

盐溶液干湿循环对 CFRP-混凝土界面 粘结性能的影响

王吉忠*, 杨俊龙, 崔文佳

(大连理工大学 结构工程研究所, 大连 116024)

摘要: 为了考察盐溶液干湿循环条件对碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)-混凝土界面粘结性能的影响, 本文采用 5% 的 NaCl 溶液来模拟海水环境, 经过不同次数的干湿循环后, 利用单面剪切试验对 48 个试件界面性能的变化情况进行了研究。分析了上述环境对界面破坏形式、界面承载力及界面剪应力等参数的影响。结果表明: 在盐溶液干湿循环作用下, 界面粘结性能发生显著地退化, 具体表现为, 随着干湿循环次数的增加, 界面承载力会不断降低, 且下降程度与混凝土强度和 CFRP 的粘贴尺寸有关, 界面剪应力在不同环境下的分布具有相似性, 即荷载的不断加大会使剪应力逐渐由加载端向自由端传递, 但在传递过程中, 有效传递区域的长度不会发生改变。

关键词: 干湿循环; 盐溶液; CFRP-混凝土界面; 粘结性能; 耐久性

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)08-2055-10

Effect of wet and dry cycles in salt solution on the interfacial bonding property of CFRP-concrete

WANG Jizhong*, YANG Junlong, CUI Wenjia

(Institute of Structure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to investigate the effects of wet dry cycles in salt solution conditions on the interfacial bonding property of carbon fiber reinforced polymer(CFRP)-concrete, this paper adopted 5% NaCl solution to simulate sea-water environment. After different times of wetting drying cycle, the single shear test was used to study the changes of 48 specimens' interfacial properties. The effects of the above mentioned environment condition on the types of interfacial bonding failure, interfacial capacity and interfacial shear stress were analyzed. The test results show that after wet dry cycles in salt solution, the interface bonding property will be significantly degraded. With the increase of cycle times, the interfacial capacity that is related to the strength of concrete and the CFRP size continues to decrease. Although the interfacial shear stress distribution under different environmental conditions all expresses as the transmission from the loading end to the free end as the load increasing, the effective bonding length does not change during the whole transfer process.

Keywords: wet and dry cycles; salt solution; CFRP-concrete interface; bonding behavior; durability

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)以强度高、质量轻、抗疲劳性能优越和施工便捷等诸多优点, 已被广泛应用于工程结构的加固与增强领域中^[1-5]。试验研究和工程实践表明, CFRP-混凝土界面粘结性能对结构

加固的效果起着决定性的作用^[6]。而对于港口和海岸建筑, 及处在浪溅区和潮汐涨落区的混凝土结构, 因长期受到海水干湿循环的作用, 故其腐蚀破坏程度较浸没在海水中的部位更加严重。现有的大量试验研究表明, 当采用 CFRP 对浪溅区的混凝土

收稿日期: 2017-06-30; 录用日期: 2017-08-17; 网络出版时间: 2017-08-29 16:26

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170829.003>

基金项目: 国家自然科学基金(51378089)

通讯作者: 王吉忠, 博士, 副教授, 研究方向为 FRP 加固混凝土结构理论及应用 E-mail: wangjz@dlut.edu.cn

引用格式: 王吉忠, 杨俊龙, 崔文佳. 盐溶液干湿循环对 CFRP-混凝土界面粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2055-2064.

WANG J Z, YANG J L, CUI W J. Effect on interfacial bonding property of CFRP-concrete under wet and dry cycles in salt solution [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2055-2064 (in Chinese).

结构进行加固时,CFRP-混凝土界面的粘结强度将发生明显的下降,从而导致CFRP布的性能尚未充分发挥时便提前发生了粘结破坏,使结构既得不到应有的加强,又会造成材料的浪费^[7],且构件的刚度及极限荷载将随着腐蚀时间的增加表现出更加不稳定的状态,甚至会使破坏模式发生相应的变化。因此,对盐溶液干湿循环作用下CFRP与混凝土之间的粘结性能进行相应的研究具有十分重要的意义。

尽管目前已有CFRP加固混凝土结构耐久性的有关研究,但大多学者所采用的试验方法均局限于传统的简支梁或修正梁试验,较为单一。考虑到梁弯曲试验和面内剪切试验的内部应力状态是不一样的^[5],故本文通过简单可靠的单剪试验探究了盐溶液干湿循环作用下CFRP-混凝土界面的破坏过程和破坏形态,得到了界面剥离承载力的变化情况、剪应力的发展和分布规律及界面粘结滑移关系。

1 试验

1.1 试件设计及制作

CFRP选用Sigmatex PC 251复合纤维材料,其主要材料性能指标见表1。混凝土强度等级为C30和C60两种,混凝土配合比及28天抗压强度见表2。试验所用的胶黏剂为JGN型碳纤维建筑结构专用胶,胶体的抗拉强度为40 MPa,弹性模量为 2.5×10^3 MPa。

本试验共制作48个尺寸为150 mm×150 mm×300 mm的CFRP-混凝土柱,所有CFRP片材均粘

贴在混凝土的两个相对面,因而共有96组试验数据。CFRP粘贴尺寸设计为6种规格,试件的具体参数详见表3。

表1 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)材料性能

Table 1 Material properties of carbon fiber reinforced polymer(CFRP)

Thickness/ mm	Tensile strength/MPa	Modulus/ GPa	Elongation /%
0.167	4 100.0	240.0	1.8

试件制作时按《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》^[8]中相关要求将CFRP粘贴在混凝土表面,为防止出现混凝土局部拉剪破坏,粘结CFRP时在加载端留出50 mm非锚固段,试件在温度20℃左右干燥环境下养护7天后,即可进行盐溶液干湿循环试验,标准试件示意图见图1,制作完成的所有试件见图2。

1.2 试验装置和加载程序

本次试验所用盐溶液为浓度5%的NaCl溶液,且考虑到国内外相关文献^[9-12]中,干湿循环试验的持续时间大多处于1 500~5 000 h区间之内,故本文根据文献^[12]中所述方法,将在盐溶液中浸泡12 h、室温环境下风干12 h作为一个循环,总持续时间共计4 320 h,基本满足相关的试验要求。

所有单剪试验均在1 000 kN电液伺服万能试验机上完成,加载前先进行0.7 kN的预加载,卸载后按1.5 kN/min的加载速度进行单调加载,直至试件发生粘结破坏。加载时采用文献^[13]中所述

表2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mixture design

Grade	Cement/kg	Water/kg	Sand/kg	Aggregate/kg	Flyash/kg	Water reducer/kg	f_{cu} /MPa
C30	266.5	157.3	711.9	1 217	47	0.347	34.8
C60	440.0	138.5	613.0	1 145	110	3.520	64.9

Note: f_{cu} is the cubic compressive strength of concrete.

表3 CFRP-混凝土单剪试验试件参数

Table 3 Experimental parameters of CFRP-concrete specimens for single shear test

Specimen ID	CFRP size (Length×Width/mm)	Number of wet and dry cycles			
		0	60	120	180
C30-8-8- <i>x</i>	80×80	2	2	2	2
C30-15-8- <i>x</i>	150×80	2	2	2	2
C30-25-8- <i>x</i>	250×80	2	2	2	2
C30-8-15- <i>x</i>	80×150	2	2	2	2
C30-15-15- <i>x</i>	150×150	2	2	2	2
C30-25-15- <i>x</i>	250×150	2	2	2	2

Notes: The letter *x* represents the number of wet and dry cycles, which is the same for the C30 specimen and C60 specimen; And the unit of the table is piece.

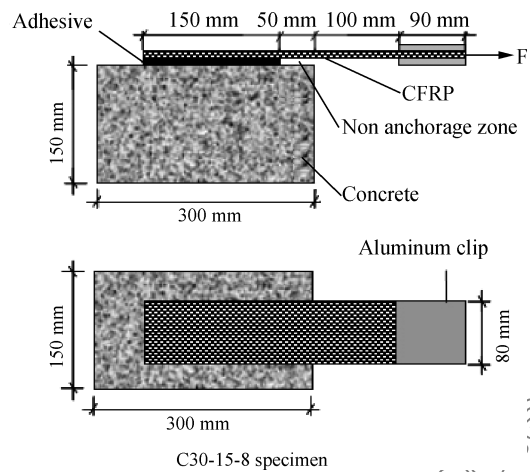
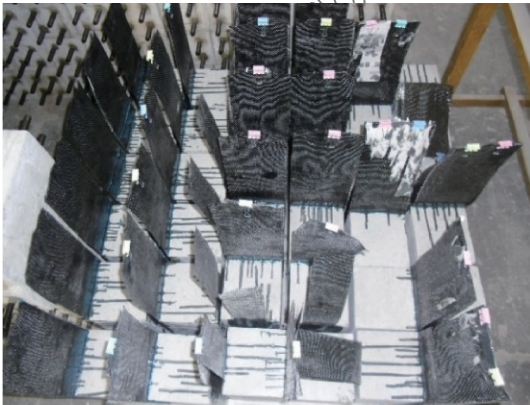


图 1 CFRP-混凝土试件示意图

Fig. 1 Diagram of CFRP-concrete specimens



(a) C30 specimens



(b) C60 specimens

图 2 CFRP-混凝土单剪试验所用全部试件

Fig. 2 All the CFRP-concrete specimens in single shear test

的加载装置，如图 3 所示，且为了防止加载端发生滑移和局部破坏，故试验前预先在加载端的 CFRP 布上粘贴 2 mm 厚的铝夹板。试验过程中的力由连接于球铰和夹头之间的荷载传感器获得，CFRP 自由端与混凝土之间的滑移量采用加在混凝土和粘贴

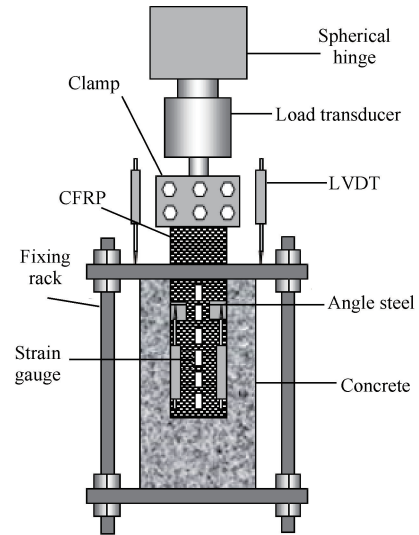


图 3 CFRP-混凝土单剪试验装置

Fig. 3 Single shear test of CFRP-concrete setup

于纤维布上的角钢的 4 个位移传感器获取，沿加载方向的应变由粘贴在纤维布上的应变片测试得到，应变片采用梯度布置，如图 4 所示，应变片距加载端 100 mm 之内按间距 20 mm 布置，距加载端 100 mm 之外按间距 25 mm 布置。

2 试验现象

2.1 盐溶液干湿循环对 CFRP-混凝土作用效果

试验发现，经过若干次的盐溶液干湿循环后，试件表面发生了较明显的变化，经历了 180 天干湿循环后的试件 C30-25-15-180 如图 5 所示，CFRP 表面出现了白色的 NaCl 结晶体，触感光滑细腻，而混凝土经过长时间的盐溶液浸泡后，表面也变得较粗糙，且有一层盐附着在其表面，整体颜色相较

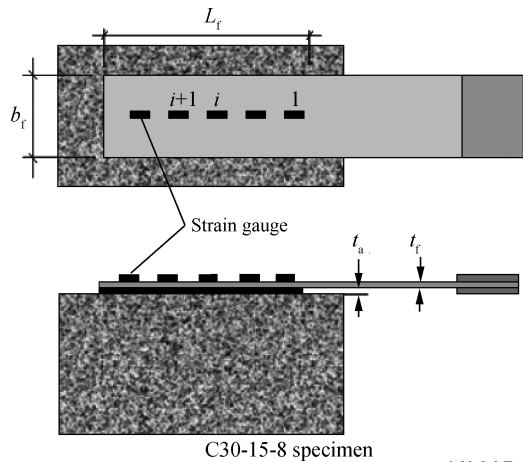


图 4 CFRP-混凝土单剪试验试件应变片布置图

Fig. 4 Strain gauges distribution of CFRP-concrete specimens in the single shear test



图 5 CFRP-混凝土试件 C30-25-15-180 CFRP 表面结晶体

Fig. 5 Crystals on CFRP surfaces of CFRP-concrete specimen C30-25-15-180

于对比件发黄,说明混凝土、粘结胶层及 CFRP 均不同程度地受到了盐溶液干湿循环作用的影响。

尽管干湿循环次数对试件的剥离过程并无很大影响,但不同条件下试件的剥离荷载和破坏形态却存在较明显的差异。随着循环次数的增加,剥离荷载下降明显,且经过一定次数的循环后,粘结面的抗剪强度弱化严重,剥离后的 CFRP 上附着的混凝土颗粒减少,剥离界面更趋光滑,说明长时间的干湿循环使胶层的物理性能发生了很大变化,界面体系的薄弱层发生了改变,即未经循环试件的剥离破坏通常发生在混凝土层,而经过干湿循环后,试件剥离则更多的发生在胶层,图 6 为干湿循环前后,界面剥离形态的变化情况。

2.2 CFRP-混凝土单剪试验破坏形态

在本次试验的 96 个单剪试件中有 94 个由于

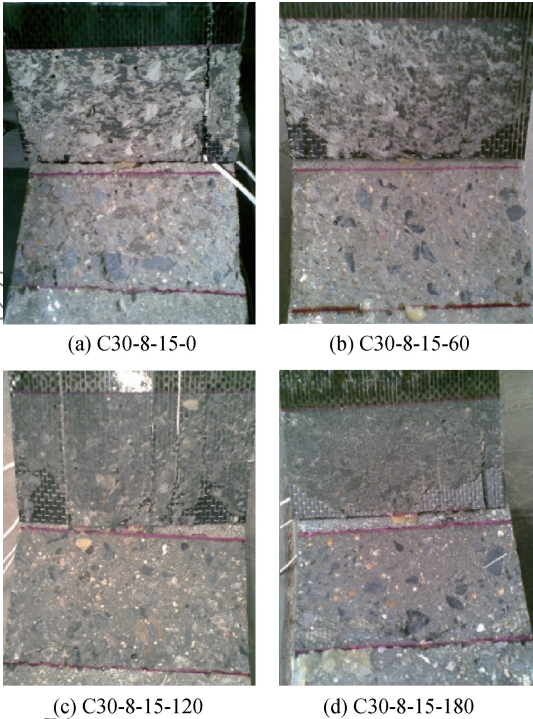


图 6 剥离前后混凝土的表面

Fig. 6 Concrete surface before and after debonding

CFRP 与混凝土之间发生界面剥离而破坏,剩下的 2 个试件则发生 CFRP 布的撕裂破坏,而并未出现拉剪破坏,可见在试验装置的加载端留出 50 mm 非锚固段可以有效避免混凝土拉剪破坏的发生。

对于未经过干湿循环的试件,剥离破坏是由加载端混凝土内部所产生的微小裂缝在荷载的作用下逐渐发展导致的,即初始加载时 CFRP 布开始绷紧,随着荷载增加试件并无明显现象;当荷载加至剥离荷载的 80% 左右,CFRP 开始发出噼啪声,且距加载端最近处的应变迅速增加,混凝土内部的细微裂缝渐渐开展,试件开始发生粘结破坏;随着荷载的进一步提高,应变出现急速增加,剥离深度逐渐加深,距加载端较远的应变片也有相应的应变产生;当剥离深度将要达到自由端时,由于剩余的粘结面积不足以抵抗当前的荷载,故最终的破坏在瞬间发生。而在干湿循环的作用下,由于混凝土与胶层之间的界面更加薄弱,故开裂首先发生在此界面,随着荷载的增加,裂缝不断向自由端延伸,且开裂的速度较未经循环的试件更加迅速,最终,界面发生粘结破坏。而 CFRP 撕裂破坏是加载时局部 CFRP 布断裂所致,该种破坏形式属于因施工原因导致的非理想破坏,本文不予讨论。

试验时 C60 混凝土试件从开始剥离到最终破

坏的时间较 C30 混凝土试件更短, 破坏更突然, 脆性更加明显。但由于 C60 试件强度更高, 密实度更好, 故混凝土试件破坏面更光滑, 而 C30 试件破坏面则相对粗糙, 且局部区域的粗骨料被粘出或拉断, 二者具体的破坏形态详见图 7。

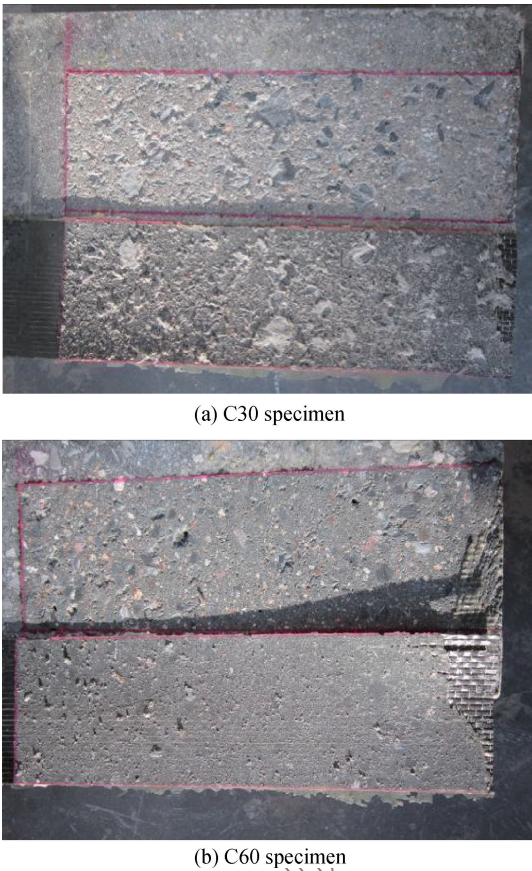


图 7 CFRP-混凝土单剪试验试件破坏形态
Fig. 7 Failure modes of CFRP-concrete specimens in the single shear test

3 试验结果与分析

3.1 CFRP-混凝土界面承载力及平均粘结强度

两种不同强度混凝土单剪试件界面的剥离承载力随干湿循环次数的变化情况如表 4 和图 8 所示。可以发现, 随着干湿循环次数的增加, 界面承载力总体上呈下降趋势, 且干湿循环前期的下降速度普遍快于后期, 但也有个别试件的剥离承载力在后期下降得更快, 如试件 C30-15-15, 60 次循环、120 次循环和 180 次循环后的界面承载力较 0 次循环分别下降了 2.13%、5.47%和 11.32%。试验中部分数据出现的微小波动, 可能是由于混凝土强度随着龄期增加而增大及胶体的后固化作用引起的。同时, 图 8 还表明, 无论是 C30 还是 C60 试件, 只要保证 CFRP 的粘结宽度及干湿循环次数相同, 当粘结长度从 80 mm 增加至 250 mm 时, 界面承载力整体上呈现出先上升再下降的趋势, 但上升与下降的幅度并不大, 且考虑到试件破坏时的延性要求及随着粘结长度的增加, 施工质量的不确定性也随之增大, 故建议将 150 mm 作为适宜的粘结长度。但当粘结宽度从 80 mm 增加到 150 mm 时, 界面承载力却提高了 50%~80%, 故说明 CFRP 的粘结宽度是影响界面承载力的一个主要因素^[14-16]。

为了避免相关几何因素对试件界面粘结性能的影响, 现采下式计算得到的界面平均粘结强度来考察界面在盐溶液干湿循环作用下的老化情况:

$$\tau_f = P_u/A \tag{1}$$

式中: τ_f 为试件平均粘结强度(MPa); P_u 为 CFRP-混凝土界面承载力(kN); A 为粘结面积(mm²)

图 9 为 CFRP-混凝土界面平均粘结强度曲线。

表 4 CFRP-混凝土界面承载力平均值和降低幅度

Table 4 Average interfacial bearing capacity and decrease for CFRP-concrete specimens									
Grade	CFRP size (Length×Width/mm)	interfacial bearing capacity/kN				Decrease of bearing capacity/%			
		0 cycle	60 cycles	120 cycles	180 cycles	0 cycle	60 cycles	120 cycles	180 cycles
C30	80×80	12.203	9.991	9.955	8.639	—	18.13	18.42	29.21
	150×80	13.113	10.527	10.885	9.269	—	19.72	16.99	29.31
	250×80	13.896	9.913	9.697	10.644	—	28.66	30.22	23.04
	80×150	21.221	20.246	20.291	19.886	—	4.59	4.38	6.29
	150×150	23.703	23.199	22.406	21.019	—	2.13	5.47	11.32
	250×150	24.309	20.388	20.261	20.893	—	16.13	16.65	14.05
C60	80×80	14.878	13.382	12.094	11.612	—	10.06	18.71	21.95
	150×80	13.645	12.649	12.189	10.886	—	7.30	10.67	20.22
	250×80	15.737	14.431	12.600	14.730	—	8.30	19.93	6.40
	80×150	25.922	23.145	24.181	22.828	—	10.71	6.72	11.94
	150×150	27.455	26.110	23.430	22.063	—	4.90	14.66	19.64
	250×150	27.090	23.801	22.407	25.590	—	12.14	17.29	5.54

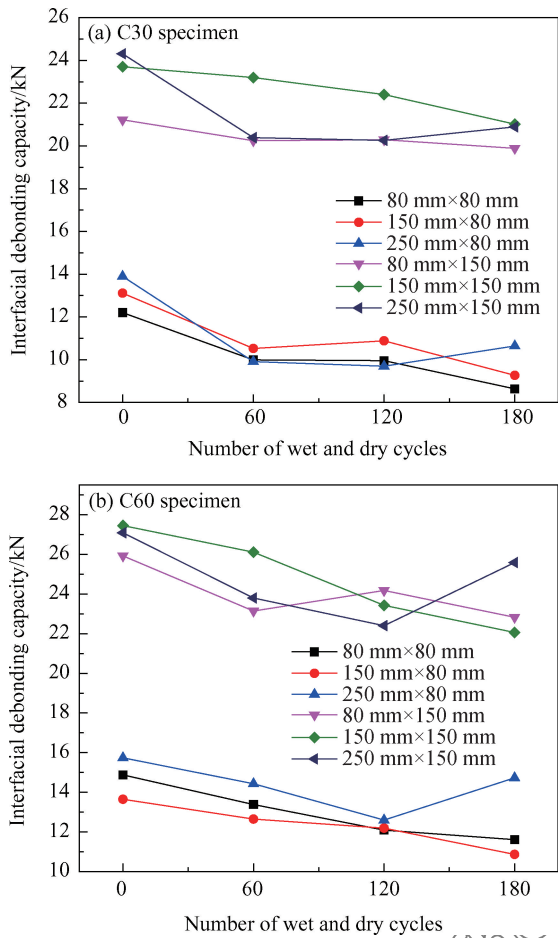


图 8 CFRP-混凝土界面承载力曲线
Fig. 8 Interfacial capacity curves of CFRP-concrete

由于 C60 试件的密实度较好，故干湿循环作用对界面粘结特性的影响较小，因而图 9 中 C60 单剪试件的平均粘结强度高出 C30 试件 15% 左右，说明混凝土强度对 CFRP-混凝土的界面粘结性能有一定的提高作用。但效果并不是十分明显，而且其曲线的下降段更加陡峭，考虑到高强混凝土的脆性较为突出，因而不建议采用提高混凝土强度的方式来增加界面的粘结强度。鉴于粘结长度对粘贴面积的贡献较大，故平均粘结强度曲线可以按粘结长度的不同分为 3 个系列，在保证相同粘结长度的条件下，除了 C60-25-15 试件外，其余试件的平均粘结强度整体上均呈现出与粘结宽度正相关的关系，从而再次印证了 CFRP 粘贴宽度对界面粘结特性的重要影响。

3.2 CFRP-混凝土界面剪应力的分布规律

鉴于无法直接得到界面每个点的应变值，故本文采用两个相邻应变片之间的平均剪应力作为界面剪应力的取值。由于 CFRP 非常薄，因此可以假定

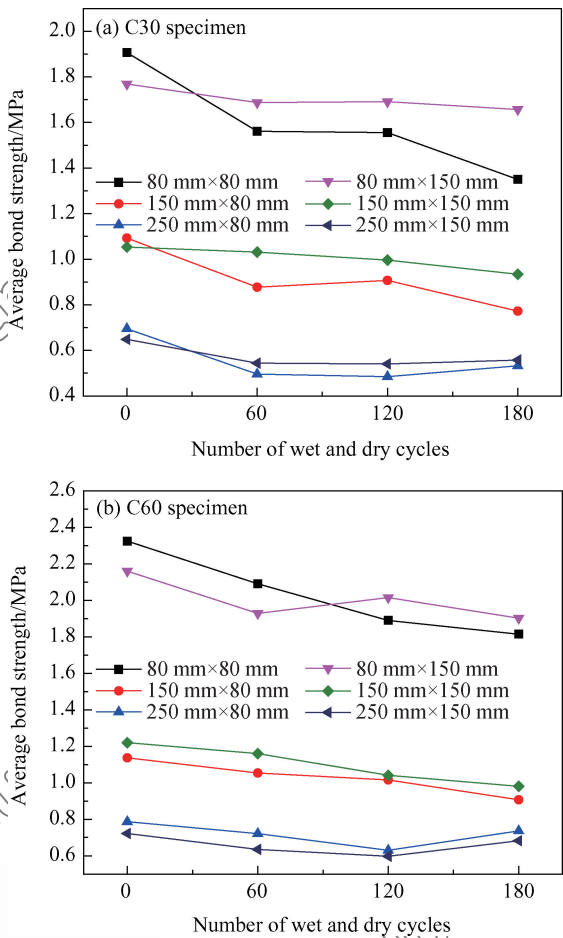


图 9 CFRP-混凝土界面平均粘结强度曲线
Fig. 9 Average bonding strength curves of CFRP-concrete interface

CFRP 轴向应力 σ_f 在横截面内是均匀分布的，且相邻两个应变片之间的应变呈线性分布，现取长度为 dx 的 CFRP 单元体作为研究对象，如图 10 所示。

则由力的平衡条件易得到粘结剪应力的计算公式为

$$\sigma_f(x) = \frac{dF}{b_f dx} = t_f \frac{d\sigma_f}{dx} = E_f t_f \frac{d\epsilon(x)}{dx} = E_f t_f \frac{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (2)$$

式中： F 为界面粘结力； b_f 、 t_f 、 E_f 和 ϵ_i 分别为 CFRP 片材的宽度、厚度、弹性模量和应变，弹性

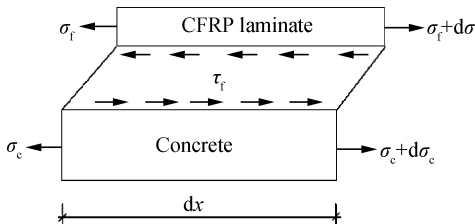
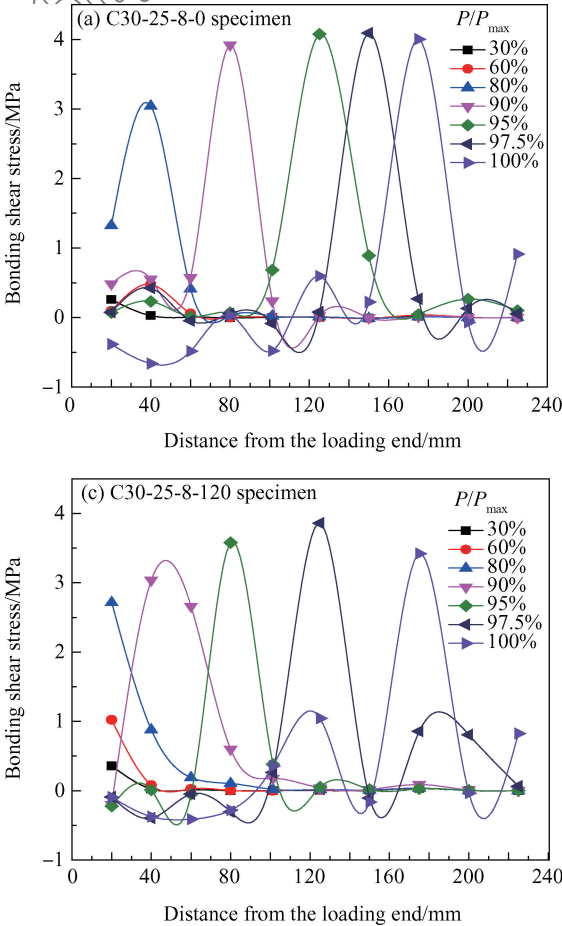


图 10 CFRP-混凝土界面单元体剪应力分布
Fig. 10 Shear stress distribution of the CFRP-concrete interface element

模量取为 CFRP 片材在相同环境下所测得的试验值。

考虑到试件数量较多, 且各试件的剪应力分布具有一定的相似性, 故以 C30-25-8 试件为例, 其剪应力分布如图 11 所示。

以上四个试件的剪应力分布曲线表明, 当荷载水平较低时, 剪应力的峰值出现在加载端, 而粘结剪应力只分布在距加载端 40 mm 左右的范围内, 当荷载逐渐增加时, 加载端附近的剪应力也随之逐渐增加, 增加到峰值后剪应力开始向远端传递, 此时的剪应力集中分布在一定区域内, 区域外剪应力几乎为零, 这一区域即为有效粘结区域, 该区域的长度称为“有效粘结长度”, 本试验中有效粘结长度基本保持不变, 大约为 40~60 mm, 且其不随 CFRP 粘结尺寸及盐溶液干湿循环次数而变化, 说明随着荷载的增加, 有效粘结区域在破坏过程中会以近似不变的长度由加载端向自由端平行移动, 从而使剥离区域逐渐增加, 直至试件破坏, 这与前人的研究结论是一致的^[2, 17]。



3.3 CFRP-混凝土界面粘结滑移本构关系

为充分了解剥离机制及整个剥离破坏过程中粘结剪应力与滑移值的相对变化情况, 建立准确可靠的粘结滑移曲线, 即 $\tau/\tau_{\max}-s/s_0$ 曲线, 是极其必要的。其中, 滑移值为 CFRP 与混凝土的位移差, 可按 $s(x) = s(0) + \int_0^x \epsilon(u) du$ 进行计算。

图 12 列举了目前较常见的四种粘结滑移曲线的示意图, 分别为剪滞型、双折线型、双曲线型及 Popovics 型^[18-22], 由于剪滞型曲线未考虑材料的软化效应, 故使用较少。通过对双折线型、双曲线型及 Popovics 模型进行对比分析发现, 本文中的试验数据与 Popovics 模型拟合效果最好(拟合系数 $n = 2.562$, 见式(3)), 可以较准确地体现出 CFRP-混凝土界面粘结滑移的有关特征, 如图 13 所示。

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{s}{s_0} \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_0}\right)^n} \tag{3}$$

通过试验得到的离散点可以清晰地发现,

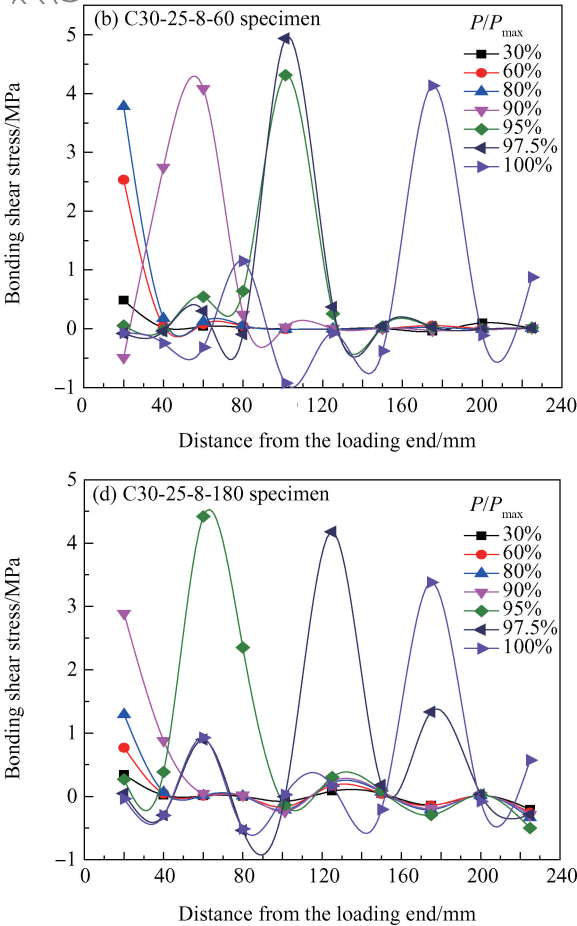


图 11 CFRP-混凝土界面剪应力分布曲线

Fig. 11 Shear stress distribution curves of CFRP-concrete interface

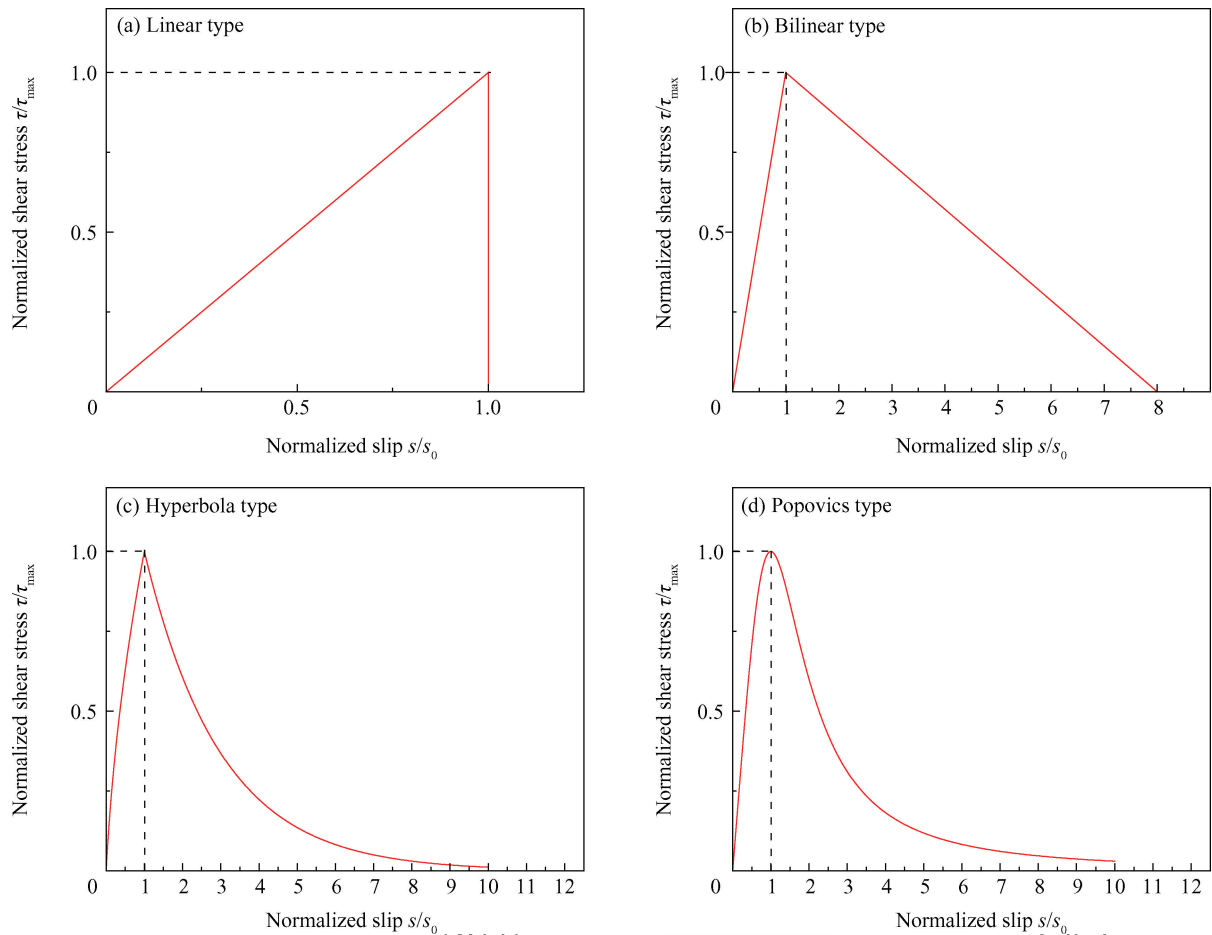


图 12 常见的 CFRP-混凝土界面粘结滑移曲线

Fig. 12 Bond-slip relationship curves of CFRP-concrete interface

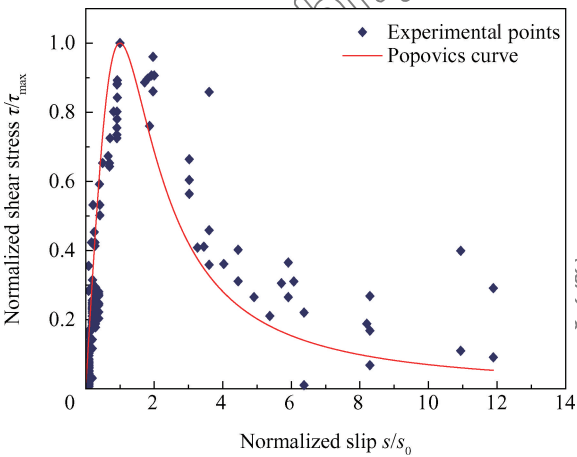


图 13 CFRP-混凝土界面粘结滑移关系

Fig. 13 Bond-slip relationship of CFRP-concrete interface

CFRP-混凝土界面粘结-滑移关系有明显的强化上升段和软化下降段，且当界面粘结剪应力处于较低水平时，粘结-滑移关系近似呈现出线性关系，此时

界面荷载水平也较低，CFRP 布-胶层-混凝土处于弹性粘结状态，此时滑移刚度较大，变形协调，界面并没有裂缝产生，滑移量随界面粘结剪应力增加而增加，当粘结剪应力达到一定水平时，粘结-滑移关系逐渐由近似线性变为非线性，此时粘结剪应力增加逐渐缓慢，滑移量增加较快，界面逐渐达到最大剪应力并开始滑移；当粘结剪应力增加至最大后粘结-滑移曲线进入软化下降阶段，粘结剪应力迅速下降，界面开始发生剥离，滑移量增加的速度越来越大，粘结应力最终几乎接近于零，CFRP-混凝土界面完全剥离。从实验数据与 Popovics 模型对比中可以发现，Popovics 模型可以很好地描述界面粘结滑移关系，上升段试验数据点几乎与 Popovics 模型曲线重合，下降段的试验数据点处于 Popovics 模型曲线上侧，但偏差较小，这表明用 Popovics 模型来描述 CFRP-混凝土界面的粘结滑移本构关系是较准确的。

4 结 论

(1) 碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)-混凝土界面的破坏模式主要为 CFRP 与混凝土之间的剥离破坏, CFRP 从加载端逐渐向自由端剥离,混凝土强度、粘结尺寸和干湿循环次数均对界面承载力有一定的影响,其中,CFRP 宽度是影响界面承载力的一个重要因素。

(2) 随着干湿循环次数的增加,CFRP-混凝土界面承载力逐渐下降,且低强度混凝土对盐溶液干湿循环作用更加敏感,表现为极限承载力下降的幅度更大,高强混凝土虽然对 CFRP-混凝土的界面粘结性能有一定的提高作用,但效果并不是十分明显。

(3) CFRP-混凝土界面粘结剪应力分布曲线具有相似性,当荷载水平逐渐增加,剪应力也随之逐渐增加,并从加载端向自由端传递,且所有剪应力集中分布在一定的“有效粘结区域”内,而区域外的剪应力几乎为零,本试验有效粘结区域的长度约为 40~60 mm,且其不随盐溶液干湿循环次数而变化。

(4) CFRP-混凝土界面粘结滑移关系有明显的强化上升段和软化下降段,Popovics 模型可以很好地描述本试验的界面粘结滑移关系。

参考文献:

- [1] SATO Y, KIMURA K, KOBATAKE Y. Bond behavior between CFRP sheet and concrete (Part 1)[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 1997, 500: 75-82.
- [2] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T, et al. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3): 359-367.
- [3] AL-SAIDY A H, SAADATMANESH H, EL-GAMAL S, et al. Structural behavior of corroded RC beams with/without stirrups repaired with CFRP sheets[J]. Materials and Structures, 2015: 1-15.
- [4] HADI M N S, KHAN Q S, SHEIKH M N. Axial and flexural behavior of unreinforced and FRP bar reinforced circular concrete filled FRP tube columns[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 43-53.
- [5] 诸葛萍, 章子华, 丁勇, 等. 土木工程用 CFRP 筋弯折抗拉性能[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1300-1305.
- [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] 王苏岩, 张所东, 李璐希, 等. 海水干湿循环作用下 CFRP-高强混凝土黏结性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2015(2): 165-170.
- [8] 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程: CECS 146—2003(2007)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [9] SILVA M A G, FONSECA B S D, BISCAIA H. On estimates of durability of FRP based on accelerated tests[J]. Composite Structures, 2014, 116(9): 377-387.
- [10] MEYER M R, FRIEDMAN R J, JR D S H, et al. Long-term durability of the interface in FRP composites after exposure to simulated physiologic saline environments[J]. Journal of Biomedical Materials Research, 1994, 28(10): 1221.
- [11] 岳清瑞, 彭福明, 杨勇新, 等. 碳纤维片材耐久性初步研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(s1): 8-11.
- [12] LI S, REN H, HUANG C K, et al. Durability of concrete beams reinforced with CFRP sheet under wet-dry cycles and loading[J]. Journal of Southeast University, 2009, 25(3): 376-380.
- [13] 周英武. FRP-高强混凝土梁强度与延性的理论与试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [14] XU T, HE Z J, TANG C A, et al. Finite element analysis of width effect in interface debonding of FRP plate bonded to concrete[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2015, 1300-1305 (in Chinese).

- 93: 30-41.
- [15] ZHENG X H, HUANG P Y, GUO X Y, et al. Experimental study on bond-slip constitutive relation between CFL and concrete[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 302: 359-364.
- [16] 廖志刚, 姚谏, 汪光满. 表面粘贴 FRP 加固混凝土单剪粘结试件的拉剪破坏[J]. *科技通报*, 2010, 26(6): 919-925.
- LIAO Z G, YAO J, WANG G M. Analysis of tension-shear failure on externally bonded FRP single shear test[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2010, 26(6): 919-925 (in Chinese).
- [17] YUN Y, WU Y F. Durability of CFRP-concrete joints under freeze-thaw cycling[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65(3): 401-412.
- [18] NEUBAUER U, ROSTASY F. Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks-experiments and fracture mechanics model[C]//Proc. of 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, SP-188. Farmington Hills: ACL, 1999: 369-382.
- [19] MONTI G, RENZELLI M, LUCIANI P. FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones[C]//Proceedings of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003, 1: 183-192.
- [20] DAI J G, UEDA T. Local bond stress slip relations for FRP sheets-concrete interfaces[C]//Proceedings of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003: 143-152.
- [21] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(4): 10-18.
- LU X Z, YE L P, TENG J G, et al. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface[J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(4): 10-18 (in Chinese).
- [22] SAVIOA M, FARRACUTI B, MAZZOTTIC. Non-linear bond-slip law for FRP-concrete zones[C]//Proceedings of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (Volume 1). Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003: 163-172.