

UHPC 加固修复复合试件界面黏结性能 影响因素研究*

邓代强^{1,2}, 胡圳^{1,2}, 许福^{1,2}, 李水生³, 曹国栋^{1,2}, 李新星³

(1. 湘潭大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 材料动载行为与工程韧性湖南省高校重点实验室, 湖南 湘潭 411105;
3. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 超高性能混凝土(Ultra-High-Performance Concrete, UHPC)与既有混凝土基体之间的界面黏结性能是结构加固与修复的关键因素。本文通过试验,研究破坏形态、基体强度、界面粗糙度、养护龄期等因素对劈裂抗拉与双面剪切强度的影响,并分析界面粗糙度组的微观机理。结果表明:破坏形态以界面剥离为主;基体强度、养护龄期的增加可显著提高界面黏结强度;界面黏结强度随着界面粗糙度的增大而持续提升,但在RO2之后趋于稳定;顶面浇筑有助于形成比侧面浇筑更高的黏结强度;RO2组通过适度粗糙度平衡机械咬合与化学结合,形成致密界面过渡区,有效提升界面黏结性能。

关键词: 超高性能混凝土;加固修复;复合试件;界面黏结性能;微观机理分析

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.10.13.0001

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2026)02-0208-015

引文格式: 邓代强,胡圳,许福,李水生,曹国栋,李新星. UHPC加固修复复合试件界面黏结性能影响因素研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文),2026,43(2):208-222.

英文引文格式: Deng Daiqiang, Hu Zhen, Xu Fu, Li Shuisheng, Cao Guodong, Li Xinxing. Study on factors affecting the bonding performance at the interface of UHPC composite repair specimens[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English),2026,43(2):208-222.

Study on Factors Affecting the Bonding Performance at the Interface of UHPC Composite Repair Specimens

Deng Daiqiang^{1,2}, Hu Zhen^{1,2}, Xu Fu^{1,2}, Li Shuisheng³, Cao Guodong^{1,2}, Li Xinxing³

(1. School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China; 2. Hunan Province University Key Laboratory of Material Dynamics & Engineering Resilience, Xiangtan Hunan 411105, China; 3. China Construction Fifth Engineering Division Co. Ltd., Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: The bonding performance between UHPC (ultra-high-performance concrete) and existing concrete substrates is a critical factor in structural reinforcement and repair. This study experimentally investigates the effects of failure mode, matrix strength, interfacial roughness, and curing age on splitting tensile strength and double-sided shear strength, while analyzing the micro-mechanisms of the interfacial roughness group. Results indicate that: failure primarily occurs through interfacial delamination; increased matrix strength and curing age significantly enhance interfacial bond strength; interfacial bond strength continuously increases with rising interfacial roughness but stabilizes beyond RO2; top-pouring methods yield higher bond strength than side-pouring; the RO2 group achieves optimal interfacial bonding performance by balancing mechanical inter-

* 收稿日期: 2025-10-13; 修回日期: 2026-01-24; 录用日期: 2026-01-31.

基金项目: 湖南省科技创新计划“低成本超高性能混凝土及构件连接技术与示范”(2024JK2047);湖南省自然科学基金“纤维极细尾砂充填材料性能及损伤机理”(2023JJ50041);砖石质文物智慧化保护利用技术湖南省重点实验室开放基金“中南区摩崖石刻风化特征与机理研究”(HUSE-2024-01);中华人民共和国自然资源部金属矿山地下水灾害防治工程技术创新中心开放课题“岩溶大水深井矿山防治水技术研究”(CXZX-KF-2025-09).

作者简介: 邓代强(1974—),男,教授,主要从事岩土工程的研究,E-mail:65780042@qq.com.

locking and chemical bonding through moderate roughness, forming a dense interfacial transition zone.

Key words: ultra-high-performance concrete; reinforcement and repair; composite specimens; interface bonding performance; micro-mechanism analysis

0 引言

超高性能混凝土(Ultra-High-Performance Concrete, UHPC)因优异的力学性能、卓越的耐久性以及良好的界面黏结性能,成为既有混凝土结构加固与修复领域的重要研究方向。相比传统加固修复材料,UHPC在提升界面抗剪与抗剥离性能方面表现突出,其内置钢纤维还可有效抑制裂缝扩展,从而延长结构服役寿命。然而,加固修复复合界面作为既有混凝土基体与UHPC加固修复材料之间的薄弱环节,其界面黏结性能直接影响两者能否协同工作^[1-2]。在加固或修复后的结构中,常因受外部荷载或界面应力集中,在加固修复复合界面处发生破坏,或因黏结面受拉发生脱离破坏,或沿黏结面受剪出现滑动破坏,抑或两者皆有。为保证和提升加固修复材料的效果,国内外研究人员针对加固修复材料的界面黏结性能开展了大量工作,涵盖界面黏结机理、影响因素、界面破坏模式、测试方法以及优化措施等多个方面。但现有研究多集中于传统加固修复材料,关于UHPC加固修复材料的相关研究较为欠缺。故本文着重于UHPC加固修复材料界面黏结性能的影响因素研究。

目前,国内外对UHPC加固修复普通混凝土(Normal Concrete, NC)有较多研究报道。吴琛等^[3]研究免蒸养UHPC与NC界面黏结性能,发现NC表面刻槽并使用SiKa 32LP结构胶可显著提高黏结强度和延性,其中刻槽处理最大强度提高183.7%,结构胶强度达4.91 MPa。吴香国等^[4]研究预制UHPC加固修复层与既有混凝土界面黏结短期性能,发现在界面处设置剪力键可提高界面黏结强度,通过斜剪试验获得的界面黏结强度及黏结刚度均大幅提高。Hussein等^[5]发现UHPC与既有混凝土间的黏结强度明显比NC高,认为没有必要增加抗剪连接件。谢剑等^[6]发现UHPC-NC复合试件的界面黏结强度及黏结刚度均随界面粗糙度的增加而增加。冯硕等^[7]采用UHPC加固修复NC基体约束加强的方法,将失效位置控制在加固修复黏结界面,发现UHPC-普通强度混凝土(Normal Strength Concrete, NSC)界面更加致密。Feng等^[8]研究UHPC和NSC作为加固修复材料对黏结强度和过渡区(Outer Transition Zone, OTZ)微观结构的影响。UHPC-NC复合试件一方面可以有效提高抗冲击性能,另一方面相对纯UHPC构件,能有效降低经济成本。Mohammed等^[9]探讨在深梁中设置垂直开洞对NC深梁性能的影响,并提出两种加固技术:使用UHPC和在开洞周围布置水平及垂直钢筋。伍敏等^[10]提出UHPC局部替换和包裹方案改善NC梁的抗冲击性能。UHPC-NC复合试件的抗冲击性能明显优于普通钢筋混凝土结构,且由于UHPC材料优异的力学性能,可有效抑制其在冲击区域的局部损伤。

既有研究普遍认为,基体强度、界面粗糙度、养护龄期和浇筑方向是影响界面黏结性能的关键因素^[11]。基体强度^[12]与界面粗糙度^[6,13-14]的影响已获得较多关注,其正向促进效应已形成基本共识,但结论仍停留在定性层面。尤其是不同粗糙度的影响规律及对应的微观机理尚不明确^[15]。相比之下,对于养护龄期与浇筑方向的研究则较为缺乏,是当前研究的薄弱环节:现有研究多集中于28 d标准龄期,对UHPC-NC界面3 d、7 d等早期强度发展及长期(大于等于60 d)性能的研究少有报道;浇筑方向的影响^[16]也多限于单一龄期下的观察,其影响是否随养护龄期变化等尚未可知。

综上所述,目前仍缺乏将上述4个关键因素置于同一试验状态下进行的分析对比,尤其缺乏对粗糙度微观机理、全龄期强度发展及浇筑方向时变规律的深入探讨。为此,本文通过设计单因素试验,旨在量化C50~C60的基体强度、RO0~RO3的界面粗糙度、3 d、7 d、28 d、60 d的养护龄期及顶面或侧面的浇筑方向对UHPC-NC界面劈裂抗拉与双面剪切强度的影响规律,并重点结合微观机理分析,阐明粗糙度影响的机理,明确界面黏结的全龄期发展特征,揭示浇筑方向在不同养护阶段的影响差异,以期对UHPC加固修复提供一定参考。

1 试验方法

1.1 原材料

所用胶凝材料包括P·O 42.5水泥、I级粉煤灰和硅灰,化学组成如表1所示。选用平均粒径为50.5 μm 、密度约为2.63 g/cm^3 的石英粉,以提高UHPC加固修复材料的致密性,并选用最大粒径不超过2.0 mm的10~20目石英砂作为骨料。选用减水率为35%的FOX-8HP型聚羧酸减水剂(粉红色粉末)。为制备低成本、综合性能卓越

的UHPC,选用还原氧化石墨烯(reduced Graphene Oxide, rGO)、促凝快干料(Quick-Drying Material, QDM)、再生钢纤维(Recycled Steel Fibers, RSF)、工业钢纤维(Industrial Steel Fibers, ISF)作为掺料. 表1、表2、表3、表4分别列出QDM、rGO、RSF、ISF及石英砂的主要成分、性能参数及粒径范围.

表 1 胶凝材料和促凝快干料的化学组成(wt%)

Table 1 Chemical composition of cementitious materials and QDM (wt%)

材料	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	LOI	C ₄ AF	TiO ₂
水泥	21.0	2.90	65.4	3.30	5.50	-	2.00	-	1.72	6.41	-
粉煤灰(FA)	49.2	1.30	3.13	0.85	27.8	-	1.21	-	2.65	-	-
硅灰	94.2	0.57	0.64	0.28	0.30	0.87	-	0.16	2.18	-	-
QDM	6.96	2.75	49.2	1.17	27.3	0.52	10.2	0.06	-	-	1.52

表 2 还原氧化石墨烯的物理性质

Table 2 Physical properties of rGO

材料	型号	比表面积/(m ² /g)	灰分/wt%	氧含量/wt%	振实密度/(g/L)	金属杂质/×10 ⁻⁶
rGO	G1000	660	<0.5	8.5	3~5	≤800

表 3 工业钢纤维和再生钢纤维的性能

Table 3 Performance of ISF and RSF

纤维	长度/mm	直径/mm	密度/(kg/m ³)	熔点/°C	强度/MPa	弹性模数/GPa
ISF	13	0.405	7 850	1 500	2 000	750
RSF	4~30	0.230	7 850	1 450	1 800	200

表 4 石英砂的粒径范围和化学成分

Table 4 Particle size range and chemical composition of quartz sand

材料	类别	粒径范围/mm	SiO ₂ /%	Fe ₂ O ₃ /%	含水量/%
石英砂	10~20目	0.9~2.0	99.1~99.6	0.04~0.11	1.5

本文共制备3种不同强度的既有混凝土基体,强度等级分别为C50、C55和C60. 各等级既有混凝土的配合比和实测抗压强度如表5所示,河砂、碎石的粒径范围等如表6所示. 取3个150 mm的标准立方体试件,养护28 d后测得实际抗压强度. 本文分别基于劈裂抗拉、Bi-surface剪切,设计两种不同尺寸的既有混凝土基体. 劈裂抗拉试验使用既有混凝土基体尺寸为150 mm×150 mm×75 mm的长方体,如图1(a)所示;Bi-surface剪切试验使用既有混凝土基体尺寸为150 mm×150 mm×100 mm的长方体,如图1(b)所示.

表 5 不同强度等级的混凝土配合比和实测抗压强度

Table 5 Concrete mix proportions and measured compressive strength for different strength grades

强度等级	材料掺量/(kg/m ³)				28 d实测抗压强度/MPa
	水泥	水	碎石	河砂	
C50	570	209	1 012	613	54.8
C55	600	209	980	630	59.5
C60	642	209	949	639	64.9

表 6 河砂和碎石的粒径范围及河砂的细度模数

Table 6 Particle size range of river sand and crushed stone, and fineness modulus of river sand

材料	类型	粒径范围/mm	细度模数
细骨料	河砂	0.6~1.0	2.6
粗骨料	碎石	5~20	-

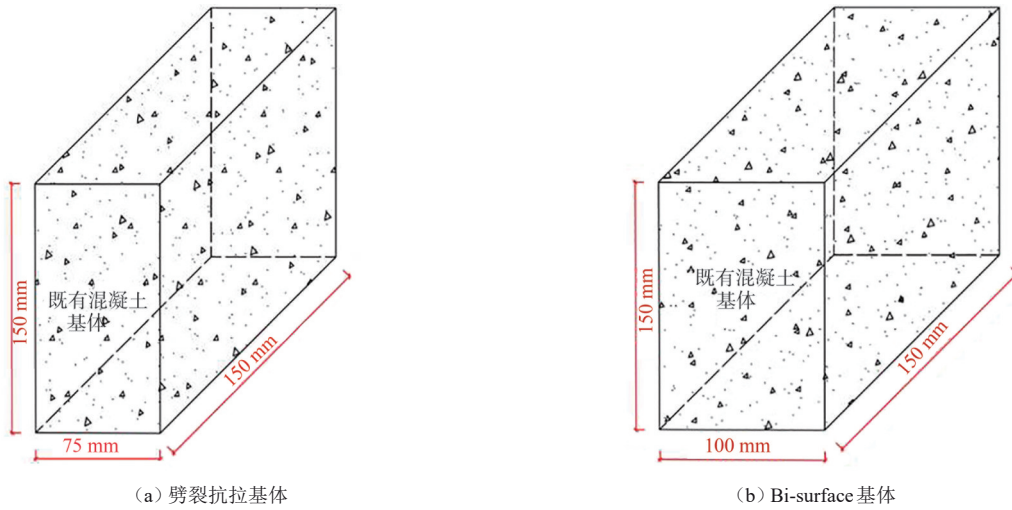


图 1 既有混凝土基体的试件尺寸

Figure 1 Dimensions of test specimens for existing concrete matrix

1.2 试验样品制备

本文UHPC加固修复材料配合比基于前期完成的预实验确定。共设计13组不同配合比的UHPC,通过改变rGO、QDM、ISF与RSF混杂影响UHPC性能。基于流动性、凝结时间等工作性能和抗压、抗折强度等力学性能的综合评估,兼顾材料经济性,选出综合性能最佳的配合比R0.5I1.5(RSF与ISF体积掺量为0.5%:1.5%,并复合0.02% rGO与1.5% QDM)。该配合比的关键性能指标及优选依据如表7所示。

表 7 优选UHPC配合比(R0.5I1.5)综合性能及优选依据

Table 7 Optimal UHPC mix proportions (R0.5I1.5) comprehensive performance and selection criteria

	性能指标	测试值	相较于纯ISF(I2)	相较于基准组(r0Q0)	优选依据
工作性能	流动性/mm	189.5	+1.1%	-14.8%	流动性适中,满足浇筑要求
	初凝时间/h:min	2:45	-5.7%	-86.4%	凝结极快,满足快速修复施工要求
力学性能	28 d抗压强度/MPa	144.5	-2.5%	+6.7%	强度优异,满足结构承载需求
	28 d抗折强度/MPa	28.8	-2.7%	+22.0%	韧性突出,抗裂性好
	28 d折压比	0.199	-0.5%	+14.4%	材料韧性良好
经济性	相对材料成本	0.88	-12%	-	利用再生钢纤维,成本显著降低

选择R0.5I1.5配合比主要基于其在超高强度、快速凝结与成本控制之间的最优平衡。该配合比在保持优异力学性能的同时,将初凝时间缩短至3 h以内,显著提升施工效率;其适中的流动性确保现场可操作性。此外,以25% RSF替代ISF,在力学性能损失极小的前提下降低约12%的成本,体现了良好的经济性与可持续性。故该配合比综合性能卓越,特别适用于对早期强度、施工速度及经济性有严格要求的加固修复工程。

基于此优选结果,本文将R0.5I1.5确定为后续UHPC加固修复界面性能研究的材料配合比。水泥、粉煤灰、硅灰、石英砂、石英粉、水、QDM、RSF和ISF的掺量(kg/m^3)依次为778.0、78.5、203.5、873.0、227.0、190.8、15.9、39.5、118.5,并掺入胶凝材料质量0.2%的减水剂以及0.02%的rGO。

既有混凝土基体的制备:首先,按照比例称取相应质量的河砂和碎石,放入容量为60 L的混凝土搅拌桶,干料手动搅拌约3~5 min,搅拌均匀后加入试验用水,继续搅拌5~6 min,将搅拌均匀的混凝土浇筑到已涂油的塑料模具中,并置于振动台上进行振实,振捣至试件表面无明显气泡溢出且混凝土不再显著下沉,振实时限按GB/T 50080—2016执行。待凝固固化1 d后脱模,立即置于标准养护箱中,控制温度(20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度(95 ± 5)%,养护至龄期28 d取出。其次,将所有既有混凝土基体在水中浸泡24 h以上,然后置于室温下,直至饱和面干燥。将既有混凝土基体重新固定于150 mm的立方体模具中,清理界面并保持饱和面干燥,随后将UHPC材料作为覆盖层浇筑到模具空白区域内。

1.3 试验方法

为科学评估UHPC与既有混凝土间的界面黏结性能,需选择真实反映实际受力状态的试验方法. 根据已有研究^[17],目前界面黏结性能的测试方法主要分为拉伸、剪切与斜剪,其中拉伸与剪切试验最为常用,本文主要采用这两种方法开展研究. 针对拉伸性能,试验可分为直接拉伸与间接拉伸,其中直接拉伸法易因试件偏心产生结果偏差,且无法较好模拟实际受力情况,故选择间接拉伸法中的劈裂抗拉试验. 该方法加载方式明确,测试结果离散性较小,数据更为可靠. 对于剪切性能,试验包括单面剪切、双面剪切与L型剪切等,本文选用双面剪切试验(Bi-surface shear test)以便全面评估界面的抗剪能力,具体复合试件如图2所示. 另外,采用单因素试验设计研究既有混凝土基体强度、粗糙度、养护龄期和浇筑方向对界面黏结性能的影响.

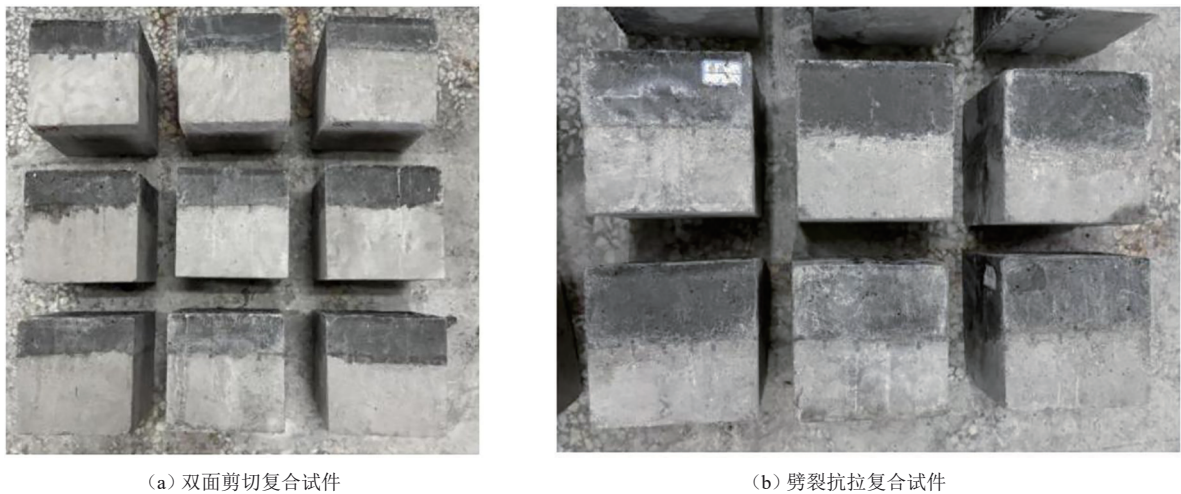


图2 部分复合试件

Figure 2 Partial composite specimens

既有混凝土基体强度方面,考虑本文加固修复材料为UHPC,鉴于国内外研究人员目前对高性能混凝土加固修复多采用C55的既有混凝土强度等级,故以此为基准设计了3种既有混凝土基体强度,分别为C50、C55和C60,具体配合比及实测抗压强度见表5. 界面粗糙度方面,通过界面切槽处理以设置不同粗糙度. 界面粗糙度采用灌砂法测定,通过测量填充表面凹坑所需标准砂的体积,计算平均灌砂深度 H_a ,以量化表征界面表面起伏程度. 具体方法为:将处理后的试件界面朝上水平放置,用2 mm厚透明亚克力板围合成一个150 mm×150 mm的无底测量区域. 向内缓慢注入经烘干、粒径为0.60~1.18 mm的标准砂,经振实使砂面与界面最高点齐平,如图3所示. 称量用砂重量,按式(1)计算 H_a 值. 每种切槽模式(RO0~RO3)至少测试3个试件,以平均值定义其粗糙度等级:RO0(0~0.3 mm)、RO1(1.0~1.4 mm)、RO2(1.8~2.2 mm)、RO3(2.6~3.0 mm). 该方法能有效表征与机械咬合相关的宏观粗糙度.

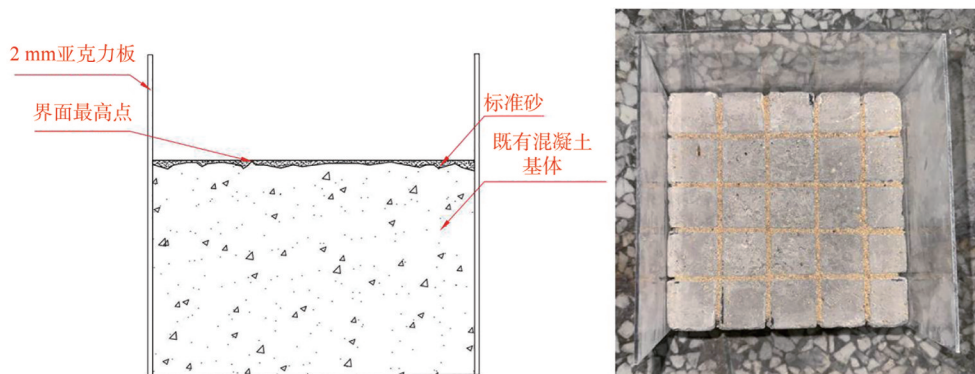


图3 灌砂法示意图和实际图

Figure 3 Schematic diagram and actual image of sand-filling method

既有混凝土基体的界面粗糙度计算方式为:

$$H_a = \frac{G_s}{A_i \times \gamma_s}, \quad (1)$$

式中: H_a 为平均灌砂深度(mm); G_s 为灌砂总体重量(kN); A_i 为界面接触面积(mm^2); γ_s 为灌砂容重(kN/m^3).

通过人为控制既有混凝土基体的界面处理方式,形成 1×1 、 3×3 、 5×5 和 7×7 不同尺寸的切割界面,模拟不同程度的表面粗糙处理,分别记为RO0、RO1、RO2和RO3. 其中 1×1 、 3×3 、 5×5 和 7×7 分别对应界面切割槽的间距尺寸,如图4所示. 养护龄期方面,设置3 d、7 d、28 d和60 d. 浇筑方向方面,设计侧面浇筑和顶面浇筑并研究其对界面黏结性能的影响.

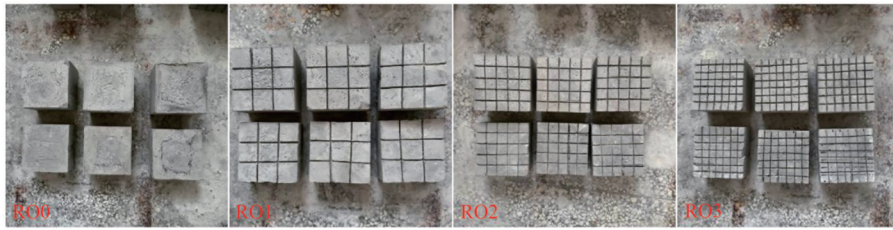


图4 劈裂抗拉和Bi-surface剪切试验的既有混凝土基体界面处理

Figure 4 Interface treatment of existing concrete matrix for splitting tensile and Bi-surface shear tests

基于以上影响因素水平,共设计11组不同配合比的试验,具体方案如表8所示.

表8 加固修复复合试件界面黏结性能影响因素研究试验设计

Table 8 Experimental design for investigating factors affecting interfacial bonding performance of reinforced composite specimens

试验编号	基体强度	界面粗糙度/mm	养护龄期/d	浇筑方向	设计因素
ECS-0	C55	RO2(1.8~2.2)	28	顶面	重复组
ECS-1	C50	RO2(1.8~2.2)	28	顶面	基体强度
ECS-2	C60	RO2(1.8~2.2)	28	顶面	基体强度
ECS-3	C55	RO0(0.0~0.3)	28	顶面	界面粗糙度
ECS-4	C55	RO1(1.0~1.4)	28	顶面	界面粗糙度
ECS-5	C55	RO3(2.6~3.0)	28	顶面	界面粗糙度
ECS-6	C55	RO2(1.8~2.2)	3	顶面	养护龄期
ECS-7	C55	RO2(1.8~2.2)	7	顶面	养护龄期
ECS-8	C55	RO2(1.8~2.2)	60	顶面	养护龄期
ECS-9	C55	RO2(1.8~2.2)	28	侧面	浇筑方向
ECS-10	C55	RO2(1.8~2.2)	7	侧面	浇筑方向

注: ECS-0为重复组. 各因素研究均包含与ECS-0条件(C55、RO2、28 d、顶面)一致的对照试件,但未在表中重复列出. ECS-1~ECS-2改变基体强度(C50、C60); ECS-3~ECS-5改变界面粗糙度(RO0、RO1、RO3); ECS-6~ECS-8改变养护龄期(3 d、7 d、60 d); ECS-9~ECS-10用于分析浇筑方向,分别对应ECS-0(28 d顶面)和ECS-7(7 d顶面)

2 结果和讨论

2.1 劈裂抗拉试验试件破坏形态

劈裂抗拉试验中,复合试件的破坏主要集中于黏结界面附近,如图5所示. 试验加载初期,试件整体处于弹性阶段,界面无明显变形或宏观裂纹,试件表面保持平整,未出现明显缺陷;此时荷载主要由复合试件通过界面黏结共同承担,二者协同变形,无明显异响,结构处于稳定状态. 随着荷载逐渐增大并达到极限荷载的50%~75%时,界面开始出现微小裂纹,这些裂纹通常起源于界面附近,并沿界面法线方向或微小倾斜角扩展;此阶段常伴随轻微的摩擦声响,表明界面局部开始脱黏或微裂形成,但整体结构仍保持完整,未发生宏观剥离. 当荷载继续增至极限荷载的90%时,界面周边的微裂纹迅速扩展并相互连通,形成连续的破裂带;此时既

有混凝土基体在界面附近出现明显的微裂缝开展,局部伴随细小碎屑的剥落,界面黏结性能显著退化;复合试件的协同工作能力明显下降,荷载主要由未破坏的局部承担,试件整体刚度降低,变形逐渐集中在界面附近.当荷载达到极限值时,试件内部的应变能迅速释放,常伴随一声清脆或低沉的破坏声响,复合试件发生剥离,界面黏结彻底失效,试件丧失承载能力.



图 5 劈裂试验试件加载过程

Figure 5 Loading process of splitting test specimens

根据破坏后试件的宏观形态与断裂面特征,可将破坏模式分为3类,具体破坏形态如图6所示.由于试件破坏形态主要受界面粗糙度影响,而基体强度对破坏模式的影响相对有限,故本文在界面破坏模式分析中以RO0~RO3作为主要分组依据.第一类为界面完全剥离型,其破坏完全发生于黏结界面,UHPC表面几乎无混凝土残留,界面清晰平整.第二类为界面剥离伴随基体局部断裂型,其破坏始于界面但延伸至基体浅层,UHPC表面附着部分基体,两者互有材料残留,基体出现表层微裂或局部骨料暴露.第三类为界面剥离与基体破坏主导型,其破坏深入混凝土基体内部,UHPC表面覆盖大量基体残留,基体出现显著碎裂、骨料拔出或贯穿性裂缝.统计结果显示,RO0组试件全部表现为第一类破坏;RO1组试件中,约67%表现为第二类破坏,33%为第一类;RO2组试件全部表现为第二类破坏,且基体损伤范围较RO1组更明显;RO3组试件中,约67%表现为第三类破坏,33%为第二类.这一统计规律清晰显示,随着界面粗糙度增加,破坏模式从纯粹的界面失效,逐步转变为界面-基体共同作用的混合破坏,最终发展为以基体自身破坏为主导.

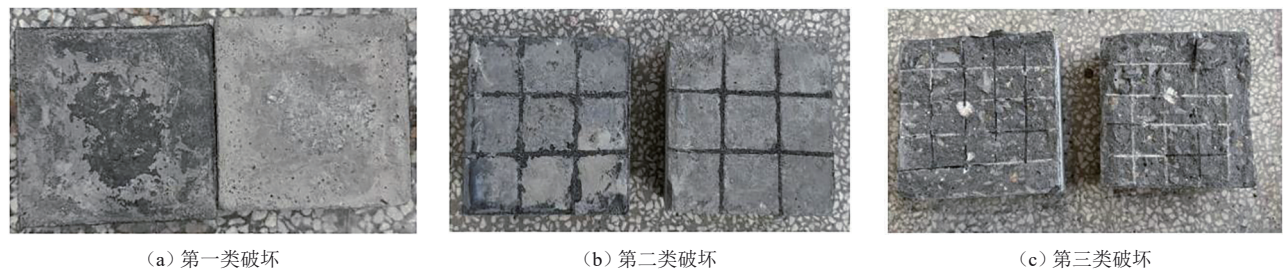


图 6 劈裂试验试件破坏形态

Figure 6 Failure mode of splitting test specimens

2.2 Bi-surface 剪切试验试件破坏形态

Bi-surface 剪切试验中,试件的破坏主要集中在复合试件的黏结界面区域,破坏过程具有脆性特征,且破坏瞬间表现出界面分离行为.加载初期,试件整体处于弹性变形阶段,界面未出现可见的微裂缝或变形迹象;加载过程中,试件表面未见明显裂纹扩展,也未产生显著的异响或振动,结构整体稳定性较好,荷载主要由UHPC与既有混凝土基体通过界面黏结共同承担,两者协同变形,未发生局部脱离或滑移.随着荷载逐渐增大,直至接近极限荷载的80%~90%时,试件仍未出现肉眼可见的宏观裂缝或破坏征兆,仅可能伴随轻微的摩擦声或细微的应力释放声响,但整体保持稳定,未发生显著变形或错动.具体加载过程如图7所示.

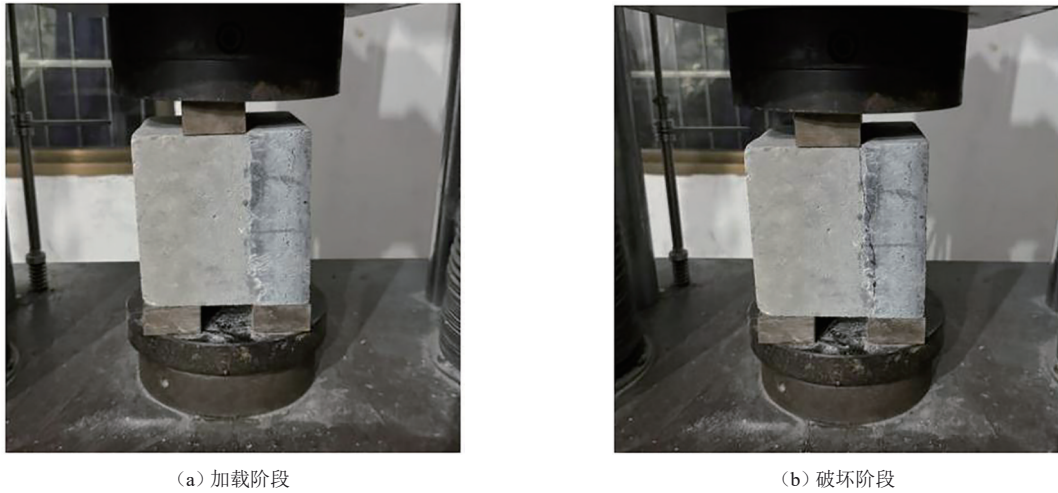


图 7 Bi-surface 剪切试验试件加载过程

Figure 7 Loading process of Bi-surface shear test specimens

当荷载进一步增加并接近极限值时,界面的剪切应力达到材料间的临界承载能力,此时试件未出现明显的塑性变形或预警信号,而是在极短时间内发生突然破坏;破坏发生时,复合试件破坏面清晰分布于界面附近,试件未发生大范围的弯曲、断裂或整体失稳,破坏过程无明显预兆,属于典型的脆性破坏模式. 破坏瞬间常伴随一声清脆或低沉的断裂声响,但无明显宏观变形或位移,表明破坏主要由黏结界面控制,而非基体或整体结构强度不足引起.

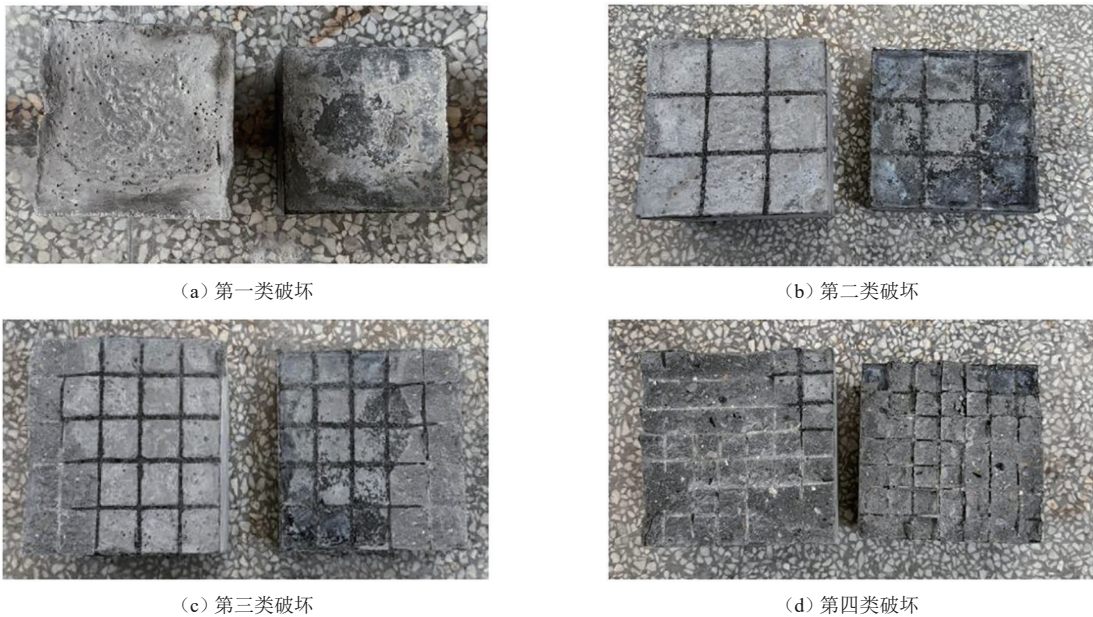


图 8 Bi-surface 剪切试验试件破坏形态

Figure 8 Failure mode of Bi-surface shear test specimens

根据破坏后试件的宏观形态与断裂面特征,可将破坏模式进一步细分为4类,破坏形态与劈裂较为类似,具体破坏形态如图8所示. 由于试件破坏形态主要受界面粗糙度影响,而基体强度对破坏模式的影响相对有限,故本文在界面破坏模式分析中以RO0~RO3作为主要分组依据. 第一类为纯界面破坏型,其破坏完全沿界面发生,分离彻底,界面平整. 第二类为界面破坏伴轻微残留型,其破坏面位于界面,但UHPC表面保留更明显的基体附着,呈现剥离与局部咬合并存特征. 第三类为界面破坏与基体局部断裂型,其破坏发生在界面并引发基体小范围损伤,如局部骨料松动、压溃或微碎裂. 第四类为界面破坏与基体显著破坏型,其破坏导致基体

在黏结区出现大范围损伤,特征为大量骨料拔出、基体碎裂或形成宏观裂缝.统计结果显示,RO0组试件全部表现为第一类破坏;RO1组试件全部表现为第二类破坏;RO2组试件中,约67%表现为第三类破坏,33%为第四类;RO3组试件全部表现为第四类破坏.与劈裂试验相比,剪切荷载在相同粗糙度下(如RO2)更易诱发基体损伤,表明剪切应力对界面机械咬合与基体内部黏结的挑战更为直接.

2.3 基体强度对界面黏结性能的影响

在UHPC加固修复既有混凝土基体的过程中,既有混凝土基体的强度等级作为其自身承载能力与变形特性的基础指标,对UHPC与既有混凝土基体之间界面黏结性能的形成与发展具有重要影响.本文通过检测得到C50、C55和C60基体强度试件分别在劈裂抗拉与双面剪切作用下的界面黏结强度,变化趋势如图9所示.

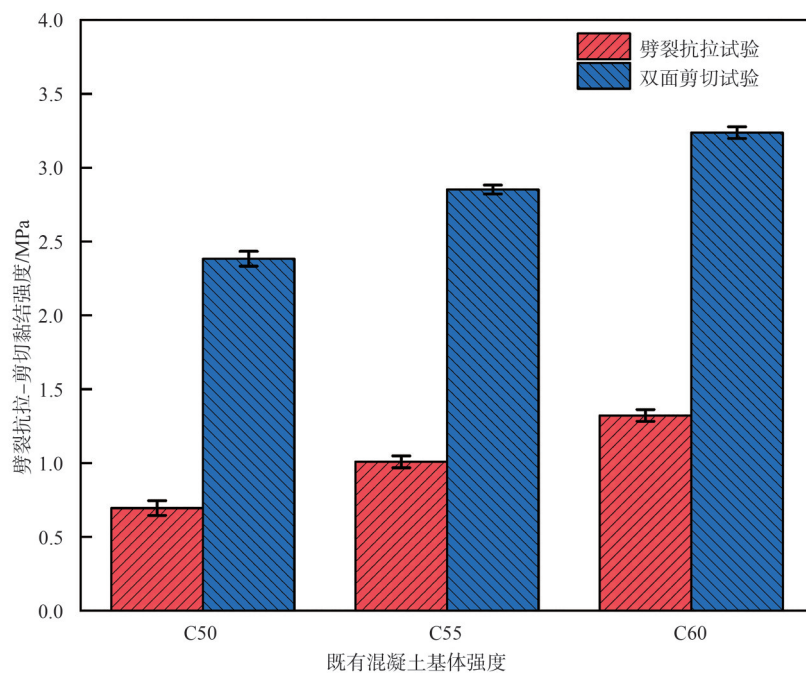


图9 基体强度对界面黏结性能的影响

Figure 9 Effect of matrix strength on interfacial bonding performance

由图9可知,当既有混凝土基体强度从C50提升至C55时,劈裂抗拉强度由0.695 MPa增加至1.008 MPa,双面剪切强度由2.383 MPa提高至2.852 MPa;当基体强度进一步从C55提升至C60时,劈裂抗拉强度继续增加至1.322 MPa,双面剪切强度则提高至3.237 MPa.另外,基体强度从C50增至C55时,劈裂抗拉强度相对增幅为45.04%,双面剪切强度增幅为19.68%;而从C55提升至C60时,劈裂抗拉强度增幅为31.15%,双面剪切强度增幅为13.50%;若以C50为基准,基体强度提升至C60时,劈裂抗拉强度相对增幅达到90.22%,双面剪切强度增幅高达35.84%.王楠等^[18]基于劈裂试验和剪切试验、易新祥等^[19]基于双面剪切试验和三点弯曲试验以及Al-Azzawi等^[20]基于剪切试验也得出上述结论,即复合试件的界面黏结强度随着混凝土基体强度的增加而增大.分析其原因,一是既有混凝土基体强度越高,受载时越能为复合试件的界面提供更坚实的侧向约束与反向支撑力,让界面在承受拉剪应力时更难因应力集中出现早期剥离;二是高强度基体通常具有更为致密的微观结构、更低的初始缺陷密度以及更优的界面过渡区特性,这些因素共同促进UHPC与既有混凝土基体之间更为紧密的物理咬合与接触状态,从而增强界面的整体黏结性能;三是更高强度(如C60)的基体具有更高的弹性模量,其与UHPC的模量差异较小,两者在受力时变形更协调,从而减少因变形不匹配在界面处产生的应力集中,使荷载能够更均匀传递并充分发挥UHPC的高强特性^[21];四是结合2.1与2.2节对破坏模式的观察可发现,随着基体强度等增加,破坏模式从脆弱的界面剥离逐步转向伴有基体损伤的混合型破坏^[22].表明高强基体自身承载能力的提升,改变了复合试件中的薄弱环节,使破坏不得不克服更强的界面黏结与基体自身强度的双重阻力,从而在宏观上表现为黏结强度的提升.

2.4 界面粗糙度对界面黏结性能的影响

为研究不同界面粗糙度对加固修复复合试件界面黏结性能的影响,通过劈裂抗拉、Bi-surface剪切对其在不同受力状态下的界面黏结强度进行测试.不同界面粗糙度下加固修复复合试件界面黏结性能的变化趋势如图10所示.

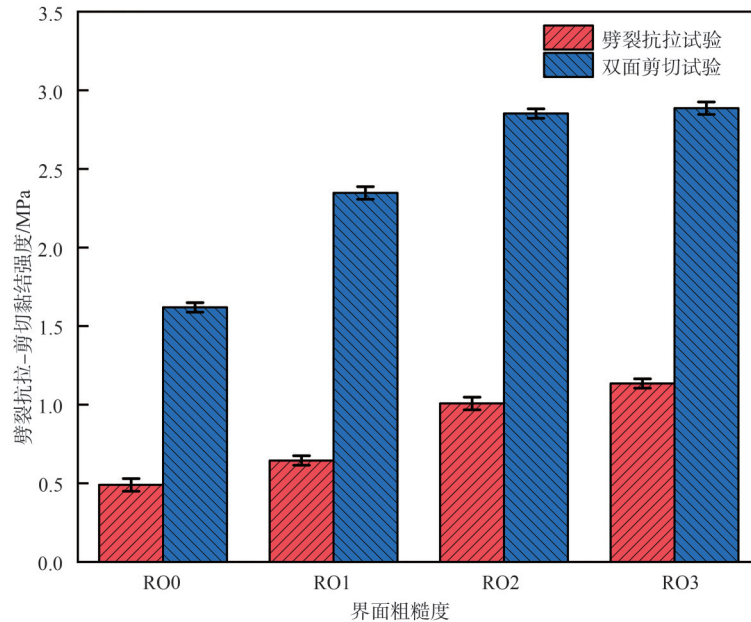


图10 界面粗糙度对界面黏结性能的影响

Figure 10 Effect of interface roughness on interfacial bonding performance

由图10可知,既有混凝土基体的界面粗糙度对UHPC加固修复复合试件界面黏结性能的影响效果显著.随着界面粗糙度从RO0提升至RO1、RO2和RO3,复合试件的劈裂抗拉强度与双面剪切强度均呈显著增长趋势.当界面粗糙度从RO0增至RO1时,劈裂抗拉强度相对增幅为31.63%,双面剪切强度提高至2.347 MPa,相对增幅为45.00%;当界面粗糙度继续增至RO2时,劈裂抗拉强度进一步提高至1.008 MPa,较RO1提升56.28%,双面剪切强度较RO1提升21.52%;当界面粗糙度增至RO3时,劈裂抗拉强度上升至1.135 MPa,较RO2相对增幅为12.60%,双面剪切强度为2.886 MPa,较RO2相对增幅为1.19%.

另外,随着界面粗糙度的增大,UHPC加固修复材料与既有混凝土基体之间的劈裂抗拉强度与双面剪切强度均呈显著增长趋势.界面粗糙度在RO1至RO2范围内对劈裂抗拉强度与双面剪切强度的增强效应最为显著;而当界面粗糙度继续增至RO3时,劈裂抗拉强度与双面剪切强度的增长幅度均明显放缓,说明其界面的机械咬合效应已趋于饱和,继续增大粗糙度对界面黏结性能提升作用有限.这与王孟伟^[23]、Valipour等^[24]、Wang等^[25]的研究结果一致.界面粗糙度的提升主要通过增加复合试件间接触界面的微观不规则性,形成大量凹凸起伏的几何特征,从而产生显著的机械互锁作用.这些由人工形成的粗糙表面结构能够在受力过程中产生摩擦阻力与咬合作用,有效抑制界面在受拉状态下发生剥离或在受剪状态下发生滑移.在劈裂荷载作用下,界面粗糙度的增加有助于分散集中应力,避免应力在局部区域过度集中而引发早期剥离破坏;而在剪切荷载作用下,粗糙界面通过增强接触界面的摩擦阻力显著提高复合试件抵抗相对滑移的能力,延缓或阻止界面剪切失效的发生^[26].

2.5 养护龄期对界面黏结性能的影响

为研究养护龄期对复合试件界面黏结性能的影响,通过劈裂抗拉和Bi-surface剪切试验对复合试件在不同受力状态下的界面黏结强度进行测试.不同养护龄期下UHPC加固修复材料界面黏结性能的变化趋势如图11所示.

由图11可知,随着养护龄期的延长,加固修复复合试件间的劈裂抗拉强度与双面剪切强度均呈持续增

长趋势. 当养护龄期为 3 d 时, 劈裂抗拉强度为 0.303 MPa, 双面剪切强度为 1.738 MPa, 均为所有测试龄期中的最低值; 养护至 7 d 时, 劈裂抗拉强度提升至 0.567 MPa, 相对增幅为 87.13%, 双面剪切强度提高至 2.265 MPa, 相对增幅为 30.32%; 养护至 28 d 时, 劈裂抗拉强度进一步增至 1.008 MPa, 较 7 d 提升 77.78%, 双面剪切强度达到 2.852 MPa, 较 7 d 提升 25.92%; 当养护龄期延长至 60 d 时, 劈裂抗拉强度上升至 1.328 MPa, 较 28 d 增幅为 31.75%, 双面剪切强度为 3.453 MPa, 较 28 d 增幅为 21.07%. 从各阶段变化趋势来看, 养护龄期在 3~7 d 范围内, 劈裂抗拉强度与双面剪切强度的增长最为显著, 相对增幅分别达到 87.13% 和 30.32%; 7 d 至 28 d 阶段, 劈裂抗拉强度与双面剪切强度保持增长, 但增幅有所下降, 相对增幅分别为 77.78% 和 25.92%; 当养护龄期延长至 60 d 时, 劈裂抗拉强度与双面剪切强度的增长进一步放缓, 相对增幅仅为 31.75% 和 21.07%, 说明界面黏结性能在 28 d 后仍持续提升, 但增长速率趋缓. 何伟^[27]发现新老混凝土的黏结强度总体上随龄期的增长而增长, 早期黏结强度增长均较快, 后期黏结强度增长平缓. Zhang 等^[28]发现 7 d 抗剪强度可达最终抗剪强度的 90% 以上, 而在 180 d 略有降低. 可知本文规律同上述研究一致, 即随着龄期的增加, 其界面黏结性能增强.

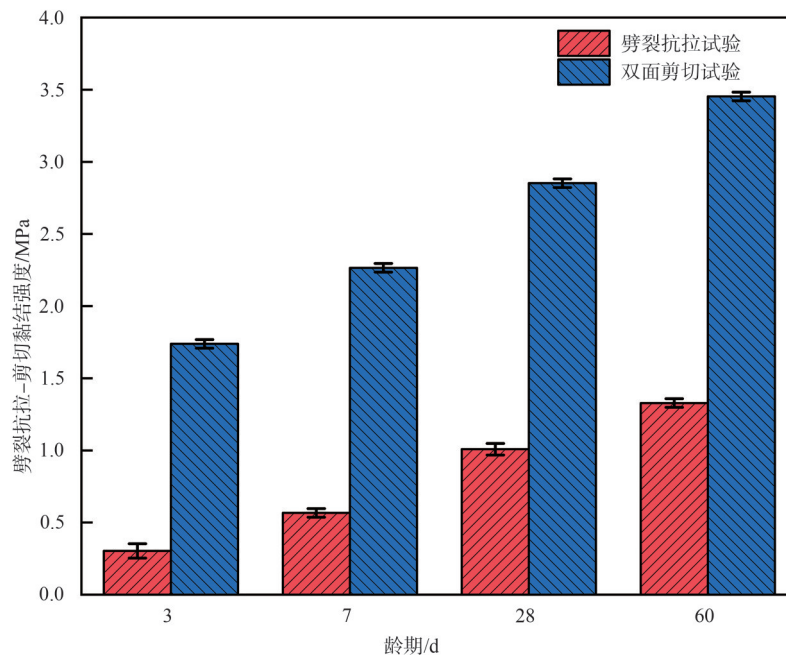


图 11 养护龄期对界面黏结性能的影响

Figure 11 Effect of curing age on interfacial bonding performance

2.6 浇筑方向对界面黏结性能的影响

为研究浇筑方向对加固修复复合试件界面黏结性能的影响, 对比顶面与侧面两种不同浇筑方向下 7 d 和 28 d 龄期的劈裂抗拉强度与双面剪切强度. 不同浇筑方向下界面黏结性能的变化趋势如图 12 所示.

由图 12 可知, 在相同龄期条件下, 浇筑方向对复合试件界面黏结性能具有显著影响, 其中顶面浇筑相比侧面浇筑更有利于获得较高的劈裂抗拉强度与双面剪切强度. 28 d 时, 顶面浇筑试件的劈裂抗拉强度为 1.008 MPa, 双面剪切强度为 2.852 MPa; 而侧面浇筑试件的上述两种强度分别为 0.767 MPa 和 2.511 MPa. 通过上述可得, 顶面浇筑的劈裂抗拉强度较侧面浇筑增幅为 31.42%, 双面剪切强度增幅为 13.58%. 7 d 时, 顶面浇筑的劈裂抗拉强度较侧面浇筑提高 79.37%, 双面剪切强度提高 15.56%. 由此可见, 无论是 7 d 还是 28 d, 顶面浇筑下的劈裂抗拉强度与双面剪切强度均高于侧面浇筑, 不过不同龄期的相对增幅有所差异, 但整体上表明浇筑方向对界面黏结性能的影响在整个养护过程中表现出一定稳定性. Okamura 等^[29]也指出材料能在重力作用下自由流动, 并于界面处实现充分固结, 从而有效提升其与既有混凝土基体的黏结性能.

顶面浇筑与侧面浇筑在 28 d 时的强度变化相比 7 d 时有所减小, 劈裂抗拉强度增幅从 79.37% 下降到 31.42%, 双面剪切强度增幅从 15.56% 下降到 13.58%. 表明随着养护龄期的增加, 浇筑方向对界面黏结性能的

影响呈逐渐减弱趋势。不过这种影响很可能在浇筑初期就已形成,并在后续硬化过程中持续存在。在重力作用下,顶面浇筑UHPC会更容易浇筑并填充界面间的空隙;同时,振捣密实相对来说也更容易排除内部的气泡,改善界面材料的密实程度。这种良好的流动性和排气效果,有助于减少界面处的弱结合或局部未密实区域,也能增大复合试件的实际接触面积、增强界面间的力学咬合作用。相比之下,侧面浇筑由于受模板限制、UHPC流动性相对受限等因素影响,可能导致界面出现更多的缺陷,如气泡不易排出、局部密实性不足等问题,这些都会对界面黏结性能造成不利影响。

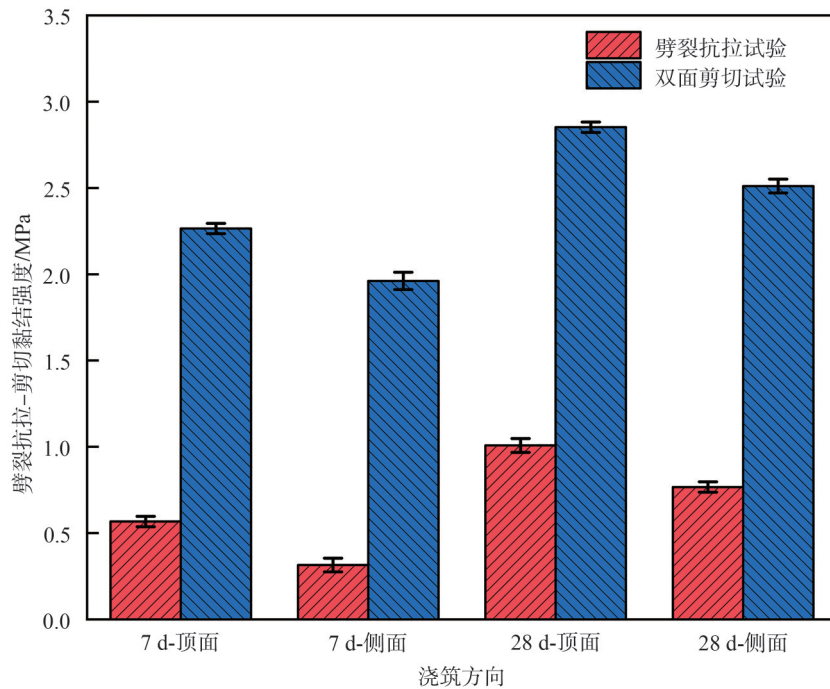


图 12 浇筑方向对界面黏结性能的影响

Figure 12 Effect of pouring direction on interfacial bonding performance

2.7 微观形貌观察及机理分析

针对 RO1、RO2、RO3 及对照组 NC-NC 界面粗糙度条件下的复合试件开展 SEM 微观表征,分析复合试件界面的微观形貌特征及其作用机理,如图 13 所示。

由图 13(a)可知,RO1 组的界面过渡区可观察到 C-S-H 凝胶呈层状堆积形态,与基体中针状 AFt 晶体形成弱连接。界面区域周围存在若干不同尺寸的微裂缝,部分微裂缝贯穿 C-S-H 凝胶层,连接起碎石颗粒与基体,这些微裂缝的存在对界面黏结性能产生不利影响。界面处结构较为松散,不同成分之间的黏结不够紧密。由图 13(b)可知,RO2 组表现出较为理想的界面构造。UHPC-NC 界面具有密集且均匀的过渡区域。活性 SiO₂、硅灰和 C-H 在 NC 中形成 C-S-H 凝胶,填充界面处的间隙,提高界面过渡区的致密性^[30]。机械咬合作用形成的凹凸结构使 C-S-H 凝胶能够更好附着与填充。可观察到纤维状 C-S-H 凝胶穿透界面,形成“桥联效应”,有效增强界面区不同成分之间的连接。另外,硅灰通过优化混凝土孔隙结构,特别是改善界面过渡区,提升水泥基体的致密性。随时间推移,C-H 与火山灰的二次反应进一步细化微观结构,形成更为密实、持久的界面区域。该微观结构的强化显著增强界面处的分子作用力与机械互锁效应,进而提高黏结性能^[31]。由图 13(c)可知,RO3 组出现界面构造劣化现象。过深的机械切割刻槽导致局部应力集中。FA 活化产物在界面处存在偏聚现象,未参与反应的惰性成分形成薄弱的界面层。虽然碎石颗粒与基体的机械咬合力在一定程度上有所提升,但微裂缝密度明显增加,相比 RO2 组显著上升,反映过度粗糙化会引起负面效应,影响界面及整体性能。由图 13(d)可知,对照组 NC-NC 界面呈典型弱结合特征。水化产物以团块状 C-S-H 凝胶为主。微裂缝沿着界面连续出现,复合试件界面存在明显的空隙带,这种疏松结构严重影响界面的黏结性能,导致其界面黏结性能较差。

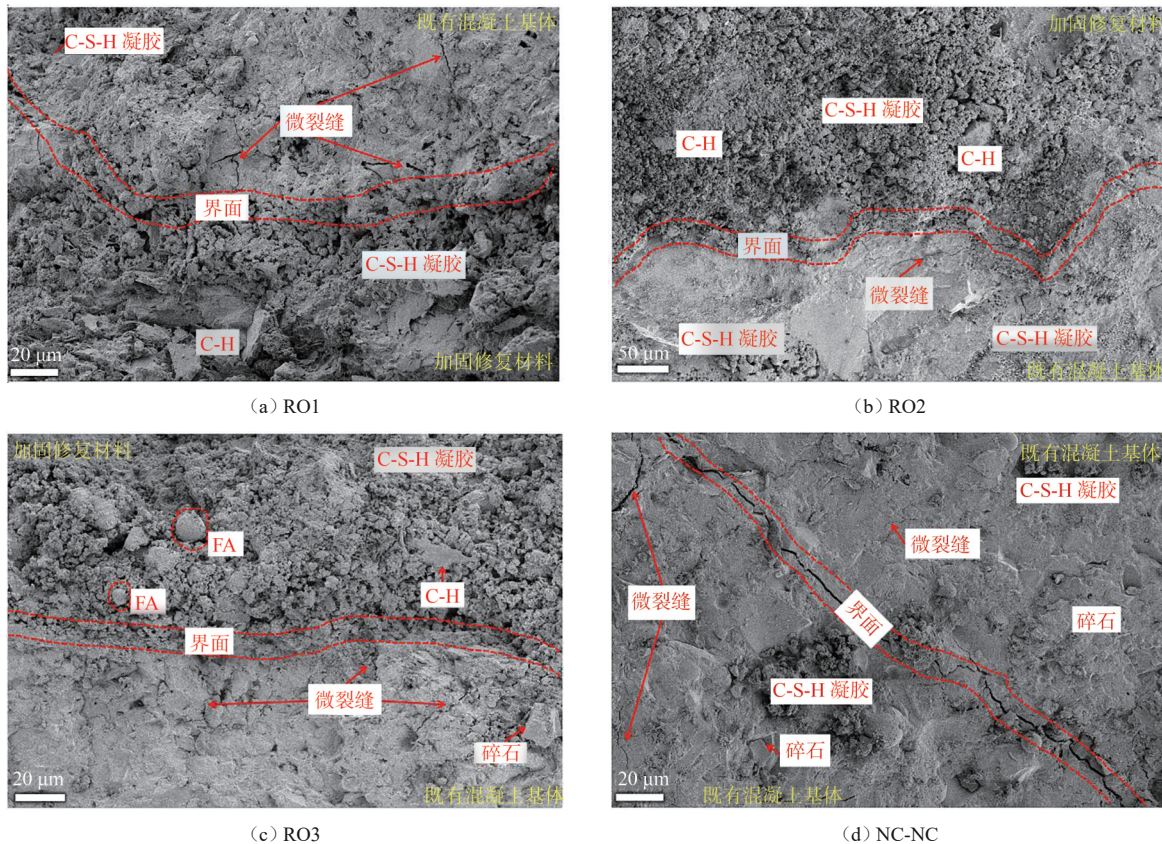


图 13 不同粗糙度下复合试件界面的微观形貌

Figure 13 Microstructure of the interface in composite specimens under different roughness conditions

3 结论

1) 劈裂抗拉与 Bi-surface 剪切试验中, 试件的破坏均集中于 UHPC 与既有混凝土基体的黏结界面附近, 破坏过程表现出从稳定到微裂缝扩展再到瞬时剥离的阶段性特征, 破坏呈脆性, 且无明显宏观变形。

2) 基体强度、界面粗糙度的提升对加固修复复合试件界面黏结性能具有正向促进作用, 随着基体强度由 C50 提升至 C60, 劈裂抗拉强度增幅为 90.22%, 双面剪切强度增幅为 35.84%。由 RO0 提升至 RO2 时, 劈裂抗拉强度增幅为 105.71%, 双面剪切强度增幅为 76.16%, 而界面粗糙度增至 RO3 时, 其进一步强化作用逐渐减弱。

3) 养护龄期对界面黏结性能具有显著的时间效应, 其中: 3 d 至 28 d 劈裂抗拉强度增幅为 232.67%, 双面剪切强度增幅为 64.10%。浇筑方向对加固修复复合试件界面黏结性能具有明显影响, 顶面浇筑在 7 d 与 28 d 龄期内均表现出更高的劈裂抗拉强度与双面剪切强度, 增幅均超过 13%。

4) RO2 组通过优化机械咬合与化学结合的协同作用, 优化了界面过渡区。适度的表面起伏既保证足够的水化产物沉积与结合空间, 又有效避免因过度切割导致的应力集中。

建议将界面粗糙度控制在 1.8~2.2 mm, 并依据快速抢修等早期强度的需求合理选择养护龄期。当基体条件超出本研究范围时, 应重点评估基体自身性能。为提升该技术在实际复杂环境下的可靠性, 后续有必要研究环境侵蚀与长期荷载对界面性能的耦合影响。

参考文献:

- [1] 沙建芳, 徐海源, 刘建忠, 等. 新旧混凝土界面粘结性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(10): 133-135+151.
Sha J F, Xu H Y, Liu J Z, et al. Study on interfacial bonding behavior of new and old concrete[J]. New Building Materials, 2019, 46(10): 133-135+151. (in Chinese)
- [2] 周建庭, 周璐, 杨俊, 等. UHPC 与普通混凝土界面黏结性能研究综述[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(4):

- 373-381.
- Zhou J T, Zhou L, Yang J, et al. Summarization on bonding behaviors of ultra-high performance concrete and normal concrete[J]. *Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)*, 2020, 41(4): 373-381. (in Chinese)
- [3] 吴琛, 储福玮, 龚明子, 等. 免蒸养超高性能混凝土-既有混凝土界面黏结性能试验研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(24): 23010119.
- Wu C, Chu F W, Gong M Z, et al. Experimental investigation of interfacial bond behavior between non-autoclave curing ultra-high performance concrete and existing normal concrete[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(24): 23010119. (in Chinese)
- [4] 吴香国, 张孝臣. 预制超高性能混凝土修复层与既有混凝土界面黏结短期性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(10): 156-163.
- Wu X G, Zhang X C. Investigation of short-term interfacial bond behavior between existing concrete and precast ultra-high performance concrete layer[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(10): 156-163. (in Chinese)
- [5] Hussein L, Amleh L. Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 1105-1116.
- [6] 谢剑, 杨云涛, 陈玉洁, 等. 氯盐环境下UHPC-NC界面黏结性能试验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2024, 57(1): 11-20.
- Xie J, Yang Y T, Chen Y J, et al. Test study on interfacial bonding behavior of UHPC-NC in a chloride environment[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2024, 57(1): 11-20. (in Chinese)
- [7] 冯硕, 石新波, 王威, 等. UHPC-NSC界面黏结性能的评价方法[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(11): 1220-1228.
- Feng S, Shi X B, Wang W, et al. Evaluation method of UHPC-NSC interface bond performance[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(11): 1220-1228. (in Chinese)
- [8] Feng S, Xiao H G, Liu R, et al. Single-side shear bond strength and OTZ microstructure of UHPC repair materials with concrete substrate[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(9): 04022216.
- [9] Mohammed M Y, Ali A Y, Kadhim M M A, et al. RC deep beams with vertical openings: Behavior and proposed mitigation techniques[J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2024, 29(1): 04023060.
- [10] 伍敏, 黄于倩, 潘仁胜, 等. NC-UHPC组合梁抗冲击性能的数值研究[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(2): 354-364.
- Wu M, Huang Y Q, Pan R S, et al. Numerical study on impact resistance of NC-UHPC composite beam[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(2): 354-364. (in Chinese)
- [11] Zhai D P, Sun Q S. Molecular dynamics and experimental study of the interfacial adhesion mechanism of polyurethane-based repair materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 459: 139796.
- [12] 贾方方, 贺奎, 王万金, 等. 活性粉末混凝土与普通混凝土黏结劈拉性能[J]. *铁道学报*, 2016, 38(3): 127-132.
- Jia F F, He K, Wang W J, et al. Splitting tensile bonding strength of reactive powder concrete to normal concrete[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(3): 127-132. (in Chinese)
- [13] 吕昭旭, 张冠军, 杨才千, 等. ESS-HPC与既有混凝土界面抗剪性能试验研究[J]. *混凝土*, 2025(5): 1-6+11.
- Lyu Z X, Zhang G J, Yang C Q, et al. Experimental study on shear performance of the interface between early strength self-compacting shrinkage-compensating high-performance concrete and existing concrete[J]. *Concrete*, 2025(5): 1-6+11. (in Chinese)
- [14] 程菊科, 伍贤智, 杨树萍, 等. UHPC-NC组合箱梁顶板界面抗剪性能试验研究[J]. *湘潭大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(2): 123-130.
- Cheng J K, Wu X Z, Yang S P, et al. Experimental study on shear resistance of top plate interface of UHPC-NC composite box girder[J]. *Journal of Xiangtan University(Natural Science Edition)*, 2024, 46(2): 123-130. (in Chinese)
- [15] 张孝臣. 预制超高性能混凝土修复既有混凝土结构界面黏结性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Zhang X C. Study of interface bond behavior between precast ultra high performance concrete repaired layer and existing concrete structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 沈捷. 活性粉末混凝土与普通混凝土的黏结性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- Shen J. The study on bonding behaviors of reactive powder concrete and ordinary concrete[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [17] 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黏结性能研究综述[J]. *材料导报*, 2023, 37(16): 21120057.

- Wu Y X, Zheng X Y, Huang W, et al. Review of interface bond behavior between ultra-high performance concrete and existing normal concrete[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(16):21120057. (in Chinese)
- [18] 王楠,徐世焱. 超高韧性水泥基复合材料与既有混凝土黏结性能[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(3):317-323.
Wang N, Xu S L. Bonding performance between ultra high toughness cementitious composites and existing concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(3): 317-323. (in Chinese)
- [19] 易新祥,章本本,李政阳. 地质聚合物砂浆与既有混凝土界面粘结性能研究[J]. *市政技术*, 2023, 41(7):71-76.
Yi X X, Zhang B B, Li Z Y. Study on the interfacial bonding performance of geopolymer mortar and existing concrete[J]. *Journal of Municipal Technology*, 2023, 41(7):71-76. (in Chinese)
- [20] Al-Azzawi H A, Aules W A, Alshandah M, et al. Bonding strength between ultra high-performance concrete (UHPC) and the surface of normal and high-strength concrete[J]. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2025, 10:29.
- [21] Buttignol T E T, Sousa J L A O, Bittencourt T N. Ultra high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC): A review of material properties and design procedures[J]. *IBRACON Structures and Materials Journal*, 2017, 10(4):957-971.
- [22] 程文强,耿健,柳根金,等. 界面处理对预制UHPC与现浇NC界面抗剪性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(1):76-83.
Cheng W Q, Geng J, Liu G J, et al. Effect of interfacial treatment on shear properties of precast UHPC and cast-in-place NC[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(1):76-83. (in Chinese)
- [23] 王孟伟. ECC与既有混凝土粘结性能的影响因素研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
Wang M W. Research on factors affecting bonding behavior between existing concrete and ECC[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [24] Valipour M, Khayat K H. Debonding test method to evaluate bond strength between UHPC and concrete substrate [J]. *Materials and Structures*, 2020, 53(1):15.
- [25] Wang Y Z, Qiao P Z, Sun J, et al. Influence of surface treatments and test methods on tensile strength of UHPC-NC interface bond[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 456:139051.
- [26] 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.
- [27] 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 W. The research on the interfacial bond strength of new-to-old concrete[D]. Changsha:Hunan University, 2004. (in Chinese)
- [28] 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.
- [29] Okamura H, Ouchi M. Self-compacting concrete[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(1): 5-15.
- [30] Xu L Y, Yao Y, Li Y X, et al. Review of the interfacial bonding properties between ultrahigh-performance concrete and normal concrete[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(11):6697.
- [31] Tayeh B A, Abu Bakar B H, Johari M A M, et al. Microstructural analysis of the adhesion mechanism between old concrete substrate and UHPFC[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, 28(18):1846-1864.

责任编辑: 张自强