

Research on the Influence of Hydrodynamic Action and Countermeasures during the Construction Period of High Pile Wharf

Hua Qin

China Power Construction Group Port and Shipping Construction Co., Ltd., Tianjin, 300450, China

Abstract

During the construction period, port high-pile wharves are exposed to complex and highly variable hydrodynamic environments. The combined effects of tides, waves, and currents exert continuous influences on pile foundation stress states, construction stability, and operational safety. Focusing on the characteristics of hydrodynamic actions during the construction stage and their impacts on project implementation, this study systematically analyzes the mechanisms of tidal fluctuations, wave disturbances, and current-induced scour under different construction conditions. The influence patterns of hydrodynamic variations on pile installation accuracy, construction platform stability, and the safety of temporary structures are revealed. On this basis, targeted response measures are proposed from both engineering and construction management perspectives, including the optimization of construction parameters, structural protection and reinforcement, hydrodynamic monitoring, and risk control, with the aim of enhancing the adaptability of high-pile wharf construction to complex hydrodynamic environments and providing technical support for the safe and efficient implementation of port engineering projects.

Keywords

port high-pile wharf; construction period; hydrodynamic action; structural stability; response measures

港口高桩码头施工期水动力作用影响及应对措施研究

秦华

中国电建集团港航建设有限公司, 中国·天津 300450

摘要

港口高桩码头施工期处于复杂多变的水动力环境中,潮汐、波浪及水流等因素相互叠加,对桩基受力状态、施工稳定性及作业安全产生持续影响。围绕施工阶段水动力作用特征及其对工程实施过程的影响,系统分析潮汐涨落、波浪扰动和水流冲刷在不同施工工况下的作用机理,揭示水动力条件变化对桩基沉设精度、施工平台稳定性及临时结构安全的影响规律。在此基础上,从工程技术与施工管理两个层面,提出针对性应对措施,包括施工参数优化、结构防护加固、水动力监测与风险控制等内容,以期提升高桩码头施工期对复杂水动力环境的适应能力,为港口工程安全、高效实施提供技术支撑。

关键词

港口高桩码头; 施工期; 水动力作用; 结构稳定性; 应对措施

1 引言

随着港口向深水化、大型化方向发展,高桩码头在复杂水域条件下的建设数量不断增加。相较于运营阶段,施工期结构体系尚未形成整体受力状态,桩基、施工平台及临时设施对外界水动力作用更为敏感。实际工程中,潮汐变化引起的水位波动、波浪荷载的周期性作用以及水流冲刷对地基条件的改变,均可能放大施工风险,影响工程进度与安全控

制。传统施工组织多侧重工艺安排,对水动力影响的系统分析与全过程管控相对不足,易导致局部失稳或施工事故。因此,有必要从施工期视角出发,深入研究水动力作用对高桩码头施工行为和结构响应的影响机制,并结合工程实践提出科学、可操作的应对措施,为港口高桩码头施工安全管理与技术优化提供理论依据。

2 港口高桩码头施工期水动力作用特征分析

2.1 施工期潮汐作用对高桩码头结构受力的影响特征

港口高桩码头施工阶段上部结构尚未闭合,桩基与临时构件处于分散受力状态,潮汐涨落带来的水位周期变化会直接改变桩身受水深度、外露长度与约束条件,使桩体弯矩与剪力分布在一个潮周期内反复调整。高潮位时静水压力与

【作者简介】秦华(1985-),男,中国内蒙古乌兰察布人,本科,高级工程师,从事水利、市政、港航项目的施工技术和施工管理研究。

附加水体质量上升,桩身中上部侧向荷载增大,局部弯矩峰值向上移动;低潮时桩身露出水面长度增加,风荷载与设备作业扰动更容易叠加到桩顶,导致桩顶水平位移放大。潮位变化还会改变施工船机靠泊与作业平台相对标高,造成测量基准漂移、定位偏差累积,进而引起桩位复测与校正频次增加。潮差较大的海湾或河口港区,回涨回落流速差异明显,桩周水压力与流致力呈现不对称特征,桩基在涨潮与落潮阶段的受力方向与幅值并不完全相同,容易形成交变受力与微小残余变形,对施工期结构稳定与控制精度提出更高要求^[1]。

2.2 施工期波浪作用对桩基稳定性与施工安全的影响特征

施工水域波浪作用具有随机性与脉动性,波面起伏使动水压力以周期形式作用于桩身,桩基在短时间内承受反复的水平动载荷与倾覆力矩。由于施工阶段桩帽、横梁等整体连接尚未形成,单桩或少数桩群的协同抗侧能力有限,波浪引起的往复荷载更易导致桩身振动、桩顶摆动与桩位偏移风险增加。中短周期波浪在浅水区可能形成破碎浪,冲击力会在桩身局部产生瞬时峰值,使临时夹具、导向架与系缆点受力突增,出现滑移、松动或局部损伤隐患。长周期涌浪会引起施工平台与船机缓慢摇摆,造成吊装摆幅增大、对位时间延长,影响沉桩、钢构拼装、灌注等工序的连续性。波浪还会诱发水体含砂量上升与床面扰动增强,叠加冲刷效应,使桩周土体结构更易松散,稳定性下降。作业人员在波浪条件下的视线、脚下稳定与应急撤离条件均会恶化,同时强流条件下,回淤与再冲刷交替出现,床面高程在短周期内波动,传统单次测深难以及时反映真实变化,风险具有滞后暴露特征。冲刷还会影响封底、垫层、抛石护底等临时防护的稳定性,防护材料滚移后进一步扩大裸露范围,使桩周地基条件呈现持续劣化趋势,必须在施工期建立针对桩周地形的动态识别与快速处置机制。

3 港口高桩码头施工期水动力作用对施工工序的影响机理

3.1 水动力条件对桩基沉桩施工过程的影响机理

沉桩过程需要稳定的定位条件与可控的贯入阻力,水动力变化会从“定位—受力—成桩”三个环节同时施加干扰。潮位涨落导致作业水深变化,导向架与打桩船的相对标高调整频繁,测量基准随浮态变化产生微漂移,桩位放样与复核难度增加。水流对桩体产生持续的侧向推力,使桩在贯入过程中出现横向偏移与扭转趋势,波浪扰动使打桩船纵横摇与升沉加剧,锤击能量传递不稳定,冲击点偏离导致桩顶受力偏心,桩身弯曲响应放大,贯入阻力呈现波动,表现为贯入量不均与停顿频发。地基侧向扰动与桩周孔隙水压力变化会改变瞬时摩阻与端阻,使沉桩控制参数在短时间内发生跳变,给沉桩终止判据与质量判断带来不确定性。水动力叠加条件下,沉桩作业往往需要提高实时监测密度、缩短校正周

期,并通过工艺参数与设备姿态协同控制,才能稳定获得设计桩位、垂直度与入土深度要求^[2]。

3.2 水动力变化对水上作业平台稳定性的影响机理

水上作业平台稳定性取决于浮态、锚固与结构刚度的耦合状态,潮汐、波浪与水流改变其中任一要素,都会引起平台姿态与受力的连锁响应。潮位升降使平台浮力与吃水变化,平台相对岸线或桩群的工作标高发生调整,系泊缆与锚链的受力角度变化导致拉力重新分配,部分锚点可能出现超载或松弛,平台会产生偏航与横移。波浪使平台发生升沉、纵摇与横摇,节点连接与支腿构件承受交变内力,局部螺栓连接与焊缝部位出现疲劳累积风险,平台甲板的振动会降低对位精度与施工人员操作稳定性。水流对平台产生恒定推力,叠加波浪的脉动推力后形成不规则合力,使平台难以保持固定方位,吊装、拼装与混凝土浇筑等对稳定性敏感的工序会出现质量波动。平台周边流场改变还可能诱发局部冲刷,造成支撑基础或临时桩周土体削弱,引起平台沉陷与倾斜。

4 港口高桩码头施工期水动力作用引发的主要风险类型

4.1 水动力作用引发的桩基偏位与承载性能风险

施工期桩基偏位风险往往由持续侧向水动力与施工控制误差耦合引发,表现为桩体在沉桩、接桩、复打及上部构件安装阶段出现渐进性偏移。潮汐造成水位与流速周期波动,打桩船与导向架的相对标高不断变化,测量放样与复核基准出现漂移,桩位控制精度降低。波浪引起的船体纵横摇与升沉会使锤击点偏心,桩顶受力偏离轴线,桩身产生弯曲与扭转响应,偏位在贯入过程中被放大并固化为永久偏差。水流对桩体施加恒定推力,导向约束不足时会形成持续的横向位移趋势,导致桩群几何关系偏离设计布置,桩间荷载分配失衡。承载性能风险与桩周土体条件变化密切相关,冲刷降低有效嵌固深度,桩侧土体密实度下降,侧摩阻发挥受限,端承力受床面扰动影响出现波动,单桩承载储备被削弱。

4.2 水动力作用引发的施工结构失稳与安全风险

施工期高桩码头的临时结构、导向系统与作业平台普遍处于未形成整体传力体系的状态,水动力交变荷载容易触发失稳与事故风险。波浪作用使平台、栈桥、临时支撑产生周期振动与摆动,节点连接承受交变内力,螺栓预紧力衰减、焊缝疲劳裂纹与构件局部屈曲等问题更易出现。潮位变化导致浮力与支撑反力反复调整,系泊缆、锚链与钢丝绳受力角度改变,局部锚点可能出现超载或松弛,平台偏航与横移概率增大。水流叠加波浪后产生不规则合力,使导向架、挂篮、模板体系等临时设施受力路径发生突变,局部构件在短时间内进入不利工况,出现倾覆、滑移或整体失稳风险。施工安全层面,平台晃动会削弱人员站立与操作稳定性,吊装摆幅放大导致构件碰撞、挤压与失控,起重臂回转受限时容易发

生吊载偏载与冲击。该类风险具有突发性特征，往往在波况快速变化或流速突增时集中显现，且事故后果呈现放大效应，可能同时损伤设备、结构与人员安全，必须将临时结构稳定性校核、连接可靠性与作业窗口控制作为关键管控点^[3]。

5 港口高桩码头施工期水动力作用的工程技术应对措施

5.1 基于水动力条件优化施工工艺与施工参数的技术措施

工程技术应对的核心在于将水动力条件转化为施工组织与参数控制的约束变量，实现“工艺选择—参数设定—动态调整”的闭环控制。沉桩工艺应根据波况与流速水平选择适配方式，在较强波浪条件下提高导向约束与定位能力，采用多点导向、桩夹具与纠偏装置组合控制桩身姿态，减少偏位累积。锤击参数与贯入控制需结合水动力扰动程度调整打击能量、击打频率与停歇节奏，避免船体升沉时冲击偏心导致桩顶损伤与弯曲放大。潮位变化较大区域应建立标高与定位基准的动态修正规则，确保测量系统、船机姿态与导向架标定保持一致，减少系统误差。对于上部构件安装、模板支设与灌注作业，应将波浪周期与平台姿态稳定性纳入作业条件判据，控制吊装幅度、吊点布置与构件临时固定方式，降低摆振与冲击。施工参数优化不应停留在静态设定层面，而应依托实时监测结果对定位、锚固张力、船机功率与作业节奏进行动态修正，使施工过程在可控水动力窗口内完成关键节点，提升施工质量稳定性与安全裕度。

5.2 针对冲刷与扰动问题的桩周防护与加固技术措施

桩周防护与加固的技术路线应以抑制局部冲刷、稳定床面形态与保持嵌固条件为目标，结合地层类型与流场特征分阶段实施。对易冲刷区域可采用抛石护底、袋装砂石、格宾网垫或柔性防冲毯等措施构建临时护面，材料粒径、厚度与铺设范围应与现场流速、波浪能量与床质抗冲能力匹配，防止发生掀翻、滚移或空鼓。对桩群密集区需考虑桩间流道加速效应，适当扩大护底覆盖范围并加强边缘压载，减少边界冲刷扩展。施工期频繁扰动会导致床面反复松动，可在关键阶段开展二次补抛与整平，保持床面高程稳定，避免嵌固深度随冲刷发展被动降低。对于软弱地基或粉砂层，必要时采用局部灌浆加固或置换垫层，提高桩周土体抗剪强度与整体性，降低孔隙水压力扰动带来的承载衰减。防护措施需与测量监控联动，通过定期测深、断面复测与桩周地形比对识别冲刷热点，实现“发现—处置—复核”闭环，确保防护效

果能够随水动力变化持续保持有效。

5.3 适应复杂水动力环境的施工装备与临时结构优化措施

装备与临时结构优化应围绕抗扰动能力、定位保持能力与结构安全储备开展，提高施工系统对水动力不确定性的容忍度。施工船舶与平台应优先配置高精度定位与抗漂移能力强的系泊系统，采用多锚点布置与分区张力控制，使平台在流、浪作用下保持方位稳定，减少偏航与横移。对关键作业平台可采用刚性更高的桩腿式或组合式支撑体系，提升抗摇摆能力，并对连接节点进行加强设计，提高疲劳抗力与可靠性。导向架、桩夹具与临时支撑构件应提高整体刚度与抗扭性能，关键部位设置限位与保险装置，避免水动力突变时出现滑移与脱扣。起重与吊装设备应配置防摆控制与缓冲装置，优化吊点布置与吊索长度，降低摆振幅度与碰撞风险。临时结构布置需兼顾流场影响，避免形成不利水流集中与涡流区，必要时通过导流构件或布置调整减弱局部冲刷。装备维护与工况校核应强化动态视角，定期复核锚链磨损、连接松弛与构件疲劳状态，确保在复杂水动力条件下仍能保持稳定的承载与运行能力，从系统层面提升施工安全与效率^[4]。

6 结语

港口高桩码头施工期处于结构体系逐步形成与外部水动力持续作用的交汇阶段，潮汐、波浪与水流等因素相互叠加，使施工安全与质量控制面临较高复杂性与不确定性。通过系统分析施工期水动力作用特征及其引发的结构、工序与环境风险，可以看出水动力条件已成为影响高桩码头施工稳定性和可靠性的关键外部约束。围绕工程实际，从施工工艺优化、桩周防护加固以及施工装备与临时结构适应性提升等方面提出的技术措施，有助于削弱不利水动力影响、降低风险累积效应。将水动力因素纳入施工全过程控制体系，有利于实现施工安全、质量与效率的协同提升，为港口高桩码头工程顺利实施提供保障。

参考文献

- [1] 温美能.港口高桩码头PHC桩成桩施工技术应用探析[J].珠江水运,2025,(13):100-102.
- [2] 高少强.高桩码头施工中的测量监理控制策略分析[J].珠江水运,2024,(20):27-29.
- [3] 韦作仪.沿海港口工程高桩码头PHC桩沉桩施工技术应用[J].珠江水运,2023,(17):96-98.
- [4] 谢华伟,黄赛花,杨斌,程永舟.码头施工过程虚拟仿真教学实验平台设计[J].实验科学与技术,2022,20(05):128-132.