

文章编号: 1005-0523(2024)02-0001-24



混凝土桥梁服役性能退化及预防性维护综述

陈华鹏¹, 刘维刚^{1,2}, 江 钰¹, 肖 烽¹, 朱泽文³

(1. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 新余学院建筑工程学院, 江西 新余 338004;
3. 江西省交通科学研究院有限公司, 江西 南昌 330052)

摘要: 针对混凝土桥梁服役性能退化分析与预防性维护这一热点问题进行了综述。混凝土桥梁作为复杂的结构体系, 具有损伤因素多、材料劣化机理复杂以及服役性能评估难等特点, 在环境与荷载等因素的共同作用下, 钢筋与混凝土材料特性发生劣化, 导致混凝土构件承载力退化, 最终影响桥梁整体结构力学性能。从材料劣化机理分析、材料与结构力学性能退化模拟、服役性能评估、剩余使用寿命预测以及预防性维护策略制定等方面对既有混凝土桥梁服役性能退化与预防性维护进行了详细阐述, 同时对比分析了各研究模型和方法的优势与不足。然后, 分别从既有混凝土桥梁材料、构件和结构等层次着手, 分析了桥梁材料微观劣化特性, 探讨了桥梁构件损伤机理与失效过程, 明确了在役混凝土桥梁结构力学性能宏观退化规律。最后, 基于对现有研究的分析与总结, 指出了当前混凝土桥梁服役性能退化与预防性维护中存在的问题, 为后续研究提供了新的思路, 为桥梁全寿命智能运维管理提供科学依据。

关键词: 混凝土桥梁; 性能退化; 性能评估; 预防性维护

中图分类号: U448.33

文献标志码: A

本文引用格式: 陈华鹏, 刘维刚, 江钰, 等. 混凝土桥梁服役性能退化及预防性维护综述[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(2): 001-024.

Review of Performance Deterioration and Preventive Maintenance of In-service Concrete Bridges

Chen Huapeng¹, Liu Weigang^{1,2}, Jiang Yu¹, Xiao Feng¹, Zhu Zewen³

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Architectural and Engineering, Xinyu University, Xinyu 338004, China; 3. Jiangxi Transportation Research Institute, Nanchang 330052, China)

Abstract: This paper reviews the hot research topic of the performance deterioration and preventive maintenance of in-service concrete bridges. As complicated structural systems, concrete bridges have characteristics of multiple causes of structural damage, complex degradation mechanisms of materials, and difficult assessment of the structural performance. Due to the combined action of the environmental and loading effects, the properties of steel reinforcement and concrete materials deteriorate, which leads to a decrease in the load-carrying capacity of the structural components and ultimately affects the structural performance of the whole concrete bridge. This paper discusses the performance deterioration and preventive maintenance of the in-service concrete bridges in many aspects, such as the material degradation mechanism, the simulations of the mechanical performance dete-

收稿日期: 2023-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0105600); 江西省科技合作专项重点项目(20212BDH80022); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBH80002); 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2022H0014)

rioration of materials and structures, the evaluations of service performance, the predictions of remaining service life, and the determination of preventive maintenance strategies. Meanwhile, the advantages and disadvantages of the proposed models and methods are compared and analyzed. Consequently, from different levels of materials, components and structures of the existing concrete bridges, it analyses the degradation characteristics of bridge materials at the meso-scale level, investigates the damage mechanisms and failure process of the bridge components, and further examines the deterioration laws of the mechanical performance of the in-service concrete bridges at macro-scale level. Finally, based on the analysis and review of the existing investigations, it proposes the current issues in the performance deterioration and preventive maintenance of the in-service concrete bridges, provides new frameworks for future research, and offers the scientific basis for the smart operation and maintenance management throughout the whole life cycle of bridges.

Key words: concrete bridges; performance deterioration; performance evaluation; preventive maintenance

Citation format: CHEN H P, LIU W G, JIANG Y, et al. Review of performance deterioration and preventive maintenance of in-service concrete bridges[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(2): 001–024.

我国是桥梁大国,据统计截至2022年底,我国共有桥梁约112.52万座,累计长度11.706万公里,居世界首位^[1],其中近四十年修建的桥梁约占总量的80%,超过40万座桥梁已经服役20多年,需要进行科学有效地维护管理。因此,我国桥梁正在由以“建设为主”转向“建养并重”发展。

资料显示,我国大量桥梁正在面临老化和病害问题^[2]。虽然按1972年及之后的设计标准修建的桥梁能够基本满足目前交通需求,但受制于服役环境的复杂性以及当时的技术水平和材料水平,既有桥梁普遍存在服役性能退化等问题,并进一步出现承载力不足等状况^[3]。此外,随着交通运输荷载加重、运输密度提高以及运输需求增加,许多桥梁面临着超载和超设计寿命服役的问题^[4]。

鉴于混凝土桥梁在交通运输中的关键作用以及其面临的材料结构力学性能退化问题,进一步研究桥梁结构的性能演化、预测结构的剩余寿命和制定最优维护策略,是保障结构安全、适用和耐久性的重要举措^[5]。本文系统阐述了既有混凝土桥梁的材料劣化机理分析、结构力学性能退化模拟、服役性能评估、剩余使用寿命预测和预防性养护策略制定等方面的研究现状,从材料、构件和结构等层次着手,分析了混凝土桥梁服役性能退化规律与评估方法。此外,对在役桥梁的结构力学性能退化模拟和剩余使用寿命预测方法进行了分析和比较,指出了已有研究的不足,进一步明确了未来的发展方

向;图1为本文的技术路线图。

1 材料劣化机理

钢筋混凝土桥梁主要损伤类型有混凝土开裂、混凝土老化、保护层剥落、钢筋锈蚀、钢筋疲劳和预应力损失等。因此,混凝土性能退化应重点考虑混凝土和钢筋两种主要材料的劣化机理。通过深入了解材料不同类型损伤的产生和发展,可为建立结构性能退化模型提供理论依据,也是后续开展在不同环境和使用条件下的结构可靠度、结构剩余使用寿命预测的理论基础。

1.1 混凝土劣化

引起混凝土结构耐久性损伤的直接原因可分为内部原因和外部原因。内部原因主要是混凝土自身的缺陷,如在混凝土内部存在毛细孔隙以及微裂缝,为氧气、水分与二氧化碳提供了场所,进而为有害物质向内部扩散侵蚀提供了便利。外部原因从作用机制看大致可以分为物理、化学和生物作用三大类^[5]。

1.1.1 混凝土碳化

混凝土碳化是指环境中的CO₂或某些酸性气体与暴露在空气中的混凝土表面接触并且不断向内部扩散,与混凝土中的碱性水化物(如CaO)发生反应,生成碳酸钙或其他物质的多相物理化学过程^[6]。随着煤、石油、天然气的消耗,排放到大气中的CO₂不断增加,混凝土结构的碳化问题显著^[7]。混凝土

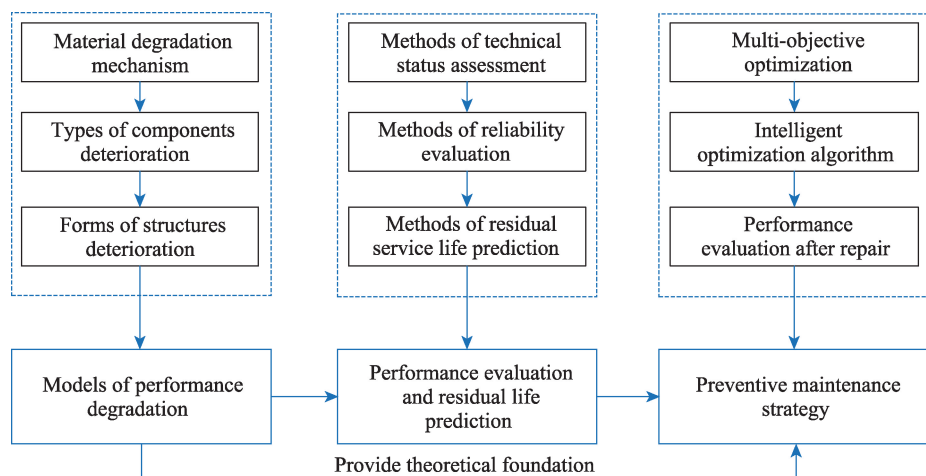


图1 本文技术路线图

Fig. 1 Flow chart of this paper

碳化会降低混凝土的碱度,造成钢筋锈蚀,进而引发混凝土保护层开裂以及钢筋与混凝土之间粘结破坏等不良后果^[8]。国内外学者对混凝土碳化问题进行了深入的研究,研究表明混凝土的碳化情况与混凝土的材料种类、配合比、养护和使用环境等息息相关^[3,6],并且发现碳化深度与碳化时间的平方根成正比,表达为 $D=k\sqrt{t}$,式中 D 为碳化深度, t 为碳化时间, k 为碳化速度系数。

近年来,对混凝土碳化研究主要围绕碳化影响因素、碳化性能以及碳化深度计算与预测等开展。碳化影响因素方面,元艳妃^[9]研究了4种不同因素对珊瑚混凝土碳化深度的影响,研究发现珊瑚混凝土的碳化深度与水灰比、粉煤灰内掺量成正比,与水泥用量成反比,且在任一情况下碳化深度均随碳化龄期延长而增大。但该研究仅从材料角度出发未考虑到环境因素的影响。Liu等^[10]研究了温度、相对湿度、 CO_2 浓度与混凝土碳化深度之间的关系,结果表明:温度、相对湿度、 CO_2 浓度对混凝土碳化深度的影响显著,混凝土碳化深度与温度、 CO_2 浓度和相对湿度分别呈指数函数、幂函数和多项式函数关系。蒋建华等^[11]从施工养护方面研究了再生混凝土的抗碳化性能,发现在其他条件不变的情况下,使用养护剂进行养护的混凝土试块碳化深度最小,洒水养护和覆膜养护下试块的碳化深度依次增大。

关于混凝土的碳化性能,王柳南等^[12]用试验方法从宏观上研究了水灰比、水泥用量和石粉掺量对机制砂混凝土抗碳化性能的影响,发现机制砂混凝土

的碳化深度与水灰比呈正相关关系,与水泥用量呈负相关关系。张淑云等^[13]通过建立掺机制砂量的自密实轻骨料混凝土碳化深度预测模型,从宏观和微观两个层面探究机制砂掺量对自密实轻骨料混凝土碳化性能的影响及其变化规律。然而,以上研究忽略了混凝土在实际受荷下产生应力损伤的情况。为解决该问题,Shi等^[14]利用数值模拟方法,研究了应力损伤与碳化对三相细观混凝土碳化深度的耦合效应。Pan等^[15]从微观角度分析了初始损伤程度和外加剂掺量对喷射混凝土碳化性能的影响机理。

在以往的研究中,通常采用影响因素与碳化深度之间的隐式投影关系对碳化深度进行预测,采用的模型主要分为统计和理论两大类^[16]。但混凝土碳化的内在机制复杂,影响因素繁多,这为碳化深度的准确预测带来了较大困难。近年来,机器学习因其出色的预测能力成为处理复杂非线性问题最佳工具之一。Liu等^[17]利用混合群智能算法的人工神经网络模型开展了再生骨料混凝土碳化深度的预测。Chen等^[18]开发了一种基于加权函数的混合机器学习方法来预测混凝土碳化深度。Nunez与Nehdi^[19]提出了梯度增强回归树模型来确定再生骨料混凝土的碳化深度,并基于713条试验数据进行验证,发现所提模型能准确预测不同粒径再生骨料混凝土的碳化深度,优于现有的数学公式模型。

尽管混凝土碳化影响因素、机理和深度预测模型等研究已取得了显著的进展,但基于碳化机理和试验研究的平均碳化深度预测模型在实际工程中

碳化深度还存在偏差,只有开展不同环境下的混凝土构件长期暴露性试验研究才更接近工程实际。此外,针对碳化后混凝土力学性能的研究还有待进一步深入,如碳化混凝土本构关系、碳化混凝土构件和结构的力学性能等。

1.1.2 混凝土冻融破坏

混凝土的冻融破坏主要发生在严寒地区,其机理是混凝土孔隙水遇冷冻后体积膨胀,孔壁产生挤压应力,待温度升高后冰冻融化,孔壁应力随之消失,经过多次循环作用或孔壁应力超过混凝土强度时导致混凝土开裂^[20]。混凝土抗拉和抗弯强度受冻融次数较为敏感,冻融是严寒地区混凝土结构破坏的主要因素,特别是水工结构物。

国内外对混凝土冻融劣化机理研究开展较早,提出了多种理论,如水离析成层理论、水压力理论、渗透压理论、充水系数理论、临界水饱和理论和现象学理论等。其中 Powers 与 Helmuth^[21]提出的静水压力理论和渗透压力理论较为常用。Fagerlund^[22]于1977年提出的混凝土临界水饱和假说,分析了混凝土冻融机理。Gong等^[23]认为渗透性决定静水压力,并基于孔隙力学与达西定律推导出静水压力公式,创立了一个综合静水压力模型。

面对多种冻融劣化机理,迄今还未得到统一的认识和结论。此外,对于冻融循环作用下混凝土的动力特性和冻融多因素耦合作用下的损伤模型研究相对不足。

1.1.3 盐类侵蚀

盐类是影响混凝土耐久性的另一个重要因素,盐类侵蚀主要表现为混凝土弹性模量和抗压强度的下降。盐类对混凝土的侵蚀分物理侵蚀和化学腐蚀两大类。物理侵蚀是指盐溶液结晶膨胀对混凝土产生的破坏,而化学腐蚀是水泥水化产物与盐发生化学反应导致的破坏^[24]。已有的研究表明物理侵蚀速度比化学腐蚀速度要快许多,且破坏主要集中在结构的干湿交替处。白卫峰等^[25]基于统计损伤理论及宏观试验,分析了硫酸盐侵蚀混凝土的演化过程,结果显示侵蚀程度的加深显著改变了混凝土细观的累积损伤演化过程,最终导致混凝土宏观力学性能呈现先“强化”后“弱化”的现象。Kliukas等^[26]研究了混凝土在盐类长期侵蚀下的力学性能,研究表明随着盐类侵蚀时间增长,混凝土抗压强度和杨氏模量不断下降。

国外对盐类侵蚀研究较早,法国于1904年做了混凝土耐盐侵蚀试验,美国自上世纪20年代初开始研究不同环境下盐类对混凝土的侵蚀,比利时在1934年开展了氯盐对不同水泥制成的混凝土侵蚀的试验。如今,国内外很多设计规范均逐渐考虑了盐类环境对混凝土耐久性的影响,如我国《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51335-2019)中环境类别列出了“化学腐蚀环境”,腐蚀机理中强调了硫酸盐等化学物质对混凝土腐蚀。

尽管对盐类侵蚀的一些机理已经进行了研究,但仍有很多机理尚未完全理解。特别是在复杂盐类侵蚀环境下,如多种盐类共存的情况下,其相互作用和影响机制尚未充分探究。试验方法和评价指标等方面还欠缺科学性。相较于物理结晶侵蚀,盐溶液的化学腐蚀研究应受到更多的关注,尤其是硫酸盐和氯盐的腐蚀。目前,盐类侵蚀评估方法主要基于实验室试验和经验公式,缺乏全面准确的预测模型。同时,现有方法对于多种盐类共同作用、长期盐类侵蚀以及不同环境条件下的侵蚀效应等方面仍考虑不足,需要进一步改进和完善。

1.1.4 碱-骨料反应

碱-骨料反应是指骨料的特定成分与混凝土中的碱发生反应,进而导致混凝土膨胀开裂。碱-骨料反应因发生在混凝土内部且长期存在难以根除,故被称为混凝土“癌症”,至今也是国内外研究的热点。根据骨料中活性成分的不同,既有研究把碱骨料反应大致分为3种类型:碱硅酸反应、碱碳酸盐反应和碱硅酸盐反应,其中以碱硅酸反应最为常见^[27]。

碱硅酸反应是一种复杂的物理化学反应,研究也最为广泛。在上世纪四十至五十年代形成了两种理论:吸水肿胀理论和渗透压理论。吸水肿胀理论认为导致混凝土开裂的原因是在骨料与水泥石界面上形成具有吸水肿胀的碱硅酸凝胶,而渗透压理论认为骨料周围的水泥浆可作为半透膜作用,碱性氢氧化合物和水可以透过其中到反应区而产生膨胀压力。已有的研究把碱碳酸盐反应膨胀机理大致分为间接反应机理和直接反应机理两类。Tang等^[28]利用先进的显微镜和能谱仪对Kingston活性岩石的微观结构进行了详细研究,发现膨胀与反应程度之间存在很好的相关性,这一发现加大了直接反应的可信度。由于多数碳酸盐没有碱活性,研究起来较复杂,各国对碱碳酸盐反应机理说法不

一,有待进一步研究。

尽管我国发生碱-骨料破坏案例相对较少,但在欧美日加等国发生过很多先例,所以不得不加以重视。基于混凝土碱骨料反应发生的条件、影响因素和对结构力学性质的影响,今后可从技术层面(抑制碱骨料反应的技术措施)、材料层面(不同材料不同环境下的碱骨料反应机理、抑制碱骨料反应的材料、骨料活性的检测等)、力学层面(碱骨料反应或其他损伤因素耦合对混凝土结构力学的影响)、试验方法和损伤评估等方面进行进一步的研究。

1.2 钢筋劣化

在钢筋混凝土结构中,钢筋劣化是影响结构耐久性的主要因素,也是工程实际中关注的重点问题。国内外学者就钢筋的劣化做了大量的实地调查研究与理论试验分析等工作,包括研究钢筋劣化的影响因素、劣化机理、力学性能、对结构的危害以及防止劣化措施等^[29-34]。综合来看,钢筋劣化主要体现在钢筋的锈蚀和疲劳两方面,其中锈蚀是主要的劣化形式。

1.2.1 钢筋锈蚀

长期以来,钢筋锈蚀引发的混凝土结构过早破坏问题得到广泛关注。1980年,交通运输部公路科学研究所对中国南方18个码头进行了实地调查^[29]。调查结果显示,超过80%的钢筋混凝土结构存在钢筋锈蚀问题,其中部分结构在建成后的5至10年内就已出现锈蚀现象。

混凝土受到碳化、氯离子、硫酸盐等腐蚀作用,导致钢筋表面的钝化膜破坏,引发结构内部钢筋锈蚀^[30]。钢筋锈蚀会消耗原有钢筋,并形成性能差、体积大的锈胀物。根据氧化程度的不同,锈胀物的体积可达原钢筋损失体积的2.2至6.4倍^[31]。

根据锈蚀形态不同,钢筋锈蚀可分为点状锈蚀和均匀锈蚀。研究和实践表明在自然环境下锈蚀以点状形态为主,且点状锈蚀对结构耐久性的影响要大于均匀锈蚀。过去的研究主要侧重于考虑单一因素对钢筋锈蚀的影响,其中以氯离子侵蚀导致的锈蚀研究居多^[32]。此外,为了尽早获得锈蚀结果,大部分研究选择在实验室中开展加速锈蚀试验^[32-33]。虽然加速锈蚀试验大大加深了人们对钢筋锈蚀行为的认识,但锈蚀形态主要以均匀锈蚀为主,与混凝土结构在自然环境下的锈蚀情况存在较

大差异。

钢筋锈蚀不仅会引起混凝土保护层脱落,还会导致钢筋的屈服强度、延展性以及钢筋与混凝土之间的粘结性能降低。锈蚀对混凝土结构的影响可分为3个阶段,即裂缝萌芽阶段、裂缝扩展阶段和剩余寿命阶段^[34]。

既有研究对一般环境下的钢筋锈蚀机理研究较成熟,对特殊环境下的钢筋锈蚀机理研究仍处于探索阶段。当前开展的钢筋锈蚀研究,通常采用试验方法,也有一些从理论层面进行研究。基于宏观与微观试验,卢越^[35]研究了碳化环境下碱矿渣混凝土中钢筋的锈蚀机理。Zhao^[36]通过试验方法研究了碳钢在电化学除垢工业循环冷却水系统中的腐蚀行为及机理。针对常见破坏性试验方法所带来的局限性,Robuschi等^[37]提出了一种先进的三维无损方法,用于分析获取嵌入式钢筋的锈蚀参数。农喻媚与陈正^[37]基于第一性原理的密度泛函理论从微观尺度证明了干湿交替环境中钢筋锈蚀更加严重。此外,锈蚀试验的可靠性、不同环境条件下钢筋锈蚀机理以及多因素耦合作用下混凝土构件性能退化等问题仍需进一步研究。

1.2.2 钢筋疲劳

钢筋除锈蚀损伤外,钢筋疲劳损伤也是导致桥梁性能退化的一大因素^[38]。钢筋疲劳破坏是一个损伤累积的过程,疲劳损伤不仅与作用大小有关,而且与作用频率有关。为确保桥梁的安全性和可靠性,对其进行疲劳试验至关重要。疲劳试验基于疲劳劣化机理,即在交变荷载作用下,材料发生塑性变形,导致微观结构变化并出现裂纹,随荷载循环次数增加,裂纹逐渐扩展,最终导致材料断裂。应力幅值与循环周次关系(S-N)曲线是对钢筋疲劳性能进行表征的一种常用方法。通过分析S-N曲线,可以预测钢筋在实际工作条件下的疲劳寿命,为结构设计和评估提供可靠依据^[39]。

分析荷载因素对钢筋疲劳损伤的研究相对成熟,且相关成果已形成规范。现阶段的研究一般考虑荷载与其他因素耦合作用时的疲劳损伤,其中以锈蚀钢筋疲劳损伤居多。Li等^[40]采用34个锈蚀试件进行了轴向拉伸疲劳试验,研究了光圆钢筋在自然锈蚀下的疲劳行为。兰成明等^[41]通过将锈蚀程度作为协变量引入三参数Weibull模型,综合考虑了疲劳寿命、应力幅和锈蚀程度,构建了一种可以

定量评价锈蚀影响的钢绞线疲劳寿命多参数的Weibull模型,该模型可为在役预应力混凝土结构疲劳性能评定提供理论依据。针对非预应力钢筋混凝土桥梁,杨良与孙立军^[38]研究了钢筋锈蚀与疲劳耦合损伤,并推导出钢筋综合损伤度的理论计算模型。

鉴于疲劳损伤影响因素众多,目前仍未全面掌握钢筋在多因素耦合作用下的疲劳劣化机理。另外,已有一些研究关注钢筋疲劳寿命的可靠性评估,但仍需要更多的方法和模型来预测实际工程中的疲劳寿命,并提供可靠的评估依据。实验室中对钢筋加载大都是在短时间内完成,这与实际不符。由于成本和时间的限制,目前钢筋疲劳长期现场数据相对较少,这限制了对疲劳性能的深入理解。最后,针对一些恶劣环境或极端环境下的钢筋疲劳研究仍然相对较少,这些不足之处需要通过更深入的研究来填补。

2 材料力学性能退化模型

混凝土材料力学性能退化模型是基于劣化机理、实验数据、经验公式和统计方法等建立的计算模型,用于描述材料在使用过程中力学性能退化的规律和趋势。桥梁服役性能退化从层次组成上可分为材料力学性能退化、构件力学性能退化和结构力学性能退化,基于不同层级,许多既有文献提出了相应的研究模型。性能退化模型可分为确定性模型、随机模型和模糊模型,其中随机模型考虑随机变量的时间因素形成随机过程,基于随机过程理论的时变可靠度理论较贴合实际。从方法上看可分为理论模型和试验模型,其中理论模型又包含数值分析模型和基于机器学习模型等。这些模型在描述和分析桥梁性能退化时各有优缺点且并非孤立存在,可相互补充和交叉应用。研究表明钢筋混凝土桥梁材料力学性能退化的主要因素包括钢筋锈蚀、预应力筋预应力损失、混凝土强度减小和钢筋与混凝土之间的黏结下降等^[42]。

2.1 锈蚀钢筋力学性能退化模型

锈蚀钢筋力学性能退化研究体现在多个方面,主要有锈蚀钢筋的本构关系、锈蚀量与锈胀时间以及混凝土锈胀开裂等。

2.1.1 本构关系模型

本构关系反映了材料受到外部载荷时应力应

变响应,研究锈蚀钢筋的本构关系可预测钢筋在腐蚀环境中的力学性能,从而评估腐蚀环境中结构的安全性,为结构的维修和加固提供指导。锈蚀对钢筋的力学性能影响主要体现在锈蚀率较高(5%以上)且呈不均匀锈蚀时,钢筋屈服强度、抗拉强度和极限伸长率会下降^[3]。

锈蚀钢筋的本构关系可用力学模型表示。张伟平等^[43]在已有锈蚀钢筋力学性能数据库的基础上得到了锈蚀钢筋平均截面积与最小截面积之比服从Gumbel极值分布,并据此建立了锈蚀钢筋的确定性本构关系。Yu^[44]等对68根钢绞线进行了人工锈蚀和单调拉伸试验,建立了锈蚀预应力筋本构关系的双线性模型。Li等^[45]在假设锈蚀对钢筋的影响只导致钢筋截面面积的局部减小的基础上,建立了锈蚀钢筋力学性能的理论本构模型,并利用双线性弹塑性本构方程,推导出考虑点蚀特性的锈蚀钢筋的广义等效应力—应变方程。

本构关系的建立通常采取一些假设(如忽略材料非线性特性与温度效应,人工腐蚀等同自然腐蚀等),这些假设导致模型在某些条件下预测结果不准确。

2.1.2 锈蚀量与锈胀时间预测模型

锈蚀量与锈胀时间对于评估结构安全,规划维护以延长结构使用寿命,有效管理桥梁及推动材料研发与改进具有重要意义。Zhang等^[46]回顾了既有的钢筋锈蚀模型,提出了钢筋横截面积临界损失率的预测模型,并结合平衡方程、协调方程和边界条件,通过迭代计算确定了钢筋截面积的临界损失率。过民龙等^[47]利用全卷积神经网络提出了一种锈蚀钢筋截面的检测方法。王磊与张建仁^[48]采用模糊时变概率模型,分析了钢筋截面面积在不同时刻的退化特征。Salami等^[49]基于机器学习模型研究了嵌入式自密实混凝土钢筋锈蚀的起始估计时间。

既有锈蚀量和锈胀时间的预测主要有物理模型、数学模型和机器学习模型等,这些模型在各自的适用条件下能作出正确预测,但同时也存在不足。如物理模型中基于氧气扩散控制机理的假设可能与实际情况不符,导致在某些条件下预测结果不准;数学模型中平衡方程、协调方程、边界条件、迭代计算和时变概率等需要较多参数,而这些参数的获取可能存在一定困难,准确性也得不到保证。机器学习模型需要大量的样本数据,且样本数据的

准确性和规模会影响预测结果。

2.1.3 混凝土锈胀开裂模型

混凝土锈胀开裂是结构寿命衰减的主要因素之一,通过研究锈胀开裂模型可以评估预测结构在寿命期内裂缝扩展情况,并制定有效的维护和加固策略,以提高结构可靠性和安全性。许多学者研究了钢筋锈蚀对裂缝扩展的影响,并提出了相应的模型。Zhang等^[50]考虑相邻纵向钢筋非均匀锈蚀对混凝土保护层开裂的影响,建立了用于研究混凝土保护层破坏行为的损伤模型,并通过模型模拟了相邻两根纵向钢筋的保护层裂缝扩展过程。Chauhan与Sharma^[51]考虑到环境温度和相对湿度的变化,将锈蚀产物的发展模拟为钢筋的径向膨胀,研究了混凝土在氯化物非均匀腐蚀下的劣化,建立了内嵌黏聚单元的有限元模型,并利用该模型预测了在热带海洋型和温带海洋型两种不同气候条件下混凝土的裂缝扩展形态。Fang等^[52]研究了非均匀锈蚀导致混凝土保护层开裂问题,并开发了二维相场模型,建立了随时间变化的非均匀锈蚀模型。Chen与Nepal^[53]研究了锈蚀钢筋临界攻击深度和混凝土保护层与钢筋直径比的关系以及不同混凝土保护层厚度构件的裂缝宽度随锈蚀水平的变化规律,结果如图2所示。从图中可知,裂缝宽度与锈蚀程度大致呈正相关,并且保护层厚度越小,开裂越早、裂缝宽度增长越快。

目前,锈胀开裂模型主要以数学模型为主。在大多数预测模型中,通常假定各种铁锈占比是恒定的。然而,铁锈的成分会受到不同环境条件和锈蚀机制的影响而发生变化。因此,使用固定的比例来模拟不同场景的锈蚀产物膨胀是不适合的。另外,在钢筋非均匀锈蚀的情况下,还需进一步考虑锈蚀

产物在周围混凝土中的分散以及二次和三次裂缝对氯离子进入混凝土的影响。最后,钢筋锈蚀存在较大的随机性,因此有必要开展锈蚀的随机分布对钢筋和混凝土力学性能退化的研究。

综上所述,研究锈蚀钢筋力学性能退化主要有数学模型、物理模型和机器学习模型等。各种模型都有优缺点。数学模型和物理模型计算精确度高,但是由于考虑因素不全面且很多参数很难确定,使计算结果与实际数据均有较大出入。机器学习模型基于已有的样本数据进行训练,按照学习算法来对结果进行预测;其优点是基于真实的样本值,缺点是需要大量的训练集,且预测结果可能存在一定的误差。表1列出了具有代表性的锈蚀钢筋性能退化模型。

2.2 预应力损失退化模型

预应力混凝土预应力筋(如高强度钢筋、钢丝或钢绞线)在长期服役下将产生预应力损失,影响因素包括材料特性(如混凝土收缩与徐变,钢筋松弛、锈蚀与疲劳等)、外部环境(如温度、湿度、荷载与化学腐蚀物等)和施工工艺(如张拉方法与张拉控制应力等)等。

材料特性方面,Yang等^[54]提出了一种基于混凝土收缩徐变、预应力筋松弛、非预应力钢筋存在以及预应力筋和非预应力筋锈蚀耦合效应的长期预应力损失预测模型,并介绍了考虑计算参数和模型不确定性的预应力长期损失概率分析方法。Nguyen^[55]提出了一种实现预应力损失实时监测的深度学习回归方法,用于预应力定量监测,并自动提取损伤敏感特征。Yang等^[56]提出了考虑混凝土收缩、徐变及预应力筋松弛相互影响的时变预应力损失预测方法。外部环境方面,崔宁^[57]研究了降温回温过

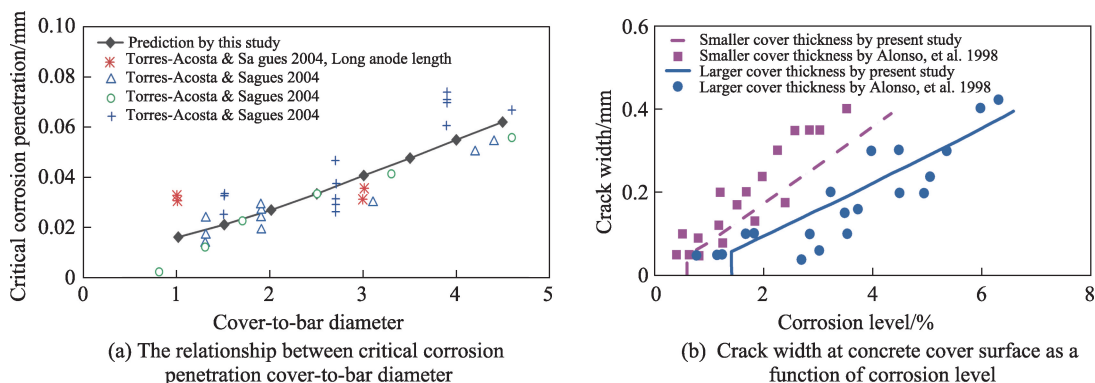


图2 钢筋锈蚀引起的混凝土开裂时间与裂缝宽度预测^[30,53]

Fig. 2 Prediction of concrete cracking time and crack width caused by steel corrosion^[30,53]

表1 锈蚀钢筋退化模型

Tab.1 Degradation model of corroded steel bars

Models	Formulas	Year and authors
Constitutive model of corroded steel bar	$\sigma_{sc} = \begin{cases} E_{sc}(\eta_s)\varepsilon_{sc}, & \varepsilon_{sc} \leq f_{yc}(\eta_s)/E_{sc}(\eta_s) \\ f_{yc}(\eta_s), & \varepsilon_{shc}(\eta_s) \geq \varepsilon_{sc} > f_{yc}(\eta_s)/E_{sc}(\eta_s) \\ f_{yc}(\eta_s) + E_{shc}[\varepsilon_{sc} - \varepsilon_{sch}(\eta_s)], & \varepsilon_{suc}(\eta_s) \geq \varepsilon_{sc} > \varepsilon_{sch}(\eta_s) \end{cases}$	2014, Zhang, et al. ^[43]
Constitutive model of corroded prestressed tendon	$\sigma_{pc} = \begin{cases} E_{pc}\varepsilon_{pc}, & \varepsilon_{pc} \leq \varepsilon_{p0c} \\ 0.85f_{puc} + (\varepsilon_{pc} - \varepsilon_{p0c})\left(\frac{0.15f_{puc}}{\varepsilon_{puc} - \varepsilon_{p0c}}\right), & \varepsilon_{pc} \leq \varepsilon_{p0c}, \eta_s < \eta_{s,cr} \end{cases}$	2022, Yu, et al. ^[44]
Degradation model of bond strength of corroded steel bar	$\sigma_{corr} = \frac{f_t}{1 - \nu^2} \frac{a}{W_u - W_{cr}} \left[\left(1 + \nu \sqrt{\beta_b^u}\right) (W_u - W_b) + (I_0^u - R_b) W_r^u + \nu \sqrt{\beta_b^u} \frac{I_0^u}{R_b} W_b \right]$	2016, Chen and Nepal ^[53]
Critical corrosion level of reinforcements	$\begin{cases} \delta_{rust} = \frac{(v_r + 1)(2v_r - 1)n\rho R \sqrt{(n-1)\rho + 1}}{E_r(2v_r(\rho - 1) + (n-2)\rho + 2)} p \\ \delta_{rust} - \delta_{rust,0} \leq \delta \end{cases}$	2019, Zhang, et al. ^[46]
Phase field model for corrosion-induced cracking	$\begin{cases} \nabla \cdot \sigma + b = 0, & \text{in } \Omega \\ \sigma \cdot n - f = 0 & \text{on } \partial\Omega_f \\ g'(\phi)H + \frac{G_c}{c_0} \left(\frac{\alpha'(\phi)}{l_0} - 2l_0 \nabla \cdot \nabla \phi \right) = 0 & \text{in } \Gamma \\ \frac{2G_c}{c_0} l_0 \nabla \phi \cdot n_\Gamma = 0 & \text{on } \partial\Gamma \end{cases}$	2022, Fang, et al. ^[52]
Rust expansion cracking model	$W = \frac{1}{(1 - \alpha) + (I_0^c - R_b)} \left[\frac{E}{f_t} \bar{u}_b(x_p) - R_b \right] \frac{\delta^{cr}(R_c, r)}{\delta^{cr}(R_c, R_b)} W_{cr} n + \frac{\delta^{cr}(R_b, r)}{\delta^{cr}(R_b, R_b)} W_c$	2016, Chen and Nepal ^[53]

程中由钢绞线和混凝土线膨胀系数差异引起的预应力变化。Lou等^[58]考虑了热膨胀、力学性能退化和钢绞线高温蠕变的影响,建立了钢绞线在高温下预应力损失的分析模型。Jeanneret等^[59]对混凝土高温暴露进行了检验,研究了火灾后暴露时间对预应力钢筋强度的影响。施工工艺方面,Shen等^[60]根据上海输水工程现场试验监测结果和数据调查,对钢丝在顶推施工过程中的应力进行了分析,建立了顶推预应力混凝土筒管的数值模型,并通过现场试验数据进行了验证。

预应力损失模型研究涉及多个方面,并取得了一定的成果。但预应力损失涉及因素多,随机性大,因此有必要开展在多因素随机作用下的预应力损失研究,并结合实际工程案例进行验证。

2.3 混凝土力学性能退化模型

混凝土受内外环境的影响会发生力学性能退化,主要表现为混凝土的弹性模量下降、本构关系变化与强度降低等。

2.3.1 本构关系模型

混凝土力学性能退化后的本构关系模型指考

虑混凝土力学性能退化因素,研究其对应力—应变行为的影响,是桥梁混凝土构件或结构损伤分析的基础。这些模型可以基于试验数据与观测数据,将混凝土的力学性能退化因素在本构关系中加以考虑,通过数学公式和参数来描述混凝土的退化行为。常见的混凝土材料劣化因素包括龄期效应、收缩、徐变、蠕变、疲劳与化学侵蚀等。这些因素会导致混凝土的强度、刚度和耐久性等发生退化。

混凝土本构关系可以通过试验分析和理论推导来获得。于沛琳^[61]通过试验对比分析了普通混凝土与硅灰混凝土抗硫酸盐侵蚀性能和能量演化规律,并基于Weibull统计损伤力学理论建立了损伤本构模型。Yang等^[62]基于应变等效假设和改进的Loland损伤理论,建立了单轴压缩损伤本构模型,并研究了冻融循环后箍筋约束再生骨料混凝土的单轴压缩性能,分析了损伤变量的演化规律。针对单轴压缩可能与实际受力不相符的问题,白卫峰等^[25]基于统计损伤理论及宏观试验,建立了考虑硫酸盐侵蚀影响的混凝土单轴、双轴压缩统计损伤本构模型,并分析了硫酸盐侵蚀混凝土过程。Bai

等^[63]对多固体废料混凝土进行三轴应力下的力学性能试验,建立了三轴应力下的破坏准则和本构压缩关系。以上研究大多考虑了单一因素的影响,没有考虑多因素的侵蚀。Jaafari等^[64]提出了基于本构法的多纤维有限元模型,来描述由收缩、蠕变、热应变和机械应变引起的早期损伤。Shang等^[65]研究了焚烧尾矿掺量和中间应变速率对次轻混凝土性能的影响,提出了适用性较好的次轻混凝土动力本构方程,并成功应用于数值计算。

随着有限元理论和计算机技术的发展,以有限元模型为代表的数值分析模型逐渐成为混凝土本构关系研究的重要方向。有限元模型可以更准确地模拟混凝土在多尺度、多物理场耦合和不同加载条件下的力学行为和损伤演化过程。除力学模型和数值分析模型外,近年来还出现了基于统计学和机器学习的模型,如基于人工神经网络、支持向量机和深度学习等预测模型。这些模型可以根据实验数据和监测数据进行参数校准,从而更准确地预测混凝土的力学性能退化和损伤演化过程。

2.3.2 强度时变模型

在实际工程中,混凝土的强度往往不是恒定的,会随着时间的推移而发生变化。强度时变模型是一种描述混凝土强度随时间变化的模型,可预测材料在不同时间点或加载阶段的强度变化。这些模型通常基于实验数据和理论分析,考虑了材料的老化、变形和损伤等因素。牛荻涛与王庆霖^[66]在总结国内外暴露试验和实测结果的基础上,分析了一般大气环境下混凝土强度的时变规律,利用统计方法建立了强度平均值和标准差的时变数学模型。高向玲等^[67]基于实测数据,采用假设检验及参数估计方法得到混凝土时变强度的概率分布函数,确立了上海地区民用建筑混凝土样本的强度均值和标准差与龄期的变化关系,建立了由回弹法和钻芯法测得的混凝土强度时变模型。为研究冻融环境作用下混凝土的时变强度,杨松等^[68]对中国东北部严寒地区在役钢筋混凝土结构混凝土抗压强度进行现场实测,采用非参数检验确定混凝土时变强度概率分布函数,并通过对相关参数与服役龄期之间的关系进行了回归分析。Fu与Feng^[69]开发了一种基于机器学习的方法来预测锈蚀钢筋混凝土梁在不同使用时间的剩余抗剪强度,提出的时间相关预测模型能够预测任意给定使用时间下锈蚀钢筋混凝土梁的抗剪强度。

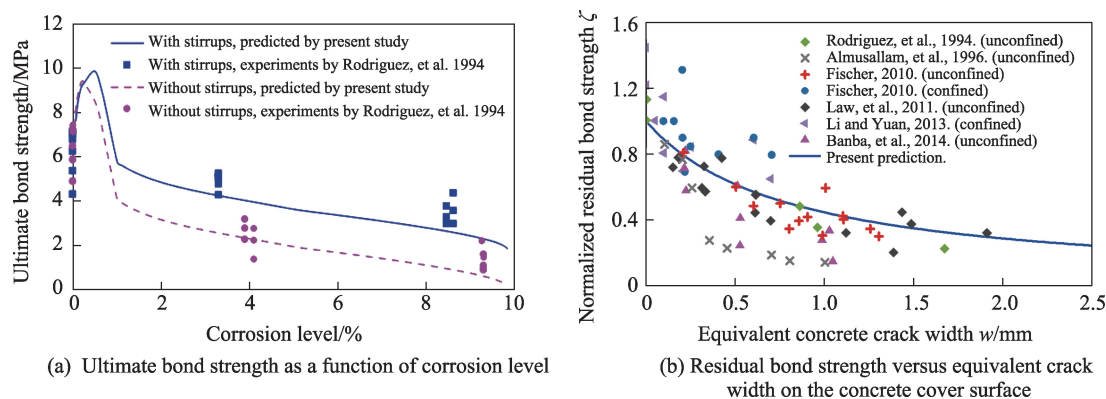
实测数据的统计模型具有较高的可信度,但实测数据的获取条件较苛刻。因此,目前研究混凝土强度时变方法主要还是基于实验数据和理论分析为主。由于客观条件的限制,无论是环境还是服役时间在实验室均无法精确模拟。

2.4 钢筋与混凝土之间的粘结强度退化模型

钢筋与混凝土之间的牢固粘结是保证二者共同工作的前提。当粘结不足时会导致结构承载力和刚度下降,直接影响钢筋混凝土结构的使用性能^[70]。因此研究混凝土与钢筋之间的粘结性能对保障结构安全和耐久性具有重要的意义。在役钢筋混凝土结构粘结强度退化受到多种因素的影响,如钢筋锈蚀、环境侵蚀、混凝土强度下降和混凝土开裂等都会降低其粘结性能。

研究人员对钢筋与混凝土之间粘结力学性能退化进行了大量研究。其中,考虑锈蚀对其影响的居多。Chen与Nepal^[53]在厚壁圆筒模型的基础上,结合混凝土的实际力学性能,提出了一种预测锈蚀钢筋极限粘结强度演变的力学模型,利用该模型预测了有无箍筋约束时极限粘结强度随锈蚀率变化的曲线,并与已有的试验结果进行了对比,相关结果如图3(a)所示;从图可知,配有箍筋的构件粘结强度明显高于未配箍筋的构件,粘结强度在钢筋锈蚀率较小时保持上升趋势,随后迅速下降,最后保持一个缓慢的下降趋势。

为了研究锈蚀率、裂缝宽度和粘结强度之间的关系,Tahershamsi等^[71]利用暴露在自然腐蚀环境中的13根钢筋混凝土梁进行了锚固能力测试,并通过质量损失率和三维扫描两种方法测量其锈蚀水平。Kivell^[72]研究了钢筋锈蚀率为0至25%时对粘结性能的影响,并利用试验结果建立了依赖于腐蚀和约束的粘结滑移模型。为了定性和定量的研究锈蚀程度对钢筋混凝土板构件粘结强度和展开长度的影响,Kearsley与Joyce^[73]开展了锈蚀混凝土板的弯曲试验。Bhargava等^[74]根据已有的拉拔试验和弯曲试验研究数据统计,归纳得出了钢筋锈蚀对粘结强度影响的数学模型。除锈蚀率外,混凝土裂缝宽度也是评估粘结强度的理想指标,Chen等^[75]在研究锈蚀钢筋混凝土环形截面柱的剩余承载能力时推导了归一化残余粘结强度与混凝土保护层表面等效裂纹宽度的关系曲线,并与已有试验数据进行了比较,结果见图3(b);由图可知,钢筋粘结强度在开裂初期下降迅速,在开裂后期下降缓慢,当裂缝

图3 锈蚀率和裂缝宽度对粘结强度的影响^[53,75]Fig. 3 Effect of corrosion rate and crack width on bond strength^[53,75]

宽度较大时,由于箍筋的约束,钢筋的粘结强度能维持在一个较小的值。

针对其他混凝土材料,Wu等^[76]对5种复合石灰石钢筋混凝土在硫酸盐冻融环境下进行了粘结性能退化试验研究,结果表明石灰石粉和粉煤灰降低了极限黏结强度,增大了劈裂破坏的滑移峰值。Gong等^[77]通过试验研究了碳纤维增强聚合物与锈蚀开裂钢筋混凝土界面的粘结性能。Wang等^[78]基于分层网络技术,利用有限元模型对钢筋混凝土粘结界面损伤过程进行了多尺度分析。

目前,钢筋的粘结退化模型大都是基于试验模型,而基于数据驱动模型与基于有限元模型分析的较少。锈蚀对钢筋粘结退化方面,主要考虑主筋锈蚀的居多,考虑箍筋锈蚀的较少。粘结试验方法主要以中心拉拔试验为主,其次为梁弯试验,梁端式试验较少。由于粘结问题的特殊性,当前大部分粘结试验方法都不能充分地反映实际构件中的粘结状态,每一种试验方法都有自身的优缺点,获得理想的粘结试验方法仍然是一个值得探索的课题。另外,目前的研究大都局限于分析混凝土材料、环境影响、钢筋锈蚀率、箍筋间距、保护层厚度和疲劳等因素下对粘结强度关系的影响,而缺乏对钢筋在锈蚀率接近的情况下,钢筋直径、类型和位置对粘结性能的对比研究。

3 钢筋混凝土结构力学性能退化模型

钢筋混凝土结构力学性能退化规律是实现结构科学运维的关键。结构力学性能退化不仅受服役环境的影响,还受材料力学性能的影响。如钢筋锈蚀对结构力学性能的影响见图4。钢筋混凝土结

构力学性能退化可分为锈蚀钢筋引起的退化模型、结构预应力筋损伤退化模型和结构疲劳损伤退化模型。

3.1 锈蚀钢筋引起的退化

锈蚀钢筋混凝土结构力学性能退化的研究近年来越来越得到重视。既有研究考虑了单因素或多因素耦合作用,采用试验研究、理论分析以及数值模拟等方法,针对不同构件开展了锈蚀钢筋混凝土结构的残余力学性能评估。研究对象以混凝土梁为主,其次是竖向承重的混凝土柱构件,针对钢筋混凝土板、剪力墙、基础等构件的研究较少。根据不同的研究对象,提出了针对性的结构力学性能退化模型。

在锈蚀钢筋混凝土梁方面,钢筋锈蚀主要在减小钢筋截面积,引发混凝土开裂、剥落,以及降低钢筋与混凝土之间的粘结强度等三个方面影响混凝土梁的承载能力。Chen^[79]基于钢筋锈蚀引起的钢筋截面损失、屈服强度降低和粘结强度退化,提出了一种评估钢筋锈蚀引起的混凝土裂缝扩展和结构抗力退化的方法,通过该方法预测了锈蚀混凝土梁在服役期间结构性能的演化,并估算了其剩余使用寿命。彭建新等^[80]基于试验研究了“锈蚀-加固-锈蚀”钢筋混凝土梁的力学行为及承载力,发现锈蚀梁和锈蚀钢板加固梁的跨中截面应变基本符合平截面假定,但锈蚀加固再锈蚀梁不符合此假定。Jiang等^[81]基于不同的失效模式建立了锈蚀钢筋混凝土梁的承载力计算模型,通过96组未锈蚀梁以及421组锈蚀梁的试验结果对比,验证了所提方法的有效性。

对于竖向承重的混凝土柱构件,其性能退化对

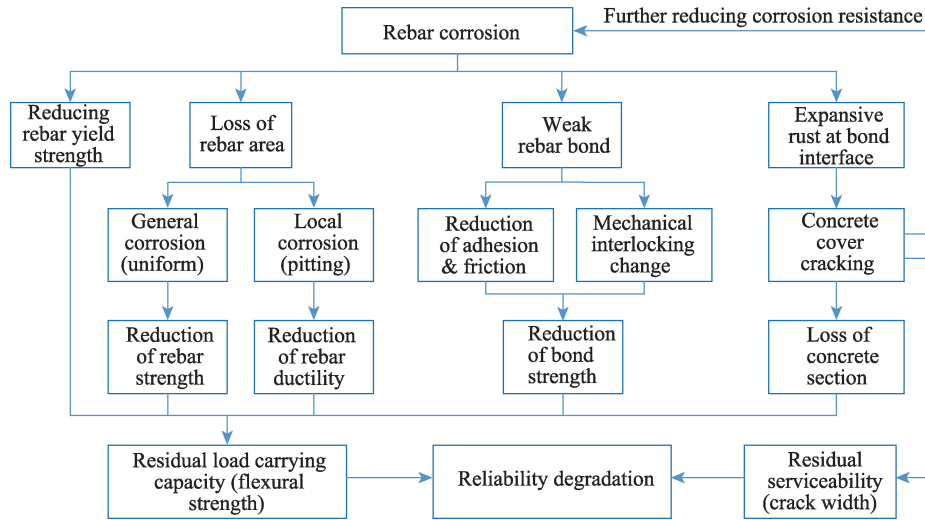


图4 钢筋锈蚀对结构力学性能的影响路径

Fig. 4 Influence path of reinforcement corrosion on structure mechanical properties

结构整体的安全性与可靠性有较大影响。相较于混凝土梁,钢筋的锈蚀和混凝土的开裂与剥落还将引起柱内纵向钢筋的屈曲。Wang与Liang^[82]通过开展试验与理论研究,分析了局部粘结失效对钢筋混凝土柱承载力的影响。Zaghian等^[83]提出了基于状态的锈蚀模型,通过有限元分析研究锈蚀对偏心荷载作用下桥墩的极限承载力、刚度和延性的不利影响,生成不同锈蚀程度的桥墩相互作用图,并引入新的安全裕度。基于对锈蚀引起的材料损伤以及结构强度退化机理的分析,并考虑锈蚀程度、损伤位置、受力状态以及截面形式对钢筋混凝土柱构件力学性能的影响,Chen等^[84-85]建立了锈蚀钢筋混凝土柱承载力理论与计算模型,并进一步预测了锈蚀柱的残余寿命。金浏等^[86]将混凝土看作三相复合材料,考虑锈蚀对钢筋、混凝土保护层和粘结强度退化等因素,建立了三维细观精细化有限元模型,分析了锈蚀率和偏心率对钢筋混凝土柱力学性能的影响。

在锈蚀率低的情况下,受弯梁截面和小偏心柱截面平均应变分布基本上符合平截面假定。钢筋锈蚀率增大时,构件逐渐向无粘结构件转变且破坏模式逐渐转变为脆性破坏。由于构件性能退化的影响因素较多,单纯从理论上或通过试验建立一个统一的数学模型难以实现。目前,对锈蚀钢筋混凝土构件斜截面抗剪的理论成果较少,有待进一步研究。

3.2 结构预应力筋损伤

预应力筋损伤对结构的安全性和耐久性危害极大,预应力筋损伤包括预应力损失和预应力筋锈

蚀,而钢筋锈蚀前面已详细讨论。预应力损失会导致桥梁的承载力降低,从而增加桥梁的失效与倒塌风险。此外,预应力损失会引起结构的过度变形,导致桥梁出现裂缝,进而影响其耐久性等。

预应力损失对结构力学性能的影响已有大量的研究。Breccolotti^[87]基于材料非线性、预应力损失以及超静定结构中梁段应力重分布,提出了预应力损失对连续预应力混凝土桥梁振动频率影响的数值计算方法。曹大富等^[88]对预应力混凝土梁通过快速冻融试验方法获得材料受压应力—应变曲线,再根据等效应力图创建了冻融后预应力混凝土梁极限承载力的计算模型。宋佳杰^[89]以广东省佛山市华阳特大桥为例,运用有限元模拟软件计算出连续梁桥在悬臂施工期间和成桥后的预应力损失对线形的影响。

对预应力损失性能退化模型的研究主要采用数值仿真、试验研究或二者相结合的方法。然而,不论是使用数值仿真还是试验研究得出的结论,与实际情况都存在差距。这种差距主要是因为预应力混凝土结构的影响因素较多。目前,预应力损失与刚度下降和裂缝开展等关键理论仍需深入研究。

3.3 结构疲劳损伤

混凝土桥梁在长期服役过程中,经常受到交通重载(超载货车,货运火车等)、温度应力、地震与风振等作用,这将会加速桥梁的疲劳损伤,降低其力学性能,增加安全风险,甚至引发严重的安全事故^[95-96]。因此,对混凝土桥梁结构疲劳损伤的研

究具有重要意义。

Gao等^[90]通过引入混凝土细观随机疲劳损伤本构模型,并结合基于随机调和函数的交通荷载模拟方法,构建了随机交通荷载下混凝土桥梁疲劳损伤估计的理论框架。Aloisio等^[91]基于混凝土疲劳模型和混凝土强度相关的不确定性,提出了评估混凝土铁路桥梁疲劳寿命的概率方法。Yu等^[92]针对桥梁交通应力时程不存在明确的循环历史问题,通过推导裂纹扩展动力学函数,提出了基于时间的疲劳裂纹扩展模型,并用于预测交通荷载作用下桥梁的疲劳损伤。

然而,目前对桥梁疲劳损伤研究大部分集中在构件层面,部件和整体层面研究较少。另外,由于进行足尺试验难,大部分试验是按缩小比例进行,有些也辅以有限元模拟来进行研究。随着大数据、移动通信和人工智能时代的到来,对结构疲劳损伤的研究不仅可以考虑参数的随机性,还可以考虑参数的时变性,结构健康监测技术对桥梁进行实时数据采集为其提供了可能。另一方面,如今机器学习越发强大,在试验数据量足够的前提下,可考虑利用神经网络分析多因素耦合作用下桥梁疲劳性能的影响。最后,我国对公路和城市道路桥梁还未制定疲劳设计所需的车辆荷载谱,对在役桥梁实际荷载作用下的疲劳还有待进一步研究,混凝土桥涵设

计规范对疲劳的要求也有待补充。

3.4 性能退化模型

混凝土桥梁结构力学性能退化模型可分为确定性模型、模糊模型与随机模型等,如图5所示。确定性模型的优点是预测简单,计算精度高;缺点是忽略了不确定性因素后与实际性能退化有较大偏差。模糊模型考虑了信息不全面和参数模糊性的客观存在,在灵活性和可解释性方面具有一定的优势。随机模型包括基于状态的模型和基于时间的模型。

基于状态的退化模型有马尔科夫链模型,优点是提供了一个不确定性建模的方法,与现有的桥梁状态评定兼容,在桥梁网络层面非常实用;缺点是条件状态之间的过渡平稳均匀,增量与时间无关。基于时间的退化模型一般是把处于特定条件状态的持续时间作为一个随机变量,如韦布尔分布、伽马分布、半马尔可夫模型等概率分布来描述退化过程。此模型的优点是考虑了与时间相关参数的随机性,缺点是忽略了与结构可靠度相关的不同元素之间的相互作用,而且参数估计复杂,特别是在缺乏条件实测数据的情况下。表2列举了几种重要的随机退化模型。

有限元模型可以用于快速分析桥梁性能退化趋势,但是需要基于某些假设进行建模,这些假设可能与实际情况存在较大的差距,导致模型与实际

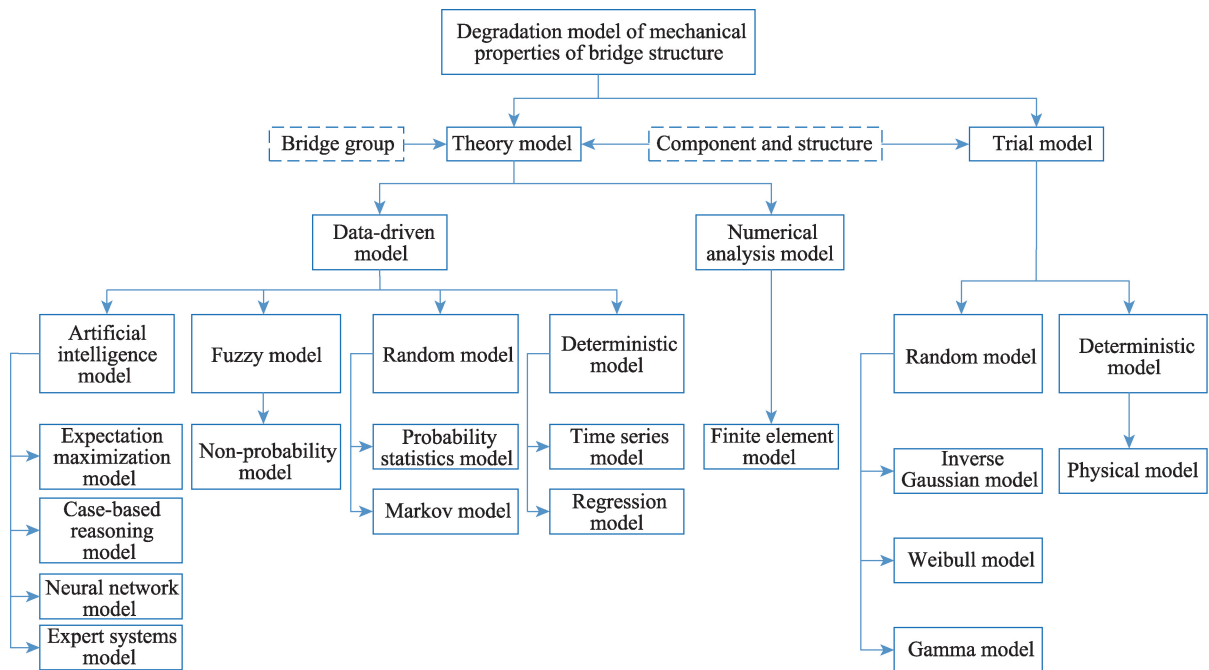


图5 桥梁结构力学性能退化模型

Fig. 5 Degradation models of mechanical properties of the bridge structure

表2 几种重要的随机退化模型

Tab.2 Several important theoretical formulas of stochastic degradation models

Stochastic models	Formulas	Year and authors
Weibull model	$f(T_i) = \frac{\beta_i}{\eta_i} \left(\frac{T_i}{\eta_i}\right)^{\beta_i-1} e^{-\left(\frac{T_i}{\eta_i}\right)^{\beta_i}}$	2019, Fang and Sun ^[108]
Gamma model	$f_{S(t)}(S) = Ga(S \eta(t), \lambda) = \frac{\lambda^{\eta(t)}}{\Gamma(\eta(t))} S^{\eta(t)-1} e^{-\lambda S}$	2018, Chen ^[79]
Inverse Gaussian model	$f(y a, b) = \sqrt{\frac{b}{2\pi y^3}} \exp\left[-\frac{b(y-a)^2}{2a^2 y}\right], y > 0$	2020, Chen ^[98]
Semi-Markov model	$p_{ij}(kh) = \delta_{ij}(1 - F_i(kh)) + \sum_{l=1}^m \left(\sum_{\tau=0}^k \omega_{\tau} p_{ij}(kh - \tau h) Q'_i(\tau h) \right)$	2019, Fang and Sun ^[108]

情况不符。物理模型对于构件和材料层性能退化分析较具可靠性,但对于结构和网络层成本代价高,并且这些模型不太好直接集成到网络桥梁中。人工智能模型可以在一定程度上填补桥梁不定期检查造成的性能评估与预测的空白,但预测精度还需要进一步研究^[93]。

4 桥梁服役性能评估

桥梁服役性能评估方法主要有两类,即数据驱动的服役状态评定方法与物理模型驱动的结构性能评估方法。数据驱动的服役状态评定方法是利用既有桥梁的历史检查数据,对桥梁的服役状态进行评定,包括技术状态评定和适应性评定(如承载能力、通行能力、抗灾害能力和耐久性),但目前主要以技术状态评定为主。物理模型驱动的结构性能评估方法主要是利用结构可靠度理论,对既有桥梁的结构性能进行定量评估。

4.1 技术状态评定方法

目前许多国家根据自身实际制定了相关的桥梁技术状态评定标准,大部分标准是在层次分析法理论的基础上进行相应的改进编制而成。层次分析法是多指标综合评价的一种定量方法,能把定性因素定量化,并能在一定程度上减少主观因素的影响,使评价更加合理。但该方法把定性因素定量化时没有考虑到事物的模糊性和不确定性,此外检查人员在检查时具有主观判断和不精确性。针对此问题, Sasmal 与 Ramanjaneyulu^[94]提出了一种层次分析方法和模糊法相结合的技术状态评定方法,并开发了一个计算机程序以方便快速评定。阳逸鸣^[95]基于改进的证据理论和模糊层次分析法提出了一种与实际较为接近的综合评定方法,该方法能

解决模糊数学在评估存在较大差异指标时可能会失效的问题。刘来君等^[96]把贝叶斯方法引入层次分析法中,提出一种基于改进贝叶斯理论的桥梁状态评估方法,以此来考虑构件的时变效应。

桥梁技术状况评定主要是为桥梁养护决策提供依据,在对桥梁进行评定时,应根据本国桥梁实际情况,同时借鉴国外相关方法,采用更加先进的理论制定更符合实际的新技术评定方法。

4.2 可靠度理论评估方法

桥梁服役性能的可靠度评估可为桥梁安全预警与维修养护提供科学指导。因此,一直以来在役桥梁的可靠度分析都是研究的热点。目前,在役桥梁结构可靠度分析涵盖了时变可靠度、时空可靠度、非概率可靠度和多尺度可靠度等多个方面,但以时变可靠度为主。

时变可靠度评估方面。Chen等^[84]研究了钢筋锈蚀对钢筋特性、开裂后混凝土性质,以及钢筋与混凝土之间的粘结强度的影响规律,提出了锈蚀钢筋混凝土柱的时变残余承载力的评价方法。陈梦成等^[97]基于抗力和荷载相互独立的随机过程退化,使用条件概率严格得到了失效概率计算表达式,并以此分析某T型梁桥服役20年的抗力衰减规律。陈龙与黄天立^[98]采用逆高斯随机过程描述了在役钢筋混凝土桥梁的抗力退化过程,同时采用复合泊松过程描述车辆荷载效应,建立了基于抗力-车辆荷载效应的双随机过程在役钢筋混凝土桥梁时变可靠度分析方法。Zhou等^[99]通过模拟随机车辆荷载,考虑混凝土收缩徐变,提出了一种计算简支预应力混凝土梁桥时变可靠度的方法。以上研究中都把抗力的概率分布类型假定为对数正态分布,但当考虑时隔较远的抗力时,其概率分布类型是否依

然服从对数正态分布,即是否依然服从Lindeberg定理需要进一步分析和统计确定。

其他可靠度评估方面。Aryai等^[100]考虑锈蚀深度的空间变异性,基于随机场理论建立了铸铁表面锈蚀时空可靠性模型,并对铸铁水管道的结构完整性进行了评估。但该模型是基于均匀的高斯随机场,没有考虑非均匀的情况。Nguyen与Le^[101]提出了对称三角模糊数的等价正态随机变量的公式,并将这些等效随机问题转化为结构的基本可靠度问题,从而建立利用经典可靠度理论计算结构模糊可靠度的新方法。Wang等^[102]介绍了一种基于可靠度的非概率可靠性结构优化方法,建立了基于面积比和可信特征距离的可靠性指标,提出了可信序列优化策略。Zhou等^[103]提出了一种基于单位可靠度和相关理论的方法,能够在系统全生命周期内,以最小的投入评估出系统最合理的可靠度。这种方法被称为系统可靠性绿色评估方法,为多尺度可靠度评估提供了全新的思路。由于正常使用极限状态在工程中难以确定,因此在评价正常使用极限状态可靠度时可考虑采用模糊可靠度来分析。非概率可靠度的不足主要体现在数据获取和处理困难、考虑因素的不全面性以及缺乏统一的计算方法和标准。概率体系和非概率体系的度量方法具有一定的内在联系,在分析初期信息量不足时可采用非概率体系,随着信息的积累可以在原分析结果的基础上进行概率体系下的可靠度分析或重新进行严密的概率可靠度分析。多尺度可靠度作为一种全新的可靠度评价方法,在桥梁可靠度研究中目前还应用较少,但随着相关理论和技术的不断发展,在桥梁可靠度评估中将会越来越受到重视。

桥梁性能评估除了以上方法之外,还有特尔斐专家评估法、专家系统法、灰色关联度法和结构反演法等。采用何种方法进行评估应该根据实际情况考虑,如采用标准化的技术状况评定法适合桥梁群,采用可靠度评估方法主要是针对单座桥梁的构件或部件进行评估。

如今随着智能传感、移动通信、云计算和人工智能的飞速发展,可考虑构建基于桥梁智慧监测理论的数字孪生系统。采用智能传感技术对数据进行采集,5G通信技术进行数据传输,神经网络算法对多源数据进行清洗、降噪、筛选和融合,云计算对桥梁进行有限元建模分析;从而达到虚实结合,实

现对桥梁的多尺度、全方位的实时动态性能评估。国内有部分学者正在进行此方面的研究,如许肇峰等^[104]建立了以实测交通流荷载为连接的桥梁数字孪生系统,用于评估在役斜拉桥结构的健康状态。Dan等^[105]开发了机器视觉与动态称重系统相融合的全桥面交通荷载监测技术,并将其初步应用于上海附近的一个桥梁群的数字孪生系统中。

5 剩余使用寿命预测

随着桥梁数量的不断增加以及交通运输量的持续增长,越来越多的桥梁出现服役性能退化现象。因此,合理预测桥梁的剩余使用寿命,并在适当的时间进行保养和维护,成为桥梁安全高效运行的关键。这不仅能够节约大量资源和资金,还能有效避免因桥梁结构性能缺损引发交通事故。

5.1 预测方法类型

桥梁寿命预测方法大致可以分为经验法、类比法、加速试验法、人工智能法、物理模型法和概率分析法等^[3,106]。经验法是基于专家已有经验进行估计的方法,其结果的可信度与专家的经验 and 水平直接相关,具有较强的主观性,经验法可用于初步估计,但在面对新情况和新环境时可能不具备可行性。类比法是根据在相似环境中已安全使用若干年的相似结构来推断目标结构的使用寿命,它可以用于定性的初步判断。然而,实际上具有相似环境的相似结构并不多,所以类比法通常作为经验法的辅助手段。加速试验法是基于实验室材料快速退化与实际结构材料退化的关系来计算结构的寿命。该方法一方面需要一定的试验条件,另一方面由于加速退化与实际退化的关系尚未完全了解,导致预测结果可能存在一定的误差。人工智能法基于机器学习原理,利用现有数据进行算法编程训练,从而对后期结果进行预测。其中,人工神经网络法是人工智能法中较为常见的一种方法。物理模型法是在基于材料性能退化规律的基础上建立的退化模型。它具有较强的科学性和逻辑性,在混凝土和钢筋劣化规律认识不断深入的情况下,物理模型法被广泛应用。概率分析法根据是否考虑时间可分为数理统计法和可靠度法。数理统计法的精度取决于样本空间的大小,结果具有普遍性,不适合针对具体结构进行预测,常用的有回归分析法和马尔可夫法。可靠度法是在物理模型的基础上考虑时间

因素而形成的方法,是评估结构使用寿命的理想方法,也是当前研究的热点。

5.2 典型的预测方法

回归分析预测法。回归分析法预测是基于历史检测的实际桥梁技术状态数据,通过建立技术状态与时间的函数关系模型,来预测未来桥梁技术状态的一种方法。当涉及多参数的非线性拟合时,常采用最小二乘法^[107]。该方法要求数据真实、样本容量足够且变量之间存在相关关系,另外,对预测值要进行综合分析和评估才能考虑是否采用。

马尔可夫预测法。马尔可夫过程是一种基于状态的随机方法,该方法假设状态上的无记忆性和时间上的平稳增量,在预测桥梁寿命方面具有计算简单的优势。鉴于无记忆性的假设与实际不符,Fang与Sun^[108]提出了一种基于威布尔分布的城市桥梁退化预测的半马尔可夫过程模型,对城市桥梁的使用寿命、桥面系统和子结构的转移概率以及未来退化引起的状态等级比例变化进行了预测,结果表明半马尔可夫模型在网络级的整体预测精度优于回归分析方法。Chen与Mehrabi^[109]利用半马尔可夫随机过程模拟了土海堤结构抗力(堤顶水位损失和土体渗流长度减少)的退化情况。由上可知马尔可夫模型提供了一个解释不确定性的框架,与现有的定性离散桥梁状态评级系统兼容,在网络层面非常实用,但破坏状态是基于桥梁系统的定性条件评级,与可测量的物理量无关,具有较强的主观性。

人工神经网络预测法。神经网络在桥梁寿命预测中应用较广的是BP神经网络,通过既有的样本检测数据对神经网络进行反复学习、训练和测试,用复杂的非线性函数去模拟退化,寻找最优解以获得所需要的参数来实现对桥梁寿命的预测^[110]。徐凤月等^[111]通过BP神经网络模型,采用附加动量法和自适应调整法对某混凝土桥梁剩余使用寿命进行了预测。Srikanth与Arockiasamy^[93]针对佛罗里达州的三座钢筋混凝土桥桥面,利用神经网络预测缺失年份的状况评级,并对其寿命进行预测。尽管神经网络应用较广,但该方法需要建立在一定数量的样本上,且学习训练时容易出现不收敛或收敛速度慢等问题,因此还有待于研究和改善。

可靠度预测法。由于桥梁的寿命与时间有关,因此通常利用时变可靠度来预测桥梁的寿命。其中,基于时变的“抗力-效应”物理模型是一

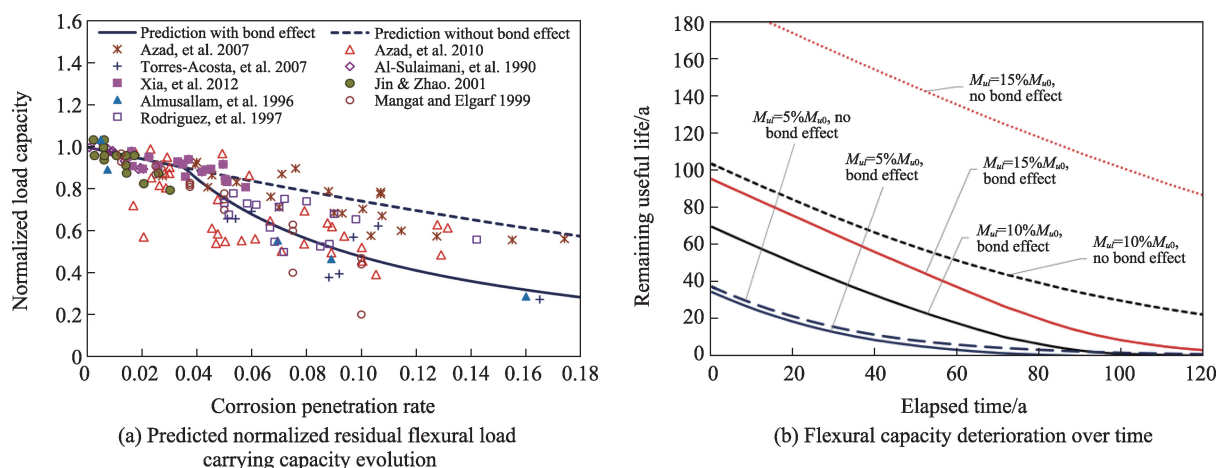
种常用的方法,用于求解临界可靠度指标。剩余寿命可以通过临界可靠度指标所对应的时间与当前时间之差来计算。计算临界指标有解析解和近似解,由于解析解难以计算,因此工程中一般采用近似解,如验算点法、中心点法和蒙特卡洛模拟法。李杰等^[112]基于抗力衰减和可靠度理论,考虑混凝土碳化、钢筋锈蚀、预应力损失和荷载效应等因素,以临界可靠指标的形式建立预应力混凝土桥使用寿命预测方法。郭冬梅^[113]利用验算点法对某桥梁的相关构件时变可靠度进行了计算,并进行了寿命预测。Chen^[79]基于混凝土开裂演化和抗弯能力退化的伽马随机过程,提出了锈蚀损伤钢筋混凝土梁的剩余抗弯承载能力评估方法,并以此预测其剩余使用寿命,结果如图6所示。从图可知,荷载大小与粘结效应对梁的剩余使用寿命影响很大。可靠度预测法适用于单座桥梁分析,具有较强的逻辑解释性。但退化模型在数据需求和建模方面代价较高,因此对于大型桥梁来说效率相对较低。

除以上几种典型的预测方法外,还有其他预测方法,如灰色理论预测方法与威布尔分布预测方法等。由于桥龄寿命影响因素多且有些过于复杂,难以进行精准的预测,因此更需深入研究。

6 预防性维护策略制定

桥梁结构力学性能发生退化后,需要及时进行养护维修,以有效降低退化速度,提高在役桥梁服役性能水平,延长结构使用寿命。对于如何养护维修,需要考虑最佳时间,过早会造成资源浪费,过晚又达不到效果。

养护工程根据养护目的和养护对象,可分为日常养护、预防养护、修复养护、专项养护和应急养护。根据养护时间点不同,桥梁养护又可分为矫正性养护和预防性养护^[114]。相比矫正性养护,预防性养护在于养护时间的提前性,养护时间需要根据养护的经济性和桥梁的技术状况等科学确定。预防性养护的核心工作主要是成本效益分析及最优养护时机分析,成本效益分析主要是对桥梁养护成本的计算与预测,分析养护方案能带来的社会经济效益。我国预防性养护目前主要体现在道路方面,桥梁还没有形成一套完整的体系,未来桥梁养护将主要以预防性养护为主^[115]。

图6 混凝土梁残余承载力评估与使用寿命预测^[79]Fig. 6 Evaluation of residual bearing capacity and prediction of service life of concrete beams^[79]

桥梁维修有基于状态和基于可靠度两种方法,目前应用最广的是基于状态的维修方法,基于可靠度的维修方法还处于探索阶段,是未来的发展方向,预防性养护维修与可靠度的大致关系见图7。另外,维修不仅要考虑费用问题,也要考虑桥梁状况、桥梁可靠度和桥梁寿命等方面的问题,尽可能做到在约束条件下的多目标优化。如何做到多目标优化涉及到优化理论和方法问题。修复之后能否达到既定的目标要求,又需要对其进行科学合理

的评估。

6.1 多目标优化的维护策略

桥梁维护的最优方案在考虑多种决策目标时会变得更加复杂。除了控制成本和增加使用寿命之外,高可靠性和良好的技术状态也是需要考虑的目标。因此,如何在权衡众多目标的情况下,综合考虑并得出最优的维护方案,是当前亟须解决的问题。

Shim等^[116]以桥面性能和养护成本两方面作为

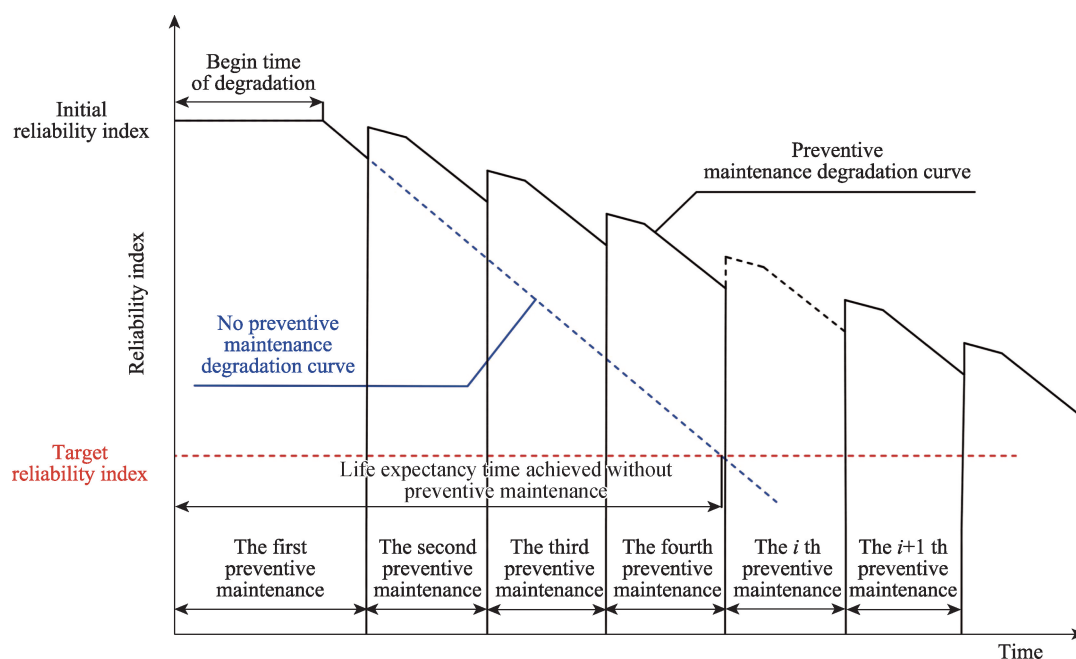


图7 预防性维修与可靠度指标关系图

Fig. 7 Relationship between preventive maintenance and reliability index

优化目标,提出一种适用于非凸问题且只产生 Pareto 最优解集的改进求解方法。Yang 与 Frangopol^[117]针对疲劳关键细节的检查和维修问题,以预期生命周期成本、预期检查成本和预期维护成本三方面为优化目标,利用动态贝叶斯网络进行优化计算,得到生命周期成本最低的检查维护方案。Xin 等^[118]提出了一种基于长短期记忆模型的路面粗糙度指数序列预测方法,结合系统可靠性分析和遗传算法进行路面维护优化,通过遗传算法得到最优的维护策略,在预测效益、延长服务寿命和生命周期成本之间取得最佳平衡。Chen 与 Mehrabani^[109]根据土堤全寿命周期失效率分布和全寿命成本分析,建立成本最小化和风险最小化双重目标函数,获得了土堤维护策略的最优解集。戴理朝等^[119]以桥梁网络整体性能最优、碳排放量和维修总成本最小为目标,以桥梁个体满足最低性能要求为约束条件,构建了桥梁网络多目标维修决策优化模型。

在确定最佳桥梁维修策略时,需要综合考虑桥梁的实际情况,并采用多目标优化方法。这意味着不仅要考虑单一种类的维修措施,还可以考虑多种维修措施的组合方案,以实现更好的维修效果。多目标优化的目标可以包括但不限于安全性、养护费用、社会影响和环境保护等方面。

6.2 智能优化算法

传统优化算法能较好地解决单极值问题,但在面临多极值问题时往往遇到困难。但智能优化算法对比却表现出色。智能优化算法通过模拟自然界的进化、群体行为或其他启发式方法,能够有效地搜索解空间中的多个最优解。智能优化算法有遗传算法、蚁群算法、粒子群优化算法等。这些算法不依赖于问题特定的信息,可以应用于各种复杂的优化问题。在桥梁多目标养护维修方面,智能优化算法也得到了广泛的应用,特别是基于遗传算法和蚁群算法的桥梁养护维修优化方法已经取得了显著的成果。

智能优化算法为桥梁维护策略的多目标优化提供了有效的方法。Hosein 等^[120]将遗传算法与离散事件仿真相结合,提出了基于仿真的桥梁维修优化框架,以确定考虑维修资源有限的最佳维修计划,实际案例研究表明该方法具有查找最佳维护计划的能力,提高了优化计划的效率以及估算成本的准确性。Abdelkader 等^[121]考虑构件性能指标最大

化、成本最小化、交通中断持续时间最小化和环境影响最小化四个主要目标建立优化模型,引入指数混沌差分进化算法对优化模型进行计算。Zhang 与 Wang^[122]把桥梁多个参数整合到整体网络性能和维修成本的全局目标函数中,利用元启发式优化算法对其进行求解,以获得退化桥梁网络中桥梁的优先维护等级。

智能优化算法在寻找全局最优解方面具有很大的优势,但也存在一些不足之处,比如算法需要大量计算资源,可能陷入局部最优解,对问题的建模与参数调整敏感和可能存在收敛速度慢等问题。尽管存在这些不足,智能优化算法仍然是解决许多实际问题的有效工具,并且在不断发展和改进中。

7 结束语

本文从桥梁材料劣化机理、材料力学性能退化、钢筋混凝土结构力学性能退化模拟、桥梁服役性能评估、剩余使用寿命预测和预防性维护策略制定等六个方面进行了阐述,分析了钢筋混凝土桥梁服役性能退化、评估、预测与提升等研究现状,指出了相关理论和研究的不足,得出以下结论:

1) 研究钢筋与混凝土的材料机理可为建立结构性能退化模型、预测结构的使用寿命以及制定最优的维修养护策略提供理论依据。在研究其劣化机理时,应充分考虑多因素耦合作用,并力求与实际环境相结合。另外,材料微观损伤对宏观力学性能影响的定量关系有待于进一步探索。

2) 结构力学性能退化有理论模型和试验模型等,各种模型各具特色,应相互借鉴,取长补短。针对不同材料与构件应科学的选择,并应考虑多模型相结合,综合对比得出最优结果。对于各种材料、构件和结构的性能退化研究,可以考虑真实环境下的多因素耦合力学性能退化试验,以获得与实际相匹配的数据。

3) 桥梁技术状态评定作为桥梁服役状态评估的一种方法,具有操作简单、实用性强等特点,但评定结果的准确性会受检查人员的主观性影响。而时变可靠度法为更加科学的评估桥梁服役性能提供了有效途径,但统计参数的精确性和随机因素的全面性对可靠度计算的准确性影响较大。对重要桥梁可考虑研究构建数字孪生系统,以对桥梁服役

性能进行实时动态评估。

4) 桥梁剩余使用寿命预测是桥梁智能运维中的一项重要内容,为科学制定养护和维修计划提供依据。目前,准确预测桥梁剩余使用寿命仍然具有挑战性,但明确材料劣化、结构力学性能退化和结构可靠度三者之间的内在联系对桥梁寿命预测具有关键作用。

5) 在进行桥梁养护维修时,应根据桥梁实际情况尽可能的确定各种优化目标,选择合适的优化方法,制定最佳维护策略,达到最好的维修效果。同时研究维修后的桥梁结构力学性能和维修效果,可为后期再维修提供技术支持。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2023-06-16(2).
Ministry of Transport of The People's Republic of China. Transport industry development statistical bulletin Of 2022[N]. China Transport News, 2023-06-16(2).
- [2] 淡丹辉. 桥梁工程结构智慧监测理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
DAN D H. Theory and practice of intelligent monitoring of bridge engineering structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [3] 张建仁, 王磊, 彭建新, 等. 服役钢筋混凝土桥梁时变可靠性评估与剩余寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
ZHANG J R, WANG L, PENG J X, et al. Time varying reliability assessment of reinforced concrete bridge in service and remaining life prediction[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [4] 武彤. 车辆超载对桥梁结构与使用寿命的影响分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
WU T. Analysis of the influence of vehicle overload on bridge structure and service life[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [5] WANG H, NIE D, LI P, et al. Effect of recycled concrete aggregate with different degrees of initial alkali-aggregate reaction damage on the mechanical behavior and porosity of self-compacting recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 363: 129797.
- [6] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
JIN W L, ZHAO Y X. Durability of concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [7] EKOLU S O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016(127): 306-320.
- [8] 姚韦靖, 庞建勇, 刘雨珊. 轻骨料混凝土抗碳化性能及微结构分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (4): 138-143.
YAO W J, PANG J Y, LIU Y S. Carbonation resistance performance and microstructure analysis of lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(4): 138-143.
- [9] 元艳妃. 珊瑚混凝土碳化深度影响因素及预测模型研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
YUAN Y F. Study on affecting factors and forecasting model of coral concrete carbonation depth[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021.
- [10] LIU P, YU Z, CHEN Y. Carbonation depth model and carbonated acceleration rate of concrete under different environment[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103736.
- [11] 蒋建华, 陈思安, 赵克寒, 等. 养护方式对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(4): 12-17.
JIANG J H, CHEN S A, ZHAO K H, et al. Effect of curing method on carbonation resistance of recycled concrete[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2022, 39(4): 12-17.
- [12] 王柳南, 陈家海, 郑舜元, 等. 机制砂混凝土抗碳化性能研究[J]. 混凝土, 2023(12): 170-174.
WANG L N, CHEN J H, ZHENG S Y, et al. Study on carbonation resistance of manufactured sand concrete[J]. Concrete, 2023(12): 170-174.
- [13] 张淑云, 陈猛, 杨旭龙, 等. 机制砂掺量对自密实轻骨料混凝土碳化性能的影响机理[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 314-320.
ZHANG S Y, CHEN M, YANG X L, et al. Influence mechanism of the content of manufactured sand on the carbonation performance of self compacting lightweight aggregate concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 314-320.
- [14] SHI X Y, ZHANG C, WANG L, et al. Numerical investigations on the influence of ITZ and its width on the carbonation depth of concrete with stress damage[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 132: 104630.
- [15] PAN H M, QIU Y X, JIANG H Q, et al. Carbonation

- depth assessment in shotcrete with various initial damage degrees and accelerator dosages: Experimental study[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 404: 133192.
- [16] ZHANG K, ZHANG K, BAO R, et al. A framework for predicting the carbonation depth of concrete incorporating fly ash based on a least squares support vector machine and meta-heuristic algorithms[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65: 105772.
- [17] LIU K, ALAM M S, ZHU J, et al. Prediction of carbonation depth for recycled aggregate concrete using ANN hybridized with swarm intelligence algorithms[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124382.
- [18] CHEN Z, LIN J, SAGOE-CRENTSIL K, et al. Development of hybrid machine learning-based carbonation models with weighting function[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 321: 126359.
- [19] NUNEZ I, NEHDI M L. Machine learning prediction of carbonation depth in recycled aggregate concrete incorporating SCMs[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 287: 123027.
- [20] JIN S, ZHENG G, YU J. A micro freeze-thaw damage model of concrete with fractal dimension[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 257: 119434.
- [21] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume change in hardened Portland cement paste during freezing [J]. *Highway Research Board*, 1953, 32: 285-297.
- [22] FAGERLUND G. The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze thaw resistance of concrete[J]. *Materials and Structures*, 1977, 10(2): 23-31.
- [23] GONG F Y, SICAT E, ZHANG D W, et al. Stress analysis for concrete materials under multiple freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2015, 13 (3): 124-134.
- [24] THAULOW N, SAHU S. Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization[J]. *Materials Characterization*, 2004, 53(11): 123-127.
- [25] 白卫峰, 刘霖艾, 管俊峰, 等. 基于统计损伤理论的硫酸盐侵蚀混凝土本构模型研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(2): 66-77.
- BAI W F, LIU L A, GUAN J F, et al. The constitutive model of concrete subjected to sulfate attack based on statistical damage theory[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(2): 66-77.
- [26] KLIUKAS R, JARAS A, LUKOŠEVIČIENE O. The impact of long-term physical salt attack and multicycle temperature gradient on the mechanical properties of spun concrete[J]. *Materials*, 2021, 14(17): 4811-4823.
- [27] 杨华全, 李鹏翔, 李珍. 混凝土碱骨料反应[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- YANG H Q, LI P X, LI Z. Concrete alkali aggregate reaction[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2010.
- [28] 刘峥, 韩苏芬, 唐明述. 碱-碳酸盐岩反应机理[J]. *硅酸盐学报*, 1987, 15(4): 302-308.
- LIU Z, HAN S F, TANG M S. Mechanism of alkali-carbonate reaction[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 1987, 15(4): 302-308.
- [29] 王胜年, 黄君哲, 张举连, 等. 华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析[J]. *水运工程*, 2000(6): 8-12.
- WANG S N, HUANG J Z, ZHANG J L, et al. An investigation on concrete corrosion of seaport wharf in south China and analysis of structures durability[J]. *Port and Waterway Engineering*, 2000(6): 8-12.
- [30] CHEN H P, ALANI A M. Optimized maintenance strategy for concrete structures affected by cracking due to reinforcement corrosion[J]. *ACI Structural Journal* 2013, 110 (2): 229-238.
- [31] ROBUSCHI S, TENGATTINI A, DIJKSTRA J, et al. A closer look at corrosion of steel reinforcement bars in concrete using 3D neutron and X-ray computed tomography [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 144: 106439.
- [32] TIAN Y, ZHANG G Y, YE H L, et al. Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 369: 130504.
- [33] 陈华鹏, 江钰, 刘昌雨. 锈蚀钢筋混凝土柱残余承载力研究[J]. *铁道学报*, 2023, 45(4): 166-174.
- CHEN H P, JIANG Y, LIU C Y. Residual loading capacity of corroded reinforced concrete columns[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(4): 166-174.
- [34] CHEN H P, NEPAL J. Stochastic modelling and lifecycle performance assessment of bond strength of corroded reinforcement in concrete[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2015, 54(2): 319-336.
- [35] 卢越. 碳化环境下碱矿渣混凝土钢筋锈蚀机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2022.
- LU Y. Research on steel corrosion mechanism of alkali-

- activated slag concrete in carbonation environments[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2022.
- [36] ZHAO S C, JING Y Y, LIU T, et al. Corrosion behavior and mechanism of carbon steel in industrial circulating cooling water system operated by electrochemical descaling technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139817.
- [37] 农喻媚, 陈正. 基于第一性原理的水氧相互作用下混凝土中钢筋锈蚀机理研究[J]. *混凝土*, 2020, 367(5): 24-27.
NONG Y M, CHEN Z. Study on the corrosion mechanism of reinforcement in concrete with interaction of water and oxygen based on first- principles[J]. *Concrete*, 2020, 367(5): 24-27.
- [38] 杨良, 孙立军. 钢筋混凝土桥梁的钢筋锈蚀与疲劳耦合损伤[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(12): 1784-1787.
YANG L, SUN L J. Damage of steel bar of reinforced concrete bridge by the coupling effect of corrosion and fatigue[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science edition)*, 2015, 43(12): 1784-1787.
- [39] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
GUO Z H. Principle of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [40] LI S B, TANG H W, GUI Q, et al. Fatigue behavior of naturally corroded plain reinforcing bars[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 933-942.
- [41] 兰成明, 杨海涛, 白娜妮, 等. 腐蚀预应力钢绞线疲劳寿命概率模型[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(10): 68-77.
LAN C M, YANG H T, BAI N N, et al. Probabilistic model for fatigue life evaluation of corroded prestress strand [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(10): 68-77.
- [42] 邢国华, 武名阳, 常召群, 等. 锈蚀预应力混凝土梁承载力及破坏模式研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 177-188.
XING G H, WU M Y, CHANG Z Q, et al. Load bearing capacity and failure mode of corroded prestressed concrete beams[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(7): 177-188.
- [43] 张伟平, 李崇凯, 顾祥林, 等. 锈蚀钢筋的随机本构关系[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(5): 920-926.
ZHANG W P, LI C K, GU X L, et al. Stochastic model of constitutive relationship for corroded steel bars[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(5): 920-926.
- [44] YU Q Q, GU X L, ZENG Y H, et al. Flexural behavior of corrosion-damaged prestressed concrete beams[J]. *Engineering Structures*, 2022, 272: 114985.
- [45] LI D W, XIONG C, HUANG T, et al. A simplified constitutive model for corroded steel bars[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186, 11-19.
- [46] ZHANG K J, XIAO J Z, ZHAO Y X, et al. Analytical model for critical corrosion level of reinforcements to cause the cracking of concrete cover[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 185-197.
- [47] 过民龙, 张凯, 杨厚易. 基于全卷积神经网络的锈蚀钢筋截面检测方法[J]. *广东土木与建筑*, 2022, 24(1): 85-90.
GUO M L, ZHANG K, YANG H Y. Method of section detection for corroded rebar based on fully convolutional networks[J]. *Guangdong architecture civil engineering*, 2022, 24(1): 85-90.
- [48] 王磊, 张建仁. 钢筋截面面积模糊随机时变概率模型[J]. *工程力学*, 2011, 28(3): 94-102
WANG L, ZHANG J R. Fuzzy random time-variant probability model of reinforcement sectional area[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(3): 94-102.
- [49] SALAMI B A, RAHMAN S M, OYEHAN T A, et al. Ensemble machine learning model for corrosion initiation time estimation of embedded steel reinforced self-compacting concrete[J]. *Measurement*, 2020, 165: 108141.
- [50] ZHANG J H, LING X Z, GUAN Z G. Finite element modeling of concrete cover crack propagation due to non-uniform corrosion of reinforcement[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 132: 487-499.
- [51] CHAUHAN A, SHARMA U K. Crack propagation in reinforced concrete exposed to non-uniform corrosion under real climate[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 248: 107719.
- [52] FANG X, PAN Z, CHEN A. Phase field modeling of concrete cracking for non-uniform corrosion of rebar[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103517.
- [53] CHEN H P, NEPAL J. Analytical model for residual bond strength of corroded reinforcement in concrete structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2016, 142(2): 1-8.
- [54] YANG Y Y, TANG H, MAO Y, et al. Prediction of long-term prestress loss and crack resistance analysis of corroded prestressed concrete box-girder bridges[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(8): 1309936.
- [55] NGUYEN T, PHAN T T V, HO D D, et al. Deep learn-

- ing-based autonomous damage-sensitive feature extraction for impedance-based prestress monitoring[J]. Engineering Structures, 2022, 259: 114172.
- [56] YANG M, GONG J, YANG X. Refined calculation of time-dependent prestress losses in prestressed concrete girders[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(10): 1430-1446.
- [57] 崔宁. 超低温环境下混凝土构件预应力损失试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- CUI N. Experimental studies on prestress losses in temperatures concrete members under ultra-low[D]. Tianjin: Tianjin university, 2019.
- [58] LOU G B, HOU J, QI H H, et al. Prestress loss of twisted wire strands and parallel wire strands at elevated temperatures[J]. Engineering Structures, 2023, 291: 116483.
- [59] JEANNERET C, NICOLETTA B, ROBERTSON L, et al. Guidance for the post-fire structural assessment of prestressing steel[J]. Engineering Structures, 2021, 235: 112023.
- [60] SHEN Y, LING J X, LU X, et al. Steel wire prestress analysis of large section jacking prestressed concrete cylinder pipe (JPCCP): Site experiment and numerical investigation[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 184: 110420.
- [61] 于沛琳. 基于统计损伤理论的硫酸盐侵蚀掺硅灰混凝土本构模型研究[J]. 市政技术, 2023, 41(7): 85-93.
- YU P L. Research on the constitutive model of sulfate eroding silica fume concrete by statistical damage theory [J]. Journal of Municipal Technology, 2023, 41(07): 85-93.
- [62] YANG H F, LIU C L, IANG J S. Damage constitutive model of stirrup-confined recycled aggregate concrete after freezing and thawing cycles[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119100.
- [63] BAI Y Y, GUO W C, ZHAO Q X, et al. Triaxial compression failure criterion and constitutive relation of concrete containing multiple solid wastes[J]. Construction and Building Materials, 2023, 386: 131573.
- [64] JAAFARI C, GRANGE S, BERTRAND D, et al. Multifiber finite element model based on enhanced concrete constitutive law to account for the effects of early age damage on the seismic response of RC structures[J]. Engineering Structures, 2022, 256: 113987.
- [65] SHANG M G, QIAO H X, HE Z M, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive model of specified density concrete reinforced by waste incineration tailings [J]. Construction and Building Materials, 2023, 371: 130712.
- [66] 牛荻涛, 王庆霖. 一般大气环境下混凝土强度经时变化模型[J]. 工业建筑, 1995, 25(6): 36-38.
- NIU D T, WANG Q L. Models of concrete strength changing with time in general air environment[J]. Industrial Construction, 1995, 25(6): 36-38.
- [67] 高向玲, 颜迎迎, 李杰. 一般大气环境下混凝土经时抗压强度的变化规律[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 19-26.
- GAO X L, YAN Y Y, LI J. Change law of time-dependent concrete compressive strength in the atmospheric environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 19-26.
- [68] 杨松, 郑山锁, 明铭, 等. 冻融环境下的混凝土经时抗压强度[J/OL]. 土木与环境工程学报, 1-8. [2023-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20231106.0858.002.html>.
- YANG S, ZHENG S S, MING M, et al. Time-dependent compressive strength of concrete in freeze-thaw environment[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 1-8. [2023-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20231106.0858.002.html>.
- [69] FU B, FENG D C. A machine learning-based time-dependent shear strength model for corroded reinforced concrete beams[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 36: 102118.
- [70] 林红威, 赵羽习. 变形钢筋与混凝土黏结性能研究综述[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 11-27.
- LIN H W, ZHAO Y X. Review of research on bonding properties of deformed steel bars and concrete[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 11-27.
- [71] TAHERSHAMSI M, Fernandez I, LUNDGREN K, et al. Investigating correlations between crack width, corrosion level and anchorage capacity[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(10), 1294-1307.
- [72] KIVELL A. Effects of bond deterioration due to corrosion on seismic performance of reinforced concrete structures [D]. University Canterbury, New Zealand, 2012.
- [73] KEARSLEY E P, JOYCE A. Effect of corrosion products on bond strength and flexural behavior of reinforced concrete slabs[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2014, 56(2): 21-29.
- [74] BHARGAVA K, GHOSH A K, MORI Y, et al. Suggested

- empirical models for corrosion-induced bond degradation in reinforced concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(2): 221-230.
- [75] CHEN H P, JIANG Y, LI W B. Residual load-bearing capacity of corroded reinforced concrete columns with an annular cross-section[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 286: 115519.
- [76] WU Y Z, TANG P, LV H L, et al. Degradation of the bond performance between composite limestone powder concrete and steel bars under a sulfate freeze - thaw environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 369: 130515.
- [77] GONG Y Z, SHAN Y J, WU Y Y, et al. Bond properties of carbon fiber reinforced polymer and corrosion-cracked reinforced concrete interface: experimental test and non-linear degenerate interface law[J]. *Materials*, 2021, 14 (18), 5333.
- [78] WANG Y, ZHENG Y Q, WANG X, et al. Multi-scale analyses on performance degradation of reinforced concrete structure due to damage evolution on bonding interface [J]. *PLoS ONE*, 2019, 14(4): e0214915.
- [79] CHEN H P. Residual flexural capacity and performance assessment of corroded reinforced concrete beams[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(12): 04018213.
- [80] 彭建新, 徐鹏, 唐皇, 等. “锈蚀-加固-锈蚀”RC梁力学行为及承载力试验[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(9): 82-89.
- PENG J X, XU P, TANG H, et al. Experiment on mechanical behavior and bearing capacity of reinforced concrete beam based on "corrosion- strengthening- corrosion"[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(9): 82-89.
- [81] JIANG C, DING H, CHAO X L, et al. Failure mode-based calculation method for bending bearing capacities of normal cross-sections of corroded reinforced concrete beams[J]. *Engineering Structures*, 2022, 258: 114113.
- [82] WANG X H, LIANG F Y. Performance of RC columns with partial length corrosion[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238 (12): 3194-3202.
- [83] ZAGHIAN S, MARTÍN-PÉREZ B, ALMANSOUR H. Finite element modelling of bridge piers subjected to eccentric load combined with reinforcement corrosion[J]. *Engineering Structures*, 2023, 283: 115822.
- [84] CHEN H P, JIANG Y, GEORGE M. Structural performance deterioration of corroding reinforced concrete columns in marine environments[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 262: 112155.
- [85] CHEN H P, JIANG Y, XIAO L F, et al. Lifetime reliability analysis of concrete columns damaged by reinforcement corrosion[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 926259.
- [86] 金浏, 李炎锡, 张仁波, 等. 锈蚀钢筋混凝土柱偏心受压性能精细化模拟[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(4): 599-612.
- JIN L, LI Y X, ZHANG R B, et al. Refined simulation of eccentric compression behavior of corroded reinforced concrete columns[J]. *Science in China: Technical Sciences*, 2022, 52(4): 599-612.
- [87] BRECCOLOTTI M. Eigenfrequencies of continuous prestressed concrete bridges subjected to prestress losses[J]. *Structures*, 2020, 25: 138-146.
- [88] 曹大富, 秦晓川, 袁沈峰. 冻融后预应力混凝土梁受力全过程试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(8): 38-44.
- CAO D F, QIN X C, YUAN S F. Experimental study on mechanical behaviors of prestressed concrete beams subjected to freeze-thaw cycles[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(8): 38-44.
- [89] 宋佳杰. 大跨度预应力混凝土连续梁桥预应力损失对线形的影响[J]. *国防交通工程与技术*, 2018, 16(1): 77-80.
- SONG J J. On the effect of the pre-stress loss of a large-span continuous reinforced concrete girder bridge on the linearity of the bridge[J]. *Traffic Engineering and Technology for National*, 2018, 16(1): 77-80.
- [90] GAO R F, HE J R, NIE Z H. Stochastic harmonic function-based traffic load simulation method for fatigue damage assessment of concrete bridges[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2022, 69: 103308.
- [91] ALOISIO A, ROSSO M M, FRAGIACOMO M, et al. Fragility estimate of railway bridges due to concrete fatigue[J]. *Structures*, 2023, 49: 70-87.
- [92] YU Y, KURIAN B, ZHANG W. Fatigue damage prognosis of steel bridges under traffic loading using a time-based crack growth method[J]. *Engineering Structures*, 2021, 237: 112162.
- [93] SRIKANTH I, AROCKIASAMY M. Deterioration models for prediction of remaining useful life of timber and concrete bridges: A review[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 7(2): 152-173.
- [94] SASMAL S, RAMANJANEYULU K. Condition evalua-

- tion of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35(3): 1430-1443.
- [95] 阳逸鸣. 大跨度PC箱梁桥可靠性评估及维护策略优化[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- YANG Y M. Reliability assessment and maintenance strategy optimization of long span PC box girder bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2020.
- [96] 刘来君, 吴多, 张夏, 等. 改进贝叶斯方法在桥梁状态评估中的应用[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(6): 47-53.
- LIU L J, WU D, ZHANG X, et al. Application of improved Bayes method in bridge state assessment[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2017, 37(6): 47-53.
- [97] 陈梦成, 张明阳, 方苇, 等. 既有结构时变可靠度预测模型及计算方法研究[J]. *华东交通大学学报*, 2022, 39(4): 16-23.
- CHEN M C, ZHANG M Y, FANG W, et al. Study on Time-Varying Reliability Prediction Model and Calculation Method of Existing Structures[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2022, 39(4): 16-23.
- [98] 陈龙, 黄天立. 基于贝叶斯更新和逆高斯过程的在役钢筋混凝土桥梁构件可靠度动态预测方法[J]. *工程力学*, 2020, 37(4): 186-195.
- CHEN L, HUANG T L. Dynamic prediction of reliability of in-service RC bridges using the bayesian updating and inverse gaussian process[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(4): 186-195.
- [99] ZHOU H, FAN X P, LIU Y F, et al. Time-variant reliability analysis of simply supported PC girder bridges considering shrinkage, creep, resistance degradation and vehicle load flows[J]. *Structures*, 2023, 56: 104885.
- [100] ARYAI V, MAHMOODIAN M. Spatial-temporal reliability analysis of corroding cast iron water pipes[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 82: 179-189.
- [101] NGUYEN H T, LE X H. Structural fuzzy reliability analysis using the classical reliability theory[J]. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, 19(4): 1-9.
- [102] WANG X J, ZHU J Z, NI B W. Structural reliability-based design optimization with non-probabilistic credibility level[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2024, 418: 116489.
- [103] ZHOU J G, LI L L, TSENG M L, et al. Green system reliability assessment method based on life cycle: Resources and economical view[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119786.
- [104] 许肇峰, 宋健, 张欣, 等. 考虑实测交通流的数字孪生系统在斜拉桥结构状态评估中的应用[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(6): 93-102.
- XU Z F, SONG J, ZHANG X, et al. Application of digital twin system considering measured traffic flow in structural state evaluation of cable-stayed bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(6): 93-102.
- [105] DAN D H, YING Y F, GE L F. Digital Twin System of Bridges Group Based on Machine Vision Fusion Monitoring of Bridge Traffic Load[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23 (11): 22190-22205.
- [106] 秦吉丽, 王毅娟. 在役混凝土桥梁剩余寿命预测方法研究[J]. *北京建筑工程学院学报*, 2012, 28(3): 14-18.
- QIN J L, WANG Y J. Research on residual life prediction method of the existing concrete bridge[J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2012, 28(3): 14-18.
- [107] 喻文健. 数值分析与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- YU W J. Numerical analysis and algorithm[M]. Beijing: Tsinghua university press, 2020.
- [108] FANG Y, SUN L J. Developing a semi-markov process model for bridge deterioration prediction in Shanghai[J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5524.
- [109] CHEN H P, MEHRABANI M B. Reliability analysis and optimum maintenance of coastal flood defences using probabilistic deterioration modelling[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, 185: 163-174.
- [110] 林兵, 郑丹, 周建庭, 等. 西南地区桥梁寿命预测分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2008, 6(2): 374-378.
- LIN B, ZHENG D, ZHOU J T, et al. Forecast analysis of bridge life in southwest China[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science)*, 2008, 6(2): 374-378.
- [111] 徐凤月. 梁桥的健康监测及其剩余寿命预测分析[J]. *四川建材*, 2013, 39(5): 152-154.
- XU F Y. Health monitoring of beams and bridges and

- their remaining life prediction analysis[J]. *Sichuan Building Materials*, 2013, 39(5): 152-154.
- [112] 李杰, 陈淮, 江莹莹, 等. 基于可靠度理论预应力混凝土桥梁使用寿命预测研究[J]. *世界桥梁*, 2015, 43(6): 51-57.
- LI J, CHEN H, JIANG Y Y, et al. Study of service life evaluation based on reliability theory for prestressed concrete bridge[J]. *World Bridges*, 2015, 43(6): 51-57.
- [113] 郭冬梅. 沿海在役钢筋混凝土桥梁性能退化及剩余使用寿命预测[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- GUO D M. Prediction the remaining useful life and study of performance degeneration for R.C. bridge near coastal areas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [114] XIE H B, WU W J, WANG Y F. Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering LCA and LCC[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 36-45.
- [115] 王迎军, 李鹏飞, 张佳念. 公路桥梁预防性养护调查分析[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2020, 16(9): 216-218.
- WANG Y J, LI P F, ZHANG J N. Investigation and analysis of highway bridge preventive maintenance[J]. *Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition)* 2020, 16(9): 216-218.
- [116] SHIM H S, LEE S H, KANG B S. Pareto front generation for bridge deck management system using bi-objective optimization[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(5): 1563-1572.
- [117] YANG D Y, FRANGOPOL D M. Probabilistic optimization framework for inspection/repair planning of fatigue-critical details using dynamic Bayesian networks[J]. *Computers and Structures*, 2018, 198: 40-50.
- [118] XIN J, ZHANG M, AKIYAMA M, et al. Multi-objective optimization of in-service asphalt pavement maintenance schedule considering system reliability estimated via LSTM neural networks[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 18(7): 1002-1019.
- [119] 戴理朝, 康哲, 陈瑞, 等. 基于NSGA-III的桥梁网络多目标维修决策优化研究[J/OL]. *土木工程学报*, 1-13. [2023-12-17]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.23010043>.
- DAI L Z, KANG Z, CHEN R, et al. Study on multi-objective maintenance decision optimization of bridge networks based on NSGA-III[J/OL]. *China Civil Engineering Journal*, 1-13. [2023-11-03]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.23010043>.
- [120] HOSEIN M N, HOSEIN T, BANAFSHEH Z. Integrating discrete event simulation and genetic algorithm optimization for bridge maintenance planning[J]. *Automation in Construction*, 2021, 122: 103513.
- [121] ABDELKADER E M, MOSELI O, MARZOUK M, et al. An exponential chaotic differential evolution algorithm for optimizing bridge maintenance plans[J]. *Automation in Construction*, 2022, 134: 104107.
- [122] ZHANG W L, WANG N Y. Bridge network maintenance prioritization under budget constraint[J]. *Structural Safety*, 2017, 67: 96-104.



第一作者: 陈华鹏(1964—), 男, 教授, 研究方向为结构健康监测、智能交通基础结构、结构性能评估, 以及智能运维等。E-mail: hp.chen@ecjtu.edu.cn

(责任编辑: 李根)