

氯盐-冻融耦合作用下GFRP筋与纤维自密实混凝土粘结耐久性能

宁喜亮 刘朕钰 李媛媛 尤志国 张振宽 李剑峰

Bond durability between GFRP rebars and fiber reinforced self-compacting concrete under coupled chloride salt and freeze-thaw cycles

NING Xiliang, LIU Zhenyu, LI Yuanyuan, YOU Zhiguo, ZHANG Zhenkuan, LI Jianfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241031.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盐碱和冻融环境下GFRP筋/ECC材料粘结滑移模型

Bond-slip model of GFRP bars/ECC interface in alkaline-saline or freeze-thaw environments

复合材料学报. 2023, 40(5): 2859-2875 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220706.001>

冻融循环对FRP片材-砌块界面粘结性能的影响

Effect of freeze-thaw cycles on bond properties of FRP sheet-brick

复合材料学报. 2022, 39(11): 5275-5286 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220110.003>

BFRP筋与低碱度硫铝酸盐水泥混凝土粘结性能试验

Experimental investigations on bonding performance between BFRP bars and low alkalinity sulphoaluminate cement concrete

复合材料学报. 2023, 40(6): 3513-3528 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220906.001>

高温作用后GFRP筋与海水珊瑚混凝土粘结性能试验研究

Experimental study on bond behavior of GFRP bar and seawater coral aggregate concrete after exposure to high temperatures

复合材料学报. 2023, 40(4): 2224-2239 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.001>

冻融循环对CFRP-烧结粘土砖界面粘结性能影响

Effects of freeze-thaw cycles on interfacial bonding property of CFRP-sintered clay brick

复合材料学报. 2020, 37(9): 2294-2302 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200111.002>

海水浸泡与持续荷载耦合作用下GFRP筋的长期锚固长度

Long-term development length of GFRP bar in concrete under coupling effect of seawater immersion and sustained load

复合材料学报. 2022, 39(11): 5122-5134 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220720.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

氯盐-冻融耦合作用下 GFRP 筋与纤维自密实混凝土粘结耐久性能



分享本文

宁喜亮¹, 刘朕钰¹, 李媛媛^{*1}, 尤志国², 张振宽³, 李剑峰⁴

(1. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 132012; 2. 苏州城市学院 智能制造与智慧交通学院, 苏州 215104; 3. 中建八局第四建设有限公司, 青岛 266100; 4. 中国广核新能源控股有限公司, 哈尔滨 150000)

摘要: 为了研究不同纤维对玻璃纤维增强聚合物 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 筋与混凝土在氯盐-冻融耦合作用下粘结性能的影响, 对 90 个中心拉拔试件进行测试, 主要变化参数为冻融循环次数、纤维种类和纤维掺量。试验结果表明: 在氯盐-冻融循环作用下, 聚丙烯短纤维 (PPFA) 的掺入可以改善混凝土的抗冻性能, 降低钢纤维混凝土与 GFRP 筋之间粘结强度的损失率。单掺聚丙烯长纤维 (PPFB) 和钢纤维 (SF) 均对氯盐-冻融循环作用后 GFRP 筋与混凝土之间的粘结强度有较大提升。混掺 40 kg/m³ 的 SF 和 2 kg/m³ 的 PPFB 后对混凝土力学性能的提升效果最为显著。与未掺纤维的混凝土试件相比, 混掺纤维使氯盐-冻融循环作用后混凝土与 GFRP 筋之间的粘结强度提高了 39.4%。基于本文试验结果, 考虑氯盐-冻融循环作用的影响, 拟合得出粘结-滑移曲线上升段的模型参数, 预测结果与试验结果吻合较好。

关键词: 氯盐; 冻融循环; GFRP 筋; 混杂纤维; 粘结强度; 粘结-滑移曲线

中图分类号: TU377.9; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)09-5189-14

Bond durability between GFRP rebars and fiber reinforced self-compacting concrete under coupled chloride salt and freeze-thaw cycles

NING Xiliang¹, LIU Zhenyu¹, LI Yuanyuan^{*1}, YOU Zhiguo², ZHANG Zhenkuan³, LI Jianfeng⁴

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Institute of Intelligent Manufacturing and Smart Transportation, Suzhou City University, Suzhou 215104, China; 3. The Fourth Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division, Qingdao 266100, China; 4. CGN New Energy Holdings Co., Ltd., Harbin 150000, China)

Abstract: To investigate the influence of various fibers on the bond performance between glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars and concrete under the combined effects of chloride salt and freeze-thaw cycles, pull-out tests were conducted on 90 specimens. The main variables were the number of freeze-thaw cycles, fiber types, and fiber content. The results demonstrate that the addition of polypropylene short fibers (PPFA) enhances the frost resistance of concrete and mitigated bond strength degradation between steel fiber-reinforced concrete and GFRP bars under chloride salt-freeze-thaw conditions. When added individually, both polypropylene long fibers (PPFB) and steel fibers (SF) significantly improve the bond strength between GFRP bars and concrete after exposure to chloride salt-freeze-thaw cycles. The combination of 40 kg/m³ SF and 2 kg/m³ PPFB results in the most notable improvements in the mechanical properties of concrete. Compared to specimens without fibers, the inclusion of fibers increases the bond strength between concrete and GFRP bars by 39.4% after exposure to chloride salt and freeze-thaw

收稿日期: 2024-09-03; 修回日期: 2024-10-08; 录用日期: 2024-10-18; 网络首发时间: 2024-10-31 16:13:33

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241031.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51608100); 吉林省科技厅自然科学基金面上项目 (20230101331JC)

National Natural Science Foundation of China (51608100); Natural Science Foundation of Jilin Provincial Department of Science and Technology (20230101331JC)

通信作者: 李媛媛, 博士, 讲师, 研究方向为地质灾害演变与风险评估 E-mail: yuanyuanl2020@163.com

引用格式: 宁喜亮, 刘朕钰, 李媛媛, 等. 氯盐-冻融耦合作用下 GFRP 筋与纤维自密实混凝土粘结耐久性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(9): 5189-5202.

NING Xiliang, LIU Zhenyu, LI Yuanyuan, et al. Bond durability between GFRP rebars and fiber reinforced self-compacting concrete under coupled chloride salt and freeze-thaw cycles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(9): 5189-5202(in Chinese).

cycles. Based on the experimental results in the present study, the ascending branch is established accounting for the effects of chloride salt and freeze-thaw cycles, and the predicted model corresponds well with the testing curve.

Keywords: chlorine salts; freeze-thaw cycle; GFRP rebars; hybrid fiber; bond strength; bond-slip curve

传统钢筋混凝土结构易受环境因素影响,特别是在海洋环境中,氯离子侵蚀而产生的钢筋锈蚀破坏极为常见^[1]。玻璃纤维增强聚合物 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 筋代替钢筋,被认为是解决混凝土结构钢筋锈蚀问题的有效途径,并在实际工程中取得了显著成效^[2-5]。然而,与钢筋相比, GFRP 筋的弹性模量低且各向异性^[3],使其与混凝土之间的粘结机制更加复杂。在北方沿海严寒地区,结构长期经受冻融循环和氯离子侵蚀的双重作用,导致混凝土材料劣化,严重威胁筋材与混凝土的粘结性能。因此,开展氯盐-冻融耦合作用下 GFRP 筋与混凝土之间粘结退化机制的研究具有重要的现实意义。

国内外学者已对冻融循环作用下 GFRP 筋与混凝土的粘结性能进行了大量试验研究,但关于冻融循环作用对其粘结性能的影响尚未达成一致结论。Fursa 等^[6]对 16 个 GFRP 筋-混凝土中心拉拔试件进行了冻融作用后的粘结试验,发现经历 18 次-40~20℃ 的冻融循环作用后,粘结强度下降了约 50.0%。Shakiba 等^[7]在-18~4℃ 的温度区间进行了 200 次冻融循环作用后,同样对 18 个中心拉拔试件进行粘结试验,发现 GFRP 筋与自密实混凝土 (SCC) 和纤维混凝土 (FRC) 之间的粘结强度分别降低了 1.5% 和 3.6%。吴丽丽等^[8]研究表明,经过 75 次-18~5℃ 冻融循环作用后,工程用水泥基复合材料与 GFRP 筋的粘结强度降低了 14.1%。由于上述研究所选择的温度区间和冻融循环次数不同,导致试验结果存在较大差异。因此,进一步深入探讨冻融循环作用对 GFRP 筋与混凝土粘结性能的影响是十分必要的。

氯盐环境也会加速纤维增强复合材料 (FRP) 筋与混凝土间的粘结性能退化。王磊等^[9]和高傲等^[10]研究了氯盐环境下 FRP 筋与珊瑚混凝土之间的粘结性能。结果表明, FRP 筋与珊瑚混凝土之间的粘结强度随浸泡龄期的增加呈先上升后下降的趋势。Dong 等^[11]对海水环境下 BFRP 筋与海水海砂混凝土的粘结耐久性进行研究,发现浸泡在海水环境下试件的粘结强度持续降低。王月等^[12]研究了氯盐-冻融耦合作用下高性能混凝土的耐久性,结果显示在氯盐-冻融耦合环境下,混凝土的

抗压强度退化速度显著加快。Zhou 等^[13]和 Long 等^[14]研究指出,由于盐溶液的吸湿性,增加了混凝土的含水率,导致其内部结冰增多,产生更大的结冰压,从而加速混凝土强度的下降。相较于单一冻融循环作用,氯盐-冻融耦合作用下混凝土基体的劣化更为严重。目前,针对氯盐环境下 GFRP 筋与混凝土基体之间粘结的退化规律,国内外学者尚未形成一致结论。

近年来,纤维对 FRP 筋与混凝土之间粘结性能的积极影响得到了广泛认可。大量研究表明^[15-17],纤维的掺入能够有效限制混凝土裂缝的扩展,并显著提高 GFRP 筋与混凝土之间的粘结强度和粘结韧性。丁一宁等^[18]通过 18 个中心拉拔试件试验发现, GFRP 筋与 SCC 之间的粘结强度随钢纤维掺量的增加而显著提高。吴丽丽等^[19]研究表明,单掺聚丙烯纤维和钢纤维到 SCC 基体中,能够有效提高 GFRP 筋与 SCC 之间的粘结强度。Ding 等^[17]的研究进一步指出,混掺 30 kg/m³ 钢纤维和 2 kg/m³ 的聚丙烯纤维时, GFRP 筋与混凝土之间的粘结强度较两种纤维单掺时有显著提高。然而,在冻融循环作用下,混掺纤维对 GFRP 筋与 SCC 之间粘结性能影响的研究仍鲜有报道。

FRP 筋与混凝土之间的粘结-滑移本构关系是准确分析 FRP 筋增强混凝土结构的关键前提。国内外学者针对 FRP 筋与混凝土之间粘结-滑移本构关系提出了不同模型。Henin 和 Morcous^[20]利用 BPE 和 CMR 模型对喷砂带肋 GFRP 筋与混凝土的粘结-滑移曲线上升段进行拟合。结果显示, BPE 模型低估了粘结应力,而 CMR 模型与试验结果吻合较好。Liu 等^[21]基于非线性回归模型,综合考虑混凝土抗压强度和纤维体积分数的影响,提出了 BFRP 筋与混凝土之间粘结强度的预测公式。然而,现有模型中缺少考虑冻融循环作用以及纤维单掺或混掺对 GFRP 筋与 SCC 之间粘结性能影响的研究。

为研究不同纤维对氯盐-冻融耦合作用下 GFRP 筋与 SCC 之间粘结性能的影响,本文设计了 90 个中心拉拔试件和 198 个立方体试块,探究了 0、50、100 次冻融循环作用和氯盐耦合作用下,不同种类 (PPFA、PPFB 或 SF) 和不同掺量纤维对

GFRP 筋与 SCC 之间粘结性能的影响；考虑冻融循环作用和不同纤维的影响，对已有 FRP 筋与混凝土粘结-滑移本构模型进行拟合，可为 GFRP 筋在结构工程中的实际应用提供有价值的参考。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

水泥采用吉林市冀东水泥厂 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥；粉煤灰采用吉林市源源热电厂一级袋装粉煤灰，粗骨料采用粒径 5~10 mm 碎石，细骨料采用松花江江砂，减水剂采用中国建筑科学研究院生产的聚羧酸系高效减水剂(减水率约为 30.0%，总氯离子含量小于 0.1%)，纤维采用端部弯钩型钢纤维 (SF) 以及聚丙烯短纤维 (PPFA) 和聚丙烯长纤维 (PPFB)，纤维外观见图 1，纤维详细性能参数见表 1。

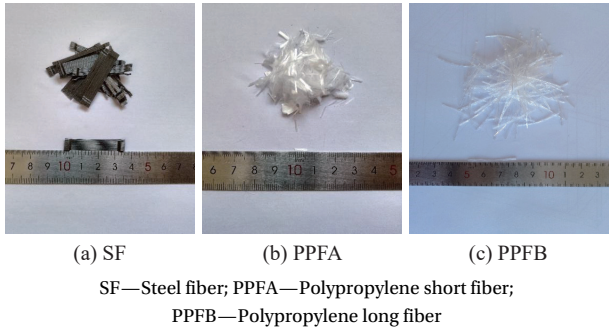


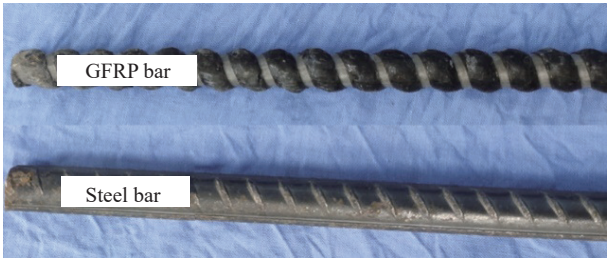
图 1 纤维种类
Fig. 1 Fiber types

本试验所采用的 GFRP 筋为深圳海川工程科技有限公司生产的 GFRP 螺旋肋筋以及国产 HRB400 级月牙肋钢筋，直径为 12 mm，如图 2 所示。GFRP 筋的抗拉强度为 700 MPa，弹性模量为

40 GPa；钢筋的极限抗拉强度为 650 MPa，弹性模量为 200 GPa。

表 1 纤维性能
Table 1 Properties of fibers

Fiber type	Length/ mm	Diameter/ mm	Aspect ratio	Density/ (g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa
SF	35	0.55	65	7.85	>1 150
PPFA	6	0.03	200	0.91	≥450
PPFB	30	0.375	80	0.93	≥490



GFRP—Glass fiber reinforced polymer
图 2 试验筋材
Fig. 2 Test reinforcement

1.2 自密实混凝土配合比设计

自密实混凝土设计强度等级为 C40。本研究参照《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)^[22] 进行新拌混凝土的坍落流动度和 J 形环试验，通过调整高效减水剂的用量，保证新拌纤维混凝土满足自密实混凝土对工作性的要求，得到自密实混凝土的配合比，详见表 2。

1.3 试件设计

依据《纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法》(GB/T 30022—2013)^[23]，并进行了改进(图 3(a))。试件尺寸定为 150 mm×150 mm×150 mm，

表 2 混凝土配合比 (kg/m³)
Table 2 Mix proportion of concrete (kg/m³)

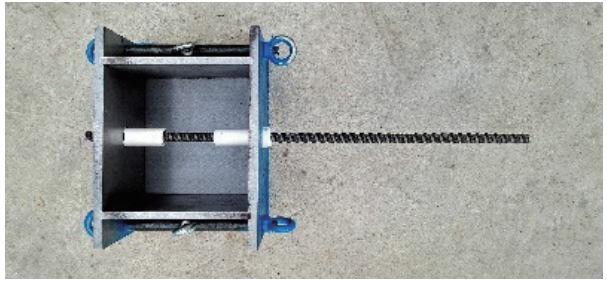
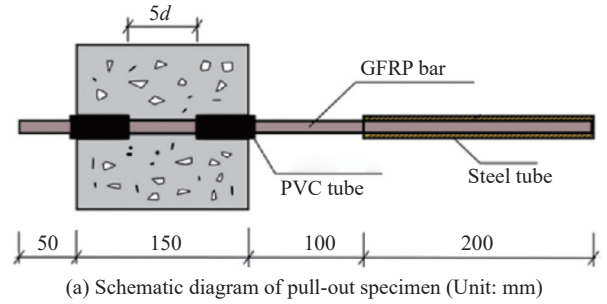
Specimen ID	Cement	Fly ash	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Superplasticizer	SF	PPFA	PPFB
NC	399	171	195	742	724	5.7	0	0	0
PPFA1	399	171	195	742	724	9.35	0	1	0
PPFB2	399	171	195	742	724	5.0	0	0	2
PPFB4	399	171	195	742	724	5.7	0	0	4
SF20	399	171	195	742	724	5.9	20	0	0
SF40	399	171	195	742	724	6.5	40	0	0
SF50	399	171	195	742	724	7.4	50	0	0
SF20PPFA1	399	171	195	742	724	13.0	20	1	0
SF20PPFB2	399	171	195	742	724	5.68	20	0	2
SF40PPFA1	399	171	195	742	724	14.25	40	1	0
SF40PPFB2	399	171	195	742	724	6.2	40	0	2

Notes: NC denotes control group; PPF denotes polypropylene fiber; PPFA1 denotes polypropylene staple fiber blended with 1 kg/m³; PPFB2 denotes polypropylene long fiber blended with 2 kg/m³; SF denotes steel fiber; SF40PPFA1 means mixed with 40 kg/m³ of steel fiber and 1 kg/m³ of polypropylene staple fiber, and other symbols are similar.

粘结区域设置在试件中心，GFRP 筋与混凝土试件之间的粘结长度为 $5d$ (d 为筋材直径)。拉拔试件采用特制钢模板水平方向浇筑 (图 3(b))，24 h 后拆模，试件浸水养护 28 d。本文共制作 90 个中心拉拔试件，变化参数为：纤维种类 (PPFA、PPFB、SF)、筋材种类 (钢筋、GFRP 筋) 以及冻融循环次数 (0 次、50 次、100 次)，详见表 3。在拉拔试件制作的同时，每组浇筑 6 个边长为 100 mm 的立方体试块，相同条件养护，测试冻融循环作用后混凝土的劈裂抗拉强度与抗压强度。

1.4 试验方法

冻融循环试验在步入式环境模拟箱 (HY-BRS-34，上海厚耀试验设备有限公司) 中进行 (图 4)。利用配套的喷淋系统使试件吸水饱和。4 d 后进行冻融循环试验。冻融循环试验参照《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》^[24] 进行。为模拟北方地区严寒环境，将冻融循环温度设定为 $-18\sim-5^{\circ}\text{C}$ 。每个冻融循环周期为 6.5 h，即 -18°C 冷



(b) Test mold
 d —Bar diameter; PVC—Polyvinyl chloride

图 3 拉拔试件示意图及模具

Fig. 3 Schematic diagram of the pull-out specimen and mold

表 3 拉拔试件列表
Table 3 Details of pull-out specimens

Matrix type	Reinforcement type	Diameter/mm	Embedment length/mm	Freeze-thaw cycles	Specimen ID
NC	Rebar	12	$5d$	0	NC-S-D12-0
NC	Rebar	12	$5d$	50	NC-S-D12-50
NC	Rebar	12	$5d$	100	NC-S-D12-100
NC	GFRP	12	$5d$	0	NC-F-D12-0
NC	GFRP	12	$5d$	50	NC-F-D12-50
NC	GFRP	12	$5d$	100	NC-F-D12-100
PPFA1	GFRP	12	$5d$	50	PPFA1-F-D12-50
PPFA1	GFRP	12	$5d$	100	PPFA1-F-D12-100
PPFB2	GFRP	12	$5d$	0	PPFB2-F-D12-0
PPFB2	GFRP	12	$5d$	50	PPFB2-F-D12-50
PPFB2	GFRP	12	$5d$	100	PPFB2-F-D12-100
PPFB4	GFRP	12	$5d$	50	PPFB4-F-D12-50
PPFB4	GFRP	12	$5d$	100	PPFB4-F-D12-100
SF20	GFRP	12	$5d$	50	SF20-F-D12-50
SF20	GFRP	12	$5d$	100	SF20-F-D12-100
SF40	GFRP	12	$5d$	0	SF40-F-D12-0
SF40	GFRP	12	$5d$	50	SF40-F-D12-50
SF40	GFRP	12	$5d$	100	SF40-F-D12-100
SF50	GFRP	12	$5d$	50	SF50-F-D12-50
SF50	GFRP	12	$5d$	100	SF50-F-D12-100
SF20PPFA1	GFRP	12	$5d$	0	SF20PPFA1-F-D12-0
SF20PPFA1	GFRP	12	$5d$	50	SF20PPFA1-F-D12-50
SF20PPFA1	GFRP	12	$5d$	100	SF20PPFA1-F-D12-100
SF40PPFA1	GFRP	12	$5d$	50	SF40PPFA1-F-D12-50
SF40PPFA1	GFRP	12	$5d$	100	SF40PPFA1-F-D12-100
SF20PPFB2	GFRP	12	$5d$	50	SF20PPFB2-F-D12-50
SF20PPFB2	GFRP	12	$5d$	100	SF20PPFB2-F-D12-100
SF40PPFB2	GFRP	12	$5d$	0	SF40PPFB2-F-D12-0
SF40PPFB2	GFRP	12	$5d$	50	SF40PPFB2-F-D12-50
SF40PPFB2	GFRP	12	$5d$	100	SF40PPFB2-F-D12-100

Notes: In the symbol "NC-F-D12-100" presented in the table, "NC" indicates the type of matrix, which is plain concrete; "F" denotes the type of reinforcement, specifically GFRP; "D12" signifies that the diameter of the reinforcement bar is 12 mm. The designation "100" indicates that the specimen has undergone 100 freeze-thaw cycles. The meanings of the other symbols in the specimen number follow a similar convention.

冻 2 h, 5℃ 融化 4 h, 降温过程持续 20 min, 升温持续 10 min。在融化过程中每间隔 1 h, 使用低温喷淋系统喷淋浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液, 时长 1 min, 近似模拟海水环境中氯盐的浓度。

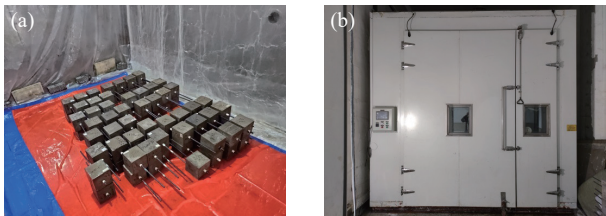


图 4 环境模拟箱 (a) 与箱内试件摆放 (b)

Fig. 4 Environmental simulation chamber (a) and placed specimens in the chamber (b)

中心拉拔试验在 1 000 kN 电液伺服万能试验机 (WAW-E1000C, 济南试金集团有限公司) 上进行, 试验加载装置如图 5 所示。加载方式采用位移控制, 加载速率为 1.0 mm/min, 直至试件破坏。加载架下底板设置穿心球铰以消除因受力筋偏心引起的误差。在拉拔试件的自由端和加载端加装位移计, 测量受力筋与混凝土的相对滑移, 加载架通过拉压力传感器与试验机横梁相连。同时将拉压力传感器和位移计通过静态应变采集仪与计算机相连接, 实现同步数据采集。

2 试验结果及分析

2.1 纤维对冻融循环前后混凝土力学性能的影响

图 6 为不同冻融循环作用前后混凝土的劈裂抗拉强度与抗压强度。由图 6(a) 可看出: 未经冻融循环作用时, 单掺聚丙烯短纤维 (PPFA) 对试件劈裂抗拉强度无明显作用, 这是由于 PPFA 弹性模量较低, 故对混凝土劈裂抗拉强度无正效应。而单掺聚丙烯长纤维 (PPFB)、钢纤维 (SF) 以及混掺 SF 和 PPFB 后, 混凝土的劈裂抗拉强度得到明显提升。纤维的加入可有效限制混凝土内部微裂纹的扩展, 提高了混凝土的劈裂抗拉强度^[25-26]。SF 抗拉强度高, 充分发挥了阻裂的作用, 能够消耗更多的能量, 对混凝土劈裂抗拉强度的提升作用较 PPFB 更明显^[27-28]。

随着冻融循环次数的增加, 混凝土的劈裂抗拉强度逐渐降低。与 NC 试件相比, 掺入纤维可提高冻融循环后混凝土的劈裂抗拉强度。由图 6(a) 可知, 单掺 PPFA 试件的劈裂抗拉强度随冻融循环次数增加逐渐提高。而与经历冻融循环 50 次相比, 混掺纤维试件 SF40PPFA1 在经历 100 次冻融

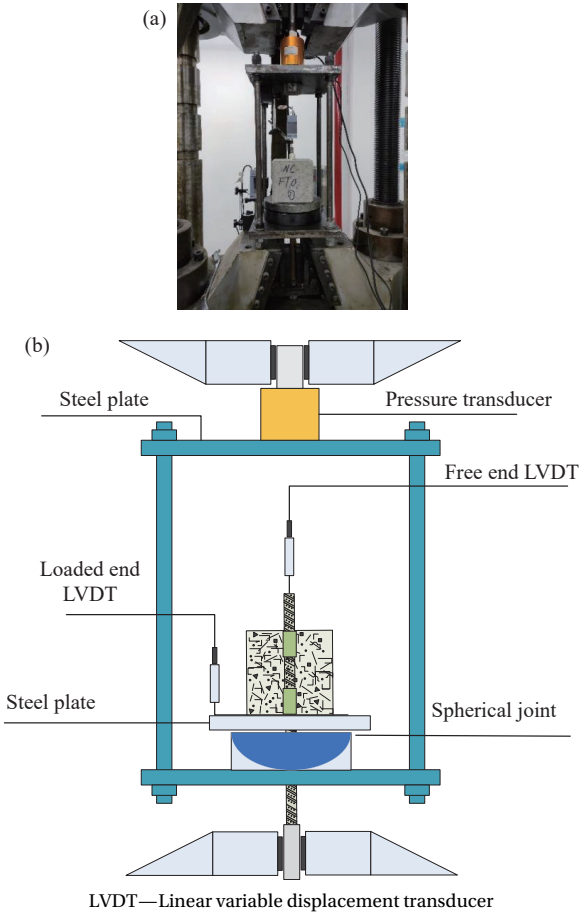


图 5 拉拔试验加载装置 (a) 及示意图 (b)

Fig. 5 Testing setup (a) and schematic diagram (b) of pull-out test

循环作用后, 劈裂抗拉强度几乎没有下降, 这说明聚丙烯短纤维的掺入能够改善混凝土基体的抗冻性能^[29]。分析认为掺入聚丙烯短纤维后, 可以减少水的渗透量和在材料表面汇集部分未冻水, 减小了混凝土内部的静水压力。同时, 掺入聚丙烯短纤维引入了部分封闭的微小气孔, 这也对混凝土的抗冻性能起到了改善作用^[30-32]。

由图 6(b) 可看出, SF20、SF40 与 PPFB2 混掺后, 未经冻融循环作用的混凝土抗压强度明显高于三者混掺前的抗压强度, 体现了不同纤维的正混杂效应^[33]。与未受冻融试件相比, PPFA1 在承受 50 次冻融循环作用后抗压强度提高了 9.4%, 而经历 100 次冻融循环作用后下降了 8.6%。

聚丙烯短纤维能够提升混凝土抗冻性, 但对混凝土力学性能影响不大。而聚丙烯长纤维对混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度均有较高的提升作用, 钢纤维对混凝土劈裂抗拉强度的提升最为显著。当混掺 PPFB2 和 SF40、SF20 后, 发现二者混掺对混凝土的抗压强度表现出显著的正混杂效应。

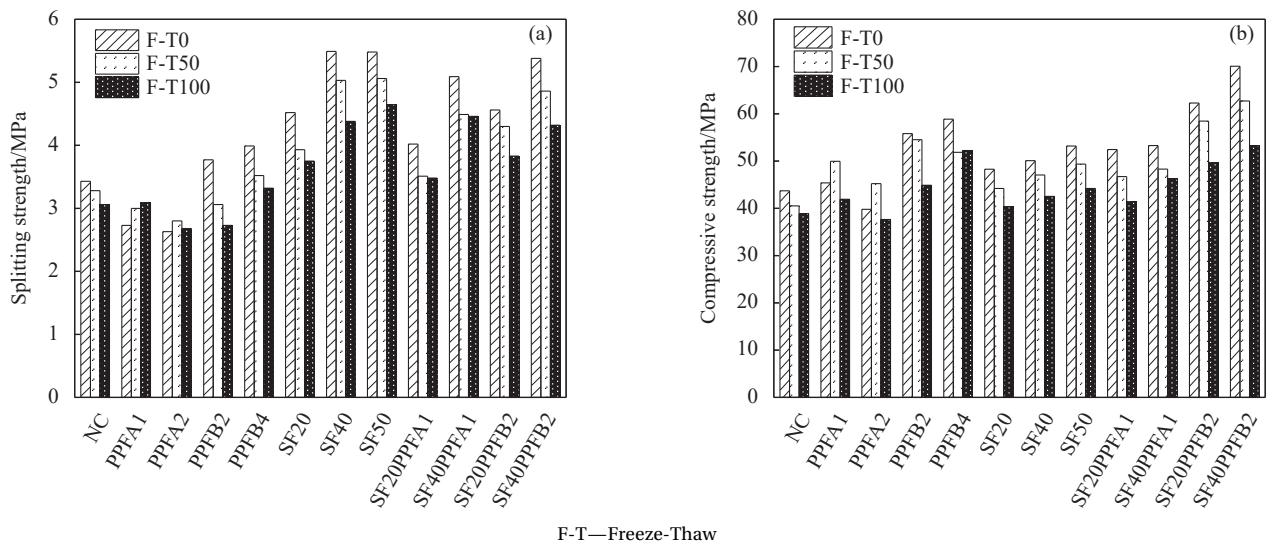


图 6 冻融循环作用前后纤维自密实混凝土的劈裂抗拉强度 (a) 与抗压强度 (b)

Fig. 6 Splitting tensile strength (a) and compressive strength (b) of fiber self-compacting concrete before and after the freeze-thaw cycles

2.2 拉拔试件破坏形态

试验破坏形态主要为拔出破坏，如图 7 所示。发生拔出破坏时，GFRP 筋的轮廓形状磨损严重，混凝土孔壁上带有被磨损的 GFRP 筋纤维片，粘结段残余大量被磨碎的白色树脂粉末，但未观察到 GFRP 筋周围的混凝土有明显损坏。GFRP 筋的外表面树脂和 GFRP 芯杆之间的剪切强度小于混凝土和外表面树脂之间的剪切强度，破坏发生在 FRP 芯杆-树脂界面^[34-35]，如图 8 所示。

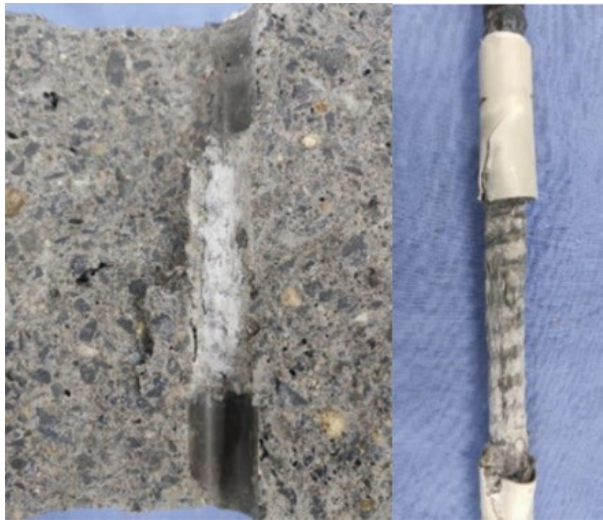


图 7 玻璃纤维增强聚合物 (GFRP) 筋从纤维自密实混凝土拔出破坏形态
Fig. 7 Pull-out failure pattern of GFRP bars from fiber self-compacting concrete

2.3 试件的粘结破坏过程

图 9 为钢筋和 GFRP 筋与混凝土的粘结-滑移曲线的对比。由图 9(a) 可知，在 GFRP 筋拔出过

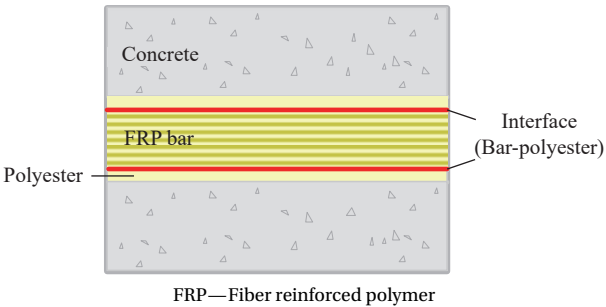


图 8 GFRP 筋从纤维自密实混凝土拔出破坏位置

Fig. 8 Damage location of GFRP bars pulled-out from fiber self-compacting concrete

程中粘结-滑移曲线会发生 3 个阶段的变化：(1) 微滑移阶段。在粘结初期，粘结力由 GFRP 筋与混凝土之间的化学胶合力提供，随着荷载增大，粘结应力也随之增加，而加载端滑移值不增加或增加很小，曲线与纵轴无限接近 (见 OA 段)，一旦 GFRP 筋与混凝土发生相对滑移则化学粘结力消失；(2) 增长阶段。如图 9(a) 中 AB' 段，该阶段粘结强度主要由混凝土与 GFRP 筋之间的机械咬合力承担，随着荷载的增大，GFRP 筋肋与肋前混凝土之间挤压加剧，GFRP 筋对混凝土作用的径向应力逐渐增加，当径向应力超过混凝土抗拉强度后，径向裂缝产生并扩展，所能承受的荷载逐渐趋于极限，此过程中不会出现钢筋试件的塑性变形；(3) 破坏阶段。当外部作用应力超过粘结强度后，GFRP 筋肋部磨损严重，混凝土与磨损的 GFRP 筋之间摩擦力无法承受较高的荷载，因此 GFRP 筋滑移量快速增加，粘结应力逐渐降低^[36]。

由图 9(b) 可看出，GFRP 筋与混凝土粘结-滑移曲线下下降段出现较大波动。主要考虑是粘结区 GFRP 筋不断被磨损造成粘结应力下降，而混凝土咬合齿并没有遭到破坏。因此，随着 GFRP 筋不断被拔出，粘结区外的 GFRP 筋与混凝土不断

接触，形成新的摩阻力与机械咬合作用，致使粘结应力上升。而钢筋的抗剪强度高于混凝土基体，在钢筋被拔出的过程中，粘结界面处的混凝土咬合齿被磨平，使得钢筋与混凝土之间粘结-滑移曲线下下降段波动较小。

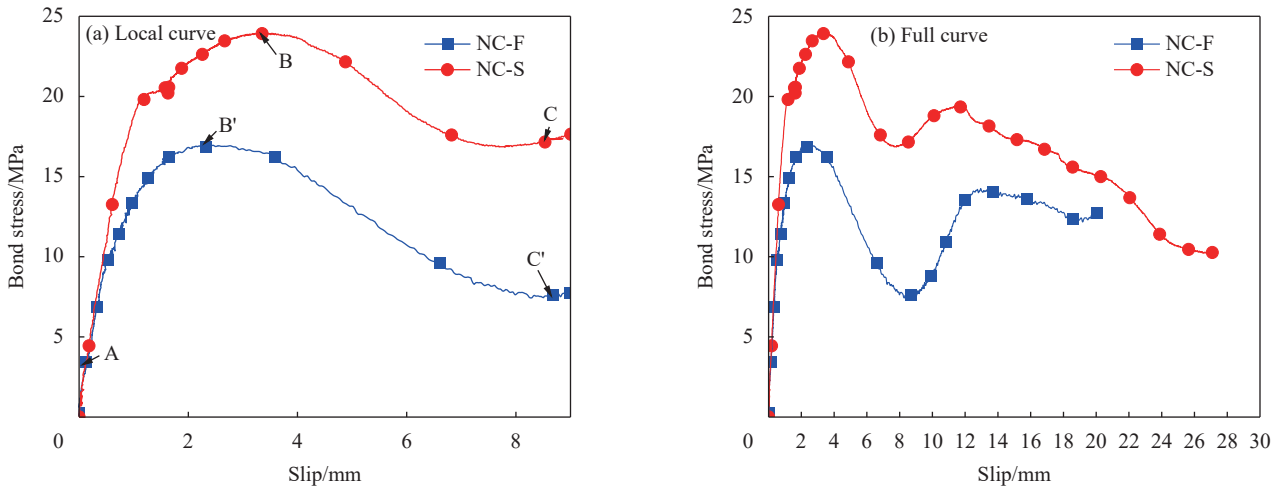


图 9 钢筋和 GFRP 筋与纤维自密实混凝土的粘结-滑移曲线的对比

Fig. 9 Comparison of bond stress-slip curves between steel bars, GFRP bars and fiber self-compacting concrete

2.4 单掺纤维对粘结性能的影响

以冻融循环作用 50 次后 GFRP 筋与不同纤维掺量混凝土粘结试验结果，分析不同纤维对

GFRP 筋与混凝土基体粘结性能的影响。图 10 对比了 GFRP 筋与单掺纤维混凝土基体的粘结-滑移曲线。

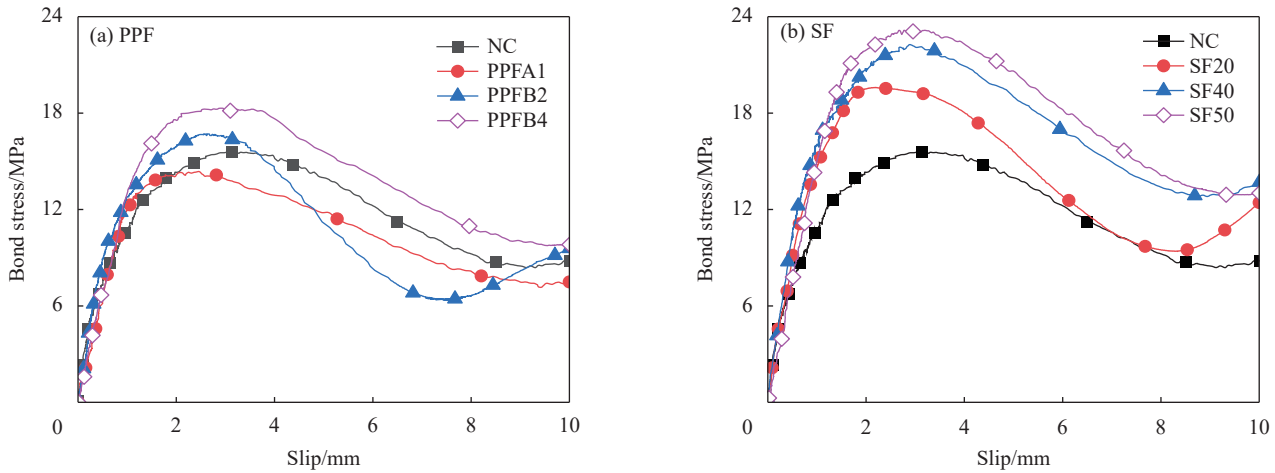


图 10 GFRP 筋在不同纤维自密实混凝土基体的粘结-滑移曲线

Fig. 10 Bond stress-slip curves of GFRP reinforcement in different fiber self-compacting concrete matrix

由图 10 可知，纤维的掺入可提高 GFRP 筋与混凝土基体之间的粘结强度。这主要归因于纤维的桥接作用，跨越裂缝的纤维可有效限制混凝土裂缝的扩展，增强混凝土对 GFRP 筋的握裹，进而提高其粘结强度。PPFB 的掺入可有效提高

GFRP 筋与混凝土基体之间的粘结强度^[37]，但 PPFB2 试件得到的粘结应力-滑移 (τ -s) 曲线下下降较快，可能由于纤维根数少，无法有效桥接裂缝，使得混凝土对 GFRP 筋的约束较低，导致试件加速破坏。而 PPFB4 试件由于纤维掺量较多，跨越裂缝

的纤维根数更多，对混凝土微裂缝桥接作用更显著，表现出更高的粘结强度。其中，GFRP 筋与 SF20、SF40 和 SF50 基体之间的粘结强度分别增加了 25.7%、42.4% 和 48.2%，可以看出钢纤维在混凝土机体内部发挥了更加优异的增韧阻裂作用，增强了混凝土基体对 GFRP 筋的约束，从而提高了粘结强度。而钢纤维掺量由 40 kg/m³ 增加至 50 kg/m³ 时，粘结强度提高了 5.8%，劈裂抗拉强度却未产生变化，说明钢纤维的最优掺量产生在 40~50 kg/m³ 区间，具体数值需要进一步试验得出^[38]。

2.5 混掺纤维对粘结性能的影响

图 11 为钢纤维混凝土中掺入了聚丙烯纤维后

与 GFRP 筋的粘结-滑移曲线。图 11(a) 给出了 PPFB 和 SF40 以及混掺纤维的 τ - s 曲线。与 NC 试件相比，GFRP 筋与 SF40PPFB2 基体粘结强度提高了 25.1%，峰值滑移降低了 0.3%。而相较于 SF40，GFRP 筋与 SF40PPFB2 基体粘结强度降低了 12.3%，峰值滑移提高了 0.3%。混掺后粘结性能出现了较大的退化，未体现出正混杂效应，粘结强度较单掺钢纤维低。分析认为，钢纤维与聚丙烯长纤维在混凝土内部分散不均匀，可能导致混凝土内部引入较多缺陷，当混凝土试件受力时，内部缺陷界面优先破坏，使得混掺纤维后的粘结强度不及单掺钢纤维时的粘结强度^[39]。

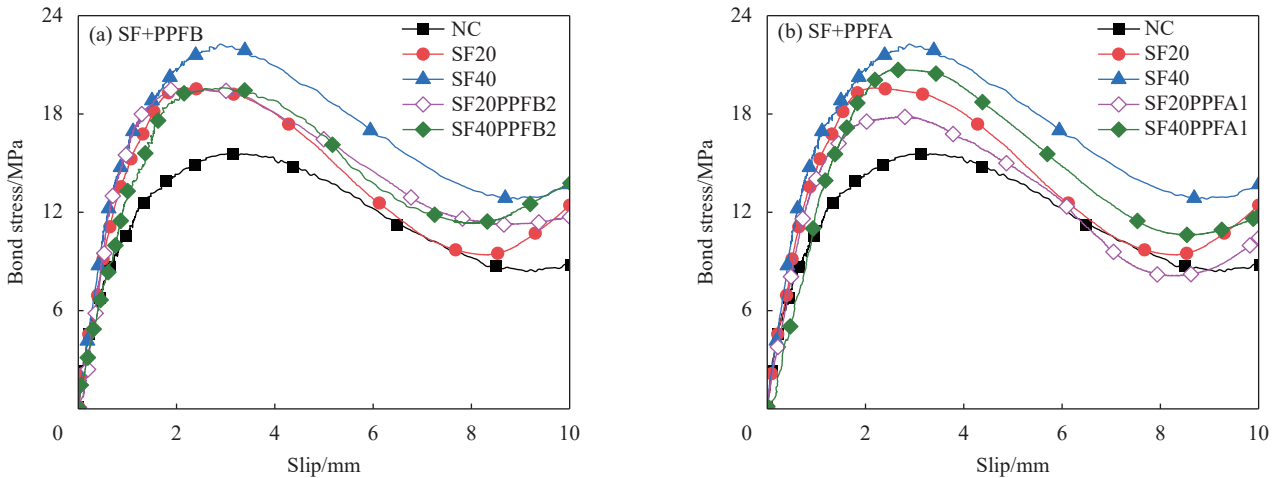


图 11 GFRP 筋与混掺纤维自密实混凝土基体粘结-滑移曲线

Fig. 11 Bond stress-slip curves of GFRP reinforcement and hybrid fiber self-compacting concrete matrix

图 11(b) 对比了 PPFA 和 SF40 以及混掺后的 τ - s 曲线。与 NC 试件相比，GFRP 筋与 SF40PPFA1 基体粘结强度增加 32.0%，峰值滑移减小 13.3%。与 SF40 相比，GFRP 筋与 SF40PPFA1 基体粘结强度降低 7.1%，峰值滑移减小 12.7%，粘结强度 PPFA 的弹性模量较低，降低了混凝土劈裂抗拉强度，从而导致混掺纤维效果不如单掺钢纤维^[40-41]。

2.6 冻融循环作用对粘结性能的影响

图 12 为 NC、SF40 和 SF40PPB2 试件经过 0~100 次冻融循环作用后的粘结-滑移曲线。表 4 为冻融循环作用前后 GFRP 筋与不同纤维混凝土基体的粘结强度与峰值滑移。由图 12 和表 4 可看出，纤维的掺入可有效限制混凝土基体裂缝的扩展，减少冻融循环作用后 GFRP 筋与混凝土之间粘结强度的损失。随着冻融循环次数的增加，混凝土基体对 GFRP 筋的约束逐渐减弱，经历 50 次和 100

次冻融循环作用后，GFRP 筋与素混凝土基体之间的粘结强度分别下降了 9.1% 和 25.4%。PPFA1 的掺入改善了混凝土的抗冻性能，经历 50 次冻融循环作用后，粘结强度较未经冻融试件提高了 1.8%；经历 100 次冻融循环作用后，粘结强度下降了 12.8%。尽管 PPFA1 的掺入在冻融前期改善了混凝土的抗冻性，但由于纤维的弹性模量较低，并没有发挥其阻裂作用，经历冻融循环作用后试件仍发生劈裂破坏，聚丙烯短纤维对粘结性能的改善作用有限。相较于素混凝土，掺入钢纤维后 GFRP 筋与混凝土基体间的粘结强度保留率有明显提升，SF20、SF40 和 SF50 试件在经历 100 次冻融循环作用后，粘结强度较冻融循环 50 次后分别下降 0.2%、9.4% 和 9.8%。SF20PPFA1 试件经历 50 次和 100 次冻融循环作用后，粘结强度分别下降了 9.5% 和 10.5%。可以看出，聚丙烯短纤维的

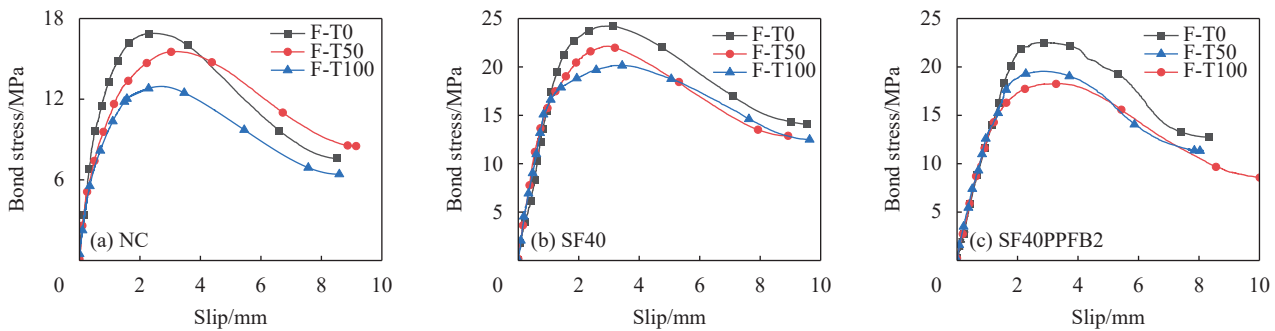


图 12 冻融循环作用前后 GFRP 筋与不同纤维自密实混凝土基体的粘结-滑移曲线

Fig. 12 Bond stress-slip curves of GFRP bars and different fiber self-compacting concrete matrix before and after freeze-thaw cycles

表 4 冻融循环作用前后 GFRP 筋与不同纤维自密实混凝土基体的粘结强度和峰值滑移

Table 4 Bond strength and peak slip between GFRP bars and different fiber self-compacting concrete matrix before and after freeze-thaw cycles

Specimen	τ_u /MPa			s_u /mm		
	0	50	100	0	50	100
NC-S	23.94	22.57	20.97	3.38	3.94	3.89
NC-F	16.95	15.58	13.15	2.44	3.08	2.78
PPFA1	-	14.48	13.84	-	2.22	2.25
PPFB2	18.69	16.70	15.72	2.48	2.67	3.09
PPFB4	-	18.30	17.26	-	2.94	2.79
SF20	-	19.60	19.22	-	2.19	3.07
SF40	24.23	22.26	20.16	2.91	2.89	3.06
SF50	-	23.14	20.88	-	2.67	2.53
SF20PPFA1	19.75	17.87	17.61	2.50	2.89	3.28
SF20PPFB2	-	19.49	17.74	-	2.13	2.90
SF40PPFA1	-	20.69	19.83	-	2.54	3.57
SF40PPFB2	22.51	19.59	18.33	2.82	2.97	3.23

Notes: τ_u is the bond stress; s_u represents the peak slip.

掺入改善了混凝土基体的抗冻性，减小了粘结强度的退化，使混凝土基体在冻融环境中的适用性更高[29]。

3 粘结-滑移本构模型

在已有钢筋与混凝土粘结-滑移本构模型的基础上，学者们提出了 FRP 筋与混凝土粘结-滑移本构模型[1, 42-44]。然而，目前的模型尚未考虑冻融循环作用和纤维掺入对粘结性能的影响。为了更准确地评估 GFRP 筋与 SCC 之间的粘结性能，本文探究了综合考虑冻融循环次数和纤维种类及掺量影响的 GFRP 筋与 SCC 之间的粘结-滑移本构模型。

由于大部分混凝土构件或结构计算时只需要用到粘结-滑移曲线的上升段，本文选取目前应用最广泛的 FRP 筋与混凝土之间粘结-滑移本构模型：mBPE 模型[45]和 CMR 模型[46]，对粘结-滑移曲线的上升段进行拟合，模型的表达式分别为：

(1) mBPE 模型

$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_1} = \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha & (s \leq s_1) \\ \frac{\tau}{\tau_1} = 1 - p\left(\frac{s}{s_1} - 1\right) & (s_1 < s \leq s_3) \\ \tau = \tau_3 & (s > s_3) \end{cases} \tag{1}$$

式中： α 为小于 1 的曲线参数； p 为下降段的软化系数； s 、 s_1 、 s_3 分别为滑移值、峰值滑移和残余段开始点滑移 (mm)； τ 、 τ_1 、 τ_3 分别为粘结应力、峰值粘结应力和残余段初始粘结应力 (N/mm²)。

(2) CMR 模型

$$\frac{\tau}{\tau_m} = (1 - e^{-s/\alpha})^\beta \tag{2}$$

式中： τ_m 为峰值粘结应力 (N/mm²)； α 、 β 为根据试验数据拟合的常数。

图 13 为 mBPE 模型和 CMR 模型对粘结-滑移试验曲线的拟合结果。可以看出，mBPE 模型对 GFRP 筋与混凝土之间 τ - s 曲线上升段的拟合效果

不尽理想，模型中 τ - s 曲线的斜率拐点较试验曲线出得较早，使得拟合曲线在滑移值较小时出现突出部分，而当超过拐点后其斜率变化不大。

CMR 模型对试验曲线的拟合效果良好，能够更准确地反映 GFRP 筋与自密实混凝土粘结滑移曲线上升段的变化趋势。

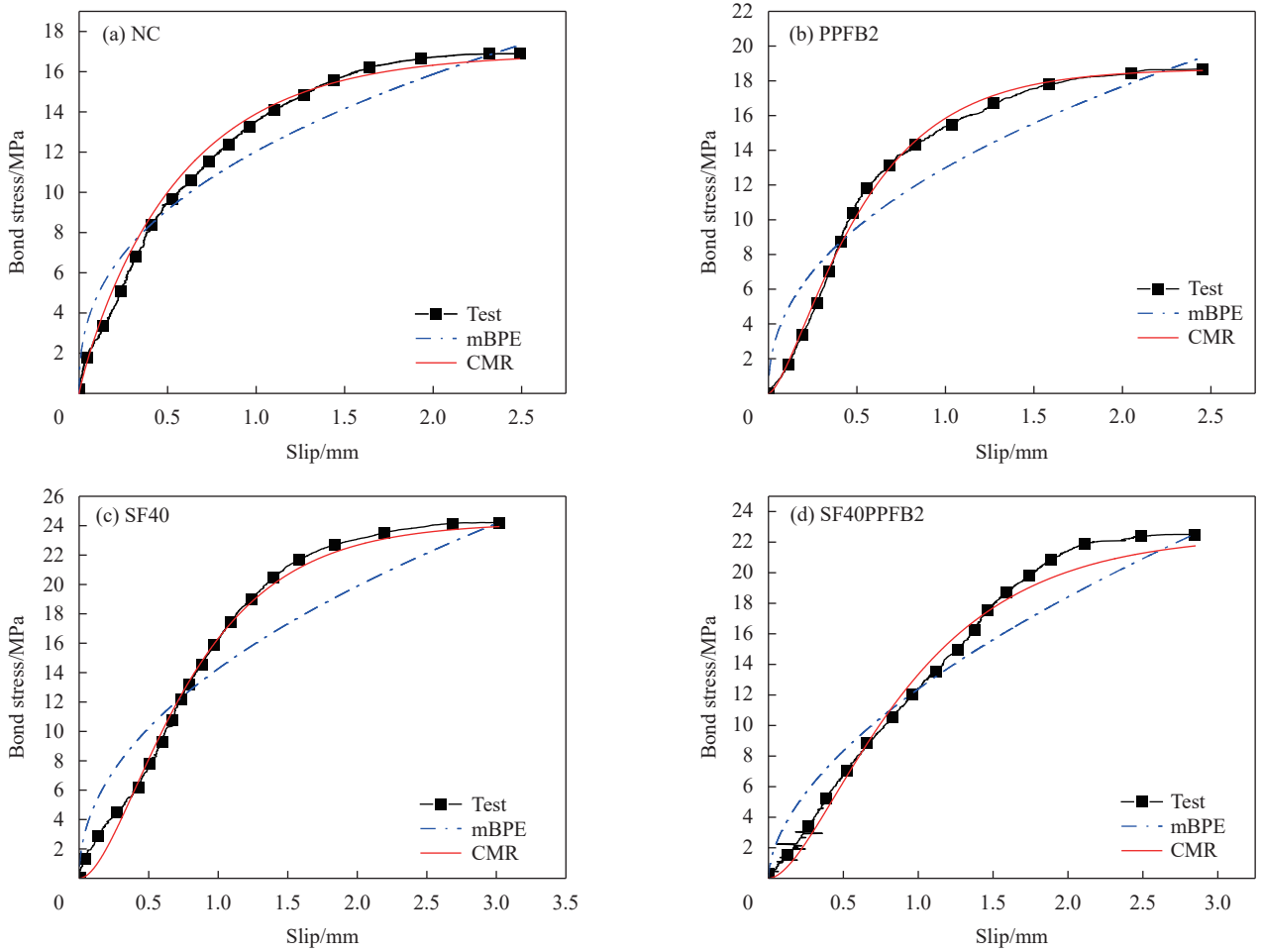
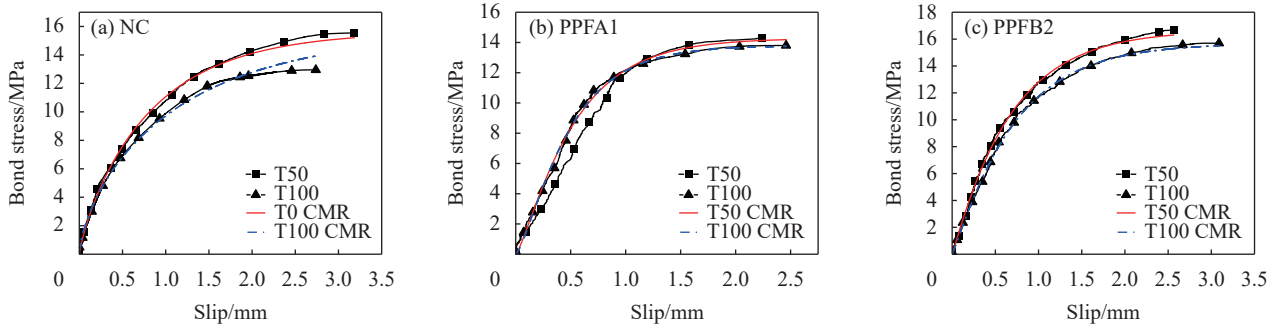


图 13 试验曲线与 mBPE 模型和 CMR 模型拟合

Fig. 13 Experimental curves fitting with mBPE model and CMR model

为了验证 CMR 模型对冻融-氯盐耦合环境下 GFRP 筋与不同纤维混凝土基体之间 τ - s 曲线的拟合情况，图 14 给出了试验中各配合比经历冻融循环作用前后 τ - s 试验曲线与 CMR 模型拟合曲线的对比。表 5 列出了 CMR 模型的具体参数。

由图 14 可知，CMR 模型对 GFRP 筋与自密实混凝土的粘结-滑移曲线上升段具有良好的拟合效果。因此，CMR 模型可用于拟合冻融-氯盐耦合作用下 GFRP 筋与不同纤维自密实混凝土粘结-滑移曲线的上升段。



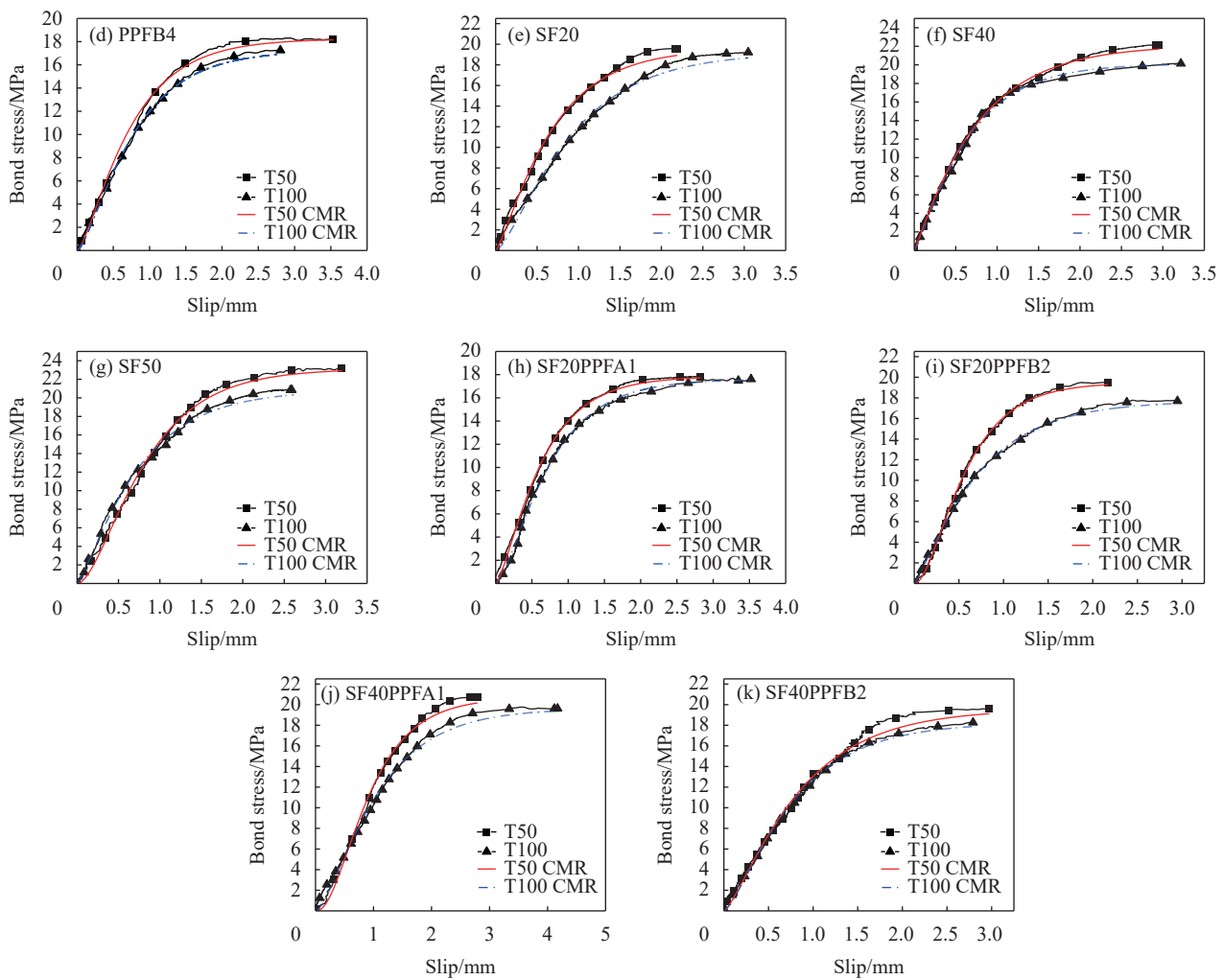


图 14 试验曲线与 CMR 模型的拟合

Fig. 14 Fitting of experimental curves with CMR model

表 5 CMR 模型的拟合参数

Table 5 Fitting parameters of CMR model

Specimen	α			β		
	0	50	100	0	50	100
NC-F	0.6068	0.9246	0.7396	1.0282	0.8234	0.8606
PPFA1	-	0.4122	0.4499	-	1.4230	1.8244
PPFB2	0.4325	0.6654	0.6803	1.5828	1.0552	1.1173
PPFB4	-	0.6222	0.6434	-	1.4929	1.5324
SF20	-	0.6013	0.7667	-	1.3145	1.4884
SF40	0.5882	0.7516	0.5864	1.9646	1.0744	1.2618
SF50	-	0.6069	0.6662	-	1.9214	1.2980
SF20PPFA1	0.5084	0.5313	0.5974	1.8135	1.4816	1.6152
SF20PPFB2	-	0.4143	0.6566	-	2.0333	1.6152
SF40PPFA1	-	0.6136	0.8768	-	2.4351	1.5928
SF40PPFB2	0.7105	0.7299	0.6649	1.8630	1.3906	1.4599

Note: α and β are fitting parameters.

4 结论

通过 90 个中心拉拔试件探究了不同纤维对氯盐与冻融循环耦合作用下玻璃纤维增强聚合物

(GFRP) 筋与自密实混凝土 (SCC) 之间粘结性能的影响。变化参数分别为冻融循环次数、纤维种类和纤维掺量, 得到如下结论:

(1) 聚丙烯短纤维 (PPFA) 对混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度无显著影响, 但在混凝土中掺入 PPFA 可显著提高其抗冻性。单掺聚丙烯长纤维 (PPFB)、钢纤维 (SF) 以及混掺纤维均可提高混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度。其中, PPFB 对混凝土抗压强度的提升效果优于 SF, 而 SF 对劈裂抗拉强度的提升优于 PPFB。混掺纤维对抗压强度的提升效果优于劈裂抗拉强度。

(2) 未经冻融循环作用时, PPFA 对粘结强度无明显改善作用。在混凝土中掺入 PPFB 和 SF 均可提高 GFRP 筋与混凝土的粘结强度, 且纤维掺量与粘结强度提高成明显正相关。研究表明, SF 对粘结强度的改善优于 PPFB, 当 SF 掺入量达到 40 kg/m^3 , 未经冻融循环作用的混凝土粘结强度达到峰值。

(3) 混凝土中掺入 PPFA 可有效减缓冻融循环作用后的粘结强度损失。尽管混掺 SF 和 PPFA 对粘结强度的改善效果弱于单掺 SF, 但混掺 SF 和 PPFA 试件经冻融循环作用后, 其粘结强度损失小于单掺钢纤维试件。与素混凝土 (NC) 试件相比, 经冻融循环作用后, 单掺 PPFB 或 SF 的基体与 GFRP 筋的粘结强度有显著提高。

(4) mBPE 模型低估了 GFRP 筋与混凝土之间的粘结应力, 而 CMR 模型的预测结果与试验曲线吻合良好。CMR 模型可用于拟合冻融-耦合作用下 GFRP 筋与不同纤维自密实混凝土的粘结-滑移曲线上升段。

参考文献:

- [1] YAN F, LIN Z, ZHANG D, et al. Experimental study on bond durability of glass fiber reinforced polymer bars in concrete exposed to harsh environmental agents: Freeze-thaw cycles and alkaline-saline solution[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 116: 406-421.
- [2] HU X, XIAO J, ZHANG K, et al. The state-of-the-art study on durability of FRP reinforced concrete with seawater and sea sand[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 51: 104294.
- [3] NAM H P, HAI N M, HAI D V, et al. Investigation of the application scope of bond strength empirical formulas for various FRP bars in concrete: A case study utilizing the safety probability value with a large test dataset[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e03168.
- [4] 闫清峰, 张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(36): 15314-15322.
- YAN Qingfeng, ZHANG Jigang. Application and development of fiber-reinforced composite materials in civil engineering[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(36): 15314-15322(in Chinese).
- [5] 黄华, 郝润奇, 黄敏. FRP 筋混凝土结构的研究现状分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(7): 108-116.
- HUANG Hua, HAO Runqi, HUANG Min. Analysis of research status of FRP reinforced concrete structures[J]. *Composites Science and Engineering*, 2018(7): 108-116(in Chinese).
- [6] FURSA T V, UTSYN G E, KORZENOK I N, et al. Using electric response to mechanical impact for evaluating the durability of the GFRP-concrete bond during the freeze-thaw process[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 90: 392-398.
- [7] SHAKIBA M, BAZLI M, KARAMLOO M, et al. Bond-slip performance of GFRP and steel reinforced beams under wet-dry and freeze-thaw cycles: The effect of concrete type[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 342: 127916.
- [8] 吴丽丽, 琚祥凯, 丛琪明, 等. 冻融循环后 GFRP 筋与 ECC 粘结性能试验研究[J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47(12): 53-61.
- WU Lili, JU Xiangkai, CONG Qiming, et al. Experimental study on the bonding properties of GFRP bars and ECC after freeze-thaw cycles[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(12): 53-61(in Chinese).
- [9] 王磊, 李威, 陈爽, 等. 海水浸泡对 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(12): 3458-3465.
- WANG Lei, LI Wei, CHEN Shuang, et al. Effect of seawater immersion on FRP reinforcement-coral concrete bond properties[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(12): 3458-3465(in Chinese).
- [10] 高傲, 杨树桐, 高广希, 等. 海洋环境下 BFRP 筋与珊瑚混凝土粘结性能的试验研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(12): 43-53.
- GAO Ao, YANG Shutong, GAO Guangxi, et al. Experimental study on the bonding performance of BFRP reinforcement with coral concrete in marine environment[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(12): 43-53(in Chinese).
- [11] DONG Z, WU G, ZHAO X, et al. Long-term bond durability of fiber-reinforced polymer bars embedded in seawater sea-sand concrete under ocean environments[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2018, 22(5): 1-12.
- [12] 王月, 安明喆, 余自若, 等. 氯盐侵蚀与冻融循环耦合作用下 C50 高性能混凝土的耐久性研究[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(3): 41-46.
- WANG Yue, AN Mingzhe, YU Ziruo, et al. Durability of C50

high-performance concrete under the coupling of chloride salt erosion and freeze-thaw cycle[J]. *China Railway Science*, 2014, 35(3): 41-46(in Chinese).

[13] ZHOU J, WANG G, LIU P, et al. Concrete durability after load damage and salt freeze-thaw cycles[J]. *Materials*, 2022, 15(13): 4380.

[14] LONG X, TAN Y, WAN X, et al. Effect of freeze-thaw cycles and chloride salt erosion coupling conditions on fatigue properties of PE-ECC[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02726.

[15] ZHOU C, CAO J, ZHANG Z, et al. Effect of fiber reinforcement on bond behavior between coral aggregate concrete and GFRP bar[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 403: 133201.

[16] LIU X, SUN Y, WU T, et al. Flexural cracks in steel fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced with FRP bars[J]. *Composite Structures*, 2020, 253: 112752.

[17] DING Y, NING X, ZHANG Y, et al. Fibres for enhancing of the bond capacity between GFRP rebar and concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 51: 303-312.

[18] 丁一宁, 李娟, 王宝民, 等. 纤维对 GFRP 筋与自密实混凝土基体粘结性能影响分析 [J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(1): 63-69. DING Yining, LI Juan, WANG Baomin, et al. Analysis of the influence of fibers on the bonding properties of GFRP bars and self-compacting concrete matrix[J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(1): 63-69(in Chinese).

[19] 吴丽丽, 王慧, 杨涵涵, 等. GFRP 筋与自密实混凝土黏结性能的试验研究 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10): 3484-3494. WU Lili, WANG Hui, YANG Changhan, et al. Experimental study on the bonding performance of GFRP bars and self-compacting concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(10): 3484-3494(in Chinese).

[20] HENIN E, MORCOUS G. Bond behavior of helically wrapped sand coated deformed glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288: 123120.

[21] LIU H, YANG J, WANG X. Bond behavior between BFRP bar and recycled aggregate concrete reinforced with basalt fiber[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 477-483.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 自密实混凝土应用技术规程: JGJ/T 283—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for application of self-compacting concrete: JGJ/T 283—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021(in Chinese).

[23] 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法: GB/T 30022—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for basic mechanical properties of fiber reinforced composite bars: GB/T 30022—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013(in Chinese).

[24] 中国工程建设标准化协会. 混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准: TCECS 762—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021. China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for indoor simulated environmental test methods for durability of concrete structures: TCECS 762—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021(in Chinese).

[25] 汪学清, 李永超, 张雪瑞, 等. 轴压下含裂隙聚丙烯纤维混凝土裂纹扩展及损伤演化研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(7): 2404-2414. WANG Xueqing, LI Yongchao, ZHANG Xuerui, et al. Research on crack propagation and damage evolution of cracked polypropylene fiber concrete under axial compression[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(7): 2404-2414(in Chinese).

[26] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴宇, 等. 不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1935-1948. LUO Honglin, YANG Dingyi, ZHOU Xingyu, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete with different aspect ratios[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1935-1948(in Chinese).

[27] 叶艳霞, 王宗彬, 谢夫林, 等. 钢纤维增强高强轻骨料混凝土的力学性能 [J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1): 63-70. YE Yanxia, WANG Zongbin, XIE Fulin, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1): 63-70(in Chinese).

[28] 赵雅明, 张明飞, 张振, 等. 混杂纤维增强高强混凝土性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(7): 2299-2307. ZHAO Yaming, ZHANG Mingfei, ZHANG Zhen, et al. Research on the properties of hybrid fiber reinforced high-strength concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(7): 2299-2307(in Chinese).

[29] 赵小明, 李奥阳, 乔宏霞, 等. 纤维混凝土抗冻性能及损伤劣化模型研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(10): 3196-3202. ZHAO Xiaoming, LI Aoyang, QIAO Hongxia, et al. Research on frost resistance and damage deterioration model of fiber concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(10): 3196-3202(in Chinese).

[30] 张广泰, 田虎学, 李宝元, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土的抗盐冻性能 [J]. *材料导报*, 2018, 32(14): 2396-2399, 2406. ZHANG Guangtai, TIAN Huxue, LI Baoyuan, et al. Salt

- freezing resistance of steel-polypropylene hybrid fiber concrete[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(14): 2396-2399, 2406(in Chinese).
- [31] 夏冬桃, 李天云, 李欣怡, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土冻融损伤试验研究 [J]. *混凝土*, 2024(3): 136-139.
- XIA Dongtao, LI Tianyun, LI Xinyi, et al. Experimental study on freeze-thaw damage of steel-polypropylene hybrid fiber concrete[J]. *Concrete*, 2024(3): 136-139(in Chinese).
- [32] HUANG G, SU L, XUE C, et al. Study on the deterioration mechanism of hybrid basalt-polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate freeze-thaw cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 449: 138560.
- [33] SUN J, DING Z, LI X, et al. Bond behavior between BFRP bar and basalt fiber reinforced seawater sea-sand recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 285: 122951.
- [34] 崔凯, 徐礼华, 池寅. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土等幅受压疲劳变形 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(7): 755-761.
- CUI Kai, XU Lihua, CHI Yin. Fatigue deformation of steel-polypropylene hybrid fiber concrete under equal compression[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(7): 755-761(in Chinese).
- [35] NEPOMUCENO E, SENA-CRUZ J, CORREIA L, et al. Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 287: 123042.
- [36] 张望喜, 胡彬彬, 王冠杰, 等. FRP 筋与混凝土粘结性能研究进展及本构模型改进 [J]. *土木与环境工程学报 (中英文)*, 2023, 45(2): 111-122.
- ZHANG Wangxi, HU Binbin, WANG Guanjie, et al. Progress of bonding performance between FRP bars and concrete and improvement of constitutive modeling[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(2): 111-122(in Chinese).
- [37] 宋泽鹏, 陆春华, 宣广宇, 等. 螺纹 GFRP 筋与混凝土黏结性能试验与理论计算 [J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4): 887-894.
- SONG Zepeng, LU Chunhua, XUAN Guangyu, et al. Tests and theoretical calculations on bonding properties of threaded GFRP bars to concrete[J]. *Journal of Construction Materials*, 2021, 24(4): 887-894(in Chinese).
- [38] 孙丽, 杨泽宇, 朱春阳, 等. GFRP 筋纤维混凝土黏结滑移性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2020, 53(S2): 259-264.
- SUN Li, YANG Zeyu, ZHU Chunyang, et al. Experimental study on bond-slip properties of GFRP reinforced fiber concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(S2): 259-264(in Chinese).
- [39] SHAN Z, LIANG K, CHEN L. Bond behavior of helically wound FRP bars with different surface characteristics in fiber-reinforced concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65: 105504.
- [40] 徐存东, 汪志航, 陈家豪, 等. 盐-冻侵蚀环境下聚丙烯纤维混凝土的寿命预测 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(6): 2111-2120, 2129.
- XU Cundong, WANG Zhihang, CHEN Jiahao, et al. Life prediction of polypropylene fiber concrete under salt-frost erosion[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(6): 2111-2120, 2129(in Chinese).
- [41] 徐晋, 樊广利, 张明明, 等. 混杂纤维对 NC 的力学性能影响研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(5): 1525-1530, 1537.
- XU Jin, FAN Guangli, ZHANG Mingming, et al. Study on the effect of mixed fibers on the mechanical properties of NC[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(5): 1525-1530, 1537(in Chinese).
- [42] TANG W C, LO T Y, BALENDRAN R V. Bond performance of polystyrene aggregate concrete (PAC) reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 98-107.
- [43] XUE W, YANG Y, ZHENG Q, et al. Modeling of bond of sand-coated deformed glass fibre-reinforced polymer rebars in concrete[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2016, 24(1): 45-56.
- [44] MAI G, LI L, LIN J, et al. Bond durability between BFRP bars and recycled aggregate seawater sea-sand concrete in freezing-thawing environment[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 70: 106422.
- [45] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars[C]// *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*. Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, 1996: 909-916.
- [46] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 1997, 1(2): 40-51.