

裝甲車武器頂板結構之設計與分析

鄧作樑* 武允中** 張鵬祥*** 蔣光中** 江基風*

* 大葉大學機械工程研究所

** 聯勤兵工整備發展中心

*** 正修科技大學工業工程與管理學系

摘 要

爲因應不同之戰鬥任務，輪型甲車可視實際需要選用適當的武器系統，使得模組化武器系統之機動平台設計的概念產生。機動平台的介面主要爲一金屬開孔板，介於甲車承載系統頂板結構與武器系統之間，並利用螺栓及固定栓元件來固定兩部份。介面頂板結構除了須承受武器系統的靜態載重，而且必須承受武器系統於不同越野運動行駛時所產生的負荷作用力，避免造成介面頂板結構的斷裂與破壞，以確保武器系統之射擊穩定性及精度。另外武器系統介面結構總成的壽命評估亦是設計過程中必須考慮的重要問題。故爲增進裝甲戰鬥車的可靠性，本研究針對武器安裝介面結構與固定元件進行強度分析與設計，以爲未來發展新型裝甲戰鬥車模組化武器系統之機動平台設計之參考，更可爲後續建立介面結構與固定元件等零件準確保修時程。

關鍵字：裝甲車，武器頂板，強度分析

Design and Analysis of the Interface Structures of Weapon System on Armored Vehicle

Tso-Liang Teng*, Yeun-Chung Wu**, Peng-Hsiang Chang***,
Kuang-Chung Chiang*, and Chi-Feng Chiang*

*Institute of Mechanical Engineering, Da-Yeh University

**Arsenal, Ordnance Readiness and Development Center

***Department of Industrial Engineering and Engineering Management, Cheng Shiu University

ABSTRACT

Recently, a concept of a mobile platform for a modular weapon system is created. For different missions, wheeled armored vehicles can be coupled with suitable weapon systems. The interface structure of the mobile platform is mainly a flat plate with a hole and is located in the middle of the carrier system and the weapon system. These two parts are fixed with bolts. To avoid the fracture of the fixed component, the interface structure should be able to resist the load of the weapon system and action forces during moving. Moreover, the fatigue estimation of the interface structure for the mobile platform is very important. In this project, the strength analysis of the interface structure and fixed component is discussed. The analysis results of the interface structure may provide a useful reference for designers during research and development. Moreover, it may be applied to the maintenance stage on the interface structure and fixed component.

Keywords: armored vehicle, interface structure, strength analysis

文稿收件日期 94.04.18; 文稿修正後接受日期 95.8.8.

Manuscript received April 18, 2005; revised August 8, 2006.

一、前言

60 年代起，僅能將步兵運送至戰場的裝甲運兵車(Armored Personnel Carrier, APC)逐漸顯得不合時宜，先進國家遂開始嘗試將裝甲運兵車武裝化——不只是在車頂架上幾挺機槍，而是配置專業化的武裝砲塔與觀測/射控系統等，使得運兵車除了載運步兵外還要擔任武裝支援，類似第二次世界大戰的驅逐戰車或步兵戰車，而這種新的概念就是裝甲步兵戰鬥車(Infantry Fighting Vehicle, IFV)。依世界輪型裝甲車的設計趨勢，從以往的六輪設計(6×6)進展到八輪設計(8×8)，比以往設計的 6×6 裝甲車更具備優異的越野性能。且輪型裝甲車的武器系統可依戰鬥需求配備各式武器系統，如 90 和 76 公厘低膛壓砲、105 公厘火炮、25 公厘機砲、重機槍、反戰車飛彈和迫砲等武器系統，如圖 1 所示。除複合、反應和模組化裝甲等新型防護結構的發展與應用，可有效降低輪型甲車的弱點，另外由於反戰車飛彈與彈藥科技的進步更使得輪型甲車擁有不錯的獵殺戰車能力。國防工業是展現一國科技水準的重要指標，也是現今強調技術與知識密集時代，強化國家安全最重要的支柱。而在國防工業的最重要的一環，即是如何在自主國防的考量之下，建立各項武器系統與裝備之研發能量。因此，國人建立自行研發新型輪型甲車之能量為一刻不容緩工作。



圖 1. 奧地利游騎兵-2 輪型甲車[1]。

有關戰甲車相關研究之文獻報告，由於列屬於國防軍事領域，且投入研究的人力不多，且世界各

國大多視為機密資料，皆密而不宣，相關之文獻亦不多見，國內除中正理工學院等軍事院校有部分相關之研究，其餘各學術單位則較少在此方面的投注心力，且少部份有關戰甲車分析研究亦多屬於機械、運動特性評估或僅為定性之討論。國內外相關文獻，敘述如后：Kiichi 等[2]進行履帶車輛主動承載系統之測試，以系統之油壓來控制車輛之位移、俯率等參數。Khourdaji [3]利用有限元素法針對砲塔及載具結構進行應力分析，以確保所有結構元件在機砲射擊時，其應力值均能在安全範圍內。Sivick [4]則分別利用解析方法及數值模擬探討機砲與載具結構結合處之結構破壞問題。另外 Catalano [5]則針對 M1 型坦克車體及砲塔結構在製造過程因銲接所造成殘留應力進行量測，量測結果顯示最大拉伸殘留應力高達 324.1MPa。馮蟻剛[6]探討戰甲車火控系統之整合模組研發與性能評估。張一屏[7]利用履帶車輛運動力學原理而建立履帶牽引/傳動所對應之運動方程式，以實驗設計法來分析建立四個不同的輸入因子間的交互影響關係，並配合最佳化搜尋的方法來推導計算乘適性能最佳化所對應的各個設計參數。張旭明等[8]建立履帶車輛動力系統之匹配及評估模式，先分析其在運動中之受阻力及摩擦力，再據以求出其所需推力；並配合引擎、變速箱、扭力變換器、終端傳動等次系統之選用，設定參數以評估其整體性能。侯光煦等[9]對陸軍現役戰車引擎使用中之潤滑油，進行磨潤及相關特性之實驗研析。宋貴銘[10]針對戰甲車履帶運動進行模擬與分析。劉慶雄等[11]建立戰甲車動力系統設計之推力計算模式，並研究提昇扭力變換器扭力放大倍率之方法以增加推力。簡錫新等[12]提出之戰甲車性能分析程式，是將動力系統分為引擎、扭力轉換器、變速箱與終端傳動四個次系統，以評估其整合之性能，並可提供戰甲車在初步設計時，進行動力系統組件之選配、自動變速箱參數設定及戰場性能之評估。鈕健等[13]針對現代戰車之穩定系統來建立其數學模式並探討之。此外更進一步以此模式來模擬分析

當戰車進行射擊時，火炮穩定系統之精度及命中率是否會受到底盤承載系統性能變化之影響。馬志高[14]針對裝甲車之機砲砲塔進行動態分析。周重石[15]以均值的引擎模擬程式為基礎，配合傳動系統組件的穩態特性建立一輪型甲車的動態模擬程式。

然而在國軍新一代自製輪型甲車的研發過程中，以目前科技的進步，輪車在防護力以及困難地形的機動力上都已經不輸給履帶車，因此整體設計上如何加強輪型甲車的武裝火力則亦顯重要；除此之外，模組化武器系統之機動平台設計更不容忽視。所謂模組化武器系統之機動平台設計主要為輪型甲車可視實際需要選用適當的武器系統，以因應不同之戰鬥任務，增加輪型甲車選用武器系統的彈性。模組化武器系統之機動平台的介面主要為一金屬開孔頂板，介於甲車車身結構與武器系統之間，並利用螺栓及固定銷將武器系統固定於車身結構，如圖 2 所示。介面頂板結構除了須承受武器系統的靜態載重，而且當裝甲車運動時，必須承受武器系統於不同越野運動行駛時所產生的負荷作用力，避免造成介面頂板結構或固定元件的斷裂與破壞，以確保武器系統之射擊穩定性及精度。另外，武器系統介面頂板結構總成的壽命評估，亦是此模組化武器系統之機動平台在設計過程中必須考慮的重要問題。故為增進裝甲戰鬥車操作的可靠性，實有必要針對武器頂板結構進行設計與強度分析。故本文將以未來輪型甲車發展趨勢為設計重點，針對輪型甲車不同形式武器頂板結構之設計，並利用 ANSYS 有限元素軟體建立結構分析之數值模型，考量在武器系統靜態載重與越野運動行駛產生的負荷下進行結構強度分析，以為未來發展新型裝甲戰鬥車模組化武器系統機動平台設計之參考，更可作為後續建立介面結構或固定元件等零件準確保修時程之基礎。

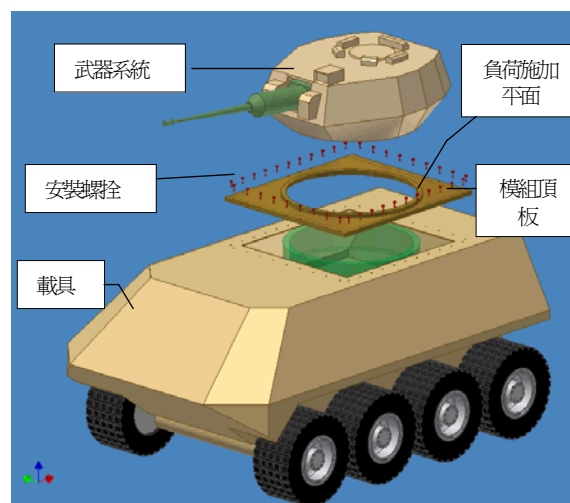


圖 2. 武器系統模組頂板結構示意圖。

二、研究方法

2.1 結構強度分析

輪型甲車武器模組頂板結構承受負荷時可能的破壞一般是在固定件和構件的表面，也可能在結構缺陷或不連續處，即應力集中的區域，故為有效分析結構區域的應力、應變變化情形，本研究以有限元素法分析輪型甲車武器模組頂板結構在承受各種負荷時之應力或應變響應，以作為介面結構設計的依據之一。本研究所使用的有限元素分析軟體為美國賓州 ANSYS 公司，所發展出來的商用有限元素軟體，其應用範圍相當廣泛，舉凡彈塑性結構應力、熱傳、熱應力、熱應變、熱流、複合材料、振動、碰撞、掉落、噪音、高低頻電磁、電性分析、IC 封裝、微機電、醫工、鈹金、光學、複合材料、土木結構……等問題都可藉由 ANSYS 來分析。本研究除了採用 ANSYS 結構分析模組進行頂板結構之應力分析之外，還利用 ANSYS 有限元素軟體中的 APDL 指令技巧模擬武器系統於不同越野運動行駛時所產生的連續作用力的施加。此技巧可使模擬模型與實際狀況更接近。並藉由結果輸出響應評估結構設計是否安全，作為結構研改設計之參考。

2.2 有限元素法

對於非平整式結構體（含有孔洞、缺口等之結構）疲勞壽命分析方式有利用實驗、理論解析等方法求得結構之應變或應力負荷歷程之後，再利用 Neuber 修正式考量結構之應力集中現象，將高應力區應變或應力負荷歷程求出，俾利進行較完整的疲勞壽命預測。本文利用有限元素法將結構因孔洞所造成應力集中現象加以考量，直接求出高應力區之應力歷程，可對非平整式結構體進行疲勞壽命估算。

本文在分析應力歷程中將力平衡方程式、協調方程式及彈塑性方程式（Prandtl-Reuss 塑流律，von Mises 降伏準則，Kinematic 硬化準則等理論）等基本方程式，利用虛功原理及散度定理有限元素程式化後，利用增量疊代方法求得結構之位移場與應力場，分析流程如圖 3 所示。

2.3 應力壽命法

在應力壽命法中，不論等幅或變幅負荷，評估方法均是利用應力-壽命曲線(S-N curve)，此曲線表示應力振幅與疲勞壽命之間的關係。因此在疲勞壽命估算過程中，最好使用實驗所獲得之應力-壽命曲線資料[16]，但由於針對某一材料試片求出其應力-壽命曲線是一件相當耗時的工作，以往學者們[17]根據材料應力-壽命實驗結果，歸納出一個 S-N 曲線的求法如圖 4 所示（求得 S_e 與 S_{1000} 後 S-N 曲線即可求出），本文之應力-壽命曲 S-N 曲線即利用此方法建立。其中

S_{1000} ：材料壽命為 1000 週期的應力

S_u ：抗拉強度 (ultimate stress)

S_e ：疲勞極限應力(endurance limit)

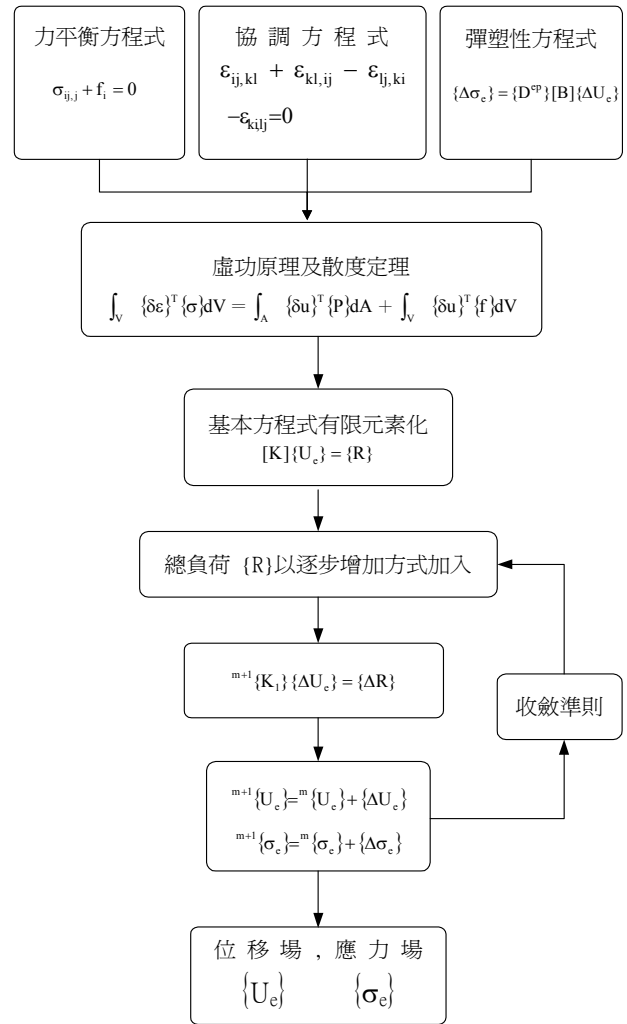


圖 3. 有限元素分析流程圖。

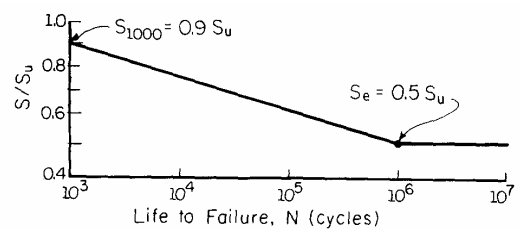


圖 4. 鋼鐵材料廣義的 S-N 曲線 [17]。

2.4 von Mises 等效應力理論

本文以 von Mises Criteria 求得構件之等效應力歷程，再利用材料之 S-N 疲勞性質來求得構件疲勞壽命。其中 σ_e 為 von Mises 等效應力

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)]^{1/2} \quad (1)$$

2.5 疲勞壽命分析

本研究建立之武器系統介面結構總成疲勞壽命評估程序主要分為兩個階段：第一階段為結構強度分析階段，以確定武器系統介面結構總成高應力區域；第二階段則針對此一高應力區域進行疲勞壽命評估分析。茲將兩階段流程說明如下：

1. 結構強度分析階段

- (1) 根據結構幾何形狀、負荷及邊界條件先建立結構有限元素模型。
- (2) 利用有限元素法進行結構靜力分析。
- (3) 求得結構之高應力區域。

2. 高應力區域疲勞分析階段

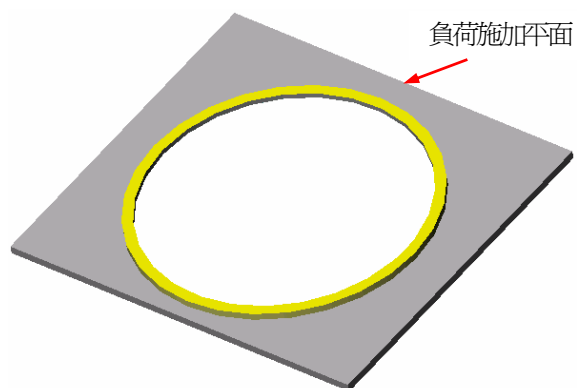
- (4) 針對高應力區域，建立細網格有限元素模型。
- (5) 進行負荷譜之處理。
- (6) 以雨流法進行負荷譜循環計數簡化工作。
- (7) 簡化後之載荷譜利用有限元素法計算可得循環應力歷程。
- (8) 利用有限元素法求出之應力歷程整合應力壽命法，並在考慮平均應力的影響後進行高應力區域疲勞壽命估算。
- (9) 估算出每一應力振幅之疲勞壽命。
- (10) 應用 Miner 線性損傷累積理論將每次循環之結構損傷加以累積。
- (11) 求得結構高應力區域之疲勞壽命。

三、頂板結構設計與分析

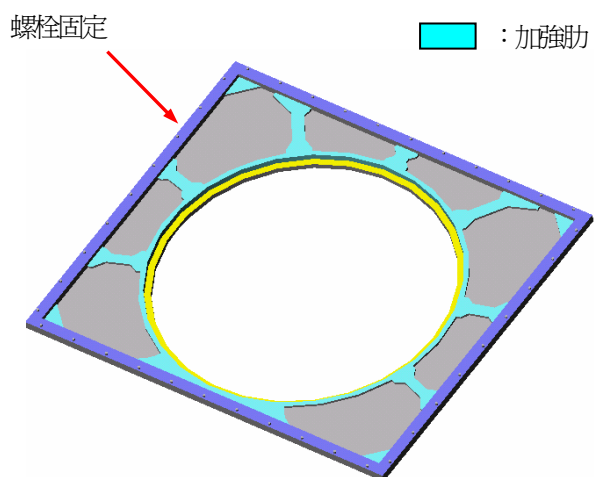
武器模組頂板主要為一金屬開孔板結構，介於甲車車身結構與武器系統之間，並利用螺栓及固定栓元件來固定兩部份，如圖 5 所示，另外，為使武器系統實際安裝於頂板結構時不產生位移，進而影響系統精準度，故於安裝過程必須將所有螺栓以固定之扭力安裝於輪型甲車上，本文模擬過程假設模

組頂板與螺栓結合處是以固定拘束條件處理。分析材料為厚度 8 mm 之 MIL-A-46100D 鋼板，經實測所得材料性質如下：為降伏強度：947 MPa；抗拉強度：2003 MPa；楊氏係數： 2.4×10^5 MPa；Poisson's ratio：0.3；密度：7900 kg/m³。介面結構除了須承受武器系統的靜態載重，介面結構與武器系統總重量約 1700 kgf；另外當裝甲車武器系統行進時，必須有效的承受武器系統於不同越野運動行駛時所產生的負荷，負荷施加之邊界均為與武器結合之平面，如圖 1 及圖 5(a)所示。本文以 3 g 重力加速度模擬越野運動行駛時所產生的負荷，為使模擬過程更符合實際狀況，實際分析時必須以武器系統路測之負荷譜資料為依據，並考慮負荷順序效應。

本文所有分析模型之有限元素網格密度均做過預先考量，以武器模組頂板-A 模型為例，當模型有限元素網格達 14559 以上時分析結果均收斂且接近，故採用此有限元素模型進行分析，如圖 6 所示。圖 7 為武器模組頂板-A 模型的 von Mises 應力分佈圖，由圖中可發現其最高應力在於頂板結構右方邊緣螺栓處，其值為 41 MPa，小於材料為降伏強度 947 MPa，故結構應可承受武器系統的載重及越野運動產生 3 g 重力加速度行駛時所產生的負荷。圖 8 為武器模組頂板-A 模型位移分佈圖，由圖中可發現其最大變形處位於頂板結構右上方開孔處附近，其值為 0.0634 mm，遠小於結構厚度 8 mm，屬小變形結構。雖然頂板的最高應力並未超過材料降伏強度，但此武器模組頂板重量高達 330 kgf，故因如何藉由結構分析結果進行頂板改進設計，除了針對結構高應力區補強外，更應從減少頂板結構的重量著手起。

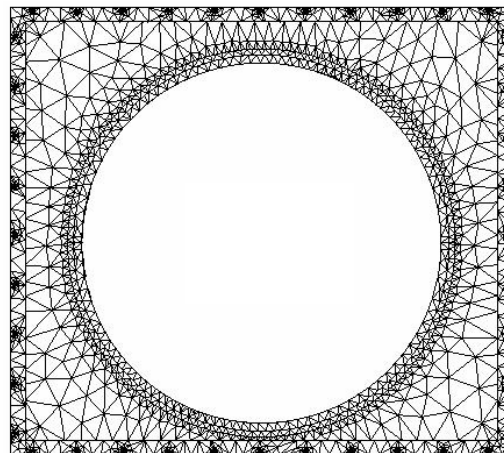


(a) 上視圖 (示意圖)

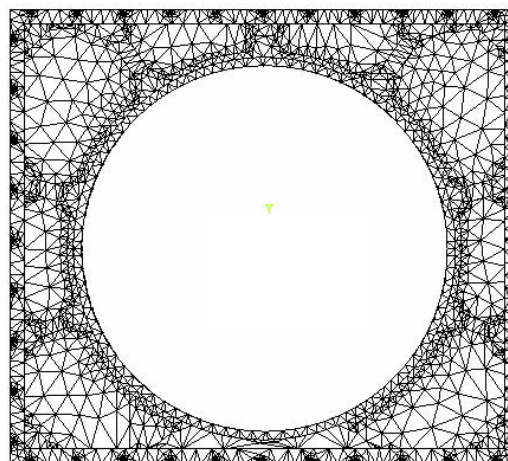


(b) 下視圖 (示意圖)

圖 5. 武器模組頂板結構-A 模型：(a)上視圖 (示意圖)；
(b)下視圖 (示意圖)。



(a) 上視圖



(b) 下視圖

圖 6. 武器模組頂板結構-A 模型有限元素模型：(a)上視圖；
(b)下視圖。

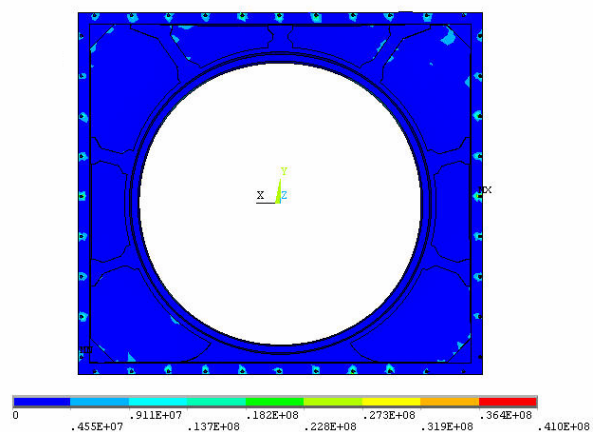


圖 7. 武器模組頂板-A 模型 von Mises 應力分佈圖。

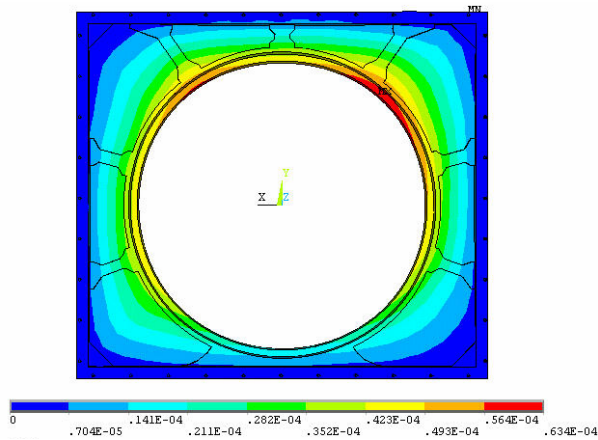


圖 8. 武器模組頂板-A 模型位移分佈圖。

為降低武器模組頂板-A 模型高應力區應力與重量，本研究進行加強肋尺寸及位置的改設計，圖 9 為三種不同構型設計的頂板結構。圖 10 為三種不同構型頂板結構的 von Mises 應力分佈圖，由圖中可發現其最高應力位於頂板結構左方及上方邊緣螺栓處，其值分別為 37.6 MPa、48.7 MPa、41.1 MPa，均於材料彈性範圍內且遠小於材料為降伏強度，故表示三種不同構型的設計皆可承受武器系統的載重及越野運動產生 3g 重力加速度行駛時所產生的負荷。圖 11 為三種不同構型頂板結構的位移分佈圖，由圖中可發現其最大變形處位於頂板結構開孔處附近，其值分別為 0.0629 mm、0.0626 mm、0.0675 mm，其變形量皆遠小於結構厚度 8mm。由表 1 四種不同構型設計的頂板結構比較結果中可看出，整體而言四種加強肋結構最高應力值均於材料彈性範圍內，且四種加強肋結構位移量均遠小於結構厚度值，結構將不會因變形過大而造成武器系統迴轉障礙問題；因此，四種構型設計皆可採行做為武器模組頂板結構。但此四種不同構型頂板結構的設計在最高應力值與變形量上並未有太大的差異，然而在整體頂板結構的重量上，D 模型的重量僅有 290 kgf，較 B 模型可有效減少 16% 的重量，因此四種構型頂板結構中 D 模型應為較適合之頂板結構。

表 1. 四種不同構型設計之頂板結構比較表

構型 比較參數	A 模型	B 模型	C 模型	D 模型
von Mises 應力	41.0 MPa	37.6 MPa	48.7 MPa	41.1 MPa
位 移	0.063 mm	0.0629 mm	0.0626 mm	0.0675 mm
重 量	330 kgf	345 kgf	335 kgf	290 kgf
疲勞壽命值	1.59×10^{10}	2.69×10^{10}	5.61×10^9	1.56×10^{10}

四、武器頂板結構疲勞壽限分析

當裝甲車武器系統行進時武器系統介面結構須承受武器系統於不同越野運動行駛時所產生的負荷作用力，可能會導致介面結構之固定元件發生破壞，而固定元件主要在使武器系統穩固定位於承載系統上，一旦產生疲勞破壞將使機砲失去固持而喪失戰力，故武器系統介面結構總成之疲勞壽命的評估是一值得深入探討的問題。因此本研究建立疲勞壽命評估模式，應用於武器系統介面結構總成之疲勞壽命評估，俾利後續設計及系統測試過程參考。介面結構總成之疲勞壽命評估程序主要理論是以多軸疲勞之 von Mises 等效應力理論並配合平均應力修正式來評估計算各組負荷譜疲勞壽命值。本研究主要以 3 g 等幅負荷來模擬越野運動行駛時所產生的連續負荷，針對四種不同構型頂板結構進行疲勞壽命評估，以作為後續實際路測過程疲勞壽命分析之參考。首先將不同越野運動行駛時所產生的 3 g 負荷作用下高應力區之 von Mises 等效應力歷程歷程求出，並利用變形能理論求得介面結構在承受越野運動行駛時所產生的負荷之疲勞壽命值。由表 1 中四種不同構型頂板結構疲勞壽命值比較可看出，即使介面頂板結構長期處於 3 g 循環負荷下，其壽

命值亦均大於 5.61×10^9 循環週次，接近材料疲勞限。

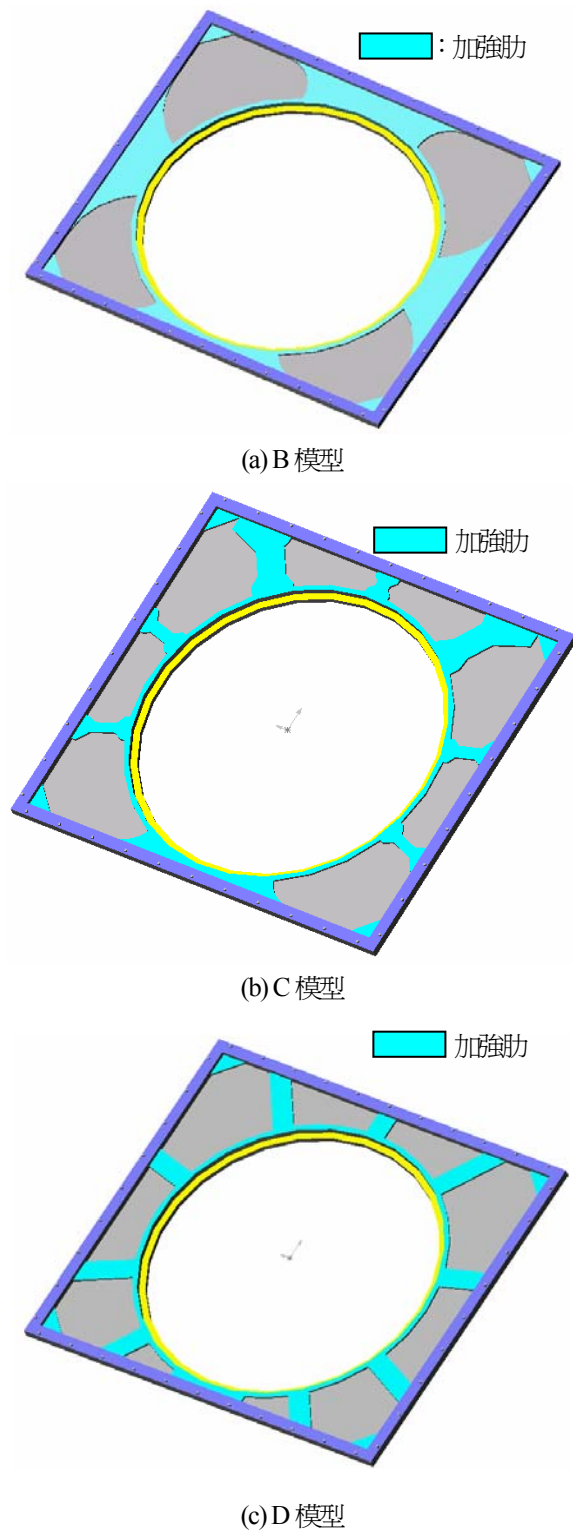


圖 9. 武器模組頂板結構模型。

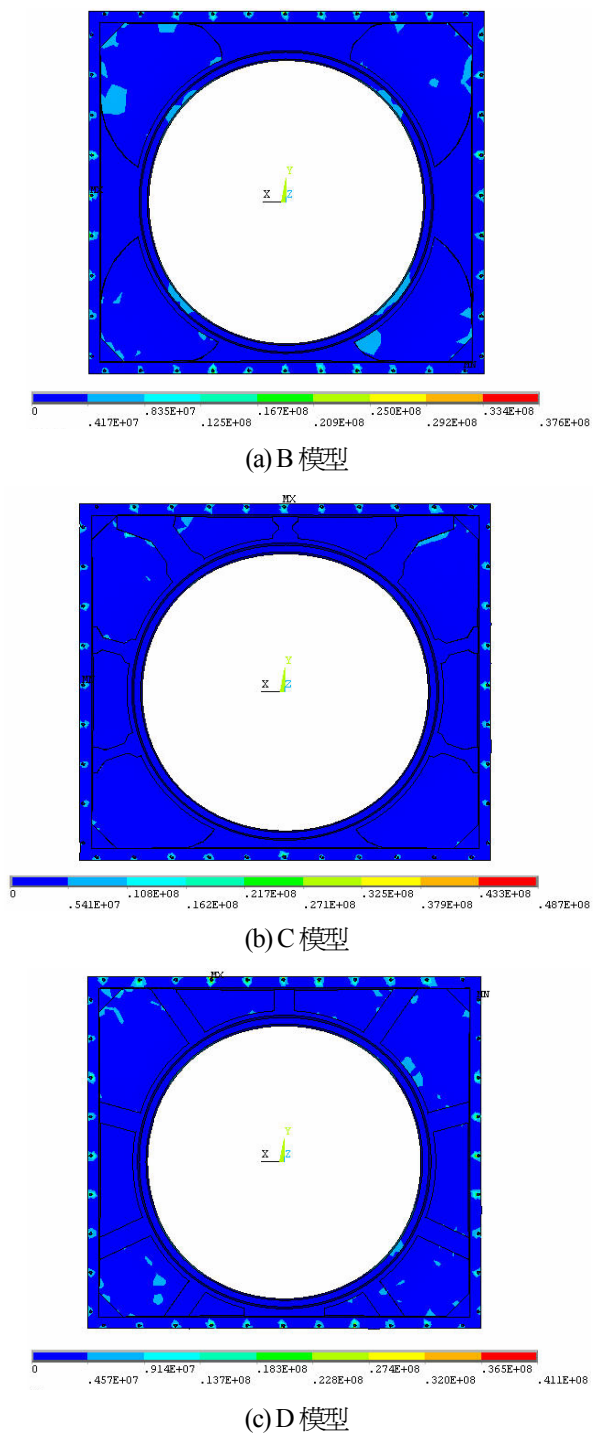


圖 10. 武器模組頂板 von Mises 應力分佈圖。

五、結論

本研究基於建立輪型甲車武器模組頂板結構之設計，以武器模組頂板為主要研究對象，進行了結構應力、位移及疲勞壽命相關問題的探討分析，其中包括了探討不同構型頂板結構之結構強度及疲勞壽命評估。在數值結構分析方面，本文利用 ANSYS 限元素軟體，建立頂板結構數值分析模型，進行結構應力分析之方法不但可節省實驗上之耗費，並可瞭解模組武器頂板結構各軸向應力分布的趨勢，作為後續研改及設計介面模型之基礎，有效提昇模組化武器系統之機動平台結構設計與分析能量。在疲勞壽命評估方面，介面結構總成之疲勞壽命評估程序主要理論是以多軸疲勞之 von Mises 等效應力理論並配合平均應力修正式來評估計算各組負荷譜疲勞壽命值，可有效預測結構的壽命，建立零組件後勤保修之參考。

在頂板結構之設計上，固然結構的強度、變形、重量及壽命為主要考量，但仍須考量頂板結構之製程技術與施工難易程度，例如 D 模型之頂板結構在四種構型中雖為較適合之結構，由於其頂板中加強肋係採用口型結構設計，可比 B 模型設計減輕約 55 kgf，在行車過程產生應力及變形亦可滿足全系統要求，但口型加強肋構件與介面結合時須注意銲接製程，應盡量克服銲接變形及未銲透等銲接瑕疵，以避免造成結構破壞。另外，亦須藉由預熱或銲後熱處理方式降低結構殘留應力。以本文分析例中係考量小口徑之武器系統，若以 D 模型之頂板結構設計為例，承載武器系統重量可達到 4000 kgf，其最高應力(193MPa)及最大位移位移量均於安全範圍內，可滿足承載大口徑武器系統設計要求，但須加以考慮大口武器系統射擊後座力負荷對頂板結構的影響。

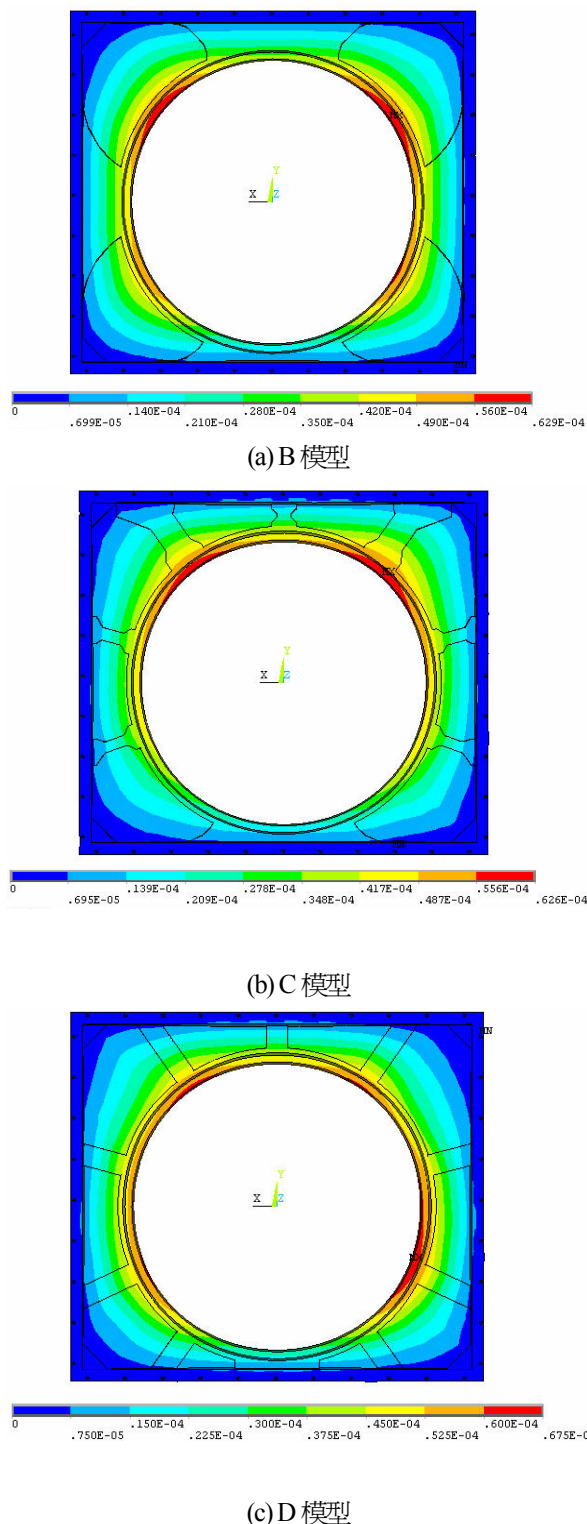


圖 11. 武器模組頂板位移分佈圖。

誌謝

本研究之進行承蒙國科會國防科技學術合作研究計畫（計畫編號：NSC 93-2623-7-212-003）經費支持方得完成，特此謝忱。

參考文獻

- [1] <http://mbox.hchs.hc.edu.tw/~military/army/pandur.htm>
- [2] Kiichi, K., Tomoaki, M., Yukio, I., Takehiko, O., Masatoshi, H., and Seikichi, N., "Active Suspension of Heavy Tracked Vehicle - Part 2: Vehicle Test," ISAE Review, Vol. 17, No. 4, pp. 443-444, 1996.
- [3] Khourdaji, S., "Finite Element Stress Analysis for Component Advanced Technology Test Bed(CATTB)," NTIS: AD-A228 389/3, May 1990.
- [4] Sivack, M. R., "Proposed Method for Dynamic Analysis of Armored Structure: Analytical Development and Computer Simulation," NTIS: AD-A284 299/5, Sep. 1994.
- [5] Catalano, S. B., "Residual Stress Measurement on M1 Tank Weldments," NTIS: A163 330/4, Sep. 30, 1985.
- [6] 馮巖剛, "戰甲車火控系統整合模組研發與性能評估", 國科會研究計畫, 2000。
- [7] 張一屏、林振昱, "軍用履帶車輛懸吊系統設計參數之乘適性最佳化分析研究", 陸軍軍官學校七十五週年校慶綜合學術研討會, pp. 648-657, 1999。
- [8] 張旭明、劉慶雄、王高樑, "戰甲車動力系統匹配與性能評估之計算模式", 第七屆三軍軍官學校基礎學術研討會, pp.971-988, 2000。
- [9] 侯光煦, "戰車引擎潤滑油之磨潤實驗研究", 陸軍軍官學校七十五週年校慶綜合學術研討會, pp. 618-623, 1999。
- [10] 宋貴銘, "戰甲車履帶運動模擬分析", 國科會研究計畫, 1998。
- [11] 劉慶雄、周道、賀俊, "動力系統設計之推力計算模式", 第一屆三軍官校基礎學術研討會, pp.337-345, 1994。
- [12] 簡錫新、周重石, "裝甲人員運輸車性能之電腦輔助評估", 第二屆國防科技學術研討會, pp.533-538, 1993。
- [13] 鈕健、劉瑞榮, "戰車火炮穩定系統數學模式之

建立及射擊時受承載系統性能影響之分析", 中正嶺學報, 第 20 卷, 第 2 期, pp.113-121, 1992。

- [14] 馬志高, "裝甲車之機砲砲塔動態分析", 國科會研究計畫, 2000。
- [15] 周重石、簡錫新、周峻峰, "輪型甲車動態模擬", 第三屆國防科技學術研討會, pp.665-669, 1994。
- [16] Fuchs, H. O., Metal Fatigue in Engineering, John-Wiley & Sons Inc, pp. 296-297, 1980.
- [17] Bannantine, J. A., Comer, J. J., and Handrock, J. L., Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.