

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.04.013

预制主梁 UHPC 湿接缝受弯性能试验研究

张哲¹, 靳文豪¹, 张晨曦^{1,2}, 汤意³, 王伟⁴, 杜战军³, 高继平⁴, 邓恩峰¹
(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中建八局(厦门)建设有限公司, 福建 厦门 361000;
3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000;
4. 河南省尧栾西高速公路建设有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要:【目标】湿接缝是影响横向多梁体系桥梁受力性能与耐久性的关键, 本研究依托郑栾高速某横向多梁体系桥梁, 将超高性能混凝土(UHPC)用于湿接缝。【方法】开展12个足尺试件抗弯性能试验, 探究钢筋搭接形式、钢筋搭接长度、湿接缝界面形状以及配筋率对UHPC湿接缝开裂荷载与极限承载力的影响。【结果】UHPC湿接缝试件的薄弱部位是湿接缝与预制板的接缝, 但在试件破坏时预制板受压区混凝土压碎, 湿接缝未出现裂缝; 横向UHPC湿接缝强度可以达到或超过现浇混凝土桥面板; 当钢筋搭接长度超过10倍钢筋直径之后, 继续提高搭接长度对湿接缝的承载力无显著影响, 采用UHPC可简化湿接缝内钢筋搭接形式; 湿接缝采用菱形界面和提高配筋率均可显著提高试件的开裂荷载及极限荷载; 相比于直线形钢筋搭接, U形钢筋搭接在弹性阶段有较高的抗弯刚度, 但二者极限承载力比较接近。【结论】试验结果表明, 综合考虑现场施工工艺等因素, 对于横向多梁体系湿接缝的施工, 采用UHPC湿接缝、钢筋直线搭接(搭接长度 $\geq 10d$)的施工效果较为理想, 可减少搭接钢筋焊接量且免去振捣环节。现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)可用于计算含UHPC湿接缝试件抗弯承载力, 理论值与试验值平均比值为0.90。

关键词: 桥梁工程; 受弯性能; 试验研究; 湿接缝; 超高性能混凝土; 开裂荷载; 极限承载力

中图分类号: U441; TU398

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2025)04-0105-07

Experimental study on flexural behaviour of wet joint of UHPC prefabricated main girder

ZHANG Zhe¹, JIN Wenhao¹, ZHANG Chenxi^{1,2}, TANG Yi³, WANG Wei⁴, DU Zhanjun³, GAO Jiping⁴, DENG Enfeng¹

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. China Construction Eighth Bureau (Xiamen) Construction Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China;

3. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China;

4. Henan YaoLuanXi Expressway Construction Co., Ltd., Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: [Objective] The wet joint is the key factor that influencing the mechanical property and durability of bridges with transverse multi-girder system. The study based on a bridge with transverse multi-girder system on Zhengzhou-Luanchuan expressway. The ultra-high performance concrete (UHPC) was used for the bridge wet joint. [Method] 12 full-scale specimens were design and tested for flexural behaviour. The influences of reinforcement configuration, reinforcement length, wet joint interface shape and reinforcement ratio on crake load and ultimate bearing capacity of UHPC wet joint were investigated. [Result] The weak point of specimen

收稿日期: 2023-04-28 修改日期: 2024-09-27

基金项目: 河南省交通运输科技计划项目(2020J-2-7, 2021J3); 河南省自然科学基金项目(242300421177); 河南省科技研发计划联合基金项目(235200810013)

作者简介: 张哲(1977-), 男, 河南南阳人, 博士, 教授, 研究方向为钢结构、钢-混凝土组合结构。(zzhe@zzu.edu.cn)

* 通讯作者: 邓恩峰(1990-), 男, 河南焦作人, 博士, 教授, 研究方向为模块化钢结构。(dengenfeng@zzu.edu.cn)

引用格式: 张哲, 靳文豪, 张晨曦, 等. 预制主梁 UHPC 湿接缝受弯性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2025, 42(4): 105-111.

ZHANG Zhe, JIN Wenhao, ZHANG Chenxi, et al. Experimental study on flexural behaviour of wet joint of UHPC prefabricated main girder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(4): 105-111.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

with UHPC wet joint is the joint between wet joint and precast slab. However, when specimen failure, the concrete at precast slab compression zone crushes, and no cracks appear on wet joint. The capacity of transverse UHPC wet joint can be equal to or exceed the cast-in-place bridge deck. When the reinforcement lap length exceeds 10 times the reinforcement diameter, further increasing the lap length has no significant effect on the joint bearing capacity. The use of UHPC can simplify the form of reinforcement lap in wet joints. It is helpful to improve the crack load and ultimate bearing capacity of wet joint by using the U-shape reinforcement, rhombus-shape wet joint, and increasing reinforcement ratio. Compared with linear reinforcement, the U-shape reinforcement has higher bending stiffness in elastic stage, but their ultimate bearing capacities are quite close.

[Conclusion] Considering in-situ construction techniques and other influencing factors, it is a relatively ideal construction method that employing UHPC wet joints and straight lap joints for reinforcement with a lap length no less than 10 times of reinforcement diameter. It is beneficial to reducing lap joints welding and omitting vibration. The current ‘*Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts*’ (JTG 3362—2018) can be used to calculate the flexural behaviour of UHPC wet joint specimen. The average ratio of theoretical value to experimental value is 0.90.

Key words: bridge engineering; flexural behaviour; experimental study; wet joint; ultra-high performance concrete; crack load; ultimate bearing capacity

0 引言

近年来,装配式桥梁逐渐成为桥梁工程的热点研究领域^[1-3]。横向多梁体系桥梁是装配式桥梁的主要发展方向之一,湿接缝是横向多梁体系桥梁的关键。普通混凝土浇注的湿接缝内钢筋通常采用绑扎连接、机械连接、焊接连接等连接方式,但接缝处钢筋数量多,施工繁琐,湿接缝受力复杂^[4-6]。因此,发展可靠的湿接缝连接方式对横向多梁体系桥梁技术的发展尤为重要。超高性能混凝土(UHPC)具有超高的强度、耐久性、韧性、延性,且与钢筋、预制混凝土之间具有良好的黏结性能^[7-9]。因此,将UHPC用于湿接缝可以简化湿接缝构造,提高湿接缝耐久性,改善湿接缝的受力性能。

国内外学者已经针对普通混凝土及UHPC湿接缝的构造形式及受力性能开展了一定研究。冯峥^[10]研究了梯形、矩形、倒梯形等3种键齿形式的直剪性能,并得到了UHPC键齿湿接缝的直剪受力性能及直剪承载力统一公式。唐涛^[11]提出了UHPC湿接缝的搭接钢筋采用环形钢筋不搭接的形式,并证明了这种形式可以充分发挥钢筋的抗拉性能。朱爱珠^[12]提出了UHPC-锚固头钢筋湿接缝,探究了不同混凝土材料、钢筋布置与配筋率等参数对湿接缝模型力学性能的影响。张勇^[13]开展了3组U形钢筋湿接缝抗拉性能试验,研究了钢筋搭接长度及形式对湿接缝受力性能的影响。张永涛^[14]对比了UHPC湿接缝与普通混凝土湿接缝的受弯性能。李文超^[15]研

究了湿接缝内钢筋构造形式、界面处理方式、预应力筋等对UHPC湿接缝性能的影响。陈贝^[16]对比了UHPC湿接缝、整体现浇混凝土及整体现浇UHPC板的受力性能。Shah^[17]研究了漏斗形接头、楔形接头、U形筋、弧形筋截面形式对预制桥面UHPC湿接缝抗弯性能的影响。Gao^[18]提出了一种模拟UHPC湿接缝的新型拉伸试样结构,并通过试验研究了钢筋直径和埋置长度对其加固效果的影响。Peng^[19]分别对带有不同垂直接头和菱形接头的UHPC湿接缝梁进行试验研究。Graybeal^[20]提出当保护层厚度(t)不小于3倍钢筋直径(d)时,变形钢筋的最小搭接长度为 $8d$,当 $2d \leq t \leq 3d$ 时,搭接长度为 $10d$ 。Qi^[21]进行了7组燕尾形UHPC湿接缝受弯性能试验,发现钢筋搭接长度为 $7.5d$ 时,钢筋与UHPC之间发生黏结滑移。虽然国内外学者已经开展了一定研究,但对不同钢筋搭接形式、不同搭接长度、不同界面形状及配筋率的UHPC湿接缝的受弯性能研究仍然不够深入,亟需开展更为系统的试验研究。

本研究以郑州—栾川高速某横向多梁体系桥梁为工程背景,该桥梁为四跨连续预应力混凝土T梁桥,跨径为30 m,T梁横向采用UHPC作为湿接缝,湿接缝宽度为412 mm,钢筋采用二次U形搭接。本研究共设计12个足尺试件研究UHPC湿接缝受弯性能,揭示了钢筋搭接形式、钢筋搭接长度、湿接缝界面形状、配筋率对UHPC湿接缝破坏形态、开裂荷载、极限承载力等的影响,可为简化UHPC湿接缝内钢筋构造提供依据。

1 试验方案

1.1 试件设计

本次试验共设计 12 个试件, 具体参数如表 1 所示。A 组为整体现浇对比构件, B、C 和 D 组试件分别用于研究钢筋搭接长度、湿接缝界面形状及配筋率对 UHPC 湿接缝受弯性能的影响, E 和 F 组试件研究了钢筋搭接形式对 UHPC 湿接缝的影响。其中, E-2 为工程原型, 依据工程经验设计钢筋搭接形式

和长度。试件预制段采用 C50 混凝土, 试件分两批次浇筑, 各试件预制段混凝土立方体抗压强度如表 1 所示。湿接缝采用 UHPC 浇筑, 主要组分包括水泥、粉煤灰、硅灰、石英砂、水、减水剂、镀铜钢纤维等, 其配合比如表 2 所示。试件采用洒水自然养护 28 d, 经测试, UHPC 标准材性试件 28 d 龄期抗压强度、抗折强度和单轴抗拉强度分别为 131.3, 21.8 MPa 和 5.7 MPa, 试件板内主筋均为 HRB400 钢筋, 直径为 12 mm。试件具体构造方式及尺寸如图 1 所示。

表 1 试件设计参数

Table 1 Specimen design parameters

组别	编号	界面形状	钢筋搭接形式	l/mm	钢筋间距/ mm	$\rho/\%$	预制板混凝土立方体 抗压强度/ MPa
A	A				100	1.13	56
B	B-1	矩形	直线形	120 (10d)	100	1.13	52
	B-2	矩形	直线形	180 (15d)	100	1.13	52
	B-3	矩形	直线形	240 (20d)	100	1.13	52
C	C	菱形	直线形	240 (20d)	100	1.13	52
D	D-1	矩形	直线形	120 (10d)	80	1.35	52
	D-2	矩形	直线形	180 (15d)	80	1.35	52
	D-3	矩形	直线形	240 (20d)	80	1.35	52
E	E-1	矩形	二次 U 形搭接	332	100	1.13	56
	E-2	矩形	二次 U 形搭接	354	100	1.13	56
	E-3	矩形	二次 U 形搭接	372	100	1.13	56
F	F	矩形	一次 U 型搭接	180 (15d)	100	1.13	52

注: 试件 A 为整体现浇对比试件, 试件 E-2 为工程设计原型; l 为钢筋搭接长度, ρ 为试件配筋率, d 为纵筋直径。

表 2 UHPC 配合比 (单位: kg/m^3)

Table 2 Mixture proportion of UHPC (unit: kg/m^3)

成分	水泥	粉煤灰	硅灰	石英砂	镀铜钢纤维	水	减水剂
配合比	1 000	100	200	1 200	234	221	39

1.2 加载与量测方案

本次试验采用三分点对称集中加载, 研究 UHPC 湿接缝在纯弯矩作用下的受力性能。试件加载方案及位移计布置如图 2 所示, 共布置 8 个位移计, 在跨中及加载点处沿板横向各布置 2 个位移计, 测量试件的跨中挠度与荷载关系曲线, 分析加载过程中构件刚度的退化规律。在板底和板顶各布置 12 个混凝土应变片, 在湿接缝内主筋布置钢筋应变片, 如图 3 所示。

正式加载时, 加载速度为 0.1 kN/s, 每级加载 10 kN 直到试件破坏。达到每级加载后, 持荷 5 min 再读取数据, 并检查试件是否出现开裂及破坏现象。试件出现以下 3 种现象时停止试验: (1) 挠度达到跨度的 1/50; (2) 受拉主筋拉断; (3) 受压区混凝土压碎。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象与破坏模式

加载初期, 混凝土板挠度呈线性增长。随着荷载的增大, 试件出现第 1 条裂缝。对于试件 A 现浇试件, 第 1 条裂缝出现在板跨中。对于 UHPC 湿接缝试件, 试件的开裂荷载均大于 A 组现浇试件, 且初始开裂位置均不在 UHPC 段内; 对 D 组试件, 由于采用加密配筋, 第 1 条裂缝出现在预制板段加载点处; 对其他含湿接缝试件, 第 1 条主裂缝均出现在接缝与预制段交界界面, 但宽度较小, 且发展缓慢, 增大荷载后预制段也陆续出现新裂缝; UHPC 与预制混凝土接缝部位的裂缝随着荷载的增加扩展十分缓慢, 加载过程中接缝处裂缝并未竖向贯穿。

随着荷载继续增加, 第 1 条主裂缝不断向上发展, 预制段混凝土内不断出现新的竖向裂缝, 但 UHPC 湿接缝未出现裂缝。随着预制段竖向裂缝的不断增多与扩展, 部分试件预制板底部混凝土保护层开始剥落, 混凝土与钢筋黏结失效, 钢筋裸露, 但试件还可以继续承载。继续加载, 受压区混凝土

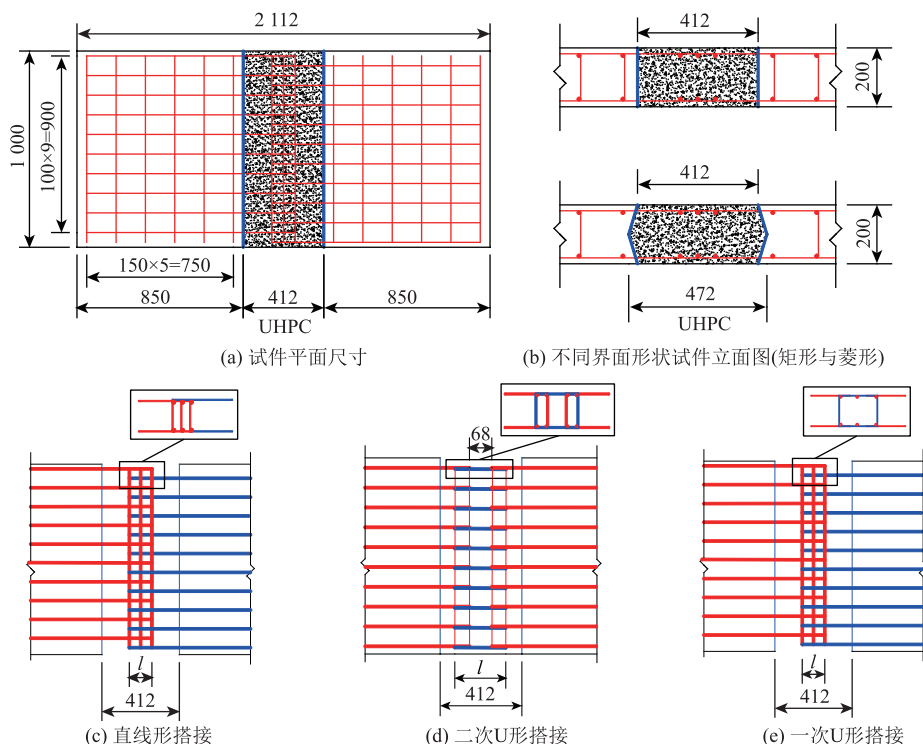


图1 试件设计构造图 (单位: mm)

Fig. 1 Configuration of specimen (unit: mm)

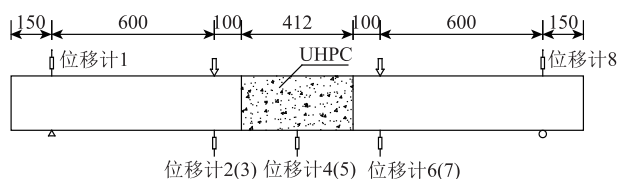


图2 位移计布置 (单位: mm)

Fig. 2 Layout of extensometers (unit: mm)

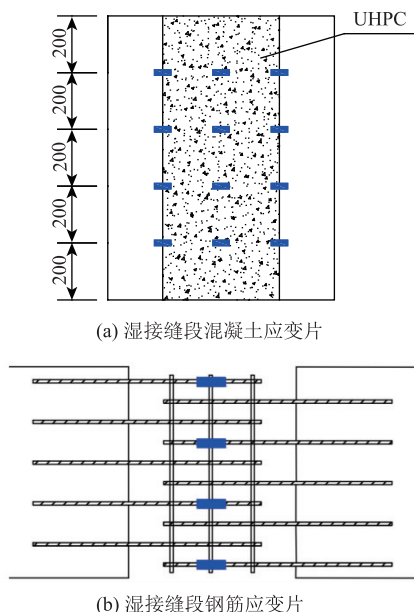


图3 应变片布置 (单位: mm)

Fig. 3 Layout of strain gauges (unit: mm)

开始出现横向裂缝并逐渐变宽, 受压区混凝土逐渐被压碎。

2.2 开裂荷载与极限承载力

表3给出了各组试件的开裂荷载、初始裂缝位置、破坏荷载与破坏模式。可以看出, 由于UHPC优异的力学性能, 采用UHPC湿接缝的试件开裂荷载均大于整体现浇混凝土板。除了C组与D组之外, 湿接缝的受力薄弱部位均在界面处, 且UHPC湿接缝在整个加载过程中并没有出现裂缝。整体现浇混凝土板A的开裂荷载约为对应破坏荷载的24.1%, 而其余试件的开裂荷载均大于破坏荷载的24.1%。因此, 相较于整体现浇混凝土板, UHPC湿接缝可以提高试件的开裂荷载, 具有更优的抗弯性能。

根据现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018) 计算预制段混凝土板受弯理论承载力并与试验所得破坏荷载比较, 结果如表3所示。可以看出, 根据规范计算试件承载力与试验破坏荷载的比值介于0.845~1.002之间, 平均比值为0.90。因此, 根据现行规范计算含UHPC湿接缝试件抗弯承载力是可行的, 可得到偏于保守的计算结果。

通过表3发现, 本试验中, 提高湿接缝内钢筋搭接长度, 试件的开裂荷载与极限承载力基本没有变化, 说明当搭接长度超过10倍钢筋直径之后, 搭接长度对湿接缝受弯性能的影响可以忽略。对比B

组和 D 组可以发现, 提高接缝的配筋率可以显著提高试件的开裂荷载与极限承载力。对比 B 组、E 组和 F 组发现, 改变钢筋的搭接方式, 二次 U 形搭接和一次 U 形搭接均可以提高试件的开裂荷载与极限承载力, 但提高幅度不大, 说明 UHPC 湿接缝可以

简化钢筋搭接方式, 且施工现场大量减少焊接等工艺; 直线型配筋各方面性能基本与二次 U 形搭接、一次 U 形搭接相同。在所有试件中, C 组的开裂荷载最高, 这是因为当界面处产生微裂缝时, 菱形界面可以约束裂缝向上发展, 从而提高其抗弯能力。

表 3 试件试验结果

Table 3 Specimens test result

编号	开裂荷载/kN	初始裂缝位置	破坏模式	试验破坏荷载/kN	理论破坏荷载/kN	理论值/试验值
A	87.3	跨中混凝土	挠度达到跨度的 1/50	325.3	326.0	1.002
B-1	101.6	接缝界面	受压区混凝土压碎	326.7	300.9	0.921
B-2	97.9	接缝界面	挠度达到跨度的 1/50、接缝宽度过大	326.1	302.9	0.929
B-3	96.1	接缝界面	受压区混凝土压碎	327.1	300.9	0.920
C	119.6	预制段加载点	受压区混凝土压碎, 受拉区混凝土剥落	334.4	301.1	0.901
D-1	116.4	预制段加载点	挠度达到跨度的 1/50	380.0	322.4	0.848
D-2	118.7	预制段加载点	挠度达到跨度的 1/50	379.6	320.6	0.845
D-3	115.5	预制段加载点	挠度达到跨度的 1/50	385.9	329.8	0.855
E-1	103.8	接缝界面	挠度达到跨度的 1/50	327.1	289.5	0.885
E-2	98.1	接缝界面	挠度达到跨度的 1/50	325.7	278.9	0.856
E-3	102.6	接缝界面	挠度达到跨度的 1/50, 受拉区混凝土剥落	314.8	301.0	0.956
F	103.7	接缝界面	挠度达到跨度的 1/50	339.7	300.9	0.886

2.3 荷载-位移关系曲线

各试件荷载-跨中位移关系如图 4 所示, 可以发现, 所有试件的破坏过程基本可以分为 3 个阶段: 弹性阶段、开裂阶段、破坏阶段。在弹性阶段, 混

凝土和钢筋共同受力, 此时板的抗弯刚度最大, 试件跨中挠度呈线性增长。在试件出现裂缝之后, 荷载-位移曲线的斜率减小, 随着受拉区混凝土裂缝的不断出现与扩展, 试件抗弯刚度略有退化, 此时主

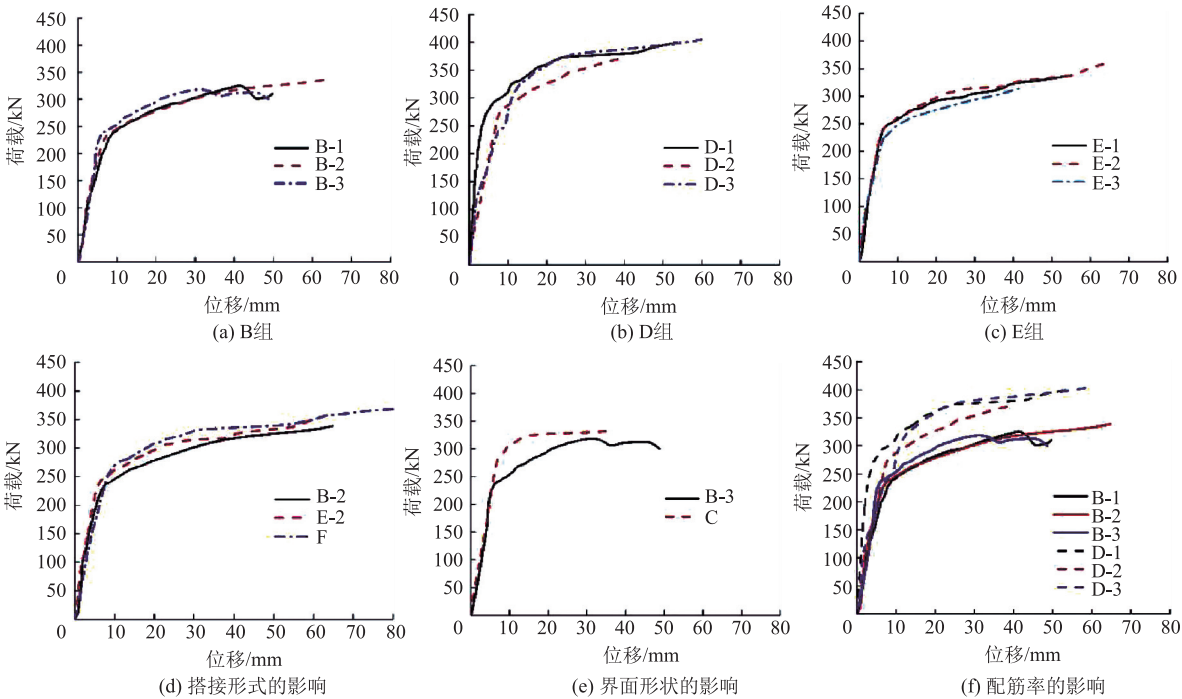


图 4 各试件荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of specimens

要由钢筋提供抗拉作用。当受拉钢筋屈服之后,荷载-位移关系曲线趋于平缓,混凝土持续开裂,受压区高度不断减小,跨中挠度快速增大,部分试件受压区混凝土压碎,试件破坏。

分别观察图4(a)、4(b)、4(c)可以发现,随着钢筋搭接长度增大,试件抗弯刚度与极限承载力并无明显变化。这说明对于UHPC湿接缝,钢筋搭接长度为10倍钢筋直径即可满足钢筋与UHPC之间黏结锚固的要求,搭接长度超过10倍钢筋直径之后,再增加锚固长度,对湿接缝抗弯性能没有影响。

由图4(d)可知,试件E-2与试件F在弹性阶段的抗弯刚度均略大于试件B-2,说明U形搭接钢筋可以在一定程度上提高试件抗弯刚度。由于试件E-2在开裂之后受拉区混凝土发生了剥落,因此试件开裂之后试件F承载力一直略高于试件E-2。3个试件极限承载力比较接近,考虑混凝土材料离散性,采用U形钢筋一次搭接与二次搭接,并不能提高湿接缝的抗弯承载力。因此,对于UHPC湿接缝,采用直线形配筋即可实现与U形搭接钢筋相同的抗弯性能,可以简化湿接缝的配筋。

由图4(e)可知,由于采用菱形界面形式,试件C的初始抗弯刚度、开裂荷载与极限荷载均高于试件B-3。同时由表3可知,试件C的初始裂缝位置在预制板加载点处,改善了湿接缝与预制板接缝处的受力性能。这说明采用菱形界面可以有效提高UHPC湿接缝的抗弯能力。

由图4(f)可知,配筋率显著影响湿接缝的抗弯性能,D组试件的抗弯刚度与极限承载力均明显高于B组。与试件B-1、B-2、B-3相比,试件D-1、D-2、D-3的极限承载力分别提高了16.3%、16.9%、18.0%,且D组初始裂缝的位置均在预制板加载点处。这说明增加配筋率可显著提高UHPC湿接缝的抗弯能力。

3 结论

本研究开展12个足尺UHPC湿接缝试件抗弯性能试验,揭示主要参数对其抗弯性能的影响,得出以下结论。

(1) 钢筋搭接长度超过10倍钢筋直径之后,提高搭接长度或改变搭接形式均不能显著提高UHPC湿接缝的抗弯性能,采用UHPC可以简化湿接缝内钢筋搭接形式。

(2) UHPC湿接缝具有良好的抗弯性能,相比现浇板,具有更高的开裂荷载,抗弯承载力与现浇板接近或超过现浇板。根据现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)计算试

件承载力是可行的,可得到偏于保守的计算结果。

(3) UHPC湿接缝试件的薄弱部位是湿接缝与预制板的接缝,但裂缝扩展十分缓慢,试件破坏时预制板受压区混凝土压碎,湿接缝未出现裂缝。

(4) 界面形状和配筋率显著影响UHPC湿接缝的抗弯性能,采用菱形界面或者提高配筋率可以使初始裂缝位置出现在预制混凝土板段,并提高试件极限抗弯承载力。

(5) 试验结果表明,综合考虑现场施工工艺等因素,对于横向多梁体系湿接缝的施工,采用UHPC湿接缝、钢筋直线搭接(搭接长度 $\geq 10d$)的施工效果较为理想,可减少搭接钢筋焊接量且免去振捣环节。

参考文献:

References:

- [1] 林上顺,何乐,夏樟华,等. 榫卯-灌浆套筒混合连接装配式方墩轴压承载力[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(3): 67-72.
LIN Shangshun, HE Yue, XIA Zhanghua, et al. Experimental study on axial compressive performance of assembled square pier with tenon and mortar sleeve hybrid connection [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(3): 67-72.
- [2] 彭旺虎,李院军,刘嘉欣. 基于静力模型修正的装配式T梁桥荷载横向分布计算[J]. 公路交通科技, 2021, 38(4): 45-54.
PENG Wanghu, LI Yuanjun, LIU Jiaxin. Calculation of transverse load distribution of prefabricated T-beam bridge based on static model updating [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(4): 45-54.
- [3] 韩普各,赵伟,陆森强. 装配式混合连接钢-混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(4): 58-65.
HAN Puge, ZHAO Wei, LU Senqiang. Experimental study on flexural behavior of assembled hybrid connected steel-concrete composite beam [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(4): 58-65.
- [4] 张育智,刘俊岭,文洁平,等. 新型湿接缝钢筋连接构造的力学性能研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(9): 152-159.
ZHANG Yuzhi, LIU Junling, WEN Jieping, et al. Mechanical performance study on advanced type of wet joint bar connection structure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(9): 152-159.
- [5] 曾明辉,尹炳森,陈刚,等. 带UHPC接缝的桥面板

- 力学性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (3): 125-131.
- ZENG Minghui, YIN Bingsen, CHEN Gang, et al. Experimental study on mechanical property of bridge deck with UHPC joint [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (9): 152-159.
- [6] 陈卫全. 钢-混组合梁桥预制桥面板连接构造研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- CHEN Weiquan. A study of connection details of precast bridge decks in steel-concrete composite bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [7] 中国混凝土与水泥制品协会 UHPC 分会. 2019 年度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, 2020 (2): 30-43.
- UHPC Branch of China Concrete and Cement-based Products Association. Technology and application development report of China UHPC in 2019 [J]. China Concrete, 2020 (2): 30-43.
- [8] 陈亮, 杨立飞, 许为民, 等. 基于力学性能试验的 UHPC 钢纤维掺量优化与性价比分析 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (增 1): 18-25.
- CHEN Liang, YANG Lifei, XU Weimin, et al. Content optimization and cost performance analysis of UHPC steel fiber based on mechanical property test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (S1): 18-25.
- [9] 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.
- SHAO Xudong, QIU Minghong. Research of high performance fabricated bridge structures based on UHPC [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51 (2): 160-167.
- [10] 冯峥, 李传习, 周佳乐, 等. UHPC 键齿湿接缝直剪试验及湿接缝直剪承载力统一公式 [J]. 土木工程学报, 2022, 55 (6): 79-91.
- FENG Zheng, LI Chuanxi, ZHOU Jiale, et al. Direct shear test on uhpc key-wet-joints and the unified calculation formula of direct shear capacity of UHPC wet-joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55 (6): 79-91.
- [11] 唐涛. 简支 T 梁 UHPC 湿接缝构造性能试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- TANG Tao. Experimental study on structural performance of UHPC wet joint of simple supported T-beam [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [12] 朱爱珠, 田知典, 曾敏, 等. 预制拼装 UHPC 湿接缝模型拉伸试验 [J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39 (1): 7-13.
- ZHU Aizhu, TIAN Zhidian, ZENG Min, et al. Tensile property test of UHPC wet joints model of precast segmental bridge [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2022, 39 (1): 7-13.
- [13] 张勇, 曹素功, 叶品, 等. 钢板梁桥 U 形钢筋湿接缝力学性能试验研究 [J]. 中国市政工程, 2019 (5): 95-97, 114.
- ZHANG Yong, CAO Sugong, YE Pin, et al. Experimental study on mechanical properties of U-shaped steel bar wet joint of steel plate girder bridge [J]. China Municipal Engineering, 2019 (5): 95-97, 114.
- [14] 张永涛, 田飞. 预制桥面板 UHPC-U 形钢筋湿接缝受力性能试验研究 [J]. 桥梁建设, 2018, 48 (5): 48-52.
- ZHANG Yongtao, TIAN Fei. Test study of mechanical behavior of UHPC-U shape reinforcement wet joint of precast deck slabs [J]. Bridge Construction, 2018, 48 (5): 48-52.
- [15] 李文超. 钢混组合结构装配式 UHPC 桥面板接缝构造与力学性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- LI Wenchao. Research on joint construction and mechanical behavior of assembly bridge panel of steel-concrete composite structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [16] 陈贝. 预制 NSC 构件的 UHPC 湿接缝受弯性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- CHEN Bei. Study on flexural performance of prefabricated NSC components with UHPC wet joints [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [17] SHAH Y I, HU Z J, YIN B S, et al. Flexural performance analysis of UHPC wet joint of prefabricated bridge deck [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46 (11): 11253-11266.
- [18] GAO X L, WANG J Y. Experimental and numerical study on the tensile behaviours of wet joints in steel-UHPC composite decks using a novel tensile test setup [J]. Materials and Structures, 2021, 54 (2): 93.
- [19] PENG K K, YAN B F. Experimental study of the flexural behaviour of Ultra-high-performance concrete beam with wet joint [J]. Magazine of Concrete Research, 2022, 74 (2): 70-80.
- [20] GRAYBEAL B, EUGEN B, KIM B S, et al. International perspective on uhpc in bridge engineering [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25 (11): 04020094. doi: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001630](http://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001630).
- [21] QI J N, BAI Y, WANG J Q, et al. Flexural behavior of an innovative dovetail UHPC joint in composite bridges under negative bending moment [J]. Engineering Structure, 2019 (200): 109716. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109716>