

螺絲緊固失效以及其預防方式

第二集

螺栓的疲勞失效

文/西田新一

「鎖螺絲」在日常生活中實在是很常見的事，以至於螺絲的好用之處還沒被世人充分認知清楚。我們常會說「就只是一支螺絲或螺栓而已，何足為奇」，即使它們擁有很重要的功能，也較不會去注意到它們的存在。在實務上，機械的設計是從大型零件開始，從螺栓這類的小型零件結束。因此在許多案例中，螺栓和其他小零件的產製在剛開始的階段並未完整檢視其安全性，其中又包括失效的問題。簡言之，螺栓和同類的零件都是容易遭遇思慮不周的機械零件。

下述的例子指出了螺絲緊固作業的重要性。1966年2月4日，某架全日航從北海道的新千歲機場起飛的定期班機在降落至東京羽田機場的前一刻墜海。在此事件中，所有登機的133人(包括乘客和機員)都身亡。在意外之後，日本國土交通省立刻組成意外調查委員會。委員會提出了報告，其中包括委員會其中一名成員自願執行的模擬測試結果⁽¹⁾。對我們來說，完全無法得知意外的確切原因。但官方的調查報告指出，該意外最可能的主因是引擎螺栓(稱為錐形螺栓)的失效使得引擎完全失能。螺栓的失效想必是導致飛機失去平衡並墜海。

1975年7月在某家鋼廠，一台起重機在使用中的吊鉤斷裂，造成員工死亡。這起意外是導因於螺絲的疲勞失效。不管在任何情況下，螺絲都是起重機吊鉤上最關鍵的零件。針對這類的失效案件，由Y. Kitsunai撰寫的報告提供了很好的參考。⁽²⁻⁴⁾

螺栓的失效時常發生，不僅限於這些嚴重的意外⁽⁵⁻⁷⁾。我投稿的第一集當中的圖1.4說到，螺栓失效問題的重要性位居第三名，但估計，實際發生過的螺栓失效次數會佔據最多重要性。比起其他零件，螺栓更容易產製和購得。螺栓若斷裂了就直接換新的，因此通報的失效次數會遠少於實際發生的失效次數。

現代的工廠都是線上操作以增加生產效率。若要說這些工廠機械的順利運作需要仰賴一支支螺栓，也不為過。由於螺栓的失效很可能起因於失效，所以以螺栓來說，抗疲勞的設計就很重要。

在本文中，我會從疲勞的角度描述幾個螺栓失效的例子，其肉眼可見的破裂表面是透過簡易的計算方式來分析。

螺絲緊固作業的失效⁽⁵⁻⁷⁾

2.1 軋鋼機拉桿的失效

圖2.1是一台軋鋼機和機內發生失效的位置。該機的設計讓滾軋反作用力會被四根巨大的螺栓吸收(稱為連桿螺栓，螺紋外徑 $\phi 475\text{mm}$ ，本體直徑 $\phi 450 \times$ 全長13,975mm)。這四支連桿螺栓當中有兩支被偵測到失效，其中一支連桿螺栓已完全斷裂，另一支則被偵測到有裂縫，如圖2.2所示。在這兩支連桿螺栓當中，失效是發生在螺帽的邊緣或其周邊，在此位置上被滾軋的材料被咬住。連桿螺栓的材質是SCM440，SCM440的化學成分列在表2.1中。

圖2.3是破裂的表面，它的大部分面積都很容易脆裂，在牙谷附近則可看到出現階梯狀結構的平滑面。此表面是起因於疲勞破裂出現在牙谷並蔓延開來。透過掃描式電子顯微鏡觀察，可看到唯有失效時才會出現的條紋(見圖2.4)。維修後，用連接到連桿螺栓上的應變力量規來測量應力，結果得到了最大重複應力幅度 $\sigma_{\text{amax}}=1.23 \text{ kgf/mm}^2$ 以及平均應力 $\sigma_{\text{m}}=17.7 \text{ kgf/mm}^2$ 。假設內力係數 ϕ 約為0.2⁽⁸⁾，外力幅度 F_{amax} 則估計會在 6.2 kgf/mm^2 左右。當材料的張力強度 σ_{B} 為80.7，疲勞極限就會降到實際張力強度的五十到六十分之一。晚一點我會再解釋大直徑螺栓的疲勞強度會急遽降低的原因。

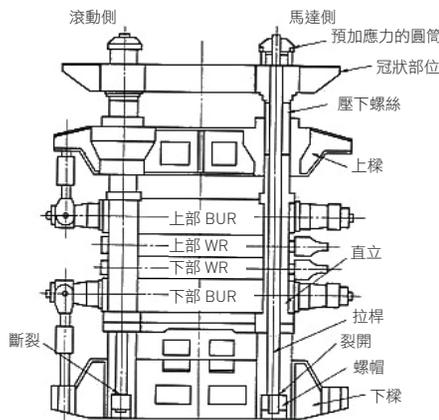


圖2.1 軋鋼機結構圖以及失效的位置

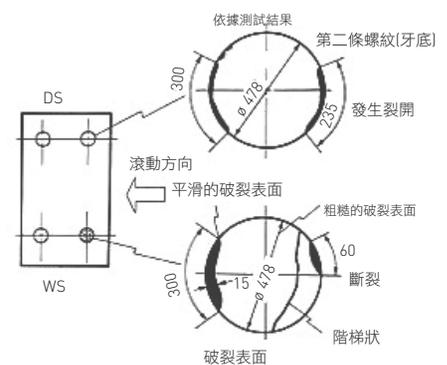


圖2.2 失效的結構圖



圖2.3 拉桿的破裂表面 (b圖: 內部發生疲勞開裂)

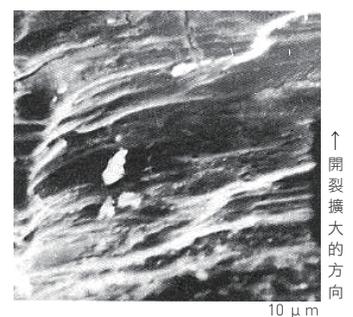


圖2.4 SEM測試觀察到的破裂表面

此外，圖2.5顯示公稱直徑和螺栓的張力疲勞極限之間的關係。這張圖的存在是為了讓螺栓的設計工程師方便參照。如圖所示，橫軸是螺栓的公稱直徑，縱軸是螺栓的張力疲勞極限（標示為應力幅度），可容易和材料的一般疲勞強度作比較。圖中的原始數據是在部分脈動的應力作用之下取得的。在圖2.5中明顯可見，與一般的疲勞特性相較之下，尺寸的影響是很明顯的，其原因有待我在未來的投稿中說明。有些設計師若有注意到螺栓有如此低的疲勞強度，就可能遲疑是否要把螺栓接合到結構物中。一般來說，以螺栓接合的結構物可承受的螺栓疲勞強度施加之應力可達數倍。

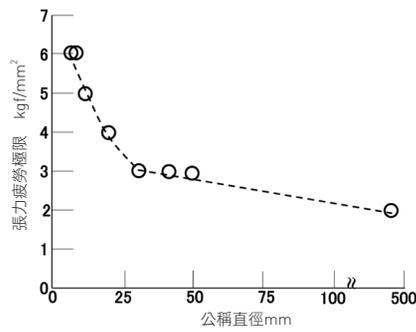


圖2.5 螺栓公稱直徑和張力疲勞極限之間的關係

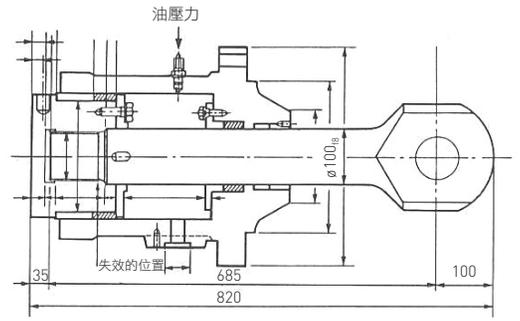


圖2.6 圓筒狀棒體的結構圖 (S50C調質鋼)

2.2 活塞桿的失效

某台油壓鐵粗機的活塞桿之螺紋部位發生了破裂，如圖2.6所示。圖2.7顯示此桿肉眼可見的破裂表面。破裂的現象發生在與內螺紋耦合的尾端。此桿的材料是S50C(調質鋼)。從破裂表面可以明顯看到，因疲勞而破裂的表面占了非常高的比例。因此估計反復應力的幅度 σ_a 接近螺紋的疲勞極限。經過測量，會造成失效的周期循環次數 N_f 是落在 25×10^4 個循環。以調質鋼來說，在SEM實驗之下，不一定會在破裂的表面上觀察到條狀的擦痕。因此以下我會描述疲勞強度分析(疲勞曲線圖)的其中一例。

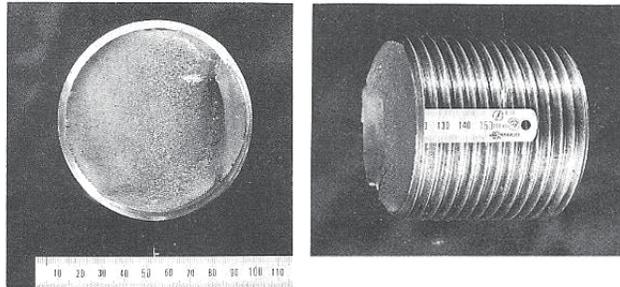


圖2.7 鐵粗機圓筒狀棒體的失效

首先要估計目前使用中的螺絲的疲勞極限。以M90螺絲來說，其螺紋的谷底直徑是 $\phi 83.5$ mm。由於交替施加0-57.4 tf的荷載P(也就是油壓力形成之荷載的恆定振幅)，所以公稱應力幅度 σ_a 的計算如下：

$$\sigma_a = 57.4 \times 10^3 / 2A = 5.24 \text{ kgf/mm}^2 \dots (2.1)$$

其中的A是螺紋谷底的面積。

若把尺寸的影響納入考量，則估計螺絲的疲勞極限會比標準的M24螺絲低了20%左右。若將透過公式(2.1)算出的數值轉換成適用於M24螺絲的數值，那麼應力振幅就會是：

$$\sigma_{a1} = 5.24 / 0.80 = 6.55 \text{ kgf/mm}^2 \dots (2.2)$$

圖2.8是一支正常螺絲的疲勞曲線。若透過公式(2.2)算出應力的層級，那麼會造成失效的循環次數 N 就會是 40×10^4 個循環。此次數的順序會同於實際量測到的失效循環次數，也就是 $N_f = 40 \times 10^4$ 個週期。

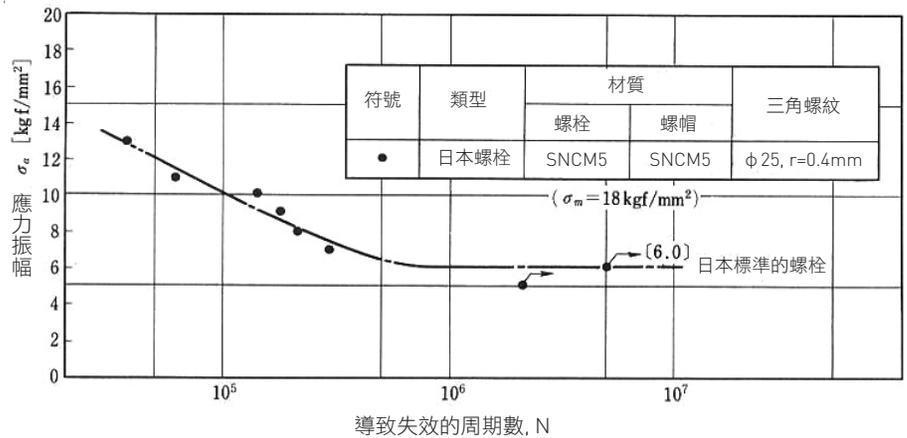


圖2.8 正常螺絲的疲勞曲線

2.3 研磨機的固定螺絲失效

有時候反復應力不會被施加到螺絲上，亦或者，有時在設計的階段中很難預測將對螺絲施加多少應力。以下我將描述在這種情況下螺絲失效的其中一例。圖2.9是一台研磨機的構造圖，此機的很多部位都有用到螺絲。最有可能破裂的是固定住馬達的螺絲(長度M20×160mm的6支螺絲)。馬達的下方有一個研磨輪(直流電110千瓦)。此馬達透過4個皮條與研磨輪相連，馬達與研磨輪一同被固定一個滑桿上，此滑桿的設計可以上下滑動。鋼胚就放在研磨輪的下方，研磨輪會研磨鋼胚一部份的表面。

顯然地，小量的反復荷載就施加在用來固定住馬達的螺絲上。但在實務上，研磨輪碰觸到鋼胚時產生的衝擊力會透過V型皮條被傳遞到馬達，因此波動的荷載會被施加到螺絲上。此外，除了波動的荷載之外，馬達、V型皮條和研磨輪周轉時的震也會被施加到螺絲上。

圖2.10是研磨機專用固定螺絲失效的其中一例，它幾乎整個表面都是疲勞破裂的痕跡。從以上的描述以及高比例的疲勞斷裂表面來推斷，估計反復應力的等級接近螺絲的疲勞極限。

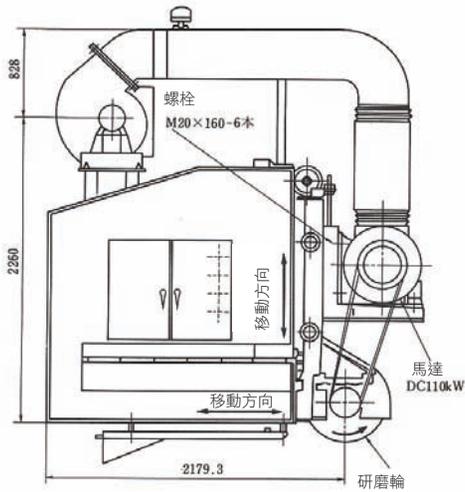


圖2.9 研磨機的结构圖(側面)

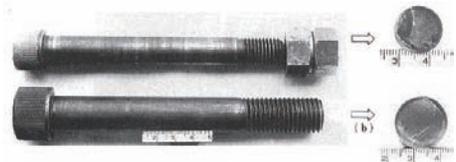


圖2.10 斷裂的研磨機專用螺絲

當螺絲失效的狀況開始增加，專用的固定螺絲就會被拉伸強度 σ_B 更高(80 kgf/mm²)的新螺絲取代，但新螺絲的疲勞壽命只有接近舊螺絲的一半。因此該螺絲的材料會改成軟鋼(SS400)作為一種激烈的措施。如此該螺絲的疲勞壽命與起初的舊螺絲相較之下會延長約50%。

如前所述，即使在設計時預估只會產生少量反復應力的螺絲也可能會因為疲勞而斷裂。依據不同的個案，強度低的螺絲可能壽命較長。由於這些重點是與一般的常識相逆，所以我會在未來的投稿中多加詳述。

2.4 壓縮機活塞桿的失效

若某螺絲斷了一條螺紋，破裂的現象可會相繼擴張到其他部位。其中一個典型的例子是壓縮機活塞桿的失效。此壓縮機屬於兩用型(約2000千瓦)。由於活塞桿上某一側的螺絲(M90)斷裂了，曲軸就失去了平衡，使得平衡重量的剪力銷、夾緊式螺絲、銜接棒和壓縮機的邊條依序失效。

圖2.11是壓縮機往復式活塞桿，這裡秀出的是位於外部且沒有斷裂的活塞桿。從外觀的顏色來看，此桿沒有出現疲勞造成的裂縫。圖2.12是此桿的破裂表面。圖2.12(c)是圖2.12(b)所示之活塞桿的縱向截面。此桿的失效現象是從螺帽的尾部開始發生的。由於

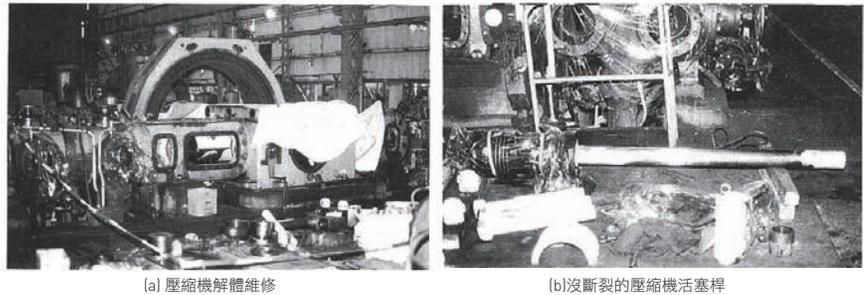


圖2.11 壓縮機活塞桿外觀

這是一支往復式活塞桿，它的破裂表面彼此嚴重撞擊且無法用來觀測。我們在從螺帽耦合處的尾端數來第12條螺紋上看到了一挑頗長的裂縫(見圖2.12(c))。可以說此桿的螺紋設計不太合理。它的材質是SNM625(調質鋼，拉伸強度 $\sigma_B=94.4$ kgf/mm²)。活塞桿斷裂時，要完全修復則會需要花費五個月的時間。

2.5 大型鑽床上的鑿子固定專用螺絲發生失效

以下將舉例描述土木建築界的機械使用螺絲發生失效的狀況。圖2.13是一台大型的鑽床，它用來固定鑿子的螺絲斷裂了。圖2.13(b)是螺絲的安置狀態(M50，長度1,200 mm)。圖2.14是螺絲的外觀和破裂的表面。四支螺絲為一組。鑿子的往復動作以及透過鑿子傳輸的衝擊力道會施加在螺絲上。可使用的時間隨著使用方式而有所不同，這四支螺絲在使用後的六個月到一年內斷裂。

圖2.14顯示破裂的表面上出現疲勞現象常伴隨的貝殼狀紋路。疲勞破裂的表面佔比超過80%，平滑且幾乎沒有出現階梯狀結構。因此可以推斷反復應力已經逼近疲勞極限。

2.6 棒磨碎石機的固定專用螺絲失效

棒磨碎石機是由水平安裝的圓筒組成，其內部安裝的棒體幾乎與碎石機等長。在圓筒沿著軸線做旋轉的同時，棒體會被舉起然後往下撞擊石材。高度抗

圖2.12 壓縮機活塞桿破裂表面的外觀

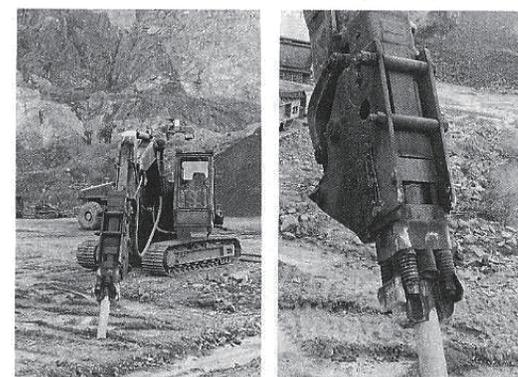
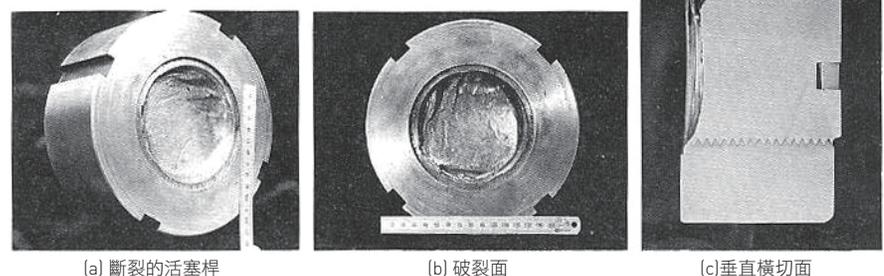


圖2.13 鑽床上的鑿子固定專用螺絲的外觀



圖2.14 鑽床上的鑿子固定專用螺絲

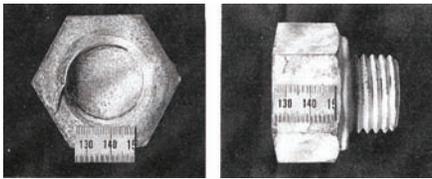


圖 2.15 棒磨碎石機專用螺栓的破裂表面

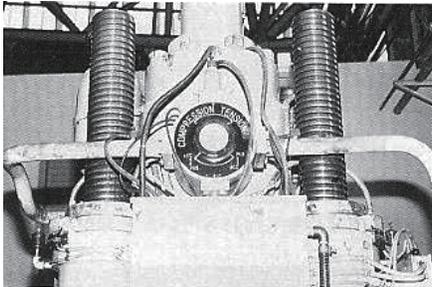


圖 2.16 用疲勞測試機的油壓致動器

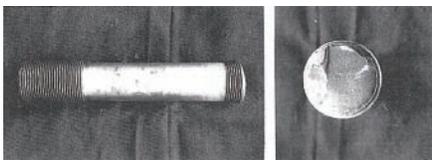


圖 2.17 通用疲勞測試機的固定專用螺栓(螺紋:W1•1/4)

磨耗的鋼板會透過螺栓被接合到碎石機的內壁。用來固定住水泥碎石機之襯墊的螺栓(M40, 長度120mm)斷裂。棒體撞擊產生的衝擊力傳遞到襯墊, 使得固定住襯墊的螺栓失效。

圖 2.15 是襯墊專用螺栓的破裂表面, 它是一種典型的疲勞破裂表面, 其佔比逼近100%。因此推斷疲勞導致的裂痕是在某一段距離之外產生並擴大, 且荷載轉移到其他螺栓上而使得外力降低了。在此情況下, 疲勞破裂會接續從一支螺栓擴散到另一支。

該螺栓的材質是SCM435(調質鋼, 拉伸強度 $\sigma_B=100 \text{ kgf/mm}^2$)。失效的現象發生在螺帽的尾部。由於石灰粉附著在螺栓上, 所以整支螺栓顏色偏白。

2.7 通用疲勞測試機的固定專用螺栓失效

國外有句諺語說鞋匠的老婆都是赤腳走路。通用測試機是用來評估測試標本的疲勞特性。所以, 測試機會接收重複施加在標本上之荷載的反作用力。雖然特適用的標本會一個接一個被換掉, 但測試機本身不會換。測試機使用了很長一段時間時, 機上零件的失效會時常發生。

圖 2.16 是一台通用疲勞測試機的油壓致動器。制動器內有八支螺栓(雙頭螺栓, W1-1/4)固定住頂蓋和底蓋。由於偵測到底蓋有漏油, 所以對底蓋的螺栓做

檢查, 並偵測到八支螺栓中有三支失效。圖 2.17 是固定制動器蓋子之螺栓的破裂表面, 整個表面都明顯可見看到疲勞破裂的表面。失效的現象發生在與內螺紋耦合處的尾端。該螺栓的材質是SCM435(調質鋼)。

2.8 疲勞測試機的錨栓失效

圖 2.18 是一台通用疲勞測試機上某一支錨栓的破裂表面, 該機與圖 2.16 所示的機種相同。錨栓失效的現象是發生在螺帽的尾部。該錨栓的材質是SS400。失效的現象是發生在四支錨栓當中的其中一支(24M)上。這種疲勞測試機的建構讓外力和反作用力在機體內可以被接收到。以臺式電子計算機的計算來看, 外力根本沒有被施加到錨栓上。此測試機已經使用了近12年, 所以錨栓的失效的起因可能是油壓致動器鬆脫時產生的機體震動。如前述, 機械隨著時間衰老就是錨栓失效的其中一個原因。

2.9 反向彎折測試專用的夾具失效

如前面的案例 2.7 所述, 即使在設計的階段有緊密地檢驗疲勞壽命, 元件的疲勞失效仍可能會發生。圖 2.19 和圖 2.20 分別是反向彎折測試專用的夾具以及其失效。其螺栓長度M85×750mm(牙底直徑 $\phi 78.5\text{mm}$)。失效的現象發生在內螺紋的尾部。夾具的材質是SCM435(調質鋼)。

由於三點彎折測試當中的反作用力是施加在螺栓上, 所以推斷拉伸應力和彎折應力都施加在螺紋上。這從圖 2.20(d) 的破裂表面就能看出來。失效的現象發生在三角螺紋上。失效之所以沒出現在方形螺紋(圖 2.20(a) 右側, 牙底直徑 $\phi 72.4\text{mm}$)上, 是因為其與螺帽耦合之處會為了調整而有規律間隔的變動, 雖然這種方式不常見。該螺栓的破裂表面未出現貝殼狀紋路。這顯示測試是以接近穩定的應力振幅來進行。

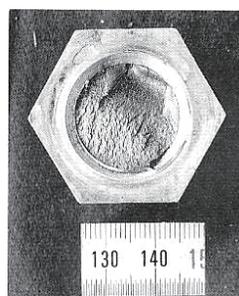


圖 2.18 疲勞測試機專用錨栓的破裂表面

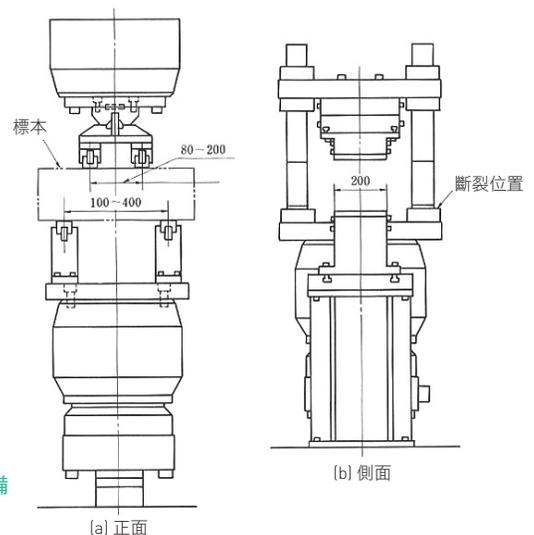


圖 2.19 彎折測試的專用設備

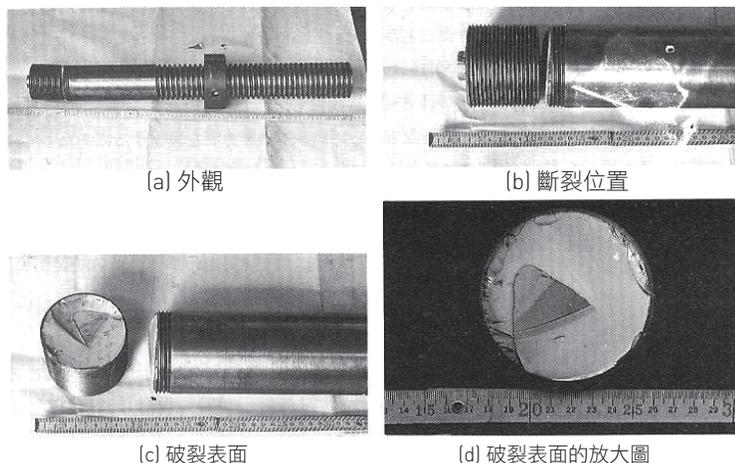


圖 2.20 彎折測試設備的斷裂位置

2.10 鐵軌接合板專用螺栓的失效

在鐵軌的接合處會有幾毫米的間隙讓軌道可以熱漲冷縮。接合板是用來強化軌道的接合處，會被4或6支軌道螺栓(M24，長度約180mm)夾住。輪子在軌道上滾時，衝擊力會施加在軌道的接合處，所以會在螺栓內產生張力和剪切力。圖2.21是軌道螺栓(材

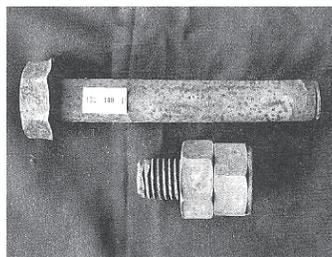


圖2.21 鐵軌接合板專用螺栓(失效現象發生在不完整的螺紋上)

質SS400)的失效案例。失效的現象是在不完整的螺紋上發生，屬於疲勞失效。一般來說，螺栓的失效發生在三個位置，也就是與內螺紋耦合處的尾端、不完整的螺紋上，以及頭部下方的圓角。螺栓在這三處斷裂的機率分別是65%、20%和15%⁽⁵⁻⁷⁾。但以夾緊式螺栓的疲勞失效來說，八九成的失效發生在與內螺紋耦合處的尾端，除非有採用特殊手段強化疲勞強度。失效之所以會發生在軌道螺栓的不完整螺紋上，可能是因為單軸張力和剪切力都施加到了螺栓上。

總結緊固用螺絲的疲勞失效

緊固用螺絲是機械很重要的一環，但大眾不完全了解其重要性，而是把它認知為一種簡單的消費零件。實務上，單一支螺栓的失效依其用途可能會有巨大的影響。前面幾個章節描述了螺栓的失效案例。應注意緊固用螺絲的機能和安全性設計之重要。茲總結如下：

(1) 在螺栓公稱直徑與螺絲的張力疲勞極限(標示為應力幅度)的關係中，與一般的疲勞特性相較之下，尺寸的影響是很明顯的，其原因有待我在未來的投稿中說明。

(2) 即使只有施加少量的反復荷載在螺栓上，螺栓仍可能斷裂，因為螺栓會因為鬆脫或機械零件的壽命老化而隨著震動的來源發生震動。

(3) 避免緊固用螺絲鬆脫是很重要的。採用(尤其是內螺紋)軟材質的緊固用螺絲，或是規律變換與內螺紋耦合的位置，都是延長疲勞壽命的有效方式。

參考文獻：

- (1) M. Yamana, Last 30 Seconds-Investigation and Study of All Nippon Airways' Plane Crash off Haneda, [1972], pp.144, Asahi Newspaper Co. Ltd., Tokyo
- (2) Y. Kitunai, Safety Engineering, Vol. 9, [1970], pp.249, Tokyo
- (3) Y. Kitunai, Metallic Materials, Vol.13, [1973], pp.32, Nikkan Kogyo News Paper Co. Ltd., Tokyo
- (4) Y. Kitunai, Safety Engineering, Vol.13, [1974], pp.235, Tokyo
- (5) S. Nishida, Failure Analysis of Machine Parts & Equipment, [1993], pp.85 and 122, Nikkan Kogyo News Paper Co. Ltd, (in Japanese)
- (6) S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, [1993], pp.71 and 103, Butterworth Heinemann Co. Ltd. UK
- (7) S. Nishida, Failure Analysis of Machines & Components, [1995], pp.85 and 122, Kinkado Co. Ltd, (in Japanese)
- (8) A. Yamamoto, Theory and Calculation of Screw Fastening, [1975], pp.68 and 102, Yokendo, Tokyo.

測試實驗室選擇須知

有時我們會需要把樣品帶去給測試單位檢驗產品的力學特性，或是做產品的失效分析。有一些測試單位可能是一般的力學測試實驗室或冶金測試單位。即使實驗人員了解鋼製產品的測試方法，也不一定代表他們會知道如何妥當地測試扣件，或者會知道扣件的產製方式。

目前市場上已有許多化學實驗室和冶金測試實驗室將業務擴展到扣件測試的領域，只是這並非他們主攻的專業。同樣地，有很多新出來的測試實驗室正要開始擴展到扣件領域。

為什麼這個現象值得注意？

就是因為一般的測試實驗室可能認不出問題的根源或用錯了測試的程序。鋼鐵的ASTM A370標準一直是最首屈一指的金屬測試標準。當然在A370出現的一百多年前，ASTM首次出版的鋼鐵測試程序與規格也有記載過比較不精細的鋼鐵測試方法。

A370的記載是出現在1953年，當時由於沒有全尺寸測試的相關規格，所以樣品必須被加工成測試用的

文/ Guy Avellon

圓棒。自那時起，實驗室就把F606/606M測試程序的摘要納入書中的附件A3.2。ASTM F606/606M在1979年首度出版，是專為扣件而編寫的標準。

以下列舉幾項真實案例，顯示為何對扣件產製和程序的知識匱乏，會使得扣件失效的真正原因被忽略。

案例1：

下圖(圖1)展示一支頭部失效的#10-24內六角螺絲。此案例中有出現幾支失效的內六角螺絲，都位在類似的位置上。起初實驗室基於該產品已經被電鍍過，所以評估起因是氫脆化，判斷該產品的硬度超過38Rc且組裝後馬上就失效了。



圖1