

# 混凝土结构耐久性损伤诊断与修复加固方法

崔金梅

中国铁路青藏集团有限公司西宁房建生活段 青海 西宁 810006

**摘要:** 混凝土结构作为现代土木工程的基石,其服役寿命和安全性直接关系到国家基础设施的可持续发展与公共安全。然而,在复杂多变的服役环境中,混凝土结构不可避免地遭受各种耐久性损伤,如钢筋锈蚀、冻融破坏、碱-骨料反应、硫酸盐侵蚀及碳化等。这些损伤若不及时诊断与处理,将导致结构承载力退化、刚度下降,甚至引发灾难性事故。本文系统阐述了混凝土结构主要耐久性损伤的形成机理与典型表征,深入探讨了基于无损/微损检测技术、环境监测与数值模拟相结合的综合诊断体系,并在此基础上,全面梳理了针对不同损伤类型与程度的修复加固策略。旨在为保障既有混凝土结构的安全、延长其服役寿命提供理论依据与实践指导。

**关键词:** 混凝土结构;耐久性损伤;损伤诊断;修复加固;高性能材料

## 引言

自19世纪波特兰水泥出现,混凝土因性能优异、成本低、原料丰富,成为全球应用最广的建筑材料,撑起现代社会的物理骨架。但大量早期混凝土结构步入或超设计年限,新建结构也因服役环境或设计施工不当提前出现耐久性问题。在中国,大规模基建高潮退去,存量结构维护修复加固成行业新重心,《“十四五”建筑业发展规划》提出既有建筑绿色改造与延寿技术是关键。混凝土结构耐久性指其在设计年限内满足预定功能的能力,耐久性损伤渐进、隐蔽且不可逆,初期难察觉却会降低结构可靠度。建立“诊断-修复-加固”技术体系意义重大,本文旨在梳理该领域核心理论、关键技术与前沿进展,为研究与工程实践提供参考。

## 1 混凝土结构主要耐久性损伤机理与表征

### 1.1 钢筋锈蚀

钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构性能退化的首要原因。其本质是一个电化学腐蚀过程,需要同时满足三个条件:阳极区、阴极区、电解质(水分)和氧气。混凝土的高碱性环境( $\text{pH} > 12.5$ )使钢筋表面形成一层致密的钝化膜,从而免于腐蚀。然而,当外部侵蚀性介质侵入,破坏这一保护环境时,锈蚀便会发生。(1)碳化诱导锈蚀:大气中的二氧化碳( $\text{CO}_2$ )通过混凝土孔隙扩散至内部,与氢氧化钙反应生成碳酸钙,导致混凝土 $\text{pH}$ 值下降。当碳化深度达到钢筋表面,钝化膜被破坏,钢筋开始锈蚀。(2)氯离子侵蚀诱导锈蚀:海洋环境或除冰盐中的氯离子( $\text{Cl}^-$ )具有强穿透性和去钝化能力。即使在高碱性环境下,当钢筋表面的氯离子浓度超过临界阈值(通常为水泥质量的0.2%-0.4%),也能局部破坏钝化膜,引发点蚀。钢筋锈蚀产物(铁锈)的体积是原钢材

的2-6倍,巨大的膨胀应力导致混凝土保护层开裂、剥落(顺筋裂缝),并伴随明显的红褐色锈迹渗出。宏观上表现为构件截面有效面积减小、粘结性能劣化,最终导致承载力和延性显著下降。

### 1.2 冻融循环破坏

在寒冷地区,饱水状态下的混凝土经历反复的冻结与融化过程,会产生严重的内部损伤。水在结冰时体积膨胀约9%,在混凝土毛细孔和气孔中产生巨大的静水压力和渗透压力。当这种压力超过混凝土的抗拉强度时,孔壁便会产生微裂缝。随着冻融循环次数的增加,微裂缝不断扩展、连通,最终导致混凝土表面砂浆剥落、骨料裸露,强度和弹性模量急剧下降<sup>[1]</sup>。其典型的外观特征是表面出现网状裂缝、片状剥落(D-cracking),严重时骨料与砂浆分离,使得混凝土变得疏松多孔,吸水率显著增加,从而进一步加剧了冻融破坏的恶性循环。

### 1.3 碱-骨料反应(AAR)

当混凝土中的碱( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )与某些活性骨料(如蛋白石、玉髓、微晶石英等)在有水存在的条件下发生化学反应,会生成一种吸水膨胀的碱-硅凝胶。这种凝胶吸收周围水分后体积急剧膨胀,对骨料和水泥浆体产生巨大的内应力,导致混凝土内部开裂。这种损伤在结构表面通常表现为特征性的网状或地图状裂缝,裂缝边缘常伴有凝胶状物质渗出。在受到外部约束的条件下,这种膨胀还可能引起构件的整体变形或鼓胀,对结构的整体性和稳定性构成严重威胁。

### 1.4 硫酸盐侵蚀

在土壤、地下水或工业废水中含有硫酸根离子( $\text{SO}_4^{2-}$ )的环境中,硫酸盐会与水泥水化产物(主要是氢氧化钙和水化铝酸钙)发生反应,生成石膏

( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )和钙矾石( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )。这两种产物的生成都会伴随体积膨胀,从而在混凝土内部产生膨胀应力,导致开裂、酥松和强度丧失。受硫酸盐侵蚀的混凝土,其表面颜色常变白(泛霜),出现不规则的膨胀裂缝,内部结构变得疏松,敲击时声音沉闷,整体力学性能大幅退化。

### 1.5 其他损伤形式

此外,混凝土结构还面临着由干湿循环引起的收缩裂缝、由荷载与环境耦合作用下的疲劳损伤、以及由生物侵蚀(如微生物代谢产酸)等造成的损伤。这些损伤形式往往并非孤立存在,而是相互交织、协同作用,共同加速了结构的劣化进程,使得耐久性问题的诊断与治理变得更加复杂。

## 2 耐久性损伤的综合诊断技术体系

### 2.1 无损/微损检测技术

针对钢筋锈蚀状态的评估,工程实践中常采用半电池电位法,通过测量钢筋相对于参比电极的电位来判断其发生锈蚀的概率,该方法操作简便,是现场普查的常用手段,但只能定性判断,无法量化锈蚀速率。混凝土电阻率法则通过反映孔隙溶液的导电能力来间接评估锈蚀速率,高电阻率意味着较低的锈蚀风险。而交流阻抗谱(EIS)则能通过分析钢筋/混凝土界面的电化学阻抗,定量评估钝化膜状态和锈蚀速率,但其设备昂贵且数据分析复杂。此外,探地雷达与红外热成像等技术主要用于探测保护层厚度、内部空洞及剥离区域,可间接辅助锈蚀损伤的定位。对于混凝土物理力学性能的评估,回弹法与超声-回弹综合法通过测量表面硬度或声速来推定抗压强度,操作便捷但易受表面状态影响;冲击回波法则利用瞬态应力波在缺陷处的反射信号,能精确定位内部缺陷的深度和范围,特别适用于板、墙等薄壁结构;探地雷达则凭借高频电磁波的优势,可快速、连续地扫描内部钢筋分布、保护层厚度及孔洞情况。在裂缝与缺陷检测方面,数字图像相关(DIC)技术通过对比结构在不同状态下的表面图像,可全场、非接触地测量裂缝的发展动态;而光纤传感技术则能实现对温度、应变及裂缝的分布式、长距离、实时监测,是构建结构健康监测系统的理想选择。

### 2.2 环境侵蚀因子监测

仅仅了解结构当前的损伤状态是不够的,还需掌握其服役环境的历史与现状。因此,在结构关键部位布设传感器,长期监测氯离子浓度、湿度、温度、 $\text{CO}_2$ 浓度等环境参数,可以为损伤机理的深入分析和剩余寿命的科学预测提供不可或缺的关键输入数据<sup>[2]</sup>。例如,埋入式氯

离子传感器可以直接获取钢筋位置的氯离子浓度时变曲线,为判断锈蚀启动时间提供直接证据。

### 2.3 基于数据融合的损伤识别与评估

必须认识到,任何单一的检测方法都存在其固有的局限性。为了克服这一不足,现代诊断理念强调将多种无损检测数据、环境监测数据与有限元数值模型进行深度融合。通过运用机器学习、贝叶斯更新等先进算法,可以构建更为精确的损伤识别与评估模型,从而实现了对损伤位置、范围、程度乃至未来演化趋势的智能化、系统化评估。这种集“感知-分析-决策”于一体的闭环模式,代表了未来结构健康监测与诊断技术的发展方向。

## 3 修复与加固方法

### 3.1 表面防护与隔离

这是最经济、最常用的预防和初期干预措施,其核心思想是在混凝土表面构筑一道屏障,以阻止水、氯离子、二氧化碳、氧气等侵蚀性介质侵入混凝土内部。涂层技术,包括环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸类涂料等,能在混凝土表面形成一层致密的物理屏障,但对于已发生锈蚀的结构,必须先进行彻底的除锈和基层处理才能保证涂层的附着力和有效性。相比之下,渗透性防护剂,如硅烷/硅氧烷浸渍剂,则展现出更优越的性能。它们能够渗透到混凝土表层数毫米至厘米深处,与内部的碱性物质发生化学反应,形成憎水层,有效降低水和氯离子的渗透性,同时又不影响混凝土内部水蒸气的正常逸出,即保持了混凝土的“呼吸”性能,从而避免了因内部水汽积聚而产生的新问题。

### 3.2 损伤混凝土的清除与修补

对于已经发生严重劣化的混凝土,必须将其彻底凿除,直至露出坚实、完好的基底,然后进行修补。传统的普通硅酸盐水泥砂浆虽然成本低廉,但普遍存在收缩大、与旧混凝土粘结差、韧性不足等问题,容易在修补后产生二次开裂,影响修复效果。为此,聚合物改性水泥基复合材料(PCC)应运而生,通过在水泥砂浆中掺入聚合物乳液或可再分散乳胶粉,能显著改善其粘结强度、抗渗性、柔韧性和耐久性,已成为目前应用最广泛的高性能修补材料。而对于一些受力关键、空间受限或对性能要求极高的部位,则可以采用超高性能混凝土(UHPC)进行局部替换或薄层加固<sup>[3]</sup>。UHPC具有极高的强度、优异的韧性和几乎不渗透的特性,能够实现“强-强”结合,但其较高的成本限制了其大规模应用。

### 3.3 阻锈与电化学修复技术

针对钢筋锈蚀这一核心问题,除了物理隔离,还可以采用化学或电化学方法直接干预锈蚀过程。迁移型阻

锈剂 (MCI) 通过喷涂或涂刷于混凝土表面, 其有效成分能凭借蒸汽压差或浓度梯度向内部迁移, 并在钢筋表面吸附成膜, 从而抑制阳极或阴极的电化学反应。电化学脱盐技术则是在混凝土表面铺设阳极网, 通以直流电, 利用电场作用将钢筋附近的氯离子强制迁移到阳极区排出, 从而恢复钢筋周围的高碱性钝化环境。而阴极保护 (CP) 则是更为彻底的解决方案, 它通过外加电流或牺牲阳极 (如锌、镁合金), 使整个钢筋网强制成为阴极, 从而完全抑制电化学腐蚀反应的发生, 是保护处于高氯盐环境 (如海港码头) 中钢筋的终极手段, 但其系统复杂, 需要长期的专业维护。

### 3.4 结构加固技术

当耐久性损伤已经导致结构承载力不足时, 就必须进行加固以提升其力学性能。增大截面法是一种传统而可靠的方法, 通过在原有构件外侧浇筑新的混凝土来增加截面尺寸和配筋, 但其缺点是会增加结构自重并占用宝贵的建筑空间。外包型钢加固法则是在构件四角包裹角钢, 并用缀板连接成整体, 这种方法能显著提高柱的承载力和延性, 且施工相对便捷。近年来, 纤维增强复合材料 (FRP) 加固法因其高强、轻质、耐腐蚀、施工便捷等突出优点而得到广泛应用, 通过将碳纤维 (CFRP)、玻璃纤维 (GFRP) 或芳纶纤维 (AFRP) 布/板用环氧树脂粘贴于梁、板、柱等构件表面, 可有效提升其抗弯、抗剪和抗震能力<sup>[4]</sup>。但其防火性能和长期蠕变性能仍需在设计中予以充分考虑。体外预应力加固法则是在结构外部设置预应力筋 (钢绞线或FRP筋), 通过张拉对结构施加反向荷载, 能有效改善其受力状态, 尤其适用于大跨度梁、桥面板的加固。

### 3.5 前沿修复材料与技术

随着材料科学的发展, 一系列前沿修复材料与技术展现出巨大潜力。渗透结晶型防水材料 (CCCW) 含有活性化学物质, 能随水渗透到混凝土内部, 与未水化的水泥颗粒及氢氧化钙反应, 生成不溶于水的枝蔓状结晶体, 从而堵塞毛细孔道, 实现永久性防水和自愈合微裂缝的功能。微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 技术则利

用特定微生物在新陈代谢过程中分解尿素产生碳酸根离子, 进而与环境中的钙离子结合生成碳酸钙沉淀, 以此来填充裂缝和孔隙, 这是一种极具前景的绿色、自修复技术, 但目前仍处于从实验室向工程应用转化的关键阶段。更具前瞻性的是形状记忆合金 (SMA) 与智能修复系统, 通过将SMA丝嵌入混凝土中, 利用其形状记忆效应, 在裂缝出现时通过加热使其收缩, 主动闭合裂缝。结合传感器和控制系统, 未来有望构建出具备感知、响应和修复能力的真正意义上的智能混凝土结构。

## 4 结语

混凝土结构耐久性损伤是复杂系统性问题, 本文论述了其损伤机理、综合诊断技术与修复加固方法。未来趋势聚焦多方面: 一是向智能化、数字化诊断迈进, 融合物联网、大数据、人工智能技术, 构建智慧运维平台; 二是发展高性能、多功能修复材料, 研发纳米改性、仿生等新一代智能材料; 三是深化全寿命周期设计理念, 将耐久性设计等贯穿结构全周期, 实现从“被动抢修”到“主动健康管理”的转变; 四是加强基础理论与工程验证, 揭示多场耦合作用下损伤与修复机理, 建立可靠寿命预测模型, 验证新技术。面对既有混凝土结构存量和安全耐久性要求提升, 创新发展“诊断-修复-加固”一体化技术体系, 是工程技术选择和国家基础设施可持续发展战略需求。

## 参考文献

- [1]朱万平.建筑结构混凝土耐久性检测与病害处治研究[J].广东建材,2025,41(09):89-92.
- [2]徐锦生.混凝土结构耐久性设计的影响因素与改进措施[C]//广西网络安全和信息化联合会.第六届工程技术与数字化转型学术交流会议论文集.辽宁工业大学土木建筑工程学院,2025:140-142.
- [3]韦智斌.建筑工程混凝土结构加固设计与应用研究[J].现代工程科技,2025,4(22):133-136.
- [4]谢华,王桃.钢筋混凝土结构加固设计在建筑工程中应用分析[J].水泥,2025,(11):149-151.