

工程基础设施耐久服役背景下混凝土材料研究的紧迫性与创新方向

徐亚峰 孔维一* 孙哲选 李玉

山东交通学院交通土建工程学院

DOI:10.12238/etd.v6i4.15456

[摘要] 本文针对全球基础设施老化加速与资源紧缺现状,系统论证了提升混凝土耐久性的紧迫需求。通过最新研究文献,揭示了氯盐侵蚀、碳化与疲劳荷载耦合作用下混凝土材料的退化机制。研究发现:传统设计方法难以满足百年服役要求,智能监测技术与再生材料应用存在显著不足。据此提出四大创新方向:(1)开发严酷环境专用混凝土的损伤抑制技术;(2)融合光纤传感的实时结构健康监测系统;(3)建立多源固废协同优化模型;(4)制定全寿命周期碳排放控制标准。研究成果为延长基础设施服役寿命提供新材料设计路径。

[关键词] 混凝土耐久性;服役寿命;损伤机制;智能监测;低碳技术

中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Urgency and innovation direction of concrete material research under the background of durable service of engineering infrastructure

Yafeng Xu Weiyi Kong* Zhexuan Sun Yu Li

School of Communications Civil Engineering, Shandong Jiaotong University

[Abstract] In view of the accelerated aging of global infrastructure and the shortage of resources, this paper systematically demonstrates the urgent need to improve the durability of concrete. Based on the latest research literature, the degradation mechanism of concrete materials under the coupling effect of chloride corrosion, carbonation and fatigue load is revealed. It is found that the traditional design method is difficult to meet the requirements of 100-year service, and there are obvious shortcomings in the application of intelligent monitoring technology and recycled materials. Based on this, four innovative directions are put forward: (1) developing damage suppression technology for special concrete in harsh environment; (2) Real-time structural health monitoring system integrating optical fiber sensing; (3) establishing a multi-source solid waste collaborative optimization model; (4) Develop the life cycle carbon emission control standards. The research results provide a new material design path for extending the service life of infrastructure.

[Key words] durability of concrete; Service life; Damage mechanism; Intelligent monitoring; Low carbon technology

引言

随着全球城市化发展越来越快,基础设施也在不断增多,建筑业相关能耗约占总能耗的40%^[1]。大型工程措施如桥梁、港口、隧道和水利工程等,成为社会经济运转的生命线。工程设施的安全保障和使用性能直接关系到个人财产和人身安全。混凝土因其成本低和抗压能力强等特点,是工程建设中的核心材料,在全球建筑材料用量中一直占据主导地位。但随着其服役时间的增加,混凝土的结构开始出现耐久性问题。早期的开裂、钢筋的生

锈和强度下降这些情况经常出现。不仅让维护消耗的资金大幅增加,还对结构的安全存在潜在威胁。

现在,受到基础设施老龄化、资源短缺 and 环境保护等方面的压力,使得研究混凝土材料耐久性变得更加迫切。一方面,全球有相当大比重的混凝土基础设施已经快到甚至超过设计使用年限,结构服役寿命锐减的问题逐渐凸显^[2],在某些特殊地段还会受到其他影响,如在沿海地区,需要考虑氯盐侵蚀的影响;受工业环境和大气污染的影响下,需要考虑混凝土的碳化作用;还要

考虑交通带来的疲劳荷载;多因素共同作用下,这些结构老化的速度比预计的更快,之前重建、轻运维的传统观念需要被改变^[3]。另一方面,资源紧张加上“碳达峰、碳中和”目标的提出,对混凝土材料的可持续性提出了更高的要求。传统硅酸盐水泥的生产会产生大量二氧化碳,天然砂石资源也被过度开采,这些问题和全球低碳转型的战略产生了严重冲突,行业必须重新考虑混凝土材料的设计思路和应用技术。

1 混凝土材料的退化机制

1.1 氯盐侵蚀作用

氯盐侵蚀是混凝土结构内部钢筋锈蚀使结构产生耐久性破坏的主要原因之一^[4]。在沿海地区和冬天撒盐的路段,氯盐会变成水溶液,并通过混凝土的孔隙和裂缝等通道进入混凝土内部。随着氯离子在混凝土中不断累积到一定程度,钢筋表面的钝化膜就会被破坏。钢筋表面的钝化膜主要成分是氢氧化铁,存在依赖于混凝土的碱性环境。当氯离子进入内部后,混凝土的碱性减弱,钝化膜就会被破坏,破坏后钢筋暴露在生锈环境中导致被腐蚀。

钢筋生锈后体积会变大,对周围的混凝土产生较大的拉应力,当拉应力超过混凝土的抗拉强度时,混凝土就会出现裂缝。一旦出现裂缝,使得氯盐进入混凝土内部更容易,钢筋锈蚀得更快。这样就形成了恶性循环,导致混凝土结构的承载能力下降。这会严重影响它的服役寿命。

1.2 碳化作用

碳化作用指的是大气中的二氧化碳和混凝土里的氢氧化钙等成分发生反应的过程。混凝土水化后产生的成分主要有氢氧化钙和水化硅酸钙凝胶等。其中氢氧化钙使得混凝土的碱性比较高,当二氧化碳通过混凝土的孔隙进入内部和氢氧化钙发生反应后,就会生成碳酸钙和水。碳化反应在进行的过程中,混凝土水化产生的氢氧化钙不断被消耗,使得混凝土的碱性慢慢变弱^[5]。当混凝土的pH值过低时,会破坏钢筋表面的钝化膜,钢筋开始生锈。同时,碳化还会让混凝土收缩增大,增大混凝土开裂的可能,造成结构更严重的损伤。

1.3 疲劳荷载作用

当交通流量足够大时,桥梁和道路等混凝土结构会受到频繁的疲劳荷载影响。疲劳荷载即结构在受到反复变化的应力作用下产生的荷载效果。在疲劳荷载的长期作用下,裂缝逐渐出现,降低了结构的刚度^[6]。微裂缝初始时很小且分布较分散,随着荷载循环次数的增加,微裂缝会不断扩大并相互连通在一起,使得裂缝进一步扩大成宏观裂缝。

宏观裂缝一旦出现,使得混凝土的刚度和强度下降更加明显,结构的承载能力随之降低。当裂缝扩大到一定程度,会导致结构的突然破坏,造成严重的工程事故。

1.4 耦合作用效应

氯盐侵蚀、碳化和疲劳荷载并非单独出现,对混凝土的作用是互相影响的,多种不利条件同时作用使得混凝土的寿命大打折扣。疲劳荷载产生的裂缝为氯盐和二氧化碳的侵蚀提供路径,

造成钢筋的锈蚀和混凝土的碳化。钢筋锈蚀体积变大,又加剧了混凝土的裂缝发展,疲劳荷载产生的裂缝进一步增大;碳化作用加快了混凝土中氯离子扩散速度,提高内部氯离子含量^[7],加速了钢筋的锈蚀。多因素之间的耦合作用,使得混凝土被破坏的速度加快,对结构的耐久性带来更大的挑战。

2 现有技术的不足

2.1 传统设计方法的局限性

目前混凝土的结构设计方法,主要依赖短期试验数据和经验参数,但对结构长期使用的性能考虑得不够,在设计的时候,往往使用固定的安全系数来保证结构安全。但在复杂环境因素下,固定的安全系数对结构性能的长期性能影响是不充分的。

目前混凝土材料耐久性设计的传统方法,也缺乏足够的系统性和针对性,通常根据经验来确定混凝土的强度等级和配合比,而没有考虑到具体的使用环境和工程要求。导致设计出的混凝土没有达到服役时间就被破坏,混凝土材料出现早期损伤和失效的情况较为普遍。

2.2 智能监测技术的不足

现在的智能监测技术,在监测混凝土结构健康时还存在很多问题。一方面,监测设备的精度和可靠性都需要提高,传感器通常会重复使用,长时间使用后,会出现数据异常和失效的情况,严重影响了监测数据的准确性和效率。另一方面,监测系统对数据处理的能力和实时处理能力不够,当出现紧急情况和大批量的数据时,监测系统不能及时给出预警信息。

2.3 再生材料应用的缺陷

将再生材料,如再生骨料和工业固废的材料用在混凝土里,是解决资源不够问题的重要途径之一,但现在对它们的应用存在许多不足之处,主要原因是再生骨料的来源复杂,导致物理力学性能变化很大,缺乏稳定的数据,对混凝土的工作性能和力学性能产生不利影响。

且工业固废的成分比较复杂,导致不同种类的工业固废之间,相互配合发挥作用的机制不够清楚,这让它们很难在混凝土里被高效利用。

3 创新方向阐述

3.1 开发严酷环境专用混凝土的损伤抑制技术

针对复杂环境耦合作用下的情况,研发专用的混凝土材料,通过技术手段阻止混凝土受损。在氯盐侵蚀严重的环境中,在设计混凝土配合比中添加阻锈剂,如亚硝酸钠等材料,可以在钢筋的表面形成保护膜,保护钢筋不被氯离子侵蚀。另一方面,通过设计低水灰比的混凝土,增加胶凝材料的用量。低水灰比使得混凝土更加致密,可以有效减少氯离子进入的通道。

在受到碳化作用明显的环境里,可以用粉煤灰、矿渣或硅灰代替一部分水泥。这些材料能和水泥水化产生的物质发生二次水化反应,生成更多的水化硅酸钙凝胶,可以显著提高混凝土的密实度,从而达到增强混凝土抵抗碳化的能力。另外,还可以在混凝土表面涂碳化抑制剂,形成的防护膜可有效阻止二氧化碳的进入。

在承受疲劳荷载作用明显的区域,通过改善混凝土的界面过渡区性能以提高它的抗疲劳能力。通过对骨料进行预处理,可以有效增加骨料和水泥浆体之间的粘结强度;也可在混凝土中加纤维,纤维的桥接作用能够阻止裂缝扩大,从而提高混凝土的韧性和抗疲劳能力。

3.2 融合光纤传感的实时结构健康监测系统

该系统主要由光纤传感器、数据传输设备和数据分析平台这几部分组成。光纤传感器有着灵敏度高,抗电磁干扰,容易被腐蚀,还能进行分布式监测等优点。通过把光纤传感器预先埋在混凝土结构内部,或者粘贴在结构表面,便可实时感知结构的应力应变、温度、裂缝等信息。

数据传输设备可以将光纤传感器收集到的信号传到数据分析平台。数据分析平台将这些数据进行处理、分析和解读,通过已经建立的损伤识别模型和预警算法,实时评估结构的健康状况。当结构出现损伤隐患时,它会及时发出预警信息。

3.3 建立多源固废协同优化模型

通过系统的研究不同种类固废的物理化学性质和活性,建立多源固废协同优化模型,综合考虑固废的来源、化学成分和性能等因素,同时考虑混凝土的工作性能、力学性能和耐用性等方面的要求,来确定最合适的固废掺量和配合比。

在构建模型时,将试验研究和数值模拟结合起来,通过大量试验,得到不同固废组合下混凝土的性能数据,再用这些数据训练数值模型,就可以达到预测混凝土的性能的目的。同时考虑固废的经济效益和环境效益,在保证混凝土性能的前提下多用固废材料,以此实现降低混凝土生产成本,减少固废对环境污染的目的。通过对此模型的应用,实现多种固废材料在混凝土中的高效配合,可提高再生混凝土的性能稳定性,并推动再生材料在混凝土中大量使用。

3.4 制定全寿命周期碳排放控制标准

全寿命周期的碳排放控制标准,包含了混凝土从原材料生产,到搅拌、运输、施工、使用最后到拆除回收的各个阶段。在原材料生产阶段,鼓励使用低碳水泥来减少水泥生产过程中产生的碳排放,并要推广使用工业固废和再生骨料等替代材料,可以有效降低对天然资源的消耗。

在搅拌和运输混凝土时,通过优化搅拌工艺,可以提高搅拌效率,减少对能源的消耗。要使用节能环保的运输设备,以此来降低运输过程中产生的碳排放。在施工阶段要推广绿色施工技术,减少施工过程中的能源浪费和碳排放。

使用阶段期间提高混凝土结构的耐久性可以达到延长使用寿命的目的,还可减少维修和重建的次数,降低全寿命周期内的碳排放。到了拆除回收阶段,要建立起完整的混凝土废料回收利用体系,既能实现资源的循环利用,又能减少因为填埋和焚烧废弃物产生的碳排放。

此标准的制定,可以为混凝土行业的低碳发展提供指引,该

标准能够引导企业使用低碳技术和工艺,推动混凝土行业向绿色低碳方向转变,为实现“碳达峰、碳中和”的目标贡献力量。

4 结论

本文研究了工程基础设施长期服役状态下的混凝土材料,深入分析了混凝土材料的退化情况,包括氯盐侵蚀、碳化、疲劳荷载以及三者耦合作用时的情况。并指出现有技术方法存在的不足,并针对不足之处提出四大创新方向,分别为复杂环境影响下混凝土的损伤抑制技术、融合光纤传感器的健康监测系统、固废协同优化模型和全寿命周期的碳排放控制标准。

通过这些研究成果,为延长基础设施的使用时间提供了新的材料设计思路和技术支持,可以提高混凝土结构的耐久性和安全性,并降低工程维护的成本,推动工程行业走上绿色和可持续发展道路。但仍有一些不足之处需要继续完善,如创新技术在实际工程中的应用效果,需要实际工程进行验证。另一方面,创新技术之间也可以进行相互进行协同应用,可以更好的解决混凝土材料在实际工程中遇到的问题。

[项目基金]

本文系为中国交通教育研究会教育科学研究重点课题(A类)“交通类院校构建高质量研究生教育体系的关键要素及实施策略研究”(项目编号JT2024ZD050)的研究成果之一。

[参考文献]

- [1]张立新,张家瑞.中国建筑业高质量发展水平演变及其影响因素[J].地域研究与开发,2024,43(01):1-8.
- [2]罗大明,牛荻涛,苏丽.荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展[J].工程力学,2019,36(01):1-14+43.
- [3]李化建,马成贤,杨志强,等.综合交通基础设施混凝土结构耐久性提升研究[J].中国工程科学,2025,27(01):226-235.
- [4]吴瑾,吴胜兴.氯离子环境下钢筋混凝土结构耐久性寿命评估[J].土木工程学报,2005,(02):59-63.
- [5]肖佳.混凝土碳化研究综述[J].混凝土,2010,(1):40-44+52.
- [6]杨聪,钟春松.疲劳荷载作用下钢筋混凝土构件裂缝宽度的计算方法[J].公路,2018,63(07):59-62.
- [7]牛荻涛,孙丛涛.混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J].硅酸盐学报,2013,41(08):1094-1099.

作者简介:

徐亚峰(1999--),男,汉族,山东济宁人,硕士研究生,研究方向:海水海砂混凝土的耐高温性能。

孔维一(1987--),女,汉族,山东济南人,博士研究生,职称:副教授,研究方向:混凝土材料的高温性能。

孙哲选(2000--),男,汉族,山东滨州人,硕士研究生,海水混凝土耐高温性能。

李玉(2001--),男,汉族,山东省枣庄市山亭区人,研究生,研究方向:混凝土材料。