 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i4.9958

Application Research of Reinforcement Technology for Soft Soil Foundation Port Engineering

Kunming Wang Zhijun Hu

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

Abstract

Soft soil foundations are prevalent in port engineering, where their high compressibility, low strength, and poor permeability significantly constrain structural stability and construction safety. Addressing the practical challenges of complex mechanical properties and variable environmental conditions in port soft soils, this study systematically analyzes deformation mechanisms and instability modes of soft foundations. It evaluates the applicability and effectiveness of various reinforcement techniques, including vacuum preloading, pile loading, CFG pile composite foundations, cement mixing piles, and high-pressure jet grouting. Through case studies, the research compares the engineering performance and cost-effectiveness of different technologies in enhancing bearing capacity, controlling settlement, and improving consolidation and drainage conditions. The application value of information-based monitoring in reinforcement processes is also assessed. Findings demonstrate that multi-technology composite reinforcement systems significantly improve the overall bearing capacity and deformation coordination of soft soil foundations, ensuring long-term structural stability and construction safety in port projects. This study provides scientific basis and engineering references for selecting and optimizing foundation reinforcement technologies in soft soil regions.

Keywords

soft soil foundation; port engineering; vacuum preloading; composite foundation; monitoring technology

软土地基港口工程加固技术应用研究

王昆明 胡智军

天津天科工程管理有限公司，中国·天津 300450

摘 要

软土地基在港口工程中普遍存在，其高压缩性、低强度与渗透性差等特征对结构稳定与施工安全形成显著制约。针对港口软土力学特征复杂、环境条件多变的实际问题，本文系统分析软土地基的变形机理与失稳模式，探讨真空预压、堆载预压、CFG桩复合地基、水泥搅拌桩及高压喷射注浆等多种加固技术的适用性与加固效果。结合典型工程案例，对比不同技术在提高承载力、控制沉降及改善固结排水条件方面的工程表现与经济性，评估信息化监测在加固过程中的应用价值。研究结果表明，多技术复合加固体系能显著提升软土地基整体承载性能与变形协调性，确保港口结构长期稳定与施工安全，为软土地区地基加固技术的选型与优化提供了科学依据与工程参考。

关键词

软土地基；港口工程；真空预压；复合地基；监测技术

1 引言

港口工程的建设往往位于海岸或河口区域，这些地区地质条件多为饱和软黏土或淤泥质土。此类地基具有承载力低、固结慢、剪切强度小的特点，在外荷载作用下易产生大变形与不均匀沉降，影响码头、堆场及道路等结构的安全与耐久性。随着港口工程规模的扩大和大型化趋势的加强，软土地基的加固问题愈加突出。传统地基处理方法在施工周期、成本及效果稳定性方面存在局限，难以满足现代港口建设对承载力、变形控制及可持续性的要求。

近年来，随着岩土工程技术的进步与地基处理理念的更新，真空预压、堆载预压、深层搅拌桩、CFG 桩、振冲置换及高压喷射注浆等多种技术得到广泛应用。本文基于港口软土地基的工程特征，研究不同加固技术的作用机理与适用性，结合典型实例探讨多技术联合应用的优化路径，以期为复杂软土区港口工程的地基设计与施工提供技术支撑。

2 软土地基特征与工程问题分析

2.1 软土地基的物理与力学特性

港口地区的软土地基多形成于河口三角洲、海相沉积或潟湖环境，具有高含水量、高孔隙比和低天然密度等显著特征。该类土体的压缩系数一般为 0.3~1.2 MPa^{-1}，黏聚力仅为 10~20 kPa，内摩擦角不足 10° ，表现出高压缩性与低

【作者简介】王昆明（1985–），男，中国辽宁葫芦岛人，本科，工程师，从事水运工程港口土建施工研究。

抗剪性。在荷载作用下，孔隙水压力迅速上升，固结速度缓慢，地基沉降历时较长，且沉降差异明显。软土还具有明显的触变性和应变速率效应，在动荷载或反复堆载作用下，易产生流变或蠕变变形。实践表明，若未进行有效加固处理，港口堆场及码头结构在运行期间可能出现不均匀沉降、桩基倾斜甚至滑移破坏，严重影响港口工程的整体稳定性和使用寿命。因此，系统认识软土的工程特性是制定合理加固方案的基础。

2.2 港口工程地基失稳机理

港口工程中地基失稳的主要形式包括超载沉降、滑坡破坏与渗流失稳等。堆载预压阶段若排水系统设计不当，孔隙水压力滞留将导致浅层剪切破坏；卸载时，土体强度恢复缓慢，易产生“回弹变形”及附加应力重分布，从而影响地基稳定。受潮汐、波浪及船舶荷载的周期性扰动影响，软土结构内部应力疲劳加剧，微裂隙逐渐扩展，抗剪强度随时间下降。地震作用下，饱和软土易发生液化，导致承载力急剧下降，引发结构倾覆与边坡失稳。此外，港口地基的复杂应力状态与地下水位波动叠加，使得地基失稳具有隐蔽性与突发性，对结构安全构成持续威胁。

2.3 软土地区地基加固的必要性与挑战

港口工程地基的加固不仅是防止沉降与滑移的关键措施，更是保障港口基础设施长期服役安全的重要环节。软土层厚、压缩性强，常需采取深层搅拌、真空预压或桩基复合加固等综合技术，以改善结构性与排水条件。由于地下水位高、地质变化复杂及施工环境受潮汐影响，地基加固施工常面临孔隙水压力异常、设备腐蚀及工期控制难度大等问题。经济性与环境可持续性亦是重要考量，在满足安全标准的前提下，需平衡施工成本与生态保护。此外，地基加固效果与施工质量、监测精度及后期养护管理密切相关。如何在多因素耦合作用下实现精准设计与动态控制，成为当前港口软土地基加固研究与实践中的核心挑战。

3 真空预压与堆载预压技术应用研究

3.1 真空预压加固原理与施工要点

真空预压加固技术是一种典型的软土地基固结加速方法，其基本原理是通过在地表铺设密封膜并建立真空系统，将地基内部孔隙水压力降低，从而产生与外部堆载等效的附加应力。负压作用促使土体排水固结，提高有效应力和抗剪强度，实现地基整体加固。该技术具有加载均匀、施工扰动小、环境友好等优势，尤其适用于港口堆场、围垦区及堤岸地基的大面积加固。施工关键在于密封系统的严密性与抽气系统的持续稳定性，一般负压维持在 80~90 kPa 之间，以确保固结速率与均匀性。为提高排水效率，常配合塑料排水板布设形成垂直排水通道，并在膜下铺设砂垫层形成水平排水系统。实践表明，真空预压能有效改善软土结构，降低孔隙比，增强地基的承载性能与长期稳定性。

3.2 堆载预压与真空联合技术的协同作用

单独堆载预压在深厚软土层中往往受限于固结时间长与沉降控制难度大，而真空预压与堆载联合可形成协同效应，显著加快地基固结过程。真空负压作用下，孔隙水压力降低，土体产生初始固结，随后堆载荷载进一步施加，使有效应力持续增长并促进二次固结。两者的叠加效应不仅能提高固结速率，还可减少堆载引起的超孔压积聚。试验数据表明，该联合方法可在相同时间内使固结比提高 40%~60%，地基承载力提升超过 50%，最终沉降量较单一堆载预压法减少约 35%。此外，联合工艺可灵活调整加载阶段，既保证施工安全，又显著缩短工期。该技术在港口围垦、堆场及码头基础处理中表现出优越的经济性与施工适应性，已成为厚层软土加固的主流方案。

3.3 真空预压法的监测与效果评估

科学的监测体系是确保真空预压加固质量与安全的关键。通过布设孔隙水压力计、沉降板、深层位移计及真空压力监测管，可实现全过程信息化监测。数据结果显示，真空预压过程中沉降速率呈指数型递减规律，与理论固结曲线高度吻合，说明固结过程受控良好。监测分析还可揭示不同深度层土体固结差异，便于调整真空度与排水板布设密度。施工结束后，通过静载试验验证地基性能，结果表明压缩模量平均提高 1.8 倍，抗剪强度增长约 60%，承载力达到设计要求。沉降稳定后的地基长期变形小，满足港口堆载与运输设备的使用要求。实践证明，真空预压技术不仅在软土地基处理方面具有显著效果，其监测与评估体系的完善也为后续地基性能预测与长期运维管理提供了可靠依据。

4 复合地基与深层搅拌加固技术分析

4.1 CFG 桩复合地基在港口工程中的应用

CFG 桩复合地基作为港口软土地基加固的主要手段，兼具承载力高、施工适应性强及经济性好的特点。其基本原理是通过水泥、粉煤灰及碎石混合成桩体，与桩间土形成复合承载体系，桩土共同承担上部荷载。港口工程中 CFG 桩常用于堆场、道路及岸壁基础加固，桩径一般控制在 0.5~0.8 m，桩距 1.8~2.4 m，复合地基模量较天然软土提高 3~5 倍。实践表明，CFG 桩可有效改善地基均匀性，降低附加应力集中，控制总沉降量和差异沉降。结合堆载预压工艺，可进一步加快固结速度，提升地基稳定性。CFG 桩施工中需控制成桩质量与桩顶加筋层厚度，以确保桩土应力比合理分配。长期监测数据显示，该技术在港口工程中能保持良好的承载性能与变形协调性，成为深厚软土区码头地基处理的优选方案。

4.2 水泥搅拌桩与粉喷桩的对比分析

深层水泥搅拌桩通过机械搅拌注入水泥浆液，使原状土与水泥发生化学反应，生成高强度固结体，能显著提高软土抗剪强度与变形模量。其抗剪强度可达 300~500 kPa，适

用于饱和淤泥与粉质黏土等高含水率地层。水泥搅拌桩可形成连续桩墙结构，对边坡稳定与防渗具有双重效果。而粉喷桩以高压空气喷出粉状水泥，适用于较干黏土层，其固化时间短、施工效率高，但强度与耐久性相对较低。在港口工程中，两者常根据地层分布组合使用，水泥搅拌桩承担深层加固，粉喷桩用于表层固结，形成梯度强度分布的加固体系。研究表明，复合布桩能显著提升堆场抗剪稳定性与整体承载力，且对环境扰动较小，是港口堆载区地基加固的有效技术路径。

4.3 高压喷射注浆技术的适用性研究

高压喷射注浆技术利用高压浆液射流切割原状土体，并与之充分混合形成水泥土加固体，具有施工灵活、加固深度大、可定向操作等特点。该技术在港口护岸、码头挡墙和堤防防渗工程中应用广泛，能有效封堵渗透通道，改善地基抗渗与抗剪性能。与传统桩类加固不同，喷射注浆施工无需大规模开挖，对周围结构扰动小，适用于空间受限或靠近水域的复杂场地。工程监测表明，经高压注浆处理后，地基承载力提高约 70%，孔隙比降低 40%，渗透系数由 10^{-4} cm/s 降至 10^{-7} cm/s 以下，显著改善地基整体稳定性与防渗性能。该技术在海港扩建与深水泊位改造中表现出优越的施工效率与适应性，尤其适合地下水位高、软黏土层厚的滨海地带，为港口工程的安全建设提供了重要技术支撑。

5 监测技术与工程实践案例分析

5.1 地基加固施工监测体系构建

港口工程地基施工具有环境复杂、荷载变化大和地质条件差异显著的特点，建立完善的动态监测体系是保障加固质量与施工安全的关键。监测系统应覆盖孔隙水压力、沉降速率、桩体应力、地下水位及地表位移等关键指标，以反映固结进程与地基响应特征。通过布设光纤光栅传感器、孔隙水压力计及沉降板，实现多点同步观测，配合自动化数据采集系统完成实时传输与预警。建立可视化数据分析平台后，可动态评估地基固结程度、安全系数与加固效果，实现从施工阶段到运营期的全过程信息化管理。该体系不仅提升了监测精度与响应速度，还为地基设计优化与加固效果反馈提供了数据支撑，使软土地基施工向智能化、精细化方向转型。

5.2 典型工程案例分析

以东南沿海某集装箱港区堆场地基加固工程为例，现场地层主要为淤泥质粉质黏土，厚度达 18 米，天然承载力不足 100 kPa。项目采用“真空预压 +CFG 桩 + 高压喷射注浆”联合技术进行综合加固。施工周期为 8 个月，真空预压阶段孔隙水压力迅速降低，随后 CFG 桩与注浆桩协同作用，显著改善了地基刚度与抗剪强度。监测结果显示，固结比达到设计要求，地基承载力由原始的 90 kPa 提升至 240 kPa，累计沉降量控制在 15 cm 以内，孔隙水压力消散率达 95%。该工程有效解决了软土沉降与不均匀变形问题，堆场在投运两年后沉降稳定，未出现二次变形或开裂，表明复合加固体系在港口软土地基处理中的长期稳定性与经济性兼具。

5.3 加固技术的经济性与可持续性评价

软土地基加固的经济性与可持续性是港口工程设计的重要考量。真空预压法设备简便、成本低，但周期较长；CFG 桩与高压注浆技术投资较高，却能在短期内显著提升承载力。通过分区分阶段施工，将不同加固技术在不同区域灵活组合，可兼顾经济性与加固效率，实现整体优化。经济评估表明，复合加固方案较单一方法节约工期约 25%，总体成本降低约 15%。在可持续性方面，推广低碳胶凝材料、再生骨料及可回收排水管材，不仅可减少施工碳排放，还能降低海洋环境污染风险。采用数字化监测与智能控制技术，减少人工巡检频次，实现能耗最小化。综合分析表明，复合加固体系在港口软土地基处理中具有高效、环保与可持续发展的综合优势，为未来港口绿色工程建设提供了可复制的技术路径。

6 结语

软土地基的加固是港口工程建设的关键环节，其技术选择与施工方案直接关系到结构安全与工程寿命。本文研究表明，真空预压、堆载预压、CFG 桩复合地基及高压喷射注浆等技术各具优势，联合应用可显著改善软土地基力学性能与排水条件，实现港口工程的稳固与高效建设。随着信息化与智能监测技术的发展，软土地基处理正由经验控制向数据驱动转变。未来研究应聚焦多技术复合体系的优化设计与长期性能监测，推动绿色施工与可持续发展理念在港口工程中的深入应用。该研究为软土地区港口地基加固的科学决策与工程实践提供了可行的技术参考与理论支持。

参考文献

[1] 钱伟杰.港口工程直排式真空预压加固软土地基施工技术研究[J].珠江水运,2024,(16):82-84.

[2] 李家法.港口工程饱和软土地基加固技术研究[J].中国水运(下半月),2017,17(14):323-324.

[3] 姜海福,连海.冲击碾压技术在港口工程地基加固中的应用[J].水运工程,2011,(06):152-155.

[4] 赵烁.天津港区软土地基排水固结浅层加固方法的研究和应用[D].天津大学,2009.