雙層鋼板密封墊片之有限元素分析

黃憲輝 張志毅*

南亞技術學院機械工程系 機械與機電工程碩士班

摘要

引擎為汽車及工程機械設備中提供動力來源的重要總成組件，由多個零件及多個次級組件構成，透過墊片(Gasket)來達成各組件之間的密封需求，墊片為一密封功能零件，主要的功能是防止工作介質如氣體、液體、氣液混合體於各個零組件之間洩漏的現象，而墊片密封性能可由運作時墊片的接觸壓力來判斷，當墊片接觸壓力小於工作介質壓力時即可能發生洩漏現象，但對於變動劇烈的引擎汽缸壓力，則需要多層墊片的回彈性能才能阻擋汽缸內氣體的洩漏。

本研究探討雙層鋼板密封墊片，在廠商提供之螺栓鎖緊扭矩條件下，分析雙層墊片的密封性能是否符合工作環境之需求。除了以有限元素法模擬雙層鋼板墊片在工作負載下的變形行為之外，還設計製作一個檢測治具，以富士感壓紙實驗驗證雙層墊片之接觸壓力分佈趨勢符合實際狀態。在分析過程發現增加螺栓扭矩負載未必能增加墊片之接觸壓力，反而有可能因為治具翹曲而得到反效果，因此必須透過詳細的分析才能提供適當的螺栓負載。利用本研究的分析方法，可以更明確瞭解在廠商提供之螺栓鎖緊扭矩之下，雙層鋼板墊片的密封能力與變形行為，對於預測雙層鋼板墊片之密封性能將有非常大的助益。

關鍵字: 雙層鋼板密封墊片，有限元素分析，接觸壓力，鎖緊扭矩

*E-mail: changci@ms.nanya.edu.tw　Tel:03-4361070 # 5133　Fax:03-4383684

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF DOUBLE-LAYER STEEL PLATE GASKET

Hsien-Hui Huang, Chih-Yi Chang*

Institute of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering,
Nanya Institute of Technology

Abstract

The engine is an important assembly component that provides a source of power in automobiles and construction machinery equipment. It is composed of multiple parts and multiple secondary components. The gaskets are used to achieve the sealing requirements between the components. Gasket is a sealed functional part to prevent the leakage of working medium such as gas, liquid, gas-liquid mixture between various components. The important basis for gasket sealing performance can be judged by the contact pressure of the gasket during operation. When the gasket contact pressure is less than the working medium pressure, leakage may occur.

This study explores the double-layer steel plate gaskets. Under the bolt tightening torque provided by the manufacturer, analyze whether the sealing performance of the double-layer gaskets meets the requirements of the working environment. In addition to using the finite element method to simulate the deformation behavior of the double-layer steel plate gasket under working load, a test fixture was also designed to verify the distribution trend of the contact pressure distribution of the double-layer gasket with the actual working state by Fuji test. It was found that increasing the bolt torque load may not increase the contact pressure of the gasket, but it may have a negative effect due to the warpage of the fixture. Therefore, a detailed analysis is necessary to provide the appropriate bolt load. By this study, we can more clearly understand the sealing capacity and deformation behavior of the double-layer steel plate gasket under the bolt tightening torque provided by the manufacturer. It will be very helpful for predicting the sealing performance of double-layer steel gaskets.

Key Words: double-layer steel gasket, finite element method, contact pressure, tightening torque.

*E-mail: changci@ms.nanya.edu.tw　Tel:03-4361070 # 5133　Fax:03-4383684

壹、緒論

一、簡介

引擎為汽車及工程機械設備中提供動力來源的重要總成組件，由多個零件及多個次級組件構成如圖 1 所示，而各組件之間使用螺栓來組裝固定如圖 2 所示，並透過墊片(Gasket)來達成各組件之間的密封需求，然而會因各組件內的工作壓力、工作介質、操作環境、維修方便性等等的考量，會有不同型態的密封產品需求，也表示這些不同型態的密封產品，會被設計及製造使用於市售市場。

墊片為一密封功能零件，主要的功能是防止工作介質氣體、液體、氣液混合體於各個零組件之間洩漏的現象，進而影響引擎的性能表現及使用壽命，甚至更可能因為洩漏的現象造成違害安全事件的發生。

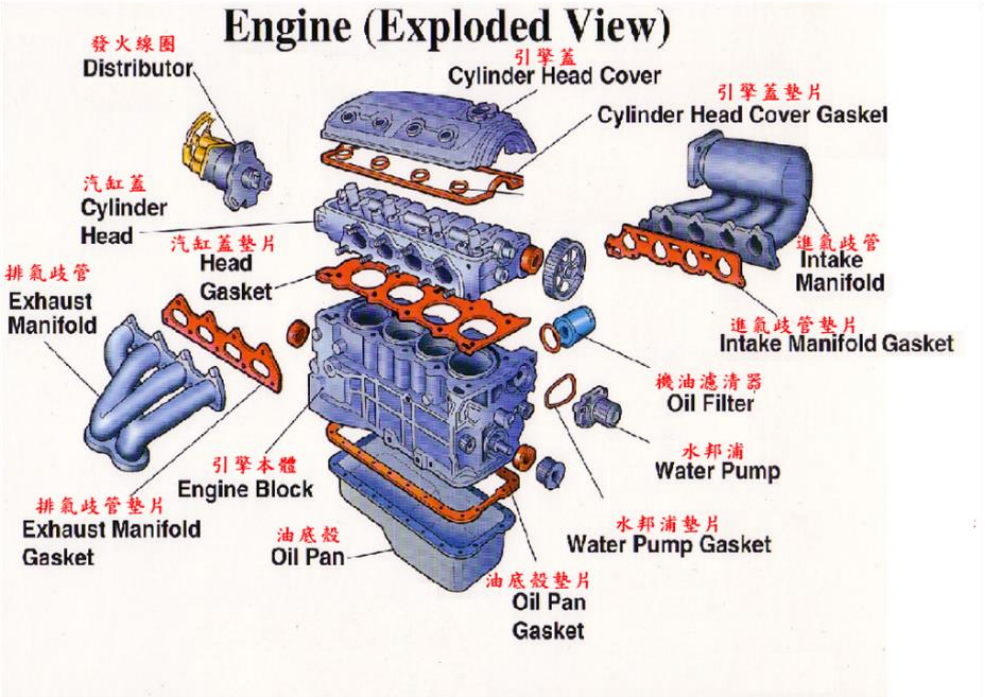

圖 1.引擎組件爆炸視圖(曾教授與古董保時捷，2013)

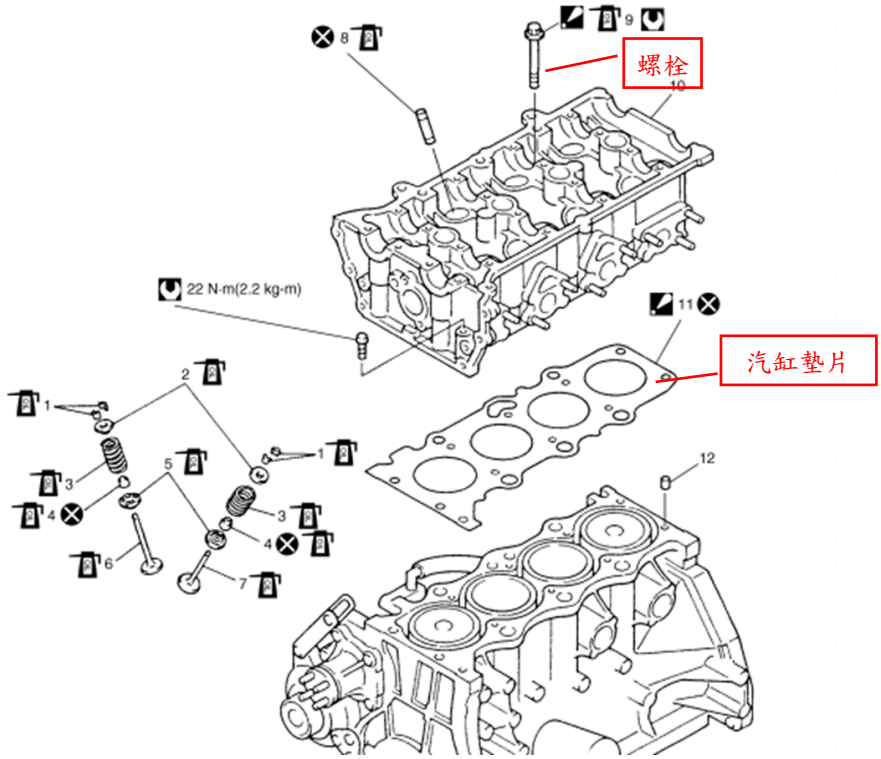

圖 2.引擎組裝示視圖(鈴木汽車，2007)

2018/09/06 台灣馬自達汽車發出聲明稿，針對 SKYACTIV-D 2.2L 柴油引擎車款之冷卻系統副水箱外溢(部分案例引擎水溫警示燈亮起)現象的調查結果提出說明，當搭載 SKYACTIV-D2.2L 柴油引擎車款之車輛以高檔位行駛於斜度高於 5%的陡坡時，引擎內部的燃燒壓力與溫度的升高變化，可能導致高壓燃燒氣體透過汽缸蓋墊片進入引擎冷卻系統，而導致冷卻液由副水箱蓋外溢(台灣馬自達汽車，2018)。由於汽缸旁有油路及水路，假如汽缸墊片失效，就有可能發生氣+水，氣+油，水+油，氣+水+油等各種洩漏問題如圖 3 所示，油污明顯擴及汽缸四處，顯見墊片的重要性。然而汽缸內的壓力是動態的，當氣體爆炸時，汽缸內部變大的壓力會將螺栓撐開，此時必須仰賴墊片的回彈性能才能確保其密封能力。

圖 3. 汽缸墊片失效示意圖(車網族第三方保證，2019)

利用墊片來防止引擎的各零件、組件之間洩漏現象的發生已經是市售的引擎中普遍運用的手法,然而引擎本身亦會因為使用環境的不同造成部份零件的老化,零組件之間運作產生的磨損及改裝上的需求等等的原因，而對引擎進行拆裝維修保養等等的作為，使得墊片這一密封性零件在引擎的正常運轉使用上佔有一席之地。另外進一步的探討,如何有效的提昇墊片產品的開發效率、降低生產風險及滿足市場需求的產品,進而提昇獲利率、市佔率及品牌價值一直是墊片製造廠商努力的目標。

(一)墊片材質的分類

引擎墊片的材質依其使用環境及可分成三大類，條列整理如下表1所示。

1. 金屬材質:具有良好的強度、硬度、耐高溫、耐高壓及回彈性能，多用於高溫、高壓及螺栓負載大的條件。
   (1) 單層板：單層金屬墊片，除了利用金屬本身的機械性質來達成密封的效果，亦會在墊片增加壓痕來發揮密封的作用，所增加的壓痕可以強化特定區域的接觸壓力以提升密封性能。
   (2) 多層板：多層金屬墊片在單層金屬墊片的基礎上，更可以耐高溫，抗腐蝕，更強化特定區域的接觸壓力，提供更多層級的密封效果，

透過多層複合結構，使得多層板墊片在使用時有良好的彈性回彈及抵抗腐蝕性，同時擁有豐富的延展性。

2. 非金屬材質:具有良好的柔軟性、可壓縮性及螺栓載荷低等優點，由於質地柔軟及機械性質較差，所以連帶的強度不高，回彈性差，不耐高溫及高壓。
3. 複合材質:結合金屬材質的強度、硬度、耐高溫、耐高壓與回彈性能，以及非金屬材質的柔軟性、可壓縮性等等雙方面特點而成，成本較低亦是重要的考量因素。

表1.墊片材質分類

分類	材質	使用環境
金屬材質	單層板	進排氣歧管
	多層板	汽缸蓋
非金屬材質	橡膠	汽門室蓋
	非石棉	機油濾清器
	石墨	水泵浦
	軟木	油底殼
	紙	
複合材質	石墨複合板	進排氣歧管
	非石棉複合板	汽缸蓋

(二)金屬墊片壓痕的分類

市售金屬墊片中，除了利用材質上的不同來達成密封防止洩漏的功能需求，亦會在墊片上增加壓痕(embossed bead)來增加其密封的性能，進而使得不需要改變被密封組件的外形、材質、加工製程等條件下，就可以提升被密封組件的表面接觸壓力。由於增加的壓痕是立體的型狀，當墊片因 2 個組件間的組裝固定而受到壓縮，連帶著墊片上的壓痕也會因為壓縮而逐漸變平而產生密封的效果，壓痕區分為全壓痕及半壓痕二種型式如圖 4 所示

1. 全壓痕(Full Bead)：為一類似半圓的型狀，經負載壓縮變平後可產生三處的壓應力多適用於高壓或中壓的工作環境。
2. 半壓痕(Half Bead)：為一斜坡階梯的型狀，經負載壓縮變平後可產生二處的壓應力多適用於中壓或低壓的工作環境。

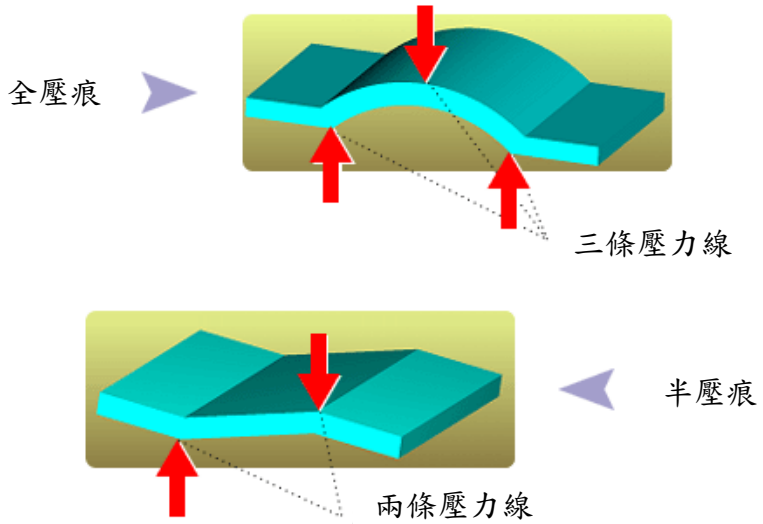

圖 4. 壓痕示意圖(DMC Inc., 2007)

二、文獻回顧

國內對於密封墊片的研究著實不多，大多屬於單層墊片的研究，國外文獻則有較多多層墊片的研究。許嘉元(1999)研究模組化氣體控制系統中的金屬墊片密封特性，考慮單層金屬墊片表面粗糙度與材料塑性變型等因素探討對於洩漏現象的影響，透過有限元素模擬與實驗結果進行比較，建立以表面最大等效塑性應變與洩漏量組成的洩漏量預測模型，並成功應用在其他墊片結構。

董昱廷(2009)介紹法蘭用墊片的基本構造與特性，及分析密封墊片的選用特性，探討歐美各國於設計法蘭用墊片時參照的設計準則或標準等等的規範，同時參考國外廠商的墊片選用軟體架構，結合國內廠商的產品特性資料及相觀知識，建立一密封墊片的選用機制，進而開發出一符合市場需求的密封墊片選別應用軟體。

熊仁洲、董昱廷與陳安富(2010)針對渦卷型墊片進行密封性能的評估，根據不同的填料材質的墊片，進行機械性能(壓縮及回彈性能)及密封性能試驗，由實驗結果得知石墨填料的密封能力優於其它填料的密封能力。同時並評估探討國內業者生產渦卷型墊片之製程水準，評估結果顯示，論文中所探討渦卷型墊片之回彈性能稍為低於規格需求，而密封性則基本滿足需求。

陳孟鴻(2013)針對非金屬材料如：紙、軟木、非石棉一類的纖維素材所合成的平面型軟質材料，進行一系列的壓縮、回彈與密封性能的分析研究。並透過一連串的墊片壓縮試驗及密封性能試驗得知，生產品質與規範需求值尚有距離，並將研究結果提供給業者，作為調整加工參數之參考，進而達成優化製程的目的。

黃俊翔(2014)使用預緊扭力控制法則換算螺栓預緊力，透過有限元素分析針對螺栓的不同鎖緊順序對於墊片式螺栓法蘭之影響進行探討，考慮螺栓螺帽的螺紋，在不同鎖緊順序的情況下，探討對內部墊片位移、墊片與鎖緊元件之應力應變的影響。

Tanmay 與 Vikas (2015)探討三層鋼板墊片在單缸引擎中的密封行為，考慮引擎不同操作環境下溫度對整體的影響，透過有限元素分析方法，而得知墊片的密封能力會因為墊片壓痕的型狀及螺栓的預緊力而影響，並對模擬結果進行富士感壓紙實驗驗證，實驗結果顯示與模擬結果有相同的接觸壓力分布，發生洩漏的位置相符，但並沒有進一步接觸壓力數值的比較。文章進一步提出改變螺栓的配置，讓螺栓位置更方正且更接近汽缸，進而獲得更佳的密封能力。

Suresh、Umashanker 與 Swapnil (2015)透過有限元素法模擬汽缸墊片在引擎運作狀態下的密封能力，在汽缸動態的用作過程中，汽缸氣體爆炸的壓力會撐開螺栓，使得洩漏的機會增加，缸體與缸體之間連接區域的接觸壓應力會變小，而產生洩漏的風險。作者考慮汽缸、汽缸蓋墊片與汽缸本體的 3D 有限元素模型，其中汽缸蓋墊片利用 ANSYS 軟體的 INTER195 元素，輸入墊片全壓痕與半壓痕位置的負載與卸載過程的壓力-變形量曲線後，可以將多層立體墊片改以一層平面墊片來模擬，無需處理立體墊片的大變型問題，因此可以用靜態方法來分析有限元素模型，大幅降低分析的困難度。文章有做富士感壓紙測試，確認缸體與缸體之間連接區域的接觸壓應力確實較小，有洩漏的危險，但並無與模擬結果的接觸壓力做數值的比較。

Suresh、Ram 與 Jham (2016)透過有限元素分析方法，考慮鋁合金汽缸蓋，在不改變汽缸蓋的外型下，變更加強筋的位置、大小及形狀來達到跟鑄鐵汽缸蓋同樣的強度，並減少 30%的重量，且提升疲勞強度約 25%。為了加速分析速度，使用 ANSYS 軟體的 INTER195 元素，以一層墊片模擬來多層鋼板墊片。

Jiaqi、Jimin 與 Xiuyong (2016)使用有限元素軟體 ABAQUS，建立汽缸蓋、汽缸套、汽缸本體、螺栓和多層鋼板汽缸墊片的分析模型，在輸入墊片全壓痕與半壓痕共 7 個位置的壓縮應力與位移曲線後，以一層墊片模擬原本三層汽缸墊片，在螺栓鎖緊力負載下，分析多層鋼板墊片的密封性能，文章提及接觸壓力容易受壓痕高度而影響，提高壓痕高度會增加接觸壓力，應變容易受壓痕寬度而影響，增加壓痕的寬度也會減少局部應變。並使用富士感壓紙實驗，確認墊片的接觸壓力與模擬結果有相同的分布範圍，但沒有進一步數值的比較。

增田義彥、吉島一也、田中利幸、稻垣英人與河口篤志(2017)運用有限元素分析方法，建立 2D 的有限元素模型，使用實驗測得墊片表面的磨擦系數，並量測墊片上的壓痕實際形狀來進行模擬，證實了墊片上的壓痕的細微變化對表面接觸壓力有重要的影響，運用同樣的方法分析墊片對汽缸運作時的影響，得知墊片表面處理塗層的剪切及磨擦力，對於汽缸蓋的滑動產生約束，可減少汽缸蓋的橫向位移，文章同時進行感壓紙測試，證實接觸壓力的實驗結果且與模擬結果趨勢吻合，但無接觸壓力實際數值比較。

Yanan Wei 與 Shuai Yang (2017)運用有限元素分析方法，延續 Jiaqi 等人(2016)的研究，考慮四種引擎運作狀態下溫度與汽缸內壓力的因子，分析汽缸點火運作時產生的壓力對墊片的影響，提出改善多層墊片中檔板層的面積及位置，使得汽缸墊片的壓縮後厚度更加均勻，且可增加壓痕的接觸壓力，文章使用 ABAQUS 軟體，使用多層墊片六個壓痕位置的壓力與位移曲線，建立以單層墊片模型模擬三層墊片。

從以上文獻得知：

1. 墊片密封性能可由墊片受壓時的接觸壓力來判斷，當墊片接觸壓力小於工作介質壓力時即可能發生洩漏現象。
2. 以有限元素法分析模擬墊片的密封性能，佐以富士感壓紙實驗驗證，成為主要的分析方法。
3. 有限元素分析中的多層墊片模型，除了以多層墊片模擬之外，還有以輸入重要壓痕位置的壓力與變形曲線後，以一層等效墊片模擬多層墊片的方法，唯其準確性無法從文獻中證實。
4. 富士感壓紙實驗一般僅作為趨勢探討，其數值準確性仍未被學者廣泛接受。

由於國內墊片相關研究非常稀少，而各種墊片實際擔負整個工業生產的各種密封任務，墊片廠商往往只提供簡單的操作指引如螺栓扭矩，不會對墊片的密封能力有明確說明，為了進一步瞭解雙層墊片在受壓變形下的力學行為與密封能力，本研究擬透過有限元素的分析模擬，並與感壓紙實驗來驗證雙層鋼板墊片密封性能的優劣。

貳、墊片與材料性質

本研究所探討的雙層鋼板密封墊片如圖 5 所示，是 Perkins 1100 系列柴油引擎中的一個零件，安裝於渦輪增壓器與進氣岐管間，其密封介質之壓力約 130～150KPa 左右，墊片中央孔周圍有一整圈的壓痕，四周有四個螺栓孔，中間有兩個小焊接點以確保上下兩片墊片的位置對齊，並不影響墊片的工作效能，依據工作手冊的安裝說明，螺栓孔位置以 M6 螺栓固定，額定鎖緊扭矩為 9 N·m。

圖 5. 市售多層金屬墊片

一、廠商提供之材料機械性質

本研究所使用墊片材質為 SUS304-H，屬於日本 SUS 系列奧斯田鐵型不鏽耐熱鋼，具有良好的耐蝕性能、焊接性能與耐熱性能，主要用於大型鍋爐、蒸汽管道與熱交換器等高溫壓力容器，廠商所提供的品質證明中材料性質如表 2 所示，廠商並未提供楊氏係數與蒲松比，僅能以一般鋼材常用的楊氏係數 200 GPa，蒲松比 0.3，密度 7850 kg/m^3 進行分析模擬。

表 2. SUS304-H 材料機械性質

硬度(HV)	抗拉強度(MPa)	降伏強度(MPa)	伸長率(%)
407	1258	1013	6.0

硬度試驗是機械工程常使用的試驗項目，利用堅硬的物體，例如碳化鎢鋼球或鑽石等，以一定的壓力在鋼材表面壓下凹痕，量測凹痕的深度、寬度等，可以計算其硬度值。由於凹痕是鋼材塑性的流動，因此可以推估其抗拉強度或降伏強度(劉澤山，2018)。參考 ASTM A370-2017 中硬度與抗拉強度對照表，最接近之硬度值 402 所對應之抗拉強度為 1300 MPa，與廠商提供資料對比，數據差異在合理範圍內，間接證實廠商提供的機械性質參數具有可信度。

二、硬度試驗

為了進一步確認廠商提供的材料機械性質，本研究針對墊片鋼片進行維克氏硬度試驗，以確認其硬度，請廠商提供與墊片相同材質 SUS304-H 薄板，製作成 50mmx50mmx0.2mm 試片，使用維克式硬度試驗機(FUTURE-TECH FM-810 軟體：FT-ARS)進行試驗如圖 6 所示，維克氏硬度試驗機對試片鋼材表面壓下凹痕，放大後及量測數據顯示畫面如圖 7 所示，反覆進行 5 次硬度試驗得到如表 3 所示。

圖 6. 維克氏硬度試驗機

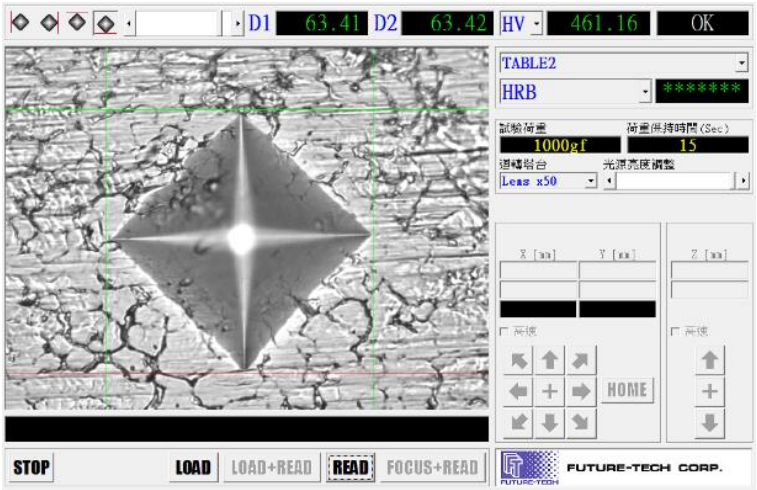

圖 7. 試片凹痕放大倍率圖

表 3. 維克氏硬度試驗結果數據表

	實驗值1	實驗值2	實驗值3	實驗值4	實驗值5
硬度(HV)	461	464	453	476	500

去除最大與最小兩筆實驗值，其餘三筆實驗值之平均為 467，以此為實驗值，與供應商提供硬度數值 407 比較如表 4 所示，硬度試驗之實驗值與供應商提供數

據有約 14.7%的差異，由此間接證實供應商所提供的品質證明書具有一定程度的可信度。

表 4. 維克氏硬度實驗值與廠商提供值比較表

實驗值	廠商提供值	誤差$\left(\frac{\text{實驗值}-\text{廠商提供值}}{\text{廠商提供值}}\right)$
467	407	14.7%

參、理論基礎

一、顯式動態有限元素法

本研究探討雙層密封墊片受壓變形的力學行為，屬於大變型的非線性動態問題，動態問題僅能處理非常短時間內的受力變形行為，以本文所分析的雙層墊片為例，整體應變應力大約在 0.004 秒已趨於穩定，持續再計算至 0.008 秒作為模擬結果。

(一)顯式(explicit)時間積分(士盟瑞其 CAE 團隊，2013)

動態問題使用顯式求解法是比較有效率的求解法，顯式求解法運用中央差分法對運動方程式進行時間積分，利用一個時間增量的動態條件下，去計算下一個時間增量的動態條件來進行，在時間增量開始時，求解的動態平衡方程式為

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I} \tag{1}$$

$\mathbf{M}$：節點質量矩陣

$\ddot{\boldsymbol{u}}$：節點加速度矩陣

$\mathbf{P}$：所施加的外力矩陣

$\mathbf{I}$：單元內力矩陣

在時間 t 增量開始時，計算節點加速度為

$$\ddot{\boldsymbol{u}}|_{(t)} = (\mathbf{M})^{-1} \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{I})|_{(t)} \tag{2}$$

由於顯式演算法總是採用一個對角化的質量矩陣，所以求解加速度並不複雜，節點的加速度完全取決於節點質量和作用在節點上的合力，使得節點計算的成本非常低。

採用中央差分法對加速度在時間上進行積分，可以假設加速度為常數的情況下，速度的計算如下式

$$\dot{\boldsymbol{u}}|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{\boldsymbol{u}}|_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{(\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)})}{2}\ddot{\boldsymbol{u}}|_{(t)} \tag{3}$$

在計算位移時，同樣可以假設速度為常數，因此位移的計算式如

$$\boldsymbol{u}|_{(t+\Delta t)} = \boldsymbol{u}|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)}\dot{\boldsymbol{u}}|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} \tag{4}$$

所謂的「顯式」是指在時間增量結束時的狀態僅依賴於該時間增量開始時的位移、速度和加速度。為了使該方法產生精確的結果，時間增量必須相當小，這樣在時間增量中加速度幾乎可以視為固定，由於時間增量必須很小，所以一個典型的分析求解程序需要成千上萬個時間增量，幸運的是因為不必同時求解聯立方程式，所以每一個時間增量的計算成本很低，大部份的計算成本損耗在元素的計算上。

(二)顯式時間積分方法的優越性(士盟瑞其 CAE 團隊，2013)

顯式方法特別適合用來求解高速動態事件，因此需要有許多小的時間增量，以便獲得高精度的答案，在顯式方法中可以用很簡易的方式，明確描述接觸條件和其他一些極度不連續的情況，透過調整節點加速度的方式，來平衡在計算接觸條件時的內力和外力的變化，並且能夠一個節點，一個節點的計算求解而不需疊代過程，要是這一個高速動態事件持續的時間非常短暫，則可以快速的獲得結果。顯式方法與隱式(implicit)方法最大的差異是顯式方法不需要疊代與收斂準則，對於動態問題之求解效率明顯優於隱式方法。

二、螺栓鎖緊張力與鎖緊扭矩的關係

鎖緊螺紋時，鎖緊扭矩(T)與鎖緊張力(F)的關係在該螺紋尚未降伏時，可表示如下示

$$T = KdF \tag{5}$$

其中 K 為扭矩係數，可表示為

$$K = \frac{1}{2}\left[\frac{d_2}{d}\tan(\emptyset' + \beta) + \frac{d_n}{d}\mu_1\right] \tag{6}$$

d:螺紋公稱直徑

d_2:螺紋有效直徑

d_n:螺栓頭部座面或平均直徑

β:螺紋的導角

$\emptyset'$:螺紋接觸面的換算摩擦角=$tan^{-1}\mu/(cos\alpha/2)$

μ:螺紋接觸面的摩擦係數

α:螺紋的角

μ_1:螺栓頭部座面或螺帽座面與被鎖緊物接觸面摩擦係數

扭矩係數 K 取決於螺紋接觸面的摩擦係數，螺栓頭部承載接觸面與被鎖緊物體的接觸面摩擦係數，摩擦係數愈小時扭矩係數愈小，扭矩係數變小的話，同尺寸的螺紋以低扭矩鎖緊時，即可得到高的鎖緊張力。這表示欲以高扭矩鎖緊高強度螺

紋時，減小摩擦係數，降低扭矩係數，即可容易鎖緊。一般狀況下如無特別指明，扭矩係數均使用 K=0.2。(賴耿陽，1989)

肆、有限元素分析

一、三維分析模型

本研究考慮的金屬墊片為一雙層金屬墊片，墊片中央圓孔處設計有壓痕，墊片厚度 0.2mm，兩片墊片疊合後之壓痕間距為 1.3mm，因此當墊片完全壓平後，上墊片之最大位移約 1.3mm，使用三維繪圖軟體建構其三維模型，其形狀尺寸如圖 8 所示

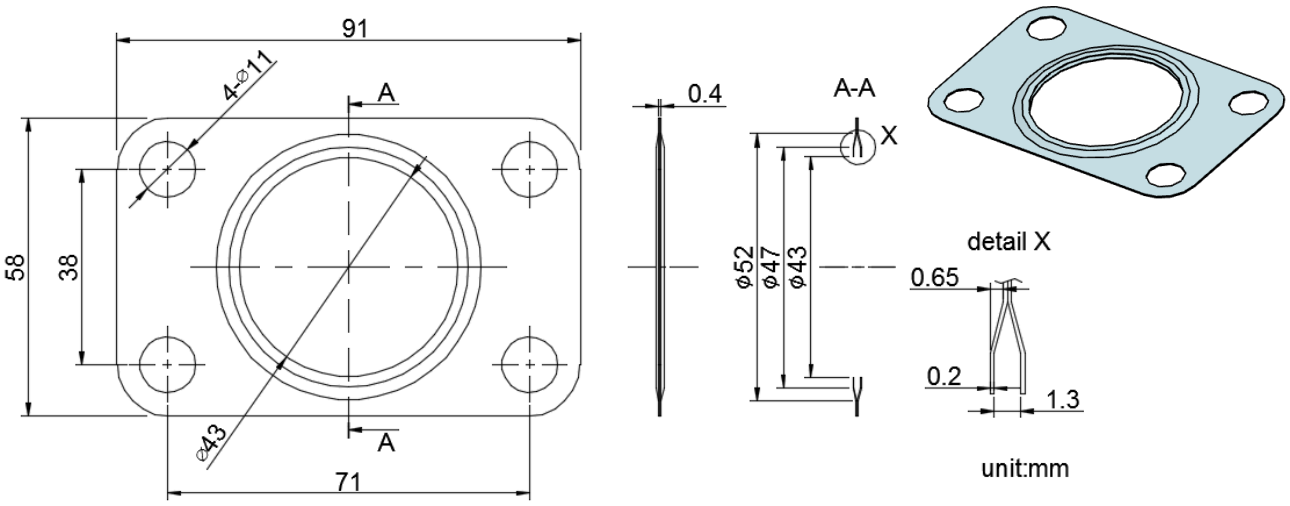

圖 8. 雙層鋼板墊片形狀尺寸圖

考慮墊片實際的使用環境，設計一個檢測治具三維模型如圖 9，用於測試墊片於實際使用時的變形與密封性能，被密封物透過四個 M6 螺栓來結合組裝，墊片位於其中擔任密封的角色，螺栓受扭矩而鎖緊，進而壓縮墊片達到密封的效果。

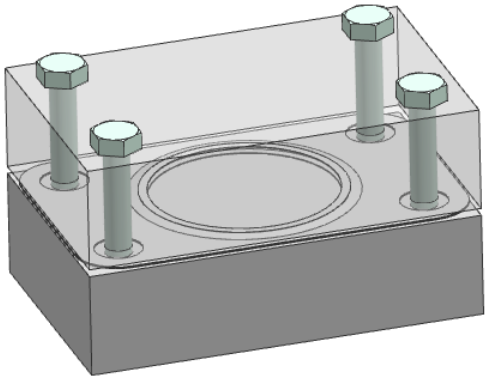

圖 9. 檢測治具與多層墊片之三維模型

有限元素分析的模型如圖 10 所示，由於本問題是前後左右對稱問題，可以只考慮 1/4 模型進行分析模擬，而螺栓緊鎖扭矩可以轉換成螺栓軸向張力，螺栓的軸向張力再換算成螺栓與上壓塊(Upper Block)接觸面之壓力負載，可獲得跟螺栓鎖緊時相同的下壓負載，因此本研究之分析模型並未考慮螺栓，以簡化模型，加快分析的速度。

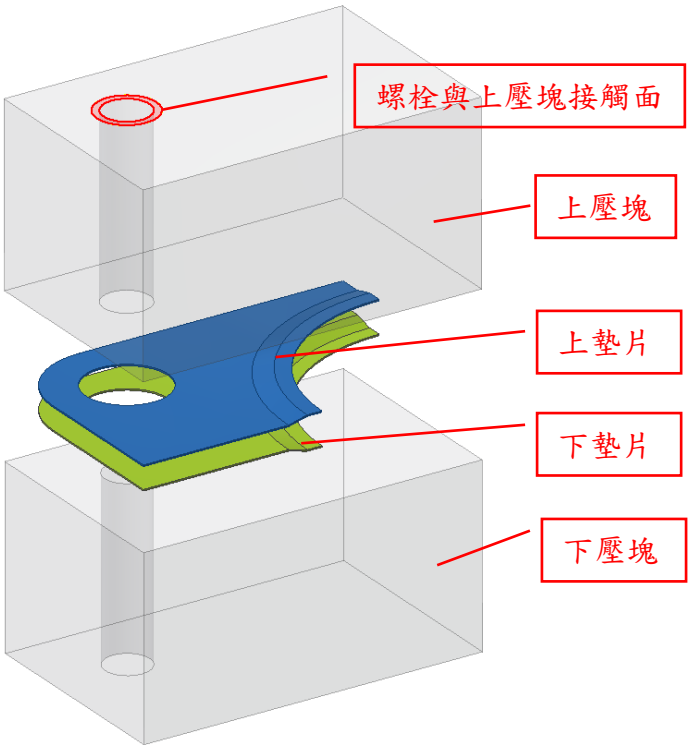

圖 10. 雙層墊片之有限元素分析模型

二、邊界條件

本墊片之額定鎖緊扭矩為 9 N·m，為了瞭解不同扭矩對墊片的影響，本文再多考慮 3 N·m 扭矩負載，以比較兩種負載的差異。M6 螺栓若以 3 N·m 扭矩鎖緊，螺栓張力可由式(5)計算，其中扭矩係數 K=0.2，扭矩 T =3 N·m，螺栓公稱直徑 d =0.006 m，一支螺栓計算鎖緊張力為 F=2500 N，螺栓與上壓塊接觸之表面積為一空心圓，外直徑 0.008 m，內直徑 0.0062 m，面積$A = (0.008^2 - 0.0062^2) \cdot \pi/4$ m^2，螺栓之鎖緊負載轉換成上壓塊與螺栓接觸面之壓力負載為$P = F/A$ =124.534 MPa。扭矩 9 N·m 轉換的壓力負載為 373.602 MPa。

約束邊界條件為，下壓塊之下表面為完全固定，螺栓孔的圓柱面僅允許 y 方向移動，另外兩個對稱面分別設定 x 方向對稱與 z 方向對稱，分析模型之負載與約束邊界條件示意圖如圖 11 所示。

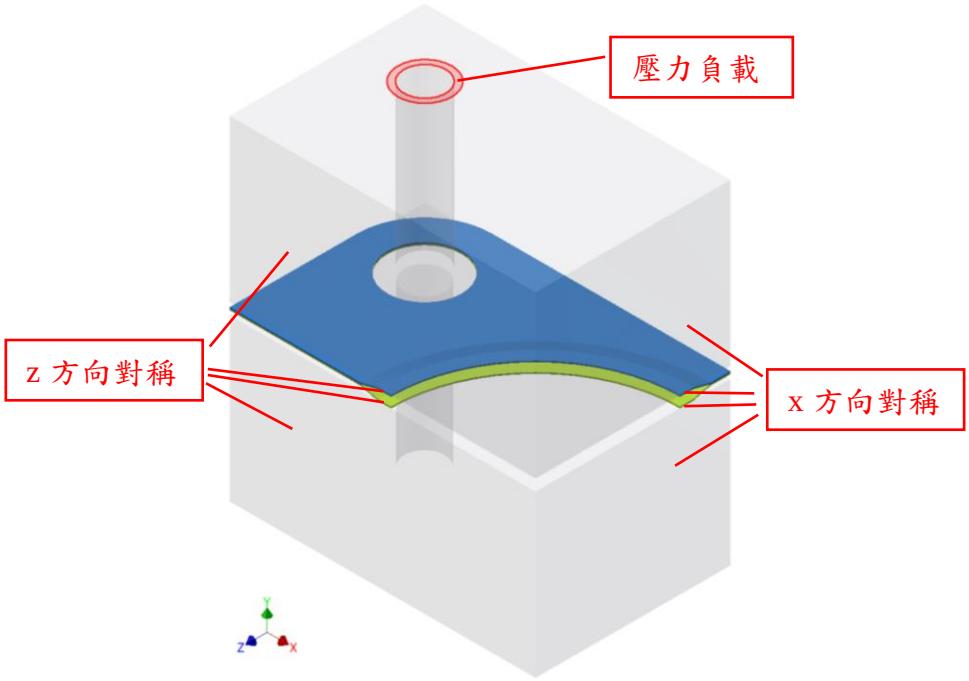

圖 11.負載與約束邊界條件示意圖

三、材料性質

雙層鋼板墊片使用 SUS304-H，上下壓塊使用一般結構鋼 SS400，其詳細材料性質如表 5 所示，兩種鋼材之楊氏係數 200 GPa，蒲松比 0.3，密度 7850 kg/m^3，均為一般鋼材常見的數據。

表 5.有限元素分析模型材料性質

模型元件	材料	抗拉強度（MPa）	降伏強度（MPa）	伸長率（%）
上下墊片	SUS304-H	1258	1013	6.0
上下壓塊	SS400	400	250	25

四、網格劃分

使用八節點磚型線性元素 C3D8R，網格劃分如圖 12 所示，網格尺寸約 0.0008 m，上下墊片各使用約 1500 個元素，上下壓塊各約 45000 個元素，總共使用約 93000 個元素。

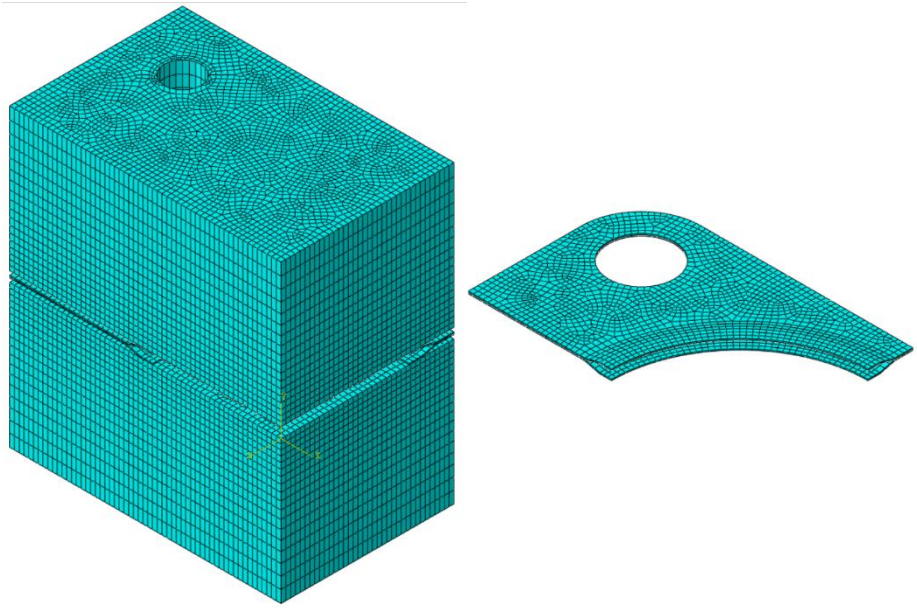

圖 12. 網格劃分圖

五、分析結果與討論

首先觀察上墊片的變形情形如圖 13，3 N·m 負載已經可以完全壓平墊片，其最大位移已達 1.304 mm，即為雙層墊片設計的最大變形量，加大的 9 N·m 負載之最大位移僅稍微增加為達 1.317 mm。

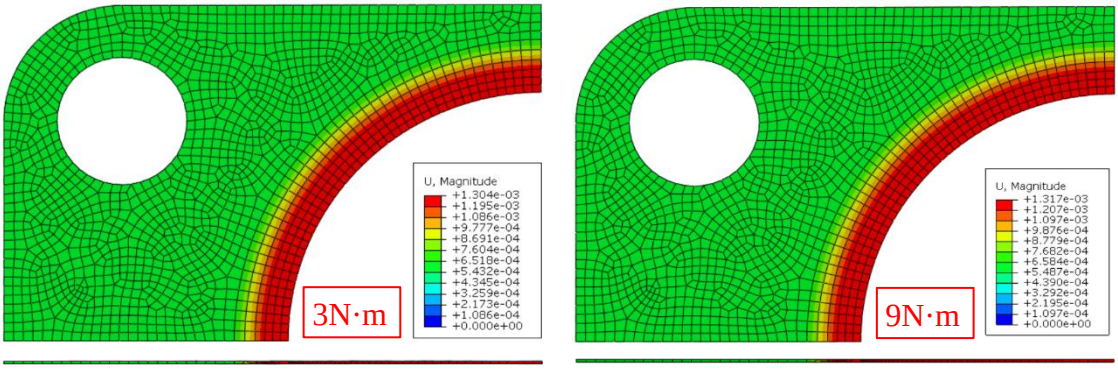

圖 13. 上墊片變形圖(單位:m)

其次觀察上墊片的 von Mises 應力分佈情形，兩種負載條件得到非常接近的應力分佈，甚至 3 N·m 負載的最大 von Mises 應力還略高於 9 N·m 負載，此結果似乎違反基本物理觀念，三倍的負載為何得到差不多的應力結果？

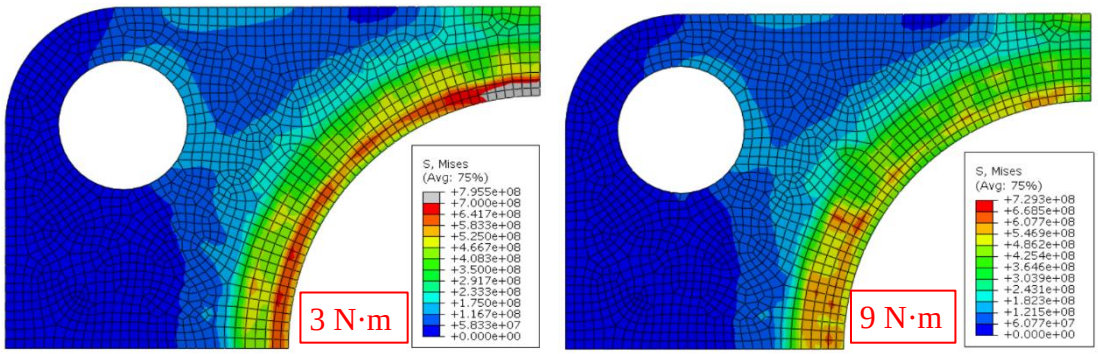

圖 14. 上墊片 von Mises 應力分佈圖(單位:Pa)

為了解釋此一看似不合理的現象，必須由上墊片接觸壓力分佈圖來說明，圖 15 比較兩種負載情況上墊片的接觸壓力分佈，兩種負載產生的接觸壓力分佈範圍相當不同，扭矩 9 N·m 負載的接觸壓力有相當大範圍分佈在墊片的左側，這表示加大的扭矩負載不僅壓平了墊片，甚至還造成上壓塊中央拱起的效應，以致於在壓痕位置的接觸壓力還略小於 3 N·m 負載的結果。

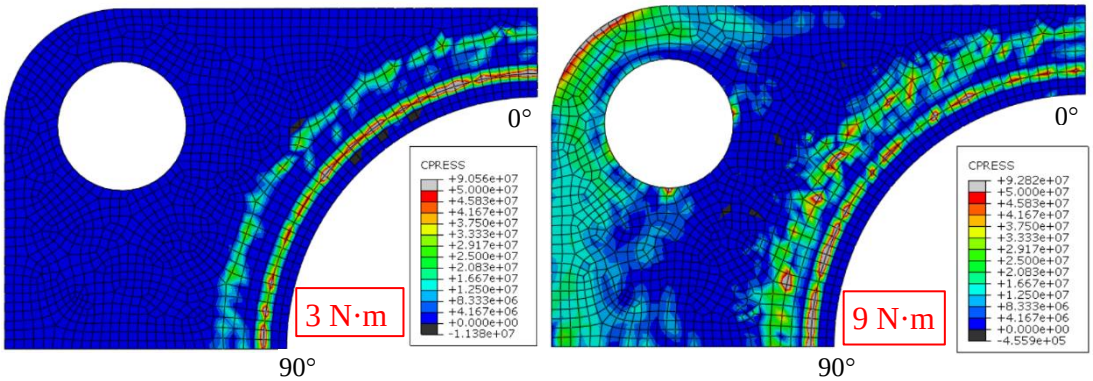

圖 15. 上墊片接觸壓力分佈圖(單位:Pa)

除此之外，觀察 3 N·m 與 9 N·m 負載的接觸壓力分佈圖，墊片中央大圓孔邊緣，有一明顯完整的環形壓力區域，除此之外，外圍尚有一圈不甚連續的環形壓力區域，這代表本研究探討之雙層金屬墊片受壓時，可產生二圈不同程度的密封效果，但關鍵的密封效果仍由內圈之較高接觸壓力來決定。

沿著內圈環形壓力區域，每 10 度擷取其接觸壓力值如表 6 所列，繪製成曲線圖如圖 16 所示，曲線顯示非常不同的分佈情形，3 N·m 負載的接觸壓力曲線在 0°~50°範圍均高於 9 N·m 負載的壓力，60°~90°則低於 9 N·m 負載的壓力，這樣的分佈情形亦可說明 9 N·m 較高的負載造成上壓塊中央拱起的效應，使其接觸壓力集中在左側，造成 60°~90°有較高的接觸壓力，而 0°~50°範圍的接觸壓力則小於 3 N·m 負載的結果。

表 6. 環形壓力區域之接觸壓力值(MPa)

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	平均
3 N·m	67	55	64	62	50	59	50	31	34	54	53
9 N·m	28	35	44	46	25	39	65	78	60	73	49

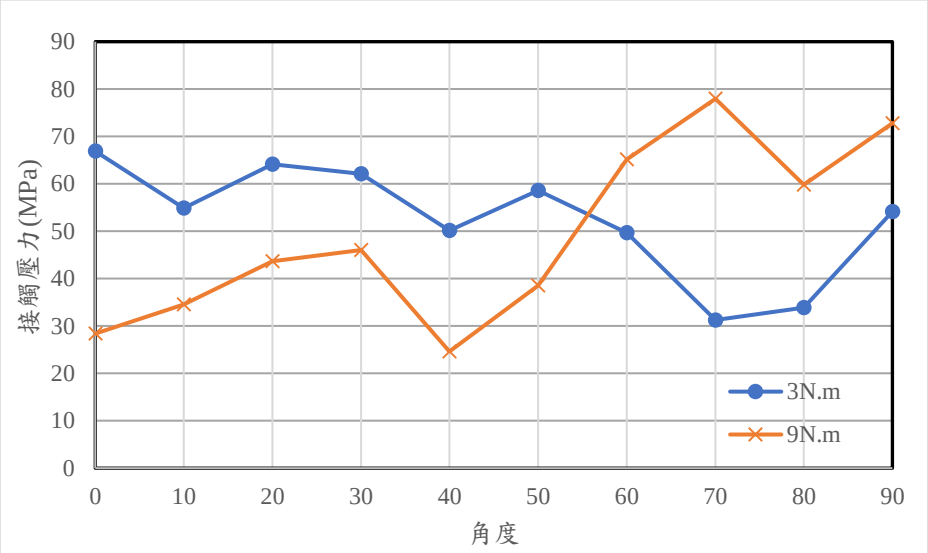

圖 16. 環形壓力區域之接觸壓力比較圖

表 6 中 3 N·m 負載的平均接觸壓力為 53 Mpa，略高於 9 N·m 負載的 49 MPa，墊片的密封能力是由壓力圈之最小值來決定，3 N·m 負載之環形壓力圈最小接觸壓力值為 31 MPa，略高於 9 N·m 負載的 25 MPa，不論 31 MPa 或 25 MPa 接觸壓力均遠高於本墊片工作環境之密封介質的工作壓力，因此兩種螺栓負載均能提供安全的密封性能。

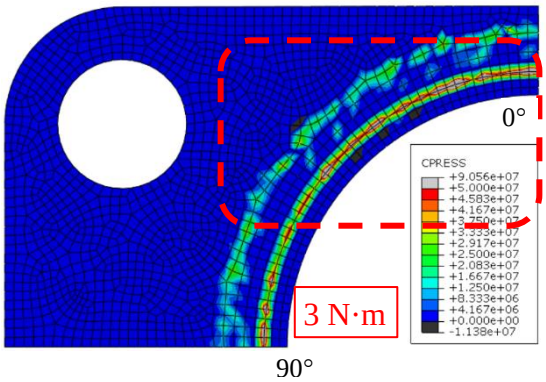

圖 17.較高接觸壓力分佈範圍(單位:Pa)

由於 3 N·m 扭矩是比較合理的負載，觀察接觸壓力分佈的曲線，較高的接觸壓力出現在 0°~50°範圍內，大約就在左右螺栓孔的水平連線上如圖 17 所示，此一

觀察符合文獻 Tanmay 與 Vikas (2015)的結論，因此若要提高 60°~90°的接觸壓力，僅需將螺栓孔右移，讓螺栓孔的垂直連線也通過壓痕即可。

由於額定負載 9 N·m 扭矩並未能提供墊片更高的接觸壓力，對於墊片密封效能並無提升效果，只增加螺栓的負載與操作的困難度，而墊片左側大面積的接觸壓力也會增加實驗時富士感壓紙誤判的機會，因此後續的實驗將以 3 N·m 扭矩負載進行，以驗證有限元素模擬的結果。

伍、實驗

一、檢測治具

依照圖 9 之三維模型，製作檢測治具如圖 18 所示。

圖 18. 檢測治具

二、富士感壓紙

富士感壓紙運作的基本原理是當感壓紙受壓時，塗佈其上的微粒色球破裂後和顯色劑作用而產生顏色，透過微粒分子控制技術，感應不同程度的壓力而釋放出不同程度的微粒色球，結果會以不同深淺的顏色反應不同程度的壓力值(巨承科技，2012)。

三、實驗方式及過程

將雙層金屬墊片放置於下壓塊上，並於富士感壓紙放置於上墊片之上，再蓋上上壓塊，先預鎖上四根 M6 螺栓，再使用扭力板手將四只 M6 螺栓鎖緊至 3 N·m 扭矩，停留約 2 分鐘後開始拆卸螺絲，取出感壓紙。

四、實驗結果與討論

進行三次實驗結果之感壓紙如圖 19 所示，由於螺栓鎖緊的扭矩略有差異，導致壓力色階分佈也略有不同，但基本上都有二圈圓形痕跡，內圈顏色較深較完整，外圈顏色較淺且有少部份斷斷續續的狀況。

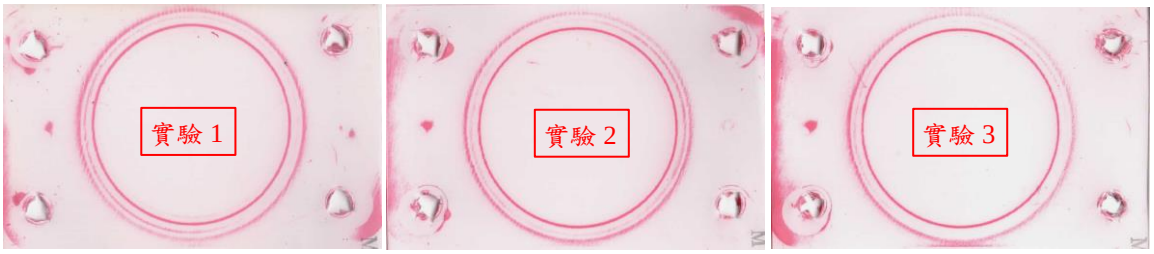

圖 19. 三次感壓紙實驗結果圖

由於實驗一的圖形較對稱，而且螺栓位置較少壓力色塊，比較接近模擬結果，因此取實驗一的 1/4 圖形與模擬結果比較如圖 20 所示，從比較圖中可觀察到相同的壓力分佈區域，基本上都有完整的內圈壓力區域，外圈的接觸壓力較小且不連續，實驗結果與模擬結果的接觸壓力分佈趨勢相同。

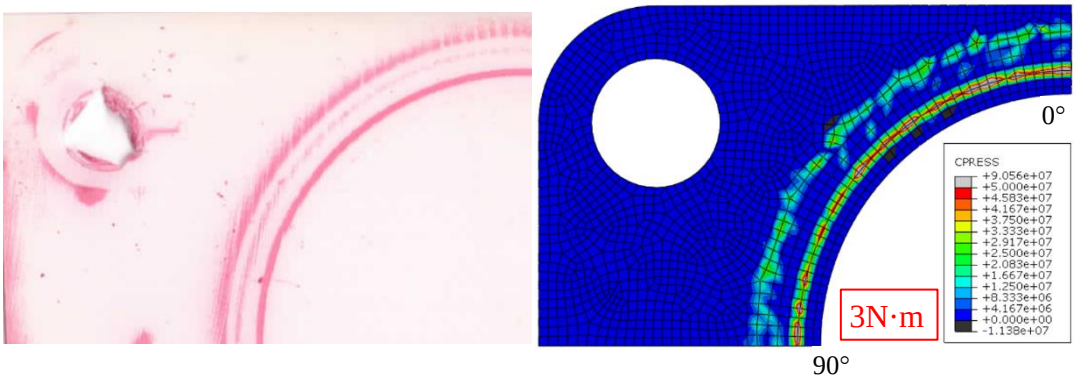

圖 20. 感壓紙實驗與模擬結果比較圖

柒、結論

本研究以有限元素法分析雙層鋼板墊片受壓變形的行為與接觸壓力，並設計製作一個測試治具進行富士感壓紙實驗，從研究結果得知：

1. 本研究所探討之雙層鋼板墊片在受壓時，會產生二圈接觸壓力圈，代表此墊片具有二圈密封性能，而其關鍵密封性能由最內圈決定，在螺栓施加額定 9 N·m 扭矩的負載下，可獲得 25 MPa 之接觸壓力，遠高於被密封件介質壓力，因此可確保洩漏不會發生。

2. 從分析得知增加螺栓扭矩未必能增加墊片之接觸壓力，反而有可能因為治具翹曲而得到反效果，本研究的結果顯示，3 N·m 扭矩的負載下可獲得 31 MPa 的接觸壓力，較小的螺栓負載反而可以得到較大的接觸壓力，因此必須透過詳細的分析才能提供適當的螺栓負載。
3. 富士感壓紙不易由色階判讀接觸壓力，但透過壓力區塊的分佈可以某種程度上證實模擬結果，本研究的實驗結果證實與模擬結果有相同的接觸壓力分佈趨勢。
4. 較大接觸壓力出現在螺栓孔的水平連線上，此結果符合文獻的結論，因此若要提高 60°~90°的接觸壓力，僅需將螺栓孔右移，孔讓螺栓孔的垂直連線通過壓痕即可。

藉由本研究的執行，可以透過有限元素法模擬雙層鋼板墊片受壓變形的行為，可提供墊片之應力、應變、位移、接觸壓力…等等的資訊，對於瞭解雙層鋼板之密封性能具有非常重要的幫助，由於國內對於墊片密封技術的研究著實不多，雙層鋼板墊片的研究更是少數，此方法盼能對國內業界提供開發設計上的幫助，進而提升開發效率，降低開發成本。

參考文獻

士盟瑞其 CAE 團隊，2013。《最新 Abaqus 實務入門》。新北市：全華圖書。

台灣馬自達汽車，2018，新聞中心:訊息公告。https://www.mazda.com.tw/news/offers/20180906/，取用日期：2019 年 04 月 17 日。

巨承科技，2012，產品介紹-富士感壓紙-使用方式-操作原理。http://www.g-chen.com/products/products_show.php?pid=118&cid=2&language=_tw，取用日期：2020 年 03 月 22 日。

車網族第三方保證，2019，技術網誌:引擎系統維修。https://www.oicar.cc/portal_d686_page.php?owner_num=d686_41610&button_num=d686&cnt_id=2298，取用日期：2020 年 03 月 22 日。

許嘉元，1999，《金屬密封塑性變形研究》。台北市:國立臺灣大學碩士論文。

陳孟鴻，2013，《墊片材料壓縮及回彈、潛變鬆弛及密封性能之研究》。 高雄市：正修科技大學碩士論文。

曾教授與古董保時捷，2013，第二章：引擎介紹。https://eatontseng.pixnet.net/blog/post/100681095，取用日期：2020 年 03 月 22 日。

黃俊翔，2014，《螺栓不同鎖緊順序對墊片式法蘭接頭力學行為之影響》。雲林縣：國立雲林科技大學碩士論文。

董昱廷，2009，《密封墊片選用機制之研究與軟體開發》。高雄市:正修科技大學碩士論文。

鈴木汽車，2007。《JIMNY 維修手冊》。

熊仁洲，董昱廷，陳安富，2010，〈渦卷型密封墊片之介紹與性能評估〉。《機械月刊》36(12):76-92。

劉澤山，2018，台灣省土木技師公會-技師報，工程資訊-談鋼材硬度與抗拉強度關係。http://etimes.twce.org.tw/工程知訊/2453-談鋼材硬度與抗拉強度關係.html，取用日期：2020 年 03 月 22 日。

賴耿陽，1989。《螺紋鎖緊機構設計，現代螺紋使用實務》。台南：復漢出版社。

ASTM- A370, 2017, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products," P.12, TABLE 2.

DMC Inc., 2007. R&D-2.Bead. http://www.edmc.co.kr/eng/tech/tech01.asp?this=1&part=1 (Date visited: 2020/03/22).

Jiaqi Li, Jimin Ni and Xiuyong Shi, 2016, "Finite Element Analysis on Multi-Layer-Steel Cylinder Head Gaskets," *SAE Technical Paper* 2016-01-1381, 2016, doi:10.4271/2016-01-1381.

Suresh Kumar Kandreegula, Umashanker Gupta and Swapnil Vyas, 2015, "Investigation of Gasket Sealing Behavior of Cylinder Head and Block under Engine Operating Conditions and Its Experimental Verification," *SAE Technical Paper* 2015-26-0029, 2015, doi:10.4271/2015-26-0029.

Suresh Kumar Kandreegula, Ram Krishna Kumar Singh and Jham Tikoliya, 2016, "Comparative Static Simulation Study of Aluminum Cylinder Head for Commercial Vehicles using Simulations Tools," *SAE Technical Paper* 2016-01-2349, 2016, doi:10.4271/2016-01-2349.

Tanmay Santra and Vikas Kumar Agarwal, 2015, "Sealing Prediction and Improvement at Cylinder Head & Block Interface under Thermo- Mechanical Loading involving Multi- Layer Steel Gasket," *SAE Technical Paper* 2015-01-1743, 2015, doi:10.4271/2015-01-1743.

Yanan Wei, Shuai Yang, 2017, “Finite Element Analysis of Cylinder Gasket under Cylinder Pressure and Structural Optimization of the Cylinder Gasket,” *SAE Technical Paper* 2017-01-1080, 2017, doi:10.4271/2017-01-1080.

増田 義彦，吉島 一也，田中 利幸，稲垣 英人，河口 篤志，2017，“シリンダヘッドガスケットのシール面圧計算解析”,*トライボロジスト*,第 62 巻第 3 号 (2017) 217～227。