

既有混凝土结构的耐久性评估与加固改造一体化技术

郑柯达

上海寰宇科建工程设计有限公司 上海 200333

摘要: 既有混凝土结构耐久性受环境侵蚀、荷载作用和材料老化等因素影响而劣化。本文构建评估-加固协同优化的一体化技术体系, 涵盖实时监测与数据融合、耐久性动态评估模型、加固方案智能生成技术; 创新加固改造材料与工艺, 包括新型加固材料、绿色加固工艺及材料-结构协同设计方法; 展望未来, 提出基于AI的自主感知与决策系统、模块化标准化加固产品开发、碳中和目标下的低碳加固技术等发展方向, 为既有混凝土结构耐久性提升提供全面解决方案。

关键词: 既有混凝土结构; 耐久性评估; 加固改造; 一体化技术

引言: 在城市建设的浪潮中, 既有混凝土结构作为重要基础设施, 其耐久性关乎结构安全与使用寿命。而受环境侵蚀、荷载作用及材料老化等因素影响, 结构耐久性逐渐劣化, 传统评估与加固方式面临诸多挑战。在此背景下, 构建评估-加固协同优化的一体化技术体系, 创新加固改造材料与工艺, 探索未来发展方向, 成为保障既有混凝土结构长期稳定运行、推动建筑业可持续发展的关键所在。

1 既有混凝土结构耐久性劣化机理与评估指标

1.1 主要劣化因素与作用机制

既有混凝土结构耐久性劣化是多种因素共同作用所致, 核心因素有环境侵蚀、荷载作用和材料自身老化。环境侵蚀中, 氯离子侵入引发钢筋锈蚀最常见, 其通过混凝土孔隙渗透到钢筋表面, 破坏钝化膜, 锈蚀产物体积膨胀致混凝土开裂剥落; 碳化作用降低混凝土碱度, 破坏钢筋钝化环境, 还与氯离子侵蚀协同。荷载作用中, 反复疲劳荷载使混凝土内部产生微裂缝, 加速环境介质渗透, 形成“荷载-环境”耦合劣化; 静力超载会使裂缝扩展, 降低结构抗渗性。材料老化表现为水泥水化产物分解、界面粘结弱化, 降低混凝土强度和弹性模量。这些因素相互促进, 形成从微观到宏观的劣化链条, 影响结构承载能力和使用寿命。

1.2 多尺度评估指标体系

既有混凝土结构耐久性评估要建立多尺度指标体系。微观尺度指标有水泥石孔隙率、孔径分布及钢筋锈蚀率, 通过压汞法等测试, 反映材料内部劣化程度, 钢筋锈蚀率可用电化学阻抗谱定量表征^[1]。细观尺度聚焦界面过渡区性能, 如界面粘结强度、裂缝宽度, 用纳米压痕法等获取, 揭示界面劣化状态。宏观尺度指标包括混

凝土强度、碳化深度等, 通过现场检测手段获取, 反映结构整体性能。各尺度指标经数据融合, 实现从材料到结构性能衰减的全链条评估, 为加固提供精准依据。

1.3 评估方法对比与选择

既有混凝土结构耐久性评估方法多样, 各有适用场景和精度差异。经验评估法基于数据库, 通过统计关系评估, 操作简便、成本低, 但精度低, 适用于初步筛查和小型简单结构。理论分析评估法建立劣化模型, 量化相关关系, 有一定理论支撑, 但难全面考虑复杂因素, 适用于劣化机理清晰场景。数值模拟评估法借助软件构建多尺度模型, 可精细化评估, 但建模难、成本高, 适用于重要结构关键部位。现场检测评估法获取实测数据, 精度最高, 但周期长、成本高, 适用于重要结构全面评估。实际工程常采用“现场检测+数值模拟”融合方法, 兼顾精度与效率。

2 一体化技术体系构建: 评估-加固协同优化

2.1 实时监测与数据融合技术

评估-加固协同优化的核心基础是实时监测与数据融合技术, 通过构建全生命周期监测网络实现数据精准获取与高效整合。监测系统采用分布式布置方案, 在结构关键部位嵌入光纤光栅传感器、电化学传感器及温湿度传感器, 实时采集混凝土应变、钢筋锈蚀速率、环境温度湿度等数据, 传感器节点通过无线传感网络实现数据实时传输^[2]。数据融合技术分为三个层次: 数据级融合对多传感器原始数据进行降噪、校准, 剔除异常数据, 确保数据可靠性; 特征级融合提取各监测指标特征参数, 如钢筋锈蚀速率变化趋势、混凝土应变峰值等, 建立特征参数与耐久性劣化的关联关系; 决策级融合结合现场检测数据与监测数据, 采用贝叶斯推理、D-S证据理论等方

法实现多源数据互补,综合判断结构耐久性状态。该技术突破传统离线检测的局限性,实现耐久性劣化的实时预警,为动态评估和加固方案调整提供连续数据支撑,确保评估与加固的动态协同。

2.2 耐久性动态评估模型

耐久性动态评估模型是评估-加固协同优化的核心载体,通过整合实时监测数据与劣化规律实现结构状态的动态更新与预测。模型以多尺度评估指标体系为基础,构建“初始状态诊断-实时状态更新-长期性能预测”的三级框架。初始状态诊断通过现场检测数据确定结构基准参数,包括混凝土强度、钢筋保护层厚度等,建立初始耐久性评估模型。实时状态更新模块基于实时监测数据,采用卡尔曼滤波算法对模型参数进行动态修正,如根据钢筋锈蚀速率监测数据调整锈蚀发展模型参数,实时反映劣化进程变化。长期性能预测模块结合修正后的模型参数与环境荷载预测数据,采用灰色预测、神经网络等方法预测未来5-20年的耐久性指标变化趋势,明确结构性能衰减临界点。模型具备自学习能力,通过积累不同服役环境下的结构劣化数据不断优化预测精度。

2.3 加固方案智能生成技术

加固方案智能生成技术实现评估结果向加固措施的高效转化,通过集成知识库、优化算法与工程经验构建智能决策系统。系统核心包括知识库、推理引擎和优化模块三部分。知识库涵盖各类加固技术参数、材料性能指标、典型工程案例及规范要求,如粘贴碳纤维布、增大截面法等技术的适用条件、施工参数及成本数据,采用结构化数据库存储便于检索调用。推理引擎基于耐久性动态评估结果,通过规则推理与案例推理相结合的方式初步匹配加固技术类型,如针对钢筋锈蚀引发的承载力不足,优先匹配粘贴碳纤维布或外包钢加固方案。优化模块采用遗传算法、粒子群优化算法等,以加固效果、成本、工期及耐久性提升幅度为目标函数,对加固参数进行优化,如碳纤维布粘贴层数、锚固长度等。系统还具备方案可视化展示功能,生成包含施工流程、材料用量、节点构造的完整方案,同时支持方案可行性验证,通过数值模拟验证加固后结构性能是否满足目标要求,实现评估与加固的无缝协同。

3 加固改造材料与工艺创新

3.1 新型加固材料

新型加固材料聚焦高强度、高耐久性、环保性及施工便捷性,突破传统材料性能局限。碳纤维增强复合材料(CFRP)在原有基础上实现性能升级,通过改性树脂基体提升界面粘结强度,采用纳米颗粒掺杂技术提高抗

紫外线老化和抗化学腐蚀能力,拉伸强度可达3000MPa以上,适用于高腐蚀环境下的结构加固。玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)凭借成本优势成为重要替代材料,通过表面改性处理解决与混凝土界面粘结不足问题,其弹性模量与混凝土更匹配,可有效避免加固后应力集中现象^[1]。自修复混凝土材料通过内置微胶囊或微生物载体实现裂缝自修复,微胶囊内包裹修复剂,当裂缝产生时胶囊破裂释放修复剂,与混凝土基体发生化学反应实现裂缝闭合,微生物载体在碱性环境下产生碳酸钙沉淀填充裂缝,提升结构耐久性。另外,超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)具备优异的弯曲韧性和抗裂性能,拉伸应变可达3%-5%,用于加固时可有效抑制混凝土裂缝扩展,与原有结构协同工作性能良好,适用于抗震加固和受弯构件加固场景。

3.2 绿色加固工艺

绿色加固工艺以节能减排、减少环境影响为核心,结合新型材料特性实现施工过程的绿色化升级。干法喷射碳纤维布工艺取代传统湿法粘贴,采用专用喷射设备将碳纤维布与无机粘结剂同步喷射至结构表面,减少有机树脂用量,降低挥发性有机化合物(VOC)排放,同时施工效率提升40%以上,适用于大面积加固工程。模块化加固工艺通过工厂预制加固组件,如预制FRP板、钢-混凝土组合加固块等,现场采用螺栓或灌浆连接,减少现场湿作业,降低施工噪音和粉尘污染,构件预制过程可实现材料精准控制,减少废料产生。无损加固工艺借助超声波、高压射流等技术实现无振动、无损伤施工,如超声波辅助粘贴FRP工艺,通过超声波振动促进粘结剂渗透,提升界面粘结质量,避免传统敲击作业对原有结构造成的二次损伤。旧混凝土再生利用工艺将拆除的旧混凝土破碎筛分后,作为加固用灌浆料骨料,配合专用外加剂改善工作性能,再生骨料利用率可达80%以上,实现建筑垃圾资源化利用,符合绿色建筑发展要求。

3.3 材料-结构协同设计方法

材料-结构协同设计方法打破材料选择与结构设计分离的传统模式,实现材料性能与结构受力需求的精准匹配。该方法以结构受力分析为基础,明确不同部位的受力特征,如梁端受剪区需材料具备高剪切强度,受拉区需材料具备高抗拉强度,据此确定材料性能指标。采用多物理场耦合分析模型,模拟加固材料与原有结构在荷载、温度、湿度等复杂环境下的协同工作行为,分析界面应力分布、变形协调特性及性能衰减规律,避免因材料与结构性能不匹配导致的加固失效。例如,在框架柱加固设计中,根据柱轴心受压或偏心受压受力特点,选

择合适弹性模量的FRP材料,通过协同设计确定包裹层数和锚固方式,确保FRP与混凝土共同承受压力,避免FRP过早剥离。设计过程中还融入全生命周期理念,结合材料耐久性数据和结构服役年限要求,选择性价比最优的材料-结构组合方案,同时考虑施工可行性和后期维护需求,通过数值模拟验证加固后结构在整个服役期内的性能稳定性,实现材料性能与结构功能的最优协同。

4 未来发展方向

4.1 基于AI的自主感知与决策系统

该系统将推动既有混凝土结构耐久性评估与加固智能化。它整合多源感知与人工智能算法,部署具自组网能力的智能传感器节点,自主采集传输结构变形等参数,传感器有边缘计算能力,可初步处理数据。AI算法核心用深度学习模型,如CNN识别裂缝、RNN预测耐久性指标,经大量数据训练优化,实现劣化模式识别与故障诊断。决策模块基于强化学习,与虚拟仿真环境交互积累经验,依结构状态等自主生成最优加固策略。系统有自适应能力,可跨场景应用,还支持与BIM技术融合,构建数字孪生模型,实现结构状态可视化监控与全生命周期智能决策。

4.2 模块化、标准化加固产品开发

模块化、标准化加固产品开发将大幅提升加固工程效率与质量稳定性,推动加固行业工业化发展。该方向以典型结构劣化形式为基础,开发系列化模块化加固组件,如针对梁、板、柱等不同构件,设计专用加固模块,每个模块集成材料、连接件及防护层,实现工厂标准化生产。产品标准化体系涵盖设计标准、生产标准、施工标准及验收标准,明确模块尺寸、材料性能、连接方式等关键参数,确保不同厂家生产的模块具备互换性。例如,开发标准化FRP加固模块,根据构件截面尺寸设计不同规格的FRP板,配套专用螺栓和灌浆材料,现场只需进行定位安装和简单固定,施工周期较传统工艺缩短60%以上^[4]。模块化产品还具备可扩展性,通过模块组合实现不同加固强度需求,如采用多模块叠加方式提升加固效果。建立产品信息数据库,整合模块性能参数、适用场景及施工指南,结合BIM技术实现模块选型与虚拟

安装,确保产品与工程需求精准匹配,降低施工难度和质量风险,推动加固工程向工业化、装配化方向转型。

4.3 碳中和目标下的低碳加固技术

碳中和目标下的低碳加固技术聚焦降低加固全生命周期碳排放,通过材料研发、工艺优化及能源替代实现低碳化升级。在材料层面,开发低碳加固材料,如采用工业固废替代水泥制备加固用灌浆料,利用粉煤灰、矿渣粉等替代率可达50%以上,降低水泥生产过程中的碳排放;研发生物基复合材料,以秸秆、亚麻等可再生资源为原料制备纤维增强材料,替代传统合成纤维,减少化石能源消耗。工艺层面,推广低碳施工技术,如采用装配式加固工艺减少现场混凝土浇筑量,利用太阳能供电的施工设备降低能源消耗,优化施工流程减少材料浪费,使施工阶段碳排放降低30%以上。另外,开发碳捕捉与利用技术,在加固材料中掺入可吸收二氧化碳的组分,如碳化硅基材料,实现加固过程中的碳封存。同时,建立低碳加固技术标准与认证体系,推动低碳技术规模化应用,助力建筑业实现碳中和目标。

结束语

既有混凝土结构耐久性评估与加固改造一体化技术是保障结构安全、延长使用寿命的关键。本文从劣化机理、评估指标、评估方法入手,构建一体化技术体系,创新材料与工艺,并展望未来发展方向。随着科技不断进步,基于AI的智能系统、模块化标准化产品及低碳技术等将逐步实现,推动加固行业向智能化、工业化、低碳化转型,为建筑业的可持续发展提供有力支撑,助力实现碳中和目标,保障既有混凝土结构长期安全稳定运行。

参考文献

- [1]陆瑞华.外加剂对高速公路混凝土结构耐久性能的影响研究[J].中华建设,2025,(07):195-197.
- [2]施文红.混凝土耐久性的无损检测方法 with 评估[J].实验室检测,2024,2(11):90-92.
- [3]牛志鹏,刘锐娜.复合混凝土的制备及黏结劈拉性能分析[J].混凝土,2025,(05):196-200.
- [4]王锡武.混凝土结构耐久性检测与加固技术[J].四川建材,2022,48(01):4-5+9.