

文章编号:1007-9629(2024)01-0076-08

界面处理对预制 UHPC 与现浇 NC 界面 抗剪性能的影响

程文强¹, 耿健^{2,*}, 柳根金², 刘慈军³, 郑志辉²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 311500; 2. 浙大宁波理工学院 土建学院, 浙江 宁波 315100;
3. 宁波市高等级公路建设指挥管理中心, 浙江 宁波 315192)

摘要: 对未处理和经喷砂、凿毛、切槽界面处理后的预制超高性能混凝土(UHPC)与现浇普通混凝土(NC)组合试件进行双面剪切试验,记录加载过程中的剪切荷载与界面滑移,通过剪切荷载-界面滑移曲线分析不同界面处理方式对组合试件抗剪性能的影响.结果表明:界面处理显著提高了预制 UHPC 与现浇 NC 组合试件的界面抗剪性能;不同界面处理方式下组合试件的破坏模式主要分为 3 种;采用边长 18 mm 正方形钢丝网格凿毛处理的组合试件界面抗剪强度与抗剪刚度均最大,其界面抗剪强度为未处理界面试件的 4.69 倍;凿毛与切槽处理使组合试件拥有较好的界面抗剪性能,表现为延性破坏;界面粗糙度相近但界面处理方式不同的组合试件抗剪性能表现出明显差异;各组试件界面抗剪强度与抗剪刚度变化趋势大致相同.

关键词: 预制超高性能混凝土;界面处理;组合试件;双面剪切试验

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.01.010

Effect of Interfacial Treatment on Shear Properties of Precast UHPC and Cast-in-Place NC

CHENG Wenqiang¹, GENG Jian^{2,*}, LIU Genjin², LIU Cijun³, ZHENG Zhihui²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 311500, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo Tech University, Ningbo 315100, China; 3. Ningbo High-Grade Highway Construction Command and Management Center, Ningbo 315192, China)

Abstract: Bi-surface shear tests were carried out on precast ultra-high performance concrete(UHPC) and cast-in-place normal concrete(NC) composite specimens including untreated, sandblasted, rough chiseled and slotting interfacially treated specimens. The shear load and interface slip were recorded during loading process. Shear load-interface slip curves were used to analyze the effect of different interfacial treatment on the shear properties of the composite specimens. The results show that the interfacial treatment significantly improves the shear properties of the precast UHPC and cast-in-place NC composite specimens, failure modes of composite specimens are mainly divided into three categories. The interfacial bonding shear strength and stiffness of the 18 mm steel-wire-mesh chiseling composite specimens are the highest, and the strength is 4.69 times that of the untreated interface. Chiseling interfacial treatment and slotting interfacial treatment make the composite specimens have good shear properties and show ductile failure. The shear properties of specimens with similar average sand filling depth but different interfacial treatment groups show obvious differences. The variation trend of shear strength and shear stiffness of different groups are about the

收稿日期:2023-01-31; 修订日期:2023-03-24

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LQ22E080024)

第一作者:程文强(1996—),男,河南信阳人,浙江大学硕士生.E-mail:547005822@qq.com

通讯作者:耿健(1976—),男,内蒙古赤峰人,浙大宁波理工学院教授,浙江大学硕士生导师,博士.E-mail:gengjian@nbt.edu.cn

same.

Key words: precast ultra-high performance concrete; interfacial treatment; composite specimen; bi-surface shear test

实际工程中使用模板的造价、总用工量均较大且工期较长,免拆模板的应用在加快工程进度与减少工程成本方面具有重大意义。

中国研究人员对免拆模板进行了大量研究^[1],其中超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)免拆模板因其性能优异受到了广泛关注。UHPC是一种高强度、高韧性、高耐久性以及良好延性的新型材料^[2-3],可由多种模型进行配合比设计^[4-5],在固废方面也取得了优异成绩^[6-8]。与普通混凝土(normal concrete, NC)形成组合结构使用的UHPC免拆模板,可以对整体结构起到增强、增韧、提高耐久性以及降低全寿命周期成本的作用^[9-10]。梁兴文等^[11-12]测试了UHPC免拆模板钢筋混凝土梁的抗弯性能,发现UHPC模板增大了梁的开裂荷载、抗弯刚度和承载力,对模板内部拉毛处理能够达到叠合结构协同变形的要求。预制UHPC免拆模板与现浇NC形成组合结构,UHPC-NC界面的黏结性能对整体结构的承载能力起到至关重要的作用。研究表明界面黏结不足引起的剥离会严重影响组合结构的整体力学性能^[13]。对界面进行粗糙处理是一种有效提高界面黏结性能的方式^[14-15]。王德弘等^[16]以预制UHPC开槽密度和后浇NC强度等级为变量,测试了组合试件的抗剪性能,发现两者均能明显提高界面抗剪性能,且

预制UHPC开槽密度的影响远大于后浇NC强度等级的影响。

现有的UHPC-NC组合试件研究主要针对UHPC修复已有的普通混凝土,有关界面处理对预制UHPC-现浇NC界面抗剪性能影响的研究不够系统。本试验采用双面剪切试验,研究4种界面处理方式对预制UHPC与现浇NC界面抗剪性能的影响,为UHPC免拆模板界面设计提供理论依据与参考。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

NC采用P·O 42.5水泥,按照C50混凝土进行配置。UHPC由水泥、硅灰、粉煤灰、石英砂、钢纤维、减水剂和水拌制而成。其中:水泥采用P·O 52.5水泥;硅灰(SF)采用SF93级硅灰;粉煤灰(FA)采用Ⅱ级粉煤灰;石英砂采用河南产高纯石英砂,其中细石英砂粒径为0.045~0.125 mm(120~300目),中石英砂粒径为0.125~0.425 mm(40~120目),粗石英砂粒径为0.425~2.000 mm(10~40目);钢纤维采用长12 mm、直径0.18 mm的平直型钢纤维,抗拉强度3 100 MPa,体积分数为2%;减水剂采用PCA-I聚羧酸高性能减水剂,减水率¹⁾为30%;水为自来水。UHPC与NC的配合比及抗压强度如表1、2所示。

表1 UHPC的配合比及抗压强度
Table 1 Mix proportion and compressive strength of UHPC

Mix proportion/(kg·m ⁻³)								28 d compressive strength/MPa
P·O 52.5 cement	Silica fume	Fly ash	Coarse quartz sand	Medium quartz sand	Fine quartz sand	Water reducing agent	Water	
734.4	210.0	105.0	706.3	121.1	197.7	31.5	189.0	113.6

表2 NC的配合比及抗压强度
Table 2 Mix proportion and compressive strength of NC

Mix proportion/(kg·m ⁻³)						28 d compressive strength//MPa
P·O 42.5 cement	Fly ash	Sand	Coarse aggregate	Water reducing agent	Water	
475.0	61.0	696.0	1 044.0	5.4	161.0	56.7

1.2 试件设计

本研究采用4种界面处理方式,即未处理(光滑,GH)、凿毛^[17](ZM)、喷砂(PS)和切槽(QC),共设计11组UHPC-NC组合试件,每组3个试件,结果

取平均值,并且采用灌砂法^[18]对界面平均灌砂深度进行测定,以表征界面粗糙度。平均灌砂深度越大表明界面粗糙度越大。试件的类型及平均灌砂深度见表3。

1)文中涉及的减水率、喷砂率等均为质量分数。

表3 试件的类型及平均灌砂深度
Table 3 Specimen type and average sand filling depth

Specimen	Test factor		Average sand filling depth/mm
	Interfacial treatment measure	Interfacial treatment factor	
GH	GH	Without treatment	
ZM	ZM-1	Steel-wire-mesh grid chiseling	12 mm grid module
	ZM-2		18 mm grid module
	ZM-3		25 mm grid module
	ZM-4		30 mm grid module
PS	PS-1	Sand blasting by quartz sand	Sand blasting rate of 0.44 kg/m ²
	PS-2		Sand blasting rate of 0.67 kg/m ²
	PS-3		Sand blasting rate of 0.89 kg/m ²
	PS-4		Sand blasting rate of 1.11 kg/m ²
QC	QC-1	Precast grooving	Grooving depth of 3 mm
	QC-2		Grooving depth of 6 mm

1.3 试件制作

UHPC-NC 试件采用双面剪切试验 (bi-surface shear test) 标准试件^[19-20], 尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm, 试件一侧为预制 UHPC, 厚度为 50 mm, 另一侧为现浇 NC, 厚度为 100 mm. 试件的制备流程为: 首先浇筑 UHPC, 并进行相应的界面处理, 标准养护 7 d; 再在 UHPC 上浇筑 C50 普通混凝土, 标准养护 28 d 后进行双面剪切试验.

预制 UHPC 的界面处理效果如图 1 所示. 光滑组对界面未进行任何处理. 凿毛组采用 SWM 网格凿毛法^[17], 网格采用边长为 12、18、25、30 mm 的正方形钢丝网格. 由表 3 可见, 随着网格边长的增大, 凿毛组

试件界面平均灌砂深度减小. 喷砂法使用粒径为 0.85~2.00 mm (10~20 目) 的石英砂, 按照不同喷砂率 (0.44、0.67、0.89、1.11 kg/m²), 均匀铺在刚浇筑的 UHPC 表面上, 并对石英砂进行压实, 使砂粒的一半压入 UHPC 中, 在 UHPC 硬化后形成喷砂界面. 随着喷砂率的增大, 喷砂组试件界面平均灌砂深度先增大后减小. 切槽法首先将布置切槽的模板放入 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试模中, 切槽宽度与两侧间隔均为 15 mm, 中间间隔 30 mm; 接着完成厚度 50 mm 预制 UHPC 的浇筑, 静养 24 h 后脱模形成切槽界面. 随着切槽深度的增大, 切槽组试件界面平均灌砂深度增大.

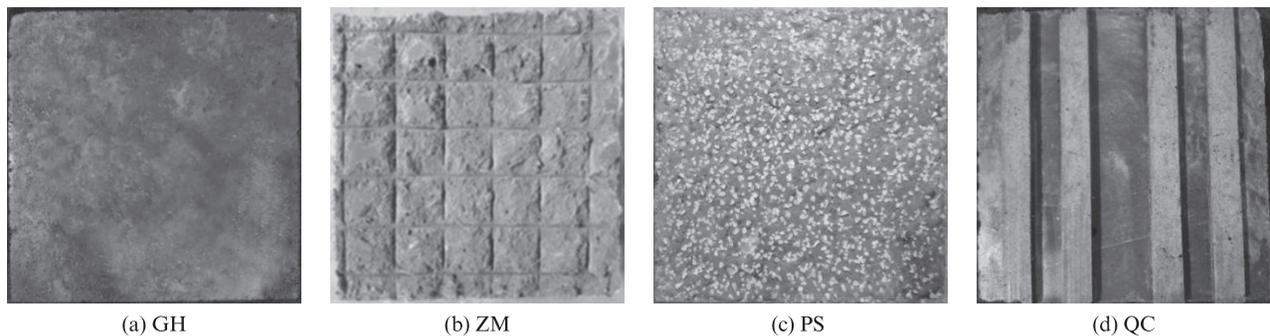


图1 预制 UHPC 界面处理方式
Fig. 1 Interfacial treatment measures of precast UHPC

1.4 加载方案

UHPC-NC 组合试件双面剪切试验在 YAW-3000 型微机控制电液伺服压力试验机上进行. 在组合试件顶部钢垫板的下方对称布置 2 个 YWC-50 型位移传感器, 位移传感器连接动静应变采集分析系统, 以便对界面滑移与剪切荷载进行实时监测.

正式加载时加载速率为 0.5 kN/s, 至组合试件发生剪断破坏时停止加载. 双面剪切试验加载示意图如图 2 所示.

2 试验现象及讨论

2.1 破坏模式

UHPC-NC 组合试件的双面剪切典型破坏模式

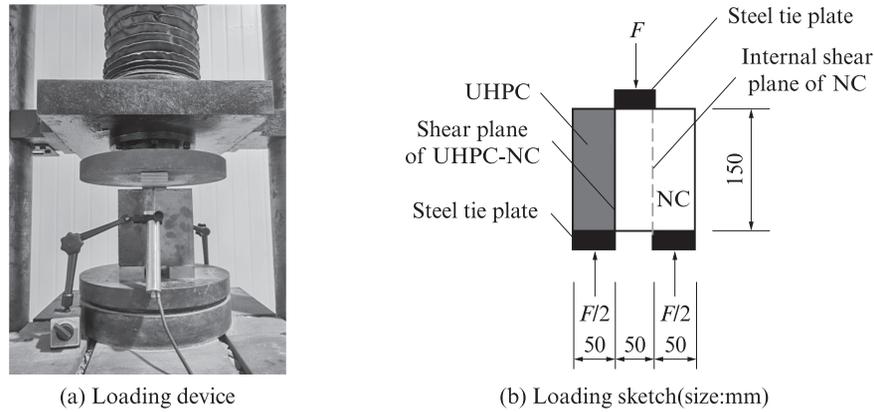


图2 双面剪切试验加载示意图

Fig. 2 Loading sketch of bi-surface shear test

呈3种形式,如图3所示.由图3可见:(1)a类破坏模式为黏结界面的剪切滑移破坏,破坏时UHPC与NC均未出现明显损伤,两种材料的界面较为光滑;(2)b类破坏模式为黏结界面与NC内部剪切面均发生剪切破坏,黏结界面滑移破坏但不发生脱落,NC内部

剪切面被剪断;(3)c类破坏模式为UHPC-NC界面先发生剪切破坏但仍能继续承载,在NC内部剪切面发生剪切破坏后,黏结界面与NC内部剪切面均被剪断,破坏时UHPC界面残留部分NC基体,NC内部剪切面发生断裂,基体与部分骨料被剪断.

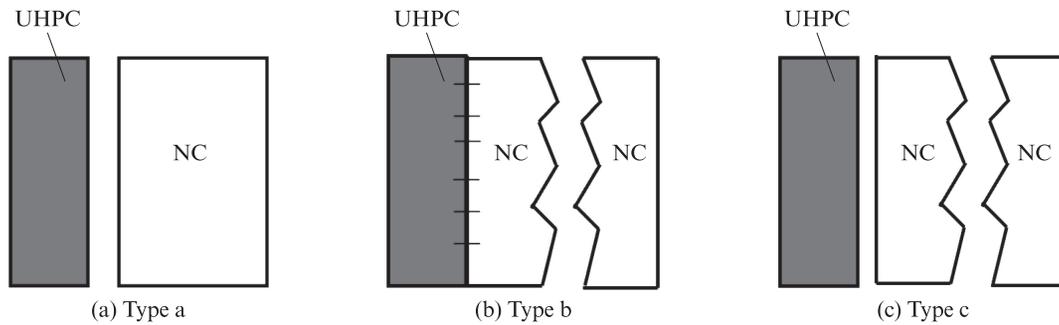


图3 UHPC-NC组合试件的双面剪切典型破坏模式

Fig. 3 Typical shear failure patterns of UHPC-NC composite specimens in bi-surface shear test

图4给出了各组合试件的破坏形态.由图4可知:(1)光滑组试件的破坏形态为a类,破坏时界面处UHPC与NC均未发生明显损坏,破坏后预制UHPC界面较为光滑.(2)喷砂组试件破坏形态也为a类,剪切破坏时预制UHPC界面有少量NC基体残留,界面上的石英砂部分被剪断和拔出.(3)凿毛组试件的破坏形态分为b类与c类,黏结界面破坏时NC内部剪切面也被剪断.随着网格边长的增大,界面处凿毛处理形成的UHPC凸峰抗剪强度先增大后减小.12 mm网格凿毛界面处UHPC凸峰与NC均发生较大破坏但不脱落,为b类破坏;18 mm网格与25 mm网格凿毛界面处UHPC发生较少破坏,且NC发生剪断破坏,为c类破坏;30 mm网格凿毛界面处UHPC凸峰与NC均发生较大破坏但不脱落,为b类破坏.(4)切槽组试件的破坏形态大部分为c类,少数为b类.发生c类破坏时切槽组预制UHPC的界面比较完整,说明在界面黏结面处UHPC的抗剪强度大

于NC的抗剪强度.同时,UHPC切槽处存在微量破损,这是因为UHPC的切槽边角较为尖锐、存在应力集中的情况;发生b类破坏时,NC内部剪切面破坏,黏结界面未发生剪断破坏,这是因为切槽处理黏结界面的抗剪强度大于NC内部抗剪强度,NC内部被剪断时黏结界面未发生完全剪断破坏.

2.2 剪切荷载-界面滑移曲线

图5是UHPC-NC试件的剪切荷载-界面滑移($F-s$)曲线.根据最小二乘法原理对曲线的弹性上升阶段进行一元线性回归.

各组试件的界面剪切荷载和界面滑移见表4,其中: F_u 为试件破坏极限荷载, F_1 为近似线性增长阶段的极限荷载, τ_u 为抗剪强度,SD为破坏极限强度的标准差, K 为线性增长阶段采用割线模量法近似计算得到的界面抗剪刚度, s_u 为达到破坏极限荷载时的滑移量, s_1 为达到近似线性增长阶段极限荷载时的滑移量.

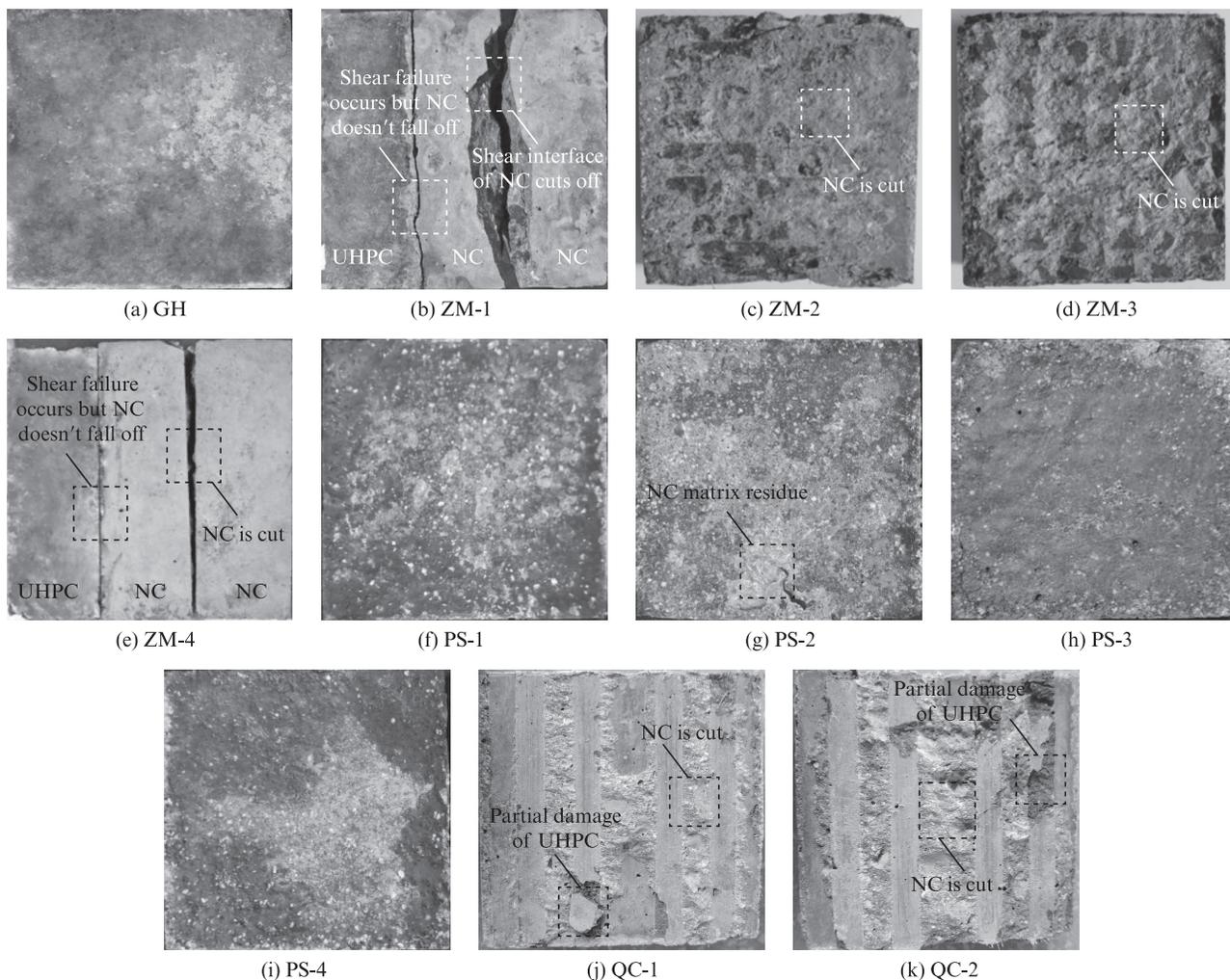


图4 各组合试件的破坏形态

Fig. 4 Shear failure patterns of composite specimens

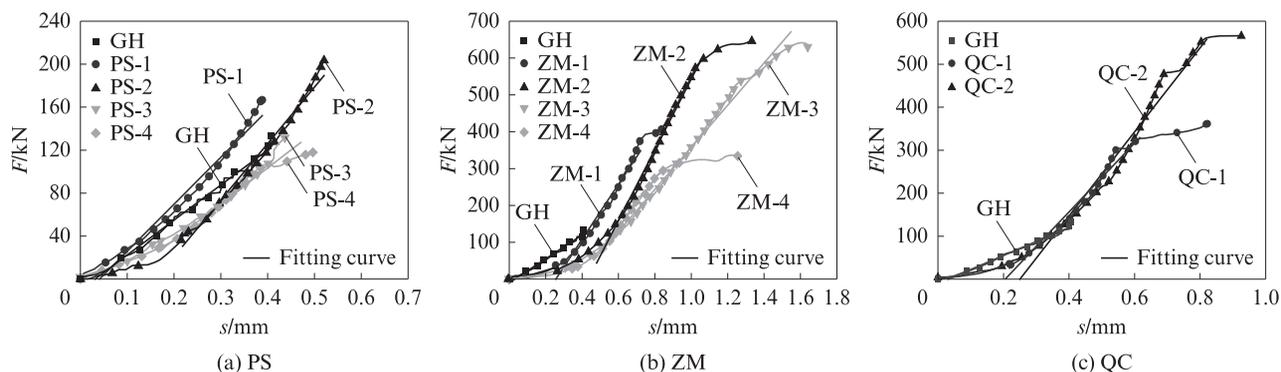


图5 UHPC-NC试件的剪切荷载-界面滑移曲线

Fig. 5 Shear load-interface slip curves of UHPC-NC specimens

由图5(a)可知:(1)GH组试件的预制UHPC表面平整光滑,界面黏结力主要为化学作用力和范德华力,而无机械咬合力.界面开裂的瞬间,黏结界面竖向裂纹瞬间贯穿而发生剪切破坏,因此光滑组试件的曲线近似呈线性,并在达到破坏极限荷载时迅速发生剪切脆性破坏.(2)PS组的预制UHPC界面进行了喷砂处理,随着喷砂率的增加,界面粗糙度增

大,组合试件的黏结能力增强,如试件PS-1、PS-2.值得注意的是,喷砂率达到一定程度后,过多的砂与预制UHPC的结合较差,使预制UHPC与现浇NC的机械咬合力下降.同时喷砂率过高会使石英砂过多覆盖UHPC,减少UHPC与NC的接触面,使得UHPC-NC界面黏结力中的化学作用力和范德华力均显著降低,组合试件的黏结能力反而降低,如试件

表4 各组试件的界面剪切荷载和界面滑移
Table 4 Interfacial shear loads and slips of specimens

Specimen	F_u/kN	F_l/kN	τ_u/MPa	SD	$K/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	s_u/mm	s_l/mm
GH	130.68	130.59	3.06	0.274	163.55	0.41	0.41
PS-1	166.66	166.66	3.75	0.334	219.00	0.39	0.39
PS-2	203.02	203.02	4.52	0.391	262.66	0.52	0.52
PS-3	131.69	131.69	2.93	0.251	152.66	0.44	0.44
PS-4	117.79	117.79	2.62	0.133	167.30	0.50	0.50
ZM-1	406.31	374.39	9.00	0.413	374.20	0.84	0.72
ZM-2	646.07	604.85	14.36	0.369	570.60	1.33	1.07
ZM-3	642.09	542.68	14.27	0.365	330.98	1.61	1.28
ZM-4	334.22	300.30	5.58	0.424	292.95	1.25	0.85
QC-1	361.58	319.52	8.49	0.397	400.95	0.82	0.62
QC-2	565.08	554.77	11.79	0.523	489.60	0.85	0.80

PS-3、PS-4、PS组试件的曲线近似呈线性,在破坏极限荷载处试件发生脆性破坏.结合表4可知,随着喷砂率的上升,喷砂试件界面的抗剪强度和抗剪刚度均先上升再下降.

由图5(b)可知,ZM组曲线表明凿毛组试件界面的破坏形式为明显的延性破坏.具体而言,ZM组曲线在前期大致呈线性,随后出现屈服阶段,荷载缓慢增加、位移快速增长.这是因为凿毛处理使预制UHPC界面粗糙度增大,表3显示,ZM组界面平均灌砂深度明显大于PS组和QC组.ZM组的UHPC界面形成凸峰并且钢纤维裸露,达到线性增长阶段的极限荷载时预制UHPC界面部分被剪断,由于UHPC本身具有延性破坏特征,ZM组试件界面剪切破坏也表现出有限的延性.这点也由图4中凿毛组破坏断面所证明.表现最好的试件ZM-2在达到极限荷载的93.62%前基本呈线性, $s_l=1.07\text{ mm}$, $s_u=1.33\text{ mm}$,屈服阶段的滑移量达到 s_l 的24.30%.试件ZM-3在达到极限荷载的84.52%前基本呈线性, $s_l=1.28\text{ mm}$, $s_u=1.61\text{ mm}$,屈服阶段的滑移量达到 s_l 的25.78%.试件ZM-2与ZM-3在拥有最高界面抗剪强度的同时,破坏时延性也最为明显.

由图5(c)可知,QC组整体呈现延性破坏.与ZM组类似,QC组曲线前期基本呈线性增加,后期出现屈服阶段.这是由于QC组界面破坏时UHPC切槽被部分剪坏,UHPC切槽延缓了界面剪切破坏过程,因此曲线出现屈服阶段.试件QC-2的滑移曲线在达到极限荷载的98.18%前基本呈线性, $s_l=0.80\text{ mm}$, $s_u=0.85\text{ mm}$,屈服阶段的滑移量达到 s_l 的6.25%.相较于试件ZM-2,试件QC-2的屈服阶段较短,延性较差.

2.3 UHPC-NC界面抗剪强度与抗剪刚度

组合试件的界面抗剪强度 τ_u 可以采用式(1)计算.

$$\tau_u = \frac{F_u}{2A} \quad (1)$$

式中: A 为组合试件界面的面积.

UHPC-NC界面抗剪刚度可按照线性增长阶段割线模量法近似计算.组合试件的界面抗剪强度和抗剪刚度见表4.

由表4中各试件抗剪强度的结果可知:(1)ZM组中试件ZM-2的界面粗糙度较高,拥有较大的机械咬合力,从而表现出最大的界面抗剪强度,达到14.36 MPa,是光滑组的4.69倍,是网格边长最小的试件ZM-1的1.60倍,说明适度增加网格边长可以使凿毛组试件界面抗剪强度增大;试件ZM-3同样具有较高的界面抗剪能力,其界面抗剪强度达到试件ZM-2的99.37%;过度增大网格边长会降低界面粗糙度,使得界面抗剪强度减小,如试件ZM-4.(2)QC组界面的切槽能较好地提升组合试件的界面抗剪强度,切槽组中试件QC-2的界面抗剪强度为11.79 MPa,达到试件ZM-2的82.10%,是光滑组试件界面抗剪强度的3.85倍,是试件QC-1的1.39倍,说明适度提高切槽深度可以有效提高组合试件的界面抗剪强度.(3)PS组试件随着喷砂率的增加,界面抗剪强度整体呈现先增加后降低的趋势,这是因为适量的喷砂能提高界面粗糙度和增大界面机械咬合力,而过度喷砂会减弱砂与UHPC的结合能力,同时会覆盖UHPC表面进而减少UHPC与NC的接触面积,使界面黏结强度降低.试件PS-2的界面抗剪强度为喷砂组试件中的最大值,是光滑组试件的1.48倍,达到试件ZM-2的31.48%,值得注意的是,试件PS-2的平均灌砂深度为2.62 mm,与试件QC-2的平均灌砂深度2.40 mm较为接近,然而其界面抗剪强度仅为试件QC-2的38.34%,这说明粗糙度接近的不同界面处理试件的界面抗剪强度表现出明显差异.

从表4中各组试件的界面抗剪刚度结果来看,界面抗剪强度大的试件界面抗剪刚度往往也偏大,整体呈现相同的变化趋势.其中:试件ZM-2的界面抗剪刚度最大,为570.60 kN/mm;试件QC-2也表现出较大的界面抗剪刚度,为试件ZM-2的85.80%;试件PS-2在喷砂组里表现出最大的界面抗剪刚度,为试件ZM-2的46.03%,PS-3组的抗剪刚度最小,为试件ZM-2的26.75%;GH组的界面抗剪刚度较小,为试件ZM-2的28.66%.

通过对既有的UHPC-NC黏结性能研究进行总

结^[21],发现不同界面处理方式的基体 NC-现浇 UHPC 的黏结强度为 2.20~6.02 MPa,斜剪试验测得的抗剪强度可达到 11.16~15.5 MPa.王德弘等^[16]对预制 UHPC-现浇 NC 进行双面剪切试验得出,不同开槽密度界面的组合试件界面抗剪强度为 1.29~3.77 MPa.Ding 等^[22]对预制 UHPC-现浇 UHPC 进行双面剪切试验发现,光滑界面与凿毛界面组合试件的界面抗剪强度分别为 0.990、1.006 MPa,铸槽界面组合试件的界面抗剪强度可达 12.355 MPa.本文以边长 18 mm 的正方形钢丝网格进行凿毛处理的试件 ZM-2 的界面抗剪强度最大,为 14.36 MPa,超过以往的研究结果.试件 ZM-2 的界面抗剪刚度也表现最为出色,同时破坏时表现出明显的延性破坏,而且其界面处理方法方便简单,因此被认为是最为适合的 UHPC 免拆模板界面处理方式.

3 结论

(1) 预制 UHPC 与现浇 NC 试件破坏时主要表现为仅 UHPC-NC 黏结界面破坏,UHPC-NC 黏结界面与 NC 内部均被剪断,以及黏结界面发生剪切破坏但未脱落与 NC 内部被剪断.

(2) 凿毛组试件界面随着凿毛网格边长的增大,抗剪强度先增大后减小;喷砂组试件界面抗剪强度随着喷砂率的增加而先增大后减小.这说明不同界面处理方式均存在一个最合适的界面处理参数.采用边长 18 mm 正方形钢丝网格凿毛处理的试件 ZM-2 界面抗剪强度与界面抗剪刚度最大,分别为 14.36 MPa 和 570.60 kN/mm,被认为是最合适的界面处理方式.

(3) 界面抗剪强度大的组合试件界面抗剪刚度往往也偏大.界面处理方式不同但界面粗糙度相近的试件界面抗剪强度相差较大.

(4) 组合试件的剪切荷载-界面滑移曲线表明,光滑与喷砂处理的试件界面发生脆性破坏,凿毛和切槽处理的试件界面表现出延性破坏特征.

参考文献:

- [1] 刘山洪,冯霄暘,李刚,等.新型组合结构纤维增强塑料永久模板施工技术研究[J].科学技术与工程,2017,17(7):112-118.
LIU Shanong, FENG Xiaoyang, LI Gang, et al. Research on construction technology of new composite structure FRP permanent formwork[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(7):112-118. (in Chinese)
- [2] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:741-751.
- [3] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2014, 31(3):1-24. (in Chinese)
- [4] 温得成,魏定邦,吴来帝,等.基于 MAA 模型的 UHPC 基体配合比设计和特性分析[J].建筑材料学报,2022,25(7):693-699,743.
WEN Decheng, WEI Dingbang, WU Laidi, et al. Research on mix design and characteristic of UHPC matrix mixture based on MAA model[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):693-699,743. (in Chinese)
- [5] 陈庆,马瑞,蒋正武,等.基于 GA-BP 神经网络的 UHPC 抗压强度预测与配合比设计[J].建筑材料学报,2020,23(1):176-183,191.
CHEN Qing, MA Rui, JIANG Zhengwu, et al. Compressive strength prediction and mix proportion design of UHPC based on GA-BP neural network[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):176-183,191. (in Chinese)
- [6] 冷勇,余睿,范定强,等.碳化再生粗骨料环保型超高性能混凝土的制备[J].建筑材料学报,2022,25(11):1185-1189,1218.
LENG Yong, YU Rui, FAN Dingqiang, et al. Preparation of environmentally friendly UHPC containing carbonized recycled coarse aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11):1185-1189,1218. (in Chinese)
- [7] 魏慧男,刘铁军,邹笃建,等.含废弃玻璃的绿色超高性能混凝土制备及性能[J].建筑材料学报,2021,24(3):492-498.
WEI Huinan, LIU Tiejun, ZOU Dujian, et al. Preparation and properties of green ultra-high performance concrete containing waste glass[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):492-498. (in Chinese)
- [8] 葛晓丽,褚洪岩.再生砂超高性能混凝土力学性能研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):810-815.
GE Xiaoli, CHU Hongyan. Mechanical properties of ultra-high performance concrete with recycled sand[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):810-815. (in Chinese)
- [9] 张永涛,李刚,郑和晖.预制 UHPC-灌注 RC 组合桩基方案设计及试验研究[J].工程力学,2021,38(增刊):45-51,65.
ZHANG Yongtao, LI Gang, ZHENG Hehui. Scheme design and experimental study of prefabricated UHPC-perfusion RC composite piles[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(Suppl):45-51,65. (in Chinese)
- [10] 杨医博,杨凯越,吴志浩,等.配筋超高性能混凝土用作免拆模板对短柱力学性能影响的实验研究[J].材料导报,2018,31(23):120-124,137.
YANG Yibo, YANG Kaiyue, WU Zhihao, et al. An experimental study on the influence of reinforced ultra-high performance concrete permanent template to short column's mechanical property [J]. Materials Reports, 2018, 31(23):120-124,137. (in Chinese)
- [11] 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,2021,41

- (7):154-163.
- LIANG Xingwen, WANG Ping, XU Mingxue, et al. Mechanical behavior and immediate stiffness of RC beams with UHPC permanent formwork[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 41(7):154-163. (in Chinese)
- [12] 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):579-588,206. LIANG Xingwen, SHI Jicong, YU Jing, et al. Seismic behavior of reinforced concrete columns with permanent template of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2020, 42(3):579-588,206. (in Chinese)
- [13] HABER Z B, MUNOZ J F, DE LA VARGA I, et al. Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190:1056-1068.
- [14] SEMENDARY A A, SVECOVA D. Bond characterization and interfacial coefficients at precast UHPC and cast-in-place UHPC interface[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(7):04021143.
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 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(增刊2):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(Suppl 2):411-419.(in Chinese)
- [17] 赵志方,于跃海,赵国藩. 测量新老混凝土粘结面粗糙度的方法[J]. *建筑结构*,2000,30(1):26-29. ZHAO Zhifang, YU Yuehai, ZHAO Guofan. Method for measuring roughness of bonded surfaces of new and old concrete [J]. *Building Structure*, 2000, 30(1):26-29. (in Chinese)
- [18] 陆凯卫. 含粗骨料 UHPC 桥面板疲劳性能研究[D]. 南京:东南大学,2018. LU Kaiwei. Experimental study on fatigue performance of bridge deck made of UHPC with coarse aggregate [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [19] RASHID K, ZHANG D W, UEDA T, et al. Investigation on concrete-PCM interface under elevated temperature: At material level and member level[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125:465-478.
- [20] MOMAYEZ A, EHSANI M R, RAMEZANIANPOUR A A, et al. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(4):748-757.
- [21] 吴应雄,郑新颜,黄伟,等. 超高性能混凝土-既有普通混凝土界面粘结性能研究综述[J]. *材料导报*,2023,37(16):144-154. WU Yingxiong, ZHENG Xinyan, HUANG Wei, et al. Review of interface bond behavior between ultra-high performance concrete and existing normal concrete [J]. *Materials Reports*, 2023,37(16):144-154. (in Chinese)
- [22] DING J N, ZHU J S, KANG J F. Bonding properties and mechanism of the interface between precast UHPC and post-cast UHPC[J]. *Structures*, 2022, 43:822-833.