

渠道衬砌裂缝成因分析与防治措施探讨

于真真

禹城市水利局 山东 禹城 251200

【摘要】：渠道衬砌长期承受温度变化、水荷载及地基变形影响，裂缝易造成渗漏、结构劣化及耐久性下降。工程实践中，材料收缩、基层沉降、浇筑振捣不当、温控养护不足等因素相互叠加，使裂缝呈现多类型、阶段化特征。依据裂缝形成机制，从材料配制、基面处理、施工工序、温度控制及养护监测等环节实施分类防治，可减少早期收缩开裂及不均匀变形损伤，提高衬砌整体密实度、抗渗性能和运行稳定程度。

【关键词】：渠道衬砌；裂缝成因；混凝土施工；裂缝防治；质量控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.006

引言

渠道衬砌直接承受水流冲刷、温度变化、干湿循环及地基变形产生的综合影响，裂缝一旦形成，水体容易沿裂隙向基层渗透，引发局部淘空、冻胀、沉降及衬砌结构损伤，部分细微裂纹还可能在运行阶段逐渐扩展。工程中出现的裂缝并非单一因素造成，混凝土配合比、骨料质量、基层稳定程度、分缝设置、浇筑振捣、温度收缩及后期养护均可能改变衬砌内部应力状态。若只在裂缝出现后采取表面封堵，难以消除持续开裂的根源。因此，需要结合裂缝位置、形态、发展时间及施工条件识别诱因，再将控制要求落实到施工全过程。

1 渠道衬砌裂缝形成特征及工程质量影响

1.1 衬砌表层收缩裂缝形成状态

衬砌表层收缩裂缝多呈细密、不规则或局部分叉形态，裂缝宽度通常较小，早期主要集中于混凝土表层及边角区域。水分散失后，表层体积收缩受到内部混凝土约束，拉应力逐步积聚，当局部抗拉强度不足时便形成微细裂纹。部分裂缝初期仅影响外观完整性，但在干湿交替、昼夜温差及水流作用下，裂缝边缘容易产生扩展、剥蚀和局部松动，使衬砌表面密实性下降。细小裂隙还会增加水分进入混凝土内部的通道，促使表层耐久性能逐渐弱化。

1.2 贯穿性裂缝发展形态识别

贯穿性裂缝通常由衬砌表面向结构内部连续延伸，形态可呈横向、纵向或斜向分布，裂缝长度、深度和宽度明显高于一般表面裂纹。裂缝发展过程中，局部应力释放会改变相邻板块受力状态，原有微裂缝可能沿薄弱界面继续延展，并出现裂缝端部集中扩展现象^[1]。部分贯穿裂缝跨越衬砌厚度后，会削弱板块连续性，使原本整体受力的衬砌转变为局部分块受力。若裂缝位置靠近施工缝、伸缩缝或坡脚区域，结构变形协调能力进一步下降，易产生错台、局部翘曲及边缘破损。

1.3 裂缝渗水造成结构性能变化

裂缝形成渗水通道后，渠道水体可沿裂隙进入衬砌内部及基层，使衬砌原有隔水体系出现局部失效。持续渗流容易带走

基层细颗粒，造成局部密实度下降和支承条件改变，衬砌板底可能出现脱空、软化或不均匀承载。渗水区域受到水压变化及干湿循环影响后，裂缝宽度还可能继续扩大，板底抗弯、抗剪及整体刚度相应降低。寒冷地区若裂隙内部积水发生冻融变化，孔隙压力增加会加快混凝土表层剥落和裂缝扩展，使渠道抗渗性能、结构完整性及输水稳定性同步下降。

2 渠道衬砌裂缝产生的主要诱发因素

2.1 原材料性能波动引起收缩变形

水泥品种、骨料级配、含泥量及外加剂适配性发生波动，会直接改变衬砌混凝土的收缩特征和体积稳定性。水胶比偏大时，硬化过程中自由水蒸发量增加，毛细孔收缩加剧，表层与内部形成较明显的变形差。骨料级配不连续或细集料比例失衡，还会削弱骨架约束能力，使浆体收缩更易转化为拉应力。外加剂掺量控制不准、不同批次材料性能差异较大，也可能造成凝结时间和早期强度发展不同步，使衬砌局部应变不均，裂缝由微观收缩逐步向可见开裂发展。

2.2 地基不均匀沉降诱发衬砌开裂

渠道地基承载条件存在差异时，衬砌板底支承反力难以保持均匀，局部沉降会改变板体原有受力状态^[2]。填筑密实度不足、软弱土层未充分处理或基槽含水状态变化，均可能形成沉降差，使衬砌产生附加弯矩和拉应力。坡脚、渠底连接部位及结构刚度突变区域更容易出现应力集中，沉降持续发展后，裂缝可沿横向、斜向或接缝附近扩展。地基局部脱空还会使衬砌由连续支承转为局部悬空受力，水荷载反复作用下裂缝宽度逐渐增大，并伴随错台、翘曲等结构变形。

2.3 施工温控养护不足加剧内部应力

衬砌混凝土浇筑后经历水化放热、环境降温 and 水分蒸发，若温度变化速度过快，内部与表层之间容易形成温度梯度。白昼高温条件下表层升温较快，夜间降温又会产生明显收缩，受基层和相邻板块约束后形成较大的温度拉应力。养护覆盖不及时、保湿时间不足，会进一步加速表层失水，使温度收缩和干燥收缩叠加。拆模、切缝时机控制不当还会削弱早期应力释放

能力,导致内部应力向薄弱部位集中,最终形成深浅不一的温度裂缝和收缩裂缝。

3 材料基层环节的裂缝源头控制措施

3.1 优化混凝土配合比降低收缩倾向

混凝土配合比控制应兼顾强度、和易性、抗渗性及体积稳定性,避免单纯提高水泥用量换取早期强度。水胶比宜结合渠道衬砌厚度、施工季节和浇筑方式综合确定,通过控制单位用水量降低毛细孔收缩幅度,同时优化粗细骨料级配,提高骨料骨架对浆体收缩的约束能力。细集料含泥量、针片状颗粒含量及骨料含水率需纳入进场检测,减少材料波动对实际用水量造成的干扰。矿物掺合料可依据性能要求合理复配,改善浆体微结构,减缓水化热集中释放。减水剂、引气剂等外加剂应开展相容性试验,防止因掺量偏差造成泌水、离析或凝结时间异常。施工拌制阶段还需建立含水率动态修正机制,使现场配合比与设计配合比保持一致,从材料源头控制塑性收缩、干燥收缩和温度收缩叠加形成的开裂风险。

3.2 强化渠道基层处理控制沉降差异

渠道基层质量直接决定衬砌板底受力是否连续均匀,处理重点应放在承载能力、压实均匀性和含水状态控制。基槽开挖完成后需及时核查土质类别、标高和局部软弱区,对扰动土、松散层及积水部位进行清理,防止带病基层直接进入衬砌工序。回填材料应按层摊铺、分层碾压,压实厚度与机械参数依据试验段确定,重点控制渠底、坡脚、转折部位及结构衔接区,避免局部压实不足形成后期沉降集中点^[3]。基层含水率偏高时容易产生软化和压缩变形,过低又会影响压实效果,因此需根据土体最佳含水状态实施调节。对承载条件差异明显的区域,可采用换填、加固或设置过渡层等方式改善刚度突变。衬砌施工前还应复测平整度和压实指标,使板底支承面连续稳定,减少悬空、局部脱离及差异沉降引起的附加弯拉应力。

3.3 规范伸缩缝设置释放结构变形

伸缩缝设置应根据渠道断面尺寸、衬砌材料特性、温度变化幅度及基础条件进行合理分区,使混凝土产生的温度变形和干缩变形能够沿预定位置释放。纵缝、横缝间距不宜机械套用统一参数,长直渠段、转弯段、坡度变化区及结构连接部位应结合受力差异调整布置,减少连续板块长度过大造成的约束应力积聚。切缝时间需与混凝土早期强度发展相匹配,过早容易破坏缝边完整性,过迟则可能在预定缝形成前出现随机裂缝。缝深、缝宽及垂直度应满足设计要求,切割后及时清除缝内碎屑和浮浆,保证填缝材料形成稳定黏结界面。嵌缝材料应具备良好的弹性恢复、耐水和耐老化性能,并控制填塞深度及表面密封质量。特殊部位还需处理施工缝、伸缩缝之间的衔接关系,使结构变形得到有序分散,避免局部应力重新集中。

4 施工过程中的衬砌裂缝防治方法

4.1 控制浇筑振捣提高衬砌密实程度

渠道衬砌浇筑阶段应保持混凝土布料连续、厚度均匀,避免局部堆料后长距离拖移造成浆骨分离。入仓混凝土的坍落度、和易性及停留时间需同步控制,使摊铺状态满足振捣成型要求。振捣作业应依据衬砌厚度选择适宜设备和作用时间,振点布置保持衔接,避免漏振形成蜂窝、孔洞和内部疏松,也要防止过振导致粗骨料下沉、浆体上浮。坡面衬砌受重力影响较明显,可按照由低向高、分段推进的方式控制混凝土稳定性,并及时处理模板边缘、施工接缝和坡脚等不易振实部位。振捣完成后应结合表面泌水状态进行整平压实,减少表层孔隙及塑性沉降裂纹。数字化施工条件下,可利用振捣时间记录、设备运行参数和浇筑温度数据形成过程质量台账,对异常工点及时校核,实现由成型后检查向施工过程精细控制转变,提高衬砌内部密实度和受力连续性。

4.2 实施分仓施工降低温度应力集中

连续大面积浇筑容易形成较长的结构约束区,水泥水化产生的热量难以及时散出,后续降温收缩又受到相邻板块和基层限制,内部拉应力容易向局部集中。分仓施工可依据渠道长度、断面变化、衬砌厚度及施工能力划分合理浇筑单元,使单仓混凝土的水化放热范围得到控制,并为温度变形预留释放空间。仓段划分需要兼顾伸缩缝和施工缝位置,避免随意留设施工断面造成新的薄弱界面^[4]。相邻仓段浇筑时间应根据前仓混凝土强度增长、温度回落程度及环境条件确定,减少新旧混凝土之间过大的温差约束。高温时段可调整浇筑节奏,控制入仓温度和单次连续作业长度,低温条件下则防止表层骤冷形成较大的内外温差。温度传感和施工数据记录可用于掌握不同仓段温升、峰值及降温速率,根据实际温度变化修正后续仓段长度和作业时间,使温度控制由经验判断转向数据辅助调节。

4.3 加强保湿养护抑制早期失水开裂

混凝土完成收面后至强度快速增长阶段,是渠道衬砌失水收缩较为敏感的时期,养护介入时间直接影响表层含水状态。表面达到适宜硬化程度后,应及时采用覆盖保湿、喷雾补水或保湿膜养护,避免裸露面受到高温、日照和风速共同作用而快速蒸发。坡面、渠肩及边角位置散失水分较快,需要保持覆盖连续完整,防止局部干湿程度差异过大。补水过程宜维持表面湿润状态,不宜采用温差明显的冷水直接冲淋,以免热湿变化过快形成新的收缩应力。养护周期应结合水泥品种、环境温湿度、混凝土强度增长及渠道施工条件确定,不能仅以固定天数作为唯一依据。施工管理可引入温湿度监测设备,对衬砌表面温度、环境湿度和水分蒸发条件进行动态记录,当监测值接近失水敏感区间时及时调整覆盖密闭程度和补水频次,使表层与内部湿度梯度保持平缓,抑制塑性收缩和早期干缩裂缝继续发

展。

5 裂缝防治实施后的衬砌质量控制成效

5.1 裂缝发生频率及扩展程度降低

裂缝防治措施落实后,衬砌表层早期收缩裂纹、接缝附近不规则裂纹及局部贯穿裂缝的出现频率明显下降,裂缝分布由连续集中转向零散可控。材料稳定性、基层支承条件和施工温湿度得到协调控制后,混凝土内部应力峰值受到削弱,微裂纹向深部发展的动力随之减小。质量检测可结合裂缝宽度、长度、深度及增长速率进行连续记录,对比不同施工阶段的变化趋势,判断防治措施的实际响应。裂缝端部扩展速度减缓后,板块边缘破损、错台及局部翘曲发生概率同步降低,使衬砌开裂由事后修补转向过程抑制。

5.2 衬砌抗渗性能及结构完整性改善

裂缝数量和贯通程度受到控制后,渠道衬砌内部连续渗流通道明显减少,水体向基层迁移的路径被有效阻断,单位面积渗漏量随之下降。密实度提高使混凝土内部孔隙结构更加均匀,接缝、边角及坡脚等易渗部位的防水连续性得到增强。基层受水浸泡产生的软化、细颗粒迁移和局部脱空现象相应减少,板底支承条件保持稳定,衬砌板受力更接近设计状态^[5]。抗渗检测、回弹检测及外观巡检可形成多维质量评价数据,及

时识别局部薄弱区。板体连续性改善后,荷载传递路径更加完整,局部应力突变得到缓和,结构整体性和抗变形能力得到增强。

5.3 渠道运行稳定程度及耐久水平提升

裂缝控制效果最终体现在渠道长期运行状态的稳定性上。衬砌表面保持完整后,水流冲刷对裂缝边缘的侵蚀减弱,局部剥落、冲蚀和渗漏损伤不易形成连续发展链条。基层含水状态趋于稳定,可减轻不均匀沉降对衬砌板产生的反复附加变形,渠道断面和坡面结构保持较好的几何稳定性。干湿循环、温度变化及冻融环境下,水分进入混凝土内部的数量减少,内部孔隙损伤和界面劣化速度得到控制。运行维护阶段结合裂缝巡检、渗流监测和重点部位变形观测,可形成动态耐久性评价机制,使病害识别由定期排查向状态感知转变,延长衬砌有效服役周期。

6 结语

渠道衬砌裂缝受材料性能、地基状态、施工工艺及环境条件共同影响,裂缝控制需要贯穿配合比设计、基层处理、浇筑振捣、分仓施工和养护管理全过程。强化源头控制及过程监测,可降低裂缝发生频率,改善衬砌抗渗性和结构完整性,为渠道长期稳定输水及耐久运行提供可靠保障。

参考文献:

- [1] 朱楠楠,韩雪凝.渠道混凝土衬砌施工中裂缝成因分析及全过程预防控制技术研究[J].水泥,2026,(3):139-142.
- [2] 马克.七星渠渠道混凝土衬砌裂缝成因及防治措施[J].工程建设与设计,2025,(22):166-168.
- [3] 赵吉生.水利工程渠道衬砌施工裂缝控制的关键技术研究[J].水上安全,2025,(20):172-174.
- [4] 兰建彪.灌区渠道混凝土衬砌裂缝防治施工工艺改进与应用效果分析[C]//中国智慧工程研究会.2025 工程新技术与新方法经验交流会论文集.2025:139-141.
- [5] 张健.高寒区渠道衬砌混凝土裂缝快速修复技术研究[J].水利科学与寒区工程,2021,4(1):59-65.