

渠道衬砌施工技术应用及防裂处理技术研究

侯阵阵

郑州市水利建筑勘测设计院集团有限公司 河南 郑州 450006

摘要：渠道衬砌是水利输水工程防渗、稳体的核心工序，裂缝病害是影响工程服役质量的主要问题。本文系统梳理现浇、预制、土工膜复合三类主流衬砌施工技术的工艺特点与应用差异，从材料、施工、环境、养护四方面剖析衬砌裂缝的成因与工程危害。针对性提出施工前预防、施工中控裂、施工后修复的全流程防裂技术，并构建长效质量保障体系，可为渠道衬砌工程提质抗裂、延长使用寿命提供技术参考。

关键词：渠道衬砌；施工技术应用；防裂处理技术

引言：节水输水工程是水利基础设施建设的重要组成部分，渠道衬砌施工质量直接决定输水效率与工程稳定性。当前各类渠道工程在施工及运营阶段普遍存在衬砌开裂问题，易引发渗漏、结构失稳等病害，造成水资源浪费与运维成本增加。为解决渠道衬砌裂缝频发难题，规范施工工艺、优化防裂技术，本文结合各类衬砌技术应用特性，深入探究裂缝病害机理与防控修复技术，助力提升渠道工程施工质量与长期服役性能。

1 渠道衬砌核心施工技术应用分析

1.1 渠道衬砌常用施工技术类型

(1) 现浇混凝土衬砌技术：该技术以现场立模、整体浇筑为核心工艺，依托滑模摊铺机或人工支模完成连续施工，适用于大中型输水渠道及高流速、大流量工况。其技术优势在于整体性好、抗渗能力强，且能适应复杂断面形式，但施工受气候条件影响较大。(2) 预制混凝土板衬砌技术：该技术涉及工厂化预制、运输到场、拼装铺设等环节，施工流程标准化程度高。适用于小型灌区、地形较简单的渠道工程，具有施工速度快、质量易于控制的特点，但接缝数量较多，对基础平整度要求严格。(3) 土工膜复合衬砌技术：该技术采用土工膜作为防渗核心层，结合无纺布保护层和上部覆盖层形成复合结构。重点适配渗漏严重、地质松软或冻胀敏感区域的渠道，具备优良的柔韧性及适应变形能力，且施工简便、成本较低。

1.2 渠道衬砌施工关键工艺流程

(1) 施工前期准备：主要包括基槽开挖成型、基层分层平整与压实、砂砾石或灰土垫层铺设，以及水泥、骨料等原材料的质量检测与配合比设计试配，确保基础条件满足设计要求。(2) 主体衬砌施工：涵盖模板安装加固、混凝土分层浇筑与振捣密实、表面压实抹平及板面精光找平成型等核心工序，施工过程中需严格控制坍

落度与振捣时间，杜绝蜂窝麻面等质量缺陷。(3) 接缝与收尾施工：涉及伸缩缝与沉降缝的预留设置、闭孔泡沫板填缝及密封胶灌注处理，同时完成坡面修整与压顶收边，保障结构整体性与外观质量^[1]。

1.3 不同施工技术工程应用对比

(1) 施工效率对比：现浇衬砌借助滑模机械可实现每日数百米连续作业，效率较高；预制板衬砌受制于预制养护及运输节奏，总体周期适中；土工膜衬砌铺设快捷，施工周期最短，机械化程度依次递减。(2) 防渗性能对比：现浇整体结构防渗效果最优，渗透系数可达 10^{-8}cm/s 量级；预制板因接缝较多需加强止水处理，防渗性能次之；土工膜复合衬砌防渗效果良好，但需注意膜体防穿刺保护。(3) 经济性与耐久性对比：现浇衬砌初始投资较高但使用寿命长、运维成本低；预制板衬砌造价中等，耐久性受接缝老化影响较大；土工膜衬砌初期造价最低，但运行期需定期检查更换，综合经济性适用于特定工况。

2 渠道衬砌裂缝病害成因及危害分析

2.1 衬砌裂缝主要病害类型

(1) 结构性裂缝：由地基不均匀沉降、渠堤填筑压实度差异或外部荷载集中作用引发的贯穿性裂缝及沉降裂缝。该类裂缝通常宽度较大、延伸较长，多沿渠底与坡脚交界处或基础刚度突变部位展开，走向与渠道轴线呈一定角度，严重时可贯穿整个衬砌断面，直接削弱渠体结构的整体承载能力与传力连续性。(2) 非结构性裂缝：包含温度裂缝、干缩裂缝、塑性收缩裂缝等常规施工及运营期裂缝。温度裂缝源于水泥水化热温升与外界气温下降形成的温度梯度应力；干缩裂缝因混凝土表面水分蒸发速率大于内部水分析出速度产生不均匀收缩拉应力所致；塑性收缩裂缝则多发于混凝土初凝前，受高风速、低湿度环境影响显著，呈不规则网状分布。(3)

环境诱导裂缝：包括冻胀裂缝、盐碱侵蚀裂缝及化学腐蚀裂缝等特殊环境作用产生的病害。冻胀裂缝因渠基土体冬季冻胀抬升、春季融沉回落导致的周期性交变应力引发；盐碱侵蚀裂缝源于硫酸根离子与水泥水化产物发生化学反应生成钙矾石或石膏，体积膨胀挤压混凝土内部结构致裂。

2.2 衬砌裂缝核心成因分析

（1）材料因素：混凝土配合比设计不合理，水胶比偏大或水泥超限致收缩增加；骨料含泥量超标、针片状颗粒过多、级配不良；外加剂品种与施工条件不匹配或掺量失控，均降低体积稳定性和抗裂性能。（2）施工因素：基层平整度偏差大、压实度不足，致衬砌厚度不均；振捣点位不当、时间过长或过短引起离析；切缝深度不足板厚 $1/3$ 、间距过大，无法有效引导应力释放；拆模时强度不足或顺序错误，均为裂缝直接诱因^[2]。（3）环境与地质因素：季节性温差大造成板面与板底温差变形不协调；地基松软、含水率高、压缩性差异大；冻融循环频繁引发疲劳损伤；地下水水位高且含侵蚀性离子，持续渗透劣化微观结构，降低抗拉极限。（4）养护因素：养护周期不满足规范，保湿覆盖不到位，高温季节未及时补水；冬季保温防冻欠缺，养护期温湿度剧烈波动，致表层与内部硬化速度差异过大，加剧微裂缝生成与扩展。

2.3 衬砌裂缝对渠道工程的危害

（1）降低防渗性能：裂缝贯穿衬砌防渗层后形成连续渗流通道，渠道输水过程中的渗漏损失量可较完好状态增加数倍至数十倍，防渗体系基本失效，直接拉低水资源综合利用系数，在干旱半干旱地区引调水工程中将造成难以估量的水资源浪费。（2）破坏结构稳定性：裂缝持续扩展会割裂衬砌结构的受力整体性，在渗流压力、扬压力及冻胀缩耦合作用下，裂缝周边混凝土逐层剥落，渗水沿缝下渗掏刷渠基土体导致脱空区不断扩大，进而引发衬砌板隆起、沉陷乃至整体滑移失稳，对输水安全构成实质性威胁。（3）缩短工程使用寿命：裂缝加速水分及各类腐蚀介质渗入结构深层，诱发钢筋锈蚀、碱骨料反应及碳化加速等耐久性劣化连锁反应，促使结构性能快速退化，大幅增加运行期维修加固频次和资金投入，严重制约工程长远服役效能与设计使用年限目标的实现。

3 渠道衬砌防裂处理关键技术及质量保障措施

3.1 施工前预防防裂技术

（1）原材料优化控制：优选低水化热、低收缩率的硅酸盐水泥或中热水泥，合理控制水泥细度和碱含量；

选用质地坚硬、级配优良的粗骨料以及含泥量达标的中细砂，确保骨料针片状颗粒含量满足规范限值；通过相容性试验优选高效减水剂、引气剂等外加剂品种及最佳掺量，综合优化水胶比、砂率及矿物掺合料比例，在保证强度和耐久性的前提下最大限度降低混凝土收缩变形，显著提升抗裂性能。（2）施工工艺优化：严格规范基层压实作业程序，确保渠基压实度达到设计指标以上，平整度偏差控制在允许范围之内，消除因基础变形引发的约束性裂缝隐患；推行分层连续浇筑工艺，合理控制单层铺筑厚度与相邻层间隔时间；执行定点匀速振捣操作，严防漏振、过振或欠振；准确把控切缝深度、宽度与间距，依照混凝土强度增长规律确定最佳切缝时机及拆模顺序与时间，有效规避因工艺执行偏差诱发的早期裂缝^[3]。（3）结构优化设计：依据渠道断面形式、地基特性及气候分区，合理确定伸缩缝与沉降缝的布设间距及构造形式，选用耐老化、耐水蚀的高分子密封材料；针对季节性冻土与多年冻土区域，于衬砌结构下方增设聚苯乙烯挤塑保温板、砂砾石排水垫层及防渗土工膜等复合构造层，有效消解冻胀力对衬砌板的抬升作用，降低不均匀变形引发的开裂风险，实现结构设计层面的裂缝源头防控。

3.2 施工过程中控制裂技术

（1）温度应力控制：高温季节采取骨料预冷降温、低温水拌和及避开高温时段浇筑等综合措施，严格控制混凝土入模温度不超过设计上限；低温季节采用热水拌和、添加防冻及早强组分、覆盖保温被及搭设暖棚等保温手段，减小混凝土内外温差及板面与大气温差幅度，有效抑制温度收缩应力集中，从过程环节降低温度裂缝的孕育与生成概率。（2）施工动态监测：在施工现场建立坍落度、含气量、凝结时间等关键指标随检随测制度，全程跟踪混凝土初凝、终凝状态演变进程，实时反馈指导拌和与浇筑参数动态调整；运用数字化手段记录各工序作业时间节点与质量控制数据，对违规操作或关键指标超差工序即时预警并强制纠偏，确保每一道工序质量均处于受控状态且具备完整可追溯性。（3）机械化精准施工：采用滑模式或轨道式衬砌摊铺机完成布料、振捣、整平一体化流水作业，运用自动切缝设备精确控制缝深、缝距及切缝线性精度，以机械作业的高稳定性与精准度替代人工操作中振捣不均、抹面不平、切缝偏差等固有缺陷，有效提升衬砌成型质量的均匀性与施工精度等级，减少人为操作误差对裂缝控制的不利影响^[4]。

3.3 施工后裂缝修复处理技术

（1）细微裂缝处理：针对宽度小于 0.2mm 的浅层干

缩裂缝及细微温度裂缝,采用低黏度渗透型环氧树脂或聚合物水泥浆液进行表面涂刷封闭,或选用水泥基渗透结晶型防水材料喷涂覆盖,使修复材料充分渗入微细孔隙与裂纹网络并固化成膜,有效恢复表面防渗屏障功能,阻止水分及侵蚀介质沿微裂缝渗入结构深层引发后续劣化。(2)中度裂缝处理:针对宽度介于0.2mm至1.0mm之间、深度较大的中度裂缝,采用专用注浆设备将环氧树脂或聚氨酯等高粘结强度灌浆材料在设定压力下压入裂缝内部,使其充分填充所有空隙并固化粘结,实现开裂界面的高强度粘合与整体性修复,有效恢复衬砌结构的抗渗指标与部分承载能力。(3)贯穿性裂缝处理:针对宽度超过1.0mm、贯通全截面的结构性裂缝,采用V形开槽法沿缝口切割后嵌填聚合物水泥砂浆或弹性密封材料,对严重破损区实施局部凿除并置换新浇微膨胀混凝土,同时辅以粘贴碳纤维布或增设锚固钢筋等补强加固技术,从结构受力层面彻底消除贯穿裂缝带来的安全隐患与渗漏通道。

3.4 工程质量长效保障措施

(1)建立全过程质量管控体系:构建覆盖施工准备、材料进场验收、工序交接检验、工程验收、成品保护与竣工验收的全流程质量责任制度,逐一明确各环节检验指标、检测频率及合格判定标准;严格落实班组自检、工序互检、专业专检“三检制”,强化关键工序与工程监理及影像资料留存,确保质量控制贯穿工程建设实施全过程并实现闭环管理。(2)规范后期养护管理制度:针对不同季节与气候条件制定差异化养护实施方案,夏季采取覆盖湿麻袋、不间断洒水保湿及遮阳防晒相结合的综合措施,冬季采用保温薄膜覆盖、蓄热养护及防冻防护等手段,严格控制养护湿度不低于90%、养护温度维持5℃以上,确保养护周期不少于14天且覆盖层始

终保持湿润状态;配备专职养护人员并建立养护台账与责任追溯制度,保障养护质量落实到位^[5]。(3)完善日常巡检与运维机制:运行期建立季度例行巡检与汛期、冰期加密巡查相结合的常态化巡查制度,配备裂缝测宽仪、回弹仪、超声波检测仪等便携设备对渠道衬砌实施量化健康评估;发现新生裂缝或既有裂缝扩展时,按照分级标准及时判定危害等级并启动相应预案开展预防性修复作业,将病害消除于萌芽阶段,切实延长渠道工程服役寿命并显著降低全生命周期维护成本。

结束语

本文全面分析了渠道衬砌各类施工技术的适配场景与应用优劣,明确了结构性、非结构性、环境诱导类裂缝的核心成因与工程危害。通过整合全流程防裂、控裂、修复技术,建立了覆盖施工、养护、运维的质量保障体系。研究证实,精细化管理管控、科学化结构设计、常态化运维监测是根治衬砌裂缝的关键,可为同类水利渠道衬砌工程的防裂施工与质量管控提供实践借鉴。

参考文献

- [1]朱国建.渠道混凝土衬砌机械化置缝施工技术及应用[J].岩土工程学报,2022,44(S2):226-228.
- [2]肖旻,王正中,吴浪.冻土地基梯形渠道衬砌结构变形开裂机理及防控技术[J].工程力学,2024,41(04):70-80.
- [3]周世华,覃茜,夏求林.大型输水工程衬砌混凝土防裂关键技术研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S2):310-317.
- [4]刘泽军.衬砌厚度对U型渠道冻胀变形及开裂的影响研究[J].农业工程学报,2022,38(10):118-125.
- [5]谢坚,陈楚,宋钢永.灌区渠道衬砌施工质量提升及裂缝防治对策[J].湖南水利水电,2025,12(03):38-50.