https://doi.org/10.12677/hjce.2023.121002

高低温循环作用后CFRP与混凝土的黏结 性能试验研究

董志彦1*, 黄鲁玉2, 周万里1, 刘桂荣1,3#

1华北水利水电大学,河南 郑州

收稿日期: 2022年12月13日: 录用日期: 2023年1月3日: 发布日期: 2023年1月17日

摘要

CFRP加固混凝土结构处于室外环境条件时会遭受高低温循环作用,为了研究CFRP与混凝土在高低温循环作用后的黏结性能,本文针对36个黏结试件进行了高低温循环作用后的单剪试验。首先利用表面粘贴 (externally bonded, EB),混合粘贴(hybrid bonding, HB)及开槽粘贴(externally bonded reinforcement on grooves, EBG)技术将CFRP布粘贴在混凝土棱柱体试块表面;然后将其中27个黏结试件置于高低温循环作用下(-20°C~60°C,60%湿度),经历50次、100次、150次高低温循环作用后在室温环境中进行单剪试验,剩余的9个试件作为对比试件养护后直接进行单剪试验。试验结果表明:随着高低温循环次数增加,CFRP与混凝土极限黏结承载力呈降低趋势,且高低温循环作用对EBG试件极限承载力影响最显著,经历150次高低温循环后,其极限黏结荷载降低了50.30%。

关键词

高低温循环,CFRP、混合粘贴、开槽粘贴、黏结承载力

Experimental Research on Bond Performance of CFRP and Concrete after High and Low Temperature Cycling

Zhiyan Dong^{1*}, Luyu Huang², Wanli Zhou¹, Guirong Liu^{1,3#}

文章引用: 董志彦, 黄鲁玉, 周万里, 刘桂荣. 高低温循环作用后 CFRP 与混凝土的黏结性能试验研究[J]. 土木工程, 2023, 12(1): 9-17. DOI: 10.12677/hjce.2023.121002

²河南省工业学校,河南 郑州

³河南省生态建材工程国际联合实验室,河南 郑州

¹North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Henan Industrial School, Zhengzhou Henan

³International Joint Research Lab for Eco-Building Materials and Engineering of Henan, Zhengzhou Henan

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

Received: Dec. 13th, 2022; accepted: Jan. 3rd, 2023; published: Jan. 17th, 2023

Abstract

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strengthened concrete structures may be under harsh and changing environmental conditions including temperature cycles. In order to investigate the bonding performance of CFRP and concrete under temperature cycles, a total of 36 concrete prisms bonded with CFRP were tested. Firstly, three techniques named externally bonded (EB), hybrid bonding (HB) and externally bonded reinforcement on grooves (EBG), were used to attach CFRP sheets to the surface of concrete prism specimens. Then 27 of the specimens were subjected to temperature cycles of -20°C~60°C and constant relative humidity of 60%. After 50, 100 and 150 temperature cycles, these specimens were tested using the single-lap shear test method after curing used as reference ones. The test results show that with the increase of the temperature cycles, the ultimate bond load of CFRP and concrete decreases. Moreover, temperature cycles affect the ultimate bearing capacity of EBG bonded specimens significantly. After 150 temperature cycles, the ultimate bond load of this specimen is reduced by 50.30%.

Keywords

High and Low Temperature Cycle, CFRP, HB, EBG, Bond Bearing Load

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Open Access

1. 引言

目前,采用碳纤维片材(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)加固钢筋混凝土结构已得到广泛应用[1] [2] [3] [4]。服役期内的 CFRP 加固混凝土结构经常处于室外恶劣环境条件下,遭受紫外线照射、高低温循环等环境作用。已有文献研究表明:CFRP 加固用胶粘剂抗剪强度随着温度的升高呈明显降低趋势,60℃时,其抗剪强度仅为常温下的 60% [5] [6],这势必会影响环境温度作用下 CFRP 与混凝土之间的黏结性能。CFRP 与混凝土之间的黏结性能的优劣是 CFRP 加固混凝土结构可靠性的关键因素,国内外研究人员针对高低温循环作用下 CFRP 与混凝土之间的黏结性能进行了研究,取得了一定的研究成果。胡克旭等[7]研究了温度循环作用对 CFRP-混凝土界面黏结性能进行了研究,取得了一定的研究成果。胡克旭等[7]研究了温度循环作用对 CFRP-混凝土界面黏结性能的影响,发现:随着温度升高,CFRP-混凝土界面黏结性能呈降低趋势,且性能退化发生在胶粘剂玻璃化温度 ± 20℃范围内。Manuel 和 Hugo [8]对 CFRP 加固混凝土梁在高低温作用下(-10℃下 12 小时,10℃下 12 小时)循环 10,000 个小时后的黏结性能进行了研究,发现经历温度循环后试件黏结强度下降,且破坏均发生在混凝土基层。Gamage [9] [10]等研究了 20℃~50℃循环温度作用下,经过 1800 h、2250 h 后对 CFRP 与混凝土黏结性能的影响。研究结果表明:经过高低温循环作用 2250 h 后,CFRP 布加载端应变降低约 20%;经过 1800 h 和 2250 h 的高低温循环作用后,CFRP 与混凝土界面黏结强度分别降低了 22%和 24%。赵少伟[11]等研究了温度循环次数、混凝土强度以及 CFRP 板宽度对高低温循环作用后 CFRP 与混凝土黏结性能的影响,结果发现:随着温度循环次数增加,界面最大剪应力逐渐增大。

目前,针对高低温循环作用下 CFRP 与混凝土黏结性能研究有限,由于遭受高低温循环作用后 CFRP 与混凝土黏结强度与粘结树脂的性能、混凝土强度等因素有关,高低温循环作用后 CFRP 与混凝土黏结性能规律尚未明确。因此,对高低温循环作用后二者黏结性能仍需进一步研究。为此,本文选取高低温循环次数、不同 CFRP 加固技术为主要研究参数,开展高低温循环作用后 CFRP 与混凝土黏结性能试验研究,期望为 CFRP 加固钢筋混凝土构件耐久性评估提供参考。

2. 试验概况

2.1. 试件设计与制作

本次试验共设计了 12 组单剪试件,每组 3 个,共 36 个试件。试验参数为高低温循环次数和加固类型。各试件编号及主要参数如表 1 所示。试件编号中 EB、HB、EBG 表示粘贴 CFRP 的方式分别为表面粘贴(externally bonded, EB)、混合粘贴(hybrid bonding, HB)及开槽粘贴(externally bonded reinforcement on grooves, EBG),试件编号中的数字表示高低温循环次数,每一个高低温循环时间为 12 h。

Table 1. Parameters and results of the test 表 1. 试验参数及结果

试件编号	加固类型	T	$P_{ m u}/{ m kN}$
EB0	EB	0	8.14
EB50		50	7.74
EB100		100	8.13
EB150		150	7.73
HB0	НВ	0	18.17
HB50		50	16.09
HB100		100	14.93
HB150		150	15.24
EBG0	EBG	0	18.77
EBG50		50	16.37
EBG100		100	14.61
EBG150		150	9.32

注: T 为高低温循环次数; P_u 为极限黏结力。

制作时先浇筑混凝土棱柱体试块,尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm (图 1),标准条件下养护 28 天后,将粘贴 CFRP 一面打磨平整,用丙酮擦拭干净。不同粘贴 CFRP 方式后续工序分别如下: 1) EB 试件:按照《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》[12]配置、涂刷碳纤维胶,修补混凝土表面不平整部位;用碳纤维胶浸润裁剪后的 CFRP 布,粘贴于棱柱体试块黏结面,并在加载端前预留 40 mm 的非黏结段。2) HB 试件:在棱柱体试块表面进行机械钻孔,清孔后注入环氧树脂胶,并插入螺栓;粘贴 CFRP 布的同时,将垫片涂胶后穿过螺栓;环氧树脂强度达到 90%以上时,套上钢片和螺母,并用扭矩扳手对螺母施加 5 N·m 扭矩。3) EBG 试件:利用开槽机在黏结区域内开 2 条纵向沟槽,大小为 200 mm×5 mm×5 mm,间距为 20 mm,将浸渍胶顺着凹槽缓慢倒入槽内直到与混凝土表面平齐后再粘贴 CFRP 布。CFRP 布名义厚度为 0.167 mm,宽度为 50 mm,黏结长度为 200 mm。

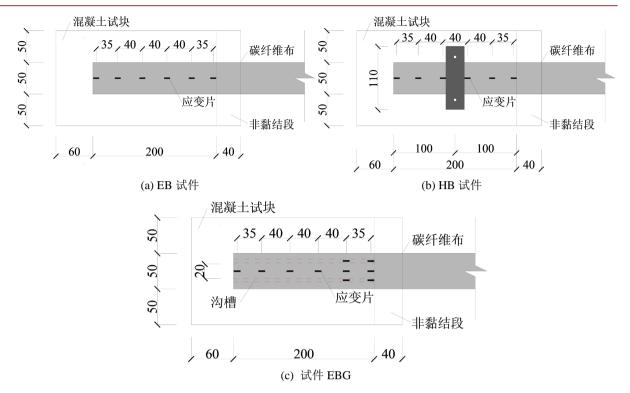


Figure 1. Test specimens and position of strain gauges 图 1. 试件示意及应变片布置

2.2. 材料性能

试验采用自拌混凝土,配合比 $m_{*\bar{*}\bar{*}}:m_{*\bar{*}\bar{*}}:m_{\bar{*}\bar{*}\bar{*}}=1:0.41:1.08:2.29$; 水泥采用 32.5 级普通硅酸 盐水泥,细骨料选用天然砂,粗骨料采用 $0\sim20$ mm 连续粒级的碎石,堆积密度为 1540 kg/m³;混凝土 抗压强度测试采用边长 150 mm 的标准立方体试块,每组 3 个,实测混凝土 28 d 立方体抗压强度为 31.5 MPa。

试验中所采用的 CFRP 布为南京天力信科技有限公司生产的高强 I 级单向 CFRP 布,其抗拉强度为 3488 MPa,弹性模量为 244 GPa,伸长率为 1.6%。采用 TLS-503 系列碳纤维加固专用胶,抗拉强度为 43.7 MPa, 受拉弹性模量为 2612 MPa,伸长率为 1.54%。

2.3. 高低温循环

试验采用高低温设备为 TEMI850 高低温循环箱,该设备温度控制范围为-40℃~150℃,温度控制精度在 0.5℃以内,湿度控制范围为 30%~98%。试验开始时,先将高低温循环箱温度降到-20℃,然后将黏结试块放入高低温循环箱内,试验过程中箱内相对湿度保持 60%不变,按照图 2 设定高低温循环制度进行温度循环:箱内温度降到-20℃;2 小时后,温度升高至 60℃并恒温 4 小时;最后经 2 小时后箱内温度降至-20℃并恒温 4 小时,至此一个温度循环结束。高低温循环箱内实测温度如图 2 所示。

2.4. 静载试验

黏结试件经过高低温循环作用后,从高低温循环箱中搬出,经过大约 24 h 后对其进行单剪试验。单剪试验采用的加载装置如图 3 所示,试验时在加载端匀速施加荷载,直至破坏。

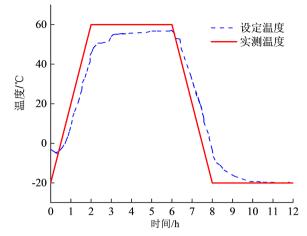


Figure 2. High and low temperature cycling program 图 2. 高低温循环制度

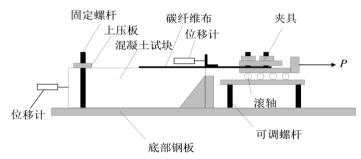
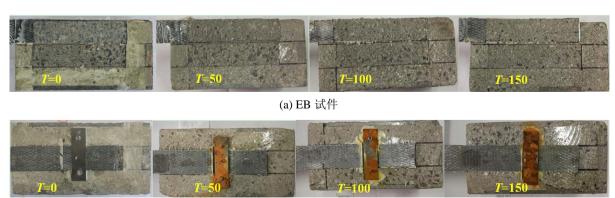


Figure 3. Schematic diagram of single-shear test setup 图 3. 单剪试验装置

3. 试验结果及分析

3.1. 试验现象与破坏形态

不同 CFRP 粘贴方式的试件,其破坏过程基本相似:荷载较小时,试件表面没有明显损伤;荷载增大至峰值荷载的 60%左右时,CFRP 布发出不连续的轻微响声;当加载至峰值荷载的 90%左右时,CFRP 布发出的声音增大,继续施加荷载至峰值荷载时,CFRP 发出巨大的响声,试件发生突然破坏。未经历高低温循环作用的 EBG 试件发生了 CFRP 布拉断破坏,其他所有试件最终破坏时,整个 CFRP 连同界面下一定厚度的混凝土一起剥离下来,破坏形式为剥离破坏,具体见图 4。



(b) HB 试件



(c) EBG 试件

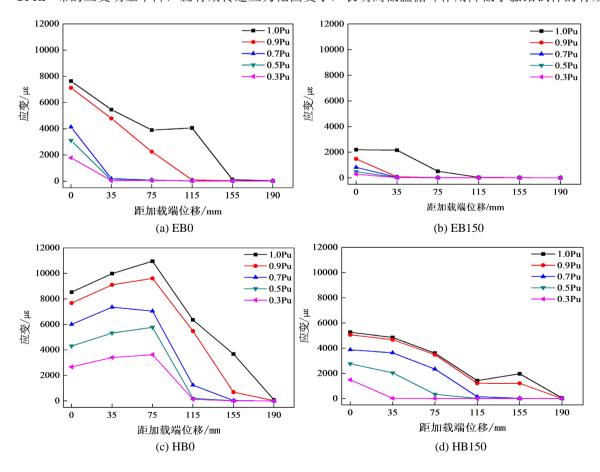
Figure 4. Failure pattern of test specimens 图 4. 试件破坏形态

对比图 4 发现:经过相同高低温循环次数后,EB 试件最终破坏时 CFRP 布表面粘有厚度不超过 5 mm 厚的混凝土,黏结区混凝土表面平整;发生剥离破坏的 EBG 试件最终破坏时沟槽处 CFRP 布与胶体完全剥离,黏结区混凝土表面凹凸不平,表层粗骨料松动。

3.2. CFRP 布应变分析

根据布置的应变片(图 1)得到 CFRP 布应变分布规律如图 5 所示,其中 EBG 试件距离加载端相同距离处 CFRP 布应变取同一位置处 3 个应变片平均值。由图 5 可以看出:不同高低温循环次数后,CFRP 布的应变分布规律相似。加载初期,应变值较小,纤维条带的传力区较短,CFRP 布仅在约 20%的黏结长度范围内产生了应变;当加载至极限荷载的 70%时,应变值明显增加,纤维条带的传力区向自由端扩展;随着荷载的增加,靠近加载端的应变值急剧增加,表明 CFRP 布与混凝土之间即将发生剥离。

对比图 5(a)~(f)发现,EB,HB,EBG 试件经过 150 次高低温循环以后,峰值荷载作用下,加载端 CFRP 布的应变明显下降,且有效传递应力范围变小,表明高低温循环作用降低了黏结试件的有效黏



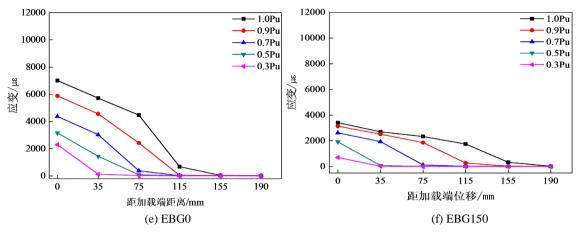


Figure 5. Strain distribution along CFRP strip **图 5.** CFRP 布应变分布

结长度。这可能是由于碳纤维加固胶在高低温循环作用下其抗剪性能降低从而导致 CFRP 条带应力传递能力下降。与 EB, EBG 试件相比, HB 加固方式由于锚固压力的作用可以明显提高 CFRP 条带应力传递能力,极限荷载作用下,HB 试件加载端应变明显大于 EB 与 EBG 黏结试件加载端应变。

3.3. 极限黏结荷载

图 6 给出了不同 CFRP 粘贴方式高低温循环作用对 CFRP 与混凝土极限黏结荷载的影响。由图 6 可以看出:随着高低温循环次数增加,不同加固方式黏结试件极限黏结荷载呈降低趋势。但是,EB 试件极限黏结荷载随着温度循环次数增加降低并不明显,经历 150 次高低温循环作用以后,其极限黏结荷载比未经历高低温循环作用试件降低了 5.0%,而 HB 试件经历 150 次高低温循环后其极限黏结荷载降低了16.1%。EBG 试件极限黏结荷载随着高低温循环次数增加呈明显降低趋势: EBG 试件经历 50 次、100 次、150 次高低温循环后,其极限黏结荷载分别降低了 12.9%、22.2%、50.30%。

比较不同 CFRP 粘贴方式对黏结试件极限黏结荷载的影响发现:与 EB 试件相比,常温下 HB 试件及

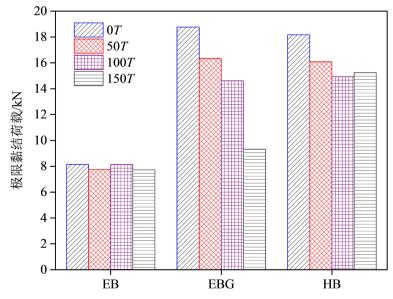


Figure 6. Ultimate bonding load 图 6. 极限黏结荷载

EBG 试件的极限黏结荷载大约提高了 1.3 倍,表明 HB 和 EBG 技术有效改善了 CFRP 与混凝土的黏结性能。但是高低温循环作用削弱了这种改善效果,与 EB 试件相比,150 次高低温循环作用后 HB 试件极限黏结荷载提高了 97%,而 EBG 试件极限黏结荷载仅提高了 20%左右。

分析主要原因是:随着高低温循环次数增加,虽然混凝土强度变化不大,但是黏结胶层发生了氧化、热降解、脱粘等,造成 CFRP-混凝土黏结性能的劣化。EBG 试件由于表面沟槽内注满了环氧树脂,因而增加了胶层厚度和黏结面积,延迟了 CFRP 片材的剥离[13],其极限黏结承载力较 EB 试件明显增加,且在相同高低温循环作用后,EBG 试件极限黏结承载力下降更明显。HB 试件极限黏结承载力主要由胶层的黏结应力,螺杆剪切力和 CFRP 与混凝土之间摩擦力组成,且以 CFRP 与混凝土摩擦力为主[14]。HB 试件由于对螺杆施加了扭矩作用,从而对 CFRP 布施加了压力,增加了 CFRP 与混凝土摩擦力,导致极限黏结承载力较 EB 试件明显增加。随着高低温循环次数增加,其极限黏结承载力呈下降趋势,但没有EBG 试件下降程度明显。

4. 结论

- 1) 不同 CFRP 粘贴方式黏结试件经过高低温循环后均发生了剥离破坏,EB 试件剥离破坏时,黏结 区混凝土表面比较平整,而 EBG 试件剥离破坏时沟槽处 CFRP 布与胶体完全剥离,黏结区混凝土表面凹 凸不平,表层粗骨料松动。
- 2) 高低温循环作用不仅导致黏结试件加载端 CFRP 布应变大幅下降,而且导致 CFRP 有效传递应力范围变小,降低了黏结试件的有效黏结长度。对 CFRP 布施加压力可以提高 CFRP 条带应力传递能力,HB 试件在极限黏结荷载作用下加载端 CFRP 布应变明显大于 EB 试件与 EBG 试件。
- 3) 随着高低温循环次数增加,CFRP与混凝土极限黏结荷载呈降低趋势。EBG 试件经历 50 次、100 次和 150 次高低温循环后,其极限黏结荷载分别降低了 12.9%、22.2%和 50.3%。
- 4) HB、EBG 技术可以有效改善 CFRP 与混凝土的黏结性能,但高低温循环作用削弱了这种改善效果。 常温下 HB、EBG 试件极限黏结荷载比 EB 试件提高了大约 1.3 倍。150 次高低温循环作用后 HB 试件极 限黏结荷载比 EB 试件提高了 97%,而 EBG 试件极限黏结荷载仅提高了 20%左右。

参考文献

- [1] Mugahed Amran, Y.M., Alyousef, R., Rashid, R.S.M., Alabduljabbar, H. and Hung, C.-C. (2018) Properties and Applications of FRP in Strengthening RC Structures: A Review. *Structures*, **16**, 208-238. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008
- [2] Komma, H.K.R., Nerella, R., and Madduru, S.R.C. (2019) Art-of-Review on CFRP Wrapping to Strengthen Compressive and Flexural Behavior of Concrete. Revue des Composites et des Matériaux Avancés, 29, 159-163. https://doi.org/10.18280/rcma.290305
- [3] 兰树伟,周东华,陈旭,毛德均.纤维增强复合材料加固混凝土受扭构件研究综述[J]. 混凝土, 2022, 44(9): 38-43.
- [4] 褚少辉, 付士峰. 粘贴钢板或碳纤维布加固受损混凝土梁效果对比试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(6): 81-84.
- [5] 周昊. 湿热环境下 FRP 加固 RC 构件耐久性实验方法研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [6] Gamage, J.C.P.H., Al-Mahaidi, R. and Wong, M.B. (2006) Bond Characteristics of CFRP Plated Concrete Members under Elevated Temperatures. *Composite Structures*, 75, 199-205. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.068
- [7] 胡克旭, 董坤, 杨耀武, 温度作用对碳纤维混凝土界面黏结性能的影响[J]. 同济大学学报, 2016, 44(6): 845-852.
- [8] Silva, M. and Biscaia, H. (2008) Degradation of Bond between FRP and RC Beams. Composite Structures, 85, 164-174. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.014
- [9] Gamage, J.C.P.H., Al-Mahaidi, R., Wong, B. and Ariyachandra, M.R.E.F. (2017) Bond Characteristics of CFRP-Strengthened Concrete Members Subjected to Cyclic Temperature and Mechanical Stress at Low Humidity-Sciencedirect. *Composite Structures*, 160, 1051-1059. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.131

- [10] Gamage, J.C.P.H., Al-Mahaidi, R. and Wong, M.B. (2016) Integrity of CFRP-Concrete Bond Subjected to Long-Term Cyclic Temperature and Mechanical Stress. *Composite Structures*, **149**, 423-433. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.040
- [11] 赵少伟, 任梓炜, 郭蓉, 张家赫, 陈冰. 温度循环作用后 CFRP-混凝土界面黏结性能研究[J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41(10): 69-76.
- [12] 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心. CECS146 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [13] Mostofinejad, D. and Mahmoudabadi, E. (2010) Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*, 14, 804-811. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000117
- [14] 张峰,高小华,高磊,吴宇飞,朱世超. HB-FRP 加固混凝土梁研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 35-47.