

超高性能混凝土(UHPC)桥梁研究综述·2024

曹君辉^{1,2*}, 张 阳^{1,2}, 邵旭东^{1,2}, 黄松龄^{1,2}, 蔡文涌^{1,2}, 张学鹏^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 超高性能混凝土(UHPC)是一种新型水泥基复合材料,具有优异的力学性能和耐久性。与普通混凝土桥梁相比,UHPC桥梁强度高、抗裂性能优,大幅减轻了桥梁自重,利于装配化建设,且具有优异的耐久性;同时,UHPC还可以与钢或普通混凝土(NC)组合,发挥不同材料的性能优势,衍生出种类丰富的钢-UHPC和NC-UHPC组合结构桥梁;此外,将UHPC应用于在役桥梁加固或拓宽改造场景,不仅施工便利,还能显著延长在役桥梁的寿命。因此,通过将UHPC与桥梁工程的痛点需求结合,不仅丰富了桥梁结构的形式,还能进一步提升桥梁的性能和品质,助力桥梁结构的创新发展。对2024年发表在国内中文期刊的相关文献进行了调研和综述,以期归纳和总结UHPC桥梁的最新研究成果。

关键词: 桥梁工程; 超高性能混凝土(UHPC); 钢-UHPC及NC-UHPC组合结构桥梁; 全UHPC桥梁; 在役桥梁加固
中图分类号: U 448.33 **文献标志码:** A

Review on UHPC Bridge Research · 2024

Cao Junhui^{1,2*}, Zhang Yang^{1,2}, Shao Xudong^{1,2}, Huang Songling^{1,2}, Cai Wenyong^{1,2}, Zhang Xuepeng^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Changsha 410082, China)

Abstract: As an innovative cement-based composite material, ultra-high performance concrete (UHPC) has excellent mechanical behavior and durability. Compared with normal concrete (NC) bridges, high strength and superior anti-cracking behavior make UHPC bridges lighter, more favorable for prefabricated construction, and more durable; Further, UHPC can be composed with steel or NC to make full use of the advantages of different materials. Thus, a number of steel-UHPC and NC-UHPC composite bridge structures can be developed; In addition, UHPC can be used in the fields of in-service bridge strengthening or bridge expansion projects, which is not only convenient in construction but also favorable for extending the service life of bridges. Thus, the combination of UHPC and the practical pain-spot and demand in bridge engineering not only can increase the bridge structure patterns, but also further improves the performance and quality of bridges and is beneficial for the innovative development of bridge structures. The relevant domestic journal papers published in 2024 were investigated and reviewed in this paper, aiming to timely summarize the latest research outcomes for UHPC bridges.

Key words: bridge engineering; ultra-high performance concrete (UHPC); composite bridges of steel-UHPC and NC-UHPC; UHPC bridges; strengthening of in-service bridges

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)是一种基于最大堆积密度原理配制的

新型水泥基复合材料,具有优异的力学性能和耐久性;其抗拉强度一般可达 5 MPa 以上,抗压强度可

收稿日期: 2025-01-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52038003); 国家自然科学基金(52378154); 福建省交通运输科技示范工程(SF20210101)

作者简介: 曹君辉,男,教授,博士,主要研究方向为 UHPC 高性能桥梁结构, E-mail: caojunhui@hnu.edu.cn.

引文格式: 曹君辉,张阳,邵旭东,等. 超高性能混凝土(UHPC)桥梁研究综述·2024[J]. 市政技术, 2025, 43(3): 1-17. (CAO J H, ZHANG Y, SHAO X D, et al. Review on UHPC bridge research · 2024[J]. Journal of municipal technology, 2025, 43(3): 1-17.)

达 120 MPa 或 150 MPa 以上,抗渗透性能等耐久性指标相比普通混凝土材料优 1~2 个数量级。近些年来,UHPC 应用于桥梁工程的研究不断增多,已成为土木工程领域的研究热点之一。

UHPC 在桥梁工程的诸多方面都能发挥其性能优势。与普通混凝土(normal concrete, NC)相比,UHPC 具有更高的强度和更优的抗裂性,因此,UHPC 桥梁不仅自重更轻、易于节段预制吊装等装配化施工,而且还能提升混凝土桥梁的耐久性、降低病害风险;同时,通过将 UHPC 与钢或普通混凝土等材料组合,能够充分发挥不同材料的性能优势,构建种类丰富的钢-UHPC 或 NC-UHPC 新型组合结构桥梁,在满足工程需求的同时,保持良好的经济性;此外,将 UHPC 应用于在役桥梁加固和改扩建工程,不仅施工快捷便利,而且能够显著提高在役桥梁的承载力和耐久性,助力在役桥梁的性能提升和扩容改造。

因此,UHPC 在新建桥梁和在役桥梁加固中均具有广阔的应用前景,可进一步提升桥梁结构的性能和品质,助力未来桥梁的长寿命发展。笔者主要对 2024 年发表在国内中文期刊上的 UHPC 桥梁相关论文进行了归纳,旨在抛砖引玉,总结相关研究成果,为 UHPC 桥梁的研究和应用提供参考。该综述主要包括钢-UHPC 组合结构桥梁、NC-UHPC 组合结构桥梁、全 UHPC 桥梁、UHPC 加固在役桥梁、UHPC 下部结构及附属结构等内容。

1 钢-UHPC 组合结构桥梁

1.1 钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构

钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构由正交异性钢桥面板和薄层 UHPC 通过短栓钉等连接件组合而成(见图 1),对其进行研究的主要目的是解决桥面疲劳开裂等病害问题,将传统的具有沥青铺装的正交异性钢桥面板转变为钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构,能够显著提高钢桥面的局部抗弯刚度,降低钢桥面在反复车轮荷载作用下的应力幅,进而降低钢桥面的疲劳开裂风险。

目前对钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构的研究已有较为丰富的积累,最新的典型研究主要包括:唐亮等^[1]对高性能混凝土在钢桥面铺装中的应用研究进展进行了总结和归纳;吴关良等^[2]、许航等^[3]分别通过有限元建模计算,分析了钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构对正交异性钢桥面板疲劳应力的改善效果;张君琳等^[4]探索了钢-薄层 UHPC 轻型组合

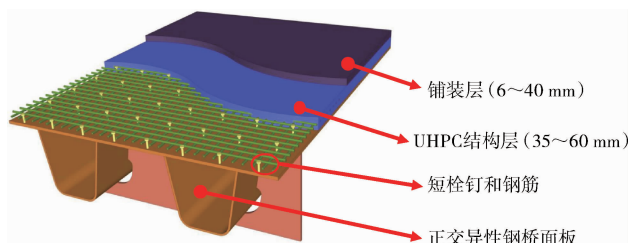


图 1 钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steel-thin UHPC lightweight composite deck structure

桥面结构中栓钉优化的可行性,将栓钉连接件在横桥向的布置间距由 150 mm 增加至 300 mm,根据计算得到了栓钉连接件在设计疲劳荷载下的等效应力幅和疲劳累积损伤度,结果表明,优化后的栓钉连接件抗疲劳性能满足受力要求;李嘉等^[5]探究了轻型组合桥面结构中磨耗层与 UHPC 层间的粘结性能,以几种常用的界面粘结剂为对象(包括热熔型改性环氧树脂、高黏高弹沥青、SBS 改性沥青等),结合试验研究和理论分析,揭示了界面的潜在粘结失效模式与机理,并基于表面能理论提出了界面粘结失效模式的判断准则,为轻型组合桥面结构中 UHPC 顶面粘结层的设计提供了依据。

1.2 组合结构桥梁中的 UHPC 桥面板

UHPC 桥面板是 UHPC 在桥梁工程领域研究和应用的热点之一。与普通钢-混凝土组合结构桥梁相比,钢-UHPC 组合结构桥梁中的 UHPC 桥面板厚度显著降低,进而大幅降低了组合结构桥梁的自重,且 UHPC 桥面板具有优异的抗裂性。目前组合结构桥梁中的 UHPC 桥面板主要包括平板、华夫板或矮肋板、钢-UHPC 组合板等多种形式。

UHPC 平板方面最新的典型研究主要包括:陈奉民等^[6]在重庆大溪河特大桥主桥设计中采用了钢-UHPC 组合梁,该桥为(92+168+650+168+92) m 的双塔双索面组合梁斜拉桥,跨中 36 块预制板和所有现浇湿接缝均采用 UHPC,其他预制板采用 C60 混凝土;曹玉贵等^[7]以某超千米级混合式组合梁斜拉桥为背景,对 UHPC 平板开展了抗弯静力试验,桥面板模型尺寸为 3.8 m(长)×1.0 m(宽)×0.17 m(厚),通过试验和分析掌握了 UHPC 平板的开裂弯矩和受拉钢筋屈服弯矩,为实桥设计和应用提供了参考;李利军等^[8]基于山东沾临高速公路黄河特大桥开展了研究,该桥为主跨 442 m 的组合梁斜拉桥,大桥组合主梁采用了 17 cm 厚的 UHPC 桥面板,大桥的整体

有限元计算分析表明,与未采用支点位移施工方法相比,采用支点位移施工方法可减小或者消除辅助墩处组合梁的负弯矩,改善了负弯矩区钢-UHPC组合梁的受力,且实桥应用效果良好(见图2a))。

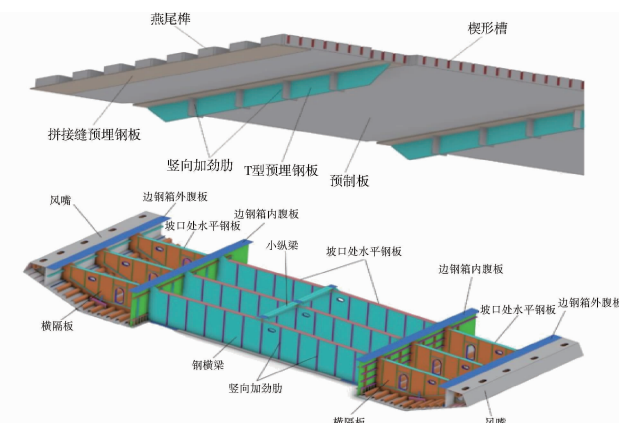
UHPC华夫板或矮肋板方面最新的典型研究主要包括:丁然等^[9]基于试验研究和数值分析,探索了配筋率、纵横肋分布、顶板厚度、肋高等设计参数对UHPC华夫板受力性能的影响规律,并给出了优化设计建议,即对于跨度5~6 m的UHPC华夫板,建议采用3条纵肋与3~5条横肋的组合形式,且UHPC顶板厚度不超过100 mm;李晓龙等^[10]以北京亦庄文昌桥为背景,设计了预应力UHPC华夫桥面板,并开展了抗弯模型试验,研究了钢纤维类型、预应力筋布置等关键因素对桥面板破坏模式、裂缝发展及抗弯承载力的影响规律,研究结果表明,试件的破坏特征为底部纵向受拉筋屈服,同时,设置预应力筋能够提升试件的强度和延性。

钢-UHPC组合板方面最新的典型研究主要包括:李传习等^[11]以广东佛山富龙西江特大桥为背景研

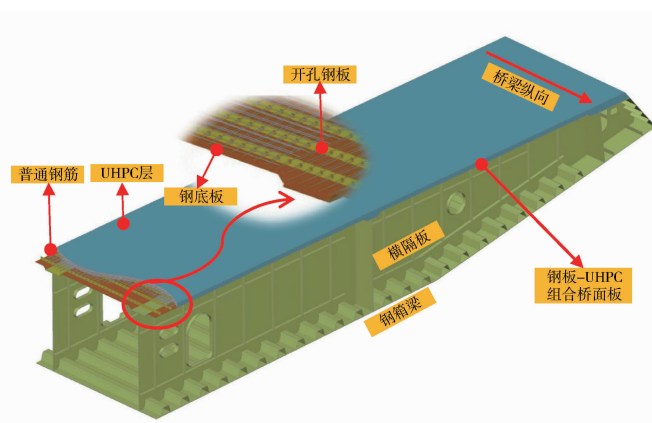
究了新型组合桥面板,大桥主梁设计采用了钢-UHPC组合梁,桥面板为钢板+PBL键+UHPC组合板,其中钢板厚8 mm, PBL键直径22 mm、布置间距80 mm, UHPC层厚15 cm, 研究中明确了新型组合桥面板在负弯矩作用下的受力性能,结果表明, UHPC层的名义开裂强度达8.9 MPa以上,远大于实桥UHPC层在设计荷载下的纵桥向最大拉应力,满足负弯矩抗裂性能要求;廖万成等^[12]同样以广东佛山富龙西江特大桥为背景,对钢板+PBL键+UHPC组合桥面板开展了湿接缝抗弯模型试验,该接缝的构造特点为采用外宽内窄的燕尾榫、纵向钢筋采用焊接搭接,试验结果表明,该组合桥面板湿接缝具有良好的延性和刚度,能够满足实桥受力要求(见图2b));谭星宇等^[13]提出了一种适用于大跨斜拉桥的新型组合桥面结构,桥面由正交异性钢桥面板、焊接在钢桥面板上的PBL剪力键以及UHPC层组合而成,组合梁采用节段预制施工, UHPC层参与主梁体系恒载受力,新型桥面应用于湖北丹江口水库特大桥(见图2c)),通过对桥面的计算分析可知, PBL剪力键群的横、纵桥向抗剪安



a) 山东沾临高速公路黄河特大桥



b) 广东佛山富龙西江特大桥





c) 湖北丹江口水库特大桥

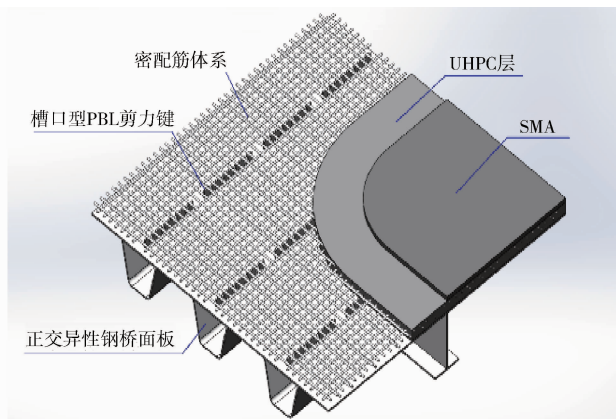


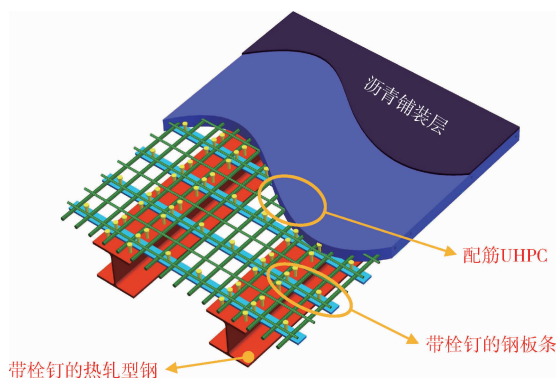
图 2 几种钢-UHPC 组合桥面板结构构造及应用

Fig. 2 Structural configuration and application of several kinds of steel-UHPC composite bridge deck panels

全系数分别达到了 12.3 和 4.0,表明界面抗剪性能满足设计要求;方志等^[14]则对该新型桥面开展了横桥向抗弯模型试验,揭示了剪力键形式、接缝构造形式、配筋率和钢混界面粘结状态等关键参数对组合桥面板受力性能的影响规律;曾丹等^[15]提出了钢-GFRP 板条-UHPC 新型组合桥面板,并结合试验研究结果对该新型组合桥面板提出了裂缝宽度计算方法。

此外,笔者所在团队在组合结构桥梁 UHPC 桥面板方面也进行了积极探索,此处简要介绍团队最新研发的 2 种钢-UHPC 组合桥面结构(见图 3、4)。一种是邵旭东等提出的型钢-UHPC 轻型组合桥面结构^[16],其由型钢、钢板条和薄层 UHPC 组合而成, UHPC 层与型钢、钢板条之间通过短栓钉组合,板件之间除了栓钉焊接外无其他焊接,具有优异的抗疲劳性能,其自重与传统正交异性钢桥面基本持平,造价则减少近半,而且局部刚度大大提高,新型桥面采用 T 型接缝。目前该桥面技术已应用于湖南长沙高铁

西站东高架匝道桥项目,该桥为跨径 55 m、桥宽 9 m 的简支组合梁桥,桥面板型钢规格为 HW200 mm×200 mm,钢板条厚 8 mm、宽 70 mm,纵向间距 200 mm, UHPC 板厚 65 mm,桥面板施工采用了工厂内预制+现浇接缝的方法,施工便利且质量可控。另一种是孙璇等提出的型钢开口肋-UHPC 轻型组合桥面结构^[17-18]:将密配筋的 UHPC 层与钢面板通过剪力连接件形成组合面板,钢面板底面焊接倒 T 形型钢作为纵向加劲肋,下方正交叠置横向 T 形型钢,纵横向型钢通过翼缘相交位置横桥向焊缝相连,横向 T 形型钢腹板下方对应为主梁横隔板,两者采用对接焊缝连接。这种型钢组合桥面将纵肋和横隔板的连接由开孔穿过改为上下叠放,大大简化了连接构造,避免了横隔板开孔引起的疲劳问题。对该轻型组合桥面结构开展了负弯矩静力以及疲劳试验,试验结果表明:在静力荷载作用下,0.05 mm 限制裂缝宽度对应的配筋 UHPC 名义开裂应力为 18.1 MPa,是实桥设计应力的 1.4 倍,



a) 工字型钢-UHPC 轻型组合桥面结构



b) 长沙高铁西站东高架匝道桥

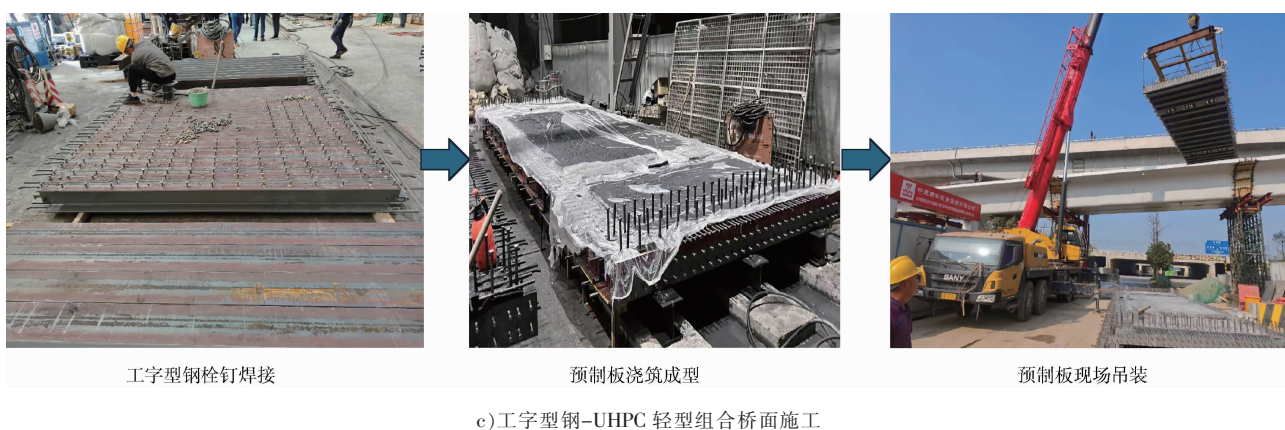


图3 工字型钢-UHPC 轻型组合桥面结构及其工程应用

Fig. 3 I-shaped section steel-UHPC lightweight composite deck structure and engineering application

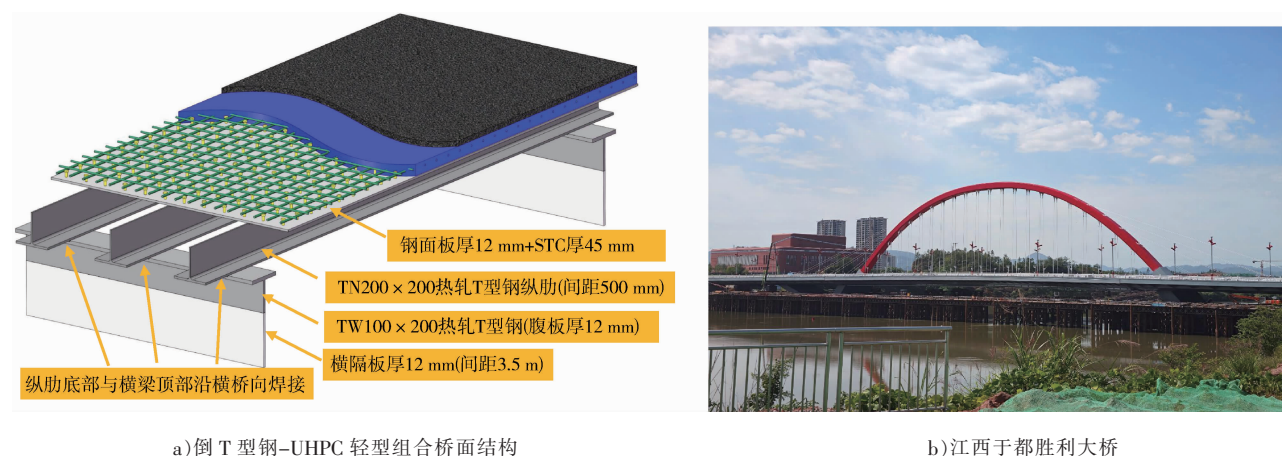


图4 倒T型钢-UHPC 轻型组合桥面结构及其工程应用

Fig. 4 Inverted T-shaped section steel-UHPC lightweight composite deck and engineering application

满足抗裂需求;在疲劳荷载作用下,试件经历累计462万次变幅疲劳加载后,焊缝发生疲劳破坏,等效为实桥设计疲劳应力幅下的疲劳寿命超过4840万次,满足疲劳寿命要求。该桥面结构已应用于江西于都胜利大桥,该桥为168 m的有背索柔性单肋系杆拱桥,应用新桥面系后,桥面造价节省约18%,焊缝总长度

减少约35%,且进一步降低了桥面的疲劳开裂风险。

1.3 钢-UHPC 组合梁及接缝

钢-混组合结构桥梁充分利用钢梁受拉、混凝土桥面板受压的特性,具有良好的经济性,钢-UHPC组合结构桥梁同样具有上述优势,且桥面板更薄、自重更轻、耐久性更优。最新的相关研究包括钢-UHPC

组合梁受力性能、墩顶负弯矩区或 UHPC 接缝性能等方面,为工程应用提供了借鉴。

钢-UHPC 组合梁受力性能方面最新的典型研究主要包括:顾奕伟^[19]对某拟建的 56 m 跨简支钢-UHPC 组合梁桥开展研究,通过计算分析,掌握了不同车辆通行时速、路面不平顺度以及钢梁底板厚度等参数对车桥耦合振动响应结果的影响规律;王继全等^[20]以嘉兴市快速路环线工程跨越京杭大运河地面老桥的龙凤桥为对象,设计了跨径布置为(65+95+65) m 的大跨径钢-UHPC 连续组合梁方案,计算分析结果表明,该方案在设计、施工和经济性等方面都具有显著优势;晏班夫等^[21]对带钢底板的 UHPC 梁提出了抗剪承载力计算方法,该方法以极限平衡理论为基础,结合分项线性叠加原理,考虑了箍筋、钢纤维、UHPC 基体及钢板的抗剪贡献;姜洋^[22]对山东济南凤凰黄河大桥跨堤引桥进行了总体设计,该桥为主跨 245 m 的三跨变梁高连续组合钢箱梁桥,是目前世界上跨径最大的组合钢箱梁桥,大桥车行道区域采用新型钢-UHPC 组合桥面板结构,避免了常规正交异性钢桥面板易疲劳开裂的问题,且显著减轻了结构自重。此外,邵旭东等^[23]提出一种自重轻、强度高、施工简易的钢内芯-UHPC 组合箱梁结构(见图 5),钢内芯作为受力结构的同时又直接作为 UHPC 结构的内部模板,且钢内芯无需设置纵肋,UHPC 材料外包钢内芯,可以保证桥梁的耐久性。目前该结构拟应用于 G59 呼北高速湖南省新化至新宁段,该段设计为(40+60+40) m 三跨单箱单室钢内芯-UHPC 组合箱梁桥,钢内芯的顶、腹板厚度均为 8 mm,底板厚度为 16 mm,UHPC 的顶板厚度为 100 mm,腹板厚度为 130 mm。计算分析结果表明,相比于含正交异性钢桥面板+薄层 UHPC 的组合箱梁桥,钢内芯-UHPC 组合箱梁的焊缝长度减少 30%,用钢量减少 46%,造价降低 11%,大桥拟采用顶推施工,无需设置临时或永久预应力束。

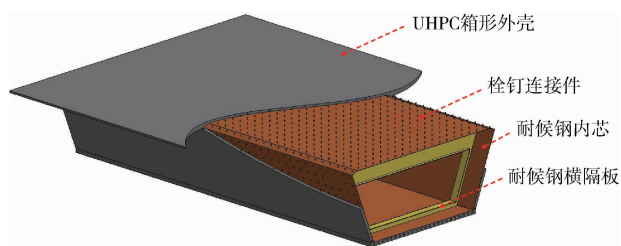


图 5 钢内芯-UHPC 组合箱梁

Fig. 5 Steel inner core-UHPC composite box girder

墩顶负弯矩区或 UHPC 接缝性能方面最新的典型研究主要包括:邓舒文等^[24]提出了钢-UHPC 组合梁负弯矩区 T 形(即上宽下窄)横向接缝构造,开展了抗弯静力模型试验,根据试验和分析结果提出了接缝最大裂缝宽度、考虑 UHPC 拉伸刚度效应的设计弯矩和挠度的计算公式,并建议对于跨度为 20~50 m 的钢-UHPC 组合梁桥,墩顶 T 形接缝上部台阶的纵向长度可设置为 0.1 倍跨径;屈志浩等^[25]以湖北某装配式组合梁桥为背景,开展了负弯矩接缝 1:2 大比例缩尺模型试验,该接缝同样呈 T 形,试验结果表明,接缝区域截面应变分布满足平截面假定,且接缝与预制梁间形成了良好的协同受力;武芳文等^[26]针对钢-混组合梁负弯矩区混凝土易开裂问题,对比研究了在负弯矩区采用水泥基复合材料(ECC)或 UHPC 方案的效果,研究结果表明,相较于普通钢-混凝土组合梁,钢-ECC 组合梁和钢-UHPC 组合梁的开裂荷载分别提高了 2.0 倍和 2.75 倍,抗弯刚度分别提高了 17.23%和 35.73%,抗弯承载力则分别提高了 9.0%和 6.81%,说明 UHPC 的抗裂能力更强,能够有效改善组合梁负弯矩区桥面板的抗裂性能。

1.4 钢-UHPC 组合结构桥梁的其他关键构造

本节将主要从剪力连接件性能、钢-混结合段受力性能、外包或内置 UHPC 的钢-UHPC 组合结构性能 3 个方面对最新的典型研究进行归纳和总结。

剪力连接件性能方面:方志等^[27]对 UHPC 板中的 PBL 键开展了推出试验,探明了抗剪钢板尺寸、贯穿钢筋设置以及 PBL 键布置间距等关键参数对钢-薄层 UHPC 组合桥面板中 PBL 键抗剪性能的影响规律,提出了 PBL 键抗剪承载力计算公式;董桦桦等^[28]研究了钢-UHPC 组合结构中连接件在经历疲劳荷载后的剩余力学性能,结果表明,经历 200 万次疲劳循环加载后,钢-UHPC 组合结构桥梁中栓钉的抗剪刚度退化 30%~40%,极限承载力下降约 6%。

钢-混结合段受力性能方面:覃作伟等^[29]对湖北丹江口水库特大桥的钢-混结合段进行了研究,该桥为主跨 760 m 的双塔双索面部分地锚式混合梁斜拉桥,其钢-混结合段的构造特点为“采用双边箱全格室构造,钢格室段顶板、底板及腹板插入混凝土梁段,通过开孔板剪力键和剪力钉加强钢-混结合段的整体性能,钢-混结合段钢格室内填充 UHPC”;邵旭东等^[30]依托山东滨州黄河五桥,对提出的大跨预应力混凝土梁与钢-UHPC 组合梁结合的新型混合式

连续梁桥建立了有限元模型,明确了钢-混结合段的传力机制和内力分配规律;杨俊等^[31]通过对钢-UHPC结合段开展钢梁端面承压、PBL连接件和两者联合3种承压方式的推出试验,对比分析了不同承压方式对钢-UHPC结合段协同受力性能的影响规律。

外包或内置UHPC的钢-UHPC组合结构性能方面:龚云霞等^[32]提出以钢管-UHPC组合杆件作为中等跨径下承式连续组合桁梁的主要承重构件,并依托沪武高速某跨线桥工程开展了设计研究,结果表明,新型组合结构具有承载力高、耐久性优、施工便捷、装配化程度高等优点;宁平华等^[33]介绍了广州海心桥大跨度斜拱曲梁桥的设计原理,其中包括UHPC包裹钢箱混凝土组合拱肋的设计特点,拱肋外包UHPC的主要目的是为了解决该桥水中钢结构防腐问题;林上顺等^[34]提出了内置矩形截面型钢-UHPC组合梁新结构,并对其抗弯特性进行了试验研究和计算分析,提出了内置矩形截面型钢-UHPC组合梁的抗弯承载力计算方法。

2 NC-UHPC组合结构桥梁

2.1 NC-UHPC组合结构桥梁基本受力性能

NC材料抗压强度高,且取材方便、经济性好,在桥梁结构中应用广泛。因此,结合NC和UHPC的性能优势,研发了NC-UHPC组合结构桥梁,探索了UHPC在混凝土桥梁中的应用。最新的相关研究主要集中在NC-UHPC组合结构桥梁的抗弯性能方面,且对抗剪性能也有一定研究。

抗弯性能方面:梅葵花等^[35]设计了高性能混凝土(HPC)-UHPC组合梁,开展了锈蚀后组合梁的抗弯性能试验,明确了氯盐侵蚀对组合梁抗弯承载力降低的影响规律,并提出了考虑锈蚀效应的HPC-UHPC组合梁抗弯承载力计算方法;曹鸿猷等^[36]设计了3×30 m NC-UHPC组合结构桥梁,通过开展1:2大型缩尺模型试验,验证了该结构具有优异的抗弯性能;焦文灿等^[37]以广西贺巴高速茶花山天桥为背景,提出了一种NC-(U形)UHPC组合梁结构,大桥主跨50 m,纵梁采用UHPC,跨中梁高3.2 m、支点梁高1.95 m,跨中区域腹板厚10 cm、支点区域腹板厚60 cm,每片纵梁分3段预制,相邻节段间设置齿键,2片UHPC纵梁由12道宽40 cm、高65 cm的预应力混凝土横梁通过UHPC现浇接缝连接,桥面板由7.5 cm厚的预制桥面板底模与16.5 cm厚的现浇NC组成,计算分

析结果表明,相较于钢-混凝土组合梁桥和钢箱梁桥,新结构的造价分别降低32%和44%;马瑞东等^[38]以中开高速改扩建工程为背景,介绍了首次在高速公路中大规模采用30 m跨度的UHPC无腹筋预应力U形NC-UHPC节段组合梁技术,试验研究结果显示,UHPC梁与NC顶板界面未出现滑移,表现出良好的整体受力性能;吴红林等^[39]介绍了25 m跨径的NC-UHPC工字形组合梁和30 m跨径的NC-UHPC箱形组合梁,结合试验结果分析了组合梁的裂缝发展规律、荷载-挠度曲线及不同截面高度应变等受力特征。

抗剪性能方面:陈宝春等^[40]提出将预制的UHPC槽形节段通过干缝连接和预应力张拉形成槽形梁,再与整体现浇的混凝土板组合形成NC-UHPC组合梁,对其抗剪性能进行了深入研究,揭示了接缝数、接缝处剪力键数、剪跨比、UHPC钢纤维体积率、配箍率和纵筋率等参数对试件抗剪承载力的影响规律,根据研究结果,由于NC-UHPC组合结构桥梁中钢纤维的“桥接”作用在干接缝处被中断,纤维的作用不能充分发挥,因此,研究建议可适当降低NC-UHPC组合梁的钢纤维掺量,同时,由于箍筋对组合梁抗剪承载力的影响较小,实际应用时可不设置箍筋;赵柏冬等^[41]提出以UHPC作为NC梁的预制永久模板,形成轻量化NC-UHPC组合结构桥梁,采用ABAQUS有限元软件对新型NC-UHPC组合梁进行了抗剪性能分析,计算结果表明,与普通混凝土梁相比,新型NC-UHPC组合梁的斜裂缝开裂荷载提高了64.7%、极限荷载提升了65.4%,并揭示了箍筋间距、剪跨比等主要参数对组合梁抗剪性能的影响规律。

2.2 NC-UHPC界面性能

NC-UHPC组合结构桥梁的受力涉及NC和UHPC两种材料,NC-UHPC界面性能不容忽视,为此,学者们开展了多项相关研究。曾明辉等^[42]分别对现浇整体板和包含不同湿接缝构造的UHPC预制桥面板开展了四点弯曲模型试验,试验结果表明,UHPC接缝连接具有良好的整体性,且UHPC接缝与NC预制板界面处的裂缝发展速度缓慢;程菊科等^[43]考虑3类界面处理方式(不处理类、凿毛类、涂缓凝剂+水冲洗类)开展了NC-UHPC组合推出试验,试验结果表明,试件的破坏形态为NC部位拔出破坏,各类试件的初始剪切刚度接近,且不同界面处理方式对平均抗剪强度影响较大,界面处理后试件的平均抗

剪强度为不处理时的 4 倍以上;赵兴华等^[44]对 NC-UHPC 界面开展了劈裂试验、抗折试验和双面剪切试验,分别研究了经不同界面处理(人工凿毛、表干润湿、掺加膨胀剂)的 NC-UHPC 界面在拉伸状态和剪切状态下的界面粘结强度,并研究了收缩对界面粘结性能的影响,试验结果表明,人工凿毛、表干润湿和掺加膨胀剂处理显著提升了 NC-UHPC 的界面粘结强度,且当膨胀剂掺量为 10% 时性能最佳,UHPC 的收缩得到了最大的补偿,界面粘结强度更高;陈振侃等^[45]通过推出试验研究了 NC-UHPC 界面的抗剪性能,并建议采用 FIB 规范来计算界面的抗剪承载力;邓继华等^[46]提出了基于三角级数表示的 NC-UHPC 界面应力分布计算方法,利用最小余能原理推导出了结合面徐变剪应力计算公式,为 NC-UHPC 组合梁界面的抗剪设计提供了参考。

除了 NC 桥面板与 UHPC 腹板层间的连接外,UHPC 还应用于混凝土梁桥面板的纵缝以及在役混凝土梁拼宽接缝等各类场景,相关界面性能研究同样较为丰富。肖鹏^[47]研究了大跨径混凝土箱梁桥拼接缝的局部受力性能,建立了有限元计算模型,考虑了新旧桥之间基础沉降差、混凝土收缩、徐变差等作用,研究结果表明,拼接缝采用 ECC 材料比采用 UHPC 材料更能满足大跨径桥梁拼接处的受力和变形要求;张志文等^[48]以某高速公路改扩建项目 3×30 m 预应力混凝土 T 梁错孔拼宽改造工程为背景,提出了基于 UHPC 的不等宽柔性拼接方案,并对新型拼宽方案进行了计算分析;曹全付等^[49]以广东湛江环城高速南三岛大桥工程为背景,提出了混凝土小箱梁间 UHPC 纵向湿接缝构造并开展了模型试验,试验结果表明,当搭接长度不小于 6 倍钢筋直径时,UHPC 湿接缝中直径 16 mm 的 U 形钢筋即可满足锚固受力要求,湿接缝内钢筋屈服后应变发展充分,且试件的破坏模式为纯弯段混凝土压碎;朱劲松等^[50]提出了一种 UHPC 免支模的湿接缝构造,其特点为 NC 桥面板底部倾斜,为后浇 UHPC 接缝提供模板,根据试验结果提出了考虑受拉区 UHPC 贡献的 NC-UHPC 组合截面抗弯承载力计算方法;黄心仪等^[51]提出了一种以预埋波形钢板作为底模的 UHPC 免模板湿接缝构造,以期解决接缝现场支模问题,通过接缝四点弯曲模型试验探明了接缝的抗裂性能,并建议接缝处 UHPC 中的钢纤维含量取 1.0%;马健等^[52]提出一种以 NC 预制桥面板局部加高部分

作为底模的 UHPC 免模板湿接缝构造,并通过模型试验获得了新型接缝的开裂荷载、裂缝分布、破坏模式和应力应变状态等特性。

3 全 UHPC 桥梁

3.1 全 UHPC 桥梁基本受力性能

相较于混凝土桥梁,全 UHPC 桥梁具有自重轻、跨越能力大等突出优点,易于预制吊装施工,且具有优异的耐久性。目前对全 UHPC 桥梁的研究多为梁桥结构,最新的相关研究包括全 UHPC 桥梁设计和计算以及 UHPC 构件模型试验等方面。

马军伟^[53]以上海松江区外下洋路油墩港桥为背景,设计了 UHPC 大跨度曲线连续刚构桥,大桥跨径为 (48+79+48) m,桥宽 7.5 m,主梁采用箱梁断面,高 3.0 m,高跨比为 1/26.3,UHPC 梁顶板和腹板厚度均为 0.15 m,底板厚 0.24 m,各板件在支点处均局部加厚,UHPC 箱梁采用钢横隔板,大桥的桥墩也采用 UHPC;丁伟亮等^[54]以广州某道路快速化改造工程中一座 UHPC 箱梁人行天桥为背景,分析了风荷载作用下复杂雨棚结构 UHPC 人行天桥关键节点的受力状态;胡玉庆等^[55]从 UHPC 受弯构件出发,建立了考虑受弯全过程纤维桥接合理量化的钢筋 UHPC 构件抗弯承载力计算方法,并建议,若要充分利用纤维的桥接作用,UHPC 梁在正常使用极限状态下的最大裂缝宽度不宜超过 0.05 mm;李伟东等^[56]通过对预应力 UHPC 工字形梁开展模型试验,分别基于 Mohr-Coulomb 准则和 Rankine 准则提出了 UHPC 梁的抗剪承载力计算方法;孙永新等^[57]对多片 UHPC“T 形”截面梁开展了四点弯曲模型试验,提出了考虑粘结-滑移效应的配筋 UHPC 梁裂缝宽度计算方法;李杰等^[58]对全 UHPC 箱梁的桥面板进行了参数分析并开展了模型试验,试验结果表明,试验梁的开裂应力为大桥桥面在正常使用极限状态下设计应力的 2.14 倍,具有较高的抗裂性能;邱明红等^[59]对钢筋 UHPC 梁提出了抗剪承载力计算方法,通过深入调研,建立了钢筋 UHPC 梁的抗剪试验数据库,并对国内外多个规范或指南中的抗剪承载力计算公式进行了评估和分析,包括法国 NFP18-710 规范,瑞士 SIA2052 指南,日本 JSCE-2006 指南,以及中国 GB 50010—2010 规范、JGJ/T 465—2019 规范和 DBJ43/T 325—2017 规程等,并修正了法国 NFP18-710 规范中的抗剪承载力计算公式,以期 UHPC 梁

抗剪设计提供参考;孔德睿等^[60]结合现场试验结果,分析了32 m简支混凝土箱梁在高速列车激励下的局部振动行为,并采用数值计算方法对56 m简支UHPC箱梁铁路桥建立了车-轨-桥耦合振动分析模型,明确了车速对局部振动的影响,结果表明,顶板中心和翼板边缘的局部振动特性最为显著,且UHPC箱梁的局部振动较混凝土箱梁更为剧烈;马熙伦等^[61]对跨径30 m的预应力UHPC公路桥——河北石磁跨线桥开展了研究,计算结果表明,完全不配置普通钢筋的预应力UHPC箱梁能够满足抗弯承载力设计要求,但腹板过薄可能会导致腹板主拉应力过大,建议腹板厚度不宜小于8 cm;姜海波等^[62]提出了一种体外预应力节段式UHPC无腹筋梁,以剪跨比、钢纤维掺量、箍筋间距为关键参数,对其开展了抗剪模型试验,研究结果表明,钢纤维的掺入可以提高梁的开裂强度、极限强度和裂后性能,且无腹筋梁的抗剪承载力相比箍筋间距为150 mm和75 mm的梁分别降低15.9%和19.6%;刘志峰等^[63]研究了无粘结预应力UHPC梁的抗剪性能,结果表明,当剪跨比适中时(1.86),梁发生剪压破坏,但得益于钢纤维的桥梁作用,梁在斜裂缝出现以后并未立即破坏,可继续承受荷载;李立峰等^[64]对体外预应力UHPC无腹筋梁进行了抗剪试验,试验结果显示,随着剪跨比增大,梁的破坏形态依次表现为斜压破坏、剪压破坏、剪拉破坏,且斜裂缝的数量越少、倾角越小,试验梁的极限抗剪承载力越小,且试件的抗剪破坏方式均为脆性破坏。

3.2 UHPC-UHPC 界面性能

UHPC桥梁多采用装配化施工,因此,UHPC-UHPC界面连接性能同样重要。何飞虎等^[65]对UHPC节段预制梁中的UHPC键齿接缝开展了双面直剪试验,涵盖的关键参数包括侧向应力(5~10 MPa)、接缝类型(干、胶接缝)等,试验结果表明,增大侧向应力有助于提高UHPC键齿胶接缝的抗剪承载力,但对于接缝试件在剪切破坏前的刚度提升效果并不显著,并建议实际工程中可采用深高比为0.5的均匀布置键齿方式;穆清君等^[66]提出采用误差反向传播神经网络(Backpropagation Artificial Neural Networks, BP-ANN)方法预测UHPC的直剪承载力,该方法将混凝土抗压强度、受剪面积、纤维特征参数、钢筋参数和侧向约束应力等作为输入特征参数,并将直剪承载力作为输出量,计算结果表明,该模型训练结果理想,可应用于实际的数据分析,且明确了对UHPC直剪承载力影响最大和最小的因素分别是侧向约束应力和钢筋参数。

4 UHPC 加固在役桥梁

4.1 UHPC 加固桥梁上部结构

目前,采用UHPC薄层补强混凝土桥梁结构(见图6)是UHPC工程应用的一个重要方向,其加固损伤钢筋混凝土(RC)结构的潜在优势主要来源于材料的超高韧性和优异的耐久性,不仅能够显著增强结构的抗弯(裂)性能,还可提升结构的耐久性,从而大幅提高在役危旧RC桥梁的使用寿命。

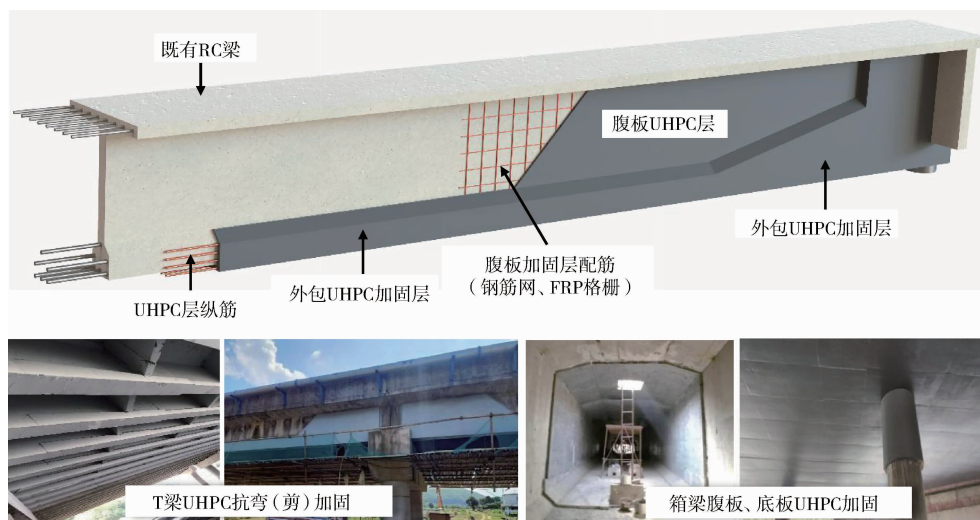


图6 UHPC加固桥梁上部结构

Fig. 6 The upper structure of the bridge strengthened by UHPC

UHPC 加固桥梁上部结构的最新相关研究如下:蔡雄庭等^[67]对 UHPC-普通混凝土界面抗剪性能和 UHPC 加固 RC 梁(受压区、受拉区)抗弯性能进行了试验研究,结果表明,经界面凿毛和涂刷界面剂+水冲洗处理后,UHPC-普通混凝土界面抗剪强度大于普通混凝土抗剪强度;RC 梁采用 UHPC 加固后,裂缝开展延缓,抗弯承载能力显著提高。常跃等^[68]基于已有试验结果,提出了考虑 UHPC 加固层和钢筋混凝土梁结合面间黏聚力接触的精细有限元模型建模方法,并在此基础上进行参数分析,探究了不同配筋率、加固层厚度以及加固层有无拼缝等关键参数对加固结构破坏模式和承载力的影响规律。王连华等^[69]通过现场足尺 UHPC 加固空心板梁桥抗弯性能试验,讨论分析了 UHPC 加固机理及加固层对受损空心板梁结构抗弯性能的影响,并推导出了 UHPC 加固空心板梁的抗弯极限承载力计算公式。王勃等^[70]提出采用 FRP 网格-UHPC 复合加固 RC 梁,通过试验研究和仿真分析,明确了随着 FRP 粘结长度的增加,FRP 网格-UHPC 加固效果提升显著,承载力最大提升幅度为 121.929%。张阳等^[71]对钢板-UHPC 组合加固损伤 RC 梁的受弯性能进行了试验和理论研究,结果表明,组合加固梁在抗裂性能、刚度及极限承载力方面较未加固梁有大幅提升,组合加固梁在极限状态下发生了界面剥离破坏,作者基于桁架模型建立了钢板-UHPC 组合加固梁剥离承载力计算理论。王秋维等^[72]通过试验研究和理论推导建立了 UHPC-NC 组合梁的极限弯矩计算模型,试验值与计算值误差小于 10%。靳玉栋等^[73]通过数值分析与理论推导相结合的方法,提出了 UHPC 加固钢筋混凝土 T 梁抗弯承载力计算公式。胥玉龙等^[74]对 UHPC 加固空心板梁桥浅铰缝的抗弯性能进行了试验研究,结果表明,UHPC 铰缝和铺装层可明显提高铰缝的抗弯承载力,配筋率和铺装层厚度的增大均能提高铺装层的抗裂性能和结构极限抗弯承载力;同时,作者还提出了带铺装层 UHPC 浅铰缝抗弯承载力计算公式。除抗弯加固外,邓珺等^[75]针对 PC 箱梁端部剪跨区出现的斜裂缝问题,提出了密配筋 UHPC 加固箱梁腹板方法,并通过试验探究了不同剪跨比下 UHPC 加固不同预损伤程度 PC 箱梁腹板后抗剪性能的演变规律以及抗裂性能的提升效果。王国林等^[76]通过足尺模型试验,探究了 UHPC 预制板及其内嵌 CFRP 板条加固 RC 梁的抗剪性能,

并建立了可用于预测 UHPC 板加固 RC 梁的全过程受力行为的非线性有限元模型。王宗山等^[77]为探究 UHPC 加固石拱桥的受力性能,开展了 UHPC 加固石拱桥全过程试验和极限承载力计算分析研究,试验结果表明,UHPC 加固层可有效提高石砌拱的极限承载力,参数分析表明,受限于砌体抗压强度,UHPC 抗拉强度的提升并不会显著提高加固拱的极限承载力,因此,应根据砌体的抗压强度合理选择 UHPC 加固材料。伍敏等^[78]提出采用 UHPC 局部替换和包裹的方案改善钢筋混凝土梁的抗冲击性能,并建议在实际工程中 UHPC 局部替换长度取大于 2 倍梁高,这样可有效避免局部冲剪破坏。

4.2 UHPC 加固桥梁下部结构

与普通混凝土相比,UHPC 具有高抗压强度、高弹性模量、低徐变等突出优点,采用 UHPC 对桥墩、桩基础等以受压为主的桥梁下部结构进行加固,可在不明显增加自重的前提下大幅提升原结构的承载能力和刚度(见图 7)。

与 UHPC 加固桥梁上部结构相比,UHPC 加固桥梁下部结构的相关研究相对较少,最新研究如下:王勃等^[79]对 UHPC 加固 RC 圆柱轴心受压性能进行了试验研究,并建立了有限元模型对不同长细比 UHPC 加固柱的承载能力和塑性变形能力进行了参数分析。结果表明,UHPC 加固对 RC 圆柱的承载力和延性的提升明显;但随着柱长细比增大,UHPC 加固柱的极限承载力逐渐降低,抵抗塑性变形的能力变差。常亚峰等^[80]通过足尺模型试验对螺旋箍筋约束 UHPC 加固 RC 柱的大偏心受压性能展开了研究,探究了不同螺旋箍筋间距和加固层是否配置螺旋箍筋对加固柱受力和变形性能的影响规律,并对不同参数试验柱的破坏现象、承载力、侧向挠度等结构响应进行了分析讨论。结果表明,螺旋箍筋可以改善加固柱的变形性能,减小螺旋箍筋间距可以提高结构极限承载能力。此外,他们还提出了螺旋箍筋约束 UHPC 加固柱的大偏心受压正截面承载力计算公式,计算结果得到了试验验证。许祥贵等^[81]考虑采用 UHPC 增大截面加固法对墩柱塑性铰区域进行加固处理,并基于 XTRACT 软件,分析得到了加固墩柱截面 $M-N$ 曲线和 $M-\varphi$ 曲线,探究了 UHPC 加固层强度、厚度、是否配筋以及墩柱设计直径对组合截面受压性能的影响;最后,从结构性能、耐久性、混凝土用量及美观性等方面综合对比分析了不同加固



图7 UHPC 加固桥墩

Fig. 7 Bridge piers strengthened by UHPC

方案的加固效果。王强等^[82]提出了节点加强 UHPC 加固 RC 柱新方法,并对节点加强下采用 UHPC 加固 RC 方柱模型的抗震性能进行了试验研究,探究了不同轴压比作用下 UHPC 加固技术对方柱抗震性能的提升效果。研究表明,节点加强后,UHPC 加固柱的延性系数、累计耗能和承载能力均得到显著提升,UHPC 中的钢纤维的桥联作用抑制了裂缝的发展,改善了高轴压比试件的破坏形态。此外,他们还提出了一种基于平截面假定的 UHPC 节点加强加固柱的压弯承载力计算方法,计算结果与试验结果吻合良好。

5 UHPC 下部结构及附属结构

5.1 下部结构

下部结构是桥梁结构的重要组成部分,对 UHPC 下部结构的最新研究中,主要包括盖梁和桥墩等方面,且多涉及接头性能和动力行为,具体如下:贾俊峰等^[83]提出了预制 UHPC 模壳填芯混凝土的悬臂盖梁结构,并开展了静力模型试验,试验结果表明,当模壳材料为 UHPC 时,盖梁的峰值承载力相较 C35 模壳盖梁提高了 22%;严闯^[84]提出了轻量化预制装配式 UHPC 大悬臂盖梁结构,并对 UHPC“Π 形”空心盖梁、C80 实心盖梁和 C80 倒 U 形盖梁进行了对比分析,结果表明,轻量化 UHPC“Π 形”空心盖梁的

抗弯和抗剪承载力与其他 2 种盖梁相当;徐佳沛等^[85]研究了钢管-UHPC 组合墩柱在典型爆炸威胁下的抗爆性能;谢濠君等^[86]通过开展 NC-UHPC 直剪试验和墩柱-桩基础轴压试验,对墩柱-桩基础承插节点的冲切性能进行了研究,明确了底板、接缝和承插连接参数对预制装配式墩柱-桩基础承插节点冲切失效模式的影响规律;王建飞等^[87]提出了一种新型嵌入式钢管混凝土墩柱-盖梁承插连接节点,墩柱与盖梁间设有 UHPC 垫层,开展了 1:3 缩尺模型拟静力试验,试验结果表明,设置 1.2 倍 CFST(钢管混凝土)直径的承插深度可保证损伤发生在节点区域以外,且盖梁保持弹性受力状态;米家禾等^[88]提出一种装配式榫卯-承插桥墩,并对其破坏机理和抗震性能进行了研究,研究表明,新型装配式桥墩在荷载作用下承台及灌浆料的破坏较小,达到极限荷载时,装配式桥墩的残余变形仅为整体现浇试件的 79.09%,表明 UHPC 灌浆料可降低桥墩的损伤,因此装配式桥墩采用较短的承插深度和钢筋搭接长度即可达到可靠的连接效果且震后更易修复;於亚辉等^[89]研究了塑性铰区采用 UHPC 材料、孔道采用 UHPC 压浆的桥墩结构,研究表明,该结构的抗震性能优于普通混凝土现浇桥墩;杨晓强等^[90]提出了高强方钢管-UHPC 组合桥墩结构,并开展了轴向冲击性能及冲击后剩余性能模型试验,试验结

果表明,高强钢管-UHPC 组合构件的抗冲击性能和冲击后剩余性能优于高强钢管-高强混凝土组合构件,在应对更大能量的轴向冲击作用时具有优势;袁星等^[91]提出了装配式 UHPC 空心墩的内浇式组合连接构造,利用墩壁作为内部后浇 UHPC 的模板,现场施工可无需设置模板,通过模型试验明确了新型连接结构在压弯变形下的承载能力和损伤模式;常柱刚等^[92]依托湖南长沙暮坪湘江特大桥提出了由 UHPC 面板、内置 X 型耗能钢板、EPS 泡沫及 D 型防撞护舷组成的钢-UHPC 组合防撞设计方案,并开展了船-桥碰撞分析。

5.2 附属结构

在 UHPC 桥梁的最新研究中,探索了 UHPC 在护栏、装饰挂板等附属结构的应用,进一步拓展了 UHPC 在桥梁工程中的应用范围。主要研究包括:周芷萱等^[93]基于拓扑优化技术对人行天桥护栏等 UHPC 围护结构进行了优化设计,优化后,UHPC 围护结构的体积减小了 35%,同时还提出了一种可实现模块简单拼装的 UHPC 榫卯节点;赵炯枫等^[94]切合大跨径桥梁的外挂装饰需求,提出了采用 UHPC 外挂装饰板以及相适应的摩擦耗能节点,开展了推出试验,试验结果表明,剪力方向不同则螺栓的受力情况不同,但所有试件破坏形态均为螺杆被剪断。

6 结论

笔者以 2024 年发表在国内中文期刊上的 UHPC 桥梁相关论文为主要对象,进行了文献调研和综述,主要结论如下:

1) 目前对 UHPC 桥梁结构的研究覆盖面较为广泛,包含了钢-UHPC 组合结构桥梁、NC-UHPC 组合结构桥梁、全 UHPC 桥梁、UHPC 加固在役桥梁、UHPC 下部结构及附属结构等诸多方面,促进了新材料和新结构的融合,丰富了桥梁结构形式,拓展了应用场景。同时,相关研究包含了仿真分析、模型试验、设计理论和工程应用等形式,从不同角度推动 UHPC 桥梁技术的发展。

2) 目前对钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构的研究仍在不断丰富;对钢-UHPC 组合结构桥梁及接缝的研究不断增加和深化,以充分利用 UHPC 的优异性能,降低桥面板自重,提升抗裂性;NC-UHPC 组合结构桥梁是 UHPC 桥梁研究和应用的另一关键场景,以期在混凝土桥梁中合理利用 UHPC,控制工

程造价,并提升混凝土桥梁的耐久性;对全 UHPC 桥梁的研究主要包括全 UHPC 桥梁方案设计和计算、构件模型试验等方面,不断完善全 UHPC 桥梁的设计理论和计算方法;UHPC 在桥梁加固领域的研究在不断深入和细化,基于 UHPC 的新型桥梁加固方法也不断丰富;对 UHPC 下部结构及附属结构的研究也正在积极开展,持续挖掘 UHPC 在桥梁工程中的应用潜力。

3) UHPC 具有强度高、耐久性优等特点,相信今后其能够在各类新桥建设和在役桥梁加固中发挥更大的作用,助力桥梁结构朝着高性能、长寿命的方向发展。

[参考文献]

- [1] 唐亮,乔浩玥,屈建,等. 高性能混凝土在钢桥面铺装中的应用研究进展[J]. 混凝土,2024(4):83-88,133. (TANG L, QIAO H Y, QU J, et al. Application advance of high performance concrete in deck paving of steel bridge[J]. Concrete, 2024(4):83-88, 133.)
- [2] 吴关良,王晓海,王杰,等. UHPC 提升钢桥面板顶板-纵肋连接疲劳性能研究[J]. 城市建筑,2024,21(10):199-203. (WU G L, WANG X H, WANG J, et al. Study on fatigue performance improvement of UHPC on deck-to-rib junction of orthotropic steel bridge deck[J]. Urbanism and architecture, 2024, 21(10): 199-203.)
- [3] 许航,鲍力,刘旭锴,等. 正交异性钢桥面板疲劳寿命设计优化研究[J]. 公路,2024,69(1):124-133. (XU H, BAO L, LIU X K, et al. Research on fatigue life design optimization of orthotropic steel deck[J]. Highway, 2024, 69(1): 124-133.)
- [4] 张君琳,李柱一,谢增奎,等. 正交异性钢-UHPC 组合桥面板剪力连接件抗疲劳性能分析[J]. 公路,2024,69(1):133-140. (ZHANG J L, LI Z Y, XIE Z K, et al. Analysis on fatigue resistance of shear connectors of orthotropic steel-UHPC composite deck[J]. Highway, 2024, 69(1): 133-140.)
- [5] 李嘉,肖鹏,范思源,等. 基于表面能理论的粘结剂-UHPC 粘结失效模式分析[J]. 材料导报,2024,38(14):131-137. (LI J, XIAO P, FAN S Y, et al. Failure mode analysis of binders-UHPC based on surface energy theory[J]. Materials reports, 2024, 38(14): 131-137.)
- [6] 陈奉民,郑升宝,谢小华,等. 重庆大溪河特大桥主桥设计[J]. 桥梁建设,2024,54(4):126-133. (CHEN F M, ZHENG S B, XIE X H, et al. Design of main bridge of Chongqing Daxi River Bridge[J]. Bridge construction, 2024, 54(4): 126-133.)
- [7] 曹玉贵,铎志莹,刘沐宇,等. UHPC 桥面板力学性能与承载力计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(7):206-214. (CAO Y G, XUAN Z Y, LIU M Y, et al. Mechanical properties and bearing capacity calculation method of UHPC bridge

- deck[J]. Journal of Hunan University (natural science), 2024, 51(7):206-214.)
- [8] 李利军, 张国民. 采用支点位移法施工的斜拉桥钢-UHPC 组合梁受力分析[J]. 桥梁建设, 2024, 54(2):64-69. (LI L J, ZHANG G M. Analysis of mechanical property of steel-UHPC composite girder cable-stayed bridge when raising elevation of auxiliary piers to improve loading condition at negative bending moment zone [J]. Bridge construction, 2024, 54(2):64-69.)
- [9] 丁然, 张亚朋, 武维宏, 等. 超高性能混凝土华夫板受力性能试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(8):93-107, 117. (DING R, ZHANG Y P, WU W H, et al. Experimental and numerical investigations on mechanical performance of UHPC waffle panels [J]. Journal of building structures, 2024, 45(8):93-107, 117.)
- [10] 李晓龙, 陈晖, 王泽辉, 等. 带预应力 UHPC 华夫桥面板抗弯性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(3):100-108. (LI X L, CHEN H, WANG Z H, et al. Experimental study on flexural performance of prestressed UHPC waffle deck panels [J]. Bridge construction, 2024, 54(3):100-108.)
- [11] 李传习, 肖和育, 贺龙飞, 等. 平钢板-UHPC 组合桥面板纵向抗负弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(3):91-105. (LI C X, XIAO H Y, HE L F, et al. Experimental study on longitudinal negative bending performance of flat steel plate-UHPC composite bridge deck [J]. Engineering mechanics, 2024, 41(3):91-105.)
- [12] 廖万成, 赵华, 安家禾. 预制拼装钢-UHPC 组合桥面板湿接缝抗弯性能研究[J]. 中外公路, 2024, 44(1):102-110. (LIAO W C, ZHAO H, AN J H. Study on flexural behavior of wet joints of prefabricated steel-UHPC composite bridge deck [J]. Journal of China & foreign highway, 2024, 44(1):102-110.)
- [13] 谭星宇, 方志, 李修坤, 等. 大跨斜拉桥节段预制钢-UHPC 组合桥面结构受力性能研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(5):102-109. (TAN X Y, FANG Z, LI X K, et al. Mechanical properties of segmental steel-UHPC composite deck panels for long-span cable-stayed bridge [J]. Bridge construction, 2024, 54(5):102-109.)
- [14] 方志, 武霄楠, 谭星宇, 等. 钢-UHPC 组合桥面板横向负弯矩区受弯性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41(2):112-124. (FANG Z, WU X N, TAN X Y, et al. Transverse flexural behavior of steel-UHPC composite deck under hogging moment [J]. Engineering mechanics, 2024, 41(2):112-124.)
- [15] 曾丹, 曹磊, 刘扬, 等. 钢-GFRP 板条-UHPC 组合桥面结构开裂及裂缝宽度计算方法研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(5):94-101. (ZENG D, CAO L, LIU Y, et al. Research on flexural test and crack width calculation methods for steel-GFRP strips-UHPC composite deck [J]. Bridge construction, 2024, 54(5):94-101.)
- [16] 邵旭东, 蔡文涌, 曹君辉, 等. 型钢-UHPC 轻型组合桥面板及其抗弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(6):152-168. (SHAO X D, CAI W Y, CAO J H, et al. Research on flexural performance of section steel-UHPC light-weight composite bridge deck [J]. China civil engineering journal, 2024, 57(6):152-168.)
- [17] 孙璇, 邵旭东, 邹德强. 型钢开口肋-UHPC 轻型组合桥面新结构静力与疲劳性能[J]. 中国公路学报, 2024, 37(4):252-262. (SUN X, SHAO X D, ZOU D Q. Research on static and fatigue properties of new structure of section steel-UHPC lightweight composite deck with open rib [J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(4):252-262.)
- [18] 邵旭东, 杨川琪, 孙璇, 等. 型钢开口肋-UHPC 轻型组合桥面横向受力性能研究[J/OL]. 土木工程学报. (2024-05-06) [2025-01-14]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.24020129>. (SHAO X D, YANG C Q, SUN X, et al. Research on transverse behavior of section steel-UHPC lightweight composite deck with open rib [J/OL]. China civil engineering journal. (2024-05-06) [2025-01-14]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.24020129>.)
- [19] 顾奕伟. 钢-UHPC 组合梁桥车桥耦合动力响应分析[J]. 公路, 2024, 69(6):122-127. (GU Y W. Vehicle-bridge interaction analysis of steel-UHPC composite bridge [J]. Highway, 2024, 69(6):122-127.)
- [20] 王继全, 刘晓奎. 大跨径钢-UHPC 组合梁桥设计与整体受力分析[J]. 城市道桥与防洪, 2024(4):71-73. (WANG J Q, LIU X L. Design and integral force analysis of long-span steel-UHPC composite girder bridge [J]. Urban roads bridges & flood control, 2024(4):71-73.)
- [21] 晏班夫, 刘千, 王凯, 等. 带钢底板 UHPC 梁抗剪承载力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(3):82-93. (YAN B F, LIU Q, WANG K, et al. Shear bearing capacity calculation method for UHPC beams with steel bottom plate [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2024, 24(3):82-93.)
- [22] 姜洋. 主跨 245 m 组合钢箱梁桥总体设计[J]. 城市道桥与防洪, 2024(12):60-64. (JIANG Y. Overall design of composite steel box girder bridge with main span 245 m [J]. Urban roads bridges & flood control, 2024(12):60-64.)
- [23] 邵旭东, 刘淦, 李盼盼, 等. 钢板-UHPC 组合腹板抗剪性能试验研究[J/OL]. 中国公路学报. (2024-04-30) [2025-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.U.20240430.0916.002>. (SHAO X D, LIU G, LI P P, et al. Experimental studies on shear performance of steel-UHPC composite web [J/OL]. China journal of highway and transport. (2024-04-30) [2025-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.U.20240430.0916.002>.)
- [24] 邓舒文, 邵旭东, 晏班夫, 等. 轻型组合桥梁负弯矩区接缝抗弯性能试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(2):399-412. (DENG S W, SHAO X D, YAN B F, et al. Experiment on flexure behavior of joint in negative moment area of lightweight composite bridge [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2024, 58(2):399-412.)
- [25] 屈志浩, 邵旭东, 邱明红, 等. 装配式组合梁负弯矩区阶梯型 UHPC 接缝抗裂性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(5):1-13. (QU Z H, SHAO X D, QIU M H, et al. Experimental study on crack resistance of stepped UHPC joints in negative moment zone of fabricated composite beams [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2024, 41(5):1-13.)

- [26] 武芳文,左剑,樊州,等. 钢-ECC/UHPC 组合梁负弯矩区力学性能研究[J]. 交通运输工程学报,2024,24(1):218-231. (WU F W,ZUO J,FAN Z,et al. Investigation on mechanical properties of steel-ECC/UHPC composite girders in negative moment regions[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2024,24(1):218-231.)
- [27] 方志,殷益彬,谭星宇,等. 钢-薄层 UHPC 组合桥面结构中 PBL 剪力键抗剪性能试验[J]. 土木工程与管理学报,2024,41(4):9-21. (FANG Z,YIN Y B,TAN X Y,et al. Experimental study on shear performance of PBL shear connectors in steel-thin UHPC composite bridge deck structure[J]. Journal of civil engineering and management,2024,41(4):9-21.)
- [28] 董桦桦,马冰,冯欢. UHPC 中栓钉连接件疲劳荷载后力学性能研究[J]. 公路交通技术,2024,40(1):107-114. (DONG H H,MA B,FENG H. Study on the mechanical properties of stud connectors in UHPC after fatigue[J]. Technology of highway and transport,2024,40(1):107-114.)
- [29] 覃作伟,廖原,丁望星,等. 丹江口水库特大桥多格室钢-混结合段设计[J]. 桥梁建设,2024,54(4):8-13. (QIN Z W,LIAO Y,DING W X,et al. Design of latticed steel-concrete joint section of Danjiangkou Reservoir Bridge[J]. Bridge construction,2024,54(4):8-13.)
- [30] 邵旭东,熊满华,怀臣子,等. PC 与钢-UHPC 混合式连续梁桥结合段受力分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(11):126-137. (SHAO X D,XIONG M H,HUAI C Z,et al. Mechanical analysis on joint section of PC and steel-UHPC hybrid continuous girder bridges[J]. Journal of Hunan University (natural science),2024,51(11):126-137.)
- [31] 杨俊,李克阳,周建庭,等. 钢-UHPC 结合段 PBL 连接件和钢梁端面承压联合作用研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(5):1-8,16. (YANG J,LI K Y,ZHOU J T,et al. Joint action of PBL connectors and steel beam end bearing in steel-UHPC joint section[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science),2024,43(5):1-8,16.)
- [32] 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(6):74-88. (GONG Y X,LIU Y J,JIANG L,et al. Study on structures of ultra-high-performance concrete-filled steel tubular bridge[J]. Journal of highway and transportation research and development,2024,41(6):74-88.)
- [33] 宁平华,杨燎原,胡会勇. 大跨度斜拱曲梁多重组合桥梁原理和应用实践[J]. 城市道桥与防洪,2024(11):9-12. (NING P H,YANG L Y,HU H Y. Principle and application practice of multiple composite bridge with long-span oblique arch and curved beam[J]. Urban roads bridges & and flood control,2024(11):9-12.)
- [34] 林上顺,暨邦冲,刘君平,等. 矩形截面型钢超高性能混凝土梁抗弯承载力[J]. 交通运输工程学报,2024,24(3):94-109. (LIN S S,JI B C,LIU J P,et al. Flexural capacity of steel reinforced ultra-high performance concrete beams with rectangular section[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2024,24(3):94-109.)
- [35] 梅葵花,亢文波,刘洋,等. 氯盐环境下预损伤 UHPC-HPC 组合梁抗弯性能[J]. 交通运输工程学报,2024,24(1):117-130. (MEI K H,KANG W B,LIU Y,et al. Flexural behavior of pre-damaged UHPC-HPC composite beams in chloride corrosion environment[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2024,24(1):117-130.)
- [36] 曹鸿猷,陈云峰,李俊,等. 预制小箱梁 UHPC-NC 组合负弯矩区抗弯承载力[J]. 长安大学学报(自然科学版),2024,44(6):59-71. (CAO H Y,CHEN Y F,LI J,et al. Bending-bearing capacity of UHPC-NC composite negative bending moment region of small box girder[J]. Journal of Chang'an University (natural science edition),2024,44(6):59-71.)
- [37] 焦文灿,陆国荣,邵旭东,等. 50 m U 形 UHPC-NC 简支梁桥设计研究[J]. 世界桥梁,2024,52(5):1-8. (JIAO W C,LU G R,SHAO X D,et al. Design of bridge with 50 m-long simply-supported spans of U-shaped UHPC-NC composite girders[J]. World bridges,2024,52(5):1-8.)
- [38] 马瑞东,王亮,范学明,等. 高速公路 30 m UHPC 无腹筋预应力 U 型节段组合梁抗弯承载力足尺试验研究[J]. 混凝土,2024(10):132-136. (MA R D,WANG L,FAN X M,et al. Full-scale experimental study on flexural bearing capacity of 30 m UHPC prestressed U-section composite beam without web reinforcement[J]. Concrete,2024(10):132-136.)
- [39] 吴红林,孙向东,季振明,等. 预应力 UHPC-RC 无腹筋组合梁足尺模型抗弯试验及极限弯矩计算研究[J]. 桥梁建设,2024,54(4):53-60. (WU H L,SUN X D,JI Z M,et al. Flexural test on full-scale prestressed UHPC-RC composite girder specimen without web reinforcement and ultimate bending moment calculation[J]. Bridge construction,2024,54(4):53-60.)
- [40] 陈宝春,陈逸聪,周家亮,等. 预应力 UHPC 槽形节段与整体式混凝土板组合梁受剪性能[J]. 建筑科学与工程学报,2024,41(3):54-64. (CHEN B C,CHEN Y C,ZHOU J L,et al. Shear behavior of composite girder with prestressed UHPC channel segments and monolithic concrete slab[J]. Journal of architecture and civil engineering,2024,41(3):54-64.)
- [41] 赵柏冬,张一鹏,刘慈,等. 预制 UHPC 永久模板钢筋混凝土组合梁抗剪性能有限元分析[J]. 黑龙江交通科技,2024(4):100-104. (ZHAO B D,ZHANG Y P,LIU C,et al. Finite element analysis of anti-shear performance of prefabricated UHPC permanent formwork reinforced concrete composite beam[J]. Communications science and technology Heilongjiang,2024(4):100-104.)
- [42] 曾明辉,尹炳森,陈刚,等. 带 UHPC 接缝的桥面板力学性能试验研究[J]. 公路交通科技,2024,41(3):125-131. (ZENG M H,YIN B S,CHEN G,et al. Experimental study on mechanical property of bridge deck with UHPC joint[J]. Journal of highway and transportation research and development,2024,41(3):125-131.)
- [43] 程菊科,伍贤智,杨树萍,等. UHPC-NC 组合箱梁顶板界面抗剪

- 性能试验研究[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 123-130. (CHENG J K, WU X Z, YANG S P, et al. Experimental study on shear resistance of top plate interface of UHPC-NC composite box girder[J]. Journal of Xiangtan University (natural science edition), 2024, 46(2): 123-130.)
- [44] 赵兴华, 许祥贵, 梁广振, 等. 界面处理与收缩对 UHPC-NC 界面黏结性能的影响研究[J]. 混凝土, 2024(6): 206-209, 214. (ZHAO X H, XU X G, LIANG G Z, et al. Research on the influence of interface treatment and shrinkage on the adhesion performance of UHPC-NC interface[J]. Concrete, 2024(6): 206-209, 214.)
- [45] 陈振侃, 李军生, 时权, 等. NRC-UHPC 界面抗剪性能试验研究[J]. 中外公路, 2024, 44(6): 176-184. (CHEN Z K, LI J S, SHI Q, et al. Experimental study on shear behavior between NRC-UHPC interface[J]. Journal of China & foreign highway, 2024, 44(6): 176-184.)
- [46] 邓继华, 李冬亮, 周亚栋, 等. 预应力 UHPC-NC 组合梁结合面徐变剪应力分析[J]. 应用力学学报, 2024, 41(5): 1075-1082. (DENG J H, LI D L, ZHOU Y D, et al. Creep shear stress on the interface of prestressed UHPC-NC composite beam[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(5): 1075-1082.)
- [47] 肖鹏. 大跨径箱梁桥拼接缝受力性能研究[J]. 低温建筑技术, 2024, 46(6): 110-114. (XIAO P. Study on the mechanical behavior of split-joint of long-span box girder bridges[J]. Low temperature architecture technology, 2024, 46(6): 110-114.)
- [48] 张志文, 胡承泽, 高洪波, 等. UHPC 在 T 梁桥错孔拼宽湿接缝中的设计研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(4): 103-108. (ZHANG Z W, HU C Z, GAO H B, et al. Research on design of UHPC in staggered wide wet joints of T-beam bridge [J]. Construction technology, 2024, 53(4): 103-108.)
- [49] 曹全付, 秦凤江, 姜瑞娟, 等. 预制拼装桥梁 UHPC 横向连接技术研究[J]. 中国市政工程, 2024(4): 16-21, 31. (CAO Q F, QIN F J, JIANG R J, et al. Research on UHPC transverse connection technology of prefabricated bridges[J]. China municipal engineering, 2024(4): 16-21, 31.)
- [50] 朱劲松, 佟欣瑶, 刘晓旭. 装配式小箱梁桥超高性能混凝土免支模湿接缝抗弯性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(9): 2568-2580. (ZHU J S, TONG X Y, LIU X X. Flexural behavior of ultra-high performance concrete joint without form work in prefabricated small box girder bridges[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2024, 54(9): 2568-2580.)
- [51] 黄心仪, 李立峰, 王连华, 等. 带波形钢板的 UHPC 免模板湿接缝抗弯模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2024, 64(1): 7-13. (HUANG X Y, LI L F, WANG L H, et al. Experimental study on the bending resistance of UHPC plate-free wet joints with corrugated steel plates[J]. Railway engineering, 2024, 64(1): 7-13.)
- [52] 马健, 熊江东, 苏官林, 等. 局部加高的 UHPC 免模板湿接缝抗弯模型试验[J]. 铁道建筑, 2024, 64(9): 68-75. (MA J, XIONG J D, SU G L, et al. Model test of bending resistance of locally heightened UHPC template-free wet joints[J]. Railway engineering, 2024, 64(9): 68-75.)
- [53] 马军伟. 大跨度曲线 UHPC 连续刚构箱梁桥的设计研究与实践[J]. 中国市政工程, 2024(2): 17-22. (MA J W. Design research and practice of long-span curve UHPC continuous rigid box girder bridge[J]. China municipal engineering, 2024(2): 17-22.)
- [54] 丁伟亮, 李萌. 风荷载作用下复杂雨棚结构 UHPC 人行天桥关键节点分析[J]. 城市道桥与防洪, 2024(11): 129-131, 142. (DING W L, LI M. Analysis of key nodes of UHPC pedestrian bridge with complex canopy structure under wind load[J]. Urban roads bridges & flood control, 2024(11): 129-131, 142.)
- [55] 胡玉庆, 戚家南, 陈东, 等. 考虑纤维桥接退化的钢筋 UHPC 梁受弯承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2024, 37(7): 168-178. (HU Y Q, QI J N, CHEN D, et al. Calculation method of flexural bearing capacity of UHPC beams based on fiber bridging degradation considerations[J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(7): 168-178.)
- [56] 李伟东, 邹德强, 潘泽宇, 等. 预应力超高性能混凝土工字形梁抗剪性能试验[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1242-1250. (LI W D, ZOU D Q, PAN Z Y, et al. Experimental on shear behavior of prestressed UHPC I-shaped beams[J]. Science technology and engineering, 2024, 24(3): 1242-1250.)
- [57] 孙永新, 蒯鹏臻, 杨子江, 等. 考虑黏结-滑移效应的 UHPC 梁裂缝宽度计算方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(9): 2600-2608. (SUN Y X, LIN P Z, YANG Z J, et al. Calculation method for crack width of UHPC beams considering bond slip effect[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2024, 54(9): 2600-2608.)
- [58] 李杰, 穆文均, 廖万成. UHPC 箱梁桥面体系主要设计参数优化及试验研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(5): 85-93. (LI J, MU W J, LIAO W C. Main design parameters optimization and experimental research on UHPC box deck system[J]. Bridge construction, 2024, 54(5): 85-93.)
- [59] 邱明红, 晏班夫, 李钊, 等. 基于试验数据库的 UHPC 梁抗弯承载力计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(9): 3441-3456. (QIU M H, YAN B F, LI Z, et al. Calculation method of shear capacity of UHPC beams based on experimental database [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2024, 55(9): 3441-3456.)
- [60] 孔德睿, 张迅, 刘子琦, 等. 列车激励下 UHPC 简支箱梁桥面板局部振动研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(9): 56-67. (KONG D R, ZHANG X, LIU Z Q, et al. Research on local vibrations of bridge deck of UHPC simply-supported box girders subjected to train excitations[J]. China civil engineering journal, 2024, 57(9): 56-67.)
- [61] 马熙伦, 唐梓轩, 陈宝春, 等. 30 m 预应力 UHPC 箱梁抗弯性能试验及结构优化研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(3): 93-99. (MA X L, TANG Z X, CHEN B C, et al. Experimental study on flexural

- behaviors and structural optimization of 30 m-long prestressed UHPC box girder[J]. Bridge construction, 2024, 54(3): 93-99.)
- [62] 姜海波, 胡泽彬, 曹志鹏, 等. 体外预应力节段式 UHPC 无腹筋梁抗剪性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(2): 105-115, 138. (JIANG H B, HU Z B, CAO Z P, et al. Experimental study on shear behavior of externally prestressed segmental UHPC beam without stirrup[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2024, 41(2): 105-115, 138.)
- [63] 刘志峰, 卢涛, 包杰, 等. 无粘结预应力 UHPC 梁剪切性能试验研究[J]. 世界桥梁, 2024, 52(5): 69-75. (LIU Z F, LU T, BAO J, et al. Experimental study on shear performance of unbonded prestressed UHPC girder[J]. World bridges, 2024, 52(5): 69-75.)
- [64] 李立峰, 房宇超, 叶萌, 等. 体外预应力 UHPC 无腹筋梁抗剪性能试验研究[J]. 铁道建筑, 2024, 64(2): 67-74. (LI L F, FANG Y C, YE M, et al. Experimental study on shear behavior of externally prestressed UHPC beams without stirrups[J]. Railway engineering, 2024, 64(2): 67-74.)
- [65] 何飞虎, 张阳, 杨金栋, 等. UHPC 两键齿胶接缝抗剪性能试验及有限元分析[J]. 铁道建筑, 2024, 64(5): 76-82. (HE F H, ZHANG Y, YANG J D, et al. Shear performance test and finite element analysis of UHPC two-key tooth adhesive joint[J]. Railway engineering, 2024, 64(5): 76-82.)
- [66] 穆清君, 李贤仰, 李思凡, 等. 基于 BP 神经网络的 UHPC 直剪承载力预测模型[J]. 世界桥梁, 2024, 52(6): 94-99. (MU Q J, LI X Y, LI S F, et al. Prediction model of UHPC direct shear bearing capacity based on BP neural network[J]. World bridges, 2024, 52(6): 94-99.)
- [67] 蔡雄庭, 刘力, 伍贤智, 等. UHPC 加固 RC 梁受力性能试验研究[J]. 世界桥梁, 2024, 52(1): 117-124. (CAI X T, LIU L, WU X Z, et al. Experimental study on the mechanical performance of UHPC reinforced RC beams[J]. World bridges, 2024, 52(1): 117-124.)
- [68] 常跃, 黄俊旗, 种迅, 等. 超高性能混凝土加固钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(11): 288-296. (CHANG Y, HUANG J Q, ZHONG X, et al. Bending performance of RC beams reinforced with UHPC[J]. Journal of vibration and shock, 2024, 43(11): 288-296.)
- [69] 王连华, 龚志权, 李立峰, 等. UHPC 加固空心板梁现场足尺抗弯试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(9): 15-23. (WANG L H, GONG Z Q, LI L F, et al. Field full-scale experimental study on flexural behavior of hollow slab girder strengthened by ultra-high performance concrete[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2024, 51(9): 15-23.)
- [70] 王勃, 尹雅南, 张振, 等. FRP 网格-UHPC 复合加固 RC 梁抗弯性能有限元分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2024, 41(3): 1-7. (WANG B, YIN Y N, ZHANG Z, et al. Experimental study on flexural performance of RC beams strengthened with FRP grid-UHPC[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2024, 41(3): 1-7.)
- [71] 张阳, 王豪, 黄松龄, 等. 钢板-UHPC 组合加固损伤 RC 梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(23): 90-96. (ZHANG Y, WANG H, HUANG S L, et al. Experimental study on flexural behavior of damaged RC beams strengthened with steel plate-UHPC composite[J]. Building structure, 2024, 54(23): 90-96.)
- [72] 王秋维, 刘彪, 史庆轩, 等. UHPC-NC 组合梁抗弯性能及计算方法研究[J/OL]. 工程力学. (2024-12-16)[2025-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20241213.1743.009>. (WANG Q W, LIU B, SHI Q X, et al. Study on flexural performance and calculation method for UHPC-NC composite beams[J/OL]. Engineering mechanics. (2024-12-16)[2025-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20241213.1743.009>.)
- [73] 靳玉栋, 陈聪, 刘鹤, 等. UHPC 加固钢筋混凝土 T 梁的抗弯承载力计算[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(5): 46-50. (JIN Y D, CHEN C, LIU H, et al. Calculation of flexural capacity of UHPC-reinforced concrete T-beams[J]. China concrete and cement products, 2024(5): 46-50.)
- [74] 胥玉龙, 黄哲标, 龚志权, 等. UHPC 加固空心板梁桥浅铰缝抗弯试验研究[J/OL]. 土木工程学报. (2024-11-20)[2025-01-14]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.24070592>. (XU Y L, HUANG Z B, GONG Z Q, et al. Bending experiments of shallow hinge joints of hollow slab girder bridge strengthened with UHPC[J/OL]. China civil engineering journal. (2024-11-20)[2025-01-14]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.24070592>.)
- [75] 邓珺, 刘昀, 粟森, 等. 配筋-UHPC 加固受损混凝土箱梁腹板抗剪性能试验研究[J/OL]. 中外公路. (2024-05-20)[2025-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20240518.1853.002>. (DENG J, LIU Y, SU M, et al. Experimental study on the shear performance of damaged PC box girder webs reinforced with reinforced-UHPC[J/OL]. Journal of China & foreign highway. (2024-05-20)[2025-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20240518.1853.002>.)
- [76] 王国林, 张宇轩, 杨家林, 等. 超高性能混凝土板加固足尺钢筋混凝土梁抗剪性能[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2007-2014. (WANG G L, ZHANG Y X, YANG J L, et al. Shear behavior of full-scale reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance concrete plates[J]. Science technology and engineering, 2024, 24(5): 2007-2014.)
- [77] 王宗山, 杨俊, 周建庭, 等. UHPC 加固石拱桥试验与极限承载力计算[J/OL]. 材料导报. (2024-10-31)[2025-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20241031.0919.006>. (WANG Z S, YANG J, ZHOU J T, et al. Test and ultimate bearing capacity calculation of stone arch bridges strengthened with UHPC[J/OL]. Materials reports. (2024-10-31)[2025-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20241031.0919.006>.)
- [78] 伍敏, 黄于倩, 潘仁胜, 等. NC-UHPC 组合梁抗冲击性能数值研究[J]. 工程科学学报, 2024, 46(2): 354-364. (WU M, HUANG Y Q, PAN R S, et al. Numerical study on impact resistance of NC-UHPC composite beam[J]. Chinese journal of engineering, 2024, 46(2): 354-364.)

- [79] 王勃,郭明胜,周家宇,等. UHPC 加固 RC 柱的轴压性能试验及有限元模拟分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2024, 41(1): 1-8. (WANG B, GUO M S, ZHOU J Y, et al. Axial compression performance test and finite-element model analysis of UHPC strengthened RC columns[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2024, 41(1): 1-8.)
- [80] 常亚峰,张俊旗,戴军,等. 螺旋箍筋约束 UHPC 加固混凝土柱大偏心受压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(11): 133-139. (CHANG Y F, ZHANG J Q, DAI J, et al. Experimental study on performance of concrete large eccentric compressed columns strengthened by UHPC constrained by spiral stirrups[J]. Building structure, 2024, 54(11): 133-139.)
- [81] 许祥贵,赵兴华,张智博,等. 考虑全寿命周期的 UHPC 加固墩柱截面性能研究[J]. 混凝土, 2024(4): 178-182, 191. (XU X G, ZHAO X H, ZHANG Z B, et al. Study on the cross-sectional performance of UHPC reinforced pier columns considering the entire life cycle[J]. Concrete, 2024(4): 178-182, 191.)
- [82] 王强,梁棚华,刘鑫,等. 节点加强下 UHPC 加固 RC 方柱抗震性能研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 164-172. (WANG Q, LIANG X H, LIU X, et al. Seismic performance of RC square columns strengthened by UHPC with node reinforcement[J]. Journal of Henan Polytechnic University (natural science), 2024, 43(6): 164-172.)
- [83] 贾俊峰,张福香,张瑞,等. 预制模壳填充混凝土悬臂盖梁承载力分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 53-60. (JIA J F, ZHANG F X, ZHANG R, et al. Analysis of the bearing capacity of cantilever cap beams of prefabricated formwork shell core-filled concrete[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (natural science), 2024, 45(3): 53-60.)
- [84] 严阅. 预制装配式大悬臂 UHPC 空心盖梁受力性能分析研究[J]. 中国市政工程, 2024(3): 96-102, 107. (YAN Y. Analysis and study on the mechanical performance of prefabricated large cantilever UHPC hollow cap beam[J]. China municipal engineering, 2024(3): 96-102, 107.)
- [85] 徐佳沛,苏琼,吴昊. 近场爆炸下 UHPC-FST 墩柱的抗爆性能分析[J]. 工程力学, 2024, 41(10): 142-155. (XU J P, SU Q, WU H. Performance of UHPC-FST pier column under near-range explosion[J]. Engineering mechanics, 2024, 41(10): 142-155.)
- [86] 谢濠君,张广达,韩强,等. 预制装配墩柱-桩基础承插节点冲击性能研究[J]. 市政技术, 2024, 42(10): 106-118. (XIE H J, ZHANG G D, HAN Q, et al. Study on punching shear performance of socket node of precast pier-pile foundation[J]. Journal of municipal technology, 2024, 42(10): 106-118.)
- [87] 王建飞,王丽锋,王利辉. 嵌入式钢管混凝土墩柱-盖梁承插节点抗震性能研究[J]. 世界地震工程, 2024, 40(1): 154-163. (WANG J F, WANG L F, WANG L H. Study on seismic behavior of embedded concrete filled steel tube (CFST) pier-cap beam socket joints[J]. World earthquake engineering, 2024, 40(1): 154-163.)
- [88] 米家禾,亓兴军,王宁宁,等. 榫卯-承插装配式桥墩抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(2): 126-136. (MI J H, QI X J, WANG N N, et al. Research on seismic performance of tenon-socket prefabricated bridge pier[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2024, 44(2): 126-136.)
- [89] 於亚辉,吕德堡,符俊冬,等. 桥墩塑性铰区采用 UHPC 连接的抗震性能研究[J]. 公路, 2024, 69(4): 162-169. (YU Y H, LYU D B, FU J D, et al. Study on the seismic performance of the plastic hinge area of the bridge pier with UHPC connection[J]. Highway, 2024, 69(4): 162-169.)
- [90] 杨晓强,张强,赖志超,等. 高强方钢管 UHPC 构件轴向冲击与冲击后剩余性能[J]. 中国公路学报, 2024, 37(5): 234-245. (YANG X Q, ZHANG Q, LAI Z C, et al. Axial impact and residual behavior of UHPC-filled high-strength square steel tubular members[J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(5): 234-245.)
- [91] 袁星,周涌昊,谭舜,等. 装配式 UHPC 空心墩的内浇式组合连接压弯试验研究[J]. 世界地震工程, 2024, 40(4): 112-120. (YUAN X, ZHOU Y H, TAN S, et al. Compressive and bending test of assembled UHPC hollow pier using internal delayed casted composite connection[J]. World earthquake engineering, 2024, 40(4): 112-120.)
- [92] 常柱刚,魏标,樊伟,等. 长沙暮坪湘江特大桥主桥抗撞性能研究与防撞设计[J]. 桥梁建设, 2024, 54(1): 117-124. (CHANG Z G, WEI B, FAN W, et al. Collision resistance and protection design of main bridge of Muping Xiangjiang River Bridge in Changsha[J]. Bridge construction, 2024, 54(1): 117-124.)
- [93] 周芷萱,蒋友宝,刘军,等. 基于拓扑优化和模块化组成的 UHPC 围护结构受力性能研究[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 155-163. (ZHOU Z X, JIANG Y B, LIU J, et al. Mechanical performance of UHPC building envelope based on topological optimization and modular composition[J]. Journal of China & foreign highway, 2024, 44(2): 155-163.)
- [94] 赵炯枫,张阳,喻满,等. 高性能材料桥梁外挂板摩擦耗能节点受力性能试验及分析[J]. 铁道建筑, 2024, 64(6): 83-89. (ZHAO J F, ZHANG Y, YU M, et al. Test and analysis of the mechanical performance of friction energy-dissipating joints of high-performance bridge cladding plates[J]. Railway engineering, 2024, 64(6): 83-89.)
- 其他作者: 张阳,男,教授,博士,主要研究方向为大跨、新型桥梁结构理论与应用。
邵旭东,男,教授,博士,主要研究方向为 UHPC 高性能桥梁结构、大跨与新型桥梁结构。
黄松龄,男,在读博士研究生,主要研究方向为新型组合结构桥梁设计理论与应用。
蔡文涌,男,在读博士研究生,主要研究方向为 UHPC 高性能桥梁结构。
张学鹏,男,在读博士研究生,主要研究方向为 UHPC 高性能桥梁结构。