

深水环境下沉管灌注桩施工关键控制参数分析

王少华

湖北三峡职业技术学院, 湖北 宜昌 443000

[摘要]沉管灌注桩在深水环境里施工时,水流扰动、桩端定位精度、导管密封性等因素会对其产生影响,导致施工控制难度不小,本文依据工程实践,对沉管灌注桩施工中的关键控制参数(如导管插入深度、水下混凝土坍落度、导管提拔速率与换浆频率等)加以系统分析,结合典型深水施工环境下的技术控制要点,就参数设置优化与过程管理给出建议,研究结果能给深水基础施工以科学指导,提高成桩质量与施工安全性,推动水下基础施工技术朝着规范化和精细化发展。

[关键词]深水环境;沉管灌注桩;施工参数;导管控制;混凝土浇筑

DOI: 10.33142/aem.v7i5.16753

中图分类号: TU473.11

文献标识码: A

Analysis of Key Control Parameters for Construction of Immersed Pile in Deep Water Environment

WANG Shaohua

Hubei Three Gorges Polytechnic, Yichang, Hubei, 443000, China

Abstract: When constructing immersed tube cast-in-place piles in deep water environments, factors such as water flow disturbance, pile end positioning accuracy, and pipe sealing can have an impact, making construction control difficult. Based on engineering practice, this article systematically analyzes the key control parameters in the construction of immersed tube cast-in-place piles, such as pipe insertion depth, underwater concrete slump, pipe lifting rate, and slurry replacement frequency. Combined with the technical control points in typical deep water construction environments, suggestions are given for parameter optimization and process management. The research results can provide scientific guidance for deep water foundation construction, improve pile quality and construction safety, and promote the standardized and refined development of underwater foundation construction technology.

Keywords: deep water environment; immersed pile; construction parameters; catheter control; concreting

引言

大型桥梁与港口工程不断发展,沉管灌注桩在深水基础建设里的应用也越来越广泛,由于深水环境对施工工艺要求更高,像导管插设、水下混凝土浇筑这些环节,施工参数控制对成桩质量和施工效率的保证特别关键,而传统浅水或者陆域的施工参数已经很难适应复杂的水下环境,研究针对性的参数优化技术就很有必要,本文针对深水环境下的技术难点,梳理施工过程中的核心控制环节,提出识别关键参数和优化路径的方法,给后续施工提供可行的参考。

1 导管系统控制技术

1.1 导管插入深度控制方法

沉管灌注桩在深水环境下施工时导管插入深度控制是关键工艺指标,导管插入浅了导管口可能悬空使混凝土送不到桩底,容易出现离析、夹泥甚至封底失败等严重质量问题,插入深了导管回拔阻力大增导致施工效率降低且设备卡阻也可能发生从而影响施工安全和进度,要综合沉渣厚度、导管总长、混凝土柱高度等参数科学设定导管插入深度,一般0.8到1.2米比较合适,施工时要配备高精度距离传感器实时监测导管底端和桩底相对位置以保证控制精度,在水流扰动厉害的区域还要结合定位系统和沉

降观测装置防止导管上浮或偏移以保障水下混凝土稳定连续浇筑,提高桩基成型质量和施工可靠性,该技术对深水复杂环境下的沉管桩施工保障意义重大。

1.2 导管提拔速率优化

在混凝土浇筑的时候,导管的提拔速率是影响水下灌注连续性和桩身质量的关键参数,提拔太快导管口容易脱离混凝土柱,会使混凝土断流、夹泥或者水漂混入,严重时形成断桩,提拔慢了导管内压力可能上升、埋深过大,会使导管受力不正常,甚至造成混凝土堆积、堵管,影响浇筑效率和密实度,施工时要综合混凝土浇筑速率、导管内外压差、导管口位置和灌注段深度等因素来调控提拔速率,一般控制在每分钟3~6cm的范围,要保证提拔之前导管内混凝土柱高度达到最小埋深要求,否则就会脱空,要提高精度和稳定性,可用自动化监测系统动态采集和分析导管高度、混凝土压力、灌注速度等,再结合实时控制技术,智能调整导管提拔节奏,让浇筑过程均匀连续,提高桩身整体密实性和结构完整性。

1.3 导管密封性能监测

保障水下混凝土浇筑质量与导管系统稳定运行的关键因素是导管密封性能,在深水高压环境下这一点更加重要,导管多次安装拆卸时接头、法兰部位很容易松动或者

老化从而出现漏浆、进水等问题,进而引发混凝土污染、离析、夹杂泥水甚至外溢,严重影响成桩质量,要确保密封性能就得采用具有优良耐压性、防腐性与抗剪切能力的高强橡胶密封圈,导管安装好后需采用正压密封试验、接口渗漏检测等方法逐一检验密封效果以杜绝隐患,施工时要配置导管内压实时监测系统与视频观测设备来动态跟踪导管运行状况,一旦监测到内压突然下降或者异常泄压现象就得马上中止灌注并启动应急修复程序,采用具有智能识别和反馈功能、能自动感知密封状态并且触发预警的导管快速连接装置可提升整体密封可靠性,使导管在复杂水下环境中持续稳定运行,保障混凝土灌注的连续性与成桩质量。

2 水下混凝土施工控制

2.1 混凝土配合比适应性设计

混凝土用于水下施工其性能须非常好,要有很强的抗离析性、不错的流动性以及很棒的抗水漂能力,因此把混凝土配合比设计好对保证浇筑质量很关键。骨料要选粒径合适、级配连续的,中砂和5~25mm粒径的碎石就较好,可使骨料间空隙小、黏结性好,并且要适量加些黏性材料,如粉煤灰或者膨润土,以使混凝土更稳定、抗分散能力更强。水胶比要严格控制,在0.40~0.45之间,这样能兼顾混凝土的强度、工作性和抗水性能,在强度达标的情况下,因深水环境下输送距离和时间都长,要延长混凝土的初凝时间,加缓凝型高性能减水剂即可,但掺量要在产品说明书推荐范围内,否则凝结时间太短或者性能出问题就不好了。为了让混凝土在导管法灌注时顺利填充,坍落度要设计成大于180mm,如此混凝土自流能力和密实性才足够。水下浇筑时孔隙率大结构强度会降低,加微膨胀剂可让体积更稳定。配合使用水下专用抗分散剂,能使混凝土在导管出口脱离时成型更稳定,有效控制离析、漂洗和泥水混杂等问题,保证浇筑质量和结构安全。

2.2 浇筑连续性与换浆控制

水下灌注桩施工时要防止断桩、夹泥、空洞等质量缺陷,关键是确保混凝土连续浇筑,一般混凝土浇筑中断不能超30min,若因特殊情况中断超时就得换浆以防止泥浆残留影响桩基成型质量。施工前应组织好混凝土运输和供应流程,使搅拌站生产能力和泵送设备输送效率合理匹配,避免因供料不及时导致施工中断。换浆时首盘混凝土要有明显标识,如改变颜色或加无害染料等,以便在导管底部观察换浆效果,换浆长度计算要考虑导管埋深和导管内混凝土柱高度,且换浆体积通常不小于导管容积的2倍以彻底排出泥浆,可通过观察导管出口处混凝土的颜色、流速和浊度变化等指标判断换浆是否完成,一旦确定混凝土稳定排出就要马上正常灌注并连续高效浇筑,防止因换浆不足或浇筑中断使桩体出现夹泥、离析或密实性不足等质量问题。

2.3 灌注量与水下体积核算

水下混凝土灌注量的精确核算是控制施工成本、保障成桩质量很重要的一环,要综合考虑孔底沉渣厚度、钢筋笼体积、桩径扩散系数、导管下沉系数等因素来计算灌注量,这样能避免混凝土因漏算出现不足或者浪费的情况,一般用公式 $V=\pi r^2 h+V_{\text{沉渣修正}}+V_{\text{损耗率}}$ 来精算(这里 V 是灌注体积, r 为桩半径, h 是桩长,损耗率通常取5%~8%),灌注的时候得建立和时间同步的混凝土累计灌注曲线并与理论灌注线作对比以实时分析偏差情况,实际灌注曲线要是陡升则导管脱空或者混凝土跑浆可能就存在,曲线过缓的话孔内空间可能就没被混凝土充满,施工单位得配备电子灌注记录仪来把混凝土灌注时间、灌注量、导管提拔高度等参数全程记录下来以形成数据报告方便事后复查和质量追踪,遇到地层有溶洞、夹层等特殊情况时灌注安全系数还得适当提高以确保混凝土充盈到设计标高之上不少于500mm来弥补不规则空间填充的误差。

3 定位与导向系统精度控制

3.1 桩位偏差控制

沉管灌注桩在深水环境施工时,较强水流扰动、浮吊平台晃动、水下可视性差等不稳定因素限制着施工,控制桩位偏差成了保障施工质量的关键,桩位一旦偏移,不但影响后续结构精准对接,工程整体功能还可能失效,严重的甚至要返工,造成巨大经济损失。施工前,需根据详实水文资料、地质条件和现场实测数据制定科学详尽的测量放样方案,布设稳定可靠的水上水下控制基准点,RTK高精度差分定位系统和激光全站仪联合这种常用定位测量技术能实时复测和动态校正桩位,使桩中心点与设计位置误差控制在 $\pm 10\text{cm}$ 以内。浮吊吊装作业时,可用多点对称拉缆系统控制水平位置,减少横向晃动影响,配实时水流监测系统,根据水流变化动态修正吊装角度和位置,若要进一步提高定位精度,引入多波束声呐扫描和遥控潜器摄像系统,连续观测导管或桩靴下沉过程,及时发现纠正水平漂移,实现桩位全过程的精准控制与闭环监控。

3.2 垂直度与桩轴稳定性控制

桩体受力均衡性与结构协调性的核心衡量指标是桩身垂直度,桩基承载能力以及上部结构稳定性都与之直接相关,在承受偏心荷载、抗倾覆荷载或者是密集群桩布置的情况下对其控制精度更关键。深水沉管灌注桩施工时,要想有效控制垂直度需在桩靴上方、导管连接区域设置高精度刚性导向架且导向装置制造和安装精度要优于设计允许偏差以形成稳定导正系统,引导沉管按设计轴线平稳下沉。沉桩时要靠配置倾角传感器或者桩靴姿态记录仪实时监测导管轴线姿态的全过程,保证桩身在长度方向的偏斜度在1/100以内。导管深入过程中因水流扰动或者地层软硬不均等桩体可能偏移,这时要根据实时监测数据适时微调浮吊设备的方位和姿态来修正桩体轴线,在桩靴和沉

管外围设置限位环结构也可抑制水平摆动趋势,增强导向刚性和桩体稳定性。水下作业完成后为验证施工精度要用声波成像垂直度检测技术或者小角度斜钻法复测桩身垂直度,全面评估成桩质量以保证桩基性能达到结构设计要求。

3.3 地层适应性探测技术

沉管灌注桩的成桩质量受不同地质条件影响显著,像卵石层、淤泥层、夹砂层这种复杂地质区域尤其如此,若不预先掌握地层特性,桩端拒沉、导管阻塞或者混凝土跑浆等问题很容易出现,施工前要用高密度浅层地质雷达、静力触探、地震波探测等技术手段精准探测预定桩位的地层剖面,找出软硬交界位置、孤石分布以及水下异常结构,施工时要配备动态沉阻监测系统,记录导管或者桩靴的下沉阻力曲线,在阻力突然增大或者减小时,要及时判断是否进入异常地层并采取注浆密实、换管钻进或者增加灌注量等应急处理措施,还可与超前地质预报系统结合起来,实时掌握前方地层分布的变化趋势以增强施工应变能力,实际浇筑时根据回弹模量、导管沉降速率和浇筑流速的联动分析能反向验证地层响应,进一步提高地质探测结果的精度和指导价值。

4 安全与质量全过程保障措施

4.1 施工风险识别与预警机制

沉管灌注桩在深水环境下施工,潮汐变化、突发水流扰动、设备运行不稳定和材料运输链条中断等众多动态因素会显著增加施工质量和安全风险,要想全过程、系统化地控制风险就得建立完善的施工风险识别与预警管理机制。施工准备阶段要全面、系统地开展危险源识别工作,对于导管脱空、导管密封失效、桩位偏移、混凝土中断、沉管卡阻这些典型风险要进行分级分类,搞清楚发生条件、可能后果和影响范围并制定有针对性的预控措施放入技术交底和现场管理体系,而且要引入智能化施工监控系统,实时采集和分析导管插入深度、混凝土灌注速率、水下流速、桩靴定位、混凝土温度与坍塌度等关键参数构建基于大数据的施工状态动态评估模型,当监测数据超限或者趋势异常时系统自动发出多级预警信号让施工人员及时调整工况避开潜在风险。项目部还得制定系统化的突发事件应急预案,明确各类紧急情况的响应流程、技术措施和责任分工并强化演练机制,确保极端天气、设备故障、人员误操作等突发事件发生时能快速有效应对以最大程度降低工程风险和经济损失。

4.2 水下视频监控与声呐检测技术

水下施工过程不透明且施工状态难以直观观察,这是影响施工可控性的关键难点,得依靠先进的水下视频监控和声呐成像技术来增强实时可视化和对隐蔽工况的感知能力。水下视频监控系统一般由高清防水摄像头、低光成像设备和远程控制终端构成,装在导管出口、桩靴或者导向架部位,用于实时监视混凝土出料状态、换浆过程以及

导管运动姿态,有视频记录功能配合就能对施工全过程进行回溯审查。声呐检测技术适合水下能见度差或者有结构遮挡的区域,用多波束或者侧扫声呐对桩体沉设轨迹、桩底充盈状态、孔壁完整性等进行非接触式检测,声呐图像能进行三维建模分析,识别桩周水体扰动、底部沉积物堆积等异常情况,施工单位把视频和声呐结果相结合就能实时判断是否存在管口悬空、局部沉桩偏差、封底不实等风险并及时补救,从而大大提高水下施工可控性和质量保障水平。

4.3 成桩后质量验收技术

保障工程安全与性能,成桩完成后的质量验收是关键终端环节,得用科学、系统的检测手段全面评估桩体结构完整性与施工质量,常规检测有超声波透射检测、低应变反射波检测、桩身声波成像等技术。灌注桩内部缺陷定位与长度测量适用超声波法,靠预埋声测管传输超声波来判断桩身均匀性,反射波法能快速检测桩体整体长度和桩端反射波形,识别断桩或夹层问题。特深或特殊工况桩型,可补以钻芯取样验证桩芯强度与密实性,水下环境里桩底密实度检验,声呐扫描和水下地质雷达协同操作可确保桩底封闭效果达设计要求。质量验收时,也应综合施工过程参数(像灌注曲线、混凝土供应记录、导管提拔轨迹等)判定,不能只看结果检验不顾过程控制,形成完整的桩基施工质量评估报告,这是竣工验收和后续结构连接的重要依据。

5 结语

沉管灌注桩在深水环境下施工会涉及导管系统、水下混凝土、定位导向以及质量控制等诸多复杂环节,这对施工技术要求颇高且风险因素不少,从关键控制参数入手,本文系统剖析了导管操作、水下混凝土浇筑、定位精度控制以及全过程安全质量保障措施并给出具有可操作性的控制策略,实践显示,精准控制参数、强化过程监测与应急响应机制才能确保成桩质量和施工安全,为复杂水域基础工程提供有力的技术支撑与质量保障。

基金项目:本项目资金来源于《长阳深水桩基础施工技术研究》。

[参考文献]

- [1]周相荣.深水管节沉放施工水下可更换穿舱密封系统设计及应用[J].中国港湾建设,2024,44(3):66-70.
- [2]李斌,高潮,张嘉莹.港珠澳大桥沉管隧道瞬时沉降规律分析[J].岩土工程学报,2021,43(2):263-266.
- [3]姚一帆,廖曾平,张鹏,郑文进.深中通道深水区管节基槽回淤特征分析[J].中国港湾建设,2023,43(3):54-57.
- [4]中交第一航务工程局有限公司.打造外海深水沉管隧道施工旗舰成套装备群[J].中国设备工程,2020(1):192-199.
- [5]陶宗恒,杨秀武.深水沉管隧道基槽精细化施工及监测技术[J].中国港湾建设,2020,40(5):44-48.

作者简介:王少华(1983—),女,硕士研究生,讲师,主要从事路桥工程专业教学。