

## ~扣件達人講座~

## 迴轉角法

文/ 福岡俊道

## 搭配扭矩法提高精密度

迴轉角法可區分為兩法，其一是「塑性領域迴轉角法」，也就是持續緊固到螺紋產生塑性變形為止；另一個是「彈性領域迴轉角法」，也就是在彈性變形的範圍內緊固。前者就如同那些緊固汽車重要零件的小直徑高強度螺栓一樣，基本上是適用於那些一旦緊固完成後就不會再開放的栓合件。另一方面，彈性領域迴轉角法就如同船用柴油裝置上的曲柄插銷螺栓一樣，適用於那些為了檢查而需定期重複緊固與鬆脫的螺栓。螺帽迴轉一圈，螺紋牙就前進一個螺紋間距(thread pitch)，彈性領域迴轉角法的運作原理，就是利用這種關係來緊固。若利用這項優點，將扭矩法與彈性領域迴轉角法搭配使用，比起一般的扭矩法就能更加改善緊固作業的精密度。本文將解說彈性領域迴轉角法的緊固原理，並指出有效的適用範圍以及與扭矩法併用時的操作方針。

## 緊固原理

(圖1)

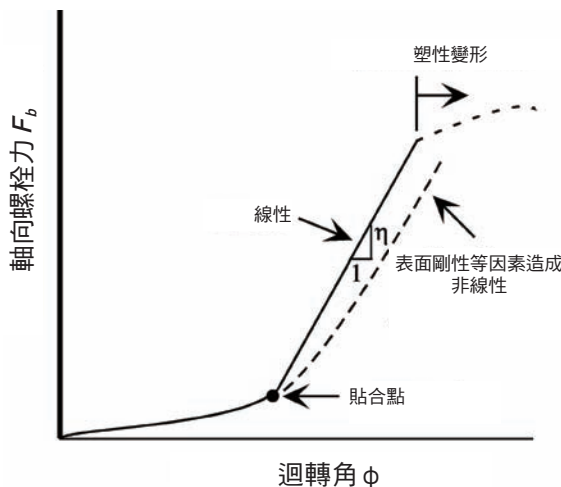


圖1顯示螺絲軸力 $F_b$ 和螺帽迴轉角 $\phi$ 之間的關係。若在螺帽座面接觸到被緊固物體的表面之時開始測量，在螺帽座面的面壓範圍小的條件下，就算迴轉角增加了，軸力也不太會增加，這是因為受到了接觸面表面粗糙度、起伏度、緊固部位的形狀誤差等影響。在這之後，若螺帽座面與被緊固物體的表面密合時，軸力與迴轉角的關係就會趨近於一直線，在這個時間點就會稱為貼合點。至少必須要用「扭矩法」緊固到達到這個狀態為止。從這個時間點開始，才能利用「螺帽迴轉一圈，螺紋就前進一個螺紋間距」這樣的關係。也就是說，彈性領域迴轉角法的緊固順序是由以下兩個步驟構成的。

步驟1：用扭矩法持續緊固道出現貼合點為止，讓某種程度的軸力產生。此時的扭力就稱為貼合扭力(Snug Torque)。

步驟2：藉由控制螺帽的迴轉角，將到達目標軸力之前所剩餘的軸力施加上去。這個步驟就是彈性領域迴轉角法，其緊固原理如下所示：

「迴轉螺帽並緊固住螺栓時，每迴轉一次( $2\pi$ )，就會往軸方向前進一個螺紋間距。此軸向的移動量等於軸向變位量的合計，而軸向變位量就是軸力 $F_b$ 除以螺栓各部位的彈簧常數之後所得的值。」

這裡提到的螺絲各部位的彈簧常數，是指我在惠達雜誌的第一篇投稿文中的圖1所述的5個彈簧常數( $k_{th}$ ,  $k_s$ ,  $k_{cyl}$ ,  $k_{hd}$ ,  $k_f$ )。前述兩者的關係可透過以下公式(其中P代表螺紋間距)表現出來：

$$\phi = \frac{2\pi}{P} F_b \left( \frac{1}{k_{th}} + \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_{cyl}} + \frac{1}{k_{hd}} + \frac{1}{k_f} \right) = \frac{2\pi}{P} \frac{F_b}{k_{total}} \quad (1)$$

公式中的 $k_{total}$ ，是我第一篇投稿文中的公式(4)所示的螺絲整體的剛性。

從公式(1)來看，可得知若螺紋間距和栓合件之剛性數值越小，為獲得同樣的軸力 $F_b$ 所需的迴轉角 $\phi$ 就會越大。迴轉角越大，就越能期待緊固精密度變高，所以彈性領域迴轉角法不適用於握持長度短的栓合件，也就是短螺絲。

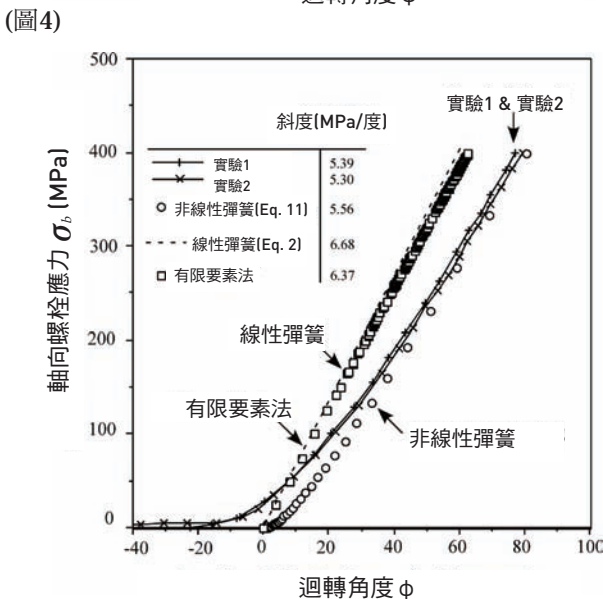
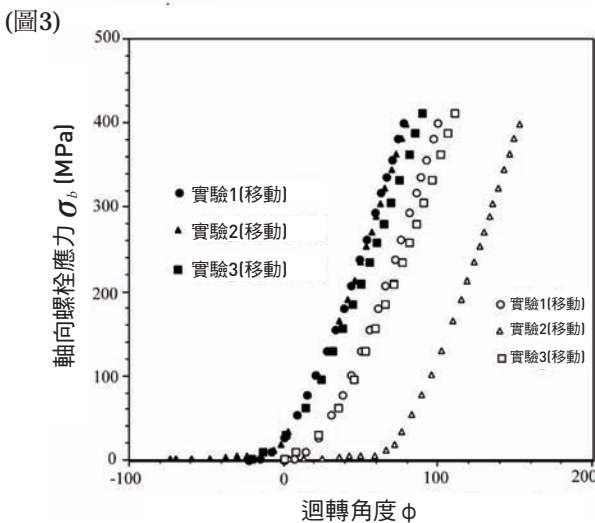
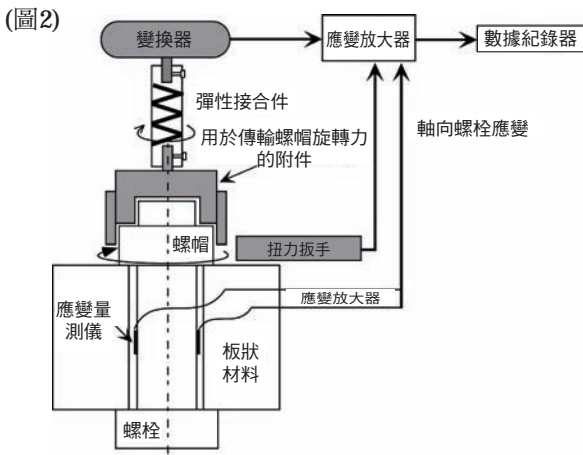
## 考慮到表面粗糙度的迴轉角—軸力關係式

在實際應用的栓合件上，由於受到表面粗糙度的影響，即使螺帽的座面已經密合了，但螺絲軸力和迴轉角之間不會呈現一直線的關係。若要考量到表面粗糙度的影響，就必須要考量「接觸面的剛性」。接觸面剛性指的就是接觸面(因螺絲軸力等等因素而承受表面壓力)上微小突起的部位破裂，使得「剛性因為接觸面周邊變形而降低的現象」。在此略過詳細的說明。若考量到接觸面剛性的影響，公式(1)可改寫如下：

$$\phi = \frac{2\pi}{P} \left( \frac{F_b}{k_{total}} + \zeta_{th} + \zeta_{nu} + \zeta_{hd} + \zeta_f \right) \quad (2)$$

公式中 $\zeta_{th}$ 、 $\zeta_{nu}$ 、 $\zeta_{hd}$ 、 $\zeta_f$ 分別是螺紋表面、螺帽座面、螺絲頭部座面、被緊固物體介面因為接觸面剛性而發生的變形量。接觸面的表面粗糙度小的時候，由於可將前述的那些變形量視為0，所以公式(2)會趨近等同於公式(1)。從這一點來看，運用彈性領域迴轉角法時，栓合件的表面粗糙度小一點才能夠期望較高的緊固精密度。

圖2是為評量彈性領域迴轉角法的緊固過程而製成的實驗裝置。它可同時測量扭力、軸力與螺帽迴轉角。迴轉角的值是在螺帽就位時透過變換器開始量測。圖3是測量結果的其中一例。縱軸是螺絲軸應力 $\sigma_b$ ，橫軸是螺帽迴轉角 $\phi$ 。若是將開始測量迴轉角的時間點移動，那麼三次的實驗結果就會一致。此結果支持前述貼合扭力的重要性。圖4是利用圖3的實驗結果與公式(1)和(2)所得出的計算結果，同時也比較了有限要素解析所導出的結果。由於實驗對象的栓合件表面粗糙度大，所以公式(2)的結果會最趨於一致；若表面粗糙度變小，即使是採用公式(1)來計算在實用層面上不會有問題。



## 適用範圍與緊固方針

### < 適用範圍 >

(1) 目標軸應力  $\sigma_b$  大的栓合件：若軸應力變小，表面粗糙度對於迴轉角—軸力關係式的影響就會變大。此外，由於很難設定適切的貼合扭力的值，緊固精密度會下降。以目標軸應力  $\sigma_b$  來說，舉例來說最好是要在300MPa以上。

(2) 握持長度長的栓合件：由於獲取目標軸力  $\sigma_b$  所需的迴轉角  $f$  變大，所以可以期望緊固緊密度變高。

(3) 使用細螺紋的栓合件：獲取同樣軸力  $\sigma_b$  所需的迴轉角  $f$  會和螺紋間距  $P$  成反比。由於細螺紋的迴轉角  $f$  會比粗螺紋大，所以可以期望緊固緊密度變高。

(4) 表面粗糙度小的栓合件：由於表面粗糙度對於迴轉角—軸力關係式的影響相對較小，所以期望緊固緊密度變高。

(5) 栓合件採用低剛性的材料：栓合件材料的壓縮彈性率若低，所需的迴轉角  $f$  就會變大。基於和第(2)、(3)點相同的原因，可期望緊固緊密度變高。

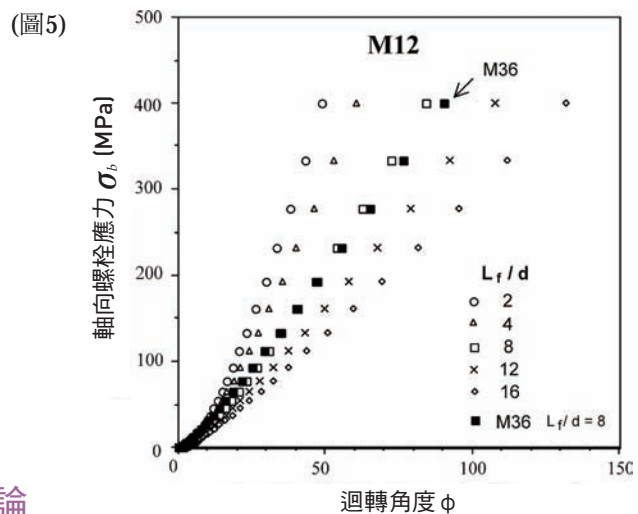
有關上述的第(2)點，握持長度若變小，表面粗糙度和栓合件的形狀誤差等等的影響會使軸力發生變異，必須節制使用彈性領域迴轉角法。

### < 緊固方針 >

舉例來說，將貼合扭力設為會產生50~100MPa軸應力的值。將此軸應力換算成螺栓軸力  $F_b$ ，並透過我的第三篇投稿文中的扭力—軸力關係式算出貼合扭力  $T_{sng}$ ，然後用此扭力值來緊固。

接著，以迴轉角—軸力關係式的理論基礎來緊固，直到到達目標軸力為止。計算所需的迴轉角度時就使用公式(2)或公式(1)。這些公式中代入的軸力  $F_b$  值，就是目標軸力扣除公式(1)算出的(貼合扭力導致的)軸力之後剩餘的值。

圖5的例子是以M12為對象，利用公式(2)算出軸應力  $\sigma_b$  和螺帽迴轉角  $\phi$  之間的關係。握持長度  $L_f$  和公稱直徑  $d$  之間的比  $L_f/d$  越大，為得出同樣軸應力所需的迴轉角就會越大，所以緊固的精密度就會提高。圖片顯示M36的結果，可見公稱直徑的影響很小。



### 結論

彈性領域迴轉角法若適切搭配扭矩法，就能期望產生相當高的緊固作業精密度。搭配使用時，栓合件的剛性最好要低一點。另一方面，像管材法蘭那種，兩塊金屬板中間包含低剛性墊圈的構造物的話，由於難以正確地評量公式(1)中出現的被緊固物彈簧常數  $k_f$ ，所以必須節制使用。

### 參考文獻

1. Toshimichi Fukuoka, "Threaded Fasteners for Engineers and Design - Solid Mechanics and Numerical Analysis -", pp.100-107, Corona Publishing Co., Ltd. (2015)
2. Fukuoka, T. and Takaki, T., 2004, "Evaluation of the Tightening Process of Bolted Joint with Elastic Angle Control Method", Analysis of Bolted Joints, PVP-Vol.478, pp.11-18