

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.089



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



FRP 筋与混凝土粘结性能研究进展及本构模型改进

张望喜^{a,b}, 胡彬彬^b, 王冠杰^b, 易伟建^{a,b}

(湖南大学 a. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室; b. 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:近年来,FRP(纤维增强聚合物)筋代替钢筋在混凝土结构中得到越来越广泛的应用。与钢筋相比,FRP 筋具有各向异性、非均质、表面形式不同等特性,这导致 FRP 筋与混凝土之间的粘结机制不同于钢筋与混凝土。为全面了解 FRP 筋与混凝土之间的粘结性能,收集数据建立由 342 个拉拔试验试件组成的数据库,分析粘结性能与各因素之间的关系,对没有达成一致结论的观点进行补充和讨论,分析高温、冻融循环、电解质溶液对 FRP 筋与混凝土粘结性能的影响;校核常用的粘结-滑移本构模型的计算精度,基于建立的试验数据库,提出新的精度更高的粘结-滑移本构上升段表达式。

关键词:混凝土;FRP 筋;粘结机理;粘结-滑移本构模型

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2023)02-0111-12

Research progress on bond behavior between FRP bars and concrete and improvement of constitutive model

ZHANG Wangxi^{a,b}, HU Binbin^b, WANG Guanjie^b, YI Weijian^{a,b}

(a. Hunan Provincial Key Lab on Diagnosis for Engineering Structures; b. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: In recent years, FRP (Fiber Reinforced Polymer) bars have been used more and more widely in concrete structures instead of steel bars. Unlike the latter, FRP bars have the characteristics of anisotropy, heterogeneity and different surface forms, which lead to the different bond mechanisms between FRP bars and concrete. In order to fully understand the bond behavior, a database of 342 pull-out test specimens was set up. The influence of various factors on the bond behavior was analyzed. The viewpoints that there was no consensus were supplemented and discussed. The effects of high temperature, freeze-thaw cycle and electrolyte solution on the bond behavior of FRP bars and concrete were also analyzed. In addition, the predictive accuracy of the commonly used bond-slip constitutive models were checked. Based on the established test database, a new expression of the rising section of the bond-slip constitutive model was set up.

Keywords: concrete; FRP bars; bonding mechanism; bond-slip constitutive model

收稿日期:2021-01-23

基金项目:国家自然科学基金(52078201)

作者简介:张望喜(1971-),男,博士,教授,主要从事结构基本理论、结构抗震与防连续倒塌性能研究,E-mail: wxizhang2000@hnu.edu.cn。

Received: 2021-01-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52078201)

Author brief: ZHANG Wangxi (1971-), PhD, professor, main research interests: the basic theory of structure, seismic analysis of reinforced concrete structures and anti progressive collapse performance research, E-mail: wxizhang2000@hnu.edu.cn.

钢筋混凝土结构是世界上应用最广泛的结构体系之一,然而,由于钢筋的锈蚀,钢筋混凝土的长期性能会降低,而且需要对锈蚀的钢筋进行高成本检查、维护和修复^[1]。因此,许多学者深入研究 FRP 筋以寻求替代钢筋的可能性和可行性。

自 20 世纪 60 年代以来,美国、加拿大、欧洲、日本等发达国家已展开相当规模的 FRP 筋与混凝土粘结性能和 FRP 筋混凝土构件的力学性能研究,并制定了相应的设计规范和施工指南,如 ACI440.1R^[2]、CSA S806-12^[3]、JSCE^[4]等。中国关于 FRP 筋相关的设计理论起步较晚,直到 2010 年才颁布实施《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010)^[5],此规范主要用于指导 FRP 布加固钢筋混凝土结构以及 FRP 筋混凝土构件的设计与应用。

FRP 筋与混凝土的粘结性能是 FRP 筋与混凝土共同工作的基础,由于外表面制造的不同及纵横向材料的差异,FRP 筋与混凝土的粘结性能和钢筋与混凝土的粘结性能不同。为了更好地了解 FRP 筋与混凝土粘结性能的研究现状,笔者对相关研究成果进行总结,并建立了 342 个试件的数据库,指出了目前存在的问题及下一步需要研究的内容。

1 试验方法及数据库

1.1 试验方法

关于 FRP 筋与混凝土粘结性能研究的试验方法主要有 3 种^[6],如图 1~图 3 所示,每种方法都有其优点和局限性,具体选用哪种试验方法要根据研究的内容和试验条件等确定。

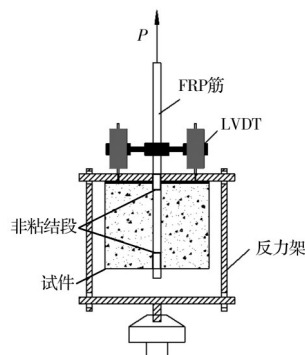


图 1 拔出试验

Fig. 1 Pull-out test

一般情况下,FRP 筋和混凝土的粘结性能是通过拔出试验^[7]来研究,这种试验方法提供了对粘结性能简单而直接的评估。拔出试验经常被用来比较不同类型 FRP 筋的粘结性能以及推导半经验的

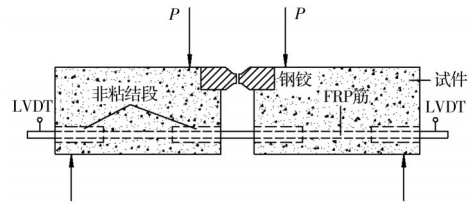


图 2 梁式试验

Fig. 2 Beam test

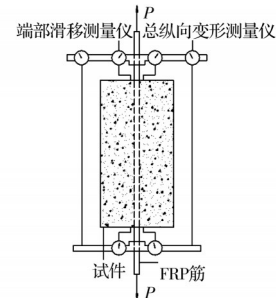


图 3 轴拉试验

Fig. 3 Axial tension test

粘结-滑移关系。尽管拔出试验得到了广泛的应用和普及,但是加载端受到混凝土的局部挤压,限制了混凝土横向裂缝的发展,与结构中 FRP 筋端部附近的应力状态差别较大,此外,实际混凝土梁 FRP 筋锚固区受到弯矩和剪力共同作用的影响,但拉拔试验中 FRP 筋锚固区只受到拉力,导致试验结果和真实的粘结性能有很大差异。

梁式试验^[8]可以模拟梁端锚固粘结性能状态,更准确地反映粘结性能,但也不是理想的试验方案,因为获得的粘结-滑移关系受到两个半梁运动系统整体行为的影响,且梁式试验尺寸较大,试验复杂。梁式试验比拔出试验得到的平均粘结强度低,可能是因为 FRP 筋周围混凝土应力状态的差别以及前者的混凝土保护层较薄。

轴拉试验^[9]是采用一对相互平行的力作用在 FRP 筋的两端,使 FRP 筋与混凝土间产生粘结-滑移,一般用来模拟混凝土梁在纯弯段主裂缝间的粘结特性,但很难满足一对拉力同时位于轴心的情况,易产生误差。

1.2 试验数据库

通过查阅大量文献,从已发表的文献中收集了 342 个拉拔试件的试验数据,根据混凝土强度、FRP 筋直径、混凝土保护层厚度、FRP 筋表面形式等影响因素进行整理,形成拉拔试验数据库,主要的试验参数和结论如表 1 所示,相关数据见: <https://www.kdocs.cn/l/sqks6YYPi1kG>。

表1 拉拔试验数据库
Table 1 Pull-out test database

作者	试件数量	主要试验参数	主要结论	破坏形式及对应试件数量
陈守磊 ^[9]	36	混凝土强度等级:C30、C35、C40 FRP筋直径:8、10、12 mm 锚固长度:40、60、80 mm 保护层厚度:25、50 mm、轴心	混凝土强度对粘结强度影响不大;直径和锚固长度较大以及保护层厚度较小的试件易发生劈裂破坏。	拔出破坏:25个 劈裂破坏:11个
Achillides等 ^[10]	30	混凝土强度:15~49 MPa FRP筋类型:CFRP筋、GFRP筋、AFRP筋	FRP筋与混凝土的粘结强度在很大程度上不取决于混凝土强度,但混凝土的强度会影响粘结破坏的失效模式。	均为拔出破坏
Okelo等 ^[11]	113	FRP筋种类:CFRP筋、GFRP筋、AFRP筋 FRP筋直径:6、8、10、16、19 mm	FRP筋的弹性模量会影响其与混凝土的粘结性能,CFRP筋与混凝土的粘结强度大于GFRP筋与AFRP筋。	拔出破坏:58个 劈裂破坏:16个 锚固破坏:22个 筋材拉断:17个
张美真 ^[12]	30	混凝土强度等级:C30、C35、C40 FRP筋种类:CFRP筋、GFRP筋	CFRP筋与混凝土的粘结强度大于GFRP筋与混凝土的粘结强度,对应的滑移量小于GFRP与混凝土的滑移量,且粘结-滑移曲线的上升段斜率较大。	拔出破坏:25个 锚固破坏:1个 筋材拉断:4个
谷泓学 ^[13]	8	FRP筋种类:GFRP筋、S/GFRP筋 钢绞线体积:14.05%、16.16%、21.05%、27.30%	加入钢绞线的S/GFRP筋,其与混凝土的粘结性能较GFRP筋有明显提高,且随着钢绞线体积率的增加,粘结强度逐渐提高而后趋于平缓。	劈裂破坏:7个 筋材拉断:1个
张彧 ^[14]	50	试验方法:新式整体型轴拉/标准轴拉 混凝土强度等级:C30、C35、C40 GFRP筋直径:10、12、14 mm 锚固长度:40、60、80 mm	标准GFRP筋轴心拉拔试件的极限荷载要明显大于新型轴心拉拔试件;随荷载增加,加载端附近的粘结首先破坏,应力值减小,粘结应力峰值逐渐向自由端方向移动,并且粘结长度过长不利于GFRP筋应力的传递。	拔出破坏:49个 劈裂破坏:1个
Veljkovic等 ^[15]	14	FRP筋直径:6、8 mm 保护层厚度:10、15、20 mm、轴心	在偏心拉拔试验下,随着混凝土保护层厚度的减小,粘结强度增加,且对应的滑移减小,但易发生劈裂破坏。	拔出破坏:14个
代前前 ^[16]	45	FRP筋表面形式:外表面有玻璃纤维外露,表面粘砂,表面带肋 加载速率:1、2、5 mm/min	不同表面形式的GFRP筋粘结力组分占比不同,外表面有玻璃纤维外露的GFRP粘结强度最高;加载速率对粘结性能并无显著影响。	拔出破坏:43个 劈裂破坏:2个
Rolland等 ^[17]	16	FRP筋种类:CFRP筋、GFRP筋、AFRP筋 FRP筋表面形式:表面光滑、表面粘砂	表面粘砂的FRP筋与混凝土粘结强度远远高于表面光滑的FRP筋与混凝土粘结强度。	拔出破坏:15个 劈裂破坏:1个

2 FRP筋与混凝土粘结机理

FRP筋与混凝土的粘结力主要由以下几个方面组成:由混凝土水化产生的凝胶体对FRP筋表面产生的化学胶着力,这种化学胶着力很小,且仅在混凝土与FRP筋无局部滑移时起作用,一旦两者之间发生滑移,胶着力即消失;由混凝土硬化时体积收缩对FRP筋握紧产生的摩擦力,摩擦力大小主要取决于树脂的质量及树脂的光滑度^[18],可通过在FRP筋表面粘砂增加FRP筋表面树脂的粗糙度,以提高摩擦力;FRP筋表面凹凸不平与混凝土之间产生的机械咬合力;硬化混凝土收缩引起的FRP筋的静水压力;温度变化和吸湿引起的FRP筋的膨胀。

随着拉拔力的增加,粘结应力峰值由加载端逐步向自由端移动,并且FRP筋的应力也逐渐趋于均匀。光圆FRP筋和表面粘砂以及变形FRP筋(表面带肋、压痕等)的粘结强度及滑移量相差悬殊。光

圆FRP筋,粘结力主要由化学胶着力组成,在低应力的情况下也会产生较大的滑移,并且可能会破坏FRP筋与混凝土之间的粘结。对于表面粘砂的FRP筋,粘结力主要由化学胶着力和摩擦力组成。变形FRP筋粘结力主要由摩擦力和机械咬合力组成,粘结力的大小主要取决于肋间混凝土的强度和肋的承载能力。如图4所示,摩擦力和挤压力的合力在垂直方向的分力为径向压力,在径向分力作用下混凝土产生环向拉应力,当环向拉应力大于混凝土的抗拉强度时,混凝土内部会产生径向裂缝,合力在水平方向的分力为粘结力,随着拉拔力增加,粘结力逐渐增大,最终发生粘结破坏。

3 粘结特性影响因素

3.1 混凝土强度

对于FRP筋,粘结破坏部分发生在混凝土与树

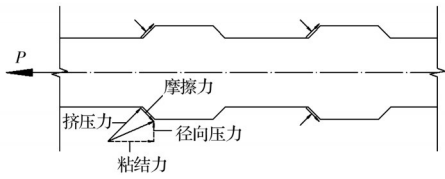


图 4 带肋 FRP 筋粘结力组成

Fig. 4 Bond stress components of FRP ribbed rebar

脂之间,部分发生在树脂和纤维之间。普通混凝土中 FRP 筋的粘结破坏主要是由于混凝土和树脂截面的滑移破坏引起的,而高强混凝土中 FRP 筋的粘结破坏主要是由于树脂和纤维的层间剥离引起的。高丹盈^[19]认为 FRP 筋与混凝土作用机理和钢筋与混凝土作用机理不同,FRP 筋与混凝土的粘结强度不与混凝土抗压强度平方根成正比。Achilides 等^[10]认为 FRP 筋的粘结强度并不受混凝土强度的控制,对于强度较低(不大于 15 MPa)的混凝土,在混凝土被压碎之前,粘结强度主要由混凝土抗剪强度确定,且粘结强度低于强度较高的混凝土。当混凝土强度等级大于 C30 时,混凝土强度对粘结强度的影响很小。同样, Lee 等^[20]基于 GFRP 筋与高强混凝土的粘结性能试验,发现 GFRP 筋的粘结强度受混凝土抗压强度的影响远小于钢筋。但在 Lee 等^[21]的研究中发现,混凝土强度在 38~84 MPa 范围内时,CFRP 筋的粘结强度与混凝土抗压强度的 1/2~2/3 次方成正比。Okelo 等^[11]在 151 个试件的基础上提出 FRP 筋的平均粘结强度与混凝土抗压强度(29~60 MPa)的 1/2 成正比的观点。

从已有的研究可以看出,目前关于混凝土抗压强度对 FRP 筋与混凝土粘结性能的影响没有统一的结论。假设粘结强度 $\tau_u = \alpha f_{cu}^\beta$, α 根据试验数据确定,基于收集到的 342 个试验数据,发现 β 约为 0.75。即粘结强度和混凝土立方体抗压强度的 0.75 次方成正比,如图 5 所示。

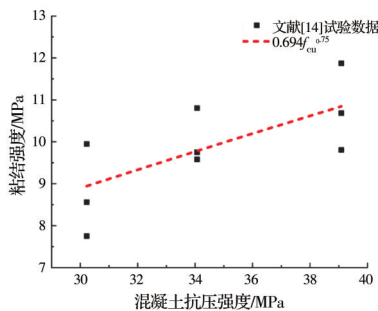
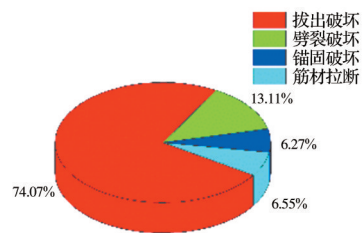


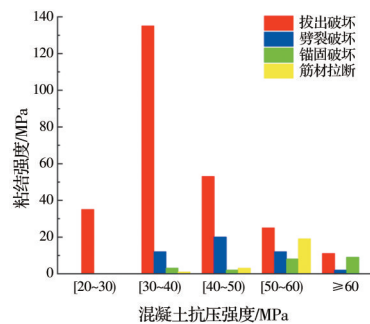
图 5 混凝土抗压强度和粘结强度关系

Fig. 5 Relationship between compressive strength of concrete and bond strength

基于研究结果表明,FRP 筋与混凝土主要有拔出破坏、劈裂破坏、锚固破坏及筋材拉断 4 种粘结破坏模式,其中,拔出破坏占比高达 74.04%,且近似呈正态分布,拔出破坏主要发生在混凝土强度等级为 30~40 MPa 之间,如图 6 所示。随着混凝土抗压强度的增加,其他 3 种破坏模式占比逐渐增加。锚固破坏定义为加载端有滑移或者加载端 FRP 筋被夹具剪坏,FRP 筋的抗剪强度较低,在进行拉拔试验时,利用镀锌钢管进行加载端筋材的锚固,可减少锚固破坏的发生。当粘结力大于 FRP 筋的极限抗拉强度时往往会发生筋材被拉断的现象。



(a) 粘结破坏模式占比



(b) 粘结破坏模式分布

图 6 粘结破坏模式

Fig. 6 Bond failure modes

3.2 FRP 筋直径

关于 FRP 筋直径对 FRP 筋与混凝土粘结性能的影响,学者们的观点基本一致。郝庆多等^[22]通过拉拔试验发现,随着直径的增大,GFRP 筋的相对粘结面积减小,导致 GFRP 筋与混凝土粘结强度降低,加载端滑移量增大,粘结性能越来越差,如图 7 所示。

FRP 筋直径越大,越需要更长的锚固长度才能产生相同的法向粘结应力,而锚固长度越长,粘结应力分布越不均匀,试件破坏时的粘结强度越小,同时,由于纵向应力的作用,泊松效应会导致 FRP 筋直径略有减小,FRP 筋直径的减少量会随着 FRP 筋尺寸的增大而增加,降低了摩擦力和机械咬合

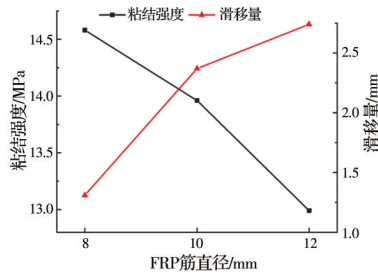


图7 FRP筋直径对粘结强度和滑移量的影响

Fig. 7 Effect of FRP bar diameter on bond strength and slip

力。并且当FRP筋受拉时,芯层和纤维可能会产生变形不同步或者变形量不同,导致FRP筋横截面上的应力分布不均匀,出现剪力滞后现象。以上就是造成FRP筋直径越大,粘结性能越差的3个主要原因^[10]。

3.3 混凝土保护层

混凝土保护层影响结构性能,减小混凝土保护层可以充分利用FRP筋优异的耐久性和抗拉强度,但过小的混凝土保护层不利于FRP筋与混凝土粘结性能的发挥,因此,需要最大限度地减小混凝土保护层,同时提供安全的粘结。Veljkovic等^[15]通过偏心拉拔试验发现,当混凝土保护层越小时,粘结强度越高,对应的滑移量越小,但粘结应力达到峰值后下降较快,容易发生劈裂破坏,增大混凝土的保护层会影响混凝土保护层的整体应力和FRP筋与混凝土之间的应力重分布,使得破坏模式从劈裂破坏向拔出破坏转变。

3.4 FRP筋表面形式

Okelo等^[11]认为将FRP筋表面制作成带肋、压痕、纤维缠绕的形式可以有效提高粘结强度。FRP筋表面粘砂可以提高初始刚度和粘结强度,提高程度和FRP筋的类型有关,GFRP筋表面粘砂时的粘结强度是未粘砂时的6~7倍,CFRP筋表面粘砂时的粘结强度是未粘砂时的2~3倍^[17]。Hao等^[23]对带肋GFRP筋进行了拉拔试验,结果表明,当肋间距和肋高较小时,横肋间的混凝土较少,产生的机械咬合力也较小,粘结强度较低;当肋间距过大时,横肋间混凝土较多,由于应力重分布减缓了楔块效应的增长速度,引起加载端较大的滑移,当肋较高时,机械咬合力随着楔块效应的增强而不断增大,对横肋表面造成一定的磨损,摩擦力减小,降低了粘结强度。综合考虑粘结强度和滑移量的影响,建议GFRP带肋筋的最佳肋间距取为直径的1倍,GFRP带肋筋的最佳肋高度应取为其直径的6%。而

Malvar认为,5.4%FRP筋直径的肋高可以提供最佳的粘结性能,谷泓学^[13]认为肋间距对粘结性能并无显著影响。Solyom等^[24]经试验研究发现,表面粘砂的GFRP筋粘结强度最高,表面压痕的GFRP筋粘结强度最低,纤维缠绕的GFRP筋滑移量最大,粘砂的GFRP筋滑移量最小。但其他学者却给出了不同的结论,Huang等^[25]发现,表面带肋的GFRP筋比表面粘砂的粘结强度更高。FRP筋的表面形状对粘结强度也有很大的影响,同等条件下,方形FRP筋与混凝土粘结强度是圆形FRP筋与混凝土粘结强度的1.25倍^[10]。

图8为不同文献^[11,24-26]中表面形式对粘结强度影响的研究结果。从图中可以看出,FRP筋表面构造形式会影响其与混凝土的粘结强度,表面带肋对粘结强度的提升效果好于表面纤维缠绕和粘砂,但表面粘砂和表面带肋对粘结强度提升的程度还没有一致结论。

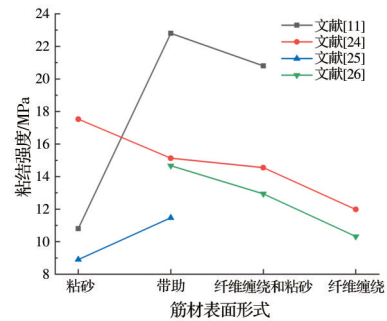


图8 表面形式对粘结强度的影响

Fig. 8 Effect of FRP surface forms on bond strength

基于文献[24]、[26]的研究结果发现,FRP筋不同表面形式对筋材直径的敏感度不同,如图9所示,随着直径的增加,所有表面形式的FRP筋粘结强度均有较大降低。文献[24]的研究表明,随着直径的增加,表面粘砂的FRP筋粘结强度下降速度略有减小,而表面纤维缠绕和粘砂以及表面纤维缠绕的FRP筋粘结强度下降速度略有上升。但这与文献[26]的试验结果不符,文献[26]中,随着直径的增加,表面纤维缠绕和粘砂以及表面纤维缠绕的FRP筋粘结强度表现出完全相反的规律,表面带肋的FRP筋粘结强度呈线性下降趋势。但由于相关研究文献有限,不能归纳出有代表性的结论,应深入研究不同因素之间的耦合作用,以便更大效率地提高FRP筋与混凝土之间的粘结强度。

Li等^[27]提出了一种新的加肋锚固体系,如图10

所示。通过拉拔试验,发现CFRP筋的主要破坏形式为拔出破坏,BFRP筋试件大多发生BFRP筋断裂或开裂,这是因为BFRP筋的抗侧刚度比CFRP筋小。使用附加肋锚固后,FRP筋与混凝土之间的粘结机制发生了变化,由于附加肋端承重的增加,混凝土中径向拉力降低,减少了混凝土开裂,提高了FRP筋的锚固性能,且在锚固长度一定的情况下,粘结性能随附加肋数量的增加而提高。

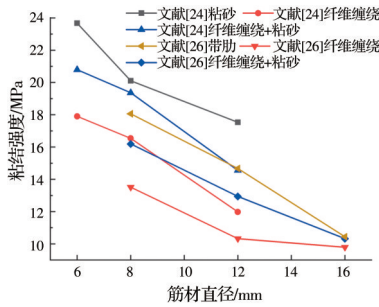


图9 表面形式和直径对粘结强度的影响

Fig. 9 Effect of FRP bar surface forms and diameter on bond strength

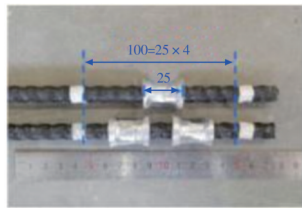


图10 加肋FRP筋

Fig. 10 Stiffened FRP bars

3.5 侧向约束的影响

王言磊等^[28]对36个GFRP筋混凝土拉拔试验进行试验研究,以BFRP布约束程度和相对混凝土保护层厚度为主要试验参数,结果表明,随着BFRP布约束程度的增加,拉拔试件的破坏模式由混凝土劈裂破坏变成拔出破坏,试件的粘结强度随着BFRP布约束程度和相对混凝土保护层厚度的增加而增大,滑移量随着BFRP布约束程度的增加而增大,随着相对混凝土保护层厚度的增加而减小,如图11所示。

3.6 复杂环境

3.6.1 高温 随着温度的升高,FRP筋的粘结树脂逐渐玻化、热分解、碳化,FRP筋纤维束性能也逐渐退化,混凝土内部裂缝逐渐增多、增大,混凝土的抗拉强度降低^[29],同时,混凝土和FRP筋横向热膨胀系数的差异会在混凝土和FRP筋的接触面产生

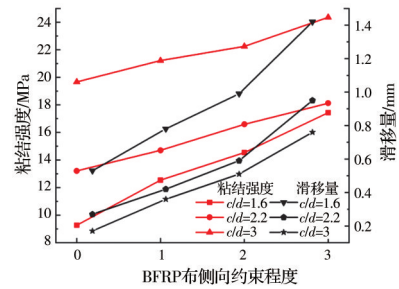


图11 侧向约束程度与粘结强度及滑移量的关系

Fig. 11 Relationship between lateral restraint degree and bond strength and slip

温度应力,当温度应力增加到混凝土的抗拉强度时,就会出现微裂缝^[30],造成FRP筋与混凝土之间粘结性能的退化,影响它们的共同工作。因此,当FRP筋混凝土构件受到荷载作用时,将会产生过大的挠度和变形,混凝土也会因为变形过大而开裂,加速内部FRP筋与外界环境中的热交换,导致构件断裂和破坏,影响结构安全^[31]。目前,有研究表明,增加混凝土保护层厚度可以减轻由于火灾和高温造成的结构性能的降低^[32-34]。

表2 FRP筋和混凝土热膨胀系数

Table 2 Thermal expansion coefficient of FRP bars and concrete

方向	热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹)			
	GFRP	CFRP	AFRP	混凝土
纵向	6.0~10.0	-9.0~0.0	-6~-2	7.2~10.8
横向	21.0~23.0	74.0~104.0	60.0~80.0	7.2~10.8

Solyom等^[35]进行了高温下带肋GFRP筋与混凝土的拔出试验,发现当拉拔试验的试验环境温度低于玻化温度时,失效是由于GFRP筋肋骨间的混凝土被剪碎,对GFRP筋表面的损害非常有限。相反,在高于玻化温度时,失效是由于GFRP筋肋骨被剪坏。当温度升高至165(对应于玻化开始温度)、190(对应于玻化温度峰值)、300 °C时,粘结强度分别下降了47%、69%、93%。

残余强度是评估火灾后GFRP筋混凝土构件强度的重要参数。Ellis等^[30]研究了GFRP筋在经历了100、200、400 °C的高温,后冷却至室温(22 °C)的残余强度,与室温相比,分别保留了96%、76%、27%。

El-Gamal^[36]发现,暴露在高温中的时间对粘结强度也有很大影响。随着在高温中暴露时间的增加,GFRP筋与混凝土之间的粘结强度逐渐降低。当温度在100、200、300时,随着暴露时间的增加,粘

结强度几乎呈线性下降。在350℃时,粘结强度在2h时突然下降到52%,在3h时没有进一步下降,在100℃下,与室温(25℃)相比,暴露1、2、3h后的粘结强度损失了约4%、12%和19%,在200℃下,粘结强度损失增加到13%、15%和21%,在300℃下,暴露1、2、3h后粘结强度损失分别增加到16%、26%和36%,如图12所示。提出一种简单的修正方法,以考虑高温和暴露时间引起的粘结强度损失,如式(1)所示。

$$\tau_{\text{loss}} = 0.015\Delta T \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: τ_{loss} 为损失的粘结强度; ΔT 为暴露温度和室温的温差($25^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 325^\circ\text{C}$); t 为暴露时间。

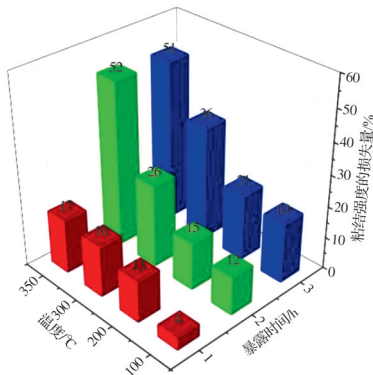


图12 粘结强度损失

Fig. 12 Bond strength loss

3.6.2 冻融循环 冻融循环对劣质混凝土结构是一个严重威胁^[37]。冻融循环引起的混凝土损伤取决于混凝土的饱和度。经历冻融循环时,在解冻阶段,混凝土内部充满水,在冻结阶段,发生膨胀并在混凝土孔隙中产生高压,所产生的应力可能会超过混凝土的抗拉强度,导致混凝土表面和内部形成裂缝。随着循环次数的增加,裂缝继续发展,对FRP筋的约束降低,同时混凝土抗压强度也会随之降低^[38]。并且,FRP筋的热膨胀系数高于混凝土,处在冻结时间内时,FRP筋的收缩要大于混凝土,在两者之间产生缝隙。此外,水分子可以扩散到聚合物树脂中,由于水分子可以起到增塑剂的作用,削弱了聚合物的范德华力,导致树脂劣化,从而降低粘结强度^[39-40]。

Fursa等^[41]对16个GFRP筋混凝土试件进行了冻融循环试验,发现在-40~20℃的第18次循环后,粘结强度下降了近50%。而Khanfour等^[42]发

现,处于冻融循环下的BFRP筋不会改变试件的失效模式,并且冻融循环(-25~15℃)以及循环次数(100、200)对粘结强度及加载端滑移量影响不大。Alves等^[43]基于GFRP筋混凝土构件在持续和疲劳加载条件下的试验发现,冻融循环使粘砂GFRP筋与混凝土的粘结强度提高了约40%。由此可见,学者们关于冻融循环对FRP筋与混凝土粘结性能的研究结果存在较大差异,这可能是由于材料性能存在差异或者采用了不同的测试方法、不同的试验条件。比如Yan等^[44]认为混凝土保护层厚度会影响冻融循环对粘结性能的影响,当混凝土保护层厚度从 $3d_b$ 增加到 $4.5d_b$ 时,粘结强度从降低12%减少到降低3%,粘结滑移减小了14%。

3.6.3 电解质溶液 当处于潮湿的碱性环境中时,粘结性能会产生退化。混凝土呈高度碱性(pH值约为12.5~13.5),不仅会使组成树脂的酯基和氢氧化物离子发生化学反应,而且会损坏玻璃纤维。另一方面,水分可以通过树脂扩散到纤维-树脂界面,甚至扩散到纤维,导致树脂的水解和塑化及纤维-树脂界面的粘结损失。此外,当含有氯离子水分存在时,GFRP筋与周围混凝土的粘结退化变得更加严重。在寒冷地区混凝土结构中不可避免地会遇到这种现象,因为在寒冷地区。混凝土孔隙溶液可能会像除冰盐中常见的那样被氯离子污染^[44]。Khanfour等^[42]通过BFRP筋粘结耐久性试验,发现潮湿的环境对粘结强度有不利影响,程度取决于符合复合材料的吸收特性。Altamas等^[45]对BFRP筋在酸、盐、碱环境中暴露30、60、90d的粘结强度进行了研究。在盐和碱性环境中暴露90d后,拔出试件的粘结强度下降了25%,而暴露在酸性环境中时粘结强度下降了14%,由此可见,较酸性环境,BFRP筋对盐和碱性环境更加敏感。

4 粘结-滑移本构模型

FRP筋和混凝土的粘结性能是FRP筋与混凝土能够共同作用的前提,FRP筋与混凝土的粘结-滑移本构关系是粘结性能的重要体现,与FRP筋混凝土构件的塑性铰转动能力、剪切破坏及非线性有限元分析有着密切关系。

Malvar^[46]基于不同围压值和固定的混凝土抗压强度,对表面形状不同的GFRP筋进行研究,提出

了第一个 FRP 筋与混凝土粘结-滑移本构模型,但该模型需要拟合的数据太多,很难进行应用和推广。Cosenza 等^[47]基于大量试验结果发现,FRP 筋与混凝土粘结-滑移曲线并不像钢筋一样出现水平段,因此,建议去掉 BPE 模型中的水平段,并改变下降段的斜率,简化得到的 MBPE 模型更适合 FRP 筋。Cosenza 等^[18]认为大多数结构计算只需要粘结-滑移曲线的上升段,提出了一种指数形式的粘结-

滑移上升段表达式,即 CMR 模型。高丹盈等^[48]基于已有的粘结-滑移本构模型,比较了各个模型之间的差异性,提出了物理概念明确、形式简单实用的连续曲线模型,并通过大量试验数据验证了其实用性。张海霞等^[49]、郝庆多等^[22]分别提出了新的分段式粘结-滑移本构模型,郝庆多等还提出了残余段的表达公式。表 3 给出了目前常用的粘结-滑移本构模型。

表 3 常用的粘结-滑移本构模型

Table 3 Bond-slip constitutive models

粘结-滑移本构模型	粘结-滑移本构表达式
Malvar's 模型 ^[46]	$\frac{\tau_u}{f_t} = A + B(1 - e^{C\sigma_r/f_t}); s_u = D + E\sigma_r; \frac{\tau}{\tau_u} = \frac{F(s/s_u) + (G-1)(s/s_u)^2}{1 + (F-2)(s/s_u) + (G-1)(s/s_u)}$
MBPE 模型 ^[47]	$\tau/\tau_u = (s/s_u)^\alpha, (s \leq s_u); \tau = [1 - p(s/s_u - 1)]\tau_u, (s_u < s \leq s_r); \tau = \tau_r, (s > s_r)$
CMR 模型 ^[18]	$\tau = (1 - e^{-s/s_u})^\beta \tau_u$
连续曲线模型 ^[48]	$\tau = (2\sqrt{s/s_u} - s/s_u)\tau_u, (0 < s \leq s_u); \tau = \tau_u(s_r - s)^2(2s + s_r - s_u)/(s_r - s_u)^3 + \tau_r(s - s_u)^2(3s_r - 2s - s_u)/(s_r - s_u)^3, (s_u < s \leq s_r); \tau = \tau_r, (s > s_r)$
张海霞模型 ^[49]	$\tau = 2(s/s_u) - (s/s_u)^2, (0 < s \leq s_u); \tau = s/(p_1s - p_2), (s_u < s \leq s_r); \tau = \tau_r, (s > s_r);$ $p_1 = (s_u\tau_r - s_r\tau_u)/[\tau_u\tau_r(s_u - s_r)] p_2 = (\tau_r - \tau_u)s_us_r/[(s_u - s_r)\tau_u\tau_r]$
郝庆多模型 ^[22]	$\tau = \tau_1(s/s_1), 0 < s \leq s_1; \tau = (\tau_2 - \tau_1)[(s - s_1)/(s_2 - s_1)]^\alpha + \tau_1, (s_1 < s \leq s_2); \tau = \tau_2[1 - \beta(s/s_2 - 1)], (s_2 < s \leq s_3); \tau = \tau_3 - \gamma[e^{-\xi\omega(s-s_3)} \cos \omega(s - s_3) - 1] + \rho(e^{-\xi\omega(s-s_3)} - 1), (s > s_3)$

注:式中 σ_r 为轴对称的侧限径向压力; f_t 为混凝土抗拉强度; A, B, C, D, E, F, G 为常数,需根据试验结果确定; τ_u, s_u 为粘结强度及相应的滑移值; p 为常数,根据试验结果确定; τ_r, s_r 为残余强度及相应的滑移值; β 为常数需根据试验结果确定; $\alpha, \beta, \gamma, \xi, \omega, \rho$ 分别为由试验结果确定的参数。

为了验证常用的粘结-滑移本构的精确性,采用决定系数 R 的平方 (R^2) 反映粘结-滑移本构和试验结果的耦合程度。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中: y_i 是利用粘结-滑移本构模型拟合出来的粘结应力值; \hat{y}_i 是试验中粘结滑移破坏模式下实测的粘结应力值; \bar{y} 是利用粘结-滑移本构关系拟合出来的粘结应力平均值。 R^2 越大,越接近 1,则拟合出的粘结-滑移本构和试验结果相关性越好。由于 Malvar's 模型、MBPE 模型、CMR 模型、郝庆多模型中需要根据试验确定的参数较多,模型复杂,且使用相对较少,所以 R^2 的计算只考虑连续曲线模型和张海霞模型。大部分混凝土构件或结构计算时只需要用到粘结-滑移本构的上升段,因此,此处只计算上升段,表 4 为粘结-滑移本构上升段 R^2 的计算结果,从计算结果可知,粘结-滑移本构的拟合精度有

待进一步商榷。

为了不断完善粘结-滑移相关理论,提高计算精度,基于收集到的粘结-滑移试验曲线,拟合出了一种新的粘结-滑移本构的上升段,如式(3)所示。

$$\tau = \left(\sqrt{s/s_u} + 0.5s/s_u - 0.5(s/s_u)^2 \right) \tau_u \quad (3)$$

式中各参数含义同表 3。

该粘结-滑移本构模型的上升段有 2 个关键点:即初始点 A 点和最高点 B 点,如图 13 所示。

$$\text{在 } A \text{ 点: } s = 0, \tau = 0, \frac{d\tau}{ds} = 0;$$

$$\text{在 } B \text{ 点: } s = s_u, \tau = \tau_u, \frac{d\tau}{ds} = 0.$$

A 点的初始斜率为无穷大,且随着滑移的增大,粘结刚度逐渐减小,达到 B 点(粘结强度)时,粘结刚度为 0,这与 FRP 筋与混凝土粘结的物理现象及受力特性吻合。

经由粘结-滑移试验曲线以及 R^2 计算结果验

证,发现式(3)表示的粘结-滑移本构模型上升段和试验结果耦合较好。现以 2 个粘结-滑移试验曲线为例说明拟合效果,见图 14, R^2 的计算结果见表 4。

表 4 粘结-滑移本构模型 R^2 的计算结果

Table 4 Calculation results of bond-slip constitutive model about R^2

作者	试件	混凝土强度/MPa	直径/mm	FRP 筋表面形式	τ_u /MPa	s_u /mm	破坏形式	连续曲线模型	张海霞模型	本文模型
Achillides 等 ^[10]	45Gr8D	45.0	13.5	粘砂	8.90	0.96	P	0.95	0.49	0.90
Rolland 等 ^[17]	GLASS-S-12.7	35.5	12.7	粘砂	9.28	1.24	P	0.76	0.83	0.95
Rolland 等 ^[17]	CARBON-NS-10	35.5	10	光滑	5.69	6.54	P	0.96	0.66	0.94
Hao 等 ^[23]	8@8#0.06	28.7	8	带肋	14.58	1.31	P	0.95	0.31	0.78
Hao 等 ^[23]	10@10#0.06	28.7	10	带肋	13.96	2.37	P	0.73	0.96	0.97
Hao 等 ^[23]	12@12#0.06	28.7	12	带肋	12.99	2.74	P	0.57	0.94	0.92
Huang 等 ^[25]	F1D14V1	37.8	14	粘砂	9.32	5.67	P	0.76	0.87	0.96
Huang 等 ^[25]	F1D16V1	37.8	16	粘砂	5.20	2.23	P	0.68	0.79	0.86
Huang 等 ^[25]	F2D14V1	37.8	14	带肋	12.66	3.92	P	0.78	0.94	0.91
Huang 等 ^[25]	F2D16V1	37.8	16	带肋	6.65	2.92	P	0.75	0.98	0.80
郭恒宁 ^[50]	C10-1	42.1	10	带肋	6.00	3.60	P	0.93	0.24	0.88
郭恒宁 ^[50]	C15-1	42.1	15	带肋	6.80	3.02	P	0.86	0.77	0.98

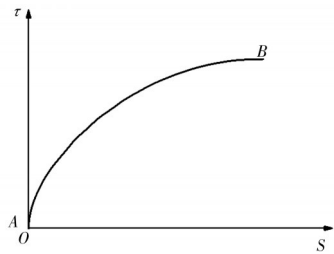


图 13 粘结-滑移本构模型上升段

Fig. 13 Rising section of bond-slip constitutive model

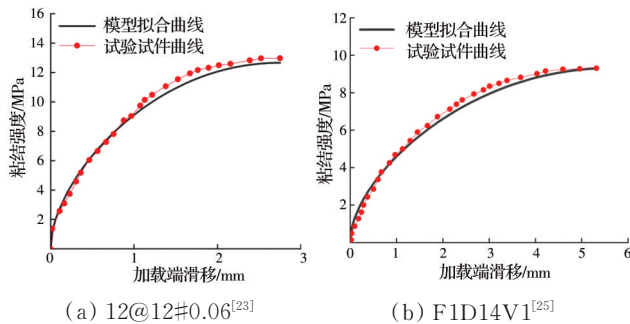


图 14 粘结-滑移本构模型拟合曲线与试验曲线对比

Fig. 14 Comparison between bond-slip constitutive model fitting curves and test curves

5 结论与展望

FRP 筋是在土木工程界被广泛用来代替钢筋的筋材之一,对专家们关于 FRP 筋与混凝土的粘

性能的研究进行全面的整理,得出如下结论:

1) 根据试验目的选择合适的试验方法,拔出试验常用来研究粘结应力和相对滑移量的关系,梁式试验主要用来模拟梁端的粘结锚固性能,轴拉试验常用来研究梁纯弯段主裂缝间的粘结性能。

2) 粘结强度随混凝土强度的增加而增加,且粘结强度和混凝土立方体抗压强度的 0.75 次方成正比;粘结强度随 FRP 筋直径的增加而减小;混凝土保护层厚度会影响粘结破坏形式;FRP 筋表面的构造会增加 FRP 筋与混凝土的粘结强度,但哪种表面形式效果最显著还没有一致的结论;复杂环境下,如高温、碱性溶液、酸性溶液等会使粘结性能退化,但关于冻融循环对粘结性能的影响还没有统一的结论。

3) 基于拉拔试验数据库建立的粘结-滑移本构模型上升段符合粘结物理现象和受力特性,且具有较好的精度。

随着制造技艺及施工技术的进步,FRP 筋逐渐成为传统建筑材料的重要补充,结合相关研究现状,对未来研究 FRP 筋与混凝土粘结性能时有以下建议:

1) 虽然已清楚粘结力的组分,但各个组分在不同影响因素下所占比重还没有深入研究。

2) 不同地区,FRP 筋混凝土结构处于复杂环境

下,所以很有必要探究多种复杂环境共同作用时对粘结性能的影响,并建立统一的数学模型和本构关系。

3)在实际的FRP钢筋混凝土结构中,当考虑地震作用和偶然荷载时构件处于非常复杂的应力状态,因此,研究复杂应力状态下FRP筋与混凝土的粘结性能具有重大意义。

参考文献

- [1] MA G W, HUANG Y M, ASLANI F, et al. Tensile and bonding behaviours of hybridized BFRP-steel bars as concrete reinforcement [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201: 62-71.
- [2] American Concrete Institute (ACI). Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars: ACI 440.1R-15 [S]. Farmington Hills, Michigan. 2015.
- [3] Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers: S806-12 [S]. Canadian Standards Association, 2012.
- [4] Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials [S]. Japan Society of Civil Engineers. 1997.
- [5] 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范:GB 50608—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB 50608-2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese)
- [6] GUDONIS E, KACIANAUSKAS R, GRIBNIAK V, et al. Mechanical properties of the bond between GFRP reinforcing bars and concrete [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2014, 50(4): 457-466.
- [7] SHEN D J, OJHA B, SHI X, et al. Bond stress-slip relationship between basalt fiber-reinforced polymer bars and concrete using a pull-out test [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, 35(9): 747-763.
- [8] 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.
- [9] 陈守磊. GFRP筋混凝土粘结性能试验方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
CHEN S L. Test method of GFRP reinforced concrete bonding performance [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [10] ACHILLIDES Z, PILAKOUTAS K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(2): 173-181.
- [11] OKELO R, YUAN R L. Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(3): 203-213.
- [12] 张美真. 基于智能筋的FRP筋与混凝土粘结滑移试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
ZHANG M Z. Experimental study on bond-slip behavior between FRP bar and concrete based on intelligent bars [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014. (in Chinese)
- [13] 谷泓学. FRP筋拉伸及与混凝土的粘结性能[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
GU H X. Tensile property of FRP tendons and bond behavior between FRP tendons and concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015. (in Chinese)
- [14] 张彧. GFRP筋与混凝土粘结性能理论及试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
ZHANG Y. Experimental study on bond performance theory between GFRP bar and concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [15] VELJKOVIC A, CARVELLI V, HAFFKE M M, et al. Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 124: 40-53.
- [16] 代前前. GFRP筋与混凝土粘结性能试验研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2017.
DAI Q Q. The experimental research on bond-slip performance of GFRP bar embedded in concrete [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] ROLLAND A, ARGOUËL P, BENZARTI K, et al. Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 231: 117160.
- [18] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 1997, 1(2): 40-51.
- [19] 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 D Y, BRAHIM B. Influential factors of bond properties between fiber reinforced polymer (FRP) rebars and concrete [J]. *Industrial Construction*, 2001, 31(2): 9-14. (in Chinese)
- [20] LEE J Y, KIM T Y, KIM T J, et al. Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-

- strength concrete [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(2): 258-270.
- [21] LEE S W, KANG S B, TAN K H, et al. Experimental and analytical investigation on bond-slip behaviour of deformed bars embedded in engineered cementitious composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 127: 494-503.
- [22] 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, 179.
HAO Q D, WANG Y L, HOU J L, et al. Experimental study on bond behavior of GFRP ribbed rebars [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(10): 158-165, 179. (in Chinese)
- [23] HAO Q D, WANG Y L, HE Z, et al. Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 865-871.
- [24] SOLYOM S, BALÁZS G L. Bond of FRP bars with different surface characteristics [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: 119839.
- [25] HUANG L H, CHEN J, QU J T, et al. Modeling for bond-constitutive relationships of FRP rebars to concrete matrix [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120654.
- [26] 胡成超, 高奎, 涂建维, 等. GFRP筋与箍筋约束混凝土之间粘结性能的试验研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(10): 13-20.
HU C C, GAO K, TU J W, et al. Experimental research on bond behavior between GFRP bars and stirrups-confined concrete [J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(10): 13-20. (in Chinese)
- [27] LI T, ZHU H, WANG Q, et al. Experimental study on the enhancement of additional ribs to the bond performance of FRP bars in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 185: 545-554.
- [28] 王言磊, 王密锋, 张学, 等. BFRP侧向约束对GFRP带肋筋与混凝土粘结性能的影响[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(4): 5-12.
WANG Y L, WANG M F, ZHANG X, et al. Effects of BFRP lateral confinement on bond behavior between GFRP ribbed bars and concrete [J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(4): 5-12. (in Chinese)
- [29] 王英来. 高温后FRP筋拉伸性能及其与混凝土粘结性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
WANG Y L. Experimental study on tensile property of FRP bars and bond behavior between FRP bars and concrete after high temperature [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013. (in Chinese)
- [30] ELLIS D S, TABATABAI H, NABIZADEH A. Residual tensile strength and bond properties of GFRP bars after exposure to elevated temperatures [J]. *Materials*, 2018, 11(3): 346.
- [31] 吕西林, 周长东, 金叶. 火灾高温下GFRP筋和混凝土粘结性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(5): 32-39, 88.
LU X L, ZHOU C D, JIN Y. Test study on bond behavior between GFRP bar and concrete in high temperature [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(5): 32-39, 88. (in Chinese)
- [32] BALÁZS-ADORJÁN É, Nehme B S G. Bond of CFRP wires under elevated temperature [C]//Proc. of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005). 2005: 7-9.
- [33] BAI Y, KELLER T, VALLEE T. Modeling of thermo-physical properties and thermal responses for FRP composites in fire [C]//Asia-Pacific Conference on FRP in Structures. APFIS. 2007: 645-650.
- [34] BELLAKEHAL H, ZAIDI A L, MASMOUDI R, et al. Behavior of FRP bars-reinforced concrete slabs under temperature and sustained load effects [J]. *Polymers*, 2014, 6(3): 873-889.
- [35] SOLYOM S, DI BENEDETTI M, GUADAGNINI M, et al. Effect of temperature on the bond behaviour of GFRP bars in concrete [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 183: 107602.
- [36] EL-GAMAL S. Bond strength of glass fiber-reinforced polymer bars in concrete after exposure to elevated temperatures [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(23): 2151-2163.
- [37] READING T J, ADAMS R F, BARNES B D, et al. Guide to durable concrete [J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1977, 74: 573-581.
- [38] WARDEH G, MOHAMED M A, GHORBEL E. Analysis of concrete internal deterioration due to frost action [J]. *Journal of Building Physics*, 2011, 35(1): 54-82.
- [39] CHEN Y, DAVALOS J F, RAY I, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures [J]. *Composite Structures*, 2007, 78(1): 101-111.
- [40] BELARBI A, WANG H Z. Bond durability of FRP bars embedded in fiber-reinforced concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16(4): 371-380.
- [41] FURSA T V, UTSYNG E, KORZENOK I N, et al. Using electric response to mechanical impact for evaluating the durability of the GFRP-concrete bond during the freeze-thaw process [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 90: 392-398.

- [42] KHANFOUR M A, REFAI AEL. Effect of freeze-thaw cycles on concrete reinforced with basalt-fiber reinforced polymers (BFRP) bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 145: 135-146.
- [43] ALVES J, EL-RAGABY A, EL-SALAKAWY E. Durability of GFRP bars' bond to concrete under different loading and environmental conditions [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(3): 249-262.
- [44] YAN F, LIN Z B, ZHANG D L, et al. Experimental study on bond durability of glass fiber reinforced polymer bars in concrete exposed to harsh environmental agents: Freeze-thaw cycles and alkaline-saline solution [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 116: 406-421.
- [45] ALTALMAS A, REFAI AEL, ABED F. Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 81: 162-171.
- [46] MALVAR L J. Bond stress-slip characteristics of FRP rebar: Report TR-2013-SHR [R]. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, 1994.
- [47] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Analytical modeling of bond between FRP reinforcing bars and concrete [C]//Proc., 2nd Int. RILEM Symp. (FRPRCS-2), 1995.
- [48] 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, 82. GAO D Y, ZHU H T, XIE J J. The constitutive models for bond slip relation between frp rebars and concrete [J]. *Industrial Construction*, 2003, 33(7): 41-43, 82. (in Chinese)
- [49] 张海霞, 朱浮声. 考虑粘结滑移本构关系的FRP筋锚固长度[J]. *四川建筑科学研究*, 2007, 33(4): 43-46. ZHANG H X, ZHU F S. Study on the anchorage length of FRP bars with bond-slip constitutive relationship [J]. *Sichuan Building Science*, 2007, 33(4): 43-46. (in Chinese)
- [50] 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 H N. Experimental study and theoretical analysis on bond and anchorage properties of FRP tendons concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)

(编辑 胡玲)