

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.018

BFRP 筋与混杂钢纤维超高性能混凝土黏结性能分析

范小春¹, 郭浩宇¹, 张 澳², 张 浩³

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中建壹品投资发展有限公司, 湖北 武汉 430075;
3. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430061)

摘要: 为研究玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)筋与混杂钢纤维超高性能混凝土(UHPC)的黏结性能,采用拉拔试验对 BFRP 筋与混杂钢纤维 UHPC 的黏结性能进行了试验研究,分析了回收轮胎钢纤维(RTSF)掺量、UHPC 保护层厚度、UHPC 龄期及不同纤维掺入比例对 BFRP 筋-UHPC 结构黏结破坏模式、黏结滑移响应和黏结强度的影响。结果表明:BFRP 筋-UHPC 结构有拔出破坏、劈裂破坏和拔出且劈裂破坏 3 种黏结破坏形态;BFRP 筋-UHPC 结构的极限黏结强度随着 UHPC 保护层厚度、UHPC 龄期的增大而增大,且 RTSF 掺量由 0% 提升至 3% 时极限黏结强度提升了 42.3%,但随着 RTSF 掺量的增大提升效果逐渐减弱。基于试验结果提出了 BFRP 筋-UHPC 结构的黏结滑移本构模型,模型模拟曲线与试验曲线吻合较好。

关键词: BFRP 筋;超高性能混凝土;钢纤维;拉拔试验;黏结滑移曲线

中图分类号:TU375 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2025)05-0154-08

Analysis of bonding property between BFRP bar and hybrid steel fiber ultra-high performance concrete

FAN Xiaochun¹, GUO Haoyu¹, ZHANG Ao², ZHANG Hao³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. China Construction Yipin Investment Development Co., Ltd., Wuhan 430075, China;

3. Wuhan Design & Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology Engineering Group, Wuhan 430061, China)

Abstract: To investigate the bonding property between basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars and hybrid steel fiber ultra-high performance concrete (UHPC), pull-out tests were conducted to study the bonding property of BFRP bars and hybrid steel fiber UHPC. The effects of recycled tire steel fiber (RTSF) content, UHPC protective layer thickness, UHPC age, and different fiber replacement ratios on the bonding failure modes, bond-slip responses, and bonding strength of the BFRP bar-UHPC structure were examined. The results indicate three distinct bonding failure modes for the structure include pull-out failure, splitting failure, and combined pull-out and splitting failure. The ultimate bonding strength of the BFRP bar-UHPC structure gradually increases with greater UHPC protective layer thickness and longer UHPC age. Specifically, increasing the RTSF content from 0% to 3% enhances the ultimate bonding strength by 42.3%. However, a slight decrease in ultimate bonding strength is observed as the RTSF content increases. Based on the experimental results, a bond-slip constitutive model for the BFRP bar-UHPC structure is proposed. The model curves are in good agreement with the experimental curves.

Key words: BFRP bar; ultra-high performance concrete; steel fiber; pull-out test; bond-slip curve

玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)具有很强的抗腐蚀能力,可以有效解决钢筋锈蚀和腐蚀带来的钢筋耐久性问题^[1],同时还有轻质高强、抗疲劳、电绝缘等优点,具有广阔的应用前景^[2-3]。然而 BFRP 筋的弹性模量低、塑性差,因此 BFRP 筋混凝土结构易发生脆性破坏^[4],而超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)具备优异的物理力学性能^[5],可以弥补 BFRP 筋的缺陷,因此

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972271)

作者简介: 范小春(1975—),男,教授,博士,主要从事新型混凝土材料与结构研究。E-mail: fxcfee@126.com

引用本文: 范小春,郭浩宇,张澳,等. BFRP 筋与混杂钢纤维超高性能混凝土黏结性能分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 154-161.

FAN Xiaochun, GUO Haoyu, ZHANG Ao, et al. Analysis of bonding property between BFRP bar and hybrid steel fiber ultra-high performance concrete[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 154-161.

BFRP 筋增强 UHPC 结构(BFRP 筋-UHPC 结构)具有较好的发展潜力。BFRP 筋与 UHPC 的黏结性能是影响 BFRP 筋-UHPC 结构稳定性的关键,必须对其展开深入研究。

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)筋与混凝土的黏结滑行行为可能受到许多因素影响,包括纤维掺量、保护层厚度、混凝土龄期等^[6-10]。掺入适量纤维通常会提高 FRP 筋与纤维增强混凝土(fiber reinforced concrete, FRC)的黏结强度^[11-12]。Pan 等^[10]研究发现,当 UHPC 保护层厚度小于临界保护层厚度(FRP 筋直径的 3~4 倍)时,增加保护层的厚度有助于提高试件的黏结强度,且保护层厚度越小,试件越易发生劈裂破坏。滕晓丹等^[13]发现工程水泥基复合材料的骨料粒径对试件平均黏结应力的影响并不明显,但 BFRP 筋的表面形式对试件黏结性能的影响很大,相较于深螺纹型 BFRP 筋试件,浅螺纹型 BFRP 筋试件的平均黏结应力下降了 83.7%。杨娟等^[14-16]研究发现,回收轮胎钢纤维(recycled tyre steel fibre, RTSF)经过处理后可以以一定比例代替工业钢纤维(industrial steel fibers, ISF)添加到 UHPC 中,RTSF 和废旧橡胶显著提高了 UHPC 的断裂能,约为普通钢纤维增强 UHPC 的 4 倍,且再生钢纤维对 UHPC 的劈裂抗拉强度和静弹性模量的提高效果均优于普通钢纤维^[14];在 UHPC 中使用 RTSF 具有显著的成本优势和环境效益,这种 UHPC 有助于为建筑行业开发新的、更可持续的应用场景^[17-19]。总体来说,目前关于 BFRP 筋与混杂钢纤维 UHPC 黏结性能的研究还较少,且基于废旧轮胎废物利用的绿色建筑理念^[20],有必要对 BFRP 筋与混杂钢纤维 UHPC 黏结性能展开研究,为此本文通过拉拔试验分析 BFRP 筋与混杂钢纤维 UHPC 黏结性能,并提出了能够描述 BFRP 筋-UHPC 结构黏结滑移全过程的三阶段理论模型,以期为建立 BFRP 筋-UHPC 结构黏结滑移本构模型及指导工程应用提供理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

a. UHPC。试验采用 P·O 42.5 型普通硅酸盐水泥作为主要胶凝材料,粗细骨料采用粒径为 40~80 目的天然石英砂,使用表面积大于 400 m²/g 的 S95 级矿粉和硅灰作为掺合料,采用聚羧酸系高效减水剂(减水率大于 35%)改善流动性。使用的 RTSF 来源于回收轮胎,ISF 采用高强度微细镀铜钢纤维,两种纤维的性能见表 1,UHPC 试件的配合比见表 2。

表 1 纤维性能
Table 1 Performance of fibers

纤维类型	长度/mm	直径/mm	密度/(kg/m ³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
RTSF	1.8~23.2	0.28	7 800	2 400	200
ISF	13~15	0.24	7 800	>3 000	200

表 2 UHPC 配合比
Table 2 UHPC mix design

单位:kg/m³
unit:kg/m³

编号	石英砂	水泥	矿粉	硅灰	水	减水剂	RTSF 掺量	ISF 掺量
IU-0-3	1092	780	180	108	177	21	0	234
HU-1-2	1 092	780	180	108	177	21	78	156
HU-2-1	1 092	780	180	108	177	21	156	78
RU-3-0	1 092	780	180	108	177	21	234	0
RU-2-0	1 092	780	180	108	177	21	156	0
RU-1-0	1 092	780	180	108	177	21	78	0
N-0-0	1 092	780	180	108	177	21	0	0

注:配合比编号中,IU 表示 ISF UHPC,HU 表示混杂钢纤维 UHPC,RU 表示 RTSF UHPC,N 表示未掺加钢纤维的 UHPC;字母后数字分别表示 RTSF 和 ISF 掺量(掺量为百分数,“1”表示掺量为 1%)。

b. BFRP 筋。试验使用的带肋 BFRP 筋由嵌入乙烯基酯的连续玄武岩纤维拉挤而成,其肋间距等于筋材直径,肋深度为直径的 0.06 倍,公称直径为 14.0 mm,有效直径为 13.1 mm,极限抗拉强度为 1 237 MPa,弹性模量为 44.7 GPa。

1.2 试验设计

为研究 RTSF 和 ISF 的掺入比例、RTSF 掺量、UHPC 保护层厚度、UHPC 龄期对 BFRP 筋-UHPC 结构黏

结性能的影响,共设计 13 组试验(表 3),每组设置 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件,黏结长度均为 84 mm。RTSF 和 ISF 体积掺量均为 0%、1%、2%、3%,设置 5 种 UHPC 保护层厚度(14、28、42、56 mm 以及中心拉拔)和 3 种 UHPC 龄期(7、14、28 d)。

1.3 试验方法

试验时,用一个由 4 根钢筋和 2 块钢板组装的铁架来充当反力装置,用万能试验机上的夹具进行固定。为确保测量荷载的准确性,在反力装置下底板与拉拔试件之间放置一个高精度轮辐测力传感器,测力范围为 0~300 kN,中间为圆环,BFRP 筋的锚固端可穿过圆环与夹具固定,在测力传感器与试件之间添加一块特制铁板,以防止试件底部因受力面积减少而发生破坏。滑移测量仪器为两个 WBD-50 型百分表式电阻应变位

移传感器,将它们通过特制夹具固定在 BFRP 筋自由端,即可以测量 BFRP 筋自由端的滑移量。试验采用 100 t 电液伺服万能试验机(WAW-1000B),以 0.6 mm/min 的速度控制对 BFRP 筋施加载荷。

BFRP 筋沿黏结长度方向的黏结应力实际上是非均匀分布的,但为了方便计算及考虑到试验所设置的黏结长度均比较短,故假设 BFRP 筋在 UHPC 中的黏结应力是沿黏结长度均匀分布、大小相等的。因此 BFRP 筋与 UHPC 的黏结应力可按式计算:

$$\tau = F / \pi dl$$

(1)

式中: F 为外荷载,kN; τ 为黏结强度,MPa; d 为 BFRP 筋直径,mm; l 为黏结长度,mm。

2 试验结果与分析

2.1 黏结破坏形态

为提高试验的准确性,取 3 组试件结果的平均值进行分析。表 4 为拉拔试验结果,可见 BFRP 筋-UHPC 结构的黏结破坏形态一共有 3 种:①劈裂破坏(图 1),这种破坏形态仅在 ISF 体积掺量为 0%的试验组中出现;②拔出且劈裂破坏(图 2),出现这种破坏形态的试件共有 5 组;③拔出破坏(图 3),这也是大部分试件的黏结破坏形态。

表 4 拉拔试验结果

Table 4 Results of pull-out tests

试件 编号	峰值 荷载/kN	极限黏结 强度/MPa	极限黏结强度 对应的自由 端滑移/mm	破坏形态
1	138.19	32.41	1.03	拔出
2	141.45	31.96	1.20	拔出
3	134.27	31.44	1.20	拔出
4	133.36	30.24	1.02	拔出且劈裂
5	108.73	29.31	1.15	拔出且劈裂
6	95.13	26.73	0.79	劈裂
7	80.71	21.25	0.75	劈裂
8	101.83	27.74	1.03	拔出
9	88.83	24.44	1.28	拔出
10	86.96	24.50	0.86	拔出且劈裂
11	103.19	27.73	0.75	拔出且劈裂
12	111.49	29.71	0.80	拔出且劈裂
13	114.79	30.93	1.04	拔出



图 1 劈裂破坏

Fig. 1 Splitting failure



图 2 拔出且劈裂破坏

Fig. 2 Combined pull-out and splitting failure



图 3 拔出破坏

Fig. 3 Pull-out failure

a. UHPC 保护层厚度的影响。由表 4 可知,在其他条件均相同的情况下,UHPC 保护层厚度为 14、28、42 mm 的试件(试件 10、11、12),其黏结破坏形态为拔出且劈裂,而保护层厚度为 56 mm 的试件(试件 13)则发生拔出破坏,可见随着保护层厚度的增大,试件的黏结破坏形态逐渐改善,由拔出且劈裂破坏转变为拔出破坏。当 UHPC 保护层厚度从 14 mm 增长到 42 mm 时,劈裂裂缝扩展的范围越来越大,裂缝的数量及宽度均逐步增长,这是因为保护层厚度越小,其劈裂裂缝发展到试件边缘的过程越短,能量将从边缘裂缝处得到释放,使得裂缝不再继续扩展;当保护层厚度增长到 56 mm 后,试件只发生拔出破坏,而不发生劈裂破坏,这是因为保护层厚度到达一定程度后,UHPC 不易形成沿筋材纵向的裂缝。

b. UHPC 龄期的影响。从表 4 可知,龄期为 7、14、28 d 的试件(试件 9、8、3)的黏结破坏形态均为拔出破坏,说明 UHPC 龄期对试件的黏结破坏形态影响不大。

c. RTSF 掺量的影响。由表 4 可知,RTSF 掺量为 0 % 和 1 % 的试件(试件 7、6)的黏结破坏形态为劈裂破坏,而掺量为 2 % 和 3 % 的试件(试件 5、4)则发生拔出且劈裂破坏。可见随着 RTSF 掺量的增大,试件的黏结破坏形态得到了显著改善,由劈裂破坏转变为拔出且劈裂破坏。RTSF 掺量为 0 % 的试件被劈裂成块,表现出明显的脆性,而 RTSF 掺量为 1 % 试件虽然也发生了劈裂破坏,但试件并未劈裂成块,此外 RTSF 掺量为 2 % 和 3 % 的试件表面仅出现细微裂缝。这是因为 RTSF 能显著提高 UHPC 的抗拉性能,有效限制 UHPC 裂缝的延伸和开展,改善 UHPC 的延性,随着 RTSF 掺量的增大,这种效果更加明显。

d. 纤维掺入比例的影响。纤维掺入比例是指 RTSF 和 ISF 两种纤维不同掺量的组合,共进行了 4 个水平的掺入比例试验,分别为 RTSF 掺量 0 % 和 ISF 掺量 3 % 组合(试件 1)、RTSF 掺量 1 % 和 ISF 掺量 2 % 组合(试件 2)、RTSF 掺量 2 % 和 ISF 掺量 1 % 组合(试件 3)、RTSF 掺量 3 % 和 ISF 掺量 0 % 组合(试件 4),分别记为 0-3、1-2、2-1、3-0。由表 4 可知,纤维掺入比例为 0-3、1-2、2-1 时试件均发生拔出破坏,掺入比例为 3-0 时试件发生拔出且劈裂破坏,可见随着 RTSF 掺量的增大,试件的黏结破坏形态逐渐由拔出破坏向拔出且劈裂破坏转变,试件的劈裂特征愈加显著。这是由于 RTSF 虽然也能改善 UHPC 的抗裂性,但 RTSF 的长度分布范围较 ISF 更为广泛,RTSF 中的短纤维对 UHPC 抗拉性能的提升较弱,故而 RTSF 对 UHPC 抗拉性能的改善效果要弱于 ISF,所以随着 RTSF 掺量的增大试件更容易产生劈裂。

2.2 黏结滑移曲线

a. UHPC 保护层厚度的影响。图 4 不同 UHPC 保护层厚度试件的黏结滑移曲线,保护层厚度为 14、28、42 mm 时,黏结滑移曲线在下降阶段中止,这是因为它们发生的是拔出且劈裂破坏,在下降阶段时试件出现劈裂,黏结应力骤减致使试验提前结束。保护层厚度为 56 mm 和中心拉拔的试件,上升阶段与下降阶段的曲线均很接近,可见保护层厚度达到 56 mm 后其对试件黏结性能的影响可忽略不计。

b. UHPC 龄期的影响。图 5 为不同 UHPC 龄期试件的黏结滑移曲线,随着 UHPC 龄期的增大,对应的黏结滑移曲线在上升阶段的斜率逐渐增大,在下降阶段其曲线反而更为平缓,在残余阶段则保留了更多的残余黏结应力。这是因为随着 UHPC 龄期的增大,BFRP 筋与 UHPC 的机械咬合力、摩擦力以及化学胶结力均有显著提升,其对试件黏结性能的提升贯穿整个黏结滑移过程。

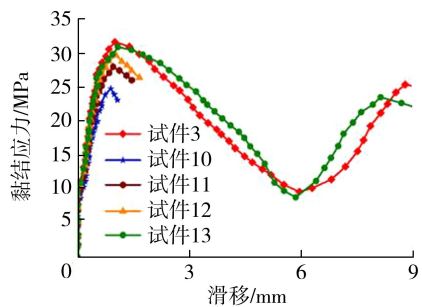


图 4 不同 UHPC 保护层厚度试件的黏结滑移曲线
Fig. 4 Bond-slip curves of specimens with different thicknesses of UHPC protective layers

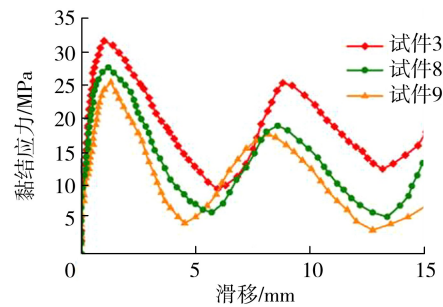


图 5 不同 UHPC 龄期试件的黏结滑移曲线
Fig. 5 Bond-slip curves of specimens at different UHPC curing ages

c. RTSF 掺量的影响。图 6 为不同 RTSF 掺量试件的黏结滑移曲线,RTSF 掺量为 0 %、1 % 时,试件的黏结滑移曲线只有上升阶段,这是因为在 BFRP 筋还未发生剪切破坏时,UHPC 无法抵抗环向拉应力而产生劈

裂,试件的黏结性能并未得到很好地发挥就发生了破坏。RTSF 掺量为 2% 时,其黏结滑移曲线在下降阶段中止,这是由于 UHPC 在 BFRP 筋发生剪切破坏后才产生劈裂裂缝,所以试件的黏结性能已得到很大程度地发挥。当 RTSF 掺量增大到 3% 时,虽然其曲线的峰值与 2% 掺量时接近,但其黏结滑移曲线还有残余阶段,说明 UHPC 直到 BFRP 筋被完全拔出也未发生劈裂,RTSF 对试件的抗拉性能有较大的提升作用。

d. 纤维掺入比例的影响。图 7 为不同纤维掺入比例试件的黏结滑移曲线,除试件 3、试件 4 两组试件因分别发生拔出破坏和拔出且劈裂破坏,曲线在下降阶段即中止,其余试件的黏结滑移曲线还有残余阶段。这说明用一定比例的 RTSF 替代 ISF 对 BFRP 筋与 UHPC 黏结性能的影响很小。

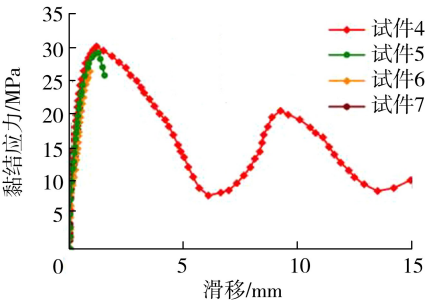


图 6 不同 RTSF 掺量试件的黏结滑移曲线
Fig. 6 Bond-slip curves of specimens with various RTSF contents

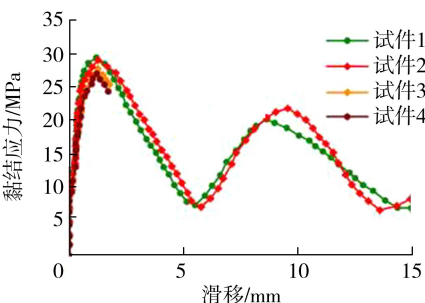


图 7 不同纤维掺入比例试件的黏结滑移曲线
Fig. 7 Bond-slip curves of specimens with different fiber replacement ratios

2.3 黏结强度

a. UHPC 保护层厚度的影响。试验结果表明,UHPC 保护层厚度为 14、28、42、56 mm 以及中心拉拔时,试件的极限黏结强度分别为 24.50、27.73、29.71、30.93、31.44 MPa,即随着保护层厚度的增大,试件的极限黏结强度呈现明显升高的趋势。保护层厚度为 28、42、56 mm 以及中心拉拔的试件,其极限黏结强度分别比保护层厚度为 14 mm 的试件增长了 13.2%、21.3%、26.2%、28.3%。可见 BFRP 筋与 UHPC 的极限黏结强度会随保护层厚度的增大而得到提升,但随着保护层厚度的增大提升的幅度越来越小,到 56 mm 后基本就可以忽略保护层厚度对黏结强度的影响。这是因为 UHPC 保护层厚度较小时,增大保护层厚度可以延长裂缝发展到试件边缘的过程,有效改善 UHPC 对裂缝开展的约束作用,使试件的极限黏结强度得以提升。

b. UHPC 龄期的影响。试验结果表明,7、14、28 d 龄期试件的极限黏结强度分别为 24.44、27.74、31.44 MPa,即随着 UHPC 龄期的增长,试件的极限黏结强度也随之显著提升。相较于龄期为 7 d 的试件,龄期为 14、28 d 的试件极限黏结强度分别提升了 13.5%和 28.6%。可见 BFRP 筋与 UHPC 的极限黏结强度会随 UHPC 龄期的增长而得到显著增强。这是因为随着龄期的增长,UHPC 强度提高,其抗拉性能也得到提升,能有效抑制裂缝的发展,使 BFRP 筋与 UHPC 的机械咬合力得到提升,且 UHPC 强度越大,BFRP 筋与 UHPC 的化学胶结作用也越强,使得 BFRP 筋与 UHPC 的极限黏结强度显著提升。

c. RTSF 掺量的影响。试验结果表明,RTSF 掺量为 0%、1%、2%、3%时,试件极限黏结强度分别为 21.25、26.73、29.31、30.24 MPa,即随着 RTSF 掺量的增大,试件极限黏结强度有明显的提高。RTSF 掺量为 1%、2%、3% 的试件极限黏结强度比 RTSF 掺量为 0%的试件分别提升了 25.8%、37.9%、42.3%。可见 BFRP 筋与 UHPC 的极限黏结强度会随 RTSF 掺量的增大而大幅度提升,但随着 RTSF 掺量的增大提升效果逐渐减弱。RTSF 掺量从 2% 增大到 3% 时,极限黏结强度仅提升了 3.2%,说明对于试件的黏结性能而言,RTSF 的最佳掺量很可能在 2%~3%之间,其原因有二:①适量增加 RTSF 掺量可以让 RTSF 承担一部分拉应力,延缓 UHPC 裂缝的开展,使 BFRP 筋与 UHPC 的黏结界面较迟受损,能有效提高 BFRP 筋与 UHPC 的机械咬合力以及摩擦力,从而使其极限黏结强度得到提高,但过量的 RTSF 会影响 UHPC 的和易性,使其密实度降低,反而使机械咬合力和摩擦力下降;②适量添加 RTSF 可以显著提高 UHPC 的强度,但过量的 RTSF 会因其对 UHPC 和易性的不利影响使 UHPC 的强度反而下降。

d. 纤维掺入比例的影响。试验结果表明,掺入比例为 0-3、1-2、2-1、3-0 的试件极限黏结强度分别为 32.41、31.96、31.44、30.24 MPa。掺入比例为 1-2、2-1、3-0 的试件相较于掺入比例为 0-3 的试件依次降低了 1.4%、3.0%、6.7%,可见在保持纤维总掺量不变时,BFRP 筋与 UHPC 的极限黏结强度会随 RTSF 掺量的增大而小幅度降低。这是因为 ISF 的长度比较接近,而 RTSF 中有不少较短的纤维,这些短纤维对 UHPC 抗拉

性能的提升作用不及 ISF,相较之下 UHPC 内部更易出现微裂缝,使 BFRP 筋与 UHPC 的机械咬合力和摩擦力有些许下降,故而其极限黏结强度也会稍微降低。

3 黏结滑移本构模型

目前,国内广泛使用的黏结滑移本构模型主要有 Malvar 模型、BPE 模型、改进的 BPE 模型、CMR 模型、GFRP/钢绞线复合筋黏结滑移模型等。本文试验得到的黏结滑移曲线表明,已有的黏结滑移本构模型对其进行描述存在以下不足:①Malvar 模型没有反映出残余阶段的黏结滑移情况,且下降阶段也与试验曲线相差较大;②BPE 模型中的水平段在试验曲线中没有得到体现,且 BPE 模型与改进的 BPE 模型默认试件的黏结应力在下降阶段与滑移量存在线性关系,在残余阶段为恒定值,这与试验得到的结果不符;③CMR 模型仅考虑了上升阶段,未能反映后续阶段的黏结滑移关系;④GFRP/钢绞线复合筋黏结滑移本构模型的残余阶段与试验结果较吻合,但其下降阶段也是一条斜率恒定的直线,而试验曲线下降阶段呈非线性。本文试验黏结滑移曲线在上升阶段与各模型拟合曲线均比较相似,且与 CMR 模型的拟合度最高,但由于 CMR 模型拟合曲线并不闭合,因此本文综合得到的试验数据,对 CMR 模型进行了一定的修正,提出最契合 BFRP 筋-UHPC 结构的黏结滑移本构模型(以下简称“本构模型”),如图 8 所示。

3.1 本构模型表达式

如图 8 所示,本构模型的曲线分为上升、下降和残余 3 个阶段,其中上升阶段(OA 段)滑移量比较小,但黏结应力攀升很快,下降阶段(AB 段)曲线开始呈非线性下降,残余阶段(BC 段)黏结强度主要由复合筋与混凝土的摩擦力组成。黏结强度随着滑移量的增大出现循环衰减过程,每个循环的峰值最高点和最低点都比上一个循环有所减小,最后应力降低较慢,滑移增大较快,衰减过程趋于平缓。残余阶段曲线呈正弦波动形态。本构模型的曲线上升、下降和残余 3 个阶段的表达式为

$$\tau = \begin{cases} \tau_u [2 - e^{-\alpha(s-s_u)}]^\beta & s \leq s_u \\ \tau_u / [1 + \omega(s-s_u)^\theta] & s_u < s \leq s_r \\ \tau_r - \gamma[e^{-\xi\eta(s-s_r)} \cos\eta(s-s_r) - 1] + \rho[e^{-\xi\eta(s-s_r)} - 1] & s > s_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ 为黏结应力,MPa; τ_u 、 τ_r 分别为极限黏结应力和残余黏结应力(分别对应于图 8 中 A、B 点处的应力),MPa; s 为 BFRP 筋的滑移,mm; s_u 、 s_r 分别为极限黏结应力处和残余黏结应力处的滑移(分别对应于图 8 中 A、B 点处的滑移),mm; α 、 β 、 ω 、 θ 、 γ 、 ξ 、 η 、 ρ 为待求参数。

3.2 模型验证与参数求解

试验中发生拔出破坏的试件共有 6 组,因此选取这 6 组试件的黏结滑移曲线进行本构模型验证,6 组试件的试验数据见表 5,将表 5 中的数据代入式(2)对黏结滑移曲线进行拟合,就可得到对应拟合参数值和拟合曲线,如表 6 和图 9 所示。

表 5 试验数据

Table 5 Test data

试件编号	τ_u /MPa	τ_r /MPa	s_u /mm	s_r /mm
1	32.41	13.46	1.20	7.52
2	31.96	12.47	1.20	7.11
3	31.44	10.78	1.03	7.38
8	27.74	10.33	1.04	6.52
9	24.44	7.69	1.03	5.18
13	30.93	9.56	1.28	6.53

表 6 拟合参数值

Table 6 Fitting parameters

试件编号	α	β	ω	θ	γ	ξ	η	ρ
1	1.01	0.81	0.01	2.64	11.21	0.22	0.84	8.60
2	0.72	0.51	0.02	2.39	9.88	0.21	0.64	6.71
3	0.59	0.45	0.04	2.04	11.70	0.19	0.82	7.61
8	0.85	0.74	0.06	2.11	8.96	0.12	0.73	-0.75
9	0.68	0.50	0.11	2.20	9.87	0.15	0.79	3.83
13	0.55	0.41	0.10	2.18	20.62	0.36	0.70	21.36
平均值	0.73	0.57	0.056	2.26	12.04	0.21	0.75	7.89

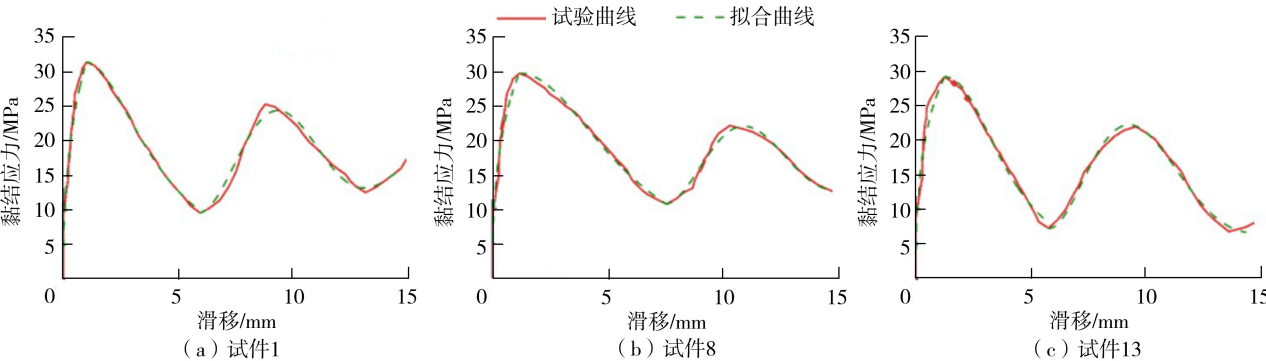


图 9 部分试验曲线与模型拟合曲线

Fig. 9 Partial experimental curves and model fitting curves

由图 9 可以看出,拟合曲线与试验曲线有较高的吻合度,说明本构模型能较准确地反映 BFRP 筋-UHPC 结构的黏结滑移关系。将表 6 中的参数平均值代入式(2)即可得到本构模型的表达式。

4 结 论

a. 本构模型的曲线分为上升、下降和残余 3 个阶段。当 RTSF 掺量增大到 3%时,其黏结滑移曲线仍然具有残余阶段,说明直到 BFRP 筋被完全拔出 UHPC 也未发生劈裂,证明了 RTSF 对试件的抗拉性能有较大的提升作用。

b. BFRP 筋-UHPC 结构的黏结破坏形态包括劈裂破坏、拔出且劈裂破坏、拔出破坏,拔出破坏是大部分试件的黏结破坏形态,二者之间的极限黏结强度随着 UHPC 保护层厚度、UHPC 龄期和 RTSF 掺量的增大逐渐增大,随着纤维掺入比例中 RTSF 掺量的增大逐渐降低。

c. RTSF 对 BFRP 筋与混杂钢纤维 UHPC 黏结性能的增强效果相较于 ISF 仅降低了 6.7%,用 RTSF 部分替代 ISF 来制备 UHPC 是可行的。此外,RTSF 掺量从 2% 增加到 3% 时,极限黏结强度仅提升了 3.2%,RTSF 的最佳体积掺量很可能在 2%~3%之间,若继续提升 RTSF 的掺量反而可能使 BFRP 筋与混杂钢纤维 UHPC 黏结性能降低。

d. 提出的本构模型与试验曲线吻合较好,可为 BFRP 筋与混杂钢纤维 UHPC 黏结性能的研究及工程应用提供理论依据。

参考文献:

[1] 陈红梅,刘玉涛,关纪文. BFRP 筋增强珊瑚混凝土耐久性研究进展[J]. 硅酸盐通报,2021,40(11):3544-3555. (CHEN Hongmei,LIU Yutao,GUAN Jiwen. Research progress on durability of coral concrete reinforced with BFRP bars[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(11):3544-3555. (in Chinese))

[2] 王海涛,陈磊,许国文,等. BFRP 管约束再生混凝土圆柱轴压试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):77-83. (WANG Haitao,CHEN Lei,XU Guowen,et al. Axial compressive experiments of recycled concrete cylinders confined by BFRP tube[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):77-83. (in Chinese))

[3] 吴小波. 玄武岩纤维复合材料波纹板力学性能及其套衬结构性能分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):87-94. (WU Xiaobo. Mechanical properties of basalt fiber composite corrugated plates and analysis of their lining structure performance[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):87-94. (in Chinese))

[4] 范小春,徐伟,陈远程,等. BFRP 筋碱激发混凝土黏结性能试验研究与数值模拟[J]. 硅酸盐通报,2022,41(6):1896-1911. (FAN Xiaochun,XU Wei,CHEN Yuancheng,et al. Experimental study and numericals simulation on bond performance of basalt fiber reinforced polymer bars and alkali activated concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2022,41(6):1896-1911. (in Chinese))

[5] ESTEVAN L, TORRES B, BAEZA F J, et al. Enhancing fire resistance of masonry structures: the potential of ultra high performance concrete (UHPC) [J]. Construction and Building Materials,2024,425:136088.

[6] 尹世平,李雨珊,刘运超. FRP 筋与全珊瑚骨料海水混凝土黏结性能数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报,2023,31(1):210-223. (YIN Shiping,LI Yushan,LIU Yunchao. Numerical simulation of bonding performance between FRP bars and full

coral aggregate seawater concrete[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(1): 210-223. (in Chinese))

[7] 李趁趁,魏非凡,刘超伟,等. 高温后 BFRP 筋与纤维混凝土黏结性能[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(8): 3014-3025. (LI Chenchen, WEI Feifan, LIU Chaowei, et al. Bond performance between BFRP bars and fiber reinforced concrete exposed to high temperature[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(8): 3014-3025. (in Chinese))

[8] 赵军,潘昊瑾,王自柯,等. BFRP 筋与低碱度硫铝酸盐水泥混凝土黏结性能试验[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3513-3528. (ZHAO Jun, PAN Haojin, WANG Zike, et al. Experimental investigations on bonding performance between BFRP bars and low alkalinity sulphoaluminate cement concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(6): 3513-3528. (in Chinese))

[9] 董恒磊,李东风,王代玉. 螺旋缠绕挤压肋 FRP 筋与混凝土间的黏结性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5239-5250. (DONG Henglei, LI Dongfeng, WANG Daiyu. Bond behavior between helically and tightly wound FRP bars and concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5239-5250. (in Chinese))

[10] PAN Rensheng, LIAO Peng, ZOU Jiayao, et al. Experimental investigation on bond performance of helically ribbed GFRP rebar embedded in ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 357: 129295

[11] HUANG Hua, YUAN Yujie, ZHANG Wei, et al. Bond properties between GFRP bars and hybrid fiber-reinforced concrete containing three types of artificial fibers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118857.

[12] DING Yining, NING Xiliang, ZHANG Yulin, et al. Fibers for enhancing of the bond capacity between GFRP rebar and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 303-312.

[13] 滕晓丹,姚淇耀,陆宸宇,等. BFRP 筋与分级粒径河砂 ECC 黏结滑移性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(4): 1264-1275. (TENG Xiaodan, YAO Qiyao, LU Chenyu, et al. Experimental study on bond-slip performance between BFRP bars and ECC with graded particle size river sand[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(4): 1264-1275. (in Chinese))

[14] 杨娟,朋改非,税国双. 再生钢纤维增韧超高性能混凝土的力学性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1949-1956. (YANG Juan, PENG Gaifei, SHUI Guoshuang. Mechanical properties of recycled steel fiber reinforced ultra-high-performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1949-1956. (in Chinese))

[15] ISA M N, PILAKOUTAS K, GUADAGNINI M, et al. Mechanical performance of affordable and eco-efficient ultra-high performance concrete (UHPC) containing recycled tyre steel fibres[J]. Construction and Building Materials, 2020, 255: 119272.

[16] ZIA A, ZHANG P, HOLLY I. Effectiveness of hybrid discarded tire/Industrial steel fibers for improving the sustainability of concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2023, 378: 131226.

[17] SHI Jun, SHEN Jiyang. Engineering properties and sustainability assessment of UHPFRC incorporating recycled tyre steel and polymer fibers as substitutes for manufactured fibers[J]. Construction and Building Materials, 2025, 468: 140440.

[18] 范小春,黄祎晨,张澳,等. BFRP 筋回收轮胎钢纤维混凝土黏结性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(2): 389-397. (FAN Xiaochun, HUANG Yichen, ZHANG Ao, et al. Analysis of bonding properties of recycled tire steel fiber reinforced concrete with BFRP bars[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(2): 389-397. (in Chinese))

[19] ALSAIF A, FARES G, ALHOZAIMY A. Effectiveness of ultra-high-performance concrete containing recycled tire steel fibers and high-volume scoria rock powder as natural pozzolan[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03841.

[20] 范小春,张雯静,梁天福,等. 回收轮胎钢纤维再生骨料混凝土基本力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2331-2340. (FAN Xiaochun, ZHANG Wenjing, LIANG Tianfu, et al. Experimental study on basic mechanical properties of recycled tire steel fiber recycled aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7): 2331-2340. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 09 - 26 编辑:熊水斌)