

隨著時代的發展至今，為了精密工業的需求，進而研發出多種不同類型的防鬆脫螺帽，其應用於工具機或專用機等高精度之加工機，以及精密之儀器和交通工具上。本文主要探討精密固鎖螺帽在不同公稱直徑、精密螺帽的預壓力及緊定螺絲扭緊力矩等，對於精密固鎖螺帽鎖固之軸向力變化率的影響，藉以瞭解其組裝特性，進而將結果與使用單一次數之精密固鎖螺帽做比較，探討精密固鎖螺帽重複使用的各項數值與僅使用單一次數螺帽之差異，並以二次線性配適來建立精密固鎖螺帽鎖固之軸向力變化率預測方程式。由實驗結果顯示，於臥式主軸組裝下，重複使用之螺帽的結構已發生塑性變形，軸向力衰退程度皆大於僅使用單一次數螺帽，且變異較大，此特性亦可作為緊固件鎖固特性之參考。

精密固鎖螺帽之組裝特性

文 / 國立勤益科技大學機械工程系、
精密螺帽研發及檢測實驗主持人 陳志明教授

研究理論

有關精密固鎖螺帽之力學理論，本人及研究團隊有詳盡之探討，對於不考慮緊定螺絲鎖定之精密固鎖螺帽的鎖緊力矩 T_F 可表示為：

$$T_F = KFd_m \quad (1)$$

螺帽的鬆脫力矩 T_L 為：

$$T_L = K'Fd_m \quad (2)$$

防鬆脫比 T_r ：

$$T_r = \frac{T_F}{T_L} \quad (3)$$

(1) 及 (2) 式中 K 為鎖緊時的力矩係數； K' 為鬆脫時的力矩係數； F 為鎖緊時之軸向力； d_m 為螺紋公稱直徑；(3) 式為防鬆脫比公式，防鬆脫比越大亦代表螺帽越不容易鬆脫，亦即防鬆脫特性愈佳。

力矩係數：

$$K = \frac{1}{2} \left[\frac{(\tan \beta + \mu \sec \alpha)}{(1 - \mu \tan \beta \sec \alpha)} + \frac{d_w \mu_w}{d_m} \right] \quad (4)$$

$$K' = \frac{1}{2} \left[\frac{(\tan \beta + \mu \sec \alpha)}{(1 - \mu \tan \beta \sec \alpha)} + \frac{d_w \mu_w}{d_m} \right] \quad (5)$$

精密螺帽的牙面摩擦係數為：

$$\mu_s = \frac{2T - Fd_m \tan \beta}{Fd_m \sec \alpha + 2T \tan \beta \sec \alpha} \quad (6)$$

(6) 式中 μ_s 為螺紋面摩擦係數； F 為鎖緊時之軸向力； β 為導程角； α 為 $\frac{1}{2}$ 螺紋角。

精密螺帽的座面摩擦係數為：

$$\mu_w = \frac{d_m}{d_w} \left[\frac{2T}{Fd_m} - \frac{\tan \beta + \mu_s \sec \alpha}{1 - \mu_s \tan \beta \sec \alpha} \right] \quad (7)$$

(7) 式中 μ_w 為座面摩擦係數。

實驗設備及樣品

實驗設備

(a) 扭力 - 軸向力試驗機：

如圖 1 所示，主要功能為量測精密固鎖螺帽之扭緊扭矩、鬆脫扭矩與軸向力，其螺帽適用範圍最大可檢測到公稱直徑 M50。扭力感測元件最大承受扭矩可達到 2000 N·m；馬達最高轉速可達 1425 rpm；軸向力感測裝置最大可量測軸向力到 98000 N。

(b) 真圓度儀：



圖 2 日本 Mitutoyo 真圓度儀 (RA-120P)



圖 1 扭力 - 軸向力試驗機

本實驗之平面度量測方式，是使用日本 Mitutoyo 真圓度儀 (RA-120P；如圖 2)，將樣品夾持於量測端，再移動探針，將其固定於樣品量測位置，校正平台之水平座標，以免因振動或放置位置傾斜而造成量測誤差，開始量測時，平台會以中心旋轉方式，轉動兩圈，其探針便與樣品接觸位置檢測出其座面之平面度。

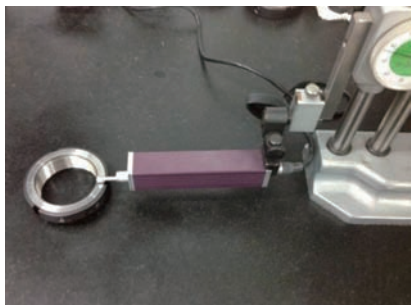


圖 3 日本 Mitutoyo 手提式表面粗糙度測定儀

(c) 表面粗糙度測定儀：

本實驗所使用之表面粗糙度量測使用日本 Mitutoyo 手提式表面粗糙度測定儀 SJ-210 型（如圖 3 所示），其測定範圍：縱方向（Z） $360\mu\text{m}$ ，橫方向（X） 17.5mm ；最小範圍 / 解析度： $25\mu\text{m}/0.002\mu\text{m}$ ；量測速度： $0.25、0.5、0.75\text{mm/s}$ ；返回速度： 1mm/s ；測針： 60 度鑽石圓錐 / 尖端半徑： $2\mu\text{m}$ ；測定力： 0.75mN 。表面粗糙度儀原理，係利用一支測針在工作物表面接觸往右移動量測經收錄（檢出）器後，而產生之上下位移訊號（類比），經資料處理器處理（放大、等分、數位訊號）後，將所需之參數、資料、圖形輸出。



圖 4 Preset 形扭力扳手

(d) Preset 形扭力扳手：

Preset 形扭力扳手主要作精密固鎖螺帽扭力的施加，其力矩精度均符合 ISO-6789：2003 規範。扭力扳手之規格如下：

60QL - TOHNICHI（使用範圍： $1.96\text{N}\cdot\text{m} \sim 5.88\text{N}\cdot\text{m}$ ；如圖 4）

實驗樣品

如圖 5 所示，本實驗用來模擬滾珠螺桿、精密主軸等之標準螺栓，採用鉻鉬合金鋼 SCM21，硬度為 HRC55~58，外螺紋精度為依據 ISO 965-3：公差等級 4h 精密研磨加工；牙腹鎖定精密固鎖螺帽如圖 6 所示，內螺紋精度為依據 ISO 965-3：公差等級 6h 精密車削加工。精密鎖定螺帽中的緊定螺絲，材質為鉻鉬合金鋼 SCM435，硬度為 HRC45~53，並符合 ISO 2320：



圖 5 標準螺栓

2003 規範；精密鎖定螺帽中的固定銅，材質為快削磷青銅 C5441，其螺紋幾何加工尺寸同精密鎖定螺帽。本實驗中使用油潤的防銹油，為北杉化學股份有限公司所生產的 PRETON R3301J 溶劑稀釋型防銹油其黏度 $2.7 (40^\circ\text{C}, \text{mm}^2/\text{s})$ 。

實驗步驟

圖 7 為本實驗流程，首先將牙腹鎖定精密固鎖螺帽置於臥式試驗機上進行預壓，再使用 Preset 形扭力扳手，先對精密固鎖螺帽本體依實驗設計施加軸向力後再對緊定螺絲施加扭緊力矩，在施加緊定螺絲扭緊力矩時須將實驗設定值分段後將分段施予為 $1.96\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $3.92\text{N}\cdot\text{m}$ 及 $5.88\text{N}\cdot\text{m}$ 等三段並分別量測軸向力變化值。依鎖定螺絲編號順序鎖定，並依序對緊定螺絲施力（施力順序為緊鎖定螺絲編號 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ ），即可得到重複使用後的螺帽各項數據。

統計模型分析

實驗結果顯示初始軸向力與軸向力變化率之關係，緊定螺絲扭緊力矩為額定力矩，並以線性配適分析發現二次線性配適曲線，找到二次線性配適方程式，以此方程式可求得精密螺帽重複使用之軸向力變化率。設初始軸向力為 F ，軸向力變化率為 Y 。

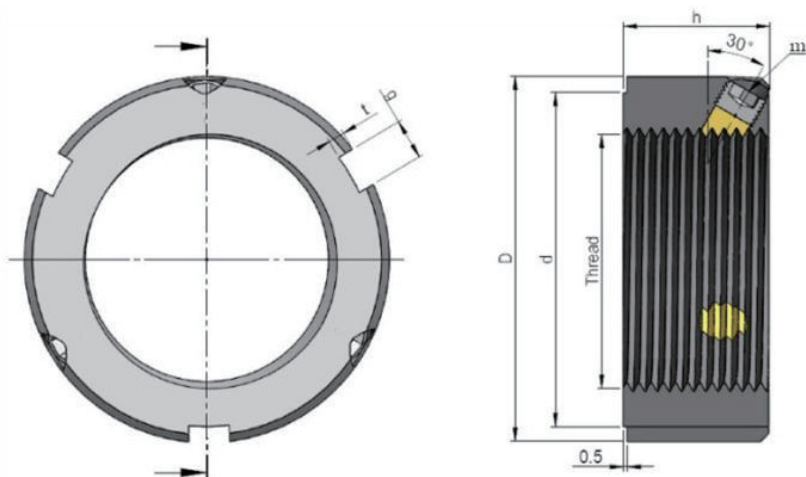


圖 6 牙腹鎖定精密固鎖螺帽

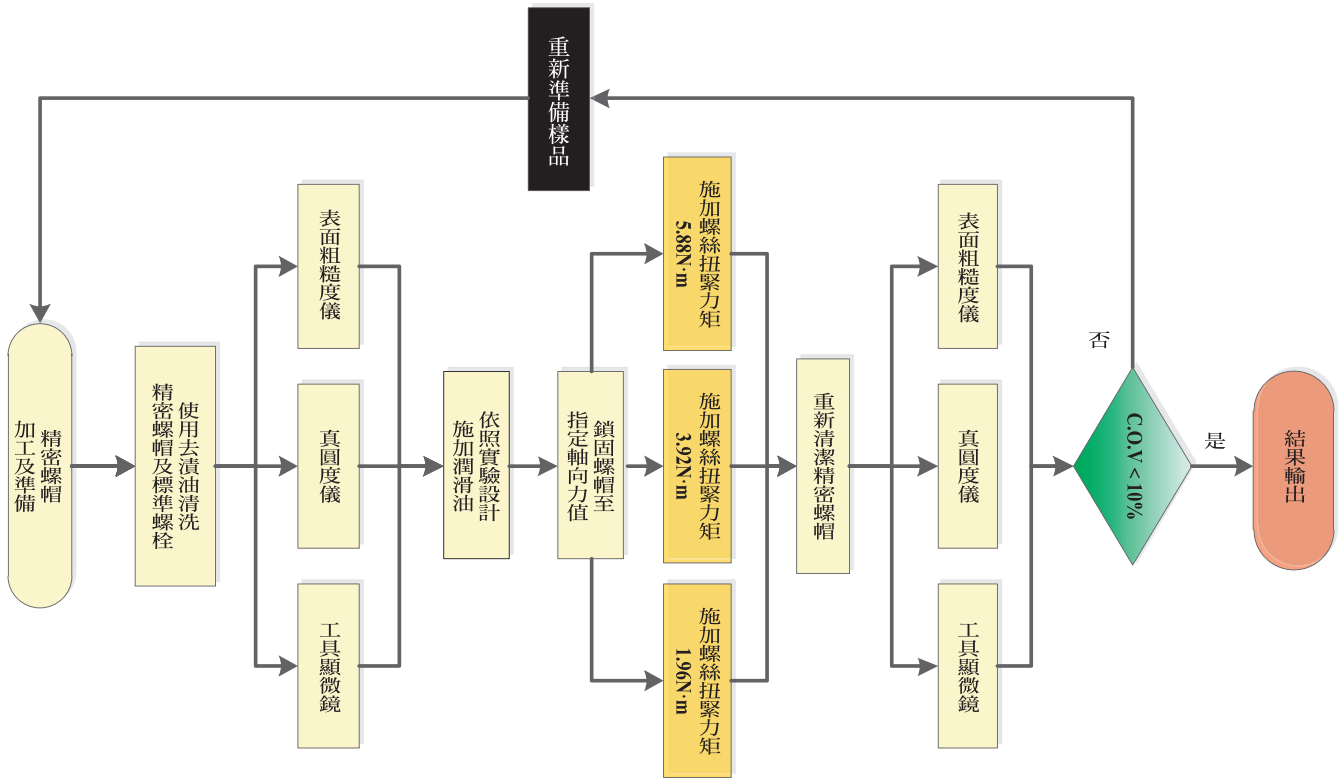


圖 7 實驗流程圖

$$Y_{35s}(\%) = -2.11073 \times 10^{-8} \times F^2 + 7.18314 \times 10^{-4} \times F - 6.80116 \quad (8)$$

$$Y_{40s}(\%) = -2.77439 \times 10^{-8} \times F^2 + 8.70814 \times 10^{-4} \times F - 7.62719 \quad (9)$$

$$Y_{45s}(\%) = -3.16615 \times 10^{-8} \times F^2 + 9.50979 \times 10^{-4} \times F - 8.03272 \quad (10)$$

$$Y_{50s}(\%) = -3.64528 \times 10^{-8} \times F^2 + 0.00108 \times F - 8.85474 \quad (11)$$

如表 1 所示，M35、M40、M45、M50 之精密固鎖螺帽預壓力 F 設定為 7000N，帶入 (8) 至 (11) 式分別可得誤差為 -0.26%、0.83%、0.95%、-0.81%，誤差值皆在 1% 以內，故此可判斷此預測方程式具有相當之可信度。

表 1 軸向力預測與驗證實驗數據比較表

項目	規格	M35X1.5P	M40X1.5P	M45X1.5P	M50X1.5P
軸向力		7000N	7000N	7000N	7000N
緊定螺絲扭距 (N·m)		5.88	5.88	5.88	5.88
變化率預測值 (%)		-2.8	-2.89	-2.93	-3.08
變化率實驗平均值 (%)		-3.05	-2.08	-2.01	-3.86
軸向力預測值 (N)		6804	6797.7	6794.9	6784.4
軸向力實驗平均值 (N)		6786.5	6854.4	6859.3	6729.8
軸向力誤差值 (%)		-0.26	0.83	0.95	-0.81

結果與討論

公稱直徑對軸向力變化率的影響

表 2 為規格 M35、M40、M45、M50 之精密固鎖螺帽，在初始軸向力為 4900N 及螺絲扭緊力矩為 1.96 N·m 時，軸向力變化率為 -0.81%、-1.08%、-1.13%、-0.65%；螺絲扭緊力矩為 3.92N·m 時，軸向力變化率為 -2.31%、-2.54%、-2.74%、-2.62%；螺絲扭緊力矩為 5.88N·m 時，軸向力變化率為 -3.79%、-4.03%、-4.13%、-4.46%，由此可看出螺帽公稱直徑在初始軸向力為 4900N 時並不影響軸向力變化率。

規格 M35、M40、M45、M50 之精密固鎖螺帽在初始軸向力為 9800N 及螺絲扭緊力矩為 1.96 N·m 時，軸向力變化率為 -0.22%、-0.34%、-0.31%、-0.13%；螺絲扭緊力矩為 3.92N·m 時，軸向力變化

表 2 重複及單一使用次數之螺帽軸向力變化率整理比較表

單一使用次數				重複使用			
M35x1.5P							
預壓力 螺絲扭緊力矩	4900N	9800N	14700N	預壓力 螺絲扭緊力矩	4900N	9800N	14700N
1.96 N·m	-0.27	0.00	0.00	1.96 N·m	-0.81	-0.22	-0.07
3.92 N·m	-1.22	-0.26	-0.22	3.92 N·m	-2.31	-1.00	-0.35
5.88 N·m	-3.10	-0.73	-0.58	5.88 N·m	-3.79	-1.79	-0.80
M40x1.5P							
預壓力 螺絲扭緊力矩	4900N	9800N	14700N	預壓力 螺絲扭緊力矩	4900N	9800N	14700N
1.96 N·m	-0.32	0.00	0.00	1.96 N·m	-1.08	-0.34	-0.13
3.92 N·m	-1.36	-0.27	-0.27	3.92 N·m	-2.54	-0.97	-0.40
5.88 N·m	-2.94	-0.84	-0.52	5.88 N·m	-4.03	-1.76	-0.82
M45x1.5P							
預壓力 螺絲扭緊力矩	4900N	9800N	14700N	預壓力 螺絲扭緊力矩	4900N	9800N	14700N
1.96 N·m	-0.25	0.00	0.00	1.96 N·m	-1.13	-0.31	-0.11
3.92 N·m	-1.28	-0.26	-0.25	3.92 N·m	-2.74	-1.01	-0.41
5.88 N·m	-2.97	-0.84	-0.58	5.88 N·m	-4.13	-1.75	-0.90
M50x1.5P							
預壓力 螺絲扭緊力矩	4900N	9800N	14700N	預壓力 螺絲扭緊力矩	4900N	9800N	14700N
1.96 N·m	-0.33	0.00	0.00	1.96 N·m	-0.65	-0.13	-0.02
3.92 N·m	-1.24	-0.27	-0.33	3.92 N·m	-2.62	-0.87	-0.47
5.88 N·m	-2.92	-0.72	-0.63	5.88 N·m	-4.46	-1.81	-0.91

(註：表中之軸向力變化率單位為%)

率為 -1.00%、-0.97%、-1.01%、-0.87%；螺絲扭緊力矩為 5.88N·m 時，軸向力變化率為 -1.79%，-1.76%、-1.75%、-1.81%，由此可看出螺帽公稱直徑在初始軸向力為 9800N 時並不影響軸向力變化率。

規格 M35、M40、M45、M50 之精密固鎖螺帽在初始軸向力為 14700N 及螺絲扭緊力矩為 1.96 N·m 時，軸向力變化率為 -0.07%、-0.13%、-0.11%、-0.02%；螺絲扭緊力矩為 3.92N·m 時，軸向力變化率為 -0.35%、-0.40%、-0.41%、-0.47%；螺絲扭緊力矩為 5.88N·m 時，軸向力變化率為 -0.80%，-0.82%、-0.90%、-0.91%，由此可看出螺帽公稱直徑在初始軸向力為 14700N 時並不影響軸向力變化率。

初始軸向力對軸向力變化率的影響

圖 8 為規格 M35x1.5P 之初始軸向力為 4900N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.27%、-1.22%、-3.10%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.81%、-2.31%、-3.79%。

由圖 9 可知，以規格 M35x1.5P 之初始軸向力為 9800N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 0%、-0.26%、-0.73%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.22%、-1.00%、-1.79%。

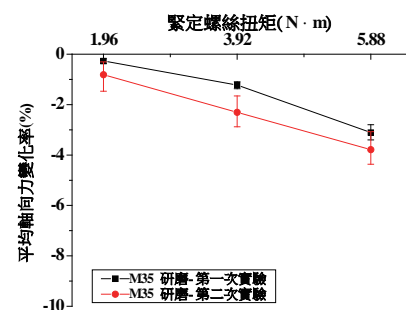


圖 8 M35 於預壓力 4900N 之軸向力變化率

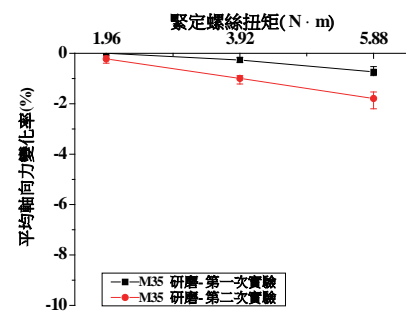


圖 9 M35 於預壓力 9800N 之軸向力變化率

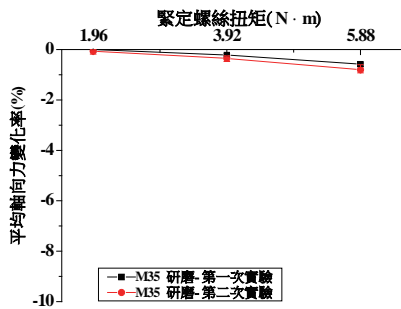


圖 10 M35 於預壓力 14700N 之軸向力變化率

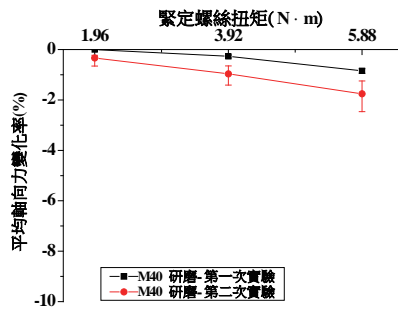


圖 12 M40 於預壓力 9800N 之軸向力變化率

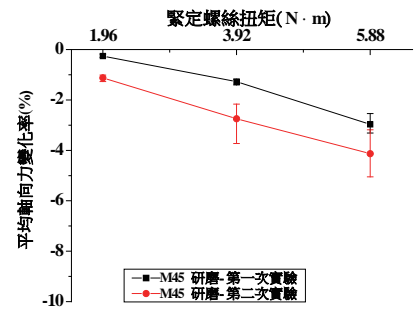


圖 14 M45 於預壓力 4900N 之軸向力變化率

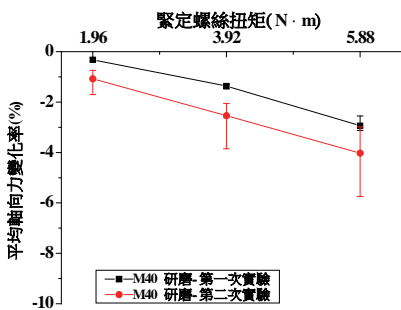


圖 11 M40 於預壓力 4900N 軸向力之變化率

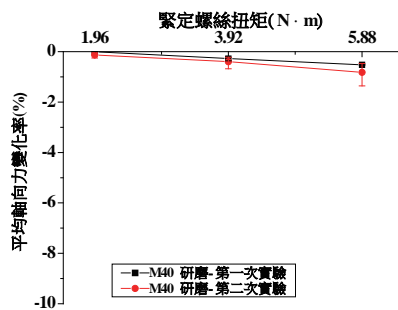


圖 13 M40 於預壓力 14700N 之軸向力變化率

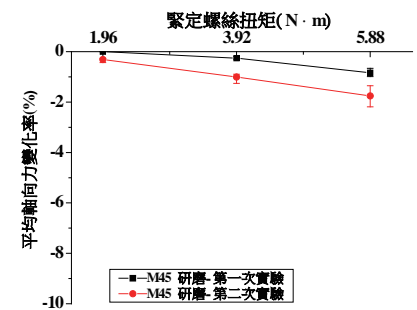


圖 15 M45 於預壓力 9800N 之軸向力變化率

圖 10 為規格 M35x1.5P 之初始軸向力為 14700N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 0%、-0.22%、-0.58%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.07%、-0.35%、-0.80%。

如圖 11 所示，規格 M40x1.5P 之初始軸向力為 4900N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.32%、-1.36%、-2.94%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -1.08%、-2.54%、-4.03%。

圖 12 為規格 M40x1.5P 之重初始軸向力為 9800N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 0%、-0.27%、-0.84%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.34%、-0.97%、-1.76%。

如圖 13 所示，規格 M40x1.5P 之初始軸向力為 14700N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 0%、-0.27%、-0.52%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.13%、-0.40%、-0.82%。

圖 14 為規格 M45x1.5P 之初始軸向力為 4900N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.25%、-1.28%、-2.97%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -1.13%、-2.74%、-4.13%。

如圖 15 所示，規格 M45x1.5P 之初始軸向力設定為 9800N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 0%、-0.26%、-0.84%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.31%、-1.01%、-1.75%。

圖 16 為規格 M45x1.5P 之初始軸向力為 14700N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 0%、-0.25%、-0.58%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.11%、-0.41%、-0.90%。

如圖 17 所示，規格 M50x1.5P 之初始軸向力設定為 4900N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 -0.33%、-1.24%、-2.92%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率為 -0.65%、-2.62%、-4.46%。

圖 18 為規格 M50x1.5P 之初始軸向力設定為 9800N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 0%、-0.27%、-0.72%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率為 -0.13%、-0.87%、-1.81%。

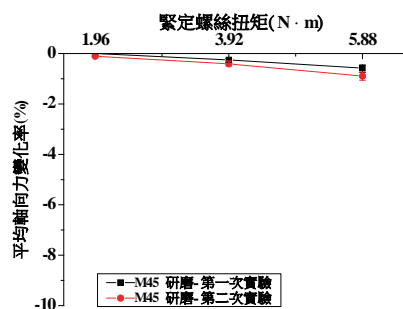


圖 16 M45 於預壓力 14700N 之軸向力變化率

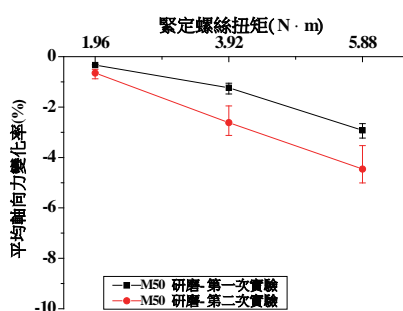


圖 17 M50 於預壓力 4900N 之軸向力變化率

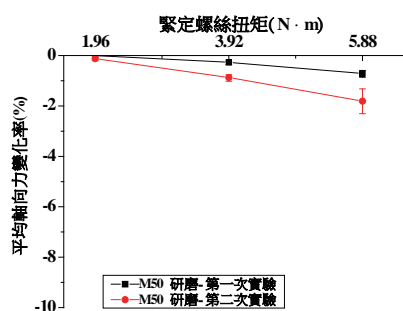


圖 18 M50 於預壓力 9800N 之軸向力變化率

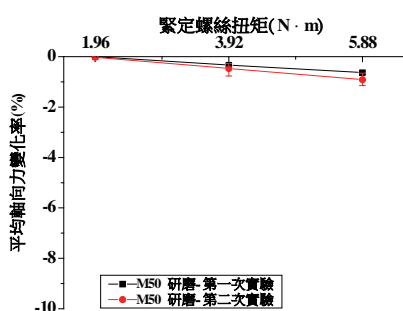


圖 19 M50 於預壓力 14700N 之軸向力變化率

如圖 19 所示，規格 M50x1.5P 之初始軸向力設定為 14700N 及施加 1.96N·m、3.92N·m 及 5.88N·m 時，第一次使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率分別為 0%、-0.33%、-0.63%，重複使用之精密固鎖螺帽其軸向力變化率為 -0.02%、-0.47%、-0.91%。

由圖 8 至圖 19 為 M35、M40、M45、M50 各尺寸之精密固鎖螺帽初始軸向力由 4900N 增加至 9800N 及 14700N 時，其緊定螺絲扭緊力矩對軸向力變化率的影響因初始軸向力增加而隨之降低，故可得知重複使用之精密固鎖螺帽的初始軸向力為影響軸向力變化率的主要因素。

精密螺帽是否適合重複使用

精密固鎖螺帽單一使用次數與重複使用之特性比較，由實驗結果得知，樣品在本實驗前已接受過一次實驗，材料已發生結構上之塑性變形（如圖 20-22 所示），應力與應變的關係不再維持正比的關係，亦即當除去應力後亦無法返回其原來的位置，因此第二次實驗軸向力衰退的程度皆高於第一次實驗，因此不建議將已使用過的精密螺帽做重複使用之用途。

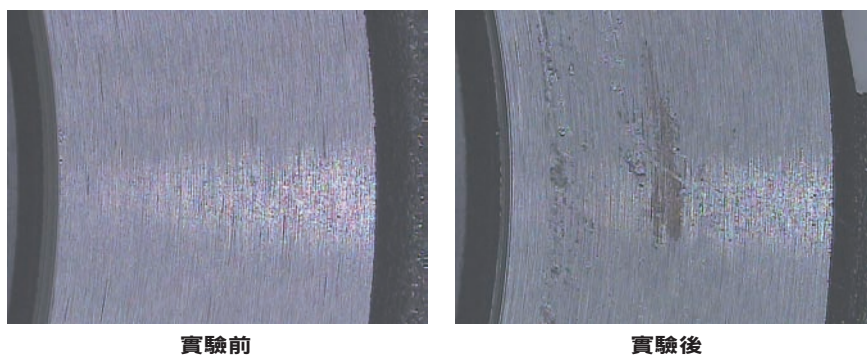


圖 20 精密螺帽接觸座面

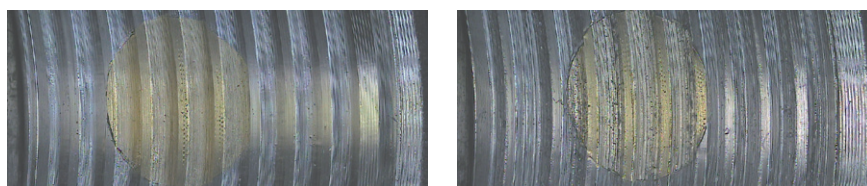


圖 21 精密螺帽之實驗前螺紋面

圖 22 精密螺帽之實驗後螺紋面

結論

精密固鎖螺帽之公稱直徑在重複使用下對軸向力變化率並無影響，但螺帽的初始軸向力為影響軸向力變化率的主要因素。本研究結果，確實可有效預測精密固鎖螺帽之軸向力變化率，提供相關業界在組裝時之重要參考依據；重複使用之精密固鎖螺帽的結構已發生塑性變形，軸向力衰退程度皆大於僅使用單一次數螺帽，且變異變大，故不建議精密螺帽重複使用。