

寒区水工混凝土裂缝形成机理与耐久性评估方法探讨

李汝献

枣庄大禹水利工程有限公司, 中国·山东 枣庄 277400

摘要: 寒区水工混凝土结构在环境温度剧烈变化和冰冻循环的双重作用下, 容易出现裂缝损伤, 严重影响工程安全和使用寿命。论文分析了寒区水工混凝土的温度应力作用机理、冻融循环劣化过程和化学-物理耦合损伤机制, 阐明了裂缝扩展的渐进性损伤演化规律。研究表明, 混凝土内外温差可达 $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$, 表层温度每降低 10°C 产生的拉应力达 $1.5 \sim 2.0\text{MPa}$; 冻融 300 次循环后动弹性模量降低 40%; 化学-物理耦合作用使劣化速度提高 2~3 倍。基于声发射、CT 扫描等无损检测技术建立了混凝土损伤评估模型, 预测精度达 85% 以上。通过材料组成优化和施工养护措施改进, 实现了裂缝宽度减少 50%、抗拉强度提高 40% 的控制效果。研究成果为寒区水工混凝土结构的耐久性设计和全寿命周期管理提供了理论依据。

关键词: 寒区水工混凝土; 裂缝形成机理; 冻融循环; 耐久性评估; 损伤演化

Discussion on the Formation Mechanism and Durability Evaluation Method of Cracks in Hydraulic Concrete in Cold Regions

Ruxian Li

Zaozhuang Dayu Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Zaozhuang, Shandong, 277400, China

Abstract: Under the dual action of drastic environmental temperature change and freezing cycle, the hydraulic concrete structure in the cold area is prone to crack damage, which seriously affects the engineering safety and service life. The paper analyzes the temperature stress mechanism, freezing-thaw cycle degradation process and chemical-physical coupling of hydraulic concrete in cold area, and illustrates the evolution of progressive damage. The study shows that the temperature difference between inside and outside of concrete can reach $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$, and the tensile stress of the surface temperature is $1.5\text{--}2.0\text{MPa}$; the dynamic elastic modulus is reduced by 40% after 300 cycles of freeze and thaw; the deterioration rate is increased 2-3 times by chemical-physical coupling. Based on the acoustic emission and CT scan, the concrete damage assessment model is established, and the prediction accuracy is more than 85%. Through the optimization of material composition and the improvement of construction maintenance measures, the control effect of reducing crack width by 50% and increasing tensile strength by 40% is realized. The results provide theoretical basis for durability design and life cycle management of hydraulic concrete structures in cold area.

Keywords: hydraulic concrete in cold area; crack formation mechanism; freeze-thaw cycle; durability assessment; damage evolution

0 前言

寒区水工混凝土结构在严寒气候与水力荷载的双重作用下, 其服役性能面临着严峻的考验。随着全球气候变化的加剧, 寒区水工建筑物所处的环境条件愈发复杂, 裂缝问题日益突出^[1]。水工混凝土结构裂缝的产生不仅降低了结构的整体性能, 还会加速混凝土的劣化进程, 显著缩短工程使用寿命。国内外对混凝土裂缝问题的研究已取得大量成果, 但针对寒区特殊环境下水工混凝土裂缝形成机理及其耐久性评估方法的系统研究仍显不足^[2]。研究表明, 寒区水工混凝土结构的裂缝问题具有显著的地域特征和环境依赖性, 传统的混凝土耐久性理论和评估方法难以准确反映寒区环境下结构的实际性能演变规律^[3]。通过分析寒区水工混凝土裂

缝的形成机理, 建立科学的耐久性评估方法, 对提升寒区水利工程建设质量和运行安全具有重要的理论意义和工程价值。

1 寒区水工混凝土裂缝的形成机理

1.1 温度应力作用机理

寒区水工混凝土结构在服役期间承受着显著的温度梯度作用。外部环境温度的季节性变化与昼夜温差导致混凝土内外产生温度差异, 引起不均匀的体积变形。混凝土浇筑初期, 水泥水化放热与外界环境的温差也会产生显著的温度应力^[4]。当温度应力超过混凝土的抗拉强度时, 即会诱发裂缝的产生。在寒区环境下, 温度的剧烈波动更加剧了这一问题。研究表明, 当环境温度从零度以上骤降至零下时, 混凝土表

层与内部的温度梯度可达到 $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ ，由此产生的温度应力是导致表层开裂的主要原因。实验研究发现，温度应力导致的裂缝具有明显的方向性，通常呈现网状或垂直于主应力方向分布。在大体积混凝土结构中，由于散热条件的差异，内外温差可能更大，导致更为严重的温度裂缝。通过热力学耦合分析可知，混凝土表层温度每降低 10°C ，产生的拉应力可达到 $1.5 \sim 2.0\text{MPa}$ ，这已接近普通混凝土的抗拉强度极限。

1.2 冻融循环作用机理

寒区水工混凝土长期处于水位变动区，反复的冻融循环对混凝土组织结构造成严重破坏。混凝土孔隙中的水分在冻结过程中体积膨胀约 9%，产生的冰楔作用使得原有微裂缝扩展^[5]。随着冻融循环次数的增加，混凝土内部的损伤逐步累积，表现为强度下降、孔隙率增加等劣化现象。实验研究发现，经过 100 次冻融循环后，混凝土的抗压强度可降低 20%~30%，抗渗性能显著下降。冻融作用与荷载应力的耦合效应进一步加速了裂缝的扩展过程，对混凝土的耐久性造成重大影响。微观分析表明，冻融循环导致的损伤主要表现为胶凝材料基体的破坏和骨料与基体界面的剥离。通过电子显微镜观察发现，经过反复冻融循环后，混凝土内部出现大量微裂纹，这些微裂纹的连通性随着循环次数的增加而增强。研究数据显示，当冻融循环达到 300 次时，混凝土的动弹性模量降低可达 40%，表明其内部结构已发生严重破坏。

1.3 化学侵蚀与物理劣化的协同作用

寒区水工混凝土还面临着化学侵蚀与物理劣化的双重威胁。水中的侵蚀性离子（如硫酸根、氯离子等）通过裂缝渗入混凝土内部，与水泥石中的化学组分发生反应，生成膨胀性产物。这些产物的体积膨胀会加剧裂缝的扩展^[6]。同时，冻融循环导致的物理劣化增加了混凝土的渗透性，加速了化学侵蚀的进程。研究发现，在硫酸盐环境下经过冻融循环作用的混凝土，其劣化速度是单一作用下的 2~3 倍。通过 X 射线衍射分析发现，硫酸盐侵蚀过程中生成的钙矾石等膨胀性产物，其体积可达原始物质的 2~3 倍，这种膨胀会在混凝土内部产生显著的膨胀应力^[7]。当这种化学应力与冻融循环产生的物理应力叠加时，会导致混凝土内部应力状态更为复杂，加速结构的破坏过程。实验数据表明，在 -20°C 的环境温度下，含 3% 氯化钠溶液的冻融循环作用下，混凝土的质量损失率比清水冻融循环高出约 50%。这种化学-物理耦合作用的机理复杂性，给混凝土的耐久性评估带来了巨大挑战。

2 裂缝扩展过程的损伤演化规律

寒区水工混凝土裂缝的扩展是一个渐进性损伤过程。通过声发射技术和 CT 扫描等先进检测手段，可对裂缝扩展的全过程进行动态监测。研究表明，裂缝的扩展大致经历以下三个阶段：微裂缝萌生阶段、稳定扩展阶段和加速扩展阶段^[8]。在微裂缝萌生阶段，混凝土内部产生大量微观裂缝，

但未形成贯通性裂缝。

声发射信号分析显示，这一阶段的声发射事件呈离散分布，能量水平较低，主要源于微观缺陷的开裂。随着外部荷载和环境作用的持续，部分微裂缝开始连通，进入稳定扩展阶段。在此阶段，裂缝的扩展速率相对恒定，主要受控于材料的断裂韧性。声发射信号呈现出簇发特征，能量水平逐渐升高，反映出裂缝的稳定扩展过程。

CT 扫描结果显示，此阶段的裂缝呈现出明显的定向性，沿着最大应力方向扩展。当裂缝扩展到临界长度后，将进入加速扩展阶段，此时裂缝快速贯通，导致结构失效。该阶段的声发射信号呈爆发性增长，能量水平急剧升高，表明材料已进入不稳定破坏阶段。

实验数据显示，在低温环境下，混凝土的断裂韧性可降低 30%~40%，这显著加快了裂缝的扩展速度。通过建立声发射参数与裂缝扩展程度的对应关系，可实现对裂缝发展状态的定量表征。基于损伤力学理论，建立了描述裂缝扩展过程的数学模型，该模型考虑了温度、应力和时间等因素的影响，能够较好地预测裂缝的扩展趋势。

3 寒区水工混凝土耐久性评估方法

3.1 基于损伤演化的评估模型

基于损伤力学理论与工程实践，建立了适用于寒区水工混凝土的耐久性评估模型。该模型综合考虑了温度应力、冻融循环、化学侵蚀等多重因素的耦合作用，通过引入损伤变量来表征混凝土的劣化程度。损伤变量可通过测试混凝土的弹性模量、超声波速度等物理力学参数获得。评估模型采用非线性演化方程描述损伤的发展过程，其一般形式为：

$$D=1-(E/E_0)^n$$

其中， D 为损伤变量， E 和 E_0 分别为损伤状态和初始状态下的弹性模量， n 为材料参数。通过大量试验数据的拟合与验证，确定了模型参数的取值范围。研究表明，对于不同强度等级的混凝土， n 值通常在 1.2~2.5 变化，且与混凝土的配合比和环境条件密切相关。在此基础上，进一步考虑温度和湿度的影响，建立了修正模型：

$$D=1-(E/E_0)^n \times f(T) \times g(H)$$

其中， $f(T)$ 和 $g(H)$ 分别为温度和湿度的影响函数。通过在实际工程中的应用验证，该模型能够较准确地预测混凝土结构的耐久性演变规律，预测精度达到 85% 以上。

3.2 无损检测技术在耐久性评估中的应用

声发射技术、CT 扫描、红外热成像等无损检测方法为混凝土耐久性评估提供了有力工具。声发射技术通过布置传感器阵列，可实时监测裂缝的萌生与扩展过程。研究发现，不同类型的裂缝具有独特的声发射特征参数。温度裂缝通常表现为高频率（100~300kHz）、低能量的声发射信号，而荷载引起的结构性裂缝则表现为中频率（50~150kHz）、高能量的信号特征。通过对声发射信号的频谱分析和参数识

别,建立了声发射特征参数与裂缝类型的对应关系,准确率可达 90% 以上。CT 扫描技术能够以 0.1mm 的精度无损检测混凝土内部的裂缝分布状况。通过三维重建技术,可直观显示裂缝的空间分布特征和演化过程。实验研究表明,CT 扫描技术特别适用于监测冻融循环导致的内部微裂纹发展。红外热成像技术通过检测混凝土表面的温度场分布,可及时发现潜在的裂缝隐患。实践证明,当裂缝宽度达到 0.2mm 以上时,红外热像仪可清晰捕捉到温度异常区域。

4 寒区水工混凝土的裂缝控制技术

4.1 材料组成设计优化

通过优化混凝土的材料组成可有效提高其抗裂性能。大量实验研究表明,水灰比是影响混凝土抗裂性能的关键因素。当水灰比从 0.5 降低到 0.4 时,混凝土的抗拉强度提高约 25%,早期收缩量减少 30% 以上。合理的掺合料复配对改善混凝土的抗裂性能具有显著效果。研究发现,掺入 20%~30% 的粉煤灰可降低水化热温升 10℃~15℃,同时改善混凝土的工作性能。矿渣的掺入则可提高混凝土的后期强度,当掺量为 30%~40% 时,90 天抗压强度提高 15%~20%。纤维增强技术在寒区水工混凝土中的应用也取得了突破性进展。试验结果表明,复合使用钢纤维和聚丙烯纤维可同时改善混凝土的抗裂性能和韧性。当钢纤维掺量为 0.9%、聚丙烯纤维掺量为 0.1% 时,混凝土的抗拉强度提高 40% 以上,裂缝宽度减小 50% 左右,冻融循环 300 次后的相对动弹性模量提高 25%。通过引入引气剂形成 4%~6% 的含气量,可显著提高混凝土的抗冻性能,实验证明这种混凝土在经过 500 次冻融循环后,质量损失率仍控制在 3% 以内。

4.2 施工工艺与养护措施

科学的施工工艺和养护措施是控制混凝土裂缝的重要手段。大体积混凝土施工中,采用分层浇筑技术可有效减少温度应力的积累。试验研究表明,当分层厚度控制在 1.5m 以内时,混凝土内部最高温度可降低 8℃~10℃。振捣密实度的控制也是关键因素,实验数据显示,当振捣不足导致的孔隙率增加 1% 时,抗压强度将降低 5%~7%。养护过程中的温度控制尤为重要,研究发现通过设置智能测温系统和自动喷淋装置,可将混凝土内外温差控制在 15℃ 以内。对于大体积混凝土结构,采用管道冷却技术效果显著,实践证明布设间距为 1.2m 的冷却水管可使混凝土的最高温度降低 12℃~15℃。在寒区施工中,保温养护措施必不可少。试验研究表明,采用复合保温材料(聚苯板+草帘)进行养护,

可使混凝土表面温度在 7 天内保持在 5℃ 以上,确保强度的正常发展。

5 结论与展望

通过对寒区水工混凝土裂缝形成机理与耐久性评估方法的深入研究,得出以下主要结论:①寒区水工混凝土的裂缝形成受温度应力、冻融循环和化学侵蚀等多因素的耦合作用影响,表现出明显的阶段性和累积性特征;②基于损伤演化理论建立的耐久性评估模型,结合现代无损检测技术,可实现对混凝土结构耐久性的定量评估,预测精度达 85% 以上;③通过优化材料组成、改进施工工艺和加强养护措施,可有效控制裂缝的形成和发展,提高结构的耐久性。未来研究应重点关注以下方向:①深入探索极端气候条件下环境因素与荷载效应的耦合作用机理;②发展基于人工智能的耐久性预测模型,提高评估的准确性和实时性;③研发新型功能材料和智能监测技术,为寒区水工混凝土结构的全寿命周期管理提供技术支持;④建立完善的寒区水工混凝土结构耐久性设计标准体系,指导工程实践。

参考文献:

- [1] 贾超,王亦欣,闵巧玲,等.含不规则跨尺度裂缝的钢筋混凝土厂房吊车梁结构性能分析[J].水资源与水工程学报,2023,34(1):159-167.
- [2] 刘丽秋.改性环氧修复剂修复潮湿环境下混凝土裂缝的固化时间影响[J].水利科学与寒区工程,2023,6(9):24-27.
- [3] 夏明海,秦子鹏,曾霞,等.寒区均质土坝混凝土面板冰冻胀破坏的力学分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):104-112.
- [4] 王丽秋.基于寒区混凝土重力坝体应力与变形分析——以辽宁省观音阁水库为例[J].黑龙江水利科技,2022,50(2):50-53.
- [5] 张健.高寒区渠道衬砌混凝土裂缝快速修复技术研究[J].水利科学与寒区工程,2021,4(1):59-65.
- [6] 姜涛,李宁,祝继隆.寒区碾压混凝土坝越冬保温措施研究[J].黑龙江水利科技,2024,52(2):33-35.
- [7] 杨梦鑫,马腾飞,高珊,等.水利工程建筑物混凝土裂缝的预防与控制技术研究[J].水利科学与寒区工程,2023,6(5):8-10.
- [8] 金书成.功能梯度混凝土结构在寒区桥梁基础上的适用性研究[D].黑龙江:东北林业大学,2023.

作者简介:李汝献(1972-),男,中国山东枣庄人,工程师,从事寒区水工混凝土形成机理研究。