

水工混凝土裂缝成因分析与耐久性提升关键技术研究

麻旭光

保定市建筑安装工程处, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/WCEST.2026020003

摘 要 : 为解决水工混凝土裂缝诱发结构耐久性劣化的工程难题, 本文系统开展水工混凝土裂缝成因机理与耐久性提升技术研究。依据核心成因将水工混凝土裂缝划分为温度应力、体积变形、荷载与环境作用三类, 明确不同裂缝的形态特征、分布规律, 深入剖析水化热、环境温差引发温度应力裂缝, 干燥收缩、自生收缩等体积变形诱发裂缝的内在机制; 揭示裂缝作为有害介质传输通道, 通过优化传输路径、提升传输速率加速介质侵入, 进而诱发钢筋锈蚀、劣化混凝土抗渗性与抗冻性, 形成裂缝扩展-性能劣化恶性循环的影响机制; 从原材料优化与配合比设计、施工过程裂缝控制、裂缝修复与长效防护三个维度, 提出水工混凝土耐久性提升关键技术及核心控制指标。

关 键 词 : 水工混凝土; 裂缝成因; 耐久性劣化; 裂缝控制

Research on the Causal Analysis of Cracks in Hydraulic Concrete and Key Technologies for Enhancing Durability

Ma Xuguang

Baoding Construction and Installation Engineering Office, Baoding, Hebei 071000

Abstract : To address the engineering challenge of crack-induced durability degradation in hydraulic concrete structures, this paper systematically investigates the causal mechanisms of cracks in hydraulic concrete and explores key technologies for enhancing durability. Based on core causes, cracks in hydraulic concrete are classified into three categories: temperature stress, volume deformation, and load and environmental effects. The morphological characteristics and distribution patterns of different cracks are identified, and the internal mechanisms of temperature stress cracks induced by hydration heat and environmental temperature differentials, as well as cracks caused by volume deformations such as drying shrinkage and autogenous shrinkage, are thoroughly analyzed. The study reveals that cracks serve as pathways for harmful media transmission, accelerating medium intrusion by optimizing transmission pathways and increasing transmission rates, thereby inducing steel corrosion and degrading the impermeability and frost resistance of concrete, forming a vicious cycle of crack propagation and performance degradation. Key technologies and core control indicators for enhancing the durability of hydraulic concrete are proposed from three dimensions: raw material optimization and mix design, crack control during construction, and crack repair and long-term protection.

Keywords : hydraulic concrete; crack causes; durability degradation; crack control

引言

水工混凝土结构作为水利水电工程的核心组成部分, 涵盖大坝、水闸、渠道、水电站厂房等关键建筑物, 其长期安全稳定服役直接关系到流域防洪、水资源调配、能源供应等国计民生重大需求。目前学界与工程界对水工混凝土裂缝成因及耐久性提升已开展大量研究, 在单一裂缝类型防控、常规修复材料应用等方面取得了诸多成果, 但针对不同成因裂缝的系统分类解析、裂缝对耐久性劣化的耦合作用机制, 以及适配复杂服役环境的全流程耐久性提升技术体系构建等方面仍有待深化。基于此, 本文以水工混凝土裂缝为研究核心, 系统分析裂缝类型及成因机理, 揭示裂缝对结构耐久性的影响规律, 从原材料优化、施工控制、裂缝修复与防护等维度提出针对性关键技术, 旨在为水工混凝土结构抗裂防控、耐久性提升提供科学理论依据与工程实践支撑, 保障水利水电工程长期安全、高效运行。

一、水工混凝土裂缝类型及成因机理分析

（一）水工混凝土常见裂缝分类

大体积水工混凝土自浇筑开始，就要经受外界环境和其本身的各种因素的作用，使混凝土中任一点的位移和变形不断地变化，从而产生了应力。一般情况下，当应力超过了混凝土的极限强度，或其应力变形超过了混凝土极限变形值，由混凝土构成的结构物就要产生裂缝^[1]。水工混凝土裂缝是内部应力与材料抗拉强度相互作用的产物，可按多维度分类。结合工程服役特征，按核心成因可分为温度应力、体积变形、荷载与环境作用裂缝三类，三者在形态、产生部位及发展规律上差异明显^[2]。温度应力裂缝多为表面不规则缝或贯穿线性缝，常见于大坝等大体积混凝土结构，走向与温度梯度垂直，浇筑初期及温差较大阶段易产生；体积变形裂缝以收缩类表面细缝为主，可发展为深层缝，多分布于混凝土表层与施工缝附近，宽度小、分布广；荷载与环境作用裂缝形态关联荷载方向或侵蚀路径，荷载裂缝多贯穿，环境裂缝由表及里发展，严重时造成结构局部破损^[3]。按裂缝深度又可分为表面裂缝（ $< 50\text{mm}$ ）、深层裂缝（ $50\text{mm} \leq \text{深度} \leq 300\text{mm}$ ）、贯穿裂缝（ $> 300\text{mm}$ ），其中贯穿裂缝对结构承载与耐久性危害最大。

（二）温度应力裂缝成因分析

温度应力裂缝是水工大体积混凝土最常见裂缝类型，核心成因是混凝土在浇筑、硬化与运行中，温变引发的变形受约束，产生超出材料抗拉强度的应力而开裂^[4]。其产生受水化热、环境温度差、结构约束及材料热学性能等多重因素影响，水泥水化热是核心内因，大体积混凝土水化热量大、导热差，易形成显著内外温差，内外变形受约束产生应力，超出抗拉强度会引发表面裂缝，甚至发展为贯穿裂缝；环境温度波动是重要外因，周期性热胀冷缩产生交变应力，衰减混凝土抗拉性能，诱发或加速裂缝扩展；水库水位升降、水流冲刷引发的运行期局部温度突变，也会加剧该类裂缝的产生与发展。

（三）体积变形裂缝成因分析

体积变形裂缝是水工混凝土硬化或长期服役时，因干燥、自生、徐变收缩等体积变形受约束产生拉应力引发的裂缝^[5]。核心特征为细长三角线性裂缝、分布广泛，初期多为表面裂缝，严重时可发展为深层裂缝，其产生与混凝土材料特性、养护条件、施工工艺相关。干燥收缩是主要诱因，多发于浇筑后1~3个月早期，因混凝土内外湿度梯度引发收缩，受约束产生的拉应力超过其抗拉强度即开裂，且受环境温湿度、风速直接影响^[6]。自生收缩由水泥水化消耗内部水分引发，收缩量小、持续时间长达数年，高强水工混凝土因水泥用量大、水胶比小，该收缩更显著，受约束易开裂。徐变收缩为长期荷载下的塑性变形，受约束会引发应力重分布，诱发或加速裂缝扩展。养护条件对控制至关重要，养护不及时、时长不足会加剧收缩，大幅提升开裂概率。

二、水工混凝土裂缝对耐久性的影响机制

（一）裂缝与介质传输的关系

混凝土耐久性本质取决于其抵御外部有害物质侵入与内部性能劣化的能力，裂缝作为结构薄弱环节，是影响混凝土耐久性的

核心因素^[7]。完好混凝土依靠致密结构阻隔介质侵入，裂缝则会形成连通传输通道，降低介质传输阻力、加速渗透。其影响主要体现在传输路径优化与传输速率提升，裂缝打通混凝土内外连通通道，大幅缩短介质传输路径；同时裂缝的宽度、深度等参数会直接提升传输速率，裂缝宽度超 0.1mm 时水气渗透速率显著升高，超 0.2mm 时氯离子等有害物传输速率呈指数级增长。此外，裂缝扩展会加剧混凝土孔隙劣化，形成裂缝产生—介质侵入—性能劣化—裂缝扩展的恶性循环。

（二）裂缝加速钢筋锈蚀机理

钢筋锈蚀是水工混凝土结构耐久性劣化的主要形式，裂缝会通过破坏混凝土保护作用显著加速该过程，并形成恶性循环。完好水工混凝土的钢筋表面存在致密钝化膜，可隔绝腐蚀介质、抑制锈蚀；混凝土开裂后，裂缝成为氧气、水分、氯离子等的快速传输通道，水分与氧气构建电化学腐蚀条件，氯离子直接穿透破坏钝化膜，碳化作用则降低混凝土碱度使钝化膜失稳破裂，进而引发钢筋锈蚀^[8]。钢筋锈蚀产物体积为本体2~4倍，其膨胀产生的应力会形成锈胀裂缝，进一步拓宽裂缝、提升连通性，加剧腐蚀介质侵入，推动锈蚀加速^[9]。该恶性循环最终会造成钢筋截面减小、结构承载力降低，混凝土剥落破损，严重影响结构耐久性与安全性。

（三）裂缝对抗冻性与抗渗性的劣化

抗冻性与抗渗性是水工混凝土核心耐久性指标，直接决定结构使用寿命，而裂缝会显著劣化二者、降低结构耐久性储备并加速结构劣化。裂缝对混凝土抗渗性的劣化体现为破坏抗渗屏障，形成贯穿渗透通道，大幅削弱抗渗能力；裂缝宽度是关键影响因素，宽度超 0.1mm 抗渗等级下降1~2级，超 0.3mm 则抗渗能力基本丧失，同时裂缝连通性与分布密度越高，抗渗劣化越严重^[10]。裂缝对抗冻性的劣化与冻融循环体积膨胀应力相关，裂缝会使更多水分渗入混凝土内部，冻融时裂缝内水冰膨胀挤压壁面，扩大裂缝并破坏内部孔隙结构，进一步降低抗拉与抗冻性能；长期冻融下裂缝持续扩展，引发结构剥落、露骨、强度下降等劣化，带裂缝混凝土冻融寿命仅为完好混凝土的30%~60%，且裂缝宽度越大，抗冻性劣化越显著。

三、耐久性提升关键技术

（一）原材料优化与配合比设计关键技术

原材料性能是水工混凝土强度、耐久性及抗裂性的基础，配合比设计则通过优化组分比例提升性能。二者核心是选用优质原材料、掺加功能性外加剂与矿物掺合料，降低水化热、减少体积变形，保障抗裂性与耐久性。原材料优化，优先低水化热高标号水泥（如矿渣、火山灰质硅酸盐水泥）；选用级配良好、洁净的骨料（粗骨料选高强度岩石，细骨料选天然河砂，严控杂质与活性成分）；掺加缓凝高效减水剂、引气剂等外加剂及粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，改善性能。

配合比设计，严控水胶比（水工 ≤ 0.45 ，高强度 ≤ 0.35 ），合理确定胶凝材料用量（大体积 $300\sim 400\text{kg/m}^3$ ），优化骨料级

配；结合服役环境调整（如冻融环境提高含气量 4%~6%）。

（二）施工过程裂缝控制与耐久性保障技术

施工过程是水工混凝土裂缝产生的关键阶段，核心通过优化施工工艺、加强养护管理、实施精细化温控，减少裂缝产生，保障结构耐久性。其中，施工工艺优化方面，大体积混凝土采用分层浇筑（层厚 $\leq 500\text{mm}$ ）、插入式振捣（20~30s），避免漏振、过振，同时避开恶劣天气浇筑，高温环境下降低入模温度（ $\leq 30^{\circ}\text{C}$ ），严寒天气做好保温防冻措施（温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ），并规范处理施工缝（凿毛、铺同配比水泥砂浆）和伸缩缝，确保结合紧密、变形不受约束。养护管理强化方面，混凝土浇筑后及时覆盖保湿，初凝前进行二次抹压，普通混凝土养护时间不少于14d，大体积及高强度混凝土养护时间不少于28d，养护过程中控制表面温变速率，避免骤升骤降，保证表面与环境温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ，同时强化早期养护以抑制收缩、提高早期抗拉强度。精细化温控技术主要针对大体积混凝土，通过建立温度监测系统实时监控温变，预埋冷却水管循环降温以控制内部最高温，搭配表面覆盖保温材料控制降温速率，从而减少温度应力裂缝。

（三）裂缝修复与长效防护技术

对已开裂的水工混凝土结构，及时修复可阻介质侵入、抑裂缝扩展、恢复结构整体性与耐久性，长效防护能提升抗侵蚀能力、延长服役寿命。核心是结合裂缝参数（宽度、深度、分布）及服役环境，选适配材料与措施。裂缝修复按类型分类实施：表

面裂缝（宽 $< 0.2\text{mm}$ ）用环氧树脂砂浆等做表面封闭；深层裂缝（ $0.2\text{mm} \leq \text{宽} \leq 0.5\text{mm}$ ）采用压力注浆填充；贯穿裂缝（宽 $> 0.5\text{mm}$ ）需注浆+表面封闭，必要时粘贴加固材料。修复材料需满足耐久、粘结强等兼容要求。长效防护以表面防护为核心，常见技术为涂层防护（聚脲等）形成防护膜；渗透结晶型防护堵塞内部孔隙，适用于恶劣环境；阴极保护抑制钢筋锈蚀，适用于氯离子污染严重场景。同时需加强日常运维监测，及时处理新裂缝与劣化问题。

四、结束语

水工混凝土裂缝的防控与耐久性提升是保障水利水电工程长期安全服役的核心课题，其涉及裂缝成因解析、劣化机制揭示及多维度技术应用的系统性工作。本文通过对水工混凝土裂缝类型与成因机理的梳理，明确了温度应力、体积变形等核心致裂因素的作用规律，阐明了裂缝加速介质侵入、诱发钢筋锈蚀及劣化抗渗抗冻性能的内在机制，并构建了原材料优化-施工控制-裂缝修复防护全流程耐久性提升技术体系。研究成果可为工程实践中水工混凝土裂缝的精准防控、耐久性病害的高效治理提供直接参考，对延长水工建筑物设计使用寿命、降低运维成本、保障流域水安全与能源安全具有重要现实意义。

参考文献

- [1] 张靖, 黄恩, 蒋孝成, 等. 水工混凝土裂缝 [J]. 广东建材, 2015(1): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4806.2015.01.018.
- [2] 赵玺. 水工混凝土裂缝的防止 [J]. 中国科技成果, 2007(12): 48-49. DOI: 10.3772/j.issn.1009-5659.2007.12.018.
- [3] 狄宜明. 水工混凝土裂缝成因及处理 [J]. 中国新技术新产品, 2011(7): 85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2011.07.078.
- [4] 刘小杏. 水工混凝土裂缝成因与修补 [J]. 内江科技, 2011, 32(8): 150-150, 176. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1436.2011.08.130.
- [5] 赵立云, 董伟, 胥姗姗. 水工混凝土裂缝成因及控制 [J]. 山西建筑, 2010, 36(9): 162-163. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6825.2010.09.101.
- [6] 王铁龙. 水工混凝土裂缝成因与控制 [J]. 城市建设与商业网点, 2009(18): 117-118.
- [7] 郝广州. 水工混凝土裂缝成因及其防治 [J]. 科技创新导报, 2009(2): 68. DOI: 10.3969/j.issn.1674-098X.2009.02.057.
- [8] 乔丽, 李树春. 浅谈水工混凝土裂缝处理 [J]. 科技创新导报, 2008(5): 48-48. DOI: 10.3969/j.issn.1674-098X.2008.05.044.
- [9] 施养鑫. 水工混凝土裂缝成因及处理 [J]. 湖南农机, 2012, 39(3): 267-268. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8320.2012.03.154.
- [10] 黄家源. 水工混凝土裂缝的成因及控制 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(15): 5505-5505. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2016.15.505.