

综合交通基础设施混凝土结构耐久性提升研究

李化建^{1,2*}, 马成贤³, 杨志强^{1,2}, 董昊良^{1,2}, 易忠来^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081; 2. 高速铁路轨道系统全国重点实验室, 北京 100081;
3. 西南交通大学地球科学与工程学院, 成都 610031)

摘要: 铁路、公路、水运、民航是我国重要的交通基础设施, 混凝土结构是交通基础设施的主要结构类型, 提升交通基础设施混凝土结构耐久性能是保障交通安全、提升运输效能、延长结构服役寿命的重要途径。本文全面调研分析了我国交通基础设施混凝土结构的服役现状, 结合国情和实情从设计理论、建造技术、运维制度等角度探讨了我国混凝土结构耐久性面临的问题与挑战, 梳理了先进交通基础设施混凝土结构表面裂纹、渗透性能、内部损伤与钢筋锈蚀监测技术, 概述了交通基础设施混凝土结构精准维修技术。研究提出了我国综合交通基础设施混凝土结构耐久性提升的对策建议: 做好顶层设计、强化科技创新、完善标准体系, 全面保障综合交通基础设施混凝土结构长寿命安全服役。

关键词: 交通基础设施; 混凝土结构; 耐久性; 健康监测; 预防性维修

中图分类号: TU375 文献标识码: A

Durability Improvement Strategies for Concrete Structures of Comprehensive Transport Infrastructure

Li Huajian^{1,2*}, Ma Chengxian³, Yang Zhiqiang^{1,2}, Dong Haoliang^{1,2}, Yi Zhonglai^{1,2}

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory for Track System of High-Speed Railway, Beijing 100081, China; 3. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Transport infrastructures, including railways, highways, waterways, and civil aviation systems, rely heavily on reinforced concrete as their primary structural material. Ensuring the durability of concrete structures is critical for maintaining transport safety, improving transportation efficiency, and extending service life. This study investigates the service status of transport infrastructure concrete structures and identifies key durability issues and challenges related to design theories, construction technologies, and operational systems. Advanced monitoring technologies for surface microcracks, ion permeation, internal damage, and reinforcement corrosion are reviewed, alongside precise maintenance technologies for concrete structures. Based on these findings, recommendations for enhancing the durability of these concrete structures are proposed, emphasizing the need for comprehensive top-level design, technological innovation, and the establishment of standards systems. These measures aim to ensure the long-term safety and reliability of the transport infrastructure concrete structures.

Keywords: transport infrastructure; concrete structures; durability; health monitoring; preventive maintenance

收稿日期: 2024-09-24; 修回日期: 2024-11-28

通讯作者: *李化建, 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所研究员, 研究方向为高速铁路新型混凝土及其结构耐久性;
E-mail: chinasailor@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“综合交通运输体系效率提升战略”(2022-PP-06)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

一、前言

铁路、公路、水运、民航是我国重要的交通基础设施，是综合交通运输体系的核心部分^[1]。改革开放以来，我国交通基础设施建设总量突飞猛进，交通运输量节节攀升，已建成全球最大的高速铁路网与高速公路网，机场、港口等基础设施建设取得显著进展^[2]。《交通强国建设纲要》（2019年）提出，到21世纪中叶，全面建成交通强国，基础设施规模质量位居世界前列。《国家综合立体交通网规划纲要》（2021年）提出，推进综合交通高质量发展，提高交通基础设施安全水平，其中既有交通基础设施的耐久可靠是其重要内容。我国交通基础设施以钢筋混凝土结构为主，多服役于环境侵蚀与外部荷载耦合作用中，耐久性成为综合交通基础设施混凝土结构的重要性能之一^[3-5]。目前，我国综合交通基础设施混凝土结构的整体服役状态良好，支撑了交通事业的快速发展。面对全球可持续发展的重大挑战，交通基础设施混凝土结构耐久性理论与技术得到了广泛关注和认可，如结构全生命周期设计理念初步实现^[6,7]，新建结构的耐久性设计成为混凝土结构承载能力设计考虑的重要内容。

随着全球气候变化、交通基础设施网络的进一步拓展以及交通运载工具的发展，既有交通基础设施混凝土结构承受环境作用与荷载作用发生了显著的变化。我国综合交通基础设施混凝土结构耐久性不足问题逐渐显现^[8-10]，部分交通基础设施和工程结构出现了提前劣化的现象，具体表现在：服役性能快速退化，导致工程实际使用寿命远低于设计使用年限；关键部位逐渐劣化，服役健康监测不及时导致交通事故频发；养护维修作业频次增加，限制通行情况时有发生。提升综合交通基础设施混凝土结构耐久性是实现基础设施长寿命安全保障的重要途径，对提升综合交通运输体系效能具有重要意义^[11]。然而，交通基础设施混凝土结构耐久性提升是一个系统工程，涉及地质工程、土木工程、材料工程、信息技术、工程管理等多学科^[12]；不同行业与地域的交通基础设施混凝土结构受环境侵蚀因素不同、荷载作用类型复杂，混凝土结构耐久性劣化机制与损伤失效呈现出复杂性、不确定性特征，为此，亟需深入研究我国综合交通基础设施混凝土结构耐久性提升技术，提高综合交通运输体系效率，

为交通强国战略实施提供技术保障^[13]。

提升综合交通基础设施混凝土结构耐久性性能，关乎国家政策、经济发展与社会治理，也涉及工程技术层面的科技创新、技术进步、标准体系建设等。本文在实际调研的基础上，总结我国铁路、公路、水运、民航等既有交通基础设施混凝土结构的耐久性服役现状，厘清交通基础设施混凝土结构耐久性面临的问题和挑战，总结综合交通基础设施混凝土结构耐久性技术进展，提出综合交通基础设施混凝土结构耐久性提升的对策建议，可为我国复杂服役环境下更长寿命基础设施建设提供参考。

二、我国既有交通基础设施混凝土结构耐久性现状

（一）铁路工程

我国铁路工程的轨道、桥梁、隧道、路基等基础设施的混凝土结构整体服役状态良好，但个别地区的混凝土结构在严酷环境作用下发生耐久性劣化，其中无砟轨道、桥梁、隧道是易发生病害的主要部位^[14]。21世纪初，为满足青藏铁路建设需求，我国工程人员研发了耐腐蚀性好的铁路高性能混凝土，为铁路工程基础设施长寿命安全服役提供了基础性材料^[15]。在大风干燥、冻融循环、有害物质侵蚀下，高原铁路涵渠、梁、墩台等部位的混凝土结构耐久性病害占全部病害的80%以上。在东北严寒地区，高速铁路混凝土轨道板、现浇道床、支承层等结构在冻融循环作用下易产生表层剥落^[16]；当地下水中的氯盐、硫酸盐和碳酸盐等侵蚀性离子浓度超标时，在冻融循环作用下的立面结构桥墩水位变动区会出现粉化剥落^[17]；处于大温差循环作用下的青藏铁路桥梁及墩身在服役一定年限后易出现表层开裂，呈现出结构向阳面开裂程度明显高于背阴面的现象^[18]；当隧道围岩地下水中的有害物质含量超标时，长期与盐溶液接触的混凝土结构会发生侵蚀性破坏，危及行车安全^[19]。与高速铁路、普通铁路不同，杂散电流腐蚀是导致城市轨道交通工程混凝土结构劣化的重要因素，部分地铁基础设施发生严重的局部腐蚀或氢脆失效，威胁轨道交通运营安全。

（二）公路工程

我国公路基础设施路面、桥梁及隧道多采用混

混凝土作为主体材料，受交通荷载、环境条件、施工质量的影响，不同公路工程混凝土结构耐久性存在差异。整体上看，在环境侵蚀和交通荷载的作用下，完工通车后一定年限内公路工程混凝土结构会出现日趋严重的耐久性问题^[20,21]，出现耐久性病害的主要结构部位有路面系统、桥梁、隧道等。2005年以后，我国高速公路路面材料多使用加厚沥青面层、柔性基层及组合式基层等路面结构型式，60%的高速公路路面在使用10~12年后需进行大修或中修，17%在使用6~8年后需进行大修或中修^[22]。在桥梁方面，目前我国需维修、加固的公路桥梁（四类、五类桥梁）占比达到14%以上。其中拉吊体系腐蚀是公路桥梁工程的典型病害类型，通常发生在通车5~16年后，平均使用寿命远低于吊杆体系的设计使用年限（20年）^[23]。公路桥墩和桥塔等部位的混凝土结构腐蚀问题也较为严重，如东部沿海地区部分位于水位变动区、浪溅区的桥墩表层混凝土出现严重剥落^[24]。受汽车尾气中二氧化碳与地下水中有毒介质的影响，运营6~19年的公路隧道需进行大修、中修或改建的隧道数量占70%左右，隧道耐久性研究及养护维修已迫在眉睫^[25]。

（三）民航工程

我国民航机场道面以混凝土结构为主，具有整体刚性大、强度高、稳定性好、日常养护工作量小等优势。在飞机荷载与环境侵蚀的耦合作用下，民航机场道面的整体耐久性不足^[26]，机场道面会产生表层开裂、错台、板底脱空等问题；跑道基础设施结构设计寿命仅15~30年，实际平均寿命不足设计使用年限的2/3^[27]（见图1）。经调查，全国300多个机场道面在完工后的5年内发生劣化的比例达到46.6%，而10年内发生劣化的比例达到78.4%^[28]。冻融循环导致机场道基冻胀，引发道面不均匀沉降和变形，进一步加剧了道面结构病害^[29]。拉萨贡嘎机场跑道受高寒、大温差、强紫外线作用，混凝土道面在服役19年后加铺了沥青面层，后续又进行了多次预防性养护维修。上海虹桥机场东跑道长期超负荷运行，1991—2022年加铺了5次沥青面层，平均每次加铺服役寿命仅为7.5年，远低于20年的设计寿命。

（四）水运工程

水运工程如海港码头、内河航道码头等的混

凝土结构在船舶撞击、海洋氯化物侵蚀、冻融循环作用下服役，其耐久性整体上可分为3个阶段。①1986年以前，码头混凝土结构耐久性劣化严重，桩基梁板结构出现锈蚀破坏的时间仅为5~10年，大部分需要多次维修；②1986—1996年，建成的服役超过20年的码头受腐蚀破坏的情况明显改善，大部分进入需维修阶段；③1996年以后，已建成码头的混凝土结构锈蚀现象较轻，整体状况良好^[30]。海港码头混凝土结构耐久性劣化的主要类型有胸墙裂缝、梁结构混凝土脱落、码头面层开裂等，占比分别为30.24%、22.12%、18.64%^[31]（见图2）；内河航道码头在水中侵蚀物质、船舶撞击下，易产生结构破损、胸墙裂缝、钢筋锈蚀等问题。2010年以后，我国建造的水运工程中，随着设计标准的提升和高耐久混凝土技术的进步，水运工程混凝土结构耐久性明显提升^[32]。作为我国采用50年不大修的设计标准、使用高性能海工混凝土和硅烷浸渍防腐等措施

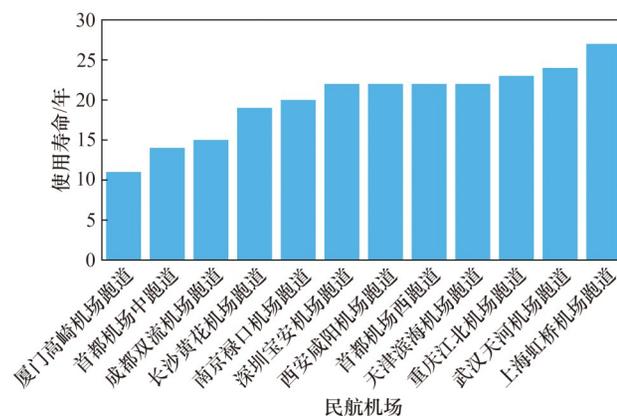


图1 我国部分民航机场跑道使用寿命

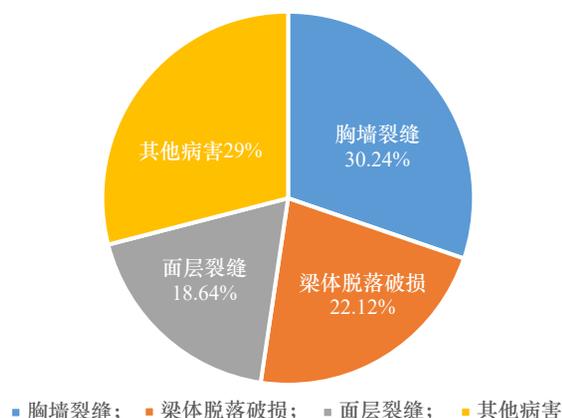


图2 海洋环境码头混凝土结构耐久性劣化类型

建造的海港工程,深圳市盐田港各泊位的服役状况良好,未发现明显的钢筋锈蚀和结构破损情况^[33]。

三、综合交通基础设施混凝土结构耐久性面临的挑战

(一) 综合交通基础设施混凝土结构耐久性设计理论尚未完全成熟

1. 混凝土结构耐久性理论尚未完全建立

混凝土结构的耐久性问题十分复杂,不仅环境作用本身多变,带有很大的不确定与不确定知性,而且结构材料在环境作用下的劣化机理也有诸多问题有待进一步明确。《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2019)规定了不同环境与作用等级的混凝土耐久性指标。在此基础上,铁路、公路、水运、民航等行业也相继制定了具有行业特色的混凝土结构耐久性设计规范,明确了不同结构部位混凝土结构设计的使用年限,提出了极端严酷环境宜采用附加防腐措施与结构耐久性监测装置,为交通基础设施混凝土结构长寿命服役提供了依据^[34,35]。然而,铁路、公路是典型的线性工程,除受环境侵蚀因素外,混凝土结构还承受着交通动荷载作用影响,但现有的设计标准未能涵盖交通基础设施所面临的各种复杂环境条件^[36]。此外,交通基础设施混凝土结构服役性能演变规律与时间关系尚不明确、基于性能的混凝土结构耐久性量化设计方法尚未完全建立^[37],导致复杂严酷环境下的交通基础设施混凝土结构耐久性问题研究存在源头不足问题。

2. 设计容量无法满足不断增长的交通量变化

在早期交通基础设施设计及建造的过程中,因对未来交通量预估不足,导致部分交通基础设施的设计容量有限。我国早期建成的高速公路大部分设计为双向四车道,随着经济社会的快速发展,已无法满足快速增加的交通量需求,致使高速公路混凝土结构耐久性逐渐下降,需要维修、改造的区段逐年增加。20世纪60年代建成的南京长江大桥公路桥的汽车通行量设计上限为每日1.2万辆,然而2016年大桥封闭维护前的日均汽车行车量达到8万辆以上,公路正桥桥面系统出现了多处耐久性劣化问题^[38]。1990—2019年,上海虹桥机场的旅客吞吐量年均增长率为8.77%,机场长期处于超负荷状态,机场跑道屡修屡坏;1990年的旅客吞吐量为398.4万人次,起

降37 105架(次),而2019年的旅客吞吐量达到4563.8万人次,起降272 928架(次)^[39]。

(二) 综合交通基础设施建造技术难以保障混凝土结构的长期耐久

1. 混凝土材料选择面临优化提升的挑战

交通基础设施混凝土结构原材料主要为大宗建材,随着我国交通基础设施建设范围的不断拓展,部分地区合格原材料难以供应,而采用不合格的原材料易导致结构产生耐久性问题。我国石灰石资源、火电厂、钢铁厂地域分布不均,导致部分地区水泥标准偏低,粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料供应缺乏^[40],使混凝土耐久性存在先天不足。随着国家对环境保护力度的不断加强和河砂限采/禁采政策的实施,部分地区天然砂石骨料无法供应,原材料质量参差不齐且质量检验流程不完善,导致混凝土质量问题时有发生^[41]。例如,公路工程早期的交通量需求不高,采用的道面沥青材料标准较低,而随着近年来交通量的飞速增长,原有的沥青材料已难以满足大交通量、重载交通的频繁冲击需求^[42],服役性能明显不足^[43]。

2. 结构耐久性受基础设施施工质量问题制约

施工过程是综合交通基础设施的关键环节,良好的施工质量是交通基础设施长期耐久的前提^[44]。以隧道工程为例,因施工不规范造成的衬砌结构病害约占80%,而由于原材料及配比不良导致的耐久性劣化问题仅占15%^[45]。一方面,改革开放以来,我国综合交通基础设施建设规模快速发展,但存在施工人员技术不足、监理作用发挥不充分、施工质量监控措施不到位等问题,导致交通基础设施混凝土结构存在不同程度的初始缺陷;另一方面,部分地区的综合交通基础设施混凝土结构处于极端施工环境,如部分高地热隧道的地下水温度在90℃以上,隧道内气温常年在60℃以上,严酷的施工环境给交通基础设施施工质量带来挑战^[46]。

(三) 综合交通基础设施的运维制度难以满足混凝土结构长期耐久需求

1. 结构健康监测技术及装备亟需完善

综合交通基础设施混凝土结构耐久性劣化表现出偶发性与突发性特征,结构健康监测是掌握其耐久性状态的主要手段^[47]。我国交通基础设施混凝土

结构服役健康监测技术已取得重要进展,但尚未建立完善的既有交通基础设施耐久性监测技术体系。交通基础设施混凝土结构型式复杂、隐蔽结构多、缺乏智能感知技术,导致难以及时准确地识别混凝土结构耐久性劣化问题。铁路、民航机场基础设施“天窗”运维作业时间有限、环境条件恶劣,不同季节、不同时间的混凝土温/湿度变化大,对耐久性监测结果影响大,亟需开发灵敏度高、抗干扰性强的混凝土结构耐久性智能监测技术与装备。

2. 养护维修材料性能与工艺亟需提升

完善的养护维修制度是确保综合交通基础设施混凝土结构耐久可靠的重要保障。《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)规定了服役一定年限的混凝土结构耐久性评定方法,为交通基础设施的耐久性评定与养护维修作业提供了依据。然而,既有综合交通基础设施的维修周期、养护维修材料质量等短板,导致交通基础设施服役性能快速下降^[48]。以水运工程为例,港口码头浪溅区混凝土结构的钢筋腐蚀问题突出,受涨落潮差和波浪冲击影响,传统涂层刷涂修复效果不佳,修复后也难以保障安全使用年限。

3. 综合管理体制机制亟需革新

为保障交通基础设施的耐久性,我国各行业均制定了较为严格的管理制度。然而,铁路、公路是线性工程,全局管理难度较大,部分行业与部分地区管理人员履职不严、制度不合理、奖惩措施不到位,导致交通基础设施运维措施不到位。近年来,随着公路运输的增长、汽车大型化与重型化的发展,部分地区公路工程汽车超载、超限运输问题突出^[49]。长期超负荷运营导致混凝土结构产生耐久性劣化,结构使用寿命远低于设计使用年限^[50]。

四、综合交通基础设施混凝土结构耐久性技术进展

(一) 加强对既有综合交通基础设施混凝土结构的耐久性监测技术

基础设施耐久性监测是基于传感技术对既有结构服役性能进行测试,当结构耐久性劣化超出一定程度时会发出预警,可以为结构养护维修提供决策依据^[51,52]。深入研究混凝土结构表层裂纹、渗透性能、内部损伤和钢筋锈蚀监测技术,发展高精度、

自动化、智能化耐久性监测技术与装备,为综合交通基础设施混凝土结构耐久性提升奠定基础。

1. 计算机视觉辅助结构裂纹识别技术

混凝土裂纹可为环境中侵蚀离子传输至内部提供额外通道,是导致结构耐久性快速降低的主要原因^[53]。现有混凝土结构表层裂纹监测以裂纹大小和深度为主^[54-56]。计算机视觉辅助结构表面裂纹识别技术可以通过图像采集和处理,实现混凝土结构表面损伤的全自动识别^[57-59]。在京沪高铁养护维修作业中,依靠计算机视觉辅助技术实现了无砟轨道表面和隧道表层裂纹的快速识别,确保了京沪高铁基础设施混凝土结构表面劣化的快速识别^[60]。运用无人机图像自动采集技术,可以跟踪拍摄交通基础设施混凝土结构表面状态,实现对既有混凝土结构表层损伤的量化评定^[61-63]。

2. 混凝土渗透性能智能监测技术

侵蚀离子进入混凝土结构内部并发生物理化学反应是导致其耐久性下降的根本原因,现有混凝土监测方法主要有水渗透、离子渗透和气体渗透试验等^[64,65],其中表层混凝土气体渗透试验对结构影响较小,适用于既有混凝土结构渗透性能评价。运用混凝土气体渗透性能测试技术,有利于探明混凝土气体渗透系数的关键影响因素,建立混凝土气体渗透性能与离子渗透性能的关联关系。未来,在已有的混凝土气体渗透系数测定仪基础上,借助自动化、数字化与信息化等技术,研发既有混凝土气体渗透系数监测装备,为交通基础设施混凝土结构耐久性评估提供依据。

3. 本征自感知混凝土技术

混凝土结构在长期冻融循环、盐结晶侵蚀、荷载作用下易产生内部损伤,导致结构承载能力不足,现有混凝土内部损伤监测方法有层析成像技术、超声波技术、探地雷达技术等^[66]。本征自感知混凝土不需单独传感器件即可实现性能感知,具有结构与功能一体化特点,在既有混凝土结构损伤监测中具有突出优势^[67]。结合多尺度复合、纳米材料自组装等技术创新本征自感知混凝土用填料,研究自身极化作用、环境温/湿度对感知信号的影响,研发灵敏度高的本征自感知混凝土^[68]。发展本征自感知混凝土与既有混凝土结构复合技术,可助力实现对既有混凝土结构内部损伤程度的高效监测。

4. 钢筋锈蚀电磁感应监测技术

混凝土结构内部钢筋锈蚀易导致结构承载能力下降^[69,70]，传统的钢筋锈蚀监测方法有物理监测法和电化学监测法^[71]。钢筋在发生锈蚀时，磁导率会降低，通过钢筋截面的磁通量减少，因此，基于电压变化可实现对内部钢筋锈蚀程度的监测。未来，可开发基于电磁学原理和霍尔元件的钢筋锈蚀监测技术，创新稳定磁场产生方法和导磁介质，研发便携性好、精度高、智能化程度高的钢筋锈蚀监测装置。加强钢筋局部腐蚀对整体性能影响研究，创新钢筋局部腐蚀与结构整体性能关系，实现既有交通基础设施混凝土结构内部钢筋锈蚀程度的在线监测。

(二) 发展既有综合交通基础混凝土结构设施精准维修技术

1. 高效拆除与整体更换技术

铁路、民航机场等交通基础设施的“天窗”运维制度要求，需具备对已劣化的交通基础设施混凝土结构的快速拆除、快速恢复能力^[72]。针对隐蔽空间、局部伤损混凝土的快速清理需求，发展高压水射流破除技术，研发更高压力、更好稳定性的射流动力系统，创新喷射-控制-保护成套系统集成优化方法与便携式装备，实现不伤钢筋条件下对伤损混凝土的快速清理。针对修复难度较大的混凝土结构，研发大型化整体吊装装备，创新拆除-更换-修复成套工艺，实现交通基础设施伤损混凝土结构的整体快速更换^[73]。

2. 先进维修材料与工艺

对于已发生侵蚀的钢筋混凝土结构，传统物理方法对结构损伤大，修复后易出现新老混凝土粘结性问题，导致修复效果难以达到预期。针对此类问题，可以创新电化学修复技术，实现混凝土内有害离子的高效外迁^[74]；发展双向电迁移技术，实现电化学除氯与电渗阻锈协同提升^[75]；研发电沉积自愈合技术，利用电场作用实现电解液定向沉淀，填充混凝土结构裂缝而实现结构自愈合^[76]；研发微生物自愈合技术，通过微生物诱导碳酸钙沉积过程修补裂纹，实现混凝土结构在开裂后的自主愈合^[77]。

3. 混凝土结构增材制造修复技术

增材制造（3D打印）修复技术无需支模，在交通基础设施不规则伤损混凝土结构修复方面有突出优势^[78]。发展3D打印钢筋修复技术，结合数字

孪生技术对伤损结构建模，利用激光能量将金属粉末材料逐层堆积熔结，叠加形成3D结构实现破损钢筋快速修复^[79]。发展3D打印水泥基材料修复技术，研发更高韧性、更高工作性能的3D打印水泥基材料，优化混凝土基体配筋增强工艺，创新精度更高、功能更加完善打印装备，实现对复杂结构不规则伤损混凝土快速修复^[80]。

五、综合交通基础设施混凝土结构耐久性提升建议

(一) 做好顶层设计，为混凝土结构长寿命服役提供引领

建立政府主管部门、行业学会/协会等发挥在交通基础设施混凝土结构长寿命服役方面的引领作用，在政策制定、科技奖励、平台建设等方面予以倾斜和引导。进一步推进交通基础设施混凝土结构预防性维修制度变革，在突出行业特色的同时也要打破行业壁垒，实现耐久性病害的“可预防、可感知、可整治”。在科技奖励中，注重结构服役性能，对长期服役性能良好的重大工程给予额外奖励。适时建设国家行业基础设施耐久性评定研究中心，全面掌握既有交通基础设施混凝土结构服役性能，助力交通基础设施长寿命安全服役。

(二) 强化科技创新，为混凝土结构长寿命服役提供支撑

建立和完善混凝土结构耐久性提升协同创新机制，深入开展混凝土结构耐久性劣化机制研究，完善复杂严酷环境基础设施混凝土结构耐久性设计理论。在国家科研立项中，持续资助特色团队长期开展混凝土结构耐久性跟踪研究。结合人工智能、物联网、无人机等先进技术研发混凝土结构耐久性智能化监测技术与装备，研究复杂严酷环境混凝土结构宏观劣化规律与微观劣化机理，持续深化基础设施混凝土结构耐久性评估与提升技术研究，创新混凝土材料-结构一体化设计理论体系，为交通基础设施混凝土结构耐久性提升提供科技支撑。

(三) 完善标准体系，为混凝土结构长寿命服役提供保障

针对混凝土结构耐久性设计、建造与运维等关

键环节存在的上下游职责不清、主体责任不明等问题,彻底改变“重建设、轻运维”的传统观念,加强交通基础设施混凝土结构长期服役性能保障标准体系建设。开展交通基础设施混凝土结构耐久性监测—服役性能评估—科学运维的全流程标准规范研究与制定,形成技术先进、统一协调、层级分明、科学衔接的基础设施混凝土结构耐久性设计—建造—运营—再设计强制性技术标准体系,全面匹配不同环节、不同部门客观需求,为基础设施混凝土结构长寿命服役提供标准保障。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 24, 2024; **Revised date:** November 28, 2024

Corresponding author: Li Huajian is a research fellow from the Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science Corporation Limited. His major research field is novel high-speed railway concrete and the structural durability. E-mail: chinasailor@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategy for Improving the Efficiency of the Comprehensive Transportation System” (2022-PP-06)

参考文献

- [1] 卢春房, 卢炜. 综合立体交通运输体系发展策略 [J]. 铁道学报, 2022, 44(1): 1–7.
Lu C F, Lu W. Development strategies of comprehensive stereoscopic transportation system [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(1): 1–7.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 2023年交通运输行业发展统计公报 [R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2024.
Ministry of Transport of the People’s Republic of China. Statistics report on transportation industry development in 2023 [R]. Beijing: Ministry of Transport of the the People’s Republic of China, 2024.
- [3] 吴智深, 刘加平, 邹德辉, 等. 海洋桥梁工程轻质、高强、耐久性结构材料现状及发展趋势研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 31–40.
Wu Z S, Liu J P, Zou D H, et al. Status quo and development trend of light-weight, high-strength, and durable structural materials applied in marine bridge engineering [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 31–40.
- [4] 高宗余, 阮怀圣, 秦顺全, 等. 我国海洋桥梁工程技术发展现状、挑战及对策研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 1–4.
Gao Z Y, Ruan H S, Qin S Q, et al. Technical status, challenges, and solutions of marine bridge engineering [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 1–4.
- [5] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1–66.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China’s pavement engineering research · 2020 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 1–66.
- [6] 陶慕轩, 聂建国, 樊健生, 等. 中国土木工程科技 2035 发展趋势与路径研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 73–79.
Tao M X, Nie J G, Fan J S, et al. Development trends and path for China’s civil and structural engineering science and technology to 2035 [J]. *Strategic Study of CAE*, 2017, 19(1): 73–79.
- [7] 何洪文, 孙逢春, 李梦林. 我国综合交通工程科技现状及未来发展 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 202–211.
He H W, Sun F C, Li M L. Current status and future development of integrated transportation technology in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(6): 202–211.
- [8] 李盛, 张海涛, 孙煜, 等. 在役水泥路面劣化行为与延寿技术综述 [J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(3): 25–47.
Li S, Zhang H T, Sun Y, et al. Review on deterioration behavior and life extension technologies of cement pavement in service [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(3): 25–47.
- [9] 郭寅川, 申爱琴, 王胜难, 等. 季冻区路面混凝土界面区劣化行为及与强度相关性 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(8): 49–57.
Guo Y C, Shen A Q, Wang S N, et al. Deterioration behavior of interfacial transition zone and its correlation with strength of a concrete pavement in seasonal frost region [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(8): 49–57.
- [10] 张志强, 李永珑, 王海彦, 等. 钢筋锈蚀劣化对隧道衬砌结构性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 73–81.
Zhang Z Q, Li Y L, Wang H Y, et al. Effect of steel-bar corrosion on properties of tunnel lining structure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(8): 73–81.
- [11] 杜彦良, 孙宝臣, 吴智深, 等. 关于建立健全交通基础设施长寿命安全保障体系的战略思考 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 1–5.
Du Y L, Sun B C, Wu Z S, et al. Strategies for establishing and perfecting long-life security strategy of transportation infrastructure [J]. *Strategic Study of CAE*, 2017, 19(6): 1–5.
- [12] 李亚东, 王崇交. 中外桥梁长寿命化研究进展及其思考 [J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 17–23.
Li Y D, Wang C J. Research advances in long-life of worldwide bridges and corresponding reflections [J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(2): 17–23.
- [13] 赵国堂, 高亮, 赵磊, 等. CRTSII 型板式无砟轨道板下离缝动力影响分析及运营评估 [J]. 铁道学报, 2017, 39(1): 1–10.
Zhao G T, Gao L, Zhao L, et al. Analysis of dynamic effect of gap under CRTSII track slab and operation evaluation [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(1): 1–10.
- [14] 渠亚男, 仲新华, 王家赫, 等. 我国铁路混凝土结构耐久性发展现状与展望 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (2): 8–12, 17.
Qu Y N, Zhong X H, Wang J H, et al. Development situation and expectation on the durability of railway concrete structures in China [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2022 (2): 8–12, 17.
- [15] 谢永江, 仲新华, 朱长华, 等. 青藏铁路桥隧结构用高性能混凝土的耐久性研究 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24(1): 108–112.
Xie Y J, Zhong X H, Zhu C H, et al. Durability of HPC for bridge and tunnel structure on Qinghai–Xizang railway [J]. *China Rail-*

- way Science, 2003, 24(1): 108–112.
- [16] 杨怀志, 刘学文, 杨志强. 无砟轨道支承层混凝土损伤机理分析 [J]. 铁道建筑, 2021, 61(8): 119–122.
Yang H Z, Liu X W, Yang Z Q. Analysis of concrete damage mechanism of ballastless track bearing layer [J]. Railway Engineering, 2021, 61(8): 119–122.
- [17] Xu T Y, Zhou Z J, Wang M M, et al. Damage mechanism of pier concrete subjected to combined compressive stress, freeze-thaw, and salt attacks in saline soil [J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126567.
- [18] 石刚强, 陈永辉. 青藏铁路桥梁水中墩表层剥蚀调查分析 [J]. 铁道建筑技术, 2006 (S1): 83–85, 88.
Shi G Q, Chen Y H. Investigation and analysis on surface erosion of pier in water of Qinghai–Xizang railway bridge [J]. Railway Construction Technology, 2006 (S1): 83–85, 88.
- [19] 段炼, 李永恒, 伍江航, 等. HTG 隧道衬砌病害调查及成因机理分析 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 727–734.
Duan L, Li Y H, Wu J H, et al. Investigation on lining diseases of HTG tunnel and analysis of their causes and mechanisms [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 727–734.
- [20] 张云清, 余红发, 孙伟, 等. 城市混凝土桥梁盐冻病害调查与研究 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(5): 665–669, 689.
Zhang Y Q, Yu H F, Sun W, et al. Investigation and study of durability of bridge under salt scaling [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(5): 665–669, 689.
- [21] 翁其能, 张丽娟, 秦伟. 公路隧道环境因子对混凝土衬砌耐久性影响综述 [J]. 材料导报, 2014, 28(15): 93–97.
Weng Q N, Zhang L J, Qin W. Effect of highway tunnel environment factors on durability of lining concrete [J]. Materials Review, 2014, 28(15): 93–97.
- [22] Jing C, Zhang J X, Song B. An innovative evaluation method for performance of in-service asphalt pavement with semi-rigid base [J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117376.
- [23] 沈坚, 何晓宇, 侯保荣, 等. 交通基础设施腐蚀的现状 [J]. 水运工程, 2022 (9): 15–21, 79.
Shen J, He X Y, Hou B R, et al. Current situation of corrosion of transportation infrastructure [J]. Port & Waterway Engineering, 2022 (9): 15–21, 79.
- [24] 冯忠居, 霍建维, 胡海波, 等. 高寒盐沼泽区干湿–冻融循环下桥梁桩基腐蚀损伤与承载特性 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 135–147.
Feng Z J, Huo J W, Hu H B, et al. Corrosion damage and bearing characteristics of bridge pile foundations under dry-wet-freeze-thaw cycles in alpine salt marsh areas [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 135–147.
- [25] 秦峰. 公路隧道养护与检测 [R]. 杭州: 第二届全国桥梁、隧道养护与管理技术研讨会, 2015.
Qin F. Maintenance and inspection of highway tunnels [R]. Hangzhou: The 2nd National Symposium on Bridge and Tunnel Maintenance and Management Technology, 2015.
- [26] 钱劲松, 潘祥伟, 岑业波, 等. 跑道不平整激励下飞机滑跑动载分析 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(20): 176–184, 269.
Qian J S, Pan X W, Cen Y B, et al. Aircraft taxiing dynamic load induced by runway roughness [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(20): 176–184, 269.
- [27] 赵鸿铎, 姜昌山. 道面设施寿命增强与性能提升技术 [R]. 上海: 同济大学, 2021.
Zhao H D, Jiang C S. Technology for life extension and performance improvement of pavement facilities [R]. Shanghai: Tongji University, 2021.
- [28] 凌建明, 刘诗福, 黄崇伟, 等. 机场水泥混凝土道面状况指数两层次分区方法及适应性 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1143–1147.
Ling J M, Liu S F, Huang C W, et al. Analysis of a double-level partitioning method for determining pavement condition index of airport concrete pavement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(8): 1143–1147.
- [29] 马好霞, 余红发, 吴雅玲, 等. 机场道面抗冻性与冻融介质的相关性 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(10): 1642–1649.
Ma H X, Yu H F, Wu Y L, et al. Correlation analysis on the frost resistance of airfield pavement and freeze-thaw medium [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(10): 1642–1649.
- [30] 王彭生, 曾俊杰, 范志宏, 等. 海工结构混凝土耐久性设计中英标准对比及工程应用 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(6): 703–709.
Wang P S, Zeng J J, Fan Z H, et al. Comparison of durability design for marine concrete structure between Chinese and British standards and their applications for engineering [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(6): 703–709.
- [31] 王胜年. 我国海港工程混凝土耐久性技术发展及现状 [J]. 水运工程, 2010 (10): 1–7, 118.
Wang S N. Development and current situation for durability technology of marine concrete in China [J]. Port & Waterway Engineering, 2010 (10): 1–7, 118.
- [32] 霍中艳, 陈旭东. 港口码头健康检测与评估技术研究现状及主要问题 [J]. 船舶力学, 2017, 21(S1): 665–669.
Huo Z Y, Chen X D. Overview of current situation and main problems of health inspection and assessment technology for ports [J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(S1): 665–669.
- [33] 黄明冬, 贾鹤鸣. 高性能混凝土在深圳盐田港三期工程中的应用 [J]. 中国港湾建设, 2004, 24(3): 31–33, 54.
Huang M D, Jia H M. Use of high performance concrete in phase III works at Yantian Port in Shenzhen [J]. China Harbour Engineering, 2004, 24(3): 31–33, 54.
- [34] 杨林德, 高占学. 公路隧道混凝土衬砌结构的耐久性与保护层厚度 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 64–67.
Yang L D, Gao Z X. The durability for concrete lining structure of highway-tunnel and the thickness of concrete cover [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(12): 64–67.
- [35] 冯冀蒙, 田明阳. 隧道结构耐久性环境分类及等级划分研究 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 85–90.
Feng J M, Tian M Y. A study on the classification and grading of environmental effects on tunnel structure durability [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 85–90.
- [36] 周建庭, 郑丹. 保障我国桥梁安全的战略思考 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 27–37.
Zhou J T, Zheng D. Safety of highway bridges in China [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(6): 27–37.

- [37] 陈七林. 基于耐久性的隧道结构设计的几个问题 [J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 105–109, 121.
Chen Q L. On the problems of durability design of tunnel structures [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2011, 48(4): 105–109, 121.
- [38] 熊文, 覃忠余, 郭建, 等. 南京长江大桥铁路层车致振动对公路层维修改造的影响分析 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 246–257.
Xiong W, Qin Z Y, Guo J, et al. Influence on highway bridge deck system reconstruction by train-passing-railway induced vibration of the Nanjing Yangtze River bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(7): 246–257.
- [39] 贺胜中. 基于全寿命理念的虹桥国际机场东跑道大修工程建设与管理 [J]. 建筑经济, 2012, 33(3): 35–37.
He S Z. Construction and management of Hongqiao international airport east runway overhaul project based on the life philosophy [J]. *Construction Economy*, 2012, 33(3): 35–37.
- [40] 刘战鳌, 周明凯, 李北星. 石粉对机制砂混凝土性能影响的研究进展 [J]. 材料导报, 2014, 28(19): 100–103.
Liu Z A, Zhou M K, Li B X. Research progress on influence of microfiners on manufactured sand concrete's performance [J]. *Materials Review*, 2014, 28(19): 100–103.
- [41] 苏怀智, 杨立夫. 混凝土碱-硅酸反应破坏机理及其进程影响研究进展 [J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1383–1396.
Su H Z, Yang L F. Review on damage mechanism and influence factors of Alkali-Silica reaction [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(11): 1383–1396.
- [42] 王选仓, 侯荣国. 长寿命路面结构设计 [J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 46–49.
Wang X C, Hou R G. Structure design of long-life pavement [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(6): 46–49.
- [43] 郑健龙, 吕松涛, 刘超超. 长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿 [J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3219–3227.
Zheng J L, Lyu S T, Liu C C. Technical system, key scientific problems and technical frontier of long-life pavement [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(30): 3219–3227.
- [44] 王海彦, 仇文革, 冯冀蒙. 提高侵蚀环境下山岭隧道衬砌混凝土耐久性施工对策研究 [J]. 现代隧道技术, 2011, 48(6): 17–22.
Wang H Y, Qiu W G, Feng J M. Research on the construction solutions to increase the lining concrete durability of mountains tunnel under aggressive environments [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2011, 48(6): 17–22.
- [45] 邵珠山, 席慧慧, 乔汝佳, 等. 运营隧道衬砌裂损与治理修复措施研究综述 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 29–39.
Shao Z S, Xi H H, Qiao R J, et al. Review of the research on lining damage and repair measures for tunnels in operation [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(4): 29–39.
- [46] 傅金阳, 徐光阳, 杨曾, 等. 高地温隧道衬砌混凝土早期开裂机理及防控措施 [J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 105–114.
Fu J Y, Xu G Y, Yang Z, et al. Early cracking mechanism and prevention measures for lining concrete in high geotemperature tunnel [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(3): 105–114.
- [47] 周建庭, 蓝章礼, 梁宗保. 大型桥梁安全监测评估新技术探索与实践 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(S1): 61–71.
Zhou J T, Lan Z L, Liang Z B. Exploration and practice of new technology for safety monitoring and evaluation of large bridges [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2016, 35(S1): 61–71.
- [48] 张金喜, 孔祥杰, 韩丁丁, 等. 不同养护模式下的高速公路沥青路面状况指数预测模型 [J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(1): 74–80.
Zhang J X, Kong X J, Han D D, et al. Prediction model of asphalt pavement PCI of expressway under different maintenance conditions [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, 42(1): 74–80.
- [49] 孙晓燕, 王海龙. 超载运营下服役钢筋混凝土桥梁疲劳损伤研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(5): 733–740.
Sun X Y, Wang H L. Fatigue damage analysis on existing reinforced concrete bridge under overloading [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008, 16(5): 733–740.
- [50] 游励晖. 市政工程桥梁设计要点研究 [J]. 铁道工程学报, 2013, 30(3): 45–49.
You L H. Research on key points of urban bridge design [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2013, 30(3): 45–49.
- [51] 钱永久, 杜彦良. 交通土建结构长寿命安全保障的途径分析 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 6–11.
Qian Y J, Du Y L. Analysis on ways of guaranteeing the safety of civil structures in traffic systems during long service lives [J]. *Strategic Study of CAE*, 2017, 19(6): 6–11.
- [52] Taheri S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 492–509.
- [53] El Khoury K, Ridley I, Vollum R, et al. Experimental assessment of crack prediction methods in international design codes for edge restrained walls [J]. *Structures*, 2023, 55: 1447–1459.
- [54] Li Z W, Liu X Z, Lu H Y, et al. Surface crack detection in precasted slab track in high-speed rail via infrared thermography [J]. *Materials*, 2020, 13(21): 4837.
- [55] Clauß F, Ahrens M A, Mark P. A comparative evaluation of strain measurement techniques in reinforced concrete structures—A discussion of assembly, application, and accuracy [J]. *Structural Concrete*, 2021, 22(5): 2992–3007.
- [56] 孙永福. 青藏铁路桥梁墩台混凝土开裂成因及裂缝维修技术 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2011.
Sun Y F. Causes of concrete cracking and repair techniques in bridge piers and abutments of Qinghai–Xizang railway [R]. Beijing: Chinese Academic of Railway Science, 2011.
- [57] 雷冬, 杜文康, 朱国靖, 等. 基于机器视觉方法的高铁桥梁监测技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2023, 40(3): 45–49.
Lei D, Du W K, Zhu G J, et al. Research on the monitoring technology of high-speed railway bridge based on machine vision method [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2023, 40(3): 45–49.
- [58] Potenza F, Castelli G, Gattulli V, et al. Integrated process of images and acceleration measurements for damage detection [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 199: 1894–1899.
- [59] Pakrashi V, Basu B, O' Connor A. Structural damage detection and calibration using a wavelet–kurtosis technique [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(9): 2097–2108.

- [60] 杨怀志, 赵国堂, 易忠来, 等. 京沪高铁无砟轨道服役状态智能感知与安全运维关键技术 [R]. 北京: 京沪高速铁路股份有限公司, 2024.
Yang H Z, Zhao G T, Yi Z L, et al. Intelligent identification and security operation key technologies for Beijing-Shanghai high-speed railway ballastless track [R]. Beijing: Beijing-Shanghai High Speed Railway Co., Ltd., 2024.
- [61] 王鹏, 徐时贤, 李国红, 等. 跨海大桥混凝土服役挑战及检测方法综述 [J]. 材料导报, 2023, 37(Z1): 204-211.
Wang P, Xu S X, Li G H, et al. Service challenges and detection methods of sea-crossing bridge concrete [J]. Materials Report, 2023, 37(Z1): 204-211.
- [62] 程浩东, 李怡静, 李明康, 等. 基于改进 U^2 -Net 模型的混凝土结构表面裂缝检测 [J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(6): 159-171.
Cheng H D, Li Y J, Li Y K, et al. Surface crack detection of concrete structure based on improved U^2 -net model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(6): 159-171.
- [63] Tan Y, Zhang L M. Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review [J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(4): 1287-1308.
- [64] Vandevorode D, Cnudde V, Dewanckele J, et al. Validation of *in situ* applicable measuring techniques for analysis of the water adsorption by stone [J]. Procedia Chemistry, 2013, 8: 317-327.
- [65] 韩建国, 李克非. 混凝土抗氯离子渗透能力测试方法的适用性 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4): 704-709, 715.
Han J G, Li K F. Adaptability of the evaluation methods of concrete anti-chloride penetration ability [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 704-709, 715.
- [66] Zheng Y X, Wang S Q, Zhang P, et al. Application of nondestructive testing technology in quality evaluation of plain concrete and RC structures in bridge engineering: A review [J]. Buildings, 2022, 12(6): 843.
- [67] Dumoulin C, Karaiskos G, Sener J Y, et al. Online monitoring of cracking in concrete structures using embedded piezoelectric transducers [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(11): 115016.
- [68] 丁思齐, 韩宝国, 欧进萍. 本征自感知混凝土及其智能结构 [J]. 工程力学, 2022, 39(3): 1-10.
Ding S Q, Han B G, Ou J P. Intrinsic self-sensing concrete for smart structures [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(3): 1-10.
- [69] 王彦明, 徐宗顺, 刘克, 等. 半电池电位法评估海港混凝土钢筋腐蚀状态的可靠性研究 [J]. 中国港湾建设, 2017, 37(12): 15-18.
Wang Y M, Xu Z S, Liu K, et al. Reliability research of evaluating the reinforcement corrosion state in harbor concrete structures by half cell potential method [J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(12): 15-18.
- [70] 施锦杰, 孙伟. 电迁移加速氯盐传输作用下混凝土中钢筋锈蚀 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(5): 1042-1047.
Shi J J, Sun W. Investigation of steel corrosion induced by accelerated chloride migration in concrete [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(5): 1042-1047.
- [71] 熊传胜, 蒋林华, 王维春, 等. 混凝土中钢筋腐蚀实时监测研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2012, 26(11): 101-104.
Xiong C S, Jiang L H, Wang W C, et al. Present situation and forecast of researches in on-time monitoring of durability of concrete [J]. Materials Review, 2012, 26(11): 101-104.
- [72] Xiao S Q, Xiao J C, Ren Q Y, et al. Damage evolution and fracture characteristics of heterogeneous concrete with coarse aggregate impacted by high-velocity water jet [J]. Construction and Building Materials, 2024, 416: 135128.
- [73] 易忠来, 李化建, 谢永江. 高速铁路无砟轨道结构部件快速更换技术 [J]. 铁路技术创新, 2015 (2): 57-61.
Yi Z L, Li H J, Xie Y J. Rapid replacement technology of structural components of ballastless track of high-speed railway [J]. Railway Technical Innovation, 2015 (2): 57-61.
- [74] 张军, 金伟良, 毛江鸿, 等. 混凝土梁电化学修复后的耐久性能及力学特征 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8): 72-80.
Zhang J, Jin W L, Mao J H, et al. Durability enhancement and mechanical properties of concrete beams after electrochemical rehabilitation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52 (8): 72-80.
- [75] Li D Y, Sun Y P, Du K Q, et al. Effect of duty cycle and frequency of pulse current on bidirectional electro-migration rehabilitation [J]. Construction and Building Materials, 2024, 426: 136185.
- [76] 朱兴一, 鲁乘鸿, 戴子薇, 等. 土木工程材料自愈合行为的若干力学问题与研究进展 [J]. 科学通报, 2021, 66(22): 2802-2819.
Zhu X Y, Lu C H, Dai Z W, et al. Application of self-healing engineering materials: Mechanical problems and research progress [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(22): 2802-2819.
- [77] Wong P Y, Mal J, Sandak A, et al. Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of mechanisms, developments, and future directions [J]. Science of the Total Environment, 2024, 947: 174553.
- [78] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D 打印技术研究现状和关键技术 [J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122-128.
Zhang X J, Tang S Y, Zhao H Y, et al. Research status and key technologies of 3D printing [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 122-128.
- [79] Mortazavian E, Wang Z Y, Teng H L. Thermal-mechanical study of 3D printing technology for rail repair [R]. Pittsburgh: Volume 2: Advanced Manufacturing, 2018.
- [80] Zaid O, El Ouni M H. Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review of mineral additives, properties, and systematic developments [J]. Construction and Building Materials, 2024, 427: 136254.