

文章编号:1673-9469(2025)06-0012-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.002

GFRP 植筋与混凝土界面粘结性能试验研究

王燕杰^{1,2,3}, 刘畅⁴, 马栋^{1*}, 袁世茂¹, 刘红波^{1,2}, 吴智敏⁵

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300101; 2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038;
3. 明珠建设集团有限公司, 浙江 金华 321300; 4. 中冶焦耐(大连)工程技术有限公司,
辽宁 大连 116085; 5. 浙江科技大学 土木与建筑工程学院, 浙江 杭州 313399)

摘要: 基于纤维增强复合材料(FRP)植筋(ETS)加固技术,考虑3种混凝土强度等级(C30、C40和C50)和3种玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋直径(8、12和16 mm),制作了18个拉拔试件,采用中心拉拔试验研究筋材直径与混凝土强度等级对GFRP植筋与混凝土界面粘结性能的影响。结果表明,筋材直径与混凝土强度对界面粘结破坏形态、荷载-滑移曲线和界面粘结强度均具有显著影响。当界面脱粘时,粘结-滑移关系曲线呈现完整的上升、下降和平稳3个阶段;若发生混凝土劈裂破坏或GFRP筋断裂,粘结-滑移关系曲线仅有上升段。当混凝土强度等级从C30增加到C50时,GFRP筋直径为8 mm和16 mm的试件粘结强度分别提高了37.35%和13.23%,但当筋材直径为12 mm时,随着混凝土强度的增加,试件的破坏模式由GFRP筋断裂转变为混凝土劈裂,混凝土约束能力不足导致界面粘结强度显著降低。筋材直径由8 mm增加至16 mm时,粘结长度的增加导致界面粘结应力分布不均匀性增强,C30、C40和C50混凝土试件的粘结强度分别降低了40.76%、47.82%和51.16%。

关键词: FRP植筋加固技术;拉拔试验;粘结强度;破坏形态

中图分类号: TG333.17

文献标识码: A

Experimental Study on Interfacial Bond Behavior Between Embedded Through-Section GFRP Bars and Concrete

WANG Yanjie^{1,2,3}, LIU Chang⁴, MA Dong^{1*}, YUAN Shimao¹, LIU Hongbo^{1,2}, WU Zhimin⁵

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300101, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 3. Mingzhu Construction Group Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang 321300, China; 4. ACRE Coking & Refractory Engineering Consulting Corporation, Dalian, Liaoning 116085, China; 5. School of Civil and Architectural Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 313399, China)

Abstract: Considering three concrete strength grades (C30, C40 and C50) and three GFRP bar diameters (8, 12 and 16 mm), 18 GFRP anchors with pre-drilled holes and concrete pull-out specimens were fabricated based on the Embedded Through-Section (ETS) strengthening technique for Fibre Reinforced Plastic (FRP). The central pull-out test was used to study the influence of bar diameter and concrete strength grade on the interface bonding performance of GFRP anchor rods and concrete. Compared with the traditional drilling anchor rod method, this method is easier to operate and avoids the local damage to the concrete caused by drilling. The results show that the bar diameter and concrete strength have significant effects on the bond failure mode, load-slip curve and bond strength. When the interface is debonded, the bond slip curve presents three stages: rising, falling and stable. In case of concrete

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52308165); 中国博士后科学基金面上项目(2023M732607); 河北省自然科学基金资助项目(E2021402028); 海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP2113); 邯郸市科技局项目(21422053226)

第一作者: 王燕杰(1992—), 男, 河北邯郸人, 博士, 讲师, 主要研究方向为FRP筋混凝土的粘结与锚固。

* 通信作者: 马栋(1999—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为FRP筋混凝土的粘结与锚固。

splitting failure or FRP bar fracture, the bond-slip curve has only an ascending segment. As the concrete strength grade increased from C30 to C50, the bond strength of specimens with diameters of 8 mm and 16 mm is increased by 37.35% and 13.23%, respectively. However, when the bar diameter is 12 mm, with the increase of concrete strength, the failure mode of the specimen changes from GFRP bar fracture to concrete splitting, and the lack of the concrete confinement leads to a significant decrease in the bond strength. With the increase of bar diameter from 8 mm to 16 mm, the increase of bond length leads to the enhancement of the non-uniform distribution of interfacial bond stresses, and the bond strength of C30, C40 and C50 concrete specimens decreases by 40.76%, 47.82% and 51.16%, respectively.

Key words: ETS-FRP bar strengthening technique; pullout test; bond strength; failure mode

纤维增强复合材料(Fibre Reinforced Plastic, FRP)筋加固既有钢筋混凝土构件已受到世界各国研究者和技术人员的广泛关注^[1]。常用的加固方法包括表面粘贴法(Externally Bonded, EB)和近表面嵌入法(Near-Surface Mounted, NSM)。近年来,FRP植筋^[2]加固方法在混凝土加固领域逐渐崭露头角。该技术将FRP筋通过粘结剂植入到预钻孔的混凝土中,相较于EB、NSM,能更好地发挥混凝土的约束和保护作用,有效提高混凝土构件的抗剪性能^[3-5]。

FRP植筋系统包括FRP筋、粘结剂和混凝土,粘结层通常很薄,因此,FRP筋与混凝土界面粘结性能既是保证FRP植筋加固混凝土承载能力的关键^[6],也是混凝土结构安全设计和评估的关键参数。许多学者针对FRP筋与混凝土界面粘结性能开展了试验^[7-13]和数值模拟研究^[14-18]。研究发现,影响界面粘结强度的因素有很多,如FRP筋材种类、粘结长度、混凝土强度、筋材直径和钻孔直径等^[7-9]。Spada等^[14-15]引入筋材-混凝土界面和筋材-粘结剂-混凝土两界面本构关系,分别提出了简化、详细的有限元数值模型。目前,针对FRP植筋与混凝土粘结-滑移行为的试验研究尚少。粘结-滑移曲线一般通过以下3种方法间接获得:(1)FRP筋外贴或开槽内贴应变片,根据FRP筋内应变变化,获得局部粘结应力和局部滑移;(2)通过短锚拉拔试验,将测得的平均粘结应力-平均滑移关系近似为局部粘结-滑移关系;(3)利用FRP筋加载端荷载-位移关系曲线推算界面粘结-滑移关系。Caro等^[7-8]考虑不同的锚固长度(FRP筋直径的5~30倍),研究了FRP植筋与混凝土界面粘结强度和粘结-滑移本构关系。国内外大量研究表明,粘结应力分布的不均匀性随锚固长度的增加愈发显著,较长的锚固长度会低估界面粘结强度。

对于FRP筋-粘结剂-混凝土三相介质锚固系统,FRP筋直径、粘结长度和混凝土强度是影响

FRP植筋与混凝土界面粘结性能的关键参数。因此,有必要定量评估各参数对界面粘结破坏模式、粘结强度和粘结-滑移关系曲线的影响。由于试验条件、试件尺寸不同,粘结承载力及粘结强度随各关键参数的变化规律尚未形成统一结论,多因素影响下FRP植筋与混凝土界面粘结性能尚需进一步研究。

本文制作了带有预制孔的玻璃纤维增强复合材料(Glass Fibre Reinforced Plastic, GFRP)植筋与混凝土拉拔试件,用于研究GFRP植筋与混凝土界面粘结性能,分析了混凝土强度和GFRP筋直径对拉拔荷载-滑移曲线、破坏模式、粘结强度、峰值荷载和脱粘荷载的影响规律。研究结果可为GFRP植筋技术推广应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验采用江苏复合材料有限公司生产的表面形式为螺纹的GFRP筋,其直径 D 分别为8、12、16 mm(图1)。参考《纤维增强复合材料建设工程应用技术标准》(GB 50608—2020)^[19]进行拉伸试验。对于直径为8、12、16 mm的GFRP筋,抗拉强度分别为1 040、946、982 MPa,肋高分别为0.012 D 、0.054 D 和0.041 D 。

环氧胶粘剂使用天津雅莱仕新材料有限公司提供的YZZ A/B注射式植筋胶,通过粘结剂抗拉强度试验^[20]测得其抗拉强度为18.88 MPa。采用不同强度等级(C30、C40和C50)的混凝土作为FRP植筋系统的基体材料,混凝土配合比如表1所示。其中,水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,细骨料为河砂,粗骨料为粒径5~10 mm的石子。混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度采用尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的立方体试件测得,混凝土弹性模量采用尺寸为300 mm×100 mm×100 mm的棱柱体试件测得。

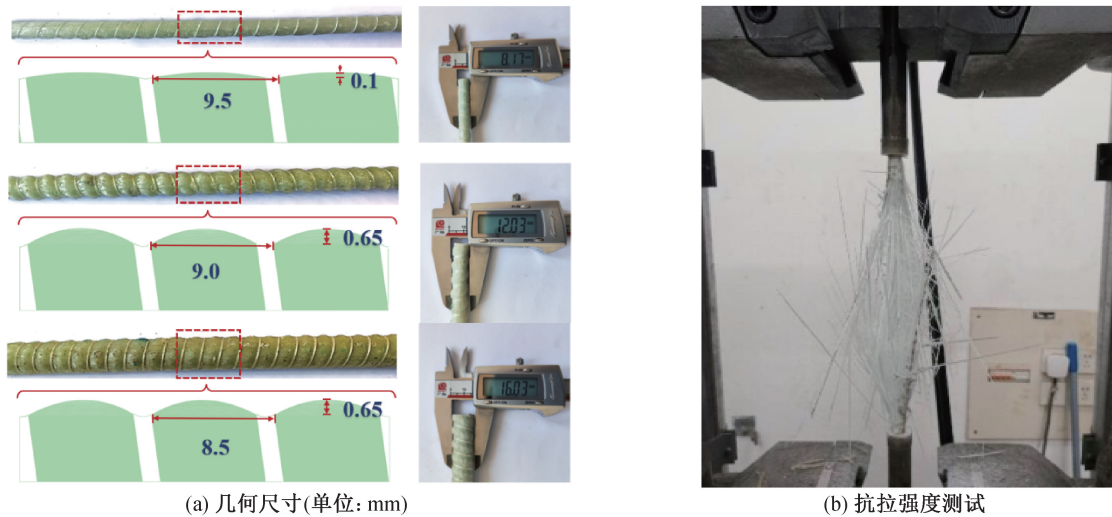


图 1 GFRP 筋性能测试

Fig. 1 Measurements of tensile properties of GFRP bars

表 1 混凝土配合比和力学参数

Tab. 1 Mix proportion and mechanical parameters of concrete

混凝土强度等级	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	河砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石子/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	立方体抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
C30	195	325	696	1 184	31.88	2.77	33.2
C40	195	433	603	1 170	41.21	3.35	34.6
C50	195	420	800	832	50.54	3.78	36.4

1.2 试件设计

试验采用 GFRP 筋-粘结剂-混凝土中心拉拔试件,考虑 3 种混凝土强度 (C30、C40 和 C50) 和 3 种 GFRP 筋直径 (8、12、16 mm)。每种混凝土强度、每种直径制备 2 个试件,共 18 个拉拔试件,图 2 为拉拔试件示意图。将总长度为 650 mm 的 GFRP 筋通过胶粘剂植入边长为 150 mm 的混凝土立方体预制孔中,预制孔是在混凝土浇筑前,利用设置在模具中心的聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride, PVC) 管制成的。预制孔直径为 GFRP 筋直径的 2 倍,当 GFRP 筋直径为 8、12、16 mm 时,对应的混凝土保护层厚度分别为 67、63、59 mm。为确保界

面粘结应力均匀分布,粘结长度取 GFRP 筋直径的 5 倍^[21]。利用 PVC 管在试件的自由和加载端设置非粘结段。为防止加载过程中筋材端部发生剪切破坏,采用外径 26 mm、内径 20 mm 的钢套筒进行锚固,锚固长度为 250 mm,试件制作过程如图 3 所示。具体如下:(1)将外径为 2D 的 PVC 管嵌入至模具中心处,为增强粘结剂和混凝土之间的粘结力,将一根厚度为 3 mm 的塑胶线以 30 mm 的间隔缠绕在 PVC 管周围。把含有预制孔的混凝土试件在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 95% 的标准养护条件下养护 28 d 后取出;(2)把 GFRP 筋植入预制孔的中央,通过窄喷嘴从筋材嵌入端缓慢注入

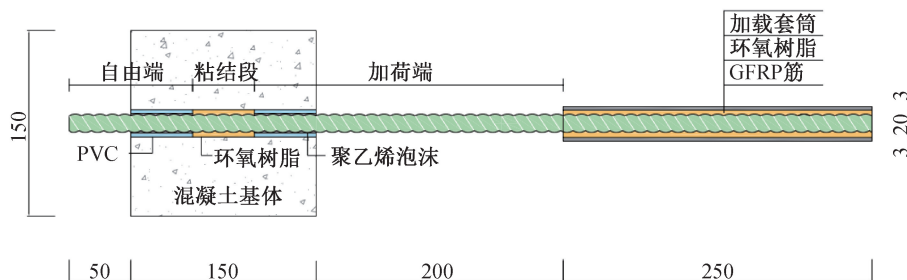


图 2 混凝土拉拔试件示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of pullout specimens (unit:mm)

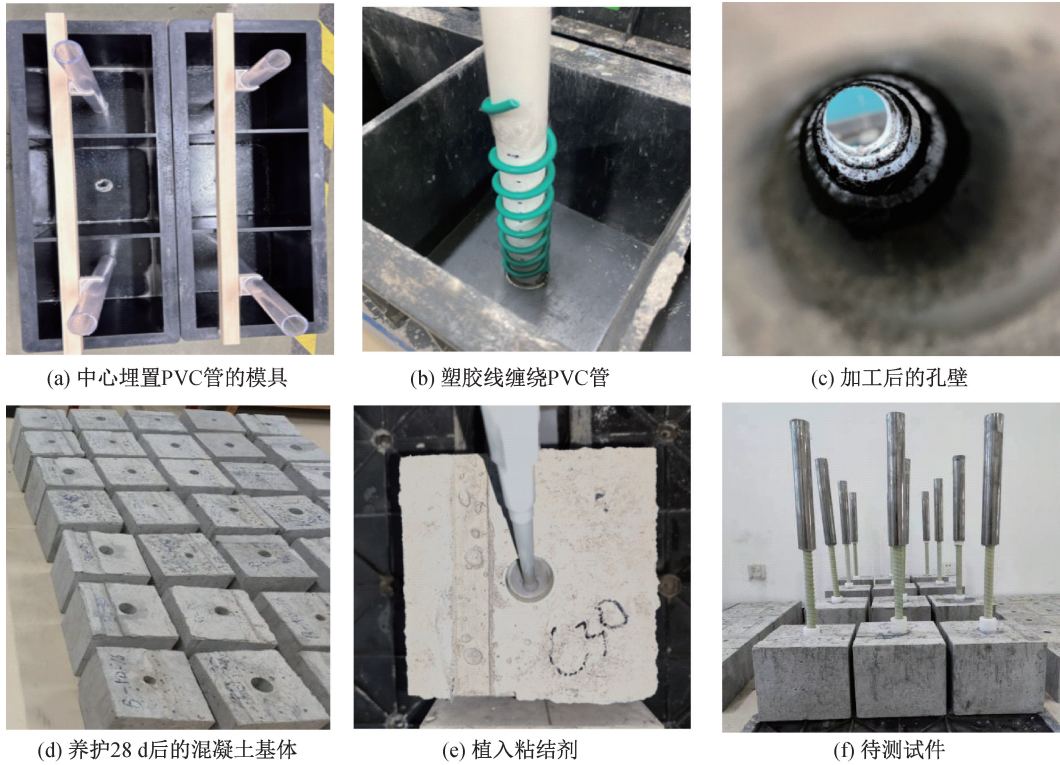


图 3 试件制作过程

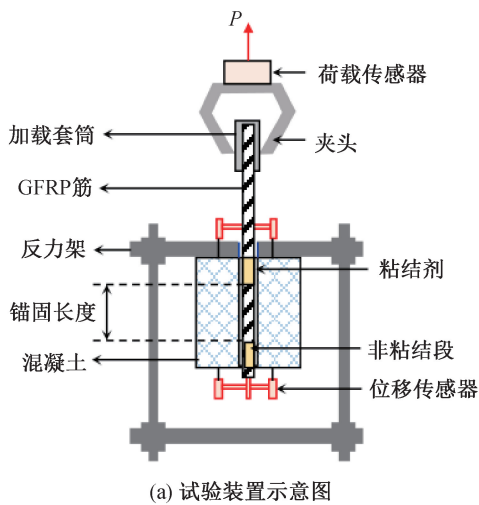
Fig. 3 Specimen fabrication

粘结剂,对喷嘴上粘结剂进行压力监测,以确保预制孔部分完全渗透且没有任何空气;(3)去除试件表面多余的粘结剂,试件固化 7 d,粘结剂完全硬化后开始拉拔试验。

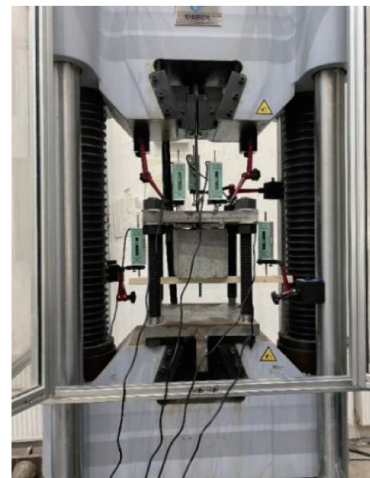
1.3 加载方案

本研究采用 WAW-1000B 型微机控制电液伺服万能试验机开展拉拔试验。加载时采用位移控制加载方式,加载速率为 0.03 mm/s,加载装置

如图 4 所示,其中 P 表示拉拔荷载, kN。混凝土试件通过自制反力架约束在试验机上。在混凝土试件的上下表面安装两对溧阳市仪厂生产的 YHD-50 型位移传感器,用于测量滑移值。采集设备为江苏东华测试技术股份有限公司生产的 DH3818Y 型静态应变采集仪,采集频率为 20 Hz。当试验过程中出现下列情况之一,结束加载:(1)GFRP 筋相对于混凝土滑移量超过 20 mm;(2)GFRP 筋被拉断;(3)混凝土发生劈裂破坏。



(a) 试验装置示意图



(b) 试验测试图

图 4 拉拔试验装置

Fig. 4 Pull-out test instrument

2 试验结果分析

2.1 破坏模式

一般来说,FRP 植筋与混凝土拉拔试件的破坏模式可分为界面脱粘、混凝土劈裂破坏、FRP 筋断裂和复合破坏。通过分析 18 个试件粘结破坏形态可知,本试验的破坏模式包括界面脱粘导致的 GFRP 筋拔出、混凝土劈裂破坏以及 GFRP 筋断裂,如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出,界面脱粘破坏集中发生在 GFRP 筋-粘结剂界面,而粘结剂-混凝土界面粘结良好,无明显滑移。混凝土发生劈裂破坏时,会在达到极限荷载后瞬间裂开,试验加载即刻停止,

混凝土分裂为 2~3 个碎块,且 GFRP 筋-粘结剂界面处有明显滑移,粘结剂也发生劈裂破坏,筋材表面有明显磨损。表 2 给出了 FRP 植筋混凝土粘结试件的试验结果。由表 2 可以看出,直径为 8 mm 的试件发生筋材拔出破坏;直径为 12 mm 的试件发生混凝土劈裂破坏或筋材断裂;直径为 16 mm 的试件全部出现混凝土劈裂破坏。试件破坏模式存在差异的原因在于直径较小的 GFRP 筋与混凝土界面接触面积不足,界面更容易剥离,极限荷载较小。随着 GFRP 筋直径的增大,粘结面积相应增加,界面脱粘的可能性降低,承载能力随之提高。当筋材拉应力和混凝土拉应力增加到极限值时,混凝土发生劈裂破坏或筋材断裂。



图 5 破坏模式

Fig. 5 Failure modes

表 2 拉拔试验结果

Tab. 2 Pullout test results

试件编号	粘结长度/mm	筋材直径/mm	孔径/mm	粘结强度/MPa	极限荷载/kN	剥离荷载/kN	破坏模式
C30_D08_1	40	8	16	18.56	18.66	7.84	筋材拔出
C30_D08_2	40	8	16	21.33	21.44	11.73	筋材拔出
C30_D12_1	60	12	24	17.08	38.64	—	筋材断裂
C30_D12_2	60	12	24	20.64	46.69	—	筋材断裂
C30_D16_1	80	16	32	11.64	46.80	—	混凝土劈裂
C30_D16_2	80	16	32	11.99	48.22	—	混凝土劈裂
C40_D08_1	40	8	16	23.29	23.41	11.02	筋材拔出
C40_D08_2	40	8	16	26.29	26.43	12.53	筋材拔出
C40_D12_1	60	12	24	20.94	47.37	—	筋材断裂
C40_D12_2	60	12	24	21.76	49.23	—	筋材断裂
C40_D16_1	80	16	32	11.03	44.36	—	混凝土劈裂
C40_D16_2	80	16	32	14.84	59.66	—	混凝土劈裂
C50_D08_1	40	8	16	28.36	28.51	20.98	筋材拔出
C50_D08_2	40	8	16	26.43	31.39	15.57	筋材拔出
C50_D12_1	60	12	24	12.90	29.17	—	混凝土劈裂
C50_D12_2	60	12	24	15.67	35.45	—	混凝土劈裂
C50_D16_1	80	16	32	13.16	52.90	—	混凝土劈裂
C50_D16_2	80	16	32	13.60	54.69	—	混凝土劈裂

注:以 C30_D08_1 为列,C30 代表混凝土强度等级,D08 代表 GFRP 筋直径,1 代表试验组中的试件编号。

通过以上分析可以看出,GFRP 筋直径是决定混凝土是否产生劈裂裂缝的主要因素。由机理分析可知,GFRP 筋直径的增加意味着拉拔力的增大,由于 GFRP 筋表面为螺纹结构,在拉拔受力过程中界面将产生较大的径向剪胀力,即界面剪胀效应。随着界面径向剪胀力的增加,混凝土与粘结剂界面处的环向拉应力有所增大,当环向拉应力达到混凝土抗拉强度时,劈裂裂缝开始出现。根据混凝土断裂力学理论,混凝土裂缝扩展将经历裂缝起裂、裂缝稳定扩展和失稳扩展 3 个阶段。混凝土劈裂裂缝出现后,随着拉拔力的继续施加,裂缝由内向外扩展,当裂缝扩展至混凝土边缘时,混凝土试件发生完全劈裂破坏。

除筋材直径外,混凝土强度也是影响 GFRP 植筋与混凝土界面粘结破坏形态的重要因素。以筋材直径为 12 mm 的试件为例,C30 和 C40 混凝土的破坏模式均为筋材拉断,而 C50 混凝土的破坏模式为混凝土劈裂破坏,这与传统的规律并不一致。一般来说,随着混凝土强度的提高,其对界面的约束作用增强,越不易发生混凝土劈裂破坏。C50 混凝土试件的峰值荷载小于 C30 和 C40 混凝土试件,这是因为 C50 混凝土试件均发生劈裂破坏,界面未能充分发挥粘结作用,粘结强度下降导致拉拔荷载降低。

2.2 荷载-位移曲线

各试件荷载-滑移曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,GFRP 植筋与混凝土界面粘结破坏模式对界面粘结滑移性能影响十分明显。界面粘结破坏模式不同,荷载-滑移曲线的形状也发生变化。当发生界面脱粘破坏时,荷载-滑移曲线具有完整的上升段、下降段和摩擦段;当发生混凝土劈裂破坏或筋材断裂时,荷载-滑移曲线只有上升段,并且极限荷载较界面脱粘时有明显提高。以 C30 试件为例,随着 GFRP 筋直径由 8 mm 增加至 12 mm,破坏模式由界面脱粘转变为筋材拉断,极限荷载平均值由 20.05 kN 提高至 42.67 kN,增长率高达 112.8%。然而,当 GFRP 筋直径由 12 mm 增加至 16 mm 时,破坏模式由筋材拉断转变为混凝土劈裂,极限荷载增长率仅为 10.19%。

对于 GFRP 筋直径为 8 mm 的拉拔试件,其荷载-滑移曲线呈现出完整的上升段、下降段和平稳段 3 个阶段,且具有明显的非线性特征。荷载达到峰值后逐渐下降至第一个波谷,该波谷对应的荷

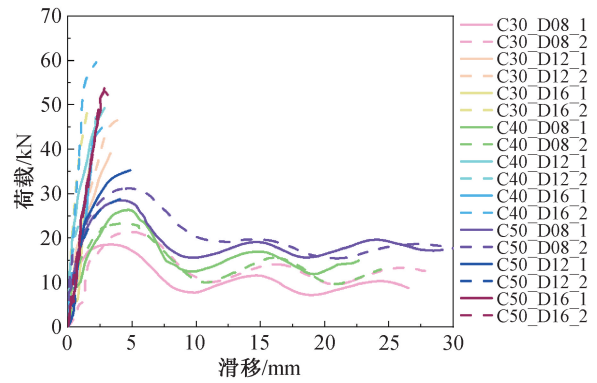


图 6 荷载-滑移曲线

Fig. 6 Load-slip curve

载值被定义为剥离荷载。随后,筋材肋间的粘结剂开始发生剪切破坏,荷载在短暂上升后继续下降,最后逐渐趋于稳定。从图 6 可以看出,随着混凝土强度的增加,极限荷载和剥离荷载均明显提高,但对应的滑移值基本保持不变,这与现有关于 GFRP 筋与混凝土两相材料粘结问题的研究结论一致。

2.3 粘结-滑移曲线

由于 GFRP 筋的粘结长度较短,可假设粘结应力沿粘结长度均匀分布,可由式(1)一式(3)得到:

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

$$\tau_u = \frac{P_{\max}}{\pi DL} \quad (2)$$

$$s = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + s_4}{4} \quad (3)$$

式中, P 为荷载值,kN; P_{\max} 为峰值荷载,kN; τ 为粘结应力,MPa; τ_u 为峰值粘结应力,即粘结强度,MPa; s 为粘结滑移,mm; L 为 GFRP 筋的粘结长度,mm; s_1 、 s_2 、 s_3 和 s_4 为位移传感器测得的滑移值,mm。

荷载达到峰值荷载、剥离荷载时对应的粘结应力分别为粘结强度和残余摩擦强度。图 7 给出了各试件的粘结-滑移曲线。与荷载-滑移曲线类似,仅 GFRP 筋直径为 8 mm 的试件呈现出完整的粘结-滑移曲线,破坏模式为界面脱粘。对于其他直径和破坏形态的试件,粘结-滑移关系曲线仅有上升段,基本呈线性特征。

3 参数分析

本节旨在考察 GFRP 筋直径和混凝土强度对粘结强度的影响。表 2 和图 8 给出了粘结强度

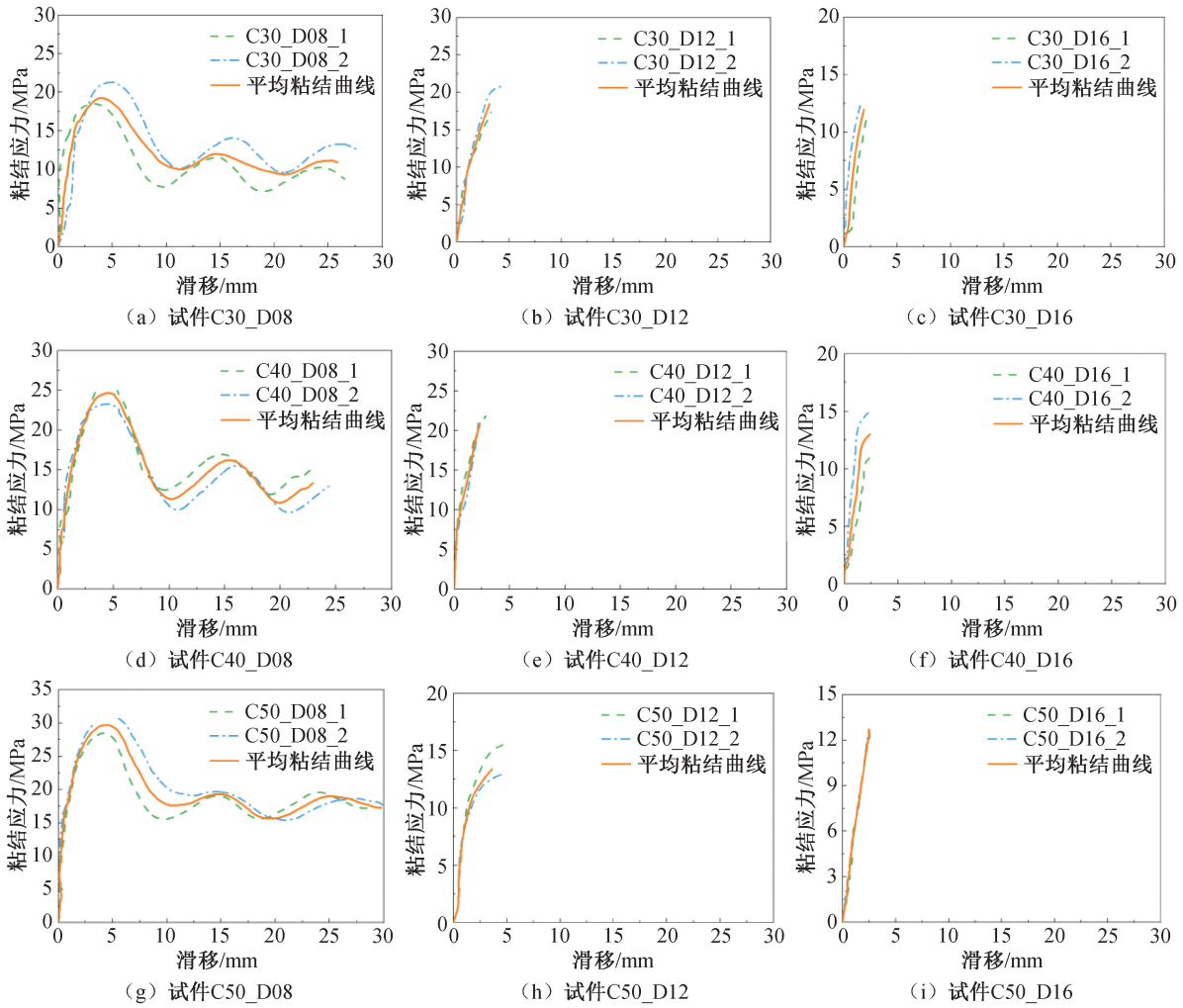


图7 粘结-滑移曲线

Fig. 7 Bond-slip curves of specimens

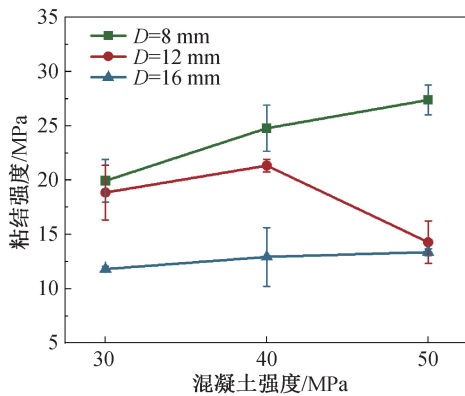


图8 混凝土强度对粘结强度的影响

Fig. 8 Effect of concrete strength on bond strength

随混凝土强度和 GFRP 筋直径的变化规律。整体而言,除 GFRP 筋直径为 12 mm 的试件外,粘结强度随混凝土强度增加而增大。当混凝土强度从 C30 增加到 C50 时,GFRP 筋直径为 8、16 mm 的试件粘结强度分别提高了 37.35% 和 13.23%。然

而,对于 GFRP 筋直径为 12 mm 的试件,粘结强度随混凝土强度的增加呈先增大后减小的趋势。当混凝土强度从 C30 增加到 C40 时,粘结强度增加了 13.20%;当混凝土强度达到 C50 时,粘结强度显著降低。这是由于直径为 12 mm 的 GFRP 筋和 C50 混凝土试件的破坏模式由 GFRP 筋断裂转变为混凝土劈裂。在拉拔过程中,混凝土中的拉应力首先超过其抗拉强度,之后开始出现裂缝,混凝土约束效应减弱,从而导致粘结强度降低。

从表 2 可以看出,混凝土破坏模式对 GFRP 筋拉拔荷载和界面粘结强度有明显影响。随着混凝土强度由 C30 增加至 C50,峰值荷载和剥离荷载平均分别提高了 49.38% 和 46.44%,但粘结强度的变化趋势与混凝土破坏模式有关。以 GFRP 筋直径为 12 mm 的试件为例,当混凝土强度达到 C50 时,粘结强度先升高后显著降低。这是因为试件的破坏模式为混凝土劈裂,而非界面剥离。随着

混凝土强度的增加,试件的破坏模式向劈裂破坏的转变可以归因于这样一个事实,即混凝土强度越高,需要更大的拉拔力才能拔出筋材,导致筋材与粘结剂界面的机械咬合力增加,从而使混凝土内部产生较大的拉应力。尽管随着混凝土强度的增加,混凝土的抗拉强度有所提高,但这些应力仍可能达到其抗拉强度并引起劈裂裂缝。此外,高强度混凝土通常表现出脆性增加,更容易出现劈裂裂缝^[22]。混凝土劈裂破坏的发生意味着混凝土保护层没有为 GFRP 筋提供足够的约束,即混凝土保护层约束不足无法防止混凝土开裂,导致该类试件的粘结强度通常低于 GFRP 筋断裂破坏的试件。

图 9 给出了 GFRP 筋直径对粘结强度的影响规律。随着筋材直径的增加,无论混凝土强度如何,GFRP 植筋与混凝土界面粘结强度均明显减小。尽管增加 GFRP 筋直径在一定程度上能够提高拉拔力,但根据式(1)可知,粘结强度并不一定增加。如图 9 所示,当 GFRP 筋直径由 8 mm 增加至 16 mm 时,C30、C40 和 C50 混凝土试件的粘结强度分别降低了 40.76%、47.82%和 51.16%,这与已有研究中关于 GFRP 筋和混凝土粘结性能的研究结果一致^[22]。需要指出的是,对于 C30 和 C40 混凝土的试件,当筋材直径由 12 mm 增加至 16 mm 时,混凝土相对保护层厚度由 5.25 减小至 3.69,混凝土约束不足导致破坏模式由筋材断裂转变为混凝土劈裂破坏,从而削弱界面粘结强度。

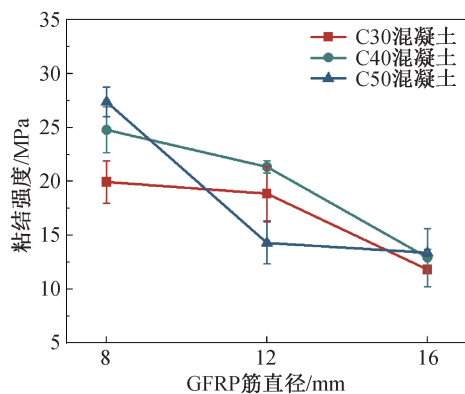


图 9 GFRP 筋直径对粘结强度的影响

Fig. 9 Effect of GFRP bar diameter on bond strength

基于以上分析可以看出,随着 GFRP 筋直径由 8 mm 增加至 16 mm,不同强度混凝土的拉拔试件粘结强度下降了 40%~50%;随着混凝土强度由 C30 增加至 C50,不同筋材直径的拉拔试件粘结强度提高了 13%~37%。这表明,与混凝土强度相比,GFRP 筋直径是影响界面粘结强度的主要因

素。GFRP 筋界面粘结强度随筋材直径增加而降低的原因可以解释如下:首先,试件的界面粘结长度为筋材直径的 5 倍,直径越大,粘结长度越长,沿粘结长度方向的粘结应力的非线性分布越明显^[22];其次,Achillides 等^[23]指出,直径越大的 GFRP 筋往往表现出更显著的泊松比效应,导致筋材与粘结剂之间的机械咬合力和摩擦力减弱,从而降低了粘结强度;再次,混凝土试件均为边长为 150 mm 的立方体,混凝土保护层厚度随筋材直径的增加而减小,造成混凝土约束不足,易引起混凝土开裂,进而影响粘结强度;最后,增加筋材直径意味着与粘结剂接触面积的增加,这可能导致粘结剂分布不均匀或粘结界面出现小的空隙、缺陷,从而对粘结强度产生负面影响^[22]。

需要指出的是,试验中的试件均采用固定比例的粘结长度,即粘结长度为筋材直径的 5 倍,未能定量分析粘结长度的影响。试验发现,粘结剂分布不均匀会对界面粘结强度产生负面影响。因此,在今后研究中将重点研究界面粘结缺陷对 GFRP 植筋与混凝土粘结强度的影响。

4 结论

1) 本文提出了一种采用预制孔的 GFRP 植筋混凝土界面粘结性能测试方法,成功获取了完整的界面粘结-滑移曲线,并量化分析了各因素对粘结强度的影响。

2) GFRP 筋直径为 8 mm 的试件发生界面脱粘破坏,直径为 16 mm 的试件发生混凝土劈裂破坏,直径为 12 mm 的试件则出现 GFRP 筋断裂或混凝土劈裂破坏。

3) 界面脱粘破坏对应的粘结-滑移曲线呈现完整的上升、下降、平稳 3 个阶段。而混凝土劈裂或 GFRP 筋断裂破坏呈脆性,其粘结-滑移曲线仅有上升段。

4) 当混凝土强度等级由 C30 提升至 C50 时,直径为 8 mm 和 16 mm 试件的粘结强度分别提高 37.35%和 13.23%。但直径为 12 mm 的试件因破坏模式由 GFRP 筋断裂转为混凝土劈裂,受混凝土约束能力不足制约,粘结强度显著降低。

5) 随着 GFRP 筋直径由 8 mm 增至 16 mm,C30、C40、C50 混凝土试件的粘结强度依次降低 40.76%、47.82%和 51.16%,主要原因是粘结长度增大加剧了界面应力分布不均匀性,削弱了整体粘结性能。

参考文献:

- [1] SIDDIKA A, AL MAMUN M A, ALYOUSEF R, et al. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: a review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 25: 100798.
- [2] VALERIO P, IBELL T J, DARBY A P. Deep embedment of FRP for concrete shear strengthening[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2009, 162(5): 311-321.
- [3] CHAALLAL O, MOFIDI A, BENMOKRANE B, et al. Embedded through-section FRP rod method for shear strengthening of RC beams: performance and comparison with existing techniques[J]. *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2011, 15(3): 374-383.
- [4] MOFIDI A, CHAALLAL O, BENMOKRANE B, et al. Experimental tests and design model for RC beams strengthened in shear using the embedded through-section FRP method[J]. *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2012, 16(5): 540-550.
- [5] BHANUGOBAN M, YAPA H D, DIRAR S. Efficient shear retrofitting of reinforced concrete beams using prestressed deep embedded bars[J]. *Engineering Structures*, 2021, 246: 113053.
- [6] KIM S J, SMITH S T. Pullout strength models for FRP anchors in uncracked concrete[J]. *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2010, 14(4): 406-414.
- [7] CARO M, JEMAA Y, DIRAR S, et al. Bond performance of deep embedment FRP bars epoxy-bonded into concrete[J]. *Engineering Structures*, 2017, 147: 448-457.
- [8] GODAT A, L'HADY A, CHAALLAL O, et al. Bond behavior of the ETS FRP bar shear-strengthening method [J]. *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2012, 16(5): 529-539.
- [9] BUI L V H, STITMANNATHUM B, JONGVIVATSAKUL P. Comprehensive investigation on bond mechanism of embedded through-section fiber-reinforced polymer bars to concrete for structural analysis[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 29: 101180.
- [10] CARO M, DIRAR S, QUINN A, et al. Shear strengthening of existing reinforced concrete beams with embedded bars-an overview [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2021, 176(6): 439-452.
- [11] HU X, PENG G, NIU D, et al. Bond behavior between deformed steel bars and cementitious grout[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120810.
- [12] ASCIONE F, LAMBERTI M, NAPOLI A, et al. Experimental bond behavior of steel reinforced grout systems for strengthening concrete elements [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 232: 117105.
- [13] ZHANG B, BENMOKRANE B, CHENNOUF A. Prediction of tensile capacity of bond anchorages for FRP tendons [J]. *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2000, 4(2): 39-47.
- [14] SPADA A, GIAMBANCO, RIZZO P. Elastoplastic damaging model for adhesive anchor systems. I: theoretical formulation and numerical implementation [J]. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 2011, 137(12): 854-861.
- [15] SPADA A, RIZZO P, GIAMBANCO G. Elastoplastic damaging model for adhesive anchor systems. II: numerical and experimental validation [J]. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 2011, 137(12): 862-876.
- [16] GODAT A, CHAALLAL O, NEALE K W. Nonlinear finite element models for the embedded through-section FRP shear-strengthening method [J]. *Computers & Structures*, 2013, 119: 12-22.
- [17] CHEN C, CHENG L. Theoretical solution to fatigue bond stress distribution of NSM FRP reinforcement in concrete[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 99: 453-464.
- [18] 郝增明, 白晓宇, 章伟, 等. 双腹板工字型 GFRP 腰梁连接受力性能研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(2): 21-26.
- HAO Z M, BAI X Y, ZHANG W, et al. Study on mechanical behavior of double web I-shaped GFRP waist beam connection[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2023, 40(2): 21-26.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料建设工程应用技术标准: GB 50608—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction: GB 50608—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [20] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- National Standardization Technical Committee for Fiber Reinforced Plastics. Test methods for properties of resin casting body: GB/T 2567—2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [21] ZHANG X, WU Z, ZHENG J, et al. Experimental study on bond behavior of deformed bars embedded in concrete subjected to biaxial lateral tensile compressive stresses[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, 2014, 26(4): 761-772.
- [22] 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.
- [23] ACHILLIDES Z, PILAKOUTAS K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions[J]. *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2004, 8(2): 173-181.

(责任编辑 张爱丽)