

DOI:10.13719/j.cnki.1009-6825.2025.21.014

基于性能退化模型的既有建筑结构加固策略优化研究

罗杰鸣

(广东房安检测鉴定有限公司, 广东 广州 510600)

摘要:针对既有建筑结构在长期服役过程中会因疲劳、锈蚀、材料老化等因素导致性能逐渐退化,给结构安全性和耐久性带来隐患这一问题,构建了考虑疲劳累积损伤、钢筋锈蚀及材料老化的建筑结构性能退化数学模型,在此基础上提出了面向寿命周期的加固策略优化方法。通过对某综合办公楼结构进行案例分析,对比不同加固时机和方案的效果与成本,验证了将结构性能退化模型直接应用于加固策略优化的可行性和优势。结果表明:基于退化模型的加固优化能显著提高加固方案的针对性和有效性,在确保结构全寿命周期安全可靠的同时,兼顾经济性,为既有建筑结构的耐久安全管理提供了新的思路和参考。

关键词:既有建筑;结构性能退化;疲劳;锈蚀;加固策略优化

中图分类号:TU318

文献标识码:A

文章编号:1009-6825(2025)21-0067-06

0 引言

随着大量建筑物步入服役中后期,结构老化劣化问题日益突出。研究表明,以高质量发展为目标的既有建筑结构加固改造与性能提升将成为当前甚至相当长时期内建筑领域的主要工作^[1]。我国现行 GB 55071—2022 建筑结构可靠性设计统一标准规定了一般房屋建筑的设计基准使用年限为 50 年^[2],但许多建于 20 世纪的建筑已超期服役或因使用功能变化面临更高性能要求。结构在长期服役中承受环境侵蚀、荷载反复作用以及材料劣化等影响,其承载能力和耐久性能会逐渐下降。如果不及时采取有效的维修加固措施,结构退化将可能导致安全储备不足,难以满足现行安全使用要求。传统的加固决策往往基于当前检测鉴定结果,缺乏对未来性能演化的预判,可能出现加固过度或不足的情况,难以在安全与经济之间取得最佳平衡。为此,有必要发展基于寿命周期的加固策略优化方法,将结构性能随时间的退化规律纳入加固方案决策中,提高加固方案的科学性与针对性。本文在综述相关文献的基础上,提出并阐释一种基于性能退化模型的加固策略优化方法,并通过某案例加以验证。

收稿日期:2025-04-30

作者简介:罗杰鸣(1983-),男,工程师,从事结构设计工作

引文格式:罗杰鸣.基于性能退化模型的既有建筑结构加固策略优化研究[J].山西建筑,2025,51(21):67-72.

1 研究现状

1.1 结构性能退化研究现状

工程结构性能退化是一个复杂的渐进过程,由荷载反复作用、环境侵蚀以及材料内部变化等多种因素耦合造成。疲劳退化方面,在机械、桥梁等领域已有成熟的疲劳寿命评估方法,如基于 S-N 曲线的 Miner 线性累积损伤准则等,用于预测构件在循环荷载下的寿命消耗比例。当累积损伤指数达到 1 时构件进入疲劳失效状态。建筑结构中虽然日常运营荷载相对稳定,但对于起重机梁、楼板支座等反复受动力荷载的部位,疲劳裂缝可能逐渐萌生扩展,导致刚度和强度下降。锈蚀退化方面,钢筋混凝土结构在服役环境中会受到氯离子侵蚀、碳化等作用引起钢筋锈蚀。钢筋锈蚀会削减钢筋有效截面面积并降低钢-混凝土界面黏结力,从而使构件承载力随时间降低。研究表明,可采用扩散模型预测氯离子到达钢筋表面的时间,再结合锈蚀速率模型估计钢筋截面损失随时间的发展。针对锈蚀造成的耐久性退化,不少学者建立了基于概率的寿命预测模型。陈宣东等采用 Monte Carlo 方法建立了钢筋混凝土耐久性失效概率模型,分析了结构服役寿命的分布特征。结果指出,相比确定性分析,概率方法得到的结构寿命更短(表明传统确定性模型低估了氯

离子侵蚀导致的性能退化影响),且保护层厚度等因素对寿命影响显著;试验和统计分析还表明结构往往存在约 5 年~10 年的安全储备期^[3]。材料老化方面,混凝土等建筑材料在长期服役中强度和刚度可能随时间劣化。例如,混凝土在反复冻融循环下抗压强度逐步降低,其退化规律可用随机过程模型表征(有研究发现冻融作用下混凝土强度退化近似符合 Gamma 随机过程)^[4]。同时,钢材在无明显锈蚀情况下性能随时间变化不大,但长期使用中由于疲劳或微观缺陷发展,其延性和韧性可能有所降低。总体而言,结构性能退化模型可分为两类基本情况:其一为渐进退化,指结构性能随时间连续下降,例如材料老化、磨损或锈蚀;其二为突变退化,指在某一时刻因遭遇罕遇灾害导致性能突然降低,如地震等^[5]。实际工程中这两类退化可能交织发生,需要综合考虑。基于上述认识,国内外逐步将时变可靠度分析引入结构寿命评估,通过数学模型预测结构在未来不同时刻的可靠指标,以判断其在目标寿命期内是否满足安全水平要求,这为制定检修加固策略提供了科学依据。

1.2 既有结构加固策略研究现状

面对服役结构性能的退化,工程上常采用加固改造手段来恢复或提高结构性能。传统加固设计主要依据现状检测鉴定结果,对不满足安全要求的构件采取措施提高其承载力或抗震能力。常用的结构加固方法包括:增大截面法、粘贴纤维增强复合材料(FRP)、外包型钢加固、粘钢加固等。这些加固技术各具特点,体现了改造加固技术的多样性和适用性。近年来,外包钢加固因工艺成熟、适用面广成为研究热点,但其钢板与混凝土界面的协同工作机理等理论问题尚未完全解决^[6]。此外,加固措施本身的耐久性问题也引起关注。因此在制定加固方案时需考虑加固材料和构造的耐久性,确保加固效果在预期寿命期内可靠。

1.3 加固决策优化研究现状

国内外已有学者尝试将寿命周期理念引入结构维护管理。一般原则是:综合考虑结构在全寿命周期内的建造、加固及损失成本,选取使寿命周期总成本最低的方案^[7]。例如,在桥梁养护中常采用 Markov 链等方法结合检测数据优化维修策略,以期在保证可靠度的前提下最小化费用支出。同样道理可推广到房屋建筑工程,加固时机和措施的选择应以寿命周期性能和经济效益为依据。然而,对于房屋建筑,目前缺乏类似桥梁那样系统的养护决策模型,工程上更多依赖经验和定性判断,具有一定局限性。鉴于此,有必要开展针对建筑结构的加固策略优化研究,将结构退化模型与优化技术相结合,确定既有结构何时以及如何加固最为合理。总的来看,将性能退化规律直接用于指导加固

决策是解决既有结构长期服役安全与经济问题的一条有效途径。

2 性能退化模型分析

为实现对结构性能随时间演化的量化描述,本文综合考虑疲劳、锈蚀和材料老化三种主要退化因素,建立结构性能退化模型。模型以构件层面的承载能力随时间变化关系为基础,并可扩展用于结构整体性能评估。下面分别阐述各退化子模型及总体性能指标的确定方法。

2.1 疲劳退化子模型

重复荷载作用会在结构材料中累积不可逆的损伤。疲劳退化模型通常采用 Miner 准则表征,即: $D_f = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$, 其中, n_i 为应力幅值水平 i 经受的循环次数; N_i 为该应力幅值下材料发生疲劳破坏的循环次数; D_f 为疲劳损伤累积值,当 $D_f \geq 1$ 时发生疲劳失效; 对于钢筋混凝土结构中的钢筋或钢构件,当反复荷载水平较高时(例如反复应力接近材料屈服强度的范围),会出现疲劳开裂或强度下降。疲劳子模型可通过材料 S-N 曲线获得 N_i , 进而计算在服役时间 t 内累计的损伤 $D_f(t)$ 。如果 $D_f(t) < 1$ 则尚未发生疲劳破坏,其对构件承载力的影响可近似考虑为剩余强度的折减。例如,对于钢材,可令疲劳后剩余强度 $R_f = R_0 (1 - \alpha D_f)$, 其中, R_0 为初始强度; α 为折减系数 ($\alpha = 1$ 表示损伤达到 1 时强度降为 0)。当疲劳损伤较小时(D_f 远小于 1),其对承载力的削弱可以忽略不计;但对于重载或高周疲劳情况,应根据计算的 D_f 修正构件的有效强度。需要指出,建筑结构大部分构件所受重复荷载有限,疲劳并非主要控制因素,但对于某些特殊构件仍需考虑其累积效应。

2.2 锈蚀退化子模型

环境因素(如氯盐侵蚀、碳化、大气锈蚀等)会导致钢材锈蚀、混凝土碳化,从而削弱结构性能。以钢筋混凝土结构为例,其锈蚀退化过程一般分为两个阶段:钢筋保护层破坏(锈蚀初始化)和钢筋截面锈蚀减薄(锈蚀发展)。对于氯离子侵蚀,可采用 Fick 第二定律模型计算钢筋达到临界氯离子浓度所需时间 T_i ; T_i 主要取决于混凝土保护层厚度、氯离子扩散系数和表面氯离子浓度等参数。 $t > T_i$ 后进入锈蚀发展阶段,钢筋截面面积逐渐减小,可用经验模型表示为 $A_s(t) = A_{s0} - \beta(t - T_i)$, 其中, A_{s0} 为钢筋原始截面面积; β 为锈蚀速度(单位面积损失/时间)。当钢筋截面削减,会引起构件承载力下降。例如,对以钢筋拉力为主的构件(如梁的受拉钢筋)可近似认为承载力与钢筋截面

成正比,则构件剩余承载力 $R_c(t) = R_0 \cdot \frac{A_s(t)}{A_{s0}}$ 。如果

混凝土因碳化或其他因素导致保护层开裂剥落,也会加速钢筋锈蚀并削弱混凝土承载贡献。对于钢结构,锈蚀主要表现为构件截面锈蚀减薄和局部坑蚀。可采用线性或指数模型描述钢材厚度随时间的衰减,如 $h(t) = h_0 - c \cdot t^n$ (其中, c, n 均为与环境有关的常数)。锈蚀造成的截面削弱会降低钢构件的刚度和强度,尤其对薄壁受压构件影响显著。在可靠度分析中,常将锈蚀量视为随机变量来评价随时间推移结构失效概率的变化。锈蚀子模型的参数可依据耐久性试验数据或规范推荐值取定,例如海洋大气环境下普通钢筋年均锈蚀率约 0.1 mm/年等。在实际应用中,应根据结构所处环境类别、材料防护措施等对模型进行校准,以提高预测精度。需要强调的是,锈蚀退化往往是结构耐久性失效的主导因素之一,必须在寿命周期分析中重点考虑。

2.3 材料老化子模型

材料老化指材料性能随时间的劣化,不一定伴随明显外部荷载或锈蚀作用。例如,混凝土在长期使用中发生收缩徐变、反复湿干循环,可能出现微裂缝和强度下降;砌体材料会由于温湿度变化和化学作用逐渐风化;一些有机材料(如加固用环氧粘胶)随时间老化导致粘结性能下降。材料老化的影响可通过经验退化系数来表征。如对于混凝土抗压强度,可假定在超过养护期后的长期逐渐降低一个比例: $f_c(t) = f_{c28} \cdot \left(1 - \rho \frac{t-28}{100}\right)$, 表示服役每 100 年强度下降 ρ (若 ρ 取 0.1, 则 100 年后强度降低 10%)。再例如,碱骨料反应(ASR)等会引起混凝土内部膨胀开裂,显著降低强度和弹性模量,这类特殊老化需根据检测结果纳入模型。材料老化子模型往往具有较大的不确定性,一般可结合结构定期检测进行修正。对于结构整体性能而言,材料老化通常导致刚度下降、阻尼比增加、开裂增多等,从而可能降低结构在风震等作用下的性能指标。为安全起见,在寿命期内应定期评估主要材料性能,如混凝土碳化深度、钢材延性等,将其退化趋势纳入可靠度分析。

2.4 综合性能退化模型

将上述疲劳、锈蚀、老化三类退化因素综合考虑,可建立结构综合性能退化模型。通常可选取结构某项关键性能指标 P (如承载力、安全系数或可靠度指数)来表征结构状态。假定初始时 $P(0) = P_0$, 随着时间推移 $P(t)$ 降低。当 $P(t)$ 下降至规范要求的最低限值 P_{min} 时, 结构达到耐久性寿命终点。综合模型可通过叠加或组合各子模型实现。例如,对于以强度控制的结

构,可认为承载力随时间的相对下降幅度等于各因素引起的强度下降之和,即:

$$\frac{P_0 - P(t)}{P_0} = \frac{\Delta P_f(t) + \Delta P_c(t) + \Delta P_a(t)}{P_0}. \quad (1)$$

其中, $\Delta P_f, \Delta P_c, \Delta P_a$ 分别为疲劳、锈蚀、老化导致的强度损失,也可采用乘积形式表示剩余性能: $P(t) = P_0 \cdot \eta_f(t) \cdot \eta_c(t) \cdot \eta_a(t), \eta_i(t) \in [0, 1]$ 为各因素的性能保持系数。对于复杂结构,可对各关键承重构件分别评估退化,再通过结构体系分析(如可靠度串并联模型)计算整体性能指标 $P(t)$ 。本文所提出的加固策略优化方法正是基于上述性能退化模型,通过预测结构在不同时刻的性能水平,判断其何时需要加固以及加固到何种程度方可满足目标寿命要求。

3 加固策略优化方法

基于性能退化模型的加固策略优化,旨在在保证结构全寿命周期安全可靠的前提下,确定何时以及如何对结构实施加固可使综合效益最佳。优化问题可表述为:在给定预测的结构性能退化曲线 $P(t)$ 和目标服役年限 T 的情况下,求解最佳的加固时机和加固方案,使得结构在 0 年 ~ T 年间可靠度满足约束且加固费用最低。其核心包括加固触发时机判定和加固方案优选两部分。

3.1 加固触发时机判定

根据性能退化模型 $P(t)$,可以预测结构在未来各时刻的性能水平。当 $P(t)$ 下降接近最低容许值 P_{min} 时,应考虑实施加固以防止结构性能进一步退化至不安全状态。一般地,定义安全裕度系数 $\gamma(t) = \frac{P(t)}{P_{min}}$ 。当 $\gamma(t) \leq 1$ 时结构刚好达到安全下限。可设定一个阈值 $\gamma_{th} > 1$ (例如 1.05 ~ 1.1) 作为提前加固的触发条件,以考虑预测误差和突发情况的影响。当 t 满足 $\gamma(t) = \gamma_{th}$ 时决定实施加固。通过调整 γ_{th} 的取值,可权衡加固时机的提前量:阈值越大,加固越提前,安全余裕越高,但使用原结构潜力偏低;阈值太小则可能临近失效才加固,存在风险。因此,需要结合结构重要性、使用功能和风险偏好选取合适的阈值。对于要求在整个目标寿命内不发生失效的结构,最晚加固时间应在 $P(t)$ 刚下降到 P_{min} 之前。如有可靠度指标 $\beta(t)$ 随时间的计算结果,也可通过 $\beta(t)$ 降至目标可靠度 β_{min} 时触发加固。总之,加固触发时机的确定以性能退化预测为依据,确保结构在寿命期内始终维持在安全水平之上。

3.2 加固方案优选

当确定需要加固时,还需选择具体的加固措施和加固力度。加固措施可以多种多样,例如增大截面、粘贴 FRP、外包型钢、预应力加固等,不同方案在提升性

能幅度、施工难度及费用上各不相同。加固力度则指加固程度,例如粘贴多少层碳纤维布、增加多少截面尺寸等。优化应在可行方案中选取使综合效果最佳者。综合效果一般通过寿命周期成本或效益函数来衡量。寿命周期成本包括加固施工直接费用和因性能不足导致的潜在损失费用(如停用维修、结构损坏甚至倒塌的损失)。对于重要结构还应考虑加固施工对正常使用的影响成本等。优化目标函数可表示为:

$$J = C_{\text{initial}} + \sum_{i=1}^N C_{\text{rein},i} \cdot \exp(-rt_i) + C_{\text{fail}} \cdot P_{\text{fail}}(T). \quad (2)$$

其中, C_{initial} 为初始建造成本; $C_{\text{rein},i}$ 为第 i 次加固费用; t_i 为其实施时间; r 为贴现率; C_{fail} 为结构在寿命期末未达到性能要求时的惩罚性费用(例如提前报废重建的成本); $P_{\text{fail}}(T)$ 为至寿命期末结构未满足性能要求的概率(若确保安全则该项为 0)。由于本研究关注已有结构的加固优化, C_{initial} 为沉没成本,可忽略不计。这样,优化问题转化为在满足可靠度约束($P(t) \geq P_{\min}$ 或 $\beta(t) \geq \beta_{\min}$, $\forall t \in [0, T]$)的前提下,使得寿命周期总成本 $\sum C_{\text{rein},i} \exp(-rt_i)$ 最小。对于一般房屋建筑,通常只需加固一次即可满足剩余寿命要求,即 $N = 1$ 。此时可简化为求解最佳加固时刻 t^* (若方案固定)或最佳加固方案组合(若方案有多个候选)。由于加固时机对费用现值有影响(越晚费用现值越低),而过晚加固又可能需要更高强度的措施甚至出现风险,存在一个折中的最优 t^* 。可以通过枚举候选方案并结合寿命周期成本计算进行比较选择。例如,可列出方案 A(较小加固,提高承载力 X%)、方案 B(较大加固,提高承载力 Y%),分别计算其可延长的使用年限和对应费用,选择性价比最高的方案。必要时可采用优化算法(如遗传算法、动态规划等)自动搜索最优解。需要注意,加固方案优选除经济因素外,还应符合相关规范和施工可行性要求。例如,当某种加固方案费用接近新建重建费用的较大比例时,即缺乏经济合理性,不宜采用。综合考虑各方面因素,方能确定最终的最优加固策略。

3.3 优化流程

基于以上原理,加固策略优化的一般流程如下:首先,收集结构设计、检测和使用环境等信息,建立相应的性能退化模型;其次,确定目标寿命及性能要求,计算结构在不加固情况下的性能退化曲线;然后,设定加固触发阈值,找出需加固的时间区间和构件;接着,针对结构薄弱环节提出若干可行的加固方案,并预测在各方案作用下结构剩余寿命和成本;最后,对比不同方案在安全裕度、寿命延长和经济成本方面的表现,选择

最优方案实施。完成加固后,应更新结构状态(例如重新设定 P_0 为加固后的性能水平),继续监测退化情况,如有必要可进行下一轮优化决策。

4 应用性能退化模的案例分析

4.1 案例概况

选取一栋综合办公楼结构作为分析对象。该办公楼为 8 层钢筋混凝土框架结构,建造于 1995 年,设计使用年限 50 年,抗震设防烈度为 6 度。结构平面如图 1 所示,层高首层 3.6 m,2 层—8 层 3.4 m。根据建筑结构检测技术标准^[8]及民用建筑可靠性鉴定标准^[9],检测结果为:构件截面尺寸和配筋底层柱截面 600 mm × 600 mm(内配 16φ25 纵筋),上部逐层略有减小;梁截面 250 mm × 600 mm(配筋 4φ22 + 3φ16);楼板厚 120 mm。混凝土强度等级 C30,钢筋为 HRB335。假定该楼处于一般环境(非氯盐锈蚀区),但由于使用年限已逾 30 年,结构部分构件出现不同程度的劣化:经检测,混凝土碳化深度平均 20 mm,最深处约 30 mm;部分梁底钢筋保护层开裂脱落,可以观察到钢筋锈蚀(推算锈蚀率约 5%);框架节点及次梁上发现少量疲劳裂缝(可能由于多年反复荷载和材料徐变产生);整体尚未发现危及承载安全的严重缺陷。针对该结构,我们应用前述性能退化模型进行寿命周期性能评估,并优化其加固策略。

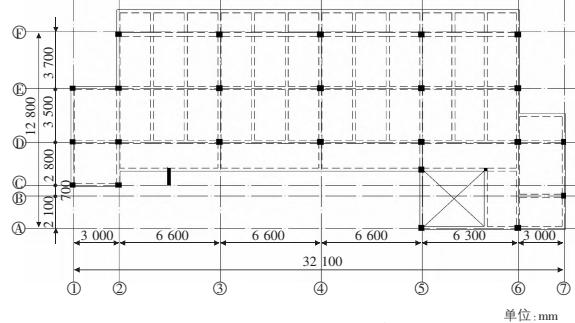


图 1 办公楼标准层平面布置图

4.2 退化模型参数选取

根据检测及文献数据,设定本结构关键构件的退化模型参数如下:混凝土强度随着碳化微降,28 年后强度下降约 5%,取 $\rho = 0.05$ (100 年约下降 10%);钢筋锈蚀初始时间 $T_i \approx 20$ 年(与碳化深度达到钢筋时间相当),锈蚀发展期钢筋截面年均损失率约 0.1%/年(考虑一般环境下有轻度锈蚀);疲劳损伤方面,由于办公楼活载变化较小,仅对局部构件取 D_f (30 年) ≈ 0.2 (即 30 年累积疲劳消耗 20%,主要集中在某些梁端和楼板支座)。基于这些参数,可计算得到结构承载能力随时间的变化。为简化分析,我们采用承载力安全系数 $\gamma(t)$ 作为性能指标,其定义为结构抗力与作用效

应之比,初始设计时 $\gamma_0 = 1.20$ (满足规范要求的安全储备)。随着退化发展, $\gamma(t)$ 逐渐降低至 1.0, 表示刚好满足安全要求。图 2 给出了不加固情况下办公楼结构承载安全系数 $\gamma(t)$ 随时间的预测曲线。由图 2 可见, 在服役前 20 年内结构性能下降较慢, $\gamma(20 \text{ 年}) \approx 1.10$; 此后由于钢筋开始锈蚀、混凝土逐步老化, 性能退化加速, $\gamma(30 \text{ 年}) \approx 1.00$, 到约 40 年时 γ 降至 0.90 左右, 不再满足安全要求。按设计寿命 50 年计, 若无维修加固, 结构将在约第 40 年出现承载力不足的风险, 无法安全服役至 50 年。

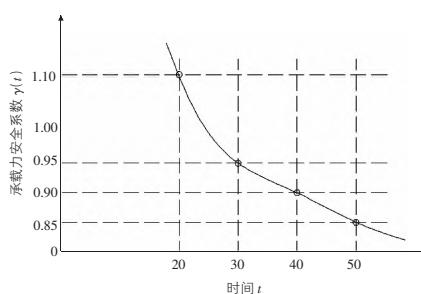


图 2 承载安全系数随时间的预测曲线

4.3 加固方案分析

表 1 列出了不加固和不同加固策略下结构关键性能指标的对比情况。根据混凝土结构加固设计规范^[10], 加固措施假定采用增大截面和粘贴 FRP 复合加固柱、梁, 可使承载力提高 20%。表中给出了各方案在 50 年末的预计安全系数 $\gamma(50)$ 、寿命周期内的累计加固费用 (以相对值表示), 以及主要优缺点。

表 1 不同加固策略方案性能与费用对比

加固方案	加固实施时间	50 年末安全系数 $\gamma(50)$	寿命周期加固费用	方案评价
不加固方案	—	0.80	0	不满足安全要求, 40 年后需限制使用甚至重建
A 方案: 提前加固	第 20 年	1.05	1.20	安全裕度充足, 但加固时机早, 费用现值高
B 方案: 适时加固	第 30 年	1.10	1.00	安全可靠至 50 年, 费用适中, 策略合理
C 方案: 滞后加固	第 40 年	1.20 (加固后)/0.95 (加固外) 未加固至 40 年)	0.85 (加固外) 加潜在事故损失	前期 10 年安全不足, 存在较大风险, 不推荐

注: 费用相对值以方案 B 为基准 1.00, 加固费用已折现至初始时刻; 方案 C 在第 30 年—40 年结构性能低于要求, 存在事故风险, 其事故损失费用以折现值计入。

由表 1 可见, 不加固方案在约 40 年时结构即达不到安全要求, 无法满足 50 年的服役目标, 最终需提前限制使用, 寿命周期成本显然最高。A 方案在 20 年时提前加固, 尽管确保了全寿命安全, 且 50 年末仍有一定裕度, 但由于加固过早, 费用现值较高 (约为方案 B 的 1.2 倍), 且未充分利用原结构剩余寿命, 不够经济。C 方案将加固推迟到 40 年, 表面上加固费用现值最低, 但在 30 年—40 年期间结构实际已低于安全

标准, 存在 10 年超期服役的风险, 如果在第 35 年左右发生超载或偶然事件, 可能导致结构破坏, 隐含的事故风险成本很高。从综合来看, 方案 B (第 30 年适时加固) 能够刚好在结构性能接近临界时实施增强, 使结构安全度恢复并略有富余, 既避免了不安全服役阶段, 又避免了过早加固的浪费, 寿命周期总成本最低。因此, 方案 B 被选定为最优加固策略。在保证安全的前提下尽量后延加固时机可以减少费用, 但不能晚于性能降至临界点的时刻。通过性能退化模型的精确预测, 我们找出了该临界时刻并进行了优化决策。我们可以看出基于性能退化模型进行加固策略优化的有效性: 模型准确预测了结构何时性能降至临界, 避免了不必要的过早加固或过迟加固; 优化选择的方案在保障安全的同时将成本控制在最低, 实现了安全与经济的平衡。

5 结论

本文围绕既有建筑结构在寿命周期内的性能退化与加固策略优化问题进行了研究, 主要成果和结论有以下几点。

5.1 性能退化模型

综合疲劳、锈蚀、材料老化三种因素, 建立了结构性能退化的数学模型。模型能够定量描述结构承载能力或可靠度随时间的衰减规律。研究表明, 结构退化可分为渐进式退化和突发式退化两类情形, 应重点关注渐进退化中锈蚀作用的长期累积影响。针对钢筋混凝土结构, 模型考虑了钢筋锈蚀初始时间和锈蚀速率对寿命的影响; 针对钢结构, 考虑了截面减薄对强度的影响; 材料老化效应通过经验系数修正。该模型为后续加固决策提供了依据。

5.2 加固策略优化方法

提出了基于退化模型的加固方案优化方法, 包括加固时机判定和方案优选两个层面。通过设定性能阈值, 当结构性能指标下降到阈值附近时触发加固, 以确保不出现不安全服役阶段。采用寿命周期成本分析比较不同加固方案的经济效率, 在满足目标可靠度约束的前提下选取费用最低的方案实施。特别地, 本文强调了结合退化模型确定最佳加固时机的重要性: 既避免过早加固造成浪费, 又避免过迟加固带来安全风险和更高费用。通过优化算法可以实现加固时机和方案的自动搜索, 提升决策科学性。

5.3 工程应用建议

为在工程中应用本文方法, 需加强结构服役期的监测与检测工作, 获取可靠的退化数据支持模型分析。同时, 应根据结构重要性确定合理的安全裕度阈值和

优化目标,动态优化加固策略。例如,对于一般民用建筑,可以最低寿命周期成本为主要目标;对于重要公共建筑,则应在成本优化的同时提高安全冗余。最后,加固策略的实施还需考虑施工可行性和相关规范要求,确保优化结果具有可操作性。

综上所述,将结构性能退化模型引入既有建筑结构加固策略优化中,可以显著提高加固决策的科学性和有效性。在保障结构安全耐久的前提下,实现资源的合理配置和使用寿命的最大化。这一方法对我国庞大的既有建筑存量的安全管理和可持续利用具有积极意义。未来有必要在更多实际工程中应用验证本方法,并进一步完善退化模型的精度以及优化决策的智能化,为既有建筑结构的养护与改造提供更有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 肖从真,李建辉,马天怡,等.既有建筑结构加固改造与性能提升现状与发展[J].工业建筑,2024,54(1):20–30.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构可靠性设计统一标准:GB 55071—2022[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [3] 陈宣东,章青,顾鑫,等.基于概率分析的钢筋混



扫码查看原文

凝土结构服役寿命预测研究[J].中国锈蚀与防护学报,2021,41(5):673–678.

- [4] 张振浩,田勇,梁高明.考虑混凝土强度随机退化的长寿命斜拉桥主梁目标可靠指标确定方法[J].中国公路学报,2025,38(1):199–212.
- [5] 高珺,姚继涛,程正杰.设计基准期内地震活动区域既有结构寿命模型[J].工程力学,2023,40(12):124–132.
- [6] 吴健,周剑,胡超群,等.基于城市更新的混凝土结构加固改造研究综述[J].土木工程,2024,13(9):1697–1703.
- [7] 金伟良,牛荻涛.工程结构耐久性与全寿命设计理论[J].工程力学,2011,28(2):31–37.
- [8] 中国建筑科学研究院有限公司.建筑结构检测技术标准:GB/T 50344—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [9] 四川省住房和城乡建设厅.民用建筑可靠性鉴定标准:GB 50292—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [10] 四川省住房和城乡建设厅.混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

Optimization of structural reinforcement strategies for existing buildings based on performance degradation models

Luo Jieming

(Guangdong Fang'an Safety Inspection and Appraisal Co., Guangzhou Guangdong 510600, China)

Abstract: Existing building structures will gradually deteriorate in long-term service due to fatigue, corrosion, material aging and other factors, which brings potential danger to structural safety and durability. In order to address this problem, this paper constructs a mathematical model of structural degradation considering fatigue cumulative damage, corrosion of reinforcement and material aging, and on this basis proposes a life-cycle oriented optimization method of reinforcement strategy. The feasibility and advantages of applying the structural performance degradation model directly to the optimization of reinforcement strategy are verified through a case study of a comprehensive office building structure, comparing the effects and costs of different reinforcement timing and schemes. The results show that the optimization of reinforcement based on the degradation model can significantly improve the relevance and effectiveness of the reinforcement scheme, ensure the safety and reliability of the structure in the whole life cycle while taking into account the economy, and provide new ideas and references for the durable safety management of existing building structures.

Key words: existing buildings; structural performance degradation; fatigue; corrosion; optimization of reinforcement strategies