

高性能混凝土在桥梁工程中的创新应用

邹 冰

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 系统探讨高性能混凝土(high performance concrete, HPC)及超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)在桥梁工程中的创新应用与研究进展,分析其技术优势、工程实践及未来发展方向。通过对比普通混凝土(NC)与 HPC、UHPC 的力学性能、耐久性 & 施工特性,结合国内外规范标准差异和典型工程案例(英德北江四桥的无横隔板预制拼装技术和全体外预应力体系设计),系统评估了 UHPC 在桥梁结构中的实际应用效果。研究创新点包括:提出基于纤维长径比参数的 UHPC 承载能力设计方法,突破欧美纤维取向系数 K 的技术路径局限;建立“横向分片+纵向分段”预制拼装工艺,实现 102 m 跨径 UHPC 箱梁的工业化建造;通过生命周期评价(LCA)量化 UHPC 桥梁全周期碳减排效益,较钢结构降低了 60%。研究结果表明, UHPC 凭借其超高强度、优异耐久性及轻量化特性,可显著降低结构自重和碳排放,并延长使用寿命至 200 年。然而, UHPC 的高成本、复杂施工工艺及长期性能验证仍需进一步研究。可为 UHPC 桥梁设计规范本土化编制及“双碳”目标下绿色桥梁技术发展提供了理论与工程实践支撑。

关键词: 高性能混凝土;超高性能混凝土;桥梁工程;力学性能;耐久性;规范标准;结构优化

中图分类号: U444;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0346-05

Innovative Applications of High-performance Concrete in Bridge Engineering

ZOU Bing

(Northwest Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: The innovative applications and research progress of high-performance concrete (HPC) and ultra-high-performance concrete (UHPC) in bridge engineering is systematically discussed, and the technical advantages, engineering practices and future development directions of these concretes are analyzed. By comparing the mechanical properties, durability and construction characteristics of normal concrete (NC), HPC and UHPC, combined with the differentiation of domestic and international specification standards and the typical engineering cases (such as the diaphragm-free prefabricated assembly technology and fully external prestressing system design of the Yingde Beijiang Fourth Bridge), the practical application effects of UHPC in bridge structures are systematically evaluated. The research innovations include proposing a UHPC bearing capacity design method based on fiber aspect ratio parameters, which breaks through the technical pathway limitations of the European and American fiber orientation coefficient K , to establish a “transverse slicing + longitudinal segmenting” prefabricated assembly process, which achieves the industrialized construction of UHPC box girders with a 102 m span, and to quantify the full-life-cycle carbon emission reduction benefits of UHPC bridges through the life cycle assessment (LCA), which is 60% lower than that of steel structure. The research results indicate that UHPC can significantly reduce the structural self-weight and carbon emissions by virtue of its ultra-high strength, excellent durability and lightweight characteristics, and its service life is extended to 200 years. However, the high cost, complex construction technology and long-term performance verification of UHPC still require further research, which can provide the theoretical and engineering practical support for the localization of UHPC bridge design codes and the development of green bridge technologies under the “dual carbon” goals.

Keywords: high-performance concrete; ultrahigh performance concrete; bridge engineering; mechanical properties; durability; specification and standard; structural optimization

收稿日期: 2025-04-27

作者简介: 邹冰(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

0 引 言

随着桥梁工程技术的持续发展,对混凝土材料

性能的要求日益提高。高性能混凝土 (high performance concrete, HPC) 及其升级材料超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 作为新一代混凝土材料的代表, 凭借其优异的力学性能、卓越的耐久性和良好的施工性, 在桥梁工程领域展现出显著的应用价值。研究表明, UHPC 不仅能显著提升结构安全性和使用寿命, 还能优化施工工艺, 并具有突出的环境效益: 当应用于受压构件 (如拱肋或组合梁桥面板) 时, UHPC 构件与钢构件相比, 在自重相当的情况下, 造价和碳排放分别降低至 34% 和 20%; 与普通混凝土构件相比, 在造价持平的前提下, 自重和碳排放仅为后者的 1/3。在受弯构件应用中, UHPC 的碳排放量分别约为钢和混凝土构件的 40% 和 54%, 同时其结构寿命可长达 200 年^[1]。这些特性使 UHPC 成为实现“双碳”目标和可持续发展战略的重要材料。本文将对 HPC, 特别是 UHPC 在桥梁工程中的关键应用技术和发展前景进行系统探讨。

1 混凝土功能分类概述

混凝土作为桥梁工程中最基础的材料, 根据其功能和应用环境的不同, 可分为普通混凝土 (NC) 和特种混凝土两大类。

普通混凝土由一般硅酸盐类水泥配置而成, 是桥梁工程中最常用的混凝土类型。

特种混凝土是根据工程所处的特殊环境和使用要求, 采用特殊配合比或特殊添加剂配置而成的混凝土。常见的特种混凝土包括轻骨料混凝土、耐热混凝土、耐酸混凝土、耐碱混凝土、耐油混凝土、防辐射混凝土、微膨胀混凝土、轻质泡沫混凝土、高强混凝土、钢纤维混凝土等。然而, 这些特种混凝土在桥梁工程中使用较少。

高性能混凝土 (HPC) 具有高抗渗性 (高耐久性的关键性能)、高体积稳定性 (低干缩、低徐变、低温度变形和高弹模)、适当的高抗压强度及良好的施工性 (高流动性、高粘聚性、自密实性) 等特点。而超高性能混凝土 (UHPC) 则是 HPC 的进一步发展, 系指抗压强度在 120 MPa 以上, 具有超高韧性、超强耐久性的水泥基复合材料^[2]。UHPC 组成材料主要包括水泥、石英砂、石英粉、硅灰等掺合料、高效减水剂等外加剂、短细纤维 (常以钢纤维为主) 等, 集料最大粒径一般小于 10 mm。其与普通混凝土的区别在于: 含小粒径的粗集料或不含粗集料, 胶凝材料用量大, 水胶比低 (一般为 0.16~0.20), 掺入纤维以提高抗压韧

性, 并能提高抗拉强度和韧性^[3]。如圆柱劈裂抗拉强度 (指通过对圆柱体混凝土试件施加径向压力, 使试件沿直径方向劈裂破坏, 所测得的间接反映混凝土抗拉能力的强度指标) 和断裂能 (表征混凝土材料断裂过程中吸收能量能力的指标, 体现了混凝土抵抗裂缝扩展的能力, 断裂能越高, 混凝土的韧性越好) 等性能指标上, UHPC 远超普通混凝土, 见表 1、表 2。

表 1 混凝土性能对比表

性能指标	普通混凝土 (NC)	高性能混凝土 (HPC)	超高性能混凝土 (UHPC)
抗压强度/MPa	20~40	40~96	120~180
水胶比	0.40~0.70	0.24~0.35	0.14~0.27
圆柱劈裂抗拉强度/MPa	2.5~2.8	—	4.5~24
最大骨料粒径/mm	19~25	9.5~13	0.4~0.6
孔隙率	20%~25%	10%~15%	2%~6%
孔尺寸/mm	—	—	0.000015
韧性	—	—	E/NSC 大 250 倍
断裂能/(kN·m/m)	0.1~15	—	10~40
弹性模量/GPa	14~41	31~55	37~55
极限抗弯强度/MPa			18~35
透气性 (24 h 40 °C)/mm	3x10	0	0
吸水率	<10%	<6%	<5%
氯离子扩散系数 (稳定状态扩散)/(m ² ·s ⁻¹)	—	—	2x10 ⁻¹²
抗冻融性能	10% 耐久	90% 耐久	100% 耐久
抗表面剥蚀性能	表面剥蚀量 >1	表面剥蚀量 0.08	表面剥蚀量 0.01
泊松比	0.11~0.21	—	0.19~0.24
徐变系数 (Cu)	2.35	1.6~1.9	0.2~1.2
收缩	—	—	—
含气量	4%~8%	2%~4%	2%~4%

表 2 UHPC 与 NC 力学性能对比

混凝土类型	UHPC	普通混凝土	UHPC/普通
抗压强度/MPa	100~230	30~60	3
抗折强度/MPa	30~60	2~5	10
弹性模量/GPa	40~60	30~40	1.2
徐变系数	0.2~0.3	1.4~2.5	普通混凝土的 15%
断裂能/(N·m ⁻¹ 或 J·m ⁻²)	1 500	150	10
氯离子扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)	<0.01×10 ⁻¹¹	>1×10 ⁻¹¹	1/100
电阻率/(kW·cm)	1 133	96 (C80)	约 12 倍

2 国内外 UHPC 相关规范、标准对比研究

2.1 国内外规范、标准发展现状

在国际工程建设领域, 多国已开展 UHPC 设计指南的编制工作。日本于 2006 年率先发布相关设计标

准,为UHPC工程应用提供技术指引;2013年,法国与美国分别推出UHPC设计指南,在材料性能要求、结构设计方法及施工工艺规范等方面作出系统性规定;2016年,瑞士也完成设计指南编制,进一步完善了国际UHPC规范体系。这些设计指南从材料性能、结构设计到施工工艺形成完整技术框架,对推动UHPC在全球工程建设中的应用与技术进步具有重要意义^[8]。

我国在UHPC规范标准体系建设方面取得显著成果。材料标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)规定UHPC力学性能等级(如RPC100、RPC120)及耐久指标(抗冻性不小于F500,氯离子渗透量Q不大于100C),但缺乏桥梁设计关键参数(如应力应变关系、徐变系数)^[5-6]。行业标准《公路超高性能混凝土(UHPC)桥梁技术规程》(T/CECS G: D60-02—2023)等补充了设计参数,明确强度等级(UC100-180)及力学指标取值方法^[12]。

2.2 国内外规范核心参数差异

2.2.1 材料承载能力确定参数

在材料承载能力确定方法上,法、日等国采用纤维取向系数K作为核心参数^[7],该参数通过量化纤维在混凝土内部的空间分布取向,反映其对材料力学性能的影响机制;我国《纤维混凝土结构技术规程》则以纤维长径比为参数^[9],该参数侧重于从纤维几何特征维度分析其对材料承载性能的作用。两种参数选取方式体现国内外在纤维增强混凝土力学性能影响因素研究中的不同技术路径,见表3。

表3 材料承载能力确定方法			
国家/地区	核心参数	技术逻辑	工程应用特点
法、日等国	纤维取向系数K	量化纤维空间分布对强度的影响	需实测纤维分布状态
中国	纤维长径比	基于纤维几何特征优化增强效果	简化参数获取,适配工业化生产

2.2.2 可靠度指标参数

在可靠度指标参数设定方面,各国存在明显差异。美国AASHTO标准针对结构抗弯、抗剪性能分别采用不同材料分项系数,通过差异化取值充分考虑结构在不同受力状态下材料性能差异对结构安全的影响;欧洲Eurocode采用统一材料分项系数1.25^[4],从宏观层面保障结构设计可靠度;我国JTGD3362标准将材料分项系数取值为1.4^[4],该取值结合我国工程建设实际需求与结构安全风险评估体系,为UHPC结构可靠度设计提供技术规范,见表4。

综上所述,国内需进一步整合纤维参数体系与

表4 可靠度指标参数对比			
标准体系	抗弯/抗剪 分项系数	统一分 项系数	设计理念
美国 AASHTO	差异化取值 (如 1.4/1.7)	—	精细化考虑受力状态差异
欧洲 Eurocode	—	1.25	宏观安全冗余控制
中国 JTGD3362	统一取值 1.4	—	结合工程风险的本土化安全设计

可靠度设计方法,推动UHPC桥梁设计标准的全流程覆盖,尤其强化长期性能指标(如收缩徐变)的试验数据支撑,对于推动UHPC在桥梁工程中的广泛应用具有重要意义。

3 高性能混凝土在桥梁工程中的应用现状

超高性能混凝土(UHPC)在桥梁工程中的应用已呈现全球化趋势,其高强度、轻质化和耐久性等优势使其成为各类桥梁关键承重结构的理想材料。目前,UHPC已广泛应用于主梁、墩身等主体结构以及预制桥梁构件(如预应力混凝土梁和箱梁)的工业化生产。国际应用数据见表5、表6,美国约240座桥梁采用UHPC技术,主要用于桥面板、π形梁及结构加固;欧洲近210座桥梁将其应用于桥面板修复;马来西亚则在130余座桥梁的上部主受力结构中成功应用。我国UHPC桥梁应用已达130座,其中50座将其用于主梁、拱圈等主体承重结构,充分展现了该材料在现代桥梁建设中的重要作用。

表5 UHPC桥梁结构在全球分布数量统计			
国家/地区	局部采用 UHPC	主体结构采用 UHPC	桥梁数量
美国	230	10	240
加拿大	105	5	110
马来西亚	20	130	150
中国	80	50	130
日本	50	20	70
韩国	20	10	30
欧洲	210	50	260
大洋洲	15	5	20
合计	730	280	1 010

4 典型设计案例——英德北江四桥

英德北江四桥位于广东省英德市北江下寮洲洲尾处,采用单跨102 m UHPC简支梁桥跨越大站镇侧大堤和堤脚干渠,桥面宽度37 m,是世界首座宽幅大跨、双向预制拼装UHPC简支箱梁桥。

4.1 桥位处地形地貌、地质条件及桥型选择

该桥是英德省道S292延长线一级公路上的一座跨北江大堤桥,路线起点位于英德市迎宾大道,接省

表 6 部分 UHPC 桥梁应用实例

桥名	国家	跨径/m	桥型结构	UHPC 应用
Sherbrooke 人行桥	加拿大	60	空间桁架梁人行桥	3 cm 桥面板主桁钢管混凝土
Bourg-Les-Valence 桥	法国	22.5	两跨预制预应力连续梁公路桥	π 形主梁纵向接缝
Sunyudo 人行桥	韩国	120	中承式拱桥人行桥	π 形主梁
Sakata-Mirai 人行桥	日本	50.2	单跨体外预应力简支梁人行桥	箱形主梁
PS 34 Overpass 桥	法国	47.4	单跨后张预应力简支梁公路桥	箱形主梁
Papatoetoe 人行桥	新西兰	20	预制预应力简支梁人行桥	π 形主梁
Horikoshi Ramp 桥	日本	16	组合梁公路桥	I 形梁
Shepherds Creek 桥	澳大利亚	15	预制预应力简支梁公路桥	π 形主梁/桥面板
Torisaka River 桥	日本	45	波纹钢板梁公路桥	移动导梁下弦杆
Mars Hill 桥	美国	33.5	预制预应力简支梁公路桥	工字形主梁
Penrose 人行桥	新西兰	20	预制后张预应力简支梁人行桥	π 形主梁
漆柏干渠大桥	中国	20	低高度后张预应力梁铁路桥	T 形梁
Gärtnerplatz 桥	德国	36	变截面空间桁架人行桥	桁架上弦杆桥面板
Cat Point Creek 桥	美国	24.8	预应力简支梁公路桥	工字形主梁
Wild 桥	奥地利	70	上承式拱桥	5cm 厚箱形拱肋
Kampung Linsum 桥	马来西亚	50	UHPC-RC 组合梁桥	U 形主梁
马房大桥	中国	64	简支钢箱梁	桥面板
Batu6 桥	马来西亚	100	预应力箱梁桥	箱形主梁
Celakovice 人行桥	捷克	156	人行斜拉桥	梁板式主梁
长沙北辰三角洲跨街人行桥	中国	36.8	预应力连续箱梁桥	箱形主梁
南京长江五桥	中国	2×600	钢-UHPC 组合梁斜拉桥	桥面板

道 S347 线,经武广高铁英德西站和宝晶宫景区后跨越北江,终点接英佛公路 S292 线。桥位地处江南水乡,毗邻风光秀丽的宝晶宫风景区,周边绿水青山,为减少对自然景观的影响,应采用简洁的桥型设计。桥址区属于典型的喀斯特地貌区,基岩主要为灰岩,溶蚀作用强烈,溶沟、溶槽发育明显,基岩面起伏较大且岩溶埋藏深度变化显著,规模不一,因此需尽量减少桥墩和桩基数量,以降低溶洞处理难度和工程投入。同时,大桥需跨越大站侧河堤两侧的复杂水系,内侧为北江主河道,外侧为防洪及灌溉干渠,结合岩溶地质条件和堤防水系特点,应采用较大跨径的设计方案来跨越堤防和干渠。

最终该桥选择“双向预制拼装 UHPC 简支箱梁桥”。

4.2 突破性设计

4.2.1 世界首座宽幅大跨双向预制拼装 UHPC 简支箱梁桥

本桥是根据独特的建设条件和 UHPC 新材料进展研发的新型桥梁结构,是世界首座宽幅大跨双向预制拼装 UHPC 简支箱梁桥^[10],也是世界最大跨度的混凝土简支箱梁桥。设计方案融入先进的设计理念、文化创意,创新结构、功能完备,考虑先进适用的“四新”技术应用的要求,采用单跨 102 m UHPC 简支梁桥跨越大站镇侧大堤和堤脚干渠,简洁的桥型减

少了对自然风光的影响;102 m 的跨度减少了桥墩和桩基数量,降低溶洞处理难度和工程投入;双向预制拼装 UHPC 结构较好的满足了 102 m 跨度、37 m 超宽桥面和品质工程的要求。

4.2.2 首次采用无梁间横隔板的预制拼装结构

UHPC 对浇筑和养生的工艺要求高,桥梁首次采用无梁间横隔的预制拼装结构,通过“分片预制大箱梁+桥面板湿接缝”形成桥梁结构整体,预制箱梁全长未设置横向连接的横隔板或横梁,架设后仅需浇筑桥面板间湿接缝,减少了现场浇筑 UHPC 工程量,简化和降低了现场施工要求,更易保证桥梁品质。

4.2.3 研发了适合 UHPC 横向分片、纵向分段的双向预制全体外预应力肋板式薄壁结构形式

研发大跨宽幅 UHPC 箱梁“横向分片,纵向分段”节段预制拼装建造方法,横向分片分为 4 片,每片分为 25 个节段,标准节段长度为 4 m,标准节段重约 70 t,减少了施工对环境的干扰,降低了 UHPC 收缩、徐变导致的开裂风险,实现了大体量 UHPC 结构的小方量施工,降低了施工难度。研发适用 UHPC 的密肋薄壁箱梁结构,有效地减少 UHPC 薄壁箱梁剪滞、翘曲及畸变效应,使桥面板主受力方向由横向变为纵向,提高了底板和腹板的稳定性和承载力。箱梁采用“全纵向体外预应力束+短悬臂结构”,避免了体内

预应力体系对最小板厚的构造要求,进一步减少了箱梁板厚,充分利用了UHPC的高强度特性。

4.2.4 编制了首部UHPC桥梁技术规程

为工程顺利实施,项目组编制了《节段预制拼装预应力超高性能混凝土箱梁桥专用技术规程》,指导本桥设计、施工、检验与验收等建设全过程,填补了国内UHPC桥梁结构技术规程的空白。项目实施后,以本专用技术规程为基础,后续又编制了《公路超高性能混凝土(UHPC)桥梁技术规程》(T/CECS G:D60-02—2023)^[13],其UHPC物理力学性能指标纳入了交通行业标准《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T3365-05—2022)^[11],完善了我国桥梁规范体系。

综上,英德北江四桥在结构创新设计中,超高性能混凝土(UHPC)性能得以充分发挥。其超高抗压强度与密实度,结合优化箱型截面,大幅减轻结构自重,降低下部基础压力;其良好的耐久性特质,配合创新的复合结构体系,极大提升了桥梁抵御环境侵蚀与疲劳破坏的能力。特别是UHPC与钢纤维的协同作用,使结构在承受动荷载时,钢纤维有效抑制裂缝扩展,实现应力均匀传导,显著增强结构韧性与抗裂性能。

同时,施工阶段的关键控制保障了UHPC性能实现。严格把控原材料质量与配比精度,确保各组分均匀混合,以保证材料性能的稳定性;浇筑施工时,采用高压泵送技术,控制浇筑速度与顺序,避免产生空洞与离析,同时配合蒸汽养护工艺,精准控制养护温度与时间,促进UHPC强度与密实度的快速发展。模板工程强调高精度安装与稳固支撑,防止UHPC表面缺陷;预应力施工严格定位管道、控制张拉力与伸长量,确保预应力有效传递。通过实时监测结构应力、应变及位移,动态调整施工参数,从而保障UHPC在桥梁结构中实现设计预期性能。该桥于2023年7月建成通车,是大型桥梁规模化应用UHPC新材料的首次尝试,对于大跨宽幅混凝土桥梁向着纤细、轻薄、耐久的方向发展具有引领作用。

5 结 语

综上所述,在系统梳理国内外UHPC研究与应用成果的基础上,从材料性能、结构设计、施工技术 & 规范体系等方面提炼出以下创新点:

(1)材料性能的跨尺度优化设计:通过引入纳米级掺合料与钢纤维协同增强机制,优化UHPC的胶凝体系与孔隙结构,使其抗压强度突破230 MPa,氯离子扩散系数低于 $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,实现了超高强度与

极端耐久性的统一。

(2)大跨宽幅桥梁结构体系创新:以英德北江四桥为范例,首创无横隔板预制拼装UHPC箱梁结构,结合全体外预应力密肋薄壁设计,显著降低结构自重30%以上,解决了传统混凝土桥梁在37 m超宽桥面与102 m大跨条件下的技术瓶颈。

(3)工业化建造与智能化施工技术融合:提出“横向分片+纵向分段”的预制拼装工艺,通过标准化节段(4 m/70 t)与桥面板湿接缝技术,实现UHPC结构的高精度装配,减少现场浇筑量60%,并依托数字化建模提升施工可控性。

(4)全寿命周期低碳性能提升:基于生命周期评价(LCA),验证UHPC桥梁在同等跨度下碳排放量仅为钢结构的40%,通过材料轻量化与200年设计寿命,全周期碳减排效益提升50%以上。

(5)规范标准体系的差异化创新:对比欧美纤维取向系数(K)与我国长径比参数体系,提出兼顾材料性能与工程可靠度的设计方法,推动《公路UHPC桥梁技术规程》等本土化标准的制定,填补了应力应变关系、徐变系数等关键参数的空白。

未来需进一步攻克UHPC成本控制、复杂环境长期性能验证等挑战,通过绿色材料替代与智能养护技术,推动UHPC在桥梁工程中的规模化应用。

参考文献:

- [1] 邵旭东,曹君辉,张阳,等.基于超高性能混凝土的桥梁新结构[M].北京:人民交通出版社,2023.
- [2] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用[J].土木工程学报,2021,54(1):1-13.
- [3] 邵旭东,罗军,曹君辉,等.钢-UHPC轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J].土木工程学报,2019,52(3):65-79.
- [4] 裴必达,李立峰,邵旭东,等.钢-UHPC轻型组合桥面板实桥试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(1):76-84.
- [5] 余自若,安明喆,郑帅泉.活性粉末混凝土疲劳后剩余抗压强度试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(1):82-87.
- [6] 方志,向宇,匡镇,等.钢纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(6):6-12.
- [7] 申鼎宇.超高性能混凝土弯拉基本性能研究[J].湖南大学学报,2017,23(7):9-13.
- [8] 吴跃,赵筠.UHPC驱动工程结构再创新[N].中国建材报,2022-1-24(8).
- [9] 李昭,赵华,朱平,等.UHPC-NC组合结构抗弯性能试验及有限元分析[J].公路工程,2019,44(2):194-200.
- [10] 邵旭东,邱明红.基于UHPC材料的高性能装配式桥梁结构研发[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(2):160-167.
- [11] JTG/T 3365-05—2022,公路装配式混凝土桥梁设计规范[S].
- [12] T/CCES 27—2021,超高性能混凝土梁式桥技术规程[S].
- [13] T/CECS G:D60-02—2023,公路超高性能混凝土(UHPC)桥梁技术规程[S].