

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.134



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



带肋超高性能混凝土与普通混凝土结合面 剪切性能

王朋^{a,b}, 尤学辉^a, 史庆轩^{a,b}, 陶毅^{a,b}

(西安建筑科技大学 a. 土木工程学院; b. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要:为研究超高性能混凝土(UHPC)与普通混凝土(NC)的界面剪切性能,设计并制作 13 个 UHPC-NC 直剪试件,通过推出试验研究 UHPC 肋条宽度、高度以及间距对界面破坏模式和抗剪承载力的影响。基于 ABAQUS 建立 UHPC-NC 试件的有限元模型,并进行参数分析。结果表明:带肋 UHPC-NC 界面的破坏模式主要有完全界面破坏及 UHPC 肋条剪断、肋条外界面破坏及 UHPC 肋条间嵌入的 NC 部分破坏、肋条外界面破坏及 UHPC 肋条间嵌入的 NC 完全破坏。肋条宽度为 10 mm 的试件破坏模式主要为完全界面破坏及 UHPC 肋条剪断,肋条宽度为 15、20 mm 的试件对应后两种破坏模式;整体来看,随着肋条宽度和间距的增加,界面的抗剪承载力和滑移也逐渐增加,表现出更好的变形能力;当肋条宽度为 10 mm 时,增加肋条高度对抗剪承载力几乎没有影响,而当肋条宽度为 15、20 mm 时,增加肋条高度可以提高界面抗剪承载力。此外,增加肋条数量也可以提高抗剪承载力,但随着肋条数量的增多,承载力提升幅度显著降低。

关键词:超高性能混凝土;UHPC-NC 界面;推出试验;剪切性能;有限元模拟

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2026)01-0142-11

Shear behavior of rib-treated interface between ultra-high performance concrete and normal concrete

WANG Peng^{a,b}, YOU Xuehui^a, SHI Qingxuan^{a,b}, TAO Yi^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The present study investigates the interfacial shear performance between ultra-high performance concrete (UHPC) and normal concrete (NC). To this end, 13 UHPC-NC direct shear specimens were designed and fabricated. Through push-out tests, the influence of UHPC rib width, height, and spacing on the interfacial failure mode and shear bearing capacity was discussed. Furthermore, a finite element model of the UHPC-NC

收稿日期: 2023-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(52178159、52178505); 陕西省教育厅协同创新中心项目(23JY040)

作者简介: 王朋(1987-), 男, 博士, 教授, 主要从事新型水泥基材料及新型混凝土结构体系研究, E-mail: wangpeng@xauat.edu.cn。

尤学辉(通信作者), 男, 博士生, E-mail: youxuehui4242@163.com。

Received: 2023-08-01

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52178159, 52178505); Scientific Research Plan Projects of Education Department of Shaanxi Provincial Government (No. 23JY040)

Author brief: WANG Peng (1987-), PhD, professor, main research interests: new cement-based materials and new concrete structural systems, E-mail: wangpeng@xauat.edu.cn.

YOU Xuehui (corresponding author), PhD candidate, E-mail: youxuehui4242@163.com.

specimens was established using the software ABAQUS, and a parameter analysis was conducted. The results indicate that the failure modes of the ribbed UHPC-NC interface mainly include: complete interface failure and UHPC ribs sheared off; partial interface failure and partial failure of NC embedded between UHPC ribs; and partial interface failure and complete failure of NC embedded between UHPC ribs. The specimens with rib widths of 10 mm primarily exhibit the first failure mode, while specimens with rib widths of 15 and 20 mm correspond to the latter two failure modes. It has been demonstrated that the shear capacity and slip of the interface increase with an increase in rib width and spacing, thereby demonstrating enhanced ductility. When the rib width is 10 mm, increasing the rib height has little effect on the shear bearing capacity, while when the rib width is 15 and 20 mm, increasing the rib height can improve the shear bearing capacity. In addition, increasing the number of ribs can improve the shear bearing capacity, but with the increase of the number of ribs, the effectiveness of bearing capacity enhancement significantly decreases.

Keywords: ultra-high performance concrete; UHPC-NC interface; push out test; shear performance; finite element simulation

因强度高、耐久性和韧性好的特点,近年来,超高性能混凝土(UHPC)被广泛地用于各种工程实际中。部分学者利用UHPC的优异性能,将其制成薄板,用作免拆模板。UHPC免拆模板不仅可以满足施工模板的要求,且在后续施工过程中不用拆卸,模板与现浇混凝土构件形成一个整体,共同受力。相关研究表明^[1-5],与普通RC构件相比,UHPC免拆模板-RC构件的承载力和延性都更好,说明UHPC用作免拆模板能有效提高现浇混凝土结构的力学性能。然而,在受力过程中UHPC免拆模板-RC构件模板与后浇混凝土在结合面处容易发生剥离,从而改变试件的破坏模式,带来一定的安全隐患。为保证UHPC免拆模板-RC构件达到“等同现浇”整体的工作性能,需采取相应措施来增强模板与后浇混凝土结合面的黏结强度。

近年来,学者们对UHPC与普通混凝土(NC)界面的黏结性能展开了大量研究。影响UHPC-NC界面黏结性能的因素很多,如混凝土强度、结合面粗糙度、UHPC养护温度等^[6-9]。Feng等^[10]通过单剪试验,研究了钢纤维性能对界面抗剪强度的影响,结果表明,随着钢纤维含量的增加,界面抗剪强度明显提高。Kim等^[11]和Gopal等^[12]研究了侧向应力对界面黏结性能的影响,结果表明,界面的抗剪强度随着侧向应力的增加而提高。此外,Hussein等^[13]还通过直接拉伸试验得到了不同界面粗糙度下UHPC-NC黏结面的抗拉强度。

已有研究表明^[14-17],结合面粗糙度对UHPC-NC界面黏结性能的影响最大,采用植筋、拉毛、开槽(设肋)等界面处理方式可以显著提高结合面的黏结强度。Tayeh等^[18]发现,经过喷砂处理后的界面斜剪强度提高超过了100%,Zhang等^[19]通过推出试验研究了拉毛、开槽等界面处理方式对UHPC-NC

界面剪切性能和破坏模式的影响,结果表明,开槽处理的界面剪切强度高于拉毛处理界面。周尚猛等^[20]对界面经过凿毛处理和植筋处理的UHPC-NC试件黏结性能进行了研究,结果表明,两种界面处理方式对抗剪刚度影响不大,但对抗剪强度有显著影响。周建庭等^[21]、Jiang等^[22]和Guan等^[23]还对采用肋条处理的UHPC-NC界面的抗剪性能进行了研究,结果表明,采用肋条处理可显著提高界面抗剪承载能力,且受肋条尺寸和形状的影响,试件的结合面破坏模式存在明显差异。

综上,UHPC-NC界面黏结性能受多种因素影响,对界面进行粗糙处理可以较好地提高结合面的剪切性能,常见的界面处理方式中,设肋处理布置简单,效果显著。当前也有学者对带肋UHPC-NC界面的剪切性能进行了一些研究,但大多仅研究了单一因素,如肋条宽度或者肋条数量对界面性能的影响,而对肋条尺寸和间距等多因素组合影响下UHPC-NC界面剪切性能的研究相对有限。为此,笔者通过推出试验对带肋UHPC-NC结合面的抗剪性能进行研究,详细分析肋条宽度、高度及间距对结合面抗剪承载力和破坏模式的影响。同时,基于ABAQUS软件建立了UHPC-NC试件的有限元分析模型,并进行进一步的参数分析。

1 试验概况

1.1 试件设计

为研究UHPC肋条宽度、高度和间距对UHPC-NC界面剪切性能的影响,设计了UN1~UN5共5组13个UHPC-NC试件。UHPC-NC试件采用受力明确的Z形剪切试件,试件高420 mm、宽

200 mm、厚 100 mm, 结合面的面积为 100 mm×180 mm, 如图 1 所示。设计时, UHPC 肋条宽度选用 10、15、20 mm; 高度选用 5、10、15 mm; 间距选用 40、70、100 mm。此外, 设计了一组无肋条的平面结合面试件(组 UN5)作为对比试件, 各试件的肋条参数见表 1。

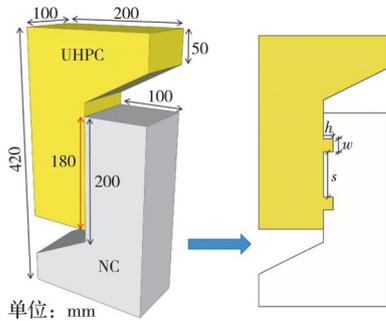


图 1 试件尺寸

Fig. 1 Size of the specimens

表 1 试件参数

Table 1 Details of the specimens

分组	试件编号	肋条宽度 w/mm	肋条高度 h/mm	肋条间距 s/mm
UN1	UN1-1	10	10	40
	UN1-2	10	10	70
	UN1-3	10	10	100
UN2	UN2-1	15	10	40
	UN2-2	15	10	70
	UN2-3	15	10	100
UN3	UN3-1	20	10	40
	UN3-2	20	10	70
	UN3-3	20	10	100
UN4	UN4-1	10	5	40
	UN4-2	10	10	40
	UN4-3	10	15	40
UN5	UN5-1	结合界面为平面		
	UN5-2	结合界面为平面		

注:表中 UN1-1 和 UN4-2 为同一试件。

1.2 试件制作

UHPC-NC 剪切试件的制作流程为

1) 根据试件尺寸制作底模, 底模采用木模板制作, 分为 UHPC 和 NC 两部分, 如图 2(a) 所示。

2) 底模制作完成后, 首先浇筑 UHPC 部分, 浇筑前, 将底模内部清理干净, 并洒水润湿。浇筑完成后的 UHPC 部分放在室温下养护 1 周, 如图 2(b) 所示。

3) 待 UHPC 养护完成后, 浇筑普通混凝土部分, 浇筑前, 对 UHPC 表面进行洒水润湿, 以增强 UHPC-NC 结合面的黏结性能, 制作完成的试件如图 2(c) 所示。



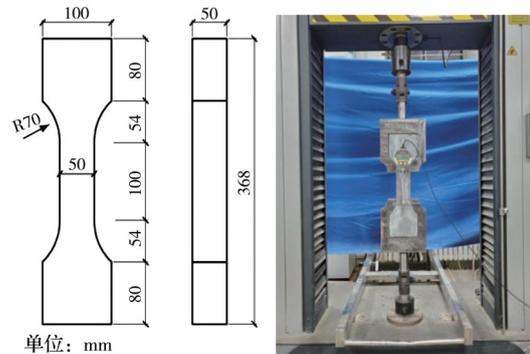
(a) 底模 (b) UHPC 部分浇筑 (c) 浇筑完成试件

图 2 试件制作

Fig. 2 Manufacture of specimens

1.3 材料性能

试验中试件的 UHPC 配合比如表 2 所示, 普通混凝土为商品混凝土。浇筑 UHPC-NC 试件时, 预留 150 mm×150 mm×150 mm 的普通混凝土立方体试块和 100 mm×100 mm×100 mm 的 UHPC 立方体试块, 此外, 还制作了 UHPC 抗拉试块, 如图 3 所示。试块制作完成后, 与试件同条件养护, 根据规范^[24]测试立方体试块的材料性能, UHPC 的抗拉强度通过直接拉伸试验得到, 抗拉试件的测试曲线如图 4 所示。表 3 为材性试验结果, 其中立方体抗压强度取平均值, 其他材料参数根据规范^[24]和文献^[25]计算得到。



单位: mm

(a) 试件尺寸

(b) 加载装置

图 3 UHPC 抗拉测试

Fig. 3 Axial tension test of UHPC

表 2 UHPC 配合比

Table 2 Mix proportions of UHPC

水泥	硅灰	石英粉	石英砂	减水剂	钢纤维	水胶比
1	0.25	0.32	1.64	0.02	0.01	0.13

表 3 混凝土力学性能

Table 3 Mechanical properties of concrete

混凝土种类	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
NC	24.7	18.8	2.3	28.0
UHPC	122.1	101.3	6.8	39.4

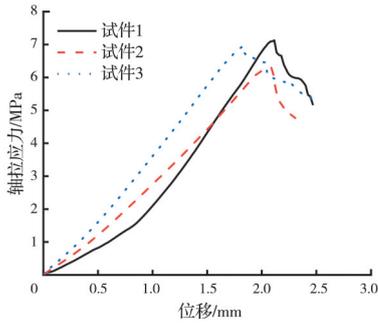


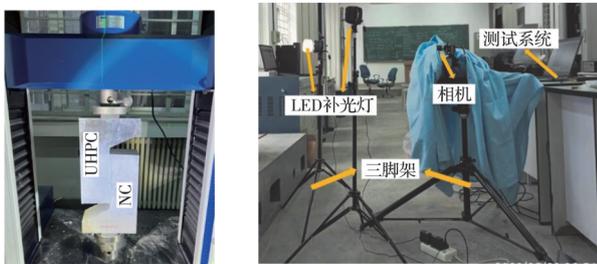
图 4 UHPC 抗拉强度-位移曲线

Fig. 4 Tensile strength-displacement curves of UHPC

1.4 加载装置与测试方法

试验采用量程 300 kN 的电液伺服压力试验机加载,加载装置见图 5(a)。安装试件时,采用激光水平仪对试件进行调整对中,确保试件放置在加载台的正中位置,避免出现偏心受压。正式加载前,先对试件进行 2 kN 的预加载,保证试件与加载板充分接触。预加载结束后,采用位移控制整个加载过程,以 0.2 mm/min 的恒定速率加载至试件破坏。

试验中,试件的荷载通过压力传感器直接采集,试件结合面的滑移采用数字图像(digital image correlation,DIC)相关技术实时监测,测量设备见图 5(b)。与传统接触式测试方法相比,DIC 技术具有非接触、无损、全场、高精度等优点。



(a) 加载装置 (b) DIC 数据采集设备

图 5 加载与测试装置

Fig. 5 Loading and measuring devices

2 试验结果与讨论

2.1 试件破坏模式与承载力

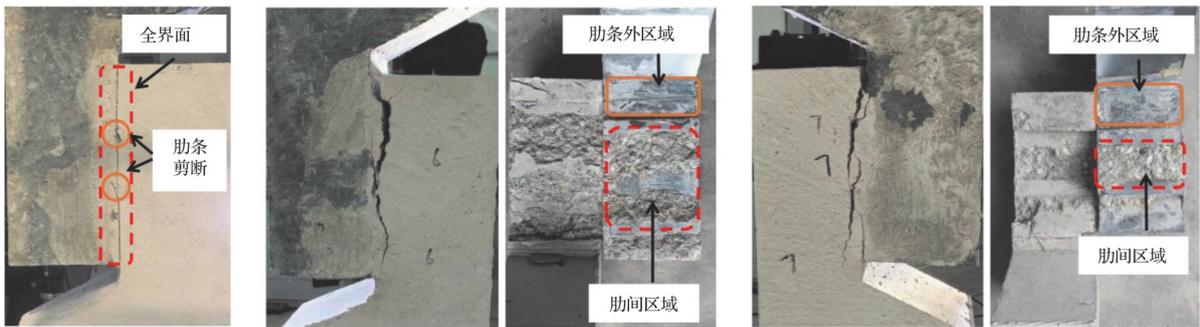
图 6 为带肋试件的典型破坏形态,主要包括 3 种类型:1)完全界面破坏及 UHPC 肋条剪断(A 类),破坏发生在 UHPC-NC 结合面处,且 UHPC 肋条从根部被剪断;2)肋条外界面破坏及 UHPC 肋条间嵌入的 NC 部分破坏(B 类),破坏时,靠近加载端的纯 UHPC-NC 界面出现分离,UHPC 肋条间的部分 NC 出现破坏,黏在 UHPC 表面;3)肋条外界面破坏及 UHPC 肋条间的 NC 完全破坏(C 类),破坏时,靠近加载端的纯 UHPC-NC 界面出现分离,UHPC 肋条间的 NC 完全断裂,嵌入到肋间表面。

表 4 为各试件的承载力和破坏模式。由表 4 可知,就破坏模式而言,肋条宽度为 10 mm 的试件更容易发生 A 类破坏,试件的 UHPC 肋条从根部被完全剪断,而对于肋条宽度为 15、20 mm 的试件,其破坏模式主要为 B 类或 C 类。试件的破坏以肋条外界

表 4 试件承载力及破坏情况

Table 4 Load-carrying capacity and failure modes of specimens

试件编号	(w/h/s)/mm	峰值荷载 V_t /kN	峰值滑移 S_u /mm	破坏模式
UN1-1	10/10/40	32.20	0.018 0	A 类
UN1-2	10/10/70	22.37	0.015 2	C 类
UN1-3	10/10/100	28.01	0.030 0	A 类
UN2-1	15/10/40	32.54	0.018 7	C 类
UN2-2	15/10/70	29.98	0.029 3	B 类
UN2-3	15/10/100	23.17	0.044 1	B 类
UN3-1	20/10/40	33.66	0.030 8	C 类
UN3-2	20/10/70	36.04	0.158 9	C 类
UN3-3	20/10/100	39.79	0.100 8	C 类
UN4-1	10/5/40	12.22	0.047 7	B 类
UN4-2	10/10/40	32.20	0.018 0	A 类
UN4-3	10/15/40	32.40	0.020 2	A 类
UN5-1		11.39	0.009 7	
UN5-2		13.23	0.001 2	



(a) A 类破坏 (b) B 类破坏 (c) C 类破坏

图 6 试件典型破坏模式

Fig. 6 Typical failure modes of specimens

面剥离和 NC 断裂为主, UHPC 肋条出现轻微损伤, 但并未发生剪断。此外, 值得注意的是, 尽管肋宽为 15、20 mm 的试件都没有出现肋条剪断破坏, 但破坏模式却表现出明显的差异。肋宽为 15 mm 的试件多为 B 类破坏, 试件肋条间的结合面更容易发生剥离, 而肋条宽度为 20 mm 的试件全为 C 类破坏, 肋间并没有发生界面剥离, 破坏以肋间 NC 完全断裂为主。综上可知, 试件的破坏模式受肋条宽度和间距共同影响, 且肋条宽度对试件破坏模式的影响更为显著。

就承载力而言, 肋条宽度为 20 mm 的试件比宽度为 10、15 mm 的试件承载力更高, 说明增大肋条宽度可以提高试件的抗剪承载力。对于肋条宽度为 10、15 mm 的试件, 总体上看, 承载力随肋间距的增加而降低; 而对于肋条宽度为 20 mm 的试件, 承载力随肋间距的增加而提高。对于肋高度的影响, 当肋条高度为 5 mm 时, 试件 UN4-1 承载力很小, 与结合面为平面的试件承载力基本相同, 说明此时肋条与 NC 基体间的机械咬合力和摩擦力较弱, 肋条不能起到提高界面抗剪承载力的作用。对于试件 UN4-2 和 UN4-3, 承载力基本相同, 说明肋宽为 10 mm 时, 增加肋条高度对提高抗剪承载力作用不大。

就峰值滑移来看, 带肋试件的峰值滑移显著比结合面为平面的试件高, 且肋宽和肋间距越大, 试件峰值滑移越大, 表明在 UHPC-NC 界面设置肋条可以提升结合面的整体工作性能, 且增加肋宽和肋

间距有利于提高界面的变形能力。

2.2 荷载-滑移曲线

试验中, 界面的滑移值取图 7 中 A、B 两点的相对滑移值。图 8 为试验获得的各试件荷载-滑移曲线。由图 8(a) 可知, 出现 UHPC 肋条剪断破坏的试件表现出较好的变形能力, 界面在失效前都经历了相对较长的滑移, 这是因为 UHPC 韧性好, 有效地提高了界面的变形性能。

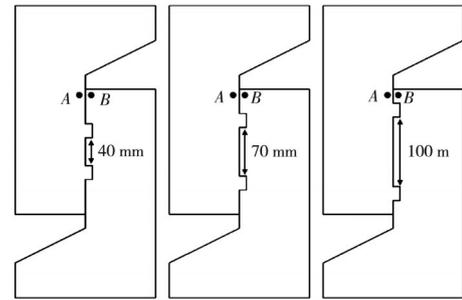


图 7 相对滑移测点位置选取

Fig. 7 Selection of relative slip measuring point positions

由图 8(b)、(c) 可知, 肋条宽度为 15、20 mm 的试件荷载-滑移曲线都存在一个明显的屈服阶段, 主要原因为 UHPC 肋条中钢纤维的存在延缓了界面的剪切破坏过程。肋间距为 70、100 mm 的试件在界面失效前的滑移值明显高于肋间距为 40 mm 的试件, 说明增大肋间距可以提高界面的变形能力。此外, 当肋间距相同时, 增大肋条宽度可以显著提高界面的滑移值, 其最大增幅超过 300%。

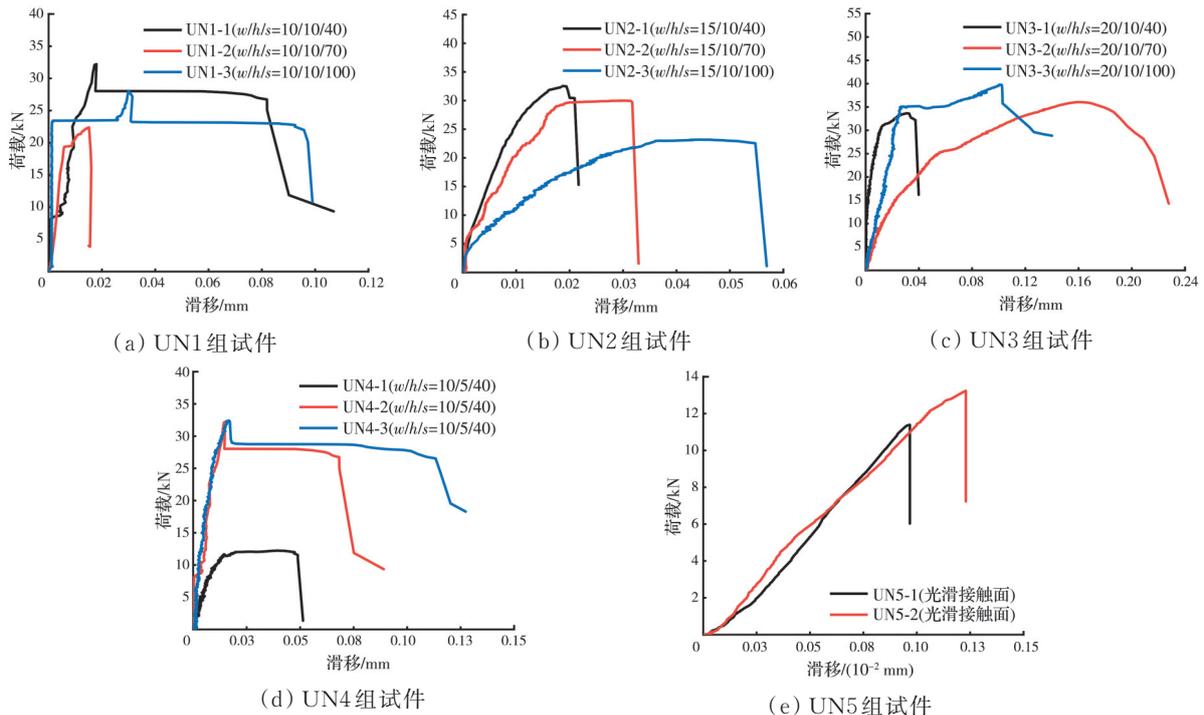


图 8 试件荷载-滑移曲线

Fig. 8 Load-slip curves of specimens

由图 8(d)可知,对于试件 UN4-1,尽管肋条宽度为 5 mm 时对提高界面抗剪承载力作用不大,但由于 UHPC 肋条的存在,相比光面试件,其界面变形能力得到了明显提升。试件 UN4-2 和 UN4-3 的滑移曲线类似,峰值荷载后都经历了一个相对较长的水平段,但由于 UHPC 肋条良好的韧性,使得试件在峰值荷载后界面并没有马上失效。由图 8(e)可知,结合面为平面的试件荷载-滑移曲线仅有弹性段,当加载到峰值荷载后,界面突然失效,表现出明显的脆性破坏。

2.3 界面抗剪强度和刚度

试件界面抗剪强度计算方法如式(1)所示。

$$\tau_u = \frac{V_u}{A_c} \quad (1)$$

式中: V_u 为界面抗剪承载力; A_c 为结合面面积。界面的抗剪刚度计算方法参考文献[19],如式(2)所示。

$$K = \frac{0.5V_u}{S_{0.5}A_c} \quad (2)$$

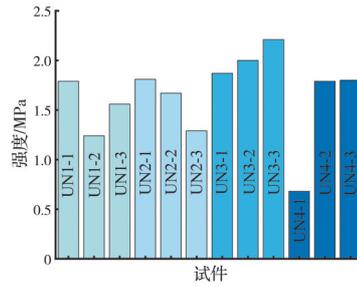
式中: $S_{0.5}$ 为试件滑移曲线上荷载为峰值荷载的 1/2 时对应的滑移值。由此可得各试件的抗剪强度及抗剪刚度,如表 5 所示。为方便对比肋条尺寸和间距对试件强度和刚度的影响,将 UN1-UN4 组试件结果绘制成柱状图,如图 9 所示。

表 5 界面抗剪强度和抗剪刚度

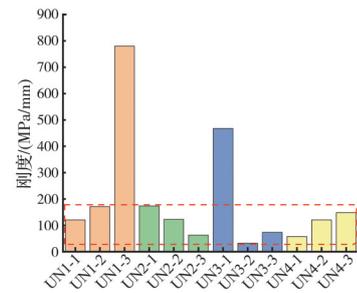
Table 5 Shear strength and shear stiffness of the interface

试件编号	(w/h/s)/mm	抗剪强度 τ_u /MPa	抗剪刚度 K/(MPa/mm)
UN1-1	10/10/40	1.79	120.6
UN1-2	10/10/70	1.24	171.3
UN1-3	10/10/100	1.56	780.0
UN2-1	15/10/40	1.81	173.7
UN2-2	15/10/70	1.67	122.4
UN2-3	15/10/100	1.29	62.9
UN3-1	20/10/40	1.87	467.5
UN3-2	20/10/70	2.00	32.1
UN3-3	20/10/100	2.21	73.5
UN4-1	10/5/40	0.68	57.9
UN4-2	10/10/40	1.79	120.6
UN4-3	10/15/40	1.80	148.2
UN5-1		0.63	596.6
UN5-2		0.74	642.8

由表 5 和图 9 可知,当肋条宽度为 10、15 mm 时,随着肋条间距的增加,界面的抗剪强度逐渐降低,如当肋条宽度为 15 mm,肋条间距从 40 mm 增加到 100 mm 时,界面的抗剪强度降低了 28.7%。而当肋条宽度为 20 mm 时,抗剪强度随肋条间距的增加而逐渐增大。当肋条间距相同时,肋条宽度大的



(a) 抗剪强度



(b) 抗剪刚度

图 9 界面的抗剪强度和抗剪刚度

Fig. 9 Shear strength and shear stiffness of the interface

试件抗剪强度更高,如相比试件 UN2-2 和 UN1-2,试件 UN3-2 的抗剪强度分别提高了 19.8% 和 61.3%,主要原因为 UHPC 材料的强度、韧性等力学性能均优于 NC,当 UHPC 肋条宽度较大时,肋条提供的抗剪强度更大,因此界面剪切强度更高。

由图 9(b)可知,除试件 UN1-3 和 UN3-1 外,其他试件的界面抗剪刚度主要分布在 200 MPa/mm 以下。对比带肋试件与光面试件可知,前者的界面抗剪刚度总体上小于后者,主要原因为 UHPC 肋条良好的韧性增强了界面的变形能力,使得带肋试件的界面滑移值显著高于光面试件。对于肋条宽度为 15、20 mm 的试件,随着肋条间距的增加,界面的抗剪刚度逐渐降低,如相比试件 UN2-1,试件 UN2-2 和 UN2-3 的刚度分别降低了 30% 和 64%。此外,对比 UN4 组中的试件可知,随肋条高度的增加,界面抗剪刚度呈增长趋势。

2.4 界面剪切应变

图 10 为采用 DIC 技术测得的试件在界面失效前一刻的剪切应变云图,由图 10 可知,与结合面为平面的试件相比,带肋试件最大剪切应变均有显著提高。带肋试件界面失效时,左右两侧的应变分布并不均匀,UHPC 肋条附近的应变通常较小。在 UN1~UN3 组试件中,当肋条宽度相同时,肋条间距较大的试件最大剪切应变更小,如试件 UN1-3 的最大剪切应变仅为试件 UN1-1 的 10%。当肋条间距相同时,随着肋条宽度的增加,界面最大剪切应

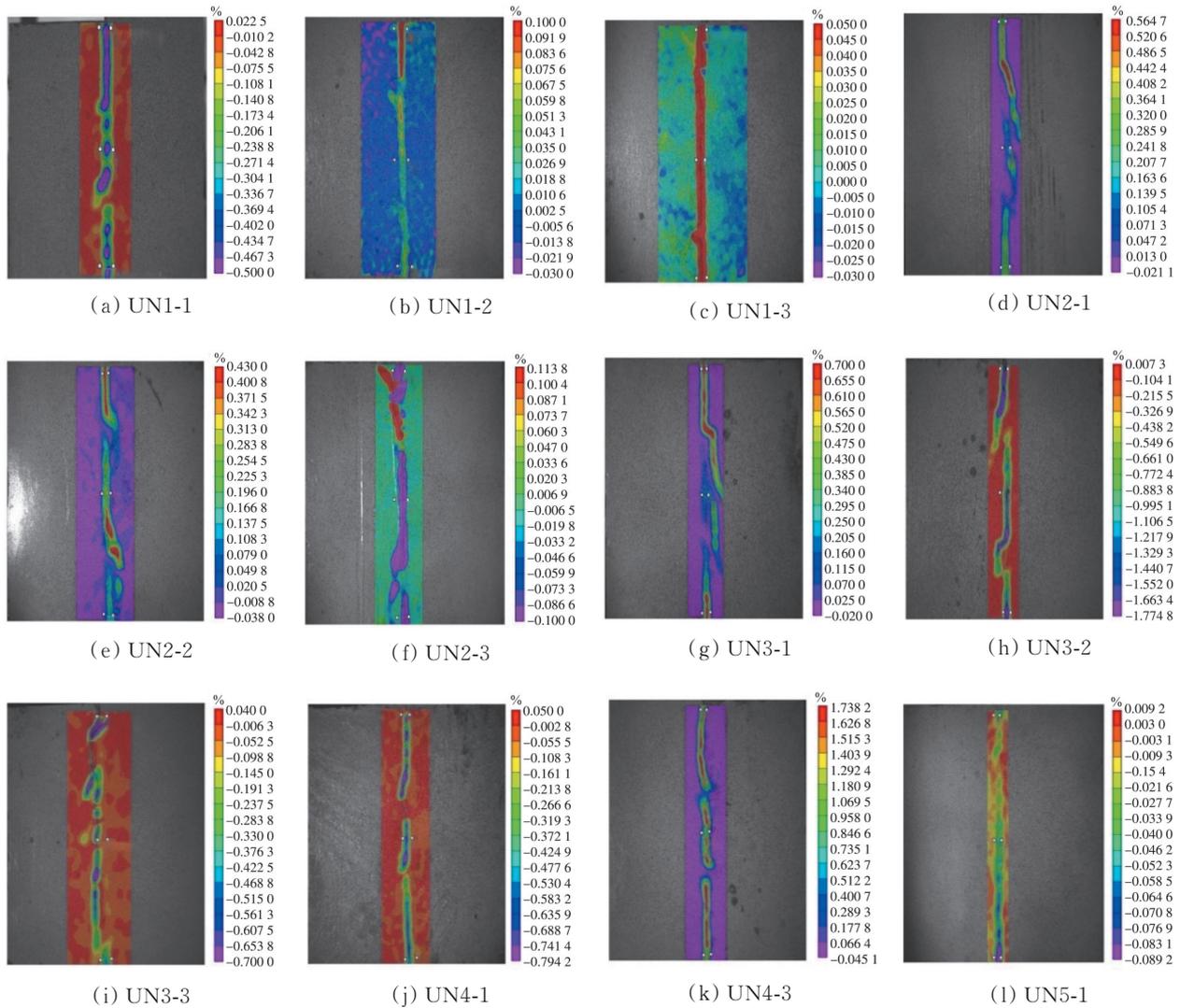


图 10 界面剪切应变分布

Fig. 10 Distribution of interface shear strain

变也逐渐增大,如当肋条宽度从 10 mm 增加到 20 mm 时,试件最大剪切应变增加了 40%。此外,对比试件 UN4-1、UN1-1 和 UN4-3 可知,随着肋条高度的增加,界面最大剪切应变先减小、后增大。

3 有限元分析

3.1 材料本构

采用 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型 (CDP) 来模拟 UHPC 和 NC 的力学行为。UHPC 单轴受压本构模型采用文献[25]中给出的模型曲线,其具体表达式为

$$y = \begin{cases} \frac{Ax}{1 + (A - 1)x^{\frac{A}{A-1}}}, & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{Bx}{1 + (B - 2)x + x^2}, & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x = \epsilon_c / \epsilon_{co}$, ϵ_c 为任意点的压应变, ϵ_{co} 为峰值压应变; $y = \sigma_c / f_c$, σ_c 为任意点应力, f_c 为轴心抗压强

度; $A = E_c \epsilon_{co} / f_c$; $0.193 \leq B \leq 0.287$, 本文 B 取 0.28。

UHPC 受拉本构模型参考文献[26],其具体表达式为

$$y = \begin{cases} \frac{Ax}{(A - 1)x^{\frac{A}{A-1}} + 1}, & (0 \leq x \leq 1) \\ \frac{x}{0.025(x - 1)^{1.7} + x}, & (x > 1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x = \epsilon_t / \epsilon_{ct}$, ϵ_t 为任意点的拉应变, ϵ_{ct} 为峰值拉应变; $y = \sigma_t / f_t$, σ_t 为任意点应力, f_t 为抗拉强度; $A = E_c / E_0$; E_0 为峰值点割线模量。

普通混凝土的本构模型采用现行《混凝土结构设计规范》[27]中推荐的混凝土受拉、压本构模型。

CDP 模型考虑了混凝土在拉、压状态下的刚度退化行为。混凝土开裂后的刚度退化由损伤因子 d 控制,其计算方法如式(5)所示。

$$d_c = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_c \epsilon}} \quad (5)$$

式中: σ 为混凝土应力; ϵ 为混凝土应变; E_c 为混凝土弹性模量。

3.2 接触设置

采用牵引-分离模型模拟UHPC-NC界面的黏结行为,其典型的本构模型如图11所示。该模型中通常包括3个关键参数:1)界面刚度,包括损伤开始前界面的法向刚度 K_n 以及与剪切分离相关的切向刚度分量 K_s 、 K_t ;2)界面黏结强度,包括法向强度 t_n 以及两个切向强度 t_s 、 t_t ;3)界面完全失效时的有效滑移 δ_m^f 。这些参数可以通过试验测试或基于材料特性的理论推导来确定,笔者根据文献[28]中推荐的参数取值,并通过与试验结果的对比,最终确定各参数的取值,见表6。

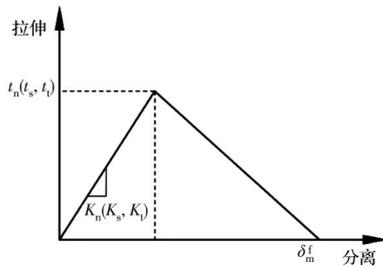


图 11 典型牵引-分离模型

Fig.11 Typical traction-separation model

表 6 界面建模关键参数

Table 6 Key parameters for interface modeling

K_n, K_s, K_t /(MPa/mm)	t_n, t_s, t_t /MPa	δ_m^f /mm	稳定系数
980	1.5	0.3	0.001

3.3 单元与边界条件

如图12所示,在加载端顶部耦合了一个加载点RP-1,竖向荷载作用在加载点上,试件底部采用完全固定约束。模型中的所有部件全部采用三维八节点减缩积分实体单元(C3D8R)。为同时兼顾计算精度和模型收敛性,选择试件网格尺寸为5 mm。

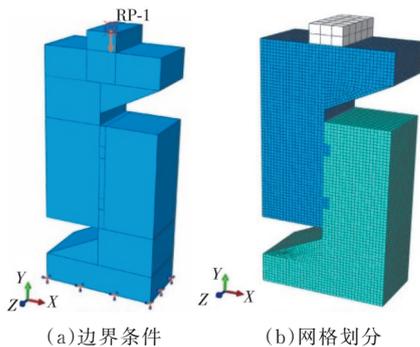


图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite element mode

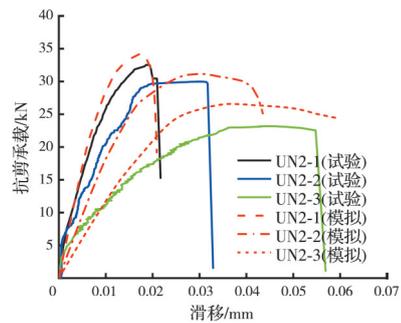
3.4 模型验证

表7为有限元模拟得到的抗剪承载力,图13为部分试件的模拟荷载-滑移曲线与试验曲线的对比。由表7和图13可知,模拟曲线与试验曲线基本吻合,且模拟得到的抗剪承载力变化规律与试验结果基本相同,仅试件UN1-2的模拟结果偏差较大,除此之外,其他试件的模拟结果误差均在20%以内。综上,认为建立的有限元模型能够较好地预测试件的承载能力。

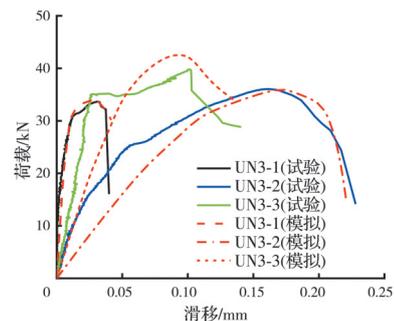
表 7 有限元模拟结果

Table 7 Results of finite element simulation

试件编号	(w/h/s)/mm	试验值 V_t /kN	模拟值 V_n /mm	V_t/V_n
UN1-1	10/10/40	32.20	34.18	0.94
UN1-2	10/10/70	22.37	31.53	0.71
UN1-3	10/10/100	28.01	29.69	0.94
UN2-1	15/10/40	32.54	34.16	0.95
UN2-2	15/10/70	29.98	31.15	0.96
UN2-3	15/10/100	23.17	26.57	0.87
UN3-1	20/10/40	33.66	33.95	0.99
UN3-2	20/10/70	36.04	35.95	1.00
UN3-3	20/10/100	39.79	42.52	0.94
UN4-1	10/5/40	12.22	15.31	0.80
UN4-2	10/10/40	32.20	34.18	0.94
UN4-3	10/15/40	32.40	35.22	0.92



(a) UN2组



(b) UN3组

图 13 模拟值与试验值对比

Fig. 13 Comparison between simulated and test results

3.5 参数分析

3.5.1 肋条高度

为研究不同肋条宽度下肋条高度对界面抗剪承载力的影响,共建立 12 个有限元模型,肋条高度分别为 15、20、25、30 mm,宽度分别为 10、15、20 mm。模型中的肋条间距均为 40 mm,且模型尺寸和混凝土强度均与试验试件相同。

图 14 为肋条高度对界面抗剪承载力的影响,由图 14 可知,当肋条宽度为 10 mm 时,随着肋条高度的增加,抗剪承载力没有明显变化,与试验得到的结论相同。原因为肋宽为 10 mm 的试件 UHPC 肋条容易发生剪断,试件的抗剪承载力主要由肋条强度决定,故增加肋条高度对承载力提升效果不显著。对于肋条宽度为 15、20 mm 的试件,随着肋条高度的增加,抗剪承载力均呈增加趋势。结合试验结果可知,肋条宽度为 15、20 mm 的试件破坏时,尽管 UHPC 肋条表皮有部分损伤,但并没有发生断裂,在试件完全破坏前肋条都能发挥作用。当肋条高度增加后,肋条与 NC 之间的机械咬合力增加,从而提高了界面的抗剪承载力。由此可见,在选择肋条高度时,不仅要保证肋条与 NC 之间有足够机械咬合力,还要考虑肋条宽度可能带来的不利影响,建议肋条高度不小于 15 mm

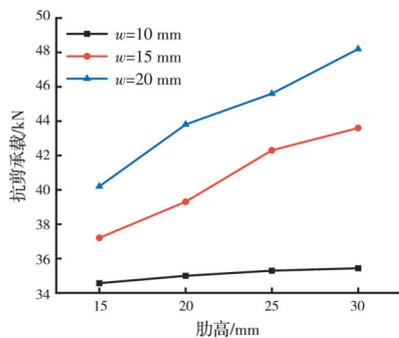


图 14 肋条高度的影响

Fig. 14 Effect of rib height

3.5.2 肋条数量

为研究肋条数量对界面抗剪承载力的影响,设计了 4 种不同肋条数量的试件,肋条数量分别为 1、2、3 和 4,具体布置如图 15 所示。除肋条数量不同外,其他参数与试验试件完全相同。

图 16 为肋条数量对界面抗剪承载力的影响。由图 16 可知,随着肋条数量的增加,抗剪承载力呈增大趋势,但当肋条数量超过 2 个后,承载力增长幅度明显降低。主要原因在于,对于肋宽为 20 mm 的试件,破坏模式以 NC 断裂为主,UHPC 肋条无明显损坏,此时界面的抗剪承载力主要由 NC 的强度决定。综上,尽管增加肋条数量可以提高抗剪承载

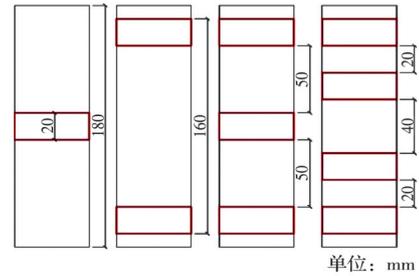


图 15 不同数量肋条布置形式

Fig. 15 Layout forms of ribs with different quantities

力,但当肋条数量超过一定值后,其对界面抗剪承载力的提升贡献显著降低。此外,由模拟结果还可以看出,对于不同肋条高度的试件,其界面抗剪承载力变化规律基本相同,即随着肋条数量的增加,抗剪承载力也呈逐渐增大趋势。

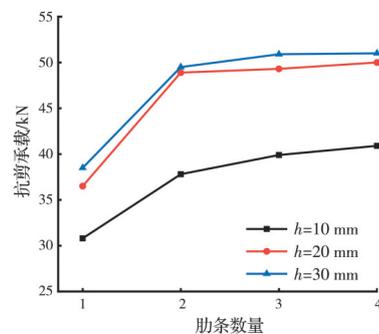


图 16 肋条数量的影响

Fig. 16 Effect of rib quantity

4 结论

设计制作 13 个带肋 UHPC-NC 结合面剪切试件,研究肋条宽度、高度和间距对试件破坏模式和承载力的影响。建立 UHPC-NC 试件有限元模型,研究肋条数量等对界面承载力的影响,得到如下主要结论:

1)带肋 UHPC-NC 界面的破坏模式主要包括 3 种类型:完全界面破坏及 UHPC 肋条剪断(A类);肋条外界面破坏及 UHPC 肋条间嵌入的 NC 部分破坏(B类);肋条外界面破坏及 UHPC 肋条间嵌入的 NC 完全破坏(C类)。除 A 类破坏外,其他类型破坏的试件在峰值荷载后 NC 基体突然断裂,荷载迅速降低,表现出明显的脆性破坏。在实际工程中,应合理选择 UHPC 肋条宽度,以保证其强度和韧性在受力过程中能得到充分利用,避免结合面出现因 NC 断裂而导致的脆性破坏。

2)UHPC 肋条的尺寸和间距对 UHPC-NC 界面的变形和承载力影响显著。界面滑移能力随肋条尺寸和间距的增加逐渐增大,且较大的肋条尺寸和间距有利于提高界面的抗剪能力,但当肋条间距较大时,UHPC-NC 容易在肋条间的界面出现分离。

3)增加肋条高度对肋条发生剪断的试件抗剪承载力几乎无影响,而对于肋条未发生剪断的试件,抗剪承载力随肋条高度的增加逐渐增大。增加肋条数量有利于提高UHPC-NC界面的抗剪承载力,但当肋条增加到一定数量后,界面承载力的提升幅度却明显降低。

由于试件数量有限,未考虑普通混凝土强度对UHPC-NC结合面剪切性能的影响。试验中,当肋条尺寸较大时,试件因普通混凝土断裂而发生破坏,但如果混凝土强度较高,结合面的剪切破坏模式有所不同。因此,有必要进一步研究混凝土强度对带肋UHPC-NC结合面受剪性能的影响。

参考文献

- [1] 张锐, 胡棚, 李晰, 等. U形UHPC永久模板RC无腹筋组合梁抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 145-156.
ZHANG R, HU P, LI X, et al. Shear behavior of reinforced concrete composite beams without stirrups using U-shaped UHPC permanent formwork [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 145-156. (in Chinese)
- [2] 梁兴文, 史纪从, 于婧, 等. 免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(3): 579-588, 606.
LIANG X W, SHI J C, YU J, et al. Seismic behavior of reinforced concrete columns with permanent template of ultra-high-performance concrete [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 579-588, 606. (in Chinese)
- [3] 梁兴文, 汪萍, 徐明雪, 等. 免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土梁的受力性能及短期刚度研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 154-163.
LIANG X W, WANG P, XU M X, et al. Mechanical behavior and immediate stiffness of RC beams with UHPC permanent formwork [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 154-163. (in Chinese)
- [4] 王朋, 尤学辉, 黄杰, 等. 拼接成型UHPC免拆模板钢筋混凝土柱的抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(1):103-116.
WANG P, YOU X H, HUANG J, et al. Seismic behavior of reinforced concrete column with an assemble stay-in-place UHPC formwork [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(1):103-116.(in Chinese)
- [5] WANG X Y, LIU H B, JU Y Z, et al. Experimental and analytical models of flexural behavior of U-shaped reactive powder concrete permanent beam formworks [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 123670.
- [6] WANG B, LI Q H, LIU F, et al. Shear bond assessment of UHTCC repair using push-out test [J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 206-216.
- [7] JU Y Z, SHEN T, WANG D H. Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118024.
- [8] FENG S, XIAO H G, LI H. Comparative studies of the effect of ultrahigh-performance concrete and normal concrete as repair materials on interfacial bond properties and microstructure [J]. Engineering Structures, 2020, 222: 111122.
- [9] ZHANG Y, ZHANG C Y, ZHU Y P, et al. An experimental study: Various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC [J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117480.
- [10] FENG Z, LI C X, PAN R S, et al. Shear capacity of ultrahigh-performance concrete with monolithic interface and wet-joint interface [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(7): 04022153.
- [11] KIM Y J, CHIN W J, JEON S J. Interface shear strength at joints of ultra-high performance concrete structures [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 1-14.
- [12] GOPAL B A, HEJAZI F, HAFEZOLGHORANI M, et al. Shear strength of dry and epoxy joints for ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete [J]. ACI Structural Journal, 2020, 117(1): 279-288.
- [13] HUSSEIN H H, WALSH K K, SARGAND S M, et al. Interfacial properties of ultrahigh-performance concrete and high-strength concrete bridge connections [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 04015208.
- [14] TIAN J, JIANG X H, YANG X N, et al. Bonding performance of the grooved interface between ultrahigh performance concrete and normal concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 336: 127525.
- [15] JANG H O, LEE H S, CHO K, et al. Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 16-23.
- [16] BU Z Y, ZHANG X, YE H H, et al. Interface shear transfer of precast concrete dry joints in segmental columns [J]. Engineering Structures, 2018, 175: 257-272.
- [17] SEMENDARY A A, HAMID W K, STEINBERG E P, et al. Shear friction performance between high strength concrete (HSC) and ultra high performance concrete (UHPC) for bridge connection applications [J]. Engineering Structures, 2020, 205: 110122.
- [18] TAYEH B A, BAKAR B HABU, 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.
- [19] ZHANG Y, ZHU P, WANG X W, et al. Shear properties of the interface between ultra-high performance concrete and normal strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118455.
- [20] 周尚猛, 王伟, 郝聪龙. UHPC-NC组合界面连接及抗剪性能研究[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(5): 10-13.
ZHOU S M, WANG W, HAO C L. Study on UHPC-NC composite interface connection and its shear performance [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(5): 10-13. (in Chinese)
- [21] 周建庭, 胡天祥, 杨俊, 等. 键槽构造UHPC-NC界面黏结性能试验研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(16): 16050-16057, 16064.
ZHOU J T, HU T X, YANG J, et al. Experimental investigation on bonding behavior of UHPC-NC interface in keyway structure [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(16): 16050-16057, 16064. (in Chinese)
- [22] JIANG H B, DONG X T, FANG Z C, et al. Experimental study on shear behavior of a UHPC connection between adjacent precast prestressed concrete voided beams [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(12): 04020106.
- [23] GUAN D Z, LIU J B, JIANG C, et al. Shear behaviour of the UHPC-NSC interface with castellated keys: Effects of castellated key dimension and dowel rebar [J]. *Structures*, 2021, 31: 172-181.
- [24] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [25] 闫光杰. 200MPa级活性粉末混凝土(RPC200)的破坏准则与本构关系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
YAN G J. Study on failure criterion and constitutive relation of 200MPa reactive powder concrete (RPC200) [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005. (in Chinese)
- [26] 胡翱翔, 梁兴文, 于婧, 等. 超高性能混凝土轴心受拉力学性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(9): 30-37.
HU A X, LIANG X W, YU J, et al. Experimental study of uniaxial tensile characteristics of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(9): 30-37. (in Chinese)
- [27] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [28] JANG H O, LEE H S, CHO K, et al. Numerical and experimental analysis of the shear behavior of ultrahigh-performance concrete construction joints [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 1-17.

(编辑 王秀玲)