

文章编号: 1000-5013(2011)02-0198-05

CFRP 筋预应力锚具受力性能试验

叶勇, 郭子雄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 设计一套圆弧槽夹板式锚具,通过拉拔试验研究锚具的夹持性能,并研究包括施加于夹板紧固件螺栓上的总扭矩值和扭矩沿夹具纵向分布等主要参数对锚具性能的影响. 结果表明,总扭矩值和扭矩分布均对锚具的性能有明显影响. 当施加在夹板紧固件螺栓的总扭矩值小于 200 N·m,试件最终将发生滑移破坏;当总扭矩值超过 200 N·m,试件最终发生碳纤维增强复合材料(CFRP)筋断裂破坏,且极限荷载随总扭矩值的增加而降低. 扭矩沿加载端向自由端递增分布,将使锚具获得更好的性能.

**关键词:** 碳纤维增强复合材料; 预应力; 锚具; 机械夹持; 拉拔试验

**中图分类号:** TU 378.8                      **文献标志码:** A

纤维增强复合材料(FRP)具有强度高、重量轻、耐腐蚀和抗疲劳性能好等优点<sup>[1]</sup>,可靠的锚固措施是保证 FRP 材料能充分发挥高强性能的前提. 目前,FRP 筋锚具依其锚固受力原理,可分为机械夹持型和化学粘结型两大类<sup>[2]</sup>. CFRP 筋是一种典型的各向异性材料,其横向抗压强度和抗剪强度低,且不具备弯折能力,其预应力锚具将不同于传统的钢筋预应力锚具方式<sup>[3-5]</sup>. Nanni 等<sup>[6]</sup>研究表明,配置预应力 CFRP 筋的结构,其最终承载能力将更多地取决于锚具系统的锚固性能而不是预应力筋本身的强度. 同时,文献[6]提出一种能够充分发挥 CFRP 筋高强抗拉性能的预应力锚具. 本文设计了一套弧线槽口机械夹持式 CFRP 筋预应力锚具,通过改变夹板对 CFRP 筋的横向压力大小和分布,以检验适用于预应力 CFRP 筋的锚固性能及施工工艺特点.

1 试验设计

1.1 锚具特征

设计的 CFRP 筋预应力锚具的具体构造和几何尺寸,如图 1 所示. 每套 CFRP 筋预应力锚具由 2 块钢制夹板和 6 个高强螺栓型紧固件组成,夹板材料采用 45 号钢.

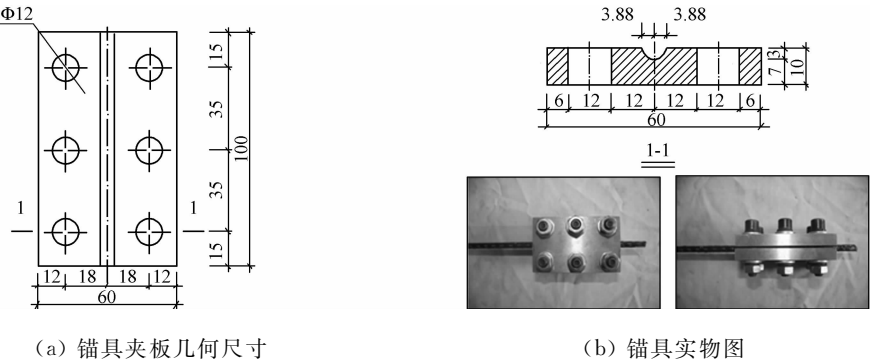


图 1 锚具构造图(单位:mm)

Fig. 1 Details of the prestressed anchor(unit:mm)

在每块夹板表面中央沿着长度方向开一圆弧形槽口,CFRP 筋置于两块夹板的槽口之中,夹板通过 6 个螺栓型紧固件夹紧,并对筋材施加横向压力. 为了增加夹板与 CFRP 筋的界面摩擦力和机械咬合力,在夹板槽口表面刻痕并作热处理.

1.2 试验装置

试验采用 FRP 筋专用拉拔加载装置,如图 2 所示. 试验中,通过压力传感器控制加载,用百分表测量 CFRP 筋与锚具的相对滑移. 在 CFRP 筋表面粘贴电阻应变片,绘制筋材的应力-应变关系曲线.

加载过程中,荷载、CFRP 筋与锚具的相对滑移,以及 CFRP 筋的应变均由 DH3816 型静态应变测试系统连续采集,采集时间间隔为 3 s. 当 CFRP 筋与锚具的相对滑移量超过 0.5 mm 时,认为锚具失效,停止试验.

1.3 试验方案

试验使用的 CFRP 筋均为直径 7 mm 的单螺旋变形筋,抗拉强度为 2.0 GPa,抗拉弹性模量为 150 GPa. 在紧固件螺栓上施加的扭矩与其螺杆产生的拉力之间存在一定比例关系. 为了更直观地控制夹板对 CFRP 筋的横向压力及方便该锚具的实际应用,试验使用扭矩扳手上紧紧固件螺栓,并通过施加不同的扭矩组合来研究该锚具的锚固性能.

已有的研究表明,夹板夹持力沿纵向均匀分布时,CFRP 筋与锚具的粘结应力在锚固区内并非均匀分布;在近加载端存在应力集中,削弱了夹持能力,也容易造成 CFRP 筋在荷载不大时提前断裂.

试验定义靠近加载端的一排紧固件为第 1 排紧固件,往自由端的紧固件分别为第 2 排紧固件和第 3 排紧固件. 在第 1,2,3 排紧固件螺栓上施加的扭矩( $T_i$ )依次增加,以防止近加载端 CFRP 筋的应力集中. 试验参数包括:(1) 施加于紧固件螺栓上的总扭矩值;(2) 施加于紧固件螺栓的扭矩分布. 18 个锚具试件的基本情况,如表 1 所示.

表 1 锚具试件的螺栓扭矩分布  
Tab. 1 Torque distribution of clamping bolts

编号	$T_1$	$T_2$	$T_3$	编号	$T_1$	$T_2$	$T_3$
CA1	0	20	60	CA10	20	60	100
CA2	0	40	60	CA11	20	80	100
CA3	0	40	80	CA12	40	60	80
CA4	0	60	80	CA13	40	60	100
CA5	0	60	100	CA14	40	80	100
CA6	0	80	100	CA15	60	80	100
CA7	20	40	60	CA16	60	100	100
CA8	20	40	80	CA17	80	80	80
CA9	20	60	80	CA18	80	100	120

2 试验结果及分析

2.1 主要试验结果及破坏特征

各试件的试验结果,如表 2 所示. 表 2 中: $\xi$  为试件极限荷载与 CFRP 筋名义极限拉力的比值; $P_1$  为极限荷载. 锚具试件的最终破坏形态主要有 3 种破坏模式,如图 3 所示.

(1) 拔出破坏. 如试件 CA1~CA10 和 CA12,当加载到 CFRP 筋名义极限拉力前,试件开始出现滑移现象;继续加载时,滑移量不断增加,荷载基本保持不变;当滑移量达到 0.5 mm 时,停止加载. 破坏

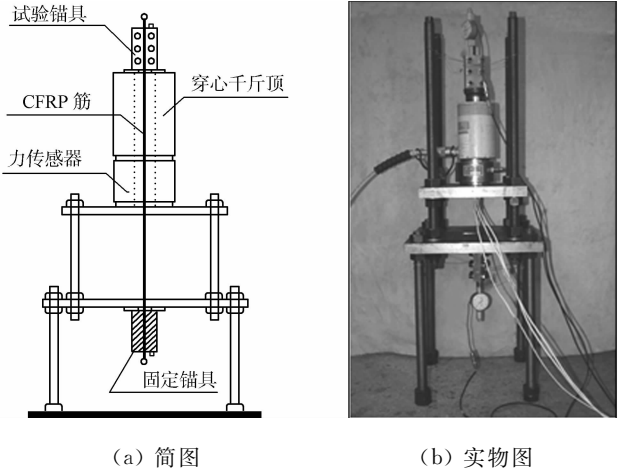
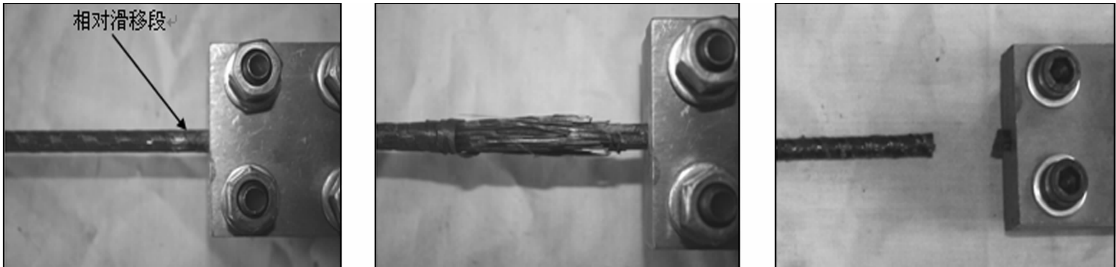


图 2 试验装置图  
Fig. 2 Test set-up

形态如图 3(a)所示.

表 2 锚具试件的主要试验结果  
Tab. 2 Test results of clamping bolts

编号	$P_1/\text{kN}$	$\xi$	破坏特征	编号	$P_1/\text{kN}$	$\xi$	破坏特征
CA1	27	0.35	滑移	CA10	76	0.99	滑移
CA2	29	0.38	滑移	CA11	74	0.96	筋材拉断,并伴有滑移
CA3	41	0.53	滑移	CA12	68	0.88	滑移
CA4	46	0.60	滑移	CA13	80	1.04	筋材拉断,并伴有滑移
CA5	68	0.88	滑移	CA14	70	0.91	筋材拉断
CA6	69	0.90	滑移	CA15	73	0.95	筋材拉断
CA7	40	0.52	滑移	CA16	67	0.87	筋材拉断,并伴有滑移
CA8	55	0.72	滑移	CA17	58	0.76	筋材拉断
CA9	58	0.75	滑移	CA18	55	0.72	筋材拉断



(a) CFRP 筋拔出失效                      (b) CFRP 筋散状式断裂                      (c) CFRP 筋齐口式断裂

图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Ultimate failure modes

(2) 滑移后拉断. 如试件 CA11,CA13 和 CA16,加载到接近 CFRP 筋名义极限拉力时,试件开始出现滑移现象;继续加载时,滑移发展缓慢,筋材陆续发出劈裂响声,最后在靠近锚固端头部筋材被拉断. 破坏形态如图 3(b),(c)所示.

(3) 拉断破坏. 如试件 CA14,CA15,CA17 和 CA18,加载过程中试件未出现明显滑移,接近极限荷载时,筋材陆续发出劈裂响声,最终 CFRP 筋在锚固端被拉断. 破坏形态如图 3(b),(c)所示.

2.2 紧固螺栓扭矩分布对锚具性能的影响

不同于化学粘结型锚具,机械夹持型锚具筋材与夹板之间的粘结作用,由 CFRP 筋与夹板槽内刻痕表面间的机械咬合力和摩擦力两部分组成.

由于 CFRP 筋与夹板开槽表面的摩擦系数为恒定值,当试件发生滑移时,夹板对 CFRP 筋所施加的横向压力相同则产生相同的摩擦力. 因此,紧固件螺栓的不同扭矩分布,即夹板对 CFRP 筋的横向压力分布不同,产生的锚具锚固性能差异主要源自于夹板与 CFRP 筋之间的机械咬合力. 夹板在夹持 CFRP 筋的同时,筋材在压力的作用下产生了一定的横向变形,在筋材与夹板开槽刻痕表面形成机械咬合力,不同的压力分布使得机械咬合力的大小和分布不同.

紧固件螺栓施加相同总扭矩值而扭矩分布不同时,其荷载( $P$ )与滑移( $\Delta$ )的关系,如图 4 所示.

从图 4(a)可以看出,紧固件螺栓的施加总扭矩值为  $120\text{ N}\cdot\text{m}$ ,试件 CA3,CA7 的极限荷载仅相差  $2.5\%$ . 由此可见,当总扭矩值较小时,扭矩的分布对于锚具的锚固性能影响不明显.

从图 4(b)~(d)可以看出,当紧固件螺栓的施加总扭矩值分别为  $140,160,180\text{ N}\cdot\text{m}$  时,试件 CA4 和 CA8,CA5 和 CA9,CA10 和 CA12 的极限荷载分别相差  $19.6\%,17.2\%$  和  $11.8\%$ . 由此可见,当总扭矩值在  $140\sim180\text{ N}\cdot\text{m}$  时,扭矩的分布对锚具的锚固性能影响显著,表现为相同总扭矩值条件下,第 2 排和第 3 排紧固件螺栓的扭矩值相差较大的试件具有较好的锚具性能.

从图 4(e)可以看出,当紧固件螺栓的施加总扭矩值为  $200\text{ N}\cdot\text{m}$  时,试件 CA11,CA13 在滑移后发生 CFRP 筋拉断破坏,两者的极限荷载相差  $8.1\%$ ;试件 CA13 第 1 排紧固件螺栓的扭矩较大,导致了 CFRP 筋在锚固端应力集中明显,削弱了 CFRP 筋的极限拉力.

从图 4(f)可以看出,当紧固件螺栓的施加总扭矩值为  $240\text{ N}\cdot\text{m}$  时,试件 CA15,CA17 均发生 CFRP 筋无滑移断裂破坏,极限荷载相差  $25.9\%$ 。究其原因是,试件 CA17 第 1 排紧固件螺栓的扭矩过大,严重削弱了 CFRP 筋的极限拉力。

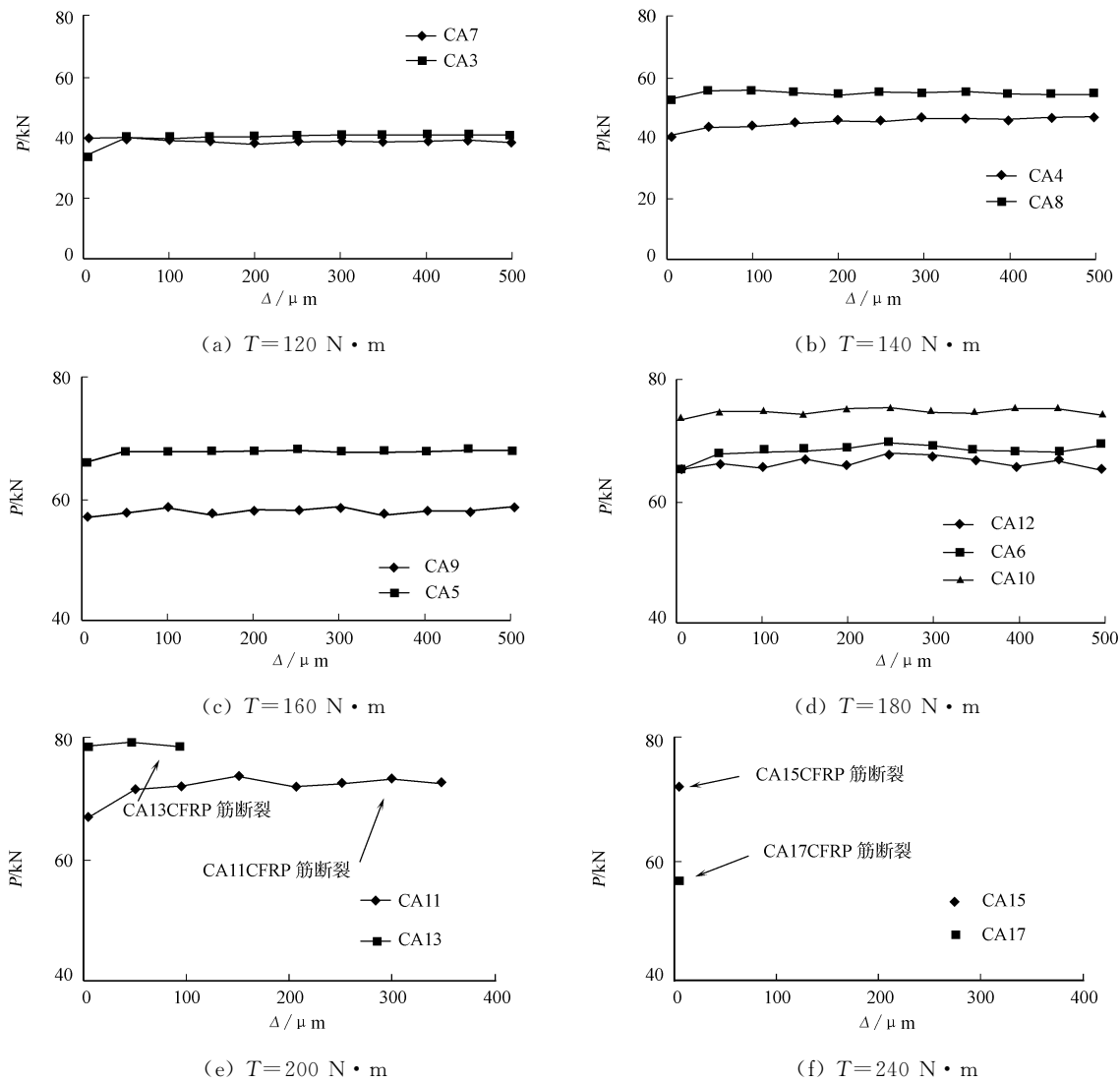


图 4 不同扭矩分布荷载-滑移曲线

Fig. 4 Load-slip curves with different torque distributions

### 2.3 紧固件螺栓总扭矩值对锚具性能的影响

夹板紧固件螺栓不同总扭矩值与试件平均极限荷载的关系,如图 5 所示.结合图 4,5 可以看出,曲线随总扭矩值的增加呈现先上升后下降的趋势.当总扭矩值为  $80\sim 180\text{ N}\cdot\text{m}$  时,试件均发生滑移破坏,极限荷载从  $27\text{ kN}$  逐渐增加到  $71\text{ kN}$ ;当总扭矩值为  $200\sim 260\text{ N}\cdot\text{m}$  时,试件发生所述 3 种破坏模式,极限荷载在总扭矩值为  $200\text{ N}\cdot\text{m}$  时达到最大值  $77\text{ kN}$ ;当总扭矩值为  $300\text{ N}\cdot\text{m}$  时,试件发生 CFRP 筋无滑移断裂破坏,极限荷载  $55\text{ kN}$  仅为 CFRP 筋名义极限拉力  $76.93\text{ kN}$  的  $71.5\%$ ,说明夹板对筋材施加了过大的压力(尤其在靠近加载端),削弱了 CFRP 筋的极限拉力。

试验得到当第 1 排至第 3 排紧固件螺栓扭矩值分别为  $20,80,100\text{ N}\cdot\text{m}$ ,以及  $40,60,100\text{ N}\cdot\text{m}$  时,锚具

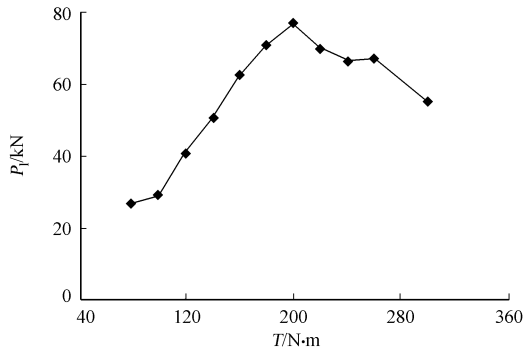


图 5 总扭矩值与极限荷载关系曲线

Fig. 5 Torque-ultimate load curve

系统可以发挥良好的锚固性能;对应的极限荷载分别为 CFRP 筋名义极限拉力的 96.2%和 104.0%,且滑移量较小.

3 结 论

通过对弧线槽口机械夹持式 CFRP 筋预应力锚具的拉拔试验,可以得到以下 4 点结论.

(1) 通过合理控制施加在夹板紧固件螺栓上的扭矩,弧线槽口机械夹持式 CFRP 筋预应力锚具可以获得较好的锚固性能. 与其他类型锚具相比,所设计的锚具加工简易、操作方便、施工周期短,而且在锚固性能方面具有性能稳定、滑移量小的优点.

(2) 施加在夹板紧固件螺栓上的总扭矩值对锚具的性能有明显影响. 当总扭矩值小于  $200\text{ N}\cdot\text{m}$  时,试件发生滑移破坏;随着总扭矩值的增加,试件的极限荷载逐渐增加;当总扭矩值超过  $200\text{ N}\cdot\text{m}$  时,由于锚具挤压对 CFRP 筋的削弱,CFRP 筋的拉断极限荷载随着总扭矩值的增加而降低.

(3) 施加在夹板紧固螺栓上的扭矩分布对锚具的夹持性能有一定程度影响. 第 1 排紧固件螺栓施加扭矩过大将严重削弱 CFRP 筋的极限拉力. 相同总扭矩值条件下,第 2 排和第 3 排紧固件螺栓的扭矩值相差较大,可取得较好的锚固效果.

(4) 该锚具用于锚固 7 mm 直径 CFRP 筋的紧固螺栓最优扭矩分布分别为 40,60,100  $\text{N}\cdot\text{m}$ ,对应的极限荷载为 CFRP 筋名义极限拉力的 104.0%.

参考文献:

[1] 王全凤,杨勇新,岳清瑞. FRP 复合材料及其在土木工程中的应用研究[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2005,26(1):1-6.

[2] 詹界东,杜修力,邓宗才. 预应力 FRP 筋锚具的研究与发展[J]. 工业建筑,2006,36(12):65-68.

[3] 方志,梁栋,蒋田勇. 不同粘结介质中 CFRP 筋锚固性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2006,39(6):47-51.

[4] 涂永明,吕志涛,张继文,等. 四种预应力 FRP 筋材锚固体系的试验研究[J]. 工业建筑,2008,38(10):38-41,111.

[5] 丁汉山,林伟伟,张义贵,等. CFRP 预应力筋夹片式锚具的试验研究[J]. 特种结构,2009,26(2):83-87.

[6] NANNI A,BAKIS C E,DIXON T O. Performance of FRP tendon-anchor systems for prestressed concrete structures[J]. PCI Journal,1996,41(1):34-43.

Experimental Study on a Clamping Anchor System  
for Prestressed CFRP Rods

YE Yong, GUO Zi-xiong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** A new type of clamping anchor with arc groove for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods is proposed. The performance of the prestressed anchor is investigated by pullout tests. The main parameters include the value and distribution of torque applied to the bolt fasteners. It shows that the value and distribution of torque influence greatly on the performance of clamping anchor. When the value of torque is less than  $200\text{ N}\cdot\text{m}$ , the anchor system fails due to slip-page. When the torque is greater than  $200\text{ N}\cdot\text{m}$ , the anchor system fails due to CFRP rod rupture, and the failure load decreased with increasing the value of torque. When the value of torque increases from loading end to free end, the anchor shows better performance. A proper torque distribution for this anchor system is put forward.

**Keywords:** carbon fiber reinforced polymer; prestressing; anchor; mechanica grip; pullout test

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 方德平)