

陕亮, 龚亚琦, 张亮. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土与变形钢筋粘结破坏试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 206-213.
SHAN Liang, GONG Yaqi, ZHANG Liang. Experimental study on bonding failure between steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete and deformed reinforcement[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 206-213.

钢-聚丙烯混杂纤维混凝土与变形钢筋 粘结破坏试验研究

陕亮^{1,2}, 龚亚琦^{1,2}, 张亮^{1,2}

(1. 长江科学院 材料与结构研究所, 湖北 武汉 430010;
2. 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为研究混杂纤维混凝土的力学特性, 以纤维体积率和长径比为关键变量, 采用单端中心拉拔试验方法, 进行了钢-聚丙烯混杂纤维混凝土(SPHFRC)与带肋变形钢筋粘结破坏的试验研究, 建立了粘结强度计算公式。试验结果表明: SPHFRC与变形钢筋之间的粘结强度与SPHFRC的强度正相关。相比于单掺钢纤维混凝土、单掺聚丙烯纤维混凝土和普通混凝土, SPHFRC的极限粘结强度相应提高9.2%、20.8%和26.2%; 混杂纤维不仅提高了钢筋周围混凝土的抗拉强度, 同时提供了侧向约束, 在钢筋混凝土粘结破坏的全过程路径中均发挥着有利作用。本文提出的SPHFRC与变形钢筋粘结强度计算公式明确清晰, 适用性良好, 为促进混杂纤维钢筋混凝土的应用提供有益的探索。具有互补性的混杂纤维, 在正混杂效应下, 可有效提高混凝土的综合力学性能。本研究可为相应技术规程提供理论支持与试验依据。

关键词: 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土; 带肋变形钢筋; 粘结破坏; 混杂效应; 粘结强度

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.01.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)24-0206-08



与作者互动
听语音 聊科研

Experimental study on bonding failure between steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete and deformed reinforcement

SHAN Liang^{1,2}, GONG Yaqi^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}

(1. Material and Engineering Structure Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China;
2. Research Center of Water Engineer Security and Disease Prevention, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: In order to study the mechanical performance of the hybrid fiber reinforced concrete, an experimental study on the bonding failure between the steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete (SPHFRC) and the deformed ribbed-reinforcement is carried out with the method of single-ended central pull-out experiment by taking the volume fraction and length-diameter ratio of the fiber as the key variables, and then a bonding strength calculation formula is established. The experiment result shows that the bonding strength between SPHFRC and the deformed reinforcement is positively correlated to the strength of SPHFRC. Compared with the concrete mixed only with steel fiber, the concrete mixed only with polypropylene hybrid fiber and the conventional concrete, the ultimate bonding strength of SPHFRC is correspondingly increased by 9.2%, 20.8% and 26.2% respectively,

收稿日期: 2019-03-14

基金项目: 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2013032/CL)

作者简介: 陕亮(1976—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水工结构、高性能混凝土结构研究。E-mail: robert_shanl@163.com

while the hybrid fiber not only enhances the tensile strength of the concrete around the reinforcement ,but also provides the relevant lateral restraint simultaneously ,thus plays an favorable role in the path of the full process of the bonding failure. The calculation formula for the bonding strength between SPHFRC and the deformed reinforcement proposed herein is clear and definite along with a better adaptability ,thus provides a beneficial exploration to promote the application of the hybrid fiber reinforced concrete. Under the positive hybrid effect ,the hybrid fiber with relevant complementarity can enhance the comprehensive mechanical performance of concrete. This study can provide theoretical support and experimental basis for the corresponding technical regulations concerned.

Keywords: steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete(SPHFRC) ; deformed ribbed-reinforcement; bonding failure; hybrid effect; bonding strength

0 引言

对于钢筋混凝土结构来说，钢筋与混凝土有效结合共同工作的主要原因除了具有相近的线膨胀系数外，还在于混凝土硬化后，它们之间存在着粘结作用^[1]。由于钢筋与混凝土界面传力机理复杂，影响因素众多，以及试验手段的不同和量测技术的差异导致了试验数据分散，因而其研究难度较大发展缓慢，是钢筋混凝土结构基本理论中的难点问题。

混凝土裂缝的开裂、扩展常常是导致钢筋混凝土结构性能降低的主要原因。为了改善混凝土力学性能，研究者在混凝土中添加了钢纤维、聚丙烯纤维等各类纤维。由于混凝土是一种非匀质、多相材料，加入某一种纤维只能显著改善或者加强其某一相的性能，因而为了得到更好的增强效果，进行两种或多种纤维混杂掺入混凝土，是一种十分有益的探索。已有研究表明^[2-5]，复合工程材料钢-聚丙烯混杂纤维混凝土(Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete，简称 SPHFRC)通过叠加效应，将混杂纤维作为混凝土的次增强筋，增强了吸收能量的能力，当混凝土内的拉应力自其界面传递给纤维时，纤维因变形而消耗能量，从而可在不同层次、不同阶段提高混凝土基体的强度和韧性，为解决混凝土的高强度和高延性问题提供了一条有效途径。

目前，国内外对 SPHFRC 与钢筋粘结性能的研究文献还甚少。文献[6]分别将钢纤维、聚丙烯纤维添加在 C50 的高性能混凝土中进行了单端拉拔试验，试验结果表明，单掺体积比 0.5% 的钢纤维对极限粘结强度略有提高，峰值粘结应力对应的滑移有较大的增长；单掺 0.2% 的聚丙烯纤维后极限粘结强度略有降低，峰值粘结应力对应的滑移亦略有减小。文献[7]研究了不同直径的变形钢筋与钢-聚丙烯混杂纤维高性能混凝土的粘结性能，试验结果表明，与普通高性能混凝土相比，掺入的混杂纤维起到了约束与桥

接作用，有利于提高粘结强度；掺入纤维对直径小的钢筋与混凝土的粘结强度的提高幅度更大一些。文献[8]进行了强度等级 C50 以下的粘结性能拉拔试验，试验结果表明，混凝土强度对极限粘结强度的影响最大，钢纤维体积率和长径比影响次之，聚丙烯纤维体积率对极限粘结强度影响最小。作为结构设计的基本问题，粘结特性的研究仍需要更多的系统性试验成果。因此，为了补充和完善纤维混凝土设计规范，推动混杂纤维混凝土的实际应用，为相应技术规程提供理论支持与试验依据，本文开展 SPHFRC、单掺钢纤维混凝土、单掺聚丙烯纤维混凝土与带肋变形钢筋的粘结强度和粘结延性的试验研究，具有重要的意义和价值。

1 试验概况

1.1 试验材料

研究选用上海贝卡尔特一二钢有限公司生产的佳密克丝钢纤维(SF)，呈水溶性胶合排状。聚丙烯纤维(PPF)选用北京中纺纤建科技有限公司生产的凯泰砂浆/混凝土抗裂改性聚丙烯单丝纤维。纤维的主要物理性能由厂家提供，如表 1 所列。变形钢筋采用武汉钢铁厂生产的直径为 20 mm(内径 18 mm 外径 22 mm 肋间距 10 mm)的带肋直钢筋，实测钢筋的力学性能如表 2 所列。

1.2 基准混凝土配合比

混凝土配合比设计参考《纤维混凝土结构技术规程》^[9]与《钢纤维混凝土结构》^[10]中的有关要求，设计 C50 基准混凝土配合比，如表 3 所列。胶凝材料选用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥，水灰比 0.36；细骨料选用细度模数为 2.5 的河砂，砂率为 42%；粗骨料选用级配为 5~20 mm 的灰岩碎石，针片状颗粒含量不大于 5%；外加剂选用聚羧酸 X404 高效减水剂。

1.3 试验因素与水平

SPHFRC 力学性能试验研究表明^[5]，混杂纤维的

表 1 钢纤维和聚丙烯纤维的物理性能

纤维	长度 /mm	直径 /mm	长径比	纤维类型	密度 /g·cm ⁻³	抗拉强度 /MPa	产品型号
SF	30	0.75	40(30/0.75)	端钩形强拉钢丝	7.8	≥1 100	ZP308
	30	0.55	55(30/0.55)		7.8	≥1 100	ZP305
	60	0.75	80(60/0.75)		7.8	≥1 100	RC-80/60
PPF	19	0.03	633(19/0.03)	束状单丝	0.91	≥500	CTA

表 2 变形钢筋力学性能

钢筋类型	屈服荷载 /kN	屈服强度 /MPa	极限荷载 /kN	抗拉强度 /MPa	屈强比	弹性模量 /MPa
带肋直钢筋	108.1	344	163.9	522	0.66	1.9 × 10 ⁵

表 3 基准混凝土配合比 kg/m³

强度	水泥标号	水	水泥	砂子	石子	减水剂	水灰比	砂率/%
C50	P. O. 42.5	175	486	746	1 038	3.89	0.36	42

掺量显著影响基体混凝土的和易性。本文 SPHFRC 与变形钢筋粘结性能试验研究中, 钢纤维体积率为 0.0%、0.4%、0.8%、1.2%, 长径比为 40、55、80; 聚丙烯体积率为 0.00%、0.05%、0.10%、0.15%, 长径比为 633。混杂纤维影响因素试验 27 组, 单掺钢纤维、单掺聚丙烯纤维及不掺纤维的对比试验 13 组, 共计 40 组试件。相应的抗压强度、劈裂抗拉强度和轴心抗拉强度试验同时进行, 其振捣方法与养护条件一致, 在试件龄期 28 d 时进行试验。

1.4 试验方法

目前, 关于粘结性能试验的方法, 国内各行业标准并不统一^[11-13]。本文单端中心拉拔试验在微机控制电液伺服万能试验机(MTS)上进行, 自行设计夹持加载反力架装置, 结合力控制与位移控制的混合控制方式测量整个试验过程, 并自动记录荷载-位移关系的全过程曲线。综合考虑多方因素^[11, 14], 采用尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试件作为粘结锚固性能试验的标准试件, 试件内钢筋的直径 d 为 20 mm, 有效埋置粘结长度 l_a 为 100 mm, 即 $l_a/d = 5$, 两端预留用双面胶隔离混凝土与钢筋的无粘结区, 长度各为 25 mm, 混凝土保护层厚度 c 为 65 mm, 即 $c/d = 3.25$ (见图 1)。

2 试验结果分析

2.1 试验结果与现象分析

本文试验研究中的试件均无横向箍筋, 由于各试件的纤维掺量和长径比不同, 试件的破坏形态亦有所

不同, 但其粘结失效破坏模式与文献[15]中配有箍筋的普通混凝土短锚拉拔试件破坏形态类似, 亦可归纳如下: (1) 混凝土劈裂破坏 (splitting failure, 简称 S 型破坏), 其实质是混凝土的劈裂破坏, 不是钢筋与混凝土的粘结锚固破坏; (2) 劈裂-剪切破坏 (split-shear failure, 简称 S-S 型破坏), 达到极限荷载时混凝土开裂, 随即钢筋被拔出破坏; (3) 钢筋拔出剪切破坏 (shear pull-out failure, 简称 P 型破坏), 钢筋与混凝土之间发生沿钢筋横肋外径圆柱面上的剪切滑移, 直至钢筋肋间混凝土被压碎或剪断, 钢筋屈服而破坏。

粘结破坏模式伴随的试验现象如表 4 所列; 粘结强度由下式根据试验结果计算得到列于表 5, 试验试件破坏形态与相应荷载-自由端滑移曲线如图 2 所示。

$$\tau_{sp\mu} = \frac{F}{\pi d l_a} \quad (1)$$

式中, F 为荷载; d 为钢筋直径; l_a 为有效埋置粘结长度。

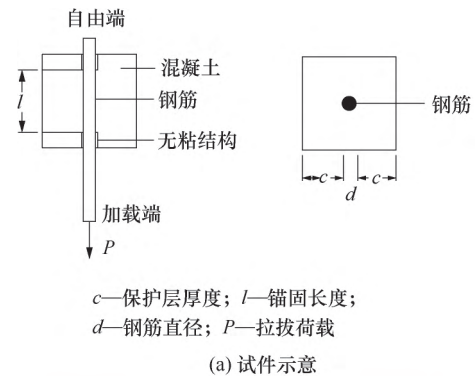


图 1 拔出试件

表 4 粘结破坏试验伴随现象

破坏类型	破坏时的声响	破坏时的形态	荷载-自由端滑移曲线
S型破坏	响亮爆裂声	破碎为2、3块	无下降段
S-S型破坏	较大开裂声	保持整体性、开裂裂缝宽度大	有突降再逐步下降段、无平稳残余段
	闷响开裂声	保持整体性、开裂裂缝宽度逐步变小	有突降再逐步下降段、有平稳残余段
P型破坏	无开裂声	保持整体性、表面裂纹细小	有顺滑逐步下降段、有平稳残余段

2.2 粘结失效破坏模式分析

对比分析试验结果可知,未掺纤维或单掺聚丙烯纤维的拉拔试件,由于未配箍筋,裂缝发展到试件表面,整个试件被劈裂成几块,发生S型破坏,属于钢筋混凝土结构的脆性破坏。而SPHFRC拔出试验虽然未配置箍筋,且当纤维掺量较低时也有SPHFRC发生劈裂,但由于混杂纤维的约束作用,均为裂而不碎。钢纤维掺量为0.4%的试件破坏形式大部分为S-S型破坏,在纤维的桥接作用下,试件在破坏后虽然有明显较宽的一条主裂缝,但仍然保持整体状态未分解。钢纤维掺量为0.8%的试件破坏形式亦大部分为S-S型破坏,但试件在破坏后裂缝宽度明显较0.4%掺量的试件小,混杂纤维限制裂缝进一步扩展降低开裂程度的同时,裂缝细化宽度减小。而钢纤维掺量为1.2%的试件破坏形式均为P型破坏,开裂模式由单一裂纹的开裂模式转化为多条细密裂纹的微观开裂模式,避免了荷载能量的集中释放,使试件有较好的韧性。

表4中的破坏模式表明:随着钢-聚丙烯混杂纤维体积率、长径比的增加,试件的粘结失效破坏模式逐步由S型破坏过渡到S-S型破坏再到P型破坏,即由脆性破坏模式转变为塑性破坏模式。一般都是钢筋达到屈服乃至强化后被“刮犁”式从SPHFRC中拔出,粘结强度已达到极限,说明钢-聚丙烯混杂纤维在提高混凝土强度的同时,对钢筋周围的混凝土有很好的环向约束作用,提高了钢筋混凝土结构的延性。

2.3 粘结强度影响因素

2.3.1 纤维掺量的影响

表5中的极限粘结强度试验结果表明:(1)单掺聚丙烯纤维时,粘结强度随聚丙烯纤维体积率(0.05%、0.10%、0.15%)的增加,有先增加再减小的趋势,比普通混凝土粘结强度提高4.4%;(2)单

掺钢纤维时,粘结强度随钢纤维体积率(0.4%、0.8%、1.2%)的增加而增长,比普通混凝土粘结强度提高15.5%;(3)对于SPHFRC,相同聚丙烯纤维体积率条件下,粘结强度随钢纤维体积率的增加有不同程度的提高,比普通混凝土粘结强度提高26.2%,但在 V_{pf} 达到0.15%且 V_{sf} 达到1.2%时,粘结强度有下降趋势;(4)对于SPHFRC,相同钢纤维体积率条件下,粘结强度随聚丙烯纤维体积率的增加有先增加后减小的趋势,在 V_{pf} 为0.15%时最小;(5)与单掺钢纤维混凝土、单掺聚丙烯纤维混凝土、普通混凝土相比,SPHFRC的极限粘结强度相应提高9.2%、20.8%、26.2%。

混杂纤维掺量加大出现强度下降的原因,是因为纤维掺量过大会大大降低混凝土的坍落度,因而影响成型的密实效果以及混杂纤维在基体中的均匀分散,导致纤维间作用的相互干扰,不能够很好地相互协调工作,从而使纤维与基体的粘结削弱,表现在宏观性能上,就是纤维对混凝土的增强作用弱化乃至减小。

2.3.2 钢纤维长径比的影响

在同等钢纤维掺量下,钢纤维长径比为80(60/0.75)的试件破坏状态最好,钢纤维长径比为55(30/0.55)的试件破坏状态次之,钢纤维长径比为40(30/0.75)的试件破坏状态再次之;粘结强度也有相同的规律,由此说明SPHFRC粘结强度与钢纤维的长径比呈正相关关系,钢纤维长径比越大,钢筋与SPHFRC粘结性能越好。这是由于纤维非连续分布存在随机性,钢纤维长径比较大,能够保证纤维与混凝土基体的接触面积多,有更大的概率横跨宏观裂缝将应力传递给两侧混凝土,能有效地阻止裂缝的开展,纤维桥接作用明显,因而提高了其粘结强度,同时又能保证试件的延性。

2.3.3 混杂效应系数

极限粘结强度混杂效应系数列于表6。本文采用比值法^[16]定量分析混杂效应

$$\alpha_{sp} = \frac{\beta_{sp}}{\beta_s \beta_p}; \beta_i = \frac{f_i}{f_m} \quad (2)$$

式中, α_{sp} 为混杂效应系数; β_i 为增强系数; f_i 为纤维混凝土的强度; f_m 为基准混凝土的强度。符号下标说明: s 为单掺钢纤维, p 为单掺聚丙烯纤维, sp 为钢-聚丙烯混杂纤维。当 $\alpha_{sp} \geq 1$ 时为正混杂效应, $\alpha_{sp} \leq 1$ 时为负混杂效应,通过混杂效应系数可以非常方便地探讨纤维特征值对基体混凝土性能的影响。

由表6可知:(1)在所有试验范围内($V_{sf}=0.4\% \sim$

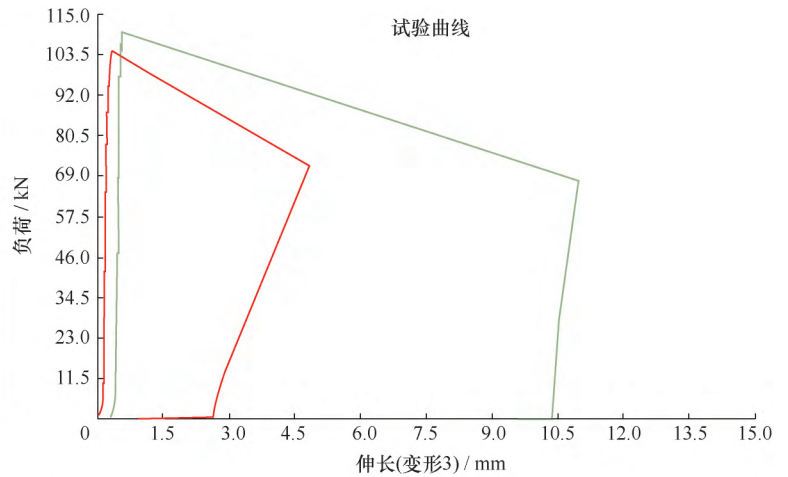
表 5 强度试验值

纤维组份			抗压强度	劈拉强度	轴拉强度	钢筋应力	极限粘结强度	$R_{sp/nc}$	破坏模式
NC(SF0. 0% , PPF0. 00%)			49. 36	3. 27	3. 25	338	16. 88	1. 00	S 型
—	PPF0. 05%	—	52. 43	3. 47	3. 29	341	17. 07	1. 01	S 型
—	PPF0. 10%	—	50. 36	3. 59	3. 22	<u>353</u>	17. 63	1. 04	S 型
—	PPF0. 15%	—	46. 75	3. 17	3. 14	312	15. 62	0. 93	S 型
SF0. 4%	—	R40	55. 78	3. 57	4. 19	<u>379</u>	18. 95	1. 12	S-S 型
	—	R55	52. 46	3. 50	3. 76	<u>362</u>	18. 10	1. 07	S-S 型
	—	R80	55. 56	3. 72	3. 92	<u>377</u>	18. 86	1. 12	S-S 型
SF0. 8%	—	R40	58. 96	3. 69	3. 86	<u>380</u>	19. 02	1. 13	S-S 型
	—	R55	59. 72	3. 77	4. 32	<u>367</u>	18. 36	1. 09	S-S 型
	—	R80	56. 24	3. 80	3. 87	<u>386</u>	19. 30	1. 14	S-S 型
SF1. 2%	—	R40	51. 62	3. 56	3. 72	<u>403</u>	20. 15	1. 19	P 型
	—	R55	60. 56	3. 73	4. 01	<u>381</u>	19. 07	1. 13	P 型
	—	R80	57. 57	3. 60	3. 74	<u>390</u>	19. 50	1. 16	P 型
SF0. 4%	PPF0. 05%	R40	55. 93	3. 71	4. 05	<u>385</u>	19. 24	1. 14	S-S 型
		R55	59. 94	3. 70	4. 53	<u>400</u>	19. 99	1. 18	S-S 型
		R80	57. 68	3. 77	4. 07	<u>404</u>	20. 22	1. 20	S-S 型
	PPF0. 10%	R40	57. 60	3. 75	3. 87	<u>382</u>	19. 10	1. 13	S-S 型
		R55	58. 02	4. 01	4. 10	<u>408</u>	20. 39	1. 21	S-S 型
		R80	62. 47	3. 97	4. 55	<u>403</u>	20. 15	1. 19	S-S 型
	PPF0. 15%	R40	61. 60	3. 75	4. 29	<u>380</u>	19. 00	1. 13	S-S 型
		R55	58. 26	3. 81	4. 09	<u>387</u>	19. 35	1. 15	S-S 型
		R80	63. 19	4. 18	4. 11	<u>385</u>	19. 26	1. 14	S-S 型
SF0. 8%	PPF0. 05%	R40	62. 42	3. 84	4. 30	<u>405</u>	20. 23	1. 20	S-S 型
		R55	62. 79	4. 22	4. 83	<u>406</u>	20. 32	1. 20	S-S 型
		R80	60. 90	4. 46	4. 40	<u>409</u>	20. 45	1. 21	S-S 型
	PPF0. 10%	R40	55. 25	3. 83	4. 09	<u>388</u>	19. 39	1. 15	S-S 型
		R55	61. 34	3. 79	4. 02	<u>409</u>	20. 46	1. 21	S-S 型
		R80	62. 88	4. 34	4. 41	<u>420</u>	21. 01	1. 24	S-S 型
	PPF0. 15%	R40	59. 77	3. 62	3. 84	<u>416</u>	20. 80	1. 23	S-S 型
		R55	51. 58	3. 77	4. 01	<u>401</u>	20. 05	1. 19	P 型
		R80	59. 98	3. 90	4. 28	<u>420</u>	20. 98	1. 24	P 型
SF1. 2%	PPF0. 05%	R40	52. 18	3. 35	3. 68	<u>421</u>	21. 07	1. 25	P 型
		R55	49. 64	3. 23	3. 66	<u>421</u>	21. 03	1. 25	P 型
		R80	49. 59	3. 27	3. 65	<u>422</u>	21. 11	1. 25	P 型
	PPF0. 10%	R40	52. 74	3. 52	3. 69	404	20. 18	1. 20	P 型
		R55	52. 94	3. 49	3. 73	<u>415</u>	20. 73	1. 23	P 型
		R80	54. 50	3. 59	3. 85	<u>426</u>	21. 30	1. 26	P 型
	PPF0. 15%	R40	52. 82	3. 78	3. 79	<u>413</u>	20. 64	1. 22	P 型
		R55	54. 60	3. 57	3. 75	<u>383</u>	19. 17	1. 14	P 型
		R80	58. 18	3. 92	4. 01	<u>395</u>	19. 76	1. 17	P 型

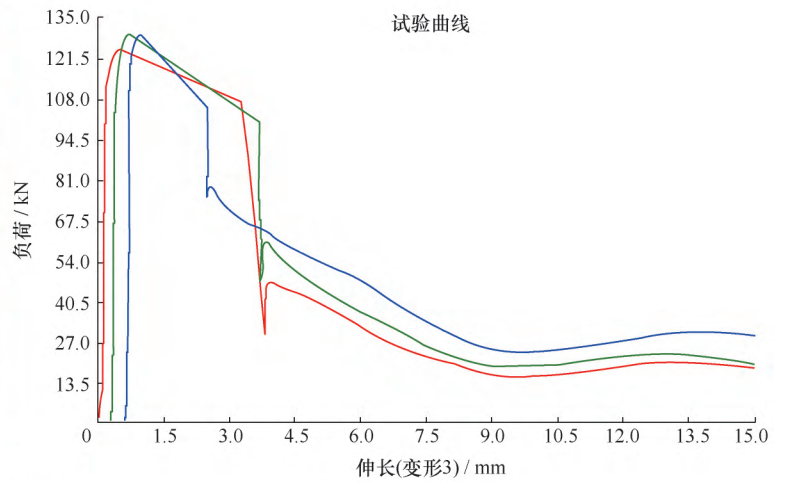
注: 表中 $R_{sp/nc}$ 为纤维混凝土与普通混凝土(NC) 极限粘结强度比; 钢筋应力超过钢筋屈服强度 344 MPa 的以下划线标出

1. 2% , $V_{pf} = 0. 05\% \sim 0. 15\%$) , 除一些个别组外, SPHFRC 的粘结强度基本表现出了正的混杂效应;
(2) 当 V_{pf} 为 0. 05% 时, 聚丙烯纤维的增强系数 $\beta =$

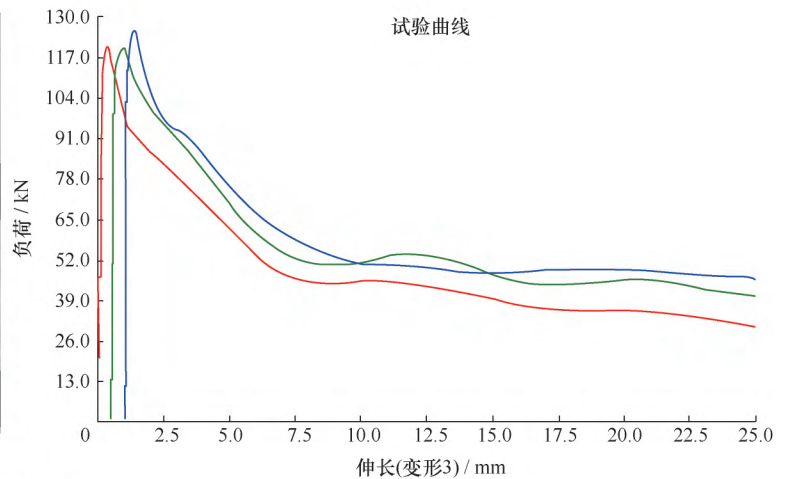
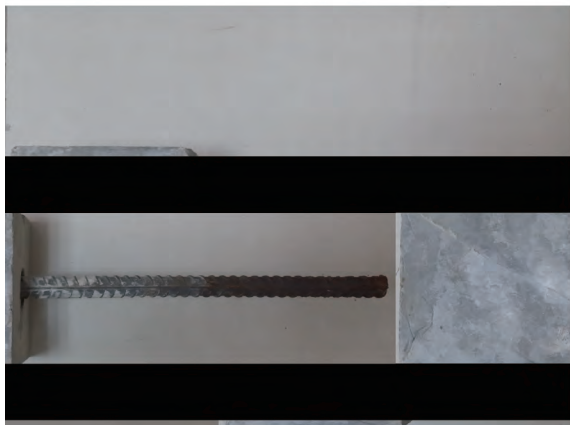
1. 01 > 1 , SPHFRC 的混杂效应系数 α 随钢纤维体积率的增大而增大; 当 V_{pf} 为 0. 10% 时, 聚丙烯纤维的增强系数 $\beta = 1. 04 > 1$, SPHFRC 的混杂效应系数 α 有



(a) S型破坏



(b) S-S型破坏



(c) P型破坏

注: 右侧试验曲线仅示意每种破坏形态对应的曲线形式, 不代表具体数值

图2 试验时试件破坏形态与相应荷载-自由端滑移曲线示意

随钢纤维体积率增大而减小的趋势; 当 V_{pf} 为 0.15% 时, 聚丙烯纤维的增强系数 $\beta = 0.93 < 1$, SPHFRC 的混杂效应系数 α 有随钢纤维体积率增大而减小的趋势, 由此说明钢纤维的体积率选取 0.8% 已较适宜;

(3) 当 V_{sf} 分别为 0.4%、0.8%、1.2% 时, 聚丙烯纤维的增强系数 β 在体积率为 0.15% 时普遍最低, 表明聚丙烯纤维的体积率不宜超过 0.10%。因此综合混凝土工作性能、基本力学性能以及经济效益, 本文

表 6 粘结强度混杂效应系数

V_{pf} 值 / %	$V_{sf} = 0.00\%$		$V_{sf} = 0.40\%$						$V_{sf} = 0.80\%$						$V_{sf} = 1.20\%$					
			R40C		R55C		R80C		R40C		R55C		R80C		R40C		R55C		R80C	
	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}	β_{sp}	α_{sp}
0.00			$\beta_s = 1.12$		$\beta_s = 1.07$		$\beta_s = 1.12$		$\beta_s = 1.13$		$\beta_s = 1.09$		$\beta_s = 1.14$		$\beta_s = 1.19$		$\beta_s = 1.13$		$\beta_s = 1.16$	
0.05	$\beta_p = 1.01$	1.14	1.00	1.18	1.09	1.20	1.06	1.20	1.05	1.20	1.09	1.21	1.05	1.25	1.03	1.25	1.09	1.25	1.07	1.07
0.10	$\beta_p = 1.04$	1.13	0.97	1.21	1.08	1.19	1.02	1.15	0.98	1.21	1.07	1.24	1.04	1.20	0.96	1.23	1.04	1.26	1.05	1.05
0.15	$\beta_p = 0.93$	1.13	1.08	1.15	1.16	1.14	1.10	1.23	1.18	1.19	1.18	1.24	1.17	1.22	1.11	1.14	1.09	1.17	1.10	1.10

SPHFRC 中，以选择体积率为 0.8%、长径比为 80 的钢纤维，与体积率为 0.10% 的聚丙烯纤维进行混杂为宜。

2.4 粘结强度计算式

本文基于试验数据，根据复合材料力学混合定律建立 SPHFRC 的粘结强度计算公式。参照《纤维混凝土结构技术规程》^[9]，提出如下两种 SPHFRC 强度计算公式，分别为不考虑或考虑纤维混交互作用强度影响系数的计算式

$$\tau_{sp\mu} = \tau_u (1 + \alpha\lambda_{sf} + \beta\lambda_{pf})$$

或 $\tau_{sp\mu} = \tau_u (1 + \alpha\lambda_{sf} + \beta\lambda_{pf} + \gamma\lambda_{sf}\lambda_{pf})$ (3)

式中， $\tau_{sp\mu}$ 、 τ_u 为混杂纤维混凝土和基准普通混凝土与变形钢筋的粘结强度值； α 、 β 、 γ 为纤维特征值影响系数， $\lambda_{sf} = v_{sf}l_{sf}/d_{sf}$ ， $\lambda_{pf} = v_{pf}l_{pf}/d_{pf}$ 。

采用 DATAFIT 软件对表 5 中的强度试验实测数据进行回归分析，所得强度计算式列于表 7 中，该式满足当纤维掺量为 0% 时与普通混凝土粘结强度相衔接，适用范围为 $v_{sf} \in [0.0\%, 1.2\%]$ 且 $v_{pf} \in [0.00\%, 0.15\%]$ 。

文献[17]中给出的普通混凝土与钢筋粘结的公式如下

$$\tau_u = \left(0.82 + 0.9 \frac{d}{l_a}\right) \left(1.9 + 0.8 \frac{c}{d} + 20 \frac{A_{sv}}{cS_{sv}}\right) f_{ts}$$
 (4)

根据试验结果拟合，提出的 SPHFRC 与变形钢筋的粘结强度计算公式

$$\tau_{sp\mu} = \tau_u (1 + 0.217\lambda_{sf} + 0.148\lambda_{pf})$$
 (5)

将式(4)代入到式(5)中，得

表 7 SPHFRC 粘结强度计算式

项 目	强度计算式	判断系数 R^2	拟合效果
粘结强度	$\tau_{sp\mu} = \tau_u (1 + 0.217\lambda_{sf} + 0.148\lambda_{pf})$	0.804	较好
	$\tau_{sp\mu} = \tau_u (1 + 0.209\lambda_{sf} + 0.154\lambda_{pf} + 0.016\lambda_{sf}\lambda_{pf})$	0.805	较好
SPHFRC 劈裂抗拉强度 ^[5]	$f_{sp\mu} = f_{ts} (1 + 0.219\lambda_{sf} + 0.166\lambda_{pf})$	0.857	良好
	$f_{sp\mu} = f_{ts} (1 + 0.203\lambda_{sf} + 0.138\lambda_{pf} + 0.089\lambda_{sf}\lambda_{pf})$	0.867	良好

$$\tau_{sp\mu} = \left(0.82 + 0.9 \frac{d}{l_a}\right) \left(1.9 + 0.8 \frac{c}{d} + 20 \frac{A_{sv}}{cS_{sv}}\right) f_{ts} \times (1 + 0.217\lambda_{sf} + 0.148\lambda_{pf})$$
 (6)

表 8 中根据试验结果拟合，提出的 SPHFRC 的劈裂抗拉强度计算公式

$$f_{sp\mu} = f_{ts} (1 + 0.219\lambda_{sf} + 0.166\lambda_{pf})$$
 (7)

比较(6)式与(7)式的纤维特征值影响系数差别极小，即上式可表示为

$$\tau_{sp\mu} = \left(0.82 + 0.9 \frac{d}{l_a}\right) \times \left(1.9 + 0.8 \frac{c}{d} + 20 \frac{A_{sv}}{cS_{sv}}\right) f_{sp\mu}$$
 (8)

综上所述，根据试验资料的统计分析，同时为使 SPHFRC 的粘结强度公式与国内普通混凝土的粘结强度公式相衔接^[18]，仍可采用文献[17]我国粘结锚固专题组提出的公式结构，仅在公式中用 SPHFRC 劈裂抗拉强度代替普通混凝土劈裂抗拉强度即可为 SPHFRC 的粘结强度计算公式。钢纤维、聚丙烯纤维以及纤维交互作用在 $f_{sp\mu}$ 中已得到体现。

2.5 粘结强度与混凝土强度关系式

粘结强度与混凝土基本力学强度建立的关系简单明确适用性好，为国际上广泛采用^[19-20]。同时试验结果表明，SPHFRC 与变形钢筋粘结强度的变化规律与 SPHFRC 基本强度的变化规律相同，表现出了良好的相关性。因此，根据试验实测值统计分析，亦可采用幂函数表达式反映 SPHFRC 粘结强度 $\tau_{sp\mu}$ 与 SPHFRC 立方体抗压强度 $f_{sp\mu}$ 、劈裂抗拉强度 $f_{sp\mu}$ 、轴心抗拉强度 $f_{sp\mu}$ 之间的关系

$$\tau_{sp\mu} = 2.65f_{sp\mu}^{\frac{1}{2}}$$
 (9)

$$\tau_{sp\mu} = 5.287f_{sp\mu}$$
 (10)

$$\tau_{sp\mu} = 4.896f_{sp\mu}$$
 (11)

整体绝对误差 IAE 分别为 1.86%、3.48%、4.31%，拉拔粘结强度的实测值与按公式计算所得的计算值比值的变异系数 δ 分别为 0.026、0.043、0.053，公式的符合性良好。上述计

算公式与普通混凝土的相应计算公式衔接,物理概念清楚,可供进行 SPHFRC 结构设计时参考。

3 结 论

(1) SPHFRC 与变形钢筋之间的粘结强度与 SPHFRC 的抗拉强度成正比,混杂掺入钢纤维和聚丙烯纤维,对混凝土起到了增强增韧的作用,也相应提高了与钢筋的粘结强度,与单掺钢纤维混凝土、单掺聚丙烯纤维混凝土、普通混凝土相比,SPHFRC 的极限粘结强度相应提高 9.2%、20.8%、26.2%。

(2) 对于 SPHFRC 与钢筋的粘结破坏标准应采用强度和延性双重的判别条件。混杂纤维的掺入将粘结破坏转变为显著的塑性破坏,对保持后期粘结强度,改善结构延性有明显作用,从而可大大提高粘结锚固可靠度。

(3) 本文所建议的 SPHFRC 与钢筋粘结强度计算公式,反映了 SPHFRC 本身的抗拉特性对粘结强度的影响,与现行的粘结强度计算式衔接,关系明确清晰,适用性好。

参考文献:

[1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[2] QIAN C X, STROEVEN P. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1): 63-69.

[3] YAO W, LI J. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction[J]. Cement and Concrete Research, 2003(33): 27-30.

[4] SONG P S, WU J C. Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19: 1-9.

[5] 陕亮,张亮. 混杂钢-聚丙烯纤维混凝土的试验研究与强度计算[J]. 长江科学院学报, 2015, 32(12): 114-119.

[6] 高向玲. 高性能混凝土与钢筋粘结性能的试验研究及数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2003.

[7] GANESAN N. Bond stress slip response of bars embedded in hybrid fibre reinforced high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 108-115.

[8] 徐礼华,陈平. 钢-聚丙烯纤维混凝土与变形钢筋黏结性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 1-8.

[9] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土结构技术规程: CECS 38: 2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.

[10] 赵国藩,彭少民,黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[11] 中华人民共和国国家标准. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[12] 中国工程建设标准化协会. 钢纤维混凝土试验方法: CECS 13: 89[S]. 北京: 中国计划出版社, 1989.

[13] 中华人民共和国电力行业标准. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[14] 高丹盈,谢丽,朱海堂. 钢纤维高强混凝土与钢筋的粘结性能试验研究[J]. 建筑科学, 2004, 20(3): 56-60.

[15] 徐有邻,沈文都,汪洪. 钢筋混凝土粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 26-37.

[16] 孙海燕,何真,龚爱民. 混杂纤维对混凝土力学及抗裂性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2009(2): 48-51.

[17] 粘结锚固专题研究组. 钢筋混凝土粘结锚固的研究及设计建议[J]. 建筑结构, 1986(4): 2-5.

[18] 章文纲,程铁生. 钢纤维混凝土与钢筋粘结锚固性能的研究[J]. 工业建筑, 1989(10): 9-14.

[19] 李方元,赵人达. C80 高强混凝土与变形钢筋的粘结滑移试验[J]. 同济大学学报, 2003, 31(6): 714-718.

[20] HARAJI M H, MABSOUT M E. Evaluation of bond strength of steel reinforcing bars in plain and fiber-reinforced concrete[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(4): 509-553.

(责任编辑 郭利娜)