

· 施 工 ·



基于 BIM 仿真的复杂空间岸坡施工技术应用*

刘根生¹, 计 煥¹, 潘子煜¹, 李烈顺¹, 陈灿奕¹, 危 伟², 黄筱云³, 黄伦超³

(1. 广州打捞局, 广东 广州 510290; 2. 江西省港口集团有限公司, 江西 南昌 330008;

3. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为解决内河框架式码头筑岛法施工后期岸坡施工的难题, 依托宜春港樟树港区河西作业区综合码头工程, 运用 BIM 技术开展筑岛、填土开挖与岸坡抛石的施工仿真, 提出“开挖填土分区作业、水陆协同、护岸抛石自卸与网兜相结合”的技术方案。工程实践表明, 与钢平台法相比, 筑岛法施工节省总工期约 40 d, 节约施工成本约 700 余万元, 其中, 复杂空间岸坡施工新工艺缩短工期 10 d。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词: 内河框架式码头; 筑岛法; 复杂空间; 岸坡施工; BIM 仿真

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0194-06

Application of construction technology of bank slope in complex space based on BIM simulation

LIU Gensheng¹, JI Huan¹, PAN Ziyu¹, LI Lieshun¹, CHEN Canyi¹, WEI Wei², HUANG Xiaoyun³, HUANG Lunchao³

(1. Salvage Bureau of Guangzhou, Guangzhou 510290, China; 2. Jiangxi Port Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China;

3. School of Hydraulic & Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To solve the problem of construction on the bank slope in the late construction stage of an inland framed wharf on island platform, BIM technology is used to simulate construction of filling, excavation and stone throwing in the project of the comprehensive terminal in Hexi operation area of Zhangshu port area in Yichun Port, and an implementation plan is proposed that contains island excavation by partitions, collaborative operation between excavators and dredgers, stone throwing with self-dumping and string bag. Engineering practice shows that compared with the steel platform, the construction by island platform saves the total construction period by about 40 days and the construction costs by about 7 million yuan, in which the new construction technique for complex spatial bank slope can shorten the construction period by 10 days. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: inland framed wharf; construction approach by island platform; complex space; construction on the bank slope; BIM simulation

高桩结构是我国内河港口码头的主要结构形式之一。高桩码头可采用梁板式、无梁板式、墩式、多层式、浮式和柔性靠船桩式等结构形式。当设计高、低水位差大于 10 m 时, 高桩码头宜采用多层系靠主体结构^[1], 包括桁架式、框架式等结构形式。多层系靠的框架式码头的主体结构由

基桩和空间框架构成, 空间框架可包括立柱、横撑、纵撑、靠船立柱、系靠船梁、横梁、纵梁和面板等。由于施工条件限制, 内河一般无法使用大型水上沉桩设备, 因此, 内河高桩码头的桩基一般采用钻孔灌注桩^[2]。钻孔灌注桩水上施工平台可采用岛式^[3]、支撑桩(钢)^[4-6]、浮式^[7]、移动

收稿日期: 2023-12-20

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171245)

作者简介: 刘根生(1983—), 男, 高级工程师, 从事水运工程施工与管理。

式自升平台^[8]等形式。其中, 桩位处于浅水区且地质条件较好时可采用岛式平台, 水深或流速较小时可直接填土筑岛。

填土筑岛进行灌注桩施工后, 筑岛填土随即被清除, 或是在框架底部横撑混凝土浇筑后清除(纵撑暂不浇筑)。在此阶段清除筑岛填土, 施工操作空间较大, 可采用大型机械开挖, 岸坡抛石作业容易开展。筑岛填土清除完毕后, 再利用灌注桩等搭建支架和模板, 进行底部水平连系梁或纵撑浇筑施工。该施工工艺对支架的稳定性要求较高, 且施工平台开销较大、施工工期较长。国内一些内河港口码头工程因多种因素的制约, 工期要求短, 直接利用筑岛作为支撑平台进行底部水平连系梁浇筑施工, 以及立柱、上部横纵梁与上部结构施工, 在上部结构施工后期再进行填土开挖和岸坡抛石, 称之为筑岛法施工工艺。上部结构施工与填土开挖(岸坡抛石)平行作业, 形成流水施工, 节约工程成本。这种情况下, 码头平台底部筑岛开挖(岸坡形成)、抛石施工空间比较狭窄, 大型机械开挖、旋转时易与码头框架发生碰撞, 造成工程实体出现质量缺陷, 甚至出现质量事故。

本文结合宜春港樟树港区河西作业区综合码头工程实践, 开展 BIM 仿真研究, 提出复杂空间筑岛填土开挖与岸坡抛石施工技术措施, 以期改进内河码头高桩结构筑岛法施工工艺。

1 BIM 技术概述

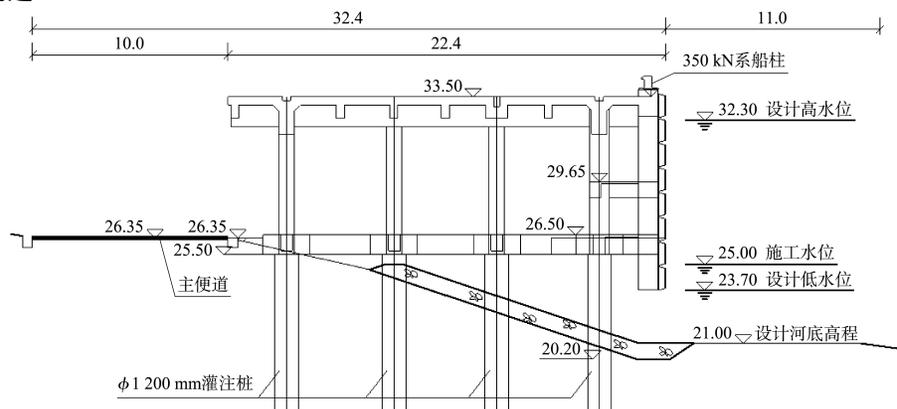


图 1 筑岛平台典型断面 (单位: m)

建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 技术以建筑工程为对象, 充分吸纳 IT、软件、物联网、大数据、云计算、CAD、图形学等先进的信息技术, 深度融入建筑工程的全生命周期, 以减少重复工作, 解决工程中高度复杂的数据交换、业务与管理协同等问题, 实现高效率、低成本、高质量完成工程项目^[9]。在水运工程领域, BIM 技术开始应用于设计、施工以及运营管理各方面^[10]。在施工阶段, BIM 技术可应用于涉及可视化展示、碰撞检测与施工模拟、深化设计、施工项目管理等的诸多环节^[11]。

2 工程概况

宜春港樟树港区河西作业区综合码头工程新建 3 个 1 000 吨级集装箱泊位、4 个 1 000 吨级件杂货泊位、8 个 1 000 吨级的散货泊位。码头平台连续布置, 总长 1 494 m, 宽 28 m, 为高桩梁板式透空结构。码头平台主要由 3 部分组成, 分别为 1[#]、2[#]、3[#]平台。1[#]平台是件杂和集装箱泊位平台, 共 7 个泊位, 其中件杂泊位 4 个, 集装箱泊位 3 个, 与 2[#]平台的 5 个散货泊位平台夹角为 161°, 2[#]平台和 3[#]平台的 3 个散货泊位平台夹角 171°。平台主体采用现浇框架结构, 由立柱、联系梁及上部梁板组成, 框架按 3 层设计, 码头面下高程 29.65 和 26.50 m 处设 2 层系缆平台。排架基础采用 φ1 200 mm 钻孔灌注桩, 每榀排架设 4~5 根直桩。内河高桩码头典型断面如图 1 所示。

3 筑岛法施工

内河码头高桩框架式结构筑岛法施工的主要环节包括筑岛平台施工、基桩施工、底部水平连系梁以及上部框架混凝土浇筑施工、面层施工、附属设施施工、岸坡土方(包括筑岛填土、岸坡原状土)开挖和岸坡抛石与整理等。

宜春港樟树港区河西作业区综合码头筑岛的整个施工平台总长 1 500 m, 顶面高程 26.35 m。其中, 下游段长 312 m, 填筑宽度为 22.4 m; 上游段长 1 182 m, 填筑宽度为 28.4 m。在筑岛阶段, 平台填筑按照由岸侧到江侧、从便道中间向两端开始回填的顺序进行。水下不分层, 一次性填筑至水面以上; 水面以上采取分层填筑、分层压实的施工方法, 平台全宽水平分层, 分层松铺厚度 300 mm, 逐层向上填筑, 见图 2。填筑出水面后利用挖掘机进行理坡, 保证坡面平顺, 并在迎水面铺设复合土工垫, 使用沙袋压面, 防止水流对筑岛平台的冲刷而造成水土流失, 见图 3。

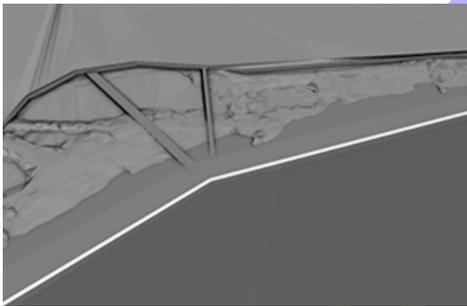


图 2 筑岛平台 BIM 仿真



图 3 筑岛填土施工

4 复杂空间开挖与抛石施工技术

4.1 筑岛填土开挖技术

4.1.1 重难点分析

本工程工期短, 且与传统施工程序不同,

先浇筑码头框架结构, 在码头上部结构施工后期平行进行填岛清除和岸坡整理抛石。在此阶段若陆上大型挖掘机在内部进行施工, 其移动、旋转和开挖的空间狭窄, 易与框架结构发生碰撞, 损坏结构。若采用小型挖掘机, 则因挖臂长度太短, 开挖深度不足, 且施工效率太低。解决思路是减少陆上大型挖掘机的开挖作业以及旋转操作。

4.1.2 重难点解决措施

1) 采用 BIM 技术进行工艺比选, 确定采用水上与陆上开挖相结合, 合理分区、协同作业, 减少陆上开挖量与回转操作的方案。

2) 合理分区, 协同作业。在每个结构段内, 将筑岛填土和原位土开挖区域划分成 3 个区域, I 区土体包含泊位处的填土和原位土, II 区土体为靠船柱内侧至第 2 排直桩范围内的填土和原位土, III 区土体则是第 2 排直桩后方的填土和原位土, IV 区土体为陆上开挖 II 区土体时供挖掘机进出的临时填筑土体, 区域划分见图 4。I 区土体采用铲斗式挖泥船和泥驳在水上进行施工; II 区部分土体会因 I 区开挖自然坍塌, 或被陆上挖掘机推入到已开挖的 I 区土坑中, 这部分土体也需要挖泥船清除, 剩余部分则采用陆上挖掘机开挖; III 区土体采用反铲式挖掘机和运输车陆上进行施工。

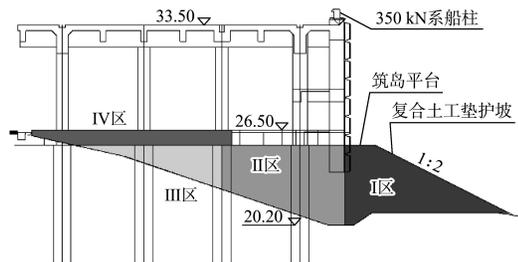
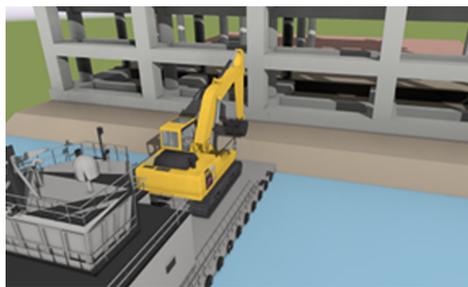


图 4 筑岛填土分区 (单位: m)

3) 水上开挖分两阶段作业。第 1 阶段进行港池部位筑岛填土及原地形土体 (I 区土体) 及 II 区自然坍塌土体的开挖, 开挖至设计河底高程附近, 见图 5a); 第 2 阶段将陆上挖掘机推入到已开挖第 I 区土坑中的土体清除, 并将港池开挖至设计要求。

4) 陆上施工先铺后挖。如图 5b) 所示, 陆上

开挖采用反铲式挖掘机和运输车进行施工, 施工主要包括 3 个过程。第 1 步, 回填Ⅳ区, 顶高程应超过底部纵横撑顶高程 0.2~0.3 m, 以便于挖掘机行进; 第 2 步, 挖掘机行进到Ⅲ区前端, 将剩余Ⅱ区土体尽可能推入到已开挖的第Ⅰ区土坑中; 第 3 步, 挖掘机从Ⅲ区前端逐步后退, 开挖剩余Ⅱ区土体及Ⅲ区土体, 并按照设计开挖线进行理坡。需要说明的是, 陆上开挖Ⅲ区时, 部分土体可以回填其他结构段的Ⅳ区。



a) 水上开挖



b) 陆上开挖

图 5 填土开挖 BIM 仿真

4.2 岸坡抛石技术

4.2.1 重难点分析

由于框架结构的存在, 直接采用自卸卡车抛石的施工方法会损坏底层纵横梁以及裸露的灌注桩。而自卸抛石采用挖掘机进行整理时, 也会因为纵横梁与直桩的阻碍无法实现。解决思路是减少自卸抛石整理量。

4.2.2 解决措施

1) 分区施工, 自卸与网兜结合。按照坡面位置, 将抛石区域分为坡脚、坡面 A 区和 B 区, 见图 6。A 区从坡脚到第 2 排直桩, B 区从第 2 排直桩到坡顶。如图 7 所示, 坡脚和坡面 A 区采用挖

掘机进行网兜块石定点安放, 坡面 B 区使用卡车自卸抛石, 挖掘机整理。岸坡抛石施工顺序是先抛坡脚, 后抛坡面和坡顶。

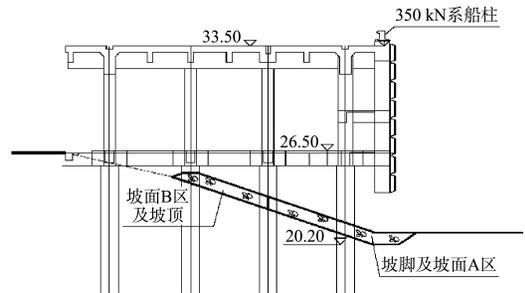
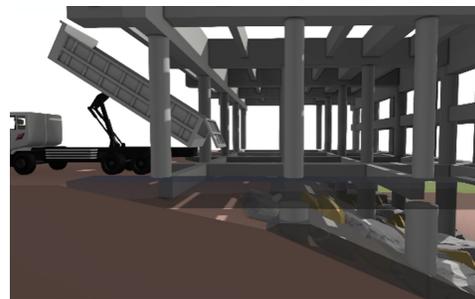


图 6 岸坡抛石分区 (单位: m)



a) 网兜抛石



b) 自卸抛石

图 7 网兜抛石和自卸抛石 BIM 仿真

2) 安装便桥。为方便坡脚及坡面 A 区进行网兜抛石作业, 使用 32# 工钢为主肋、10# 槽钢铺面制作 2 个长 5.75 m、宽 4.5 m 的便桥。通过挖掘机吊装, 将便桥安装到框架底纵梁上, 便桥与底纵梁之间采用废旧轮胎或木方等柔性材料进行支垫, 防止便桥移动摩擦损坏框架底横撑混凝土。

4.3 工艺流程

根据 BIM 仿真研究的结果, 提出内河码头高桩框架结构筑岛法施工的工艺流程, 见图 8。

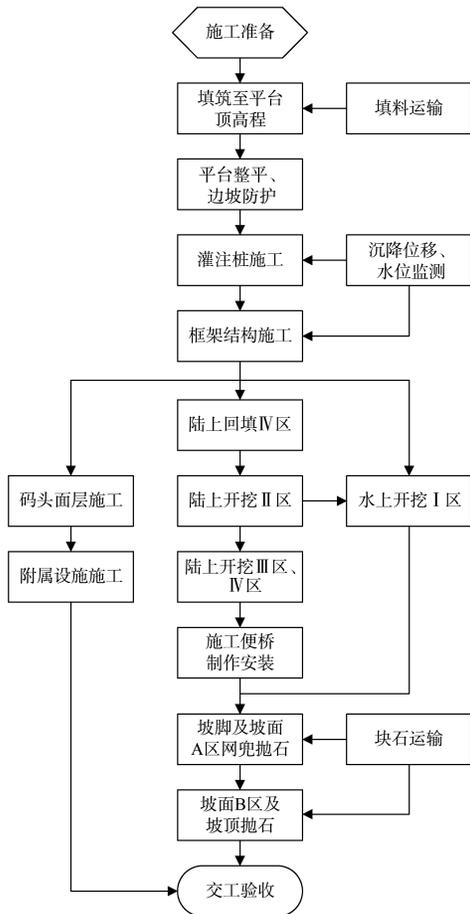


图 8 筑岛法施工工艺流程

5 实施效果

宜春港樟树港区河西作业区综合码头工程采用筑岛法工艺提升桩基及框架结构的施工速度，节约主体工程平台施工成本，缩短工程总工期。采用筑岛填土分区开挖、水上水下协同开挖、自卸与网兜分区抛石等技术措施，在保证岸坡及抛石质量的同时，避免在复杂空间内筑岛填土开挖与岸坡抛石施工损坏已建结构。效果如下：

1) 在灌注桩浇筑施工完毕后，直接在筑岛填土上铺设垫层，搭设模板，进行底层水平连系梁混凝土浇筑施工。上层结构混凝土浇筑施工的支架搭设更方便，且用量更少，混凝土运输车辆可直接进入筑岛平台。与钢平台方案相比，节约内河高桩码头上部结构混凝土浇筑施工平台的成本 779 万元，缩短浇筑施工工期 40 d。筑岛与钢平台方案的工期与费用对比见表 1。

表 1 筑岛与钢平台施工方案对比

方案	工程量	效率	工期	单价	费用/万元	
筑岛	填筑	20 万 m ³	1 万 m ³ /d	20 d	23 元/m ³	460
	平台	开挖	22 万 m ³	1 万 m ³ /d	平行施工	5 元/m ³
钢平台	搭设	3.9 万 m ²	216 m ² /d	60 d	238 元/m ²	928
	拆除	3.9 万 m ²	350 m ² /d	平行施工	108 元/m ²	421

注：1. 码头共有 47 个结构段，面积共 3.9 万 m²，经核算，需一次性搭设钢平台 1.3 万 m²，钢平台需周转 3 次。2. 两种方法桩基和上部结构的施工周期和费用相同。

2) 码头框架结构限制了筑岛清除和岸坡抛石施工作业的空间，陆上施工效率较低，其中，挖掘机的小时成产率降低约 50% 以上，抛石生产效率也下降一半。虽然分部施工工期延长，但在码头上部结构施工后期以及面层和附属设施施工阶段，平行进行筑岛清除和岸坡抛石施工，同时开展填土开挖和岸坡抛石分结构段施工，工程总工期不变。

3) 筑岛填土分区开挖提高填土开挖的效率。通过合理分区、挖掘机和挖泥船联合作业能够减少挖掘机旋转操作及开挖量，保证岸坡开挖质量，降低已建结构损伤几率，见图 9。实际开挖中，水上与陆上作业占比为 55% 与 45%，减少陆上开挖量约 7 万 m³。



a) 水上开挖



b) 陆上开挖

图 9 填土开挖

4) 机械抛石和网兜定点抛石相结合, 分区施工, 保证抛石质量。码头底层横纵梁与灌注桩会制约抛石施工。网兜定点抛石和机械抛石分区施工在保证岸坡抛石质量的同时, 可避免抛石施工损坏已建结构。最终, 填土开挖与岸坡抛石分部工程工期为 50 d, 比预计工期缩短 10 d。

6 结语

1) 基于 BIM 仿真技术, 提出分区开挖、流水作业、水陆施工相结合的技术措施, 提高开挖效率, 减少开挖对框架结构造成的损伤; 通过钢便桥、分区抛石作业、自卸与网兜抛石结合的施工工艺, 保证岸坡抛石的质量, 减少自卸抛石对框架结构的损坏。新工艺节省分部工程工期 10 d。

2) 筑岛法操作简便、安全可靠。在合同期限内, 顺利完成宜春港樟树港区河西作业区综合码头主体结构施工任务, 节省工期 40 d 左右, 节约成本 779 万元。

3) 内河框架码头筑岛法施工工艺适用于施工期水位变化不大, 尤其是工期紧、施工窗口期短的项目。

参考文献:

- [1] 廖劲松, 刘建国. 基于 GIS 系统的内河高水位差架空直立式码头灾害评估[J]. 水运工程, 2012(2): 154-157.
- [2] 薛志武. 无覆盖层条件下码头钻孔桩一体化施工技术[J]. 水运工程, 2020(11): 199-204.
- [3] 王林峰, 何静, 唐宁, 等. 振动荷载作用下桥梁桩基筑岛平台变形机制研究[J]. 人民长江, 2021, 52(12): 181-187.
- [4] 杨乃全, 马俊林, 陈岩, 等. 灌注桩水上作业平台施工工艺优化[J]. 水运工程, 2022(S2): 84-88, 94.
- [5] 殷立中, 刘文. 高桩码头水上施工平台的设计计算[J]. 水运工程, 2018(S1): 80-82.
- [6] 潘一强. 组合式深水施工平台设计与施工[J]. 中国港湾建设, 2012(1): 36-38.
- [7] 欧政权. 水上浮动钻孔平台深水基础施工技术[J]. 四川建材, 2013, 39(4): 190-191.
- [8] 王扬, 温清晖. 自升式多功能水上施工平台研发[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(1): 104-106, 167.
- [9] 农兴中, 史海欧, 袁泉, 等. 城市轨道交通工程 BIM 技术综述[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(3): 451-460.
- [10] 倪寅. BIM 技术在水运工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(4): 128-133, 166.
- [11] 张建平, 李丁, 林佳瑞, 等. BIM 在工程施工中的应用[J]. 施工技术, 2012, 41(16): 10-17.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 181 页)

- [5] 孙利成. 基于修正摩尔库伦模型的深基坑数值分析及变形预测研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2021.
- [6] 胡建林, 孙利成, 崔宏环, 等. 修正摩尔库伦模型下的深基坑变形数值分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 134-140.
- [7] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [8] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [9] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278.
- [10] 杨靖. 考虑尺寸效应的双排桩的有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [11] 郭淋, 李忠享, 蔡飞. 双排桩支护结构设计参数优化[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(5): 266-271.
- [12] 孙涛, 刘俊岩, 刘燕. 双排桩支护排距的优化研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 616-620.
- [13] 彭文祥, 刘彬. 深基坑双排桩支护排距室内模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(1): 121-127.
- [14] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [15] 中国建筑科学研究院, 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京市建华建材技术研究院有限公司, 北京城建科技促进会. 建筑基坑支护技术规程: DB 11/489—2016[S]. 北京: 北京城建科技促进会, 2016.

(本文编辑 赵娟)