复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 35 卷 第 12 期 12 月 2018 年
Vol. 35 No. 12 Dec 2018

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.001

海水浸泡对 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响

王磊*[1,2]，李威[1]，陈爽[1]，毛亚东[1]，王恺[1]

（1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院，桂林 541004；2. 广西岩土力学与工程重点实验室，桂林 541004）

摘　要： 开展了 30℃海水浸泡条件下玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)筋、碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)筋与珊瑚混凝土粘结性能的试验研究，分析了纤维增强树脂基复合材料(FRP)筋-珊瑚混凝土粘结滑移曲线特征、破坏形态及粘结强度变化。试验结果表明，海水浸泡后 FRP 筋力学性能和粘结性能均表现为不同程度的降低。随浸泡时间增加，GFRP 筋表层树脂与纤维间的孔隙率明显增大，并逐渐出现脱粘现象，纤维本身遭受到侵蚀，而 CFRP 筋仅表面基体有少许损伤，其耐久性明显优于 GFRP 筋；FRP 筋-珊瑚混凝土粘结强度呈现出先增加后减小的趋势，且后期下降速率逐渐变小，部分 GFRP 筋-珊瑚混凝土试件的破坏模式逐渐由筋被拔出转变为筋材断裂；增加保护层厚度能有效地减缓海水对 GFRP 筋的侵蚀，有利于保持 GFRP 筋-珊瑚混凝土间的粘结性能。

关键词： 粘结性能；拉拔试验；FRP 筋；珊瑚混凝土；耐久性；海洋环境

中图分类号： TB302；TU528.59　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2018)12-3458-08

Effects of sea water soaking on the bonding properties of FRP bars-coral concrete

WANG Lei*[1,2], LI Wei[1], CHEN Shuang[1], MAO Yadong[1], WANG Kai[1]

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Guilin 541004, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering in Guangxi, Guilin 541004, China)

Abstract: The experimental study on the bond properties of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars and coral concrete, carbon fiber reinforced plomer (CFRP) bars and coral concrete under sea water immersion at 30℃ was carried out. The characteristics of bond slip curves, failure modes and bond strength of fiber reinforced polymer (FRP) bars-coral concrete were analyzed. The results show that the mechanical properties and adhesive properties of FRP bars decrease in different degrees after immersion in seawater. With the increase of soaking time, the porosity between surface resin and fiber increases evidently, the phenomenon of debonding occurrs gradually, and the fiber itself is that of GFRP bars. The ultimate bond strength of FRP bars-coral concrete shows a trend to increase at first and then decreases and the later falling rate gradually becomes smaller. The failure modes of some GFRP bars-coral concrete specimens gradually change into bar fracture from pull-out. Increasing the cover thickness of coral concrete could reduce the erosion of the sea water to the FRP bars effectively, and helps to maintain the bond performance of the GFRP bars-coral concrete.

Keywords: bond property; pull-out test; FRP bars; coral concrete; durability; ocean environment

以天然珊瑚碎屑替代传统的碎石、砂子作为粗(细)骨料所得到的珊瑚混凝土(Coral Aggregate Concrete)抗压强度可以达到 20～40 MPa，在远海岛礁建设中具有较高的应用价值[1-3]。然而，由于长期以来海洋权益保护意识的淡薄所导致的岛礁建设低需求及珊瑚生长的地域特点，珊瑚混凝土开发利用的相关研究不被重视；加之珊瑚混凝土本身所存在的先天性能缺陷，其应用范围局限于不带钢筋

收稿日期： 2017-11-23；**录用日期：** 2018-01-26；**网络出版时间：** 2018-02-12　12:53
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.001
基金项目： 国家自然科学基金(51568013；51868014)；广西高等学校高水平创新团队及卓越学着计划(2017)
通讯作者： 王磊，博士，教授，博士生导师，研究方向为建筑新材料　E-mail：tianmu77@163.com
引用格式： 王磊，李威，陈爽，等. 海水浸泡对 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响[J]. 复合材料学报，2018，35(12)：3458-3465.
WANG L, LI W, CHEN S, et al. Effects of sea water soaking on the bonding properties of FRP bars-coral concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3458-3465 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

的挡墙、防波堤及路面工程等较低层次的混凝土工程。湿热海洋环境及珊瑚碎屑所含的大量盐分引发的钢筋锈蚀问题，是困扰珊瑚混凝土工程应用的最主要障碍[4-6]。

纤维增强树脂基复合材料筋(Fiber Reinforced Polymer Rebar，FRP 筋)具备优异的力学性能和极强的耐腐蚀性能等特点，近年来，玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)筋和碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)筋在有特殊要求的工程领域中应用越来越广泛，为珊瑚混凝土工程应用提供了新的途径[7-12]。虽然 FRP 筋在恶劣环境下所表现的良好耐久性已无需置疑，但长期处于湿热高盐环境下的 FRP 筋，其性能依然会出现不同程度的衰退，进而影响 FRP 筋混凝土结构的力学性能及耐久性[13-15]。珊瑚混凝土材料和南海环境具有显著的特殊性，已有的试验数据和断续的理论研究成果在描述 FRP 筋与珊瑚混凝土粘结行为和耐久性性能方面存在明显的局限性。基于此，本文开展了 30℃海水浸泡条件下 GFRP 筋、CFRP 筋与珊瑚混凝土粘结性能的试验研究，重点分析了 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结滑移曲线特征、破坏形态及粘结强度变化，研究成果有助于推动 FRP 筋-珊瑚混凝土结构相关理论研究和实际工程应用。

1 试 验

1.1 原材料

试验采用浙江海宁安捷复合材料有限公司生产的 CFRP 筋和 GFRP 筋，其表面状况见图 1，力学性能见表 1。试验采用的粗骨料为广西北海涠洲岛的碎石型珊瑚碎屑，见图 2，细骨料为中粗河沙，标号为 3205 的广西兴安牌硅酸盐水泥，水泥为广西兴安牌硅酸盐水泥，以质量浓度为 3.5%的人工海水模拟海洋环境。试验参考 JGJ51—2002《轻骨料混凝土技术规程》中单一变量法进行珊瑚混凝土配合比设计[16]，立方体抗压强度及劈裂抗拉强度的试验方法参照 GB/T50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行[17]，珊瑚混凝土的力学性能试验结果如表 2 所示。

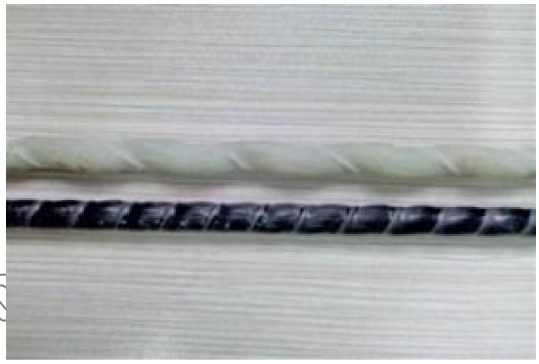

图 1 纤维增强树脂基复合材料(FRP)筋

Fig. 1 Fiber reinforced polymer (FRP) bars

图 2 珊瑚碎屑

Fig. 2 Coral

1.2 试件制备

本次试验考虑保护层厚度的影响，制备 25 mm、30 mm 两种保护层厚度的 CFRP 筋-珊瑚混凝土试件和 25 mm、30 mm、35 mm 3 种保护层厚度的 GFRP 筋-珊瑚混凝土试件，共 23 组，每组 3 个。试件分类及编号见表 3。标准粘结试块参照

表 1 FRP 筋的力学性能

Table 1 Mechanical properties of FRP bars

Type of rebar	Bar diameter/mm	Rib spacing/mm	Rib height/mm	Ultimate strength/MPa
CFRP	6	1.7d	0.02d	1 981.60
GFRP	6	3d	0.02d	606.86

Note: d—Diameter of FRP rebars.

表 2 珊瑚混凝土配合比及物理力学性能

Table 2 Mix proportion and mechanical properties of coral concrete

Concrete strength	Mix proportion of coral/(kg·m^{-3})				Water-cement ratio	Cube strength f_{cu}/MPa	Splitting tensile strength f_{ts}/MPa
	Coral	Sand	Cement	Seawater			
C20	716	830	380	180	0.47	22.5	2.01

http://fhcxb.buaa.edu.cn

表 3　FRP 筋-珊瑚混凝土拉拔试件分类及编号

Table 3　Classification and numbering of FRP bars-coral concrete pull-out specimens

Specimen No.	Rebar type	Thickness of the protective/mm	Temperature/℃	Soaking time and number of test pieces				
				0 d	10 d	30 d	60 d	120 d
C-25	CFRP	25	30	3	3	3	—	3
C-30	CFRP	30	30	3	—	3	3	3
G-25	GFRP	25	30	3	3	3	3	3
G-30	GFRP	30	30	3	3	3	3	3
G-35	GFRP	35	30	3	3	3	3	3

Notes: C denotes the CFRP bar; G denotes the GFRP bar; — denotes no specimens.

Canadian Standards Association(CSA)标准的设计规定[18]：试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm，粘结长度为 48 mm。为避免加载端的混凝土应力集中，将粘结段设置在试件底端，未粘结段设置在加载端，用塑料套管将 FRP 筋与珊瑚混凝土隔离，加载端预留 FRP 筋的长度为 250 mm，自由端预留长度为 50 mm，试件详图见图 3。试件经 28 d 标准养护后置于 30℃海水中浸泡，时间分别为 0 d、10 d、30 d、60 d、120 d，如图 4 所示。

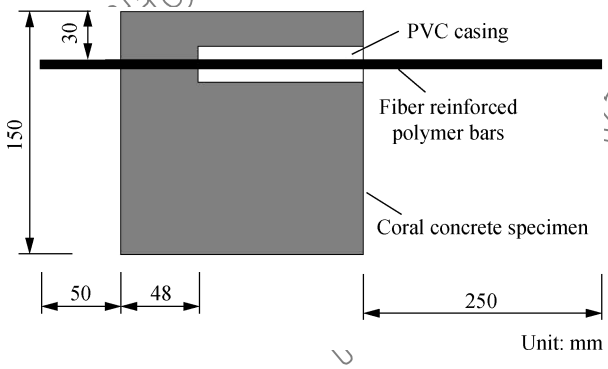

图 3　玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)筋-珊瑚混凝土试件详图

Fig. 3　Schematic diagram of glass fiber reinforced polymer(GFRP) bars-coral concrete pull-out specimens

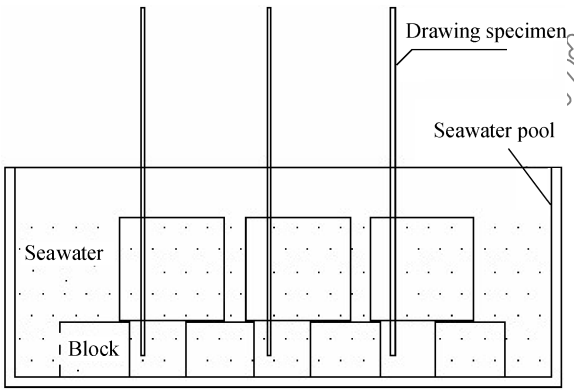

图 4　GFRP 筋-珊瑚混凝土拉拔试件浸泡图

Fig. 4　Schematic diagram of GFRP bars-coral concrete pull-out specimen immersion

1.3　加载方案

所有拉拔试件均按照 CSA 标准进行加载。试验中分别测量 FRP 筋自由端的绝对滑移值和钢板的变形量，二者之差即为 FRP 筋自由端的相对滑移值。试验机采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 UTM5305 型电子万能试验机，加载速率为 0.3 mm/min，加载过程持续 3～4 min。当出现 FRP 筋断裂、珊瑚混凝土劈裂或自由端滑移量超过 45 mm 任意一种情况时，结束加载，加载装置如图 5 所示。

假设粘结应力沿 FRP 筋埋长均匀分布，以粘结长度内粘结应力的平均值作为 FRP 筋的粘结强度，即拉拔力除以 FRP 筋埋长部分表面积，公式为 $\tau = p/(\pi d l_n)$，式中：τ 为平均粘结应力；p 为拉拔力；d 为 FRP 筋的直径；l_n 为粘结长度。

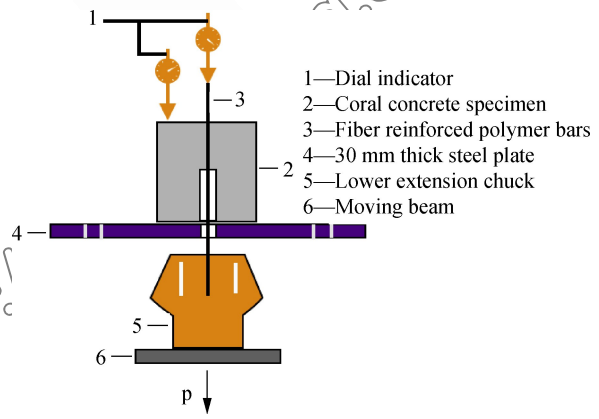

图 5　拉拔试验加载装置

Fig. 5　Pull-out test set-up

2　试验结果与分析

2.1　FRP 筋损伤

试验表明，长时间的海水浸泡会造成 FRP 筋的腐蚀劣化，但不同类型的 FRP 筋劣化程度存在差异。图 6、图 7 分别为浸泡 0 d、30 d、60 d、120 d 的 CFRP 筋和 GFRP 筋横截面 SEM 图像。

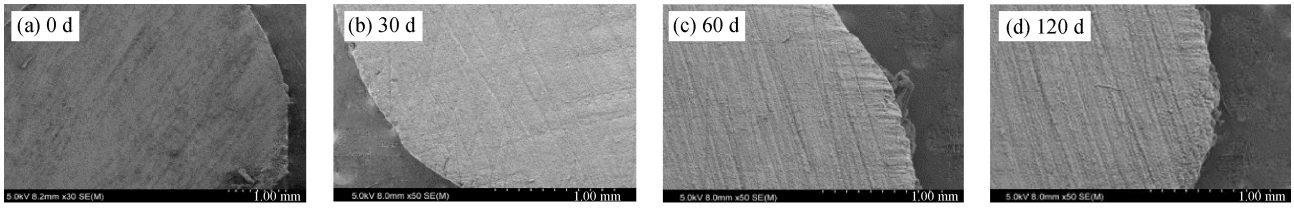

图 6　碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)筋横截面 SEM 图像

Fig. 6　SEM images of a cross section of carbon fiber reinforced polymer(CFRP) bar

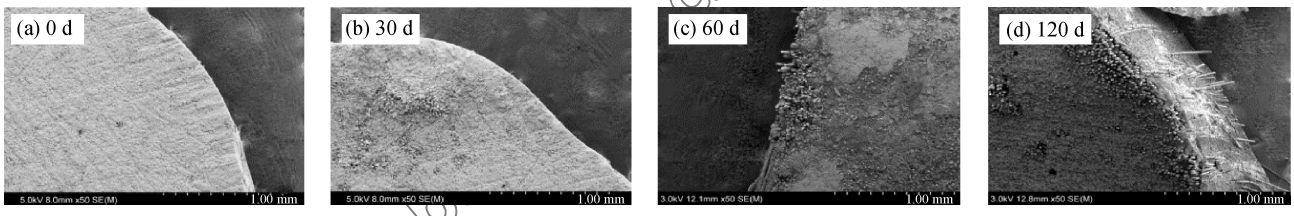

图 7　GFRP 筋横截面 SEM 图像

Fig. 7　SEM images of a cross section of GFRP bar

由图 7 可以看出，GFRP 筋被海水侵蚀前，纤维与树脂间粘结较紧密，随着海水侵蚀，内部微裂纹扩展，孔隙率逐渐增大，导致界面逐渐发生脱粘，并随时间推移不断向筋内部发展。这主要是由于：(1)环氧树脂基体水解反应生成物OH^-离子与玻璃纤维中SiO_2骨架反应生成硅醇键，破坏了纤维结构的完整性，导致有效纤维含量不断减少[19-20]；(2)海水中的Na^+、Cl^-、Mg^{2+}、SO_4^{2-}等离子对玻璃纤维结构也具有破坏作用[21]。由于 C 元素化学性能稳定[22]，CFRP 筋的耐久性明显优于 GFRP 筋，仅在表面发生部分基体脱离，纤维本身未发生明显损伤现象，如图 6 所示。

2.2　FRP 筋-珊瑚混凝土试件破坏形态

采用不同保护层厚度设计的粘结拉拔试件要比中心拉拔更加贴近材料实际受力状态。由于本文试件相对保护层厚度较大(保护层厚度 c 与 FRP 直径 d 之比 $c/d \geqslant 4.17$)，试验中主要出现 FRP 筋拔出破坏和筋材断裂两种破坏模式，未出现混凝土劈裂的情况。试件破坏断面如图 8 所示。

CFRP 筋由于其较高的抗拉强度和良好的耐久性，其破坏形式均为筋被拔出。一般 FRP 筋表层树脂抗剪强度较低，因此发生粘结滑移破坏时，往往伴随着筋横肋被剪切磨损的现象，如图 8(a)、图 8(b)所示，拔出段 FRP 筋横肋有磨损迹象，且筋肋间留有少量混凝土。

GFRP 筋在长期海水浸泡条件下所产生的损伤较为严重，当受损严重的 GFRP 筋极限拉应力小于 GFRP 筋-珊瑚混凝土间粘结力时，试件发生筋材断裂破坏，此类试件在加载后期可以听到纤维与树脂的剥离声。本文中，浸泡时间为 120 d 的 GFRP 筋粘结试件主要发生断裂破坏，如图 8(c)所示。与拔出破坏不同的是，发生断裂的 GFRP 筋与珊瑚混凝土的粘结段表面磨损程度相对较轻，自由端无明显滑移。

2.3　FRP 筋-珊瑚混凝土试件的粘结破坏机制及粘结-滑移(τ-s)曲线

FRP 筋-珊瑚混凝土拉拔试件的受力过程及试

(a) Pull-out failure of CFRP tendons　(b) Pull-out failure of GFRP tendons　(c) Fracture failure of GFRP tendons

图 8　FRP 筋-珊瑚混凝土试件破坏断面

Fig. 8　Fracture diagram of FRP bars-coral concrete specimen

http://hdlxb.buaa.edu.cn

验现象与 FRP 筋-普通混凝土相似[23]，其 τ-s 曲线可大致分为微滑移、滑移、下降、残余段等 4 个阶段，如图 9 所示。与 FRP 筋-普通混凝土相同[24]，FRP 筋-珊瑚混凝土间的粘结力主要由化学胶着力、摩擦力及机械咬合力组成。加载初期，两种材料未发生相对滑移，粘结力主要由化学胶着力提供；随着荷载不断增大，自由端开始出现相对滑移，化学胶着力减弱并逐渐消失，此时的粘结力主要由 FRP 筋横肋与周围珊瑚混凝土的机械咬合力和摩擦力组成；与此同时，GFRP 筋与珊瑚混凝土间相对滑移而产生的刮削作用，使 FRP 筋表面横肋发生严重磨损，界面区混凝土也不断出现损伤，摩擦力和机械咬合力不断被削弱，直至 FRP 筋被拔出。

随浸泡时间的增加，FRP 筋表面状况和力学性能及 FRP 筋-珊瑚混凝土界面状态的变化，将引起 τ-s 曲线发生变化。由图 9 可以看出，与 FRP 筋材在海水中长期浸泡下性能不断降低的趋势不同，FRP 筋-珊瑚混凝土的极限粘结强度呈现出先小幅增大后减小的趋势。浸泡早期，由于 FRP 筋表面基体吸湿膨胀[25-26]，在 FRP 筋与珊瑚混凝土交界面处产生一定的压应力，相应增强了珊瑚混凝土对 FRP 筋的握裹力，有利于小幅度提高粘结强度。随着浸泡时间的延长，FRP 筋的表面状况及力学性能不断退化，其与珊瑚混凝土间的粘结性能也随之不断降低，在宏观上则表现为极限粘结强度降低及 τ-s 曲线斜率减小。

3　FRP 筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响因素

3.1　FRP 筋材种类对 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响

如前所述，30℃人工海水环境下，CFRP 筋和 GFRP 筋的劣化程度不同，导致其与珊瑚混凝土间粘结强度的降低程度不同。就本文试验而言，CFRP 筋-珊瑚混凝土间的粘结性能明显优于 GFRP 筋-珊瑚混凝土。随着海水浸泡时间的增加，CFRP 筋、GFRP 筋-珊瑚混凝土间的粘结强度虽然都呈现出先增大后减小的趋势，但在 120 d 后，CFRP 筋试件的粘结强度保持率明显高于 GFRP 筋试件。如图 10 所示，保护层厚度为25 mm、30 mm 的 CFRP 筋粘结试件在海水中浸泡 120 d 后，其粘结强度分别为 9.26 MPa 和 9.66 MPa，粘结强度的保持率分别为 89.91% 和 93.44%，比 GFRP 筋对应的粘结强度保持率分别高 13.75% 和 13.31%。此外，CFRP 筋-珊瑚混凝土间的粘结性能下降趋势随时间增加逐渐趋缓，而 GFRP 筋-珊瑚混凝土间粘结性能后期降低的速率虽然也有所减缓，但没有 CFRP 筋明显，其长期粘结性能有待于进一步研究和探讨。

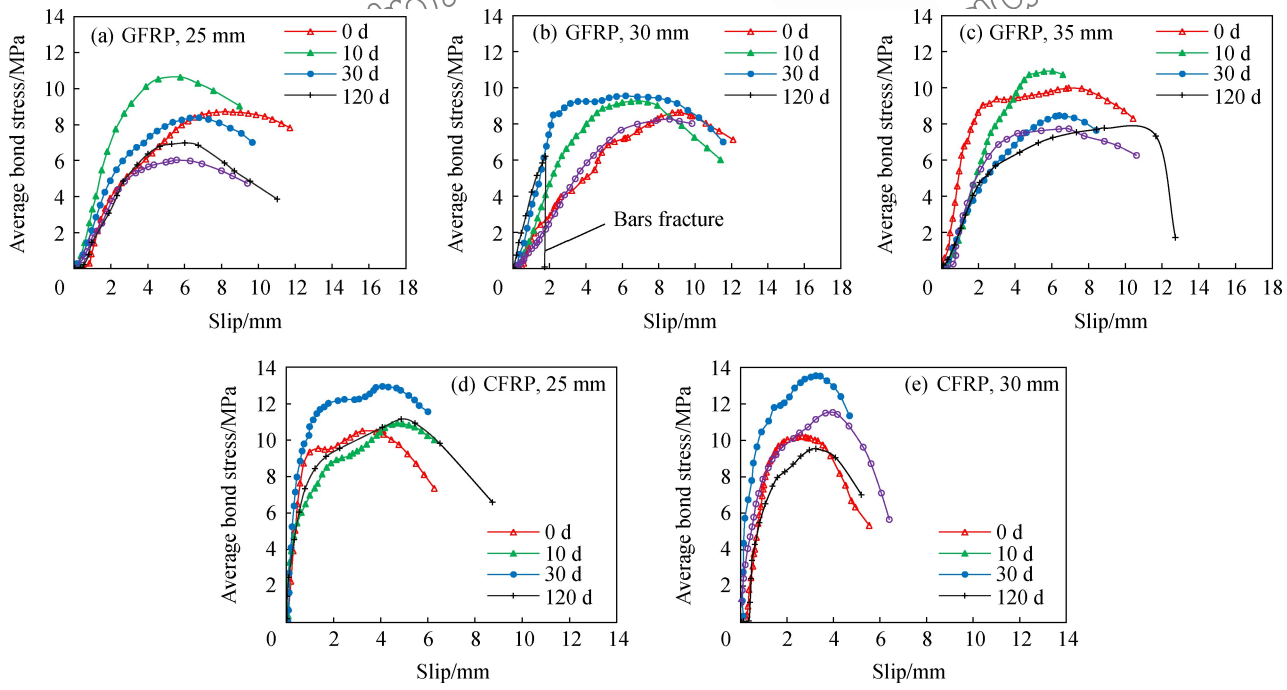

图 9　不同保护层厚度 FRP 筋-珊瑚混凝土试件粘结-滑移(τ-s)曲线

Fig. 9　Typical bond-slip (τ-s) curves of FRP bars-coral concrete specimens with different thickness of protective layer

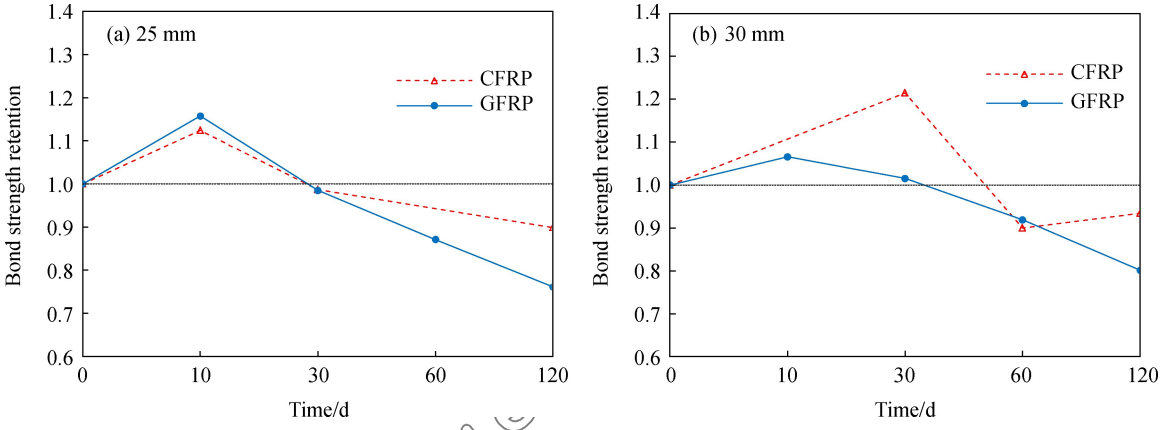

图 10　不同保护层厚度 GFRP-珊瑚混凝土和 CFRP 筋粘结强度随浸泡时间的变化情况

Fig. 10　Bond strength of GFRP rebar-coral concrete and CFRP rebar-coral concrete with different thickness of protective layer changed with immersion time

3.2　珊瑚混凝土对 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响

珊瑚混凝土本身轻质疏松、多孔、易碎、强度和弹性模量低等特点对 FRP 筋的粘结性能影响也比较明显，珊瑚骨料在受到挤压时，肋前的珊瑚骨料混凝土容易破碎变形，降低机械咬合力，因此相同条件下的总粘结力低于普通混凝土。

此外，珊瑚混凝土相对保护层厚度(c/d)对试件的破坏形态和粘结强度有明显影响，相对保护层厚度较小的试件，当 FRP 筋横肋对周围珊瑚混凝土产生斜向挤压力的径向分力大于珊瑚混凝土的抗拉强度时，试件容易发生劈裂破坏。随着保护层厚度的增加，珊瑚混凝土的抗劈裂能力、对 FRP 筋-珊瑚混凝土界面区的约束效应及平均粘结应力会得到相应的提高，但当相对保护层厚度增加到一定程度时，增强作用会逐渐减弱。

尽管珊瑚混凝土本身的抗渗性能较差，海水及有害物质进入混凝土内部到达筋材表面相对容易，且珊瑚本身就含有大量盐分等有害物质，但保护层厚度的增加，依然有利于提高试件粘结性能的耐久性。图 11 为保护层厚度对 GFRP 筋-珊瑚混凝土试件粘结强度的影响。可见，海水浸泡 120 d 后，保护层厚度增加对 GFRP 筋试件粘结性能的保护作用逐渐显现，保护层厚度为 25 mm 试件粘结强度下降速度明显大于保护层厚度为 35 mm 的试件，如图 11 所示。增加保护层厚度能有效地减缓海水对 GFRP 筋的腐蚀，减缓粘结性能降低速率，有利于保持 GFRP 筋-珊瑚混凝土间的粘结性能。

4　结　论

(1) 海水浸泡后，纤维增强树脂基复合材料(FRP)筋呈现不同程度的劣化。随浸泡时间增加，玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)筋表层树脂与纤维间的孔隙率明显增大，并逐渐出现脱粘现

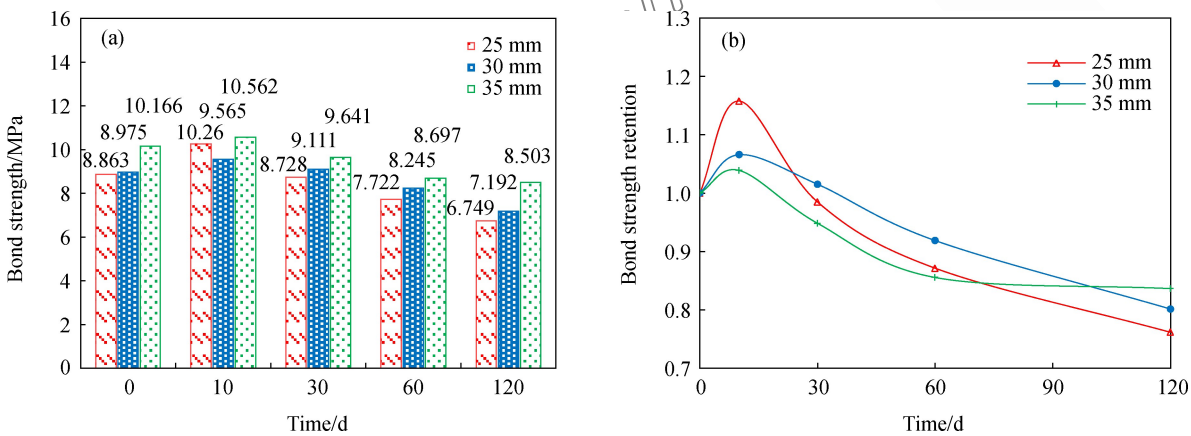

图 11　保护层厚度对 GFRP 筋-珊瑚混凝土试件粘结强度的影响

Fig. 11　Influence of thickness of protective layer on ultimate bond strength of GFRP bars-coral concrete specimens

象，玻璃纤维本身也遭到侵蚀，而碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)筋仅表面基体有少许损伤，其耐久性明显优于 GFRP 筋。

(2) 与 FRP 筋材性能持续下降不同，随着浸泡时间的增加，FRP 筋-珊瑚混凝土粘结强度呈现出先小幅增大后减小的趋势，且不同筋材对应的粘结强度降低程度不同。海水浸泡 120 d 后，GFRP 筋试件的粘结强度退化较明显，由于玻璃纤维本身遭到侵蚀，其破坏模式逐渐转变为筋材断裂，而 CFRP 筋的粘结强度降低较少，其破坏模式均为筋被拔出。

(3) 因多孔特征和所含大量盐分的影响，尽管珊瑚混凝土保护层对 FRP 筋材的保护作用弱于普通混凝土，但增加保护层厚度依然能有效地减缓海水对 GFRP 筋的腐蚀，有利于保持 GFRP 筋-珊瑚混凝土间的粘结性能。

参考文献：

[1] DA B, YU H, MA H, et al. Chloride diffusion study of coral concrete in a marine environment[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 47-58.

[2] 王磊，吴翔，曾榕，等. CFRP 筋与珊瑚混凝土的黏结性能试验研究[J]. 中国农村水利水电，2016 (7): 127-131.
WANG Lei, WU Xiang, ZHENG Rong, et al. The experimental research on bond performance between CFRP bars and the coral concrete[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(7): 127-131 (in Chinese).

[3] 王磊，赵艳林，吕海波. 珊瑚骨料混凝土的基础性能及研究应用前景[J]. 混凝土，2012(2): 99-100.
WANG Lei, ZHAO Yanlin, LV Haibo. Prospect on the properties and application situation of coral aggregate concrete[J]. Concrete, 2012(2): 99-100 (in Chinese).

[4] SONG H W, LEE C H, ANN K Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(2): 113-121.

[5] ANGST U, ELSENER B, LARSEN C K, et al. Critical chloride content in reinforced concretea review[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(12): 1122-1138.

[6] 李林. 珊瑚混凝土的基本特性研究[D]. 桂林：广西大学，2012.
LI Lin. Research on basic characteristics of coral concrete [D]. Guilin: Guangxi University, 2012 (in Chinese).

[7] IDAJAH S, ALAWSI G, RAHMAAN S A. Impact of sea and tap water exposure on the durability of GFRP laminates [J]. Materials & Design, 2009, 30(5): 1835-1840.

[8] 邓宗才，高伟男，沈锋. 碱、盐环境下不同应力水平 FRP 筋抗压强度试验与理论研究[J]. 复合材料学报，2017，34(10): 2220-2231.
DENG Zongcai, GAO Weinan, SHEN Feng. Experimental and theoretical study on compressive strength of FRP rebars under different stress leves in alkali and salt solution[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(10): 2220-2231 (in Chinese).

[9] NANNI A. Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: Properties and applications[J]. Developments in Civil Engineering, 1993, 16(1): 65-66.

[10] 薛伟辰，刘华杰，王小辉. 新型 FRP 筋粘结性能研究[J]. 建筑结构学报，2004(2): 104-109, 123.
XUE Weichen, LIU Huajie, WANG Xiaohui. Studies on bond properties of new-type FRP bars[J]. Jouranl of Building Structures, 2004(2): 104-109, 123 (in Chinese).

[11] 葛文杰，张继文，戴航，等. FRP 筋和钢筋混合配筋增强混凝土梁受弯性能[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2012，42(1): 114-119.
GE Wenjie, ZHANG Jiwen, DAI Hang, et al. Flexural behavior of concrete beam with hybrid reinforcement of FRP bars and steel bars[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(1): 114-119 (in Chinese).

[12] NAKADA M, MIYANO Y. Accelerated testing for long-term fatigue strength of various FRP laminates for marine use [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(6): 805-813.

[13] 吴刚，董志强，徐博，等. 海洋环境下 BFRP 筋与混凝土黏结性能及基本锚固长度计算方法研究[J]. 土木工程学报，2016，49(7): 89-99.
WU Gang, DONG Zhiqiang, XU Bo, et al. Bond performance and calculation method for the basic anchorage length of BFRP bar with concrete in marine enviroment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 89-99 (in Chinese).

[14] ALTALMAS A, REFAI A E, ABED F. Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions[J]. Construction and Building Materials, 2015, 81: 162-171.

[15] ROBERT M, BENMOKRANE B. Effect of aging on bond of GFRP bars embedded in concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(6): 461-467.

[16] 中华人民共和国建设部. 轻骨料混凝土技术规程：JGJ51—2002[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical specification for lightweight aggregate concrete: JGJ51—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002 (in Chinese).

[17] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法：

http://fhclxb.buaa.edu.cn

GB/T 50081—2002[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese).

[18] Canadian Standard Association. Design and construction of building components with fibre reinforced polymers: CSA S806 02[S]. Toronto: Canadian Standards Association International, 2002.

[19] 付凯，薛伟辰. 人工海水环境下 GFRP 筋抗拉性能加速老化试验[J]. 建筑材料学报，2014，17(1)：35-41.
FU Kai, XUE Weichen. Accelerated aging tests for evaluations of tensile properties of GFRP bars under artificial seawater environment[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 35-41 (in Chinese).

[20] 王磊，毛亚东，陈爽，等. GFRP 筋与珊瑚混凝土粘结性能的试验研究[J]. 建筑材料学报，2018(2)：1-7.
WANG Lei, MAO Yadong, CHEN Shuang, et al. The experimental research on bond perfomance between GFRP bars and the coral concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018(2): 1-7 (in Chinese).

[21] 杨苗苗. 模拟海水浸泡对玄武岩与玻璃纤维增强筋长期性能的影响[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.
YANG Miaomiao. Effects of arificial seawater immersion on the long term properties of basalt and glass fibers reinforced bars[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).

[22] 张建. 海洋环境下 CFRP 及 CFRP 混凝土界面性能的耐久性研究[D]. 大连：大连理工大学，2013.
ZHANG Jian. Durability study on CFRP and the interfacial performance between CFRP and concrete in sea enviroment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese).

[23] 吴芳. 玄武岩纤维筋与混凝土黏结性能试验研究[D]. 大连：大连理工大学，2009.
WU Fang. The experimental research on bond bahavior between BFRP rebars and the concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009 (in Chinese).

[24] 郭恒宁. FRP 筋与混凝土粘结锚固性能的试验研究和理论分析[D]. 南京：东南大学，2006.
GUO Hengning. Experimental study and theoretical analysis on bond and anchorage properties of FRP tendons concrete [D]. Naijing: Southeast University, 2006 (in Chinese).

[25] 金云东. BFRP 筋—海水海砂混凝土梁短长期力学性能研究[D]. 南京：东南大学，2016.
JIN Yundong. Research on short-and long-term mechanical properties of BFRP bar reinforced marine sand concrete beams[D]. Nanjing: Southeast China Unversity, 2016 (in Chinese).

[26] 吁新华，董志强，贺建平，等. 海洋环境下 CFRP 筋与混凝土长期粘结性能研究[J]. 高科技纤维与应用，2015，40(6)：19-23.
YU Xinhua, DONG Zhiqiang, HE Jianping, et al. Research on the long-term bond performance of CFRP bars to concrete in ocean enviroment[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2015, 40(6): 19-23 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn