

纤维增强复合材料筋与全珊瑚骨料海水海砂硫铝酸盐水泥混凝土的 粘结性能

鲍玖文¹, 单联飞¹, 刘 鹏², 李 冉¹, 孙建伟¹, 崔祎菲¹

(1. 青岛理工大学海洋环境混凝土技术教育部工程研究中心, 山东 青岛 266520; 2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 在全珊瑚骨料海水海砂硫铝酸盐水泥混凝土(FCASS-CSAC)中用纤维增强复合材料(FRP)筋替换传统钢筋可有效解决钢筋锈蚀问题, 但 FRP 筋与 FCASS-CSAC 的粘结机理尚不明晰。为了探明二者粘结性能退化规律, 本工作对 18 个中心拉拔试件进行了测试, 分析了 FRP 筋种类(BFRP 和 GFRP)和粘结长度($5d$ 、 $7.5d$ 、 $10d$)对其粘结性能的影响。结果表明: 对于直径 d 为 10 mm 的 FRP 筋材, 在不考虑肋形的情况下, 玄武岩 FRP(BFRP)筋增强的粘结性能普遍优于玻璃 FRP(GFRP)筋, 其粘结强度总体比 GFRP 筋高约 40%; 当 BFRP 和 GFRP 筋的粘结长度为 $5d$ 时粘结应力较高, 其中 BFRP 粘结体系中 $5d$ 粘结长度的强度比 $7.5d$ 和 $10d$ 的分别高出约 30% 和 60%。结合试验结果, 提出了考虑粘结长度影响的 FRP 筋与 FCASS-CSAC 的粘结强度预测公式, 开展了其粘结性能的有限元仿真分析, 并对不同加载速度和混凝土强度进行模拟预测, 粘结-滑移曲线的预测分析结果均与试验结果吻合较好。

关键词: 硫铝酸盐水泥; 珊瑚骨料; 海水海砂混凝土; 粘结性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)08-2328-12

网络出版时间: 2025-05-30



随着中国“一带一路”倡议、“海洋强国”战略的大力实施与深入推进, 目前我国海洋开发建设速度不断加快, 面向未来发展必然要建设大量沟通海陆、辐射周边的跨海桥梁、海底隧道、岛礁工程、海港码头等重大基础设施, 海洋环境下工程结构和材料耐久性及韧性提升关键技术已成为工程研究领域的热点问题。但针对复杂海洋环境, 如何合理使用海水、海砂及珊瑚骨料作为海工混凝土原材料是解决海洋工程用淡水、河砂等资源匮乏问题的有效方法之一, 且还可降低运输成本及缩短工程建设周期^[1]。然而, 海水中氯离子等有害离子的大量存在, 对传统钢筋的锈蚀问题已构成严重威胁^[2-3]。纤维增强复合材料(FRP)筋是以碳纤维、玻璃纤维等为增强体, 高分子树脂为基体的一种高性能筋材, 具有耐海水腐蚀、轻质高强等特点, 若采用 FRP 筋在海工混凝土中替换

传统钢筋可有效解决其钢筋锈蚀问题, 目前已在海洋工程基础设施中得到广泛应用。

硫铝酸盐水泥(CSA)混凝土因其具有早硬高强、耐腐蚀及抗渗性好等特点, 且 CSA 混凝土的细孔孔隙和总孔隙体积均小于普通硅酸盐水泥混凝土^[4-5], 而适用于对早期强度、耐久性能要求较高的海工混凝土结构工程中。此外, 若采用 CSA 配制海水海砂珊瑚骨料混凝土, 可提升其基体强度并改善内部孔隙结构^[6]。若将 FRP 筋与 CSA 混凝土结合使用可更有效提升海工结构耐久性。例如, Wang 等^[7]将 CSA 代替普通硅酸盐水泥, 开展了 CSA 砂浆中玻璃 FRP(GFRP)筋材拉伸性能研究, 进一步表明 CSA 对 GFRP 筋具有较强的防护性能。但是, FRP 筋与混凝土的粘结性能是结构协同工作的关键, 其界面破坏模式复杂, 受筋材粘结长度、筋材尺寸及环境因素影响显著。例如, 实际工程中发现, 带肋

收稿日期: 2025-01-12。 修订日期: 2025-02-20。

基金项目: 国家自然科学基金(U2106219, U22A20244, 52308264); 山东省高校优秀青年创新团队资助项目(2021KJ019); 山东省“泰山学者”青年专家项目(No.tsqn202408223)。

第一作者: 鲍玖文(1989—), 男, 博士, 教授。

通信作者: 崔祎菲(1986—), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2025-01-12. Revised date: 2025-02-20.

First author: BAO Jiwen (1989—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: baojiuwen@qut.edu.cn

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

E-mail: cuiyifei@126.com

FRP 筋在海洋环境中易因机械咬合作用失效导致界面剥离, 尤其是肋高增加虽可提高极限粘结强度, 但残余强度显著降低, 可能引起突发性破坏^[8]。此外, 外贴 FRP 加固混凝土梁的案例中, 端部粘结破坏与非端部破坏并存, 氯盐侵蚀又进一步加剧界面滑移, 导致荷载传递效率下降^[9]。尽管 CSA 在海洋工程中表现出优于传统硅酸盐水泥的抗侵蚀能力, 但其长期暴露下的性能演变仍需关注。试验数据显示, 海洋环境中 CSA 混凝土微结构会因氯离子渗透和干湿循环作用逐渐劣化, 且界面过渡区(ITZ)的孔隙率增加显著^[10]。此外, CSA 混凝土与 FRP 筋的粘结性能研究较少, 两者协同作用下的耐久性数据更是匮乏, 因此, 非常有必要深入研究 FRP 筋与 CSA 混凝土的粘结耐久性能劣化规律, 这对实际工程及应用具有重要的指导意义。

目前, 海洋环境下混凝土基体与筋材的粘结性能已被广泛关注。Kazemi 等^[11]研究了钢筋普通混凝土和钢筋海水混凝土在不同暴露环境下的粘结滑移性能。研究表明, 经过 250 d 的海水暴露及海水干湿循环测试后, 钢筋普通混凝土和钢筋海水混凝土的极限粘结强度分别下降了约 6%和 10%, 以及 8%和 13%。有研究表明: FRP 筋的表面特性对其与基体粘结性能的影响显著, 且多数 FRP 筋与混凝土基体的粘结强度要高于钢筋^[12]。Wang 等^[13]开展了不同海水温度(30、60 °C 和 80 °C)下 GFRP、碳纤维增强复合材料(CFRP)筋与珊瑚混凝土的粘结性能, 并分析了不同暴露龄期(30、60 d 和 120 d)的影响规律, 发现 GFRP 与 CFRP 筋材受海水高温浸泡后其粘结强度明显降低。Yang 等^[14]研究了 FRP 筋与海水珊瑚骨料混凝土(SCAC)的粘结性能, 发现其最大平均粘结应力随粘结长度和筋材直径的增大而减小, 并且浸泡在海水中养护的 FRP 筋与 SCAC 粘结试件粘结强度比标准养护条件下的略有降低。Zhang 等^[15]研究了玄武岩 FRP(BFRP)筋在碱激发珊瑚骨料混凝土体系中的粘结性能, 与珊瑚骨料混凝土试件相比, 碱激发海水珊瑚骨料混凝土具有更高的粘结强度、粘结刚度和残余粘结应力。Hussain 等^[16]研究了海水和碱性溶液环境下 BFRP 筋与混凝土之间的粘结性能, 发现 BFRP 筋材在碱性溶液中的粘结性能优于海水环境。此外, 硅酸盐水泥混凝土与钢筋的粘结滑移模型理论已较为成熟, Kang 等^[17]研究了钢筋在混凝土中的动态粘结滑移行为并提出可用于预测不同

荷载速率下其粘结滑移行为的预测公式。Wu 等^[18]通过对已有的粘结滑移行为和数据进行系统分析, 并考虑了普通混凝土强度和钢筋直径等参数, 提出了钢筋与普通混凝土的粘结应力-滑移计算统一模型。目前国内外学者针对 FRP 筋与 SCAC 的粘结性能演变规律及预测模型已开展了大量研究, 但针对 FRP 筋与全珊瑚骨料海水海砂硫铝酸盐水泥混凝土(FCASS-CSAC)粘结性能退化机理研究甚少。尽管传统的硅酸盐水泥混凝土与钢筋或 FRP 筋的粘结强度计算公式已较为完善, 但在本研究体系中并不具备良好的适用性, 限制了其在海洋工程基础设施建设中的应用与发展。因此, 开展海洋环境下 FRP 筋增强 CSA 混凝土粘结性能时变规律及预测模型研究, 对丰富海洋环境下 FRP 筋-CSA 混凝土粘结性能基本理论具有重要意义。

基于此, 为了深入探究 FRP 筋与 FCASS-CSAC 的粘结性能退化规律, 开展 FRP 筋增强的 FCASS-CSAC 试件中心拉拔试验, 分析不同 FRP 筋材种类(BFRP 筋、GFRP 筋)、锚固长度对其界面粘结性能的影响, 基于试验获得粘结滑移曲线, 结合有限元数值模拟分析与验证, 提出考虑粘结长度影响的 FRP 筋增强 FCASS-CSAC 粘结滑移计算方法, 为海工混凝土结构腐蚀控制及延寿技术提供理论依据。

1 实验

1.1 制备

采用环氧树脂为基体的 GFRP 和 BFRP 筋, 其具体参数如表 1 所示。胶凝材料选用河北唐山北极熊牌 72.5 级 CSA, 比表面积为 478 m²/kg, 其主要成分如表 2 所示; 测定其初凝和终凝时间分别为 166 min 和 208 min, 1、3 d 和 7 d 的抗压强度分别为 59.3、70.2 MPa 和 80.5 MPa。粗骨料选用粒径为 4.75~9.50 mm、9.5~16.0 mm 的珊瑚骨料(CA), 骨料级配如图 1 所示。在使用前需对 CA 进行破碎、清洗、晒干等处理, 依据《混凝土用珊瑚骨料》(T/CECS 10090—2020)^[19]的有关规定, 筛分选取 4.75~16.00 mm 的粒径, 符合颗粒级配要求, 其物理性能参数如表 3 所示。细骨料选用青岛当地海砂。选用青岛海域海水作为搅拌用水, 其离子含量如表 4 所示。采用江苏苏博特新材料股份有限公司生产的高效减水剂, 使用时需将其提前溶于拌合水中搅拌均匀。

表 1 FRP 筋的力学性能

Table 1 Mechanical properties of fiber reinforced polymer (FRP) reinforcement

Bar	Diameter/mm	Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa
GFRP	10	51.5	756.3
BFRP	10	49.1	1091.0

GFRP is glass fiber reinforced polymer. BFRP is basalt fiber reinforced polymer.

表 2 胶凝材料的主要化学成分

Table 2 Chemical composition of binding material w/%

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Others
43.59	33.48	8.29	8.05	1.88	1.86	2.85

w is mass fraction.

表 3 珊瑚骨料的基本物理性能

Table 3 Basic physical properties of coral aggregates(CA)

Loose bulk density/(kg·m ⁻³)	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Porosity/24 h water %	absorption/%	Cylinder compressive strength/MPa
864.03	2449	33.21	17.8	2.6

表 4 海水中离子含量

Table 4 Ion content in seawater

Type	Region/(μS·min)	Quality/μS	Degree of dilution	Concentration/(mg·L ⁻¹)	Total content/(mg·kg ⁻¹)
Na ²⁺	1.111	5.800	1000.7	9.282	9 288.23
Cl ⁻	0.872	3.034	1015.4	16.48	16 738.16
SO ₄ ²⁻	0.116	0.175	1015.4	2.17	2 202.34
Mg ²⁺	0.276	0.276	1000.7		
Ca ²⁺	0.080	0.080	100.7		

FCASS-CSAC 试件设计水胶比为 0.38，配合比如表 5 所示。在混凝土搅拌过程中，首先向搅拌锅中加入 CA，并同时逐渐加入一定量的海水进行预湿处理，确保骨料被充分润湿，其用量符合《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T 12—2019)的要求。预湿处理完成后，继续搅拌约 2 min，以确保骨料与海水混合均匀。然后依次向搅拌锅中加入砂、水泥，并在搅拌过程中逐步掺入含有一定量减水剂的搅拌用水。此步骤旨在确保各种原材料能够均匀混合，同时减水剂能有效发挥作用，提高混凝土工作性能。在添加完砂、水泥和搅拌用水后，继续搅拌约 2 min，以确保所有原材料充分混合，形成均匀的混凝土拌合物。在标准养护条件下养护 28 d 后，测定混凝土立方体试件的抗压强度，由于 CA 自身抗压强度远低于常规骨料，使其对混凝土总体抗压强度影响较大^[20–21]，故采用 72.5 级 CSA 制备 CA 混凝土抗压强度平均值为 40.1 MPa。

表 5 全珊瑚骨料海水海砂硫铝酸盐水泥混凝土(FCASS-CSAC)配合比

Table 5 Concrete mix proportion of fully coral aggregate seawater sea sand CSAC kg/m³

Cement	CA	Sea sand	Total water	Water reducer	Pre-wetting water
500	692	933	190	2.5	62.28

1.2 方法

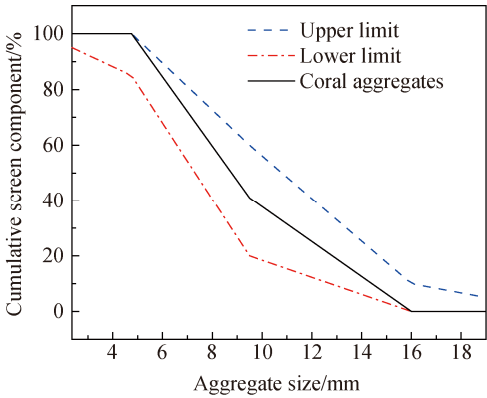
设计了 18 个边长为 150 mm 的插筋立方体试件开展中心拉拔试验，如图 2 所示。试件分为 2 组，分别为 BFRP 混凝土试件和 GFRP 混凝土试件，即 BFRP-G1 和 GFRP-G1；试验通过调整混凝土试件两侧 PVC 管的长度来控制 FRP 筋的锚固长度，设置了粘结长度为 50、75 mm 和 100 mm 的 3 种情况。为了



(a) Particle size is 4.75–9.50 mm



(b) Particle size is 9.5–16.0 mm



(c) Coral aggregate grading curves

图 1 珊瑚骨料及级配曲线

Fig. 1 Coral aggregates used in this study and grading curves

防止加载过程中 FRP 筋的端部发生脆性破坏, 在 FRP 筋的加载端处使用了改性环氧树脂植筋胶, 并将其套入内螺纹钢套筒中, 以增加其稳定性和耐久性。

采用 YAW-3000 微机控制电液伺服试验机进行加载。采用图 3 所示的加载装置测量 FRP 筋在混凝土中的粘结强度。自由端固定位移计以测量其滑移量。根据 ACI-440.3R^[22]和《纤维增强复合材料建设

工程应用技术规范》(GB 50608—2020)^[23]的要求, 加载速度设定为 1 mm/min, 使其处在对粘结强度影响较小的区间^[24]。在加载过程中, 时刻关注 FRP 筋与混凝土的劈裂情况以及自由端的滑移量。若加载过程中出现 FRP 筋断裂、混凝土劈裂或自由端滑移量超过 20 mm 的情况, 须立即停止加载, 以确保试验数据的有效性。

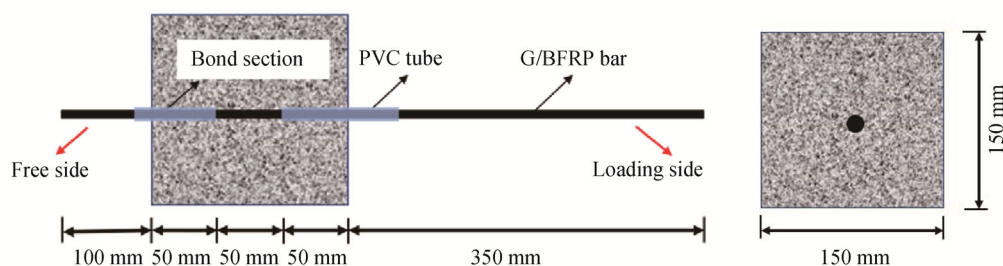


图 2 中心拉拔试件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of central pull-out specimens

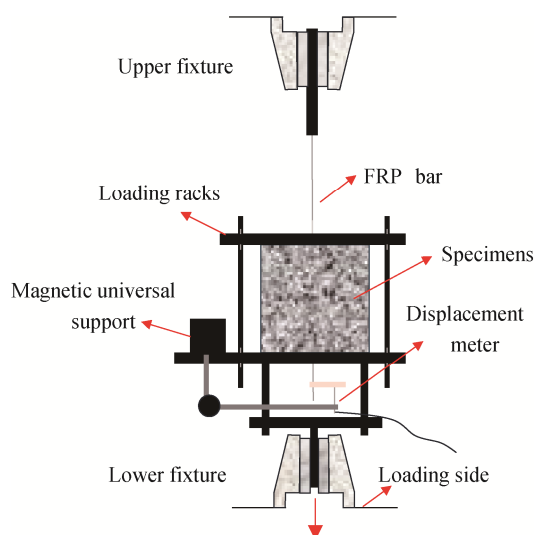


图 3 中心拉拔试验加载装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the loading device of central pull-out tests

2 结果与讨论

2.1 破坏形态

图 4 给出了 FRP 筋与 FCASS-CSAC 中心拉拔试验的典型破坏形态。通常中心拉拔试件破坏形式主要有 4 种: 拔出破坏、筋断破坏、筋劈裂破坏和混凝土基体劈裂破坏^[25]。FRP 筋在加载过程中被缓慢拔出, 混凝土与 FRP 筋接触面已摩擦光滑, 以至于产生了如图 4a 的拔出破坏。试件在受拉过程中粘结部分未达到滑移条件, 但是 FRP 筋在此过程中达

到了其极限应力导致筋材断裂。筋断破坏的 FRP 筋在受力过程中某处纤维陆续拉断从而集中一处断裂, 其断裂处纤维筋处于炸散状, 即为图 4b 所示的 FRP 筋断破坏。图 4c 为 FRP 筋劈裂破坏, 是由于加载时筋内受力不均或者拉拔受力时筋材薄弱点不再集中一处, 其破坏展现出筋材劈裂的形态。混凝土基体劈裂破坏是由于带肋筋在拉拔过程中由肋周辐射向混凝土基体的应力超过混凝土本身的抗拉强度, 导致混凝土试块出现开裂。总的来说, 由于混凝土基体延性较高, 导致试验破坏形态基本以拔出破坏为主, 说明所采用的粘结长度符合试验要求。

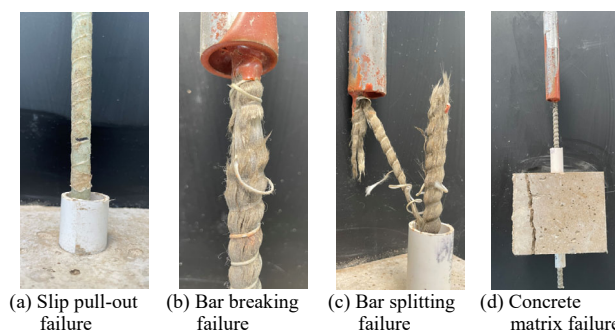


图 4 中心拉拔试件的典型破坏形式

Fig. 4 Typical failure modes of central pull-out specimens

2.2 粘结-滑移性能分析

结合中心拉拔测试结果, 基于粘结应力平均分布的基本假定^[26], 采用式(1)可计算极限粘结应

力为:

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

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 筋的锚固长度, 单位为 mm。采用 τ_p 作为 3

个试件中拔出破坏的平均拔出粘结应力; τ_{up} 作为 3 个试件中非正常拔出的平均粘结应力; τ_m 作为试件中测试出的最大粘结应力。表 6 给出了中心拉拔试件的测试结果, 其中 B 和 G 分别代表 BFRP 筋和 GFRP 筋; 5、7.5 和 10 分别代表筋材与混凝土基体的粘结长度。

表 6 中心拉拔试验测试结果
Table 6 Test results of central pull-out experiments

Type	Bond stress/MPa			Failure Morphology			Average pull-out bond stress τ_p /MPa	Average non-pull-out bond stress τ_{up} /MPa	Maximum bond stress τ_m /MPa
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3			
B-5	13.7	14.6	12.5	C	C	C	13.6		14.6
B-7.5	10.7	10.3	9.8	C	C	C	10.3		10.7
B-10	9.2	6.6	ND	S	F	M		7.9	9.2
G-5	9.6	10.4	10.1	C	C	C	10.0		10.4
G-7.5	5.5	4.6	5.7	C	C	C	5.3		5.7
G-10	5.7	6.5	3.2	C	C	C	5.5		6.5

C is pull-out failure. F is the breaking failure of FRP bar. M is the splitting failure of FRP bar. S is the cracking failure of the concrete matrix. ND is no data.

结合表 6 可知, 对于 BFRP 和 GFRP 筋材的粘结长度为 $5d$ 时, 其粘结应力普遍高于粘结长度为 $7.5d$ 和 $10d$ 的情况, 其中对于 BFRP 筋, 粘结长度为 $5d$ 时粘结强度比同体系下 $7.5d$ 和 $10d$ 的情况高 30%和 60%左右。这是由于随着 FRP 筋锚固长度的增加, 荷载传递在 FRP 筋中逐渐衰减, 导致自由端附近粘结应力较小, 而加载端附近出现应力集中, 使得粘结应力分布不均匀, 且锚固长度越长, 这种不均匀现象越显著^[27–28]。这一发现与先前文献[29–30]中的研究结果一致, 进一步也证实了这 BFRP 和 GFRP 筋在粘结长度为 $5d$ 时展现出更优的粘结性能。但是, 峰值点的位置并未随粘结长度的改变而发生显著变化。此外, 对比 BFRP 和 GFRP 筋材的粘结性能, 发现 BFRP 筋材通常展现出更优的粘结性能, 其粘结强度总体比 GFRP 筋材高约 40%, 而且 BFRP 粘结滑移曲线中上升段的斜率大于 GFRP, 反映出 BFRP 筋高抗拉强度对粘结刚度的影响。

图 5 为不同粘结长度下 FRP 筋材与 FCASS-CSAC 的中心拉拔试件粘结滑移(τ - s)曲线。图中粘结滑移曲线基本包括微滑阶段、滑移阶段、下降阶段和残余阶段 4 个阶段^[31]。在加载初期, 微滑阶段特征明显, 首先 FRP 筋材从不受力状态逐渐变为紧绷状态, 然后加载端附近的粘结段承受应力, 经历细微的弹性与塑性滑移。此阶段, 力和滑移现象沿结构纵向向自由端逐渐、不均匀地传播, 而自由端附近的粘结段尽管已承受应力,

却尚未显现出滑移迹象, 其粘结强度主要依赖于 FRP 筋与混凝土基体间稳固的化学胶合作用。随着外部拉拔力的逐步增强, 该阶段内自由端仍保持静止无位移, 化学胶合力占主导作用。当自由端产生位移时进入滑移阶段, 滑移现象的出现, 预示着 FRP 筋与混凝土基体间的化学粘结力逐渐减弱, 摩擦力与机械咬合力则成为维持粘结的主要应力效应^[27]。在滑移起始阶段, 试件曲线的初始斜率揭示了其固有的粘结刚度特性, 该刚度是衡量材料承载时抗形变能力的关键指标。在滑移阶段滑移量显著增加, 曲线斜率减小, 图 4 中出现的破坏情况均出现在这个阶段。随着位移的持续累积, 粘结区形变不可逆, 试件逐渐被破坏, 同时粘结强度的逐步提升, 直至达到其峰值^[32], 这一过程直接决定了材料的极限粘结强度。荷载峰值后迎来下降阶段, 此时 FRP 筋肋部剪切破坏^[33], 随着滑移的继续进行, 粘结应力从峰值开始下降, 此阶段为摩擦力主导作用, 混凝土表面磨损剥离加剧。当后续肋在位移过程中替换掉前一肋的位置时进入残余阶段, 界面粘结能力完全丧失, 残余应力由 FRP 筋与混凝土孔壁间的摩擦力维持。滑移量持续增大, 曲线趋于平缓, 应力值稳定在较低水平。曲线再次上升进入下一循环, 此时的粘结力则为摩擦力和机械咬合力共同构成。总的来说, 长粘结长度易触发筋材断裂, 而短粘结长度主要以拔出破坏为主。GFRP 筋相对 BFRP 筋延性较好, 滑移段较长。

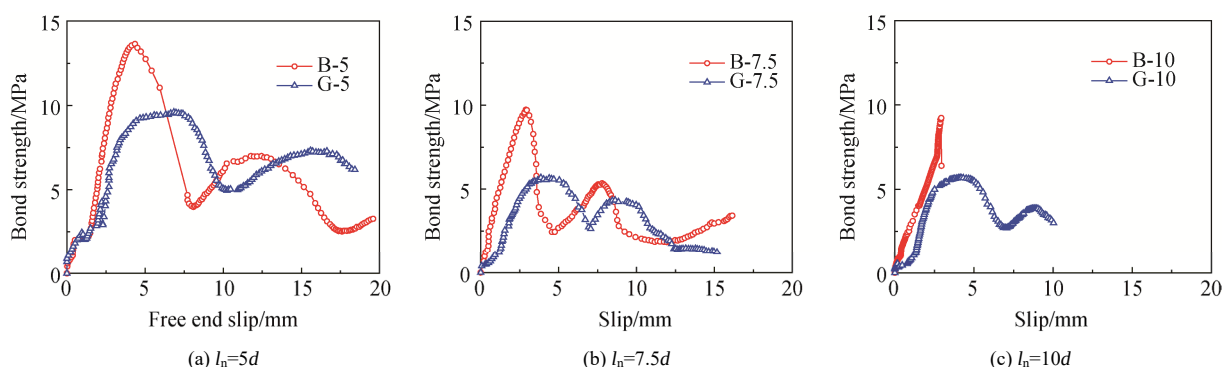


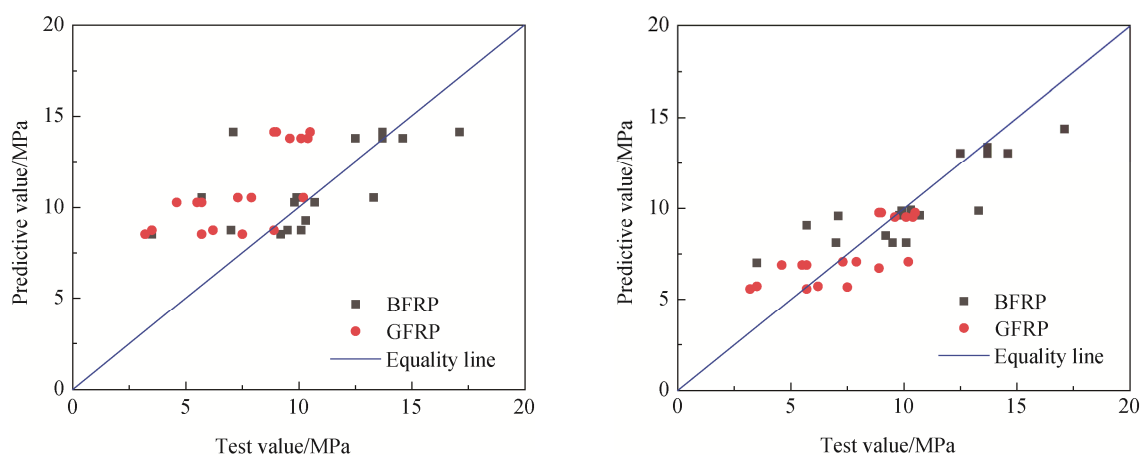
图 5 中心拉拔试件的粘结-滑移曲线

Fig. 5 Bond-slip curves of central pull-out specimens

2.3 粘结强度预测经验公式

目前, 硅酸盐水泥混凝土与钢筋之间的粘结性能已有既定标准来衡量, 且形成了完善的计算公式来进行量化分析。众多学者也已提出考虑筋材种类、温度及粘结长度等影响因素的 FRP 筋与混凝土粘结强度预测模型^[34-37]。在这些模型中, 陆新征双线性模型^[38]、Monti 简化双线性模型^[39]以及 Chen&Teng 模型^[40]较为常见。其中陆新征双线性模型采用双线性描述滑移非线性行为, 参数标定需要通过试验获得。Monti 简化双线性模型引入了有效锚固长度系数 λ , 但未考虑环境与材料交互作用, 而 Chen&Teng 模型中的 β_1 参数在 L/d (粘结长度与筋材直径之比) 大于 2 时失效, 对小直径筋材和长粘结长度的应用存在局限且对高强混凝土适应性不足。为了解决 FRP 筋与 FCASS-CSAC 的粘结强度预测问题, 结合参考文献中已提出的模型, 建立适用于 FRP 与 FCASS-CSAC

的粘结强度经验公式。本粘结强度经验公式选用可通过线性项 $100d/L$ 强调短粘结长度的敏感性, 通过线性叠加 c/d 和 d/L 体现多因素耦合, 且公式以 $0.083\sqrt{f'_c}$ 为基准, 规避了其他模型直接关联 τ_u 和 $\sqrt{f'_c}$, 从而可能导致不同混凝土强度下的归一化误差问题。以美国规范 ACI-440.1R-15^[41]中粘结强度式(2)为基础, 筋材直径 d 为 10 mm, 并假设保护层厚度 c 为 75 mm^[42], 由此可推导得到式(3), 其中 a 、 b 为待拟合参数。将混凝土强度 f'_c 、粘结长度 L 和极限粘结应力 τ_u 代入进行求解 a 、 b 以优化经验公式, 可得到 BFRP 和 GFRP 筋与 FCASS-CSAC 粘结强度的经验式(4)。图 6 给出了式(2)和式(4)的计算值与试验值的相关度离散性对比。可以发现, 在式(2)在优化经验公式后, 计算值与实验值之间的相关离散程度显著降低, 这强有力地表明优化后的经验公式极大地提升了预测精度。相较于传统的普通硅



(a) Correlation between the calculated value of Eq. (2) and testing data

(b) Correlation between the optimized calculated value and testing data

图 6 粘结强度优化前后相关度对比分析

Fig. 6 Comparison analysis of correlation before and after optimization of bonding strength

酸盐水泥混凝土与钢筋或 FRP 筋之间的经验公式, 考虑粘结长度影响的粘结强度计算公式的预测结果与实际实验数值的吻合度更高。

$$\frac{\tau_u}{0.083\sqrt{f'_c}} = 4.0 + 0.3\frac{c}{d} + 100\frac{d}{L} \quad (2)$$

$$\frac{\tau_u}{\sqrt{f'_c}} = a + \frac{b}{L} \quad (3)$$

$$\text{BFRP 筋: } \frac{\tau_u}{\sqrt{f'_c}} = 0.44 + \frac{81}{L} \quad (4)$$

$$\text{GFRP 筋: } \frac{\tau_u}{\sqrt{f'_c}} = 0.26 + \frac{62.17}{L}$$

3 数值模拟

3.1 有限元模型的建立

采用 ABAQUS 有限元软件, 建立 FRP 筋与 FCASS-CSAC 中心拉拔试件的三维非线性粘结滑移有限元仿真模型(见图 7), 并采用双线型粘结接触行为关系模拟 FRP 筋与混凝土之间的粘结界面问题^[27]。该模型假设粘结滑移为弹性行为, 随后考虑损伤的开始与演变, 其中弹性行为依据文献[43]给出的本构矩阵。此外, 该模型还在筋材与混凝土粘结段设置了通用接触, 定义摩擦系数为 0.3, 并据此绑定 PVC 管和混凝土之间的接触面。基于本试验及相关文献确定材料相应参数, 其中 BFRP 和 GFRP 筋密度分别设置为 1.8 g/cm^3 和 1.5 g/cm^3 及泊松比分别为 0.25 和 0.35 的理想弹塑性模型, 混凝土基体的材料密度设为 2.4 g/cm^3 , 杨氏模量设为 33.48 GPa, 泊松比设为 0.2, 抗拉强度取抗压强度的 1/15, PVC 管材的密度设为 2 g/cm^3 , 杨氏模量设为 3.6 GPa, 固定刚体材料的密度设为 7.8 g/cm^3 , 杨氏模量设为 200 GPa, 泊松比设为 0.3。当对模型进行网格划分时, 将固定试件的上端刚体和 PVC 管的网格大小分别设为 10 mm 和 5 mm, 混凝土网格设为 2.5 mm, FRP 筋材的网格设为 3.75 mm。鉴于 ABAQUS/Explicit 在分析复杂问题时计算成本小且不需要考虑收敛问题, 因此采用“动力显式”分析步, 并设定为非线性类型。分析步的时间设定为 0.1s, 时间增量设为 1×10^{-7} 。模块中需输入 FCASS-CSAC 的受压行为和拉伸行为等损伤模型参数信息, 其中膨胀角 φ 取 40° , 流动势偏移量 Δs 取 0.1, 双轴抗压强度比取 1.16。如图 7b 所示, 对刚体单元设置完全固定, 并将 FRP 筋单元设置为 1 mm/min 的 Y 方向位移, 使其在试件中心只沿 Y 方向抽离。以粘结长度为 75 mm 试件为例, 经过有限元模拟可以看到

FRP 筋材其粘结段与受力端为主要受力区。

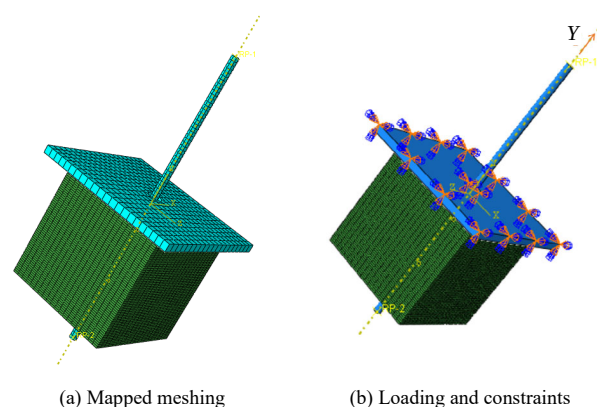


图 7 中心拉拔试件的有限元模型及边界条件设置

Fig. 7 Finite element model of central pull-out specimens and boundary condition settings

3.2 模型验证

图 8 和图 9 分别为不同粘结长度(5d、7.5d 和 10d)对 BFRP 和 GFRP 筋与 FCASS-CSAC 之间的粘结滑移性能有限元模拟结果, 其中图左侧为混凝土基体与 FRP 筋单元的应力分布。从图中可见, 粘结应力主要集中在 2 种材料的接触区域, 并且这一应力会随着向混凝土远离接触区方向逐渐扩散而减弱, 混凝土内部的挤压效应导致周围区域产生了约束应力, 这也是混凝土基体在拉拔试验中被破坏的原因之一。同样, FRP 筋所承受的最大应力也出现在其与混凝土的粘结区域内, 并且偏向下方自由端, 这是由于随着筋材的滑移其极限应力区进入最佳受力区导致。图右侧为模拟结果与试验结果的粘结滑移应力应变曲线。模拟结果显示随着粘结长度的增加粘结应力逐渐减小, 且极限粘结应力对应的位移距离逐渐减小。由于接触面积增大, 应力传递更均匀, 模拟与实验曲线均显示粘结长度越长, 上升段斜率增大的趋势, 且随着滑移的进行, GFRP 筋材由于自身材料特性使其粘结强度相较于 BFRP 的粘结曲线斜率缓慢降低。由于 FRP 与混凝土之间的摩擦系数和界面刚度参数等采用了经验值, 同时可能未完全模拟如微裂纹扩展等复杂的损伤演化过程, 这进而导致了上升段斜率或峰值应力与实际情况存在一定的偏差。模拟曲线的峰值位移出现了随着粘结长度的增加逐渐减小的趋势, 但趋势并不明显。其中粘结长度为 5d 的 BFRP 筋极限粘结应力偏差最大相差 13%, 其余模拟数值偏差均在 10% 以内, 而极限粘结应力对应的位移值误差均在 8% 以内, 数值模拟与试验结果匹配度较高, 尤其在上升段模拟曲线极其精准的预测到试验结果的发展。

虽然随着误差的不断叠加, BFRP 材料极限应力的模拟值滞后于试验值, GFRP 材料极限应力的模拟值提前于试验值, 但 FRP 筋全珊瑚骨料混凝土构件的极限拉拔承载力和峰值荷载滑移量的模拟误差均在合理区间内, 有效验证了有限元分析参数及模型对构件粘结性能的准确模拟能力。

为了进一步验证模型的有效性 with 适用性, 以粘结长度为 $7.5d$ 的 BFRP 筋为例, 开展了加载速度和混凝土强度对其粘结性能的影响研究。对比分析了不同加载速率(1, 2 mm/min 和 3 mm/min)的粘结滑移曲线

与试验结果, 如图 10a 所示。可以看出, 加载速度为 2 mm/min 和 3mm/min 的极限粘结强度为 9.157 MPa 和 9.259 MPa, 相较于加载速度为 1 mm/min 极限粘结强度分别提升了 1.7%和 2.9%。与其他文献中加载速度对粘结性能影响范围较为接近^[24]。进一步选取将文献中^[44]直径为 10 mm、粘结长度为 $7.5d$ 、抗压强度为 60 MPa 的 GFRP-普通骨料硫铝酸盐混凝土的试件建立有限元模型, 对比结果如图 10b 所示, 极限粘结强度为 19.35 MPa, 与文中实测值 18.6 MPa 偏差仅有 4%。这说明本工作所建立的模型具有一定普适性。

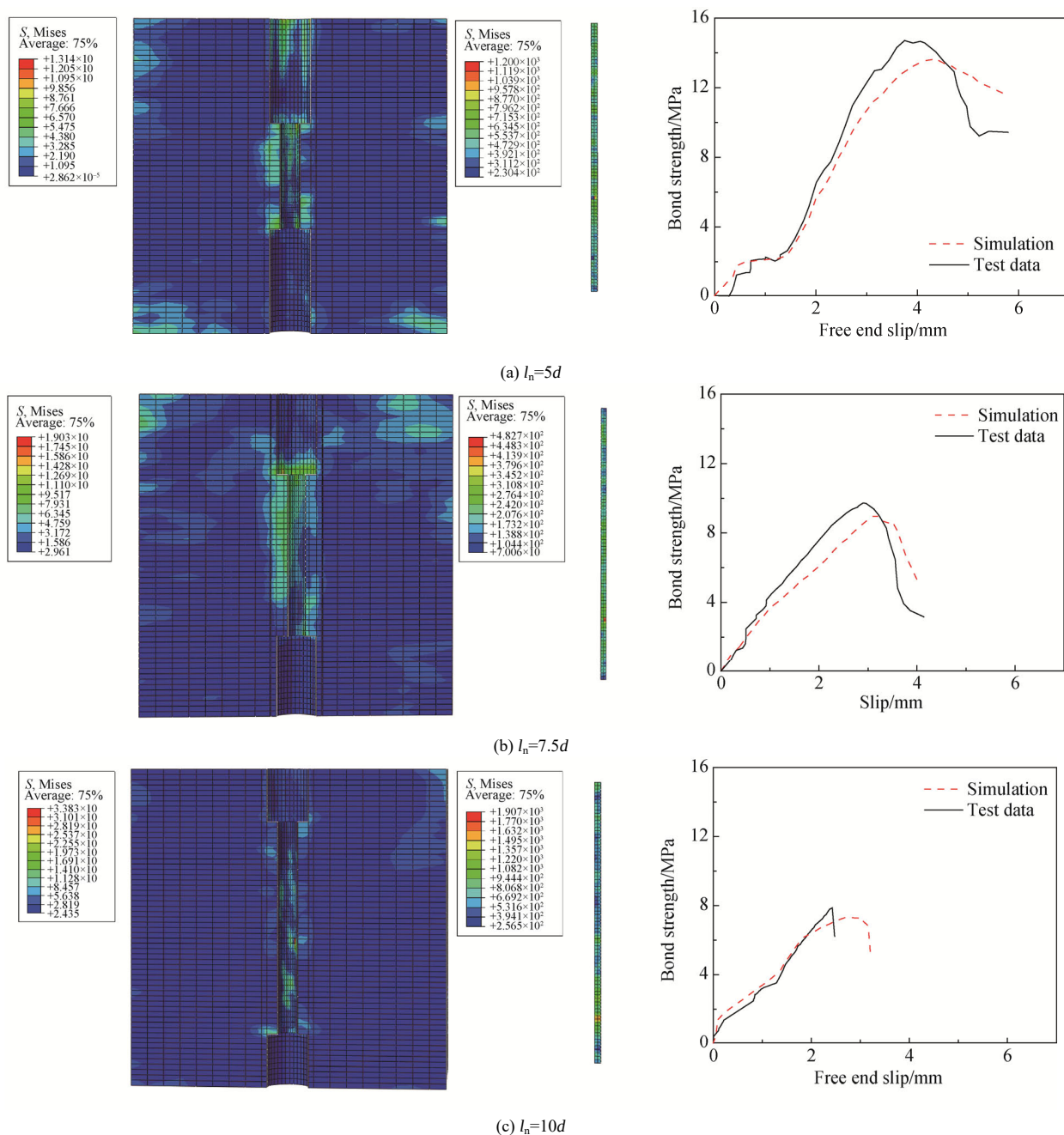


图 8 BFRP 筋与 FCASS-CSAC 粘结滑移的有限元模拟分析

Fig. 8 Finite element simulation analysis of bond-slip properties between BFRP bars and FCASS-CSAC

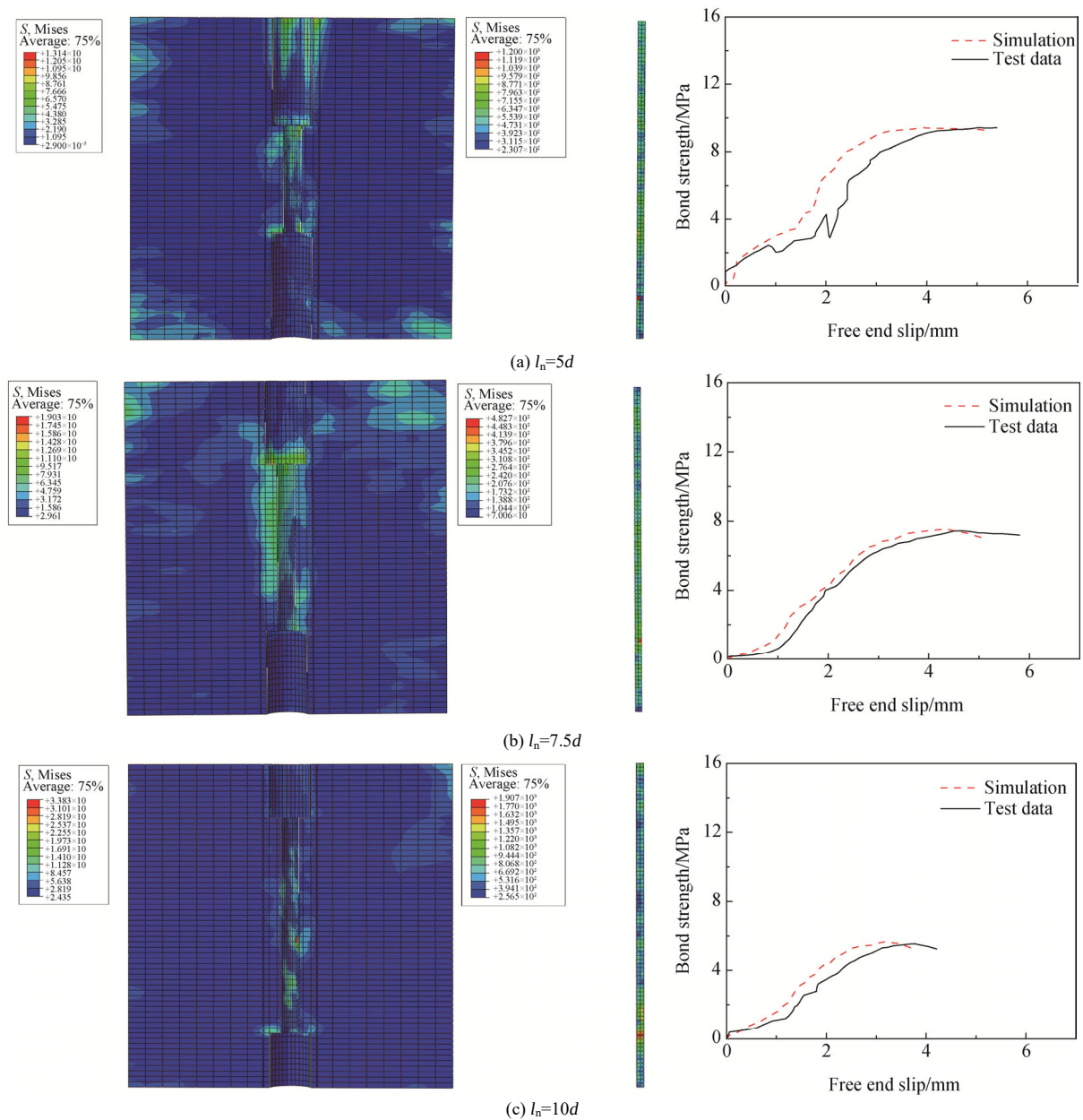


图9 GFRP筋与FCASS-CSAC粘结滑移的有限元模拟分析

Fig. 9 Finite element simulation analysis of bond-slip properties between GFRP bars and FCASS-CSAC

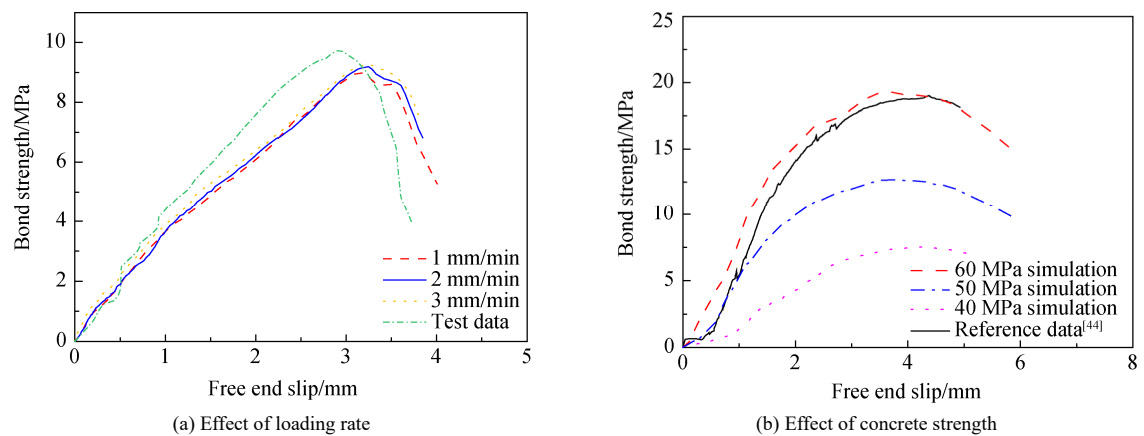


图10 加载速率与混凝土强度影响的有限元分析

Fig. 10 Finite element simulation analysis on effect of loading rate and concrete strength

4 结论

1) BFRP 筋与 FCASS-CSAC 的粘结性能普遍优于 GFRP 筋, 其粘结强度总体比 GFRP 筋高约 40%; BFRP 和 GFRP 筋材的粘结强度随着粘结长度的增加而减小, 粘结长度为 $5d$ 的 BFRP 筋体系粘结强度比 $7.5d$ 和 $10d$ 的分别高约 30% 和 60%。

2) 在已有的粘结强度预测公式基础上, 结合试验结果, 提出了更适用于 FRP 筋与 FCASS-CSAC 的粘结强度预测经验公式。

3) 开展了不同粘结长度条件下 FRP 筋增强体系的粘结性能有限元仿真分析, 粘结-滑移曲线的预测结果与试验结果吻合较好; 进一步分析了不同加载速度与混凝土强度对其粘结性能的影响, 表明所建立的粘结滑移有限元模型的普适性。

参考文献:

- [1] SU X, YIN S P, ZHAO Y D, et al. Experimental study on bond behavior between BFRP bars and seawater sea-sand concrete[J]. J Cent South Univ, 2021, 28(7): 2193–2205.
- [2] ZHOU R, ZHOU F, DU Y X, et al. Effect of seawater on bond performance between BFRP bars and seawater sea-sand concrete[J]. Constr Build Mater, 2024, 415: 135050.
- [3] 张路, 牛获涛, 文波, 等. 改性珊瑚骨料混凝土中钢筋的腐蚀行为[J]. 材料导报, 2022, 36(6): 98–104.
ZHANG Lu, NIU Ditao, WEN Bo, et al. Mater Rep, 2022, 36(6): 98–104.
- [4] 兰明章, 王浩, 陈智丰, 等. 高贝利特硫铝酸盐水泥改性白水泥的物理力学性能与水化作用[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(10): 3345–3351.
LAN Mingzhang, WANG Hao, CHEN Zhifeng, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2021, 40(10): 3345–3351.
- [5] 赵军, 蔡高创, 高丹盈. 硫铝酸盐水泥混凝土抗氯离子侵蚀机理分析[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 357–361.
ZHAO Jun, CAI Gaochuang, GAO Danying. J Build Mater, 2011, 14(3): 357–361.
- [6] WANG X P, SHUI Z H, YU R, et al. Effect of coral filler on the hydration and properties of calcium sulfoaluminate cement based materials[J]. Constr Build Mater, 2017, 150: 459–466.
- [7] WANG P, WU H L, KE L Y W, et al. Mechanical and long-term durability prediction of GFRP rebars with the adoption of low-pH CSA concrete[J]. Constr Build Mater, 2022, 346: 128444.
- [8] 徐新生, 张宁, 郑永峰. FRP 筋与混凝土粘结性能的试验研究及数值模拟[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(5): 25–30.
XU Xinsheng, ZHANG Ning, ZHENG Yongfeng. Hi Tech Fiber Appl, 2008, 33(5): 25–30.
- [9] 张卫东, 王振波, 孙文彬. FRP 筋与混凝土粘结性能研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(9): 99–103.
ZHANG Weidong, WANG Zhenbo, SUN Wenbin. Fiber Reinf Plast, 2015(9): 99–103.
- [10] 胡曙光. 硫铝酸盐水泥及其在海洋工程中的应用[C]//中国工程院化工、冶金与材料工程第十届学术会议, 福建省福州市, 2014.
- [11] KAZEMI H, YEKRANGNIA M, SHAKIBA M, et al. Bond-slip behaviour between GFRP/steel bars and seawater concrete after exposure to environmental conditions[J]. Eng Struct, 2022, 268: 114796.
- [12] SOLYOM S, BALÁZS G L. Bond of FRP bars with different surface characteristics[J]. Constr Build Mater, 2020, 264: 119839.
- [13] WANG L, MAO Y D, LV H B, et al. Bond properties between FRP bars and coral concrete under seawater conditions at 30, 60, and 80 °C[J]. Constr Build Mater, 2018, 162: 442–449.
- [14] YANG S T, YANG C, HUANG M L, et al. Study on bond performance between FRP bars and seawater coral aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 173: 272–288.
- [15] ZHANG B, CHENG Y Z, ZHU H. Bond performance between BFRP bars and alkali-activated seawater coral aggregate concrete[J]. Eng Struct, 2023, 279: 115596.
- [16] HUSSAIN S, KHAN M Z N, KHAN H A. Bond performance of basalt FRP bar against aggressive environment in high-strength concrete with varying bar diameter and bond length[J]. Constr Build Mater, 2022, 349: 128779.
- [17] KANG S B, WANG S, LONG X, et al. Investigation of dynamic bond-slip behaviour of reinforcing bars in concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 262: 120824.
- [18] WU Y F, ZHAO X M. Unified bond stress-slip model for reinforced concrete[J]. J Struct Eng, 2013, 139(11): 1951–1962.
- [19] 中国建筑科学研究院有限公司. T/CECS 10090—2020 混凝土用珊瑚骨料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [20] CHU Y J, WANG A G, ZHU Y C, et al. Enhancing the performance of basic magnesium sulfate cement-based coral aggregate concrete through gradient composite design technology[J]. Compos Part B Eng, 2021, 227: 109382.
- [21] QIN Q L, MENG Q S, YANG H M, et al. Study of the anti-abrasion performance and mechanism of coral reef sand concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 291: 123263.
- [22] ACI-440.3R. Guide test methods for fibre-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures[S]. Farmington Hills, MI: ACI Committee 440, 2012.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50608—2020 纤维增强复合材料工程应用技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [24] 袁鹏, 陈万祥, 郭志昆, 等. 中低加载速率下 BFRP 筋-混凝土粘结性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(5): 131–142.
YUAN Peng, CHEN Wanxiang, GUO Zhikun, et al. Eng Mech, 2021, 38(5): 131–142.
- [25] 孔令艳, 刘树昌, 鲍玖文, 等. FRP 筋与海水海砂混凝土界面粘结性能研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(1): 147–157.
KONG Lingyan, LIU Shuchang, BAO Jiuwen, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2024, 43(1): 147–157.
- [26] 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, 2022, 43(6): 245–256.
- [27] 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 Yushan, YIN Shiping, LIU Yunchao. Acta Mater Compos Sin, 2022, 39(8): 3950–3964.
- [28] 白晟渝. FRP 筋-再生混凝土粘结性能试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
BAI Shengyu. Experimental study on bond performance between FRP bars and recycled concrete[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University,

- 2023.
- [29] 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 Qiyan. J Archit Civ Eng, 2020, 37(5): 113–123.
- [30] 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.
- [31] 王磊, 李威, 陈爽, 等. 海水浸泡对 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3458–3465.
- WANG Lei, LI Wei, CHEN Shuang, et al. Acta Mater Compos Sin, 2018, 35(12): 3458–3465.
- [32] 周书澎, 刘泽平, 区庆佑, 等. 混杂纤维对硫酸盐水泥基 ECC 材料性能的影响[J/OL]. 材料导报, 2024: 1–14. (2024–04–10). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240408.1548.004.html>.
- ZHOU Shupeng, LIU Zeping, OU Qingyou, et al. China Ind Econ, 2024: 1–14. (2024–04–10). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240408.1548.004.html>.
- [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 Zhili. Study on durability of interface bonding between FRP bars and seawater sand concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [34] DONG Z Q, WU G, XU B, et al. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction[J]. Mater Des, 2016, 92: 552–562.
- [35] 高丹盈, 朱海堂, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋混凝土粘结滑移本构模型[J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 41–43.
- GAO Danying, ZHU Haitang, XIE Jingjing. Ind Constr, 2003, 33(7): 41–43.
- [36] 张望喜, 胡彬彬, 王冠杰, 等. FRP 筋与混凝土粘结性能研究进展及本构模型改进[J]. 土木与环境工程学报, 2023, 45(2): 111–122.
- ZHANG Wangxi, HU Binbin, WANG Guanjie, et al. J Civ Environ Eng, 2023, 45(2): 111–122.
- [37] 崔玮菲, 屈士皓, 张鹏. 海水海砂碱激发混凝土与 FRP 筋的粘结性能[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 2750–2762.
- CUI Yifei, QU Shihao, ZHANG Peng. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(11): 2750–2762.
- [38] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- LU Xinzheng. Study on interface behavior of FRP- concrete [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [39] 李磊, 王卓涵, 张艺欣, 等. 混凝土结构中考虑滑移效应的钢筋本构模型研究[J]. 工程力学, 2020, 37(3): 88–97.
- LI Lei, WANG Zhuohan, ZHANG Yixin, et al. Eng Mech, 2020, 37(3): 88–97.
- [40] CHEN J F, TENG J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete[J]. J Struct Eng, 2001, 127(7): 784–791.
- [41] ACI-440.1R-15. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars[S]. Farmington Hills, MI: ACI Committee, 2015.
- [42] TEKLE B H, KHENNANE A, KAYALI O. Bond properties of sand-coated GFRP bars with fly ash-based geopolymer concrete[J]. J Compos Constr, 2016, 20(5): 04016025.
- [43] 李路路. CFRP 筋与混凝土粘结性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- LI Lulu. Study on bond performance between CFRP bars and concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [44] 孔令艳. 海洋环境下 FRP 筋增强硫酸盐水泥混凝土时变性能退化规律研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024.
- KONG Lingyan. Study on the time-varying performance degradation law of FRP-reinforced sulphoaluminate cement concrete in marine environment [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2024.

Bonding Performance Between Fiber Reinforced Polymer Bars and Full Coral Aggregate Seawater Sea–Sand Sulphoaluminate Cement Concrete

BAO Jiuwen¹, SHAN Lianfei¹, LIU Peng², LI Ran¹, SUN Jianwei¹, CUI Yifei¹

(1. Engineering Research Center of Concrete Technology under Marine Environment, Ministry of Education, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Extended Abstract

Introduction In marine environments, the conventional steel reinforcement is prone to corrosion, leading to severe damage to concrete. Additionally, the deficiencies of ordinary concrete in terms of resistance to marine corrosion and impermeability significantly shorten the service life of marine concrete structures, which has attracted widespread attention. To enhance the durability of marine concrete, researchers are actively exploring new solutions. Among these, the use of FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforcement to replace traditional steel bars effectively addresses the issue of steel corrosion. Calcium sulfoaluminate (CSA) cement concrete, with its characteristics of early strength, high strength, corrosion resistance, and excellent impermeability, is particularly suitable for marine concrete structures that require high early-strength and durability. Based on this, the present study investigates the specific impact of different bond lengths of GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) and BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) reinforcement on the bonding performance of the FRP-CSA full-coral aggregate concrete system.

Methods This study investigated the influence of different bond lengths of FRP bars in full coral aggregate seawater sea-sand sulphoaluminate cement concrete (FCASS-CSAC) on the bond properties. This study used two different types of bars (GFRP and BFRP) and three different bond lengths (5 d , 7.5 d , 10 d , where d represents the diameter of the bars) to cross combine into 6 different types of specimens. All specimens were demolded after 24 h treatment and cured for 28 d in a standard curing chamber (temperature of (20±2) °C, relative humidity of 95%). Subsequently, compressive strength tests and central pull-out tests were conducted to

investigate the bond performance between FCASS-CSAC and FRP bars.

Results and discussion When the bond length of BFRP and GFRP reinforcement bars is $5d$, the bond stress is generally higher than when the bond length is $7.5d$ or $10d$. Specifically, for BFRP bars, the bond strength at a bond length of $5d$ is approximately 30% and 60% higher than that at bond lengths of $7.5d$ and $10d$, respectively. The bonding performance of BFRP and GFRP reinforcement bars was compared, and the results show that, in the absence of ribbed features, BFRP reinforcement typically exhibits superior bonding performance, with the bond strength generally about 40% higher than that of GFRP bars. This suggests that BFRP reinforcement has a potential advantage in providing stronger bond strength, which may be related to its material properties and the way it interacts with the matrix.

Conclusions The main conclusions of this study are summarized as follows. The bonding performance of BFRP reinforcement with FCASS-CSAC is generally superior to that of GFRP reinforcement, with an overall bond strength about 40% higher. The bond strength of both types of reinforcement decreases as the bond length increases, with BFRP reinforcement showing a significantly higher bond strength at a bond length of $5d$ compared to $7.5d$ and $10d$. Based on the experimental results, an empirical formula for predicting bond strength was proposed. Furthermore, finite element simulation analysis was conducted, and the analysis results showed good agreement with the experimental findings.

Keywords sulfoaluminate cement; coral aggregate; seawater sea-sand concrete; bonding performance