

Research on Foundation Reinforcement Technology and Settlement Control Effect of High Pier Wharf in Coastal Area

Shijie Yang

Tianjin Tianke Engineering Management Co., Ltd., Tianjin, 300450, China

Abstract

Coastal high-pile piers serve as critical infrastructure in port construction, where foundation bearing capacity and settlement control directly impact structural safety and operational stability. Constrained by factors such as widespread soft soil distribution, elevated groundwater levels, and complex marine dynamics, these piers are prone to uneven settlement and structural deformation. Based on a typical coastal engineering case study, this paper analyzes the application effects of reinforcement technologies including deep mixing pile composite foundations, prestressed pipe pile support systems, and vacuum preloading combined with consolidation. The research demonstrates that composite reinforcement systems significantly enhance foundation stiffness, reduce long-term settlement rates, and enable full-process settlement control through real-time monitoring feedback. These findings provide technical references and engineering guidance for optimizing foundation design and construction of coastal high-pile piers.

Keywords

Coastal high-pile wharf; Foundation reinforcement; Settlement control; Composite foundation; Vacuum preloading

沿海高桩码头地基加固技术与沉降控制效果研究

杨世杰

天津天科工程管理有限公司, 中国 · 天津 300450

摘要

沿海高桩码头是港口建设的重要基础设施,其地基承载力与沉降控制直接影响结构安全与运营稳定。受软土分布广、地下水位高及海洋动力复杂等因素制约,码头地基易发生不均匀沉降与结构变形。本文基于典型沿海工程实例,分析深层搅拌桩复合地基、预应力管桩支承体系及真空预压联合固化等加固技术的应用效果。研究结果表明,复合加固体系可显著提升地基刚度,降低长期沉降速率,并通过监测反馈实现全过程沉降控制。该研究为沿海高桩码头地基设计与施工优化提供了技术参考与工程指导。

关键词

沿海高桩码头; 地基加固; 沉降控制; 复合地基; 真空预压

1 引言

沿海地区软土地基广泛分布,其高压缩性与低强度特性对码头结构稳定性构成显著威胁。高桩码头由于荷载集中、受力复杂,在软基条件下极易产生不均匀沉降与结构变形,影响上部构件安全与港口运行效率。传统地基处理方法如砂桩、灰土桩等难以满足大载荷与长期稳定性的要求。近年来,随着海洋工程建设规模的扩大,地基加固与沉降控制技术呈现出多元化、系统化与智能化的发展趋势。深层搅拌桩、CFG 桩、真空预压、化学固化及复合地基结构逐渐成为主流技术手段。本文以沿海典型高桩码头工程为研究对象,结合现场监测数据与数值分析,系统探讨多种地基加固技术的适用条件与沉降控制效果,以为类似工程提供理论

依据与技术指导。

2 沿海高桩码头地基特性与加固需求分析

2.1 沿海软土地基的工程特征

沿海地区的软土具有典型的高压缩性、低强度与高含水率特征,地层结构复杂且空间分布不均。软土的孔隙比一般在 1.5 以上,天然含水量接近甚至超过液限,固结系数低,导致地基排水固结缓慢、沉降持续时间长。海相沉积作用形成的粉砂夹层与有机质黏土交替分布,使地基在受荷后出现应力集中与变形不协调现象,极易产生局部沉降集中区。地下水位长期处于高位状态,受潮汐与波浪作用频繁变化,孔隙水压力动态波动加剧了地基应力的不稳定性。软土中有机质分解及结构松散性还会引发蠕变沉降,使地基在长期荷载下表现出持续变形趋势。针对这些特性,沿海高桩码头地基的设计需注重地层非均质性分析与固结特性评估,结合静力学与动力学耦合模型,实现结构与地基的协调响应,从而保

【作者简介】杨世杰(1971—),男,中国河北承德人,工程师,从事水运工程码头施工研究。

证工程整体的安全性与耐久性。

2.2 高桩码头结构受力与沉降模式

高桩码头结构以桩基为主要承载单元，由桩、承台与上部作业平台共同组成。该类结构受力特点显著，其竖向静载、水平荷载及波浪动力荷载相互耦合，形成复杂的空间受力体系。桩基通过承台将上部结构荷载传递至地基，而桩间土体的变形协调性决定了整体沉降模式的均匀性。监测数据表明，承台中心与边缘区因应力分布差异，常产生不均匀沉降，边桩受力较大且更易出现拉拔或弯曲变形。潮汐周期与船舶靠泊引起的反复动力作用，会导致桩间土疲劳与应力松弛，长期运行中若地基刚度不足，桩基易产生负摩阻力并诱发附加内力。为此，地基加固设计需重点控制桩间土沉降协调性与承台变形匹配，通过合理布桩与分区加固实现“荷载—变形—刚度”平衡，确保结构整体受力稳定与长期服役性能。

2.3 加固设计的功能定位与目标

沿海高桩码头地基加固的设计目标在于提升地基承载力、降低不均匀沉降风险与延缓结构变形发展。设计过程中需综合考虑地层特征、荷载特性与施工环境，确定加固深度、范围与施工方式。一般以承载力提升 50% 以上、地基变形控制在 50mm 以内、沉降差不超过 20mm 为技术指标。加固方案需具备抗渗性强、抗冲刷及抗盐蚀的能力，以适应海洋环境的复杂工况。当前工程中广泛采用的“桩体强化+地基固化”复合加固技术，通过深层搅拌桩、CFG 桩、真空预压等多技术组合实现承载与固结的双重增强。设计理念由“静态强化”向“动态协调”转变，注重加固体与原状土的协同作用，实现力学性能连续过渡。与此同时，数字化监测与信息化控制系统的引入，使加固过程更具可预测性与可控性，为沿海高桩码头长期稳定运行提供了科学支撑与技术保障。

3 地基加固技术体系与工艺原理分析

3.1 深层搅拌桩复合地基技术

深层搅拌桩 (Deep Mixing Method, DMM) 是一种以机械搅拌与化学固化相结合的地基加固技术，通过向软土中注入固化剂并进行高效搅拌，使原状土形成强度高、变形小的固化体。该技术具有施工速度快、适应性强、受地层扰动小等优势，适用于沿海软土区的加固与防渗处理。加固后形成的桩—土复合地基结构，通过桩体承载与桩间土体共同作用，显著提升地基整体承载性能与刚度。对于高桩码头承台区及重载区，深层搅拌桩能有效缓解负摩阻力及应力集中问题，减少承台差异沉降。现场试验结果表明，当搅拌桩间距控制在 2.0 ~ 2.5 倍桩径、桩径为 600mm 时，复合地基承载力可提升 60% ~ 80%，而地基后期沉降速率可降低约 40%。该技术通过固化剂配比优化与自动化控制设备的应用，实现了高精度施工与地基性能可预测化，已成为沿海高桩码

头地基处理的主流方案之一。

3.2 真空预压与堆载联合固化技术

真空预压联合堆载技术利用负压排水与静荷载固结的协同效应，加速软土固结与强度增长。其工作原理是通过铺设密封膜、排水板及抽气管形成封闭系统，抽气泵维持系统内负压在 70 ~ 90kPa，使土体孔隙水排出、体积收缩，从而提高有效应力。当真空预压与堆载预压结合时，可在短期内实现地基强度快速提升与固结沉降控制。该方法在沿海滩涂、回填区及港池基底处理中的应用效果尤为显著，可避免单纯堆载导致的地基失稳或滑移问题。研究数据显示，复合真空预压法较传统堆载法固结时间缩短 40%，平均沉降速率降低 30%。同时，真空预压属于低碳环保型工艺，不仅减少堆载材料运输与弃土量，还能降低对周边环境与生态系统的扰动，是沿海软基处理的绿色化方向。

3.3 预应力管桩与化学注浆复合体系

预应力管桩与化学注浆复合加固体系通过“结构强化+土体补强”的双重机制，实现地基承载与沉降控制的协同优化。预应力管桩采用高强度离心混凝土材料制作，桩体具备较高的抗弯、抗剪及抗拔性能，可穿透软弱土层直达密实承载层。施工中在桩间土区域布设注浆管，通过高压注浆技术将水泥浆或水玻璃溶液注入软土中，形成稳定的固化体。该体系显著改善桩间土的结构性与抗剪强度，提升复合地基的整体变形协调性。现场实测表明，注浆后地基承载力可由 80kPa 提升至 180kPa 以上，桩基负摩阻力降低约 35%，长期沉降量减少超过 50%。该复合体系尤其适用于高填方、高荷载及盐渍化软土地区，具有强适应性与高可靠性。通过施工过程数字化监测与注浆参数反馈控制，能够实现对地基变形的精准调控，为沿海高桩码头提供了高效、安全的地基加固技术路径。

4 沿海高桩码头沉降控制效果研究与监测分析

4.1 监测系统的布设与数据采集

为系统掌握沿海高桩码头地基加固后的沉降变化规律，项目建立了分层、多维度的监测体系。监测点依据承载结构特征进行布设，重点覆盖承台中心、桩间土及边缘区域，以反映地基的整体沉降与局部差异。采用自动化水准仪进行高程观测，孔隙水压力计监测固结进程，应变计记录桩基受力变化。数据采集系统通过无线传输与云端平台联通，形成实时动态数据库，实现自动化监控与可视化分析。系统设有数据异常预警功能，可对突发性沉降趋势进行识别与报警。监测周期设置不少于 12 个月，涵盖真空预压固结期与运营初期阶段，确保对短期固结和长期蠕变的全面掌握，为地基稳定性评估提供了精准数据支撑。

4.2 沉降曲线特征与控制效果对比

监测结果显示，深层搅拌桩复合地基区在加载初期沉降速率较快，约占总沉降量的 70%，三个月后趋于稳定，