

GFRP 筋与海水海砂高掺量粉煤灰自密实混凝土的 粘结性能研究

周玲珠¹, 万钧涛¹, 郑 愚¹, 罗远彬², 王晓璐¹, 吴方宏³

(1. 东莞理工学院 生态环境与建筑工程学院, 广东 东莞 523000; 2. 中国建筑第六工程局有限公司, 天津 300450;
3. 广东德誉建筑设计有限公司, 广东 广州 511453)

摘要:为解决淡水河砂资源短缺、水泥高能耗等问题,采用海水海砂代替淡水河砂、粉煤灰代替 50% 的水泥制备海水海砂高掺量粉煤灰自密实混凝土(HVFA-SCC)。同时,为解决海水海砂的使用引起钢筋锈蚀问题,采用纤维增强复合(FRP)筋代替钢筋。为研究玻璃纤维增强复合(GFRP)筋与海水海砂 HVFA-SCC 的粘结性能,本文制作了 9 组拉拔试件,重点讨论混凝土材料、筋材直径和筋材类型对粘结失效机理、粘结强度及粘结-滑移曲线的影响规律。并且,分析不同粘结滑移本构模型预测 GFRP 筋与海水海砂 HVFA-SCC 粘结-滑移曲线的准确性。最后,基于 FRP 筋增强混凝土的粘结-滑移曲线数据,校核双 α 粘结滑移本构模型参数。研究表明:排除混凝土强度影响后,混凝土类型对粘结强度的影响较小;筋材直径的增加导致粘结强度降低,粘结失效机理由筋材树脂层剪切破坏转为树脂层磨损破坏;筋材类型(GFRP 筋、BFRP 筋及带肋钢筋)对粘结强度基本无影响;基于粘结-滑移曲线数据,获得了不同参数拉拔试件的双 α 粘结滑移模型表达式。

关键词: GFRP 筋; 海水海砂; HVFA-SCC; 粘结性能

中图分类号: TU377.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0211-09

Study on bond behavior of GFRP bars and self-compacting concrete mixed with seawater sea-sand and high-volume fly ash

ZHOU Lingzhu¹, WAN Juntao¹, ZHENG Yu¹, LUO Yuanbin², WANG Xiaolu¹, WU Fanghong³

(1. School of Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Guangdong Dongguan 523000, China; 2. China Construction Sixth Engineering Bureau Co., Ltd., Tianjin 300450, China;
3. Guangdong Deyu Architectural Design Co., Ltd, Guangdong Guangzhou 511453, China)

Abstract: In order to solve the problems of shortage of freshwater river sand resources and high energy consumption of cement, seawater sea sand is used to replace freshwater river sand and fly ash is used to replace 50% of cement to produce seawater sea-sand high-volume fly ash self-compacting concrete (HVFA-SCC). Also, to solve the corrosion problem of steel bar induced by the use of sea water and sea-sand, fiber reinforced polymer (FRP) bar is used instead of steel bar. In this paper, nine groups of pull-out specimens were fabricated to study the bond behavior between glass fiber reinforced polymer (GFRP) bar and seawater sea-sand HVFA-SCC. The effects of the type of concrete materials, the diameter and type of reinforcing bar on bond failure mechanism, bond strength and bond-slip curves were discussed. Furthermore, the accuracy of different bond-slip constitutive models for predicting bond-slip curves between GFRP bars and seawater sea-sand HVFA-SCC was analyzed. Finally, the parameters of double α bond-slip model were verified by using the data of bond-slip curves of FRP reinforced concrete. The results showed that the type of concrete materials had little influence on the bond strength after excluding the effect of concrete strength. The bond strength decreased with the increase of reinforcement diameter, and the bond failure

收稿日期: 2021-04-01 **修改稿日期:** 2021-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170800, 52178192)、广东省基础与应用基础粤莞联合青年基金资助项目(2019A1515110050)、粤港澳大湾区国际科技创新中心建设基金资助项目(2021A0505110016)、广东省普通高校基础研究与应用基础研究重点基金项目(2018KZDXM068)

第一作者: 周玲珠(1992—), 女, 博士, 讲师, 主要从事 FRP 纤维复材及高性能低能耗混凝土材料研究。E-mail: lingzhu_zhou@163.com

mechanism changed from shear failure to abrasion failure of the resin layer. The type of the reinforcing bar (GFRP bar, BFRP bar and steel bar) had barely effect on the bond strength. Based on the data of bond-slip curves, the expressions of double α bond-slip model for specimens with different parameters were obtained.

Key words: GFRP bar; seawater and sea-sand; HVFA-SCC; bond behavior

随着我国经济的迅速发展,混凝土需求量越来越大,从而导致淡水河砂资源匮乏。为解决淡水河砂资源短缺问题,不少学者提出采用海水海砂代替淡水河砂用于近海工程建造。已有研究表明:海水海砂混凝土的长期抗压强度与普通混凝土基本相近^[1]。同时,混凝土的制备需要消耗大量的水泥,而水泥是一种高能耗产品,在其生产过程中产生的二氧化碳约占全球碳排放量的5%^[2]。为解决水泥高能耗问题,一种高掺量粉煤灰-自密实混凝土(HVFA-SCC)被提出,其采用粉煤灰取代50%以上的水泥制备而成^[3]。作者前期研究表明:HVFA-SCC材料具有良好的力学性能,其用于工程建造具有可行性^[4]。为同时解决淡水河砂资源短缺及水泥高能耗问题,本文采用海水海砂代替淡水河砂,粉煤灰代替50%的水泥,制备海水海砂高掺量粉煤灰-自密实混凝土(SWSS-HVFA-SCC)。

海水海砂的使用容易引起钢筋锈蚀,从而导致钢筋混凝土结构力学性能退化、耐久性能下降、服役寿命缩短。而纤维增强复合(FRP)筋具有较高的抗拉强度和良好的耐腐蚀性。现有研究表明:FRP筋增强混凝土结构能够在一定程度上代替钢筋混凝土结构,在实际工程中开展应用^[5]。因此,合理采用FRP筋代替钢筋用于工程建造能够有效解决海水海砂使用引起的钢筋锈蚀问题。

筋材与混凝土的界面粘结性能是影响增强混凝土结构工作性能的重要因素。同时,筋材与混凝土的粘结强度是确定锚固长度的关键参数。肖建庄等^[6]开展玻璃纤维增强复合(GFRP)筋与海水海砂再生混凝土的粘结性能试验研究,发现GFRP筋与海水海砂(再生)混凝土的粘结强度与普通混凝土相近,且海水海砂的使用对粘结滑移曲线基本没有影响。Parvizi等^[7]表明海水的使用对FRP筋与混凝土的短期粘结性能没有显著影响。郑等^[8]研究发现:在GFRP筋肋较低的情况下,采用HVFA-SCC代替普通混凝土(NC)能够显著提高GFRP筋增强混凝土试件的粘结强度。

GFRP筋是使用最为广泛的一种FRP筋,目

前关于GFRP筋与海水海砂HVFA-SCC的粘结性能的研究尚未开展。因此,本文开展GFRP筋与海水海砂HVFA-SCC的粘结性能研究,重点讨论混凝土材料,筋材直径及筋材类型对粘结滑移属性及粘结失效机理的影响规律。研究成果将为GFRP筋与海水海砂HVFA-SCC在实际工程中的应用奠定基础。

1 试验概况

1.1 原材料

1.1.1 筋材

本次试验中所使用的筋材包括GFRP筋(直径为13 mm, 16 mm, 19 mm), BFRP筋(直径为12 mm)及带肋钢筋(直径为12 mm),见图1。所使用GFRP筋的基体类型为不饱和聚酯树脂。

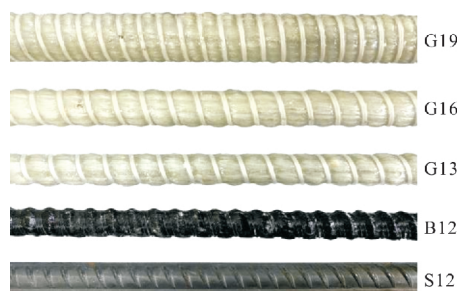
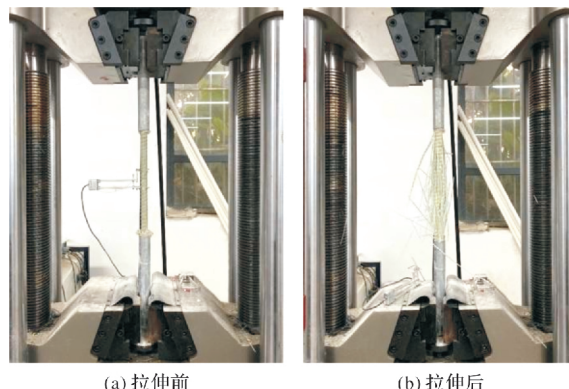


图1 筋材

Fig. 1 The reinforcing bars

对所有筋材进行拉伸测试(见图2),获取筋材的力学属性。所有筋材的物理属性(肋高、肋间距等)及力学属性(弹性模量、抗拉强度等)见表1。



(a) 拉伸前

(b) 拉伸后

图2 筋材拉伸试验

Fig. 2 Tensile test of reinforcing bar

表 1 筋材属性

Tab. 1 Properties of reinforcing bars

编号	筋材类型	直径/mm	肋高/mm	肋间距/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa
G13	GFRP 筋	13	0.71	11.97	1 028	-	47
G16	GFRP 筋	16	0.56	12.02	950	-	46
G19	GFRP 筋	19	0.45	8.94	914	-	46
B12	BFRP 筋	12	0.87	9.20	1 160	-	51
S12	钢筋	12	0.89	7.73	642	571	197

1.1.2 混凝土材料

本次试验中配制三组混凝土(海水海砂 HVFA-SCC、海水海砂普通混凝土和淡水河砂普通混凝土)。三种混凝土的配合比见表 2。本次所使用

的海水通过人工配制而成,其配合比参考文献[4],主要成分是 NaCl。对三种混凝土进行工作性能和力学性能测试,结果见表 3。

表 2 混凝土配比 (1 m³)

Tab. 2 Mix proportion of concrete (1 m³)

混凝土类型	水砂类型	水泥/kg	粉煤灰/kg	石灰石粉/kg	砂子/kg	石子/kg	水/kg	减水剂/g
HVFA-SCC	海水海砂	232.46	309.95	77.49	946.17	685.15	148.78	1 239.80
普通混凝土	海水海砂	542.41	0.00	77.49	946.17	685.15	148.78	2 169.66
普通混凝土	淡水河砂	542.41	0.00	77.49	946.17	685.15	148.78	2 169.66

表 3 混凝土材料属性

Tab. 3 Properties of concrete materials

混凝土类型	坍落扩展度/mm	扩展时间/ T_{500}/s	7 d 抗压强度/ MPa	28 d 抗压强度/ MPa	56 d 抗压强度/ MPa	56 d 弹性模量/ GPa
海水海砂 HVFA-SCC	772	2	44.8	59.2	59.5	33.5
海水海砂普通混凝土	698	5	32.6	37.5	38.5	27.1
淡水河砂普通混凝土	575	5	40.6	47.4	50.3	31.2

注: 由于配制海水海砂普通混凝土时所用的水泥受潮, 导致其强度偏低。

1.2 试件的设计及制作

本次试验共制作 9 组拉拔试件, 每组 3 个, 共 27 个。9 组拉拔试件分别改变筋材直径、筋材类型及混凝土类型(见表 4)。所有拉拔试件尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm, 锚固长度选用 5 倍直径(见图 3)。在试件制作时, 对于 FRP 筋-混凝

土拉拔试件, 其加载端的 FRP 筋应嵌入钢套筒内, 钢套筒与 FRP 筋之间灌注膨胀水泥, 以避免拉拔试件在加载过程中 FRP 筋端部发生剪切破坏。拉拔试件浇筑见图 4, 所有试件在浇筑后 24 h 脱模, 并放置于室外每天浇水养护直至 56 d。

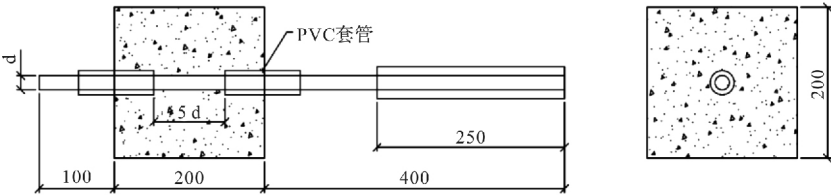


图 3 拉拔试件的尺寸

Fig. 3 Size of pull-out specimen



图 4 拉拔试件浇筑

Fig. 4 Casting of pull-out specimen

表4 拉拔试件设计

Tab. 4 Detail of pull-out specimens

试件编号	筋材直径 /mm	筋材类型	混凝土类型
G13SWSS-0%	13	GFRP 筋	SWSS-NC
G13FWRS-0%	13	GFRP 筋	FWRS-NC
G13SWSS-50%	13	GFRP 筋	SWSS-HVFA-SCC
G16FWRS-0%	16	GFRP 筋	FWRS-NC
G16SWSS-50%	16	GFRP 筋	SWSS-HVFA-SCC
G19FWRS-0%	19	GFRP 筋	FWRS-NC
G19SWSS-50%	19	GFRP 筋	SWSS-HVFA-SCC
B12SWSS-50%	12	BFRP 筋	SWSS-HVFA-SCC
S12SWSS-50%	12	钢筋	SWSS-HVFA-SCC

1.3 加载设备及方案

本次试验采用微机控制电液伺服万能试验机 HUT106D 进行加载。将拉拔试件置于反力架上,在拉拔试件的加载端和自由端分别安装两个位移计,并将位移计连接到 TDS-530 静态采集仪上以采集滑移量数据(见图 5)。荷载数据由万能试验机的采集箱采集。拉拔试验加载方式为位移加载,

加载速度为 0.2 mm/s, 以位移达到 30 mm 作为加载结束条件。



图5 拉拔测试

Fig. 5 Pull-out test

2 结果与分析

拉拔试件的平均粘结强度计算公式如下。

$$\tau = \frac{P}{\pi d_b l_e} \quad (1)$$

式中: τ 代表平均粘结应力; P 代表拉拔荷载, d_b 和 l_e 分别代表筋材直径和粘结长度。所有拉拔试件的试验结果汇总如表 5 所示。

表5 试验结果汇总

Tab. 5 Summary of test results

试件编号	P_m /kN	τ_m /MPa	$\bar{\tau}_m$ /MPa	$S_{m,le}$ /mm	$\bar{S}_{m,le}$ /mm	$S_{m,fe}$ /mm	$\bar{S}_{m,fe}$ /mm	破坏模式
G13SWSS-0%-1	51.27	19.31	19.35	3.07	3.63	1.38	2.22	P
G13SWSS-0%-2	46.44	17.49		2.27		1.47		P
G13SWSS-0%-3	56.36	21.23		5.55		3.82		P
G13FWRS-0%-1	58.81	22.15	22.79	3.06	3.91	1.51	2.01	P
G13FWRS-0%-2	59.71	22.49		4.28		2.28		P
G13FWRS-0%-3	62.98	23.72		4.38		2.24		P
G13SWSS-50%-1	75.72	28.53	26.30	5.20	4.86	2.45	2.08	P
G13SWSS-50%-2	68.53	25.82		4.89		2.42		P
G13SWSS-50%-3	65.18	24.55		4.50		1.35		P
G16FWRS-0%-1	68.60	17.06	14.40	5.76	5.02	3.53	3.07	S
G16FWRS-0%-2	59.66	14.84		5.02		3.17		P
G16FWRS-0%-3	56.15	13.96		4.28		2.51		P
G16SWSS-50%-1	73.26	18.22	17.68	4.10	4.30	1.67	2.17	P
G16SWSS-50%-2	68.97	17.15		4.34		2.27		P
G16SWSS-50%-3	91.78	22.82		4.47		2.58		S
G19FWRS-0%-1	25.84	4.56	4.79	3.18	2.81	2.78	2.39	P
G19FWRS-0%-2	27.99	4.94		2.59		2.15		P
G19FWRS-0%-3	27.66	4.88		2.65		2.23		P
G19SWSS-50%-1	48.92	8.63	7.45	3.67	3.24	3.26	2.80	P
G19SWSS-50%-2	44.85	7.91		2.83		2.42		P
G19SWSS-50%-3	32.95	5.81		3.20		2.71		P
B12SWSS-50%-1	54.84	24.24	26.42	2.66	2.88	0.74	0.79	P
B12SWSS-50%-2	63.65	28.14		3.18		0.85		P
B12SWSS-50%-3	60.79	26.87		2.81		0.78		P
S12SWSS-50%-1	62.03	27.42	27.26	6.28	6.77	0.64	0.52	P
S12SWSS-50%-2	60.36	26.69		5.22		0.34		P
S12SWSS-50%-3	62.57	27.66		8.80		0.58		P

注: P_m 为峰值荷载; τ_m 和 $\bar{\tau}_m$ 分别为粘结强度及其平均值; $S_{m,le}$ 和 $\bar{S}_{m,le}$ 分别为加载端滑移量及其平均值; $S_{m,fe}$ 和 $\bar{S}_{m,fe}$ 分别为自由端滑移量及其平均值; P 和 S 分别代表拔出破坏和劈裂破坏。

本次试验中绝大部分试件都发生拔出破坏,个别试件出现劈裂破坏,其可能由于在浇筑过程中使筋材的位置发生偏离(筋材没有完全垂直于混凝土)造成。

2.1 破坏形态

不同混凝土材料的拉拔试件界面破坏形态见图 5。由图可知:三种不同混凝土材料的拉拔试件界面破坏形态较为相似,它们的界面损伤均为 FRP 筋的表面肋损伤。G13SWSS-50% 试件的筋材表面肋被混凝土剪断,而 G13FWRS-0% 和 G13SWSS-0% 试件的筋材表面肋由于摩擦而被削弱。相比于 G13FWRS-0% 和 G13SWSS-0% 试件, G13SWSS-50% 试件的筋材表面损伤更为严重,其主要由 SWSS-HVFA-SCC 抗压强度高,及 HVFA-SCC 与 GFRP 筋的强粘结作用造成^[8]。

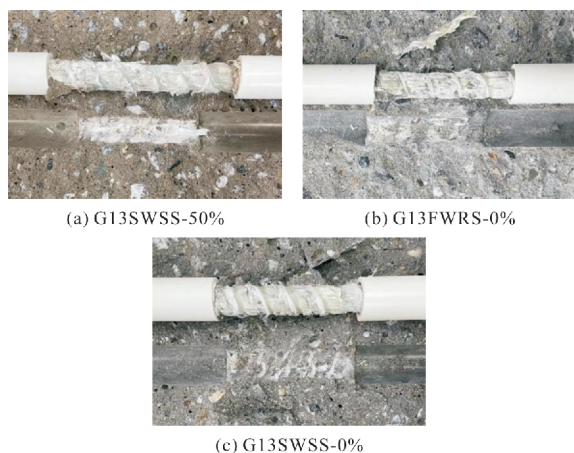


图 5 不同混凝土材料的拉拔试件界面破坏形态

Fig. 5 Interface failure modes of pull-out specimens with different concrete material

不同筋材直径的拉拔试件界面破坏形态见图 6。由图可知:由于直径为 13 mm 的 GFRP 筋肋较深, G13FWRS-0% 试件在拉拔过程中主要以 GFRP 筋的树脂层被剪断而发生破坏。而直径为其中 19 mm 的 GFRP 筋肋较浅, G19FWRS-0% 试件在拉拔过程中主要以 GFRP 筋的树脂层磨损而发生破坏。

不同筋材类型的拉拔试件界面破坏形态见图 7。由图可知: G13SWSS-50% 试件的 GFRP 表面树脂层被剪断,而 B13SWSS-50% 试件的 BFRP 表面树脂层发生磨损,这可能与筋材的树脂类型及筋材表面形式相关。 S12SWSS-50% 试件的粘结段内钢筋肋间填充了混凝土,界面混凝土发生严重损伤。由于钢筋的肋较高,且其弹性模量大,导致 S12SWSS-50% 试件的破坏形态表现为界面混凝土

土被钢筋的肋剪碎。 S12SWSS-50% 试件的粘结应力主要取决于机械咬合力。

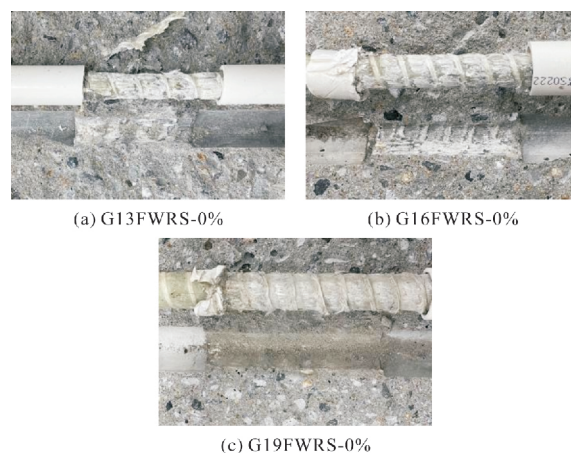


图 6 不同筋材直径的拉拔试件界面破坏形态

Fig. 6 Interface failure modes of pull-out specimens with different diameter of bar

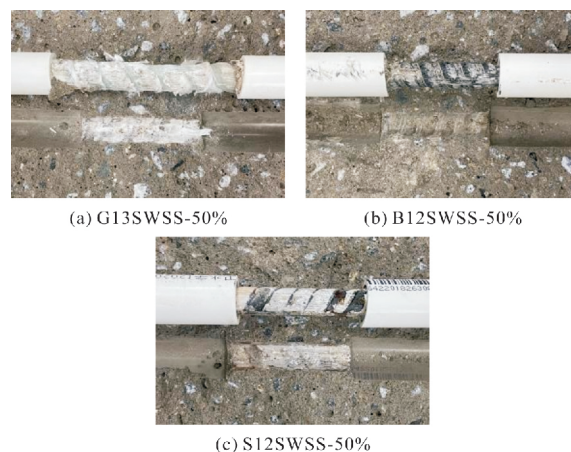


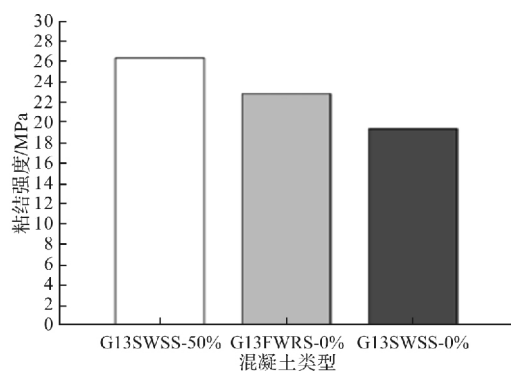
图 7 不同筋材类型的拉拔试件界面破坏形态

Fig. 7 Interface failure modes of pull-out specimens with different reinforcing bar

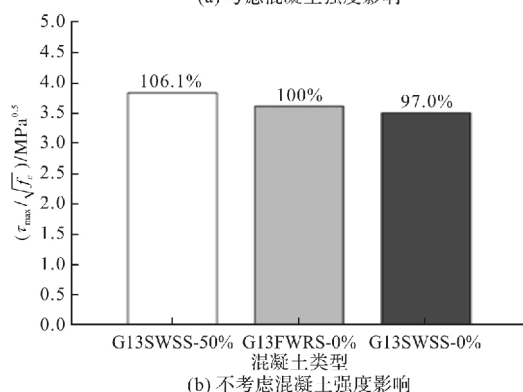
2.2 粘结强度

混凝土材料对粘结强度的影响见图 8, 如图 8(a)所示,以淡水河砂混凝土拉拔试件(G13FWRS-0%)为基准组,海水海砂高掺量粉煤灰 SCC 拉拔试件(G13SWSS-50%)的粘结强度提高 15.4%,而海水海砂混凝土(G13SWSS-0%)的粘结强度降低 15.1%。由于本次配制的三种混凝土抗压强度有所差异,且 ACI 440.3R-12 规范表明 FRP 筋增强混凝土的粘结强度与混凝土轴心抗压强度的 $1/2$ 次方成正比^[9]。本文通过粘结强度(τ_m)与轴心抗压强度的 $1/2$ 次方($f_c^{1/2}$)的比值来排除混凝土强度的影响,见图 8(b)。从图中发现:排除混凝土强度的影响后,混凝土类型对粘结强度的影响较小,说明混凝土类型对粘结强度的影响主要是由于混凝土

土强度差异引起的。



(a) 考虑混凝土强度影响

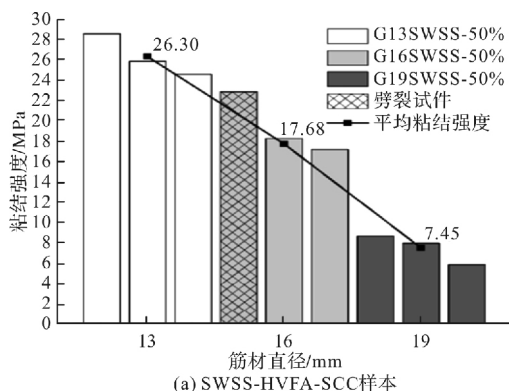


(b) 不考虑混凝土强度影响

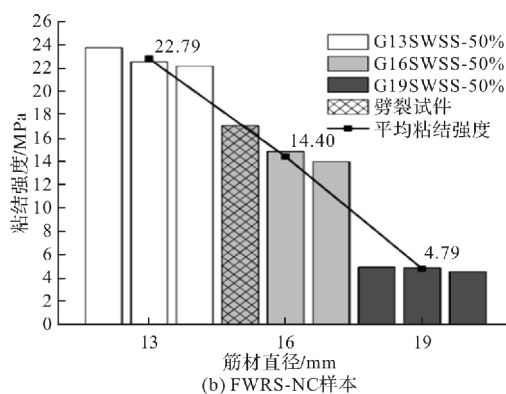
图8 混凝土材料对粘结强度的影响

Fig. 8 Influence of concrete material on bond strength

筋材直径对粘结强度的影响见图9, 由图可知: 无论是SWSS-HVFA-SCC样本还是FWRS-NC样本, GFRP筋与混凝土的粘结强度随着筋材直径增大基本呈线性降低, 这主要由于筋材表面与截面中心变形不一致, 从而导致粘结段内的筋材截面应力分布不均匀, 即剪应力滞后现象^[10]. 此外, 也有文献表明: FRP筋直径增大导致筋材表面泌水更为严重, 从而导致筋材与混凝土界面空隙较大, 粘结强度减少^[11]. 其中, G16SWSS-50%和G19SWSS-50%拉拔试件的粘结强度较G13SWSS-50%的低32.78%和71.67%, G16FWRS-0%和G19FWRS-0%拉拔试件的粘结强度较G13FWRS-0%的低36.81%和78.98%。



(a) SWSS-HVFA-SCC样本



(b) FWRS-NC样本

图9 筋材直径对粘结强度的影响

Fig. 9 Influence of reinforcement material diameter on bond strength

筋材类型对粘结强度的影响见图10, 由图发现: 在本次试验中, GFRP筋、BFRP筋和钢筋增强海水海砂HVFA-SCC的粘结强度基本相近, 其主要归因于三种筋材的肋高差异不大. 以钢筋拉拔试件为基准, BFRP筋和GFRP筋拉拔试件的粘结强度分别降低了3.52%和3.08%, 筋材类型的改变对粘结强度的影响不超过5%. 这表明GFRP筋和BFRP筋代替钢筋用于海水海砂HVFA-SCC结构中能够提供足够的粘结强度。

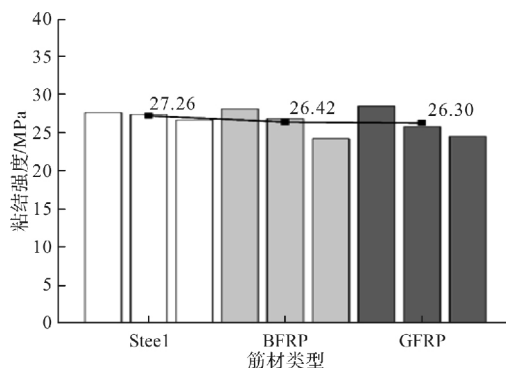


图10 筋材类型对粘结强度的影响

Fig. 10 Influence of reinforcement material type on bond strength

2.3 粘结-滑移曲线

混凝土材料对粘结-滑移曲线的影响见图11, 由图可知: 混凝土基体材料对拉拔试件的粘结-滑移曲线影响并不显著. 相比于G13SWSS-0%和G13FWRS-0%试件, G13SWSS-50%试件自由端的粘结-滑移曲线初始刚度较大, 说明海水海砂HVFA-SCC与GFRP筋之间具有更好的化学胶着力。

筋材直径对粘结-滑移曲线的影响见图12, 由图发现: 拉拔试件的粘结-滑移曲线初始刚度随着筋材直径的增大而减少. G13SWSS-50%和G16SWSS-50%试件在拉拔过程中出现第二个上升

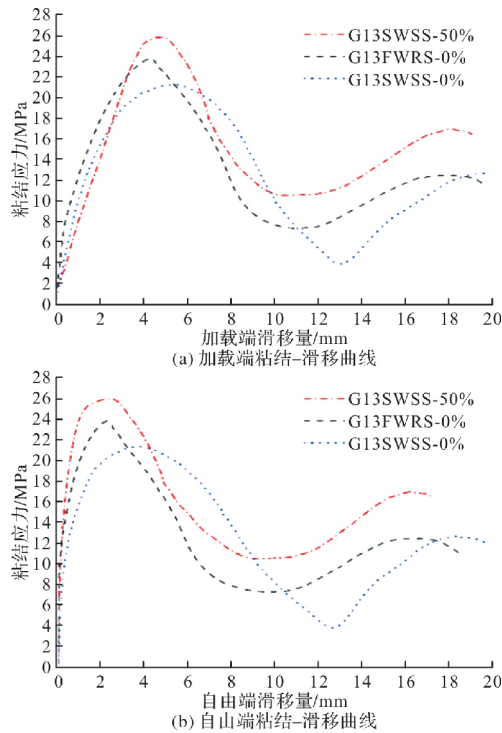


图 11 混凝土材料对粘结-滑移曲线的影响

Fig. 11 Influence of concrete material on bond-slip curves

段, 而 G19SWSS-50% 试件在拉拔过程中没有出现第二个上升段。由于试验中采用的 19 mm 筋材的肋高度与直径之比 ($H/d=0.05$) 较小, 而 13 mm 筋材 ($H/d=0.08$) 和 16 mm 筋材 ($H/d=0.10$) 的较大, 导致 G19SWSS-50% 试件未出现第二次机械咬合, 其残余应力主要取决于摩擦力。

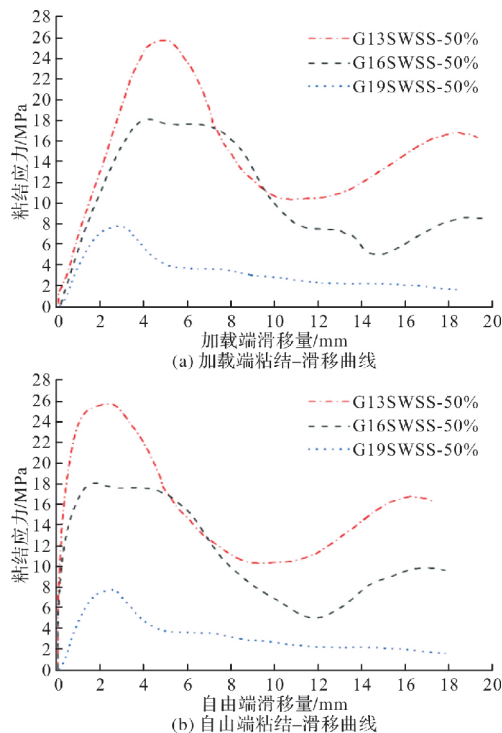


图 12 筋材直径对粘结-滑移曲线的影响

Fig. 12 Influence of reinforcement material diameter on bond-slip curves

筋材类型对粘结-滑移曲线的影响见图 13, 由图表明: 在第一个上升阶段, 同等粘结应力情况下, 带肋钢筋拉拔试件具有较小的滑移量, 其次是 BFRP 筋拉拔试件, 最后是 GFRP 筋拉拔试件, 这与三种筋材的肋高相关。在第一个下降阶段, 带肋钢筋拉拔试件下降速率较 BFRP 筋和 GFRP 筋拉拔试件慢。由于 BFRP 筋和 GFRP 筋拉拔试件的失效模式主要取决于筋材的树脂层, 因此它们在拉拔过程中存在下一个机械咬合时刻, 即粘结-滑移曲线第二次上升阶段。粘结-滑移曲线第一个峰值和第二个峰值所对应的滑移量之差与 FRP 筋的肋间距基本相同。由于带肋钢筋拉拔试件的失效模式主要取决于界面周边的混凝土被剪碎, 因此其粘结-滑移曲线不会出现第二个上升段。由图 13(a) 发现: 当粘结应力达到峰值时, 带肋钢筋拉拔试件的钢筋已经发生了屈服, 故在加载端粘结-滑移曲线中可以看到明显的力保持阶段。

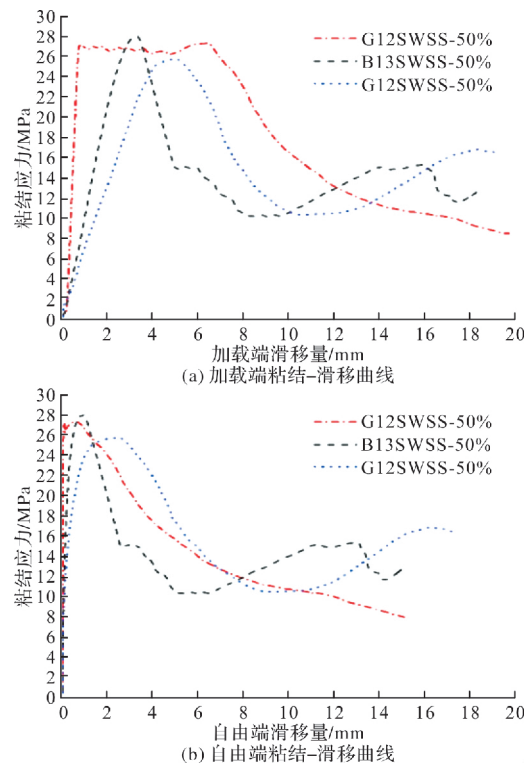


图 13 筋材类型对粘结-滑移曲线的影响

Fig. 13 Influence of reinforcement material type on bond-slip curves

3 粘结滑移本构关系

3.1 粘结滑移本构模型

Malvar's 模型和 m-BPE 模型是两种常见的 FRP 筋混凝土粘结滑移本构模型^[8], 表达式如下。Malvar's 模型

$$\tau(s) = \frac{F\left(\frac{s}{s_m}\right) + (G-1)\left(\frac{s}{s_m}\right)}{1 + (F-2)\left(\frac{s}{s_m}\right) + G\left(\frac{s}{s_m}\right)} \quad (2)$$

m-BPE 模型(仅列出上升段和下降段)

$$\tau(s) = \begin{cases} \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha} \tau_m, & 0 \leq s \leq s_m \\ \left[1 - p\left(\frac{s}{s_m} - 1\right)\right] \tau_m, & s > s_m \end{cases} \quad (3)$$

式中: F 、 G 、 α 和 p 是根据试验结果确定的参数. 此外, Soares 等人^[12]对 m-BPE 模型进行简化, 提出了双 α 模型, 其通过 α 和 α' 确定上升段和下降段的粘结滑移曲线形状. 该模型的表达式如下所示.

$$\tau(s) = \begin{cases} \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha} \tau_m, & 0 \leq s \leq s_m \\ \left(\frac{s}{s_m}\right)^{-\alpha'} \tau_m, & s > s_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 和 α' 是对试验粘结滑移曲线通过最小二乘法拟合确定的参数.

以 G13SWSS-50% 拉拔试件为例, 采用上述三种本构模型进行分析, 各模型拟合得到的粘结-滑移曲线与试验数据包络范围的对比见图 14.

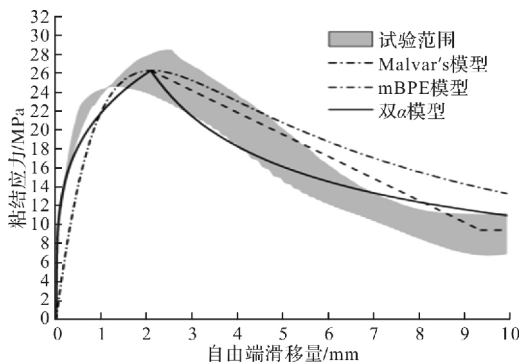


图 14 不同模型预测结果与试验结果对比

Fig. 14 Comparison between prediction results of different models and experimental results

由图可知: Malvar's 模型的预测结果较差, 而 m-BPE 模型和双 α 模型预测结果较好. 由于双 α 模型表达式最为简洁, 且 Soares 等人^[12]表明该模

型对 FRP 筋增强淡水/海水混凝土拉拔试件均有良好的适用性. 因此, 本文采用双 α 模型预测 FRP 筋混凝土拉拔试件的粘结-滑移曲线.

3.2 双 α 粘结滑移本构模型参数校核

采用双 α 模型对 FRP 筋混凝土拉拔试件的试验结果进行分析. 所有试件都采用自由端的粘结-滑移曲线对双 α 模型进行参数校核. 其中, α 和 α' 的取值控制在 $[0, 1]$ 之间. 此外, 并计算由双 α 模型确定的断裂能及试验曲线确定的平均断裂能. 每组拉拔试件样本的 α 、 α' 及相应断裂能等参数见表 5.

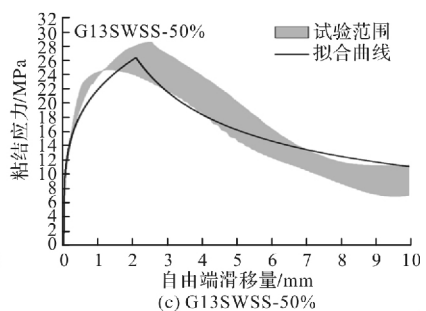
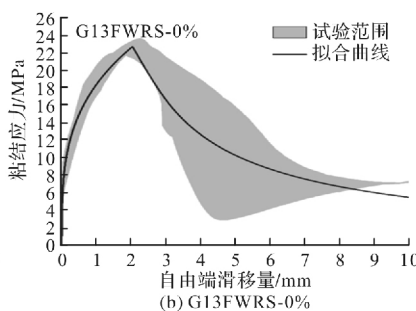
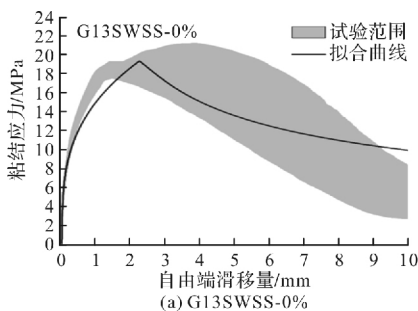
表 5 拉拔试件的参数结果

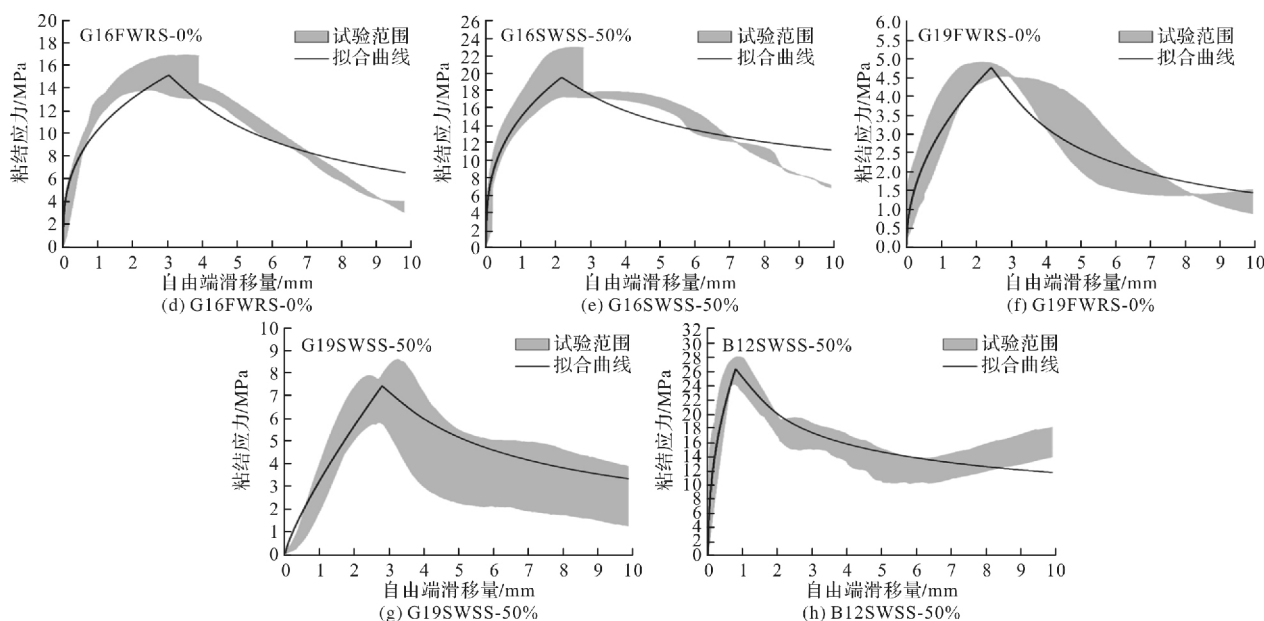
Tab. 5 Parameter results of pull-out specimens

试件编号	α	α'	$G_{f,e}/$ (MPa · mm)	$G_{f,m}/$ (MPa · mm)	$\frac{G_{f,m}}{G_{f,e}}$ /%
G13SWSS-0%	0.311	0.449	134.452	133.459	99.3
G13FWRS-0%	0.296	0.886	119.319	116.341	97.5
G13SWSS-50%	0.250	0.557	171.363	167.615	97.8
G16FWRS-0%	0.344	0.706	99.566	101.209	101.7
G16SWSS-50%	0.347	0.368	137.103	139.598	101.8
G19FWRS-0%	0.489	0.856	26.612	26.053	97.9
G19SWSS-50%	0.808	0.639	39.317	45.227	115.0
B12SWSS-50%	0.444	0.319	157.8	156.426	99.1

注: $G_{f,e}$ 代表试验曲线确定的平均断裂能, 通过试验获得的粘结滑移曲线围成的面积计算得到; $G_{f,m}$ 代表双 α 模型确定的断裂能, 通过双 α 模型预测的粘结滑移曲线围成的面积计算得到.

双 α 模型预测结果与试验结果对比见图 15. 从图中发现: 对于不同混凝土材料、不同筋材直径和不同筋材类型的拉拔试件, 双 α 模型均能够准确描述 FRP 筋-混凝土的粘结滑移过程. 由双 α 模型预测的粘结滑移曲线确定的断裂能与试验获得的粘结滑移曲线确定的平均断裂能进本相近, 其最大误差不超过 15% (见表 5). 这进一步表明采用双 α 模型能够表征 FRP 筋增强海水海砂 HVFA-SCC、海水海砂 NC/淡水河砂 NC 的粘结滑移行为.



图 15 双 α 模型预测结果与试验结果对比Fig. 15 Comparison between prediction results of double α model and experimental results

4 结论

本文对 GFRP 筋增强海水海砂高掺量粉煤灰 SCC 的粘结性能开展研究, 分析了混凝土类型、筋材直径、筋材类型对破坏形态、粘结强度及粘结-滑移曲线的影响规律, 探讨了不同粘结滑移本构模型预测 GFRP 筋-SWSS-HVFA-SCC 试件粘结-滑移过程的准确性, 最后采用双 α 模型预测拉拔试件的粘结-滑移曲线。基于以上的研究和分析, 可以得出以下结论:

(1) 排除混凝土强度的影响后, 混凝土类型(海水海砂 HVFA-SCC、海水海砂 NC 和淡水河砂 NC)对粘结强度的影响较小, GFRP 筋增强海水海砂 HVFA-SCC 试件的筋材表面损伤较 GFRP 筋增强 NC 的严重;

(2) 粘结滑移曲线的初始刚度随着筋材直径增大而减少, 粘结强度随着筋材直径增大基本呈线性降低。随着筋材直径的增加(筋材肋高的减少), GFRP 筋增强混凝土试件的筋材界面损伤由树脂层剪切破坏转为树脂层磨损破坏;

(3) 筋材类型(GFRP 筋、BFRP 筋及带肋钢筋)对海水海砂 HVFA-SCC 试件的粘结强度基本无影响。但同等粘结应力下(粘结-滑移曲线处于第一个上升阶段), 带肋钢筋拉拔试件的滑移量比 GFRP 筋/BFRP 筋拉拔试件的小。且带肋钢筋拉拔试件的界面破坏主要取决于界面周边混凝土被钢筋肋剪碎, 而 GFRP 筋/BFRP 筋拉拔试件的界面破坏主要取决于筋材表面的树脂层被剪断或

磨损;

(4) m-BPE 模型和双 α 模型预测能够准确地预测 GFRP 筋-海水海砂 HVFA-SCC 的粘结-滑移过程。基于粘结-滑移曲线的试验结果, 通过数据拟合的方法校核双 α 粘结滑移本构模型参数, 得到了不同参数(混凝土材料、筋材直径、筋材类型)下拉拔试件的粘结-滑移曲线表达式;

(5) 采用海水海砂代替淡水河砂、高掺量粉煤灰代替水泥制备的海水海砂 HVFA-SCC 的后期抗压强度和弹性模量略高于普通混凝土。同时, GFRP 筋增强海水海砂 HVFA-SCC 试件的粘结强度略高于 GFRP 筋增强普通混凝土试件。这表明结合 GFRP 筋和海水海砂 HVFA-SCC 用于实际工程具有可行性。

参考文献 References

- [1] XIAO J, ZHANG Q, ZHANG P, et al. Mechanical behavior of concrete using seawater and sea - sand with recycled coarse aggregates[J]. Structural Concrete, 2019, 20(5):1631-1643.
- [2] MATOS A M, Sousa-Coutinho J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement[J]. Construction & Building Materials, 2012, 36: 205-215.
- [3] BILODEAU A, MALHOTRA V M. High-volume fly ash system; concrete solution for sustainable development[J]. ACI materials journal, 2000, 97(1): 41-48.

(下转第 236 页)

- al. Properties of block copolymer noncovalently modified multi walled carbon nanotubes/epoxy nano-composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(11): 72-75.
- [8] ZHANG X W, PAN Y, ZHENG Q, et al. Piezoresistance of conductor filled insulator composites[J]. Polymer International, 2001, 50(2): 229-236.
- [9] WANG Y L, CHANG R J, CHEN G P. Strain and damage self-sensing properties of carbon nanofibers/carbon fiber-reinforced polymer laminates [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(2): 1-11.
- [10] 王永帅. 碳纳米纤维改性复合材料的应变和损伤演化自感知性能研究[D]. 辽宁:大连理工大学, 2019.
WANG Yongshuai. Strain and damage evolution self-sensing properties of composites modified by carbon nanofibers. Liaoning: Dalian University of Technology, 2019.
- [11] 卢学峰, 南雪莉, 何玲, 等. 原位聚合法制备环氧树脂/纳米炭黑复合导电材料的性能研究[J]. 新技术新工艺, 2010(4): 49-51.
LU Xuefeng, NAN Xueli, HE Ling, et al. Research on properties of epoxy / nano-carbon black conductive composite prepared by in-situ polymerization[J]. New Technology & New Process, 2010(4): 49-51.
- [12] 焦剑, 曲忠先, 丁美平, 等. 纳米炭黑/环氧树脂复合材料的性能研究[J]. 塑料工业, 2005, 33(12): 15-18.
JIAO Jian, QU Zhongxian, DING Meiping, et al. Study on nano-meter carbon black / epoxy resin composite[J]. China Plastics Industry, 2005, 33(12): 15-18.
- [13] TALLMAN T N, GUNGOR S, WANG K W, et al. Damage detection via electrical impedance tomography in glass fiber/epoxy laminates with carbon black filler[J]. Structural Health Monitoring, 2015, 14(1): 100-109.
- [14] FERREIRA A, CARDOSO P, KLOSTERMAN D, et al. Effect of filler dispersion on the electromechanical response of epoxy/vapor-grown carbon nanofiber composites[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(7): 075008.
- [15] BAL S. Experimental study of mechanical and electrical properties of carbon nanofiber/epoxy composites [J]. Materials & Design (1980-2015), 2010, 31(5): 2406-2413.

(编辑 沈 波)

(上接第 219 页)

- [4] ZHOU L Z, ZHENG Y, YU Y, et al. Experimental study of mechanical and fresh properties of HVFA-SCC with and without PP fibers[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267(Januray18):1-15.
- [5] ZHENG Y, ZHOU L, XIA L, et al. Investigation of the behaviour of SCC bridge deck slabs reinforced with BFRP bars under concentrated loads[J]. Engineering Structures, 2018, 171:500-515.
- [6] 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. Bond behavior between seawater sea-sand recycled aggregate concrete and glass-fiber-reinforced polymer bars[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(7):884-890 .
- [7] PARVIZI M, NOËL M, VASQUEZ J, et al. Assessing the bond strength of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in portland cement concrete fabricated with seawater through pullout tests[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263(1):1-13.
- [8] ZHENG Y, ZHOU N, ZHOU L, et al. Experimental and theoretical study of bond behaviour between FRP bar and high-volume fly ash-self-compacting concrete [J]. Materials and Structures, 2021, 54(1):1-17.
- [9] ACI Committee. Guide test methods for fiber-reinforced polymer (FRP) composites for reinforcing or strengthening concrete and masonry structures; ACI 440-3R-12 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2012.
- [10] 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]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [11] TIGHIOUART B, BENMOKRANE B, GAO D. Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars [J]. Construction and Building Materials, 1998, 12(8):453-462.
- [12] Soares S, Freitas N, Pereira E, et al. Assessment of GFRP bond behaviour for the design of sustainable reinforced seawater concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231:1-17.

(编辑 沈 波)