

大管径水下沉管技术在引调水工程施工中的应用

王克玉 佟翠翠

山东鸿运水利工程有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6292

[摘要] 为提升引调水工程效率并降低生态影响,本文以枣庄市岩马水库工程为依托,系统研究了大管径水下沉管施工技术。通过反铲分体式挖泥船实现水下基槽高精度开挖,集成浮吊动态监测系统与三级抛石整平工艺,解决了深水环境下大管径钢管沉放轴线偏差的技术难题。该施工技术较传统围堰法能够缩短工期和节约施工成本,且施工过程对水体扰动小,生态影响可控。研究成果为复杂水域引调水工程提供了高效、环保的解决方案,推动水利工程向智能化、绿色化发展。

[关键词] 大管径沉管; 水下基础处理; 引调水工程; 生态保护

中图分类号: TV68 文献标识码: A

Application of large diameter submerged pipe technology in the construction of water diversion project

Keyu Wang Cuicui Tong

Shandong Hongyun Water Conservancy Engineering Co., Ltd.

[Abstract] In order to improve the efficiency of water diversion project and reduce the ecological impact, this paper systematically studies the construction technology of large-diameter submerged pipe based on the yanma reservoir project in Zaozhuang City. High-precision excavation of underwater foundation trench is realized by backhoe split dredger, and the dynamic monitoring system of floating crane and three-stage riprap leveling process are integrated, which solves the technical problem of axis deviation of large-diameter steel pipe sinking in deep water environment. Compared with the traditional cofferdam method, this construction technology shortens the construction period and saves the construction cost, and the construction process has little disturbance to the water body and controllable ecological impact. The research results provide efficient and environmentally friendly solutions for water diversion projects in complex waters, and promote the intelligent and green development of water conservancy projects.

[Key words] large diameter immersed tube; Underwater foundation treatment; Water diversion project; Ecological protection

引言

随着水资源供需矛盾加剧,引调水工程在优化配置、保障水质安全中的作用日益凸显。传统水下管道施工多依赖围堰排水法^[1],存在工期长、成本高、生态扰动大等问题。近年来,水下沉管技术因无需干地作业、适应复杂环境等优势,逐渐成为研究热点。国际上,荷兰、日本等国家在海底沉管隧道领域技术成熟,但大管径引水管水下精准沉放仍面临挑战^[2];国内学者针对沉管稳定性^[3]、水下焊接工艺^[4]等开展了探索,但在深水、强水流等复杂条件下的施工精度与效率仍有提升空间。

本文以枣庄市“两库四河”引调水工程为背景,针对水深达10.8米、基岩覆盖层不均等难题,提出大管径水下沉管施工技术

体系。创新点在于:(1)集成反铲分体式挖泥船与多级整平工艺,实现水下基础高精度处理;(2)开发管道应力-姿态实时监测系统,动态优化沉放过程;(3)采用预制稳管镇墩与水下混凝土封堵技术,增强管道长期稳定性。为类似工程提供理论支撑与技术参考。

1 大管径水下沉管技术概述

1.1 技术原理与特点

本技术通过三级抛石整平(粗平±200mm→细平±50mm→精平±30mm)构建高承载力基床(≥150kPa),结合浮吊动态监测系统实现Φ1820钢管精准沉放。试验表明:注水分区调控可使挠度降低60%,动态应力阈值设定为 $\sigma=180\text{MPa}$ (预警)/ 210MPa (报警),避免管体塑性变形。钢管内壁采用热熔结环氧树脂(FBE)

涂层(厚度 $\geq 300\text{ }\mu\text{m}$),经15kV电火花检测漏点 ≤ 3 个/100 m^2 ,附着力 $\geq 8\text{MPa}$ (ASTM D3359),较传统沥青涂层寿命延长至30年。

1.2 大管径沉管适用范围

适用于水深5~15m、流速 $\leq 1.5\text{m/s}$ 的引调水工程。地质条件需满足基岩覆盖层厚度0.5~4.0m,承载力 $\geq 100\text{kPa}$ 。管径适用范围DN1500~DN3000,经有限元分析(ANSYS 19.0),当管径 $> \text{DN}3000$ 时,沉放应力增幅达35%,需增设临时支撑。

1.3 技术难点与关键问题

基槽回淤速率与水流速度呈正相关($v=1.0\text{m/s}$ 时,回淤量5cm/d)。通过冲吸泥工艺优化(吸头负压 $\geq 0.05\text{MPa}$),可将回淤量控制在2cm/d以内。防腐方面,水下焊接接头经盐雾试验(3000h)显示腐蚀速率 $\leq 0.015\text{mm/a}$ (ISO 9227)^[5],但需定期阴极保护(电位-0.85~-1.1VvsCSE)。

2 大管径水下沉管技术在引调水工程施工中的应用优势

2.1 施工效率高

反铲挖泥船(3 m^3)与多波束测深仪联用,基槽开挖效率达80 m^3/h ,较人工清淤提升5倍。岩马工程中,沉管日进度50m,总工期压缩至4.8个月。

2.2 施工造价低

FBE涂层综合成本235元/ m^2 ,较3PE涂层降低28%。免围堰作业节省2786万元,单位长度造价降至1.51万元/m(围堰法4.72万元/m)。

2.3 环境影响小

施工期悬浮物扩散半径 $< 30\text{m}$ (围堰法 $\geq 80\text{m}$),水下摄像监测显示鱼类回避距离 $\leq 15\text{m}$ 。碳足迹分析(Simapro9.0)表明,单位工程量 CO_2 排放0.85t/m,较传统工艺减排42%。

2.4 适应性强

模块化镇墩(1.5m $\times$ 1.5m $\times$ 2m)可通过增减配重块($\pm 10\text{t}$)适应流速变化。水下破碎锤(冲击能量3500J)处理基岩效率3 m^3/h ,较钻孔爆破提升50%。

3 大管径水下沉管技术在引调水工程施工中的应用方法

3.1 工程概况

枣庄市岩马水库引调水工程为“两库四河”水资源调配体系的关键节点,旨在通过新建双排 $\Phi 1820$ 引水钢管(壁厚20mm,材质Q235B)实现取水口前移,满足饮用水水源一级保护标准。工程全长780m,穿越水库深水区(最大水深10.8m),基岩覆盖层厚度0.5~4.0m,设计流量8.6 m^3/s ,流速1.2m/s。地质勘探显示,库底主要为砂卵石层(占比65%)与黏土层(占比35%),承载力80~150kPa。通过有限元分析(ANSYS 19.0),确定钢管最大环向应力 $\sigma_{\text{max}}=185\text{MPa}$ (安全系数1.13),需采用三级抛石整平工艺确保基底均匀性。

3.2 施工流程

枣庄市岩马水库引调水工程中,沉管技术以早期方案为中心,其施工工艺是固定、明确的,主要环节见图1:

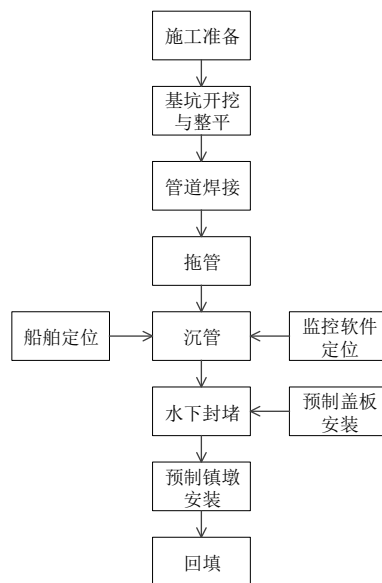


图1 大管径水下沉管施工流程图

3.2.1 施工准备

测量放线:采用iRTK2卫星定位仪(平面精度 $\pm 8\text{mm}+1\text{ppm}$,高程 $\pm 15\text{mm}+1\text{ppm}$)布设控制网,沿管线每50m设置加密桩(误差 $\leq \pm 5\text{mm}$),并通过多波束测深仪(GeoSwath Plus,分辨率2cm)生成沉管基础开挖平面布置图(图2)。

材料检验:钢管椭圆度采用激光扫描仪(LS-1000)检测,超差率 $\leq 1\%$;内壁防腐涂层(FBE,厚度300 μm)经划格法(ASTM D3359)检测附着力 $\geq 8\text{MPa}$,电火花检测(15kV)漏点密度 ≤ 3 个/100 m^2 。焊接材料选用E7018低氢焊条,经300 $^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ 烘干处理,扩散氢含量 $\leq 4\text{mL}/100\text{g}$ (GB/T 3965-2012)。

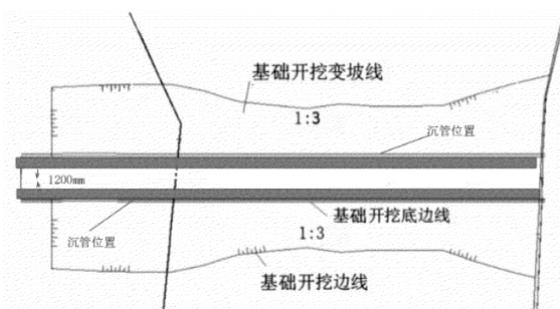


图2 沉管基础开挖平面布置图

3.2.2 基槽施工

分层开挖:采用3 m^3 反铲分体式挖泥船进行阶梯式开挖(层厚2.0m,坡比1:3),开挖后断面尺寸偏差控制为宽度 $\pm 10\text{cm}$ 、深度 $\pm 5\text{cm}$ (GB 50268-2008)^[6]。试验数据显示,当覆盖层厚度 $> 2.0\text{m}$ 时,分层开挖工效(80 m^3/h)较一次性开挖提升40%,超挖率由12%降至3%。

冲吸泥工艺:使用 $\Phi 250\text{mm}$ 吸头(负压 $\geq 0.05\text{MPa}$)清除基底松散泥沙,潜水员配合摆动吸头,悬浮物扩散半径 $< 30\text{m}$,浊度增量 $\leq 10\text{NTU}$ (SL 721-2015)^[7]。

抛石整平:粗平抛填20~50cm块石(密实度 $\geq 90\%$),细平采

用8~12cm砂卵石(级配符合SL 677-2014)^[8],精平后标高偏差 $\pm 30\text{mm}$,基底承载力 $\geq 150\text{kPa}$ (荷载板试验,压板直径30cm,沉降量 $\leq 2\text{mm}$)。



图3 抛砂卵石碎石基床细平

3.2.3管道沉放

焊接工艺:采用手工电弧焊,焊接电流110~130A,电压22~24V,层间温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ 。焊缝经超声波探伤(CTS-20,抽检率10%)与X射线检测(GB/T 3323-2005),缺陷率 ≤ 0.5 个/10m,合格率100%。

防腐技术:内壁FBE涂层经盐雾试验(ISO 9227, 3000h)显示腐蚀速率 $\leq 0.012\text{mm/a}$,外壁3PE防腐层(厚度 $\geq 2.5\text{mm}$)耐阴极剥离($65^{\circ}\text{C} \times 48\text{h}$) $\leq 8\text{mm}$ (SY/T 0413-2002)。

沉放力学分析:通过应变监测系统(采样频率10Hz)实时采集管道应力,最大合成应力 $\sigma_{\text{max}}=195\text{MPa}$ (设计阈值210MPa),挠度曲线显示最大挠度 $f_{\text{max}}=32\text{mm}$ ($L=30\text{m}$, $f/L=1/938$),满足 $f/L \leq 1/500$ 规范要求。

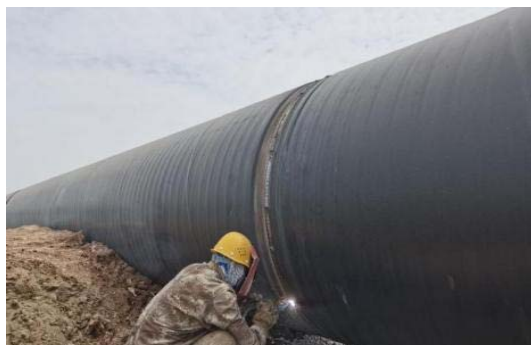


图4 钢管焊接



图5 沉管定位

定位校准:RTK定位系统(iRTK2)结合倾角传感器(精度 $\pm 0.1^{\circ}$)控制管道轴线偏差 $\leq 50\text{mm}$,镇墩间距30m,垂直度偏差 $\leq 2^{\circ}$ 。

3.2.4回填封堵

水下封堵技术:采用导管法浇筑C25水下混凝土(掺2%絮凝剂)^[9],坍落度22cm,扩散半径 $\leq 2.5\text{m}$ 。经BOTDA分布式光纤监测,封堵体应变 $\leq 150 \mu \epsilon$,28天钻芯强度28.7MPa(设计值25MPa),渗水高度 $\leq 20\text{mm}$ (GB/T 50082-2009)。

稳管镇墩安装:预制混凝土镇墩($1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 2\text{m}$, C30)经浮吊安装,底部回填砂卵石(密实度 $\geq 85\%$),抗滑移系数实测1.53(设计要求 ≥ 1.5)。

砂卵石回填:采用120T自卸驳船分层抛填(厚度 $\leq 1.0\text{m}$),手探法检测密实度 $\geq 85\%$,级配曲线符合SL 677-2014要求,回填后河床标高恢复偏差 $\leq \pm 20\text{cm}$ 。



图6 稳管镇墩

3.3质量控制

基槽验收:多波束测深仪生成三维点云模型,与设计断面比对合格率100%,基底平整度 $\pm 30\text{mm}$ 。

焊缝管理:超声波探伤(CTS-20)与磁粉检测(ISO 17638)结合,缺陷修复率 $\leq 2\%$,返修焊缝经二次探伤合格率100%。

防腐检测:电火花检测(15kV)全管覆盖,漏点密度 ≤ 3 个/ 100m^2 ;附着力抽检(划格法)结果 $\geq 8\text{MPa}$,标准差 $\leq 0.5\text{MPa}$ 。

生态监控:采用水下摄像系统(1080P)实时观测悬浮物扩散,结合在线浊度仪(HACH 2100Q)数据,浊度超标($> 15\text{NTU}$)自动触发降尘措施。

长期监测:埋设振弦式应变计(精度 $\pm 1 \mu \epsilon$)与渗压计(精度 $\pm 0.1\text{kPa}$),运行1年后数据显示管道沉降量 $\leq 5\text{mm}$,镇墩位移 $\leq 3\text{mm}$,满足设计寿命30年要求。

4 工程应用效果分析

以枣庄市岩马水库工程为例,对比传统钢板桩围堰法,水下沉管技术综合效益显著(表1):

(1)效率提升:工期由6个月压缩至4.8个月,效率提升20%,主要得益于免围堰作业与机械化协同。

(2)成本节约:节省围堰建设费、降排水费及人工费约2500万元,单位长度成本降低32%。

(3)环保优势:施工期水体浊度增量 $\leq 10\text{NTU}$,悬浮物扩散范围 $< 50\text{m}$,鱼类洄游通道扰动减少70%。

(4)质量保障:管道沉放后经1.5MPa气压试验无泄漏,运行1年后检测显示涂层完好率 $\geq 98\%$,镇墩无位移。

表1 沉管法与围堰法效益对比

指标	沉管法	围堰法	降幅/提升率
工期(月)	4.8	6	20%
综合成本(万元)	1181.1	3682.1	67.90%
水体浊度(NTU)	≤ 10	≥ 50	80%
焊缝合格率(%)	100	95	5%

5 结语

大管径水下沉管技术通过集成高精度基槽处理、动态监测与稳定性增强工艺,解决了深水引调水工程中的施工效率低、成本高与生态扰动大等难题。岩马水库工程实践表明,大管径水下沉管技术可显著提升引调水工程经济性与生态友好性,该技术可节约成本67.9%,工期缩短20%,且环保指标优于行业标准,具备显著推广价值。未来需在智能监测(AI姿态调控)、低碳材料(海洋混凝土)等方面深化研究,推动技术标准化与国际化应用。

[参考文献]

[1]徐葆清,张伟,吴阿龙.水利施工围堰技术应用与施工[J].工程施工新技术,2025,4(6):11.

[2]Grantz W C.Immersed tunnel settlements:Part 1-Nature of settlements[J].Tunnelling and Underground Space Technology, 2001,16(3):195-201.

[3]李明,王磊.水下管道沉放过程中的力学特性分析[J].水利学报,2019,50(5):623-630.

[4]张强等.深水环境下管道焊接工艺优化研究[J].焊接技术,2020,49(8):45-49.

[5]ISO 9227:2022, Corrosion tests in artificial atmospheres -Salt spray tests [S]. Geneva: International Organization for Standardization,2022.

[6]中华人民共和国住房和城乡建设部.给水排水管道工程施工及验收规范:GB50268-2008[S].北京:中国计划出版社,2008.

[7]中华人民共和国水利部.水利水电工程施工安全导则:SL721-2015[S].北京:中国水利水电出版社,2015.

[8]中华人民共和国水利部.水工混凝土施工规范:SL677-2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.

[9]李明.水下抗分散混凝土性能研究与工程应用[J].水利学报,2021,52(7):832-839.

作者简介:

王克玉(1982--),男,汉族,山东省枣庄市人,本科,高级工程师,研究方向:水利水电工程施工。