

水利工程渠道衬砌机械化施工技术应用与效率提升分析

曹连山 汪贵成

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430021

【摘要】渠道衬砌作为水利工程节水增效的关键环节，其施工质量与效率直接影响灌溉系统的运行性能。本文以某大型灌区渠道衬砌工程为案例，分析了机械化施工的重难点，系统阐述了施工准备、测量放线、基槽处理、衬砌机作业、接缝处理等技术要点，通过效果分析验证了机械化施工的应用价值，并提出了效率提升的具体措施，为同类工程提供技术参考。

【关键词】水利工程；渠道衬砌；机械化施工；效率提升；质量控制

DOI:10.12417/2811-0722.25.11.067

引言

在水资源供需矛盾日益突出的背景下，渠道衬砌工程作为减少输水损失、提高灌溉水利用系数的核心手段，其技术水平备受关注。传统人工衬砌存在施工效率低、质量稳定性差、劳动强度大等问题，已难以满足大型灌区规模化建设需求。机械化施工凭借标准化作业、精准控制、连续施工等优势，成为渠道衬砌工程的主流发展方向。本文结合实际案例，深入分析渠道衬砌机械化施工技术的应用场景与效率提升路径，为水利工程现代化建设提供实践借鉴。

1 案例分析

1.1 案例背景

某大型灌区续建配套与节水改造工程，涉及总干渠及3条支渠的衬砌施工，总长度86km。渠道设计为梯形断面，底宽3-8m，边坡比1:2.5，衬砌结构采用“C25混凝土板+土工膜”复合形式，混凝土板厚度12-15cm，下设10cm厚砂砾石垫层及0.3mm厚HDPE土工膜。工程区域属温带大陆性气候，年平均降水量450mm，施工期集中在4-10月。渠道沿线地质以粉质黏土为主，部分段落存在软弱地基，地下水位埋深2-5m。项目采用机械化衬砌施工，配置混凝土搅拌站、滑膜衬砌机、切缝机等专业设备，计划工期180天。

1.2 渠道衬砌机械化施工重难点

渠道沿线地形起伏较大，最大坡度达15°，衬砌机行走轨迹控制难度高，需解决坡地作业的稳定性问题。混凝土塌落度、摊铺厚度、振捣密实度等参数需全程精准控制，避免出现蜂窝麻面、裂缝等缺陷。从基槽开挖到混凝土养护需7道工序协同，设备调度不当易造成工序脱节，影响施工连续性。穿越农田路段需保护耕地，穿越河沟段需处理水下衬砌，对机械化施工提出特殊要求。

2 水利工程渠道衬砌机械化施工技术应用

2.1 施工准备

根据渠道断面参数，选用TC-12型滑膜衬砌机（适应底宽3-6m）和TC-15型（适应底宽6-10m），配套JS500混凝土搅拌站（生产能力25m³/h）、ZL50装载机、洒水车等辅助设备。

施工前进行设备联调，重点校验衬砌机的行走偏差（≤5mm/m）、振捣频率（50-70Hz）、摊铺厚度控制系统精度。混凝土采用P.O42.5水泥、中砂（含泥量≤3%）、5-20mm碎石（压碎值≤16%），经配合比试验确定最优参数水灰比0.45，砂率38%，掺加3%粉煤灰改善和易性，设计塌落度120±20mm。土工膜采用两布一膜复合结构，经检测其拉伸强度≥16kN/m，CBR顶破强力≥3.2kN，满足设计要求。沿渠道一侧修建4.5m宽施工便道，每隔500m设置会车平台。在支渠交汇处设置2处混凝土搅拌站，每处占地1500m²，配备封闭式料仓及自动计量系统，确保材料含水率稳定。

2.2 测量放线

采用全站仪按“20m一个控制断面”布设轴线控制点，用水准仪测定渠底高程及边坡坡顶线。通过GPSRTK技术实时校准衬砌机行走轨迹，在渠底及边坡设置高程控制线，误差控制在±3mm内。对曲线段进行加密测量，每10m设置一个偏距控制点，确保衬砌轮廓与设计吻合。

2.3 基槽处理

采用挖掘机配合平地机进行基槽开挖，预留10cm保护层由人工修整。边坡采用液压坡面修整机处理，表面平整度误差≤5cm，压实度达到93%（环刀法检测）。对2.3km软弱地基段，采用“换填30cm厚级配砂石+冲击碾压”处理方案，碾压遍数8-10遍，压实度≥95%。处理后进行承载力检测，地基承载力特征值≥120kPa。砂砾石垫层采用自卸车运输、摊铺机摊铺，厚度控制在10±1cm，用振动碾碾压3-4遍，确保孔隙率≤25%。

2.4 土工膜铺设

采用机械化铺设机进行土工膜施工，沿渠道轴线方向展开，搭接宽度10cm，采用热熔焊接机焊接，焊接温度180-200°C，行走速度1.5-2m/min。焊接完成后进行气压检测，气压保持0.2MPa持续30s不下降为合格，合格率需达到100%。

2.5 衬砌机作业

2.5.1 混凝土布料控制

搅拌站生产的C25混凝土（塌落度120±20mm）由6m³罐车运输至LC-15型衬砌机料斗，料斗容量3m³，配备电子料

位控制进料量。通过螺旋布料器将混凝土均匀摊铺至模板内, 布料厚度按设计值(12-15cm)增加5% (即12.6-15.8cm), 预留振捣收缩量。布料过程中, 人工清理模板边缘漏料, 避免凝固后影响外观。

2.5.2 滑膜振捣施工

衬砌机沿轨道匀速前进, 行走速度根据混凝土初凝时间调整(夏季1.8-2m/min, 冬季1.5-1.7m/min)。内置5组振捣棒(横向间距50cm), 采用“分层振捣”模式: 底层振捣棒插入深度至垫层表面(确保底部密实), 上层振捣棒插入深度为板厚1/2, 振捣频率50-70Hz, 振捣时间每点15-20s, 直至混凝土表面泛浆、无气泡溢出。

2.5.3 表面修整

初平通过衬砌机自带的刮板将混凝土表面刮至设计高程, 误差控制在±5mm。精平人工配合ZM-2型抹面机进行收光, 抹面机行走速度0.8-1m/min, 往返2次, 确保表面平整度≤3mm/2m。在混凝土初凝前(手指按压有轻微印痕), 用拉毛机沿渠道纵向拉毛, 深度1-2mm, 增强与后续保护层的粘结力。

2.6 接缝处理

2.6.1 伸缩缝切割

待混凝土强度达到70%(约浇筑后7天), 采用QF-500型自动切缝机施工参数。切缝宽度2cm, 切缝深度板厚1/3(12cm板厚切4cm, 15cm板厚切5cm); 间距直线段6m, 弯道段4m(根据设计伸缩量调整)。切缝前用墨线弹线定位, 切缝机沿导向轨行走, 确保缝道顺直(偏差≤5mm)。切缝后清理缝内碎屑, 用高压水枪冲洗干净。

2.6.2 填缝施工

采用“泡沫板+密封胶”复合填缝结构, 选用密度≥30kg/m³的PE泡沫板, 切割成2cm×4cm(宽×深)的条状, 用专用工具嵌入缝内, 顶部距混凝土表面预留5mm空间。选用PS-851型密封胶, 施工前先在缝两侧贴美纹纸(防止污染混凝土表面), 用胶枪将密封胶注入缝内, 注入深度≥5mm, 采用刮刀压实刮平, 确保胶层与缝壁紧密粘结。密封胶施工后24小时内避免沾水, 养护期7天, 期间禁止人员踩踏。

2.7 养护与防护

2.7.1 自动化养护

采用YS-10型自动喷水养护机, 沿渠道布置移动轨道, 设备可定时(每2小时喷水1次)、定量(每平方米喷水0.5L)喷水, 确保混凝土表面始终处于湿润状态(含水率≥90%)。养护前7天高频喷水(白天每2小时1次, 夜间每4小时1次), 后7天低频喷水(每4小时1次)。气温高于30℃时, 在混凝土表面覆盖土工布保湿, 避免强光直射导致表面开裂。在渠道顶部边缘浇筑C25混凝土路缘石(10cm×20cm×50cm), 采

用预制安装方式, 砂浆勾缝, 确保与衬砌板连接牢固。沿渠道外侧安装钢管栏杆(高度1.2m, 间距2m), 立柱埋深50cm, 混凝土浇筑固定, 栏杆刷防锈漆两道。每隔500m设置“禁止踩踏”“养护期间禁止通行”等警示牌, 确保施工区域安全。

3 效果分析

3.1 施工质量效果

本工程采用机械化施工后, 各项质量指标均优于设计标准, 具体检测结果如下。

表1 检测结果

检测项目	检测标准	检测结果	合格率
混凝土强度(28d)	≥25MPa	26.5-28.3MPa	100%
平整度	≤5mm/2m	2-3mm/2m	100%
厚度偏差	±10%设计值	±5-8%设计值	98.7%
接缝密封性	无渗漏	100%无渗漏	100%
渠道轴线偏差	≤20mm	5-15mm	100%

机械化施工通过振捣频率恒定、摊铺厚度自动控制等技术, 解决了人工衬砌常见的蜂窝麻面、厚度不均等问题, 混凝土强度离散系数由人工施工的15%降至8%, 质量稳定性显著提升。

3.2 施工效率对比

与传统人工施工相比, 机械化施工的效率优势明显。

表2 施工效率对比

指标	机械化施工	人工施工	提升幅度
日作业进度	300-400m	50-80m	375%
人均工效	80 m ³ /人·天	8 m ³ /人·天	900%
单位成本	125 元/m ³	160 元/m ³	21.9%
施工周期	150 天	300 天	50%

本工程86km渠道衬砌实际工期150天, 较计划提前30天, 节约人工成本约680万元, 减少设备租赁费用120万元, 综合经济效益显著。

3.3 节水效益

渠道衬砌完成后, 经水文监测, 输水损失率由衬砌前的35%降至8%以下, 年节约水量约1200万m³, 灌溉水利用系数从0.52提高到0.68, 有效缓解了灌区水资源紧张状况。

4 效率提升的具体措施

4.1 优化施工组织设计

4.1.1 工序衔接优化

采用BIM技术构建渠道衬砌施工4D模型(3D模型+时间维度), 对基槽处理、垫层铺设、土工膜铺设、混凝土衬砌、切缝、填缝、养护7道工序进行可视化模拟。通过模拟确定各工序的最优流水节拍: 基槽处理每段(500m)施工周期为5

天,垫层铺设为3天,土工膜铺设为2天,混凝土衬砌为4天,后续工序合计3天,形成“5-3-2-4-3”的流水节奏。在现场实施中,采用“超前3段”准备模式:当第n段进行混凝土衬砌时,第n+1段完成土工膜铺设,第n+2段完成垫层施工,第n+3段进行基槽处理,确保衬砌机连续作业无闲置。通过该模式,设备日均有效作业时间从10小时提升至14小时,利用率达到85%以上。

4.1.2 分区平行施工

结合渠道沿线地形及交通条件,将86km渠道划分为6个独立施工段,每段长度12-18km,各段设置独立的材料堆放区、设备维修站及临时办公点。每段配置1套衬砌机组(含滑膜衬砌机1台、搅拌站1座、辅助设备3台),采用“分段包干、平行作业”模式。为避免各段施工干扰,制定跨段设备调度规则:当某段遇到特殊地质需额外设备时,从相邻完工段调配,调配响应时间不超过24小时。通过分区管理,各段施工进度偏差控制在±3天内,总工期较原计划缩短30%。

4.2 设备智能化升级

4.2.1 加装智能监控系统

在TC-12型和TC-15型衬砌机上集成“五维监测系统”,采用北斗+GPS双模定位,实时采集设备位置信息,定位精度达±2cm,确保行走轨迹与设计轴线偏差≤5mm。安装振动加速度传感器(监测振捣棒振幅)、压力传感器(监测混凝土摊铺压力)、温度传感器(监测混凝土入模温度),采样频率10Hz。在衬砌机前后端安装4K高清摄像头,通过AI算法识别混凝土表面平整度、蜂窝麻面等缺陷,识别准确率达92%。采用5G+北斗短报文双模传输,确保在无信号区域数据不丢失,每30秒上传1组数据至云端平台。平台可远程调整振捣频率(50-70Hz无级调节)、行走速度(0.5-3m/min可调),实现“无人值守”作业。

4.2.2 研发专用辅助设备

针对渠道转弯半径≤50m的曲线段,设计可调节曲率的液压模板,通过伺服电机控制模板转角(0-15°可调),适应不同弯道半径需求。该模板使弯道段施工效率从150m/天提升至225m/天,提升幅度50%。在边坡坡度≥1:2.5的陡峭段,配置液压机械臂辅助混凝土布料,臂展6m可覆盖边坡全断面,减少人工辅助作业量80%,避免因人工操作不当造成厚度偏差。

参考文献:

- [1] 薛志峰.水利工程渠道衬砌机械化施工控制技术[J].科学技术创新,2018,(03):117-118.
- [2] 曾昭.农田水利工程灌溉防渗渠道衬砌施工技术研究[J].农村实用技术,2025,(05):105-106.
- [3] 杨洪林.水利灌渠渠道衬砌施工技术要点与实践应用[J].黑龙江水利科技,2025,53(03):152-155.
- [4] 刘佩婕.水利工程渠道运行维护与管理的常见问题及对策[J].四川水利,2025,46(01):165-168.
- [5] 吴祖弦.水利工程渠道施工中衬砌混凝土技术[J].中国住宅设施,2024,(09):142-144.

4.3 材料供应保障

(1) 建立集中搅拌站:采用HZS90型全自动搅拌站(理论生产能力90m³/h),设置4个分区(粗砂、细砂、5-10mm碎石、10-20mm碎石),每个仓容500m³,安装料位传感器,低于20%库容时自动报警。采用全自动计量泵(精度±1%),可同时添加减水剂、引气剂两种外加剂,根据混凝土塌落度实时调整掺量。配置10辆6m³混凝土罐车,安装GPS定位与料位计,通过调度平台优化运输路线,确保罐车到达衬砌机旁时,混凝土出站时间不超过1小时,塌落度损失控制在≤20mm。

(2) 材料预处理技术:建设洗砂生产线(时处理能力50m³),通过螺旋洗砂机去除砂石中的泥块、杂质,使砂含泥量从5%降至2%以下;采用振动筛分级(筛孔尺寸5mm、10mm、20mm),确保碎石级配连续,减少混凝土离析现象。在工厂将HDPE土工膜与无纺布复合,按渠道长度定制50m长卷材(传统为10m),现场采用热熔焊接机焊接,接缝数量减少80%,焊接合格率从95%提升至99%。

4.4 人员技能提升

制定“三级培训体系”,培训涵盖设备操作手册、安全规程、质量标准等基础内容,采用“理论授课+模拟器操作”模式,考核合格颁发操作证。针对设备故障诊断、参数优化等技能,采用“案例教学+现场实操”方式,学员需独立排除3类常见故障(如振捣棒不工作、液压系统漏油)方可结业。面向机长开展智能系统运维、施工组织管理培训,通过考核后授予“智能机组指挥证”。每台衬砌机配备1名机长(持高级培训证),统筹管理5人作业小组(机手2名、混凝土工2名、质量检查员1名),明确各岗位权责。

5 结语

渠道衬砌机械化施工是水利工程现代化建设的必然趋势,其技术应用不仅显著提升了施工质量与效率,更推动了水利建设从劳动密集型向技术密集型转变。本文案例表明,通过科学选型设备、优化施工组织、应用智能技术,可实现渠道衬砌工程“质量优、进度快、成本省”的综合目标。随着无人衬砌机、数字孪生等技术的发展,渠道衬砌施工将向“少人化”“智能化”方向迈进。建议进一步加强产学研合作,针对复杂地形、特殊地质条件开发专用机械化装备,完善技术标准体系,为水利工程高质量发展提供持续技术支撑。