



作者簡介：

工學博士西田新一是日本佐賀大學名譽教授兼同步輻射光源研究中心的特約研究員。

螺絲緊固的失效問題 以及其預防方式

~第一集：針對失效所做的統計分析~

1.1. 前言

一般來說，「螺絲」自古以來就被視為「五大最重要的簡易機械裝置：槓桿、輪、軸、滑車、楔子」當中的其一。所有的機械性零件可以分解成這五種元素。廣義的螺絲緊固作業不僅包括了結合螺栓與螺帽，還包括要被緊固的元件，而可作為代表的扣件自然也是一種螺栓與螺帽的結合。一般來說，螺絲的緊固作業在狹義上會有以下的優點：

- (1) 易於組裝和拆卸。
- (2) 可以一邊做必要的調整，一邊設置它們；或者使用簡易的緊固工具來精準地設置它們。
- (3) 可以善用楔子效應，所以即使是非常厚的元件也可以緊緊地緊固住。

尤其因為近期對全球環境保護的要求，從「回收」和「再利用」的觀點來看，上列的第2項優勢會獲得重視。此外，與其他零件相較之下，被緊固的部位會比較容易斷裂，基於材料強度理論的理論分析，設計師一直以來都被要求要準備更安全的被緊固元件。

基於這些優勢，舉例來說，一台車會用到約一千支緊固專用的螺絲(如圖 1.1⁽¹⁾)。此外，一台大型噴射客機上裝了大概150萬支螺絲⁽²⁾。以我們的隨身物來舉例的話，一隻眼鏡就會用到6種編號的螺絲。種類眾多的機械設備所使用螺栓的數量也很驚人，這些機械設備包括電動設備、機床、建築機械、鐵道機車車輛、鋼塔、橋樑、運輸設備等等。

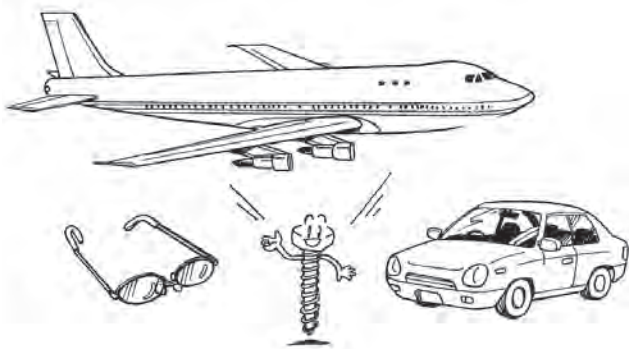


圖.1.1 螺絲應用在多種的產品上

1.2. 從發現問題到解決問題

另一方面，螺絲的緊固作業非常廣泛應用在日常生活中，以至於大眾並未完全體認到螺絲的用處之多。我們太傾向於輕忽螺絲的重要性，常會說「就只是一支螺絲、一支螺帽而已嘛」，而未注意到螺絲所具備的重要功能⁽³⁾。

因此，在開始談文章標題「螺絲緊固的失效問題以及其預防方式」之前，筆者會試著解說以下圖1.2所示的程序。換句話說，以下的程序會提供最合理的方式來達成目標。首先，在調查主要的問題來源之前，最重要的就是確認真實的狀況是什麼。因此，筆者試著分析問題的發生，以及設備的故障⁽⁴⁾、⁽⁶⁾，然後就能連結到螺絲失效的分類，以及原因的調查。針對原因的調查，筆者會導入能解決螺絲失效的對策。透過實踐預防螺絲失效的新觀念與實證來解決失效的問題。

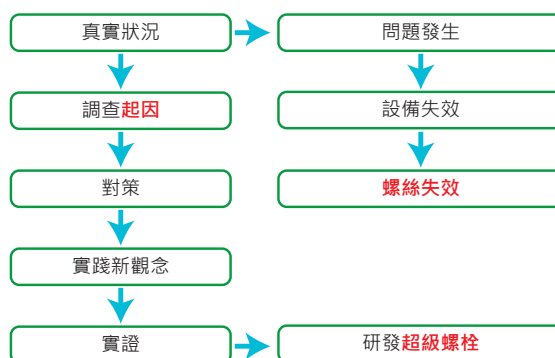


圖.1.2 從發現問題到解決問題

1.3. 失效所帶來的損失

失效所造成的損失如圖1.3⁽⁴⁾、⁽⁶⁾所示。如同我晚一點會詳述的，85~90%以上的失效通常是直接或間接導因於螺絲的「疲勞」。失效所帶來的損失可區分為直接與間接損失。前者包括修復作業的成本，以及失效、意外補償等等預防作業的成本。理想中的狀態就是同時執行修復作業和預防失效的作業。但以製造廠的情況來說，它們把保修作業設為第一優先，常會等到晚一點在排定的停機時段才會執行預防失效的作業，因為一旦停止了產線，就會減少產量。當失效的發生導致工人傷亡或鄰近人員受傷，就會產生意外賠償的問題。此外，這種失效可能會招致有關單位前來現場勘查，以及工廠安全管理者的責任問題。為避免此事發生，應該要每天花點心思預防失效並做保修。間接的損失包括了產量減少以及公

司形象受損。我們常耳聞，作業員很怕遇到重大意外發生後沒多久就馬上要增加工廠的產出量。雖然業界過去已很重視直接的損失，但最近也開始審慎考量有關企業的形象受損，阻礙了一流工人招募的問題。

在極端的狀況下，一支螺栓在現代電腦化的產製體系中斷裂的話，可能會導致產線中斷⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。因此應該盡可能詳查更細微的失效問題，而不是依據雜亂無章的政策去做維修。此外有跡象顯示，已有人不僅預防類似的失效再發生，還公開了調查的結果，對社會做出更大的貢獻。若失效的調查是由設計師和用戶來做，就能更徹底釐清失效的起因，也能容易採取理想的措施。

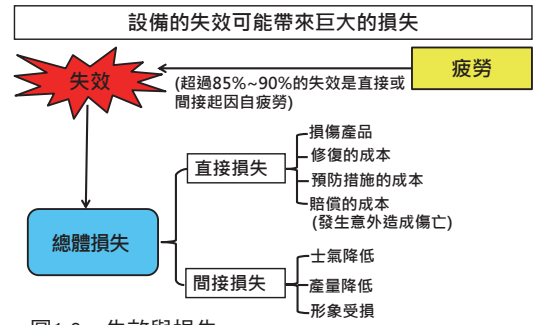


圖 1.3 失效與損失

1.4 針對失效所做的統計分析

1.4.1 依據失效的元件所訂的失效分類

筆者和合作的研究員調查了機械和機械零件的失效，其細節如圖 1.4⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾所示。從上圖中可以明顯觀察到，**焊接件的失效次數最多**，而焊接件之外的失效次數則依以下順序遞減：軸桿、螺栓、滑輪、滾輪、齒輪、鋼索...。之所以可觀察到焊接件的失效次數最多，可能是因為幾乎所有的組裝件都是焊接件，焊接件的絕對數量很大，且焊接件的強度一般會比基礎金屬還要低。之所以軸桿的失效次數僅次於焊接件且位居第二，可能是因為軸桿是動力傳輸的重要元件，且替代件無法輕易或迅速採購到。

螺栓排名第三，即使如此還是有人可能會認為螺栓其實是所有機械零件中失效次數最多的。但多數壞掉的螺栓會在當場被適度地汰換掉，因為螺栓斷裂後可以馬上再採購，或是可以很輕易地再生產出來，除非遇到特殊情況。滑輪、滾輪、齒輪和鋼索就跟軸桿一樣，都是傳輸荷載時不可或缺的元件，而且都是典型的機械零件。

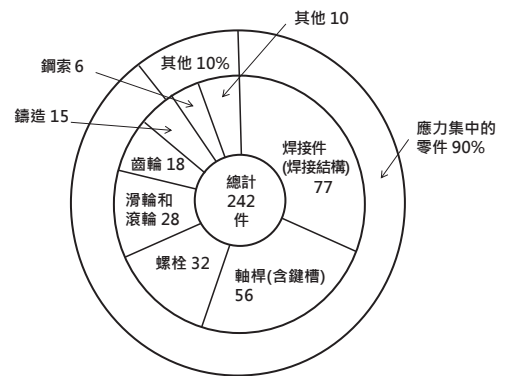


圖 1.4 依失效的元件所做的失效分類

1.4.2 依起因(cause)或影響因子(factor)所做的失效分類⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾

依據圖 1.4，這些失效依照其成因所做的歸類如圖 1.5 所示。圖 1.5 明顯可看到，約有 80% 失效是因疲勞而起(包括單純的疲勞、腐蝕造成的疲勞、熱疲勞等等)。其他的成因則包括靜態斷裂(13%)、應力腐蝕開裂(5%)、腐蝕、爆裂等等(3%)。靜態斷裂的比例將仍會有討論的空間，因為在電腦和計算力學的幫助之下，設計的工藝每年都變得更高水準且更精準。此比例幾乎全數都該歸類為「間接疲勞」。

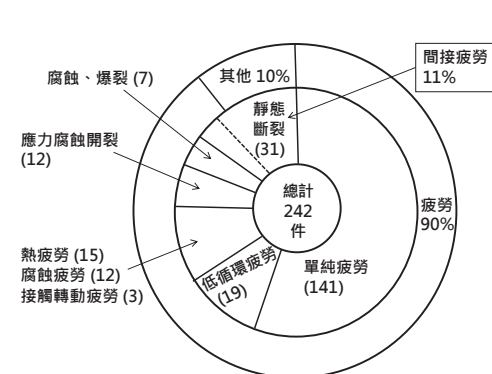


圖 1.5 依起因所做的失效分類

以圖 1.6 所示的間接疲勞為例，法蘭是由 10 支承受循環荷載的螺栓緊固住。起初，有 3 支螺栓因疲勞而斷裂。然後在第二階段，有 4 支螺栓因為疲勞而斷裂。緊接著第二階段之後，剩下的 3 支螺栓也馬上斷裂了。前述的第一和第二階段都是因「直接疲勞」而起。另一方面，剩下的 3 支螺栓是因「靜態斷裂」而起，經目測得知是因為承受過量的荷載。如果前面的第一階段和第二階段的疲勞斷裂沒有實際發生，那麼靜態斷裂就不會發生，此靜態斷裂就可稱為「間接疲勞」。直接疲勞和間接疲勞的比例在此案例中會變成 100%。因此，直接和間接疲勞的比例在圖 1.6 中就佔了 100%。把焦點放在圖 1.5 上，幾乎所有的靜態斷裂都應該被歸類為「間接疲勞」。換句話說，超過 90% 的失效案例是直接或間接起因於「疲勞」。

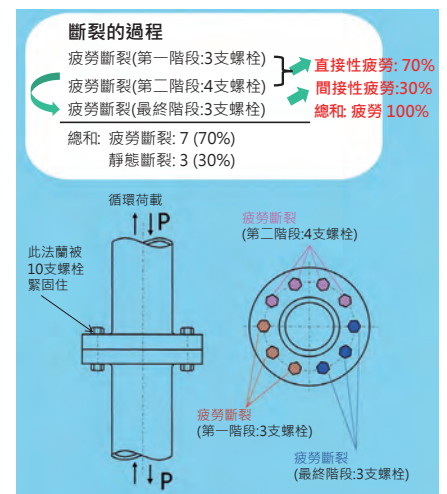


圖 1.6 直接與間接疲勞的分類

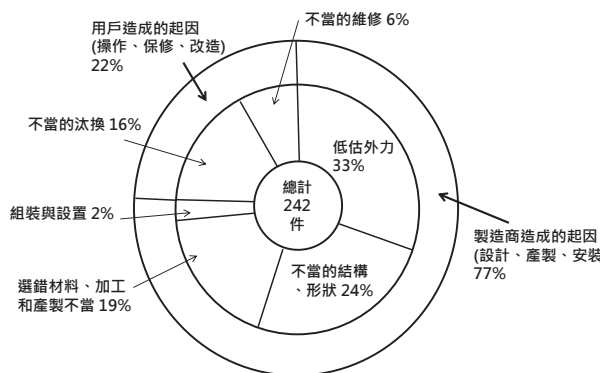


圖1.7 依影響因子所做的失效分類

1.4.3 螺絲失效的分類

如前所述，種類廣泛的機械設備使用螺栓的數量超乎我們的預期。螺栓失效的分類如圖1.8所示。從圖1.7中可明顯看到，約90%的失效是起因於「疲勞」。約有5%的失效案例是起因於「延遲斷裂」，其次是因為「應力腐蝕開裂」(3%)和伴隨腐蝕的「靜態斷裂」(2%)。因此，在失效預防措施的觀點之下，抗疲勞的螺栓將會是筆者未來投稿一系列連載專文最重要的目標。此外，在材料以及力學的觀點下，這一系列的連載專文也會談到延遲斷裂和應力腐蝕開裂。

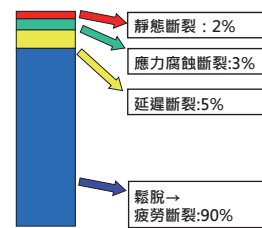


圖1.8 螺絲失效的分類

1.4.4 失效發生的條件⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾

圖1.9是失效發生的條件和預防失效的措施。不用多說，當外力大於材料的抗力時，就會發生失效的現象。有必要檢查失效的起因是算錯外力值，還是選錯材料。透過檢查關乎這兩項起因的影響因子，就能採取真正合理的做法。

換句話說，有必要採取一些措施來減少外力(包括應力)，或增加抗力，或針對這兩者採取措施。一般來說，在力學方面很強的設計師可能在材料方面很弱，反之亦然。因此，有很多案例當中的設計是很不經濟實惠的。由於材料的強度會和它所處的環境息息相關，所以在選定能夠預防失效的對策時，必須考量三個要素，也就是外力、材料和環境，以在措施的影響、成本等等的基礎上得到真正合理的結論。

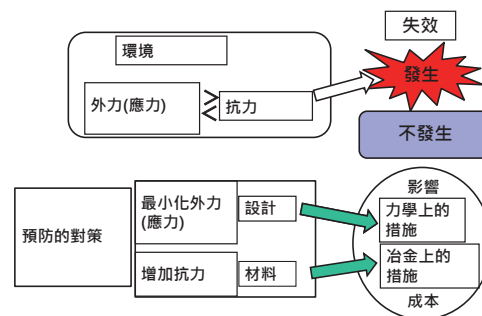


圖1.9 失效的發生以及預防的對策

1.5. 結論

本文提到的主要結論整理如下：

- (1) 雖然我們會在焊接件上觀測到最高的失效次數，還是有人可能會認為螺栓其實是所有機械零件中失效次數最多的。
- (2) 90%以上的失效通常是直接或間接導因於螺絲的「疲勞」。
- (3) 有80%的失效案例是要由製造方負責。
- (4) 以螺栓的失效來說，約有90%的失效案例是起因於疲勞，其次是起因於延遲斷裂(5%)、應力腐蝕開裂(3%)、靜態腐蝕斷裂(2%，包含腐蝕)。
- (5) 在選定能夠預防失效的對策時，有必要考量三個要素，也就是外力、材料和環境。

參考文獻

- (1) S. Nishida, "7 Questions about Screw", Journal of JFRI (The Japan Research Institute for Screw Threads and Fasteners), Vol.24, No.7 (1993), p.195
- (2) S. Nishida, Journal of the Japan Crane Association, Vol.45, No.525, (2007), p.5
- (3) S. Nishida, Direct interview with the engineer of Boeing Co. Ltd, (1990, July).
- (4) S. Nishida, Failure Analysis of Machine Parts & Equipment, (1993), p.4, Nikkan Kogyo News Paper Co. Ltd, (in Japanese)
- (5) S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, (1993), p.3, Butterworth Heinemann Co. Ltd. UK
- (6) S. Nishida, Failure Analysis of Machine Parts & Equipment, (1995), p.4, Kinkado Co. Ltd, (in Japanese)