DOI:10.11918/202308011

环作用下表 CFRP-混凝土 抗 性能试验

[1,2], [1], [1,2], 王 [1], [3]

(1. 大学 土木工程学院, 350108;2. 建 土木工程多 防治重点实验室, 350108;
3. 南 达新能 有限公司,南 330038)

摘 要: 为 究 环作用下表面 CFRP-混凝土 面抗 性能, 展 环(0 d、60 d和120 d) 同 形状(形、 形和 形)的 试验,研究 效模式和 能的变化及影响最大 应力的因素,结合试验结果推 了考虑 环的 面黏结滑移本 方 ,并 数值模拟验 其有效性。结果表明:随 环进行,表面 法 效模式由CFRP 破坏 变为 破坏;120 d 面 能下降 较未 法 60.04%~69.42%; 形 120 d最大应力相比其 表面 形状提 7.18%~9.48%。表面 法在 环作用下 有较好的抗 性能,建立的 面本 化方 用于 环作用下表面 CFRP-混凝土 面黏结性能的分析和模拟。

关键词: 混凝土结 ;碳纤维 ;表面 法; 面抗 性能; 环; 试验
中图分类号: TU375;TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2024)10-0014-10

perimental study on interfacial s ear be a ior of CFRP-concrete wit surface groo e sub ected to c loride wet dry cycles

JIANG Shaofei[1,2], ZHENG Zhenhong[1], SONG Hualin[1,2], WANG Wei[1], ZANG Rongbin[3]

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350108, China;
3. Nanchang Sunwoda New Energy Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

Abstract: To investigate the shear behaviour of CFRP-concrete with surface groove subjected to chloride wet-dry cycles, single-lap tensile shear tests with different groove shapes (rectanglular, trapezoidal and inverted trapezoidal) were carried out for 0 d, 60 d and 120 d wet-dry cycles. The changes in failure mode, fracture engergy and factors influencing the maximum shear stress were examined. On the basis of experimental results, we derived the bond slip constitutive model considering dry-wet cycles and its effectiveness was validated through numerical simulations. The results show that the failure mode of the surface groove method transitions from the CFRP sheet fracture without erosion to the mixed failure and debonding failure of the CFRP sheet. Compared with EBR specimens, the interface fracture energy of 120 d wet-dry cycles reduces by 60.04% - 69.42%. The maximum shear stress of the trapezoidal groove after 120 d wet-dry cycles is increased by 7.18% - 9.48% compared with other surface-grooved shapes. These results indicate that the surface groove method exhibits superior shear behaviour under wet-dry cycles. The developed deterioration formula of the interface constitutive relationship is applicable for analyzing and simulating the interfacial bond behaviour of CFRP-concrete with surface groove under wet-dry cycles.

Keywords: concrete structure; carbon fiber reinforced plastics (CFRP); surface groove method; interface shear behaviour; wet-dry cycles; single-lap tensile shear tests

表面粘 CFRP(carbon fiber reinforced plastics)加固法被广 应用于 天、 建造和土木工程等领域[1-2]。研究表明,表面粘 CFRP加固法(externally bonded reinforcement, EBR)主要 效模式为CFRP 离 效,CFRP利用率仅30%[3]。而在沿海恶劣环境下,CFRP-混凝土界面黏合 受离子 蚀劣化[4],加速了CFRP-混凝土界面 离 效,CFRP利用率降低至15%[5]。因此,如何提升

收稿日期: 2023-08-03;**录用日期:** 2023-09-08;**网络首发日期:** 2023-10-18
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20231013.1627.002
基金项目: 国家十三 重点 (2020YFD1100403);中国地 局重点 (2020EEEVL0402); 大学博士研究生科 新 基金
作者简介: 绍 (1969—),男,教授,博士生导师
通信作者: 华 ,songhualincn@gmail.com

CFRP 筋与混凝土的力学性能,肋参数等表面特性对二者黏结性能的影响也会相应增强;不同直径的 CFRP 筋具有相同的肋高,随着 CFRP 筋直径的加大,其对应肋高与直径的比值逐渐减小,CFRP 筋表面粗糙度随之减小,从而减小了低温对黏结强度的提升幅度。

4.3 CFRP 筋肋高的影响

图 11 为 CFRP 筋不同肋高工况下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的模拟结果。可以看出,CFRP 筋肋高对整个试件的黏结性能有较大的影响。通过对比可以看出,在常温条件下,CFRP 筋肋高较大试件的黏结强度更高;然而,在 –80 ℃条件下,随着肋高的不断增加,试件黏结强度呈现先升高后降低的趋势。此外,在相同温度条件下,与浅肋 CFRP 筋相比,深肋 CFRP 筋黏结滑移曲线峰值位移更小。这是因为当把 CFRP 筋从混凝土中向外拔出时,CFRP 筋与混凝土间的黏结强度主要取决于机械咬合力的大小。机械咬合力主要是 CFRP 筋横肋突出与混凝土形成的咬合齿相互挤压产生,当周围混凝土咬合齿受拉破坏或 CFRP 筋肋部磨损时,CFRP 筋所受的约束作用降低,从而二者界面发生黏结破坏。因此,CFRP 筋肋与混凝土抗剪强度的相对大小将影响黏结破坏面发生的位置,相应的黏结强度也会受到影响。

图 10 CFRP 筋直径对 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响

Fig. 10 Effect of CFRP bar diameter on bonding performance of CFRP bar-concrete

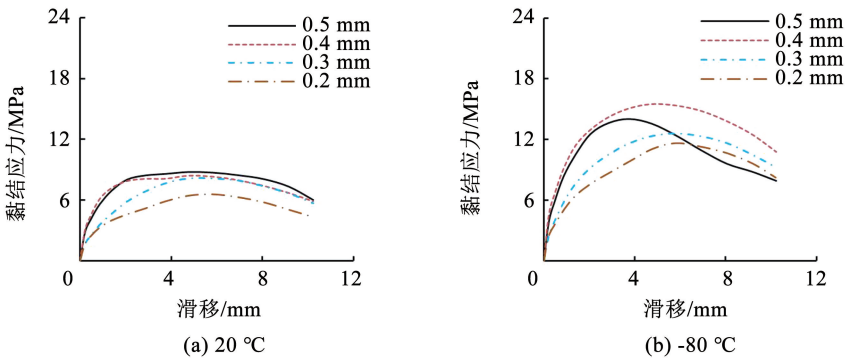

图 11 CFRP 筋肋高对 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响

Fig. 11 Effect ofrib height of CFRP bar on bonding performance of CFRP bar-concrete

常温与低温环境下，CFRP 筋肋高对黏结性能影响规律有所不同。这是因为低温提高了混凝土咬合齿的抗剪强度，黏结界面破坏主要为 CFRP 筋横肋断裂；另一方面，当 CFRP 筋肋高过高时，肋端与混凝土咬合齿间容易因应力集中而磨损，从而降低黏结强度。由表 5 可知，－80 ℃条件下，当 CFRP 筋肋高由 0.2 mm 增加至 0.3、0.4、0.5 mm 时，黏结强度分别提高了 8.35%、33.51% 和 20.93%，峰值滑移分别减小了 2.18%、17.95% 和 36.91%。

4.4　CFRP 筋肋宽的影响

图 12 为 CFRP 筋不同肋宽工况下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的模拟结果。可以看出，在同一温度条件下，随着 CFRP 筋肋宽的减小，黏结滑移曲线的黏结强度和黏结刚度明显降低，峰值滑移逐渐增加。这是由于 CFRP 筋肋宽减小，CFRP 筋横肋与混凝土有效接触面积随之减小，CFRP 筋横肋剪切面积减小，导致了 CFRP 筋–混凝土黏结性能的降低。不同 CFRP 筋肋宽试件的黏结滑移曲线有所不同，对于 CFRP 筋肋宽较小的试件，其黏结滑移曲线出现两个峰值点，且两个峰值点对应滑移值为相邻横肋的距离。由表 5 的模拟结果可知，当温度由 20 ℃降低至 －30、－60、－80 ℃时，肋宽为 10.0 mm 试件的黏结强度分别提高了 21.88%、60.05% 和 84.30%，其黏结刚度分别提高了 41.95%、106.47% 和 99.35%。肋宽为 6.0 mm 试件的黏结强度分别提高了 27.64%、59.44% 和 57.92%，其黏结刚度分别提高了 25.59%、56.88% 和 53.15%。

4.5　混凝土保护层厚度的影响

图 13 为不同混凝土保护层厚度工况下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的模拟结果。可以看出，随着混凝土保护层厚度的增加，黏结强度均有提升。这是因为混凝土保护层厚度的增加，提高了周边混凝土对筋材的约束作用，同时限制了黏结区域周围裂缝的发展，使其充分发挥二者界面的黏结性能，由此来提高黏结强度。当混凝土保护层厚度增加超过阈值后，混凝土保护层厚度对于黏结强度的贡献不再明显。在 －80 ℃时，当混凝土保护层厚度由 22.5 mm 增加至 30.0 mm 时，黏结强度增加了 35.64%。此外，峰值滑移也随着保护层厚度的增加而增加。这是由于试件破坏模式随着混凝土保护层厚度的增加，逐渐由劈裂破坏转变为拔出破坏。在 20 ℃下，保护层厚度为 27.5 mm（c/d = 5.5）时发生拔出破坏；在 －80 ℃下，保护层厚度为 30.0 mm（c/d = 6.0）时发生拔出破坏。在低温作用影响下，混凝土的脆性增加，试件破坏模式转为拔出破坏，所需保护层厚度也将增大。

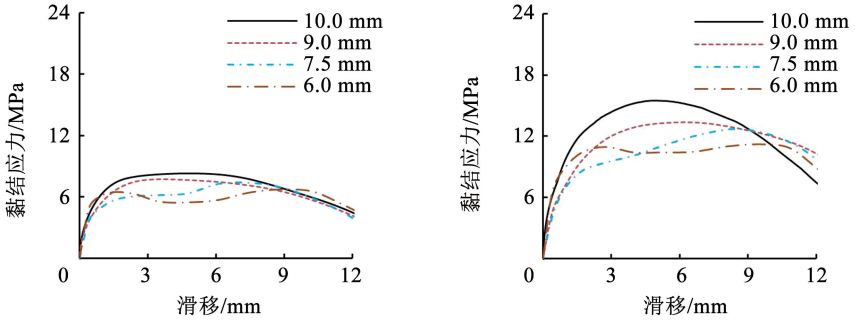

图 12　CFRP 筋肋宽对 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响

Fig. 12　Effect of rib width of CFRP bar on bonding performance of CFRP bar-concrete

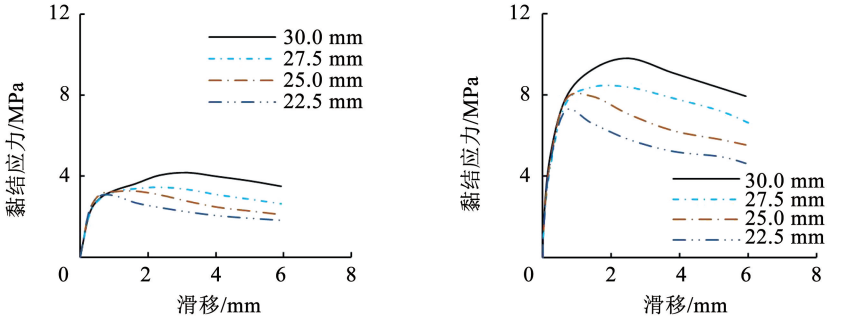

图 13　混凝土保护层厚度对 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响

Fig. 13　Effect of concrete cover thickness on bonding performance of CFRP bar-concrete

5 结 论

1)考虑CFRP筋表面特征的精细化建模能合理反应CFRP筋与混凝土之间的黏结性能,为有限元模型中黏结滑移行为模拟提供了参考。

2)降低温度和减小CFRP筋直径可以提高CFRP筋与混凝土间的黏结强度,但对不同直径CFRP筋–混凝土试件,黏结强度的提高幅度不同。在–80 ℃下,5 mm直径与12 mm直径试件的黏结强度分别较20 ℃时提高了127.54%和51.95%。随着CFRP筋直径的增大,低温对CFRP筋–混凝土间黏结强度的提高幅度逐渐减小。

3)CFRP筋肋高的增加会提高黏结强度,过大的肋高反而会减小二者之间的黏结强度;CFRP筋肋宽将影响低温黏结滑移曲线的形状。对于5 mm直径的CFRP筋,当肋高由0.2 mm增加至0.5 mm时,在20 ℃下黏结强度增加了34.05%,而在–80 ℃下增加了20.93%。

4)低温下CFRP筋–混凝土的黏结强度随混凝土保护层厚度的增加而提高。对于5 mm直径的CFRP筋,在–80 ℃下,混凝土保护层厚度由22.5 mm增加至30.0 mm时,黏结强度增加了35.64%。在低温下,试件破坏模式发生转变时的混凝土保护层厚度较常温下增大。

5)针对本文所研究的工况,在低温下存在最优CFRP筋表面特征参数及保护层厚度。基于模拟结果可知,在低温下肋高为CFRP筋直径的8%时,肋宽为2倍直径时,CFRP筋与混凝土黏结性能达到最优。保护层厚度为6倍直径时,CFRP筋与混凝土破坏模式转变为拔出破坏。

参考文献

[1]杨剑. 中国发展极地事业的战略思考[J]. 人民论坛·学术前沿, 2017(11): 6
YANG Jian. China's strategic thinking on the development of polar undertakings[J]. Renming Luntan · Xueshu Qianyan, 2017(11): 6. DOI: 10.16619/j. cnki. rmltxsqy. 2017. 11. 00

[2]崔国辉. 南极大陆最高气温为17.5 ℃[N]. 中国气象报, 2018-08-29(3)
CUI Guohui. The maximum temperature on the Antarctic continent is 17.5 ℃[N]. China Meteorological News, 2018-08-29(3)

[3]任宝双, 张翼. 南极长城站现有建筑损伤特点及原因分析[J]. 工程建设与设计, 2006(11): 9
REN Baoshuang, ZHANG Yi. Analysis of damage characteristics and causes of existing buildings in the Great Wall Station of Antarctica [J]. Construction & Design for Project, 2006(11): 9

[4]LLKER F, KARA A. Flexural performance of FRP reinforced concretebeams[J]. Composite Structures, 2012, 94(5): 1616. DOI: 10.1016/j. compstruct. 2011. 12. 012

[5]XIE Jian, LI Xiaomei, WU Honghai. Experimental study on the axial-compression performance of concrete at cryogenic temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2014(9): 72. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2014. 09. 033

[6]OKAYASU M, TSUCHIYA Y. Mechanical and fatigue properties of long carbon fiber reinforced plastics at low temperature[J]. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2019, 4(4): 22. DOI: 10.1016/J. JSAMD. 2019. 10. 002

[7]王小璐, 查晓雄, 张旭琛. 高温下FRP筋与混凝土的粘结性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 8
WANG Xiaolu, ZHA Xiaoxiong, ZHANG Xuchen. Adhesion of FRP bars to concrete at high temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 8. DOI: 10.11918/j. issn. 0367–6234. 2013. 06. 002

[8]MASHIMA M, IWAMOTO K. Bond characteristics of FRP rod and concrete after freezing and thawing deterioration[J]. ACI Structural Journal, 2004, 138(1): 51. DOI: 10.14359/10034

[9]DONG Zhiqiang, WU Gang, XU Bo, et al. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction[J]. Materials & Design, 2016, 92: 552. DOI: 10.1016/j. matdes. 2015. 12. 066

[10]XIE Jian, LIU Yang, QIAO Yu, et al. Bond behaviors of ribbed CFRP bars in concrete exposed to low temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2022(22): 341

[11]谢剑, 乔羽, 王启辰. 极地低温下CFRP筋与混凝土的黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 533
XIE Jian, QIAO Yu, WANG Qichen. Bonding behavior between CFRP bar and concrete at polar temperature [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 533

[12]周培龙, 李扬, 黄中华. FRP筋混凝土在低温下的粘结性能[J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36(5): 100
ZHOU Peilong, LI Yang, HUANG Zhonghua. Bond properties of FRP reinforced concrete at low temperature[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2021, 36(5): 100

[13]徐惟雄. 低温环境FRP筋与混凝土粘结性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018
XU Weixiong. Study on bond property of FRP bars and concrete in low temperature environment [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018

[14]AYDIN F. Experimental investigation of thermal expansion and concrete strength effects on FRP bars behavior embedded in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163(28): 1

[15]黄达海, 辜熠. 低温下混凝土中钢筋锚固性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(9): 4
HUANG Dahai, GU Yi. Experimental study on anchorage performance of steel bars in concrete at low temperature [J]. Building Science, 2007, 23(9): 4. DOI: 10.3969/j. issn. 1002–8528. 2007. 09014

[16]谢剑, 李会杰, 聂治盟, 等. 低温下钢筋与混凝土黏结性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 10
XIE Jian, LI Huijie, NIE Zhimeng, et al. Experimental study on bonding properties of steel bar and concrete at low temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 10

[17]BUI L, JONGVIVATSAKUL P, STITMANNAITHUM B, et al. Numerical modelling of bond mechanism of ETS FRP bar-concrete joints with long embedment length [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022, 117: 103179

[18]尹世平, 李雨珊, 刘运超. FRP筋与全珊瑚骨料海水混凝土粘

结性能数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报，2023，31(1)：210
YIN Shiping，LI Yushan，LIU Yunchao. Numerical simulation of bonding properties between FRP bars and whole coral aggregate seawater concrete[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences，2023，31(1)：210. DOI：10.16058/j.issn.1005－0930.2023.01.016

[19] LI Ping，JIN Liu，ZHANG Renbo，et al. Static bond performance between BFRP bars and concrete with stirrup confinement：a refined modelling[J]. Engineering Structures，2022，262：114379

[20] MASAD N，ZOLLINGER D，KIM S，et al. Meso-scale model for simulations of concrete subjected to cryogenic temperatures[J]. Materials and Structures，2016(49)：2141

[21] XIONG Zhe，WEI Wei，LIU Feng，et al. Bond behaviour of recycled aggregate concrete with basalt fibre-reinforced polymer bars[J]. Composite Structures，2021，256：113078

[22] ZHANG Renbo，JIN Liu，LIU Mengjia，et al. Refined modeling of the interfacial behavior between FRP bars and concrete under different loading rates[J]. Composite Structures，2022，291：115676

[23] JIN Liu，LIU Kaixin，ZHANG Renbo，et al. Bond behavior between steel bar and concrete considering cryogenic temperatures and confinement[J]. Case Studies in Construction Materials，2023，18：20

[24] YAN Jiabao，XIE Wenjun，ZHANG Lingxin，et al. Bond behavior of concrete-filled steel tubes at the Arctic low temperaturs[J]. Construction and Building Materials，2019，210：118

[25] 周春恒，王君义，王新堂，等. 高温作用后 GFRP 筋与海水珊瑚混凝土粘结性能试验研究[J]. 复合材料学报，2023，40(4)：2224
ZHOU Chunheng，WANG Junyi，WANG Xintang，et al. Experimental study on adhesion of GFRP bars to seawater coral concrete under high temperature[J]. Journal of Composite Materials，2023，40(4)：2224. DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.001

[26] 李鑫鑫，吴智敏. 加载速率对侧压力下光圆钢筋与混凝土粘结性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2015，39(3)：547
LI Xinxin，WU Zhimin. Effect of loading rate on bond performance of smooth round steel bar and concrete under lateral pressure[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Traffic Science and Engineering Edition)，2015，39(3)：547. DOI：10.3963/j.issn.2095－3844.2015.03.021

（**编辑**　刘　彤）

封面图片说明

封面图片来自本期论文“电化学氧化技术在 MBR 中的膜污染控制研究与应用进展”，是对电化学氧化(EO)技术抑制膜生物反应器(MBR)膜污染的机制、实现途径和抗污染效果的综述。近年来，基于 EO 的膜污染控制技术蓬勃发展，促进了 MBR 抗膜污染方法的创新，并引发了对抗膜污染机制的新思考。介绍了 EO 的工作原理并分析了电化学氧化 MBR(eMBR)中产生活性氧自由基并抑制膜污染的多种途径。根据国内外的最新研究进展，从电极装载方式、电极与滤膜的结合方式、电极的制备材料等角度系统讨论了 eMBR 的运行模式和抗膜污染效果。总结了 EO 抑制膜污染的影响因素及其实际应用的现存挑战。对 eMBR 的未来研究进行了展望，对其进一步优化与创新提出了建议，有助于推动膜滤技术在污水处理领域的应用和发展。

（图文提供：倪凌峰，王沛芳，王亚宜。河海大学环境学院）