

水工混凝土裂缝成因与修补技术探析

任月娟 余刘辉 唐家宏 邓超 肖雨欣

长江三峡技术经济发展有限公司，北京 101100

[摘要]水工混凝土结构作为水利枢纽、泵站、水闸等基础设施的核心承载体，其长期安全与稳定运行直接关系到防洪、灌溉、供水及发电等综合效益的发挥。然而，混凝土材料固有的非匀质性、施工过程的复杂性以及服役环境的严酷性，共同导致了裂缝问题的普遍性与多样性。裂缝不仅是结构外观缺陷的体现，更是引发渗漏、加速材料劣化、降低结构耐久性乃至威胁整体安全的重要诱因。本文立足于工程实际，系统梳理了水工混凝土裂缝的分类体系与形态特征，从材料物理化学特性、环境温湿度作用、设计理论模型、施工工艺控制及运行荷载历史等多个维度，深入剖析了裂缝的生成机理与发展规律。

[关键词]水工混凝土结构；裂缝成因；温度应力；碳化锈蚀

DOI: 10.33142/hst.v8i12.18453 中图分类号: TU755 文献标识码: A

Exploration on the Causes and Repair Techniques of Cracks in Hydraulic Concrete

REN Yuejuan, YU Liuhui, TANG Jiahong, DENG Chao, XIAO Yuxin

Yangtze Three Gorges Technology & Economy Development Co., Ltd., Beijing, 101100, China

Abstract: As the core carrier of infrastructure such as water conservancy hubs, pump stations, and water gates, the long-term safety and stable operation of hydraulic concrete structures are directly related to the comprehensive benefits of flood control, irrigation, water supply, and power generation. However, the inherent heterogeneity of concrete materials, the complexity of construction processes, and the harshness of service environments collectively contribute to the prevalence and diversity of crack problems. Cracks are not only a manifestation of structural appearance defects, but also an important cause of leakage, accelerated material degradation, reduced structural durability, and even a threat to overall safety. This article is based on engineering practice, systematically sorting out the classification system and morphological characteristics of hydraulic concrete cracks. From multiple dimensions such as material physical and chemical properties, environmental temperature and humidity effects, design theoretical models, construction process control, and operating load history, the generation mechanism and development law of cracks are deeply analyzed.

Keywords: hydraulic concrete structure; cause of crack formation; temperature stress; carbonization corrosion

水利工程是国家基础设施建设的重要组成部分，水工混凝土以其优异的抗压性能、良好的可塑性与相对经济的成本，在其中扮演着无可替代的角色。然而，“无裂不混凝土”的特性在此领域表现得尤为突出。裂缝的出现，打破了混凝土结构的连续性与完整性，其危害性具有显著的时变与发展特征。初期，微细裂缝可能仅影响观感；但随着时间推移，在水压力、冻融循环、侵蚀介质等因素的耦合作用下，裂缝可能扩展为贯穿性通道，导致严重渗漏，引发溶蚀、冻胀、钢筋锈蚀等一系列连锁性病害，最终显著削弱结构承载力与耐久性。因此，对水工混凝土结构裂缝的形成原因进行科学诊断，对其危害性进行准确评估，并采取及时、有效的修补与加固措施，是保障工程长期安全、发挥工程预期效益的关键技术环节，具有重要的学术研究价值与工程应用意义。

1 水工混凝土裂缝的主要类型与特征

1.1 按裂缝成因分类

基于裂缝产生的根本原因，可将其划分为荷载裂缝与非荷载裂缝两大类，这是进行裂缝诊断与责任界定的基础。荷载裂缝直接源于外部荷载作用效应超过材料或构件抗

力，其形态与受力状态密切相关。例如，受弯裂缝垂直于主拉应力方向，出现于受拉区，呈楔形，中部宽两端细；受剪裂缝则表现为斜向的枣核状裂缝；而轴心受拉构件则产生贯穿截面的横向裂缝。非荷载裂缝则占实际工程裂缝的绝大部分，成因更为复杂多样，主要包括：(1) 温度裂缝，因水泥水化热或环境温差引起约束变形所致，是大体积混凝土的典型病害；(2) 收缩裂缝，源于混凝土硬化过程中水分蒸发与胶凝材料水化引起的体积缩减，受干燥环境与约束条件影响显著；(3) 耐久性裂缝，由混凝土碳化、氯离子侵蚀导致钢筋锈蚀膨胀、碱-骨料反应、冻融破坏等引起，通常具有明显的时间累积效应与环境依赖性；(4) 地基变形裂缝，由于基础不均匀沉降，导致上部超静定结构产生附加内力而开裂；(5) 施工裂缝，因配合比不当、浇筑顺序不合理、振捣不密实、养护不及时或模板变形等因素造成。

1.2 按裂缝形态与分布特征分类

为便于工程检测、描述与危害性评估，常依据裂缝的宏观几何形态与分布特点进行分类。按裂缝走向可分为水平裂缝、垂直裂缝、纵向裂缝、横向裂缝及斜向裂缝；按

空间分布形态可分为网状裂缝（龟裂）、放射状裂缝等。按裂缝活动性可分为：（1）死缝，其宽度与长度已稳定，不再发展；（2）准稳定裂缝，宽度随季节或荷载呈周期性变化；（3）不稳定裂缝，宽度与长度持续发展，危险性高。最为关键的是按裂缝对结构的影响深度进行分类：（1）表面裂缝，深度浅，仅存在于表层；（2）浅层裂缝，深度有限，未达受力钢筋；（3）深层裂缝，延伸至结构断面内部，部分切断截面；（4）贯穿裂缝，穿透整个构件截面，严重影响结构整体性与防渗性。此外，还可按裂缝宽度（ δ ）进行划分，不同规范对不同环境、不同构件类型的裂缝宽度限值有明确规定，是评估裂缝危害性与确定修补标准的重要量化指标。

2 水工混凝土裂缝的成因分析

2.1 材料因素

混凝土是一种多相复合材料，其原材料的品质与配合比设计的合理性从根本上决定了其抗裂性能。水泥的品种、细度、矿物组成直接影响水化热释放速率与总量。采用早强高热水泥，易导致早期温升过快过高。骨料的粒径、级配、含泥量、泥块含量以及岩石本身的弹性模量与热膨胀系数，不仅影响混凝土的强度，也显著影响其收缩与热变形特性。砂率过高或细骨料过细，会增加用水量与收缩值。拌合用水的水质与用量（水灰比）是决定混凝土强度、密实度和收缩率的关键参数，过高的水灰比是导致塑性收缩与干燥收缩加大的主要原因。外加剂（如减水剂、缓凝剂、膨胀剂）与掺合料（如粉煤灰、矿渣粉）的使用，若能科学配伍，可有效改善工作性、降低水化热、抑制收缩，但若选用不当或质量不合格，则可能引入不利影响。

2.2 环境与温度应力因素

温度应力是水工大体积混凝土结构产生裂缝的主要原因，其作用贯穿施工期与运行期。施工期温度应力主要来源于水泥水化热。混凝土导热性能差，浇筑后内部热量积聚，形成内外温差。内部高温膨胀受外部已冷却混凝土及地基约束，产生压应力；后期内部降温收缩时，则受外部约束产生拉应力，当此拉应力超过混凝土龄期抗拉强度时，便产生裂缝。夏季高温施工加剧了入仓温度与环境温度，冬季低温施工则增加了内外温差与降温梯度。运行期，结构物暴露于自然环境中，季节更替、昼夜温差、日照辐射、寒潮袭击等引起结构温度场不断变化，在边界约束条件下同样会产生温度应力，可能导致后期裂缝的产生与发展。

2.3 设计、施工与荷载因素

设计层面的不足是裂缝产生的潜在诱因。结构形式复杂、截面突变处易产生应力集中；配筋设计不当，如钢筋间距过大、保护层过厚或配筋未能有效抵抗温度应力与收缩应力；构造措施不足，如未合理设置伸缩缝、后浇带或缺乏足够的抗裂钢筋；对特殊荷载（如温度荷载、地基不均匀沉降）考虑不周或计算模型失真。施工过程是裂缝产

生的直接环节。混凝土配合比现场控制不严、搅拌不均匀、运输时间过长导致坍落度损失；浇筑顺序不当、分层过厚、振捣不充分或过度振捣；模板支撑刚度不足、拆模时间过早；养护措施不到位，未能及时保温和保湿，导致表面失水过快或温差过大。运行期的荷载因素包括超出设计标准的水位、地震作用、冰压力、泥沙压力等，以及长期荷载作用下材料的疲劳与徐变效应。

3 水工混凝土裂缝的修补技术

3.1 表面封闭法

该方法适用于处理宽度较细（通常 $\delta < 0.2\text{mm}$ ）、深度较浅且稳定的非活动性表面裂缝，主要目的是恢复结构表面完整性、防止水分和侵蚀介质侵入、提高耐久性。常用工艺包括表面涂抹与粘贴法。表面涂抹是采用高渗透性、高黏结力的柔性涂料，如聚合物水泥基防水涂料、弹性环氧胶泥或刚性材料，如水泥基渗透结晶型材料直接涂刷于裂缝表面，形成连续防水膜^[1]。粘贴法则采用纤维复合材料，如玻璃纤维布、碳纤维布配合专用树脂浸渍胶，粘贴于裂缝表面，既能封闭裂缝，又能起到一定的补强作用，尤其适用于混凝土表面抗拉能力不足的区域。

3.2 压力注浆法

这是处理具有一定宽度（ $\delta > 0.2\text{mm}$ ）的深层裂缝、贯穿裂缝以及恢复结构整体性的主要方法。其原理是利用压力将低粘度、高强度的灌浆材料注入裂缝内部，使其填充饱满，胶结固化后恢复构件的整体性、密实性和承载能力，具体如图一所示。根据注浆压力可分为低压慢注和高压注浆。常用的灌浆材料包括：（1）环氧树脂类浆液：粘结强度高、收缩小、力学性能优异，适用于结构性补强加固；（2）聚氨酯类浆液：具有良好的弹性、遇水膨胀性和渗透性，特别适用于有水裂缝的防渗堵漏；（3）水泥基灌浆材料：成本较低，适用于对强度要求不高但宽度较大的裂缝填充。施工时需沿裂缝走向设置注浆嘴，并严格进行清缝、封缝、压气试漏等准备工作。

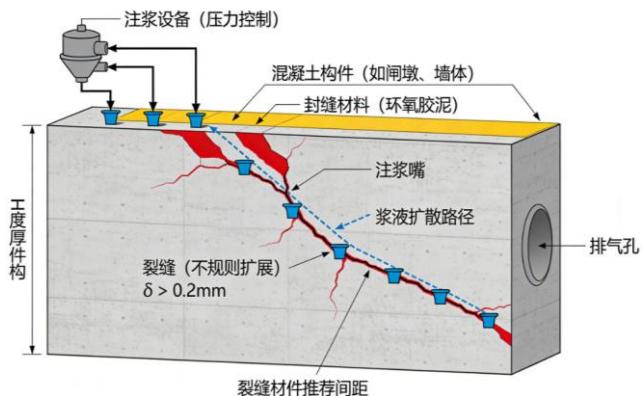


图1 压力注浆法修补混凝土裂缝施工示意图

3.3 结构加固法

对于因裂缝发展导致构件承载力严重不足，或裂缝本

身即为承载力不足表征的情况，必须进行结构加固。此法不仅处理裂缝，更旨在提升构件乃至结构的整体安全储备，具体如图2所示。常用方法包括：（1）粘贴钢板加固法：将钢板通过高性能结构胶粘贴于混凝土构件受拉区或薄弱部位，使其与原有构件共同受力，大幅提高抗弯、抗剪能力。（2）粘贴纤维复合材料（FRP）加固法：采用碳纤维布、玄武岩纤维布等，具有轻质高强、耐腐蚀、施工便捷的优点。（3）增大截面加固法：在原有构件外包钢筋混凝土，增大其截面尺寸和配筋，从根本上提高承载力与刚度。（4）预应力加固法：采用体外预应力钢束或碳板，对结构主动施加预应力，改变其内力分布，抵消部分外荷载效应。

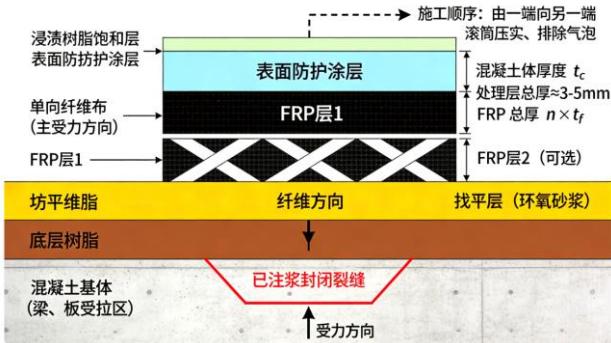


图2 粘贴纤维复合材料（FRP）加固混凝土裂缝区域施工示意图

3.4 裂缝修补材料的选择

修补材料的选择是决定修补效果成败的关键，需综合考虑裂缝性质、修补目的、环境条件及施工可行性。选择原则包括：（1）相容性：修补材料应与基层混凝土具有良好的物理（热膨胀系数、弹性模量）和化学相容性；（2）耐久性：能长期抵抗环境介质的侵蚀，性能衰减慢；（3）力学性能：满足设计要求的强度、粘结力与变形能力（例如，活动裂缝需选用柔性材料）；（4）施工性能：适宜的粘度、可操作时间、固化条件等；（5）环保性。实践中常进行材料性能对比试验，并结合工程经验做出最优选择。

4 裂缝修补施工工艺与质量控制

4.1 修补前的调查与评估

科学、全面的调查评估是制定有效修补方案的前提，必须遵循严格的程序。首先应进行详细的现场勘查，绘制裂缝分布图，精确量测裂缝宽度、长度、深度及走向。需利用超声波检测、取芯验证等手段判断裂缝的深度与是否贯通^[2]。同时，必须系统收集与裂缝可能相关的设计图纸、施工记录、材料报告、运行历史及环境资料。

4.2 修补工艺要点

不同的修补方法有其特定的工艺核心。对于表面封闭法，基层处理至关重要，必须彻底清除浮浆、油污、松动颗粒，并保持干燥（特定材料要求湿润基层除外）。涂刷或刮抹需均匀、无遗漏，多层施工时应待前一层表干后进行。对于压力注浆法，其关键工艺环节包括：

（1）裂缝处理：沿缝开V型或U型槽，或采用专用封缝材料进行表面封闭；（2）埋设注浆嘴：根据裂缝情况合理布置间距；（3）密封检查：待封缝材料固化后，进行压气或压水试验，检查密封效果；（4）浆液配制：严格按照产品说明配制，控制好可操作时间；（5）注浆施工：由下至上、由一端向另一端循序渐进，控制注浆压力，直至相邻注浆嘴出浆且稳压片刻；（6）封口处理：注浆结束后及时封堵注浆嘴。对于结构加固法，如粘贴FRP，其工艺要点在于混凝土基底打磨平整、转角处处理成圆弧、涂刷底层树脂、找平材料填补凹陷、浸渍树脂饱和浸渍纤维布、多层次粘贴的时机控制以及最终表面防护。

4.3 修补后质量检验

修补工程完成后，必须进行严格的质量检验，以评估修补效果是否达到预期目标。检验方法包括：（1）外观检查：检查封闭层是否平整、密实、无脱落，注浆口是否封堵完好^[3]；（2）粘结强度测试：对表面封闭或加固层，可进行拉拔试验，检验其与基材的粘结强度是否满足设计要求；（3）密实性检查：对于防渗堵漏为主的修补，可进行蓄水试验或压水试验，观察有无渗漏；（4）无损检测：可采用超声波法或雷达法，对比修补前后裂缝区域的声学或电磁波信号，间接评估内部填充质量；（5）对于重要结构的重大修补，可考虑在修补区域预埋传感器，进行长期的应变、温度等监测。

4.4 预防性维护建议

修补处理是“治已病”，而系统的预防性维护则是“治未病”，对于延长水工混凝土结构寿命更为经济有效。建议包括：（1）建立定期巡检制度：对易裂部位（如大体积混凝土表面、结构突变处、闸墩、桥梁等）进行定期目视检查与仪器监测，记录裂缝发展情况。（2）加强运行期环境控制：对于室内或廊道结构，注意通风除湿；对于水位变动区，采取防冲刷、防冰冻措施。（3）建立结构健康监测系统：对特大型或重要工程，集成传感器网络，实时监测应变、温度、裂缝开合度、渗漏等参数，实现预警。（4）周期性维护：定期对结构表面保护层（如涂料、防腐层）进行维护更新，阻隔侵蚀介质。（5）档案管理：完善工程全生命周期的技术档案，为后续的评估、维修与改造提供完整数据支持。

5 结语

水工混凝土结构的裂缝问题是材料特性、结构行为与环境作用共同交织的复杂产物。对其成因的分析需秉持系统观，从微观的材料反应到宏观的结构响应，从瞬时的施工状态到长期的服役环境，进行多尺度、全过程的综合研判。本文系统阐述了裂缝的类型学特征，深度剖析了材料本身、温度场效应以及设计施工荷载等多重致裂因素，其中温度应力的精细化仿真分析与碳化深度的随机模型预测，为裂缝的机理研究与预测提供了现代技术手段。在修

补技术层面，已形成从表面封闭、内部灌浆到整体加固的系列化技术体系，其成功应用关键在于基于精准评估的“对症下药”与严格受控的工艺实施。然而，裂缝的完全杜绝既不经济也不现实，未来的研究与实践应更加注重于：基于全寿命周期成本分析的裂缝控制标准优化，智能传感与物联网技术在裂缝实时监测与预警中的应用，自修复混凝土等新型智能材料的研发，以及基于大数据与人工智能的裂缝诊断与决策支持系统的构建。唯有通过设计、施工、材料、监测、维护等多环节的协同创新与精细化管理，才能最终实现水工混凝土结构长寿命、高安全性与低维护成本的目标。

[参考文献]

- [1]林荣峰.水工混凝土裂缝成因与修补技术探析[J].山东水利,2025(10):34-36.
- [2]常旭东,何鑫,孙西文.水利工程混凝土裂缝成因机理及控制措施[J].水泥,2025(9):116-119.
- [3]张井军.水利工程混凝土裂缝问题分析与控制措施[J].黑龙江水利科技,2022,50(1):162-164.
- 作者简介：任月娟（1993—），女，汉族，山西省吕梁市兴县人，硕士，工程师，长江三峡技术经济发展有限公司，研究方向：水工混凝土；余刘辉（1985—），男，汉族，湖北省荆州市人，硕士，高级工程师，长江三峡技术经济发展有限公司，研究方向：水工金属结构与机电设备；唐家宏（2000—），男，汉族，安徽省铜陵市枞阳县人，硕士，助理工程师，长江三峡技术经济发展有限公司，研究方向：水工混凝土；邓超（1996—），男，汉族，江西省抚州市临川区人，硕士，工程师，长江三峡技术经济发展有限公司，研究方向：水工混凝土；肖雨欣（1998—），女，汉族，湖北省宜昌市人，硕士，工程师，长江三峡技术经济发展有限公司，研究方向：水工混凝土。