

# CFRP预应力筋夹片式锚具的试验研究

蒋田勇 方志

(湖南大学 湖南长沙 410082)

**摘要:**传统的夹片式锚具应用于CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastics) 预应力筋时必须进行改进,改进后的夹片式锚具由凹齿曲面的夹片、锚杯、塑料薄膜以及薄壁铝套管等组成。在夹片式锚具设计过程中,首先通过锚具的静力分析,推导锚杯的应力公式,然后根据Von Mises 屈服准则确定锚杯的最小厚度,再由锚杯和夹片的几何关系得到夹片的几何尺寸。试验研究表明,当锚杯倾角为 $3^\circ$ 、夹片预紧力为100kN、铝片厚度为1mm、凹齿间距为12.85mm和凹齿深度为0.3mm时,夹片式锚具表现出较好的锚固性能,极限荷载达到了185kN,相应的锚固效率系数为96.4%。锚杯长度、锚杯倾角、夹片预紧力、凹齿间距、深度和宽度以及铝套管的厚度等试验参数,均对夹片式锚具的极限承载力及CFRP筋和夹片之间的滑移量有较大影响。锚杯应力的实测值与理论值吻合良好,验证了锚具应力分析的可靠性。极限荷载的计算式具有较好的适用性。

**关键词:** CFRP 夹片 锚杯 锚具

## 引言

CFRP预应力筋由于强度高、重量轻、免锈蚀和抗疲劳性能好等优点,有望在一些实际工程中取代预应力钢筋<sup>[1]</sup>。CFRP预应力筋是一种横观各向同性材料,其横向强度与纵向强度之比较小,因此用于锚固预应力钢绞线的传统夹片式锚具不再适合锚固CFRP筋,否则将会由于CFRP筋横向强度过低导致过早失效。Nanni等人的研究表明:配置CFRP预应力筋的结构,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<sup>[2]</sup>。

近几年来,日本、加拿大和美国在改进传统的夹片式锚具方面取得了丰富的研究成果,Campbell TL、Shrive NG、Reda MM、Soudki KA和Mayah AA1等从选择耐腐蚀的材料、提高夹片与CFRP筋的摩擦力和减小夹片对CFRP筋的剪切力等方面入手对传统夹片式锚具进行改进<sup>[3-8]</sup>。其中,Sayed-Ahmed EY和Shrive NG提出夹片式锚具的改进措施包括:选用不锈钢作为锚具材料,四片式夹片内表面进行喷砂处理,锚固区内的CFRP筋套上薄壁套管,夹片和锚杯的倾角设置 $0.1^\circ$ 角度差<sup>[3]</sup>。Campbell TL等提出夹片式锚具的改进措施与Sayed-Ahmed EY和Shrive NG等提出的

改进措施大同小异<sup>[6]</sup>。Mahmoud MReda Taha和Nigel G Shrive NG等提出的改进措施主要是选用高强混凝土作为锚具材料,并在高强混凝土锚杯外包裹CFRP布来改善材料的抗裂性能<sup>[8]</sup>。

目前在国内的研究主要集中在CFRP筋粘结式锚具,而在CFRP筋夹片式锚具的研究较少<sup>[9]</sup>。为了加快CFRP筋在我国实际工程中的应用进程,很有必要在国外现有研究成果的基础上,对传统的夹片式锚具进行改进,使之适合锚固CFRP筋。

## 1 试验锚具设计

### 1.1 锚杯尺寸拟定

图1为CFRP筋张拉时夹片式锚具的受力。其中, $\theta_1$ 为锚杯的倾角, $\theta_2$ 为夹片的倾角, $P$ 为CFRP筋的荷载, $F_{TW}$ 为CFRP筋与夹片之间接触面的摩擦力, $F_{WB}$ 为夹片与锚杯之间接触面的摩擦力, $R_{TW}$ 为夹片施加给锚杯的法向压力, $R_{WB}$ 为夹片施加给锚杯的法向压力, $R$ 为锚杯的支撑反力。应用平衡条件得:

$$F_{TW} = P \quad (1)$$

$$F_{TW} = R_{WB} \sin\theta_2 + F_{WB} \cos\theta_2 \quad (2)$$

$$F_{WB} = \mu_{WB} R_{WB} \quad (3)$$

$$R_{WB} = P / (\mu_{WB} \cos\theta_2 + \sin\theta_2) \quad (4)$$

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖二等奖(原载《土木工程学报》2008, No. 2)

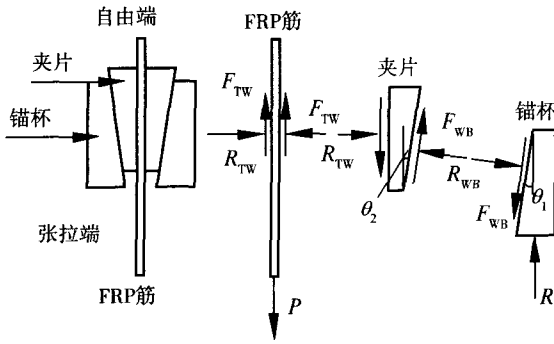


图1 夹片式锚具受力分析

根据文献[7], 可以认为夹片施加给锚杯的径向正应力沿锚杯和夹片之间的接触面线性分布, 即径向正应力在锚杯的张拉端为零, 并向锚杯的自由端逐渐线性递增到最大值。锚杯倾角较小, 可以认为锚杯的壁厚近似相等, 即锚杯为圆柱形。假设锚杯横截面上应力均匀分布, 则可获得夹片施加给锚杯的径向正应力  $\sigma_{WB}(x)$  及剪切应力  $\tau_{WB}(x)$  的表达式:

$$\sigma_{WB}(x) = \frac{2(l_B - x)R_{WB}}{\pi d_{Bt} l_B^2} \quad (0 \leq x \leq l_B) \quad (5)$$

$$\tau_{WB}(x) = \frac{2(l_B - x)\mu_{WB}R_{WB}}{\pi d_{Bt} l_B^2} \quad (0 \leq x \leq l_B) \quad (6)$$

式中: 夹片与锚杯的接触长度近似等于锚杯的长度  $l_B$ ;  $d_{Bt}$  为锚杯自由端的内径。

锚杯和夹片之间的摩擦力, 使锚杯横截面产生轴向正应力  $\sigma'(x)$ 。由平衡方程得:

$$\int_0^x \pi d_{Bt} \tau_{WB}(x) dx = \sigma'(x) \pi d_{Bt} t_{Bt} \quad (7)$$

式中:  $t_{Bt}$  为锚杯自由端顶部的厚度。

将式(6)代入式(7), 整理得:

$$\sigma'(x) = \frac{\mu_{WB}R_{WB}}{\pi d_{Bt} t_{Bt}} \times \frac{2x l_B - x^2}{l_B^2} \quad (8)$$

锚杯和夹片之间的径向压力作用, 使锚杯产生环向正应力  $\sigma''(x)$ , 如图2所示。径向压力在锚杯环向的总合力为  $\sigma_{WB}(x) d_{Bt} dx$ , 由平衡方程得:

$$\sigma''(x) = \frac{\sigma_{WB}(x) d_{Bt}}{2 t_{Bt}} = \frac{R_{WB}}{\pi t_{Bt} l_B} \times \frac{l_B - x}{l_B} \quad (9)$$

锚杯各点单元体上的应力状态为:  $\sigma_1 = \sigma''(x)$ 、 $\sigma_2 = -\sigma_{WB}(x)$ 、 $\sigma_3 = -\sigma'(x)$  (受拉为正, 受压为

负)。根据Von Mises 屈服准则, 可以得到:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_s \quad (10)$$

式中:  $\sigma_s$  为材料的屈服应力。如果已知CFRP 筋的极限荷载以及各接触面之间的摩擦系数, 则根据方程(10)求得锚杯的最小几何尺寸。假设CFRP筋极限荷载  $P$  为192kN,  $\mu_{WB}$  为0.1, 锚杯材料的屈服应力为850MPa, 锚杯长度为90mm, 锚杯倾角为  $2^\circ$ , 则锚杯在  $x=0$  处的最小厚度为9.4mm。

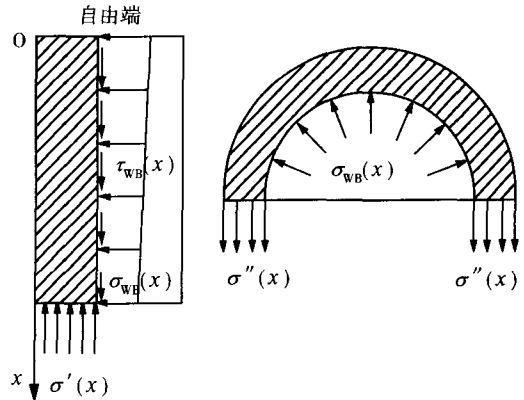


图2 锚杯应力计算模型

### 1.2 夹片尺寸拟定

假设  $d_{Bt}$  为锚杯自由端内直径,  $d_{Bb}$  为锚杯张拉端内直径,  $l_B$  为锚杯的长度, 以及  $\theta_1$  为锚杯的倾斜角度,  $d_{Wt}$  为自由端夹片的直径,  $d_{Wb}$  为张拉端夹片的直径,  $l_W$  为夹片的长度和  $\theta_2$  为夹片的倾斜角度,  $\Delta$  为锚杯自由端在锚具夹片预顶之前的夹片至锚杯之间的距离。图3为确定夹片尺寸的计算图示, 其计算式如式(11)~式(13)。

$$d_{Bt} = d_{Bb} + 2 l_B \tan(\theta_1) \quad (11)$$

$$d_{Wt} = d_{Bt} + 2 \Delta \tan(\theta_2) \quad (12)$$

$$d_{Wb} = d_{Wt} - 2 l_W \tan(\theta_2) \quad (13)$$

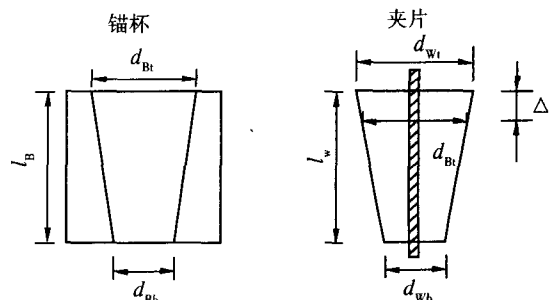


图3 已知锚杯尺寸和  $\Delta$  确定夹片尺寸

## 2 试验内容

锚杯和夹片的材料选用30SiMn2MoVA合金结构钢,经热处理后屈服应力为850MPa。CFRP筋的基本物理力学性能见表1。根据锚固效率系数不低于0.95的要求,则试验锚具系统的实测极限荷载不应低于192kN,这里锚固效率系数为锚具系统的实测极限荷载与CFRP筋的极限荷载的比值<sup>[7]</sup>。文中的极限荷载是指夹片式锚具在张拉试验过程中所观测到的最大荷载值。

表1 CFRP筋的基本物理属性

| 名称     | 表面形式 | 直径<br>(mm) | 抗拉强度<br>(MPa) | 弹性模量<br>(GPa) |
|--------|------|------------|---------------|---------------|
| PC-D10 | 压纹   | 9.8±0.15   | 2550          | 147           |

锚杯的外直径为47mm,锚具自由端的夹片至锚杯之间的距离 $\Delta$ 为20mm,锚杯和夹片倾角角度差为0.1°, $d_{bb}$ 为15.8mm。夹片内表面从自由端向张拉端倾斜0.1°。夹片加载端边缘采用10°倒角。图4为夹片式锚具。

试验参数包括锚杯倾角、预紧力、塑料薄膜、凹齿间距和深度以及铝片厚度等。在试验参数中,锚杯长度包括90mm、60mm以及40mm等三种,锚杯倾角包括2°和3°两种,预紧力包括40kN、50kN、60kN、65kN、80kN和100kN等六种,凹齿间距包括10mm、11.25mm、12mm和12.85mm四种,凹齿深度包括0.3mm和0.5mm两种,铝片厚度包括0.4mm、0.6mm和1.0mm三种等。

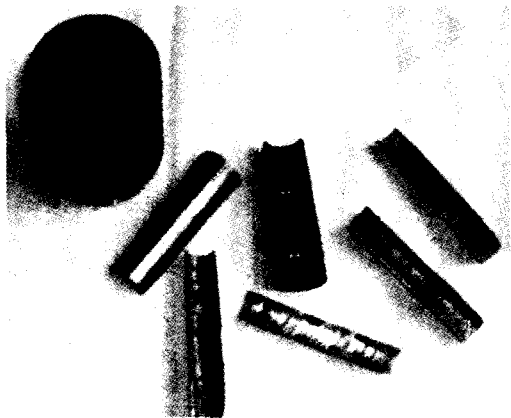


图4 夹片式锚具

夹片式锚具试件见表2。图5为预紧力施加装置。图6为试验张拉装置。张拉时对于锚杯长度为90mm的试件先预张拉荷载至100kN,然后卸载,10min后张拉至破坏;而对于锚杯长度为60mm和40mm的试件直接张拉至破坏。加载速度为100MPa/min<sup>[10]</sup>。

表2 夹片式锚具试件

| 试件<br>编号 | 锚杯长度<br>(mm) | 锚杯倾角<br>(°) | 预紧力<br>(kN) | 凹齿间距<br>(mm) | 凹齿深度<br>(mm) | 铝管厚度<br>(mm) |
|----------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 1        | 90           | 3           | 50          | 11.25        | 0.3          | 0.4          |
| 2        | 90           | 3           | 65          | 11.25        | 0.3          | 0.4          |
| 3        | 90           | 3           | 65          | 11.25        | 0.3          | 0.6          |
| 4        | 90           | 3           | 65          | 11.25        | 0.3          | 0.4          |
| 5        | 90           | 3           | 80          | 11.25        | 0.3          | 0.4          |
| 6        | 90           | 3           | 100         | 11.25        | 0.3          | 0.4          |
| 7        | 90           | 3           | 65          | 12.85        | 0.3          | 0.4          |
| 8        | 90           | 3           | 80          | 12.85        | 0.3          | 0.4          |
| 9        | 90           | 3           | 100         | 12.85        | 0.3          | 0.4          |
| 10       | 90           | 3           | 100         | 12.85        | 0.3          | 0.6          |
| 11       | 90           | 3           | 100         | 12.85        | 0.3          | 1            |
| 12       | 90           | 2           | 65          | 12.85        | 0.3          | 0.4          |
| 13       | 90           | 2           | 80          | 12.85        | 0.3          | 0.4          |
| 14       | 90           | 2           | 100         | 12.85        | 0.3          | 0.4          |
| 15       | 90           | 2           | 100         | 12.85        | 0.3          | 0.6          |
| 16       | 90           | 2           | 100         | 12.85        | 0.3          | 1            |
| 17       | 90           | 2           | 65          | 11.25        | 0.5          | 0.4          |
| 18       | 90           | 2           | 80          | 11.25        | 0.5          | 0.4          |
| 19       | 90           | 2           | 100         | 11.25        | 0.5          | 0.4          |
| 20       | 90           | 2           | 100         | 11.25        | 0.5          | 0.6          |
| 21       | 90           | 2           | 80          | 10           | 0.3          | 0.4          |
| 22       | 90           | 2           | 100         | 10           | 0.3          | 0.4          |
| 23       | 40           | 2           | 40          | 10           | 0.3          | 0.4          |
| 24       | 40           | 2           | 60          | 10           | 0.3          | 0.4          |
| 25       | 40           | 2           | 60          | 10           | 0.3          | 0.6          |
| 26       | 40           | 3           | 40          | 10           | 0.3          | 0.6          |
| 27       | 40           | 3           | 40          | 10           | 0.3          | 0.4          |
| 28       | 40           | 3           | 60          | 10           | 0.3          | 0.6          |
| 29       | 60           | 2           | 40          | 12           | 0.3          | 0.6          |
| 30       | 60           | 2           | 60          | 12           | 0.3          | 0.6          |
| 31       | 60           | 2           | 60          | 12           | 0.3          | 0.4          |
| 32       | 60           | 3           | 40          | 12           | 0.3          | 0.6          |
| 33       | 60           | 3           | 40          | 12           | 0.3          | 0.4          |
| 34       | 60           | 3           | 60          | 12           | 0.3          | 0.6          |

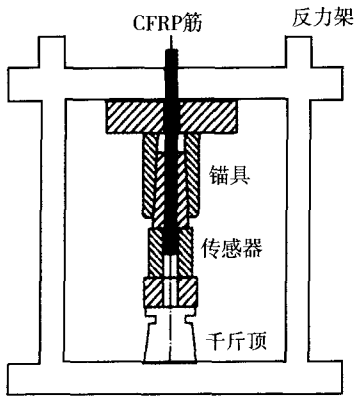


图5 预紧力施加装置

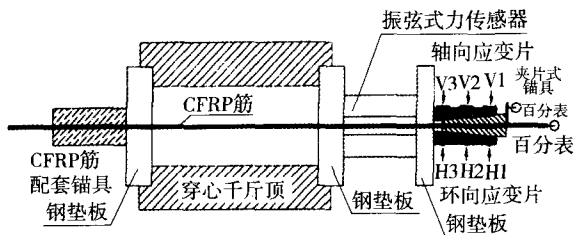


图6 试验张拉装置

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 极限荷载及破坏形式

表3为各试件极限荷载及其对应的破坏形式。从表中可以看出，试件11的极限荷载最大为185kN，相应的锚固效率系数为96.4%，大于95%。试验试件的破坏形式：第一种为滑移破坏；第二种为夹断破坏；第三种为拉断破坏，是最理想的破坏形式，如图7所示。

#### 3.2 塑料薄膜的影响

为了研究塑料薄膜对锚固性能的影响，做了两组对比性试验，一组为试件在锚杯和夹片之间设置塑料薄膜，另一组试件除了没有设置塑料薄膜外，其他条件均相同，如表2的试件2和试件4。结果表明，试件2能够有效地锚固CFRP筋，其极限荷载为156kN，锚固效率为81.4%；而试件4张拉到40.1kN时，CFRP筋就开始发生较大的滑移。卸载后继续加载，此时极限荷载为145kN，表现了相对较好的锚固性能，这主要是预张拉使各接触面接触处于良好的状态。试验表明，塑料薄膜可以大大减小锚杯和夹片之间的摩擦系数，增加夹片的自动跟进性，从而提高锚具的极限承载能力。

#### 3.3 夹片预紧力的影响

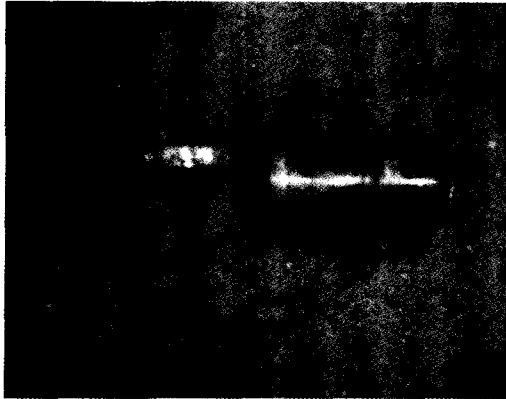
图8为夹片预紧力与极限荷载的关系曲线。从图8可以看出，夹片预紧力越大，极限荷载也越大。这主要是由于增加预紧力，有利于提高接触面之间的径向压应力，达到减小CFRP筋的滑移，提高锚具的极限荷载的效果。

从图8还可以看出，当预紧力较小时，锚具的破坏形式为滑移破坏；当预紧力较大时，锚具的破坏形式为CFRP筋夹断破坏。这是由于当预紧力较小时，锚具各接触面之间接触不够紧凑，不足以锚固CFRP筋，导致发生滑移破坏；当预紧力足够大时，锚具组装件对CFRP筋产生较大的径向压应力，但是铝片厚度不够，导致应力集中，使得CFRP筋在锚固区夹断。

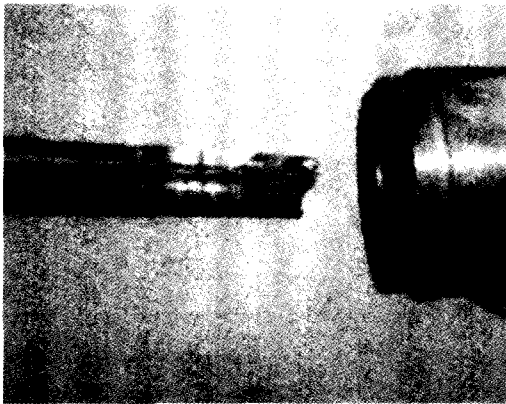
表3 试件的极限荷载及破坏形式

| 试件编号 | 极限荷载(kN) | 效率系数(%) | 破坏形式 |
|------|----------|---------|------|
| 1    | 147      | 76.6    | 2    |
| 2    | 151.5    | 78.9    | 2    |
| 3    | 156      | 81.3    | 2    |
| 4    | 145      | 75.5    | 2    |
| 5    | 160.5    | 83.6    | 2    |
| 6    | 168.7    | 87.9    | 2    |
| 7    | 89.8     | 46.8    | 1    |
| 8    | 92       | 47.9    | 1    |
| 9    | 124      | 64.6    | 2    |
| 10   | 156.3    | 81.4    | 2    |
| 11   | 185      | 96.4    | 3    |
| 12   | 160.4    | 83.5    | 2    |
| 13   | 147      | 76.6    | 2    |
| 14   | 162      | 84.4    | 2    |
| 15   | 130      | 67.7    | 2    |
| 16   | 173.1    | 90.2    | 3    |
| 17   | 127.3    | 66.3    | 2    |
| 18   | 113      | 58.9    | 2    |
| 19   | 119      | 62.0    | 2    |
| 20   | 138      | 71.9    | 2    |
| 21   | 125.9    | 65.6    | 2    |
| 22   | 150      | 78.1    | 2    |
| 23   | 85       | 44.3    | 1    |
| 24   | 123      | 64.1    | 2    |
| 25   | 129      | 67.2    | 2    |
| 26   | 128.6    | 67.0    | 2    |
| 27   | 99.6     | 51.9    | 1    |
| 28   | 142      | 74.0    | 2    |
| 29   | 134.3    | 69.9    | 2    |
| 30   | 145      | 75.5    | 2    |
| 31   | 135.1    | 70.4    | 2    |
| 32   | 140      | 72.9    | 2    |
| 33   | 109.6    | 57.1    | 1    |
| 34   | 176.7    | 92.0    | 3    |

注：破坏形式1为CFRP筋滑移破坏；破坏形式2为CFRP筋夹断破坏；破坏形式3为CFRP筋拉断破坏。



(a) 滑移破坏



(b) 夹断破坏



(c) 拉断破坏

图7 CFRP筋的破坏形式

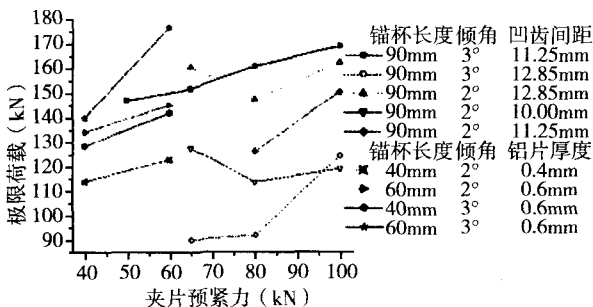


图8 预紧力与极限荷载的关系曲线

### 3.4 锚杯倾角的影响

CFRP筋夹片式锚具使用普通钢绞线夹片式锚具的最佳倾角，易使锚具锚固区产生较大的径向应力，使夹片的端口和预应力筋接触处的位置产生较大的应力集中，因此不适合应用于锚固横向强度较低的复合材料CFRP筋。研究表明，锚杯倾角一般取为 $2^\circ$ 和 $3^\circ$  [3-8]。

图9为锚杯倾角与极限荷载的关系曲线。从图9可以看出，除了锚杯长度为90mm，铝片厚度为0.4mm，预紧力分别为65kN、80kN以及100kN等三组试件以外，锚杯倾角越大，极限荷载越大，这说明了倾角从 $2^\circ$ 增加到 $3^\circ$ 时，有利于提高试件的锚固性能。

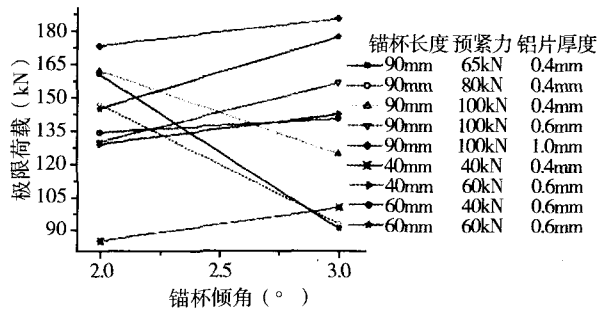


图9 锚杯倾角与极限荷载的关系曲线

### 3.5 锚杯长度的影响

图10为锚杯长度与最大极限荷载或极限荷载的关系曲线，最大极限荷载为具有相同锚杯长度多组试件的极限荷载的最大值。从图10可以看出，锚杯长度越大，对应的最大极限荷载或极限荷载也越大。当锚杯倾角为 $2^\circ$ 时，锚杯长度分别为40mm、60mm以及90mm，最大极限荷载分别为129kN、145kN以及173.1kN；当锚杯倾角为 $3^\circ$ 时，锚杯长度分别为40mm、60mm以及90mm，最大极限荷载分别为142kN、176.7kN以及185kN。

当倾角为 $2^\circ$ ，预紧力为60kN，铝套管厚度分别为0.4mm和0.6mm时，锚杯长度从40mm增加到60mm，极限荷载分别增加了12.1kN和16kN；当倾角为 $3^\circ$ ，预紧力为40kN，铝套管厚度分别为0.4mm和0.6mm时，锚杯长度从40mm增加到60mm，极限荷载分别增加了10kN和11.4kN；

当倾角为 $3^\circ$ ，预紧力为60kN，薄壁铝套管厚度为0.6mm时，锚杯长度从40mm增加到60mm，极限荷载增量为34.7kN。

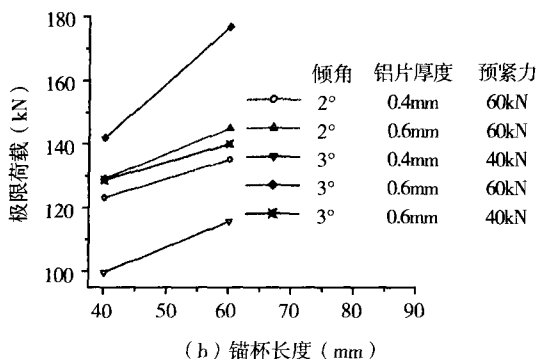
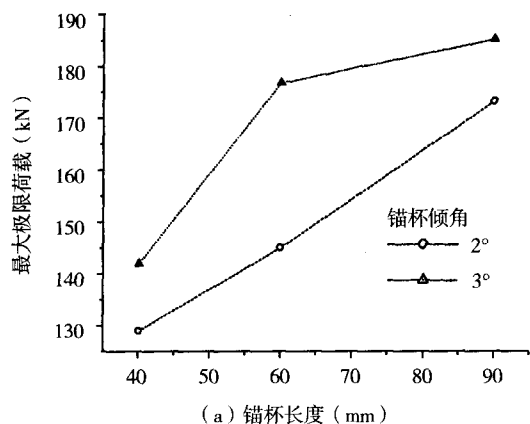


图10 锚杯长度与最大极限荷载或极限荷载的关系曲线

### 3.6 凹齿间距及深度的影响

初步试验研究表明，夹片采用螺纹齿形式，锚具组装件在较小的极限荷载时，就发生滑移破坏，不能有效锚固CFRP筋。而夹片采用凹齿时，能够锚固CFRP筋，且合适的凹齿间距和深度是夹片式锚具是否能够有效锚固CFRP筋的重要因素。试验表明，凹齿深度为0.1mm，预紧力为100kN时，夹片式锚具发生滑移破坏，极限荷载仅为56kN。因此，凹齿深度取为0.3mm和0.5mm。

图11为凹齿深度和间距与极限荷载的关系曲线。结合凹齿深度的初步试验可知，凹齿深度增加，极限荷载增加，当凹齿深度达到0.3mm后，极限荷载反而减小。夹片式锚具的凹齿深度分别为0.1mm、0.3mm和0.5mm时，极限荷载分别为56kN、168.7kN和118.7kN，效率系数分别为34.6%、87.9%和62%。

当凹齿间距很小时，试验表明试件的极限荷载较小，当凹齿间距增加，极限荷载增加，而间距增加到11.25mm后，极限荷载反而减小。对于倾角为 $2^\circ$ ，预紧力为100kN，凹齿间距分别为10mm、11.25mm和12.85mm，极限荷载分别为150kN、138kN和130kN。对于倾角为 $3^\circ$ ，凹齿间距分别为11.25mm和12.85mm，预紧力为100kN，极限荷载分别为168.5kN和156.3kN；预紧力为80kN，极限荷载分别为160.5kN和123.9kN。

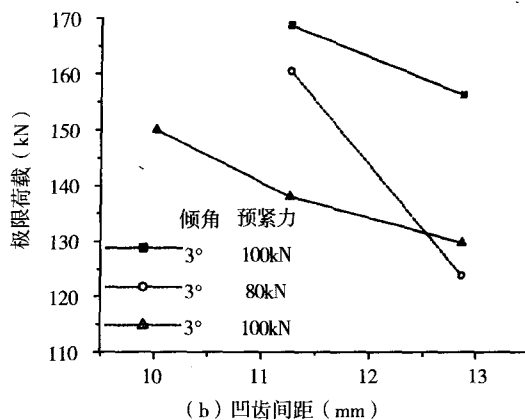
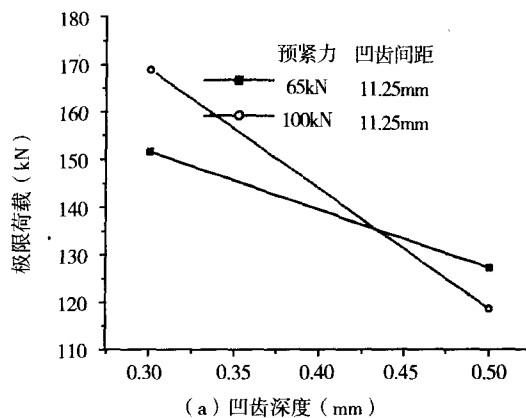


图11 凹齿间距及深度与极限荷载的关系曲线

### 3.7 铝套管厚度的影响

图12为铝套管厚度与极限荷载的关系曲线。从图12可以看出，铝套管厚度越大，极限荷载也越大。对于锚杯长度为90mm，倾角为 $3^\circ$ ，预紧力为65kN，凹齿间距为11.25mm的锚具，当铝套管厚度分别为0.4mm和0.6mm时，极限荷载分别为151.5kN和156.1kN，锚固效率系数分别为78.9%和81.4%；对于锚杯长度为90mm，倾角为 $3^\circ$ ，预紧力为100kN，凹齿间距为12.85mm的锚具，当

铝套管厚度分别为0.6mm和1.0mm时, 极限荷载分别为156.3kN和185kN, 锚固效率系数分别为81.4%和96.4%; 对于锚杯长度为90mm, 倾角为 $2^\circ$ , 预紧力为100kN, 凹齿间距为12.85mm的锚具, 当铝套管厚度为0.4mm和0.6mm时, 极限荷载分别为161.9kN和173.1kN, 锚固效率系数分别为84.3%和90.2%。

当锚杯长度为40mm, 锚杯内壁倾角为 $2^\circ$ , 预紧力为60kN时, 薄壁铝套管厚度分别为0.4mm和0.6mm, 极限荷载分别为123kN和129kN; 当锚杯长度为40mm, 锚杯内壁倾角为 $3^\circ$ , 预紧力为40kN时, 薄壁铝套管厚度分别为0.4mm和0.6mm, 极限荷载分别为99.6kN和128.6kN; 当锚杯长度为60mm, 锚杯内壁倾角为 $2^\circ$ , 预紧力为60kN时, 薄壁铝套管厚度分别为0.4mm和0.6mm, 极限荷载分别为135.1kN和145kN; 当锚杯长度为60mm, 锚杯内壁倾角为 $3^\circ$ , 预紧力为40kN时, 薄壁铝套管厚度分别为0.4mm和0.6mm, 极限荷载分别为109.6kN和140kN。

总之, 铝套管可以避免CFRP筋直接与金属夹片接触, 分散集中应力, 有利于锚固CFRP筋。

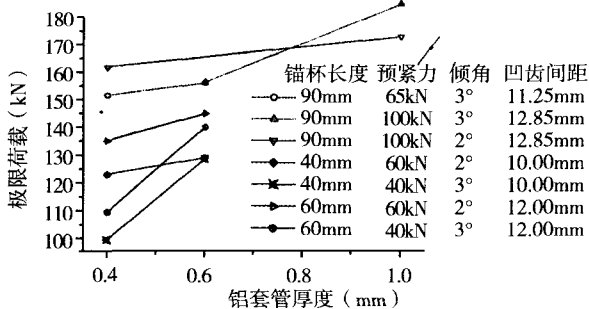


图12 铝套管厚度与极限荷载的关系曲线

### 3.8 荷载滑移曲线

#### 3.8.1 预紧力和试件预张对荷载滑移曲线的影响

图13为夹片预紧力对荷载滑移的影响曲线。从图13中可以看出, 夹片预紧力越大, 则相同荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移越小。这是由于夹片预紧力越大, 夹片与锚杯之间接触更加充分, 且径向压应力越大, 有利于减少CFRP筋和夹片的滑移, 增加锚具的极限荷载。

从图13还可以看出, 锚具组装件的预张拉, 较大程度地减少了张拉过程中CFRP筋和夹片的滑移量。试验表明, 对试件施加预张荷载, 有利于CFRP筋与夹片以及夹片与锚杯之间的充分接触, 减小CFRP筋和夹片的滑移。对于锚杯长度为90mm的试件, 以后讨论的荷载滑移曲线均为锚具预张拉后的荷载滑移曲线。

比较图13(a)和图13(b)可知, CFRP筋的荷载滑移曲线比相应的夹片的荷载滑移曲线陡些, 但是它们的差别很小, 如预紧力为100kN时, 荷载为100kN对应的CFRP筋与夹片的滑移差别最大为0.51mm, 因此可以认为CFRP筋与夹片的滑移是同步的。

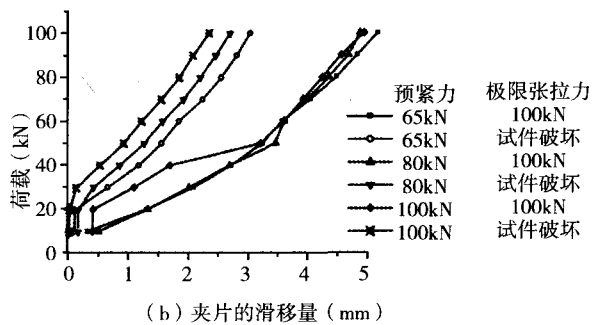
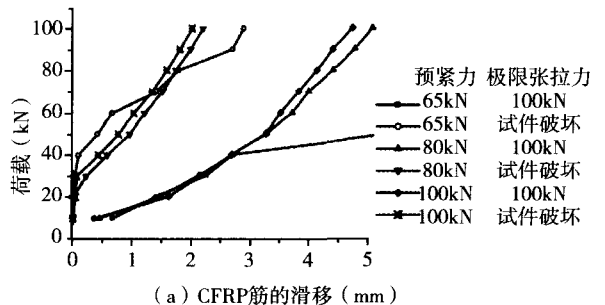


图13 预紧力对荷载滑移曲线的影响

#### 3.8.2 铝管厚度和锚杯倾角对荷载滑移曲线的影响

图14为铝套管厚度和锚杯倾角对荷载滑移曲线的影响。从图14中可以看出, 铝套管的厚度越大, 相同荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移也越大。对于倾角为 $3^\circ$ 的锚具, 当铝套管的厚度为0.4mm、0.6mm和1.0mm时, 100kN荷载对应的CFRP筋的滑移量分别为0.36mm、0.58mm和0.74mm, 夹片的滑移量分别为0.41mm、0.58mm和0.8mm; 对于倾角为 $2^\circ$ 的锚具, 当铝套管的厚度为0.4mm、0.6mm和1.0mm时, 100kN荷载对应

的CFRP筋的滑移量分别为0.81mm、1.2mm和2.45mm，夹片的滑移量分别为1.22mm、1.05mm和2.73mm。试验表明，铝套管的厚度越大，相同荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移量也越大，但极限荷载却得到了很大的提高。因此，铝套管的存在使得CFRP筋在夹片内的受力更为合理，有利于提高锚具的锚固性能。

图14还可以看出，锚杯倾角越大，CFRP筋和夹片的滑移越小。对于铝套管的厚度分别为0.4mm、0.6mm和1.0mm的试件，当锚杯的倾角从 $2^\circ$ 增加到 $3^\circ$ 时，100kN荷载对应的CFRP筋的滑移量分别减小了0.4mm、0.62mm和1.7mm，夹片的滑移量分别减小了0.86mm、0.47mm和1.93mm。锚杯倾角越大，CFRP筋在锚杯的约束越强，CFRP筋的锚固性能越好，CFRP筋和夹片的滑移量越小。

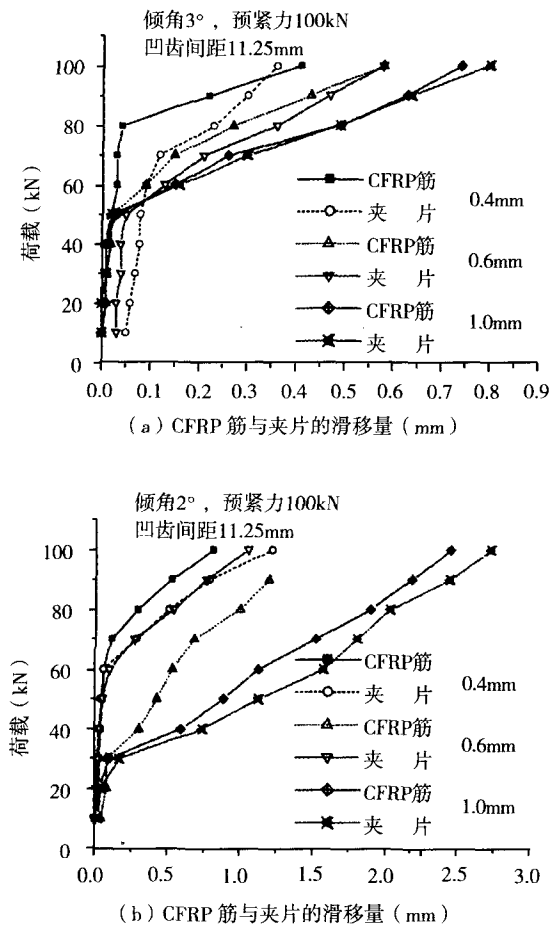


图14 铝套管厚度和锚杯倾角对荷载滑移曲线的影响

### 3.8.3 锚杯长度对荷载滑移曲线的影响

图15为锚杯长度对荷载滑移曲线的影响。锚杯长度越大，相同荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移越小。对于锚杯倾角为 $2^\circ$ ，铝套管厚度为0.4mm，预紧力为60kN的锚具，当锚杯长度从40mm增加到60mm时，70kN荷载对应的CFRP筋的滑移量减小了3.08mm，夹片的滑移量减小了1.91mm。对于锚杯倾角为 $3^\circ$ ，铝套管厚度为0.6mm，预紧力为60kN的锚具，当锚杯长度从40mm增加到60mm时，70kN荷载对应的CFRP筋的滑移量减小了3.91mm，夹片的滑移量减小了1.42mm。试验表明，锚杯长度越大，锚杯对CFRP筋的约束越强，从而CFRP筋和夹片的滑移越小。

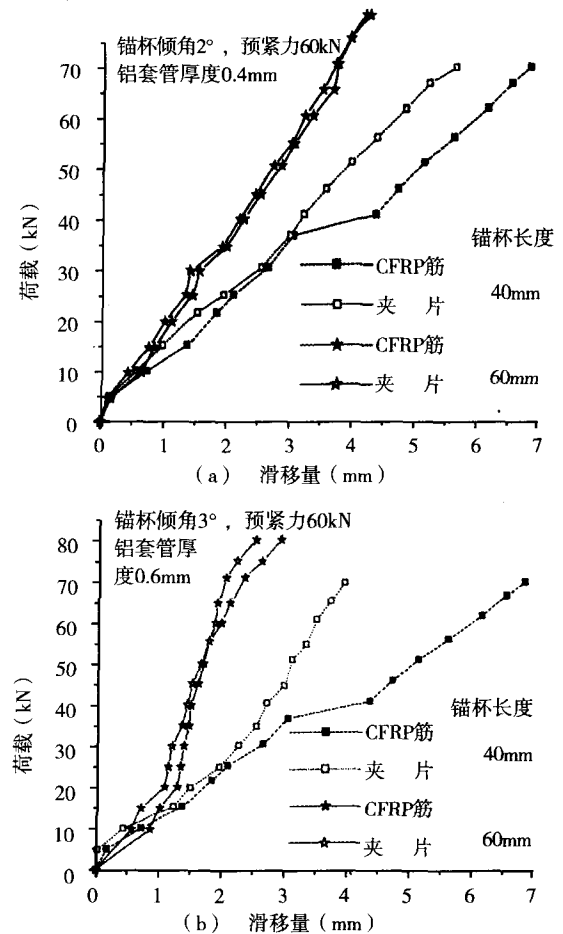


图15 锚杯长度对荷载滑移曲线的影响

### 3.8.4 凹齿间距和深度对荷载滑移曲线的影响

图16为凹齿间距和深度对荷载滑移曲线的影响。从图16可以看出，凹齿间距越大，相同荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移量越大。当凹齿间



距分别为10.00mm、11.25mm和12.85mm时，100kN荷载对应的CFRP筋的滑移量分别为0.2mm、0.4mm和0.81mm，夹片的滑移量分别为0.29mm、0.58mm和1.22mm。

图16还可以看出，凹齿深度越大，CFRP筋和夹片的滑移量越小。当凹齿深度分别为0.3mm和0.5mm时，100kN荷载对应的CFRP筋的滑移量分别为2.03mm和0.4mm，夹片的滑移量分别为2.37mm和0.58mm。

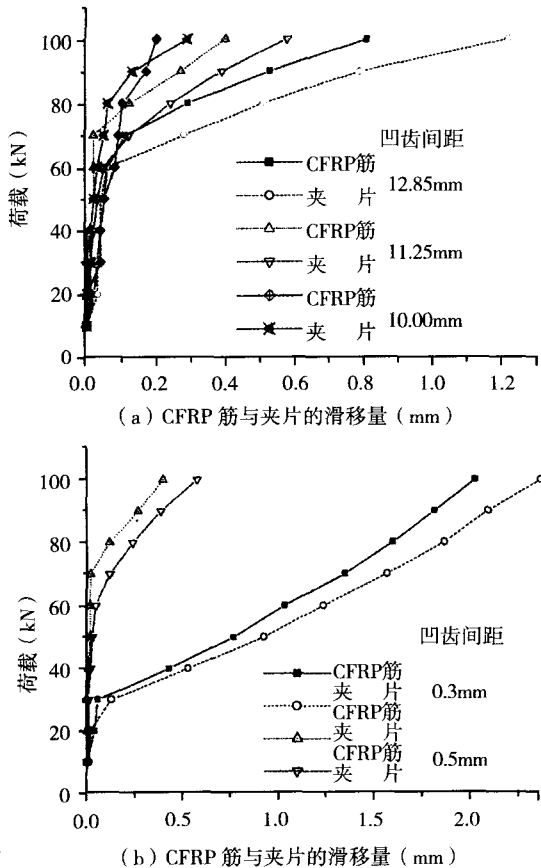


图16 凹齿间距和深度对荷载滑移曲线的影响

### 3.9 锚杯应力分布

图17所示为在各级荷载作用下的锚杯外表面应力分布。锚杯环向应力和轴向应力理论值分别按照式(9)和式(8)计算得到。从图17可以看出，锚杯应力沿筋材纵向分布不均匀；锚杯环向应力在自由端最大；锚杯轴向应力在张拉端最大；锚杯环向应力和轴向应力均随荷载的增加而增加。从图17还可以看出，实测值与理论值均吻合良好，验证了锚杯应力分析的可靠性。

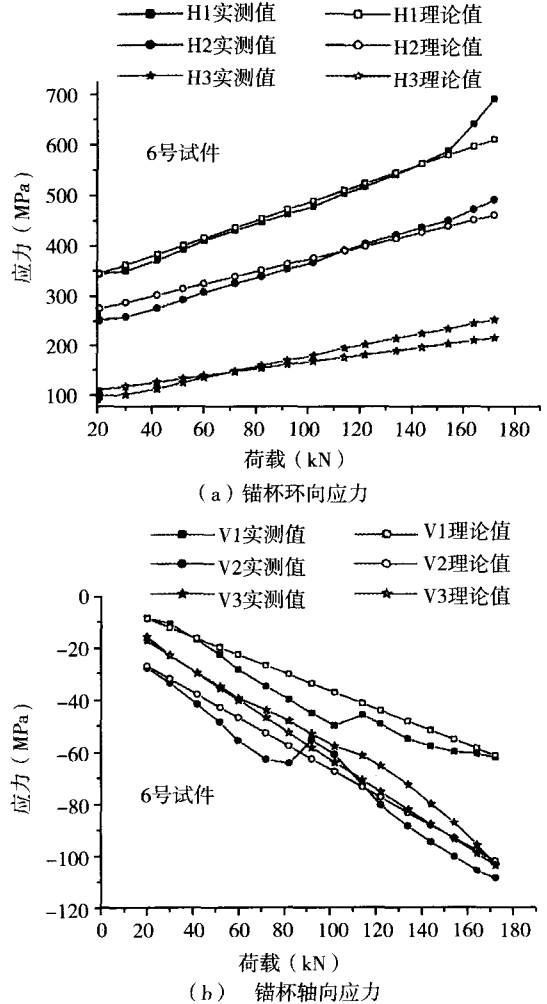


图17 锚杯在各级荷载作用下的应力分布

### 3.10 极限荷载的计算

通过试验数据回归分析，极限荷载的计算式为：

$$F = \xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \xi_6 F_{pm} \quad (14)$$

$$\xi_1 = t^{0.25} \quad \text{且 } 0.4 \leq t \leq 1 \quad (15)$$

$$\xi_2 = -9d^2 + 6d \quad \text{且 } 0.1 \leq d \leq 0.6 \quad (16)$$

$$\xi_3 = -0.008s^2 + 0.18s \quad \text{且 } 10 \leq s \leq 12.85 \quad (17)$$

$$\xi_4 = 0.2 \ln p + 0.078 \quad \text{且 } 40 \leq p \leq 100 \quad (18)$$

$$\xi_5 = 0.1a + 0.7 \quad \text{且 } 2 \leq a \leq 3 \quad (19)$$

$$\xi_6 = 0.002l + 0.82 \quad \text{且 } 40 \leq l \leq 90 \quad (20)$$

式中： $F$ 为夹片式锚具的极限荷载(kN)； $F_{pm}$ 为CFRP筋的极限荷载(kN)； $t$ 为铝套管厚度(mm)； $d$ 为凹齿深度(mm)； $s$ 为凹齿间距(mm)； $p$ 为夹片预紧力(kN)； $a$ 为锚杯倾角(°)； $l$ 为锚杯长度(mm)； $\xi_1$ 为铝套管厚度

修正系数;  $\xi_2$  为凹齿深度修正系数;  $\xi_3$  为凹齿间距修正系数;  $\xi_4$  为夹片预紧力修正系数;  $\xi_5$  为锚杯倾角修正系数;  $\xi_6$  为锚杯长度修正系数。

图18为极限荷载的理论值与实测值比较。从图18可以看出极限荷载的理论值与实测值吻合较好, 验证了极限荷载的计算式具有较好的适用性。

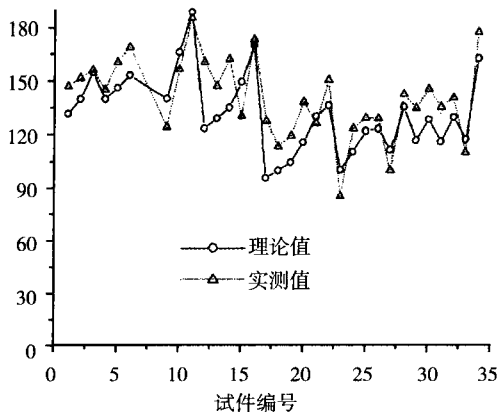


图18 极限荷载理论值与实测值比较

#### 4 结语

(1) 试验表明, 当锚杯倾角为 $3^\circ$ 、夹片预紧力为100kN、铝片厚度为1mm、凹齿间距和深度分别为12.85mm和0.3mm时, 夹片式锚具的实测极限荷载最大为185kN, 锚固效率系数为96.4%。

(2) 塑料薄膜可以减小锚杯和夹片之间的摩擦系数, 增加夹片的自动跟进性, 从而减小CFRP筋的滑移, 提高锚具的极限荷载。

(3) 当夹片预紧力小于100kN时, 夹片预紧力越大, 锚具的极限荷载越大。

(4) 凹齿深度越大, 锚具的极限荷载越大, 当凹齿深度达到0.3mm后, 极限荷载反而越小。

(5) 凹齿间距越大, 锚具的极限荷载越大, 当凹齿间距达到11.25mm后, 极限荷载反而减小。

(6) 当铝套管厚度小于1mm时, 铝套管厚度越大, 锚具的极限拉力越大。

(7) CFRP筋与夹片的滑移是同步的。锚杯

倾角、锚杯长度、夹片预紧力、凹齿间距以及凹齿深度等参数越大, 相同荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移量越小; 而铝套管的厚度越大, 相同荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移反而越大。

(8) 锚杯环向应力和轴向应力的实测值与理论值均吻合良好, 验证了锚杯应力分析的可靠性。

(9) 本文提出的极限荷载计算式具有较好的适用性。

#### 参考文献

- [1] Erki M A, Rizkalla S H. Anchors for FRP reinforcement [J]. Concrete International, 1993, 15(6): 54-59
- [2] 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
- [3] Sayed A E Y, Shrive N G. A new steel anchor system for post-tensioning applications using carbon fibre reinforced plastic tendons [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1998, 25:113-127
- [4] Campbell T L, Keatley J P, Barnes K M. Analysis of an anchor for CFRP prestressing tendons [C]. 2nd Structural Specialty Conference, CSCE, 1998, 551-560
- [5] Al-Mayah A, Soudki K, Plumtree A. Experimental and analytical investigation of stainless steel anchor for CFRP prestressing tendons [J]. PCI Journal, 2001, 46(2): 88-100
- [6] Campbell T L, Shrive N G, Soudki K A, et al. Design and evaluation of a wedge-type anchor for FRP tendons [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5): 985-992
- [7] Mahmoud M R T, Shrive N G. New concrete anchors for carbon fiber reinforced polymer post-tensioning tendons part 1: state-of-the-art review/design [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(1): 86-95
- [8] Mahmoud M, Reda T, Nigel G S. New concrete anchors for carbon fiber reinforced polymer post-tensioning tendons-part 2: development/experimental investigation [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(1): 96-104
- [9] 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 (Fang Zhi, Liang Dong, Jiang Tianyong. Experimental investigation on the anchorage performance of CFRP tendon in different bond mediums [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 47-51 (in Chinese))
- [10] JT 329.2-1997. 公路桥梁预应力钢绞线用锚具、连接器试验方法及检验规则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1997 (JT 329.2-1997. Test method and inspect rules of prestressing strand anchorage and coupler for highway bridge [S]. Beijing: China Communications Press (in Chinese))