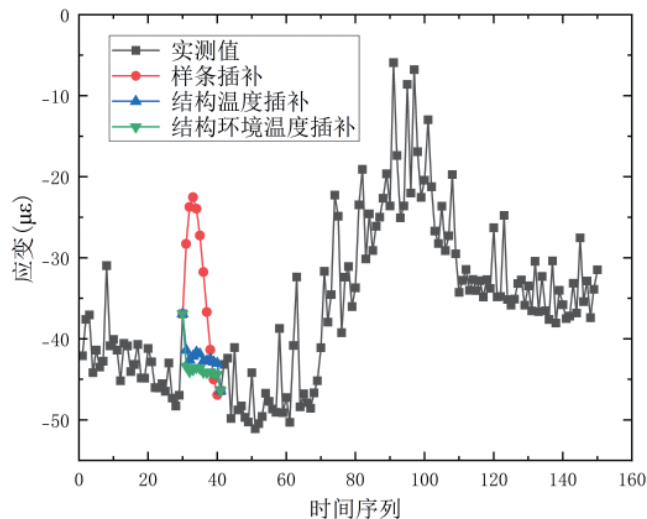
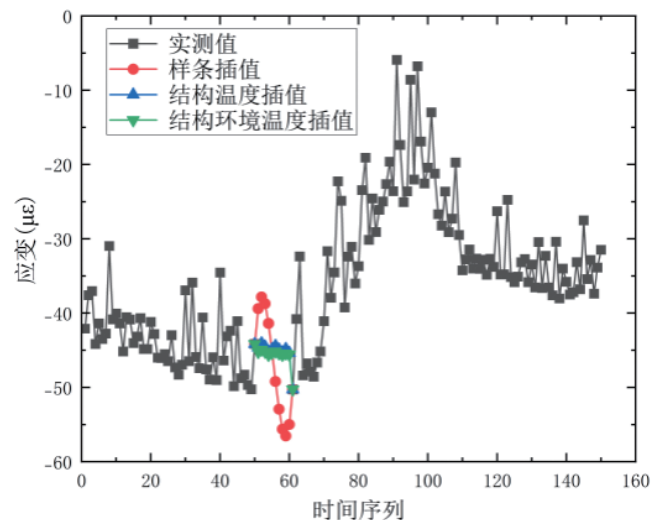


行修复。通过结合应变与两种不同温度的相关性来进行数据的修复。选取三次样条插值法和结构温度插值（相关系数最高）作为对比来评价数据修复的结果。设置缺失数据为 10 个，基于不同的修复方式进行修复，修复对比情况见图三。



(a) 5:06-6:36 修复对比



(b) 6:46-7:06 修复对比

图 3 不同时段修复对比图

表 3 不同时段修复对比表

时间段	样条插值		结构温度插值		结构与环境温度插值	
	相关性	均方根差	相关性	均方根差	相关性	均方根差
5:06-6:36	0.9029	3.9546	0.9832	1.4235	0.9855	1.3230
6:46-7:06	0.9710	2.4013	0.9846	1.2069	0.9868	1.0985

由图 3 可知，在不同的缺失段内，采用结构与环境温度插值修复情况均优于其他结果，同时考虑两种不同温度相关性的修复结果分布更为平均，能更好地反映桥梁健康监测系统的正常运行状态。由表 3 可知，基于

结构与环境温度因素修复的数据在相关性系数均可达到 0.97 以上，同时均方根差结果也优于另外两种方式，同时能更大限度地利用桥梁健康监测中的数据，为后续桥梁的运营状态把握和安全维护得到更好的结论。

4 结论

本文以厦门市某混凝土连续梁桥健康监测系統为依托，对桥梁健康监测数据进行数据处理与分析，得到以下结论：

(1) 通过灰色关联度理论的可信性分析可知，同截面 3 组应变数据的关联度（以传感器 1 为参考序列）0.6923 和 0.7367，均通过阈值验证，证明数据是可信的。

(2) 经过实桥数据验证考虑应变数据与两种温度相关性的修复效果更优，数据修复的质量受数据缺失量的影响较小。通过 Pearson 相关系数修复数据的方法对桥梁健康监测系统中的缺失值进行修复，有助于更好地把握桥梁运行状况和后续桥梁运行安全预警。

参考文献：

- [1] 王亚飞, 杨钧羽, 钟继卫, 等. 桥梁结构状态评估方法研究现状与展望 [J]. 公路工程, 2024, 49(01): 45-52.
- [2] 黄永, 鲍跃全, 李惠. 结构状态识别与评估的机器学习方法研究进展 [J]. 力学进展, 2023, 53(04): 774-792.
- [3] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测 2020 年度研究进展 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2021, 43(S1): 129-134.
- [4] 刘阳, 桑永春, 刘晓, 等. 结构健康监测异常数据修复应用研究 [J]. 物联网技术, 2018, 8(09): 48-50.
- [5] BAO Y Q, TANG Z Y, LI H, et al. Computer vision and deep learning-based data anomaly detection method for structural health monitoring [J]. Structural Health Monitoring—an International Journal, 2019, 18(02): 401-421.
- [6] YI T-H, HUANG H-B, LI H-N. Development of sensor validation methodologies for structural health monitoring: A comprehensive review [J]. Measurement, 2017, 109: 200-214.
- [7] 罗小江. 桥梁健康监测的大数据关联分析与机理性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

老旧混凝土桥梁长期性能研究综述

刘可凡

(苏州科技大学, 江苏 苏州 2150092)

摘要: 为总结老旧混凝土桥梁长期性能最新研究进展, 本文归纳了老旧混凝土桥梁应用现状, 梳理了老旧混凝土桥梁力学性能、混凝土疲劳性能、钢筋疲劳性能、混凝土桥梁疲劳评估等方面的研究进展, 探讨了老旧混凝土桥梁长期性能研究的发展方向。分析结果表明不同型号和不同时期的混凝土与钢筋材料的力学性能差异显著, 环境因素会引起钢筋混凝土结构疲劳性能的退化, 腐蚀环境对混凝土桥梁疲劳损伤程度为当下混凝土桥梁疲劳寿命研究的难点。老旧混凝土桥梁运营期间应加强交通荷载和主梁监测, 未来需要针对老旧混凝土桥梁长期性能、运营期间疲劳寿命评估等方面开展进一步研究。

关键词: 老旧混凝土桥梁; 长期性能; 力学性能; 疲劳性能; 寿命评估

中图分类号: U446.2

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0147—04

Review on Long-term Performance of Aged Concrete Bridges

Liu Ke-fan

(Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

Abstract: In order to summarize the latest research progress on long-term properties of old concrete bridges, the application status of old concrete bridges is summarized, and the research progress on long-term properties, fatigue properties of concrete, fatigue properties of steel bars and fatigue evaluation of concrete bridges are reviewed. The analysis results show that the mechanical properties of concrete and steel bar are significantly different in different types and different periods. Environmental factors will cause the degradation of fatigue properties of reinforced concrete structures, and the fatigue damage degree caused by corrosion environment to concrete bridges is difficult to research of fatigue life of concrete bridges. The monitoring of traffic load and main girder should be strengthened during the operation of the aged concrete bridge. In the future, it is necessary to carry out further research on the long-term performance of the aged concrete bridge and the evaluation of fatigue life during operation.

Key words: aged concrete bridge; long-term performance; mechanical performance; fatigue performance; life evaluation

混凝土结构具有承载力大、易就地取材、造价低、耐久性强等优点, 广泛应用于建筑、桥梁、水利等行业, 是土木工程领域最普遍的结构型式。据交通运输部统计, 截至 2022 年末我国公路桥梁总数达 103.32 万座、总长达 8576.49 万延米, 其中混凝土桥梁占桥梁总数的 90% 以上。目前, 20 世纪早期建造的钢筋混凝土桥梁多数服役时间已经超过 70 年, 尚有一定数量甚至超过 100 年, 超龄服役混凝土桥梁一般存在混凝土开裂、碳化、钢筋锈蚀等病害, 严重影响结构安全运营。

早期建造的混凝土桥梁在设计之初一般忽视结构的疲劳设计, 面对当下交通量的快速增长和车辆大型化、重型化的趋势, 混凝土桥梁构件疲劳问题在混凝土桥梁中逐渐显现, 设计荷载与实际承受荷载无法匹配的问题尤为突出, 最终导致桥梁疲劳损伤而引起坍塌事故。因此, 即使是施工、管理和养护等环节都十分完善的桥梁, 随着时间的推移和运营条件的提高, 桥梁在静载作用和频繁的疲劳荷载作用下, 桥梁结构也会发生性能劣化、耐久性降低等问题。近年来, 国内外混凝土桥梁因疲劳问题而破坏的案例也不在少数。2000 年, 美国加州

Motor Speedway 桥梁因腐蚀环境和疲劳荷载导致钢筋材料的疲劳, 致使桥梁坍塌破坏; 2005 年, 苏州平望镇堰月桥因养护不当致使桥体疲劳损伤而突发断裂; 2006 年, 陕西省冷水大桥突然发生垮塌, 经现场调查判断为桥梁服役年限久且钢筋材料设计标准低, 加上普遍超载引起的疲劳破坏; 2007 年, 我国江苏常州运村大桥由于重载交通致使主梁疲劳寿命降低, 仅使用 10 年便发生坍塌; 2007 年, 美国 I-35W 高速公路大桥因引桥桥段发生疲劳损伤破坏而突然垮塌; 2011 年, 杭州钱江三桥因运营车辆超载行驶, 致使混凝土空心板梁疲劳断裂。老旧混凝土桥梁疲劳安全问题与管养问题已经成为影响道路安全通行和国家经济建设的一个关键因素, 也是当下城市更新的难点。评估在役老旧混凝土桥梁是否具有好的疲劳性能和安全寿命, 对保障交通安全运营具有重要的工程意义。

为明确老旧混凝土桥梁长期性能最新研究进展, 本文对旧混凝土桥梁力学性能、混凝土疲劳性能、钢筋疲劳性能、混凝土桥梁疲劳评估等研究进展进行梳理, 以为老旧混凝土桥梁的长期性能研究及运营管理等提供

参考和依据。

1 老旧混凝土桥梁力学性能研究

针对老旧混凝土桥梁力学性能研究, Paulík 等^[1]对斯洛伐克境内 7 座百年以上的钢筋混凝土桥梁开展材料性能与碳化深度研究, 试验表明钢筋屈服强度为 236~363MPa, 高于后期维修加固时假定强度约 30%。Duffó 等^[2]对阿根廷境内两座分别使用 65 年和 70 年建筑中的钢筋力学性能和腐蚀情况进行试验研究, 测得两座建筑中钢筋的屈服强度分别为 242MPa、168MPa, 断后伸长率位于 20%~25% 之间。郑士举等^[3]对国内外规范中涉及钢筋等级的条文进行调研分析, 并基于上海某近代混凝土建筑中截取钢筋开展拉伸试验及里氏硬度试验, 确定了历史建筑中钢筋强度的判别方法。糜镇东等^[4]基于方形带肋钢筋构造特征, 提出方形带肋钢筋—混凝土极限粘结应力的理论模型, 通过试验研究对极限粘结应力的影响因素进行变参数分析。

2 混凝土桥梁疲劳性能研究

2.1 混凝土疲劳性能

1970 年开始, 部分国内外学者对混凝土试件开展疲劳试验。Holmen 等^[5]对大量混凝土试件进行受压疲劳试验, 得到混凝土疲劳特性、疲劳寿命分布和不可逆应变发展等结论。王瑞敏等^[6]通过对棱柱体混凝土试件进行轴心受压疲劳试验, 探究混凝土应变与循环次数的变化规律并提出混凝土应变在循环荷载下的经验计算公式。甄治国等^[7]考虑了应力幅值和疲劳的影响, 对混凝土试件进行了疲劳荷载试验, 研究表明随着应力幅值和频率的会增大混凝土疲劳损伤的概率。

考虑到混凝土疲劳试验在经验性和现象性的弊端, Hillerborg 等^[8]针对混凝土的裂纹扩展提出了虚拟裂纹模型, 并建立了材料裂纹尖端的涨开位移和应力之间的关系, 但未考虑尺寸对模型参数取值的影响。梁俊松等^[9]基于连续损伤力学理论, 提出能够模拟混凝土结构在疲劳荷载作用下失效破坏的方法, 并通过数值模拟验证方法的可靠性。

2.2 钢筋疲劳性能

当前国内外学者对钢筋疲劳性能的研究主要通过两种方法: 一种是考虑钢筋在桥梁中的真实受力状态, 将钢筋置于混凝土构件中, 后对钢筋混凝土梁体进行弯曲式疲劳试验; 另一种是对钢筋本体直接进行疲劳试验, 这种方法操作简单且成本更低, 为钢筋疲劳性能的主要研究方法。

针对历史钢筋材料强度缺乏问题, 国内外学者针

对不同时期的历史钢材进行试验研究。林峰等^[10]对历史建筑中常见的圆肋钢筋和方钢进行了试验研究, 采用线性回归分析方法得到了钢筋强度和里氏硬度的关系, 以用于历史建筑中钢筋强度的无损检测。淳庆等^[11]针对民国建筑中的方形钢筋和圆形钢筋开展了系列试验研究, 研究表明民国钢筋的宏观特征和物理力学性能部分不满足于现有规范要求。石建光等^[12]从 20 世纪早期的鼓浪屿历史建筑中实地取样了 3 种带肋方形钢筋, 采用统计分析和微观测试方法对钢筋的物理性状和腐蚀原因进行了研究和分析。Maciej 等^[13]对 120 多年历史的桥梁钢材部件进行了研究, 通过疲劳、断裂、硬度和拉伸试验评估了桥梁钢材部件的力学性能。证实了所研究的桥梁构件符合现代结构的标准且具有加固性能。

关于对钢筋本体直接进行疲劳试验, 国内外学者对不同型号的钢筋进行了疲劳试验, 得到了变形钢筋应力幅—寿命曲线 ($S-N$ 曲线), 如图 1 所示。曾志斌等^[14]对国产变形钢筋和光圆钢筋进行疲劳试验, 并给出 $S-N$ 曲线方程, 为疲劳寿命评估提供重要依据。张耀庭等^[15]对 HRB400 钢筋进行了低周疲劳试验, 得到 Coffin-Manson 疲劳模型中的三个关键参数, 为钢筋混凝土结构的模型建立提供重要材料参数。徐庆元等^[16]对 HRB500 和 HRB400 钢筋进行了轴向拉压疲劳试验, 建立了两种钢筋的 $S-N$ 曲线。

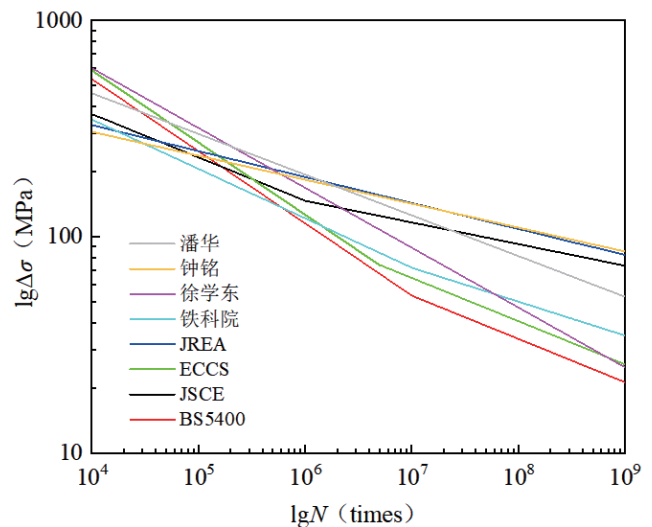


图 1 国内外变形钢筋 $S-N$ 曲线对比

2.3 钢筋混凝土构件疲劳性能

针对钢筋混凝土构件的疲劳性能研究, 国内外学者开展了大量钢筋混凝土梁的疲劳试验, 取得了丰富的研究成果。朱红兵等^[17]对钢筋混凝土空心板梁和钢筋混凝土 T 梁进行疲劳试验, 在等幅疲劳和变幅疲劳荷载下得到试验梁的 $S-N$ 曲线, 并提出疲劳寿命预测算法。刘金良等^[18]对钢筋混凝土梁进行疲劳损伤加载, 考虑

腐蚀环境的影响探讨疲劳损伤对梁内受力主筋的影响,结果表明高疲劳损伤会增加梁内受力主筋的锈蚀速率。金伟良等^[19]对钢筋混凝土梁在疲劳和锈蚀作用下的使用寿命进行试验研究,并建立了钢筋混凝土梁的疲劳损伤计算模型和极限状态方程,结果表明疲劳和锈蚀都会对钢筋混凝土梁的使用寿命和长期性能产生影响。

3 钢筋混凝土桥梁的疲劳寿命评估

桥梁结构在疲劳损伤过程中会受到车辆、材料以及服役环境等多种因素的影响。随着桥梁结构服役年限的增长,交通量和荷载水平的提高都会影响钢筋混凝土桥梁的疲劳寿命。目前,S-N曲线法和断裂力学法为钢筋混凝土桥梁常用的疲劳寿命评估方法。

基于S-N曲线和Miner准则的疲劳寿命评估方法是一种传统的疲劳分析方法,方法易于掌握且应用广泛。管国东等^[20]采用S-N曲线和Miner准则的方法对混凝土矮箱梁桥进行了疲劳寿命评估,计算结果为同类型桥梁寿命提供参考。邓露等^[21]基于S-N曲线和疲劳损伤准则的方法计算钢筋混凝土桥梁的疲劳寿命,提出将桥梁疲劳寿命达到期望值的限载试算值作为桥梁限载值。何肖斌等^[22]对考虑腐蚀环境的影响在对役混凝土T梁进行了弯曲疲劳试验,并基于S-N理论对锈蚀后混凝土T梁进行疲劳寿命预测。

基于断裂力学的寿命评估方法以裂纹的扩展作为结构的疲劳破坏过程。相较于S-N曲线法对疲劳车辆荷载细节应力历史的要求,断裂力学法则需要通过试验获得相关裂纹扩展参数。王春生等^[23]对七狼窝黄河大桥的疲劳剩余寿命进行了研究,通过对T型梁受拉主筋基于断裂力学的方法进行疲劳寿命评估,得到了七狼窝黄河大桥的安全使用年限。周虎等^[24]基于断裂力学法对湖南省常德市沅水混凝土桥进行剩余寿命评估分析,表明断裂力学法具有良好的可信度。王剑等^[25]基于断裂力学和损伤力学理论对龙河特大桥工程进行疲劳寿命评估,将两种方法估算出的受力主筋疲劳寿命之和作为其混凝土桥梁最终疲劳全寿命。

由上述研究可知,基于S-N曲线法通过疲劳试验获得受力主筋的S-N曲线,并结合疲劳车辆荷载的疲劳损伤次数计算剩余寿命值;基于断裂力学的寿命评估方法通过对混凝土桥梁受力主筋进行裂纹扩展试验,得到材料参数断裂韧度、裂纹扩展门槛值、材料参数值,估算桥梁剩余疲劳寿命值。目前,基于S-N曲线的评估方法易于操作,已广泛应用于实际混凝土桥梁的疲劳安全评估。基于断裂力学的寿命评估方法需要确定钢筋疲劳断裂参数,目前在实际工程中的应用尚处在探索阶

段。

4 结论

自20世纪早期,我国钢筋混凝土结构开始应用于桥梁建设中。随着交通行业的不断发展,钢筋混凝土桥梁在道路桥梁事业中始终占有重要位置。但在长期服役过程中,早期混凝土桥梁的疲劳安全和管养问题一直是人们关注的重点,也是当下城市更新的难点。当前老旧混凝土桥梁的长期性能研究多集中于受力主筋和钢筋混凝土构件的研究,不同型号和不同时期的混凝土与钢筋材料的疲劳性能有明显差异。由于早期混凝土及钢筋材料参数的缺乏问题,考虑老旧混凝土及钢筋材料的疲劳性能尚需进一步深入研究。环境因素会引起钢筋混凝土结构长期性能的退化,腐蚀环境对混凝土桥梁疲劳损伤程度为当下混凝土桥梁疲劳寿命研究的难点。老旧混凝土桥梁运营期间应加强交通荷载和主梁监测,未来需要针对老旧混凝土桥梁长期性能、运营期间疲劳寿命评估等方面开展进一步研究。

参考文献:

- [1] Paulík P, Bačuvčík M, Ševčík P, et al. Material properties and carbonation depths measured on seven, more than a 100-years old, concrete bridges in Slovakia [J]. Procedia Engineering, 2016, 156: 326-333.
- [2] Duffó G S, Reinoso M, Ramos C P, et al. Characterization of steel rebars embedded in a 70-year old concrete structure [J]. Cement & Concrete Research, 2012, 42(01):111-117.
- [3] 郑士举,白雪,蒋利学.近代钢筋混凝土结构的钢筋强度判别方法研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52(03):78-84.
- [4] 糜镇东,淳庆,金辉.钢筋混凝土历史建筑中方钢-混凝土的极限粘结应力分析 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(01):38-45.
- [5] Holmen J O. Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading [C]. ACI Fatigue of Concrete Structures. Detroit Michigan: American Concrete Institute, 1982, (20): 71-110.
- [6] 王瑞敏,赵国藩,宋玉普.混凝土的受压疲劳性能研究 [J]. 土木工程学报, 1991, (04):38-47.
- [7] 甄治国.疲劳荷载作用下混凝土损伤力学特征试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2023, (06):16-20.
- [8] Hillerborg A, and Modéer M. Petersson. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(06): 773-781.
- [9] 梁俊松,丁兆东,李杰.混凝土结构疲劳全过程分析方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(05):149-157.
- [10] 林峰,顾祥林,肖炳辉.硬度法检测历史建筑中钢筋的强度 [J].