

碱激发胶凝材料混凝土与纤维增强聚合物筋黏结性能研究进展

崔祎菲, 张益聪, 王 治, 徐 诺, 鲍玖文

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266525)

摘 要: 碱激发胶凝材料混凝土是近年来兴起的一种新型“零水泥”胶凝材料。它通过高效利用工业固废, 显著降低了对自然资源的需求, 因而展现出替代传统普通混凝土的巨大潜力。此外, 纤维增强聚合物(FRP)筋的使用有效解决了海洋环境下侵蚀离子带来的钢筋锈蚀问题。为探究碱激发胶凝材料混凝土与 FRP 筋的黏结性能, 主要总结了混凝土抗压强度、FRP 筋类型、黏结长度、耐久性能等因素对其黏结性能影响的研究现状, 并提出了目前研究存在的不足, 还归纳了已有黏结强度预测模型和黏结滑移本构模型, 旨在为碱激发胶凝材料混凝土与 FRP 筋界面黏结性能研究和工程应用提供参考。

关键词: 碱激发胶凝材料混凝土; 纤维增强聚合物筋; 黏结性能; 本构模型; 强度预测

中图分类号: TU528.7 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)10-3769-13

网络出版时间: 2026-07-10



近年来, 随着我国新兴海洋产业的蓬勃发展以及岛礁基础设施建设的不断推进, 海洋工程对建筑材料的需求日益增长^[1]。然而, 普通混凝土(OPC)所依赖的水泥在生产过程中消耗大量自然资源与能源, 同时伴随显著的粉尘及温室气体排放问题^[2]。为此, 研究者开始探索以工业固废为主要胶凝组分的碱激发胶凝材料混凝土(AAC)作为替代方案。AAC 作为一种新型绿色建筑材料, 凭借其卓越的抗侵蚀、抗冻融和耐高温等性能, 已引起中国内外学者的广泛关注^[3]。在海洋工程中, 往往存在混凝土中钢筋锈蚀导致建筑结构强度下降的问题。为此, 人们考虑采用一种耐腐蚀性强的筋材来取代钢筋。纤维增强聚合物(FRP)筋材作为一种新型复合材料, 具有质量轻、抗拉强度高、可设计性强和耐腐蚀性优异等特点, 可有效避免海洋环境中侵蚀性离子所引起的钢筋锈蚀问题^[4]。目前, 应用于混凝土的 FRP 筋主要有玻璃纤维增强聚合物(GFRP)、碳纤维增强聚合物(CFRP)、玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)以及芳纶纤维增强聚合物(AFRP)等筋材^[5]。

FRP 筋-混凝土结构的强度和稳定性主要取决

于混凝土与 FRP 筋之间的黏结强度。由于 FRP 筋与钢筋、OPC 与 AAC 的物理性质和力学性质差异较大, 因此不能直接将钢筋与 OPC 的黏结理论应用于 FRP 筋与 AAC 结构, 有必要明确 FRP 筋与 AAC 基体界面的黏结机理并开展深入研究。基于此, 从试验方法、黏结机理、AAC 基本性能、AAC 与 FRP 筋黏结影响因素及其相关模型 5 个方面对目前中国内外的研究成果进行总结与分析, 旨在为海洋环境下 FRP 筋增强 AAC 耐久性劣化机理研究提供参考。

1 FRP 筋-碱激发胶凝材料混凝土黏结性能表征分析

1.1 试验方法

FRP 筋-碱激发胶凝材料混凝土黏结性能试验方法通常采用与 FRP 筋-普通混凝土的相同。目前, 研究人员主要采用拔出试验^[6-7]、梁式试验^[8-9]和半梁试验^[10-11] 3 种试验方法明晰 FRP 筋-混凝土界面的黏结性能, 如表 1 所示。通过将 FRP 筋直接从混凝土立方体或圆柱中拔出, 可按照式(1)对 FRP 筋与混凝土的黏结性能进行计算与评估, 该方法已被大

收稿日期: 2025-09-29。 修订日期: 2025-10-22。

基金项目: 国家自然科学基金(U22A20244); 山东省“泰山学者”青年专家项目(tsqn202408223)。

第一作者: 崔祎菲(1986—), 女, 博士, 副教授。

通信作者: 鲍玖文(1989—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-09-29. Revised date: 2025-10-22.

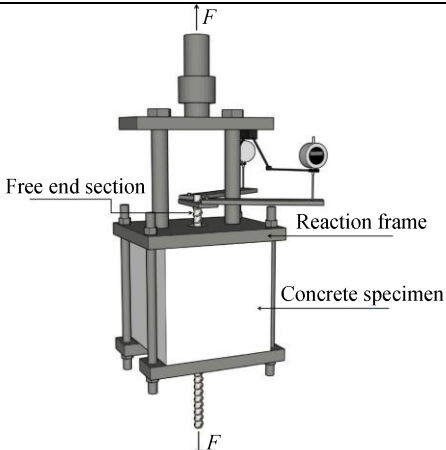
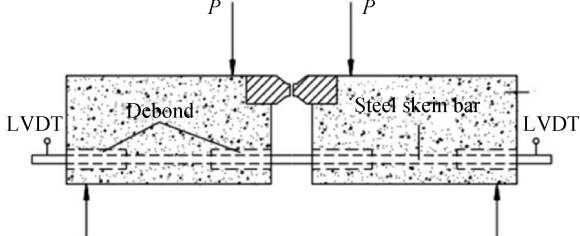
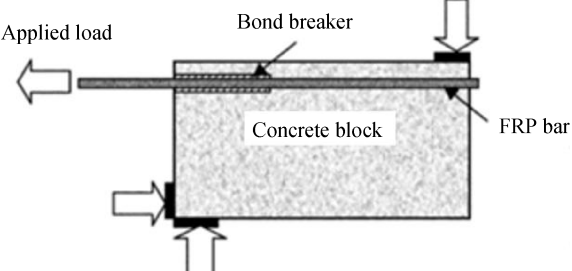
First author: CUI Yifei (1986—), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: cuiyifei@126.com

Correspondent author: BAO Jiuwen (1989—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: baojiuwen@qut.edu.cn

表 1 黏结性能试验方法对比^[13]
Table 1 Comparison of bond performance test methods^[13]

Test method	Schematic diagram	Characteristics
Pull-out test ^[6-7]		Advantage: Simple operation, low cost; clear presentation of pull-out curve. Disadvantage: Inconsistent with actual working stress; large difference from real bonding, limited practicability
Beam test ^[8-9]		Advantage: Relatively accurate simulation of FRP bars' actual bonding in concrete. Disadvantage: Large specimen size, complex operation, high cost
Half-beam test ^[10-11]		Advantage: Small specimen size; focus on single-side tension zone interface behavior, avoid complex stress interference in beam test. Disadvantage: Lack of unified design and loading standards; poor comparability of test results

量运用在 AAC 与 FRP 筋黏结的试验当中^[12]。

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

式中: τ 为黏结应力, MPa; P 为拉拔力, N; d_b 为 FRP 筋的直径, mm; l_d 为黏结长度, mm。

1.2 黏结破坏机理

与钢筋-混凝土的黏结力组成相似, FRP 筋与混凝土的黏结力也主要由三部分组成: 1) 混凝土中胶凝材料与 FRP 筋表面形成的化学胶结力; 2) 混凝土凝结硬化产生收缩或 FRP 筋受热膨胀后, 二者在相互接触的粗糙表面上发生相对滑移而产生的摩擦力; 3) 由于 FRP 筋表面形貌凹凸不平与混凝土产生的机械咬合力。需要注意的是, 机械咬合力仅出现在带肋 FRP 筋与混凝土的黏结当中。三部分作用力通过混凝土接触表面上的压应力和剪应力实现平衡, 如图 1 所示。

在拔出的各个阶段, 三种黏结力起到了不同的

作用。在初始阶段时, 两种材料之间无相对滑移, 化学胶结力发挥作用, 一旦二者产生滑移便会立即消失。在滑移阶段, 黏结力主要由摩擦力和机械咬合力组成, 混凝土对 FRP 筋肋的挤压合力分解为垂直方向上的径向压力和水平方向上的黏结力。滑移所产生的摩擦力主要取决于 FRP 筋表面粗糙程度和混凝土硬化收缩对筋产生的径向压力。机械咬合力则主要取决于 FRP 筋表面形貌和黏结界面混凝土的抗剪强度。

然而, FRP 筋和钢筋之间材料形貌、性质的差异, 导致二者与混凝土之间的力传递机制也存在不同。钢筋是一种各向同性、均质的弹塑性材料, 其抗拉强度和弹性模量与 FRP 筋相比较低。对于工程中常用的带肋变形钢筋, 其自身较高、较硬的肋在嵌入混凝土基体后在筋肋周围形成致密的“咬合区”, 抑制滑移的同时产生了较大的机械咬合力^[14]。这也导致其黏结应力主要分布在筋肋附近。随着滑

移量的增加, 肋前混凝土不断被挤压破坏。在混凝土咬合齿被完全剪断后, 黏结力转而由钢筋外围混凝土的摩擦阻力提供, 此时黏结强度稳定于一个固定的值。而 FRP 筋是一种各向异性、非均质的线弹性材料, 其肋主要由环氧树脂、纤维或砂涂层组成, 不均匀的组分导致 FRP 筋表面抗剪强度较低, 使得其与混凝土的黏结性能欠佳。目前常见的 FRP 筋表面处理方式有光滑式、喷砂式、螺旋缠绕式和开槽式。光滑式 FRP 筋的黏结力主要为化学胶结力, 与混凝土之间的黏结强度相对较低。喷砂式 FRP 筋表面砂砾尺寸较小, 黏结力以化学胶结力和摩擦力为主^[15]。当混凝土抗剪强度相对较小时, 拔出损伤出现在砂层与混凝土的剪切界面上; 当 FRP 筋表面树脂抗剪强度相对较小时, 拔出损伤则发生在砂层与树脂之间的剪切界面上^[16]。喷砂式 FRP 筋相对均质的黏结界面使得其黏结应力分布也更加均匀。螺旋缠绕式和开槽式 FRP 筋均具有相对较低的肋高, 黏结应力主要由摩擦力和机械咬合力提供。但由于与钢筋相比, 其肋的深度较浅、强度较低, 随着滑移的增加, 黏结段筋肋发生剪切破坏。而非黏结段完好的筋材逐渐滑入黏结段, 使得筋肋与黏结界面混凝土反复挤压-破坏-再挤压, 导致黏结应力反复升降, 在黏结滑移曲线上形成了波浪式的残余段。Subramanian 等^[17]对比了钢筋和 FRP 筋与 AAC 的黏结强度发现, 同样条件下螺纹 FRP 筋试件的黏结强度相较带肋钢筋低 30%~50%。但值得注意的是, 目前大部分对 FRP 筋与混凝土黏结性能方面的研究都采用的是带肋 FRP 筋, 所以二者间黏结性能相关的机理并未得到清晰的解释。

FRP 筋与混凝土结构的黏结失效模式如图 2 所示, 主要包括: 1) 混凝土劈裂破坏。这主要是由于

筋与混凝土的黏结长度较长时, 随着纵向拉力的增加, 筋肋与混凝土逐渐发生挤压, 使得混凝土内部压力增大, 整体处于环向受拉状态。当这种拉应力大于混凝土的抗拉强度时, 混凝土内部发生开裂。如混凝土保护层较薄, 内部裂纹则会向表面发展, 最终导致混凝土发生劈裂破坏。2) FRP 筋劈裂破坏。当混凝土强度较高且筋与混凝土黏结较好时, 加载端 FRP 筋抗拉强度低于黏结强度。在施加到极限荷载时, FRP 筋就会发生突然地断裂。3) FRP 筋拔出破坏。当混凝土的保护层足够厚时, 随着拔出荷载的增加, 如黏结处混凝土强度较低, 则筋肋间混凝土会发生剥离破坏, 随 FRP 筋一起被拔出; 如 FRP 筋肋抗剪强度较低, 则筋受到剪切破坏, 也会导致 FRP 筋被拔出^[18]。

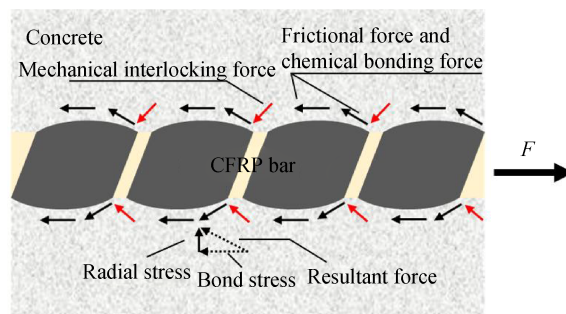


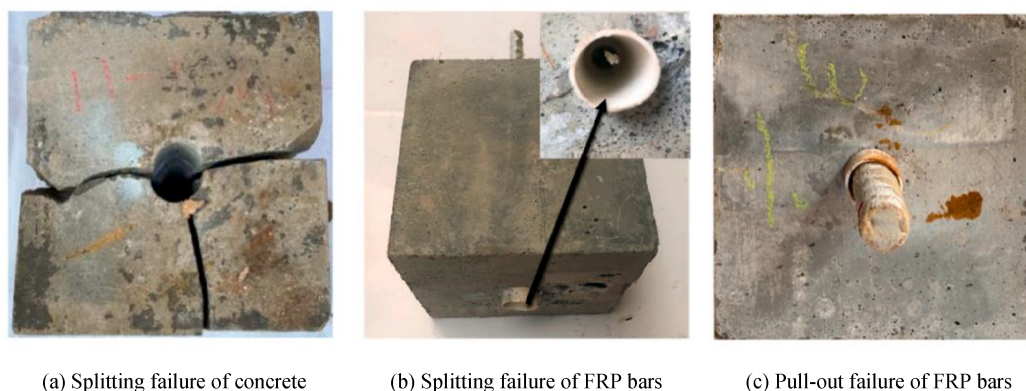
图 1 带肋 FRP 筋与混凝土的黏结力组成^[19]

Fig. 1 Bond stress components of ribbed FRP bar and concrete^[19]

2 碱激发混凝土特性及黏结影响因素

2.1 碱激发混凝土材料特性

AAC 也被称为地聚合物混凝土, 作为一种新型建筑材料, 与 OPC 相比, 其具有更致密的微观结构、较高的早期强度、优异的耐化学侵蚀和耐高温性能^[21]。它是以具有火山灰性质或潜在水硬性的非晶态硅铝酸盐为原料, 与碱激发剂发生地聚合反应



(a) Splitting failure of concrete

(b) Splitting failure of FRP bars

(c) Pull-out failure of FRP bars

图 2 不同的黏结破坏形态^[20]

Fig. 2 Different bond failure modes^[20]

后得到的一种水硬性胶凝材料(AAM)制成的混凝土。其中,常用的碱激发剂有氢氧化钠(NaOH)、水玻璃($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$)和碳酸钠(Na_2CO_3)等^[22]。相比于硅酸盐水泥,AAM 具有凝结硬化快、强度高、耐高温等特性^[23]。此外,AAM 因其多样的前驱体而具备不同的反应机理和力学特性^[24]。根据钙含量的不同,AAM 的前驱体可以分为高钙体系(如矿渣)和低钙体系(如粉煤灰)。高钙体系的主要水化产物为链状的水化硅铝酸钙(C-A-S-H)或水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,而低钙体系的主要水化产物为三维网状结构的水化硅铝酸钠(N-A-S-H)凝胶。随着钙含量的提高,N-A-S-H 凝胶会逐渐转变为 C-A-S-H 凝胶,体系孔隙率降低,AAC 的力学性能随之提高^[25]。近年来,有研究表明 AAC 与筋材的黏结性能优于 OPC^[26]。为了实现 AAC 更广泛的应用,需要系统地综述 FRP 筋增强 AAC 受不同因素影响下的黏结情况。

2.2 FRP 筋-AAC 黏结性能的影响因素分析

2.2.1 混凝土抗压强度和孔隙率的影响

已有大量研究表明,混凝土抗压强度对 FRP 筋黏结强度有显著影响^[27–30],两者关系如图 3 所示,同样在 AAC 体系中也发现这种规律。在混凝土抗压强度较低时,随着抗压强度的增加,黏结强度也随之增加。但当混凝土强度超过 60 MPa 后,抗压强度对黏结强度的影响显著降低。这主要是由于高强度混凝土抗压强度的提升相较抗拉强度的提升显著降低,而抗拉强度直接影响黏结界面的应力传递。此外,高强度混凝土的密实度已足够高,其内部缺陷对黏结的影响可以忽略,因此 FRP 筋刚度开始成为影响黏结强度的关键变量。Pellegrino 等^[31]提出了 60 MPa 以上的混凝土黏结强度预测公式,该公式中无任何与混凝土强度的相关项,极限黏结强度主要受 FRP 的刚度影响。Zhang 等^[32]通过研究 3 种抗压强度(C40、C50、C60)的碱激发海水海砂混凝土(AASSC)与 FRP 筋的黏结性能发现,随着混凝土抗压强度从 40 MPa 提升至 50 MPa,GFRP 和 BFRP 筋的黏结强度分别增加了大约 15.9%和 12.2%;试件破坏模式发生了从拔出破坏到筋材开裂或断裂的转变。这是因为较高的抗压强度增强了 FRP 筋-混凝土界面的化学黏结和机械咬合力,从而提高了周围混凝土对 FRP 筋的约束。Peng 等^[33]对比了不同强度 AASSC 与 FRP 筋的黏结行为发现,混凝土强度变化影响黏结-滑移曲线的形状和特征。随着混凝土强度的提高,黏结刚度和黏结强度逐渐增加。但当混凝土强度过高时,由于 FRP 筋自身弹性模量低、材

料各向异性导致表面肋或纤维易发生剥落,黏结应力在达到最大值后会急剧下降,使得高强试件的峰值滑移低于较低强度的混凝土试件。由此可见,当混凝土强度较高时,FRP 筋在滑移初期发生断裂破坏,使得试件过早失效,所以只通过提升混凝土强度并不能提高 FRP 筋与混凝土的黏结强度。Lu 等^[34]对比了 AASSC 与碱激发淡水河砂混凝土(AARSC)在海水浸泡下与 FRP 筋的黏结性能。研究发现,采用海水海砂替代淡水河砂后,AASSC 抗压强度提升了 2.3%~7.9%,且对 FRP 筋与混凝土界面黏结强度影响较小。此外,对比 AASSC 和 AARSC 与 FRP 筋界面的黏结-滑移曲线发现,不同种类 FRP 筋与 2 种混凝土的黏结曲线趋势基本一致,均为随着浸泡时间增加,黏结强度呈现先增后减的趋势。由此可见,在 AAC 体系中采用海水海砂代替淡水河砂对黏结的影响较小。Ametrano 等^[35]通过梁式试验和拉拔试验,研究了喷砂 GFRP 筋在高性能混凝土和超高性能混凝土(UHPC)中的黏结性能。研究发现,在梁式试验中混凝土抗压强度对 GFRP 筋黏结强度影响可忽略不计;而在拉拔试验中,混凝土抗压强度增加会使黏结强度显著提高。随着混凝土抗压强度从 71.2 MPa 提升至 174.5 MPa,黏结强度提升幅度达 140.2%~140.3%。这是因为拉拔试验中混凝土处于受压状态,试件自收缩产生的静水压力随抗压强度增加而增大,从而增强了 GFRP 筋与混凝土之间的黏结力。

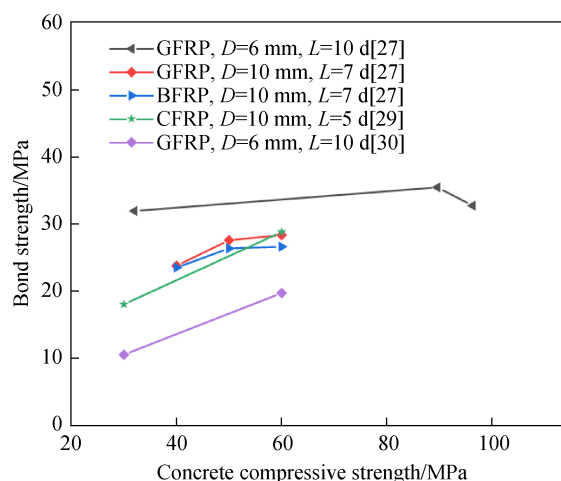


图 3 混凝土抗压强度对黏结强度的影响^[27, 29, 30]

Fig. 3 Influence of concrete compressive strength on bond strength^[27, 29, 30]

除了抗压强度以外,混凝土与 FRP 筋之间的界面过渡区(ITZ)也会对黏结性能产生影响。ITZ 是混

凝土内部的薄弱环节,其孔隙率高于基体混凝土。OPC 与 FRP 筋的 ITZ 主要由水泥水化产物氢氧化钙(CH)和 C-S-H 凝胶组成^[36]。CH 结晶度高、脆性大,与筋材界面结合力弱,且 C-S-H 凝胶孔隙率高,无法完全填充 ITZ 的孔隙,这直接降低了 OPC 与 FRP 筋黏结界面的接触质量。而 AAC 硬化后会在 FRP 筋表面形成一层主要成分为 N-A-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶的 ITZ。这些反应产物附着在筋材表面形成化学胶结力的同时填补了混凝土与筋材之间的孔隙从而提升了摩擦力。此外还有研究表明^[37],反应产物微观结构不同导致的孔隙率的差异是影响黏结强度的核心微观因素。N-A-S-H 凝胶因其自身无序的三维网状结构致使整体结构孔隙率高;而 C-A-S-H 凝胶则体现为致密度高的有序链状结构。Ling 等^[38]对比了纯粉煤灰基和粉煤灰-矿渣基工程地聚合物混凝土(EGC)与筋材的黏结强度发现,随着矿渣掺量的增加,黏结强度逐渐提高。这是由于掺入矿渣后混凝土中 C-A-S-H 凝胶含量提高,致使 ITZ 的孔隙率降低,增加了混凝土与筋材表面的接触面积。在破坏模式方面,孔隙率的降低使混凝土与筋材的界面结合更加紧密,使两者的破坏模式从混凝土劈裂破坏转变为筋材拔出破坏。这种破坏模式的转变表明致密的 ITZ 增加了界面摩擦力,避免了黏结界面因孔隙集中导致的脆性劈裂,提升了黏结的稳定性。

2.2.2 FRP 筋类型的影响 目前,中国内外使用的 FRP 筋材主要为 GFRP、BFRP 和 CFRP 筋^[39-40]。为了解 3 种不同 FRP 筋与 AAC 的黏结强度规律,大量学者对筋材的外形与种类对黏结强度的影响展开了研究。Lu 等^[34]通过拉拔试验研究了在海水浸泡和持续载荷作用下,不同 FRP 筋与 AASSC 之间界面的黏结耐久性能。研究表明,FRP 筋种类对界面结合强度有显著影响。BFRP 筋、GFRP 筋和 CFRP 筋与 AASSC 的黏结强度分别为 11.6、10.6 MPa 和 19.5 MPa,黏结强度由大到小为 CFRP 筋、BFRP 筋、GFRP 筋。这主要是因为 CFRP 筋具有更高的弹性模量,从而产生最大的黏结强度。在经过海水浸泡 180 d 后,3 种 FRP 筋的黏结强度损失情况由大到小依次为 GFRP 筋、BFRP 筋、CFRP 筋。可见 GFRP 筋和 BFRP 筋的黏结耐久性能相似,而 CFRP 筋耐久性能更优。崔祎菲等^[41]通过对比 CFRP 筋与 GFRP 筋在 AASSC 中的黏结情况发现,对于不同强度的混凝土,CFRP 筋相较于 GFRP 筋都表现出较高的黏结强度。主要原因是 CFRP 筋粗糙的表面,

使得界面摩擦力得到了提升,导致极限黏结强度较高。破坏模式方面,相较 CFRP 筋,GFRP 筋混凝土试件更易发生筋断破坏。因为 GFRP 筋的极限抗拉强度远小于 CFRP 筋,在较高的荷载作用下 GFRP 筋更容易被拉断。Zhao 等^[42]对高温对不同表面形貌及种类的 FRP 筋和地聚合物混凝土黏结性能的影响进行了试验研究。研究表明,常温下随着 FRP 筋表面粗糙度的增加,黏结强度提高。其中深肋 BFRP 筋与 AAC 的黏结强度较浅肋和裹砂筋提升了 44.7% 和 6.0%。随着温度升至 250 ℃ 以上,深肋试件的黏结强度保留率最高,浅肋试件次之,裹砂试件最低。这是因为裹砂 BFRP 筋与 AAC 黏结时主要靠摩擦传力,而高温下喷砂层严重脱落,导致摩擦力大幅降低,使得黏结强度保留率明显低于带肋 BFRP 筋。而不同种类的 FRP 筋在高温下与 AAC 的黏结性能变化趋势相似。随着温度升高,BFRP 筋和 GFRP 筋的黏结强度均呈现先增后减的趋势。这表明高温暴露下 FRP 筋种类对黏结性能影响较小。因为 BFRP 筋和 GFRP 筋表面均由环氧树脂包覆,具有相同的玻璃化转变温度和分解温度,在温度升高过程中,树脂的变化相似,所以对黏结性能的影响差异不大。

赵军等^[43]对 51 个 BFRP 筋-AAC 试件进行了中心拉拔试验,研究发现:随着筋直径的增大,筋与混凝土之间的黏结强度降低。这是由于在相同黏结长度下,筋直径增加导致筋与混凝土黏结面积增加,使得混凝土中黏结应力分布愈发不均匀。还有研究表明,FRP 筋的抗剪强度主要取决于树脂的抗剪强度和树脂与纤维界面处的抗剪强度。当大尺寸的 FRP 筋受拉时,内部纤维和表面纤维之间会发生一定位移,导致筋截面上的正应力分布不均匀,即发生“剪切滞后现象”,使得黏结强度降低^[39],如图 4 所示。此外,当 FRP 筋受拉时,由于泊松效应^[44],筋的直径越大黏结段的收缩也就越大,这导致黏结摩擦力和机械咬合力下降,最终使黏结强度降低。从黏结滑移曲线来看,在微滑移阶段,小直径的筋表现出更高的初始黏结刚度^[45]。这主要是由于小直径筋的比表面积更大,单位长度内界面化学胶结力能更好地发挥作用;肋纹密度相对更高,滑移初期即可触发机械咬合机制;周围混凝土的环向约束更均匀,径向应力分布更集中,延缓了黏结界面微裂缝发展,导致初始阶段黏结应力快速上升。而在下降阶段,大直径的筋表现出更陡峭的下降趋势,残余黏结强度较低,这主要是由于大直径筋试件以劈

裂破坏为主,当环向拉应力超过混凝土抗拉强度时,黏结界面裂缝迅速发展并贯通基体,导致机械咬合失效,残余强度仅由开裂混凝土与筋表面的微弱摩擦提供。

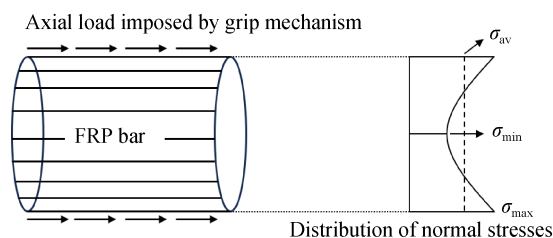


图4 剪切滞后现象^[39]

Fig. 4 Shear lag phenomenon^[39]

2.2.3 黏结长度的影响 FRP 筋与混凝土的黏结长度(l_d)是指 FRP 筋在混凝土中能够有效地传递应力,从而保证两者共同工作所需的长度。图 5 对比了不同直径的 BFRP 筋、GFRP 筋和 CFRP 筋在不同黏结长度下的黏结强度。可以发现,随着 FRP 筋黏结长度的增加,FRP 筋与混凝土界面的黏结强度逐渐降低^[45–49],且这种降低趋势不受筋直径的影响。范小春等^[50]研究了 BFRP 筋与 AAC 的黏结情况:当黏结长度较短($l_d \leq 5d$)时,试件易发生筋拔出破坏;当黏结长度较长($l_d \geq 7.5d$)时,由于试件混凝土基体抗拉强度小于环向拉力导致发生混凝土劈裂破坏,且随着黏结长度的增加,黏结强度逐渐降低。这是由于黏结应力沿黏结长度的分布是非线性的,随着黏结长度增大,黏结应力沿筋材表面分布越不均匀,造成平均黏结应力越来越小。赵军等^[43]也发现了类似的现象,并认为这是由于黏结长度增大,拉拔试件的破坏荷载也随之增加。当黏结应力达到混凝土劈裂抗拉强度时,试件发生劈裂破坏,此时的黏结强度结果并非为真实的最大黏结强度。

2.2.4 耐久性能的影响 由于人们对现代建设寿命的预期越来越高,因此 AAC 与 FRP 筋的黏结耐久性成为人们关注的因素。FRP 筋与混凝土的耐久性失效主要由环境因素和力学荷载所引起。Zhang 等^[51]研究了海水干湿循环和不同温度下 BFRP 筋与 AAC 和 OPC 的黏结耐久性能。结果表明,在 12 个月的干湿循环下 2 种混凝土试件均出现黏结强度退化现象,但 AAC 组试件黏结强度损失较小。还发现随着试验温度的升高,2 种混凝土试件黏结强度显著降低。研究认为,AAC 组更好的黏结耐久性是由于 OPC 的水化产物(Friedel 盐、CH 等)与海水中的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 发生反应生成膨胀性产物引发微裂缝

发展;而 AAC 仅生成致密稳定的 C-A-S-H 凝胶和 N-A-S-H 凝胶,通过阻碍腐蚀离子和 OH^- 向混凝土内部及 BFRP 筋界面渗透,减缓了混凝土强度退化和 BFRP 筋降解。即使高温环境加速离子渗透和 BFRP 筋树脂水解速率,AAC 的抗腐蚀性能仍优于 OPC。这一研究表明 AAC 更适合应用于海洋高温高盐的环境。

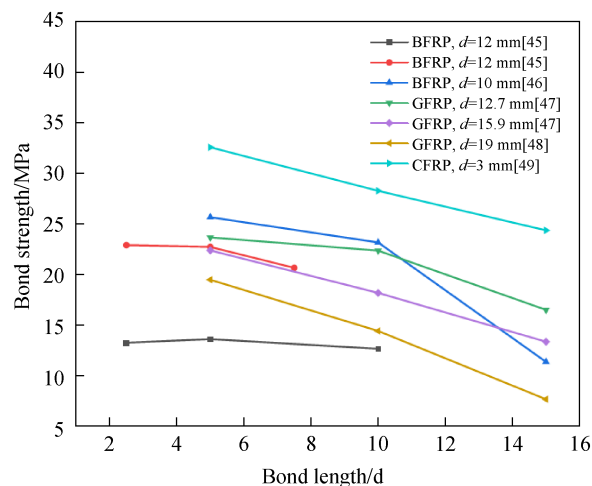


图5 黏结长度对黏结强度的影响^[45–49]

Fig. 5 Influence of bond length on bond strength^[45–49]

此外,不同于钢筋在混凝土碱性环境下良好的适配性,FRP 筋尤其是 GFRP 筋在碱性环境下存在失效的风险^[52],这主要与 GFRP 筋的材料组成有关。GFRP 筋是由内部玻璃纤维增强相和外部聚合物基体组成的复合材料。当混凝土与 GFRP 筋黏结时,混凝土孔隙液中的 Na^+ 、 K^+ 在碱性环境下会与树脂基体和玻璃纤维中的活性硅发生碱-硅反应(ASR),破坏纤维骨架并生成膨胀性产物(如碱-硅凝胶),进而导致材料性能逐渐退化^[53]。为了解碱性环境下混凝土中 GFRP 筋的耐久性能,许多学者使用加速试验方法,将 GFRP 筋直接浸入模拟碱性溶液中进行研究。Wang 等^[54]通过将 GFRP 筋暴露于不同 pH 值(7.0~13.6)的溶液中,发现高 pH 值下时纤维腐蚀严重,而低 pH 值下筋材表面损伤程度较低。然而,由于混凝土保护层的阻碍,模拟碱溶液中 GFRP 筋的降解速度比实际混凝土中更快,且模拟碱溶液只能提供饱和的混凝土情况。为了更准确地模拟实际情况,许多学者考虑将 GFRP 筋增强混凝土试件暴露在碱性溶液中。Wu 等^[55]通过加速老化试验对 GFRP 筋与工程水泥基复合材料(ECC)在盐碱环境下的黏结耐久性进行研究,发现浸泡时间 60 d 和 90 d 的黏结强度损失率分别为 5.88%和 8.55%。通过扫描电子显微镜(SEM)观察发现,黏结界面处生

成的 C-S-H 凝胶阻碍了离子的迁移, 使得 GFRP 筋表面并无明显侵蚀痕迹。通过长期黏结强度预测后认为, ECC 对 GFRP 筋黏结界面有保护作用, 使得碱盐溶液难以持续侵蚀。为了使 GFRP 筋有更好的抗碱侵蚀效果, 可以考虑采用纤维含量更少的筋材或者表面涂有耐碱涂层的筋材。

综上所述, 主要从混凝土强度、FRP 筋类型、黏结长度、耐久性能 4 个方面综述了不同影响因素对 FRP 筋与 AAC 黏结性能的影响。总的来说, 混凝土强度对黏结性能的影响最为显著, 而混凝土组分的变化(如海水海砂代替淡水河砂)因不涉及自身强度的改变, 所以对黏结的影响可以忽略。此外, 当混凝土强度超过 60 MPa 后, 混凝土强度对黏结强度的提升有限。微观层面, 混凝土的孔隙率尤其是 ITZ 结构的致密程度对黏结强度和破坏模式都将产生影响, 更致密的反应产物将显著提高黏结强度并改变破坏模式。FRP 筋直径和黏结长度与黏结强度呈负相关。在混凝土强度无法得到提升的情况下, 可以通过适当减小 FRP 直径和选用深肋表面的 FRP 筋等方式提升黏结强度。从长期黏结性能来看, AAC 与 FRP 筋的组合更适用于高温高盐的海洋环境。此外, 在高碱性环境下可以使用耐碱性更好的 CFRP 筋并涂覆耐碱涂层来减少碱性环境对 FRP 筋的侵蚀。

3 黏结滑移性能理论预测

FRP 筋和 AAC 的黏结性能是二者能够共同作用的前提, 为较好地描述 FRP 筋与 AAC 的黏结滑移机理与分析 FRP 筋混凝土构件的结构性能提供重要的理论依据, 急需提出适用于 FRP 筋与 AAC 的黏结强度预测和黏结滑移本构模型。

3.1 黏结强度预测

FRP 筋与混凝土之间的黏结强度直接影响两者协同工作的能力, 通过预测黏结强度可以为工程结构设计提供依据。目前, 一些国家已在施工设计规范中提出了 FRP 筋与混凝土的黏结强度预测公式, 如表 2 所示^[56-59]。但这些规范模型都存在一定的局限性, ACI 440.1R-1S 模型未能考虑不同 FRP 筋弹性模量的差异且对 AAC 的特性无针对性修正, 使得预测结果偏低; CSA S806-02 模型忽略了黏结长度对黏结强度的影响; CSA S6-06 模型更适用于存在横向钢筋约束时的场景; JSCE 模型仅适用于普通混凝土强度等级范围且黏结强度较小时的场景。Trabacchin 等^[46]对上述黏结强度预测公式进行验证

发现, 所有模型都对 BFRP 筋与 AAC 之间的黏结强度给出了保守的预测。其中, CSA S6-06 模型预测出的黏结强度最小, 与实际结果差距最大。为了得到更适用于 AAC 的黏结强度预测模型, 大量学者对此进行了研究^[60]。Albidah 等^[61]对纤维增强 AAC 与 GFRP 筋的黏结性能进行了研究, 并认为传统预测模型因基于 OPC 性能, 显著低估了 AAC 的黏结强度。考虑到 AAC 高碱性带来的化学胶结力的增加, 在经典模型中引入抗拉强度修正项, 提出了针对 AAC 的修正模型:

$$\tau_u = 0.121 \left[1.2 + 3 \frac{c}{d_b} + 50 \frac{d_b}{l_d} + \frac{A_{tr} f_{yt}}{500 s d_b} \right] f_{ct} \quad (2)$$

式中: τ_u 为极限黏结强度; c 为混凝土保护层厚度; d_b 为筋材直径; l_d 为黏结长度; f_{ct} 为混凝土抗拉强度; A_{tr} 、 s 、 f_{yt} 分别为面积、间距和纵向 FRP 筋屈服强度。该模型作为 AAC 与 GFRP 筋的黏结强度模型, 首次揭示了化学胶结与纤维增强摩擦的双机制作用。崔祎菲等^[41]考虑了混凝土强度、FRP 筋直径、黏结长度等因素, 并参考美国规范模型 ACI440.1R-15 对已有公式进行修正, 提出了 AASSC 与 CFRP 筋/GFRP 筋黏结强度预测公式:

$$\text{CFRP: } \frac{\tau_u}{\sqrt{f_c}} = 2.59 + \frac{0.02}{d} + 3.07 \frac{d}{L} \quad (3)$$

$$\text{GFRP: } \frac{\tau_u}{\sqrt{f_c}} = 0.95 + \frac{5.06}{d} + 4.93 \frac{d}{L} \quad (4)$$

式中: τ_u 为极限黏结强度; f_c 为混凝土立方体抗压强度; d 为 FRP 直径; L 为锚固长度。

表 2 FRP 筋-混凝土黏结强度预测典型规范模型
Table 2 Typical specification models for predicting bond strength of FRP bar-concrete

Name	Expression
ACI440.1R-15 ^[56]	$\frac{\tau_b}{0.083 \sqrt{f_c}} = 4.0 + 0.3 \frac{C}{d_b} + 100 \frac{d_b}{l_a}$
CSA S806-02 ^[57]	$\tau_b = \frac{d_{cs} \sqrt{f_c}}{1.15 (K_1 K_2 K_3 K_4 K_5) \pi d_b}$
CSA S6-06 ^[58]	$\tau_b = \frac{f_{cr} d_{cs}}{0.45 \pi d_b K_1 K_6 K_7}$
JSCE ^[59]	$\tau_b = f_{bod} / \alpha_1$

τ_b —Bond strength calculated by the prediction model; f_c —Compressive strength of concrete; C —Thickness of concrete cover; d_b —Diameter of FRP bars; l_a —Bond length; d_{cs} —The smallest of the distance from the closest concrete surface to the center of the bar being developed or two-thirds the center-on-center spacing of the bars being developed; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 、 K_6 、 K_7 —Material-based coefficient; f_{cr} —The cracking strength of concrete; α_1 —The modification factor equal to 0.6;

$$f_{bod} = \frac{0.28 \alpha_2 f_c (2/3)^2}{1.3} \leq 3.2 \text{ N/mm}^2.$$

现有黏结强度预测模型多数针对 OPC 基体, 未能考虑到 AAC 自身特性、FRP 表面形貌及多参数之间的交互作用。为实现 AAC 与 FRP 筋之间黏结强度的精准预测, 还需要在考虑混凝土性能的基础上对传统模型进行修正, 并借助机器学习等方法, 整合多尺度试验数据, 推动模型向更智能、更精准的方向发展。

3.2 黏结滑移本构模型

FRP 筋与混凝土之间的黏结滑移行为复杂, 受多种因素影响。黏结滑移本构模型通过描述黏结应力与滑移之间的关系, 有助于人们理解在不同受力阶段, 2 种材料之间力的传递和变形协调机制, 对结构设计和耐久性评估等方面具有重要意义。目前, 国内外典型的黏结-滑移本构模型及其表达式如表 3 所示^[62–66]。其中, Malvar 模型因其参数较多, 实际应用较少。MBPE 模型则是在 BPE 模型的基础上, 考虑到 FRP 筋与钢筋材料性质的差异而提出的改进模型。为了更加精确地拟合黏结滑移的上升阶段,

Cosenza 等^[65]提出了仅具有上升阶段的 CMR 模型。国内学者高丹盈等^[66]考虑到黏结滑移全阶段的连续性和模型中参数的实际物理意义, 基于已有经典模型提出了连续曲线模型。表 4 为下文各试验中模型的拟合参数。

Lu 等^[34]对比各模型与试验黏结-滑移曲线的拟合效果发现, 在曲线上升阶段, Malvar 模型、MBPE 模型、CMR 模型等与试验曲线拟合效果都较好。但在曲线下降阶段, MBPE 模型表现为线性倾斜直线, 无法准确反映试验曲线的特征; 连续曲线模型由于高估了 FRP 筋与混凝土黏结界面的延展性, 因此表现出更慢的下降趋势; 唯有 Malvar 模型能更好地与试验曲线变化趋势保持一致。赵军等^[43]对比 CMR 模型和 MBPE 模型对试验黏结-滑移曲线上升段和下降段的拟合结果, 并采用回归系数 R^2 评价各模型的拟合优度。结果表明, CMR 模型的 R^2 均大于 0.96, 可以较为准确地拟合不同表面形貌的 BFRP 筋与 AAC 黏结-滑移曲线的上升段。Niyazuddin 等^[45]和

表 3 FRP 筋混凝土常用的黏结-滑移本构模型
Table 3 Bond-slip constitutive models of FRP reinforced concrete

Constitutive models	Bond-slip constitutive expressions
Malvar model ^[62]	$\frac{\tau}{f_t} = A + B \left(1 - e^{\frac{-C\sigma_c}{f_t}} \right);$ $s_u = D + E\sigma_r;$ $\frac{\tau}{\tau_u} = \frac{F \left(\frac{s}{s_u} \right) + (G-1) \left(\frac{s}{s_u} \right)^2}{1 + (F-2) \left(\frac{s}{s_u} \right) + G \left(\frac{s}{s_u} \right)^2}$
BPE model ^[63]	$\tau = \tau_u \left(\frac{s}{s_u} \right)^\alpha, (s \leq s_u);$ $\tau = \tau_u, (s_u < s \leq s_1);$ $\tau = \tau_u - \frac{(\tau_u - \tau_r)(s_1 - s)}{(s_1 - s_r)}, (s_1 < s \leq s_r);$ $\tau = \tau_r, (s > s_r)$
MBPE model ^[64]	$\frac{\tau}{\tau_u} = \left(\frac{s}{s_u} \right)^\alpha, (s \leq s_u);$ $\frac{\tau}{\tau_u} = \left[1 - \beta \left(\frac{s}{s_u} - 1 \right) \right], (s_u < s \leq s_r);$ $\tau = \tau_r, (s > s_r)$
CMR model ^[65]	$\frac{\tau}{\tau_u} = \left(1 - e^{-\frac{s}{a}} \right)^\varphi, (s \leq s_u)$
Continuous curve model ^[66]	$\tau = \tau_u \left[2\sqrt{\frac{s}{s_u} - \frac{s}{s_u}} \right], (s \leq s_u);$ $\tau = \frac{\tau_u(s_r - s)^2(2s + s_r - 3s_u)}{(s_r - s_u)^3} + \frac{\tau_r(s - s_u)^2(3s_r - 2s - s_u)}{(s_r - s_u)^3}, (s_u < s \leq s_r);$ $\tau = \tau_r, (s > s_r)$

σ_c —Axisymmetric confined radial pressure; f_t —Compressive strength of concrete; τ_u —Peak bond strength; s_u —Slip value corresponding to peak bond strength; τ_r —Residual bond strength; s_r —Displacement corresponding to the residual bond strength; s_1 —Slip distance when the bond strength starts to decrease; A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G —Constants determined by fitting the type of reinforcement according to the test data; α 、 β 、 φ —Parameters determined by experiment.

表 4 参数拟合值及相关系数

Table 4 Parameter fitting values and correlation coefficients

Ref.	Model	Sample	Parameter				
			α	β	φ	s_r	R^2
Zhao <i>et al.</i> [43]	CMR	12.0 mm			0.965	0.386	0.998
	MBPE		0.518				0.971
	CMR	16.0 mm			0.917	0.190	0.996
	MBPE		0.528				0.984
	CMR	20.0 mm			1.096	0.081	0.982
	MBPE		0.578				0.980
Niyazuddin <i>et al.</i> [45]	CMR	12.0 mm			0.81	1.81	>0.95
	MBPE		0.57	0.57			>0.95
Maranan <i>et al.</i> [44]	CMR	12.7 mm			9	0.20	0.95
		15.9 mm			5	0.14	0.93
		19.0 mm			4	0.12	0.91

Tekle 等^[47]的研究结果表明 CMR 模型和 MBPE 模型与试验曲线匹配度较高, 但 CMR 模型与数据曲线的一致性更高。Maranan 等^[44]用 CMR 模型对不同直径的 GFRP 筋与 AAC 黏结-滑移曲线拟合发现, 随着 GFRP 筋直径的增加, φ 和 s_r 的值随之减小, 且 CMR 模型仅适用于混凝土强度较低、黏长较短的试件。范小春等^[50]通过对比试验曲线和常用的黏结滑移本构模型发现, BFRP 筋与 AAC 的黏结滑移机理与郝庆多等^[67]提出的理论模型相似, 主要区别体现在曲线下降阶段。为此, 提出了更适应于 FRP 筋与 AAC 黏结的本构模型:

微滑移段:

$$\tau = \frac{\tau_1}{s_1} s, s \leq s_1 \quad (5)$$

滑移段:

$$\tau = (\tau_2 - \tau_1) \left(\frac{s - s_1}{s_2 - s_1} \right)^\alpha + \tau_1, s_1 \leq s \leq s_2 \quad (6)$$

下降段:

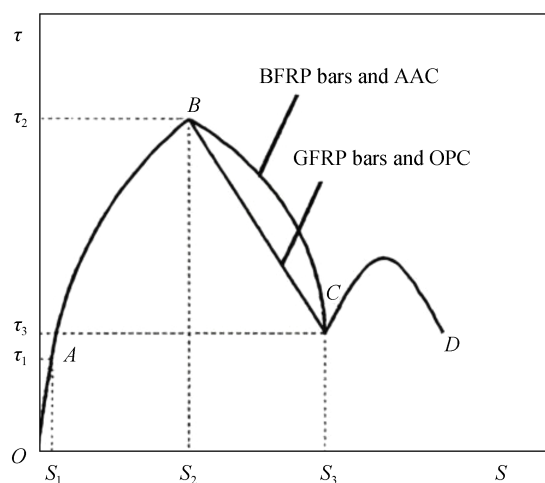
$$\tau = \frac{\tau_2}{1 + \beta(s - s_2)^\theta}, s_2 < s \leq s_3 \quad (7)$$

残余应力段:

$$\tau = \tau_3 - \gamma \left\{ e^{-\delta \omega(s - s_3)} \cos[\omega(s - s_3)] - 1 \right\} + \rho \left(e^{-\delta \omega(s - s_3)} - 1 \right), s > s_3 \quad (8)$$

式中: τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为图 6 中点 A、B、C 对应

的黏结强度, MPa; s_1 、 s_2 、 s_3 分别为图 6 中点 A、B、C 对应的黏结滑移值, mm; α 、 β 、 θ 、 γ 、 δ 、 ω 、 ρ 分别为根据试验结果确定的参数。

图 6 范小春等提出的黏结滑移本构模型^[50]Fig. 6 Constitutive model of bond slip proposed by Fan *et al.*^[50]

根据上述大量学者对 FRP 筋与 AAC 黏结滑移本构模型进行的研究, 以及针对不同试验条件提出的不同本构模型综合比较和验证发现: 相较于 MBPE 模型, CMR 模型可以较为准确地对各试验条件下曲线上升段进行拟合, 因此更常用于理论分析和有限元建模。而对于曲线下降段和残余段目前常用的公式模型仅能作为参考, 还需要根据曲线走势确定更加合适的模型表达式。

4 结论与展望

近年来已有大量学者对 FRP 筋与 AAC 的界面黏结性能进行了试验研究。本文通过对国内外研究结果进行梳理和分析,总结了各项因素对界面黏结性能的影响,并探讨了现有的 FRP 筋与混凝土之间的黏结强度预测公式和黏结-滑移本构模型。

1) 目前中国内外对于 AAC 的研究较少,作为结构基体还需要从胶凝材料种类、碱激发剂组成和增强纤维等方面对 AAC 的力学和耐久等性能进行系统性的研究,以实现相关标准体系的建立和国家海洋强国战略的实施。

2) 虽然目前对 FRP 与 AAC 界面黏结性能研究较少,但通过参考 FRP-OPC 界面黏结性能影响因素可以得到许多类似的结论。采用 AAC 代替 OPC 提升了黏结 ITZ 的致密度,改善了混凝土的黏结性能;提升混凝土抗压强度可以显著提升黏结强度。筋材选择上,使用 CFRP 筋对黏结耐久性能的提升最高;FRP 筋直径越小、黏结长度越短,黏结强度越高。长期耐久性方面,AAC 在高温海洋环境下对于 FRP 筋有更好的保护作用;对于高碱环境下则可选用耐碱性能优异的 CFRP 筋。

3) 黏结-滑移本构模型方面,在不同试验条件下,CMR 模型更适用于对曲线上升段进行拟合,而对于下降段和残余段,目前还需要根据曲线走势来确定更加合适的模型表达式。

虽然人们对 FRP 筋与 AAC 的黏结性能有了一定程度的研究,但由于材料的新颖性,目前研究成果有限,还有待进行深入的系统性研究:

1) 目前,对于黏结性能常用的研究方法主要为中心拉拔试验和半梁试验。还可以考虑利用微观检测技术,如 SEM 对黏结界面的 ITZ 进行观察;利用 X 射线衍射仪检测 ITZ 内是否有新相生成等。

2) 在现有研究中,带肋 FRP 筋的拔出试验是评估筋材与混凝土黏结性能的主要手段。由于带肋筋材的黏结力主要由筋肋的机械咬合力贡献,其化学胶结力的重要性常被低估。为此,建议在后续工作中增加对光滑筋材的研究,通过消除肋的机械作用,实现对黏结性能更本质的剖析。

3) 对于海洋工程,可以考虑沿海地区的海水海砂拌合 AAC。然而,海水海砂的加入会引入侵蚀离子,因此对 FRP 筋与 AAC 的黏结耐久性还需进行深入研究,并可以考虑在短期加速试验的基础上开展长期现场试验。

4) AAC 与 UHPC 结合可以有效降低水泥的使用并符合 UHPC 绿色化需求。两者结合可以在实现力学性能互补的情况下提升耐久性能,在未来的海洋工程中具有巨大应用前景。但目前对海洋环境下超高性能碱激发混凝土(UHPAAC)与 FRP 筋黏结性能的研究明显不足,后续可以考虑对 UHPAAC 性能进行细致研究后进行黏结性能试验。

5) 已有大量学者提出了 FRP 筋与混凝土黏结强度预测模型和黏结-滑移本构模型。然而,现有模型均存在各自的适用条件,对于 AAC 这种新型混凝土还需进行大量试验得到具有多因素的数据库,并结合现有模型和机器学习等方法,提出适用于该体系下的模型。

参考文献:

- [1] 刘运超. 全珊瑚骨料海水混凝土与 FRP 筋粘结性能数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
LIU Yunchao. Numerical study on the bonding performance of full coral aggregate seawater concrete with FRP bars[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [2] 章定文, 王安辉. 地聚合物胶凝材料性能及工程应用研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 13–38.
ZHANG Dingwen, WANG Anhui. J Archit Civ Eng, 2020, 37(5): 13–38.
- [3] 杨达, 卢明阳, 宋迪, 等. 地质聚合物水泥的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊 1): 644–649.
YANG Da, LU Mingyang, SONG Di, et al. Mater Rev, 2021, 35(Suppl 1): 644–649.
- [4] 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, 2014(12): 13–18.
- [5] 尹世平, 华云涛, 徐世烺. FRP 配筋混凝土结构研究进展及其应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1): 134–150.
YIN Shiping, HUA Yuntao, XU Shilang. J Build Struct, 2021, 42(1): 134–150.
- [6] 郝庆多, 王言磊, 侯吉林, 等. GFRP 带肋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, 2008, 25(10): 158–165.
- [7] LU Z Y, SU L Z, LAI J W, et al. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete with fly ash in aggressive environments[J]. Compos Struct, 2021, 271: 114121.
- [8] 毕超豪, 赖华铭, 张耿斌, 等. 地聚物混凝土-玻璃纤维增强复合材料筋界面黏结行为的梁式试验研究[J]. 工业建筑, 2024, 54(6): 46–53.
BI Chaohao, LAI Huaming, ZHANG Gengbin, et al. Ind Constr, 2024, 54(6): 46–53.
- [9] 闫佳, 张海燕, 吴波. 钢筋-地聚物混凝土黏结性能梁式试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 178–186.
YAN Jia, ZHANG Haiyan, WU Bo. J Build Struct, 2019, 40(12): 178–186.
- [10] CUI Y F, QU S H, BAO J W, et al. Bond performance of steel bar and

- fly ash-based geopolymer concrete in beam end tests[J]. *Polymers*, 2022, 14(10): 2012.
- [11] SARKER P K. Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete[J]. *Mater Struct*, 2011, 44(5): 1021–1030.
- [12] 高丹盈, B. Brahim. 纤维聚合物筋与混凝土粘结性能的影响因素[J]. *工业建筑*, 2001, 31(2): 9–14.
- GAO Danying, BRAHIM B. *Ind Constr*, 2001, 31(2): 9–14.
- [13] CUI Y F, AI W X, TEKLE B H, et al. State of the art review on the production and bond behaviour of reinforced geopolymer concrete[J]. *Low-carbon Mater Green Constr*, 2023, 1: 25.
- [14] ROMANAZZI V, LEONE M, AIELLO M A, et al. Bond behavior of geopolymer concrete with steel and GFRP bars[J]. *Compos Struct*, 2022, 300: 116150.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] SUBRAMANIAN N, SOLAIYAN E. Study on bond strength of geopolymer and control concrete between fiber-reinforced polymer and steel bars[J]. *Struct Concr*, 2021, 22(1): 146–153.
- [18] F M FAHMY M, A S AHMED S, WU Z S. Bar surface treatment effect on the bond-slip behavior and mechanism of basalt FRP bars embedded in concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 289: 122844.
- [19] 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.
- [20] TONG D H, CHI Y, HUANG L, et al. Bond performance and physically explicable mathematical model of helically wound GFRP bar embedded in UHPC[J]. *J Build Eng*, 2023, 69: 106322.
- [21] 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*, 2018(3): 60–64.
- [22] 艾威侠. 超高性能碱激发混凝土力学性能与界面粘结性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2025.
- AI Weixia. Study on mechanical and interfacial bonding properties of ultra-high performance alkali activated concrete[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2025.
- [23] 刘梦珠. 碱激发胶凝材料的制备及性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- LIU Mengzhu. Preparation and properties of alkali-activated cementitious materials[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [24] 彭晖, 张白. 地聚物混凝土耐久性研究进展[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(5): 1–24.
- PENG Hui, ZHANG Bai. *J Changsha Univ Sci Technol Nat Sci*, 2023, 20(5): 1–24.
- [25] 庄培镇. 碱激发粉煤灰/矿渣微观力学性能的研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- ZHUANG Peizhen. Study on micromechanical properties of alkali-activated fly ash/slag[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.
- [26] 屈士皓. 海水海砂碱激发混凝土与 FRP 筋的粘结性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024.
- QU Shihao. Bond performance between seawater sea-sand alkali activated concrete and FRP bars[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2024.
- [27] 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*, 2020, 37(5): 113–123.
- [28] 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*, 2022, 39(3): 1194–1204.
- [29] HE S H, LI L J, LIN J W, et al. Bond performance between ribbed BFRP bar and seawater sea-sand concrete: Influences of rib geometry[J]. *Structures*, 2024, 65: 106660.
- [30] CUI Y F, QU S H, TEKLE B H, et al. Experimental and finite element study of bond behavior between seawater sea-sand alkali activated concrete and FRP bars[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 424: 135919.
- [31] PELLEGRINO C, TINAZZI D, MODENA C. Experimental study on bond behavior between concrete and FRP reinforcement[J]. *J Compos Constr*, 2008, 12(2): 180–189.
- [32] ZHANG B, ZHU H, CAO R M, et al. Feasibility of using geopolymers to investigate the bond behavior of FRP bars in seawater sea-sand concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 282: 122636.
- [33] PENG K D, ZENG J J, HUANG B T, et al. Bond performance of FRP bars in plain and fiber-reinforced geopolymer under pull-out loading[J]. *J Build Eng*, 2022, 57: 104893.
- [34] LU Z Y, ZHAO C Y, ZHAO J X, et al. Bond durability of FRP bars and seawater-sea sand-geopolymer concrete: Coupled effects of seawater immersion and sustained load[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 400: 132667.
- [35] AMETRANO D. Bond characteristics of glass fibre reinforced polymer bars embedded in high performance and ultra-high performance concrete[R]. Ryerson University, 2011.
- [36] ZHONG H, ZHANG M Z. Engineered geopolymer composites: A state-of-the-art review[J]. *Cem Concr Compos*, 2023, 135: 104850.
- [37] PROKOPSKI G, HALBINIAK J. Interfacial transition zone in cementitious materials[J]. *Cem Concr Res*, 2000, 30(4): 579–583.
- [38] LING Y F, WANG K J, LI W G, et al. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites[J]. *Compos Part B Eng*, 2019, 164: 747–757.
- [39] 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 Jiwen, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2024, 43(1): 147–157.
- [40] SOARES S, FREITAS N, PEREIRA E, et al. Assessment of GFRP bond behaviour for the design of sustainable reinforced seawater concrete structures[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 231: 117277.
- [41] 崔伟菲, 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.
- [42] ZHAO J, WANG S B, WANG Z K, et al. Bond performance between FRP bars and geopolymer concrete after elevated temperature exposure[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 384: 131476.
- [43] 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.
- [44] MARANAN G, MANALO A, KARUNASENA K, et al. Bond stress-slip behavior: Case of GFRP bars in geopolymer concrete[J]. J Mater Civ Eng, 2015, 27: 04014116.
- [45] NIYAZUDDIN, UMESH B. Experimental investigation on bond behaviour of the GFRP bars with normal and high strength geopolymer concrete[J]. Constr Build Mater, 2024, 429: 136395.
- [46] TRABACCHIN G, SEBASTIAN W, ZHANG M Z. Experimental and analytical study of bond between basalt FRP bars and geopolymer concrete[J]. Constr Build Mater, 2022, 315: 125461.
- [47] 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.
- [48] DING Y, BAI Y L. Fracture properties and softening curves of steel fiber-reinforced slag-based geopolymer mortar and concrete[J]. Materials, 2018, 11(8): 1445.
- [49] RANJBAR N, ZHANG M Z. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review[J]. Cem Concr Compos, 2020, 107: 103498.
- [50] 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.
- FAN Xiaochun, XU Wei, CHEN Yuancheng, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2022, 41(6): 1896.
- [51] ZHANG B, XU F, ZHU H, et al. Deterioration of bond performance between BFRP bars and coral aggregate concrete incorporating slag-based geopolymers under seawater corrosion environments[J]. Constr Build Mater, 2024, 411: 134518.
- [52] SUN Y N, JIN Z Q, ZHANG X Y, et al. Degradation of GFRP bars in alkaline environments: An experimental and molecular dynamics study[J]. J Build Eng, 2023, 77: 107449.
- [53] WANG P, KE L Y W, WU H L, et al. Lowering exposure pH for durability enhancement of glass fiber reinforcement polymer (GFRP) rebars[J]. Constr Build Mater, 2022, 354: 129131.
- [54] WANG P, KE L, WANG Z K, et al. Effects of alkaline concentration and saline contents on degradation of tensile properties, microstructure and chemical characterization of glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebars[J]. J Build Eng, 2023, 69: 106222.
- [55] WU W W, HE X J, YANG W R, et al. Long-time durability of GFRP bars in the alkaline concrete environment for eight years[J]. Constr Build Mater, 2022, 314: 125573.
- [56] ALKHRDAJI T, FYFE E R, KORFF J, et al. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars[C]//Proceeding of American Concrete Institute Committee, 2006, 440.
- [57] ASSOCIATION C S. Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers[S]. Canadian Standards Association, 2002.
- [58] ASSOCIATION C S. Canadian highway bridge design code (CAN/CSA S6-06)[S]. Canadian Standards Association: Toronto, ON, Canada, 2006.
- [59] MACHIDA A, UOMOTO T. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials[R]. Japan Soc. of Civil Engineers Tokyo, Japan, 1997.
- [60] RAHMAN S K, AL-AMERI R. Experimental investigation and artificial neural network based prediction of bond strength in self-compacting geopolymer concrete reinforced with basalt FRP bars[J]. Appl Sci, 2021, 11(11): 4889.
- [61] ALBIDAH A, ALTHEEB A, ALRSHOUDI F, et al. Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete[J]. Structures, 2020, 27: 1582–1593.
- [62] MALVAR L J. Bond stress-slip characteristics of FRP rebars. Naval Facilities Engineering Service Center[R]. 1994.
- [63] ELIGEHAUSEN R, POPOV E P, BERTERO V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations[M]. Springfield: NTIS, 1983.
- [64] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Analytical modelling of bond between FRP reinforcing bars and concrete[C]//Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures: proceedings of the second international RILEM symposium. Boca Raton: CRC Press, 1995:164.
- [65] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete[J]. J Compos Constr, 1997, 1(2): 40–51.
- [66] 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.
- [67] 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 Qingduo, WANG Yanlei, HOU Jilin, et al. Eng Mech, 2009, 26(5): 62–72.

作者贡献声明:

崔祎菲: 论文构思、提供资源、设计研究方法
 张益聪: 撰写初稿、分析/综合数据并推导结论
 王 治: 软件使用、验证、绘制图表
 徐 诺: 软件使用、验证、绘制图表
 鲍玖文: 监督指导、审阅与修订

Research Progress on Bond Performance Between Alkali-Activated Cementitious Materials Concrete and Fiber-Reinforced Polymer Bars

CUI Yifei, ZHANG Yicong, WANG Zhi, XU Nuo, BAO Jiuwen

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, Shandong, China)

Extended Abstract

Alkali-activated concrete (AAC), as a novel green, low-carbon building material, has attracted extensive attention because it reuses industrial solid waste, reducing energy consumption and carbon emissions, and offers superior corrosion resistance, frost resistance, and high-temperature stability compared with ordinary Portland cement (OPC) concrete. In marine engineering, steel-bar corrosion caused by aggressive ions has long been a critical threat to structural durability. Fiber-reinforced polymer (FRP) bars,

including glass fiber-reinforced polymer (GFRP), carbon fiber-reinforced polymer (CFRP), and basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars, have emerged as ideal alternatives to steel bars because of their light weight, high tensile strength, excellent corrosion resistance, and design flexibility, thereby effectively addressing the corrosion problem in harsh marine environments.

The bond performance between FRP bars and AAC is a fundamental prerequisite for composite action in the structure. Because of the significant differences in physical and mechanical properties between FRP bars and steel bars, as well as between AAC and OPC, traditional bond theory for steel-OPC structures cannot be directly applied to FRP-AAC systems, making in-depth research on their bond mechanisms and influencing factors essential. This paper systematically summarizes the research progress in this field in terms of test methods, bond mechanisms, influencing factors, and theoretical models.

Common test methods for bond performance include the pull-out test, beam test, and half-beam test, among which the pull-out test is widely used because of its simplicity and ability to clearly present bond-slip curves. The bond resistance between FRP bars and AAC mainly comprises chemical adhesion, friction, and mechanical interlocking, and the force-transmission mechanism differs from that of steel-OPC due to the anisotropy and low shear strength of FRP-bar surfaces. The main failure modes include concrete splitting failure, FRP-bar splitting failure, and FRP-bar pull-out failure.

Key factors affecting bond performance include the following: 1) AAC properties. Compressive strength and porosity (especially the density of the interfacial transition zone, ITZ) strongly influence bond strength; higher compressive strength improves bond performance, while the transformation from N-A-S-H gel to C-A-S-H gel reduces ITZ porosity and improves bond stability. 2) FRP-bar characteristics. CFRP bars exhibit higher bond strength than BFRP and GFRP bars because of their higher elastic modulus and rougher surfaces; a smaller bar diameter and appropriate surface treatment contribute to better bond performance. 3) Bond length. Bond strength decreases with increasing bond length because of nonuniform stress distribution. 4) Durability. AAC provides better protection for FRP bars in high-temperature, high-salinity marine environments; CFRP bars have superior alkali resistance compared with GFRP and BFRP bars.

Existing bond strength prediction models are mainly developed for OPC systems and lack modifications that account for AAC characteristics, which leads to conservative predictions. For bond-slip constitutive modeling, the CMR model is more suitable for describing the ascending segment of bond-slip curves, whereas the descending and residual segments still require optimization.

Summary and prospects AAC combined with FRP bars has broad application potential in marine engineering. Future research should focus on the following aspects: developing advanced microscale testing techniques to analyze the ITZ microstructure; investigating the bond durability of AAC prepared with seawater and sea sand under long-term field conditions; exploring the bond performance of ultra-high-performance AAC (UHPAAC) with FRP bars; and establishing more accurate prediction models by integrating multifactor test data with machine-learning methods.

Keywords alkali-activated concrete; fiber-reinforced polymer bars; bond performance; constitutive models; strength prediction