

疲劳荷载作用下钢混组合梁的抗弯性能研究综述

兰 贵, 王琼芬*

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年7月28日; 发布日期: 2026年8月7日

摘 要

正弯矩区作为组合梁跨中受弯控制区域, 其受力主要表现为UHPC板受压、钢梁下翼缘受拉及剪力连接件传递界面纵向剪力。本文围绕疲劳荷载作用下正弯矩区UHPC钢混组合梁抗弯性能展开综述, 重点梳理静力抗弯性能、疲劳损伤演化、界面滑移、连接件疲劳性能及疲劳后剩余承载性能等研究进展。现有研究多集中于静力性能、负弯矩区裂缝控制和连接件推出试验, 对正弯矩区不同疲劳荷载水平下刚度退化、残余变形、界面滑移及剩余抗弯承载力的研究仍不充分。

关键词

UHPC钢混组合梁, 正弯矩区, 疲劳荷载, 抗弯性能, 剩余承载力

Review of Research on Flexural Bending Performance of Steel-Concrete Composite Beams under Fatigue Loading

Gui Lan, Qiongfeng Wang*

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: July 6, 2026; accepted: July 28, 2026; published: August 7, 2026

Abstract

As the bending moment-controlled region at the mid-span of composite beams, the positive moment region is characterized by the compression of the UHPC slab, tension of the lower flange of the steel

*通讯作者。

文章引用: 兰贵, 王琼芬. 疲劳荷载作用下钢混组合梁的抗弯性能研究综述[J]. 土木工程, 2026, 15(8): 36-43.
DOI: 10.12677/hjce.2026.158198

beam, and longitudinal interface shear transmission by shear connectors. This paper reviews research progress on the flexural behavior of UHPC-steel composite beams in positive moment regions under fatigue loading, with a focus on sorting out advances in static flexural performance, fatigue damage evolution, interface slip, fatigue performance of connectors, and post-fatigue residual bearing capacity. Existing studies mainly focus on static performance, crack control in negative moment regions, and push-out tests of connectors. Research on stiffness degradation, residual deformation, interface slip and residual flexural bearing capacity of positive moment regions under different fatigue load levels is still insufficient.

Keywords

UHPC-Steel Composite Beam, Positive Moment Region, Fatigue Loading, Flexural Performance, Residual Bearing Capacity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

传统钢-混凝土组合梁凭借钢材与混凝土的材料互补优势,在桥梁工程中应用广泛。但在重载交通与往复车辆荷载长期作用下,该类结构易产生桥面板开裂、连接件疲劳损伤及整体刚度退化等病害,难以满足桥梁长效服役需求[1]。相较普通混凝土,UHPC具备高强度、高韧性与高耐久性突出优势,可显著改善组合结构受力性能与耐久水平。现有静力研究表明,可靠的界面连接可充分发挥钢-UHPC组合梁的协同受力特性,正弯矩区界面滑移与连接件工作性能是决定组合抗弯性能的关键要素[2]。

疲劳荷载作用下,钢-UHPC组合梁损伤呈现持续累积的演化规律。循环车辆荷载易引发钢梁应力往复波动、栓钉连接性能劣化及界面滑移不断发展,致使构件挠度增大、残余变形累积、整体刚度下降与截面应力重分布[3]。钢-UHPC组合梁的疲劳性能并非仅取决于UHPC材料自身性能,而是由钢梁、连接件及界面协同工作状态共同耦合控制,因此需从构件整体层面揭示疲劳荷载对结构抗弯性能的劣化机制[4]。

鉴于此,开展正弯矩区钢-UHPC组合梁疲劳抗弯性能研究具有重要的工程价值。通过对比分析不同疲劳工况下钢-UHPC与普通混凝土组合梁的变形响应、界面滑移演化及剩余承载力特性,可明晰UHPC对组合梁疲劳抗弯性能的提升机理,为该类新型组合梁的抗疲劳设计、服役性能评估及工程推广提供理论依据与试验支撑[5]。

2. 正弯矩区钢-UHPC组合梁抗弯性能研究现状

钢-UHPC组合梁正弯矩区为结构主要受弯受力区域,受力机制表现为UHPC桥面板承压、钢梁受拉,剪力连接件通过传递界面纵向剪力,维持钢-UHPC界面协同工作性能,充分发挥UHPC高强抗压的材料优势。该区域静力加载依次经历弹性、弹塑性、屈服、极限及破坏阶段,其抗弯性能由极限承载力、等效割线刚度、变形特征、界面滑移状态及破坏模式共同调控,界面协同工作性能对组合截面受力效率起主导作用[6]。

现有研究已明晰正弯矩区钢-UHPC组合梁的静力受力机理与弯曲破坏特征,系统揭示荷载-挠度响应、截面应变分布及界面滑移演化规律。UHPC的应用可有效提升组合梁等效刚度与承载储备,构件以

延性弯曲破坏为主。结构宏观抗弯性能受材料属性、截面尺寸与连接件布置参数的耦合调控,上述参数通过改变截面内力分配机制,主导结构整体力学响应[7]。

当前研究多聚焦静力力学行为分析,针对正弯矩区钢-UHPC 组合梁在疲劳循环荷载下的微观损伤演化、残余塑性变形累积规律及剩余承载力评估体系的系统性研究仍较为匮乏。疲劳循环荷载引发的钢梁应变累积、连接件剪切劣化与界面滑移扩展,会持续诱发结构等效割线刚度衰减与宏观性能退化。因此,开展该结构疲劳抗弯性能研究,可完善疲劳损伤评价体系,为桥梁抗疲劳设计与工程应用提供理论支撑[8]。

3. 疲劳荷载下钢混组合梁损伤演化研究现状

3.1. 车辆荷载与循环加载特征

桥梁钢混组合梁疲劳损伤是车辆荷载长期循环累积作用的结果,重载、高频率交通工况易引发结构多部位疲劳损伤,削弱桥梁长期服役性能[9]。鉴于实际车辆荷载存在随机变幅特性,室内疲劳试验普遍采用规则循环荷载等效模拟车辆加载效应,以此系统揭示钢-UHPC 组合梁的疲劳损伤演化机制[10]。钢-UHPC 组合梁正弯矩区以抗弯承载力与抗弯刚度为核心静力评价指标,可通过屈服荷载、极限荷载及极限弯矩定量表征,主要受材料力学性能与界面协同受力特性共同调控;UHPC 受压性能、钢梁截面参数及剪力连接件布置方式共同决定结构承载能力,界面滑移超限将削弱截面组合效应,造成结构刚度与承载性能衰减[11]。

荷载-挠度曲线、截面应变分布及界面滑移是表征钢-UHPC 组合梁抗弯性能与截面组合效应的核心参数。组合梁加载全过程依次呈现线弹性受力、刚度渐进退化、屈服非线性发展三阶段特征,各项特征参数可有效评价结构静力特性与疲劳力学性能[12]。常规受力状态下组合截面符合平截面假定,荷载提升与界面滑移扩展会弱化截面变形协调性,促使结构由完全组合受力状态向部分组合受力状态转变[13]。对于栓钉连接体系,栓钉构造参数、焊接质量及 UHPC 包裹约束性能共同决定界面抗滑移能力,疲劳荷载作用下的滑移累积会持续劣化结构力学性能,降低组合梁残余抗弯承载力[14]。

荷载幅、荷载比、循环次数与加载频率是调控钢-UHPC 组合梁疲劳损伤演化的核心试验参数。荷载幅与结构疲劳损伤速率呈正相关,高荷载幅加速结构损伤演化,低荷载幅在高周循环作用下仍会产生不可逆的力学性能损伤[15]。科学选取荷载比可精准还原实际车辆荷载作用效应,有效保障疲劳试验结果的准确性与可靠性[16]。组合梁疲劳损伤随循环加载次数呈现初始发展、稳定累积、加速退化的阶段性演化规律,高荷载水平与高循环次数易诱发结构刚度骤降、界面滑移激增,最终导致构件疲劳失效[17]。标准化选取加载频率可规避附加动力效应、构件温升等试验干扰,保证疲劳损伤演化规律的真实性[18]。

3.2. 疲劳寿命与 S-N 曲线研究

疲劳寿命是评定钢-UHPC 组合梁长期服役安全与耐久性能的核心指标,表征结构在循环荷载作用下达到损伤限值的荷载循环次数,其损伤具有典型隐蔽性与累积性[19]。车辆反复荷载虽单次作用难以引发结构破坏,但长期循环效应会造成钢梁、连接件及界面的渐进损伤累积,诱发刚度退化、变形增长与承载力衰减。S-N 曲线是疲劳寿命评估的核心方法,可建立应力幅与疲劳循环次数的量化关系,明确了应力幅越大、结构疲劳损伤越快、寿命越短的核心规律[20]。应力幅是控制组合梁疲劳性能的关键参数,钢梁构造细节、栓钉根部及钢-UHPC 界面为疲劳敏感区域,高低应力幅均会诱发不同程度的结构损伤与性能退化,因此疲劳评价需兼顾断裂特征与整体性能演化[21]。钢-UHPC 组合梁疲劳损伤呈现多区域耦合特征,钢梁、栓钉连接件、UHPC 板材及结合界面协同损伤,结构整体疲劳寿命由最不利受力部位控制[22]。正弯矩区组合梁受“上压下拉”截面特性调控,UHPC 优异的力学性能可提升结构整体刚度,但无

法规避钢梁应力循环、栓钉疲劳及界面滑移带来的损伤问题, 需从材料、连接件与构件多维度开展寿命评价[23]。现阶段常结合 S-N 曲线、雨流计数法与 Miner 线性累积损伤理论, 实现变幅车载下的疲劳寿命评估, 工程适用性较强[24]。但传统方法难以适配钢-UHPC 组合梁的耦合损伤特性, 无法考虑荷载次序、滑移累积与刚度退化的影响, 存在明显局限性。后续研究需融合多维度性能指标, 完善疲劳退化机理与寿命评价体系[25]。

3.3. 疲劳损伤演化规律

钢-UHPC 组合梁的疲劳劣化表现为多构件、多机制耦合的渐进式性能退化行为, 区别于静力荷载下的瞬时破坏特征, 其损伤演化具备显著的累积效应与隐蔽特性。循环往复荷载作用下, 正弯矩区受拉钢梁的应力集中区域易萌生、扩展疲劳微裂纹, 引发局部刚度与承载性能持续衰减, 是控制组合梁疲劳性能的关键薄弱部位。UHPC 材料依托高致密基体、高韧性及纤维桥联作用可有效阻滞受压区损伤扩展, 但长期疲劳荷载迭代作用仍会诱发受压塑性应变累积与材料本征性能劣化, 弱化结构残余抗弯储备。栓钉剪力连接件持续承受往复剪切作用, 极易产生根部应力集中、剪切塑性变形及焊缝损伤, 导致界面传力刚度衰减, 进一步加剧钢-UHPC 界面滑移累积效应[26]。该类组合梁整体疲劳损伤严格遵循初始发展、稳定累积、加速退化的三阶段演化范式。受正弯矩“上压下拉”特殊截面受力机制调控, 其疲劳损伤演化具备明显结构特异性, 需依托多维度力学指标实现综合量化评价。现阶段, 各组分损伤的耦合关联机制尚未明晰, 仍需依托系统性试验与理论分析完善其疲劳劣化理论体系[27]。

3.4. 刚度退化与残余挠度发展

刚度退化与残余挠度累积是疲劳荷载作用下钢-UHPC 组合梁整体力学性能劣化的核心宏观表征, 可有效反映结构损伤演化进程与剩余服役性能, 是评价组合梁疲劳性能的核心指标。荷载-挠度曲线是分析组合梁刚度演变规律与变形响应特征的基础依据, 能够完整揭示不同疲劳循环次数下的结构力学响应差异, 精准表征构件疲劳损伤的发展状态。刚度退化率为结构疲劳损伤的定量评价参数, 随疲劳循环次数递增, 组合梁等效割线刚度呈持续衰减趋势, 该力学行为是钢梁受拉应变累积、UHPC 受压区微损伤发育、剪力连接件剪切疲劳劣化及钢-UHPC 界面滑移扩展等多因素耦合作用的结果。残余挠度是衡量结构不可逆塑性损伤的关键参数, 其累积过程具备显著的阶段性特征, 可划分为初始受力调整、稳定损伤累积、加速性能劣化三个典型疲劳阶段。在正弯矩受力状态下, 钢梁下翼缘受拉、UHPC 顶板受压的截面受力特性, 结合剪力连接件反复剪切作用引发的传力性能退化与界面滑移持续累积, 持续弱化组合截面协同受力工作性能, 最终导致构件抗弯刚度衰减、残余塑性变形不断累积。目前, 国内外针对普通钢混组合梁的疲劳刚度退化特性已形成较为系统的研究成果, 但针对正弯矩区受力条件下钢-UHPC 组合梁的刚度退化微观机理、残余挠度演化规律, 以及二者对结构剩余抗弯承载力的影响机制研究仍较为有限, 有待进一步开展系统性的深化研究[28]。

3.5. 疲劳后剩余抗弯性能

疲劳后剩余抗弯性能是评估钢-UHPC 组合梁长期服役安全性与结构可靠度的重要指标。桥梁运营期间持续经受车辆循环荷载作用, 组合梁内部将产生渐进式疲劳损伤累积, 诱发残余应变发展、基体微损伤扩展、剪力连接件传力性能劣化及钢-UHPC 界面滑移持续增长, 逐步弱化组合截面协同受力效应, 导致疲劳损伤构件的静力学响应显著区别于完好构件。因此, 仅依托疲劳循环次数难以全面表征结构安全储备, 需结合多项疲劳后力学指标开展综合评价。疲劳损伤累积会进一步削弱截面组合工作性能, 造成结构极限承载力与抗弯刚度同步衰减, 其中界面滑移的持续扩展是诱导结构整体性能劣化的关键诱因。此外, 疲劳损伤的空间分布差异可改变构件静力损伤演化规律与破坏形态。现有研究多针对传统钢混组

合梁展开, 关于正弯矩工况下钢-UHPC 组合梁多损伤耦合作用下的剩余抗弯性能演化机制仍缺乏系统探究。后续可通过疲劳加载结合后置静力试验, 揭示疲劳参数对结构力学性能的影响机理, 完善其疲劳评价理论与工程应用体系[29]。

4. 钢-UHPC 组合梁界面滑移与连接件性能研究

钢-UHPC 组合梁的整体抗弯性能不仅依赖钢梁与 UHPC 板的材料性能, 更取决于钢-UHPC 界面的协同连接性能。由于钢梁与 UHPC 板的弹性模量、变形特性存在显著差异, 可靠的剪力连接构造是保障截面整体协同受力的核心。剪力连接件可有效传递界面纵向剪力、约束层间相对滑移, 在正弯矩受力状态下, 充分适配 UHPC 板受压、钢梁下翼缘受拉的受力特征, 发挥两种材料的组合力学优势。界面连接性能直接决定结构受力水平: 良好的界面协同作用可充分释放组合梁抗弯刚度与承载潜力, 而界面滑移的持续发展会削弱截面整体性, 诱发刚度衰减、挠度增大及整体力学性能劣化[30]。

当前钢-UHPC 组合梁常用连接形式主要为栓钉、PBL 连接件及剪力槽。栓钉连接件构造简单、施工便捷, 工程应用最广, UHPC 的超高强度与致密特性可有效改善其周边约束条件, 显著提升连接件抗剪承载力与界面抗滑移能力, 但长期疲劳荷载会造成栓钉根部、焊缝及周边 UHPC 渐进损伤累积, 引发连接刚度退化、界面滑移增长。PBL 连接件以机械咬合传力, 刚度与承载力更优, 适配高受力工况, 但构造复杂、施工精度要求高, 疲劳下易出现孔边 UHPC 及横向钢筋损伤劣化。剪力槽依靠界面咬合与局部承压传力, 可提升界面整体性, 但反复荷载下槽口微损伤累积会逐步衰减界面约束效果, 其疲劳性能规律仍有待完善[31]。

界面滑移是表征截面组合效应与协同工作能力的关键指标, 滑移增大会使结构由完全组合状态向部分组合状态转变, 造成受力响应软化、应变分布偏离平截面假定。疲劳荷载会加剧界面与连接件不可逆损伤, 导致界面刚度衰减、残余滑移累积, 最终引发组合梁刚度退化、残余挠度增长与剩余承载力下降。现有研究多集中于连接件静力性能, 对疲劳作用下界面损伤、连接件刚度退化与整体抗弯性能劣化的耦合机制研究尚不充分, 亟需系统开展相关机理研究, 完善该类组合梁的疲劳性能理论体系[32]。

5. 研究局限性

现有研究已基本阐明钢-UHPC 组合梁的静力受力特性, 可为工程应用提供理论与试验支撑, 但正弯矩区疲劳抗弯性能相关研究仍存在明显不足。现阶段疲劳研究多针对传统钢-普通混凝土组合梁, 难以直接适用于钢-UHPC 组合梁体系。UHPC 具备高强度、高韧性及优异抗裂性能, 可显著改变组合截面的受力协调机制与疲劳损伤演化规律, 使传统组合梁疲劳理论存在明显适用性局限。此外, 现有钢-UHPC 组合梁研究多侧重于静力抗弯性能与负弯矩区裂缝控制, 对正弯矩区疲劳劣化机理关注不足。由于正负弯矩区应力状态、损伤形式及演化机制存在本质区别, 负弯矩区研究结论无法准确表征正弯矩区 UHPC 受压、钢梁受拉耦合受力下的疲劳性能退化规律[33]。

现有疲劳性能评价体系普遍存在指标单一、评价维度不足的问题。多数研究以疲劳寿命、循环次数和应力幅为主要评价依据, 仅判别构件是否发生宏观疲劳破坏, 忽略了桥梁长期服役过程中未失效构件的不可逆累积损伤。仅依靠单一破坏指标, 无法全面反映疲劳荷载引发的刚度衰减、残余挠度增长及剩余承载力退化等劣化特征, 难以精准评估结构实际安全储备与服役可靠性。因此, 亟需结合极限承载力、刚度保持率、残余变形、界面滑移及破坏模式等多维度参数, 建立全面系统的疲劳性能综合评价体系[34]。

与此同时, 钢-UHPC 组合梁界面疲劳耦合劣化机制仍有待进一步厘清。现有研究多基于推出试验开展连接件静力性能分析, 难以真实反映整体受弯构件在疲劳荷载作用下, 连接件损伤、界面滑移扩展与主梁抗弯性能的协同劣化规律, 各损伤参数的内在耦合关系尚不明确。该类组合梁疲劳损伤具有多部位、

全过程、耦合累积的特点, 单一指标无法完整刻画损伤萌生、累积与整体性能衰减的演化过程。构建适配正弯矩区受力特征的多参数疲劳损伤评价体系, 是补齐现有研究短板、完善钢-UHPC 组合梁疲劳理论的关键[35]。

6. 未来研究方向

针对现有研究存在的不足, 后续可从试验机理、评价体系及理论模型三个维度完善钢-UHPC 组合梁的疲劳性能研究。首先开展正弯矩区组合梁精细化疲劳与疲劳后静载试验, 系统探究荷载工况与构造参数对构件挠度、应变响应、界面滑移及刚度退化的影响规律, 揭示疲劳损伤的阶段性演化机制, 分析剩余承载力与刚度衰减特性, 突破单一疲劳寿命的评价局限, 精准评估结构长期服役安全储备[36]。

其次厘清界面协同劣化耦合机理, 构建多指标疲劳损伤评价体系。结合整体梁力学响应与局部连接件疲劳性能试验结果, 阐明连接件性能劣化、残余滑移累积与整体抗弯性能衰减的内在关联, 揭示界面滑移对正弯矩区截面组合协同效应的影响规律, 建立适配多部位耦合损伤、阶段性退化特征的多维综合评价体系[37]。

最后融合试验测试、数值模拟与理论分析完善疲劳理论体系。基于试验结果建立精细化数值模型, 系统探明关键设计与荷载参数对疲劳性能的影响机制, 结合累积损伤理论构建正弯矩区剩余抗弯性能预测模型, 进一步完善疲劳评价理论, 推动该研究由局部构件性能分析向结构全生命周期服役性能评估深化拓展。

7. 主要结论与贡献

相较于传统钢-混凝土组合梁, 钢-UHPC 组合梁依托 UHPC 高强、高韧、高耐久的优异材料性能, 可有效改善桥面板开裂及长期服役劣化难题, 显著提升结构整体刚度与承载储备。在正弯矩受力工况下, 结构通过 UHPC 板受压、钢梁受拉、剪力连接件传递界面剪力的协同机制实现整体抗弯, 界面连接性能直接控制截面组合工作效应。界面滑移可有效表征连接件退化与疲劳损伤程度, 其持续发展将弱化构件协同受力能力, 最终导致结构刚度与抗弯承载力逐步劣化[38] [39]。

钢-UHPC 组合梁的疲劳损伤具备显著的累积性与阶段性演化特征, 循环荷载作用下会诱发钢梁应变累积、UHPC 微损伤萌生、界面滑移持续拓展, 即便未出现宏观疲劳破坏, 构件抗弯性能仍会产生不可逆衰减。本文系统梳理了该类组合梁抗弯力学性能、疲劳损伤演化、界面滑移规律及连接件力学特性的研究成果, 明确了正弯矩区疲劳性能核心评价指标, 构建了多维度综合评价体系, 凝练了现阶段研究存在的短板与局限[40] [41]。

综上, 钢-UHPC 组合梁正弯矩区的疲劳抗弯性能退化, 是材料损伤萌生、界面滑移扩展、连接件性能劣化与截面组合效应衰减多机制耦合作用的结果。后续研究需结合疲劳模型试验、多指标损伤评价体系及数值理论分析方法, 深入揭示其疲劳损伤演化内在机理。本研究可为该类组合梁的抗疲劳设计、全生命周期服役评估及工程推广应用提供可靠的理论支撑。

参考文献

- [1] Hung, C.C., El-Tawil, S. and Chao, S.H. (2021) A Review of Developments and Challenges for UHPC in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design. *Journal of Structural Engineering*, **147**, Article 03121001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0003073](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0003073)
- [2] Amran, M., Huang, S.S., Onaizi, A.M., Makul, N., Abdelgader, H.S. and Ozbakkaloglu, T. (2022) Recent Trends in Ultra-High Performance Concrete (UHPC): Current Status, Challenges, and Future Prospects. *Construction and Building Materials*, **352**, Article 129029. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129029>
- [3] 刘欣益. 正交异性 UHPC 组合桥面板结构层抗弯行为与疲劳性能研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学,

- 2022.
- [4] 李荣超. 曲线连续钢混组合梁桥施工控制研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [5] 吴昊, 杨琳珂, 彭琦. 落石冲击下钢混组合梁桥桥面板动力行为及易损性分析[J]. 振动与冲击, 2025, 44(1): 177-189.
- [6] 沈德建, 白松林, 姜国庆, 等. 考虑黏结滑移的型钢超高性能混凝土组合梁受力性能影响因素分析[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(5): 29-39.
- [7] Benedetty, C.A., dos Santos, V.B., Krah, P.A., Rossi, A., Silva, F.D.A., Cardoso, D.C.T., *et al.* (2023) Flexural and Shear Behavior of Steel-UHPC Composite Beams: A Review. *Engineering Structures*, **293**, Article 116649. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116649>
- [8] Zhu, Z., Zhu, R. and Xiang, Z. (2023) A Review on Behavior and Fatigue Performance of Orthotropic Steel-UHPC Composite Deck. *Buildings*, **13**, Article 1906. <https://doi.org/10.3390/buildings13081906>
- [9] Mohammadi Niaei, A., Mashiri, F., Mirza, O. and Hosseini, M. (2025) Review on the Static, Low-Cycle and High-Cycle Fatigue Behaviour of Shear Connectors in Sustainable Steel-Concrete Composite Structures: Experimental Studies. *Structures*, **78**, Article 109188. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109188>
- [10] Ge, W., Zhang, Z., Ashour, A., Jiang, H., Liu, Y., Li, S., *et al.* (2023) Investigation on Flexural Behavior of Steel-UHPC Composite Beams with Steel Shear Keys. *Journal of Constructional Steel Research*, **211**, Article 108158. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108158>
- [11] Shi, F.W., Sun, C.H., Liu, X.G., Wang, H. and Zong, L. (2022) Flexural Behavior of Prefabricated Composite Beam with Cast-in-Situ UHPC: Experimental and Numerical Studies. *Structures*, **45**, 670-684. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.048>
- [12] Xu, Q., Sebastian, W. and Wang, J. (2025) Flexural Performance of Steel-UHPC Composite Beams with Innovative Steel Wedge Block-Crossed Inclined Stud Connections. *Journal of Structural Engineering*, **151**. <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-13935>
- [13] Lai, Z., Yao, P., Yang, X., Li, S. and Zhao, Q. (2025) Flexural Behavior and Design of High-Strength I-Shaped Steel-UHPC Composite Beams. *Advances in Structural Engineering*, **28**, 1877-1889. <https://doi.org/10.1177/13694332251319094>
- [14] Tan, C., Luo, Z., Zhao, H., An, J., Liang, L., Guo, W., *et al.* (2023) Flexural Behavior on a Steel-UHPC Composite Deck System of Long-Span Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, **28**, Article 04023062. <https://doi.org/10.1061/jbrnf2.beeng-6323>
- [15] Wang, Y., Wang, H. and Chen, Y. (2025) Flexural Behavior of Steel-UHPC Composite Bridge Slab under Different Curing Conditions. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 19977. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03774-2>
- [16] Li, J.P., Zhang, L.Y., Zhu, Y.J., Zhao, G., Liu, F. and Zhang, T. (2024) Finite Element Analysis of the Flexural Behavior of Steel Plate-High-Performance Concrete (HPC) Slab and Beam Composite Structures. *Buildings*, **15**, Article 27. <https://doi.org/10.3390/buildings15010027>
- [17] Xu, B., Liu, Y. and Zhu, W. (2023) Comparative Study on Flexural Behavior of Steel-UHPC Composite Beams and Steel-Ordinary Concrete Composite Beams in the Negative Moment Zone. *Structures*, **57**, Article 105288. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105288>
- [18] Zhao, Q., Xiao, F., Nie, Y., Yang, Y. and Fang, X. (2023) Behavior and Design of Steel-UHPC Composite Beams Subjected to Negative Moment. *Structures*, **57**, Article 105183. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105183>
- [19] Mao, M., Yin, C.L., Shen, S.Y. and Wan, Y. (2024) Experimental and Numerical Study on Flexural Behaviors of Steel-UHPC Composite Beams under Hogging Moment. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, **28**, 2344-2354. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1945-z>
- [20] Sun, G., Shan, B., Kang, J. and Zhou, G. (2024) Flexural Behavior of Steel-UHPC Composite Beams with Different Connectors in Negative Moment. *Journal of Constructional Steel Research*, **216**, Article 108617. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108617>
- [21] Cao, L., Zhang, D., Zeng, D., Zhang, J., Zhang, Y., Zhang, Z., *et al.* (2025) Flexural Performance of Steel-GFRP Strips-UHPC Composite Beam in Negative Moment Region. *Buildings*, **15**, Article 2652. <https://doi.org/10.3390/buildings15152652>
- [22] Deng, Z., Li, W. and Xue, H. (2025) Experimental Study on Bending Performance of Steel-UHPC Continuous Composite Beam. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **48**, 505-517. <https://doi.org/10.1080/02533839.2025.2471378>
- [23] Hong, L., Li, Z. and Peng, Y. (2024) Application of Lightweight Steel-UHPC Composite Beam in Bridge Emergency Repair. *Advances in Bridge Engineering*, **5**, Article No. 19. <https://doi.org/10.1186/s43251-024-00128-2>
- [24] Zhang, D., Ma, X., Shen, H., Guo, S. and Liu, C. (2023) Analysis of Structural Parameters of Steel-NC-UHPC Composite

- Beams. *Materials*, **16**, Article 5586. <https://doi.org/10.3390/ma16165586>
- [25] Guo, S., Liu, C. and Ma, X. (2024) Flexural Performance of Steel-Normal Concrete-Ultra-High-Performance Concrete Composite Slabs with Steel Ribs. *Buildings*, **14**, Article 1301. <https://doi.org/10.3390/buildings14051301>
- [26] Fang, Z., Fang, S. and Liu, F. (2022) Experimental and Numerical Study on the Shear Performance of Short Stud Shear Connectors in Steel-UHPC Composite Beams. *Buildings*, **12**, Article 418. <https://doi.org/10.3390/buildings12040418>
- [27] Wei, C., Zhang, Q., Zhou, Y., Cheng, Z., Li, M. and Cui, C. (2022) Static and Fatigue Behaviors of Short Stud Connectors Embedded in Ultra-High Performance Concrete. *Engineering Structures*, **273**, Article 114888. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114888>
- [28] 郑修军, 刁琥, 张理民, 等. 考虑混凝土收缩和徐变的钢混组合梁挠度分析[J]. 山西建筑, 2025, 51(3): 119-124.
- [29] 秦寰宇, 高泽刚, 李波, 等. 混凝土桥梁收缩徐变研究综述[J]. 2025, 45(1): 103-111.
- [30] Shi, Z., Su, Q., Kavoura, F. and Veljkovic, M. (2022) Behavior of Short-Headed Stud Connectors in Orthotropic Steel-UHPC Composite Bridge Deck under Fatigue Loading. *International Journal of Fatigue*, **160**, Article 106845. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106845>
- [31] An, R., Wang, Y., Zhuang, M., Yang, Z., Tian, C., Qiu, K., *et al.* (2024) Study of Fatigue Performance of Ultra-Short Stud Connectors in Ultra-High Performance Concrete. *Buildings*, **14**, Article 1179. <https://doi.org/10.3390/buildings14041179>
- [32] Lu, K., Du, L., Xu, Q., Yao, Y. and Wang, J. (2023) Fatigue Performance of Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Beam with Initial Damage. *Engineering Structures*, **276**, Article 115381. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115381>
- [33] Fang, Z., Wu, J., Xu, X., Ma, Y., Fang, S., Zhao, G., *et al.* (2024) Grouped Rubber-Sleeved Studs-UHPC Pocket Connections in Prefabricated Steel-UHPC Composite Beams: Shear Performance under Monotonic and Cyclic Loadings. *Engineering Structures*, **305**, Article 117781. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117781>
- [34] Jiang, H., Wang, H., Deng, X., Li, Y., Zhou, H., Wu, C., *et al.* (2024) Shear Performance of Headless Studs in Ultra-High Performance Concrete Bridge Deck. *Frontiers in Materials*, **11**, Article ID: 1379386. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1379386>
- [35] Du, W., Hu, Z. and Zhou, Z. (2024) Analytical Study of Stud Shear Connector Behavior in Steel-UHPC Composite Structures. *Buildings*, **14**, Article 3807. <https://doi.org/10.3390/buildings14123807>
- [36] Lin, Y., Cao, M., Mao, X., Feng, M. and Sun, M. (2025) Push-Out Tests and Theoretical Models of Steel-UHPC Composite Members Considering Interfacial Bonding Strength. *Construction and Building Materials*, **472**, Article 140856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140856>
- [37] Zhu, Y., Taffese, W.Z. and Chen, G. (2025) Data-Driven Shear Capacity Prediction of Studs Embedded in UHPC for Steel-UHPC Composite Structures. *Journal of Structural Engineering*, **151**, Article 04025119. <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-13818>
- [38] 侯帆. 钢混组合梁桥横向分布及抗弯承载力研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [39] 王建省, 张建猛, 贾玉梦. 车辆荷载作用下钢混组合梁的疲劳性能(英文) [J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 51-57.
- [40] Wu, F.W., Feng, Y.P., Dai, J., Wang, G.Q. and Zhang, J.F. (2022) Study on Mechanical Properties of Stud Shear Connectors in Steel-UHPC Composite Structures. *Engineering Mechanics*, **39**, 222-234.
- [41] Ding, J., Zhu, J. and Shi, T. (2023) Performance of Grouped Stud Connectors in Precast Steel-UHPC Composite Bridges under Combined Shear and Tension Loads. *Engineering Structures*, **277**, Article 115470. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115470>