

第九集

螺栓的鬆脫與其對策

佐賀大學名譽教授 西田新一

螺紋緊固的失效與預防方式

1. 前言

以下介紹螺栓鬆脫導致的失效與疲勞問題。2008年4月11日週五上午11點08分，行駛在日本東名高速公路北向車道上的某台大卡車的輪胎脫落，越過分隔島直接擊中南向車道上的名鐵觀光巴士的前擋風玻璃，不幸打中司機和七名乘客。鎖住輪胎的8支螺栓全都斷裂，其中2支螺栓的斷裂面佈滿鏽屑。這台一日遊的巴士上有41人，包括司機和導遊。外界認為上述生鏽的螺栓發生鬆脫，且在意外發生前就先疲勞化了。

此外在另一則事故當中，11名通勤者因為手扶梯上使用的螺栓失效而受了傷。2008年5月9日，名古屋市營地下鐵久屋大通站的某個上行的手扶梯突然停止並往下滑。這11名通勤者因為3支螺栓失效而身受重傷。這3支用在手扶梯馬達座上

的螺栓斷裂了。此外，馬達座也從原本的位置偏移了幾公分，驅動鏈條的鬆弛導致了這場突發的意外。（另一座手扶梯也發生類似事故，斷了2支螺栓。）上述的螺栓斷裂被歸因於鬆脫之後的疲勞化現象。

如上述，螺栓的鬆脫與失效事件緊密相關，且會導致螺栓斷裂。因此本文會從安全性的觀點來論述螺栓的鬆脫和其對策。

2. 螺栓防鬆脫的重要性

圖9.1顯示施加在被緊固物上的外力和內力之間的平衡關係，其中 W_a 是外力， f_i 、 f_c 是內力。 K_i 是螺栓的彈簧常數， K_c 是被緊固物的彈簧常數， F_r 是施加在螺栓上的鎖固力， F_i 是變動的外力 W_a 形成的內力。

此案例中的 F_i 和 F_c 的計算公式如下：

$$F_i = K_i \cdot \lambda \quad \dots(1)$$

$$F_c = K_c \cdot \lambda \quad \dots(2)$$

從力平衡的關係中得出

$$W_a = (F_i + F_r) - (F_c + F_r) = F_i - F_c \quad \dots(3)$$

把公式(1)和(2)代換成(3)

$$W_a = (K_i + K_c) \cdot \lambda \quad \dots(4)$$

$$\lambda = \frac{1}{K_i + K_c} W_a \quad \dots(4)$$

把公式(4)代換成(1)和(2)

$$F_i = \frac{K_i}{K_i + K_c} W_a \quad F_c = \frac{K_c}{K_i + K_c} W_a \quad \dots(5)$$

透過外力 W_a ，施加在螺栓上的拉伸力 K_i 以及作用在接合部位上的外力 W_a ，這兩者的比透過螺栓的內力係數 ϕ 計算如下：

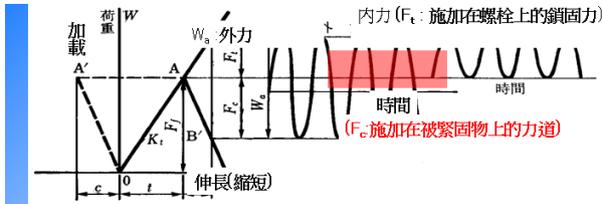
$$\phi = \frac{K_i}{W_a} = \frac{K_i}{K_i + K_c} \quad \dots(6)$$

公式(5)的 F_i 和 F_c 可以透過內力係數 ϕ 計算如下：

$$F_i = \phi W_a \quad F_c = (1 - \phi) W_a \quad \dots(7)$$

圖9.1 外力和內力之間的平衡





K_t : 螺栓的彈簧常數 K_c : 被緊固物的彈簧常數
 W_a : 小於緊固力的外力 F_t : 施加在螺栓上的鎖固力
 F_t : 外力 W_a 形成的內力 F_c : 施加在被緊固物上的力道在 $\Phi=0.2$ 的狀況下是五分之一的外力

$$F_t = \frac{K_t}{K_t + K_c} W_a \dots \dots \dots (8)$$

施加在螺栓上的最大力道

$$F_{max} = F_t + \frac{K_t}{K_t + K_c} W_a \dots \dots \dots (9)$$

圖9.2顯示螺栓與被緊固物件的力道和收縮之間的關係。

外力區分為施加在螺栓上的內力，以及施加在被緊固物上的內力。

例如若無鬆脫狀態下的內力因數 $\phi=2$ (圖9.3)，在公式(7)中，假定傳統螺栓($K_t=K_c$)的疲勞極限值 $F_t=6 \text{ kgf/mm}^2$ ，那麼螺栓能承受的最大外力值 $W_a=6/0.2=30\text{kgf/mm}^2$ ，因為有80%的外力施加在被緊固物件上。換句話說，螺栓在鎖固後最多可承受 30kgf/mm^2 的應力而不鬆脫。它在不鬆脫狀態下的疲勞極限也就變成 30kgf/mm^2 。另一方面，若鎖固好的螺栓發生鬆脫，所有的外力就會施加在螺栓上，螺栓很快就會斷裂，因此鎖固好的螺栓必須要有防鬆脫的對策。

此外，表9.1顯示螺栓無鬆脫的狀態，此無鬆脫的狀態可透過公式10和11表現出來。

表9.1. 螺栓無鬆脫的狀態

參照圖9.1與9.2

$$F_t \geq K_c \cdot W_a / (K_t + K_c) \dots \dots \dots (10)$$

或

$$W_a \geq (1 + K_t / K_c) \cdot F_t \dots \dots \dots (11)$$

W_a : 外力、 K_t : 螺栓的彈簧常數、
 K_c : 被緊固物的彈簧常數、
 F_t : 施加在螺栓上的鎖固力。
 F_t : 變動的外力 W_a 形成的內力。

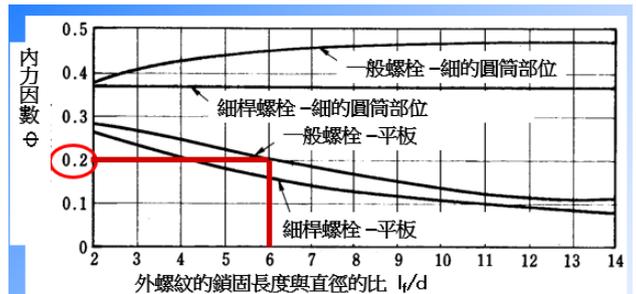


圖9.3 內力因數的快速計算表

3.防鬆脫的對策

市面上已有販售幾種防鬆脫工具。它們的價格幾乎都很昂貴，無法重複使用，無法用於內嵌的螺栓，且必須耗費更長的前置作業時間。

市面上有一種名為「超級鎖固式螺栓」的防鬆脫螺栓，它上面有鎖著兩個不同螺紋的螺帽，此結構能承受劇烈的震動。圖9.4是此雙螺紋螺栓的結構，對比日本JIS標準的雙螺帽結構。以JIS雙螺帽來說，其中的動力螺帽和鎖固式螺帽同樣都採用粗螺紋。然而以「超級鎖固式螺栓」來說，其使用的動力螺帽是採用粗螺紋，其鎖固式螺帽是採用細螺紋，即使它的動力螺帽因振動等等因素而鬆脫，粗、細螺紋的差異會在動力螺帽和鎖固式螺帽之間產生干預的效果(圖9.5)^{(4),(5)}。

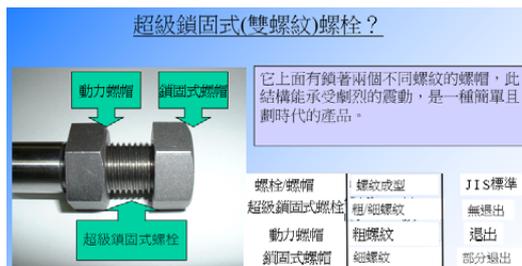


圖9.4 雙螺紋螺栓的結構，對比日本JIS標準的雙螺帽結構。

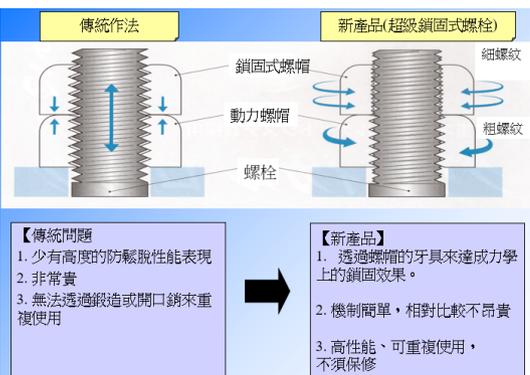


圖9.5. 雙螺紋螺栓的機制

圖9.6是M8尺寸的雙螺紋螺栓的外觀，此螺栓是透過量產機械生產出來的。雖然此雙螺紋螺栓的防鬆脫效果很好，但仍有一些缺陷，因為它無法用於內嵌的螺栓，且重量比一般的單一支螺帽還要重，且需要更長的加工時間。



圖9.6. 雙螺紋螺栓的外觀

4.新的防鬆脫對策

在所有防鬆脫的對策當中，最多人採用的是雙螺帽結構。這種結構的重量相當重，需要的螺紋部位更長，所以需要更多時間來鎖固螺栓，且無法重複使用，因此市場希望能推出一種優異的措施只需用單一支螺帽就能防鬆脫。新的防鬆脫對策就是採用單一支螺帽以及以下簡單的機制：



4.1 透過螺栓和螺帽相異的牙距產生防鬆脫效果

圖9.6是螺栓與螺帽典型的組合方式。圖9.7是圖9.6的A區塊的放大圖，螺栓的牙距與螺帽的牙距重疊，因此螺栓與螺帽的螺紋之間不會產生軸向應力。但如果加工螺帽的牙距，讓它比螺栓的牙距大一點，就會產生軸向應力。也就是說，此螺栓與螺帽鎖固在一起時，螺帽的螺紋會讓

螺栓的螺紋擴大。尤其壓縮殘留應力會出現在螺栓上最危險的區塊，也就是圖9.8的B區塊。此壓縮殘留應力可改善被緊固部位的疲勞強度。此外，上述透過螺栓螺帽不同牙距產生的軸向應力，可提供螺栓與螺帽的防鬆脫效果。



圖9.9. 含有一支螺帽的防鬆脫螺絲
(此機制可套用到內嵌式螺栓)

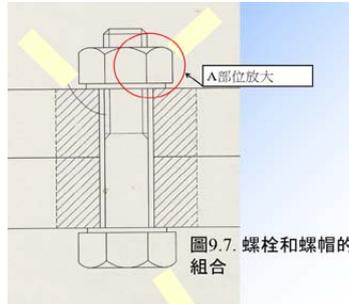


圖9.7. 螺栓和螺帽的組合

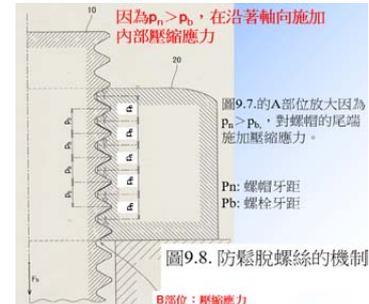


圖9.8. 防鬆脫螺絲的機制

圖9.9是含有一支螺帽的防鬆脫螺絲的外觀，它的防鬆脫效果來自螺栓與螺帽的牙距差異。此防鬆脫螺絲的機制非常簡單，也可套用到內嵌式螺栓。在緊固作業中，操作員靠雙手只能對幾個牙距的長度用螺絲將螺帽鎖固住。

圖9.10是鬆脫測試的結果，測試的基準遵循NAS3354規格。結果測得循環頻率為1,780cpm，振動沖程為11mm，沖擊沖程為19mm，振動方向是與螺栓軸呈垂直的方向。鬆脫測試的判定結果是3萬個振動循環(約17分鐘)之後，螺帽和螺帽上的標記線分開了。結果清楚顯示，經過60分鐘攝氏650度退火處理的螺帽在測試第3分鐘時就鬆脫了，而經過60分鐘攝氏900度退火處理的螺帽則撐了17分鐘。軟質螺帽也有有效的鬆脫效果。



圖9.10. 鬆脫測試結果

4.2 對螺栓和螺帽的螺紋做珠擊處理

以下介紹另一個防鬆脫對策。圖9.11是對螺帽的一個端面做珠擊處理後的外觀。珠擊處理是用來移除掉厚板材表面的鏽屑。此外，此處理方式是對零件的危險部位施予壓縮殘留應力，並改善零件的性能，尤其是透過表面的塑性變形來些微改善疲勞強度。珠擊方向上的表面有出現局部的變形。內層並沒有變形，而是表層有被壓縮。由於表層和內層的變形差異，內層要承受拉伸應力。此螺帽的螺紋因為珠擊而產生塑性變形，換句話說，螺帽的螺紋有些微往珠擊的方向傾斜。珠擊處理不但可用在螺帽的螺紋上，也可用在螺栓的螺紋上。此防鬆脫螺絲的機制也非常簡單，也可套用到內嵌式螺栓。在緊固作業中，操作員靠雙手只能對幾個牙距的長度用螺絲將螺帽鎖固住，這如同筆者先前提到透過牙距的差異來達到防鬆脫的效果。



圖9.11. 對螺帽的尾端做珠擊處理

表9.2. 防鬆脫的對策

(1) 透過牙距的差異達成防鬆脫效果：
螺栓與螺帽的牙距差異
→外力會加在被緊固物上→防鬆脫效果
施

(2) 對螺紋做珠擊處理：
對螺栓和螺帽的螺紋做珠擊處理
→防鬆脫效果

(3) 上述的(1)+(2)

表9.2列出新的防鬆脫對策。這兩種對策也可依需求併用。

5. 結論：

以下本文總結前述的主要結果：

- (1) 為了預防疲勞斷裂，從被緊固部位的安全性方面來看，防鬆脫的特性是很重要的。
- (2) 雖然市面上有幾種防鬆脫的扣件產品，但價格幾乎都很昂貴，重量很重，無法重複使用且無法加工。
- (3) 雖然雙螺紋構造的超級鎖固式螺栓擁有高防鬆特性，但仍有本文在第2點的文字中提到的缺陷。
- (4) 作為防鬆脫對策的牙距差異法和珠擊法都擁有非常簡單的機制，效果表現也絕佳。

參考文獻 (1) 2008年4月12日與13日的日本每日新聞早報
(2) 2008年5月3日的日本每日新聞早報
(3) S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, (1993), pp.68, Butterworth Heineman Co. Ltd., UK.

(4) Shin-ichi Nishida et al., Development of the double thread bolt, which is superior to anti-loosening performance, (2004)
(5) Shin-ichi Nishida et al., Mass Production of the double thread bolt by form rolling with plane dies, (2007).

