

不同材質壘球棒之振動特性與性能評估

王栢村¹ 林鴻裕² 戴偉哲³

¹ 屏東科技大學機械工程系教授

² 屏東科技大學機械工程系副教授

³ 屏東科技大學機械工程系研究生

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

本文主要是針對木製、鋁製及合成球棒進行實驗模態分析及理論有限元素分析，以獲得三種不同材質球棒之振動特性。首先以有限元素法對有限元素模型進行模態分析，得到理論模態參數。接著進行實驗模態分析，得到實驗模態參數，包括自然頻率、模態振型及阻尼比，將理論與實驗之模態參數進行比較修正可得驗證之模型。驗證成功之球棒有限元素模型可視為一等效模型，同時藉由球棒的模態振型探討球棒之振動特性，探討甜蜜區與打擊區的位置，並分析比較三種不同材質球棒之性能。而此經過驗證成功之球棒模型也可以用來作球棒其他性能指標應用分析的研究及球棒設計變更之參考。

關鍵詞：有限元素分析，實驗模態分析，壘球棒。

1. 前言

隨著棒壘球受歡迎的程度日益增加，打球的人口也漸漸增多，不論是球場上打球或是空地上揮棒練習，擁有球棒的人真的很多，似乎成了全民運動。然而，球棒的種類繁多、性能、價格也大不相同，一般人在挑選球棒時，大部份以手感舒適度、甜蜜區等方式挑選球棒，並無客觀數據可完整顯示出球棒的性能評估，以供一般人了解球棒的特性。

球棒性能評估方面，Nathan [1]透過一種確定參數的方法，找出彈性球棒與球的關聯性，藉此獲得一完整的碰撞過程，包括球的離開速度(BEV)，發現振動為決定 BEV 的重要角色。Bahill [2]指出在選擇棒球或壘球棒，總重量和重量分配應該被考慮。然而，這些考慮一定要被個別化，因為不同的打擊手如何揮動球棒有較大的可變性。早期的研究已經定義理想的球棒重量，其最大的擊球速度會因個別揮棒、恢復係數而改變。Cross [3]以壓電材料為感測器，分別在距離棒球桶部(打擊區)底部 5、13、17 cm 三個地方分別進行碰撞試驗，並在握把處黏貼壓電材料量測，獲得感興趣的波形，比較三處的結果。以及量測握把處力量的波形，針對距離棒球桶部底部 5、15、25 cm 三個地方分別進行衝擊試驗，並在握把處黏貼壓電材料量測，獲得八個量測點之波形，並進行比較、探討頻率及節點位置對於甜蜜區的影響。

Nicholls *et al.* [4]藉由專業打擊手分別使用金屬和木製球棒之揮擊，使用二台電子同步化 200 Hz 的相機收集高速的影像資料。經由軟體轉換出 3D 立體座標，以了解球棒與球的運動。Smith *et al.* [5]是針對揮棒速度下，量測球棒的重量和轉動慣量的作用，球棒運動使用高速錄影記錄每次揮棒的動作。結果顯示，恆定 MOI 的球棒的揮棒速度，幾乎不受球棒重量的控制，當揮棒速度是恆定重量的球棒的揮棒速度，顯示出 MOI 的重要性。

Mustone and James [6]利用 LS-DYNA 對鋁棒及木棒進行分析，以及探討其性能。實驗則是利用擊球機來做量測，並在有限元素模型中調整材料參數，以便理論分析值和實驗量測值相吻合，即可得到二種球棒的材料性質，可更進一步來探討球棒的性能特性。Sherwood *et al.* [7]以有限元素軟體分析以及用 BHM 測試機器進行實驗，研究對象為鋁棒和木棒。在 COR 測試中，模擬用球碰撞木塊在球 70 mph、球棒 70 mph 時進行模擬，結果顯示 COR 趨近於 0.56。

Russell [8]試圖確立環狀頻率的參數，可來幫助解釋，在各種不同類型的空心球棒之間之不同性能的關係。藉由實驗模態分析來探討棒球或壘球棒之振動模態振型和頻率。研究指出第一和第二個彎曲模態節點分別為離球桶底部 7 和 5 英寸。而在這兩個節點之間，歸類為甜蜜區。對該區域作衝擊，將只有貧乏地激出前二個彎曲模態，而減少最初的球之動能損對於球棒之振動。基本的環狀模態為金屬製球棒的(砰)聲音的原因，同時，第一個環狀模態也是彈簧效應產生的原因。

本文主要是完成球棒之模型驗證與了解其振動特性，並以此資訊為基礎，日後可以進一步做甜蜜區特性、轉動慣量、碰撞分析或聲音量測等球棒之性能指標的研究。未來可提供於球棒產業的應用，作為自行研發產品的參考。

2. 有限元素分析

本文採用Louisville Slugger生產的木棒、鋁棒、合成球棒，三種不同材質的球棒，如圖1。進行有限元素分析求取模態參數，並與實驗模態分析所求得之實際球棒之模態參數進行比較驗證，包括自然頻率、模態振型，再進行有限元素模型結構的修正，確定有限元素分



析模型之正確性及球棒之適用性。並探討球棒之振動特性，以及探討振型能量累加與球棒甜蜜區之關聯性。



圖1 選用球棒之實際圖

(a)木棒、(b)鋁棒、(c)合成棒

本文利用 ANSYS 軟體對三種不同材質的球棒進行有限元素分析。首先架構球棒實體模型，使用的參數與材料性質如表 1 所示。所使用元素形式為(SOLID45)三維線性立體元素。元素分割是以球棒圓周方向分為 56 等分。位移限制則採用全自由邊界(free-free)模擬，即球棒兩端皆為(free-free)。負荷條件則是無任何外力負荷。進行模態分析求取模態參數，並將分析所得結果與實驗模態分析所得結果做比較。

表 1 材料性質表

球棒型號	125SB	SB77S	SB206
材料	白樺木	7046 鋁合金	鋁、石墨 玻璃纖維
楊氏係數(GPa)	12.2	70	80
密度(kg/m ³)	600	2700	2713
蒲松比 ν	0.371	0.3	0.3
長度(mm)	863.6	863.6	863.6
最大寬度(mm)	56	56	56
重量(g)	793.78	793.78	737.08

3. 實驗模態分析

圖 2 為實驗模態分析儀器架構示意圖，相關儀器與設定如表 2 所示。其實驗方法及步驟說明如下：

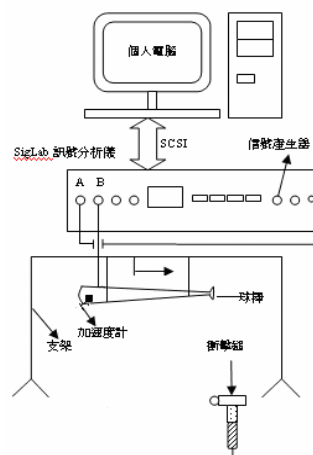
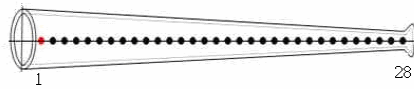


圖 2 實驗模態分析儀器架構示意圖

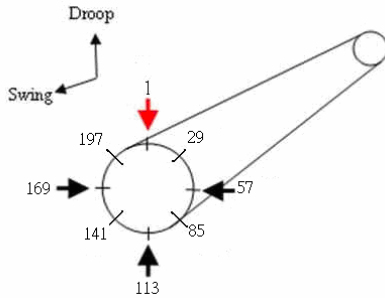
1. 利用鋼頭之衝擊錘為驅動器，加速度計作感測器之組合，對不同材質球棒結構進行實驗模態分析，以固定加速度計量測位置、移動衝擊錘的方式進行實驗。
2. 將球棒實體模型等分成 224 點，如圖 3(a)及(b)，模擬自由邊界的情況，以棉線懸吊球棒於支架上。固定加速度計在球棒之第 1 點，並移動衝擊錘敲擊每一點的 Droop 方向(與球棒揮擊方向垂直之方向)。
3. 將衝擊錘之導線接於頻譜分析儀之輸入模組頻道 A，接著將加速度計連接於頻譜分析儀之輸入模組頻道 B。
4. 在訊號分析儀設定方面，依實驗設定所需將頻寬設為 5000Hz，時間點數設定為 8192。
5. 固定加速度計在球棒劃分的 1 點，移動衝擊錘敲擊球棒上的每一量測點，平均敲擊次數為 3 次，再透過 SCSI 介面連接至電腦。
6. 利用頻譜分析儀量測可得到 224 組結構系統之頻率響應函數與關聯性函數，經由 ME'scopeVES 軟體進行模態參數擷取，進而得到結構之模態參數，如自然頻率、模態振型及阻尼比。

表 2 實驗架構所使用之儀器型號

儀器名稱	型號
頻譜分析儀	SigLab model 20-42
衝擊錘	PCB086 C03
加速度計	PCB352 A72
曲線嵌合軟體	ME'scopeVES



(a) 球棒量測點數規劃



(b) 球棒劃分的 224 點立體圖
圖 3 結構之量測示意圖

4. 結果與討論

4.1 自然頻率與模態振型比對

自然頻率與模態振型比對如表 3、4 所示。表 3 為理論與實驗之自然頻率與模態振型比對，表 4 為理論與實驗之自然頻率與模態振型比對總表。其中，F-07 代表理論分析的第 1 個彈性模態，E-01 代表實驗求得的第 1 個模態。比對結果綜合討論如下：

1. 由表 3、4 中可發現，木棒的振型為單純的彎矩模態，而鋁棒和合成棒則多了環狀模態，由文獻得知，第一個環狀模態的物理意義與球棒打擊時的聲音有關，而第一個彎矩模態和球棒的恢復係數 (COR) 有關，也會影響打擊時的手感舒適度。
2. 誤差方面，木棒除了第 11 個模態誤差大於 10% 之外，其餘皆在 10% 之內；鋁棒除了第 1 個模態誤差大於 10% 之外，其餘皆在 10% 之內；合成棒除了第 4 個模態誤差大於 10% 之外，其餘皆在 10% 之內，顯示自然頻率與模態振型有對應到整體的趨勢。
3. MAC 比對方面，可看出木棒在 y 方向的彎曲模態對應的不錯，不過在 z 方向的彎曲模態都低於 0.5，顯示對應的不是很理想；鋁棒，只有少部份的模態對應的不錯，尤其是環狀模態的部份，對應的比較好；合成棒，幾乎都在 0.5 以上的值。整體而言，三種不同材質的球棒都有對應到其整體趨勢，除了 MAC 值偏低之外，模型大致上近似於實體球棒。
4. 在木棒的部份，有軸對稱的模態出現，有可能是模型分割的問題所造成的。而在本文中，木棒是假設為等向性材料，並非實際結構的非等向，有可能是造成 MAC 值偏低的原因。
5. 在鋁棒及合成棒的部份，主要掌握到了金屬製球棒的模態特性，包括彎曲模態及環狀模態。部份自然頻率和模態振型，並沒有對應到，推測是因為不清楚實際金屬製球棒的厚度是否同厚度，理念有限元素模型，可能與實際球棒結構有些差異。

4.2 阻尼比探討

因理論分析無法得到實際之阻尼值，只能透過實驗量測而得，因此藉由累計平均阻尼之值找出一平均值，可用來代入有限元素軟體，做後續的分析及應用。

阻尼值愈高表示球棒的吸振能力愈好，由表 5 中可以發現，木棒的累計平均阻尼為 0.4468，鋁棒則為 0.3382，合成棒則為 0.6972。

4.3 不同材質球棒之品質指標數值

主要是對球棒之振型進行累加，其指標值愈小，表示該處的振動量愈小，亦即球棒於擊球時傳遞給打擊者的振動量愈小，同時擊球感覺也較佳，振型累加品質指標定義描述如下：

$$PI_i^{grip} = \sum_{n=1}^N \phi_{grip,n,i} \quad (1)$$

$$PI_n^{grip} = \sum_{i=1}^M \phi_{grip,n,i} \quad (2)$$

$$PI_{\phi}^{grip} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^M \phi_{grip,n,i} \quad (3)$$

其中， PI_i^{grip} 稱為握把處不同點模態振型累加性能指標，其定義為第一個模態至第 N 個模態之模態振型累加； $\phi_{grip,n,i}$ 為握把處第 n 個模態之第 i 個位置之模態振型值； N 為模態累加之數目。 PI_n^{grip} 稱為握把處不同模態之模態振型累加性能指標，其定義為第 n 個模態之球棒打擊區指標值， M 為握把處之規劃點數； PI_{ϕ}^{grip} 為模態振型累加之握把處性能指標。此模態振型累加之握把處性能指標值愈小，代表擊球舒適度愈佳。

表 6 為不同材質壘球棒之球棒打擊處及球棒握把處品質指標表，討論如下：

1. 表中可得到打擊處及握把處型累加之各模態品質指標值與其貢獻度，同時也獲得其振型累加總值。
2. 由各模態之振型累加值與貢獻度而言，這三種球棒均於高頻模態有較大的貢獻度，其中：
 - 木棒約為 39%，座落之頻率範圍約於 500Hz-1000Hz 內，推測影響球員揮棒擊球舒適感之頻寬約於 500Hz-1000Hz 範圍內
 - 鋁棒約為 45% 以上，座落之頻率範圍約於 600Hz-1200Hz 內，推測影響球員揮棒擊球舒適感之頻寬約於 600Hz-1200Hz 範圍內
 - 鋁棒約為 52% 以上，座落之頻率範圍約於 700Hz-1300Hz 內，推測影響球員揮棒擊球舒適感之頻寬約於 700Hz-1300Hz 範圍內。
3. 於握把處振動品質指標值計算中，值愈小表示實際擊球激振時，球員於握把處對振動量的感受度愈低，揮桿擊球之舒適度愈高。同理，打擊處振動品質指標值計算中，值愈小表示實際擊球激振時，球

棒擊球時受振動量的影響較低，揮棒打擊之性能較高。

- 就打擊處振型累加總值部分，鋁棒有最大值 11864.51，其次為合成棒的 8735.4，木棒則有最小總值 5696.97，就此數值而言，推測木棒會有最佳打擊效果，其次分別為合成棒與鋁棒。
- 就握把處振型累加總值部分，合成棒有最大值 11359.9，其次為木棒的 9495.70，鋁棒則有最小總值 6293.57，就此數值而言，推測鋁棒會有最佳揮擊舒適度，其次分別為木棒與合成棒。

4.4 不同材質球棒之品質指標數值

一般打擊時，球棒從接觸球到將球揮擊出去，這個過程約 0.0005 秒，亦即 2000 Hz，因此選取 2000 Hz 以內的彎矩模態做振型累加，不選環狀模態的原因是因為環狀模態的位移量與彎矩模態不同。

於壘球棒之振型累加計算方式中，可觀察不同頻寬之累加振型，圖 4 為不同材質球棒之振型能量累加示意圖，木棒取前 4 個模態、鋁棒取前 4 個模態、合成棒取前 3 個模態。

圖 4 中 Type1 為第 1 個模態，Type2 為第 1 個模態加第 2 個模態，Type3 為第 1 個模態加第 2 個模態加第 3 個模態，敲擊點數 3 至 11，為打擊區域，敲擊點數 24 至 28 為握把處區域。

由圖 4 可以發現，在打擊區域中，數值最小處，可能是甜蜜區，此處也和文獻[8]記載的位置相近，其中，握把處可看出前段握把的地方振動量是最大的，因此若能改善彎矩模態出現位置，則能減少打擊時的刺痛感。

而從前面打擊區可看出有一部份明顯低於其他區域，因此可以判定，這個區域為打擊區域，打擊時，比較能有效的將能量傳遞出去。而這個區域之外的地方打擊，顯然效率會較打擊區域差。比較三種不同材質的球棒發現，木棒的打擊區域和鋁棒相近，而合成棒的打擊區域是三種球棒中最高的。

綜合比較三種不同材質之球棒，無論擊球舒適度好壞，均於頻寬範圍 0-2000Hz 有相同趨勢之累加振型，同時也顯示於球棒外型與材料之設計製造組合並非偶然，藉由本文所提出之振型累加評估模式亦期望能回饋於球棒之設計開發，以提高產品品質。

5. 結論

本文主要是針對木製、鋁製及合成球棒進行實驗模態分析及理論有限元素分析，以獲得三種不同材質球棒之振動特性。由理論有限元素分析得到模態參數與實驗模態分析得到之模態參數進行模型驗證。

在比對模態參數部份，了解到木棒、鋁棒、合成棒之模態特性。除部份模態並未對應到之外，整體趨勢有相當程度的吻合。而由振動特性及性能評估的探討中，經由振型累加所得到的結果，對於判別甜蜜區、打擊區域、握把處的特性，皆有一定的準確度。

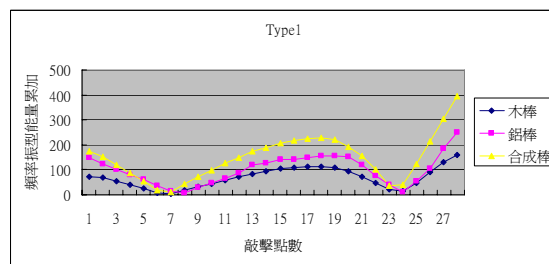
比較整體性之結果，顯示三種球棒中，在敲擊點數 3 至 5 的區間中，振動量為最小，在此區間範圍中，能有最佳的打擊性能。

在品質指標數值部份，打擊性能以木棒為最佳，其次是合成棒，打擊性能最差的是鋁棒。手感舒適度以鋁棒為最佳，其次是木棒，最差的是合成棒。

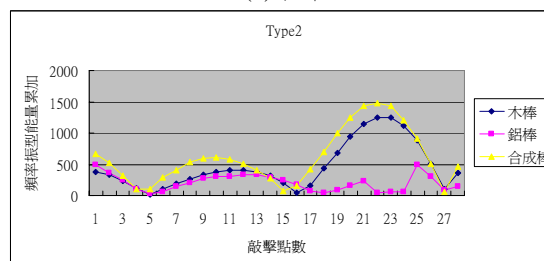
因此，本文所架構的有限元素模型，可視為接近實體球棒的模型，在經過修正後，未來可以用來作其他球棒性能指標的研究、球棒造形的設計變更等應用。

針對未來改善建議方面，有下列幾點：

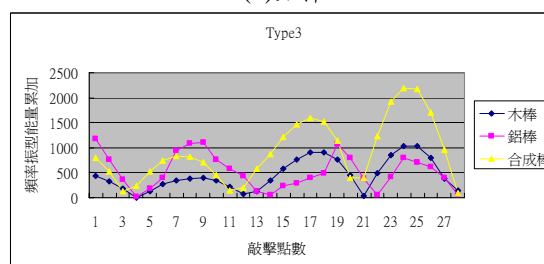
- 進行木棒之有限元素分析時，材料參數應考慮使用非等向性材料，元素分割可換成用 mapped mesh 分割以提高準確性。
- 在進行鋁棒及合成棒之有限元素分析時，應確認實際球棒結構中，厚度是否一致。確認理念有限元素模型，是否與實際結構相同。
- 在球棒之品質指標部份，本文以振型累加的計算方式進行探討，未來可以再加上頻率域的累加，亦即頻率響應函數的累加的方式進行探討。



(a)木棒



(b)鋁棒



(c)合成棒

圖 4 不同材質球棒之振型能量累加示意圖

表3 理論與實驗之自然頻率與模態振型比對
(a)木棒


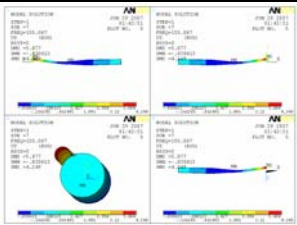

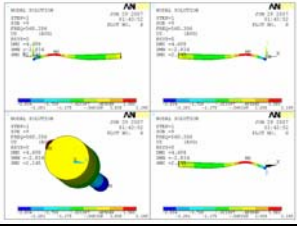
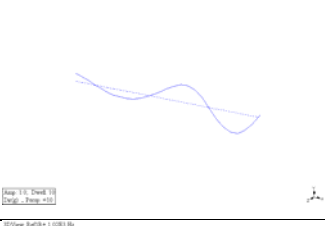
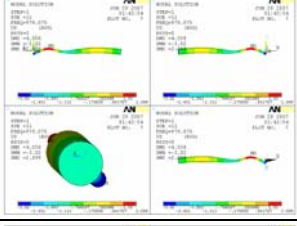
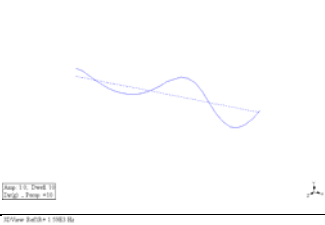
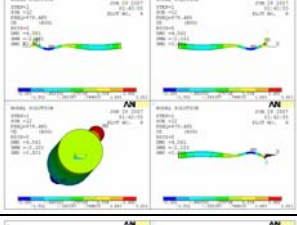
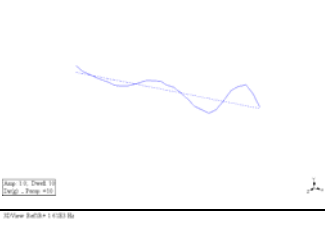
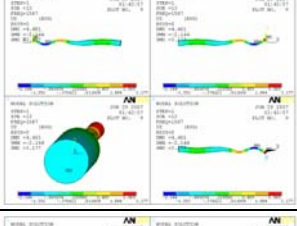
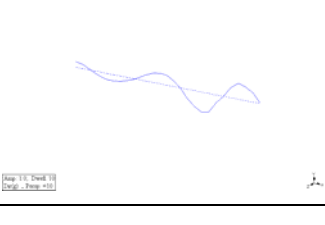
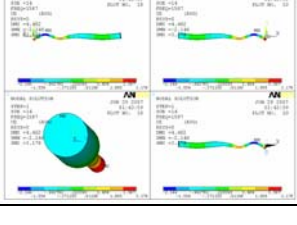
EMA			FEA			Diff,%	MAC
模態數	自然頻率 (Hz)	模態振型	模態數	自然頻率 (Hz)	模態振型		
E-01	154		F-07	152		-0.970	0.337
E-02	531		F-09	551		3.776	0.515
E-03	1010		F-11	962		-4.664	0.601
E-04	1020		F-12	963		-5.559	0.312
E-05	1590		F-13	1560		-1.839	0.814
E-06	1610		F-14	1560		-3.046	0.228

表 3 理論與實驗之自然頻率與模態振型比對(續)
 (b) 鋁棒

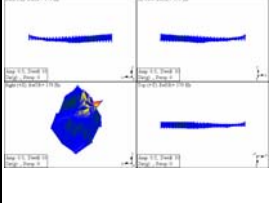
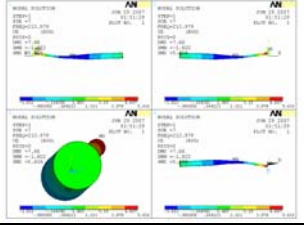
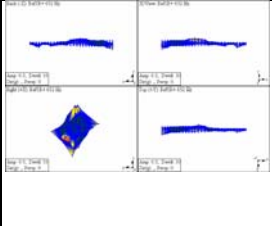
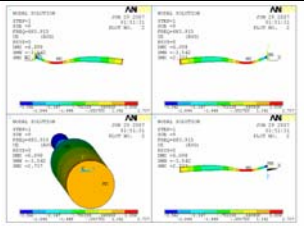
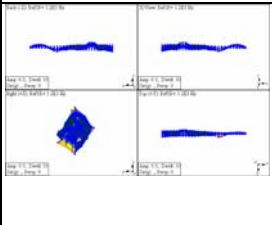
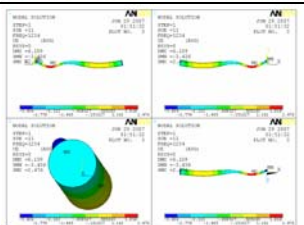
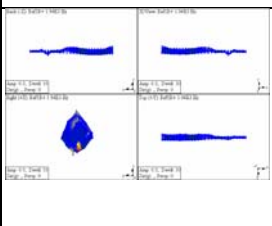
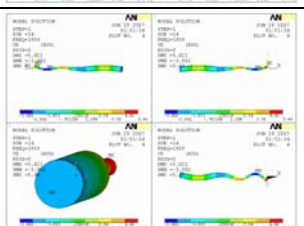
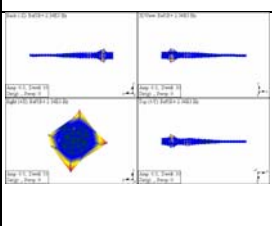
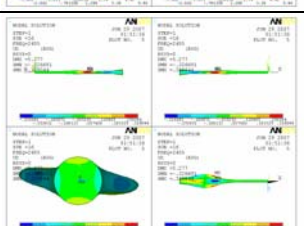
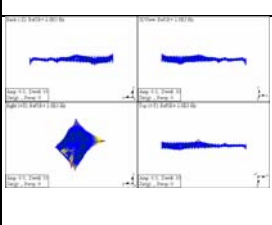
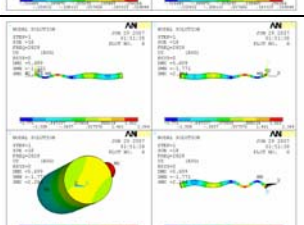
EMA			FEA			Diff,%	MAC
模態數	自然頻率 (Hz)	模態振型	模態數	自然頻率 (Hz)	模態振型		
E-01	179		F-7	204		14.304	0.720
E-02	652		F-9	653		0.299	0.240
E-03	1200		F-11	1179		-1.704	0.355
E-04	1940		F-14	1872		-3.470	0.184
E-05	2340		F-16	2346		0.297	0.208
E-06	2800		F-18	2704		-3.422	0.209

表3 理論與實驗之自然頻率與模態振型比對(續)
 (c)合成棒

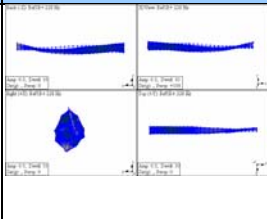
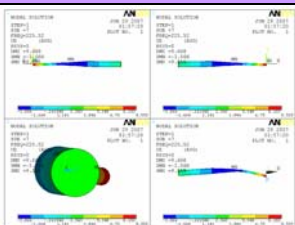
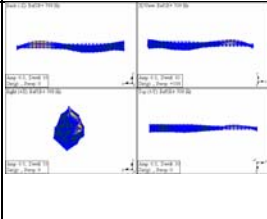
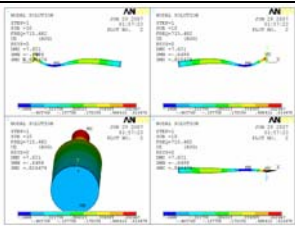
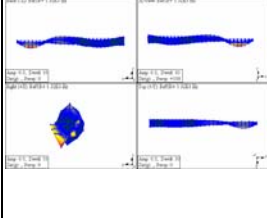
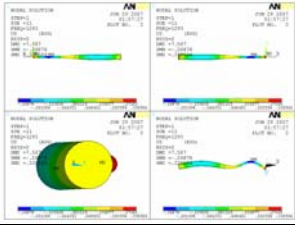
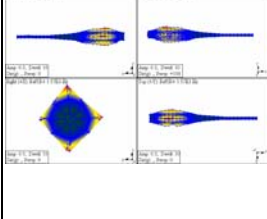
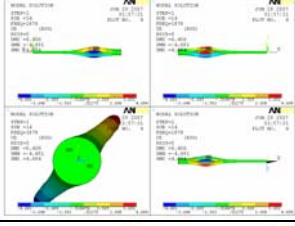
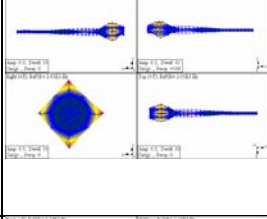
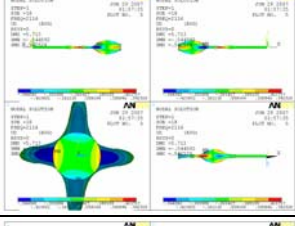
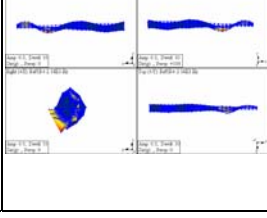
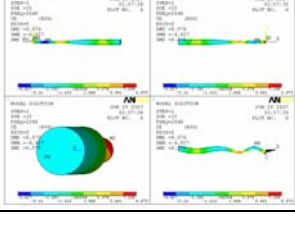
EMA			FEA			Diff,%	MAC
模態數	自然頻率(Hz)	模態振型	模態數	自然頻率(Hz)	模態振型		
E-01	228		F-7	223		-2.097	0.683
E-02	709		F-10	708		-0.116	0.7128
E-03	1320		F-11	1279		-3.060	0.5998
E-04	1570		F-14	1858		18.391	0.466
E-05	2010		F-18	2094		-5.280	0.5621
E-06	2140		F-15	2027		4.189	0.3588

表 4 理論與實驗之自然頻率與模態振型比對總表

(a)木棒

FEA		EMA		物理意義	誤差%	MAC
模態	自然頻率	模態	自然頻率			
7	152.507	1	154	1 st y-bending mode	-0.970	0.3371
9	551.048	2	531	2 nd y-bending mode	3.776	0.5152
11	962.896	3	1010	3 rd y-bending mode	-4.664	0.6012
12	963.299	4	1020	3 rd z-bending mode	-5.559	0.3124
13	1560.767	5	1590	4 th y-bending mode	-1.839	0.8146
14	1560.963	6	1610	4 th z-bending mode	-3.046	0.2284
16	2282.437	7	2210	5 th y-bending mode	3.278	0.7192
17	2283.912	8	2260	5 th z-bending mode	1.058	0.231
19	3090.653	9	2890	6 th y-bending mode	6.943	0.7982
20	3091.538	10	2980	6 th z-bending mode	3.743	0.1364
22	4012.951	11	3560	7 th y-bending mode	12.723	0.7418
23	4015.606	12	3710	7 th z-bending mode	8.237	0.1004

(b)鋁棒

FEA		EMA		物理意義	誤差%	MAC
模態	自然頻率	模態	自然頻率			
7	204.604	1	179	1 st z-bending mode	14.304	0.7205
9	653.953	2	652	2 nd z-bending mode	0.299	0.2409
11	1179.547	3	1200	3 rd z-bending mode	-1.704	0.3556
14	1872.684	4	1940	4 th z-bending mode	-3.470	0.1846
16	2346.951	5	2340	Hoop(1,1)	0.297	0.2089
18	2704.181	6	2800	5 th z-bending mode	-3.422	0.2097
23	3192.695	7	2920	Hoop(2,1)	9.339	0.5727
25	3580.044	9	3780	6 th z-bending mode	-5.290	0.2163
27	3736.954	8	3680	Hoop(3,1)	1.548	0.4435
29	4401.788	10	4740	Hoop(4,1)	-7.135	0.1859

(c)合成棒

FEA		EMA		物理意義	誤差%	MAC
模態	自然頻率	模態	自然頻率			
7	223.219	1	228	1 st z-bending mode	-2.097	0.683
10	708.179	2	709	2 nd z-bending mode	-0.116	0.7128
11	1279.607	3	1320	3 rd z-bending mode	-3.060	0.5998
14	1858.736	4	1570	Hoop(1,1)	18.391	0.466
15	2027.001	6	2140	4 th z-bending mode	-5.280	0.5621
18	2094.209	5	2010	Hoop(2,1)	4.189	0.3588
20	2589.601	7	2770	Hoop(3,1)	-6.513	0.5526
23	2928.309	8	3010	5 th z-bending mode	-2.714	0.5458
27	3430.234	9	3460	Hoop(4,1)	-0.860	0.6133
31	4128.535	10	4320	Hoop(5,1)	-4.432	0.2323
		11	4370	Hoop(5,1)		

表 5 實驗阻尼比與累計阻尼比

(a)木棒

模態數	自然頻率	阻尼比	修正後阻尼比	累計平均阻尼	模態數	自然頻率	阻尼比	修正後阻尼比	累計平均阻尼
1	154	0.549	0.1770	0.1770	9	2890	0.626	0.6061	0.4938
2	531	0.806	0.6981	0.4375	10	2980	0.572	0.5527	0.4997
3	1010	0.472	0.4152	0.4301	11	3560	0.455	0.4389	0.4942
4	1020	0.484	0.4278	0.4295	12	3710	0.499	0.4835	0.4933
5	1590	0.566	0.5299	0.4496	13	4270	0.318	0.3045	0.4788
6	1610	0.519	0.4834	0.4552	14	4450	0.419	0.4061	0.4736
7	2210	0.622	0.5960	0.4754	15	4970	0.0835	0.0719	0.4468
8	2260	0.536	0.5106	0.4798					

(b)鋁棒

模態數	自然頻率	阻尼比	修正後阻尼比	累計平均阻尼	模態數	自然頻率	阻尼比	修正後阻尼比	累計平均阻尼
1	179	0.349	0.0290	0.0290	6	2800	0.12	0.0995	0.1399
2	652	0.108	0.0201	0.0245	7	2920	1.16	1.1403	0.2829
3	1200	0.112	0.0642	0.0378	8	3680	0.833	0.8174	0.3497
4	1940	0.122	0.0924	0.0514	9	3780	0.153	0.1378	0.3261
5	2340	0.559	0.5345	0.1480	10	4740	0.459	0.4469	0.3382

(c)合成棒

模態數	自然頻率	阻尼比	修正後阻尼比	累計平均阻尼	模態數	自然頻率	阻尼比	修正後阻尼比	累計平均阻尼
1	228	0.363	0.1117	0.1117	7	2770	1.1	1.0793	0.6055
2	709	0.398	0.3172	0.2144	8	3010	1.13	1.1109	0.6687
3	1320	0.371	0.3276	0.2521	9	3460	1.23	1.2134	0.7292
4	1570	1.12	1.0835	0.4600	10	4320	0.859	0.8457	0.7409
5	2010	0.797	0.7685	0.5217	11	4370	0.274	0.2608	0.6972
6	2140	0.578	0.5512	0.5266					

表 6 不同材質壘球棒之球棒打擊處及球棒握把處品質指標表

(a)球棒量測點數為3~11之品質指標(打擊處)

Type	125SB		SB77S		SB206	
mode	Index Value	Contribution(%)	Index Value	Contribution(%)	Index Value	Contribution(%)
1	282.57	4.96	441.51	3.72	631.40	7.23
2	2027.30	35.59	1653.50	13.94	3543.00	40.56
3	2258.50	39.64	5419.50	45.68	4561.00	52.21
4	1128.60	19.81	4350.00	36.66		
PI_{ϕ}^{grip}	5696.97		11864.51		8735.40	

(b)球棒量測點數為24~28之品質指標(握把處)

Type	125SB		SB77S		SB206	
mode	Index Value	Contribution(%)	Index Value	Contribution(%)	Index Value	Contribution(%)
1	443.10	4.67	601.27	9.55	1075.20	9.46
2	2964.00	31.21	1084.30	17.23	3167.00	27.88
3	3403.00	35.84	2560.00	40.68	7117.70	62.66
4	2685.60	28.28	2048.00	32.54		
PI_{ϕ}^{grip}	9495.70		6293.57		11359.90	

6. 參考文獻

- [1] Nathan, A. M., 2000, "Dynamics of the Baseball-Bat Collision," *American Journal of Physics*, Vol. 68, No. 11, pp. 979-990.
- [2] Bahill, A. T., 2004, "The Ideal Moment of Inertia for a Baseball or Softball Bat," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans.*, Vol. 34, No. 2, pp. 197-204.
- [3] Cross, R., 1998, "The Sweet Spot of a Baseball Bat," *American Journal of Physics*, Vol. 66, No. 9, pp. 772-779.
- [4] Nicholls, R. L., Miller, K., and Elliott, B. C., 2001, "Bat Design and Ball Exit Velocity in Baseball Implication of Player Safety," *Australian conference of science and medicine in sport*, Perth, pp. 1-4.
- [5] Smith, L., Broker, J., and Nathan A., 2003, "A Study of Softball Player Swing Speed," *International Congress on Sports Dynamics*, Melbourne, Australia, pp. 12-17.
- [6] Mustone, T. J., and James, J. A., 1998, "Using LS-DYNA to Characterize the Performance of Baseball Bats," *Proceedings of the 5th International LS-DYNA Users Conference*, Southfield, September, pp. 21-22.
- [7] Sherwood, J. A., Mustone, T. J., and Fallon, L. P., 2000, "Characterizing the Performance of Baseball Bats Using Experimental and Finite Element Methods," *3rd International Conference on the Engineering of Sport*, June, Sydney, Australia, pp. 377-388.
- [8] Russell, D., A., 2004, "Hoop Frequency as a Predictor of Performance for Softball Bats," *5th International Conference on the Engineering of Sport*, UC Davis, September 11-15, Vol. 2, pp. 641-647.

Vibration Characteristics and Performance Evaluation of Different Materials of Softball Bats

Bor-Tsuen Wang¹ Hong-Yuh Lin² Wei-Che Tai³

¹ Professor, Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology.

² Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology.

³ Department of Mechanical Engineering National Pingtung University of Science and Technology.

ABSTRACT

This paper presents both finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA) to study three types of softball bats made up with wood, aluminum and synthetic material for their vibration properties. First, FEA and EMA are performed, respectively, to obtain theoretical and experimental modal parameters, including natural frequencies, mode shapes and modal damping ratios. Base on the experimental results, the FE model can be modified to fit the modal properties and therefore the analytical model can be validated and equivalent to the real bats. The structural mode shapes of bats are also studied to show the "sweet spots" for better hit areas. The performance among the three bats is compared to reveal the feel of players. The validated FE model can also be applied to perform other analysis, such as impact, as well as design modification of baseball bats.

Keywords: Finite element analysis, Experimental modal analysis, Softball bats.

