

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2024.02.008

## 海水环境下 CFRP 筋与海水海砂混凝土 黏结耐久性试验研究\*

武江传<sup>1,2</sup>, 谭振昆<sup>1,2</sup>, 谢青海<sup>1,2</sup>, 施勇<sup>1,2</sup>, 顾洋<sup>1,2</sup>, 杨祥<sup>1,2</sup>

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005;  
2. 江苏省海洋工程基础设施智能建造工程研究中心, 江苏 连云港 222002)

**摘要:**为研究海水环境下碳纤维增强复合材料筋(CFRP筋)与海水海砂混凝土的黏结强度、黏结破坏模式、黏结—滑移曲线的影响因素,制作了13组(共39个)CFRP筋-海水海砂混凝土黏结试件进行偏心拉拔试验,研究混凝土强度等级、筋材类型、腐蚀环境及腐蚀龄期等因素对CFRP筋与海水海砂混凝土之间黏结性能的影响。结果表明:CFRP筋与海水海砂混凝土的黏结强度随着混凝土强度等级的增大而明显增强;在海水腐蚀环境下,CFRP筋较普通钢筋抗腐蚀能力强,其破坏模式及黏结—滑移曲线表现良好;经过海水长期浸泡和干湿循环后,CFRP筋与海水海砂混凝土黏结强度均呈现下降趋势;随着腐蚀龄期的增加,CFRP筋与海水海砂混凝土的黏结强度呈现先减小后增大趋势,且干湿循环试件比长期浸泡试件受到的腐蚀程度更严重。

**关键词:**CFRP筋;海水海砂混凝土;黏结耐久性

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-8248(2024)02-0053-08

**引用格式:**武江传,谭振昆,谢青海,等.海水环境下CFRP筋与海水海砂混凝土黏结耐久性试验研究[J].江苏海洋大学学报(自然科学版),2024,33(2):53-60.

## Experimental Study on Bond Durability Between CFRP Bars and Seawater Sea Sand Concrete in Seawater Environment

WU Jiangchuan<sup>1,2</sup>, TAN Zhenkun<sup>1,2</sup>, XIE Qinghai<sup>1,2</sup>, SHI Yong<sup>1,2</sup>, GU Yang<sup>1,2</sup>, YANG Xiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;  
2. Jiangsu Ocean Engineering Research Center for Intelligent Infrastructure Construction, Lianyungang 222002, China)

**Abstract:** In order to study the influence factors of bond strength, bond failure mode and bond-slip curve between CFRP bars and seawater sea sand concrete in seawater environment, 13 groups (39 in total) of CFRP bars-seawater sea sand concrete bond specimens were made for eccentric pull-out test. The effects of concrete strength grade, reinforcement type, corrosion environment and corrosion age on the bond performance between CFRP bars and seawater sea sand concrete were studied. The results show that the bond strength between CFRP bars and seawater and sea sand concrete increases obviously with the increase of concrete strength grade. In the seawater corrosion environment, CFRP bars have stronger corrosion resistance than ordinary steel bars, and their failure modes and bond-slip curves perform well. After long-term immersion in seawater and dry-wet cycles, the bond strength of CFRP bars and seawater sand concrete showed a

\* 收稿日期:2023-12-23;修订日期:2024-01-17

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20210925)

作者简介:武江传(1974—),男,山东临沂人,副教授,博士,研究方向为预制装配结构体系的抗震性能、结构纠偏加固等,(E-mail)wujch@163.com。

downward trend. With the increase of corrosion age, the bond strength between CFRP bars and seawater sea sand concrete decreases first and then increases, and the corrosion degree of dry-wet cycle specimens is more serious than that of long-term immersion specimens.

**Key words:** CFRP bars; seawater sea sand concrete; bond durability

## 0 引言

钢筋锈蚀是影响近海及海岸工程长期寿命的重要因素,碳纤维增强复合材料筋(CFRP筋)因具有良好的耐腐蚀性能被认为是一种替代钢筋的理想材料<sup>[1]</sup>。海洋工程中使用海水海砂混凝土代替普通混凝土可缓解我国河砂资源枯竭、资源环境约束增强、淡水资源不足等问题<sup>[2-4]</sup>。考虑到海水海砂混凝土资源丰富及CFRP筋耐腐蚀性能良好的优势,将两者结合组成CFRP筋增强海水海砂混凝土结构。这种特殊结构有利于解决近海工程海洋资源利用率不高、运输成本昂贵和钢筋锈蚀等问题,因此研究CFRP筋与海水海砂混凝土之间的黏结耐久性具有必要性与可行性。

针对FRP筋增强混凝土结构,Wang等<sup>[5]</sup>通过长期海水浸泡试验,证明了BFRP筋和GFRP筋在海水长期作用下抗拉强度降低近20%,与混凝土的黏结强度降低近40%。Dong等<sup>[6]</sup>将BFRP筋、GFRP筋和CFRP筋浸泡在海水环境下,发现40℃海水中浸泡60d后,BFRP筋和GFRP筋与混凝土的黏结强度分别下降了9.1%和7.1%,由于碳纤维优异的防腐性能和吸水引起的膨胀效应,CFRP筋与混凝土的黏结强度增加。Altamas等<sup>[7]</sup>研究表明,腐蚀溶液浸泡几乎不影响试件黏结滑移曲线的变化趋势,但持续浸泡在溶液中会导致黏结力迅速恶化。Wang等<sup>[8]</sup>将GFRP筋-珊瑚混凝土、CFRP筋-珊瑚混凝土放入不同温度的海水中浸泡,由于FRP筋表面树脂的吸水膨胀以及混凝土强度增加,GFRP筋-珊瑚混凝土与CFRP筋-珊瑚混凝土黏结强度会出现短暂上升,但随着浸泡温度及浸泡时间的增加,黏结强度会显著降低。单波等<sup>[9]</sup>研究表明,CFRP筋-海水海砂混凝土的黏结强度为CFRP筋-普通混凝土黏结强度的0.87~0.91倍。综上可知,目前关于FRP筋与混凝土的研究大都是对FRP筋与混凝土间的黏结性能进行横向对比,且试验用混凝土多数为普通混凝土,对CFRP筋与海水海砂混凝土间的黏结性能研究相对较少。

因此本文共设计13组(共39个)偏心拉拔试件,进行CFRP筋-海水海砂混凝土黏结试件偏心拉拔试验,研究混凝土强度等级、筋材类型、腐蚀环境及腐蚀龄期等因素对CFRP筋与海水海砂混凝土之间黏结性能的影响,为后续的CFRP筋在海水海砂混凝土结构中的应用提供基础理论。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

如图1所示,试验所用的纤维增强筋材均来自浙江海宁安捷复合材料有限公司生产的CFRP筋,筋材由拉挤粘接成型;普通钢筋选用HRB400钢筋。其基本力学参数如表1所示。海水海砂为江苏连云港赣榆区的天然海水海砂。粗骨料为从连云港海州区砂石批发市场购买的花岗岩碎石,粒径为5~25mm,其级配情况如表2所示。水泥采用P.O42.5普通硅酸盐水泥,减水剂采用固态粉末状聚羧酸减水剂。

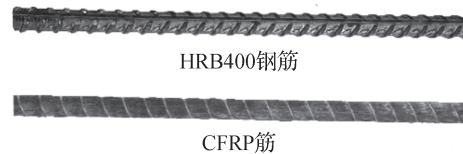


图1 筋材示意图

Fig. 1 Reinforcement schematic diagram

表1 筋材基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of reinforcements

筋材类型	筋材直径/mm	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
CFRP	10	150	1 800
HRB400	10	195	548

所用海水经离子色谱法,测得氯离子浓度为1 400 mg/L,硫酸根离子浓度为1 700 mg/L。用5 mm筛网去除海砂中较大贝壳及其他物质后,测得海砂细度模数为2.32,根据《建设用砂》(GB/T 14684—2022)<sup>[10]</sup>得知海砂细度模数为中砂。同样

方法测得海砂表面附着氯离子浓度为 1 300 mg/L, 附着硫酸根离子浓度为 300 mg/L, 将海砂进行 2 次等质量的淡水冲洗、搅拌并烘干处理, 有效去除其表面附着的氯离子和硫酸根离子。根据《普通混凝土

配合比设计规程》(JGJ 55—2011)<sup>[11]</sup> 和《海砂混凝土应用技术规范》(JGJ 206—2010)<sup>[12]</sup> 设计强度等级为 C30 和 C40 的海水海砂混凝土。不同混凝土强度等级的配合比及 28 d 强度实测值如表 3 所示。

表 2 石子级配

Table 2 Stone grading

孔径/mm	筛余量/g	筛余百分比/%	累计筛余/%	规范上限/%	规范下限/%
	4.2	0.08			
2.36	0.7	0.01	99.92	100	95
4.75	300.6	6.01	99.90	100	85
9.50	2 523.0	50.47	93.89	60	30
16.00	1 259.0	25.19	43.42	10	0
19.00	911.2	18.23	18.23	0	0
26.50	0	0	0	0	0

表 3 混凝土配合比

Table 3 Concrete mix ratio

混凝土强度等级	材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )				总用量/(kg·m <sup>-3</sup> )	减水剂用量(以水泥用量计)/%	抗压强度/MPa
	海水	海砂	水泥	石子			
C30	150	829	319	1 100	2 398	0.30	38.3
C40	150	749	375	1 113	2 387	0.30	44.3

## 1.2 试件制备

本试验共制作 13 组拉拔试件, 每组 3 个, 共计 39 个, 如表 4 所示。

表 4 拉拔试件设计分组

Table 4 Pull-out specimen design grouping

试件编号	筋材类型	腐蚀环境	腐蚀时间/d	混凝土强度等级
C30-0	CFRP	普通环境	0	C30
C30-J60	CFRP	长期浸泡	60	C30
C30-G60	CFRP	干湿循环	60	C30
R40-0	HRB400	普通环境	0	C40
R40-J30	HRB400	长期浸泡	30	C40
R40-J60	HRB400	长期浸泡	60	C40
R40-G30	HRB400	干湿循环	30	C40
R40-G60	HRB400	干湿循环	60	C40
C40-0	CFRP	普通环境	0	C40
C40-J30	CFRP	长期浸泡	30	C40
C40-J60	CFRP	长期浸泡	60	C40
C40-G30	CFRP	干湿循环	30	C40
C40-G60	CFRP	干湿循环	60	C40

13 组拉拔试件以不同的混凝土强度、筋材类型、腐蚀环境、腐蚀龄期为对照。其中混凝土强度等级为 C30 和 C40; 筋材类型为 HRB400 钢筋和 CFRP 筋; 腐蚀环境为普通环境、海水长期浸泡、海水干湿循环, 海水干湿循环设定为试件 6 h 干燥、6 h 浸泡, 海水温度为室温; 腐蚀龄期为 0, 30, 60 d。如图 2 所示, 拉拔试

件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm, 其锚固长度至少为  $5d_a$  ( $d_a$  为筋材直径)。对于 CFRP 筋与海水海砂混凝土拉拔试件, 其加载段嵌入镀锌钢套管内, 灌入粘钢结构胶进行加固。试件浇注完成后, 在标准养护室内养护 1 d 后拆除模具, 并在相同环境下继续养护至 28 d。拉拔试件浇注如图 3 所示。

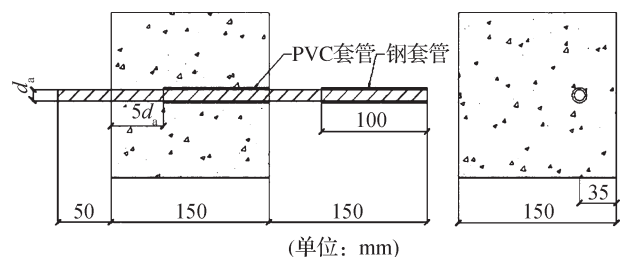


图 2 拉拔试件尺寸

Fig. 2 Pull-out specimen size

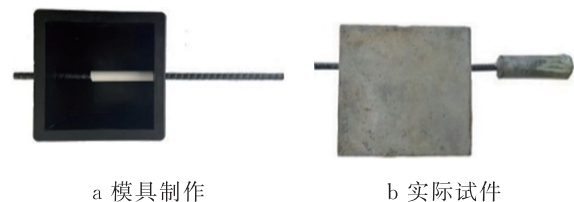


图 3 拉拔试件浇注

Fig. 3 Pull-out specimen pouring

### 1.3 加载方案

考虑到中心拉拔会使混凝土块体受到底板约束反力作用,始终处于受压的应力状态,与实际构件中混凝土的受力状态不一致,故本试验采用偏心拉拔。在CFRP筋拔出过程中,使海水海砂混凝土块体处于弯-剪耦合应力下,从而使海水海砂混凝土所处的应力状态与实际构件中一致。利用100 t的液压万能试

验机进行加载,将拉拔试件置于反力架上,采用位移控制加载方式,加载速率为0.3 mm/min。分别测量筋材自由端绝对滑移值和钢板变形量,二者之差即为CFRP筋或HRB400钢筋自由端的相对滑移值。当试验过程中出现海水海砂混凝土劈裂、筋材拉断或筋材自由端相对滑移量超过30 mm中任意一种情况时,停止加载,结束试验。拉拔试件加载装置见图4。

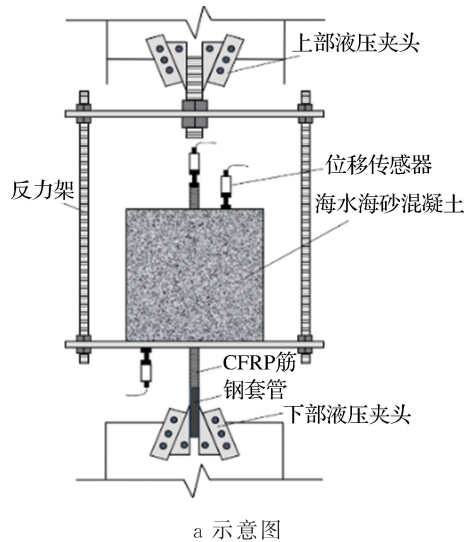


图4 拉拔试件加载装置

Fig. 4 Pull-out specimen loading diagram

## 2 试验结果分析

本试验拉拔试件黏结段长度为 $5d_a$ ,长度较短,一般认为黏结应力沿着筋材埋置长度均匀分布。黏结应力 $\tau$ 计算如式(1)所示,即

$$\tau = P / (\pi d_a l_a) \quad (1)$$

式中, $\tau$ 为黏结应力, $P$ 为极限拉拔荷载, $d_a$ 为筋材直径, $l_a$ 为黏结长度。

试验破坏形式为筋材拔出破坏、筋材拉断破坏和混凝土劈裂破坏。试验结果如表5所示。

表5 拉拔试件试验结果

Table 5 Test results of pull-out specimen

试件编号	黏结强度/MPa			平均黏结强度/MPa	破坏形式		
	No. 1	No. 2	No. 3		No. 1	No. 2	No. 3
C30-0	10.34	9.44	8.52	9.43	拔出	拔出	拔出
C30-J60	8.14	7.59	7.49	7.74	拔出	拔出	拔出
C30-G60	7.53	7.27	6.44	7.08	拔出	拔出	拔出
R40-0	24.57	28.92	25.49	26.33	劈裂	劈裂	劈裂
R40-J30	27.18	25.88	23.59	25.55	劈裂	劈裂	劈裂
R40-J60	26.42	31.19	24.83	27.48	劈裂	拉断	劈裂
R40-G30	25.41	20.28	27.01	24.23	劈裂	劈裂	劈裂
R40-G60	25.46	27.06	28.01	26.84	劈裂	劈裂	劈裂
C40-0	16.12	17.94	20.72	18.26	劈裂	劈裂	劈裂
C40-J30	16.12	16.28	13.68	15.36	拔出	拔出	拔出
C40-J60	13.37	10.82	25.46	16.55	拔出	拔出	劈裂
C40-G30	15.52	15.98	18.78	16.76	拔出	拔出	拔出
C40-G60	12.73	15.28	14.32	14.11	拔出	拔出	拔出

## 2.1 试件破坏形式

2.1.1 筋材拔出破坏 此类破坏仅发生在筋材为 CFRP 筋,主要表现为 CFRP 筋被拔出。加载阶段 CFRP 筋在拉拔力加载初期发生滑移,此时黏结力主要由化学胶着力承担;随着荷载继续增大,CFRP 筋的自由端开始发生相对滑移,黏结力从化学胶着力开始转变为由 CFRP 筋肋与海水海砂混凝土之间的机械咬合力及摩擦力承担;随着拉拔力的不断增大,CFRP 筋渐渐地从海水海砂混凝土试块中被拔出。从开始发生相对滑移到被拔出过程中,CFRP 筋自由端混凝土自筋材部位向周围生成细微裂缝,如图 5 所示。

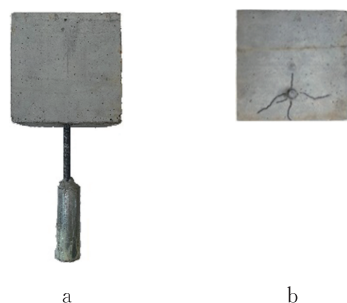


图 5 筋材拔出破坏

Fig. 5 Failure of reinforcement pullout

2.1.2 筋材拉断破坏 筋材为 HRB400 钢筋的试件在拉拔试验中发生 HRB400 钢筋被拉断破坏。加载过程中,拉拔力逐渐增大,HRB400 钢筋出现屈服,随后被拉断,自由端出现部分滑移未产生裂缝。此类破坏主要原因是 HRB400 钢筋被海水腐蚀后与海水海砂混凝土之间的黏结力大于 HRB400 钢筋的极限拉应力,从而使 HRB400 钢筋被拉断破坏,如图 6 所示。

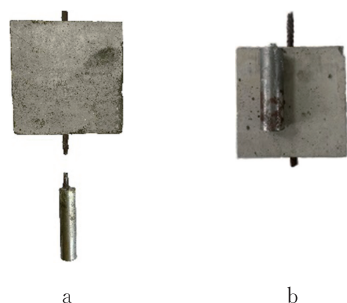


图 6 筋材拉断破坏

Fig. 6 Failure of broken reinforcement

2.1.3 混凝土劈裂破坏 混凝土强度等级提高,达

到 C40 时,HRB400 钢筋与海水海砂混凝土主要发生混凝土劈裂破坏,CFRP 筋与海水海砂混凝土部分发生混凝土劈裂破坏。混凝土劈裂破坏产生的裂缝沿着偏心一侧混凝土产生,并在拉拔力继续增大时,裂缝呈对称贯穿整个试件,如图 7 所示。

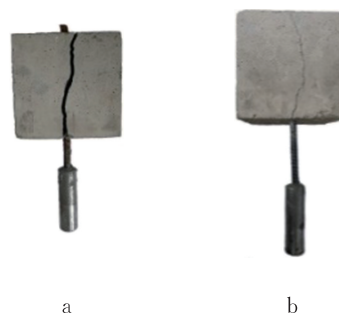


图 7 混凝土劈裂破坏

Fig. 7 Failure of concrete splitting

## 2.2 黏结—滑移曲线

图 8 为典型的黏结—滑移曲线。从图 8 可以看出,同一组试件,其黏结—滑移曲线基本保持一致。结合表 5 得出,同组试件的峰值荷载及相对的黏结滑移量也较为接近。因此,选择不同破坏形式的代表性黏结—滑移曲线来展开讨论。

如图 9 所示,筋材拔出破坏相对于混凝土劈裂破坏和筋材拉断破坏有着良好的黏结—滑移曲线。混凝土劈裂破坏和筋材拉断破坏的黏结—滑移曲线在其抗拉拔力达到峰值后试件及筋材会发生猛然破坏,这种破坏具有突然性,明显地属于脆性破坏。而筋材拔出破坏的特征符合典型黏结—滑移曲线,其黏结—滑移曲线分为 4 个阶段:① 初期的微滑移阶段,此阶段的相对滑移量较小,但黏结应力增长非常迅速,其抗拉拔力主要由 CFRP 筋与海水海砂混凝土之间的黏结力产生;② 滑移阶段,此阶段随着拉拔力的增加,滑移量迅速增长,黏结—滑移曲线呈现非线性上升,其抗拉拔力主要由 CFRP 筋横肋与海水海砂混凝土之间的机械咬合力及摩擦力产生;③ 拔出阶段,此阶段由于 CFRP 筋与海水海砂混凝土之间发生整个界面黏结破坏,CFRP 筋被整体拔出,曲线斜率急剧减小,在趋近峰值应力时趋于平缓;④ 残余阶段,此阶段为黏结应力达到峰值时,快速下降后残留的黏结应力,其残余黏结应力主要为曲线的第二波峰的趋势,其抗拉拔力主要由于 CFRP 筋横肋嵌入被破坏的海水海砂混凝土内,在被拔出过程中产生了附加阻力。

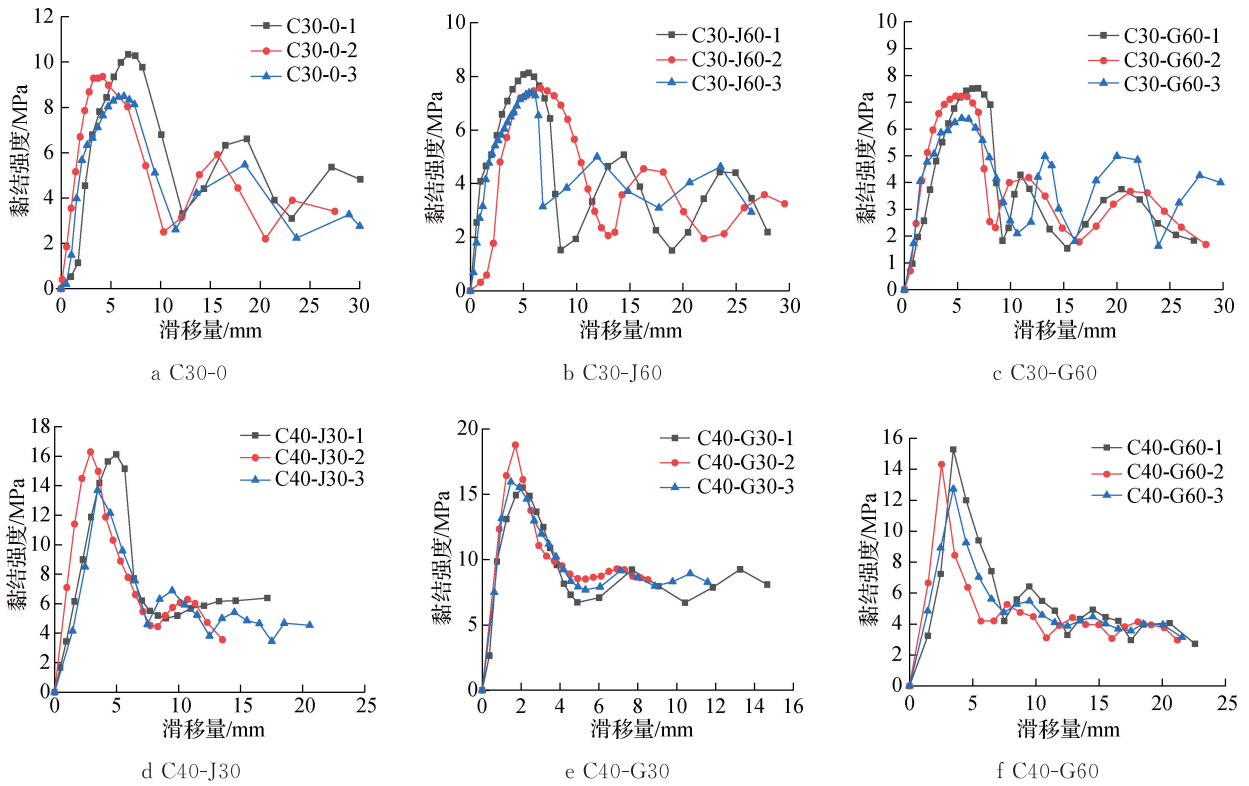


图8 典型黏结—滑移曲线

Fig. 8 Typical bond-slip curves

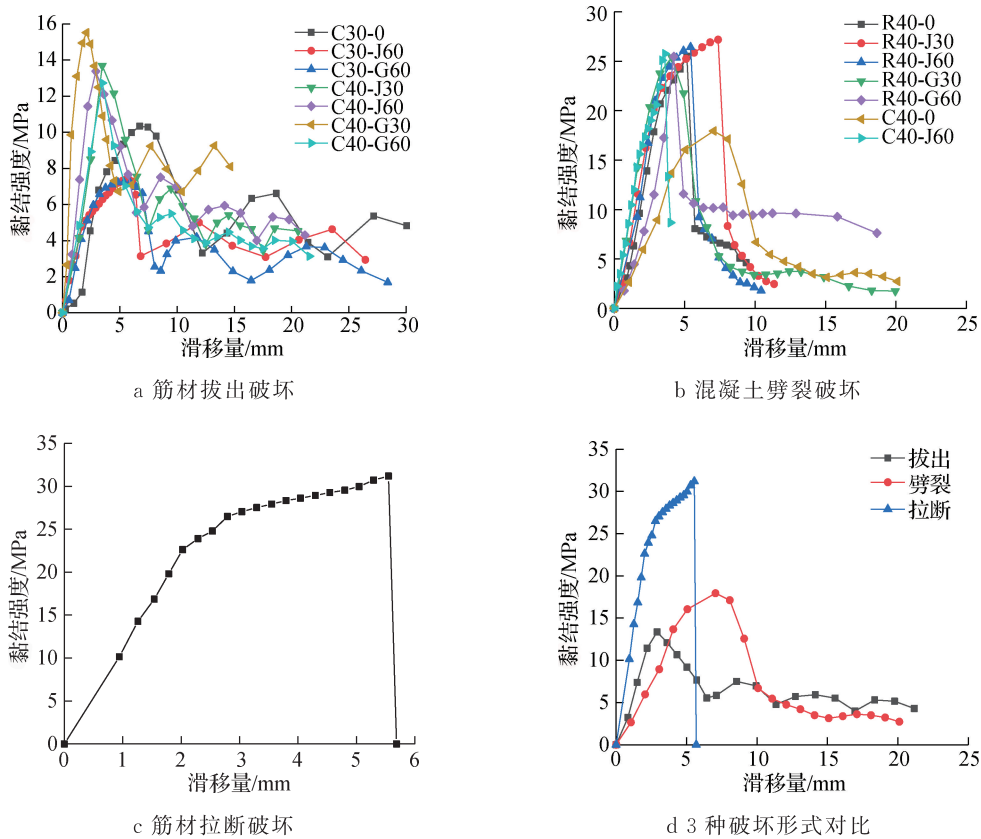


图9 不同破坏类别黏结—滑移曲线

Fig. 9 Different types of bond-slip curves

相比较而言,混凝土劈裂破坏只具有筋材拔出破坏前 3 个阶段的特征,且混凝土发生劈裂后,筋材与海水海砂混凝土间还存在黏结力,但黏结力普遍降低至 20% 以下,筋材与海水海砂间的黏结破坏严重。筋材拉断破坏同样具有筋材拔出破坏前 3 个阶段的特征,但筋材发生断裂后,筋材与海水海砂混凝土间不再有任何黏结力。

### 3 影响因素分析

#### 3.1 混凝土强度

如图 10 所示,混凝土强度等级对 CFRP 筋与海水海砂混凝土黏结强度有显著的影响。普通环境下, C40 混凝土强度比 C30 混凝土强度所对应的黏结力提高 52.71%;海水长期浸泡 60 d 下, C40 混凝土强度比 C30 混凝土强度所对应的黏结力提高 49.52%;海水干湿循环 60 d 下, C40 混凝土强度比 C30 混凝土强度所对应的黏结力提高 44.79%。说明强度等级高的混凝土与 CFRP 筋的黏结作用更强,其界面机械咬合力更好,两者之间的黏结强度相对更高。

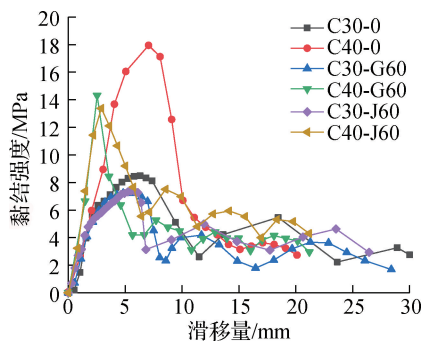


图 10 混凝土强度对黏结强度的影响

Fig. 10 Effect of concrete strength on bond strength

#### 3.2 筋材类型

如图 11 所示,CFRP 筋与海水海砂混凝土试件破坏形式主要表现为筋材拔出破坏。HRB400 钢筋由于耐腐蚀能力较差,破坏形式表现为混凝土劈裂破坏和筋材拉断破坏。两者黏结—滑移曲线的表现也相差很大,CFRP 筋与海水海砂试件的曲线具有上文所述的 4 个阶段性变化,HRB400 钢筋与海水海砂混凝土试件的曲线缺少残余阶段,虽然从图中可以看出 HRB400 钢筋与海水海砂混凝土试件的黏结强度高于 CFRP 筋与海水海砂混凝土试件的黏结强度,但其性能已出现严重退化,并发生脆性破坏。这是由于经过海水中的  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  腐蚀后,

HRB400 钢筋出现锈蚀,混凝土内部锈蚀部分与混凝土结合方式发生改变,导致受力时混凝土出现劈裂破坏,外部拉拔端直接暴露在海水中,被锈蚀后抗拉性能降低,导致筋材被拉断。

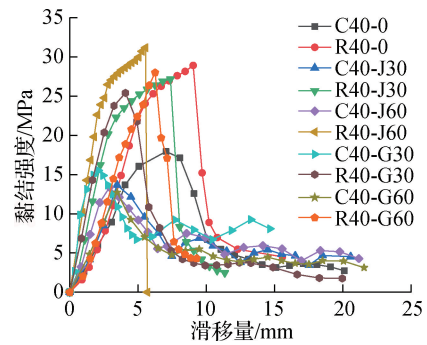


图 11 筋材类型对黏结强度的影响

Fig. 11 Effect of reinforcement type on bond strength

#### 3.3 腐蚀环境

如图 12 所示,对于 CFRP 筋与海水海砂混凝土试件来说,经过海水浸泡 60 d 和海水干湿循环 60 d 后,其黏结强度均出现下降趋势,下降率分别为 25.5% 和 29.1%。经过海水腐蚀 60 d 后,破坏形式出现混凝土劈裂破坏,其原因主要是混凝土在海水腐蚀中也会出现性能下降,导致 CFRP 筋与混凝土的黏结强度受到影响。

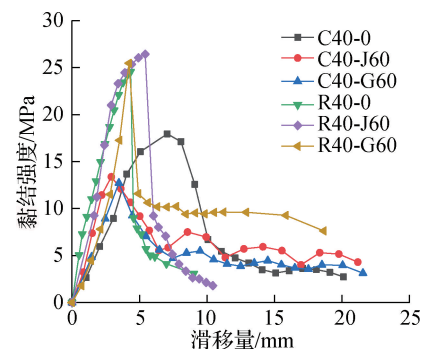


图 12 腐蚀环境对黏结强度的影响

Fig. 12 Effect of corrosive environment on bond strength

结合表 5 和图 12 可以看出,HRB400 钢筋与海水海砂混凝土试件,在海水腐蚀后,其黏结强度出现先下降后上升的趋势。主要原因是 HRB400 钢筋出现锈蚀后,黏结段锈蚀嵌入混凝土部位增大,致使易发生混凝土劈裂和 HRB400 钢筋被拉断破坏。

#### 3.4 腐蚀龄期

如图 13 所示,对于 CFRP 筋与海水海砂混凝土试件来说,随着腐蚀龄期的增加,其黏结强度出现下

降的趋势。海水浸泡 30 d 和 60 d 后其黏结强度下降 10.15% 和 25.46%；海水干湿循环 30 d 和 60 d 后其黏结强度下降 11.18% 和 29.01%。从图 13 中还可看出，海水浸泡试件相比海水干湿循环试件腐蚀程度较低。30 d 的海水浸泡较海水干湿循环腐蚀程度降低 1.03%；60 d 的海水浸泡较海水干湿循环腐蚀程度降低 3.55%。对于 HRB400 钢筋与海水海砂混凝土试件来说，随着腐蚀龄期的增加，其峰值点黏结强度变化趋势不大，经过长期腐蚀后，HRB400 钢筋的性能大幅度下降，海水浸泡 60 d 后，由于 HRB400 钢筋被腐蚀严重，出现 HRB400 钢筋拉断破坏现象。

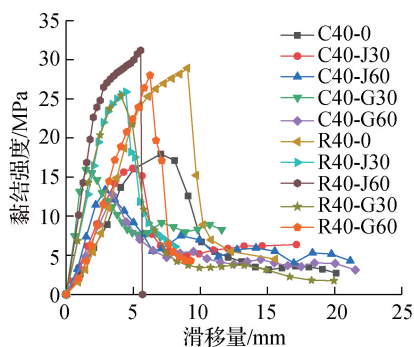


图 13 腐蚀龄期对黏结强度的影响

Fig. 13 Effect of corrosion time on bond strength

## 4 结论

(1) 混凝土强度等级对 CFRP 筋与海水海砂混凝土试件黏结强度有很大的影响，混凝土强度等级越高，CFRP 筋与海水海砂混凝土的黏结强度越高。普通环境下，C40 混凝土强度比 C30 混凝土强度所对应的黏结力提高 52.71%；海水浸泡 60 d 下，C40 混凝土强度比 C30 混凝土强度所对应的黏结力提高 49.52%；海水干湿循环 60 d 下，C40 混凝土强度比 C30 混凝土强度所对应的黏结力提高 44.79%。

(2) 在海水腐蚀环境中，CFRP 筋由于自身抗腐蚀能力强，其破坏形式及黏结—滑移曲线表现良好。HRB400 钢筋与海水海砂混凝土试件的破坏形式由于海水中的  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  腐蚀，全部表现为脆性破坏。

(3) 经过海水浸泡 60 d 和海水干湿循环 60 d 后，CFRP 筋与海水海砂混凝土试件黏结强度均会出现下降的趋势，下降率为 25.5% 和 29.1%。其破坏形式在海水浸泡 60 d 时会出现混凝土劈裂破坏。

(4) 随着腐蚀龄期增加，CFRP 筋与海水海砂混凝土试件在海水浸泡 30 d 和 60 d 后其黏结强度下降 10.15% 和 25.46%；海水干湿循环 30 d 和 60 d 后其

黏结强度下降 11.18% 和 29.01%。海水浸泡试件相比海水干湿循环试件腐蚀程度较低。30 d 的海水浸泡较海水干湿循环腐蚀程度降低 1.03%；60 d 的海水浸泡较海水干湿循环腐蚀程度降低 3.55%。HRB400 钢筋与海水海砂混凝土试件在海水浸泡 60 d 后，由于 HRB400 钢筋被腐蚀严重，性能出现大幅度下降，出现 HRB400 钢筋被拉断破坏现象。

## 参考文献：

- [1] 董志强, 吴刚. FRP 筋增强混凝土结构耐久性性能研究进展[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 1-19.
- [2] 李田雨, 张玉梅, 刘小艳, 等. 海水海砂高性能海工混凝土力学及早期工作性研究[J]. 混凝土, 2019(11): 1-5.
- [3] 秦斌. 海水海砂混凝土基本力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(2): 90-92.
- [4] 耿健智, 朱德举, 郭帅成, 等. 基于不同地域海砂的海水海砂混凝土力学性能试验研究[J]. 材料导报, 2022, 36(3): 152-159.
- [5] WANG Xin, ZHAO Xing, WU Zhishen. Fatigue degradation and life prediction of basalt fiber-reinforced polymer composites after saltwater corrosion[J]. Materials & Design, 2019, 163: 107529.
- [6] DONG Zhiqiang, WU Gang, XU Bo, et al. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction[J]. Materials & Design, 2016, 92: 552-562.
- [7] 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.
- [8] WANG Lei, MAO Yadong, LV Haibo, et al. Bond properties between FRP bars and coral concrete under seawater conditions at 30, 60, and 80 °C [J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 442-449.
- [9] 单波, 佟广权, 刘其元. CFRP 筋与海水海砂混凝土黏结性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 113-123.
- [10] 中国建筑材料联合会. 建设用砂: GB/T 14684—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [11] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [12] 中国建筑科学研究院. 海砂混凝土应用技术规范: JGJ 206—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [13] 唐朝, 谢青海, 张海津, 等. 天然海水浸泡对 FRP 筋抗压性能的影响[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2023, 32(3): 80-86.

(责任编辑: 褚金红 实习编辑: 张昌保)