

钢筋新型代用材料 FRP 筋粘结锚固性能试验研究

茅卫兵¹, 章定国²

(1. 江苏省城乡规划设计研究院, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 对混凝土结构中的钢筋新型代用材料 FRP 筋在周围不同环境介质中的粘结锚固性能进行了试验研究. 通过对 36 个 FRP 筋混凝土和钢筋混凝土所进行的立方体试件中心拔出试验研究, 得出了 FRP 筋在混凝土、水泥浆和环氧树脂中的粘结锚固性能. 试验结果表明: FRP 筋在周围不同介质中的粘结锚固性能与钢筋在相应介质中的粘结锚固性能相似. 螺纹 FRP 筋的粘结锚固性能要明显高于光面 FRP 筋.

关键词 玻璃纤维增强塑料; 钢筋代用材料; 粘结性能; 锚固

中图分类号 :TQ171.1+1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)05-0044-05

钢筋混凝土结构是土木水利工程中应用最为广泛的结构型式之一, 但钢筋易于锈蚀却是严重影响钢筋混凝土结构耐久性的最根本的缺陷. 据有关文献^[1]报道, 美国 16 万座桥梁在设计基准期内因钢筋锈蚀而所需要的维修费用即达 200 亿美元, 而欧洲因钢筋锈蚀而引起的损失估计每年达 15 亿美元.

为防止和克服钢筋锈蚀引起的结构耐久性问题, 各国都根据具体情况采取了一系列相应措施, 但效果并不理想. 自 80 年代中期以来, 欧、美及日本等国已陆续开始对连续纤维增强塑料 (Continuous Fiber Reinforced Plastics, 简称 FRP) 及其为原料制成的 FRP 筋的加工工艺、力学特性和结构性能进行了研究, 并将 FRP 筋作为钢筋的新型代用材料在工程实践中加以应用, 并取得了一定的成果. 为了解决我国土木水利工程中钢筋混凝土结构的耐久性问题, 本文也对 FRP 筋进行了一定的试验研究工作.

1 FRP 筋的制作

笔者参考文献^[2~4], 经多次试验与调整, 以玻璃纤维为原料, 在专门的长线台座上采用挤拉工艺制作了试验所用的光面 FRP 筋. 同时, 为了提高 FRP 筋与周围介质之间的粘结强度, 还采用将一束连续纤维缠绕在其周围的方法制作了螺纹 FRP 筋. 这两种 FRP 筋的直径均为 9.5 mm.

2 FRP 筋的部分性能测试

2.1 FRP 筋的拉伸应力 ~ 应变曲线 ($\sigma \sim \varepsilon$ 曲线)

作为钢筋的新型替代材料, FRP 筋受拉时的 $\sigma \sim \varepsilon$ 曲线对反映其物理力学性能是十分重要的.

拉伸试验参照普通钢筋拉伸试验的方法在万能试验机上进行. 试件长度约 400 mm, FRP 筋两端通过特殊处理固定在试验机上, 在试件标距中部贴有应变片 (量测标距为 100 mm), 用以量测 FRP 筋在拉伸过程中的应变情况. 通过上述方法, 得出了 FRP 筋的 $\sigma \sim \varepsilon$ 曲线 (图 1). 试验中发现, 与普通钢筋相比, FRP 筋被拉破坏时, 各股纤维相互分离, 不再能整体工作, 承载力迅速降低, 但未出现“颈缩”现象.

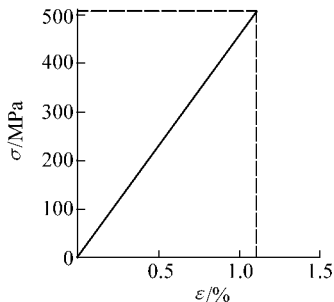


图 1 FRP 筋的应力 ~ 应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curve for FRP reinforced bar

从测得的 FRP 筋的 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线可以看出,FRP 筋从开始加载直至被拉断而破坏的整个试验过程中,基本上一直保持线弹性状态,没有明显的屈服点,也几乎没有塑性变形.根据试验结果,可得试验中所用光面 FRP 筋及螺纹 FRP 筋的弹性模量为 $E_s = 41 \text{ GPa}$,极限强度为 $f_u = 504.2 \text{ MPa}$,极限拉应变 $\epsilon_u = 0.012$.

2.2 FRP 筋的粘结强度试验

2.2.1 试件制备

FRP 筋与混凝土、水泥浆及环氧树脂之间的粘结强度试验目前尚没有规范和规程可循,所以本次试验暂参照《混凝土结构试验方法标准》(GB50152—92)中测定钢筋与混凝土粘结强度的试验方法,进行了未配置箍筋的混凝土立方体试件(图 2)中心拔出试验.

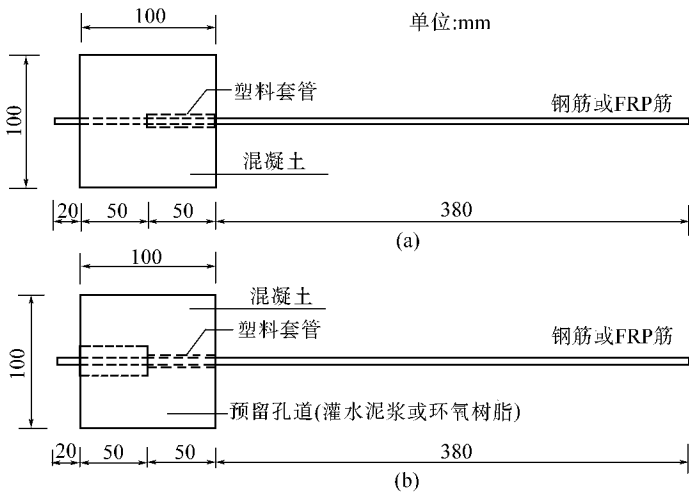


图 2 拔出试验简图

Fig.2 Pullout test

本次试验试件总数为 36 个,试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$.试验所用锚筋有 FRP 筋和钢筋两种,其中光面 FRP 筋和螺纹 FRP 筋的直径均为 9.5 mm ,光面钢筋和螺纹钢筋的直径均为 10 mm .FRP 筋和钢筋的力学性能见表 1.

试验进行了以下两个方面的工作:

a. 测定并讨论 FRP 筋及钢筋在周围分别为混凝土、水泥浆和环氧树脂等不同介质条件时的粘结强度.

当周围介质为混凝土时,拔出试验采用如图 2(a)所示的试件进行立方体中心拔出试验,而当周围介质为水泥浆或环氧树脂时,则采用如图 2(b)所示的试件(在浇筑试件过程中,先在锚固区域预留孔道,待孔道成型后再用水泥浆或环氧树脂进行二次浇灌)进行立方体中心拔出试验.

b. 研究 FRP 筋和钢筋与相同的周围介质之间的粘结强度的异同.

2.2.2 试验过程

混凝土立方体试件中心拔出试验在万能试验机上进行.试验时,在试件加载端设置一穿心球铰,以防止因受力锚筋和拉拔荷载不在同一直线上而导致试件发生撕裂破坏.具体试验装置如图 3 所示.试验均在试件龄期 28 d 时进行.按《混凝土结构试验方法标准》规定的标准加载速度均匀加载,加载直至锚筋与周围介质的粘结发生破坏.试验过程中主要量测了试件所受拉拔荷载 P

表 1 锚筋的力学性能

Table 1 Mechanical properties of FRP and steel

锚筋类型	直径 /mm	弹性模量 E_s /GPa	屈服强度 f_s /MPa	极限强度 f_u /MPa
光面 FRP 筋	9.5	41		504.2
螺纹 FRP 筋	9.5	41		504.2
光面钢筋	10.0	189	234.4	286.6
螺纹钢筋	10.0	350	428.0	550.3

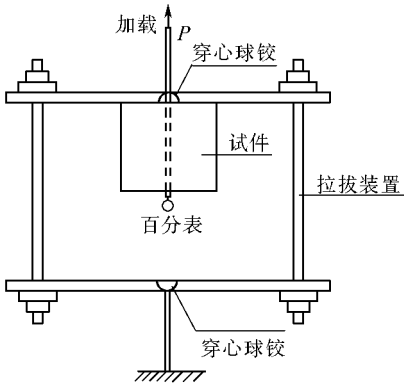


图 3 拉拔试验装置

Fig.3 Pullout test setup

及对应的锚筋自由端滑移 S 。其中拉拔荷载 P 通过万能试验机刻度盘读出,锚筋自由端的滑移 S 则由设置在试件锚筋自由端的百分表测得。

3 主要试验结果及分析

3.1 拉拔试件的荷载~滑移曲线($P \sim S$ 曲线)

图 4 为经回归分析得出的各拉拔试件的 $P \sim S$ 曲线。图 4 中 ①为螺纹钢筋与混凝土之间的 $P \sim S$ 曲线;②为光圆钢筋与混凝土之间的 $P \sim S$ 曲线;③为螺纹 FRP 筋与混凝土之间的 $P \sim S$ 曲线;④为螺纹 FRP 筋与水泥浆之间的 $P \sim S$ 曲线;⑤为螺纹 FRP 筋与环氧树脂之间的 $P \sim S$ 曲线;⑥为光圆 FRP 筋与环氧树脂之间的 $P \sim S$ 曲线;

根据图 4 所示的 $P \sim S$ 曲线,可将 FRP 筋立方体中心拔出试件的受力过程分为以下几个阶段:

a. 微滑移阶段
加载初期,拉拔荷载不超过破坏荷载 P_u 的 15% 时,加载端滑移很小,自由端未发生滑移。在这一阶段,粘结滑移缓慢向锚筋自由端传递,但尚未达到自由端端部。此时锚筋与周围介质之间的胶结力是组成其粘结力的最主要的成分。

b. 滑移阶段
在拉拔荷载继续增加直至破坏荷载 P_u 的 30% 左右的过程中,锚筋自由端开始发生滑移,滑移量增长逐渐加快。 $P \sim S$ 曲线开始呈非线性变化。此时锚筋与周围介质之间的摩擦力是与其周围介质之间的粘结力的主要成分。光面 FRP 筋表面非常光滑,与周围介质之间的摩擦力极小,因而粘结力也就极小。而螺纹 FRP 筋,在与周围介质之间的粘结力中起主要作用的还有锚筋的肋与周围介质的机械咬合力。

c. 劈裂阶段或拔出阶段
对周围介质为混凝土或水泥浆的拉拔试件,当拉拔荷载继续增加至接近破坏荷载 P_u 时,在锚筋加载端沿混凝土最薄弱处首先出现纵向劈裂裂缝,劈裂裂缝沿加载端逐渐向内延伸,当裂缝发展延伸至锚筋自由端时,试件破坏。在此过程中,锚筋与周围介质之间滑移的增长进一步加快, $P \sim S$ 曲线发生了明显的转折。试件破坏后,混凝土试件一般崩裂为两块,破坏呈脆性特征。此时的荷载即为拉拔试验的破坏荷载。周围介质为环氧树脂的拉拔试件,一般不会发生纵向劈裂破坏。直径为 9.5 mm 的光面 FRP 筋环氧树脂拉拔试件,破坏时锚筋直接从环氧树脂介质中拔出,而直径为 9.5 mm 的螺纹 FRP 筋环氧树脂拉拔试件,破坏时首先是缠绕在光面 FRP 筋外表面上的肋与光面 FRP 筋分离,成为“光面 FRP 筋”,然后“光面 FRP 筋”再从环氧树脂中拔出。如果能够调整生产工艺,提高肋与光面 FRP 筋的粘结性能,将能进一步提高螺纹 FRP 筋与周围介质的粘结力。

d. 下降段
拉伸荷载达到峰值后,荷载开始迅速下降,滑移迅速发展,直至锚筋从周围介质中拔出。

从图 4 的 $P \sim S$ 曲线可以看出,各曲线形状大致相同,只是螺纹 FRP 筋、光面 FRP 筋与环氧树脂之间的 $P \sim S$ 曲线,开始段滑移增长较快,随后逐渐减慢;而其它试件的 $P \sim S$ 曲线,开始段滑移增长较慢,随后逐渐变快。

3.2 FRP 筋的粘结锚固性能

3.2.1 FRP 筋的粘结强度

由立方体试件中心拔出试验得出 36 个试件破坏荷载的平均值,见表 2。

参照钢筋与混凝土之间粘结强度的计算方法,根据试件锚筋的直径、埋入长度及试件的破坏荷载,可由下式求得锚筋与周围

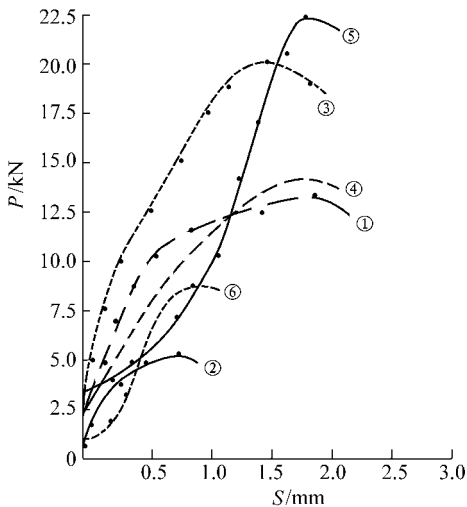


图 4 锚筋与周围介质之间的 $P \sim S$ 曲线
Fig.4 $P \sim S$ curve for pullout specimens

表 2 拉拔试件粘结破坏荷载平均值
Table 2 Mean failure loads from pullout tests kN

介质材料	锚筋类型			
	φ9.5 FRP 筋	φ9.5 FRP 筋	φ10FRP 筋	φ10FRP 筋
混凝土	19.2	1.4	11.8	5.0
水泥浆	12.7	1.1		
环氧树脂	22.5	8.2		

介质之间的粘结强度.

$$\tau_m = P_u/(\pi dl_a)$$

(1)

式中 : τ_m ——锚筋与周围介质之间的平均粘结强度 ; P_u ——拉拔试件粘结破坏时的破坏荷载 ; d ——锚筋直径 ; l_a ——锚筋埋入长度.

式(1)中锚筋直径 d 及埋入长度 l_a 均为已知,破坏荷载 P_u 也在试验中测得(表 2),故由式(1)即可计算出锚筋与周围环境介质之间的粘结强度计算结果见表 3.

从表 3 可以看出 :(a) 光面 FRP 筋和螺纹 FRP 筋与环氧树脂之间的粘结强度都要高于各自与混凝土之间的粘结强度,而光面

FRP 筋则尤为明显 ;(b)光面 FRP 筋与混凝土、水泥浆及环氧树脂之间的粘结强度,都远小于螺纹 FRP 筋与混凝土、水泥浆及环氧树脂之间的粘结强度 ;(c)光面 FRP 筋与混凝土之间的粘结强度极低,不到光面钢筋与混凝土之间粘结强度的 1/3 ;(d)螺纹 FRP 筋与混凝土之间粘结强度则明显高于螺纹钢筋与混凝土之间的粘结强度,约为其 1.63 倍.

上述情况,是由于 FRP 筋与环氧树脂之间有着良好的化学胶结力所致.光面 FRP 筋在生产过程中通过光滑的合金拔丝模拉拔成型,其表面未经处理,十分光滑,与周围介质之间的摩擦力和机械咬合力都极低,而螺纹 FRP 筋则由于在其表面缠绕了一束螺旋连续纤维,提高了与周围介质之间的摩擦力和机械咬合力.

3.2.2 FRP 筋的锚固长度

由式(1)可得

$$l_a = P_u/(\tau_m \pi d)$$

(2)

将 FRP 筋的极限拉伸荷载 $f_{fu}A_f$ 和钢筋的屈服荷载 f_yA_s 代替上式中的 P_u ,即可得所需锚筋锚固长度,即

FRP 筋

$$l_{af} = f_{fu}A_f/(\tau_{fm} \pi d_f)$$

(3)

钢筋

$$l_{as} = f_yA_s/(\tau_{sm} \pi d_s)$$

(4)

试验用螺纹 FRP 筋,直径为 $d_f=9.5\text{ mm}$,由表 1 和表 3 查得其极限强度 $f_{fu}=504.2\text{ MPa}$,与混凝土之间的粘结强度 $\tau_{fm}=12.23\text{ MPa}$,代入(4)式可得直径 $l_{af}=98\text{ mm}$;试验用 II 级钢筋,直径 $d_s=10\text{ mm}$,由表 1 和表 3 查得其屈服强度 $f_y=428\text{ MPa}$,与混凝土之间的粘结强度 $\tau_{sm}=7.51\text{ MPa}$,代入(4)式可得直径 $l_{as}=142\text{ mm}$. 经比较可知

$$l_{af} = 0.69l_{as}$$

即试验用螺纹 FRP 筋与混凝土之间的粘结锚固长度约为试验用 II 级钢筋与混凝土之间粘结锚固长度的 70%.

4 结 语

a. 通过对 FRP 筋的力学性能试验,得出了其 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线.从曲线可以看出,FRP 筋从开始加载直到破坏均保持线弹性状态,没有明显的屈服点,也没有塑性变形.

b. 通过 FRP 筋立方体试件中心拔出试验,得到了 FRP 筋试件的 $P \sim S$ 曲线.通过对各试件受力过程的分析可以看出,FRP 筋立方体试件中心拔出试验的受力过程与普通钢筋中心拔出试验的受力过程相似,也分为微滑移段、滑移段、劈裂段和下降段四个阶段.

c. 光面 FRP 筋与周围介质之间的粘结强度极低,不适用于普通混凝土结构.

d. 螺纹 FRP 筋与周围介质之间的粘结强度高于普通螺纹钢筋与周围介质之间的粘结强度.特别是螺纹 FRP 筋与水泥浆之间的粘结强度高于螺纹钢筋与水泥浆之间的粘结强度,为螺纹 FRP 筋在后张法有粘结预应力混凝土结构中的应用提供了良好的基础.

- e. 螺纹 FRP 筋与环氧树脂之间的粘结强度很高,为研制 FRP 筋新型的锚、夹具提供了参考依据.
- f. 螺纹 FRP 筋与混凝土之间的粘结锚固长度约为普通螺纹钢与混凝土之间粘结锚固长度的 70%.但随着试件尺寸和混凝土强度等级的变化,该结论也可能有所变化.

参考文献：

[1] Chaallal O,Benmokrane B.Pullout and bond of glass-fibre rods embedded in concrete and cement grout[J]. Materials and structures, 1993,26 :167 ~ 175.

[2] Brown V L,Bartholomew C L.FRP reinforcing bars in reinforced concrete members[J]. ACI Materials Journal, 1993,90(1) 34 ~ 39.

[3] Benmokrane B, Tighiouart B, Chaallal O. Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete [J]. ACI Materials Journal, 1996,93(3) 246 ~ 253.

[4] Malvar L J. Tensile and bond properties of GFRP reinforcing bars[J]. ACI Materials Journal, 1995,92(3) 276 ~ 285.

Pullout and Bond Properties of FRP Reinforcing Bars

MAO Wei-bing¹, ZHANG Ding-guo²

(1. Jiangsu Institute of Urban & Rural Planning and Designing, Nanjing 210024, China ;
2. College of Civil Engineering, Hohai Univ. ,Nanjing 210098, China)

Abstract In this paper, the bond characteristics of FRP reinforcing bars in different environmental media are studied. The media consist of concrete, cement grout and epoxy. The pullout and bond properties are found out through thirty-six pullout tests. The results of the study show that glass-fiber rod bond strength in different media is similar to that of steel bars in corresponding media, and that the bond strength of helical FRP reinforcing bars is higher than that of plain FRP reinforcing bars.

Key words Glass-fiber-reinforced-plastics (GFRP) ; substitution of steel ; bond characteristics ; anchorage