

# UHPC-NC 界面抗剪性能试验研究

万志勇<sup>1,2</sup>, 陈健平<sup>3</sup>, 贺绍华<sup>4\*</sup>, 黄旭<sup>4</sup>, 孙向东<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507; 3. 广东省建筑工程机械施工有限公司, 广东 广州 510500; 4. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**超高性能混凝土(UHPC)在工程结构加固领域应用前景广阔,新浇UHPC加固层与既有混凝土可靠的界面黏结性能,是确保加固结构服役性能的关键。为研究不同界面处理方式对UHPC与普通混凝土(NC)间黏结性能的影响,设计制作了6个Z形UHPC-NC界面抗剪试件,探究光滑、凿毛、凿毛+植筋3种不同UHPC-NC结合面黏结性能,并通过建立混凝土结合面非线性有限元模型,探讨剪切荷载作用下不同UHPC-NC结合面黏结应力的分布规律。结果表明:UHPC-NC界面黏结性能随结合面粗糙度增大不断提高,界面抗剪钢筋有利于延缓混凝土结合面脱黏和裂缝发展;相比光滑UHPC-NC结合面,平均凿毛深度为4 mm且植入4根直径8 mm抗剪钢筋的混凝土结合面,其抗剪强度、刚度及弹性刚度依次增大了156.1%、10.9%和101.0%,且随着界面裂缝不断发展,凿毛+植筋处理的UHPC-NC界面剪应力分布渐趋均匀,结合面残余黏结作用主要由界面抗剪钢筋提供。

**关键词:**UHPC-NC界面;加固;黏结性能;抗剪试验;数值模拟

中图分类号:U441

文献标志码:A

## Experimental Study on Shear Performance of UHPC-NC Interface

WAN Zhiyong<sup>1,2</sup>, CHEN Jianping<sup>3</sup>, HE Shaohua<sup>4\*</sup>, HUANG Xu<sup>4</sup>, SUN Xiangdong<sup>2</sup>

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; 2.Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510507, China; 3.Guangdong Construction Engineering Machinery Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510500, China; 4.School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** Ultra-high performance concrete (UHPC) has great application prospects in engineering structure reinforcement. The reliability of the bonding properties at the interface between the new UHPC reinforcement layer and the old concrete structure is critical for ensuring the serviceability of the reinforced structures. To determine the influence of different interface treatments on the bonding properties at the interface between the UHPC and normal concrete (NC), six Z-shaped UHPC-NC bonding specimens were designed, and the bonding properties of the UHPC-NC with three different kinds of interface, namely smooth, chisel, chisel + reinforced, were investigated. In addition, nonlinear finite element models for the concrete interface were established to determine the distribution law of bonding stresses of different UHPC-NC interfaces under shear loads. The results show that the bonding properties of the UHPC-NC interface increase with the increase in the interface roughness, and interfacial shear reinforcements can postpone the debonding and cracking of the concrete interface. Compared to the smooth UHPC-NC interface, the shear strength, stiffness, and elastic stiffness of the concrete interface with an average chisel depth of 4 mm and four shear reinforcements with a diameter of 8 mm are improved by 156.1%, 10.9%, and 101.0%, respectively. With the continuous development of interfacial cracks, the shear stress distribution of the UHPC-NC interface treated with chisel

收稿日期:2023-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278161);广东省自然科学基金资助项目(编号:2023A151010535)

作者简介:万志勇,男,博士研究生,教授级高工.E-mail:1095801967@qq.com

\*通信作者:贺绍华,男,博士,副教授.E-mail:hesh@gdut.edu.cn

and reinforcement becomes more and more uniform, and the residual bonding effect of the interface is mainly provided by the interfacial shear reinforcement.

**Keywords :** UHPC-NC interface; reinforcement; bonding properties; shear test; numerical simulation

## 0 引言

进入21世纪以来,中国公路交通运输量每年保持井喷式增长,大量现役钢筋混凝土桥梁出现不同程度的开裂、混凝土剥落、钢筋锈蚀等病害,影响结构安全和耐久性。导致既有混凝土桥梁开裂病害频发的原因很多,包括早期设计理论不完善(如混凝土收缩徐变考虑不充分、温度效应模型不成熟等)、施工质量缺陷(如预应力灌浆不饱满、混凝土严重超方等)、车辆超载普遍、运营管养不及时等。加固既有混凝土桥梁的结构是增强其服役性能和耐久性的重要手段。传统做法是在桥梁表面粘贴板材(如钢板条、碳纤维CFRP布)或采用普通混凝土增大结构断面,或在其受拉区增设体外预应力改善桥梁服役性能。然而,粘贴薄钢板条或CFRP布对桥梁刚度和抗裂性能提升有限,较厚的普通混凝土加固层会显著增大结构自重,降低加固效率,体外预应力可以增强桥梁刚度和承载能力,但钢束锚固区和转向块应力集中明显,且钢束防腐难度大。

近年来,有学者提出采用超高性能混凝土(Ultra High-Performance Concrete, UHPC)加固既有混凝土结构的新方法<sup>[1]</sup>。UHPC是一种具有超高强度、优异耐久性、符合国家“双碳”目标的可持续发展材料,其组成材料中的钢纤维可有效提高混凝土抗裂性能,掺入的硅灰也有利于改善UHPC与普通混凝土(Normal Concrete, NC)的结合能力<sup>[2-3]</sup>。采用UHPC加固既有钢筋混凝土桥梁不仅能提高结构使用寿命和承载能力,还能增强抗渗和抗锈蚀能力。然而,新浇UHPC与旧混凝土之间存在明显的服役龄期和收缩徐变差异,服役过程中新老混凝土结合面拉剪效应明显,加固层与既有混凝土结构的黏结界面开裂风险高,甚至存在服役过程中提早剥离的风险。处治加固区混凝土表面,可以提高界面黏结能力,增强加固结构的可靠性,较为常见的混凝土界面处治方式包括凿毛、喷砂、切槽、钻孔、植筋等。

目前,国内外学者对UHPC-NC结合面黏结性能已有一些研究。Jang等<sup>[4]</sup>对不同混凝土结合面抗剪

性能进行了试验研究,发现结合面附近的骨料咬合作用对UHPC-NC界面黏结强度影响显著;Aaleti等<sup>[5]</sup>基于新老混凝土界面黏结试验结果,探讨了凿毛度对UHPC-NC结合面黏结性能的影响,结果显示凿毛度对界面剪力传递影响较大;张阳等<sup>[6]</sup>研究了不同UHPC-NC界面抗剪性能,发现混凝土凿毛和刻槽对结合面抗剪强度提高明显,界面植筋或刻槽能进一步增强结合面变形能力;饶欣频等<sup>[7]</sup>对UHPC-NC界面进行的试验研究表明:结合面为光滑或凿毛状态时,黏结界面极易发生脆性剪切破坏。综合国内外已有研究,目前有关UHPC-NC界面黏结影响因素的研究已较多,但对剪切荷载作用下UHPC-NC结合面黏结承载机理的研究还较少,尤其是在桥梁加固中常用的凿毛和植筋界面剪切失效机制亟待深入研究。

基于此,本文设计制作了6个Z形UHPC-NC界面抗剪试件,对光滑、凿毛、凿毛+植筋3种不同UHPC-NC结合面进行试验研究,分析不同UHPC-NC结合面的黏结强度、刚度、开裂模式及变形特征,并通过建立的UHPC-NC结合面抗剪非线性有限元模型,探讨剪切荷载作用下不同结合面黏结应力的分布规律,以期为UHPC薄层加固既有混凝土桥梁的工程应用提供依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计及制作

试验采用如图1(a)所示的Z形直剪试件测试UHPC-NC结合面黏结性能,该试件能有效降低加载偏心导致的界面弯曲应力影响,被国内外学者广泛用于确定混凝土结合面黏结特性<sup>[8-9]</sup>。Z形抗剪试件由两个反向布置的“L”形混凝土块组成,中间区域结合成整体。为保证竖向加载时混凝土结合面能自由滑移,“L”形混凝土构件端部预留30 mm宽的空槽,试件的其他尺寸及截面布置情况如图1(b)所示。

本试验设计的UHPC-NC结合面形式包括界面光滑、凿毛、凿毛+植筋,按结合面形式共制作3组Z形UHPC-NC界面抗剪试件,同组参数试件制作2个。如图1(b)所示,UHPC与NC结合面高度和宽度均为

200 mm。表1给出了试验参数设置情况。试件编号GH、ZM、ZJ分别表示界面光滑、凿毛、凿毛+植筋,数字1和2分别代表同组试件中两个相同参数试件的编号。

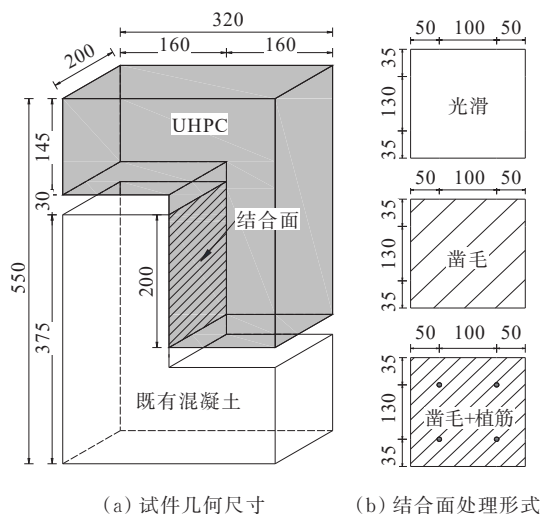


图1 试件尺寸及植筋布置(单位:mm)

Figure 1 Specimen dimension and reinforcement arrangement (unit:mm)

表1 试件主要设计参数

Table 1 Main design parameters of specimen

组号	序号	黏结面处理方式			备注
		光滑	凿毛	抗剪钢筋	
GH	1	√	—	—	界面不处理,保持自然光滑
	2	√	—	—	
ZM	1	—	√	—	界面人工凿毛,平均凿毛深度4 mm
	2	—	√	—	
ZJ	1	—	√	√	界面人工平均凿毛深度4 mm,并植入4根直径8 mm的钢筋
	2	—	√	√	

Z形界面试件的制作流程遵循先浇NC再浇UHPC的顺序,具体步骤如下:①模板内绑扎钢筋,然后浇筑普通混凝土,养护28 d;②处治养护好的NC构件表面,利用凿毛机和小型钻机对结合区进行凿毛和钻孔,通过灌砂法控制平均凿毛深度为4 mm,钻孔直径10~12 mm、孔深60 mm,植入直径8 mm的HRB400钢筋,孔内填充植筋胶固定;③待胶体完全固化后,对结合面进行湿润处理,模板内绑扎钢筋,浇筑UHPC,并覆膜湿润养护28 d。

## 1.2 材料参数

试验采用的NC为C55混凝土,UHPC为U120级,表2为测得的混凝土材料力学性能结果。NC的

立方抗压强度、轴心抗压强度、弹性模量和泊松比参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行测定<sup>[10]</sup>。其中,混凝土立方体抗压强度通过3个150 mm×150 mm×150 mm的标准立方体试件测定,轴心抗压强度、弹性模量、泊松比通过6个150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体依据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)规定方法测定。试件使用的HRB400钢筋实测屈服强度为455 MPa,弹性模量为200 GPa。

表2 混凝土材料性能

Table 2 Concrete material properties

材料	立方体抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	轴心抗压强度/MPa
C55	66	36 800	0.2	57
U120	129	39 500	0.2	111

## 1.3 试验加载方案及测点布置

如图2所示,所有试件采用量程为1 000 kN的伺服压力试验机进行加载,试验机加载端板与Z形试件之间放有8 mm厚的钢板,并用石膏抹平。试件上下端各布置1个量程50 mm的位移传感器(型号:YHD-50),实时测量加载过程中UHPC与NC构件之间的相对滑移。此外,UHPC-NC结合面中部设有1个量程5 mm的位移传感器(型号:YHD-5),监测UHPC与NC结合面开裂后的剥离位移。加载前期,荷载通过力加载,加载速率为1 kN/s;当荷载超过50%的试件理论极限荷载后,加载方式转换为位移加载,加载速率为0.1 mm/min,直至试件破坏。

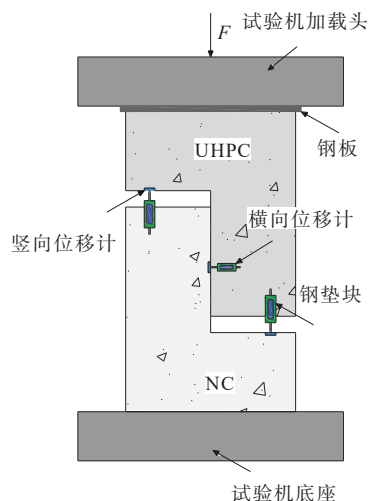


图2 加载装置及测点布置

Figure 2 Loading device and measuring point arrangement



## 2 试验结果分析

### 2.1 破坏形态

图3为3种不同UHPC-NC结合面抗剪试件的破坏形态。

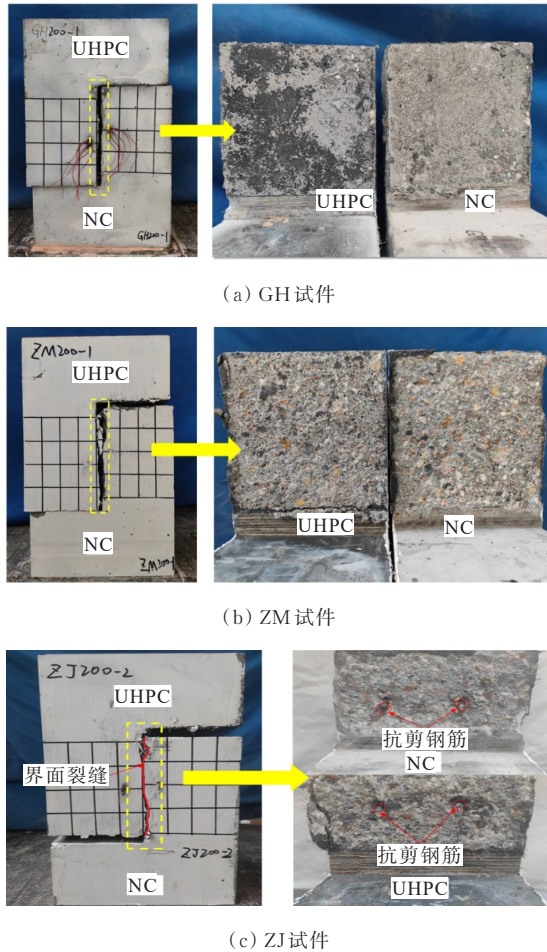


图3 试件破坏形态

Figure 3 Failure mode of specimen

由图3可知:对于GH(光滑)和ZM(凿毛)组界面抗剪试件,加载时未观察到明显的UHPC-NC表面裂缝,直至峰值荷载时结合面上部突然开裂,并迅速延伸贯穿整个UHPC-NC界面。这两组试件从开裂到破坏的过程极短,脆性破坏特征明显。由图3(a)可知:破坏后的GH试件NC界面仍保持光滑,UHPC与NC彻底分离,属于完全界面破坏(A类破坏形态);图3(b)显示ZM试件的NC构件混凝土局部剥落,且UHPC表面残留有少量NC,属于界面-NC破坏(B类破坏形态)。结合GH和ZM的界面破坏情况可知,界面凿毛对UHPC-NC结合面破坏形态影响较小。对于ZJ(凿毛+植筋)试件,加载至极限荷载的

0.7附近时,UHPC-NC结合面上部产生竖向裂缝,且随荷载增大裂缝迅速向下延伸,直至极限荷载时贯穿整个结合面。由于界面布置了抗剪钢筋,极限荷载后结合面仍保持较大的残余黏结作用,表现出较为明显的延性破坏特征,试件最终破坏由NC侧抗剪钢筋剪断控制(C类破坏形态),如图3(c)所示。与ZJ试件相比,GH和ZM试件的初始开裂荷载更高、破坏时界面滑移更大,这主要是由于界面钢筋在提供抗剪作用之余,在结合面上也形成了法向约束,抑制了结合面裂缝的扩展。

### 2.2 剪切应力-滑移曲线

UHPC-NC结合面平均剪应力 $\tau$ 可按式(1)计算,基于试验结果计算得到不同UHPC-NC界面黏结应力-滑移曲线如图4所示。

$$\tau = F/A \quad (1)$$

式中: $F$ 为施加的荷载值(kN); $A$ 为黏结面面积( $\text{mm}^2$ )。

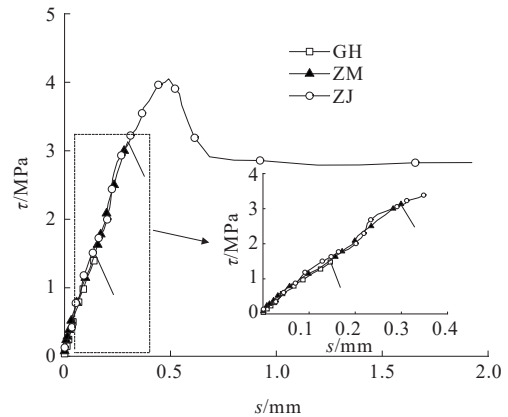


图4 剪应力-滑移曲线

Figure 4 Shear stress-slip curve

从图4可以看出:对于未设置抗剪钢筋的GH和ZM试件,黏结曲线大体分为两段:①从初始加载到极限荷载( $F_u$ )的上升段,荷载与滑移基本保持线性关系,试件表面暂未开裂;②峰值荷载过后的下降段,滑移快速增大并伴随荷载骤降,UHPC-NC结合面完全剥离并丧失承载能力。对于界面凿毛并设有抗剪钢筋的ZJ试件,结合面剪切应力-滑移曲线主要包含4个阶段:①初始加载至 $0.7F_u$ 的线弹性阶段,随着荷载的增加,滑移线性增长,界面无裂缝出现,此时主要的抗剪作用由界面化学胶着力与机械咬合力提供;②当荷载从 $0.7F_u$ 增加至 $F_u$ ,进入弹塑性阶段,此时随着荷载增大,UHPC与NC间的相对滑移非线性增长。结合面开始出现竖向裂缝,并迅速蔓延至整

个界面。随着裂缝的扩展,结合面逐渐剥离,界面黏结逐渐失去作用,而由抗剪钢筋开始承担主要的竖向荷载;③当荷载从 $F_u$ 下降至 $0.7F_u$ 时,进入下降阶段。该阶段荷载急剧下降,而界面滑移继续增大。此时,结合面丧失黏结作用,抗剪钢筋进入塑性阶段,钢筋销栓力主要承担剪切作用;④破坏阶段,即使荷载继续下降,结合面的残余黏结作用( $F_r$ )基本保持稳定,直至抗剪钢筋断裂。

### 2.3 黏结强度与刚度

由黏结剪应力-滑移曲线得到UHPC-NC结合面主要力学性能指标,如表3所示。 $K_e$ 为结合面弹性抗剪刚度,对应剪切应力-滑移曲线上开裂荷载时的割线刚度,其值通过开裂荷载 $F_c$ 与开裂滑移 $s_c$ 计算得到;开裂荷载 $F_c$ 换算得到的黏结剪应力和滑移分别定义为开裂黏结强度 $\tau_c$ 和开裂滑移 $s_c$ ;极限荷载 $F_u$ 对

应的剪应力和滑移分别定义为极限黏结强度 $\tau_u$ 和极限滑移 $s_u$ ;残余荷载 $F_r$ 对应的剪应力和滑移分别定义为残余黏结强度 $\tau_r$ 和残余滑移 $s_r$ 。由前述结果可知,GH和ZM的开裂荷载即为极限荷载。

不同UHPC-NC结合面的极限黏结强度和弹性刚度情况如图5所示。

从图5可以看出:不同UHPC-NC结合面的黏结强度差异较大。与GH相比,ZM和ZJ试件的结合面极限黏结强度分别增大了98.1%和156.1%。这是由于界面凿毛增大了UHPC与NC之间的机械咬合作用,结合面钢筋参与提供界面剪切抗力,进而提高了UHPC-NC结合面黏结强度。此外,由于界面抗剪钢筋具有良好的变形能力,在凿毛界面增设抗剪钢筋显著增强了结合面的黏结能力。与ZM试件相比,ZJ试件的结合面极限黏结强度提高了29.3%。

表3 试验主要结果

Table 3 Main test results

项目	$K_e/$ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$F_c/$ kN	$\tau_c/$ MPa	$s_c/$ mm	$F_u/$ kN	$\tau_u/$ MPa	$s_u/$ mm	$F_r/$ kN	$\tau_r/$ MPa	$s_r/$ mm
GH	试件1	403.42	58.9	1.47	0.146					
	试件2	429.61	65.3	1.63	0.152					
	均值	416.52	62.1	1.55	0.149					
ZM	试件1	418.73	125.2	3.13	0.299					
	试件2	420.56	120.7	3.02	0.287					
	均值	419.65	122.9	3.07	0.293					
ZJ	试件1	457.66	113.5	2.84	0.248	162.0	4.05	0.492	113.1	2.83
	试件2	466.38	108.2	2.71	0.232	155.9	3.90	0.446	117.5	2.94
	均值	462.02	110.9	2.77	0.243	158.9	3.97	0.475	115.3	2.88

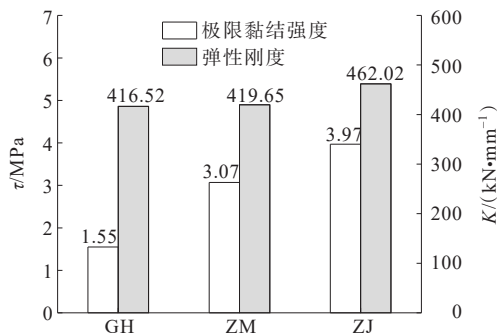


图5 试件极限黏结强度与弹性刚度

Figure 5 Ultimate bonding strength and elastic stiffness of specimen

对于未设置抗剪钢筋的UHPC-NC结合面,GH和ZM的剪切刚度接近,机械咬合作用对界面刚度的改善有限。这是因为在抵达峰值荷载前,两种结合

面均未开裂,外部剪切荷载主要由黏结界面的化学胶着力承担。尽管凿毛处理能显著提高界面黏结强度,但对剪切刚度提高并不大,不利于UHPC加固混凝土桥梁结构的刚度提升。而对于界面设置抗剪钢筋的UHPC-NC结合面,由于结合面的混凝土化学胶着力与钢筋共同承担剪切荷载,ZJ的弹性黏结刚度相较于GH和ZM,分别增大了10.9%和10.1%。这种凿毛+植筋处理方式,能够大幅提高界面的黏结强度和剪切刚度,有利于加固结构更有效地抵抗外部荷载产生的界面剪切作用,从而延缓裂缝的出现与发展。

### 3 有限元模拟

由于在试验过程中难以直接观察到UHPC-NC

建立的 Z 形试件三维实体有限元模型如图 8 所示。C55、UHPC 与钢垫块均采用 C3D8R 实体单元, 普通钢筋和界面抗剪钢筋均采用 T3D2 单元。利用 Abaqus 内嵌的“Structured”模块进行网格划分, 整体



网格尺寸为  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ <sup>[20]</sup>。试件顶部设有1个参考点,并将其与顶面加载钢板节点耦合,荷载通过参考点施加,然后传递至试件顶面。试件底面  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向及参考点  $x$ 、 $z$  方向自由度均被约束<sup>[9]</sup>。

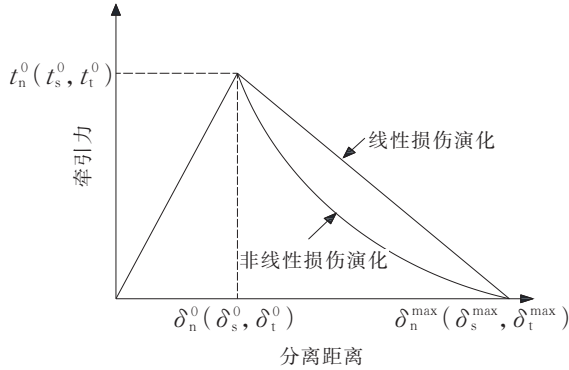


图7 典型的 Traction-separation 响应模型

Figure 7 Typical traction-separation response model

表5 有限元模型界面参数

Table 5 Interface parameters of finite element model

试件界面形式	$K_{nn}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	$K_{ss}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	$K_{tt}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	$t_n^0$	$t_s^0$	$t_t^0$
GH	10.42	4.45	4.45	6.97	12.07	12.07
ZM	10.49	4.48	4.48	12.32	21.33	21.33
ZJ	11.41	4.88	4.88	12.32	21.33	21.33

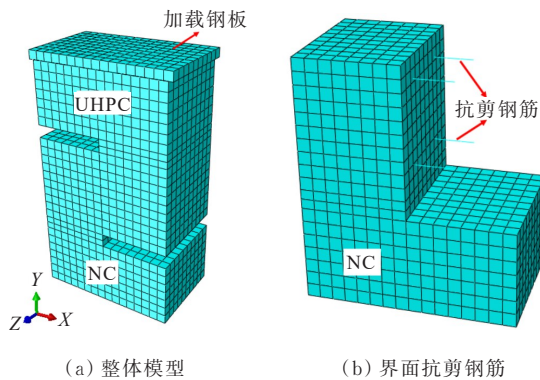


图8 有限元模型

Figure 8 Finite element model

### 3.2 有限元计算结果

图9为有限元模型计算结果与试验实测结果的对比。从图9可以看出:有限元模拟得到的结合面黏结应力-滑移曲线与试验曲线整体趋势一致,模拟结果与试验结果接近,表明采用建立的有限元模型分析 UHPC-NC 界面黏结应力是可行的。

当荷载接近 GH 试件的极限时,在单个荷载计算增量下, UHPC-NC 黏结界面的应力分布情况如图10所示。

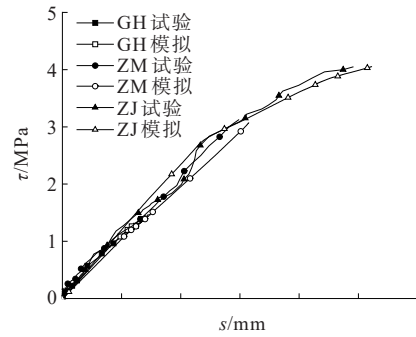


图9 试验与有限元模拟的剪应力-滑移曲线

Figure 9 Shear stress-slip curves of test and finite element simulation

从图10可以看出:在竖向荷载作用下, UHPC-NC 结合面的法向正应力很小,几乎可忽略不计,表明采用的 Z 形试件能较好地反映结合面在剪切作用下的受力情况。值得注意的是, ZJ 结合面的正应力高于 GH、ZM 试件。结合图5, ZJ 试件的极限强度与剪切刚度均高于 GH 和 ZM 试件,表明界面钢筋受到剪切作用时,会产生垂直于结合面的法向拉拔力,增强了界面机械咬合作用,提高了抗剪能力。

由图10(a)可知:在界面裂缝贯通后, GH 试件的 UHPC 与 NC 彻底分离,接触面的摩擦剪应力逐渐趋于均匀分布,最大剪应力位于界面边缘,该计算结果与 GH 失效时,结合面裂缝自上而下发展,最终导致混凝土块瞬间脱落的失效模式相吻合。由图10(b)可知:结合面凿毛后,该荷载增量步下 ZM 试件的 UHPC 与 NC 黏结整体性得到显著增强,界面摩擦剪应力也远小于 GH 试件。由图10(c)可知:在凿毛界面上植入短钢筋后,由于界面抗剪钢筋参与抵抗剪切荷载,在该计算荷载增量步下, ZJ 试件结合面摩擦剪应力远低于 ZM 试件。由结合面应力结果可知, UHPC-NC 结合面最大剪应力最先出现在靠近钢筋的根部区域,说明 ZJ 试件的界面裂缝最先形成于抗剪钢筋附近。

极限状态下不同 UHPC-NC 结合面的应力云图如图11所示。图11(a)、(b)显示 GH 和 ZM 的结合面应力分布规律接近,最大界面应力均出现在结合面顶部边缘,这与试验观察的裂缝自上而下延伸发展现象一致,验证了有限元模型的可靠性。结合图11(c), ZJ 的界面抗剪钢筋在结合面产生了明显的应力集中,混凝土峰值应力均靠近抗剪钢筋根部,说明界面裂缝首先出现在该区域附近,随着荷载增大逐渐

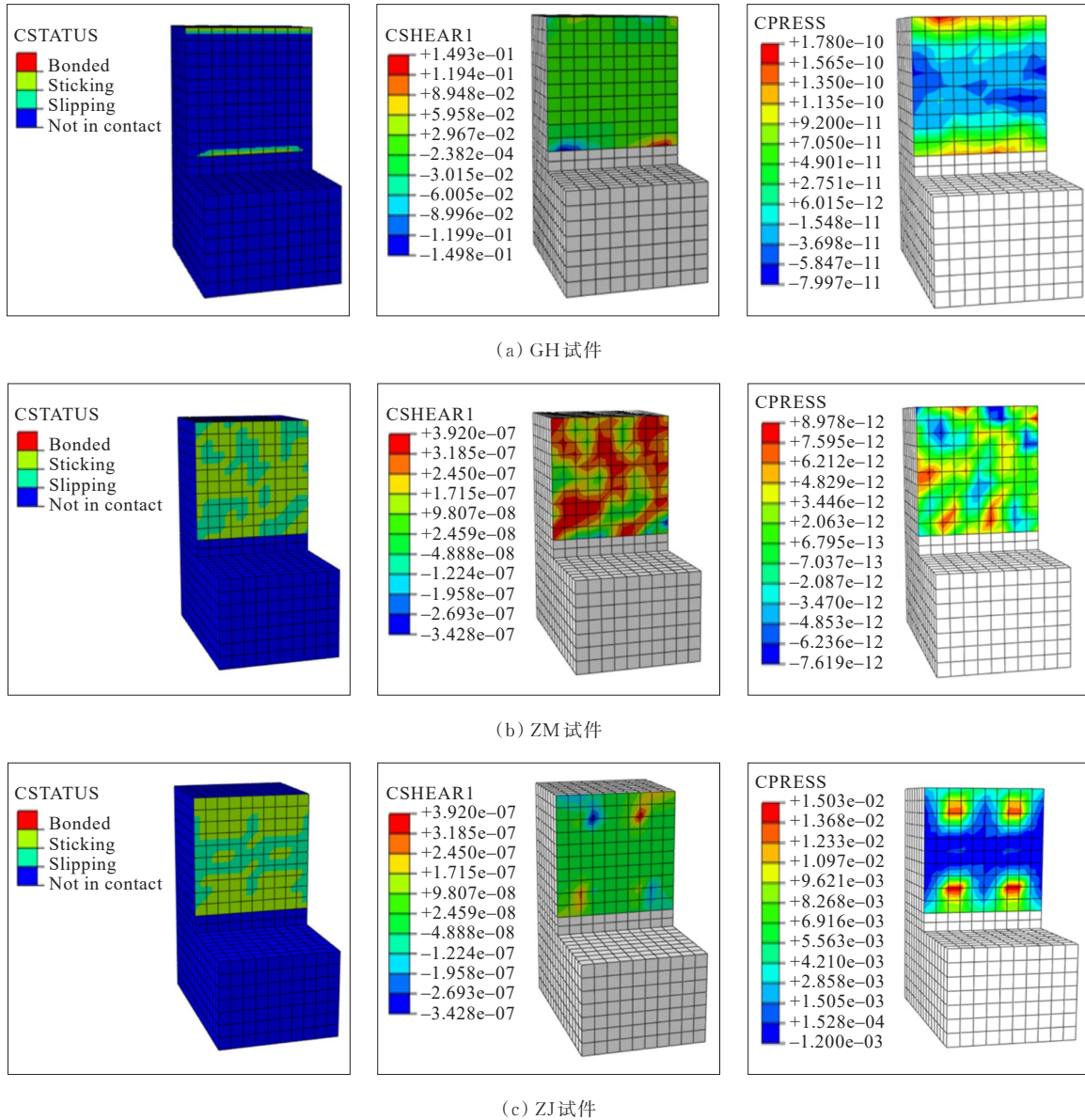


图 10 界面黏结状态(左)、界面摩擦剪切应力(中)与界面正应力(右)(单位:MPa)

Figure 10 Interfacial bonding state (left), frictional shear stress (middle), and normal stress (right) (unit:MPa)

由内而外延伸,直至贯穿整个接触面。综上可知:对于光滑或凿毛的混凝土界面,UHPC-NC结合面的剪切失效主要源于界面边缘的应力集中;对于设有抗剪钢筋的混凝土界面,UHPC-NC结合面的剪切开裂是由NC侧抗剪钢筋根部应力集中所致,随着裂缝不断发展蔓延,最终引发整个界面失效。

由图 11 可知:与 GH 试件相比,ZM 试件的结合面最大黏结应力提高了 37.0%,对应 ZJ 的结合面最大黏结应力也提高了 120%。界面凿毛有效增强了 UHPC 与 NC 间的机械咬合力,改善两者之间的界面黏结作用。在峰值荷载作用下,ZJ 试件的界面抗剪钢筋最大应力达 455 MPa,表明此时除机械咬合作用

外,结合面抗剪钢筋承担了大部分的界面剪切作用。

## 4 结论

本文对 UHPC-NC 结合面的黏结性能进行了试验研究和数值模拟,分析了不同界面处理方式对 UHPC-NC 结合面力学性能的影响,并基于模拟结果,探讨了结合面的应力分布规律及 UHPC-NC 界面的失效机制。得到以下主要结论:

(1) UHPC-NC 界面的弹性刚度受结合面粗糙度的影响较小,但抗剪强度随界面粗糙度增大提高显著。与光滑界面相比,当界面平均凿毛深度为 4 mm 时,结合面的黏结强度提高了 98.1%。



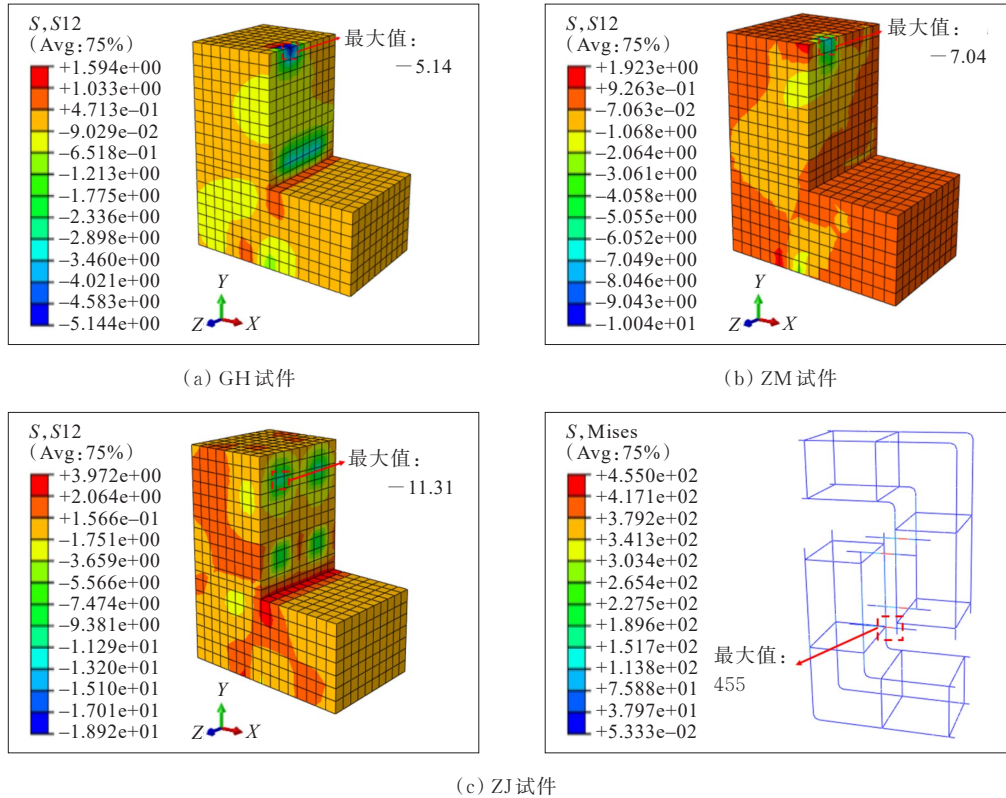


图 11 极限状态下不同 UHPC-NC 结合面应力计算结果(单位:MPa)

Figure 11 Calculation results of stress at different UHPC-NC interfaces under extreme conditions (unit:MPa)

(2) 界面凿毛+植筋可以大幅改善 UHPC-NC 结合面的黏结强度及变形能力,与凿毛界面相比,凿毛+植筋界面的弹性黏结刚度、极限黏结强度分别增大了 10.1%、29.3%。

(3) 对于光滑或凿毛的 UHPC-NC 结合面,界面最大黏结剪应力及裂缝均先出现在结合面的边缘;对于凿毛+植筋的 UHPC-NC 结合面,界面最大黏结剪应力及裂缝则均先出现在抗剪钢筋的根部,并随着荷载的增大迅速向四周发展。

(4) 结合面凿毛+植筋的 UHPC-NC 界面黏结强度最高,且剪切刚度较大,其黏性强度与弹性剪切刚度分别为 3.97 MPa 和 462.02 kN/mm。鉴于凿毛和植筋工艺相对简便,在 UHPC 加固既有混凝土桥梁工程中推荐使用,以有效改善界面黏结能力与剪切刚度,进而提升加固结构的可靠性。

#### 参考文献:

#### References:

[1] BRÜHWILER E, DENARIÉ E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high

performance fibre reinforced concrete[J]. Structural Engineering International,2013,23(4): 450-457.

[2] 任亮,方葦,王凯,等.超高性能混凝土与水泥基材料界面粘结性研究进展[J].硅酸盐通报,2019,38(7): 2087-2094.

REN Liang, FANG Xun, WANG Kai, et al. Research progress on interface bond behavior between ultra high performance concrete and cement-based materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2019,38(7): 2087-2094.

[3] 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.

[4] 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.

[5] AALETI S, SRITHARAN S. Quantifying bonding characteristics between UHPC and normal-strength concrete for bridge deck application[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(6): 4019041.1-4019041.13.

- [6] 张阳,吴洁,邵旭东,等.超高性能混凝土-普通混凝土界面抗剪性能试验研究[J].土木工程学报,2021,54(7): 81-89.  
ZHANG Yang, WU Jie, SHAO Xudong, et al. Experiment on interfacial shear properties between ultra-high performance concrete and normal strength concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(7): 81-89.
- [7] 饶欣频,霍文斌,胡智敏,等.超高性能混凝土与普通混凝土的界面抗剪性能试验研究[J].建筑结构,2021,51(14): 101-106.  
RAO Xinpin, HUO Wenbin, HU Zhimin, et al. Experimental study on the interface shear performance of ultra-high performance concrete and normal concrete[J]. Building Structure, 2021, 51(14): 101-106.
- [8] HOFBECK J A, IBRAHIM I O, MATTOCK A H. Shear transfer in reinforced concrete[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1969, 66(2): 119-128.
- [9] 方志,吴荣杰,裴炳志,等.新旧混凝土结合面抗剪性能的尺寸效应[J].中国公路学报,2021,34(11): 92-103.  
FANG Zhi, WU Rongjie, PEI Bingzhi, et al. Size effect of the shear performance on the bonding interface between new and old concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 92-103.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [11] 丁发兴,余志武.混凝土受拉力学性能统一计算方法[J].华中科技大学学报(城市科学版),2004,21(3): 29-34.  
DING Faxing, YU Zhiwu. Unified calculation method of mechanical properties of concrete in tension[J]. Journal of Wuhan Urban Construction Institute, 2004, 21(3): 29-34.
- [12] 余志武,丁发兴.混凝土受压力学性能统一计算方法[J].建筑结构学报,2003,24(4): 41-46.  
YU Zhiwu, DING Faxing. Unified calculation method of compressive mechanical properties of concrete[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 41-46.
- [13] 马亚峰.活性粉末混凝土(RPC200)单轴受压本构关系研究[D].北京:北京交通大学,2006.  
MA Yafeng. Study on constitutive relationship of 200 MPa reactive powder concrete under uni-axial compression[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.
- [14] 刘坤.NSC-UHPC湿接缝界面粘结力学性能研究[D].北京:北京建筑大学,2021.  
LIU Kun. Study on interfacial bonding mechanical properties of NSC-UHPC wet joint [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.
- [15] 徐文强.新老混凝土结合面抗剪强度计算方法与粘结-滑移本构模型[D].成都:西南交通大学,2021.  
XU Wenqiang. Calculation method of shear strength and bond-slip constitutive model of the new-to-old concrete interface[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [16] 欧阳娜,邓舒文.UHPC-NC组合构件界面行为研究[J].重庆大学学报,2021,44(3): 63-74.  
OUYANG Na, DENG Shuwen. Study on the interfacial properties of UHPC-NC composite component[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(3): 63-74.
- [17] 张轶,张阳,刘颖峰,等.带湿接缝的预制UHPC-NC组合板试验与分析[J].铁道建筑,2023,63(8): 63-69.  
ZHANG Yi, ZHANG Yang, LIU Yingfeng, et al. Experimental and numerical investigation of prefabricated UHPC-NC composited slab with wet joint[J]. Railway Engineering, 2023, 63(8): 63-69.
- [18] 王宁宁,赵奇,米家禾,等.UHPC墩周连接装配式桥墩抗震性能研究[J].地震工程学报,2023,45(4): 780-791.  
WANG Ningning, ZHAO Qi, MI Jiahe, et al. Seismic performance of assembled piers connected with ultra-high-performance concrete around the pier[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(4): 780-791.
- [19] 李云虎,熊诚,潘诚.混凝土界面黏结性能有限元分析[J].城市道桥与防洪,2022(3): 190-193, 21.  
LI Yunhu, XIONG Cheng, PAN Cheng. Finite element analysis on bonding properties of concrete interface[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(3): 190-193, 21.
- [20] ALHENDI H, CELIKAG M. Parametric study on moment-rotation characteristics of reverse channel connections to tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 104: 261-273.