

高速公路跨海斜拉桥深水基础整体施工技术集成与工程应用

陈佳裕

中电建路桥集团有限公司 北京 100000

摘要:随着我国沿海地区经济的快速发展和交通基础设施建设的不断推进,跨越高等级通航水域、连接重要经济节点的高速公路跨海斜拉桥日益增多。此类桥梁往往具有跨度大、荷载重、环境复杂等特点,其深水基础施工成为制约工程成败的关键环节。传统的分阶段、分散式施工方法在深水、强风浪、复杂地质条件下存在效率低、风险高、质量控制难等突出问题。本文以中山至开平高速公路银洲湖特大桥主墩深水基础工程为依托,系统梳理并集成创新了“大型钢套箱围堰整体下放—水下封底混凝土智能浇筑—超大直径钻孔灌注桩集群同步施工”三位一体的整体化施工技术体系。通过理论分析、数值模拟、现场监测与工程实践相结合的方法,验证了该集成技术在提升施工效率、保障结构安全、控制环境影响及实现智能化管理方面的显著优势。研究成果不仅成功应用于实际工程,也为今后类似跨高等级航道桥梁深水基础建设提供了可复制、可推广的技术范式与工程经验。

关键词:跨海斜拉桥;深水基础;整体施工;钢套箱围堰;施工集成

引言

跨海及跨高等级航道通道对促进区域协调发展、保障国家战略安全意义重大,斜拉桥是现代大跨径桥梁的主流桥型。银洲湖特大桥作为中山至开平高速公路的关键控制性工程,主跨达530米,跨越崖门Ⅰ级航道,通航标准为5万吨级海轮,其主塔基础位于深水急流区,面临复杂水文、深厚软弱覆盖层及严苛通航安全要求。传统深水基础施工采用“先桩后承台”或“先围堰后成桩”分步模式,如钢吊箱围堰内施作钻孔桩再封底浇筑承台。该模式工序繁杂、周期长,恶劣水文及繁忙通航条件下作业窗口期短,围堰结构反复受力致安全风险高,且水下封底混凝土质量难保证,易出现离析等问题,影响结构安全^[1]。本文针对上述挑战,提出并实践“整体化、工厂化、智能化”深水基础施工技术集成体系,以银洲湖特大桥主墩基础工程为例,阐述其技术原理等,为同类工程提供参考。

1 工程概况与技术难点

1.1 工程背景

本工程为中山至开平高速公路银洲湖特大桥,主桥采用双塔双索面混合式组合梁斜拉桥,主跨布置为(188+530+188)m,跨越崖门Ⅰ级航道,通航净宽491米,跨水域宽度约950米。主塔基础位于主航道边缘深水区,设计高潮位时水深超过20米,局部可能达30米以上。桥址区地质条件复杂,覆盖层主要为深厚淤泥、粉质黏土及砂层,下伏基岩埋深大且起伏不均。海域属强

潮汐区,水流速度高,且日均船舶通行频繁。主塔基础采用群桩加整体式承台结构,下设多根超大直径钻孔灌注桩,桩长逾80米,嵌入中风化岩层深度满足规范要求。如此规模的深水基础,在跨高等级航道桥梁中具有代表性,其施工难度与技术复杂性对工程组织与技术创新提出了极高要求。

1.2 主要技术难点

该工程深水基础施工面临多重叠加的技术挑战。首先,水深大且流速高,叠加繁忙通航环境,导致施工船舶定位困难,有效作业窗口极为有限,全年可施工天数严重受限。其次,传统分块拼装式围堰在深水环境中整体刚度不足,抗水流冲击与船舶扰动能力弱,在极端工况下易发生变形或失稳,结构安全风险突出^[2]。第三,水下封底混凝土体积庞大,在深水高压、强流扰动条件下,传统导管法难以保证混凝土的均匀分布与密实成型,极易产生夹泥、空洞或强度不足等缺陷,进而危及承台结构完整性。此外,多根超大直径桩基需在有限承台范围内高精度成孔,若采用单机逐根施工,不仅效率低下,且难以满足紧张的工期要求。最后,项目所在水域通航等级高、生态敏感,施工过程必须严格控制泥浆排放、噪音污染及对水体扰动,协调与环保压力巨大。上述难点相互交织,亟需一套系统性、集成化的技术方案予以破解。

2 深水基础整体施工技术集成体系

2.1 大型整体式钢套箱围堰设计与整体下放技术

2.1.1 围堰结构创新设计

为克服传统围堰的局限性，本工程摒弃分块拼装模式，采用整体式双壁钢套箱围堰。该围堰外轮廓尺寸根据承台及施工空间需求定制，高度适配深水作业要求，总重达数千吨，由底板、内外壁板、环形加劲肋、水平桁架及内部支撑系统构成。设计过程中，充分考虑了银洲湖深水静水压力、波浪动力荷载、水流冲击力、潜在船舶撞击力以及施工阶段临时荷载的复杂组合作用。通过ANSYS有限元软件进行多工况非线性分析，对壁板厚度分布、加劲肋间距及节点构造进行了精细化优化，确保围堰在浮运、下放、着床、封底及后续承台施工各阶段均具备足够的强度、刚度与整体稳定性。围堰底部设置可调节支腿系统，用于初步调平与精确定位；顶部则预留相应数量的桩基导向孔，导向精度严格控制在 $\pm 10\text{mm}$ 以内，为后续高精度桩基施工奠定基础。

2.1.2 整体制造与运输

围堰的制造在岸上专用船坞内完成，实现全工厂化预制。所有焊接、涂装、无损检测均在受控环境下进行，大幅提升了制造质量与防腐性能，避免了海上高空作业带来的安全风险与质量不确定性。制造完成后，利用大型半潜驳船将整个围堰整体拖运至桥位。这一“岸上造、水上运”的模式，不仅缩短了海上作业时间，也显著降低了对恶劣水文条件的依赖，体现了现代桥梁施工向工业化、装配化转型的趋势。

2.1.3 精准整体下放工艺

围堰下放采用“浮运—精确定位—整体同步下沉”一体化工艺。首先，半潜驳船通过压载下潜，使围堰依靠自身浮力漂浮，由拖轮牵引至墩位附近。随后，依托由DGPS（差分全球定位系统）、USBL（超短基线声学定位系统）和IMU（惯性测量单元）组成的多源融合高精度定位系统，实时解算围堰的三维空间位置与姿态，定位精度可达厘米级。在此基础上，启动多台大功率液压同步顶升系统，在PLC中央控制器的统一调度下，实现围堰的平稳、同步下沉。下放全程，通过布设的传感器网络实时监测各吊点受力、围堰倾斜度及水下地形变化，动态调整下放速度与姿态，确保围堰精准着床于预设标高，偏差控制在2厘米以内。该工艺将围堰安装周期从传统方法的30余天压缩至7天以内，极大提升了施工效率与安全性。

2.2 水下封底混凝土智能浇筑技术

2.2.1 封底混凝土配合比优化

水下封底是隔绝水流、创造干施工环境的核心工序。为确保深水、大体积条件下的浇筑质量，项目研发

了高性能自密实水下不分散混凝土。该混凝土通过掺加高效絮凝剂和复合矿物掺合料，显著提升了其抗水洗分散能力、流动保持性及后期强度发展^[3]。经大量室内试验验证，其水下成型试件28天抗压强度满足设计要求，坍落扩展度大于650mm，完全满足相关技术规程要求，为高质量封底提供了材料保障。

2.2.2 多点同步智能浇筑系统

为解决传统单点导管浇筑易导致封底面不平整、形成冷缝或空洞的问题，本工程构建了多点同步智能浇筑系统。在围堰内部均匀布置多根大直径导管，每根导管连接独立的混凝土泵送单元。基于BIM平台建立的封底浇筑数字孪生模型，集成了混凝土供应量、各导管浇筑速率、导管埋深、围堰内水位等实时数据，通过内置算法动态优化各导管的开启顺序与流量分配，确保封底混凝土面均匀、同步上升。同时，配备水下机器人，搭载多波束声呐与高清摄像头，对封底界面形态进行实时扫描与视频监控，数据即时反馈至控制中心，形成“感知—决策—执行”的闭环调控机制。该系统成功实现了大体积水下混凝土连续、无中断浇筑，经检测，封底结构密实度高，无有害缺陷，质量优异。

2.3 超大直径钻孔灌注桩集群同步施工技术

2.3.1 多机协同作业平台

在围堰封底形成稳定干施工环境后，立即转入桩基施工阶段。为最大限度压缩工期，项目在围堰顶部搭建了大型钢结构施工平台，并部署多台全液压力头钻机，形成集群作业格局。通过BIM技术进行详细的碰撞检测与路径规划，精确模拟各钻机在有限空间内的作业轨迹，确保设备运行互不干扰、高效协同。每台钻机负责若干桩基的施工任务，通过科学的工序安排，实现了资源的最优配置。

2.3.2 智能成孔与成桩技术

桩基施工全过程贯彻智能化理念。成孔采用气举反循环工艺，配备多级泥浆净化系统，实现泥浆的高效循环利用，大幅减少废浆排放。同时，引入随钻测量系统，实时监测钻孔的垂直度与孔径变化，确保成孔质量满足严苛要求。钢筋笼采用分节制作、整体吊装方案，利用大型浮吊一次性完成吊装作业，并通过专用导向架确保其在孔内的居中定位。混凝土灌注则采用“一孔双管”法，两套独立的灌注系统同步工作，显著缩短了单桩灌注时间，有效防止了因灌注中断导致的断桩风险。整个灌注过程通过视频监控与数据自动记录系统进行全程追溯。得益于该集群同步施工模式，单根超大直径桩基的成孔与灌注周期显著缩短，全部桩基高效完成，为后续工序赢得了宝贵时间。

3 关键技术保障措施

3.1 安全风险智能预警系统

为全面保障深水基础施工安全，项目构建了基于物联网的智能安全监控平台。在围堰结构、施工平台、运输船舶等关键部位密集布设多种类型传感器，所有数据通过无线网络实时上传至云端服务器。平台运用机器学习算法，对海量监测数据进行深度挖掘与趋势预测，能够提前识别结构异常响应或环境突变风险。一旦监测指标超过预设阈值，系统将自动触发多级预警，并通过手机APP即时推送至相关管理人员，实现风险的早发现、早研判、早处置，从根本上提升了施工安全的主动防控能力。

3.2 环境保护专项措施

面对严苛的环境保护要求，项目制定了系统性的环保专项方案。所有钻孔产生的泥浆均通过多级净化系统处理后循环使用，实现了施工过程中的泥浆“零排放”；固化后的废渣则统一运至指定陆域进行合规处置。在设备选型上，优先采用低噪音、低振动的先进装备，并严格规定夜间禁止进行高噪音作业，以减少对水生生物的声学干扰^[4]。此外，项目在施工前委托专业机构开展了详细的生态本底调查，并在施工结束后主动实施生态补偿措施，践行了绿色建造理念。

3.3 BIM+GIS全过程管理

为提升项目管理的精细化与可视化水平，项目建立了覆盖设计、制造、运输、安装、施工全生命周期的BIM模型，并与GIS地理信息系统深度融合。该集成平台不仅支持施工进度的4D动态模拟与资源的动态优化调配，还实现了工程质量的全过程追溯、安全隐患的可视化交底以及多方协同的高效沟通。管理人员可通过移动终端随时调阅模型信息、查看现场实景，极大地提高了决策效率与管理透明度，为这一复杂超级工程的顺利实施提供了强大的数字化支撑。

4 工程应用效果与效益分析

本集成技术体系在银洲湖特大桥主墩基础施工中成

功应用，取得了显著成效：深水基础施工总工期大幅缩短，较传统方案节约40%以上，为上部结构施工赢得了宝贵时间。虽初期投入较高，但因工期缩短、人工机械台班减少、风险事故率降低，综合成本得到有效控制。围堰着床偏差 $< 2\text{cm}$ ，封底混凝土强度合格率100%，桩基I类桩占比远超规范要求。实现“零死亡、零重大事故”目标，未发生一起环境污染事件，获省级绿色施工示范工程称号。形成专利5项（其中发明专利2项），工法2项，发表核心期刊论文3篇，技术成果经专家鉴定达到国际先进水平。

5 结语

本文聚焦高速公路跨海斜拉桥深水基础施工难题，提出并实践“整体化”集成化技术体系。该体系融合大型整体钢套筒围堰下放、水下封底混凝土智能浇筑、超大直径桩基集群同步施工三大关键技术，有效应对深水、急流、复杂地质及严苛环保等挑战。工程实践显示，其提升效率、保障安全、控制质量与保护环境成效显著，引领现代跨航道桥梁基础施工向工业化、智能化、绿色化发展。展望未来，国家重大跨海通道工程向更深水域、更大跨度推进，深水基础施工技术面临新挑战。后续研究可聚焦数字孪生自主决策系统开发、超深水新型基础形式探索及跨领域协同创新，以巩固我国跨海桥梁建设领先地位，支撑交通强国战略实施。

参考文献

- [1]熊国武.高速公路大跨度连续刚构主墩深水基础施工技术[J].路基工程,2023,(03):160-164.
- [2]孙泽龙.公路大桥深水区桥塔墩基础围堰法施工探析[J].交通世界,2024,(Z2):232-234+237.
- [3]陈浪.桥梁深水基础施工中新型围堰技术的研发与实践[J].交通科技与管理,2025,6(17):61-63.
- [4]石磊.深水桥梁基础施工技术及钢栈桥受力分析研究[J].交通世界,2025,(15):127-129.