

海水干湿循环作用下 CFRP-高强混凝土黏结性能研究

王苏岩*, 张所东, 李璐希, 洪雷

(大连理工大学 建设工程学部 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在沿海地区,海水干湿循环成为限制 CFRP(碳纤维增强复合材料)在加固混凝土结构应用中的主要因素之一.考虑结构自身荷载和海水干湿循环作用,用 5% NaCl 溶液模拟海水,利用发明的持载装置施加持续荷载,采用双面剪切试验方法对 CFRP 与高强混凝土的界面黏结性能进行了研究.结果表明:海水干湿循环作用下界面黏结性能发生显著的退化,极限荷载、剥离荷载、端部滑移、断裂能等界面参数均显著降低;而持续荷载和干湿循环耦合作用下界面黏结性能退化更加严重,黏结界面参数进一步降低.因此未考虑持续荷载作用而对 CFRP-高强混凝土界面耐久性的研究将会过高地估算界面的黏结性能.

关键词: CFRP; 高强混凝土; 干湿循环; 持续荷载; 黏结性能; 耐久性

中图分类号: TU375

文献标识码: A

doi:10.7511/dllgxb201502007

0 引言

由于 CFRP(碳纤维增强复合材料)具有轻质、高强、便于施工、对结构影响小等优点,在混凝土结构的加固、补强等方面得到了广泛的应用,同时也逐渐成为土木工程中研究和应用的热点.然而目前国内外对 CFRP 加固混凝土结构的研究还仅仅局限于普通混凝土结构,只有少数的试验研究^[1-2]涉及高强混凝土,对于各种恶劣环境因素(如冻融循环、干湿循环、高温等)作用下 CFRP 加固高强混凝土的耐久性研究甚少,而耐久性问题恰恰是限制 CFRP 应用的重要因素,因此十分有必要对 CFRP 加固高强混凝土结构的耐久性能进行研究.

在沿海区域,海水干湿循环作用是 CFRP 加固混凝土结构的主要限制因素之一.目前已有学者对此进行了研究^[3-4],一致认为长期海水干湿循环作用下 CFRP 与混凝土的黏结性能严重退化,但是这些研究普遍建立在未考虑结构自身持载的基础上,因此这些研究得出的结论可能会过高估算加固构件的实际性能.基于以上考虑,利用发明的施加持续荷载的装置,对干湿循环和持续荷载共同作用下 CFRP 加固高强混凝土的界面性能进行研究.

1 试验方案

1.1 试验材料

试验中高强混凝土的设计强度等级为 C60,水胶比为 0.3,其配合比为 $m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{砂子}):m(\text{石子})=168:460:100:570:1\ 058$,减水剂为 1.6%.实测标养 28 d 平均强度为 68.6 MPa,满足 C60 混凝土强度要求.碳纤维布采用大连凯华新技术工程有限公司生产的 300 g/m^2 的布材,其主要性能指标见表 1.

表 1 CFRP 布性能指标

Tab.1 Properties of CFRP sheet

抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	名义厚度/mm
3 696	240	1.7	0.167

1.2 试验设计

1.2.1 试件设计 试验采用的混凝土棱柱体试块尺寸为 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times150\text{ mm}$,标准养护 28 d.将一整条尺寸为 $750\text{ mm}\times50\text{ mm}$ 的矩形条带状碳纤维布(共 19 束)的两端粘贴在混凝土试块两个相对侧表面,从而形成双面剪切试件,如图 1(a)所示.混凝土侧表面首先进行打磨和除尘,选择平整、孔洞少的侧表面作为双剪试验黏结测

以通过自身的二次水化自愈,从表中也可发现,干湿循环作用下 CFRP 的弹性模量基本保持不变,这与很多学者的研究结论是一致的^[6].

表 3 干湿循环对材料性能的影响
Tab.3 Effects of wet-dry cycles on the material performance

干湿循环次数	f_c /MPa	E_f /GPa
0	68.6	248.21
30	69.1	254.24
60	69.2	261.13
90	68.7	256.32
120	69.0	255.01
150	68.7	257.35

注: f_c 为混凝土抗压强度; E_f 为 CFRP 弹性模量

2.3 破坏过程

试验中所有试件的破坏过程均具有相似性,图 4 以海水干湿循环 150 次试件为例分析破坏过程:荷载 P 与端部滑移 s 曲线.从图中可以看出,3 条曲线的发展规律大致相同:在加载初期,荷载-滑移曲线大致呈线性发展规律,即 CFRP-混凝土的界面剪切应变和剪切应力呈线性变化;当增加到某一荷载时,曲线上出现一个明显的转折点,表明加载端发生了初始剥离,滑移迅速增大,如图上 A_1 、 A_2 、 A_3 所示,此时荷载定义为初始剥离荷载;随着滑移的继续增加,荷载最后稳定在一个数值附近,直至破坏,即极限荷载,如图上 B_1 、 B_2 、 B_3 所示,破坏时的端部滑移称为极末端部滑移,如图上 C_1 、 C_2 、 C_3 所示.极末端部滑移值越大,界面的延性就越好,反之延性就越差.由于实际测量的荷载-端部滑移曲线中荷载在剥离阶段有一定的波动,取 BC 段的平均值为极限荷载.所有试件的测量结果见表 2.

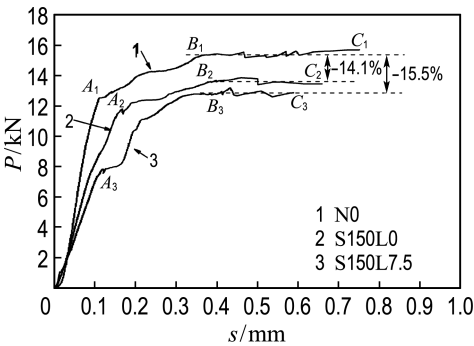


图 4 荷载-端部滑移曲线
Fig. 4 Curve of load-slip of ends

观察表 2 中所有试件的试验结果可以发现以下规律:当荷载达到极限荷载的 60%~80%时端部发生剥离,对比文献^[7]可以发现,普通混凝土一般在极限荷载的 40%~60%时开始发生剥离,这说明高强混凝土与 CFRP 的黏结破坏更为突然,脆性更大;从表 2 中数据亦可观察到,随着干湿循环次数的增加,初始剥离荷载、极限荷载、极末端部滑移均呈下降趋势,其中与对比试件相比,150 次干湿循环试件分别下降了 11.8%、14.1%、10.4%,而施加持续荷载的 150 次干湿循环试件,分别下降了 38.3%、15.5%、22.4%.由此可见,干湿循环作用明显造成 CFRP-高强混凝土的界面性能退化,在干湿循环作用下施加持续荷载,界面性能进一步退化.因此,在模拟环境作用对 CFRP 加固补强性能的研究中,仅考虑环境作用对补强性能的影响,会过高地估算加固后的结构性能,必须考虑环境作用和结构自身承载的共同作用,才能真实地反映结构加固补强后的性能.

2.4 应变、应力分析

本文通过密集的应变片测得 CFRP 布上的应变分布变化.试验中所有试件的应变变化均具有相似性,且随着干湿循环次数的增加,应变变化现象越加明显,故以干湿循环 150 次试件为例对应变变化进行分析.图 5(a)为端部滑移 0.45 mm 时 150 次干湿循环试件及其对比试件(均达到极限荷载)的应变分布曲线,应变的波动是由于局部材料的差异造成的.为了形象描述应变分布规律变化,采用非线性公式(1)^[8]进行拟合,拟合结果如图 5(b)所示.

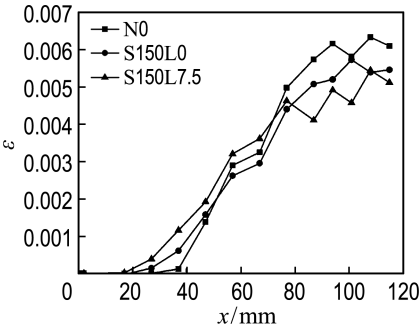
$$\epsilon(x) = \epsilon_0 + \alpha / (1 + \exp((x - x_0)/\beta)) \quad (1)$$

式中: x 表示距自由端的距离,参数 ϵ_0 、 α 、 β 采用非线性回归确定.

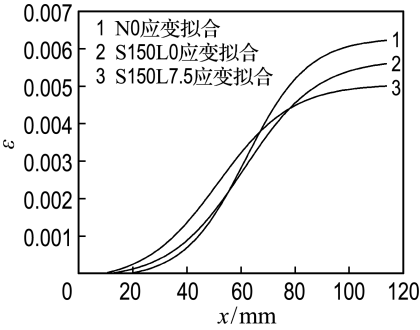
可以发现,应变分布曲线大致呈 S 形,分为 3 个主要区域:(1)剥离区域;(2)有效黏结区域,长度用 L_e 表示;(3)无应力区域.所有试件的 L_e 、平均最大应变见表 2.对比表 2 中数据可以发现,随着干湿循环次数的增加,试件的有效黏结长度 L_e 呈增加趋势,而试件的平均最大应变呈降低趋势;而相同干湿循环次数下施加持续荷载的试件, L_e 进一步增加,平均最大应变进一步降低,这可能是由于在持载作用下,界面处于较高应力状态,初始裂缝扩大,导致海水干湿循环对试件的损伤破坏加剧^[9].因此,未考虑结构持载的研究结论会过高地估算界面的黏结性能.

图 6(a)为对比试件 N0 在端部滑移为 0.45

mm 和 0.50 mm 时的应变拟合曲线,可以发现,

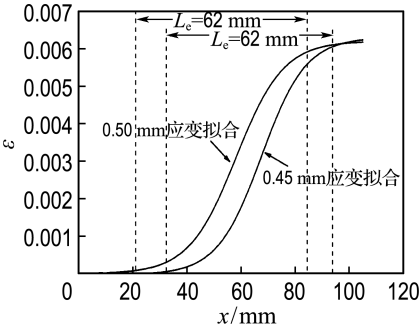


(a) 应变分布

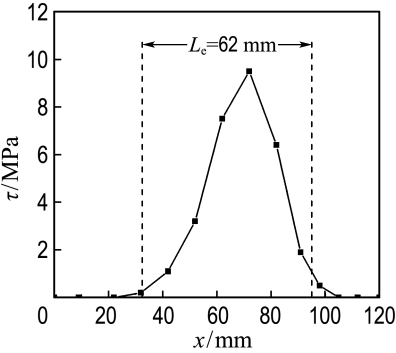


(b) 应变分布拟合

图 5 滑移 0.45 mm 时应变分布及其拟合
Fig. 5 Strain distribution and its fitting of slip 0.45 mm



(a) 滑移 0.45 mm 和 0.50 mm 应变拟合



(b) 滑移 0.45 mm 时应力分布

图 6 应变及其应力分布
Fig. 6 Strain and stress distribution

当达到极限荷载后,剥离区域的应变基本保持不变.随着端部滑移的增加,剥离区域逐渐增加,有效黏结区域向后平行移动,但长度保持不变,直至破坏.在不同海水干湿循环次数的试件中均发生这种现象,说明有效黏结区域在破坏过程中以不变的长度平行向试件自由端移动,这与很多学者的研究结论一致^[5].因此,可以认为在达到极限荷载(图 4 中 B 点)后,有效黏结区域的应变分布具有自相似性,而这种自相似性与裂缝的传递有密切关系.起初随着荷载的增加,界面间裂缝逐渐形成、发展、传递,当达到极限荷载时裂缝的传递速度达到极值,此后在恒载作用下以自相似的方式传递.裂缝稳定发展传递是造成 CFRP 相对于混凝土整体滑移的原因.

由于 CFRP 非常薄,可以假定 CFRP 内截面上轴力分布均匀且相邻两个应变片之间的应变呈线性分布.由图 7 所示单位长度 dx 内 CFRP 片材的受力平衡和图 8 所示计算模型得到下式:

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

式中: $F = b_f t_f \sigma_f = b_f t_f E_f \epsilon_f$,表示 CFRP 片材的轴向力, b_f 、 t_f 、 E_f 、 ϵ_f 分别表示 CFRP 片材的宽度、厚度、弹性模量和应变,弹性模量取 CFRP 片材在相同环境下所测得的试验值. ϵ_i 、 x_i 表示第 i 个测点的应变和位置.

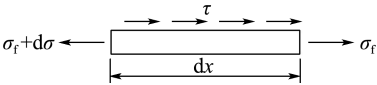


图 7 CFRP 微段受力平衡

Fig. 7 Force equilibrium of micro-segment in CFRP

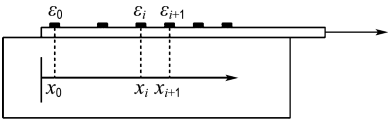


图 8 计算模型

Fig. 8 Calculation model

图 6(b)为对比试件 N0 在端部滑移为 0.45 mm 时相应的应力分布情况,对 L_c 长度范围内的应力曲线积分(图中虚线所示范围)可以近似求得 L_c 范围内承担的界面剪力水平.采用相同方法对所有试验试件分析发现, L_c 范围内承担界面总剪力水平均在 95% 以上,可见 L_c 为界面的主要承力区域.

2.5 界面黏结滑移曲线

CFRP 与高强混凝土的界面黏结滑移曲线是指黏结区域测点的剪应力 τ 和该点的滑移量 s 之间的关系,即 τ - s 曲线.假定混凝土与 CFRP 片材在自由端的相对滑移 $s_0 = 0$ (已有研究表明这个假设是成立的)^[10],则测点的局部滑移 s_i 可由下式简化计算:

$$s_i = s_0 + \int \epsilon_f(x) dx =$$
$$\frac{1}{2} \sum_{j=0}^{i-1} [(\epsilon_{j+1} + \epsilon_j)(x_{j+1} - x_j)] \quad (3)$$

考虑持载作用和干湿循环显著性,选择第 1、2 测点中点处(距加载端 6.5 mm)进行分析.图 9 以对比试件 N0 为例,给出了距离加载端 6.5 mm 处计算所得的剪应力与滑移曲线.从图中可以看出,黏结滑移曲线可以分为 3 个阶段:上升阶段、下降阶段、稳定阶段.图中 $\tau_{\max}$ 表示黏结界面最大剪应力, s_m 表示界面最大剪应力对应的相对滑移; s_f 表示剪应力减小至零时的相对滑移,即界面发生剥离时的相对滑移. G_f 表示界面的断裂能,即剥离所需要的能量,通过对 τ - s 曲线积分,按照式(4)计算.所有试件的黏结-滑移曲线相关参数见表 4.

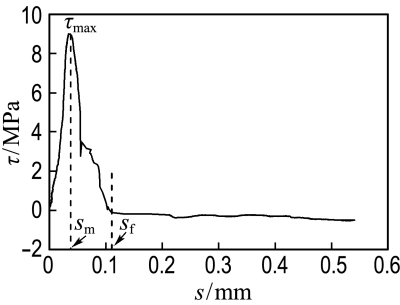


图 9 界面黏结-滑移曲线
Fig. 9 Interfacial bond-slip curve

$$G_f = \int \tau ds \quad (4)$$

从表 4 中可以发现,随着干湿循环次数的增加, $\tau_{\max}$ 、 s_m 、 s_f 、 G_f 均有下降的趋势,干湿循环次数越多,下降得越明显.而干湿循环基础上施加持续荷载将会产生更加不利的影响, $\tau_{\max}$ 、 s_m 、 s_f 、 G_f 降低的程度均显著增大.可见,在干湿循环作用下,持续荷载将会进一步增加界面的损伤,在研究耐久性问题时必须考虑结构自身持载的影响.CFRP-高强混凝土界面相对滑移值为 0.10~0.15 mm 时发生剥离,对比文献[11]可以发现,普通混凝土与 CFRP 的界面相对滑移值为 0.12

~0.25 mm 才会发生剥离,说明 CFRP 与高强混凝土的黏结破坏更为突然,脆性更大,破坏预兆不明显,这之前文中提到的结果相吻合.

表 4 界面黏结-滑移曲线相关参数
Tab. 4 Relative parameters of interfacial bond-slip curve

试件编号	$\tau_{\max}$ /MPa	s_m /mm	s_f /mm	G_f /(MPa·mm)
N0	9.08	0.045	0.148	0.782 0
S30L0	9.11	0.049	0.157	0.755 4
S30L7.5	8.75	0.042	0.128	0.575 5
S60L0	8.92	0.050	0.125	0.523 4
S60L7.5	7.79	0.038	0.109	0.601 6
S90L0	8.43	0.039	0.142	0.529 4
S90L7.5	7.87	0.047	0.122	0.360 9
S120L0	8.22	0.041	0.114	0.380 9
S120L7.5	6.82	0.042	0.104	0.319 1
S150L0	7.79	0.039	0.115	0.380 9
S150L7.5	6.18	0.037	0.102	0.340 9

3 结 论

- (1)海水干湿循环作用下,混凝土抗压强度、CFRP 弹性模量基本保持不变,说明海水干湿循环对材料自身的影响并不明显.
- (2)海水干湿循环环境作用对 CFRP-高强混凝土的界面性能造成显著的损伤,初始剥离荷载、极限荷载、极限端部滑移、断裂能、界面最大剪应力等参数均随着干湿循环次数的增加而逐渐降低.
- (3)海水干湿循环和持续荷载共同作用下,界面性能进一步退化并且退化的速度加快.仅考虑环境作用对 CFRP 加固补强性能的影响,会过高地估算加固后的结构性能,必须考虑环境作用和结构自身承载的共同作用,才能真实地反映结构加固补强后的性能
- (4)荷载达到极限荷载后,在 CFRP 与高强混凝土之间有一个恒定的应力传递长度,即有效黏结区域 L_e ,该区域承载界面剪力的 95% 以上.随着干湿循环次数的增加, L_e 逐渐增加,且施加持载的试件, L_e 进一步增加.
- (5)CFRP 与高强混凝土的黏结较普通混凝土相比,破坏更为突然,脆性较大.

参考文献:

[1] 王苏岩,曹怀超,刘毅. CFRP 修复震损高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(3):1-7.
WANG Su-yan, CAO Huai-chao, LIU Yi. Experimental investigation on seismic behavior of damaged high strength concrete columns repaired

- with CFRP sheets [J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2012, **9**(3):1-7. (in Chinese)
- [2] 尚亚妮, 王海涛, 赵海波. CFRP 加固高强混凝土的本构模型研究[J]. 科学技术与工程, 2010, **10**(20):4964-4967.
SHANG Ya-ni, WANG Hai-tao, ZHAO Hai-bo. Study on constitutive model of high-strength concrete confined by CFRP [J]. **Science Technology and Engineering**, 2010, **10**(20):4964-4967. (in Chinese)
- [3] 武玉涛. 侵蚀环境下 FRP-混凝土界面的黏结性能与耐久性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
WU Yu-tao. Bond performance and durability of FRP-concrete interface under the erosion environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] 李趁趁, 黄承逵, 高丹盈. 特定环境下 FRP 与混凝土正拉黏结性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, **46**(S):77-81.
LI Chen-chen, HUANG Cheng-kui, GAO Dan-ying. Experimental investigation on normal bonding property between FRP and concrete in special environments [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2006, **46**(S):77-81. (in Chinese)
- [5] YUN Yan-chun, WU Yu-fei. Durability of CFRP-concrete joints under freeze-thaw cycling [J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2010, **65**(3):401-412.
- [6] 李趁趁. FRP 加固混凝土结构耐久性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
LI Chen-chen. Experimental study on durability of FRP strengthened concrete structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [7] 马涛, 潘金龙, 魏红雾. 循环荷载作用下 CFRP-混凝土的黏结性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, **43**(19):15-18.
MA Tao, PAN Jin-long, WEI Hong-wu. Experimental study of bond behavior between CFRP and concrete under cyclic loading [J]. **Building Structures**, 2013, **43**(19):15-18. (in Chinese)
- [8] ZHOU Ying-wu, WU Yu-fei, YUN Yan-chun. Analytical modeling of the bond-slip relationship at FRP-concrete interface for adhesively-bonded joints [J]. **Composites Part B: Engineering**, **41**(6):423-433.
- [9] 夏远洋. 荷载和拟海洋环境耦合作用下 FRP-混凝土黏结耐久性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
XIA Yuan-yang. Experimental study on durability of interface between FRP and concrete under marine environment and loads [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] Mukhopadhyaya P, Swamy R, Lynsdale C. Influence of aggressive exposure conditions on the behavior of adhesive bonded concrete-GFRP joints [J]. **Construction and Building Materials**, 1998, **12**(8):427-446.
- [11] Kolluru V S, 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.

Research on bond behavior of high-strength concrete with CFRP under seawater wet-dry cycles

WANG Su-yan*, ZHANG Suo-dong, LI Lu-xi, HONG Lei

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

Abstract: In coastal areas, one of the major factors to restrict the application of CFRP (carbon fiber reinforced polymer or plastic) in strengthening concrete structures is seawater wet-dry cycles. Considering structure load and seawater wet-dry cycles, the 5% NaCl solution was used to simulate seawater, the self-designed loading device was used to apply sustained load, and the double-sided shear test was used to study the bond behaviors of high-strength concrete with CFRP. The experimental results indicate that the bond behavior has significant degradation under seawater wet-dry cycles, and ultimate load, peel load, ultimate slip and fracture energy are all reduced. The degradation of bond behavior is more serious under the sustained load and wet-dry cycles, and the parameters of bond behavior are further reduced. So the interfacial bond behavior of high-strength concrete with CFRP under wet-dry cycles will be overestimated without consideration of the sustained load in the study of durability of CFRP-high-strength concrete interface.

Key words: CFRP; high-strength concrete; wet-dry cycles; sustained load; bonding performance; durability