

# 超高性能混凝土 (UHPC) 在桥梁结构中的应用性能研究

钟广州

湖北讯翔建设工程有限公司 湖北 恩施 445600

**摘要:** 超高性能混凝土 (UHPC) 作为一种新型水泥基复合材料, 凭借其卓越的力学性能、优异的耐久性以及良好的体积稳定性, 近年来在桥梁结构领域展现出广阔的应用前景。本文系统梳理了UHPC的基本组成与微观机理, 深入分析其抗压强度、抗拉性能、韧性、疲劳性能及耐久性等关键指标, 并结合国内外典型工程案例, 探讨UHPC在桥梁主梁、节点连接、桥面板、加固修复等场景中的应用优势与技术特点。同时, 针对当前UHPC在成本控制、施工工艺标准化、长期性能监测等方面存在的挑战, 提出相应的优化路径与发展建议。研究表明, UHPC不仅能够显著提升桥梁结构的承载能力与服役寿命, 还能实现结构轻量化与施工效率提升, 是推动桥梁工程向高性能、长寿命、低维护方向发展的重要技术支撑。

**关键词:** 超高性能混凝土; 桥梁工程; 力学性能; 耐久性; 结构应用; 可持续发展

## 引言

传统混凝土存在抗拉强度低、脆性大、易开裂、氯离子渗透率高等固有缺陷, 导致桥梁结构在服役过程中常面临钢筋锈蚀、冻融破坏、碱骨料反应等耐久性问题, 维修成本高昂且影响交通运营。在此背景下, 超高性能混凝土 (UHPC) 应运而生。UHPC最早由法国学者于20世纪90年代提出, 其通过优化颗粒级配、掺入高活性矿物掺合料、引入微细钢纤维并采用低水胶比设计, 实现了致密的微观结构与优异的宏观性能。典型UHPC的抗压强度可达150–250MPa, 抗折强度15–40MPa, 且具有极低的渗透性与高韧性。这些特性使其成为解决传统混凝土桥梁痛点的理想材料。本文旨在系统探讨UHPC在桥梁结构中的应用性能, 从材料本征特性出发, 结合结构行为与工程实践, 全面评估其技术优势与应用潜力, 为未来高性能桥梁建设提供理论参考与工程指导。

## 1 UHPC的基本组成与微观机理

UHPC核心设计理念是实现最大堆积密度与最小内部缺陷, 以获致密基体结构。其材料组成上, 以普通硅酸盐水泥为基础, 加高活性硅灰 (占胶凝材料20%至30%), 部分引入粉煤灰等调节性能; 骨料仅用粒径小于600微米细石英砂, 严格级配; 极低水胶比 (不超0.20) 下, 用高效聚羧酸系减水剂 (掺量2%至4%) 维持流动性; 微细镀铜钢纤维 (直径0.15至0.2毫米, 长度13至30毫米, 体积掺量1.5%至3.0%) 赋予高韧性, 是工程应用主流。微观结构上, 极低水胶比与硅灰反应生成致密C-S-H凝胶, 总孔隙率降至5%以下; 取消粗骨料, 消除薄弱界面过渡区, 结构更均匀连续; 受力时钢纤维耗散能量, 实现多缝开裂与应变硬化, 这种“类陶瓷”致密性与“类金属”韧

性结合, 是其高性能的物理基础。

## 2 UHPC的关键性能指标及其对桥梁工程的意义

### 2.1 力学性能

UHPC的力学性能是其在桥梁工程中得以广泛应用的核心优势。其抗压强度普遍超过150MPa, 在实验室条件下甚至可达到800MPa, 这一特性使得桥梁承重构件的截面尺寸可以大幅缩减, 从而显著减轻结构自重。对于大跨径桥梁而言, 这不仅降低了上部结构的恒载, 也相应减少了下部结构和基础的规模与造价, 实现了整体结构的轻量化设计。更为重要的是, UHPC在钢纤维的增强作用下, 展现出远优于普通混凝土的抗拉性能与韧性。其抗拉强度可达8至15MPa, 并能在开裂后维持较高的残余强度, 表现出明显的应变硬化行为<sup>[1]</sup>。这种高断裂能 (可达10,000至40,000N/m) 意味着结构在遭遇地震、车辆撞击等突发动力荷载时, 能够通过塑性变形有效耗散能量, 避免发生脆性破坏, 极大地提升了桥梁的安全储备与灾后可修复性。此外, 桥梁结构在服役期间长期承受车辆反复荷载的作用, 疲劳性能至关重要。研究表明, UHPC的疲劳极限可达到其静力抗压强度的70%至80%, 远高于普通混凝土的约45%。在钢-UHPC组合梁中, UHPC桥面板能够有效约束钢梁的局部变形, 抑制疲劳裂纹的萌生与扩展, 从而显著延长桥梁的整体使用寿命。

### 2.2 耐久性性能

UHPC的致密微观结构为其带来了卓越的耐久性能, 这是解决传统混凝土桥梁耐久性难题的根本途径。其极低的孔隙率和曲折的渗透路径使得侵蚀性介质难以侵入。具体而言, UHPC的氯离子扩散系数可低至 $10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ 量级, 仅为普通混凝土的百分之一甚至千分之一, 这意味着即使

在海洋环境或频繁使用除冰盐的地区,钢筋也能得到长期有效的保护,钢筋保护层厚度可从常规的30–50mm减小至15–20mm,进一步促进了结构轻薄化。在抗冻融方面,得益于其几乎不透水的特性,UHPC即使不掺加引气剂,也能轻松通过300次以上的快速冻融循环测试,质量损失极小,动弹性模量保持率高。同时,其高碱性和低渗透性共同作用,使得碳化深度几乎可以忽略不计,从根本上杜绝了因碳化引起的钢筋锈蚀风险。此外,UHPC对硫酸盐侵蚀和碱-骨料反应(ASR)也具有极强的抵抗力,因为其内部不存在粗骨料这一ASR膨胀的源头,且致密结构有效阻隔了外部硫酸根离子的侵入。这些综合耐久优势使得UHPC桥梁在严酷服役环境下依然能够保持长期稳定的结构性能,大幅降低全生命周期内的检测、维修与更换成本。

### 2.3 体积稳定性

体积稳定性是影响预应力混凝土桥梁长期性能的关键因素。UHPC在早期由于水胶比极低,自收缩现象较为明显,其自收缩值可达800至1200微应变,若不加以控制,可能导致早期微裂缝的产生<sup>[2]</sup>。然而,这一问题可以通过标准的蒸汽养护工艺(通常为90°C下养护48小时)得到有效缓解,蒸汽养护不仅能加速水化反应,还能显著降低自收缩和干燥收缩。进入服役阶段后,UHPC的后期干燥收缩与徐变变形均较小,这对于预应力结构尤为重要。较小的徐变意味着预应力损失更少,能够更好地保证结构在长期荷载作用下的挠度控制和承载能力,确保桥梁线形的长期稳定性与行车舒适性。

## 3 UHPC在桥梁结构中的典型应用形式

### 3.1 全UHPC桥梁

全UHPC桥梁主要适用于中小跨径的人行桥、景观桥或特殊用途桥梁。这类桥梁充分利用了UHPC超高强度和 高韧性的特点,可以设计出极为纤细、轻盈的结构形式,实现传统材料无法企及的建筑美学效果。例如,2002年在法国建成的Sherbrooke人行桥,其主跨达60米,采用预应力UHPC箱梁结构,其自重仅为同等跨度普通混凝土梁的三分之一,充分展示了UHPC在结构轻量化方面的巨大潜力。中国长沙湾田大桥为国内首座UHPC-NC(普通混凝土)混合梁公路桥,主跨采用UHPC箱梁(厚18cm),边跨为NC梁。UHPC梁段工厂预制,现场吊装拼接。

### 3.2 钢-UHPC组合梁

钢-UHPC组合梁是目前UHPC在公路桥梁中最具推广价值的应用形式之一。该结构将UHPC作为桥面板,与下部的钢梁通过剪力连接件形成整体受力体系。UHPC桥面板凭借其高抗拉强度和高韧性,能够有效抵抗车辆轮载

产生的横向弯曲应力,从根本上解决了传统混凝土桥面板易出现横向裂缝的顽疾。同时,UHPC的高强特性允许桥面板做得更薄(通常为8至15厘米),从而降低了整个桥梁的建筑高度,增加了桥下净空,或在相同净空条件下减小了纵坡,有利于路线设计<sup>[3]</sup>。更重要的是,这种结构形式非常适合“加速桥梁施工”(ABC)理念,UHPC桥面板可在工厂预制,现场快速吊装并与钢梁连接,极大缩短了对交通的干扰时间。

### 3.3 节点与连接部位

在桥梁结构体系中,节点区域(如墩梁固结处、横梁与主梁的连接处)往往是受力最为复杂、应力集中的关键部位,也是传统混凝土结构中最容易出现开裂和损伤的薄弱环节。UHPC凭借其高强度和高韧性,被广泛应用于预制节段拼装桥梁的湿接缝或现浇节点中。通过使用UHPC填充接缝,可以实现“等强连接”,即接缝区域的强度不低于预制构件本身,从而确保结构的整体性和传力的连续性。

### 3.4 桥面板与铺装层

UHPC在桥面板领域的应用既包括作为新建桥梁的整体式桥面板,也包括作为既有桥梁的局部加强层或铺装层。作为整体式桥面板,其高抗弯拉强度和优异的抗冲击性能能够有效抵抗重载车辆的反复碾压,减少桥面铺装层的损坏频率。对于正交异性钢桥面板这一长期困扰工程界的难题,UHPC提供了一种创新的解决方案。通过在钢桥面板上浇筑或喷射一层UHPC,可以形成一个刚度大、不开裂的保护层,有效分散轮载应力,显著延缓甚至阻止钢桥面板疲劳裂缝的产生与发展,从而大幅延长钢桥的服役寿命。

### 3.5 加固与修复工程

UHPC在既有桥梁的加固与修复领域同样展现出巨大价值。对于因荷载等级提升或材料老化而导致承载力不足的混凝土梁、墩柱等构件,采用UHPC进行外包加固是一种高效可靠的方法。UHPC与旧混凝土基面之间能够形成很高的粘结强度(通常大于3MPa),且自身在服役期内几乎不会开裂,从而确保了新旧材料协同工作的有效性。与碳纤维布等非水泥基加固方法相比,UHPC加固层具有更好的耐火性、抗冲击性和长期环境稳定性,尤其适用于对耐久性要求极高的重要交通基础设施。

## 4 应用挑战与对策

### 4.1 成本较高

UHPC的原材料成本,尤其是硅灰、微细钢纤维和高 效减水剂的价格,使其单位造价通常是普通混凝土的3到5倍,这成为制约其大规模应用的主要经济障碍。为应对

这一挑战,一方面可以通过材料科学手段优化配合比设计,例如探索利用煅烧黏土、偏高岭土或再生微粉等低成本、低碳足迹的材料部分替代昂贵的硅灰;另一方面,应大力推广工厂化、标准化的预制生产模式,通过规模化效应摊薄模具、专用设备和蒸汽养护等固定成本。更重要的是,决策者需要从全生命周期成本(LCC)的角度进行综合评估。虽然UHPC的初期投入较高,但其近乎免维护的特性和长达100年甚至更长的设计寿命,将显著降低后期的检测、维修、交通管制和重建费用,从长远来看具有更优的经济性。

#### 4.2 施工工艺复杂

UHPC的高黏度、短凝结时间以及对搅拌均匀性的高要求,使其施工过程比普通混凝土更为复杂,对施工设备和操作人员的专业技能提出了更高要求。为解决这一问题,材料研发应侧重于开发具有良好流动性和可泵送性的自密实UHPC(SC-UHPC),以降低现场振捣难度。同时,行业亟需制定并推广详细的、可操作的标准化施工指南和工法,明确从原材料验收、搅拌、运输、浇筑到养护的全过程技术要点<sup>[4]</sup>。此外,开发适用于现场作业的移动式蒸汽养护设备,也是保障UHPC性能稳定发挥的关键配套技术。

#### 4.3 缺乏统一标准

目前,全球范围内对UHPC的定义、最低性能指标、结构设计方法、施工验收规范等尚未形成完全统一的标准体系。各国甚至各地区的标准存在差异,这给设计、施工、监理和验收各方带来了困惑,也阻碍了UHPC产品的跨区域流通和工程经验的共享。因此,建立一套覆盖材料、结构、施工、检测与验收等全链条的、权威的国家或国际标准体系已迫在眉睫。中国近年来已发布了多项关于UHPC的团体标准和技术指南,为国家标准的出台奠定了良好基础,但仍需加快步伐,以引导和规范市场健康发展。

#### 4.4 长期性能数据不足

UHPC作为一种相对较新的工程材料,其大规模工程应用的历史仅有十余年。因此,关于其在50年、100年甚至更长时间尺度下的徐变、收缩、碳化、钢筋锈蚀等长期性能演变规律,尚缺乏足够的实测数据支撑。现有的预测模型多基于短期试验外推,存在一定的不确定性。为此,必须加强对已建成UHPC桥梁的长期健康监测,建立国家级的UHPC长期性能数据库,并结合先进的数值模拟方法,不断修正和完善其长期性能预测模型,为未来的设计规范修订提供坚实的科学依据。

### 5 结语

超高性能混凝土(UHPC)以其超高强度、高韧性、卓越耐久性与良好体积稳定性,为桥梁工程提供了革命性的材料解决方案。其在全桥结构、组合梁、节点连接、桥面板及加固修复等场景中均展现出显著技术优势,能够有效提升结构安全性、延长服役寿命、降低全生命周期成本。尽管当前在成本、施工标准化与长期性能数据方面仍存挑战,但随着材料优化、工艺进步与标准完善,UHPC必将在未来高性能桥梁建设中发挥越来越重要的作用。推动UHPC从“高端示范”走向“常规应用”,是实现桥梁工程高质量、可持续发展的关键路径之一。

### 参考文献

- [1]于庆邦.超高性能混凝土(UHPC)在桥梁工程中的应用综述[J].价值工程,2025,44(33):85-88.
- [2]章沛瑶,高经纬,蒋迪.超高性能混凝土(UHPC)在桥梁工程中的应用现状[C]//昆明理工大学,中国建设科技集团股份有限公司,云南省土木建筑学会,《建筑结构》杂志社.2024年工程结构抗震技术交流会论文集(第一册).中国核电工程有限公司,2024:269-274.
- [3]宋立国.超高性能混凝土在桥梁结构中应用研究[J].铁道建筑技术,2022,(01):82-86.
- [4]郑芝营.超高性能混凝土材料在桥梁工程中的应用[J].四川建材,2024,50(11):168-170.