



螺紋緊固的失效與預防方式

第7集：提升螺栓疲勞強度的新方法（下半部）

文 / 佐賀大學名譽教授 西田新一

前言

筆者在第6集（上半部）和第7集（下半部）中提到提升螺栓疲勞強度的新方法。首先，我針對螺紋外形、牙底半徑、螺絲與螺帽的機械特性，以及預加應力，實施疲勞測試，藉此量化評估了所有與螺栓疲勞強度相關的因素。此外，筆者將在本文中介紹提升螺栓疲勞強度的新方法。上述的主要實驗結果將在表7.1 (1) - (4) 中做總結。

表7.1. 螺栓疲勞測試結果彙整

研究項目	螺栓種類	使用的材料		螺栓的尺寸(mm)			預處理	測試條件		2 x 10 ⁶ 次循環時的疲勞強度 kgf/mm ²	疲勞強度的增加率(%)	備註
		螺栓	螺帽	最小直徑	牙底半徑	牙距		平均應力 kgf/mm ²	頻率 (循環/分鐘)			
各種牙的螺栓的疲勞強度	三角牙	SCM440	SCM440	25.0	0.30	3.0	無預處理	18.0	500	±6.0	100	一般形狀 (標準螺栓)
	梯形螺紋	SCM440	SCM440	25.0	0.25	3.0	同上	18.0	500	±7.0	117	
	正向鋸齒形螺紋	SCM440	SCM440	25.0	0.35	4.0	同上	18.0	500	±6.0	100	無效果
	反向鋸齒形螺紋	SCM440	SCM440	25.0	0.30	4.0	同上	18.0	500	±7.0/±8.0	117/133	
尺寸的影響	三角牙	SCM440	SCM440	32.0	0.80	3.6	同上	18.0	350	(±6.0)	100	
	同上	SCM440	SCM440	40.0	1.00	5.5	同上	18.0	350	(±6.0)	100	
牙底半徑的影響	同上	SCM440	SCM440	25.0	0.50	3.25	同上	18.0	500	±6.0	100	無效果
	同上	SCM440	SCM440	25.0	0.70	3.5	同上	18.0	500	±6.0	100	無效果
螺絲的機械屬性之影響	同上	SNCM630	SNCM630	25.0	0.40	3.25	同上	18.0	500	±6.0	100	無效果
	螺帽的材質	同上	SNCM630	SNCM630	25.0	0.40	3.25	同上	18.0	500	±6.0	100
預加應力的影響 (新方法)	同上	SNCM630	S20C	25.0	0.40	3.25	同上	18.0	500	±7.0	117	
	同上	SNCM630	SNCM630	25.0	0.40	3.25	預加應力	18.0	500	±9.0	150	
	同上	SNCM630	S20C	25.0	0.40	3.25	預加應力 43 kgf/mm ²	18.0	500	±7.5	125	
	同上	SNCM630	S20C	25.0	0.40	3.25	預加應力 37 kgf/mm ²	18.0	500	±7.5	125	
螺栓牙的漸次切斷	同上	SNCM630	SNCM630	25.0	0.40	3.25	預加應力 33 kgf/mm ²	18.0	500	±12.0	200	CD紋螺栓
	螺栓牙漸次切斷法	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
螺栓牙漸次切斷法的影響(新方法)	螺栓牙的漸次切斷	SNCM630	SNCM630	25.0	0.40	3.25	同第一條牙漸次切斷至第8條	18.0	500	±11.0	183	咬合住 第4條牙的螺帽

* 螺栓牙的漸次切斷代表CD紋螺栓

† 疲勞壽命變成十分之一左右

提升螺栓疲勞強度的新方法

CD紋螺栓極高的疲勞強度

如第5集所述，傳統螺栓的疲勞極限比較低，其典型值落在5~6 kgf/mm² (約50~60Mpa)。現在筆者將介紹疲勞強度極高的CD紋螺栓。CD紋螺栓是日本Nippon Steel Bolten這家公司的產品商標。「CD」是「critical design for fracture (包括Fatigue)」的縮寫，它擁有目前最頂尖極致的牙形。這對於疲勞特性、延遲斷裂現象（氫脆化）和應力腐蝕龜裂來說是一種最有效的設計，因為CD紋螺栓的形狀會產生應力鬆弛的效果。延遲斷裂與應力腐蝕龜裂又稱為「環境性脆裂」。CD紋螺栓的成形方式稱為CD紋成形。由於此成形法牽涉到專業知識，相關工程師應向製造商諮詢。如前所述，一般螺栓的疲勞強度遠低於含有一個切口之同材質樣本的疲勞強度。這是因為荷載在螺栓中傳遞並通過外螺紋與內螺紋的接觸點。疲勞強度之所以會低，可歸因於以下四個因素，筆者也曾首度釐清過這四個因素：

- (1) 螺紋之間不均勻的荷載分攤
- (2) 拉伸應力集中在牙底
- (3) 彎折應力集中在牙底
- (4) 局部的荷載

除了第(2)點之外，其他因素都不會在傳統含有切口的樣本上遇到。因此，其他三項因素就是螺絲緊固作業中特有的動態現象。目前我在第五集的投稿中，針對此四個因素只有描述過兩個做法。

其中一個做法是確保螺紋分攤等量的荷載。另一個做法是依據被緊固零件的狀況降低內力係數，因為螺栓通常是在被擰緊的狀態下使用（見第五集投稿中的圖5.10）然而第一個作法只對四個因素的其中一個因素有效用，而第二個方法只有在螺栓被施加緊固力時才有效。此外，如果螺栓鬆脫或施加了足以產生螺栓塑性變形的力，那麼上述的兩個做法都會失效。

Cd紋螺栓的外形

以下介紹新研發的做法可善螺栓本身的疲勞強度。圖7.1顯示螺栓的典型外形（以下將稱之為CD紋螺栓）。這裡顯示的是一支公稱直徑的CD紋螺栓。當然，CD紋螺栓的概念也可套用到節圓直徑的螺栓以及細桿螺栓。

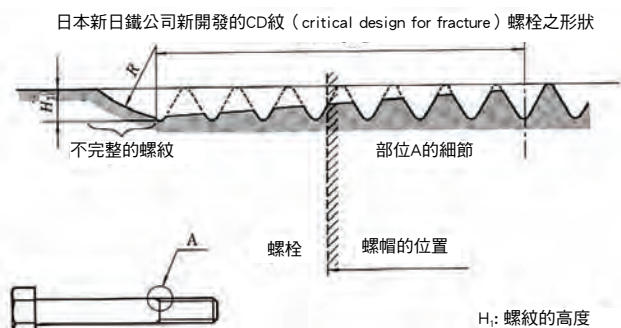


圖7.1. CD紋螺栓的標準形狀

以下描述典型的CD紋螺栓。以一般尺寸的粗螺紋來說，CD紋的部位有足夠的斜度（例如6/100），並形成一條完整的螺紋。此外，不完整的螺紋幾乎都被CD紋去除掉，而且此部位透過一個微弧形（ $R \geq 10\text{mm}$ ）連接到螺栓本體。螺帽最佳的端部狀態，是約有七八成的螺紋CD紋部位進入到螺帽中。如果因為是長牙條的關係使得螺帽尾端和不完整螺紋之間的距離過長，那麼要移除掉螺紋的零件長度就應該要加長。螺帽尾端和不完整螺紋的疲勞強度可透過此做法來大幅改善。此外，螺栓頭下的圓角的疲勞強度也應該要提升。為此，就應增加頭下的半徑（ $R \geq 5\text{mm}$ ），或是可採用硬化加工。換句話說，壓縮殘留應力可以透過冷加工（珠擊處理或沖壓）施加到頭下的圓形部位。

CD紋螺栓的一般特性和使用的注意事項

CD紋螺栓是透過動態的觀點被研發出來以改善螺栓的特性。CD紋螺栓整合了所有改善螺栓疲勞強度的必要措施。因此，CD紋螺栓與傳統螺栓之間的疲勞特性之效果是有顯著差異的。CD紋螺栓的疲勞特性優異，如以下所述：

- (1) 荷載的分攤很均勻。
- (2) 與螺帽接觸的螺栓牙高度降低了，集中在牙底的拉伸應力有鬆弛開來。
- (3) 螺栓的牙高度降低了，因此若假設該牙是一種懸臂結構，那麼牙的加載部位與牙底之間的距離會縮小。因此，集中在牙底的彎折應力會明顯地鬆弛開來。

- (4) 隨著接觸面的壓力增加，螺栓與螺帽的接觸區域會容易變形，螺栓牙會與螺帽牙的尖部接觸，更容易偏斜。

因此，成形精確度低或者其他的因素造成的局部荷載會降低。換句話說，CD紋螺栓是改善疲勞強度已採取的必要做法中唯一有效的一個。

以下敘述CD紋螺栓的使用注意事項。CD紋螺栓與螺帽耦合的最佳位置取決於螺栓的螺紋外形之特性。但以現場作業來說，螺帽和CD紋螺栓不一定會在最佳位置上耦合。在此狀況下，必須透過改變墊片的厚度來做調整。然而，有可能會遇到難以調整墊片的狀況。以一般的準則來說，公差大約是落在 ± 1 個螺紋之間。換句話說，在典型的案例中，M20粗牙螺栓的緊固容差約為5mm。一般認為此容差在實務上已經很足夠。

CD紋螺栓的疲勞強度

圖7.2至7.4顯示套用CD紋外形的疲勞特性曲線。圖7.2的螺栓通常用於機械零件。另一方面，圖7.3的高張力螺栓是應用到土木工程建築的零件上。如這些圖所示，CD紋螺栓的疲勞極限比傳統日本規格的螺栓多出一倍。圖7.3的疲勞強度會比圖7.2還要低的原因，就在於螺紋與螺帽之間間隙。換句話說，就是因為螺紋的疲勞強度取決於其與螺帽的結合。以機械螺栓來說，螺栓和螺帽都是透過車床來滾出螺紋，因此這種結合幾乎可避免掉鬆弛的狀況（這裡的鬆弛是指螺紋與螺帽的螺紋之間的鬆弛）。然而以高張力螺栓和錨栓來說，其鬆弛度會因為使用的次數而增加（因為其螺帽的牙屬於加大攻牙）。圖7.4顯示透過3D分析計算牙底應力集中度的結果。如圖所示，CD紋螺栓的應力集中度變成了日本規格螺栓的一半。此外，雖然CD紋的成形使得不均一的加載變得相當鬆弛，但這種外形不一定就能獲得理想中均勻加載的優勢。若時間允許的話，理想上可對各式材料與外形的螺紋與螺帽進行疲勞測試，並依據測試的結果來設計螺紋。

以疲勞特性的觀點來看，CD紋成形的期望斜度約為6/100。以大直徑螺栓來說，其細牙或粗牙大於M40，其牙高相對於直徑則比較低，因此必須將斜度更改為6/100。理想上，必須消除或鬆弛化所有前述主宰著疲勞強度的因素。CD紋成形的設計是要只透過合適的措施確保均勻的荷載分攤，藉此消除前述的四個因素（見表7.1 (1) - (4) 與7.2，圖7.4、7.5 (1) - (3) 與7.6）。因此，CD紋成形應該與此觀念一致。換句話說，要導入CD紋成形的部位的斜度可以很確定了，將被成形的部位會占整個螺紋的七八成，且發生在螺帽尾端的螺紋耦合程度會變成傳統耦合的兩到三成。這些數值是取決於實證方法。

2.5 基於CD紋成形的CD紋螺帽

螺紋並不能隨時都以最佳的方式來耦合，以免庫存的螺紋要在緊急的狀況下使用。針對這一點，CD紋螺帽並不便利。在這種情況下，建議使用CD紋螺帽，因為它不受限於螺紋耦合的位置，雖然疲勞強度會比CD紋螺栓大幅降低（見圖7.7）。使用CD紋螺帽時，疲勞極限的改善幅度只有 $1\text{kgf}/\text{mm}^2$ ，只有CD紋螺栓改善幅度的三分之一或四分之一。這可能是因為採用了主宰螺紋疲勞強度的四個因素中的其中一個因素，也就是均勻的荷載分攤。



CD紋螺栓的靜態特性

圖7.3、7.4和7.5分別顯示CD紋螺栓、螺帽的安全荷載、高張力螺栓的扭力係數。從這些圖中顯見CD紋螺栓與傳統

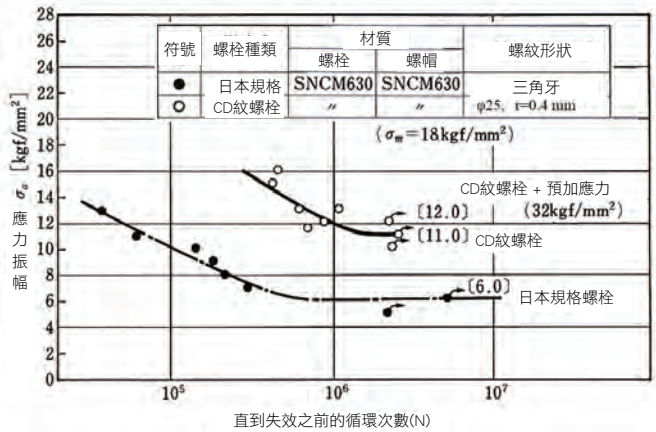


圖7.2. CD紋螺栓的應力-壽命曲線圖

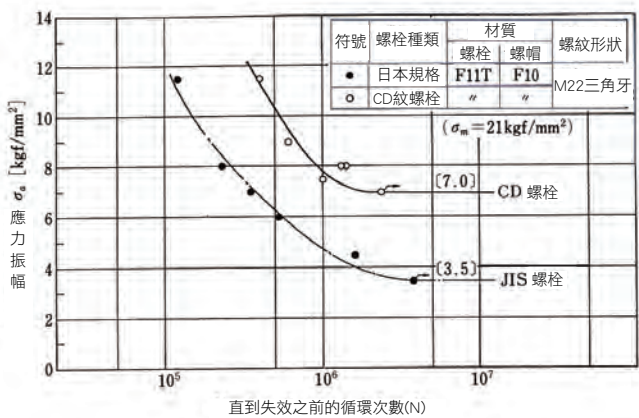


圖7.3. 高張力CD紋螺栓的應力-壽命曲線圖

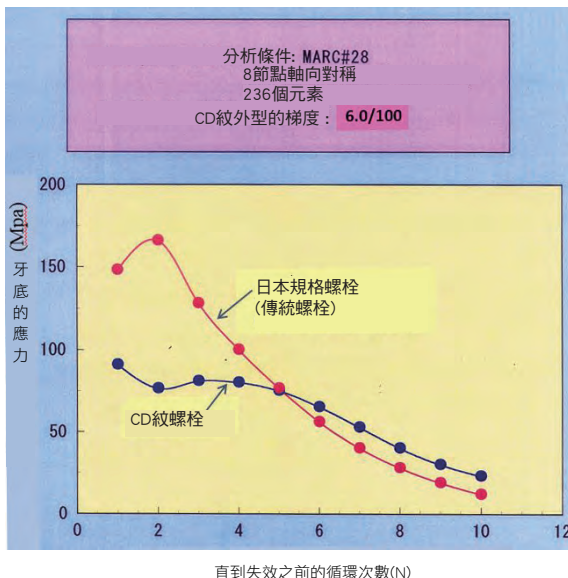


圖7.4. 牙底應力集中度的3D分析計算結果

統螺栓之間靜態張力特性的差異很小。看看圖7.1所示的CD紋螺栓外形，我們可以很直覺地理解螺紋因為剪切力或塑性變形而斷裂，而且如果拉動螺栓的話，螺栓可能很容易就從螺帽中掉出來。然而，透過表7.3和7.4可理解這種憂慮並無根據。

表7.5列出了扭力係數的測試結果。以下公式得出了扭力係數：

$$k = \frac{T}{d \cdot N \times 1000} \quad (7.1)$$

其中k是扭力係數，T是扭力（螺帽緊固力kgf-m），d是螺栓直徑的基本尺寸（mm），N是螺栓的軸向張力（在螺栓的軸向上產生的張力kgf）。

圖7.8顯示螺栓的可變形度。因此，CD紋螺栓與傳統螺栓之間的可變形度差異很小。

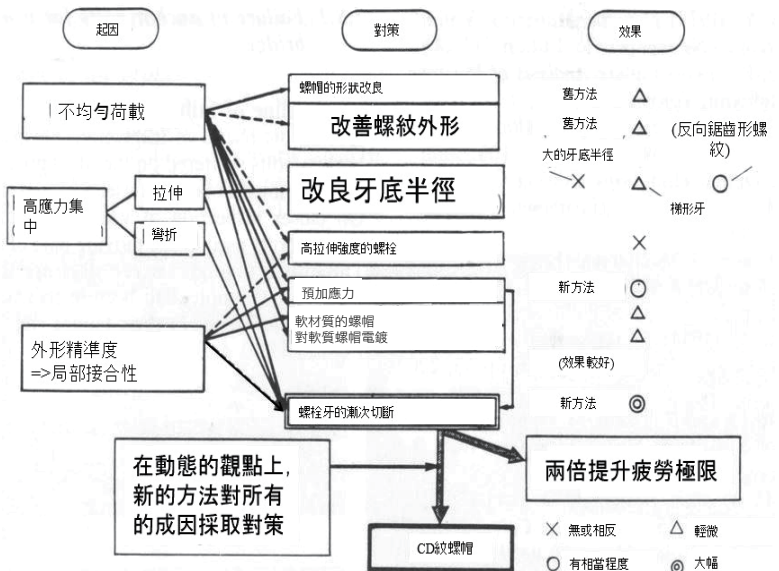


圖7.5. 主宰螺栓疲勞強度的一般因子、其對策與效果

表7.2. 傳統螺栓與CD紋螺栓的比較

	日本規格螺栓	CD紋螺栓
均勻荷載	第一條牙的荷載約為總荷載的三分之一(見表2.2)	減少到日本規格螺栓的一半(見圖6.11)
高拉伸應力集中	高度應力集中	應力集中度趨緩
高度彎折應力集中	高度應力集中	應力集中度趨緩
局部接合性	在高張力材質和大直徑的螺栓上會大幅增加	局部接合性趨緩

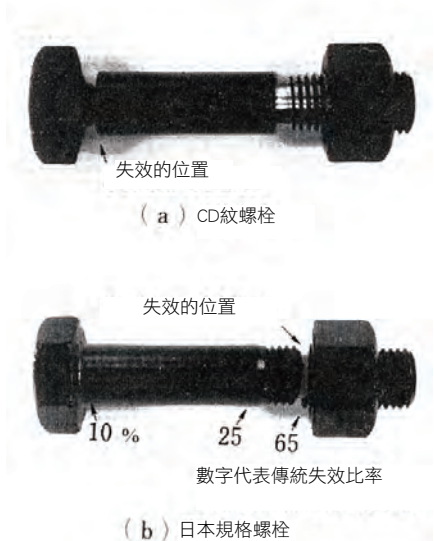


圖7.6. (a) CD紋螺栓與 (b) 日本規格螺栓的失效位置差異

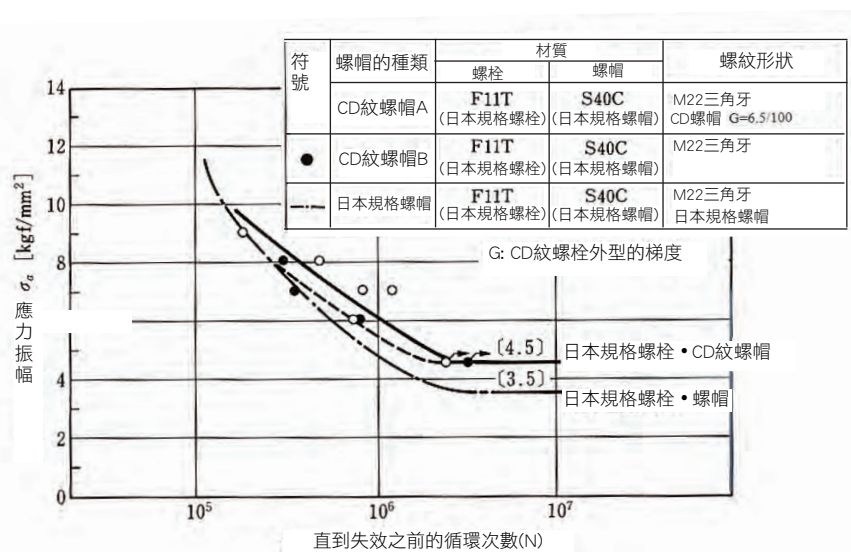


圖7.7. CD紋螺帽的應力-壽命曲線圖

圖7.9是振動導致軸向荷載鬆弛化的測試結果，雖然嚴格來說鬆弛化並不屬於一種靜態特性。因此，CD紋螺栓與傳統螺栓之間的差異很小。

由於CD紋螺栓，尤其是其螺紋部位，有較高的疲勞強度，因此斷裂的現象會發生在CD紋螺栓的頭下。另一方面，傳統螺栓的斷裂會發生在螺帽尾端。圖7.6顯示這種斷裂現象的一個事例。

總結CD紋成形的疲勞強度

圖7.1列出螺栓疲勞測試的總結結果。如該表所示，其它種螺栓的疲勞強度幾乎等同於三角牙螺栓。反之，三角牙螺栓的疲勞強度並不那麼低。我們可以說，若把可加工性納入考量，三角牙幾乎是一種理想的外形。因此，我們可能會有一種印象，認為三角牙幾乎是完美的牙形，幾乎沒有更進一步改善的空間。

比較這些結果時，CD紋螺栓顯示出壓倒性的高疲勞強度。圖7.5顯示主宰螺栓疲勞強度的一般因子、其對策與效果，包括不均勻的荷載、高應力集中度（張力和彎折力）、局部接合。只有CD紋螺栓照應到所有主宰螺栓疲勞強度的因子，因此比日本規格螺栓更優異。

表7.2列出傳統日本規格螺栓與CD紋螺栓的比較。此外，CD紋螺栓的螺紋部位疲勞強度有改善，斷裂現象就會發生在頭下，因為疲勞強度較高，而傳統螺栓的斷裂現象會發生在螺帽的尾端（見圖7.6）。此表列出控制螺栓疲勞強度的四個因素，如總結的表7.6所示，可以清楚得知CD紋螺栓絕佳改善疲勞強度的原因。

表7.3. 靜態張力屬性

公稱直徑×總長度	螺栓種類	彈性極限應力 $\sigma_{0.2}$ [kgf/mm ²]	拉伸強度 σ_B [kgf/mm ²]	El. [%]	ϕ [%]	σ_B' [kgf]
M16×55	CD紋螺栓	110	116	18	68	18000
	日本規格螺栓					18500
M22×140	CD紋螺栓	112	118	17	63	35100
	日本規格螺栓					35800

El.是伸長率； ϕ 是面積的減少率， σ_B' 含螺帽之螺栓的拉伸強度

表7.4. 螺帽的保證測試結果

公稱直徑×總長度	螺栓種類	最大荷載 [kgf]
M16×55	CD紋螺栓	18 200
	日本規格螺栓	18 300
M22×65	CD紋螺栓	36 400
	日本規格螺栓	36 200

表7.5. 高張力螺栓的扭力係數

公稱直徑×總長度	螺栓種類	扭力係數K	標準偏差 σ	規格
M16×55	CD紋螺栓	0.163	0.0046	B類 $\bar{K}=0.150\sim0.190$ ≤ 0.013
	日本規格螺栓	0.166	0.0012	
M22×65	CD紋螺栓	0.122	0.0088	A類 $\bar{K}=0.110\sim0.150$ ≤ 0.010
	日本規格螺栓	0.123	0.0045	



表7.6. 總結提升螺絲疲勞強度的新方法:

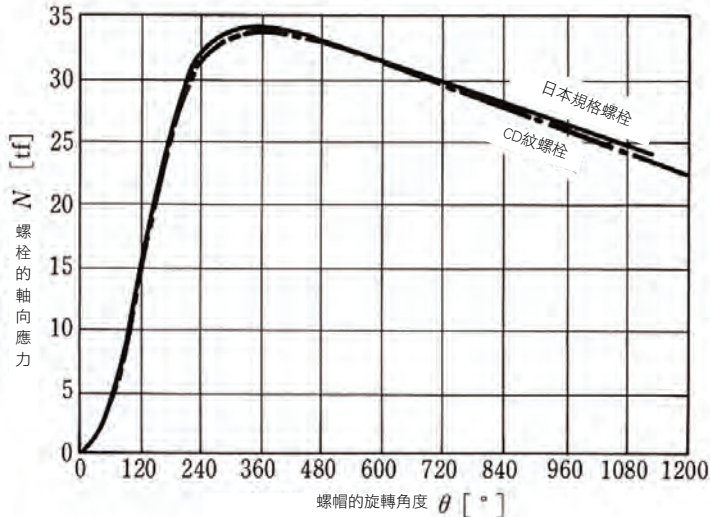


圖7.8. 螺絲的變形度

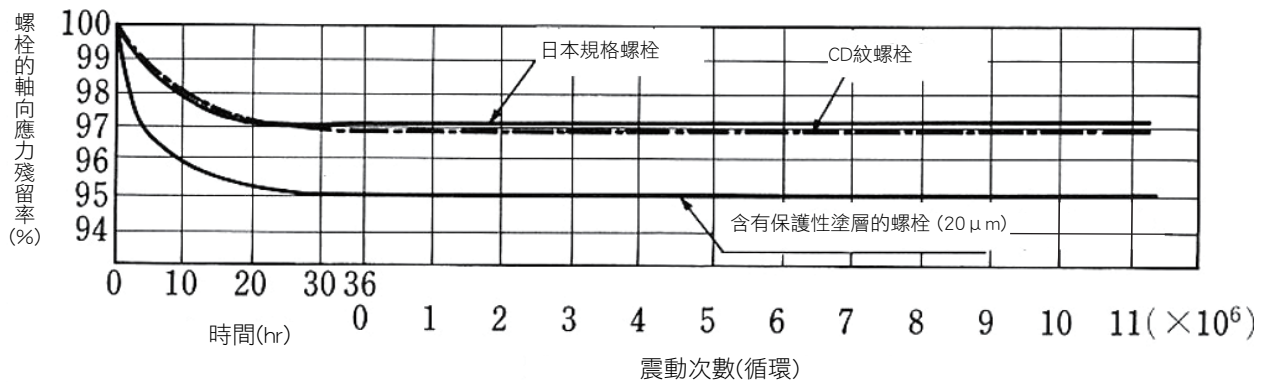


圖7.9. 因為震動而使軸向荷載趨緩的測試結果

結論

以下本文總結前述的主要結果：

CD紋螺絲外形：以一般尺寸的粗螺紋來說，CD紋的部位有足夠的斜度（例如6/100），並形成一條完整的螺紋。此外，不完整的螺紋幾乎都被CD紋去除了，而且此部位透過一個微弧形（ $R \geq 10\text{mm}$ ）連接到螺絲本體。

CD紋螺絲的疲勞強度（ 2×10^6 循環）：CD紋螺絲的疲勞強度將近是傳統螺絲的兩倍。改善的幅度很顯著是因為螺絲是一種含有切口的樣本，其荷載是透過螺絲與螺帽的接觸來傳遞。

第（2）點顯示的結果會被視為全球第一個絕佳改善疲勞強度的成就。會導致前述結果的理由是因為消除或鬆弛化所有主宰著螺絲疲勞強度的因素。CD紋成形的設計是要只透過適當的措施確保均勻的荷載分攤，以消除那些因素。

CD紋螺帽：雖然螺絲和螺帽之間耦合的位置並沒有限制，但疲勞強度只有改善30%左右，約為CD紋螺絲改善程度的三分之一或四分之一。

CD紋螺絲的靜態特性：CD紋螺絲與傳統螺絲之間的靜態張力特性（包括震動導致的軸向荷載鬆弛化）的差異很小。

參考文獻：

- S. Nishida, Failure Analysis of Machine Parts & Equipment, (1986), pp.100, 116 and 123, Nikkan Kogyo News Paper Co. Ltd, (in Japanese)
- S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, (1993), pp.84, 96 and 103, Butterworth Heinemann Co. Ltd. UK
- S. Nishida, Failure Analysis of Machines & Components, (1995), pp.100, 116 and 122, Kinkado Co. Ltd, (in Japanese)
- S. Nishida, C. Urashima, H. Tamasaki, A New Method for Fatigue Life Improvement of Screw, Fatigue Design Components, ESIS Publication 22, Elsevier Science Ltd., □1998□, pp.215.

(1) 對四大主宰螺絲疲勞強度之因素的因應對策：

1. 螺紋之間不均勻的荷載分攤 → 均勻荷載
 2. 高度拉伸應力集中 → 應力集中度趨緩
 3. 高度拉伸應力集中 → 應力集中度趨緩
 4. 局部接合性 → 局部接合性趨緩
- ：隨著接觸面的壓力增加，由於螺絲牙與螺帽的尖端接觸更容易偏離，所以螺絲與螺帽之間的接觸面積容易變大。

(2) 將疲勞侷限提升兩倍 → 外部荷載提升數倍 →

- ：透過螺絲與螺帽的接觸大幅提升疲勞強度