

GFRP 筋与 C15 混凝土之间黏结强度的试验研究

杨 雨¹,薛伟辰¹,赵 谦²,戴方毕²

(1. 同济大学土木工程学院,上海 200092; 2. 中材科技股份有限公司,江苏 南京 210012)

摘要 基于 12 个拉拔试件的黏结试验,对 GFRP 筋与 C15 混凝土之间的黏结滑移特性、受力过程、破坏形态、破坏机理、黏结强度以及锚固长度等进行了研究.结果表明:GFRP 筋试件的黏结应力下降到其黏结强度的 8%~13%后,出现规律性的波动,而相应钢筋试件的黏结应力下降到 20%~30%后基本保持不变;GFRP 筋与 C15 混凝土之间的黏结强度较低,6.35 mm 直径的 GFRP 筋,其黏结强度比相应的钢筋低 8%,9.5 mm 直径的 GFRP 筋,其黏结强度则比相应的钢筋低 37%;GFRP 筋试件的黏结应力达到黏结强度时,GFRP 筋的滑移值为 3~5 mm,而相应钢筋的滑移值为 1~2 mm.文中还提出了 GFRP 筋与 C15 混凝土之间黏结强度以及 GFRP 筋锚固长度的设计建议.

关键词 GFRP 筋 黏结强度 拉拔试件 滑移 混凝土

中图分类号 :TU377.9

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2007)04-0404-05

FRP 筋与混凝土之间良好的黏结性能是两者协同工作的基础,是 FRP 筋代替传统钢筋应用于混凝土结构的关键因素.作为 FRP 筋混凝土结构关键设计参数之一的锚固长度,就直接取决于 FRP 筋与混凝土之间的黏结性能.构件的挠度、裂缝的宽度和间距等也与黏结性能有很大关系.

近年来,国内外在 FRP 筋与混凝土之间黏结强度方面的研究取得了许多进展. Chaallal 等^[1]研究了 GFRP 筋与 $f'_c = 30 \text{ MPa}$ (f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度)的普通强度混凝土以及 $f'_c = 80 \text{ MPa}$ 的高强混凝土之间的黏结强度,结果表明:GFRP 筋与普通强度混凝土和高强混凝土之间的黏结强度分别约为相应变形钢筋黏结强度的 62%~84%和 28%~53%;GFRP 筋与混凝土之间的黏结强度不随着 $\sqrt{f'_c}$ 的增大而线性增加,这与变形钢筋与混凝土之间的黏结强度与 $\sqrt{f'_c}$ 呈线性关系不同. Chaallal 等^[1]还建议锚固长度取 $20d$ (d 为 GFRP 筋直径). Ehsani 等^[2-3]通过梁式黏结试验和拉拔黏结试验,分别给出了 GFRP 筋锚固长度的设计建议. Achillides 等^[4]研究了 4 种 FRP 筋与 $f_{cu} = 15.5 \sim 49.5 \text{ MPa}$ (f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度)的混凝土之间的黏结强度,结果表明:当 $f_{cu} > 30 \text{ MPa}$ 时,试件的黏结强度主要由 FRP 筋中纤维与树脂之间的抗剪强度决定,试件破坏时的黏结应力高于相应的钢筋试件;当 $f_{cu} < 15 \text{ MPa}$ 时,试件的黏结强度主要由混凝土的抗剪强度决定. Tighiouart 等^[5]进行了 GFRP 筋和 $f'_c = 31 \text{ MPa}$ 的混凝土的黏结试验,并指出 GFRP 筋与混凝土之间的黏结力主要由化学胶结力和摩擦力组成.王勃等^[6]采用了 f_{cu} 分别为 30.76 MPa,36.19 MPa,40.76 MPa 的混凝土和 CFRP 筋以及混杂纤维 HFRP 筋进行黏结试验,结果表明:黏结破坏分为 FRP 筋表面肋的脱落和 FRP 筋断裂 2 种情况,而混凝土没有明显破坏.王勃等^[6]还建议 CFRP 筋和 HFRP 筋的锚固长度分别取 $30d$ 和 $50d$ (d 为 FRP 筋直径).

综上,目前国内外主要研究了 FRP 筋与中、高强混凝土之间的黏结强度,在 FRP 筋与低强混凝土(如强度等级为 C15 的混凝土)之间的黏结强度方面,相关研究较少. GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》^[7]规定:钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C15.在实际工程中,C15 混凝土在大体积混凝土结构中的应用较多,如我国高鸟桥电站实体拦水重力坝、浙江龙翔大厦深基坑维护工程中的嵌入桩,均采用 C15 混凝土;C15 混凝土在桥梁和路面等工程中也有应用.此外,在钢筋锈蚀严重的低强混凝土结构(如水工、港工结构物)中,具有良好抗腐蚀性能的 FRP 筋也具有广阔的应用前景.因此,研究 GFRP 筋与 C15 混凝土之间的黏结

强度具有重要的理论意义和工程应用价值.基于此,本文通过 12 个标准拉拔试件的黏结试验,研究了 GFRP 筋与 C15 混凝土之间的黏结滑移特性,并提出了其黏结强度和锚固长度的设计建议.

1 试验设计

1.1 材 料

试验采用了国产 GFRP 筋和变形钢筋.GFRP 筋的表面经过黏砂变形处理,直径有 6.35 mm 和 9.5 mm 两种.6.35 mm 直径的 GFRP 筋,其轴心抗拉强度和弹性模量分别为 444 MPa 和 46.0 GPa,而 9.5 mm 直径的 GFRP 筋,则分别为 532 MPa 和 40.8 GPa.

混凝土强度等级为 C15,其立方体抗压强度、劈裂抗拉强度以及弹性模量分别为 16.4 MPa,1.42 MPa 和 19.0 GPa.需要说明的是,由于直径为 6 mm 的变形钢筋较少见,本文采用的 6 mm 直径变形钢筋的表面肋的高度较低.

1.2 试件设计

按照 GB 50152—92《混凝土结构试验方法标准》^[8] 设计了 12 个拉拔试件,试件明细见表 1,具体尺寸见图 1.

表 1 试件明细及黏结强度
Table 1 Lists of pull-out specimens and bond strength

试件 编号	配筋 类型	直径 <i>d</i> /mm	黏结长度/ mm	试件 数量	黏结强度/ MPa
PG6	GFRP 筋	6.35	31.75	3	8.61
PS6	钢 筋	6.00	31.75	3	9.32
PG10	GFRP 筋	9.50	47.50	3	8.72
PS10	钢 筋	10.00	47.50	3	13.89

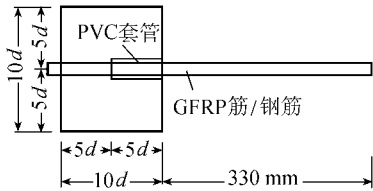


图 1 试件构造示意图
Fig.1 Schematic diagram of pull-out specimens

1.3 加载装置

本次拉拔试验是在同济大学建筑结构试验室完成的,加载装置如图 2 所示.在试件的加载端布置 1 个位移计(W1),在自由端布置 3 个位移计(W2,W3,W4),以量测 GFRP 筋在加载端和自由端的滑移.试验采用液压试验机在试件下端直接加载.液压试验机和 4 个位移计均与计算机相连,由计算机直接采集数据.在拉拔装置的钢框架上部布置了一个穿心球铰,避免了因受力筋与受荷面不严格垂直而导致的混凝土撕裂破坏.

1.4 试验量测内容

试验量测内容包括荷载 P ,受力筋(GFRP 筋或钢筋)自由端的滑移量 S 、加载端的滑移量 S' 及其应变等. S 和 S' 的计算公式分别为 $S = S_{W2} - (S_{W3} + S_{W4})/2$, $S' = S_{W1}$.其中: S_{W1} 为受力筋加载端对试件下表面的相对位移; S_{W2} 为受力筋自由端的绝对位移; S_{W3} , S_{W4} 为试件上表面的绝对位移.

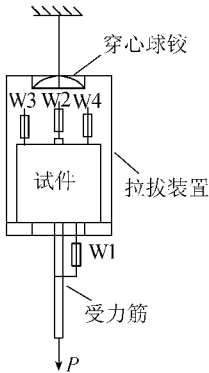


图 2 加载装置
Fig.2 Loading installation

2 试验结果及分析

2.1 黏结应力-滑移曲线(τ - S 曲线)

实际上,GFRP 筋或钢筋与混凝土之间的黏结应力是不均匀分布的.为分析和对比方便,本文定义 GFRP 筋或钢筋的黏结应力 τ 为黏结段的平均黏结应力, $\tau = P/(\pi d_b l_d)$.其中: d_b , l_d 分别为 GFRP 筋或钢筋的直径和黏结长度; P 为有效拉力.本文将最大黏结应力定义为黏结强度.

典型试件的黏结应力-滑移曲线如图 3 所示.可见:

- a. GFRP 筋试件的 τ - S 曲线上升段有明显的转折点,转折点的滑移量为试件达到黏结强度时滑移量的 10% 左右,其黏结应力为黏结强度的 40% ~ 70% 而钢筋试件的 τ - S 曲线上升段没有明显的转折点.
- b. 当 GFRP 筋试件达到黏结强度时,受力筋的滑移值为 3 ~ 5 mm,而相应钢筋试件的滑移值则为 1 ~ 2 mm.

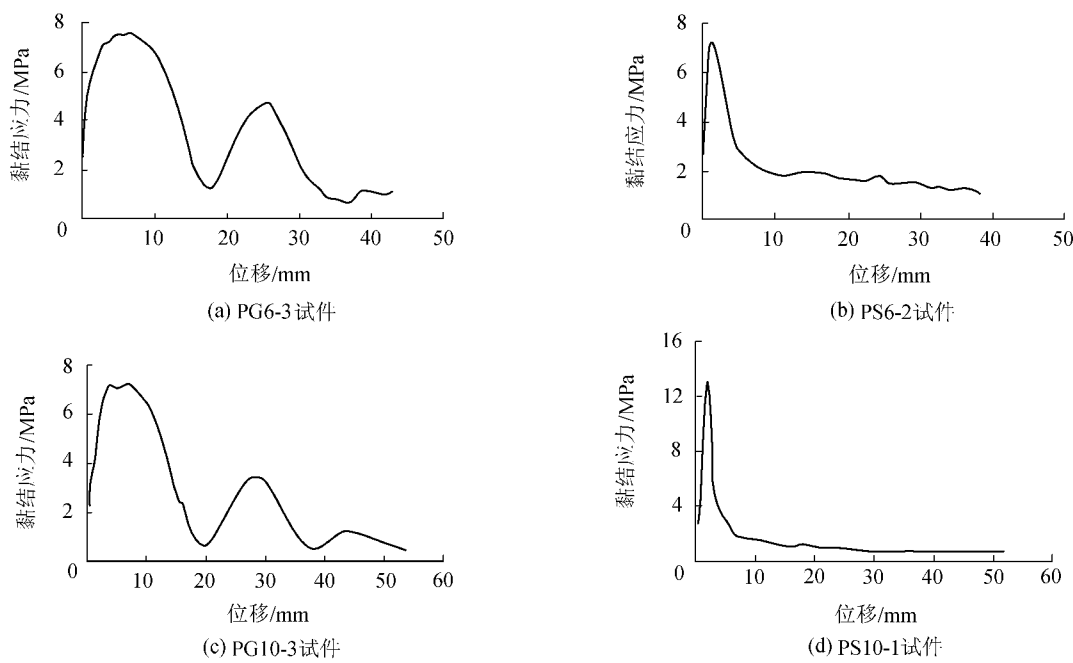


图 3 典型试件的黏结应力-滑移曲线

Fig.3 τ -S curves for typical specimens

c. 试件达到黏结强度后, τ -S 曲线进入下降段:GFRP 筋滑移约 10 mm 后,黏结应力下降到黏结强度的 8% ~ 13%,随后 τ -S 曲线形状类似于正弦曲线,约经过 2 个“正弦周期”波动后,筋被拔出.而对于钢筋试件,筋滑移约 5 mm 后,黏结应力就急剧下降到黏结强度的 20% ~ 30%,然后随着钢筋滑移量的增加,黏结应力缓慢降低直至筋被拔出, τ -S 曲线并未出现波动.

d. 对于 GFRP 筋试件,将 τ -S 曲线下降段的初次上升点作为谷底,其后曲线类似于正弦曲线,黏结应力波动的幅值为黏结强度的 35% ~ 45%,当 GFRP 筋滑移约 20 mm(与筋表面螺旋肋的间距接近)后,曲线再一次回到谷底,完成一个“正弦周期”波动.这是因为此阶段 GFRP 筋与混凝土之间的黏结主要由机械咬合力提供,对于本次试验采用的 GFRP 筋,机械咬合作用表现为筋表面螺旋肋有规律地挤压混凝土.

2.2 黏结强度

12 个拉拔试件的黏结强度如表 1 所示.可见:

a. 与钢筋相比,GFRP 筋与混凝土之间的黏结强度较低,且随着筋直径的增加,两者的差别增大:6.35 mm 直径的 GFRP 筋,黏结强度仅比相应的钢筋低 8% 而 9.5 mm 直径的 GFRP 筋,黏结强度则比相应的钢筋低 37%.

b. 与钢筋试件相比,GFRP 筋试件的黏结应力随着筋直径的增加,变化不大.对于 GFRP 筋,直径由 6.35 mm 增至 9.5 mm,相应试件的黏结应力仅增加 1%.对于变形钢筋,直径由 6 mm 增至 10 mm,相应试件的黏结应力增加了 49%,这主要是由于本次试验采用的 6 mm 直径变形钢筋,其表面肋高度较低缘故.

2.3 破坏形态、受力过程和破坏机理

12 个试件均为拉拔破坏.

GFRP 筋试件与钢筋试件的受力过程都可以分为 3 个阶段,即上升阶段、下降阶段和残余阶段,两者区别在于 GFRP 筋试件的上升阶段又可分为微滑移阶段和滑移阶段,表现为微滑移阶段的黏结应力-滑移曲线基本呈线性,滑移阶段的黏结应力-滑移曲线呈非线性.

GFRP 筋试件的受力过程和破坏机理:(a)微滑移阶段,GFRP 筋与混凝土之间的黏结力主要由化学胶结力和一部分机械咬合力组成;(b)滑移阶段,化学胶结力受到破坏,机械咬合力增加,同时摩擦力出现;(c)下降阶段,机械咬合力降低,摩擦力增加,摩擦力的增加使 GFRP 筋在滑移过程中表面出现磨损,表面磨损使机械咬合力进一步降低;(d)残余阶段,机械咬合力已被破坏,黏结主要由摩擦力提供.

钢筋试件的受力过程和破坏机理:(a)上升阶段,随着荷载的增加,变形钢筋肋前的混凝土受挤压产生裂缝,裂缝不断发展、延伸,直到达到试件的黏结强度;(b)下降阶段,随着钢筋滑移量的增加,肋前混凝土的破

碎区不断扩大,肋前挤压力减小,直到钢筋横肋间的混凝土被剪断 ;(c) 残余阶段,钢筋与剪断的肋间混凝土作为整体,一起被拔出,此时的黏结主要由钢筋与混凝土间的摩擦力提供.

3 GFRP 筋黏结强度和锚固长度的设计建议

3.1 GFRP 筋黏结强度的设计建议

综合国内外相关的研究成果,采用 3 种方法计算 GFRP 筋与 C15 混凝土之间的黏结强度^[5,9-10]. 3 种方法的计算公式分别为 $\tau_{u,th1} = 2.05 \times (8.00 - 0.17 d_b) \left(\frac{l_d}{d_b} \right)^{0.4} f_t$, $\tau_{u,th2} = \frac{14.7 \sqrt{f'_c}}{d_b}$, $\tau_{u,th3} = \frac{4.97 \sqrt{f'_c}}{d_b}$. 3 种方法的理论值与试验值的对比情况见表 2. 式中: $\tau_{u,exp}$ 为试验值; $\tau_{u,th1}$, $\tau_{u,th2}$, $\tau_{u,th3}$ 依次为上述 3 个公式的理论计算值; d_b , l_d 为 GFRP 筋的直径和黏结长度; f_t 和 f'_c 为 C15 混凝土的轴心抗拉强度和圆柱体抗压强度.

表 2 黏结强度试验值与理论值的对比

Table 2 Comparison of theoretical value with experimental data of bond strength							
试件编号	$\tau_{u,th1}/\tau_{u,exp}$ [9]	$\tau_{u,th2}/\tau_{u,exp}$ [10]	$\tau_{u,th3}/\tau_{u,exp}$ [5]	试件编号	$\tau_{u,th1}/\tau_{u,exp}$ [9]	$\tau_{u,th2}/\tau_{u,exp}$ [10]	$\tau_{u,th3}/\tau_{u,exp}$ [5]
PG6-1	1.28	1.12	0.38	PG10-2	0.86	0.55	0.18
PG6-2	0.92	0.81	0.27	PG10-3	1.18	0.75	0.25
PG6-3	1.19	1.04	0.35	平均	1.08	0.82	0.28
PG10-1	1.04	0.66	0.22				

从表 2 可以看出,文献[9]中公式的理论值与试验值吻合较好,两者之比平均值为 1.08,文献[10]中公式的理论值与试验值相比偏小,平均值为 0.82,文献[5]中公式的理论值较试验值保守,平均值为 0.28. 因此本文建议,GFRP 筋与 C15 混凝土的黏结强度采用文献[9]中公式进行计算.

3.2 GFRP 筋锚固长度的设计建议

参考国内外相关的研究成果,采用 2 种方法计算 C15 混凝土中 GFRP 筋锚固长度. 2 种方法的计算公式分别为文献[9]中 $l_{db,th1} = \lambda \frac{f_{tu}}{4\tau_u} d_b$,文献[11]中 $l_{db,th2} = \frac{d_b f_{tu}}{18.5}$. 式中: d_b 为 GFRP 筋直径; $l_{db,th1}$, $l_{db,th2}$ 为理论计算值; f_{tu} , τ_u 分别为 GFRP 筋的抗拉强度和黏结强度; λ 为安全储备系数,偏安全地,本文建议取 $\lambda = 2.0$. 按上述 2 个公式计算的 GFRP 筋锚固长度: 6.35 mm 直径 GFRP 筋, $l_{db,th1} = 164 \text{ mm} (26 d_b)$, $l_{db,th2} = 152 \text{ mm} (24 d_b)$; 9.5 mm 直径 GFRP 筋, $l_{db,th1} = 290 \text{ mm} (31 d_b)$, $l_{db,th2} = 272 \text{ mm} (29 d_b)$. 可见 2 种方法的计算结果吻合良好. 本文建议,C15 混凝土中直径为 6.35 mm 和 9.5 mm 的 GFRP 筋其锚固长度设计值均可取为 30 倍 GFRP 筋直径.

4 结 论

- a. GFRP 筋试件与钢筋试件的受力过程都可以分为 3 个阶段,即上升阶段、下降阶段和残余阶段,其中 GFRP 筋试件的上升阶段又可分为微滑移阶段和滑移阶段.
- b. 与钢筋相比,GFRP 筋与混凝土之间的黏结强度较低,且随着筋直径的增加,两者的差别增大: 6.35 mm 直径的 GFRP 筋,其黏结强度仅比相应的钢筋低 8% 而 9.5 mm 直径的 GFRP 筋,其黏结强度则比相应的钢筋低 37%. 这主要是由于本次试验采用 6 mm 直径的变形钢筋,其表面肋高度较低缘故.
- c. GFRP 筋试件的黏结应力下降到其黏结强度的 8% ~ 13% 后会再次上升,并出现规律性的波动,波动的幅值为 3 ~ 4 MPa 而相应的钢筋试件,黏结应力下降到黏结强度的 20% ~ 30% 后,随着筋滑移量的增加,黏结应力缓慢降低直至试件破坏.
- d. 本文提出了 GFRP 筋与 C15 混凝土之间的黏结强度计算公式,并建议 6.35 mm 和 9.5 mm 直径 GFRP 筋在 C15 混凝土中的锚固长度设计值均取筋直径的 30 倍.

参考文献:

[1] CHAALLAL O, BENMOKRANE B. Pullout and bond of glass fiber rods embedded in concrete and cement grout [J]. Materials and Structures, 1993, 26: 167-175.

[2] EHSANI M R, SAADATMANESH H, TAO S. Design recommendations for bond of GFRP rebars to concrete [J]. Journal of Structural

Engineering,1996,122(3):247-254.

[3] 刘华杰.纤维塑料筋混凝土受弯构件试验研究与理论分析[D].上海:同济大学,2003.

[4] 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.

[5] TIGHIOUART B, BENMOKRANE B, GAO D. Investigation of bond in concrete member with fiber reinforced polymer (FRP) bars [J]. Construction and Building Materials,1998,12(8):453-462.

[6] 王勃,欧进萍,张新越,等. FRP筋与混凝土黏结性能的试验研究[J]. 低温建筑技术,2006(1):39-41.

[7] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[8] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GB 5052—92 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1992.

[9] 郑乔文. FRP筋混凝土梁设计理论研究[D]. 上海:同济大学,2006.

[10] 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.

[11] American Concrete Institute. ACI 440.1R-01 Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars[S]. Farmington Hills:ACI Committee 440,2001.

Experimental studies on bond strength between GFRP rebar and concrete C15

YANG Yu¹, XUE Wei-chen¹, ZHAO Qian², DAI Fang-bi²

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Sinoma Science & Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract Experimental studies were performed on 12 pull-out specimens to investigate the bond-slip characteristics, loading process, failure mode, failure mechanism, bond strength, and anchorage length of GFRP rebar in concrete C15. The result shows that the bond stress of GFRP rebar specimens fluctuates within a range of 3-4 MPa when it decreases to 8%-13% of its bond strength, however, the bond stress of normal steel rebar keeps invariable when it decreases to 20%-30% of its bond strength. The bond strength of GFRP rebar in concrete C15 is relatively low. Taking GFRP rebar with diameter 6.35 mm and 9.5 mm as examples, the corresponding bond strengths of GFRP rebar are 8% and 37% lower than those of normal steel rebar with similar diameters respectively. When the bond strength of GFRP rebar is reached, the slippage of GFRP rebar is 3-5 mm, but the value is 1-2 mm for the normal steel rebar. Finally, some suggestions for design about rational bond strength between GFRP rebar and concrete C15 and anchorage length of GFRP were made.

Key words GFRP rebar; bond strength; pull-out specimen; slippage; concrete