

建筑结构耐久性评价与寿命预测研究

张雄 130184198908191037

摘要

建筑结构的耐久性直接影响工程全生命周期的安全性与经济性，近年来我国基础设施建设进入运维与新建并重的阶段，对既有建筑结构剩余寿命的科学预测成为工程领域的研究热点。本文围绕建筑结构耐久性衰减的核心影响因素展开分析，梳理当前主流的耐久性评价方法与寿命预测模型，探讨现有研究存在的不足，并对未来发展方向提出展望，为建筑结构运维决策提供理论参考。

关键词

建筑结构；耐久性评价；寿命预测；劣化机理

一、引言

我国城镇化建设已从高速增量建设转向存量提质改造的新阶段，截至 2023 年，我国既有城乡建筑面积超过 600 亿平方米，其中超过 30% 的建筑已服役超过 20 年，大量混凝土结构受环境侵蚀出现钢筋锈蚀、保护层开裂等耐久性劣化问题，不仅大幅降低结构承载能力，还会缩短结构使用寿命，引发不必要的拆除重建，造成巨大的资源浪费与经济损失。因此，建立科学的建筑结构耐久性评价体系与寿命预测方法，能够帮助运维单位精准掌握结构劣化状态，制定合理的加固改造方案，对延长建筑使用寿命、降低全生命周期成本具有重要的现实意义。

二、建筑结构耐久性劣化的主要影响因素

建筑结构耐久性衰减是多因素耦合作用的结果，针对占比最高的钢筋混凝土结构，劣化过程的核心影响因素可以分为环境因素、材料自身因素与荷载作用因素三类。

第一，环境侵蚀是结构耐久性劣化最主要的外部诱因，我国不同区域的环境侵蚀特征存在显著差异：沿海地区的混凝土结构长期受海水氯离子侵蚀，氯离子会穿透混凝土保护层到达钢筋表面，破坏钢筋表面的钝化膜，引发钢筋锈蚀，锈蚀产物体积膨胀会进一步导致保护层开裂与混凝土剥落，形成侵蚀劣化的恶性循环；北方寒冷地区则面临冻融循环破坏，混凝土内部孔隙中的水分结冰体积膨胀，会产生内部拉应力，反复冻融会导致混凝土内部微裂缝不断扩展，降低混凝土强

度与密实性；工业厂区的建筑结构则常受酸、碱、盐等化学介质侵蚀，会直接溶解水泥水化产物，降低混凝土基体性能。

第二，材料自身特性是影响耐久性的内部基础，混凝土的水灰比直接决定孔隙率与密实度，水灰比越大，孔隙率越高，侵蚀介质越容易渗透进入混凝土内部；水泥品种、骨料质量以及外加剂掺量也会影响混凝土抗侵蚀性能，例如掺加粉煤灰、矿渣等矿物掺合料能够细化混凝土孔隙结构，提升抗氯离子渗透能力。

三、建筑结构耐久性评价方法

当前建筑结构耐久性评价方法主要可以分为定性评价、半定量评价与定量评价三类，不同方法适用于不同的工程场景。

定性评价方法主要依赖专家经验，通过现场检测对结构外观劣化情况进行等级划分，例如根据混凝土开裂程度、钢筋锈蚀面积、保护层剥落情况将耐久性状态划分为完好、轻微劣化、中度劣化、严重劣化四个等级，该方法操作简单，能够快速对批量既有建筑做出初步评价，但评价结果受专家主观经验影响较大，精度较低，仅适用于初步筛查阶段。

半定量评价方法结合了现场检测数据与层次分析法、模糊综合评价等数学方法，将多个影响耐久性的指标进行加权计算，得到综合评价结果。例如选取混凝土碳化深度、氯离子渗透系数、钢筋锈蚀率、保护层厚度等作为评价指标，通过层次分析法确定各指标的权重，再利用模糊数学方法计算耐久性综合得分，划分耐久性等级。该方法相较于定性评价更加客观，能够综合考虑多因素的影响，是当前工程中应用较为广泛的评价方法，但指标权重的确定仍存在一定主观性，不同专家确定的权重差异会影响评价结果。

定量评价方法以材料劣化机理为基础，通过室内试验与现场检测建立性能衰减的量化模型，计算得到结构当前的耐久性能指标，该方法精度更高，能够为寿命预测提供基础数据。例如通过快速氯离子迁移试验（RCM 法）测定混凝土的氯离子扩散系数，通过半电池电位法测定钢筋锈蚀概率，通过碳化深度实测推算混凝土碳化速率，这些定量检测数据为后续寿命预测提供了精准的输入参数。

四、建筑结构寿命预测模型研究

基于耐久性评价的寿命预测模型是当前研究的核心内容，主流预测模型可以分为基于劣化机理的理论模型、基于统计数据的经验模型与基于人工智能的预测模型三类。

基于劣化机理的理论模型以经典扩散理论为基础，针对氯离子侵蚀引发钢筋

锈蚀的场景，Fick 第一扩散定律是应用最广泛的氯离子扩散模型，该模型将氯离子扩散过程简化为稳态扩散过程，通过计算氯离子到达钢筋表面的时间来预测结构的初始劣化寿命。在此基础上，学者们考虑了混凝土龄期、温度、应力对扩散系数的影响，对经典 Fick 模型进行了修正，形成了考虑多因素耦合的改进扩散模型，提升了预测精度。针对碳化引发的钢筋锈蚀，也建立了基于碳化深度的碳化寿命预测模型，能够预测碳化锋面到达钢筋表面的时间。这类模型基于清晰的物理劣化过程，机理明确，但实际工程中结构劣化受多种随机因素影响，理论模型通常需要做出较多简化假设，与实际情况存在一定偏差。

基于统计数据的经验模型通过对大量工程实测数据进行回归分析，建立性能衰减与服役时间的经验关系，常见的包括混凝土强度衰减模型、钢筋锈蚀率增长模型等。这类模型直接基于实际工程数据，更符合工程实际，但经验模型的适用性受数据来源限制，对于不同环境、不同材料的结构通用性较差，需要针对特定区域积累大量实测数据才能得到可靠的预测结果。

五、当前研究存在的问题与展望

当前建筑结构耐久性评价与寿命预测研究已经取得了较多成果，但仍存在一些不足：一是多因素耦合劣化机理研究仍不充分，现有研究大多针对单一侵蚀因素，对于冻融、氯离子、荷载多因素耦合作用下的劣化规律研究还不够深入，模型难以反映实际工程的复杂劣化过程；二是现场检测数据的准确性与完整性不足，耐久性劣化是长期缓慢发展的过程，长期连续监测数据较少，现有检测大多为抽样检测，难以全面反映结构整体的耐久性状态；三是预测模型的可靠性还有待提升，现有模型大多针对新建结构或特定劣化阶段，对于不同劣化阶段的模型参数修正研究不足，预测结果的离散性较大。

未来研究可以从三个方向推进：第一，加强多因素耦合劣化机理与长期性能监测研究，依托实际工程建立长期监测站点，获取连续的劣化数据，完善多因素耦合作用下的劣化模型；第二，结合无损检测技术与大数据技术，建立既有建筑结构耐久性数据共享平台，积累大量实测数据为模型训练与验证提供基础；第三，发展融合机理模型与智能算法的混合预测模型，兼顾模型的物理可解释性与对非线性关系的拟合能力，提升寿命预测的精度与可靠性。

六、结论

建筑结构耐久性评价与寿命预测是保障既有建筑结构安全运行、实现工程全生命周期优化管理的基础，当前研究已经形成了多种评价方法与预测模型，能够为工程运维提供一定的技术支撑，但在多因素耦合作用、数据积累、模型精度等

方面仍存在不足，未来需要结合新兴检测与智能技术进一步完善，推动建筑结构耐久性研究向更精准、更实用的方向发展，为我国存量建筑提质改造提供技术支撑。

参考文献

[1] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 2000.

[2] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.

[3] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(4): 371-380.