

「扣件事故 / 起因 / 方策」連載講座

管線專用法蘭的漏液現象： 受密封片影響的密封性能

文 / 福岡俊道

前言

社會的基礎建設支撐著我們的生活中各種大小事的運作。其中，運送液體的管線是一種最基本的基礎建設。管線的基本構造包括管材和用來接合管材的專用法蘭（或稱凸緣）。液體從管材內部流漏出去的現象，多是發生在接合的部位，也就是在法蘭上。螺栓的軸力會將兩個成一對的法蘭鎖固起來，它會影響到密封性能。通常為了防止內部的液體滲漏，會在管線的法蘭中間插入薄片，稱之為密封片。密封片的剛性非常低，所以法蘭的鎖固特性以及法蘭承受液體帶來的內壓和熱負載時的作動，會大大影響密封片的力學特性。因此本文針對有插上密封片且有高溫液體流過的法蘭，解說可能會影響密封性能的螺栓軸力變化。

側急速上升，如圖1(a)所示。透過這種特有的分佈特性，得以預防內部液體滲漏出來，而這兩個成對的法蘭前端會變形往彼此靠攏。這種變形的模式稱為法蘭的轉動。當工廠進入運轉狀態，管線的法蘭周邊的溫度上升的時候，密封片的剛性會下降，使法蘭轉動的現象更加明顯。結果導致螺栓的軸力降低，使得密封片的表面壓力也降低，造成內部的液體滲漏出來。

圖2(a)顯示了含高纖維的密封片的壓縮特性。縱軸是密封片的表面壓力，橫軸是密封片的應變力。把螺栓的軸力提高時，密封片的表面壓力相對於密封片的應變力會呈現非線性的增加現象。接著，若在某程度時卸除荷載，表面壓力降低的程度會比之前承受荷載時的情況更加急遽，產生一種稱為遲滯現象的特性。因此，密封片的壓縮特性包括非線性變化和遲滯現象等等複雜的現象。另一方面，壓縮特性會因為密封片的材料和成分而有所不同，因此很難對它做有系統的評定。此外，溫度上升時，密封片的剛性會降低。圖2(b)透過模式化顯示出密封片壓縮特性的溫度依賴性，可得知密封片的剛性會隨著溫度的上升而下降。因此，為了評定有高溫液體流過的法蘭的熱學特性和力學特性，必須使用壓縮特性的相關數據，且該數據須考量到密封片的溫度依賴性。

管線專用法蘭的構造和密封片的壓縮特性

圖1(a)是法蘭鎖固完成時的狀態，圖1(b)是進入運轉狀態後法蘭承受高溫熱負載時的狀態。密封片的使用很廣泛但剛性很低，因此，螺栓的軸力所造成的表面壓力會往外

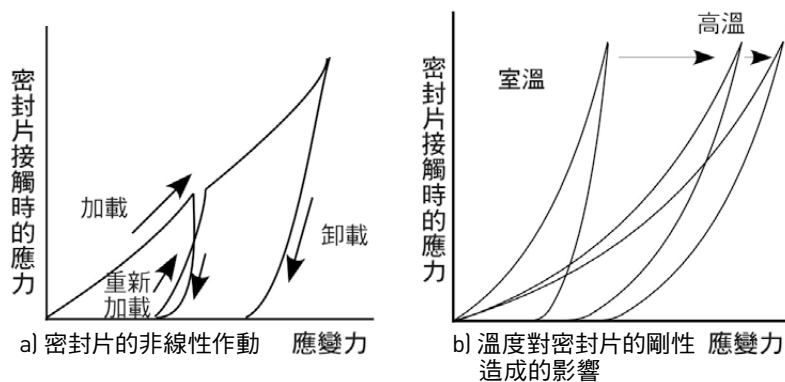


圖2. 壓縮特性以及其對密封片溫度的依賴性

有關用來測量密封片壓縮特性的裝置，相關學會有發表研究的成果，其中也包括材料的溫度依賴性。下文所介紹的有限元素分析，使用了透過該裝置測得的密封片壓縮特性。

高溫熱負載使法蘭專用螺栓的軸力發生變化

在此，我們使用實驗獲得的密封片壓縮特性，透過有限元素法，分析管線專用法蘭受熱時的熱學和力學作動。本來理應使用3D模型，但考量到密封片的特性會影響管線專用法蘭整體的力學作動，且各種管線用法蘭和密封片的分析相對較簡單，因此才使用了軸對稱模型。有關如何將3D形狀的管線專用法蘭轉換成軸對稱模型，請參閱本文的參考文獻。

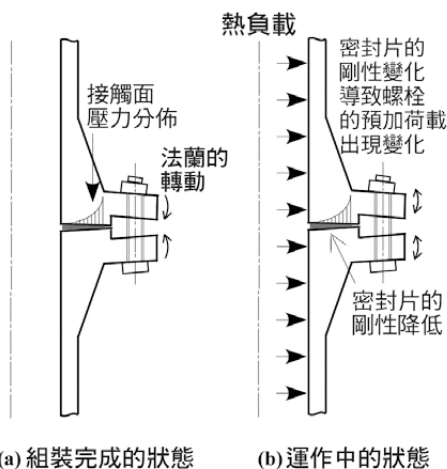


圖1. 管線專用法蘭



受測的管線專用法蘭是以8支螺栓來鎖緊，鎖固完成時的軸應力是100MPa。此軸應力所產生的密封片平面壓力約為22MPa。密封片的厚度為3mm，它的材料基底是芳香聚醯胺纖維。圖3是應力分佈的分析結果，並以Tresca應力來表示。圖3(a)是鎖固完成時的狀態，圖3(b)顯示密封片承受熱負載後平均溫度升至攝氏100度，並變成一個恆常的狀態。注意最大應力值已降到初期狀態的七成水平左右。此數值大致會與螺栓軸力呈現一種比例關係，所以螺栓軸力也會跟著下降到七成的水平。圖4顯示螺栓軸力殘留量的時間變化。螺栓軸力殘留量的計算方式，是將加熱一段時間後紀錄到的螺栓軸力值除以初期的螺栓軸力值。圖中的參數是密封片的平均溫度 θ_g 。在平均溫度從攝氏50度上升到70度的範圍內，螺栓的軸力會大幅降低。但若上升到100度與150度，軸力下降趨勢會減緩。此現象與密封片剛性在實驗中的高溫下會降低的情況一致。

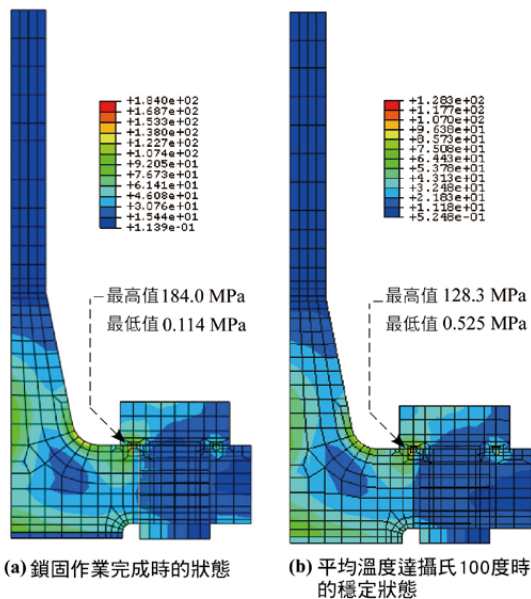


圖3. 應力分佈的分析結果

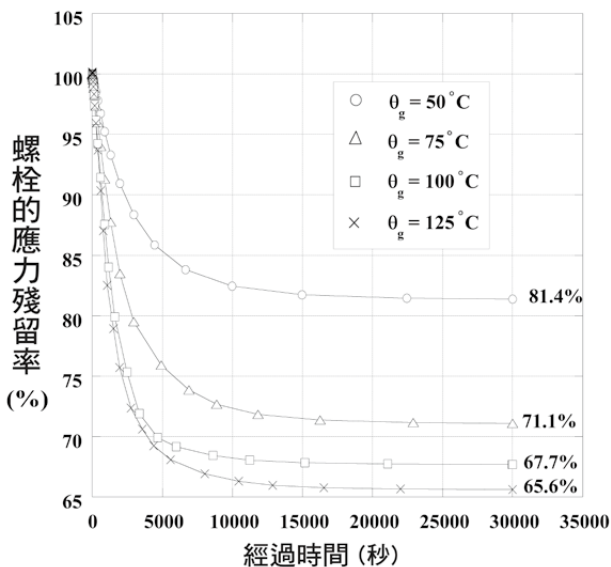


圖4. 螺栓應力殘留率隨時間產生的變化

管線專用法蘭的加熱實驗

若要了解各種形狀的管線用法蘭的力學作動，有限元素分析是一套很有效的做法。然而在分析管線專用法蘭在高溫條件下的作動時，必須適當地將密封片的壓縮特性公式化，並透過實驗來驗證軸對稱模型的妥適性。圖5是法蘭加熱實驗中使用的裝置。受測的管線專用法蘭以及密封片的規格形狀都和有限元素分析所做出的模型相同。螺栓軸部的溫度是透過熱電偶測量出來的。螺栓的軸力是透過高溫專用的應變力量規測量出來的。熱負載是透過貼在法蘭內側的磁鐵式加熱片施加上去的。加熱片的每一單位面積輸熱量為 4897W/m^2 ，根據實驗得知，其中有75%左右傳遞到管線專用法蘭上。初期的螺栓軸應力為50MPa、100MPa、150MPa這三種

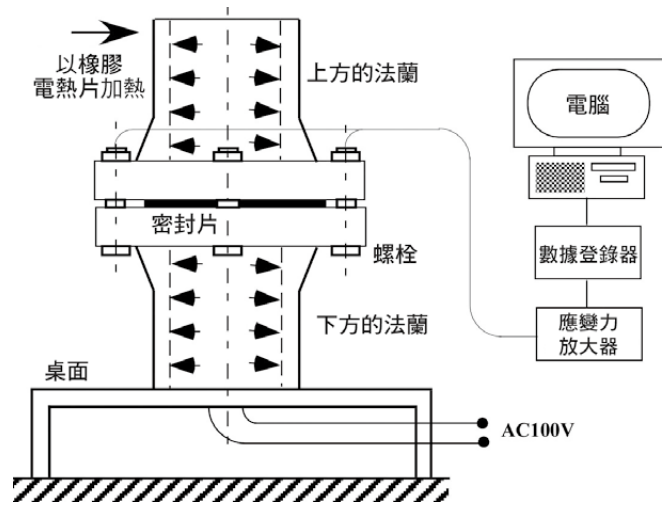


圖5. 管線專用法蘭的加熱裝置

圖6是其實驗結果。縱軸是螺栓軸力的殘留率與螺栓的軸部溫度，橫軸是軸部的加熱時長。我們在這8支有標註號碼的螺栓當中，針對奇數號的螺栓做了溫度與應變力的檢測。加熱15000秒後，螺栓的溫度上升到 115°C 左右，螺栓軸力下

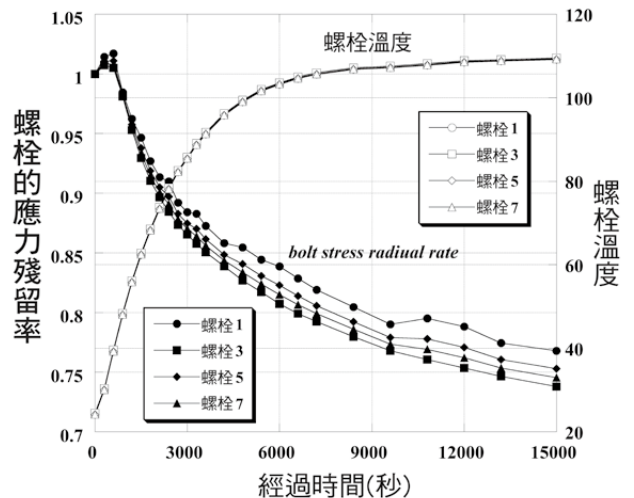


圖6. 實驗結果



降到75%左右。圖7比較了加熱15000秒後螺栓軸力殘留量的分析數值與實驗數值。橫軸是初期的螺栓軸應力。螺栓軸力的殘留量雖會隨著螺栓軸應力的上升而微幅增加，但其影響很小。雖然實驗數值與分析數值之間有所差距，但從分析過程中設定的各種假設來看，本文介紹的分析方式是既實用也有效。

結語：

有高溫液體流過的管線所使用的專用法蘭，它的使用數量可以說是無限多的，其中有相當多的法蘭都有漏液的問題。具體來說，管線專用法蘭的栓合部位所使用的密封片，其複雜的熱學和力學特性會增加解決漏液問題的難度。因此，能將管線專用法蘭鎖固住的螺栓軸力就變成判定密封性能的基準。另一方面，專用來鎖固此法蘭的螺栓，它的性質又和容易發生機械性外力問題的其他螺栓不同，理想上會希望它產生表面壓力且不至於會因此導致漏液。基於以上的重點，可以說螺栓的軸力即使比設定值偏離了30%左右，也不會有問題。下一篇投稿預計會說明法蘭裝在低溫液體流通的管線中的性能表現。

參考文獻

1. Toshimichi Fukuoka, "Threaded Fasteners for Engineers and Design – Solid Mechanics and Numerical Analysis –", pp. -256-262, Corona Publishing Co., Ltd. (2015)
2. Fukuoka, T., Nomura, M. and Nishikawa T., Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Pipe Flange Connections by Taking Account of Gasket Compression Characteristics at Elevated Temperature, ASME Journal of Pressure Technology, Vol.134, Paper No.021202 (2012)

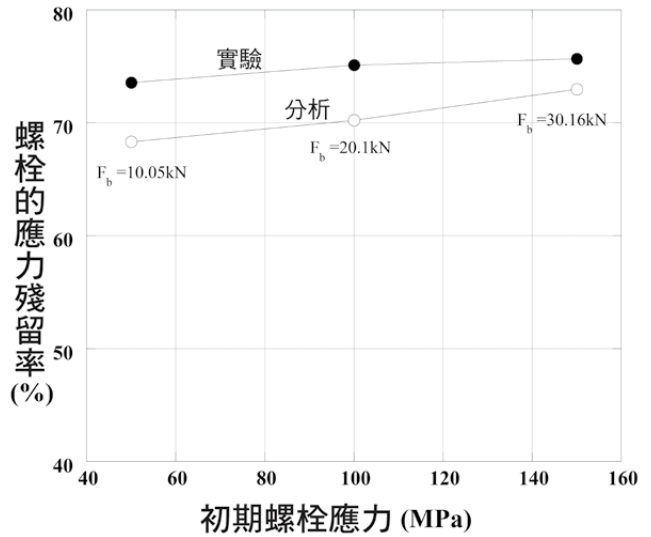


圖7. 比較分析與實驗的結果

第九集

螺栓的鬆脫與其對策

佐賀大學名譽教授 西田新一

螺紋緊固的失效與預防方式

1. 前言

以下介紹螺栓鬆脫導致的失效與疲勞問題。2008年4月11日週五上午11點08分，行駛在日本東名高速公路北向車道上的某台大卡車的輪胎脫落，越過分隔島直接擊中南向車道上的名鐵觀光巴士的前擋風玻璃，不幸打中司機和七名乘客。鎖住輪胎的8支螺栓全都斷裂，其中2支螺栓的斷裂面佈滿鏽屑。這台一日遊的巴士上有41人，包括司機和導遊。外界認為上述生鏽的螺栓發生鬆脫，且在意外發生前就先疲勞化了。

此外在另一則事故當中，11名通勤者因為手扶梯上使用的螺栓失效而受了傷。2008年5月9日，名古屋市營地下鐵久屋大通站的某個上行的手扶梯突然停止並往下滑。這11名通勤者因為3支螺栓失效而身受重傷。這3支用在手扶梯馬達座上

的螺栓斷裂了。此外，馬達座也從原本的位置偏移了幾公分，驅動鏈條的鬆弛導致了這場突發的意外。（另一座手扶梯也發生類似的事故，斷了2支螺栓。）上述的螺栓斷裂被歸因於鬆脫之後的疲勞化現象。

如上述，螺栓的鬆脫與失效事件緊密相關，且會導致螺栓斷裂。因此本文會從安全性的觀點來論述螺栓的鬆脫和其對策。

2. 螺栓防鬆脫的重要性

圖9.1顯示施加在被緊固物上的外力和內力之間的平衡關係，其中 W_a 是外力， f_i 、 f_c 是內力。 K_i 是螺栓的彈簧常數， K_c 是被緊固物的彈簧常數， F_r 是施加在螺栓上的鎖固力， F_i 是變動的外力 W_a 形成的內力。

此案例中的 F_i 和 F_c 的計算公式如下：

$$F_i = K_i \cdot \lambda \quad \dots(1)$$

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

從力平衡的關係中得出

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

把公式(1)和(2)代換成(3)

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

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

把公式(4)代換成(1)和(2)

$$F_i = \frac{K_i}{K_i + K_c} W_a \quad F_c = \frac{K_c}{K_i + K_c} W_a \quad \dots(5)$$

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

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

公式(5)的 F_i 和 F_c 可以透過內力係數 ϕ 計算如下：

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

圖9.1 外力和內力之間的平衡

