

Paper

Y.C. Cho, S.Y. Chen and Y.L. Huang, “Application of Finite Element Methods for the Analysis of Automotive Disc Brake Caliper”, *the 28th Conference on Theoretical and Applied Mechanics*, October 2004, Taiwan.

有限元素法在汽車碟式剎車制動器之分析與應用

卓玉娟* 陳申岳** 黃玉麟***

*中興大學 土木工程學系研究生

**中興大學 土木工程學系論文共同指導老師

***中興大學 土木工程學系教授

摘要

據以往的文獻資料記載，汽車剎車器的分析研究與設計，大都著重於剎車器摩擦耗材（亦即來令片）的材料成分分析，及其與剎車碟接觸情形及摩損狀況研究，藉由自行撰寫的電腦程式與實際實驗結果相對照，以發展來令片摩擦耗材與剎車碟的接觸應力分析程式，但仍未見到有關於，針對剎車器整體進行固體力學方面的應力應變分析之研究，以及進而提出分析及改良設計方面之建議；此外，由於傳統的剎車器多採用反覆的模型實驗與設計迴圈來進行研發設計，既所費不貲也耗費時間，投資研發成本更是昂貴，所以使得台灣本地的製造商多仰賴於國外的研發成果。

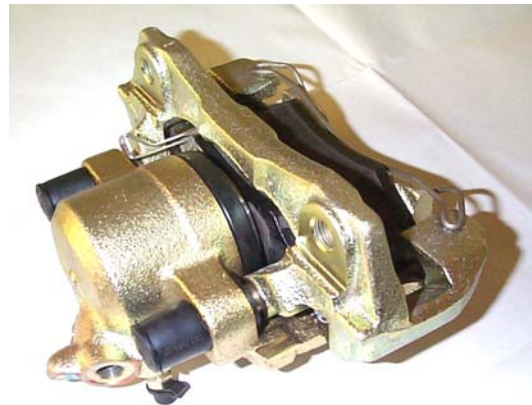
本研究有鑑於傳統的剎車器研發方法之不足，以及剎車器的研究文獻甚少，而建立一套逆向工程技術應用於產品設計的模式，結合了有限元素分析理論及現有 CAD 軟體，使用現有電腦軟體進行電腦輔助工程分析，本文針對 CM99 型汽車碟式油壓剎車器進行分析及改良方向探討，並使用了廣泛應用於研發航太工業技術方面的有限元素分析軟體-ANSYS 為分析工具，以期在日後提昇機械產品的研發工作準確性、經濟性及研發效率，並提昇本國自行研發機械產品之國際市場競爭力。

關鍵字：逆向工程，有限元素分析，碟式剎車器，油壓剎車器

一、前言

1.1 研究目的與動機

傳統的產品設計過程中，一個產品的設計仰賴於反覆的實驗結果，但是通常實驗的結果，只能告訴我們產品是否會破壞以及其性能，卻不能分辨其破壞原因，要將各個外力因素隔離亦很困難，又加上傳統模型的製作過程往往耗時費力，反覆的實驗與設計迴圈有時亦所費不貲，所以，這樣的產品研發改良過程有時並無法因應現今瞬息萬變的市場生態。



照片 1.1 CM99 碟式油壓剎車制動器

但現今經由有限元素分析，已能模擬產品的實際受力行為，因此，本研究引用逆向工程概念，結合了有限元素分析理論及結構力學觀念，建立一套逆向工程技術應用於產品設計的模式，使用有限元素分析軟體-ANSYS 配合 CAD 軟體-Solid Work 為分析工具，對 CM99 型汽車碟式油壓剎車器（如照片 1.1）進行分析研究，而此逆向電腦輔助工程分析模式，可以達到僅由取得的成品及製造圖，在完全不了解其原始設計準則及改型方向的情況下，藉由分析結果，追溯出其原始設計準則，並瞭解其力學特性，因而藉由分析判斷結果為根據，即

可提出進階分析、設計之方向及建議。

此研發模式將提供產品設計師更準確、快速的提案構想，提昇研發工作的效率及經濟性，及產品的市場競爭力。

此研發模式優於傳統研發方法之效益如下：

1. 減少設計開發時程：精確的分析可避免重複修改硬體及出圖製造。
2. 降低製造成本：正確的分析及設計可盡量減少材料用量，節省成本。
3. 降低製造過程毀損比例：減少由於結構設計不良，而導致的組裝過程中的毀損率，減少生產成本。
4. 提高商品競爭力：藉由精密分析所設計的產品，可達到堅固、耐用、壽命長久的強勢商品競爭力。
5. 提高商品信譽：生產公司若能對本身商品的可靠度有相當的瞭解和控制，則更容易獲得客戶的信任。

1.2 CM99 剎車器之介紹與簡單原理

CM99 碟式油壓剎車制動器是由國內某廠商與德國之著名剎車器製造商合資開發，藉由國際合作所研發生產之剎車器產品，並藉雙方各有專精的研發能力及製造管理，以達成國際分工之雙贏策略。

CM99 剎車器為現今最普遍使用的碟式油壓剎車器，且為『浮動式單一活塞自動定位式』剎車器(single-piston floating caliper)。

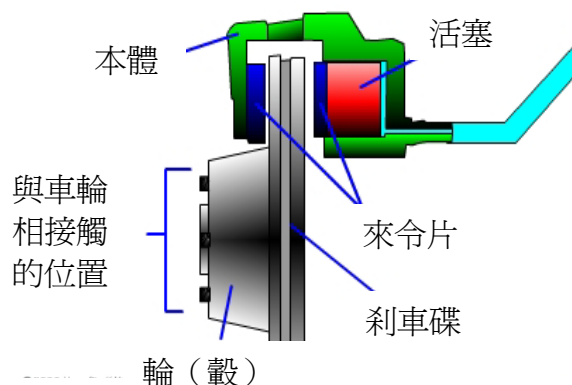


圖 1.1 碟式油壓剎車器之作用機制

見圖 1.1，碟式剎車器使用金屬塊（碟）而不用鼓輪，因此在剎車碟的兩邊都有一平坦的剎車蹄片（來令片背

板），當從剎車總泵來的油體壓送到分缸時，活塞會推動剎車蹄片而將剎車碟夾住並剎車。在各種碟式剎車器中，單一活塞自動定位式碟式剎車器則具有自動調校中線、自動調節之特性，亦即，本體構件能沿著滑動軸桿自由滑動（如圖 1.2），因而剎車碟片能即時移動到中心處，並夾住剎車碟，因此其靈敏度及活動性良好，剎車效能優良。剎車器普遍用於前輪，而且散熱良好，不必調整剎車間隙，保養容易。

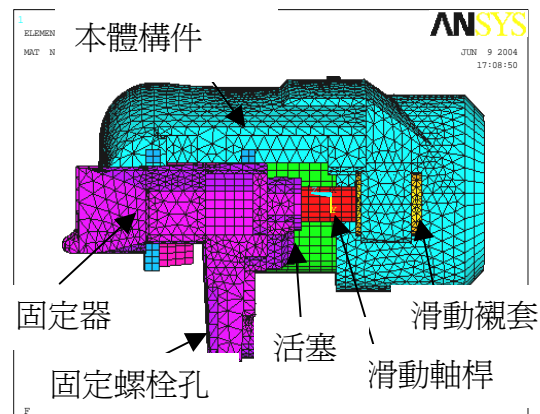


圖 1.2 CM99 碟式油壓剎車器側面圖

二、數值分析

2.1 研究分析重點

本研究主要目的在於追溯 CM99 型碟式油壓剎車制動器之原始設計內容，並提出進階設計及分析建議，所以，必須先模擬其實際受力情形，進行分析，進而瞭解各構件之力學特性，亦即，必須先區隔與確定哪些為強度構件、勁度構件、兼具強度勁度之構件，及功能性構件。

實際受力情形的模擬分析重點：

1. 剎車時，來令片(Brake Pads)上之應力及應變分布。
2. 當活塞 (Piston) 受到油壓壓力時，主體 (Housing) 上應力及應變分布。
3. 當達到剎車效能之作用極限，施加最大的剎車力量於來令片的表面時，固定器 (Anchor) 上所形成之

應力及應變分布。

2.2 數值分析歸納

本研究使用結構靜力分析，此為基本指標分析，並假設所有材料行為均在線彈性範圍內，由於分析結果中並無出現降伏區域，所以此線彈性之假設成立。

使用實體元素 Solid 45，並且以六面體及四面體混合使用，並加以簡化處理及修改幾何模型，以期取得準確而快速的分析結果，並同時避免不合理之應力集中現象發生。

網格化後，模型（如圖 2.1）包含約 27000 個節點，62000 個元素；材料性質（Material Properties）有七種，沒有實體常數，元素型式（Element Type）一種。

金屬材料單位重約 $7\sim 8\text{ g/cm}^3$ ，金屬材料降伏應變量約 0.002，金屬材料泊松比約 0.3。

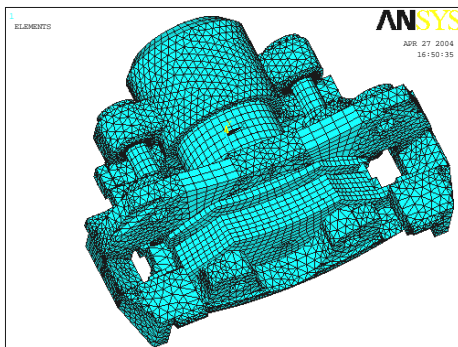


圖 2.1 CM99 剎車器有限元素模型

2.3 荷載及邊界條件

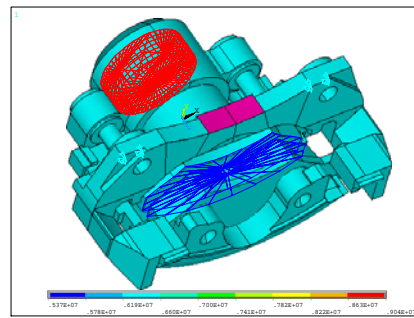
2.2.1 荷載條件方面：

討論油壓器內部油壓壓力及來令片上之接觸壓力、摩擦力對模型之影響。

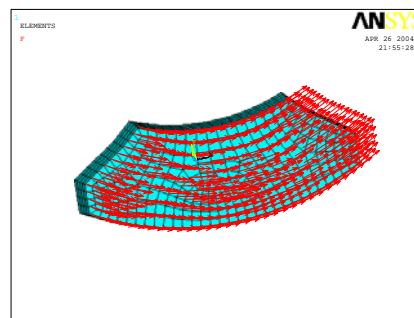
剎車碟片（來令片背板）會對剎車碟施加垂直正向力，並且剎車碟和來令片間有接觸摩擦力存在。

本研究設定最大油壓力 $9.04 \times 10^6\text{ N/m}^2$ 於油壓器之活塞上，如此會同時產生 $5.4 \times 10^6\text{ N/m}^2$ 之正向壓力於剎車碟及來令片上（如圖 2.2 所示），最後導致來令片產生 $2.7 \times 10^6\text{ N/m}^2$ 之摩擦力，如圖

2.3。

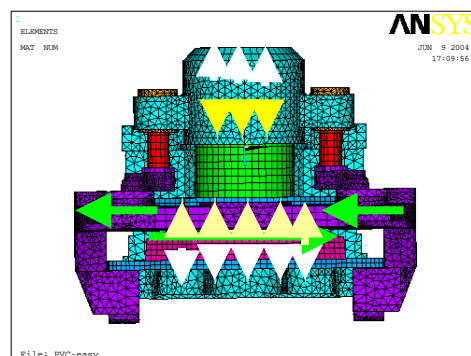


2.2 油壓壓力及來令片上之正向壓力



2.3 來令片上所受之均布摩擦力

2.2.2 邊界條件方面：



2.4 力平衡關係圖

由圖 2.4 中所示的油壓壓力、摩擦力、正向壓力及支承反力之平衡關係，本研究可考慮到兩種不同的可能力量傳遞路徑，因此，研究中安排兩個模型，其中一個在固定器與來令片背板間設有結合條件，另一個則沒有，其他部位之邊界條件皆相同。在各零件間的互相黏接位置建立相互結合（Constraint Equation）之拘束條件，而固定器上之

螺栓孔則施予零位移的邊界條件，此外，整個剎車器唯一的支承構件則是固定器。

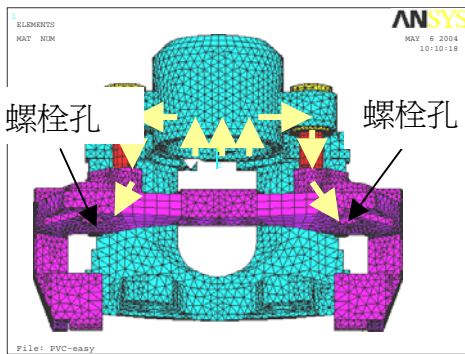


圖 2.5 主要載重傳遞路徑之一

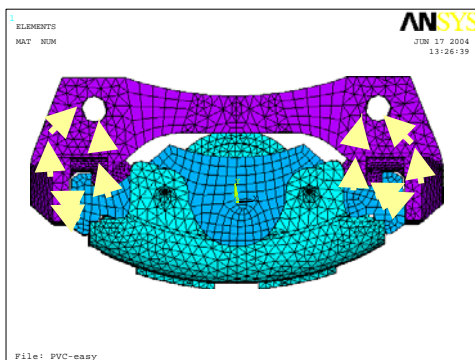


圖 2.6 主要載重傳遞路徑之二

位於本體上的來令片背板之主要載重傳遞路徑(load path)有兩條，一為直接將力量由來令片、活塞傳到本體，再由本體通過滑動軸桿，最後到達固定器的固定螺栓，如圖 2.5 所示。另一路徑則是由於主體上的來令片背板跟固定器會直接接觸，故力量傳遞會跳過主體/滑動軸桿這條路徑，而藉由來令片背板與固定器零件的接觸面，不經由滑動軸桿而直接將外力傳遞至固定器，如圖 2.6 所示。

2.4 元素介紹

ANSYS 套裝軟體的 Structural Solid 45 元素是結構-固體元素，使用於等向性固體力學問題的三維立方體元素，共有八個節點，每個節點具有 x、y 及 z 三個方向之位移自由度，另外，Structural

Solid 45 元素還包括六節點之五面體元素以及四節點之四面體元素。

此元素可描述固體力學實體模型之諸多性質及特性，例如：塑性、潛變、膨脹、應力勁度、大變形，以及很大的應變容量；負載方面，表面分佈負載（壓力）可施加於元素表面，而輸出結果包含節點位移，額外元素輸出結果包含 x、y 及 z 方向正向應力、剪應力及主應力。

三、數值結果

由於剎車器主要構件均採用韌性材料，所以，將使用最大畸變能理論（von Mises-Hencky Theory）來進行討論，總應力（應變）圖均採取 von Mises 應力（應變）分布圖。

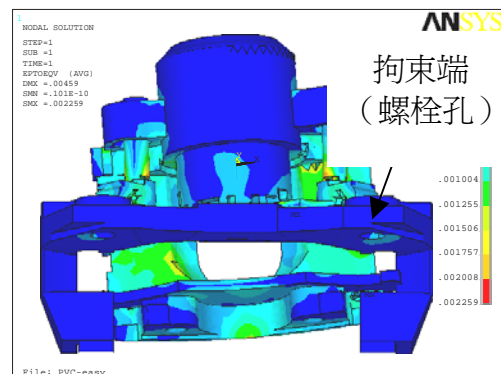


圖 3.1 本體構件及固定器之相對位移

由圖 3.1 第一個力量傳遞路徑之模型分析結果可知：金屬構件中以本體及滑動軸桿之應變及位移量最大，而且以摩擦力（剪力）對位移量的貢獻最大，但本體和固定器（拘束端）間出現了很大的相對位移量，亦即，本體在剎車時將會出現不小的振動；而負責引導本體的滑動方向的重要構件『滑動軸桿』上，則出現應變值接近降伏點的區域，這使滑動軸桿顯得異常脆弱，因此，此模型之分析結果雖與實際情形大致相符，但還有一些部分未模擬出真實情況，此因邊界條件之設定尚未周全，但已顯出大致的力量傳遞路徑及方式，因此，在來令片背板與固定器的接觸面上

增加結合條件而形成另一模型，稱為『主要載重傳遞路徑之二』之模型，並進行分析。

研究中發現第二力量傳遞路徑之模型的分析結果更為合理（如圖 3.2），因為分析結果中顯示，剎車器整體之相對位移及變形量比第一個模型減少許多，而滑動軸桿上的應變量遽減，不再過於脆弱，來令片背板的受力則遽增，由此可證，摩擦力也經由路徑二傳遞至固定端。

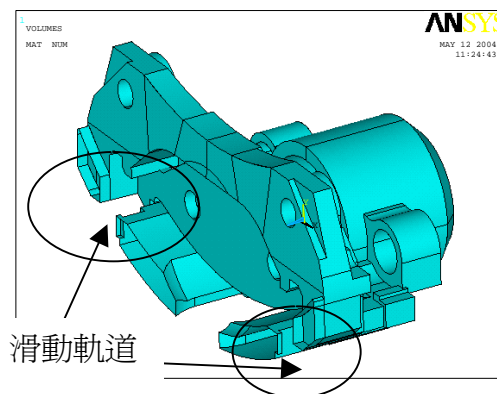


圖 3.3 剎車器截面圖

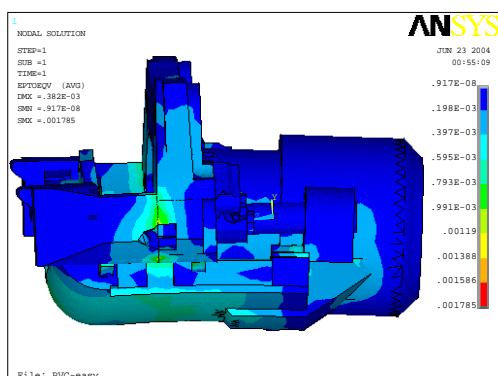


圖 3.2 第二傳遞路徑模型分析結果

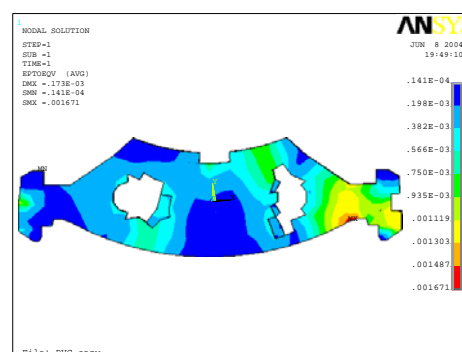


圖 3.4 來令片背板應變圖

3.1 來令片背板之分析結果討論

由分析結果中發現，來令片背板屬於勁度及載重路徑傳遞構件，其位置是介於固定器跟本體構件間的，而本體構件與固定器間並沒有任何的接觸，如圖 3.3 所示，所以，此構件除了用於傳遞來令片所承受的外力至活塞及本體構件上（載重傳遞路徑之一）外，也藉由與本體及固定器間的接觸面積，而傳遞力量至支承端（固定器上的螺栓），此為載重傳遞路徑之二，因此其勁度的功能在於維持本身的形狀不變，以順利將力量傳遞至強度構件上，而且，來令片背板也有拘束住本體構件的位移，以減少剎車器振動幅度之功能。另外，因為來令片背板被位於固定器及本體構件上的滑動軌道限制住，只能在 z 方向有滑動位移，所以其也有穩定來令片運作方向的功能。

另外，由於來令片背板的形狀像薄板，所以容易產生彎折變形，尤其以內側的來令片背板最為明顯。因此，在原始設計中，用來減少來令片背板發生彎折破壞的方法有兩種，一是使來令片背板之兩端與固定器間有接觸面積，如此，則來令片背板所承受的外力，亦可藉由此接觸面積傳遞到固定器及滑動軸桿上，另一個方法則是，來令片背板可藉由其兩端與固定器及本體間的接觸面積，將位移拘束住，並同時減少來令片背板發生彎折破壞的機率。

但是，來令片背板上產生的彎折作用依然不可小覷，如圖 3.4，因此，內側來令片背板的厚度應酌量增加，或是採用降伏強度更高的材料，以免在過度的彎折變形下，導致背板兩端與固定器及本體構件上的滑動軌道有嚴重的摩擦作用，影響剎車器運作。

3.2 本體構件之分析結果討論

由結果中發現，本體構件屬於勁度

與強度並重的構件，在不同的部位有不同的勁度及強度要求，如下圖 3.5。

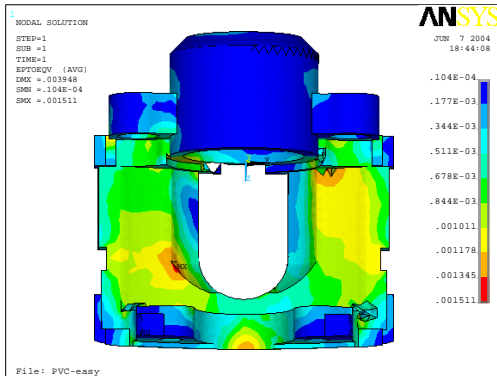


圖 3.5 剎車器之本體構件應變圖

本體構件上有兩個主要功能為提供勁度的區域，一為在邊緣地區具有寬厚截面積的部分，其功能在於防止位於此本體構件邊緣區域的來令片背板滑動軌道上出現過大變形，因此雖其承擔的應力不大，但仍具有寬厚的截面積以提供滑動軌道足夠的勁度；二為油壓器套殼部分，由於油壓器套殼屬於油壓器的一部份，因此，一旦出現變形，則會直接影響油壓器的正常運作，並損害剎車功能，因此其勁度要求高，以減少其應變量直至趨近於零，如此才能確保油壓器的正常運作。所以，此部分所承受的應力雖不大，但其勁度要求卻很重要，因而其截面積必須寬厚，以減少變形。

本體構件中，提供強度的部分位於本體構件的中間（鏤空部分），其主要功能在於承受由剎車碟所施加的正向壓力及摩擦力，此部分的形狀設計有兩個考量，一、盡量減少材料用量及剎車器重量，二、有關於提供構件強度的考量。因為此空洞周圍的變形量小，所以會選擇在對於截面之 y 方向慣性矩貢獻最小的位置，盡量減少材料用量，並削薄其斷面之截面積，而在對於截面之 y 方向慣性矩貢獻較大的區域，則設計為具有寬厚的截面積，如此的截面形狀設計，既能維持抵抗外力（外摩擦力所造成之 y 方向彎矩）所需的斷面強度，亦能減少材料用量及剎車器重量。

3.3 固定器之分析結果討論

固定器屬於勁度與強度並重的構件，在不同的部位有不同的勁度及強度要求。固定器上有兩個主要提供勁度的區域，在圖 3.6 中分別編號為 A 及 B 區域，而其他區域則皆為提供強度的部分。

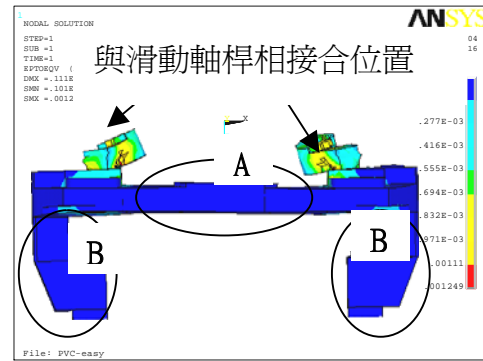


圖 3.6 固定器之應變圖

區域 A 是連結桿件，連接著與滑動軸桿相接的固定器兩端，其目的為使固定器兩端的位移一致而沒有相對位移及旋轉，維持其穩定性，而且 A 區截面積雖寬厚，應力值卻趨近於零，因為其勁度及強度要求都不大，所以，連結桿部分之材料或截面積大小均可減少。而 B 區域，主要是作為來令片背板的滑動軌道，並可藉由來令片背板、本體構件及固定器間的接觸面積來傳遞外力至拘束螺栓上，所以既然滑動軌道，勢必不允許出現過度變形，否則就會造成兩個來令片及其背板被過度變形的軌道卡住，而無法夾住剎車碟，並使得剎車器失去正常運作的功能，所以，此部分的勁度要求較高，也必須具有寬厚的截面積來提供勁度。

固定器上的應力值雖然普遍不大，但是其是否能維持形狀不變，而順利接收由來令片背板所傳來的力量並傳遞至拘束端，則是非常重要的，因此其斷面積較為寬厚是為了防止大變形，並維持其上的滑動軌道幾乎沒有變形，以使其順利接收由剎車時前後滑動的來令片背板所傳遞的 x 方向力量，並束制住本體

的 x 方向振動，及增加剎車器的穩定性。

而在固定器上有斷面劇烈變化及縮減的部分，也更需要小心，因為，在斷面驟減處的角隅易發生降伏而使固定器出現大變形，影響來令片之運作。

3.4 滑動軸桿之分析結果討論

屬於勁度構件，如圖 3.7。滑動軸桿在剎車作用進行時，除了負責從本體構件（承受所有外力的構件）傳遞大部分的外力至固定器之支承端（螺栓孔）外，亦是，支持剎車器本體前後自由滑動之支撐構件，所以其勁度要求較高。

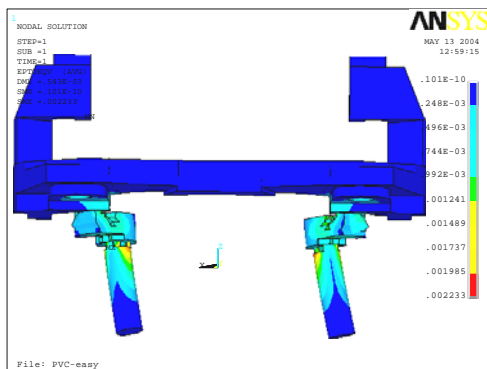


圖 3.7 滑動軸桿之變形及應變圖

但因滑動軸桿不但負責傳遞外力，其上又有斷面驟變，所以易形成應力集中，又其降伏應力值是所有金屬構件中最小的，所以容易導致彎折。若其發生破壞或挫屈，則會使整個剎車器運作出現問題而破壞，因此，其勁度十分重要，更應注意其截面積是否足夠，或是增加其使用材料強度，否則的話，同為傳遞外力功能的來令片背板就必須能替滑動軸桿分擔掉大部分的外力才行。

3.5 來令片之分析結果討論

來令片屬於功能性構件，主要功能在提供與剎車碟間的良好接觸狀況，並增加其間的摩擦力，以提升制動的效率，其強度與勁度均不高，且為摩擦耗材。變形量大而強度小的性質是為了能夠增加與剎車碟間的接觸面密合程度，

進而能造成阻止剎車碟轉動的高摩擦力。因此其材料的選用需較為謹慎，而且即使是在非常潮濕的環境（鹽水或下雨天）下，也必須保持與剎車碟絕佳的接觸情形，充分發揮剎車效能，所以其材料種類及配比（主要為碳纖維）一直是重要的設計項目。

此外，來令片還有負責傳遞及接收外力的功能，而且，來令片的形狀、受力的型式（正向力、剪力...等），以及其與其他構件間的相對位置關係，都會影響其他構件的受力情形，所以，來令片屬於功能構件。

3.6 滑動襯套之分析結果討論

滑動襯套屬於功能性構件，亦是摩擦耗材。為滑動軸桿和本體之間傳遞力量，吸震及減震之用，橡膠材質，強度小、變形量大、韌性高。

其主要功能除了傳遞滑動軸桿和本體之間的力量外，還能緩和本體構件及滑動軸桿間的接觸面之應力集中狀況，並避免本體構件及滑動軸桿出現過大變形或破壞，而其因具有足夠的韌性，所以能提供 CM99 浮動式單一活塞自動定位式剎車器適當的靈敏性，亦即，輔助本體構件沿著軸桿自由滑動及即時移動到中心處，以達到良好的剎車性能。

四、結論與未來展望

4.1 進階設計之方向及建議

從研究分析結果探討出主要改良方向如下：

一、增加滑動襯套勁度，並使其兼具吸震功能：適量增加滑動襯套勁度，除了能增加其吸收應變能的能力外，也使變形量減少，而減少主體與滑動軸桿間的相對位移，但需同時兼顧其吸震性，以減低外力造成的振動影響。

二、增加滑動軸桿間距離以增加慣性矩：增加滑動軸桿間的距離，可增加用來抵抗外力之斷面積的慣性矩大小，而在有限的斷面積下，提供更多的斷面強度來抵擋由外摩擦力之 x 方向分量所

造成的彎矩作用，可節省材料用量。但滑動軸桿間的距離增長，來令片也要同時增長，如此外力才能順利地傳遞。

三、來令片面積以近似圓形為佳，減少前後端面面積：將剎車碟與來令片的接觸面積集中於來令片上變形最少的中段部分，可減少來令片前後端磨損量，也使來令片只承受水平（x 方向）的外摩擦力，如此不但可減少其磨損量，亦減少其他構件因承受 y 方向（垂直方向）的外摩擦力分量而扭轉變形的情形。

四、減少固定器材料用量：固定器上提供勁度的連結桿件區域，連接著固定器兩端，以使兩端的位移一致而穩定，在分析結果中，此部分之應力趨近於零，勁度及強度要求均不大，但是截面積卻十分寬厚，所以，可以酌加減少此部分之材料用量或截面積，節省材料。

五、來令片背板屬於勁度構件，其功能在於順利將力量傳遞至強度構件上，並拘束本體構件之位移，減少剎車器之振動幅度，也維持來令片穩定地運作方向在 z 方向上，但是，由於來令片背板狀如薄板，容易彎折變形，因此，其厚度應酌量增加，或採用降伏強度更高的材料，以免因過度的變形，導致背板兩端與滑動軌道有嚴重的摩擦，影響剎車器運作。

4.2 未來展望

從本研究瞭解剎車器各主要構件的受力行為及力學特性後，尚還有自然振態分析、動力分析、疲勞分析、等等數種分析需要完成，以確保準確地模擬剎車器之實際情況。

再進行剎車器的最佳化設計，以原始的設計準則為基礎，對剎車器的幾何形狀構造予以修改，以期能減輕其重量，增加其剎車性能或工作效率。而且，由於剎車器是一項非常重要，並且攸關汽車的安全性之機械設計，所以，其所有經過分析而得知的作用臨界點，亦即，模擬數值模型分析結果中的最大

應力值、最大變形量...等等，將被要求必須大於基準值。

參考文獻

1. Cook , R.D. , Malkus , D. S. and Plesha , M. E. , Concepts and Applications of Finite Element Analysis , 3d. ed., John Wiley and Sons, New York, 1989
2. 陳昭昌編譯，有限元素法—工程上之應用，復文書局，台南市
3. ANSYS User's Manual , Swanson Analysis Systems,Inc.
4. 陳申岳編著，ANSYS 有限元素法軟體—實務產品可靠度分析，全華科技圖書股份有限公司
5. 陳新郁，林政仁 譯，有限元素分析-理論與應用 ANSYS，高立圖書有限公司
6. 康淵，陳信吉編著，ANSYS 入門，全華科技圖書股份有限公司
7. Mikael Eriksson, Filip Bergman, and Staffan Jacobson,2002 ,“On the nature of tribological contact in automotive brakes,” Materials Science Division, The Ångstrom Laboratory, Uppsala University.
8. Junzo Tamari, Kazuhiro Doi, and Tadashi Tamasho,1999 ,“Prediction of contact pressure of disc brake pad,” Nissan Motor Co., Ltd., Japan.

Application of Finite Element Methods for the Analysis of Automotive Disc Brake Caliper

Y. C. Cho* S. Y. Chen Y. L. Huang*****

**Master, Department of Civil Engineering ,
National Chung- Hsing University*

*** ,Co-Advisor, Department of Civil Engineering ,
National Chung- Hsing University*

**** Professor, Department of Civil Engineering ,
National Chung- Hsing University*

Abstract

The research utilizes the concept of reverse engineering and the finite element theory, together with the existing CAD software, to develop a procedure for product design. That is, although the design rules of the original product is unknown, it is still possible to understand the characteristics and design criteria of the product with currently manufacturing drawing and the application of finite element analysis. Suggestions and improvement for the future product can also be provided based on this approach. to make design projects faster with current CAD software.

The objective of this research is to develop the finite element analysis apability and procedures, in order to simulate the mechanism of the disc brake system, and provide suggestions for further improvement based on the reverse engineering approach.

In this study, we applied the FEA simulation to the CM99 disc brake caliper with the commercial package — ANSYS, and attempted to understand the mechanical property of the main components. The displacement and von Mises stress were calculated. With such information, we can understand different needs of strength and stiffness for each component and possibly the original

design concept behind the CM99 disc brake caliper. Further study of the simulation results also provide suggestion for product improvement by modifying geometry of the caliper for the purposes of weight reduction or strength enhancement.

The analysis result showed that the designed strength of the anchor in the current model is so conservative that it is possible to reduce the material used. The shape of the pad should be similar to a circle to reduce the unbalanced wearing. Also, the stiffness of the pad back plates can be increased to decrease reducing bending deformation. Furthermore, the stiffness of the bushings are suggested to be increased, but should still be able to absorb the external shock and vibration. The distance between the two pins can also be increased to achieve larger inertial moment and provide larger reacting force. Finally, this research has shown the possibilities and feasibilities of improving the existing product with finite element analysis techniques, even when the original design rules are unknown.

Keywords: disc brake, finite element analysis, reverse engineering