

# 混凝土结构耐久性设计与使用寿命预测方法研究

任盛鑫

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]混凝土结构是现代工程建设中最为重要的结构形式之一,其耐久性水平直接关系到工程结构的安全性、适用性和全寿命周期经济性。随着工程服役环境日趋复杂以及使用年限要求不断提高,单纯以承载力为核心的传统设计方法已难以全面反映结构长期服役性能,耐久性设计与使用寿命预测逐渐成为结构工程领域的重要研究内容。文中在系统分析混凝土结构耐久性问题基本特征的基础上,围绕耐久性设计原则、关键技术以及使用寿命预测方法展开研究,重点探讨了环境作用下混凝土结构性能劣化机理与寿命预测思路。研究认为,将耐久性设计理念与寿命预测方法相结合,有助于实现混凝土结构全寿命周期性能控制,为工程结构的科学设计和长期管理提供理论依据。

[关键词]混凝土结构;耐久性设计;使用寿命预测;劣化机理;全寿命周期

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18849

中图分类号: TU375

文献标识码: A

## Research on Durability Design and Service Life Prediction Method of Concrete Structures

REN Shengxin

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Concrete structure is one of the most important structural forms in modern engineering construction, and its durability level directly affects the safety, applicability, and full life cycle economy of the engineering structure. With the increasing complexity of engineering service environments and the continuous improvement of service life requirements, traditional design methods that solely focus on bearing capacity are no longer able to fully reflect the long-term service performance of structures. Durability design and service life prediction have gradually become important research topics in the field of structural engineering. Based on a systematic analysis of the basic characteristics of durability issues in concrete structures, this article focuses on durability design principles, key technologies, and service life prediction methods, with a particular emphasis on exploring the mechanism of performance degradation and service life prediction ideas of concrete structures under environmental conditions. Research suggests that combining durability design concepts with life prediction methods can help achieve full life cycle performance control of concrete structures, providing theoretical basis for scientific design and long-term management of engineering structures.

**Keywords:** concrete structure; durability design; prediction of service life; degradation mechanism; whole life cycle

### 引言

混凝土结构广泛应用于建筑、交通、水利等工程领域,是现代基础设施的重要组成部分。然而,在长期服役过程中,混凝土结构不可避免地受到环境侵蚀、材料老化和荷载作用等多重因素影响,其性能随时间逐渐退化,耐久性问题日益凸显。近年来,因耐久性不足引发的结构损伤现象不断出现,不仅影响工程安全,也显著增加维护和加固成本。在此背景下,开展混凝土结构耐久性设计与使用寿命预测方法研究,对于提升工程结构长期服役性能具有重要意义。

### 1 混凝土结构耐久性问题基本认识

#### 1.1 混凝土结构耐久性的内涵与特征

混凝土结构耐久性是衡量结构在其全寿命周期内能否稳定维持使用功能和安全性能的重要指标。与传统的承载力性能不同,耐久性具有明显的时间效应,且其变化过程具有渐进性和隐蔽性,常常在未引起结构外观变化的情况下持续发展,最终导致性能失效。这种特征使耐久性问题难以

及时发现和有效控制,从而对结构的长期稳定性形成威胁。此外,耐久性还具有环境依赖性,不同的温湿度条件、侵蚀性介质以及受力状态都会导致混凝土内部结构发生不同程度的劣化,使耐久性具有显著的区域差异性和随机性。

#### 1.2 常见耐久性问题的形成机理

混凝土材料由水泥、水、骨料及掺合料共同构成,其内部结构复杂且多孔。当外界条件发生变化时,如温度循环、湿度波动和化学介质侵蚀,混凝土孔隙中的水分和体会发生迁移和反应,逐步改变材料性能。例如,干湿交替可导致混凝土的体积反复变化,使结构产生微裂缝;温度循环可促进内部微结构损伤累积。此外,化学腐蚀、碳化、氯离子侵入等作用均会破坏钢筋保护层,降低混凝土对钢筋的保护能力,使钢筋出现锈蚀。这些损伤在初期可能较为轻微,但长期累积会削弱混凝土与钢筋之间的协同作用,降低结构整体可靠性。

#### 1.3 耐久性问题对工程结构的影响

混凝土结构耐久性不足会引起承载能力下降、变形增

大、构件开裂等多种问题,最终影响结构的安全性和使用功能。随着劣化程度的加深,结构维护和加固需求不断增加,显著提高工程全寿命周期成本。尤其在复杂环境作用下,耐久性问题可能呈现加速发展趋势,导致设计使用年限大幅缩短。此外,耐久性不足还会影响结构外观质量,对建筑物的公共形象和使用舒适性造成影响,因此在结构设计阶段充分考虑耐久性问题具有重要意义。

## 2 混凝土结构耐久性设计的基本原则

### 2.1 全寿命周期设计理念

全寿命周期设计理念强调在结构构思阶段便整体预估其从建造到服役至退役的全过程性能,避免传统设计中过分关注初期承载能力而忽视中后期耐久性的现象。耐久性设计不仅需要保证结构在初期具有足够的性能储备,还需在设计中考虑材料老化、环境作用累积等因素。通过提前分析劣化趋势并制定针对性措施,可显著提升结构的长期服务性能。此外,全寿命周期理念还提倡将维护管理策略纳入设计体系,从而实现结构性能的动态控制。

### 2.2 环境适应性与针对性设计原则

不同地区的环境条件差异显著,如沿海地区的氯离子浓度较高,高寒地区冻融循环频繁,工业区大气中硫化物含量高等。因此,混凝土结构耐久性设计必须具备环境适应性,针对不同环境类型采取差异化的措施,包括选择适宜的材料配方、合理的构造形式以及必要的防护体系。通过“环境定级、措施适配”的方式,可有效控制环境作用对结构性能的不利影响,使耐久性设计更加科学合理。

### 2.3 安全性与经济性协调原则

在设计中追求更高的耐久性往往意味着增加材料成本和施工复杂度。为此,科学设计需在安全性与经济性之间取得平衡,通过综合考虑工程规模、环境条件和预期使用年限,从而选择成本合理且性能优越的设计方案。过度设计虽可提升性能,但会造成资源浪费;而设计不足则可能导致结构提前失效,增加维修成本。因此,在安全性前提下兼顾经济性,是耐久性设计的核心要求之一。

## 3 混凝土结构耐久性设计关键技术

### 3.1 材料性能控制与优化设计

混凝土材料性能对结构耐久性具有决定性作用。其中,水胶比是影响混凝土孔隙率的关键指标,水胶比越高,混凝土孔隙越多,抗渗性、抗冻性和抗侵蚀性越差。因此,设计中应通过优化配合比设计,合理控制水胶比,使混凝土具有较低的孔隙率和良好的密实性。此外,掺加矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉或硅灰,可有效改善微观结构,提高混凝土抵御环境影响的能力。对于钢筋混凝土结构,钢筋表面性能和保护层厚度同样影响耐久性,应通过合理选材和构造措施确保钢筋长期处于安全环境中。

### 3.2 结构构造与防护措施设计

构造处理得当的混凝土结构能够更有效地抵抗环境

作用。构造设计需特别关注内外角部、接缝和薄弱部位,这些区域易形成应力集中,是耐久性薄弱环节。通过合理设计细部构造、设置防渗构造、提高保护层厚度等措施,可有效降低环境渗透风险。此外,表面涂层、封闭剂等防护措施能在结构表面形成保护屏障,从而延缓劣化过程。对于环境侵蚀严重的工程,可采用多重防护体系,通过不同材料和技术的结合,实现更高的耐久性水平。

### 3.3 施工质量对耐久性的影响

施工质量直接关系到耐久性设计能否在工程中得到真实体现,是混凝土结构长期性能保障的重要前提。若施工过程中出现配合比控制不严、材料拌合不均、振捣不到位或养护条件不足等问题,混凝土内部容易形成孔隙集中区和微裂缝,为外界有害介质的侵入提供通道。这些初始缺陷会显著削弱材料密实性,加快钢筋锈蚀和混凝土劣化进程,缩短结构实际使用寿命。施工质量偏差一旦形成,往往难以通过后期补救彻底消除,对结构耐久性产生长期不利影响。通过加强施工过程管理,对关键工序进行严格控制和检查,可有效减少人为因素造成的质量隐患。建立覆盖原材料、施工过程和成型质量的全过程检测机制,有助于保证混凝土结构具备良好的初始耐久性能,为后续安全服役奠定坚实基础。

## 4 混凝土结构使用寿命预测方法研究

### 4.1 基于劣化机理的寿命预测思路

基于劣化机理的寿命预测方法通过建立材料性能随时间演化的数学模型,对结构在服役过程中的耐久性变化进行定量分析。这类方法以化学、物理或力学作用机制为理论基础,能够描述混凝土在复杂环境下的真实劣化过程。例如,通过氯离子迁移模型可模拟侵蚀介质在混凝土中的扩散行为,从而推算钢筋锈蚀启动时间;利用碳化深度模型可评估碳化前沿随时间推进的规律,为保护层厚度设计提供依据。该类方法在反映材料内部劣化机理方面具有明显优势,预测结果更具科学性和针对性。模型构建过程中需综合考虑混凝土孔隙结构、渗透性能和环境条件等因素,对参数获取和计算精度提出较高要求。通过合理选取模型参数并结合工程实测数据,可建立较为精确的寿命预测体系,为混凝土结构耐久性设计和长期性能控制提供可靠支撑。

### 4.2 经验模型与统计方法的应用

在长期工程实践积累的基础上,经验模型和统计方法因操作简便、计算效率高而在结构寿命预测中得到广泛应用。经验模型通常依托历史工程数据,通过统计归纳建立寿命预测公式,能够快速反映特定环境和结构类型下的性能演化规律。统计方法则基于大量既有结构的观测结果,对材料劣化和结构退化趋势进行分析,从而推测未来服役阶段的性能变化情况。这类方法在工程初步评估和方案比选中具有较高实用价值。然而,其预测精度高度依赖数据来源的完整性和代表性,当应用条件超出原有数据范围时,预测结果的不确定性会显著增加。因此,在实际应用过程

中,需要对数据质量进行严格筛选,并结合工程背景合理使用,以保证寿命预测结论的可靠性和适用性。

### 4.3 寿命预测结果的不确定性分析

结构寿命预测受多种因素共同影响,环境条件的长期变化、材料性能的离散性以及施工质量差异,都会使预测结果存在不确定性。若仅依赖确定性参数进行分析,容易低估潜在风险或高估结构实际寿命。在寿命预测过程中引入不确定性分析方法,有助于全面认识各类变量对预测结果的影响程度。通过敏感性分析可识别对寿命影响较大的关键参数,为设计和维护提供重点控制方向。概率分析能够描述不同因素组合下结构性能演化的可能性,使寿命评估更加符合实际运行情况。将不确定性分析结果应用于风险评估,可更准确地判断结构在服役过程中的安全裕度。该方法为寿命预测提供了更加稳健的技术支撑,有助于提升工程决策的科学性和可靠性。

## 5 耐久性设计与寿命预测的综合应用

### 5.1 设计阶段的寿命目标控制

在结构设计初期引入清晰明确的寿命目标,有助于将抽象的耐久性要求转化为可操作的设计参数,使设计过程更具针对性和前瞻性。寿命目标能够指导材料性能等级的选择,促使设计人员合理确定混凝土强度等级、耐久性指标以及钢筋防护措施,从源头提升结构抵御环境作用的能力。构造细节和保护层厚度的科学设定,也可在寿命目标约束下更加精准地匹配实际服役环境。以寿命为导向的设计思路,使结构在满足安全与使用功能的同时,具备更稳定的长期性能表现。该理念还能为后续运行阶段的检测、维护和加固提供明确依据,使维护策略更加精准有效,避免过度干预或维护滞后造成的资源浪费,从而实现结构全寿命周期内性能与经济效益的协调统一。

### 5.2 运行阶段的性能评估与修正

在结构服役阶段,通过定期检测混凝土外观状态、内部损伤程度以及钢筋腐蚀发展情况,可及时掌握结构性能变化趋势。检测结果能够反映环境作用和长期荷载对结构的不利影响,为判断耐久性退化程度提供客观依据。将检测信息引入寿命预测模型,有助于对原有预测结果进行动态修正,使寿命评估更加贴近结构的真实工作状态。基于监测数据开展持续分析,可实现结构由静态评估向动态管理的转变,提高性能保持与风险防控能力。长期积累的监测数据还能为模型参数校准和退化规律识别提供支撑,从而显著提升寿命预测的精度与可靠性。这种以监测数据为

基础的管理方式,为工程维护决策提供量化依据,有助于保障混凝土结构在全寿命周期内的安全与耐久运行。

### 5.3 未来发展方向与工程应用展望

随着现代材料科学和智能技术的不断进步,混凝土结构耐久性研究正逐步向更加精细化和智能化的方向发展。高性能混凝土、自修复材料和新型防护材料的应用,使结构在复杂环境下的服役能力得到显著提升。智能监测技术的发展,使结构在长期使用过程中能够实现状态感知与性能跟踪,为耐久性评估提供真实可靠的数据基础。借助大数据分析的智能算法,可对材料劣化规律和结构性能演化过程进行深入挖掘,提高寿命预测的准确性和前瞻性。将先进技术与工程实践紧密结合,有助于推动耐久性设计由经验驱动向数据与模型驱动转变。未来研究在加强基础理论深化的同时,更需注重工程应用反馈,不断完善和创新耐久性设计体系,为混凝土结构的安全、长寿与高效服役提供更加坚实的技术保障。

## 6 结论

本文围绕混凝土结构耐久性设计与使用寿命预测方法展开系统研究,从理论基础、设计理念与工程应用等层面进行了综合分析。研究表明,将全寿命周期理念贯穿于结构设计与管理过程中,有助于全面认识环境作用、材料劣化与结构性能演化之间的内在联系。耐久性设计与寿命预测方法的有机结合,使结构性能控制由经验判断转向科学评估,为长期安全运行提供依据。通过合理的材料选用、构造措施与防护策略配合寿命预测分析,可在满足安全和使用功能要求的前提下实现更优的经济效益。面向未来,有必要进一步深化混凝土劣化机理与寿命预测模型之间的协同研究,加强理论模型与工程监测数据的融合,以提升预测结果的可靠性和适用性,为混凝土结构耐久性设计和工程实践提供更加坚实的技术支撑。

### [参考文献]

- [1]陈国兴,李术才.混凝土结构耐久性设计理论与方法[J].建筑结构学报,2019,40(5):1-10.
- [2]王铁成,张建民.混凝土结构耐久性与寿命预测研究进展[J].土木工程学报,2020,53(6):11-19.
- [3]周小平,刘新荣.混凝土结构劣化机理及耐久性评价方法[J].工程力学,2021,38(8):25-33.

作者简介:任盛鑫(1984.12—),男,汉族,毕业院校:石家庄铁道大学,现就职单位:中土大地国际建筑设计有限公司。