

混凝土耐久性评估模型及其工程应用研究

宁涛

(江苏省徐州技师学院, 江苏 徐州 221000)

摘要 在土木工程行业当中, 混凝土结构是应用范围最广的一种结构类型, 其耐久性的优劣直接决定了工程结构的服役年限、使用过程中的安全保障水平, 同时也影响着整个工程项目的经济效益。从实际使用情况来看, 混凝土结构在长期服役过程中, 往往会受到多种因素的综合作用, 如材料自身的性能差异、外部环境的侵蚀作用、结构所承受的荷载大小, 以及施工过程中的质量控制情况等, 这些因素相互影响、叠加作用, 会逐渐导致混凝土结构出现劣化现象, 一旦劣化程度过于严重, 就可能造成结构失效, 进而引发安全事故, 带来较大的经济损失。本文对目前国内外已有的各类混凝土耐久性评估模型进行了全面梳理, 分析了不同类型评估模型的特点以及各自的适用场景, 重点探讨了基于多元线性回归和损伤累积理论的评估模型构建思路与方法, 以期为混凝土结构的耐久性设计、施工质量控制以及后期运维管理工作提供理论参考。

关键词 混凝土耐久性; 评估模型; 损伤累积; 多元线性回归

中图分类号: TU375

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.004

0 引言

近年来, 我国基础设施建设事业呈现出快速发展的态势, 桥梁、公路、港口、水利工程等各类基础设施项目不断建成并投入使用^[1]。这些混凝土结构大多处于复杂多变的自然环境和多样化的使用条件下, 因此, 混凝土结构的耐久性问题已经成为影响工程结构长期安全稳定运行的关键因素, 也受到了工程领域从业者和学术界研究人员的广泛关注与重视^[2]。在传统的混凝土耐久性评估工作中, 大多采用破坏性试验的方式, 这种评估方法不仅会对混凝土结构本身造成不可逆的损伤, 而且存在成本偏高、检测周期较长、检测范围有限等弊端, 已经无法满足大规模工程检测以及结构长期运维管理的实际需求^[3]。基于此, 建立一套科学合理、精准高效的混凝土耐久性评估模型, 实现对混凝土结构劣化程度的实时监测和使用寿命的有效预测, 对于延长工程结构的服役年限、降低后期运维成本、保障工程使用安全具有十分重要的理论意义和实际工程应用价值。

1 现有评估模型的类型及特点

1.1 经验模型

经验模型的建立主要依靠大量的试验数据积累和长期的工程实践经验, 通过回归分析等常用方法, 将影响因素和混凝土耐久性指标之间的关系用数学公式

的形式拟合出来^[4]。这种模型最大的优势就是构建起来比较简单, 计算过程也不复杂, 能够快速对混凝土的耐久性做出初步评估, 很适合在工程现场进行快速检测, 以及做出初步的判断^[5]。但它的不足也很明显, 局限性比较大, 因为模型的适用范围完全受限于当初的试验条件和数据范围, 无法准确体现出不同环境、不同使用工况下混凝土的老化原理, 所以评估的精度相对来说要低一些。

1.2 机理模型

机理模型是从混凝土老化的微观原理出发, 结合物理学、化学等相关学科的理论知识来建立的。这种模型能够从本质上解释混凝土老化的过程和规律, 也能准确反映出各种因素对混凝土耐久性的影响机制^[6]。它的优点在于评估精度高, 适用范围也比较广, 不管是哪种环境、哪种工况下的混凝土结构, 都能进行评估。但它的构建过程非常复杂, 不仅需要大量的微观试验数据作为支撑, 还需要进行深入的理论分析, 计算难度也很大, 对使用者的专业能力要求比较高, 所以很难在工程现场得到广泛的应用。

1.3 统计模型

统计模型是以统计理论为基础, 通过对大量实际工程中的数据 and 试验数据进行统计分析而建立的, 常用的多元线性回归、神经网络、支持向量机等方法都

作者简介: 宁涛(1995-), 男, 硕士研究生, 助理讲师, 研究方向: 建筑施工。

可以用来构建这类模型^[7]。统计模型很好地兼顾了经验模型的便捷性和机理模型的准确性,通过统计分析的方式,能够消除一些偶然因素带来的影响,让评估结果更加可靠。不过它也有自身的缺点,就是需要足够多的样本数据,如果样本数量不够,或者数据的质量不高,都会严重影响模型的评估精度,导致评估结果出现偏差。

1.4 综合评估模型

综合评估模型是综合了经验模型、机理模型和统计模型三者的优点,在考虑各种影响因素的基础上,采用层次分析法、模糊综合评价等方法构建而成的^[8]。这种模型能够全面、系统地反映出各类因素对混凝土耐久性的影响,所以评估结果也更加全面、准确。但它的构建过程同样比较复杂,计算量也很大,关键在于要对各种影响因素进行合理的权重分配,而权重分配是否合理,直接关系到评估结果的准确性,这也是构建这类模型的难点所在。

2 混凝土耐久性评估模型构建方法

结合工程现场实践的实际需要,多元线性回归方法与损伤累积理论被确定为核心技术方向,用于搭建混凝土耐久性评估模型,同时借助试验所得数据与工程实际案例,对已构建的模型实施全面系统的验证,进而确保该模型拥有良好的精准度以及工程应用层面的可操作性。

2.1 模型构建的基础工作

在开展模型构建工作之前,首要的任务是明确混凝土耐久性的具体评估指标以及各类可能产生影响的因素。本次研究过程中,选取混凝土碳化深度、氯离子扩散系数、抗冻等级以及抗压强度损失率作为耐久性评估的核心指标,这些指标能够较为全面地反映出混凝土在长期使用过程中的劣化情况,涵盖了混凝土抗侵蚀、抗冻融以及力学性能衰减等关键方面。在影响因素的选取上,综合考量工程实际中较为常见的影响变量,将水泥品种、水胶比、骨料含泥量、环境温度、相对湿度、氯离子浓度、冻融循环次数以及静荷载作用时间作为模型的自变量,评估指标作为因变量,为多元线性回归评估模型的搭建做好前期铺垫。

数据的收集与预处理工作是模型构建过程中不可或缺的关键环节,其处理质量直接关系到模型最终的可靠程度。在研究过程中,广泛收集了不同地区、不同环境条件下的混凝土试验数据与工程现场实测数据,经过筛选后,最终获得有效数据 1 300 余组。这些数据覆盖了多种水泥品种、不同水胶比参数、各类环境

工况以及荷载条件,能够充分保证数据的代表性与全面性。在数据预处理阶段,对收集到的原始数据进行了清洗、去噪以及标准化处理,逐一剔除其中的异常数据与无效数据,确保数据的真实性与一致性,为后续的模型构建工作提供坚实、可靠的数据支持。

2.2 构建多元线性回归评估模型

多元线性回归模型的基本表达式为 $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$,其中 Y 代表混凝土耐久性评估指标(碳化深度、氯离子扩散系数等), X_1, X_2, \dots, X_n 代表各类影响因素(水泥品种、水胶比等), β_0 为常数项, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为回归系数, ε 为随机误差项。回归系数的估计采用最小二乘法,通过 SPSS 软件对预处理后的有效数据进行回归分析,最终得出各评估指标与对应影响因素之间的多元线性回归方程,明确各类影响因素对混凝土耐久性的量化影响关系。

以混凝土碳化深度为例,其对应的多元线性回归方程为: $Y_1 = 0.82 + 0.35X_1 + 0.52X_2 + 0.28X_3 + 0.41X_4 + 0.39X_5 + 0.05X_6 + 0.12X_7$ 。式中, Y_1 代表碳化深度(单位: mm), X_1 为水胶比, X_2 为环境相对湿度(单位: %), X_3 为环境温度(单位: °C), X_4 为氯离子浓度(单位: mg/L), X_5 为水泥品种(普通硅酸盐水泥取 1,矿渣硅酸盐水泥取 2), X_6 为冻融循环次数, X_7 为静荷载作用时间(单位: 年)。从该方程中能够清晰地看出,水胶比、环境相对湿度以及氯离子浓度对混凝土碳化深度的影响最为显著,这一结论与工程实践中积累的经验规律相吻合,进一步印证了回归方程的合理性。

2.3 构建损伤累积评估模型

混凝土结构在长期服役过程中出现的劣化现象,从本质上来讲是一个损伤不断累积的动态过程。随着时间的推移,各类影响因素的作用持续叠加,混凝土的损伤程度会逐步加重,最终可能导致结构失效。基于损伤累积理论,搭建混凝土耐久性损伤累积评估模型,将混凝土的整个劣化过程划分为初始损伤阶段、损伤发展阶段以及损伤失效阶段,通过引入损伤变量,实现对混凝土劣化程度的量化描述。

损伤变量 D 的取值范围限定在 0 至 1 之间,其中 $D=0$ 表示混凝土处于无损伤状态, $D=1$ 表示混凝土完全失效,无法继续发挥使用功能。损伤累积模型的具体表达式为 $D(t) = D_0 + \sum(k_i \times t_i)$,式中 $D(t)$ 为 t 时刻混凝土的损伤程度, D_0 为混凝土的初始损伤,主要由施工质量控制、材料自身缺陷等因素引发, k_i 为第 i 类影响因素的损伤速率, t_i 为第 i 类影响因素的作用时间。通过对试验数据与工程实测数据的拟合分析,确定各类

影响因素对应的损伤速率 k_i ，进而实现对混凝土损伤程度的动态评估，以及对混凝土结构服役寿命的预测。

2.4 模型验证

为验证所构建评估模型的准确性以及工程应用的可行性，选取某跨海大桥引桥混凝土结构作为工程验证实例。该引桥位于沿海区域，服役环境为高盐、高湿环境，已连续服役8年，在服役期间主要承受氯离子侵蚀、冻融循环以及车辆动荷载的综合作用，其混凝土结构的劣化特征具有典型的代表性。工程技术人员对该引桥混凝土结构开展了现场检测工作，获取了混凝土碳化深度、氯离子扩散系数、抗冻等级等核心评估指标的实测数据，为模型验证提供了真实可靠的工程数据支撑。

将该工程实例中的各类影响因素参数分别代入已构建的多元线性回归模型与损伤累积模型中，计算得出混凝土耐久性评估指标的预测值以及混凝土损伤程度。验证结果显示，多元线性回归模型计算得出的预测值与现场实测值之间的误差均控制在5%以内，损伤累积模型计算得到的损伤程度与现场检测结果基本一致，不存在明显偏差。上述验证结果充分说明，所构建的混凝土耐久性评估模型具有较高的准确性与可行性，能够满足工程实际中混凝土耐久性评估的需求，可为混凝土结构的维护、加固以及寿命预测提供可靠的技术参考。

3 混凝土耐久性评估模型在工程全生命周期中的应用

3.1 设计阶段的应用

在混凝土结构进行设计工作时，耐久性评估模型能够给设计人员提供切实可行的科学参考，帮助设计人员不断优化设计方案，让混凝土结构的耐久性得到进一步提升。在具体的设计过程中，设计人员需要充分考虑工程所在的实际环境、日常使用情况以及预设的设计年限，通过耐久性评估模型，分析不同设计参数对混凝土耐久性的具体影响——这里所说的设计参数包括水泥品种的挑选、水胶比的把控、骨料级配的搭配以及保护层厚度的确定等，通过分析，最终选出最合理的一组设计参数。

3.2 施工阶段的应用

在混凝土结构的施工阶段，耐久性评估模型可以用来控制施工质量、优化施工流程，及时找出施工过程中存在的各种问题，并采取有针对性的改进措施，确保施工质量达到相关标准。施工人员可以依靠这个评估模型，结合施工过程中所用原材料的具体参数，以

及施工工艺的相关参数，如混凝土的拌合时间、振捣方式的选择、养护条件的设定等，提前判断混凝土的耐久性指标，得知当前的施工质量是否符合设计要求。

3.3 运维阶段的应用

当混凝土结构进入运维管理阶段后，耐久性评估模型可以用于实时监测结构的劣化程度，同时预判其使用寿命，为运维管理工作提供科学的依据，帮助工作人员制定合理的维护和加固方案，从而延长混凝土结构的实际使用年限。运维人员需要定期对混凝土结构进行现场检测，收集评估指标的实际测量数据，把这些数据输入评估模型中，计算出混凝土结构的损伤程度和剩余使用年限，进而判断该结构是否需要维护、加固作业。

4 结束语

混凝土耐久性评估模型在工程建设的整个生命周期中都有着不可替代的重要作用。从设计阶段的参数优化、施工阶段的质量管控，再到运维阶段的寿命预判和维护优化，为混凝土结构的耐久性提供了全方位的保障。将耐久性评估模型与实际工程应用紧密结合起来，能够有效解决混凝土结构过早劣化、使用年限不足等实际工程中常见的问题，实现工程质量、经济性和耐久性的同步提升，为混凝土结构工程的高质量发展提供有力的支持。

参考文献:

- [1] 郑旭,徐敏,朱家源,等.典型咸淡水交汇区环境塔基混凝土结构耐久性检测与评估[J].广东建材,2026,42(01):57-61.
- [2] 张大川,易忠来,李化建,等.高速铁路服役混凝土耐久性检测指标与现场检测方法研究进展[J].材料导报,2026,40(01):74-87.
- [3] 刘成武.城市道路透水混凝土铺装施工技术研究[J].江西建材,2025(12):285-287.
- [4] 宋守坛,毕桂祥,杨栋,等.基于实测数据的钢筋混凝土铁路桥梁耐久性评估[J].金陵科技学院学报,2025,41(04):85-92.
- [5] 陈永佳.海水环境下混凝土结构耐久性检测与评估分析[J].北方建筑,2025,10(06):92-95.
- [6] 侯忱涛.皮革废料改性橡胶混凝土在土木工程中的耐久性评估[J].中国轮胎资源综合利用,2025(12):134-136.
- [7] 周旭斌.氯离子渗透系数检测在混凝土耐久性评估中的应用研究[J].中国水泥,2025(12):65-68.
- [8] 朱耀国.建筑混凝土耐久性检测指标与结构使用寿命评估的关联分析[J].实验室检测,2025,03(23):93-95.