

大型调水工程渡槽伸缩缝防护及橡胶止水带老化预防技术研究

邓道勇 刘 佳 蔡正乾

中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司 河南 南阳 473000

摘 要：南水北调中线工程作为国家战略性水资源配置工程，渡槽结构的安全稳定直接关系输水效益与工程寿命。本文以严陵河渡槽为研究对象，针对其伸缩缝止水带运行超10年出现的老化破损、渗漏等问题，依托“伸缩缝守护者”QC小组的实践活动，提出临背水侧协同防护技术优化方案。通过材料性能升级、施工工艺创新与全过程质量管理体系构建，实现了止水带老化预防与渗漏根治的双重目标。工程实践表明，该技术方案可使止水带使用寿命延长至10年以上，节约维护成本40万元，且槽体结构变形控制在规范允许范围内，为同类水利工程伸缩缝养护提供了可复制的技术范式与管理经验。

关键词：输水渡槽；伸缩缝；协同防护；橡胶止水带

引言

南水北调中线工程是缓解京津冀豫等北方地区水资源短缺的核心基础设施，年输水规模超95亿立方米，直接受益人口达1.14亿。渡槽作为工程中的关键输水建筑物，承担着跨越河流、洼地的重要功能，其伸缩缝止水系统是保障结构防渗性能的核心环节。严陵河渡槽作为中线工程的关键节点，运行已逾10年，受水流冲击、日照老化、水生物侵蚀及槽体不均匀沉降等因素影响，伸缩缝止水带出现龟裂、鼓包、脱落等病害，部分缝位甚至发生渗漏，严重威胁渡槽结构安全与输水稳定性^[1]。

1 工程概况

严陵河渡槽全长540m，其中槽身段长240m，采用双线两槽梁式结构，跨径布置为6×40m，单槽净空尺寸为7.39m×13m，设计流量340m³/s，加大流量410m³/s。该渡槽的核心功能包括保障中线工程输水系统稳定，以及在极端天气或下游出现安全隐患时快速退水，避免渠道压力过大引发溃堤风险。

渡槽伸缩缝止水结构分为两种类型：一是左槽4#伸缩缝，采用角钢固定止水带，上部回填环氧砂浆，顶部涂刷3mm聚脲防护层；二是右槽1#-7#及左槽1#-3#、5#-7#伸缩缝，采用35mm厚度橡胶压块固定止水带，顶部设置2mm橡胶面板。经现场检测，14道伸缩缝均存在不同程度的止水带老化破损问题，右槽1#缝已出现洇湿渗漏，严重影响工程运行安全。

2 QC小组概况与工作思路

2.1 小组基本情况

“伸缩缝守护者”QC小组成立于2024年9月15日，

成员共7人，涵盖工程技术、质量控制、施工管理等专业领域，均为本科及以上学历，其中高级工程师6人，助理工程师1人，人员结构合理、施工经验丰富。小组设组长1名，全面负责方案策划与实施控制；副组长1名，协助组长推进现场工作；其余5名组员分别承担现场施工、数据采集、资料整理等任务。小组活动时间为2024年9月20日—2025年2月23日，课题类型为问题解决型。

2.2 工作思路

小组以“根治渗漏、预防老化、延长寿命、降本增效”为目标，采用“全维度病害诊断—技术方案优化—全过程质量管控—效果评估与巩固”的工作思路，通过现场检测明确病害成因，针对性制定临背水侧协同防护技术方案，并构建质量管理体系保障方案落地，最终形成可推广的施工工法与养护手册。

3 全维度病害诊断

为精准定位质量隐患，小组组织两轮渡槽排空作业，利用6台水泵完成左右槽水体抽排，结合外观检测、结构变形监测与材料性能试验，明确伸缩缝病害类型及成因：

结构缝渗漏：右槽1#缝因进口渐变段水流紊乱，尖锐杂物刺破止水带U型部位，形成23cm长裂缝，渗漏量随水压增大持续恶化。

表层防护老化：左槽、右槽结构缝表层橡胶面板/聚脲普遍出现龟裂、鼓包、脱落，其中左槽第一道缝橡胶面板完全脱落，右槽第七道缝左侧壁下半部脱落，主要由水流冲击、日照老化及水生物侵蚀所致。

4 技术方案优化

针对病害成因，小组突破传统单一防护模式，从材料升级、工艺创新、施工技术突破三个维度，构建临背水侧协同防护技术体系。

4.1 材料性能升级

三元乙丙橡胶面板替代传统橡胶：新型橡胶面板添加针织物增强结构，耐老化、抗拉伸强度及与混凝土界面粘结强度大幅提升，可有效适应槽体变形，避免因拉伸导致的破损。

SR塑性填料取代双组分聚硫密封胶：SR塑性填料具有优异的可塑性、抗渗性与耐候性，可在低温环境下保持弹性，解决传统密封胶易开裂的问题。

4.2 施工工艺创新

根据伸缩缝止水结构类型差异，采用差异化修复工艺，实现“精准修复、降本增效”目标：

强化防护工艺：针对左槽4#采用槽钢压板+环氧砂浆回填的伸缩缝，取消易破损的手刮聚脲层，创新采用“槽钢压板+新止水带+SR塑性填料鼓包+6mm三元乙丙橡胶面板”工艺，形成“刚性支撑+柔性防渗”双层防护体系，提升抗水流冲刷能力，如图1。

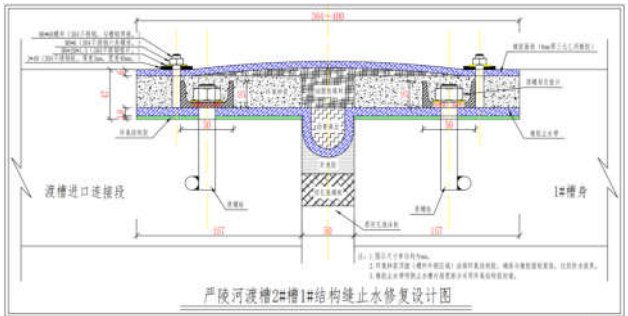


图1 左槽4#缝“刚性支撑+柔性防渗”双层防护体系图

压块利旧工艺：针对左槽1#-3#及5#-7#、右槽1#-7#原防水压块完好的伸缩缝，通过机械调平、打磨处理后利旧使用，保留原35mm橡胶压块与止水带的弹性结合结构，节省材料成本约25万元，如图2。

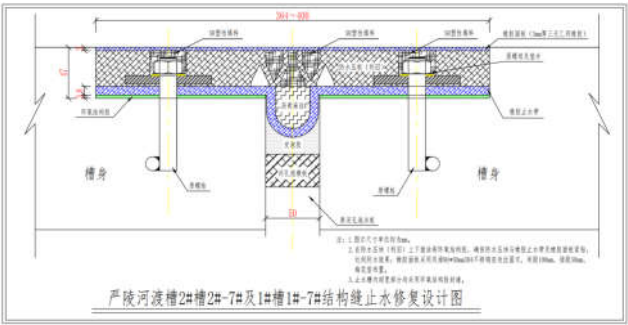


图2 压块利旧结构示意图

双层防护技术：针对受水流冲击最大的左右槽1#缝，采用双层三元乙丙橡胶面板防护：第一层以双排自

攻丝（间距100mm，梅花型布置）固定3mm橡胶面板，第二层通过植筋（ $\phi 8$ 不锈钢螺杆，间距25cm）安装70cm宽橡胶面板，并用镀锌扁铁压块加固，形成“缓冲层+防护层”复合结构，大幅提升抗冲击性能，如图3。

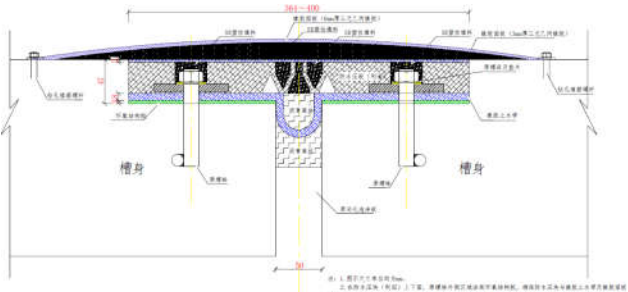


图3 左右槽1#缝双层三元乙丙橡胶面板防护结构示意图

4.3 施工技术突破

基面处理标准化：采用“高压水枪清洗+角磨机打磨+棱角圆弧化处理”的三步法基面处理工艺，确保止水带与混凝土基面紧密贴合，消除空鼓隐患。

螺栓紧固量化控制：使用扭矩扳手逐颗检测螺栓上紧力，控制扭矩在800~1200N·m，螺栓外露部分套塑料保护套，避免锈蚀，确保止水带均匀受力。

5 全过程质量管理体系构建

为保障技术方案落地见效，小组构建“责任固化—过程管控—安全防控”三位一体的质量管理体系，实现工程质量全过程闭环管理。

5.1 责任固化：“三位一体”监管机制

成立由管理处领导任组长的现场工作组，下设工程管理、安全管理、合同管理三个专项小组，制定《监管责任人及值班表》，实行“每日双班旁站+工序验收”制度，明确各岗位质量职责，确保质量监管无盲区。同时，编制《渡槽排空检修方案》，经专家评审后严格执行，方案涵盖病害分析、工艺调整、质量验收等核心内容，明确关键工序验收标准^[2]。

5.2 过程管控：全工序标准化验收

材料检验“三检制”：建立施工单位班组自检、施工单位质检人员复检、管理处终检的三级检验制度，对进场的止水带、环氧结构胶等材料，严格检测拉伸强度、断裂伸长率、耐老化等关键指标，不合格材料严禁进场。

关键工序验收量化标准：①基面处理验收：清洁度达到95%以上，平整度偏差 $\leq 2\text{mm}$ ；②止水带安装验收：位置偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 内，胶体溢出率 $\geq 98\%$ ，螺栓扭矩合格率100%；③注水试验验收：14道结构缝均进行48小时静置注水试验，无渗漏为合格，修复合格率需

达到100%。

5.3 安全防控：风险闭环管理

针对渡槽检修中的有限空间作业、高处作业、动火作业等危险工序，制定专项安全管控措施：①有限空间作业执行“通风30分钟+三气检测（氧气、可燃气体、有毒气体）+应急设备就位”流程；②危险作业严格履行《危险作业工作票》审批制度；③编制《渡槽检修应急撤离预案》并开展实战演练，建立“吹哨人”奖励机制，实现检修期间“零事故、零伤亡”目标。

6 实施效果评估

6.1 工程质量效果

渗漏根治：14道伸缩缝经注水试验均无渗漏，外观平整、密封性能良好，止水功能恢复率达100%。渡槽排空检修完成至今，未出现任何洇湿渗漏现象。

结构稳定：运行监测数据显示，槽体变形量控制在-1.96mm~1.64mm之间，优于《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》允许值（ $\pm 3\text{mm}$ ），应变计、垂直位移测点等内观仪器数据平稳，结构安全等级提升至Ⅰ级。

老化预防成效显著：经长期效果评估，新型防护体系有效隔绝水流、紫外线对止水带的侵蚀，橡胶止水带老化速度明显减缓，初步判断可实现10年以上使用寿命目标。

6.2 经济效益

直接成本节约：通过防水压块利旧，节省材料采购成本25万元；采用协同防护技术，整体检修较传统局部检修降低排空措施费37%，合计节约维护成本约40万元。

全寿命周期降本：“定期维护+局部更换”的养护策略，预计未来10年可减少止水带整体更换次数80%，仅更换橡胶面板的成本为整体更换的1/5，大幅降低长期养护成本。

6.3 社会效益

保障输水安全：消除渡槽渗漏隐患，确保南水北调中线工程输水系统稳定运行，为京津冀豫地区水资源安全提供坚实保障。

行业示范效应：该项目形成的“三固定”工序管控（固定操作人员、固定工艺参数、固定验收标准）、有限空间作业规范等经验，在中线工程全线推广，推动水利工程伸缩缝养护技术升级。

人才培养成效：通过QC小组活动，提升了工程技术、质量控制人员的专业能力与团队协作水平，增强了全员质量意识与问题解决能力。

7 巩固措施与未来展望

7.1 巩固措施

优化运行调度：加强输水渡槽水位变化监测，避免水位骤升骤降引发槽体不均匀沉降及拉伸变形，防止伸缩缝二次破坏。

强化日常巡查：安排专人定期巡检伸缩缝外观及密封性能，建立巡查台账，发现异常及时上报处理。

完善监测体系：加强槽体监测仪器数据采集与分析，建立变形预警机制，数据异常时及时启动应急处置流程。

形成标准化工法：编制《南水北调中线工程输水渡槽伸缩缝渗漏点水下临时封堵施工工法》（Q/NSBDJT—01 0101—2025），在全公司推广应用。

7.2 未来展望

智能化运维体系建设：引入无人机激光扫描、分布式光纤传感等技术，建立伸缩缝变形实时监测系统，实现病害自动识别与预警，将预警响应时间缩短至15分钟内。

标准化作业推广：将渡槽“诊断—设计—施工—验收”全流程转化为模块化作业指南，制作VR培训课件，在南水北调中线工程全线推广，提升整体检修效率与质量。

行业标准制定：主导编制《水利工程输水建筑物伸缩缝维护技术规程》，将双层防护、压块利旧等创新工艺纳入国家标准，推动水利工程养护行业规范化发展^[3]。

8 结语

本研究以严陵河渡槽伸缩缝病害治理为切入点，通过全维度病害诊断明确问题根源，创新提出临背水侧协同防护技术方案，并构建全过程质量管理体系保障实施。工程实践表明，该技术方案可有效根治伸缩缝渗漏问题，显著延缓橡胶止水带老化速度，延长渡槽使用寿命，同时实现降本增效目标。相关技术成果与管理经验可为南水北调工程及同类水利工程伸缩缝养护提供参考，对保障国家重大水资源配置工程安全稳定运行具有重要意义。

参考文献

- [1] 王建宏. 伸缩缝止水带施工质量控制技术研究[J]. 水利建筑工程, 2022, 58(4): 112-118.
- [2] 刘志远, 陈浩. 渡槽结构渗漏成因分析与防治措施探讨[J]. 水电能源科学, 2023, 41(7): 85-90.
- [3] 李国林, 周立新. 基于数值模拟的止水带防渗性能评估方法研究[J]. 水利科技与工程, 2021, 39(6): 73-79.