

混杂纤维混凝土与既有混凝土的粘结斜剪性能试验研究

夏冬桃¹,李欣怡¹,吴昊²

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068;2. 长江航务管理局机关事务中心,湖北 武汉 430014)

摘要 目的 研究混杂纤维及涂抹环氧界面剂对新老混凝土粘结性能的影响。方法 对12组混杂纤维混凝土(体积分数为0.11%的聚丙烯纤维,体积分数分别为0.8%和1.2%的多锚点钢纤维)与既有混凝土粘结试件(100 mm×100 mm×300 mm)进行斜剪性能试验,并对粘结界面取样进行SEM扫描分析。研究不同纤维掺量及界面剂对新老混凝土的界面粘结强度、破坏形式的影响以及混杂纤维在粘结面的作用机理。结果 与普通混凝土试件的粘结斜剪强度相比,1.2HFRC粘结斜剪试件强度提高幅度最大,达到了29%;混杂纤维混凝土试件与单掺钢纤维混凝土试件的粘结斜剪强度差异较小,二者平均提升幅度约为5%,纤维掺量每增加0.1%,斜剪强度平均提升约0.18 MPa;不同纤维掺量的混凝土试件在涂抹环氧界面剂后增幅平均为3 MPa左右。结论 混杂纤维掺入后能有效改善粘结界面区的孔隙结构,提高界面粘结性能。

关键词 混杂纤维混凝土;既有混凝土;粘结斜剪性能;界面剂;SEM

中图分类号 TU528.572

文献标志码 A

Experimental Research on the Bonding Oblique Shear Performance of HFRC and Existing Concrete

XIA Dongtao¹, LI Xinyi¹, WU Hao²

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, China, 430068; 2. Office Affairs Center of Changjiang Navigation Administration, Wuhan, China, 430014)

Abstract: In order to study the effect of hybrid fiber and epoxy interfacial agent on the bonding performance of new and old concrete, the oblique shear performance of 12 groups of hybrid fiber concrete (polypropylene fiber with volume fraction of 0.11%, multi anchor steel fiber with volume fraction of 0.8% and 1.2%) and existing concrete bond specimens (100 mm×100 mm×300 mm)

收稿日期:2021-09-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52009038)

作者简介:夏冬桃(1975—),女,教授,博士,主要从事纤维混凝土结构理论及应用等方面研究。

were tested, SEM scanning was carried out for the adhesive interface samples. The influence of different fiber content and interfacial agent on the interface bond strength and failure mode of new and old concrete and the action mechanism of the hybrid fiber on the bonding surface are studied. The research results show that, compared with the bonded oblique shear strength of ordinary concrete specimens, the strength of 1.2HFRC bonded oblique shear specimens is increased by the largest 29%; there is little difference in bond oblique shear strength between hybrid fiber concrete specimens and steel fiber reinforced concrete specimens, with an average increase of about 5%. For every 0.1% increase in fiber content, the average increase in oblique shear strength is about 0.18 MPa; the average increase rate of concrete specimens with different fiber content after applying epoxy interfacial agent is about 3 MPa; the pore structure of interfacial region can be improved and improve the interface bonding performance by the incorporation of hybrid fibers.

Key words: hybrid fiber reinforced concrete; existing concrete; bond oblique shear performance; interfacial agent; SEM

混凝土结构长时间在外界因素的影响下,受到环境的侵蚀以及不同程度的破坏,其耐久性以及承载能力随之下降。在工程建设和应用过程中,对于年久失修以及不再满足使用要求的建(构)筑物、路面、桥面等,应进行混凝土的修补和加固改造,使其满足规范的安全使用性能。在建筑结构的加固、翻新或新建过程中经常遇到疏松部分露出坚实的混凝土或砂浆,以及长期磨损或碰撞下混凝土结构出现掉角、断裂等问题^[1],当对其进行修补或加固时,需要新老混凝土界面具备较好的粘结力;其粘结性能的情况直接反映修补加固的成功与否^[2-3]。因普通混凝土抗拉性能和抗裂性能较差,普通混凝土与既有混凝土界面粘结强度较低,导致粘结的质量和加固效果较差。

掺入纤维是改善水泥基复合材料强度和韧性的有效途径之一^[4],混凝土的力学性能和耐久性能随着掺入纤维量增加而提高,性能不同的纤维对混凝土的改性优势得到充分发挥并产生互补叠加效应^[5-6]。目前对于单掺纤维混凝土作为新混凝土已经取得一定研究成果,掺入一定量的纤维及使用界面剂能够提高新老混凝土的粘结斜剪强度及粘结性能^[7-13],但是关于混杂纤维增强混凝土作为

补强混凝土的研究尚不多见。从性能、应用和经济上综合考虑,选用高弹性模量的钢纤维和低弹性模量的聚丙烯纤维,两者优势互补所产生的混杂效应能有效提高混凝土的阻裂和增韧性能。为更好地延长混凝土结构的寿命,提高结构修补加固的质量,降低修补成本,从而符合“绿色建筑”可持续发展的要求,笔者通过开展混杂纤维增强混凝土与既有混凝土的粘结斜剪性能试验研究以及粘结面微观界面的分析,研究如何提高新老混凝土界面粘结强度,进而为混凝土结构加固补强提供借鉴。

1 试验

1.1 原材料

参照《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T 221—2010)^[14]选用原材料。水泥采用湖北“华新牌”P.O 42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料采用粒径 5~25 mm 的连续集配碎石;细骨料采用细度模数为 2.6 的河砂;矿渣粉为武汉微神科技有限公司生产的 P8000 系列超细矿渣粉,取代率为 20%;减水剂为高效聚羧酸减水剂,减水率为 24%~26%;试验用水为普通自来水;界面剂为 Sika 公司生产的 32N&LP 的双组份环氧界面剂。

试验所用的纤维:武汉新途工程新材料科技有限公司生产的多锚固点钢纤维(SF)

和美国“杜拉”牌聚丙烯单丝纤维(PF),纤维性能指标见表1。

表1 纤维参数

Table 1 Fiber parameters

种类	l/mm	d/mm	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	σ_b/MPa	E/GPa
钢纤维(SF)	30	0.50	7.85	1 200	200
聚丙烯纤维(PF)	12	0.03	0.91	276	3.79

注:表中 l, d, ρ 分别为纤维的长度、等效直径和密度; σ_b 和 E 分别为纤维的抗拉强度和弹性模量。

1.2 试验配合比

用于斜剪试验的既有混凝土配合比参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)^[15],设计强度等级为C50,配合比见表2。依据《混凝土结构加固设计规范》(GB50367—2013)^[16],试验中所用试件混凝土强度等级在原构件强度设计基础上提高一级,且强度不低于C20,笔者选用C55作为新

浇混杂纤维混凝土设计强度,其配合比及各组试件的纤维掺量见表3。

表2 既有混凝土配合比

Table 2 Existing concrete mix ratio

kg/m^3				
$\rho(\text{水})$	$\rho(\text{水泥})$	$\rho(\text{砂})$	$\rho(\text{碎石})$	$\rho(\text{减水剂})$
144	450	750	1120	3.38

表3 新浇混杂纤维混凝土配合比及纤维掺量

Table 3 HFRC mix ratio and fiber parameters

试件编号	C55 混凝土材料用量					纤维掺量		
	$\rho(\text{水})$	$\rho(\text{水泥})$	$\rho(\text{砂})$	$\rho(\text{碎石})$	$\rho(\text{矿渣粉})$	$\rho(\text{减水剂})$	$\rho(\text{钢纤维})$	$\rho(\text{聚丙烯纤维})$
OC	160	440	692	1038	110	5.5	0	0
0.11PFRC	160	440	692	1 038	110	5.5	0	1.0
0.8SFRC	160	440	692	1 038	110	5.5	62.8	0
1.2SFRC	160	440	692	1 038	110	5.5	94.2	0
0.8HFRC	160	440	692	1 038	110	5.5	62.8	1.0
1.2HFRC	160	440	692	1 038	110	5.5	94.2	1.0

注:表中OC代表普通混凝土试件;数字代表纤维体积分数;PFRC代表单掺聚丙烯纤维混凝土试件;SFRC代表单掺钢纤维混凝土试件;HFRC代表混杂纤维混凝土试件。

1.3 试件制作

根据表2的既有混凝土配合比提前浇筑一批长宽高为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的试件,放入标准养护室养护28d后用切割机以保持夹角为 30° 的方式将单个试件斜切成两个大小相同、形状为楔形的既有混凝土斜剪试件(见图1)。对养护成型的试件进行切槽处理,然后通过“灌砂法”测量处理面的粗糙度,经计算其平均灌砂深度为 5.3 mm ,满足粘结质量要求^[17]。

参照文献[18],新老混凝土粘结斜剪试



图1 既有混凝土斜剪试件

Fig. 1 Existing concrete oblique shear specimen
件均为两个相同尺寸的楔形试件结合而成的

棱柱体,其粘结面与竖直面保持夹角为 30° (见图2)。将切槽处理好的既有混凝土试件放入试验前准备好的棱柱体模具内,将拌好的环氧界面剂均匀地涂抹在粘结面处(见图3),另一半混杂纤维混凝土依照“斜上补”的方式进行浇筑,随后把混凝土振动均匀,将表面处抹平,试件在静置24 h后进行标记记录,最后放入标准养护室养护28 d后取出,开展试验。

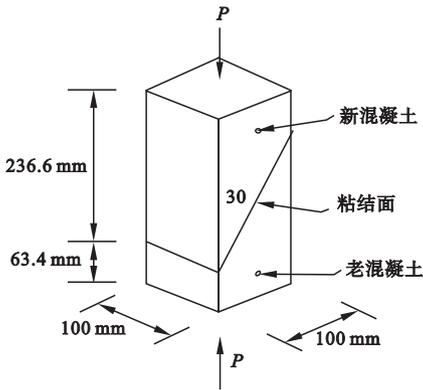


图2 斜剪试件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oblique shear specimen



图3 粘结面涂抹环氧界面剂

Fig. 3 Apply epoxy interface agent on the bonding surface

1.4 试验方法

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[19]的相关规定,将试件直立放在下压板的中心(见图4),试验加载速度为每秒钟3~5 kN,当试件破坏时记录最终破坏荷载。混凝土粘结试件的斜剪试验是双重力学性能破坏试验,既是混凝土试件进行受压、也是粘结界面处进行受剪的破坏,混凝土粘结斜剪强度以及剪切面上的

压应力根据混凝土立方体抗压公式进行推算,按式(1)、式(2)计算,精确至0.01 MPa:

$$f_{st} = \sin 30^\circ \cos 30^\circ \frac{P}{A} = 0.433 \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$N = \sin 30^\circ \sin 30^\circ \frac{P}{A} = 0.25 \frac{P}{A} \quad (2)$$

式中: f_{st} 为混凝土粘结斜剪强度,MPa; N 为破坏时粘结面上压应力,MPa; P 为混凝土试件破坏荷载,N; A 为试件承载面积, mm^2 。

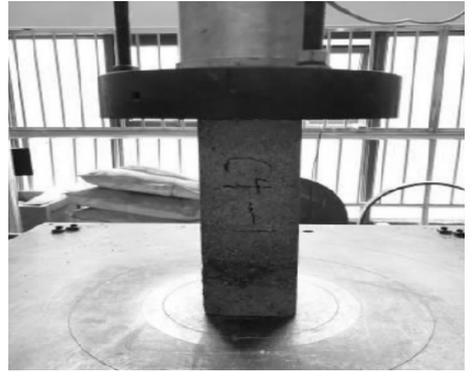


图4 粘结斜剪强度试验

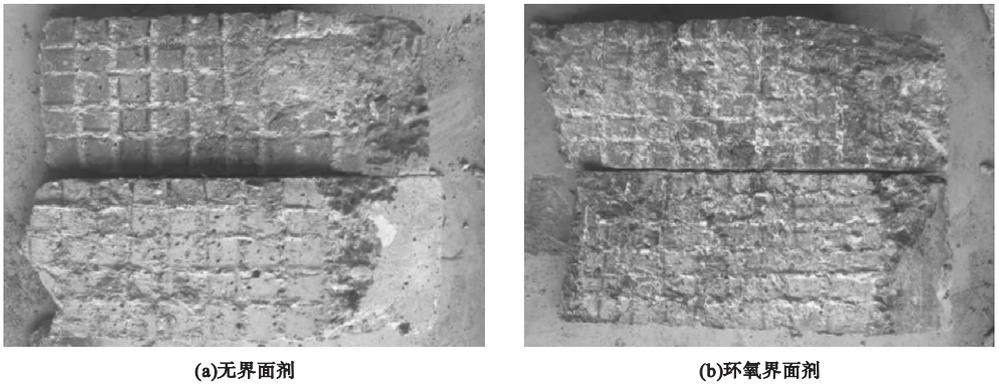
Fig. 4 Bonding oblique shear strength test

2 试验现象及结果分析

2.1 破坏形态

观察压好的混凝土试件可以发现,破坏面大多数发生在新老混凝土的粘结面上(见图5),侧面证明了破坏面的位置与是否涂抹界面剂无关。在未涂抹界面剂的粘结面上,既有混凝土的切槽缝里含有混杂纤维混凝土的浆体,被拔出和剪断的钢纤维和聚丙烯纤维在粘结面上可被观察到(见图5(a));当粘结面上涂抹了环氧界面剂,既有混凝土和混杂纤维混凝土上均布满着乳白色的界面剂以及拔出的和剪断的钢纤维(见图5(b))。

混凝土粘结试件在斜剪试验阶段的破坏形式有三种(见图6):第一类破坏形式为既有混凝土未破坏但边缘脱落,界面切槽间距较大,且深度不明显;第二类和第三类破坏形式为既有混凝土被破坏且脱落,界面切槽较深且间距较密。

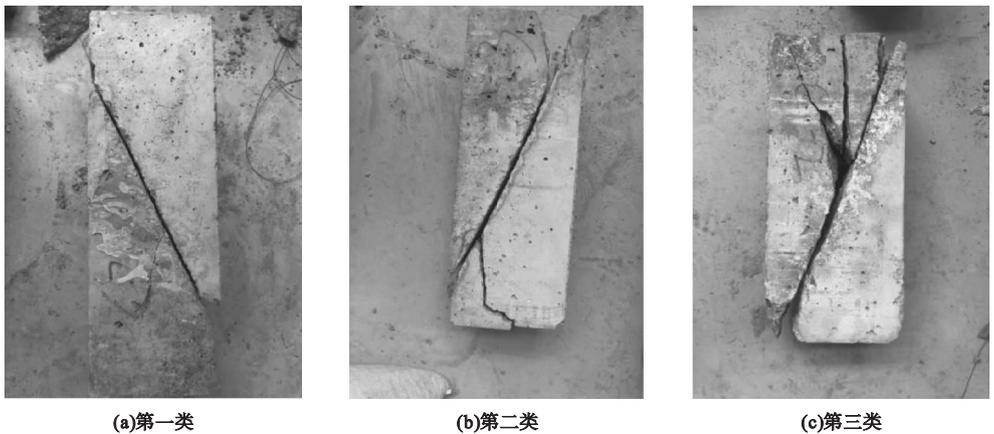


(a)无界面剂

(b)环氧界面剂

图5 粘结斜剪试件粘结面

Fig. 5 Bonding surface of oblique shear specimen



(a)第一类

(b)第二类

(c)第三类

图6 斜剪试件的三种破坏形式

Fig. 6 Three failure modes of oblique shear specimen

2.2 试验结果与分析

2.2.1 试验结果

文献[18]中采用的粘结斜剪强度的计算方法是综合考虑压力和剪切力两个因素进行推算的,而文献[20]中采用的界面剪切粘结强度计算方法是按抗压强度计算式(3)得来:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3)$$

式中: τ 为混凝土粘结斜剪强度,MPa; F 为混凝土试件破坏荷载,N; A 为混凝土界面实际粘结面积, mm^2 。

混凝土整体抗压试验、混杂纤维混凝土与既有混凝土粘结斜剪试验结果见表4。

表4 混凝土整体抗压及粘结试件斜剪强度

Table 4 The compressive strength of concrete and the oblique shear strength of bonded specimens MPa

试件编号	整体抗压强度	基于 ASTM 标准的粘结斜剪强度		基于 ACI 标准的粘结斜剪强度	
		无界面剂	环氧界面剂	无界面剂	环氧界面剂
OC	58.3	11.84	14.86	13.67	16.34
0.11PFRC	58.7	12.32	15.06	14.23	17.39
0.8SFRC	61.7	13.12	16.34	15.80	18.87
1.2SFRC	65.6	14.08	17.14	16.97	19.79
0.8HFRC	62.9	14.14	16.68	16.33	19.26
1.2HFRC	66.5	15.22	17.74	17.58	20.48

注:ASTM(American Standard Test Method)代表美国标准试验方法;ACI(American Concrete Institute)代表美国混凝土协会标准。

根据文献[20]的相关规定,ACI 标准界面斜剪试验粘结强度在 28 d 的测试强度为 14 ~ 21 MPa。表 4 中未加界面剂的普通混凝土粘结试件未达到强度要求,其他类型的粘结试件均在规范要求的强度范围内。

2.2.2 纤维的影响

图 7 为各纤维种类分别在基于 ASTM 标准和 ACI 标准下对混凝土粘结斜剪强度的影响。

由图可知,当粘结界面处无界面剂时,0.11PFRC、0.8SFRC、1.2SFRC、0.8HFRC 和 1.2HFRC 的粘结斜剪强度与 OC 的粘结斜剪强度相比,增幅分别为 4%、16%、24%、19%、29%;同理,当粘结界面涂抹环氧剂时,0.11PFRC、0.8SFRC、1.2SFRC、0.8HFRC、1.2HFRC 与 OC 的粘结斜剪强度相比,粘结斜剪强度的增幅依次为 1%、10%、15%、12%、19%。

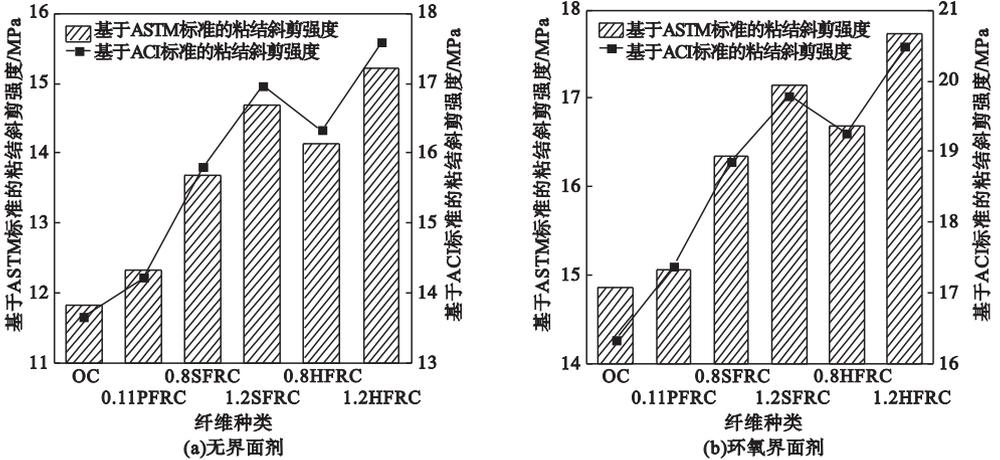


图 7 纤维对粘结斜剪强度影响

Fig. 7 The influence of fiber on the bonding oblique shear strength

分析可知,当涂抹环氧剂时,1.2HFRC 的粘结斜剪强度增幅最大,0.11PFRC 粘结斜剪强度增幅最小,SFRC 粘结斜剪强度增幅介于二者之间。当混凝土试件内部掺入纤维后,新老混凝土与粘结面之间的收缩差减小,界面区细小裂缝的发展受到抑制,从而能有效地提高混凝土试件粘结斜剪强度。

2.2.3 混杂效应分析

体积分数分别为 0.8% 和 1.2% 的钢纤维以单掺和混掺的形式对混凝土粘结斜剪强度影响曲线见图 8。从图中可以看出,当粘结界面未涂抹界面剂、钢纤维掺量为 0.8% 时,混杂纤维混凝土试件的粘结斜剪强度比单掺钢纤维混凝土试件增加了 1.02 MPa,提高了 7.2%;钢纤维掺量为 1.2% 时,混杂纤维混凝土试件的粘结斜剪强度比单掺钢纤维混凝土试件增加了 1.14 MPa,提高了 7.5%。同理,当粘结界面涂抹环氧剂、钢纤维掺量为

0.8% 时,混杂纤维混凝土试件的粘结斜剪强度比单掺钢纤维混凝土试件增加了 0.34 MPa,提高了 2%;钢纤维掺量为 1.2% 时,混杂纤维试件的粘结斜剪强度比单掺钢纤维混凝土试件增加了 0.60 MPa,提高了 3.4%。

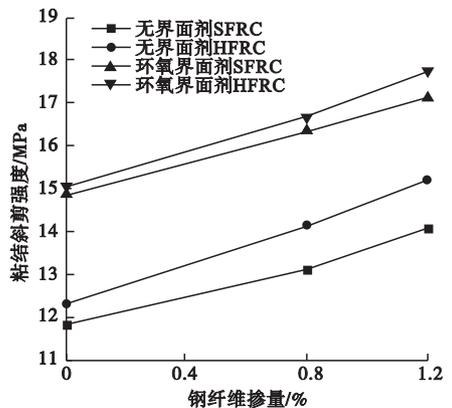


图 8 混杂纤维对粘结斜剪强度影响

Fig. 8 The influence of hybrid fiber on bonding oblique shear strength

分析可知,在钢纤维掺量相同时,混杂纤维混凝土试件与单掺钢纤维混凝土试件相比,粘结斜剪强度相差较小,平均提升幅度约为5%;同类型的混凝土试件随着钢纤维掺量增加能有效提高粘结斜剪强度,纤维掺量每增加0.1%,平均提升斜剪强度约为0.18 MPa。由此可知“混杂效应”对粘结斜剪强度的提高并不明显,所以在实际工程的应用过程当中,可以通过增加钢纤维的掺量,有效提高混凝土的粘结斜剪强度。

2.2.4 界面剂的影响

不同纤维种类在涂抹环氧界面剂下对混凝土粘结斜剪强度的影响曲线见图9。从图中可以看出,无论粘结面是否涂抹界面剂,新浇混杂纤维混凝土的抗压强度远大于混杂纤维混凝土与既有混凝土的粘结斜剪强度;在纤维掺量不同的混凝土试件中,无界面剂混凝土试件的粘结斜剪强度均低于涂抹环氧界面剂混凝土试件的粘结斜剪强度。OC普通混凝土试件涂抹环氧界面剂后,与未涂的试件相比,其粘结斜剪强度增幅最大,约为41%;而1.2SFRC单掺钢纤维混凝土试件涂抹环氧界面剂后,与未涂的试件相比,粘结斜剪强度增幅最小,约为22%,在涂抹环氧界面剂后不同纤维掺量的混凝土试件增幅平均为3 MPa左右。

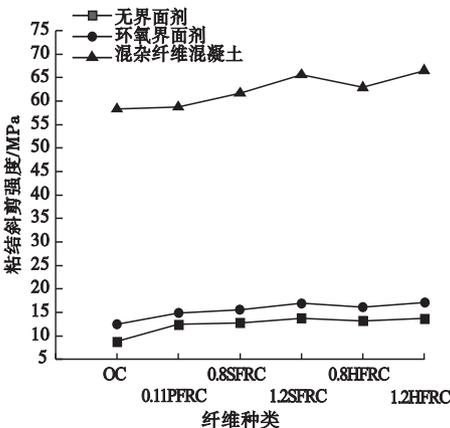


图9 界面剂对粘结斜剪强度的影响

Fig. 9 The influence of interfacial agent on the bond strength of oblique shear

不同体积分数纤维混杂和涂抹界面剂对粘结斜剪强度影响曲线见图10。从图中可以看出,OC、0.8SFRC、1.2SFRC三种粘结试件在涂抹环氧界面后强度的增幅都远超过纤维混杂效应的强度增幅,影响粘结强度提高的主要因素是环氧界面剂,这为实际工程的加固提供了一定的借鉴。

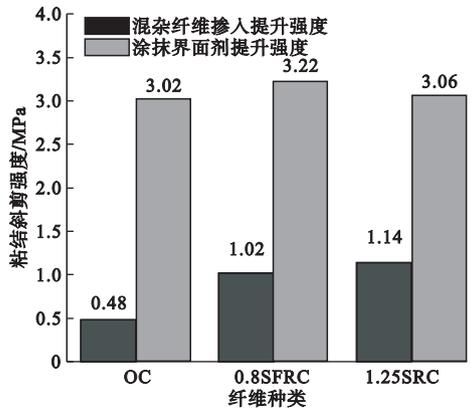


图10 纤维混杂和界面剂对粘结斜剪强度的影响

Fig. 10 The influence of fiber hybrid and interfacial agent on the bond oblique shear strength

3 粘结面微观分析

混凝土界面的粘结性能是宏观力学性能的表现,纤维混凝土粘结面在应力作用下,粘结界面会提前破坏,导致纤维增强的效果没有完全发挥,因此有必要研究纤维-混凝土之间的粘结作用机理。笔者分别对1.2HFRC环氧界面剂粘结试件和OC无界面剂粘结试件取样进行SEM分析,观察界面粘结面处的微观构造,取样位置见图11,两种试件的微观结构图如图12和图13所示。

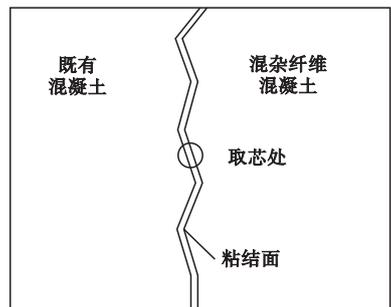


图11 试件取样位置

Fig. 11 Sample sampling position

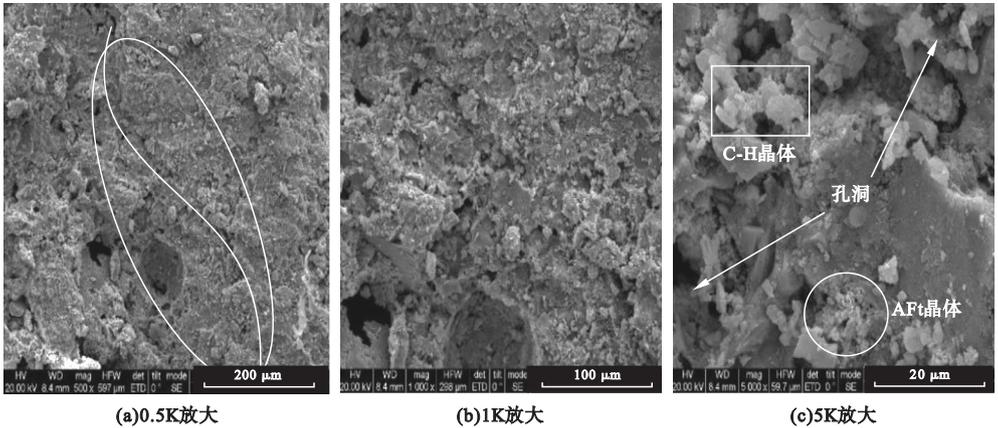


图 12 无界面剂 OC 粘结试件粘结面 SEM 图

Fig. 12 SEM image of bonding surface of OC bonded specimen without interfacial agent

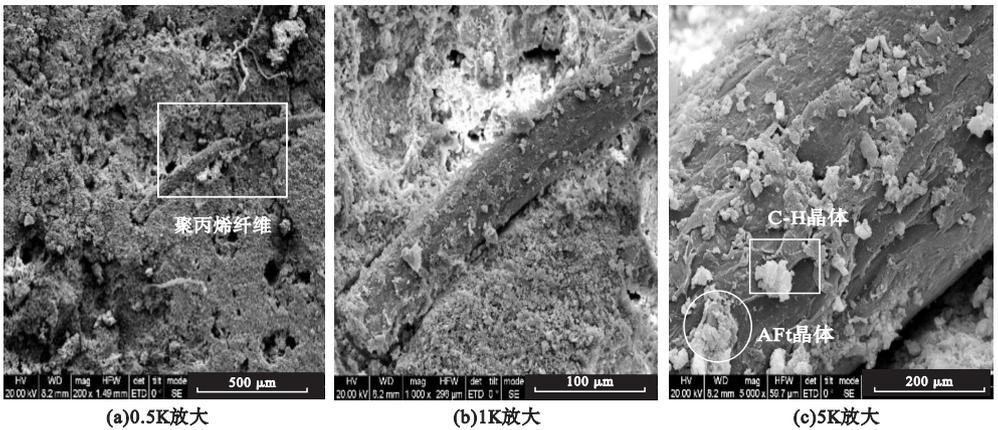


图 13 环氧界面剂 1.2HFRC 粘结试件粘结面 SEM 图

Fig. 13 SEM image of bonding surface of epoxy interface agent 1.2HFRC bonding specimen

从微观结构来看,图 12 中 OC 试件粘结面上有一条宽度约为 $80\ \mu\text{m}$ 的裂缝,其形成的原因是在混凝土发生水化反应前期阶段,新浇筑的混凝土内部所含的水分通过振动台振捣后,向着老混凝土一侧移动,导致水灰比在粘结面处开始增大。与此同时,骨料经过挤压后水逐步形成一层水膜,老混凝土一侧的水膜伴随着界面区水化反应持续增大开始逐渐消失,最终形成孔隙。同时水化反应受界面区生成的大量 C-H 晶体以及 AFT 影响,造成了反应的不充分;界面区存在大量疏松网络结构,粘结强度随之降低。

从图 13 可以看出,粘结面处无明显裂缝,环氧界面剂附着在混凝土粘结面上,环氧界面剂在粘结面上形成一层“乳膜”,并且渗

入新老混凝土间微小的孔隙中,与 C-H 晶体紧密粘结在一起,试件的粘结强度得到明显提高。从图中还可以看出,试件中混杂着少量聚丙烯纤维,并且从 1K 和 5K 放大的 SEM 图中看到有少量 C-H 晶体和 AFT 晶体在聚丙烯纤维表面,孔隙率较 OC 粘结试件要小,分析原因是新混凝土在搅动过程中,纤维在水泥凝胶作用下形成化学粘结力,纤维周围的孔隙率得到改善,基体粘结更紧密。

钢纤维有亲水性的特性,聚丙烯纤维有憎水性,混杂纤维混凝土在搅拌时,钢纤维基体附近的干缩值随着钢纤维附近的水灰比增大而增大,与未掺加聚丙烯纤维的混凝土相比,此时钢纤维受到更大的竖向压力,基体紧紧包裹住钢纤维,基体与钢纤维之间的摩擦

力也随之增大,使钢纤维难以从基体中拔出;异形钢纤维在拔出时,与之接触的混凝土易产生裂缝,掺入聚丙烯纤维则抑制了细小裂缝的发展,部分混凝土碎片与聚丙烯纤维搅成团,滞留在钢纤维的拉拔通道中,阻碍钢纤维拔出,若不掺聚丙烯纤维,钢纤维随受力方向拔出,则纤维的机械咬合力效果开始呈现出递减状(见图14)。

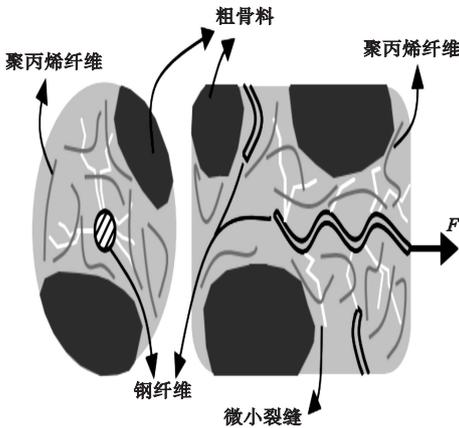


图14 机械咬合力受纤维的影响

Fig. 14 Mechanical bite force is affected by fiber

4 结论

(1)纤维混凝土试件相较普通混凝土试件,其粘结斜剪均达到了文献[20]中28d斜剪强度;未涂抹界面剂下,1.2HFRC试件的粘结斜剪强度与OC相比增幅最大,为29%;1.2HFRC混杂纤维混凝土试件的粘结斜剪强度在涂抹环氧界面剂后,提高幅度最大,达到了19%。

(2)在钢纤维掺量相同时,混杂纤维混凝土试件与单掺钢纤维混凝土试件相比,粘结斜剪强度相差较小,平均提升幅度约为5%;同类混凝土试件随着钢纤维掺量增加能有效提高粘结斜剪强度,纤维掺量每增加0.1%,平均提升斜剪强度约为0.18 MPa。

(3)普通混凝土试件涂抹环氧界面剂后,与未涂的试件相比,其粘结斜剪强度增幅最大,约为41%。而1.2SFRC单掺钢纤维混凝土试件涂抹环氧界面剂后,与未涂的试件

相比,粘结斜剪强度增幅最小,约为22%。在涂抹环氧界面剂后,不同纤维掺量的混凝土试件增幅平均提高约为3 MPa左右,证明环氧界面剂是一种良好的混凝土界面剂。

(4)涂抹环氧界面剂的1.2HFRC粘结试件SEM图上无明显的裂缝,新老混凝土基体与界面剂粘结紧密;混杂纤维的掺入使纤维与基体附近的水化反应加剧,改善了界面区的结构;聚丙烯纤维抑制了裂缝的产生,钢纤维与基体的机械咬合力增强,界面粘结性能增大。

参考文献

- [1] 袁建伟,龙莉萍.新旧混凝土粘结性能的改善方法[J].山西建筑,2008(10):161-162.
(YUAN Jianwei, LONG Liping. A way to improve the bond quality of the new and old concrete [J]. Shanxi architecture, 2008(10): 161-162.)
- [2] 彭小芹,刘艳萌,林力勋.界面剂对界面劈拉强度的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006,22(4):596-599.
(PENG Xiaoqin, LIU Yanmeng, LIN Lixun. Influence of the interface cementing agent on the bond strength of interface [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2006, 22(4): 596-599.)
- [3] 张进科.加固用界面剂对新旧砼粘结性能影响的试验研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2017.
(ZHANG Jinke. Experimental research on bond behavior of new and old concrete with interface agent [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [4] 夏冬桃,刘向坤,夏广政,等.混杂纤维增强高性能混凝土弯曲韧性研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(6):108-112.
(XIA Dongtao, LIU Xiangkun, XIA Guangzheng, et al. Flexural toughness of high-performance hybrid fiber reinforced concrete [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science), 2013, 41(6): 108-112.)
- [5] AFROUGHSABET V, BIOLZI L, MONTEIRO P J M. The effect of steel and polypropylene fiber on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete [J]. Composites part B: engineering, 2018, 139: 84-96.
- [6] 李晓克,霍洪媛,张亮,等.混杂钢纤维增强混凝土力学性能试验研究[J].河南大学学报(自然科学版),2017,47(1):101-107.
(LI Xiaoke, HUO Hongyuan, ZHANG Liang, et al. Experimental study on mechanical properties of concrete reinforced by hybrid steel fibers [J]. Journal of Henan university (natural

- science), 2017, 47(1): 101 - 107.)
- [7] 刘安庆, 汪一鸣, 王建民, 等. 纤维陶粒混凝土与普通混凝土粘结性能实验研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2016, 29(4): 92 - 95.
(LIU Anqing, WANG Yiming, WANG Jianmin, et al. Experiment on the bonding performance of fiber ceramsite aggregate concrete and normal concrete [J]. Journal of Ningbo university (natural science and engineering edition), 2016, 29(4): 92 - 95.)
- [8] 程红强, 刘国龙, 高丹盈. 钢纤维混凝土与老混凝土粘结剪切性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 177 - 181.
(CHENG Hongqiang, LIU Guolong, GAO Danying. Experimental study on bonding shear performance of new steel fiber reinforced concrete to old concrete [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2013, 32(4): 177 - 181.)
- [9] 滕录强. 钢纤维聚合物混凝土与旧混凝土界面粘结性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
(TENG Luqiang. Study on the interfacial bonding performance between steel fiber polymer concrete and old concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.)
- [10] 黄璐, 卓卫东, 谷音, 等. 界面剂对新旧混凝土界面粘结性能影响的试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 396 - 402.
(HUANG Lu, ZHUO Weidong, GU Yin, et al. Effect test of interface agent on bonding of old and new concrete [J]. Journal of Fuzhou university (natural science), 2018, 46(3): 396 - 402.)
- [11] TAYEH B A, BAKAR B H A, JOHARI M A M. 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.
- [12] 崔寒, 冯凌云, 吕晨, 等. 不同龄期老混凝土与新混凝土粘结性能研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(4): 100 - 101.
(CUI Han, FENG Lingyun, Lü Chen, et al. Study on the bond performance of old concrete and new concrete at different ages [J]. Shanxi architecture, 2018, 44(4): 100 - 101.)
- [13] 蔡炜, 方海. 纤维增强磷酸盐水泥基复合材料与旧混凝土的黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊2): 443 - 450.
(CAI Wei, FANG Hai. Experimental study on bonding performance of fiber reinforced phosphate cement matrix composites with old concrete [J]. Journal of building structures, 2020, 41(S2): 443 - 450.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维混凝土应用技术规程: JGJ/T 221—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for fiber concrete application: JGJ/T 221—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ55—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Design specification for ordinary concrete mix ratio: JGJ55—2011 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB50367—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Design code for reinforcement of concrete structures: GB50367—2013 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.)
- [17] 韩菊红, 毕苏萍, 张启明, 等. 粗糙度对新老混凝土粘结性能的影响[J]. 郑州工业大学学报, 2001(3): 22 - 24.
(HAN Juhong, BI Suping, ZHANG Qiming, et al. Influence of the roughness on the bonding properties of new and old concrete [J]. Journal of Zhengzhou university of technology, 2001(3): 22 - 24.)
- [18] ASTM Standards. Standard test method for bond strength of epoxy-resin systems used with concrete by slant shear: ASTM C882/C882M—2013a [S]. Conshohocken: American Society for Testing and Materials, PA, 2013.
- [19] 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, 2019.
(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 Construction Industry Press, 2019.)
- [20] ACI Committee 546. Concrete repair guide: ACI 546R—04 [S]. American: American Concrete Institute, 2004.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)