

钢-超高性能混凝土(UHPC)组合梁 国内外研究与应用现状

杨荔波^{1,2}(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043; 2. 极端环境
岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 西安 710043)

摘 要:随着工程新材料的突破性发展,高性能材料在土木工程领域的合理应用与结构形式的发展成为钢-混凝土组合梁创新的重要途径。钢-超高性能混凝土(UHPC)组合梁具有优异的受力性能、耐久性能,为我国土木工程结构的创新发展提供了良好途径和解决办法。为了促进中国桥梁工程向轻量化、高性能化、装配化、可持续化、智能化方向的转型升级,结合钢-UHPC组合梁的工程应用现状、受力性能、剪力连接件力学行为三个方面的国内外研究与应用现状,对钢-UHPC组合梁的主要研究进展和未来发展方向进行了分析。首先梳理了钢-UHPC组合梁在国内外桥梁建设领域的工程应用现状,从中小跨径简支梁桥和连续梁桥到跨径超千米的悬索桥和斜拉桥等均有钢-UHPC组合梁的身影,分析表明:随着低碳建筑在全球的兴起以及我国“交通强国”战略的提出,钢-UHPC组合梁桥也将迎来巨大的发展机遇。其次总结了钢-UHPC组合梁在正弯矩和负弯矩作用下的受力性能、受弯性能计算理论及有限元模拟方法方面的研究进展,分析表明:钢-UHPC组合梁的应用可显著提升结构的抗裂性能、受弯承载能力及抗弯刚度,有利于降低结构自重、实现装配化施工,促进高性能工程结构的进一步发展。之后分别探讨了普通栓钉抗剪连接件、短栓钉抗剪连接件、大直径抗剪连接件、群钉布置的栓钉抗剪连接件、开孔钢板抗剪连接件以及螺栓抗剪连接件等剪力连接件的研究现状,分析表明:合理地选用和设计剪力连接件可兼顾不同工程背景下钢-UHPC组合梁对界面连接可靠度和UHPC材料高效利用的共同需求。目前国内外对钢-UHPC组合梁的工作机理、受力性能、剪力连接件的研究虽已逐渐开展,但是系统性不足、仍应围绕基本理论、设计方法等开展深入的系统研究,以满足钢-UHPC组合梁大量工程应用需求。最后对钢-UHPC组合梁受力性能研究和设计理论、高强钢-UHPC组合梁研究、新型剪力连接件受力性能研究以及钢-UHPC组合梁智能设计研究面临的关键问题、主要挑战及未来发展趋势进行了展望,以期对中国桥梁工程的学术研究与工程应用的发展方向提供创新思路。

关键词:钢-UHPC组合梁;工程应用;受力性能;剪力连接件;综述分析

0 引 言

钢-混凝土组合梁是一种通过抗剪连接件将钢梁与混凝土翼板组合为整体共同受力且变形协调的横向承重结构^[1],如图1所示。设计合理的钢-混凝土组合梁可以充分发挥钢材、混凝土材料性能优势,兼具承载能力高、刚度大、耐久性好等性能优势。钢-UHPC组合梁受力性能的优势主要在于能够充分发挥钢材的良好抗拉性能、混凝土的良好抗压性能,从而充分提升梁受力性能和经济性能。因此,无

论在跨越海峡的特大跨桥梁、还是在城市交通中小跨径桥梁,以及大跨度建筑楼盖梁中,钢-混凝土组合梁都有显著优势,这在目前国内外已有的部分桥梁工程应用实例中也得到了充分体现^[2-4]。

随着道路等级、桥面荷载的提高和建设规模的

作者:杨荔波,工程师,主要从事高性能钢-混凝土组合结构研究。

Email:1513056922@qq.com

收稿日期:2024-02-20

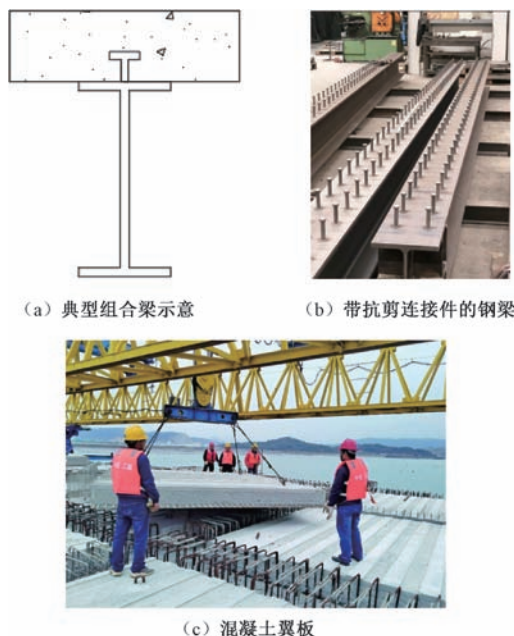


图1 钢-混凝土组合梁

Fig. 1 Steel-concrete composite beam

不断扩大,桥梁呈现轻型、大跨、高强和耐久的发展趋势,桥梁建设的综合经济效益和全寿命周期内的力学性能受到越来越多的重视^[5]。而为满足桥梁结构的设计和使用需求,传统钢-普通混凝土组合梁需采用较大截面,导致较大的上部结构自重和下部结构的承重需求,造成组合桥梁的经济跨径受限,产生较高的建设成本和建造周期^[6]。此外,普通混凝土作为一种脆性材料,具有抗拉强度低、韧性差的缺点,导致混凝土桥面板在往复的车轮荷载作用下易开裂,从而显著降低混凝土桥面板的耐久性能和疲劳性能。从组合结构的受力性能看,混凝土板的开裂会降低负弯矩作用下钢-混凝土的界面组合作用,降低结构的刚度和承载力,引起结构的安全性和耐久性等问题^[7-10]。因此,传统钢-混凝土组合梁逐渐暴露出难以满足现代建筑对高性能桥梁发展需求的紧迫问题。

随着工程新材料的突破性发展,高性能材料在土木工程领域的合理应用与结构形式的发展成为钢-混凝土组合梁创新的重要途径^[6]。超高性能混凝土(简称UHPC)作为过去40年中最具创新性与新世纪最热门的水泥基复合材料,因其超高的抗压、抗拉、抗裂、抗疲劳等力学性能在土木工程领域得到了深入的研究和广泛的应用^[11-16]。此外,UHPC的高致密性、低渗透性和耐氯化物侵蚀的性能也使其成为提升建筑结构耐久性能的理想保护层^[17-18]。

为充分发挥UHPC的力学性能,通过减小混凝

土板的厚度形成UHPC薄板,并与钢梁组合形成钢-UHPC组合梁,可以充分发挥钢梁的良好受拉性能和UHPC的超高受压强度。相比于传统的钢-普通混凝土组合梁,其有利于减小上部结构的自重,提升桥面板的抗裂性能和耐久性能^[19-20],具有显著性能优势。钢-UHPC组合梁为组合结构桥梁体系的创新发展极大地拓宽了设计思路,对于促进桥梁结构的轻量化、高性能化、装配化、可持续化、智能化方向转型升级具有重要意义,非常契合我国结构工程可持续发展的核心战略和必由之路,具有广阔的发展和应用前景^[21]。

目前,国内外对钢-UHPC组合梁的研究主要聚焦于两个方面:1)钢-UHPC组合梁的结构形式研发及受力性能研究;2)适用于钢-UHPC组合梁的剪力连接件的形式研发及力学行为研究。

1 工程应用现状

桥梁是我国UHPC应用的主要领域。随着UHPC应用技术的逐渐成熟,钢-UHPC组合梁的应用日益广泛,从小跨径简支梁桥和连续梁桥到跨径超千米的悬索桥和斜拉桥,都有钢-UHPC组合梁的身影,如图2(a)~(f)所示。

针对中、小跨径桥梁,尤其是城市桥梁快速化建设的需求,邵旭东等提出一种全预制钢-UHPC组合 π 形梁,并应用于广东惠清高速^[22]。该桥是国内首座采用“先简支后连续结构体系”的钢-UHPC轻型组合梁桥,桥跨布置为 4×25 m,桥梁断面全宽8.5 m,横向由3片全预制钢-UHPC组合 π 梁组成,单片 π 梁宽度为2.8 m,全桥共12片预制钢-UHPC组合 π 梁。梁高100 cm,其中工字梁高88 cm,UHPC桥面板厚12 cm,另加1 cm厚UHPC作为磨耗层,桥面不再设计铺装层^[23]。

湖南益阳青龙洲大桥为国内首座钢-UHPC组合梁双塔自锚式悬索桥,该桥的钢-UHPC组合梁在湘潭市UHPC预制基地内完成,该基地是国内建成的首个桥梁UHPC装配式构件生产基地^[24]。该桥全长1 636 m,主桥为600 m双塔自锚式悬索桥。该桥首创了钢-UHPC矮肋板轻型组合加劲梁,研发并采用了UHPC纵向矮肋板新结构、钢板增韧+长栓钉抗剪结构和T型湿接缝新构造,梁体自重降低37%,大幅减小了基础、塔、缆、梁等关键构件的规模,取得了显著的社会经济效益。

广州鹤洞大桥于1998年建成,因梁体普遍存在裂缝,且有钢筋腐蚀和混凝土脱落的现象,于2021



图2 工程应用案例

Fig. 2 Engineering application

年对主桥和东西引桥完成中大修工程,设计拆除 H 线引桥原上部现浇钢筋混凝土板式梁格结构,新建钢-UHPC 组合连续梁桥^[24]。该桥梁全长 465 m,全宽 UHPC 桥面板分为预制板、纵向湿接缝、横向湿接缝、两侧现浇带及伸缩缝处现浇带五部分。UHPC 预制桥面板长度 6~7 m,宽度约 2 m,厚度均为 18 cm。因长度、角度、弧线等各项参数的变化,该工程 UHPC 预制桥面板规格类型约 400 多种、共计约 880 块。该桥梁充分发挥了钢材及 UHPC 超高强度(160 MPa)的特点,极大优化了梁体结构尺寸,减少了碳排放至少 30%,实现了新建上部结构的绿色快速施工。

湖北十淅高速丹江口水库特大桥是世界最大跨径部分地锚式混合梁斜拉桥,该桥为双塔双索面部分地锚式钢-UHPC 轻型组合梁斜拉桥,全长 1 076 m,其中中跨 760 m 的主梁采用新型的钢-UHPC 轻型组合梁结构,由分离式双边箱断面钢梁+钢-UHPC 组合桥面板组成;钢-UHPC 组合桥面板由正交异性钢桥面板、剪力连接件、80 mm 等厚密配筋 UHPC 层,以及铺设在 UHPC 层上方 4 cm 厚的 SMA-13 沥青磨耗层四部分组成^[24]。该结构具有轻质、高强、耐久等诸多优点,既作为主体结构的一部分参与第一体系受力,又解决了正交异性钢桥面板易疲劳开裂和铺装易损问题。

湖南张家界跨张花高速大桥主梁为钢-UHPC 组合梁,采用全焊接双箱双室截面钢箱梁的结构形式,桥跨布置为 1 m(节段长)×50 m(跨径),桥面全宽 10.5 m,钢箱梁顶板采用厚度为 15 cm 的 UHPC 桥面板。该桥梁为国内首次采用顶推施工的钢-UHPC 组合梁,主跨 50 m 一次浇筑完成,施工对桥下交通零干扰,为上跨高速桥梁建设提供一种新的选择方案^[24]。

山东滨州沾临高速黄河特大桥的主桥全长 962 m,采用双塔双索面钢-UHPC 组合梁斜拉桥,主跨为 442 m。该桥梁采用全断面顶推方式进行主跨段梁体的架设,可实现带桥面盖板的一体式顶推,开创了同类工程的全新施工技术。主桥盖板采用 320 片 UHPC 桥面板,板厚仅 17 cm,设计抗压强度 150 MPa,采用“无粗骨料 UHPC+90 ℃ 高温蒸养”预制生产,可以规避全断面顶推时盖板断裂的危险,实现主桥的超薄、超高性能和一次顶推,使得顶推工期缩短整整半年^[24]。该桥梁的建成标志着我国桥梁领域首次带 UHPC 桥面板大吨位、长距离全断面顶推施工全部完成,意味着我国桥梁建设在更轻、更强、更快的发展方向上又进了一步,实现了中国桥梁建设又一次全新跨越。

在国际桥梁建设领域,钢-UHPC 组合梁在实际工程中的应用同样成为了主要趋势之一。波兰跨越

维斯瓦河的 Tczew 大桥采用了钢-UHPC 组合连续梁桥,利用 UHPC 卓越的耐久性能应对河流的侵蚀和恶劣的天气条件。丹麦的 Herning 新桥展示了钢-UHPC 组合梁桥的美学特性和自然形态设计。瑞士的 Haegendorf 大桥和英国的 Blaydon 桥分别展现了钢-UHPC 组合梁桥在公路桥和铁路桥领域的应用,考虑了公路和铁路桥运营的要求与 UHPC 超强的耐久性能和耐磨性能,实现了较大跨度的设计,为交通运输提供了可靠的通行条件。此外,钢-UHPC 组合梁桥在罗马尼亚的 Tarnita 大桥、莫桑比克的 Maputo Bay 大桥、加拿大的 Saint Lawrence 大桥、沙特阿拉伯的 Saudi Arabia Rail Crossing 大桥、孟加拉国的 Padma 大桥、瑞典的 Västlänken 大桥、法国跨越塞纳河的 Hécourt 大桥、英国的 Mersey Gateway 大桥、美国的 Elizabeth River 隧道和 Woodrow Wilson 大桥等各国代表性工程中也得到了应用,部分工程如图 2(g)~(j)所示。

随着低碳建筑在全球的兴起以及我国“交通强国”战略的提出,具有显著性能优势的钢-UHPC 组合梁桥也将迎来巨大的发展机遇,日后定能在全球的工程领域中大放异彩。

2 钢-UHPC 组合梁受力性能

钢-UHPC 组合梁主要应用于大跨度桥梁、大跨度楼盖梁中,而且为实现结构轻量化,一般采用高强度的 UHPC 薄板代替普通混凝土板,使得钢-UHPC 组合梁截面高度相对传统钢-混凝土组合梁小,梁跨高比相对传统钢-混凝土组合梁更大。因此,钢-UHPC 组合梁的受弯承载能力和受弯刚度等受弯性能是目前国内外学术界的关注重点和研究热点。

2.1 钢-UHPC 组合梁正弯矩作用下受力性能

在钢-UHPC 组合梁正弯矩受力性能方面,刘君平等通过静力试验和数值模拟对钢-普通混凝土组合梁与钢-UHPC 组合梁的抗弯性能进行了对比研究,结果表明:两种组合梁的破坏模式均为以钢梁下翼缘屈服、混凝土板顶被压碎为标志的弯曲破坏,且整体呈现“钢弱板强”的破坏特征;在相同抗弯承载力下,钢-UHPC 组合梁的混凝土板厚度可降低 28%,且表现出更好的变形能力;同时研究发现钢-UHPC 组合梁中混凝土板的剪力滞效应、钢梁与混凝土板间的相对滑移均显著小于钢-普通混凝土组合梁^[25]。

张彦玲等对钢-活性粉末混凝土(简称 RPC)组合梁抗弯性能进行了数值模拟分析,首先分别定义

了钢-RPC 组合梁正截面受弯破坏的弹性极限状态和塑性极限状态,研究表明,正弯矩作用下钢-RPC 组合梁的抗弯承载力可基于简化塑性理论分析计算^[26]。Hu 等对采用集束式栓钉连接件的钢-UHPC 组合梁的受弯性能开展了试验研究和数值模拟分析,结果表明:1) 钢-UHPC 组合梁的极限荷载和弹性刚度分别比钢-普通混凝土组合梁的提高了 11.3% 和 10.8%;2) UHPC 对混凝土桥面板的抗裂性能提升显著^[27]。Yoo 等提出了一种采用倒 T 形钢梁和栓钉连接件的钢-UHPC 组合梁,并通过静力试验研究了 UHPC 板厚度、栓钉间距等参数对该组合梁受弯性能的影响,结果表明:1) 倒 T 形钢梁与 UHPC 板组合作用良好;2) 当栓钉间距较大时,UHPC 板顶仅有沿钢梁轴向的裂缝,表明钢纤维有利于提升组合梁延性;3) 基于 UHPC 受拉软化模型建立了组合梁弯矩-曲率关系曲线的截面计算分析方法,用以评估该组合梁在 UHPC 板开裂后的力学性能^[28]。Zhu 等首次提出钢-UHPC 组合梁在华夫板桥面体系中的应用,并对足尺寸钢-UHPC 华夫板组合梁开展了受弯性能试验研究,结果表明:1) 剪跨比对组合梁破坏模式影响显著;2) 相比于肋高和肋宽,UHPC 层厚度对该组合梁受弯承载力的影响较大^[29]。Liu 等提出一种钢-混凝土叠合梁体系,在预制的混凝土板顶现浇 UHPC 层形成钢-混凝土-UHPC 组合梁体系(S-RC-UHPC 组合梁体系),所开展的钢-普通混凝土组合梁、钢-UHPC 组合梁和 S-RC-UHPC 组合梁的受弯性能对比试验研究表明:1) S-RC-UHPC 组合梁具有更高的极限抗弯承载力;2) 与 S-UHPC 组合梁相比,S-RC-UHPC 组合梁具有相当的抗弯刚度和更好的经济性^[30]。

2.2 钢-UHPC 组合梁负弯矩作用下受力性能

在钢-UHPC 组合梁负弯矩受力性能方面,张彦玲等针对负弯矩作用下的钢-RPC 组合梁,确定了其临界开裂状态下正截面破坏模式,建立了钢-RPC 组合梁抗弯承载力的理论计算公式,并对组合截面中高度比、宽度比、RPC 板中的配筋率等进行了参数分析。结果表明,在相同参数条件下,钢-RPC 组合梁比钢-普通混凝土组合梁具有更高的抗弯承载能力,且其抗裂性能和抗弯刚度都有显著提升^[31]。针对传统钢-混凝土组合梁在负弯矩区混凝土拉应力过大的问题,邓舒文等提出一种可与梁段整体预制的钢-UHPC 组合梁负弯矩处理方案,相比钢-普通混凝土组合梁桥,预制钢-UHPC 组合梁结构的自重可减小 46%^[32]。刘新华等对负弯矩区采用不同

接口形式的钢-UHPC 组合梁进行了试验研究和数值模拟分析,结果表明:1)采用 UHPC 可以显著提高负弯矩区抗裂性能,能有效解决桥面板负弯矩区的开裂问题;2)建议负弯矩区 UHPC 纵向铺设长度取 $0.1L$ (L 为原腹板高度)以提升结构的经济性;3)基于黏结滑移理论建立了简化的 UHPC 裂缝宽度计算方法^[33]。Shao 等研究了超薄 UHPC 组合梁受弯性能(采用厚度为 45~50 mm 且保护层厚度为 15 mm 的 UHPC 板),研究发现,UHPC 保护层厚度为 15 mm 时钢-UHPC 组合梁就可以具有较高的抗裂性能和极限抗弯承载力^[34-35]。Lin 和 Luo 等研究了钢纤维掺量、UHPC 保护层厚度、UHPC 板的增强比和抗剪连接件的间距对钢-UHPC 组合梁中裂缝间距和裂缝宽度的影响,研究表明:增加钢纤维掺量与 UHPC 板的厚度和增强比、减小 UHPC 保护厚度与剪切连接件间距可以抑制 UHPC 裂缝发展、减小裂缝宽度^[36-38]。Zhang 等提出了负弯矩作用下钢-UHPC 组合梁的滑移-弯矩计算公式与裂缝宽度为 0.05 mm 时弯矩和极限承载力计算公式^[39]。Hamoda 等研究发现,相比钢-普通混凝土组合梁,钢-UHPC 组合梁弹性刚度提升了 23%^[40]。Zhao 等提出了采用燕尾榫湿接缝钢-UHPC 组合梁,并通过静力试验研究了该组合梁在负弯矩作用下的受弯性能,结果表明:1)采用燕尾榫构造形式的湿接缝时展现出良好的抗裂能力;2)UHPC 界面处的开裂应力仅为全现浇 UHPC 开裂应力的一半;3)建议厚度为 55 mm 的 UHPC 板配筋率为 4.5%^[41]。Pan 等开展了 4 个采用不同湿接缝构造的装配式钢-RPC 组合梁在负弯矩作用下的受力性能试验研究,结果表明:1)采用不同构造形式的组合梁抗弯性能和变形性能接近;2)采用锯齿形和矩形湿接缝时组合梁的抗裂性能更优;3)钢纤维的掺入显著提升了 RPC 板的抗裂能力^[42]。为实现桥梁的快速装配化施工,Wang 等提出了一种采用完全干式连接的全预制钢-UHPC 组合梁,并开展了该组合梁在负弯矩作用下的受弯性能试验,研究结果表明所提出的完全干式连接钢-UHPC 组合梁具有良好的抗裂性能和抗弯刚度^[43]。

2.3 钢-UHPC 组合梁受弯性能计算理论

在抗弯承载力计算理论方面,由于普通混凝土的抗拉强度和韧性均较低,在传统钢筋混凝土结构设计原理中,计算结构构件的抗弯承载力时通常忽略混凝土的抗拉作用^[44-45]。UHPC 材料因钢纤维的掺入而具有明显的受拉应变-硬化特征,因

此,在配筋 UHPC 结构构件的截面抗弯承载力计算理论中,需考虑 UHPC 材料的受拉应变-硬化特征和钢纤维的桥接作用^[15-17]。然而,国内外学者对中性轴下方 UHPC 有效受拉区高度和拉应力分布情况的研究认识不同,分为 4 种情况:1)文献[46-48]中提出将受拉区 UHPC 的应力分布等效为受拉区全截面的矩形分布,已被加拿大 UHPC 设计标准(CSA 2019)采用^[49];2)Bae 等提出忽略中性轴处 UHPC 的抗拉作用,并将中性轴下方一定距离到受拉区边缘的应力分布等效为矩形分布^[50],相关结论已被瑞士 UHPC 设计指南采用;3)徐海滨等^[51]和 Graybeal^[52]认为靠近中性轴处的 UHPC 拉应力呈线性分布,远离中性轴的 UHPC 拉应力呈矩形分布,这与法国 UHPC 结构设计规范和美国 UHPC 华夫板结构设计规范中的计算模型相似^[53-54];4)Qi 等认为靠近中性轴处的 UHPC 拉应力呈线性分布,远离中性轴的 UHPC 拉应力基于 UHPC 残余抗拉强度等效为矩形分布^[55]。为简化计算,文献[48,56-57]中分别建议将受拉区 UHPC 的拉应力考虑为 0.25、0.40 和 0.65 的 UHPC 抗拉强度;文献[58-61]中均基于确定性模型和微观力学模型分别建立了描述钢纤维黏结应力和平均方向系数与裂缝宽度间关系的数学模型,被广泛用于计算受拉区 UHPC 材料中钢纤维的黏结应力^[39,62]。

在裂缝宽度计算理论方面,裂缝对钢-UHPC 组合梁桥结构的抗弯刚度、承载能力与耐久性能都起着重要的控制作用,故需建立 UHPC 桥面板的裂缝宽度计算理论。目前,国内学者主要依据试验对 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》^[44]中裂缝宽度计算公式进行修正,从而采用与 GB/T 50010—2010 一致的计算模式来计算 UHPC 受弯构件的裂缝宽度。邱明红等、郑文忠等均修正了平均裂缝间距、钢筋应变不均匀系数、构件受力特征系数等参数,建立了裂缝宽度计算公式,但由于构件的截面尺寸、配筋率、钢纤维掺量等因素不同,各参数的修正结果存在差异^[48,63]。邓宗才等、徐海滨等综合考虑钢纤维类型、掺量、长径比等因素的影响,引入了不同的综合修正系数,建立了半理论半经验的裂缝宽度计算公式^[64-65]。然而,前述公式主要考虑了裂缝截面处钢纤维对裂缝宽度的抑制作用,却忽视了裂缝区段内 UHPC 与钢筋界面间黏结性能对裂缝宽度的影响。法国 UHPC 结构规范基于综合分析理论,考虑了钢筋与 UHPC 材料之间的黏结滑移以及钢筋保护层厚度的影响,并针对配筋 UHPC 结

构构件提出了裂缝宽度的计算理论与公式^[53]。孙永新等从 UHPC 材料与钢筋的黏结滑移理论出发,综合考虑 UHPC 抗拉贡献和 UHPC-钢筋黏结滑移影响,建立了 UHPC 材料的最大裂缝宽度计算公式,并提出钢筋应力、应变不均匀系数以及平均裂缝间距的计算方法^[66]。

2.4 钢-UHPC 组合梁有限元模拟方法

传统的有限元模拟方法通常利用材料本构模型来模拟钢-混凝土组合结构构件中各种材料的宏观性能,如 ABAQUS 和 LS-DYNA 的材料模型库都提供混凝土损伤塑性模型(CDP 模型)来定义传统的混凝土材料^[67]。该模型将混凝土材料视为一种均匀的物质,因此该有限元方法也可称为单尺度有限元法^[67]。张清华等和邵旭东等利用单尺度有限元法对不同荷载工况组合下钢-UHPC 组合梁桥面板的力学性能进行了模拟分析^[22,68]。钢纤维的几何形状、掺量、纤维取向分布等因素对 UHPC 材料开裂后的非线性力学行为都有着显著影响,但是单尺度有限元法使用的 CDP 模型忽略了 UHPC 材料细观结构特征^[15-17]。文献[69-72]优化了 CDP 模型中的各参数以模拟各类采用 UHPC 材料的梁构件的力学行为,结果表明:传统单尺度有限元法对 UHPC 材料开裂后的非线性行为的模拟精度较低,尤其是采用平直型钢纤维的 UHPC 材料。随机分布的钢纤维会使 UHPC 材料的力学性质产生各向异性,这是导致 CDP 模型模拟 UHPC 材料开裂后非线性行为精度不佳的主要原因^[73-75]。因此,国内外学者对多尺度有限元计算方法开展了深入研究,聚焦于 UHPC 材料内部的细观结构特征对其宏观力学行为的影响^[76-77]。Advani 等、Tal 等基于有限元法采用连续体单元模拟 UHPC 材料的基体,用理想的一维杆单元来模拟钢纤维,建立了 UHPC 材料的细观模型来分析其抗压、抗拉、抗折的宏观力学行为,结果表明:该方法可以精准地模拟 UHPC 材料的各项非线性宏观力学行为^[78-79]。由于 UHPC 材料多尺度模型中随机分布的钢纤维对算力的要求非常高,因此,多尺度有限元法通常仅用于模拟 UHPC 材料的力学行为,很少被应用于模拟采用 UHPC 材料的结构构件甚至实际的工程中。Fish 提出了降阶均匀化(ROH)理论方法对纤维复合材料的宏观力学性质进行多尺度分析,主要考虑了材料基体的力学性能、纤维材料的力学性能,并采用二阶纤维取向张量确定纤维复合材料内部纤维取向分布^[80]。Huang 等验证了 ROH 理论模型可以为模拟 UHPC 材料线性

与非线性力学行为提供良好计算精度^[81]。

综合上述研究可知,UHPC 在钢-混凝土组合梁中的应用可显著提升结构的抗裂性能、受弯承载能力以及抗弯刚度。通过合理的设计,钢-UHPC 组合梁可大幅降低自重,有利于实现装配化施工,促进高性能工程结构的进一步发展。然而,目前 UHPC 的本构关系尚不统一,关于 UHPC 与钢梁匹配性的研究也相对有限,现在的有限元技术虽已相对完善,但尚未形成完整的设计的理论和方法。因此,钢-UHPC 组合梁的相关研究仍有待深入展开,以推动钢-UHPC 组合结构在工程结构中经济且合理的应用。

3 钢-UHPC 组合梁剪力连接件研究

在钢-混凝土组合结构中,剪力连接件的力学行为是保证钢与混凝土共同受力、协调变形以产生良好组合效应的基础。剪力连接件除传递纵向剪力外,还起到抵抗钢梁与混凝土翼板之间竖向分离的作用,即抗掀起的作用^[45]。目前栓钉抗剪连接件、开孔钢板(简称 PBL)抗剪连接件和螺栓抗剪连接件在钢-UHPC 组合梁中应用较多,其抗剪承载能力、抗剪刚度、滑移性能和疲劳性能为国内外学者的研究重点^[82-83]。

3.1 普通栓钉抗剪连接件

针对栓钉抗剪连接件,为满足钢-UHPC 界面存在较大纵向剪力的要求,其常用直径为 10~22 mm。王景全等通过试验和数值模拟研究了栓钉抗剪连接件在 UHPC 中的静力与疲劳力学性能,结果表明:与普通混凝土中的栓钉抗剪连接件相比,UHPC 的超高韧性和超高抗压强度可显著延缓栓钉抗剪连接件发生破坏、提高其抗剪承载力和刚度及疲劳安全性^[84-86]。Kruszewski 等开展了推出试验,研究了栓钉抗剪连接件的长径比对其在 UHPC 中力学行为的影响,结果表明:栓钉抗剪承载力与直径密切相关,且随着 UHPC 强度提高而略微增加^[87]。赵根田等开展了单调及重复荷载作用下栓钉抗剪连接件抗拔性能试验研究,结果表明极限位移随栓钉抗剪连接件长径比增加而增大^[88]。蒲黔辉等基于有限元分析建立了栓钉抗剪连接件抗拔承载力的分析方法^[89]。李嘉等开展了采用栓钉抗剪连接件的钢桥面板与 RPC 薄板的静力性能和疲劳性能试验,研究发现减小栓钉间距可显著提高栓钉抗剪连接件的抗疲劳性能,应力比是影响栓钉抗剪连接件抗疲劳性能的关键因素^[90]。Chen 等研究了采用不同腐蚀程

度下栓钉抗剪连接件的钢-UHPC 组合梁的承载力、刚度和疲劳寿命^[91]。李慧等开展了冻融循环作用后的栓钉抗剪连接件抗剪性能试验研究^[92]。

3.2 短栓钉抗剪连接件

由于 GB 50017—2017《钢结构设计标准》对常规栓钉长径比大于 4^[93]的要求无法满足 UHPC 薄板对栓钉抗剪连接件的应用需求,国内外学者逐步开展了 UHPC 薄板中长径比小于 4 的短栓钉抗剪连接件受力性能和疲劳性能研究。翁雪微通过数值模拟对直径为 13 mm、长径比为 2.7 的短栓钉抗剪连接件和普通栓钉抗剪连接件在厚度为 50 mm 的 UHPC 薄板中的静力及疲劳性能进行了对比分析,结果表明,短栓钉抗剪连接件与普通栓钉抗剪连接件的变形和应力分布基本一致,且均满足 GB 50017—2017 对抗剪承载力的要求^[94]。Cao 等发现在厚度为 50 mm 的 UHPC 薄板中采用直径为 13 mm、长径比为 2.7 的短栓钉抗剪连接件时,UHPC 薄板不发生劈裂破坏而栓钉抗剪连接件发生剪切破坏,并基于疲劳试验提出了采用短栓钉连接的钢-UHPC 组合界面的 $S-N$ 曲线^[95-96]。孙启力等研究了直径为 13 mm、长径比为 2.7 的栓钉在钢-UHPC 界面的滑移,并基于栓钉的荷载-滑移关系曲线标定了 UHPC 中短栓钉抗剪连接件的荷载-滑移关系的指数函数模型^[97]。Dieng 等研究发现直径为 13 mm、高度为 25 mm 的栓钉在 UHPC 中的荷载-滑移曲线呈现弹塑性关系,其极限滑移可达 3 mm,呈现栓钉根部屈服的破坏模式;栓钉的滑移特征值受栓钉高度的影响并不显著^[98]。

3.3 大直径栓钉抗剪连接件

在钢-UHPC 组合梁的高剪力区段往往需要焊接大量的栓钉抗剪连接件来保证钢梁与 UHPC 界面具有充足的纵向抗剪能力,但容易产生群钉效应导致栓钉抗剪连接件的应力传递不均匀^[1,3,99-100]。因此,为减少栓钉抗剪连接件的焊接数量,同时提高施工效率,许多学者提出采用大直径栓钉抗剪连接件,并定义 22 mm 以上直径的栓钉抗剪连接件为大直径栓钉抗剪连接件,22 mm 直径以下为常规栓钉抗剪连接件^[86,101]。Wang 等开展推出试验研究了分别采用 30 mm 大直径单钉和群钉抗剪连接件连接的钢-UHPC 界面抗剪性能,结果表明:1) UHPC 能抵抗大直径栓钉抗剪连接件产生的劈裂应力;2) 采用大直径栓钉抗剪连接件连接时钢与 UHPC 的组合效果更好,且群钉效应不显著;3) 长径比和 UHPC 板的厚度对大直径栓钉抗剪连接件静力性能的影响

较小;4) 提出了考虑群钉效应的荷载-滑移曲线拟合公式^[86]。陈阳等通过数值模拟研究了装配式钢-薄层 UHPC 组合梁中大直径群钉抗剪连接件的抗剪性能,结果表明:1) 采用预制 UHPC 板试件的抗剪承载力比采用现浇 UHPC 板的低 10% 以内;2) 大直径栓钉抗剪连接件的间距小于 2.5 倍直径时,试件的抗剪承载力显著下降;3) 随着大直径栓钉键群间距和数量的增加,键群中单个栓钉抗剪连接件的抗剪承载力和抗剪刚度均降低;4) 针对装配式钢-薄层 UHPC 大直径群钉抗剪连接件,建立了荷载-滑移关系预测理论模型^[102]。

3.4 群钉布置的栓钉抗剪连接件

为提升桥梁领域工业化建造水平,促进装配式组合结构桥梁的发展,群钉布置形式常被应用于装配式组合结构桥梁来保证组合界面的抗剪性能并满足快速施工的需求。Ding 等开展了采用群钉连接形式的钢-UHPC 界面抗剪性能推出试验,研究结果表明:1) 栓钉抗剪连接件的直径对界面抗剪承载力的影响较大;2) 纵向间距为 $2.5d$ (d 为栓钉直径) 时对群钉抗剪连接件抗剪刚度的影响最大;3) 长径比从 4.2 减小至 3.2 对群钉抗剪连接件的抗剪承载力和抗剪刚度影响都不显著^[103]。Fang 等通过静力试验研究了栓钉直径 50 mm、薄板厚度 75 mm、群钉布置形式、预留槽口形状和浇筑方式等参数对全预制钢-UHPC 薄板界面连接性能的影响,结果表明:栓钉直径、UHPC 板厚和预留槽口形状对界面连接性能影响较大,而浇筑方式则对界面连接性能影响较小^[104]。He 等针对采用群钉抗剪连接件的钢-混杂纤维混凝土界面连接性能开展了试验研究和数值模拟分析,结果表明:1) 钢纤维掺量的增加有利于提高群钉抗剪连接件抗剪承载力;2) 聚丙烯纤维掺量的增加有利于改善群钉抗剪连接件的延性^[105]。Luo 等针对栓钉抗剪连接件的纵向间距和横向间距等参数对钢-SFRCC 群钉连接界面性能的影响开展了试验研究,结果表明:1) 群钉抗剪连接件均发生剪断破坏;2) 栓钉纵向间距为 $3.5d$ 时仍能达到单钉极限强度的 90%;3) 提出了考虑群钉效应的界面抗剪承载力计算方法^[106-107]。

3.5 开孔钢板(PBL)抗剪连接件

PBL 抗剪连接件的首次工程应用是在委内瑞拉 Caroni 钢-混凝土组合桥梁中被用以取代栓钉抗剪连接件,避免了栓钉抗剪连接件潜在的抗疲劳性能弱的问题^[108]。施洲等分析了 PBL 抗剪连接件的破坏机理及抗剪承载力影响因素^[109]。张清华等基

于变形协调理论模型分析了 PBL 抗剪连接件群的非均匀传力机理及极限抗剪承载力^[110]。Li 等提出带环箍的 PBL 抗剪连接件,并基于剪切摩擦理论与多元线性回归分析,提出了适用抗剪承载力与指数型滑移特征值计算方法^[111]。Liu 等创新性提出在 PBL 抗剪连接件内安装橡胶环形式,以改善 PBL 抗剪连接件群的非均匀受力状态,并开展了相关试验研究和数值模拟分析,结果表明:1)采用橡胶环 PBL 抗剪连接件的抗剪刚度降低;2)PBL 抗剪连接件的变形能力和延性得到改善,极限滑移提高 3~7 倍^[112]。张宁等研究了孔内有无钢筋 PBL 抗剪连接件疲劳性能的影响规律^[113]。陈海等通过推出试验研究了采用斜钢板的 PBL 抗剪连接件抗剪性能,并与采用直钢板的 PBL 抗剪连接件的抗剪性能进行对比分析,结果表明,采用斜钢板对 PBL 抗剪连接件的抗剪承载力无明显影响,但对抗剪刚度与延性有所提高^[114]。刘瑞等针对采用 PBL 抗剪连接件的钢板-UHPC 组合桥面板抗弯性能进行了试验研究和数值模拟分析,研究结果表明:1)钢板与 UHPC 桥面板具有良好的组合效果;2)邻近 PBL 抗剪连接件的桥面板在车轮荷载的作用下可承担更大的负弯矩^[115]。

3.6 螺栓抗剪连接件

为了适应快速化装配式组合结构的发展,螺栓抗剪连接件常被用以替代栓钉抗剪连接件实现混凝土板与钢梁的装配与分离和回收,契合组合结构的可持续发展理念。采用螺栓抗剪连接件的钢-UHPC 组合梁有整体浇筑和拼装连接两种施工方式,均被广泛应用以更好地满足装配化施工的各项要求^[116-117]。

国内外学者研发了多种适用于现浇钢-混凝土组合梁的螺栓抗剪连接件,Kwon 等提出了双螺母螺栓、黏结锚螺栓和高压摩擦螺栓三种螺栓抗剪连接件用于加固既有钢-混凝土组合桥梁^[118]。Dai 等将传统焊接栓钉根部改造成型钢厚度范围内的缩颈部分和螺母安装范围内的螺纹部分形成了可拆卸螺栓抗剪连接件,完成的推出试验结果表明:1)可拆卸螺栓抗剪连接件在试验后可以容易实现拆卸;2)可拆卸螺栓抗剪连接件的抗剪承载力与焊接栓钉基本相同,但抗剪刚度小于焊接栓钉^[119]。He 等提出了可拆卸自锁螺栓抗剪连接件以消除螺栓与型钢孔间隙和初始滑移,开展的推出试验研究结果表明:1)可拆卸自锁螺栓抗剪承载能力与初始刚度比普通栓钉更高;2)该螺栓滑动能力较强,属于柔性连接

件^[120]。陈炳聪提出了方形预埋螺母型螺栓连接件,该连接件具有承载力高、刚度大、连接紧密等优点^[121]。王宣鼎等通过推出试验研究了现浇 UHPC 中 8.8 级 M30 高强螺栓抗剪连接件抗剪性能,结果表明:1)单个螺栓试件发生螺栓剪断破坏、UHPC 损伤较小;2)横向双排螺栓发生螺栓受剪屈服、UHPC 冲切剪破坏;3)纵向双排螺栓发生 UHPC 纵向劈裂破坏^[122]。

为进一步提升装配化施工效率,国内外学者不断研发出适用于装配式钢-混凝土组合梁的螺栓抗剪连接件。Chen 等对钢-预制混凝土组合桥梁中全贯穿式螺栓抗剪连接件的抗剪性能进行了推出试验研究,结果表明:1)全贯穿式螺栓抗剪连接件初始滑动荷载较低,同时存在滑移平台段,但峰值荷载和延性与栓钉相当;2)提出了能够预测全贯穿螺栓抗剪连接件极限承载力的力学模型^[123]。何余良等针对混杂纤维混凝土中全贯穿式螺栓抗剪连接件的抗剪性能开展了试验研究,结果表明混凝土中掺入纤维和减小预留孔孔径比均可增大螺栓抗剪连接件承载力和初始刚度^[124]。严鑫提出了锥形铸铁螺栓抗剪连接件,其特点为内外锥套均设置竖缝,在螺栓挤压时可产生环向变形,进而消除钢板孔和螺栓间隙、增大螺栓抗剪连接件的刚度^[125]。齐连训等提出了 UHPC 插块螺栓抗剪连接件,其构造与锥形铸铁螺栓相似,其中预制 UHPC 块和预埋螺母均为锥形,试验研究结果表明:UHPC 插块降低了螺栓抗剪连接件的抗剪刚度,但不影响螺栓抗剪连接件的抗剪承载能力^[126]。刘中良提出在混凝土预制板中采用波纹管或塑料管制作圆形预留孔以形成预留孔螺栓剪力键,研究结果表明,预留孔螺栓抗剪连接件在预制装配式钢-混凝土组合梁中受力合理、构造简单、施工高效^[127]。

为了消除螺栓抗剪连接件荷载-滑移曲线中早期的滑移平台段,并提高螺栓抗剪连接件的早期刚度,陈辛将常用于精度要求较高的机械设备和船舶工程中的铰制孔螺栓抗剪连接件应用于钢-UHPC 组合梁并开展了试验研究和数值模拟分析,研究结果表明:1)铰制孔螺栓抗剪连接件在抗剪承载力、滑移、延性和刚度四个方面表现出较优的综合抗剪性能;2)在混凝土强度相对螺栓较弱的推出试件中主要发生混凝土压溃破坏,反之发生螺栓抗剪连接件的剪断破坏;3)提出了考虑多种参数影响的现浇和装配式试件中铰制孔螺栓抗剪连接件的抗剪承载力计算公式和极限滑移计算公式^[128]。

不同工程应用条件对抗剪连接件的要求促使多种新型剪力连接件的不断研发。除前文介绍的栓钉抗剪连接件、PBL 抗剪连接件和螺栓抗剪连接件,还有多种抗剪连接件因其自身独特的受力形式或经济性等原因在工程应用中也得到推广应用。例如,可以改善组合梁负弯矩区混凝土抗裂性能的抗拔不抗剪 T 形抗剪连接件^[129],刚性的型钢抗剪连接件^[130-131],可以解决 PBL 抗剪连接件承载能力不足和安装不方便而衍生出的 T-PBL 抗剪连接件、Y 形抗剪连接件、L 形抗剪连接件以及帽形抗剪连接件等^[132-133]。

综合来看,合理选用和设计抗剪连接件可兼顾不同工程背景下钢-UHPC 组合梁对界面连接可靠度和 UHPC 材料高效利用的共同需求。国内外学者已对传统的抗剪连接件在钢-混凝土组合结构中的传力机理、抗剪性能和疲劳性能等进行了大量深入研究,但目前对各类抗剪连接件在钢-UHPC 组合结构中的应用研究仍不完善。因此,对各类抗剪连接件在钢-UHPC 组合结构中的工作性能和适用性仍有待深入研究和验证,以期为各类抗剪连接件在高性能工程结构中的应用奠定基础。

4 展 望

结合钢-UHPC 组合梁的工程应用案例,对钢-UHPC 组合梁受弯性能和钢-UHPC 组合梁中剪力连接件力学行为进行了综述分析。钢-UHPC 组合梁在实现桥梁结构和大跨建筑结构梁的安全可靠、长寿耐久、优质高效和绿色低碳发展目标方面具有显著优势,但国内对钢-UHPC 组合梁的设计方法尚未形成完整体系,需要围绕以下方面开展深入系统研究:

1) 钢-UHPC 组合梁受力性能研究方面。目前国内外关于钢-UHPC 组合梁的受力性能还主要为受弯承载能力研究,而关于钢-UHPC 组合梁受剪性能、受扭性能、整体和局部稳定性能等方面研究开展较少,由于钢-UHPC 组合梁的截面高度相对钢-普通混凝土组合梁更小(跨高比更大),受扭性能和稳定性能需要深入开展相关研究,以建立相应设计计算方法。

2) 钢-UHPC 组合梁设计理论方面。钢-UHPC 组合梁中,UHPC 翼板厚度较小、组合梁延性更好,在组合梁设计内力计算和承载能力计算时,如何更为准确、更为充分地利用钢-UHPC 组合梁的塑性能力,建立相应的塑性设计计算理论是需要研究的关

键问题。

3) 高强度-UHPC 组合梁研究方面。已有研究结果表明,普通钢材与 UHPC 在组合梁的使用中容易出现“钢弱混凝土强”现象、导致出现在组合梁中的钢材较早屈服或者钢材用量过大等情况,因此为匹配 UHPC 超高抗压强度发挥,需要开展采用高强钢的钢-UHPC 组合梁研究。目前国内外已有学者针对高强钢材与 UHPC 材料在组合梁中的匹配性开展了研究,但尚缺乏系统性研究,尚应深入研究高强钢-UHPC 组合梁的受力性能、工作机理和设计理论。

4) 新型剪力连接件受力性能研究方法。目前关于剪力连接件的研究多为剪力连接件的静力抗剪性能展开,而在实际工程应用中,抗剪连接件往往处于弯剪或剪拔的复合受力状态,因此需开展剪力连接件复合受力性能研究。

5) 钢-UHPC 组合梁智能设计研究方面。在钢-UHPC 组合梁中,从材料选择、截面形式、剪力连接件配置等方面均具有大量的可优化选择性,因此针对不同的应用场景和设计需求,结合深度学习等人工智能技术实现钢-UHPC 组合梁的优化设计,并进一步结合数字孪生技术对钢-UHPC 组合梁在灾害下的性能、响应进行研究,也是未来重要研究方向。

参考文献

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 聂建国, 吕坚锋, 樊健生. 组合梁桥在中小跨径桥梁中的应用[C]//中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十一次学术会议暨钢-混凝土组合结构的新进展交流会论文集. 长沙: 中国钢结构协会, 2007: 663-667.
- [3] 聂建国. 钢-混凝土组合结构原理与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [4] 2020 年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2021(6): 92-97.
- [5] 张喜刚, 刘高, 马军海, 等. 中国桥梁技术的现状与展望[J]. 中国公路, 2017(5): 40-45.
- [6] 徐启智. 钢-UHPC 组合梁桥新型界面连接构造的试验研究与精细化分析[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Hamoda A, Hossain K M A, Sennah K, et al. Behaviour of composite high performance concrete slab on steel I-beams subjected to

- static hogging moment[J]. *Engineering Structures*, 2017, 140: 51-65.
- [10] Wang Y, Shao X D, Cao J H, et al. Static and fatigue flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced concrete slabs[J]. *Engineering Structures*, 2021, 231, 111728.
- [11] Toutlemonde F, Resplendino J. Designing and building with UHP-FRC: State of the art and development[M]. United Kingdom: Wiley, 2011.
- [12] Xu L K, Yang Y, Zhang Y, et al. Estimation of stress-strain constitutive model for ultra-high performance concrete after high temperature with an deep neural network based method[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 408, 133690.
- [13] Hao N, Yang Y, Xue Y C, et al. Experimental study on flexural behavior of partially precast high-strength steel reinforced ultra-high performance concrete beam[J]. *Engineering Structures*, 2023, 284, 115999.
- [14] Hao N, Yang Y, Xue Y C, et al. Shear performance of partially encased composite beams with high-strength steel and UHPC[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 211, 108217.
- [15] 郝宁, 杨勇, 薛亦聪, 等. 预制装配部分包覆高强度钢-超高性能混凝土组合梁受弯承载力试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(2): 95-106.
- [16] 刘加平, 刘建忠, 韩方玉, 等. 基于钢-混凝土组合结构轻量化的粗骨料超高性能混凝土研究进展与应用[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(9): 36-44.
- [17] Shi C J, Wu Z M, Xiao J F, et al. A review on ultra high performance concrete; part I. raw materials and mixture design[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 741-751.
- [18] Hung C C, El-Tawil S, Chao S H. A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: behavior, analysis, and design[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(9), 03121001.
- [19] Yoo D Y, Lee J H, Yoon Y S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites[J]. *Composite Structures*, 2013, 106: 742-753.
- [20] Deng W Q, Gu J C, Liu D, et al. Study of single perfobond rib with head stud shear connectors for a composite structure[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2019, 71(17): 920-934.
- [21] 聂建国. 我国结构工程的未来:高性能结构工程[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(9): 1-8.
- [22] 邵旭东, 李玉祺, 廖子南, 等. UHPC 华夫桥面板抗弯性能试验及有限元分析[J]. *长安大学学报*, 2018, 38(3): 52-63.
- [23] 2020 年中国超高性能混凝土 (UHPC) 技术与应用发展报告[J]. *混凝土世界*, 2021(4): 20-29.
- [24] 砦心砦德. 超高性能混凝土 (UHPC) 在路桥建设领域的应用 [EB/OL]. (2024-05-13) [2024-07-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/NKLvpa8Od2kHGk4JmG1pvQ>.
- [25] 刘君平, 徐帅, 陈宝春. 钢-UHPC 组合梁与钢-普通混凝土组合梁抗弯性能对比试验研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(11): 92-98.
- [26] 张彦玲, 王元清, 季文玉. 钢-活性粉末混凝土简支组合梁正截面破坏模式[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 11(6): 10-15.
- [27] Hu Y Q, Meloni M, Cheng Z, et al. Flexural performance of steel-UHPC composite beams with shear pockets[J]. *Structures*, 2020, 27: 570-582.
- [28] Yoo S W, Choo J F. Evaluation of the flexural behavior of composite beam with inverted-T steel girder and steel fiber reinforced ultra high performance concrete slab[J]. *Engineering Structures*, 2016, 118: 1-15.
- [29] Zhu J S, Wang Y G, Yan J B, et al. Shear behaviour of steel-UHPC composite beams in waffle bridge deck[J]. *Composite Structures*, 2020, 234, 111678.
- [30] Liu J P, Lai Z C, Chen B C, et al. Experimental behavior and analysis of steel-laminated concrete (RC and UHPC) composite girders[J]. *Engineering Structures*, 2020, 225, 111240.
- [31] 张彦玲. 钢-混凝土组合梁负弯矩区受力性能及开裂控制的试验及理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [32] 邓舒文, 邵旭东, 晏班夫, 等. 全预制快速架设钢-UHPC 轻型组合城市桥梁[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(3): 159-166.
- [33] 刘新华, 周聪, 张建仁, 等. 钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(5): 110-121.
- [34] Shao X D, Yi D T, Huang Z Y, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(5): 417-428.
- [35] Shao X D, Qu W T, Cao J H, et al. Static and fatigue properties of the steel-UHPC lightweight composite bridge deck with large U ribs[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 148: 491-507.
- [36] Lin W W, Yoda T, Taniguchi N. Application of SFRC in steel-concrete composite beams subjected to hogging moment[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 101: 175-183.
- [37] Luo J, Shao X D, Cao J H, et al. Transverse bending behavior of the steel-UHPC lightweight composite deck: orthogonal test and analysis[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 162: 35-47.
- [38] Luo J, Shao X D, Fan W, et al. Flexural cracking behavior and crack width predictions of composite (steel + UHPC) lightweight deck system[J]. *Engineering Structures*, 2019, 194(1): 120-137.
- [39] Zhang Y, Cai S K, Zhu Y P, et al. Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment[J]. *Engineering Structures*, 2020, 206, 110134.
- [40] Hamoda A, Hossain K M A, Sennah K, et al. Behaviour of composite high performance concrete slab on steel I-beams subjected to static hogging moment[J]. *Engineering Structures*, 2017, 140: 51-65.
- [41] Zhao C H, Wang K K, Zhou Q F, et al. Full-scale test and simulation on flexural behavior of dovetail-shaped reactive powder-concrete wet joint in a composite deck system[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(8), 04018051.

- [42] Pan W H, Fan J S, Nie J G, et al. Experimental study on tensile behavior of wet joints in a prefabricated composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultra-thin reactive-powder concrete layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(10), 04016064.
- [43] Wang K K, Zhao C H, Wu B, et al. Fully-scale test and analysis of fully dry-connected prefabricated steel-UHPC composite beam under hogging moments[J]. Engineering Structures, 2019, 197, 109380.
- [44] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [45] 薛建阳. 钢-混凝土组合结构与混合结构设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [46] 邓宗才, 王义超, 肖锐, 等. 高强钢筋 UHPC 梁抗弯性能试验研究与理论分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 68-78.
- [47] 郑文忠, 李莉, 卢姗姗. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 25-134.
- [48] Liu C, Zhang Y X, Yao Y, et al. Calculation method for flexural capacity of high strain-hardening ultra-high performance concrete T-beams[J]. Structural Concrete, 2019, 20(1): 405-419.
- [49] Canadian Standards Association. Canadian highway bridge design code: CSA S6:19[S]. Toronto: Canadian Standards Association, 2019.
- [50] Bae B I, Choi H K, Choi C S. Flexural strength evaluation of reinforced concrete members with ultra high performance concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016, 2815247.
- [51] 徐海宾, 邓宗才, 陈春生, 等. 超高性能纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 91-97.
- [52] Graybeal B A. Flexural behavior of an ultrahigh-performance concrete L-girder[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(6): 602-610.
- [53] European Committee for Standardization. National addition to Eurocode 2-design of concrete structures: specific rules for ultra-high performance fiber-reinforced concrete: NFP18-710[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [54] Aaleti S, Petersen B, Sritharan S. Design guide for precast UHPC waffle deck panel system, including connections[M]. Washington: Create Space Independent Publishing Platform, 2014.
- [55] Qi J N, Wang J Q, Ma Z J. Flexural response of high-strength steel-ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams based on a mesoscale constitutive model: experiment and theory[J]. Structural Concrete, 2018, 19(3): 719-734.
- [56] 王文雷. RPC 预应力梁相关设计参数研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [57] 鲁胜虎. 高强钢筋活性粉末混凝土梁受力性能试验及理论研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2013.
- [58] Aveston J, Kelly A. Theory of multiple fracture of fibrous composites[J]. Journal of Materials Science, 1973(8): 352-362.
- [59] Lim T Y, Paramasivam P, Lee S L. Analytical model for tensile behaviour of steel-fibre concrete[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(4): 286-298.
- [60] Li V C, Stang H, Krenchel H. Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete[J]. Materials and Structures, 1993, 26: 486-494.
- [61] Voo J Y L, Foster S J. Tensile-fracture of fibre-reinforced concrete: variable engagement model[C]//6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. Varenna: RILEM Publications SARRL, 2004: 875-884.
- [62] Zhao Q, Fang X M, Nie Y, et al. Behavior and design of steel-UHPC composite beams subjected to negative moment[J]. Structures, 2023, 57, 105183.
- [63] 邱明红, 邵旭东, 胡伟业, 等. 钢筋 UHPC 受弯构件裂缝宽度计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 89-98, 119.
- [64] 邓宗才, 肖锐, 徐海宾, 等. 高强钢筋超高性能混凝土梁的使用性能研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(10): 1335-1340.
- [65] 徐海宾, 邓宗才. UHPC 梁开裂弯矩和裂缝试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(4): 87-92.
- [66] 孙永新, 蔺鹏臻, 杨子江, 等. 考虑多影响因素的配筋 UHPC 梁裂缝宽度计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(4): 628-636.
- [67] 庄茁. ABAQUS 有限元软件 6.4 版入门指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 438.
- [68] 张清华, 韩少辉, 贾东林, 等. 新型装配式 UHPC 华夫型上翼缘组合梁受力性能[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(3): 445-452.
- [69] Markovich N, Kochavi E, Ben-dor G. An improved calibration of the concrete damage model[J]. Finite Elements in Analysis Design, 2011, 47(11): 1280-1290.
- [70] Chen W S, Hong H, Chen S Y. Numerical analysis of prestressed reinforced concrete beam subjected to blast loading[J]. Materials and Design, 2015, 65:662-674.
- [71] Yin H, Shirai K, Teo W. Finite element modelling to predict the flexural behaviour of ultra-high performance concrete members[J]. Engineering Structures, 2019, 183: 741-755.
- [72] Wang Y, Shao X D, Cao J H, et al. Static and fatigue flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced concrete slabs[J]. Engineering Structures, 2021, 231, 111728.
- [73] Hung C C, Lee H S, Chan S N. Tension-stiffening effect in steel-reinforced UHPC composites: constitutive model and effects of steel fibers, loading patterns, and rebar sizes[J]. Composites, 2019, 158: 269-278.
- [74] Guo J Y, Wang J Y, Wu K. Effects of self-healing on tensile behavior and air permeability of high strain hardening UHPC[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 342-356.
- [75] 陈善富, 陈静芬, 杨凤祥, 等. 双轴受压状态下的高延性纤维增强水泥基复合材料本构模型[J]. 工程力学, 2020, 37(12): 94-105.
- [76] 邓方茜, 徐礼华, 池寅, 等. 基于均匀化理论的混杂纤维混凝土有效弹性模量计算[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 161-170.
- [77] Artz T, Yuan Z F, Kumar R, et al. Computational model for oxi-

- dation-assisted rupture of ceramic matrix composites[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 202: 195-207.
- [78] Advani S G, Tucker C L. The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites[J]. *Journal of Rheology*, 2000, 31(8): 751-784.
- [79] Tal D, Fish J. Stochastic multiscale modeling and simulation framework for concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 90: 61-81.
- [80] Fish J. *Practical multiscale*[M]. United Kingdom: Willy, 2014.
- [81] Huang S Q, Yuan Z F, Fish J. Computational framework for short steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (COR-TUF)[J]. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 2019, 17(5): 551-562.
- [82] Nie J G, Fan J S, Cai C S. Stiffness and deflection of steel-concrete composite beams under negative bending[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(11): 1842-1851.
- [83] Du H, Hu X M, Meng Y F, et al. Study on composite beams with prefabricated steel bar truss concrete slabs and demountable shear connectors[J]. *Engineering Structures*, 2020, 210, 110419.
- [84] 王景全, 戚家南, 刘加平. 基于细观本构模型的 UHPC 梁受弯全过程分析[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(9): 137-144.
- [85] 王景全, 吕志涛, 刘钊. 部分剪力连接钢-混凝土组合梁变形计算的组合系数法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2005, 35(1): 5-10.
- [86] Wang J Q, Qi J N, Tong T, et al. Static behavior of large stud shear connectors in steel-UHPC composite structures[J]. *Engineering Structures*, 2019, 178: 534-542.
- [87] Kruszewski D, Wille K, Zaghi A E. Push-out behavior of headed shear studs welded on thin plates and embedded in UHPC[J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 429-441.
- [88] 赵根田, 曹亚楠, 贾然, 等. 单调及重复荷载作用下栓钉连接件抗拔性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(增刊1): 418-423.
- [89] 蒲黔辉, 谢宏伟, 樊书文, 等. 拔出破坏的钢混组合结构栓钉连接件承载力的分析方法[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 89-95.
- [90] 李嘉, 杨波, 邵旭东, 等. 钢桥面-薄层 CRRPC 组合结构栓钉连接件抗剪疲劳性能研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(6): 67-75.
- [91] Chen J, Zhang H, Yu Q. Static and fatigue behavior of steel-concrete composite beams with corroded studs[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 156: 18-27.
- [92] 李慧, 刘永健, 张宁, 等. 冻融循环作用后栓钉连接件受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(5): 149-155.
- [93] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [94] 翁雪微. 钢-UHPC 轻型组合桥面板中短栓钉的静力及疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [95] Cao J H, Shao X D, Deng L, et al. Static and fatigue behavior of short-headed studs embedded in a thin ultra-high-performance concrete layer[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22, 040170055.
- [96] 曹君辉. 钢-薄层超高性能混凝土轻型组合桥面结构基本性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [97] 孙启力, 路新瀛, 聂鑫, 等. 非蒸养 UHPC-钢板结构界面的受拉和剪切性能试验研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(9): 167-174.
- [98] Dieng L, Marchand P, Gomes F, et al. Use of UHPFRC overlay to reduce stresses in orthotropic steel decks[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 89: 30-41.
- [99] Xue D Y, Liu Y Q, Yu Z, et al. Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 74: 1-7.
- [100] 廖崇庆. 钢-混凝土连续组合梁群钉连接件抗剪承载力试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [101] Chen X, Yang Y, Xue Y C, et al. Shear behavior of large studs and novel bolted connectors in steel-UHPC composite beams[J]. *Structures*, 2022, 45: 2091-2103.
- [102] 陈阳, 宁建, 任重, 等. 装配式钢-薄层 UHPC 组合梁大直径群钉连接件抗剪性能数值分析[J]. *工业建筑*, 2023, 53(12): 164-174.
- [103] Ding J N, Zhu J S, Kang J F, et al. Experimental study on grouped stud shear connectors in precast steel-UHPC composite bridge[J]. *Engineering Structures*, 2021, 242, 112479.
- [104] Fang Z C, Fang H Z, Huang J X, et al. Static behavior of grouped stud shear connectors in steel-precast UHPC composite structures containing thin full-depth slabs[J]. *Engineering Structures*, 2022, 252, 113484.
- [105] He Y L, Guo S J, Wang L C, et al. Experimental and numerical analysis of grouped stud shear connectors embedded in HFRC[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242, 118197.
- [106] Luo Y B, Hoki K, Hayashi K, et al. Behavior and strength of headed stud-SFRCC shear connection. I: experimental study[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(2), 04015112.
- [107] Luo Y B, Hayashi K, Nakashima M, et al. Behavior and strength of headed stud-SFRCC shear connection. II: strength evaluation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(2), 04015113.
- [108] Rodrigues J, Laim L. Behaviour of perfobond shear connectors at high temperatures[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(10): 2744-2753.
- [109] 施洲, 秦搏聪. 2 类 PBL 推出试验破坏机理及承载力影响因素研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(4): 943-952.
- [110] 张清华, 李乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机理研究 II: 极限承载力[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(5): 101-108.
- [111] Li X, Hu Z J, Fan L, et al. Experimental investigation of perfobond hoop shear connector's bearing capacity and slip[J]. *Engineering Structures*, 2019, 198, 109461.
- [112] Liu Y Q, Xin H H, Liu Y Q. Experimental and analytical study on shear mechanism of rubber-ring perfobond connector[J]. *Engineering Structures*, 2019, 197, 109382.
- [113] 张宁, 刘永健, 刘士林. 单孔 PBL 剪力连接件疲劳性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(3): 186-192.
- [114] 陈海, 郭子雄, 刘阳, 等. 斜板 PBL 剪力键受剪性能试验研

究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 209-218.

[115] 刘瑞, 赵华, 安家禾. 钢板-UHPC 组合桥面板抗弯性能试验及有限元分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 20(2): 1-15.

[116] 张凡, 陈炳聪, 刘爱荣, 等. 装配式钢-混凝土组合梁高强螺栓剪力连接件力学模型[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊1): 173-179.

[117] Liu X P, Bradford M A, Ataei A. Flexural performance of innovative sustainable composite steel-concrete beams[J]. Engineering Structures, 2017, 130: 282-296.

[118] Kwon G, Engelhardt M D, Klingner R E. Experimental behavior of bridge beams retrofitted with postinstalled shear connectors[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(4): 536-545.

[119] Dai X H, Lam D, Saveri E. Effect of concrete strength and stud collar size to shear capacity of demountable shear connectors[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(11), 04015025.

[120] He J, Suwaed A S, Vasdravellis G. Horizontal pushout tests and parametric analyses of a locking-bolt demountable shear connector[J]. Structures, 2022, 35: 667-683.

[121] 陈炳聪. 装配式钢-混凝土组合梁预埋螺母型螺栓连接件力学性能的研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.

[122] 王宣鼎, 沈敏慧, 钟国辉, 等. 大直径高强螺栓剪力件受剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊2): 427-434.

[123] Chen Y, Zhao Y, West J, et al. Behaviour of steel-precast composite girders with through-bolt shear connectors under static loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103: 168-178.

[124] 何余良, 胡立普, 曹鑫雨, 等. 混杂纤维混凝土螺栓剪力键试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 90-98.

[125] 严鑫. 钢-混凝土新型可拆卸螺栓连接件抗剪性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

[126] 齐连训, 罗云标, 严加宝, 等. 高变形能力螺栓抗剪连接件抗剪承载力理论分析与验证[J]. 工程力学, 2021, 38(10): 74-82.

[127] 刘中良. 装配式组合梁高强螺栓连接件抗剪性能试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017.

[128] 陈辛. 钢-UHPC 组合梁铰制孔螺栓连接件受力性能与设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.

[129] 李政圆, 樊健生, 马晓伟, 等. 基于悬吊系统的钢-混凝土组合桥面系试验[J]. 工程力学, 2019, 36(12): 134-144.

[130] Shariati M, Sulong N H R, Shariat A, et al. Behavior of V-shaped angle shear connectors; experimental and parametric study[J]. Materials and Structures, 2016, 49(9): 3909-3926.

[131] Shariati M, Sulong N H R, Shariat A, et al. Comparative performance of channel and angle shear connectors in high strength concrete composites; an experimental study[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 382-392.

[132] Vianna J, Costa-neves L, Vellasco P, et al. Structural behaviour of T-perfobond shear connectors in composite girders: an experimental approach[J]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2381-2391.

[133] Kim S H, Kim K S, Park S, et al. Y-type perfobond rib shear connectors subjected to fatigue loading on highway bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122(7): 445-454.

A Review on the Research and Application of Steel-UHPC Composite Beam

Libo Yang^{1,2}

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Maintenance for Extreme Environmental Geotechnical and Tunnel Engineering, Xi'an 710043, China)

Abstract:

With the development of novel engineering materials, the rational application of high-performance materials in the field of civil engineering, alongside the evolution of structural forms, has become a significant pathway for innovations in steel-concrete composite beams. Steel-UHPC composite beams exhibit exceptional mechanical and durability properties, offering a promising pathway and solution for the innovative development of civil engineering structures in our country. In order to promote the transformation and upgrading of Chinese bridge engineering towards lightweight, high-performance, prefabricated, sustainable, and intelligent directions, this paper analyses the main research progress and future development directions of steel-UHPC composite beams. This is done by examining the current state of engineering applications, mechanical performance, and the mechanical behaviour of shear connectors from both domestic and international research and applications. Firstly, the paper reviews the current state of engineering applications of steel-UHPC composite beams in the field of bridge construction both domestically and internationally. These applications span from small and medium-span simply supported and continuous beam bridges to suspension and cable-stayed bridges with spans exceeding a thousand meters, showcasing the presence of steel-UHPC composite beams in various types of bridge structures. It indicates that with the rise of low-carbon construction globally and the introduction of China's "Transportation Powerhouse" strategy, steel-UHPC composite beam bridges are poised to encounter significant development opportunities. Secondly, the paper summarises the research

progress on the mechanical performance of steel-UHPC composite beams under positive and negative bending moments, including the calculation theories for bending performance and finite element simulation methods. It indicates that the application of steel-UHPC composite beams can significantly enhance the structural crack resistance, flexural capacity, and flexural stiffness. This is beneficial for reducing the self-weight of the structure, facilitating prefabricated construction, and promoting the further development of high-performance engineering structures. Subsequently, the current state of research on various shear connectors was discussed, including conventional stud shear connectors, short stud shear connectors, large diameter shear connectors, grouped stud shear connectors, perforated steel plate shear connectors, and bolt shear connectors. It indicates that the rational selection and design of shear connectors can simultaneously address the dual requirements of interface connection reliability and the efficient utilisation of UHPC materials in steel-UHPC composite beams across various engineering contexts. Although the research on the force transmission mechanism and mechanical performance of steel-UHPC composite beam has been gradually developed, the systematic research is insufficient, and in-depth systematic research should still be carried out around the basic theory and design method, so as to meet the needs of a large number of engineering applications. Finally, an outlook is provided on the key issues, main challenges, and future development trends related to the study of the load-bearing performance and design theory of steel-UHPC composite beams, research on high-strength steel-UHPC composite beams, the load-bearing performance of novel shear connectors, and the intelligent design of steel-UHPC composite beams. This is intended to offer innovative insights into the academic research and engineering applications of bridge engineering in China.

Key words: steel-UHPC composite beam; engineering application; mechanical performance; shear connectors; review and analysis