研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering

Open Access

引用格式:陆晓婉, 张海滨, 孙天舒, 等. GFRP−钢复合筋与珊瑚海水海砂混凝土粘结性能试验研究 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(4): 351−363.

Citation: Lu Xiaowan, Zhang Haibin, Sun Tianshu, et al. Experimental study on the bond behavior between GFRP-steel composite bars and coral seawater sea-sand concrete[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(4): 351−363.

GFRP−钢复合筋与珊瑚海水海砂混凝土粘结性能试验研究

陆晓婉[1,2], 张海滨[1,2]✉, 孙天舒[1,2], 陈天宇[1,2], 刘婉秋[1,2], 周　智[1,2]✉

(1. 热带海洋工程材料及评价全国重点实验室, 海南 海口 570228;
2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

摘　要: 深远海岛礁工程建设面临传统建筑材料耐腐蚀性不足和远洋运输成本高昂的严峻挑战。采用属地化材料与复合材料是可行的解决方案, 但玻璃纤维 (GFRP)−钢复合筋与珊瑚海水海砂混凝土 (CSSC) 的粘结性能目前尚不明确。针对此问题, 本研究设计了 5 组共 15 个中心拉拔试件, 分析了珊瑚海水海砂混凝土立方体抗压强度、GFRP−钢复合筋直径和 GFRP−钢复合筋粘结长度对粘结性能的影响, 并提出了 GFRP−钢复合筋与珊瑚海水海砂混凝土的粘结强度计算式以及基本锚固长度计算式。结果表明: 试件极限粘结强度主要与 CSSC 立方体抗压强度、GFRP−钢复合筋粘结长度呈正相关; 初始粘结刚度与 CSSC 立方体抗压强度呈正相关。

关键词: GFRP−钢复合筋; 珊瑚海水海砂混凝土; 粘结强度

中图分类号: TU377.9　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)04-0351-13

DOI: 10.65658/j.hndk.2026012702　　CSTR: 32403.14.hndk.2026012702

Experimental study on the bond behavior between GFRP-steel composite bars and coral seawater sea-sand concrete

Lu Xiaowan[1,2], Zhang Haibin[1,2]✉, Sun Tianshu[1,2], Chen Tianyu[1,2],
Liu Wanqiu[1,2], Zhou Zhi[1,2]✉

(1. State Key Laboratory of Tropic Ocean Engineering Materials and Materials Evaluation, Haikou 570228, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The construction of projects on remote islands and reefs faces severe challenges, including insufficient corrosion resistance of traditional building materials and high costs for long distance marine transportation. The use of localized materials and composite materials represents a feasible solution, though the bonding performance between GFRP-steel composite bars and coral seawater sea-sand concrete (CSSC) remains unclear. To address this issue, this study designed five groups comprising a total of 15 central pull-out specimens to analyze the effects of CSSC strength, GFRP-steel composite bar diameter, and bond length on bonding performance. Bond strength and basic anchorage length calculation formulas for GFRP-steel

Received: 2026−01−27; **Revised:** 2026−02−19; **Accepted:** 2026−02−24.
✉ **Corresponding author(s):** Zhang Haibin, E-mail: zhanghb01@hainanu.edu.cn; Zhou Zhi, E-mail: zhizhou@hainanu.edu.cn.

composite bars and coral seawater sea-sand concrete were proposed. The results indicate that the ultimate bond strength of test specimen is primarily positively correlated with the cube compressive strength of CSSC and the bond length of GFRP-steel composite bars, while the initial bond stiffness shows a positive correlation with the cube compressive strength of CSSC. The experimental data can provide support for the application of localized materials in the construction of remote island and reef projects.

Keywords: GFRP-steel composite bar; coral seawater sea-sand concrete; bond strength

0 引 言

深远海岛礁工程建设正面临严峻挑战,偏远海域不仅建筑材料的供应极为稀缺,运输成本也极为高昂,制约了当地基础设施建设的发展。为破解该资源瓶颈,采用属地化材料如珊瑚石骨料、天然海砂和海水拌合制备的珊瑚海水海砂混凝土(coral seawater sea-sand concrete, CSSC),成为属地化建设重要技术路径[1]。但是 CSSC 中高浓度氯离子会引发传统钢筋的严重锈蚀。目前研究为提高耐久性能,纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)通过混杂纤维设计,在维持较高耐腐蚀性的同时,增强了拉伸性能和环境抗力[2−3]。在此基础上,为更好地兼顾筋材在 CSSC 中的耐腐蚀与刚度需求,一种新型 FRP−钢复合筋(FRP-steel composite bar)应运而生。该材料通过 FRP 包裹钢筋形成兼具更高弹性模量与二次刚度的复合筋,从而显著提升力学性能与长期耐久性[4]。在此基础上,FRP−钢复合筋与 CSSC 之间的可靠粘结是实现两者协同工作的关键,也是推动属地化材料在深远海岛礁工程中应用的基础。

混凝土和筋材共同决定粘结性能。相较于普通混凝土(normal concrete, NC),劈裂抗拉强度和密实度导致珊瑚骨料混凝土在力学性能和破坏模式上差异明显[5]。Lyu 等[6] 研究表明由于珊瑚骨料独特的“返水”特性,能够显著提升界面砂浆的水化程度,从而使珊瑚骨料混凝土的劈裂抗拉强度高于同强度等级的普通混凝土。王磊等[7] 研究表明降低水灰比可提高珊瑚骨料混凝土的密实度、增强与 FRP 筋之间的机械咬合力,但密实度过高后,受压破坏将不再沿水泥浆−骨料界面发生,而是直接贯穿珊瑚骨料。在筋材方面,不同种类 FRP 筋与珊瑚骨料混凝土的粘结性能也存在差异。胡长顺[8]、周济等[9] 和 Li 等[10] 研究发现玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)筋与全珊瑚骨料海水混凝土的粘结强度明显高于碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)筋,破坏模式以劈裂破坏为主,而 CFRP 筋试件多发生拔出破坏。复合筋与普通 FRP 筋的材料本构不同[11],这导致二者的粘结−滑移曲线及粘结应力分布具有明显区别。郝庆多等[4] 基于 GFRP−钢绞线复合筋与 NC 粘结拉拔试验,提出了对应的粘结−滑移本构模型,与 FRP 筋−NC 的粘结−滑移本构模型区别明显。王磊等[12] 通过 CFRP−钢复合筋−全珊瑚混凝土之间梁式粘结试验,发现粘结应力分布规律不同于 CFRP 筋−全珊瑚混凝土。尽管上述研究包含了 FRP 筋−珊瑚骨料混凝土、FRP−钢复合筋−NC 的粘结性能,但 GFRP−钢复合筋与 CSSC 之间的粘结性能及影响因素仍不明确。此外粘结−滑移本构模型是用于确定锚固长度的理论基础[4],锚固长度是结构设计的重要构造措施,若缺少适配 GFRP−钢复合筋−CSSC 合理与锚固长度的计算式,将直接限制其在岛礁的工程应用。

为了研究 GFRP−钢复合筋−CSSC 的粘结性能,本研究开展了 GFRP−钢复合筋−CSSC 中心拉拔试验,研究 CSSC 立方体抗压强度、GFRP−钢复合筋直径及 GFRP−钢复合筋粘结长度 3 个因素对 GFRP−钢复合筋−CSSC 粘结性能的影响,并提出 GFRP−钢复合筋−CSSC 粘结强度和基本锚固长度计算式,以期为海水海砂−FRP 相关标准的完善提供依据,推动 GFRP−钢复合筋和 CSSC 在深远海岛礁工程中的实际应用。

1 材料与方法

1.1 原材料 本研究采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,S95 级粒化高炉矿渣粉,Ⅰ级 F 类粉煤灰,以及高效聚羧酸减水剂。珊瑚粗骨料采用珊瑚石破碎得到的粒径为 5 ~ 20 mm 不规则颗粒;细骨料采用天然海

砂，属于中砂适用于拌和混凝土。珊瑚石与珊瑚粗骨料、细骨料的外观如图 1 所示，2 种骨料的物理力学指标如表 1 所示。本研究采用江苏智性科技南通有限公司生产的 GFRP−钢复合筋，钢芯规格为 HRB 400，钢芯外包 GFRP，外径规格为 12 和 16 mm，GFRP−钢复合筋参数如表 2 所示。拌和水选用海南大学海水湖的天然海水。



a 珊瑚石 b 珊瑚粗骨料 c 细骨料

图 1 珊瑚石、珊瑚粗骨料和细骨料的外观

表 1 2 种骨料的物理力学指标

骨料	细度模数	堆积密度/(kg・m^{-3})	表观密度/(kg・m^{-3})	吸水率/%	含水率/%	压碎值指标/%	空隙率/%
细骨料	2.89	1 370	2 580	11.73	0.18	38.68	—
珊瑚粗骨料	—	1 187	2 513	15.14	4.41	22.96	52.77

表 2 GFRP−钢复合筋的参数

筋材类型	内径/mm	外径/mm	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	肋宽/mm	肋深/mm	肋间距/mm	弹模1/(×10^{3}MPa)	弹模2/(×10^{3}MPa)
GFRP−钢复合筋12	6	12	237.04	710.87	6.66	1.20	9.24	86.23	15.31
GFRP−钢复合筋16	10	16	275.52	617.22	7.08	1.02	9.67	106.93	13.08

注：弹模1为钢芯屈服前GFRP−钢复合筋的弹性模量，弹模2为钢芯屈服后GFRP−钢复合筋的弹性模量。

1.2 2 种强度等级 CSSC 本研究配制 2 种强度等级 CSSC，C30 和 C40 两组配合比参数见表 3，拌合前珊瑚粗骨料用预拌水提前充分预湿，预拌水占总拌合水质量分数分别为 47.5% 和 31.6%，海水养护 28 d 测量得：立方体抗压强度平均值分别为 31.3 和 40.7 MPa，标准差分别为 1.63 和 0.91 MPa；劈裂抗拉强度平均值分别为 2.95 和 3.47 MPa，标准差分别为 0.11 和 0.14 MPa，满足 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》[13] 中设计试件的强度要求。

表 3 C30 和 C40 的 CSSC 配合比 单位：kg・m^{-3}

强度等级	水泥	粉煤灰	矿渣	珊瑚粗骨料	细骨料	拌合水	减水剂
C30	429	83	38	935	765	198	8
C40	620	120	60	675	553	224	16

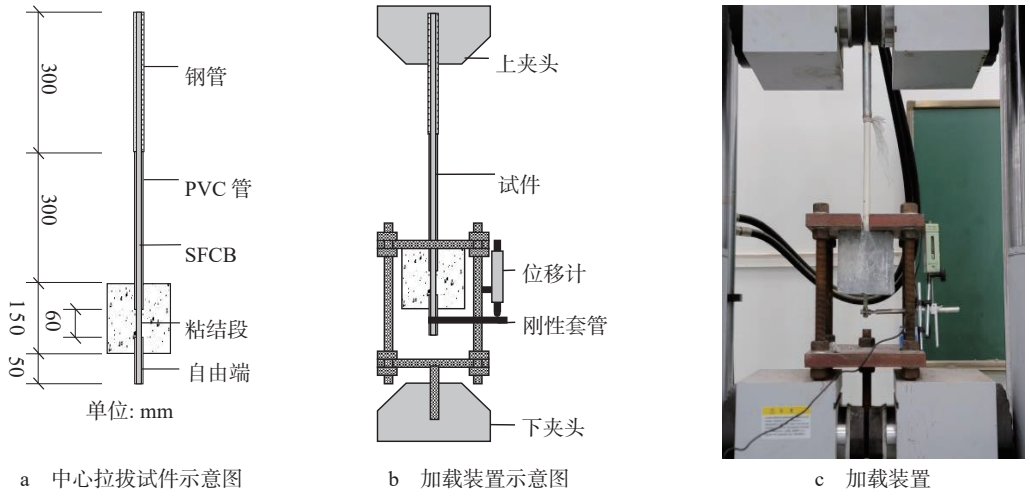
1.3 试件制作 各中心拉拔试件组参数如表 4 所示。对照组为“C30-S-12-60”，其余试件均为 GFRP−钢复合筋−CSSC 试件。例如，试件组“C30-12-60”表示 CSSC 强度等级为 C30、GFRP−钢复合筋直径为 12 mm、粘结长度为 60 mm。每组均设置 3 个平行试件。试件制作参照文献 [14]，GFRP−钢复合筋总长度为 800 mm，外套钢管一端为锚固端，钢管内注入环氧树脂植筋胶，除粘结段以外的 GFRP−钢复合筋外套塑料管，塑料管端部注入少量结构胶，正式加载前将位于自由端的一小段塑料管取出，以防端部约束效应影响试验结果。

1.4 试验装置及试验过程 试验加载设备采用上海华龙测试 WAW−1000S 微机控制电液伺服万能试验机，试验采用位移控制进行加载[15]，加载速率为 0.5 mm・min^{-1}，通过自制的反力架装置进行中心拉拔试验，在拉拔试件自由端设置刚性套管，套管一端与位移计连接，用于测得 GFRP−钢复合筋自由端滑移量

S, 中心拉拔试件和加载装置如图 2 所示。

表 4 各中心拉拔试件组参数

试件组编号	钢芯直径/mm	直径/mm	粘结长度/mm	CSSC强度等级
C30-12-60	6	12	60	C30
C30-12-80	6	12	80	C30
C30-16-80	10	16	80	C30
C40-12-60	6	12	60	C40
C30-S-12-60	—	12	60	C30

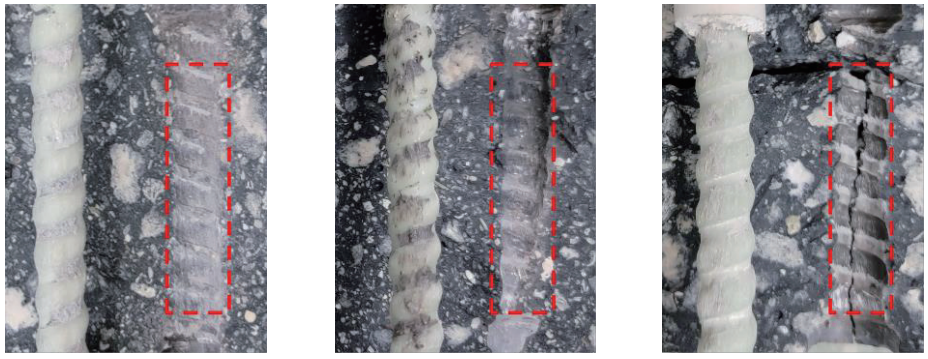


a 中心拉拔试件示意图 b 加载装置示意图 c 加载装置

图 2 中心拉拔试件和加载装置

2 结果与分析

2.1 中心拉拔试件破坏形态 GFRP−钢复合筋−CSSC 中心拉拔试件共存在 3 类典型破坏形式: 拔出破坏、拔出−劈裂破坏和劈裂破坏。3 种破坏形式对应的粘结界面磨损状态如图 3 所示。

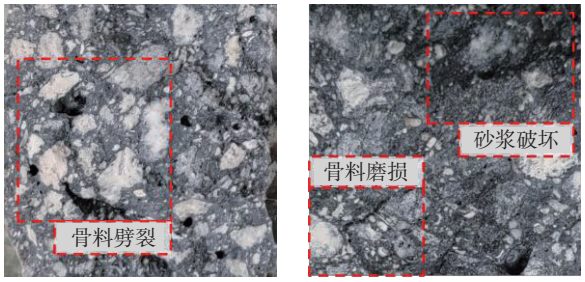


a 拔出破坏 b 拔出−劈裂破坏 c 劈裂破坏

图 3 3 种破坏形式对应的粘结界面磨损状态

粘结界面磨损状态从严重到轻微对应的破坏形式依次为: 拔出破坏、拔出−劈裂破坏和劈裂破坏。拔出破坏对应的粘结界面状态为 GFRP−钢复合筋表面有明显擦痕、外包 GFRP 受摩擦产生白色粉屑且 CSSC 被大量剪碎残留在肋间, CSSC 基体上的肋痕被磨损到几乎光滑。拔出−劈裂破坏对应的粘结界面状态为外包 GFRP 几乎未见擦痕, 肋间残留砂浆, 肋痕磨损程度中等。劈裂破坏对应的粘结界面状态为外包 GFRP 与 CSSC 基体上的肋痕均未见磨损。劈裂破坏和拔出−劈裂破坏 2 种破坏形式都会发生

CSSC 基体的开裂，观察 CSSC 开裂截面的骨料和砂浆的形态，可明显区分 2 种 CSSC 开裂截面，如图 4 所示。



a 劈裂破坏 b 拔出-劈裂破坏

图 4 2 种 CSSC 开裂界面

通过对 CSSC 开裂截面图像开展量化统计发现，劈裂破坏试件中珊瑚粗骨料劈裂面积超过 65% 的开裂截面，而拔出−劈裂破坏形式对应的砂浆破坏面积占比超过 80%。从机理上分析，发生珊瑚粗骨料劈裂，是由于试验过程中粘结应力突增，大于珊瑚粗骨料抗剪强度[16]；发生砂浆破坏时由于 CSSC 内部应力分布不均，在试验过程中逐渐在砂浆区域产生应力集中。这表明，延缓 GFRP−钢复合筋−CSSC 粘结破坏的关键在于引导破坏集中于砂浆区域，不发生劈裂破坏，而是发生拔出−劈裂破坏，这样才能符合工程安全要求。

2.2 粘结强度变化特征 试验结果得到最大荷载 P 和最大滑移量 S_u。为了对比不同参数对试件界面粘结强度的影响规律，以达到最大荷载时 GFRP−钢复合筋粘结界面的平均粘结应力作为粘结强度 τ_u[9]，

$$\tau_u = \frac{P}{\pi d_b l_0}$$

其中，τ_u 为粘结强度；d_b 为 GFRP−钢复合筋直径；l_0 为粘结长度。

各组试验结果汇总如表 5 所示，各组试验的粘结−滑移曲线如图 5 所示，每组包括平行试件的 3 条粘结−滑移曲线。由表 5 可知，对照组 C30-S-12-60 的平均粘结强度为 16.40 MPa，GFRP−钢复合筋试件组 C30-12-60 的平均粘结强度为 15.64 MPa，经计算达到对照组平均粘结强度的 95.3%，表明 GFRP−钢复合筋与 CSSC 之间能够建立较可靠的界面粘结作用，具备工程应用可行性。

表 5 各组试验结果汇总

试件组编号	平行试件编号	破坏形式	最大荷载P/kN	粘结强度 τ_u/MPa	平均粘结强度 $\overline{\tau}_u$/MPa	最大滑移量S_u/mm	平均最大滑移量 $\overline{S}_u$/mm
C30 -12-60	1	拔出	36.1	15.97	15.64	1.72	1.65
	2	拔出	35.2	14.86		1.68	
	3	拔出	36.0	16.08		1.54	
C30 -12-80	1	劈裂	51.3	16.99	15.79	5.42	3.85
	2	劈裂	39.5	13.11		3.42	
	3	拔出−劈裂	52.1	17.28		2.71	
C30-16-80	1	劈裂	46.2	11.49	12.94	1.47	1.56
	2	劈裂	52.5	13.06		1.39	
	3	劈裂	57.3	14.26		1.81	
C40-12-60	1	拔出−劈裂	43.2	19.11	19.04	1.56	1.38
	2	拔出−劈裂	49.1	21.72		1.32	
	3	劈裂	36.8	16.28		1.26	
C30-S-12-60	1	拔出	37.5	16.58	16.40	0.26	0.27
	2	拔出	36.1	15.97		0.31	
	3	拔出	37.7	16.67		0.23	

不同试件组破坏形式存在明显差异，其中 C30-12-60 组均表现为拔出破坏，C30-16-80 组均表现为劈裂破坏，C30-12-80 组和 C40-12-60 组则呈现劈裂破坏与拔出−劈裂破坏并存的特征。C30-12-60 组 3 个平行试件的粘结−滑移曲线形态较为一致，能够较完整地反映拔出破坏下的界面演化过程。以 C30-12-60 组

为例,其粘结–滑移曲线可划分为微滑移阶段、滑移发展阶段、下降阶段和残余阶段[17]。微滑移阶段,自由端滑移量极小,粘结应力迅速增长,界面传力主要依赖CSSC与外包GFRP之间的化学胶着作用及机械咬合作用;滑移发展阶段,随着荷载持续增加,界面局部损伤逐步累积,滑移量不断增大,粘结应力增速放缓并达到峰值;下降阶段,界面磨损与局部破坏进一步扩展,承载能力开始衰减;残余阶段,此时界面传力机制主要表现为摩擦作用,粘结应力维持在较低且相对稳定的水平。

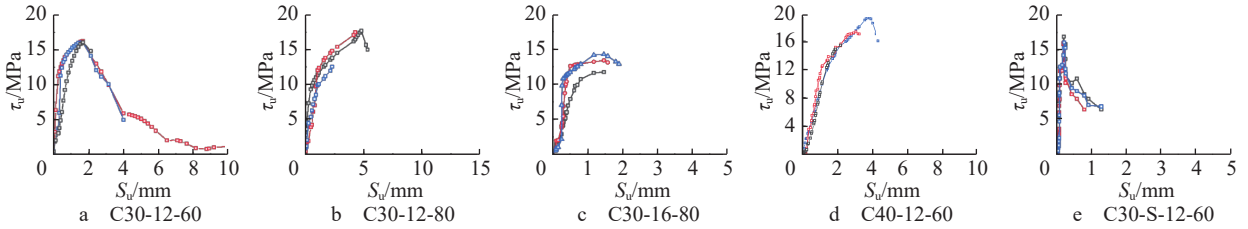


图5 各试件组的粘结–滑移曲线

2.3 粘结性能影响因素分析 评价粘结性能的重要指标包括$\bar{\tau}_u$、$\bar{S}_u$和初始粘结刚度均值$\bar{K}$[18]。初始粘结刚度为滑移量达到0.1 mm时粘结–滑移曲线的切线斜率,体现了GFRP–钢复合筋与CSSC的协调变形能力。为了便于分析,各组试验结果采用平行试件的平均值进行对比,符合GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》[19]要求。各组试验结果的对比曲线如图6所示,分别以CSSC立方体抗压强度、GFRP–钢复合筋直径以及粘结长度为变量。

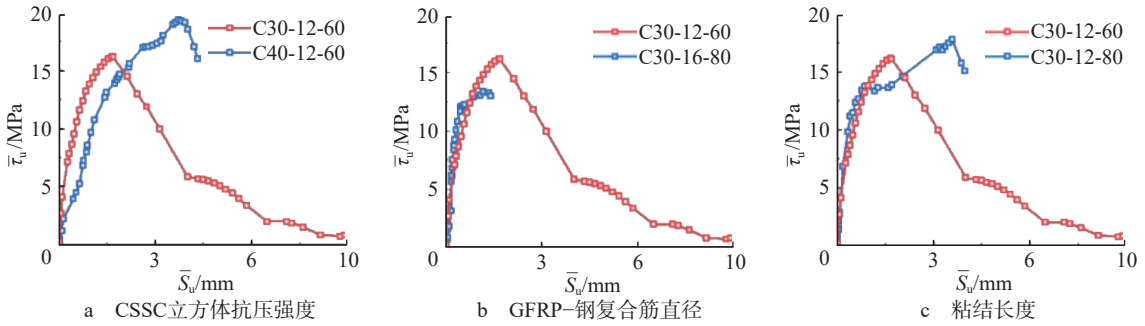


图6 各组试验结果曲线的对比图

2.3.1 CSSC立方体抗压强度 对不同f_{cu}试验结果进行对比分析,结果如图7所示。C30-12-60试件组的$\bar{\tau}_u$为15.64 MPa,$\bar{S}_u$为1.65 mm;C40-12-60试件组的$\bar{\tau}_u$为19.04 MPa,$\bar{S}_u$为1.38 mm,且C30-12-60试件组的$\bar{K}$更大。这是因为强度等级为C40的CSSC的水灰比更小,导致CSSC中砂浆更密实、握裹力更大,界面产生的粘结力更大、对应的滑移量更小;同时砂浆握裹力更大导致与GFRP–钢复合筋的协同作用更强,初始粘结刚度大。CSSC立方体抗压强度与$\bar{\tau}_u$、$\bar{K}$呈正相关,与$\bar{S}_u$呈负相关。

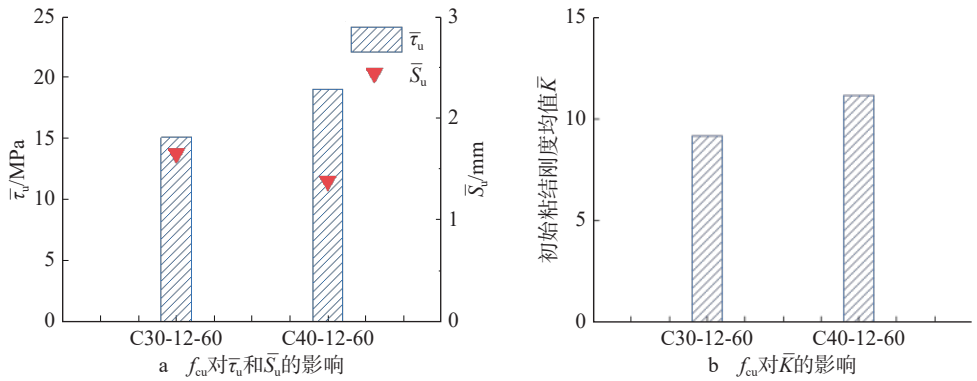


图7 CSSC立方体抗压强度f_{cu}的影响

2.3.2 GFRP−钢复合筋直径 对不同 d_b 试验结果进行对比分析，结果如图 8 所示。由图 8 可知，C30-12-60 试件组的$\bar{\tau}_u$为 15.64 MPa，$\bar{S}_u$为 1.65 mm；C30-16-80 试件组的$\bar{\tau}_u$为 12.94 MPa，$\bar{S}_u$为 1.56 mm，且 C30-12-60 试件组的 $\bar{K}$ 更大。d_b 主要从 3 个方面原因影响$\bar{\tau}_u$：(1)d_b 增大伴随着 CSSC 相对保护层厚度(c/d)减小、CSSC 基体能够提供的侧向约束力减小。(2)d_b 增大时，粘结段端部粘结应力集中现象更为显著，也使得 CSSC 更易发生劈裂。C30-16-80 试件组劈裂破坏时的$\bar{\tau}_u$和对应的$\bar{S}_u$均低于 C30-12-60 试件组在完整拔出状态下能达到的值。(3)GFRP−钢复合筋直径增大导致沿筋材直径方向的应力传递效率降低，更不易与 CSSC 变形协调，从而导致初始粘结刚度更小。总体上，GFRP−钢复合筋直径与$\bar{\tau}_u$、$\bar{S}_u$和 $\bar{K}$ 均呈负相关。

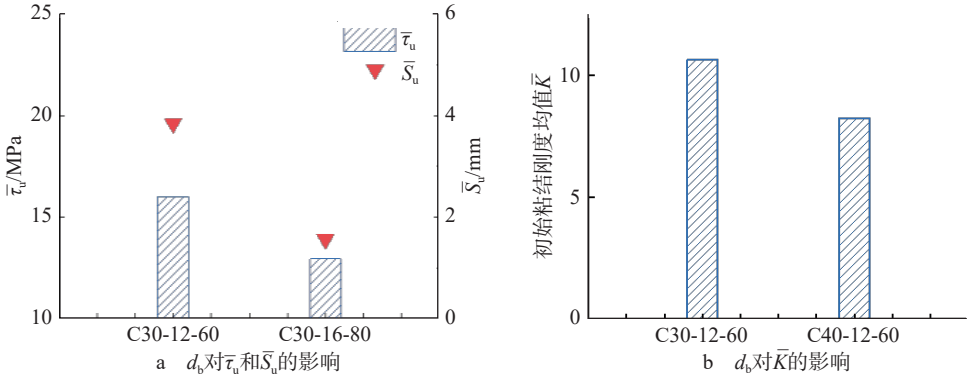


图 8 GFRP−钢复合筋直径 d_b 的影响

2.3.3 GFRP−钢复合筋粘结长度 对不同 l_0 试验结果进行对比分析，结果如图 9 所示。由图 9 可知，C30-12- 60 试件组的$\bar{\tau}_u$和$\bar{S}_u$分别为 15.64 MPa 和 1.65 mm，C30-12-80 试件组分别为 15.79 MPa 和 3.85 mm，且 C30-12-80 试件组的$\bar{K}$略小。这表明随着l_0增大，界面粘结面积增加，$\bar{\tau}_u$略有提高；但界面沿粘结长度方向的应力分布趋于不均匀，高应力区相对较短，导致滑移发展更为明显、握裹力弱化，表现为$\bar{S}_u$增大、$\bar{K}$减小。总体上，粘结长度与$\bar{\tau}_u$、$\bar{S}_u$呈正相关，与$\bar{K}$呈负相关。

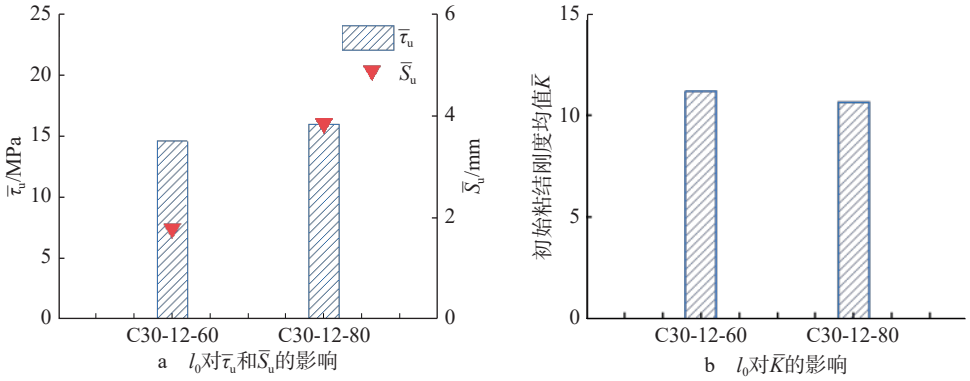


图 9 GFRP−钢复合筋粘结长度 l_0 的影响

3 SFCB-CSSC 粘结性能理论模型

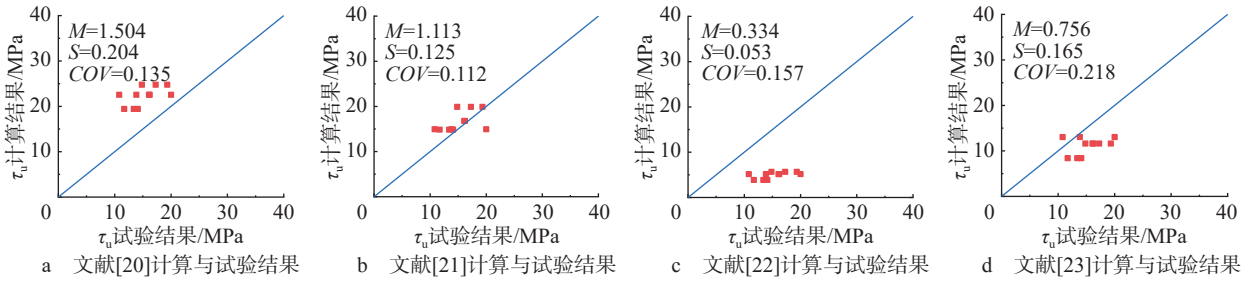
3.1 粘结强度模型 列举已有研究的 4 个粘结强度计算式，分别针对不同种类的筋材和混凝土(如表 6 所示)。将本研究中 GFRP−钢复合筋−CSSC 试件的参数代入，将 τ_u 的计算结果与试验结果比较得到图 10。M、S 和 COV 表示计算结果与试验结果之比的平均值、标准差和变异系数，用于反映计算结果的准确性。

由于筋材种类差别，针对 FRP 筋−NC[20] 和 FRP 筋−全珊瑚混凝土[21] 提出的计算式，得到的 τ_u 计算结果与试验结果相比偏大。由于混凝土种类差别，针对 FRP−钢绞线复合筋−NC[22] 和 FRP−钢复合筋−NC[23] 的计算式，得到的 τ_u 计算结果与试验结果相比偏小。

表 6 已有研究的 4 个粘结强度计算式

计算式	粘结强度计算式	应用范围
文献[20]计算式	$\tau_u = 0.154\times(8.00-0.17d)\left(\frac{l_0}{d}\right)^{-0.4} f_t$	FRP筋−NC
文献[21]计算式	$\tau_u = (0.23+1.63\sqrt{c/d})\sqrt{f_c'}$	FRP筋−全珊瑚混凝土
文献[22]计算式	$\tau_u = 11.37\sqrt{f_c'}/d$	FRP−钢绞线复合筋−NC
文献[23]计算式	$\tau_u = (0.4l_0/d)^{0.3E_f/E_s-0.5} f_t(8.50-12.20kd)$ $k = 0.009$	FRP−钢复合筋−NC

注:f_c'为混凝土抗压强度,MPa;f_t为混凝土抗拉强度,MPa;d为筋材直径,mm;c为混凝土保护层厚度,mm;k为与混凝土强度和筋材半径有关的常数系数;E_f为外包FRP的弹性模量,×10³MPa;E_s为钢芯的弹性模量,×10³MPa。



a 文献[20]计算与试验结果 b 文献[21]计算与试验结果 c 文献[22]计算与试验结果 d 文献[23]计算与试验结果

图 10 不同 τ_u 的计算式计算与试验结果比较

通过上述分析可知,GFRP−钢复合筋直径影响 $\bar{K}$,并且 GFRP−钢复合筋的刚度主要受钢芯影响[11],钢芯面积占比越大,表明钢芯在 GFRP−钢复合筋的刚度中贡献越突出。由参考文献 [24] 可知,不同种类的 FRP 弹性模量的影响通常不显示在计算式中,但其对界面摩擦的影响在设计中可简化为常数 α',该常数可使计算式适用于更多种类 FRP−钢复合筋−CSSC 的粘结强度计算。文献 [20] 的计算式相比文献 [21] 和文献 [22] 中的计算式考虑了 d、相对粘结长度(l_0/d)、f_t 变量,对粘结强度的影响因素考虑更全面;且相比于文献 [23] 的计算式表达形式更简洁。已有研究表明,CSSC 的 f_{cu} 和 f_t 之间可用一次项系数 K_0 建立线性回归方程,系数 K_0=0.065[5]。综上所述,参照文献 [20] 计算式的形式,本研究提出适用于 GFRP−钢复合筋−CSSC 的粘结强度计算式,并引入 A_s/A_f(钢芯截面积与总截面积之比)、α'(FRP 种类系数)和 K_0(CSSC 强度转换系数)。

本研究用到 2 种 GFRP−钢复合筋的 A_s/A_f 分别为 0.25 和 0.39。文献 [24] 将 GFRP 与 CFRP 的 α'取 1.0。将本研究的试件参数和 τ_u 试验结果代入,通过最小二乘法拟合确定常数项,最终得到粘结强度计算式:

$$\tau_u = \alpha'\left(1.29+0.0571d_b\frac{A_s}{A_f}\right)\left(\frac{l_0}{d_b}\right)^{-0.934}\frac{1}{K_0}\times f_t \tag{1}$$

为验证式(1)有效性,将本研究 τ_u 试验结果,以及搜集的已有 16 组 CFRP−钢复合筋−CSSC 拉拔试件[25−29]的 τ_u 试验结果与式(1)的 τ_u 计算结果比较,τ_u 试验结果与计算结果比较如图 11 所示。经计算,计算结果与试验结果的比值的 M、S 和 COV 分别为 0.977、0.135 和 0.101,说明式(1)适用于计算 GFRP−钢复合筋−CSSC 的粘结强度,考虑 α'后,式(1)可拓展用于其他种类 FRP−钢复合筋−CSSC 粘结强度的计算,具有较好的适用性和可靠性。

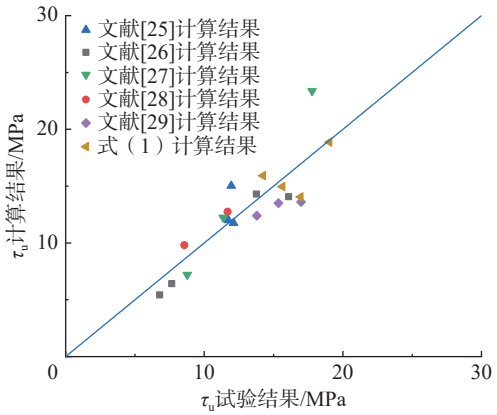


图 11 τ_u 试验与计算结果比较

3.2 粘结−滑移关系理论模型 2 种粘结−滑移关系理论模型的上升段(包括滑移段和微滑移段)模型,如表 7 所示,可用于粘结−滑移试验结果曲线的

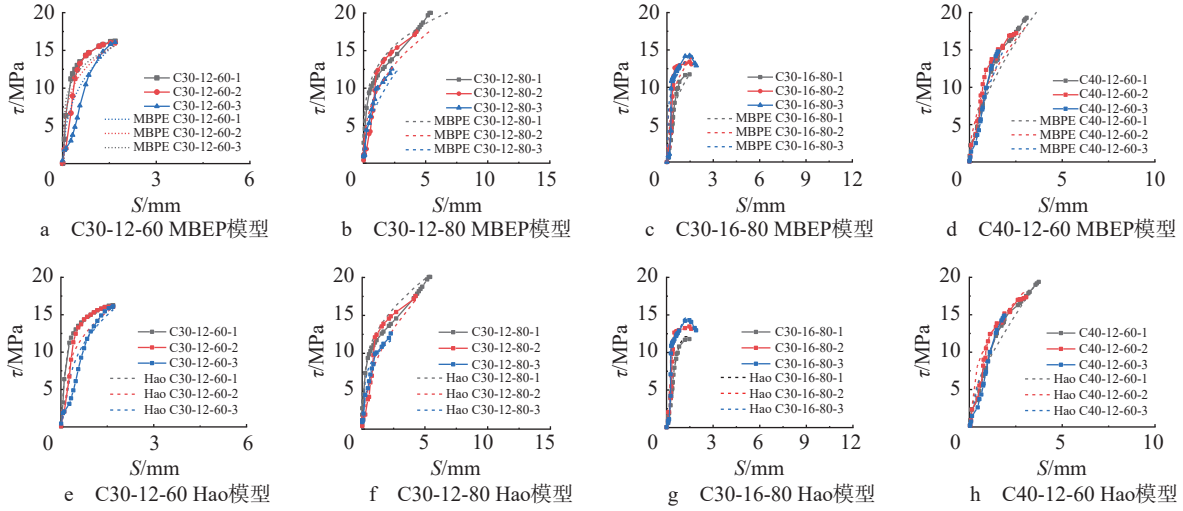
拟合分析。MBEP(modified Bertero-Eligehausen-Popov)模型基于钢筋−NC 中心拉拔试验建立，可用于 FRP 筋拉拔试验[30]。其上升段由单一常数参数 α 控制，表达形式较为简洁。Hao 模型[22] 基于 GFRP−钢绞线复合筋−NC 中心拉拔试验建立，上升段采用分段式表达。

表 7　2 种粘结−滑移关系理论模型的上升段

模型	上升段表达式	应用范围
MBEP模型	$\tau=\tau_u\left(\frac{S}{S_u}\right)^{\alpha}\ (0<S<S_u)$	钢筋−NC中心拉拔试验、FRP筋−NC中心拉拔试验
Hao模型	$\tau=\begin{cases}\frac{\tau_e}{S_e}S & (S<S_e)\\ (\tau_u-\tau_e)\left(\frac{S-S_e}{S_u-S_e}\right)^{\beta}+\tau_e & (S_e<S<S_u)\end{cases}$	GFRP-钢绞线复合筋-NC中心拉拔试验、FRP筋- NC中心拉拔试验

注：τ为拔出过程中粘结界面的平均粘结应力，MPa；S为滑移量，mm；τ_e和S_e为微滑移段与滑移段临界点的粘结应力以及对应的滑移量；α和β为待拟合常数参数。

基于本研究试验结果的粘结−滑移曲线，各试件组用 2 个模型拟合与试验结果曲线对比如图 12 所示。图 12 中各线型标识用于区分试验结果曲线与模型拟合曲线。以“C30-12-60-1”为例，表示“C30-12 mm-60 mm”试件组中的第 1 个平行试件试验结果曲线；“MBEP C30-12-60-1”表示 MBEP 模型对相应试件的试验结果的拟合曲线。MBEP 模型拟合求得的回归系数 R^2 均值 0.87，Hao 模型拟合的回归系数 R^2 均值 0.91，R^2 值越大说明拟合效果越好，说明 GFRP−钢复合筋−CSSC 的粘结−滑移曲线与 Hao 模型拟合度更高。因此，采用 Hao 模型作为拟合 GFRP−钢复合筋−CSSC 的粘结−滑移曲线理论模型，能更加准确全面地描述粘结−滑移关系，为后续 GFRP−钢复合筋−CSSC 中心拉拔试验提供更可靠的理论依据。



a C30-12-60 MBEP模型　b C30-12-80 MBEP模型　c C30-16-80 MBEP模型　d C40-12-60 MBEP模型

e C30-12-60 Hao模型　f C30-12-80 Hao模型　g C30-16-80 Hao模型　h C40-12-60 Hao模型

图 12　各试件组 2 个模型拟合与试验结果曲线图对比

3.3　基本锚固长度建议

3.3.1　基本锚固长度计算式　GFRP−钢复合筋在 CSSC 中的基本锚固长度是设计结构的重要参数，目前钢筋、FRP 筋在 NC 中的基本锚固长度已有规范要求，但针对 GFRP−钢复合筋−CSSC 的基本锚固长度未见报道。GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》[31] 中规定 FRP 筋在 NC 中的基本锚固长度 l 计算式：

$$l=\frac{f_{fd}}{f_t}d \tag{2}$$

其中，f_{fd} 为 FRP 筋的抗拉强度设计值，MPa。

结合 GFRP−钢复合筋−CSSC 的 MBEP 模型上升段表达式[32]，可通过静力平衡方程推导，得到一种形式的 GFRP−钢复合筋−CSSC 基本锚固长度 l 计算式：

$$l=\frac{f_{\mathrm{fk}}(1+\alpha)}{4\tau_{\mathrm{u}}(1-\alpha)}(\sigma_{\mathrm{m}}/f_{\mathrm{fk}})^{\frac{1-\alpha}{1+\alpha}}d_{\mathrm{b}} \tag{3}$$

其中,α为采用MBEP模型拟合得到各试验曲线的平均值,α=0.397;σ_{m}为最大荷载在GFRP−钢复合筋正截面产生的拉应力,MPa;f_{fk}为GFRP−钢复合筋的极限抗拉强度,MPa。

通过本研究试验结果可知,GFRP−钢复合筋在达到极限抗拉强度前能与CSSC保持良好的粘结性能。GFRP−钢复合筋屈服后,界面的粘结应力仍能重新分布均匀[30],直至达到τ_{u}。参考文献[22]中的结论,为保证结构具有一定的安全储备,将GFRP−钢复合筋抗拉强度设计值f_{fud}取为f_{fk}的70%[33]。将本研究中GFRP−钢复合筋各试验结果得到的τ_{u}、S_{u}和l_0代入,得到λ取值范围为0.247~0.335,考虑锚固设计安全性,λ取最大值0.335,得到第二种形式的GFRP−钢复合筋−CSSC基本锚固长度l计算式:

$$l=\lambda\frac{f_{\mathrm{fud}}}{\tau_{\mathrm{u}}}d_{\mathrm{b}} \tag{4}$$

3.3.2 基本锚固长度计算结果比较 GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》[31]规定值与2种计算式的l计算结果比较如表8所示。从表8中可以看出,文献[31]对基本锚固长度的规定值出于安全考虑,设计值预留较大。经计算可知,与式(4)相比,式(3)计算结果偏小。因此,式(4)得到的基本锚固长度值偏安全。

表8 规范值与2种形式计算式的锚固长度计算结果比较 单位:mm

试件编号	文献[31]	式(3)	式(4)
本研究	$24.7d_{\mathrm{b}}$	$18.7d_{\mathrm{b}}$	$20.2d_{\mathrm{b}}$
文献[25]	$32.3d_{\mathrm{b}}$	$31.4d_{\mathrm{b}}$	$31.2d_{\mathrm{b}}$
文献[26]	$42.7d_{\mathrm{b}}$	$34.4d_{\mathrm{b}}$	$41.3d_{\mathrm{b}}$
文献[27]	$26.8d_{\mathrm{b}}$	$15.7d_{\mathrm{b}}$	$16.2d_{\mathrm{b}}$
文献[28]	$33.2d_{\mathrm{b}}$	$21.0d_{\mathrm{b}}$	$25.9d_{\mathrm{b}}$
文献[29]	$20.9d_{\mathrm{b}}$	$19.1d_{\mathrm{b}}$	$19.7d_{\mathrm{b}}$

4 结 论

本研究通过试验分析了GFRP−钢复合筋−CSSC的粘结性能以及破坏机理,主要结论如下:

(1)破坏形式方面,中心拉拔试件主要发生劈裂破坏、拔出破坏、拔出−劈裂破坏。对界面进行分析可知,破坏集中于砂浆区域而非珊瑚粗骨料劈裂,可实现延性拔出破坏,达到GFRP−钢复合筋−CSSC的充分粘结。为保证GFRP−钢复合筋−CSSC在实际工程中发挥粘结强度提供了依据。

(2)粘结性能方面,粘结强度主要与CSSC立方体抗压强度、GFRP−钢复合筋粘结长度正相关;初始粘结刚度与CSSC立方体抗压强度正相关。这为通过材料强度与几何参数调控粘结性能提供了参考。

(3)基于试验结果提出了适用于GFRP−钢复合筋−CSSC的粘结强度计算式与基本锚固长度计算式,并验证了有效性。同时,粘结−滑移曲线采用Hao模型拟合的吻合度高于MBEP模型拟合,为相关设计分析提供了试验依据、进行理论分析时的模型选择提供参考。

综上所述,本研究揭示了GFRP−钢复合筋与CSSC的粘结性能与破坏机理及其关键影响因素,可为深远海岛礁工程中GFRP−钢复合筋−CSSC的结构设计提供数据支持与设计参考,对推动属地化珊瑚海水海砂混凝土在结构中的应用具有积极工程意义。

参考文献:

[1] Li Y L, Zhao X L, Raman R K S. Behaviour of seawater and sea sand concrete filled FRP square hollow sections[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 148: 106596.

[2] 郭向柯, 金祖权, 熊传胜, 等. 玄武岩−碳混杂FRP筋在海洋环境中的时变性能[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(9): 849−857.

Guo X K, Jin Z Q, Xiong C S, et al. Time-varying properties of basalt-carbon hybrid FRP bars in marine environment[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(9): 849−857.

[3] 郭向柯, 吴庆亮, 周新显, 等. 模拟海水海砂混凝土孔溶液碱度对玄武岩−碳混杂纤维增强复合筋耐久性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(8): 2264−2272.
Guo X K, Wu Q L, Zhou X X, et al. Effects of simulated seawater sea sand concrete pore solution alkalinity on durability of basalt-carbon hybrid fiber reinforced plastics bars[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(8): 2264−2272.

[4] 郝庆多, 王言磊, 侯吉林, 等. GFRP/钢绞线复合筋与混凝土粘结滑移本构关系模型 [J]. 工程力学, 2009, 26(5): 62−72.
Hao Q D, Wang Y L, Hou J L, et al. Bond-slip constitutive model between GFRP/steel wire composite rebars and concrete[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 62−72.

[5] 糜人杰, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚骨料海水混凝土力学性能试验研究 [J]. 海洋工程, 2016, 34(4): 47−54.
Mi R J, Yu H F, Ma H Y, et al. Study on the mechanical property of coral concrete[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(4): 47−54.

[6] Lyu B C, Wang A G, Zhang Z H, et al. Coral aggregate concrete: numerical description of physical, chemical and morphological properties of coral aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 100: 25−34.

[7] 王磊, 范蕾. 珊瑚碎屑混凝土的强度特性及破坏形态分析 [J]. 混凝土与水泥制品, 2015(1): 1−4.
Wang L, Fan L. Strength characteristic and failure pattern analysis on coral debris concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2015(1): 1−4.

[8] 胡长顺. 全珊瑚骨料海水混凝土与 FRP 筋粘结性能试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
Hu C S. Experimental study on the bonding performance of full coral aggregate seawater concrete with FRP bars[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[9] 周济, 陈宗平, 庞云升, 等. CFRP−钢复合筋与珊瑚海砂海水混凝土黏结性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45(8): 243−258.
Zhou J, Chen Z P, Pang Y S, et al. Experimental study on bond behavior between CFRP-steel composite bar and coral sea-sand seawater concrete[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(8): 243−258.

[10] Li X T, Mi T W, Newlands M, et al. Comparative analysis of GFRP and CFRP bars for marine concrete: insights into influence on the bond performance[J]. Structures, 2024, 69: 107273.

[11] 吴刚, 罗云标, 吴智深, 等. 钢−连续纤维复合筋(SFCB)力学性能试验研究与理论分析 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 53−61.
Wu G, Luo Y B, Wu Z S, et al. Experimental and theoretical studies on the mechanical properties of steel-FRP composite bars[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 53−61.

[12] 王磊, 余涵, 章明明, 等. 钢−连续纤维复合筋珊瑚混凝土梁式拉拔粘结应力分布研究 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(7): 2461−2469, 2489.
Wang L, Yu H, Zhang M M, et al. Bond stress distribution of steel-FRP composite bar coral concrete beam drawing[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(7): 2461−2469, 2489.

[13] GB/T 50010—2010 混凝土结构设计标准 [S].
GB/T 50010—2010 Code for design of concrete structures[S].

[14] ACI. Guide test methods for fiber-reinforced polymer （FRP）composites for reinforcing or strengthening concrete and masonry structures[R]. Farmington Hills: ACI, 2012.

[15] 韩世文. FRP−钢筋复合筋海水海砂混凝土梁的受弯性能及设计方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Han S W. Flexural behavior and design method of seawater sea-sand concrete beam reinforced with FRP-steel composite bars[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[16] 吴彰钰. 珊瑚混凝土材料本构关系与梁柱构件性能的若干细观力学问题 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
Wu Z Y. Mesoscopic study on stress-strain relationship and beam-column structural performance of coral aggregate concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.

[17] 李雨珊, 尹世平, 刘运超. FRP 筋与全珊瑚骨料海水混凝土界面粘结−滑移本构关系 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 3950−3964.
Li Y S, Yin S P, Liu Y C. Bond-slip constitutive relation between FRP bars and coral aggregate seawater concrete[J]. Acta

Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(8): 3950−3964.
[18] 王轶. 高性能湿接缝混凝土与钢筋粘结锚固性能的试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
Wang Y. Study on bond behavior between high-performance wet-joint concrete and steel reinforcement[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
[19] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准 [S].
GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S].
[20] 薛伟辰, 郑乔文, 杨雨. 黏砂变形 GFRP 筋黏结性能研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(12): 59−68.
Xue W C, Zheng Q W, Yang Y. A study on the bond behavior of sand-coated and deformed GFRP rebars[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(12): 59−68.
[21] Zhou W, Feng P, Lin H W, et al. Bond behavior between GFRP bars and coral aggregate concrete[J]. Composite Structures, 2023, 306: 116567.
[22] Hao Q D, Wang Y L, Ou J P. Design recommendations for bond between GFRP/steel wire composite rebars and concrete[J]. Engineering Structures, 2008, 30(11): 3239−3246.
[23] 高丹盈, 房栋, 谷泓学. GFRP−钢绞线复合筋与混凝土黏结机理及强度计算模型 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 130−139.
Gao D Y, Fang D, Gu H X. Bonding mechanism and strength calculation model of GFRP-steel composite rebars embedded in concrete[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4): 130−139.
[24] CSA S806-02 Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers[S].
[25] 申妮. 钢−连续碳纤维复合筋(SCFRP)与混凝土粘结性能的试验研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
Shen N. Bond performance of steel-CFRP bar reinforced concrete[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
[26] 章明明. 钢−碳纤维复合筋与全珊瑚混凝土粘结性能的试验研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
Zhang M M. Experimental study on the bonding properties of steel-carbon fiber composite bars with all-coral concrete[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2019.
[27] 陈俊雯. 单向、重复荷载作用下钢−碳纤维复合筋混凝土粘结性能的试验研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
Chen J W. Experimental study on bond performance of steel-carbon fiber reinforced concrete under unidirectional and repeated loads[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021.
[28] 余涵. 钢−连续纤维复合筋(SFCB)珊瑚混凝土粘结性能的试验研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2024.
Yu H. Experimental study on the bonding performance of coral concrete with steel-FRP bar (SFCB) [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2024.
[29] 孙泽阳, 吴刚, 吴智深, 等. 钢−连续纤维复合筋(SFCB)与混凝土粘结性能试验研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(1): 21−27.
Sun Z Y, Wu G, Wu Z S, et al. Experimental study on the bond behavior between steel fiber composite bar (SFCB) and concrete[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(1): 21−27.
[30] Wang L, Shen N, Zhang M M, et al. Bond performance of Steel-CFRP bar reinforced coral concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118456.
[31] GB 50608−2020 纤维增强复合材料工程应用技术标准 [S].
GB 50608—2020 Technical standard for application of fiber reinforced polymer composites in construction engineering[S].
[32] Cosenza E, Manfredi G, Realfonzo R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 1997, 1(2): 40−51.
[33] 于志力. FRP 筋与海水海砂混凝土界面粘结耐久性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Yu Z L. Study on the durability of bonding between FRP bars and seawater sea sand concrete interface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

作者贡献声明

陆晓婉提出研究问题和设计实验方案, 进行实验并且收集与处理数据, 使用软件并进行分析, 撰写初稿、修订内容、

润色语言等。张海滨提供实验设备、数据资源、学术指导和方向把握，并提出关键修改意见、逻辑调整等。孙天舒提出关键修改意见、逻辑调整等。陈天宇撰写初稿、修订内容、润色语言等。刘婉秋和周智提供实验设备、经费支持、数据资源、学术指导和方向把握。

利益冲突声明

作者声明，其不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文的英文题名、摘要和关键词采用 DeepSeek-V3.2 翻译生成，并进行了部分修改。

伦理声明

不适用：本文不涉及人类或动物的生物学研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2026012702。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据，可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到热带海洋工程材料及评价全国重点实验室自主研究课题（STOEM9940391、STOEM99407718）；海南大学协同创新中心科研项目（XTCX2022HYB10）；海南省科技人才创新项目（KJRC2023L02）资助支持。

This work was supported by the Independent Research Projects of the National Key Laboratory of Tropical Marine Engineering Materials and Evaluation (STOEM9940391, STOEM99407718); Hainan University Collaborative Innovation Center Research Project (XTCX2022HYB10); Hainan Provincial Science and Technology Talent Innovation Project (KJRC2023L02).

作者简介

陆晓婉（2001—），女，辽宁葫芦岛人，海南大学 2023 级土木工程专业硕士研究生。E-mail: 23210814000007@hainanu.edu.cn。

张海滨（1988—），男，黑龙江哈尔滨人，博士，副教授，研究方向：热带海岛工程结构健康监测、防灾减灾。E-mail: zhanghb01@hainanu.edu.cn。

孙天舒（1988—），男，辽宁大连人，海南大学副研究员，研究方向：热带海岛土木工程材料、海岛工程结构抗震减灾、高性能装配式结构多灾害响应与智能建造方面工作。E-mail: tssun@hainanu.edu.cn。

陈天宇（1999—），男，海南海口人，海南大学 2025 级土木工程专业博士研究生。E-mail: 25110814000002@hainanu.edu.cn。

刘婉秋（1981—），女，蒙古族，内蒙古通辽人，博士，教授，博士生导师，研究方向：道路基础设施健康监测，结构计算力学及优化设计等领域。E-mail: liuwanqiu@hainanu.edu.cn。

周　智（1973—），男，湖南永州人，博士，教授，研究方向：纤维增强复合材料 FRP 及其海岛工程应用；高性能传感器网络与结构健康监测。E-mail: zhizhou@hainanu.edu.cn。

（责任编辑：高　喆，英文校对：张海滨）

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.