



高桩码头受限空间疏浚工艺

刘聪聪^{1,2,3,4}, 刘卫⁵, 邹丰⁵, 林富豪⁵

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;

3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040;

4. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 湖北 武汉 430040;

5. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212004)

摘要:受限空间条件下开展水下疏浚施工对其设备和工艺的要求高, 对工程整体施工进度与成本影响大。以某码头工程为例, 优化码头总体施工组织, 采用先沉桩后疏浚工艺, 利用小型挖机、改造绞吸船及水下智能清淤装备多项组合施工, 系统解决受限空间水下疏浚问题, 节省了项目工期。基于断面法、二维潮流泥沙数学模型, 提出高桩码头桩间土疏浚施工质量保障措施, 快速评估桩间土疏浚与抛泥状态。结果表明: 1) 疏浚量快速评估方法可有效应对受限空间内超挖、欠挖问题; 2) 将抛泥点设置为海侧距离码头前沿 35 m 时, 可减小码头区域泥沙回淤影响。

关键词:受限空间; 疏浚; 沉桩; 泥沙数学模型

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0107-05

Dredging technology for confined space of high-piled wharf

LIU Cong-cong^{1,2,3,4}, LIU Wei⁵, ZOU Feng⁵, LIN Fu-hao⁵

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology for Transportation Industry, Wuhan 430040, China;

3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies
of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China;

4. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co. Ltd., Wuhan 430040, China;

5. China Communications 2nd National Bureau 3rd Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212004, China)

Abstract: Underwater dredging construction under confined space conditions has a high requirement for equipment and technology, and a great impact on the overall construction schedule and cost of the project. Taking a wharf project as an example, this study optimizes the overall construction organization of the wharf, adopts the technology of sinking piles first and then dredging, and conducts combined construction with a small excavator, a modified cutter suction dredger, and underwater intelligent dredging equipment. The aim is to systematically solve the problem of underwater dredging under confined space conditions and thereby reduce the construction period of the project. Resorting to the section method and a two-dimensional tidal-current sediment mathematical model, this paper puts forward construction quality assurance measures for dredging soil between piles of a high-piled wharf and conducts a quick evaluation of the states of soil dredging between piles and mud dumping. The following observations can be made from the results: 1) The quick evaluation method for dredging volumes can effectively deal with the problems of over-excavation and under-excavation in the confined space. 2) The influence of sediment siltation in the wharf area can be reduced by setting the mud dumping point 35 m away from the wharf front on the sea side.

Keywords: confined space; dredging; pile sinking; sediment mathematical model

收稿日期: 2021-12-07

作者简介: 刘聪聪(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口与航道工程研究。

高桩码头具有对水流波浪影响小、软土地基适用强等特点，是目前应用最为广泛的码头结构形式之一，主要由桩基及上部结构组成^[1-2]。高桩码头施工，传统工艺为先完成岸坡疏浚挖泥，后沉桩作业，最后进行桩帽、梁板、面层等上部结构施工，整体形成流水作业^[3]。而对于体量大、工序繁多的工程，流水作业施工在一定程度上制约了工效最大化。若同时考虑缩短工期、降低成本并保障质量等因素，须优化施工工序，例如将岸坡疏浚工序置于桩基及上部结构等其他工序之后，岸坡疏浚形成受限空间内施工。此外，高桩码头疏浚施工的质量保障措施尤为重要。在一些工程中高桩码头下方易产生泥沙回淤，对桩基、岸坡稳定性均可能产生不良影响^[4-5]；张振超等^[6]通过数值计算表明桩间土回淤深度达 3 m 时可能对桩基产生结构裂缝。这些文献均说明桩间土疏浚必要性强，但施工难度大，对施工组织、疏浚设备及技术要求高^[7]。

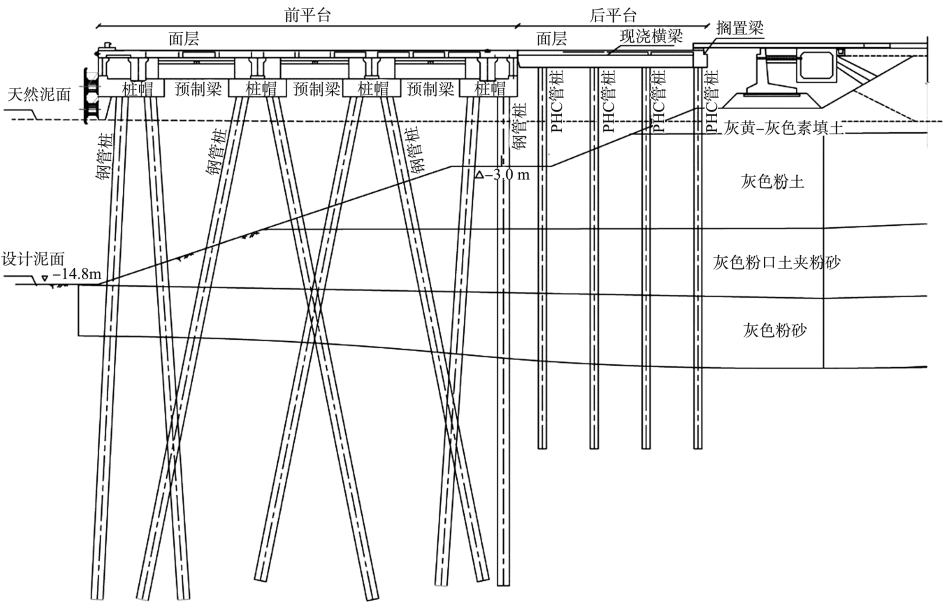
本文以某码头工程为研究对象，改进施工工艺，优化施工组织，采用先沉桩后疏浚工艺进行网格化平行施工，利用小型挖机、改装绞吸船及水下智能清淤装备组合疏浚，通过受限空间疏浚算量及生成水下地形图方法快速评估桩间土疏浚状态，采用二维潮流泥沙数学模型分析抛

泥回淤程度。

1 工程概况

某码头工程处于半环抱式港池内，波浪、流速较小，潮汐为规则半日潮，属大潮差水域，平均潮差、最大潮差分别为 3.5、7.1 m。桩基至挡土墙区域为原海堤所在位置，拆除原海堤过程中地基留有护坦块石、碎石、土工布等杂物，因此工程区域需疏浚的地质包含淤泥、冲填土、粉土、铁板砂、块石及其他杂物，水下地质条件复杂。以当地理论最低潮位作为高程、潮位、设计水位起算基准面(85 国家高程基准面-当地理论最低潮面=3.23 m)，码头前沿原泥面高程约为-2.0 m，码头前沿设计高程为-14.8 m，与挡土墙接岸处高程为 2.8 m，开挖深度大。

码头总长 812 m、宽度为 66 m，总体为高桩梁板结构。分为 10 个结构段，由西至东 1~5、5~10 结构段分别为 B、A 泊位。主体结构分为前平台、后平台，后平台采用现浇横梁、预制面板及现浇面层形式，排架中心间距 6 m，桩基采用 $\phi 800$ mm PHC 管桩；前平台采用现浇桩帽、预制梁板、现浇节点及面层形式，排架中心间距为 12 m，桩基采用直径 1 200 mm 钢管桩，见图 1。



a) 立面

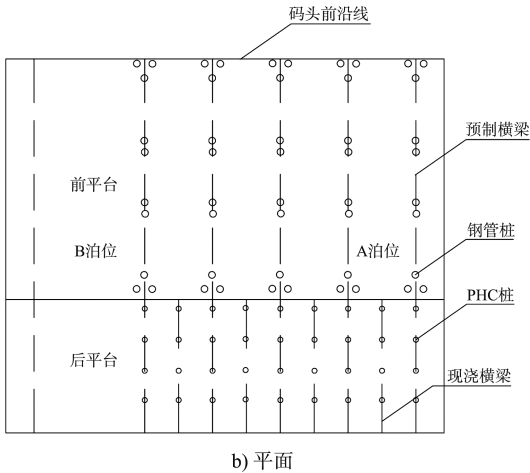


图 1 码头主体结构

考虑项目工期紧、任务重,改进岸坡挖泥、新建护岸传统工艺,进行先沉桩后疏浚,而桩间土疏浚施工存在作业空间受限、挖泥深度大、水下地质条件复杂等特点,导致传统绞吸船、长臂挖机无法直接进行疏浚^[8],施工难度大。

2 施工工艺

2.1 工艺改进

高桩码头传统施工工艺首先进行岸坡挖泥,待疏浚挖泥完成后进行水下沉桩,后依次开展桩帽现浇、预制纵横梁安装、节点现浇、预制面板安装、码头面层现浇施工。本研究改进传统施工工艺,在进行初步岸坡挖泥后开展桩基施工,随后开展上部结构多项工序同时施工,并针对各个施工阶段采用不同疏浚设备完成桩间土疏浚,加快整体施工进度。

结合研究对象实际情况,某码头沉桩顺序从西侧 B 泊位至东侧 A 泊位,沉桩完成的区域即可开展桩帽、预制梁板等上部结构施工,未沉桩区域仍可使用大型绞吸船进行水下开挖。待 2 个泊位沉桩全部结束后,西侧 B 泊位前后平台上部结构部分区域已施工,由此可针对上部结构全部完成、部分完成(顶部预制面板未安装)以及仅桩基施工完成的区域采用不同方式进行桩间土疏浚。

2.2 作业环境及疏浚设备

码头结构施工工艺改进后,受限空间内桩间土疏浚施工难度大。后平台桩基横向最小净间距

为 4.0 m、纵向最小净间距为 5.2 m,前平台相邻桩帽横向最小净间距为 5.5 m、纵向最小净间距为 5.2 m。预制梁板安装后,顶部被遮蔽,高潮位可淹没前平台预制梁 0.2~0.6 m,桩间土疏浚作业空间受限。另外根据设计要求,疏浚应超深 0.4 m,则在桩基施工完成的条件下,桩间土水下挖泥深度普遍为 6 m 以上,最大达 12 m,总体挖泥深度大。

为解决桩间土疏浚问题,采用小型挖机、改造绞吸船及自主研发的水下智能清淤装备组合施工。小型挖机为徐工 XE60D 履带式反铲挖掘机,基本尺寸为 5.86 m×1.92 m×2.58 m(长×宽×高),最大挖掘深度 3.83 m,待低潮位时可在后平台接岸处挖泥埋坡,基本适宜该区域粉砂、黏土、冲填土等土质,可满足疏浚要求。改造绞吸船由浮排、绞吸泵组装而成,吸砂泵流量 2 300 m³/h,单艘浮排尺寸 6 m×4 m×1.8 m(长×宽×高),抵抗风、浪、潮流条件较差,但对受限空间适应性较强,可自由组装 2~5 艘浮排;小型绞吸船尺寸为 28 m×5 m×1.8 m,只在码头排架间前后移动,对风、浪、潮流条件适应性较强。组装绞吸船可在码头下方进行水下疏浚,主要适宜粉砂、黏土等,对部分铁板砂等硬质土层疏浚效率低。小型挖机及绞吸船疏浚平均超深达 0.4 m。水下智能清淤装备总长 4.5 m、总宽 3.45 m、总高 3.7 m,主要针对硬质土层辅助疏浚。该装备前端安装有可回转 180°的工作臂,针对不同土层可灵活更换铲斗、绞吸泵、贝克抓斗、梅花抓斗等工具,后端安装有供设备航行的螺旋推进器,两侧有 4 个可自动折叠的用于维持机器人姿态稳定的平衡桨,附有水下平衡系统、报警系统、摄像监测等软件系统。清淤装备最大下潜深度 25 m,绞吸泵设计流量 500 m³/h,输泥管道设计长度 120 m,见图 2。



图 2 水下智能清淤装备

2.3 桩间土受限空间疏浚

具体疏浚施工区分 B、A 泊位，B 泊位进行上部结构施工的同时，A 泊位先进行桩间土疏浚。挡土墙至后平台第 2 排 PHC 管桩区域使用 6 辆徐工 XE60D 挖机进行疏浚理坡，疏浚量约 4.02 万 m³；其他区域使用 8 艘浮排船装载吸砂泵的组装绞吸船及 4 艘常用小型绞吸船进行疏浚，疏浚量约 18.30 万 m³。考虑港池大潮差影响，小型挖机在低潮位(小于 2.8 m)时施工，绞吸船施工潮位包括预制梁板安装前后两种情况，预制梁板安装前施工潮位小于桩帽顶高程 5.75 m，梁板安装后受顶部高程影响，施工潮位小于 3.55 m。

由于水下地质条件复杂，且绞吸船疏浚后未能形成良好的坡面，采用水下智能清淤装备辅助疏浚。其装备利用自身的推进器和排水功能进行下潜、上浮及保持平衡状态，接收水下各种传感器的数据，如水深、温度、油压、影像、姿态、航向等，并发送给上位机显示系统，通过地面远程操控完成水下施工任务。

水下桩间土由不同设备开挖后，将泥土直接输送到港池指定的区域内，后由大型疏浚船在港池疏浚的同时定期对抛泥区清淤。

2.4 实施效果及质量保障措施

2.4.1 实施效果

桩间土施工受潮差影响较大，有效作业时间受限。据现场统计，单日最大疏浚量达 3 100 m³，平均日疏浚量 2 024 m³。而由于工艺改进，现场网格化平行施工，2 个 10 万吨级泊位码头主体结构提前两个月完工，缩短了总体工期，节省了施工成本。

2.4.2 受限空间疏浚与抛泥评估

受上部结构遮蔽，桩间土疏浚施工较难确定具体区域的超挖、欠挖状态。此外，向港池布置输泥管道直接影响疏浚效率，输泥管道布置过长则影响其他施工船舶作业，也增加绞吸船的准备时间；输泥管道布置过短则容易产生泥沙回淤^[9]。为此提出受限空间疏浚与抛泥评估方法，科学精

准指导桩间土疏浚施工，保障疏浚施工质量。

1)疏浚状态快速评估。疏浚量快速评估主要包括编制断面法^[10] Fortran 程序快速计算疏浚量，进行网格划分与高程插值阶段性生成水下地形图。具体以码头宽度方向为疏浚断面，码头长度方向间隔 6 m 均匀划分多个断面，并在码头面层、横梁顶部等上部结构处做标识。预制面板安装后，人工记录测点高程及其与桩基的相对位置。由此计算期间总疏浚量为 22.32 万 m³以及单次疏浚总量。

图 3 展示了某单次疏浚量水下地形。由图 3 可知，此次疏浚后断面 S5~S7 码头前沿部分区域超挖 0.2 m 以内；靠岸侧水下桩间土较码头前沿开挖难度更大，单次疏浚量小，后续所需疏浚厚度大，为 2.2~2.6 m；临近挡土墙的前两排 PHC 管桩附近可使用挖机施工，所需疏浚厚度为 0.6 m 以内。各断面比较，S3~S4 受上次疏浚作用，后续所需疏浚厚度较小；而 S6~S7 断面土层地质疏浚难度大，改用铰刀工具进行破土。

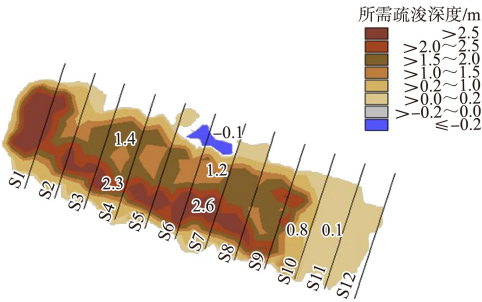


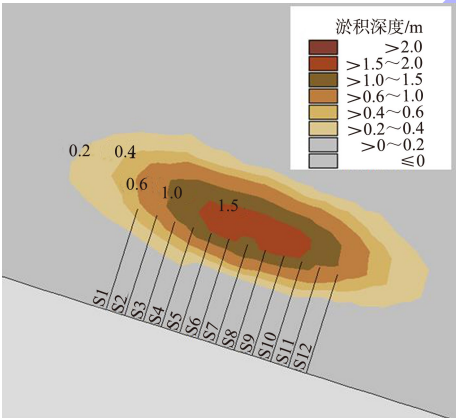
图 3 单次桩间土疏浚状况

2)疏浚抛泥评估。基于水动力控制方程、泥沙运动方程、床面变形方程，构建二维潮流泥沙数学模型^[11]。模型以港池口门潮位为边界条件，围堰及海岸设为固定边界。港池区域网格尺寸最大 100 m²，码头及抛泥区域局部加密，网格尺寸最大 5 m²，时间步长 2 s，总模拟时长为 7 d。模型验证依据现场实测数据，预制梁板未安装情况下，抛泥点距离码头前沿线约 25 m，输泥管口流量 1.5 m³/s，浓度为 80 kg/m³。对比抛泥回淤模拟结果与实测结果可知，抛泥回淤厚度模拟值与实测值最大相差 0.05 m，表明模型能够较为准确地

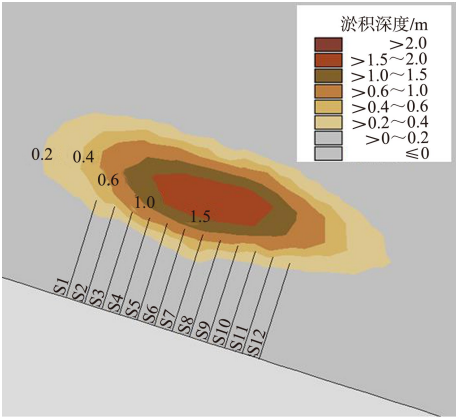
反映抛泥回淤深度和范围的规律。

结合现场实际情况, 拟定 4 种计算工况, 即设置 4 个位置抛泥, 输泥管流量 $1.5\text{ m}^3/\text{s}$, 浓度为 $90\text{ kg}/\text{m}^3$, 抛泥点为 4 个 (每次只有 1 个位置抛泥), 码头长度方向以排架标准间距 12 m 布置, 距离码头前沿线向海侧分别取 10 、 20 、 30 、 35 m 。

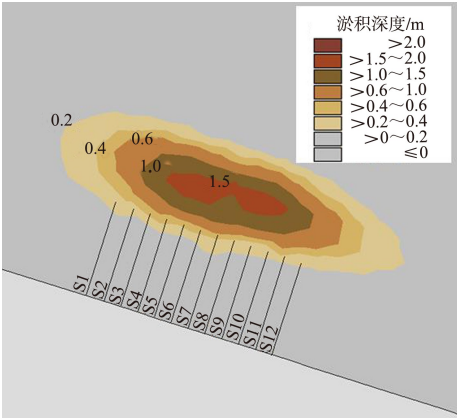
图 3 为不同工况下抛泥回淤模拟结果, 由图 3 可知, 抛泥点距离码头前沿线 10 m 工况下, 整体淤积影响最大, 抛泥点位置最大淤积厚度超过 2.0 m , 其中码头前沿线位置淤积为 $1.0\sim 1.5\text{ m}$; 抛泥点位于前沿线向海侧 30 m 的工况下, 码头前沿向岸侧 4.0 m 内回淤最大深度为 0.6 m ; 抛泥点位于码头前沿线向海侧距离 35 m 时, 码头前沿向岸侧 4.0 m 以内回淤深度不超过 0.20 m 。由此可知, 抛泥点距离 35 m 时回淤深度及范围均较小, 且可通过绞吸船快速清淤解决, 因此桩间土疏浚抛泥临界点拟定为码头前线向海侧 35 m 。



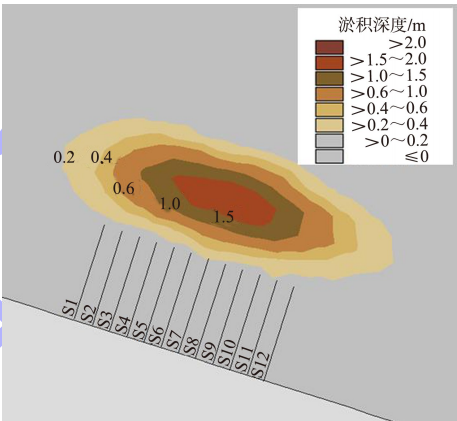
a) 距离10 m



b) 距离20 m



c) 距离30 m



d) 距离35 m

图 4 抛泥回淤数值模拟结果

3 结论

1)改进高桩码头传统施工工艺, 在岸坡初步挖泥后先进行水上沉桩, 其后上部结构施工与桩间土疏浚同时进行。工程实践结果表明采用该先沉桩后疏浚工艺可行, 缩短了整体工期。但改进工艺后形成的受限空间下桩间土疏浚难度大, 需根据作业空间、土质、潮位与泥面高程等因素, 采用小型挖机、改装绞吸船及可潜水的水下清淤设备多种组合方式进行疏浚。

2)通过现场标识及断面法快速计算疏浚量, 生成水下地形图, 为受限空间疏浚施工提供精准、直观的依据; 采用二维潮流泥沙数学模型评估抛泥回淤程度, 确定了抛泥临界点, 减少了抛泥距离过短或过长而分别产生泥沙回淤、水上作业干扰等问题, 以此保障了高桩码头桩间土疏浚施工质量。

(下转第 117 页)