

高爾夫球頭振動與聲音關聯性之探討

Discussions on Correlation Between Vibration and Sound Radiation of Golf Club Head

王栢村¹ 林昆正² 徐川洋²

Bor-Tsuen Wang¹, Kun-Zheng Lin², Chuan-Yang Xu²

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研究生

912 屏東縣內埔鄉學府路一號機械系振動噪音實驗室

Tel : (08)7703202 轉 7036 FAX : 08-7740142

E-MAIL : Wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

本文旨在對一高爾夫球木桿球頭，進行理論有限元素分析與實驗模態分析，以求得球頭之振動模態特性，包括自然頻率、阻尼比及模態振型。理論有限元素分析是以一實際球頭建立之有限元素模型，進行模態分析再與實驗模態分析所得之模態參數進行模型驗證。經由模型驗證方式，可以確認理論之有限元素模型正確性。另外，以衝擊槌敲擊球頭，同時量測球頭表面之加速度，及聲音信號以探討球頭振動模態與聲音輻射之關聯性。結果顯示，球頭聲音頻譜與振動自然頻率有密切之關係，不同的敲擊位置，將激發出不同的聲音頻譜特性。本文建立之分析與量測方法，可供球頭設計之參考。

關鍵字：有限元素分析、實驗模態分析、模態參數、聲音頻譜

Abstract

This paper presents the theoretical and experimental modal analysis on a golf club head to obtain the modal parameters, including natural frequencies, damping ratios and mode shapes. By the process of model verification, the theoretical finite element model can be validated. Besides, the club head is excited by an impact hammer, the acceleration on the head surface and radiated sound are measured, simultaneously, and compared to study the correlation between the modal properties and radiated sound of the club head. Results show that the sound spectra are strongly correlated with the natural modes of vibration. Different impact locations result in different sound spectra. The developed analysis and measurement techniques can be applied to the design of golf club head.

Key word : finite element analysis, experiment modal analysis, modal parameters, sound spectrum

一、前言

近年來休閒活動逐漸被國人所重視，相對地球桿品質也漸漸受到重視。而我國高爾夫球用品製造業也因此迅速蓬勃發展，不斷地引進國外自動化生產技術之外，同時也著手改善生產品質與生產速度。體育用品的快速發展，也讓消費者與設計者日益重視球具的品質，而球頭設計所需要考慮之因素相當地廣泛，包括了：材料選擇、幾何形狀、製造方法的不同與設計分析的能力等等。

在高爾夫球桿的設計與開發研究上，國內外有許多學者亦從事高爾夫球桿這方面的研究分析，國內學者邱[1]以動力學來分析球頭動態碰撞，探討高爾夫球在空氣中飛行射程軌跡，進一步探討球頭打擊面之能量，界定高爾夫球桿的甜蜜區位置，並將甜蜜區數量化，應用在球頭設計理念上。胡[2]是利用 Pro/Engineer 軟體來對高爾夫球桿木桿頭進行參數化設計，透過參數的變化，設計出最佳形狀的球頭，分析軟體則是採用 Marc 有限元素分析法軟體來模擬球頭跟球碰撞分析，探討球頭在擊球碰撞後所產生的應力大小與分佈情形，由分析數據來作為改善球頭設計的依據。黎[3]在模型設計方面一樣是採用 Pro/Engineer 繪圖軟體作為球頭形狀參數化設計的工具，以 Marc 分析軟體模擬球頭之碰撞分析，探討不同揮桿速度與不同擊球點之應力大小與變形量的差異。吳[4]則是採用電腦輔助設計軟體 I-DEAS 對球頭進行幾何形狀的參數化設計，用 LS-DYNA 有限元素分析軟體，模擬球與球頭的碰撞過程，並以田口方法得到最佳化的球頭模型之最佳厚度、容積與球頭質心，得到最佳的球頭甜蜜區與擊球位置，作為桿頭設計的依據。在球頭應力分析部份，Joseph and Larry[5]說明了結構的疲勞極限與安全係數求法。Okubo and Simada[6]則說明了高爾夫球頭受高爾夫球撞擊後，球頭打擊面所受之衝擊力大小大約介於 700~1800N 之間，可作為疲勞分析之參考依據。

在球桿振動特性探討部份則有王和黃[7]以有限元素分析法與實驗模態分析法來求得高爾夫球桿的模態參數與頻率響應函數，以模型驗證來確認架構球桿之有限元素模型適用性。王和黃[8]探討握把對球桿之振動特性影響，探討握把對球桿設計的影響程度。王和黃[9]另外探討球桿揮擊所產生的聲音品質，藉由三種不同聲音品質探討不同球桿揮擊時的擊球聲音品質，提供球桿擊球聲音品質的評估方式。

二、問題定義與分析目標

本文係採用大田精密股份有限公司所提供的 TYPE B 高爾夫球頭，進行有限元素分析與實驗模態分析與聲音量測分析。有限元素分析是採用殼元素來對球頭進行模態分析，求取 TYPE B 高爾夫球頭的模態參數，包括了自然頻率與振型；再對球頭進行簡諧分析，求取球頭的頻率響應函數。而球頭實驗模態分析，則是對球頭進行模態測試(modal testing)，以求得 TYPE B 高爾夫球頭之頻率響應函數及關連性函數，將所得的頻率響應函數做曲線嵌合(curve fitting)，進而得到球頭結構的模態參數，即自然頻率、阻尼比及振型，以對球頭結構進行模型驗證。由理論分析結果與實驗結果之模型驗證，探討球頭之有限元素模型的正確與否。再將實驗與理論之頻率響應函數與實驗得到之 Synthesize 結果比對，並探討理論與實驗振型的差異，對球頭有限元素模型進行適度的修正，得到可以代表實際球頭結構的理念有限元素模型。在聲音量測分析，則是探討球頭之振動與聲音頻譜特性，並與實驗分析結果作一比較，探討其關連性。

三、球頭之有限元素分析

本文採用 ANSYS 軟體對大田公司編號 TYPE B 高爾夫球頭進行有限元素分析，圖 1 為球頭的有限元素模型，係由 Pro/Engineer 繪圖軟體中得到高爾夫球頭幾何模型，再匯入 Ansys 軟體進行元素分割得之。採用殼元素以架構球頭的模型，模擬 free-free 邊界情況，進行球頭之有限元素模態分析(modal analysis)，求得 TYPE B 球頭的模態參數，再對球頭進行簡諧分析(harmonic analysis)，求取球頭的頻率響應函數。

四、球頭之實驗模態分析

首先將球頭打擊面分為 100 個實驗量測點如圖 2 所示，實驗方式是以橡皮筋將球頭懸掛於支撐架上，使球頭呈現自由邊界(free-free)狀態如圖 3 所示。以衝擊錘為驅動器，加速度計為感測器，將衝擊錘經由導線接於訊號分析儀(SigLab)之輸入模組，將加速度計經由導線接於輸入模組，以固定加速度計，移動衝擊錘的方式進行實驗，訊號經由導線傳輸到頻譜分析儀，透過 SCSI 卡介面將訊號分析儀以及應用 MEScope 連接成整個實驗架構。本實驗對球頭進行實驗模態分析，對球頭進行模態測試(modal testing)，求得球頭之頻率響應函數及關連性函數，將所得的頻率響應函數進行曲線嵌合(curve fitting)，進而得到球頭結構的模態參數，即自然頻率、阻尼比及振型，來對球頭結構進行模型驗證。

五、球頭之聲音頻譜量測

本文希望透過聲音實驗量測結果得到球頭聲音與振動之關係，藉此由球桿振動特性來改善球桿的聲音品質，進而嘗試訂定出球桿的聲音品質之評估指標。如圖 4(a)所示，球桿聲音頻譜量測方法是以實驗模態分析用之衝擊錘敲擊球頭，模擬球桿揮擊時之聲音響度，以便能明確紀錄球頭受力大小及其聲音頻譜，同時亦分別量測記錄球頭面振動之加速度響應及球頭之聲音輻射(sound radiation)響應，經由時間域與頻率域分析如圖 4(b)所示，得到球頭聲音頻譜特性，以做進一步之分析。圖 4(c)為聲音量測球頭打擊面之敲擊點位置圖。

六、結果與討論

探討 TYPE B 球頭結構之實驗與理論和實驗與聲音量測之比較結果，其中，理論與實驗之結果驗證包括：頻率響應函數、模態參數(即自然頻率、阻尼比及振型)。

(一) 實驗與理論分析之模態參數的驗證

表 1 為理論與實驗之自然頻率比較誤差與振型比較表，實驗與理論可以得到相當多的模態，在本節中取出相互對應的 13 組模態與振型做探討，由表中可以看出自然頻率百分比誤差在正負間變動，沒有完全偏向正或負，而振型圖也大致上吻合，可以判斷出球頭分析模型的正确性。其中 3910Hz 為第(1,1)模態，物理意義為球頭打擊面中心有一上下振動之振動模態；5860Hz 為第(2,1)模態，物理意義為球頭打擊面左右有一上下振動之模態振型。在理論分析中並無法求得阻尼比，但可以在實驗中進行參數估測求得阻尼比，如表 1 所示，各模態之阻尼比在 0.27~0.64 之間。

(二) 實驗與理論分析之頻率響應函數的驗證

圖 5 為實驗與理論之頻率響應函數比較圖，由圖 5(a) $i=36$ 、 $j=96$ ，表示輸入為第 36 點，輸出在第 96 點，其頻率響應函數稱為轉移頻率響應函數，圖中 3 條曲線分別為理論、實驗及合成 (Synthesized) 之頻率響應函數曲線，其中合成曲線為曲線嵌合得到的模擬曲線，可以看出實驗結果與曲線嵌合結果相當吻合，表示曲線嵌合正確。但理論頻率響應函數與實驗頻率響應函數吻合度比較時稍有差異，原因可能是因為球頭進行 ANSYS 理論分析時，是以殼元素來架構球頭有限元素模型，無法代表實際複雜結構的實際模型，造成理論與實驗的誤差；另一原因可能是因為實驗頻寬只取到 10K Hz，但有效頻寬僅至 4950 Hz，故 5000 Hz 以後的模態振型較不精確，不過由前節振型比較之吻合性，也可以看出有相當參考價值。

(三) 聲音量測與實驗分析之結果比較

圖 6 為 1/3 八音頻帶在不同敲擊位置具有類似頻譜趨勢比較圖，所對應之打擊位置如圖 4(c)，綜合討論如下：

1. 球桿之 1/3 八音頻帶則是在頻率為 4k Hz 與 6.3k Hz 時明顯偏高，可以更加精確知道影響 TYPE B 球桿之聲音頻譜主要頻率是 4k Hz 與 6.3k Hz 附近。
2. 在打擊面上中央(點 4、10)的 4k Hz 聲音頻譜較高，顯示 4k Hz 可能是 TYPE B 球桿的第(1,1)個模態。打擊面周圍部份(點 3、6)則是在 8k Hz 較高，顯示 8k Hz 可能是 TYPE B 球桿的第(2,1)個或(3,1)個模態。
3. TYPE B 球桿的第一點頻譜線性討論如下，除了點 3、6、8 之較高頻譜在 6.3k Hz 外，其餘各點都是在 4k Hz 有較高的頻譜，而 1k Hz~63Hz 頻譜向下下降的斜度差不多，大概都在 10dB 左右，成直線下降。

圖 7 為敲擊 TYPE B 第一點之線性頻譜圖， G_{aa} 與 G_{pp} 則為球頭面振動之加速度響應頻率。 G_{ff} 接近 white noise 之頻譜，為典型衝擊力之影響，在 4200 Hz 與 7900 Hz 有兩個低點，乃 $f(t)$ 之衝擊力接觸力時間所致。由 H_{af} 與 H_{pf} 可以更明確得知球桿的聲音輻射與球頭振動有極大的相關性，主要的聲音頻率在 4228 Hz 與 5587 Hz，這也能解釋說明 1/3 八音頻帶分析中，4kHz 及 6kHz 聲音較高之原因。

七、結論

本文探討高爾夫球頭之結構振動與聲音輻射之關連性分析，綜合結論如下：

1. 針對球頭分別作有限元素之模態與簡諧分析，並做實驗模態分析，得到模態參數與頻率響應函數，進行模型驗證。結果顯示有限元素分析結果與實驗結果在第(1,1)模態與(2,1)模態有不錯的吻合度，其他模態也算相當吻合，誤差原因可能是以殼元素架構的有限元素模型不足以代表實際的球頭模型。
2. 實驗模態分析結果與聲音量測結果比對呈現一致性，影響 TYPE B 球頭的主要聲音輻射模態是在第(1,1)個模態(4kHz 左右)，其次則是 6 kHz 左右(1,2)與 8kHz 左右(2,1)模態，得知影響 TYPE B 球頭聲音品質的主要頻率範圍是在 4k Hz~8k Hz 之間，未來在球桿的設計上則是要注意的重點。

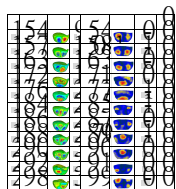
3. 目前在聲音品質實驗部份均是在實驗室內進行，以衝擊鎚敲擊球頭模擬球桿揮擊所產生的聲音，與實際現場的擊球聲音將有所落差，未來評估實驗之可靠度是值得深入探討的方向。

八、誌謝

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及相關技術資料以及經費資助，特此致謝。

九、參考文獻

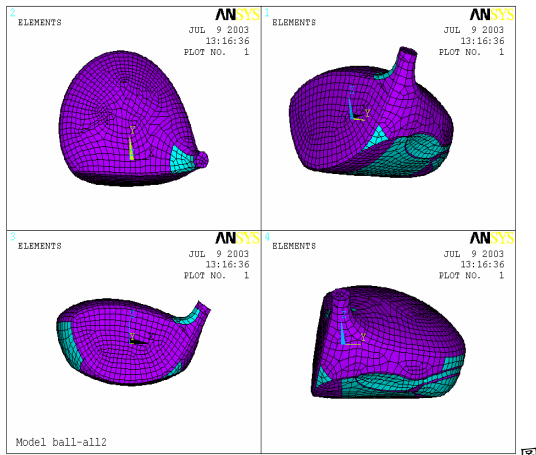
1. 邱佑宗，1998，「高爾夫球頭甜區計算」，中華民國力學會第二十二屆全國力學會會議論文集(二)，台南市，第395-400頁。
2. 胡宏昇，1995，「高爾夫球具之動態模擬分析」，碩士論文，國立中山大學，高雄。
3. 黎煥生，1994，「高爾夫球桿頭與球之碰撞分析及球桿頭之設計」，碩士論文，國立中山大學，高雄。
4. 吳世平，2001，「高爾夫桿頭厚度變化之碰撞效果分析」，碩士論文，國立中山大學，高雄。
5. Joseph, E. R., and Larry, D. M., 1983, *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill, Inc
6. Okubo, N., and Simada, M., 1990, "Application of CAE (Computer Aided Engineering) to Golf Club Dynamics," *Proceedings of the First World Scientific Congress of Golf 9th-13th*, pp. 270-273.
7. 王栢村，黃瑞光，1999，「高爾夫球桿振動模態參數之測定」，中華民國第二十三屆全國力學會會議論文集(二)，第457-464頁。
8. 王栢村，黃瑞光，2000，「握把對高爾夫球桿振動特性影響之分析」，中華民國第二十四屆全國力學會會議，論文編號：J-17。
9. 王栢村，黃瑞光，2000，「不同球頭之高爾夫球桿聲音品質分析」，中華民國音響學會第十三屆學術研討會論文集，第A47-A54頁。



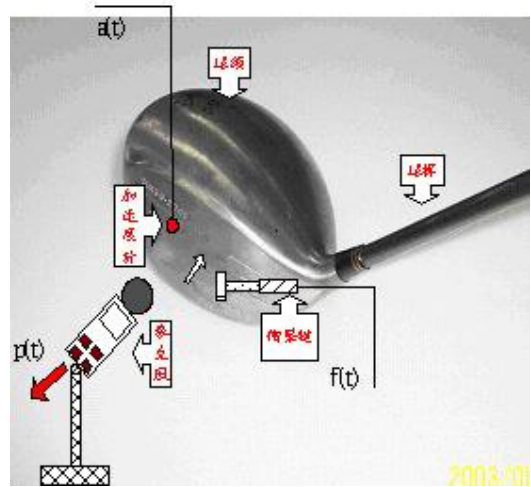
十、附錄(圖、表)

表 1、理論與實驗之自然頻率與振型比較表

模態	理論自然頻率	理論振型	模態	實驗自然頻率	實驗振型	頻率誤差 (%)	實驗阻尼比
7	3910.07(Hz)		4	3910(Hz)		0.00	0.65
8	4640.58(Hz)		5	4350(Hz)		6.68	



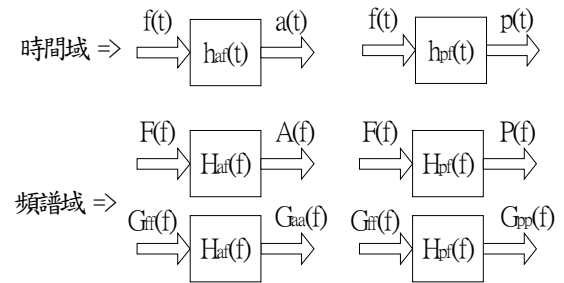
1、TYPE B 高爾夫球頭之有限元素模型



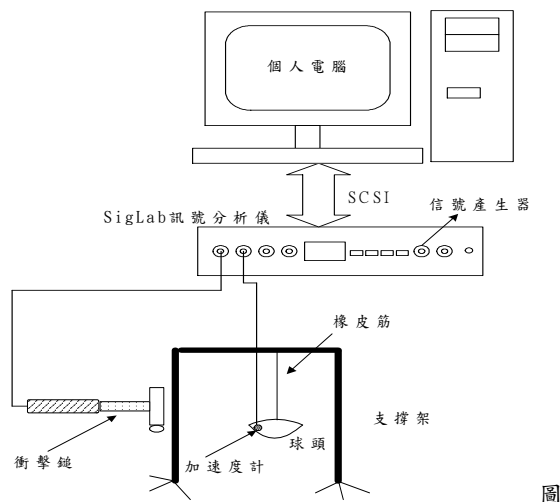
(a)、聲音量測實驗儀器架構



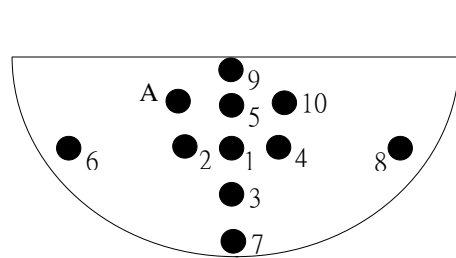
2、實驗量測規劃點示意圖



(b)、量測訊號分析方塊圖



3、實驗儀器架構示意圖



(c) 聲音量測敲擊點位置示意圖

圖 4、聲音實驗量測與訊號分析示意圖

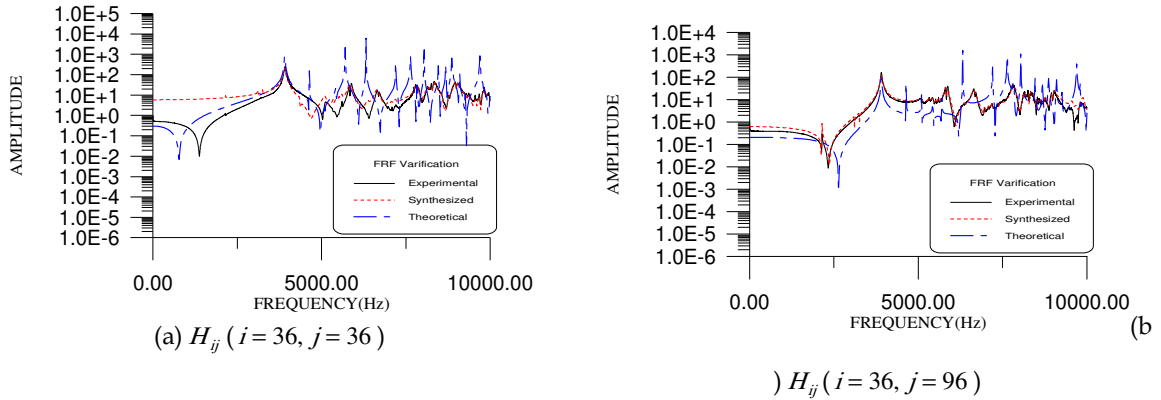


圖 5、實驗與理論之頻率響應函數比較圖

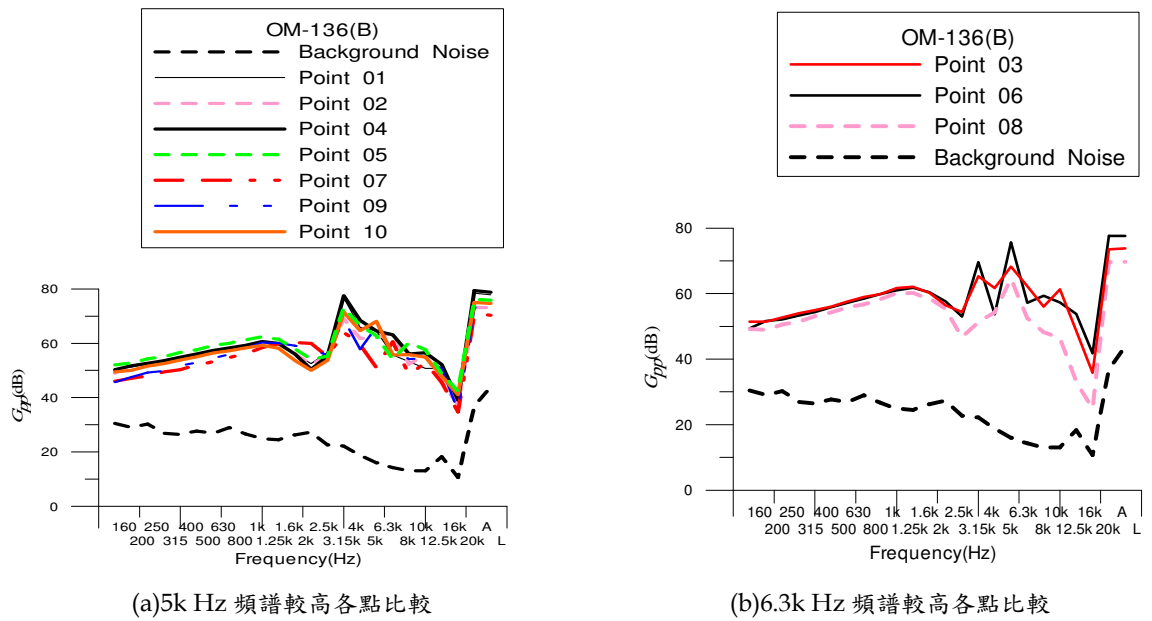


圖 6、TYPE B 球桿 1/3 八音頻帶各敲擊點聲音頻譜趨勢線性比較圖

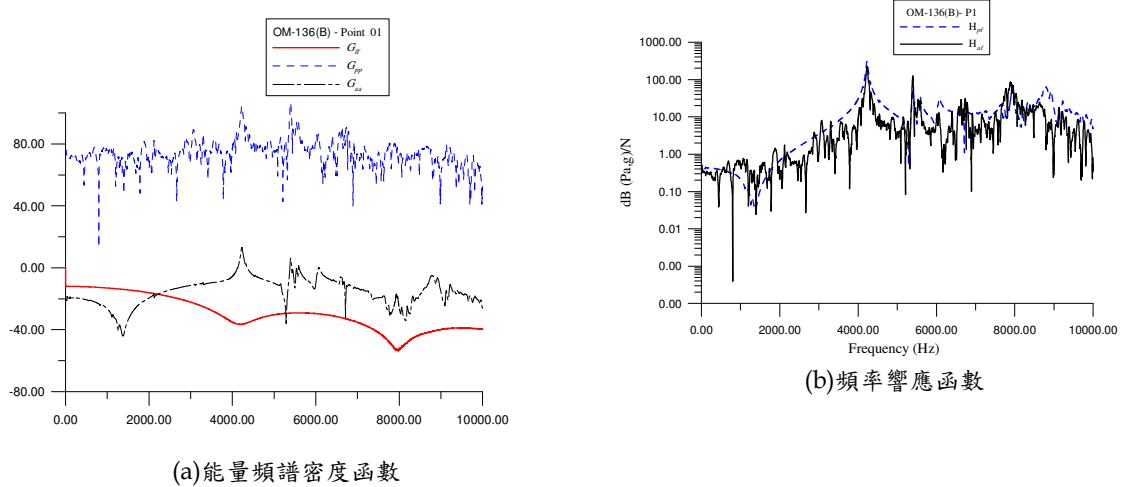


圖 7、TYPE B 球桿的第一點線性量測結果