

碳纖維高爾夫球桿材料機械性質探討

指導教授： 王栢村 教授

學生姓名： 洪研庭 劉文全

學 號： A9032014 A9032023

國 立 屏 東 科 技 大 學
機 械 工 程 系

摘要

本文是以等向性材料來做探討以求得碳纖維高爾夫桿之楊氏係數(E)、蒲松比(ν)。本實驗是利用頻譜分析儀(BK3550)作為量測器具、CADA-PC 軟體作曲線嵌合；以單自由度對球桿做實驗模態分析(EMA)，再與立體元素(SOLID)架構球桿之有限元素分析(FEA)所求得的模態參數(包括其頻率及振型)來做比對，藉此驗證實驗模態分析是否正確。倘若，分析比對之結果相吻合則以實驗模態分析求得的頻率作為對照值，再以 ANSYS 有限元素分析軟體作等向性材料之最佳化分析。其頻率誤差若太大(>5%)則修改影響之參數(E_x 、 ν_{xy} 、 G_{xy})，直到最佳化之頻率與 EMA 之誤差值在接受的範圍內(<5%)，如此我們便可得到材料之楊氏係數與蒲松比。

一. 前言:

隨著國民生活品質的提升，閒暇時的休閒活動也相對的被大眾所重視。以往被一般民眾所認為高等級的休閒運動—高爾夫球，亦隨著潮流的趨勢變得更普及化，幾乎成為人人皆可從事的休閒運動。因此，在市場的需求下，各家廠牌的高爾夫球桿紛紛出籠；由於消費者的選擇眾多，業者也不得不球桿的品質上加以改良，使其對使用者而言更具舒適度，而求得消費者的青睞。高爾夫球桿材質的演進由先前的鐵桿、鋁桿到現在大部份以碳纖維為主的階段，主要是因為碳纖維此種材料具有高強度、高韌性、重量輕等特性，故非常適合運在高爾夫球桿的材質上。不過對於碳纖維材質在打擊時的受力情形並沒有詳細的參考資料來做探討，所以碳纖維桿的品質特性頗具有研究之價值。

桿振動之特性分析與設計之考量已逐漸受到學術單位及製造廠商所重視，國內外皆有相關之文獻可做探討。王和黃[2]高爾夫球桿振動模態參數之測定，本文以 ANSYS 分析軟體架構三種有限元素模型進行模態分析(modal analysis)分別求取期模態參數，並與實驗模態分析所求取之模態參數做比對，然後進行有限元素模型之修正。探討其不同模型之適應性，同時亦進行簡諧分析(harmonic analysis)求取頻率響應函數再與實驗模態分析所求取之頻率響應函數進行比對驗證。經由兩種分析比較各種結果顯示，有限元素分析模型可視為此高爾夫球桿之實驗模型。王和吳[3]應用實驗模態分析於高爾夫球頭素料之材料性質測定，本文應用實驗模態分析法將材料形狀模擬成懸臂樑的形式，以實驗模態分析的方法求得材料之自然頻率，再配合半點能量法與阻尼比修正的方法，進而比對實驗模態分析與有限元素分析所求得隻自然頻率以得到材料的楊氏係數。

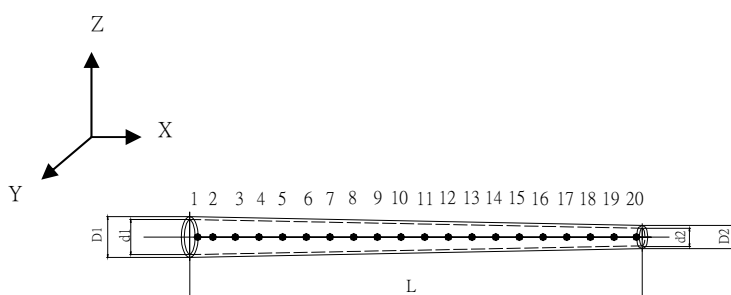
二. 問題定義及分析目標

(1).問題定義:

高爾夫球桿之材料性質如表一。將桿分成 19 等份，共 20 個點以作分析如圖一。

表一.材料之性質

材質	碳纖維
總長 L(mm)	1145
桿最大外徑 D1(mm)	15.54
桿最大內徑 d1(mm)	12.94
桿最小外徑 D2(mm)	9.44
桿最小內徑 d2(mm)	4.08
桿重(g)	82.5
桿密度(kg/m ³)	1545.7



圖一.碳纖維桿示意圖

(2).分析目標:

求得球桿之材料性質。以有限元素分析進行模態分析求取模態參數，並與實驗模態分析所求取球桿之模態參數進行比較驗證，包括自然頻率、振型、阻尼比，確定有限元素分析模型之正確性，並探討碳纖維球桿材料之機械性質。

三. 分析方法及步驟

整體流程如圖二，為首先利用有限元素分析軟體以立體元素架構來建立碳纖維桿的有限元素模型，以進行有限元素分析，求得其模態參數，並對真實碳纖維球桿進行模態實驗分析，以求得球桿頻率響應函數及模態參數：包括自然頻率、阻尼及振形，然後以實驗求得的數據為主，對理論分析的有限元素模型進行修整，以確認有限元素模型之正確性，之後再進行簡諧分析求取理論頻率響應函數，並與實驗模態分析求得的頻率響應函數進行比較驗證，最後得到一個和實際狀況互相符合的有限元素模型。

(1).有限元素分析：

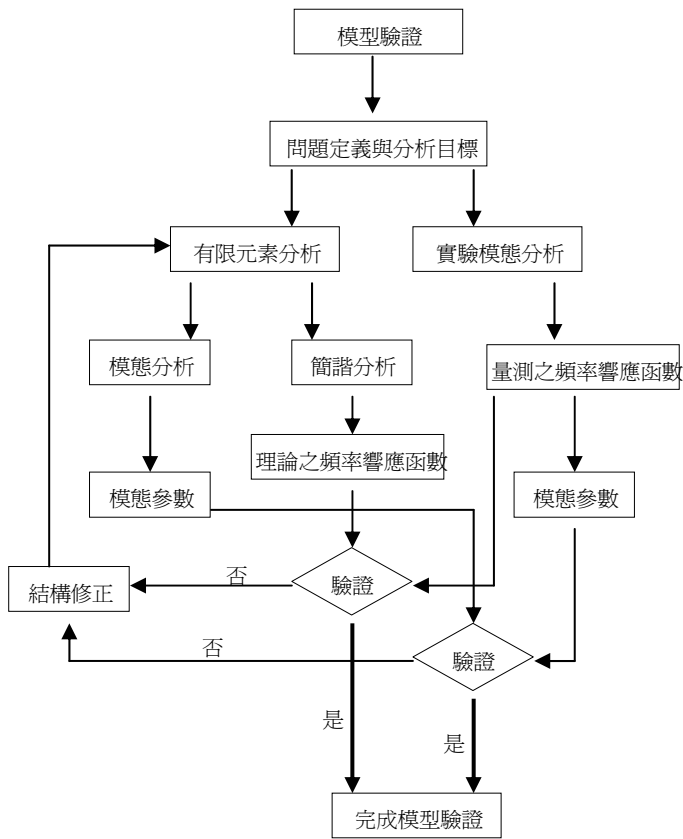
- 首先在 ANSYS 架構球桿有限元素模型，將球桿區分為 19 段。所使用元素形式為立體元素(SOLID)。
- 結構之分割在球桿部份為 19 等份共 20 點，位移限制採用球桿兩端皆為 free-free 的方式。進行模態分析(modal analysis)求取模態參數，並將分析所得結果與實驗模態分析所得結果作比較，以求得到一個和實際狀況互相符合的有限元素模型，並得到其材料性質包含： E_x 、 ν_{xy} 、 G_{xy} 。

(2).實驗模態分析：

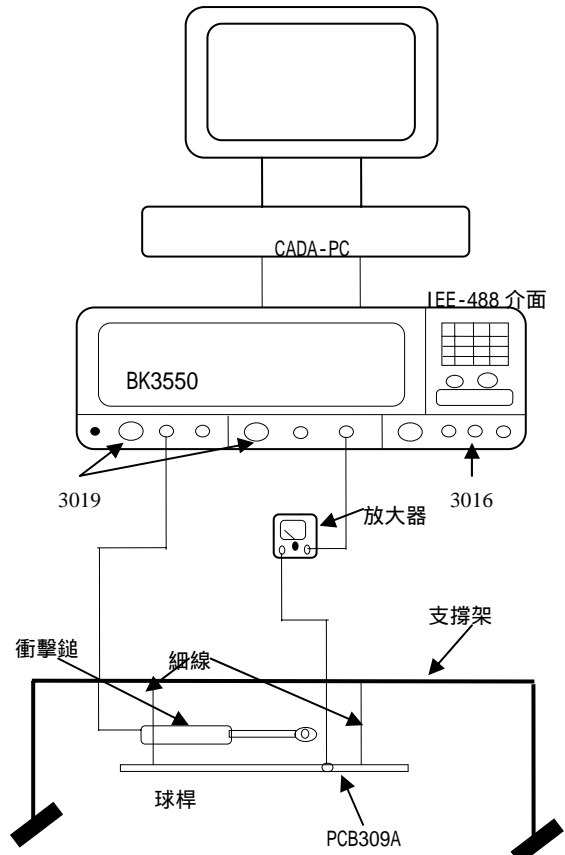
- 本文的實驗架構情形如圖三所示，首先將衝擊鎚用導線接於訊號分析儀之 Channel A，其次再將加速度計用導線經過電荷放大器接於訊號分析儀之 Channel B，再透過 IEE-488 介面將訊號分析儀與個人電腦相連接。
- 實驗的動作原理為，利用衝擊鎚對高爾夫球桿激振，利用加速度計作感測器，量取結構之響應訊號，經過電壓放大器將訊號傳入雙頻道訊號分析儀，由訊號分析儀對輸入之訊號作快速傅立葉轉換，求得球桿的頻率響應函數和關聯連性函數。
- 最後再將所得到的頻率響應函數傳入 CADA-PC 軟體作曲線嵌合(curve fitting)工作，則可得到球桿模態參數，即自然頻率、阻尼比和振型等。本實驗所使用之實驗儀器及其型號如表二。
- 實驗過程中，首先須完成 BK 3550 訊號分析儀設定，頻寬設為 0~800Hz，解析條數為 800 條，本實驗驅動器因使用衝擊鎚，所以加 Transient 加權函數，在感測器之加速度響應加 Exponential 加權函數。
- 實驗模態分析之方式是固定衝擊鎚擊的位置移動加速度計。以固定敲擊在球桿等份劃分的 20 個測試點中的第 4 點如圖一所示，而移動加速度計在球桿上的每一測試點，由量測出的響應經由訊號放大器傳入訊號分析儀作分析，即可得到 20 組頻率響應函數，再將之傳入 CADA-PC 軟體作曲線嵌合，以求取球桿的模態參數。分別對 Y 平面進行完整之模態測試。

(3).最佳化分析：

●在 ANSYS 中的最佳化分析，利用等向性原理修改其影響分析所得頻率的參數，以期能與實驗所得之頻率相吻合。如此便可得材料之機械性質，以應用作為球桿實際製造時改進的一種參考依據。



圖二.碳纖維桿模型驗證之流程圖



圖三、模態實驗架構圖

表二、使用之儀器一覽表

儀器名稱	型號
雙頻道訊號分析儀	BK 3550
衝擊錘	BK 8202
加速度計	PCB 309A
加速度計之電荷放大器	PCB 480E09
曲線嵌何軟體	LMS CADA-PC

四、結果與討論

1. 模型驗證之結果:

(1).在 FEA 分析當中，我們所求得的 E_x 、 E_y 、 ν_{xy} 、 G_{xy} 值如表三。

(2).自然頻率之比較:對碳纖維球桿 Y 平面所得之實驗模態分析(EMA)及有限元素分析(FEA)之頻率比較如表四，其結果算是相當吻合。

表三.FEA 所得之 E_x 、 E_y 、 ν_{xy} 、 G_{xy} 值

E_x	60.875e9
E_y	60.875e9
ν_{xy}	0.30554
G_{xy}	0.233e11

表四.EAM 與 FEA 自然頻率之比較

MODE	EMA	FEA	誤差值%
mode1	84.002	81.52	-2.95
mode2	229.001	224.81	-1.83
mode3	448.001	446.71	-0.29
mode4	736.433	755.52	2.59

(3).振型之比較:如圖四(a)、(b)、(c)、(d)，EMA 與 FEA 之模態振型比較可看出各個 MODE 之振型對應良好，其實驗結果與分析結果也相當接近。

(4).頻率響應函數(FRF)圖形與關聯性函數 (Coherence)圖形之對照:

從高爾夫球桿 20 點中我們取第 1、4、10、20 點如圖五(a)、(b)、(c)、(d)可看出 EMA、FEA 與 Synthesized 所對應的頻率相當接近，且頻率響應函數圖形與 Coherence 圖形所對應之反共振點也相當吻合。

故由此判定所實驗的結果相當正確。

(5). 理論振型與實驗振型之 MSF 與 MAC:

如表五、表六，其比較值皆相當接近 1，由此可以顯示我們所做的實驗相當正確。

表五.理論振型與實驗振型之 MSF

FEA \ EMA	MODE 1	MODE 2	MODE 3	MODE 4
MODE 1	-0.95775	-0.12816	-0.16575	-0.086859
MODE 2	0.014845	-0.96958	-0.046837	-0.22298
MODE 3	0.037340	-0.042482	0.96928	0.79036
MODE 4	-0.0076105	-0.02267	0.010983	-0.93089

表六.理論振型與實驗振型之 MAC

FEA \ EMA	MODE 1	MODE 2	MODE 3	MODE 4
MODE 1	0.92111	0.016504	0.035945	0.0078252
MODE 2	0.00035064	0.94601	0.0026359	0.057769
MODE 3	0.0029982	0.001805	0.94612	0.0063659
MODE 4	0.00033668	0.0076466	0.0006828	0.91644

五.結論

●阻尼值越高表示球桿吸振能加越好，亦表示擊球時振動能量傳給高爾夫球的打擊者會相對減少。

●在 FEA 分析下單一方向所得之模態振型並非是正確的，因為碳纖維球桿並非是直桿而是有錐度的球桿，故必須以兩個方向作考量，經座標轉換後所得的振型才能與 EMA 之振型相吻合。

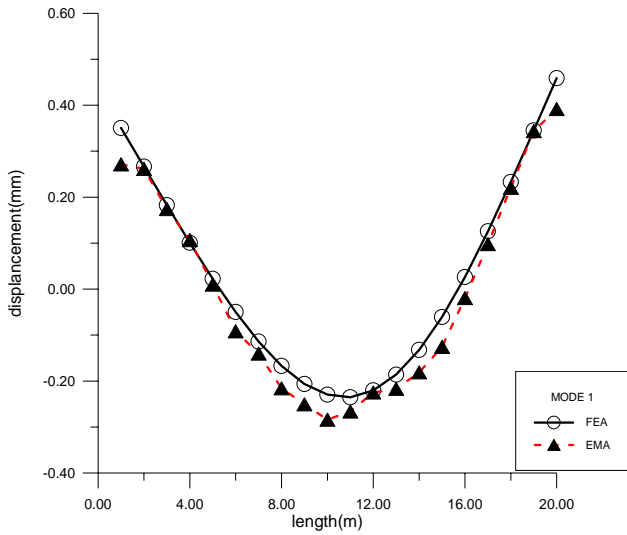
●在 FEA 模態分析中，其第八個 MODE 才與 EMA 模態分析的第一個 MODE 相對應。

六.致謝

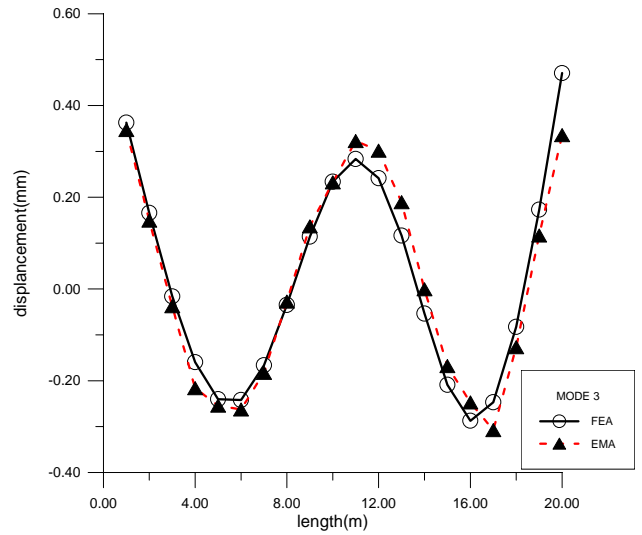
本研究感謝王栢村老師及振動與噪音實驗室的所有學長對我們的指導與協助。

七.參考文獻

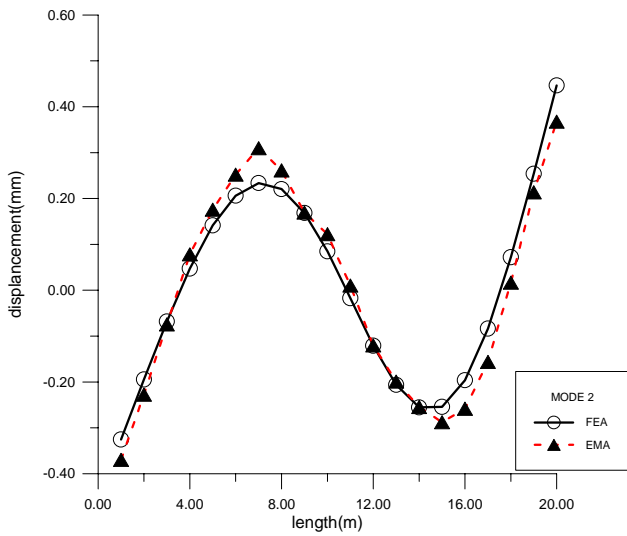
1. 璩春暉，蔡鋒儒，劉健志，2002，「高爾夫球木桿振動品質特性分析」，2002 年國立屏東科技大學論文集，國立屏東科技大學機械工程系，第 12-1~12-11 頁。
2. 王栢村，黃瑞光，1999，「高爾夫球桿振動模態參數之測定」，中華民國力學學會第二十三屆全國力學會議論文集，新竹市，第 457-464 頁。
3. 王栢村，趙志燁，吳建德，1999，「應用實驗模態分析於高爾夫球頭素料之材料性質測定」，中華民國振動與噪音工程學會第七屆學術研討會論文集，第 68-72 頁。



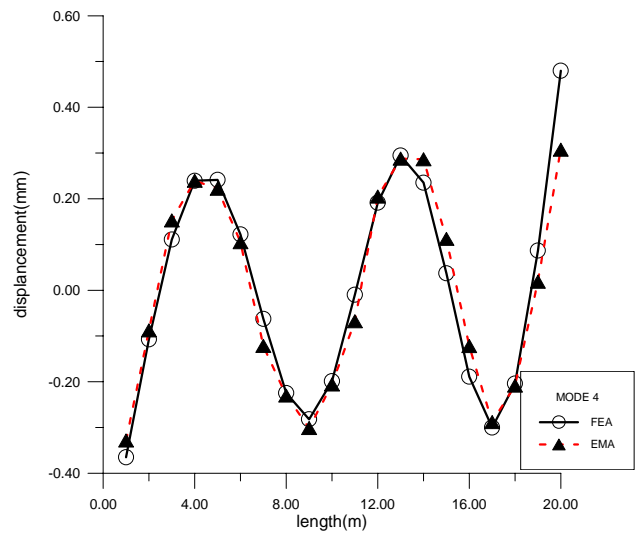
(a) 第一個 MODE 振型



(c) 第三個 MODE 振型

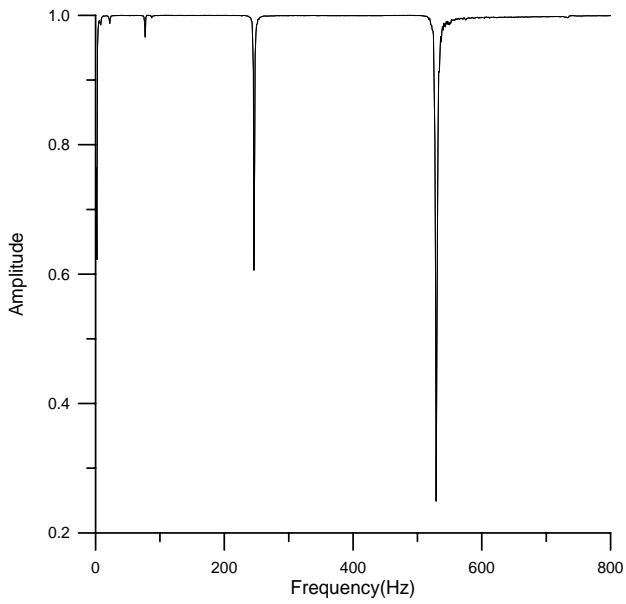
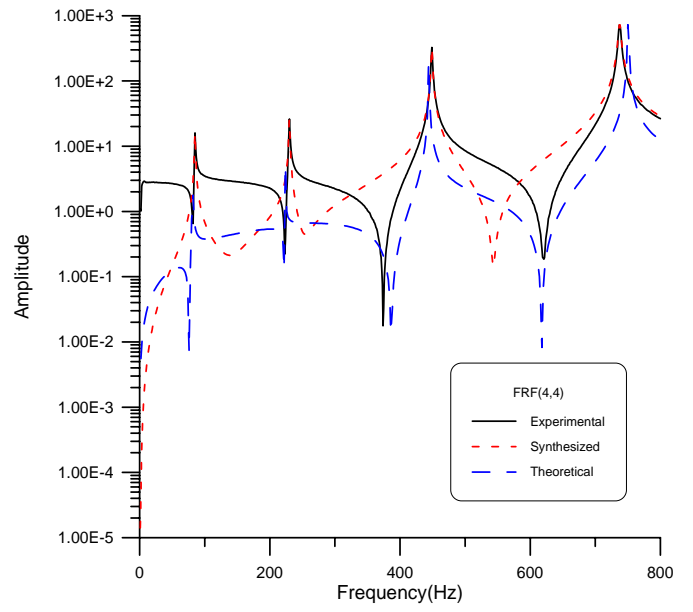
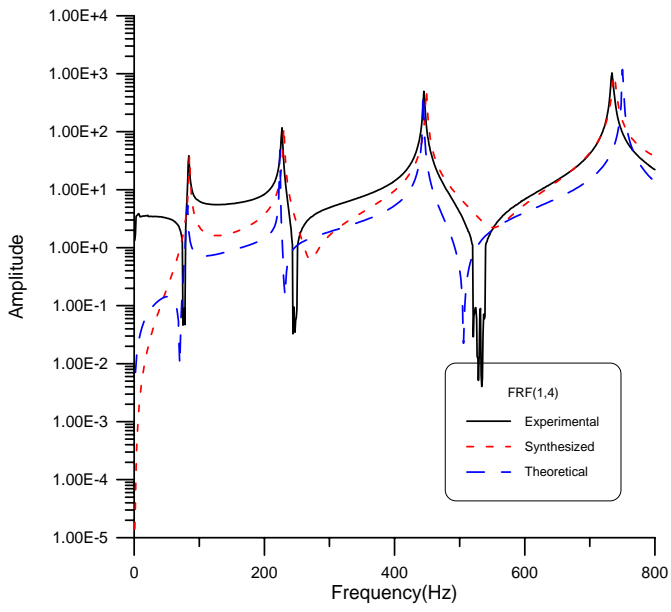


(b) 第二個 MODE 振型

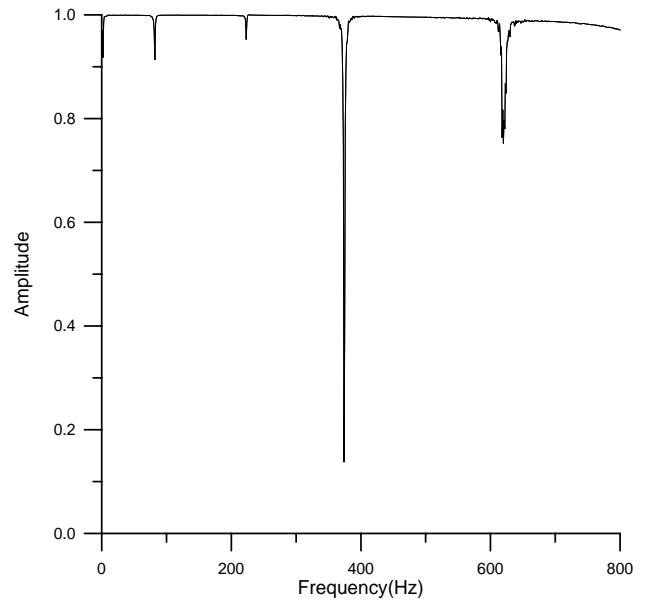


(d) 第四個 MODE 振型

圖四.EMA 與 FEA 模態振型之比較

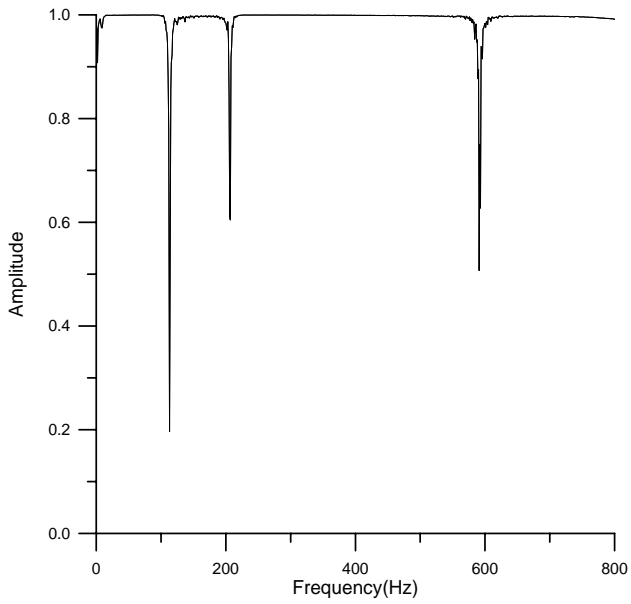
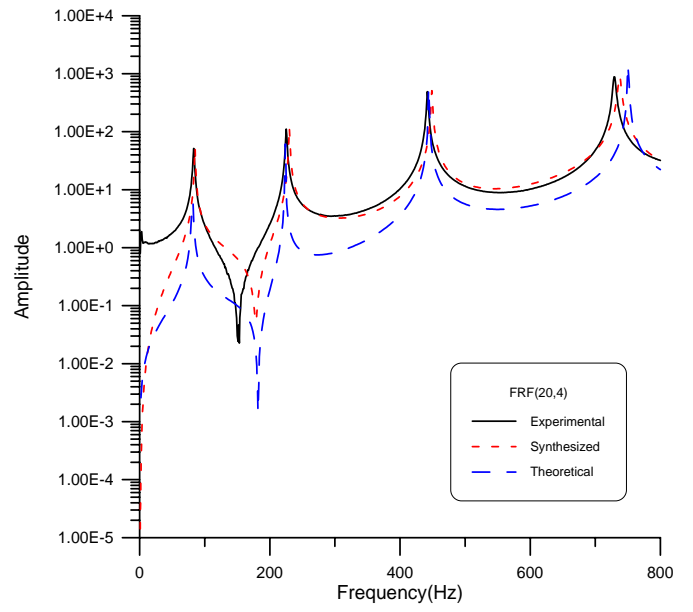
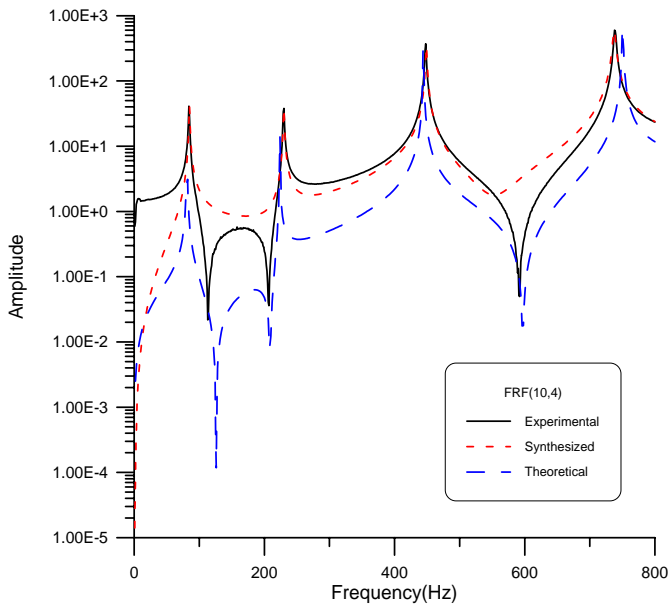


(a) $i=1$ $j=4$

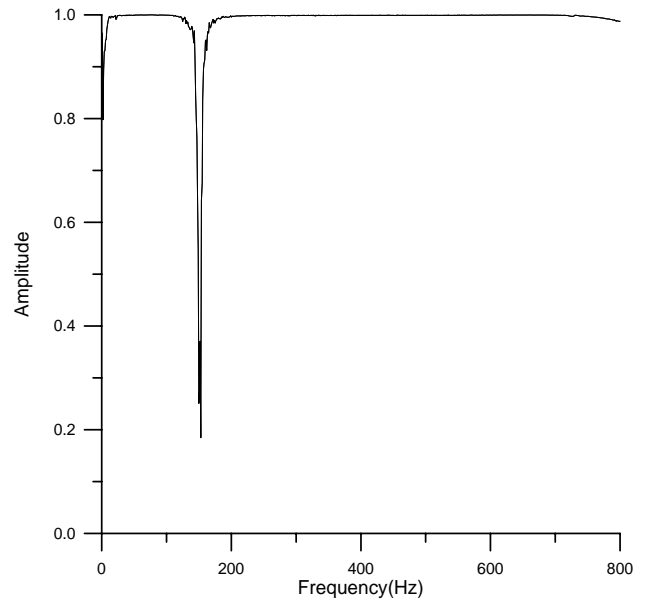


(b) $i=4$ $j=4$

圖五. 頻率響應函數圖形與關聯性函數圖形



(c) $i=10$ $j=4$



(d) $i=20$ $j=4$

圖五.頻率響應函數圖形與關聯性函數圖形(續)