



# 重力式老码头前沿 PHC 桩沉桩施工的影响

冯光华, 刘志威

(中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510310)

**摘要:** 坦桑尼亚某水工改扩建工程的1#~3#泊位原结构为重力式方块码头, 新建外扩部分为宽11.54 m的墩式结构。对1#和2#泊位PHC桩打桩过程原重力式方块码头的位移进行监控, 并总结出沉桩规律。结果表明, 将重力式方块海侧珊瑚礁石垫层疏浚后施打PHC桩, 对原重力式码头结构的位移影响较大, 码头面及附近建筑物地面均出现了裂缝; 打桩过程中, 方块不同结构形式交界面的水平位移最大; 采用外凸型十字桩尖桩靴, PHC桩穿透性能最强, 原码头方块结构水平位移最小, 码头更稳定。

**关键词:** 老码头改造; 重力式结构; PHC桩; 位移监控

中图分类号: U 656.1<sup>1</sup>11; U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0202-06

## Influence of PHC pile sinking construction in front of old gravity wharf

FENG Guang-hua, LIU Zhi-wei

(The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510310, China)

**Abstract:** The original structure of 1# to 3# berths of a hydraulic reconstruction and expansion project in Tanzania is a gravity block, and the new-build expansion part is a pier structure with 11.54 m width. We carry out the displacement monitoring of the old gravity square block of 1# and 2# berths in the PHC pile driving process and summarize the pile sinking laws. The results show that after dredging the coral reef cushion under the gravity block, the PHC pile is driven, and the displacement of the original gravity wharf structure has a greater impact, and cracks appear on the old wharf surface and nearby buildings ground. During the pile driving process, the horizontal displacement of the interface between the different structural forms of the block is the largest. With the outer convex cross-tip pile boots, the PHC pile has the strongest penetration performance, the original horizontal displacement of the square structure of the dock is minimum, and the dock is more stable.

**Keywords:** old wharf renovation; gravity structure; PHC pile; displacement monitoring

老港口因采用数十年前的设计规范和施工标准, 往往存在泊位等级低、构件尺度小、混凝土强度等级低等特点<sup>[1]</sup>。为了满足现代化码头运营需求, 使其能够停靠更大吨位的船舶, 亟待对老码头进行升级改造。国内外对老港口改造做出了重要的实践和探索<sup>[2-4]</sup>, 例如天津港老码头的改造取得了一些成功的案例<sup>[5-7]</sup>。通常老港口改造采用的桩基础形式有PHC桩(预应力高强度混凝土管桩)、预应力方桩、钢管桩等, 也有采用钢管桩和

钢板桩的组合对老港进行改造的工程实践<sup>[8]</sup>。然而基于原有的重力式方块结构, 采用PHC桩作为扩建部分的新建码头基础, 其沉桩施工对于重力式方块的影响如何, 是否会导致原重力式方块结构出现较大水平位移, 是老码头改造中面临的技术问题。

## 1 工程概况

工程位于东非坦桑尼亚达累斯萨拉姆港, 是

东非第二大港口。码头于 20 世纪 50 年代开始运营, 至今已超过 60 年, 梁、板构件存在局部损坏的情况, 无法满足继续运营的需要, 因此需要进行老码头改造。工程共建设 8 个泊位及 2 个堆场, 其中 1#~3#泊位总长 573.73 m, 保留原重力式码头结构, 海侧外扩高桩承台结构。4#~7#泊位须将原码头面层结构、附属设施和桩基础拆除, 在原址上及海侧外拓部分新建高桩梁板式结构码头, 桩基础采用 PHC 桩和灌注桩的形式, 4#泊位的码头面宽度为 40.9 m, 5#~7#泊位码头面宽度为 43 m。而滚装泊位为新建泊位, 其码头标准段为高桩梁板结构, 采用 800 mm 桩径的 PHC 桩, 码头面尺寸为 247 m×34 m(长×宽), 分为 85 m+77 m+85 m 共 3 个结构段, 平面布置见图 1。



图 1 工程施工平面布置

## 2 PHC 桩沉桩施工对重力式老码头结构的影响

### 2.1 重力式老码头结构

原 1#~3#泊位为重力式方块结构, 其结构形式见图 2。



图 2 重力式码头方块结构

施工内容为保留原重力式结构, 前沿线外扩宽 11.54 m, 高桩墩式结构采用 PHC 桩作为基础, 桩径为 1.0 m、壁厚为 130 mm, 3 个泊位共 306 根 PHC 桩, 其中斜桩 198 根, 斜率分别为 1:6、1:8, 扭角均为 12°, 直桩 108 根。从岸侧到陆侧, 基桩分为 3 排, 斜桩在同一横向轴线上, 直桩与斜桩异轴, 海侧俯桩与仰桩的中心距为 1.6 m, 仰桩与直桩的中心距为 3.34 m, 1#~3#泊位基桩平面布置见图 3。PCH 桩参数见表 1。

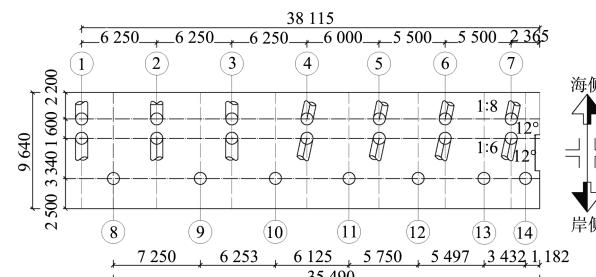


图 3 1#~3#泊位桩基平面布置 (单位: mm)

表 1 1#~3#泊位 PHC 桩参数

| 桩型 | 数量/根 | 最大入土深度/m | 桩靴长度/m | 基桩总长/m    |
|----|------|----------|--------|-----------|
| 直桩 | 108  | 18.25    | 5      | 31.0~34.0 |
| 斜桩 | 198  | 24.61    | 5~6    | 34.5~38.5 |

原码头面顶高程为 5.40 m, 方块总厚度 16.8 m, 方块下方为珊瑚礁石垫层, 厚度为 1.6 m。岸侧直桩与原码头前沿线的净距离仅为 3.9 m, 且仰桩穿插至珊瑚礁石垫层下方, 以 3#泊位仰桩的桩尖高程最深, 为 -33.96 m, 至珊瑚礁石垫层垂直距离为 20.95 m。

以 1# 和 2# 泊位为例, 分析基桩沉桩施工对方块码头的稳定性影响, 1# 泊位斜桩的桩尖高程为 -31.96 m, 直桩桩尖高程为 -28.0 m, 持力层为标贯击数  $N > 50$  击的粗砂; 2# 泊位斜桩桩尖高程为 -29.96 m, 持力层为  $N > 100$  击的密实中砂层, 直桩桩尖高程为 -28.0 m, 持力层为  $N = 42 \sim 44$  击的硬黏土层。2 个泊位的重力式方块结构见图 4。

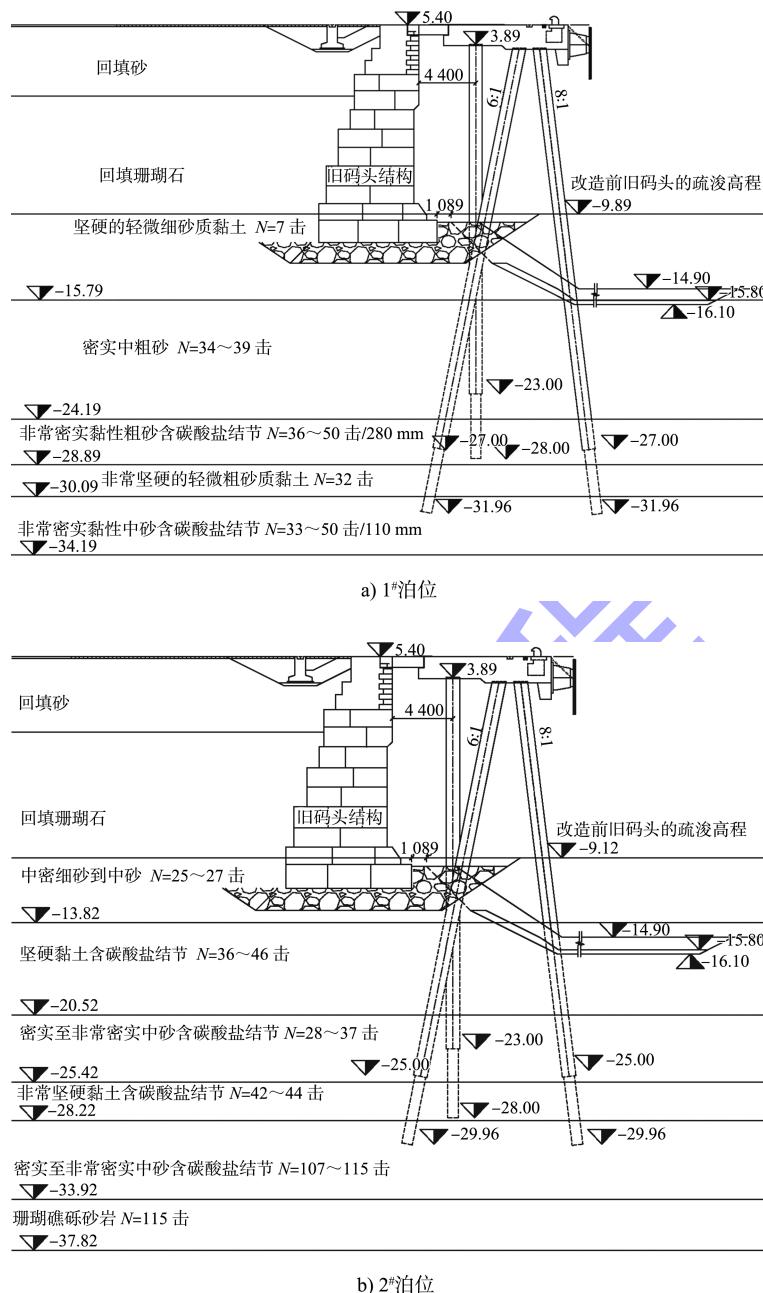


图 4 重力式方块结构断面 (尺寸: mm, 高程: m)

## 2.2 沉桩施工对于旧码头结构的影响

沉桩作业采用永安 YC 系列液压锤, 锤芯质量为 30 t, 沉桩施工时锤芯跳高为 30 cm, 停锤标准采用贯入度和桩尖高程双控的方式:

1) 最后 3 阵, 每阵 10 击, 平均贯入度  $\leq 5$  mm/击, 且达到设计桩尖高程可以停锤; 如果达到设计高程贯入度仍大于 5 mm/击, 应继续沉桩至贯入度小于 5 mm/击。

2) 未达到设计桩尖高程, 平均贯入度  $\leq 3$  mm/击

(最后 3 阵, 每阵 10 击), 且桩尖距设计值  $\leq 1.0$  m, 可以停锤。

### 2.2.1 珊瑚礁石垫层疏浚对方块结构的影响

1<sup>st</sup>泊位按照设计高程线对方块码头底部海侧珊瑚礁石垫层采用抓斗船疏浚后进行沉桩作业。珊瑚礁石岩样见图 5, 呈多孔风化状态, 人工持手锤可敲碎, 取块状较大岩样进行打磨后测试抗压强度, 3 个芯样无侧限抗压强度值在 12.5~18.6 MPa。



图 5 重力式方块下方珊瑚礁石垫层岩样

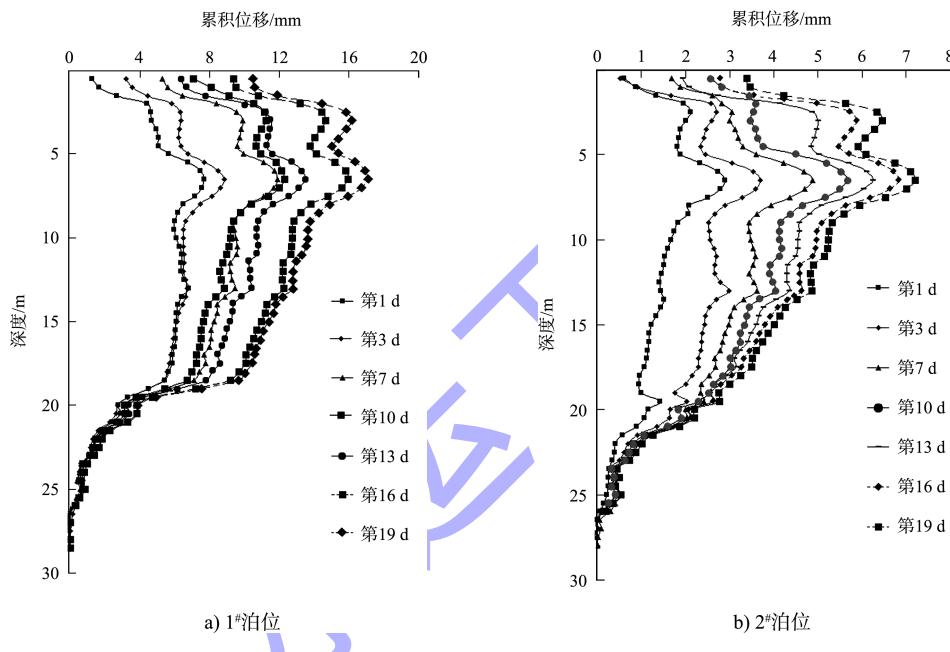


图 6 沉桩过程中累计水平位移与深度的关系曲线

由图 6 可知, 1#泊位最大水平位移为 17.12 mm, 2#泊位最大水平位移为 7.22 mm, 2#泊位最大水平位移值仅为 1#泊位的 42.2%。2 个泊位位移结果显示, 0~20 m 深度范围累计位移增加较为明显, 随着深度增加, 对土层的扰动作用逐渐减弱, 深度 27 m 处位移量接近于 0。1#泊位沉桩过程中, 原重力式码头面层混凝土出现了裂缝, 位于重力式方块与后缘混凝土交界面上, 同时, 1#泊位码头后方存在一个框架结构仓库, 仓库外墙墙体出现局部裂缝和脱落, 见图 7。沉桩完毕后, 2#泊位原码头面并无发现裂缝, 其完整性较好。珊瑚礁石垫层疏浚作业对于码头的水平位移及原码头混凝土面完整性影响较大。

2#泊位不进行疏浚工作, 直接进行沉桩作业。1#和 2#泊位进行沉桩作业前, 均在码头纵向长度的中间设置测斜管, 以监控沉桩过程中重力式方块码头的深层水平位移, 位移监测采用 RST 数字测斜仪, 监测频率为每 3 d 监测 1 次, 测斜管埋深 28.5 m, 约在珊瑚礁石垫层底部以下 10.1 m, 测斜管距离重力式方块码头前沿线 1.5 m, 深度方向测量间距为 0.5 m。1#和 2#泊位沉桩过程中累计水平位移与深度的关系曲线见 6。



图 7 1#泊位码头面后方仓库地坪裂缝

2 个泊位最大水平位移的深度均为 6.5 m, 此高程尚在水面以上, 为重力式方块结构突变位置, 以上为整方块, 以下为碎方块。

### 2.2.2 沉桩过程桩靴形式对于方块码头的影响

PHC 桩桩靴形式直接影响基桩的穿透能力,

因此在 1# 和 2# 泊位测斜管理设位置附近各施打 3 根基桩，为连续排架号，均为直桩。桩尖形式分别为外凸十字桩尖、内嵌十字桩尖以及纯钢管桩尖，桩尖材质为 Q345B 钢，测试 6 根基桩沉桩过程码头深层位移值以及 PHC 桩沉桩参数的变化。外凸十字桩尖桩靴结构见图 8。

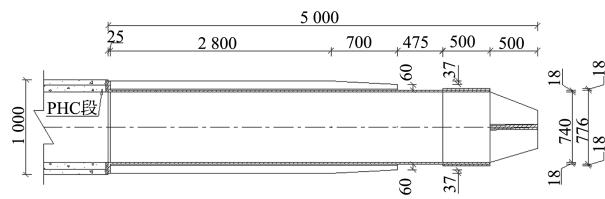


图 8 外凸型十字桩尖结构 (单位: mm)

1# 和 2# 泊位的 6 根试验基桩均沉桩至设计高程，贯入度变化见图 9，基桩的沉桩参数见表 2。可以看出，1# 泊位清除了珊瑚礁石垫层，桩尖首层土为  $N=7$  击的砂质黏土层，而 2# 泊位桩尖首层土为珊瑚礁石层，因此 2# 泊位的贯入度较小。而同一个泊位相同情况下，均为带外凸型桩尖桩靴基桩贯入度较大，其桩基穿透性能也较强；纯钢管桩段的桩靴形式，其基桩穿透性能较弱，贯入度较小。1# 泊位的外凸桩尖沉桩至设计高程，其贯入度为 4.8 mm/击，而总锤击数比纯钢管型桩靴少 18.1%；2# 泊位的外凸桩尖沉桩至设计高程，其贯入度为 4.5 mm/击，总锤击数比纯钢管型桩靴少 17.2%。

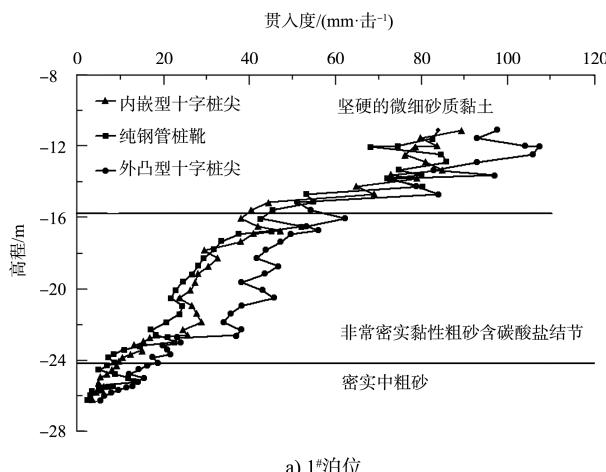


图 9 不同桩尖形式贯入度的变化

表 2 2 个泊位不同桩尖形式沉桩规律

| 泊位 | 桩号  | 桩尖形式 | 总锤击数/击 | 终锤贯入度/ (mm · 击 <sup>-1</sup> ) |
|----|-----|------|--------|--------------------------------|
| 1# | C15 | 外凸   | 2 135  | 4.8                            |
|    | C16 | 内嵌   | 2 386  | 3.6                            |
|    | C17 | 纯钢管  | 2 607  | 3.1                            |
| 2# | C48 | 外凸   | 1 936  | 4.5                            |
|    | C49 | 内嵌   | 2 189  | 4.1                            |
|    | C50 | 纯钢管  | 2 338  | 3.7                            |

2 个泊位的 3 根不同桩尖形式基桩沉桩后码头深层位移值见图 10，图中的位移值为沉桩前后的位移差值。1# 泊位外凸十字桩尖、内嵌十字桩尖、纯钢管桩靴 3 种桩靴形式基桩沉桩后码头深层位移最大值分别为 3.17、3.45、3.96 mm；而 2# 泊位分别为 1.29、1.56、1.77 mm。2 个泊位的外凸型十字桩尖的最大深层位移值最小，纯钢管的值最大。相同的桩尖形式下，因 1# 泊位将珊瑚礁石垫层疏浚后、其码头深层位移较大，其值相差超过 2 倍。沉桩前抓除珊瑚礁石垫层对 PHC 桩沉桩过程码头稳定性以及附近建筑物的质量完整性影响较大，鉴于前 2 个泊位的施工经验，后续 3# 泊位先打设 PHC 桩再疏浚桩间区的珊瑚礁石层，沉桩完毕后旧码头面层混凝土并无明显裂缝。

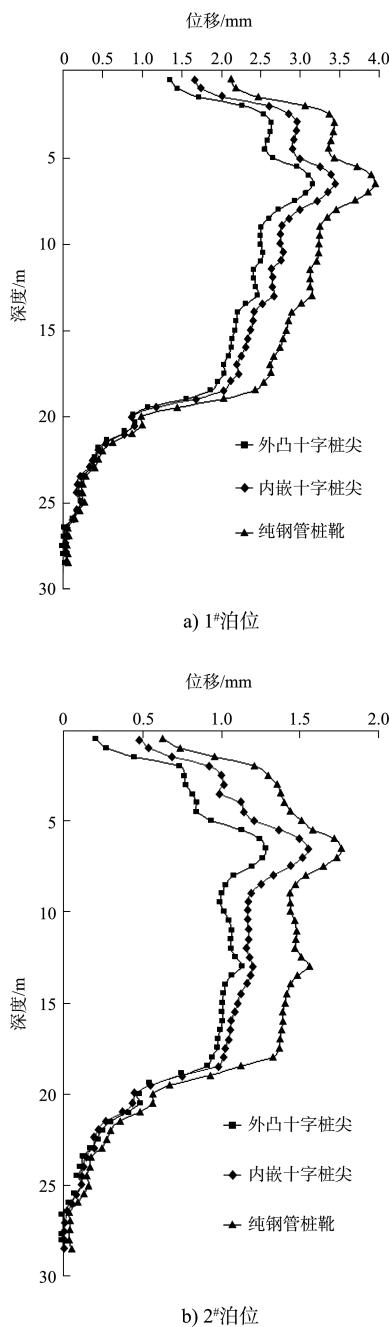


图 10 不同桩靴基桩沉桩后码头位移

### 3 结论

1) 重力式老码头方块下方的珊瑚礁石垫层应在沉桩后再进行疏浚作业, 可减少沉桩作业造成的码头深层位移, 有利于码头结构的稳定及控制码头面裂缝的发生。

2) 沉桩过程, 重力式码头的位移最大值位于不同的方块形式的交界面。

3) 采用外凸型十字桩尖的桩靴形式能提高 PHC 桩的穿透力、减少基桩总锤击数、提高沉桩过程贯入度、减少沉桩过程震动对于旧码头稳定性的影响。

### 参考文献:

- [1] 李云龙, 张智山. 天津港北疆 21#泊位码头结构加固改造关键技术[J]. 港工技术, 2016, 53(S1): 44-47.
- [2] 吕威, 麦宇雄. 境外港口升级改造工程建设要点[J]. 水运工程, 2017(1): 195-200.
- [3] 孙大鸣. 大连港集装箱码头升级改造方案研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [4] 孙熙平, 阚津, 张勇, 等. 老旧高桩码头升级改造技术研究[J]. 水道港口, 2014, 35(2): 165-170.
- [5] 张智山, 孙建军, 朱子平. 天津港老码头等级提升改造难点与关键技术分析[J]. 港工技术, 2016, 53(S1): 81-84.
- [6] 郝鹏. 天津港石油化工码头南 2 泊位码头升级改造研究[J]. 港工技术, 2016, 53(S1): 32-34.
- [7] 张智山, 徐金昌, 朱子平. 天津港部分老码头结构改造技术要点[J]. 港工技术, 2014, 51(6): 30-34.
- [8] 史宏达, 李冬冬, 于通顺. 基于旧码头改造的钢管板桩结构静力分析[J]. 水运工程, 2019(2): 34-40, 88.

(本文编辑 王璁)

### 勘误

2021年第1期第196~201页“基于机器学习的排泥管线压降预测”, 第一作者曲嘉铭, 在作者简介中遗漏了通讯作者, 经作者核实, 补充通讯作者为: 袁超哲(1988年—), 工艺室副主任, 主要从事疏浚施工工艺、装备和技术研发。E-mail: yuanchaozhe@cccc-drc.com。