

文章编号:1007-9629(2021)03-0525-08

## 配筋 UHPC 湿接缝界面抗弯性能及影响因素

霍文斌<sup>1</sup>, 张 阳<sup>2</sup>, 黄龙田<sup>1</sup>, 陈 贝<sup>2</sup>

(1. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 制作普通矩形、密配筋矩形、打孔矩形、楔形和菱形 5 种类型的现浇超高性能混凝土(UHPC)接缝板试件, 并对其进行抗弯试验, 研究了配筋 UHPC-普通混凝土(NC)湿接缝界面的抗裂能力、抗弯性能和破坏模式. 通过轴拉试验探讨了 NC 表面处理方式、NC 湿润度、UHPC 养护龄期和养护方法等对 UHPC-NC 界面抗裂性能的影响. 结果表明: 现浇 UHPC 与预制 NC 界面的开裂强度和抗弯承载力均优于完整的预制 NC, 大部分接缝板的破坏均发生在预制 NC 部分; 粗糙或凹凸 NC 表面、湿润 NC、60 °C 蒸汽养护均可显著提升界面的抗裂性能; 养护龄期 3~7 d 时, UHPC-NC 界面的抗裂强度可达到其 28 d 强度的 86.1%, 而 28 d 后 UHPC-NC 界面的抗裂性能提升有限.

**关键词:** 超高性能混凝土; 普通混凝土; 接缝; 配筋 UHPC-NC 界面; 试验; 抗弯

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.011

## Flexural Behavior and Influence Factors of Reinforcement Interface of UHPC Wet-Joint

HUO Wenbin<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>2</sup>, HUANG Longtian<sup>1</sup>, CHEN Bei<sup>2</sup>

(1. Guangdong Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The interfaces between five types of reinforcement ultra-high performance concrete(UHPC) and normal concrete(NC) were evaluated with respect to their crack resistance, flexural capacity and failure modes by the flexural behavior tests, namely rectangular with holes, rectangular with high reinforcement, wedge-shaped and diamond-shaped reinforcement interfaces. The influences of treatments of NC surface, moisture degrees of NC, ages of UHPC and curing conditions on the crack resistance of UHPC-NC interface were investigated by the NC-UHPC-NC specimens' direct tensile tests. The results demonstrate that cracking strength and flexural capacity of the reinforcement interfaces between UHPC and precast NC are better than that in the intact NC deck. The failure occurs in the precast NC components in most cases. The roughened or concave-convex NC surfaces, saturated by NC substrate and 60 °C steam curing can significantly improve the crack resistance of the interface, the 86.1% of 28 d cracking strength of the UHPC-NC interface can be achieved at the early age of 3 - 7 d, and cracking strength develops slowly after 28 d.

**Key words:** ultra-high performance concrete(UHPC); normal concrete(NC); joint; reinforcement UHPC-NC interface; experiment; flexural

目前, 装配式混凝土桥梁多采用现浇普通混凝土 (NC) 湿接缝连接, 但工程实践表明, 新老混凝土界面

收稿日期: 2020-01-05; 修订日期: 2020-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778221); 广州市产业技术重大攻关计划项目(201902010019)

第一作者: 霍文斌(1978—), 男, 广西桂林人, 广东省建筑设计研究院教授级高级工程师, 学士. E-mail: 124777092@qq.com

通讯作者: 张 阳(1971—), 男, 辽宁辽阳人, 湖南大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: zhangbridge@163.com

的黏结强度较低<sup>[1]</sup>,因而装配式桥梁翼板的 NC 接缝界面容易发生开裂、漏水,甚至失效,对结构的安全性和耐久性构成严重威胁.超高性能混凝土(UHPC)是一种具有超高抗拉/压强度、超强韧性和超高耐久性的新型水泥基材料<sup>[2]</sup>.由于 UHPC 水胶比较低、不含粗骨料、且无需振捣就能够与老混凝土的凹凸表面充分接触,从而可有效提高 UHPC-NC 界面的黏结强度<sup>[3]</sup>,是一种有前途的预制拼装混凝土桥梁的现浇接缝材料.近年来,一些学者开展了 UHPC 与 NC 黏结性能的研究.如 Carbonell 等<sup>[4-6]</sup>通过劈拉、斜剪和拉拔(直拉)试验,研究了 UHPC-NC 界面在不同混凝土表面粗糙度、龄期、冻融循环次数,以及基底湿润度等情况下的黏结性能,并得到 UHPC-NC 界面的黏结抗拉强度和摩擦系数,研究表明,UHPC 与 NC 间具有优异的黏结性能,湿润和粗糙的混凝土基底对界面黏结性能尤为有利.王兴旺<sup>[3]</sup>和 Zhang 等<sup>[7]</sup>采用劈拉、斜剪、直拉和直剪试验,探讨了 NC 强度、基体表面粗糙度、湿润度,界面龄期,UHPC 养护条件,界面剂和膨胀剂等参数对 UHPC-NC 界面黏结强度的影响.Hussein<sup>[8]</sup>和 Graybeal<sup>[9]</sup>开展了预制 NC 构件 UHPC 铰缝、湿接缝试验研究,发现 UHPC 接缝性能和 UHPC-NC 界面黏结性能良好,UHPC 是目前最优异的水泥基接缝材料.

由于装配式 NC 桥梁翼板及其纵向湿接缝主要承受横向弯矩,且 UHPC-NC 界面配有钢筋,因此常用的劈拉、斜剪、直剪等界面黏结性能测定方法无法准确反映其连接受力性能,同时界面形状以及其他因素的影响也需要进一步深入研究.鉴于此,本文通过配筋 UHPC 接缝板抗弯试验,研究了不同形状配筋 UHPC-NC 界面的抗弯性能,并通过轴拉试验探讨了 NC 表面处理方式和湿润度、UHPC 养护龄期、养护方法等对配筋界面抗裂性能的影响,以期对装配式 NC 桥梁的 UHPC 湿接缝设计和施工提供参考.

## 1 接缝抗弯试验

### 1.1 试验材料

UHPC 配合比见表 1.其中钢纤维为  $\phi 0.2 \times$

13 mm 端钩型高强钢纤维,其抗拉强度大于 2 GPa,掺量(体积分数)为 2%;减水剂为聚羧酸减水剂,其减水率(质量分数)大于 30%.NC 按照 C40 混凝土配制.接缝板试件配置  $\phi 12$  的 HRB400 钢筋(N1)和  $\phi 10$  的 HPB300 钢筋(N2)2 种配筋.UHPC 和 NC 的力学性能见表 2,表中 UHPC-N、UHPC-60 分别代表在常温和 60 ℃蒸汽条件下养护的 UHPC.

表 1 UHPC 的配合比

Table 1 Mix proportion of UHPC						kg/m <sup>3</sup>
Cement	Silica fume	Quartz sand	Quartz powder	Water reducing agent	Water	Steel fiber
771.2	154.2	848.4	154.2	20.1	180.5	157.5

表 2 UHPC 和 NC 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of UHPC and NC				MPa
Material	Compressive strength	Elastic modulus	Flexural strength	
UHPC-N	143.2	$4.20 \times 10^4$	21.4	
UHPC-60	156.1	$4.72 \times 10^4$	25.6	
NC	40.2	$3.28 \times 10^4$	6.2	

### 1.2 试件制备

根据接缝形状制作 6 组共 11 块试件.考虑到装配式 NC 桥梁翼板厚度一般为 150 mm,接缝宽度须满足接缝钢筋的最小锚固长度要求,将试件尺寸设计为 1 500 mm $\times$ 300 mm $\times$ 150 mm,2 个支点间距为 1 300 mm,接缝宽度为 140 mm.试件参数详见表 3.表中 MN 为 1 块 NC 完整板(无接缝)试件,作为对照组;另外 5 组试件均为 UHPC-NC 接缝板试件(每组各 2 块),其中 3 组为矩形界面接缝板(RJ1、RJ2、RJ3)、1 组为楔形界面接缝板(WJ)、1 组为菱形界面接缝板(DJ).接缝板试件制备步骤如下:首先浇筑 NC 完整板和接缝板中的 NC 部分,并常温养护 60 d;然后将 NC 表面进行凿毛、打孔等界面处理,接着将 NC 充分润湿后,现浇 UHPC 湿接缝,再常温养护 28 d,即可进行加载试验.接缝板试件尺寸和配筋布置如图 1 所示.对照试件 MN 的尺寸、配筋和养护方式等与上述 5 组接缝板试件相同.

表 3 试件参数

Table 3 Parameters of specimens

Index	MN	RJ1	RJ2	RJ3	WJ	DJ
Amount	1	2	2	2	2	2
Joint configuration		Rectangular	Rectangular	Rectangular	Wedge	Diamond
Interface treatment		Rough	Rough+hole	Rough	Rough	Rough
Reinforcement ratio/%	2.01	2.01	2.01	3.52	2.01	2.01

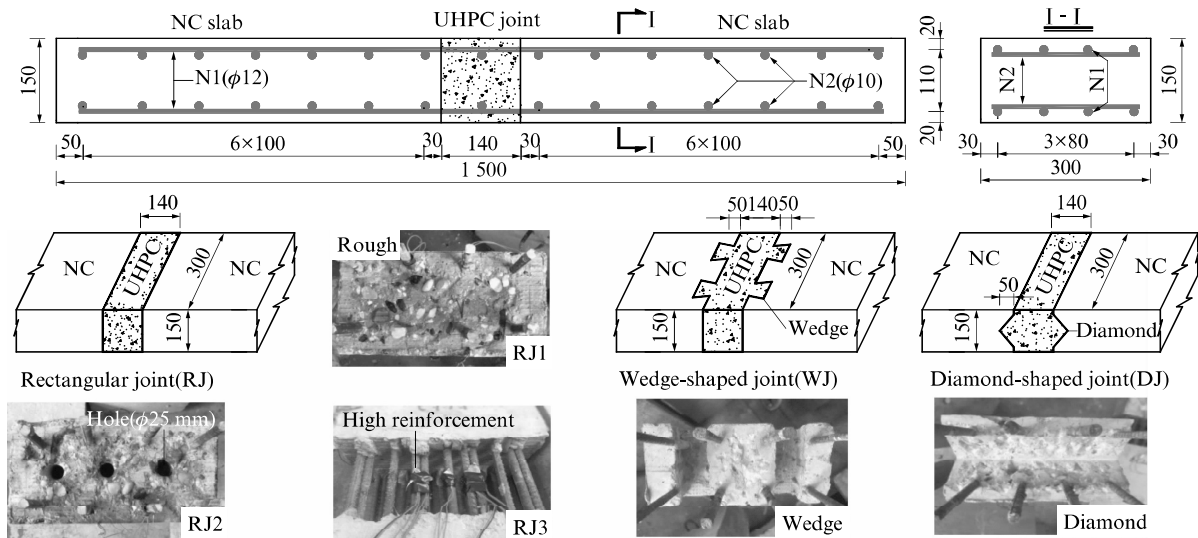


图1 接缝板试件尺寸和配筋布置

Fig. 1 Size and reinforcement arrangement of joint specimens(size:mm)

### 1.3 加载方式与测点布置

试验采用千斤顶,通过分配梁来实现两点式加载,加载间距为 400 mm. 每级试验荷载为 4 kN. 图 2 为测点布置图. 由图 2 可见:在接缝部位的顶部和底部 UHPC 表面及接缝处钢筋表面均粘贴电阻式应变计;在支点和跨中的分配梁顶部位置设置竖向千分表,用以测量试件挠度;采用裂缝观测仪测量较宽的典型裂缝和界面裂缝.

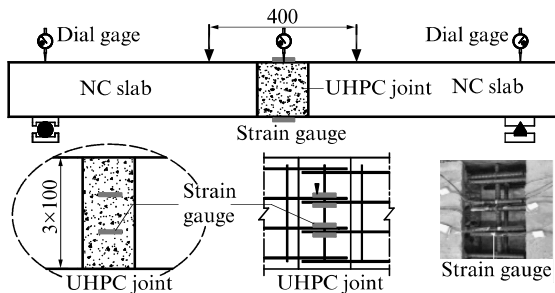


图2 测点布置图

Fig. 2 Measuring point arrangement(size:mm)

## 2 结果与分析

### 2.1 开裂过程及破坏模式

试验过程中,当 NC 板和界面分别出现第 1 条肉眼可视裂缝(缝宽约为 0.02 mm)所对应的荷载,即为其开裂强度;在加载后期,若荷载下降且试件挠度和主裂缝宽度快速增大,受压混凝土出现局部压碎,即为试件破坏状态. 试件破坏模式如图 3 所示. 图中 WJ 试件中的 A 和 B 分别为楔形接缝的两类 UHPC-NC 界面. 由图 3 可见:(1) NC 完整板 MN

试件和接缝板试件均发生了典型的弯曲破坏——受压区混凝土局部压碎,受拉区混凝土或 UHPC-NC 界面处形成较宽的受拉主裂缝;对于 MN 试件,当荷载达到极限荷载( $P_u$ )的 20% 左右时,在跨中纯弯段内出现了第 1 条弯曲横向裂缝, MN 试件破坏时有多条主裂缝出现;对于接缝板试件,其裂缝多发生在预制 NC 部位或 UHPC-NC 界面处,因 UHPC 自身优异的抗裂性,在接缝范围内的裂缝数量少、宽度小、长度短. (2) 在受弯过程中,各接缝板试件上裂缝的产生和发展形式各不相同——①对于凿毛矩形接缝板试件 RJ1,当荷载达到 0.21 $P_u$  左右时,在 UHPC-NC 界面处出现第 1 条裂缝,其初裂荷载与完整板 MN 试件基本持平;主裂缝位于界面处,最终产生界面破坏. ②对于凿毛+打孔接缝板试件 RJ2,当荷载达到约 0.20 $P_u$  时,预制 NC 板首先在打孔范围外加加载点之间的位置开裂,当荷载持续增大到 0.28 $P_u$  时, UHPC-NC 界面处开始萌生裂缝,主裂缝位于预制 NC 板内,最终预制 NC 破坏. (3) 对于密配筋矩形接缝板试件 RJ3,当荷载达到 0.21 $P_u$  左右时, UHPC-NC 界面处出现第 1 条裂缝,初裂荷载与完整板 MN 试件基本持平;但界面处裂缝扩展缓慢、并未形成主裂缝,其主裂缝位于预制 NC 板内,最终预制 NC 破坏. (4) 由于楔形接缝板试件 WJ 截面形状的特殊性,形成了 A、B 2 类 UHPC-NC 界面,当荷载达到 0.18 $P_u$  时,预制 NC 板首先开裂;当荷载增加到 0.25 $P_u$  和 0.46 $P_u$  时, A、B 界面先后开裂;主裂缝产生在楔形界面之外的预制 NC 板内,最终预制 NC 破坏. (5) 对于菱形接缝板试件 DJ,当荷

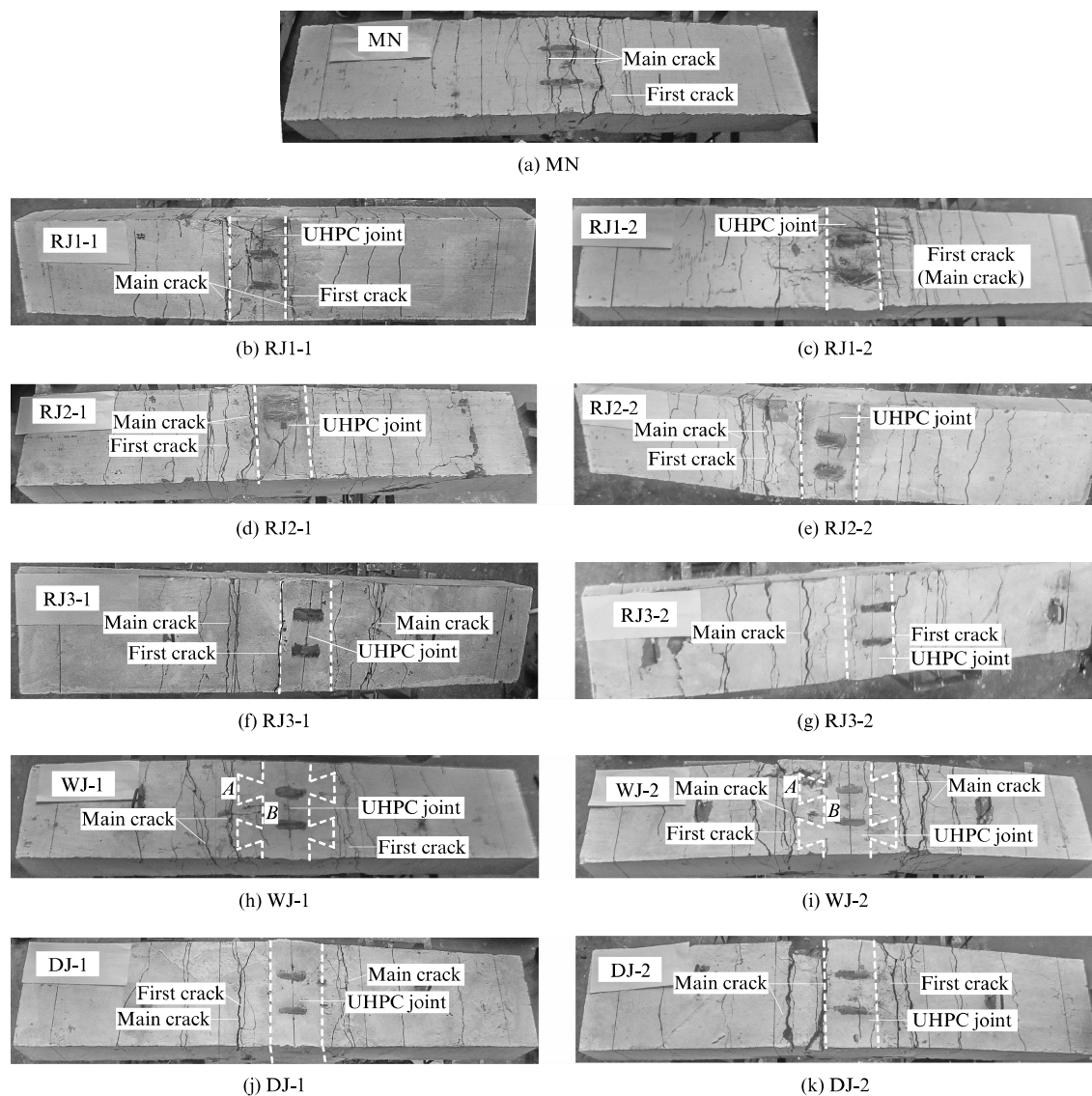


图3 试件破坏模式

Fig. 3 Failure modes of specimens

载达到  $0.21P_u$  左右时,预制 NC 板首先开裂;当荷载增至  $0.40P_u$  左右时,UHPC-NC 界面处开始出现裂缝,主裂缝产生在菱形界面外的预制 NC 板内,最终预制 NC 破坏。

综上所述,RJ1、RJ3 接缝板试件的 UHPC-NC 界面开裂时间略早于预制 NC 板,RJ2、WJ 和 DJ 接缝板试件的 UHPC-NC 界面开裂时间均晚于预制 NC 板。除 RJ1 接缝板试件外,其余各接缝板的主裂缝均出现在预制 NC 板内,UHPC-NC 界面处未形成主裂缝。RJ1 接缝板试件的界面抗弯强度及抗裂性与预制 NC 板基本持平,其余各接缝板试件的界面抗弯强度及抗裂性均高于预制 NC 板。

## 2.2 试验特征荷载

接缝板试件初裂荷载、破坏荷载、UHPC-NC 界

面处初裂荷载,以及发生部位等详见表 4。由表 4 可见:RJ1 接缝板试件的 UHPC-NC 界面处虽然首先开裂并最终形成主裂缝破坏,但其初裂荷载和破坏荷载仅比完整板试件 MN 低 1.3% 和 3.7% 左右,两者基本持平;RJ3 接缝板试件由于配筋率较高,其开裂荷载略高于完整板试件 MN 8.8%,破坏荷载高于完整板试件 MN 21.4%;RJ2、WJ 和 DJ 接缝板试件均首先在预制 NC 部位开裂,它们的界面开裂荷载明显高于完整板试件 MN,分别高出 43.7%、32.4% 和 96.2%,它们的破坏荷载基本持平或略高于完整板试件 MN,其中菱形接缝板 DJ 试件的界面抗裂性能最为优异。RJ2、WJ 和 DJ 接缝板试件界面抗裂性能良好的原因如下:(1)RJ2 接缝板试件界面处伸入预制 NC 中的 UHPC 棒提高了界面的抗弯

拉强度;(2)WJ 和 DJ 接缝板试件一方面界面黏结面积增大,显著提高了界面的黏结能力,另一方面楔形和菱形界面的横向和竖向不在同一平面内,界面不贯通,当界面产生微裂缝时会受到附近完整 NC 或 UHPC 的限制而无法扩展,使得其界面抗弯拉能力提高;(3)这 3 种接缝板试件的预制 NC 先于 UHPC-NC 界面开裂,随着荷载的增加,拉伸变形集中于预制 NC 开裂处,UHPC-NC 界面处实际所承担的拉应力增长缓慢,因此宏观表现为 UHPC-NC 界面的抗裂性较好,开裂荷载大幅提升。

表 4 试件荷载特征值  
Table 4 Load characteristic values of specimens kN

Specimen No.	First crack load	Location of first crack	First crack load of interface	Failure load	Location of main crack
MN	23.8	NC		117.6	NC
RJ1-1	22.5	Interface	22.5	111.6	Interface
RJ1-2	24.5	Interface	24.5	115.0	NC
RJ2-1	22.6	NC	30.2	119.0	NC
RJ2-2	27.6	NC	38.2	128.0	NC
RJ3-1	25.0	Interface	25.0	139.2	NC
RJ3-2	26.8	Interface	26.8	146.4	NC
WJ-1	24.0	NC	30.1	123.1	NC
WJ-2	25.2	NC	32.9	130.5	NC
DJ-1	23.2	NC	45.8	112.5	NC
DJ-2	25.2	NC	47.6	120.3	NC

总体来说,UHPC-NC 界面的黏结性能良好,甚至超过完整 NC。从微观上看,新旧混凝土的结合面存在一个类似于整体浇筑混凝土中水泥石与骨料之间的界面过渡区,而这个过渡区就是新旧混凝土界面发生破坏的关键位置<sup>[10]</sup>。UHPC 水灰比较低(0.16~0.20)时,在 NC 表面骨料周围形成的水膜较薄,使得界面处“过渡区”孔隙率较小、密实度大,因此增强了界面的黏结强度;同时,由于 UHPC 无粗骨料且水灰比低,在现浇过程中不会发生 NC 浇筑过程中所出现的粗骨料下沉、水分上浮而形成的泌水现象,因此在界面处因泌水产生的气泡也就较少,降低了界面黏结区域的孔隙率,使得界面黏结强度进一步提高。从宏观上看,由于 UHPC 没有粗骨料、且无须振捣即可获得较好的密实度,浇筑时不会在粗糙混凝土表面形成类似 NC-NC 界面中因粗骨料与界面突出的石子、水泥石“点接触”而造成的“缺浆”现象<sup>[11]</sup>,同时无粗骨料的 UHPC 浆体能够充分接触、填充混凝土的凹凸表面,确保界面处密实,从而提高了二者的黏结性能。

### 2.3 荷载-界面裂缝宽度曲线

各试件的荷载-界面裂缝宽度曲线如图 4 所示,

其中 MN 试件的曲线为其主裂缝发展曲线。由图 4 可以看出:(1)RJ1 和 MN 接缝板试件的荷载-界面裂缝宽度曲线基本呈双线性特征,以其钢筋屈服点为分界点。由于 RJ1 接缝板试件的 UHPC-NC 界面最先开裂,并且在界面处形成破坏主裂缝,因此 RJ1 接缝板试件接缝界面的荷载-界面裂缝宽度曲线明显低于其他试件,裂缝扩展速率也大于其他试件;提取特征裂缝宽度(0.05、0.10、0.20 mm)对应的试验荷载,发现 RJ1 接缝板试件界面特征缝宽所对应的荷载比 MN 试件低 6.6%、13.0%和 15.6%,表明其抗裂性能略低于完整 NC。除 RJ1 接缝板试件外,其余各接缝板试件破坏时均未在界面处形成主裂缝,它们的界面裂缝宽度基本上随着荷载的增加呈线性增长。(2)RJ2 和 RJ3 接缝板试件界面的初裂荷载高于 MN 试件(见表 3),其他特征缝宽荷载(0.05、0.10、0.20 mm)也高于 MN 试件 17.9%和 27.4%;其裂缝宽度曲线发展趋势与 MN 试件基本吻合,相同荷载下 RJ2 和 RJ3 接缝板试件界面裂缝宽度略小于 MN 试件,说明 RJ2 和 RJ3 接缝板试件的界面裂缝扩展速率略低于 MN 试件,即这 2 种界面的抗裂性能优于完整 NC,并且密配筋接缝对界面抗裂的增强作用要优于打孔接缝。(3)WJ 和 DJ 接缝板试件的荷载-界面裂缝宽度曲线高于 MN 试件,其界面开裂后裂缝发展缓慢,裂缝扩展速率明显低于 MN 试件;WJ 和 DJ 接缝板试件界面无论是初裂荷载还是其他特征缝宽荷载均远高于 MN 试件,WJ 接缝板试件界面特征缝宽荷载比 MN 试件高 109.6%、71.4%和 39.1%,DJ 接缝板试件界面特征缝宽荷载比 MN 试件高 96.3%、62.0%和 20.5%。综合来看,密配筋、界面打孔及可增大黏结面积的楔形和菱形等界面处理方法均能够有效提高 UHPC-NC 界面开裂后的抗弯拉性能,抑制界面裂缝的开展,使得界面裂缝宽度扩展速率低于完整 NC。

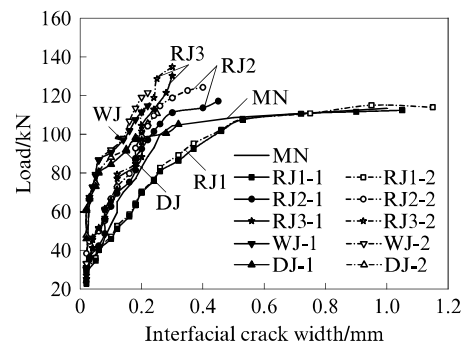


图 4 各试件的荷载-界面裂缝宽度曲线  
Fig. 4 Load-interface crack width curves of specimens

2.4 荷载-挠度曲线

图 5 为各试件的荷载-跨中挠度曲线. 由图 5 可见: MN 试件和各接缝板试件的荷载-跨中挠度曲线均呈现 3 个阶段特征——阶段①, 试件未开裂, 其荷载-挠度曲线斜率最大, 此时混凝土和钢筋共同承受弯拉应力, 各试件的抗弯刚度差异不大; 阶段②, 受拉区混凝土开裂, 但受拉钢筋处于弹性状态, 荷载-挠度曲线斜率有所减小, 即抗弯刚度比阶段①略有下降, 此时受拉区混凝土开裂、部分失效, 主要由钢筋提供抗拉作用; 阶段③, 受拉钢筋屈服, 荷载-跨中挠度曲线趋于平缓, 荷载基本不变、但跨中挠度急剧增加. 此外在接缝钢筋屈服前, 在相同挠度下各试件承受的荷载大小依次为 RJ2、RJ3、WJ、MN、DJ 和 RJ1. RJ1 和 DJ 接缝板试件的等挠度荷载略低于 MN 试件, 由于楔形界面的黏结面积增大, 因此 WJ 试件的等挠度荷载与 MN 试件基本持平; RJ2 和 RJ3 接缝板试件由于孔内 UHPC 榫和界面密配筋的加强作用, 其等挠度荷载明显高于 MN 试件. 此外, 从试件破坏挠度对比来看, 所有接缝板与 NC 完整板的破坏挠度值相差不大, 平均误差不超过 5%.

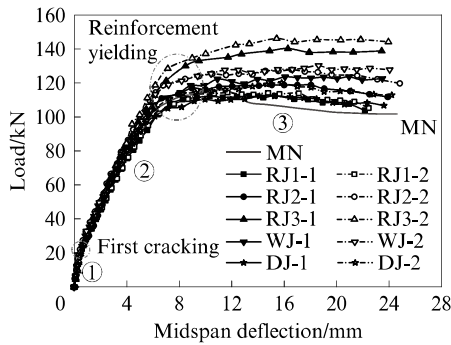


图 5 试件的荷载-跨中挠度曲线  
Fig. 5 Load-midspan deflection curves of specimens

3 UHPC-NC 界面抗裂性能影响因素

为研究各影响因素对 UHPC-NC 界面抗裂性能的影响, 进行 UHPC 湿接缝轴拉试验. 图 6 为轴拉试件示意图及张拉装置. 由图 6 可见, 轴拉试验采用狗骨试件, 试件长 500 mm、截面尺寸 100 mm×50 mm, 接缝长 80 mm, 采用 HRB400 钢筋搭接连接. 试件制作步骤如下: 先将两端 C40 级 NC 部分自然养护 60 d, 再浇筑 UHPC 湿接缝, 常温养护 28 d 或 60℃蒸汽养护 72 h 后加载. 轴拉试验采用 60 t MTS 试验机加载, 加载方式为压力控制, 每级加载 200 N, 加载速率 10 N/s. 试件两端采用轴拉配套夹具固定, 夹具外侧设有万向球铰, 以保证尽可能减小

偏心弯矩产生的影响. 试件中部设置应变计和引伸仪, 以测量试件的应变和变形. 裂缝宽度采用裂缝观测仪量测.

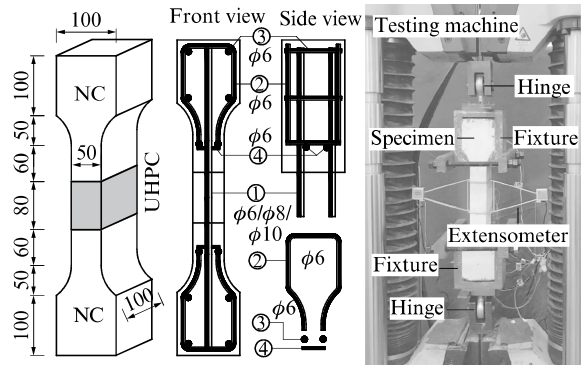


图 6 轴拉试件示意图及张拉装置  
Fig. 6 Direct tensile specimen and test setup(size:mm)

4 种 UHPC-NC 界面抗裂性能影响因素包括: NC 表面处理方式、NC 湿润度、UHPC 养护龄期和养护方法. 将“NC 表面凿毛(Ro)-NC 湿润(ASW)-常温养护 28 d(NC-28)”的试件作为基本组. 为研究每一因素对界面抗裂性能的影响, 仅改变基本组试件中的对应参数, 其余参数保持不变. 试验参数详见表 5.

表 5 试验参数  
Table 5 Test parameters

Parameter	Detailed situation
Treatment of NC surface	Wire brushed(Wb), Rough(Ro), Hole+Rough(HR), Groove+Rough(GR), Diamond+Rough(DR)
Moisture degree	Air surface dry(ASD), air surface wet(ASW), saturated surface dry(SSD)
Curing age of UHPC	3, 7, 28, 180 d
Curing condition	Normal-temperature curing 28 d, steam curing 72 h at 60℃

采用裂缝观测仪观测界面处裂缝的发展情况, 将首次出现的宽度约为 0.01 mm 裂缝所对应的试验荷载定义为界面开裂荷载. 界面初裂时, 裂缝宽度和长度均较小; 随着荷载的增加, 裂缝沿界面扩展, 直至贯通整个界面. 试验结果表明, 每组 3 个试件的实测 UHPC-NC 界面开裂强度变异系数均为 0.7%~7.8%, 变异系数平均值较低, 仅为 3.3%. 这说明同组 3 个试件的界面开裂强度试验结果离散性在合理范围内.

3.1 NC 表面处理方式

采用钢刷刷毛(Wb)、凿毛(Ro)、打孔+凿毛(HR)、刻槽+凿毛(GR)和菱形+凿毛(DR)5 种界



面处理方式,对常温养护 28 d 且 NC 湿润的 UHPC-NC 界面进行轴拉试验,其开裂荷载对比如图 7 所示。由图 7 可以看出:UHPC-NC 界面的抗裂性能对 NC 表面粗糙度较为敏感,NC 表面越粗糙、界面的抗裂性能越好;UHPC-NC 界面的抗裂性能从高到低依次为 DR、GR、HR、Ro 和 Wb 界面;粗糙的 Ro 界面开裂荷载比相对光滑的 Wb 界面提高了 188.0%;与 Ro 界面相比,HR、GR、DR 界面的开裂荷载分别提高了 5.5%、50.0%和 75.0%;在界面裂缝发展过程中,DR、GR、HR 界面裂缝宽度发展较慢,同等裂缝宽度的情况下界面承担荷载能力均强于 Ro 和 Wb 界面。由于现浇 UHPC 与粗糙 NC 的外露集料之间具有优异的黏结性能和良好的互锁作用,加之钻孔 UHPC 榫、刻槽 UHPC 键齿与 NC 的机械咬合作用,使得 HR、GR 界面抗裂性能有所加强。值得注意的是,将平面矩形界面变成内凹的菱形界面,增大了界面的黏结面积,其抗裂性能提升最为显著。

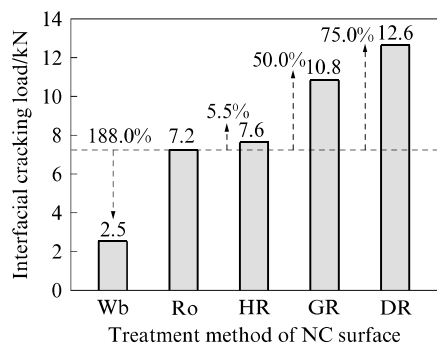


图 7 NC 表面处理方式对 UHPC-NC 界面开裂荷载的影响  
Fig. 7 Effects of treatment method of NC surface on UHPC-NC interfacial cracking load

### 3.2 NC 湿润度

试验设置 2 组 NC 湿润度参数:一组为自然养护条件下的饱和面干(ASD)、湿润(ASW)、湿饱和(SSD)3 种湿润度试件;另一组为蒸汽养护条件下的 ASD、ASW 2 种湿润度试件。不同 NC 湿润度 UHPC-NC 界面的开裂荷载对比如图 8 所示。由图 8 可见:与 ASD 界面相比,常温养护下 ASW 和 SSD 界面的开裂荷载分别提高了 28.6%和 71.4%,蒸汽养护条件下 ASW 界面的开裂荷载提高了 70.6%。说明 UHPC-NC 界面抗裂性能随着 NC 湿润度的增加而大幅提高,充分湿润 NC 可以显著提升界面的开裂强度。其原因在于:NC 亲水性较强,如果 NC 干燥,则界面处 UHPC 中的水分很容易浸入 NC 中,使得 UHPC(低水灰比)水化反应减弱,降低了界面黏结强度。因此,实际工程中现浇 UHPC 接缝前,应

充分湿润 NC,以获得良好的 UHPC-NC 界面抗裂性能。此外,界面越湿润,界面裂缝扩展速度越小;同等荷载条件下,SSD 界面裂缝宽度最小,而 ASD 界面裂缝宽度最大。

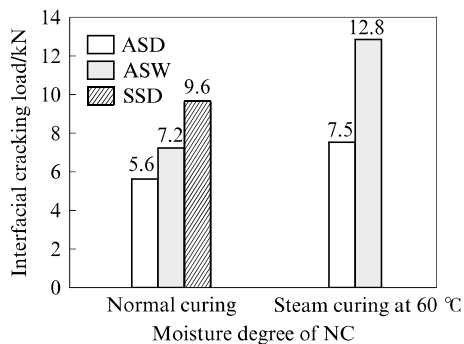


图 8 NC 湿润度对 UHPC-NC 界面开裂荷载的影响  
Fig. 8 Effects of moisture degree of NC substrate on UHPC-NC interfacial cracking load

### 3.3 UHPC 养护龄期

对自然养护 3、7、28、180 d 的试件进行试验,其界面开裂荷载对比如图 9 所示。由图 9 可见:随着 UHPC 养护龄期的增长,UHPC 强度逐渐增加,界面的开裂荷载也随之增大;3 d 龄期时,UHPC-NC 界面的开裂荷载仅为 28 d 龄期界面的 29.2%;7 d 龄期时,界面抗裂性能增长迅速,其开裂荷载达到 28 d 界面的 86.1%,7~28 d 龄期内,界面抗裂强度增长了 13.9%。这说明 UHPC-NC 界面在 3~7 d 的早期龄期内,即可获得大部分抗裂能力。此外,28~180 d 龄期界面的开裂荷载变化不大,仅提高了 8%左右。UHPC-NC 界面的抗裂强度在早期龄期(3~7 d)增长较快,中后期(28~180 d)增长缓慢,该优点可以确保现浇 UHPC 湿接缝能够在短时间内形成足够的界面强度而尽快投入使用。从界面裂缝扩展来看,28 d 龄期界面的开裂速度最小;而 3 d 龄期界面裂缝发展最快,相同裂缝宽度的持荷能力也最小。

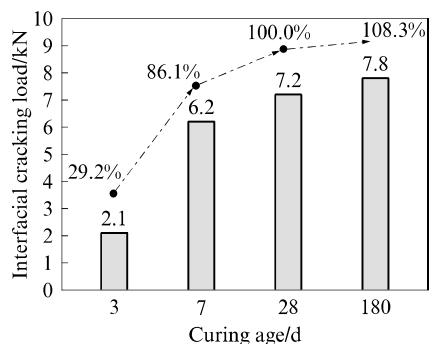


图 9 养护龄期对 UHPC-NC 界面开裂荷载的影响  
Fig. 9 Effect of curing age on UHPC-NC interfacial cracking load

### 3.4 养护方法

常温养护、60℃蒸汽养护2种养护条件下,UHPC-NC界面开裂荷载对比如图10所示。60℃蒸汽养护条件下的UHPC抗压强度高于常温养护(见表1),说明UHPC在高温蒸汽养护下可以获得较好的力学性能。由图10可以看出,60℃蒸汽养护72h的试件界面开裂荷载明显强于自然养护28d的界面,60℃蒸汽养护ASD界面和ASW界面的开裂荷载分别高出对应自然养护界面33.9%、77.8%。说明蒸汽养护能够提升UHPC-NC界面的抗裂性能。此外,60℃蒸汽养护的界面承担载荷的能力强于自然养护28d的界面,在裂缝发展阶段的相同荷载作用时,蒸汽养护界面的裂缝宽度较小、自然养护界面的裂缝宽度相对较大。

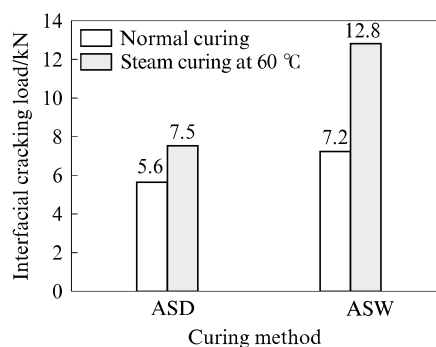


图10 养护方法对UHPC-NC界面开裂荷载的影响  
Fig. 10 Effects of curing method on UHPC-NC interfacial cracking load

## 4 结论

(1)RJ1接缝板试件界面开裂荷载略低于完整NC板,RJ3试件界面开裂荷载略高于完整NC板,RJ2、WJ、DJ接缝板试件界面开裂荷载明显高于完整NC板;除RJ1接缝板试件外,其余4种接缝板试件(RJ2、RJ3、WJ、DJ)均在预制NC部位破坏,即这些界面的抗弯承载力高于完整NC板。

(2)凿毛矩形UHPC接缝采用钻孔和密配筋处理后,其UHPC-NC界面的裂缝扩展速率略慢于完整NC板;而楔形和菱形界面由于黏结面积增大和咬合作用加强,开裂后裂缝发展缓慢,其裂缝扩展速率明显低于完整NC板。

(3)UHPC-NC界面抗裂性能对NC表面粗糙度和湿润度较为敏感,NC表面进行粗糙和充分湿润处理后,可显著提升界面的抗裂性能。

(4)UHPC-NC界面在早龄期(3~7d)的抗裂强度可以达到其28d强度的86.1%,而28d后界面的抗裂能力提升有限;同时,相比于常温养护,60℃蒸

汽养护能够提升UHPC-NC界面的抗裂性能。

### 参考文献:

- [1] 赵志方,赵国藩,刘健,等.新老混凝土粘结抗拉性能的试验研究[J].建筑结构学报,2001,22(2):51-55.  
ZHAO Zhifang, ZHAO Guofan, LIU Jian, et al. Experimental study on adhesive tensile performance of young on old concrete[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 51-55. (in Chinese)
- [2] DUGAT J, ROUX N, BERNIER G. Mechanical properties of reactive powder concretes[J]. Materials and Structures, 1996, 29: 233-240.
- [3] 王兴旺. UHPC与普通钢筋混凝土结构界面抗剪性能研究[D].长沙:湖南大学,2016.  
WANG Xingwang. Research on the interfacial shear behavior of UHPC and reinforced concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [4] CARBONELL M M A, HARRIS D K, AHLBORN T M, et al. Bond performance between ultra-high performance concrete and normal-strength concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(8): 04014031-1-9.
- [5] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A. Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra-high performance fiber concrete repair composite[J]. Materials and Structures, 2013, 46(5): 743-753.
- [6] HUSSEIN H H, WALSH K K, SARGAND S M, et al. Interfacial properties of ultra-high performance concrete and high-strength concrete bridge connections[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 04015208-1-10.
- [7] ZHANG Y, ZHU P, LIAO Z Q, et al. Interfacial bond properties between normal strength concrete substrate and ultra-high performance concrete as a repair material[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 11743
- [8] HUSSEIN H H. Laboratory evaluation of ultrahigh-performance concrete shear key for prestressed adjacent precast concrete box girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(2): 04016113-1-13.
- [9] GRAYBEAL B A. Behavior of field-cast ultra-high performance concrete bridge deck connections under cyclic and static structural loading[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2010.
- [10] 何伟.新老混凝土界面粘结强度的研究[D].长沙:湖南大学,2004.  
HE Wei. The research on the interfacial bond strength of new-to-old concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2004. (in Chinese)
- [11] 赵志方,周厚贵,袁群,等.新老混凝土粘结机理研究与工程应用[M].北京:水利水电出版社,2003.  
ZHAO Zhifang, ZHOU Hougui, YUAN Qun, et al. Bonding mechanism research and engineering application of new and old concrete[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese)