

水工结构工程裂缝成因及防治

刘耀飞

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 水工结构作为水利工程核心, 长期处于复杂水环境与受力状态, 裂缝问题频发且危害极大。本文先阐述裂缝相关基础理论, 明确水工结构类型、裂缝分类及危害机理。再从材料、施工、环境与受力三方面, 系统剖析裂缝成因。最后针对性提出检测诊断技术、预防措施及治理技术, 构建“检测-预防-治理”完整技术体系。研究旨在分析裂缝产生规律, 为水工结构裂缝防控提供技术支持, 保障水利工程长期安全稳定运行, 对提升水工结构耐久性具有重要实践价值。

关键词: 水工结构; 工程裂缝成因; 检测; 防治技术

引言: 水利工程是国民经济重要基础设施, 水工结构的安全稳定直接关系工程效益与区域安全。裂缝是水工结构最常见病害, 易引发防渗失效、承载力下降、材料腐蚀等连锁问题, 缩短工程使用寿命, 甚至诱发安全事故。当前, 水工结构裂缝防控仍面临成因复杂、技术适配性不足等难题。基于此, 本文结合工程实际, 深入分析裂缝成因, 优化检测与防治技术方案, 为破解水工结构裂缝治理瓶颈提供理论与实践参考, 助力水利工程高质量运维。

1 水工结构工程裂缝相关基础理论

1.1 水工结构的常见类型及受力特点

水工结构是水利工程核心组成部分, 常见类型包括挡水结构、泄水结构、输水结构等。挡水结构以重力坝、拱坝为代表, 主要承受水压力、自重及扬压力, 受力呈现明显的空间分布特性, 坝体各截面需平衡水平推力与竖向荷载。泄水结构如溢洪道、泄水孔, 除承受水压力外, 还需应对高速水流冲刷产生的动水压力。输水结构中的隧洞、涵管, 受力以围岩压力、内水压力为主, 且易受地基不均匀变形影响。这类结构长期处于水环境中, 受力复杂且工况多变, 为裂缝产生提供了潜在条件。

1.2 裂缝的分类及判定标准

水工结构裂缝按成因可分为结构性裂缝与非结构性裂缝, 结构性裂缝由荷载作用引发, 危害程度较高; 非结构性裂缝多由温度、收缩等因素导致, 虽初期影响较小, 但易逐步扩展。按形态可分为表面裂缝、深层裂缝及贯穿裂缝, 贯穿裂缝对结构防渗性、整体性破坏最为严重。判定标准以《水工混凝土结构设计规范》为依据, 表面裂缝宽度 $\leq 0.2\text{mm}$ 为允许范围, 超过则需处理; 深层裂缝深度超过结构截面厚度 $1/3$, 或贯穿裂缝贯通截面, 均需紧急处置, 同时结合裂缝发展速率、所处部位综合判

定危害等级。

1.3 裂缝对水工结构的危害机理

裂缝会从多维度破坏水工结构稳定性, 首要危害是降低防渗性能, 水流通过裂缝渗透, 不仅导致水资源流失, 还会引发地基渗透变形、管涌等灾害。其次削弱结构承载力, 裂缝使截面有效受力面积减小, 应力集中现象加剧, 易引发结构局部破坏, 严重时导致整体失稳。水环境中的水分、侵蚀性介质通过裂缝侵入结构内部, 腐蚀钢筋、骨料, 加速混凝土碳化, 降低材料耐久性, 形成“裂缝扩展-侵蚀加剧-性能衰减”的恶性循环, 缩短水工结构使用寿命, 对水利工程安全运行构成重大威胁^[1]。

2 水工结构工程裂缝成因分析

2.1 水工结构工程裂缝的材料因素成因

材料自身特性及质量问题是引发水工结构裂缝的基础因素, 核心成因体现在以下几方面: (1) 原材料质量不达标, 水泥强度等级波动、安定性不合格, 骨料级配不均、含泥量超标, 会导致混凝土整体性能下降, 抗裂能力先天不足, 易在后期形成裂缝。(2) 混凝土配合比设计不合理, 胶凝材料用量过高、水胶比过大, 会加剧混凝土收缩变形, 降低结构密实度; 骨料用量或粒径搭配不当, 会影响混凝土和易性与力学性能, 为裂缝产生提供条件。(3) 外加剂使用不规范, 选用的外加剂与水泥适应性差, 或掺量过高、过低, 会破坏混凝土内部结构稳定性, 要么引发异常收缩, 要么降低混凝土强度, 诱发裂缝。(4) 材料收缩特性影响, 水泥水化过程中产生的体积收缩、骨料干燥收缩及混凝土硬化后的徐变收缩, 若无法有效释放, 会在结构内部形成内应力, 当内应力超过材料抗拉强度时便会产生裂缝。

2.2 水工结构工程裂缝的施工因素成因

施工环节的工艺缺陷和管控不当, 是导致水工结构

裂缝的关键后天因素,具体成因包括:(1)混凝土浇筑及振捣工艺不佳,浇筑顺序混乱、分层厚度过大,会导致混凝土密实度不均;振捣不足易形成蜂窝、孔隙,振捣过度则会造成骨料离析,两者均会削弱结构抗裂能力。(2)养护措施不到位,混凝土浇筑完成后未及时覆盖保湿,或养护时间不足,会导致表面水分快速蒸发,内外温差及湿度差增大,引发表面裂缝,后续逐步向内部扩展。(3)模板施工不规范,模板支撑体系刚度不足、稳定性差,会在混凝土浇筑过程中产生变形;模板拆除时间过早,混凝土强度未达到设计要求,无法承受自身重量及外部荷载,易产生受力裂缝。(4)施工缝处理不当,施工缝留置位置不合理,或清理不彻底、结合面未做凿毛处理,会导致新旧混凝土结合不紧密,形成薄弱环节,在应力作用下出现裂缝。

2.3 水工结构工程裂缝的环境与受力因素成因

外部环境作用及结构受力异常,是促使水工结构裂缝产生和扩展的重要诱因,主要成因如下:(1)温度变化影响,环境温度骤升骤降会使混凝土表面与内部产生较大温差,形成温度应力,反复的温度循环会不断加剧应力累积,最终突破材料抗拉极限形成裂缝。(2)环境侵蚀作用,潮湿环境、冻融循环会破坏混凝土内部微观结构,冻融循环中水分结冰膨胀会产生内胀力,反复作用下混凝土表层剥落、内部开裂;腐蚀性介质侵入则会弱化材料性能,降低抗裂能力。(3)受力状态异常,结构承受的水压力、荷载超过设计标准,或荷载分布不均,会导致局部应力集中,当应力超过结构承载能力时,会产生结构性裂缝。(4)地基变形影响,地基勘察不充分导致承载力不均,或后期地基发生不均匀沉降,会使水工结构产生附加应力,这种应力持续作用会引发结构开裂,且裂缝多呈不规则分布^[2]。

3 水工结构工程裂缝的检测及防治技术

3.1 水工结构工程裂缝的检测与诊断技术

裂缝检测与诊断是水工结构安全管控的前提,核心围绕外观排查、无损检测、参数判定及数据评估开展。(1)外观检测遵循“全面覆盖、重点排查”原则,通过肉眼结合标尺、放大镜等简易工具,记录裂缝位置、走向、长度及表面形态,标注所处结构部位与周边环境特征;隐蔽部位借助登高设备或内窥镜辅助检测,杜绝检测盲区。(2)无损检测需结合结构特点选用适配方法,超声波检测通过声波传播速度及幅值变化判定裂缝深度,回弹法辅助评估裂缝周边混凝土强度,雷达探测适用于隐蔽裂缝及内部缺陷排查,红外热成像技术可快速识别裂缝渗透引发的温度差异区域,多技术协同提升检测准确性。(3)

参数判定需规范流程,宽度检测采用裂缝宽度仪,选取裂缝中间及两端三点测量取平均值;深度检测通过无损检测数据校准,贯穿裂缝需结合双面检测结果验证。同时定期监测裂缝发展速率,依据连续观测数据判断其是否稳定。(4)数据分析需结合规范标准,对检测数据分类整理、剔除异常值,结合结构设计参数及运行工况,评估裂缝对结构安全性、防渗性的影响程度,划分危险等级,为后续防治措施制定提供可靠数据支撑^[3]。

3.2 水工结构工程裂缝的预防措施

3.2.1 原材料质量控制与配合比优化

(1)原材料质量控制需严格执行进场检验制度,水泥核查强度等级、安定性、凝结时间等指标,优先选用水化热低、体积稳定性好的品种,杜绝受潮、过期水泥投入使用;细骨料控制含泥量、泥块含量及颗粒级配,确保质地坚硬洁净;粗骨料检查强度、压碎值及针片状含量,级配需符合设计要求;外加剂需与水泥适配,经试验验证性能达标后方可使用,严禁随意更换类型或调整掺量。(2)配合比优化以降低水化热、提升抗裂性能为核心,合理控制水胶比,在满足施工和易性的前提下减小用水量;优化胶凝材料用量,掺入适量矿物掺合料改善混凝土微观结构,提升密实度与抗渗性;调整骨料级配,使骨料骨架密实,减少胶凝材料填充量,同时控制混凝土坍落度,避免坍落度过大导致收缩裂缝。

3.2.2 施工工艺改进与全过程质量管控

(1)施工工艺改进需规范混凝土搅拌、运输、浇筑及振捣流程,搅拌时严格按配合比投料,控制搅拌时间确保物料混合均匀;运输过程做好保温保湿措施,缩短运输时间,防止坍落度损失过大或温度波动超标;浇筑前清理基层杂物与积水,浇筑分层进行,控制分层厚度与间歇时间,振捣采用插入式振捣器,遵循快插慢拔原则,振捣至表面泛浆、无气泡溢出,杜绝漏振、过振。(2)全过程质量管控需建立施工台账,实时记录原材料用量、搅拌参数、浇筑时间等信息;加强养护管理,及时覆盖保湿材料,控制养护环境温湿度,延长养护周期;严格执行施工缝、后浇带施工规范,做好界面处理,避免形成薄弱环节。

3.2.3 温度应力控制与抗裂设计优化

(1)温度应力控制从浇筑温度、内部温升及降温速率三方面入手,浇筑前对骨料、水泥预冷却,必要时采用冰水搅拌混凝土,降低初始浇筑温度;合理安排施工进度,避免大面积连续浇筑,设置测温点实时监测混凝土内表温差,控制温差在允许范围;降温阶段采取保温覆盖措施,减缓降温速率,防止温度应力超过混凝土抗

拉强度。(2) 抗裂设计优化结合结构受力特点与环境条件,合理选择结构形式与截面尺寸,增强整体刚度与抗裂能力;配置足量构造钢筋,优化钢筋间距与保护层厚度,约束裂缝开展;大体积混凝土采用跳仓法、分段分层浇筑,设置温度伸缩缝释放温度应力;根据运行环境选用适配强度等级混凝土,提升抗裂耐久性。

3.2.4 地基处理与结构设计完善措施

(1) 地基处理前开展详细地质勘察,明确土层分布、承载力等指标,软土地基采用换填、夯实、排水固结等措施提升承载力,岩质地基清理风化层、破碎带,采用灌浆加固消除缺陷,地基处理后需经质量检测达标方可施工上部结构。(2) 结构设计完善需考虑地基不均匀沉降影响,采用合理基础形式,增强整体性与抗变形能力;优化受力体系,避免局部应力集中,对边角、孔洞等易开裂部位采取加强构造措施;设计合理的防渗、排水系统,降低水压力作用;完善抗疲劳设计,考虑水流冲刷、温度循环等长期作用,提升抗裂稳定性。

3.3 水工结构工程裂缝的治理技术

3.3.1 表面修补技术及适用场景

表面修补技术以封闭裂缝、防止外界介质侵入为核心,适用于宽度较窄、深度较浅、不影响承载力的表层裂缝,具体技术要点:(1) 涂抹法采用聚合物水泥浆、环氧砂浆等材料,施工前清理裂缝表面浮渣、灰尘,确保基层干燥洁净,涂抹厚度均匀并压实抹平;(2) 粘贴法采用玻璃纤维布、碳纤维布等材料,粘结剂需均匀涂抹,布材粘贴平整无气泡、空鼓;(3) 表面凿槽嵌补法沿裂缝凿设V型或U型槽,清理槽内杂物并洒水湿润,填入嵌缝材料并压实,修补材料需满足抗渗、抗冻、抗腐蚀要求。

3.3.2 灌浆加固技术的应用与操作要点

灌浆加固技术通过注入浆液胶结裂缝两侧结构,恢复整体性与承载力,适用于裂缝较深、影响强度或防渗性能的情况,操作要点:(1) 浆液根据裂缝宽度、介质环境选用水泥浆、水泥-水玻璃双液浆、环氧浆液等,确保浆液流动性、粘结力及耐久性达标;(2) 施工前清理

裂缝表面杂物与松散体,采用封缝材料封闭裂缝,合理设置灌浆孔与排气孔;(3) 灌浆设备提前调试,灌浆遵循由低到高、由浅到深原则,控制压力与流量,避免结构二次损伤;(4) 观察排气孔出浆情况,当出浆浓度与进浆浓度一致且无气泡时停止灌浆,及时封堵灌浆孔,养护至浆液达到设计强度。

3.3.3 结构加固改造技术处理严重裂缝

结构加固改造技术适用于裂缝宽深、承载力下降明显的严重裂缝,核心是提升结构整体承载能力,技术要点:(1) 加大截面法需凿除构件表面老化松散混凝土,清理基层并植入连接钢筋,浇筑混凝土或喷射混凝土,增加截面尺寸与配筋量,确保新旧结构结合紧密;(2) 粘贴加固法采用高强度纤维复合材料或钢板,粘贴于构件受拉区或裂缝部位,粘贴前处理构件表面,保证平整干燥,粘结剂满足强度与耐久性要求,粘贴后加压固定至粘结剂固化;(3) 增设支撑法通过增加支撑构件调整受力体系,减小原构件荷载,支撑布置需结合结构受力特点,确保受力均匀、连接牢固;加固完成后需检测结构承载力,达标后方可投入使用^[4]。

结束语:水工结构裂缝防控是系统性工程,需贯穿设计、施工、运维全生命周期。本文全面梳理裂缝成因与防治技术,明确材料、施工管控是预防核心,精准检测是治理前提,适配技术是治理关键。未来可结合智能化检测手段,深化裂缝成因与扩展规律研究,优化防治技术体系。期望本文研究能为工程实践提供借鉴,推动水工结构裂缝防控技术迭代,筑牢水利工程安全防线。

参考文献:

- [1]李明会.水工结构工程裂缝成因及防治[J].中国地名,2025(2):0217-0219.
- [2]邵乐.水工结构工程裂缝成因及防治[J].城市建筑与发展,2025,6(13):11-12.
- [3]杨猛,郭林林.水工结构工程裂缝成因及防治探讨[J].珠江水运,2023(11):81-83.
- [4]蓝鸿鹏.水工结构工程裂缝机理及防治探讨[J].科学技术创新,2024(21):191-194.