海港工程中推广的适用性与技术经济性,为今后港口类基础工程提供可行技术路径与参考依据。

关键词

旋喷桩; 地基处理; 海港工程; 承载力提升; 环境影响

1 引言

海上港口工程的地基稳定性对整体结构安全与运营效率具有决定性作用。传统地基处理方式如开挖换填、挤密砂桩等虽技术成熟,但在高水深、软土厚、环保敏感区域常面临技术适应性与施工可控性问题。高压旋喷注浆法因其扰动小、成桩质量高、适应性强的特点,成为当前海上软土地基处理的重要选择。尤其在獐子岛沙包港等典型海岛工程中,旋喷桩有效克服了施工场地受限、材料外运不便等困难,体现出良好的技术优势。本文通过实证工程研究与技术评价,探索该工艺在港口地基加固中的实用价值与应用前景。

2 高压旋喷桩技术原理与适用性分析

高压旋喷桩通过将带喷嘴的注浆管钻入预定深度,在高压条件下注入水泥浆液,使其与土体混合、剪切、搅拌并胶结成桩。系统主要由钻机、注浆泵、高压管路、旋喷头等组成,施工过程控制关键在于注浆压力、提升速度、旋转速度与浆液水灰比的匹配。浆液通过射流作用切割原状土并与其充分混合,形成具有一定抗压强度和整体性的水泥土体。成桩后形成复合地基结构,增强软土地层的承载力与抗变形能力,对深厚淤泥或液化敏感土层具有明显加固效果。针对淤泥质粉质粘土与粉细砂等不稳定土层,通过调控注浆参数可实现不同深度、不同强度的加固层设计。在不具备大型设备进场条件或缺乏砂石料来源的岛屿或远岸区域,该工艺可通过平台施工方式灵活布设,减少对原地形与生态环境的干

【作者简介】冯星(1987-),男,蒙古族,中国辽宁锦州人,本科,工程师,从事港航工程研究。

扰,适用于不能进行大面积开挖换填的区域。

3 港口地基典型特性与加固需求

3.1 港口区域软土特征与承载力评估

港口地基普遍存在软土层厚、孔隙比高、含水率大等特征,导致天然承载力较低,无法满足结构物的荷载要求。在獐子岛沙包港区域,地基主要由淤泥质粉质黏土与粉细砂构成,局部分布不均,地层存在明显液化风险。依据勘察数据显示,表层软土的承载力仅为 50kPa,需通过有效加固提升其变形模量与抗剪强度。旋喷桩处理后形成的水泥石桩可将承载力提升至原值的数倍,实现防波堤、码头等设施基础的稳定支撑。

3.2 海洋潮流、水深与施工条件限制

港口施工面临复杂的海洋水动力环境,潮流方向不定、水深变化大、海底地貌起伏显著,常对设备稳定性与工序连续性构成挑战。受风浪和潮汐双重影响,传统机械作业的速度与安全性难以保障。在无纳泥区、缺乏抛泥点的工程区域,开挖作业易造成大范围泥沙扰动。高压旋喷注浆法通过平台作业与定点控制,适应海域浅基坑作业需求,同时避免大面积疏浚,可在限定海域内有效完成地基加固任务,降低海洋水体二次污染风险。

3.3 地震设防与液化敏感性影响分析

沿海地区受地震活动影响显著,港区多布置在液化敏感土层之上,需进行系统性的抗震设计。粉细砂等饱和砂土层在地震作用下易发生液化,对结构基础稳定性构成威胁。根据《水运工程抗震设计规范》,獐子岛项目地震设防烈度为 6 度,液化判别后粉细砂层需按 7 度设防处理。旋喷桩工艺通过注浆加固方式可直接提升液化土体的抗剪强度与有效应力水平,形成抗液化能力强的加固体,有效减少震动引发的地基沉降与破坏,提升港口设施抗震安全性能。

4 海上旋喷桩施工工艺流程与质量控制

4.1 海上平台搭建与钻机布设要求

海上旋喷桩施工需依托临时作业平台,平台通常采用钢结构模块拼装方式,通过浮吊吊装定位,并由锚桩系统或刚性连接构件固定在预定水域。平台承载能力需满足钻机、注浆设备和施工人员作业要求,同时具备良好的抗风浪稳定性与纵横向刚度。钻机布设根据加固区域的桩位布置图进行精确定位,需保证钻头垂直度和入土精度。布设过程中对平台整体沉降、倾斜进行动态监测,确保钻孔轨迹一致性和作业安全性。钻孔深度须精确控制至设计持力层,平台移位与转场必须在完成桩体强度达标验证后进行,保证连续施工质量。

4.2 注浆参数配置与桩体成型控制

旋喷桩的加固效果取决于浆液配比、喷射压力、提升速度、旋转速度等核心参数的精准控制。注浆浆液多采用水泥为主材,掺加一定比例的水和外加剂形成可泵性良

好的混合液,常用水灰比为 1.01.5。注浆压力一般控制在 2530MPa,通过多喷管系统实现径向高压喷射,对原状土体进行切削、搅拌和固结。施工中实时监控注浆压力与流量,记录注浆量与提升进程,结合土层变化调节提升与旋转速度,确保桩体直径、强度与成型均匀性达到设计要求。施工完成后通过钻芯取样和低应变检测手段验证桩体完整性与强度分布,确保地基承载性能满足结构荷载需求。

4.3 施工过程中变形控制与环境监测

旋喷桩施工过程对周边结构和生态环境的扰动较小,但在软弱地层中仍可能引发局部位移与渗漏风险。变形控制依赖于施工顺序优化与实时监测系统布设,施工前设立沉降观测点、水平位移桩及地下水监测井,施工中以传感器收集实时数据反馈给调控系统。平台沉降、邻近结构基础沉降与围堰位移变化作为控制指标,一旦偏离预设阈值,需立即暂停施工进行校核调整。环保监测重点覆盖水体浊度、悬浮物浓度与注浆液外溢控制,在桩体成型区域设立拦污网与浮筒屏障,收集溢浆物质并分类处理,保障水域生态安全。全过程监测结果形成数据报告,为后期环境影响评价提供依据。

5 工程实施效果评估与性能表现

5.1 地基强度提升与沉降控制表现

本项目实施前,工程区域地基主要由淤泥质粉质黏土和粉细砂构成,含水率高达 45.48%,液性指数 1.94,压缩模量最低仅为 2.69MPa,地基承载力偏低,软土厚度可达 10.8m。经高压旋喷注浆处理后,形成的水泥石桩体有效提高了复合地基的承载能力和稳定性。加固后桩间区域复合承载力普遍达到 200~250kPa,最大实测值为 285kPa,满足防波堤和码头结构对持力层强度的要求。沉降监测数据显示,加固区域累计沉降量稳定控制在 25mm 以内,明显优于施工前地基预测沉降值 60mm,沉降曲线无突变趋势,显示地基应力传递与变形协调性良好。东防波堤加固段加固后模量提升至 10.38MPa,压缩性明显改善,有效降低结构不均匀沉降风险。旋喷桩桩顶复合褥垫层进一步起到荷载均化作用,提升地基整体承载响应的一致性和可控性,为码头设施的安全运行提供了坚实基础。

5.2 水下桩体成形一致性与完整性分析

本项目共完成旋喷桩施工总长度 123981m,其中东防波堤 70954m,西防波堤 54769m。施工完成后由大连理工现代工程检测有限公司和信德建设检测单位联合开展桩体检测,使用钻芯法、声波透射与低应变反射测试三种手段交叉验证。检测结果显示桩径实际控制在 0.981.02m 之间,成桩偏差不得超过规范要求 2%,桩长误差控制在 0.05m 以内。桩身抗压强度在 2.53.2MPa 之间,远高于设计强度 1.5MPa 下限,桩体整体均匀性良好。检测合格率达到 98.6%,其中主要不合格项为桩头浆液离析所致轻微缩径,未出现贯通性缺陷。桩体截面密实,结构致密无裂隙,水泥土分布均匀。

桩体之间搭接区域结合严密,连续墙整体刚度高,满足防波堤高外荷载工况要求。全线旋喷加固段未见因质量问题引发的沉降异动或结构变形,充分验证了海上旋喷桩技术在复杂软土环境中的可控性与可靠性。

5.3 对海洋生态环境扰动程度的实测结果

本项目毗邻虾夷扇贝幼苗浮筏养殖区和底播增养殖海域,环境保护等级要求高。施工全过程由自然资源部大连海洋中心进行海洋生态环境跟踪监测,主要指标包括水体悬浮物浓度、化学需氧量、溶解氧、pH值和底栖生物群落变化。监测数据显示,注浆作业期间水域悬浮物浓度峰值不超过28mg/L,施工高峰期增幅不超过基准值的35%,在防护围栏及滤布屏障控制下迅速恢复。pH值稳定在7.9~8.1之间,浆液外溢控制良好,未检测到水泥组分沉积层形成。底栖生物监测数据显示,施工区与对照区中贝类存活率差异小于2%,未发生规模性死亡或迁移。海水溶解氧浓度维持在6.5mg/L以上,生态系统未出现明显紊乱现象。现场未发生对虾夷扇贝养殖区的影响投诉或应急事件,监测报告结论为工程扰动总体可控、生态影响轻微,符合国家海洋工程施工环境保护标准。

6 技术经济性比较与适用推广建议

6.1 与开挖换填、挤密砂桩方案的成本效益对比

在獐子岛沙包港项目地质条件下,开挖换填法虽然施工工艺成熟,但涉及40万方疏浚工程,需外运至90公里外的抛泥区,施工周期长达8个月,占用海域广泛,污染风险高。该方案填料需从大陆运输,单方运输费用与环保处理成本显著推高总投资。挤密砂桩方案虽具一定施工效率,但砂石用量大,设备依赖性强,软土隆起问题导致需额外处理8万方泥沙,造成环境扰动。相比之下,高压旋喷桩施工周期为5个月,泥面扰动小,占用海域最小,不需疏浚和大宗砂石运输。旋喷施工总桩长123981m,尽管单位成本高于砂桩,但总施工成本控制在合理区间,因其在工期压缩、环境控制和平台适配方面具有综合优势,使得单位造价折算后的投资效益优于传统方案,具备在软土港区中推广的经济合理性。

6.2 高压旋喷桩技术在港口多类型结构中的适应性

港口结构涵盖直立式防波堤、趸船式客运码头、突堤式货运平台等多种类型,各类结构对地基强度、变形协调性、液化控制能力要求差异显著。高压旋喷桩通过注浆参数调整可实现对不同结构荷载传递特性的定制加固。对于直立式沉箱结构,旋喷桩形成的连续加固墙体能有效提升抗滑移和抗震稳定性,对软弱持力层提供强支撑;对趸船结构,通过调整桩顶褥垫层与承载区搭接关系,可满足浮动平台的变形协

调需求;对于突堤式货运平台,通过深层桩体加固粉细砂层,有效降低液化风险。该技术无需大量开挖作业,适应浅水、深水、孤立岛礁等多种施工场景,尤其在材料运输受限、环保要求严格的海港环境中具备广泛适用性,为多种结构提供统一而灵活的地基解决方案。

6.3 后续工程推广与优化施工路径建议

旋喷桩工艺在港口地基加固中的工程适应性已得到实际验证,未来推广需在工艺参数标准化、平台布设模板化及信息化监控方面持续优化。应建立针对不同土层组合的标准桩型数据库,结合历史项目注浆参数与地质响应数据,构建智能推荐系统,提升设计效率与施工可控性。作业平台可采用模块化装配设计,适配不同水深与海况,减少现场组装时间与安全风险。施工过程中引入数字监控系统,对浆液压力、成桩深度、提升速度进行实时记录与反馈,实现全过程质量可追溯。推广策略上应优先布局海岛型港口、深水软基码头及生态敏感区域,通过示范工程总结应用经验,推动地方规范修订与工程造价标准调整,在满足环保与安全前提下,构建高压旋喷桩地基处理的系统性施工技术体系。

7 结语

高压旋喷桩技术在港口地基加固中展现了显著的技术优势与经济效益,尤其在海上软土和复杂地质条件下的应用,解决了传统方法难以克服的环境扰动与施工周期问题。通过精确控制注浆参数和施工工艺,旋喷桩不仅提高了地基承载力,减少了沉降,还有效降低了对海洋生态环境的影响。项目的实施表明,该技术对港口各类结构具有广泛适应性,特别适用于地质条件复杂、水域受限的区域。随着施工技术的不断优化和信息化管理的推进,旋喷桩的施工效率与质量控制有望得到进一步提升。结合实际工程经验,未来该技术将在港口、桥梁及其他基础设施建设中得到更广泛的应用,为类似项目提供重要的技术参考和保障。

参考文献

- [1] 陈雪锋.强砂化白云岩地层隧道水平旋喷桩应用分析[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2025,24(01):1-5.
- [2] 谢佳丽.高压旋喷桩施工技术在防洪排涝工程项目中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(05):130-132.
- [3] 李云超,侯禹辰,刘坤,祝阿龙,刘迪.海上旋喷桩施工移动作业平台研究应用[J].中国港湾建设,2023,43(07):84-88+99.
- [4] 校建东.海上风电单桩基础地基加固技术研究[J].南方能源建设,2023,10(04):184-192.
- [5] 郭琼玲.高压旋喷桩在海上风电桩周土加固中的应用[J].地基处理,2023,5(01):62-66.