



深厚泥炭质土软基条件下的老码头改扩建

吕 威¹, 贝建忠², 孙国辉¹

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 泥炭质土因其有机质含量高、含水量高、压缩性高、强度低、固结慢等特点, 加固处理难度较大, 严重危害工程安全。依托某境外老板桩码头改造项目, 针对其存在深厚泥炭质土软基、堆场面积狭小、老码头结构破损严重、改造空间受限、边改造边运营等突出特点, 拟定多种改扩建平面和结构方案。从码头运营、结构可靠性、经济性和施工难度等方面分析各方案优缺点, 最终提出适应深厚泥炭质土软基条件下老码头改扩建工程的推荐方案, 并分析了施工过程中关键技术难点及注意事项, 可为类似工程提供借鉴。

关键词: 老码头改造; 深厚泥炭质土; 水泥搅拌桩; 高压旋喷桩; 后板桩高桩码头结构

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0066-06

Reconstruction and expansion of existing wharf under condition of deep peaty soft soil foundation

LYU Wei¹, BEI Jianzhong², SUN Guohui¹

(1. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Peat soil is difficult to consolidate and seriously endangers engineering safety because of its high organic content, high water content, high compressibility, low strength and slow consolidation. Relying on the expansion project of an overseas existing steel sheet pile wharf, this paper draws up a variety of reconstruction and expansion plans and structural plans in view of its outstanding characteristics such as deep peaty soil soft foundation, small yard area, serious structural damage of the old wharf, limited renovation space, and operation in construction stage. The advantages and disadvantages of each scheme are analyzed from the aspects of wharf operation, structural reliability, economy and construction difficulty, and finally the recommended scheme is proposed to adapt to the old wharf reconstruction and expansion project under the condition of deep peat soil soft foundation. Besides, the key technical difficulties and precautions in the construction process are analyzed, which can provide reference for similar projects.

Keywords: reconstruction and expansion of existing wharf; deep peaty soft soil; cement mixing pile; high-pressure jetting grouting; high-piled wharf structure with rear sheet pile

随着全球海运快速发展和船舶大型化趋势, 非洲等欠发达国家的旧码头设施无法满足国际贸易需求, 而新港口建设需配套建设大量基础设施, 投资规模大, 因此诸多老码头改造项目应运而生。笔者参与了大量境外老码头改造项目, 大部分是位于城市中心海湾内的第一代港口, 码头结构因达到设计寿命或长期超负荷运营而损坏严重, 急需升级改造。

本文依托非洲某板桩码头改扩建项目, 其工程区域存在深厚泥炭质土, 有机质含量大、强度低、含水率高, 加固处理难度较大, 严重影响工程安全及改扩建方案选型。在市政道路、民用建筑等工程中, 针对泥炭质土软基, 一般采用水泥搅拌桩、高压旋喷桩等工艺进行处理, 如曾卫东等^[1]分析了 3 种添加外掺剂方案的试验结果, 探讨了深层水泥搅拌法在加固处理泥炭质土的适宜

收稿日期: 2023-06-16

作者简介: 吕威 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计及施工管理工作。

性; 张帆等^[2]开展深层搅拌桩加固泥炭质土的试验及作用机理研究, 通过分析泥炭质土埋置深度、水泥强度等级、深层搅拌桩施工工艺等因素, 探讨昆明泥炭质土层的加固效果; 李永迪等^[3]针对泥炭质土进行双重管旋喷试验, 优化双重管旋喷桩施工参数, 总结了高压旋喷桩在泥炭质土施工中存在的问题, 并给出施工建议。目前, 针对泥炭质土软基加固的研究多为陆上淡水环境, 且未形成普适性、原则性的指导意见, 针对深厚泥炭质土软基下的海港工程研究更是极为匮乏, 本文依托工程的海水中硫酸根浓度高达 0.011, 对水泥土桩的成桩质量造成不利影响, 水泥土桩失败的风险很高。

针对深厚泥炭质土软基下的海港工程改造, 本文主要研究码头改扩建平面方案选型^[4]、码头

结构方案选型^[5-8]及高压旋喷桩地基处理工艺优化^[9]等内容, 提出深厚泥炭质土软基后板桩接岸式高桩码头方案及采用低浆液压力、复喷工艺、低水灰比、外掺石膏、桩机控制提速的高压旋喷桩施工工艺, 旨在为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

某境外老码头改造项目位于河口附近的沿海滩涂, 码头平面布置和结构断面见图 1。2 个通用码头泊位呈折线布置, 堆场狭小; 前沿水深 -3.0 m, 大型船舶到港后需在外海锚泊, 通过平板驳转运货物; 钢板桩结构, 已运营 70~110 a, 存在严重锈蚀和局部断裂的现象; 1 号泊位后方的 7 号仓库距码头 15 m, 不许拆除。

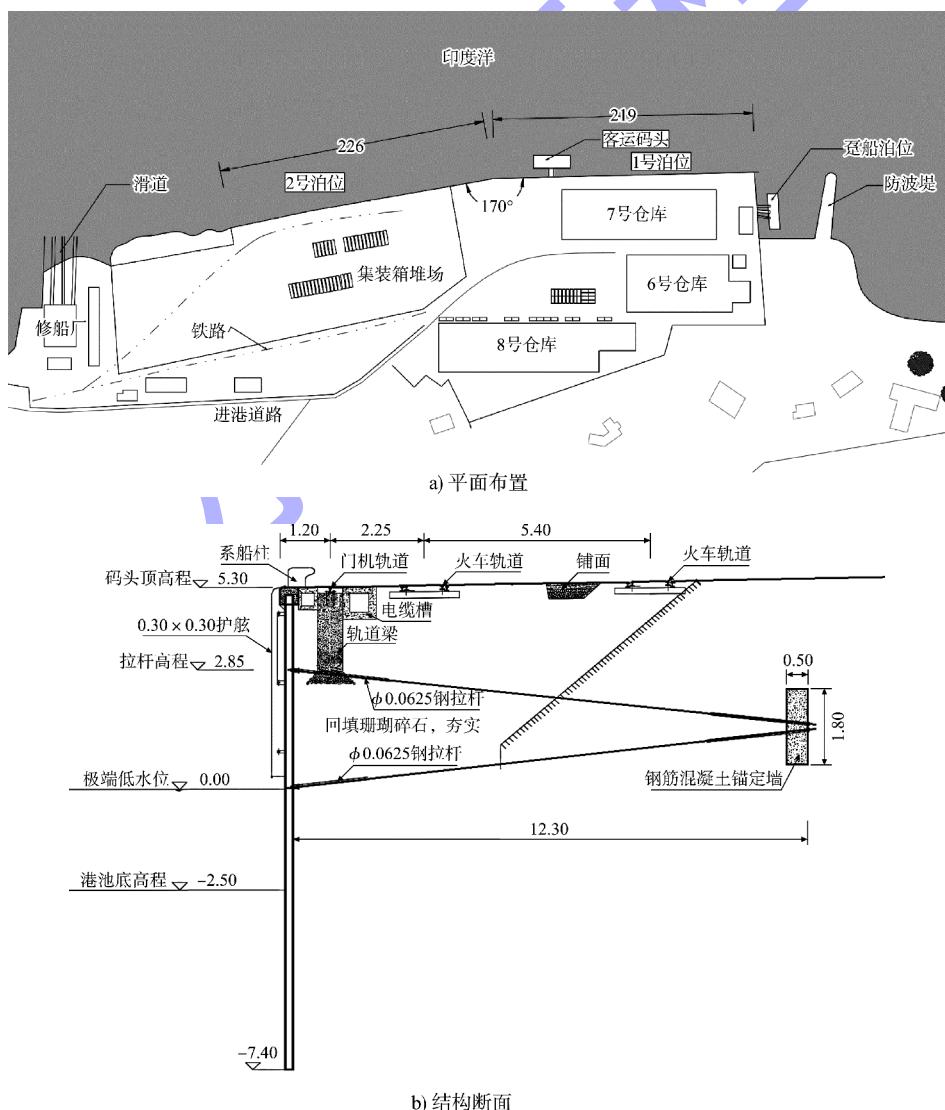


图 1 老码头平面布置和结构断面 (单位: m)

2 工程特点及难点分析

1) 老码头建造年代久远，改扩建方案需合理评估码头现状。老码头位于湾内，水域面积狭窄，外扩空间受限；岸线呈折线状，泊位使用率较低；钢板桩结构腐蚀严重，存在较大安全隐患；深厚泥炭质土地质处理难度大，严重影响码头改造方案平面布置、码头稳定性及地基承载力。

2) 港口运营水平低, 改扩建方案需考虑当地运营特点。业主要求改造为通用码头, 采用可更换吊臂通用高塔装卸货物, 连片式码头优势明显; 需考虑2 000~5万吨级船型靠离泊作业, 船型跨度大; 边改造边运营, 且需保留7号仓库, 结构改造空间受限; 既有堆场小, 老码头改造后急需增加堆场面积。

3) 工程建设条件有限，预算紧张，改扩建方案需充分考虑可行性和经济性。老码头现状复杂，需充分评估其性能，尽可能利用原结构；当地船机设备资源较少，宜采用常规简易的设计和施工方案；材料宜因地制宜，降低成本。

3 改扩建方案设计及比选

3.1 平面布置和结构方案

基于工程特点及难点，提出4种改扩建平面布置方案，分别为离岸码头、顺岸包裹、顺岸连片透空式和拉直连片式。

结合 4 种改扩建平面布置方案，提出 5 种结构方案，分别为离岸高桩码头、顺岸板桩码头、板下岸坡加固式高桩码头、重力方块接岸式高桩码头和板桩接岸式高桩码头。

3.2 改扩建方案

3.2.1 离岸高桩码头

码头呈直线布置，与1号泊位平行，距老码头110~150 m，疏浚至-13 m，边坡为1:7~1:10，新旧码头通过3条宽9~16 m高桩栈桥连接；码头采用高桩梁板结构，高桩平台宽38 m，每榀排架包括5根直桩和2根斜桩，均为 $\phi 0.9$ m钢管桩；

老码头前沿海侧采用抛石挤淤形成块石护坡，将旧钢板桩结构掩埋，保证老码头安全，码头平面布置和结构断面见图 2。

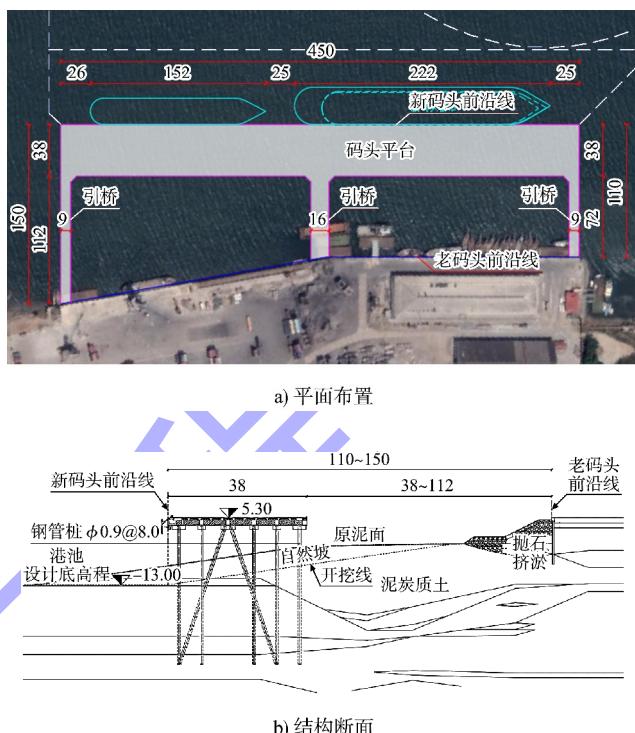
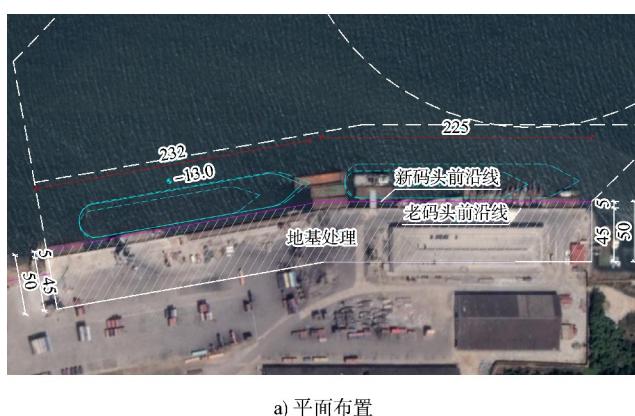


图 2 离岸高桩梁板方案平面布置和断面结构 (单位: m)

3.2.2 顺岸板桩码头

码头呈折线布置，向外平移 5 m 与老码头平行，疏浚至-13 m；前墙采用钢管组合板桩结构（ $\phi 2.0\text{ m}$ 钢管桩+AZ26-700 钢板桩），后锚碇板桩设置于老码头前沿线后方 40 m 处，采用 AZ36-700N 型钢板桩，前后板桩之间采用高压旋喷桩进行地基处理，码头平面布置和结构断面见图 3。



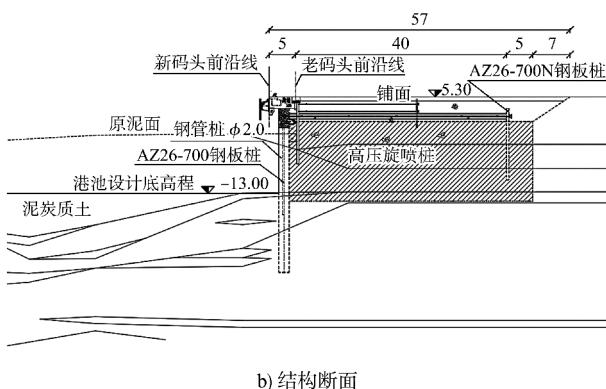
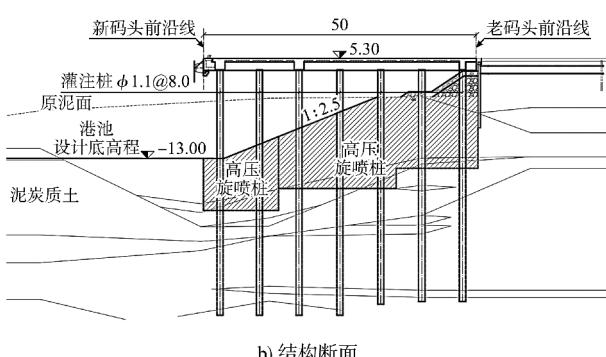


图3 顺岸板桩方案平面布置和结构断面(单位:m)

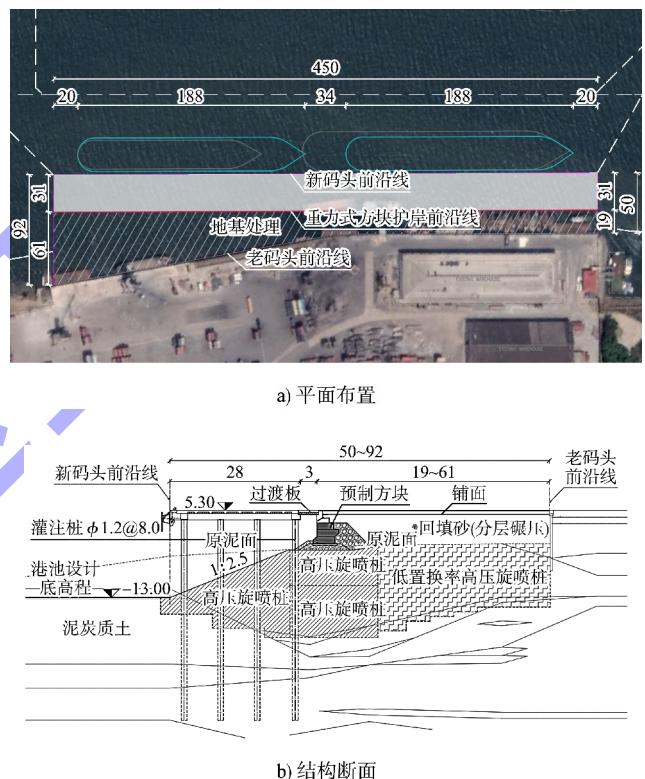
3.2.3 板下岸坡加固式高桩码头

码头呈折线布置, 向外平移50 m与老码头平行, 疏浚至-13 m, 边坡1:2.5; 采用灌注桩高桩梁板结构, 每榀排架7根 $\phi 1.1$ m灌注桩直桩, 排架间距8 m, 码头岸坡及后方陆域15 m范围内采用高压旋喷桩进行处理, 保证疏浚边坡稳定, 码头平面布置和结构断面见图4。

图4 板下岸坡加固式高桩码头方案平面布置和结构断面
(单位: m)

3.2.4 重力方块接岸式高桩码头

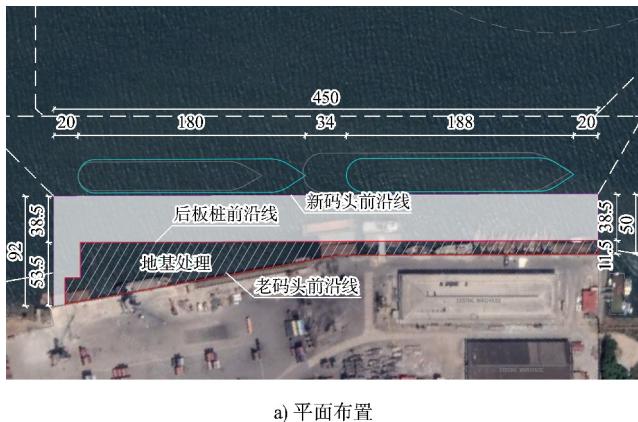
码头呈直线布置, 与1号泊位平行, 距老码头50~92 m, 疏浚至-13 m, 边坡为1:2.5; 采用灌注桩高桩梁板结构, 高桩平台宽27.5 m, 每榀排架4根 $\phi 1.2$ m灌注桩直桩, 排架间距8 m, 高桩平台后方采用砼方块护岸, 高桩平台与护岸以过渡板连接, 码头岸坡及方块底部采用水上高压旋喷桩处理, 回填区采用陆上低置换率高压旋喷桩处理, 保证边坡稳定并减小回填区工后沉降, 码头平面布置和结构断面见图5。

图5 重力方块接岸式高桩码头方案平面布置和结构断面
(单位: m)

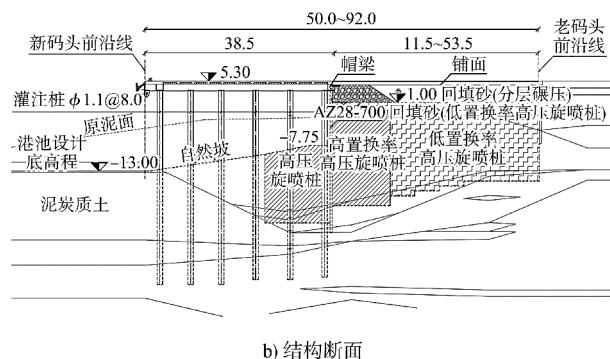
3.2.5 后板桩接岸式高桩码头

码头呈直线布置, 与1号泊位平行, 距老码头50~92 m, 疏浚至-13 m, 疏浚边坡为变边坡度, 原状地基范围内采用自然稳定坡度1:7~1:10, 地基处理范围内采用1:2.5; 码头采用后板桩高桩码头结构, 高桩平台宽38.5 m, 每榀排架6根 $\phi 1.1$ m灌注桩直桩, 排架间距8 m, 高桩平台后方采用板桩接岸结构, 钢板桩采用AZ28-700, 板

桩墙前 13.5 m 范围采用壁式高压旋喷桩处理，板桩墙后 12.0 m 范围内采用高置换率壁式高压旋喷桩处理，其他回填区域采用低置换率壁式布置高压旋喷桩处理，以优化板桩结构受力、保证边坡稳定并减小回填区工后沉降。码头平面布置和结构断面见图 6。



a) 平面布置



b) 结构断面

图 6 后板桩接岸式高桩码头方案平面布置和结构断面
(单位: m)

3.3 方案比选

从侵占水域面积、结构可靠性、经济性及施工难度等方面，对改扩建设计方案进行评价，结果见表 1。经综合比选，确定方案 5 为推荐方案。

表 1 改扩建方案评价

方案	侵占水域面积	结构可靠性	经济性	施工难度	方案评价
1	侵占水域面积达 56.4 万 m^2 , 对船舶进出港影响较大	采用抛石挤淤工艺, 挤淤效果不确定性较大, 对老码头的防护效果较差	疏浚采用自然稳定坡度, 无需回填陆域及地基处理, 工程造价约 5 400 万美元	采用打入桩, 施工速度较快, 但需调遣专业打桩船舶	经济性适中, 但侵占水域面积大、结构可靠性较低
2	侵占水域面积仅 2.4 万 m^2 , 对船舶进出港影响最小	回填料将老码头完全掩埋, 对老码头的防护效果较好	码头前沿线平移较少, 码头平台较窄且回填工程量较少, 工程造价约 5 000 万美元, 经济性最好	需拆除老码头拉杆及后锚碇结构, 施工难度较大, 且施工期存在较大的安全风险; 老码头陆域存在较厚回填块石, 陆上旋喷桩处理施工难度大、施工效率较低	经济性最好、结构可靠性较好, 但未缓解堆场面积狭小的压力且施工难度较大
3	侵占水域面积 23.0 万 m^2 , 对船舶进出港影响较小	采用抛石对老码头进行防护, 旧钢板桩结构耐久性较差; 码头岸坡未采取防护措施, 螺旋桨冲刷下, 岸坡存在局部冲刷、垮塌风险	水上高压旋喷桩地基处理工程量极大, 处理费用较高, 工程造价约 6 020 万美元	水上高压旋喷桩地基处理工程量极大, 需专业地基处理船舶	结构可靠性和经济性均较差, 且施工难度较大
4	侵占水域面积 27.3 万 m^2 , 对船舶进出港影响较小	码头岸坡未采取防护措施, 螺旋桨冲刷下, 岸坡存在局部冲刷、垮塌风险; 回填料将老码头完全掩埋, 对老码头的防护效果较好	水上高压旋喷桩地基处理工程量极大, 处理费用较高, 工程造价约 6 340 万美元	水上高压旋喷桩地基处理工程量极大, 需专业地基处理船舶	经济性最差, 且施工难度较大, 结构可靠性一般
5	侵占水域面积 27.3 万 m^2 , 对船舶进出港影响较小	回填料将老码头完全掩埋, 对老码头的防护效果较好; 新旧板桩形成止水围堰, 可通过降水形成负压, 保证施工期安全	工程造价约 5 500 万美元。后板桩接岸结构挡土高差较大, 有效缩窄高桩平台宽度; 通过施工期降水, 将水上地基处理转变为陆上干地施工, 降低了地基处理单价, 节省工程总体造价	通过施工期降水, 将水上地基处理转变为陆上干地施工, 大大降低了地基处理难度	结构可靠性最高, 施工难度较小, 侵占水域面积适中, 经济性适中

4 海港工程泥炭质土地基高压旋喷桩施工关键技术及注意事项

4.1 施工关键技术

泥炭质土有机质含量大、强度低、含水率高,且海洋环境中的硫酸根离子也极高,严重影响高压旋喷桩的成桩质量,常规浆液压力(25~30 MPa)、

水灰比(0.9~1.0)及施工工艺适应性较差,通过室内试验、现场试验、典型施工及大面积施工,突破陆域旋喷桩处理的常规施工工艺参数,提出采用低浆液压力、复喷工艺、低水灰比、外掺石膏、桩机控制提速的组合施工工艺,最终确定的高压旋喷桩施工参数见表2。

表2 泥炭质土旋喷桩施工工艺参数

工艺	浆液石膏 掺入量/%	水灰比	喷嘴 个数	喷嘴 直径/mm	桩机档位定速/ (cm·s ⁻¹)	浆液压力/ MPa	旋转速度/ (r·min ⁻¹)	气压/ MPa	水泥掺入量/ (kg·m ⁻³)		
双管法(浆液及 压缩气体),复 喷工艺,桩机档 位定速	2.1	0.83	2	1.8	25 (正常喷浆)	80~100 (复喷)	21 (正常喷浆)	10 (复喷)	17.5~ 18.0	0.6~ 1.0	210

施工措施方面,因水上旋喷桩及搅拌桩专用船机的调遣成本较高,通过搭设水上平台的方式进行施工;回填陆域高压旋喷桩施工,通过新旧板桩结构形成止水围堰,并通过降水实现干施工,大大降低施工难度并提高施工效率。工期安排方面,充分考虑旋喷桩及搅拌桩强度增长缓慢的特点,试验性及大规模施工均需预留足够的强度增长长期。

4.2 注意事项

深厚泥炭质土软基进行高压旋喷桩施工需注意:1)泥炭质地层的有机质含量高,会延缓及破坏水泥土的固化,导致常规旋喷桩施工工艺及参数存在较大的失败风险;2)在泥炭质淤泥地层采取降低浆液压力、复喷工艺、降低浆液水灰比、外掺石膏等措施,可以提升成桩质量;3)当海水中的硫酸根浓度超过0.01时,采用海水制浆的水泥土桩的失败风险很高;4)适量石膏可加快水泥土凝结及固化,提高水泥土早期强度,建议在泥炭质淤泥地层的旋喷桩加固时掺加适量石膏,SO₃含量为3%~4%时水泥土的强度最佳;5)旋喷桩大面积施工期间观测到了多种挤土现象,包括旧码头位移及失稳、灌注桩偏位及海床面抬升等,充分证明旋喷桩的挤土效应显著,应将其视为挤土桩,设置合理的施工工序,并采取必要的施工措施,以减小旋喷桩施工对周边结构的影响。

5 结语

1)老码头升级改造常面临限制条件多、运营要求高、投资有限、标准高及设计寿命长等突出特点,将新码头前沿线向外平移适当距离,码头前沿线裁折取直,工作平台采用高桩梁板结构,接岸结构采用高差较大的挡土结构,并利用回填料将旧结构完全掩埋,既可有效缩窄高桩平台宽度,降低造价,又可增加堆场面积及提高改扩建方案的可靠性。

2)老码头改扩建方案比选过程中,应结合当地施工设备、建筑材料供应等情况,着重分析改扩建方案的可实施性和便利性,另需综合考虑方案的可靠性和经济性等因素,比选得出可靠性高、经济性好且可实施性较高的改扩建方案。

3)泥炭质地层的有机质含量高会对水泥土的固化起延缓及破坏作用,且海洋环境中的硫酸根离子含量高也严重影响高压旋喷桩的成桩质量,常规的施工参数适应性较差,大面积施工前应开展室内试验、现场试验及典型施工,可采用低浆液压力、复喷工艺、低水灰比、外掺石膏、桩机控制提速的组合施工工艺。

4)高压旋喷桩为挤土桩,应设置合理的施工工序,并采取必要的施工措施,以减小旋喷桩施工对周边结构的影响。