

DOI:10.11784/tdxbz202406001

钢-UHPC 组合桥面纤维网格湿接缝静力弯曲抗裂性能研究

朱劲松^{1,2}, 李佳凝¹, 丁婧楠³, 孙雅丹¹

- (1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;
3. 山东建筑大学土木工程学院, 济南 250101)

摘要: 针对钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面在实际工程中 UHPC 接缝界面因基体及钢纤维不连续导致局部抗拉性能下降这一问题, 提出新型纤维网格湿接缝构造。为探究该新型构造的力学性能和抗裂性能的优越性, 将其与规范中的异形加强钢板湿接缝、矩形湿接缝、平直湿接缝进行对比分析。对上述 4 种湿接缝构造的组合桥面进行负弯矩静力弯曲抗裂性能试验研究和数值模拟, 分析试件破坏过程、裂缝开展过程、荷载-挠度关系及应变分布。结果表明: 湿接缝局部构造的改变不足以影响试件整体弯曲刚度及承载力; 纤维网格湿接缝、异形加强钢板湿接缝、矩形湿接缝构造的初裂荷载相较于平直湿接缝分别提高了 117.0%、57.0%和 3.7%, 纤维网格湿接缝抗裂性能最佳; 数值分析得到 4 种湿接缝最大裂缝宽度分别为 0.236 mm、0.275 mm、0.243 mm 和 0.510 mm; 纤维网格湿接缝构造可有效延缓裂缝宽度的发展。

关键词: 钢-UHPC 组合桥面; 湿接缝; 静力负弯矩试验; 纤维网格; 抗裂性能; 有限元模拟

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)07-0751-10

Study on Static Bending Crack-Resistance of Fiber Grid Wet Joints of Steel-UHPC Composite Bridge Deck

Zhu Jinsong^{1,2}, Li Jianing¹, Ding Jingnan³, Sun Yadan¹

- (1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Aimed at the problem that the local tensile performance of ultra-high performance concrete (UHPC) joint interface will decrease due to the discontinuity of matrix and steel fiber in the practical engineering of steel-UHPC composite bridge deck, a novel fiber grid wet joint structure was proposed. In order to explore the superiority of the mechanical properties and crack-resistance of this structure, it was compared with a special-shaped reinforced steel plate wet joint, a rectangular wet joint and a flat wet joint in the specification. A negative bending moment static bending crack-resistance test and numerical simulations were carried out on the composite bridge deck of the above four wet joint structures, and the failure process, crack development process, load-deflection relationship and strain distribution of the specimens were analyzed. Results showed that the change in the local structure of the wet joint was not enough to affect the overall bending stiffness or the bearing capacity of the specimens. The initial crack loads of the fiber grid wet joint, special-shaped reinforced steel plate wet joint and rectangular wet joint were 117.0%, 57.0% and 3.7% higher than that of the flat wet joint, respectively, and the crack-resistance of the fiber grid wet joint was the best. The numerical analysis indicated that the maximum crack widths of these four wet joints were 0.236 mm,

收稿日期: 2024-06-01; 修回日期: 2024-12-17.

作者简介: 朱劲松(1975—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 朱劲松, jszhu@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078333).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52078333).

0.275 mm, 0.243 mm and 0.510 mm, respectively, and the fiber grid wet joint structure can effectively delay the development of crack width.

Keywords: steel-ultra-high performance concrete (UHPC) composite bridge deck; wet joint; static negative bending moment test; fiber grid; crack-resistance; finite element simulation

为解决正交异性钢桥面体系疲劳损伤的问题,邵旭东等^[1]提出在传统正交异性钢桥面上铺设配筋超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 层,形成新型钢-UHPC 组合桥面结构体系.在该体系中,UHPC 层与钢桥面板通过剪力钉连接实现二者协同受力,提高了桥面刚度,降低了钢桥面板的应力水平且不显著增加自重.基于以上优势,钢-UHPC 组合桥面结构在旧桥加固及大跨度新桥设计建造中得到青睐.在 UHPC 层施工过程中无论采用何种工艺均不可避免接缝的存在,且 UHPC 基体及钢纤维不连续导致 UHPC 接缝界面抗拉性能和黏结性能下降,引发严重的耐久性及安全问题.

近年来,有诸多学者对钢-UHPC 组合桥面湿接缝构造及力学性能进行研究.邵旭东等^[2]针对 UHPC 桥面接缝提出了企口接缝、加密钢筋接缝、异形钢板强化接缝、UHPC 层破损修补接缝并进行试验,这 4 种强化技术均表现出较好的受拉性能. Pan 等^[3]设计了倾斜面形、矩形、锯齿形湿接缝构造,结果表明锯齿形、矩形和加强钢板湿接缝的抗裂性能明显优于常规湿接缝. Zhao 等^[4]针对燕尾形湿接缝进行了足尺模型负弯矩受力性能的试验研究和有限元模型的参数分析,结果表明燕尾形湿接缝具有良好的抗裂性能,接缝倾角对桥面板力学性能的影响很小,但配筋率的影响较为显著. Zhu 等^[5]研究了钢-UHPC 组合梁在负弯矩作用下的抗弯性能,并对不同接缝配置的组合梁进行了 3 点弯曲试验,研究发现 T 形接缝相比于矩形接缝具有更优异的抗裂性能但延性并未有明显提高.吴善友^[6]以钢-UHPC 组合桥面板为研究对象,针对 8 mm 平钢板 + 15 cm UHPC 层 + PBL 剪力键以及燕尾榫湿接缝结构形式开展了弯曲静力性能试验,依据正交试验设计理论对有限元模型进行了参数分析,得到了最优参数组合.史占崇等^[7]研究了钢-UHPC 组合桥面板分段浇筑矩形接缝的轴拉性能,考察了配筋率对矩形接缝区域抗裂性能的影响.已有的接缝形式虽然能够形成整体共同受力,但复杂的接缝界面构造形式不利于界面处理,施工复杂,用钢量较大,且没有从本质上解决 UHPC 接缝界面钢纤维不连续导致其抗拉能力下降的问题.

因此,本文提出钢-UHPC 组合桥面纤维网格湿接缝构造并探究其力学性能和抗裂性能,将其与规范

中的异形加强钢板湿接缝、矩形湿接缝、平直湿接缝进行对比分析.对采用上述 4 种构造的组合桥面进行负弯矩作用下的性能试验,分析试件破坏过程、裂缝开展过程、荷载-挠度关系及应变分布,并采用 ABAQUS 有限元软件建立模型模拟加载全过程,与试验结果对比分析.

1 钢-UHPC 组合桥面纤维网格湿接缝构造

本文所提出的纤维网格湿接缝构造是在钢-UHPC 组合桥面施工的过程中,将纤维网格埋置于 UHPC 层先后浇筑界面位置,如图 1 所示.

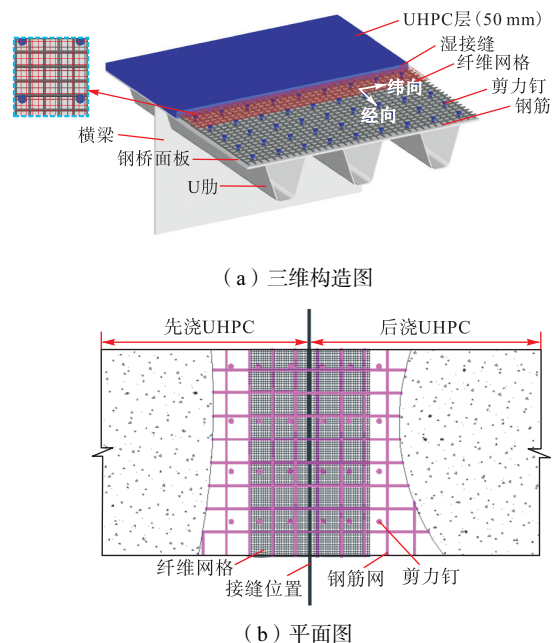


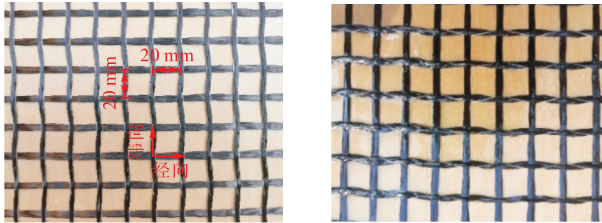
图 1 纤维网格湿接缝构造示意

Fig.1 Schematic of fiber grid wet joint

该构造采用的纤维网格是由碳纤维束沿经、纬方向编织加工而成,网格尺寸为 20 mm × 20 mm,沿纵桥向(经向)的布设长度为 480 mm,沿横桥向(纬向)的布设长度与桥面横桥向宽度一致,纤维网格示意如图 2(a)所示.在浇筑施工前需用环氧树脂胶对纤维网格进行预处理,如图 2(b)所示.

钢-UHPC 组合桥面纤维网格湿接缝施工过程如下:将纤维网格布设于先后浇筑接缝界面位置处,且位于钢筋网上方,同时确保纤维网格的中轴线与接缝界面位于相同铅垂面,目的是使纤维网格被先后浇筑

的 UHPC 层均匀包覆且受力均衡. 在钢桥面板上浇筑先浇 UHPC 层,使其覆盖纤维网格一半的表面积,并充分振捣至均匀密实,24 h 后在钢桥面板上浇筑后浇 UHPC 层.



(a) 未处理的碳纤维网格 (b) 表面涂刷环氧树脂

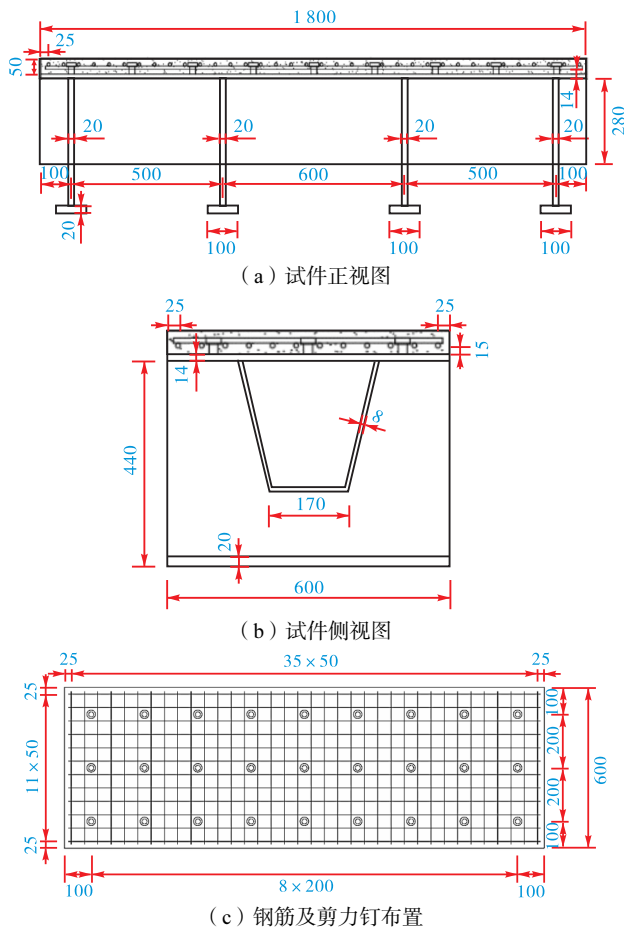
图2 碳纤维网格处理效果

Fig.2 Carbon fiber grid processing effect

2 钢-UHPC组合桥面湿接缝 4点弯曲加载试验方案

2.1 试件尺寸设计与制作

为探究新型湿接缝构造的力学性能和抗裂性能,根据某大桥正交异性钢桥面的结构尺寸,共设计4种湿接缝构造试件,试件整体构造及尺寸细节如图3所示.试件钢结构部分采用 Q370qE 钢材,沿纵桥向取



(a) 试件正视图

(b) 试件侧视图

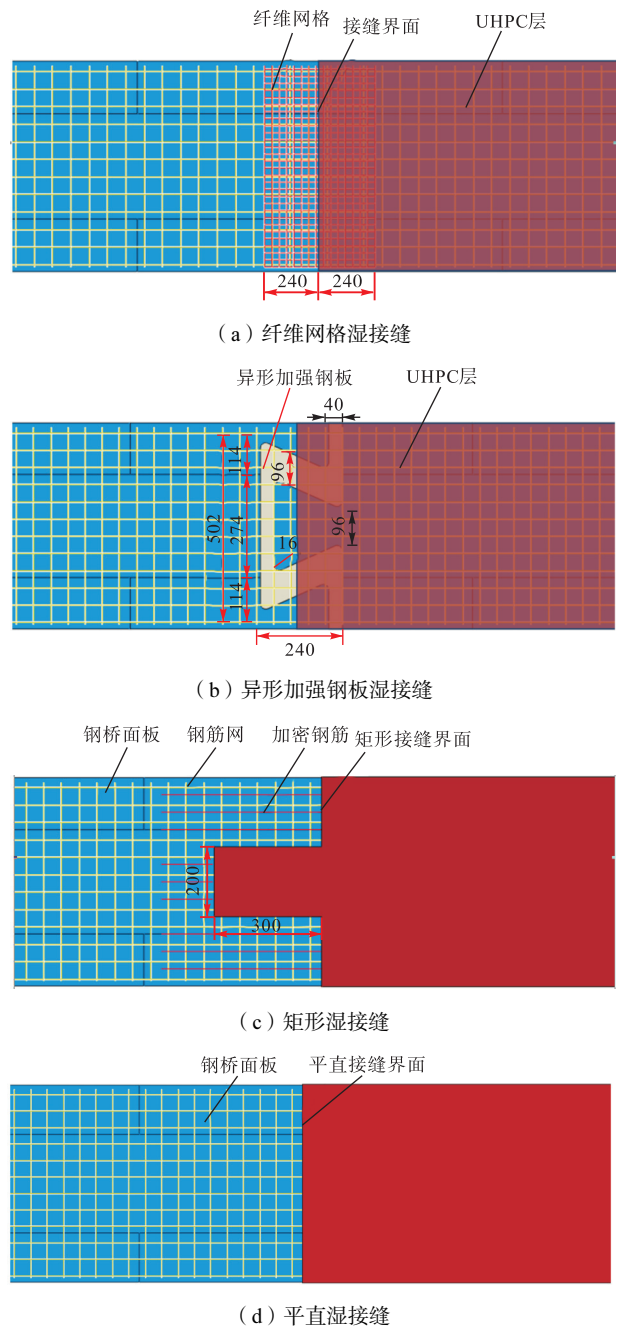
(c) 钢筋及剪力钉布置

图3 试件构造(单位:mm)

Fig.3 Specimen structure (unit: mm)

含1条U肋的条带,并焊接4条横向加劲肋.试件总长1800mm,宽度为600mm.U肋宽度为300mm,高度为280mm,厚度为8mm.钢桥面板厚度为14mm并焊接纵横向间距为200mm的剪力钉,剪力钉柱身直径为19mm,总高35mm.桥面层UHPC厚度为50mm,层内配置HRB400级带肋钢筋网,其中纵、横桥向钢筋直径均为10mm,间距为50mm,且横桥向钢筋位于上层.4个试件的湿接缝构造如图4所示,试件编号及构造细节见表1.

在浇筑前制作并安装桥面板侧模以及接缝处模板.首先对先浇筑段进行浇筑,先浇段UHPC层接缝



(a) 纤维网格湿接缝

(b) 异形加强钢板湿接缝

(c) 矩形湿接缝

(d) 平直湿接缝

图4 湿接缝局部构造示意(单位:mm)

Fig.4 Schematic of local structures of wet joints (unit: mm)

表 1 试件湿接缝细节

Tab.1 Details of wet joints of specimens

试件编号	接缝类型	接缝细节
J-1	纤维网格湿接缝	碳纤维网格(预处理), 网格尺寸为 20 mm × 20 mm
J-2	异形加强钢板湿接缝	厚度为 12 mm 的异形钢板焊接于钢桥面板
J-3	矩形湿接缝	矩形湿接缝界面, 配置加密钢筋
J-4	平直湿接缝	仅界面凿毛处理

24 h 后拆模并用钢丝刷对接缝界面凿毛处理, 凿毛结束后随即进行后浇段 UHPC 层浇筑. 浇筑完成后喷适量水雾并即时覆盖保湿养护膜, 保证在自然条件下养护 28 d.

2.2 材料性能

试件制作过程中, 同时浇筑了材性试件并于同等条件进行养护. 根据规范 GB/T 50081—2019^[8]测试 UHPC 力学性能, 3 个立方体试样 (100 mm × 100 mm × 100 mm) 用于测定 UHPC 的抗压强度; 3 个棱柱体试样 (150 mm × 150 mm × 300 mm) 用于测定

UHPC 的弹性模量; 3 个端部预埋钢筋的棱柱体试样 (100 mm × 100 mm × 400 mm) 用于测定 UHPC 的直拉强度. 实测 UHPC 立方体抗压强度为 122.4 MPa, 抗拉强度为 8.2 MPa, 弹性模量为 42 GPa. 根据规范 GB/T 3362—2017^[9] 进行碳纤维束拉伸试验, 其弹性模量为 206 GPa, 抗拉强度为 2 600.0 MPa; 根据规范 GB/T 13239—2006^[10] 进行钢材拉伸试验, Q370qE 弹性模量为 206 GPa, 屈服强度为 420.1 MPa, 极限抗拉强度为 607.1 MPa; 钢筋弹性模量为 206 GPa, 屈服强度为 500.3 MPa, 极限抗拉强度为 605.1 MPa.

2.3 试件测点布置及加载方案

在两端支座处和试件跨中布置位移计以测量试件支座处和跨中的位移, 如图 5(a) 所示; 在现浇截面、接缝截面、U 肋、钢顶板布置应变片以测试应变, 其测点布置如图 5(b) ~ (d) 所示. 将试件倒置于两端支座, 采用 500 t 电液伺服试验机进行 4 点弯曲加载, 加载试验如图 6 所示. 在正式加载前施加 30 kN 的预荷载, 确保加载装置及测量设备可靠. 正式加载采用分级加载方式, 以荷载增量控制加载.

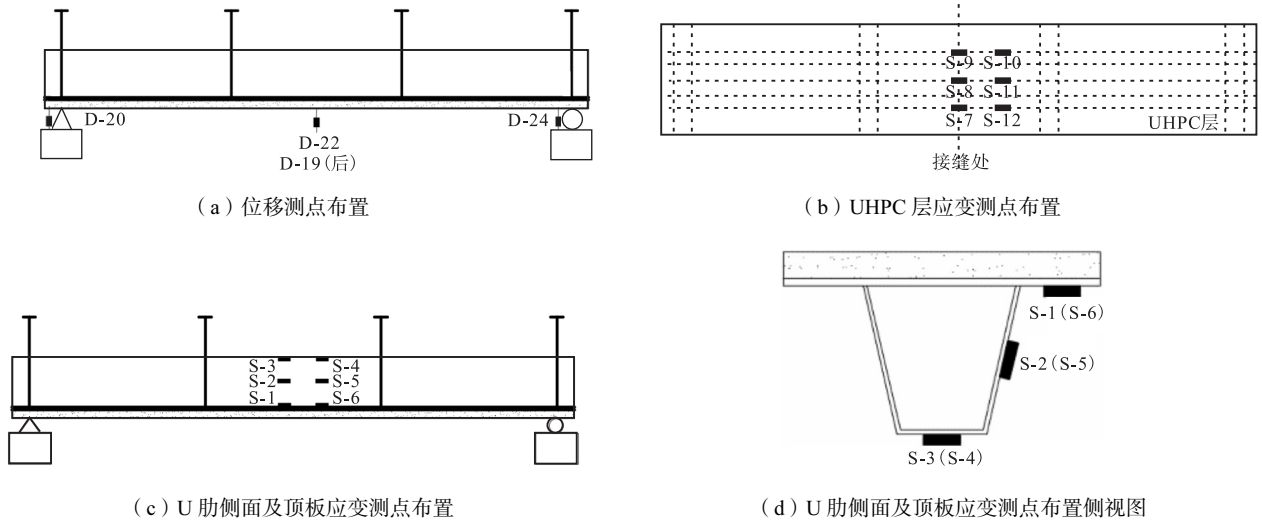


图 5 试件应变测点布置

Fig.5 Arrangement of strain measuring points on specimen



图 6 加载试验

Fig.6 Loading test

3 试验结果

3.1 试验破坏及裂缝开展过程

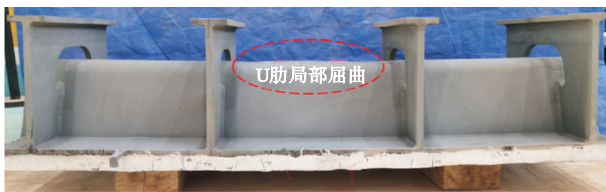
4 个钢-UHPC 组合桥面湿接缝试件的破坏形态均为 U 肋凹陷屈曲的弯曲破坏形态; UHPC 裂缝主要分布在纯弯段区间, 且主裂缝分布于接缝位置及纯弯段与弯剪段交界处, 试件变形情况如图 7 所示. 随着荷载增加, 接缝处由于 UHPC 基体断开、钢纤维不完整连接, 导致该位置抗拉能力被削弱, 各试件

UHPC 先后浇筑接缝处最先出现肉眼可见裂缝, 将此时对应的荷载视为初裂荷载, 试件 J-1、J-2、J-3 和 J-4 的初裂荷载分别为 293 kN、212 kN、140 kN 和 135 kN, 即 J-1、J-2 和 J-3 湿接缝构造的初裂荷载相较于 J-4 平直湿接缝构造分别提高了 117.0%、57.0% 和 3.7%, 纤维网格湿接缝构造抗裂性能最佳. 接缝初裂后, 纯弯段与弯剪段交界处的 UHPC 相继出现裂缝, 该阶段的 UHPC 层裂缝宽度发展较慢. 当荷载增至 $0.45P_u$ (P_u 为极限荷载) 左右时, UHPC 纯弯段与弯剪段交界处的裂缝逐渐密集, UHPC 与钢桥面板的交界面出现裂纹. 荷载增至 $0.75P_u$ 左右时, UHPC 层裂缝数量及宽度的发展均加快, 可以持续听到 UHPC 内“噼啪”的钢纤维断裂声, 同时该阶段试件整体弯曲变形较为明显, U 肋局部应变接近屈服应变. 达到极限荷载 P_u 时, U 肋局部凹陷屈曲, UHPC 层内钢筋达到屈服应变, 位于接缝位置及纯弯段与弯剪段交界

处的主裂缝即将贯通. 各试件接缝最终裂缝宽度因接缝构造不同而异, 对于试件 J-4, 由于接缝构造为仅进行凿毛处理的平直接缝, 相比于试件 J-1 ~ J-3, 接缝最终裂缝宽度要明显变宽, 最终各试件桥面层裂缝的分布情况如图 7 所示.

3.2 荷载-跨中挠度关系

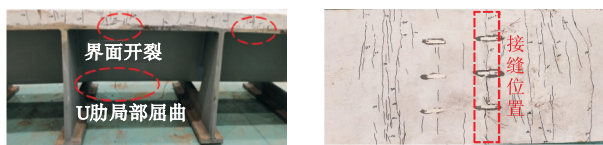
荷载-跨中挠度曲线发展趋势分为两阶段: 第 1 阶段为荷载小于 $0.75P_u$ 的线弹性阶段, 该阶段 UHPC 层的开裂并不影响整体刚度, 这表明试件弯曲刚度主要由钢结构控制; 第 2 阶段为荷载介于 $0.75P_u \sim P_u$ 的塑性阶段, U 肋部分屈服导致试件出现明显刚度退化, 挠度变化幅度增大. 试件 J-1、J-2、J-3 和 J-4 的极限承载力分别为 1 696.35 kN、1 674.97 kN、1 652.59 kN 和 1 692.37 kN, 弹性弯曲刚度分别为 169.65 kN/mm、175.46 kN/mm、177.06 kN/mm 和 185.62 kN/mm. 试件跨中挠度随荷载的变化曲线如图 8 所示. 各试件荷载-跨中挠度关系曲线高度重合, 这说明承载力和挠度响应并不会因接缝构造不同而明显不同, 即湿接缝构造不足以影响试件弯曲刚度及承载力.



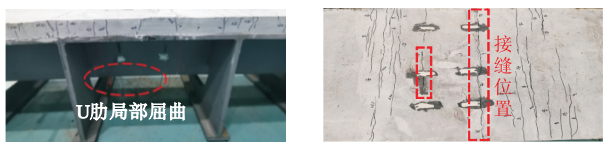
(a) 试件整体变形情况



(b) 试件 J-1



(c) 试件 J-2



(d) 试件 J-3



(e) 试件 J-4

图 7 试件主要破坏现象

Fig.7 Main failure phenomena of specimens

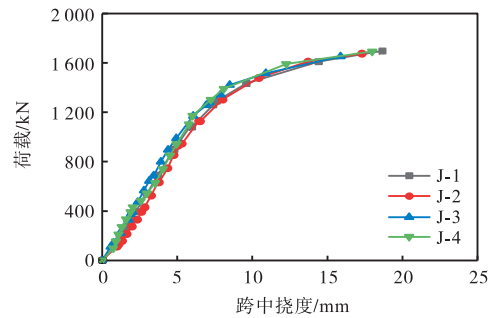


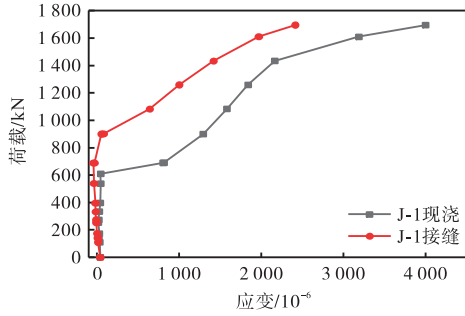
图 8 荷载-跨中挠度关系曲线

Fig.8 Curves of relationship between load and midspan deflection

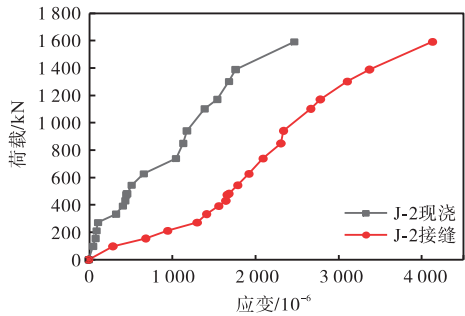
3.3 UHPC 层应变分布

各试件 UHPC 层现浇截面和接缝截面的荷载-应变关系曲线如图 9 所示, 应变均采用截面应变测点的平均值. 在加载初期, 现浇截面和接缝截面应变均大体呈线性发展. 加载过程中出现应变突增现象, 原因是测点附近出现裂纹导致应变重分布. 在相同荷载作用下, 试件 J-2 和 J-4 的 UHPC 接缝截面应变比现浇截面应变大很多, 即接缝截面与现浇截面力学性能差异较大. 由于试件 J-1 的接缝处布置了纤维网格, UHPC 基体与纤维网格界面黏结作用使接缝位置力学性能显著增强, 在现浇截面应变突增前, J-1 试件接缝截面与现浇截面的力学性能相近. 试件 J-3 在荷载大于 900 kN 时, 接缝位置可能由于矩形纵横边互锁机制提高了其受力性能. 各试件接缝荷载-应变关

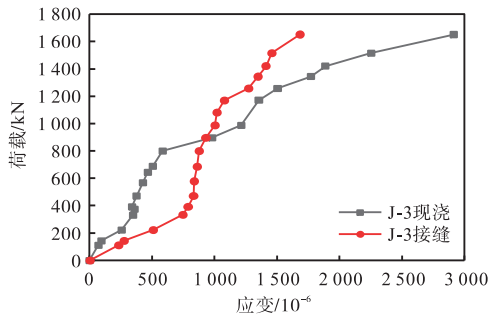
系曲线如图 10 所示,可见接缝位置的力学性能因接缝构造不同而异. 当试件处于线弹性阶段时,J-4 平直接缝构造力学性能相对较差,J-1 ~ J-3 的构造均对提升接缝性能有一定的贡献,其中 J-1 的湿接缝构造提高接缝力学性能的效果更为明显.



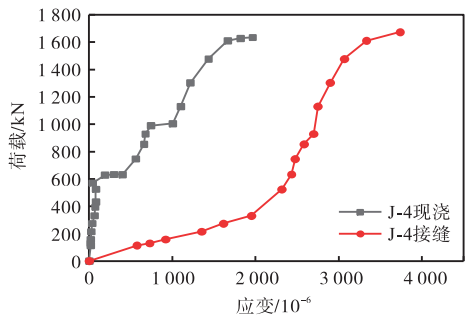
(a) 试件 J-1



(b) 试件 J-2



(c) 试件 J-3



(d) 试件 J-4

图 9 UHPC 层荷载-应变关系曲线

Fig.9 Curves of relationship between load and strain for UHPC layer

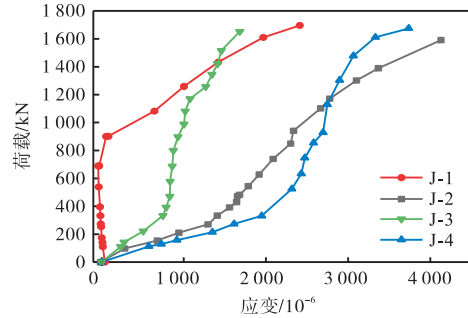


图 10 各试件接缝荷载-应变关系曲线

Fig.10 Curves of relationship between load and strain for joints of each specimen

4 有限元分析

4.1 模型的建立

运用 ABAQUS 建立钢-UHPC 组合桥面湿接缝有限元模型. UHPC 层选用 C3D8R 实体单元,钢筋网和纤维网格选用 T3D2 桁架单元模拟. U 肋、钢桥面板等钢结构部分厚度较小,选用 S4R 三维壳单元模拟. 有限元模型网格尺寸为 0.03 m. 将支座与 UHPC 层、钢板与 UHPC 层的约束关系均定义为绑定 (tie) 约束. 钢筋和纤维网格埋置于 UHPC 层由嵌入区域约束功能实现. 建立钢垫块模型模拟支座,边界条件施加于钢垫块底面. 加载方式采用位移加载,建立两个参考点并沿 Z 正方向设置位移幅值曲线以实现显式计算中的准静态加载,模型边界条件及网格划分如图 11 所示.

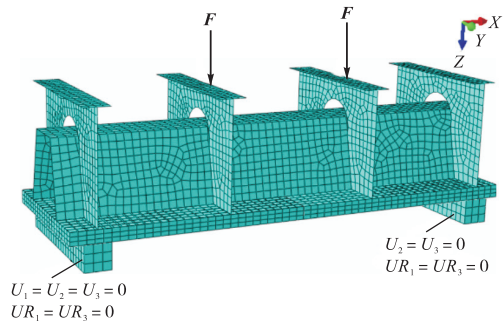


图 11 边界条件及网格划分

Fig.11 Boundary condition and grid division

桥面 UHPC 层本构采用 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型,依据相关 UHPC 本构参数^[11-12]和材料性试验,设置见表 2.

UHPC 单轴受拉压应力-应变本构关系、损伤变量与非弹性应变之间的关系采用文献[13-16]中的模型. 假定钢板、钢筋、碳纤维网格为理性的弹塑性材料,采用双直线模型定义其应力-应变关系如图 12 所示,其中, $f_{y,steel}$ 、 $f_{y,rebar}$ 和 $f_{y,carbon fiber}$ 分别为钢板、钢筋

和碳纤维的屈服应力, E_0 为上述材料的弹性模量.

表 2 UHPC 材料参数取值
Tab.2 Values of UHPC material parameters

参数	取值
弹性模量/GPa	42.0
密度/(kg/m ³)	2 400
膨胀角/(°)	15
偏心率	0.1
强度比	1.16
K_c	0.667
黏聚系数	0.01

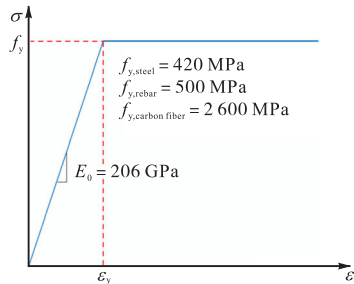


图 12 钢板、钢筋和碳纤维本构模型

Fig.12 Constitutive model of steel plate, steel rebar, and carbon fiber

先后浇筑的新老 UHPC 接缝界面采用内聚力接触行为模拟^[4,17], 使用双线性牵引分离本构黏聚力模型, 采用最大名义应力准则 (MAXS), 黏聚力参数结合文献^[18]进行定义, 见表 3, 其中 n、s 和 t 代表法向和两个切向方向.

表 3 黏聚力接触参数取值

Tab.3 Values of cohesive force contact parameters

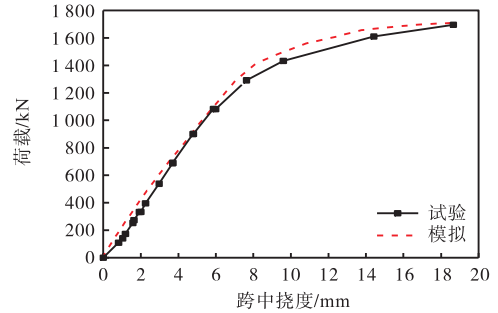
参数	取值
接触刚度 $K_{n,s,t}$ /(MPa/mm)	52.475
最大接触应力 $\sigma_{n,s,t}^f$ /MPa	7.259
最大分离位移 $\delta_{n,s,t}^f$ /mm	0.271
黏性系数	1×10^{-6}

4.2 荷载-挠度关系对比

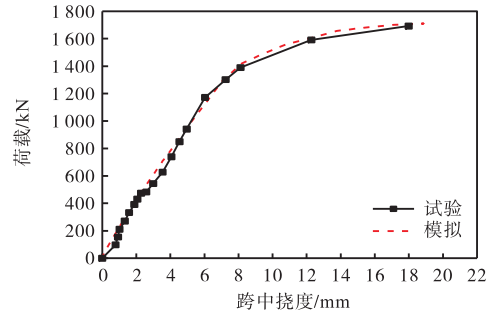
4 个不同接缝构造试件荷载-挠度数值模拟与试验结果对比如图 13 所示, 可见模拟曲线与试验曲线吻合较好, 极限承载力与极限位移的数值模拟结果与试验结果误差小于 10%, 说明本文所建立的试件有限元模型计算结果可靠.

4.3 破坏模式分析

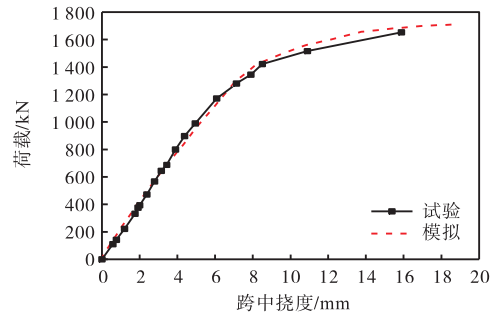
各模型最终破坏模式相同且与试验相吻合, 均由 U 肋和钢板底部加载端对应位置屈曲引起, 且此时 UHPC 内部纵向受拉钢筋即将达到屈服, 整体应力分布云图和钢板底部应力云图如图 14 (a) 和 (b) 所示. 各模型钢筋网破坏状态应力云图如图 14 (c) ~ (f) 所示, 其中每根纵向钢筋受力均匀, 应力分布状态相



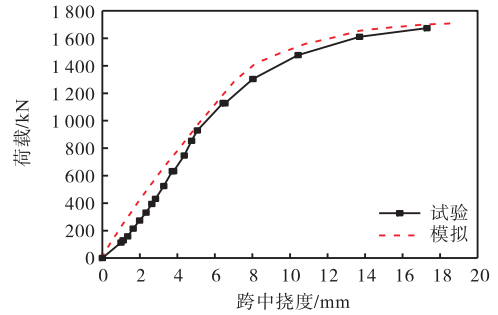
(a) 试件 J-1



(b) 试件 J-2



(c) 试件 J-3



(d) 试件 J-4

图 13 各试件接缝荷载-跨中挠度关系曲线

Fig.13 Curves of relationship between load and midspan deflection for joints of each specimen

近, 对于横向钢筋而言, 参与受力的作用较小, 未承担很大应力. J-1 和 J-2 由于纤维网络和异形钢板对应力的分担, 钢筋整体应力要比 J-3 和 J-4 小. J-1 中的纤维网络一直处于线弹性阶段, 能够很好地协助钢筋抗弯和提升 UHPC 抗裂能力. 混凝土采用的塑性损伤模型可以通过受拉损伤 DAMAGET 来模拟 UHPC 表面最终裂缝分布, 与试验较为吻合, 如图 15 所示.

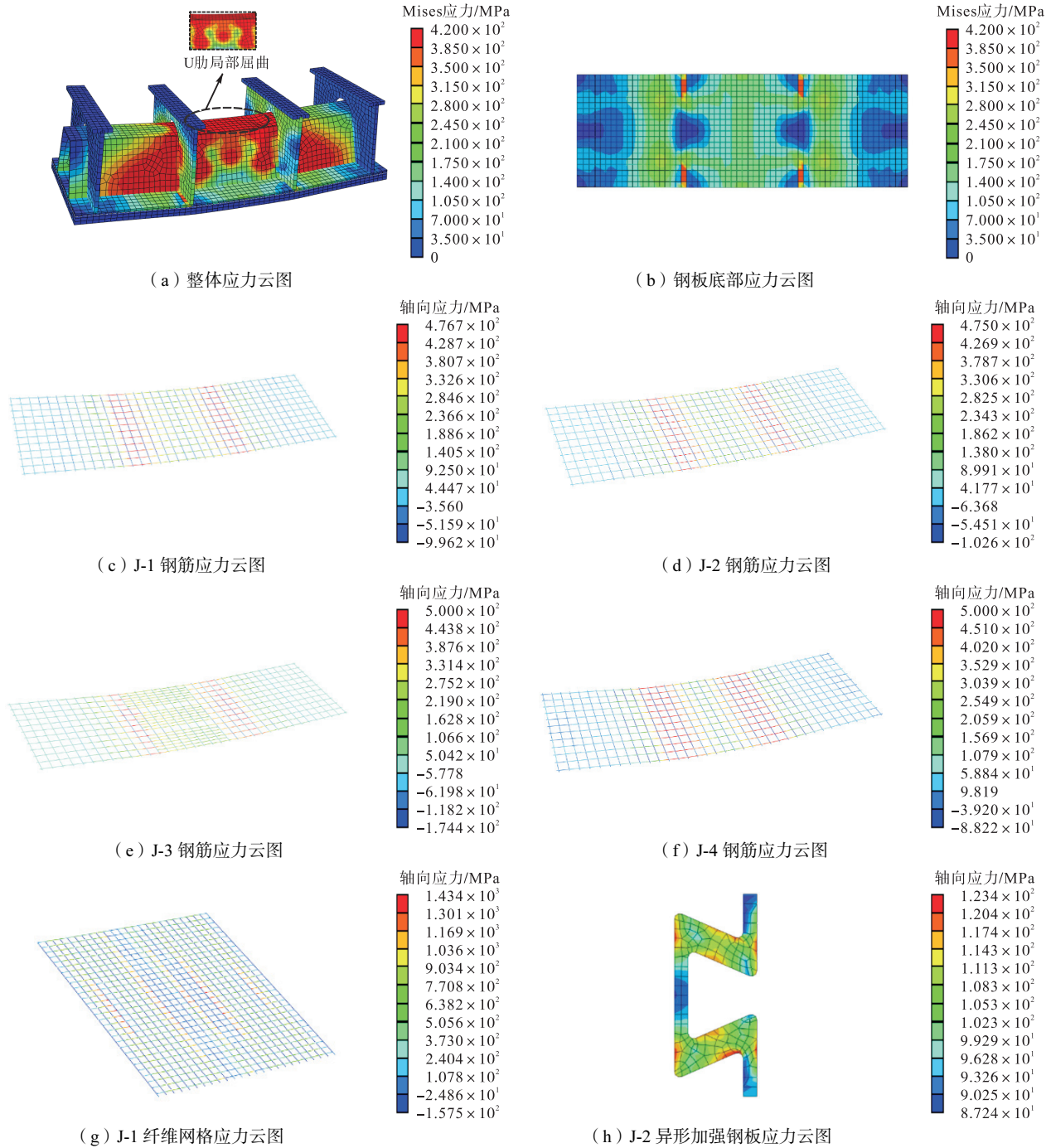


图 14 破坏状态应力云图

Fig.14 Stress cloud diagram in failure state

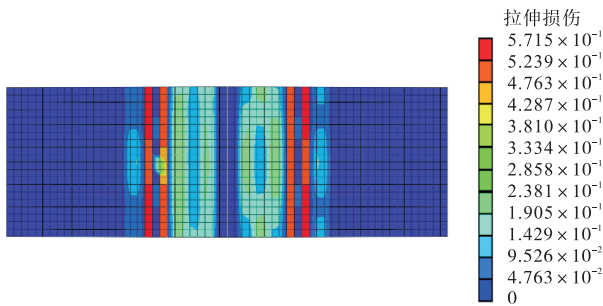


图 15 破坏状态开裂云图

Fig.15 Cracking cloud diagram in failure state

4.4 UHPC湿接缝裂缝宽度发展分析

先后浇筑的新老 UHPC 接缝界面损伤模态如图 16 所示,此状态代表接缝开始损伤. 建立有限元模型时将先浇筑 UHPC 层与后浇筑 UHPC 层的节点对齐,开裂后接缝处相邻节点间的距离即可视为接缝处的裂缝宽度,荷载-最大裂缝宽度曲线如图 17 所示. 由图 17 可知,将最大裂缝宽度为 0.05 mm 时的荷载作为初裂荷载,则 J-1、J-2、J-3 和 J-4 的初裂荷载分别为 306.5 kN、235.0 kN、229.8 kN 和 172.1 kN,

本文所提出的纤维网格湿接缝构造 J-1 试件的初裂荷载较传统接缝构造明显提高. J-1、J-2、J-3 和 J-4 最终最大裂缝宽度分别为 0.236 mm、0.275 mm、0.243 mm 和 0.510 mm, 同时根据荷载-最大裂缝宽度曲线的变化速率可知, J-4 平直型接缝对裂缝发展的控制能力最差, J-1、J-2 和 J-3 的接缝构造均对接缝位置裂缝发展起到抑制作用, 且 J-1 效果最佳. 由图 17 可见, 各模型加载后期裂缝宽度发展速度均变快, 这与试验现象相吻合.

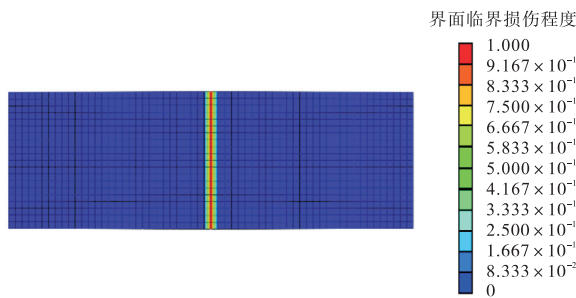


图 16 接缝界面损伤示意

Fig.16 Schematic of joint interface damage

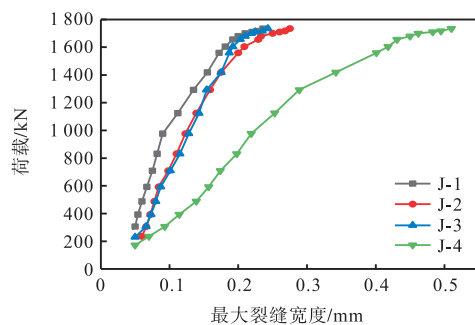


图 17 荷载-接缝最大裂缝宽度曲线

Fig.17 Curves of load vs maximum crack width of joint

5 结论

本文对钢-UHPC 组合桥面不同湿接缝构造形式的试件进行负弯矩静力弯曲抗裂性能试验研究和数值模拟, 结论如下.

(1) 钢-UHPC 组合桥面在负弯矩加载过程中 UHPC 层产生的裂缝不影响结构整体的刚度, 结构弹性阶段的刚度主要受钢结构部分控制, 湿接缝局部构造的改变不足以影响整体抗弯刚度及承载力.

(2) 对于纤维网格湿接缝构造, UHPC 基体与纤维网格二者间的黏结作用使湿接缝位置力学性能得到了显著增强. 纤维网格湿接缝试件、异形加强钢板湿接缝试件、矩形湿接缝试件和平直湿接缝试件的初裂荷载分别为 293 kN、212 kN、140 kN 和 135 kN, 即纤维网格湿接缝试件、异形加强钢板湿接缝试件、矩

形湿接缝试件的初裂荷载相较于平直湿接缝构造分别提高了 117.0%、57.0% 和 3.7%, 4 个试件的最终最大裂缝宽度分别为 0.236 mm、0.275 mm、0.243 mm 和 0.510 mm. 纤维网格湿接缝构造与其他 3 种构造相比, 其对初裂荷载的提高能力和裂缝发展的控制能力最为优异.

参考文献:

- [1] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬, 等. 正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 40-45.
Shao Xudong, Cao Junhui, Yi Dutao, et al. Study on basic performance of composite bridge deck system with orthotropic steel deck and thin RPC layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 40-45 (in Chinese).
- [2] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Shao Xudong, Hu Jianhua. The Steel-UHPC Light-Weight Composite Bridge Structures[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015 (in Chinese).
- [3] 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 ultrathin reactive-powder concrete layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(10): 04016064.
- [4] 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.
- [5] Zhu Y P, Zhang Y, Hussein H H, et al. Flexural study on UHPC-steel composite beams with joints under negative bending moment[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(10): 04020084.
- [6] 吴善友. 新型钢-UHPC 组合桥面板湿接缝负弯矩静力性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学土木工程学院, 2021.
Wu Shanyou. The Research on Static Behavior of Wet Joint in New Steel-UHPC Composite Bridge Deck Under Negative Moment[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, 2021 (in Chinese).
- [7] 史占崇, 苏庆田, 邵晓东, 等. 钢-UHPC 组合桥面板分段浇筑矩形接缝的轴拉性能[J]. 土木工程学报,

- 2022, 55(2): 50-60.
- Shi Zhanchong, Su Qingtian, Shao Xiaodong, et al. Axial tension behavior of segmented-casting rectangular joint of steel-UHPC composite bridge deck[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(2): 50-60(in Chinese).
- [8] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- GB/T 50081—2019 Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019(in Chinese).
- [9] GB/T 3362—2017 碳纤维复丝拉伸性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- GB/T 3362—2017 Test Methods for Tensile Properties of Carbon Fiber Multifilament[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(in Chinese).
- [10] GB/T 13239—2006 金属材料 低温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- GB/T 13239—2006 Metallic Materials—Tensile Testing at Low Temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006(in Chinese).
- [11] 郭晓宇, 亢景付, 朱劲松. 超高性能混凝土单轴受压本构关系[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 369-376.
- Guo Xiaoyu, Kang Jingfu, Zhu Jinsong. Constitutive relationship of ultrahigh performance concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2017, 47(2): 369-376(in Chinese).
- [12] 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.
- [13] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- GB 50010—2010 Code for Design of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015(in Chinese).
- [14] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
- Zhang Zhe, Shao Xudong, Li Wenguang, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58(in Chinese).
- [15] Birtel V, Mark P. Parameterised finite element modeling of RC beam shear failure[C]//Proceedings of the 19th Annual International ABAQUS Users' Conference. Boston, USA: ABAQUS Inc., 2006.
- [16] 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: 湖南大学土木工程学院, 2016.
- Cao Junhui. Research on Basic Performance of Steel-Thin UHPC Lightweight Composite Deck[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2016(in Chinese).
- [17] 代健波. 钢-UHTCC 组合桥面板湿接缝弯曲抗裂性能研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2022.
- Dai Jianbo. Research on Cracking-Resistant Behavior of Wet Joints in Steel-UHTCC Composite Bridge Decks [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2022(in Chinese).
- [18] Ding J N, Zhu J S, Kang J F. Bonding properties and mechanism of the interface between precast UHPC and post-cast UHPC[J]. Structures, 2022, 43: 822-833.

(责任编辑: 武立有)