

DOI: 10.7672/sgjs2026080126

负弯矩作用下钢-UHPC组合桥面板力学性能试验研究*

梁 鹏¹, 何惟煌², 黄庭华¹, 陈善行², 陈 浩²

(1. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029;

2. 广东盛翔交通工程检测有限公司, 广东 广州 511400)

[摘要] 为明确钢纤维类型、普通钢筋配筋率、栓钉布置形式等参数对负弯矩作用下钢-UHPC组合桥面板工作性能的影响, 室内制作5个组合板大比例尺试验模型并完成静力弯曲试验, 分析了钢纤维类型、普通钢筋配筋率、栓钉布置形式对组合板试件工作性能的影响规律。试验结果表明: 增加普通钢筋配筋率、调整(增加)栓钉布置、采用端钩钢纤维可提升组合板的极限承载力($\leq 11\%$), 使整个桥面板受力更均衡, 裂缝分布更均匀且无明显主裂缝, 但会导致开裂荷载明显降低、更早出现裂缝; 此外, 上述措施还能显著提升钢-UHPC组合桥面板的整体性能及结构刚度, 可使底部钢板更均衡地参与受力, 避免上部混凝土迅速开裂后产生钢板局部受力集中、屈曲破坏。

[关键词] 桥梁; 组合桥面板; 钢纤维混凝土; 负弯矩; 试验

[中图分类号] U443.31

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0126-06

Experimental Study on Mechanical Properties of Steel-UHPC Composite Bridge Deck Slab Under Negative Bending Moment

LIANG Peng¹, HE Weihuang², HUANG Tinghua¹, CHEN Shanxing², CHEN Hao²

(1. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530029, China;

2. Guangdong Shengxiang Traffic Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China)

Abstract: To clarify the influence of the parameters such as steel fiber type, ordinary reinforcement ratio, and stud arrangement on the working performance of steel-UHPC composite bridge deck slab under negative bending moment, five large-scale test models of composite slabs were made indoors and static bending tests were completed. The influence of steel fiber type, ordinary steel reinforcement ratio, stud arrangement on the working performance of composite slab specimens was analyzed. The experimental results show that increasing the reinforcement ratio of ordinary steel bars, adjusting (adding) the arrangement of studs, and using end hook steel fibers can improve the ultimate bearing capacity of composite slabs (not exceeding 11%), making the entire bridge deck slab more evenly stressed, with more uniform crack distribution and no obvious main cracks, but it will lead to significant reduction in cracking load and earlier occurrence of cracks; In addition, the above measures can significantly improve the overall performance and structural stiffness of the steel-UHPC composite bridge deck slab, enabling the bottom steel plate to participate in stress more evenly and avoiding local stress concentration and buckling failure of the steel plate caused by rapid cracking of the upper concrete.

Keywords: bridges; composite bridge deck slab; steel fiber reinforced concrete; negative bending moment; testing

0 引言

钢-UHPC组合桥面板通过剪力连接件将钢梁与UHPC桥面板结合在一起充分发挥了2种材料的性能优势, 具备施工方便、刚度大、自重小、经济性好、跨越能力强等优点, 因此在大跨度桥梁项目中

* 广西重点研发计划(桂科 AB22080042)

[作者简介] 梁 鹏, 高级工程师, E-mail: 370118969@qq.com

[收稿日期] 2025-06-23

得到大量应用^[1-2]。但该类桥面板组合类型在被广泛应用的同时,因负弯矩区组合桥面板混凝土受拉、钢梁受压导致桥面开裂的情况时有发生,影响了桥面结构的耐久性能及整体刚度^[3-5]。因此,开展负弯矩作用下钢-UHPC 组合桥面板力学性能研究、探索有针对性的桥面结构开裂解决方案,对该类桥面结构设计具有重要参考意义(见图1)。

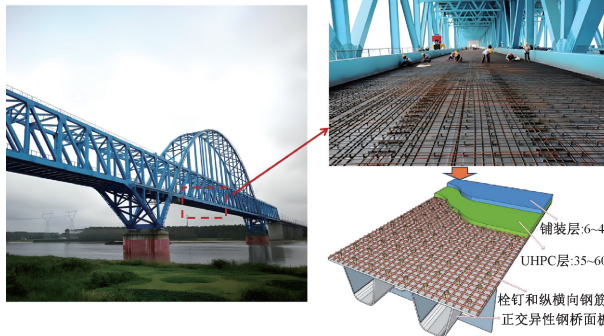


图1 钢-UHPC 组合桥面板

Fig. 1 Steel-UHPC composite bridge deck slab

围绕钢-UHPC 组合桥面板负弯矩区开裂问题,国内外学者开展了大量研究。聂建国等^[6]通过室内试验研究得出连接件间距对钢-混凝土组合桥面板开裂影响显著的结论,基于试验结果提出了组合梁负弯矩区混凝土裂缝宽度的理论计算方法。张彦玲^[7]考虑预应力、非预应力、普通钢筋布置等因素,室内制作6根钢-混凝土组合梁并开展了负弯矩区的开裂性能试验研究,分析了钢筋数量、间距、预应力等因素对桥面板开裂的影响规律。戴昌源等^[8]室内制作了正交异性钢桥面板并进行了加载试验研究,分析了钢筋应力、栓钉连接形式、普通钢筋直径、混凝土强度对负弯矩区桥面板裂缝扩展速率的影响。通过对桥面板混凝土进行改性,如掺入一定量纤维(钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维)可提高混凝土抗拉强度、减少混凝土凝结时干缩裂缝、约束结构裂缝发展,显著改善其开裂性能,有助于解决负弯矩区桥面板开裂问题。何余良等^[9]设计了4个桥面板试件(2个钢-纤维混凝土组合板试件,2个钢-普通混凝土试件),分别进行单调加载试验和循环加载试验,在试验结果的基础上结合有限元软件进行参数分析,研究了不同工况下钢-纤维混凝土组合板的静力性能。已有研究表明,钢-高强钢纤维混凝土组合板相比于普通钢-UHPC 组合板,不仅开裂荷载、承载力和刚度得到提高,而且延缓了裂缝开展速度、减小了裂缝宽度^[10-14]。但关于钢筋的配筋率、栓钉布置方式和间距对其钢-UHPC 组合桥面板横向受弯性能的影响研究还十分

缺乏^[15-19]。

有鉴于此,本文进行负弯矩作用下钢-UHPC 组合桥面板力学性能试验研究,室内制作5个组合板大比例尺试验模型并完成静力弯曲试验,通过破坏形态、开裂强度、极限承载力、挠度发展曲线等力学指标比对分析钢纤维类型、普通钢筋配筋率、栓钉布置形式等对组合板试件工作性能的影响规律,所得结果可为钢-UHPC 组合桥面板的设计与工程应用提供参考。

1 试验模型设计与制作

1.1 试验模型设计

室内制作5个钢-UHPC 组合桥面板大比例尺试验模型,其构造、配筋如图2,3所示。组合桥面板由12mm厚钢底板和50mm厚UHPC构成,两者间通过短栓钉连接。桥面板宽680mm、长1400mm,栓钉尺寸为 $\phi 16 \times 40$,栓钉及普通钢筋布置考虑2种类型:①纵、横向间距均为300mm(3行5列),面层内钢筋网纵、横向间距均为100mm;②纵向间距均为300mm,横向间距均为150mm(5行9列),面层内钢筋网纵向间距均为38mm,横向间距均为40mm。考虑钢纤维类型及掺量、混凝土浇筑方式、面层钢筋配筋率(1.96%和2.82%)等参数变化,共制作桥面板5片,编号及参数设置如表1所示。试件配筋详情如图3所示,钢板和栓钉均采用Q345钢,均采用HRB400级钢筋。

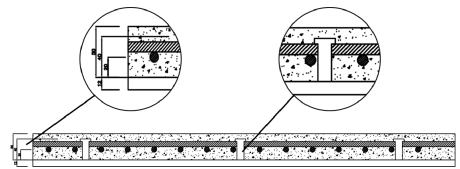


图2 钢-UHPC 组合桥面板构造

Fig. 2 Structure of steel-UHPC composite bridge deck slab

1.2 UHPC 层配合比

试验中所采用的UHPC材料的配合比参考实际工程配合比确定,详细数据如表2所示。所掺入的钢纤维是平直型钢纤维,钢纤维直径为0.2mm,长度为13mm,在UHPC中的体积掺量为2.3%。试件制作过程中,同时浇筑UHPC材性试验试块,保证其与试件桥面板是在相同环境条件下进行养护。试块养护完成后,参照T/CBMBF 37—2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》^[20]进行抗压强度、抗拉强度及弹性模量测定,实测数据平均值分别为176.1MPa,10.7MPa,47.5GPa,相应的变异系数分别为6.6%,2.4%,1.4%。

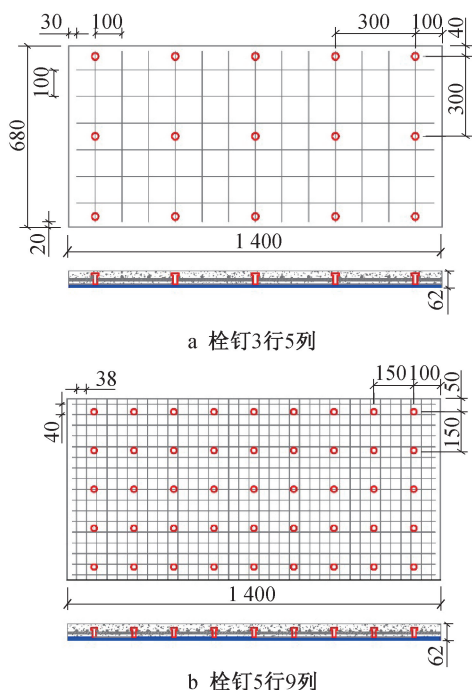


图 3 钢-UHPC 组合桥面板配筋

Fig. 3 Reinforcement of steel-UHPC composite bridge deck slab

表 1 试件编号及参数

Table 1 Number and parameters of specimens

序号	试件编号	栓钉布置	配筋率/%	钢纤维类型	浇筑方式
1	S0-F0-P0-1	5 列 3 行	1.96	直线型	地泵
2	S0-F1-P0-2	5 列 3 行	1.96	直线+端钩型	地泵
3	S0-F1-P0-3	5 列 3 行	1.96	直线+端钩型	地泵
4	S1-F0-P0-4	9 列 5 行	1.96	直线型	地泵
5	S1-F0-P0-5	9 列 5 行	2.82	直线型	地泵

注:编号中 S0 和 S1 分别代表栓钉类型为 $\phi 16 \times 40$ 和 $\phi 13 \times 35$, F0, F1 分别表示钢纤维类型为直线和直线+端钩, P0 表示混凝土浇筑方式为地泵

表 2 UHPC 材料配合比设计

Table 2 Mix design of UHPC ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

项目	材料						
	水泥	硅粉	粉煤灰	石英砂	水	高效减水剂	钢纤维
用量	620	180	200	1 120	160	38	180

1.3 UHPC 层配合比

参照工程实际施工顺序完成钢-UHPC 组合桥面板试件施工。在工厂完成钢底板、栓钉焊接,形成钢部件;绑扎钢筋网和制作模板,接着浇筑 UHPC 并覆膜静停约 48h;待 UHPC 终凝后,开始为期 48h 的 90℃ 高温蒸汽养护。试件养护完成静置 7d 后运至实验室进行试验加载。

2 试验加载与测试方案

2.1 试验加载方案

采用负弯矩 4 点加载方案,加载方案及测点布

置如图 4 所示。图 4 中试件支撑边界条件、加载位置等主要参考正交异性钢桥面板 U 肋实际尺寸并按负弯矩加载模式等比例确定。边界条件采取 4 边悬臂自由,忽略桥面板相邻区域对试验区域的影响。构件加载分为 2 步:①采用荷载控制模式进行加载,2kN/级直至试件进入非线性阶段;②进入非线性阶段后调整为位移控制加载模式,0.5mm/级直至试件完全破坏。每级加载持荷 5min 后,通过预先布置的百分表、应变片、裂缝测宽仪收集跨中挠度、界面相对滑移及应变、裂缝(包括位置、裂宽、路径)等数据。

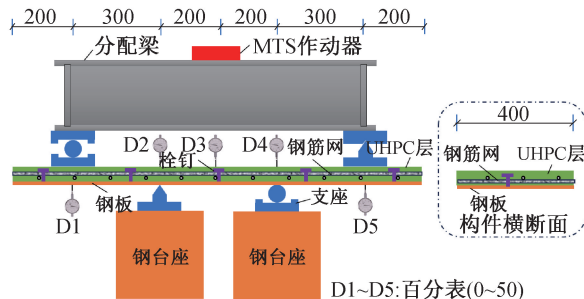


图 4 加载装置及位移测点布置

Fig. 4 Loading device and displacement measuring points layout

2.2 测试方案

位移测点布置如图 4 所示,在跨中沿横向布置 3 个高精度位移计(编号 D2~D4)测量桥面板跨中挠度,支座上方各布置 1 个高精度位移计(编号 D1, D5)收集桥面板支座处位移;应变测点布置在纯弯段,分为混凝土水平表面和侧面 2 种,如图 5 所示,其中大组合板(宽 680mm)混凝土上表面、钢板下表面各布置 15 个应变片,小组合板(宽 400mm)混凝土上表面、钢板下表面各布置 12 个应变片,混凝土板、钢板侧面中心线处各布置 3 个应变片。桥面板的裂缝宽度通过智能裂缝观测仪测量,每级荷载下人工寻找较宽裂纹,以确保不遗漏各级荷载的最大裂缝宽度。裂缝观测仪精度为 0.01mm。

3 试验结果及分析

3.1 破坏过程及主要荷载指标

按预定试验方案对 5 个钢-UHPC 组合桥面板试件进行试验加载,通过预先布置的测试设备记录破坏过程并分析不同参数对组合桥面板各向力学性能的影响规律。负弯矩作用下各桥面板试件的荷载-挠度曲线如图 6 所示,由结果可知,不同工况参数下组合桥面板破坏全过程呈现较一致规律,可分为 4 个阶段,即线弹性阶段、起裂发展阶段、钢筋屈服阶段及破坏阶段。其中,线弹性与起裂发展阶段以出现第 1 条可视裂缝为分界点,起裂发展与钢

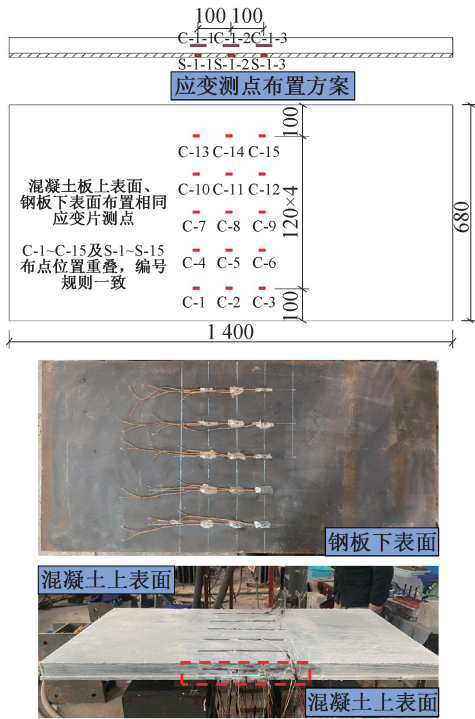


图5 钢-UHPC 组合桥面板试件应变测试布置方案

Fig. 5 Layout scheme for strain testing of steel-UHPC composite bridge deck slab specimens

筋屈服阶段以钢筋应变值达到 $2000\mu\varepsilon$ 为临界点,破坏阶段从主裂缝所在断面表层钢纤维桥连作用完全丧失、荷载达到极限值算起,直至结构完全破坏(即上缘钢筋拉断或下缘钢板压溃)。7块组合板的荷载-最大裂缝宽度曲线如图7所示,由图可知不同参数组合板的最大裂缝发展趋势大体一致。裂缝萌芽增至最大裂缝宽度 0.3mm 前,最大裂缝宽度发展缓慢,且与荷载呈线性变化关系;当裂缝宽度 $> 0.3\text{mm}$ 后呈非线性增长,明显加快。为了对不同工况参数的组合板试件进行量化评价,从图6,7中提取、统计了关键荷载参数并列于表3。

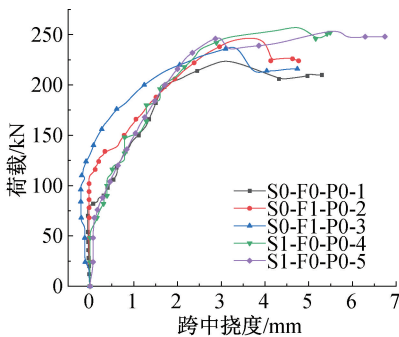


图6 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 6 Load-midspan deflection curves

3.2 配筋率及栓钉布置对组合板力学性能的影响
选择3个组合板试件(S0-F0-P0-1, S1-F0-P0-4,

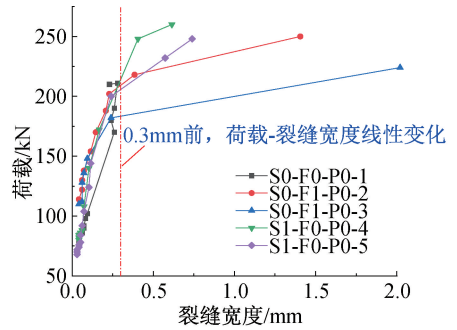


图7 荷载-最大裂缝宽度曲线

Fig. 7 Load-the maximum crack width curves

表3 不同工况下组合板关键荷载参数

Table 3 Key load parameters of the composite slab under different working conditions

试件	kN		
	开裂荷载 F_{cr}	荷载 $F_{\text{裂缝}0.05\text{mm}}$	极限荷载 F_{mu}
S0-F0-P0-1	78	86	234
S0-F1-P0-2	114	120	248
S0-F1-P0-3	110	112	240
S1-F0-P0-4	54	66	260
S1-F0-P0-5	68	78	246

S1-F0-P0-5)进行横向对比,分析配筋率及栓钉布置对组合板试件力学性能的影响规律。对比过程中,重点关注不同组合板荷载-位移曲线、荷载-首条裂缝宽度曲线及最终裂缝形态对比,如图8,9所示。3块组合板的荷载-跨中挠度曲线如图8a所示,由图可知增加配筋率、调整(增加)栓钉布置可提升组合板的极限承载力($234\text{kN} \rightarrow 260\text{kN}$),但其开裂荷载明显降低($76\text{kN} \rightarrow 54\text{kN}$),表明增加配筋率、栓钉会导致组合板更早出现裂缝;不同组合板首条裂缝发展情况及最终裂缝形态如图8b、图9所示,可知当配筋率较低、栓钉间距较大时,组合板最终破坏会出现明显的主裂缝、小裂缝发展受限,适当增加配筋率、调整(增加)栓钉布置会使整个组合板受力更均衡,裂缝分布更均匀且无明显主裂缝。此外,试验完成后凿开组合板件UHPC层观察栓钉破坏情况发现,栓钉完好,未发生弯曲、破损、断裂情况。

3.3 纤维类型对组合板力学性能的影响

选择3个组合板试件(S0-F0-P0-1, S1-F1-P0-2, S1-F1-P0-3)进行横向对比,分析纤维类型对组合板力学性能的影响规律。其中, S0-F0-P0-1采用直线型钢纤维, S1-F1-P0-2, S1-F1-P0-3采用2种纤维组合(直线+端钩型),掺量为2.3%,其他参数完全一致。采用图4所示方案进行加载试验,并记录加载响应数据。不同组合板荷载-跨中挠度曲线、首条裂缝宽度发展曲线如图10所示,由图可知端钩钢纤维

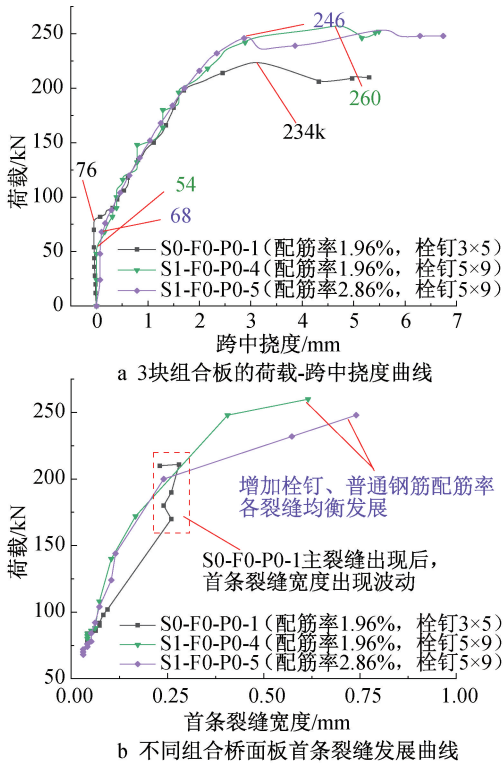


图8 配筋率及栓钉布置对组合板性能的影响曲线

Fig. 8 The influence curves of reinforcement ratio and studs arrangement on the performance of composite slabs

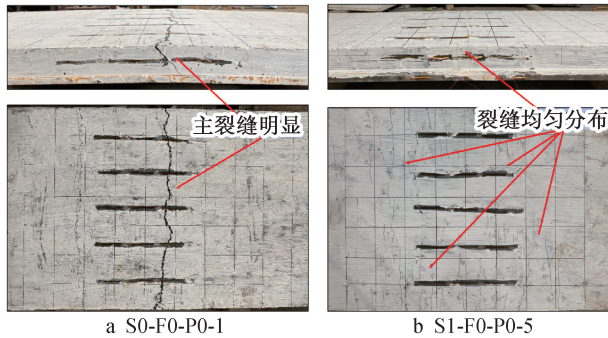


图9 组合板的最终开裂形态(仅给出代表性的2个)

Fig. 9 Final cracking pattern of composite slabs (only two representative ones are given)

可明显提升组合板的开裂强度(78kN→114kN),并改变裂缝宽度的发展趋势,使得纯弯段裂缝分布更均匀,但其对组合板极限承载力的提升较有限(234kN→248kN)。

不同组合板加载过程中混凝土及钢板应变数据对比如图11所示(仅展示C-8,S-8 2个测点),可知添加端钩钢纤维后混凝土应变与施加的荷载呈现更明显的线性发展趋势,这表明纯弯段裂缝分布、发展较均匀,与图10b所示首条裂缝宽度的发展趋势结果一致。图11b所示钢板应变数据进一步说明,随着端钩钢纤维加入,混凝土开裂得到一定程

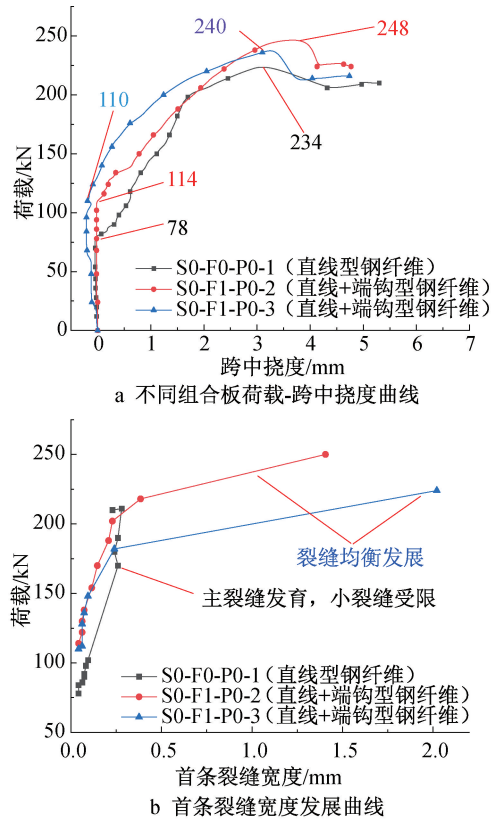


图10 不同钢纤维类型对组合板性能的影响曲线
Fig. 10 The influence curves of different steel fiber types on the performance of composite slabs

度的遏制,尤其是图9a所示主裂缝,提升了组合板的整体性能及刚度,使得底部钢板能更均衡地参与受力。

4 结语

本文开展负弯矩作用下钢-UPHC组合桥面板力学性能试验研究,室内制作5个组合板大比例尺试验模型并完成静力弯曲试验,分析了钢纤维类型、普通钢筋配筋率、栓钉布置形式对组合板试件工作性能的影响规律,得到如下基本结论。

1)增加普通钢筋配筋率、调整(增加)栓钉布置可提升组合板的极限承载力,但会导致开裂荷载明显降低,这也意味着增加配筋率、调整(增加)栓钉布置会导致组合板更早出现裂缝;对比不同组合板裂缝的发展情况及最终裂缝形态可知,适当增加配筋率、调整(增加)栓钉布置会使整块组合板受力更均衡,裂缝分布更均匀且无明显主裂缝。

2)加入端钩钢纤维可明显提升组合板的开裂强度,使得纯弯段裂缝分布更均匀,但其对组合板极限承载力提升较有限。此外,随着端钩钢纤维加入,混凝土应变与施加的荷载呈更明显的线性发展趋势,这表明纯弯段裂缝分布、发展较均匀。

3)在钢-UPHC组合桥面板设计过程中,减小普

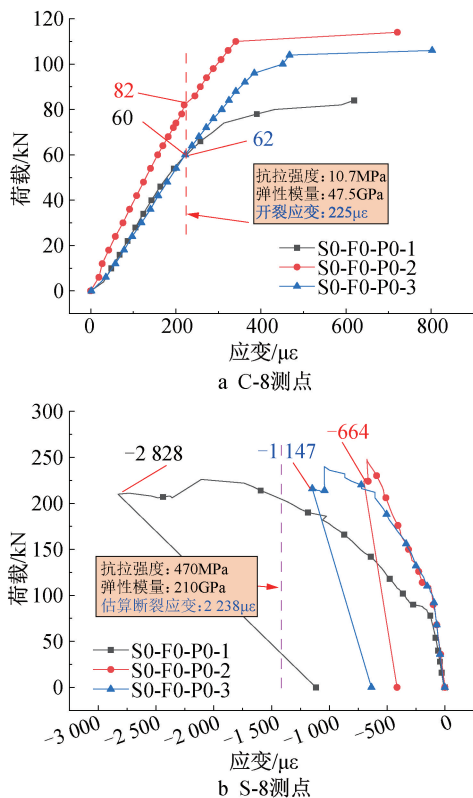


图 11 混凝土及钢板表面应变测试结果

Fig. 11 Surface strain test results of concrete and steel plate

通钢筋直径、适当增加配筋率、增加栓钉布置、掺入端钩纤维等都是有效提升组合板整体性能及刚度的有效方法,可使得混凝土裂缝分布更均匀、底部钢板能更均衡地参与受力,但是这种方法对极限承载力提升较有限($\leq 11\%$)。

参考文献:

- [1] 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 lightweight composite bridge deck[J]. China civil engineering journal,2024,57(6):152-168.
- [2] 谭星宇,方志,李修坤,等. 大跨斜拉桥桥段预制钢-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.
- [3] SHI Z C, SU Q T, KAVOURA F, et al. Fatigue behavior evaluation of full-scale OSD-UHPC composite bridge deck system[J]. Engineering structures,2023,275:115179.
- [4] CHEN S M, HUANG Y, GU P, et al. Experimental study on fatigue performance of UHPC-orthotropic steel composite deck[J]. Thin-walled structures,2019,142:1-18.
- [5] ZHANG Y, WANG H, QIN Y Y, et al. Experimental and analytical studies on the flexural behavior of steel plate-UHPC

composite strengthened RC beams [J]. Engineering structures, 2023,283:115834.

- [6] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报,2012,45(6):110-122.
NIE J G, TAO M X, WU L L, et al. Advances of research on steel-concrete composite bridges [J]. China civil engineering journal, 2012,45(6):110-122.
- [7] 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.
ZHANG Y L. Theoretical analysis and experimental research on behavior and crack control of negative moment zone in steel-concrete composite beams [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2009.
- [8] 戴昌源,苏庆田. 钢-混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(6):806-813.
DAI C Y, SU Q T. Crack width calculation of steel-concrete composite bridge deck in negative moment region [J]. Journal of Tongji University (natural science),2017,45(6):806-813.
- [9] 何余良,刘稼萌,曹鑫雨,等. 混杂纤维混凝土组合梁桥面板力学性能[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(2):80-88.
HE Y L, LIU J M, CAO X Y, et al. Mechanical behavior of HFRC bridge deck for composite bridge [J]. Journal of Chang'an University (natural science edition),2023,43(2):80-88.
- [10] QIU M H, CAO J H, SHAO Z X, et al. Flexural cracking behavior of steel-NC-UHPC composite beam under negative bending moment [J]. Engineering structures,2025,322:119071.
- [11] 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.
- [12] 邵旭东,张哲,刘梦麟,等. 正交异性钢-RPC 组合桥面板弯拉强度的实验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2012,39(10):7-13.
SHAO X D, ZHANG Z, LIU M L, et al. Research on bending tensile strength for composite bridge deck system composed of orthotropic steel deck and thin RPC topping [J]. Journal of Hunan University (natural sciences),2012,39(10):7-13.
- [13] 丁贝. 基于栓钉连接的 ECC 钢桥面铺装结构界面特性分析[D]. 南京:东南大学,2015.
DING B. Research of interface characteristics of early-strength ECC steel deck pavement structure based on stud connection [D]. Nanjing: Southeast University,2015.
- [14] 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,2019,162:105708.
- [15] 杨大海,汪志甜,王倩,等. 钢-UHPC-NC 螺栓连接组合梁负弯矩区抗弯试验研究[J]. 桥梁建设,2025,55(2):34-42.

- span steel trussed arch bridge exposed to fire [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 77-84.
- [5] PERIS-SAYOL G, PAYA-ZAFORTEZA I, ALOS-MOYA J, et al. Analysis of the influence of geometric, modeling and environmental parameters on the fire response of steel bridges subjected to realistic fire scenarios [J]. Computers & structures, 2015, 158: 333-345.
- [6] PAYA-ZAFORTEZA I, GARLOCK M E M. A numerical investigation on the fire response of a steel girder bridge [J]. Journal of constructional steel research, 2012, 75: 93-103.
- [7] 李雪红, 杨星堃, 徐秀丽, 等. 大跨桥梁油罐车燃烧火灾模型计算方法研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 147-157.
- LI X H, YANG X C, XU X L, et al. Research on calculation method for tank truck fire model on large-span bridge [J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(6): 147-157.
- [8] 张晓栋, 马如进, 陈艾荣. 车致火灾作用下预应力混凝土 T 梁易损性计算方法 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 11-19.
- ZHANG X D, MA R J, CHEN A R. Vulnerability calculation method of prestressed concrete T-shaped girder exposed to vehicles-related fires [J]. Journal of Chang'an University (natural science edition), 2018, 38(6): 11-19.
- [9] 刘旭政, 李任福, 余晨曦, 等. 火灾后混凝土桥梁结构安全初步评估方法 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(1): 62-73.
- LIU X Z, LI R F, YU C X, et al. Preliminary safety assessment method for concrete bridge structure after fire exposure [J]. Journal of Guangxi University (natural science edition), 2022, 47(1): 62-73.
- [10] 钟元, 王磊. 混凝土桥梁火灾后损伤检测与技术状况评估 [J]. 公路, 2023, 68(3): 228-232.
- ZHONG Y, WANG L. Damage detection and technical evaluation of concrete bridge after fire [J]. Highway, 2023, 68(3): 228-232.
- [11] 田宇, 卢文良, 方继伟, 等. 某混凝土公路桥火灾后损伤评定 [J]. 中外公路, 2018, 38(3): 119-124.
- TIAN Y, LU W L, FANG J W, et al. The damage assessment of a concrete highway bridge after fire [J]. Journal of China & foreign highway, 2018, 38(3): 119-124.
- [12] 唐鹏, 宫赛. 火灾发生后小型桥梁的快速检测评估与加固研究 [J]. 公路, 2019, 64(10): 93-98.
- TANG P, GONG S. Research on rapid detection, evaluation and strengthening of small bridges after fire [J]. Highway, 2019, 64(10): 93-98.
- [13] 蔡正东, 叶敏. 某钢结构桥梁火灾后检测评估和安全鉴定 [J]. 桥梁建设, 2019, 49(S1): 62-67.
- CAI Z D, YE M. Inspection, evaluation and safety identification for a steel bridge experienced a fire disaster [J]. Bridge construction, 2019, 49(S1): 62-67.
- [14] 毛德均, 吴维彬, 郭俊, 等. 长联多跨 PC 连续宽幅箱梁桥荷载试验研究 [J]. 中外公路, 2023, 43(6): 165-170.
- MAO D J, WU W B, GUO J, et al. Study on load test of long link multi-span PC continuous wide box-girder bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2023, 43(6): 165-170.
- [15] 曾德礼. 大跨度桥梁承载能力鉴定研究 [J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 43-47.
- ZENG D L. Study on identification of load bearing capacity of long span bridge [J]. Bridge construction, 2018, 48(5): 43-47.
- [16] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21-01—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- Chang'an University. Regulation of load test for highway bridge: JTG/T J21-01—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [17] 邢兵, 强士中, 唐堂. 关于桥梁承载能力评定若干问题的思考 [J]. 中外公路, 2015, 35(6): 152-155.
- XING B, QIANG S Z, TANG T. Reflections on some problems of bridge bearing capacity evaluation [J]. Journal of China & foreign highway, 2015, 35(6): 152-155.

(上接第 131 页)

- YANG D H, WANG Z T, WANG Q, et al. Experimental study on flexural behaviors of bolted steel-UHPC-NC composite girders in hogging moment zone [J]. Bridge construction, 2025, 55(2): 34-42.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- LIU X H, ZHOU C, ZHANG J R, et al. Experiment on negative bending behavior of steel-UHPC composite beams [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33(5): 110-121.
- [19] 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.
- [20] 清华大学, 江西贝融循环材料股份有限公司, 南京倍立达新材料系统工程股份有限公司. 超高性能混凝土基本性能与试验方法: T/CBMF 37—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Tsinghua University, Jiangxi Beirong Recycling Materials Co., Ltd., Nanjing Beilida New Materials System Engineering Co., Ltd. Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete: T/CBMF 37—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.