

水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术探讨

赵 云¹, 刘 洋², 郑昆冈³

(1. 青岛市水利勘测设计研究院有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 山东省水网运行调度中心, 山东 济南 250100;

3. 山东省调水工程运行维护中心青岛分中心, 山东 青岛 266000)

摘 要 混凝土裂缝是水利工程施工中主要的质量问题, 直接影响水利工程结构稳定性以及使用年限。本文从混凝土裂缝形成的主要影响因素入手, 对水利工程施工全过程的防治技术体系进行系统的分析, 包括材料优化、工艺控制、环境适应等预防措施, 以及表面封闭、注浆封堵、结构补强等治理技术, 结合水利工程高水头、大温差、强侵蚀的环境特点, 提出预防为主、治理为辅、全程管控的技术路径, 以期为提高水利工程混凝土结构抗裂性能提供实践参考。

关键词 水利工程; 混凝土裂缝; 表面封闭; 注浆封堵; 结构补强

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.017

0 引言

水利工程是国民经济的重要基础设施, 其混凝土结构长久以来要面对水流冲刷、温度变化、地基沉降等复杂的影响, 产生裂缝后容易造成渗漏、结构强度下降等连锁反应, 严重时会对工程的安全运行造成威胁。混凝土裂缝的产生是材料特性、施工工艺、环境因素三者共同作用的结果, 水利工程施工场景的特殊性又加大了裂缝防控的难度。基于此, 探究水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术具有现实意义。

1 水利工程施工中混凝土裂缝的防治理论基础

1.1 裂缝形成的核心力学机制

混凝土在凝结硬化和使用初期由于水化热释放、体积收缩等原因产生内应力, 当内应力超过材料的抗拉强度时就会产生裂缝, 水利工程中地基约束、环境温湿度剧变等因素会进一步增大这一效应。材料内部孔隙结构、骨料与胶凝材料的界面结合状态影响应力传递效率, 施工过程中振捣不均、养护不当等操作会加大内部缺陷, 给裂缝萌生提供条件^[1]。

1.2 水利工程的特殊影响因素

水利工程混凝土结构大多处在水下、地下或者露天环境之中, 会遭遇高压水渗透、冻融循环、干湿交替等严酷的工况, 这些状况同施工过程相互叠加, 加大了裂缝防控的难度。大体积混凝土浇筑时产生的温度应力、高空作业导致的浇筑连续性问题、水下施

工时密实度控制的难题等都是造成裂缝的特殊原因, 需要防治技术适应水利工程的施工环境与结构特点, 达到技术措施和工程场景精准匹配的目的。

1.3 防治技术的核心原则

水利工程混凝土裂缝防治要遵循源头控制、过程调节、精准治理的基本原则, 把技术干预贯穿到施工全过程。源头控制以材料性能优化为主, 通过科学配比降低混凝土收缩性、水化热; 过程调节以施工工艺精细化控制为主, 减少人为操作造成的结构缺陷; 精准治理根据裂缝类型、规模、所处环境选择合适的治理技术, 避免过度治理或者治理不足。

2 水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术

2.1 材料优化与配合比设计

混凝土材料性能是抗裂能力的基础, 施工前要根据水利工程的使用要求做针对性的优化。采用低热型胶凝材料, 复合矿物掺合料, 降低水化热峰值和速率, 改善混凝土内部孔隙结构, 提高界面粘结强度; 优化骨料级配, 选用质地坚硬、级配连续的骨料, 减少空隙率, 增强骨架支撑作用; 合理掺加复合型外加剂, 通过缓凝、引气、减水等协同作用, 调节混凝土工作性及体积稳定性, 防止早期塑性收缩裂缝和后期干燥收缩裂缝。

2.2 施工工艺的精细化管控

施工过程是裂缝预防的重要环节, 要根据水利工程不同的施工场景制定专项控制措施。大体积混凝土

作者简介: 赵云 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水工建筑物结构设计及水利工程施工技术。

浇筑采用分层分块施工法,控制浇筑层厚度和间歇时间,配合预埋冷却水管、布设保温层等温控措施,平衡内外温差和温度梯度;浇筑过程中使用高频振捣设备保证密实度,防止漏振、过振造成内部缺陷,控制浇筑速度,减少混凝土堆积产生的附加应力;模板工程需注意支护刚度和拆除时机,避免过早拆模造成结构变形开裂,水下浇筑时采用导管法保证混凝土浇筑质量,防止离析、泌水形成薄弱层面^[2]。

2.3 施工环境的适应性调控

水利工程施工环境复杂多变,根据气候、地质状况实时调整防控手段。高温季节施工时采用骨料预冷、搭设遮阳棚、夜间浇筑等方法降低混凝土入仓温度,加强表面保湿养护,延缓水分蒸发速率;寒冷地区施工要做好保温防冻措施,选用早强型混凝土并掺入防冻剂,浇筑后及时覆盖保温材料,防止冻融循环对未硬化混凝土的破坏;雨季施工重点控制骨料含水率,及时调整配合比,浇筑后做好防雨遮盖,防止雨水冲刷造成表面起砂开裂;对于地基不均匀地段,施工前进行地基处理,采用换填、夯实等方法提高地基承载力的均匀性,减少沉降引起的结构裂缝。

3 水利工程施工中混凝土裂缝的治理技术

3.1 表面封闭技术的应用

宽度小于0.2 mm、深度较小、位于表面的裂缝,用表面封闭法来防止裂缝继续延伸。封闭材料的选择要严格遵循环境适配原则:干燥环境中环氧树脂类封闭胶因粘性好、耐候性佳成为首选;潮湿环境中水固化型聚合物材料能在有水存在的情况下发生交联反应,形成致密防水层;水下裂缝处理要使用水下固化树脂或聚合物水泥浆,这些材料可以在水下快速凝固并与混凝土表面形成化学锚栓效应。

施工时基层处理为保证封闭效果。使用高压空气枪、钢丝刷等工具将裂缝表面的浮浆、油污、松散颗粒彻底清除,干燥环境要将基层含水率控制在6%以下,水下施工要利用水下机器人或潜水员配合,用高压水枪完成表面清理。封闭材料涂抹分多层次进行,首层用稀释过的材料渗透裂缝毛细孔,涂层厚度控制在0.5 mm到1 mm之间。

3.2 注浆封堵技术的实施

贯穿性裂缝、深层裂缝和有防渗要求的裂缝都会对结构完整性造成严重破坏,注浆封堵技术通过填充裂缝内部空隙来恢复结构的力学性能。注浆材料的选择要兼顾渗透能力与粘结强度,高渗透环氧树脂灌浆料

适合于细微裂缝(宽度 ≥ 0.1 mm),其粘度低至50~150 MPa·s,可以渗透到裂缝的深处,改性水泥浆因为成本低、耐久性好,常被用来处理宽度较大的裂缝(≥ 0.5 mm)。水免型注浆材料可以抵抗水流冲刷,在动态水环境中快速固化。

施工前要利用超声波检测仪、探地雷达等设备对裂缝进行三维定位,准确测定裂缝走向、深度和宽度分布。注浆孔布置采用“梅花形交错、间距合理”的原则,孔距一般为20~30 cm,孔径比注浆管外径大2~3 mm。采用电动高压注浆泵进行作业,注浆压力根据裂缝深度和材料特性动态调整,浅层裂缝控制在0.2~0.5 MPa,深层裂缝提高到1~2 MPa。注浆顺序按照“由浅入深、由低到高、间隔跳注”的原则,防止产生气腔。

3.3 结构补强技术的应用

当裂缝造成结构承载能力下降或者存在失稳风险的时候,需要把注浆封堵和结构加固技术结合起来,形成修复加固一体化解决方案。在水利工程中,由于碳纤维布的强度高、耐腐蚀性好,所以它经常用于粘贴加固技术。施工时先用环氧砂浆对混凝土表面凹凸处进行找平,误差控制在2 mm以内,涂刷底胶形成过渡层后,将碳纤维布浸渍配套树脂,沿主应力方向粘贴,用滚筒反复滚压排出气泡,保证粘贴密实度 $\geq 95\%$ 。

采用钢板加固的外包加固技术,适用于大跨度水工结构、闸墩等重要部位。在钢板和混凝土界面处填充高强度结构胶(剪切强度 ≥ 15 MPa),利用化学粘结和M12-M16膨胀螺栓的机械锚固双重作用来形成复合受力体系。对裂缝集中处增设加劲肋提高钢板刚度,螺栓间距控制在20 cm到30 cm之间,保证钢板与混凝土共同工作^[3]。

4 水利工程混凝土裂缝防治的综合保障体系

4.1 技术标准与质量管控

建立适应水利工程特点的混凝土裂缝防治技术标准体系,要深入结合现行的水工混凝土施工规范、混凝土结构耐久性设计标准等行业的规范,同时要融入工程实践中的创新经验。明确材料选型要求,细化不同强度等级、抗渗等级混凝土的原材料技术指标,水泥品种(优先选用水化热低的矿渣硅酸盐水泥)、骨料级配标准、外加剂掺量控制范围;规范施工工艺细节,涵盖混凝土搅拌时间、运输温度控制、浇筑分层厚度、振捣密实度标准等关键参数;针对不同类型的裂缝(塑性裂缝、温度裂缝、干缩裂缝等),制定对应的治理措施技术规程。

施工前组织专家小组和技术骨干编制专项防治方案,根据工程规模(大、中、小型水利工程)、结构形式(水坝、渡槽、涵管等)、环境条件(高寒、高温、潮湿地区)来制定针对性的技术措施。高坝大体积混凝土施工中用分层分块浇筑、预埋冷却水管等温控技术,在薄壁结构施工中优化混凝土配合比来降低收缩风险。

4.2 施工人员与设备保障

加强施工人员的专业技能培训,创建“理论教学+实操演练+案例分析”的三维培训体系。理论课程系统讲解水利工程混凝土裂缝的产生机理,包括温度应力、收缩应力、地基不均匀沉降等;实操环节设置模板安装、混凝土浇筑振捣、温控设备操作等模拟场景,加强技术要点的掌握;通过典型工程案例剖析,如某水库大坝由于温控不当造成的贯穿性裂缝的修复过程,提高操作人员的风险防范意识和应急处理能力。培训之后组织严格考核,实行持证上岗制度,保证关键岗位人员技术达标。

设备保障上按照工程需要配备专业施工、检测设备。施工设备有高精度智能温控系统(可以实时调节冷却水流量和温度)、自密实混凝土浇筑设备、智能振捣机器人等;检测仪器有裂缝测宽仪、钢筋扫描仪、应力应变监测仪等^[4]。建立设备全生命周期管理台账,制订详细的维护保养制度,日常巡检记录设备运行状况,每月做深度检修和校准,每季度进行性能评定,使设备一直处于最佳的工作状态。同时,建立设备应急调配机制,与周围施工单位或者设备供应商签订互助协议,以应对突发的设备故障,给裂缝防治技术的精准执行提供可靠的技术保障。

4.3 动态监测与应急响应

建立混凝土结构裂缝动态监测体系,采用光纤光栅传感器、振弦式应变计、无线倾角传感器等智能监测设备,对混凝土的温度、应力、位移等主要数据进行实时采集。利用物联网技术把数据传送到工程智慧管理平台,利用大数据分析和 AI 算法对裂缝发展趋势进行预测预警。在大坝坝踵、闸墩支座等重点部位加密布设监测点,形成点、线、面相结合的立体监测网络,保证裂缝隐患早发现、早研判。

对水利工程施工过程中出现的突发裂缝隐患,制定分级分类的应急响应预案。根据裂缝危害程度将裂缝分为 I 级(紧急)、II 级(严重)、III 级(一般),确定不同等级的应急处理程序: I 级裂缝要立即停止有关区域的施工,启动人员疏散和专家会诊; II 级裂

缝采取临时加固措施后,组织专项技术论证; III 级裂缝由现场技术人员按照既定方案处理^[5]。细化应急技术措施,表面封闭法(环氧树脂胶泥涂抹)、压力注浆法(水泥-水玻璃双液浆)、结构补强法(粘贴碳纤维布)的适用场景及操作规范。明确应急责任分工,设立现场指挥组、技术保障组、物资调配组等职能小组,保证应急响应高效有序。同时储备足量的应急治理材料(快速修补剂、止水带、灌浆材料)和应急设备(移动式注浆泵、发电机、照明设备),定期对应急物资进行清点与更新,在裂缝初期出现的时候可以迅速启动应急处置,有效控制裂缝的发展,将质量风险降到最低。

5 结束语

水利工程施工中混凝土裂缝的防治是一项系统性工程,需要结合工程实际,综合利用材料科学、施工技术、结构力学等多学科的知识,构建预防、治理、保障的全链条技术体系。通过科学的材料优化、精细的施工控制、合适的治理技术、完善的保障措施,可以有效地减少混凝土裂缝产生的概率,提高裂缝治理的效果。随着新型材料技术、智能监测技术在水利工程中逐渐应用,混凝土裂缝防治技术将朝着更加精确化、智能化的方向发展,并依靠技术创新提高水利工程混凝土结构抗裂能力和使用安全性。在工程实践中,要根据具体的工程特点来优化技术方案,使防治效果和经济效益达到统一,为水利工程的长期稳定运行提供有力保障。

参考文献:

- [1] 李征,王栋.浅谈水利工程施工中的混凝土裂缝的防治技术[A].智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一)[C].重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会、重庆市大数据和人工智能产业协会,2025.
- [2] 宋林超.水利工程中混凝土坝裂缝修补材料的耐久性及施工工艺优化[A].智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(三)[C].重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会、重庆市大数据和人工智能产业协会,2025.
- [3] 何吉东.水利工程中混凝土裂缝的防治施工技术[J].中国水泥,2025(05):110-112.
- [4] 杨文锐.水利施工中混凝土裂缝防治管理研究[J].低碳世界,2025,15(04):61-63.
- [5] 吴谷丰.水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025(10):211-213.