

软土地基处理在港口码头建设中的应用与效果分析

王 涛

江苏筑港建设集团有限公司 江苏 连云港 222006

摘要：本文系统阐述了软土地基的工程特性及其对港口码头建设的主要危害，详细梳理并分析了当前在港口工程中广泛应用的各类地基处理技术，包括排水固结法（堆载预压、真空预压）、复合地基法（水泥搅拌桩、CFG桩、碎石桩）、强夯法以及近年来兴起的新型技术（如电渗法、微生物诱导碳酸钙沉淀法）。在此基础上，本文通过典型案例分析，对比了不同处理技术的应用效果，并从技术可行性、经济性、环境影响及工期等多个维度构建了综合评价体系。最后，文章展望了软土地基处理技术在智能化、绿色化和精细化方向的发展趋势，旨在为港口码头工程的设计、施工与决策提供理论参考和实践指导。

关键词：软土地基；港口码头；地基处理；排水固结；复合地基；效果分析

引言

港口作为海洋与内陆经济的连接枢纽、全球供应链关键节点，随着国际贸易发展及船舶大型化，对地基承载力等提出极高要求。但理想港口选址多在深厚软土分布的河口三角洲等区域，软土是港口工程建设的棘手地质难题。若不处理软土地基就建码头结构，会引发不均匀沉降致码头面层开裂、轨道变形，影响装卸作业；地基承载力不足可能致码头结构失稳；固结沉降周期长会拖延工期、增加成本。因此，采取科学合理的软土地基处理措施，是港口码头工程安全、经济、顺利建成及长期稳定运营的核心前提。本文将系统探讨软土地基处理技术在港口码头建设中的应用情况，通过理论与案例结合，剖析方法优劣，构建综合决策框架，为工程人员提供参考。

1 软土地基的工程特性及其对港口码头的危害

1.1 软土的定义与基本特性

软土通常指在静水或缓慢流水环境中沉积，并经生物化学作用形成的，天然含水量大于液限、天然孔隙比大于1.0、压缩系数大于 0.5MPa^{-1} 、不排水抗剪强度小于 30kPa 的黏性土。其主要类型包括淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土及泥炭质土等。其核心工程特性可概括为以下几点：（1）高含水量与高孔隙比：软土的天然含水量通常高达40%~80%，甚至超过100%。其孔隙比 e 普遍大于1.0，意味着土体中水的体积远大于固体颗粒的体积，结构极为疏松^[1]。（2）高压缩性：在外部荷载作用下，软土会产生显著的压缩变形。其压缩系数 a_{1-2} 通常大于 0.5MPa^{-1} ，属于高压缩性土。这意味着即使施加较小的附加应力，也会引起较大的沉降。（3）低强度：软土的不排水抗剪强度（ C_u ）极低，一般在5~20kPa之间。其内摩

擦角 φ 也很小，几乎可以忽略不计。这种低强度特性使得地基在承受码头结构自重和堆载、船舶荷载时极易发生剪切破坏。（4）低渗透性：软土的渗透系数 k 极小，通常在 $10^{-7}\sim 10^{-9}\text{cm/s}$ 量级。这导致其内部孔隙水压力消散极其缓慢，固结过程漫长，使得沉降稳定需要很长时间。（5）触变性与流变性：软土结构一旦受到扰动（如打桩、开挖），其强度会显著下降，呈现流动状态（触变性）。即使在恒定荷载下，其变形也会随时间持续发展（流变性），这给长期沉降预测带来困难。

1.2 软土地基对港口码头工程的主要危害

上述不良特性直接转化为对港口码头工程的多重威胁：（1）承载力不足：软土地基的天然承载力远低于码头结构（如重力式沉箱、高桩承台、板桩墙等）及其上部荷载（集装箱堆场、大型装卸设备、流动机械等）的要求，极易导致地基失稳。（2）过大沉降与不均匀沉降：由于高压缩性，软土地基在荷载作用下会产生巨大的总沉降。更重要的是，由于地质条件的复杂性和荷载分布的不均匀性，极易产生不均匀沉降。这将直接导致码头前沿线倾斜、轨道不平顺、装卸桥等大型设备无法正常运行，甚至引发结构开裂。（3）稳定性问题：对于重力式码头，软弱地基可能导致码头结构整体沿软弱层面滑动；对于高桩码头，过大的侧向位移会改变桩的受力状态，增加桩身弯矩，威胁结构安全。（4）工期延误与成本增加：软土地基漫长的固结时间意味着必须预留很长的预压期才能进行上部结构施工，这不仅延长了整个项目的建设周期，也增加了临时工程（如堆载土方、排水设施）的费用和后期维护成本。

2 港口码头软土地基常用处理技术分析

针对软土地基的上述危害，工程界发展了多种处理

技术。在港口码头工程中,选择何种技术需综合考虑地质条件、结构形式、工期要求、经济成本及环境影响等因素。主要技术可分为以下几类:

2.1 排水固结法

排水固结法是最经典、应用最广泛的软基处理方法,其核心原理是通过设置竖向排水体(如塑料排水板、砂井)缩短土体的排水路径,并施加预压荷载(堆载或真空负压)加速孔隙水排出,从而促进土体固结,提高强度和降低压缩性。(1)堆载预压法:在拟建场地堆填土石方作为预压荷载,使软土在加载过程中完成大部分主固结沉降。该方法原理简单,效果可靠,适用于处理深度较大、对工后沉降要求严格的区域(如堆场、道路)。但其缺点是需要大量土石方资源,堆载和卸载过程耗时耗力,且会对周边环境造成一定影响^[2]。(2)真空预压法:通过在地表铺设密封膜,利用真空泵抽气形成负压,使膜下软土承受相当于80kPa左右的等效荷载。与堆载预压相比,真空预压无需堆载材料,加载卸载速度快,对周边建筑物影响小,且能产生向内的水平收缩变形,有利于边坡稳定。近年来,结合塑料排水板的“真空联合堆载预压”技术被广泛应用,可进一步提高处理效果和效率。

2.2 复合地基法

复合地基法是通过在软土中设置强度和模量远高于原状土的增强体(桩体),与桩间土共同承担上部荷载,从而形成一个性能优越的人工地基。这种方法能显著提高地基承载力,有效控制沉降。(1)水泥土搅拌桩(湿法/干法):利用深层搅拌机械将水泥浆(湿法)或水泥粉(干法)与软土强制搅拌,形成水泥土桩。该方法施工噪音小,对周边环境扰动小,形成的桩体具有良好的止水性能,常用于码头岸壁后的地基加固和防渗帷幕。但其单桩承载力相对较低,且对有机质含量过高的软土效果不佳。(2)CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩):由水泥、粉煤灰、碎石、石屑加水拌和而成的高粘结强度桩。CFG桩通过设置褥垫层,能充分发挥桩-土共同作用,承载力高,沉降小,施工速度快,成本相对较低,在港口堆场、道路地基处理中应用极为广泛。(3)碎石桩:通过振动或冲击方式在软土中成孔并填入碎石,形成密实的碎石柱体。碎石桩主要通过挤密作用和排水作用改善地基,适用于处理砂性土或对排水要求较高的场合,但在纯淤泥质土中易出现“缩颈”现象,效果不稳定。

2.3 强夯法

强夯法是利用重锤(通常10~40吨)从高处(6~20米)自由落下,对地基土进行强力夯实。巨大的冲击能可以挤密深层土体,破坏土的结构,排出孔隙水和气体,从

而提高地基的密实度和承载力。该方法设备简单,施工速度快,成本低廉。但对于饱和软黏土,强夯可能因瞬间冲击导致孔隙水压力剧增而产生“橡皮土”现象,反而降低地基性能。因此,强夯法在港口软基处理中常用于处理浅层软土,或与排水固结法结合使用(如强夯置换)。

2.4 其他及新型处理技术

(1)换填垫层法:将浅层软土挖除,回填砂、碎石等强度高、透水性好的材料。该方法简单直接,效果立竿见影,但仅适用于软土层较薄(通常<3m)的情况,否则工程量巨大,不经济。(2)电渗法:在土中插入电极并通以直流电,利用电场作用使带负电的土颗粒向阳极移动,而水分子向阴极移动,从而加速排水固结。该方法对低渗透性淤泥效果显著,但能耗高,成本昂贵,目前多处于试验研究阶段^[3]。(3)微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP):利用特定微生物的代谢活动,在土颗粒间生成碳酸钙胶结物,从而胶结土体,提高其强度和刚度。这是一种极具前景的绿色、原位加固技术,但目前尚处于实验室和小规模现场试验阶段,距离大规模工程应用还有距离。

3 典型案例分析与效果对比

3.1 案例一:某大型集装箱码头堆场真空预压处理

该码头位于东南沿海,堆场区分布有厚达15~20m的淤泥质黏土。设计要求工后沉降控制在15cm以内。处理方案采用塑料排水板(间距1.0m,正方形布置)结合真空预压(膜下真空度维持在85kPa以上)进行处理,预压期6个月。效果分析:实测总沉降量达1.8m,固结度达到90%以上,满足设计要求。工后沉降观测显示,一年内沉降量仅为8cm。处理后地基承载力特征值由处理前的50kPa提高到150kPa以上。优势是无需堆载土方,节约了大量资源;施工期间对邻近已建码头影响小;形成的向内收缩变形有利于岸坡稳定。局限是需要高质量的密封系统,对施工工艺要求高;处理深度受真空传递效率限制。

3.2 案例二:某散货码头后方陆域CFG桩复合地基处理

该码头后方陆域需建设大型筒仓和堆场,软土层厚约12m,地下水位高。处理方案采用CFG桩复合地基,桩径0.5m,桩长15m,桩间距1.8m,正三角形布置,桩顶设置30cm厚碎石褥垫层。效果分析:复合地基承载力特征值达到250kPa,完全满足大型筒仓和重型设备的荷载要求。总沉降量控制在10cm以内,且沉降均匀,无明显差异沉降。CFG桩施工速度快,一个月内完成全部桩基施工,大大缩短了地基处理周期。优势是承载力高,沉降小且均匀,施工效率高,综合经济效益好。局限是会产生一定量的弃土(钻孔泥浆);对施工质量控制(如桩身

完整性、褥垫层铺设)要求严格。

3.3 效果综合对比

表1: 软土地基处理方案效果综合对比

处理方法	适用土层	承载力提升	沉降控制	工期	成本	环境影响
堆载预压	深厚软土	中等	优(但周期长)	长	中等(土方成本高)	大(占地、扬尘)
真空预压	深厚软土	中等	优	中等	中等	小
CFG桩	中等深度软土	高	优(快速、均匀)	短	中等偏高	中等(噪音、弃土)
水泥搅拌桩	中等深度软土	中等	良	中等	中等	小(噪音小)
强夯法	浅层软土/填土	中等	良(浅层)	短	低	大(噪音、振动)

4 软土地基处理方案的综合评价与选择

在实际工程中,单一的地基处理方法往往难以满足所有要求,常需根据具体情况进行技术组合或优化。一个科学的方案选择应基于一个多维度的综合评价体系:(1)技术可行性:首要考虑地质条件(土层厚度、性质、地下水)、结构荷载特点(大小、分布、对沉降的敏感度)以及周边环境约束(邻近建筑物、管线、航道)。(2)经济性:全面核算直接成本(材料、设备、人工)和间接成本(工期延误损失、后期维护费用)。例如,虽然CFG桩单价较高,但其缩短的工期可能带来更大的综合经济效益^[4]。(3)工期要求:港口项目通常有严格的工期节点。对于工期紧张的项目,CFG桩、强夯等快速处理方法更具优势;而对于工期相对宽松的项目,成本更低的排水固结法可能是更优选择。(4)环境影响:现代工程建设越来越重视可持续发展。应优先选择噪音小、振动小、废弃物少、能耗低的绿色处理技术,如真空预压、水泥搅拌桩等。(5)长期性能与风险:评估处理后地基的长期稳定性、耐久性以及潜在风险(如次固结沉降、地震液化等)。

5 结语

本文系统梳理了软土的工程特性及其带来的危害,并详细分析了排水固结法、复合地基法、强夯法等主流处理技术的原理、优缺点及适用条件。通过典型案例的

对比分析,揭示了不同技术在承载力提升、沉降控制、工期和成本等方面的差异,强调了方案选择需基于多维度的综合评价。未来,软土地基处理技术将朝着以下方向发展:(1)智能化:结合物联网(IoT)、大数据和人工智能(AI),实现对地基处理全过程(如真空度、沉降、孔压)的实时监测、智能分析和动态优化,实现“智慧工地”。(2)绿色化:大力研发和推广低能耗、低排放、少扰动的生态友好型技术,如MICP技术、利用工业废料(如矿渣、粉煤灰)作为固化剂的绿色胶凝材料等。(3)精细化:从“均匀处理”向“按需处理”转变,利用先进的地质勘探和数值模拟技术,对地基进行精细化分区,针对不同区域采用最经济、最有效的处理方案,实现资源的最优配置。

参考文献

[1]钟招茂.如何处理港口工程中的软土地基问题研究[J].建筑技术开发,2023,50(06):136-138.
 [2]丛建,徐镨,李继才.沿海港口工程软土地基处理实用技术[M].中国水利水电出版社:2020:303.
 [3]高翔.如何处理港口工程中的软土地基问题研究[J].科技与创新,2020,(09):130-131.
 [4]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.