

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.011

冻融循环与持续荷载共同作用下 FRP 片材-混凝土界面黏结性能的退化行为

陈雨唐, 缪凡璠, 唐 晨, 刘钰汶, 施嘉伟

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究冻融循环影响下纤维增强复合材料(FRP)外贴加固混凝土结构的界面性能,通过双面剪切试验研究冻融循环与持续荷载共同作用下 FRP 片材-混凝土界面黏结性能的退化行为。在经历最大 200 次冻融循环作用后,对试件进行静态加载,并采用数字图像相关法量测试件表面的全场位移,进而计算界面黏结滑移关系。试验结果表明:冻融循环作用对 FRP 片材-混凝土界面的极限承载力、极限滑移、FRP 最大应变、最大剪应力、界面断裂能等均有明显的削弱作用,界面黏结滑移曲线退化显著;预加荷载的存在加剧了冻融循环作用后界面黏结性能的退化;冻融循环作用前后界面的破坏模式也发生了显著改变。

关键词: FRP;混凝土;界面;冻融循环;持续荷载

中图分类号: TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)05-0468-09

Bond performance degradation behavior of FRP laminate-to-concrete interface under combined effects of freeze-thaw cycling and sustained loading

CHEN Yutang, MIAO Fanfan, TANG Chen, LIU Yuwen, SHI Jiawei
(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study interfacial behavior of concrete structures strengthened with fiber reinforced polymer (FRP) subjected to the freeze-thaw cycling, this study presents experimental investigations on the degradation behavior of FRP laminate-to-concrete interfacial bond performance under combined effects of freeze-thaw cycling and sustained loading with double-lap shear tests. After being exposed up to 200 freeze-thaw cycles, the specimens were tested to failure monotonously. Digital image correlation method was employed to capture the full-field displacement of the specimen during loading. Interfacial bond stress-slip relationship was determined based on the analysis of full-field data. Test parameters included the freeze-thaw cycles, sustained loading and concrete types. Test results show that the freeze-thaw cycling leads to significant decreases in all interfacial parameters. The bond stress-slip relationship is also degenerated with freeze-thaw cycles seriously. When considering the sustained loading, additional interfacial degradations were observed after freeze-thaw cycling. Apparent changes of interfacial failure modes were also observed during tests.

Key words: FRP; concrete; interface; freeze-thaw cycling; sustained loading

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer,简称 FRP)具有轻质、高强、耐久性好、可设计性强等一系列优点。外贴 FRP 片材是一种简单有效的混凝土结构加固形式。FRP 与混凝土的界面剥离破坏是 FRP 片材

基金项目: 国家自然科学基金(51508157);河海大学创新训练项目(2017102941087)
作者简介: 陈雨唐(1996—),男,本科生,主要从事 FRP/复合材料的工程应用研究。E-mail:qbchenyutang@163.com
通信作者: 施嘉伟,讲师。E-mail:jwshi@hhu.edu.cn
引用本文: 陈雨唐,缪凡璠,唐晨,等.循环与持续荷载共同作用下 FRP 片材-混凝土界面黏结性能的退化行为[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):468-476.
CHEN Yutang, MIAO Fanfan, TANG Chen, et al. Bond performance degradation behavior of FRP laminate-to-concrete interface under combined effects of freeze-thaw cycling and sustained loading[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 468-476.

外贴加固混凝土构件的一种重要破坏模式,会导致 FRP 的高强度无法完全发挥^[1]。目前对 FRP 片材-混凝土界面的短期性能已提出了众多界面承载力和界面黏结滑移关系的预测模型^[2-3]。然而,工程结构在使用过程中面临服役荷载和自然环境的共同作用,界面的耐久性能直接关系到 FRP 加固混凝土结构的长期服役效果。

冻融循环是影响寒冷地区混凝土结构耐久性的一个重要因素。研究表明,冻融循环对普通混凝土的力学性能有严重削弱作用,而高强混凝土或在混凝土中掺入引气剂等能够显著提升混凝土的抗冻性^[4-5]。冻融循环作用不会影响纤维本身的性能,树脂基体以及纤维-基体界面性能的退化是造成 FRP 性能退化的主要原因^[6]。冻融循环作用对界面性能有不利影响,并且在较大冻融循环次数下还伴随着破坏模式的改变^[7-9]。

FRP 片材-混凝土界面承受荷载的长期作用,因此只有在耐久性试验中考虑服役荷载才能准确反映实际 FRP 片材-混凝土界面的受力状况。王苏岩等^[10]指出持续荷载和冻融循环共同作用对碳纤维增强复合材料(CFRP)-高强混凝土黏结界面产生了额外的损伤,导致黏结界面弹性模量降低,承载能力下降。任慧韬等^[11]认为在环境和持续荷载共同作用下,黏结界面更容易遭受侵蚀介质的腐蚀,加速了加固试件的黏结失效破坏。Jia 等^[12]则认为冻融循环和持续荷载共同作用对加固试件的变形量及极限承载能力没有较大影响,这一观点也得到了 Tam 等^[13]的支持。由此可以看出,考虑冻融循环和持续荷载共同作用下的 FRP 片材-混凝土的界面黏结性能劣化机理需要更深入的研究。

笔者对 42 个双面剪切(双剪)试件进行了试验,在 FRP 片材-混凝土双面剪切试件内部设计了加载装置,实现在冻融循环的同时给界面施加持续荷载,研究持续荷载、混凝土种类和冻融循环次数对 FRP 片材-混凝土界面性能的影响。

1 试验概况

1.1 试验材料

双剪试件混凝土包括普通和引气混凝土,引气混凝土是在普通混凝土中掺入占胶凝材料质量 0.7% 的 GYQ 型高效引气剂所得。浸渍胶和底涂胶分别为上海三悠树脂生产的 L-500 和 RN-6 型环氧树脂。试验所用 FRP 布为 BUF11-360 型玄武岩纤维布,理论厚度为 0.156 mm。各材料的实测力学性能指标见表 1。

1.2 试件设计及预加载

依据 JSCE 试验规程^[14]制作了混凝土表面粘贴玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)片材的双面剪切试件,如图 1 所示。混凝土表面经过打磨和清洁处理后,涂刷底涂胶,待其达到初凝状态时黏结单层玄武岩纤维布。双剪试件分为试验端和锚固端 2 个部分,破坏试验时锚固端采用钢板锚固,以保证剥离破坏发生于试验端。

为了在狭小的冻融循环试验箱空间内实现界面的预加载,在试验端预埋了 30 mm 内径的钢管,在靠近两混凝土试块分隔处钢管内设置了一段长 30 mm 的内螺纹,在钢管内穿入钢螺杆,拧动螺杆使之顶住锚固端混凝土试块,从而在不增加试件外部尺寸的条件下实现 FRP-混凝土界面的预加载。预加载通过扭力扳手旋转固定在钢螺杆上的螺母施加,预加荷载的大小通过布置在非黏结段 FRP 片材上的应变片进行控制,如图 1 所示。

1.3 冻融循环试验

冻融循环试验依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[15]中的快冻法

表 1 试验材料的实测力学性能平均值

Table 1 Measured average mechanical property of test materials

材料	压缩强度/ MPa	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ GPa	极限 变形/%
BFRP 片材		2 145	81.50	2.76
浸渍胶	93.9	52	2.87	2.90
底涂胶		59.8	3.26	2.39
普通混凝土	52.4			
引气混凝土	43.1			

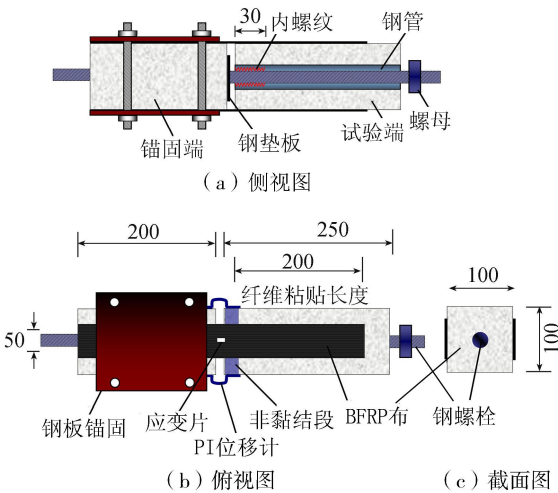


图 1 双面剪切试件示意图(单位:mm)
Fig.1 Scheme of double-lap shear specimen (units: mm)

进行。在冻融循环试验前,将双剪试件装入橡胶试件盒并在盒内注入清水,FRP 片材和树脂冻融材性试件放置在双剪试件与橡胶盒的空隙处,之后将试件盒放入盛有冻融液的冻融试验箱。在冻融液和控制混凝土试块中放置温度传感器,冻融循环周期约为 3~4 h,冻融液温度变化范围为 20~-25℃,混凝土试块中心温度变化范围为 8~-17℃。另外,为了避免泡水对试件材料性能的影响,所有试件均与受最大冻融作用的试件浸泡相同时间的水。

1.4 破坏试验

经历完相应次数的冻融循环作用和相同的浸水周期后,卸载预加荷载,并在量程为 10 t 的万能试验机上进行拉伸破坏试验。试验加载按位移控制,加载速度为 0.2 mm/min。采用 PI(π形)位移计测量两混凝土试块之间的相对位移,在试验机与试件之间连接荷载传感器,测量加载过程中的荷载,传感器数据由 TDS530 测试仪自动采集,采样频率为 1 Hz。采用数字图像相关(DIC)法量测双剪试件表面(FRP 片材及两侧混凝土)的全场位移,进一步计算 FRP 应变分布、界面滑移分布、界面黏结滑移关系等重要界面参数^[16]。

2 试验结果及讨论

2.1 材料的冻融耐久性能

2.1.1 FRP 片材

冻融循环作用后,BFRP 片材表面无明显变化,破坏模式也无改变。如图 2 为冻融循环后 FRP 片材的拉伸性能试验结果,图中每组结果为 5 个有效数据平均值,其中 CFRP 和玻璃纤维增强复合材料(GFRP)结果为文献[6]中与本文采用相同方法的冻融耐久性数据。

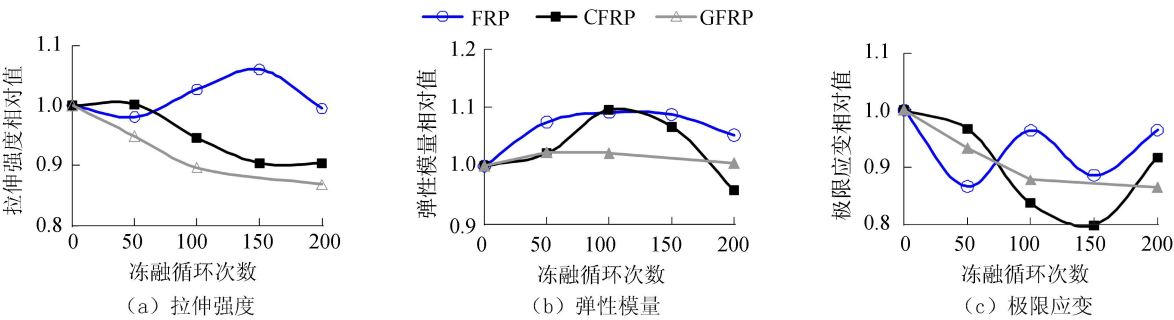


图2 冻融循环作用后 FRP 片材的拉伸性能相对值
Fig. 2 Normalized values of FRP tensile properties after freeze-thaw cyclings

随冻融循环次数增大,FRP 片材抗拉强度和延伸率呈下降趋势,而弹性模量基本没有降低。200 次冻融循环作用后,BFRP 的拉伸强度无明显降低,高于 CFRP;FRP 片材弹性模量经冻融循环之后呈先增大后略微减小的变化,BFRP 的增长幅度大于 CFRP 和 GFRP;冻融循环作用之后,BFRP 的极限应变相对值略有下降,在较大冻融循环次数下仍高于 CFRP 和 GFRP。BFRP 片材在冻融循环作用后的各项指标均高于 CFRP 和 GFRP,抗冻性能优异。

2.1.2 黏结树脂

对冻融循环作用后黏结树脂的拉伸性能和钢-钢拉伸剪切性能进行了测试,图 3 为试验结果的相对值。与 FRP 片材类似,冻融循环作用对黏结树脂的弹性模量几乎没有影响;而拉伸强度和极限应变随着冻融循环次数的增大降低明显,100 次循环后降速变缓,拉伸强度保留率略高于极限应变,250 次冻融循环作用后保留率分别为 72% 和 70%;黏结树脂的剪切强度随冻融循环次数的增大呈直线下降,100 次循环前性能劣化速率与拉伸性能类似,100 次循环后则明显高于拉伸性能,250 次冻融循环作用后剪切性能保留率仅为 38%。黏结树脂剪切性能的退化与试件的破坏模式是相关的:100 次循环前钢-钢剪切试件破坏面为黏结树脂破碎破坏,而 100 次循环后为钢/树脂之间的脱黏破坏,这说明在较大的冻融循环次数下树脂的黏结性能有较大退化。

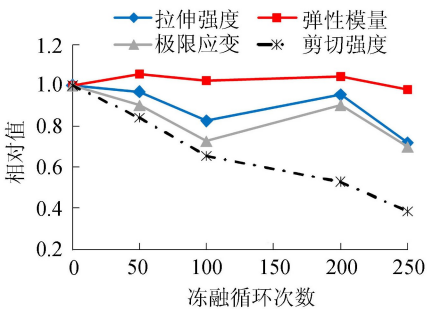


图3 冻融循环作用后黏结树脂力学性能的保留率
Fig. 3 Normalized values of epoxy resin mechanical properties after freeze-thaw cyclings

2.1.3 混凝土

50 次冻融循环作用后普通混凝土试块表层即开始有剥落,100 次循环作用后表面已可见裂纹,引气混凝土试块在 200 次冻融循环作用后表面仍然完好。冻融循环作用后对混凝土试块进行抗压试验,每组包含 5 个试样,测试结果如图 4 所示。冻融循环作用对普通混凝土力学性能削弱严重,抗压强度 f_{cu} 相对值随冻融循环次数呈线性下降,100 次冻融循环后有 3 个普通混凝土试块开裂严重,剩余的 2 个试块抗压强度仅为未冻融试块的 50% 左右。在混凝土中加入引气剂,极大提高了混凝土材料的抗冻性能,200 次冻融循环后抗压强度相对值仍有 91%。

2.2 界面破坏模式

图 5 为冻融循环作用前后双剪试件的几种典型破坏模式:(a)模式 1 为未受和受较低冻融循环作用后 FRP 片材-混凝土界面的典型破坏模式,剥离下的 FRP 片材上粘有一薄层混凝土,加载端部伴随着混凝土三角块破坏;(b)在 100 次以上冻融循环作用后,引气混凝土试件界面破坏模式发生转变,剥离下的 FRP 片材无混凝土,混凝土表面保持完好,为界面胶层的脱黏,且加载端无混凝土三角块破坏,如图 5 中模式 2;(c)模式 3 为 100 次冻融循环作用后普通混凝土试件界面破坏模式,当 FRP 片材-混凝土界面发生初始宏观剥离时混凝土试块中部沿内置螺杆方向开裂破坏。各试件破坏模式见表 2。

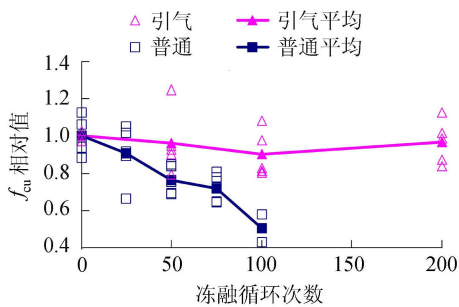


图 4 冻融循环作用后混凝土抗压强度相对值
Fig. 4 Normalized value of concrete compressive strength after freeze-thaw cyclings

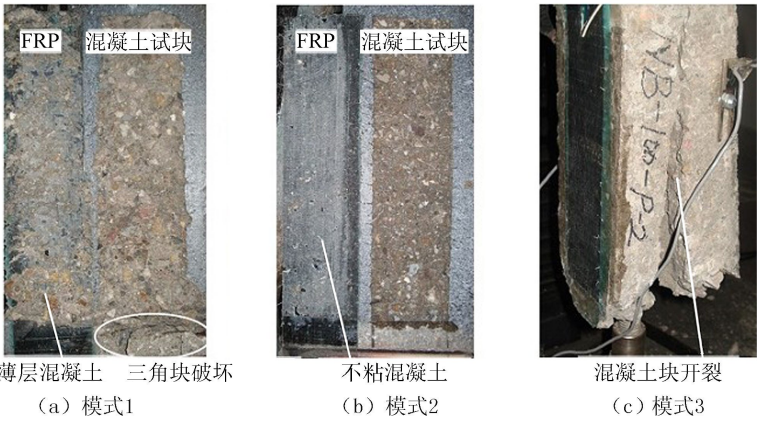


图 5 FRP 片材-混凝土界面的破坏模式
Fig. 5 Failure models of FRP-concrete interface

表 2 试件参数及主要试验结果

Table 2 Parameters of specimens and main test results								
试件编号	极限荷载/kN	破坏模式	试件编号	极限荷载/kN	破坏模式	试件编号	极限荷载/kN	破坏模式
AB-R-1	17.6	模式 1	AB-S-1	19.1	模式 1	NB-S-1	18.8	模式 1
AB-R-2	16.8	模式 1	AB-S-2	17.5	模式 1	NB-S-2	19.1	模式 1
AB-R-3	16.8	模式 1	AB-S-3	18.5	模式 1	NB-S-3	18.4	模式 1
AB-0-50-1	17.2	模式 1	AB-P-50-1	17.1	模式 1	NB-P-25-1	16.1	模式 2
AB-0-50-2	17.1	模式 1	AB-P-50-2	16.7	模式 2	NB-P-25-2	16.9	模式 1
AB-0-50-3	17.0	模式 1	AB-P-50-3	18.9	模式 1	NB-P-25-3	15.5	模式 1
AB-0-100-1	18.5	模式 1	AB-P-100-1	17.0	模式 1	NB-P-50-1	15.7	模式 2
AB-0-100-2	15.8	模式 2	AB-P-100-2	17.7	模式 2	NB-P-50-2	16.3	模式 1
AB-0-100-3	17.3	模式 1	AB-P-100-3	14.5	模式 2	NB-P-50-3	14.6	模式 2
AB-0-150-1	15.7	模式 2	AB-P-150-1	16.8	模式 1	NB-P-100-1	15.5	模式 3
AB-0-150-2	16.1	模式 2	AB-P-150-2	15.5	模式 2	NB-P-100-2	13.8	模式 3
AB-0-150-3	17.9	模式 1	AB-P-150-3	15.7	模式 2	NB-P-100-3	15.7	模式 3
AB-0-200-1	19.6	模式 1	AB-P-200-1	19.1	模式 1			
AB-0-200-2	15.7	模式 2	AB-P-200-2	15.4	模式 2			
AB-0-200-3	15.0	模式 2	AB-P-200-3	14.9	模式 2			

注:A 代表引气混凝土,N 代表普通混凝土,B 代表 BFRP 片材,R 代表未浸水的对比试件,S 代表浸水的对比试件,0/P 表示是否预加荷载,25/50/100/150/200 为冻融循环次数,1/2/3 代表同组试件编号。

界面的破坏模式与 2.1 节描述的材料冻融耐久性能是对应的。对于普通混凝土试件,冻融循环对混凝土性能有较大影响,混凝土材料是界面的薄弱环节;对于引气混凝土试件,混凝土性能受冻融影响较小,而界面胶层性能随冻融循环次数的增大退化明显,界面薄弱环节由混凝土层转移至界面胶层。

2.3 界面极限承载力和界面断裂能

表 2 列出了各试件的极限承载力。界面断裂能(G_f)为界面黏结滑移曲线包含的面积,它决定了界面极

限承载力大小,FRP 片材-混凝土界面的承载力的平方与 G_f 成正比,而与黏结滑移曲线的形式无关^[1],可表示为

$$G_f = \frac{P_u^2}{2b_f^2 E_f t_f}$$

(1)

式中: b_f ——FRP 片材的宽度; P_u ——单面的荷载极值; E_f ——FRP 片材的弹性模量; t_f ——FRP 片材的理论厚度。

图 6 为冻融循环作用后各组试件界面断裂能的平均值。由图 6 可知,各组试件界面断裂能均随冻融循环次数增大而降低,但降低速率不同:在 100 次冻融循环以内,普通混凝土试件的退化速率明显高于引气混凝土,普通混凝土性能的快速下降是导致其界面断裂能快速退化的原因;冻融过程中,AB-P 试件在相应的冻融循环次数下界面断裂能整体低于 AB-0 试件,说明持续荷载的存在加剧了冻融循环的破坏作用。另外,混凝土试件在经过一定时间的浸水作用后界面断裂能有所增大,如图 6 中的 AB-R 和 AB-S,这是由于混凝土和界面胶层材料在水中得到养护和后固化而使界面材料性能进一步增大的缘故。而试验中试件是浸泡在水中进行冻融作用的,部分文献试验中出现受冻融之后的界面承载力反而有所提高的现象就与上述原因相关。为了避免该因素的影响,如 1.3 节所述除 AB-R 之外的所有试件均作浸水处理,并在数据分析时将浸水作用后界面的性能指标作为未冻融试件的参考值。

2.4 荷载-加载端滑移关系

荷载-加载端滑移关系反映了界面的承载和延性性能。试验中加载端滑移由布置在混凝土两侧的 PI(π) 位移计平均值减掉非黏结段 FRP 片材伸长变形所得。冻融前后各组试件的荷载-加载端滑移曲线如图 7 所示。图 7(a)对 AB-0 和 AB-P 试件进行了比较:2 组试件的界面极限荷载和极限滑移均随冻融循环次数增大而降低;AB-0 试件的极限荷载和极限滑移均高于 AB-P 试件,这反映出了冻融循环作用时荷载的存在对界面的不利影响;冻融循环及荷载共同作用对曲线的初始刚度(曲线上升段斜率)几乎无影响。图 7(b)反映了冻融循环和荷载共同作用对普通混凝土-FRP 界面的影响,退化规律与引气混凝土类似,但退化程度更加显著,100 次冻融循环作用后初始刚度还有明显的降低。

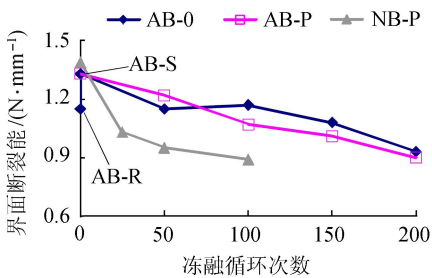


图 6 冻融循环作用后的界面断裂能
Fig.6 Interfacial fracture energies after freeze-thaw cyclings

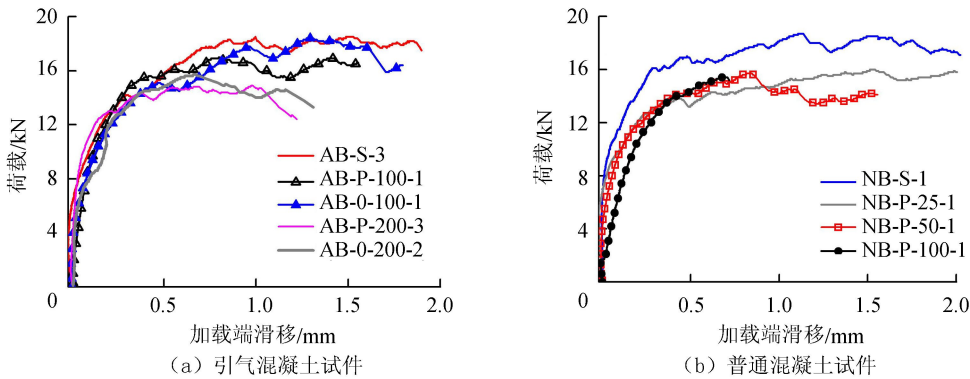


图 7 荷载-加载端滑移关系
Fig.7 Load versus slip at loaded end

2.5 试件表面位移分布

试验采用数字图像相关(DIC)法测量试件表面的变形,直接输出的结果是以像素为单位的数值,经过标定处理后可获得位移数据,详细的测量过程见文献[16]。图 8(a)为 FRP 片材及其两侧混凝土表面在加载过程中的位移变化情况。由图 8(a)可知:FRP 位移数值随远离加载端而逐渐减小,达到一定位置后位移值则恒定不变;混凝土位移全长几乎恒定不变,该位移数值与远离加载端的 FRP 位移相等,这也等于试件加载过程中的刚体位移。

根据文献[16]的研究,采用式(2)对 FRP 位移进行拟合具有较好的效果。

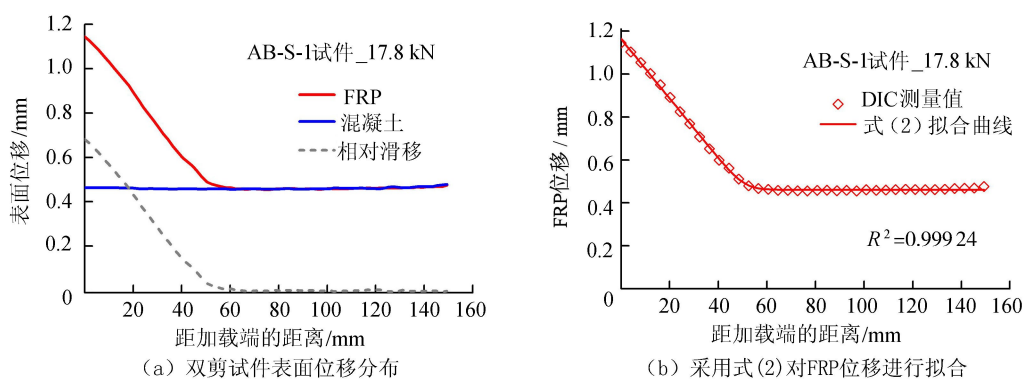


图 8 位移分布
Fig. 8 Distribution of displacement

$$u_f(x) = a \ln(1 + e^{\frac{x_0 - x}{b}}) + u_c \quad (2)$$

式中： u_f ——FRP 位移； u_c ——混凝土位移； x ——距加载端的距离； a 、 b 、 x_0 ——拟合参数， x_0 也等于界面剪应力峰值距加载端距离。

在此基础上可以推得界面各种性能指标表达式，如 FRP 应变分布、有效黏结长度、黏结滑移关系等（式（3）~（7））。采用该方法可以有效减小应变和剪应力求解过程中因求导计算产生的误差，并充分发挥 DIC 法全场测量的优势，得到较为精确的界面性能指标。图 8（b）为采用式（2）对图 8（a）中的 FRP 位移数据进行拟合处理的示例，由图可见拟合曲线与测量数据吻合很好，反映了 FRP 位移变化的规律。以下 2 节对采用该方法得到的结果进行分析。

2.6 FRP 应变分布及有效黏结长度

FRP 的应变及有效黏结长度可根据式（3）（4）得到，相关参数由 2.5 节中的位移拟合分析获得。将参数带入式（3）（4），可得到各试件加载过程中 FRP 的应变分布和不同冻融循环次数下的有效黏结长度，如图 9~11 所示。

$$\varepsilon(x) = \frac{\frac{a}{b}}{1 + e^{\frac{x-x_0}{b}}} \quad (3)$$

$$L_e = 2b \ln\left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}\right) \quad \alpha = 0.96 \quad (4)$$

图 9（a）（b）对不同冻融循环次数作用后引气混凝土双剪试件的 FRP 应变分布进行了比较，在界面发生初始剥离前及剥离扩展阶段，FRP 最大应变随冻融循环次数增大呈明显降低的趋势，界面应力传递段应变曲线的斜率也出现明显降低，表明界面剪应力也随冻融循环次数的增大而减小。图 9（c）（d）为普通混凝土试件的 FRP 应变分布，在界面发生初始剥离前及剥离扩展阶段，FRP 的最大应变和界面应力传递段应变曲线的斜率随冻融循环次数增加所呈现的变化规律与引气混凝土试件类似，表明冻融循环与持续荷载的共同作用对界面黏结性能产生了较大的削弱。

图 10 对相同冻融循环次数下引气混凝土双剪试件在有无荷载共同作用下的 FRP 应变分布进行了比较，在界面发生初始剥离前及剥离扩展阶段，考虑荷载共同作用后，FRP 最大应变进一步降低，但降低幅度远小于冻融循环的影响，其应力传递段的曲线斜率基本保持不变，表明考虑荷载共同作用前后界面剪应力差异不大。可以看出持续荷载的共同作用进一步加剧了冻融环境下界面黏结性能的退化，但其影响程度要低于冻融循环的单独作用。

图 11 对 AB-0 和 AB-P 试件在不同冻融循环次数下平均有效黏结长度（ L_e ）的比较，随着冻融循环次数的增加，AB-0 和 AB-P 试件的有效黏结长度均呈上升趋势。根据现有研究^[1-3]， L_e 与混凝土强度成反比，与 FRP 弹性模量成正比，冻融循环作用后混凝土强度呈降低而 FRP 弹性模量则呈略微增大的趋势，因此 L_e 随冻融循环次数的增加而变大是合理的。考虑荷载共同作用后，AB-P 试件有效黏结长度变化曲线的斜率明显小于 AB-0 试件，这与荷载共同作用后界面黏结滑移曲线上升段的脆性增加有关。AB-P 试件的有效黏结长

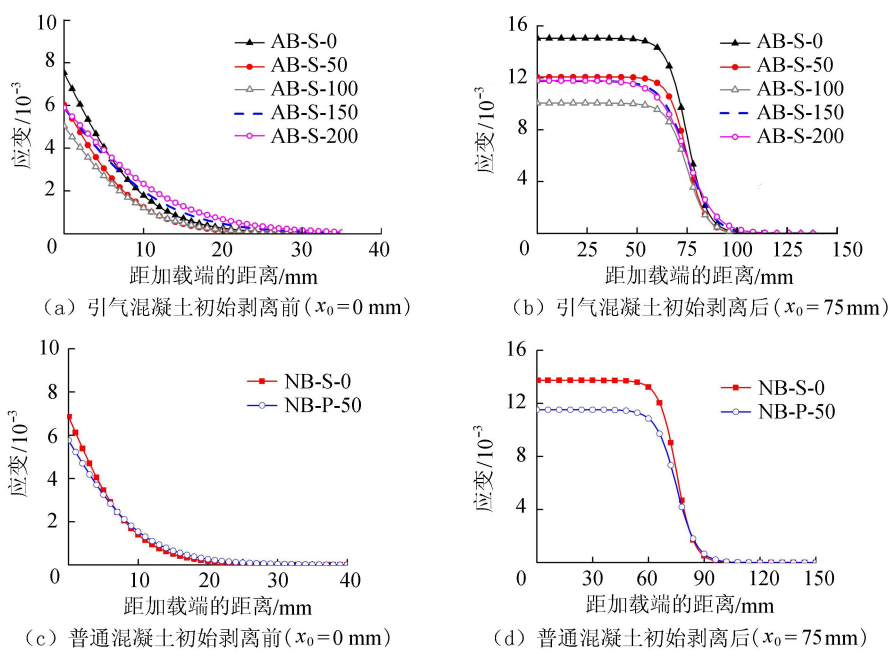


图 9 冻融循环对 FRP 应变分布的影响

Fig. 9 Effect of freeze-thaw cycling on the distribution of FRP strain

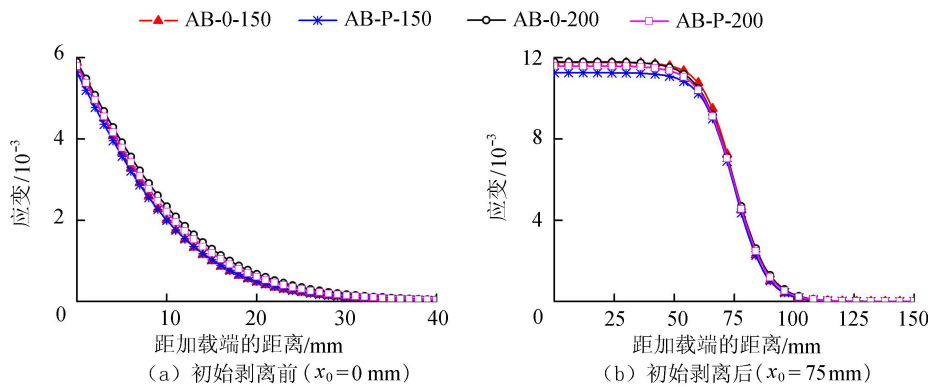


图 10 持续荷载共同作用对 FRP 应变分布的影响

Fig. 10 Effect of sustained load on the distribution of FRP strain

度在 50 次、100 次、150 次循环下均大于 AB-0 试件,所以在一定程度上荷载共同作用增大了有效黏结长度,也就是说更多的黏结界面提前进入了工作状态,这对长期冻融循环下黏结界面的耐久性是不利的。当循环 200 次时,AB-0 试件的有效黏结长度大于 AB-P 试件,可知荷载共同作用对增大有效黏结长度的影响随冻融循环次数的增大而减小。

2.7 界面黏结滑移关系

界面黏结滑移关系可根据式(5)求得,界面最大剪应力 τ_0 及其对应的滑移值 s_0 可根据式(6)(7)求得。相关参数由 2.5 节中的 FRP 位移数据拟合分析获得,所得结果如图 12 ~ 13 所示。

$$\tau(s) = E_t t_f \frac{a}{b^2} e^{-\frac{s}{a}} (1 - e^{-\frac{s}{a}})$$

(5)

$$\tau_0 = \frac{1}{4} E_t t_f \frac{a}{b^2}$$

(6)

$$s_0 = a \ln 2$$

(7)

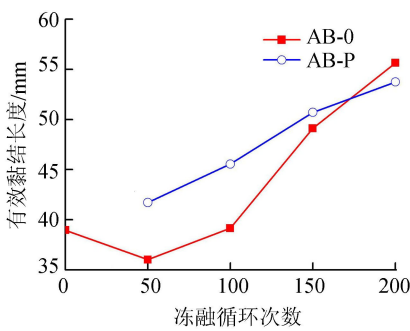


图 11 有效黏结长度随冻融循环次数的变化

Fig. 11 Effect of freeze-thaw cycling on the effective bond length

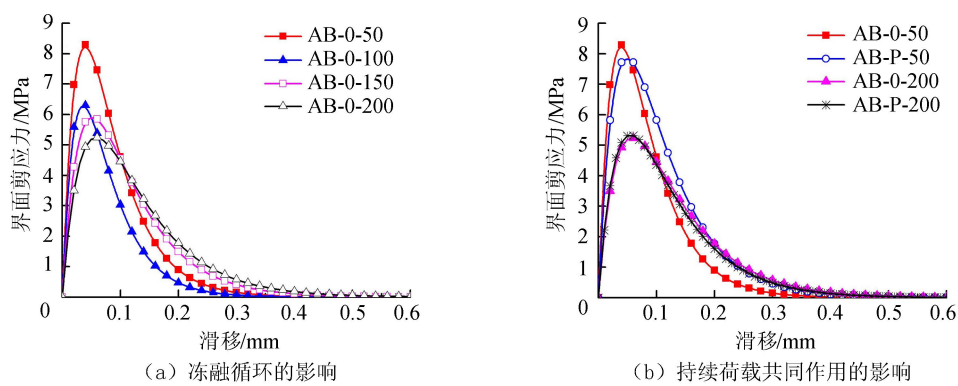


图 12 冻融循环及持续荷载共同作用对界面黏结滑移关系的影响

Fig. 12 Combined effect of freeze-thaw cycling and sustained load on the interface bond stress-slip relationship

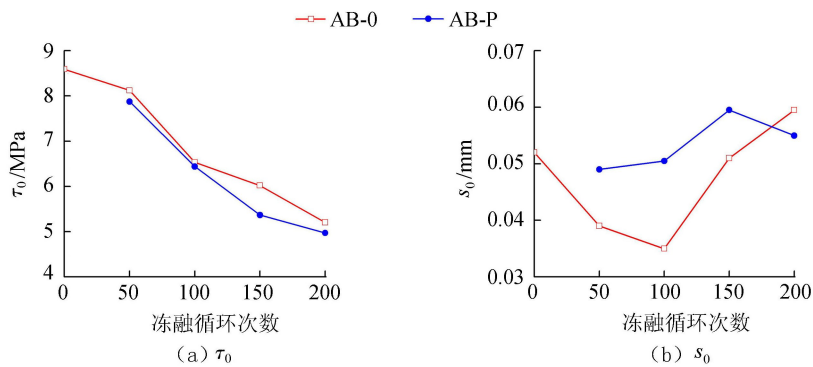


图 13 界面黏结滑移关键参数随冻融循环次数的变化

Fig. 13 Effect of freeze-thaw cycling on the key parameters of interface bond stress-slip relationship

图 12 对冻融循环及其与持续荷载共同作用后双剪试件的黏结滑移关系进行了比较。由图 12(a)可知,随冻融次数的增大,界面黏结滑移曲线呈现出明显的退化:界面剪应力最大值 τ_0 明显降低,界面断裂能 G_f 随冻融次数的增大也快速降低,也就是界面极限承载力降低。当考虑荷载共同作用后, τ_0 和 G_f 出现了进一步的退化,但是退化的程度随着冻融循环次数的增加而逐步减小,如图 12(b) 所示。

在图 12 的基础上,图 13 对黏结滑移中的界面最大剪应力 τ_0 及其对应的滑移值 s_0 两个关键参数进行了进一步分析,界面断裂能已在 2.3 中讨论过,故不再加以讨论。由图 13(a)可知,AB-P 和 AB-0 试件的界面最大剪应力均随冻融循环次数的增加呈近乎线性降低,且二者下降的斜率几乎相同,即随着冻融循环次数增加界面将在较小的剪应力下发生破坏。由图 13(b)可知,AB-P 试件的 s_0 值呈先增大后减小的趋势,而 AB-0 试件则呈先减小后增大的趋势,两者的变化范围均较小,表明冻融循环及其与荷载的共同作用对 s_0 的影响不显著。

3 结 论

- a. 冻融循环作用后,FRP-混凝土界面的极限承载力、极限滑移、FRP 最大应变、界面黏结滑移参数(最大剪应力,界面断裂能)等均出现显著降低,而有效黏结长度则呈现增大的趋势。
- b. 对于普通混凝土试件,冻融循环对混凝土性能有较大影响,混凝土材料是界面的薄弱环节;对于引气混凝土试件,混凝土性能受冻融影响相对较小,而界面胶层性能随冻融循环次数的增大退化明显,界面薄弱环节由混凝土层转移至黏结胶层。
- c. 在冻融循环的同时考虑持续荷载的共同作用,界面极限承载力、极限滑移、FRP 最大应变及界面最大剪应力等指标相比单一冻融循环作用下均出现了进一步的退化,而有效黏结长度较单一冻融循环下有一定增加;冻融循环产生的退化程度大于持续荷载共同作用的影响,且随着冻融循环次数的增大,荷载共同作用的影响逐渐减小。

参考文献:

- [1] WU Zhishen, YIN Jun. Fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete structures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(10): 1339-1355.
- [2] 杨勇新,岳清瑞,胡云昌. 碳纤维布与混凝土黏结性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3): 36-42. (YANG Yongxin, YUE Qingrui, HU Yunchang. Experimental study on bond performance between carbon fiber sheets and concrete[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(3): 36-42. (in Chinese))
- [3] WU Zhishen, ISLAM S M. A three-parameter bond strength model for FRP-concrete interface[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2009, 28(19): 2309-2323.
- [4] 于孝民,任青文. 冻融循环作用下普通混凝土断裂能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 80-82. (YU Xiaomin, REN Qingwen. Fracture release energy for ordinary concrete with freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(1): 80-82. (in Chinese))
- [5] 金伟良,吴航通,许晨,等. 钢筋混凝土结构耐久性提升技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 68-76. (JIN Weiliang, WU Hangtong, XU Chen, et al. Advances in research of technologies for durability enhancement of reinforced concrete structures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 68-76. (in Chinese))
- [6] SHI Jiawei, ZHU Hong, WU Gang, et al. Tensile behavior of FRP and hybrid FRP sheets in freeze-thaw cycling environments [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 60: 239-247.
- [7] GREEN M F, BISBY L A, BEAUDOIN Y, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the bond durability between fiber reinforced polymer plate reinforcement and concrete[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5): 949-959.
- [8] SUBRAMANIAM K V, ALI-AHMAD M, GHOSN M. Freeze-thaw degradation of FRP-concrete interface; impact on cohesive fracture response[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(13): 3924-3940.
- [9] SILVA M A G, BISCAIA H. Degradation of bond between FRP and RC beams[J]. Composite Structures, 2008, 85(2): 166-174.
- [10] 王苏岩,尹晓明,刘林. 持载作用下 CFRP-高强混凝土界面的抗冻性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(5): 834-841. (WANG Suyan, YIN Xiaoming, LIU Lin. Research on freeze-thaw resistance behaviour of bonded joints between CFRP and high strength concrete under sustained load[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Sciences), 2009, 25(5): 834-841. (in Chinese))
- [11] 任慧韬,李杉,高丹盈. 荷载和恶劣环境共同作用对 CFRP-钢结构黏结性能的影响[J]. 土木工程学报, 2009, 43(3): 36-41. (REN Huitao, LI Shan, GAO Danying. Bond behaviour of CFRP and steel under dry-wet cyclic condition and loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 43(3): 36-41. (in Chinese))
- [12] JIA J, BOOTHBY T E, BAKIS C E, et al. Durability evaluation of glass fiber reinforced polymer concrete bonded interfaces [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2005, 9(4): 348-359.
- [13] TAM S, SHEIKH S A. Behavior of fibre reinforced polymer (FRP) and FRP bond under freeze-thaw cycles and sustained load [C]//4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Zurich: International Institute for FRP in Construction, 2008.
- [14] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Test method for bond properties of continuous fiber sheets to concrete: JSCE-E-543—2000[S]. Tokyo: Research Committee on Upgrading of Concrete Structures with use of Continuous Fiber Sheets, JSCE, 2001.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [16] 施嘉伟,朱虹,吴智深,等. 数字图像相关法测量 FRP 片材与混凝土界面的黏结滑移关系[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 13-22. (SHI Jiawei, ZHU Hong, WU Zhishen, et al. Digital image correlation method for measuring the bond-slip relationship of FRP sheet-concrete interface[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 13-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-03-05 编辑: 刘晓艳)