

海洋环境下 CFRP - 混凝土粘结性能的试验研究

王吉忠, 张 建

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为全面了解海水环境下 CFRP - 混凝土界面粘结性能的变化规律, 采用单面剪切试验方法, 考虑混凝土强度、CFRP 的宽度、CFRP 的粘贴长度以及海水侵蚀时间等因素, 对 CFRP - 混凝土的粘结性能进行了深入研究。试验结果表明: 随着侵蚀时间的增加, 界面粘结强度总体呈缓慢下降的趋势; 荷载滑移曲线上拐点所对应的滑移值以及最大滑移值有所增加; 剪应力分布曲线可以较好的反应出界面的剥离过程; 混凝土强度等级对粘结强度的影响程度较小。

关键词: CFRP; 混凝土; 海水侵蚀; 粘结性能; 单剪试验; 粘结强度

中图分类号: TU528.58⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)04-0051-05

Experimental Study on Bond Performance between CFRP and Concrete in Seawater Environment

WANG Ji-zhong, ZHANG Jian

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to obtain the variation of the interface bond performance between CFRP and concrete in seawater environment, the single shear test is adopted to study the bond performance of CFRP-concrete with the emphasis on the effects of concrete compression strength, width of CFRP, bond length of CFRP and seawater erosion time. The test results show that the interface bond strength between CFRP and concrete has a slowly downward trend with the increase of erosion time; The slip value corresponding to the inflection point of load-slip curve and the maximum slip value have a certain increase; The shear stress distribution curve can show the interface debonding process between CFRP and concrete; The concrete compression strength has a small impact on the bond strength.

Keywords: CFRP; concrete; seawater erosion; bond performance; single shear test; bond strength

0 引言

对于港口和滨海地区的建筑物, 钢筋混凝土构筑物长期处于海水浸泡的特殊环境中, 不可避免的要受到海水的物理和化学侵蚀, 造成钢筋混凝土结构产生各种缺陷而发生破坏。近年来, 碳纤维增强塑性材料(CFRP)作为一种高强、耐腐蚀的优良加固材料, 已经成为工程结构加固领域中研究和应用的热点^[1-4]。

将碳纤维材料用于增强海水中的钢筋混凝土结构既可以利用碳纤维材料耐腐蚀、耐久性好的特点, 又可以充分发挥其高强、高效的优点, 可以说这种方法对海工结构的防腐抗蚀是一种良好的选择。但工

程师们发现, 在 CFRP 片材强度得到充分利用之前, CFRP 与混凝土间会发生剥离破坏而失效, 而且对处于海洋环境下的结构来说, 海水中的组分会对 CFRP 与混凝土间的界面层产生一定的腐蚀作用, 进而影响界面粘结性能。由于缺少确定粘结强度的规范或标准, 以往粘结强度试验研究主要有单剪、双剪和修正梁^[5-8]等方法, 单面剪切试验方法由于比较简单而被广泛采用。为此本文通过单剪试验研究在海水侵蚀环境下, CFRP - 混凝土界面粘结强度的变化、剪应力的分布、荷载滑移曲线的变化规律以及混凝土强度对界面粘结强度的影响, 由此分析界面粘结性能的变化。

1 试验方案

1.1 试件设计与制作

试验中,混凝土试件的强度等级无论是 C30 还是 C60,都采用等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥,砂为中砂,石子采用碎石,砂石料级配良好,粉煤灰类别属于 I 类,FND-1 型高效减水剂。试件采用钢模板分批浇筑,采用强制式搅拌机拌制混凝土,台式振

表 1 混凝土材料的各项指标

强度等级	水泥/kg	水/kg	砂/kg	石子/kg	粉煤灰/kg	减水剂/kg	f_{cu}/MPa
C30	291	185	656	1217	67	0.873	41.1
C60	440	165	590	1145	110	2.200	63.6

表 2 CFRP 材料性能

名义厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
0.167	4100	240	1.8

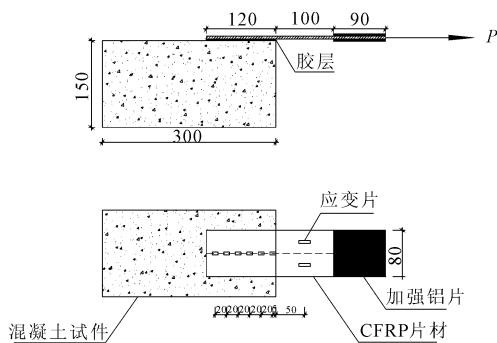


图 1 剪切试件示意图(单位:mm)

本试验共制作 CFRP-混凝土试件 72 个,试件尺寸为 $150 \times 150 \times 300$ (mm^3)。为提高混凝土试件的利用率,粘贴面积为 150×300 (mm^2) 的 CFRP 片材在混凝土的一侧粘贴,其余粘贴面积的 CFRP 片材均在混凝土的两侧粘贴,试件的具体参数见表 3。将制作好的试件置于人工海水^[10]中进行侵蚀老化,侵蚀时间分为 0 d、30 d、60 d、90 d、120 d 和 150 d 六种,用来研究不同侵蚀时间下,CFRP 与混凝土之间粘结性能的变化。海水温度大致控制在 20°C 左右。

表 3 试验参数汇总表

CFRP 粘贴尺寸 (宽度×长度)/ mm^2	人工海水侵蚀时间/d					
	0	30	60	90	120	150
80×80	2	2	2	2	2	2
80×120	2	2	2	2	2	2
150×120	2	2	2	2	2	2
150×200	2	2	2	2	2	2
150×300	2	2	2	2	2	2

注:C30 试件参数的情况与 C60 完全相同。

动器振动成型,24 h 后拆模,标准养护室养护 28 d。混凝土的各项指标见表 1。CFRP 布采用英国原装进口 Sigmatec PC 251 复合纤维材料,主要性能指标见表 2。黏合剂采用瑞士生产的 Araldite AV/HY180-2 碳纤维布粘结胶。按照《结构加固修复用碳纤维片材》^[9](GB/T21490-2008)将 CFRP 粘贴在混凝土表面,在温度 20°C 左右环境下养护 7 d,即可进行侵蚀试验了,标准试件见图 1。

1.2 试验装置

CFRP-混凝土试件的粘结试验采用单面剪切粘结试验方法^[11],自制的加载装置如图 2 所示。

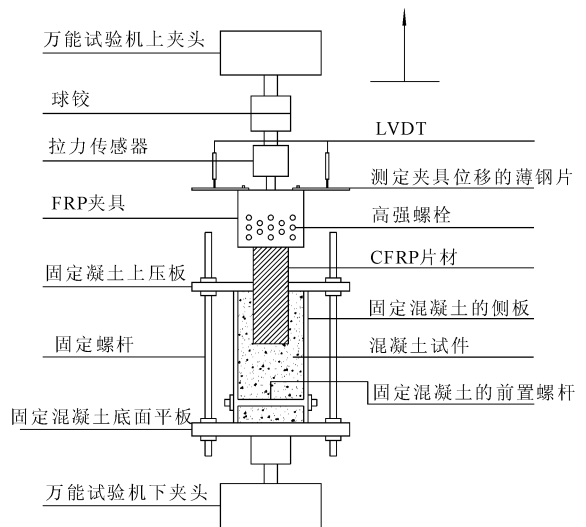


图 2 单面剪切试验加载装置

试验中,通过调整固定螺杆中的螺栓来调节上固定钢板,进而将混凝土试件牢牢固定在试验机下台座上,固定混凝土的前置螺杆的作用是防止加载过程中混凝土下部翘起。将粘有加强铝片的 CFRP 片材一端用夹具固定,并和拉伸传感器以及球铰连接后固定在万能试验机上台座上,即可进行单剪试验了。

1.3 仪表布置及加载

本试验所有试件均在 100 t 电液伺服万能试验机上进行,采用等速试验力控制,加载速度为 $1.5 \text{ kN}/\text{min}$,直到发生粘结破坏时停止加载,同时记录试验现象。试验过程中,通过荷载传感器和 LVDT 来实时量测 CFRP 加载端的荷载和位移。为防止固定

底板有任何微小位移,在其左右两侧分别配置 LVDT 来量测。通过粘贴在 CFRP 片材上的应变片来实时量测各点的应变变化,CFRP 片材粘贴面积为 80×120 (mm^2) 试件各应变测点的布置情况如图 3。所有数据均通过德国产的动态采集设备 IMC 进行实时采集。

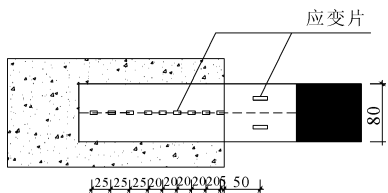


图 3 CFRP 应变片布置情况

2 试验现象

2.1 腐蚀试验现象

经过海水侵蚀后,CFRP 片材表面发白,触感滑腻,同时有一层盐附着在混凝土的表面。CFRP 和混凝土的表面经擦拭后,颜色仍对比试件发白,说明一部分盐已经侵入到混凝土、CFRP 以及粘结胶层中。

2.2 单剪试验破坏形态

本次单剪试验共有三种破坏形态^[12]:混凝土拉剪破坏、界面剥离破坏以及混合破坏。具体破坏形态见图 4。



(a) 拉剪破坏

(b) 界面剥离破坏

(c) 混合破坏

图 4 试件破坏形态

混凝土拉剪破坏:破坏时,试块端部混凝土被剪下一大块三角体。这种破坏在未被海水侵蚀的试块中较多,但经海水侵蚀后的试块也有少量类似破坏形态。

界面剥离破坏:CFRP 与混凝土层间发生破坏,CFRP 布上粘有少量混凝土颗粒剥离下来,混凝土表面上有若干的微小裂缝。此种破坏表明,海水已经对胶层有了一定的侵蚀作用,因此经海水侵蚀后的试块大部分发生这种破坏,经统计属于此种破坏的

试件占试件总数的 78%。

混合破坏:属于上述两种现象的混合。

3 单剪试验结果分析

3.1 粘结强度的变化规律

CFRP-混凝土界面平均粘结强度的计算公式为: $\tau_w = P/A$,其中 τ_w 为平均粘结强度; P 为破坏荷载; A 为 CFRP 的粘贴面积,粘结强度分布趋势见图 5。

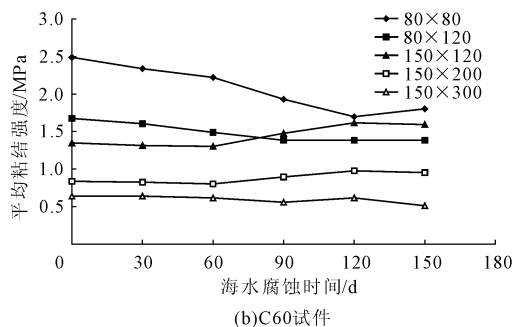
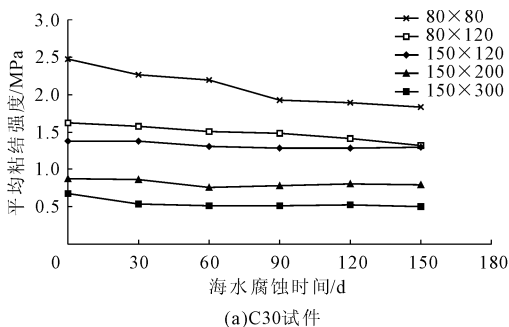


图 5 海水侵蚀时间-粘结强度曲线

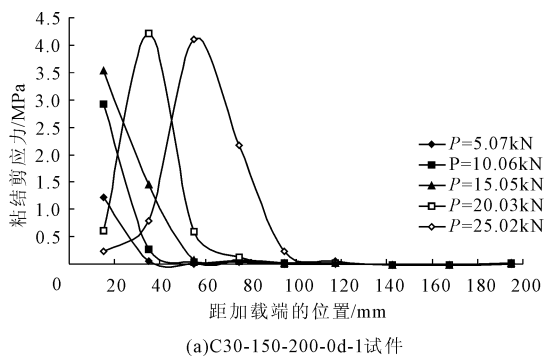
由图 5 可以看到,无论 C30 还是 C60 强度等级的混凝土试件,随着侵蚀时间的增加,界面粘结强度

总体呈缓慢下降的趋势,其中 C30 强度等级的试件 150 d 老化后平均降幅一般在 18% 左右,说明在海

水侵蚀下,海水中的组分弱化了胶层与混凝土之间的抗剪强度,使得 CFRP-混凝土的粘结性能有着一定的下降,验证了试验的破坏现象。另外随着侵蚀时间的增加,混凝土的强度也会随着龄期的增长而增加,这样粘结胶层与混凝土表面的固化作用也会增强,使得界面粘结作用有所增加,因此存在一定的波动属正常现象,但总体趋势是下降的。

3.2 CFRP-混凝土界面上剪应力的分布

图 6 是单剪试件在各级荷载作用下,各应变测点间粘结剪应力随荷载变化典型的分布曲线。加载初期,仅仅距加载端较近的区域(0~40 mm 左右)内粘结剪应力较大,且最大剪应力发生在加载端,此区



域以外的剪应力很小,这表明作用在 CFRP 片材上的荷载仅仅在 0~40 mm 区域内传给了混凝土;当荷载达到最大剪应力不在加载端时,曲线的形状发生根本的变化,形状类似正态分布曲线,这说明距加载端较近区域已处于剥离状态。同时随着荷载的增加,曲线的峰值也逐渐的远离加载端向远端发展,说明了远离加载端的区域逐渐开始参与受力,但就算荷载达到最大值时,100 mm~200 mm 区域的剪应力仍然很小,说明了剪应力只在有效的粘结长度范围以内传递,说明了有效粘结长度^[13]的存在,试验中粘结宽度为 150 mm 时,有效粘结长度大约为 60 mm~80 mm。

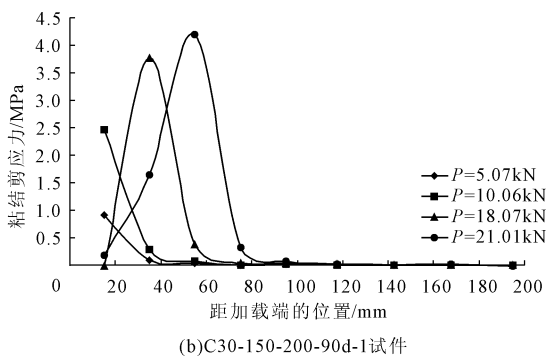


图 6 CFRP-混凝土界面上剪应力的分布

3.3 荷载与粘结滑移关系

图 7 是两种单剪试件的荷载-滑移关系曲线,另一曲线为其拟合曲线,可见拟合曲线与试验曲线的相关性较好,拟合公式^[14]采用任慧韬建议的对数函数:

$$y = a + b \cdot \ln(x)$$

其中: a 、 b 均为常数。

虽然受到海水的侵蚀,试件的破坏特征有了变化,但其粘结滑移-荷载曲线并没有根本变化。加载初期,滑移-荷载曲线呈典型的线性关系,而且斜率较大,说明滑移较小时,荷载值增加的很快,同时

也反映了此时混凝土表面无剪切裂缝出现,处于弹性状态;随着荷载的继续增加,在粘结滑移大约在 0.3 mm~0.6 mm 区域内出现一个拐点,此时出现初始剪切裂缝,拐点后曲线的滑移突然增大而荷载变化很小,说明 CFRP 与混凝土正在处在剥离状态, C60-150-200 的试件最大滑移量一般在 2 mm~2.8 mm 范围内。通过对比图 7(a)、图 7(b),可见随着侵蚀时间的增加,曲线变的略微“扁平”些,拐点所对应的粘结滑移值以及最大滑移值有了一定的增加,表明界面粘结作用有所老化,验证了海水侵蚀可以弱化界面粘结性能。

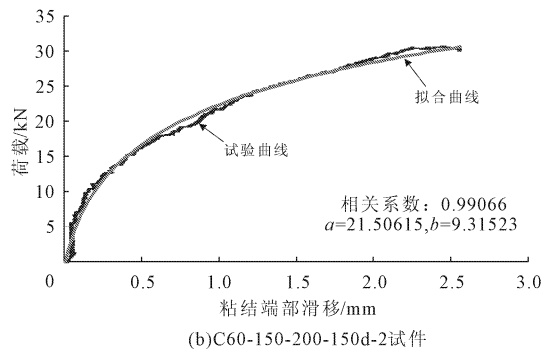
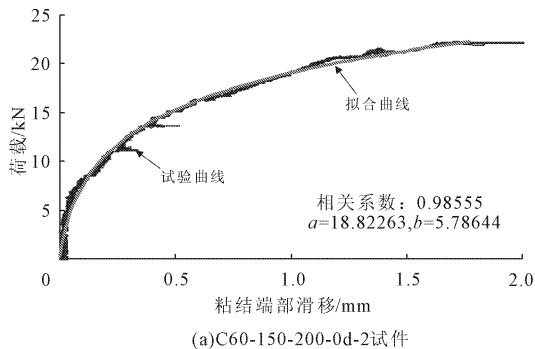
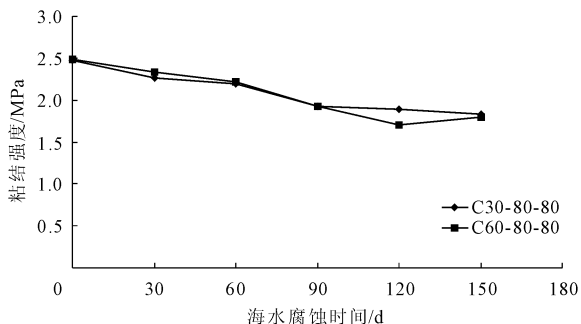


图 7 CFRP-混凝土粘结滑移-荷载关系曲线

3.4 混凝土强度等级对界面粘结强度的影响

图8是CFRP片材粘贴面积为 80×80 (mm^2)和 80×120 (mm^2)的试件在海水环境下,混凝土强度对界面粘结强度影响的曲线。从图8可以看出,对C30、C60试件,随着海水的侵蚀,界面粘结强度变化



趋势大致相同,说明彼此粘结强度衰减速率基本一致。虽然强度等级提高50%,但是粘结强度却变化不大,表明了混凝土强度的变化对粘结强度的影响程度较小,这与相关文献[15]得出一致的结论。

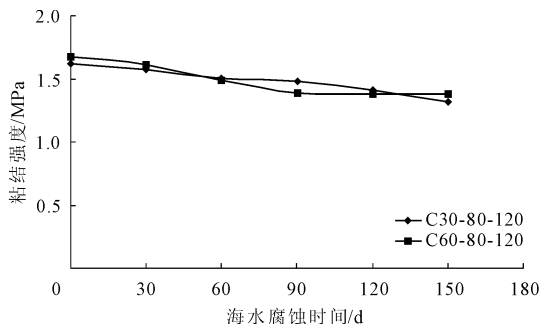


图8 混凝土强度对粘结强度的影响

4 结论

(1) 经过海水的侵蚀,大部分试件发生了界面剥离破坏,部分试件发生了拉剪和剥离的混合破坏。

(2) 随着海水侵蚀周期的增加,CFRP-混凝土界面粘结性能呈下降的趋势。

(3) CFRP剪应力分布曲线表明,界面上存在一个有效的粘结长度,试验中粘结宽度为150 mm时,有效粘结长度大约为60 mm~80 mm。

(4) 荷载滑移曲线存在一个拐点,拐点之前,曲线斜率较大,滑移变化小荷载变化大;拐点之后的曲线斜率比较小,滑移变化大荷载变化小。随着海水侵蚀周期的增加,拐点所对应的滑移量以及最大粘结滑移量是逐渐增大的。

(5) 在海水环境下,混凝土的强度等级对CFRP-混凝土界面粘结性能衰减程度的影响较小。

参考文献:

[1] 华玉,曹志强,姚雷,等. FRP片材在土木工程结构加固中的应用及力学性能试验研究进展[J]. 复合材料学报, 2005, 22(Z): 182-187.

[2] 李荣,滕锦光,岳清瑞. 嵌入式CFRP板条-混凝土界面的粘结性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 31-34.

[3] 张明辉,海洪,赵颖华,等. 碳纤维布-混凝土界面抗剪性能的试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(3): 208-210.

[4] 吴昆,翟爱良,王晖,等. 预应力玻璃纤维布加固已损混凝土梁的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,

2010, 8(5): 20-23.

[5] 杨勇新. 碳纤维布与混凝土的粘结性能及其加固混凝土受弯构件的破坏机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2001.

[6] Chen J F, Teng J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 784-791.

[7] 姚谏,滕锦光. FRP-混凝土的抗剪粘结强度试验研究[C]//第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流论文集. 昆明, 2002: 86-89.

[8] 曹双寅,潘建伍,陈健飞,等. 外贴纤维与混凝土结合面的粘结滑移关系[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1): 99-105.

[9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T21490-2008. 结构加固修复用碳纤维片材[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T15748-1995. 船用金属材料电偶腐蚀试验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.

[11] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

[12] 刘贵. 玻璃纤维布(GFRP)-高强混凝土界面粘结性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[13] 滕锦光. FRP加固混凝土结构[M]. 李荣,等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 11-26.

[14] 任慧韬. 纤维增强复合材料加固混凝土结构基本力学性能和长期受力性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

[15] 杨勇新,郭春红,才鹏,等. 海水对CFRP-混凝土界面影响的试验[J]. 工业建筑, 2006, 36(8): 10-12.