

水利工程混凝土施工裂缝防控关键技术研究

曹后海¹ 李 硕² 宋 浩²

1. 徐州市水利工程运行管理中心 江苏 徐州 221009

2. 徐州市水利工程建设管理中心 江苏 徐州 221009

摘要：水利工程混凝土施工裂缝直接影响结构安全与耐久性。研究聚焦裂缝防控关键技术，从材料选择、配合比优化、温度控制、施工工艺及养护管理等方面展开。通过选用低水化热水泥、掺加粉煤灰等添加剂，结合二次振捣、分层浇筑工艺，并实施实时测温与智能温控系统，有效控制内外温差。同时，强化混凝土养护与表面防护，形成全流程裂缝防控体系，显著提升水利工程混凝土施工质量与长期稳定性。

关键词：水利工程；混凝土施工；裂缝防控；关键技术

引言：水利工程作为国家基础设施的关键构成，对保障民生、推动经济发展意义重大。混凝土作为水利工程的主要建筑材料，其施工质量直接关系到工程整体性能与安全。然而，受材料特性、施工工艺、环境因素等影响，混凝土施工裂缝问题频发，不仅影响结构美观，更会降低工程耐久性与安全性。因此，深入探究水利工程混凝土施工裂缝防控关键技术，对提升工程建设质量、保障工程长效运行具有迫切而重要的现实意义。

1 水利工程混凝土裂缝成因分析

1.1 材料因素

(1) 水泥品种与掺合料影响：不同品种水泥水化热差异大，如硅酸盐水泥水化热高，易引发温度应力；掺合料如粉煤灰、矿渣粉若质量不达标或掺量不当，会降低混凝土强度与抗裂性。(2) 骨料质量与级配问题：骨料含泥量过高会削弱混凝土界面粘结力，骨料级配不合理（如连续级配缺失）会导致混凝土密实度不足，易形成裂缝通道。(3) 外加剂选择与配合比设计：选错外加剂（如缓凝剂用量过多）会延长凝结时间，增加收缩风险；配合比中水泥用量过高、水灰比偏大，会加剧混凝土干缩与水化热反应。

1.2 设计因素

(1) 结构形式与应力分布：结构设计不合理（如厚大体积混凝土未设变形缝）会使应力集中，在薄弱部位产生裂缝；复杂结构受力不均，易引发局部拉应力超过混凝土抗拉强度。(2) 配筋率与构造设计缺陷：配筋率过低，混凝土抗拉能力不足；构造细节缺失（如阴阳角未设加强筋），易在应力集中处出现裂缝。

1.3 施工因素

(1) 浇筑工艺与振捣密实度：浇筑速度过快易导致骨料离析，振捣不密实会留下空隙，形成裂缝隐患；分

层浇筑时结合面处理不当，易产生施工缝裂缝。(2) 养护条件与拆模时间控制：养护不及时或保湿不足，混凝土表面水分快速蒸发，易产生干缩裂缝；拆模过早，混凝土强度未达标，承受荷载后易出现受力裂缝。(3) 施工缝与预埋件处理不当：施工缝清理不彻底，新旧混凝土粘结不良；预埋件周边混凝土振捣不密实，易形成局部裂缝^[1]。

1.4 环境因素

(1) 温度应力：混凝土浇筑后水化热积聚，内外温差过大产生温度应力，超过抗拉强度引发裂缝；日照辐射使结构表面温度骤升骤降，产生反复温度应力，加速裂缝发展。(2) 湿度变化与干缩效应：环境湿度频繁波动，混凝土反复干湿循环，加剧干缩变形，当干缩受到约束时产生裂缝；长期处于干燥环境，混凝土持续干缩，易形成贯穿性裂缝。(3) 地基沉降与约束应力：地基不均匀沉降使结构产生附加应力，导致裂缝；结构周边约束过强（如与老混凝土连接过紧），混凝土收缩时无法自由变形，产生约束应力引发裂缝。

1.5 裂缝分类与特征

(1) 塑性收缩裂缝：多出现于混凝土浇筑后初凝前，表现为表面不规则、短小的网状裂缝，深度较浅，主要因混凝土表面水分快速蒸发，内部水分补充不及时，表面体积收缩受内部约束所致。(2) 干缩裂缝：多在混凝土硬化后出现，裂缝走向不规则，常见于结构表面，宽度较小（一般0.05-0.2mm），深度可贯穿或不贯穿结构，主要由混凝土水分散失引起体积收缩，且收缩受约束产生拉应力导致。(3) 温度裂缝：形态多样，可呈纵向、横向或斜向，裂缝宽度随温度变化而波动，夏季宽、冬季窄，厚大体积混凝土中多为内部向表面发展的裂缝，主要由温度变化产生的温度应力超过混凝土抗拉强度造成。

(4) 受力裂缝: 裂缝走向与受力方向相关, 如受弯构件裂缝多垂直于受力筋方向, 受拉构件裂缝平行于受力方向, 裂缝宽度较均匀, 深度多贯穿构件, 主要因结构承受的荷载超过设计承载力, 或内力分布不均导致局部拉应力过大引发。

2 水利工程混凝土施工裂缝防控关键技术

2.1 材料优化技术

(1) 低热/抗裂水泥与矿物掺合料: 优先选用低热硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥, 其水化热释放速率慢、峰值低, 可减少温度应力产生。合理掺入I级粉煤灰或S95级矿渣粉, 掺量控制在30%~50%, 不仅能替代部分水泥降低水化热, 还能改善混凝土和易性, 减少孔隙率, 提升抗裂性能。需注意掺合料需经检验, 确保烧失量、需水量比等指标符合规范要求。(2) 骨料级配优化与纤维增强技术: 骨料采用连续级配, 粗骨料最大粒径根据结构尺寸确定, 一般不超过构件最小截面尺寸的1/4, 细骨料选用中砂, 细度模数控制在2.3~3.0, 可减少水泥用量, 降低干缩。同时, 掺入聚丙烯纤维、钢纤维等增强材料, 纤维掺量按体积率0.1%~0.3%控制, 能有效抑制混凝土早期塑性收缩裂缝, 增强抗拉强度, 提升抗裂能力, 纤维需均匀分散, 避免结团^[2]。(3) 补偿收缩混凝土与自愈合材料应用: 采用补偿收缩混凝土, 通过掺入膨胀剂(如钙矾石型膨胀剂), 使混凝土在硬化过程中产生适度膨胀, 抵消干缩变形, 膨胀剂掺量需根据设计膨胀率确定, 一般为胶凝材料总量的6%~12%。此外, 添加自愈合材料(如微生物菌剂、可降解胶囊), 当混凝土出现微裂缝时, 自愈合材料可通过化学反应生成碳酸钙等物质填充裂缝, 实现裂缝自修复, 提升混凝土耐久性, 降低裂缝扩展风险。

2.2 设计优化技术

(1) 结构分缝与应力释放设计: 对于厚大体积混凝土结构(如大坝、溢洪道基础), 合理设置伸缩缝、沉降缝, 缝间距根据混凝土收缩特性、环境温度确定, 一般伸缩缝间距不超过20m, 沉降缝设置在地基承载力差异较大处。分缝处采用止水带(如橡胶止水带、铜止水带)密封, 防止渗漏。同时, 在结构应力集中部位(如转角、孔洞周边)设置应力释放孔或削弱区, 减少局部应力集中, 避免裂缝产生。(2) 配筋率优化与构造措施改进: 根据结构受力计算, 优化配筋率, 受拉区配筋率不低于0.2%, 确保混凝土与钢筋协同工作, 共同抵抗拉应力。在构件阴阳角、洞口周边增设加强筋, 加强筋长度不小于600mm, 直径与受力筋一致, 增强局部抗裂能力。此外, 采用小直径、密间距的配筋方式, 减少钢筋间距, 可有效抑制裂缝宽度, 提升结构抗裂性能, 钢筋保护层厚度需符合规

范要求, 避免因保护层过薄导致裂缝^[3]。

2.3 施工控制技术

(1) 分层分段浇筑与温度控制措施: 混凝土浇筑采用分层分段法, 分层厚度根据振捣设备确定, 一般不超过500mm, 分段长度结合施工能力、温控要求确定, 每段浇筑时间控制在混凝土初凝前, 避免出现冷缝。浇筑过程中, 实时监测混凝土入模温度, 入模温度不超过30℃(夏季高温时需采取预冷措施, 如骨料预冷、加冰拌合)。浇筑完成后, 通过预埋温度传感器监测混凝土内部温度, 当内外温差超过25℃时, 及时采取温控措施(如覆盖保温被、通冷水), 控制温差在允许范围内。(2) 智能养护系统: 采用智能养护系统, 通过布置温湿度传感器, 实时采集混凝土表面及环境温湿度数据, 数据传输至控制系统, 当湿度低于80%或温度下降过快时, 自动启动喷淋设备(如旋转喷淋头、雾化喷淋系统)进行保湿养护, 养护时间不少于14d(大体积混凝土不少于28d)。智能养护系统可实现养护过程自动化、精准化, 避免人工养护不及时、不均匀导致的干缩裂缝^[4]。(3) 施工缝与预埋件精细化处理: 施工缝处理前, 需清除表面浮浆、松动骨料, 用高压水枪冲洗干净, 浇筑前铺筑20~30mm厚同配合比水泥砂浆, 确保新旧混凝土粘结紧密。预埋件安装时, 固定牢固, 避免浇筑过程中移位, 预埋件周边混凝土采用小直径振捣棒(如 $\phi 30$ 振捣棒)仔细振捣, 确保密实, 振捣时间以混凝土表面泛浆、无气泡逸出为宜, 防止预埋件周边出现蜂窝、麻面, 减少裂缝隐患。

2.4 环境适应性技术

(1) 温控措施: 在厚大体积混凝土内部预埋冷却水管(如 $\phi 40$ mm镀锌钢管), 冷却水管间距1.5~2.0m, 呈梅花形布置, 混凝土浇筑完成后, 待内部温度升至峰值后, 通入冷却水(水温不低于5℃), 通过循环水带走内部热量, 控制混凝土内部最高温度不超过60℃, 内外温差不超过25℃。同时, 混凝土表面覆盖保温材料(如阻燃保温被、聚苯板), 保温层厚度根据环境温度计算确定, 冬季低温时增加保温层厚度, 夏季高温时覆盖遮阳布, 减少环境温度对混凝土温度的影响, 抑制温度裂缝。(2) 抗裂外加剂: 掺入高效减水剂(如聚羧酸系减水剂), 减水剂掺量一般为胶凝材料总量的0.8%~1.5%, 可减少混凝土用水量15%~30%, 降低水灰比, 减少干缩变形, 提升混凝土强度与抗裂性能, 需注意减水剂与水泥的相容性, 避免出现泌水现象。结合补偿收缩混凝土技术, 合理掺入膨胀剂, 协同发挥减水、补偿收缩作用, 进一步提升混凝土抗裂能力, 外加剂需经复试合格后方可使用^[5]。(3) 地基处理与抗沉降设计: 施工前对地基进行详细勘察, 明

确地基承载力分布情况,对软弱地基(如淤泥质土、湿陷性黄土)采用换填法、挤密桩法、水泥土搅拌桩法等进行处理,处理后地基承载力需满足设计要求,且沉降量控制在允许范围内。在结构设计中,考虑地基不均匀沉降影响,采用柔性基础或设置沉降后浇带,后浇带宽度800-1000mm,待主体结构施工完成、地基沉降基本稳定后(一般间隔42-60d),采用补偿收缩混凝土浇筑后浇带,减少地基沉降引发的结构裂缝。

3 水利工程混凝土施工裂缝防控技术应用与验证

3.1 工程案例选择与背景介绍

选取三类典型水利工程:一是某大型碾压混凝土大坝(坝高120m,混凝土浇筑量80万m³),地处温带季风区,昼夜温差大,历史同类工程温度裂缝发生率达8%;二是南方某平原水闸(闸室长50m,底板厚度3m),地基为软土地基,雨季施工湿度波动大,曾因干缩与沉降裂缝导致渗漏;三是西北某灌溉渠道(总长10km,混凝土衬砌厚度0.2m),气候干燥,年蒸发量高,传统施工裂缝率超12%,影响输水效率。

3.2 裂缝防控技术实施

(1)材料选择与配合比设计:大坝采用低热硅酸盐水泥+40%矿渣粉掺合料,配合比水灰比0.42,添加0.2%聚丙烯纤维;水闸使用补偿收缩混凝土,掺入8%钙矾石膨胀剂与1.2%聚羧酸减水剂;渠道衬砌采用C30细石混凝土,优化骨料级配(中砂+5-16mm连续级配碎石)。(2)施工工艺优化与质量控制:大坝分层浇筑(层厚0.3m),预埋冷却水管控温;水闸采用智能喷淋养护(养护14d,湿度保持≥85%),施工缝铺20mm厚同配比砂浆;渠道分段浇筑(每段20m),拆模后及时覆盖保温被。(3)环境监测与应急措施:三类工程均布设温湿度传感器(每500m²1个),大坝增设内部温度监测点,当温差超25°C时启动保温覆盖;水闸监测地基沉降,沉降超5mm时调整浇筑顺序;渠道遇大风干燥天气,临时增加喷雾保湿。

3.3 效果评估与数据分析

(1)裂缝发生率统计与对比分析:大坝施工后裂缝

率仅1.2%,较历史工程降低85%;水闸未出现渗漏裂缝,裂缝率0.3%,远低于行业平均4%;渠道衬砌裂缝率降至2.1%,较传统施工下降82%。(2)耐久性测试:大坝混凝土抗渗等级达W12(传统W8),水闸混凝土抗碳化深度2.1mm(规范要求≤5mm),渠道混凝土28d抗压强度达标率100%,各项指标优于设计标准。

3.4 经济与社会效益分析

三类工程防控技术成本较传统施工增加3%-5%(主要为材料与监测设备),但大坝后期裂缝修补费用减少92万元,水闸因渗漏导致的停水维修费用降低85%,渠道输水效率提升10%,年节水120万m³。综合测算,工程全生命周期成本降低12%-15%,同时保障了防洪、灌溉功能稳定,减少了水资源浪费,社会效益显著。

结束语

水利工程混凝土施工裂缝防控是保障工程安全与耐久性的核心环节。本研究通过系统分析裂缝成因,从材料优化、施工工艺改进、温度精准控制及智能监测等多维度提出防控关键技术,有效提升了混凝土抗裂性能。实践表明,全流程精细化管理与技术创新是减少裂缝的关键。未来需持续深化研究,结合新技术、新材料,构建更完善的裂缝防控体系,为水利工程建设高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]张大海.水利施工工程中混凝土裂缝措施控制技术探讨[J].水泥,2025,(07):146-149.
- [2]常磊金.水利工程施工中混凝土裂缝防治技术分析[J].中国设备工程,2025,(S2):264-266.
- [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]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.
- [5]秦松林.水利工程施工中混凝土裂缝控制技术及案例分析[J].数字农业与智能农机,2025,(01):70-73.