

# 港口工程建设中软土地基处理技术优化与应用研究

梁 涛

(江苏兴旺物流有限公司, 江苏 泰州 225300)

**摘 要** 全球多数重要港口坐落于软土分布区, 其高含水率、高压缩性等不良工程特性, 对港口设施的安全与长期稳定构成挑战, 但传统地基处理方法往往存在施工周期长、经济成本高等局限。基于此, 本文系统探究了港口工程建设中软土地基处理的技术优化与实际应用。首先剖析软土地基的物理力学特性及相应工程控制要求, 阐明沉降控制与承载力提升的重要性。其次详细阐述了多种地基处理技术的原理、适用条件及技术优缺点, 构建系统的综合评价框架。研究显示, 凭借科学的设计方案、合理的技术组合与严格的施工管理, 可显著提高工程质量, 实现工期缩短与成本控制的双重目标。

**关键词** 港口工程; 软土地基; 真空井点降水; 强夯; 振动碾压

**中图分类号**: U655

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.020

## 0 引言

港口作为国家经济发展和对外贸易的重要枢纽, 其工程建设质量直接关系到区域经济安全与物流效率。全球范围内, 诸多大型港口地处沿海、河口等软土广泛分布的区域。软土因高含水率、大孔隙比、低渗透性、高压缩性和弱抗剪强度等不良工程特性, 给港口地基处理带来严峻挑战<sup>[1]</sup>。在荷载作用下, 软土地基易发生显著沉降和差异变形, 若不加以有效处理, 会引发码头面层开裂、轨道偏移、设备基础失稳等一系列工程问题, 严重影响港口设施的长期安全运行。故而, 开展软土地基处理技术的系统研究与优化, 对提升港口工程质量、保障结构安全、控制建设成本与工期, 具有重要的理论与现实意义。

## 1 港口工程软土地基特性与工程问题分析

### 1.1 港口软土地基的物理力学特性

软土地基通常含水量极高, 水分含量接近甚至超过液限, 孔隙比普遍大于1.0, 呈现出土体松散、密度低、容重轻等特征。由于土颗粒间连接薄弱, 其整体强度较低, 抗剪能力差, 尤其在快速剪切或不排水条件下, 强度更为薄弱, 难以承受较大外部荷载。这类土体压缩性高, 在外荷作用下会产生显著沉降变形, 且压缩过程持续时间长。此外, 软土还具有明显的流变特性——在持续恒定应力作用下, 变形会随时间不断累积, 产生次固结沉降, 进一步加剧工后沉降问题。这些特性使软土地基在工程应用中面临较大的稳定性和沉降控制挑战。

### 1.2 港口工程对地基的主要要求

港口工程的特殊性, 对地基性能提出高标准、综合性与系统性要求。码头建筑、堆场、重型装卸机械轨道及后方道路等构筑物, 均要求地基具备足够强度与刚度, 以安全传递巨大的静荷载与动荷载, 防止发生整体剪切破坏和局部压碎。因此, 必须精准控制地基位移, 将总沉降量和差异沉降严格限制在规范允许范围内。过大的差异沉降可能导致码头面层开裂、轨道变形、管线断裂等问题, 严重影响港口运营效率与设备使用寿命。此外, 考虑施工期填土加载和运营期满载状态, 需避免出现整体滑坡或滑移等失稳破坏; 尤其在地震区, 港口地基应具备抵抗液化的能力。鉴于港口属于长期服役的基础设施, 对其地基的耐久性要求极高, 工后沉降须具备可控制性与可预测性。

### 1.3 软土地基引发的主要工程问题

由于软土地基固有的工程缺陷, 港口工程建设面临诸多难以回避的技术难题。其中较为突出的包括: 总沉降量显著, 不可避免的差异沉降易引发上部结构开裂、设备基础错台, 进而导致大型设备无法平稳运行; 地基承载力不足可能诱发整体失稳, 在岸坡开挖或快速填土等工况下, 存在滑移或隆起风险; 在强震作用下, 饱和软土可能发生液化, 瞬时丧失强度, 造成严重结构破坏; 因软土固结周期较长, 工后沉降持续时间久且难以精确预测, 给工程验收及长期运维管理带来很大的不确定性。

## 2 港口工程软土地基主要处理技术对比分析

### 2.1 排水固结法

排水固结法作为处理深厚软土地基的常用技术之一,通过设置竖向排水通道,同时施加预压荷载,促进土体中孔隙水快速排出,从而加速地基固结过程,提高土体强度,有效控制工后沉降<sup>[2]</sup>。预压方式通常采用堆载预压,也可结合真空预压技术,利用负压差增强排水效果。该方法适用于大面积、深度较大的软土地基处理,具有工艺成熟、加固效果稳定、材料成本较低等优点,能有效提升地基的整体承载能力和均匀性。但它也存在一定局限,如预压周期较长、成本偏高、占地面积大等。

### 2.2 复合地基法

复合地基技术是通过在软弱土层中设置增强体,使桩体与周围土体协同工作、共同承担上部荷载的地基处理方法。水泥土搅拌桩是应用较广的一种形式,它利用深层搅拌机械将软土与水泥浆(湿法)或干水泥粉(干法)充分混合,形成具有一定强度的水泥土加固桩体,不仅可提升局部地基承载力,还兼具土体置换和改善排水固结条件的作用。旋喷桩是另一类常见的复合地基桩型,施工时采用高压水射流切割土体,并同步注入水泥浆形成大直径加固桩体,广泛应用于地基加固、止水帷幕及既有建筑基础托换等工程场景。复合地基法具有施工周期短、地基承载力提升显著、沉降控制效果好等优点,特别适用于对工后沉降要求严格的工程,如大型码头、重型设备基础等。但该方法造价相对较高,且施工质量对最终效果影响较大,全过程的质量控制至关重要。

### 2.3 强夯与强夯置换法

强夯法是通过起重设备将重锤提升至预定高度(通常 8~25 m)后自由下落,利用巨大的冲击能(一般 1 000~8 000 kJ)对地基土进行动力压实和挤密。其核心机理是高能冲击波使土体产生强烈振动和液化,破坏土体原有结构,随后土颗粒在自重和冲击力作用下重新排列,孔隙减小,密度和强度显著提高。强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基,对深层饱和软土效果有限。其主要优点是设备简单、施工速度快、成本相对较低、浅层加固效果显著;主要缺点包括有效加固深度有限(通常 $\leq 10$  m)、施工产生强烈振动和噪声污染、需要较大的施工场地。

## 3 软土地基处理技术优化策略

### 3.1 多技术组合优化策略

在面对复杂的软基条件以及愈发严格的规范要求时,如何根据实际工况选择一套行之有效并可兼顾效

率及经济效益的复合地基处理方案尤为重要,选择优化组合的技术思路来提升复合地基处理的效率<sup>[3]</sup>。如将排水固结技术与其他复合地基处理技术相互融合,一边铺设塑料排水板加快固结排水,同时再在地下施工水泥搅拌桩或预制管桩,相当于一个“排水+加桩”的组合,此时,一方面,塑料排水板可对桩周土体消散在施工过程中产生的超孔隙水压力起着加速土体强度恢复作用;另一方面,预压荷载又能加速桩间土体固结,最终起到桩、土共同作用的效果,可大量缩减整体工期。各种复合地基处理技术的优化组合是在明确具体技术主次作用及协同时机的基础上,合理设计来达成“1+1>2”的复合效果。

### 3.2 关键参数优化设计

参数设计是否合理决定了处理技术的处理效果。优化设计应摆脱经验取值的习惯,寻求更加精确、更加高效的参数。复合地基的设计参数中,桩长、桩径、桩距、水泥掺量的取值均影响最终的承载力与沉降性能,优化设计应结合详细的工程勘察和上部结构荷载,通过理论计算和数值模拟,探求承载力与沉降双控下的最佳置换率和布桩方案,避免“过火设计”导致的浪费,或“设计欠佳”留下的隐患<sup>[4]</sup>。

### 3.3 施工工艺与质量控制优化

施工技术和施工质量控制是优化设计成果实现的必要条件。传统的施工工艺为经验施工,质量差距较大,引入监控设备,选择施工设备较先进的机械设备,可以有效提高施工质量与施工效率;对于真空预压,改善密封和抽气设备可以保持较高的负压和稳定的效果,质量控制从“事后检查”转变为“过程控制”“实时反馈”;利用静力触探、轻型动力触探、钻孔取芯等原位测试对加固效果进行综合、全面分析,及时找出施工偏差,保证最终地基质量达到设计要求<sup>[5]</sup>。

## 4 软土地基处理技术组合优化应用案例

### 4.1 工程概况与地基处理方案

场地上部以素填土、淤泥质粉质黏土夹黏质粉土等软土为主,土层强度低、分布极不均匀,易导致地基稳定性较差,不均匀沉降和机械施工时沉陷。部分场地现状标高低于设计标高,需要进行回填土补标高,本项目采用吹填砂作为回填土,即地基处理的土层包括现有地层和新吹填的砂土。

根据表 1 数据可以看出,浅层土体具备一定的渗透性,适合采用真空井点降水联合强夯法进行地基处理。地基承载力指标要求:散货堆场地基承载力特征值 $\geq 150$  kPa,其余场地地基承载力特征值 $\geq 120$  kPa。

表1 土的物理力学性质指标

| 层号 | 岩土名称             | 含水率    | 重度                            | 孔隙比   | 液限         | 塑限         | 渗透系数                 | 黏聚力             | 内摩擦角             | 塑性指数  | 液性指数  | 地基承载力           |
|----|------------------|--------|-------------------------------|-------|------------|------------|----------------------|-----------------|------------------|-------|-------|-----------------|
|    |                  | W<br>% | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> | $e_0$ | $W_L$<br>% | $W_P$<br>% | k<br>cm/s            | $C_{cq}$<br>kPa | $\Phi_{cq}$<br>度 | $I_P$ | $I_L$ | $f_{ak}$<br>kPa |
| 1  | 素填土              | 26.7   | 18.52                         | 0.808 | 30.0       | 21.8       | $2.0 \times 10^{-4}$ | 8.8             | 19.4             | 8.2   | 0.64  | 55              |
| 2  | 粉质黏土             | 32.4   | 18.57                         | 0.907 | 36.6       | 22.3       | $3.0 \times 10^{-6}$ |                 |                  | 14.2  | 0.71  | 85              |
| 3  | 淤泥质粉质黏土<br>夹黏质粉土 | 37.7   | 17.68                         | 1.073 | 36.0       | 25.2       | $5.0 \times 10^{-5}$ | 15.4            | 11.1             | 10.7  | 1.16  | 60              |
| 4  | 黏质粉土夹<br>砂质粉土    | 32.9   | 17.96                         | 0.957 | 33.6       | 26.4       | $3.5 \times 10^{-3}$ | 9.3             | 19.2             | 7.2   | 0.91  | 90              |
| 5  | 粉质黏土             | 34.5   | 18.08                         | 0.982 | 36.2       | 25.0       | $2.5 \times 10^{-6}$ | 19.7            | 11.1             | 11.1  | 0.85  | 80              |
| 6  | 粉砂夹黏质粉土          | 31.0   | 17.95                         | 0.924 |            |            | $3.0 \times 10^{-3}$ | 5.1             | 22.8             |       |       | 100             |
| 7  | 粉砂               | 27.9   | 18.74                         | 0.796 |            |            | $4.0 \times 10^{-3}$ | 2.4             | 31.7             |       |       | 150             |

#### 4.2 分区处理方案选择

核心区域（深厚软土，高承载力需求）采用真空井点降水加强夯组合技术。该方案旨在通过降水快速降低浅层地下水位、提高土体有效应力，再利用强夯冲击能实现高效深层动力排水固结与土体密实，可显著提高浅~中层地基承载力，缩短传统排水固结法的工期。真空井点降水加强夯组合工艺：采用3遍真空井点降水+2遍点夯（跳档夯）、1遍满夯工艺，2遍点夯夯能分别为2 100 kJ、3 000 kJ，每遍击数暂定为6击，夯点间距为4.0 m，正方形布置。外围封闭降水井点管间距2 m，埋深6 m，施工区降水井点管间距2 m，采用长短管相结合的方法，长管埋深6 m，短管埋深3 m，正方形布置，水平排水管间距4 m。每遍强夯施工前，需保证地下水位在夯击面以下2.5 m，且土体内超孔隙水压力消散80%以上。点夯完成后拔除所有降水管进行满夯，满夯为搭接夯，搭接宽度为1/4锤径，满夯能量暂定为800 kJ，单遍击数为2击。

#### 4.3 技术组合应用效果与协同性

技术组合方案有效解决了核心区域深厚软土的承载力提升和沉降控制难题，特别在加速排水固结方面效果显著。振动碾压法高效、经济地完成了辅助区域的浅层压实任务。分区组合应用实现了根据地质条件和工程需求“对症下药”，优化了资源配置在保证整体处理效果的同时，有效控制了工程成本和缩短了工期。隔振措施的应用保障了邻近结构的安全。监测数据（如水位、孔隙水压、沉降、振动、压实度）和检测结果均表明方案实施有效，达到了预期处理目标。

#### 5 结束语

针对软土性质和复杂的工程施工要求，采用单一手段无法满足港口工程软土地基处理需要，综合型不同机理技术组合优化处理途径可作为优选方案。真空井点降水加强夯与振动碾压法分区组合应用案例表明，科学选择并组合适用技术，能有效应对不同区域的地基难题，提高处理效率，降低成本，并控制环境影响。同时，可以通过对相关工程中重要参数的合理分析，以及智能施工工艺等方法来进行施工，确保在质量等方面更加有效地进行控制。通过科学的设计、优化的技术组合和精细的施工控制，可以使处理效果、经济成本、施工时间和环境效益等方面达到有机结合，形成最佳方案，从而保证港口工程的安全稳定运行以及实现可持续绿色发展的目标，为同类工程提供有价值的参考。

#### 参考文献：

- [1] 李达宏,张蕊,顾祥奎.后注浆技术在码头软土地基灌注桩补强工程中的应用[J].水运工程,2025(03):133-138.
- [2] 杨松姗,何冯斌.适应软土地基的港口铁路路基方案优化[J].港口航道与近海工程,2024,61(02):61-63,79.
- [3] 孙必祥,黄诚.软土地基处理技术在基础工程建设中的应用[J].新城建科技,2024(01):145-147.
- [4] 吴菲菲,朱步纲,黄佃贵.水利工程施工中软土地基处理技术研究[J].水上安全,2025(07):190-192.
- [5] 刘欢.水利项目的软土地基处理技术分析[J].水上安全,2025(21):172-174.