

深水基础围堰施工关键技术及变形控制研究

黄志伟

广东南力工程建设管理有限公司 广东 佛山 528000

摘要：深水基础围堰是跨江跨海桥梁及大型水利工程建设的关键临时结构，其施工质量与变形控制直接影响主体结构安全。本文系统分析了深水围堰的主要结构形式及其受力变形机理，从钢板桩围堰、钢吊箱围堰、双壁钢围堰三类典型结构入手，阐述了围堰设计、拼装、下沉、封底等关键施工技术。针对围堰变形问题，构建了涵盖地质勘察、结构优化、下沉控制、封底质量及监测预警的全过程变形控制体系。精准的地质参数获取、合理的结构刚度匹配、均衡的下沉姿态控制及高质量的封底施工是控制围堰变形的核心要素。

关键词：深水基础；围堰施工；变形控制；钢板桩围堰；水下封底

引言：随着我国交通基础设施向江河湖海延伸，深水桥梁及水利工程建设规模不断扩大，深水基础施工技术面临严峻挑战。围堰作为深水基础施工的临时挡水结构，承担着创造干地施工条件、保障基坑稳定的重要功能。深水环境下，围堰承受巨大的水压力、土压力及波浪水流冲击，施工过程中结构变形控制难度极大，一旦变形失控可能导致围堰失稳、基坑进水甚至主体结构偏位等严重后果。本文旨在系统研究深水围堰关键施工技术及变形控制措施，为类似工程提供技术参考。

1 深水基础围堰结构类型及受力机理

1.1 主要围堰结构形式

深水基础围堰根据结构形式及适用水深可分为三类。钢板桩围堰由单根钢板桩锁口连接形成封闭围护结构，结构轻便、施工速度快、可重复使用，适用于水深 10~15m、地质条件较软的河床。钢吊箱围堰是悬挂在钻孔桩钢护筒上的箱式结构，围堰随水位变化可上下浮动，适用于水深 15~25m、流速较大的水域，常用于高桩承台施工。双壁钢围堰由双层钢板壁加隔舱混凝土构成，整体刚度大、抗水压能力强，适用于水深 30m 以上、水流湍急的深水基础，是大型跨江跨海桥梁的首选方案。三类围堰各有适用工况，选型需综合水深、流速、地质、工期及经济性等因素确定。

1.2 围堰受力机理分析

深水围堰在施工过程中承受复杂荷载组合。水压力是最主要的荷载，随水深增加呈线性增长，围堰侧壁承受巨大的向内侧压力。土压力包括主动土压力与被动土压力，围堰下沉阶段外侧主动土压力促使围堰向内变形，封底后内侧被动土压力起抵抗作用。波浪水流冲击

力在流速较大水域不可忽视，易引发围堰振动和局部应力集中。此外，围堰自重、施工荷载、温度应力及浮力也影响结构受力。围堰受力机理的核心在于各阶段荷载转化：下沉阶段以侧壁土水压力为主，封底后底部水压力转化为封底混凝土的向上顶托力，抽水后围堰转为承受外侧水土压力组合。理解这一转化规律是制定变形控制措施的理论基础^[1]。

1.3 围堰变形特征及影响因素

围堰变形主要表现为侧向水平位移、竖向沉降及局部屈曲三类。水平位移沿深度呈“弓形”分布，最大位移通常发生在水面至河床之间；竖向沉降主要发生在下沉阶段，与刃脚支撑条件及底部土体承载力密切相关；局部屈曲多见于钢板桩锁口或双壁结构隔舱位置。影响围堰变形的关键因素包括：地质条件（土层分布、土体参数）决定围堰与土体相互作用特征；结构刚度分布影响整体抗变形能力；下沉过程控制精度直接影响初始受力状态；封底质量决定底部约束条件；水位变化速率影响围堰内外压差。诸多因素相互耦合，需系统考虑，不可孤立对待。

2 深水基础围堰施工关键技术

2.1 钢板桩围堰施工技术

钢板桩围堰施工流程包括导向架设置、钢板桩插打、合龙、支撑安装及封底。插打前需在河床面设置导向架保证桩位精度，导向架应具有足够刚度，偏差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内。插打顺序一般采用“逆时针或顺时针逐根打入”，转角处使用转角桩或焊接处理。插打过程中控制垂直度是关键，桩身垂直度允许偏差不超过 1%，发现倾斜应及时调整。锁口止水是钢板桩围堰的技术难点，

可在锁口涂抹黄油混合物或采用膨胀止水条。内支撑设置需与插打同步进行,每插打一定深度立即安装一道支撑,防止围堰在深水压力下过度变形。支撑形式以钢管支撑为主,与围堰形成闭合框架。合龙段施工是质量控制重点,需精确计算最后一根桩的宽度,必要时加工异形桩。封底混凝土浇筑前应对锁口进行高压水或压缩空气检查,消除渗漏通道。

2.2 钢吊箱围堰施工技术

钢吊箱围堰施工以“吊挂系统”为核心特色,关键技术包括底板拼装、吊杆安装、壁体下沉及同步提升。底板在拼装平台上分块制作,运至现场通过吊杆悬挂于钢护筒上,底板与护筒间需设置密封装置防止渗水。壁体采用分块预制,现场拼装焊接,下沉过程采用“分部下沉、对称注水”方式,每下沉 2~3m 暂停观测姿态,调整吊杆受力使围堰保持水平。钢吊箱的最大优势在于适应水位变化,承台浇筑后无需抽水即可浇筑,减少了深水抽水风险。吊杆受力均匀性控制是核心,每根吊杆应安装轴力计,各吊杆拉力偏差不超过设计值的 10%。吊箱下沉到位后需进行底板与护筒间封堵,常用橡胶止水带加快凝砂浆。封底混凝土采用刚性导管法水下浇筑,混凝土面速度控制在 0.5~0.7m/h,保证底板不产生过大上浮力。吊箱与钢护筒间的竖向约束需在封底混凝土达到强度后解除,避免温度应力导致的附加变形。

2.3 双壁钢围堰施工技术

双壁钢围堰具有整体刚度大、抗水压能力强的优势,施工关键环节包括分节制造、浮运就位、下沉着床及隔舱混凝土浇筑。围堰在陆上胎架分节制造,每节高度通常 6~10m,双壁间距 1.2~2.0m。首节围堰加水配重后浮运至墩位,通过定位船和锚碇系统精确就位。下沉着床采用“分舱加水”方式,各隔舱注水保持围堰水平下沉。刃脚触及河床后,向双壁隔舱浇筑水下混凝土增强围堰刚度,浇筑速度不宜过快,防止混凝土离析^[2]。围堰下沉至设计高程后,立即进行基底清理及封底混凝土浇筑。双壁围堰下沉过程中最易发生倾斜,应在围堰顶部设置四个方向的高程观测点,实时监测各点高差,单点下沉速度差控制在 5cm/h 以内。隔舱混凝土浇筑顺序应“对称、分区、分层”,先浇筑刃脚部位形成嵌固,再逐层向上浇筑,保证围堰受力均匀。封底混凝土厚度根据水头差和地基条件计算确定,一般不少于 2.5m。

2.4 水下封底关键技术

水下封底是围堰施工中决定成败的关键工序,其质量直接影响基坑安全及围堰变形控制。封底混凝土采

用导管法水下浇筑,导管直径 250~300mm,导管间距按 3~5m 布置,导管底口距基底 20~30cm。混凝土配合比应具有良好流动性、抗分散性及早期强度,坍落度控制在 18~22cm,扩展度不小于 50cm,可掺入絮凝剂防止混凝土在水下离析。混凝土浇筑遵循“由低到高、逐层推进、连续作业”原则,首次灌注需将导管理深不小于 1m,后续灌注保持导管理深 1~3m。多导管作业时采用“接力法”或“赶浆法”,确保混凝土面均匀上升,避免出现冷缝。封底厚度控制通过设置测点实时测量混凝土面高程,厚度允许偏差 $\pm 10\text{cm}$ 。封底混凝土达到设计强度后,应进行抽水试验检验封底质量,渗水量过大需进行补充注浆。封底完成后应及时进行支撑体系转换,使封底混凝土与围堰共同受力。

3 围堰变形控制策略

3.1 地质勘察与参数选取

准确的地质参数是围堰变形控制的基础。深水条件下应综合采用钻探、原位测试及地球物理勘探手段,钻探深度应达到围堰刃脚以下 1.5~2 倍水深,查清土层分布及软弱夹层位置。原位测试获取土的抗剪强度、压缩模量等力学参数,考虑施工扰动影响,设计参数应在室内试验基础上折减 10%~20%。敏感参数如土体弹性模量、水平抗力比例系数建议通过现场试桩验证。对于软土地区,应获取土体流变特性参数用于分析长期变形。地质参数的不确定性应通过敏感性分析评估,关键参数推荐采用“标准值 $\pm 20\%$ ”包络设计。

3.2 结构刚度匹配设计

围堰结构刚度匹配设计是控制变形的核心措施。钢板桩围堰中,钢板桩型号需满足抗弯刚度要求,内支撑间距与围堰刚度匹配,一般按竖向间距 3~5m、水平间距 4~6m 设置。钢吊箱围堰中,壁体与吊杆刚度应相互协调,避免吊杆过柔导致不均匀沉降。双壁钢围堰中,水深超过 20m 时建议增加内隔舱数量形成网格状结构。各类围堰在转角、开口等应力集中部位应局部加强。刚度匹配设计应采用有限元分析验证,对比不同刚度组合下的位移响应,选择经济合理的刚度配置方案^[3]。

3.3 下沉过程精准控制

围堰下沉过程需从姿态、速度、导向三个维度精准控制。姿态控制核心是防止倾斜,在围堰顶部四角布设水准观测点,每下沉 1~2m 测量高差,各点高差应小于下沉深度的 1/200。发现倾斜时采用“偏压法”向偏高侧隔舱注水纠偏。下沉速度遵循“慢速均匀”原则,钢板桩围堰控制在 0.5~1.0m/h,双壁围堰控制在 0.3~0.6m/h。导

向措施包括设置导向架、导向轮及限位装置。下沉过程中应连续监测围堰应力,重点部位布设应变计,应力超限时立即停止下沉并分析原因。

3.4 封底质量控制措施

封底质量是控制围堰变形的关键环节。基底清理必须彻底,采用高压水枪冲洗或空气吸泥机清除浮泥沉渣。首批混凝土储量应满足导管埋深不小于1m的要求,通常按 $3\sim 5\text{m}^3$ 控制。浇筑过程应连续不间断,混凝土面上升速度控制在 $0.5\sim 0.7\text{m/h}$ 。封底混凝土养护期不少于7天,期间禁止基坑内抽水。封底混凝土强度达到80%设计值后方可分级抽水,每级水位差不超过2m,每级稳定时间12~24小时,观测围堰变形稳定后再进行下级抽水,确保封底质量满足变形控制要求。

3.5 全过程监测与预警系统

建立完善的监测预警系统是实现围堰变形动态控制的技术保障。监测内容涵盖围堰位移、沉降、倾斜、应力及水位变化五大类。位移监测采用全站仪或GNSS自动化监测,测点布设在围堰顶部四角及中部,水平位移和竖向位移分别采集,监测频率每天不少于2次,下沉阶段加密至每小时1次。应力监测在围堰关键受力部位布设振弦式应变计,支撑轴力监测采用轴力计,数据采集应实现自动化远程传输。水位监测在围堰内外分别设置水位计,实时记录内外水位差变化。预警系统应设置三级预警阈值:黄色预警(变形达控制值70%)、橙色预警(达85%)、红色预警(达95%)。触发黄色预警时加密监测,橙色预警时分析原因并采取调整措施,红色预警时立即停工并启动应急预案。监测数据每日形成分析报告,与数值模拟结果对比,修正后续施工参数。

4 工程案例

4.1 工程概况

长江下游某跨江大桥主墩基础位于水深22m的河道中,河床覆盖层为10~15m厚粉细砂,下伏强风化泥岩。承台尺寸为 $32\text{m}\times 24\text{m}\times 5\text{m}$,采用双壁钢围堰施工方案。围堰平面尺寸 $34\text{m}\times 26\text{m}$,双壁间距1.5m,总高度28m,分3节制造。设计要求围堰顶部位移控制在5cm以内,支撑轴力安全系数不小于1.5,封底混凝土厚度2.8m,混凝土强度等级C30水下混凝土。

4.2 关键施工技术应用

围堰施工中采取多项关键控制措施。地质勘察采用

钻探与静力触探相结合,获取粉细砂内摩擦角 32° 、粘聚力5kPa的精确参数。结构设计中采用“上密下疏”的支撑布置方案,顶部3道支撑间距3m,下部2道支撑间距4.5m,围檩采用双拼HN800型钢。下沉过程采用全站仪实时监测,下沉速度控制在 0.4m/h ,各舱注水保持围堰水平,下沉到位后顶部高差仅3.2cm。封底混凝土采用6根导管同时浇筑,历时32小时连续完成,混凝土面上升速度 0.6m/h ,经取芯检测封底混凝土密实均匀,无夹泥和冷缝缺陷^[4]。

4.3 变形控制效果

通过全过程的变形监测,围堰施工期间顶部最大水平位移为3.8cm,小于设计要求的5cm;最大竖向沉降1.2cm,各支撑轴力均在设计值的85%以内。基坑抽水完成后围堰变形趋于稳定,连续观测7天变形增量小于1mm。封底混凝土抽水试验渗水量仅 0.15L/s ,远小于规范限值 0.5L/s 。围堰拆除后检查结构完好,无显著残余变形。本工程成功经验表明,精准的地质参数、合理的结构设计、精细的下沉控制及高质量的封底施工是控制围堰变形的有效手段。

结束语

深水基础围堰施工是一项复杂的系统工程,结构变形控制是确保施工安全的核心任务。本文系统分析了钢板桩围堰、钢吊箱围堰、双壁钢围堰三类典型结构的关键施工技术,从地质勘察、结构设计、下沉控制、封底质量及监测预警五个维度提出了全过程变形控制策略。围堰变形控制的核心在于“预防为主、动态调控”:设计阶段应注重结构刚度匹配,施工阶段应严控下沉姿态与封底质量,运行阶段应强化监测预警。建议后续工程进一步深化土-围堰相互作用机理研究,发展智能化变形控制技术,提升深水围堰施工的安全性与经济性。

参考文献

- [1] 喻烽. 跨河桥梁深水基础围堰施工关键技术与风险防控[J]. 越野世界, 2026, 21(8):118-120.
- [2] 张立忠, 杨永宏. 跨海桥梁深水基础钢吊箱围堰关键技术研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2026, 8(3):60-66.
- [3] 刘良志. 大落差深水复杂地质哑铃型锁口钢管桩围堰施工关键技术[J]. 价值工程, 2026, 45(8):134-136.
- [4] 杨金龙, 赵林, 江群龙. 深水高桩系梁新型单壁钢吊箱围堰施工关键技术研究[J]. 中外公路, 2024, 44(6):219-225.