

海水海砂碱激发混凝土与 FRP 筋的粘结性能

崔祎菲, 屈士皓, 张 鹏

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: 为了探究海水海砂碱激发混凝土与 FRP 筋的粘结性能发展规律, 推动新型绿色建筑材料的应用, 本研究通过对碳纤维增强塑料(CFRP)筋/玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋与海水海砂碱激发混凝土(SSASC)试件进行中心拉拔试验, 研究了 FRP 筋种类、直径、锚固长度及混凝土强度、养护龄期等因素对 FRP 筋-SSASC 试件的粘结性能的影响。基于现有文献和实验所得数据统计分析, 表明碱激发混凝土(ASC)与 FRP 筋的粘结性能明显优于普通硅酸盐混凝土(OPC)。同时使用多元线性方程将试验数据代入拟合出适用的粘结强度预测公式。结果表明: 粘结强度随 FRP 筋直径和锚固长度的增大呈减小趋势, 其中随直径的变化趋势不明显; ASC30 混凝土大多为拔出破坏, ASC60 混凝土大多为劈裂/筋断破坏, 且强度较高的混凝土的粘结强度也较高; 随养护龄期的增加其粘结强度有所上升; OPC 与 FRP 筋的粘结强度小于 ASC; 所得粘结强度经验公式与实验数据具有良好的相关性。

关键词: 海水海砂混凝土; 碱激发混凝土; 纤维增强塑料筋; 粘结性能; 粘结强度预测

中图分类号: TU528.36 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-2750-13

网络出版时间: 2023-09-28



Bond Performance Between Seawater Sea-Sand Alkali Activated Concrete and FRP Bars

CUI Yifei, QU Shihao, ZHANG Peng

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China)

Abstract: To investigate the bond performance between seawater sea-sand alkali activated concrete (SSASC) and carbon fiber-reinforced polymer (CFRP)/glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars, center pull-out tests were carried out at different FRP bars, FRP bars diameters, bond lengths, concrete strengths, and concrete curing ages. Based on the statistical analysis of existing experimental data, the bonding performance between alkali activated concrete (ASC) and FRP bars is significantly better than that of ordinary Portland concrete (OPC). The bond strength can be predicted by the corresponding empirical model. The results show that the bond strength decreases with the increase of FRP bars' diameter and bond length, and there is no significant change as the diameter changes. Concrete ASC30 is mostly destroyed in pull-out failure, while concrete ASC60 is mostly destroyed in splitting/reinforcement fracture failure, and the concrete with a higher strength also has a higher bond strength. The bond strength increases with the increase of curing age. The bond strength between OPC and FRP bars is less than that of ASC. In addition, the bond strength predicted by the empirical model is in reasonable agreement with the experimental data.

Keywords: seawater sea-sand concrete; alkali activated concrete; fiber-reinforced polymer bars; bond performance; bond strength prediction

随着建设海洋强国战略的逐步推行, 海洋工程建设蓬勃发展, 对建材的需求逐渐增多。普通

混凝土使用大量淡水拌和, 然而在近海和岛屿岛礁混凝土工程中使用淡水, 会因运输产生高昂的

收稿日期: 2023-07-23。 修订日期: 2023-09-13。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600704); 国家自然科学基金(52108223, U22A20244); 山东省自然科学基金(ZR2020QE249, ZR2021JQ17); 111 平台(D16006)。

第一作者: 崔祎菲(1986—), 女, 博士, 副教授。

通信作者: 张 鹏(1981—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-07-23. Revised date: 2023-09-13.

First author: CUI Yifei (1986—), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: cuiyifei@qut.edu.cn

Correspondent author: ZHANG Peng (1981—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: peng.zhang@qut.edu.cn

建设成本^[1-2]。为响应可持续发展的基本国策,近海工程越来越多的考虑利用海水代替淡水来生产混凝土,而对于淡水资源紧缺的岛礁,海水混凝土更是唯一的选择^[3-4]。除了拌合水,普通混凝土中用到的河砂面临更严峻的缺口。对河砂的过度的开采致使河床下陷、含砂量减少,不仅使混凝土的生产成本增加,也对环境构成了难以挽回的破坏^[5-6]。在工程建设尤其是海洋工程项目中,急需更易得、更充足的细骨料来替代远洋运输河砂。由此,对海砂的开发利用逐渐热门起来。相关研究表明^[7],掺入海水海砂后其力学性能仍与淡水河砂混凝土相当,这使海水海砂混凝土取代传统混凝土成为可能。根据《混凝土结构工程施工规范》(GB50666—2011)^[8],细骨料内氯离子质量分数不得超过 0.06%。根据《混凝土用水标准》(JGJ 63)^[9],拌合水内氯离子含量不得超过 1 000 mg/L。然而海水及海砂内含量极多的氯盐导致钢筋的锈蚀不可避免^[10],因此需要一种耐腐蚀性强的材料来替代钢筋。FRP 筋材的出现有效地解决了氯离子所带来的问题。常见的有碳纤维增强塑料(CFRP)筋、玄武岩纤维增强塑料(BFRP)筋和玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋。FRP 筋材除了耐腐蚀性强外,还具有轻质高强、可设计性强、安全性强等优点^[11-12]。

水泥作为传统的混凝土胶凝材料,在生产过程中的高能耗和温室气体排放对环境造成严重污染^[13-14]。LOUISE 等^[15]以普通混凝土(OPC)和碱激发混凝土(ASC)的制备过程的碳足迹为出发点,发现相比于传统混凝土,碱激发混凝土的碳排放系统较为简约,且其碳排放量仅为传统混凝土碳排放量的 9%。碱激发胶凝材料是以具有火山灰性质或潜在水硬性的非晶态硅铝酸盐材料为主要原料,与碱激发剂发生化学反应后得到的一种水硬性胶凝材料。它具有快速的强度发展、优异的化学性、耐火性能以及致密的微观结构,拥有良好的抗渗透性和抗腐蚀性^[16-18]。相关学者对碱激发混凝土的基本力学性能进行了相应的研究。张宇等^[19]和 THOMAS 等^[20]经对比发现碱激发混凝土的脆性大于普通混凝土。BILEK 等^[21]通过测试长龄期的强度发展,发现 28 d 后碱激发混凝土的强度随龄期的增加持续增长。相关研究^[22-23]表明海水海砂替代淡水河砂生产的碱激发混凝土对其力学性能影响不大。因此,采用海水海砂和碱激发胶凝材料制备的混凝土成为近海和岛礁工程的最优选择。

目前国内外对 FRP 筋与碱激发混凝土的粘结性

能已展开一定的探讨。BIRUK 等^[24]通过研究 GFRP 筋与不同混凝土的粘结性能,发现 ASC 与 OPC 的粘结强度相差不大,而 OPC 的粘结刚度大于 ASC。范小春等^[25]研究发现 BFRP 筋与碱激发混凝土的粘结强度随直径和锚固长度增加呈减小趋势。徐金金等^[26]通过探究 CFRP 筋与 4 种碱激发混凝土的粘结性能,发现混凝土种类对粘结性能影响不大,且 CFRP 筋与钢筋的粘结-滑移曲线差别很大。综上所述,现存文献对 FRP 筋与海水海砂碱激发混凝土的粘结性能研究较少,为便于后期工程应用,需对该体系的粘结性能进行探讨。

为了系统的探究该体系的粘结性能发展规律,通过进行 CFRP 筋/GFRP 筋与海水海砂碱激发混凝土(SSASC)的中心拉拔试验,对比碱激发混凝土和普通混凝土与 FRP 筋的粘结性能差异,研究不同 FRP 筋种类、直径、锚固长度及混凝土强度、养护龄期对界面粘结性能的影响。基于试验结果使用多元线性方程将试验数据代入拟合出粘结强度预测公式,同时提出符合该文的粘结-滑移本构模型,为后期 FRP 筋 SSASC 体系的实际应用奠定理论基础。

1 实验

1.1 原材料

1.1.1 胶凝材料 采用巩义龙泽净水材料有限公司 S95 矿粉,主要化学成分包括氧化钙、二氧化硅、氧化铝、氧化铁、氧化镁等。矿粉的化学成分分析如表 1 所示。

1.1.2 骨料 细骨料采用天然海砂,取自胶州湾海砂原砂,根据标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 522—2006)^[27]测得其颗粒级配数据如图 1 所示,并根据规范内公式计算得出该海砂的细度模数为 2.99,属于中砂。试验粒径选取 0~5 mm。粗骨料采用天然花岗岩,根据标准《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)^[28]测得其物理指标如表 2 所示。粒径选取 5~20 mm。

1.1.3 拌合水 采用青岛银沙滩天然海水,海水离子含量检测数据如表 3、表 4 所示。观察发现天然海水内主要离子含量为 Na^+ 与 Cl^- ,其次为 SO_4^{2-} ,其他离子含量极少。

1.1.4 碱激发剂 采用青岛优索化学科技有限公司的水玻璃溶液,其物理化学指标如表 5 所示;采用无锡晶科化工有限公司的氢氧化钠分析纯,其技术指标如表 6 所示。所有碱溶液均需提前配制并静置晾凉处理,具体配置方法见本节 1.2。

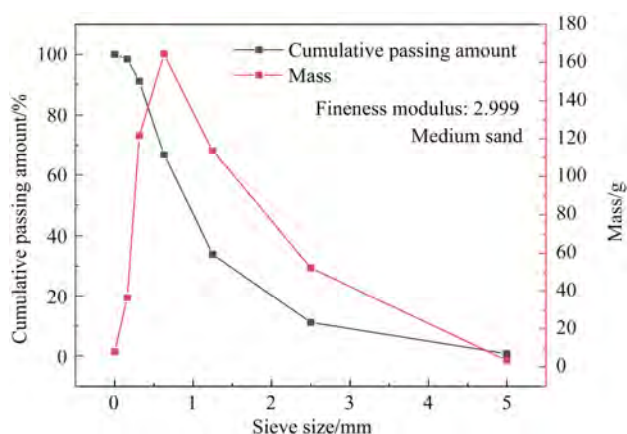


图1 天然海砂的颗粒级配

Fig. 1 Particle grading of natural sea sand

1.1.5 外加剂 缓凝剂采用上海埃彼化学试剂有限公司的四硼酸钠分析纯，在使用时将其提前溶于拌合水中，搅拌均匀后加入混凝土搅拌锅。

1.1.6 FRP 筋 采用海宁安捷复合材料有限责任公司生产的 GFRP 筋与 CFRP 筋，直径为 8、10、12 mm，筋材是通过拉挤缠绕工艺而成的新型复合

材料。所用 FRP 筋是使用环氧树脂浸没经拉挤缠绕的纤维后，将纱线缠绕该筋材以制造一节节等距凸起，其中肋间距均为 10 mm，肋高从小到大分别为 0.14、0.26、0.32 mm。其基本性能测试参考规范《结构工程用纤维增强复合材料筋》(GB/T 26743—2011)^[29]，测试结果及规格尺寸如表 7 所示。

1.2 配合比

所用 SSASC 试块的配合比如表 8 所示，ASC30 混凝土的碱激发剂为质量分数为 22% 的氢氧化钠溶液，ASC60 混凝土的碱激发剂由模数为 1.8、碱当量为 7% 的配制水玻璃溶液与浓度为 12 mol/L 的氢氧化钠溶液组成。其中配制水玻璃溶液由水玻璃溶液、氢氧化钠分析纯和自来水按照 1 000.0:83.2:1 126.2 的比例配制而成。所有碱溶液均提前配制并静置 1 d。

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[30]，测定 ASC30 与 ASC60 试块的 28 d 立方体抗压强度及劈裂抗拉强度，结果如表 9 所示。

表 1 胶凝材料的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of cementing material

w/%

Type	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Others
Slag	34.00	34.50	17.70	1.03	6.01	1.39	0.32	1.63

w—Mass fraction.

表 2 天然花岗岩的物理指标

Table 2 Physical indicators of natural granite

Water absorption rate/%	Moisture content/%	Crushing index/%	Density/(kg·m ⁻³)
1.5	0.4	10.8	2 650

表 3 天然海水的阴离子含量

Table 3 Anion content of natural seawater

Sample No.	Time/min	Peak Name	Peak Type	Area/(μS·min)	Height/μS	m/g	Dilution factor	Concentration/(mg·L ⁻¹)	Amount/(mg·kg ⁻¹)
1		HCOO ⁻				0.539	1 015.40		
2	6.23	Cl ⁻	BMB	0.872	3.034	0.539	1 015.40	16.48	16 738.16
3	18.78	SO ₄ ²⁻	BMB*	0.116	0.175	0.539	1 015.40	2.17	2 202.34

表 4 天然海水的阳离子含量

Table 4 Cation content of natural seawater

Sample No.	Time/min	Peak Name	Peak Type	Area/(μS·min)	Height/μS	m/g	Dilution factor	Concentration/(mg·L ⁻¹)	Amount/(mg·kg ⁻¹)
1	4.23	Na ⁺	BMB*	1.111	5.800	0.548	1 000.700	9.282	9 288.23
2	8.96	Mg ²⁺	BMB	0.276	0.579	0.548	1 000.700		
3	11.25	Ca ²⁺	BMB	0.080	0.140	0.548	1 000.700		

表 5 水玻璃的物理化学指标

Table 5 Physical and chemical indicators of water glass

w(Na ₂ O)/%	w(SiO ₂)/%	Baume degree	Modulus	Transparency
26.96	9.02	39.5–40.2	3.07	≥82

表 6 氢氧化钠分析纯的技术指标

Table 6 Technical indicators of sodium hydroxide analytically pure						w/%
Sodium hydroxide	Carbonate	Chloride	Sulfate	Al	Ca	
≥99.5	≤1.5	≤0.005	≤0.005	≤0.002	≤0.01	

表 7 FRP 筋的基本性能及规格尺寸

Table 7 Mechanical properties and dimensions of FRP bars				
Type	Nominal diameter/mm	Measure diameter/mm	Ultimate tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa
GFRP bars	8	7.97	659.5	43.1
	10	10.02	751.3	51.6
	12	12.11	302.9	42.3
CFRP bars	8	7.98	1 064.8	135.5
	10	10.12	905.4	128.6
	12	12.07	561.5	113.9

表 8 SSASC 试块的配合比

Table 8 Mix proportion of SSASC specimens							
Concrete type	Water/cement ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)					
		Slag	Sea sand	Granite	Seawater	Water glass	NaOH
ASC30	0.43	420	630	1 090	17		210
ASC60	0.42	420	630	1 090	17	150	60

表 9 SSASC 试块的物理力学性能

Table 9 Mechanical properties of SSASC specimens				
Concrete type	Cube compressive strength/MPa			Splitting tensile strength/MPa
ASC30	33.1	32.6		2.9
	32.5			3.0
	32.2			3.0
ASC60	62.0	64.5		3.9
	66.4			4.1
	65.2			4.1

1.3 试验设计

1.3.1 试验设计 对 135 个 150 mm×150 mm×150 mm 的插筋立方体试件进行中心拉拔试验,变量见表 10 内试件编号,每组 3 块结果取平均值。在混凝土靠近加载端一侧通过改变 PVC 管的长度来控制锚固长度,并于 FRP 筋加载端处用改性环氧树脂植筋胶套入内螺纹钢套筒,以防止在加载过程中 FRP 筋的端部发生脆性破坏。

1.3.2 试验加载装置 采用 WAW-1000-G 微机控制电液伺服钢绞线试验机对 FRP 筋混凝土试件进行拉拔强度测试,根据 ACI-440.3R-12^[31]规范的要求,加载速度设置为 1 mm/min,加载装置如图 2 所示。当加载过程中出现 FRP 筋断裂、混凝土劈裂、自由端滑移量超过 20 mm 其中任意一种情况时停止加载。

采用西瓦卡容栅千分测微计 CW-341 与西瓦卡

四路集线器 5010-311A 对自由端位移每 5 s 进行 1 次记录,拉拔力通过试验机软件记录。

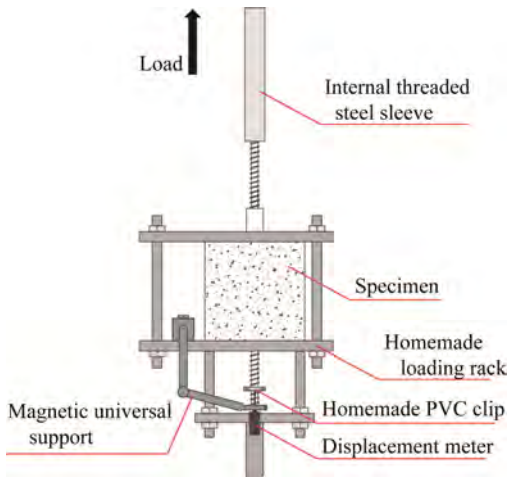


图 2 试验加载装置
Fig. 2 Loading device

2 结果与讨论

2.1 破坏形态

试件破坏形态如图 3 所示, 主要包括 3 种: 筋断破坏、拔出破坏和劈裂破坏。筋断破坏是指 FRP 筋在加载过程中发生断裂, 发生的原因可能有 2 种。一是钢套管在粘结时不居中, 导致拉拔时 FRP 筋被扭断, 二是 FRP 筋在加载过程中到达极限拉伸强度时, 混凝土尚未损失对其的锚固力, 导致 FRP 筋被拉断; 拔出破坏是指 FRP 筋在混凝土中被拔出, 混凝土界面上有残留的 FRP 筋碎屑, 如图 4 所示; 劈裂破坏是指混凝土在加载过程中

发生劈裂, 而 FRP 筋自由端几乎无位移。观察实验现象发现, ASC60 混凝土与 FRP 筋的拉拔试件主要发生筋断或劈裂破坏, ASC30 混凝土与 FRP 筋的拉拔试件主要发生拔出破坏; 小直径 FRP 筋混凝土试件更易发生拔出破坏, 大直径 FRP 筋混凝土试件更易发生筋断或劈裂破坏; 锚固长度较小的 FRP 筋混凝土试件更易发生拔出破坏, 锚固长度较大的 FRP 筋混凝土试件更易发生筋断或劈裂破坏; 相对于 CFRP 筋, GFRP 筋混凝土试件更易发生筋断破坏, 原因是 GFRP 筋的极限抗拉强度远小于 CFRP 筋, 在较高的锚固力下 GFRP 筋更容易被拉断。

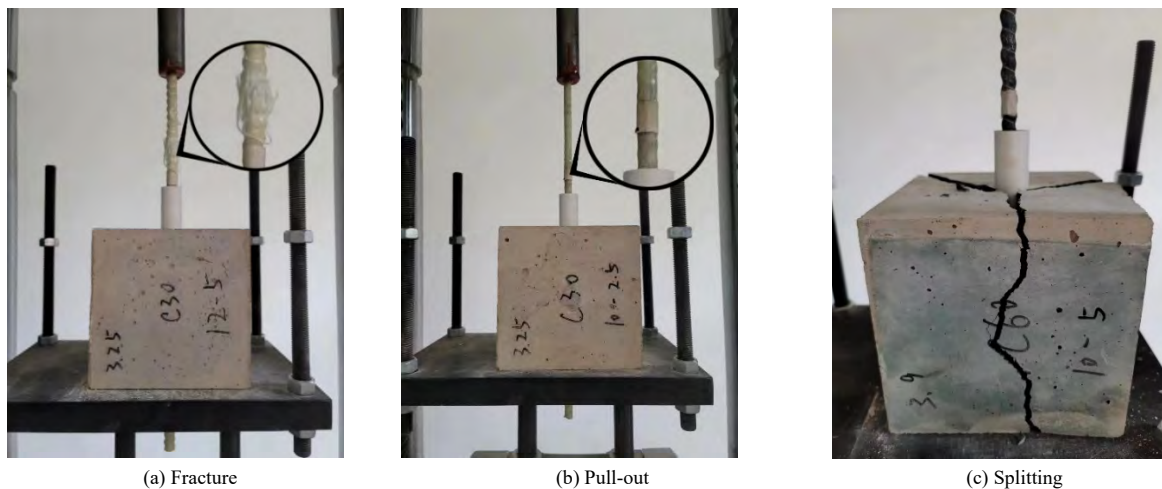


图 3 破坏形态

Fig. 3 Failure mode

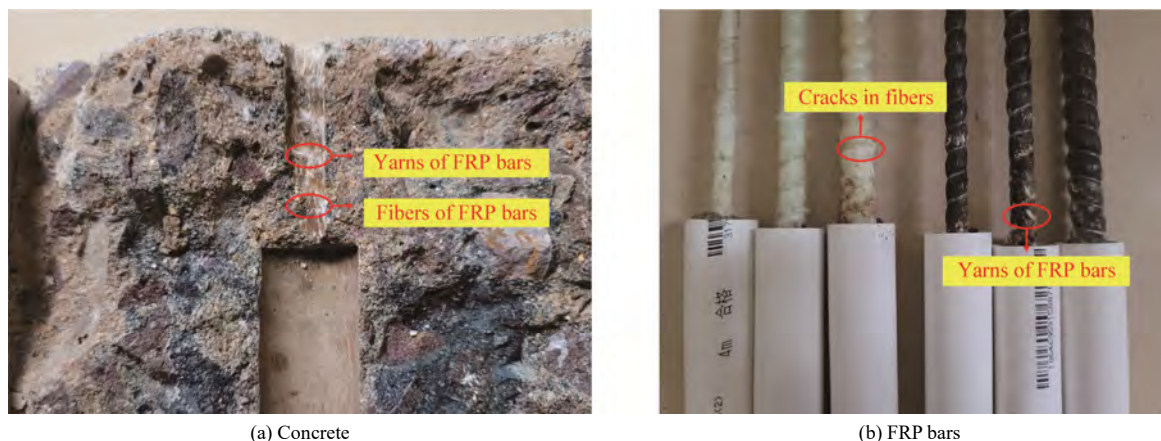


图 4 发生拔出破坏的混凝土及 FRP 筋实物图

Fig. 4 Physical images of concrete and FRP bars that have undergone pull-out failure

2.2 结果

选取加载装置导出的荷载值与位移计输出的自由端位移值, 假设粘结应力平均分布, 采用式(1)拉拔试件的极限粘结应力计算^[32], 即

$$\tau = \frac{P}{\pi D l_n} \quad (1)$$

式中: τ 为极限粘结应力, 单位为 MPa; P 为拉拔力, 单位为 N; D 为 FRP 筋直径, 单位为 mm; l_n 为 FRP 筋锚固长度, 单位为 mm。

采用式(2)~(4)进行 1 组试件的粘结应力均值计算, 即

$$\bar{\tau}_p = \frac{\tau_{p1} + (\tau_{p2} + \tau_{p3})}{3} \quad (2)$$

$$\bar{\tau}_{NP} = \frac{\tau_{NP1} + (\tau_{NP2} + \tau_{NP3})}{3} \quad (3)$$

$$\bar{\tau}_{ALL} = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{3} \quad (4)$$

式中: $\bar{\tau}_p$ 为 1 组拔出破坏粘结应力均值; $\bar{\tau}_{NP}$ 为 1 组非拔出破坏粘结应力均值; $\bar{\tau}_{ALL}$ 为 1 组粘结应力均值, 单位均为 MPa; τ_{p1} 、 τ_{p2} 、 τ_{p3} 为拔出破坏的各个试块的极限粘结应力, τ_{NP1} 、 τ_{NP2} 、 τ_{NP3} 为非拔出破坏的各个试块的极限粘结应力, τ_1 、 τ_2 、 τ_3 为

一组各个试块的极限粘结应力, 单位均为 MPa; 公式内()含义为若存在该数值则代入计算。

试验结果如表 10 所示。C-30-8-2.5(-180)代表 CFRP 筋, ASC30 混凝土, 8 mm 直径, 2.5 倍直径的锚固长度, 180 表示养护龄期为 180 d, 若未标注则表示养护龄期为 30 d。表内样品 1、2、3 分别代表由式(1)计算的每一个配筋构件的极限粘结应力值, 同时展示了 3 种粘结应力均值, 其中 $\bar{\tau}_p$ 表示纯粘结破坏的结果, 为了便于与其他大量文献作对比, 列出了 $\bar{\tau}_{NP}$ 与 $\bar{\tau}_{ALL}$ 。

表 10 中心拉拔试验结果

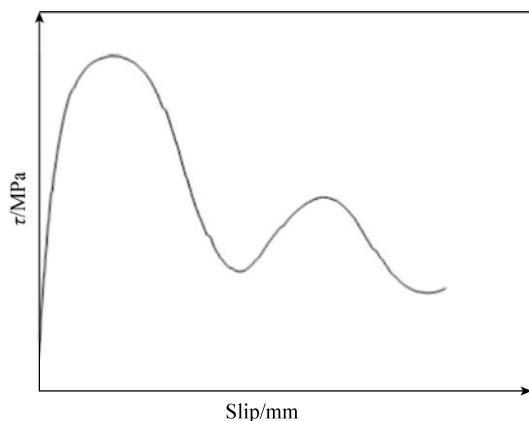
Table 10 Results of central pull-out test

Sample No.	Age	τ_{max}/MPa			$\bar{\tau}_p/\text{MPa}$	$\bar{\tau}_{NP}/\text{MPa}$	$\bar{\tau}_{ALL}/\text{MPa}$
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3			
G-60-8-2.5	30 d	35.8-P	38.9-P	33.7-P	36.1		36.1
G-60-8-5		21.2-S	20.3-P	25.3-S	20.3	23.3	22.3
G-60-8-7.5		17.7-S	NA	18.4-S		18.1	18.1
G-60-10-2.5		32.3-P	31.3-S	32.1-S	32.3	31.7	31.9
G-60-10-5		21.5-S	18.3-S	19.8-S		19.9	19.9
G-60-10-7.5		NA	16.7-S	21.3-S		19.0	19.0
G-60-12-2.5		30.8-P	30.7-P	26.2-P	29.2		29.2
G-60-12-5		23.7-S	25.7-S	27.3-S		25.6	25.6
G-60-12-7.5		18.0-S	16.6-S	15.3-S		16.6	16.6
C-60-8-2.5		41.8-P	42.1-P	41.4-P	41.8		41.8
C-60-8-5		35.6-S	23.9-S	26.8-S		25.3	25.3
C-60-8-7.5		22.9-S	22.2-S	27.5-S		24.2	24.2
C-60-10-2.5		38.0-P	35.4-P	35.9-S		35.9	36.4
C-60-10-5		28.7-S	29.8-S	NA		29.3	29.3
C-60-10-7.5		29.2-F	28.1-S	32.4-S		29.9	29.9
C-60-12-2.5		33.6-S	34.2-P	35.8-S	34.2	34.7	34.5
C-60-12-5		NA	30.0-S	29.8-S		29.9	29.9
C-60-12-7.5		19.9-S	NA	24.3-S		22.1	22.1
G-30-8-2.5		15.5-P	14.9-P	16.9-P	15.8		15.8
G-30-8-5		16.3-P	14.1-P	15.2-P	15.2		15.2
G-30-8-7.5		7.5-P	8.6-P	10.8-P	9.0		9.0
G-30-10-2.5		10.8-P	8.5-P	11.4-P	10.2		10.2
G-30-10-5		8.8-P	13.3-P	9.6-P	10.6		10.6
G-30-10-7.5		11.5-F	13.8-P	12.8-P	13.3	11.5	12.7
G-30-12-2.5		17.9-P	16.6-P	18.2-P	17.6		17.6
G-30-12-5		15.6-S	15.0-F	13.7-F		14.8	14.8
G-30-12-7.5		11.9-S	9.3-F	9.5-F		10.2	10.2
C-30-8-2.5	180 d	14.9-P	19.1-P	17.7-P	17.2		17.2
C-30-8-5		15.7-P	17.3-P	10.9-P	14.6		14.6
C-30-8-7.5		12.6-P	10.9-P	13.0-P	12.2		12.2
C-30-10-2.5		11.8-P	16.2-P	14.2-P	14.1		14.1
C-30-10-5		18.5-P	15.4-P	20.5-P	18.1		18.1
C-30-10-7.5		18.1-P	17.2-P	16.9-P	17.4		17.4
C-30-12-2.5		13.4-P	15.4-P	14.7-P	14.5		14.5
C-30-12-5		19.2-P	18.7-P	19.3-S	19.0	19.3	19.1
C-30-12-7.5		17.1-S	18.8-P	NA	18.8	17.1	18.0
G-30-8-2.5-180		17.8-P	18.1-P	18.7-P	18.2		18.2
G-30-8-5-180		15.2-P	14.8-P	16.9-P	15.6		15.6
G-30-8-7.5-180		14.6-P	15.4-P	NA	15.0		15.0
G-30-10-2.5-180		16.5-P	11.9-P	15.4-P	14.6		14.6
G-30-10-5-180		14.0-P	12.6-P	14.5-P	13.7		13.7
G-30-10-7.5-180		9.5-P	13.6-P	11.7-P	11.6		11.6
G-30-12-2.5-180		15.8-P	18.3-P	16.5-P	16.9		16.9
G-30-12-5-180		13.4-P	15.2-P	11.5-P	13.4		13.4
G-30-12-7.5-180		11.6-P	13.4-P	9.2-P	11.4		11.4

S—Splitting; P—Pull-out; F—Fracture; NA—No data.

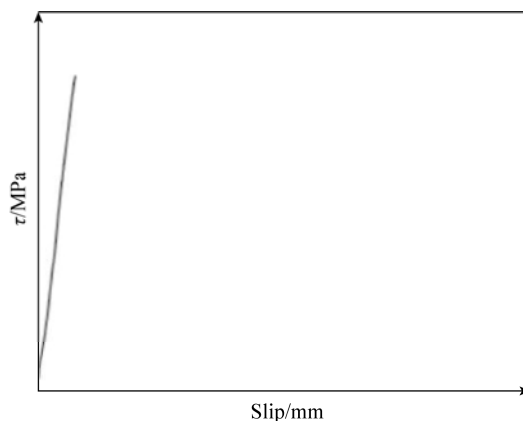
2.3 粘结-滑移曲线

如图5所示为取自于本研究的典型粘结-滑移试验曲线。观察拔出破坏曲线,分为3个部分:上升阶段、下降阶段和残余阶段。其中上升阶段可细分为微滑移阶段和滑移阶段,微滑移阶段时随着拉拔力的增加其自由端位移为零,此时主要是化学胶结力作用。微滑移阶段持续时间很短,自由端一旦产生位移便进入滑移阶段,此时化学胶结力失去作用,机械咬合力和摩擦力取而代之。在滑移阶段初期,其曲线斜率代表试件的初始粘结刚度,它表示在一定荷载下抵抗变形的能力。



(a) Pull-out

随着位移的增加,变形不可恢复,粘结强度逐渐到达峰值,极限粘结强度由这一阶段决定,伴随FRP筋的肋被剪坏,曲线开始进入下降阶段,此时为摩擦力占主导。当位移增加一个肋间距时,新的肋被拉入锚固区域,此时粘结力组成为机械咬合力和摩擦力,曲线迎来又一个上升段与下降段,但峰值比前一个小,这阶段便是残余阶段。观察筋断或劈裂破坏曲线,只有上升阶段,达到峰值时FRP筋断裂或混凝土劈裂,此时自由端位移量也较小。由于筋断或劈裂破坏为脆性破坏,在实际工程中要尽量避免。



(b) Splitting/Fracture

图5 典型粘结-滑移曲线
Fig. 5 Typical bond-slip curves

2.4 粘结性能影响因素分析

2.4.1 混凝土强度 混凝土强度是界面粘结性能的重要影响因素之一。对于钢筋混凝土结构来说,混凝土强度越高,其粘结强度越强^[33]。肖建庄等^[34]通过进行不同组分的混凝土与GFRP筋间的标准立方体中心拔出试验,也得出粘结强度随着混凝土抗压强度的增加而增加的结论。

为探究FRP筋与SSASC的粘结性能,将不同混凝土强度等级下的试验数据汇总于图6a所示。对其进行线性拟合,发现随着混凝土强度的提升,其极限粘结强度呈上升趋势。将一组典型粘结-滑移曲线放于图6b中。观察发现在其他影响因素相同时,混凝土强度的改变对其粘结强度影响较大,ASC60混凝土与FRP筋的极限粘结强度达到了ASC30混凝土的4倍,且其初始粘结刚度也远大于ASC30混凝土。研究表明^[32, 35],强度相对较高的混凝土拥有相对较高的密实度,对FRP筋有更强的化学胶结力

和摩擦力,因此破坏时需要提供更大的拉力,导致其极限粘结强度高;而随着粘结力的增加,FRP筋移动相同距离即需要更大的拔出力,因此初始粘结刚度增大。ZOU等^[36]认为提高混凝土强度,可以提高混凝土与FRP筋之间的化学胶结力和机械咬合力,增强其界面承载力和抗劈裂能力,粘结性能也随之加强。

2.4.2 养护龄期 混凝土养护龄期也对界面粘结性能有一定的影响,但对此方面的研究较少。观察图7a,发现随着养护龄期的增加,其极限粘结强度呈上升趋势。将1组典型粘结-滑移曲线放于图7b中,观察发现在其他影响因素相同时,养护180 d试样的极限粘结强度和初始粘结刚度均大于养护28 d的,这是因为随着养护龄期的增加,混凝土内部结构愈发致密,抗压强度也有所提升,对FRP筋的粘结力有所增强^[36],其原因类似于混凝土强度因素。

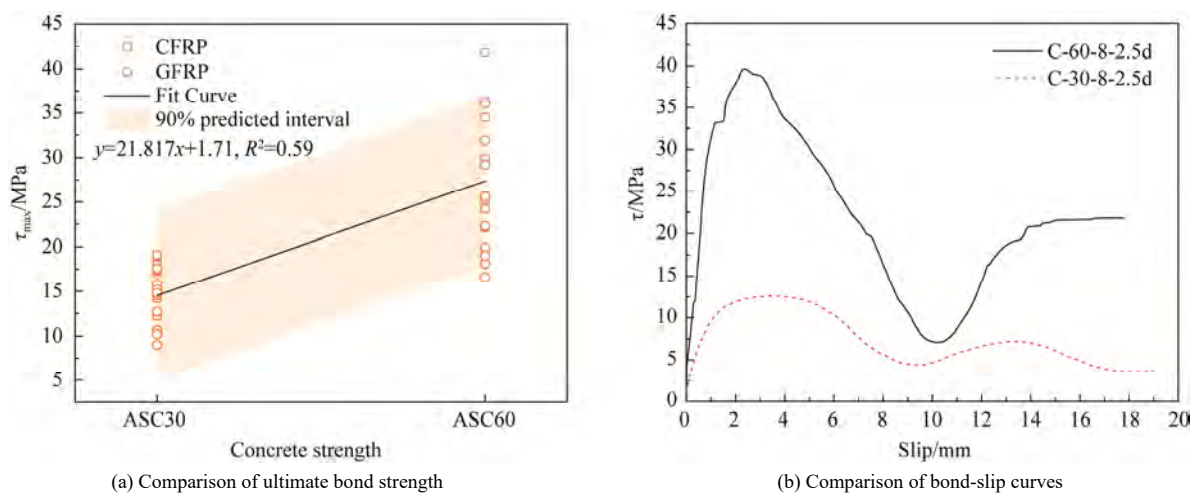


图 6 混凝土强度对粘结性能的影响

Fig. 6 Influence of concrete strength on bonding performance

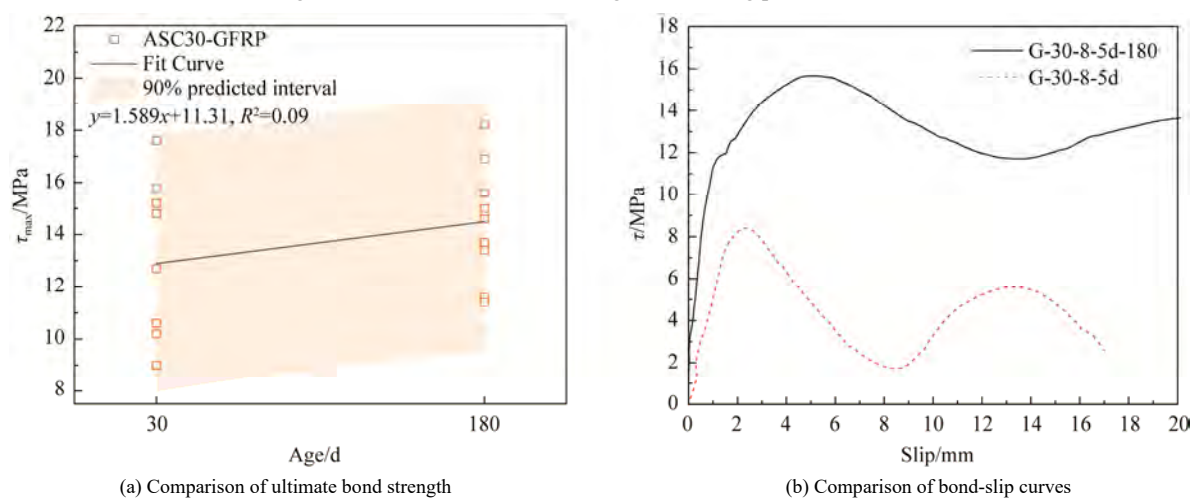


图 7 养护龄期对粘结性能的影响

Fig. 7 Influence of curing age on bonding performance

2.4.3 锚固长度 相关研究^[32, 37-38]表明, 无论是钢筋还是 FRP 筋, 与混凝土的粘结强度的大小均与锚固长度成反比。通过汇总本试验数据, 锚固长度与粘结强度的关系如图 8a 所示, 发现随着锚固长度的增加, 其极限粘结强度呈下降趋势, 符合上述规律。观察图 8b 的粘结-滑移曲线, 发现初始粘结刚度随着锚固长度的增加几乎无变化, 而极限粘结强度逐渐减小。这主要是因为粘结应力在加载端较大而在自由端较小, 在锚固长度越大时这种不均匀分布的现象越明显, 但试验采取平均粘结应力代表粘结强度, 因此锚固长度越大, 平均粘结应力越小, 即极限粘结强度越小, 这种现象已被大量试验证实^[26, 39]。

2.4.4 FRP 筋种类 图 9a 为 FRP 筋种类对粘结强度的影响。观察发现无论是哪种强度的混凝土, 其与 CFRP 筋的粘结强度大于 GFRP 筋, 这与石萃卿^[40]的研究结果一致。观察图 9b 所示的粘结-滑移

曲线, 发现 CFRP 筋的极限粘结强度和初始粘结刚度均大于 GFRP 筋。主要原因是本研究所使用的 CFRP 筋外表较粗糙, 增强了一定的界面摩擦力, 因此界面粘结力较大, 导致极限粘结强度较大^[41]。同时使 FRP 筋位移相同距离时需要更大的拉拔力, 因此初始粘结刚度也较大。大量研究^[32, 42-43]证实了 FRP 筋表面越粗糙、凹凸越明显, 其与混凝土之间的粘结力越大, 导致粘结强度有所提升。

2.4.5 FRP 筋直径 FRP 筋直径也对粘结性能有一定的影响。单波等^[44]对 CFRP 筋混凝土进行拉拔试验, 发现随着直径的增加其粘结强度呈下降趋势, 但规律性不显著; 熊哲等^[45]对 GFRP 筋混凝土的粘结强度展开探讨, 发现随着直径的增加其粘结强度有明显先减弱后增强的趋势; REFAI 等^[46]通过对带肋 BFRP 筋的研究, 发现其直径越大粘结强度越小, WEI 等^[47]则发现表面粘砂 BFRP 筋的直径对粘结强度的影响不大。

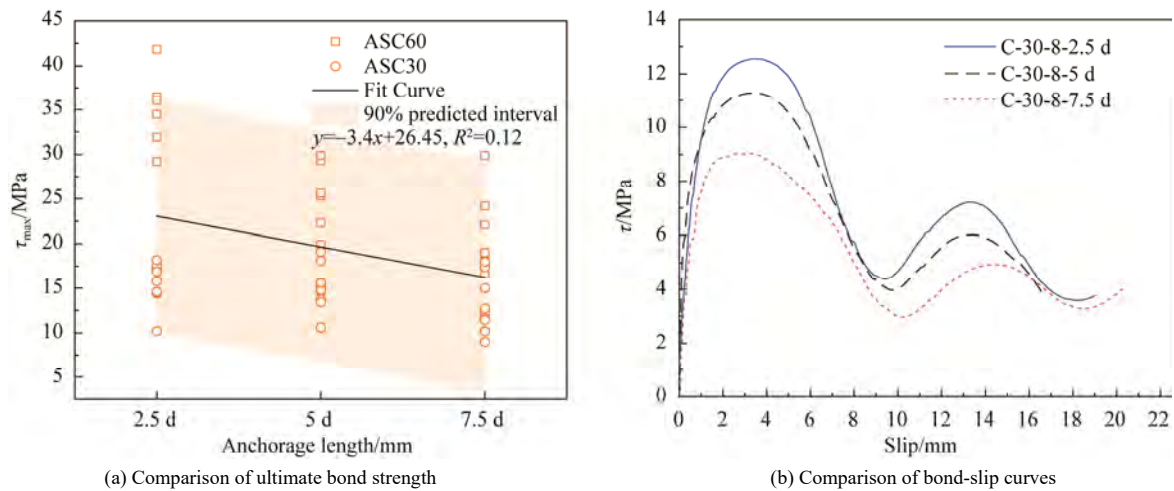


图 8 锚固长度对粘结性能的影响

Fig. 8 Influence of anchorage length on bonding performance

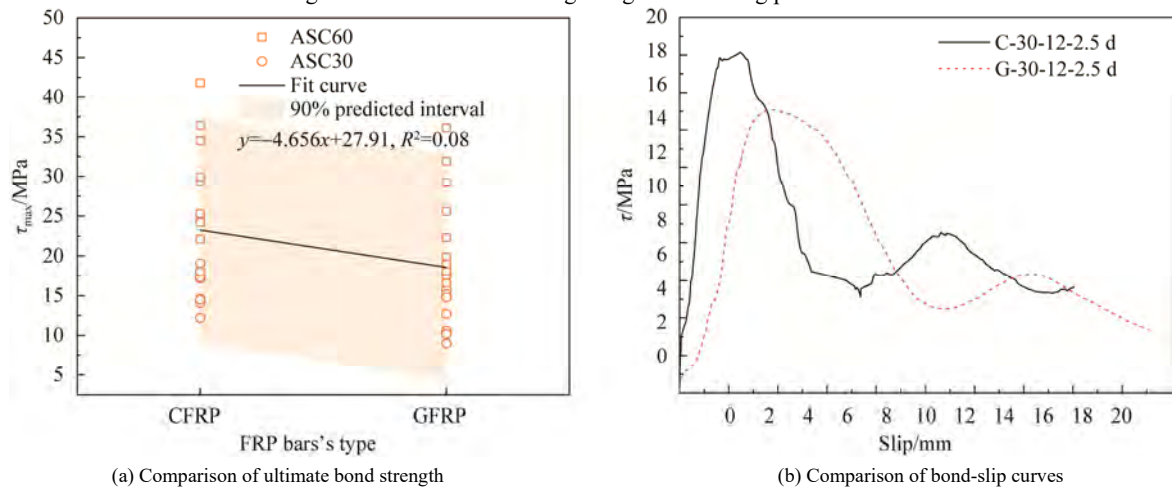


图 9 FRP 筋种类对粘结性能的影响

Fig. 9 Influence of FRP bars' type on bonding performance

通过观察图 10a, 发现其粘结强度在整体上存在一种微弱的减小趋势, 与上述讨论一致。观察图 10b 的粘结-滑移曲线, 发现随着直径的增大, 其极限粘结强度呈不显著的减小趋势, 产生这种现象的原因可能有 3 种^[48-49]: 一是 Poisson 比效应, 在 FRP 筋受拉时其横切面变细, 与混凝土之间产生空隙, 使界面粘结力有所下降, 而直径越大的 Poisson 比效应越强, 因此随直径的增大其极限粘结强度越小; 二是剪切滞后效应, 导致 FRP 筋横截面的边缘与中心部位的应力分布不均匀, 边缘大而中心小, 随直径的增大这种不均匀分布现象越强, 也会导致极限粘结强度降低; 三是混凝土在制作过程中在 FRP 筋周围会泌水产生气泡, 在直径越大时则产生的间隙会越大, 气泡所造成的孔隙会导致粘结力的下降, 因此极限粘结强度有所降低。而变化规律不显著是因为使用的筋材由于制作问题存在表面形状不一的情况, 相关研究表明 FRP 筋的外观形状可对粘结强

度发生成倍的变化^[41]; 同时本试验由于直径改变跨度较小, 也会使其变化趋势不明显。

2.4.6 混凝土种类 不同的混凝土种类对界面粘结强度也有一定的影响, 但现有文献在这方面研究较少。徐金金等^[26]通过对淡水河砂 ASC 与海水海砂 ASC 进行对比, 发现海水海砂取代淡水河砂后, 其与 CFRP 筋的粘结强度变化不大。石萃卿等^[40]对海水海砂取代淡水河砂的 ASC 与 3 种 FRP 筋的粘结强度进行对比, 也发现了海水海砂取代淡水河砂对 ASC 与 FRP 筋的粘结强度影响不大。将相同条件下的海水海砂混凝土与淡水河砂混凝土的对比置于图 11 中^[50-51], 观察发现二者差值不超过 1.5 MPa, 因此影响也极小。综上, 为了扩大 OPC 与 ASC 的粘结强度对比数据库, 建议忽略海水海砂取代淡水河砂的影响, 将相同条件下的 OPC^[44, 51-58]与本研究 ASC 进行数据对比, 汇总于图 12 所示, 其中直线为 $y=x$ 等轴线, 横坐标代表 OPC 粘结强度, 纵坐标

代表 ASC 粘结强度, 若该点位于等轴线上, 则说明这种情况下的 ASC 与 FRP 筋的粘结强度大于 OPC。通过观察图 12, 发现数据点均位于等轴线上

方, 说明相同条件下 OPC 与 FRP 筋的粘结强度小于 ASC。然而该结果仅为与文献的对比, 后期将根据需要进行相关对比组测试。

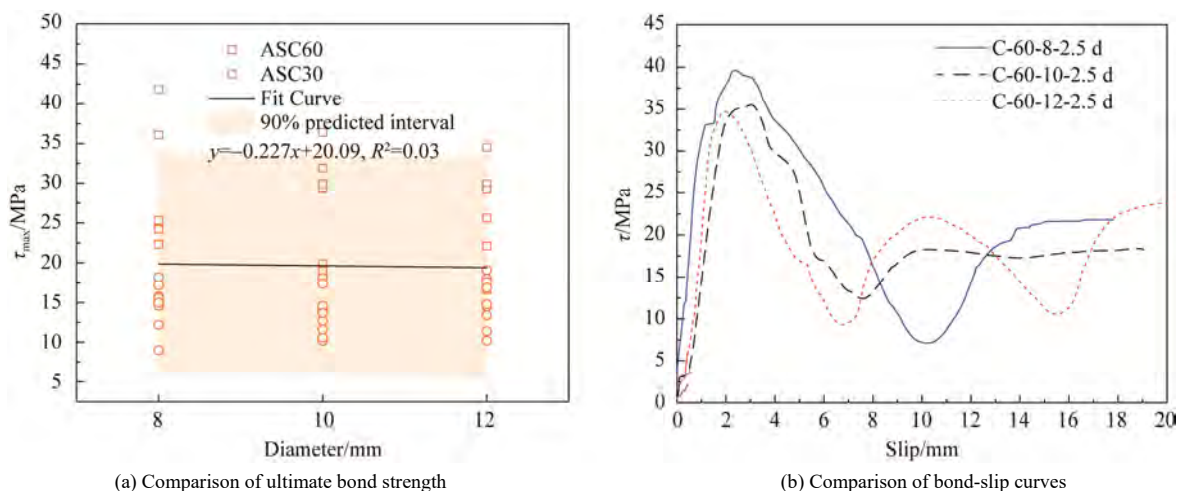


图 10 FRP 筋直径对粘结性能的影响

Fig. 10 Influence of FRP bars' diameter on bonding performance

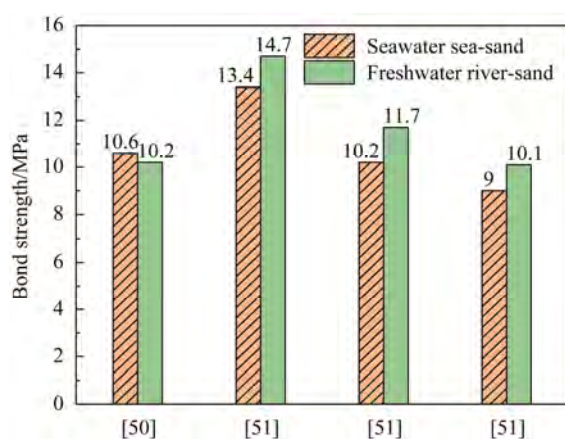


图 11 相同条件下两种 OPC 与 FRP 筋的粘结强度对比^[50-51]

Fig. 11 Comparison of bond strength between two types of OPC and FRP bars under the same conditions^[50-51]

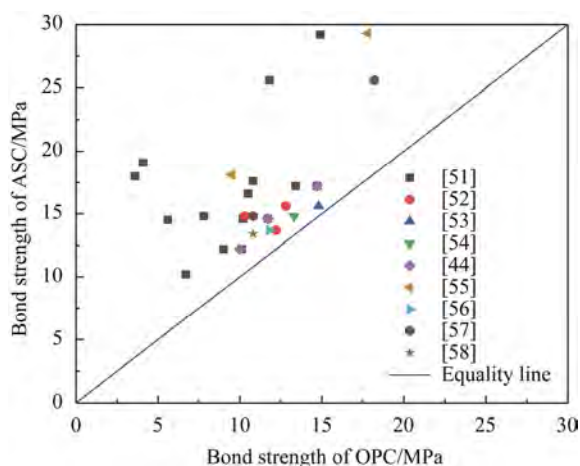


图 12 OPC/ASC 与 FRP 筋的粘结强度对比^[44, 51-58]

Fig. 12 Comparison of Bond Strength between OPC and ASC^[44, 51-58]

2.5 粘结强度预测经验公式

粘结强度是混凝土的重要指标, 其大小直接影响混凝土结构的承载能力和安全性能。因此, 界面粘结强度的预测计算一直是混凝土研究领域的热点问题。

为了便于后期 FRP 筋 SSASC 体系应用, 对一定条件下的粘结强度预测尤为重要。由于本试验考虑了混凝土强度、FRP 筋直径、锚固长度等因素, 参考美国规范 ACI-440.1R-15^[59], 即式(5)。然而本研究未考虑保护层厚度, 因此将式(5)中 C 代入 75 mm,

将左式化为 $\frac{\tau_u}{\sqrt{f'_c}}$, 得到式(6), 将已知参数 d 、 $L\sqrt{f'_c}$

代入式(6)得到预测值, 预测值与试验值的对比见图 13a, 观察发现其与等轴线的离散性较大。因此将公式化为式(7), 代入已知参数 τ_u 、 d 、 $L\sqrt{f'_c}$, 通过多元线性回归确定系数 a 、 b 、 e , 同时为了更好的表示不同 FRP 筋的粘结强度区别, 对 CFRP 筋和 GFRP 筋分别确定不同的系数 a 、 b 、 e , 输出 2 个粘结强度预测公式, 结果见式(8)、式(9)所示。通过式(8)、式(9)所得的预测值与试验值对比见图 13b, 观察发现其与等轴线的关联度较好, 因此这 2 个公式可分别用于预测 CFRP 筋/GFRP 筋与 SSASC 体系的极限粘结强度, 但仍需后期大量试验进行验证以确保公式准确性。

$$\frac{\tau_u}{0.083\sqrt{f'_c}} = 4.0 + 0.3\frac{C}{d} + 100\frac{d}{L} \quad (5)$$

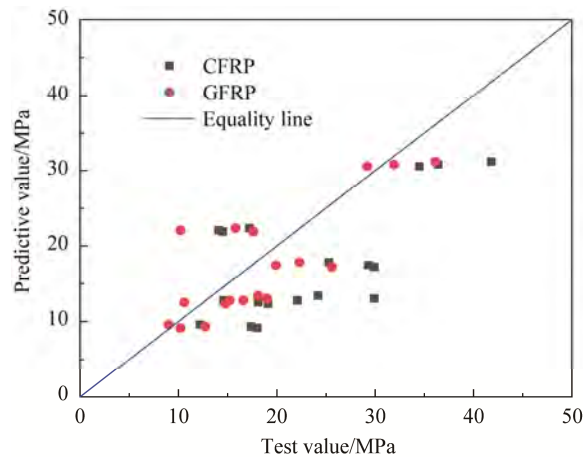
$$\frac{\tau_u}{\sqrt{f'_c}} = 0.33 + \frac{1.87}{d} + 8.3 \frac{d}{L} \quad (6)$$

$$\frac{\tau_u}{\sqrt{f'_c}} = a + \frac{b}{d} + e \frac{d}{L} \quad (7)$$

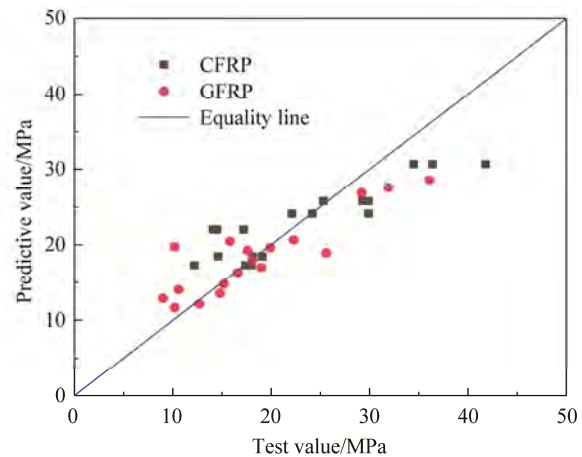
$$\text{CFRP: } \frac{\tau_u}{\sqrt{f'_c}} = 2.59 + \frac{0.02}{d} + 3.07 \frac{d}{L} \quad (8)$$

$$\text{GFRP: } \frac{\tau_u}{\sqrt{f'_c}} = 0.95 + \frac{5.06}{d} + 4.93 \frac{d}{L} \quad (9)$$

式中: τ_u 为极限粘结强度; f'_c 为混凝土立方体抗压强度; C 为混凝土保护层厚度; d 为 FRP 筋直径; L 为锚固长度; a 、 b 、 e 为待定参数。



(a) Comparison based on ACI-440.1R



(b) Comparison between corrected predicted values and experimental values

图 13 校正前后相关度对比

Fig. 13 Comparison of correlation before and after correction

3 结论

对 FRP 筋与海水海砂碱激发混凝土的粘结性能进行了系统的研究, 通过改变不同影响因素, 得到了不同情况下的粘结-滑移曲线, 分析了粘结强度影响规律, 并分别拟合了 GFRP 筋/CFRP 筋与 SSASC 的粘结强度预测公式, 主要的结论如下:

1) 随着混凝土强度和锚固长度的增加, FRP 筋与 SSASC 结构发生劈裂/筋断破坏的概率增大。

2) FRP 筋与 SSASC 的粘结-滑移曲线, 拔出破坏分为 3 段, 分别是上升阶段、下降阶段和残余阶段, 其中上升段分为微滑移阶段和滑移阶段; 劈裂和筋断破坏只有上升阶段。

3) FRP 筋与 SSASC 的粘结强度随着 FRP 筋直径、锚固长度的增加呈减小趋势, 但随直径的变化不明显; 随混凝土强度、养护龄期的增加呈增加趋势, 其中混凝土强度的影响最显著; CFRP 筋与 SSASC 的粘结性能优于 GFRP 筋。

4) 相关文献表明海水海砂对 OPC/ASC 与 FRP 筋的粘结强度影响甚微, 因此本研究忽略海水海砂的影响, 扩大数据库, 直接进行 ASC 与 OPC 的对比, 发现碱激发混凝土与 CFRP 筋和 GFPC 筋的粘结强度均高于普通硅酸盐水泥混凝土。然而该结果仅为与文献的对比, 后期将根据

需要进行相关对比组测试。

5) 以 ACI-440.1R-15 公式为基础, 根据多元线性回归方程分别提出了 CFRP 筋/GFRP 筋与 SSASC 的粘结强度预测公式, 该公式考虑了 FRP 筋种类、直径、锚固长度及混凝土强度的影响, 其预测结果与试验结果相关程度高。

参考文献:

- [1] 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.
LI Tianyu, ZHANG Yumei, LIU Xiaoyan, et al. Concrete (in Chinese), 2019(11): 1–5.
- [2] 秦斌. 海水海砂混凝土基本力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(2): 90–91.
QIN Bin. Concrete (in Chinese), 2019(2): 90–91.
- [3] 赵苏雅, 吴庆, 沈娇, 等. 海洋原材料制备的混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2021(10): 48–51.
ZHAO Suyu, WU Qing, SHEN Jiao, et al. Concrete (in Chinese), 2021(10): 48–51.
- [4] 陈兆林, 唐筱宁, 孙国峰, 等. 海水拌养混凝土耐久性试验与应用[J]. 海洋工程, 2008, 26(4): 102–106.
CHEN Zhaolin, TANG Xiaoning, SUN Guofeng, et al. Ocean Eng (in Chinese), 2008, 26(4): 102–106.
- [5] 袁婷, 黄道明, 陈锋, 等. 河道采砂对水生生态的影响与减缓对策[J]. 中国水利, 2020(2): 50–53.
YUAN Ting, HUANG Daoming, CHEN Feng, et al. China Water Resour (in Chinese), 2020(2): 50–53.
- [6] 霍惠玉, 赵云云, 赵名彦, 等. 基于河北省河道采砂规划的砂石供

- 需分析[J]. 南水北调与水利科技, 2022, 20(4): 825–832.
- HUO Huiyu, ZHAO Yunyun, ZHAO Mingyan, et al. South-to-North Water Transfers Water Sci Technol (in Chinese), 2022, 20(4): 825–832.
- [7] 陈宗平, 张亚旗, 姚如胜, 等. 海砂混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(12): 3934–3940.
- CHEN Zongping, ZHANG Yaqi, YAO Rusheng, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 38(12): 3934–3940.
- [8] 中国建筑科学研究院. GB50666—2011 混凝土结构工程施工规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [9] 中国建筑科学研究院. JGJ63-2006 混凝土用水标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [10] 关国浩, 王学志, 贺晶晶. 海水海砂混凝土研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1483–1493.
- GUAN Guohao, WANG Xuezhi, HE Jingjing. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2022, 41(5): 1483–1493.
- [11] 冯鹏, 王杰, 张泉, 等. FRP 与海砂混凝土组合应用的发展与创新[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(12): 13–18.
- FENG Peng, WANG Jie, ZHANG Xiao, et al. Fiber Reinf Plast (in Chinese), 2014(12): 13–18.
- [12] AHMED A, GUO S C, ZHANG Z H, et al. A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 256: 119484.
- [13] 曾嵘, 廖润华, 肖林峰. 水泥生产中环境可持续性研究进展[J]. 建材发展导向, 2022, 20(4): 1–8.
- ZENG Rong, LIAO Runhua, XIAO Linfeng. Dev Guide Build Mater (in Chinese), 2022, 20(4): 1–8.
- [14] WANG S D, SCRIVENER K L. Hydration products of alkali activated slag cement[J]. Cem Concr Res, 1995, 25(3): 561–571.
- [15] TURNER L K, COLLINS F G. Carbon dioxide equivalent ($\text{CO}_2\text{-e}$) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete[J]. Constr Build Mater, 2013, 43: 125–130.
- [16] 阎培渝. 碱激发胶凝材料发展瓶颈在哪里[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2067–2069.
- YAN Peiyu. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2067–2069.
- [17] 李灵煌, 洪雪颖, 吴达鹏, 等. 碱激发胶凝材料研究进展及工程应用研究[J]. 四川建材, 2022, 48(6): 12–13.
- LI Linghuang, HONG Xueying, WU Dapeng, et al. Sichuan Build Mater (in Chinese), 2022, 48(6): 12–13.
- [18] CUI Y F, QU S H, GAO K K, et al. Effect of corrosion on the bond behavior of steel-reinforced, alkali-activated slag concrete[J]. Materials, 2023, 16(6): 2262.
- [19] 张宇, 万小梅, 于琦, 等. 碱激发胶凝材料的力学性能研究综述[J]. 混凝土, 2018(3): 60–64.
- ZHANG Yu, WAN Xiaomei, YU Qi, et al. Concrete (in Chinese), 2018(3): 60–64.
- [20] THOMAS R J, PEETHAMPARAN S. Alkali-activated concrete: engineering properties and stress-strain behavior[J]. Constr Build Mater, 2015, 93: 49–56.
- [21] BILEK V, HURTA J, DONE P, et al. Development of alkali-activated concrete for structures - Mechanical properties and durability[J]. Perspect Sci, 2016(7): 190–194.
- [22] YANG S T, XU J J, ZANG C H, et al. Mechanical properties of alkali-activated slag concrete mixed by seawater and sea sand[J]. Constr Build Mater, 2019, 196: 395–410.
- [23] LI Y L, ZHAO X L, SINGH RAMAN R K, et al. Thermal and mechanical properties of alkali-activated slag paste, mortar and concrete utilising seawater and sea sand[J]. Constr Build Mater, 2018, 159: 704–724.
- [24] TEKLE B H, KHENNANE A, KAYALI O. Bond behaviour of GFRP reinforcement in alkali activated cement concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 154: 972–982.
- [25] 范小春, 徐伟, 陈远程, 等. BFRP 筋碱激发混凝土粘结性能试验研究与数值模拟[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(6): 1896–1911.
- FAN Xiaochun, XU Wei, CHEN Yuancheng, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2022, 41(6): 1896–1911.
- [26] 徐金金, 杨树桐, 刘治宁. 碱激发矿粉海水海砂混凝土与 CFRP 筋粘结性能研究[J]. 工程力学, 2019, 36(增刊 1): 175–183.
- XU Jinjin, YANG Shutong, LIU Zhining. Eng Mech (in Chinese), 2019, 36(Suppl 1): 175–183.
- [27] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局. 建筑用卵石、碎石: GB/T 14685—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [29] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 结构工程用纤维增强复合材料筋: GB/T 26743—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [31] ACI-440.3R. Guide test methods for fibre-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. Farmington Hills, MI: ACI Committee 440, 2012.
- [32] 赵军, 王帅斌, 王自柯, 等. BFRP 筋与地聚物混凝土黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 245–256.
- ZHAO Jun, WANG Shuaibin, WANG Zike, et al. J Build Struct (in Chinese), 2022, 43(6): 245–256.
- [33] 兰官奇, 王毅红, 刘乐, 等. 考虑混凝土软化效应的钢筋与混凝土粘结强度计算模型[J]. 工程力学, 2022, 39(9): 234–241.
- LAN Guanqi, WANG Yihong, LIU Le, et al. Eng Mech (in Chinese), 2022, 39(9): 234–241.
- [34] 肖建庄, 廖清香, 张青天, 等. 海水海砂再生混凝土与玻璃纤维增强塑料筋黏结性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 884–890.
- XIAO Jianzhuang, LIAO Qingxiang, ZHANG Qingtian, et al. J Tongji Univ Nat Sci (in Chinese), 2018, 46(7): 884–890.
- [35] YAN F, LIN Z B, YANG M J. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: a review[J]. Compos Part B Eng, 2016, 98: 56–69.
- [36] ZOU R, LIU F, XIONG Z, et al. Experimental study on fatigue bond behaviour between basalt fibre-reinforced polymer bars and recycled aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 270: 121399.
- [37] 张海燕, 闫佳, 吴波. 地聚物混凝土与钢筋黏结性能研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 107–115.
- ZHANG Haiyan, YAN Jia, WU Bo. China Civ Eng J (in Chinese), 2016, 49(7): 107–115.
- [38] SAYED AHMAD F, FORET G, LE ROY R. Bond between carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): experimental study[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(2): 479–485.
- [39] ARIAS J P M, VAZQUEZ A, ESCOBAR M M. Use of sand coating to improve bonding between GFRP bars and concrete[J]. J Compos Mater, 2012, 46(18): 2271–2278.
- [40] 石萃卿. 海水与荷载耦合作用下 FRP 筋与 ASSC 界面粘结耐久性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- SHI Cuiqing. Study on bond durability of FRP bars embedded in ASSC

- under coupling effect of seawater immersion and sustained loading. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [41] HUA Y T, YIN S P, WANG Z H. Analysis of influence factors on interfacial bond between BFRP bars and seawater sea-sand concrete[J]. *J Reinf Plast Compos*, 2021, 40(1/2): 16–28.
- [42] ROLLAND A, ARGOU L, BENZARTI K, et al. Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 231: 117160.
- [43] 郝庆多, 王言磊, 侯吉林, 等. GFRP 带筋粘结性能试验研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(10): 158–165.
- HAO Qingduo, WANG Yanlei, HOU Jilin, et al. *Eng Mech* (in Chinese), 2008, 25(10): 158–165.
- [44] 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.
- SHAN Bo, TONG Guangquan, LIU Qiyuan. *J Archit Civ Eng* (in Chinese), 2020, 37(5): 113–123.
- [45] 熊哲, 麦广浩, 陈晓攀, 等. GFRP 筋与海水海砂混凝土的黏结疲劳性能[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(2): 259–268.
- XIONG Zhe, MAI Guanghao, CHEN Xiaopan, et al. *China J Highw Transp* (in Chinese), 2022, 35(2): 259–268.
- [46] EL REFAI A, AMMAR M A, MASMOUDI R. Bond performance of basalt fiber-reinforced polymer bars to concrete[J]. *J Compos Constr*, 2015, 19(3): 259–268.
- [47] WEI W, LIU F, XIONG Z, et al. Bond performance between fibre-reinforced polymer bars and concrete under pull-out tests[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 227: 116803.
- [48] ACHILLIDES Z, PILAKOUTAS K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions[J]. *J Compos Constr*, 2004, 8(2): 173–181.
- [49] ALVES J, EL-RAGABY A, EL-SALAKAWY E. Durability of GFRP bars' bond to concrete under different loading and environmental conditions[J]. *J Compos Constr*, 2011, 15(3): 249–262.
- [50] 陈应贺. 海水浸泡环境下 GFRP 筋-混凝土界面粘结耐久性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- CHEN Yinghe. Study on bond durability of GFRP bars concrete interface in seawater immersion environment. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [51] 佟广权. FRP 筋与海水海砂混凝土粘结性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- TONG Guangquan. Experimental research on the bond performance of FRP bars in seawater and sea sand concrete. Changsha: Hunan University, 2020.
- [52] HAO Q D, WANG Y L, HE Z, et al. Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2009, 23(2): 865–871.
- [53] BAENA M, TORRES L, TURON A, et al. Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test[J]. *Compos Part B Eng*, 2009, 40(8): 784–797.
- [54] SOLYOM S, BALÁZS G L. Bond of FRP bars with different surface characteristics[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 264: 119839.
- [55] 高婧, 范凌云. CFRP 筋与海水海砂混凝土粘结性能试验与机制分析[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(3): 1194–1204.
- GAO Jing, FAN Lingyun. *Acta Mater Compos Sin* (in Chinese), 2022, 39(3): 1194–1204.
- [56] 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 Zhili. Study on the durability of bonding between FRP bars and seawater sea sand concrete interface. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [57] 林培轩. 海水海砂纤维水泥基复合材料(混凝土)与 GFRP 筋表面粘结性能的研究[D]. 温州: 温州大学, 2019.
- LIN Peixuan. Bonding properties of GFRP bars and seawater sand PVA cement-based composites (concrete). Wenzhou: Wenzhou University, 2019.
- [58] PAN Y F, YU Y X, YU J C, et al. Effects of simulated seawater on static and fatigue performance of GFRP bar-concrete bond[J]. *J Build Eng*, 2023, 68: 105985.
- [59] ACI-440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, vol. 440, ACI Committee, Farmington Hills MI, 2015.