

## 1. 前言

大型車的車輪脫落事故中，大部分發生於後輪的主要原因，一般認為跟緊固住輪轂的車輪螺栓的軸力偏差有關。多輪結構的後輪是大型車固有的栓合件形狀，其採用的2階段緊固方式會引起軸力偏差。本篇文章首先講解車輪專用螺栓具特色的緊固件特性。接著說明車輪螺栓上疲勞破壞的形成機制。除了螺紋之外，導致金屬疲勞破壞的首要因子為應力振幅。因此，透過介紹實機改造的實驗裝置測得的應力振幅，以及介紹有限元素分析(用來詳細評量牙底的應力振幅)的結果，本文將解說車輪脫落的機制與原因。

## 2. 車輪螺栓的緊固作業與軸力偏差

如同我在第三篇連載專文中所說的，緊固一般螺栓與螺帽時，其扭力-軸力關係式可透過初級力學的理論導引出來。另一方面，由於大型車的後輪是採用兩階段緊固，所以有必要透過電腦解析來獲得扭力-軸力關係式。以下公式顯示內螺帽與外螺帽緊固過程中出現的扭力 $T_{inn}$ 與 $T_{out}$ 、扭力係數 $K_{inn}$ 與 $K_{out}$ 、軸力成分 $F_{inn}$ 與 $F_{out}$ 這幾者之間的關係。 $d$ 為螺紋之公稱直徑。

$$\begin{aligned} T_{inn} &= K_{inn} F_{inn} d \\ T_{out} &= K_{out} F_{out} d \quad (1) \\ F_b &= F_{inn} + F_{out} \end{aligned}$$

如第三個公式所示，最終的軸力 $F_b$ 為 $F_{inn}$ 和 $F_{out}$ 的總和。圖1是用於解析的有限元素模型，透過該模型獲得的

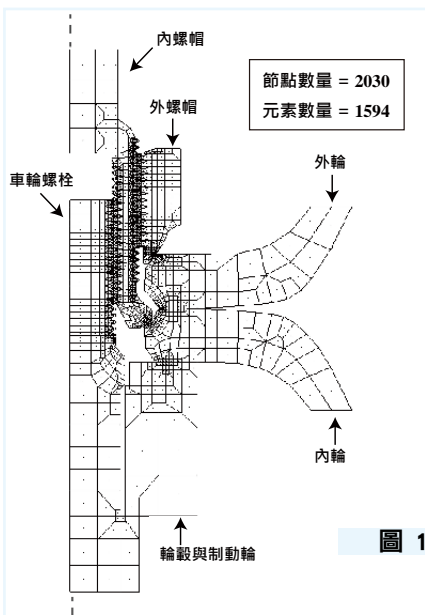


圖 1

# 「扣件事故 / 起因 / 方策」連載講座 大型車的車輪脫落事故 (第二集) ~軸力偏差與疲勞破壞的機制~

文/ 福岡俊道

扭力係數與摩擦係數關係如下:

$$\begin{aligned} K_{inn} &= 0.6004\mu_{ith} + 0.8423\mu_{inu} + 0.02120 \\ K_{out} &= 3.179\mu_{oth} + 0.6198\mu_{onu} + 0.08163 \quad (2) \end{aligned}$$

此處的 $\mu_{ith}$ 、 $\mu_{inu}$ 、 $\mu_{oth}$ 、 $\mu_{onu}$ 依序為內螺帽緊固與外螺帽緊固時的螺紋表面及螺帽座面之摩擦係數。 $K_{inn}$ 值與 $K_{out}$ 相比之下小了许多。從這裡可以發現，車輪螺栓在用於內輪緊固時會產生巨大的軸力。舉例來說，我們對內輪與外輪都以 $600\text{N}\cdot\text{m}$ 的扭力緊固住，並假設摩擦係數為0.15，來計算軸力為 $F_b$ 。內輪緊固時軸力 $F_{inn}$ 為 $123\text{kN}$ ，此外在緊固住外輪時，就只有數值為 $30\text{kN}$ 的軸力 $F_{out}$ 會增加至 $153\text{kN}$ 。此時注意扭力係數 $K_{inn}$ 的公式，內螺帽座面摩擦係數 $\mu_{inu}$ 的對應係數是0.8423。反之，一般螺栓與螺帽上的係數是0.65。換句話說，若摩擦係數因為交替旋緊和鬆開栓合件而發生變化，車用螺栓的軸力會比一般的螺栓與螺帽更容易發生變化。這表示每年在雪季為大型車替換輪胎時，必須要特別注意緊固作業。

由此可知，即使使用了可以穩定摩擦係數的潤滑液，在交替旋緊和鬆開車輪螺栓並測定摩擦係數時，一旦交替超過15次，摩擦係數就會大幅變化。此時，內螺帽與外螺帽的座面就會很粗糙，變成無法讓潤滑劑發揮效果的狀態。基於以上所述，交替緊固和鬆開大型車的輪胎時，一般會建議定期汰換栓合件的螺紋零件和輪胎。

## 3. 車輪螺栓的疲勞破壞機制

圖2是重複荷載作用於車輪螺栓時的運作機制。如下圖所示，大型車所裝載的貨物重量作用在輪胎上。而支撐該荷載的車輪螺栓，其應力會隨著輪胎的轉動而變化。根據下圖左，假定大型車以等速度在平坦的道路上跑，此時關注某個特定的螺栓，會發現相當於一個轉動週期那麼大的應力振幅作用該在螺栓上。這個應力振幅超過疲勞極限的話會發生裂縫，最壞則會造成斷裂的情況。為了知道應力振幅的大小，考量到栓合件的形狀很複雜，則有必要做實驗或進行電腦數據分析。

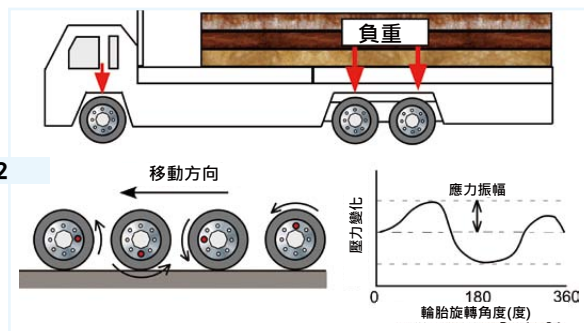


圖 2

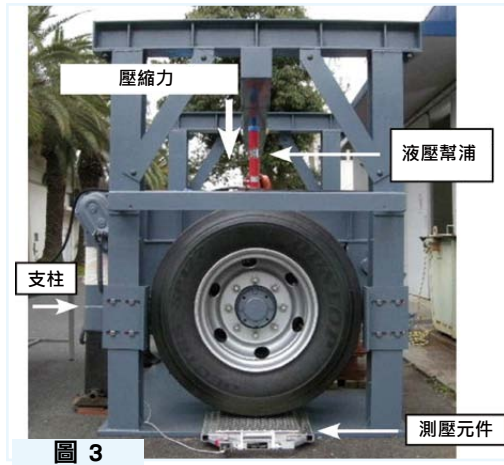


圖 3

## 4. 以實機改造之裝置來測量應力振幅

圖3這張照片是使用拖車後方部位製作出的實驗裝置。在車輛行走狀態下測定作用在車輪螺栓上的應力振幅是非常困難的。所以要對油壓幫浦施加相當於貨物荷載的力道，並透過位於下方的測壓元件來測量作用在輪胎上的壓縮力。用於測量應力振幅的應變儀，則安裝在8個車輪螺栓中的其中一個上。其實驗步驟如下。用油壓幫浦，施加相當於積載荷載的壓縮力，此時測量作用在螺絲軸部的應力。接下來將輪胎旋轉45度，測量相對於同一個壓縮力的螺栓軸應力。做連續8次的45度旋轉後，就能夠得出輪胎旋轉一周時的應力振幅。圖4是測試結果的其中一例。縱軸為螺栓軸應力的變化量，橫軸為輪胎的旋轉角度。其參數為積載的荷載，而25kN就相當於實驗中用的拖車之最大積載荷載。圖5為應力振幅與積載荷載的關係示意圖，兩者關係大致呈線形。另外，圖中的「IN」與「OUT」表示螺栓表面的位置，分別表示離輪胎中心近跟遠的表面。整體上IN的應力振幅雖然有些偏高，但就算積載到規定的最大荷載量，振幅值也大不到哪裡去。此圖為螺絲軸力設為預設值的結果。另一方面，軸力若降至預設值的30%，對抗最大積載荷載的應力振幅則會增加到約25MPa。根據這樣的結果，可以得知螺絲軸力降低會使應力振幅急遽上升。此外，在牙底的應力振幅，會因為切口的效果而變大，這一點會讓疲勞破壞發生的可能性很高。

## 5. 透過有限元素分析評估牙底的應力振幅

圖6(a)的有限元素模型是用來分析車輪螺栓之栓合件產生的應力振幅。只將後輪的單一側模組化，並在積載荷載作用的車軸部位上，施加壓縮荷載。圖(b)與圖(c)為車輪螺

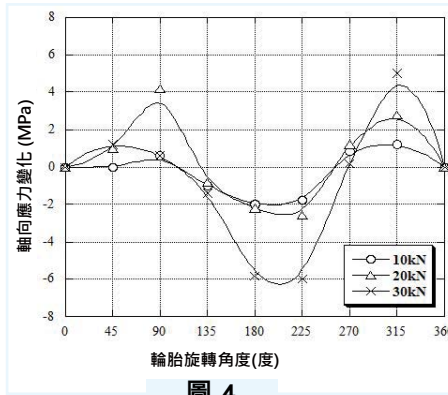


圖 4

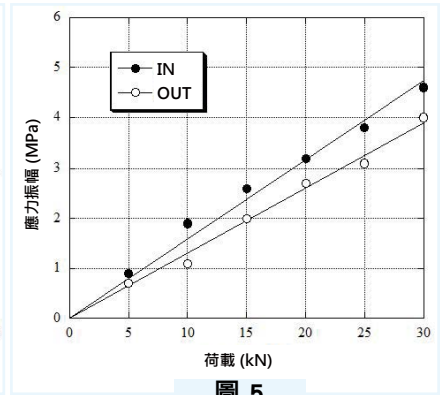


圖 5

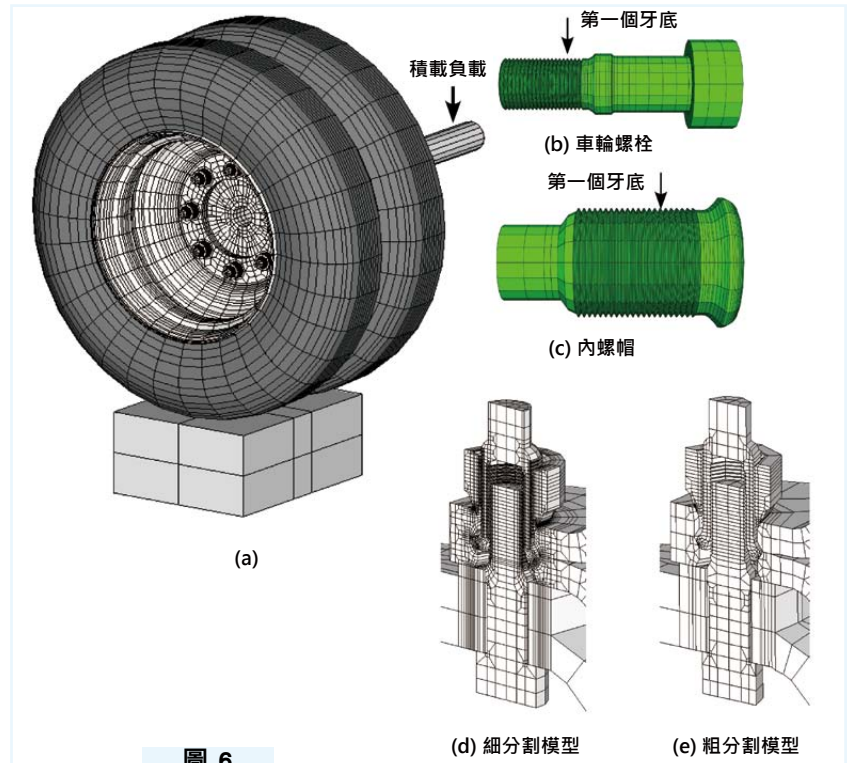


圖 6

絲與內螺帽的有限元素模型。為了讓計算效率化，8支螺絲之中，只有一個做精細的元素分割，其餘的7支則做較粗的分割。圖(d)為細分割的模型，圖(e)為粗分割的模型。在分析當中，我們關注在精細元素分割的螺絲上，藉由改變施加壓縮荷載的方向和接觸到輪胎的地面的模型位置，得出輪胎轉一周時的應力振幅。依據以上的有限要素解析，如果螺絲軸力在既定值的50%，發生的應力振幅的數值不至於導致疲勞破壞，但下降達到30%的話則會變成相當危險的狀況。

## 6. 總結

大型車的後輪是複輪結構，所以可以說螺栓軸力本質上就容易產生偏差。但是如果以規定的扭力緊固住車輪螺栓，幾乎就沒有發生車輪脫落事故的可能性。另一方面，從現場作業的觀點來看，以規定的扭力緊固住許多支車輪螺栓時會有很多問題。在下一篇投稿中，我將介紹專為降低軸力偏差而生的高精度緊固裝置。

## 參考文獻

1. Toshimichi Fukuoka, "Threaded Fasteners for Engineers and Design – Solid Mechanics and Numerical Analysis –", pp.264-280, Corona Publishing Co., Ltd. (2015)