

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

利用實驗與數值模擬探討羽球拍結構特性

Investigating Structural Behaviors of Badminton Racket
experimentally and numerically

研究生：李佳旻

指導教授：蔡佳霖 博士

中華民國一〇二年七月

利用實驗與數值模擬探討羽球拍結構特性
Investigating Structural Behaviors of Badminton Racket
experimentally and numerically

研究生：李佳旻

Student : Chia-Min Li

指導教授：蔡佳霖

Advisor : Jia-Lin Tsai

國立交通大學
機械工程學系
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Mechanical Engineering

July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月

利用實驗與數值模擬探討羽球拍結構特性

學生：李佳旻

指導教授：蔡佳霖 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

本研究主要目的係建立一套有限元素分析方法，針對羽球拍穿線後的拍框變形、球拍靜壓響應及恢復係數等結構特性進行模擬，並透過羽球拍的靜態與動態實驗來進行驗證與探討。本研究針對鋁製羽球拍與碳纖維複合材料羽球拍兩種羽球拍進行研究。其中，在碳纖維羽球拍的模擬分析，除了依據纖維疊層角度排列建立模型之外，亦建立碳纖維羽球拍的等效模型來進行模擬分析。

從有限元素分析與實驗的結果比較中可發現，在球拍穿線後的拍框變形中，由於有限元素模擬中無法掌握實際的球線張力退減情形，使得分析與實驗的結果之間有些許的誤差。但在球拍靜壓響應與恢復係數的探討中，分析與實驗的結果相當接近。經由分析與實驗的結果比較，本研究所提出的分析方法適用於羽球拍的結構特性模擬。此外，在碳纖維羽球拍的模擬分析中，等效模型與疊層模型的結果皆非常吻合。然而等效模型的分析所

需的時間卻比疊層模型的少很多。這也意謂著本文所提出的等效模型能更有效率地模擬出碳纖維羽球拍的結構特性。



Investigating Structural Behaviors of Badminton Racket experimentally and numerically

Student : Chia-Min Li

Advisor : Dr. Jia-Lin Tsai

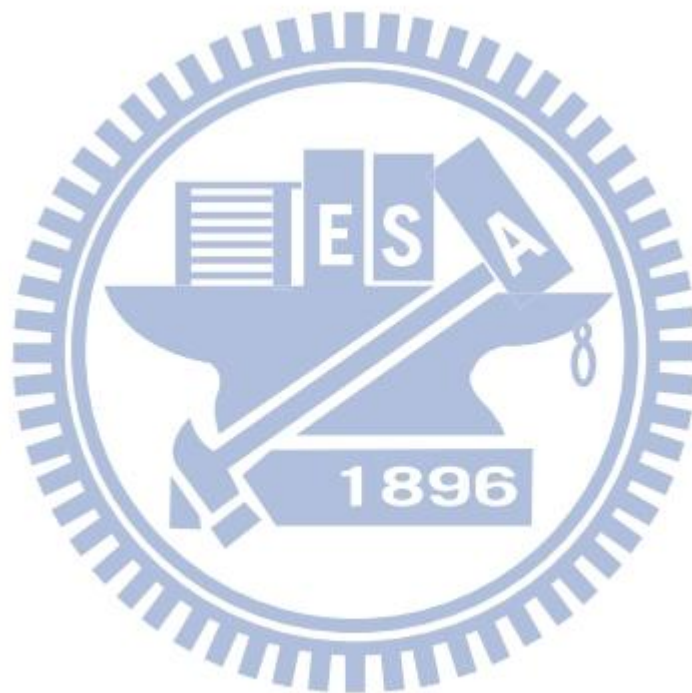
Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

This research aims to establish an analytical method to characterize the structural behaviors of badminton racket, including string effect on the frame deformation, the response of static indentation, and coefficient of restitution. The analysis results were validated by the static and dynamic experiments. This study includes two kinds of badminton rackets which are aluminum badminton racket and carbon/epoxy composites badminton racket. In addition to establishing the model according to the stacking sequences (layer-by-layer model), the study proposed the equivalent model for carbon/epoxy composites badminton racket.

The study found that there was some difference between the analysis and experiment in the string effect on the frame deformation. The discrepancy could be attributed to the degradation of the string which is not accounted for in the simulation. On the other hand, the analysis was closed to experiment data in the response of static indentation and coefficient of restitution. In light of

the foregoing validation, the analysis method proposed is capable of characterizing the mechanical behaviors of badminton racket with accuracy. Furthermore, in the numerical analysis of carbon/epoxy composites badminton racket, the equivalent model was in good agreement with the layer-by-layer. In addition, the equivalent model costs less time than the layer-by-layer model. Thus, the equivalent model proposed in this study can be an efficient manner to characterize the structural behaviors of carbon/epoxy composites badminton racket.



致謝

在兩年的研究生活中，承蒙指導教授 蔡佳霖博士於學生求學期間不遺餘力的指導與協助，使學生在學術研究以及待人處事上有很大的收穫與成長，在此致上由衷的感謝。同時感謝工業研究院邱佑宗博士與清華大學動機系葉孟考教授撥冗擔任學生口試委員，並給予寶貴的建議，使得本論文更為精進與豐富。

感謝一起奮鬥的夥伴奕心與子晨，在兩年來的幫助與砥礪。同時感謝學長盧廷鉅、黃健洋、賴彥錕、王泰元、莊文彥、葉日翔、齊揚楷、許嵩群、劉少淇與學弟羅品冠、李脩毓，在這兩年來研究的建議與協助。此外，感謝勝利體育公司在資源的支援，並特別感謝劉宗翰、王子瑋、張鎮宇及歐明威的協助，使得本研究順利完成。在漫長的求學生涯中，更要感謝我親愛的家人在背後的支持與鼓勵，讓我無後顧之憂的在這兩年盡情的學習。如今求學生涯即將告一段落，感謝一路支持我走到今日的朋友們。

李佳旻 謹誌

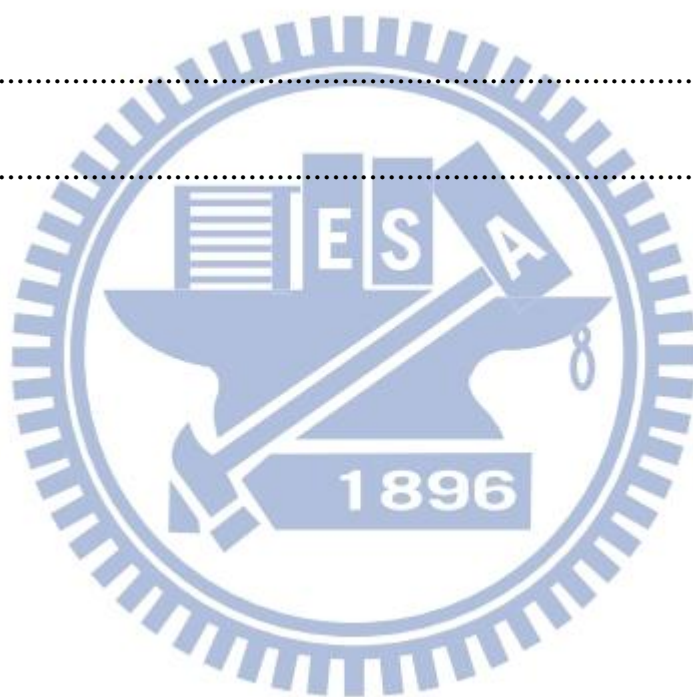
102年8月

目錄

摘要	i
英文摘要	iii
致謝	v
目錄	vi
表目錄	ix
圖目錄	x
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與文獻回顧	1
1.2 研究目標與方法	5
第二章 鋁製羽球拍實驗與有限元素分析	6
2.1 羽球線行為特性	6
2.2 有限元素分析	7
2.2.1 建立有限元素模型	7
2.2.2 模擬分析	9
2.2.2.1 球拍穿線後的變形	9
2.2.2.2 球拍靜壓響應	10
2.2.2.3 球拍恢復係數	11

2.3 實驗方法.....	12
2.4 結果與討論.....	13
第三章 碳纖維羽球拍實驗與有限元素分析.....	16
3.1 等效材料性質.....	16
3.1.1 單方向複合材料的基本特性.....	16
3.1.2 複合材料疊層板等效材料性質.....	20
3.2 有限元素分析.....	21
3.2.1 建立有限元素模型.....	21
3.2.1.1 球拍模型.....	22
3.2.1.2 網線模型.....	23
3.2.2 模擬分析.....	24
3.2.2.1 球拍剛性分析.....	24
3.2.2.2 球拍自然頻率分析.....	25
3.2.2.3 球拍結構特性模擬.....	26
3.3 實驗方法.....	26
3.3.1 球拍剛性量測.....	27
3.3.2 球拍自然頻率量測.....	27
3.3.2 球拍靜動態結構特性量測.....	28
3.4 結果與討論.....	29

3.4.1 球拍剛性與自然頻率.....	29
3.4.2 球拍結構特性.....	30
第四章 結論與未來展望.....	32
4.1 結論.....	32
4.2 未來展望.....	33
參考文獻.....	35
附表.....	37
附圖.....	43



表目錄

表 2.1 金屬材料性質	37
表 2.2 羽球線材料性質	37
表 2.3 鋁製羽球拍穿線後之變形量結果比較.....	38
表 2.4 鋁製羽球拍恢復係數結果比較.....	38
表 3.1 碳纖維與樹脂的材料性質	39
表 3.2 不同纖維體積比的碳纖維複合材料之基本特性.....	39
表 3.3 不同模態下拍框之自然頻率.....	40
表 3.4 中管之自然頻率(彎矩模態).....	40
表 3.5 碳纖維複合材料羽球拍穿線後之變形量結果比較.....	41
表 3.6 比較不同碳纖維複合材料羽球拍模型之分析時間(靜壓特性分析)...	41
表 3.7 比較不同碳纖維複合材料羽球拍模型的恢復係數結果與分析時間 .	42

圖目錄

圖 2.1 羽球線拉伸實驗照片	43
圖 2.2 球線伸長量與負載關係圖	43
圖 2.3 負載減退與時間關係圖	44
圖 2.4 球線應力應變關係圖	44
圖 2.5 鋁製球拍有限元素模型	45
圖 2.6 鋁製羽球拍有限元素模型 (a)FEM A 的局部網線區域之示意圖 (b)編織網線模型局部示意圖 (c)平整無編織網線模型部示意圖	46
圖 2.7 穿線分析流程圖	47
圖 2.8 分析網線張力分布圖	47
圖 2.9 穿線分析之邊界條件示意圖	48
圖 2.10 球拍變形示意圖	48
圖 2.11 球拍靜壓響應分析的邊界條件示意圖	49
圖 2.12 鋁製羽球拍恢復係數分析的邊界條件示意圖	49
圖 2.13 鋁製羽球拍靜壓響應實驗照片	50
圖 2.14 鋁製羽球拍恢復係數實驗儀器架設示意圖	50
圖 2.15 鋁製羽球拍靜壓位置示意圖 (a)CASE 1：位於網格中間處 (b)CASE 2：位於網格中間上方 2 mm 處	51

圖 2.16 鋁製羽球拍靜壓響應結果比較 (a)FEM A 與實驗結果比較 (b)FEM A 與實驗結果比較 (c)FEM A 與實驗結果比較.....	51
圖 3.1 碳纖維複合材料羽球拍材料座標示意圖.....	52
圖 3.2 不同纖維體積比的代表性單元體模型 (a)纖維體積比為 40% (b)纖維體積比為 55%.....	53
圖 3.3 代表性單元體座標系統及尺寸示意圖.....	54
圖 3.4 施加外力負載之示意圖.....	54
圖 3.5 施加扭矩負載之示意圖.....	54
圖 3.6 碳纖維複合材料羽球拍有限元素模型.....	55
圖 3.7 疊層設定情形 (a)截面位置 (b)截面疊層情形.....	55
圖 3.8 球拍不同型式的載重分析示意圖 (a)拍框側壓 (b)拍框頂壓 (c)中 管三點彎矩.....	56
圖 3.9 球拍不同型式的載重實驗照片 (a)拍框側壓 (b)拍框頂壓 (c)中管 三點彎矩.....	56
圖 3.10 拍框不同模態之變形示意圖 (a)彎矩(X 軸)模態 (b)彎矩(Z 軸)模 態 (c)扭矩模態 (d)徑向伸縮模態.....	57
圖 3.11 拍框不同振動模態之實驗方法示意圖 (a)彎矩(X 軸)模態 (b)彎矩 (Z 軸)模態 (c)扭矩模態 (d)徑向伸縮模態.....	58
圖 3.13 中管彎矩振動模態之實驗方法示意圖.....	59

圖 3.14 碳纖維複合材料羽球拍恢復係數實驗儀器架設示意圖	59
圖 3.15 拍框側壓實驗與分析結果比較.....	60
圖 3.16 拍框頂壓實驗與分析結果比較.....	60
圖 3.17 拍框側壓分析的接觸壓力分布圖.....	61
圖 3.18 拍框頂壓分析的接觸壓力分布圖.....	61
圖 3.19 拍框側壓分析的接觸力分布圖 (a)接觸範圍位置示意圖 (b)接觸 力分布圖.....	62
圖 3.20 拍框頂壓分析的接觸力分布圖 (a)接觸範圍位置示意圖 (b)接觸 力分布圖.....	62
圖 3.21 中管三點彎矩的實驗與分析結果比較.....	63
圖 3.22 碳纖維複合材料羽球拍靜壓位置示意圖 (a)CASE 1：位於網格中 間處 (b)CASE 2：位於網格中間上方 2 mm 處	63
圖 3.23 碳纖維複合材料羽球拍靜壓響應結果比較.....	64

第一章 緒論

1.1 研究動機與文獻回顧

近年來，運動風氣興起，羽球運動這項老少咸宜的運動深受國人喜愛。隨著工業科技與材料科學的進步，羽球拍的製作已由傳統的木製球拍，演進到由鋁、鐵等材料所製成的金屬球拍，一直發展到現今由碳纖維與樹脂等材料所混合製成的碳纖維複合材料(Composite)球拍。碳纖維複合材料具有質量輕、高強度與高度剛性等特性，這些特性提高羽球拍的剛性及強度，使得羽球拍在使用上更舒適及更具有操控性。在羽球拍設計中，球拍的幾何形狀與材料特性扮演重要的角色。回顧羽球拍的相關研究中，學者大多以實驗的方式來探討影響球拍結構特性之因素。

林與陳[1]針對不同穿線張力對球拍彈性恢復係數(Coefficient of restitution, COR)之影響進行探討。使用 80 克鋼球來撞擊羽球拍，並藉由鋼球撞擊前後的速度來獲得球拍的恢復係數。其中，為了使鋼球撞擊瞬間的動量等同於羽球在時速 200 km/hr 下之動量，將使鋼球自高 61.5 公分處自由落下撞擊球拍。實驗過程皆以高速攝影機進行拍攝，並藉由影片分析軟體獲得鋼球反彈速度，計算出球拍的彈性恢復係數。實驗結果指出，對於球拍擊球區中心而言，穿線張力由 19 磅增至 27 磅時，穿線磅數越高的球拍，球拍的彈性恢復係數越高，。

曾[2]針對羽球拍在不同網線張力下，對於羽球拍有效擊球區域的彈性恢復係數之影響進行探討。實驗結果指出，穿線張力在 19 磅至 27 磅範圍中，球拍中間區域的彈性恢復係數會隨著張力提高，但有效擊球區域的其它區域就無此現象發生。若對整體球拍而言，穿線張力較低之球拍的甜區較大。此外，經由觀察實驗影片，發現垂直撞擊的恢復係數較非垂直撞擊的低，推論在非垂直撞擊時，構成網格的球線向外滑動的現象較不明顯，動能損失較小，使得其恢復係數較高。

林等人[3]針對羽球拍中桿(Shaft)勁度對於揮拍速度及球速之影響進行探討。經由實驗發現中桿勁度較小的球拍，擁有較快的揮拍速度及球速。若對網球拍而言，蘇[4]針對球拍勁度與網線張力對網球拍恢復係數之影響進行探討。實驗結果顯示，網線張力為 40 磅、50 磅、60 磅及 70 磅的球拍中，穿線張力為 50 磅的球拍擁有較高的恢復係數，並指出勁度較高的網球拍，因碰撞時球拍變形量較小，其損失能量較少，使得勁度較高的網球拍產生球速比勁度低的網球拍更快。

Bower 與 Sinclair[5]針對網球拍的勁度與網線張力對網球反彈速度及角度之影響進行探討。實驗結果指出，勁度較高球拍產生的反彈速度較快且反彈角度較小；且比較穿線張力為 40 磅、50 磅與 60 磅的球拍，張力較小的球拍產生的反彈速度較快且反彈角度較小。

然而，文獻[3]與文獻[4,5]的實驗結果相左，林等人[3]推測其原因係羽

球拍與網球拍的揮拍形態不同所導致。羽球拍在擊球前的揮拍過程中，球拍中桿會有彎曲和復原的現象，在此過程中，勁度較小的球拍擁有較高的變形能，並在揮拍過程中釋放，使得球拍擁有較快的速度進而產生較高的球速。

在羽球拍的研究中，學者較少以有限元素分析(Finite element analysis)的方式來進行探討。然而，在網球拍的方面，除了以實驗的方式來探討球拍的行為特性外，部分學者亦會使用有限元素分析來進行探討。Li 等人[6]以有限元素分析的方式來探討球拍網線張力與撞擊位置對於球拍擊球力量與網球反彈速度之影響。分析結果發現穿線張力較高的球拍，其撞擊接觸時間較短且網球反彈速度與角度也比較小。位於球拍中間下方的最佳反彈區域(Best bounce spot)，其網球反彈速度比甜區(Sweet spot)高且反彈角度較小，但其打擊時所需承受的力量卻比甜區高出 1.4 倍。

Kim 等人[7]針對球線間的摩擦係數對於網球回擊的速度、角度、撞擊接觸時間以及支撐處的反力之影響進行探討。其中在有限元素模型中，其依據網線上下交錯的幾何外形，使用實體元素建構出三維交錯(interlace)的網線模型。有限元素分析結果指出，球線間的摩擦係數較大時，網球回擊的速度較快且支撐處的反力較大，但其網球撞擊接觸時較短且回擊角度較小，將有益於擊球時對球拍的控制。

Allen 等人[8-11]亦以有限元素分析的方式針對碳纖維網球拍進行一系

列的探討。首先，Allen 等人使用實體元素建構三維上下交錯的線床 (String-bed)模型，並對此模型進行撞擊分析驗證，其分析結果與實驗結果相吻合[8]。接著，Allen 等人依據球拍幾何建立以及經由模態分析，得知球拍的剛性性質與自然頻率的關係，找出與球拍實際的自然頻率最相近的剛性性質，此性質稱為球拍的等效模數。並且利用此等效模數建立球拍的模型，進行不同速度下的撞擊分析，其分析結果亦與實驗結果相吻合[9]。最後，Allen 等人透過調整球拍參數[10-11]，包括球拍勁度、質量與平衡點位置，探討這些球拍設計參數對球拍擊球的影響。分析結果發現球拍勁度較高的網球反彈速度比勁度較低的快 9%，球拍較重的網球反彈速度比球拍較輕的快 37%，重頭型球拍的網球反彈速度較輕頭型快 32%。

綜合上述文獻可知，影響球拍行為的因素有很多，包括網線張力、撞擊位置、球拍勁度等因素。在目前的相關研究中，有限元素分析的探討對象都集中於網球拍方面。然而，羽球拍與網球拍在結構擊揮拍型態上有很明顯的差異，無法將網球拍的分析方法或結構特性應用於羽球拍上。因此，本研究將建立有限元素分析的方法，針對羽球拍的結構特性進行模擬分析。在碳纖維羽球拍進行的分析中，若要依據疊層角度建立模型進行分析，其分析的計算量十分龐大。為了提升分析的效率，Allen 等人[9]建立等效模型來進行分析。然而，Allen 等人建立等效模型的方式無法在球拍製作前模擬出球拍的行為特性。因此，本研究將提出一套建立等效模型的方法，

並對碳纖維羽球拍的結構特性進行模擬分析。未來，可透過此有限元素分析流程，探討不同設計參數對羽球拍的結構行為特性影響，作為球拍設計的參考依據。

1.2 研究目標與方法

本研究主要目的係建立有限元素分析方法，使用有限元素分析套裝軟體 ANSYS[12]，針對羽球拍的結構特性進行模擬。其中在碳纖維複合材料羽球拍的模擬分析中，為了提升分析的效率，本研究將建立碳纖維複合材料羽球拍的等效模型來進行模擬。

本文將分成三個部分，第一部分，將針對羽球拍的結構特性建立一套有限元素分析的方法，並使用鋁製羽球拍來進行分析模擬，同時藉由相關的靜態與動態實驗來探討與驗證羽球拍的結構特性。第二部分，針對碳纖維羽球拍的結構特性進行模擬分析與探討。將先提出計算碳纖維羽球拍的等效材料性質之方法，計算球拍的等效材料性質並建立的羽球拍模型。接著，使用第一部分所建立的分析方法，針對碳纖維複合材料羽球拍的結構特性進行模擬與探討。此外，亦透過分析球拍的疊層模型以及實驗的方式來探討與驗證羽球拍的結構特性。第三部分中，將歸納出本研究的結論及未來展望。

第二章 鋁製羽球拍實驗與有限元素分析

羽球線在羽球拍的行為扮演很重要的角色，本研究將先針對羽球線的性质與特性進行探討。接著，建立一套有限元素分析方法，針對鋁製羽球拍穿線後的變形、球拍靜壓響應與恢復係數等三個結構特性進行模擬分析。最後，將以實驗的方式來驗證與探討鋁製羽球拍的結構特性。

2.1 羽球線行為特性

為了瞭解羽球線的行為特性，將藉由羽球線的拉伸實驗來進行探討。本研究所使用羽球線的型號為 VS-800，主要由尼龍(Nylon)所組成，經由實際測量，羽球線的直徑為 0.7 mm，密度為 1143 kg/m^3 。在球線的拉伸實驗中，羽球線兩端使用夾具固定，羽球線有效長度約 10 cm，並為了避免夾具與羽球線之間產生滑動，於夾具與羽球線之間放入砂紙，以增加夾具與羽球線之間的摩擦力，如圖 2.1 所示。球線的拉伸實驗分成三個階段，第一階段，夾具以 2 mm/min 的速率拉伸至位移到達 14 mm，此時球線負載約 23 磅。第二階段，夾具在位移 14 mm 處固定 20 分鐘。最後階段，夾具再繼續以 2 mm/min 位移速率拉伸至其負載到達 28 磅。

羽球線的拉伸實驗過程中，球線的伸長量與負載之關係如圖 2.2 所示。由此伸長量與負載的關係圖中，得知在固定夾具的階段中，羽球線的負載會隨者時間退減的現象，約減退了 3 至 4 磅，球線負載減退與時間的關係

如圖 2.3 所示。從圖中可得知，在一開始的 10 分鐘內，球線的負載會有明顯退減的現象，其負載約減少了 3 磅；經過 10 分鐘之後，球線負載的退減現象也逐漸減緩。接著，將實驗過程中球線的伸長量與負載關係轉換成應變與應力之關係，羽球線的應力與應變關係如圖 2.4 所示。考慮球拍在實際使用中，球線大多已在球拍上停滯一段時間後才會因擊球而有伸長的行為產生，與羽球線拉伸實驗中的第三階段行程的行為相似，因此，球線的楊氏係數將以第三階段行程的應力應變關係決定。經計算此段中的應變介於 0.13 至 0.14 的應力應變之關係，獲得球線的楊氏係數為 6.9 GPa。

2.2 有限元素分析

2.2.1 建立有限元素模型

本研究以有限元素分析來探討羽球拍的機械行為。鋁製羽球拍由球拍與網線兩個部分所構成。球拍部分包含了鋁製的拍框(Frame)、鐵製的三通(Joint)與中管(Shaft)以及木製的握把(Grip)。由於在本研究中主要針對拍面(拍框與三通)與網線之間的行為進行探討，因此，球拍模型將只建立拍框與三通部份，如圖 2.5 所示，其材料性質列如表 2.1 所示。其中為了簡化球拍的有限元素模型，將忽略拍框中穿孔的幾何特徵。球拍模型使用 SOLID185 元素建立，此元素為三維實體元素，每個元素有 8 個節點，每個節點具有三個自由度，支援幾何大變形及應力硬化效應。

鋁製羽球拍的網線部分係由 22 條豎線(Main string)與 23 條橫線(Cross string)上下交錯所構成。在有限元素分析中，若要依據其幾何外形建立模型並進行模擬，那其建模與模擬運算的過程會十分複雜、耗時。因此，本研究將以平整無編織的網線來取代上下交錯的網線之概念，將網線部分建構成以下三種簡化的網線模型：(1)FEM A：撞擊點周遭 5x5 的網格將依據其幾何形狀，建構出三維編織的網線模型，而其餘的網格部分則簡化成平整無編織的網線模型，如圖 2.6 所示。(2)FEM B：只將撞擊點附近的 3x3 網格建構成三維編織之網線模型，其餘的網格部分則簡化成平整無編織的網線模型。(3)FEM C：將網線全部簡化成平整無編織的網線模型。以上三種的網線模型皆使用 BEAM188 元素建立，此元素為三維梁元素，每個元素有 2 個節點，每個節點具有六個自由度，支援幾何大變形及應力硬化效應。經實際量測，網線的直徑為 7 mm，密度為 1143 kg/m³，楊氏係數為 6.9 GPa，並假設其波松比為 0.3 以及其材料阻尼係數為 5x10⁻⁵，網線的材料性質整理列在表 2.2 中。在編織的網線模型中，將依據網線間上下交錯的幾何外形，建構出三維編織的網線模型。為了使編織網線之間可以發生接觸作用的行為，將在此編織網線之間設定線對線接觸(Line-to-Line Contact)，於豎線接觸範圍建立接觸元素 CONTA176，於橫線接觸範圍建立接觸目標元素 TARGE170，並假設其接觸間摩擦係數為 0.1。在平整無編織的網線模型中，利用網線兩端點連成一直線的幾何外形，建構出平整

無編織的網線模型，其中此模型中網線之間沒有接觸的關係。為了在碰撞階段之模擬中，使平整網線模型中的球線之間有相互作用的關係，將於兩球線間的相鄰節點上，在其 X、Y 及 Z 方向位移均建立耦合關係。

2.2.2 模擬分析

在鋁製羽球拍的有限元素模擬分析中，將探討羽球拍穿線後的變形、靜壓響應以及恢復係數等三個球拍的結構特性。

2.2.2.1 球拍穿線後的變形

為了探討羽球拍穿線後的變形，本研究參考球拍實際穿線的情形，將其過程簡化成四個步驟進行分析，分別為設定網線張力、穿豎線、穿橫線及球拍無外力拘束的結構平衡，穿線分析流程如圖 2.7 所示。設定網線張力為給予網線兩端點位移，使網線具有張力，此端點位移可先由力學關係推算，如下式：

$$\delta = \frac{P(L/2)}{AE} \quad (2.1)$$

其中 P 為網線張力， L 為網線的長度， A 為網線的面積， E 為網線的楊氏係數。但由於網線模型在施予位移過程中會產生幾何非線性的現象，造成網線無法達到預期的張力，因此將藉由讀取網線端點的負載來修正端點位

移量，使得網線具有正確的張力。本研究針對球線張力為 23 磅的球拍進行探討，在實際穿線過程中，中間 14 條橫線的張力會增加 2 磅。然而在 2.1 節的實驗觀察得知，球線拉完張力後，會發生退磅現象。張力約為 23 磅的球線，在一開始的 10 分鐘內，球線會有明顯退磅的現象，張力約減少了 3 磅；經過 10 分鐘之後，球線退磅的現象將減緩。因此，在有限元素分析中所設定的球線張力將比實際穿線時所設定的張力減少 3 磅，網線張力分布圖 2.8 所示。設定網線張力後，分別找出豎線與橫線的端點與實際拍框孔洞的對應位置，建立位移自由度的耦合關係，使網線與球拍進行結合；在此步驟中，球拍依據真實穿線時的拘束情形，在拍框頂部下方 85 mm 處及拍框底部上方 83 mm 處，進行 X 方向位移之拘束，其拘束寬度約 7 mm，並於拍框頂部與底部之內緣節點進行 Y 方向位移之拘束，其拘束寬度約 34 mm，球拍邊界條件如圖 2.9 所示。最後，將球拍上的拘束條件移除，使球拍在無外力拘束下再進行結構平衡，即完成球拍穿線分析。球拍在穿線後會產生變形，如圖 2.10 所示，本研究將對球拍在寬度(W)及長度(H)兩個方向，進行變形分析。

2.2.2.2 球拍靜壓響應

在球拍的靜壓響應模擬分析中，將先於球拍中間網格上方處建立直徑與羽球相同為 27 mm 的銅質球頭模型，材料性質列如表 2.1。因網線與球

頭模型之間會發生接觸碰撞的行為，所以於兩個模型間設定點對面的接觸 (Node-to-Surface Contact)，於網線中可能與球頭接觸的範圍建立接觸元素 CONTA175，於球體的下表面建立接觸目標元素 TARGE170，並假設其接觸間摩擦係數為 0.1。接著，將此模型進行的穿線的模擬分析。完成穿線的模擬分析後，依據實驗情形，將距靜壓位置前後各 8cm 之拍框節點給予 Z 方向的拘束，球拍的拘束情形如圖 2.11 所示。最後，將銅質球頭模型往網線移動，使球頭對網線施力，以此方式模擬球拍靜壓受力行為。本研究將針對球拍靜壓過程中球頭模型的位移與負載關係進行探討。

2.2.2.3 球拍恢復係數

在球拍恢復係數的探討中，參考林與陳[1]對羽球拍的彈性恢復係數的研究，使用鋼球撞擊球拍並藉由鋼球撞擊前後的速度來獲得球拍的恢復係數。在有限元素模擬分析中，於球拍上方建立直徑與羽球相同為 27 mm 的鋼球模型，材料性質如表 2.1。因網線與鋼球模型之間會發生接觸碰撞的行為，於兩個模型間設定點對面的接觸，於網線中可能與鋼球接觸的範圍建立接觸元素 CONTA175，於鋼球的下表面建立接觸目標元素 TARGE170，並假設其接觸間摩擦係數為 0.1。接著，將此模型進行的穿線的模擬分析。完成穿線的模擬分析後，將固定球拍頂部與底部之下方節點的 Z 方向位移，其拘束寬度約 80 mm；且固定球拍頂部與底部之內緣節點

的 Y 方向位移，其拘束寬度約 10 mm，球拍的拘束情形如圖 2.12 所示。接著，為了使鋼球撞擊的動量(Momentum)等同於羽球於 200 km/hr 之動量，假設鋼球以速度 3.49 m/s 來撞擊羽球拍。經有限元素分析，可獲得鋼球的反彈速度，計算出球拍的恢復係數(COR)，恢復係數計算方式[13]如下：

$$COR = \frac{V_1}{V_0} \quad (2.2)$$

其中 V_0 、 V_1 分別為鋼球撞擊前後的速度。

2.3 實驗方法

為了確認有限元素分析的正確性，本研亦透過實驗方式來探討球拍穿線後變形、球拍靜壓響應及恢復係數等結構特性。在探討球拍穿線後變形的實驗中，先在球拍穿線前，對其寬度及長度兩個方向的長度進行量測。接著球拍進行穿球線的動作，球拍穿球線完成後再對球拍寬度及長度兩個方向的長度進行測量。比較穿線前後球拍兩方向的長度，即可獲得羽球拍兩個方向的變形量。

在探討球拍靜壓響應的實驗中，將穿完球線的羽球拍放置於跨距為 16 cm 的支撐架上，並使用直徑與羽球相同為 27 mm 的銅質球型夾頭，以 10 mm/min 的移動速率，對位於羽球拍中間的網格進行靜壓測試，實驗照片如圖 2.13 所示。本研究將針對靜壓測試過程中，夾頭的位移與荷重元的負

載之關係進行探討。

在探討球拍恢復係數的實驗中，將穿完球線的羽球拍放置於固定架上，並為了使鋼球撞擊球拍前具有 3.49 m/s 的速度，將直徑為 27 mm、重量為 78.5 克的鋼球吸附於電磁鐵，其鋼球底部與拍面相距 62 cm，將透過關閉電磁鐵電源，使得鋼球自由落下撞擊拍面，實驗儀器架設如圖 2.14 所示。此鋼球撞擊過程以高速攝影機進行拍攝，其拍攝的取樣頻率為 300 Hz。最後，藉由影像擷取而獲得鋼球碰撞後反彈高度，計算出鋼球的反彈速度及球拍恢復係數。本研究參考 Brody 等人[13]對恢復係數的定義，鋼球的反彈速度及球拍恢復係數(COR)計算如下式：

$$V_1 = \sqrt{2gh_1} \quad (2.3)$$

$$COR = \frac{V_1}{V_0} = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad (2.4)$$

其中 V_0 、 V_1 分別為鋼球撞擊前後的速度， g 為重力加速度， h_0 、 h_1 分別為鋼球的初始高度及反彈高度。

2.4 結果與討論

羽球拍穿線之後，球拍在其長度(H)與寬度(W)兩個方向之變形量結果

列如表 2.3 所示。在有限元素模擬分析中，三種模型的變形結果皆相同，這代表著網線模型無論是否為編織幾何外形，都不會影響球拍的穿線後變形結果。在兩次的實驗結果中，在寬度的方向變形量結果相近，但在長度的方向變形量結果之間誤差卻達 12%。其原因可能係其變形量很小，很容易因穿線過程中些許的差異，造成每次實驗之間的差距產生。比較分析與實驗結果，在長度方向的變形量誤差為 7.1%，在寬度的方向變形量誤差為 14.4%。本研究認為在有限元素模擬中，將穿線階段簡化成四個步驟，與實際穿線過程中網線是依序穿附於拍框的方式不同，並且在模擬中無法掌握實際的球線張力退減情形，使得分析與實驗結果之間的誤差達 14.4%。

在球拍靜壓響應的探討中，考慮實驗時球頭靜壓位置可能會有偏差的情形，所以在有限元素分析中將對以下兩種不同的球頭靜壓位置進行分析與探討，第一種情形為球頭靜壓位置位於網格中心處(CASE 1)，第二種情形為球頭靜壓位置位於網格中心上方 2 mm 處(CASE 2)，如圖 2.15 所示。實驗與有限元素分析的位移與負載關係結果如圖 2.16 所示。比較分析與實驗的結果，實驗的位移與負載關係為雙線性之曲線，與有限元素分析中的 CASE 2 相同，並且其位移與負載關係曲線相當接近。反觀有限元素分析中 CASE 1 之的位移與負載關係呈現一線性曲線，與實驗的趨勢不相同。因此，本研究推測，實驗中的球頭位置並非位於網格正中心處，使得球頭在靜壓過程初期並沒有接觸到網格所有網線，需過一段時間才能接觸到所

有網線，使得其位移與負載關係呈現出一雙線性之曲線。接著比較三種模型的分析結果，從中發現具有局部編織網線的模型(FEM A、FEM B)與平整無編織網線的模型(FEM C)在不同情形下的靜壓初期之位移與負載關係皆非常吻合。但在靜壓後期，由於具有局部編織網線之模型中的球線間會發生滑動，然而平整無編織網線之模型中的球線之間是不會發生滑動現象，使得兩者的位移與負載關係有差距產生，但其差距不到 5%。

在羽球拍的恢復係數之實驗與分析結果列如表 2.4 所示。在有限元素模擬分析中，由於鋼球撞擊過程中，具有局部編織網線之模型(FEM A、FEM B)中的網線間會發生滑動，在其滑動過程中會消耗能量，使得鋼球反彈速度與球拍恢復係數較平整無編織網線之模型(FEM C)為低，但三個模型的恢復係數結果仍然非常相近，三者之間最多僅有 3.5% 的差距。比較三個模型與實驗的結果，分析與實驗結果非常接近，其之間最高誤差約為 2.2%。此外，經由以上的有限元素模擬中，三種不同的模型在球拍穿線後的變形、靜態響應及動態恢復係數等方面均相近，可是平整無編織網線的模型在建立模型以及模擬運算上皆比具有編織網線的模型方便許多。因此，為了提升分析的效率，在下一章的碳纖維複合材料羽球拍的模擬中將只使用平整無編織的網線模型進行模擬分析。

第三章 碳纖維羽球拍實驗與有限元素分析

本章將針對碳纖維複合材料羽球拍的結構特性進行探討。在有限元素分析中，若要依據球拍的碳纖維疊層角度排列建立分析模型，其分析的計算量與時間非常龐大。因此，為了提升分析的效率，本研究提出計算碳纖維羽球的等效材料性質之方法，建立羽球拍的等效材料模型，並對碳纖維羽球拍的結構特性進行分析。同時依據球拍疊層角度排列建立模型進行分析模擬，並將其模擬結果與等效模型進行比較。最後，亦透過實驗來驗證與探討纖維複合材料羽球拍的結構特性。

3.1 等效材料性質

在計算碳纖維複合材料球拍的等效材料性質中，將依據其複合材料的基本特性以及球拍的幾何形狀與疊層角度排列，並透過本研究所提出的等效方式，獲得球拍的等效材料性質。本節將先對球拍的材料基本特性進行探討，接著介紹本研究提出的球拍等效材料性質之等效計算方式。

3.1.1 單方向複合材料的基本特性

碳纖維複合材料羽球拍由不同角度的單向性(Unidirectional)碳纖維預浸材堆疊捲製而成。碳纖維複合材料為正交性(Orthotropic)材料，此種材料共具有 9 個獨立的材料係數，分別為三個楊氏模數(E_x 、 E_y 、 E_z)、三個剪

力模數(G_{xy} 、 G_{xz} 、 G_{yz})及三個柏松比(ν_{xy} 、 ν_{xz} 、 ν_{yz})。依據羽球拍製作方法，纖維 0 度方向(x 方向)為球拍的軸向方向，纖維 90 度方向(y 方向)為球拍截面之環向方向，碳纖維複合材料球拍的材料座標如圖 3.1 所示。在碳纖維複合材料中，材料的纖維體積比(Fiber Volume Fraction)對材料的基本特性影響非常巨大。而為了瞭解球拍的基本材料性質，本研究將經由實驗得知球拍的纖維體積比，並透過數值模擬的方式，分析具有相同的纖維體積比之代表性單元體(Representative Volume Element, RVE)，獲得碳纖維複合材料羽球拍的基本材料性質[14]。

在探討球拍的基本材料性質中，考慮球拍製程的差異，將球拍分成拍框與中管兩部分進行討論。經由實驗量測得知，拍框部分的纖維體積比約為 40%，中管部分的纖維體積比約為 55%。本研究依據其纖維體積比建立纖維隨機排列之代表性單元體的有限元素模型，如圖 3.2 所示。其中纖維體積比為 40%的模型共有 88,674 個元素，模型中具有 40 根碳纖維；纖維體積比為 55%的模型共有 87,456 個元素，模型中具有 30 根碳纖維。此代表性單元體以 SOLID185 元素建立，並根據實驗量測結果與文獻[15]，碳纖維(Carbon fiber)與樹脂(Epoxy)的材料性質列如表 3.1 所示。接著，此代表性單元體的模型以不同型式的負載及週期性邊界條件(Periodic Boundary Condition)[16]進行分析，其中週期性邊界條件的座標系統如圖 3.3 所示及其模型中節點之間的關係如下：

在 $x = 0$ 及 $x = L$ 之平面上之節點：

$$u(0, Y, Z) - u(L, Y, Z) = \text{constant} \quad (3.1.a)$$

$$v(0, Y, Z) - v(L, Y, Z) = \text{constant} \quad (3.1.b)$$

$$w(0, Y, Z) - w(L, Y, Z) = \text{constant} \quad (3.1.c)$$

在 $y = 0$ 及 $y = W$ 之平面上之節點：

$$u(X, 0, Z) - u(L, W, Z) = \text{constant} \quad (3.2.a)$$

$$v(X, 0, Z) - v(L, W, Z) = \text{constant} \quad (3.2.b)$$

$$w(X, 0, Z) - w(L, W, Z) = \text{constant} \quad (3.2.c)$$

在 $z = 0$ 及 $z = H$ 之平面上之節點：

$$u(X, Y, 0) - u(L, Y, H) = \text{constant} \quad (3.3.a)$$

$$v(X, Y, 0) - v(L, Y, H) = \text{constant} \quad (3.3.b)$$

$$w(X, Y, 0) - w(L, Y, H) = \text{constant} \quad (3.3.c)$$

經由分析可得此模型的應力及應變狀態，並計算此模型的平均應力與應變，

其計算方法如下：

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int \sigma_{ij} dV \quad (3.4)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ii} = \frac{1}{V} \int \varepsilon_{ii} dV \quad (3.5)$$

$$\bar{\gamma}_{ij} = \frac{1}{V} \int \gamma_{ij} dV \quad (3.6)$$

其中 v 為模型的體積， σ_{ij} 、 ε_{ii} 、 γ_{ij} 及 dV 分別為元素的應力、正向應變、剪應變及體積。經由代表性單元體的模型之平均應力與應變，可計算得模型整體的基本性質，其計算方法如下：



$$E_i = \frac{\bar{\sigma}_{ii}}{\bar{\varepsilon}_{ii}} \quad (3.7)$$

$$G_{ij} = \frac{\bar{\sigma}_{ij}}{\bar{\gamma}_{ij}} \quad (3.8)$$

$$\nu_{ij} = \frac{\bar{\varepsilon}_{jj}}{\bar{\varepsilon}_{ii}} \quad (3.9)$$

本研究經由有限元素分析，可得知當纖維體積比為 40% 與 55% 時，複合材料的基本性質如表 3.2 所示。此外，為了確認其結果的收斂性。本研究亦分別建立 144,022、175,406 個元素之模型進行分析，其結果與原先的結果相同，這也表示原先的代表性單元體模型之結果已達收斂。

3.1.2 複合材料疊層板等效材料性質

本研究將藉由觀察羽球拍的行為模式決定球拍等效性質的計算方式。在羽球拍的行為模式中，可得知球拍受到力矩作用的影響遠大於軸向力與側向力。依據球拍材料性質方向的定義，與球拍承受力矩有關的材料性質分別為 E_x 、 G_{xy} 。因此，在等效疊層 E_x 、 G_{xy} 的性質時，將以其結構承受彎矩或扭矩負載之行為進行計算。在其餘疊層的等效性質部份，將藉由其拉伸行為之性質進行計算。但由於 z 方向剛性的性質 (E_z 、 G_{xz} 、 G_{yz}) 受到疊層角度改變的影響很小且其對球拍的變形影響也很小，將假設疊層的 z 方向之等效材料性質與其複合材料的基本性質相同。本研究將計算等效材料性質的過程劃分成以下三個步驟：

- (1) 疊層拉伸性質 (E_y 、 ν_{xy} 、 ν_{xz} 、 ν_{yz}) 的等效：建立具有相同疊層的平板模型，其中平板模型的長、寬、高分別為 20、20、0.2 cm。並且對此模型進行其長、寬兩個方向的拉伸試驗之模擬分析。藉由分析模型中的應力與應變結果關係，計算此疊層的等效拉伸性質，其計算方式與分析代表性單元體的方式相同。
- (2) 疊層 E_x 性質的等效：依據球拍截面形狀建立長度為 150 cm 管狀幾何，建構疊層結構模型以及等效性質模型。其中，模型的長度為 150 cm 是為了讓此模型為尤拉樑 (Euler Beam) 的結構，降低剪力變形對整體

結構變形的影響。模擬分析時，模型的一端固定並於另一端截面上施加外力負載，如圖 3.4 所示，使結構發生彎矩之變形。最後，藉由調整等效性質中的 E_x 性質，使得兩個模型的變形相同，獲得疊層的等效性質 E_x 。

(3) 疊層 G_{xy} 性質的等效: 依據球拍截面形狀建立長度為 50 cm 管狀幾何，建構疊層結構模型以及等效性質模型。模擬分析時，模型的一端固定並於另一端截面上施加扭矩負載，如圖 3.5 所示，使結構發生扭轉之變形。其中施加扭矩負載的方式為在截面中心建立節點，此節點與截面上的各個節點分別建立 MPC184 元素(此元素有兩個節點，有六個自由度，元素的行為是剛性樑)。並於截面中心之節點施加扭矩負載，其負載將藉著 MPC184 元素傳遞至結構模型上，造成結構發生變形。最後，藉由調整等效性質中的 G_{xy} 性質，使得兩個模型的變形相同，獲得疊層的等效性質 G_{xy} 。

3.2 有限元素分析

3.2.1 建立有限元素模型

本研究亦以有限元素分析來探討碳纖維複合材料羽球拍的機械行為。碳纖維複合材料羽球拍係由拍框、中管、握把與網線四個部份所構成。由於本研究中主要針對碳纖維球拍的拍框、中管與網線之間行為進行探討，

因此，碳纖維複合材料羽球拍的有限元素模型將只建構出拍框、中管與網線部份，如圖 3.6 所示。

3.2.1.1 球拍模型

在本研究將建立兩種類型的碳纖維複合材料羽球拍的有限元素模型，分別為球拍的等效模型 (equivalent model) 與疊層模型 (layer-by-layer model)。其中，為簡化羽球拍的有限元素模型，將忽略拍框中穿孔的幾何特徵。首先，本研究依據碳纖維複合材料羽球拍的幾何與等效材料性質，建立羽球拍的等效模型。此模型使用 SOLID185 元素建立。在 ANSYS[12] 分析軟體中是元素座標來定義材料性質的方向。因此，本研究將藉由局部座標來定義元素座標，使得其元素座標符合球拍的材料性質方向，圖 3.1 所示。

此外，亦依據碳纖維複合材料羽球拍的幾何、疊層角度排列與基本材料性質，建立羽球拍的疊層模型。球拍疊層模型亦使用 SOLID185 元素建立，並藉由局部座標來定義元素座標，使得其元素座標符合球拍的材料性質方向。在疊層模型中，依據球拍製作時的疊層角度排列方式，球拍任一截面可分成內框與採框兩的部分，球拍模型中元素疊層設定情形如圖 3.7 所示。由觀察球拍的截面可發現，雖然疊層數量相同，但其截面的厚度有些許不同。其原因係在球拍製作中，會因為受力不均勻，使得截面厚度不

相同。這意味著各位置的纖維體積比不同，其基本材料性質也不會相同。但本研究認為因厚度不同造成的材料性質差異不大，且若要依據各位置的厚度來定義各自的材料性質，其過程非常繁瑣複雜。因此，本研究在拍框與中管將各使用一種的基本材料性質進行分析。在球拍的等效與疊層兩個模型中，其元素的大小與數量皆相同；但在疊層模型中，每個元素中皆會設定疊層角度，其疊層數量約為 7 至 10 層，這使此模型的高斯點增加許多，是造成其分析的運算量非常龐大的原因。

3.2.1.2 網線模型

碳纖維複合材料羽球拍中的網線部分係由 22 條豎線及 22 條橫線上下交錯所構成。在有限元素分析中，若要依據其上下交錯之幾何外形建立模型進行模擬，那其建模與分析運算的過程會十分複雜與耗時，所以本研究亦將對其幾何進行簡化。依據第二章中不同簡化的網線模型之比較，可得知平整無編織的網線模型可以提升分析的效率。因此，碳纖維羽球拍的網線部分將全部建構成平整無編織的網線模型，此模型使用 BEAM188 元素建立，材料性質列如表 2.2。而在碰撞行為模擬中，為了使網線之間有相互作用之關係，將於兩網線間之相鄰的節點，在其 X、Y 及 Z 方向位移自由度建立耦合關係。

3.2.2 模擬分析

在碳纖維複合材料球拍的模擬分析中，將先對於球拍結構的剛性與自然頻率進行探討，並搭配實驗來驗證碳纖維羽球拍模型的正確性。接著，亦針對球拍穿線後的變形、球拍靜壓響應與恢復係數等三個球拍的結構特性進行模擬分析。

3.2.2.1 球拍剛性分析

本文將藉由不同型式的載重分析來探討球拍剛性，其中不同型式的載重分析包括了拍框側壓、拍框頂壓以及中管三點彎矩，如圖 3.8 所示。

1. 拍框側壓的模擬：於球拍兩側建立鋼質平板模型，因為分析時平板與球拍間會發生接觸碰撞，所以於兩個模型間設定面對面的接觸 (Surface-to-Surface Contact)，於球拍中可能與平板接觸的範圍建立接觸元素 CONTA173，並於平板模型的接觸表面建立接觸目標元素 TARGE170。模擬時，固定球拍左側平板具，並移動球拍右側平板，以此方式模擬拍框側壓受力行為。藉由球拍右側平板模型的位移與用力的關係描述球拍側壓的行為。
2. 拍框頂壓的模擬：於球拍上方建立鋼質平板模型，因為分析時平板與球拍間會發生接觸碰撞，所以於兩個模型間設定面對面的接觸，於球拍中可能接觸範圍建立接觸元素 CONTA173，並於平板模型的接觸表

面建立接觸目標元素 TARGE170。分析中，固定拍框下方兩側的節點，並將上方之平板往球拍移動，使平板對球拍施力，並在分析過程中藉由平板模型的位移與作用力的關係描述拍框頂壓的行為。

3. 中管三點彎矩的模擬：依據中管的截面建立長度 16 cm 的模型，並於中管中央上方處建立直徑為 12 mm 之半圓管的治具模型，因為分析時治具與中管間會發生接觸碰撞，所以於兩個模型間設定面對面的接觸。模擬時，固定中管模型兩端下方節點的 Z 方向位移，並移動中管上方的治具模型，以此方式模擬中管三點彎矩受力行為。藉由治具模型的位移與作用力的關係描述中管在三點彎矩受力時的行為。

3.2.2.2 球拍自然頻率分析

在探討球拍自然頻率中，將藉由模態分析(Modal analysis)的方式針對拍框與中管兩個部分的自然頻率進行探討。在探討拍框的自然頻率中，將固定模型中的中管部分，但因實驗中夾持的問題，中管上方 2 mm 的範圍將不進行拘束，並以此邊界條件進行模態分析，計算拍框在各個振動模態下的自然頻率。在中管的自然頻率的探討分析中，依據中管的截面建立長度 16 cm 的模型，固定模型一端，以此邊界條件進行模態分析，計算中管的自然頻率。

3.2.2.3 球拍結構特性模擬

本研究針對碳纖維複合材料羽球拍穿線後的變形、靜壓響應與恢復係數等三個球拍結構特性進行模擬。其中球拍穿線後變形與球拍靜壓響應的模擬方法與第二章鋁製羽球拍的相同，本節不再對其進行敘述。

在碳纖維複合材料碳纖維球拍的恢復係數模擬分析中，於球拍上方建立直徑與羽球相同為 27 mm 的鋼球模型。因為網線與鋼球模型之間可以發生接觸的行為，所以於兩個模型間設定點對面的接觸，於網線中可能與鋼球接觸的範圍建立接觸元素 CONTACT175，於鋼球的下表面建立接觸目標元素 TARGET170，並假設其接觸間摩擦係數為 0.1。在碳纖維複合材料球拍的恢復係數之探討中，將固定中管的後端使得其有效長度為 14 cm。為了使鋼球撞擊的動量等同於羽球於 200 km/hr 之動量，假設鋼球將以速度 3.49 m/s 來撞擊羽球拍。經由有限元素分析，可獲得鋼球的反彈速度，並計算出球拍的恢復係數(COR)，其計算方式請如 2.2 式所示。

3.3 實驗方法

為了確認有限元素分析的正確性，本研究亦透過實驗來量測碳纖維複合材料羽球拍結構剛性、自然頻率、球拍穿線後的變形、球拍靜壓響應及恢復係數等結構行為特性。

3.3.1 球拍剛性量測

本研究藉由不同型式的載重測試來探討球拍結構剛性，其中在拍框部分將進行側壓與頂壓實驗，在中管部分將進行三點彎矩的實驗，實驗情形如圖 3.9 所示。在拍框側壓與頂壓的實驗中，分別將球拍橫放或直放於固定座上，並於球拍上方使用鋼質平板的夾頭，以 10 mm/min 位移速率針對球拍進行靜壓動作。在中管三點彎矩的實驗中，將球拍中管部分放置於跨距為 16 cm 的支撐架上，並使用直徑為 12 mm 的半圓管之夾頭，以 10 mm/min 位移速率對中管進行靜壓測試。本研究將上述球拍實驗過程中，夾頭的位移與荷重元的負載之關係進行探討

3.3.2 球拍自然頻率量測

本研究藉由振動實驗來探討拍框與中管的自然頻率。在拍框的部分中，將對其在彎矩(X 軸、Z 軸)、扭矩及徑向伸縮等四種振動模態下的結構自然頻率進行探討，其模態的變形如圖 3.10 所示。實驗中，使用夾治具將羽毛球拍的中管部分固定，但為了不讓夾治具影響到拍框，中管上方 2 mm 的範圍將不進行拘束。依據不同振動模態，使用敲擊錘來激振球拍，激發羽毛球拍產生此振動模態的行為。同時使用雷射位移計量測球拍的位移歷程，其激振的位置與方向及量測點位置如圖 3.11 所示，並將量測點的位移時間歷程進行快速傅立葉轉換，獲得其振動模態之自然頻率。然而，在激發球

拍的扭矩模態中，會同時激發出球拍的彎矩與扭矩兩個模態之行為。因此，若要獲得球拍的扭矩模態之自然頻率，將忽略與彎矩模態相同的自然頻率。對於中管的部分中，將對其在彎矩模態下的自然頻率進行探討，此模態的變形如圖 3.12 所示。實驗時使用夾治具將中管固定，並使中管有效長度為 16 cm。亦使用敲擊錘來激振中管的實驗方式，獲得中管彎矩模態的自然頻率。

3.3.2 球拍靜動態結構特性量測

本研究藉由實驗方式來探討對球拍穿線後的變形、靜壓響應與恢復係數三個球拍結構特性。其中球拍穿線後變形與球拍靜壓響應的實驗方法與第二章鋁製羽球拍的方法相同，本章節不再對其進行敘述。

在探討球拍恢復係數的實驗中，將穿完球線的羽球拍使用夾治具固定中管的後端，使中管有效長度為 14 cm。為了使鋼球撞擊球拍前具有 3.49 m/s 的速度，將直徑為 27 mm、重量為 78.5 克的鋼球吸附於電磁鐵，其鋼球底部與拍面相距 62 cm，並將透過關閉電磁鐵電源，使得鋼球自由落下撞擊拍面，實驗儀器架設如圖 3.14 所。鋼球撞擊過程以高速攝影機進行拍攝，其拍攝的取樣頻率為 300 Hz 示。最後，藉由影像擷取而獲得鋼球碰撞後反彈高度，進而計算鋼球的反彈速度及球拍球拍各區域的恢復係數，其鋼球的反彈速度及球拍恢復係數計算與 2.3 節的方式相同。

3.4 結果與討論

3.4.1 球拍剛性與自然頻率

本研究藉由不同型式的載重分析來探討球拍的剛性。拍框的側壓與頂壓結果分別如圖 3.15 及圖 3.16 所示。從分析結果可得知，等效模型與疊層模型的剛性非常相近。然而，分析與實驗的結果之間約有 5-10 % 的誤差。本研究認為由於羽球拍為手工推疊捲製而成，其纖維疊層角度會有偏差的情形，並且球拍的製程中沒有抽真空，在複合材料的內部會有孔洞產生，使得拍框剛性會與分析模擬之剛性會有些許的差異。在拍框的側壓與頂壓模擬分析中，可由觀察拍框的接觸情形，如圖 3.17 與圖 3.18 所示，得知拍框與鋼板間的接觸並非單點接觸。並且由於球拍外形為圓弧狀，在其接觸範圍中間處會具有最大的接觸力，拍框的接觸力分布分別如圖 3.19 與圖 3.20 所示。接著，中管三點彎矩的結果如圖 3.21 所示，等效模型與疊層模型的剛性非常吻合，並且分析與實驗的結果也非常相近。

在球拍自然頻率部分中，拍框在四種模態下之自然頻率與中管的自然頻率分別列在表 3.3 及表 3.4 所示。分析與實驗結果顯示，等效模型與疊層模型的自然頻率非常相近。然而，分析與實驗的結果之間約有 3-8% 的差距。本研究認為分析模型與實際球拍之間的剛性差異是造成此其自然頻率差距的主要原因。

3.4.2 球拍結構特性

碳纖維複合材料球拍穿線後，在其寬度與長度兩個方向之變形量結果列如表 3.5 所示。在兩次的實驗結果中，球拍在寬度方向的變形結果相當接近，但在長度方向的變形結果之間具有不小差距。其原因可能為此方向的變形量很小，容易因穿線過程中些許的機器與人為的差異，造成兩次實驗之間的差距。而在有限元素分析中，疊層與等效兩個模型的變形結果非常相近，兩者間誤差最大僅有 2.1%。比較實驗與分析的結果，但由於兩次實驗在長度的方向變形量之差異很大，不將其結果與分析結果進行比較。在寬度的方向變形量誤差約為 8.2%。本研究認為造成其差異的因素為在分析中，將穿線階段簡化成四個步驟且無法掌握實際的球線張力退減情形，與實際穿線過程的情形有所不同，導致分析與實驗結果之間的誤差。

在碳纖維複合材料球拍靜壓響應的分析探討中，亦考慮到實驗中的球頭靜壓位置可能會有偏差的情形，有限元素模擬中將對以下兩種不同球頭靜壓位置進行分析與探討，第一種情形為球頭中心位於網格中心處(CASE 1)，第二種情形為球頭中心位於網格中心上方 2 mm 處(CASE 2)，如圖 3.22 所示。實驗與有限元素分析的位移與負載關係如圖 3.23 所示。在有限元素分析中，疊層與等效兩個模型的分析結果在不同情形的結果皆非常相近，但疊層模型分析所需的時間卻比等效模型多出 2 倍以上，分析所需的時間

如表 3.6 所示。比較分析與實驗的結果，可發現實驗的位移與負載關係為雙線性之曲線，與有限元素分析中的 CASE 2 相同，且此兩條位移與負載關係曲線相當接近；反觀有限元素分析的 CASE 1 之位移與負載關係呈現為一線性曲線，與實驗的趨勢不相同。因此，本研究推測實驗中的球頭位置並非位於網格正中心處，使得球頭在靜壓過程初期並沒有接觸到網格所有網線，需過一段時間才能接觸到所有網線，使得此位移與負載關係呈現出一雙線性之曲線。

碳纖維複合材料球拍恢復係數的實驗與分析結果列如表 3.7 所示。在有限元素模擬分析中，等模型效與疊層模型的分析結果非常相近，二者間僅有 1.2% 的差距，但疊層模型分析所需的時間卻比等效模型多出 3 倍之多，分析時間如表 3.7 所示。接著，比較分析與實驗的結果，實驗與分析之間的誤差約為 5.2%，此誤差應係分析模型與實際球拍之間的剛性差異所造成。

第四章 結論與未來展望

4.1 結論

本研究建立一套羽球拍有限元素分析方法，針對羽球拍穿線後的變形、靜壓響應及恢復係數之結構特性進行模擬分析，並藉由相關的實驗進行驗證與探討。此外，針對碳纖維羽球拍建立計算疊層等效性質的方法，並建構碳纖維羽球拍的等效模型進行分析。經由有限元素分析及實驗的探討，可歸納出以下結論：

1. 有限元素分析與實驗的結果中，在球拍穿線後之變形的部分有些誤差。但在球拍靜壓響應與恢復係數的部分，分析與實驗結果相當接近。由以上分析與實驗的比較，本研究所建立的有限元素分析方法適用於羽球拍的結構特性模擬分析。
2. 在鋁製羽球拍的模擬分析中，使用了三種簡化網線的模型進行模擬分析。在球拍結構特性模擬中，三個模型的結果皆非常接近。但由於全為平整無編織網線的模型無論在建立模型或是運算上皆比具有編織網線的模型方便許多。因此，使用平整無編織的網線模型進行模擬會提高有限元素分析的效率。
3. 在碳纖維複合材料羽球拍的模擬分析中，無論在球拍的剛性特性或

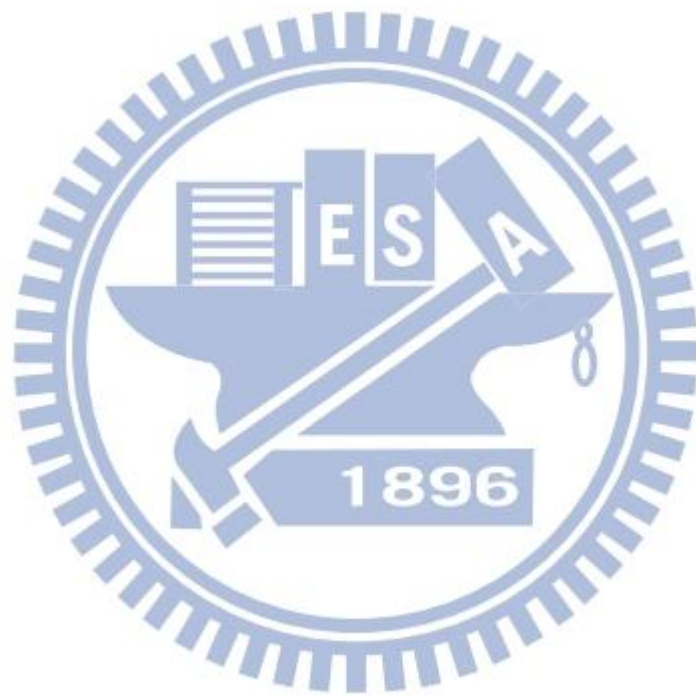
是三個球拍結構特性之模擬中，球拍的等效模型與疊層模型結果非常吻合。但疊層的模型分析所需時間卻比等效模型多出 2-3 倍。此結果代表在碳纖維羽球拍的分析中，使用等效模型將使得分析效率提高 3-4 倍。

4.2 未來展望

本研究透過有限元素分析探討羽球拍的結構特性，並建構碳纖維羽球拍的等效模型，有效提升分析之效率。本研究未來可針對以下項目進行更深入的探討：

1. 對羽球線的行為特性做更深入的探討，並找出一套最佳的穿線分析流程，使得球拍穿線行為的模擬更能符合實際的情形。
2. 針對碳纖維羽球拍的結構內部進行更進一步的了解，建構出結構剛性與特性與實際球拍更吻合的羽球拍模型。
3. 在羽球拍不同行為的模擬中，未來可使用破壞準則來探討羽球拍的破壞行為。
4. 針對不同設計因素的羽球拍進行模擬分析，包括網線張力、球拍重量與勁度等因素，並歸納出各因素對球拍結構特性的影響程度。

5. 針對不同疊層角度排列的羽球拍進行模擬分析，並搭配最佳化分析找出球拍的最佳疊層角度排列。
6. 以實際揮拍之行為進行模擬分析，探討不同的球拍對於球拍行為之影響，並作為球拍設計的參考依據。



參考文獻

- [1] 林信良、陳五洲，"不同穿線磅數的羽球網線其彈性恢復係數之探討，"大專體育，44期，103-107頁，1999。
- [2] 曾馨平，"不同張力羽球拍線之彈性恢復係數，"臺北市立教育大學體育研究所碩士論文，2006。
- [3] 林雅涵、陳婉菁、蔡虔祿，"羽球拍中桿勁度對揮拍速度及球速之影響，"台灣運動生物力學學會研討會論文，59-60頁，2008。
- [4] 蘇榮立，"球拍勁度與網線張力對網球拍恢復係數及發球表現之影響，"國立體育學院運動科學研究所碩士論文，1996。
- [5] R. Bower, and P. Sinclair , "Tennis racket stiffness and string tension effects on rebound velocity and angle for an oblique impact," Journal of Human Movement Studies, vol. 37, pp. 271-286, 1999.
- [6] L. Li, S. H. Yang, C. S. Hwang, and Y. S. Kim, "Effects of string tension and impact location on tennis playing," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 23, pp. 2990-2997, 2009.
- [7] Y. S. Kim, Y. J. Zhang, M. K. Bae, and M. S. Kim, " FEM analyses for dynamic characteristics of tennis racket and ball using interlaced solid string model ,"symposium on sports engineering : symposium on human dynamics, The Japan Society of Mechanical Engineers, pp. 66-71, 2009.
- [8] T. Allen, S. Goodwill, and S. Haake, " Experimental Validation of a Finite-element Model of a Tennis Racket String-bed ," The Engineering of sport 7, vol. 1, pp. 115-123, 2008.
- [9] T. Allen, J. Hart, J. Spurr, S. Haake, and S. Goodwill, "Validated dynamic analysis of real sports equipment using finite element; a case study using tennis rackets," Procedia Engineering, vol. 2, pp. 3275-3280, 2010.

- [10] T. Allen, S. Haake, and S. Goodwill, "Comparison of a finite element model of a tennis racket to experimental data ," Sports Engineering, vol. 12, pp. 87-98, 2009.
- [11] T. B. Allen, S. J. Haake, and S. R. Goodwill, "Effect of tennis racket parameters on a simulated groundstroke ," Journal of Sports Sciences, vol. 29, pp. 311-325, 2011.
- [12] "ANSYS® Academic Research, Release 13.0, "2010.
- [13] H. Brody, R. Cross, and C. Lindsey, "The physics and technology of tennis," United States Racquet Stringers Association, Racquet Tech Publishing, California USA,2002.
- [14] C.T. Sun and R.S. Vaidya, "Prediction of composite properties from a representative volume element," Composites Science and Technology, vol. 56, pp. 171-179, 1996.
- [15] M. Kaliske and H. Rothert, "Damping characterization of unidirectional fibre reinforced polymer composites," Composites Engineering, vol. 5, pp. 551-567, 1995.
- [16] C. Zhu and C.T. Sun, "Micromechanical modeling of fiber composites under off-axis loading," Journal of Thermoplastic Composite Materials, vol. 16, pp. 333-344, 2003.

附表

表 2.1 金屬材料性質

	楊氏模數 (GPa)	剪力模數 (GPa)	波松比	密度 (kg/m ³)
鋁	68.9	26	0.35	2710
鐵	172	68	0.28	7280
銅	101	37	0.35	8740
鋼	200	75	0.32	7617

表 2.2 羽球線材料性質

楊氏模數 (GPa)	剪力模數 (GPa)	波松比	密度 (kg/m ³)	阻尼係數
6.9	2.7*	0.3*	1143	5×10 ⁻⁵ *

*假設的材料性質

表 2.3 鋁製羽球拍穿線後之變形量結果比較

	長度方向變形量 ΔH (mm)	寬度方向變形量 ΔW (mm)
實驗 1	0.90	-2.70
實驗 2	0.80	-2.70
FEM A	0.79	-2.31
FEM B	0.79	-2.31
FEM C	0.79	-2.31

表 2.4 鋁製羽球拍恢復係數結果比較

	恢復係數
實驗 1	0.938
FEM A	0.927
FEM B	0.937
FEM C	0.959

表 3.1 碳纖維與樹脂的材料性質

	楊氏模數(GPa)			剪力模數(GPa)			波松比		
	E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
碳纖維	220	15.6	15.6	38.0	38.0	5.2	0.23	0.23	0.49
樹脂	3.0			1.1			0.35		

表 3.2 不同纖維體積比的碳纖維複合材料之基本特性

纖維體積比 (%)	楊氏模數(GPa)			剪力模數(GPa)			波松比		
	E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
40	89.7	5.5	5.5	2.6	2.6	1.8	0.30	0.30	0.50
55	122.3	7.0	7.0	4.1	4.1	2.3	0.28	0.28	0.49

表 3.3 不同模態下拍框之自然頻率

模態	自然頻率(Hz)			
	彎矩(X 軸)	彎矩(Z 軸)	扭矩	徑向伸縮
實驗	72.3	80.5	184.0	284.3
等效模型	69.9	84.6	199.1	294.3
疊層模型	69.8	83.6	198.3	291.9

表 3.4 中管之自然頻率(彎矩模態)

自然頻率(Hz)	
實驗	250.9
等效模型	261.2
疊層模型	261.4

表 3.5 碳纖維複合材料羽球拍穿線後之變形量結果比較

	長度方向變形量 ΔH (mm)	寬度方向變形量 ΔW (mm)
實驗 1	0.55	-2.60
實驗 2	0.85	-2.50
等效模型	0.96	-2.33
疊層模型	0.94	-2.35

表 3.6 比較不同碳纖維複合材料羽球拍模型之

分析時間(靜壓特性分析)

	分析時間(分鐘)
等效模型	120
疊層模型	408

表 3.7 比較不同碳纖維複合材料羽球拍模型的恢復係數結果與分析時間

	恢復係數	分析時間(分鐘)
實驗	0.842	-
等效模型	0.798	282
疊層模型	0.808	1228



附圖



圖 2.1 羽球線拉伸實驗照片

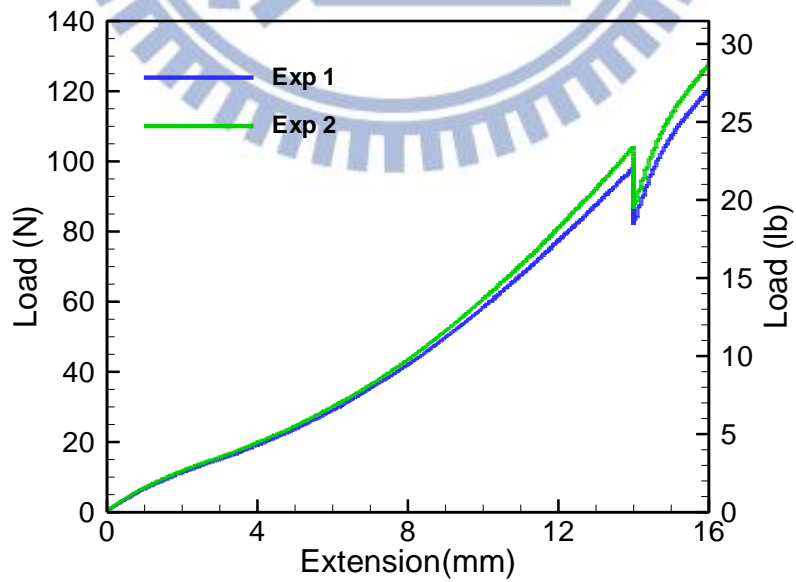


圖 2.2 球線伸長量與負載關係圖

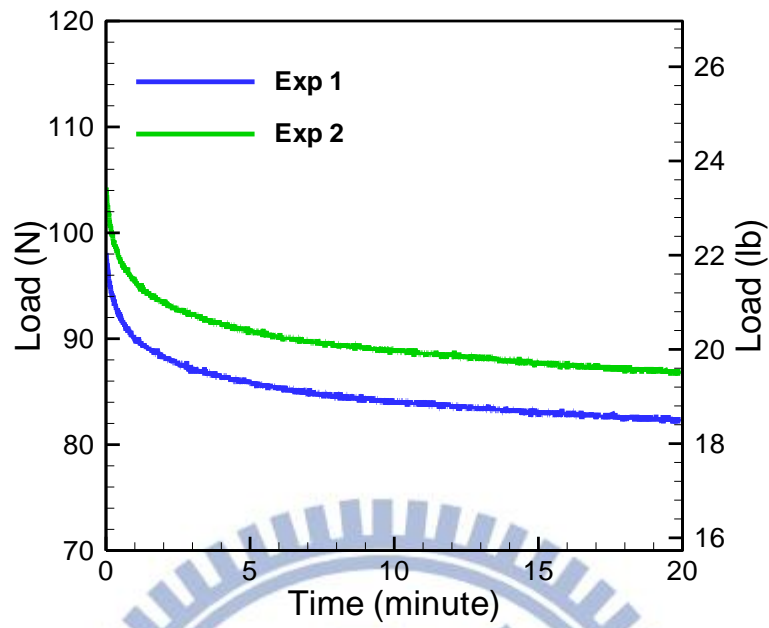


圖 2.3 負載減退與時間關係圖

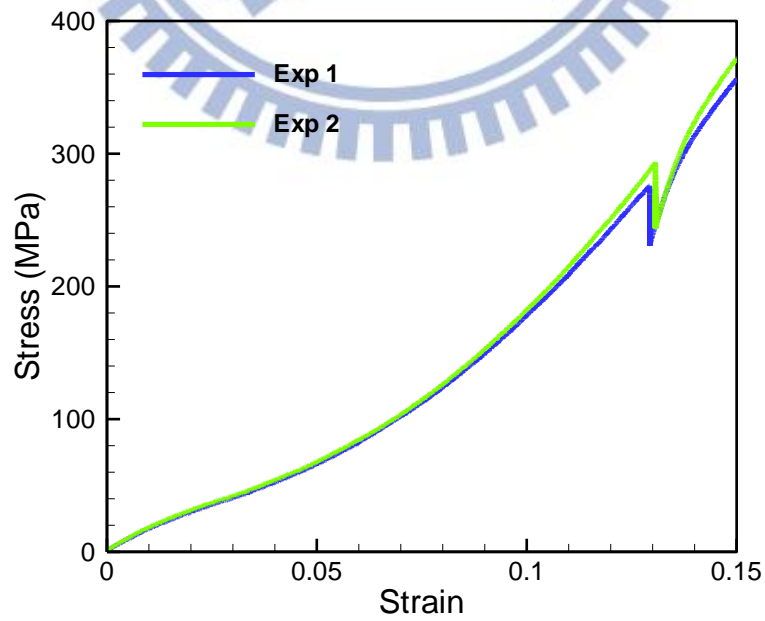


圖 2.4 球線應力應變關係圖



圖 2.5 鋁製球拍有限元素模型

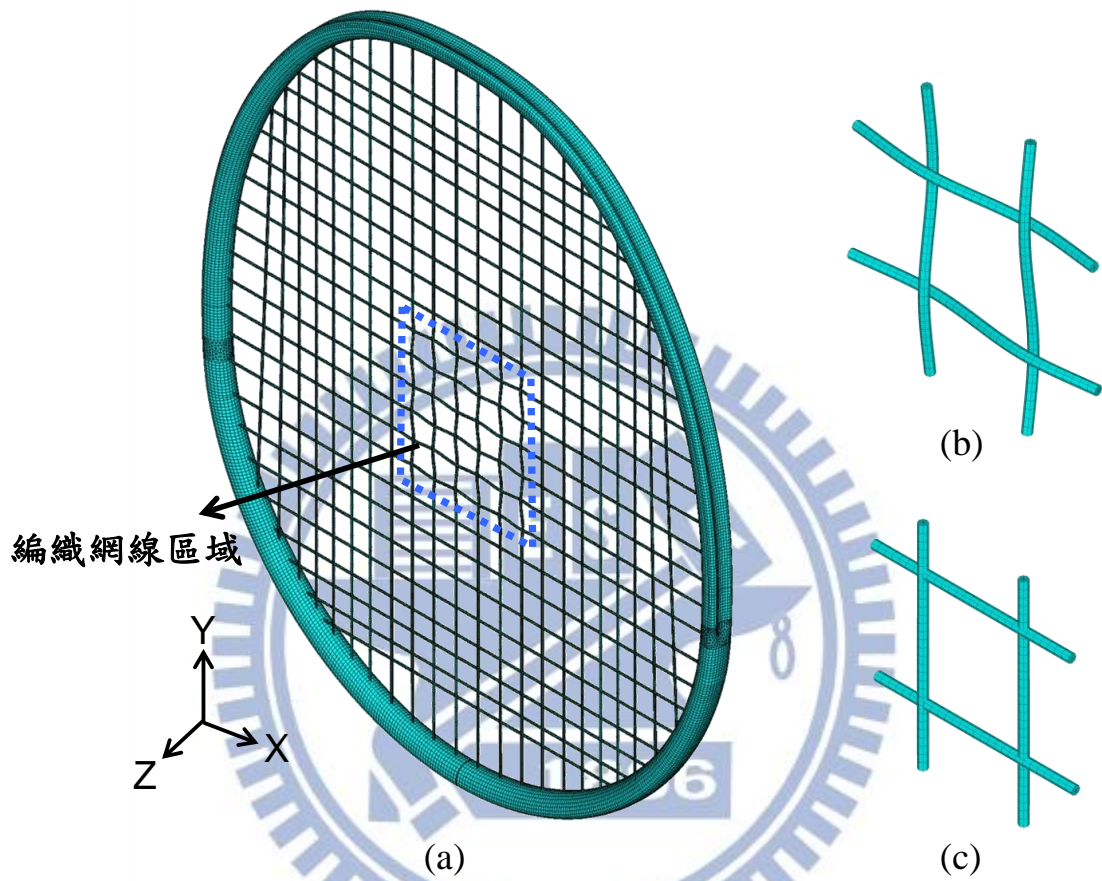


圖 2.6 鋁製羽球拍有限元素模型 (a)FEM A 的局部網線區域之示意圖

(b)編織網線模型局部示意圖 (c)平整無編織網線模型部示意圖

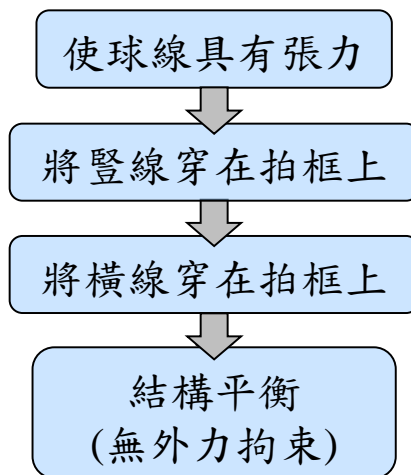


圖 2.7 穿線分析流程圖

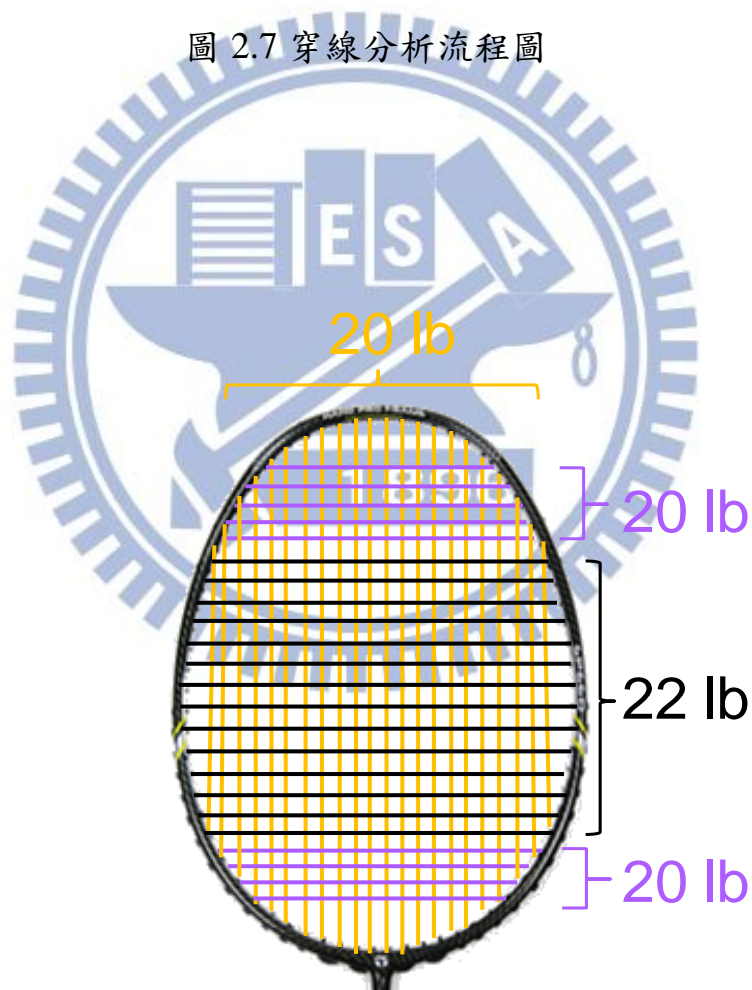


圖 2.8 分析網線張力分布圖

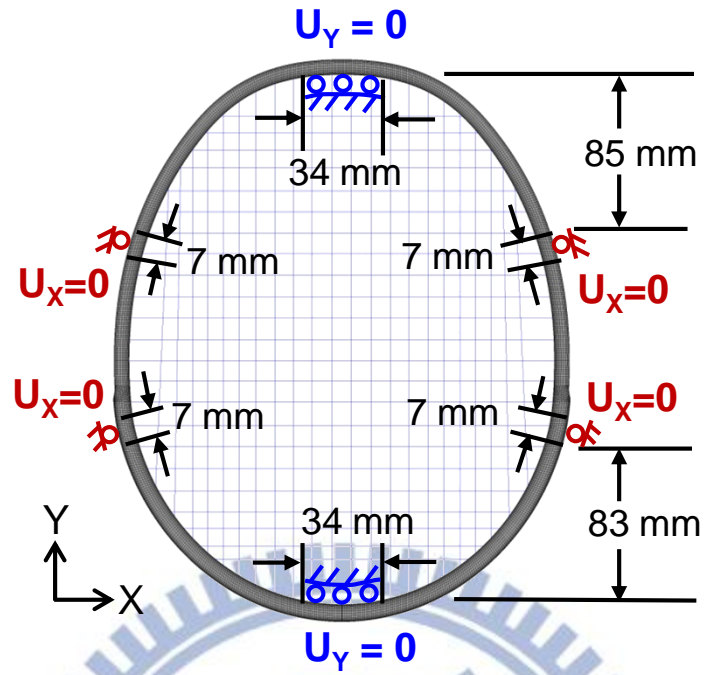


圖 2.9 穿線分析之邊界條件示意圖

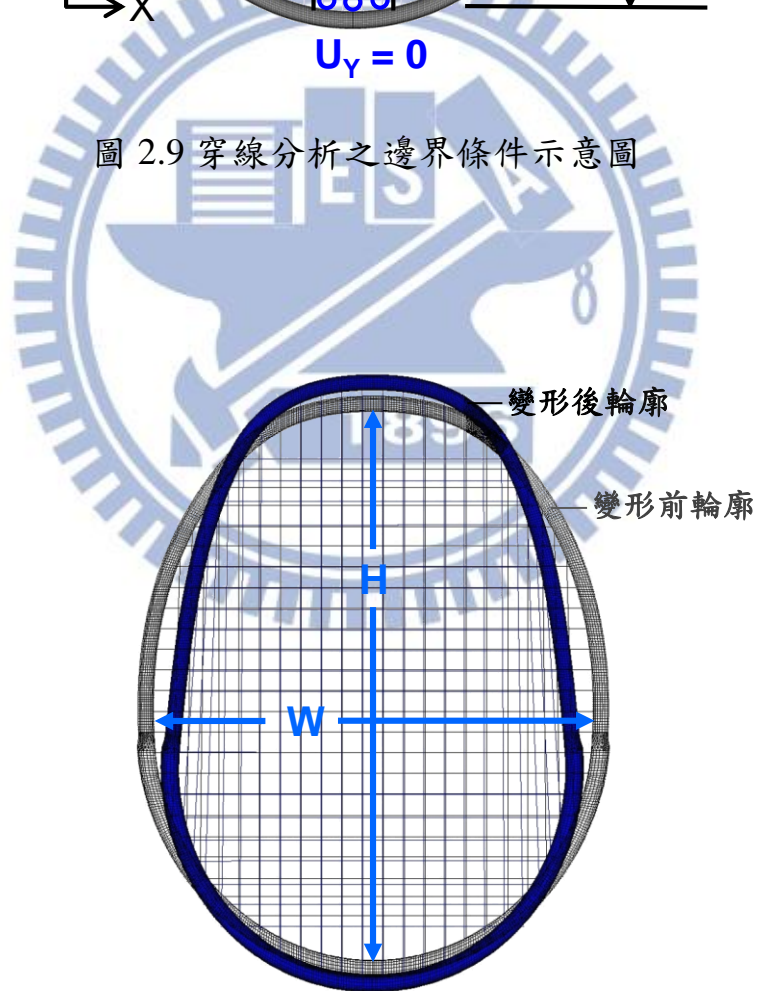


圖 2.10 球拍變形示意圖

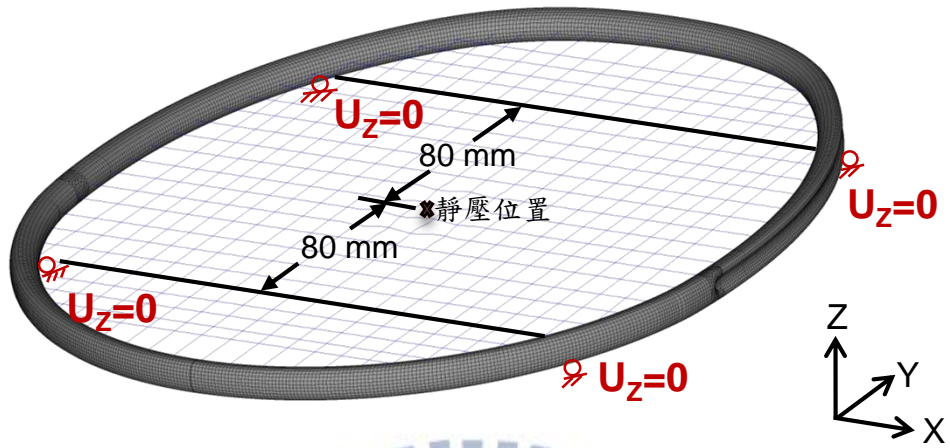


圖 2.11 球拍靜壓響應分析的邊界條件示意圖

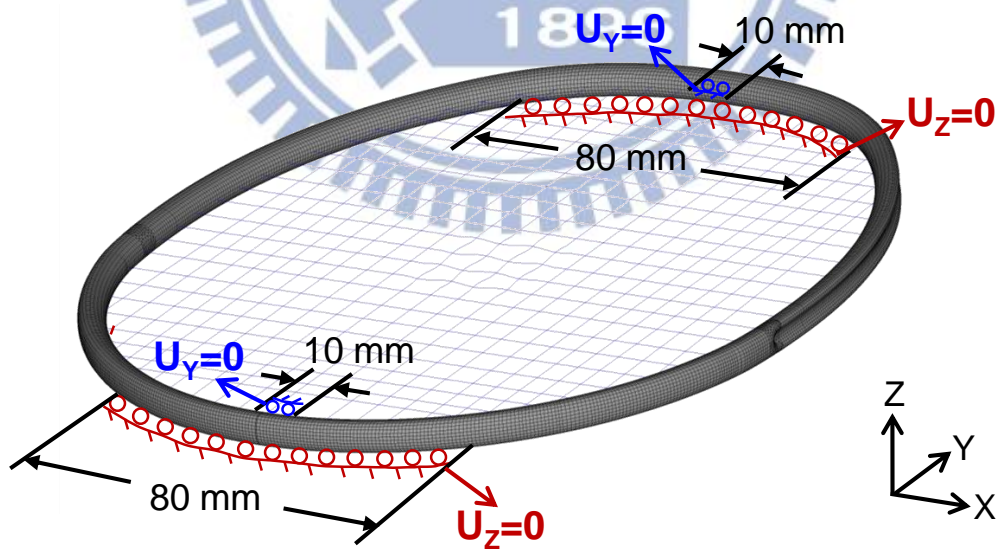


圖 2.12 鋁製羽球拍恢復係數分析的邊界條件示意圖

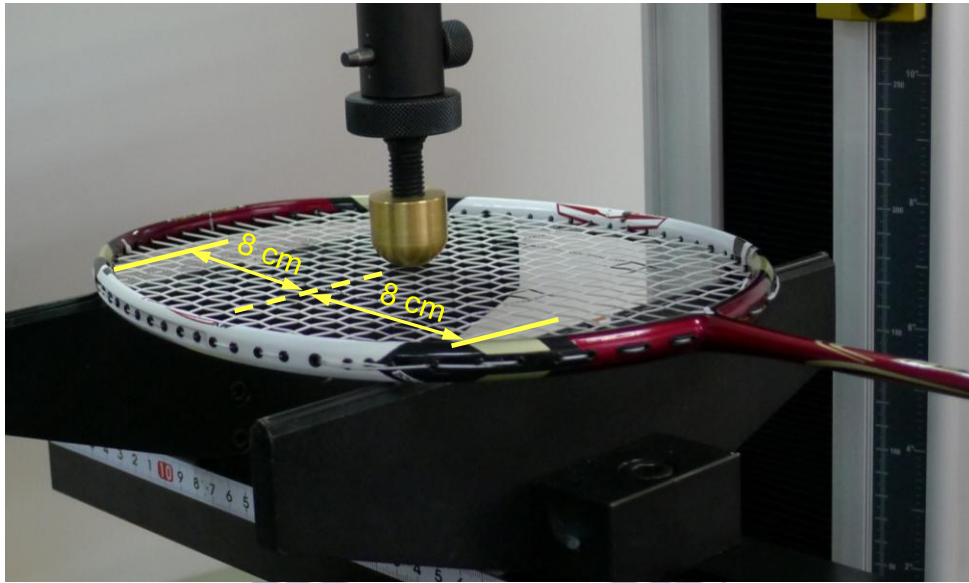


圖 2.13 鋁製羽球拍靜壓響應實驗照片

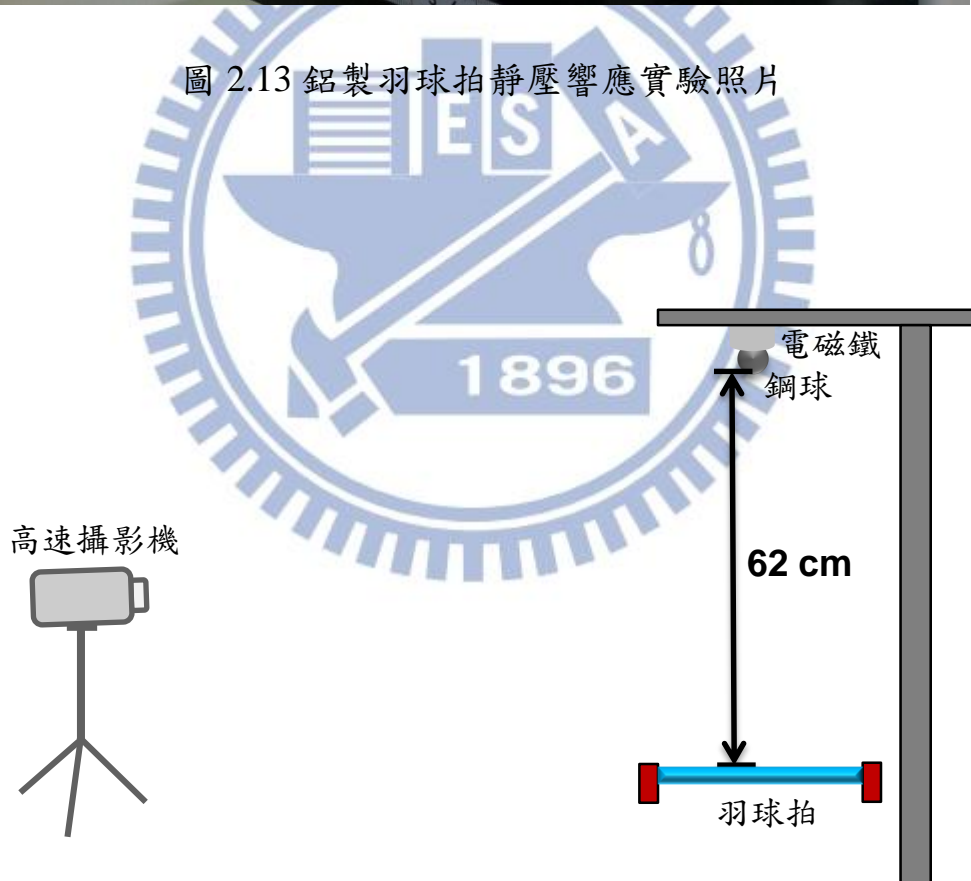


圖 2.14 鋁製羽球拍恢復係數實驗儀器架設示意圖

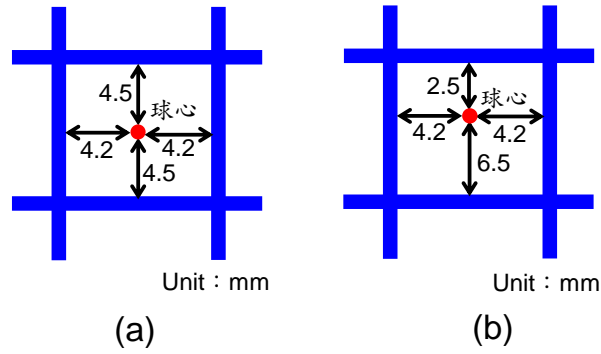


圖 2.15 鋁製羽球拍靜壓位置示意圖 (a)CASE 1：位於網格中間處
(b)CASE 2：位於網格中間上方 2 mm 處

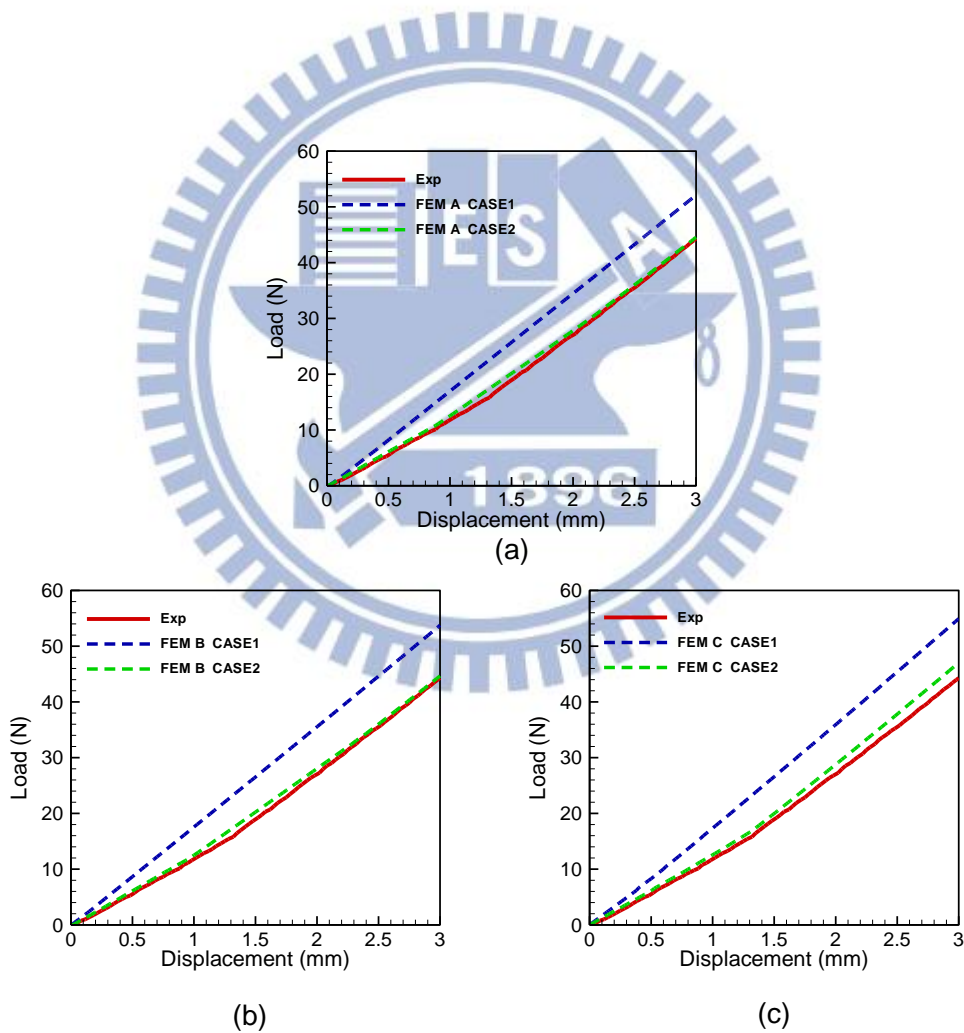


圖 2.16 鋁製羽球拍靜壓響應結果比較 (a)FEM A 與實驗結果比較

(b)FEM A 與實驗結果比較 (c)FEM A 與實驗結果比較

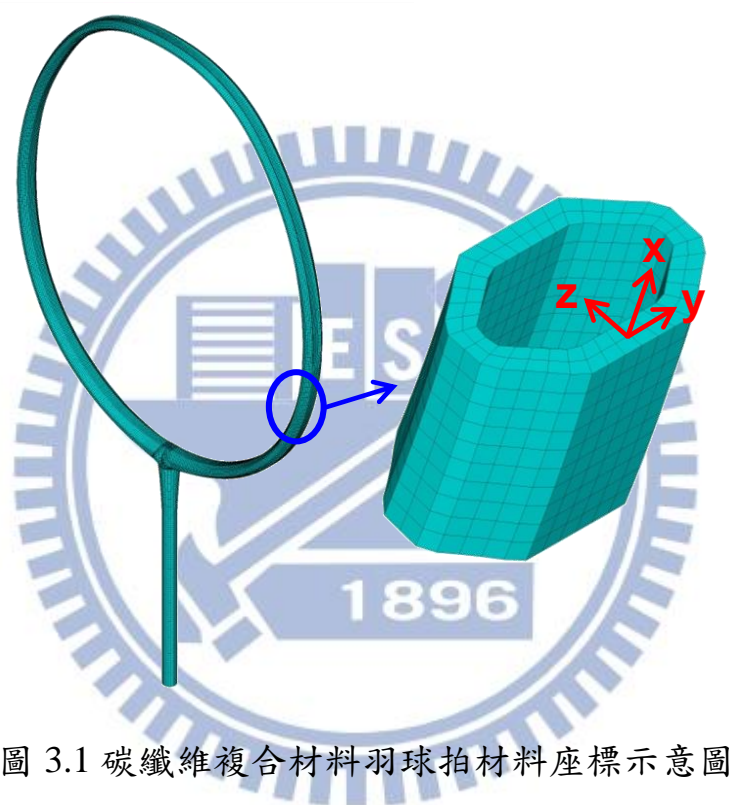


圖 3.1 碳纖維複合材料羽球拍材料座標示意圖

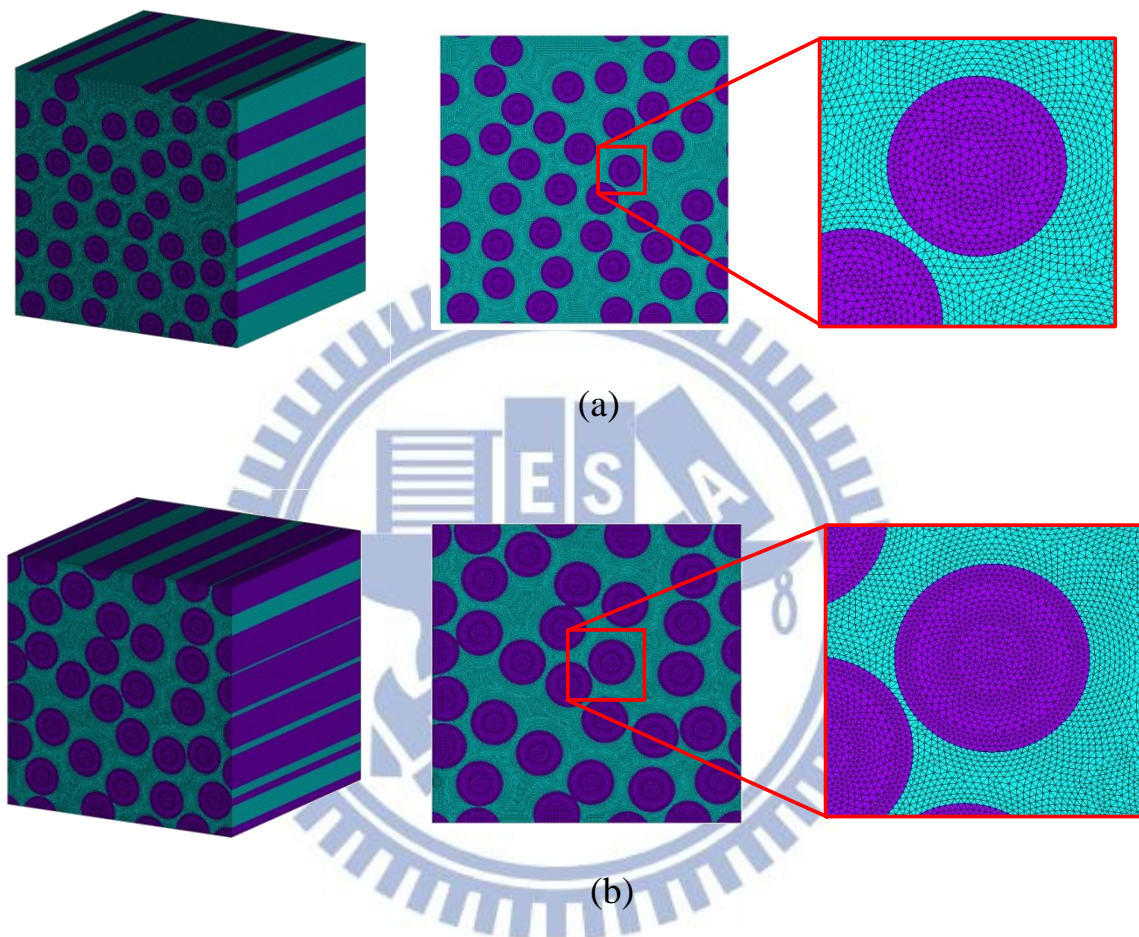


圖 3.2 不同纖維體積比的代表性單元體模型 (a)纖維體積比為 40%

(b)纖維體積比為 55%

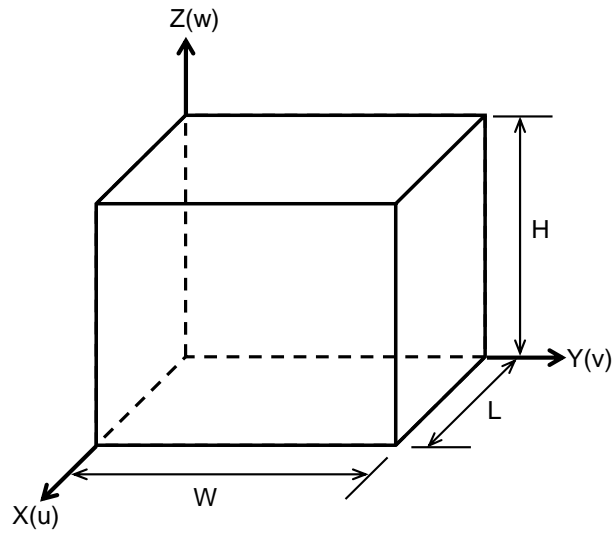


圖 3.3 代表性單元體座標系統及尺寸示意圖

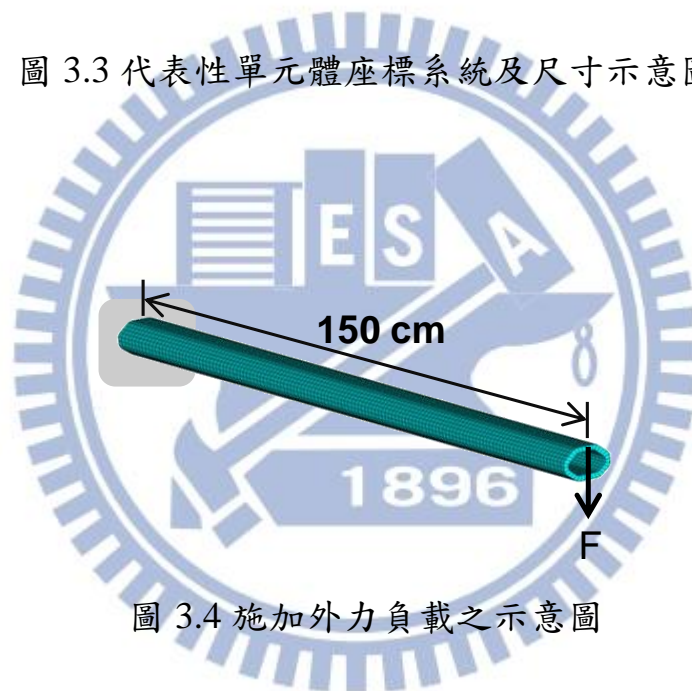


圖 3.4 施加外力負載之示意圖

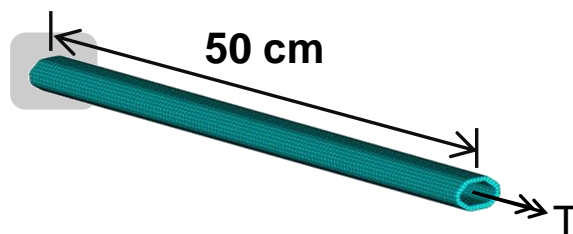


圖 3.5 施加扭矩負載之示意圖

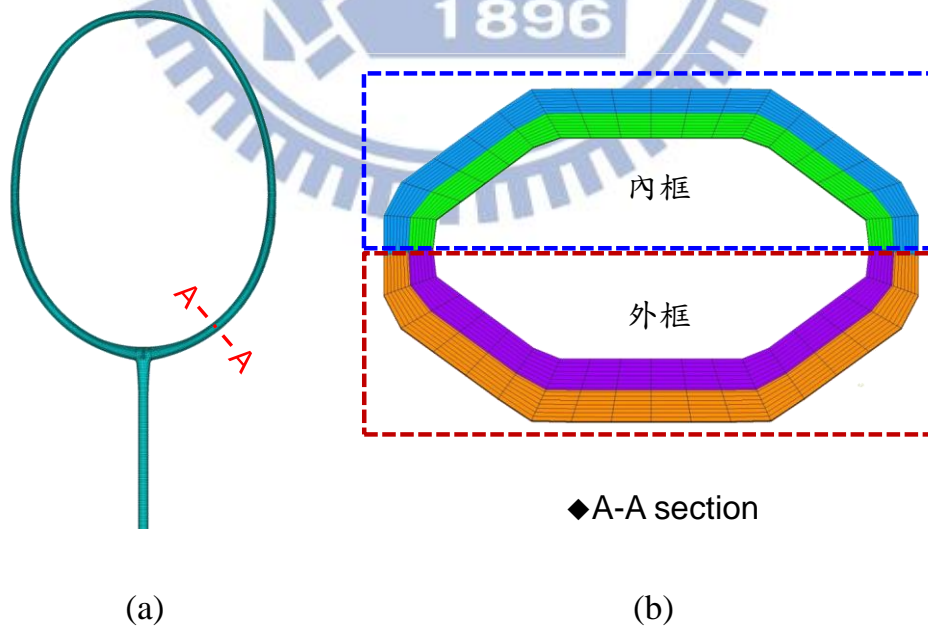
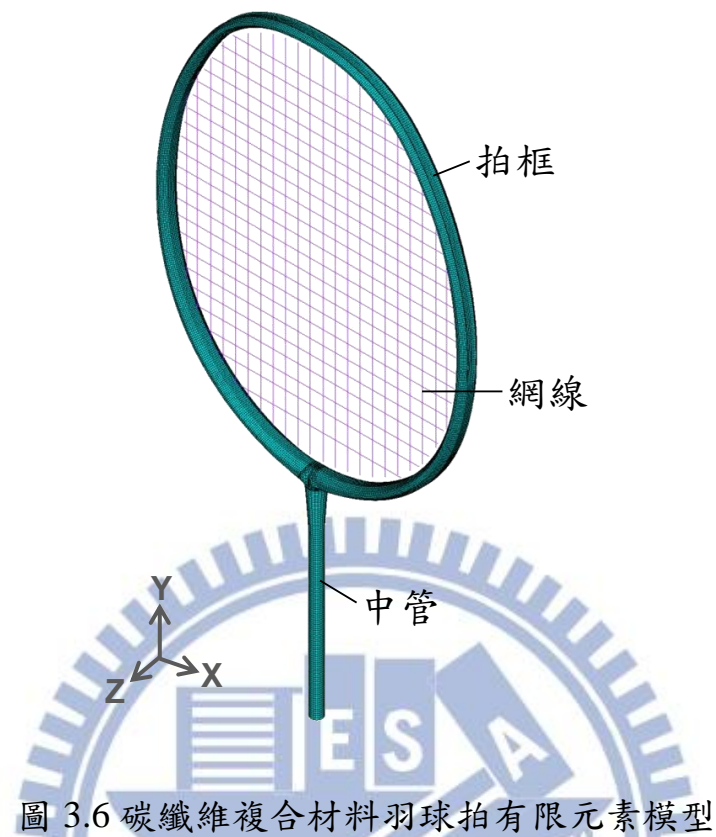


圖 3.7 疊層設定情形 (a)截面位置 (b)截面疊層情形

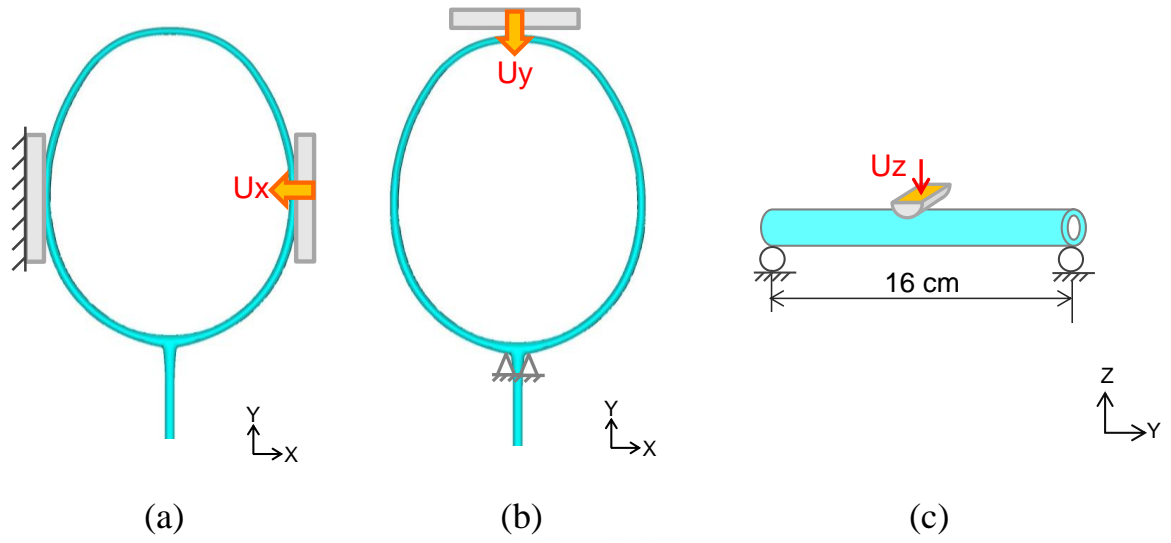


圖 3.8 球拍不同型式的載重分析示意圖 (a)拍框側壓 (b)拍框頂壓

(c)中管三點彎矩

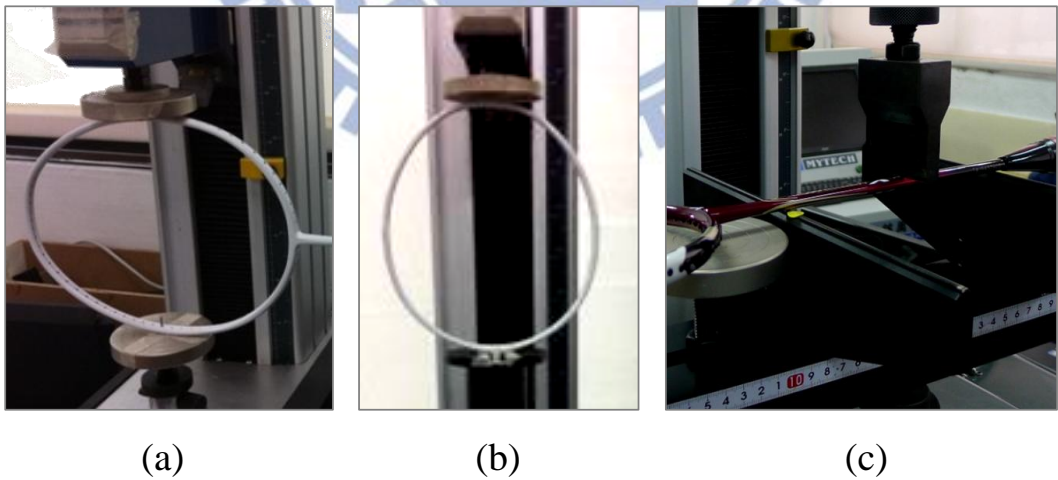


圖 3.9 球拍不同型式的載重實驗照片 (a)拍框側壓 (b)拍框頂壓

(c)中管三點彎矩

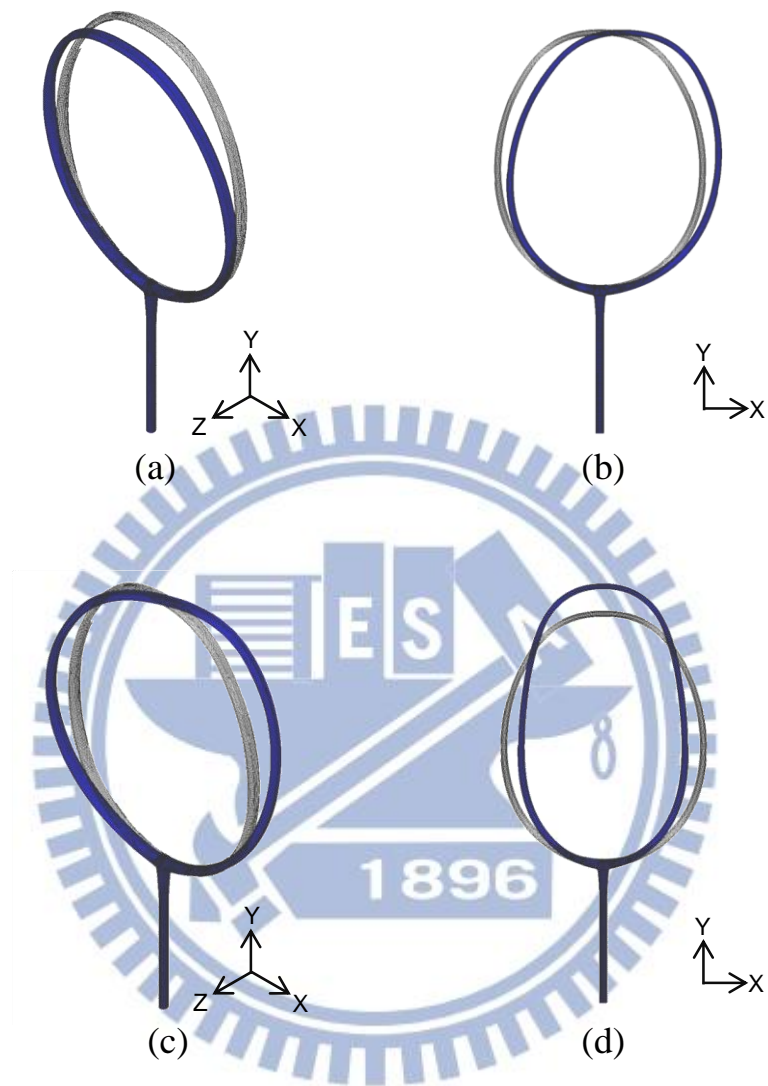


圖 3.10 拍框不同模態之變形示意圖 (a)彎矩(X 軸)模態

(b)彎矩(Z 軸)模態 (c)扭矩模態 (d)徑向伸縮模態

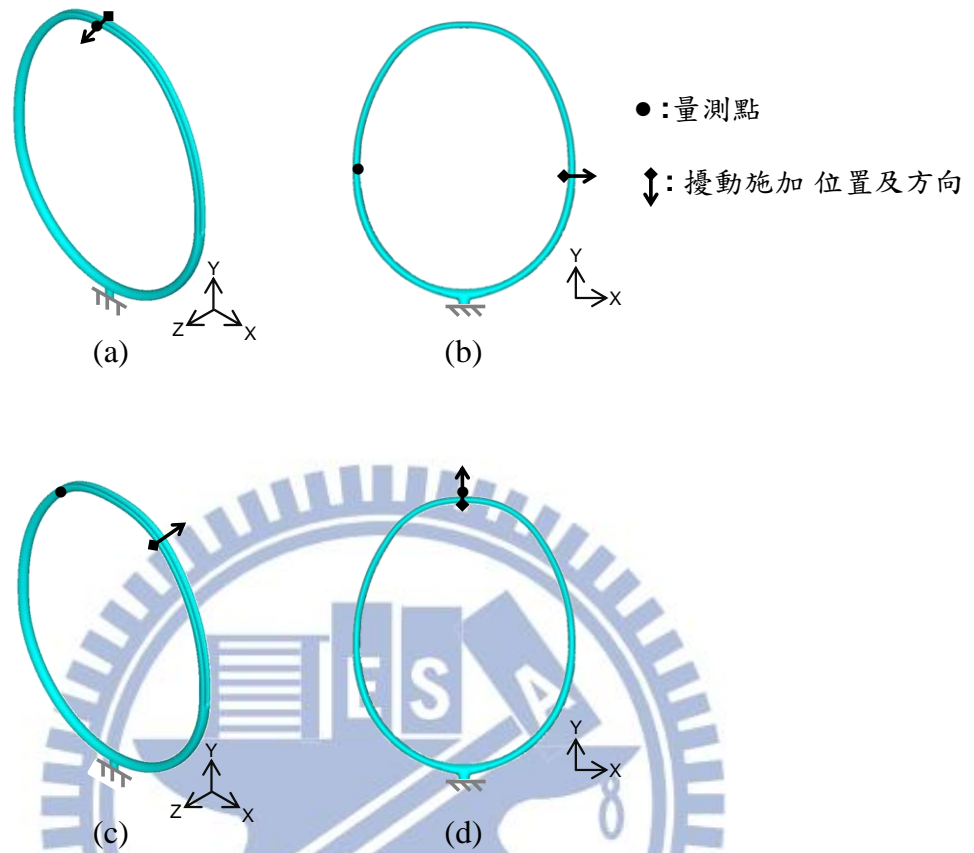


圖 3.11 拍框不同振動模態之實驗方法示意圖 (a)彎矩(X 軸)模態 (b)彎矩(Z 軸)模態 (c)扭矩模態 (d)徑向伸縮模態

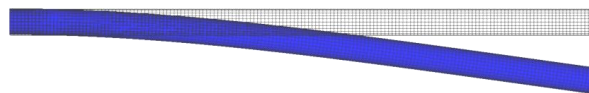


圖 3.12 中管彎矩模態之變形示意圖

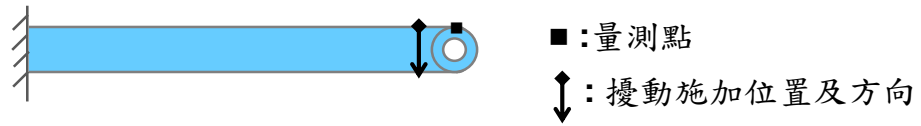


圖 3.13 中管彎矩振動模態之實驗方法示意圖

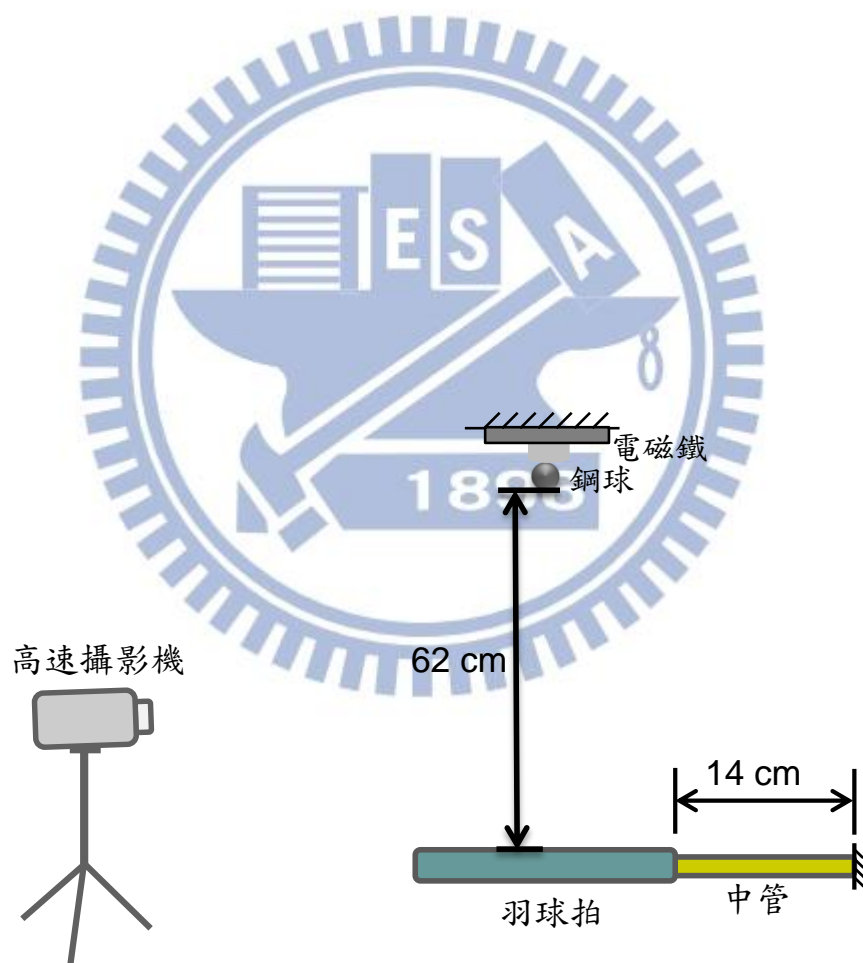


圖 3.14 碳纖維複合材料羽球拍恢復係數實驗儀器架設示意圖

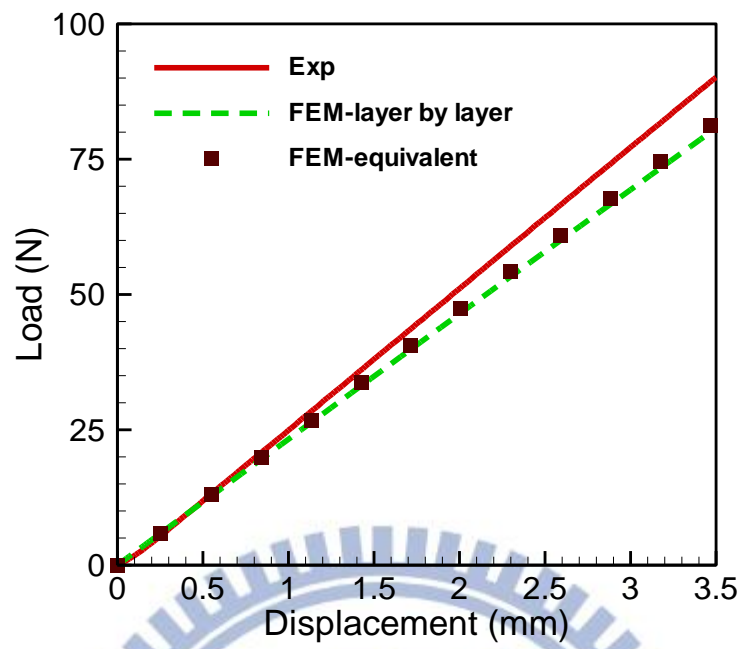


圖 3.15 拍框側壓實驗與分析結果比較

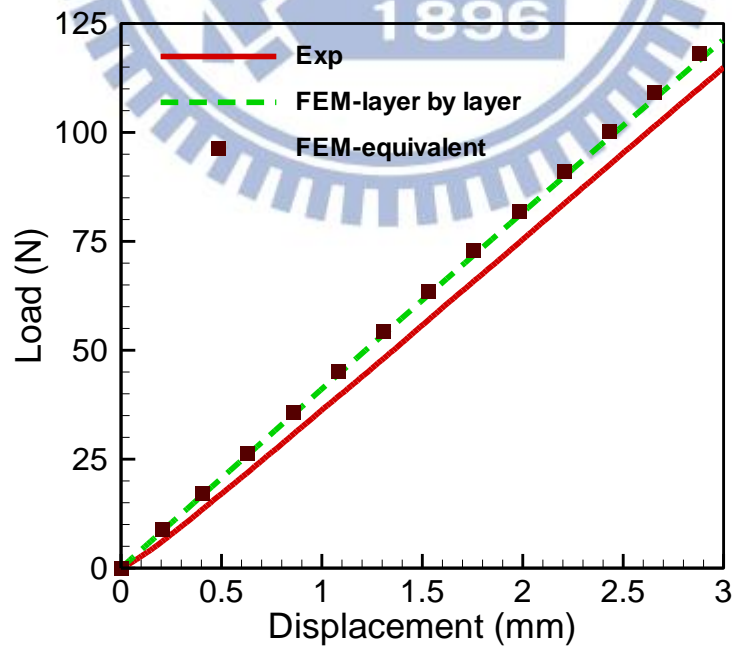


圖 3.16 拍框頂壓實驗與分析結果比較

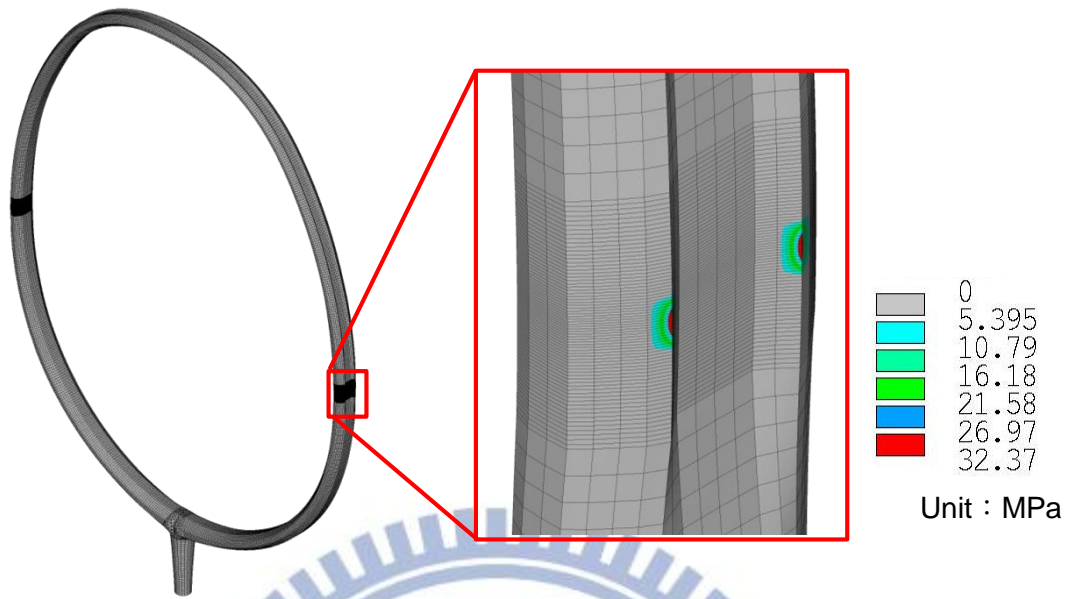


圖 3.17 拍框側壓分析的接觸壓力分布圖

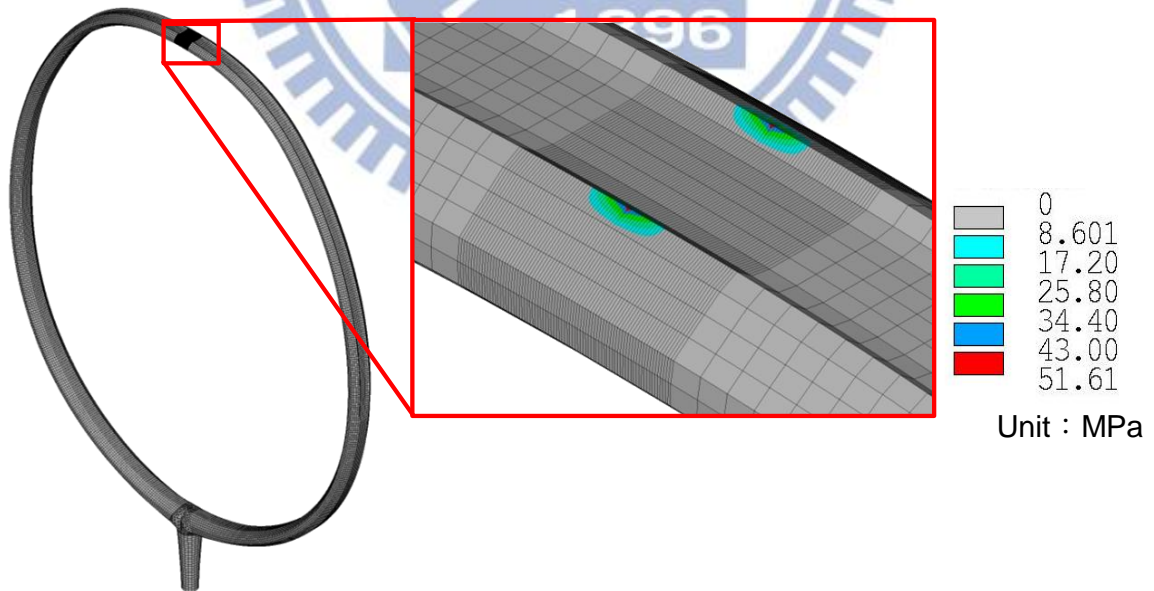


圖 3.18 拍框頂壓分析的接觸壓力分布圖

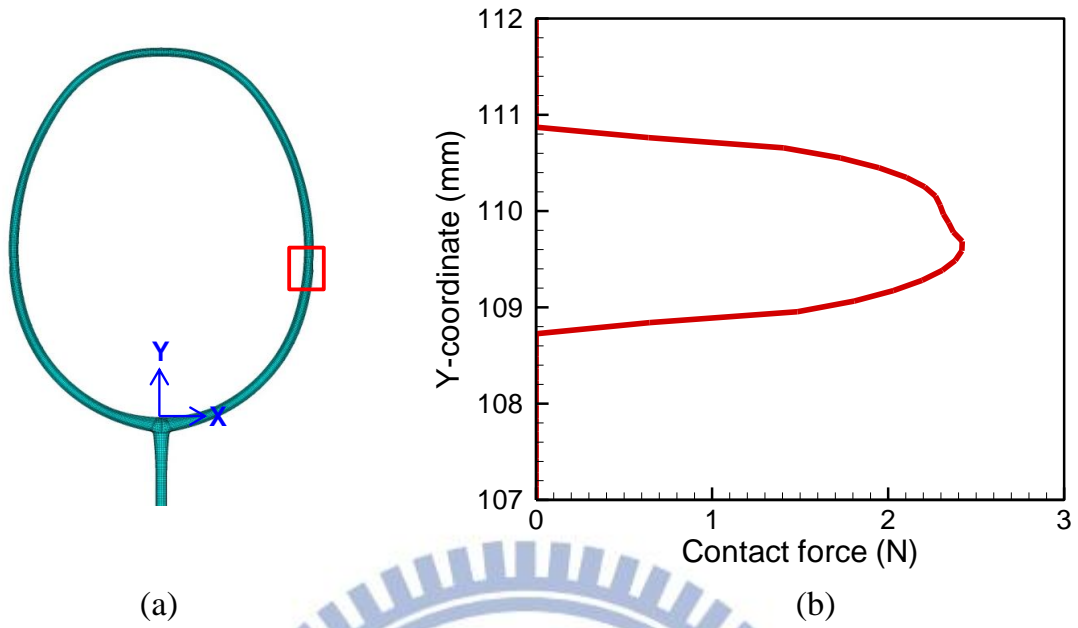


圖 3.19 拍框側壓分析的接觸力分布圖 (a)接觸範圍位置示意圖

(b)接觸力分布圖

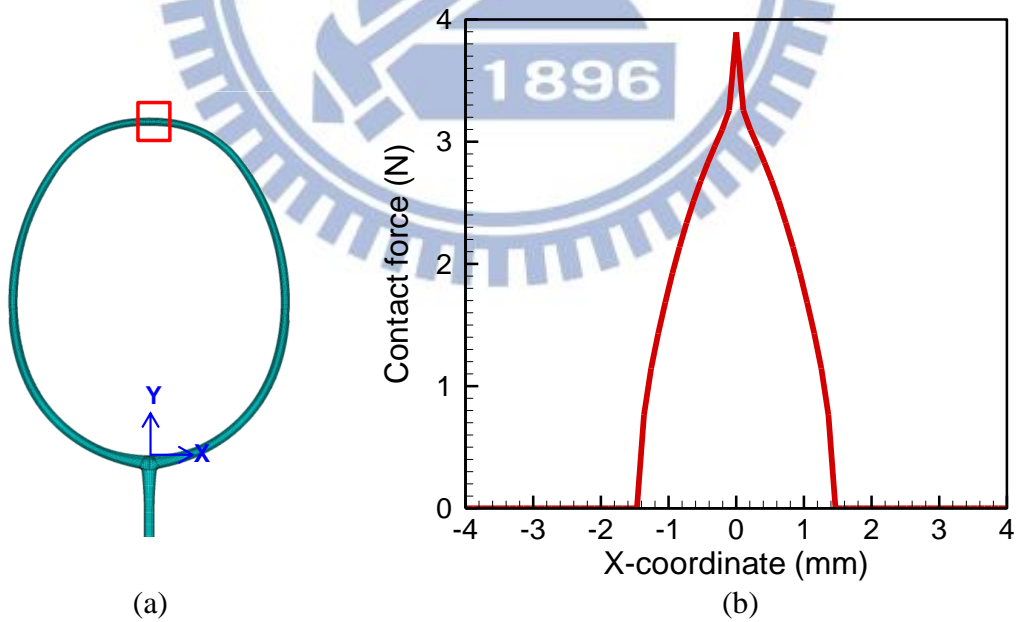


圖 3.20 拍框頂壓分析的接觸力分布圖 (a)接觸範圍位置示意圖

(b)接觸力分布圖

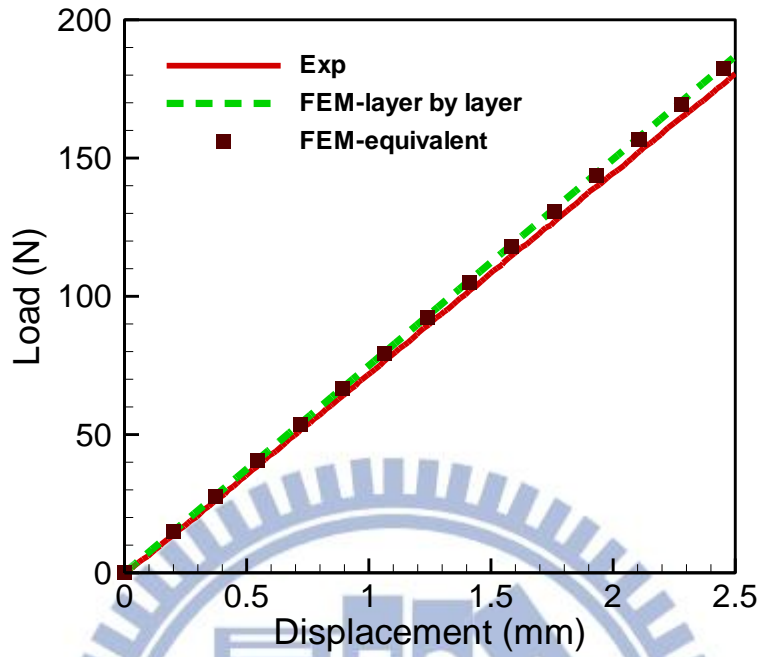


圖 3.21 中管三點彎矩的實驗與分析結果比較

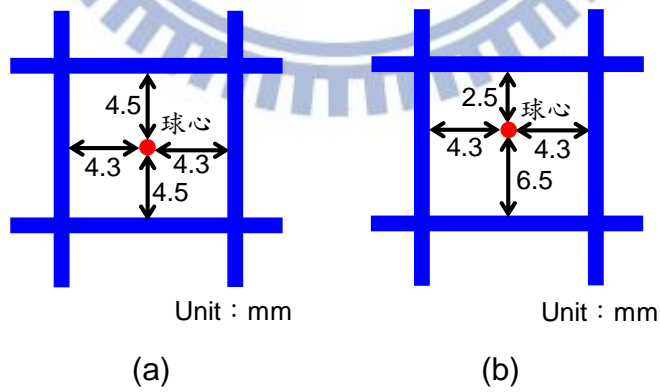


圖 3.22 碳纖維複合材料羽球拍靜壓位置示意圖 (a)CASE 1：位於網格

中間處 (b)CASE 2：位於網格中間上方 2 mm 處

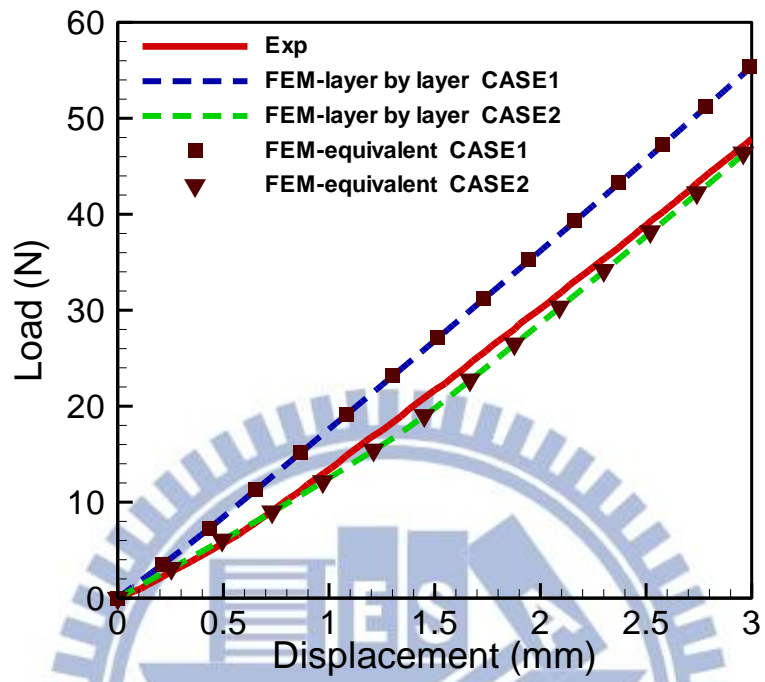


圖 3.23 碳纖維複合材料羽球拍靜壓響應結果比較