

螺栓失效預防對策的建議

佐賀大學名譽教授 西田新一

前言

如同我在第一集提過的，螺栓大量廣泛地應用到機械與設備，例如電氣設備、工具機、建築機械、鐵道機車車輛、鋼塔、橋樑、運輸設備等等。此外，超過9成的失效案件是因為疲勞才直接或間接造成的，而製造商需要為8成的失效案件負責。

根據上述的結果，我在第二集以疲勞的角度切入描述螺栓的失效，透過簡易的計算方法分析肉眼可見的斷裂表面。

第3和第4集介紹了環境導致的失效，以及其應對措施。環境導致的失效包括腐蝕失效、延遲斷裂和應力腐蝕開裂。此外，第5集分析了螺栓疲勞強度的相關因素，以及螺栓的傳統改善方式。

第6集和第7集介紹了提升螺栓疲勞強度的新方法。這兩集的前半部試著分析了螺栓螺帽疲勞強度諸多相關因素的影響，作為基本的分析方式。接著，下半部釐清了控制螺栓疲勞強度的四個主要因素，並提出了對抗前述四個因素的應對措施，也就是採用CD紋螺栓，以期能改善疲勞強度。

第8集介紹了CD紋螺栓的一些應用實例。

此外，第9集介紹了螺栓的鬆脫和其應對措施，這兩者都和螺栓的疲勞失效現象緊密相關。

此第10集已是最後一集，我想提出本研究從出發點一路到研究螺栓疲勞強度的歷程，並透過螺栓失效的預防措施提供通用的建議。

研究抗疲勞螺栓的出發點

研究螺栓抗疲勞特性的出發點

滾軋機才運作三年而已，其使用的巨型螺栓卻發生疲勞失效，當時的失效造成了虧損超過5億日幣。此外，過去各種研究報告和教科書不會提到有效的螺栓疲勞強度改進方式。圖10.1顯示滾軋機的示意圖，以及失效的位置(詳閱第2集)。我們在4支拉桿(一種巨型螺栓)的其中兩支監測到失效，其中一支螺栓完全斷裂，另一支是斷裂一半了。圖10.2是巨大拉桿螺栓(拉桿)表面的斷裂外觀。這支巨型螺栓是因為疲勞而斷裂，而此大型失效意外事件成為我研究螺栓的出發點。



圖10.2 拉桿螺帽的斷裂表面外觀

「抗疲勞螺栓」的發展

基於上述的螺栓失效意外，我在第6和第7集做過各種螺栓相關測試，釐清了以下項目。換句話說，雖然有諸多螺栓疲勞強度相關的因素，那些因素鮮少或僅些微會受到螺紋種類、牙底半徑、螺栓螺帽材質等等傳統因素的影響。螺栓的疲勞強度僅透過預加應力就增加了相當多，而透過和傳統因素比較後得知，疲勞強度的增加比例分別為38%和50%。

根據前述各種疲勞測試的結果，我為改善螺栓疲勞強度提出了新的做法。圖10.3是抗疲勞螺栓(CD紋螺栓)的典型形狀。

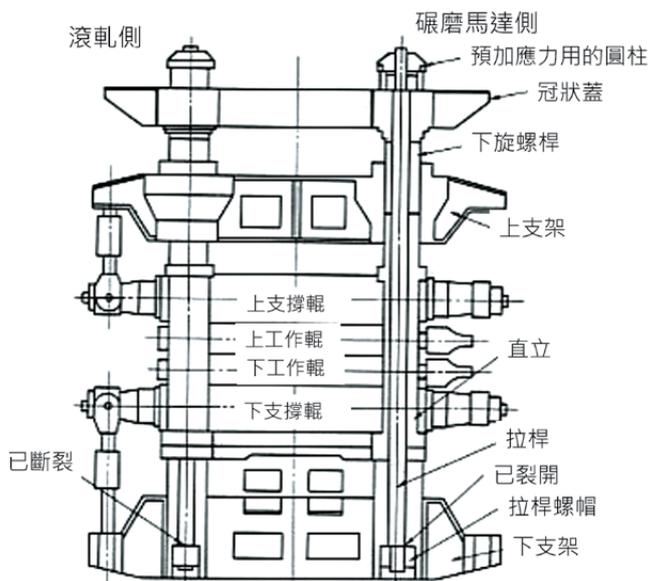


圖10.1 滾軋機和失效位置的圖解

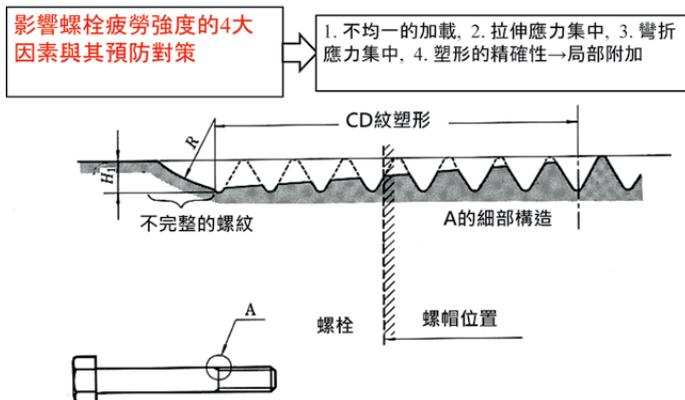


圖10.3 抗疲勞螺栓(CD紋螺栓)的典型形狀



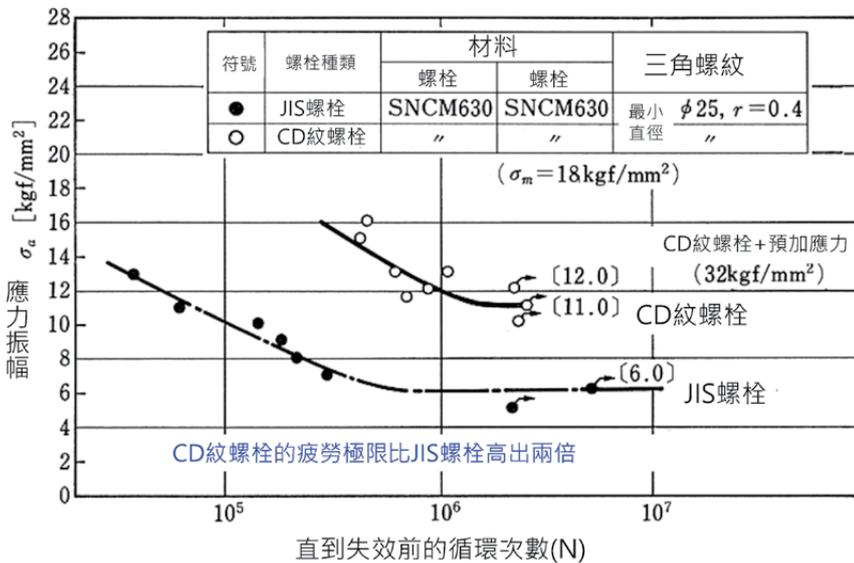


圖10.4 CD紋螺栓的應力振幅/次數曲線圖

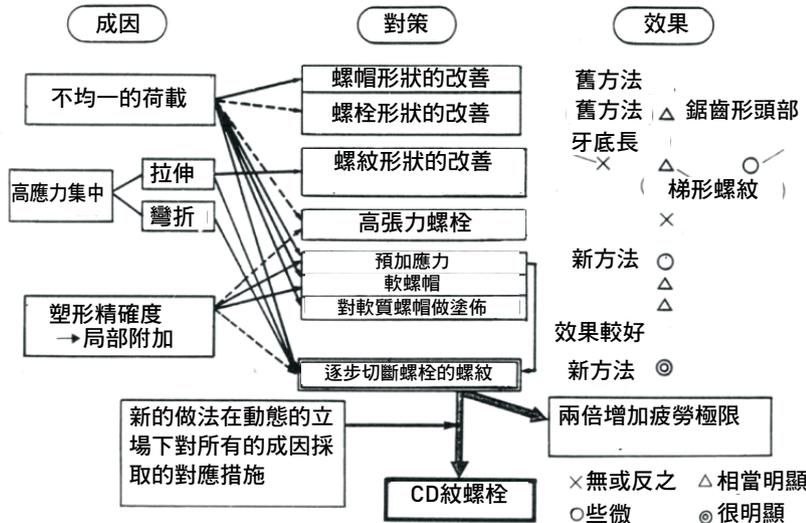
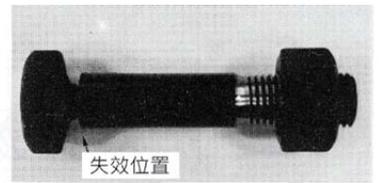


圖10.6 影響螺栓疲勞強度的4大因素、其預防對策和效果

表10.1 傳統螺栓和CD紋螺栓的比較

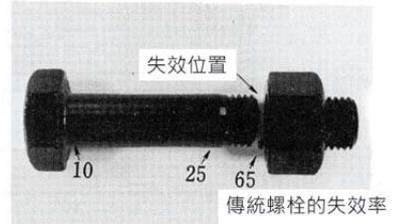
	傳統螺栓	CD紋螺栓
不均一的加載	第一條螺紋與螺帽的螺紋咬合時，荷載變成原來的三分之一	第一條螺紋的荷載減少到傳統螺栓的一半
拉伸應力集中	高應力集中	應力集中度降低
彎折應力集中	高應力集中	應力集中度降低
局部附加	在高張力材料和直徑較大的狀況下很顯著	接觸面積較小的螺柱牙與螺帽的牙咬合

螺紋部位的疲勞強度較高，使CD紋螺栓的頭部下方位置斷裂



(a) CD紋螺栓

傳統螺栓會在螺帽的尾部斷裂



(b) JIS螺栓

圖10.5 CD紋螺栓和傳統螺栓之間不同的失效位置

圖10.4是CD紋螺栓和傳統JIS標準螺栓的S-N曲線。CD紋螺栓的疲勞強度(2×10⁶循環):CD紋螺栓的疲勞強度將近是傳統螺栓的兩倍。改善的幅度很顯著是因為螺栓是一種含有切口的樣本，其荷載是透過螺柱與螺帽的接觸來傳遞。此外，圖10.5顯示CD紋螺栓和傳統JIS標準螺栓的失效發生位置不同之處。如圖所示，CD紋螺栓是從頭部下方的部位斷裂，而JIS標準螺栓是在與螺帽咬合的尾部開始斷裂。此結果證實CD紋螺栓採用的措施對抗了主宰螺栓疲勞強度的四個主要因素。此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弱化所有主宰著螺栓疲勞強度的因素(參考圖10.6和表10.1)。換句話說，CD紋形狀的設計僅透過圖10.6和表10.1所示的最佳措施，消除了那些因素。

圖10.6顯示主宰螺栓疲勞強度的主要因素、其對策與效果)。此外，表10.1列出傳統螺栓和CD紋螺栓之間有關那四個因素(參閱圖10.6)的比較。我在一開始就已釐清主宰螺栓疲勞強度的四個主要因素：包括(1)不均一的加載(2)拉伸應力集中，(3)彎折應力集中(4)塑形的精確度(局部附加)(參閱第7集)。只有CD紋螺栓對這四個因素採取了對應措施。

「螺栓抗鬆脫性能」的發展

螺栓的抗疲勞對性能表現來說很重要，而抗鬆脫螺栓在平衡被緊固物上的外力與內力方面很有用處。圖10.7顯示螺絲抗鬆脫性能的重要性。圖10.8顯示螺柱與被緊固物件的力道和收縮之間的關係。根據前述的圖，螺柱在不鬆脫的前提下，僅承受很少的外力(參閱第9集)。



雖然市面上有許多種防鬆脫扣件，它們都很昂貴、笨重，不適合用來重複使用扣件。

為了預防鬆脫之後發生疲勞斷裂，防鬆脫的特性在被緊固部位的安全性方面是很重要的。我認為一個小小的進步，對防鬆脫性能就已足夠，因為被鎖固的螺栓有了難以鬆脫的特性。所以我提出了以下三種防鬆脫措施：(1) 首先是螺栓和螺帽不同的牙距，圖10.9顯示螺栓和螺帽彼此咬合的部位放大圖。如圖所示，螺栓的牙距看似和螺帽的相同，但螺栓的牙距不一定要和螺帽的相同。pn是螺帽的牙距，pb是螺栓的牙距。在pn > pb的條件下，兩者之間的差距終究很小。因為螺栓和螺帽的咬合，軸力把螺栓的牙距變大，在兩者之間形成了防鬆脫性。此外，前述的軸力使得螺栓最危險的部位(也就是螺帽尾部的)牙底出現了壓縮應力。圖10.10是螺栓和螺帽結成一體的外觀，而兩者彼此的牙距差距很小。這個產品可以用在傳統螺栓上，也可用在螺樁上。(2) 防鬆脫的第二個措施是珠擊處理。若對螺栓或螺帽的螺紋發射適當的衝擊，一部份的螺紋會局部冷變形。此變形會促成螺栓與螺帽咬合後的防鬆脫力。圖10.11是對螺栓和螺帽做珠擊處理後的扣件外觀。(3) 防鬆脫的第三個措施是在螺帽加工過程中使螺紋傾斜。螺帽的螺紋對螺栓的頭部呈2~10度之間的傾斜。此傾斜會在螺栓和螺帽咬合時產生軸力。此外，前述的軸力使得螺栓最危險的部位(也就是螺帽尾部的)牙底出現了壓縮應力。

作為防鬆脫對策的牙距差異法、珠擊和螺帽牙傾斜法都擁有非常簡單的機制，效果表現也絕佳。

結合「抗疲勞」和「防鬆脫」的扣件：「超級螺絲」

如前所述，融合「抗疲勞」和「防鬆脫」技法的新產品備受期待。

圖10.12的例子結合了CD紋塑形和牙距差異的工法。圖10.13是結合性產品的另一個例子。此圖中螺栓和螺帽都經過了珠擊處理。

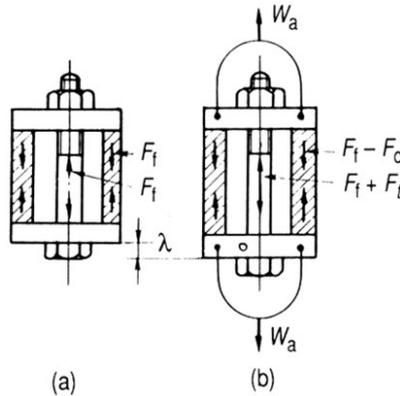


圖10.7 施加到螺紋接合件的外力與內力之間的平衡關係 (Wa為外力；Ff、Ft、Fc為內力)

此案例中的Ft和Fc的計算公式如下：代入公式

$$F_t = K_t \cdot \lambda \quad \dots (1)$$

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

從力平衡的關係中

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

(1)和(2)變成(3)

$$W_a = (K_t + K_c) \cdot \lambda$$

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

代入公式(4)變成(1)和(2)

$$F_t = \frac{K_t}{K_t + K_c} W_a \quad F_c = \frac{K_c}{K_t + K_c} W_a \quad \dots (5)$$

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

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

公式(5)的Ft和Fc可以透過內力係數φ計算如下：

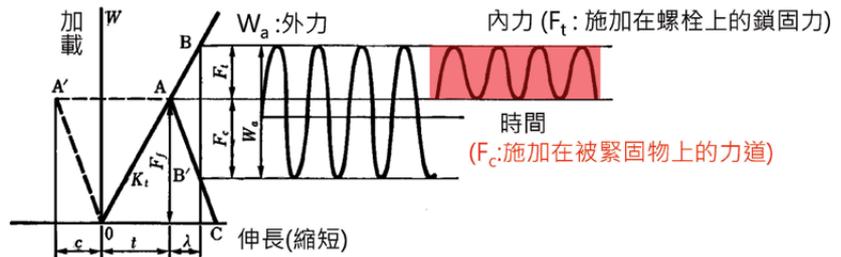
$$F_t = \phi W_a$$

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

Kt：螺栓的彈簧常數

Kc：被緊固物的彈簧常數

Ff：施加在螺栓上的鎖固力。



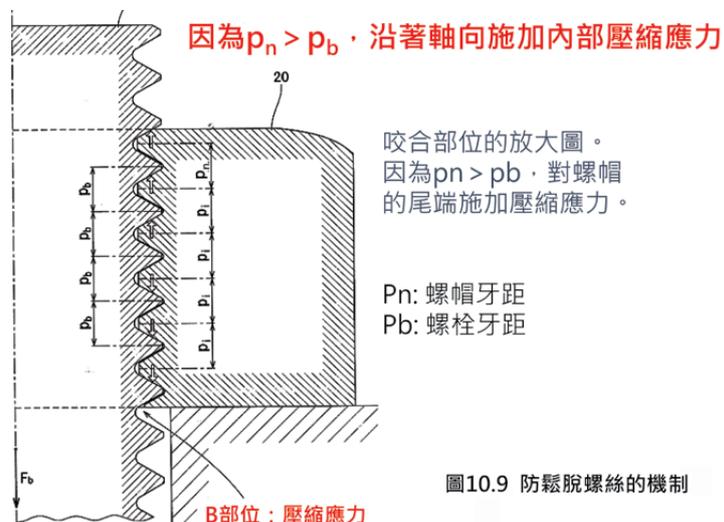
Kt：螺栓的彈簧常數，Kc：被緊固物的彈簧常數，
Wa：外力小於鎖固力，Ff：施加在螺栓上的鎖固力，
Ft：變動的外力Wa形成的內力，Fc：施加在被緊固物上的力道
變動的外力Wa形成的內力。Φ=0.2時，內力為外力的五分之一

$$F_t = \frac{K_t}{K_t + K_c} W_a \Rightarrow \text{外力的幾分之1} \dots (8)$$

施加在螺栓上的最大力道

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

圖10.8 螺栓與被緊固物件的力道和收縮之間的關係



咬合部位的放大圖。
因為pn > pb，對螺帽的尾端施加壓縮應力。

Pn: 螺帽牙距
Pb: 螺栓牙距

圖10.9 防鬆脫螺絲的機制

P_n : 螺帽牙距、 P_b : 螺栓牙距， $p_b < p_n$ 但這兩者的差距很小。軸力把螺栓的牙距變大，影響到兩者的防鬆脫性



圖10.10 防鬆脫螺帽(包含一支加裝到螺樁的螺帽)

對螺帽尾部和/或螺紋進行珠擊處理



圖10.11 珠擊處理過的防鬆脫螺絲

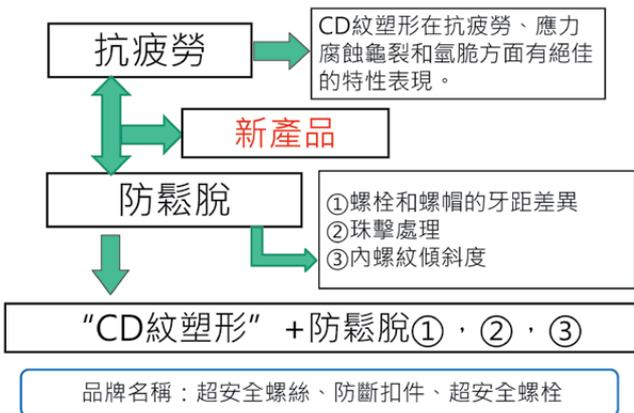
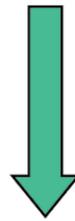


圖10.12 組合式新產品



圖10.13 CD紋塑形+防鬆脫螺帽
(抗疲勞+防鬆脫扣件)

此螺栓只是一個研發案例。一般來說，一般人認為螺栓已沒有再研發的空間。



- ① 原料(盤元)
- ② 冷/熱塑性變形或車修
- ③ 熱處理、表面處理
- ④ 鎖固作業
- ⑤ 抗疲勞、應力腐蝕龜裂、氫脆方面的性能表現

如上所示，每個面向都還有許多研發空間!

圖10.14 螺栓失效預防對策的建議

圖10.14是前述的總結。如圖所示，CD紋塑形在疲勞、應力腐蝕開裂和延遲斷裂方面都是絕佳的做法。另一方面，圖中所示的三個做法較不昂貴且適合重複使用螺絲。一個小小的應對措施，對防鬆脫性能就已足夠，因為螺絲透過內螺紋鎖固時，就發揮了鎖固的性質。

超級螺絲的品牌名稱包括：超安全螺絲、防斷扣件、超安全螺栓。

表10.12 列出了給予螺栓用戶的益處。如表所示，螺栓用戶可以選擇較低價且高安全性的方式來設計被緊固物。他們可以減少螺栓的數量和尺寸，達到輕量化和降低成本。此外，基於上述的優異性能，市場上會供應無須保修的設備。

「超級螺絲」的研發建議

眾所皆知，螺栓是最受歡迎的工業產品之一。我的連載投稿介紹了螺栓性能的研發。一般來說，一般人認為螺栓已沒有再研發的空間。

圖10.15是螺栓失效預防對策的建議。我僅提及了第1到第10集介紹的螺栓之性能(疲勞、應力腐蝕開裂、氫脆化)。若將範圍侷限在螺栓，現有的研究範圍包括了原物料(線材)、塑性變形(冷/熱變形)或加工、熱處理、表面處理、鎖固作業等等，但不包含前述的領域。因此這些領域仍有許多研發空間。說實話，人的一生必定會遇到需解決的問題，也可用智巧和練習來應對。未來所有的問題就可以獲得解決。發生問題和解決問題的過程之間會有某種程度的時間延遲。

表10.2 給予螺栓使用者的益處

- (1) 螺絲鎖固安全
- (2) 螺絲用量減少、或尺寸變小→輕量化、降成本
- (3) 無須保修



結論

有關螺栓的高度性能，可總結如下：

- (1) 疲勞直接或間接導致了90%以上的失效案件。
- (2) CD紋塑形是改善疲勞強度的最有效方式。
- (3) 此外，此方式也可用於大氣導致的脆性斷裂，例如應力腐蝕開裂和延遲斷裂(氫脆化)。
- (3) 可以透過螺栓與螺帽牙距的差異、對螺紋做珠擊處理、讓螺帽的螺紋傾斜，作為螺紋的防鬆脫方式。
- (4) 「超級螺絲」可抗疲勞，且透過結合上述第2和第3點可防鬆脫，所以可以進行研發。
- (5) 有關「超級螺絲」的研發，在各種領域當中仍發現有諸多研發的空間。■

人的一生必定會遇到需解決的問題，
應該用智巧和練習來應對。

必須使用“合理的思考”。

未來所有的問題就可以獲得解決。
發生問題和解決問題的過程之間會有某種程度的時間延遲。

我們應該對此沉靜應對。
毅力終究會克服問題。
耐心會打開所有的門，困境會使人變得有智慧。

圖10.15 應對此過程的建議

參考文獻

- (1) S. Nishida, Failure Analysis of Machine Parts & Equipment, (1986), pp.100, 116 and 123, Nikkan Kogyo News Paper Co. Ltd, (in Japanese)
- (2) S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, (1993), pp.84, 96 and 103, Butterworth Heinemann Co. Ltd. UK
- (3) S. Nishida, Failure Analysis of Machines & Components, (1995), pp.100, 116 and 122, Kinkado Co. Ltd, (in Japanese)
- (4) 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.



CHINA STEEL

中國鋼鐵

中鋼調降第三季內銷盤價 台灣棒線需求業者受惠

文 / 惠達副總編輯 張剛豪

回顧上一季，台灣中鋼針對棒線開出每噸調漲新台幣500元的盤價，當時讓不少期望農曆新年長假後力拼新訂單的業者直呼此舉將大幅削弱台灣扣件外銷競爭力。後續幾個月又因新冠疫情重創全球產業鏈的供需穩定，採購端的需求停滯甚或不斷傳出擋單或要求延遲出貨的情形。另一方面，供應端因需求驟減進行停工或減少生產導致原料庫存無法快速消化，連帶影響後續原料需求降低。

不過隨著疫情逐步趨緩，全球產線需求似乎也有緩慢回升的跡象。中鋼選擇在第三季調降內銷棒線、冷/熱軋中高碳和工具鋼和汽車料價格，每公噸調降新台幣500元，也算是為了已經快被營運成本開銷榨乾的企業帶來一場及時雨。

以下為中鋼05/22日公布2020年第三季鋼品內銷基價調整(僅列出扣件、五金相關):

項目	平均調整金額(新台幣/公噸)
棒線	-500
熱軋中高碳、工具鋼	-500
冷軋中高碳、工具鋼	-500
汽車料	-500

過去一個月，台灣因疫情控制得當，製造業仍可維持正常生產，加上近期國外許多工業產線也逐步恢復生產，例如歐洲、中國和美國許多城市逐步解封，帶動相關民生消費需求，預計在種種利多消息釋出加持下，應會為相關製造產業注入發展動能。

例如，台灣的鋼構營造、綠能風電和軌道基礎建設在政府擴大內需和前瞻基礎政策的激勵下表現優於預期，為建築扣件、風電扣件和軌道扣件業者創造一波需求商機。另外，以外銷為主的五金手工具和相關扣件業者，也可望因為歐、美、日市場緊急事態的解除，看到訂單回流的曙光。若是加上第三季中鋼調降棒線價格的優勢，應可大幅減輕台灣扣件和五金製造業者的成本壓力，間接提高台灣廠商在國際市場的競爭力。■

