

不同球頭之高爾夫球桿振動特性及品質之探討

王柏村 黃瑞光
國立屏東科技大學

摘要

本文目的在探討三種(大田精密股份有限公司代號為 i1364、w0072 及 i0035)相同握把及碳纖維球桿而不同球頭高爾夫球桿振動特性與定義高爾夫球桿品質之判斷依據。分別對相同握把及碳纖維球桿而不同球頭之完整高爾夫球桿進行實驗模態分析及有限元素分析,由所得之模態參數來判斷球桿品質之可行性以及有限元素模型之適用性。分別分析節點位置、握把處振型及阻尼來判斷球桿之品質,在相同球桿與握把下實驗模態分析及有限元素分析所得之結果皆顯示 i0035 球頭與此組球桿與握把所組成之高爾夫球桿有較佳之品質。由此分析,對於高爾夫球桿品質之定義皆可依此方式來做為一種判斷之依據,而有限元素模型的驗證則可作為日後其他分析應用之基礎。

關鍵字:高爾夫球桿、球桿品質、實驗模態分析、有限元素分析、球頭

一、前言

我國體育用品製造業快速發展,業者先後引進國外先進生產技術,並大量接受國際著名品牌體育用品之委託製造(OEM)訂單,從而奠定了我國在國際體育用品市場上重要供應國地位。我國高爾夫用品廠商除為各著名品牌 OEM 代工生產外,同時慢慢轉型為 ODM(或自創品牌)致力於外型設計以及各種材質產品之開發,並努力拓銷自有品牌產品。

就高爾夫球頭與球桿之設計製造的研發工作,應有幾項重點:1.材料素材:包括球桿材質從早期如鐵桿、鋁桿到碳纖維桿等,球頭材質如鈦合金、不鏽鋼、鐵鋁錳等,都在增加高爾夫球桿的性能,如高強度、高韌性、重量輕。2.加工製造方法:從傳統鑄造、精密脫蠟鑄造到鍛造、高溫高壓加工等朝向產量多、不良率低、降低成本等方向改進。3.設計方法:從早期代工到現在慢慢自創設計品牌。4.設計分析能力:球桿振動特性之分析、球頭甜蜜區分析等各種設計分析考慮已逐漸受到製造廠商的重視,但為現在我國產業最缺乏的能力。

國外對於高爾夫球桿等也有相關的文獻探討, Hockell et al. [1]使用非接觸式雷射振動儀及電子光束干涉技術求得空心高爾夫球頭的振動模態特性,驗證有限元素分析所得之結果。Wicks et al. [2]應用振動模態分析技術,由球桿之振動模態、聲音模態及結構阻尼,來探討比較鑄造與鍛造球頭之差異性。Merkel and Blough [3]則應用模態分析技術得到球頭之模態振型,同時也探討擊球點在甜蜜區與非甜蜜區,握把、球頭之振動頻率響應,以瞭解揮擊過程之能量損失情形。Wicks et al. [4]也以衝擊錘作用於球頭,並量測握把處之加速度,以得到頻率響應函數,再擷取球頭之模態

振型,也得到如 Merkel and Blough [3]之類似結論。Iwata et al. [5]使用有限元素方法分析高爾夫球及球頭在瞬間衝擊的現象,藉由電腦的幫助所分析可在最短的時間決定最佳的設計。Okbuo and Simada[6]運用 CAE 以三種不同的邊界條件來分析高爾夫球桿,包括進行模態測試、甜蜜區的定義及擊球時衝擊力之測試。Friswell et al. [7]架構高爾夫球桿的有限元素模型與實驗模態分析所得結果進行比較後,進行有限元素模型的修正,以建立一個改善分析的高爾夫球桿有限元素模型。王柏村與黃瑞光[8]主要對一高爾夫球鐵桿分別做有限元素分析及模態實驗分析,分別求得球桿頻率響應函數及模態參數,在進行驗證探討有限元素模型的適應性。

本文應用振動模態分析技術,包括實驗模態分析及有限元素分析,分別對三種球桿(大田精密股份有限公司代號為 i1364、w0072 及 i0035)進行測試與分析,探討三種不同高爾夫球頭振動特性。由所得之模態參數來判斷球桿品質之可行性,分別分析節點位置、握把處振型及阻尼。在相同碳纖維球桿與握把下顯示 i0035 球頭與此組球桿與握把所組成的高爾夫球桿較佳。

二、問題定義與分析目標

1.問題定義:

本文採用大田精密股份有限公司所提供之三種不同球頭(大田精密股份有限公司代號為 i1364、w0072 及 i0035),同樣握把與碳纖維球桿之 5 號鐵桿,採用 free-free 邊界情況來進行有限元素分析及實驗模態分析。模擬 free-free 邊界情況方式是以兩條橡皮筋所組合之彈性繩支撐球桿於支撐架上,依球桿之外型、材質將球桿分為四段 L1, L2, L3 及 H,取不同材料性質,其各段之材料

性質如表一。

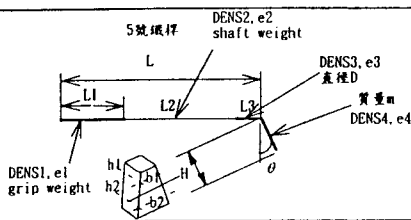
三、有限元素分析

2.分析目標：

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。並探討高爾夫球桿之振動特性與有限元素模型於球桿品質之適用性，並分別從節點位置、握把處振型、阻尼比定義球桿品質指標，分析在不同球頭、同樣握把與碳纖維球桿狀況下高爾夫球桿之品質差異。

本文採用 ANSYS 軟體對三種不同球桿進行有限元素分析。首先架構球桿有限元素模型，因球桿為圓錐體為方便架構有限元素模型故簡化成圓柱體以樑元素架構。將球桿區分為八段，將各段之大小直徑平均作為所架構元素之外徑，握把部份以密度加重其重量來表示。所使用元素形式為三維樑元素(beam4)來架構有限元素模型。結構之分割在球桿部份為等份 32 個元素，在球頭部份為等分為 4 個元素，位移限制採用球桿兩端皆為 free-free 的方式。

表一、材料性質



The diagram shows a golf club shaft and head. The shaft is divided into three sections: L1 (grip), L2 (middle), and L3 (head). The head has dimensions H (length), b1 and b2 (thickness), and h1 and h2 (width). Material properties are labeled as DENS1.e1 (grip weight), DENS2.e2 (shaft weight), DENS3.e3 (head weight), and DENS4.e4 (head weight). The angle theta is also indicated.

材質	I1364 (15-5)		W0072 (17-4+64Ti)		I0035 (17-4)	
	有握把	無握把	有握把	無握把	有握把	無握把
總長L(mm)	920		916		916	
握把長 L1	259		259		259	
桿最大外徑 D	14.6		14.6		14.6	
桿最小外徑 d	9.4		9.4		9.4	
桿最大內徑 D _i	12.4		12.4		12.4	
桿最小內徑 d _i	4		4		4	
L3	33		38		40	
D	13.6		13.6		13.6	
θ	30		30		30	
球頭長 H	85		85		85	
球頭厚度 b1	10		7.9		8	
球頭厚度 b2	10		7.9		8	
球頭寬度 h1	32		33		33	
球頭寬度 H2	50		51		50	
球頭比重	7.75		7.75		7.75	
L1之楊氏係數E(N/m ²)	5.20E+10	2.17E+10	6.80E+10	2.17E+10	4.50E+10	2.17E+10
L1之密度(kg/m ³)	2305	391	2275	398	2320	400
L2之楊氏係數E(N/m ²)	2.17E+10		2.17E+10		2.17E+10	
L2之密度(kg/m ³)	391		398		400	
H之楊氏係數E(N/m ²)	2.10E+11		2.10E+11		2.10E+11	
H之密度(kg/m ³)	7750		7750		7750	
球頭重(g)	258.9		251.9		253.4	
桿重(g)	74.4		76.1		75.2	
握把重(g)	47.3		46.7		47	
整枝桿重(g)	377	326.9	369.5	321.8	375.6	323.3

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。

四、實驗模態分析

本文的實驗架構情形如圖一所示，首先將衝擊錘用導線接於訊號分析儀之 A 輸入模組，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 B 輸入模組，再透過 IEE-488 介面將訊號分析儀與個人電腦相連接。其實驗的動作原理為，利用衝擊錘對高爾夫球桿激振，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錘，所以加 Transient 加權函數，在感測器之加速度響應加 Exponential 加權函數。

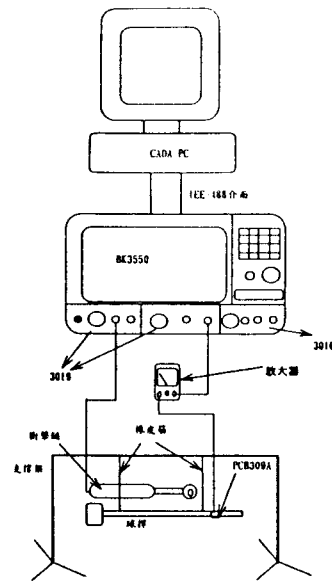
實驗模態分析之方式是固定衝擊錘敲擊的位置移動加速度計。以固定敲擊在球桿劃分的 12 個測試點(如圖二所示)中的第 11 點，而移動加速度計在球桿上的每一測試點，由量測出的響應經由訊號放大器傳入訊號分析儀作分析，即可得到 12 組頻率響應函數，再將之傳入 CADA-PC 軟體作曲線嵌合，以求取球桿的模態參數。分別對 droop 及 swing 平面進行完整之模態測試。

五、結果與討論

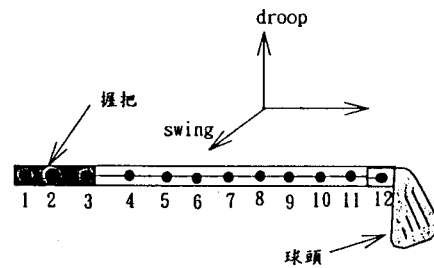
1. 有限元素模型驗證

- (1) 頻率：表四、表五及表六分別為三支球桿有限元素分析與實驗模態分析所得之頻率，其誤差皆在 9% 以下具有相當吻合性。
- (2) 模態保證指標：表七、表八分別為三支球桿 droop 及 swing 方向之模態保證指標(MAC)，可發現 droop 方向對角線值皆在 0.8-0.9 之間，swing 方向對角線值在 0.7-0.9 之間為可接受之範圍。非對角線除(3,1)值較大，約在 0.2-0.5 不等稍差外，大體均有成模態正交性。判斷為何有這樣大之間距，可能之原因為握把阻尼效應之影響

2. 球桿品質之定義與分析



圖一、實驗架構圖



Droop：與揮桿方向垂直的方向

Swing：揮桿方向

圖二、球桿分割之狀況

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
曲線嵌合軟體	LMS CADA-PC

本報告將以節點位置、阻尼、頻率與握把處振型等來定義球桿品質指標，分述如下：

1. 節點位置：高爾夫球桿的節點位置若位於握把處是理想的狀況，表示此處之位移為零且其相鄰位置的位移亦小，對於高爾夫球者而言，握在節點處擊球將感覺到較小的反作用力。由圖三、圖四實驗模態分析所得及圖五、圖六有限元素分析分析所得 i1364、0035 及 w0072 球桿之振型圖來看，這三種球桿 droop 方向與 swing 方向前三個振型第一個之節點位置皆落於握把處，最後一個節點亦接近於球頭處，表示此三種球桿之組合設計是正確的。

表三、i1364 實驗模態分析與有限元素分析所得頻率之比較

Mode	EMA	FEA	誤差	平面
1	45.66	46.331	-1.4696	Droop
2	52.82	56.889	-7.7035	Swing
3	132	122.84	6.93939	Droop
4	162	161.85	0.09259	Swing
5	266.47	286.39	-7.4755	Droop
6	317.72	320.06	-0.7365	Swing

表四、w0072 實驗模態分析與有限元素分析所得頻率之比較

Mode	EMA	FEA	誤差	平面
1	44.36	45.551	-2.6848	Droop
2	54	54.573	-1.0611	Swing
3	125.78	120.11	4.50787	Droop
4	164.48	150.58	8.45087	Swing
5	262.75	284.25	-8.1826	Droop
6	314.59	308.24	2.0185	Swing

表五、i0035 實驗模態分析與有限元素分析所得頻率之比較

Mode	EMA	FEA	誤差	平面
1	44.45	45.601	-2.5894	Droop
2	54	54.877	-1.6241	Swing
03	127.37	119.5	6.17885	Droop
4	163.5	150.75	7.79816	Swing
5	265.35	284.61	-7.2583	Droop
6	316.65	309.33	2.3117	Swing

2. 阻尼：阻尼值越高表示球桿吸振能力越好，亦表示擊球時振動能量傳給高爾夫球著的會消對減少。由表八、i1364、W0072 與 i0035 之阻尼比來看其值皆在 0.4-2.4 之間，此三種球桿之阻尼並無太大差異，可能是相同握把及碳纖維桿所造成之結果。
3. 頻率：由於三支球桿之主要差異只有球頭部分，因此其頻率變化不大，如表九實驗模態分析所得頻率之比較，其第一個頻率約在 45Hz 左右，第二個頻率約在 52-54Hz 左右，第三個頻率約在 125-132Hz 左右，第四個頻率約在 162-165Hz 左右，第五個頻率約在 262-267Hz 左右，第六個頻率約在 317-318Hz 左右。
4. 握把處振型：握把處振型越小表示此處能量小，傳遞給球員的能量亦相對的小，而球員對於擊球時球桿的感覺亦會較佳。由圖三、圖四實驗模態分析及圖五、圖六有限元素分析所得 i1364、w0072 及 i0035 之振型比較顯示其優劣，每個振型並不一樣，亦很難看出整體結果。若將每個模態握把處振型與零點所圍面積相，加如表十實驗模態分析及表十一有限元素

表六、droop 方向實驗振型與理論振型之 MAC
(a) i1364

Mode	1	2	3
1	0.9805	0.3491	0.4645
2	0.1554	0.9011	0.0061
3	0.1679	0.0395	0.818

(b) w0072

Mode	1	2	3
1	0.902	0.3671	0.1816
2	0.0883	0.856	0.0232
3	0.1065	0.0504	0.8551

(c) i0035

Mode	1	2	3
1	0.8909	0.1257	0.4818
2	0.1952	0.8727	0.0063
3	0.3321	0.0053	0.874

表七、swing 方向實驗振型與理論振型之 MAC
(a) i1364

Mode	1	2	3
1	0.9484	0.0029	0.4358
2	0.0073	0.9132	0.0045
3	0.2625	0.0318	0.7313

(b) w0072

Mode	1	2	3
1	0.9878	0.0285	0.3127
2	0.0028	0.9343	0.1185
3	0.1725	0.0086	0.7078

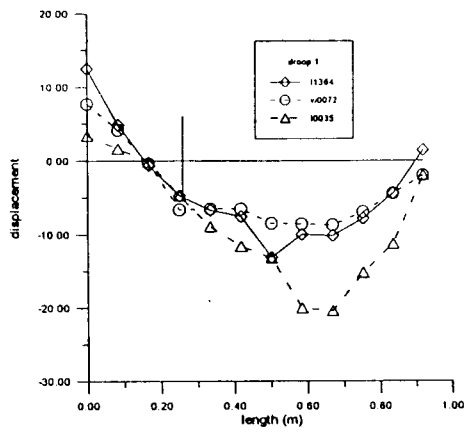
(c) i0035

Mode	1	2	3
1	0.9756	0.0081	0.3312
2	0.0028	0.9161	0.0417
3	0.1496	0.0105	0.8298

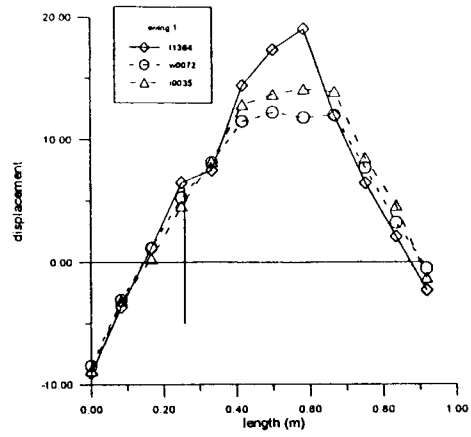
表八、i1364 W0072 與 i0035 之阻尼比

Mode	i1364		W0072		i0035	
	修正前	修正後	修正前	修正後	修正前	修正後
1	2.04	2.039	2.09	2.089	2.36	2.359
2	1.98	1.979	1.25	1.249	1.44	1.439
3	0.67	0.669	0.86	0.859	0.77	0.769
4	0.48	0.479	0.6	0.599	0.89	0.889
5	0.45	0.449	0.51	0.509	0.58	0.579
6	0.46	0.459	2.08	2.079	0.47	0.469

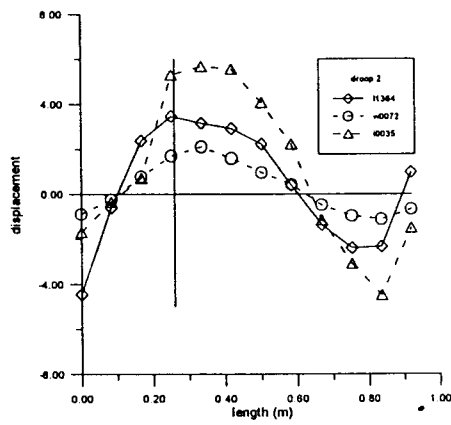
分析所得顯示，則可明確看出整體結果。由表十數據顯示 i0035 總面積較小為 2.356，其次為 w0072 的 2.793，最後為 i1364 的 3.5841。由表十一數據顯示亦為 i0035 總面積較小為 2.7848，其次為 w0072 的 2.8413，最後為 i1364 的 3.0291。



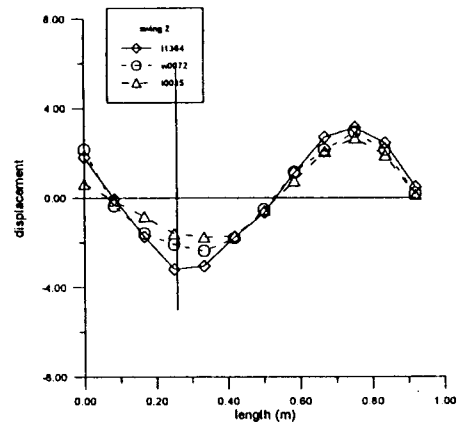
(a) 第 1 個振型



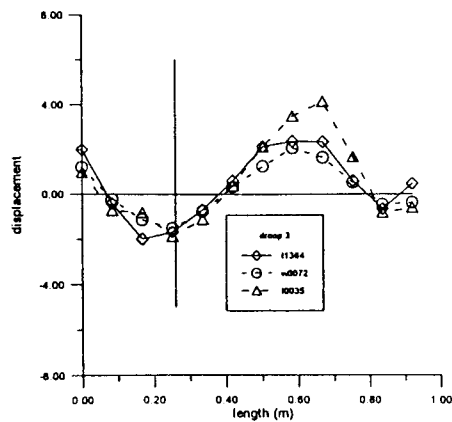
(a) 第 1 個振型



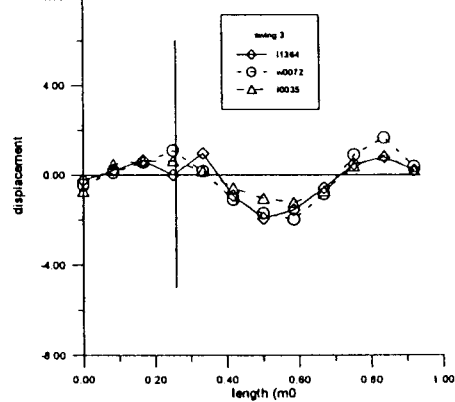
(b) 第 2 個振型



(b) 第 2 個振型



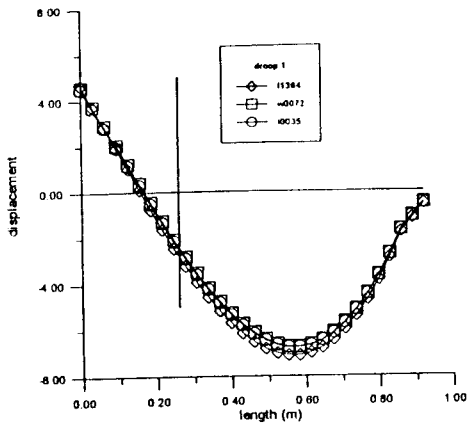
(c) 第 3 個振型



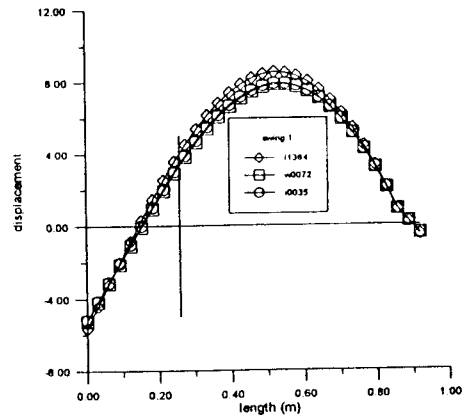
(c) 第 3 個振型

圖三、i1364、w0072 及 i0035EMA droop 方向
 之振型比較

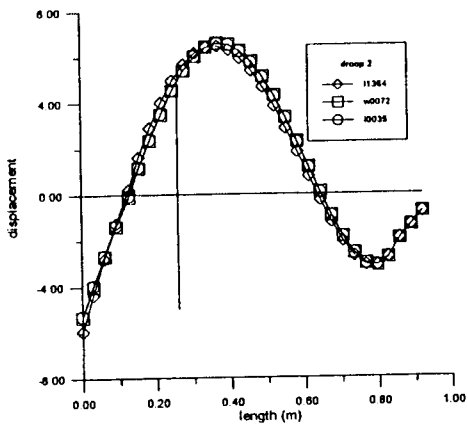
圖四、i1364、w0072 及 i0035EMA swing 方向
 之振型比較



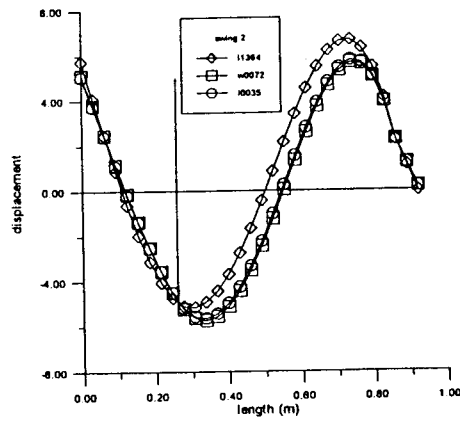
(a) 第一個振型



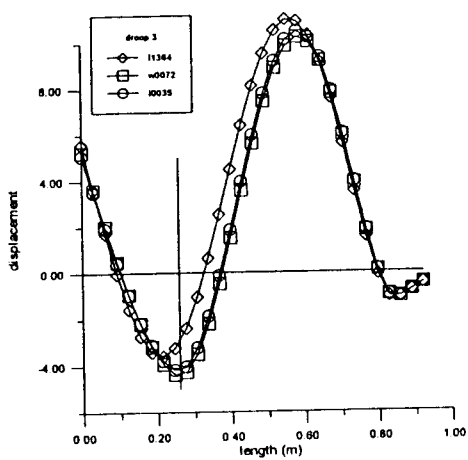
(a) 第一個振型



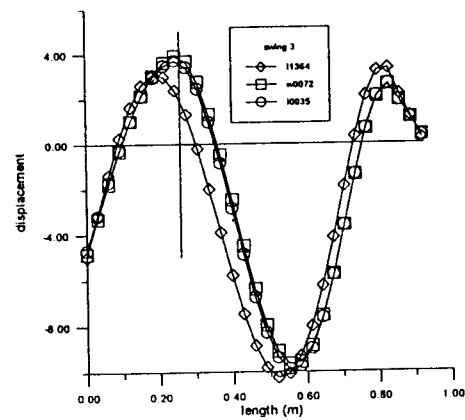
(b) 第二個振型



(b) 第二個振型



(c) 第三個振型



(c) 第三個振型

圖五、i1364、w0072及i0035FEA droop 方向之振型比較

圖六、i1364、w0072及i0035FEA swing 方向之振型比較

六、結論

本文探討三種(大田精密股份有限公司代號為 i1364、w0072 及 i0035)不同高爾夫球頭對振動特性與球桿品質之影響。運用實驗模態分析方法及有限元素分析方法分別對相同握把與碳纖維球桿及不同球頭之完整高爾夫球桿進行實驗與分析與有限元素分析,由所得之模態參數來判斷球桿品質及有限元素模型應用之可行性。實驗模態分析所求得球桿之模態參數包括振型、阻尼及頻率,與進行有限元素模型所求得結果之驗證,並做球桿品質之初步定義。結果顯示有限元素分析模型所得結果與球桿實體實驗所得之數據有相當程度吻合。再分析節點位置、握把處振型及阻尼來判斷球桿之品質,在相同握把與碳纖維球桿下,實驗模態分析及有限元素分析皆顯示 i0035 球頭與此組碳纖維球桿與握把所組合而成的高爾夫球桿有較佳的品質。

而本次有限元素模型以 beam4 架構球頭,要區分出三種不同球頭性能並不是那麼明顯,因此以後應以實體元素(solid)來架構球頭,對探討不同球頭之特性如球頭各部尺寸之差異、重心之差異等應會更明確。另單獨碳纖維球桿之材料性質亦值得探討,因為碳纖維球桿之材料性質如楊氏係數、密度等對球桿振動特性影響亦很大故需進一步加以分析。

七、參考文獻

1. Hocknell, A., Mitchell, S. R., Jones, R., and Róthberg, S. J., 1998, "Hollow Golf Club Head Modal Characteristics: Determination and Impact Applications," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 38, pp. 173-180.
2. Wicks, A. L., Knight, C. E., Braunwart, P., and Neighbors, J., 1993, "The Comparison of Forged Heads to Cast Heads for Golf Clubs," *Proceeding of the 12th International Modal Analysis Conference*, Vol. 2, pp. 1797-1802.
3. Ronald, C., Merkel, and Tom, Blough, 1998, "Dynamic Characterization and Comparison of Golf Clubs," *Proceeding of The 17th International Modal Analysis Conference*, Vol. 1, pp. 513-517.
4. Wicks, A. L., Knight, C. E., Braunwart, P., and Neighbors, J., 1993, "Identification of The 'Sweet Spot' for Golf Clubs," *Proceeding of The 12th International Modal Analysis Conference*, Vol. 2, pp. 1803-1806.
5. Iwata, M., Okuto, N., and Satoh, F., 1990, "Designing of Golf Club

表九、i1364 W0072 與 i0035 實驗模態分析所得

頻率之比較

Mode	i1364	W0072	I0035	平面
1	45.66	44.36	44.45	Droop
2	52.82	54	54	Swing
3	132	125.78	127.37	Droop
4	162	164.48	163.5	Swing
5	266.47	262.75	265.35	Droop
6	317.72	314.59	316.65	Swing

表十、三種球桿實驗所得握把處能量

	i1364	w0072	i0035
Mode1	1.167732	1.000047	0.514872
Mode2	1.032443	0.8987	0.863443
Mode3	0.57105	0.19476	0.408576
Mode4	0.382352	0.344127	0.182462
Mode5	0.353258	0.231852	0.2449
Mode6	0.077272	0.123629	0.141813
總和	3.584106	2.793113	2.356066

表十一、三種球桿有限元素分析所得握把處能量

	i1364	w0072	i0035
Mode1	0.411934	0.412289	0.401547
Mode2	0.494739	0.464106	0.457231
Mode3	0.550489	0.491266	0.488332
Mode4	0.542139	0.479128	0.473524
Mode5	0.543273	0.512726	0.498248
Mode6	0.486584	0.481804	0.465944
總和	3.029158	2.841318	2.784825

Heads by Finite Element Method (FEM) Analysis," *Proceedings of the First World Scientific Congress of Golf 9-13th*, pp. 274-279.

6. Okbuo, N., and Simada, M., 1990, "Application of CAE(computer aided engineering) to Golf Club dynamics," *Proceedings of The First World Scientific Congress of Golf 9-13th*, pp.270-273.
7. Friswell, M. I., Smart, M. G., and Mottershead, J. E., 1997, "Updating Finite Element Models of Golf Club," *Proceeding of the 15th International Modal Analysis Conference*, Vol. 1, pp. 155-161.
8. 王柏村, 黃瑞光, 1999, 高爾夫球桿振動模態參數之測定, 中華民國力學會議第二十三屆全國力學會議論文集(二), 新竹市, 第 457-464 頁

八、致謝

本研究承蒙屏東工業區大田精密工業股份有限公司提供球
桿、相關技術資料以及部份經費資助，特此致謝。

Vibration Characteristics and Quality for Golf Clubs with Different Heads

Bor-Tsuen Wang and Jui-Kuang Huang

Department of Mechanical Engineering

National Pingtung University of Science and Technology

ABSTRACT

This paper discusses three type of golf clubs that have the same grip and shaft, but different heads. The vibration characteristics of the golf clubs are analyzed via experimental modal analysis (EMA) and finite element analysis (FEA), respectively. This work discusses the feasibility for the use of modal parameters to determine the golf club quality. The golf club mode shapes are analyzed and shown to be a suitable quality index for golf clubs. From both EMA and FEA, i0035 golf club reveals the best quality in terms of vibration energy near the grip. The quality definition of golf club based on vibration characteristics is established and discussed. Finite element model is also validated and useful for further studies.

Keyword: golf club, club quality, experimental modal analysis (EMA),
finite element analysis (FEA), head