



轨道式陆上打桩平台施工技术

吴 睿，薛 帆

(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司，海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室，
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)

摘要：老旧码头改造过程中常用的桩基施工方法主要分为水上施工法和陆上施工法，针对水上施工存在成本高、工效低以及陆上施工中对码头自身结构强度要求高等问题，依托以色列阿什杜德港 Q21 码头改造工程，提出基于轨道行走的陆上打桩平台施工技术，实现钢管桩及板桩的高质量施工，并运用有限元软件对打桩平台施工全过程关键参数及计算方法进行分析。结果表明，轨道式打桩平台在不同工况组合条件下结构强度和刚度均能满足使用要求，该技术可为码头桩基的陆上施工提供参考。

关键词：码头改造；桩基；轨道；打桩平台

中图分类号：U 655.4

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)11-0212-06

Track-type onshore piling platform construction technology

WU Rui, XUE Fan

(CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Co., Ltd.,

Hubei Key Laboratory of Advanced Materials & Reinforcement Technology Research for Marine Environment Structures,
Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China)

Abstract: The common pile foundation construction methods in old wharf reconstruction mainly include water construction method and land construction method. Aiming at the problems of high cost and low efficiency in water construction and high requirement of wharf structural strength in onshore construction, we propose the construction technology of onshore piling platform based on rail walking combining with the Q21 wharf reconstruction project of Ashdod Port in Israel, realize the high quality construction of steel pipe pile and sheet pile, and analyze the key parameters and calculation method by using finite element software. The results show that the structural strength and stiffness of the track type pile driving platform can meet the requirements under different working conditions. This technology can provide the references for the onshore construction of wharf pile foundation.

Keywords: wharf reconstruction; pile foundation; track; piling platform

进入 21 世纪以来我国经济发展迅猛，世界航运船舶大型化趋势明显。我国港口吞吐量迅速提升，一大批老旧码头面临升级改造的问题，为了适应社会经济发展需要、节约岸线资源，开展沿海港口码头结构升级改造成为保障港口运行安全的必然要求，也是港口企业走可持续发展的必然途径。

码头改造常用的方法是在靠船排架的前沿增加桩基，以提高其水平靠泊力。常用的码头桩基

施工方法主要分为水上施工法和陆上施工法^[1]。

已有一些关于码头改造相关方面的研究，如刘蒂^[2]对南京钢铁公司原料码头改造工艺进行研究，码头采用打桩船进行沉桩施工。施工时由于靠船墩作业面狭窄，打桩船导向架无法伸到桩位处。通过对打桩船导向架进行改造，将其悬挑长度由 2.5 m 增加到 6 m，克服了施打作业受现有码头结构制约的问题，但施工时须密切注意施工船

舶动态, 谨防船舶碰桩及锚缆绊桩。翁悦^[3]在对宁波舟山港北仑港区四期集装箱码头改造升级中, 设计了一种步履式行走的陆上打桩机。该机桩架上设有抱桩机构, 最大倾角为 8°, 打斜桩时在码头前沿岸壁设置临时导向架, 并配备 D100 型柴油锤。但由于该打桩机质量较大, 接地比压高达 90 kPa, 超过码头均载 30 kPa 的设计值, 因此使

用时须另设计专用路基板。施灿斌^[4]对福州港松下港区某码头桩基施工工艺进行研究, 首先利用打桩船进行施工平台桩基施工, 随后在码头施工海域内搭设满铺平台。待平台搭设完成后利用钻机钻孔进行码头桩基施工。但该方法存在资源消耗大、施工周期长的问题。码头桩基常用的施工方法及其特点见表 1。

表 1 码头桩基施工方法对比

施工方法	优点	缺点
浮式平台法 (打桩船法)	全旋转桩架吊桩便利; 对打桩先后顺序、桩间距及桩位平面扭角等条件要求较低; 施工工艺成熟	在长周期波条件下船舶稳定性差, 造成施工精度难以控制, 施工工效较差; 对水深有要求(大于 4.5 m)
装配式移动平台法	适应性强, 受风浪条件影响小; 结构简单, 受力明确	平台上部结构安装工序繁杂, 现场焊接工作量大, 施工工效低; 需要投入两台吊车用于施工
陆上施工法	陆域施工, 为成熟工艺, 沉桩精度易控, 施工效率较高	对改造码头结构承载力要求较高
顶推平台法 ^[5]	定位精度高, 平台自身稳定性较好, 使钢管桩位置控制更加准确; 平台以工程桩为支撑, 移位和沉桩施工均不受风浪影响	已在 Q28 码头钢管桩施工运用, 但单排桩施工条件不满足; 平台依托液压系统进行移位, 操作较复杂

通过以上调研可知, 采用水上桩基施工法对既有码头改造时需使用打桩船或搭设施工平台, 不仅施工成本高而且工艺复杂; 采用陆上打桩设备进行施工时, 受码头面板承载力不足的影响, 需要专门设计路基板。为了解决以上问题, 本文提出一种利用码头既有门机轨道进行移动的陆上打桩平台, 为类似工程提供参考和借鉴。

1 工程概况

以色列阿什杜德港 Q21 码头改造工程位于以色列阿什杜德老港区, 施工现场平面布置如图 1 所示。改造内容是将 850 m 长的散货码头改造成集装箱码头, 包括老码头拆除、沉桩(板桩及管桩)、钻孔桩及附属设施等。其中沉桩施工包括 85 根钢管桩、242 根 HZ 板桩以及 241 根 AZ 板桩。

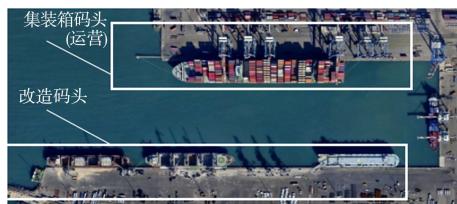


图 1 施工现场平面布置

采用打桩船施工时, 由于阿什杜德港位于地中海季风气候区, 施工海域常年浪高 1.5~2.5 m, 夏季最大浪高可达 5 m 以上。实际施工过程中桩位及高程控制不便, 施工精度和工效难以满足要求, 且施工时需要在码头上安装导向架进行桩基定位, 施工工序繁琐。采用履带吊在陆上进行施工时虽然可以节约成本, 但由于老码头面板强度不足, 履带吊无法直接在面板上施工。

2 施工工艺研究

2.1 总体工艺

综合考虑以色列阿什杜德港 Q21 现场水深条件以及资源情况, 为了保证施工效率及降低资源投入, 沉桩施工方法拟定如图 2 所示: 施工平台在码头西边进行拼装, 自西向东进行 290 m 长度的钢管桩施工, 然后将平台移动至东边码头, 自东向西开始进行 430 m 范围内 HZ+AZ 板桩施工, 待施工完 HZ+AZ 板桩后, 平台再次移动至西边 290 m 处进行钢管桩施工。

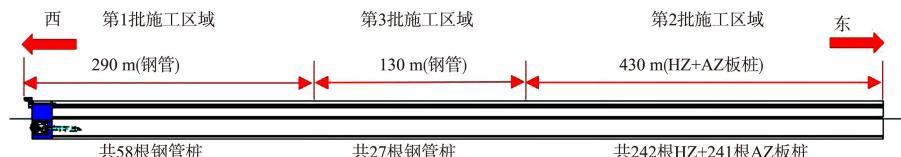


图 2 施工顺序

2.2 平台结构组成

陆上打桩平台由工作平台、行走机构、导向架、导向支撑架等主要部件组成,如图 3 所示。工作平台分为 1 层平台和 2 层平台,行走机构包括轨道轮、液压夹轨器和液压油缸。1 层平台通过行走机构与轨道接触,在 2 层与 1 层平台之间设置的调位油缸可推动两层平台之间相对滑动,施工时通过调节 2 层平台的位置,控制履带吊向远岸侧和近岸侧移动。

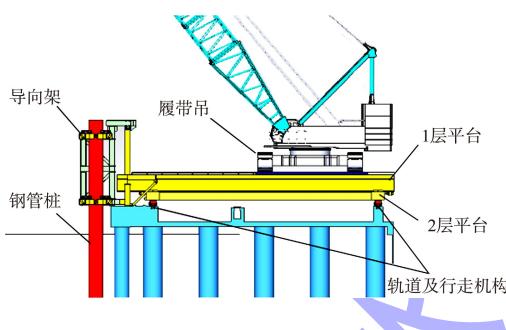


图 3 打桩平台

平台拼装流程如下:1)利用汽车吊将拼装完成的行走机构安装在码头门机轨道上,在行走轮组件上安装 1 层平台;2)将 2 层平台安装在 1 层平台的滑轨上,然后在 2 层平台上安装导向支撑架;3)利用汽车吊将履带吊在 2 层平台上散拼成整体,随后利用平台上的履带吊安装导向架。

2.3 施工流程

步骤 1: 完成平台安装调试和试运行后在平台上散拼履带吊。随后吊装钢管桩至立桩台竖直,吊装打桩锤至桩顶夹紧后从西侧喂入导向架,闭合导向架龙口,调整调位机构螺杆使滚轮顶紧钢护筒,然后进行重力沉桩,沉桩完成后用打桩锤进行施打。

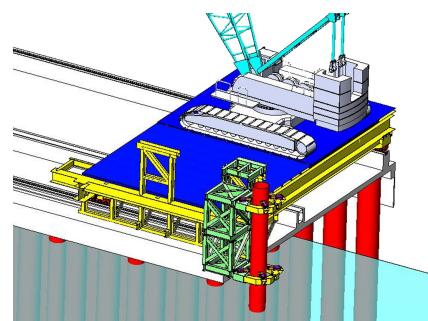
步骤 2: 继续施工钢管桩,当钢管桩顶施工至

距导向架顶端 1.2 m 位置时,打开导向架上龙口,继续进行桩基施工,直至桩顶距离下龙口 1.2 m 处。打开导向架下龙口,运用行走机构移动平台,使导向架退出钢管桩位置,继续进行该桩施工,直至沉桩达到设计高程。

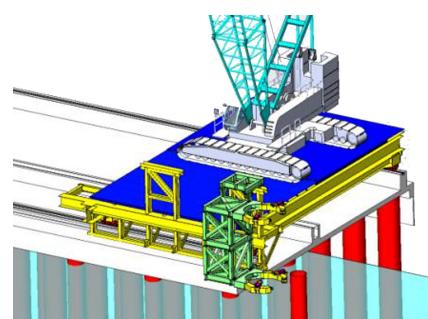
步骤 3: 每完成一根钢管桩施工后,利用平台行走机构将平台移动至下一桩位。当完成第一批钢管桩施工后,运用装载机将平台整体推动至码头东侧,自东向西开始施工 HZ+AZ 板桩。

步骤 4: 安装板桩导向架,采用步骤 1 中的方法进行板桩施工。当板桩顶至导向架 1.5 m 处时,拆除板桩导向架上龙口,继续沉桩至设计高程。

步骤 5: 将平台移动至西侧中间 130 m 钢管桩起始处,重复步骤 1、2 自西向东完成中间 130 m 钢管桩施工。桩基施工全部完成,拆除施工平台。施工流程见图 4。



a) 步骤1



b) 步骤2

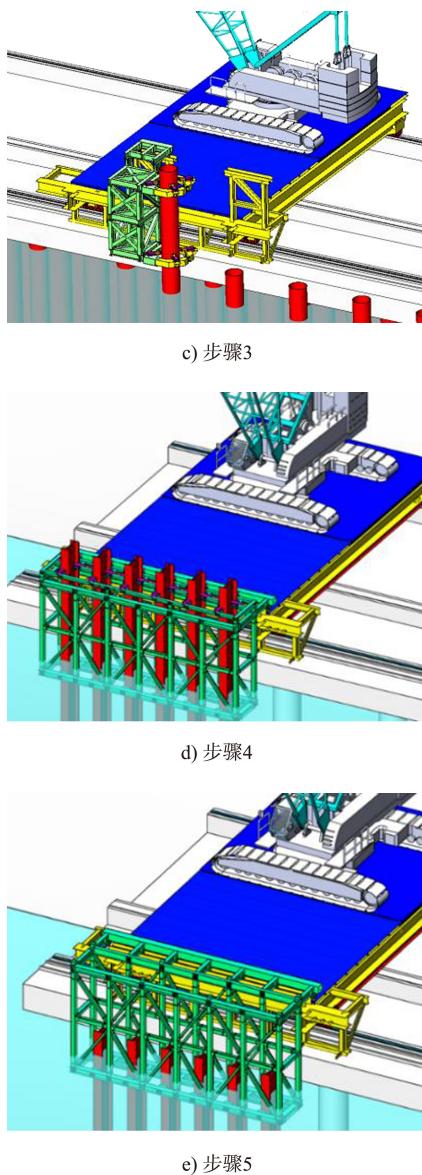


图 4 施工流程

3 陆上打桩平台结构仿真分析

3.1 平台荷载

平台受到的荷载主要有结构自身重力、施工设备荷载、沉桩荷载、波浪力和风荷载等。

1) 平台自重荷载: 根据施工图设计, 打桩平台自重荷载在有限元模型中自动计人, 荷载分项系数取 1.4。

2) 施工设备荷载: 施工设备荷载主要包括 200 t 履带吊及 40 t 冲击锤的荷载。履带吊在进行钢管桩吊装时, 须考虑对平台的偏载; 冲击锤不作业时放置在平台上, 以集中荷载形式加载在平台相应位置。以上荷载的分项系数取 1.6。

3) 沉桩荷载: 利用导向架沉桩时, 桩锤对桩

顶的瞬时最大打击力为 6 771.5 kN, 考虑钢管桩在初始搁置状态下 1/200 的倾斜度。因此, 产生的水平分力以集中荷载形式加载在平台导向架龙口位置, 荷载分项系数取 1.6。

4) 风荷载: 根据《港口工程荷载规范》^[6], 风压 w_0 与风速 v 的关系为 $w_0 = v^2 / 1600$ 。风荷载按式(1)计算, 荷载分项系数取 1.6。

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中: w_k 为风荷载标准值(kPa); β_z 为高度 z 处的风振系数; μ_s 为风荷载体形系数; μ_z 为风压高度变化系数; w_0 为基本风压(kPa)。

5) 波浪力荷载: 参照《海港水文规范》^[7], 波浪力按式(2)(3)进行计算, 荷载分项系数取 1.6。

$$P_D = \frac{1}{2} \rho C_D D u \quad (2)$$

$$P_I = \rho C_M A \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

式中: P_D 为波浪力的速度分力(kN/m); ρ 为水的密度(kg/m³); t 为时间(s); C_D 为速度力系数, 管桩取 1.2, 板桩取 2.0; D 为柱体的直径(m); u 为水质点轨道运动的水平速度(m/s); P_I 为波浪力的惯性分力(kN/m); C_M 为惯性力系数, 圆形截面取 2.0; A 为柱体的断面面积(m²)。

3.2 工况组合

陆上打桩平台施工全过程包含钢管桩施工、HZ 板桩施工、液压锤吊装和平台移位等多个工况。施工阶段不同的荷载差异很大, 平台施工各阶段最不利受力工况为:

1) 施工准备阶段为工况 1。履带吊吊装液压冲击锤回转至面向陆侧, 履带吊靠海侧履带压力与陆侧履带压力比为 3:7, 风向由海侧吹向陆侧, 风速 13.6 m/s, 波浪波高 1.5 m。

2) 钢管桩施工阶段为工况 2。履带吊吊装液压冲击锤进行施工, 履带吊靠海侧履带压力与陆侧履带压力比为 7:3, 风向由海侧吹向陆侧, 风速 13.6 m/s。

3) HZ 板桩施工阶段为工况 3: 履带吊吊装液压冲击锤进行施工, 履带吊靠海侧履带压力与陆侧履带压力比为 7:3, 风向由海侧吹向陆侧, 风速 13.6 m/s, 波浪波高 1.5 m。

4) 行走阶段为工况 4: 冲击锤和 HZ 导向架置于平台上, 履带吊面向陆侧, 靠海侧履带压力与陆侧履带压力比为 5:5, 风向由海侧吹向陆侧, 风速 13.6 m/s。

3.3 计算结果

根据陆上打桩平台的结构特点, 借助 ANSYS 软件对平台结构进行计算分析。在建模过程中采用 BEAM188 单元进行建模。各部分之间通过刚接、耦合等方式进行连接。各工况仿真分析结果见表 2。

表 2 陆上打桩平台及导向架各工况仿真分析结果

工况	陆上打桩平台		导向架	
	最大应力/ MPa	最大变形/ mm	最大应力/ MPa	最大变形/ mm
1	233	28.4	119	15.5
2	280	43.1	118	15.5
3	269	42.6	150	38.8
4	221	39.6	126	39.3

平台采用 Q345 钢, 由表 2 可知整个平台的最大应力出现在钢管桩施工过程中, 结构计算的最大应力为 280 MPa, 出现在 2 层平台右侧纵梁底部位置, 小于钢材的抗拉抗弯强度设计值 295 MPa, 结构安全可靠。平台最大位移出现在 2 层平台中间横梁中部位置为 43.1 mm, 不影响履带吊施工。

导向架结构采用 Q235 钢, 结构最大应力出现在 HZ 板桩施工阶段, 最大应力值为 150 MPa, 出现在最左端中间纵梁端部位置, 小于钢材的抗拉抗弯强度设计值 215 MPa; 最大位移出现在板桩导向架最上层中间横梁位置为 38.9 mm。

工况 2 的最大支反力见表 3。平台均衡梁采用 Q345B 钢, 在 ANSYS 有限元分析软件中, 采用壳 shell63 单元建立均衡梁的有限元分析模型, 选取表 3 中竖向的最大支反力 $F_y = 1\ 608.2\text{ kN}$ 作为施加荷载, 对结构进行验算。计算结果见图 5。

表 3 工况 2 的最大支反力

支点位置	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN
海侧右	-1 533.9	740.6	-1.259
海侧左	-1 377.3	1 025.5	0.003
陆侧右	1 524.9	1 608.2	-0.471
陆侧左	1 337.8	1 566.3	1.727

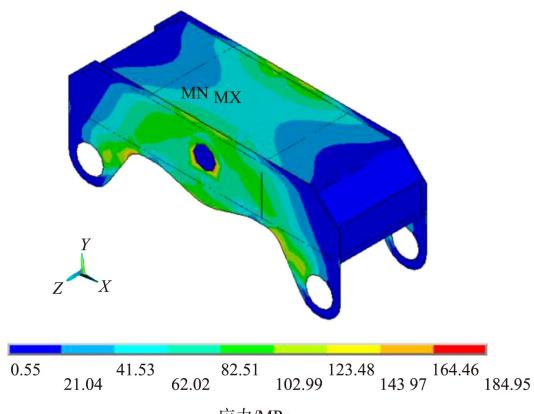


图 5 均衡梁结构应力云图

根据计算结果可知, 均衡梁的最大应力出现在前盖板的弧形段, 为 184 MPa; 最大位移出现在均衡梁中间销孔位置, 为 0.48 mm; 可以得出, 均衡梁结构满足设计使用要求。

4 实施效果

基于轨道行走的陆上打桩平台施工技术成功运用于以色列阿什杜德港 Q21 码头改造桩基施工中, 该技术克服了传统步履式陆上打桩设备施工时, 因码头结构承载力不足需要铺设路基板的弊端, 为老旧码头桩基施工的创新方法。现场施工情况见图 6。

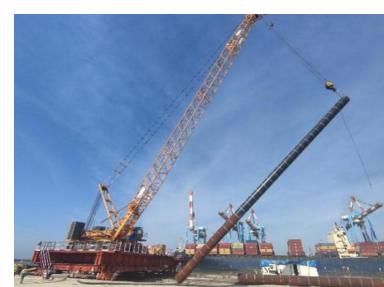


图 6 现场施工情况

据统计, 钢管桩及板桩施工效率达到了 4 根/d, 在生产受海外疫情严重影响的情况下, 用时 6 个月完成了阿什杜德港 Q21 码头 85 根钢管桩及 483 根板桩的施工, 经检测, 沉桩正位率达 99.6%。

5 结语

1) 轨道式陆上打桩平台可用于各类老旧码头改造施工中的沉桩作业。对于施工水域受限, 无法使用打桩船、自升式平台等水上桩基施工方法

以及码头自身结构承载力有限, 无法使用打桩设备的码头适用性极强。

2) 为保证平台结构的安全, 履带吊散拼完成后应限制其行走, 以免对平台产生额外的水平力, 造成平台晃动。

3) 平台行走到位后, 须将夹轨器夹紧抱死, 防止平台纵向滑动; 平台横向调位完成后, 须及时将限位挡板用木方塞实, 防止桩基施工过程中平台横向移位。

参考文献:

- [1] 陆治周, 许应杰. 东非某重力式码头升级改造设计与施工[J]. 水运工程, 2020(10): 182-186, 193.

(上接第 202 页)

- [2] 李小刚. 含碳酸盐混合砂力学性质研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
- [3] American Petroleum Institute. API recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S]. Washington DC: API Publishing Services, 2007.
- [4] Geotechnical Standards Committee. SAES-Q-014: Offshore Geotechnical Investigation and Analysis[S]. Riyadh: Saudi Aramco, 2017.
- [5] KOLK H J. Deep foundations in calcareous sediments[C]// Proceedings of the Second International Conference on Engineering for Calcareous Sediments. Bahrain: A A Balkema Publishers, 2000: 313-344.

(上接第 211 页)

2) 重点对叶轮叶片进口区域的结构形式优化改进, 在保证原有泥泵扬程、效率的情况下, 采用了叶轮直径更小、转速更高的泥泵方案, 其更容易获得高效率, 但是会降低泥泵的汽蚀性能, 而本叶轮制造选择耐汽蚀的材料, 从而达到高效挖掘泥沙目的。

3) 根据实船工程应用效果, 采用叶轮直径更小、转速更高的泥泵方案是成功的, 不仅提高耙吸船的挖掘效率, 还节约燃油能耗, 为类似耙吸船泥泵改造提供借鉴经验。

- [2] 刘蒂. 高桩码头改造施工工艺[J]. 门窗, 2019(13): 71-73.
- [3] 翁悦. 陆上打桩机在高桩码头改扩建工程中的运用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2014(16): 1690-1691.
- [4] 施灿斌. 高桩梁板结构码头桩基施工技术[J]. 珠江水运, 2018(8): 70-71.
- [5] 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.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港水文规范: JTS 145-2—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

(本文编辑 王璁)

- [6] JARDINE R. ICP design methods for driven piles in sands and clays[M]. London: Thomas Telford Ltd, 2005: 15-26.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 武亚庆)

参考文献:

- [1] 廖永涛. 3 500 m³/h 绞吸挖泥船泥泵的改进设计[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(6): 90-91, 94.
- [2] 杨正军, 郑选斌, 陈浩. 增大泥泵最大球形通道的方案[J]. 水运工程, 2017(8): 36-39.
- [3] 庄海飞, 杨晨, 胡京招. 4 500 m³/h 耙吸挖泥船用高效泥泵的研究与应用[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(1): 63-67.
- [4] 刘明明, 庄海飞, 郑琳珠, 等. 3 500 m³/h 绞吸挖泥船专用高效高耐磨泥泵研制与应用[J]. 港口科技, 2018(2): 15-22.
- [5] 王健, 钟志生, 丁树友. 特大型耙吸挖泥船研制及工程应用[J]. 水运工程, 2017(8): 28-30, 44.

(本文编辑 王璁)