

水利工程混凝土衬砌渠道防渗漏技术探讨

孟令乐 杨光宇

山东中泽工程集团有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i9.9048

[摘要] 水是生命的源泉，水利工程建设与社会经济高质量发展和公众的日常生活息息相关。在整个水利输水体系中，混凝土衬砌渠道具有覆盖范围广、应用场景多等特点，是水源地与用水终端稳定连接的关键所在。但受材料、结构、施工等多种因素的影响，混凝土衬砌渠道渗漏问题逐步增多，进行科学的防渗处理势在必行。下文首先从混凝土衬砌渠道渗漏的成因入手，随后讨论了混凝土衬砌渠道主流防渗技术，最后制定了混凝土衬砌渠道防渗漏施工关键控制技术策略，仅供参考。

[关键词] 水利工程；混凝土衬砌渠道；防渗技术

Discussion on Leakage Prevention Technologies for Concrete Linings in Hydraulic Engineering Channels

Meng Lingle Yang Guangyu

Shandong Zhongze Engineering Group Co., Ltd.

[Abstract] Water is the source of life, and water conservancy engineering projects are closely linked to high-quality socio-economic development as well as the daily lives of the general public. Within the overall water conservancy and water conveyance system, concrete-lined channels—characterized by their extensive coverage and diverse application scenarios—serve as a critical link for establishing stable connections between water source areas and end-user points. However, due to various factors such as material selection, structural design, and construction practices, leakage issues in concrete-lined channels have been increasingly prevalent, making the implementation of scientific anti-seepage measures an urgent necessity. This paper first examines the causes of leakage in concrete-lined channels, then discusses prevailing anti-seepage technologies for such channels, and finally proposes key technical control strategies for anti-seepage construction in concrete-lined channels, provided for reference purposes.

[Key words] hydraulic engineering; concrete-lined channels; seepage prevention technologies

引言

在水利工程中，混凝土衬砌渠道具有农业灌溉供水、水资源跨区域调配、生态环境补水、工业生产输水等多项作用，保证结构的防渗能力尤为关键。为了实现水利工程作用和价值最大化发挥，必须正视诱发渗漏问题的重要原因，应用科学的防渗技术，确保施工质量达标，延长水利工程使用年限，维护社会的稳定性发展。

1 混凝土衬砌渠道渗漏的成因

1.1 材料原因

混凝土衬砌渠道渗漏问题的出现受混凝土自身密实度的影响明显。混凝土拌制阶段，一旦水胶比控制过大，则会造成混凝土硬化后内部形成大量连通性的毛细孔隙，受长期通水压力的影响，形成连续渗流通道，进而提升结构的渗透系数。另

外，针对水泥水化热释放过程中产生的温度应力以及混凝土凝结硬化过程中所产生的干缩变形，一旦补偿措施不合理，就可能在衬砌层内部产生早期裂缝问题，这类初始裂缝会随着渠道通水后的荷载循环逐步扩展，最终成为渗漏的主要路径。

1.2 结构原因

结构连接节点是衬砌渠道渗漏问题的高发区域。渠道与涵管、节制闸等交叉建筑物衔接的过程中，由于不同材质结构变形模量不尽相同，受外部荷载和温度变化的影响，就会出现相对位移，造成接缝区域止水结构失效，形成集中渗漏通道。与此同时，渠道沿轴线设置的伸缩缝、沉降缝若止水填充材料选型不当或嵌填不密实，在水流长期侵蚀作用下会逐步出现老化脱空，最终造成接缝渗漏问题。

1.3 施工原因

混凝土衬砌渠道施工阶段, 缺少精细化管控是渗漏病害发展的又一诱因。比如说, 在进行基面处理过程中, 未能将渠床内部的尖锐石块、腐殖土等彻底清理干净, 进而造成防渗层被刺破, 形成具有隐蔽性的渗漏点。在进行混凝土浇筑阶段, 若振捣作业不到位, 衬砌层内部会形成蜂窝、麻面、孔洞等缺陷, 破坏结构的整体防渗连续性。在进行结构养护阶段, 养护措施不合理、养护时长不足会导致混凝土表面早期失水过快, 出现大量干缩裂缝, 严重影响衬砌层的抗渗能力。

1.4 环境原因

对于混凝土衬砌渠道来讲, 周边冻胀地区土体冻融循环、土体不均匀沉降等问题, 均会对衬砌结构产生持续的附加作用, 造成缺陷问题的扩大, 最终出现渗漏问题。并且不同诱因之间相互影响, 存在一定的内在联系, 初始阶段的微小缺陷会在长期运行中逐步被放大, 最终形成贯通性渗漏通道, 这也是造成既有渠道运行数年后渗漏问题恶化发展的重要原因。

2 混凝土衬砌渠道主流防渗漏技术

2.1 刚性类防渗漏技术

此类防渗漏技术现阶段已经成为混凝土衬砌渠道防渗处理的关键技术, 主要是将水泥基材料作为防渗载体, 提升混凝土初期结构的自身密实性和抗渗等级。技术应用阶段需要从材料自身入手, 混凝土内部微观结构优化的过程中, 内部连通孔隙数量明显减少, 通过阻断原生毛细渗流通道的方式, 充分提升混凝土自身结构的抗渗透能力。从材料优化层面入手, 混凝土配比设计阶段, 增加矿物掺合料, 借助矿渣粉、粉煤灰等超细活性粉体的火山灰效应和形态效应, 将水泥颗粒之间的空隙充分填充, 优化胶凝材料体系的颗粒级配, 大幅降低水泥石内部的孔隙率, 同时消耗水泥水化过程中产生的氢氧化钙等易溶出组分, 优化混凝土内部的孔结构分布, 将原本连通的大孔隙转化为大量封闭的微小孔隙, 从微观层面阻断渗流路径。并且, 做好混凝土水灰比、单位用水量的严格管控, 在确保与施工要求相吻合的同时, 尽量减少拌和水的用量, 避免混凝土硬化阶段多余水分蒸发留下过多的毛细通道, 促进混凝土整体密实性的提升。从结构设计方面分析, 需做好衬砌板分缝尺寸、结构配筋的合理设置, 降低结构内部的约束力, 从源头上控制温度裂缝、干缩裂缝的产生。在衬砌结构的表层设置水泥基渗透结晶型涂层, 这类材料中的活性化学组分可以通过混凝土表层的毛细孔隙渗透到结构内部, 在孔隙与细微裂缝中生成不溶于水的结晶产物, 逐步填充内部的微观渗流通道, 实现对细微裂缝的自我修复能力, 进一步提升刚性衬砌结构的长期防渗性能。总的来讲, 刚性类防渗漏技术具有耐久性好、抗冲击能力强、适配性高等优势, 施工工艺成熟、便捷, 无需进行独立附加防渗层的设置, 并且在后续运维阶段, 人员工作压力较小, 特别是可满足输水流量大、长期运行要求高、外部荷载条件复杂的输水渠道防渗漏处理工作要求。

2.2 柔性类防渗漏技术

作为一种主动式防渗技术方法, 柔性防渗漏技术主要以高分子防渗材料为基础, 在渠基土体和混凝土衬砌结构之间设置连续的隔水层, 控制高分子材料的自身渗透系数, 以阻断渗流路径。此项技术的应用, 主要是通过衬砌结构底部进行一层完全不透水连续隔水屏障的构建, 应对上部混凝土衬砌结构的开裂和缺陷影响, 阻断水体向下方渠基土体内部的侵入, 实现彻底阻断渗流路径的目的。柔性防渗层的核心材料为高分子土工合成材料, 这类材料本身具有优异的隔水性能, 几乎完全不允许水体透过, 同时具备良好的延伸变形能力, 可以跟随渠基土体的不均匀沉降发生协同变形, 不会因为渠基的微小变形就出现断裂失效的问题。具体施工阶段, 需要先进行渠基基面的平整处理, 之后铺设防渗层并在上方浇筑混凝土衬砌板, 确保柔性防渗层完全处于渠基和刚性衬砌板之间, 以形成刚柔结合的复合型防渗结构体系。并且还需要在防渗层的向下两侧设置无纺布垫层, 具有重要的保护和缓冲作用, 能够有效避免尖锐骨料对防渗层的破坏。柔性类防渗技术具有适应变形能力强、防渗效果优异的特点, 并且材料自重较低, 施工便捷, 可满足地质条件复杂、渠基变形较大的施工要求。同时这类技术的材料化学稳定性良好, 可以抵御大部分常规的化学介质侵蚀, 在腐蚀性较强的输水工况下也能保持长期的防渗性能。通常情况下, 此种技术可满足不均匀沉降风险较高、渠基岩土条件较差、防渗要求严格的水利渠道和农业灌溉渠道的防渗处理要求。

2.3 新型复合材料防渗技术

对于混凝土衬砌渠道施工来讲, 新型复合防渗材料的应用尤为关键, 此类材料具有防渗性能好、强度高、耐久性强的特点, 能够改善混凝土衬砌结构性能, 提升渠道结构的耐久性和适应性, 进一步延长渠道的使用年限, 保障衬砌防渗效果。比如说, 常用的纤维混凝土复合材料, 主要是将钢纤维、聚丙烯纤维、玻璃纤维等掺入混凝土当中, 具有改善混凝土耐久性和力学性能的作用, 可有效抑制塑性收缩、温度应力等问题所造成的结构裂缝, 保障混凝土衬砌渠道的完整性, 延长工程服役周期, 保证结构防渗效果。另一方面, 聚合物水泥基复合材料则是将聚合物乳液或聚合物粉末与水泥基材料通过物理或化学方式混合而成, 形成具有有机-无机杂化结构的复合材料。这种材料融合了水泥、聚合物的优势, 不仅柔韧性好、黏结性高, 而且在抗渗性和化学稳定性方面表现优异, 尤其是在地基不均匀沉降以及温度变化较大的混凝土衬砌渠道防渗项目施工过程中, 可以在保证结构完整性的同时, 适应结构变形需求。特别是在科技不断发展进步的过程中, 纳米改性防渗材料逐步出现在公众的视野当中, 通过材料改性优化, 保证混凝土衬砌防渗体系的可靠性, 为混凝土衬砌渠道防渗施工提供多种选择, 确保结构防渗性能达标, 进而延长项目的使用年限。

2.4 智能防渗漏技术

智能防渗技术可配套应用于混凝土衬砌渠道运维阶段,利用传感器网络、自动化控制、物联网等先进技术,完成对混凝土衬砌渠道渗漏情况的智能化监测与管理。为实现对渠道渗流情况、水位变化、流速流量等方面数据的采集,需要在混凝土衬砌渠道的关键区域布置相应数量的渗漏传感器、水位传感器、流量传感器等,通过实时采集数据并传输至中央监控平台,能够为数据的分析和应用提供便利保障。利用大数据分析技术、云计算技术等,监控中心可完成对回传数据的实时处理和智能诊断,针对衬砌裂缝、接缝渗漏等异常隐患情况,自动触发预警并提供决策指导。比如说,可启动渗漏点的修复处置、调节闸门开度以控制输水流量,甚至联动视频监控进行现场确认,从而实现从感知到决策再到执行的闭环管理。总的来讲,智能监测技术的应用可提升混凝土衬砌渠道防渗工程管理水平,实现对衬砌渗漏问题的高效响应,降低人工巡检压力,及时发现衬砌裂缝、接缝渗漏等病害,在保证水资源高效输送的同时,降低水资源损失,具有重要的环保价值。

3 混凝土衬砌渠道防渗漏施工关键控制技术

3.1 渠基处理技术

作为混凝土衬砌渠道防渗漏处理的首要工序,渠基处理尤为关键,可有效提升地基的承载力水平,降低不均匀沉降问题出现的概率。严格按照设计断面和边坡坡度进行渠道开挖施工,控制超挖问题对原有土体的扰动,实施同类别素土的分层回填和压实处理。将基底表面的淤泥、杂草、树根、尖锐石块等提前清理干净。完成清基后分层碾压,压实度满足设计规范要求。针对不良地基,采取相应的处理方法,比如说,软土地基采用换填砂石法,挖除软弱土层,分层回填砂砾料压实;湿陷性黄土采用预浸水、强夯处理,消除湿陷性;膨胀土渠道需要换填非膨胀土,设置排水层,减少土体含水率波动。渠基处理结束后,进行压实度、承载力的检测,确保合格后才能开展后续作业,同时严格控制渠床基底的平整度,严禁存在局部凸起刺破防渗材料的情况,确保衬砌层厚度统一均匀。

3.2 原材料与混凝土配合比优化控制

原材料管理至关重要,应优先选用水化热较低、稳定性好的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。严格控制砂石骨料的含泥量,粗骨料和细骨料的含泥量分别 $\leq 1\%$ 和 $\leq 3\%$,不得使用软弱、风化骨料。掺加粉煤灰、矿粉替代部分水泥,降低水化热,优化孔隙结构;掺加适量膨胀剂补偿收缩;添加聚丙烯短纤维,抑制早期塑性裂缝;掺入高效减水剂,在保证工作性前提下降低水胶比,提升密实度和抗渗等级。在实验室中确定材料配比,需同时包括材料强度、抗渗、收缩、抗冻等指标。为保证配比的精准性,需定期进行设备的校验,并且在混凝土拌和及运输过程中严格控制离析情况,及时进行坍落度检测,严禁不合格材料进场使用。

3.3 混凝土浇筑与成型工艺控制

混凝土浇筑工作正式开始之前,需做好基底标高、断面尺寸的复核,确保模板、止水构件安装质量达标。渠底实施平铺浇筑,渠坡衬砌进行自上而下的分段浇筑,控制混凝土的下滑离析。控制分层浇筑厚度,将相邻浇筑段间隔时间控制在混凝土初凝时间以内,避免产生冷缝。控制混凝土入仓自由下落高度,防止骨料分离。振捣采用插入式振捣器搭配平板振捣器,梅花形布点,控制振捣时间,以混凝土表面泛浆、不再下沉、无气泡溢出为准。机械化滑模施工的过程中,需在控制滑升速度的同时进行振捣和抹面施工,实施结构表面的二次压光,避免表面塑性裂缝的出现。进行连续的混凝土浇筑作业时,需在施工缝区域设置止水条,做好缝面的凿毛清理后才能进行后续浇筑。

3.4 混凝土养护技术

混凝土养护工作的开展,是保障混凝土抗渗性能、防止干缩裂缝的关键环节,待混凝土浇筑结束且表面初凝后,及时进行保湿养护。高温大风季节,浇筑完成后短时间内覆盖土工布、保湿毡洒水保湿;低温环境做好保温覆盖,防止表面温度骤降产生温度裂缝。普通混凝土养护时间不少于14d,掺加粉煤灰、膨胀剂的混凝土养护时间延长。整个养护期间,需确保结构表面湿润,养护期内,严禁车辆碾压、渠道过水。

结束语

总之,在我国水利工程建设规模不断扩大的过程中,开展混凝土衬砌渠道的防渗漏处理工作至关重要,具体施工阶段需要根据结构的实际情况灵活选择刚性类防渗漏技术、柔性类防渗漏技术、新型复合材料防渗技术、智能防渗漏技术。另外配合严格的技术管控,有效提升施工效果,将渗漏问题的不良影响降到最低,保证水利工程运行的安全性和稳定性。

[参考文献]

- [1]李云鹏.水利工程建设施工中混凝土衬砌渠道防渗漏技术的运用[J].工程建设与设计,2023(20):204-206.
- [2]廖业飞.水利工程现浇混凝土衬砌渠道防渗漏技术[J].建材发展导向,2024,22(16):115-117.
- [3]汤涌.水利工程施工中渠道防渗技术分析[J].科技创新与应用,2022,12(21):157-160.
- [4]靳国平.水利工程中混凝土衬砌渠道渗漏策略探析[J].建材发展导向,2023,21(16):102-104.
- [5]彭新梅.水利工程施工中渠道防渗技术[J].建材发展导向,2023,21(12):130-132.
- [6]吴利园.水利渠道施工中防渗漏技术运用[J].科技创新与应用,2024,12(15):151-154.
- [7]王海伟.水利工程混凝土衬砌渠道防渗漏技术探讨[J].工程与管理科学,2025,7(12):58-60.
- [8]张磊.现浇混凝土渠道防渗加固施工技术分析[J].工程技术研究,2025,11(08):112-114.