

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.137



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



带肋 FRP 筋与混凝土的粘结强度预测方法

董恒磊^{1,2}, 李东风¹, 蔡庆森², 王代玉³

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)理学院, 广东深圳 518000; 2. 深圳市龙岗区建筑工务署, 广东深圳 518100;
3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:目前有关带肋纤维增强复合材料(FRP)筋粘结性能的研究不足。收集粘结纤维肋 FRP 筋(简称粘结肋 FRP 筋)和机械刻槽肋 FRP 筋(简称刻槽肋 FRP 筋)的试验数据,探究各参数对粘结性能的影响。结果表明:两种带肋 FRP 筋的宏观破坏模式都是拔出破坏,在细观上粘结肋 FRP 筋主要为 FRP 筋肋的剪切剥落,而混凝土损伤较轻微,大部分刻槽肋 FRP 筋表现为混凝土肋剪切破坏,二者的粘结强度随混凝土强度的增加而增大;增加保护层厚度可增强混凝土对 FRP 筋的约束效果,有助于提高粘结肋 FRP 筋的粘结强度,但对刻槽肋 FRP 筋几乎没有影响;增加相对肋高 h_{rd} 和 FRP 筋肋宽比 F_R 可提高粘结肋 FRP 筋的粘结强度;而刻槽肋 FRP 筋几乎不受 h_{rd} 的影响,主要受混凝土肋宽比 C_R 的影响,其粘结强度随 C_R 的增加而增大;建立的粘结强度公式计算值与试验结果吻合较好,预测精度高于设计规范,主要原因在于该公式准确考虑了 FRP 筋肋成型工艺和几何特征对粘结强度的影响。

关键词:带肋 FRP 筋;肋成型工艺;肋几何特征;粘结破坏模式;粘结强度;理论计算公式

中图分类号:TU511.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)01-0130-12

Bond strength prediction method of ribbed FRP bars in concrete

DONG Henglei^{1,2}, LI Dongfeng¹, CAI Qingsen², WANG Daiyu³

(1. School of Science, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518000, Guangdong, P. R. China; 2. Bureau of Public Works of Longgang District of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518100, Guangdong, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: Until now, there has been limited research on the bonding behavior of ribbed fiber-reinforced polymer (FRP) bars. In this paper, bond test data of the spirally-glued FRP bar and mechanically-grooved FRP bar were collected to investigate the test parameters on the bond behavior. The results show that the macroscopic failure mode for the two types of ribbed FRP bars is pullout failure. More specifically, spirally-glued FRP bars mainly exhibit shearing off of FRP bar ribs, while slight damage occurs in concrete. Most grooved FRP bars show shearing off of concrete ribs, and the bond strength increases with the increase of concrete strength for both FRP bars. Spirally-glued FRP bars show higher bond strength by increasing concrete cover which contributes to better confinement to FRP bars, but this seems to have no effect on grooved FRP bars. The bond strength of spirally-glued FRP bars can be improved by increasing relative rib height h_{rd} and FRP bar rib width ratio F_R .

收稿日期:2022-07-27

基金项目:国家自然科学基金(51878224)

作者简介:董恒磊(1989-),男,博士,主要从事 FRP 在土木工程中的应用研究,E-mail: hengleidong@foxmail.com.

Received: 2022-07-27

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51878224)

Author brief: DONG Henglei (1989-), PhD, main research interest: application of FRP in civil engineering, E-mail: hengleidong@foxmail.com.

While grooved FRP bars are almost unaffected by h_{rd} , and are mainly influenced by concrete rib width ratio C_R , having higher bond strength by increasing C_R . The calculated results by the proposed equations are in good agreement with the test results with greater accuracy than the design codes. This is because the effect of rib forming process and geometrical features of ribbed FRP bars on bond strength is accurately accounted in the proposed equations.

Keywords: ribbed FRP bars; rib forming process; rib geometrical features; bond failure mode; bond strength; theoretical calculation formula

钢筋混凝土结构耐久性能降低的主要原因是钢筋锈蚀,例如,沿海设施、化工厂房等在遭受侵蚀性介质腐蚀时,结构安全性能会急剧退化,最终导致上述基础设施在未达到设计使用年限的情况下丧失了使用功能^[1-2]。纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)具有耐腐蚀、可设计性强等优势,采用FRP筋作为混凝土结构中的配筋材料,即可避免钢筋锈蚀带来的耐久性不足等问题,同时,FRP筋还可以不经过防腐处理直接在海水海砂混凝土中应用,极大地缓解淡水和河沙资源匮乏的问题,促进绿色可持续发展^[3-5]。

FRP筋与混凝土间的粘结性能是影响FRP筋混凝土结构力学性能的关键因素,例如,正常使用极限状态、承载能力极限状态都在不同程度上受粘结性能的影响。FRP筋是由连续长纤维组成的,包括碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等,并采用树脂将纤维黏结在一起,例如环氧树脂、乙烯基脂等^[6]。因此,FRP筋的力学性能和黏结特性与钢筋有明显的不同,需要进行系统的研究。目前,研究FRP筋粘结性能主要采用拔出试验和梁式试验等方法,考察混凝土保护层和抗压强度、FRP筋类别和直径、粘结长度、环境条件等因素对粘结性能的影响规律^[7-8]。

与钢筋相比,FRP筋的表面处理形式和几何特征多种多样,如光圆、编织、喷砂、刻槽、加肋等,相应的粘结机理和破坏模式具有很大差异^[9]。光圆FRP筋主要依靠与混凝土间的摩擦传递粘结应力,筋与混凝土界面很容易被破坏,粘结强度较低^[10]。在FRP筋表面喷砂可以明显提升粘结强度,粘结损伤破坏主要集中在喷砂层与混凝土之间;研究表明^[11-13],粘结损伤破坏模式受砂子粒径影响,且粘结强度随砂子粒径的增大而提高,但大多数文献并未给出砂粒级配,其结果的规律性仍需进一步研究。

在FRP筋表面形成有规律的螺旋肋也可以明显提高粘结性能,FRP筋肋与混凝土肋相互咬合,有望产生与带肋钢筋相似的机械咬合作用。Malvar等^[14]尝试在光圆FRP筋表面粘结纤维束,形成了螺旋式凸肋,试验结果表明混凝土损伤不明显,而主

要表现为FRP筋凸肋的脱粘,粘结强度较低。Cosenza等^[9]指出纤维肋与FRP筋与混凝土未形成有效粘结是肋过早脱粘的主要原因。因此,这种带肋FRP筋的粘结性能主要取决于纤维肋与FRP筋之间的粘结强度。采用机械成型的工艺将光圆FRP筋刻出螺旋式凹槽也是一种有效的带肋方式,试验发现凹槽中的混凝土与FRP筋相互咬合,主要表现为混凝土剪切破坏^[15],说明混凝土强度对粘结性能起到关键作用。显然由于肋成型工艺和几何特征的区别,不同种类的FRP筋具有不同的粘结机理。Solyom等^[15-16]通过直接拔出试验发现上述两种类型FRP筋的损伤模式有明显区别,粘结强度的变化规律也不相同,在粘结强度公式中采用修正系数考虑肋成型工艺的影响。Basaran等^[17]也在试验中发现了类似的结果,采用修正系数考虑肋成型工艺对粘结强度的影响。此外,对于同种肋成型工艺,肋的几何特征也对黏结性能有明显影响。例如,刻出螺旋式凹槽的带肋FRP筋随FRP筋肋宽的增加,粘结强度也增大,但破坏更加突然^[18]。上述有限的研究对理解带肋FRP筋粘结性能做出了有益的尝试,但目前尚未形成统一结论。迄今为止,国内外主要FRP筋混凝土结构设计规范对FRP筋粘结性能的规定仍有较大差异。ACI 440.1R-15未考虑筋表面带肋的影响^[19];JSCE建议考虑该影响,但未给出相关公式,并建议依据试验确定^[20];CSA S806-12仅采用系数1.05对带肋或螺旋状FRP筋的粘结强度进行修正^[21]。

综上所述,由于带肋FRP筋的肋成型工艺的复杂性和多样性,这方面的研究仍处于不断探索和修正的阶段,肋几何特征对粘结性能的影响规律尚未见到详细报道。笔者以带肋FRP筋为切入点,首先明确常见的肋成型工艺,在公开发表的文献中收集带肋FRP筋的粘结性能试验数据,再考察主要研究变量对粘结性能的影响规律,尤其关注肋成型工艺、肋几何特征对破坏模式和粘结强度的影响,最终提出可定量考虑FRP筋肋特征的粘结强度计算模型,揭示带肋FRP筋的粘结机理。

1 带肋 FRP 筋的特征和粘结性能试验

1.1 肋成型工艺和几何特征

根据肋成型工艺的不同,可以把带肋 FRP 筋分为粘结纤维肋 FRP 筋(简称粘结肋 FRP 筋)、机械刻槽肋 FRP 筋(简称刻槽肋 FRP 筋)。如图 1(a)所示,粘结肋 FRP 筋是将纤维束或其他材料螺旋缠绕并粘结在光圆 FRP 筋表面,形成有规律的螺旋式凸肋,FRP 筋肋宽度为 w_f ,相邻肋间距为 s_r ,在 FRP 筋相邻肋之间形成混凝土肋,其肋宽为 w_c ,FRP 筋凸肋的高度为肋高 h_r 。如图 1(b)所示,刻槽肋 FRP 筋是采用机械成型工艺在光圆 FRP 筋表面刻出凹槽,也形成了有规律的螺旋式凸肋,肋宽、肋高、肋间距分别为 w_f 、 h_r 、 s_r ,FRP 筋凸肋之间的凹槽形成混凝土肋,宽度为 w_c 。在肋成型过程中,可以根据需要动态控制各参数的大小,实现不同的粘结性能。

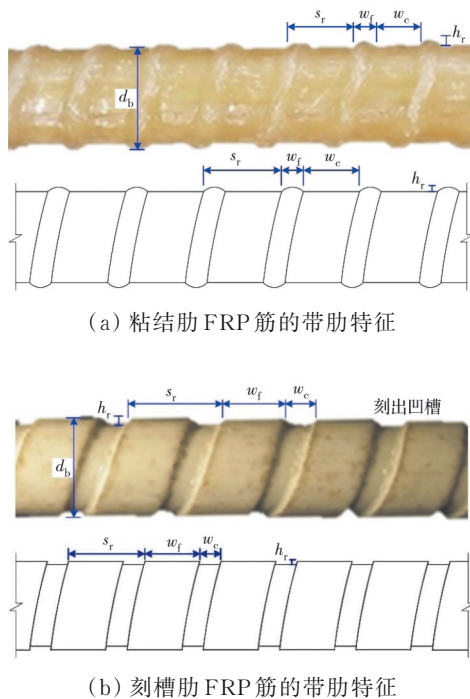


图 1 带肋 FRP 筋的几何特征

Fig. 1 Geometric features of ribbed FRP bars

如图 2 所示,这两种带肋 FRP 筋与混凝土间的粘结应力来源于界面间的化学胶结力和摩擦力、FRP 筋肋和混凝土肋间的机械咬合力。研究表明,带肋 FRP 筋的粘结强度主要取决于机械咬合力^[9]。笔者采用相对肋高度 h_{rd} 、FRP 筋肋宽比 F_R 或混凝土肋宽比 C_R 描述带肋 FRP 筋的几何特征。

$$h_{rd} = \frac{h_r}{d_b} \quad (1)$$

$$C_R = \frac{w_c}{s_r} \quad (2)$$

$$F_R = \frac{w_f}{s_r} \quad (3)$$

式中: d_b 为 FRP 筋直径; h_{rd} 为肋高与筋材直径的比值,该值越大说明筋与混凝土在横向上的咬合深度越大; C_R 为混凝土肋在纵向上所占的比例,该值越大说明混凝土肋在纵向上越强; F_R 为 FRP 筋肋在纵向上所占的比例,该值越大说明 FRP 筋肋在纵向上越强。

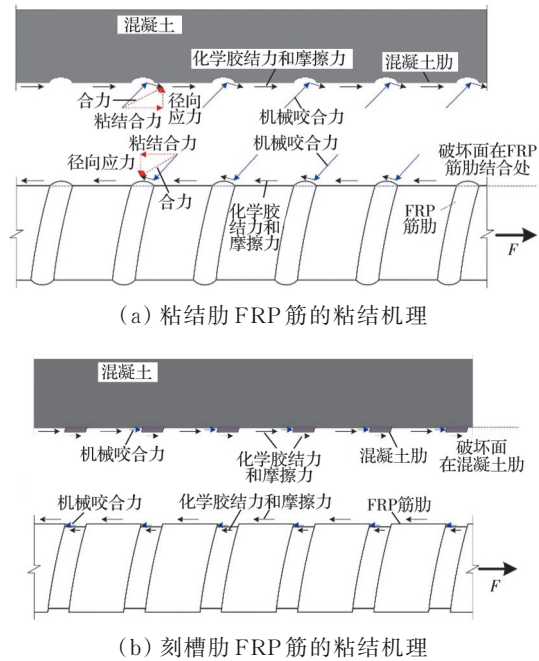


图 2 带肋 FRP 筋与混凝土的粘结机理

Fig. 2 Bond mechanism of ribbed FRP bars in concrete

1.2 带肋 FRP 筋粘结性能试验数据汇总

在公开发表的文献中搜集了带肋 FRP 筋的粘结性能试验数据,包含 47 个粘结肋 FRP 筋试件^[15,17,22-25]和 67 个刻槽肋 FRP 筋试件^[15,17-18,26-30],共计 114 个试件,均采用普通混凝土,试验研究变量和主要结果详见表 1 和表 2。主要研究变量包括 FRP 筋树脂和纤维类别、FRP 筋直径和粘结长度、混凝土保护层厚度和抗压强度、FRP 筋肋几何特征等。混凝土抗压强度是指 150 mm×300 mm 圆柱体的抗压强度试验平均值,若文献仅给出了 150 mm×150 mm 立方体抗压强度,可参考《钢筋混凝土原理》^[31]及《混凝土结构设计标准(2024 年版)》(GB/T 50010—2010)^[32]的规定,乘系数 0.8,可近似得到 150 mm×300 mm 圆柱体的抗压强度。表 1 和表 2 中的粘结强度 τ_m 的定义为

$$\tau_m = \frac{F}{\pi d_b l_b} \quad (4)$$

式中: F 为 FRP 筋从混凝土中拔出的最大荷载; d_b 和 l_b 分别为 FRP 筋的直径和粘结长度。

表 1 粘结肋FRP筋粘结性能试验主要结果汇总

Table 1 Summary of main results from bond tests of FRP bars with spirally-glued surface

数据来源	试件	$f_{c0}/$ MPa	纤维/ 树脂	$E_f/$ GPa	$f_t/$ MPa	$d_b/$ mm	l_b/d_b	c/d_b	$h_{rd}/$ mm	$h_{rd}/\%$	$w_f/$ mm	$w_c/$ mm	F_R	$\tau_m/$ MPa	失效 模式
Kotynia, et al. [22]	12-L120-35.1	36.3	Glass fiber	50.5	1 281	12	10	2.92	0.35	2.92	1.10	8.50	0.11	11.05	F
	12-L120-35.2	34.3		50.5	1 281	12	10	2.92	0.35	2.92	1.10	8.50	0.11	12.11	F
	16-L160-15.1	34.3		50.5	1 205	16	10	0.94	0.35	2.19	1.00	8.00	0.11	7.59	F
	16-L160-15.2	36.3		50.5	1 205	16	10	0.94	0.35	2.19	1.00	8.00	0.11	7.72	F
	16-L160-35.1	36.3		50.5	1 205	18	10	1.94	0.35	1.94	1.00	8.00	0.11	9.15	F
	18-L180-15.2	36.3		50.5	1 109	18	10	0.83	0.35	1.94	1.00	7.50	0.12	6.24	F
	18-L180-35.1	34.3		50.5	1 109	18	10	1.94	0.35	1.94	1.00	7.50	0.12	7.70	F
	18-L180-35.2	34.3		50.5	1 109	18	10	1.94	0.35	1.94	1.00	7.50	0.12	7.36	F
Bazli, et al. [23]	L-C	23	Glass fiber Vinyl ester	55	950	8	10	5.75	0.50	6.25	1.10	4.00	0.22	10.25	F
	N-C	33		55	950	8	10	5.75	0.50	6.25	1.10	4.00	0.22	14.98	F
	H-C	54		55	950	8	10	5.75	0.50	6.25	1.10	4.00	0.22	16.81	F
	S-C	38		55	950	8	10	5.75	0.50	6.25	1.10	4.00	0.22	14.68	F
Won, et al. [24]	G-1	54.56	Glass fiber Vinyl ester	51.99	1 022	13	4	5.27	0.90	6.92	2.50	7.50	0.25	17.12	F
	G-2	73.68		51.99	1 022	13	4	5.27	0.90	6.92	2.50	7.50	0.25	18.91	F
	G-3	93.83	51.99	1 022	13	4	5.27	0.90	6.92	2.50	7.50	0.25	21.48	F	
	C-1	54.56	Carbon fiber	120.88	2 048	9	3.56	7.83	0.35	3.89	0.90	6.70	0.12	9.89	F
	C-2	73.68		120.88	2 048	9	3.56	7.83	0.35	3.89	0.90	6.70	0.12	10.52	F
	C-3	93.83	Vinyl ester	120.88	2 048	9	3.56	7.83	0.35	3.89	0.90	6.70	0.12	12.67	F
Solyom, et al. [15]	R6-6-C1-1	28.264	Glass fiber	46	1 200	6	5	12.00	0.71	11.83	5.82	12.50	0.32	19.46	F
	R6-6-C1-2	28.264		46	1 200	6	5	12.00	0.71	11.83	5.82	12.50	0.32	22.90	F
	R6-6-C1-3	28.264		46	1 200	6	5	12.00	0.71	11.83	5.82	12.50	0.32	15.38	F
	R6-6-C1-4	28.264		46	1 200	6	5	12.00	0.71	11.83	5.82	12.50	0.32	13.87	F
	R6-8-C1-1	28.264		46	1 200	8	5	8.88	0.88	11.00	6.46	14.50	0.31	14.87	F
	R6-8-C1-2	28.264		46	1 200	8	5	8.88	0.88	11.00	6.46	14.50	0.31	16.89	F
	R6-8-C1-3	28.264		46	1 200	8	5	8.88	0.88	11.00	6.46	14.50	0.31	17.86	F
	R6-6-C2-1	52.88		46	1 200	6	5	12.00	0.71	11.83	5.82	12.50	0.32	15.12	F
	R6-6-C2-2	52.88		46	1 200	6	5	12.00	0.71	11.83	5.82	12.50	0.32	23.39	F
	R6-6-C2-3	52.88		46	1 200	6	5	12.00	0.71	11.83	5.82	12.50	0.32	22.90	F
	R6-8-C2-1	52.88		46	1 200	8	5	8.88	0.88	11.00	6.46	14.50	0.31	24.59	F
	R6-8-C2-2	52.88		46	1 200	8	5	8.88	0.88	11.00	6.46	14.50	0.31	27.67	F
	R6-8-C2-3	52.88		46	1 200	8	5	8.88	0.88	11.00	6.46	14.50	0.31	26.08	F
	R6-8-C2-4	52.88		46	1 200	8	5	8.88	0.88	11.00	6.46	14.50	0.31	28.62	F
Ibrahim, et al. [25]	B10-SH10-2	35	Basalt fiber	48	1 120	9.8	10	4.60	1.00	10.20	2.00	8.00	0.20	11.02	F
	B10-SH10-3	35		48	1 120	9.8	10	4.60	1.00	10.20	2.00	8.00	0.20	11.32	F
Basaran, et al. [17]	G6R/4.5-17.7- 4.5-10-1/C30	29.14	Glass fiber	50	800	5.1	10	4.50	0.45	8.82	2.00	4.10	0.33	13.1	F
	G8R/4.5-11- 4.5-10-1/C30	29.14		50	800	7.2	10	4.50	0.40	5.56	2.00	5.60	0.26	15.08	F
	G8R/4.5-11- 4.5-20-1/C20	17.26		50	800	7.2	20	4.50	0.40	5.56	2.00	5.60	0.26	9.62	F
	G8R/4.5-11- 4.5-10-1/C20	17.26		50	800	7.2	10	4.50	0.40	5.56	2.00	5.60	0.26	10.74	F
	G8R/4.5-11- 4.5-10-1/C35	37.34		50	800	7.2	10	4.50	0.40	5.56	2.00	5.60	0.26	22.11	F
	G8R/4.5-11- 4.5-10-1/C40	41.37		50	800	7.2	10	4.50	0.40	5.56	2.00	5.60	0.26	17.35	F
	G8R/4.5-11- 4.5-10-0/C20	17.26		50	800	7.2	10	4.50	0.40	5.56	2.00	5.60	0.26	11.13	F

续表 1

数据来源	试件	$f_{c0}/$ MPa	纤维/ 树脂	$E_f/$ GPa	$f_f/$ MPa	$d_b/$ mm	l_b/d_b	c/d_b	$h_{rd}/$ mm	$h_{rd}/\%$	$w_f/$ mm	$w_c/$ mm	F_R	$\tau_m/$ MPa	失效 模式
	G8R/2. 5-15-4. 5-10-1/C30	29. 14		50	800	7. 2	10	4. 50	0. 40	5. 56	2. 00	5. 60	0. 26	15. 83	F
	G8R/4. 5-11-2. 5-10-1/C30	29. 14		50	800	7. 2	10	2. 50	0. 40	5. 56	2. 00	5. 60	0. 26	13. 82	F
	G8R/4. 5-11-3. 5-10-1/C30	29. 14		50	800	7. 2	10	3. 50	0. 40	5. 56	2. 00	5. 60	0. 26	15. 95	F
	G8R/4. 5-3. 75-4. 5-10-1/C30	29. 14		50	800	7. 2	10	4. 50	0. 40	5. 56	2. 00	5. 60	0. 26	12. 79	F
	G8R/4. 5-7-4. 5-10-1/C30	29. 14		50	800	7. 2	10	4. 50	0. 40	5. 56	2. 00	5. 60	0. 26	15. 62	F
	G12R/4. 5-11-4. 5-10-1/C30	29. 14		50	800	11. 2	10	4. 50	0. 40	3. 57	2. 00	6. 10	0. 25	10. 74	F

注: 试件名称中各符号的含义可参考原文献; E_f, f_f 分别为 FRP 筋的弹性模量和抗拉强度; f_{c0} 为混凝土抗压强度; d_b 为筋直径; l_b 为粘结长度; c 为混凝土保护层厚度; w_f 为 FRP 筋肋宽度; w_c 为混凝土肋宽度; h_{rd} 为 FRP 筋肋高和筋直径的比值; F_R 为 FRP 筋肋宽比; C_R 为混凝土肋宽比; τ_m 为粘结强度; F 表示 FRP 筋肋剪切剥落; C 表示混凝土肋剪切破坏。

表 2 刻槽筋 FRP 筋粘结性能试验主要结果汇总

Table 2 Summary of main results from bond tests of FRP bars with grooved surface

数据来源	试件	$f_{c0}/$ MPa	纤维/ 树脂	$E_f/$ GPa	$f_f/$ MPa	$d_b/$ mm	l_b/d_b	c/d_b	$h_{rd}/$ mm	$h_{rd}/\%$	$w_f/$ mm	$w_c/$ mm	C_R	$\tau_m/$ MPa	失效 模式
Al-Mahmoud, et al. [18]	M1-5d	34		145. 9	1 875	12	5	3. 67	1. 00	8. 33	8. 40	2. 80	0. 25	6. 28	C
	M1-10d	34		145. 9	1 875	12	10	3. 67	1. 00	8. 33	8. 40	2. 80	0. 25	5. 91	C
	M2-5d	34	Carbon	145. 9	1 875	12	5	3. 67	1. 00	8. 33	2. 80	8. 40	0. 75	24. 30	F
	M2-10d	34	fiber	145. 9	1 875	12	10	3. 67	1. 00	8. 33	2. 80	8. 40	0. 75	19. 26	F
	M3-5d	34		145. 9	1 875	12	5	3. 67	1. 00	8. 33	4. 20	2. 80	0. 40	12. 58	C
	M3-10d	34		145. 9	1 875	12	10	3. 67	1. 00	8. 33	4. 20	2. 80	0. 40	9. 32	C
Baena, et al. [26]	R5-8-C1-1	29. 66		60	1 000	8. 55	5	11. 20	0. 44	5. 15	5. 40	3. 60	0. 40	12. 75	C
	R5-8-C1-2	29. 66		60	1 000	8. 55	5	11. 20	0. 44	5. 15	5. 40	3. 60	0. 40	12. 23	C
	R5-12-C1-1	27. 16		60	1 000	13. 72	5	6. 79	0. 72	5. 25	5. 32	3. 68	0. 41	9. 09	C
	R5-12-C1-2	29. 34		60	1 000	13. 72	5	6. 79	0. 72	5. 25	5. 32	3. 68	0. 41	8. 48	C
	R5-16-C1-1	26. 67	Glass fiber	60	1 000	17. 25	5	5. 30	1. 05	6. 09	4. 75	4. 25	0. 47	11. 70	C
	R5-16-C1-2	27. 16		60	1 000	17. 25	5	5. 30	1. 05	6. 09	4. 75	4. 25	0. 47	9. 80	C
	R5-8-C2-1	50. 5	Polyester	60	1 000	8. 55	5	11. 20	0. 44	5. 15	5. 40	3. 60	0. 40	16. 40	C
	R5-8-C2-2	56. 3		60	1 000	8. 55	5	11. 20	0. 44	5. 15	5. 40	3. 60	0. 40	17. 70	C
	R5-12-C2-1	50. 5		60	1 000	13. 72	5	6. 79	0. 72	5. 25	5. 32	3. 68	0. 41	14. 54	C
	R5-12-C2-2	56. 3		60	1 000	13. 72	5	6. 79	0. 72	5. 25	5. 32	3. 68	0. 41	15. 75	C
R5-16-C2-1	58. 2		60	1 000	17. 25	5	5. 30	1. 05	6. 09	4. 75	4. 25	0. 47	15. 47	C	
R5-16-C2-2	56. 3		60	1 000	17. 25	5	5. 30	1. 05	6. 09	4. 75	4. 25	0. 47	15. 66	C	
Solyom, et al. [15]	R10-8-C1-2	35. 33		60	1 500	8. 86	5	7. 97	0. 43	4. 85	6. 05	2. 27	0. 27	9. 83	C
	R10-8-C1-3	35. 33		60	1 500	8. 86	5	7. 97	0. 43	4. 85	6. 05	2. 27	0. 27	11. 43	C
	R10-8-C1-4	35. 33		60	1 500	8. 86	5	7. 97	0. 43	4. 85	6. 05	2. 27	0. 27	7. 86	C
	R10-12-C1-1	35. 33	Glass fiber	60	1 500	13. 48	5	5. 06	0. 74	5. 49	5. 06	3. 67	0. 42	11. 49	C
	R10-12-C1-2	35. 33		60	1 500	13. 48	5	5. 06	0. 74	5. 49	5. 06	3. 67	0. 42	11. 56	C
	R10-12-C1-3	35. 33	Polyester	60	1 500	13. 48	5	5. 06	0. 74	5. 49	5. 06	3. 67	0. 42	11. 77	C
	R10-12-C1-4	35. 33		60	1 500	13. 48	5	5. 06	0. 74	5. 49	5. 06	3. 67	0. 42	8. 72	C
	R10-8-C2-1	66. 1		60	1 500	8. 86	5	7. 97	0. 43	4. 85	6. 05	2. 27	0. 27	17. 35	C
	R10-8-C2-2	66. 1		60	1 500	8. 86	5	7. 97	0. 43	4. 85	6. 05	2. 27	0. 27	17. 51	C
R10-8-C2-3	66. 1		60	1 500	8. 86	5	7. 97	0. 43	4. 85	6. 05	2. 27	0. 27	12. 71	C	
Solyom, et al. [15]	R10-8-C2-4	66. 1	Glass fiber	60	1 500	8. 86	5	7. 97	0. 43	4. 85	6. 05	2. 27	0. 27	16. 34	C
	R10-12-C2-1	66. 1		60	1 500	13. 48	5	5. 06	0. 74	5. 49	5. 06	3. 67	0. 42	16. 23	C
	R10-12-C2-2	66. 1		Polyester	60	1 500	13. 48	5	5. 06	0. 74	5. 49	5. 06	3. 67	0. 42	19. 02

续表 2

数据来源	试件	$f_{c0}/$ MPa	纤维/ 树脂	$E_f/$ GPa	$f_f/$ MPa	$d_b/$ mm	l_b/d_b	c/d_b	$h_{rd}/$ mm	$h_{rd}/\%$	$w_f/$ mm	$w_c/$ mm	C_R	$\tau_m/$ MPa	失效 模式
	R10-12-C2-3	66.1		60	1 500	13.48	5	5.06	0.74	5.49	5.06	3.67	0.42	18.43	C
	R10-12-C2-4	66.1		60	1 500	13.48	5	5.06	0.74	5.49	5.06	3.67	0.42	11.83	C
Basaran, et al. [17]	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14		63.5	1 000	8.9	10	4.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	10.11	C
	G8WO/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26		63.5	1 000	8.9	20	4.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	7.79	C
	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26		63.5	1 000	8.9	10	4.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	8.25	C
	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34		63.5	1 000	8.9	10	4.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	13.05	C
	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37		63.5	1 000	8.9	10	4.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	10.48	C
	G8WO/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	Glass fiber	63.5	1 000	8.9	10	4.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	8.27	C
	G8WO/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14		63.5	1 000	8.9	10	2.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	10.15	C
	G8WO/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14		63.5	1 000	8.9	10	3.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	10.18	C
	G8WO/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14		63.5	1 000	8.9	10	4.50	0.40	4.49	6.10	2.50	0.29	10.21	C
	G12WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14		63.5	1 000	13.3	10	4.50	0.50	3.76	5.60	2.50	0.31	8.95	C
Rosa, et al. [27]	RB-D12	31.7	Glass fiber	60	1 380	13.6	5	5.01	0.70	5.15	5.30	3.30	0.38	11.72	C
	RB-D8	31.7	Viny lester	58	1 482	9.0	5	7.83	0.30	3.33	6.50	2.00	0.24	7.07	C
	RBP-D12	31.7		60	1 184	14.4	5	4.71	0.70	4.86	3.10	3.80	0.55	17.58	C
Solyom, et al. [28]	P1	38.7	Glass fiber	56.1	1 542	8.86	5	5.48	0.43	4.85	6.05	2.27	0.27	11.92	C
	P3	38.7	Polyester	56.1	1 542	8.86	5	5.48	0.43	4.85	6.05	2.27	0.27	12.01	C
Veljkovic, et al. [29]	G8C1C	17.71	Glass fiber	60	1 500	8	5	12.00	0.49	6.13	5.70	2.30	0.29	5.30	C
	G8C2C	29.56	Viny lester	60	1 500	8	5	12.00	0.49	6.13	5.70	2.30	0.29	5.90	C
	G8C3C	42.79		60	1 500	8	5	12.00	0.49	6.13	5.70	2.30	0.29	10.10	C
Parvizi, et al. [30]	SP-12-CA-1-N	31.2		65	1 405	12	5	7.83	0.35	2.92	5.00	2.50	0.33	13.00	C
	SP-12-CA-2-N	31.2		65	1 405	12	5	7.83	0.35	2.92	5.00	2.50	0.33	11.90	C
	SP-12-CA-3-N	31.2		65	1 405	12	5	7.83	0.35	2.92	5.00	2.50	0.33	9.50	C
	SP-12-CA-4-N	31.2		65	1 405	12	5	7.83	0.35	2.92	5.00	2.50	0.33	12.50	C
	SP-12-CA-5-N	31.2		65	1 405	12	5	7.83	0.35	2.92	5.00	2.50	0.33	12.40	C
	SP-16-CA-1-N	31.2		66	1 339	16	5	5.75	0.70	4.38	4.70	3.30	0.41	13.40	C
	SP-16-CA-2-N	31.2		66	1 339	16	5	5.75	0.70	4.38	4.70	3.30	0.41	12.80	C
	SP-16-CA-3-N	31.2	Glass fiber	66	1 339	16	5	5.75	0.70	4.38	4.70	3.30	0.41	13.40	C
	SP-16-CA-4-N	31.2		66	1 339	16	5	5.75	0.70	4.38	4.70	3.30	0.41	13.60	C
	SP-16-CA-5-N	31.2		66	1 339	16	5	5.75	0.70	4.38	4.70	3.30	0.41	12.60	C
	SP-12-CH-1-N	42.8		65	1 405	12	5	7.83	0.35	2.92	5.00	2.50	0.33	9.60	C
	SP-12-CH-2-N	42.8		65	1 405	12	5	7.83	0.35	2.92	5.00	2.50	0.33	11.30	C
	SP-12-CH-3-N	42.8		65	1 405	12	5	7.83	0.35	2.92	5.00	2.50	0.33	8.60	C
	SP-16-CH-1-N	42.8		66	1 339	16	5	5.75	0.70	4.38	4.70	3.30	0.41	12.40	C
	SP-16-CH-2-N	42.8		66	1 339	16	5	5.75	0.70	4.38	4.70	3.30	0.41	13.70	C
SP-16-CH-3-N	42.8		66	1 339	16	5	5.75	1.70	10.63	4.70	3.30	0.41	11.60	C	

注: 试件名称中各符号的含义可参考原文献; E_f/f_f 分别为 FRP 筋的弹性模量和抗拉强度; f_{c0} 为混凝土抗压强度; d_b 为筋直径; l_b 为粘结长度; c 为混凝土保护层厚度; w_f 为 FRP 筋肋宽度; w_c 为混凝土肋宽度; h_{rd} 为 FRP 筋肋高和筋直径的比值; F_R 为 FRP 筋肋宽比; C_R 为混凝土肋宽比; τ_m 为粘结强度; F 表示 FRP 筋肋剪切剥落; C 表示混凝土肋剪切破坏。

2 带肋 FRP 筋粘结破坏模式和粘结强度的演化规律

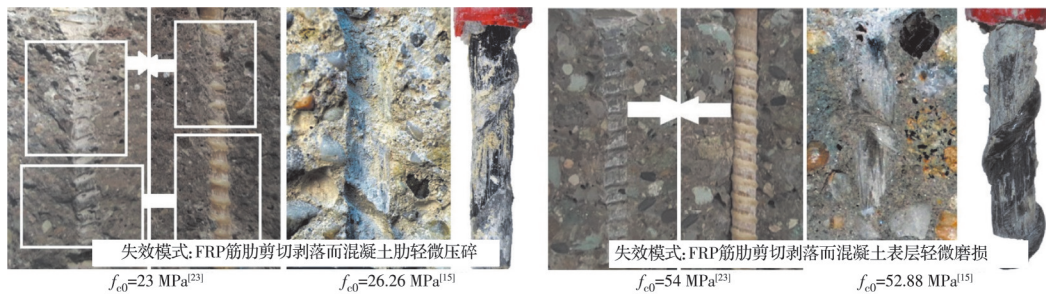
粘结肋 FRP 筋和刻槽肋 FRP 筋的粘结强度破坏模式和粘结强度变化规律有明显区别,下面结合试验数据分析各研究变量对两种带肋 FRP 筋粘结性能的影响规律。

2.1 混凝土抗压强度的影响

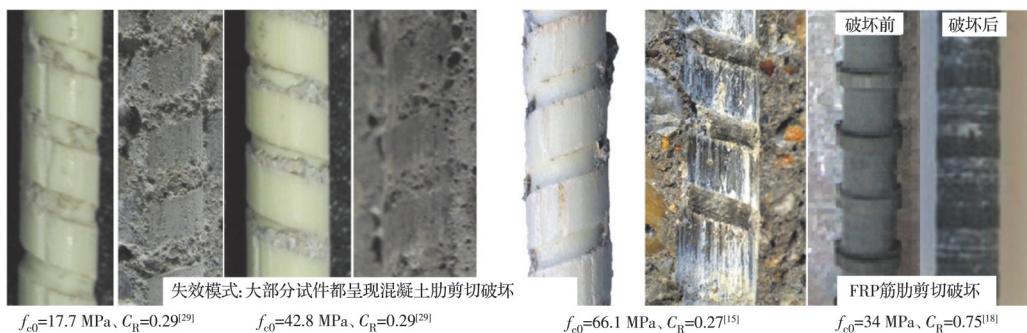
粘结肋 FRP 筋和刻槽肋 FRP 筋的典型破坏模式为拔出破坏,尚未发现有劈裂破坏的现象。如图 2(a)所示,粘结肋 FRP 筋的破坏面主要集中在 FRP 筋肋与筋的粘结处,而混凝土的破坏较为轻微,且其损伤程度与混凝土抗压强度有关。图 3(a)表明,当混凝土抗压强度较低时,以 FRP 筋肋的剪切剥落为主,同时在肋咬合处伴随混凝土的轻微压碎;提高混凝土抗压强度后,FRP 筋肋仍出现明显的剪切剥落,而混凝土仅在表层发生轻微磨损。而刻槽肋 FRP 筋的破坏模式与粘结肋 FRP 筋完全不同,除 Al-Mahmoud 等^[18]所采用的少量 FRP 筋肋宽较小

($C_R=0.75$)的试件外,其他刻槽肋 FRP 筋的破坏模式都是混凝土肋直剪破坏,而 FRP 筋仅在表面出现轻微磨损,如图 3(b)所示。因此,刻槽肋 FRP 筋的粘结破坏模式主要集中于混凝土肋(图 2(b)),而 FRP 筋的损伤很轻微,二者间的粘结性能受混凝土力学特性的影响更加明显。

混凝土抗压强度对这两种带肋 FRP 筋粘结强度的影响规律详见图 4。显然,混凝土抗压强度的提高有助于 FRP 筋粘结强度的提升,但影响程度不同。图 4(a)为粘结肋 FRP 筋,当混凝土强度低于 40 MPa 左右时,混凝土强度对粘结强度的影响程度较大;而当混凝土强度高于 40 MPa 左右时,粘结强度也随混凝土强度的增加而增加,但影响程度减弱。图 4(b)为刻槽肋 FRP 筋,其粘结强度随混凝土强度的增加明显增大。此规律与前述粘结破坏模式相呼应,粘结肋 FRP 筋的失效模式主要受 FRP 筋肋的剥落控制,而刻槽肋 FRP 筋主要表现为混凝土肋的剪切破坏,后者的粘结强度受混凝土强度的影响更加显著。



(a) 粘结肋 FRP 筋的典型破坏模式



(b) 刻槽肋 FRP 筋的典型破坏模式

图 3 带肋 FRP 筋的典型粘结破坏模式

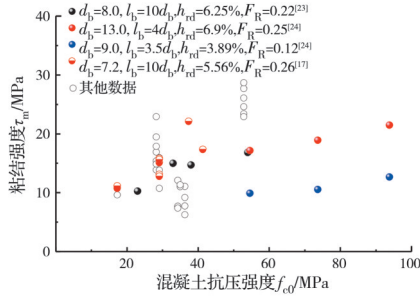
Fig. 3 Typical bond failure mode of ribbed FRP bars

2.2 混凝土保护层、FRP 筋直径和粘结长度的影响

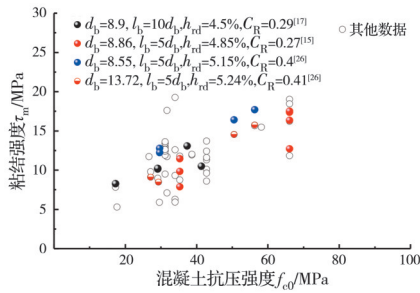
为了统一评估混凝土保护层厚度、FRP 筋直径和粘结长度对粘结性能的影响规律,分别采用 c/d_b 和 l_b/d_b 反映上述因素的客观影响。由图 2 可知,机械咬合作用可使 FRP 筋对周围混凝土产生径向应力 σ_r ,导致混凝土中产生环向应力 σ_h ^[33],二者关系可表达为

$$\sigma_h = \frac{1}{2} \frac{d_b}{c} \sigma_r \quad (5)$$

环向应力 σ_h 是混凝土产生裂缝并发生劈裂破坏的主要原因,在 σ_r 相同的情况下, c/d_b 越小, σ_h 越大,试件越容易发生劈裂破坏。粘结肋 FRP 筋的 c/d_b 介于 0.94~12,而所有试件都是拔出破坏,混凝土几乎未见纵向劈裂裂缝,这主要是由于粘结肋 FRP



(a) 粘结肋 FRP 筋



(b) 刻槽肋 FRP 筋

图 4 混凝土抗压强度对带肋 FRP 筋粘结强度的影响

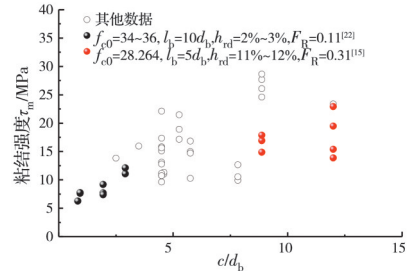
Fig. 4 Effect of concrete compressive strength on bond strength of ribbed FRP bars

筋的肋过早剥落,对周围混凝土的挤压作用不明显。刻槽肋 FRP 筋的 c/d_b 介于 2.5~12,所有试件都是拔出破坏,无劈裂裂缝,原因是槽形肋的独特几何特征使 FRP 筋与混凝土肋直接发生纵向剪切,几乎无法产生径向应力,如图 2(b)所示。此外,在所列试验数据中,暂未发现 l_b/d_b 对粘结破坏模式的影响。

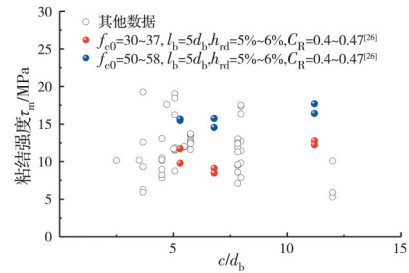
图 5 和图 6 分别反映了 c/d_b 和 l_b/d_b 对粘结强度的影响规律。图 5(a)所示粘结肋 FRP 筋的粘结强度随 c/d_b 的增加而增大, c/d_b 较小时增长快, c/d_b 较大时(大于 7)几乎没有明显增长。原因是增加 c/d_b 增强了混凝土对 FRP 筋的约束作用,机械咬合作用也增强,而当 c/d_b 较大时,混凝土的约束作用对机械咬合作用的影响减弱,此时粘结强度主要取决于 FRP 筋肋与筋的粘结。图 5(b)为刻槽肋 FRP 筋,粘结强度几乎不受 c/d_b 的影响,这与前述破坏模式和粘结机理相呼应,增加 c/d_b 无法有效增强 FRP 筋与混凝土间的机械咬合作用。图 6 表明,粘结肋 FRP 筋和刻槽肋 FRP 筋的粘结强度随 l_b/d_b 的增加而减小,其根本原因粘粘应力在 FRP 筋粘结长度上的分布是非均匀的,随粘结长度的增加,应力的非均匀分布程度也变大,导致粘结强度呈现减小的趋势。

2.3 FRP 筋的带肋几何特征的影响

FRP 筋的带肋几何特征可采用相对肋高 h_{rd} 、FRP 筋肋宽比 F_R 或混凝土肋宽比 C_R 描述。粘结肋



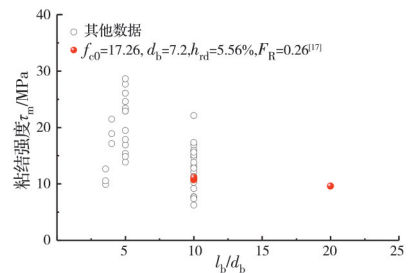
(a) 粘结肋 FRP 筋



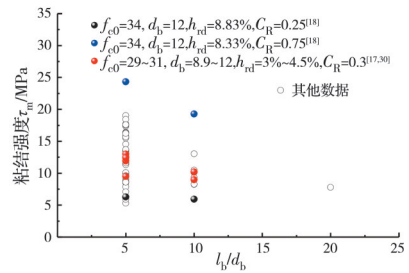
(b) 刻槽肋 FRP 筋

图 5 混凝土保护层对带肋 FRP 筋粘结强度的影响

Fig. 5 Effect of concrete cover on bond strength of ribbed FRP bars



(a) 粘结肋 FRP 筋



(b) 刻槽肋 FRP 筋

图 6 粘结长度对带肋 FRP 筋粘结强度的影响

Fig. 6 Effect of embedment length on bond strength of ribbed FRP bars

FRP 筋的薄弱点在肋与筋的结合处,无论几何特征如何变化,都表现为肋的剪切剥落。刻槽肋 FRP 筋以混凝土肋剪切破坏为主,但当 C_R 较大时(0.75),FRP 筋肋被削弱,发生剪切破坏,如图 3(b)所示。

图 7 为相对肋高 h_{rd} 对粘结强度的影响规律。随着 h_{rd} 的增大,粘结肋 FRP 筋的粘结强度也增大,这是由于 FRP 筋肋与混凝土的咬合深度增加;而刻槽肋 FRP 筋的粘结强度几乎不受 h_{rd} 的影响。图 8 为

FRP 筋肋宽比 F_R 或混凝土肋宽比 C_R 对粘结强度的影响规律。粘结肋 FRP 筋主要受 F_R 的影响, F_R 越大, 粘结强度越大, 原因在于其破坏模式为 FRP 筋肋的剪切剥落, 增大其相对宽度可提高粘结强度。而刻槽肋 FRP 筋的粘结强度主要与 C_R 有关, 原因是其主要破坏模式为混凝土肋剪切破坏, 增大 C_R 可增加混凝土肋的抗剪作用面积, 从而提高了粘结强度。以上试验结果进一步说明了当肋成型工艺不同时, 肋几何特征对粘结性能的影响规律是截然不同的, 因此, 有必要采用不同的粘结强度模型考虑该影响。

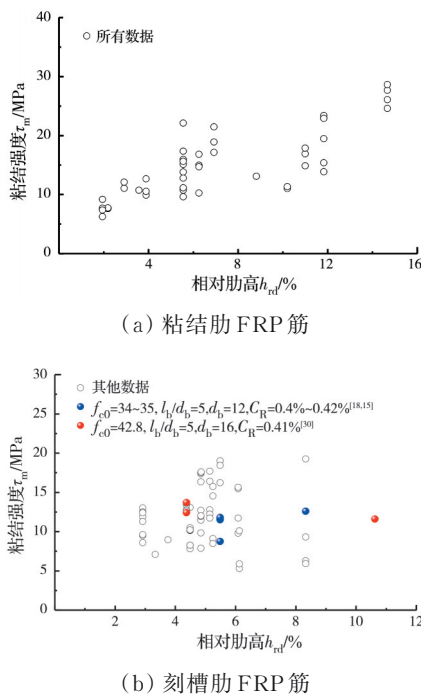


图 7 相对肋高对带肋 FRP 筋粘结强度的影响
Fig. 7 Effect of relative rib height on bond strength of ribbed FRP bars

3 带肋 FRP 筋的粘结强度预测模型

混凝土抗压强度、 c/d_b 、 l_b/d_b 、相对肋高 h_{rd} 、FRP 筋肋宽比 F_R 或混凝土肋宽比 C_R 等因素对不同带肋 FRP 筋粘结强度的影响规律不同, 因此, 选择式(6)和式(7)分别预测粘结肋 FRP 筋和刻槽肋 FRP 筋的粘结强度。

$$\tau_{sg} = (f_{c0})^{a_1} \cdot [a_2 + a_3(d_b/l_b) + a_4(c/d_b) + a_5(h_{rd}) + a_6(F_R)] \quad (6)$$

$$\tau_{mg} = (f_{c0})^{a_1} [a_2 + a_3(d_b/l_b) + a_6(C_R)^{a_7}] \quad (7)$$

式中: 下标 sg 和 mg 分别表示 spirally-glued (sg, 粘结肋) FRP 筋和 mechanically-grooved (mg, 刻槽肋) FRP 筋。由于 c/d_b 和 h_{rd} 对刻槽肋 FRP 筋几乎没有影响, 故式(7)将其省去。待定参数 $a_1 \sim a_7$ 采用多参

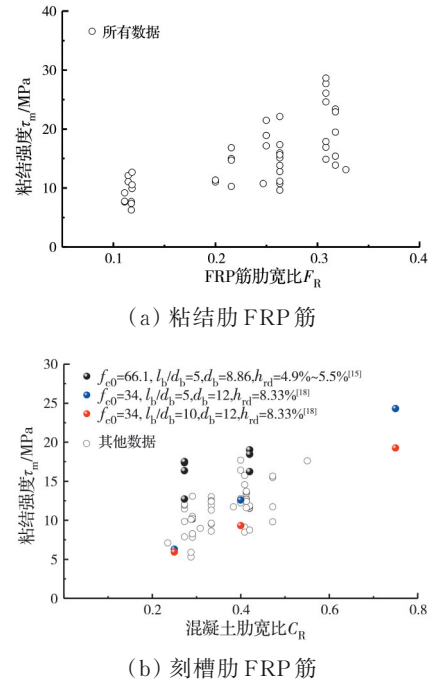


图 8 肋宽比对带肋 FRP 筋粘结强度的影响
Fig. 8 Effect of ratio of rib width on bond strength of ribbed FRP bars

数非线性回归分析的方法确定, 式(6)确定为: $a_1=0.472$ 、 $a_2=0.243$ 、 $a_3=0.010$ 、 $a_4=0.018$ 、 $a_5=0.021$ 、 $a_6=9.554$; 式(7)确定为: $a_1=0.557$ 、 $a_2=1.186$ 、 $a_3=0.407$ 、 $a_6=3.685$ 、 $a_7=2.462$ 。该式与 ACI 440.1R-15^[19]在形式上类似, 形式简洁且能清晰地反映了各因素对粘结强度的影响规律, 同时还考虑了 FRP 筋肋成型工艺和表面几何特征对粘结强度的影响。

为了比较本文与设计规范的粘结强度计算公式的准确性, 图 9 展示了带肋 FRP 筋试验值与各公式预测值的对比结果, 设计规范公式详见文献[19-21], 同时还绘制了 $y=0.85x$ 和 $y=1.15x$ 误差线来反映模型的预测能力。采用决定系数 R^2 表征预测公式的准确度, 其表达式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\tau_i - \hat{\tau})^2}{\sum(\tau_i - \bar{\tau})^2} \quad (8)$$

式中: τ_i 和 $\hat{\tau}$ 分别为粘结强度的试验值及相应的预测值; $\bar{\tau}$ 为粘结强度试验值的平均值。

显然, 本文模型的预测值与试验值吻合较好, R^2 为 0.76~0.82, 且大部分数据点都落在了预测误差线以内; 而设计规范的 R^2 都小于 0, 数据点明显偏离了 $y=x$ 参考线和预测误差线, 说明本文模型的预测精度更高。RMSE(均方根误差)反映了预测值与试验值间的平均相对误差, 其值越小, 说明模型准确度越高。本文模型公式的 RMSE 仅为 1.93~2.43 MPa, 远小于相关设计规范, 其准确度最高。

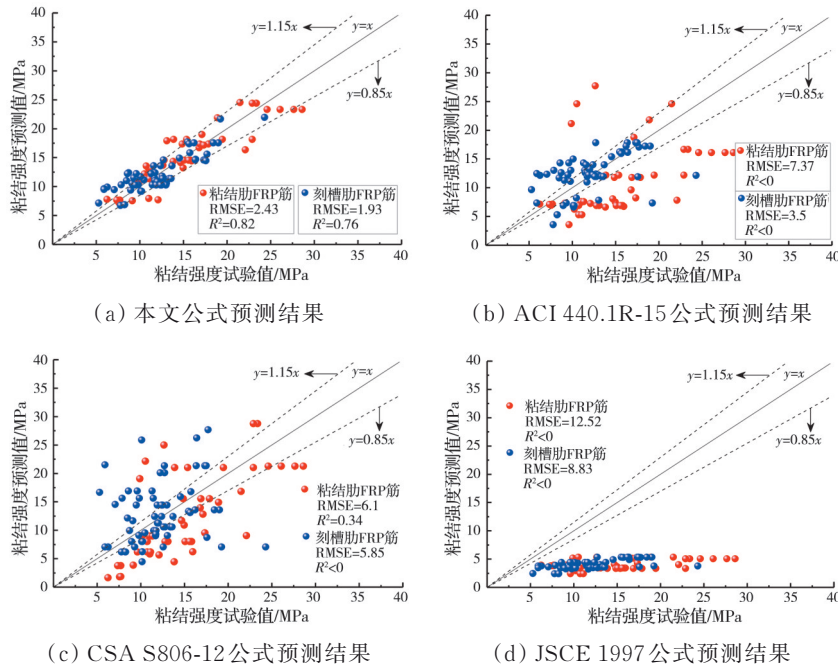


图 9 带肋 FRP 筋粘结强度试验值与不同模型公式预测值的对比
 Fig. 9 Comparison of experimental bond strength for ribbed FRP bars to predicted values from different equations

此外,JSCE 1997 的粘结强度计算值变化幅度很小,似乎没有变量影响其粘结性能,显然与实际相差较大;这是由于公式中考虑箍筋约束和混凝土保护层的系数一般都取 0.6,且限制了初步设计粘结强度不超过 3.2 MPa,详见文献[20]。综上所述,所提公式的预测结果与试验值最为接近,平均相对误差较小,预测精度高于设计规范,其根本原因在于模型准确考虑了带肋 FRP 筋表面肋成型工艺和几何特征对粘结强度的影响。

4 结论

针对粘结肋 FRP 筋和刻槽肋 FRP 筋,以粘结性能试验数据为基础,探究主要参数对粘结损伤模式和粘结强度的影响规律,并提出了合理的粘结强度公式。主要结论总结如下:

1) 两种带肋 FRP 筋的宏观破坏模式都是拔出破坏;在微观层面上粘结肋 FRP 筋主要表现为 FRP 筋肋的剪切剥落,而混凝土的破坏较为轻微,提高混凝土强度可提升其粘结强度;大部分刻槽肋 FRP 筋的破坏模式为混凝土肋的剪切破坏,其粘结强度随混凝土强度的增加而明显增大。

2) 增大 c/d_b 可增强混凝土对 FRP 筋的约束效果,这对提高粘结肋 FRP 筋粘结强度有一定效果,而对刻槽肋 FRP 筋几乎没有影响;增加 l_b/d_b 使粘结应力分布的非均匀性增大,导致两种带肋 FRP 筋的粘结强度降低。

3) 增加相对肋高 h_{rd} 和 FRP 筋肋宽比 F_R 有助于提高粘结肋 FRP 筋的粘结强度;而刻槽肋 FRP 筋几乎不受 h_{rd} 的影响,且混凝土肋宽比 C_R 对刻槽肋 FRP 筋有明显影响,其粘结强度随 C_R 的增加而增大,当 C_R 较大时,FRP 筋肋发生剪切破坏。

4) 本文提出的带肋 FRP 筋粘结强度预测公式的计算结果与试验吻合较好, R^2 为 0.76~0.82,预测精度高于目前的主流设计规范,主要原因在于该公式准确考虑了 FRP 筋肋成型工艺和几何特征对粘结强度的影响。

5) 需要说明的是,粘结肋 FRP 筋的破坏面主要集中在 FRP 筋肋和筋的粘结处,因此,其粘结性能应当与纤维肋宽度 w_f 、纤维肋和筋的粘结工艺有密切联系。但受限于参考文献并未给出有关纤维肋和筋的粘结工艺和粘结强度的信息,因此,仅研究了纤维肋宽度 w_f 对粘结肋 FRP 筋与混凝土间粘结强度的影响规律,所提出公式的准确度尚可接受。未来仍需要开展更多的试验研究和有限元模拟,探究粘结胶体材料、粘结工艺等因素对此类型 FRP 筋粘结性能的影响规律。

参考文献

[1] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
 NIU D T. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

- [2] 张伟平, 顾祥林, 金贤玉, 等. 混凝土中钢筋锈蚀机理及锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(Sup1): 327-332.
ZHANG W P, GU X L, JIN X Y, et al. Study on corrosion mechanism of steel bars in concrete and mechanical performance of corroded steel bars [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Sup1): 327-332. (in Chinese)
- [3] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
YE L P, FENG P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36. (in Chinese)
- [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 P, WANG J, ZHANG X, et al. Development and innovation on combining FRP and sea sand concrete for structures [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(12): 13-18. (in Chinese)
- [5] 滕锦光. 新材料组合结构[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 1-11.
TENG J G. New-material hybrid structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 1-11. (in Chinese)
- [6] ELGABBAS F, AHMED E A, BENMOKRANE B, et al. Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 623-635.
- [7] YAN F, LIN Z, YANG M. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 98: 56-69.
- [8] NEPOMUCENO E, SENA-CRUZ J, CORREIA L, et al. Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 287: 123042.
- [9] 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.
- [10] TRABACCHING G, SEBASTIAN W, ZHANG M, et al. Experimental and analytical study of bond between basalt FRP bars and geopolymer concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125461.
- [11] ROLLAND A, QUIERTANT M, KHADOURA, et al. Experimental investigations on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars [J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 136-148.
- [12] 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.
- [13] TEKLE B H, KHENNANE A, KAYALI O. Bond properties of sand-coated GFRP bars with fly ash-based geopolymer concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(5): 4016025.
- [14] MALVAR L J, COX J V, COCHRAN K B. Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete. I: Experimental study [J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(2): 154-163.
- [15] SOLYOM S, BALÁZS G L. Bond of FRP bars with different surface characteristics [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 119839.
- [16] SOLYOM S, BALÁZS G L. Analytical and statistical study of the bond of FRP bars with different surface characteristics [J]. Composite Structures, 2021, 270: 113953.
- [17] BASARAN B, KALKAN I. Investigation on variables affecting bond strength between FRP reinforcing bar and concrete by modified hinged beam tests [J]. Composite Structures, 2020, 242: 112185.
- [18] AL-MAHMOUD F, CASTEL A, FRANÇOIS R, et al. Effect of surface pre-conditioning on bond of carbon fibre reinforced polymer rods to concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(9): 677-689.
- [19] American Concrete Institute (ACI). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: ACI 440.1R-15 [S]. Farmington Hills, MI, USA, 2015.
- [20] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials: JSCE 1997 [S]. Japan, 1997.
- [21] Canadian Standards Association (CSA). Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers: CSA S806-12 [S]. Toronto, Canada, 2012.
- [22] KOTYNIA R, SZCZECHE D, KASZUBSKA M. Bond behavior of GRFP bars to concrete in beam test [J]. Procedia Engineering, 2017, 193: 401-408.
- [23] BAZLI M, ASHRAFI H, OSKOUEI A V. Experiments and probabilistic models of bond strength between GFRP bar and different types of concrete under aggressive environments [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 429-443.
- [24] WON J P, PARK C, KIM H, et al. Effect of fibers on the bonds between FRP reinforcing bars and high-strength concrete [J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(5): 747-755.
- [25] IBRAHIM A M A, FAHMY M F M, WU Z S. Numerical simulation on fracturing bond mechanisms of different basalt FRP bars [J]. Journal of Applied Mechanics, 2015, 71(2): 289-298.
- [26] BAENA M, TORRES L, TURON A, et al. Experi-

- mental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2009, 40(8): 784-797.
- [27] ROSA I C, FIRMO J P, CORREIA J R, et al. Influence of elevated temperatures on the bond behaviour of ribbed GFRP bars in concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 122: 104119.
- [28] 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.
- [29] VELJKOVIC A, CARVELLIV, HAFFKEM 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.
- [30] PARVIZI M, NOËL M, VASQUEZ J, et al. Assessing the bond strength of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in Portland cement concrete fabricated with seawater through pullout tests [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120952.
- [31] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- GUO Z H. Reinforced concrete theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [32] 混凝土结构设计标准(2024年版): GB/T 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [33] 董恒磊, 李东风, 王代玉. 螺旋缠绕挤压肋FRP筋与混凝土间的黏结性能[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5239-5250.
- DONG H L, LI D F, WANG D Y. Bond behavior between helically and tightly wound FRP bars and concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(11): 5239-5250. (in Chinese)

(编辑 胡玲)