

港口工程地基加固施工技术应用研究

李启迪

大连港口建设监理咨询有限公司 辽宁大连 116000

【摘要】港口工程作为国家对外开放的门户和物流运输的关键节点，其建设质量直接关系到区域经济的繁荣与国家安全。然而，我国沿海及内河港口多分布于河口三角洲、海湾滩涂等软土发育区，这些区域普遍存在深厚淤泥质土、高含水量、低强度及高压缩性等问题，极易引发地基沉降、失稳甚至破坏，严重制约了大型现代化港口的建设与发展。因此，科学选择并高效应用地基加固技术是确保港口工程安全运营的核心环节。本文旨在系统综述当前港口工程地基加固的主要施工技术应用现状，深入剖析深层搅拌法、高压旋喷桩、真空预压、复合地基及生态加固等核心技术的原理、适用条件、施工工艺及质量控制要点。文章首先探讨了不同地质环境下加固技术的选择策略；其次，详细阐述了各类主流加固技术的实施细节与优化措施；再次，结合典型工程案例，分析了新技术在提升地基承载力、控制工后沉降及缩短工期方面的实际效能；最后，展望了绿色化、智能化及多技术耦合在地基加固领域的应用前景。研究表明，针对港口复杂多变的地质环境，需因地制宜地构建组合加固方案，并强化全过程数字化管控，以确保港口基础设施的长期安全稳定运行。

【关键词】港口工程；软弱地基；地基加固；深层搅拌；真空预压；施工质量；绿色技术

Research on Application of Foundation Reinforcement Technologies in Port Engineering

Li Qidi

Dalian Port Construction Supervision and Consulting Co., Ltd. Dalian, Liaoning 116000

【Abstract】As strategic gateways for national openness and critical logistics hubs, port engineering projects directly impact regional economic prosperity and national security through their construction quality. However, China's coastal and inland river ports are predominantly located in soft-soil zones such as estuarine deltas and bay tidal flats, characterized by deep silty soils, high moisture content, low strength, and poor compressibility—conditions prone to causing foundation settlement, instability, or structural failure, severely hindering the development of modern large-scale ports. Therefore, the scientific selection and efficient application of foundation reinforcement technologies constitute a pivotal factor in ensuring port operational safety. This paper provides a systematic review of current foundation reinforcement techniques, thoroughly analyzing the principles, applicable conditions, construction methodologies, and quality control measures of core technologies including deep mixing methods, high-pressure jet grouting piles, vacuum preloading, composite foundations, and eco-reinforcement. The study first examines selection strategies for reinforcement techniques under diverse geological conditions; then details implementation specifics and optimization approaches for mainstream technologies; subsequently evaluates practical effectiveness of innovative solutions in enhancing foundation bearing capacity, controlling post-construction settlement, and reducing project timelines through case studies; and finally explores future prospects for green, intelligent, and multi-technology integrated applications in foundation reinforcement. Research indicates that, given the complex and dynamic geological conditions of ports, it is essential to develop tailored composite reinforcement solutions and enhance digital management throughout the entire process to ensure the long-term safe and stable operation of port infrastructure.

【Key words】Port engineering; Weak foundation; Foundation reinforcement; Deep mixing; Vacuum preloading; Construction quality; Green technology

引言

随着全球贸易格局的深刻调整与“一带一路”倡议的深入推进，港口作为连接内陆腹地与国际市场的枢纽，其吞吐能力、装卸效率及结构安全性面临着前所未有的挑战。现代港口正加速向大型化、深水化、自动化及绿色化方向演进，

这对码头基础及后方堆场的承载能力提出了更为严苛的要求。然而，我国沿海及部分内河港口往往选址于地质条件极为复杂的河口三角洲或滨海平原区域，这些区域广泛分布着深厚的软土层，如淤泥、淤泥质粘土、冲填土及海相沉积物等。这类地基土体具有天然含水率高、孔隙比大、抗剪强度低、渗透性差以及触变性显著等特征。若直接在其上建设重

载码头或堆场,极易在荷载作用下产生不均匀沉降、整体剪切破坏或侧向位移,导致码头面板开裂、岸坡滑移、轨道梁变形甚至设备倾覆等严重后果,不仅影响港口正常运营,更可能酿成重大安全事故。

一、港口工程常见软弱地基特性与加固需求深度分析

(一) 软弱地基的物理力学特征及其对工程的危害

港口工程常见的软弱地基主要包括滨海沉积淤泥、河口冲积粉质粘土及人工吹填土。这类土体最显著的特征是天然含水率往往接近或超过液限,孔隙比高达1.0以上,压缩系数大,属于典型的流变性地基。在静荷载作用下,其固结沉降历时漫长,往往需要数年甚至数十年才能完成大部分沉降,且沉降量巨大;在动荷载(如船舶靠泊撞击、重型集装箱堆垛、龙门吊运行)作用下,土体容易发生液化或剪切破坏,导致承载力急剧下降甚至丧失。此外,软土的渗透性极低,排水固结困难,且受扰动后结构性破坏严重,强度恢复缓慢。若不进行有效加固,直接在上述地基上建设码头,不仅会导致巨大的工后沉降,影响航道水深标准和装卸设备的平稳运行,还可能引起岸坡整体滑移,威胁港区整体安全,造成不可估量的经济损失。

(二) 不同工况下的地基加固目标与多维要求

港口工程的加固需求因具体部位和功能定位而异,呈现出多元化的特点。对于深水码头前沿,主要目标是提高地基的抗剪强度和抵抗水平荷载的能力,防止岸坡失稳和地基滑动,同时需严格控制差异沉降以保证轨道梁或面板的平整度,确保自动化导引车(AGV)的精准运行。对于后方堆场,重点在于提高地基的承载力并大幅减小工后沉降,以满足重型集装箱堆垛及大型龙门吊运行的荷载要求,通常要求工后沉降量控制在厘米级以内,以防止堆垛倒塌。对于围堰及临时设施,则侧重于快速形成稳定的挡土结构并具备一定的防渗性能。此外,随着生态文明建设的推进,现代港口地基加固还要求施工过程噪音小、振动低、污染少,尽可能减少对周边水域生态环境及居民生活的干扰。因此,加固方案必须兼顾安全性、经济性、时效性与环保性,实现多目标的协同优化。

二、主流地基加固施工技术应用深度解析

(一) 深层搅拌法及其改良技术在软基中的创新应用

深层搅拌法(Deep Mixing Method, DMM)是目前港口工程中应用最为广泛的加固技术之一。其基本原理是利用专用搅拌机将水泥、石灰等固化剂与软土在原位强制搅拌,使土体与固化剂发生物理化学反应,形成具有一定强度和水稳性的水泥土桩体或连续墙。该技术具有无振动、无噪声、造价相对较低、可处理深厚软土层等优点。在港口应用中,常采用重力式码头后的深层搅拌止水帷幕,或作为复合地基的桩

体。然而,传统深层搅拌法存在搅拌均匀性难控制、桩身强度离散性大、易出现断桩缩颈等问题。为此,近年来发展了高压喷射注浆与深层搅拌相结合的“双轴”或“三轴”搅拌技术,通过引入高压水流切割土体,显著提高了搅拌的均匀性和桩体的连续性。此外,掺入粉煤灰、矿渣等工业废料的改性搅拌技术,不仅降低了成本,还提升了水泥土桩的耐久性和抗渗性能,使其更适应港口高盐雾腐蚀环境,延长了结构使用寿命。

(二) 真空预压法及其联合加固技术的优势与突破

真空预压法是处理深厚饱和软土地基的有效手段,特别适用于大面积堆场和港池疏浚回填区的加固。其原理是在地基表面铺设密封膜,通过抽气设备在膜下形成负压,利用大气压力作为预压荷载,加速孔隙水排出,从而提高土体密度和强度。该技术的最大优势在于无需额外加载材料,不产生侧向挤土效应,不会破坏周边环境,且能显著减少工后沉降。在港口工程中,真空预压常与塑料排水板、砂井等竖向排水通道联合使用,以缩短固结时间。针对单一真空预压固结速率慢的问题,工程实践中常采用“真空-堆载联合预压”技术,即在达到一定真空度后,再施加部分砂垫层或土袋堆载,进一步增加总预压应力,大幅缩短工期。同时,结合电渗加固技术,可有效解决低渗透性淤泥层的排水难题,显著提升加固效率,特别是在超软土地区表现出独特的优势。

(三) 复合地基与刚性桩基础技术的精细化应用

对于荷载要求极高或对沉降控制极为严格的港口关键部位,如大型散货码头、自动化集装箱码头的基础,复合地基和刚性桩基础技术发挥着不可替代的作用。复合地基通过在软土中设置刚性桩(如预应力管桩、CFG桩、搅拌桩),利用桩土共同承担荷载,大幅提高地基承载力并减少沉降。其中,PHC管桩因其强度高、质量可控、施工速度快,在港口工程中应用极广。然而,长桩施工易出现断桩、偏斜等问题,且打桩过程中的挤土效应可能影响邻近建筑物。为此,引孔沉桩、静压桩等低挤土施工技术应运而生,有效缓解了挤土效应。另一种趋势是“桩-网复合地基”技术,即在桩顶设置钢筋混凝土承台或土工格栅加筋垫层,进一步优化桩土应力分配,提高整体刚度。此外,针对水下作业,钻孔灌注桩结合水下混凝土浇筑技术,为深水码头基础提供了可靠的解决方案,确保了基础结构的整体稳定性。

三、施工质量控制难点与关键技术优化措施

(一) 原材料质量控制与配合比动态优化

地基加固材料的品质直接决定了加固效果。在水泥搅拌桩施工中,水泥的标号、安定性及掺合料的活性是关键因素。港口高盐环境要求水泥土桩必须具备优异的抗氯离子侵蚀能力,因此需严格控制水泥用量,并合理掺入抗硫酸盐外加剂或矿物掺合料,以提升耐久性。在真空预压中,密封膜的完整性至关重要,需选用高强度、耐老化、抗穿刺的HDPE

膜,并确保接缝焊接质量达到气密性标准。同时,应根据现场土样试验结果,动态调整固化剂的配合比,避免盲目套用经验数据,确保桩体强度既满足设计要求又经济合理,实现材料性能的最优匹配。

(二) 施工过程参数监控与实时智能纠偏

施工过程中的参数控制是保证工程质量的核心。对于深层搅拌法,需严格监控钻进速度、提升速度、搅拌转速及注浆量,确保土体与固化剂充分混合。利用数字化监控系统实时采集扭矩、电流、深度等数据,可及时发现断桩、缩颈等缺陷,实现施工过程的可视化管控。对于真空预压,需持续监测膜下真空度、沉降速率及孔隙水压力,确保真空度稳定在设计值(通常 $\geq 85\text{kPa}$)以上,并根据沉降曲线及时调整抽气策略,防止真空度波动影响固结效果。对于桩基施工,必须实施全程旁站监理,利用测斜仪、超声波检测仪等设备对桩身垂直度、完整性和承载力进行实时检测,发现偏差立即采取纠偏措施,杜绝“带病”桩基投入使用,确保每一根桩都符合设计规范。

(三) 特殊地质条件下的适应性施工技术

港口地质条件复杂多变,常遇到孤石、硬夹层、深厚淤泥或强透水层等特殊地层。在孤石区,可采用冲击钻引孔或爆破破碎后再进行搅拌施工,克服障碍物影响;在强透水层,需采用“两搅两喷”工艺或添加速凝剂以防止浆液流失,确保加固效果;在深厚淤泥层,则需加强排水通道布置,延长预压时间,并采用多级真空预压策略。此外,针对潮汐变化频繁的水域,应合理安排施工窗口期,避开大潮汛期,确保水下作业安全。通过引入 BIM 技术与地理信息系统(GIS),可实现施工方案的三维模拟与可视化交底,提前预判潜在风险,优化施工路径,提高应对复杂地质的能力,确保工程顺利推进。

四、未来发展趋势与绿色智能加固展望

(一) 绿色化与生态修复技术的深度融合

随着生态文明建设的推进,港口地基加固将更加注重绿

色低碳。未来,研发和推广利用工业固废(如钢渣、粉煤灰、矿渣)替代部分水泥的生态固化剂将成为主流,既能降低碳排放,又能实现废物资源化,符合循环经济发展理念。同时,结合生态护岸技术,在加固地基的同时构建亲水生态界面,恢复海岸带生物多样性。例如,采用透水性好的生态混凝土桩体,既满足结构强度要求,又为海洋生物提供栖息空间,实现工程效益与生态效益的双赢,打造“绿色港口”新标杆。

(二) 智能化监测与全生命周期数字管理

物联网、大数据、人工智能及数字孪生技术的深度融合,将推动港口地基加固向智能化迈进。通过埋设光纤光栅传感器、无线传感网络,实现对地基沉降、孔隙水压力、应力应变等参数的全天候实时监测。利用 AI 算法对海量监测数据进行深度学习,可精准预测地基变形趋势,实现预警预报与主动调控,变“被动抢险”为“主动预防”。此外,建立地基加固全生命周期数字档案,从设计、施工到运维,实现数据的无缝流转与共享,为后续改扩建及维护决策提供科学依据,大幅提升港口基础设施的韧性与管理水平,构建智慧港口新范式。

结语

港口工程地基加固是一项涉及多学科交叉、技术难度高、影响因素复杂的系统工程。面对沿海地区多样化的软弱地质条件,单一的技术手段往往难以满足所有工程需求。本文通过对深层搅拌、真空预压、复合地基等主流加固技术的综述与分析,表明因地制宜地选择组合加固方案,并辅以严格的施工质量控制和先进的监测手段,是确保港口地基安全稳定的关键。当前,行业正朝着绿色化、智能化、精细化的方向快速发展,新材料、新工艺、新装备的不断涌现为解决传统难题提供了新的思路。未来,随着科研攻关的深入和管理水平的提升,港口工程地基加固技术将更加成熟完善,为保障国家水运战略安全、推动港口高质量发展奠定坚实基础。唯有坚持技术创新与规范管理并重,方能筑就经得起时间与风浪考验的百年港口,助力交通强国建设行稳致远。

参考文献

- [1]陈富.不同真空预压规范中的真空泵差异及修改建议[J/OL].地基处理,1-11[2026-05-16].<https://link.cnki.net/urlid/33.1416.TU.20260507.1434.002>.
- [2]谢主清,杨颜齐,周毅.滨海区高水位填筑土地基加固技术应用综述[J].公路与汽运,2025,41(06):73-87+99.DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.06.014.
- [3]马秀敏,陈波,张海亮.水利工程地基处理技术对比分析[J].水上安全,2026,(02):160-162.
- [4]姚旗,邵睿男,卫英琦.振冲碎石桩地基加固技术在水闸工程地基处理中的应用[J].水上安全,2025,(17):195-197.
- [5]吴安阳.水平-竖直排水板联合增压式真空预压加固软土效果影响因素探究[D].武汉大学,2025.DOI:10.27727/d.cnki.gwhxc.2025.000467.