

高桩码头施工期桩基冲刷防护措施研究

刘础豪

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要:为了解决高桩码头施工期桩基受复杂水文影响,冲刷严重威胁结构安全、降低承载力甚至导致失稳的问题,以监利市白螺高桩码头二期工程为例,综合运用数值模拟与物理模型试验方法,深入剖析桩基冲刷机理,创新性提出涵盖临时与永久防护的分级防护措施,研发基于智能监测的动态防护系统,融合 BIM 与物联网技术实现动态预警。实际应用中,桩基平均冲刷深度降低 60%,节约工程成本 15%。该分级防护体系及智能技术能有效应对施工期桩基冲刷风险,提升防护效率与生态效益,具备良好的实践价值与推广意义。

关键词:高桩码头;桩基冲刷;防护措施;施工期管理;智能监测

0 引言

高桩码头施工期桩基稳定性关乎工程安全。桩基沉设后至上部结构防护形成前,裸露桩基受水流、波浪共同作用,桩周土体易形成局部冲刷坑,导致桩基嵌固深度缩短、摩阻力削弱,诱发失稳风险。施工期为防护薄弱阶段,永久护底未生效,运营期防护措施因施工干扰、成本限制难以实施,抛填砂袋等临时防护效果不足,施工期高效经济防护措施是关键难题。施工期水文条件复杂,强潮、风暴潮导致流速骤变,码头及栈桥区域冲刷不可避免,需强制且及时防护,桩基施工后防护滞后将大幅提升治理成本与难度,亟需专业防护方案^[1]。为此,本研究采用“数值模拟-模型试验-工程验证”方法,以 FLOW-3D 模拟 3~5 m/s 流速下的流场与冲刷过程,通过 1:50 波浪水槽缩尺试验验证,并结合工程监测数据,揭示桩基冲刷机理,构建施工期防护技术体系。

1 桩基冲刷机理分析

1.1 冲刷影响因素

1.1.1 水动力条件

水流流速是影响桩基冲刷的关键水动力因素之一。较高的流速会增加水流对桩基周围土体的剪切力,加速土体颗粒的侵蚀和搬运。当流速达到一定程度时,会在桩前形成强大的冲击压力,在桩后产生负压区,引发水流的紊动和漩涡,加剧土体的冲刷。波浪作用同样不可忽视,波浪的周期性振荡会使桩周水体产生往复运动,与水流

共同作用,进一步破坏土体结构。潮汐的涨落则导致水位的周期性变化,使桩基周围的水流条件和受力状态不断改变,对冲刷过程产生复杂影响^[2]。在一些河口地区的高桩码头施工中,受潮水涨落影响,每天不同时段桩基冲刷速率可相差数倍。

1.1.2 地质条件

桩基所处的地质条件如泥沙粒径、土层分布等,对冲刷过程有着重要影响。较细粒径的泥沙颗粒更容易被水流带走,在相同水动力条件下,细砂质海床的冲刷速率明显高于粗砂或砾石地层。土层分布的不均匀性也会导致冲刷的差异,当桩基穿越不同土层时,由于各土层的抗冲刷能力不同,会在土层交界处形成冲刷薄弱带,更容易出现局部冲刷加剧的现象。

1.1.3 桩基结构参数

桩径和桩间距是影响桩基冲刷的重要结构参数。较大的桩径会使桩前水流受阻更明显,产生更强的局部冲刷。而桩间距过小时,会形成桩群效应,使得桩间水流流速增大,局部冲刷加剧。研究表明,当桩间距小于 5 倍桩径时,桩群内部的流速相较于单桩情况可增大 30% 以上,导致桩周冲刷深度显著增加。

1.2 数值模拟与试验设计

1.2.1 模型建立

采用 FLOW-3D 软件构建数值模型,该软件基于计算流体力学原理,能够精确模拟复杂流场。在模型中,根据实际工程参数设置桩基的几何形

状、尺寸以及桩间距等。同时,设定施工期典型的水流流速、波浪参数和潮汐变化规律等边界条件。通过模拟不同工况下的水流运动,分析流场分布特征以及桩基周围的冲刷发展过程。如在模拟流速为 4 m/s 工况时,观察到桩前水流速度急剧增大,在桩后形成明显的漩涡区域,这与实际观测到的水流现象相符。

1.2.2 试验验证

在波浪水槽中进行物理模型试验,按照 1:50 的比例制作缩尺模型,以模拟实际工程中的桩基和周围土体。试验过程中,通过调整水槽中的水流流速、波浪参数等,模拟不同的水动力条件。使用高精度的测量仪器,如激光测距仪、压力传感器等,实时测量桩周冲刷坑的形态变化。在一次模拟强波浪作用的试验中,经过数小时的冲刷,测量得到桩周冲刷坑的最大深度达到了模型桩入土深度的 20%,为深入了解冲刷过程提供了直观的数据支持。

1.3 结果分析

通过数值模拟与物理模型试验结果的对比分析发现,桩基冲刷深度与水流流速之间呈现正比例关系,随着流速的增加,冲刷深度迅速增大,如表 1 所示。

表 1 水流流速与冲刷深度关系

流速/(m·s ⁻¹)	单桩冲刷深度/m	桩群冲刷深度/m	冲刷坑半径/m
3.0	1.2	1.8	2.1
3.5	1.7	2.4	2.5
4.0	2.1	3.0	3.0
4.5	2.8	3.9	3.6
5.0	3.5	4.9	4.2

注:试验条件为砂质河床,桩径 D 为 1.0 m,桩间距为 $5D$ 。

1.4 施工期冲刷特征

在施工期,临时结构如施工平台的存在会极

大地改变局部水流形态。施工平台的桩腿和支撑结构会阻挡水流,导致水流在其周围发生绕流和紊动,使得桩基周围的水流紊乱程度加剧。与运营期相比,施工期桩周的冲刷速率可提高 40% 左右。在某高桩码头施工过程中,由于施工平台的布置不合理,导致附近桩基在一个月内的冲刷深度达到了 0.8 m,而同运营期类似条件下的桩基冲刷深度仅为 0.3 m。这充分说明施工期临时结构对桩基冲刷的影响不容忽视,必须采取针对性的防护措施。

2 防护措施体系构建

2.1 防护措施分类与适用性

1) 临时防护

临时防护措施主要应用于施工期,具有成本低、可拆卸的特点。抛石防护是较为常见的临时防护方法,通过在桩基周围抛投一定粒径和级配的石块,形成防护层,抵御水流冲刷。沙袋围堰也是常用的临时防护措施,将沙袋堆砌在桩基周围,起到阻挡水流和保护桩基的作用。

2) 半永久防护

半永久防护措施可应用于施工期至运营期的过渡阶段,具有一定的环保性。透水模板则是一种新型的防护材料,其既能让部分水流通过,缓解水流对桩基的冲击力,又能在模板内部形成过滤层,防止土体流失。

3) 永久防护

永久防护措施主要用于码头运营期,具有较高的耐久性。混凝土护坦是一种常见的永久防护结构,通过在桩基周围浇筑混凝土板,形成坚固的防护层,有效抵抗水流冲刷。防冲刷桩群则是通过在主桩基周围设置辅助桩,改变水流流态,减小主桩基周围的冲刷力。

高桩码头桩基冲刷防护类型适用性分析如表 2 所示。

表 2 高桩码头桩基冲刷防护措施分类表

防护类型	具体措施	核心材料	适用阶段	优点	缺点
临时防护	抛石防护	级配石块(0.2~0.5 m)	桩基安装期	施工快、成本低	耐久性差,需定期补抛
	沙袋围堰	编织袋+回填土	施工期	灵活易布置	易腐烂,需频繁更换
半永久防护	透水模板	高分子透水材料	施工—运营过渡期	缓解水流冲击	长期使用易堵塞,需定期清理
永久防护	混凝土护坦	C30 混凝土	运营期	耐久性强	施工复杂,成本高
	防冲刷桩群	钢筋混凝土桩	运营期	流态改良效果显著	增加桩基数量,造价提升约 20%

2.2 分级防护方案设计

2.2.1 阶段划分

根据高桩码头的施工进度，将防护措施分为 3 个阶段。在桩基安装期，由于桩基刚刚入土，稳定性较差，此时采用抛石防护与透水模板相结合的方式。抛石能够快速形成防护层，透水模板则可进一步缓解水流对桩基周围土体的冲刷，同时便于桩基的后续安装。在上部结构施工期，随着施工平台等临时结构的拆除，水流条件发生变化，此时增设防冲刷桩群，增强对桩基的防护效果。在竣工期，码头结构基本成型，采用混凝土护坦等永久防护措施，确保码头在长期运营过程中的稳定性。

2.2.2 智能决策系统

基于 BIM 模型构建智能决策系统，该系统能够集成实时水文监测数据。通过在施工现场布置的流速仪、波浪仪等监测设备，将采集到的水文数据实时传输至系统中。系统根据预设的算法和阈值，结合 BIM 模型中的桩基结构信息，实时推荐最优的防护方案。例如，当监测到水流流速 $\geq 4\text{ m/s}$ 时，系统自动发出警报，并推荐启动抛石防护措施，同时根据现场实际情况调整抛石的粒径和数量。这种智能化的决策方式能够大大提高防护措施的针对性和有效性。

2.3 创新技术应用

2.3.1 物联网监测

在桩基周围布设压力传感器与声呐设备，构建物联网监测系统。压力传感器能够实时监测桩基周围土体的压力变化，通过分析压力数据，可间接判断冲刷情况。声呐设备则可直接测量桩周冲刷坑的深度和范围。这些传感器将采集到的数据通过无线传输模块实时上传至云端平台，可通过手机、计算机等终端设备随时随地查看监测数据^[9]。在某高桩码头施工现场，通过物联网监测系统发现一处桩基周围的冲刷深度在短时间内迅速增加，通过及时采取加固措施，避免了安全事故的发生。

2.3.2 环保材料

采用可降解植生袋替代传统沙袋作为临时防护材料。可降解植生袋由可降解材料制成，内部填充植物种子和营养土。在使用过程中，随着时间推移，植生袋逐渐降解，植物种子发芽生长，不仅起到了临时防护的作用，还能在后期改善周

边生态环境。与传统沙袋相比，可降解植生袋减少了对环境的污染，降低了后期清理成本。在某码头施工项目中，使用可降解植生袋后，周边区域的植被覆盖率在 3 个月内达到了 30%，生态效益显著。

3 工程应用

3.1 工程概况

以白螺高桩码头二期工程为应用案例，该码头位于长江流域区段，桩基直径为 1.0 m，水深在 15~20 m 之间，设计流速为 4.2 m/s。工程施工难点众多，其中大风季频繁来袭，带来的强大波浪荷载对桩基冲刷影响巨大。同时，该区域的海床为砂质，土体抗冲刷能力较弱，容易在水流作用下发生冲刷。

3.2 防护措施实施

在施工阶段，桩基安装期采用抛石与透水模板的组合防护措施。抛石粒径控制在 0.2~0.5 m，按照一定的级配进行抛投，形成厚度为 1.5 m 的防护层。透水模板采用高强度、耐冲刷的材料制作，安装在抛石层外侧，有效减少水流对土体的直接冲刷。在上部结构施工期，增设防冲刷桩群，防冲刷桩直径为 1.2 m，桩间距为 3 m，均匀布置在主桩基周围。同时，在施工现场部署了 12 组传感器，包括压力传感器、声呐设备以及流速仪等，每 4 h 将监测数据上传至云端平台，以便实时掌握桩基周围的冲刷情况。

3.3 效果分析

3.3.1 冲刷控制

通过实施上述防护措施，冲刷控制效果显著，监测数据见表 3。监测数据表明分级防护体系能够有效应对施工期复杂的水流条件，显著减少桩基冲刷深度，保障桩基的稳定性。

表 3 白螺码头防护措施监测数据

项目	未防护预测值/m	实际监测值/m	冲刷深度降幅/%
主桩区 P12	3.200	1.300	59.4
栈桥区 Z05	2.800	1.100	60.7
过渡区 T08	2.500	1.000	60.0
平均值	2.833	1.133	60.0

3.3.2 经济效益

防护成本占项目总造价的比例由最初预计的 8%降至 6.8%。通过采用合理的防护措施，减少

了冲刷导致的桩基加固、修复等额外费用。同时由于防护措施有效控制了冲刷,避免了冲刷导致的工期延误。项目工期缩短了 10 d,节约了大量的人工、设备租赁等费用,综合计算,节约工程成本约 15%。

3.3.3 生态效益

采用可降解植生袋等环保材料取得了良好效果。与传统防护材料相比,减少了抛石量约 30%,降低了对周边海域生态环境的影响。同时,可降解植生袋区域的植被覆盖率提升了 40%,为海洋生物提供了可栖息和繁殖场所,改善了周边生态环境。

4 结语

通过深入分析高桩码头施工期桩基冲刷机理,构建了一套可有效应对施工期动态冲刷风险的分级防护体系,同时结合物联网监测、BIM 技术及

环保材料的应用,显著提升了施工期桩基冲刷防护的管理效率与生态友好性,且在实际工程应用中取得了良好的冲刷控制效果、经济效益与生态效益。尽管研究已取得一定成果,但仍存在待深入探索的问题,例如极端气候条件下现有防护措施的可可靠性需进一步验证,未来需开展更多针对极端工况的模拟与试验研究以优化防护措施设计。此外,为更好地推广相关防护措施,建议制定标准化设计流程,明确不同水文地质条件下防护措施的选择及设计参数,提升工程实践的可操作性。

参考文献:

- [1] 纪彬,张新华.高桩码头桩基冲刷的加固措施[J].珠江水运,2020(13):42-43.
- [2] 王丽,莫秋荣.江苏 LNG 项目接收站配套码头及栈桥桩基冲刷防护设计[J].中国港湾建设,2014(8):27-29.
- [3] 郑晓,韩康,苏建勇.新型城镇化背景下建筑结构安全性评估技术的研究[J].新型城镇化,2025(5):73-76.