

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.210



混凝土桥梁耐久性 2020 年度研究进展

占玉林^{1a, 1b}, 斯睿哲^{1a, 1b}, 臧亚美^{1a, 1b, 2}

(1. 西南交通大学 a. 桥梁工程系; b. 土木工程材料研究所, 成都 610031; 2. 西藏大学 工学院, 拉萨 850000)

摘要:近年来,混凝土桥梁的耐久性引起广泛关注,混凝土桥梁的耐久性直接影响到长期服役桥梁的安全性和使用寿命,是桥梁研究的热点之一。目前,混凝土桥梁耐久性的研究主要分为两个方面:一是从材料的损伤机理层面入手,研究桥梁构件材料的破坏方式和影响因素,分析混凝土桥梁材料的耐久性影响作用机理;二是从桥梁结构的整体出发,研究桥梁耐久性的设计、评估以及桥梁的养护方案等,探究提高混凝土桥梁结构耐久性的措施。为全面掌握混凝土桥梁耐久性的研究动态,从混凝土桥梁的设计、桥梁混凝土材料的耐久性研究、混凝土桥梁的钢筋锈蚀研究、混凝土桥梁的耐久性提升技术、不同服役环境对桥梁耐久性的影响、长期服役性能评估及寿命预测等方面对2020年关于混凝土桥梁耐久性的论文进行梳理,探讨未来混凝土桥梁耐久性的研究重点和发展方向。

关键词:混凝土桥梁;耐久性;服役性能;寿命预测

中图分类号:U448.34 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0100-07

State-of-the-art review of the durability of concrete bridges in 2020

ZHAN Yulin^{1a, 1b}, SI Ruizhe^{1a, 1b}, ZANG Yamei^{1a, 1b, 2}

(1a. Dept. of Bridge Engineering; 1b. Institute of Civil Engineering Materials, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. School of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, P. R. China)

Abstract: In recent years, the durability of concrete bridges has attracted extensive attention from researchers and has been one of the hot topics in bridge research. The durability of concrete bridges can affect the safety and service life of bridges directly. Currently, the research on the durability of concrete bridges is mainly divided into two aspects: 1) From the perspective of the damage mechanism of the materials, the damage modes and influence factors of the bridge component materials are studied and the influence mechanism of the durability of the concrete bridge materials is analyzed; 2) From the whole of the bridge structure, the design and evaluation of the durability of the bridge and the maintenance of the bridge are studied, and the methods to improve the durability of the concrete bridge structures are explored. In order to grasp the research trend on the durability of the concrete bridge, this paper reviewed the literature on the durability research of concrete bridges by domestic and foreign scholars in 2020, from the design of the concrete bridge, the durability of the concrete material research, the study of concrete bridge reinforcement corrosion and the durability of concrete bridge improving technology, the influence of different service environment on the durability of the bridge, performance evaluation and service life prediction. The research focus and development direction of the durability of concrete bridges in the future are discussed.

Keywords: concrete bridge; durability; service performance; service life prediction

混凝土桥梁的耐久性直接影响到长期服役桥梁的安全性和使用寿命,是桥梁研究的热点之一。由于桥梁的使用环境比较复杂,外部环境的影响(如气候、温湿度、有害离子的

侵蚀等)以及荷载作用会导致混凝土桥梁的服役性能退化。混凝土桥梁的耐久性研究大致分为两个方面:一方面是从材料的损伤机理层面入手,研究桥梁材料的破坏方式和影响因

收稿日期:2021-07-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51878564);四川省科技计划资助(2021JDTD0012)

作者简介:占玉林(通信作者),男,博士,教授,主要从事混凝土及钢-混凝土组合结构桥梁、高性能复合材料等研究,
E-mail: yulinzhan@home.swjtu.edu.cn.

素,其中,混凝土的性能劣化主要受物理、化学和力学等影响,混凝土劣化进而导致内部钢筋锈蚀问题,从而引起混凝土桥梁结构的耐久性退化;另一方面是从桥梁结构的整体出发,研究混凝土桥梁的耐久性性能设计、寿命预测评估及养护方案等,探究提高混凝土桥梁结构耐久性的措施。从混凝土桥梁的设计、混凝土桥梁材料的耐久性研究、混凝土桥梁的钢筋锈蚀研究、混凝土桥梁的耐久性提升技术、不同服役环境对桥梁耐久性的影响、长期服役性能评估及寿命预测等方面对 2020 年在混凝土桥梁耐久性研究方面取得的进展进行梳理总结。

1 桥梁耐久性设计

在混凝土桥梁结构中,不同部位的构件受到的荷载以及所处环境的不同会导致桥梁混凝土结构耐久性的差异,针对这一现象,陈琳等^[1]对混凝土构件的耐久性设计方法进行研究,提出混凝土结构的分层模块化划分方法,对各构件进行单独寿命设计使各层次的耐久性达到要求,从而能够优化混凝土结构的整体设计,降低桥梁的建造、维修以及养护成本,延长桥梁结构的寿命。林政园等^[2]对全寿命周期的桥梁设计流程进行了系统的介绍(图 1),分析对比该方法与传统设计方法的区别,并且以日喀则地区某市政桥梁设计为例,开展了桥梁全寿命周期设计。王崇交等^[3]通过考虑桥梁使用周期内的荷载、环境和灾害作用,结合桥梁与周围环境、经济的相互关系,采用时变可靠度分析方法,建立了桥梁结构时变可靠指标,并以成本效益为最优目标提出基于可靠度的桥梁全寿命设计方法。殷鹏程^[4]以湄洲湾跨海大桥为工程背景,考虑桥梁使用环境中具有侵蚀性离子和结晶破坏等特点,对该桥梁开展了结构耐久性设计,主要设计手段是高性能混凝土的应用、混凝土保护层厚度的增加以及结构表面的防腐措施的应用。

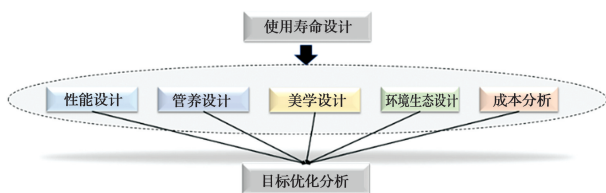


图 1 全寿命周期设计流程示意图^[2]

秦向杰等^[5]对南京长江大桥加固方案进行比选,为满足文物保护要求而采用不同的填料材料来提高结构性能,分别采用薄层自密实混凝土、轻质泡沫混凝土填料等来提高桥梁结构的承载力及耐久性能。黄海新等^[6]为实现钢筋混凝土 T 梁桥结构的优化设计,以桥梁设计规范为基础,采用模块化的思想构建了能进一步考虑耐久性和可靠性的优化设计模型,并采用 VB 和 MATLAB 平台开发了优化程序。

上述研究在桥梁结构的设计和桥梁构件层面提出更为细化的设计方法,并且桥梁全周期设计方法也得到进一步的提升。

2 桥梁混凝土材料耐久性问题的研究

混凝土桥梁中,混凝土材料的耐久性问题体现为材料本身的劣化问题,主要包括碱骨料反应、硫酸盐侵蚀和冻融循环等对混凝土的损伤和破坏。

碱骨料反应方面:碱骨料反应是导致桥梁耐久性退化的主要问题之一,混凝土中碱骨料反应主要有两种形式,分别为碱-硅反应(ASR)和碱-碳反应(ACR)。在桥梁服役过程中,ASR 相比于 ACR 更为常见。碱骨料反应对桥梁中各个部位的混凝土构件都有潜在的影响,从而导致桥梁结构的耐久性问题。仅法国就有 400 余座桥梁结构受到 ASR 的影响^[7]。ASR 模型的建立可以有效地提供混凝土构件在 ASR 破坏条件下的行为特征,从而更好地进行混凝土构件的耐久性设计,以及做出桥梁养护维修的有效决策。Allahyari 等^[8]采用机器学习的理论,结合化学-力学、动力学知识,建立时变-温变的 ASR 模型,用来分析在役混凝土结构中 ASR 的膨胀问题;该模型利用实验室实测数据,并结合相关文献中的 ASR 数据对模型进行了修正,相较于同类碱-硅反应膨胀模型,该模型在预测碱-硅反应中材料行为的精确度上有明显的提高。Karthik 等^[9]考虑混凝土保护层、内部混凝土的时效性和被动预应力效应对纵向和横向钢筋的影响等,采用兼容拉压杆模型对实验环境条件下不同程度碱-硅反应、延迟钙矾石形成以及钢筋锈蚀的 C 型梁进行了研究,碱-硅反应和钙矾石形成后,混凝土构件的力学性能和韧性随着被动预应力的增加而提升,而对于受到严重侵蚀的构件,其吸能性能降低 59% 左右;结果还表明,经过 60 年的服役,梁柱接头处横向和纵向钢筋的锈蚀会导致 35% 左右的变形能力下降以及 86% 的吸能能力降低。对在役桥梁的现场实测数据的分析,能够进一步了解实际使用过程中 ASR 对桥梁结构的影响, Sanchez 等^[10]利用表面观测以及多层次测试方法对服役近 50 年的立交桥的状况进行了评估,研究发现:与桥面板上部相比,其底部由于高湿度环境、钢筋高度锈蚀以及加载和约束效应等因素与碱-硅反应产生的膨胀相叠加有更严重的损坏;碱-硅反应物的产生影响到骨料咬合能力,导致受 ASR 影响的构件抗剪能力降低。为充分利用已有的检测数据对桥梁混凝土构件中 ASR 问题进行有效的分析, Ogawa 等^[11]利用一种名为主题模型的统计方法,对不同桥梁检测报告中的数据及内容进行了统计分析,研究总结归纳出桥梁在不同条件下的破坏特征,为桥梁的养护以及管理提供有效的指导。该研究重点分析了桥梁检测报告中与 ASR 破坏相关且出现频率较高的关键词如“裂缝(crack)”“碱-硅反应(ASR)”“龟背纹(turtle-shaped)”等,总结出桥梁中产生碱-硅反应后的破坏特征,从而有利于在之后的桥梁检测过程中根据这些特征及早地判断桥梁结构中是否存在 ASR 破坏,并做出相应的防护措施。

硫酸盐侵蚀方面:为研究硫酸盐侵蚀对弯曲疲劳荷载和干湿循环条件下的混凝土试件的影响, Liu 等^[12]采用质量损失率和相对动弹性模量的变化来评估耦合效应对混凝土的

整体性以及力学性能的影响,并测量了混凝土内部的硫酸盐含量来衡量硫酸根离子在不同实验环境条件下的渗透率,结果显示,在干湿循环作用下混凝土试件同时受到毛细作用引起的水对流以及浓度梯度产生的扩散现象的影响,弯曲疲劳荷载和干湿循环的条件加速了硫酸根离子在混凝土中的迁移以及混凝土的劣化程度。张中亚等^[13]采用微观扫描以及力学性能测试的方法,研究硫酸盐侵蚀条件下混凝土构件的抗剪性能,发现混凝土的抗剪强度随着硫酸盐侵蚀的时间增加而降低;不同硫酸盐浸泡条件下试件的破坏形式由于侵蚀机理的不同而产生变化,全浸泡的混凝土试件的主要破坏形式为骨料的翻滚、剥离以及剪切面附近水泥基质的滑移,如图 2(a)所示。但在半浸泡条件下,混凝土试件以物理结晶损伤为主,破坏形式主要以基质开裂和剪胀滑移为主,如图 2(b)所示。

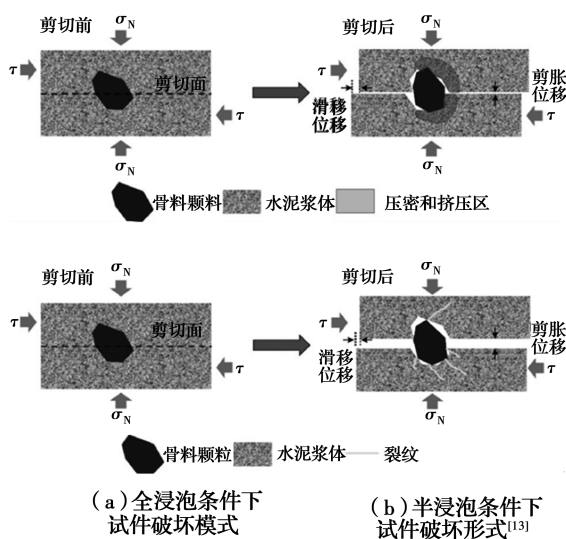


图 2 硫酸盐侵蚀条件下混凝土构件的抗剪性能

为进一步研究不同浸泡环境中硫酸盐对混凝土孔隙结构的影响机理,Zhang 等^[14]从微观孔隙结构层面对混凝土在不同硫酸盐侵蚀条件下的劣化特性进行了探讨,结果表明:混凝土试件在硫酸盐溶液中全浸泡条件下,硫酸盐侵蚀产物在前期(3个月内),首先会填充在混凝土微观孔隙中;在中后期(3个月后),由于硫酸根离子与水泥水化产物的反应以及骨料与基质接触区域的破坏,试件中大孔隙(直径为 1~100 μm)的含量增加导致混凝土构件的劣化;在硫酸盐半浸泡条件下,硫酸盐侵蚀产物前期主要在大孔隙中聚集,而中后期由于结晶压力的作用引起水泥基质中裂缝的开展导致微观孔隙增多。该研究提出减少混凝土结构中大孔隙(直径为 1~100 μm)的起始含量将会潜在地减少硫酸盐侵蚀对混凝土构件的物理破坏。

冻融循环方面: Saydan 等^[15]根据 Misirlioglu 大桥用不同种类集料类型的实测数据建立有限元模型,并模拟在现有荷载下冻融循环前后桥梁的结构行为,冻融循环前桥梁构件在当前荷载的作用下,应力分布在整体结构的表面,而冻融循环后结构易失去承载能力并且荷载会集中分布在局部构件。Xu 等^[16]对新型桥面铺装材料聚醚型聚氨酯混凝土的抗

老化性能进行了评估,发现在不同老化条件下,聚醚型聚氨酯混凝土在冻融循环后的劈裂强度都明显高于未老化的 SBS 改性沥青,聚醚型聚氨酯混凝土有良好的抗老化性以及耐久性,可以用于长期服役的桥面铺装材料。Khanzadeh 等^[17]利用临界饱和点到达时间模型(TTRCS)评估了混凝土构件冻融循环条件下的耐久性能,研究了 30 种不同水灰比、空隙率以及气孔分布的混凝土构件,表明高效减水剂和引气剂同时使用时会产生反应,引起混凝土内部气孔间距增大,从而导致混凝土构件在使用高效减水剂的时候需要增加引气剂的用量,但高效减水剂在低水灰比的混凝土试件中可以减少小气孔直径,降低气孔连通性,从而增加到达饱和临界点的时间,进而提高混凝土抗冻融循环的性能。

3 桥梁结构中钢筋的锈蚀研究

除混凝土基体结构以及混凝土保护层的损伤以外,钢筋混凝土中钢筋的锈蚀也是钢筋混凝土桥梁耐久性性能退化的一个重要原因。在钢筋混凝土桥梁服役过程中,环境中的有害物质(如氯离子和 CO_2 等)逐渐侵入混凝土并在混凝土内部迁移,从而导致钢筋钝化层的破坏和钢筋的锈蚀,如图 3 所示。

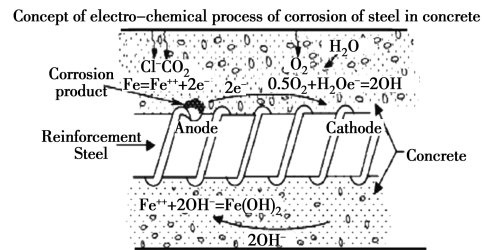


图 3 混凝土中钢筋锈蚀示意图^[18]

混凝土碳化导致的钢筋锈蚀也是影响桥梁结构耐久性最普遍的问题之一。大气中的 CO_2 是导致混凝土碳化的主要因素。随着世界工业化的发展,全球二氧化碳的排放量在不断增加,预测显示大气中的 CO_2 在未来较长一段时间里会持续上升^[19]。为考虑大气中 CO_2 的变化对混凝土结构的影响,Ekolu^[20]基于全球 CO_2 浓度变化的预测数据(到 2100 年)并考虑环境因素(包括内陆和沿海亚热带地区的气候条件),研究了自然碳化预测模型,以探讨混凝土碳化发展过程以及混凝土结构的使用寿命,研究结果表明,随着 CO_2 浓度的增加,普通强度的混凝土的碳化深度将会增加 31%,而使用寿命则降低 24%。对于正在服役的混凝土结构,由于大气 CO_2 浓度的增加,钢筋锈蚀速率将会加快,进而导致桥梁维修和养护成本的增加。针对大气中 CO_2 浓度不断升高的问题,混凝土结构设计时,需要更加注意混凝土强度等级以及保护层厚度的设计。

混凝土结构的碳化引起钢筋锈蚀的预测模型,对桥梁的耐久性设计、旧桥的养护和维修以及桥梁耐久性性能的评估都有着重要的指导作用。常见的自然碳化模型主要是根据加速碳化等实验数据建立,对于实际混凝土结构的自然碳化以及锈蚀过程难以准确预测。为提高现有钢筋混凝土碳化预

测模型的准确性,Gu 等^[21]基于贝叶斯定理提出了基于实测数据修正碳化引起的钢筋混凝土结构锈蚀与开裂模型的方法,为校准现有的混凝土碳化引起的衰退模型提供了强有力的工具,使现有的预测模型能够更准确地评估钢筋混凝土构件在真实使用环境中的劣化程度以及结构的耐久性,并且预测模型对混凝土构件剩余使用寿命预测的准确性随实测数据样本数量的增加而提高。Jung 等^[22]根据服役超过 19 年桥梁的现场实测数据,考虑扩散系数、CO₂ 浓度、CO₂ 吸收量以及水化程度等设计参数,提出一种结合菲克第一定律与贝叶斯原理的混凝土碳化预测方法;利用韩国不同地区桥梁的现场实测数据对该方法进行验证,新的预测方法能够较好地针对不同环境条件下的钢筋混凝土构件的碳化过程进行预测,从而根据预测结果有效地对在役桥梁结构提供针对性的养护方案。Sun 等^[23]研究了混凝土碳化、钢筋锈蚀以及保护层表面的劣化过程,考虑使用环境、材料以及结构特性存在的不确定性提出综合的概率分析方法,该方法在已有的模型基础上增加矫正项和误差项,并基于现场实测数据利用贝叶斯理论对模型参数进行改进和校准,能够分析锈蚀引起的钢筋混凝土开裂问题,从而达到更准确且满足结构耐久性的设计要求。Crespi 等^[24]提出了水平荷载作用下在役高速公路桥梁垮塌的有效评估方法,并通过减少钢筋用量和应用多模态推覆分析方法建立简化模型,用于考虑碳化导致的钢筋锈蚀问题。该方法能够识别出桥梁结构中最先达到垮塌条件的混凝土构件,从而为桥梁的养护、维修以及加固提供有效信息。

在大气环境下桥梁结构中钢筋的锈蚀问题主要是考虑混凝土的碳化问题,并建立碳化模型来研究。在过去的一年中,研究人员从不同方面对钢筋混凝土碳化锈蚀模型进行改进,然而对模型的优化依然需要更多的桥梁实测数据进行校准和验证。

4 不同服役环境对桥梁耐久性的影响

不同的服役环境对桥梁耐久性影响明显,如海洋环境下海水中含有的有害离子和气候变化过程中温度的变化都会潜在地增加桥梁结构耐久性退化速度。因此,了解桥梁在不同服役环境中的劣化行为对桥梁耐久性的设计与评估有重要意义。

海洋环境:Xie 等^[25]研究了洋流和海浪的耦合效应对海洋环境中跨海桥梁桥墩结构耐久性的影响,包括环境指标、耐久性指标和耐久性评价等。研究表明,桥墩结构的损伤与桥墩材料的成分、特殊环境作用下宏观性能的下降有关。Zhou 等^[26]在日本开展了为期 4 年的混凝土桥梁结构在大气海洋环境下的暴露实验,并考虑盐雾、台风、雨水等多种环境因素,研究了混凝土中氯化物的黏附与扩散行为,发现混凝土结构中氯化物的沉积不仅与时间有关,还与构件所处位置的局部气候以及地理状况有着密切的关系;桥梁表面氯化物的沉积在台风期间会明显增加,而雨水对试件表面氯化物的影响与雨水的分布和平均降雨量有关,既影响冲刷作

用也影响其渗透性。其研究结果有助于更细致地确定海洋环境下桥梁结构的养护重点,从而对桥梁进行针对性的养护以节约养护维修成本。

气候变化:Shirkhani 等^[27]研究了加拿大不同区域的气候变化条件下温度升高对混凝土桥面板设计使用寿命的影响,研究利用 3 种温室气体排放的代表性浓度路径下的 10 种全球气候模型来获取未来温度变化的预测值,并根据菲克扩散模型建立氯离子扩散和钢筋脱钝氯离子阈值与温度相关联的模型,预测钢筋开始锈蚀的时间,从而评估混凝土桥面板的使用寿命。研究发现,30 年平均温度每升高 1 °C,氯离子扩散系数将会从 4% 提高到 7%,到 21 世纪末,普通水泥混凝土和高性能混凝土桥面板的平均设计寿命将会分别减少 50% 和 33%。Guest 等^[28]探究了考虑气候变化过程中钢筋混凝土劣化的桥面板设计模型,该模型模拟钢筋锈蚀的产生、混凝土裂缝的产生以及裂缝的扩展 3 个劣化阶段,研究了不同的桥面板设计方法以及气候变化对桥面板的设计寿命和桥面板劣化敏感性的影响,说明气候变化对桥面板使用寿命影响的大小主要取决于桥面板的耐久性设计。

上述研究均表明,不同的气候条件以及桥梁的服役环境在不同程度上影响了桥梁结构的使用寿命以及耐久性能。在桥梁设计过程中考虑多因素的耦合有利于提高混凝土桥梁的使用寿命。

5 桥梁耐久性的提升技术

桥梁耐久性的提升有助于降低桥梁养护维修的成本和延长桥梁的使用寿命,随着桥梁耐久性问题越来越多地受到研究人员以及工业界的重视,关于耐久性提升方法的研究也逐渐增多。从桥梁材料的改性以及加固的角度出发,Sheng^[29]发现在钢筋混凝土结构中使用高岭土作为添加剂部分替代普通硅酸盐水泥,能够有效地减少有害离子对钢筋表面的侵蚀,从而提高钢筋混凝土结构的耐久性。Chen 等^[30]通过为期 3 年的自然锈蚀实验发现,钢纤维的掺加可以提高混凝土内部裂纹的曲折度,并减少在使用荷载下混凝土和钢筋之间的损坏程度;另外,纤维能够对混凝土基质产生约束作用,减缓在钢筋锈蚀膨胀的情况下混凝土保护层的开裂,从而延长钢筋混凝土构件的耐久性能。孙宗磊^[31]提出对浅海区铁路桥梁通过添加原位增韧材料或减缩型聚羧酸减水剂,能够有效地提升钢筋混凝土结构的耐腐蚀性能;并且添加的材料能够有效地抑制有害离子向混凝土结构内部迁移,从而提升海洋环境下桥梁结构的耐久性能。

上述研究结果表明,通过不同手段对混凝土材料进行改性和加固能够在一定程度上提高桥梁结构的耐久性能,如果在设计阶段考虑到改性材料性能的提升对耐久性的影响,并且细化桥梁耐久性设计,将有利于更高效地提升桥梁的整体耐久性能。

6 桥梁长期服役性能评估

为更好地评价桥梁在实际使用过程中产生的劣化问题,

对长期服役的桥梁进行现场实测数据的采集必不可少,并在此基础上开展桥梁的使用性能评估。

Ambroziak 等^[32]调查波兰北部一座 95 年水泥混凝土拱桥的物理、化学以及力学性能,分析桥梁混凝土材料的抗冻性、吸水性、氯离子和硫酸根离子浓度以及碳化深度等耐久性指标,发现虽然混凝土的碳化深度相对较大(最高可达到 55 mm),但混凝土的 pH 值仍然在安全范围内,测试的混凝土样品有较好的抗冻性能,并且氯离子和硫酸根离子浓度未超过标准值。Wacker 等^[33]分析长期服役木-混凝土组合桥梁的实测数据后,认为木-混凝土结构桥梁是一种高效、耐久的结构(图 4),木材为混凝土提供了湿度保护,从而大大减少了潜在的结构劣化,在高交通量与少量养护的情况下,其能保持近 100 年的使用寿命。因此,木-混凝土结构高耐久性的实现得益于良好的项目规划和桥梁的细部设计,减少服役过程中重大的破坏及劣化,延长了结构的使用寿命。



图 4 木-混凝土组合桥梁 (Salmon River Bridge)^[33]

Liu 等^[34]以 30 年服役期的钢筋混凝土桥梁构件为样本,研究了构件中氯化物含量、混凝土的微观结构、孔隙分布和钢筋的锈蚀物等,发现氯化物的侵入深度在已开裂混凝土中明显大于未开裂混凝土,并且由于海水的冲刷和钙的浸出,上游侧的混凝土桥墩孔隙率会相应地增大。Oktavianus 等^[35]以 1984 年建立在印度尼西亚泗水港 Peti Kemas 码头的预制钢筋混凝土 T 形梁为研究案例,以无损检测和有限元模拟的方法对桥梁翻新加固前后的挠度和抗弯承载力进行了研究,对于徐变、裂缝分布以及单个梁的极限弯矩承载力变化所引起的长期变形开展预测,同时考虑钢筋锈蚀和车辆通行要求,得到了新的桥梁结构使用寿命,为印尼港口的桥梁管理、养护维修和桥梁使用寿命的评估提供重要的参考。Konečný 等^[36]用现场测试的方法对捷克在役钢筋混凝土桥梁的劣化程度进行评估,并通过钻芯方法分析了碳化作用和氯离子侵蚀对钢筋锈蚀的影响;该研究对 14 座桥(包括 9 座普通公路桥梁和 5 座高速公路桥梁)的数据进行评估,发现高速公路桥梁潜在的锈蚀风险比普通公路桥梁更大。Al-Khafaji 等^[37]开展了美国密苏里州的 Southview 大桥和得克萨斯州的 Sierrita de la Cruz Creek 桥的钻芯试件微观结构分析,研究了玻璃纤维增强韧性聚合物筋对桥梁混凝土结构耐久性的影响,结果表明:两座大桥在微观结构上都没有发现明显的劣化现象,且不存在浸出氯离子以及侵蚀的迹象;碳化问题仅发生在其中一座桥梁上,研究结果为玻璃纤维增强韧性聚合物筋提高混凝土在实际工程中应用的耐久性能提供重要的参考。Zhang 等^[38]对南京长江大桥轻骨料混凝土

土桥板的宏观力学性能以及轻质骨料和水泥浆体的界面过渡区进行了研究,发现服役 50 年后,混凝土取芯试件的抗压强度在冻融循环和动荷载的作用下降低了 76%;由于长期的水泥水化作用使轻骨料与水泥浆能够紧密地结合,导致界面过渡区在扫描电子显微镜下无法辨别,用纳米压痕的方法判断出界面过渡区的范围在 100 μm 左右,有助于进一步了解轻质骨料对桥梁结构耐久性的影响。

长期服役桥梁实测数据的分析能够较好地反应出在桥梁实际使用过程中产生的实际耐久性退化问题,有效地为当地的桥梁设计、养护和修复提供重要的数据支撑。桥梁实际所处环境比实验室模拟的环境更为复杂,对实测数据的研究能够更准确地体现导致桥梁耐久性退化的主要原因。

7 热点与展望

随着基础设施建设的日趋饱和,越来越多的基础设施进入运营维修阶段,混凝土桥梁的耐久性能受到越来越多的重视。根据目前现有的文献发现,对于桥梁耐久性的研究在不同层面上都趋于精细化,未来可以从以下几个方面开展桥梁耐久性的研究:

- 1) 混凝土耐久性设计的优化,如混凝土桥的材料(结构)一体化设计、考虑多因素耦合情况下的耐久性设计。
- 2) 高性能及高耐久性材料的研发,如改性混凝土、抗侵蚀表面涂层、UHPC、FRP 材料以及混凝土高效有机添加剂在混凝土桥构件中的应用。
- 3) 钢筋抗腐蚀技术的研究,如钢筋阻锈剂、自迁移钢筋阻锈技术等。
- 4) 混凝土桥梁耐久性相关的破坏损伤机理研究。
- 5) 桥梁寿命预测模型的进一步提升,如根据桥梁监测数据进一步完善桥梁寿命预测理论。

参考文献:

- [1] 陈琳, 屈文俊, 朱鹏, 等. 混凝土结构等耐久性设计方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(2): 81-90.
- [2] 林政园, 肖光术, 冯玉龙, 等. 基于全寿命周期的桥梁安全和耐久性设计研究[J]. 公路工程, 2020, 45(4): 120-122, 210.
- [3] 王崇交, 李亚东. 基于可靠度的桥梁全寿命设计方法[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 1-6.
- [4] 殷鹏程. 福厦高铁湄洲湾跨海大桥(96+180+96) m 斜拉桥总体设计[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(Sup1): 12-18.
- [5] 秦向杰, 何初生, 陈春, 等. 基于文保要求的南京长江大桥双曲拱桥加固方案比选及设计[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 102-106.
- [6] 黄海新, 孙文豪, 程寿山. 钢筋混凝土 T 梁桥模块化集成设计优化与实践[J]. 混凝土, 2020(6): 152-159, 162.
- [7] MULTON S, LECLAINCHE G, BOURDAROT E, et

- al. Alkali-silica reaction in specimens under multi-axial mechanical stresses[C]// Proc. 4th Int. Conf. Consec, 2004: 2004-2011.
- [8] ALLAHYARI H, HEIDARPOUR A, SHAYAN A, et al. A robust time-dependent model of alkali-silica reaction at different temperatures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 106: 103460.
- [9] KARTHIK M M, MANDER J B, HURLEBAUS S. Simulating behaviour of large reinforced concrete beam-column joints subject to ASR/DEF deterioration and influence of corrosion [J]. *Engineering Structures*, 2020, 222: 111064.
- [10] SANCHEZ L F M, FOURNIER B, MITCHELL D, et al. Condition assessment of an ASR-affected overpass after nearly 50 years in service [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236: 117554.
- [11] OGAWA F, CHIKATA Y. Analysis on the utilization of opinion of bridge inspection results using topic model for maintenance and management [J]. *Materials Transactions*, 2020, 61(12): 2428-2434.
- [12] LIU F, YOU Z P, DIAB A, et al. External sulfate attack on concrete under combined effects of flexural fatigue loading and drying-wetting cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118224.
- [13] 张中亚, 周建庭, 邹杨, 等. 硫酸盐侵蚀对混凝土抗剪性能的影响[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(7): 64-72.
- [14] ZHANG Z Y, ZHOU J T, YANG J, et al. Understanding of the deterioration characteristic of concrete exposed to external sulfate attack; Insight into mesoscopic porestructures [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119932.
- [15] SAYDAN M, UNAL A, KESKIN U S, et al. An investigation of the current situation of the Mısırhoğlu Bridge and possible damages after freeze-thaw by using finite elements analysis, Sille-Konya (Central Anatolia, Turkey) [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 117: 104788.
- [16] XU S F, XU M, ZHANG Y X, et al. An indoor laboratory simulation and evaluation on the aging resistance of polyether polyurethane concrete for bridge deck pavement [J]. *Frontiers in Materials*, 2020, 7: 237.
- [17] KHANZADEH MORADLLO M, QIAO C Y, GHANTOUS R M, et al. Quantifying the freeze-thaw performance of air-entrained concrete using the time to reach critical saturation modelling approach [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 106: 103479.
- [18] SATYENDRA. Corrosion of steel reinforcement bars in concrete [J/OL]. <https://www.ispatguru.com/corrosion-of-steel-reinforcement-bars-in-concrete>.
- [19] STOCKER TF, QIN D, PLATTNER G K, et al. *Climate Change 2013; The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of Ipcc the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [20] EKOLU S O. Implications of global CO₂ emissions on natural carbonation and service lifespan of concrete infrastructures-Reliability analysis [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103744.
- [21] GU H, LI Q W. Updating deterioration models of reinforced concrete structures in carbonation environment using in-situ inspection data [J/OL]. *Structure and Infrastructure Engineering*, <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1841246>.
- [22] JUNG H, IM S B, AN Y K. Probability-based concrete carbonation prediction using on-site data [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(12): 4330.
- [23] SUN B, XIAO R C, RUAN W D, et al. Corrosion-induced cracking fragility of RC bridge with improved concrete carbonation and steel reinforcement corrosion models [J]. *Engineering Structures*, 2020, 208: 110313.
- [24] CRESPI P, ZUCCA M, VALENTE M. On the collapse evaluation of existing RC bridges exposed to corrosion under horizontal loads [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 116: 104727.
- [25] XIE Y P, LI X H. Influence of the coupling effect of ocean currents and waves on the durability of pier structure of cross-sea bridges [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 110(Sup1): 87-90.
- [26] ZHOU M, LIAO J C, AN L. Effect of multiple environmental factors on the adhesion and diffusion behaviors of chlorides in a bridge with coastal exposure: Long-term experimental study [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(10): 04020081.
- [27] SHIRKHANI H, ZHANG J Y, LOUNIS Z. Ensemble analysis of climate-change impacts on design-service life of reinforced concrete bridge decks across Canada [J]. *Natural Hazards Review*, 2020, 21(3): 04020030.
- [28] GUEST G, ZHANG J Y, ATADERO R, et al. Incorporating the effects of climate change into bridge deterioration modeling: The case of slab-on-girder highway bridge deck designs across Canada [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32

- (7): 04020175.
- [29] SHENG P. Effect of Kaolin addition on electrochemical corrosion resistance of duplex 2205 stainless steel embedded in concrete exposed in marine environment [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020, 11732-11741.
- [30] CHEN E, BERROCAL C G, LÖFGREN I, et al. Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams [J]. *Materials and Structures*, 2020, 53(2): 1-22.
- [31] 孙宗磊. 浅海区铁路桥梁耐久性设计与应用研究[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(Sup1): 27-33.
- [32] AMBROZIAK A, HAUSTEIN E, NIEDOSTATKIEWICZ M. Chemical, physical, and mechanical properties of 95-year-old concrete built-in arch bridge [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 14(1): 20.
- [33] WACKER J P, DIAS A M P G, HOSTENG T K. 100-year performance of timber-concrete composite bridges in the United States [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(3): 04020006.
- [34] LIU J, JIANG Z L, ZHAO Y L, et al. Chloride distribution and steel corrosion in a concrete bridge after long-term exposure to natural marine environment [J]. *Materials*, 2020, 13(17): 3900.
- [35] OKTAVIANUS Y, SOFI M, LUMANTARNA E, et al. Long-term performance of trestle bridges: Case study of an Indonesian marine port structure [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(5): 358.
- [36] KONEČNÝP, VOŘECHOVSKÁ D, ŠOMODÍKOVÁ M, et al. Extended evaluation of durability-related field inspection data from concrete bridges under service [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2020, 26: 430-438.
- [37] AL-KHAFAJI A F, MYERS J J, NANNI A. Assessment study of glass fiber-reinforced polymer reinforcement used in two concrete bridges after more than 15 years of service [J]. *ACI Materials Journal*, 2020, 117(5): 209-220.
- [38] ZHANG H, HUANG L M, YU L, et al. Macromechanical properties and ITZ of lightweight aggregate concrete from the deck of Nanjing Yangtze River bridge after 50 years [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(5): 05020005.

(编辑 邓云)