

基于 UHPC（超高性能混凝土）的桥梁结构耐久性研究

曹玉平

河南盛达公路工程有限公司 河南郑州

【摘要】超高性能混凝土（UHPC）在桥梁结构中的应用，因其显著的高强度和优异的耐久性，已成为现代桥梁工程中的重要研究方向。研究表明，UHPC 不仅在抗压、抗弯和抗冲击方面具有显著优势，而且能够有效抵御环境因素的侵蚀，提高桥梁的使用寿命。本文通过对 UHPC 桥梁结构耐久性进行分析，探讨了其在不同环境条件下的表现，并分析了与传统混凝土的差异。UHPC 的微观结构和添加剂成分对其耐久性起到了决定性作用，从而为桥梁设计与维护提供了新的思路和依据。本文还针对 UHPC 在桥梁设计中可能面临的挑战提出了相应的解决方案，并讨论了未来研究的潜力和发展方向。

【关键词】超高性能混凝土；桥梁结构；耐久性；环境条件；混凝土性能

【收稿日期】2025 年 3 月 14 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 10 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.2025000160

Research on durability of bridge structures based on UHPC (Ultra-High Performance Concrete)

Yuping Cao

Henan Shengda Highway Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, Henan

【Abstract】The application of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) in bridge structures has become an important research direction in modern bridge engineering due to its remarkable high strength and excellent durability. Studies have shown that UHPC not only has significant advantages in terms of compressive, flexural and impact resistance, but also can effectively resist erosion from environmental factors, thereby extending the service life of bridges. This paper analyzes the durability of UHPC bridge structures, explores their performance under different environmental conditions, and compares the differences with traditional concrete. The microstructure and additive composition of UHPC play a decisive role in its durability, which provides new ideas and basis for bridge design and maintenance. In addition, this paper puts forward corresponding solutions to the possible challenges of UHPC in bridge design, and discusses the potential and development directions of future research.

【Keywords】Ultra-high performance concrete; Bridge structure; Durability; Environmental conditions; Concrete performance

引言

在全球范围内，桥梁作为交通基础设施的核心，其耐久性问题日益受到关注。随着交通负荷的增加及极端环境因素的变化，桥梁的耐久性问题愈加显著，尤其是在面临水、盐、冻融等腐蚀性环境时。超高性能混凝土（UHPC）因其卓越的物理与机械性能，成为提升桥梁结构耐久性的理想材料。UHPC 的研究逐渐深入，尤其是在桥梁领域的应用，展现出了其极高的耐久性和更长的使用寿命。针对传统混凝土在承载能力和耐久性上的不足，UHPC 在结构设计和抗腐蚀能力上提供了全新的解决方案。尽管其表现出色，UHPC 在实际应用中

中仍面临诸多挑战，包括成本、施工难度及长期性能验证等问题。如何优化 UHPC 在桥梁结构中的应用，提升其性能并确保结构安全性，成为当前研究的重要方向。

1 超高性能混凝土在桥梁结构中的应用现状

超高性能混凝土（UHPC）在桥梁工程中逐渐得到广泛应用，成为提升结构性能和延长使用寿命的关键材料。UHPC 的应用范围不断拓展，尤其在高速公路桥梁、跨海大桥以及悬索桥等重要交通工程中，因其优异的抗压强度、抗拉强度及耐腐蚀性能，逐步替代了传统混凝土和钢材^[1]。与常规混凝土相比，UHPC 的抗压强

度可达到传统混凝土的三倍以上，且其显著的密实性使得其在抗渗透、抗冻融及耐化学腐蚀方面具备了更强的优势。UHPC 的高强度特性也使得桥梁设计在结构形式上更加灵活，既能够减少使用钢筋的数量，又能提升桥梁的抗震性能，为设计师提供了更多的空间来优化桥梁的结构和使用功能。

尽管 UHPC 在桥梁工程中的应用已经取得了显著成果，但由于其高成本和施工技术要求较高，仍然面临着一系列挑战。在传统桥梁工程中，混凝土的施工工艺相对成熟，但 UHPC 的特殊配比及生产工艺要求更高，对施工工人的技术水平和施工设备的要求也相对较大。当前，UHPC 的生产通常需要在特定的环境下进行，且配合使用高性能的钢筋，以确保其最优的结构性能。尽管 UHPC 能够带来更长久的桥梁寿命，但其高昂的初期投资和复杂的施工过程仍然是限制其大规模推广应用的主要障碍。相关标准和规范的缺乏也使得 UHPC 的应用进程有所滞缓，需要进一步的技术积累与标准化工作来推动其广泛应用。

在桥梁工程的实际应用中，许多项目已采用 UHPC 作为桥梁的关键构件，尤其是在承受极端荷载和环境因素的区域。某些跨海桥梁和高层桥梁的桥面板和墩柱，采用了 UHPC 材料以保证其长期稳定的性能。在这些工程中，UHPC 不仅提高了桥梁结构的耐久性，还有效减少了维护和加固的成本。随着技术的不断进步和材料成本的逐渐降低，预计 UHPC 在未来会有更多的应用场景。可以预见，随着更多的成功案例的积累，超高性能混凝土将逐步成为桥梁建设中不可或缺的材料，推动桥梁工程朝着更高的性能和更长的使用寿命发展。

2 UHPC 对桥梁耐久性的提升机制分析

超高性能混凝土（UHPC）在桥梁耐久性方面的表现远超传统混凝土，其提高结构耐久性的机制主要体现在材料的微观结构和化学成分优化上。UHPC 采用了较为精细的骨料配比和优化的水胶比，从而形成了致密的微观结构。这一结构特性使得混凝土内部的孔隙率大大降低，极大地提升了抗渗透性。低孔隙率有效地减少了水和有害物质的渗入，从而显著提高了混凝土在极端环境下的耐久性。这种结构不仅提升了混凝土的抗冻融性能，还提高了其抗化学腐蚀的能力，尤其是在含盐环境中，能够有效避免混凝土表面出现裂缝和剥落等现象。

UHPC 中使用了大量的高强度掺合料如硅灰、矿粉等，这些掺合料的加入不仅优化了水泥水化反应，还改

善了混凝土的微观结构，使其具有了更高的抗裂性和抗疲劳性。硅灰等高活性掺合料与水泥反应生成的致密水化产物，进一步降低了混凝土内部的孔隙和裂缝的生成^[2]。这种高度致密的微观结构不仅使得 UHPC 表现出优异的抗冻性能，还增强了其抵抗化学侵蚀（如氯离子、硫酸盐等）的能力，从而显著延长了桥梁结构的使用寿命。特别是在一些极端环境下，如海洋或高湿气候区域，UHPC 表现出的耐久性大大超过了普通混凝土的性能。

UHPC 的耐久性提升还体现在其自修复功能上。虽然 UHPC 的自愈性尚处于研究阶段，但现有的实验结果表明，UHPC 中含有一定量的矿物材料能够在发生微裂纹时，与水分反应形成新的水化产物，从而部分修复裂缝。这一特性对于桥梁等大型基础设施的长期维护至关重要。通过优化 UHPC 的成分和生产工艺，能够使其具备更强的自愈能力，在一定程度上避免了桥梁结构由于微裂纹和材料退化而导致的性能衰减，从而提高了其长期使用过程中的稳定性。

3 环境因素对 UHPC 桥梁耐久性影响的研究

环境因素是影响桥梁结构耐久性的关键因素之一，尤其是对于位于恶劣环境中的桥梁，超高性能混凝土（UHPC）能够在一定程度上抵御这些环境因素的影响。环境中的湿度、温度、盐分、酸碱度等因素，会对混凝土产生不同程度的腐蚀作用，进而影响桥梁的安全性与使用寿命。与传统混凝土相比，UHPC 在面对这些极端环境条件时表现出了更强的适应性。其致密的微观结构能够有效地阻止水分和化学物质的渗透，降低了外界腐蚀物质对桥梁结构的侵害，尤其在盐雾、酸雨等环境中，UHPC 的抗腐蚀性能尤为突出。

针对氯离子引发的钢筋腐蚀问题，UHPC 中的低孔隙率与特殊的矿物掺合料配置，大大减少了氯离子渗透的路径。这使得 UHPC 在海洋性环境或冻融交替的气候条件下，具有更长的抗腐蚀寿命。UHPC 的高强度和高密实性使得其不易产生裂缝，这对于防止由于水分浸入或其他外部因素引发的劣化反应至关重要。研究表明，采用 UHPC 的桥梁在面对极端气候条件（如低温冻融循环）时，表现出了更强的耐久性。即便在冻融循环过程中，UHPC 的抗裂性也远超传统混凝土，其耐久性得到了显著提升。

尽管 UHPC 对环境因素具有良好的抵抗能力，但在实际应用中，桥梁的耐久性仍然可能受到其他一些因素的影响。环境温度和湿度的波动可能会导致 UHPC 在长期使用过程中发生微小的物理变化，进而影响其

性能表现。极端的酸碱环境、强烈的污染物沉积等也可能对 UHPC 的表面造成一定损害^[3-7]。为了更好地保障桥梁的长期稳定性,需要在设计和施工中充分考虑不同环境条件下 UHPC 的长期表现,并进一步优化其材料配比和施工工艺,确保其在各种环境因素下都能够发挥出其最佳性能。

4 超高性能混凝土桥梁设计中的挑战与解决策略

尽管超高性能混凝土(UHPC)在桥梁结构设计中展现出了显著的优势,但其在实际设计和施工中的应用仍面临一些挑战。UHPC 的高成本是限制其广泛应用的主要障碍之一。相比传统混凝土,UHPC 的生产成本较高,尤其是在特殊添加剂和高强度钢筋的使用上,进一步增加了桥梁建设的初期投资。尽管从长远来看,UHPC 的耐久性和较低的维护成本能够有效抵消这一初期投入,但其高昂的成本仍然是设计和施工过程中需要考虑的重要因素。为了解决这一问题,研究人员正在努力优化 UHPC 的生产工艺,降低其原材料成本,从而使其在桥梁建设中的应用变得更加经济实用。

超高性能混凝土(UHPC)在桥梁施工中所面临的技术难度较大,尤其是在复杂构件的浇筑和养护过程中。UHPC 的高强度和耐久性要求施工过程中必须严格控制混凝土的配比、浇筑工艺和养护条件。若操作不当,容易影响其最终性能。施工人员需要具备较高的专业技术水平,并且施工设备也应当具备高精度和高效率的性能,确保各项工艺的顺利实施。为了克服这一挑战,许多学者和工程师提出了自动化施工和智能化养护的方案,这些新技术利用先进的传感器、监控系统 and 数据分析手段,使施工过程更加精确,并能够实时调整和优化工艺参数。通过采用这些现代化技术手段,不仅提高了施工效率,还能在最大程度上减少人为操作失误的影响,从而确保 UHPC 桥梁结构的长期稳定性和耐久性。

超高性能混凝土(UHPC)在桥梁设计中的应用潜力巨大,但目前其规范体系仍不完善,缺乏统一的设计标准和施工规范,给实际工程的实施带来一定的不确定性。在实际应用中,由于缺乏针对 UHPC 特性的详细设计指南和施工流程,工程师在选择材料、设计结构以及施工过程中可能面临较大的挑战。为了促进 UHPC 在桥梁设计中的广泛应用,急需制定一套科学合理标准体系。这不仅涉及对 UHPC 性能的全面评估,还需要根据不同环境条件和施工要求,提供具体的设计

方法和施工技术方案^[8]。进一步完善设计规范和施工流程,将为实际应用提供指导,确保工程安全、质量和效率。加强技术研发与行业合作,通过积累实践经验,建立完善的技术支持体系,有助于推动 UHPC 的应用,发挥其在提升桥梁耐久性和减少维护成本方面的优势。

5 结语

超高性能混凝土(UHPC)作为一种创新材料,凭借其卓越的力学性能和耐久性,已成为桥梁工程领域的重要发展方向。尽管其高成本和施工难度限制了广泛应用,但随着技术的进步和材料成本的降低,UHPC 的应用前景愈加广阔。通过进一步优化设计、施工工艺和标准化应用,UHPC 有望在未来为桥梁结构的长寿命、高安全性提供更加坚实的保障。展望未来,超高性能混凝土将成为桥梁设计与建设的重要材料,推动基础设施的可持续发展。

参考文献

- [1] 许波,杨锦林,刘曙光,等. 超高性能混凝土 UHPC 配合比设计及其性能研究[J/OL].内蒙古工业大学学报(自然科学版),1-7[2025-08-02].
- [2] 王栋. FRP 约束超高性能混凝土(UHPC)在桥面应用的抗压行为[J].建筑机械,2025,(06):232-237.
- [3] 季重良. UHPC 超高性能混凝土在钢桥面铺装应用的经济性分析[J].内蒙古科技与经济,2025,(09):111-114.
- [4] 冯峥,胡宇河,王湔,等. 超高性能混凝土(UHPC)构件直剪性能研究综述[J].交通科学与工程,2025,41(03):39-53.
- [5] 刘建芬,杨兵忠,刘旭,等. 基于超高性能混凝土(UHPC)的光伏支架应用研究[J].中国建材科技,2025,34(02):88-93.
- [6] 梁伟波. 超高性能混凝土在桥梁加固工程中的应用研究[J].广东建材,2024,40(09):146-150.
- [7] 龚云霞,刘永健,姜磊,等. 超高性能钢管混凝土桥梁结构研究[J].公路交通科技,2024,41(06):74-88.
- [8] 杨尚霖.超高性能混凝土宏细观力学行为及典型桥梁结构爆炸毁伤效应研究[D].华南理工大学,2024.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS