

# 水工混凝土耐久性问题的技术挑战与设计理念更新

何 联

第八师石河子市水利工程管理服务中心 新疆 乌鲁木齐 832000

**摘 要：**水工混凝土结构作为国家水利基础设施的核心组成部分，其服役寿命直接关系到水资源调控、防洪减灾、能源供应及生态安全等重大战略目标。然而，在复杂多变的服役环境中，水工混凝土面临着严峻的耐久性挑战，裂缝、冻融破坏、碱骨料反应、硫酸盐侵蚀、碳化及钢筋锈蚀等问题频发，严重威胁工程安全与长期效益。本文系统梳理了当前水工混凝土耐久性面临的主要技术挑战，深入剖析了传统设计理念在应对这些挑战时的局限性，并在此基础上，提出以“全生命周期”、“性能导向”和“韧性优先”为核心的新一代设计理念。文章进一步探讨了支撑该理念更新的关键技术路径，包括高性能材料体系、智能监测与数字孪生技术、以及基于风险评估的维护决策模型。研究表明，唯有通过设计理念的根本性变革，辅以技术创新，方能构建真正安全、可靠、可持续的现代水工混凝土工程体系。

**关键词：**水工混凝土；耐久性；技术挑战；全生命周期；性能导向设计

## 引言

自19世纪末，混凝土因性能优异、经济且原料丰富，成为水工建筑物主要建材。但“混凝土万年牢”的认知在自然环境前被证伪，全球大量服役数十年的水工混凝土结构提前劣化，维修成本高，甚至引发灾难。中国拥有最多大型水利水电工程，庞大水工混凝土基础设施正步入“老龄化”，耐久性成制约行业高质量发展的核心瓶颈。传统水工混凝土设计聚焦短期力学性能，对长期环境作用下的性能演变关注不够，“重强度、轻耐久”的设计范式难以应对复杂服役环境。因此，深刻认识当前水工混凝土耐久性技术挑战，推动设计理念系统性更新，是工程技术需求，更是实现国家水安全战略和“双碳”目标的必然选择。

## 1 水工混凝土耐久性面临的主要技术挑战

### 1.1 多场耦合作用下的劣化机理复杂性

水工混凝土的劣化很少由单一因素引起，而是多种物理、化学和生物过程相互交织、协同或竞争的结果。例如：（1）冻融-盐蚀耦合：在寒冷地区，混凝土孔隙中的水结冰膨胀产生内应力，同时环境中（如除冰盐或海水）的氯盐、硫酸盐等会降低水的冰点并加剧渗透，二者共同作用显著加速混凝土表层的剥落和内部微裂纹的扩展。（2）干湿循环-碳化-钢筋锈蚀链式反应：干湿交替环境促进了大气中CO<sub>2</sub>向混凝土内部的扩散（碳化），碳化深度达到钢筋表面后，破坏其钝化膜。若同时存在氯离子侵入，则会诱发并加速钢筋的电化学腐蚀。腐蚀产物的体积膨胀反过来又会引发顺筋裂缝，形成恶性循环。（3）碱-硅酸反应（ASR）与应力状态的交互：ASR

产生的凝胶吸水膨胀，在约束条件下（如大体积混凝土内部或配筋区域）会产生巨大的内应力，导致开裂<sup>[1]</sup>。而外部荷载或温度应力的存在，会改变混凝土内部的应力场，进而影响ASR膨胀的发展速率和破坏模式。这种多场耦合的复杂性使得实验室的单一因素加速试验结果难以准确外推至真实服役环境，给耐久性预测和寿命评估带来了巨大困难。

### 1.2 大体积混凝土温控防裂难题

水工结构多为大体积混凝土，水泥水化释放的大量热量导致内外温差巨大，产生显著的温度拉应力。当该应力超过混凝土早期抗拉强度时，便会产生贯穿性或深层裂缝。这些裂缝不仅是结构的薄弱环节，更是水、侵蚀性离子等有害介质快速侵入的通道，从根本上损害了混凝土的耐久性屏障功能。尽管已有成熟的温控措施（如预冷骨料、通水冷却、分缝分块等），但在超大体积、超长结构（如高坝、长距离输水渡槽）中，如何精准模拟、预测并有效控制全过程的温度场与应力场，依然是世界级的技术难题。

### 1.3 原材料品质波动与新型胶凝材料体系的不确定性

随着天然优质砂石骨料资源的日益枯竭，机制砂、再生骨料、工业固废（如粉煤灰、矿渣、钢渣）等替代材料的应用越来越广泛。这些材料虽然有助于资源循环利用和“双碳”目标，但其物理化学性质（如颗粒形貌、级配、活性、有害成分含量）的波动性远大于传统材料，对混凝土的工作性、强度发展及长期耐久性（特别是ASR、硫酸盐侵蚀敏感性）的影响尚不完全明确。此外，为提升性能而开发的新型胶凝材料体系（如超高

性能混凝土UHPC、地聚物混凝土)虽然展现出优异的力学和耐久性能,但其长期性能演变规律、与传统混凝土的界面相容性、以及大规模工程应用的经济性与施工工艺适配性,仍需大量的基础研究和工程验证。

#### 1.4 极端气候事件频发带来的新挑战

全球气候变化背景下,极端高温、极端低温、强降雨、干旱等事件的发生频率和强度显著增加。这给水工混凝土结构带来了前所未有的考验:一是极端高温:加剧混凝土早期水分蒸发,增大塑性收缩开裂风险;长期高温可能改变水泥水化产物的稳定性。二是极端低温与剧烈温变:超出常规设计考虑的冻融循环次数和温变速率,对混凝土的抗冻性和抗裂性提出更高要求<sup>[2]</sup>。三是强降雨与洪水:导致水位骤变,加剧干湿循环效应;洪水携带的泥沙对混凝土表面产生磨蚀-空蚀联合作用。四是长期干旱:导致水库水位长期偏低,使原本处于水下的混凝土结构长期暴露于干湿交替甚至完全干燥环境,改变了其劣化模式。这些“黑天鹅”或“灰犀牛”事件,使得基于历史气象数据的传统设计方法面临失效风险。

### 2 传统设计理念的局限性

面对上述严峻挑战,以《水工混凝土结构设计规范》(SL191)为代表的传统设计理念显现出明显的局限性:

#### 2.1 “强度主导”范式的片面性

传统设计以极限状态法为核心,首要确保结构在承载能力极限状态下不发生破坏,对正常使用极限状态(如裂缝宽度控制)虽有规定,但对更长期的耐久性极限状态缺乏系统性的、量化的控制指标。设计过程往往通过经验性的构造措施(如最小保护层厚度、最大水胶比限制、最低胶凝材料用量)来间接保证耐久性,而非直接针对具体的环境作用进行性能设计。这种“一刀切”的做法,无法适应不同工程、不同部位所面临的差异化耐久性需求。

#### 2.2 静态、确定性思维的不足

传统设计将材料性能、环境作用和结构响应视为静态和确定的。它假设混凝土一旦硬化,其性能就基本固定;环境作用是平稳、可预测的;结构响应是线弹性的。然而,现实恰恰相反:混凝土是一个随时间持续演变的“活”材料;环境作用是动态、随机且日益极端的;结构在长期荷载和环境作用下表现出显著的时变非线性行为。这种静态思维导致设计成果与实际服役性能之间存在巨大鸿沟。

#### 2.3 全生命周期视角的缺失

传统设计主要关注建设期的成本和性能,对结构长达50年、100年甚至更长的服役期内的维护、修复、更新成

本及社会环境影响考虑甚少。这导致许多工程在建设时看似经济,却在后期付出了高昂的运维代价,甚至因提前失效而造成更大的经济损失和安全风险。缺乏全生命周期成本(LCC)和全生命周期环境影响(LCA)的综合评估,使得决策难以实现真正的经济性和可持续性。

### 3 设计理念的更新:迈向新一代水工混凝土设计

为应对挑战、克服局限,水工混凝土的设计理念亟需进行一场深刻的范式革命,其核心应围绕以下三个维度展开:

#### 3.1 全生命周期设计理念

全生命周期理念要求设计师跳出建设期的狭隘视野,将工程视为一个从规划、设计、施工、运营、维护直至最终退役或再生的完整生命过程。在此框架下,设计决策不再仅仅依据初始造价,而是要综合权衡其在整个预期服役年限内的全部经济、社会和环境代价。这意味着,在方案比选阶段,就必须引入全生命周期成本(LCC)分析,量化预测未来的检查、监测、维护、修复费用;同时,也要进行全生命周期环境影响评价(LCA),评估其从原材料开采到最终处置全过程的能耗与碳足迹<sup>[3]</sup>。通过这种综合评估,可以科学地论证采用高性能、高耐久性材料的长期价值,引导投资从“省眼前钱”转向“花长远钱”,从而做出真正符合可持续发展原则的最优决策。

#### 3.2 性能导向设计理念

性能导向设计标志着从“规定怎么做”到“要求达到什么效果”的根本转变。其核心在于,根据工程的具体服役环境、重要性等级和业主期望的服务寿命,预先设定清晰、具体且可验证的耐久性性能目标。例如,可以明确规定:“在海洋浪溅区,结构在100年设计使用年限内,钢筋表面的氯离子浓度不得超过临界值”或“在严寒地区,混凝土在经历300次标准冻融循环后,其相对动弹性模量不得低于80%”。设计过程不再是简单地套用规范条文,而是运用先进的材料科学、传输理论和数值模拟工具,去验证所选用的材料配合比、结构细部构造和防护体系能否可靠地达成这些预设目标。这种以终为始的设计方法,赋予了设计师更大的灵活性和创新空间,同时也对设计理论、试验技术和计算能力提出了更高的要求。

#### 3.3 韧性优先设计理念

在充满不确定性的时代,一个优秀的水工结构不应仅满足于“在正常条件下不坏”,更应具备在遭遇意外扰动(如超标洪水、极端低温、局部材料失效)后,依然能够维持核心功能并具备快速恢复能力的韧性。韧

性优先的设计理念,强调在结构中融入冗余度、鲁棒性和可恢复性。冗余度体现在合理的结构体系布置上,确保局部损伤不会引发灾难性的连续倒塌;鲁棒性则通过采用高断裂能、高延性的材料(如纤维增强混凝土)来实现,使其在开裂后仍能有效传递荷载,抑制裂缝的快速扩展;而可恢复性则着眼于未来的维护便利性,例如在关键部位预设易于检测和修复的构造细节,甚至前瞻性地集成自感知、自修复等智能功能材料,让结构具备一定程度的“自愈”能力。这种面向未来的韧性思维,是保障国家水安全战略在极端情景下依然稳固的关键。

#### 4 支撑理念更新的关键技术路径

新的设计理念的落地,离不开一系列前沿技术的支撑。

##### 4.1 高性能与多功能材料体系

材料是新设计理念实现的物质基础。为提升水工混凝土耐久性与韧性,要大力发展高性能与多功能材料体系。推广低热水泥并复合大掺量优质矿物掺合料,可降低水化热总量和温升峰值,缓解大体积混凝土温控防裂难题;在混凝土基体中掺入钢纤维或合成纤维,能改善抗裂性能和断裂韧性,抑制各阶段裂缝开展;开发智能混凝土是前沿方向,如将微胶囊包裹的修复剂或具矿化能力的微生物嵌入混凝土,使其裂缝产生时自动修复,或将分布式光纤传感器与混凝土一体化成型,使其具备实时感知健康状态的能力,这些多功能材料成熟应用将为新一代水工结构提供可能。

##### 4.2 智能监测与数字孪生技术

实现全生命周期管理和性能导向设计,需长期精准感知结构真实状态,这依赖先进智能监测技术。在结构关键部位预埋由分布式光纤、压电陶瓷、腐蚀电位传感器等构成的传感网络,可原位、实时、连续监测温度、应力等核心参数,海量监测数据是评估结构健康状况等的宝贵财富<sup>[4]</sup>。数字孪生技术是整合数据的终极平台,它以BIM模型为骨架,融合全链条信息构建物理结构高保真虚拟映射,借助机器学习和大数据分析算法,能动态更新结构性能退化模型,精准预测剩余寿命,为运维人

员提供智能决策支持,实现从“经验判断”到“数据驱动”的跨越。

##### 4.3 基于风险与可靠度的维护决策模型

面对结构性能固有不确定性和环境作用随机性,传统确定性维护策略乏力,应采用基于概率和风险的科学决策模型。概率耐久性设计方法将不确定性因素量化,运用可靠度理论计算结构满足预定耐久性功能的概率,为设计提供科学依据。在此基础上构建完整风险评估与管理框架,全面评估结构失效多维度后果,根据综合风险等级制定差异化、成本效益最优的检查、监测和维护策略,将运维资源精准投放,实现从被动“坏了再修”向主动“精准养护”模式转变。

#### 5 结语

水工混凝土的耐久性问题,已从单纯的技术议题上升为关乎国家水安全、经济安全和生态安全的战略命题。面对多场耦合劣化、温控防裂、材料不确定性及极端气候等多重技术挑战,固守传统的“强度主导、静态确定、忽视全周期”的设计理念已难以为继。未来的水工混凝土工程,必须拥抱以“全生命周期、性能导向、韧性优先”为核心的新一代设计理念。这一理念的精髓在于,将结构视为一个动态演化的生命体,以明确的、量化的长期性能目标为指引,通过高性能材料、智能感知技术和先进决策模型的深度融合,构建起能够主动适应、抵御并从扰动中恢复的韧性工程系统。实现这一愿景,需要材料科学家、结构工程师、环境学家、信息技术专家以及政策制定者的通力合作。

#### 参考文献

- [1]陈精卫,聂章博.水工混凝土结构耐久性研究[J].工程研究与实用,2025,6(23).
- [2]张丽.基于水利枢纽工程水工混凝土结构耐久性评价[J].水利电力技术与应用,2025,7(16).
- [3]吴能.聚丙烯纤维改良水工混凝土耐久性能及损伤模型研究[J].水利科技与经济,2025,31(10):18-22.
- [4]卢春丽,丁筛霞,高睿君,等.提高大体积水工混凝土耐久性的措施[J].中国水泥,2025(8):86-88.