



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402903

引用格式:方钰,张大山,王慧青,等.基于超高性能混凝土与普通混凝土优化Z形试件的界面抗剪性能[J].科学技术与工程,2025,25(8):3349-3358.

Fang Yu, Zhang Dashan, Wang Huiqing, et al. Interface shear performance based on optimized Z-type UHPC-NC specimens[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3349-3358.

# 基于超高性能混凝土与普通混凝土优化 Z形试件的界面抗剪性能

方钰<sup>1</sup>, 张大山<sup>1</sup>, 王慧青<sup>2\*</sup>, 董毓利<sup>1</sup>, 戴玉成<sup>1</sup>, 曾婷婷<sup>3</sup>

(1. 华侨大学土木工程学院, 厦门 361021; 2. 厦门工学院建筑科学与土木工程学院, 厦门 361021;

3. 华大工程科技(厦门)有限公司, 厦门 361021)

**摘要** 针对常见界面抗剪性能测试的试件形式存在不能有效反映界面上切应力的实际情况,提出对传统Z形试件的优化改进方案。采用优化改进的Z形试件,开展超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)与普通混凝土(normal concrete, NC)界面处抗剪强度的试验研究,考察抗剪钢筋配筋率和界面粗糙度对界面抗剪强度的影响程度。结果表明:界面受剪时的破坏面发生在NC侧或者部分界面与部分NC侧,为典型的脆性破坏特征;界面的抗剪强度随着粗糙度的增大而增大,但当粗糙度大于1.8时,增大界面粗糙度来提高界面抗剪强度的效果不太明显;带肋钢筋作为抗剪钢筋能充分发挥钢筋的销栓作用,比光圆钢筋提高界面抗剪强度的效果有显著提高。建立能考虑抗剪钢筋和界面粗糙度贡献的UHPC和NC界面抗剪承载力计算公式,其理论计算值和试验结果吻合良好,能够为具有UHPC和NC界面的叠合构件在进行工程设计时提供参考。

**关键词** 超高性能混凝土(UHPC)-普通混凝土(NC)界面;优化Z形试件;界面抗剪性能;粗糙度;抗剪钢筋

中图分类号 TU375;

文献标志码 A

## Interface Shear Performance Based on Optimized Z-type UHPC-NC Specimens

FANG Yu<sup>1</sup>, ZHANG Da-shan<sup>1</sup>, WANG Hui-qing<sup>2\*</sup>, DONG Yu-li<sup>1</sup>, DAI Yu-cheng<sup>1</sup>, ZENG Ting-ting<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361021, China;

3. Huada Engineering Technology (Xiamen) Co., Ltd., Xiamen 361021, China)

**[Abstract]** In response to the common forms of specimens used for interface shear performance testing, these specimens fail to effectively reflect the actual situation of shear stress on the interface. An optimized improvement scheme for the traditional Z-type specimen was proposed. By employing the optimized Z-type specimen, experimental studies on the shear strength at the interface between ultra-high performance concrete (UHPC) and normal concrete (NC) were conducted, examining the influence of shear reinforcement ratio and interface roughness on the interface shear strength. The research results indicate that the failure occurs on the NC side or partially on the interface and partially on the NC side, which is characteristic of typical brittle failure. The shear strength of the interface increases with the increase of roughness, but when the roughness is larger than the value of 1.8, the effect of increasing interface roughness to enhance the interface shear strength is not very significant. Ribbed reinforcement as shear reinforcement can fully exert the anchoring effect and the effect of improving the interface shear strength is more evident than that of smooth-round reinforcement. A calculation formula for the interface shear capacity of UHPC and NC, which can consider the contribution of shear reinforcement and interface roughness, has been established. The theoretical calculation values are in good agreement with the experimental results, which can provide reference for the engineering design of composite components with UHPC and NC interfaces.

**[Keywords]** ultra-high performance concrete(UHPC)-normal concrete(NC) interface; optimized Z-type specimen; interface shear performance; roughness; shear reinforcement

混凝土结构是中外主流的一种结构形式。在使用过程中,既有建筑结构会出现局部破损、耐久性失效等病害,必要时会对其进行加固和补强,不

可避免将遇到新老混凝土界面黏结性能的技术难题。目前,中外学者针对新老普通混凝土的界面性能已开展了大量的研究工作和工程实践,取得了丰

收稿日期:2024-04-20; 修订日期:2024-12-18

基金项目:国家自然科学基金(52178484);福建省中青年教育科研项目(JAT210570);福建省自然科学基金(2023J01107)

第一作者:方钰(1999—),男,汉族,安徽安庆人,硕士研究生。研究方向:混凝土结构。E-mail:3130935310@qq.com。

\*通信作者:王慧青(1982—),女,汉族,河北衡水人,硕士,副教授。研究方向:混凝土结构。E-mail:695903294@qq.com。

硕的成果<sup>[1-4]</sup>。近年来,超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)因其具有强度高、韧性好和优良耐久性等优点被广泛应用到既有建筑结构、桥梁工程等领域的加固和补强<sup>[5]</sup>。因此,UHPC和既有普通混凝土(normal concrete, NC)的界面性能备受关注。由于UHPC和NC两种材料的成分不同,它们之间的协同工作机制与传统的新老混凝土界面处的工作性能有较大差异,已成为中外学者和工程师关注的技术难题之一。

近年来,中外学者针对UHPC和NC界面的抗剪性能开展了诸多研究工作。Jang等<sup>[6]</sup>通过Z形试件研究了不同界面处理情况(喷水、垂直接缝和沟槽)对界面抗剪性能的影响,研究发现,钢纤维和沟槽几何形状对UHPC和NC界面的抗剪性能影响较大。Zhang等<sup>[7]</sup>通过双面剪切试件进行了8组界面剪切推出试验,研究了浅凿、深凿、界面黏合剂、钢筋暴露、开槽、钻孔和安装钢螺柱等多种界面处理方式对UHPC-NC界面剪切性能的影响,并提出一种综合考虑界面黏结力、钢筋与混凝土机械互锁等因素的界面抗剪强度计算方法。王德弘等<sup>[8]</sup>、Tian等<sup>[9]</sup>先后开展了基于双面剪切试件的界面连接处受剪性能的试验研究,发现设置沟槽可以提高两者间的机械咬合作用,其中开槽密度和后浇普通混凝土强度对界面抗剪强度有显著影响,并提出了界面处抗剪强度的计算公式。杨俊等<sup>[10]</sup>、周庭雄等<sup>[11]</sup>针对不同键槽参数及键槽形状下界面的剪切性能开展了试验研究,分析UHPC-NC的黏结-滑移模型特征以及剪应变的分布规律,给出黏结刚度建议值。管东芝等<sup>[12]</sup>开展了气泡直径25 mm以下的气泡膜式UHPC和NC结合面的试验研究,并提出适合于气泡直径在25 mm以下的界面抗剪承载力公式。Al-Madani等<sup>[13]</sup>通过双面剪切试件等研究了不同表面粗糙度、固化条件、暴露条件对界面黏结性能的影响,发现固化条件对黏结性能的影响不显著,而NC基材的表面粗糙度对界面黏结强度有显著影响。Chen等<sup>[14]</sup>开展了配置界面抗剪钢筋的试验研究,发现界面配筋对提高UHPC与NC间的抗剪强度起着关键作用,并建立了有限元模型分析了界面处的剪力作用机制。吴玥等<sup>[15]</sup>开展了凿毛、植筋两种界面设置的UHPC和NC抗剪试验研究,并通过数值模拟的方法分析了不同界面参数的力学响应。Tong等<sup>[16]</sup>提出了一种新的UHPC和NC界面数值模拟方法,研究UHPC-NC复合材料构件的准静态行为,且能够准确地捕捉到UHPC和NC界面的损伤演化和失效模式。

综上所述,前人主要是围绕界面处不同构造措

施对抗剪强度的影响和作用机理展开的,但采用的试件却有所不同,这主要是由于中外一直没有统一的界面抗剪性能测试的方法与标准。不同的测试试件形式,其界面上的切应力分布必然有所不同,甚至有时差异较大。为此,将分析现有主流试件形式的切应力分布情况,指出存在的主要问题,提出界面抗剪测试试件的优化方法,并针对优化后的试件形式开展相应的试验研究和理论分析。

## 1 试验方案

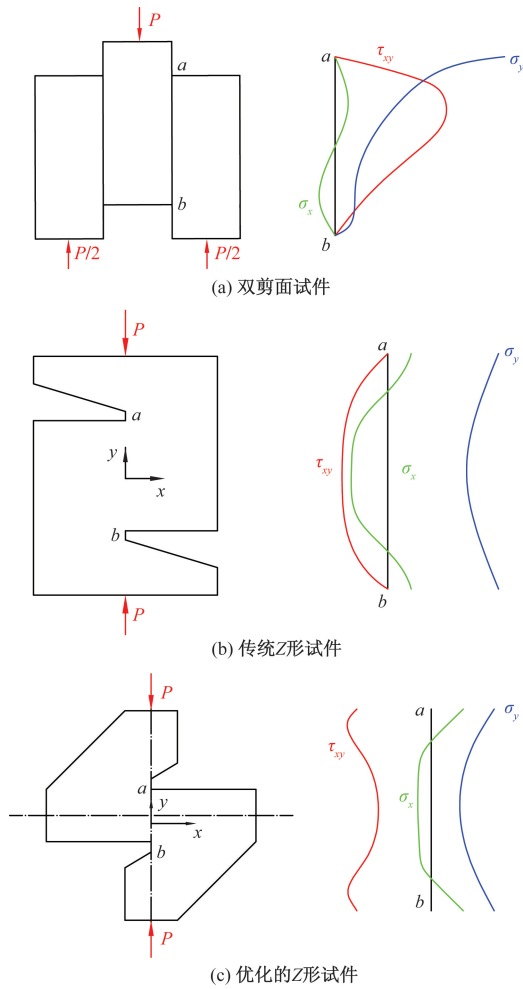
### 1.1 试件优化与设计

如前所述,中外学者在研究UHPC和NC界面黏结性能时并没有采用统一的界面抗剪性能测试试验方法和标准,仅试件形式就有双面剪切式、单剪面Z形和“8”形缺口梁等多种。不同的试件形式,在界面处的切应力分布规律必定有所不同。为此,张琦等<sup>[17]</sup>在针对几种常见抗剪试件剪切面上的应力状态做过探讨,通过计算相应的应力分布情况,认为有些试件类型的破坏剪切面不能准确反映混凝土的实际抗剪强度,如图1所示。图1(a)所示的双剪面试件,在加载过程中剪切面上的切应力分布不均匀;图1(b)所示的传统Z形试件,虽然剪切面上的切应力比较均匀,但同时存在较大的垂直正应力,对试件实际的抗剪强度有较大影响。可见,这两种试件形式与理想的纯剪切状态均有较大差距,不能真实反映剪切面上的抗剪强度。

基于以上分析,提出一种优化改进的Z形试件形式,具体如图1(c)所示。与传统Z形试件相比,优化后Z形试件的受剪面较小并且位于试件的中部,与上下的加载点的距离较远,根据圣维南原理,受剪面上的应力分布能有效避免集中荷载的不利影响。由应力分析结果可知,剪切面上的切应力分布较为均匀且垂直正应力的影响也较小,能够较好地反映剪切面上的抗剪强度。

本试验将采用优化改进的Z形试件(下文简称为Z形试件)测试UHPC和NC界面黏结的抗剪性能,如图2所示。可以看出,试件的受剪面尺寸为100 mm × 100 mm,端部配置直径为8 mm的HRB335钢筋,避免试件背部由于受拉而破坏。

试验时,主要考虑配筋率和界面粗糙度对抗剪强度的影响。配筋率主要设置3种情况:①不设置抗剪钢筋,配筋率 $\rho = 0$ ;②设置1根6 mm的HRB335光圆抗剪钢筋, $\rho = 0.283\%$ ;③设置1根8 mm的HRB335带肋抗剪钢筋,配筋率 $\rho = 0.502\%$ 。界面粗糙度选择工程中常见的沟槽法,粗糙度通过式(1)进行定量计算。沟槽的具体尺寸为



*a, b* 为界面起始点;  $\sigma_x$  为  $x$  方向正应力;  $\sigma_y$  为  $y$  方向正应力;  $\tau_{xy}$  为剪应力;  $P$  为试件所受荷载  
图 1 抗剪试件类型及剪应力分布

Fig. 1 Types of shear specimens and shear stress distribution

10 mm(宽) 6 mm(深) 100 mm(长)。为便于结果对比,共设置 3 种粗糙度的试件:①1 条沟槽,粗糙度  $\beta=0.6$ ;②3 条沟槽,粗糙度  $\beta=1.8$ ;③5 条沟槽,粗糙度  $\beta=3.0$ 。

$$\beta = \frac{n\Delta ah}{a'b'} \quad (1)$$

式(1)中: $a'$ 为界面长度; $b'$ 为界面宽度; $\Delta a$ 为沟槽平均宽度; $h$ 为沟槽平均深度; $n$ 为开槽个数。

### 1.2 试件制作

共制作 9 个 Z 形试件,每个试件均在专门定制的 GFRP 模具中分两次浇筑而成。制作时,先浇筑普通混凝土,常温下养护 56 d 后,清洗界面并进行沟槽处理后,再浇筑超高强混凝土,继续养护 56 d。NC 和 UHPC 的配合比如表 1 所示。

NC 部分选用强度等级为 32.5 MP 的硅酸盐水泥,其组成成分的质量比为水:水泥:砂:碎石 = 0.458:1:1.59:3.23。UHPC 部分选用强度等级为

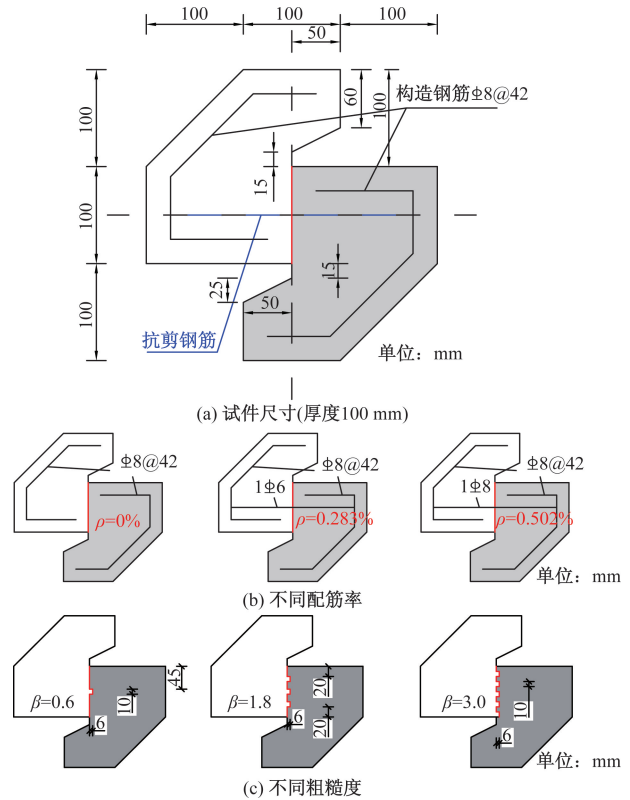


图 2 试件尺寸及参数设置

Fig. 2 Dimensions and parameter configuration of the specimen

52.5 MP 的硅酸盐水泥,各组分的质量比为水泥:石英粉:石英砂:硅灰:矿渣:水 = 1:0.2:1:0.3:0.15:0.29。浇筑时,分别制作 3 个 NC 和 UHPC 的标准立方体试块,在养护 28 d 时测量抗压强度,具体结果如表 1 所示。抗剪钢筋包括直径为 6 mm 和 8 mm 两种规格,其屈服强度和极限强度分别由 3 次拉伸试验的平均值测得,具体结果如表 2 所示。

### 1.3 试验加载与测量

加载装置主要包括电液伺服作动器、脚手架、垫块等,具体位置如图 3 所示。上部的电液伺服作动器可以自动测量并记录荷载值,最大推力为 100 kN。为保证上部的荷载能够均匀稳定地传递到试件上,在 Z 形试件的上下部分别安装连接件及硬质钢板。为测试抗剪界面的相对滑移量,在上、下硬质钢板的两端分别安装 2 个机电百分表(具体编号为  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ )。所用百分表的精度为 0.01 mm,测量位移的量程为 0 ~ 50 mm。

界面相对滑移量为

$$S = \frac{W_1 + W_2}{2} - \frac{W_3 + W_4}{2} \quad (2)$$

式(2)中: $W_1$ 、 $W_2$ 为试件上部钢板处机电百分表测得的位移; $W_3$ 、 $W_4$ 为试件下部钢板处机电百分表测得的位移。

表 1 NC 与 UHPC 的配合比和性能指标

Table 1 Mix proportion and performance index of NC and UHPC

类别	水	水泥	砂	碎石	石英粉	石英砂	硅灰	矿渣	减水剂/ %	钢纤维体 积掺量/%	PP 纤维体 积掺量/%	水胶比	试验前平均 含水率/%	28 d 平均 强度/MPa
NC	0.458	1	1.59	3.23	—	—	—	—	—	—	—	0.458	5.42	25.20
UHPC	0.290	1	—	—	0.2	1	0.3	0.15	2.41	2	0.3	0.200	7.59	111.07

表 2 钢筋强度指标

Table 2 Strength index of steel reinforcement

钢筋 类型	直径/ mm	屈服强度/ MPa	平均值/ MPa	极限强度/ MPa	平均值/ MPa
HRB335		397.85		579.43	
	φ6	405.06	395.42	585.68	577.94
		383.34		568.71	
	φ8	384.76		578.69	
		382.95	382.75	576.32	574.82
		380.55		569.45	

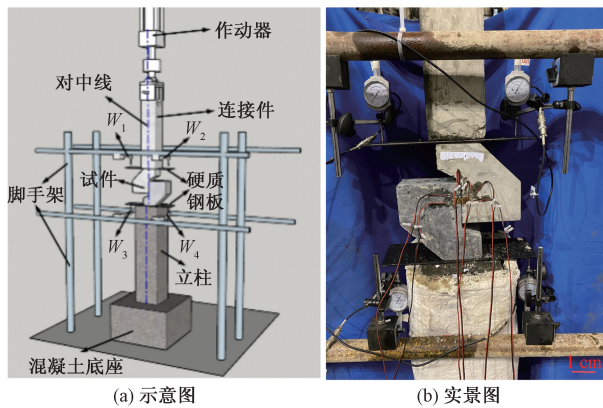


图 3 加载装置  
Fig. 3 Loading device

为保证测试结果的准确性,在试验过程中,需严格保证作动器、预制混凝土连接件、立柱的中心线与 UHPC 和 NC 试件的抗剪界面在竖向保持对齐。试验时,当激光水平仪的红线与图 3(a)所示的对中线重合时,即认为该试验装置符合安装要求,可以开展竖向加载。

剪切破坏属于脆性破坏,且混凝土材料对加载速度的响应较为敏感。当加载速率较大时,在同等剪切滑移下,混凝土的剪切刚度和强度也随之增加。本次试验统筹考虑试件尺寸、试验加载设备精度,同时参考新老混凝土黏结强度测试的加载速率,确定试验的加载速率为 6 kN/min。

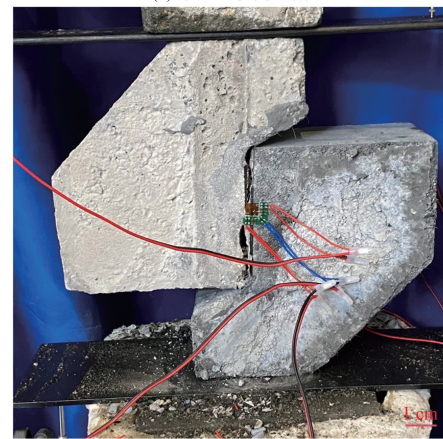
## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验现象

在整个加载过程中,所有试件均未出现明显的变化,且无显著裂缝产生。在加载后期,所有试件均是突然发生断裂分离,裂缝突然贯穿整个滑移



(a) 未配置抗剪钢筋



(b) 配置抗剪钢筋

图 4 试件破坏模式

Fig. 4 Failure pattern of the specimen

面,破坏前无明显征兆,呈现典型的脆性破坏特征。试件破坏的位置位于 NC 和 UHPC 的交界面附近,主要表现为两种情况:①全部 NC 侧;②部分交界面与部分 NC 侧。值得注意的是,所有试件均未出现 NC 和 UHPC 在交界面处全部剥离的现象,且 UHPC 侧均未出现破坏。未配置界面抗剪钢筋的试件,达到极限荷载后,整个试件直接发生滑移错动,最终分解成完全脱离的两部分。配置界面抗剪钢筋的试件则表现不同,破坏后仍保持为一个整体,但在 UHPC 和 NC 叠合面部位出现了明显的滑动并裂开。试件的破坏形态具体如图 4 所示。

试验测得的每个试件的极限荷载、最大滑移等结果如表 3 所示。其中,UHPC 和 NC 界面上的抗剪强度  $\tau$  近似按名义切应力计算,计算公式为

$$\tau = \frac{V_t}{a'b'} \quad (3)$$

式(3)中: $V_t$ 为极限荷载。

表 3 UHPC 和 NC 界面抗剪性能试验结果

Table 3 Test results of interface shear performance of the UHPC and NC

序号	编号	粗糙度 $\beta$	配筋率 $\rho/\%$	极限荷载 $V_i/\text{kN}$	最大滑移 $S/\text{mm}$	抗剪强度 $\tau/\text{MPa}$
1	Z-1-0	0.6	0	31.99	1.37	3.20
2	Z-1-6	0.6	0.283	41.79	1.89	4.18
3	Z-1-8	0.6	0.502	49.90	2.49	4.99
4	Z-2-0	1.8	0	38.39	2.09	3.84
5	Z-2-6	1.8	0.283	45.92	2.84	4.59
6	Z-2-8	1.8	0.502	63.62	3.56	6.36
7	Z-3-0	3.0	0	41.72	2.58	4.17
8	Z-3-6	3.0	0.283	50.07	2.97	5.01
9	Z-3-8	3.0	0.502	65.82	3.44	6.58

2.2 荷载-滑移曲线

图 5 为不同配筋率下各个试件的荷载-滑移曲线。可以看出,每个试件的荷载-滑移曲线近似呈现线性变化规律,NC 和 UHPC 两者交界面的滑移量随着荷载的增大而增大。所有试件的荷载-滑移曲线没有下降段,均是达到极限荷载时即发生破坏,属于典型的脆性破坏特征。当未配置抗剪钢筋时,增大交界面处的粗糙度可以有效提高极限剪切强度和最大滑移量。当配置抗剪钢筋时,在同一配筋率下,粗糙度为 1.8 和 3.0 的试件,两者的极限强度和最大滑移量差别较小,但均比粗糙度 0.6 的试件要大。这说明 NC 和 UHPC 交界面处的抗剪强度主要是由两者之间的黏结作用、齿槽的机械咬合作和抗剪钢筋组成。因此,当提高界面的粗糙度和配筋率时,NC 和 UHPC 交界面处的最大滑移量会有所提高。

2.3 影响因素分析

2.3.1 粗糙度对界面抗剪性能的影响

界面的整体抗剪性能可以通过抗剪强度和最大滑移量来综合评价。图 6 为不同的粗糙度水平对 NC 和 UHPC 界面抗剪性能的影响。通过对比分析可知,无论界面是否有配筋,提高 NC 和 UHPC 界面的粗糙度可以在一定程度上增强界面的抗剪强度。相较于粗糙度  $\beta = 0.6$  的试件,粗糙度  $\beta = 1.8$  和  $\beta = 3.0$  的试件的抗剪强度分别提高了约 19.1% 和 27.3%。比较粗糙度  $\beta = 1.8$  和  $\beta = 3.0$  的试件可知,两个试件提高幅度相差仅 8.2%,这也表明较大的粗糙度对抗剪强度的提升效果较为有限。

对于配筋率为  $\rho = 0$  和  $\rho = 0.283\%$  的试件,它们的最大滑移均小于 3 mm。同时发现,这两种配筋率的试件随着粗糙度的增加,最大滑移的数值也有所增加,但最大滑移的增幅却有所减小。然而,对于配筋率  $\rho = 0.502\%$  的试件,粗糙度  $\beta = 3.0$  的试件的最大滑移出现略小于粗糙度  $\beta = 1.8$  的试件所

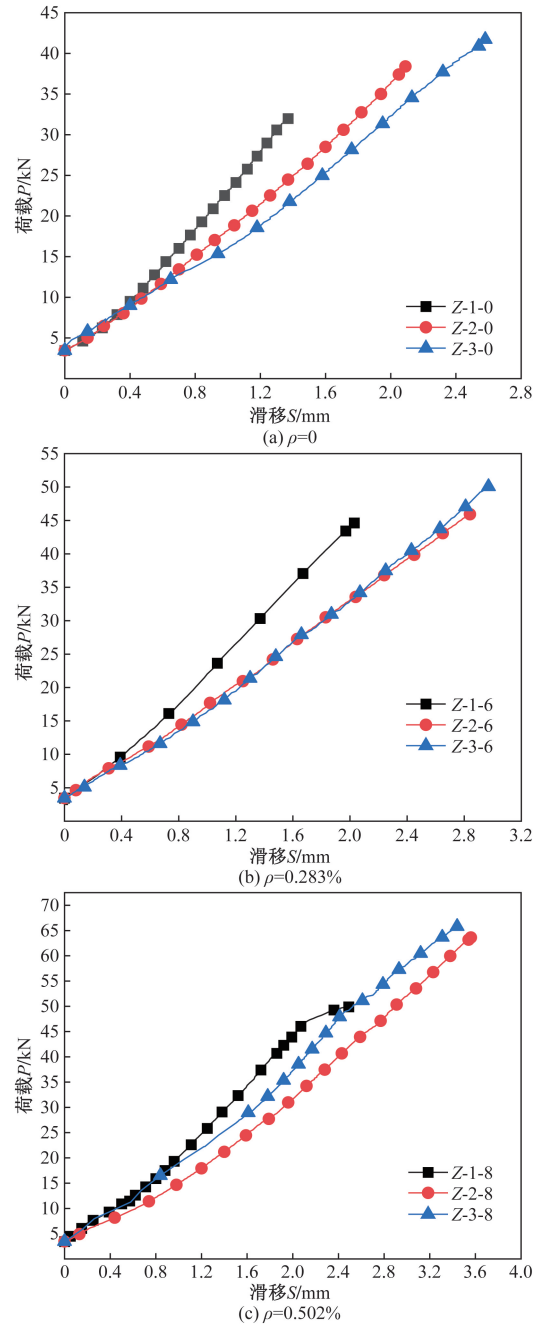


图 5 UHPC-NC 试件的荷载-滑移曲线

Fig. 5 Load and slip curves of the UHPC and NC specimens

测得的最大滑移。这一现象表明,随着配筋率的升高,粗糙度对试件剪切变形出现的最大滑移量的影响有所减小。

2.3.2 配筋率对界面抗剪性能的影响

图 7 为不同粗糙度下 NC 和 UHPC 界面抗剪强度和最大滑移量随配筋率的变化情况。根据试验结果的对比分析可知,在同一种粗糙度下,NC 和 UHPC 界面的抗剪强度均随着抗剪钢筋配筋率的增大而逐渐增大。相比于未配置抗剪钢筋的试件,配置 1 $\phi$ 6 mm 光圆钢筋 ( $\rho = 0.283\%$ ) 和 1 $\phi$ 8 mm 带肋

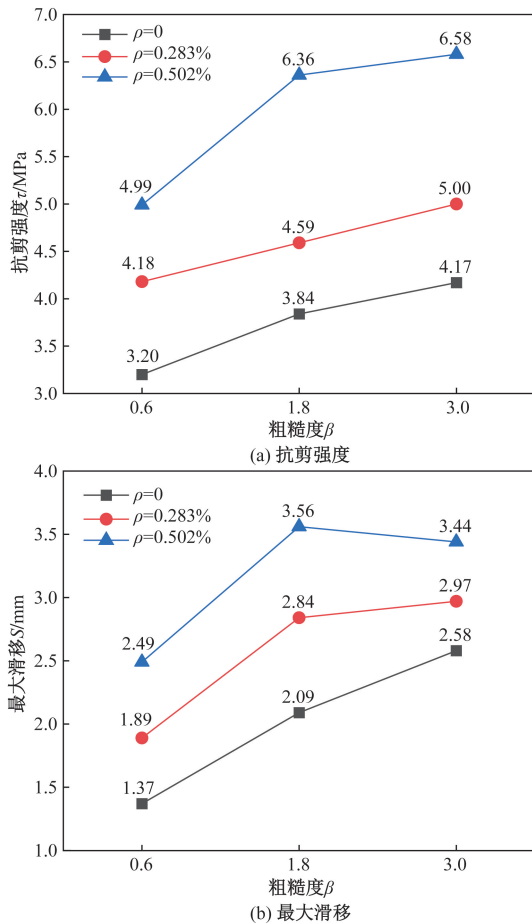


图6 粗糙度对 UHPC 和 NC 界面抗剪性能的影响

Fig. 6 Effect of roughness on interface shear performance of the UHPC and NC specimens

钢筋 ( $\rho = 0.502\%$ ) 的试件的界面剪切强度分别提高了 23.4% 和 59.8%, 效果较为显著。同时还发现, 配置 1 $\phi$ 8 mm 带肋钢筋试件的界面抗剪强度提升效果是配置 1 $\phi$ 6 mm 的光圆钢筋试件的 2 倍以上, 这与配置带肋钢筋比光圆钢筋具有更好的销栓作用和压夹效应有关, 提高了钢筋与混凝土之间的黏结效应。

在同一种粗糙度下, NC 和 UHPC 界面上产生的最大滑移量随着配筋率的增大而增大, 且呈线性规律变化。经对比可知,  $\beta = 3.0$  的试件的界面最大滑移随配筋率变化时 ( $0 \rightarrow 0.502\%$ ), 其最大滑移由 2.58 mm 变化至 3.56 mm, 增幅较小 (仅 0.98 mm)。另外, 当配筋率  $\rho = 0.502\%$  时,  $\beta = 3.0$  的试件的界面最大滑移 (3.44 mm) 小于  $\beta = 1.8$  的试件在界面处产生的滑移量 (3.56 mm)。这些结果表明, 粗糙度较低的试件, 增加抗剪钢筋配筋率可以改善界面处的最大滑移量, 而对于粗糙度较高的情况, 这一措施的效果并不显著。这一现象主要是由于在粗糙度较高的情况下, NC 和 UHPC 界面处的抗剪强度大部分是由沟槽处的机械咬合作用产生, 而具有较

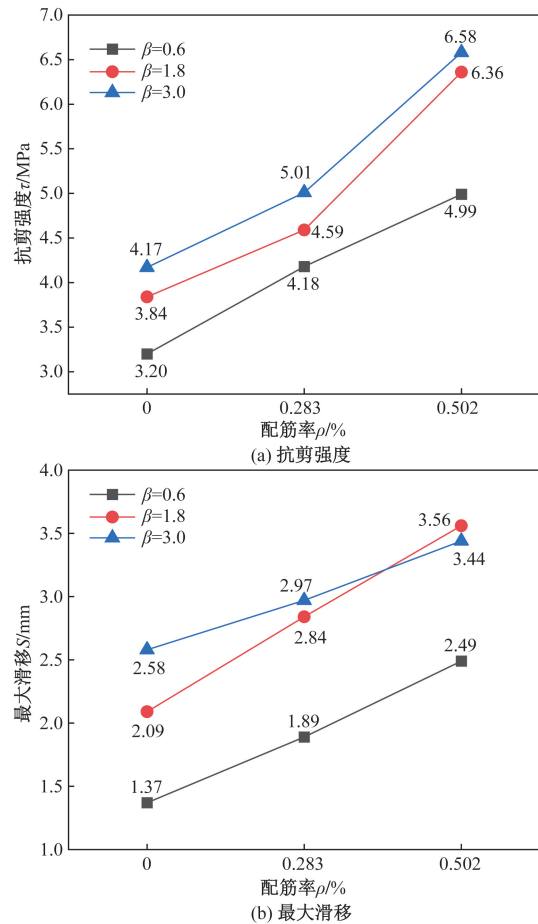


图7 配筋率对 UHPC 和 NC 界面抗剪性能的影响

Fig. 7 Effect of reinforcement ratio on interface shear performance of the UHPC and NC specimens

好变形性能的抗剪钢筋对整体抗剪性能的贡献度变小, 从而使得试件在界面处的滑移量变小。

### 3 UHPC 和 NC 界面的抗剪强度计算

#### 3.1 现有的新老混凝土界面抗剪强度计算公式

目前, 较为成熟的新老混凝土界面抗剪强度计算方法, 在中国规范、欧洲规范和美国公路桥梁规范等已经有明确的规定, 但这些公式对 UHPC 和 NC 界面处抗剪强度的计算未必有效, 需要进一步的校核。针对这一瓶颈问题, 将通过分析部分规范和学者的计算模型的计算精度, 探讨计算 UHPC 和 NC 界面处抗剪强度时存在的问题, 并能提出相应的抗剪强度计算方法。

(1) 在欧洲规范 *Design of Concrete Structures-Part 1: General Rules and Rules for Buildings* (EN-1992-1-1)<sup>[18]</sup> 中, 新老混凝土黏结界面抗剪强度  $\tau_u$  的计算公式为

$$\tau_u = c f_t + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \beta_a + \cos \beta_a) \leq 0.5 v f_{cd} \quad (4)$$

式(4)中: $c$ 为内聚力系数,自然与粗糙黏结面分别取 0.35、0.45; $\mu$ 为摩擦系数,自然与粗糙黏结面分别取 0.6、0.7; $f_t$ 为两种混凝土最小轴心抗拉强度; $\rho$ 为叠合面的配筋率; $f_{yd}$ 为叠合面抗剪钢筋屈服强度; $\sigma_n$ 为叠合面法向正压力; $f_{cd}$ 为混凝土轴心抗压强度设计值; $v$ 为强度折减系数,取 0.6; $\beta_a$ 为抗剪钢筋与叠合面夹角,当抗剪钢筋与叠合面垂直取  $90^\circ$ 。

(2)在美国公路桥梁设计规范 *AASHTO LRFD Bridge Design Specification* (2017)<sup>[19]</sup>中,叠合面抗剪承载力  $\tau_a$ 为

$$\tau_a = cA_{cv} + \mu(A_v f_y + P_c) \leq \min(0.2f'_c A_{cv}, 5.5A_{cv}) \quad (5)$$

式(5)中:若二次浇注混凝土时首次浇筑的混凝土已硬化,则  $c = 0.7$ 、 $\mu = 1$ ; $A_{cv}$ 为叠合面的面积; $A_{vt}$ 为抗剪钢筋截面面积; $f_y$ 为抗剪钢筋的屈服强度; $P_c$ 为叠合面处的法向压力; $f'_c$ 为先后两次浇筑混凝土的轴心抗压强度较小值。

(3)Zhang 等<sup>[7]</sup>通过分析 NC-UHPC 界面的抗剪机制,引入与界面粗糙度相关的影响系数  $\beta'$ ,提出对于带沟槽的 NC-UHPC 界面,其抗剪承载力由界面力  $V_{bv}$  和沟槽处提供的黏附力  $V_{ujv}$  两部分组成;对于配置抗剪钢筋的 NC-UHPC 界面,其抗剪承载力由界面力  $V_{bv}$  和钢筋提供的阻力  $V_{sv}$  两部分组成。因此,对于同时设置沟槽和抗剪钢筋的界面,其抗剪承载力  $V_u$  可表示为

$$V_u = V_{bv} + V_{ujv} + V_{sv} \quad (6)$$

$$V_{bv} = \beta' \tau_c A_b \quad (7)$$

$$V_{ujv} = \alpha A_{ku} \sqrt{f'_u} \quad (8)$$

$$V_{sv} = (\mu \rho k_1 f_y + k_2 \rho \sqrt{f_y f'_c}) A_b \quad (9)$$

式中: $\beta'$ 为界面粗糙度相关系数; $\tau_c$ 为 NC 的直接剪切强度,  $\tau_c = 0.75 \sqrt{0.8f_{cu} f'_{ct}}$ ,其中  $f'_{cu}$  为 NC 立方体

抗压强度; $f'_{ct}$ 为混凝土立方体抗拉强度; $A_b$ 为界面面积; $\alpha$ 为 UHPC 的槽缝系数,取值为 0.996 1; $A_{ku}$ 为沟槽面积; $f'_u$ 为 UHPC 圆柱体抗压强度, $f'_u = 0.83f_{cu}$ ,其中  $f_{cu}$  为 UHPC 立方体抗压强度; $\mu$ 为界面摩擦系数,光滑和粗糙黏结面分别取 1.07 和 1.385; $k_1$ 、 $k_2$ 为相互作用系数,光滑黏结面分别取 0.5 和 1.1,粗糙黏结面分别取 0.5 和 0.9; $\rho$ 为界面配筋率; $f_y$ 为钢筋屈服强度; $f'_c$ 为 NC 圆柱体抗压强度, $f'_c = 0.83f_{cu}$ 。

(4)Ahmad 等<sup>[20]</sup>通过对 8 个传统 Z 形直剪试件的试验测试,将界面的抗剪承载力由混凝土和钢筋的贡献相加来计算,提出的界面抗剪承载力  $V_u$  表达式为

$$V_u = \frac{0.18(f'_c)^{1/2} A_c}{0.3 + \frac{24w_c}{d_a + 16}} + \mu A_v f_y \quad (10)$$

式(10)中: $f'_c$ 为 NC 圆柱体抗压强度, $f'_c = 0.83f_{cu}$ ,其中  $f_{cu}$  为 NC 立方体抗压强度; $w_c$ 为裂缝宽度; $d_a$ 为最大骨料直径; $A_c$ 为界面面积; $\mu$ 为摩擦系数; $A_v$ 为钢筋截面面积; $f_y$ 为钢筋屈服强度。

按照上述 4 种承载力计算方法,对前面基于优化 Z 形 UHPC 和 NC 黏结试件的抗剪承载力进行理论计算,并将其与试验值进行比较,结果如表 4 所示。由计算结果可知,欧洲规范 *Design of Concrete Structures-Part 1: General Rules and Rules for Buildings* (EN-1992-1-1)<sup>[18]</sup> 和美国公路桥梁设计规范 *AASHTO LRFD Bridge Design Specification* (2017)<sup>[19]</sup> 的结果较为接近,并且过于保守,这主要是由于它们的公式均未考虑界面粗糙度的影响。在界面处设置沟槽等措施,可以显著提高两种材料间的机械咬合力,较大幅度提高界面处的抗剪承载力。另外,这两个规范<sup>[18-19]</sup>中的承载力计算方法均是基

表 4 UHPC 和 NC 界面抗剪承载力的试验值与计算值

Table 4 Tests and theoretical values of interface shear capacity for the UHPC and NC specimens

编号	试验值 $V_t$ / kN	计算值/kN				$\frac{V_1}{V_1}$	$\frac{V_1}{V_2}$	$\frac{V_1}{V_3}$	$\frac{V_1}{V_4}$
		Eurocode 2 (2004) <sup>[18]</sup>	AASHTO LRFD (2017) <sup>[19]</sup>	Zhang 等 <sup>[7]</sup>	Ahmad 等 <sup>[20]</sup>				
		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$				
Z-1-0	31.99	6.17	7.82	1.13	27.44	5.18	4.09	1.13	1.17
Z-2-0	38.39	6.17	7.82	0.89	27.44	6.22	4.91	0.89	1.40
Z-3-0	41.72	6.17	7.82	0.72	27.44	6.76	5.34	0.72	1.52
Z-1-6	41.79	15.33	17.31	1.09	36.72	2.73	2.41	1.09	1.17
Z-2-6	45.92	15.33	17.31	0.86	36.72	3.00	2.65	0.86	1.28
Z-3-6	50.07	15.33	17.31	0.73	36.72	3.27	2.89	0.73	1.40
Z-1-8	49.90	22.42	24.65	1.09	43.41	2.23	2.02	1.09	1.19
Z-2-8	63.62	22.42	24.65	1.05	43.41	2.84	2.58	1.05	1.52
Z-3-8	65.82	22.42	24.65	0.87	43.41	2.94	2.67	0.87	1.57
均值						3.91	3.29	0.94	1.36
变异系数						0.43	0.36	0.17	0.11

于常规普通混凝土和既有混凝土间黏结性能的研究背景提出的,它与所关注的 UHPC 与 NC 的界面黏结工作机制有较大差异。因此,原有新老混凝土间界面抗剪承载力的计算方法不能直接应用于 UHPC 和 NC 间界面承载力的计算评估。

相比之下, Zhang 等<sup>[7]</sup>提出的界面抗剪承载力计算公式的计算结果与本文试验值较为接近,该方法是基于 UHPC 和 NC 界面的黏结性能试验得出的,分别考虑了材料强度、抗剪钢筋和界面粗糙度的对抗剪承载力的贡献。然而,在研究中他们采用的是 UHPC 和 NC 双剪面试件,它在剪切面上切应力分布与所提出的优化后 Z 形试件会有较大差异。Ahmad 等<sup>[20]</sup>提出的计算方法是基于 Z 形新老混凝土界面黏结试件提出的,与所研究的优化后 Z 形试件有一定的相似和关联。但是,它的计算结果与本文试验结果相比略显保守,这主要是由于该计算方法中并未考虑界面粗糙度的影响。

### 3.2 UHPC 和 NC 界面抗剪承载力计算公式

由 3.1 节的计算分析可知,上述 4 种方法的计算结果均与本文试验值有一定差异,并分析了误差产生的主要原因。由工程实践可知,UHPC 和 NC 界面处的抗剪承载力主要包括材料强度、抗剪钢筋和界面粗糙度等关键因素。为此,以与本文有本源关联的 Z 形试件为依托得出的 Ahmad 等<sup>[20]</sup>的计算模型为基础,引入界面粗糙度的影响,提出 UHPC 和 NC 界面抗剪承载力计算方法。在建立该方法时,假设 UHPC 和 NC 在界面处黏结良好,两者间不产生裂缝(即  $w_c = 0$ ),并将其代入式(9)。在此基础上,引入 Zhang 等<sup>[7]</sup>关于界面粗糙度(以沟槽处 UHPC 的面积为表征)对抗剪承载力贡献的计算方法,建立 UHPC 和 NC 界面抗剪承载力  $V_u$  的计算公式为

$$V_u = 0.6f_c^{1/3}(A_c - A'_c) + \mu A_w f_y + 0.6f_{um}^{1/3} A'_c \quad (11)$$

式(11)中: $f_c$ 为 NC 圆柱体抗压强度; $f_{um}$ 为 UHPC 圆柱体抗压强度; $A'_c$ 为界面凹槽处 UHPC 表面积。

由式(11)可得出所浇筑的 UHPC 和 NC 试件界面抗剪承载力的计算值,具体如表 5 所示。

由结果可知,试验值与计算值比值的均值为 1.09,变异系数为 0.08,这表明所提出的 UHPC 和 NC 界面抗剪承载力计算公式的理论值与试验值吻合较好。

### 3.3 UHPC-NC 界面抗剪承载力贡献率分析

图 8 为基于本试验结果利用式(11)计算抗剪钢筋和界面粗糙度对抗剪承载力贡献率的结果。

表 5 UHPC-NC 界面抗剪承载力计算公式的有效性验证  
Table 5 Validation of the calculation formula of the interface shear capacity for the UHPC and NC specimens

编号	$V_i /$ kN	$f_c /$ MPa	$f_{um} /$ MPa	$f_y /$ MPa	$V_u /$ kN	$V_i / V_u$
Z-1-0	31.99	20.92	92.12	0	30.32	1.05
Z-1-6	41.79	20.92	92.12	395.42	39.60	1.09
Z-1-8	49.90	20.92	92.12	382.75	46.29	1.14
Z-2-0	38.39	20.92	92.12	0	36.08	1.05
Z-2-6	45.92	20.92	92.12	395.42	45.36	1.04
Z-2-8	63.62	20.92	92.12	382.75	52.05	1.27
Z-3-0	41.72	20.92	92.12	0	41.84	0.98
Z-3-6	50.07	20.92	92.12	395.42	51.12	0.99
Z-3-8	65.82	20.92	92.12	382.75	57.81	1.18

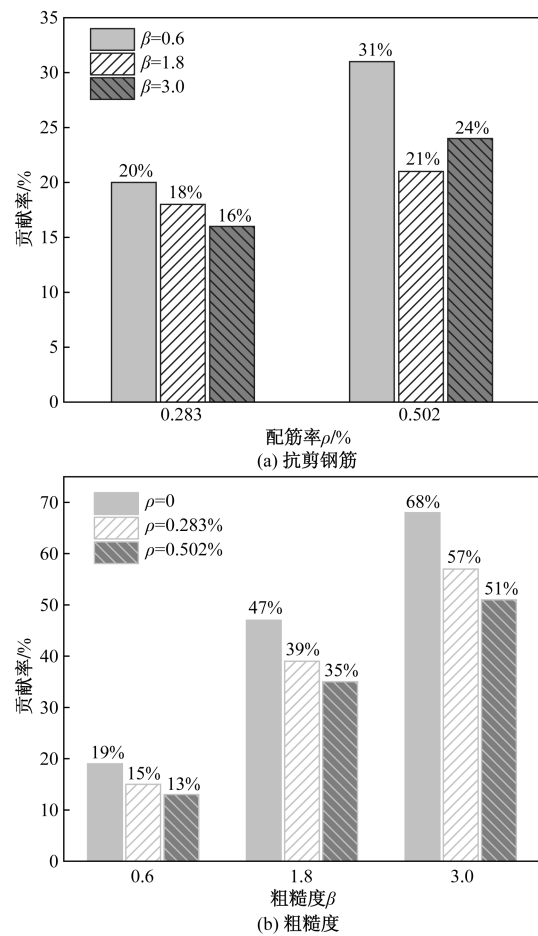


图 8 抗剪钢筋和界面粗糙度对 UHPC-NC 界面抗剪承载力的贡献率

Fig. 8 Contribution rate of shear reinforcement and roughness to the interface shear capacity of the UHPC-NC specimens

由图 8(a)可知,在配筋率为  $\rho = 0.283\%$  的试件中,抗剪钢筋对界面抗剪承载力的贡献率大多小于 20%,总体相对较小,且贡献率随着粗糙度的增大而逐渐减小;对于配筋率为  $\rho = 0.502\%$  的试件,在增大配筋率以后,可以提高抗剪钢筋对界面抗剪承载

力的贡献率(均大于 20%),尤其是粗糙度小的试件更为显著,如粗糙度  $\beta = 0.6$  时,抗剪钢筋的贡献率可到 31%。相比之下,当具有大配筋率的抗剪钢筋时,提高界面粗糙度,抗剪钢筋的贡献率提高效果并不明显。

由图 8(b)可知,当粗糙度  $\beta = 3.0$  时,这类试件中沟槽面积达到受剪界面面积的 1/2,此时界面粗糙度对界面抗剪承载力的贡献率均在 50% 以上,这也说明设置沟槽可以显著提高界面的抗剪能力。对于同一配筋率,提高界面粗糙度可以使其对抗剪承载力的贡献率相应地提高。当界面粗糙度由 0.6 增加至 1.8 时,界面粗糙度对界面抗剪承载力的贡献率增幅较为显著,而将界面粗糙度由 1.8 增至 3.0 时,它对界面抗剪承载力的贡献率增幅不太明显。由此可见,仅靠增加界面粗糙度提高其对抗剪承载力的贡献率,这一做法的效果不明显,且施工繁琐、不经济。为此,建议在 UHPC 和 NC 黏结上通过设置沟槽提高界面粗糙度时,不宜超过界面面积的 1/2。

## 4 结论

(1)UHPC 和 NC 界面受剪的破坏模式为在界面处发生典型的脆性破坏,破坏的位置主要发生在 NC 侧或部分界面与部分 NC 处,且无界面完全剥离现象;UHPC 和 NC 界面的荷载-滑移曲线为线性变化,无明显的下降段。

(2)在粗糙度和配筋率等主要指标内,UHPC 和 NC 界面的抗剪强度分布在 3.20 ~ 6.58 MPa;界面的最大滑移量相对较小,分布在 1.37 ~ 3.44 mm 范围内。UHPC 和 NC 界面的黏结作用、沟槽间的机械咬合作用以及是否配筋对界面抗剪强度有显著影响。

(3)在相同配筋率下,当 UHPC 和 NC 界面粗糙度由 0.6 增至 3.0 时,界面间抗剪强度呈现出逐渐增大的趋势。然而,仅靠增大粗糙度提高界面抗剪强度的效果并不太明显。因此,建议通过设置沟槽提高粗糙度时,沟槽的面积不宜超过两者交界面面积的一半。

(4)为提高 UHPC 和 NC 界面的抗剪强度,在界面处宜设置带肋钢筋或光圆钢筋;配有光圆钢筋或带肋钢筋的 UHPC 和 NC 界面抗剪强度比未配置抗剪钢筋的试件分别提高了 23.4% 和 59.8%,效果较为显著。

(5)提出 UHPC 和 NC 界面抗剪承载力的计算方法,能够综合考虑抗剪钢筋和界面粗糙度对抗剪性能的贡献;研究表明,该计算方法的理论值与试验结果吻合较好。

## 参 考 文 献

- [1] Rashid K, Ahmad M, Ueda T, et al. Experimental investigation of the bond strength between new to old concrete using different adhesive layers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118798.
- [2] 肖成志, 田稳苓, 刘波, 等. 设置界面构造锚筋的新老混凝土黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 75-81. Xiao Chengzhi, Tian Wenling, Liu Bo, et al. Experimental study on bonding properties of young and old concrete with constructional steel bar[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 75-81.
- [3] 乔建刚, 王琦森, 徐阳, 等. 不同界面剂对湿接缝混凝土黏结性能影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(6): 2540-2546. Qiao Jiangang, Wang Qisen, Xu Yang, et al. Effect of different interfacial agents on bonding properties of wet joint concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(6): 2540-2546.
- [4] 林拥军, 徐文强, 杨敏润, 等. 基于三维能量屈服准则的新老混凝土无锚筋结合面抗剪强度统一计算方法[J]. 工程力学, 2022, 39(5): 119-132. Lin Yongjun, Xu Wenqiang, Yang Minrun, et al. Unified calculation method for shearing strength of new to old concrete interface without anchor bars based on three-dimensional energy yield criterion[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(5): 119-132.
- [5] 孙世国, 鲁艳朋. 超高性能混凝土国内外研究进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(20): 184-199. Sun Shiguo, Lu Yanpeng. Research progress of ultra high performance concrete at home and abroad[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(20): 184-199.
- [6] Jang H, Lee H, 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.
- [7] 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.
- [8] 王德弘, 沈彤, 鞠彦忠, 等. 后浇普通混凝土与预制 UHPC 的黏结受剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(S2): 411-419. Wang Dehong, Shen Tong, Ju Yanzhong, et al. Study on shear bond behavior of post-cast normal concrete and precast UHPC[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S2): 411-419.
- [9] 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.
- [10] 杨俊, 周建庭, 张中亚, 等. UHPC-NC 键槽界面抗剪性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 132-144. Yang Jun, Zhou Jianting, Zhang Zhongya, et al. Shear performance of keyway interface between UHPC and normal concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 132-144.
- [11] 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 Jianting, Hu Tianxiang, Yang Jun, et al. Experimental investigation on bonding behavior of UHPC-NC interface in keyway structure[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(16): 16050-16057, 16064.
- [12] 管东芝, 陈子轩, 蒯志一, 等. 先浇 UHPC-后浇普通混凝土气泡膜式结合面受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(S1): 426-432, 455.
- Guan Dongzhi, Chen Zixuan, Lin Zhiyi, et al. Experimental study on shear performance of bubble grove interface between precast UHPC and post cast normal concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(S1): 426-432, 455.
- [13] Al-Madani M K, Al-Osta M A, Ahmad S, et al. Interfacial bond behavior between ultra high performance concrete and normal concrete substrates[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 320: 126229.
- [14] Chen L, Yan J, Wu Z G, et al. Experimental and numerical study on shear behavior of shear pockets between ultra-high-performance and normal concrete for precast girder bridges [J]. *Structures*, 2023, 55: 1645-1658.
- [15] 吴玥, 张阳, 刘颖峰, 等. 预制 UHPC 与后浇 NC 界面的抗剪性能[J]. *铁道建筑*, 2023, 63(9): 48-53.
- Wu Yue, Zhang Yang, Liu Yingfeng, et al. Experimental and numerical analysis on interfacial shear resistance of prefabricated UHPC-post-cast NC Interface [J]. *Railway Engineering*, 2023, 63(9): 48-53.
- [16] Tong T, Yuan S Q, Wang H, et al. Numerical insights on quasi-static behaviors of UHPC-NC composite members by a phase-field approach enhanced with a cohesive-frictional interface model [J]. *Composite Structures*, 2022, 297: 115948.
- [17] 张琦, 过镇海. 砼抗剪强度和剪切变形的研究 [J]. *建筑结构学报*, 1992(5): 17-24.
- Zhang Qi, Guo Zhenhai. Investigation on shear strength and shear strain of concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 1992(5): 17-24.
- [18] British Standards Institution. Design of concrete structures-part 1: general rules and rules for buildings: EN-1992-1-1 [S]. Brussels: CEN European Committee for Standardization, 2004.
- [19] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specification [S]. Washington D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- [20] Ahmad S, Bhargava P, Chourasia A. Direct shear failure in concrete joints exposed to elevated temperatures [J]. *Structures*, 2020, 27: 1851-1859.