

螺紋之所以會損壞，其中一個讓栓合件設計師最頭痛的原因就是「金屬疲勞所導致的螺紋斷裂」，因為原本認為已經設計妥當之處卻發生很多螺紋疲勞損壞的問題。金屬疲勞會發生在應力反覆作用的地方。此時用來判定疲勞強度的數值不會是應力的絕對值，而是因重複施加荷載導致的「應力變化量」。這種應力的變化不僅會發生在擁有可動部位的機械上，也會發生在(基本上是在靜止狀態下使用的)電腦或電器上。機器的重複開關或負載等等的變動一旦發生，電路板上的發熱量就會產生變化。熱應力的反覆作用可能使精密電器發生疲勞損壞。本文會先說明必要的基礎事項讓讀者了解何謂金屬疲勞，接著解說螺紋零件常發生的疲勞損壞現象。

扣件達人講座

螺紋的疲勞強度

文/ 福岡俊道

螺紋損壞的最大原因

金屬疲勞與螺紋的斷裂

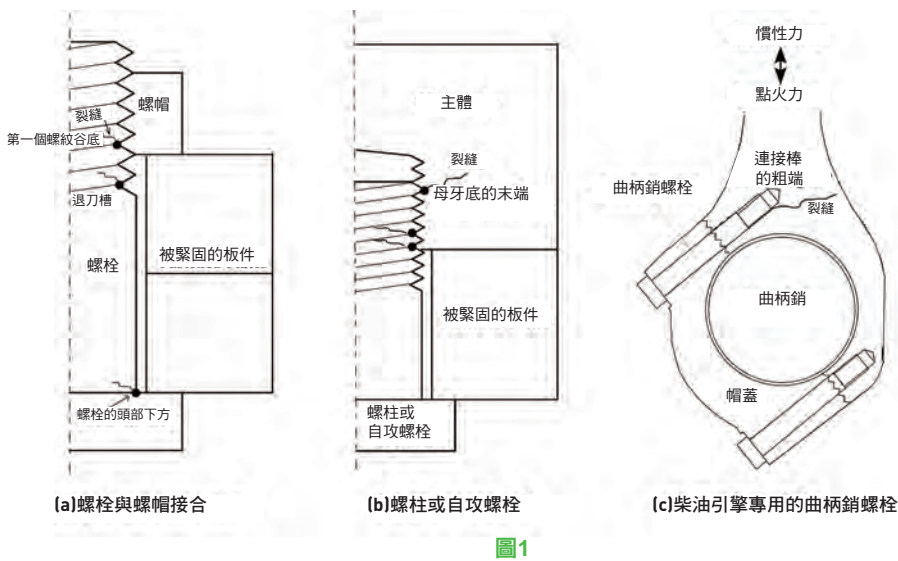


圖1

圖1顯示金屬疲勞使螺紋零件發生斷裂的位置。以使用螺栓和螺帽的栓合件來說，多發生在最接近螺帽座面之螺栓的牙底，此外也可能發生在退刀槽的部位。以螺栓頭下方的部位來說，只要R的大小適切且材料質地均勻，幾乎不會發生斷裂。如圖1(b)所示，把螺紋加工到本體上並以螺柱或六角螺栓來緊固時，螺紋可能會像圖1(a)一樣斷裂，龜裂的現象有時也可能在耦合螺紋部位中最裡面的「母牙底」上發生。以中速柴油機(用來當作船體或發電機的動力機械)來說，龜裂的現象會像圖1(c)一樣，發生在連接棒中相對應的位置上，可能會導致致命的事故。

圖2顯示各種荷載重複作用時，零件上產生的應力時間變化。以螺栓來說，重複的外力由於作用在原初的軸力上，所以會變成「部分脈動式加載」。金屬疲勞的重要特性是：受到應力振幅(應力的變化量)的影響會比受到零件應力絕對值的影響還要大。只要應力振幅超過「疲勞限度」這種臨界值的話，疲勞損

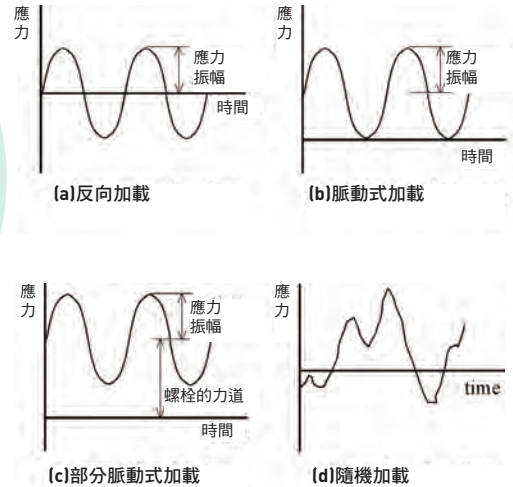


圖2



圖3

壞的現象就會發生。疲勞限度比材料的張力還要更小。如同電車的車軸，會有一種在轉動狀態下重複承受彎折荷載的荷載型態，稱為「旋轉彎折」。這種狀況的疲勞限度會是張力的約50%。因此即使材料不發生塑性變形，也會發生疲勞斷裂。圖3(a)和(b)顯示因疲勞破壞或大量塑性變形而斷裂的螺栓。目前得知，疲勞破壞時，幾乎不會有大幅變形，而是在維持原狀的狀態下斷裂。

由於疲勞限度的大小會因為施加荷載的方式不同而發生變化，所以通常會對圖2所示的荷載型態實施對應的疲勞試驗以得出疲勞限度的大小。圖4所示的S-N曲線，是一種廣泛用來衡量疲勞強度的線狀圖。其中縱軸是應力振幅，橫軸是荷載在直到發生斷裂之前重複的次數。以碳鋼材料來說，在重複106~107次的情況下，S-N曲線會呈現水平狀態，此時的應力振幅就是疲勞限度。圖5顯示的是，對螺栓與螺帽施加圖中所示的重複荷載時，疲勞限度與張力強度之間呈現的關係。圖內的數據，是相關領域研究者針對螺紋材料或圓角半徑等等規格各有不同的螺紋施行的可靠數據。螺紋的疲勞限度大約落在材料張力強度的1/5至1/20之間，受

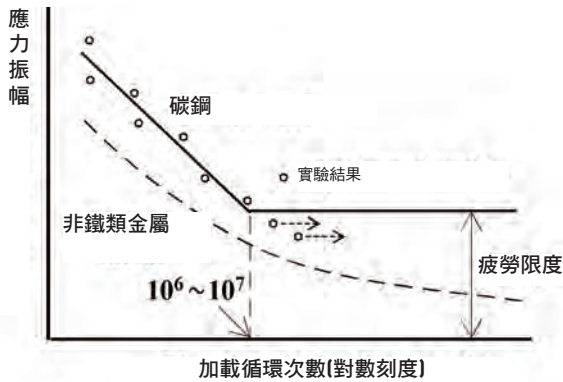


圖4

到銳利的切槽影響，會比一般疲勞實驗中使用之圓棒的疲勞限度還要小很多。雖然張力強度越大則疲勞限度越高，但限度的增加比率很小。也就是說，即使使用張力強度高的材料，疲勞強度的改善也很有限。此外，這兩者之間的相關性也很低。由此，圖6就是使用同樣的數據，將橫軸變更為螺紋間距P與公稱直徑d之間的比。在某個範圍內，若公稱直徑越大且螺紋間距越小，則疲勞限度就會縮小。此外，若P/d值變小，則疲勞限度就會急遽上升，在急劇上升之後，疲勞限度的下降比例會比右側部位更多。此時還看不太到牙底圓角半徑的影響。如上，螺紋的疲勞限度會出現非常具特徵的動向。因此，在實體的螺紋栓合件承受複雜的荷載時，要以高精密度推算疲勞限度的話是相當困難的。

作用於栓合件的外力，以及內力係數

栓合件一旦承受外力，螺栓的軸力就會產生變化。若將軸力增加量的一半除以剖面積，就會得出應力的幅度。在此舉一個最簡單的例子來考察螺栓呼應外力而發生的動向。圖7(a)顯示外力沿著螺栓的軸心對稱發生作用，螺栓軸力上升的狀況。這並非意味外力會全都作用在螺栓上。此時把軸力呼應外力而增加的比例稱為「內力係數」。如圖7(b)所示，內力係數並非固定不變，通常是隨著外力的增加而變大，這是因為被緊固物的接觸面正在分離的緣故。由此，如圖所示，若提高螺栓軸力，內力係數就會下降。結果，即使承受外力，應力振幅也會變小，因此疲勞強度就會上升。另一方面，一旦極大的外力開始作用，接觸面就會完全分離，沿著圖中45度的直線發生變化。此時，外力會完全作用在螺栓上，因此內力係數的數值就會變成1，形成容易發生疲勞損壞的危險狀態。在評量以螺栓構成之栓合件的疲勞強度時，有時可以使用「緊固線狀圖」這種手法來顯示螺栓軸力、螺栓的拉伸量、被緊固物的縮小量這三者之間的關係。機械設計相關的教科書有廣泛介紹這種思考方式。但如同上述，此線狀圖只適用於外力以軸對稱方式發生作用的狀況。由於內力係數的最大值就是1，所以未必能正確評量實體的栓合件的疲勞強度。

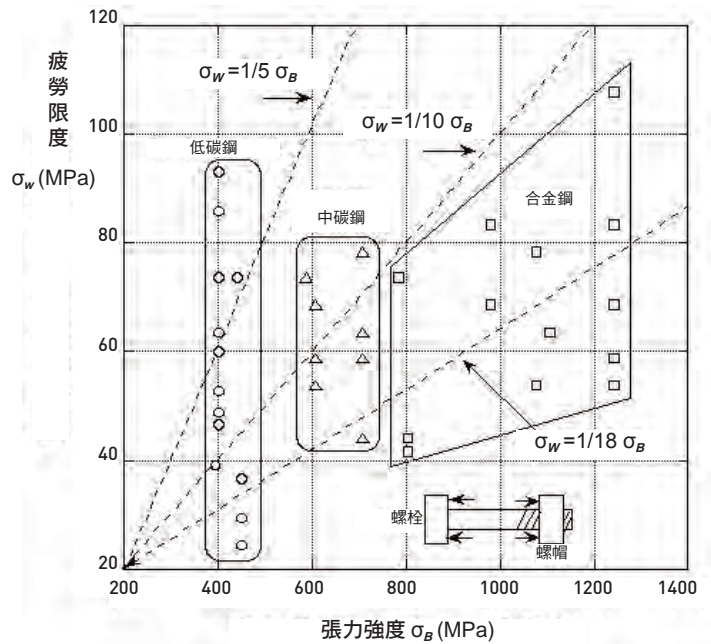


圖5

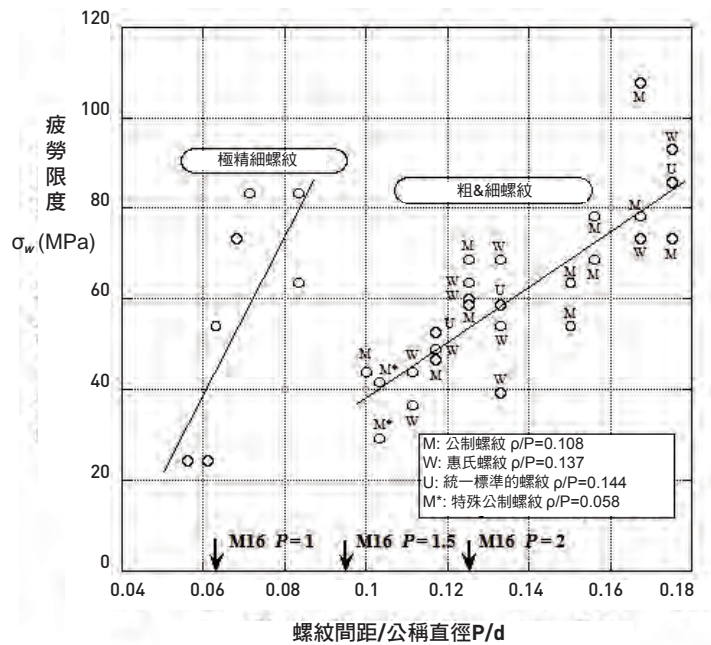


圖6

在實體機械上增加的外力和螺栓軸力

如圖7(a)所示，在實體的機械或機器上，外力鮮少會沿著螺栓軸對稱發生作用。圖8(a)即是以實體機械為例，呈現形狀類似汽缸蓋的栓合件。外力一旦變得非常大，被緊固物的接觸面就會分離。圖8(b)顯示的是，在極端的例子中，接觸面大幅分離時力量的平衡狀況。我們可得知，若將力矩(moment)的平衡納入考量，被施加的外力會放大到L/La倍，並作用在螺栓上。也就是說，此時的內力係數值會大於1，這在疲勞強度的觀點上是非常危險的。像這樣，放大外力並作用到螺栓上的現象，和業餘木工使用釘鉗的

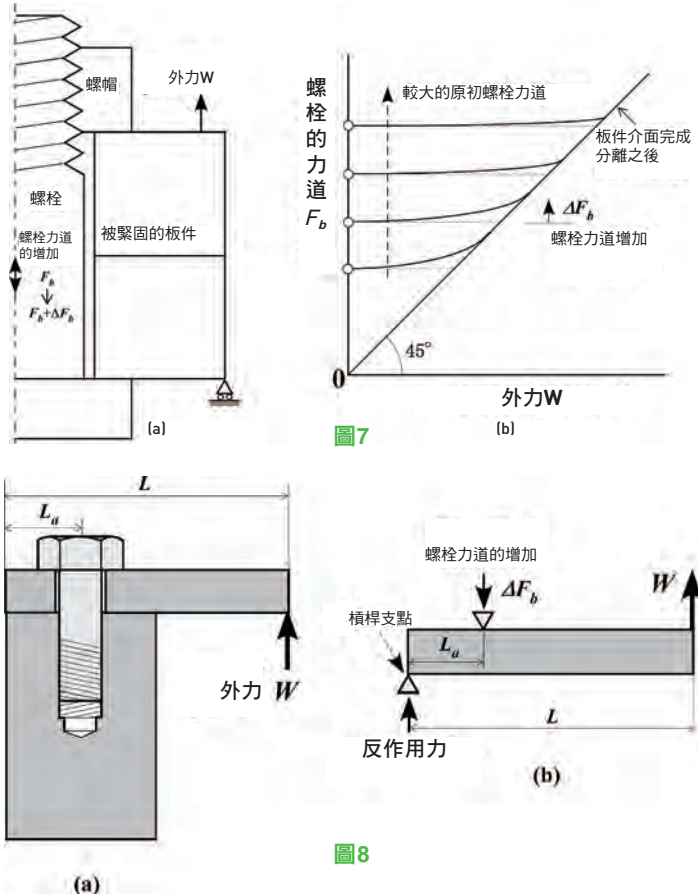


圖7

圖8

原理是一樣的。換句話說，隨著左端的支撐點、螺栓的軸心、外力作用的位置這三者之間的關係，力道的放大比例會大幅變化。同時，藉由在栓合件的形狀上下一點功夫，此機制可能就可以提高疲勞強度。

結語

金屬疲勞的研究，就是由前述以S-N曲線聞名的烏勒(Wöhler)先生在1860年左右帶頭。即使經過無數的年月到了現在，螺絲等等的金屬疲勞損壞導致的交通事故和問題仍不斷發生。即使解決了某個問題，一旦提升了機械或機器的性能，別的部位又會因為別的原因發生疲勞損壞，這種現象一直重複上演。在下一篇投稿中，我會透過電腦解析來證明螺紋的疲勞損壞常發生的位置，並介紹改善疲勞強度的具體作法。

參考文獻

Toshimichi Fukuoka, "Threaded Fasteners for Engineers and Design – Solid Mechanics and Numerical Analysis –", pp.166-200, Corona Publishing Co., Ltd. (2015)

最近幾年有樣新設課程大舉進攻美國公立學校。此新設課程稱作「科學、技術、工程和數學(STEM)」。該課程中其中一個基本主題是「七種簡易機械」。對學技術方面的學生來說，每樣都是很有趣的主題，但這七種也許沒有任何一種會比螺紋這主題的論述還要簡要明確。

從螺紋出現和首次有使用紀錄以來，螺紋一直以各種方式忠實地服務人類。首次螺紋被使用的紀錄可追溯至阿基米德用來把某處的水移至他處，現在它被用於各種緊固物件的需求，從最普通的應用到最重要關鍵的應用都可看見。事實上，現在還有很多螺絲被用來把骨頭和身體部位接合在一起，在大眾健康和行動問題上創造出革命性的解決辦法。

不同螺紋 設計及其應 用領域

文/Laurence Claus