

复杂条件下水工混凝土研究进展

蒋林华, 闫菁怡, 杨国辉, 职芳芳

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 鉴于水工混凝土的性能直接影响水利水电工程的使用功能和运行安全, 从复杂条件下水工混凝土的基础理论和新技术研究出发, 综述了复杂环境、复杂组分对水工混凝土性能演变影响的规律与预测方法方面的进展, 介绍了近年来水工混凝土新材料新技术的发展。针对目前水工混凝土在耐久性和技术经济性方面面临的挑战, 提出了多因素耦合作用、现代复杂组分水工混凝土和智能水工混凝土新技术等有待进一步研究的问题。

关键词: 水工混凝土; 复杂环境; 复杂组分; 新材料新技术

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)05-0081-08

Research progress on hydraulic concrete under complex conditions//JIANG Linhua, YAN Jingyi, YANG Guohui, ZHI Fangfang(*College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Given that the performance of hydraulic concrete directly affects the service function and operational safety of water conservancy and hydropower projects, this study reviews the progress in research of the laws and prediction methods concerning the influence of complex environments and complex components on the performance evolution of hydraulic concrete based on fundamental theories and new technologies for hydraulic concrete under complex conditions. The developments in new materials and technologies for hydraulic concrete are also introduced. In response to the current challenges in durability, as well as technical and economic performance of hydraulic concrete, key issues are put forward for further research, including multi-factor coupling effects, modern hydraulic concrete with complex components, and new technologies of the intelligent hydraulic concrete.

Key words: hydraulic concrete; complex environments; complex components; new materials and technologies

水利水电工程是世界各国的重要基础设施和基础产业,关系到经济发展、资源节约、环境保护和人民群众的生命财产安全,日益受到政府的高度重视和人民群众的高度关注。国内外兴建了许多著名的大型水利水电工程,如我国的三峡工程、美国的胡佛大坝、巴西的伊泰普水坝等。现代水利水电工程建设呈现出规模化、巨型化和工程条件复杂化等特点,工程建设时必须充分考虑所在地区对社会经济发展、生态环境保护 and 全寿命周期安全的需求,对水工混凝土的性能及其建设技术提出了越来越高的要求。大坝等混凝土建筑物是水利水电工程的关键设施,在现代大型水利水电工程建设中占有重要地位。

随着我国社会经济快速发展,水利水电工程投资和建设规模不断增大,对水工混凝土的需求不断增加。“十四五”期间,全国计划完成水利投资额5.2万亿元^[1]。随着国际水电工程的快速发展,国内大型水电企业向国外发展,借“一带一路”的东风

加快“走出去”步伐。中国水电企业要想“走得快”“走得稳”,需要根据“一带一路”沿线国家的经济水平和特点开展工作。我国西部地区和东南亚、非洲、中东、中亚、拉美等地区经济发展相对滞后,高寒、高温、侵蚀等环境条件严酷,粉煤灰等掺合料紧缺^[2],因此,研究复杂条件下水工混凝土的基础理论与新技术对实现水利水电行业的可持续发展,确保工程的安全运行具有十分重要的意义。本文从复杂环境作用、复杂组分影响和水工混凝土新材料新技术3个方面介绍了复杂条件下水工混凝土研究所取得的进展,并提出未来的研究建议。

1 复杂环境对水工混凝土性能演变的影响规律与预测模型

引起水工混凝土性能劣化的环境因素主要包括侵蚀、冻融、碳化、冲磨等。大部分研究都是基于单因素、双因素耦合,且较多集中于氯盐-硫酸盐、氯

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078183);江苏省水利科技项目(2021018)

作者简介: 蒋林华(1963—),男,教授,博士,主要从事工程新材料和结构耐久性研究。E-mail:lhjiang@hhu.edu.cn

盐-荷载、氯盐-干湿交替、碳化-冻融等方面,多因素耦合的研究相对较少。

1.1 单因素作用

1.1.1 氯盐

氯离子引起混凝土中钢筋锈蚀是氯盐环境下水工混凝土结构耐久性劣化的重要因素之一。当混凝土内部钢筋表面的氯离子浓度达到临界值时,会导致钢筋的脱钝化和不均匀腐蚀^[3-5]。侵蚀引起的钢筋腐蚀还会导致混凝土保护层膨胀、开裂甚至剥落。氯离子在混凝土中的传输过程包括扩散、对流和电迁移作用等。氯离子在混凝土中的扩散一般采用基于菲克第二定律建立的模型进行预测。由于混凝土的非均质性以及侵入氯离子会与水泥水化产物反应、引起微结构变化等,菲克第二定律并不严格适用于混凝土。许多学者在菲克第二定律的基础上提出了相应的修正模型。例如:Wang 等^[6]建立了扩散、对流和电迁移耦合作用下的氯离子传输模型;宋子健^[7]建立了基于电中性平衡、多曲率传输通道及非线性反应动力学的氯离子传输模型。

1.1.2 硫酸盐

硫酸盐侵蚀是水工混凝土耐久性劣化的另一重要因素,可分为物理结晶型侵蚀和化学反应型侵蚀。物理结晶型侵蚀主要表现为结晶膨胀压力导致混凝土表层剥落,一般出现在干湿交替、半浸泡半掩埋等部位^[8]。物理结晶型硫酸盐侵蚀机理包括固相体积膨胀理论、结晶水压力理论和盐结晶压力理论等。化学反应型硫酸盐侵蚀可进一步分为钙矾石结晶、石膏结晶和碳硫硅钙石型硫酸盐侵蚀 3 种。前两种结晶膨胀是导致混凝土侵蚀破坏的常见类型,碳硫硅钙石型硫酸盐侵蚀通常发生在低温且含有石灰质原料的混凝土中。水工混凝土中的硫酸根离子扩散属于非稳态扩散。Sun 等^[9]基于菲克第二定律和化学反应动力学理论,建立了混凝土中硫酸根离子的一维非稳态扩散模型。熊传胜^[10]引入了孔结构因子,建立了有效硫酸根离子扩散系数预测模型。

1.1.3 冻融

冻融损伤是指水工混凝土在冻融循环作用下因内部水分结冰膨胀导致微观结构破坏和性能下降的现象。混凝土冻融损伤机理主要涉及静水压力理论、渗透压理论、微冰晶理论和结晶压力理论^[11]。混凝土的抗冻融性能直接受孔结构和饱水程度控制,同时受材料因素和环境因素的影响。掺入引气剂可有效缓解冻融循环过程中的静水压力和渗透压力,提升混凝土的抗冻性能。混凝土内可冻结水含量低于水饱和度时可免于冻害破坏,超过时则会加速劣化。Zhou 等^[12]采用速冻法研究了混凝土在冻融环境下

的耐久性,建立了基于威布尔概率分布的冻融损伤模型。Liu 等^[13]则以动弹性模量作为评价指标,基于冻融损伤机理和非线性疲劳损伤理论,建立了混凝土的非线性冻融损伤演化方程。Guo 等^[14]基于一种热-水-力模型,揭示了材料性质、液体边界等对冻融行为的定量影响。

1.1.4 碳化

混凝土碳化是指二氧化碳通过孔隙向混凝土内部缓慢扩散,并与氢氧化钙、水化硅酸钙等水化产物反应生成碳酸钙的复杂过程。碳化会使混凝土内部 pH 值降低,导致钢筋脱钝锈蚀,同时在混凝土表面形成收缩,显著降低钢筋混凝土结构的耐久性^[15]。现有碳化深度预测模型主要基于菲克定律和 Papadakis 模型^[16]。对于水工混凝土,水泥品种、水胶比、矿物掺合料等也会显著影响碳化进程,导致上述模型的适用性受限。张誉等^[17]基于碳化机理与影响因素分析,提出了混凝土的碳化模型。Jiang 等^[18]提出了有效水胶比概念,建立了适用于高掺量粉煤灰混凝土的碳化深度预测模型。之后,一些研究者逐步引入了 Monte-Carlo 随机模拟方法、相似理论、统计理论等新方法以提升水工混凝土碳化预测的准确性。

1.1.5 冲磨

冲磨是指高速挟沙和石块的水流对水工混凝土产生冲刷磨损与冲击作用,导致表层水泥石磨蚀、集料剥落的现象。混凝土冲磨破坏机理主要包括考虑磨损介质的悬移质冲磨破坏和推移质冲磨破坏理论,以及考虑材料性质的塑性材料磨蚀和脆性材料磨蚀机理等。在高速水流冲刷作用下,混凝土的损伤主要集中于裂缝及凹坑周围的表面剥落,当流速达到临界值时,切向应力会导致混凝土内部形成横向裂缝。在速度为 20~100 m/s 的水流冲蚀下,水工混凝土的冲蚀程度显著加剧^[19]。混凝土在高速水流作用下的质量损失与流速正相关。冲磨过程中的能量传递可以通过单个冲击的能量平衡方程进行量化^[20]。混凝土的磨损程度随砂石粒径的增大而显著提升。Xiong 等^[21]指出,在影响混凝土磨损程度的砂石特性中,砂子硬度的主导作用远超过粒径形状与水流速度的影响。

1.2 双因素作用

1.2.1 氯盐-硫酸盐

针对氯盐-硫酸盐侵蚀,大多研究认为氯离子会优先渗入混凝土内部反应产生 Friedel 盐,减缓硫酸盐侵蚀速率,也有学者认为硫酸根离子可优先于氯离子与水泥水化产物反应,其初期生成的膨胀性产物能有效填充孔隙,从而降低氯离子的扩散速率。

Maes 等^[22]将硫酸根离子对氯离子传输速率的影响划分为 3 个阶段:早期消耗铝酸三钙抑制氯结合;中期生成钙矾石等堵塞孔隙;后期侵蚀产物产生裂缝,促进氯离子扩散。刘加平等^[23]也对氯盐-硫酸盐侵蚀作用下的混凝土性能演变规律开展了研究。Zhang 等^[24]通过引入损伤函数理论,建立了硫酸盐损伤下的氯离子扩散预测模型。

1.2.2 氯盐-荷载

挡潮闸、海港码头等水工建筑物结构往往会同时受到氯盐和荷载的作用,导致混凝土的使用寿命缩短。荷载引起的微裂缝与氯离子渗透之间存在明确的关系。蒋金洋等^[25]研究表明弯曲疲劳荷载引起的混凝土损伤提高了混凝土的氯离子扩散系数,相较于单一环境作用,氯盐-荷载交替作用下的混凝土服役寿命有所降低。关博文等^[26]引入了交变荷载因子,建立了荷载作用下的氯离子传输模型。Wang 等^[27]建立了弯曲荷载应力水平与氯离子扩散系数的定量关系模型。朱承龙等^[28-29]研究了拉伸和压缩疲劳作用对混凝土氯离子扩散系数的影响,建立了考虑拉伸和压缩疲劳影响的混凝土氯离子扩散系数模型。

1.2.3 氯盐-干湿交替

长期暴露于动态水环境中的水工混凝土结构往往会持续经历干湿循环作用,外部环境中的氯离子在饱水阶段易通过毛细吸附与微裂缝等途径侵入混凝土内部,在干燥阶段由于浓度梯度的存在,表面有氯盐析出。干湿循环过程中的干湿比研究表明,当干湿比大于 1 时,混凝土表层的氯离子扩散速率大大提升,且腐蚀程度与干湿比呈正相关关系。金伟良等^[30]解耦干湿过程,分别构建了干燥和渗入过程中的氯离子传输模型。Ben 等^[31]发现湿度降低会在一定程度上提高混凝土的表观氯离子扩散系数,干湿循环过程中的湿度变化更能促进混凝土中的氯离子传输。

1.2.4 碳化-冻融

在严寒及温差较大地区,水工混凝土结构不仅要承受持续的冻融循环过程,还存在着碳化侵蚀过程。周晓明等^[32-33]结合南水北调工程开展了碳化-冻融交替作用下渡槽混凝土耐久性研究,基于碳化与冻融作用下水工混凝土破坏机理及损伤失效过程,建立了碳化与冻融作用下水工混凝土寿命预测模型。碳化作用可以在一定程度上降低冻融循环所导致的混凝土劣化程度,提高混凝土的抗冻性能。碳化作用下混凝土的致密性增加,碳化时间越长,孔隙率越低^[34]。Wang 等^[35]基于低场核磁共振和横向弛豫时间谱分析了不同碳化和冻融循环条件下的

劣化规律,建立了单轴抗压强度模型。

1.2.5 其他双因素作用

基于水利水电工程行业发展需要,河海大学学者们^[7,10,36-41]近年来开展了一些国内外尚未进行的双因素作用下水工混凝土的耐久性研究,包括不同阳离子-氯盐、不同阳离子-硫酸盐、水压-氯盐、氯盐-溶蚀、硫酸盐-疲劳、硫酸盐-溶蚀、冻融-溶蚀、冻融-冲磨和溶蚀-冲磨等,探明了双因素作用下水工混凝土性能的演变规律及机理,建立了相关性能的预测模型。

1.3 多因素作用

水利水电工程往往在多因素共同作用下工作,且多因素的协同效应呈现显著的非线性特征。余红发等^[42]研究了弯曲荷载、化学腐蚀和碳化作用等多因素耦合作用对混凝土抗冻性的影响。廖晨悦^[43]研究了混凝土在降雨、湿度、电场耦合作用下的抗氯离子侵蚀性能,并建立了相应的氯离子传输模型。Dong 等^[44]通过高频弯曲疲劳荷载和氯离子侵蚀下的冻融试验,建立了冻融循环-疲劳-氯离子侵蚀耦合作用下混凝土传输性能的预测模型。陈燕娟^[45]开展了荷载、盐蚀、干湿耦合作用下混凝土的损伤试验,并建立了相应多因素作用下的氯离子传输模型。多因素作用下水工混凝土的性能演变试验研究难度较大,研究成果相对较少。

2 复杂组分水工混凝土性能演变的理论和预测方法

随着现代水工混凝土的不断发展,水工混凝土的组分变得越来越复杂,增稠剂、调凝剂、阻锈剂以及低热水泥、石粉等特殊组分的广泛应用,使得混凝土中胶凝材料体系的水化过程变得更加复杂,从而影响混凝土碳化、溶蚀、硫酸盐侵蚀、氯离子扩散和变形等性能,因此开展复杂组分水工混凝土性能演变的理论和预测方法研究尤为必要。

2.1 外加剂

作为混凝土的第五组分,化学外加剂常被用于改善和提高混凝土的某些性能,如改善流变性能、调节凝结时间、提高耐久性等。外加剂对混凝土性能影响的研究通常聚焦于外加剂的功能特性,而有关外加剂对混凝土其他性能的影响往往遭到忽视。

2.1.1 增稠剂

针对混凝土水下施工及难振捣的工况,水利水电工程中通常采用增稠剂来改善混凝土的施工性能。增稠剂可以显著提高自密实混凝土的黏度、减轻喷射混凝土的回弹。增稠剂对混凝土性能影响的研究主要集中于拌合物性能和硬化后的力学性能,对其他性能影响的研究相对较少。Zhao 等^[46]研究

了聚乙二醇增稠剂对水泥砂浆中氯离子扩散行为的影响。Goncalves 等^[47]通过混凝土的耐硫酸盐侵蚀性能研究,认为纳米纤维素分子可以促进水泥水化和降低孔隙率,从而抑制硫酸根离子的扩散。Zhi 等^[48]针对水工结构的服役环境,研究了增稠剂对水泥基材料抗碳化、抗溶蚀和氯离子传输性能的影响规律及其作用机理。

2.1.2 调凝剂

高温、高寒等严酷施工条件使得缓凝剂、早强剂等调凝剂在水利水电工程中的应用逐渐增多。有关调凝剂对混凝土性能影响的研究以往主要关注凝结性能、强度及抗渗、抗碳化等性能。近年来,调凝剂对含特殊组分水工混凝土性能特别是抗侵蚀耐久性影响的研究有了积极进展。例如:Chol 等^[49]发现亚硝酸盐类早强剂的加入会加剧水泥的收缩变形,导致裂纹生长时间提前;王文婷等^[50]研究发现钠盐类早强剂导致砂浆抗碳化性能大大降低;朱鹏飞^[51]研究了调凝剂对大掺量石灰石粉水泥水化行为及混凝土绝热温升的影响;陈磊^[52]研究了调凝剂对轻烧 MgO 水泥基材料水化和变形行为的影响及协同调控方法;责询钦^[53]研究了早强剂对混凝土耐久性能的影响。

2.1.3 阻锈剂

阻锈剂作为最简捷、经济和高效的防腐蚀材料,是抑制氯盐侵蚀钢筋腐蚀的首选。现有阻锈剂存在环保问题、用量不足会加速腐蚀、价格昂贵等关键技术瓶颈,急需研发阻锈效率高、环境友好、成本低廉的阻锈剂。Jiang 等^[54]采用合成生物学方法首创生物核酸钢筋阻锈剂,制备的阻锈剂具有合成方法简单、绿色环保、用量低、阻锈效果好等优点。此外,国内外开发了一系列生态友好植物型钢筋阻锈剂^[55-57]。

2.2 低热水泥和新型掺合料

温度裂缝是大坝等大体积水工混凝土危害最大的一类裂缝。采用低热混凝土是防止大体积混凝土开裂最为有效的措施之一。选用低热水泥或掺粉煤灰等矿物掺合料是制备低热混凝土的关键方法。粉煤灰和矿渣是比较理想的大体积混凝土掺合料,但我国西部地区和“一带一路”沿线的许多国家,粉煤灰和矿渣等掺合料紧缺,长距离运输会大幅提高成本。因此,研究低热水泥或寻找绿色环保、廉价易得、性能较好的新型掺合料势在必行。

2.2.1 低热水泥

进入 21 世纪后,低热硅酸盐水泥在我国多个水利水电工程中得到应用。向家坝、深溪沟等水利枢纽工程分别在坝体、导流洞、消力池和厂房等区域使用了低热水泥混凝土;我国特高拱坝中最先使用低

热水泥混凝土的是溪洛渡水利工程的 30、31 号坝段以及泄洪洞;近期建成的乌东德、白鹤滩两座特高拱坝均采用低热硅酸盐水泥混凝土建造,并首次实现了低热水泥的全坝体应用,解决了特高拱坝“无坝不裂”的世界性难题。低热水泥混凝土的性能研究基本按照实验室标准条件开展,可与中热硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥混凝土的性能进行简单对比^[58]。Jiang 等^[39,59]结合我国西部地区特点研究了低热水泥混凝土在冻融、冲磨、硫酸盐侵蚀、溶蚀单一因素以及冻融-溶蚀、冻融-冲磨和溶蚀-冲磨双因素作用下的性能演变规律和机理,建立了性能预测模型。

2.2.2 石粉

石粉既可用作水泥混合材,又可用作混凝土掺合料。石灰石粉可用作水泥混合材生产通用硅酸盐水泥和石灰石硅酸盐水泥。石粉作为混凝土掺合料的应用近年来成为热点,主要用于高流动性混凝土和优质掺合料缺乏地区的混凝土生产,以改善混凝土的流变性能,降低混凝土的水化热温升,解决这些地区掺合料短缺的问题。研究和应用较多的是石灰石粉,也有少量凝灰岩等石粉。Celik 等^[60]研究表明,适宜细度的石灰石粉可显著提升水泥基材料的早期强度,但强度会随着掺量的增加而有所降低。朱鹏飞等^[51,61-65]从石灰石粉水泥基材料的作用机理、性能、规范标准和工程应用等方面对国内外石灰石粉水泥基材料研究取得的进展进行了综述,并就石灰石粉混凝土性能的水化、溶蚀、氯盐侵蚀、绝热温升以及凝灰岩石粉对水泥基材料水化和体积稳定性的影响等开展了研究。

2.2.3 其他掺合料

随着工程需求的增加和低碳战略的发展,粉煤灰、矿渣粉、硅粉在水工混凝土中的应用日益广泛,偏高岭土、沸石粉、稻壳灰等矿物掺合料的研究逐渐增多。蒋鹏^[66]开展了温度历程对高掺量粉煤灰混凝土耐久性影响的研究。大掺量矿物掺合料混凝土在南水北调中线、舟山大陆引水二期、江苏三洋港挡潮闸和曹娥江大坝等工程中得到成功应用^[67]。

3 水工混凝土新材料新技术

“双碳”战略、国家水网构建等战略实施,对水利水电工程的需求巨大。现代水利水电工程建设必须充分考虑所在地区社会经济发展、生态环境保护和全寿命周期安全的需求,对水工混凝土提出了越来越高的要求,迫切需要开展相关新材料新技术的研究。

3.1 水工混凝土新材料

为解决水利水电工程建设和运行期间存在的裂缝控制难、病害引起的过早破坏等问题,结合长江大

保护等工作的推进,近年来出现了智能混凝土、防裂抗渗混凝土、植生型生态混凝土等新型水工材料。

3.1.1 智能混凝土

智能混凝土是在混凝土原有组分基础上复合智能型组分,使混凝土具有自感知、自适应、自修复、自诊断等特性的多功能材料。自诊断智能混凝土具有压敏性和温敏性等自感应功能,可用于大坝、桥梁等工程,如 Lin 等^[68]采用 MXene 制备了具有良好导电性、自感知、自监测性能的水泥基复合材料。自修复智能混凝土是对材料损伤破坏具有自修复和再生功能的一种新复合材料,如 Zhang 等^[69]采用微胶囊、微生物等制备了硬化混凝土发生裂缝时,可触发破裂、修补裂缝的自修复智能混凝土。

3.1.2 防裂抗渗混凝土

防裂抗渗混凝土是一种可显著改善水工混凝土防裂和抗渗性能的新型材料。防裂抗渗混凝土的抗裂性能来源于粉体材料和纤维的复合作用,疏水粉体提高了保水性,可抑制水分蒸发,降低表面张力带来的毛细孔力;纤维约束了收缩变形和早期裂纹的发展。牛亚露^[70]对防裂抗渗混凝土系列性能进行了研究,并在新孟河奔牛水利枢纽工程、牛塘水利枢纽等工程中得到了成功应用。

3.1.3 植生型生态混凝土

植生型生态混凝土也被称为植被混凝土或绿化混凝土,属于生物相容型混凝土。植生型生态混凝土的研究主要涉及制备方法、降碱技术和性能。传统植生混凝土护坡存在植被存活率较低、水体污染物削减性能较差、生态环境修复效果不明显等问题,低碳化、多功能化和智能化是其重要的发展趋势。Shi 等^[71]研发了具有护坡、净水、利废、生态修复等特点的多功能植生型生态混凝土。

3.1.4 新型温控导热流体

在粉煤灰等优质掺合料缺乏地区,石灰石粉等掺合料常被用于配制大体积水工混凝土,这类大体积水工混凝土的温控防裂效果相比传统掺合料粉煤灰等较差,导致其温控防裂难度加大。目前大体积水工混凝土采用冷却水管的温控防裂措施中水的传热效率较低,其热工参数难以调控,温控防裂效果亟待提高。靳卫准^[64]研制了新型纳米导热流体和相变微胶囊悬浮液导热流体,仿真分析了新型导热流体的温控防裂效果,提出了温控防裂效果提升的改进措施。

3.2 水工混凝土新技术

为确保复杂环境水利水电工程的耐久性和服役寿命,针对复杂环境水利水电工程结构受到的侵蚀作用,在水工混凝土侵蚀防治理论方法体系和新技术的工艺、材料、装备等方面取得了不少突破。

3.2.1 表面涂层技术

水工混凝土经常性或周期性地承受复杂水环境因素的作用,在长期服役过程中存在易腐蚀、易沾污、易产生裂缝等问题。表面涂层能够提升水利工程的美观和安全性能,符合新时代高质量发展的需求。提升耐久性和环保性,同时解决易沾污问题是表面涂层面临的技术瓶颈。Lu 等^[72]基于水质和微生物影响的水工混凝土表面腐蚀机制,制备了具有长效自清洁功能的水工混凝土表面涂层新材料,并成功应用于向家坝电厂。

3.2.2 电化学修复技术

电化学修复技术主要包括电化学脱盐技术和电化学沉积修复技术。电化学脱盐技术是以混凝土中的钢筋作为阴极,外部设置金属网作为阳极,通过施加外加电场,达到去除混凝土中有害氯离子的目的。电化学沉积修复技术充分利用钢筋混凝土自身特性及水环境条件,通过电化学作用,产生电解沉积,从而填充、愈合混凝土裂缝,封闭混凝土表面。Chu 等^[73]发明了脉冲电化学脱盐和脉冲电沉积修复混凝土裂缝的方法及装置,揭示了工艺和材料参数对修复效果和体系电化学特征的影响规律和机理。

3.2.3 智能监测技术

通过对水工混凝土性态的实时监测,可准确获取混凝土的碳化、冻融损伤、氯盐侵蚀等信息,评估混凝土的性态,预测混凝土性能的发展,以便及时采取补救措施,在避免较大经济损失的同时保障水工混凝土结构的服役安全性。水工混凝土性态的智能监测主要涉及内置多元传感器和实时动态数据采集、分析与预测管理平台两个方面。金鸣等^[74-75]对混凝土性态监测多元传感器的制备、性能和监测评估进行了系统研究,研发了复杂条件下超低功率无线传感器监测系统和混凝土性态监测平台,并在水利水电工程中试用。

4 研究展望

目前在复杂环境、复杂组分水工混凝土性能演变理论、预测模型和水工混凝土新材料新技术方面取得了重要进展,但现代水工混凝土的工程条件和组分日益复杂,对混凝土的耐久性、技术经济性等也带来了更多的挑战,尚有以下两个方面需要深入研究:

a. 实际工程环境条件复杂且各不相同,高水压等多因素耦合作用下水工混凝土性能演变和寿命预测是极有意义的研究。

b. 现代水工混凝土组分日益复杂,“双碳”战略背景下工程建设时不同地材的应用日趋增多,关于复杂组分对水工混凝土性能演变影响的研究仍然任重道远。

参考文献:

[1] 李庆斌,马睿,胡昱,等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(8):1252-1269. (LI Qingbin,MA Rui,HU Yu,et al. A review of intelligent dam construction techniques[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2022,62(8):1252-1269. (in Chinese))

[2] 蒋金洋. 长寿命水工混凝土结构材料研究进展综述[J]. 水力发电学报,2024,43(8):1-13. (JIANG Jinyang. Review of research progress on long-life hydraulic concrete structural materials[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(8):1-13. (in Chinese))

[3] 徐金霞. 混凝土中钢筋腐蚀的临界氯离子浓度研究[D]. 南京:河海大学,2010.

[4] LIU Yongqi, GUAN Xiangdong, SHI Jinjie. Synergistic inhibition of molybdate and phytate on chloride-induced corrosion of carbon steel in simulated concrete pore solutions[J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 145:105366.

[5] 蒋林华,白舒雅,徐金霞,等. 钢筋锈蚀氯离子临界浓度研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):77-82. (JIANG Linhua, BAI Shuya, XU Jinxia, et al. Review on research of threshold chloride concentration of reinforcing steel corrosion in concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):77-82. (in Chinese))

[6] WANG Yuncheng, MIAO Yanchun, LIU Zhiyong, et al. Convection-diffusion-electromigration coupled numerical simulation of water and chloride in cement-based materials [J]. Construction and Building Materials, 2024, 426: 136149.

[7] 宋子健. 溶液成分对混凝土中氯离子扩散迁移行为影响研究[D]. 南京:河海大学,2014.

[8] 侯伟. 水泥基材料硫酸盐侵蚀产物形成过程中的钙迁移[D]. 长沙:中南大学,2022.

[9] SUN Chao, CHEN Jiankang, ZHU Jue, et al. A new diffusion model of sulfate ions in concrete [J]. Construction and Building Materials,2013,39:39-45.

[10] 熊传胜. 硫酸盐侵蚀作用下水泥石的时变行为及预测模型研究[D]. 南京:河海大学,2016.

[11] 彭艳周,高军,徐港,等. 盐冻融环境下钢筋混凝土结构锈蚀寿命预测[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):44-49. (PENG Yanzhou, GAO Jun, XU Gang, et al. Prediction for corrosion life of reinforced concrete structures under salt freeze-thaw environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(3):44-49. (in Chinese))

[12] ZHOU Dafu, CHEN Daiguo, YANG Fujian, et al. Freeze-thaw damage analysis and life prediction of modified pervious concrete based on Weibull distribution[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20:e03305.

[13] LIU Miaoyan, LU Jun, MING Pan, et al. Study on the fracture properties of concrete considering salt-freeze-thaw damage[J]. Construction and Building Materials, 2024, 448:138147.

[14] GUO Weiqi, WANG Fengjuan, WU Yang, et al. A non-equilibrium micromechanics-based thermo-hydro-mechanical model for freezing/thawing in saturated cementitious materials: from elasticity to elastic-plasticity [J]. Cement and Concrete Research, 2023, 173:107267.

[15] 郑开发,卢万友,周程涛,等. 碳化对大坝混凝土微观结构及力学特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):8-15. (ZHENG Kaifa, LU Wanyou, ZHOU Chengtao, et al. Effect of carbonation on mesostructures and mechanical properties of dam concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3):8-15. (in Chinese))

[16] PAPADAKIS V G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress [J]. Cement and Concrete Research, 2000,30(2):291-299.

[17] 张誉,蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑,1998,28(1):16-19. (ZHANG Yu, JIANG Lixue. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism[J]. Industrial Construction, 1998, 28(1):16-19. (in Chinese))

[18] JIANG Linhua, LIN Baoyu, CAI Yuebo. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(5):699-702.

[19] LIU Qiong, ANDERSEN L V, ZHANG Mingzhong, et al. Abrasion damage of concrete for hydraulic structures and mitigation measures: a comprehensive review [J]. Construction and Building Materials, 2024, 422:135754.

[20] MELENTIEV R. Physical theories of solid particle erosion and abrasive jet wear [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 106:422-452.

[21] XIONG Bobo, YANG Man, LU Xiaochun, et al. Characteristics and model of mortar abrasion damage considering the influence of sediment characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2024, 443:137681.

[22] MAES M, MITTERMAYR F, DE BELIE N. The influence of sodium and magnesium sulphate on the penetration of chlorides in mortar[J]. Materials and Structures, 2017, 50(2):153.

[23] 刘加平,刘玉静,石亮,等. 氯盐硫酸盐对水泥基材料的复合侵蚀破坏[J]. 建筑材料学报,2016,19(6):993-997. (LIU Jiaping, LIU Yujing, SHI Liang, et al. Combined attack of chloride-sulfate on cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6):993-997. (in Chinese))

[24] ZHANG Chenglin, CHEN Weikang, MU Song, et al.

- Numerical investigation of external sulfate attack and its effect on chloride binding and diffusion in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 285:122806.
- [25] 蒋金洋,孙伟,王晶,等. 弯曲疲劳载荷作用下结构混凝土抗氯离子扩散性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2):362-366. (JIANG Jinyang, SUN Wei, WANG Jing, et al. Resistance to chloride ion diffusion of structural concrete under bending fatigue load[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(2):362-366. (in Chinese))
- [26] 关博文,杨涛,吴佳育,等. 交变荷载作用下损伤混凝土中氯离子传输行为[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2):304-308. (GUAN Bowen, YANG Tao, WU Jiayu, et al. Chloride transport behavior of damaged concrete under alternating load[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):304-308. (in Chinese))
- [27] WANG Hailong, DAI Jianguo, SUN Xiaoyan. Chloride transport in concrete under sustained flexural loading[J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 69(5):245-254.
- [28] 朱承龙. 拉伸疲劳作用对混凝土氯离子扩散及临界氯离子浓度影响的研究[D]. 南京:河海大学, 2015.
- [29] 李炜. 压缩疲劳对混凝土氯离子扩散系数的影响研究[D]. 南京:河海大学, 2014.
- [30] 金伟良,张奕,卢振勇. 非饱和状态下氯离子在混凝土中的渗透机理及计算模型[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(10):1362-1369. (JIN Weiliang, ZHANG Yi, LU Zhenyong. Mechanism and mathematic modeling of chloride permeation in concrete under unsaturated state[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(10):1362-1369. (in Chinese))
- [31] BEN FRAJ A, BONNET S, KHELIDJ A. New approach for coupled chloride/moisture transport in non-saturated concrete with and without slag[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35:761-771.
- [32] 周晓明. 冻融与碳化交替作用下渡槽混凝土耐久性研究[D]. 南京:河海大学, 2010.
- [33] 濮琦. 碳化与冻融作用下钢筋混凝土耐久性 & 寿命预测研究[D]. 南京:河海大学, 2012.
- [34] 蒋林华,那彬彬,周晓明,等. 冻融与碳化交替作用下的混凝土性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4):33-36. (JIANG Linhua, NA Binbin, ZHOU Xiaoming, et al. Tests for properties of concrete under alternate freeze-thaw and carbonation actions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4):33-36. (in Chinese))
- [35] WANG Wensheng, YANG Liansheng, WU Fei, et al. Compressive behavior deterioration mechanism of concrete under carbonization and freeze-thaw cycles and time-varying structural reliability evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2025, 466:140359.
- [36] 刘焕强. 静水压力和阳离子类型对混凝土中氯离子传输行为的影响[D]. 南京:河海大学, 2021.
- [37] SONG Zijian, JIANG Linhua, CHU Hongqiang. Impact of calcium leaching on chloride diffusion behavior of cement pastes exposed to ammonium chloride aqueous solution[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153:211-215.
- [38] 严先萃. 压缩疲劳对蒸养矿渣混凝土硫酸盐侵蚀行为影响及抗侵蚀提升方法[D]. 南京:河海大学, 2021.
- [39] JIANG Chunmeng, YU Lin, TANG Xinjun, et al. Deterioration process of high belite cement paste exposed to sulfate attack, calcium leaching and the dual actions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15:2982-2992.
- [40] 张开来,沈振中,甘磊. 水泥基材料溶蚀试验研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6):86-94. (ZHANG Kailai, SHEN Zhenzhong, GAN Lei. Advances in cement-based materials leaching test[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(6):86-94. (in Chinese))
- [41] 宋子健,蒋林华. 溶液成分对混凝土中氯离子扩散系数影响的研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5):82-87. (SONG Zijian, JIANG Linhua. Review of researches on influence of solution composition on chloride diffusivity coefficient in concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5):82-87. (in Chinese))
- [42] 余红发,慕儒,孙伟,等. 弯曲荷载、化学腐蚀和碳化作用及其复合对混凝土抗冻性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(4):492-499. (YU Hongfa, MU Ru, SUN Wei, et al. Effects of Flexural loads, Chemical attack, carbonation and their combination on freezing-thawing durability of concretes[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(4):492-499. (in Chinese))
- [43] 廖晨悦. 滨海地区多因素作用下混凝土内含氯离子传输的数值模拟研究[D]. 深圳:深圳大学, 2023.
- [44] DONG Qi, ZHANG Wei, ZHANG Weijie, et al. Transport behaviors of concrete under complex coupled effects of freeze-thaw, high-frequency load, and chloride attack: an experimental and numerical study[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 94:109973.
- [45] 陈燕娟. 多因素耦合作用下混凝土微结构演化及氯离子传输模拟[D]. 南京:东南大学, 2017.
- [46] ZHAO Lixiao, FENG Pan, SHAO Lijing, et al. Using viscosity modifying admixture to reduce diffusion in cement-based materials; effect of molecular mass[J]. Construction and Building Materials, 2021, 290:123207.
- [47] GONCALVES J, EL-BAKKARI M, BOLUK Y, et al. Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement based systems[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99:100-111.
- [48] ZHI Fangfang, JIANG Yu, GUO Mingzhi, et al. Effect of polyacrylamide on the carbonation behavior of cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 156:

- [49] CHOL H, LEE J, LEE B, et al. Shrinkage properties of concretes using blast furnace slag and frost-resistant accelerator [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220:1-9.
- [50] 王文婷, 何廷树, 史琛, 等. 无机盐对水泥砂浆碳化性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(1): 56-59. (WANG Wenting, HE Tingshu, SHI Chen, et al. Effects of inorganic salts on the carbonation resistance of cement mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(1): 56-59. (in Chinese))
- [51] 朱鹏飞. 调凝剂对掺大掺量石灰石粉水泥水化行为及混凝土绝热温升的影响[D]. 南京: 河海大学, 2021.
- [52] 陈磊. 调凝剂对轻烧 MgO 水泥基材料水化和变形行为的影响及协同调控方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2023.
- [53] 贲询钦. 早强剂对混凝土耐久性能的影响[D]. 南京: 河海大学, 2021.
- [54] JIANG Shaobo, GAO Song, JIANG Linhua, et al. Effects of deoxyribonucleic acid on cement paste properties and chloride-induced corrosion of reinforcing steel in cement mortars[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 91: 87-96.
- [55] LIU Yongqi, SONG Zijian, WANG Wanyi, et al. Effect of ginger extract as green inhibitor on chloride-induced corrosion of carbon steel in simulated concrete pore solutions[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214: 298-307.
- [56] 黄清华. 微藻阻锈剂对钢筋阻锈行为与水泥基材料性能的影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2025.
- [57] ANITHA R, CHITRA S, HEMAPRIYA V, et al. Implications of eco-addition inhibitor to mitigate corrosion in reinforced steel embedded in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 246-256.
- [58] XIN Jianda, ZHANG Guoxin, LIU Yi, et al. Environmental impact and thermal cracking resistance of low heat cement (LHC) and moderate heat cement (MHC) concrete at early ages[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101668.
- [59] JIANG Chunmeng, JIANG Linhua, CHEN Cheng, et al. Evaluation and prediction on the hydraulic abrasion performance of high belite cement-based concrete[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(6): 2175-2185.
- [60] CELIK K, MERAL C, PETEK GURSEL A, et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 56: 59-72.
- [61] 蒋林华, 张炎, 李辰治, 等. 石灰石粉水泥基材料的研究与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 83-89. (JIANG Linhua, ZHANG Yan, LI Chenzhi, et al. Review on the research and application of cement-based materials with limestone powder[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(1): 83-89. (in Chinese))
- [62] 张炎. 石灰石粉水泥石的溶蚀特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [63] 李辰治. 石灰石粉对混凝土中氯离子扩散及临界氯离子浓度的影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [64] 靳卫淮. 不同养护温度石灰石粉混凝土性能与新型导热流体温控防裂方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2023.
- [65] 尹武晓. 凝灰岩石粉对水泥基材料水化和体积稳定性的影响[D]. 南京: 河海大学, 2017.
- [66] 蒋鹏. 温度历程对高掺量粉煤灰混凝土耐久性影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [67] 黄国泓. 大掺量矿物掺合料抗侵蚀混凝土制备和性能研究[D]. 南京: 河海大学, 2022.
- [68] LIN Zhengxiang, TANG Xiaodan, JIN Weizhun, et al. Piezoresistive performance of cement-based composites with two-dimensional MXene subjected to various loading conditions and water content[J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 150: 105554.
- [69] ZHANG Shiyu, SONG Zijian, ZHANG Haoliang, et al. Innovative ZIF-8 modified ER@EC microcapsules: enhancing slow-release and longevity for superior self-healing in cementitious materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2025, 158: 105966.
- [70] 牛亚露. KLJ 型抗裂剂和轻烧 MgO 对输水隧洞混凝土性能影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2023.
- [71] SHI Mingding, FANG Yi, ZHANG Fengchen, et al. A bionic mineral precipitation method to improve the mechanical and vegetative properties of ecological concrete[J]. Construction and Building Materials, 2025, 476: 141294.
- [72] LU Liyin, YANG Lu, XU Yi, et al. Preparation of composite superhydrophobic coatings for mortar utilizing polydimethylsiloxane as a hydrophobic interconnection[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 96: 110635.
- [73] CHU Hongqiang, JIANG Linhua, SONG Zijian, et al. Repair of concrete crack by pulse electro-deposition technique[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 241-248.
- [74] 金鸣. 钢筋混凝土性状监测多元传感器制备、性能和监测评估研究[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [75] WANG Longbao, GAO Dongyu, LI Xin, et al. LWCCNet: lightweight remote sensing change detection network based on composite convolution operator[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2023, 16: 8621-8631.

(收稿日期: 2025-06-30 编辑: 俞云利)