

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

結構健康診斷及控制研究:大型結構實驗驗證-子計畫:應用類神經網路技術於  
房屋結構之非線性系統識別、損壞診斷以及健康監測(II)

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2625-Z-009-005-

執行期間： 94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

計畫主持人：洪士林

共同主持人：

計畫參與人員： 林宏宇、張巍羸

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學 土木工程學系(所)

中 華 民 國 95 年 12 月 1 日

## 摘要

結構物的系統參數如：自然頻率 (Natural Frequency)、振態阻尼比 (Damping Ratio) 為結構物的重要特性之一，若能得到結構物的系統參數，將能掌握結構物在風力或地震力影響之下的動力行為表現，亦可運用在結構物的健康檢測。本研究主要是採用倒傳遞類神經網路 (Back-Propagation Neural Network, BPN) 及希伯特-黃轉換兩種方法來識別結構物參數。倒傳遞類神經網路進行結構系統模態識別的架構主要為類神經網路及時間域分析技術所組成。使用地表加速度的資料以及各樓層的加速度反應作為類神經網路的訓練案例，設定與調整網路之適當的層數、自由度等參數後，配合著類神經網路的學習能力與疊代計算可得到網路權值。將訓練完畢的網路權植，代入動力方程式中即可估算出系統之動力特性。由黃鵬等人所提出的希伯特-黃轉換 (Hilbert Huang transform, HHT)，包含了經驗模態分解法 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 與希伯特轉換 (Hilbert Transform, HT)。經驗模態分解法將各感測器接收到的真實地震訊號分解成數個重要的內建模態函數 (Intrinsic Mode Functions, IMF)，配合使用帶通濾波器可得到各個模態的資訊，再由隨機遞減法 (Random Decrement Technique, RDT) 將得到的各個模態的反應訊號轉換成為自由震動衰減的訊號，最後以希伯特轉換得到瞬時的相位角與振幅，經由動力方程式的推導可求出結構物的阻尼比與自然頻率。本研究先以建立好的數值模型來測試此兩種方法，驗證是否皆能得到預期的答案，隨後以 Benchmark 模型在振動台上試驗的反應資料來進行測試，比較兩者所求出真實結構物的系統參數是否相近。在自然頻率識別的部分，兩者皆有不錯的是識別效果，而在阻尼比的識別上類神經網路依然可以得到準確的答案，希伯特黃轉換則會因為參數的改變得到差異較大的結果。然而，類神經網路對於雜訊過高的實驗案例會出現無法識別的現象，而希伯特黃轉換可藉由調整濾波器的參數得到識別結果。

關鍵詞：類神經網路；希伯特黃轉換；經驗模態分解法；系統識別；基準模型

## Abstract

The modal parameters of a structure, such as natural frequency and damping ratio, are the important characteristics of the structure as they are the key factors for the technology of structural health monitoring. Herein, two different approaches, artificial neural networks (ANNs) and Hilbert-Huang transform (HHT), are employed to identify these parameters of the structure under different external excitations.

The process of system identification using back-propagation neural network (BPN) consists of two submodels, artificial neural network model and time domain analysis technique. First, the dynamic responses of each floor and external excitation are used to train the ANN model. Following, the natural frequency and damping ratio of the structure can be computed via the time domain analysis with the trained weights of the network.

Hilbert-Huang transform consists of Empirical Mode Decomposition (EMD) and Hilbert Transform (HT). EMD is the method of signal processing, it can decompose the inputted signal to several Intrinsic Mode Functions (IMFs). Passing the first IMF to the bandpass filter, each mode responses can be obtained. The Random Decrement Technique is used to get the free vibration signal. Afterwards, the instantaneous phase angle and amplitude can be got by passing free vibration signal through HT. Following, the natural frequency and damping ratio of the structure can be computed via the derivation of dynamic equations.

In this study, a three-floor benchmark model with different configurations is employed as a testing structure. The numerical analysis and corresponding shake table test results with different configurations of the benchmark model are used to verify these two methods and the verification results are also compared. The results indicated that both approaches have good performance for identifying nature frequencies of variant benchmark models. For identification of damping ratios, ANN model also performs well, but HHT does not.

Keywords: Artificial neural networks (ANNs); Hilbert Huang transform (HHT) ; Empirical Mode Decomposition (EMD); System identification (SI); Benchmark model

## 壹、前言

二十一世紀的今天，隨著商業與科技的蓬勃發展，人類文明欲趨都市化，而產生顯著的人口集中現象，人們為了追求更方便與有效率的空間使用，以及工程師對高樓建築極限的挑戰，致使都會城市中高樓大廈林立，且伴隨著各大都會區之間的人車頻繁往來，城鄉機場港口之間的人力物流運輸，長距離高流量的交通需求大增，也使得捷運、大型橋樑、高速鐵路...等，大量的興建。而台灣正好處於環太平洋的地震帶西緣，因菲律賓板塊與歐亞大陸板塊長期處於碰撞狀態下，平均每年發生百餘次的有感地震。若在都市人口密集的地區，發生高規模的大地震，造成的傷亡與財物損失是令人難以想像的，幾年前的921大地震就是一個令人難以抹滅的慘痛經驗。為了避免地震對人們傷害，對結構物做非破壞檢測以進行補強修復，選擇使用合適的隔減震設備也將是勢在必行的；而在這些措施的執行使用之前，我們必須先對結構物做系統識別，來確認結構物的系統參數，如此才能對地震做出最有效的防範。

在本計畫前一階段的報告中，有多筆 Benchmark 模型在振動台上所量測的地震反應，以這些數據做為系統識別資料，應用兩種發展出來的方法，來比較是否能正確得到相同的系統參數。

### 1.1、研究背景

在過去的二十年間，類神經網路 (Artificial Neural Network, ANN) 已經逐漸發展成熟並且成功的應用在影像、文字、語音的辨識系統、礦床探測、製程監控、股票預測、財務分析、氣象預測、疾病診斷、土木工程...等領域之中。類神經網路主要具有下列之優點：

#### 1. 具有過濾能力與高容錯性：

在類神經網路中各個輸入與輸出的關係，並不是直接由網路中單一個節點所負責的，而是每一個節點都會映射給輸入-輸出模式一組權值。當網路中所有結點與對應的權值組合在一起時，才能夠映射出完整的輸入-輸出模式。因此，當某一節點所輸入要處理的訊號具有雜訊或處理的數據不完整時，此一輸入對網路所造成的影響，將不會導致嚴重的錯誤。

#### 2. 具有適應性學習能力：

每種類型的類神經網路都有其特定的學習演算法，經由演算法可調整節點與節點之間的連接權重值，藉由不斷地調整權重值，直到產生最佳的輸入-輸出模式，這種能力稱之為適應性學習能力。

#### 3. 多輸入輸出之系統：

輸入層與輸出層可以具有任意數目的節點，可方便我們運用在多自由度的系統上。因此使其無論在訊號處理或系統識別控制及複雜的映射 (mapping) 等問題上，成為了一種強有力的工具。

希伯特黃轉換 (Hilbert Huang Transformation, HHT) 為任職於美國航空暨太空總署

(NASA) 大華府地區學者黃鐸博士近幾年於英國皇家學會(The Royal Society)期刊上所發表的發明[1]，該研究榮獲 NASA 所頒發的年度發明獎，也因該研究的成就，使其於 2000 年獲選為美國國家工程院院士，2004 年獲選為台灣中央研究院院士。希伯特黃轉換的優勢在於可處理非線性和非穩態資料，過程主要包含了兩個部分，有前處理的經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)以及之後的希伯特轉換(Hilbert Transform, HT)。此方法目前同樣已經廣泛的運用於氣候、水利、地震工程、地球物理探測、潛艇設計、結構損害偵測、衛星資料分析、血壓變化和心律不整等各項研究之中。

因此本研究的主要目的在於建立以此兩種方法為基礎的結構物系統識別程序，並驗證比較這兩種方法的精確性，且於實地案例中能否得到同樣的結果。

## 1.2、文獻回顧

如果把結構物視作一個系統，則可利用結構矩陣與結構動力等概念建立出其等效的數學模型，當此系統接收到一個外部的輸入訊號時，如地震力、風力…等，將可從結構物的實際量測或數值模型的推導對應得到此一結構物反應的輸出訊號，如：樓層的位移、速度、加速度。而所謂的系統識別就是利用輸入訊號與輸出訊號之間的關係反推出其等效的數學模型進而得到此結構物系統的各項參數。所求得的參數可用來檢驗結構的建造是否如同我們設計時所預期，亦可以用來評估建築物經歷過地震、強風或材料的老化後的強度及其安全性，可做為補強的依據，來確保結構物的安全。

一般的結構系統識別依據描述系統的方式，可分為參數模式[2]與非參數模式識別。若從識別時所用的資料，可分為時間域與頻率域識別。又依量測數據之處理程序，則系統識別技巧可再概分成兩類，線上模式(on-line model)及離線模式(off-line model)。所謂參數識別是指識別代表該結構物系統的數學模式中，具有物理意義之參數，像是一般在結構動力分析裡的自然頻率 $\omega$ 及阻尼比 $\xi$ 等。至於非參數的識別乃對系統不作任何物理或數學模型之假設，僅對已知的輸入和輸出資料之間以一組相關的數學函數來連結，而此函數的係數，即為識別的對象，是沒有明確的物理意義。時間域的系統識別是直接將所量測的時間域反應來做系統識別的資料，而頻率域系統識別法則是先將時間域反應的資料轉換到頻率域再進行系統識別，頻率域識別若在時變或非線性系統，可以移動視窗方式找尋等值線性系統參數，優點為計算快速，缺點則是精確度受限於所收集資料長短和取樣頻率大小。時間域識別，需選擇適當數學模式和合理的誤差準則(Error Criterion)，再運用數值方法識別出相關參數。線上模式為數據進來一筆；即進行系統識別一次，其分析技巧架構於遞迴公式(Recursive Formula)[3]。而離線模式，則是將所有量測到的數據記錄完成後，再進行系統識別。線上分析模式，雖有減少數據儲存時間、計算快速及可分析時變系統之優點，但於分析線性非時變系統，則其精度一般不如離線分析模式。本研究所應用的兩種方法，都是屬於離線的時間域參數識別。

許多的系統識別方法已成功地應用於土木工程，由於估算方法之多樣性，有不少專家學者即針對各種方法進行比較，如Yun 和Shinozuka [4]則針對傳統最小平方差法、工具變數法、最大可能機率法(Maximum Likelihood Algorithm)和有限訊息最大可能機率法

(Limited Information Maximum Likelihood Method)應用於多重輸入／輸出系統建立ARX(Auto Regressive eXogenous) 模式之比較。Ghanem 和Shinozuka [5]、[6]亦對推廣卡氏過濾法(Entended Kalmen Filter Algorithm)、最大可能機率法、遞迴最小平方差法(Recursive Least Square Method)、和遞迴工具變數法應用於多重輸入／輸出系統建立ARX模式比較。Saridis [7]針對線上分析法之互相關法(Cross Correlation Algorithm)、一階隨機近似法(First Order Stochastic Approximation Algorithm)、二階隨機近似法(Second Order Stochastic Approximation Algorithm)、最大可能機率法、最大事後機率法(Maximum Posteriori Probability Algorithm)、推廣卡氏過濾法應用於線性單一輸入／輸出系統(SISO)之比較。

類神經網路之相關研究已有近五十年的歷史，最近二十年逐漸發展成熟並應用在許多的領域之中。Rosenblatt (1957) 提出第一種神經網路模式-感知機(Perceptron) 模式，它由二元值神經元組成，以此模仿生物的大腦及視覺系統，主要用於理論研究與樣本識別。Widrow和Hoff (1960) 提出自適應線性元件(Adaptive Linear Element) 模式，它是一種連續值的線性網路。Rumelhart等人(1985) 提出著名的倒傳遞類神經網路模式(Back-Propagation Network, BPN)，此網路模式之基本原理是利用最陡坡降法(Gradient Steepest Descent Method) 的觀念，將誤差函數予以最小化。Kohonen (1980) 提出組織映射圖(Self-Organizing Map) 模式，並且在1988從該模式衍生出學習向量量化網路(Learning Vector Quantization Network)。Hinton 和Miller (1988) 對霍普菲爾-坦克神經網路在解決最佳化問題時，其收斂最小值和參數設定等問題加以改善。Barnard (1992) 探討訓練類神經，網路值目標函數最佳化之各種方法，並提出一個以隨機的觀念所建立的序列演算法。Hagan和Menhaj (1994) 根據Kollias和Anastassiouh所建議的概念，提出改良式倒傳遞演算法，此法是將應用與非線性最小平方法的Levenberg-Marquardt演算法，配合傳統倒傳遞演算法來訓練前向式類神經網路。Flood和Kartam (1994) 提出將類神經網路應用於土木工程上的明瞭性、使用性以及實用性方面的論述，並利用倒傳遞前向式網路訓練，來解決結構分析問題。Narendra和Parthasarathg(1990) 曾驗證類神經網路能有效地使用至非線性動力系統識別中。Wu 等人[8]以一系列三層樓鋼構架之數值模擬資料，利用倒傳遞神經網路(Back-Propagation Neural Network, BPN) 來描述該結構的破壞狀態。該研究以加速度反應富氏譜以及桿件勁度，分別作為其BPN 之輸入及輸出變數。而Elkordy 等人[9]則以模態作為其BPN 之輸入變數，以偵測模擬的結構破壞。Szewczyk 與Hajela [10]則應用反傳遞神經網路(Counter-Propagation Neural Network, CPN)，以剛架之靜定位移來估算桿件勁度的折減情形。Pandey 與Barai [11]應用多層感知器(Multilayer Perceptron)，以數值模擬資料偵測桁架橋之破壞。Zhao 等人[12]以靜定位移、自然頻率、以及模態，應用CPN 來分別偵測梁和剛架的破壞位置。Masri 等人[13]根據非線性系統識別，建立了一套破壞偵測的方法。其方法裡採用了實驗中所量測到的位移、速度、加速度反應，以及輸入外力等資料，作為網路訓練之用。傳統的類神經網路多為一非參數系統識別之方法，而本文則是利用ARX來模擬結構系統的運動方程式，建立出參數系統識別之方法，而推出結構的系統參數。

希爾伯特黃轉換有別於傳統快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)只能處理

線性且穩態訊號的技術，及之後發展的像是小波和Wanger-Ville distribution [14][15] 用來處理非穩態但線性的資料，還有像是Tong [16]、Kantz和Schreiber [17]、Diks [18] 提出數種可以分析非線性但穩態的系統，希伯特黃轉換則是一種可以處理非線性非穩態時間序列資料的分析方法。其主要包含了經驗模態分解法與希伯特轉換兩個步驟。EMD的過程是利用資料變化的內部時間為尺度，將資料分解成多個內建模態函數(Intrinsic Mode Function, IMF)的疊加，這樣可以看作是將原來的訊號以IMF 當做基底展開，它也可以是非線性或非平穩性的，完全基於原來訊號的性質。這樣的過程可以使原始訊號的複合波拆解成單一波，如此一來對每個IMF都將具有一個良好的希伯特轉換對，而可得到訊號的頻率、振幅、相位角。Ruzzene [19]等證明當模態的自然頻率非常接近時，希伯特黃轉換比小波更有能力處理，Yang和Lei [20]提出了一種以HHT為基礎的方法來分析多自由度的線性結構，Vincent、Hu和Hou [21]比較經驗模態分解法與小波分析在結構物的損害偵測，Yang和Lei [22]~[25]延伸先前的研究，利用自由振動的加速度資料，不止能識別線性結構物的自然頻率、阻尼係數更能推演到質量、勁度、阻尼矩陣。Yang和Lei [26]提出了整合使用經驗模態分解法、隨機遞減法、希伯特轉換處理高樓風力的振動資料，來做系統識別，Yang、Lin、Pan和Huang [27][28]等人將經驗模態分解法搭配帶通濾波器來求得各模態的系統參數，Yang、Lin與Pan [29]應用希伯特黃頻譜來檢測的損害程度，XU、CHEN和ZHANG [30]使用希伯特黃轉換搭配隨機遞減法分析深圳的地王商業中心於強颱風約克的侵襲下所記錄的資料，而得到結構物的系統參數，Yang、Lin和Huang [31]運用希伯特黃轉換來識別結構物損傷後的自然頻率和阻尼比，Banfu Yan 和 Ayaho Miyamoto [32]比較小波與希伯特黃轉換在系統識別上優缺點。Huang & Shen [33]又提出了完整的希伯特黃轉換原理解說與應用及其還之後要深入研究改進的部分。而針對實際的地震資料目前尚未有人提出具體的測試結果，本研將以Benchmark振動台的資料為測試的案例，來驗證此方法的可行性。

## 貳、類神經網路於系統識別之理論與架構

類神經網路 (ANN) 近年來被快速地廣泛發展應用於各領域，主要其乃是一個具有計算能力的多層網路系統，原理在於使用大量簡單而具有平行處理能力的人工神經元來模擬人腦的學習行為，所以常被拿來應用於人工智慧上，而本文將利用其學習能力，在多次的疊代後，識別出結構物的系統參數。本章首先是倒傳遞類神經網路的介紹，接著是 L-BFGS 演算法與線搜尋演算法之理論分析，最後是運用於系統識別之架構。

### 2.1、倒傳遞類神經網路

類神經網路是由生物神經網路得到靈感所發展出的一種系統；它由一些相互連結在一起的簡單處理單元（結點）所組成，連結的權值 (weights) 代表儲存在系統的資訊並用來表示連結的強度，這些權值掌握了使類神經網路產生功能的關鍵。在各種不同的類神經網路模式中，使用誤差倒傳遞演算法之向前饋入、多層、監督式的神經網路，即所謂的倒傳遞網路 (Back-Propagation Network, BPN) [34]，由於它的簡單性，是目前應用最普遍的類神經網路學習模式。一個類神經網路在可以應用之前，必須先從一筆存在有一對輸入值及輸出值的案例或資料庫來訓練。

如圖(2.1)所示，BPN 的網路架構包含了一層的輸入層、一或多層的隱藏層以及一層的輸出層。而每一層之節點皆與其鄰層的節點相連接。通常隱藏層之結點數目越多收斂越慢，但可達到更小的系統誤差值，當超過一定數目後，再增加則對降低系統誤差幾乎沒有幫助，只是徒然增加執行之時間。另外值得一提的是，Hecht-Nielsen [35] 在其研究中證明，一層的隱藏層已足夠解決大部分實際應用上的問題。因此，於本報告中之各個神經網路將只使用一層的隱藏層。在一類神經網路能夠使用之前，它必須先經過訓練的過程。利用 BP 學習演算法的訓練過程，一般包含了三個階段。第一階段稱之為資料向前饋入 (data feedforward)。輸出層中第  $i$  個節點的計算輸出值  $y_i$  定義如下，見圖 (2.1)：

$$y_i = g\left(\sum_{j=1}^{N_h} (w_{ij} g\left(\sum_{k=1}^{N_i} v_{jk} x_k + \theta_{vj}\right) + \theta_{wi})\right), \quad i=1, 2, \dots, N_o, \quad (2.1)$$

其中  $w_{ij}$  為隱藏層及輸出層節點之間的連接權植； $v_{jk}$  為輸入層及隱藏層節點之間的連接權植； $\theta_{wi}$  與  $\theta_{vj}$  為轉換函數  $g$  之門檻值； $x_k$  為輸入層第  $k$  個節點的輸入值。而  $N_i$ 、 $N_h$ 、及  $N_o$  則分別為輸入層、隱藏層、及輸出層的節點數目。而轉換函數之採用可取線性或非線性。

第二階段稱之為誤差向後推導 (error back-propagation)。在訓練的過程中，以一系統誤差函數來監測網路的學習表現。而此函數通常定義如下：

$$E(\mathbf{W}) = \frac{1}{2P} \sum_{p=1}^P (\tilde{\mathbf{Y}}_p - \mathbf{Y}_p)(\tilde{\mathbf{Y}}_p - \mathbf{Y}_p)^T, \quad (2.2)$$

其中  $P$  為學習的案例數。 $\tilde{\mathbf{Y}} = (\tilde{y}_1 \tilde{y}_2 \dots \tilde{y}_i \dots \tilde{y}_{N_o})$ ； $\mathbf{Y} = (y_1 y_2 \dots y_i \dots y_{N_o})$ ， $\tilde{y}_i$  為輸出節點  $i$



之期望值，而

$$\mathbf{W} = (v_{11}v_{12}\cdots v_{jk}\cdots v_{N_h N_i} \theta_{v1} \theta_{v2}\cdots\theta_{vN_h} w_{11}w_{12}\cdots w_{ij}\cdots w_{N_o N_h} \theta_{w1} \theta_{w2}\cdots\theta_{wN_o})。$$

訓練的最後階段為權值的修正。標準 BP 演算法係基於最陡梯度法 (gradient descent method) 並使用固定的搜尋步幅 (step length) 或學習速率 (learning ratio) 來訓練網路。其權值的修正如下：

$$\mathbf{W}^{(k+1)} = \mathbf{W}^{(k)} + \Delta\mathbf{W}^{(k)} \quad (2.3)$$

$$\Delta\mathbf{W}^{(k)} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}^{(k)}} \quad (2.4)$$

其中  $\eta$  為學習率，一般介於 0~1 之間。上標 ( $k$ ) 表示迭代第  $k$  次，亦即網路經過  $k$  次的學習。BP 演算法中最小化搜尋方向是由負的誤差函數梯度決定，這種搜尋方向上的搜尋步幅由固定的學習速率決定，因此常常導致學習之系統誤差不穩定以及學習速度緩慢之困擾。

## 2.2、L-BFGS 類神經網路

由於 BP 神經網路通常需要大量的學習時間，而且其網路收斂速度非常倚靠學習率的選擇。因此，本報告中，將採用另外一種基於最小記憶體之 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) [36] 假牛頓二階 (Quasi Newton second-order) 法，且結合非精確的線搜尋演算法 (inexact line search algorithm)，所發展的可調式 L-BFGS 學習演算法 [37]，來使得學習的過程更具有效率。在傳統的 BFGS 法中，誤差函數  $E$  的 Hessian 反矩陣  $\mathbf{H}_{k+1}$  可經由下式而逼近。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{k+1} &= (\mathbf{I} - \rho_k \mathbf{s}_k \mathbf{y}_k^T) \mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \rho_k \mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T) + \rho_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \\ &\equiv \mathbf{V}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{V}_k + \rho_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中

$$\rho_k = 1 / \mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k \quad (2.6)$$

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{I} - \rho_k \mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T \quad (2.7)$$

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{W}_{k+1} - \mathbf{W}_k \quad (2.8)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k \quad (2.9)$$

$$\mathbf{g}_k = \frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}} \quad (2.10)$$

在本法中，僅需儲存  $\mathbf{s}_k$  及  $\mathbf{y}_k$  向量，而不像在 BFGS 方法中需建立矩陣  $\mathbf{H}_k$ 。首先先將這些向量定義好，然後從最近幾次迭代的資料中，動態地 (dynamically) 更新近似 Hessian 矩陣

之反矩陣。其優點為簡化計算與減少儲存空間。因此，最後一個步驟之權值調整修正如下：

$$\mathbf{W}^{(k+1)} = \mathbf{W}^{(k)} + \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (2.11)$$

其中  $\alpha_k$  為搜尋步幅；而  $\mathbf{d}_k$  為搜尋方向，其定義如下

$$\mathbf{d}_k = -\mathbf{H}_k \mathbf{g}_k + \beta_k \mathbf{d}_{k-1} \quad (2.12)$$

$$\text{其中 } \beta_k = \frac{\mathbf{y}_{(k-1)}^T \mathbf{H}_{(k-1)} \mathbf{g}_{(k-1)}}{\mathbf{y}_{(k-1)}^T \mathbf{d}_{(k-1)}} \quad (2.13)$$

L-BFGS 學習演算法在學習的過程中非精確線搜尋演算法來調整搜尋步幅，而不使用固定之學習速率。非精確線搜尋演算法是基於下列三個連續的步驟：建立區間 (Bracketing)，分割 (Sectioning)，及內插 (Interpolation)。因此，搜尋步幅  $\alpha_k$  在每一次迭代過程中需要滿足下列條件[37]：

$$\begin{aligned} E(\mathbf{W}^{(k)} + \alpha_k \mathbf{d}_k) &\leq E(\mathbf{W}^{(k)}) + \beta \alpha_k (\nabla E(\mathbf{W}^{(k)})^T \mathbf{d}_k) \\ \beta &\in (0,1) \text{ and } \alpha_k > 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\nabla E(\mathbf{W}^{(k)} + \alpha_k \mathbf{d}_k)^T \mathbf{d}_k \geq \theta (\nabla E(\mathbf{W}^{(k)})^T \mathbf{d}_k) \quad \theta \in (\beta,1) \text{ and } \alpha_k > 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla E(\mathbf{W}^{(k)} + \alpha_k \mathbf{d}_k)^T \mathbf{d}_{(k+1)} < 0 \quad (2.16)$$

所以，可調式的 L-BFGS 學習演算法可解決標準 BP 演算法裡以試誤法選擇學習速率的問題。

### 2.3、線性結構系統之類神經網路識別架構

在一般之地震反應監測系統中，通常所量測的多為結構加速度反應。因此，以這些量測的加速度資料用來訓練類神經網路，待該網路測試收斂至穩定時，將其學習完畢之權值，拿到系統識別的程式之中，便可輕易的得到系統的動態特性。

本研究所採用的類神經網路架構如圖(2.1)所示。其中

$$f_l(t-i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2.17)$$

表示在  $(t-i)$  時刻下，第  $l$  個輸入自由度之地表加速度。而

$$\ddot{x}_k(t-j), \quad j = 0, 1, 2, \dots, m \quad (2.18)$$

表示在  $(t-j)$  時刻下，第  $k$  個自由度的加速度觀測量。因此，由網路架構圖可知，本報告中採用了三層的倒傳遞網路架構，輸入層取地震前  $(t-i)$  個時刻的外力輸入與前  $(t-j)$  個時刻的觀測自由度加速度反應值，作為網路輸入變數，輸出層則取  $t$  時刻各觀測自由度的加速度反應值，作為網路的輸出變數，而隱藏層為一層。學習演算法則採用了前面所述的 L-BFGS 學習法則。另外，本研究所採用的轉換函數如下式所示：

$$g(y) = \begin{cases} 1 & \text{if } y > 1 \\ y & \text{if } -1 \leq y \leq 1 \\ -1 & \text{if } y < -1 \end{cases} \quad (2.19)$$

值得一提的是，於訓練網路前，通常會將訓練數據加以正規化。因此，在整個網路運算過程中， $|y|$  值很少會大於 1。

確立類神經網路架構為本模式之重點所在。首先，吾人必須收集地震反應資料作為訓練範例，加以各種合理之網路架構測試。在這過程之中，吾人需決定之重要因素有幾個地方：

1. 時間延滯的採用：所謂「時間延滯」，即式(2.17)與(2.18)中採用之  $m$  與  $n$  值。其在類神經網路收斂與系統識別之準確度上有極重要之關係。一般而言， $m$  與  $n$  若取的越大，對本模式效果會越佳；但是相對的，網路訓練之時間將消耗越久，識別所得之準確度提昇亦不大。
2. 隱藏層結點數的選擇：節點數之選擇依據問題而定，一般以試誤法來處理。在誤差容許的範圍下，盡量減少其數目，以降低網路學習之時間。
3. 訓練資料數目的多寡：對類神經網路而言，資料之多寡即訓練案例數目之增減。一旦有著較充足之資訊作分析，類神經網路可以在搜尋的空間中穩定地找到較佳解。然而數目的多寡同樣主宰了網路學習的時間。一般情況下，常取資料中較具代表性之一段資料作為訓練案例即可，如此既可造成資料失真，亦可減少訓練的時間。

於是，根據類神經網路架構的程序，利用量測資料加以訓練之，以獲得適當的網路架構與節點連接權值。而系統的動態特徵便可由這些連接權值以系統識別程序求得[38][39]。

## 2.4、模態參數估算程序

當完成網路訓練之後，網路的輸出輸入關係便可描述該系統的動力行為。依據本研究之網路架構見圖(2.2)，網路輸出與輸入之關係可近似地表示成如下：

$$\{Y\} = [W][V]\{X\} + ([W]\{\theta_v\} + \{\theta_w\}) \quad (2.20)$$

其中

$$\{Y\} = (\ddot{x}_1(t), \ddot{x}_2(t), \dots, \ddot{x}_k(t))^T ; \{X\} = (\bar{X}F)^T \quad (2.21)(2.22)$$

又

$$\bar{X} = (\ddot{x}_1(t-1) \ \ddot{x}_2(t-1) \ \dots \ \ddot{x}_k(t-1) \ \ddot{x}_1(t-2) \ \ddot{x}_2(t-2) \ \dots \ \ddot{x}_k(t-2) \ \dots \ \ddot{x}_1(t-m) \ \ddot{x}_2(t-m) \ \dots \ \ddot{x}_k(t-m)), \quad (2.23)$$

$$F = (f_1(t) \ f_2(t) \ \dots \ f_l(t) \ f_1(t-1) \ f_2(t-1) \ \dots \ f_l(t-1) \ \dots \ f_1(t-n) \ f_2(t-n) \ \dots \ f_l(t-n)) \quad (2.24)$$

而矩陣  $[W]$  與  $[V]$  內之元素為  $w_{ij}$  與  $v_{jk}$ 。向量  $\{\theta_w\}$  與  $\{\theta_v\}$  內之元素為  $\theta_{wi}$  與  $\theta_{vj}$ 。將式(2.20)

加以展開，可得

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_k(t) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^m \hat{W}_1^{(i)} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t-i) \\ \ddot{x}_2(t-i) \\ \vdots \\ \ddot{x}_k(t-i) \end{Bmatrix} + \sum_{j=0}^n \hat{W}_2^{(j)} \begin{Bmatrix} f_1(t-j) \\ f_2(t-j) \\ \vdots \\ f_l(t-j) \end{Bmatrix} + \{C\} \quad (2.25)$$

$$\text{其中 } \begin{bmatrix} \hat{W}_1 & \hat{W}_2 \end{bmatrix} = [W][V] \quad (2.26)$$

$$\{C\} = [W]\{\theta_v\} + \{\theta_w\} \quad (2.27)$$

$$\hat{W}_1 = [\hat{W}_1^{(1)} \hat{W}_1^{(2)} \dots \hat{W}_1^{(n)}] \quad (2.28)$$

$$\hat{W}_2 = [\hat{W}_2^{(0)} \hat{W}_2^{(1)} \dots \hat{W}_2^{(m)}] \quad (2.29)$$

式(2.25)與時間序列模式之 ARX 相似，而 ARX 可對等於結構系統的運動方程式。因此，結構之動力特徵便可由 AR 之係數矩陣而求得[38]。根據網路之權值矩陣建立以下矩陣：

$$[G] = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \\ \hat{W}_1^{(n)} & \hat{W}_1^{(n-1)} & \dots & \hat{W}_1^{(2)} & \hat{W}_1^{(1)} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

於是從  $[G]$  矩陣之特徵值與特徵向量，便可計算出系統之模態參數[39]。今假設  $\lambda_k$  與  $\{\psi_k\}$  分

別表示  $[G]$  的第  $k$  個特徵值與特徵向量。而  $\lambda_k$  通常為複數，可表示為  $a_k + ib_k$ 。則相對應的自然頻率與振態阻尼比可經由下列式子計算之。

$$\tilde{\gamma}_k = \sqrt{\sigma_k^2 + \gamma_k^2} \quad (2.31)$$

$$\xi_k = -\sigma_k / \tilde{\gamma}_k \quad (2.32)$$

其中  $\tilde{\gamma}_k$  為擬自然振動頻率，而  $\xi_k$  為振態阻尼比。 $\gamma_k$  與  $\sigma_k$  則根據下列式子決定。

$$\gamma_k = \frac{1}{\Delta t} \tan^{-1} \left( \frac{b_k}{a_k} \right) \quad (2.33)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{2\Delta t} \ln(a_k^2 + b_k^2) \quad (2.34)$$

其中  $1/\Delta t$  為測量時的採樣頻率。

由於  $[G]$  矩陣本身之特殊結構，使得其特徵向量之間有以下的關係：

$$\{\Psi_k\} = (\{\Psi_k\}_1^T, \lambda_k \{\Psi_k\}_1^T, \lambda_k^2 \{\Psi_k\}_1^T, \dots, \lambda_k^{n-1} \{\Psi_k\}_1^T)^T \quad (2.35)$$

其中  $\{\Psi_k\}_1$  為相對於自然頻率  $\tilde{\gamma}_k$  之複數模態。

以上的推導過程中，乃基於類神經網路僅一層的隱藏層。然而，吾人只要將式(2.25)中  $\hat{W}_1^{(i)}$ 、 $\hat{W}_2^{(j)}$ 、及  $\{C\}$  稍作修正亦可將上列公式推展至多層隱藏層的情況。

## 2.5、類神經網路之預測誤差

當結構系統在外力作用下仍為線性，且其模態參數無明顯改變時，可根據前幾段時刻所測量的反應及輸入，建立一個符合線性結構系統的類神經網路識別架構，如此將能夠準確地，預測目前的結構反應。然而，若此時結構系統有所破壞或是退化的情形發生，則結構系統便會呈現出非線性的行為。若以一健康、線性結構所建立的網路來預測此時的結構反應，便會導致有較大的預測誤差。由 Masri 等人[13]所提出的指標可作為量化這些誤差的工具。而為了簡單呈現，本報告僅採用各自由度預測值與實際量測值之間的平均絕對誤差 (mean absolute error, *MAE*)，作為網路預測誤差的表示。*MAE*之定義如下：

$$MAE(i) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |y_{im}(t) - y_{ip}(t)| \quad (2.35)$$

其中  $i$  表示第  $i$  個自由度，而  $y_{im}$  與  $y_{ip}$  分別為第  $i$  個自由度上的正規化量測反應與預測反應。

## 參、希伯特黃轉換於系統識別之基礎理論與架構

近年來由黃鐸博士等人發展出一種新的訊號處理方法，它可以處理頻率域與時間域的資料。該方法首先是利用經驗模態分解法(EMD)將訊號分解成數個內建模態函數，如此一來每個內建模態函數將會是良好的希伯特轉換對，接著我們對每個內建模態函數進行希伯特轉換，如此將可以得到頻率域與時間域的分解訊號，這樣的過程我們稱之為希伯特黃轉換。該方法是可適用於非穩態的訊號，而吾人將嘗試以此方法為基礎來分析多自由度的結構中的自然頻率以及阻尼比。在利用希伯特黃轉換於多自由度線性系統的識別的過程中，自由振動(Free Vibration)的訊號是吾人所需要的，我們第一可以利用衝擊載重可以直接求得結構物自由振動的反應，第二若於現地的風力或地震力外擾的情況下，吾人必須搭配使用隨機遞減法來求得各自由度的自由振動訊號。接下來可以利用帶通濾波器的技術來處理得到的訊號，如此將可分離求得每個模態反應，將各個模態的反應透過經驗模態分解法，分別求出每個模態的第一個內建模態函數，將此內建模態函數經由希伯特轉換後可以得到其瞬時相位角與瞬時震幅對時間的關係曲線，最後使用最小平方法來近似求得的瞬時相位角與瞬時震幅的對數值，透過簡單的計算，就可以求得多自由度系統中每個模態的自然頻率與阻尼比。本章前幾節將介紹希伯特黃轉換相關理論，與隨機遞減法，之後為運用在系統識別的架構。

### 3.1、簡介希伯特黃轉換

希伯特黃轉換(HHT)為1998年美國太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的黃鐸博士所發表，其方法第一步是先將實驗所得之歷時訊號由經驗模態分解法，過程是以不同的內部資料時間為尺度將能量直接萃取，如此訊號分解而產生數個內建模態函數，而被分解出來的訊號就可以為非線性或非平穩性，如此一來這些分量依就保留了原來訊號的物理特性，因此該分析方法對非線性(Non-linear)或非穩態(Non-stationary)之歷時訊號亦有不錯的解析。經過分解後的每個內建模態函數將是良好的希伯特轉換對，吾人也將可由此得到其瞬時頻率及振幅隨時間之分佈，使訊號能表現瞬時變化的訊息與特性，稱為希伯特黃轉換。在黃鐸博士所提出的經驗模態分解法曾驗證過該法具有完整性、正交性、局部性及可適性等之特性，因此也使得其在訊號處理中有著極大的優勢。圖(3.1)所示為希伯特黃轉架構之流程圖。

1. 完整性：確保展開之精確度。
2. 正交性：保持能量的正定及避免能量不保守。
3. 局部性：使訊號表現瞬時變化的特性。
4. 可適性：適應暫態、非線性及非穩定性之系統條件。

### 3.2、即時頻率(Instantaneous Frequency)與希伯特轉換

在介紹經驗模態分解法前，須先瞭解何謂內建模態函數，而在說明內建模態函數前必

須先明確的定義即時頻率。即時頻率為分量函數所必要滿足的限制條件，而符合這些限制條件的函數，就是所謂的內建模態函數。經驗模態分解法的目的即將原始訊號分解成多個內建模態函數。

即時頻率的意義一直以來是廣受討論，1995年Cohen[40]提出了一個特殊單一分量訊號的觀念，才使即時頻率有了一個具體的概念。在傳統的傅立葉分析中對於即時頻率的定義以正弦及餘弦調和函數來做為基底，並且振幅是固定不變，即時頻率表示每一瞬間的頻率值。就傅立葉分析而言，因為取樣的訊號必須大於一個完整的震盪周期，因此最少要有一個完整的正弦波或餘弦波震盪周期來定義局部的頻率值。如此一來，對於頻率值隨著時間改變的非穩態訊號而言是不合理的，因此我們藉助希伯特轉換將使訊號得以解析。對任意的時間序列  $X(t)$ ，可以得到它的希伯特轉換  $Y(t)$ ，如下：

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(t')}{t-t'} dt' \quad (3.1)$$

這裡的P 是指柯西主值(Cauchy Principal Value)，這個轉換對所有  $L^p$  階的函數皆存在 [41]。由此一定義， $X(t)$  和  $Y(t)$  可以組合成一共軛複數，如此我們可以得一解析的訊號  $Z(t)$ ：

$$z(t) = [X^2(t) + Y^2(t)]^{1/2} = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (3.2)$$

其中

$$a(t) = [X^2(t) + Y^2(t)]^{1/2} \quad (3.3)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left( \frac{Y(t)}{X(t)} \right) \quad (3.4)$$

理論上來說，有無限多種方法可來定義虛部，但是希伯特轉換提供了一個唯一的方法來定義虛部，所以結果是一解析的函數。簡單來說，在式(3.1)中，希伯特轉換即定義為  $X(t)$  與  $1/t$  的迴旋積分(Convolution)，因此，希伯特轉換的物理意義在於強調  $X(t)$  的局部特性。而在式(3.2)中，利用極座標的表示式，更進一步的闡明了它局部性的本質，它將振幅及相位角改變的三角調和函數利用最佳局部近似方法來近似  $X(t)$ 。但即使有了希伯特轉換，對於式(3.5)所定義即時頻率仍然是備受爭議的。

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3.5)$$

這促使了Cohen(1995)[40]提出“單一分量函數”(Monocomponent Function) 這個專門的名詞。在這理論中，對於資料將有一些必要的限制。在任何時間點上式(3.5)定義的即時頻率必要是單一的值，它將只能表示一個分量，稱之“單一分量函數”。不幸地，對於如何判別是否為“單一分量函數”的方法卻沒有提供一個清楚的定義。由於缺乏一精確的定義，在文獻裡是採用“窄頻寬”(Narrow Band) 來定義即時頻率。而為了得到有意義的即時頻率，將使用Gabor[42]與Bedrosian[43]所討論而得的嚴格條件：對於任一個函數要得到其有意義的即時頻率，它的傅立葉轉換的實部必須只能有正的頻率。對於資料分析而言，

要使這個條件成為具體可以實行的步驟因而發展出一個簡單的方法來加以應用。為了達成這個目的，必須修正這個限制條件從全面性的變成局部性的，而且它的基底還必須滿足前一節所列的幾個必要條件。

### 3.3、內建模態函數

前一節定義了即時頻率，其給予分量限制條件，為了使所有的分量都能滿足限制條件，接下來就使用這些限制條件來定義內建模態函數。在物理上要定義一個有意義的即時頻率其必要條件是函數的相對局部零均值(local zero mean)是否對稱的，並且跨零(zero-crossings)的數量必須相等於極值(Extrema)數量總和。根據這些條件，定義了內建模態函數。一個內建模態函數它是一個必須滿足下列條件的函數，其條件如下：

- (1)在整個函數中，極值的數量必須要跟跨零點的數量相等或者相差一個；
- (2)在任何時間點上，由極大值包絡線(The maxima value of envelope)及極小值包絡線(The minima value of envelope)所定義的均值包絡線(The mean value of envelope)必須是零。其中這裡的極大值包絡線是由局部極大值所定義的，極小值包絡線是由局部極小值所定義的。

第一個條件，與傳統平穩高斯過程(Stationary Gaussian Process)中窄頻寬的要求很類似。第二個條件是一個新的建議，目的在將整體性要求改變成局部性的要求，這樣的好處在於對處理不對稱的波形時即時頻率也將不會產生不必要的晃動；理想中，要處理訊號的局部均值(local mean)應該要是零，但是對於非平穩性的訊號而言，局部均值是需要一個局部的時間尺度(local time scale)來計算，這是非常不容易的。因此為了完成這個動作，將利用局部極大值定義的極大值包絡線及由局部極小值定義的極小值包絡線來強迫局部的對稱，來代替原來的的方法，這樣的近似方法則可避免定義局部平均時間尺度的困擾。內建模態函數它表達了深藏在訊號內部振盪模態，在每一個循環中由跨零點所定義的內建模態函數只包含一個模態的振動，不會有很複雜的載波亦不會被限制到是一個窄頻寬的訊號，它的振幅及頻率是可以變動的，頻率或振幅完全變動的函數皆可以為內建模態函數，因此內建模態函數將可以是非平穩性的。綜觀之前的論述，若要得到即時頻率，需要解析一個任意的資料成為內建模態函數分量，即時頻率才可以應用到每一個內建模態函數分量裡去，對於複雜的資料來說，在同一時刻可能會得到超過一個以上的即時頻率。

### 3.4、經驗模態分解法

內建模態函數為希伯特黃轉換的前置條件，但大部分的輸入訊號都不是內建模態函數這種形式，因為在任何給定的時間，可能包含了不只一個振動模態，這也就是希伯特轉換不能對完整的訊號提供全盤頻率內涵的原因。因此必須分解輸入訊號成為多個內建模態函數分量，要達到這樣的目的，則必須藉由經驗模態分解法，簡單的來說，經驗模態分解法就是將輸入訊號分解成多個帶有物理特性的內建模態函數，而內建模態函數就如同傅立葉轉換中的正弦、餘弦函數為希伯特黃轉換的基底。在經驗模態分解法中較特別的是其基底



函數是藉由分解原輸入訊號而得，這個方法是直觀的、直接的、後驗的、及可適性的。由於分解的基底是從原來的訊號推導而來的，因此有下列假設條件：

- (1) 欲分析之訊號至少有兩個極值，其中包括一個極大值和一個極小值；
- (2) 訊號特徵時間尺度是定義成兩個極值之間的時間差；
- (3) 如果資料全無極值但只包含反曲點，可以將訊號微分一或多次，就能將極值找出來。最後的結果可以由分量的積分得到。

根據經驗利用訊號中特徵時間尺度來定義其振動模態，然後依據它來分解訊號，這是一個有系統的方法用來解析出內建模態函數，又可稱為轉移過程(Shifting Process)，此分解法分別找出局部極大值和局部極小值，再將所有的局部極值利用立方雲線(Cubic Spline)把它們連接起來，產生上圍的極大值包絡線和下圍的極小值包絡線(mean envelope)。則待分析之原始訊號會被上下圍包絡線完全包覆，再由極大值包絡線與極小值包絡線取平均得均值包絡線為  $m_1$ ，而原始訊號與均值包絡線之差即是第一個分量，稱為  $h_1$ ，即：

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (3.6)$$

其中  $x(t)$  是原始訊號，過程見圖(3.2)~(3.14)。此時的  $h_1$ ，如圖(3.14)，不一定是內建模態函數，因原始資料突高及突低，會在如此轉移的過程中產生出新的極值或是平移誇大先前存在的極值。而因為是直接利用原始資料取其極值包絡線，所以對極值包絡線的影響是直接的，而對均值包絡線的影響是間接的，即使立方雲線近似再完美，斜率輕微的突起也會放大成一個局部極值，使得局部零值從一個直角的座標系統改變成曲線的座標系統，換句話說已經把均值包絡線和y軸當成新的座標系統。同時這個方法產生的新極值會使試驗中消失的模態顯露，而靠著一連串的轉移也將會使得低振幅的載波復原。經過一次轉移過程出來的結果將不能保證所有的局部極大皆為正，局部極小值皆為負，將不符合我們所需要的內建模態。內建模態函數的導出跟原始訊號有很大的關係，所以當原訊號越複雜時，則要達到符合內建模態函數條件的函數就需要較多次這樣的轉移過程。

對非線性的資料而言，EMD 仍然存在其他複雜的問題，如包絡線的均值可能會跟真正的局部均值不一樣，所以，無論對訊號轉移多少次，一些不對稱的波形仍然會存在。除了這些理論上的問題，在實際數值分析中，立方弧線近似在邊界的近似也會產生很嚴重的問題，因為立方弧線近似會造成相當大的擺盪。更不理想的情形是末端的擺盪最後會傳遞到訊號內部而將整個訊號破壞，我們可以試著在原始資料的前後各延伸一個餘弦波來消除末端效應，便可求得改良的立方弧線近似，但也有其它的方法可以選擇。即使有這些問題，轉移過程仍是可從資料中解析出必要的分量。

在第二次轉移過程中，則是將  $h_1$  當作原始訊號，找出  $h_1$  的極大值、極小值包絡線，然後求得  $h_1$  的均值包絡線  $m_{11}$ ，即

$$h_{11} = h_1 - m_{11} \quad (3.6)$$

如圖(3.15)~(3.18)，圖(3.18)為經過兩次轉移過程的結果，而經過兩次轉移過程所得到的  $h_{11}$  將更加對稱，如果仍然有局部極大值並非為正，將必須要再繼續做轉移過程，圖(3.19)即經過  $k$  次轉移過程的結果  $h_{1k}$ ，已經完全符合一個內建模態函數的條件，以數學式

可表示成

$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \quad (3.7)$$

圖(3.21)即是原始的訊號中第一個內建模態函數分量，利用轉移過程有兩個目的：(1)消除載波；(2)使得波形振幅更為平順。藉著轉移過程消除載波以及平滑不平整的振幅，如此過程才能產生有意義的即時頻率。振幅平滑是必需的，但將轉移過程次數過多，雖然平滑了不平整振幅，但卻將訊號原先的物理特性消除，且通過轉移的次數達到一個極值，將使得整個訊號變成固定振幅，而單純頻率變化的訊號；因此必須決定轉移過程停下來的收斂條件。歷來，黃鐸博士等人曾提出兩種不同的收斂停止條件：

- (1) 前後轉移函數間的標準差小於我們預先設定的值，標準偏差(standard deviation, SD)公式定義如下：

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2} \quad (3.8)$$

- (2) 選定一個轉移次數值S，使得跨零點數量和局部極值總數量(局部極大值數量加上局部極小值數量)要相等或差一個。

當滿足以上任一個收斂條件，即停止此一模態的轉移程序，再繼續下一個模態的轉移。在第一個停止條件中而SD的大小該以多少為佳呢？S值取多少適宜呢？在黃鐸博士先前發表的文章[1]中提出一般在SD值取0.2~0.3之間就已足夠，而S值的大小的範圍，也約介於4~8間就足夠了。

假定選擇了其中的一個停止條件，第一個內建模態將可因此產生。整體來說， $C_1$ 應該是包含訊號中最佳的時間尺度或者是最短週期的分量。從原來訊號中分離 $C_1$ 可得到：

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (3.9)$$

因為餘數 $r_1$ ，仍然包含較長週期變動的分量，所以它即被當成新的資料並且再利用上述相同的轉移過程來做處理。這個過程持續的重複在之後所有餘數 $r_j$ ，公式如下：

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 - c_2 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$r_n = r_{n-1} - c_n$$

轉移過程可以靠著任何下面所提的準則來停止，一是當分量 $C_n$ 或者是 $r_n$ 變得比預定值來的小時就停止，二是當餘數 $r_n$ ，變成單調的函數，使得沒有IMF可以解析出即停止。即使是零均值的訊號，最後的餘數仍可能不是零；假如該訊號有一個趨勢(trend)，轉移過程後最後產生的餘數就是其趨勢。將Eq(3.9)與(3.10)加起來，最後可以得到

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (3.11)$$

如此一來，將可以把一筆資料分解成 $n$ 個經驗模態(empirical modes)及一個可以當作均值趨勢(mean trend)或常數的餘數 $r_n$ 。當應用EMD時，不需要任何的均值或零值參考軸，只需要知道局部極值的位置。在轉移過程中，每個分量的零值參考軸即會自動產生。且由於EMD不需要零值參考軸，故在對具有非零均值的資料時，EMD 即可免除資料中尋找均值的這項麻煩的步驟。

### 3.5、隨機遞減法

假設一自由度為 $n$ 之線性系統受到一零平均值的穩態白訊隨機振動(zero-mean stationary white-noise random vibration)外力，其運動方程式可寫為：

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (3.12)$$

其中 $M$ 、 $C$ 及 $K$ 分別代表 $n$ 個自由度的結構之質量、阻尼以及勁度矩陣， $x(t)$ 為位移反應，而 $F(t)$ 為外力向量。考慮此系統於某時刻 $t_i$ 滿足運動方程式，接著將時間平移 $t$ 後可得：

$$M \ddot{x}(t_i + t) + C \dot{x}(t_i + t) + Kx(t_i + t) = F(t_i + t) \quad (3.13)$$

將(3.13)式進而累加 $N$ 次後可導出：

$$M \left[ \sum_{i=1}^N \ddot{x}(t_i + t) \right] + C \left[ \sum_{i=1}^N \dot{x}(t_i + t) \right] + K \left[ \sum_{i=1}^N x(t_i + t) \right] = \sum_{i=1}^N F(t_i + t) \quad (3.14)$$

接著將(3.14)式除以 $N$ 則可寫成：

$$M \ddot{y}(t) + C \dot{y}(t) + Ky(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(t_i + t) \quad (3.15)$$

其中

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ddot{x}(t_i + t) \quad ; \quad \dot{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{x}(t_i + t) \quad ; \quad y(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i + t) \quad (3.16)$$

由於假設 $F(t)$ 為具零平均值之穩態白訊，因此當 $N \rightarrow \infty$ 時，(3.15)式等號右邊必為零向量，而(3.15)式可改寫成：

$$M \ddot{y}(t) + C \dot{y}(t) + Ky(t) = 0 \quad (3.17)$$

如此即可把原本(3.12)式之外力運動方程式轉化為(3.17)式的自由振動方程式，只是變數向量由 $x(t)$ 改成 $y(t)$ 。一般而言，當(3.16)式之訊號疊加超過500次(亦即 $N > 500$ )時，即可得穩定的特徵曲線 $y(t)$  [44]，文獻中稱為隨機遞減曲線(random decrement signature)。如圖(3.22)所示之任意速度訊號為例，隨機遞減曲線之求取可分為以下步驟詳細說明：

1. 取該量測反應訊號之平均值(零)加上一個標準差(standard deviation)的加速度值 $x_{sd}$

為基準，使得  $\ddot{x}(t)$  在時間為  $t_1$ 、 $t_2$  一直到  $t_N$  等  $N$  個時間點通過  $\ddot{x}_{sd}$  值，如圖(3.22)所示。

如此在這些時間點， $\ddot{x}(t)$  之斜率將依序正負相間。 $\ddot{x}_{sd}$  取訊號平均值(零)加上標準差 (standard deviation)，是為了確保疊加次數足夠使其疊加後之反應接近自由振動。

2. 訂定截取訊號的延時  $T_d$ ，通常  $T_d$  須取為系統預估最大自然週期的數倍[45]，如此可以使最後萃取的訊號能明顯地表示結構之動態特性。
3. 由  $t_1$ 、 $t_2$  等開始依序截取  $T_d$  時間長之量測訊號，相繼累加  $N$  次而產生隨機遞減曲線：

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ddot{x}(t_i + t) \quad , \quad 0 < t < T_d \quad (3.18)$$

由於

$$\ddot{x}(t_i) = \ddot{x}_{sd} \quad , \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (3.19)$$

所以

$$\ddot{y}(0) = \ddot{x}_{sd} \quad (3.20)$$

另外

$$\ddot{x}(t_i) \geq 0 \quad , \quad i=1, 3, 5, 7, \dots, 2n-1 \quad (3.21)$$

且

$$\ddot{x}(t_i) \leq 0 \quad , \quad i=2, 4, 6, 8, \dots, 2n \quad (3.22)$$

上述步驟隨著疊加次數的增加，因初始加速度所引起的自由振動反應將由於相鄰兩段疊加截取訊號之起始斜率大小相似、正負相反而互相抵銷。另外，由(3.20)式可以清楚知道隨

機遞減曲線  $y(t)$  乃代表僅由初始加速度  $\ddot{x}_{sd}$  所引起的自由振動反應。

### 3.6、多自由度系統之模態反應

如同前節，一個  $n$  自由度為之結構其運動方程式可寫為：

$$M \ddot{X}(t) + C \dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (3.23)$$

其中  $X(t) = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  =  $n$  個自由度的位移向量， $F(t)$  =  $n$  個自由度的外力向量， $M$ 、 $K$ 、 $C$  為  $(n \times n)$  的質量、勁度、阻尼矩陣。假設有振動模態產生，位移加速度反應可以分離成  $n$  個真實的模態：

$$X(t) = \sum_{j=1}^n \Phi_j q_j(t) ; \ddot{X}(t) = \sum_{j=1}^n \Phi_j \ddot{q}_j(t) \quad (3.24)$$

上式中， $\Phi_j$  是第  $j$  個模態向量，表是第  $j$  個振態的形狀(mode shape)，而  $q_j(t)$  是第  $j$  個模態的廣義模態座標(generalized modal coordinate)。將(3.24)代入(3.23)並依據振態形狀的正交性，我們可以把(3.23)分離成  $n$  個模態的動力方程。

$$\ddot{q}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = \Phi_j^T F(t) / m_j \quad (3.25)$$

其中  $\omega_j$  為第  $j$  個模態頻率， $\zeta_j$  為第  $j$  個阻尼比， $m_j$  為第  $j$  個模態的質量。

假設若有個衝擊載重施加在第  $k$  個自由度上，如： $f_k(t) = F_0 \delta(t)$ ，其他  $k$  之外的自由度皆為零  $f_j(t) = 0$ ， $f_j(t)$  是表示外力向量  $F(t)$  矩陣中的第  $j$  個元素的值。然後，第  $j$  個廣義模態座標的加速度反應可以得到如下：

$$\ddot{q}_j(t) = \frac{F_0 \phi_{kj} \omega_j}{m_j \sqrt{1 - \zeta_j^2}} e^{-\zeta_j \omega_j t} \cos\left(\omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.26)$$

其中  $\phi_{kj}$  表示第  $j$  個振態向量  $\Phi_j$  矩陣中第  $k$  個元素， $\omega_{dj}$  為第  $j$  個模態的阻尼頻率，

$\varphi_j = \tan^{-1}\left[2\zeta_j^2 \sqrt{1 - \zeta_j^2} / (1 - 2\zeta_j^2)\right]$  為第  $j$  個模態的相位差。而在第  $p$  ( $p=1, \dots, n$ ) 個自由

度的加速度反應  $\ddot{x}_p(t)$  可表示如下：

$$\ddot{x}_p(t) = \sum_{j=1}^n \phi_{pj} \ddot{q}_j(t) = \sum_{j=1}^n \ddot{x}_{pj}(t) \quad (3.27)$$

其中

$$\ddot{x}_{pj}(t) = \phi_{pj} \ddot{q}_j(t) = B_{pj,k} e^{-\zeta_j \omega_j t} \cos\left(\omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}\right) \quad (3.28)$$

$$B_{pj,k} = \frac{F_0 |\phi_{pj}| |\phi_{kj}| \omega_j}{m_j \sqrt{1 - \zeta_j^2}} \quad (3.29)$$

在(3.28)， $\varphi_{pj,k}$  表示在第  $j$  個振態中，第  $p$  個元素與第  $k$  個元素的相位差。假若存在簡正模(normal mode)，則所有的振態形狀都將會是實數，如此  $\varphi_{pj,k}$  將會是  $\pm 2m\pi$  或者為

$\pm 2(m+1)\pi$ ， $m$  為整數，如：

當  $\phi_{pj,k} = \pm 2m\pi$ ，則  $\phi_{pi} / \phi_{kj} > 0$

當  $\phi_{pj,k} = \pm 2(m+1)\pi$ ，則  $\phi_{pi} / \phi_{kj} < 0$

若把雜訊的干擾也列入考量的話。則量測出來的加速度反應向量

$\ddot{Z}(t) = [\ddot{z}_1(t), \ddot{z}_2(t), \dots, \ddot{z}_n(t)]^T$  將可表示如下：

$$\ddot{Z}(t) = \ddot{X}(t) + V(t) \quad (3.30)$$

其中  $V(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]^T$  為一個噪訊向量。量測出來第  $p$  個自由度受衝擊載重的

加速度反應  $\ddot{z}_p(t)$  將可表示如下：

$$\ddot{z}_p(t) = \ddot{x}_p(t) + v_p(t) = \sum_{j=1}^n \ddot{x}_{pj}(t) + v_p(t) \quad (3.31)$$

其中  $\ddot{x}_{pj}(t)$  在(3.26)到(3.29)式中已清楚說明， $v_p(t)$  我們將試著以零均值高斯白噪作為模擬。

### 3.7、模態參數之識別程序

經驗模態分解法可以分解量測的反應訊號  $\ddot{z}_p(t)$  成為適於希伯特轉換的內建模態。依

據經驗模態分解法且搭配著帶通濾波器，可以從  $\ddot{z}_p(t)$  中分解出每個模態的反應。應用帶通濾波器的有點有兩個優點：

- (1) 便於處理訊號擁有較高模態頻率的訊號，
- (2) 去除訊號受到高頻的雜訊干擾。

把加速度反應  $\ddot{z}_p(t)$  經過傅立葉轉換得到的傅立葉頻譜圖中，可以看到每個自然頻率大致的頻帶分佈情形，假設得到第  $j$  的模態的訊號頻率  $\omega_j$  介於  $\omega_{jL}$  與  $\omega_{jH}$  之間如：

$\omega_{jL} < \omega_j < \omega_{jH}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )，接著將量測到的訊號  $\ddot{z}_p(t)$  通過  $\omega_{jL} < \omega_j < \omega_{jH}$  的帶通濾波器，將可分別得到這個模態的歷時訊號，接著再利用經驗模態分解法處理之，經過大量

的轉移次數，所得到的第一個內建模態，將相當接近第  $j$  個模態的反應  $\ddot{x}_{pj}$ 。重複處理

$j=1,2,\dots,n$  將可以得到這  $n$  個模態的反應  $\ddot{x}_{pj}(j=1,2,\dots,n)$ 。這個方法可以很輕易的從  $\ddot{z}_p(t)$  分離出每個模態的反應，且可以移除這個頻段 ( $\omega_{jL} < \omega_j < \omega_{jH}$ ) 以外的雜訊。不過在應用帶通濾波器時，盡可能的讓相位偏移(phase shift)越小越好。

經由上面的過程可以得到模態反應  $\ddot{x}_{pj}$ ，接著使用希伯特轉換，可得到  $\tilde{\ddot{x}}_{pj}(t)$  如下所示：

$$\tilde{\ddot{x}}_{pj}(t) = HT[\ddot{x}_{pj}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ddot{x}_{pj}(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau \quad (3.32)$$

而由(3.28)知道  $\ddot{x}_{pj}$ ：

$$\ddot{x}_{pj}(t) = \phi_{pj} \ddot{q}_j(t) = B_{pj,k} e^{-\zeta_j \omega_j t} \cos\left(\omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}\right)$$

應用 Bedrosian 定理將能得到  $\tilde{\ddot{x}}_{pj}(t)$  如下：

$$\tilde{\ddot{x}}_{pj}(t) = B_{pj,k} \left[ a_{LP,j}(t) \sin\left(\omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}\right) + \tilde{a}_{HP,j}(t) \cos\left(\omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}\right) \right] \quad (3.33)$$

由(3.29)式知其中  $B_{pj,k} = \frac{F_0 |\phi_{pj}| |\phi_{kj}| \omega_j}{m_j \sqrt{1 - \zeta_j^2}}$ ，而

$$a_{LP,j}(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_{dj}} \frac{2\zeta_j \omega_j}{\zeta_j^2 \omega_j^2 + \omega^2} \cos(\omega t) d\omega ;$$

$$\tilde{a}_{HP,j} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_{dj}}^{\infty} \frac{2\zeta_j \omega_j}{\zeta_j^2 \omega_j^2 + \omega^2} \sin(\omega t) d\omega \quad (3.34)$$

得到了  $\ddot{x}_{pj}$  與  $\tilde{\ddot{x}}_{pj}(t)$ ，如此第  $j$  個模態的解析訊號將可表示如下：

$$Y_{pj}(t) = \ddot{x}_{pj}(t) + i \tilde{\ddot{x}}_{pj}(t) = A_{pj}(t) e^{i\theta_{pj}(t)} \quad (3.35)$$

其中的瞬時振幅  $A_{pj}$  與相位角  $\theta_{pj}$  如下：

$$A_{pj}(t) = B_{pj,k} \left\{ e^{-2\zeta_j \omega_j t} \cos^2 \left( \omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k} \right) + \left[ a_{LP,j}(t) \sin \left( \omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k} \right) + \tilde{a}_{HP,j}(t) \cos \left( \omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k} \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.36)$$

$$\theta_{pj}(t) = \tan^{-1} \left\{ e^{\zeta_j \omega_j t} \left[ a_{LP,j}(t) \tan \left( \omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k} \right) + \tilde{a}_{HP,j}(t) \right] \right\} \quad (3.37)$$

假設  $\zeta_j$  遠小於  $\omega_j$  的狀況下，式(3.34)將可改寫如下

$$a_{LP,j}(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_{dj}} \frac{2\zeta_j \omega_j}{\zeta_j^2 \omega_j^2 + \omega^2} \cos(\omega t) d\omega \approx e^{-\zeta_j \omega_j t} ;$$

$$\tilde{a}_{HP,j} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_{dj}}^{\infty} \frac{2\zeta_j \omega_j}{\zeta_j^2 \omega_j^2 + \omega^2} \sin(\omega t) d\omega = 0 \quad (3.38)$$

因此(3.33)將變成

$$\tilde{x}_{pj}(t) = B_{pj,k} e^{-\zeta_j \omega_j t} \sin \left( \omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k} \right) \quad (3.39)$$

瞬時振幅  $A_{pj}$  與相位角  $\theta_{pj}$  也將可改寫為

$$A_{pj}(t) = B_{pj,k} e^{-\zeta_j \omega_j t} \quad (3.40)$$

$$\theta_{pj}(t) = \omega_{dj} t - \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k} \quad (3.41)$$

將(3.40)取自然對數後再對時間  $t$  微分則：

$$\frac{\ln A_{pj}(t)}{dt} = -\zeta_j \omega_j \quad (3.42)$$

而將(3.41)對  $t$  微分則：

$$\omega_{pj}(t) = \frac{d\theta_{pj}(t)}{dt} = \omega_{dj} \quad (3.43)$$

$$\omega_{dj} = \omega_j (1 - \zeta_j^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.44)$$

因此在  $\zeta_j$  遠小於  $\omega_j$  的狀況下，可以利用上面三式計算出每個模態的自然頻率  $\omega_j$  與阻尼比



$\zeta_j$ 。但若在  $\zeta_j$  並非很小的狀況下，必須重新考慮(3.36)與(3.37)二式，其中  $\ln A_{pj}$  與  $\theta_{pj}$  將不在是對時間  $t$  的線性方程式，而黃鐸博士等人隨後做出的數值驗證結果[22]發現到，振幅的變化會導致頻率會在均值附近產生波動，且不會改變均值，因而提出可以使用最小平方方法近似的方式來估算自然頻率與阻尼係數。

## 肆、數值模擬

吾人以數值模擬線性非時變之三層樓的鋼構架分別受到衝擊載重、白噪、El-Centro 等地表加速度歷時作用下，用先前介紹的兩種識別方法來進行預測，比較兩者是否都能符合期望。假設三層樓的鋼構架如圖(4.1)從最底部開始質量分別為 $m_1=5$  kg， $m_2=4$  kg， $m_3=3$  kg，勁度分別為 $k_1=1800$  kN/m， $k_2=1200$  kN/m， $k_3=600$  kN/m，則質量與勁度矩陣可寫成下式。

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}; \quad [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

如此一來結構物的自然頻率可由計算此兩矩陣的特徵值求得，三個模態的自然頻率分別為1.37、2.99、4.56(Hz)。將各模態的阻尼比設定為0.05後，用前面所提的幾種作用力輸入，經由程式的計算，可得到各樓層的加速度反應歷時，以得到的這些資料來完成之後的測試。兩種識別方法吾人皆利用matlab程式語言來進行設計。

### 4.1、衝擊載重測試

在希伯特黃轉於系統識別的過程，先將衝擊載重作用下的加速度反應歷時，經由傅立業轉換得到頻譜分佈狀況，隨後需選取各樓層中傅立業轉換頻譜峰谷值較為顯著的其中一個樓層來進行識別。由傅立業轉換大致得到幾個尖峰值後，接著選取適當的頻帶區段作為帶通濾波的通過頻段，以本案例傅立業轉換如圖(4.2)，峰值大約落在1.4、3、4.5(Hz)附近，所以選取0.8~2.1(Hz)為第一個模態的通帶，2.4~3.6(Hz)為第二個模態的通帶，4~5.2(Hz)為第三個頻帶的通帶，圖(4.3)為衝擊載重作用下，一樓的加速度反應經過10階通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減20(dB)所得到的加速度反應歷時，吾人試著利用傅立業轉換來觀察濾波後的頻普分佈，見圖(4.4)，再來應用經驗模態分解法經過多次轉移得到第一個內建模態函數，見圖(4.5)，擷取第一個模態的自由振動衰減訊號如圖(4.6)，接著以希伯特轉換將得到的瞬時相位角與瞬時震幅取自然對數得到歷時曲線，在以最小平方方法近似計算其斜率，最後經由上個章節所推倒的公式運算後將可得到自然頻率與阻尼比，見圖(4.7)與圖(4.8)。

在識別的過程當中尚有幾個參數的設定還沒能準確的決定，例如：濾波器的形式、階數、濾波器的阻帶衰減量(Stopband Attenuation)、經驗模態分解法的轉移次數…等。濾波器的形式主要分為兩種類型IIR(Infinite Impulse Response)無限脈衝響應濾波器與FIR(Finite Impulse Response)有限脈衝響應濾波器，包含有Butterworth型、Chebyshev第一型與第二型…等，各有其不同的轉換函數，根據[32]採用Chebyshev II此種類型的濾波器來進行測試。而濾波器的階數影響到轉換函數中矩陣的大小，通常來說階數越大，濾波的效果會越明顯，但所需要的計算量也越大，階數的選擇在[22][23]文獻中提到他們在衝擊載重的作用力下是採用4階的帶通濾波器，而在[32]文獻中則是以10階的帶通濾波器來

進行地震力反應下橋樑結構的系統識別，吾人將比較使用4與10階兩種階數的濾波器於各種外力作用的情況下會有比較好的試驗結果，選擇最合適的一個來完成地震力下的系統識別。在數值測試的過程中可以發現帶通濾波器中阻帶衰減量的大小影響了通過頻段訊號與濾除頻段訊號經由濾波器後保留的多寡，設定高，則會將通帶外頻段的資料濾除的越明顯見圖(4.9)~(4.11)。

圖(4.9)為通過4階，通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減10(dB)之帶通濾波器所得到第一個模態的加速度反應歷時，再將其經由傅立業轉換觀察頻率分佈，圖(4.10)為通過4階，通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減20(dB)之帶通濾波器所得到第一個模態的加速度反應歷時，再將其經由傅立業轉換觀察頻率分佈，圖(4.11)為通過4階，通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減30(dB)之帶通濾波器所得到第一個模態的加速度反應歷時，再經由傅立業轉換觀察頻率分佈。從測試過程中可以發現到較高的阻帶衰減量將造成較大的相位偏移(phase shift)。

相對的較低的阻帶衰減量將使得相位偏移變少，見圖(4.12)~(4.14)，圖(4.12)通過10階，通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減10(dB)之帶通濾波器所得到第一個模態的加速度反應歷時，圖(4.13)通過10階，通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減50(dB)之帶通濾波器所得到第一個模態的加速度反應歷時，圖(4.14)通過10階，通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減100(dB)之帶通濾波器所得到第一個模態的加速度反應歷時。

在蒐集閱讀了許多介紹與應用希伯特轉換的相關參考文獻中，皆未提及濾波器參數該如何設計，而在許多希伯特黃轉換相關的文獻[22][23]數值測試的章節中皆有提出，濾波器的使用造成相位偏移的程度能越小越好，因此吾人藉由大量的數值測試，來比較何種數值的設計才能得到最佳的效果，是否有符合到少量的相位偏移，能有更接近預期的成效呢？經驗模態分解的轉移次數在黃鐸博士發表的文章中[1][33]，提出以標準差是否以達0.2~0.3間來做判斷且配合最高八次轉移為基準的一種方式，但在各種應用的狀況下還有待研究與探討，而另外在[22]關於系統識別的文章中有說明處理自然頻率較高的訊號將有可能需要較多的次數，有時甚至需要使用到2000次以上，但如此將需要用到很高的電腦計算量，而之前所建立的數值模型其三自然頻率還不算高，因此吾人先採用1、3、5、8、10、50、100、200、500次數來比較結果的差異。下段各表主要來測試4階與10階兩種類型的濾波器識別的效果。

表(4.1)為三層樓之數值模型，衝擊載重作用。固定4階濾波器，通帶0.8~2.1(Hz)，改變阻帶衰減從10~60(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第一個模態自然頻率與阻尼比的識別結果，表(4.2)為與前表一樣的三層樓之數值模型，受相同之衝擊載重作用。固定10階濾波器，通帶0.8~2.1(Hz)，改變阻帶衰減從10~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第一個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。表(4.3)同前三層樓之數值模型，衝擊載重作用。固定4階濾波器，通帶2.4~3.6(Hz)，改變阻帶衰減從10~60(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第二個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。表(4.4)三層樓之數值模型，衝擊載重作用。固定10階濾波器，通帶2.4~3.6(Hz)，改變阻帶衰減從10~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移

前後的標準差，與之後兩行第二個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。表(4.5)同前三層樓之數值模型，衝擊載重作用。固定4階濾波器，通帶4~5.2(Hz)，改變阻帶衰減從10~60(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第三個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。表(4.6)同前三層樓之數值模型，衝擊載重作用。固定10階濾波器，通帶4~5.2(Hz)，改變阻帶衰減從10~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第三個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。

以上各表為4階與10階的濾波器，各種不同每個阻帶衰減、轉移次數得到的自然頻率還有阻尼，接著把同個阻帶衰減各種不同轉移次數得到的結果做平均繪圖，比較與理論值的差異，見圖(4.15)~(4.26)，圖(4.15)為衝擊載重作用下，以4階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率之平均見表(4.1)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.16)衝擊載重作用下，以4階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比之平均見表(4.1)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.17)衝擊載重作用下，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率之平均見表(4.2)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.18)衝擊載重作用下，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比之平均見表(4.2)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.19)衝擊載重作用下，以4階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表(4.3)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.20)衝擊載重作用下，以4階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均見表(4.3)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.21)衝擊載重作用下，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表(4.4)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.22)衝擊載重作用下，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比之平均見表(4.4)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.23)衝擊載重作用下，以4階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表(4.5)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第三個模態識別結果，圖(4.24)衝擊載重作用下，以4階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均見表(4.5)，阻帶衰減為橫軸，識別出的頻率為縱軸比較第三個模態識別結果，圖(4.25)衝擊載重作用下，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表(4.6)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第三個模態識別結果，圖(4.26)衝擊載重作用下，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均見表(4.6)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第三個模態識別結果。

在衝擊載重作用下，4階的濾波器，在變動其他的參數的狀況下，都可以得到與目標相近的自然頻率，最大的誤差不超過0.1(Hz)而第一個模態阻帶衰減低的時候(40(dB)以下)會有更好的效果，第二個模態則在阻帶衰減於10、30(dB)時都還蠻接近答案的，而

第三個模態，阻滯衰減提高將會得到較接近的答案，10階的濾波器在自然頻率的識別，也有大致相似的效果，但變動的幅度稍稍比4階濾波器大一些，且兩種階數的濾波器隨著阻滯衰減的提高自然頻率識別的結果有逐漸下降的趨勢。仔細觀察數據可以發現在衝擊載重作用下使用4階濾波器的精準度比起10階的濾波器來稍微好；再來觀察各種參數的測試下對阻尼比的影響，觀察比較識別的走勢也是隨著階數的提高而降低，在選擇4階的濾波器，阻滯衰減40(dB)的以內，轉移次數的數量不論多少，第一個模態的阻尼比估算的都還算不錯都在預期的5附近，不過第二個模態在阻滯衰減於30(dB)內還可以接受，但變動的幅度比前個模態稍大些。第三個模態在阻滯衰減30(dB)內算較可接受，只是變化更大了點，於20(dB)時準確度較高；10階的濾波器於第一個模態的識別中，50(dB)內的阻滯衰減都有不錯的準確度，60~90(dB)的阻滯衰減，誤差也約在+1%~-1%的阻尼比，而在第二個模態的識別，阻滯衰減在30、或70~100(dB)的狀況下，也識別在預期的答案附近，第三個模態的識別，20~80(dB)都有還算接近設計目標，10階濾波器識別出的結果，相較起4階的來的好上一些。觀察表(4.1)~(4.6)所得到的這些數據，轉移次數的多寡在此案例中似乎與答案的精確度無直接的關連，有時多次與少次皆得到差不多的答案，但有時經過過多的轉移反而會離目標答案有更大的差距。而在觀察所有數據後，似乎沒有一個定值是可以滿足三個模態識别的自然頻率或阻尼比都能與預期答案十分相近的效果，而大概取10階80(dB)阻滯衰減，可以讓幾個模態識别的結果與預期設計的相近。

在類神經網路的識別過程，需要將地表加速度，與三個層樓的反應資料，作為輸入進行學習，隱藏層設定為一層，隱藏層的結點數設定與自由度數相同，資料取整個地震歷時的中間10%的紀錄點來學習，時間延滯設定往前五筆時間點的資料(本數值模型取250Hz做資料的記錄)，預設在學習的誤差率低於 $10^{-15}$ 時，即可停止學習，由於衝擊載重的反應信號複雜程度較低僅需經過792次的疊代後將可以很快的就收斂到達設定目標，見圖(4.27)。將得到的矩陣參數代入公式將可計算出自然頻率與阻尼比，而得到的結果也與理論值幾乎完全相同，若將這些設定的參數改更大些也可得到相同的結果但卻會更耗時，因此就不在多測試與記錄。我們把兩種方法識别的結果做成表格比較見表(4.7)。

## 4.2、白噪測試

在衝擊載重的測試過後，吾人將輸入地震力換成高斯白噪，測試希伯特轉換是否也能得到預期的答案。而以高斯白噪測試的原因，是因為在之後將把希伯特轉換運用在地震力作用下的識別，在識别的過程之中必需要搭配使用隨機遞減法。而隨機遞減法的理論中，輸入地震力要求為零均值的白色噪訊，如此才能將加速度反應歷時轉換成為自由振動，因此吾人先行以高斯白噪作為輸入地震力來進行驗證。程式計算的流程與前節的衝擊載重類似，一樣先進行傅立葉轉換，再來通過帶通濾波器，接著使用經驗模態分解法，經過多次的轉移結束後運用隨機遞減法來得到自由振動，此後將可以利用希伯特轉換求得瞬時頻率與振幅，再以最小平方方法近似，經由推出的公式計算將可得到自然頻率與阻尼比，過程見圖(4.28)~(4.34)，圖(4.28)最下圖所示為輸入之地表加速度(高斯白噪)，其上方三圖左邊由下到上依序為一、二、三層樓之加速度反應，右邊分別為其加速度反應之傅立葉轉換，

圖(4.29)為一樓之地表加速度反應經過10階通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減80(dB)之帶通濾波器後所得到第一個模態的加速度反應歷時圖，所得到的加速度反應歷時經傅立業轉換觀察其頻率分佈見圖(4.30)，圖(4.31)為經由濾波器所得到的加速度反應歷時經過數次轉移後所得到的第一個內建模態函數(曲線)與此內建模態函數的標準差(直線)，圖(4.32)為運用隨機遞減法將圖(4.31)得到的第一個內建模態轉換成自由振動衰減的訊號。圖(4.33)為圖(4.31)自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到相位角對時間的關係圖(黑點)，直線段為最小平方法近似直線，圖(4.34)為圖(4.31)的自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到的瞬時振幅取自然對數後對時間的關係圖(黑點)，直線段為最小平方法近似之直線。

在上章節使用的4階濾波器在本案例測試中經由經驗模態分解法會造成端點值被放大，而使得隨機遞減法無法計算或是得到誤差極大的數值，因此本案例只運用10階的濾波器來做測試，一樣以大量的參數來試驗，看是否如同衝擊載重的測試，在某些參數的設定下可以得到不錯的解答。吾人同時以不同的阻帶衰減與轉移次數進行測試，測試結果詳見表(4.8)~(4.10)。表(4.8)為三層樓之數值模型，高斯白噪作用。固定10階濾波器，通帶0.8~2.1(Hz)，改變阻帶衰減從30~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第一個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。X表示濾波轉移過後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法，\*表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤。表(4.9)為三層樓之數值模型，高斯白噪作用。固定10階濾波器，通帶2.4~3.6(Hz)，改變阻帶衰減30~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第二個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。\*表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤，表(4.10)為三層樓之數值模型，高斯白噪作用。固定10階濾波器，通帶4~5.2(Hz)，改變阻帶衰減30~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第三個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。

接著一樣將每個阻帶衰減下，各種轉移次數得到的自然頻率還有阻尼比取平均繪圖，比較與理論值的差異，見圖(4.35)~(4.40)，圖(4.35)為輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表(4.8)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.36)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均見表(4.8)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.37)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的平均自然頻率見表(4.9)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.38)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的平均阻尼比見表(4.9)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.39)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表(4.10)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第三個模態識別結果，圖(4.40)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均見表(4.10)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第三個模

態識別結果。首先觀察自然頻率，三個模態的阻帶衰減在60(dB)以上得到的答案都非常的接近預期，其中以第一個模態的誤差最大，但也不超過0.1(Hz)；再來觀察阻尼比，阻尼比的推估誤差就大的多，此三個模態只有在阻帶衰減低的時候才會比較靠近答案，第一個模態阻尼比預估最接近時約在阻帶衰減60(dB)附近，離預期也有2%阻尼比的誤差，第二個模態在阻帶衰減40~50(dB)時最接近正解，此時誤差約在1%阻尼比附近，第三個模態只有在阻帶衰減30(dB)轉移次數50次時有不錯的答案，其他最接近的狀況，阻帶衰減設定為40(dB)，離預期的誤差也達到3%阻尼比左右。如此可以發現到阻尼比的預估準確度是很不易拿捏的，自然頻率的識別將比較可以信任，但轉移的次數，依舊不知道該取多少為佳，觀察表(4.8)~(4.10)取80(dB)為阻帶衰減在3個模態的估算上已經得到一定的精確度，吾人試著固定此參數，以更多不同的轉移次數來觀察，看看最後識別的效果如何？

表(4.11)~(4.13)為測試轉移次數對識別結果的影響。表(4.11)為三層樓之數值模型，高斯白噪作用。固定10階濾波器，通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減定為80(dB)，轉移次數1~10、10~100、100~1000、2000、3000，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第一個模態自然頻率與阻尼比的識別結果，表(4.12)為三層樓之數值模型，高斯白噪作用。固定10階濾波器，通帶2.4~3.6(Hz)，阻帶衰減定為80(dB)，轉移次數1~10、10~100、100~1000、2000、3000，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第二個模態自然頻率與阻尼比的識別結果，表(4.13)為三層樓之數值模型，高斯白噪作用。固定10階濾波器，通帶4~5.2(Hz)，阻帶衰減定為80(dB)，轉移次數1~10、10~100、100~1000、2000、3000，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第三個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。將所得結果繪圖，見圖(4.41)~(4.46)，圖(4.41)為輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器阻帶衰減80(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表(4.11)，轉移次數為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.42)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器阻帶衰減80(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表(4.11)，轉移次數為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.43)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器阻帶衰減80(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表(4.12)，轉移次數為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.44)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器阻帶衰減80(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表(4.12)，轉移次數為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.45)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器阻帶衰減80(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表(4.13)，轉移次數為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第三個模態識別結果，圖(4.46)輸入外力為高斯白噪，以10階濾波器阻帶衰減80(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表(4.13)，轉移次數為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第三個模態識別結果。

經過更多轉移次數的測試後，在自然頻率的部分可以發現除了第二個模態，有漸漸接近預期的結果，多次的轉移似乎並未有更好的效果。而阻尼比轉移的越多次，得到的結果越低，也越遠離正確值。

在類神經網路的識別過程，需要將地表加速度，與三個層樓的反應資料，作為輸入進行學習，參數的設定比照與上節相同，預設在學習的誤差率低於 $10^{-15}$ 時，即可停止學習，高斯白噪的反應信號僅需經過450次的疊代後將可以到達設定目標，見圖(4.47)。將得到的

矩陣參數代入公式將可計算出自然頻率與阻尼比，而得到的結果也與理論值幾乎相同。將兩種方法識別的結果做成表格比較見表(4.14)。

### 4.3、真實地震力測試

接著以真實的地震力(El Centro)作為輸入，看是否可以得到準確的識別結果。程式計算的流程與上節完全相同，過程見圖(4.48)~(4.53)。圖(4.48)最下圖所示為輸入之地表加速度(El Centrol)，其上方三圖左邊由下到上依序為一、二、三層樓之加速度反應，右邊分別為其加速度反應之傅立業轉換，圖(4.49)為一樓之地表加速度反應經過10階通帶0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減80(dB)之帶通濾波器後所得到第一個模態的加速度反應歷時圖，圖(4.50)為圖(4.49)所得到第一個模態反應經過數次轉移後所得到第一個內建模態函數(曲線)，直線為此內建模態函數的標準差，圖(4.51)為運用隨機遞減法將圖(4.50)得到的第一個內建模態轉換成自由振動衰減的訊號，圖(4.52)黑色點所示為圖(4.51)的自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到相位角對時間的關係圖，直線段為最小平方法近似直線，圖(4.53)黑色點所示為圖(4.51)的自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到的瞬時振幅取自然對數後對時間的關係圖，直線段為最小平方法近似之直線。

在上節的數值測試後，吾人依然無法準確的得到一組數值可以同時使自然頻率與阻尼比逼近真實的解答，而取80(dB)的阻帶衰減是能在三個模態自然頻率的識別皆有接近的結果，因此如同上兩節，在此依然用大量的數值進行測試，改變阻帶衰減與轉移次數來觀察識別結果，見表(4.15)~(4.17)，表(4.15)為三層樓之數值模型，El Centro地表加速度作用下。固定10階濾波器，通帶0.8~2.1(Hz)，改變阻帶衰減從40~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第一個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。X濾波轉移過後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法，\*表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤，表(4.16)三層樓之數值模型，El Centro地表加速度歷時作用下。固定10階濾波器，通帶2.4~3.6(Hz)，改變阻帶衰減從30~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第二個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。X濾波轉移過後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法，表(4.17)三層樓之數值模型，El Centro地表加速度歷時作用。固定10階濾波器，通帶4~5.2(Hz)，改變阻帶衰減從20~120(dB)，轉移次數1、3、5、8、10、50、100、200、500，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第三個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。X濾波轉移過後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法，\*表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤。

接著如同前幾節的做法將每個阻帶衰減下，各種轉移次數得到的自然頻率還有阻尼比做平均，比較與理論值的差異，見圖(4.54)~(4.59)。圖(4.54)輸入地震力為El Centro地表加速度，以10階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表(4.15)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第一個模態識別結果。圖(4.55)



輸入地震力為 El-Centro 地表加速度，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均見表 (4.15)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第一個模態識別結果。圖(4.56) 輸入地震力為 El-Centro 地表加速度，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表 (4.16)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第二個模態識別結果。圖(4.57) 輸入地震力為 El-Centro 地表加速度，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均見表 (4.16)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第二個模態識別結果。圖(4.58) 輸入地震力為 El-Centro 地表加速度，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均見表 (4.17)，阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第三個模態識別結果。圖(4.59) 輸入地震力為 El-Centro 地表加速度，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均見表 (4.17)，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第三個模態識別結果。

在自然頻率的識別上，三個個模態阻帶衰減在 70(dB)以上誤差都小於 0.1(Hz)，第一個模態在阻帶衰減為 90(dB)時最為準確，第二個模態於 80(dB)時最接近，第三個模態則是在 120(dB)時最佳。而阻尼比第一個模態於阻帶衰減 90(dB)時識別效果最佳，第二個模態則是於阻帶衰減 50~60(dB)之間差距在 1%的阻尼比內，第三個模態則是在阻帶衰減 30(dB)左右效果最佳。而阻尼係數在上節與本節部分係數的設定下，可以推得出正確的結果，但始終無法找到一個趨勢與規則，因此之後將把重點放在自然頻率的識別上，在三個模態都有找到幾個設定值可以得到很好的效果，接著吾人在這幾個數值設定下，觀察轉移次數的影響。

表(4.18)三層樓之數值模型，El-Centro 地表加速度作用。固定 10 階濾波器，通帶 0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減定為 90(dB)，轉移次數 1~10、10~100、100~1000、2000、3000，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第一個模態自然頻率與阻尼比的識別結果，表(4.19)三層樓之數值模型，El-Centro 地表加速度作用。固定 10 階濾波器，通帶 2.4~3.6(Hz)，阻帶衰減定為 80(dB)，轉移次數 1~10、10~100、100~1000、2000、3000，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第二個模態自然頻率與阻尼比的識別結果，表(4.20)三層樓之數值模型，El-Centro 地表加速度作用。固定 10 階濾波器，通帶 4~5.2(Hz)，阻帶衰減定為 120(dB)，轉移次數 1~10、10~100、100~1000、2000、3000，將可得到第一行為轉移前後的標準差，與之後兩行第三個模態自然頻率與阻尼比的識別結果。

將所得結果繪圖，見圖(4.60)~(4.65)，圖(4.60)輸入外力為真實地震力，以 10 階濾波器阻帶衰減 90(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表(4.18)，轉移次數為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.61)輸入外力為真實地震力，以 10 階濾波器阻帶衰減 90(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表(4.18)，轉移次數為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第一個模態識別結果，圖(4.62)輸入外力為真實地震力，以 10 階濾波器阻帶衰減 80(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表 (4.19)，轉移次數為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.63)輸入外力為 El-Centro 地表加速度作用，以 10 階濾波器阻帶衰減 80(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表

(4.19)，轉移次數為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第二個模態識別結果，圖(4.64) 輸入外力為 El-Centro 地表加速度作用，以 10 階濾波器阻帶衰減 120(dB)，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表 (4.20)，轉移次數為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第三個模態識別結果，圖(4.65) 輸入外力為 El-Centro 地表加速度作用，以 10 階濾波器阻帶衰減 120dB，以數種轉移次數識別的結果繪圖見表 (4.20)，轉移次數為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第三個模態識別結果。

經過更多轉移次數的測試後，在自然頻率的部分除了第一個模態與第二個模態千次以上的轉移影響大一點，轉移次數的多寡似乎沒有一個明確的規則可尋，且第一個模態在 8 次左右的轉移次數可以最貼近答案，之後在較高的轉移次數下辨識的效果反而更差，跟上節高斯白噪的作用下第二個模態的識別剛好相反，不過綜合之前的所有測試案例，在阻帶衰減設定較高，辨識頻率高的時候，轉移次數的多寡對結果的影響將非常的不明顯。而阻尼比的識別轉移次數的提升，辨識得到的結果在第一模態和第二模態有往下降的趨勢，也越遠離正確值，跟上節辨識的結果相同，而第三個模態多少次的轉移得到的結果幾乎都維持在一個定值附近。

類神經網路的識別過程，如同前幾節所述，在經過 10000 次的疊代後誤差將來到  $10^{-9}$  以下，見圖(4.66)。接著將兩種方法識別的結果做成表格比較，見表(4.21)。

## 伍、實際案例運用

在實際案例的測試部分，由於沒有標準答案，所以吾人先以類神經識別出來的結果當作預期的結果，而在希伯特轉換方面如同前章節，也將以不同的參數進行識別。來確定是否可以得到相同的結論。

### 5.1、振動台試驗之系統識別

為了驗證本研究所提的兩種系統識別方法對實際案例進行識別的可行性，本節採用振動台試驗的實際數據進行系統識別以比較兩種方法識別的結果。其中，試驗所用的模型為圖(5.1)所示的 Benchmark 模型，而實驗的數據由國家地震工程研究中心所提供。Benchmark 模型為 3 公尺長、2 公尺寬的三層鋼構架共分為 A、B、C1、C2、C3、C4 及 D 等型態。Benchmark A 模型在結構長向（3m 之方向）為材料強度較強的方向，其餘的 Benchmark 模型結構長向均為材料強度較弱的方向；而在振動台上的試驗僅有 A、B 及 D 等型態的模型有實施非線性的測試其餘的模型只進行線性測試；Benchmark D 模型的測試上另外將第一層左端的柱改為構造如圖(5.2)的脆弱桿件作測試。如表(5.1)~表(5.11)所示，試驗時同一型態的模型分別依不同振動方向及不同強度的地震作為振動台試驗輸入之地表加速度而有不同的試驗編號，並由感應器記錄所有試驗的位移反應歷時及加速度反應歷時。在振動台上測試時所架設的感應器配置如圖(5.3)所示，紀錄的採樣頻率為 1000 Hz，並且記錄時採用 50 Hz 的低通濾波器擷取所需的訊號。

首先對試驗編號 A1 的試驗數據進行 HHT 與 ANN 的識別。類神經網路的識別過程，在 10000 次的疊代後，錯誤率已低於  $10^{-6}$ ，見圖(5.4)，此時已經可把三個模態的自然頻率與阻尼比識別出來。而希伯特轉換於系統識別的過程見圖(5.5)~圖(5.10)，圖(5.5)為試驗編號 A1 的振動台試驗中各感測器的反應，圖左下角的小圖為 x 方向地表量測到的加速度反應，右下角的小圖為其快速傅立葉轉換的結果，之後往上的 A1、A2、A3 依序為一二三層樓的反應，圖(5.6)是將圖(5.5)二樓之地表加速度反應經過 10 階通帶 1~2(Hz)，阻帶衰減 80(dB)之帶通濾波器後所得第一模態的加速度反應歷時圖，圖(5.7)將圖(5.6)所得第一模態反應經過數次轉移後所得第一內建模態函數(曲線)，圖中的直線為此內建模態函數的標準差，圖(5.8)為運用隨機遞減法將圖(5.7)得到的第一內建模態轉換成自由振動衰減的訊號，圖(5.9)所標示的黑點為圖(5.8)的自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到相位角對時間的關係圖，直線段為最小平方近似直線，圖(5.10)所標示的黑點為圖(5.8)的自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到的瞬時振幅取自然對數後對時間的關係圖，直線段為最小平方近似之直線。

吾人以大量的數值進行測試來觀察識別的結果，表(5.12)~表(5.14)是對試驗編號 A1 的數據進行希伯特-黃轉換的系統識別得到的結果。固定採用 10 階濾波器，改變阻帶衰減從 20~120(dB)，轉移次數 1、3、5、8、10、50、100、200、500；表中的 X 表示濾波轉移後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法，而\*表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤。表(5.12)~表(5.14)

所採用的濾波器通帶分別為 1~2(Hz)、4~5(Hz)及 7~9(Hz)分別用來取得第一個模態、第二個模態及第三個模態的識別結果。

接著將每個阻帶衰減下，各種轉移次數得到的自然頻率還有阻尼比平均，與類神經網路識別的結果互相比較，見圖(5.11)~圖(5.16)。圖(5.11)是對試驗編號 A1 的實際數據進行希伯特-黃轉換的系統識別，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，依據表(5.12)中幾種預設的轉移次數得到的自然頻率做平均，以阻帶衰減為橫軸，識別出的自然頻率為縱軸比較第一個模態識別結果。圖(5.12)是以表(5.12)幾種預設的轉移次數得到的阻尼比做平均，阻帶衰減為橫軸，識別出的阻尼比為縱軸比較第一個模態識別結果。圖(5.13)及圖(5.14)是依據表(5.13)中結構的第二個模態識別結果，以阻帶衰減為橫軸，分別以識別出的頻率及阻尼比為縱軸來比較。圖(5.15)及圖(5.16)是依據表(5.14)中結構的第三個模態識別結果，以阻帶衰減為橫軸，分別以識別出的頻率及阻尼比為縱軸。

經由上面測試的圖表我們發現，在自然頻率的識別中阻帶衰減的高低在三個模態的影響都非常的小，在所有測試的數據中幾乎誤差都在 0.1(Hz)以內，且第一個模態阻帶衰減設定不論高低幾乎都與 ANN 識別的結果非常接近，而阻尼比則只有在第一個模態阻帶衰減為 40(dB)的情況下，會有接近的答案，另兩個模態的阻尼比的識別則有所差異。以兩種方法對試驗編號 A1 的數據進行識別的結果見表(5.15)。

在本節及上個章節的案例測試中，發現希伯特轉換的識別使用 10 階 80(dB)的阻帶衰減的濾波器，於大部分的狀況下，識別的結果都不錯，然而在部分案例裡其他的阻帶衰減也可以得到不錯的效果，而轉移次數對答案的影響較不顯著，觀察之前測試的結果，轉移次數影響有限，不需太多就可以得到好的效果，所以可設定為 8 次，如此在自然頻率的識別上，已經可以得到不錯的效果，但阻尼比就還有待驗證。而類神經網路有數個重要的參數，對學習的效果與所需的時間有重大的影響，分別是：時間延滯、隱藏層的層數與結點數、資料的多寡、量測的自由度數。由本研究前幾個章節的案例測試經驗，取一層的隱藏層，隱藏層的結點數，設定與結構物的自由度數相同，數值模型測試上資料時間取 3.5 秒的歷時資料，時間延滯吾人往前取 5 個量測的時間點( $m=5$ 、 $n=5$ )。按照以上所歸納出的參數設定方式，將兩種識別方法的參數設定好，接著對 Benchmark 模型在振動台上試驗的所有數據進行識別，兩種識別方法所得到的自然頻率及阻尼比如表(5.16)~表(5.45)所示。

由於在實際地震的作用下，在初動強動等階段的阻尼比會因結構啟動的力學機制不同而經常會是時變的訊號，且吾人利用類神經網路選取各個不同的時段來進行識別，阻尼比的部分也都呈現了些許波動的變化，而自然頻率則因為其為線性測試的過程幾乎沒改變，在類神經的測試也證實了這樣的結果，然而以希伯特黃轉換建立的系統識別模式則是以線性非時變為基礎，因此比較阻尼識別的差異基本上意義不大，且在上節數值模擬的過程中，也說明了阻尼比的識別受參數設定的影響很大，並不容易找到規則性。因此本文僅針對 ANN 與 HHT 識別的 natural frequency 部分的識別做比較，對於同一型態的模型且輸入的地震力同方向的試驗歸納為一組畫於同一個圖中，結果見圖(5.17)~圖(5.36)。可以發現在同一圖中用兩種方法辨識出來的結果均非常的接近。然而從表(5.16)~表(5.45)及圖(5.17)~圖(5.36)中可以觀察出 ANN 的識別方法會出現無法識別或識別錯誤的現象，而 HHT 的識別只要找到適當參數設定之後對於自然頻率的識別都可得到不錯的結果。另外，在

Benchmark 模型中 C2、C3 及 C4 的結構均含有斜撐的桿件造成識別的結果只出現第一模態的自然頻率，而類神經網路對 Benchmark C4 模型中試驗編號 C4\_C1~C4\_C8 無法識別的情形特別嚴重。由於本研究所提之類神經網路的系統識別方法是應用時間序列模式之 ARX 推導而得到，而 ARX 的識別在雜訊過多的情形下會伴隨著許多的虛擬模態產生，也會造成主要的模態無法識別出來，所以本文所採用的振動台實驗數據當中，雜訊是造成 ANN 無法識別的主要因素。而 HHT 因為基本架構與 ANN 不同，在雜訊較高時只要濾波器參數設定適當仍可以進行識別。

## 陸、結論與建議

在過去的二十年間，類神經網路 (Artificial Neural Network, ANN) 已經逐漸發展成熟並且成功的應用在影像、文字、語音的辨識系統、礦床探測、製程監控、股票預測、財務分析、氣象預測、疾病診斷、土木工程…等領域之中。希伯特黃轉換(Hilbert Huang Transformation, HHT)為任職於美國航空暨太空總署 (NASA) 大華府地區學者黃鐸博士近幾年於英國皇家學會(The Royal Society)期刊上所發表的發明，其優勢在於可處理非線性和非穩態資料，過程主要包含了兩個部分，有前處理的經驗模態分解法 (Empirical Mode Decomposition, EMD)以及之後的希伯特轉換 (Hilbert Transform, HT)。此方法目前同樣已經廣泛的運用於氣候、水利、地震工程、地球物理探測、潛艇設計、結構損害偵測、衛星資料分析、血壓變化和心律不整等各項研究之中。

因此本研究的主要目的在於建立以此兩種方法為基礎的結構物系統識別程序，並驗證比較這兩種方法的精確性，且於實地案例中能否得到同樣的結果，以下為本研究之結論與建議。

### 6.1、結論

1. 類神經網路有數個重要的參數，對學習的效果與所需的時間有重大的影響，分別是：時間延滯、隱藏層的層數與結點數、資料的多寡、量測的自由度數。由本研究前幾個章節的案例測試經驗，取一層的隱藏層，隱藏層的結點數，設定與結構物的自由度數相同，數值模型測試上資料時間取 3.5 秒的歷時資料，時間延滯吾人往前取 5 個量測的時間點( $m=5$ 、 $n=5$ )。
2. 類神經網路的預測，已可達可接受的識別效果，除非資料的雜訊過多，否則都可以收斂到很低的誤差以下。整體而言，自然頻率的識別結果準確度高，但對結構阻尼的識別誤差較大。
3. 希伯特黃轉換在系統識別上的應用，影響識別結果最大的因素在於濾波器的設計過程，只要找到適當參數設定之後對於自然頻率的識別都可得到不錯的結果。
4. 由於本研究所提之類神經網路的系統識別方法是應用時間序列模式之 ARX 推導而得到，而 ARX 的識別在雜訊過多的情形下會伴隨著許多的虛擬模態產生，也會造成主要的模態無法識別出來，所以本文所採用的振動台實驗數據當中，雜訊是造成 ANN 無法識別的主要因素。而 HHT 因為基本架構與 ANN 不同，在雜訊較高時只要濾波器參數設定適當仍可以進行識別
5. 在 Benchmark 模型中 C2、C3 及 C4 的結構均含有斜撐的桿件造成識別的結果只出現第一模態的自然頻率，而類神經網路對 Benchmark C4 模型中試驗編號 C4\_C1~C4\_C8 無法識別的情形特別嚴重。此結果顯示，若結構自然頻率有偶合現象出現時，本研究所採用之 AMNN 模式與 HHT 均無準確的識別能力。

### 6.2、建議

1. 類神經網路的預測，已可達可接受的識別效果，除非資料的雜訊過多，否則都可以收斂到很低的誤差以下，而其最大的缺點，就在於運算過於費時，如能研發出一種更快速的演算法改良，對於其實用性將大大的提升。
2. 希伯特黃轉換在系統識別上的應用，影響識別結果最大的因素在於濾波器的設計過程，因此如能配合該方法發展出一種更合適的濾波器類型與參數，這將能使得阻尼比識別的結果更為精準。
3. 經驗模態分解法在轉移過程中會放大區域極值，也常會造成末端資料的錯誤，除了頭尾加上一個餘弦外，不知是否有更好的方法，使得轉移完的波形，能保留其完整的物理性質。
4. 經驗模態分解法得到的第一個內建模態，經希伯特轉換後將可得到結構物自然頻率與阻尼比，為何為是第一內建個模態，仍需要有嚴謹的數學理論證明會更好。
5. 隨機遞減法的運用，基礎理論是基於高斯白噪外擾下各樓層的反應，而希伯特黃轉換僅將其通過濾波後進行經驗模態的轉移過程即使用該方法，似乎不夠嚴謹，若能發展出另一更好的方法，將得到的訊號轉換成自由振盪衰減，或許會有更好的識別效果。

## 柒、参考文献：

1. Huang, Norden E. et al., “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” Proc.R Soc. Lond. 454, 903-995, (1998).
2. Hart, GC. and Yao, JTP., “System identification in structural dynamics,” Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE; 103(EM6): 1089-1104., (1977).
3. Ljung, L. and Stoica, T., Theory and Practice of Recursive Identification, Asco.Trade Typesetting Ltd., Hong Kong., (1983).
4. Yun, C.B. and Shinozuka, M., “Program LINEARID for identification of linear structural dynamic systems,” technical report, NCEER-90-0011, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., (1990).
5. Shinozuka, M. and Ghanem, R., “Structural system identification II: experimental verification,” Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 121(2), pp.265-273, (1995).
6. Ghanem, R. and Shinozuka, M., “Structural-system identification I: theory,” Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 121(2), pp.255-264, (1995).
7. Saridis, G.N., “Comparison of six on-line identification algorithm,” Automatica, 10, pp.69-79, (1974).
8. Wu, X., et al., “Use of neural networks in detection of structural damage,” Computers and Structures, 42(4), pp.649-659, (1992).
9. Elkordy, M. F., et al., “Neural networks trained by analytically simulated damage states,” Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 7(2), pp.130-145, (1993).
10. Szweczyk, Z. P. and Hajela, P., “Damage detection in structures based on feature-sensitive neural network,” Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 8(2), pp.163-178, (1994).
11. Pandey, P. C. and Barai, S. V., “Multilayer perceptron in damage detection of bridge structures,” Computers and Structures, 54(4), pp. 597-608, (1995).
12. Zhao, J., et al., “Structural damage detection using artificial neural networks,” Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 4(3), pp. 93-101, (1998).
13. Masri, S. F., et al., “Application of neural networks for detection of changes in nonlinear systems,” Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 126(7), pp. 666-676, (2000).
14. Flandrin, P., Time-Frequency/Time-Scale Analysis, Academic Press, 386 pp, (1999).
15. Grochenig, K., Foundations of Time-Frequency Analysis, Birkhauser, 359 pp, (2001).
16. Tong, H., Nonlinear Time Series Analysis, Oxford University Press, 564 pp, (1990).
17. Kantz, H. and Schreiber, T., Nonlinear Time Series Analysis, Cambridge University Press, 304 pp, (1999).
18. Diks, C., Nonlinear Time Series Analysis: Methods and Applications, World Scientific Press, 180 pp, (1999).
19. Ruzzene, M., et al., “Natural frequencies and dampings identification using wavelet transform: Application to real data,” Mech. Syst. Signal Process, 11(2), 207–218, (1997).



20. Yang, J. N., and Lei, Y., "Identification of natural frequencies and damping ratios of linear structures via Hilbert transform and empirical mode decomposition," Proc., IASTED Int. Conf. on Intelligent Systems and Control, IASTED/Acta Press, Anaheim, Calif., 310–315, (1999).
21. Vincent HT., et al., "Damage detection using empirical mode decomposition method and a comparison with wavelet analysis," Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA: 891–900, (1999).
22. Yang, J. N., and Lei, Y., "System identification of linear structures using Hilbert transform and empirical mode decomposition," Proc., 18th Int. Modal Analysis Conf.: A Conf. on Structural Dynamics, Society for Experimental Mech., Inc., Bethel, Conn., Vol. 1, 213–219, (2000a).
23. Yang, J. N., and Lei, Y., "Identification of civil structures with nonproportional damping," Proc. SPIE, 3988, 284–294, (2000b).
24. Yang, J. N., and Lei, Y., "Parametric identification of tall buildings using ambient wind vibration data," Proc. 8th ASCE Specialty Conf. on Probabilistic Mech. and Structural Reliability (CD-Rom), ASCE, Reston, Va, (2000c).
25. Yang, J. N., and Lei, Y., "Identification of tall building using noisy wind vibration data," Advances in Structural Dynamics, Elsevier, New York, Vol. II, 1093–1100, Proc., Int. Conf. on Advances in Structural Dynamics, Hong Kong, Polytechnic Univ., Hong Kong, (2000d).
26. Yang, J. N. et al., "Parametric Identification of Tall Buildings Using Ambient Wind Vibration Data," 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability PMC2000-076, (2000).
27. Yang, J. N. , et al., "Identification of linear structures based on Hilbert-Huang transform. I: Normal modes," J. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 32(9), 1443–1467, (2003a).
28. Yang, J. N., et al., "Identification of linear structures based on Hilbert-Huang transform. II: Complex modes," J. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 32(10), 1533–1554, (2003b).
29. Yan, Jann N., et al., "Damage Identification of Structures Using Hilbert-Huang Spectral Analysis," 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, (2002).
30. Xu Y. L., et al., "Modal identification of Di Wang Building under Typhoon York using the Hilbert-Huang transform method," The Structural Design of Tall and Special Buildings, 12, 21–47, (2003).
31. Yang, Jann N., et al., "Hilbert-Huang Based Approach for Structural Damage Detection," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130, No. 1, 85-95. (2004).
32. Yan, Banfu and Miyamoto, Ayaho, "A Comparative Study of Modal Parameter Identification Based on Wavelet and Hilbert–Huang Transforms," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21, 9–23, (2006).
33. Huang, Norden E. and Shen, Samuel SP., "Hilbert-Huang Transform and Its Applications,"

Interdisciplinary Mathematical Sciences, Vol. 5, (2005).

34. Rumelhart, D. E., et al., "Learning international representation by error propagation," in Parallel Distributed Processing, D. E. Rumelhart et al., Eds, The MIT Press, Cambridge, MA, pp. 318-362, (1986).
35. Hecht-Nielsen, R., "Theory of the back propagation neural network," Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, IEEE, 1, pp. 593-605, (1989).
36. Nocedal, J., "Updating Quasi-Newton Matrix with Limited Storage," Math. Computation, 35, 20-33, (1980).
37. Hung, S. L. and Lin, Y. L., "Application of an L-BFGS Neural Network Learning Algorithm in Engineering Analysis and Design," Proc., The 2nd National Conf. on Struct. Engrg., Chinese Soc. of Struct. Eng., Taiwan, R.O.C. (in Chinese). (1994).
38. Huang, C. S., "Structural identification from ambient vibration measurement using the multivariate AR model," Journal of Sound and Vibration, 241(3), pp. 337-359, (2001).
39. Huang, C. S., "A study on techniques for analyzing ambient vibration measurement (II)-time series methods," Report No. NCREE-99-018, National Center for Research on Earthquake Engineering, R. O. C. (in Chinese). (1999).
40. Cohen, L., Time-frequency analysis, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1995).
41. Hahn, Stefan L., Hilbert transforms in signal processing, Boston: Artech House, (1996).
42. Gabor, D., "Theory of communication," Proc. IEE 93, pp. 429-457, (1946).
43. Bedrosian, E., "A product theorem for Hilbert transform," Proc.IEEE 51, pp. 868-869, (1963).
44. Cole, H. A. Jr., "Methods and apparatus for measuring the damping characteristics of a structure," United States Patent No. 3,620,069, (1971).
45. C. C. Lin ,L. L. Hong ,J. M. Ueng ,K. C. Wu and C. E. Wang, "Parametric identification of asymmetric buildings from earthquake response records," Smart Mater.Struct., 14 850–861, (2005).

表 4. 1 數值模型，衝擊載重作用。固定 4 階濾波器，通帶 0.8~2.1(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入外力：衝擊載重；識別模態：1st

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
1	以下數據取通過頻帶 0.8~2.1(Hz)之帶通濾波器					
1	4	10	1	3.70E+00	1.3696	5.0938
1	4	10	3	1.00E-03	1.3706	5.0827
1	4	10	5	5.80E-04	1.3710	5.1246
1	4	10	8	2.00E-04	1.3705	5.1819
1	4	10	10	2.40E-03	1.3699	5.1900
1	4	10	50	7.70E-07	1.3707	4.9213
1	4	10	100	4.40E-04	1.3716	5.0127
1	4	10	200	5.60E-05	1.3738	5.5118
1	4	10	500	2.60E-04	1.3695	5.6485
1	平均				1.3708	5.1964
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	4	20	1	1.10E+00	1.3693	5.0656
1	4	20	3	5.10E-03	1.3691	5.0551
1	4	20	5	2.40E-04	1.3694	5.0480
1	4	20	8	6.00E-05	1.3696	5.0565
1	4	20	10	3.40E-05	1.3696	5.0624
1	4	20	50	3.20E-04	1.3685	5.0032
1	4	20	100	4.70E-04	1.3704	4.9590
1	4	20	200	3.50E-06	1.3712	5.0533
1	4	20	500	9.30E-08	1.3757	5.5146
1	平均				1.3703	5.0909
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	4	30	1	1.70E-01	1.3796	4.7006
1	4	30	3	1.50E-03	1.3795	4.6972
1	4	30	5	7.40E-05	1.3796	4.6970
1	4	30	8	1.60E-05	1.3796	4.7024
1	4	30	10	1.10E-05	1.3797	4.7058
1	4	30	50	1.70E-03	1.3796	4.7278
1	4	30	100	3.60E-04	1.3798	4.7115
1	4	30	200	7.30E-07	1.3805	4.8092
1	4	30	500	4.20E-06	1.3811	5.1297

1	平均				1.3799	4.7646
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	4	40	1	2.60E-02	1.3606	4.8014
1	4	40	3	3.30E-04	1.3606	4.8010
1	4	40	5	1.60E-05	1.3606	4.7999
1	4	40	8	3.60E-06	1.3607	4.8001
1	4	40	10	3.80E-06	1.3607	4.8006
1	4	40	50	7.60E-07	1.3606	4.7929
1	4	40	100	4.50E-07	1.3606	4.7939
1	4	40	200	1.00E-07	1.3603	4.7949
1	4	40	500	2.80E-06	1.3601	4.7281
1	平均				1.3605	4.7903
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	4	50	1	4.80E-03	1.3153	2.3896
1	4	50	3	6.60E-05	1.3153	2.3895
1	4	50	5	3.60E-06	1.3153	2.3897
1	4	50	8	7.80E-07	1.3153	2.3895
1	4	50	10	6.80E-07	1.3153	2.3892
1	4	50	50	2.30E-07	1.3153	2.3892
1	4	50	100	1.50E-07	1.3152	2.3856
1	4	50	200	2.30E-08	1.3153	2.3915
1	4	50	500	7.90E-09	1.3151	2.3688
1	平均				1.3153	2.3870
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	4	60	1	9.20E-04	1.3046	0.3831
1	4	60	3	1.20E-05	1.3046	0.3831
1	4	60	5	9.20E-07	1.3046	0.3830
1	4	60	8	2.20E-07	1.3046	0.3830
1	4	60	10	1.30E-07	1.3046	0.3831
1	4	60	50	2.60E-08	1.3046	0.3827
1	4	60	100	1.70E-07	1.3046	0.3822
1	4	60	200	5.30E-09	1.3046	0.3792
1	4	60	500	1.30E-09	1.3045	0.3832
1	平均				1.3046	0.3825
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000

表 4. 2 數值模型，衝擊載重作用。固定 10 階濾波器，通帶 0.8~2.1(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入外力：衝擊載重；識別模態：1st

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
1	以下數據取通過頻帶 0.8~2.1(Hz)之帶通濾波器					
1	10	10	1	8.70E-01	1.3711	5.1167
1	10	10	3	2.10E-02	1.3691	5.0904
1	10	10	5	5.10E-03	1.3698	5.0072
1	10	10	8	2.00E-02	1.3717	4.9869
1	10	10	10	2.70E-03	1.3731	5.0118
1	10	10	50	3.90E-06	1.3730	5.3145
1	10	10	100	3.50E-06	1.3700	5.5806
1	10	10	200	4.90E-07	1.3670	5.3580
1	10	10	500	8.50E-08	1.3624	5.2140
1	平均				1.3697	5.1867
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	20	1	7.30E-02	1.3696	5.0881
1	10	20	3	7.30E-02	1.3697	5.0898
1	10	20	5	3.00E-03	1.3698	5.0781
1	10	20	8	1.10E-03	1.3704	5.0881
1	10	20	10	6.40E-04	1.3706	5.1078
1	10	20	50	5.00E-05	1.3669	4.9504
1	10	20	100	5.00E-06	1.3699	4.7538
1	10	20	200	7.40E-07	1.3727	4.9335
1	10	20	500	2.00E-07	1.3754	5.1846
1	平均				1.3706	5.0305
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	30	1	1.40E-02	1.3701	5.1471
1	10	30	3	2.60E-04	1.3698	5.1515
1	10	30	5	7.90E-05	1.3696	5.1512
1	10	30	8	3.80E-05	1.3694	5.1502
1	10	30	10	3.20E-05	1.3693	5.1498
1	10	30	50	6.70E-06	1.3677	5.0267
1	10	30	100	2.30E-06	1.3685	4.9008
1	10	30	200	7.10E-07	1.3704	4.9081
1	10	30	500	1.40E-07	1.3733	5.0945

1	平均				1.3698	5.0755
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	40	1	2.50E-03	1.3682	4.9835
1	10	40	3	5.50E-05	1.3683	4.9660
1	10	40	5	1.40E-05	1.3685	4.9492
1	10	40	8	8.40E-06	1.3687	4.9294
1	10	40	10	5.90E-06	1.3688	4.9191
1	10	40	50	2.00E-06	1.3713	4.8531
1	10	40	100	1.10E-06	1.3729	4.9077
1	10	40	200	4.50E-07	1.3740	5.0193
1	10	40	500	1.10E-07	1.3763	5.2418
1	平均				1.3708	4.9743
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	50	1	4.00E-04	1.3698	4.7192
1	10	50	3	1.20E-05	1.3699	4.7279
1	10	50	5	5.10E-06	1.3700	4.7371
1	10	50	8	3.40E-06	1.3700	4.7516
1	10	50	10	3.00E-06	1.3701	4.7616
1	10	50	50	8.80E-07	1.3705	4.9181
1	10	50	100	4.10E-07	1.3704	5.0188
1	10	50	200	2.40E-07	1.3708	5.0961
1	10	50	500	8.40E-08	1.3732	5.4050
1	平均				1.3705	4.9039
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	60	1	6.40E-05	1.3630	5.3996
1	10	60	3	2.60E-06	1.3630	5.3971
1	10	60	5	1.30E-06	1.3630	5.3960
1	10	60	8	1.00E-06	1.3630	5.3959
1	10	60	10	1.50E-06	1.3630	5.3970
1	10	60	50	4.70E-07	1.3631	5.4189
1	10	60	100	2.40E-07	1.3634	5.4528
1	10	60	200	9.80E-08	1.3639	5.5581
1	10	60	500	3.60E-08	1.3640	5.9556
1	平均				1.3633	5.4857
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	70	1	2.70E-05	1.3757	5.9702
1	10	70	3	6.20E-06	1.3757	5.9722

1	10	70	5	4.80E-07	1.3757	5.9740
1	10	70	8	3.50E-07	1.3756	5.9764
1	10	70	10	3.10E-07	1.3756	5.9779
1	10	70	50	2.20E-07	1.3761	6.0266
1	10	70	100	1.30E-07	1.3768	6.1141
1	10	70	200	2.30E-07	1.3777	6.3107
1	10	70	500	1.80E-08	1.3772	6.7883
1	平均				1.3762	6.1234
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	80	1	1.50E-06	1.4044	4.6756
1	10	80	3	3.80E-06	1.4044	4.6785
1	10	80	5	5.90E-06	1.4044	4.6814
1	10	80	8	2.10E-07	1.4044	4.6856
1	10	80	10	9.70E-08	1.4044	4.6884
1	10	80	50	6.20E-08	1.4039	4.7304
1	10	80	100	5.10E-08	1.4032	4.7660
1	10	80	200	3.60E-08	1.4020	4.8067
1	10	80	500	6.90E-08	1.3992	4.8114
1	平均				1.4034	4.7249
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	90	1	8.60E-07	1.3809	4.3743
1	10	90	3	1.20E-07	1.3809	4.3696
1	10	90	5	7.50E-08	1.3809	4.3652
1	10	90	8	2.00E-07	1.3809	4.3587
1	10	90	10	1.60E-07	1.3809	4.3546
1	10	90	50	3.60E-07	1.3806	4.2839
1	10	90	100	2.00E-08	1.3803	4.2093
1	10	90	200	1.40E-08	1.3798	4.0810
1	10	90	500	2.00E-08	1.3786	3.7817
1	平均				1.3804	4.2420
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	100	1	2.50E-07	1.3420	2.7941
1	10	100	3	9.60E-08	1.3420	2.7941
1	10	100	5	1.70E-08	1.3420	2.7942
1	10	100	8	1.40E-08	1.3420	2.7943
1	10	100	10	1.10E-07	1.3420	2.7943
1	10	100	50	1.80E-08	1.3421	2.7911

1	10	100	100	7.00E-09	1.3423	2.7784
1	10	100	200	8.70E-08	1.3427	2.7380
1	10	100	500	3.20E-09	1.3435	2.5981
1	平均				1.3423	2.7641
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	110	1	2.10E-07	1.3366	3.0494
1	10	110	3	1.20E-08	1.3366	3.0495
1	10	110	5	6.50E-09	1.3366	3.0497
1	10	110	8	5.20E-09	1.3366	3.0500
1	10	110	10	4.80E-09	1.3366	3.0502
1	10	110	50	2.70E-09	1.3366	3.0538
1	10	110	100	2.00E-09	1.3367	3.0541
1	10	110	200	5.70E-09	1.3369	3.0444
1	10	110	500	6.20E-09	1.3375	2.9824
1	平均				1.3367	3.0426
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	120	1	8.70E-08	1.3209	1.9939
1	10	120	3	9.40E-09	1.3209	1.9939
1	10	120	5	3.60E-09	1.3209	1.9939
1	10	120	8	2.50E-09	1.3209	1.9939
1	10	120	10	2.20E-09	1.3209	1.9938
1	10	120	50	2.00E-09	1.3209	1.9918
1	10	120	100	4.70E-09	1.3209	1.9904
1	10	120	200	1.60E-07	1.3208	1.9928
1	10	120	500	3.60E-10	1.3208	2.0076
1	平均				1.3209	1.9947
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000



表 4. 3 數值模型，衝擊載重作用。固定 4 階濾波器，通帶 2.4~3.6(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入外力：衝擊載重；識別模態：2nd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
2	以下數據取通過頻帶 2.4~3.6(Hz)之帶通濾波器					
2	4	10	1	2.90E+00	2.9893	5.5258
2	4	10	3	1.80E-03	2.9899	5.4628
2	4	10	5	1.10E-03	2.9898	5.4795
2	4	10	8	4.30E-04	2.9893	5.4887
2	4	10	10	1.90E-04	2.9890	5.4854
2	4	10	50	4.30E-06	2.9908	5.3902
2	4	10	100	5.30E-07	2.9927	5.4711
2	4	10	200	2.30E-04	2.9933	5.6510
2	4	10	500	2.30E-07	2.9851	5.8807
2	平均				2.9899	5.5372
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	4	20	1	7.00E-01	3.0192	5.8898
2	4	20	3	8.90E-04	3.0184	5.8943
2	4	20	5	1.70E-04	3.0184	5.8938
2	4	20	8	6.50E-05	3.0183	5.8935
2	4	20	10	2.80E-05	3.0183	5.8933
2	4	20	50	1.00E-06	3.0183	5.9056
2	4	20	100	3.70E-07	3.0179	5.9023
2	4	20	200	1.20E-07	3.0180	5.9060
2	4	20	500	3.40E-08	3.0188	5.9798
2	平均				3.0184	5.9065
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	4	30	1	1.10E-01	3.0089	4.8961
2	4	30	3	2.10E-04	3.0088	4.8954
2	4	30	5	4.40E-05	3.0088	4.8951
2	4	30	8	1.20E-05	3.0088	4.8949
2	4	30	10	6.30E-06	3.0088	4.8947
2	4	30	50	2.90E-07	3.0088	4.8922
2	4	30	100	9.30E-08	3.0088	4.8892
2	4	30	200	3.10E-08	3.0089	4.8846
2	4	30	500	1.40E-08	3.0088	4.8741

2	平均				3.0088	4.8907
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	4	40	1	1.80E-02	2.9544	2.2068
2	4	40	3	3.70E-05	2.9544	2.2068
2	4	40	5	6.20E-06	2.9544	2.2068
2	4	40	8	2.10E-06	2.9544	2.2069
2	4	40	10	1.30E-06	2.9544	2.2069
2	4	40	50	5.10E-08	2.9544	2.2070
2	4	40	100	1.50E-07	2.9544	2.2069
2	4	40	200	5.10E-09	2.9544	2.2069
2	4	40	500	1.30E-09	2.9544	2.2064
2	平均				2.9544	2.2068
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	4	50	1	3.00E-03	2.9441	1.2793
2	4	50	3	5.90E-06	2.9441	1.2794
2	4	50	5	1.20E-06	2.9441	1.2794
2	4	50	8	6.70E-07	2.9441	1.2794
2	4	50	10	2.40E-07	2.9441	1.2794
2	4	50	50	5.70E-08	2.9440	1.2794
2	4	50	100	2.30E-09	2.9440	1.2793
2	4	50	200	8.30E-10	2.9440	1.2793
2	4	50	500	2.30E-10	2.9440	1.2793
2	平均				2.9441	1.2794
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	4	60	1	5.20E-04	2.9408	0.6182
2	4	60	3	9.60E-07	2.9408	0.6182
2	4	60	5	2.30E-07	2.9408	0.6182
2	4	60	8	6.60E-08	2.9408	0.6182
2	4	60	10	3.80E-08	2.9408	0.6182
2	4	60	50	1.50E-09	2.9408	0.6182
2	4	60	100	4.60E-10	2.9408	0.6182
2	4	60	200	1.50E-10	2.9408	0.6182
2	4	60	500	3.90E-11	2.9408	0.6182
2	平均				2.9408	0.6182
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000

表 4. 4 數值模型，衝擊載重作用。固定 10 階濾波器，通帶 2.4~3.6(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入外力：衝擊載重；識別模態：2nd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
2	以下數據取通過頻帶 2.4~3.6(Hz)之帶通濾波器					
2	10	10	1	4.40E-02	3.0605	7.9243
2	10	10	3	6.80E-02	3.0803	7.8985
2	10	10	5	1.40E-03	3.0868	7.9060
2	10	10	8	2.70E-04	3.0897	7.9038
2	10	10	10	2.70E-04	3.0907	7.8574
2	10	10	50	1.50E-05	3.1112	7.7457
2	10	10	100	3.70E-06	3.1051	8.3181
2	10	10	200	8.90E-07	3.0738	8.0662
2	10	10	500	1.40E-07	3.0277	4.6600
2	平均				3.0806	7.5867
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	20	1	1.10E-02	3.0457	10.7581
2	10	20	3	9.10E-04	3.0418	10.9885
2	10	20	5	1.90E-04	3.0403	10.9693
2	10	20	8	3.00E-05	3.0399	10.8980
2	10	20	10	1.30E-05	3.0399	10.8582
2	10	20	50	2.30E-07	3.0370	10.2209
2	10	20	100	1.10E-07	3.0337	9.7078
2	10	20	200	7.00E-08	3.0271	8.9880
2	10	20	500	3.40E-08	3.0106	7.5045
2	平均				3.0351	10.0993
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	30	1	7.50E-04	3.0629	5.8529
2	10	30	3	8.80E-05	3.0624	5.8784
2	10	30	5	1.80E-05	3.0621	5.8767
2	10	30	8	2.60E-06	3.0620	5.8678
2	10	30	10	1.30E-06	3.0620	5.8619
2	10	30	50	3.30E-08	3.0625	5.7530
2	10	30	100	2.60E-08	3.0637	5.6373
2	10	30	200	2.20E-08	3.0658	5.4278
2	10	30	500	1.60E-08	3.0704	4.8674

2	平均				3.0638	5.6692
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	40	1	5.40E-05	3.0749	7.6859
2	10	40	3	6.80E-06	3.0750	7.6727
2	10	40	5	1.80E-06	3.0748	7.6650
2	10	40	8	3.40E-07	3.0746	7.6560
2	10	40	10	1.60E-07	3.0745	7.6585
2	10	40	50	2.70E-08	3.0730	7.5982
2	10	40	100	1.10E-08	3.0720	7.5236
2	10	40	200	7.90E-09	3.0708	7.3689
2	10	40	500	5.00E-09	3.0693	6.9180
2	平均				3.0732	7.5274
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	50	1	1.30E-05	3.1025	7.3071
2	10	50	3	9.70E-07	3.1024	7.3011
2	10	50	5	3.50E-07	3.1023	7.2928
2	10	50	8	1.70E-07	3.1022	7.2811
2	10	50	10	1.10E-07	3.1021	7.2742
2	10	50	50	1.60E-08	3.0998	7.2096
2	10	50	100	8.70E-09	3.0981	7.1706
2	10	50	200	5.20E-09	3.0955	7.1137
2	10	50	500	1.30E-08	3.0912	6.9440
2	平均				3.0996	7.2105
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	60	1	2.90E-06	3.0992	6.0255
2	10	60	3	3.50E-07	3.0992	6.0231
2	10	60	5	1.40E-07	3.0991	6.0204
2	10	60	8	6.30E-08	3.0989	6.0170
2	10	60	10	4.60E-08	3.0989	6.0151
2	10	60	50	7.20E-09	3.0980	5.9831
2	10	60	100	5.20E-09	3.0974	5.9406
2	10	60	200	3.90E-09	3.0961	5.8679
2	10	60	500	1.90E-09	3.0930	5.7176
2	平均				3.0978	5.9567
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	70	1	7.50E-07	3.0194	4.6984
2	10	70	3	5.20E-08	3.0194	4.6999

2	10	70	5	2.70E-08	3.0194	4.7012
2	10	70	8	3.50E-08	3.0194	4.7027
2	10	70	10	1.30E-08	3.0194	4.7036
2	10	70	50	3.30E-09	3.0196	4.7106
2	10	70	100	2.10E-09	3.0200	4.7073
2	10	70	200	1.20E-09	3.0208	4.6854
2	10	70	500	1.10E-09	3.0224	4.5882
2	平均				3.0200	4.6886
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	80	1	1.90E-07	3.0187	4.5992
2	10	80	3	1.80E-08	3.0187	4.6005
2	10	80	5	9.20E-09	3.0188	4.6013
2	10	80	8	6.30E-09	3.0188	4.6023
2	10	80	10	5.20E-09	3.0188	4.6027
2	10	80	50	1.50E-09	3.0193	4.6024
2	10	80	100	9.70E-10	3.0197	4.5911
2	10	80	200	5.50E-10	3.0204	4.5673
2	10	80	500	2.90E-10	3.0216	4.4895
2	平均				3.0194	4.5840
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	90	1	9.80E-08	3.0361	5.3213
2	10	90	3	6.60E-09	3.0361	5.3218
2	10	90	5	4.20E-09	3.0361	5.3222
2	10	90	8	2.80E-09	3.0362	5.3226
2	10	90	10	2.30E-09	3.0363	5.3227
2	10	90	50	1.00E-09	3.0371	5.3148
2	10	90	100	5.70E-10	3.0379	5.2965
2	10	90	200	2.70E-10	3.0390	5.2542
2	10	90	500	1.30E-10	3.0406	5.1343
2	平均				3.0373	5.2900
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	100	1	1.30E-07	3.0110	4.5867
2	10	100	3	4.40E-09	3.0111	4.5877
2	10	100	5	3.00E-09	3.0111	4.5879
2	10	100	8	1.40E-09	3.0111	4.5889
2	10	100	10	1.20E-09	3.0111	4.5895
2	10	100	50	3.80E-10	3.0116	4.5941

2	10	100	100	2.30E-10	3.0120	4.5924
2	10	100	200	1.30E-10	3.0127	4.5820
2	10	100	500	6.40E-11	3.0140	4.5347
2	平均				3.0117	4.5827
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	110	1	1.40E-07	2.9643	2.7051
2	10	110	3	2.30E-09	2.9643	2.7050
2	10	110	5	1.10E-09	2.9643	2.7050
2	10	110	8	7.40E-10	2.9643	2.7049
2	10	110	10	6.30E-10	2.9643	2.7048
2	10	110	50	2.10E-10	2.9642	2.7049
2	10	110	100	1.50E-10	2.9642	2.7067
2	10	110	200	1.20E-10	2.9641	2.7115
2	10	110	500	3.30E-11	2.9641	2.7262
2	平均				2.9642	2.7082
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	120	1	1.50E-07	2.9502	1.5191
2	10	120	3	7.10E-10	2.9502	1.5191
2	10	120	5	4.30E-10	2.9502	1.5191
2	10	120	8	3.20E-10	2.9502	1.5191
2	10	120	10	2.90E-10	2.9502	1.5192
2	10	120	50	1.10E-10	2.9502	1.5192
2	10	120	100	6.40E-11	2.9502	1.5192
2	10	120	200	3.60E-11	2.9502	1.5193
2	10	120	500	1.60E-11	2.9502	1.5188
2	平均				2.9502	1.5191
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000

表 4. 5 數值模型，衝擊載重作用。固定 10 階濾波器，通帶 2.4~3.6(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入外力：衝擊載重；識別模態：3rd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
3	以下數據取通過頻帶 4~5.2(Hz)之帶通濾波器					
3	4	10	1	3.00E+00	4.5977	6.0783
3	4	10	3	1.20E-04	4.6024	5.9451
3	4	10	5	9.20E-05	4.6075	5.8856
3	4	10	8	4.40E-05	4.6134	5.8284
3	4	10	10	3.70E-05	4.6167	5.8118
3	4	10	50	4.00E-06	4.6369	5.8542
3	4	10	100	8.50E-07	4.6411	5.9097
3	4	10	200	3.40E-07	4.6468	6.1070
3	4	10	500	3.60E-08	4.6332	6.7202
3	平均				4.6217	6.0156
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	4	20	1	8.80E-01	4.6114	4.9810
3	4	20	3	9.10E-05	4.6119	4.9744
3	4	20	5	2.70E-05	4.6125	4.9666
3	4	20	8	1.40E-05	4.6131	4.9592
3	4	20	10	1.50E-05	4.6135	4.9563
3	4	20	50	2.00E-06	4.6151	4.9633
3	4	20	100	5.60E-07	4.6149	4.9718
3	4	20	200	1.40E-07	4.6146	4.9712
3	4	20	500	2.60E-08	4.6151	4.9566
3	平均				4.6136	4.9667
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	4	30	1	1.50E-01	4.5973	4.2821
3	4	30	3	1.80E-05	4.5973	4.2832
3	4	30	5	5.70E-06	4.5973	4.2834
3	4	30	8	3.50E-06	4.5973	4.2838
3	4	30	10	3.00E-06	4.5973	4.2841
3	4	30	50	6.50E-07	4.5973	4.2905
3	4	30	100	1.70E-07	4.5973	4.2952
3	4	30	200	4.20E-08	4.5975	4.3007
3	4	30	500	8.60E-09	4.5980	4.3060

3	平均				4.5974	4.2899
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	4	40	1	2.50E-02	4.5684	2.0508
3	4	40	3	1.40E-05	4.5684	2.0509
3	4	40	5	1.20E-06	4.5684	2.0509
3	4	40	8	6.00E-07	4.5684	2.0509
3	4	40	10	5.00E-07	4.5684	2.0510
3	4	40	50	6.90E-08	4.5684	2.0511
3	4	40	100	4.30E-07	4.5684	2.0511
3	4	40	200	7.80E-09	4.5684	2.0511
3	4	40	500	1.50E-09	4.5684	2.0512
3	平均				4.5684	2.0510
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	4	50	1	4.30E-03	4.5632	1.0870
3	4	50	3	7.20E-07	4.5632	1.0870
3	4	50	5	2.00E-07	4.5632	1.0870
3	4	50	8	1.00E-07	4.5632	1.0870
3	4	50	10	1.60E-07	4.5632	1.0870
3	4	50	50	1.60E-08	4.5632	1.0870
3	4	50	100	4.80E-09	4.5632	1.0870
3	4	50	200	1.40E-09	4.5632	1.0870
3	4	50	500	2.70E-10	4.5632	1.0870
3	平均				4.5632	1.0870
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	4	60	1	7.50E-04	4.5615	0.5154
3	4	60	3	1.20E-07	4.5615	0.5154
3	4	60	5	3.60E-08	4.5615	0.5154
3	4	60	8	1.80E-08	4.5615	0.5154
3	4	60	10	1.60E-08	4.5615	0.5154
3	4	60	50	2.80E-09	4.5615	0.5154
3	4	60	100	8.50E-10	4.5615	0.5154
3	4	60	200	2.40E-10	4.5615	0.5154
3	4	60	500	4.40E-11	4.5615	0.5154
3	平均				4.5615	0.5154
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000



表 4. 6 數值模型，衝擊載重作用。固定 10 階濾波器，通帶 4~5.2 (Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入外力：衝擊載重；識別模態：3rd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
3	以下數據取通過頻帶 4~5.2(Hz)之帶通濾波器					
3	10	10	1	5.00E-02	4.9024	7.7168
3	10	10	3	6.70E-04	4.9046	7.3555
3	10	10	5	1.20E-03	4.9086	7.1536
3	10	10	8	1.40E-04	4.9142	6.9984
3	10	10	10	5.90E-05	4.9173	6.9444
3	10	10	50	4.10E-05	4.9355	7.0203
3	10	10	100	3.70E-06	4.9398	7.0612
3	10	10	200	1.00E-06	4.9484	7.0629
3	10	10	500	9.60E-08	4.9560	7.1446
3	平均				4.9252	7.1620
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	20	1	6.40E-03	4.7828	4.8497
3	10	20	3	6.20E-05	4.7859	4.8448
3	10	20	5	6.30E-05	4.7878	4.8402
3	10	20	8	3.10E-05	4.7897	4.8323
3	10	20	10	1.70E-05	4.7907	4.8305
3	10	20	50	1.50E-06	4.7933	4.8183
3	10	20	100	4.90E-07	4.7935	4.7867
3	10	20	200	1.10E-07	4.7940	4.7589
3	10	20	500	1.20E-08	4.7930	4.7230
3	平均				4.7901	4.8094
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	30	1	6.70E-04	4.8178	5.9683
3	10	30	3	3.80E-06	4.8180	5.9812
3	10	30	5	5.90E-06	4.8181	5.9892
3	10	30	8	3.80E-06	4.8181	5.9959
3	10	30	10	2.50E-06	4.8181	5.9981
3	10	30	50	3.10E-08	4.8170	5.9593
3	10	30	100	2.60E-08	4.8162	5.9064
3	10	30	200	8.00E-09	4.8148	5.8234
3	10	30	500	1.60E-09	4.8126	5.6407

3	平均				4.8167	5.9181
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	40	1	8.00E-05	4.9044	5.6584
3	10	40	3	3.90E-07	4.9043	5.6595
3	10	40	5	7.50E-07	4.9042	5.6604
3	10	40	8	5.50E-07	4.9040	5.6615
3	10	40	10	3.90E-07	4.9039	5.6622
3	10	40	50	3.50E-09	4.9025	5.6728
3	10	40	100	2.80E-09	4.9010	5.6822
3	10	40	200	1.50E-09	4.8985	5.6973
3	10	40	500	7.70E-10	4.8934	5.7238
3	平均				4.9018	5.6753
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	50	1	1.60E-05	4.7128	5.4240
3	10	50	3	5.70E-08	4.7129	5.4240
3	10	50	5	1.20E-07	4.7130	5.4239
3	10	50	8	1.00E-07	4.7131	5.4233
3	10	50	10	8.00E-08	4.7132	5.4229
3	10	50	50	2.80E-08	4.7144	5.4101
3	10	50	100	1.30E-09	4.7154	5.3881
3	10	50	200	9.30E-10	4.7166	5.3400
3	10	50	500	5.70E-10	4.7188	5.1966
3	平均				4.7145	5.3837
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	60	1	1.50E-06	4.6674	4.5781
3	10	60	3	2.20E-08	4.6674	4.5800
3	10	60	5	1.30E-08	4.6674	4.5814
3	10	60	8	1.20E-08	4.6674	4.5831
3	10	60	10	1.00E-08	4.6675	4.5840
3	10	60	50	1.70E-09	4.6681	4.5894
3	10	60	100	9.60E-10	4.6688	4.5863
3	10	60	200	5.30E-10	4.6698	4.5718
3	10	60	500	3.50E-09	4.6717	4.5136
3	平均				4.6684	4.5742
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	70	1	6.60E-07	4.6573	4.7432
3	10	70	3	1.50E-08	4.6573	4.7454

3	10	70	5	9.40E-09	4.6573	4.7472
3	10	70	8	1.00E-08	4.6574	4.7493
3	10	70	10	5.60E-09	4.6574	4.7504
3	10	70	50	1.10E-09	4.6582	4.7588
3	10	70	100	5.90E-10	4.6590	4.7574
3	10	70	200	3.40E-10	4.6602	4.7450
3	10	70	500	1.50E-10	4.6625	4.6924
3	平均				4.6585	4.7432
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	80	1	5.40E-07	4.6417	4.5832
3	10	80	3	4.80E-08	4.6418	4.5870
3	10	80	5	6.90E-09	4.6418	4.5892
3	10	80	8	3.70E-09	4.6418	4.5920
3	10	80	10	2.90E-09	4.6418	4.5936
3	10	80	50	7.10E-10	4.6424	4.6104
3	10	80	100	3.70E-10	4.6431	4.6179
3	10	80	200	2.10E-10	4.6441	4.6197
3	10	80	500	9.10E-11	4.6464	4.5969
3	平均				4.6428	4.5989
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	90	1	6.20E-07	4.5996	3.1289
3	10	90	3	8.40E-09	4.5996	3.1290
3	10	90	5	3.40E-09	4.5996	3.1291
3	10	90	8	1.90E-09	4.5995	3.1294
3	10	90	10	1.60E-09	4.5995	3.1296
3	10	90	50	4.00E-10	4.5993	3.1357
3	10	90	100	2.20E-10	4.5992	3.1430
3	10	90	200	1.10E-10	4.5992	3.1544
3	10	90	500	4.70E-11	4.5995	3.1738
3	平均				4.5994	3.1392
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	100	1	6.70E-07	4.5779	1.8793
3	10	100	3	3.20E-09	4.5779	1.8793
3	10	100	5	1.80E-09	4.5779	1.8792
3	10	100	8	1.20E-09	4.5779	1.8791
3	10	100	10	9.40E-10	4.5779	1.8791
3	10	100	50	2.20E-10	4.5779	1.8789

3	10	100	100	1.20E-10	4.5779	1.8785
3	10	100	200	6.20E-11	4.5779	1.8775
3	10	100	500	2.50E-11	4.5778	1.8771
3	平均				4.5779	1.8787
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	110	1	6.10E-07	4.5722	1.5135
3	10	110	3	1.20E-08	4.5722	1.5135
3	10	110	5	9.50E-10	4.5722	1.5135
3	10	110	8	6.30E-10	4.5722	1.5136
3	10	110	10	5.30E-10	4.5722	1.5136
3	10	110	50	1.20E-10	4.5722	1.5136
3	10	110	100	6.30E-11	4.5722	1.5133
3	10	110	200	3.40E-11	4.5721	1.5131
3	10	110	500	1.40E-11	4.5721	1.5140
3	平均				4.5722	1.5135
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	120	1	5.40E-07	4.5698	1.5122
3	10	120	3	1.30E-09	4.5698	1.5121
3	10	120	5	5.30E-10	4.5698	1.5121
3	10	120	8	3.10E-10	4.5698	1.5121
3	10	120	10	2.50E-10	4.5698	1.5121
3	10	120	50	6.00E-11	4.5698	1.5120
3	10	120	100	4.70E-11	4.5698	1.5119
3	10	120	200	1.70E-11	4.5698	1.5115
3	10	120	500	7.00E-12	4.5697	1.5114
3	平均				4.5698	1.5119
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000

表 4. 7 比較衝擊載重作用下 HHT 與 ANN 的識別結果。

模態	HHT 識別 自然頻率 (Hz)	ANN 識別 自然頻率 (Hz)	理論值 (Hz)	HHT 識別 阻尼比 (%)	ANN 識別 阻尼比 (%)	理論值 (%)
1	1.40	1.37	1.37	4.72	5.00	5.00
2	3.02	2.99	2.99	4.58	5.00	5.00
3	4.64	4.56	4.56	4.60	5.02	5.00

表 4. 8 數值模型，高斯白噪作用。固定 10 階濾波器，通帶 0.8~2.1(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：高斯白噪；識別模態：1st						
模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
1	以下數據取通過頻帶 0.8~2.1(Hz)之帶通濾波器					
1	10	30	1	x <sup>2</sup>	x	x
1	10	30	3	x	x	x
1	10	30	5	x	x	x
1	10	30	8	x	x	x
1	10	30	10	x	x	x
1	10	30	50	x	x	x
1	10	30	100	x	x	x
1	10	30	200	x	x	x
1	10	30	500	x	x	x
1	平均				x	x
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	40	1	x	x	x
1	10	40	3	x	x	x
1	10	40	5	x	x	x
1	10	40	8	x	x	x
1	10	40	10	x	x	x
1	10	40	50	x	x	x
1	10	40	100	x	x	x
1	10	40	200	x	x	x
1	10	40	500	x	x	x
1	平均				x	x
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	50	1	3.20E-01	1.3240	3.1926
1	10	50	3	3.20E-01	1.3240	3.1926
1	10	50	5	2.40E-01	1.3452	1.8020
1	10	50	8	9.50E-01	1.3368	2.4637
1	10	50	10	2.10E+00	1.3511	1.9525
1	10	50	50	1.40E-02	1.3384	4.2400
1	10	50	100	5.00E-04	*1.2538	*7.6927
1	10	50	200	1.80E-04	*3.2776	*10.3071
1	10	50	500	*	*	*
1	平均				1.3366	2.8072

<sup>2</sup>X 表示濾波轉移過後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法。

1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	60	1	4.70E-03	1.3289	3.4313
1	10	60	3	2.00E-03	1.3293	3.4197
1	10	60	5	4.60E-03	1.3298	3.3583
1	10	60	8	2.30E-04	1.3324	3.0298
1	10	60	10	1.10E-04	1.3332	3.1954
1	10	60	50	2.30E-05	1.3413	2.9541
1	10	60	100	8.00E-05	1.3427	2.9057
1	10	60	200	8.90E-04	1.3330	2.3366
1	10	60	500	3.10E-06	1.3340	1.3607
1	平均				1.3338	2.8880
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	70	1	3.10E-04	1.3351	2.4931
1	10	70	3	9.00E-05	1.3354	2.5085
1	10	70	5	1.20E-05	1.3356	2.5081
1	10	70	8	6.50E-06	1.3358	2.5123
1	10	70	10	4.60E-06	1.3359	2.5152
1	10	70	50	3.90E-06	1.3376	2.5489
1	10	70	100	4.50E-07	1.3376	2.5589
1	10	70	200	1.20E-07	1.3375	2.5847
1	10	70	500	8.20E-07	1.3395	1.7192
1	平均				1.3367	2.4388
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	80	1	3.90E-04	1.3413	2.2937
1	10	80	3	1.50E-05	1.3412	2.2838
1	10	80	5	5.30E-06	1.3412	2.2801
1	10	80	8	2.60E-06	1.3412	2.2767
1	10	80	10	1.80E-06	1.3412	2.2752
1	10	80	50	2.30E-07	1.3411	2.2681
1	10	80	100	9.20E-05	1.3415	2.0675
1	10	80	200	3.10E-08	1.3416	2.0467
1	10	80	500	7.60E-09	1.3401	1.2648
1	平均				1.3412	2.1174
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	90	1	1.60E-05	1.3354	1.2972
1	10	90	3	2.10E-06	1.3354	1.2955
1	10	90	5	1.00E-06	1.3354	1.2943
1	10	90	8	5.20E-07	1.3354	1.2932
1	10	90	10	4.90E-07	1.3354	1.2919
1	10	90	50	8.00E-08	1.3353	1.2832
1	10	90	100	3.70E-08	1.3354	1.2719

1	10	90	200	6.30E-08	1.3354	1.2512
1	10	90	500	3.70E-09	1.3310	0.5832
1	平均				1.3349	1.2068
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	100	1	7.90E-05	1.3227	0.9426
1	10	100	3	6.30E-06	1.3228	0.9418
1	10	100	5	2.40E-06	1.3229	0.9418
1	10	100	8	1.10E-06	1.3230	0.9407
1	10	100	10	7.50E-07	1.3231	0.9400
1	10	100	50	6.60E-08	1.3236	0.9309
1	10	100	100	2.30E-08	1.3238	0.9250
1	10	100	200	9.20E-09	1.3240	0.9136
1	10	100	500	2.60E-09	1.3245	0.8795
1	平均				1.3234	0.9284
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	110	1	1.40E-05	1.3175	0.5465
1	10	110	3	1.70E-06	1.3175	0.5486
1	10	110	5	7.70E-07	1.3175	0.5468
1	10	110	8	4.40E-07	1.3176	0.5432
1	10	110	10	3.00E-07	1.3176	0.5407
1	10	110	50	3.80E-08	1.3178	0.5104
1	10	110	100	1.60E-08	1.3180	0.4927
1	10	110	200	6.70E-09	1.3184	0.4694
1	10	110	500	2.20E-09	1.3192	0.4384
1	平均				1.3179	0.5152
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	120	1	3.80E-05	1.3115	2.5799
1	10	120	3	3.50E-06	1.3114	2.5647
1	10	120	5	1.70E-06	1.3113	2.5614
1	10	120	8	7.30E-07	1.3112	2.5609
1	10	120	10	6.00E-07	1.3111	2.5615
1	10	120	50	1.10E-07	1.3102	1.2686
1	10	120	100	2.90E-08	1.3105	1.2686
1	10	120	200	8.30E-09	1.3110	1.2814
1	10	120	500	3.50E-09	1.3119	1.3300
1	平均				1.3111	1.9974
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000

表 4. 9 數值模型，高斯白噪作用。固定 10 階濾波器，通帶 2.4~3.6(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：高斯白噪；識別模態：2nd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
2	以下數據取通過頻帶 2.4~3.6(Hz)之帶通濾波器					
2	10	30	1	2.10E-01	3.0599	4.3986
2	10	30	3	1.60E-01	3.1167	7.5002
2	10	30	5	1.30E-01	3.1000	10.0889
2	10	30	8	1.20E-01	2.5241	10.0467
2	10	30	10	6.90E-02	1.9958	16.0376
2	10	30	50	*1	*	*
2	10	30	100	*	*	*
2	10	30	200	*	*	*
2	10	30	500	*	*	*
2	平均				2.7593	9.6144
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	40	1	1.20E-02	3.0532	5.3656
2	10	40	3	7.80E-03	3.0323	5.6123
2	10	40	5	1.10E-02	3.0624	5.0686
2	10	40	8	2.00E-03	3.0416	5.0659
2	10	40	10	3.30E-04	3.0368	5.1128
2	10	40	50	6.90E-04	3.0726	5.1007
2	10	40	100	1.90E-04	3.0786	4.6807
2	10	40	200	5.80E-04	3.0694	5.4887
2	10	40	500	3.60E-03	2.7884	12.2498
2	平均				3.0261	5.9717
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	50	1	4.40E-04	3.0426	4.1128
2	10	50	3	2.50E-05	3.0426	4.1117
2	10	50	5	7.90E-06	3.0380	4.1378
2	10	50	8	2.50E-05	3.0380	4.1381
2	10	50	10	3.20E-06	3.0382	4.1371
2	10	50	50	4.00E-06	3.0177	3.8409
2	10	50	100	1.90E-06	3.0198	3.6991
2	10	50	200	4.20E-07	3.0121	3.8225
2	10	50	500	6.90E-08	3.0011	4.0127

<sup>1</sup>\*表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤。



2	平均				3.0278	4.0014
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	60	1	3.60E-05	2.9985	3.1954
2	10	60	3	3.10E-06	2.9984	3.1963
2	10	60	5	1.90E-06	2.9984	3.1980
2	10	60	8	7.20E-07	2.9985	3.2001
2	10	60	10	5.20E-07	2.9985	3.2012
2	10	60	50	8.30E-08	2.9991	3.2161
2	10	60	100	4.00E-08	2.9996	3.2275
2	10	60	200	1.60E-08	3.0006	3.2434
2	10	60	500	8.00E-09	3.0012	3.2614
2	平均				2.9992	3.2155
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	70	1	6.30E-06	2.9969	1.9614
2	10	70	3	7.80E-07	2.9969	1.9618
2	10	70	5	4.00E-07	2.9969	1.9622
2	10	70	8	2.20E-07	2.9969	1.9626
2	10	70	10	1.70E-07	2.9969	1.9628
2	10	70	50	2.90E-08	2.9971	1.9650
2	10	70	100	1.40E-08	2.9973	1.9648
2	10	70	200	7.50E-09	2.9971	1.9959
2	10	70	500	4.30E-09	2.9939	1.9935
2	平均				2.9967	1.9700
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	80	1	3.30E-07	2.9667	1.2306
2	10	80	3	2.60E-08	2.9667	1.2307
2	10	80	5	2.20E-08	2.9667	1.2308
2	10	80	8	1.40E-08	2.9668	1.2309
2	10	80	10	1.20E-08	2.9668	1.2310
2	10	80	50	3.20E-08	2.9670	1.2322
2	10	80	100	2.50E-09	2.9672	1.2334
2	10	80	200	1.60E-09	2.9675	1.2355
2	10	80	500	8.20E-10	2.9681	1.2414
2	平均				2.9671	1.2329
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	90	1	9.00E-08	2.9775	0.5653
2	10	90	3	1.70E-09	2.9775	0.5653
2	10	90	5	7.10E-10	2.9775	0.5653
2	10	90	8	3.80E-10	2.9775	0.5653
2	10	90	10	3.30E-10	2.9775	0.5653
2	10	90	50	2.00E-10	2.9775	0.5656

2	10	90	100	1.10E-08	2.9775	0.5659
2	10	90	200	1.30E-10	2.9775	0.5665
2	10	90	500	9.60E-11	2.9775	0.5680
2	平均				2.9775	0.5658
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	100	1	8.50E-08	2.9752	0.3467
2	10	100	3	1.10E-09	2.9752	0.3467
2	10	100	5	5.80E-10	2.9752	0.3468
2	10	100	8	3.90E-10	2.9752	0.3468
2	10	100	10	3.40E-10	2.9752	0.3468
2	10	100	50	1.60E-10	2.9752	0.3472
2	10	100	100	1.20E-10	2.9752	0.3476
2	10	100	200	7.30E-11	2.9752	0.3481
2	10	100	500	4.20E-11	2.9752	0.3489
2	平均				2.9752	0.3473
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	110	1	1.60E-07	2.9647	0.2012
2	10	110	3	1.10E-08	2.9647	0.2012
2	10	110	5	8.80E-09	2.9647	0.2012
2	10	110	8	1.20E-08	2.9647	0.2012
2	10	110	10	2.90E-09	2.9647	0.2012
2	10	110	50	8.90E-09	2.9647	0.2012
2	10	110	100	2.70E-10	2.9647	0.2012
2	10	110	200	1.30E-10	2.9647	0.2011
2	10	110	500	5.20E-11	2.9647	0.2014
2	平均				2.9647	0.2012
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	120	1	7.60E-07	2.9589	0.2967
2	10	120	3	5.10E-08	2.9589	0.2967
2	10	120	5	2.20E-08	2.9589	0.2967
2	10	120	8	1.10E-08	2.9589	0.2967
2	10	120	10	8.00E-09	2.9589	0.2967
2	10	120	50	8.20E-10	2.9589	0.2968
2	10	120	100	3.20E-10	2.9589	0.2968
2	10	120	200	1.30E-10	2.9589	0.2968
2	10	120	500	4.20E-11	2.9589	0.2969
2	平均				2.9589	0.2968
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000

表 4. 10 數值模型，高斯白噪作用。固定 10 階濾波器，通帶 4~5.2(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：高斯白噪；識別模態：3rd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
3	以下數據取通過頻帶 4.0~5.2(Hz)之帶通濾波器					
3	10	30	1	5.40E-02	4.6778	2.6592
3	10	30	3	1.90E-02	4.6829	2.9347
3	10	30	5	2.40E-02	4.6948	3.1900
3	10	30	8	8.80E-03	4.6983	3.4632
3	10	30	10	1.50E-03	4.7047	3.5335
3	10	30	50	3.00E-04	4.6711	5.2183
3	10	30	100	1.10E-04	4.6664	5.9501
3	10	30	200	6.20E-04	4.6693	7.0384
3	10	30	500	5.10E-03	4.5717	13.1624
3	平均				4.6708	5.2389
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	40	1	2.30E-03	4.6551	2.0342
3	10	40	3	2.80E-04	4.6555	2.0420
3	10	40	5	2.20E-04	4.6554	1.9903
3	10	40	8	4.60E-05	4.6554	1.9884
3	10	40	10	2.20E-05	4.6554	1.9878
3	10	40	50	3.70E-05	4.6612	1.9424
3	10	40	100	1.00E-06	4.6603	1.9412
3	10	40	200	4.40E-07	4.6554	1.9822
3	10	40	500	2.00E-04	4.6543	2.1589
3	平均				4.6564	2.0075
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	50	1	2.40E-05	4.6027	1.3904
3	10	50	3	1.70E-06	4.6027	1.3907
3	10	50	5	1.80E-06	4.6027	1.3910
3	10	50	8	2.90E-07	4.6027	1.3909
3	10	50	10	2.50E-07	4.6026	1.3909
3	10	50	50	1.00E-07	4.6024	1.3899
3	10	50	100	2.90E-08	4.6023	1.3873
3	10	50	200	5.50E-09	4.5987	1.3914
3	10	50	500	2.00E-09	4.5963	1.3528
3	平均				4.6015	1.3861
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	60	1	5.00E-06	4.5747	0.7942

3	10	60	3	3.50E-07	4.5747	0.7941
3	10	60	5	2.20E-07	4.5747	0.7941
3	10	60	8	3.70E-08	4.5747	0.7940
3	10	60	10	4.90E-08	4.5747	0.7940
3	10	60	50	4.90E-09	4.5748	0.7765
3	10	60	100	2.80E-09	4.5748	0.7759
3	10	60	200	1.20E-09	4.5719	0.7482
3	10	60	500	6.20E-10	4.5721	0.7504
3	平均				4.5741	0.7802
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	70	1	1.20E-05	4.5649	0.4970
3	10	70	3	6.20E-07	4.5649	0.4970
3	10	70	5	4.00E-07	4.5648	0.4971
3	10	70	8	1.40E-07	4.5648	0.4972
3	10	70	10	3.10E-07	4.5648	0.4973
3	10	70	50	5.00E-09	4.5648	0.4993
3	10	70	100	1.80E-09	4.5647	0.5008
3	10	70	200	7.10E-10	4.5648	0.5020
3	10	70	500	2.50E-10	4.5649	0.5028
3	平均				4.5648	0.4989
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	80	1	7.30E-07	4.5621	0.3152
3	10	80	3	1.80E-08	4.5621	0.3152
3	10	80	5	1.80E-08	4.5621	0.3153
3	10	80	8	9.00E-09	4.5621	0.3154
3	10	80	10	3.80E-09	4.5621	0.3154
3	10	80	50	7.70E-10	4.5622	0.3158
3	10	80	100	3.80E-10	4.5622	0.3158
3	10	80	200	2.00E-10	4.5623	0.3155
3	10	80	500	9.80E-11	4.5620	0.2870
3	平均				4.5621	0.3123
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	90	1	3.80E-07	4.5644	0.2503
3	10	90	3	4.70E-09	4.5644	0.2503
3	10	90	5	1.30E-09	4.5644	0.2503
3	10	90	8	5.10E-10	4.5644	0.2503
3	10	90	10	4.20E-10	4.5644	0.2503
3	10	90	50	2.40E-10	4.5644	0.2503
3	10	90	100	8.20E-11	4.5644	0.2503
3	10	90	200	5.10E-11	4.5643	0.2502
3	10	90	500	2.70E-11	4.5643	0.2498

3	平均				4.5644	0.2502
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	100	1	3.30E-07	4.5675	0.2092
3	10	100	3	7.80E-09	4.5675	0.2092
3	10	100	5	4.10E-09	4.5675	0.2092
3	10	100	8	4.20E-09	4.5675	0.2092
3	10	100	10	1.50E-09	4.5675	0.2092
3	10	100	50	3.00E-10	4.5675	0.2091
3	10	100	100	1.70E-10	4.5675	0.2089
3	10	100	200	8.20E-11	4.5675	0.2088
3	10	100	500	2.80E-11	4.5675	0.2090
3	平均				4.5675	0.2091
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	110	1	5.30E-07	4.5693	0.1808
3	10	110	3	2.90E-09	4.5693	0.1808
3	10	110	5	1.20E-09	4.5693	0.1808
3	10	110	8	2.10E-10	4.5693	0.1808
3	10	110	10	2.10E-10	4.5693	0.1808
3	10	110	50	3.90E-10	4.5693	0.1808
3	10	110	100	1.70E-10	4.5693	0.1807
3	10	110	200	5.60E-11	4.5693	0.1805
3	10	110	500	1.00E-11	4.5693	0.1801
3	平均				4.5693	0.1807
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	120	1	4.10E-07	4.5693	0.1419
3	10	120	3	1.30E-09	4.5693	0.1418
3	10	120	5	3.50E-10	4.5693	0.1418
3	10	120	8	9.10E-11	4.5693	0.1418
3	10	120	10	4.70E-11	4.5693	0.1418
3	10	120	50	1.40E-12	4.5693	0.1419
3	10	120	100	5.90E-13	4.5693	0.1419
3	10	120	200	3.90E-13	4.5693	0.1419
3	10	120	500	2.90E-13	4.5693	0.1418
3	平均				4.5693	0.1418
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000

表 4. 11 數值模型，高斯白噪作用。固定 10 階濾波器，通帶 0.8~2.1(Hz)，阻帶衰減定為 80(dB)，不同轉移次數，得到的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：高斯白噪；識別模態：1st

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
1	以下數據取通過頻帶 0.8~2.1(Hz)之帶通濾波器					
1	10	80	1	3.90E-04	1.3413	2.2937
1	10	80	2	1.30E-04	1.3413	2.2871
1	10	80	3	1.50E-05	1.3412	2.2838
1	10	80	4	7.80E-06	1.3412	2.2816
1	10	80	5	5.30E-06	1.3412	2.2801
1	10	80	6	4.00E-06	1.3412	2.2788
1	10	80	7	3.20E-06	1.3412	2.2777
1	10	80	8	2.60E-06	1.3412	2.2767
1	10	80	9	2.10E-06	1.3412	2.2759
1	10	80	10	1.80E-06	1.3412	2.2752
1	10	80	20	8.20E-07	1.3412	2.2719
1	10	80	30	9.00E-05	1.3412	2.2678
1	10	80	40	3.00E-07	1.3411	2.2681
1	10	80	50	2.30E-07	1.3411	2.2681
1	10	80	60	1.20E-06	1.3411	2.2649
1	10	80	70	1.70E-07	1.3415	2.0737
1	10	80	80	1.30E-07	1.3415	2.0716
1	10	80	90	1.10E-07	1.3415	2.0697
1	10	80	100	9.20E-05	1.3415	2.0675
1	10	80	200	3.10E-08	1.3416	2.0467
1	10	80	300	1.40E-08	1.3399	1.2340
1	10	80	400	2.70E-08	1.3400	1.2523
1	10	80	500	7.60E-09	1.3401	1.2648
1	10	80	600	5.30E-09	1.3447	1.0663
1	10	80	700	4.10E-09	1.3447	1.0796
1	10	80	800	3.30E-09	1.3447	1.0918
1	10	80	900	2.80E-09	1.3447	1.1029
1	10	80	1000	2.30E-09	1.3447	1.1121
1	10	80	2000	8.20E-10	1.3405	0.8779
1	10	80	3000	7.40E-10	1.3396	0.9436
1	平均				1.3416	1.8502
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000

表 4. 12 數值模型，高斯白噪作用。固定 10 階濾波器，通帶 2.4~3.6(Hz)，阻帶衰減定為 80(dB)，不同轉移次數，得到的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：高斯白噪作用；識別模態：2nd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
2	以下數據取通過頻帶 2.4~3.6(Hz)之帶通濾波器					
2	10	80	1	3.30E-07	2.9667	1.2306
2	10	80	2	3.80E-08	2.9667	1.2306
2	10	80	3	2.60E-08	2.9667	1.2307
2	10	80	4	3.80E-08	2.9667	1.2307
2	10	80	5	2.20E-08	2.9667	1.2308
2	10	80	6	2.20E-08	2.9667	1.2308
2	10	80	7	1.50E-08	2.9668	1.2309
2	10	80	8	1.40E-08	2.9668	1.2309
2	10	80	9	1.20E-08	2.9668	1.2310
2	10	80	10	1.20E-08	2.9668	1.2310
2	10	80	20	7.00E-09	2.9668	1.2315
2	10	80	30	5.40E-09	2.9669	1.2317
2	10	80	40	5.20E-09	2.9669	1.2320
2	10	80	50	3.20E-08	2.9670	1.2322
2	10	80	60	3.40E-09	2.9670	1.2324
2	10	80	70	3.10E-09	2.9670	1.2327
2	10	80	80	2.80E-09	2.9671	1.2329
2	10	80	90	2.60E-09	2.9671	1.2331
2	10	80	100	2.50E-09	2.9672	1.2334
2	10	80	200	1.60E-09	2.9675	1.2355
2	10	80	300	1.20E-09	2.9677	1.2376
2	10	80	400	9.70E-10	2.9679	1.2396
2	10	80	500	8.20E-10	2.9681	1.2414
2	10	80	600	7.20E-10	2.9708	1.1717
2	10	80	700	6.50E-10	2.9710	1.1738
2	10	80	800	5.90E-10	2.9711	1.1755
2	10	80	900	5.60E-10	2.9741	1.1457
2	10	80	1000	5.20E-10	2.9742	1.1472
2	10	80	2000	2.90E-10	2.9777	1.0906
2	10	80	3000	1.90E-10	2.9798	1.0740
2	平均				2.9687	1.2111
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000

表 4. 13 數值模型，高斯白噪作用。固定 10 階濾波器，通帶 4~5.2(Hz)，阻帶衰減定為 80(dB)，不同轉移次數，得到的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：高斯白噪；識別模態：3rd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
3	以下數據取通過頻帶 4~5.2(Hz)之帶通濾波器					
3	10	80	1	7.30E-07	4.5621	0.3152
3	10	80	2	4.10E-08	4.5621	0.3152
3	10	80	3	1.80E-08	4.5621	0.3152
3	10	80	4	1.10E-08	4.5621	0.3153
3	10	80	5	1.80E-08	4.5621	0.3153
3	10	80	6	9.00E-09	4.5621	0.3153
3	10	80	7	6.30E-09	4.5621	0.3153
3	10	80	8	9.00E-09	4.5621	0.3154
3	10	80	9	4.40E-09	4.5621	0.3154
3	10	80	10	3.80E-09	4.5621	0.3154
3	10	80	20	1.80E-09	4.5621	0.3156
3	10	80	30	1.30E-09	4.5622	0.3157
3	10	80	40	1.30E-08	4.5622	0.3158
3	10	80	50	7.70E-10	4.5622	0.3158
3	10	80	60	5.90E-10	4.5622	0.3158
3	10	80	70	5.10E-10	4.5622	0.3158
3	10	80	80	4.50E-10	4.5622	0.3158
3	10	80	90	4.10E-10	4.5622	0.3158
3	10	80	100	3.80E-10	4.5622	0.3158
3	10	80	200	2.00E-10	4.5623	0.3155
3	10	80	300	1.40E-10	4.5623	0.3155
3	10	80	400	1.10E-10	4.5620	0.2871
3	10	80	500	9.80E-11	4.5620	0.2870
3	10	80	600	7.60E-11	4.5621	0.2869
3	10	80	700	6.50E-11	4.5621	0.2868
3	10	80	800	1.10E-10	4.5621	0.2866
3	10	80	900	2.10E-09	4.5621	0.2864
3	10	80	1000	1.10E-10	4.5621	0.2863
3	10	80	2000	4.20E-09	4.5623	0.2849
3	10	80	3000	1.80E-11	4.5625	0.2823
3	平均				4.5622	0.3067
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000



表 4. 14 比較高斯白噪作用下 HHT 與 ANN 的識別結果。

模態	HHT 識別 自然頻率 (Hz)	ANN 識別 自然頻率 (Hz)	理論值 (Hz)	HHT 識別 阻尼比 (%)	ANN 識別 阻尼比 (%)	理論值 (%)
1	1.34	1.37	1.37	2.12	5.00	5.00
2	2.97	2.99	2.99	1.23	5.00	5.00
3	4.56	4.56	4.56	0.31	5.00	5.00

表 4. 15 數值模型，真實地震力作用。固定 10 階濾波器，通帶 0.8~2.1(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：El Centro；識別模態：1st

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
1	以下數據取通過頻帶 0.8~2.1(Hz)之帶通濾波器					
1	10	40	1	8.10E-01	*0.1211 <sup>1</sup>	*34.157
1	10	40	3	x <sup>2</sup>	x	x
1	10	40	5	x	x	x
1	10	40	8	x	x	x
1	10	40	10	x	x	x
1	10	40	50	x	x	x
1	10	40	100	x	x	x
1	10	40	200	x	x	x
1	10	40	500	x	x	x
1	平均				x	x
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	50	1	1.20E-01	1.4952	6.2711
1	10	50	3	1.80E-01	1.4880	4.4517
1	10	50	5	1.20E-01	1.4557	6.3383
1	10	50	8	5.60E-01	1.4893	2.9845
1	10	50	10	*	*	*
1	10	50	50	*	*	*
1	10	50	100	*	*	*
1	10	50	200	*	*	*

<sup>1</sup> \*表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤。

<sup>2</sup> X 表示濾波轉移過後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法。

1	10	50	500	*	*	*
1	平均				1.4821	5.0114
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	60	1	1.50E-02	1.4853	5.1621
1	10	60	3	1.40E-02	1.4829	4.9693
1	10	60	5	1.60E-02	1.4834	5.0241
1	10	60	8	9.40E-03	1.4792	4.7293
1	10	60	10	1.70E-02	1.4807	5.0180
1	10	60	50	*	*	*
1	10	60	100	*	*	*
1	10	60	200	*	*	*
1	10	60	500	*	*	*
1	平均				1.4823	4.9806
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	70	1	8.40E-04	1.4534	3.7149
1	10	70	3	6.00E-04	1.4537	3.7084
1	10	70	5	1.20E-04	1.4537	3.7075
1	10	70	8	3.00E-05	1.4568	3.7642
1	10	70	10	1.00E-05	1.4567	3.7577
1	10	70	50	5.50E-06	1.4536	3.4723
1	10	70	100	6.20E-05	1.4600	3.3324
1	10	70	200	2.70E-05	1.4606	2.9170
1	10	70	500	5.50E-07	1.4603	2.8213
1	平均				1.4565	3.4662
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	80	1	2.60E-04	1.4439	3.2802
1	10	80	3	3.60E-05	1.4440	3.2804
1	10	80	5	1.70E-05	1.4440	3.2813
1	10	80	8	7.10E-06	1.4440	3.2822
1	10	80	10	4.70E-06	1.4439	3.2828
1	10	80	50	5.40E-07	1.4367	3.3358
1	10	80	100	3.10E-07	1.4369	3.3231
1	10	80	200	9.20E-08	1.4383	3.1038
1	10	80	500	2.30E-08	1.4450	2.8485
1	平均				1.4419	3.2242
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	90	1	2.70E-03	1.3885	5.3761
1	10	90	3	1.00E-04	1.3883	5.3697
1	10	90	5	6.60E-05	1.3882	5.3610
1	10	90	8	3.80E-05	1.3773	4.8406
1	10	90	10	2.30E-05	1.3861	5.1684

1	10	90	50	3.40E-06	1.3882	5.0714
1	10	90	100	2.20E-07	1.3847	4.3499
1	10	90	200	6.70E-08	1.3972	4.1761
1	10	90	500	3.00E-08	1.3997	2.3497
1	平均				1.3887	4.6737
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	100	1	1.30E-04	1.3410	2.7633
1	10	100	3	6.80E-06	1.3410	2.7599
1	10	100	5	2.90E-06	1.3409	2.7557
1	10	100	8	1.50E-06	1.3409	2.7503
1	10	100	10	2.00E-06	1.3409	2.7473
1	10	100	50	1.50E-07	1.3464	2.6088
1	10	100	100	8.70E-08	1.3498	2.3287
1	10	100	200	4.80E-08	1.3505	2.3048
1	10	100	500	1.60E-08	1.3473	2.8126
1	平均				1.3443	2.6479
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	110	1	9.70E-05	1.3210	3.6413
1	10	110	3	5.10E-06	1.3209	3.6480
1	10	110	5	2.10E-06	1.3224	3.0444
1	10	110	8	1.10E-06	1.3224	3.0450
1	10	110	10	8.00E-07	1.3224	3.0457
1	10	110	50	1.00E-07	1.3223	3.0575
1	10	110	100	4.20E-08	1.3222	3.0655
1	10	110	200	1.80E-08	1.3221	3.0734
1	10	110	500	6.10E-09	1.3219	3.0855
1	平均				1.3220	3.1896
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000
1	10	120	1	7.50E-05	1.2990	2.6547
1	10	120	3	5.00E-06	1.2990	2.6518
1	10	120	5	2.00E-06	1.2957	2.3407
1	10	120	8	8.80E-07	1.2957	2.3354
1	10	120	10	6.20E-07	1.2957	2.3326
1	10	120	50	9.20E-08	1.2958	2.3119
1	10	120	100	2.40E-08	1.2958	2.3056
1	10	120	200	1.10E-08	1.3002	2.2853
1	10	120	500	3.90E-09	1.2983	2.6546
1	平均				1.2972	2.4303
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000

表 4. 16 數值模型，真實地震力作用。固定 10 階濾波器，通帶 2.4~3.6(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：El Centro；識別模態：2nd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
2	以下數據取通過頻帶 2.4~3.6(Hz)之帶通濾波器					
2	10	30	1	3.00E-01	3.0990	3.7614
2	10	30	3	1.80E-01	3.0126	3.8521
2	10	30	5	1.80E-01	2.6664	0.0735
2	10	30	8	1.00E-01	2.6466	0.4458
2	10	30	10	4.90E-02	2.1269	0.3928
2	10	30	50	x <sup>2</sup>	x	x
2	10	30	100	x	x	x
2	10	30	200	x	x	x
2	10	30	500	x	x	x
2	平均				2.7103	1.7051
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	40	1	2.30E-02	3.1818	4.0037
2	10	40	3	5.50E-03	3.1776	4.1760
2	10	40	5	4.10E-03	3.1798	3.9692
2	10	40	8	1.20E-02	3.1911	4.1586
2	10	40	10	2.60E-03	3.1909	3.7100
2	10	40	50	3.60E-05	3.1384	3.7638
2	10	40	100	1.60E-03	3.1147	2.8184
2	10	40	200	4.40E-03	3.1225	2.8570
2	10	40	500	2.70E-07	3.1129	2.5133
2	平均				3.1566	3.5522
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	50	1	2.20E-04	3.1151	4.6035
2	10	50	3	8.60E-06	3.1151	4.6020
2	10	50	5	1.20E-06	3.1151	4.6000
2	10	50	8	4.90E-05	3.1151	4.5974
2	10	50	10	4.70E-05	3.1151	4.5951
2	10	50	50	1.20E-07	3.1151	4.5701
2	10	50	100	2.60E-06	3.1128	4.4347
2	10	50	200	5.70E-05	3.1129	4.2792
2	10	50	500	1.30E-08	3.1054	4.2174
2	平均				3.1135	4.4999
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000

<sup>2</sup>表示濾波轉移過後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法。

2	10	60	1	7.60E-05	3.0564	4.5046
2	10	60	3	2.50E-05	3.0564	4.5240
2	10	60	5	2.20E-06	3.0565	4.5226
2	10	60	8	1.30E-06	3.0565	4.5208
2	10	60	10	5.20E-07	3.0566	4.5201
2	10	60	50	1.10E-07	3.0612	4.4339
2	10	60	100	2.50E-08	3.0499	4.5665
2	10	60	200	9.60E-09	3.0445	4.3967
2	10	60	500	6.30E-08	3.0481	4.3952
2	平均				3.0540	4.4872
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	70	1	1.50E-05	3.0157	2.4182
2	10	70	3	1.30E-06	3.0158	2.4178
2	10	70	5	4.20E-07	3.0158	2.4171
2	10	70	8	2.20E-07	3.0158	2.4162
2	10	70	10	1.40E-07	3.0158	2.4156
2	10	70	50	4.30E-08	3.0159	2.4113
2	10	70	100	9.90E-09	3.0159	2.4106
2	10	70	200	4.80E-09	3.0160	2.4128
2	10	70	500	1.80E-09	3.0177	2.5266
2	平均				3.0160	2.4274
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	80	1	8.40E-06	2.9908	1.9795
2	10	80	3	7.70E-07	2.9908	1.9800
2	10	80	5	3.00E-07	2.9908	1.9803
2	10	80	8	1.40E-07	2.9908	1.9802
2	10	80	10	1.30E-07	2.9908	1.9800
2	10	80	50	4.10E-08	2.9908	1.9749
2	10	80	100	3.50E-08	2.9907	1.9702
2	10	80	200	3.00E-09	2.9906	1.9650
2	10	80	500	1.10E-09	2.9905	1.9600
2	平均				2.9907	1.9745
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	90	1	1.70E-07	2.9724	1.2117
2	10	90	3	3.00E-08	2.9724	1.2117
2	10	90	5	1.50E-08	2.9724	1.2116
2	10	90	8	6.20E-09	2.9724	1.2115
2	10	90	10	1.70E-08	2.9724	1.2114
2	10	90	50	1.60E-09	2.9724	1.2103
2	10	90	100	9.80E-10	2.9724	1.2092
2	10	90	200	8.30E-10	2.9724	1.2073

2	10	90	500	2.60E-10	2.974	1.0786
2	平均				2.9726	1.1959
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	100	1	1.40E-07	2.9607	0.5023
2	10	100	3	1.50E-09	2.9607	0.5023
2	10	100	5	1.00E-09	2.9607	0.5022
2	10	100	8	7.00E-10	2.9607	0.5022
2	10	100	10	6.10E-10	2.9607	0.5022
2	10	100	50	3.10E-09	2.9607	0.5021
2	10	100	100	1.90E-09	2.9607	0.5019
2	10	100	200	2.10E-09	2.9607	0.5016
2	10	100	500	6.20E-11	2.9607	0.5011
2	平均				2.9607	0.5020
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	110	1	1.00E-07	2.9597	0.3386
2	10	110	3	1.40E-09	2.9597	0.3386
2	10	110	5	3.40E-10	2.9597	0.3386
2	10	110	8	1.90E-10	2.9597	0.3386
2	10	110	10	1.60E-10	2.9597	0.3386
2	10	110	50	6.80E-11	2.9597	0.3386
2	10	110	100	4.90E-11	2.9597	0.3385
2	10	110	200	3.50E-11	2.9597	0.3385
2	10	110	500	2.10E-11	2.9597	0.3384
2	平均				2.9597	0.3386
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000
2	10	120	1	1.00E-07	2.9537	0.1392
2	10	120	3	8.60E-10	2.9537	0.1392
2	10	120	5	4.10E-10	2.9537	0.1392
2	10	120	8	2.20E-10	2.9537	0.1392
2	10	120	10	1.90E-10	2.9537	0.1392
2	10	120	50	6.50E-11	2.9537	0.1391
2	10	120	100	4.30E-11	2.9537	0.139
2	10	120	200	2.70E-11	2.9537	0.1388
2	10	120	500	1.60E-11	2.9538	0.1384
2	平均				2.9537	0.1390
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000

表 4. 17 數值模型，真實地震力作用。固定 10 階濾波器，通帶 4~5.2(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：El Centro；識別模態：3rd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
3	以下數據取通過頻帶 4.0~5.2(Hz)之帶通濾波器					
3	10	20	1	4.50E-01	4.7493	5.0782
3	10	20	3	2.80E-01	4.8391	4.3529
3	10	20	5	9.80E-01	4.0672	8.9406
3	10	20	8	5.20E-02	3.9682	8.8883
3	10	20	10	5.20E-02	5.1457	7.5616
3	10	20	50	*1	*	*
3	10	20	100	*	*	*
3	10	20	200	*	*	*
3	10	20	500	*	*	*
3	平均				4.5539	6.9643
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	30	1	4.80E-02	4.7747	5.8195
3	10	30	3	1.80E-02	4.7906	4.8951
3	10	30	5	8.50E-03	4.7854	5.3176
3	10	30	8	1.30E-02	4.7568	5.5661
3	10	30	10	1.00E-02	4.7442	5.7601
3	10	30	50	3.40E-04	4.8198	5.7227
3	10	30	100	5.00E-04	4.8877	4.8591
3	10	30	200	8.00E-04	4.9166	3.3029
3	10	30	500	6.60E-07	x33.8043 <sup>2</sup>	x1.288
3	平均				4.8095	5.1554
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	40	1	2.40E-03	4.6911	4.0430
3	10	40	3	1.70E-03	4.7005	3.9467
3	10	40	5	1.60E-03	4.7014	4.3237
3	10	40	8	8.10E-05	4.6870	4.4030
3	10	40	10	4.40E-05	4.6806	4.5291
3	10	40	50	1.30E-06	4.6896	4.3362

<sup>1</sup> 表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤。

<sup>2</sup> 表示濾波轉移過後數值尾端放大嚴重致使無法使用隨機遞減法。

3	10	40	100	3.20E-05	4.6781	4.1517
3	10	40	200	3.80E-04	4.6790	3.9191
3	10	40	500	5.90E-08	4.6570	4.4266
3	平均				4.6849	4.2310
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	50	1	3.50E-05	4.6608	2.8058
3	10	50	3	9.50E-06	4.6608	2.8073
3	10	50	5	7.40E-06	4.6608	2.8075
3	10	50	8	1.00E-06	4.6608	2.8074
3	10	50	10	8.30E-07	4.6608	2.8073
3	10	50	50	7.50E-08	4.6659	2.7540
3	10	50	100	2.80E-08	4.6660	2.7511
3	10	50	200	9.60E-09	4.6717	2.6912
3	10	50	500	2.00E-09	4.6774	2.6178
3	平均				4.6650	2.7610
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	60	1	2.70E-05	4.7103	3.2865
3	10	60	3	2.50E-06	4.7103	3.2859
3	10	60	5	1.50E-06	4.7149	3.1479
3	10	60	8	3.30E-07	4.7149	3.1479
3	10	60	10	2.20E-07	4.7149	3.1480
2	10	60	50	3.30E-08	4.7150	3.1480
3	10	60	100	3.70E-08	4.7128	3.1279
3	10	60	200	9.60E-09	4.7127	3.1239
3	10	60	500	3.10E-09	4.7126	3.1207
3	平均				4.7132	3.1707
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	70	1	8.00E-06	4.6114	1.9575
3	10	70	3	7.60E-07	4.6114	1.9575
3	10	70	5	2.00E-07	4.6114	1.9575
3	10	70	8	1.50E-07	4.6114	1.9574
3	10	70	10	6.90E-08	4.6114	1.9573
3	10	70	50	2.90E-08	4.6115	1.9563
3	10	70	100	3.10E-09	4.6115	1.9557
3	10	70	200	1.90E-09	4.6115	1.9548
3	10	70	500	3.90E-10	4.6081	1.8958
3	平均				4.6111	1.9500



3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	80	1	1.30E-06	4.6002	1.1215
3	10	80	3	1.30E-07	4.6002	1.1214
3	10	80	5	6.90E-08	4.6002	1.1214
3	10	80	8	3.20E-08	4.6002	1.1213
3	10	80	10	1.90E-08	4.6002	1.1213
3	10	80	50	2.70E-09	4.6002	1.1207
3	10	80	100	1.20E-09	4.6002	1.1202
3	10	80	200	7.00E-10	4.6002	1.1195
3	10	80	500	2.10E-10	4.5993	1.1209
3	平均				4.6001	1.1209
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	90	1	1.50E-06	4.6007	0.8934
3	10	90	3	1.20E-07	4.6007	0.8934
3	10	90	5	4.60E-08	4.6007	0.8934
3	10	90	8	2.40E-08	4.6007	0.8933
3	10	90	10	1.80E-08	4.6007	0.8934
3	10	90	50	2.60E-09	4.6007	0.8932
3	10	90	100	1.10E-09	4.6007	0.8928
3	10	90	200	4.80E-10	4.6007	0.8922
3	10	90	500	1.60E-10	4.6007	0.8915
3	平均				4.6007	0.8930
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	100	1	5.30E-07	4.5917	0.7725
3	10	100	3	2.80E-08	4.5917	0.7724
3	10	100	5	8.70E-09	4.5917	0.7724
3	10	100	8	4.60E-09	4.5917	0.7724
3	10	100	10	3.50E-09	4.5917	0.7724
3	10	100	50	5.70E-10	4.5917	0.7722
3	10	100	100	2.80E-10	4.5917	0.772
3	10	100	200	1.40E-10	4.5917	0.7716
3	10	100	500	5.40E-11	4.5917	0.7709
3	平均				4.5917	0.7721
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	110	1	3.90E-07	4.5839	0.6218
3	10	110	3	7.30E-09	4.5839	0.6218
3	10	110	5	3.70E-09	4.5839	0.6218

3	10	110	8	2.00E-09	4.5839	0.6218
3	10	110	10	2.80E-09	4.5839	0.6218
3	10	110	50	3.30E-10	4.5839	0.6217
3	10	110	100	1.20E-08	4.5839	0.6216
3	10	110	200	8.00E-11	4.5839	0.6214
3	10	110	500	3.20E-11	4.5839	0.592
3	平均				4.5839	0.6184
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000
3	10	120	1	9.90E-07	4.5684	0.3976
3	10	120	3	4.70E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	5	1.80E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	8	9.10E-09	4.5684	0.3976
3	10	120	10	1.80E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	50	7.10E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	100	2.90E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	200	1.20E-10	4.5684	0.3978
3	10	120	500	3.70E-11	4.5684	0.398
3	平均				4.5684	0.3977
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000

表 4. 18 數值模型，真實地震力作用。固定 10 階濾波器，通帶 0.8~2.1(Hz)，不同轉移次數得到第一個模態的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：El Centro；識別模態：1st

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
1	以下數據取通過頻帶 0.8~2.1(Hz)之帶通濾波器					
1	10	90	1	2.70E-03	1.3885	5.3761
1	10	90	2	6.90E-05	1.3883	5.3728
1	10	90	3	1.00E-04	1.3883	5.3697
1	10	90	4	8.10E-05	1.3882	5.3655
1	10	90	5	6.60E-05	1.3882	5.3610
1	10	90	6	4.90E-05	1.3882	5.3582
1	10	90	7	5.10E-05	1.3882	5.3533
1	10	90	8	3.80E-05	1.3773	4.8406
1	10	90	9	2.90E-05	1.3773	4.8372
1	10	90	10	2.30E-05	1.3861	5.1684
1	10	90	20	7.20E-06	1.3867	5.1461
1	10	90	30	3.60E-06	1.3873	5.1206
1	10	90	40	2.10E-06	1.3877	5.0955
1	10	90	50	3.40E-06	1.3882	5.0714
1	10	90	60	7.30E-06	1.3835	4.4196
1	10	90	70	5.10E-07	1.3838	4.4027
1	10	90	80	2.70E-07	1.3841	4.3837
1	10	90	90	9.00E-07	1.3844	4.3668
1	10	90	100	2.20E-07	1.3847	4.3499
1	10	90	200	6.70E-08	1.3972	4.1761
1	10	90	300	4.00E-08	1.3962	3.0913
1	10	90	400	1.30E-07	1.3947	2.8108
1	10	90	500	3.00E-08	1.3997	2.3497
1	10	90	600	1.70E-08	1.4000	2.3436
1	10	90	700	1.40E-08	1.4003	2.3357
1	10	90	800	1.30E-08	1.4047	2.6270
1	10	90	900	1.20E-08	1.3999	2.5392
1	10	90	1000	1.10E-08	1.4022	2.6184
1	10	90	2000	5.70E-09	1.4077	2.2313
1	10	90	3000	3.20E-09	1.4096	1.9718
1	平均				1.3914	4.1285
1	數值模擬理論值				1.3720	5.0000

表 4. 19 數值模型，真實地震力作用。固定 10 階濾波器，通帶 2.4~3.6(Hz)，不同轉移次數得到第二個模態的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：El Centro；識別模態：2nd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
2	以下數據取通過頻帶 2.4~3.6(Hz)之帶通濾波器					
2	10	80	1	8.40E-06	2.9908	1.9795
2	10	80	2	1.40E-06	2.9908	1.9798
2	10	80	3	7.70E-07	2.9908	1.9800
2	10	80	4	4.30E-07	2.9908	1.9802
2	10	80	5	3.00E-07	2.9908	1.9803
2	10	80	6	3.10E-07	2.9908	1.9803
2	10	80	7	1.70E-07	2.9908	1.9802
2	10	80	8	1.40E-07	2.9908	1.9802
2	10	80	9	1.20E-07	2.9908	1.9801
2	10	80	10	1.30E-07	2.9908	1.9800
2	10	80	20	4.40E-08	2.9908	1.9788
2	10	80	30	4.20E-08	2.9908	1.9774
2	10	80	40	1.90E-08	2.9908	1.9761
2	10	80	50	4.10E-08	2.9908	1.9749
2	10	80	60	2.80E-08	2.9907	1.9737
2	10	80	70	1.10E-08	2.9907	1.9727
2	10	80	80	9.00E-09	2.9907	1.9718
2	10	80	90	9.50E-09	2.9907	1.9708
2	10	80	100	3.50E-08	2.9907	1.9702
2	10	80	200	3.00E-09	2.9906	1.9650
2	10	80	300	1.90E-09	2.9906	1.9623
2	10	80	400	1.40E-09	2.9905	1.9609
2	10	80	500	1.10E-09	2.9905	1.9600
2	10	80	600	9.30E-10	2.9905	1.9596
2	10	80	700	7.90E-10	2.9904	1.9612
2	10	80	800	7.00E-10	2.9833	1.8062
2	10	80	900	6.60E-10	2.9833	1.8059
2	10	80	1000	5.60E-10	2.9832	1.8063
2	10	80	2000	2.80E-10	2.9804	1.7445
2	10	80	3000	1.90E-09	2.9838	1.5932
2	平均				2.9894	1.9364
2	數值模擬理論值				2.9921	5.0000

表 4. 20 數值模型，真實地震力作用。固定 10 階濾波器，通帶 4~5.2(Hz)，不同轉移次數得到第三個模態的識別結果。

結構：三層數值模型；輸入地震力：El Centro；識別模態：3rd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
3	以下數據取通過頻帶 4~5.2(Hz)之帶通濾波器					
3	10	120	1	9.90E-07	4.5684	0.3976
3	10	120	2	9.10E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	3	4.70E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	4	2.60E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	5	1.80E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	6	1.40E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	7	1.10E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	8	9.10E-09	4.5684	0.3976
3	10	120	9	7.70E-09	4.5684	0.3976
3	10	120	10	1.80E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	20	1.50E-08	4.5684	0.3976
3	10	120	30	1.40E-09	4.5684	0.3977
3	10	120	40	9.60E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	50	7.10E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	60	5.60E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	70	4.60E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	80	3.80E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	90	3.30E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	100	2.90E-10	4.5684	0.3977
3	10	120	200	1.20E-10	4.5684	0.3978
3	10	120	300	6.90E-11	4.5684	0.3979
3	10	120	400	5.00E-11	4.5684	0.3980
3	10	120	500	3.70E-11	4.5684	0.3980
3	10	120	600	3.00E-11	4.5684	0.3981
3	10	120	700	2.40E-11	4.5684	0.3981
3	10	120	800	2.10E-11	4.5684	0.3982
3	10	120	900	1.80E-11	4.5684	0.3982
3	10	120	1000	1.60E-11	4.5684	0.3982
3	10	120	2000	6.90E-12	4.5684	0.3981
3	10	120	3000	4.30E-12	4.5684	0.3979
3	平均				4.5684	0.3978
3	數值模擬理論值				4.5636	5.0000

表 4. 21 比真實地震力作用下 HHT 與 ANN 的識別結果

模態	HHT 識別 自然頻率 (Hz)	ANN 識別 自然頻率 (Hz)	理論值 (Hz)	HHT 識別 阻尼比 (%)	ANN 識別 阻尼比 (%)	理論值 (%)
1	1.44	1.37	<b>1.37</b>	3.22	5.00	<b>4.99</b>
2	2.58	2.99	<b>2.99</b>	1.72	5.00	<b>5.02</b>
3	4.60	4.56	<b>4.56</b>	1.12	5.02	<b>5.03</b>

表 5.1 Benchmark A 模型的線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
A1	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
A2	Random	100	X-dir. / Strong Dir.
A3	El Centro NS	100	X-dir. / Strong Dir.
A4	El Centro NS	200	X-dir. / Strong Dir.
A5	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Strong Dir.
A6	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Strong Dir.
A7	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Strong Dir.
A8	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Strong Dir.
A9	Random	50	Y-dir. / Weak Dir.
A10	Random	100	Y-dir. / Weak Dir.
A11	El Centro NS	50	Y-dir. / Weak Dir.
A12	El Centro NS	100	Y-dir. / Weak Dir.
A13	ChiChi/TCU076/NS	50	Y-dir. / Weak Dir.
A14	ChiChi/TCU076/NS	100	Y-dir. / Weak Dir.
A15	ChiChi/TCU082/NS	50	Y-dir. / Weak Dir.
A16	ChiChi/TCU082/NS	100	Y-dir. / Weak Dir.

表 5.2 Benchmark A 模型的非線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
A17	El Centro NS	300	X-dir. / Strong Dir.
A18	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
A19	El Centro NS	500	X-dir. / Strong Dir.
A20	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
A21	El Centro NS	1000	X-dir. / Strong Dir.
A22	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
A23	El Centro NS	1500	X-dir. / Strong Dir.
A24	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
A25	El Centro NS	1000	X-dir. / Strong Dir.
A26	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
A27	El Centro NS	1200	X-dir. / Strong Dir.
A28	Random	50	X-dir. / Strong Dir.

表 5.3 Benchmark B 模型的線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
B1	Random	50	X-dir. / Weak Dir.
B2	Random	100	X-dir. / Weak Dir.
B3	El Centro NS	50	X-dir. / Weak Dir.
B4	El Centro NS	100	X-dir. / Weak Dir.
B5	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
B6	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
B7	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
B8	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
B9	Random	50	Y-dir. / Strong Dir.
B10	Random	100	Y-dir. / Strong Dir.
B11	El Centro NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
B12	El Centro NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
B13	ChiChi/TCU076/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
B14	ChiChi/TCU076/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
B15	ChiChi/TCU082/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
B16	ChiChi/TCU082/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.

表 5.4 Benchmark B 模型的非線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
B17	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Strong Dir.
B18	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
B19	ChiChi/TCU082/NS	1000	X-dir. / Strong Dir.
B20	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
B21	ChiChi/TCU082/NS	500	X-dir. / Strong Dir.
B22	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
B23	ChiChi/TCU082/NS	300	X-dir. / Strong Dir.
B24	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
B25	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Strong Dir.
B26	Random	50	X-dir. / Strong Dir.



表 5.5 Benchmark C1 模型的線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
C1_C1	Random	50	X-dir. / Weak Dir.
C1_C2	Random	100	X-dir. / Weak Dir.
C1_C3	El Centro NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C1_C4	El Centro NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C1_C5	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C1_C6	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C1_C7	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C1_C8	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C1_C9	Random	50	Y-dir. / Strong Dir.
C1_C10	Random	100	Y-dir. / Strong Dir.
C1_C11	El Centro NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C1_C12	El Centro NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C1_C13	ChiChi/TCU076/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C1_C14	ChiChi/TCU076/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C1_C15	ChiChi/TCU082/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C1_C16	ChiChi/TCU082/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.

表 5.6 Benchmark C2 模型的線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
C2_C1	Random	50	X-dir. / Weak Dir.
C2_C2	Random	100	X-dir. / Weak Dir.
C2_C3	El Centro NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C2_C4	El Centro NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C2_C5	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C2_C6	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C2_C7	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C2_C8	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C2_C9	Random	50	Y-dir. / Strong Dir.
C2_C10	Random	100	Y-dir. / Strong Dir.
C2_C11	El Centro NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C2_C12	El Centro NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C2_C13	ChiChi/TCU076/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.

C2_C14	ChiChi/TCU076/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C2_C15	ChiChi/TCU082/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C2_C16	ChiChi/TCU082/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C2_Cn1	Random	50	X-dir. / Weak Dir.
C2_Cn2	Random	100	X-dir. / Weak Dir.
C2_Cn3	El Centro NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C2_Cn4	El Centro NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C2_Cn5	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C2_Cn6	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C2_Cn7	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C2_Cn8	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Weak Dir.

表 5.7 Benchmark C3 模型的線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
C3_C1	Random	50	X-dir. / Weak Dir.
C3_C2	Random	100	X-dir. / Weak Dir.
C3_C3	El Centro NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C3_C4	El Centro NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C3_C5	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C3_C6	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C3_C7	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C3_C8	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C3_C9	Random	50	Y-dir. / Strong Dir.
C3_C10	Random	100	Y-dir. / Strong Dir.
C3_C11	El Centro NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C3_C12	El Centro NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C3_C13	ChiChi/TCU076/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C3_C14	ChiChi/TCU076/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C3_C15	ChiChi/TCU082/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C3_C16	ChiChi/TCU082/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.

表 5.8 Benchmark C4 模型的線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
C4_C1	Random	50	X-dir. / Weak Dir.
C4_C2	Random	100	X-dir. / Weak Dir.
C4_C3	El Centro NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C4_C4	El Centro NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C4_C5	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C4_C6	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C4_C7	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
C4_C8	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
C4_C9	Random	50	Y-dir. / Strong Dir.
C4_C10	Random	100	Y-dir. / Strong Dir.
C4_C11	El Centro NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C4_C12	El Centro NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C4_C13	ChiChi/TCU076/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C4_C14	ChiChi/TCU076/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
C4_C15	ChiChi/TCU082/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
C4_C16	ChiChi/TCU082/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.

表 5.9 Benchmark D 模型（原結構）的線性試驗項目

<b>Test No.</b>	<b>Excitation case</b>	<b>PGA (ideal)</b>	<b>Direction</b>
D1	Random	50	X-dir. / Weak Dir.
D2	Random	100	X-dir. / Weak Dir.
D3	El Centro NS	50	X-dir. / Weak Dir.
D4	El Centro NS	100	X-dir. / Weak Dir.
D5	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
D6	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
D7	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
D8	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
D9	Random	50	Y-dir. / Strong Dir.
D10	Random	100	Y-dir. / Strong Dir.
D11	El Centro NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
D12	El Centro NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
D13	ChiChi/TCU076/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.

D14	ChiChi/TCU076/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
D15	ChiChi/TCU082/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
D16	ChiChi/TCU082/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.

表 5.10 Benchmark D 模型（1F 柱換成脆弱桿件）的線性試驗項目

Test No.	Excitation case	PGA (ideal)	Direction
D17	Random	50	X-dir. / Weak Dir.
D18	Random	100	X-dir. / Weak Dir.
D19	El Centro NS	50	X-dir. / Weak Dir.
D20	El Centro NS	100	X-dir. / Weak Dir.
D21	ChiChi/TCU076/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
D22	ChiChi/TCU076/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
D23	ChiChi/TCU082/NS	50	X-dir. / Weak Dir.
D24	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Weak Dir.
D25	Random	50	Y-dir. / Strong Dir.
D26	Random	100	Y-dir. / Strong Dir.
D27	El Centro NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
D28	El Centro NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
D29	ChiChi/TCU076/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
D30	ChiChi/TCU076/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.
D31	ChiChi/TCU082/NS	50	Y-dir. / Strong Dir.
D32	ChiChi/TCU082/NS	100	Y-dir. / Strong Dir.

表 5.11 Benchmark D 模型（1F 柱換成脆弱桿件）的非線性試驗項目

D33	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Strong Dir.
D34	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
D35	ChiChi/TCU082/NS	1000	X-dir. / Strong Dir.
D36	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
D37	ChiChi/TCU082/NS	500	X-dir. / Strong Dir.
D38	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
D39	ChiChi/TCU082/NS	300	X-dir. / Strong Dir.
D40	Random	50	X-dir. / Strong Dir.
D41	ChiChi/TCU082/NS	100	X-dir. / Strong Dir.
D42	Random	50	X-dir. / Strong Dir.

表 5. 12 試驗編號 A1 的數據經 HHT 識別的結果。固定 10 階濾波器，通帶 1~2(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：Benchmark A 模型；輸入地震力：Random；識別模態：1st

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
1	以下數據取通過頻帶 1~2(Hz)之帶通濾波器					
1	10	20	1	1.30E+00	1.3295	4.8615
1	10	20	3	9.00E-01	1.5901	1.4129
1	10	20	5	9.10E-03	1.1963	3.0834
1	10	20	8	*	*	*
1	10	20	10	*	*	*
1	10	20	50	*	*	*
1	10	20	100	*	*	*
1	10	20	200	*	*	*
1	10	20	500	*	*	*
1	平均				1.3720	3.1193
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	30	1	6.80E-02	1.3558	1.6592
1	10	30	3	3.00E-02	1.3628	1.8144
1	10	30	5	1.50E-02	1.3595	2.1968
1	10	30	8	3.60E-02	1.3581	3.0938
1	10	30	10	1.50E-02	1.3545	4.0059
1	10	30	50	9.10E-05	1.3454	4.0269
1	10	30	100	5.80E-06	1.3594	3.3013
1	10	30	200	2.00E-06	1.3509	3.2000
1	10	30	500	5.10E-02	1.3514	2.0896
1	平均				1.3553	2.8209
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	40	1	3.60E-03	1.3527	1.8216
1	10	40	3	3.90E-04	1.3547	1.7806
1	10	40	5	1.30E-03	1.3531	1.7097
1	10	40	8	9.10E-05	1.3533	1.6879
1	10	40	10	2.40E-05	1.3535	1.6724
1	10	40	50	7.30E-07	1.3533	1.6223
1	10	40	100	3.40E-07	1.3543	1.5462

<sup>1</sup> 表示隨機遞減法得到的自由振動，波形有瑕疵，使得希伯特轉換得到一堆零散的點，致使運算結果錯誤。

1	10	40	200	5.20E-06	1.3540	1.1861
1	10	40	500	1.10E-07	1.3557	1.0119
1	平均				1.3538	1.5599
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	50	1	3.60E-04	1.3502	1.3491
1	10	50	3	1.80E-05	1.3502	1.3467
1	10	50	5	1.50E-05	1.3503	1.3482
1	10	50	8	3.70E-06	1.3503	1.3471
1	10	50	10	2.40E-06	1.3504	1.3467
1	10	50	50	4.10E-07	1.3505	1.2031
1	10	50	100	1.20E-07	1.3504	1.1956
1	10	50	200	5.60E-08	1.3516	1.1213
1	10	50	500	2.40E-08	1.3523	0.9078
1	平均				1.3507	1.2406
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	60	1	5.00E-05	1.3516	0.9502
1	10	60	3	4.20E-06	1.3516	0.9494
1	10	60	5	2.10E-06	1.3516	0.9494
1	10	60	8	1.10E-06	1.3516	0.9503
1	10	60	10	8.30E-07	1.3516	0.9510
1	10	60	50	1.30E-07	1.3515	0.9711
1	10	60	100	6.90E-08	1.3516	0.8213
1	10	60	200	3.20E-08	1.3520	0.7229
1	10	60	500	7.20E-09	1.3525	0.7634
1	平均				1.3517	0.8921
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	70	1	3.20E-05	1.3531	0.7928
1	10	70	3	2.80E-06	1.3532	0.7915
1	10	70	5	1.20E-06	1.3532	0.7901
1	10	70	8	6.60E-07	1.3532	0.7887
1	10	70	10	5.40E-07	1.3532	0.7881
1	10	70	50	9.50E-08	1.3533	0.7932
1	10	70	100	5.10E-08	1.3538	0.8323
1	10	70	200	3.10E-08	1.3550	0.7031
1	10	70	500	6.00E-09	1.3549	0.7613
1	平均				1.3537	0.7823
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100

1	10	80	1	1.00E-05	1.3565	0.5730
1	10	80	3	1.10E-06	1.3565	0.5739
1	10	80	5	4.80E-07	1.3566	0.5746
1	10	80	8	2.80E-07	1.3566	0.5752
1	10	80	10	1.90E-07	1.3566	0.5755
1	10	80	50	3.70E-08	1.3568	0.5827
1	10	80	100	2.10E-08	1.3568	0.5945
1	10	80	200	1.10E-08	1.3569	0.6171
1	10	80	500	3.40E-09	1.3569	0.5603
1	平均				1.3567	0.5808
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	90	1	8.80E-07	1.3585	0.4653
1	10	90	3	1.50E-07	1.3585	0.4658
1	10	90	5	8.20E-08	1.3585	0.4663
1	10	90	8	5.60E-08	1.3585	0.4668
1	10	90	10	4.50E-08	1.3585	0.4671
1	10	90	50	1.80E-08	1.3586	0.4718
1	10	90	100	6.20E-09	1.3587	0.4775
1	10	90	200	3.10E-09	1.3588	0.4887
1	10	90	500	1.20E-09	1.3586	0.4254
1	平均				1.3586	0.4661
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	100	1	6.70E-08	1.3647	0.3382
1	10	100	3	4.40E-09	1.3647	0.3383
1	10	100	5	2.40E-09	1.3647	0.3384
1	10	100	8	1.60E-09	1.3647	0.3385
1	10	100	10	1.40E-09	1.3647	0.3386
1	10	100	50	6.80E-10	1.3647	0.3398
1	10	100	100	5.10E-10	1.3647	0.3411
1	10	100	200	3.60E-10	1.3647	0.3435
1	10	100	500	2.00E-10	1.3648	0.3493
1	平均				1.3647	0.3406
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	110	1	1.30E-08	1.3756	0.1915
1	10	110	3	5.70E-10	1.3756	0.1915
1	10	110	5	2.50E-10	1.3756	0.1915
1	10	110	8	1.50E-10	1.3756	0.1915

1	10	110	10	1.20E-10	1.3756	0.1915
1	10	110	50	7.40E-11	1.3756	0.1916
1	10	110	100	6.10E-11	1.3756	0.1918
1	10	110	200	4.90E-11	1.3756	0.1920
1	10	110	500	3.10E-11	1.3756	0.1927
1	平均				1.3756	0.1917
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100
1	10	120	1	1.30E-08	1.3827	0.1092
1	10	120	3	2.00E-10	1.3827	0.1092
1	10	120	5	4.90E-11	1.3827	0.1092
1	10	120	8	2.90E-11	1.3827	0.1092
1	10	120	10	2.60E-11	1.3827	0.1092
1	10	120	50	1.70E-11	1.3827	0.1091
1	10	120	100	1.50E-11	1.3827	0.1090
1	10	120	200	1.20E-11	1.3827	0.1088
1	10	120	500	8.40E-12	1.3827	0.1082
1	平均				1.3827	0.1090
1	ANN 識別結果				1.3480	1.8100



表 5.13 試驗編號 A1 的數據經 HHT 識別的結果。固定 10 階濾波器，通帶 4~5(Hz)，得轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：Benchmark A 模型；輸入地震力：Random；識別模態：2nd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
2	以下數據取通過頻帶 4~5(Hz)之帶通濾波器					
2	10	20	1	5.00E-03	4.4345	0.0512
2	10	20	3	1.80E-05	4.4345	0.0513
2	10	20	5	4.50E-06	4.4345	0.0513
2	10	20	8	3.20E-06	4.4345	0.0513
2	10	20	10	1.20E-06	4.4345	0.0513
2	10	20	50	8.30E-09	4.4345	0.0514
2	10	20	100	1.00E-09	4.4345	0.0514
2	10	20	200	5.00E-09	4.4345	0.0515
2	10	20	500	1.60E-10	4.4345	0.0517
2	平均				4.4345	0.0514
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	30	1	5.40E-04	4.4343	0.0362
2	10	30	3	1.50E-07	4.4343	0.0362
2	10	30	5	3.70E-08	4.4343	0.0362
2	10	30	8	2.60E-08	4.4343	0.0362
2	10	30	10	7.20E-09	4.4343	0.0362
2	10	30	50	1.80E-09	4.4343	0.0361
2	10	30	100	5.10E-11	4.4343	0.0361
2	10	30	200	2.70E-11	4.4343	0.0361
2	10	30	500	1.60E-11	4.4343	0.0362
2	平均				4.4343	0.0362
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	40	1	5.70E-05	4.4341	0.0320
2	10	40	3	1.30E-08	4.4341	0.0319
2	10	40	5	2.70E-09	4.4341	0.0319
2	10	40	8	1.50E-09	4.4341	0.0319
2	10	40	10	4.40E-10	4.4341	0.0319
2	10	40	50	4.90E-11	4.4340	0.0319
2	10	40	100	1.40E-11	4.4340	0.0319
2	10	40	200	8.80E-12	4.4340	0.0319
2	10	40	500	5.60E-12	4.4340	0.0318

2	平均				4.4341	0.0319
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	50	1	6.80E-06	4.4338	0.0297
2	10	50	3	1.90E-09	4.4338	0.0297
2	10	50	5	5.80E-10	4.4338	0.0297
2	10	50	8	1.20E-10	4.4338	0.0297
2	10	50	10	7.10E-11	4.4338	0.0297
2	10	50	50	8.10E-12	4.4338	0.0297
2	10	50	100	5.40E-12	4.4338	0.0297
2	10	50	200	3.70E-12	4.4338	0.0297
2	10	50	500	2.40E-12	4.4338	0.0295
2	平均				4.4338	0.0297
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	60	1	1.60E-06	4.4343	0.0058
2	10	60	3	9.30E-10	4.4343	0.0058
2	10	60	5	1.90E-10	4.4343	0.0058
2	10	60	8	5.30E-11	4.4343	0.0058
2	10	60	10	9.00E-11	4.4343	0.0058
2	10	60	50	1.30E-12	4.4343	0.0058
2	10	60	100	8.40E-13	4.4343	0.0058
2	10	60	200	6.90E-13	4.4343	0.0057
2	10	60	500	5.90E-13	4.4343	0.0056
2	平均				4.4343	0.0058
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	70	1	1.00E-06	4.4356	0.0274
2	10	70	3	7.80E-10	4.4356	0.0274
2	10	70	5	1.40E-10	4.4356	0.0274
2	10	70	8	2.90E-11	4.4356	0.0274
2	10	70	10	1.40E-11	4.4356	0.0274
2	10	70	50	8.90E-13	4.4356	0.0274
2	10	70	100	2.20E-13	4.4356	0.0274
2	10	70	200	1.80E-13	4.4356	0.0274
2	10	70	500	1.50E-13	4.4356	0.0274
2	平均				4.4356	0.0274
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	80	1	6.50E-07	4.4367	0.0593
2	10	80	3	3.80E-10	4.4367	0.0593

2	10	80	5	7.50E-11	4.4367	0.0593
2	10	80	8	1.90E-11	4.4367	0.0593
2	10	80	10	1.00E-11	4.4367	0.0593
2	10	80	50	3.60E-13	4.4367	0.0593
2	10	80	100	1.50E-13	4.4367	0.0593
2	10	80	200	1.10E-13	4.4367	0.0593
2	10	80	500	8.10E-14	4.4367	0.0593
2	平均				4.4367	0.0593
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	90	1	1.40E-06	4.4360	0.0612
2	10	90	3	2.40E-10	4.4360	0.0612
2	10	90	5	4.50E-11	4.4360	0.0612
2	10	90	8	1.30E-11	4.4360	0.0612
2	10	90	10	7.30E-12	4.4360	0.0612
2	10	90	50	2.50E-13	4.4360	0.0612
2	10	90	100	8.60E-14	4.4360	0.0612
2	10	90	200	4.10E-14	4.4360	0.0612
2	10	90	500	2.60E-14	4.4360	0.0612
2	平均				4.4360	0.0612
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	100	1	9.40E-07	4.4353	0.0645
2	10	100	3	1.90E-10	4.4353	0.0645
2	10	100	5	4.40E-11	4.4353	0.0645
2	10	100	8	1.40E-11	4.4353	0.0645
2	10	100	10	8.50E-12	4.4353	0.0645
2	10	100	50	3.30E-13	4.4353	0.0645
2	10	100	100	8.90E-14	4.4353	0.0645
2	10	100	200	3.00E-14	4.4353	0.0645
2	10	100	500	1.40E-14	4.4353	0.0645
2	平均				4.4353	0.0645
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	110	1	8.90E-07	4.4347	0.0645
2	10	110	3	2.40E-10	4.4347	0.0645
2	10	110	5	6.40E-11	4.4347	0.0645
2	10	110	8	2.30E-11	4.4347	0.0645
2	10	110	10	1.50E-11	4.4347	0.0645
2	10	110	50	1.40E-12	4.4347	0.0645

2	10	110	100	7.40E-13	4.4347	0.0645
2	10	110	200	4.40E-13	4.4347	0.0645
2	10	110	500	2.10E-13	4.4347	0.0645
2	平均				4.4347	0.0645
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800
2	10	120	1	8.80E-07	4.4356	0.0665
2	10	120	3	3.30E-10	4.4356	0.0665
2	10	120	5	1.70E-10	4.4356	0.0665
2	10	120	8	7.80E-11	4.4356	0.0665
2	10	120	10	4.80E-11	4.4356	0.0665
2	10	120	50	2.10E-12	4.4356	0.0665
2	10	120	100	1.20E-12	4.4356	0.0665
2	10	120	200	6.70E-13	4.4356	0.0665
2	10	120	500	3.00E-13	4.4356	0.0665
2	平均				4.4356	0.0665
2	ANN 識別結果				4.5022	0.1800

表 5.14 試驗編號 A1 的數據經 HHT 識別的結果。固定 10 階濾波器，通帶 7~9(Hz)，得到轉移前後標準差與自然頻率、阻尼比的識別結果。

結構：Benchmark A 模型；輸入地震力：Random；識別模態：3rd

模態	階數	阻帶衰減	轉移次數	標準差	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)
3	以下數據取通過頻帶 7~9(Hz)之帶通濾波器					
3	10	20	1	1.30E-03	8.0032	0.3804
3	10	20	3	2.00E-04	8.0039	0.3784
3	10	20	5	4.70E-05	8.0039	0.3746
3	10	20	8	7.10E-06	8.0039	0.3883
3	10	20	10	2.20E-06	8.0044	0.3885
3	10	20	50	5.60E-09	8.0042	0.3864
3	10	20	100	1.70E-09	8.0042	0.3865
3	10	20	200	8.20E-10	8.0039	0.3775
3	10	20	500	4.20E-10	8.0037	0.3687
3	平均				8.0039	0.3810
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	30	1	1.30E-04	8.0045	0.3830
3	10	30	3	2.00E-05	8.0047	0.3731
3	10	30	5	5.10E-06	8.0046	0.3714
3	10	30	8	7.40E-07	8.0046	0.3714
3	10	30	10	2.40E-07	8.0046	0.3714
3	10	30	50	2.70E-09	8.0046	0.3715
3	10	30	100	1.10E-09	8.0046	0.3715
3	10	30	200	1.30E-09	8.0046	0.3715
3	10	30	500	3.10E-10	8.0046	0.3717
3	平均				8.0046	0.3729
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	40	1	2.40E-05	8.0054	0.3800
3	10	40	3	2.10E-06	8.0051	0.3744
3	10	40	5	5.50E-07	8.0051	0.3743
3	10	40	8	1.00E-07	8.0051	0.3743
3	10	40	10	3.50E-08	8.0051	0.3743
3	10	40	50	1.70E-09	8.0051	0.3743
3	10	40	100	9.80E-10	8.0051	0.3743
3	10	40	200	4.30E-10	8.0051	0.3743
3	10	40	500	2.10E-10	8.0051	0.3745

3	平均				8.0051	0.3750
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	50	1	1.30E-05	8.0074	0.4024
3	10	50	3	3.70E-07	8.0078	0.4073
3	10	50	5	1.00E-07	8.0078	0.4073
3	10	50	8	6.70E-08	8.0078	0.4073
3	10	50	10	1.90E-08	8.0078	0.4073
3	10	50	50	1.60E-09	8.0078	0.4073
3	10	50	100	6.90E-10	8.0078	0.4073
3	10	50	200	3.10E-10	8.0078	0.4073
3	10	50	500	1.40E-10	8.0078	0.4075
3	平均				8.0078	0.4068
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	60	1	9.40E-06	8.0094	0.4115
3	10	60	3	5.10E-08	8.0094	0.4116
3	10	60	5	2.60E-08	8.0094	0.4116
3	10	60	8	5.80E-09	8.0094	0.4116
3	10	60	10	3.80E-09	8.0094	0.4116
3	10	60	50	4.90E-10	8.0094	0.4116
3	10	60	100	2.30E-10	8.0094	0.4116
3	10	60	200	1.20E-10	8.0094	0.4117
3	10	60	500	4.10E-09	8.0094	0.4118
3	平均				8.0094	0.4116
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	70	1	9.50E-06	8.0110	0.4149
3	10	70	3	1.40E-08	8.0110	0.4149
3	10	70	5	2.60E-09	8.0110	0.4149
3	10	70	8	9.00E-10	8.0110	0.4149
3	10	70	10	6.90E-09	8.0110	0.4149
3	10	70	50	8.10E-11	8.0110	0.4149
3	10	70	100	7.20E-09	8.0110	0.4149
3	10	70	200	2.70E-11	8.0110	0.4149
3	10	70	500	1.50E-10	8.0110	0.4148
3	平均				8.0110	0.4149
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	80	1	9.60E-06	8.0103	0.4205
3	10	80	3	6.30E-09	8.0103	0.4205

3	10	80	5	1.60E-09	8.0103	0.4205
3	10	80	8	5.00E-10	8.0103	0.4205
3	10	80	10	3.00E-10	8.0103	0.4205
3	10	80	50	1.80E-11	8.0103	0.4205
3	10	80	100	9.20E-12	8.0103	0.4205
3	10	80	200	6.00E-12	8.0103	0.4204
3	10	80	500	3.70E-12	8.0103	0.4204
3	平均				8.0103	0.4205
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	90	1	1.10E-05	8.0101	0.3155
3	10	90	3	4.50E-09	8.0101	0.3155
3	10	90	5	1.10E-09	8.0101	0.3155
3	10	90	8	3.30E-10	8.0101	0.3155
3	10	90	10	1.90E-10	8.0101	0.3155
3	10	90	50	8.50E-12	8.0101	0.3156
3	10	90	100	3.50E-12	8.0101	0.3156
3	10	90	200	1.90E-12	8.0101	0.3156
3	10	90	500	1.10E-12	8.0101	0.3156
3	平均				8.0101	0.3155
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	100	1	9.00E-06	8.0149	0.2877
3	10	100	3	1.70E-09	8.0149	0.2877
3	10	100	5	4.80E-10	8.0149	0.2877
3	10	100	8	5.20E-10	8.0149	0.2877
3	10	100	10	1.10E-10	8.0149	0.2877
3	10	100	50	4.00E-12	8.0149	0.2877
3	10	100	100	1.30E-12	8.0149	0.2877
3	10	100	200	5.20E-13	8.0149	0.2877
3	10	100	500	2.60E-13	8.0149	0.2876
3	平均				8.0149	0.2877
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	110	1	9.30E-06	8.0114	0.2421
3	10	110	3	1.50E-09	8.0114	0.2421
3	10	110	5	4.50E-10	8.0114	0.2421
3	10	110	8	1.50E-10	8.0114	0.2421
3	10	110	10	9.20E-11	8.0114	0.2421
3	10	110	50	4.00E-12	8.0114	0.2421

3	10	110	100	1.00E-12	8.0114	0.2421
3	10	110	200	3.50E-13	8.0114	0.2421
3	10	110	500	1.50E-13	8.0114	0.2421
3	平均				8.0114	0.2421
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900
3	10	120	1	1.20E-05	8.0004	0.1354
3	10	120	3	7.20E-10	8.0004	0.1356
3	10	120	5	1.70E-10	8.0004	0.1356
3	10	120	8	6.40E-11	8.0004	0.1356
3	10	120	10	4.40E-11	8.0004	0.1356
3	10	120	50	6.90E-12	8.0004	0.1356
3	10	120	100	3.50E-12	8.0004	0.1355
3	10	120	200	1.80E-12	8.0004	0.1355
3	10	120	500	7.40E-13	8.0004	0.1355
3	平均				8.0004	0.1355
3	ANN 識別結果				8.0577	0.1900

表 5.15 試驗編號 A1 的數據經 HHT 與 ANN 的識別結果比較

模態	HHT 識別 自然頻率 (Hz)	ANN 識別 自然頻率 (Hz)	HHT 識別 阻尼比 (%)	ANN 識別 阻尼比 (%)
1	1.36	1.36	0.58	1.81
2	4.44	4.50	0.06	0.18
3	8.01	8.06	0.42	0.19



表 5.16 試驗編號 A1~A6 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
A1	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.348	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	4.502	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.058	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.357	0.006
		2 <sup>nd</sup> mode	4.437	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	8.010	0.0004
A2	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.346	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.501	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.056	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.356	0.006
		2 <sup>nd</sup> mode	4.443	0.0001
		3 <sup>rd</sup> mode	8.004	0.008
A3	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.343	0.051
		2 <sup>nd</sup> mode	4.497	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.057	0.003
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.357	0.028
		2 <sup>nd</sup> mode	4.429	0.00004
		3 <sup>rd</sup> mode	7.999	0.009
A4	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.346	0.054
		2 <sup>nd</sup> mode	4.492	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.058	0.003
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.368	0.028
		2 <sup>nd</sup> mode	4.419	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	7.994	0.009
A5	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.350	0.024
		2 <sup>nd</sup> mode	4.502	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.056	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.334	0.007
		2 <sup>nd</sup> mode	4.437	0.0004
		3 <sup>rd</sup> mode	8.076	0.014
A6	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.347	0.024
		2 <sup>nd</sup> mode	4.497	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.053	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.330	0.007
		2 <sup>nd</sup> mode	4.437	0.0004
		3 <sup>rd</sup> mode	8.004	0.014

表 5.17 試驗編號 A7~A12 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
A7	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.342	0.023
		2 <sup>nd</sup> mode	4.499	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.053	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.342	0.010
		2 <sup>nd</sup> mode	4.430	0.0004
		3 <sup>rd</sup> mode	8.016	0.007
A8	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.333	0.024
		2 <sup>nd</sup> mode	4.492	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.047	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.337	0.010
		2 <sup>nd</sup> mode	4.425	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	7.978	0.015
A9	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	3.329	0.019
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.086	0.087
		2 <sup>nd</sup> mode	3.222	0.048
		3 <sup>rd</sup> mode	5.207	0.034
A10	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.081	0.015
		2 <sup>nd</sup> mode	3.304	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.142	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.000	0.125
		2 <sup>nd</sup> mode	3.178	0.043
		3 <sup>rd</sup> mode	5.158	0.034
A11	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	3.296	0.008
		3 <sup>rd</sup> mode	5.002	0.115
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.972	0.160
		2 <sup>nd</sup> mode	3.229	0.021
		3 <sup>rd</sup> mode	5.166	0.019
A12	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	3.293	0.007
		3 <sup>rd</sup> mode	5.140	0.065
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.992	0.138
		2 <sup>nd</sup> mode	3.159	0.040
		3 <sup>rd</sup> mode	5.164	0.031

表 5.18 試驗編號 A13~A18 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
A13	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.087	0.025
		2 <sup>nd</sup> mode	3.303	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.141	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.961	0.119
		2 <sup>nd</sup> mode	3.190	0.033
		3 <sup>rd</sup> mode	5.141	0.025
A14	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.079	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.299	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.139	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.045	0.097
		2 <sup>nd</sup> mode	3.067	0.042
		3 <sup>rd</sup> mode	5.242	0.024
A15	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.085	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.304	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.142	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.045	0.114
		2 <sup>nd</sup> mode	3.144	0.027
		3 <sup>rd</sup> mode	5.215	0.024
A16	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.079	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	3.300	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.139	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.034	0.113
		2 <sup>nd</sup> mode	3.114	0.034
		3 <sup>rd</sup> mode	5.182	0.027
A17	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	4.445	0.007
		3 <sup>rd</sup> mode	8.051	0.009
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.250	0.037
		2 <sup>nd</sup> mode	4.206	0.035
		3 <sup>rd</sup> mode	7.981	0.004
A18	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.342	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.491	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.048	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.351	0.008
		2 <sup>nd</sup> mode	4.426	0.0004
		3 <sup>rd</sup> mode	8.011	0.009

表 5.19 試驗編號 A19~A24 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
A19	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	4.436	0.009
		3 <sup>rd</sup> mode	8.057	0.008
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.265	0.032
		2 <sup>nd</sup> mode	4.359	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.047	0.006
A20	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.339	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	4.485	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.042	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.345	0.009
		2 <sup>nd</sup> mode	4.344	0.029
		3 <sup>rd</sup> mode	8.015	0.008
A21	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.268	0.073
		2 <sup>nd</sup> mode	4.410	0.007
		3 <sup>rd</sup> mode	7.983	0.005
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.221	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	4.333	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.000	0.005
A22	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.332	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.475	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.034	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.343	0.013
		2 <sup>nd</sup> mode	4.412	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.013	0.007
A23	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.363	0.195
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	8.366	0.199
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.280	0.034
		2 <sup>nd</sup> mode	4.404	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	7.990	0.007
A24	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.331	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	4.475	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.034	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.342	0.013
		2 <sup>nd</sup> mode	4.412	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.015	0.007

表 5.20 試驗編號 A25~A28 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
A25	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.257	0.093
		2 <sup>nd</sup> mode	4.393	0.008
		3 <sup>rd</sup> mode	7.990	0.005
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.227	0.034
		2 <sup>nd</sup> mode	4.321	0.010
		3 <sup>rd</sup> mode	8.026	0.008
A26	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.330	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.473	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.031	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.340	0.014
		2 <sup>nd</sup> mode	4.407	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.003	0.007
A27	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.250	0.109
		2 <sup>nd</sup> mode	4.382	0.009
		3 <sup>rd</sup> mode	7.977	0.006
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.225	0.037
		2 <sup>nd</sup> mode	4.323	0.009
		3 <sup>rd</sup> mode	8.030	0.007
A28	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.328	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.470	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.028	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.341	0.015
		2 <sup>nd</sup> mode	4.404	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.006	0.007

表 5.21 試驗編號 B1~B6 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
B1	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.086	0.034
		2 <sup>nd</sup> mode	3.263	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.117	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.041	0.049
		2 <sup>nd</sup> mode	3.255	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.103	0.0007
B2	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.083	0.033
		2 <sup>nd</sup> mode	3.259	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.111	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.071	0.053
		2 <sup>nd</sup> mode	3.102	0.033
		3 <sup>rd</sup> mode	5.096	0.005
B3	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.091	0.001
		2 <sup>nd</sup> mode	3.079	0.019
		3 <sup>rd</sup> mode	5.093	0.001
B4	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.086	0.004
		2 <sup>nd</sup> mode	3.082	0.019
		3 <sup>rd</sup> mode	5.091	0.001
B5	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.074	0.024
		2 <sup>nd</sup> mode	3.262	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.118	0.001
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.073	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	3.026	0.015
		3 <sup>rd</sup> mode	5.100	0.001
B6	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.070	0.022
		2 <sup>nd</sup> mode	3.259	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.115	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.073	0.009
		2 <sup>nd</sup> mode	3.024	0.014
		3 <sup>rd</sup> mode	5.094	0.001

表 5.22 試驗編號 B7~B12 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
B7	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.071	0.022
		2 <sup>nd</sup> mode	3.260	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.116	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.070	0.052
		2 <sup>nd</sup> mode	3.181	0.029
		3 <sup>rd</sup> mode	5.095	0.001
B8	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.070	0.023
		2 <sup>nd</sup> mode	3.259	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.115	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.071	0.047
		2 <sup>nd</sup> mode	3.177	0.027
		3 <sup>rd</sup> mode	5.093	0.002
B9	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.058	0.005
		2 <sup>nd</sup> mode	4.680	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.164	0.010
B10	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.398	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.678	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.170	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.042	0.041
		2 <sup>nd</sup> mode	4.675	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.120	0.007
B11	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.089	0.014
		2 <sup>nd</sup> mode	4.672	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	8.176	0.008
B12	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.097	0.011
		2 <sup>nd</sup> mode	4.662	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	8.110	0.003

表 5.23 試驗編號 B13~B18 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
B13	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.395	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	4.676	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.168	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.079	0.012
		2 <sup>nd</sup> mode	4.669	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	8.059	0.026
B14	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.389	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	4.669	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.160	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.048	0.004
		2 <sup>nd</sup> mode	4.670	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.079	0.019
B15	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.392	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.677	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.169	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.047	0.035
		2 <sup>nd</sup> mode	4.673	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	8.318	0.007
B16	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.387	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.669	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.160	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.086	0.023
		2 <sup>nd</sup> mode	4.669	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.225	0.011
B17	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.072	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	3.257	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.112	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.068	0.037
		2 <sup>nd</sup> mode	3.190	0.026
		3 <sup>rd</sup> mode	5.091	0.002
B18	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.074	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	3.260	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.116	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.063	0.049
		2 <sup>nd</sup> mode	3.080	0.031
		3 <sup>rd</sup> mode	5.088	0.002



表 5.24 試驗編號 B19~B24 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
B19	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.980	0.031
		2 <sup>nd</sup> mode	3.058	0.006
		3 <sup>rd</sup> mode	5.058	0.008
B20	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.061	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	3.247	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.109	0.001
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.045	0.058
		2 <sup>nd</sup> mode	3.069	0.017
		3 <sup>rd</sup> mode	5.082	0.002
B21	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.020	0.026
		2 <sup>nd</sup> mode	3.078	0.005
		3 <sup>rd</sup> mode	5.057	0.003
B22	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.060	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.247	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.109	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.041	0.051
		2 <sup>nd</sup> mode	3.069	0.017
		3 <sup>rd</sup> mode	5.082	0.001
B23	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.038	0.031
		2 <sup>nd</sup> mode	3.092	0.013
		3 <sup>rd</sup> mode	5.067	0.002
B24	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.060	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.246	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.109	0.001
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.047	0.049
		2 <sup>nd</sup> mode	3.068	0.017
		3 <sup>rd</sup> mode	5.082	0.001

表 5.25 試驗編號 B25~B26 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
B25	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.048	0.042
		2 <sup>nd</sup> mode	3.159	0.023
		3 <sup>rd</sup> mode	5.077	0.001
B26	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.061	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.246	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.109	0.001
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.043	0.052
		2 <sup>nd</sup> mode	3.069	0.017
		3 <sup>rd</sup> mode	5.082	0.001

表 5.26 試驗編號 C1\_C1~ C1\_C6 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C1_C1	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.077	0.023
		2 <sup>nd</sup> mode	3.268	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.141	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.057	0.054
		2 <sup>nd</sup> mode	3.333	0.015
		3 <sup>rd</sup> mode	5.118	0.004
C1_C2	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.075	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	3.265	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.138	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.069	0.056
		2 <sup>nd</sup> mode	3.323	0.012
		3 <sup>rd</sup> mode	5.108	0.004
C1_C3	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.085	0.008
		2 <sup>nd</sup> mode	3.383	0.022
		3 <sup>rd</sup> mode	5.137	0.004
C1_C4	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.089	0.012
		2 <sup>nd</sup> mode	3.063	0.019
		3 <sup>rd</sup> mode	5.134	0.002
C1_C5	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.072	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.263	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.137	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.061	0.025
		2 <sup>nd</sup> mode	3.255	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	5.121	0.001
C1_C6	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.067	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	3.259	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.134	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.034	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.245	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.115	0.001

表 5.27 試驗編號 C1\_C7~ C1\_C12 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C1_C7	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.073	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	3.262	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.136	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.055	0.041
		2 <sup>nd</sup> mode	3.265	0.014
		3 <sup>rd</sup> mode	5.130	0.004
C1_C8	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.068	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.259	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.133	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.057	0.035
		2 <sup>nd</sup> mode	3.262	1.113
		3 <sup>rd</sup> mode	5.116	0.006
C1_C9	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.170	0.064
		2 <sup>nd</sup> mode	4.669	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.208	0.0005
C1_C10	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.404	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	4.661	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.212	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.178	0.078
		2 <sup>nd</sup> mode	4.636	0.009
		3 <sup>rd</sup> mode	8.202	0.001
C1_C11	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.196	0.033
		2 <sup>nd</sup> mode	4.629	0.006
		3 <sup>rd</sup> mode	8.197	0.007
C1_C12	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.217	0.041
		2 <sup>nd</sup> mode	4.623	0.005
		3 <sup>rd</sup> mode	8.176	0.004

表 5.28 試驗編號 C1\_C13~ C1\_C16 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C1_C13	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.399	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	4.657	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.208	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.169	0.117
		2 <sup>nd</sup> mode	4.635	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.214	0.001
C1_C14	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.392	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	4.649	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.201	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.183	0.111
		2 <sup>nd</sup> mode	4.623	0.004
		3 <sup>rd</sup> mode	8.201	0.003
C1_C15	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.394	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	4.651	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.204	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.026	0.148
		2 <sup>nd</sup> mode	4.612	0.006
		3 <sup>rd</sup> mode	8.223	0.001
C1_C16	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.387	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	4.639	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.192	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.026	0.155
		2 <sup>nd</sup> mode	4.641	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.197	0.001

表 5.29 試驗編號 C2\_C1~ C2\_C6 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C2_C1	ANN	1 <sup>st</sup> mode	3.063	0.039
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	2.963	0.022
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C2	ANN	1 <sup>st</sup> mode	3.049	0.040
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	2.951	0.015
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C3	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	2.914	0.042
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C4	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	2.896	0.039
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C5	ANN	1 <sup>st</sup> mode	3.034	0.040
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	2.974	0.015
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C6	ANN	1 <sup>st</sup> mode	3.021	0.041
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	2.962	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.30 試驗編號 C2\_C7~ C2\_C12 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C2_C7	ANN	1 <sup>st</sup> mode	3.040	0.038
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.017	0.036
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C8	ANN	1 <sup>st</sup> mode	3.026	0.040
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	2.963	0.041
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C9	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.374	0.025
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C10	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.345	0.060
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.352	0.025
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C11	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.062	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C12	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.067	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.31 試驗編號 C2\_C13~ C2\_Cn2 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C2_C13	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.327	0.058
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.131	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C14	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.301	0.062
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.119	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C15	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.335	0.059
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.290	0.014
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_C16	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.294	0.064
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.283	0.023
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_Cn1	ANN	1 <sup>st</sup> mode	3.331	0.127
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.153	0.036
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_Cn2	ANN	1 <sup>st</sup> mode	3.137	0.107
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.142	0.047
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態



表 5.32 試驗編號 C2\_Cn3~ C2\_Cn8 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C2_Cn3	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.091	0.023
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_Cn4	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.083	0.026
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_Cn5	ANN	1 <sup>st</sup> mode	2.865	0.061
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.024	0.023
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_Cn6	ANN	1 <sup>st</sup> mode	2.722	0.084
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.006	0.027
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_Cn7	ANN	1 <sup>st</sup> mode	2.726	0.199
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.077	0.014
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C2_Cn8	ANN	1 <sup>st</sup> mode	2.736	0.090
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	3.080	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.33 試驗編號 C3\_C1~ C3\_C6 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C3_C1	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.740	0.027
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.734	0.010
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C2	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.748	0.037
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.722	0.035
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C3	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.734	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C4	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.735	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C5	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.767	0.031
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.781	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C6	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.764	0.032
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.779	0.023
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.34 試驗編號 C3\_C7~ C3\_C12 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C3_C7	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.758	0.037
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.694	0.050
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C8	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.753	0.037
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.719	0.048
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C9	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.313	0.026
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C10	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.271	0.059
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.293	0.029
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C11	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.060	0.026
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C12	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.232	0.068
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.052	0.030
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.35 試驗編號 C3\_C13~ C3\_C16 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C3_C13	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.078	0.014
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C14	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.289	0.060
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.078	0.014
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C15	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.325	0.059
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.331	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C3_C16	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.286	0.063
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.308	0.016
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.36 試驗編號 C4\_C1~ C4\_C6 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C4_C1	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.947	0.051
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C2	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.531	0.027
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C3	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.167	0.071
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C4	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.143	0.035
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C5	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.160	0.042
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C6	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.136	0.040
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.37 試驗編號 C4\_C7~ C4\_C12 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C4_C7	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.600	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C8	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.592	0.030
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C9	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.329	0.055
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.351	0.025
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C10	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.269	0.063
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.318	0.029
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C11	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.064	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C12	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.061	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.38 試驗編號 C4\_C13~ C4\_C16 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
C4_C13	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.303	0.057
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.209	0.043
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C14	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.270	0.059
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.109	0.016
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C15	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.296	0.058
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.283	0.024
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
C4_C16	ANN	1 <sup>st</sup> mode	4.261	0.061
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	4.270	0.027
		2 <sup>nd</sup> mode	無此模態	無此模態
		3 <sup>rd</sup> mode	無此模態	無此模態

表 5.39 試驗編號 D1~D6 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
D1	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.058	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	3.244	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.123	0.001
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.019	0.038
		2 <sup>nd</sup> mode	3.244	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	5.097	0.002
D2	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.057	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	3.243	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.121	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.032	0.053
		2 <sup>nd</sup> mode	3.240	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	5.097	0.001
D3	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.063	0.010
		2 <sup>nd</sup> mode	3.235	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	5.108	0.002
D4	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.072	0.006
		2 <sup>nd</sup> mode	3.385	0.018
		3 <sup>rd</sup> mode	5.110	0.002
D5	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.058	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	3.239	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.118	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.037	0.009
		2 <sup>nd</sup> mode	3.314	0.023
		3 <sup>rd</sup> mode	5.101	0.0004
D6	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.057	0.022
		2 <sup>nd</sup> mode	3.235	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.115	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.030	0.008
		2 <sup>nd</sup> mode	3.332	0.024
		3 <sup>rd</sup> mode	5.094	0.0003



表 5.40 試驗編號 D7~D12 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
D7	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.057	0.016
		2 <sup>nd</sup> mode	3.237	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.117	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.040	0.036
		2 <sup>nd</sup> mode	3.246	0.011
		3 <sup>rd</sup> mode	5.098	0.001
D8	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.068	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.259	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.133	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.020	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	3.278	0.014
		3 <sup>rd</sup> mode	5.091	0.001
D9	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.181	0.060
		2 <sup>nd</sup> mode	4.635	0.004
		3 <sup>rd</sup> mode	7.802	0.015
D10	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.381	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	4.614	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.141	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.186	0.062
		2 <sup>nd</sup> mode	4.634	0.004
		3 <sup>rd</sup> mode	8.152	0.001
D11	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.225	0.045
		2 <sup>nd</sup> mode	4.609	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.131	0.001
D12	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.227	0.045
		2 <sup>nd</sup> mode	4.594	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.125	0.001

表 5.41 試驗編號 D13~D18 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
D13	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.371	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	4.603	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.132	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.199	0.105
		2 <sup>nd</sup> mode	4.607	0.0003
		3 <sup>rd</sup> mode	8.122	0.0004
D14	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.366	0.016
		2 <sup>nd</sup> mode	4.598	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	8.124	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.220	0.078
		2 <sup>nd</sup> mode	4.605	0.0004
		3 <sup>rd</sup> mode	8.113	0.0006
D15	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.369	0.015
		2 <sup>nd</sup> mode	4.600	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	7.320	0.001
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.349	0.011
		2 <sup>nd</sup> mode	4.598	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	7.340	0.006
D16	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.362	0.014
		2 <sup>nd</sup> mode	4.590	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	7.310	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.348	0.008
		2 <sup>nd</sup> mode	4.592	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	7.311	0.004
D17	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.992	0.011
		2 <sup>nd</sup> mode	3.175	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	5.074	0.0001
D18	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.028	0.027
		2 <sup>nd</sup> mode	3.178	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.083	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.997	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	3.153	0.004
		3 <sup>rd</sup> mode	5.063	0.0003

表 5.42 試驗編號 D19~D24 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
D19	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.033	0.029
		2 <sup>nd</sup> mode	3.088	0.010
		3 <sup>rd</sup> mode	5.069	0.001
D20	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.038	0.027
		2 <sup>nd</sup> mode	3.166	0.004
		3 <sup>rd</sup> mode	5.071	0.002
D21	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.030	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	3.180	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.086	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.020	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	3.157	0.007
		3 <sup>rd</sup> mode	5.077	0.0002
D22	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.027	0.017
		2 <sup>nd</sup> mode	3.176	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.082	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.026	0.019
		2 <sup>nd</sup> mode	3.157	0.005
		3 <sup>rd</sup> mode	5.071	0.001
D23	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.030	0.020
		2 <sup>nd</sup> mode	3.179	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.084	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.020	0.026
		2 <sup>nd</sup> mode	3.166	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.065	0.001
D24	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.034	0.021
		2 <sup>nd</sup> mode	3.175	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.081	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.025	0.025
		2 <sup>nd</sup> mode	3.160	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	5.063	0.0002

表 5.43 試驗編號 D25~D30 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
D25	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.072	0.031
		2 <sup>nd</sup> mode	2.292	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	3.246	0.006
D26	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.056	0.043
		2 <sup>nd</sup> mode	2.298	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	3.253	0.005
D27	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.076	0.027
		2 <sup>nd</sup> mode	2.280	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	3.245	0.002
D28	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.104	0.018
		2 <sup>nd</sup> mode	2.271	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	3.247	0.003
D29	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	2.540	0.100
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.057	0.010
		2 <sup>nd</sup> mode	2.277	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	3.237	0.002
D30	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	2.353	0.025
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.056	0.029
		2 <sup>nd</sup> mode	2.271	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	3.234	0.002

表 5.44 試驗編號 D31~D36 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
D31	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	2.322	0.043
		3 <sup>rd</sup> mode	3.518	0.037
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.062	0.010
		2 <sup>nd</sup> mode	2.276	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	3.232	0.002
D32	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	2.308	0.022
		3 <sup>rd</sup> mode	3.442	0.024
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.059	0.022
		2 <sup>nd</sup> mode	2.266	0.001
		3 <sup>rd</sup> mode	3.226	0.001
D33	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.023	0.013
		2 <sup>nd</sup> mode	3.167	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	5.077	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.005	0.001
		2 <sup>nd</sup> mode	3.151	0.005
		3 <sup>rd</sup> mode	5.066	0.0001
D34	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.999	0.001
		2 <sup>nd</sup> mode	3.143	0.008
		3 <sup>rd</sup> mode	5.072	0.0002
D35	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	2.978	0.033
		3 <sup>rd</sup> mode	4.965	0.006
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.943	0.026
		2 <sup>nd</sup> mode	2.763	0.036
		3 <sup>rd</sup> mode	4.827	0.004
D36	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.001	0.002
		2 <sup>nd</sup> mode	3.159	0.0002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.061	0.0002

表 5.45 試驗編號 D37~D42 經 HHT 與 ANN 的識別得到的自然頻率及阻尼比

試驗編號	識別方法	模態	自然頻率(Hz)	阻尼比
D37	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	3.062	0.018
		3 <sup>rd</sup> mode	5.024	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.978	0.026
		2 <sup>nd</sup> mode	3.121	0.008
		3 <sup>rd</sup> mode	5.020	0.002
D38	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	1.000	0.001
		2 <sup>nd</sup> mode	3.152	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.060	0.0001
D39	ANN	1 <sup>st</sup> mode	0.990	0.037
		2 <sup>nd</sup> mode	3.109	0.010
		3 <sup>rd</sup> mode	5.060	0.002
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.996	0.009
		2 <sup>nd</sup> mode	3.093	0.006
		3 <sup>rd</sup> mode	5.058	0.002
D40	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.987	0.010
		2 <sup>nd</sup> mode	3.153	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.060	0.0001
D41	ANN	1 <sup>st</sup> mode	1.006	0.022
		2 <sup>nd</sup> mode	3.155	0.003
		3 <sup>rd</sup> mode	5.064	0.003
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.998	0.012
		2 <sup>nd</sup> mode	3.127	0.004
		3 <sup>rd</sup> mode	5.057	0.001
D42	ANN	1 <sup>st</sup> mode	無法識別	無法識別
		2 <sup>nd</sup> mode	無法識別	無法識別
		3 <sup>rd</sup> mode	無法識別	無法識別
	HHT	1 <sup>st</sup> mode	0.990	0.011
		2 <sup>nd</sup> mode	3.153	0.002
		3 <sup>rd</sup> mode	5.060	0.0001

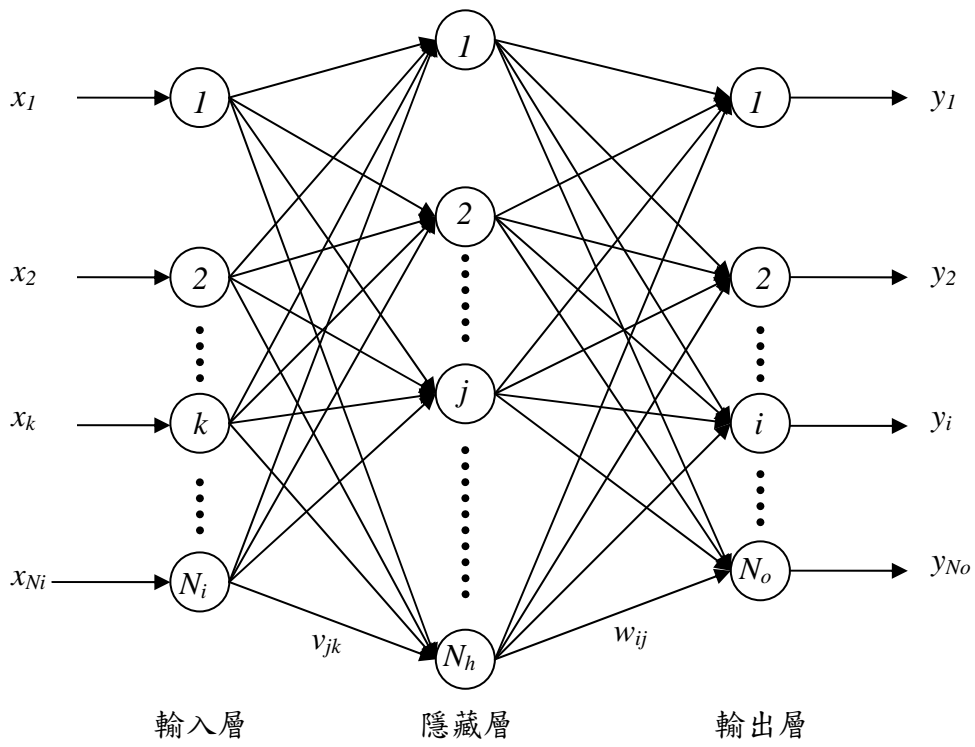


圖 2. 1 典型之三層類神經網路架構圖

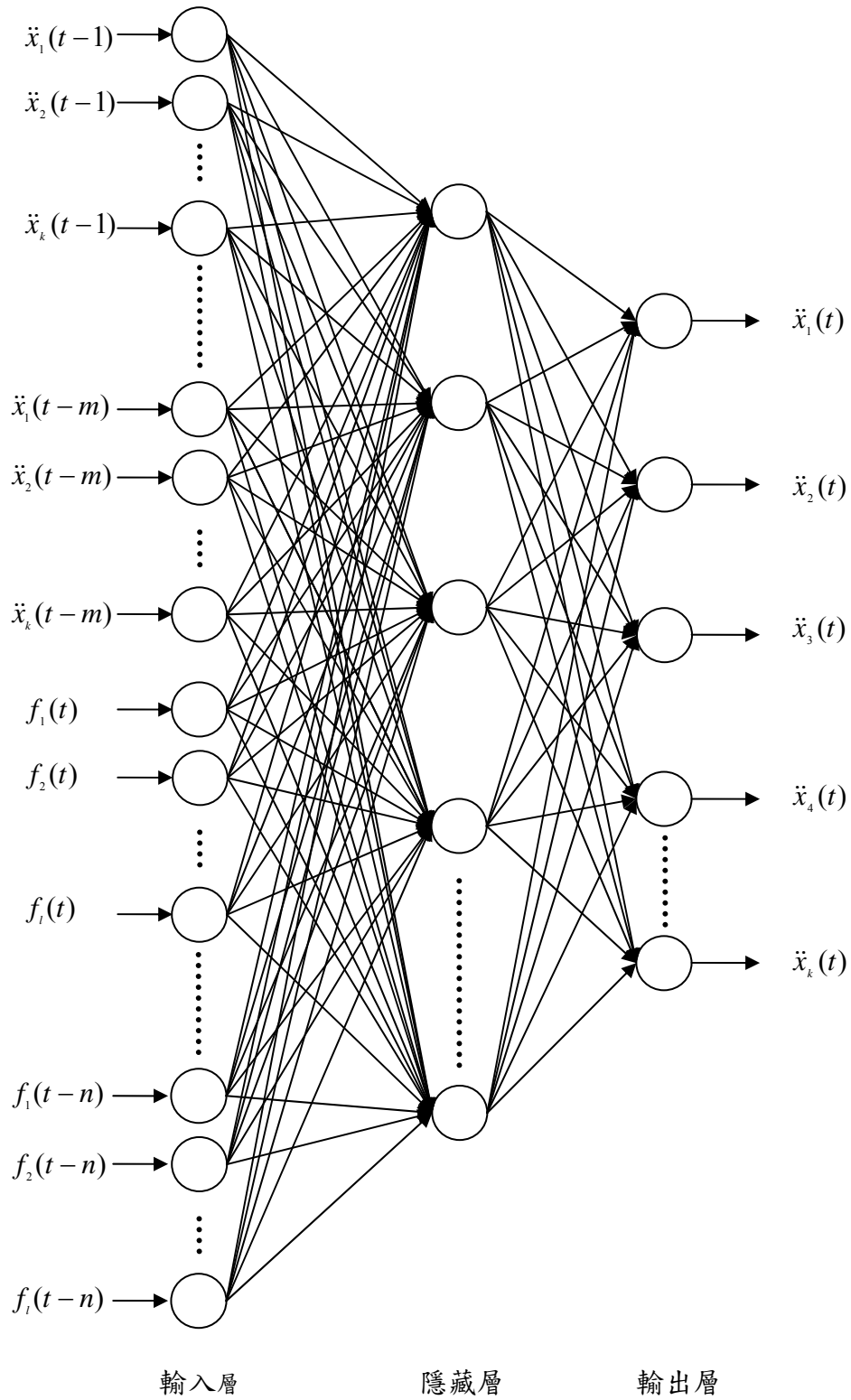


圖 2. 2 類神經網路系統識別模式之網路架構圖



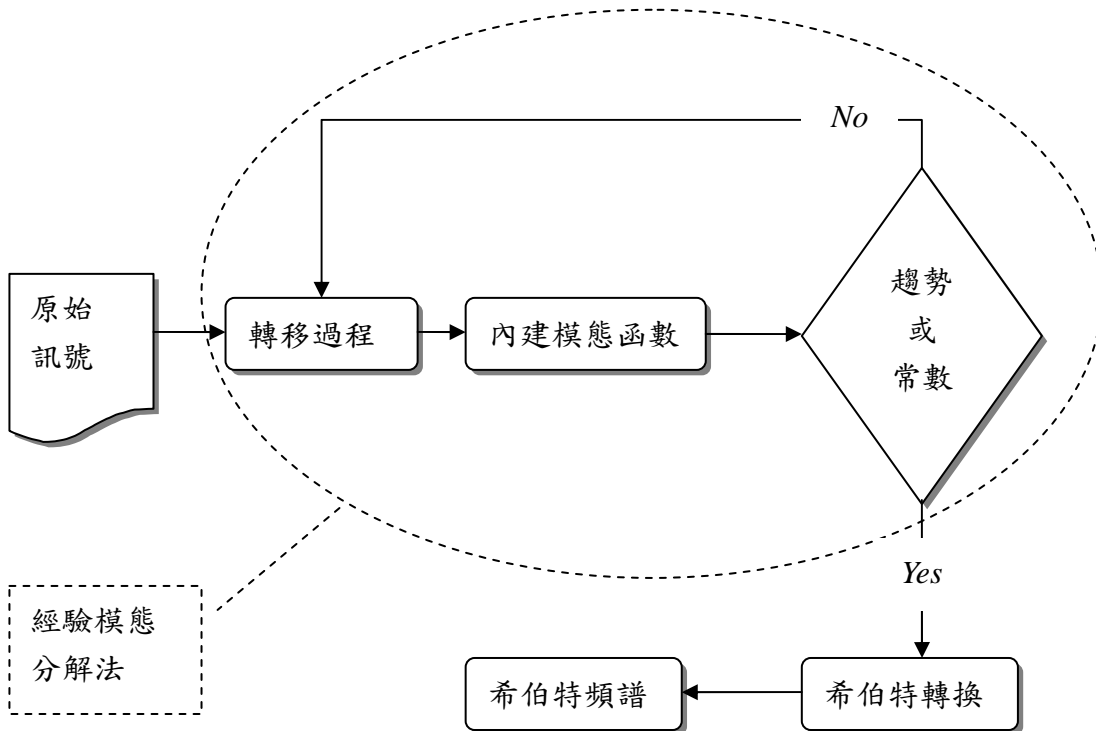


圖 3. 1 希伯特黃轉架構之流程圖。

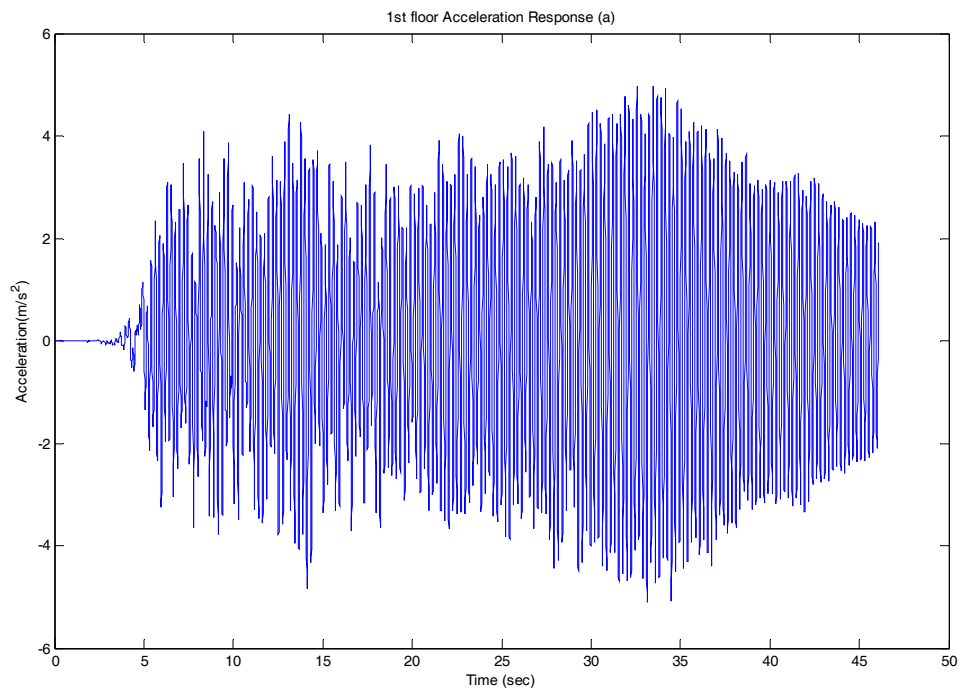


圖 3. 2 原始訊號(一樓的地震加速度反應)。

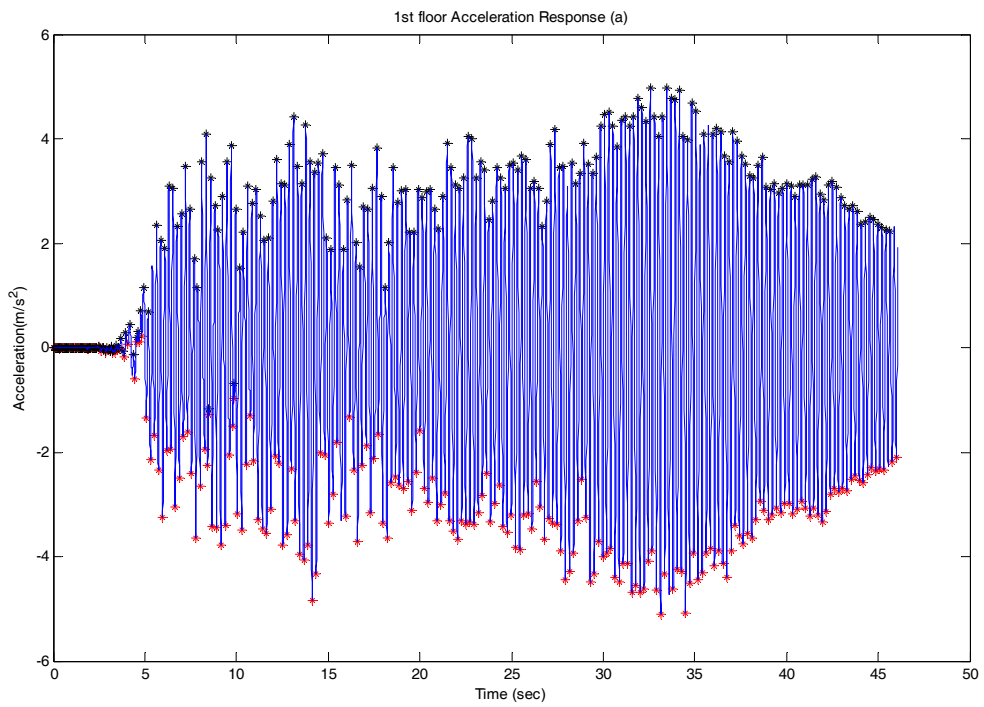


圖 3.

3 原始訊號的極大極小值，上方\*點為極大值，下方\*點為極小值。

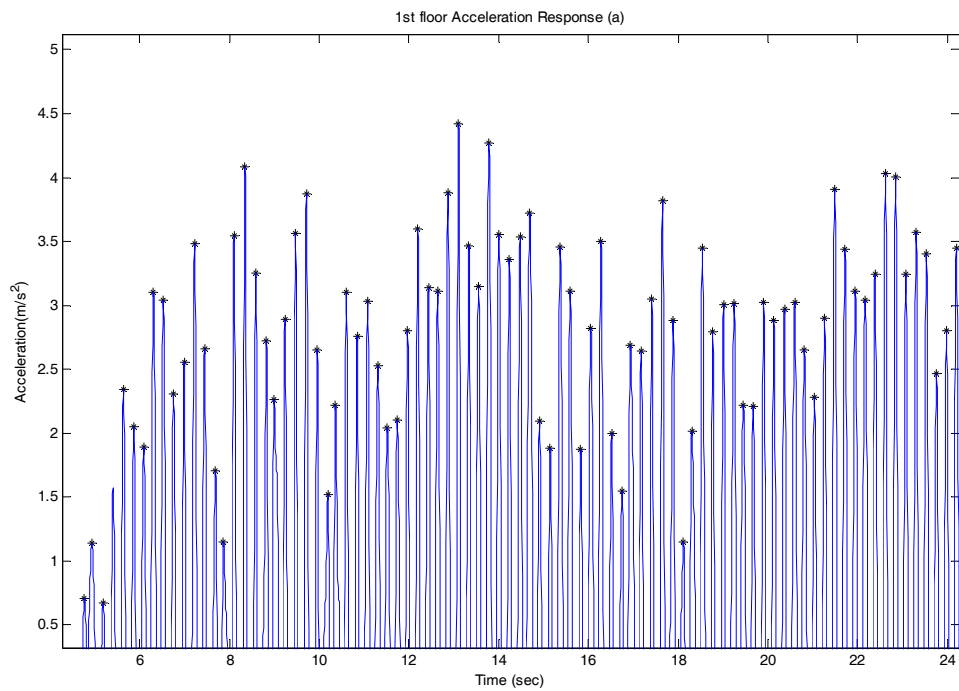
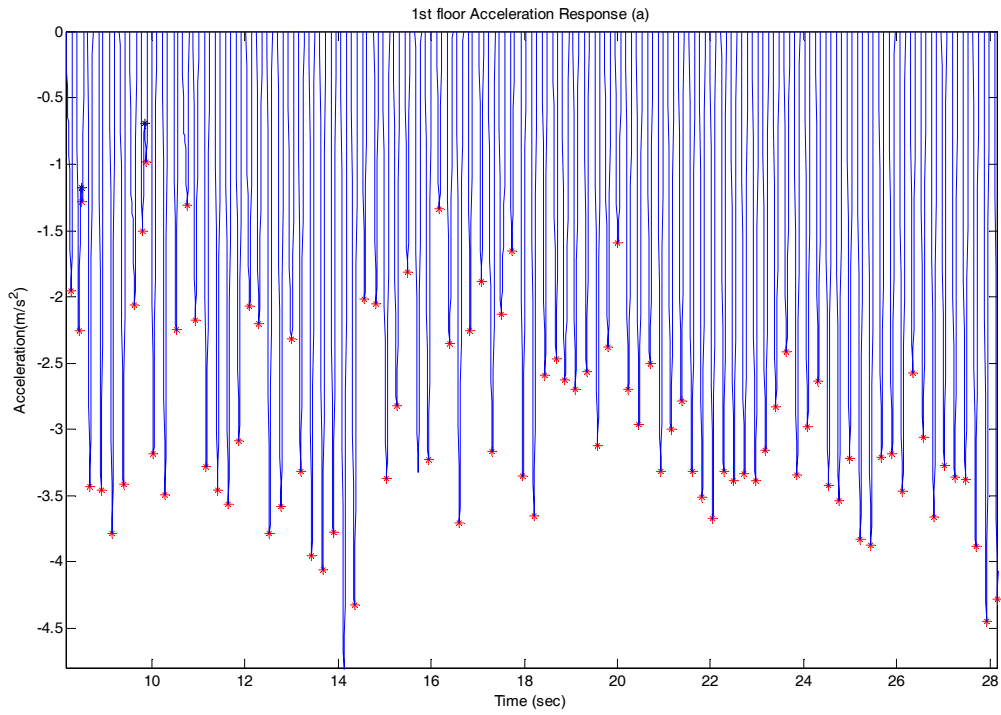


圖 3. 4 原始訊號的極大值(\*點)上半部局部放大圖。



圖

3. 5 原始訊號的極小值(\*點)下半部局部放大圖。

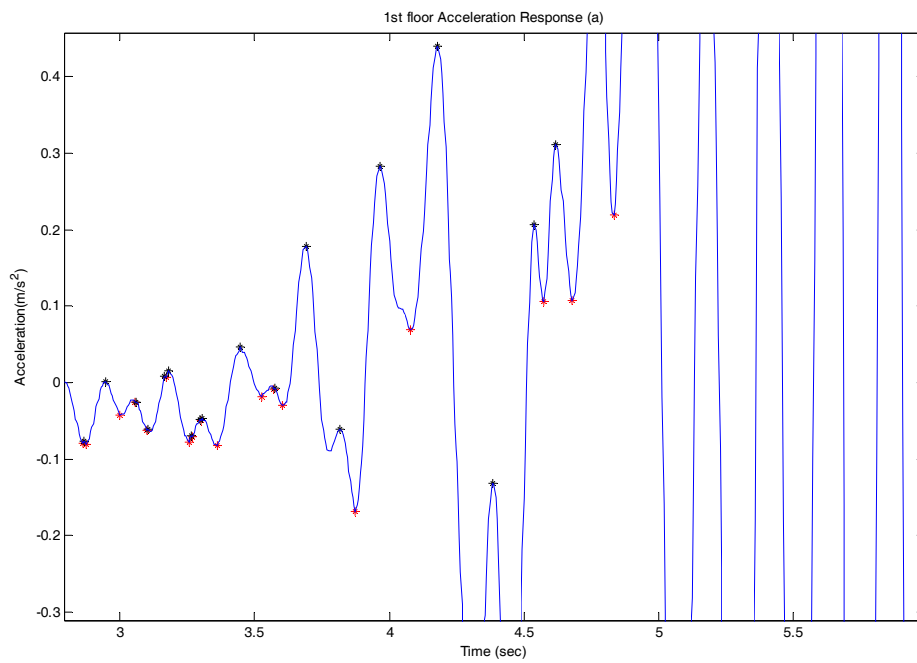


圖 3. 6 原始訊號的極大(黑點)極小(紅點)值前端局部放大圖。

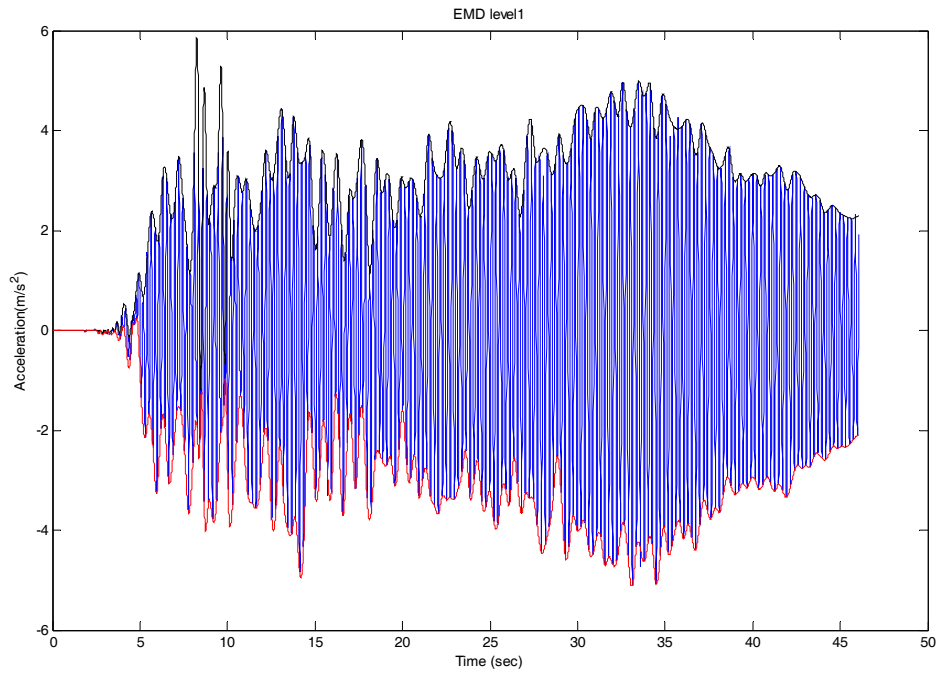


圖 3. 7

極大值包絡線(上方)與為極小值包絡線(下方)。

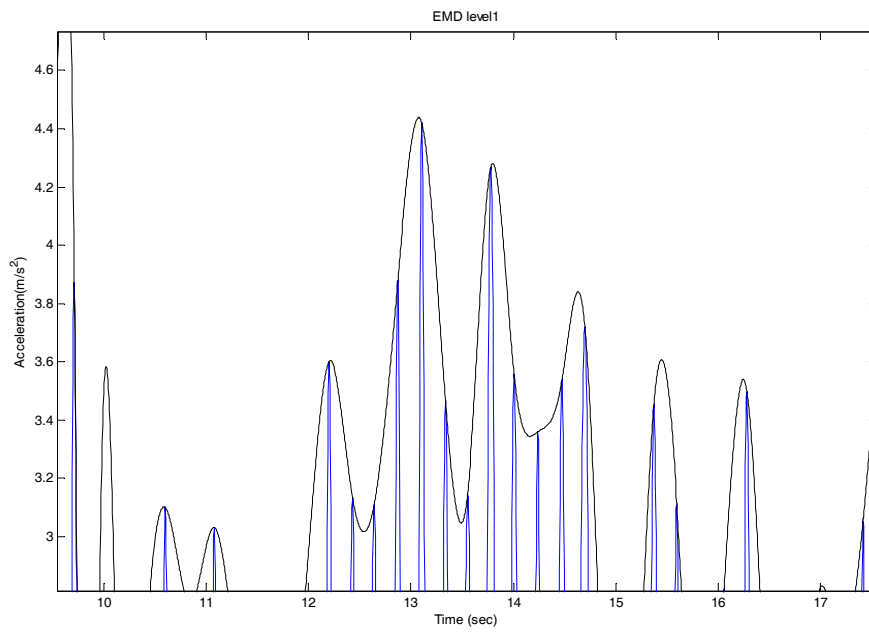


圖 3. 8 極大值包絡線(上方)上半部局部放大圖。

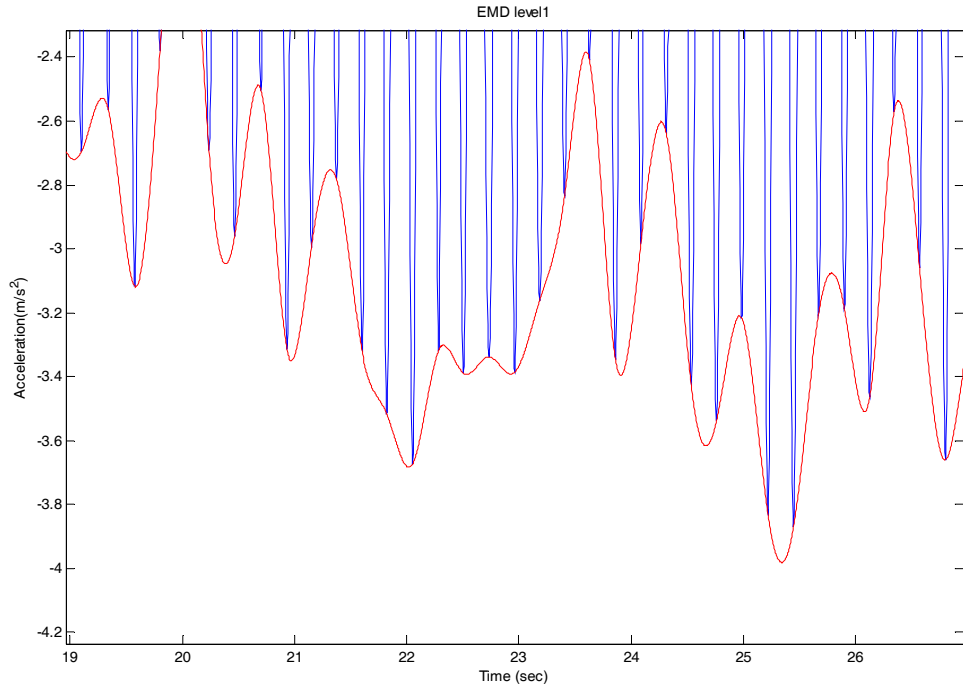


圖 3.

9 極小值包絡線(下方)下半部局部放大圖。

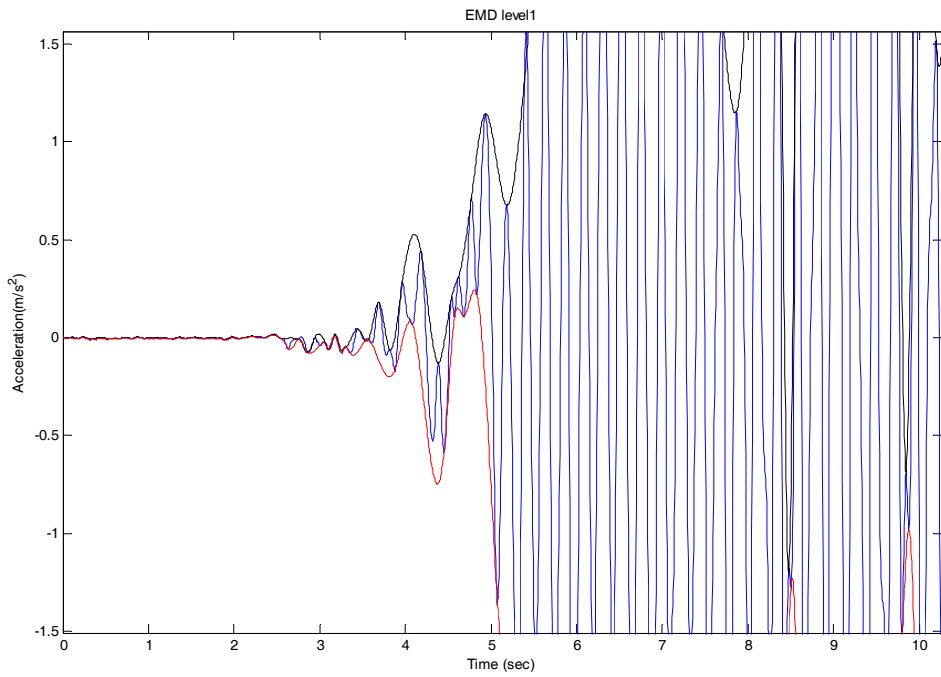


圖 3. 10 極大值包絡線(上方)與極小值包絡線(下方)前端局部放大圖。

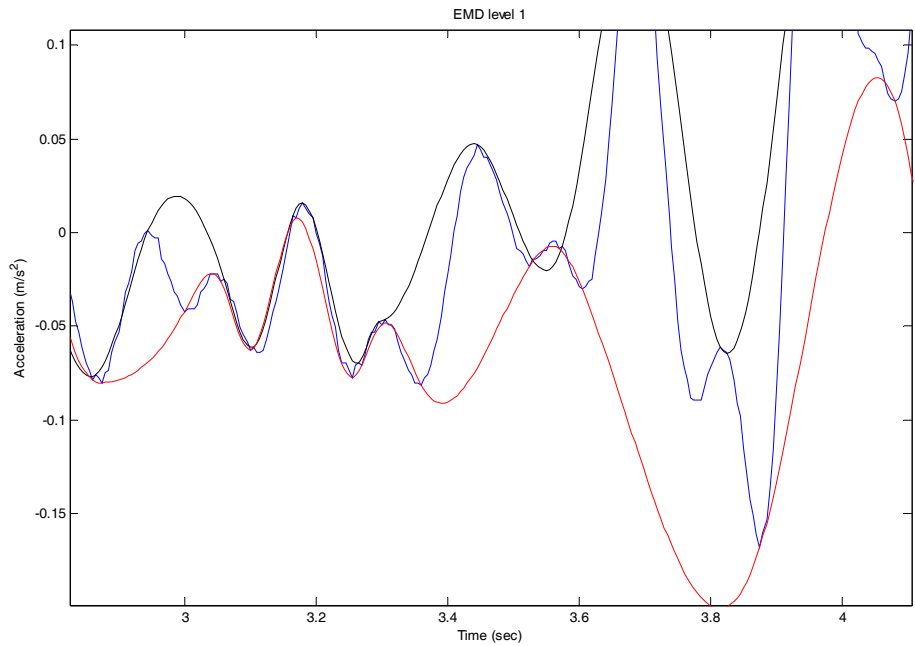


圖 3. 11 極大值包絡線(上方)與極小值包絡線(下方)。前端局部再放大圖。

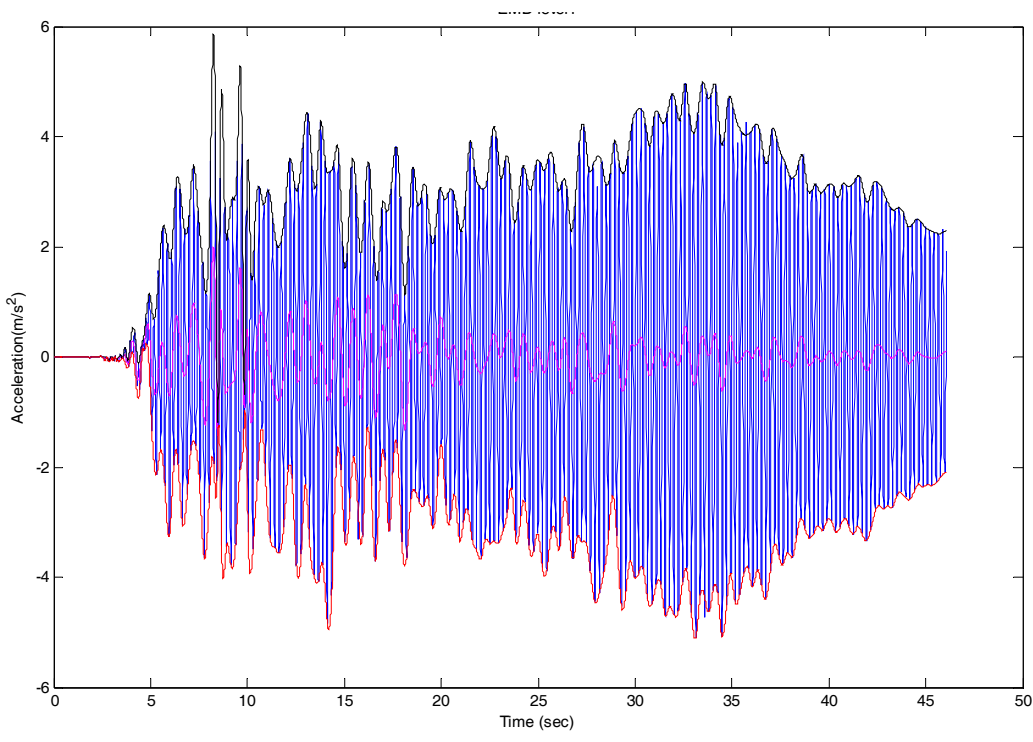


圖 3. 12 極大值包絡線(上)、極小值包絡線(下)、均值包絡線(中)。

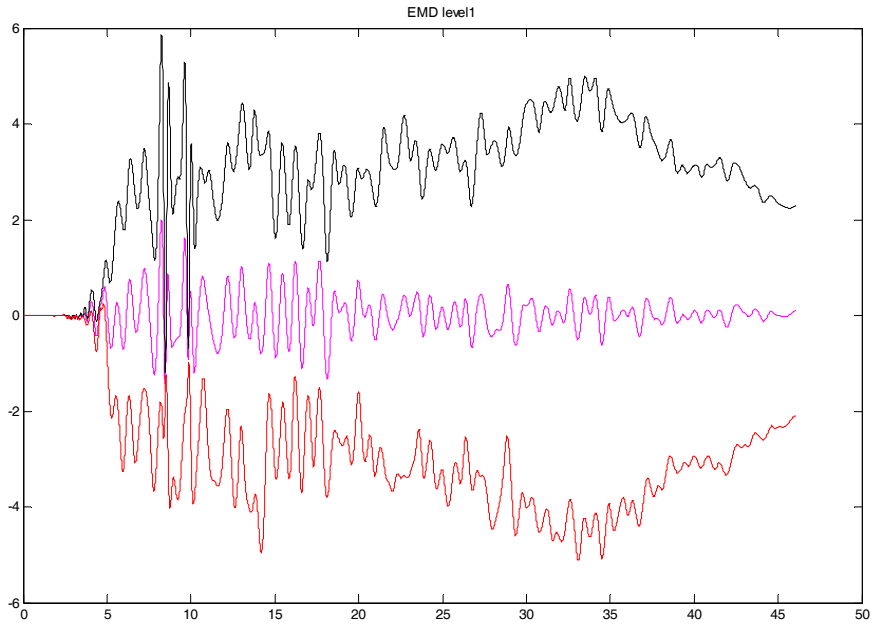


圖 3. 13 將圖 3.12 原始訊號去除後之極大極小與均值包絡線。

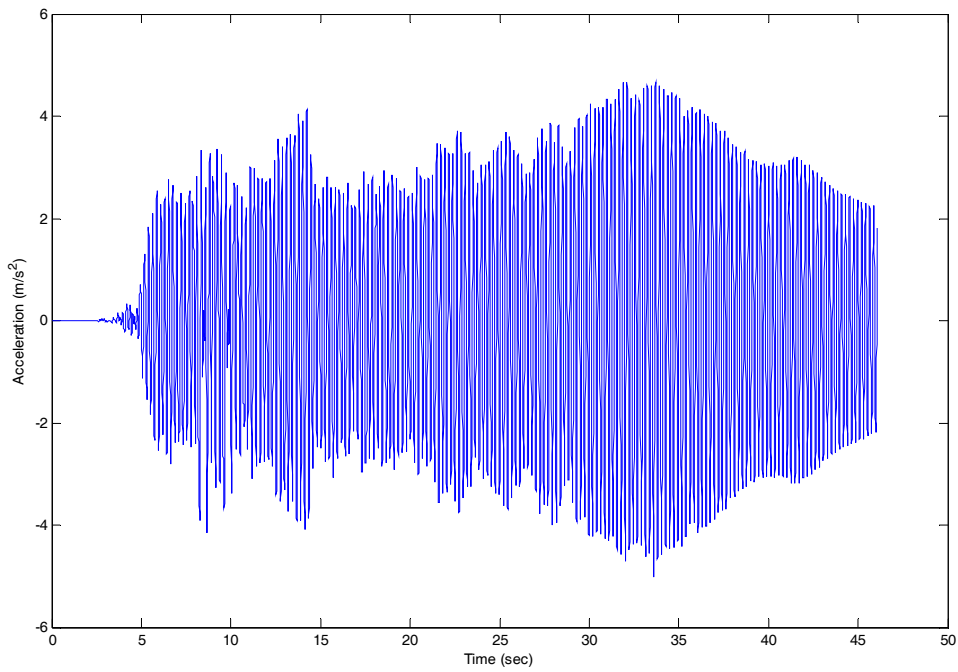


圖 3. 14 由原始訊號與均值包絡線之差得到第一次轉移後的  $h_1$ 。

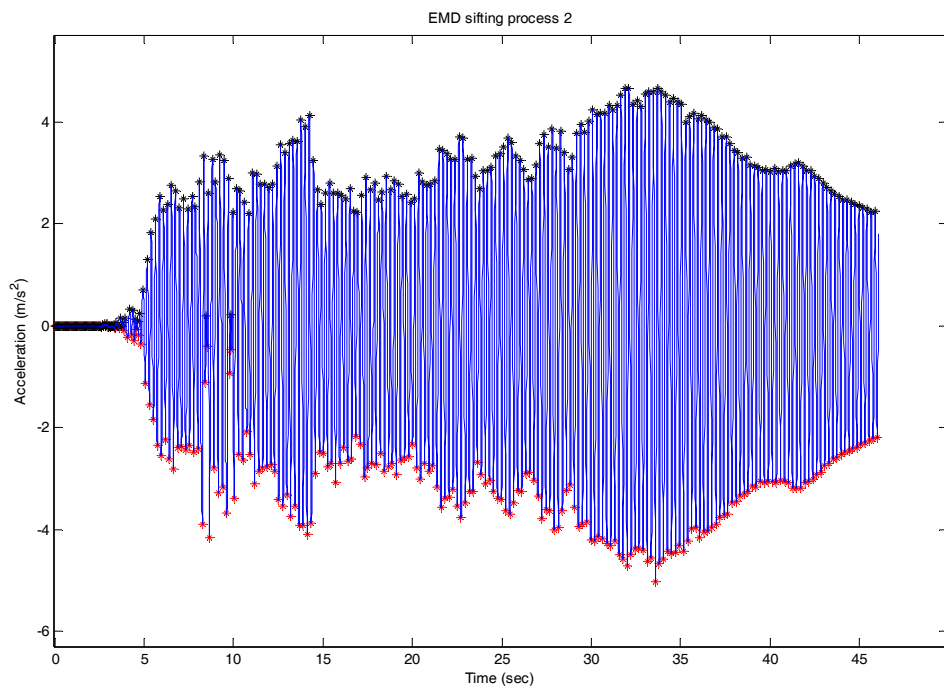


圖 3. 15 將  $h_1$  經過相同的流程找出極大(上方\*點)與極小值(下方\*點)。

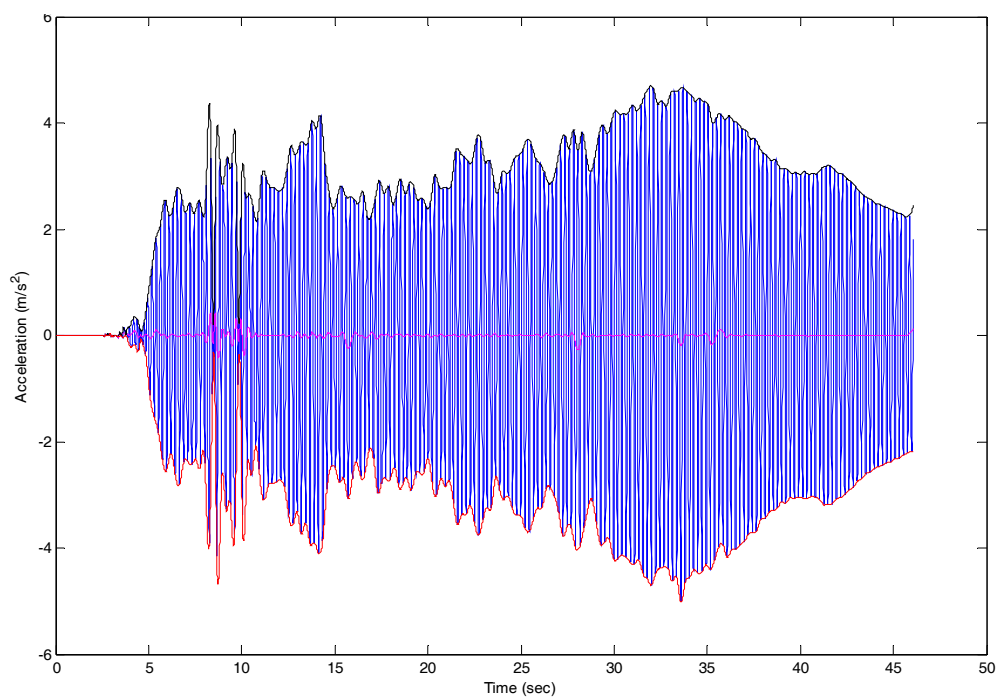


圖 3. 16  $h_1$  極大值包絡線(上方)、極小值包絡線(下方)均值包絡線(中)。



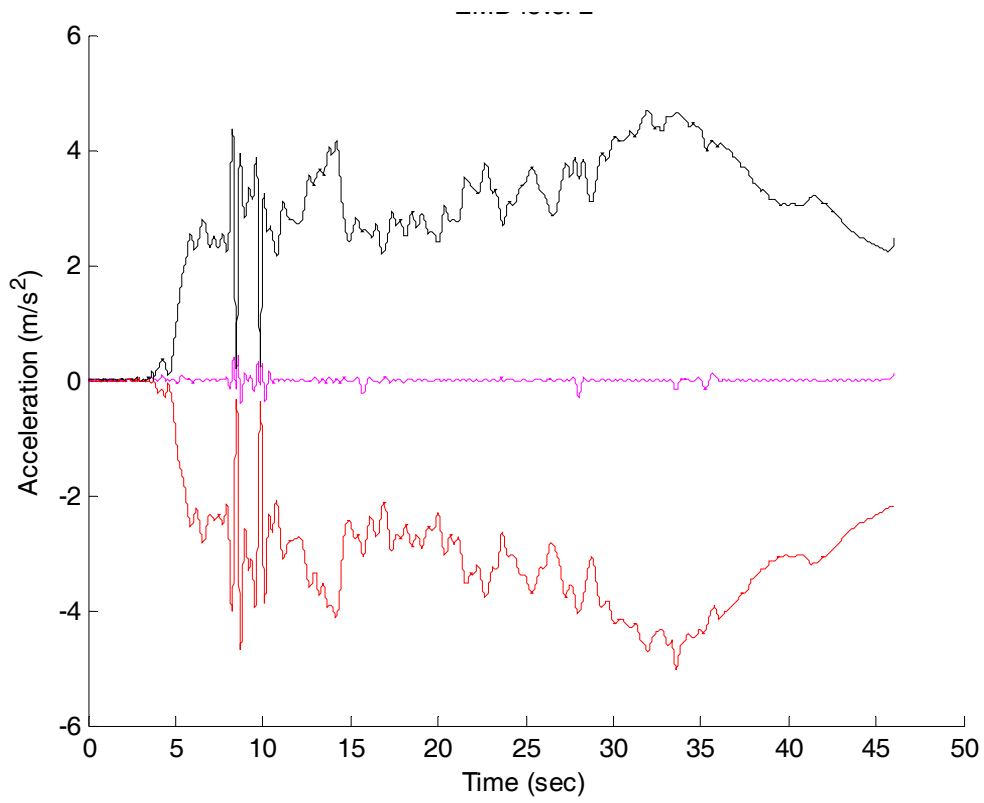


圖 3. 17 圖 3.16 原始訊號( $h_1$ )去除後之極大極小與均值包絡線。

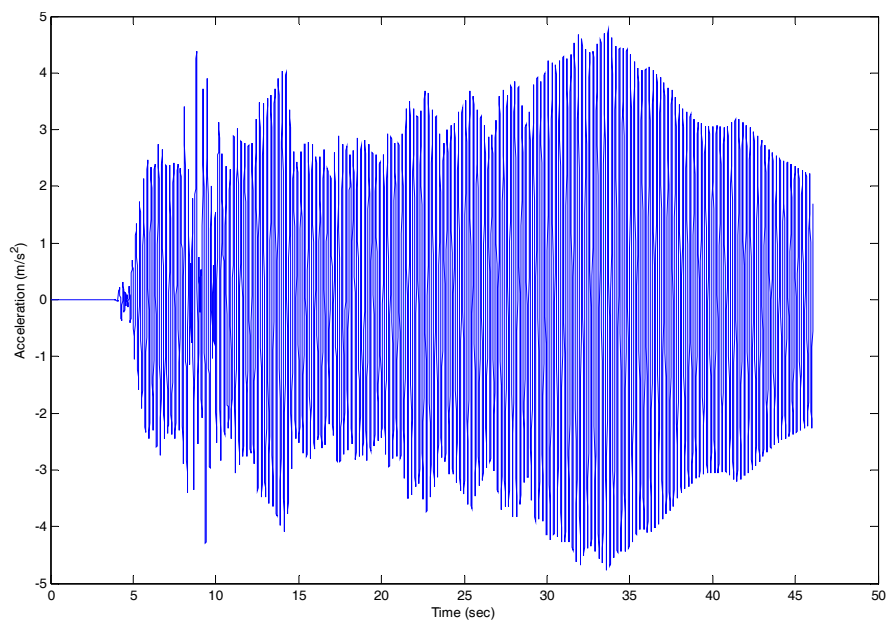


圖 3. 18  $h_1$ 經過一次轉移後得到  $h_2$ 。

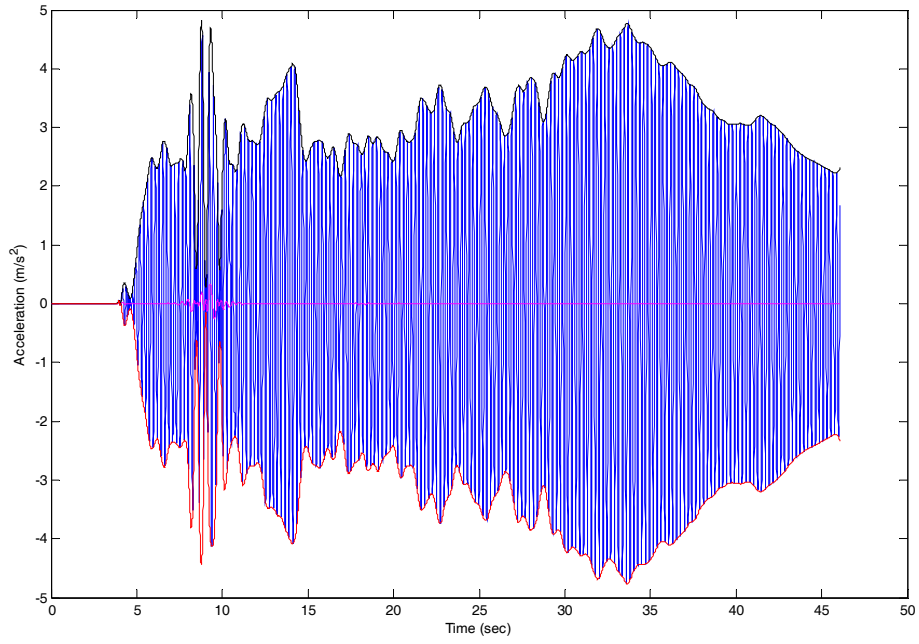


圖 3. 19 k 次轉移後得到的極大(上方)極小(下方)均值(中)包絡線。

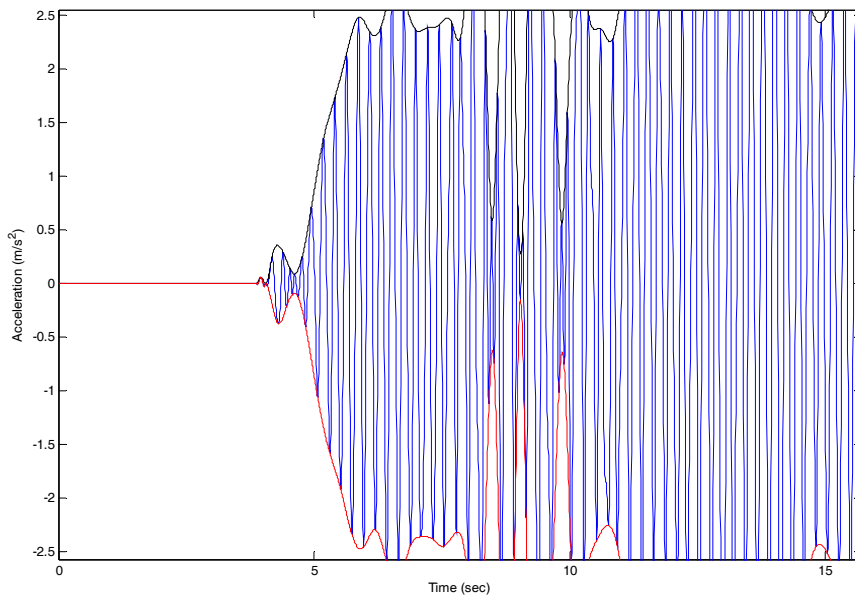


圖 3. 20 圖 3.19 前端局部放大圖。

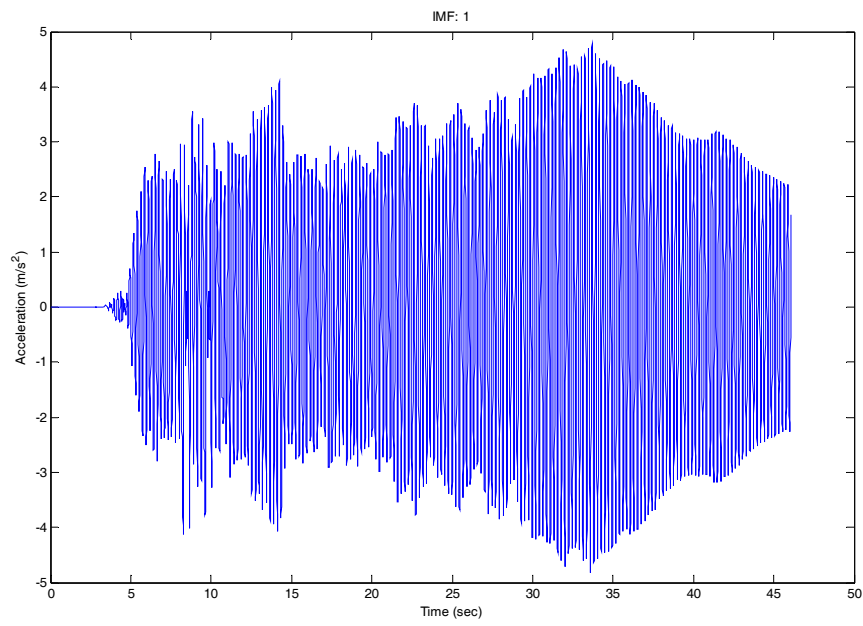


圖 3. 21 經過 k 次轉移後的到的第一個內建模態函數。

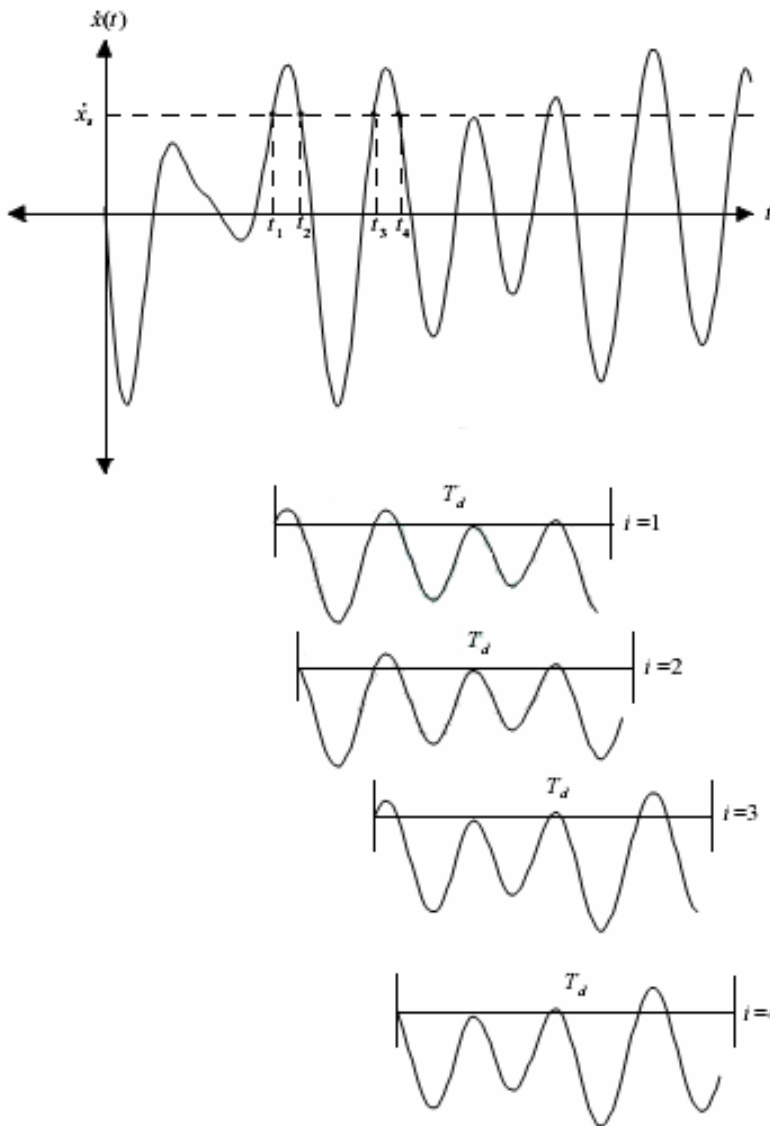


圖 3. 22 隨機遞減曲線之萃取示意圖。

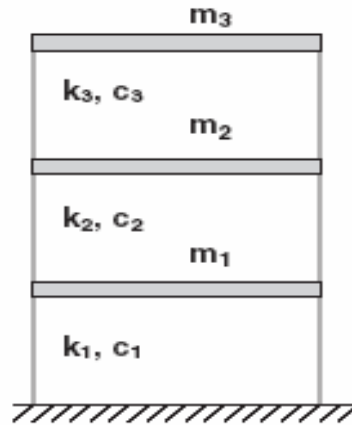


圖 4. 1 數值模擬結構物示意圖

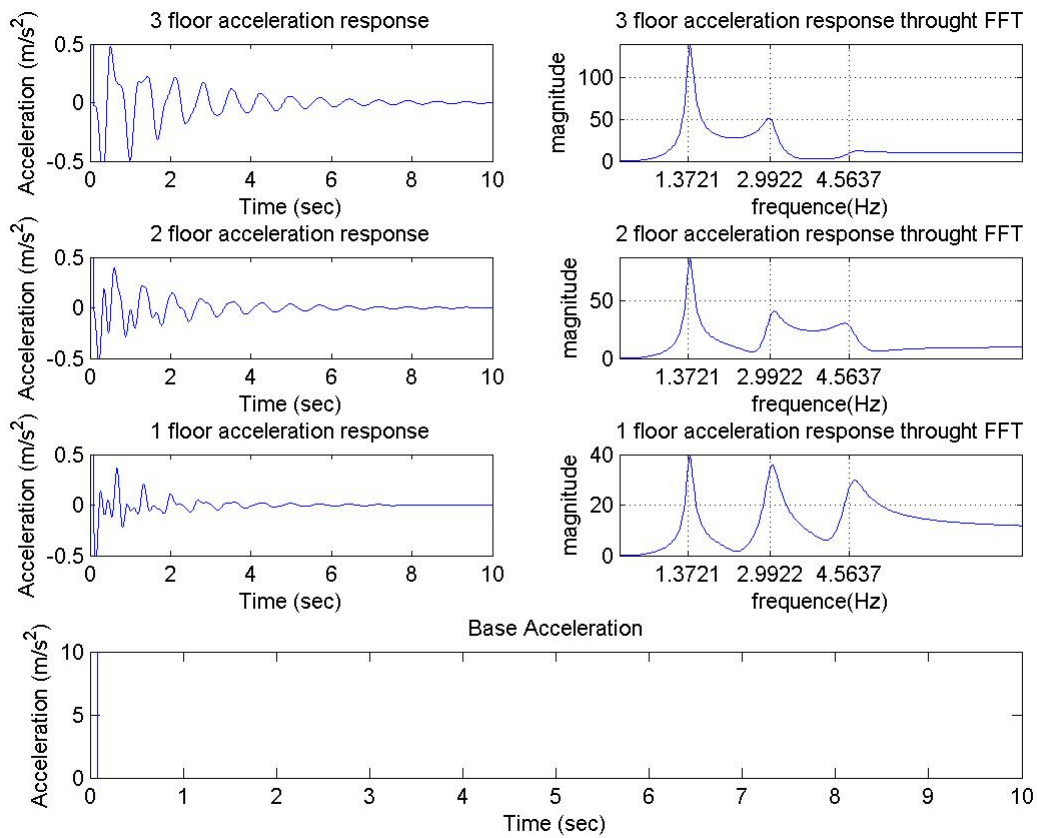


圖 4. 2 最下圖所示為輸入之地表加速度(衝擊載重)歷時，上方三圖左邊由下到上依序為一、二、三層樓之加速度反應，右邊分別為其加速度反應之傅立業轉換

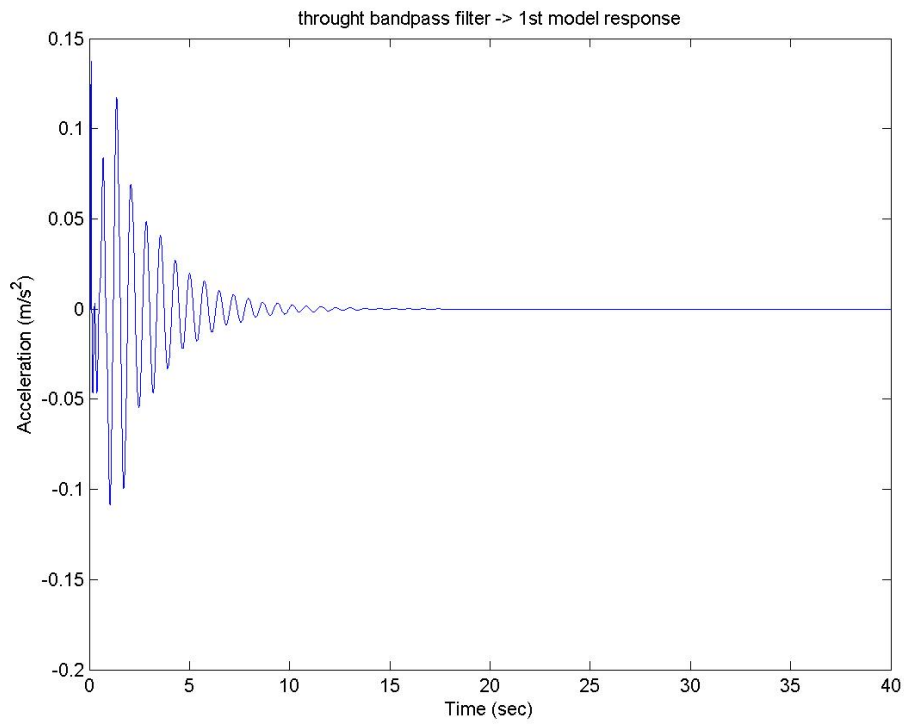


圖 4. 3 一樓之地表加速度反應經過帶通濾波器所得到的加速度反應歷時圖。

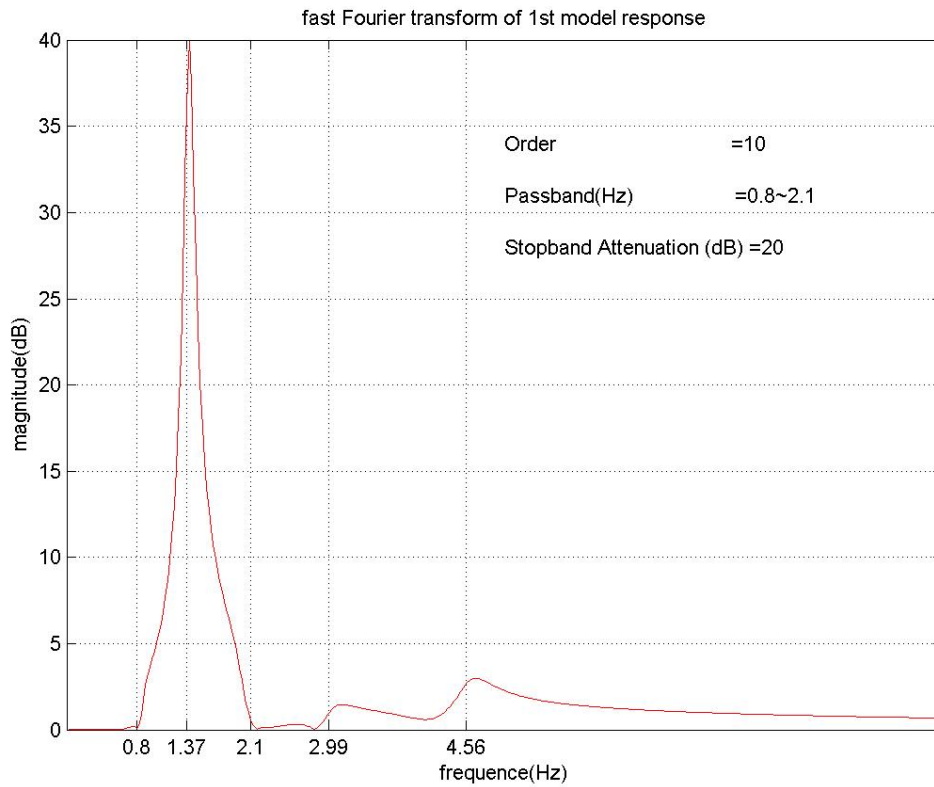


圖 4. 4 第一個模態的加速度反應歷時經傅立業轉換得其頻率分佈。

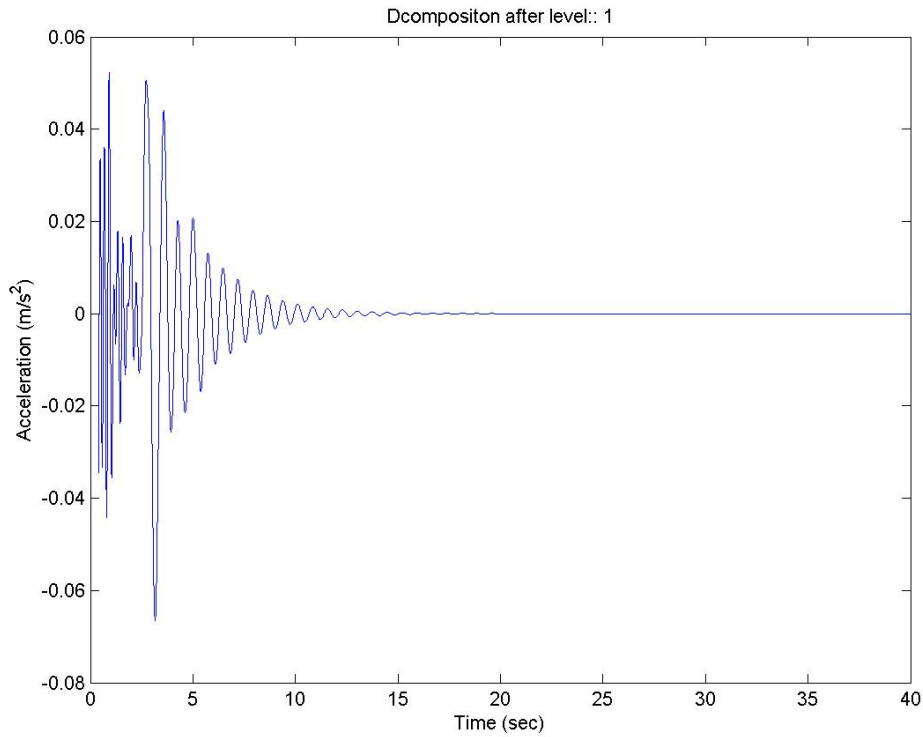


圖 4. 5 第一個模態反應經過數次轉移後所得到的第一個內建模態函數。

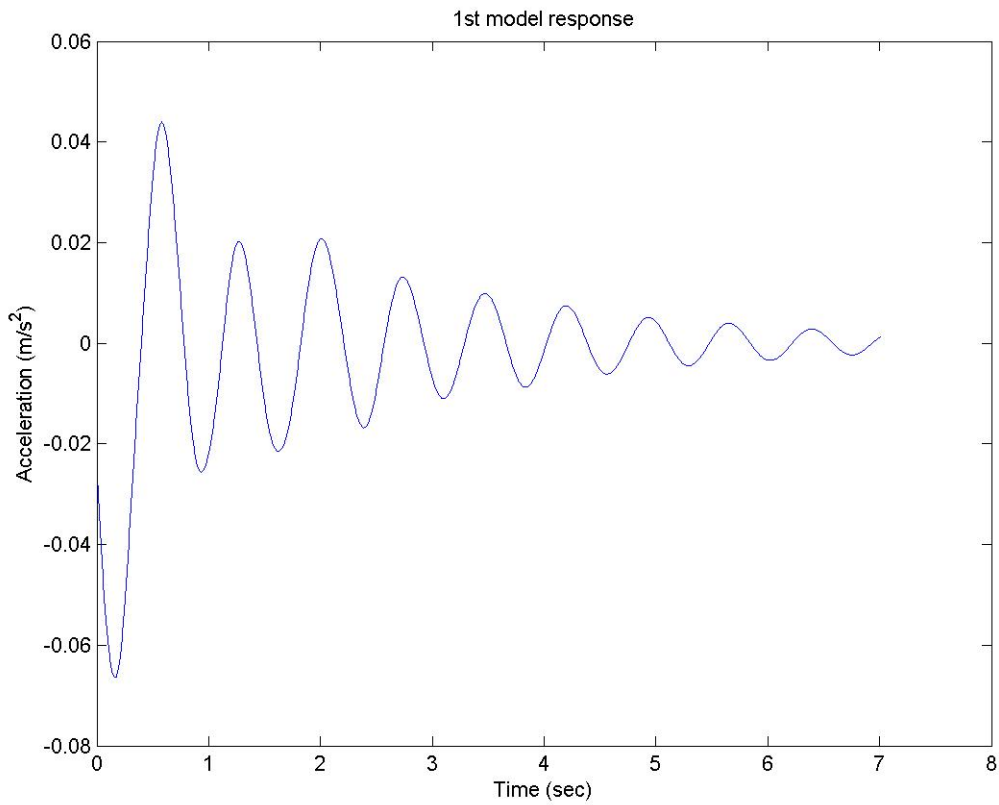


圖 4. 6 擷取第一個內建模態函數之自由振動衰減(free-decay)的訊號。

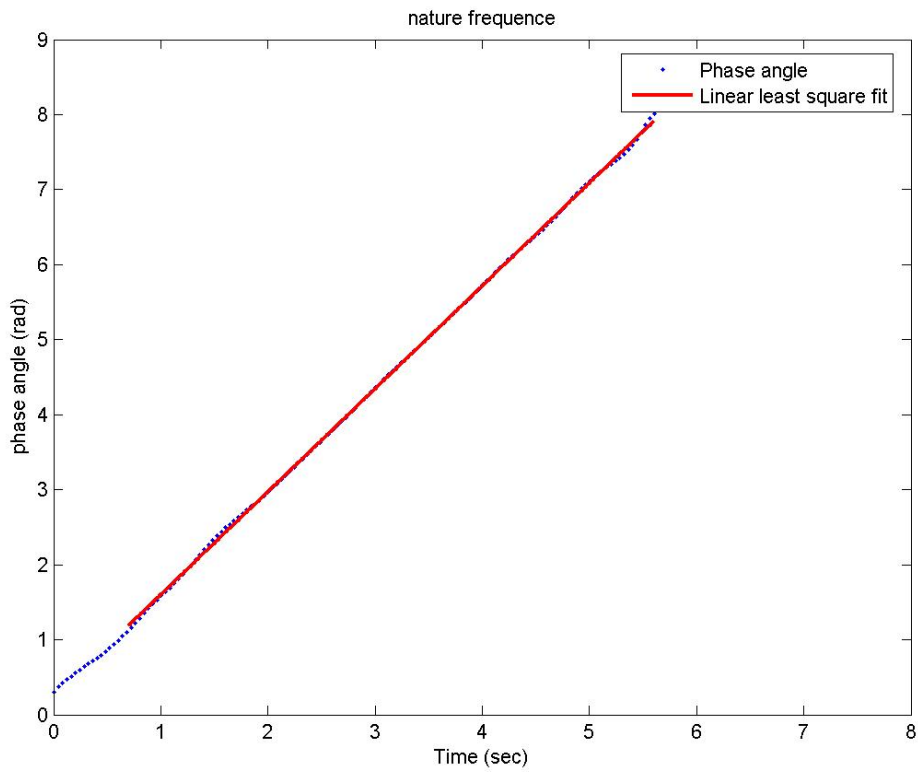


圖 4. 7 黑點所示為自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到之相位角對時間的關係圖，直線段為最小平方方法近似直線。

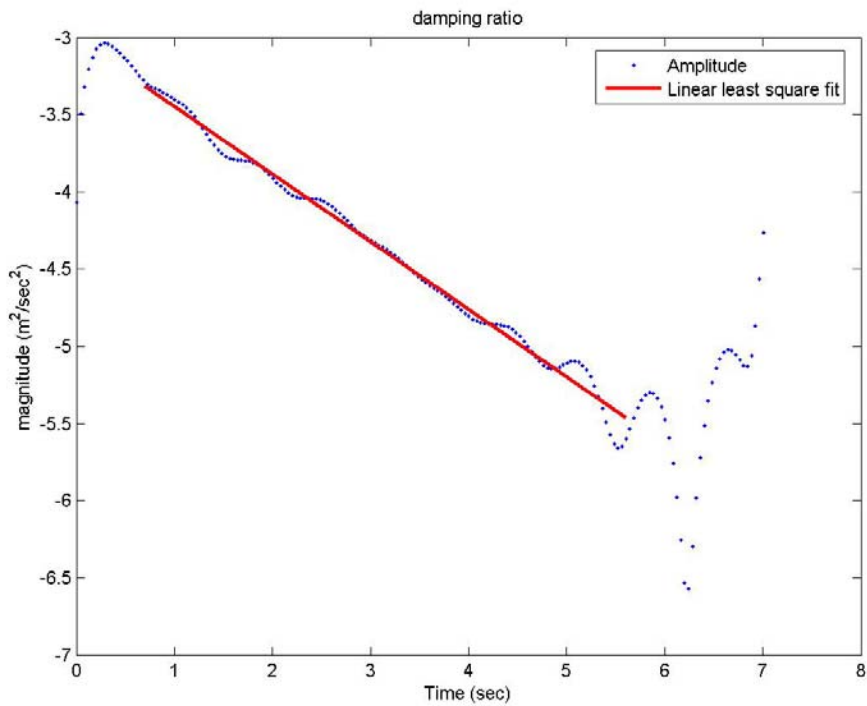


圖 4. 8 黑點所示為自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到的瞬時振幅取自然對數後對時間的關係圖，直線段為最小平方方法近似之直線。



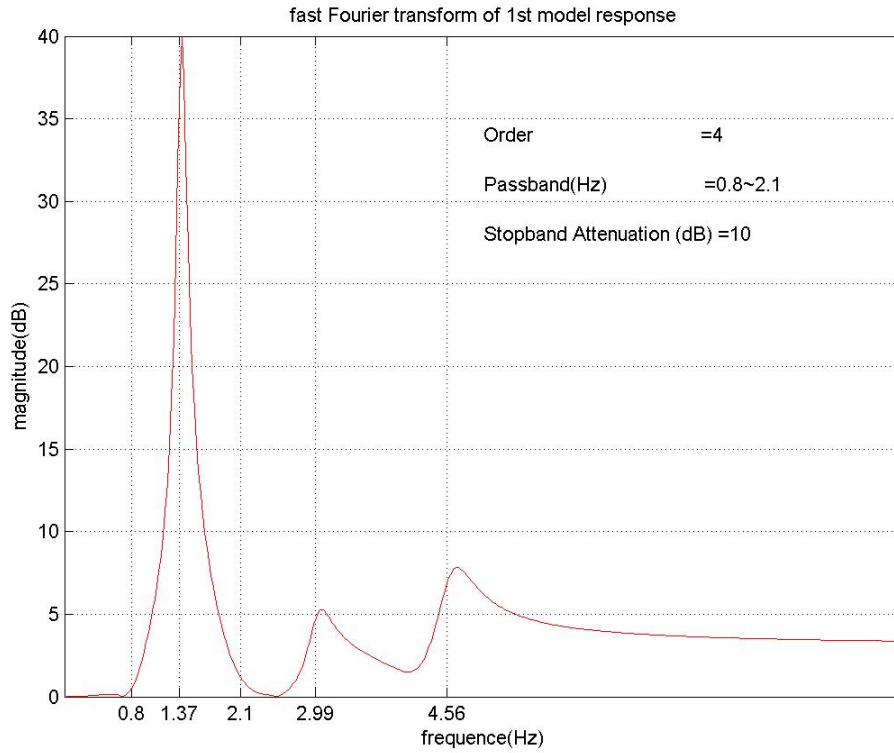


圖 4. 9 通過阻帶衰減 10(dB)之帶通濾波器得到的加速度反應歷時，再由傅立業轉換觀察頻率分佈。

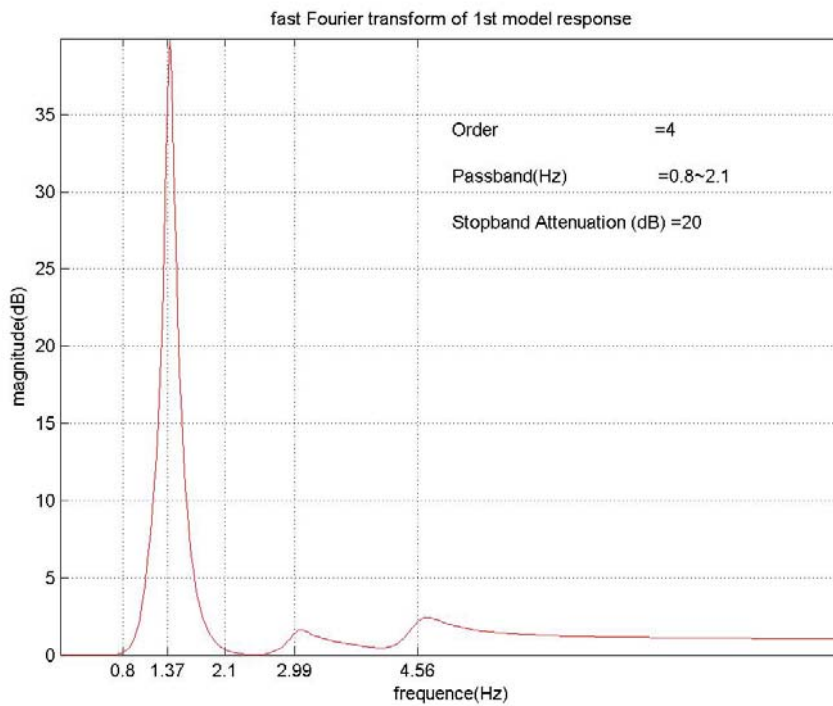


圖 4. 10 通過阻帶衰減 20(dB)之帶通濾波器得到的加速度反應歷時，再經由傅立業轉換觀察頻率分佈。

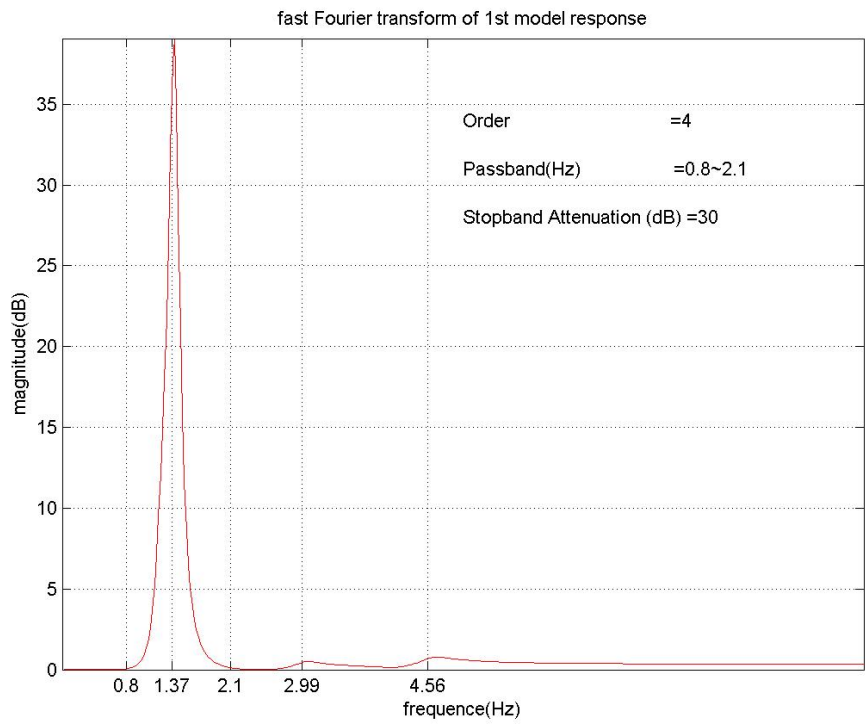


圖 4. 11 通過阻帶衰減 30(dB)之帶通濾波器得到的加速度反應歷時，再經由傅立業轉換觀察頻率分佈。

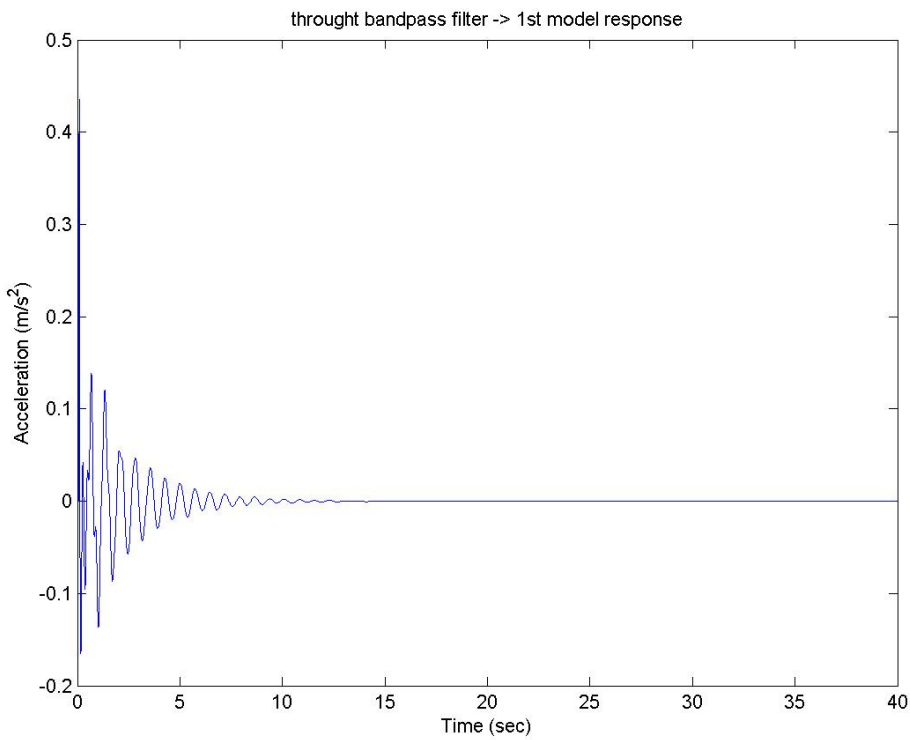


圖 4. 12 通過阻帶衰減 10(dB)之帶通濾波器所得到的加速度反應歷時。

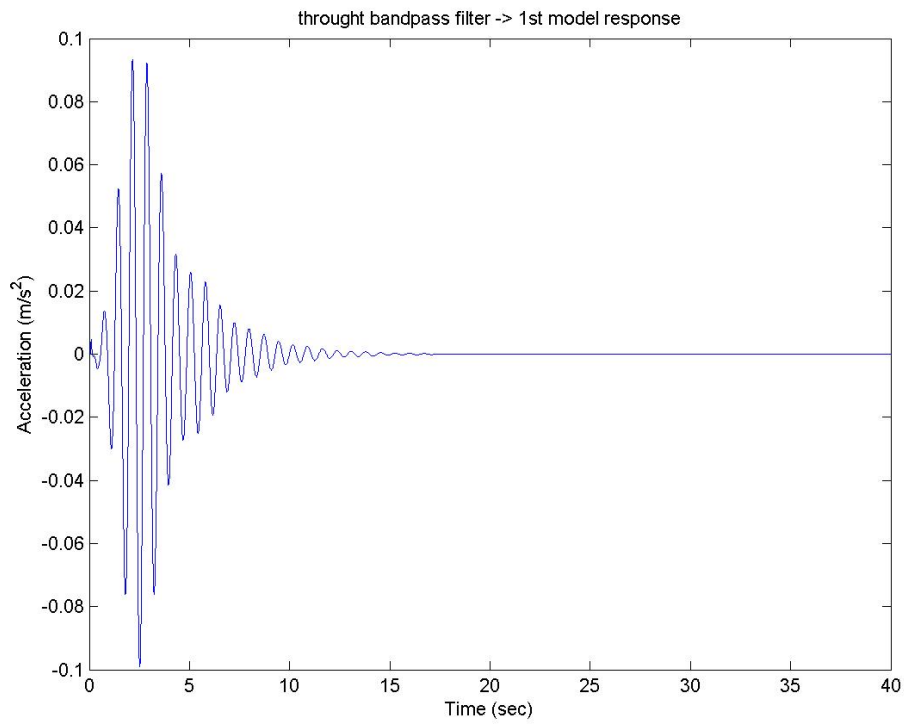


圖 4. 13 通過阻帶衰減 50(dB)之帶通濾波器所得到的加速度反應歷時。

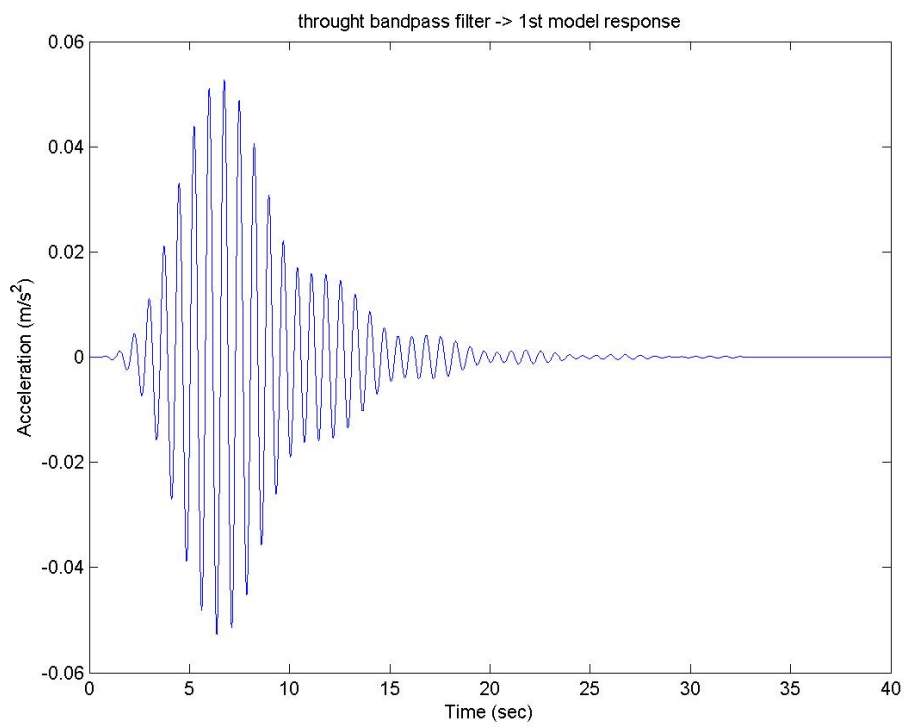


圖 4. 14 通過阻帶衰減 100(dB)之帶通濾波器所得到的加速度反應歷時。

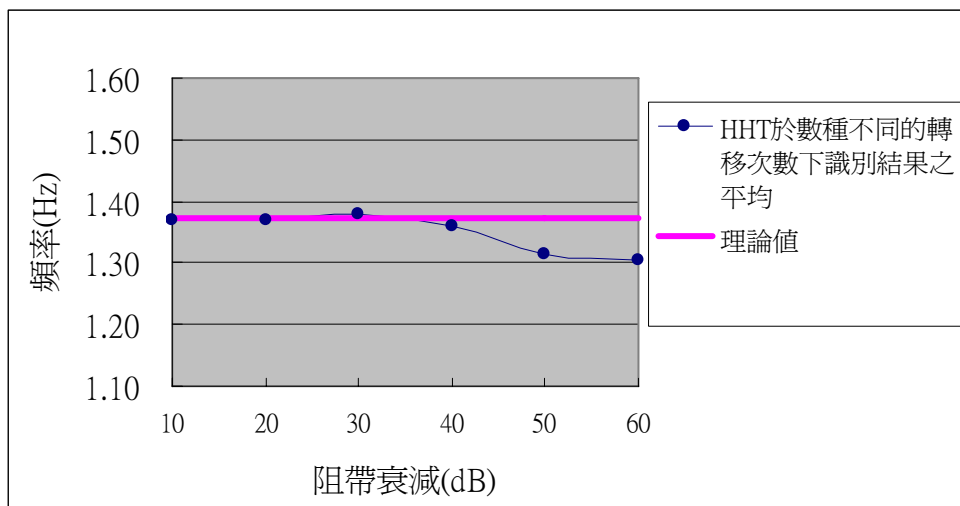


圖 4. 15 衝擊載重作用下，4 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第一個模態自然頻率平均見表 (4.1)。

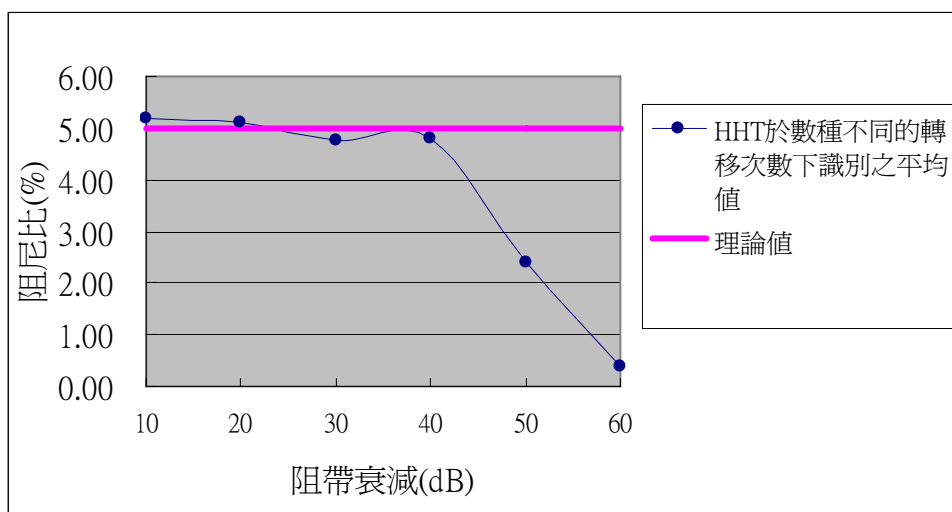


圖 4. 16 衝擊載重作用下，4 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第一個模態的阻尼比平均見表 (4.1)。

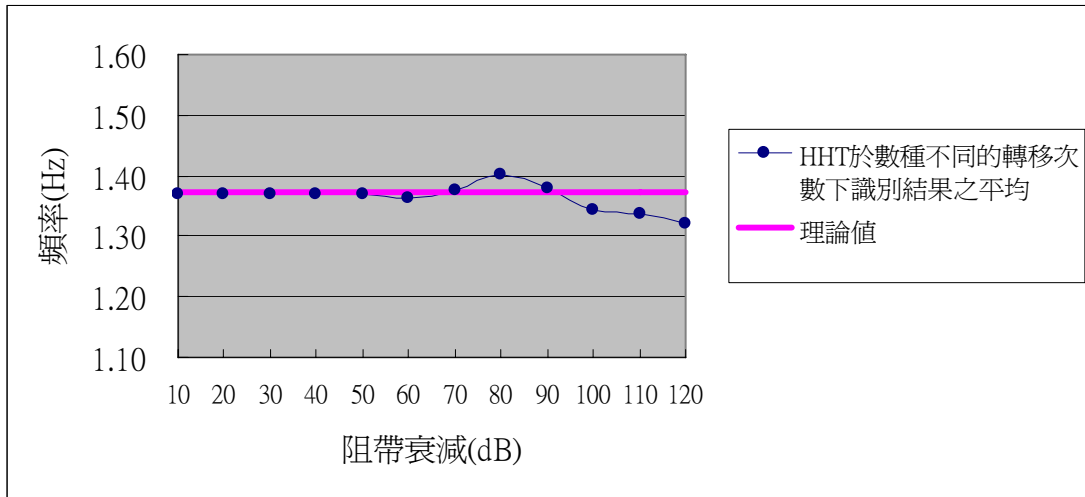


圖 4. 17 衝擊載重作用下，10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第一個模態自然頻率平均見表 (4.2)。

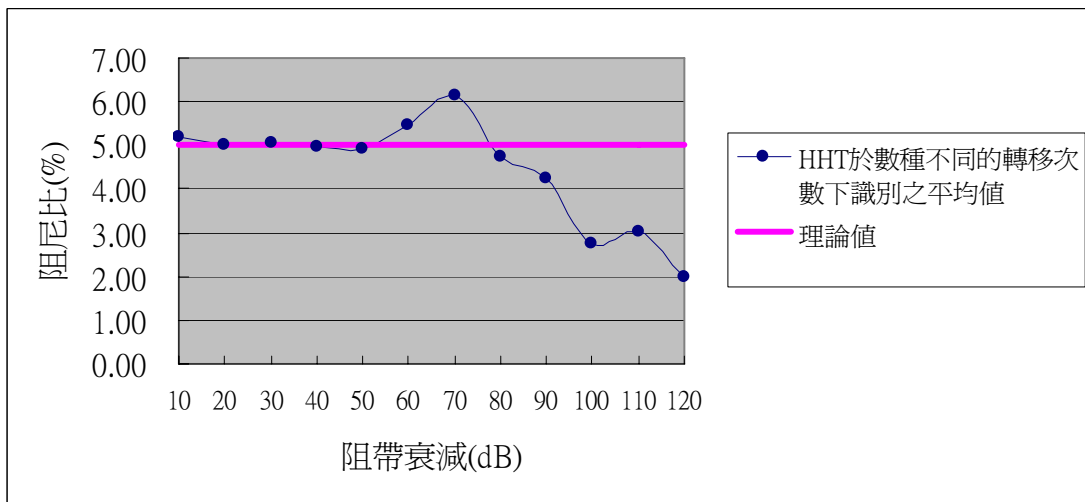


圖 4. 18 衝擊載重作用下，10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第一個模態阻尼比平均見表 (4.2)。

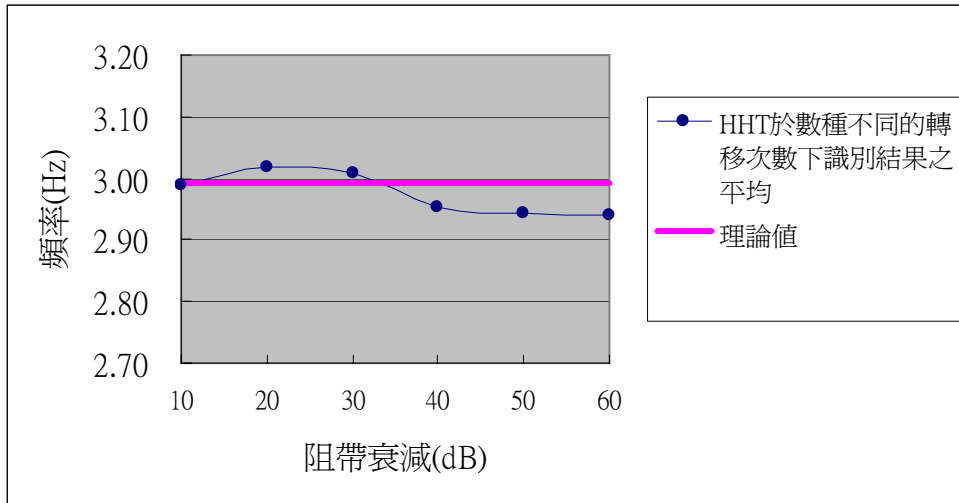


圖 4. 19 衝擊載重作用下，4 階濾波器在各阻帶衰減下，得到的第二個模態自然頻率平均見表 (4.3)。

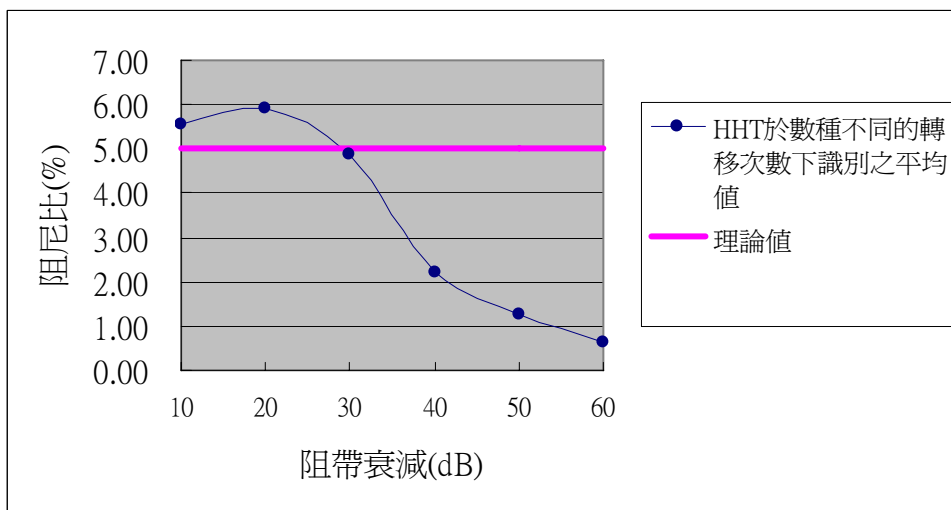


圖 4. 20 衝擊載重作用下，4 階濾波器在各阻帶衰減下，得到的第二個模態阻尼比平均見表 (4.3)。

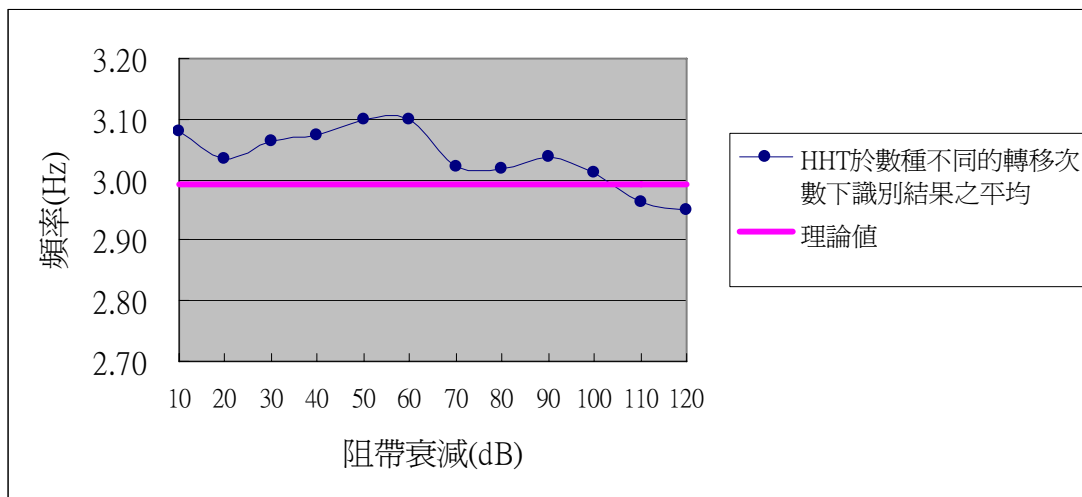


圖 4. 21 衝擊載重作用下，10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到的第二個模態自然頻率平均見表 (4.4)。

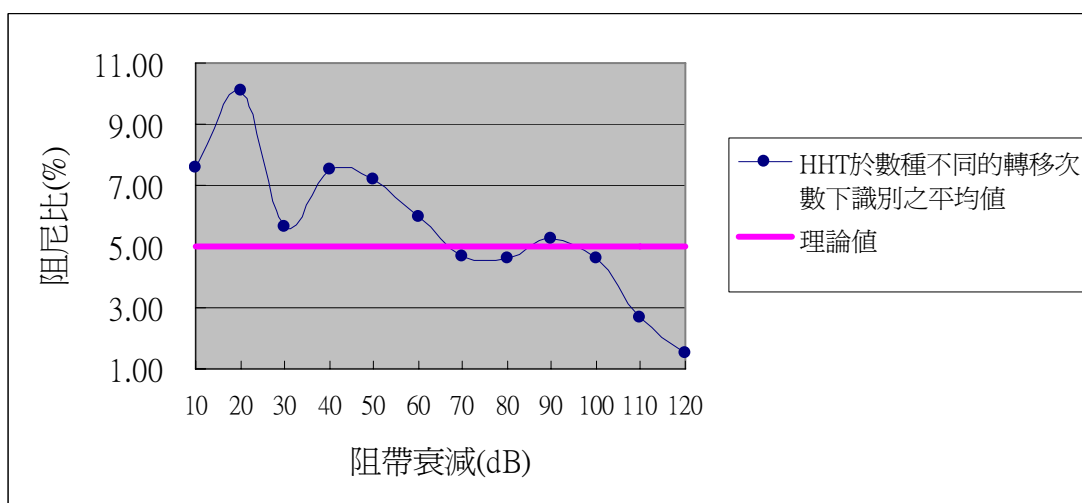


圖 4. 22 衝擊載重作用下，10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到的第二個模態阻尼比平均見表 (4.4)。

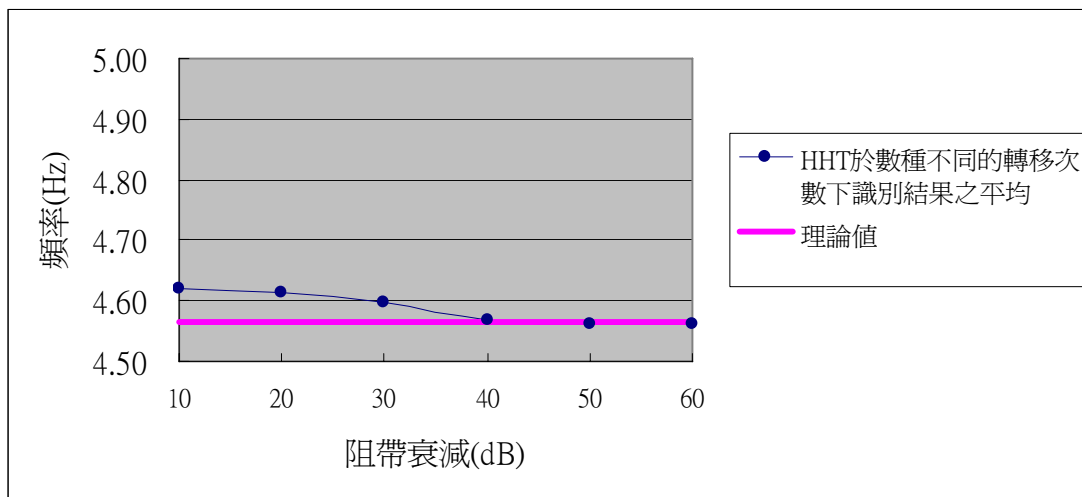


圖 4. 23 衝擊載重作用下，4 階濾波器在各阻帶衰減下，得到的第三個模態自然頻率平均見表 (4.5)。

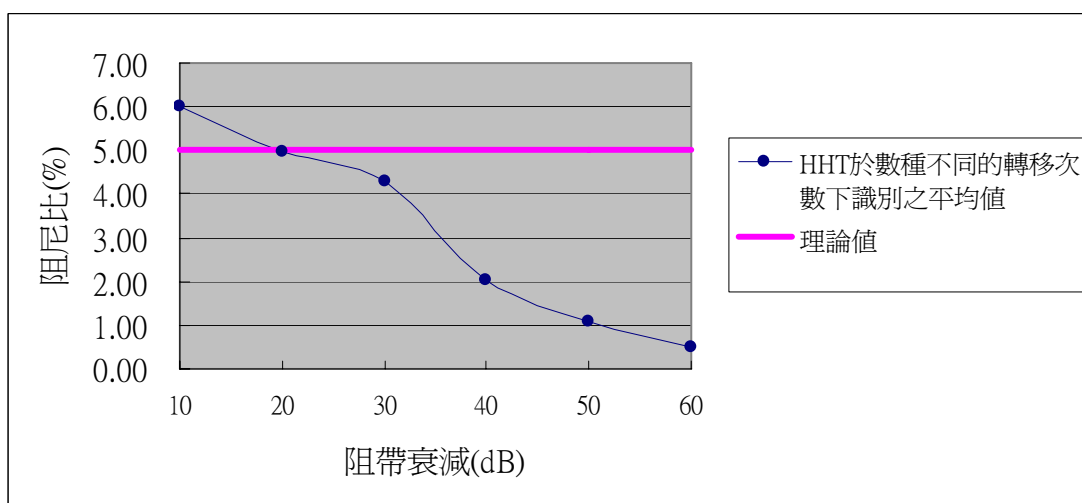


圖 4. 24 衝擊載重作用下，4 階濾波器在各阻帶衰減下，得到的第三個模態阻尼比平均見表 (4.5)。



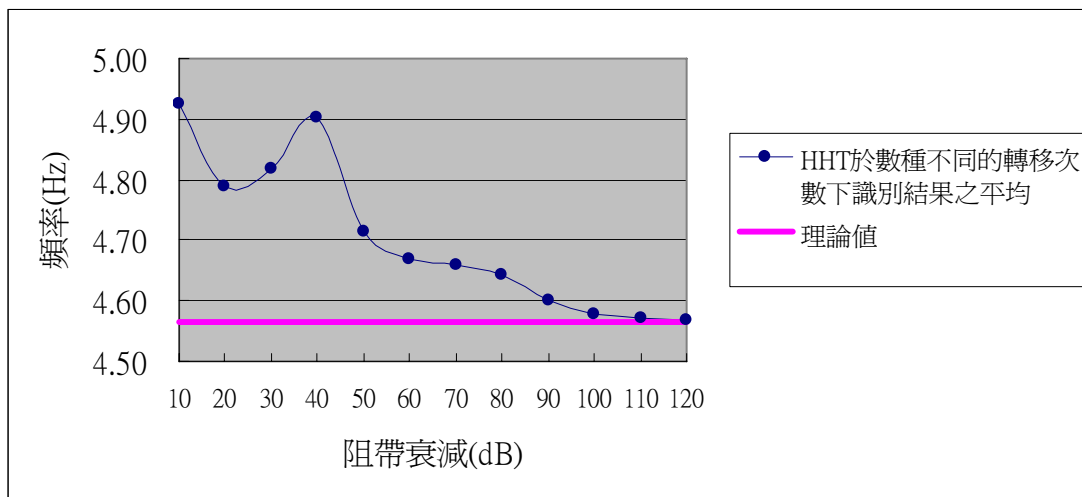


圖 4. 25 衝擊載重作用下，10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到的第三個模態自然頻率平均見表 (4.6)。

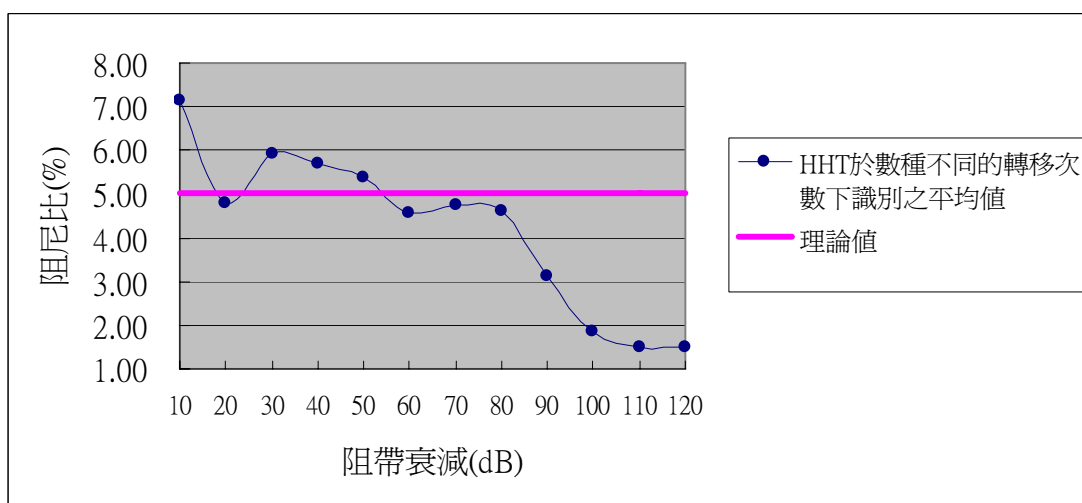


圖 4. 26 衝擊載重作用下，10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到的第三個模態阻尼比平均見表 (4.6)。

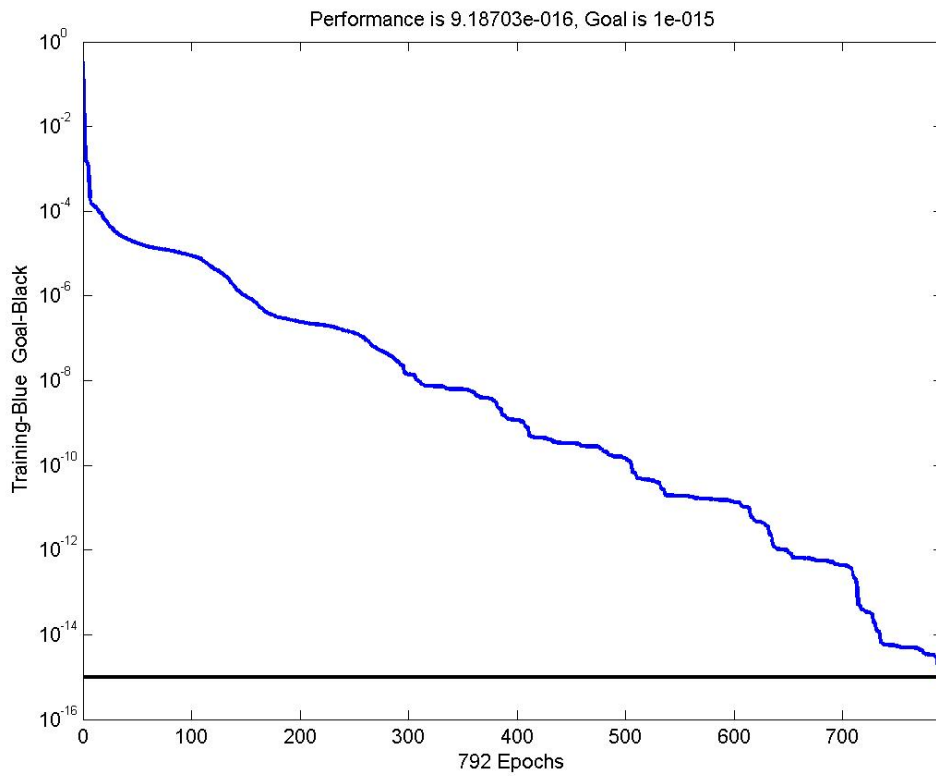


圖 4. 27 數值模型，輸入外力衝擊載重，類神經網路收斂圖。

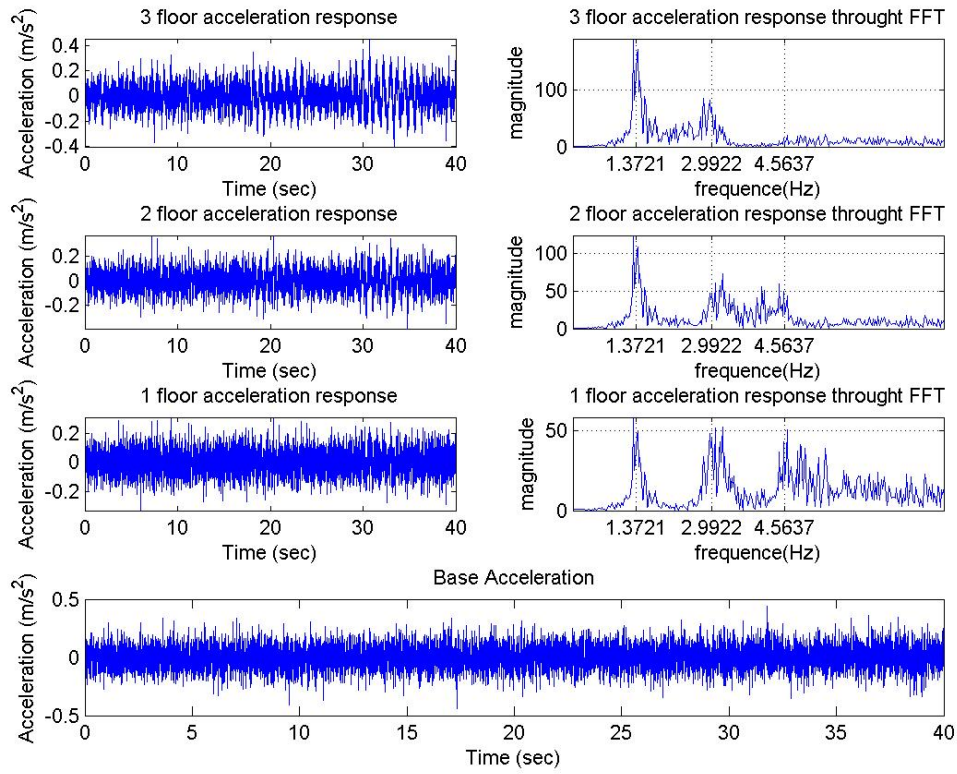


圖 4. 28 最下圖所示為輸入之地表加速度（高斯白噪），其上方三圖左邊由下到上依序為一、二、三層樓之加速度反應，右邊分別為其加速度反應之傅立業轉換。

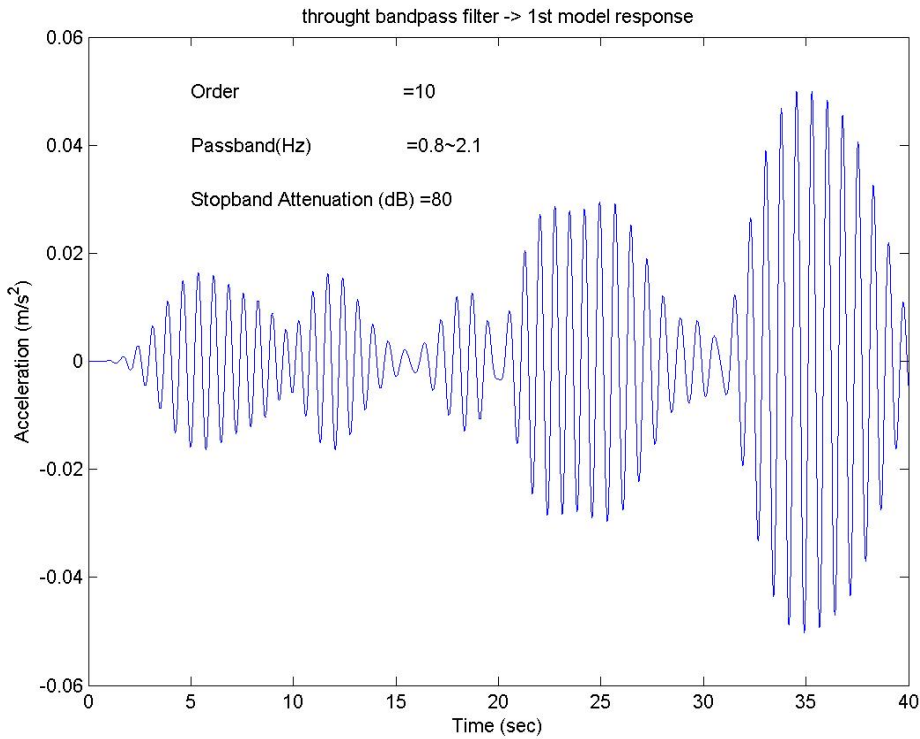


圖 4. 29 一樓之地表加速度反應經過帶通濾波器後得到的加速度反應歷時圖。

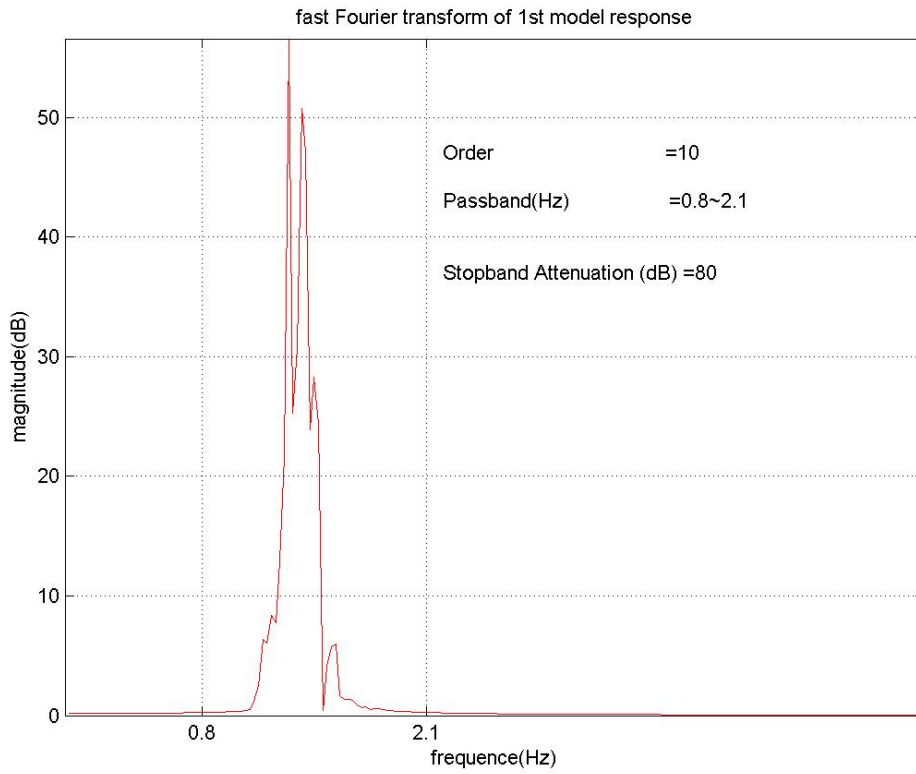


圖 4. 30 利用傅立業轉換觀察濾波後的頻率分佈狀況。

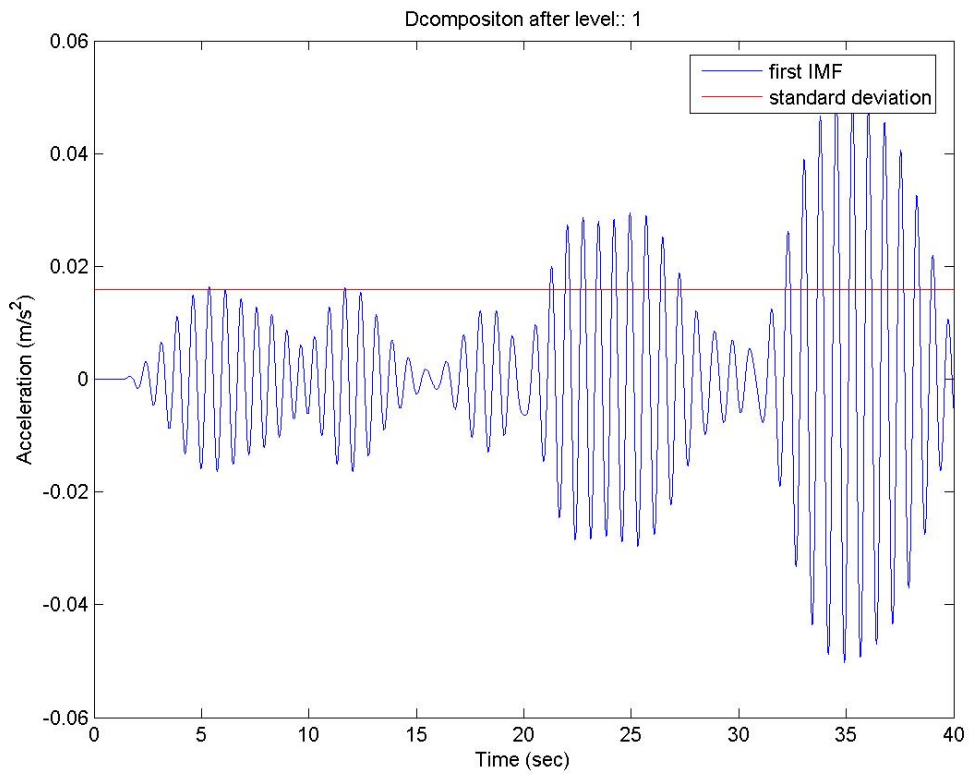


圖 4. 31 第一個內建模態函數(曲線)，此內建模態函數的標準差(直線)。

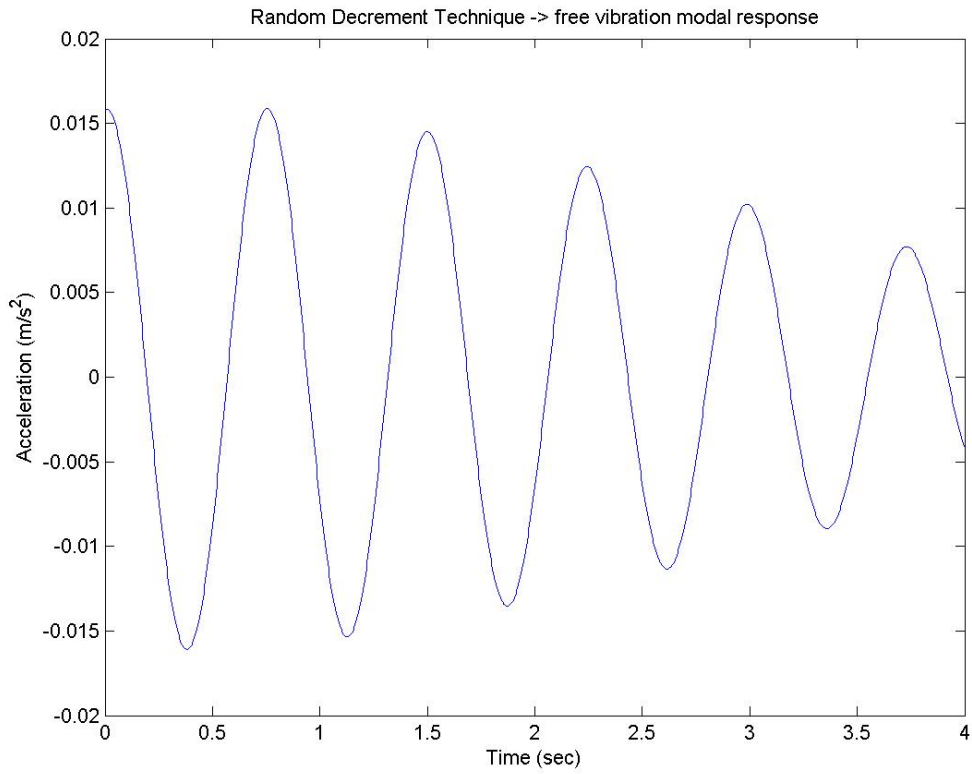


圖 4. 32 運用隨機遞減法得到的自由振動衰減的訊號。

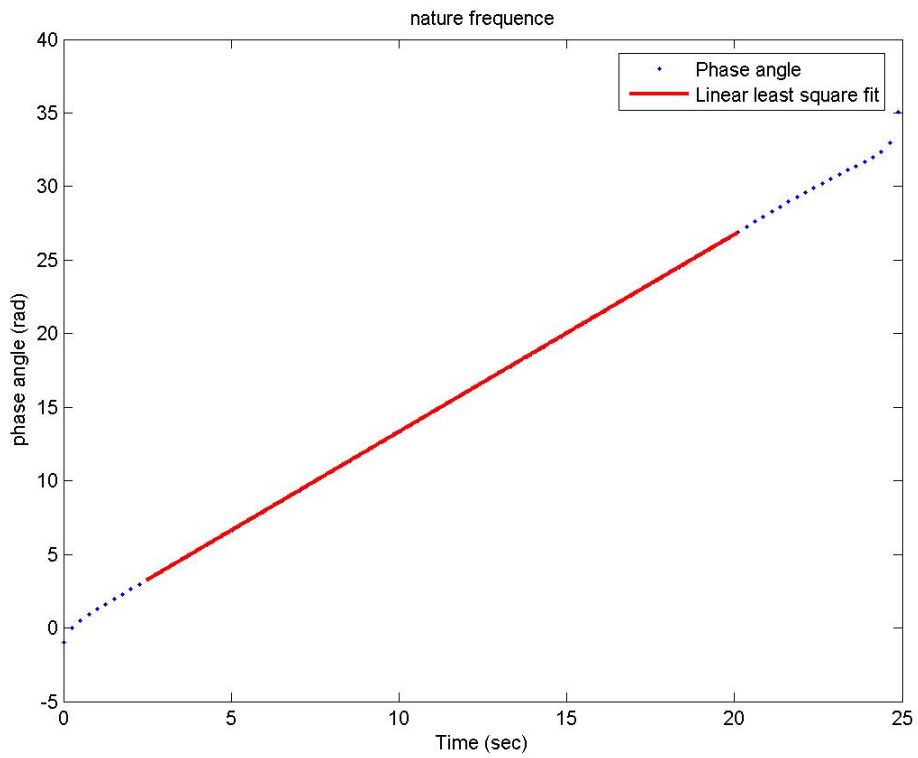


圖 4. 33 自由振動衰減訊號經過希伯特轉換後得到相位角對時間的關係圖(點)，直線段為最小平方法近似直線。

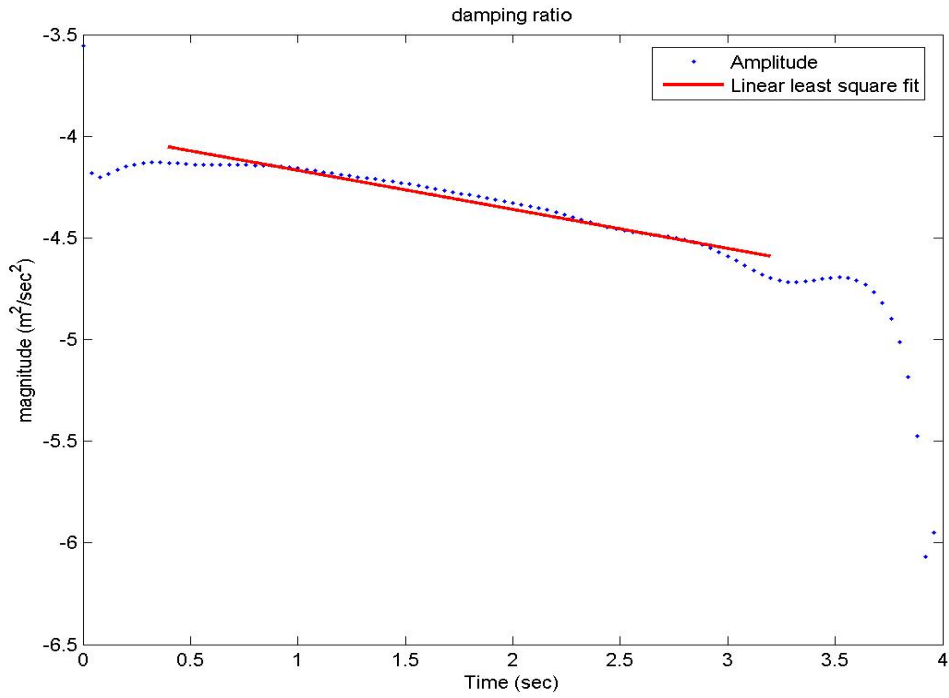


圖 4. 34 黑點希伯特轉換後得到的瞬時振幅取自然對數後對時間的關係圖，直線段為最小平方方法近似直線。

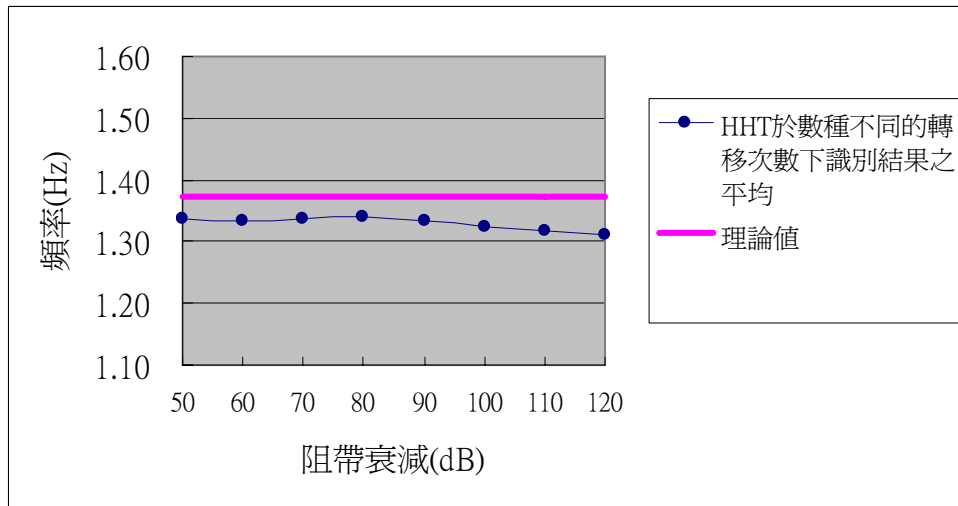


圖 4. 35 輸入外力為高斯白噪，以 10 階濾波器得到第一個模態的平均自然頻率見表 (4.8)。

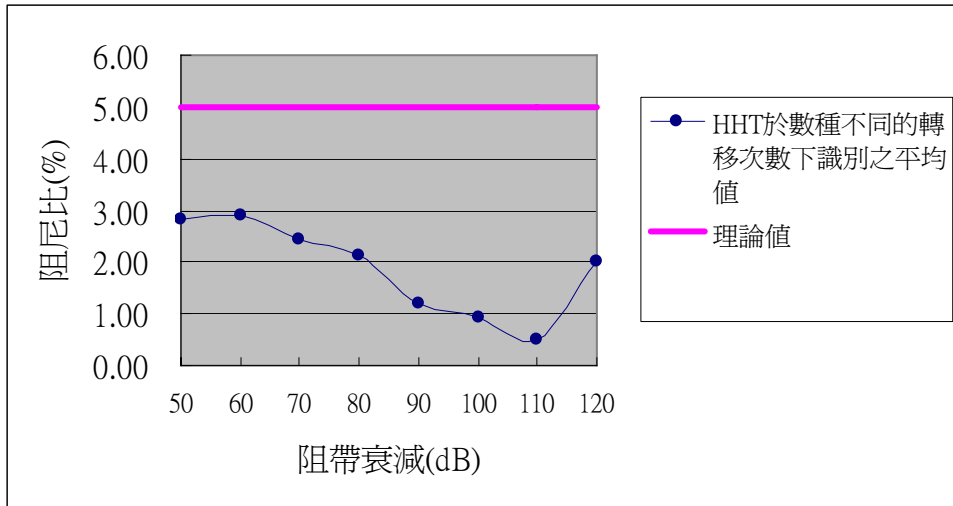


圖 4. 36 輸入外力為高斯白噪，以 10 階濾波器得到第一個模態的平均阻尼比見表 (4.8)。

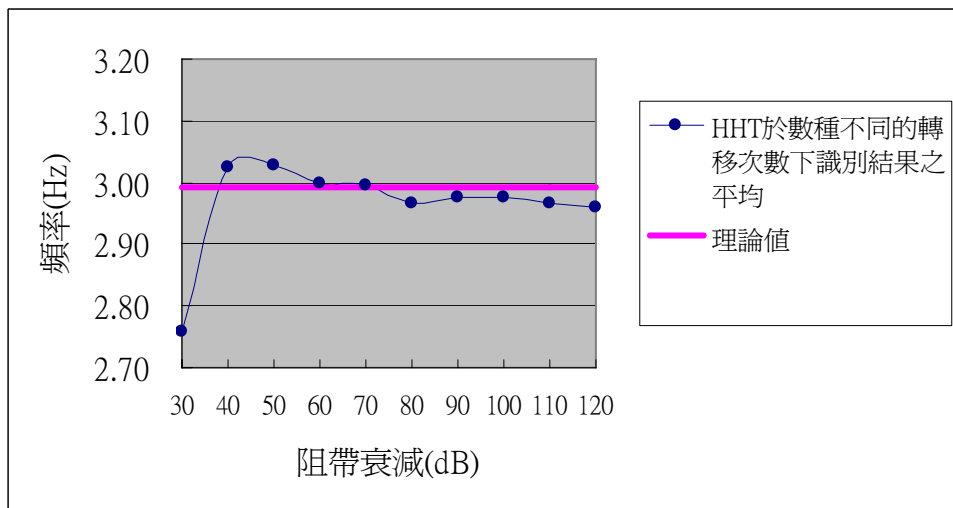


圖 4. 37 輸入外力為高斯白噪，以 10 階濾波器得到第二個模態的平均自然頻率見表 (4.9)。

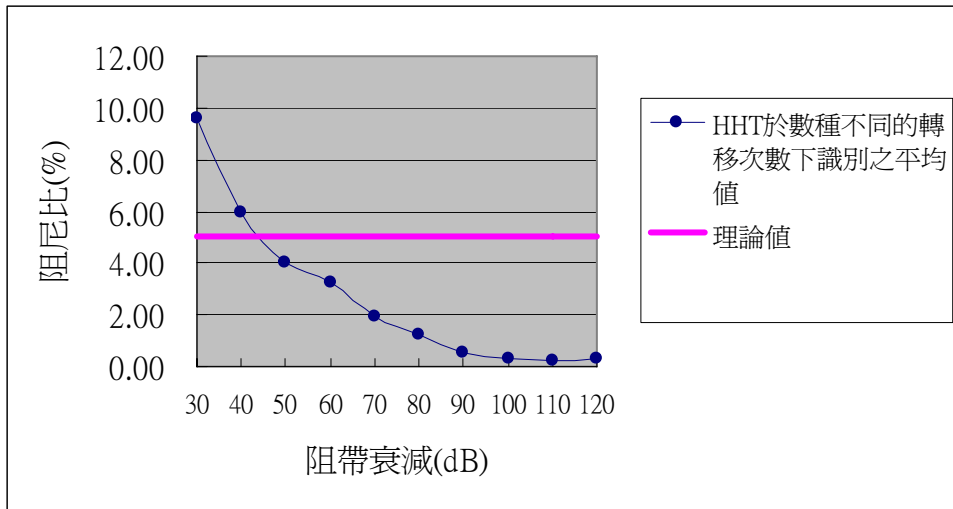


圖 4. 38 輸入外力為高斯白噪，以 10 階濾波器得到第二個模態的平均阻尼比見表 (4.9)。

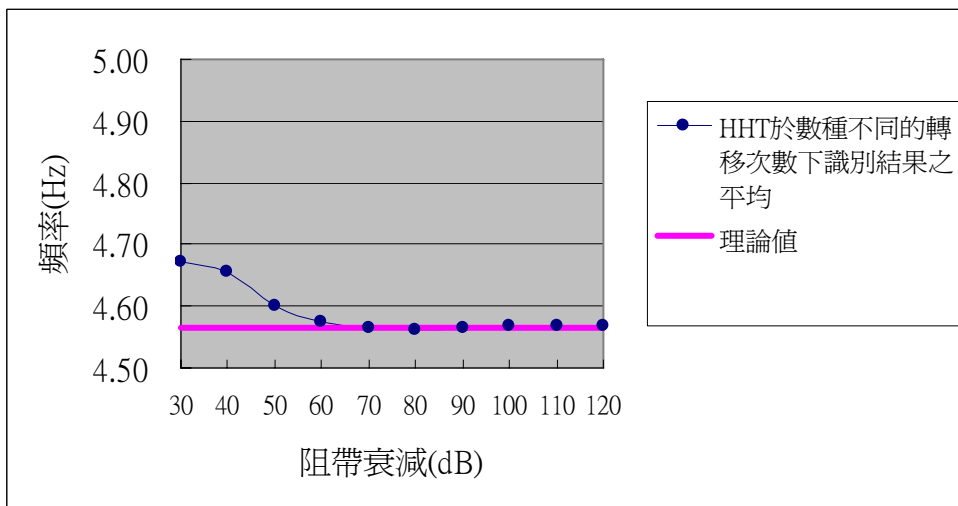


圖 4. 39 輸入外力為高斯白噪，以 10 階濾波器得到第三個模態的平均自然頻率見表 (4.10)。



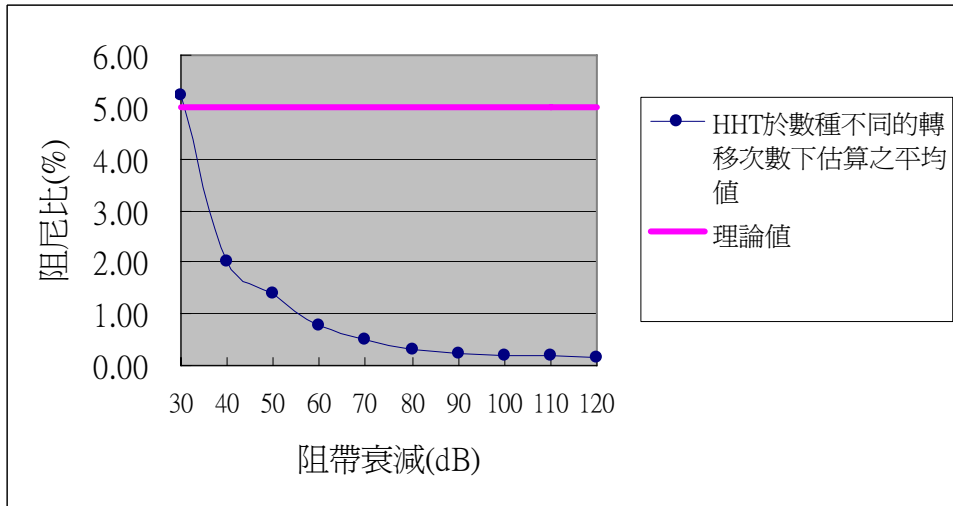


圖 4. 40 輸入外力為高斯白噪，以 10 階濾波器得到三個模態的平均阻尼比見表 (4.10)。

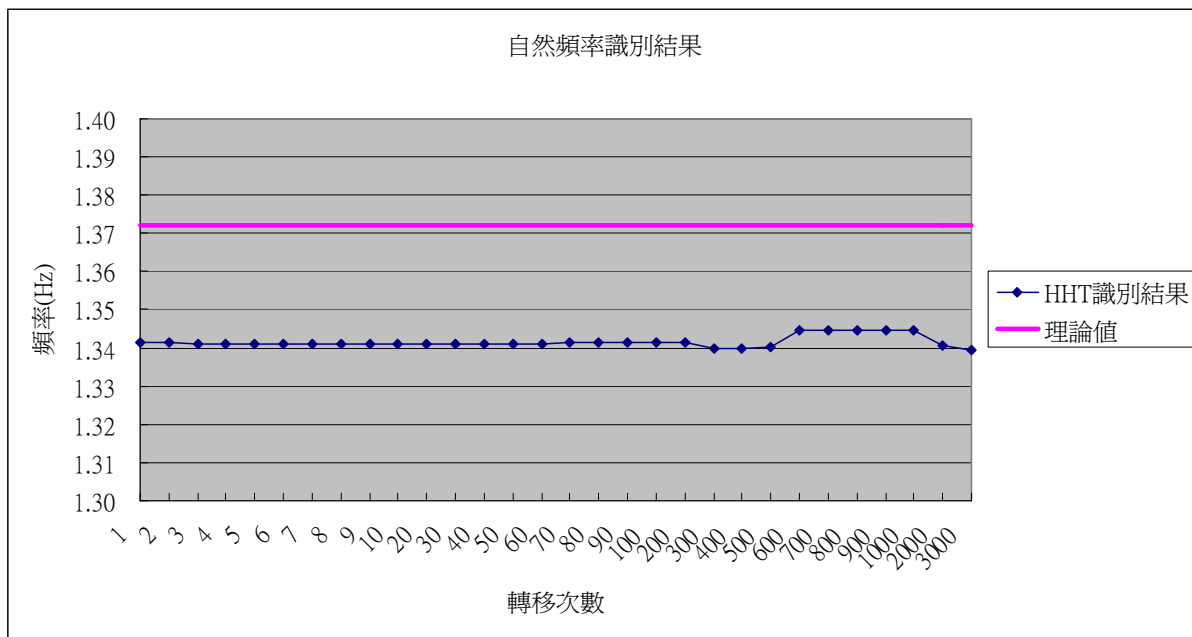


圖 4. 41 輸入外力為高斯白噪，比較轉移次數與第一個模態自然頻率識別結果見表 (4.11)。

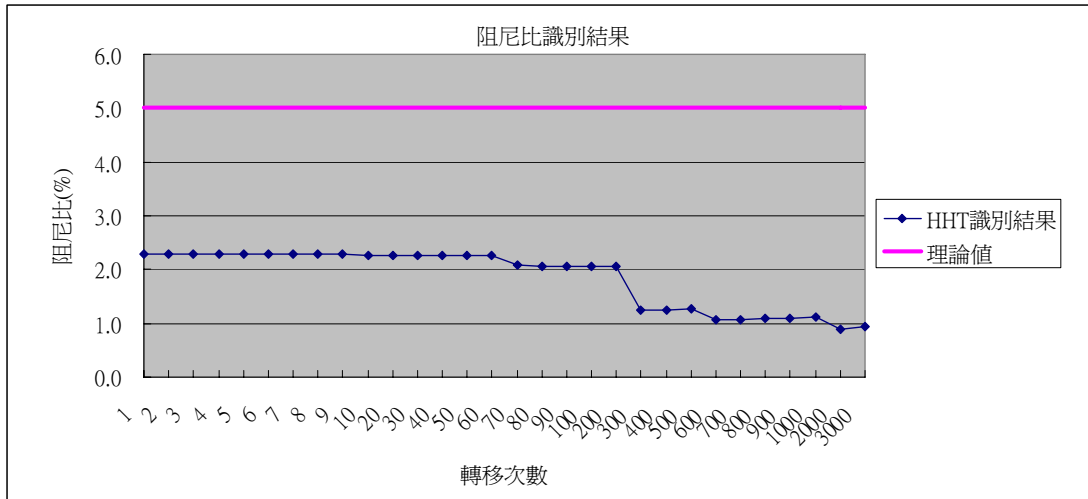


圖 4. 42 輸入外力為高斯白噪，比較轉移次數與第一個模態阻尼比識別結果見表 (4.11)。

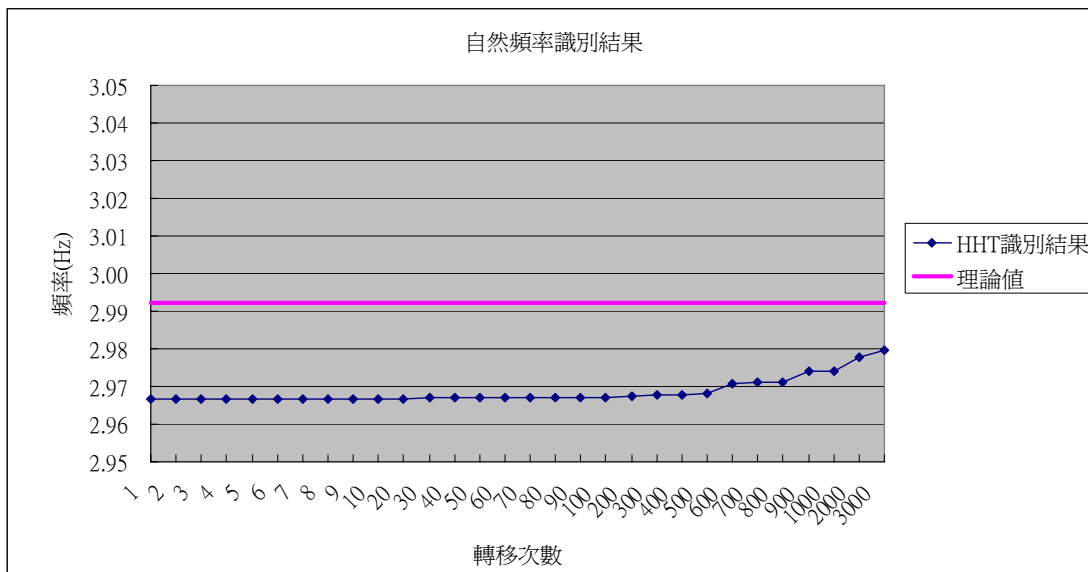


圖 4. 43 輸入外力為高斯白噪，比較轉移次數與第二個模態自然頻率識別的結果見表 (4.12)。

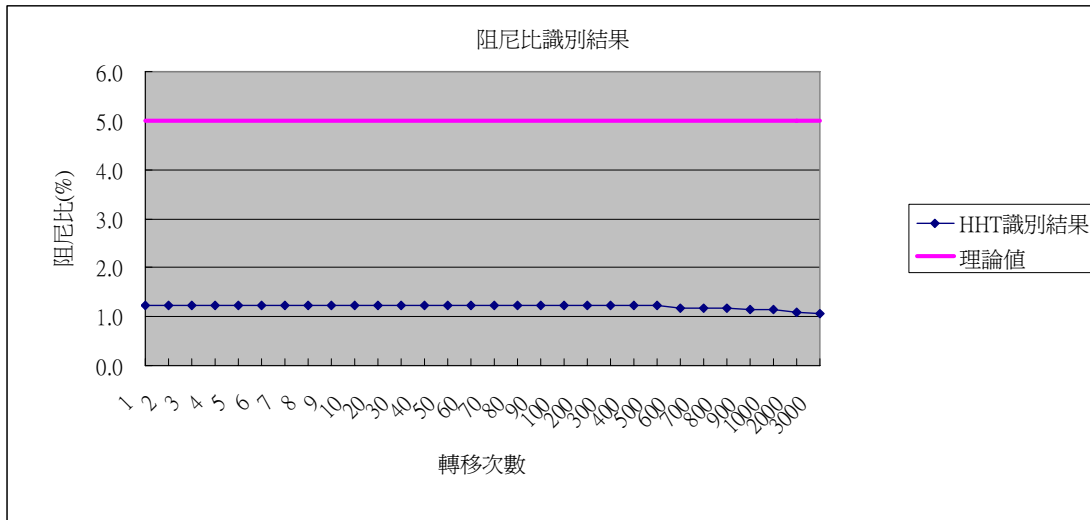


圖 4. 44 輸入外力為高斯白噪，比較轉移次數與第二個模態阻尼比識別的結果見表 (4.12)。

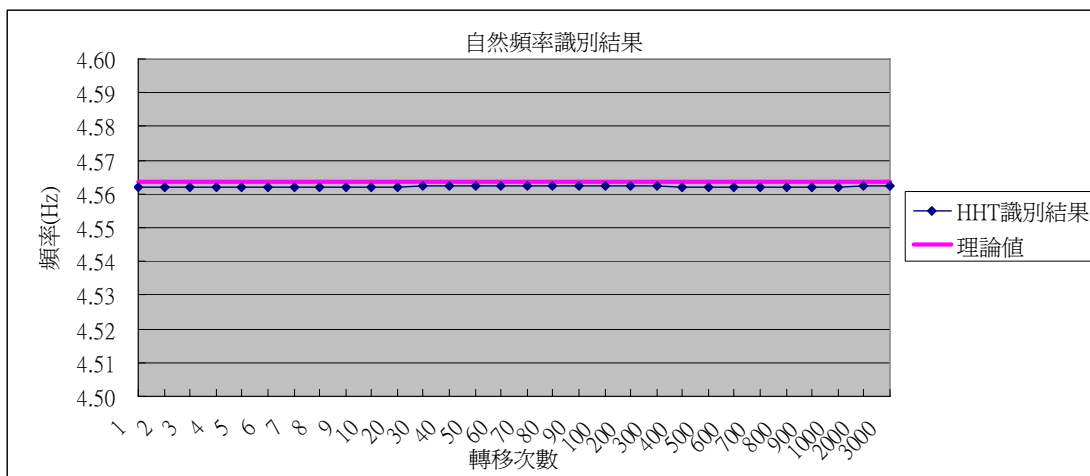


圖 4. 45 輸入外力為高斯白噪，比較轉移次數與第三模態自然頻率識別的結果見表 (4.13)。

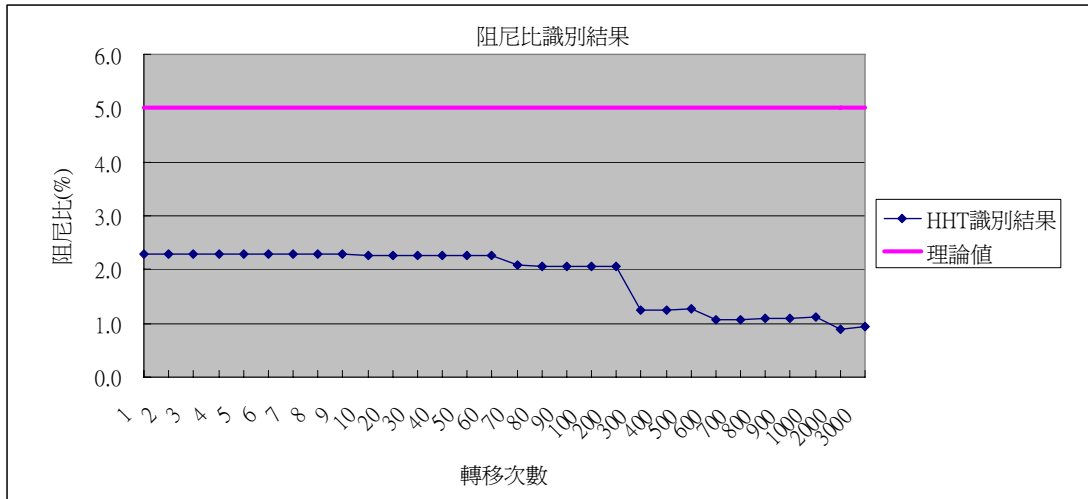


圖 4. 46 輸入外力為高斯白噪，比較轉移次數與第三個模態阻尼比識別的結果見表 (4.13)。

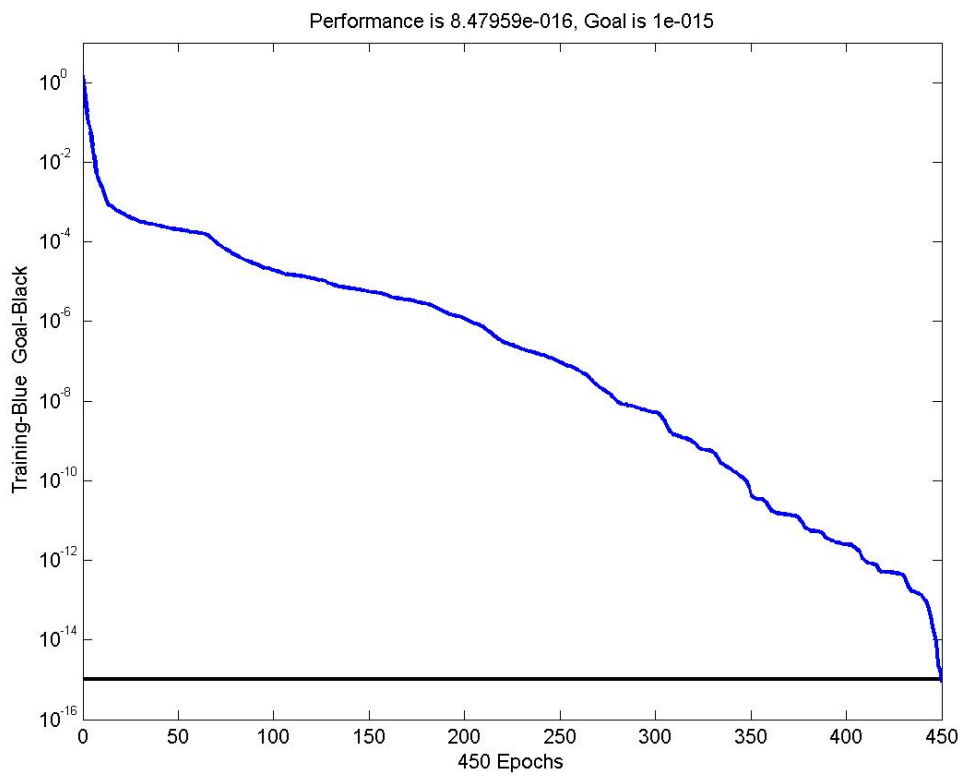


圖 4. 47 數值模型，輸入外力為高斯白噪，類神經網路收斂圖。

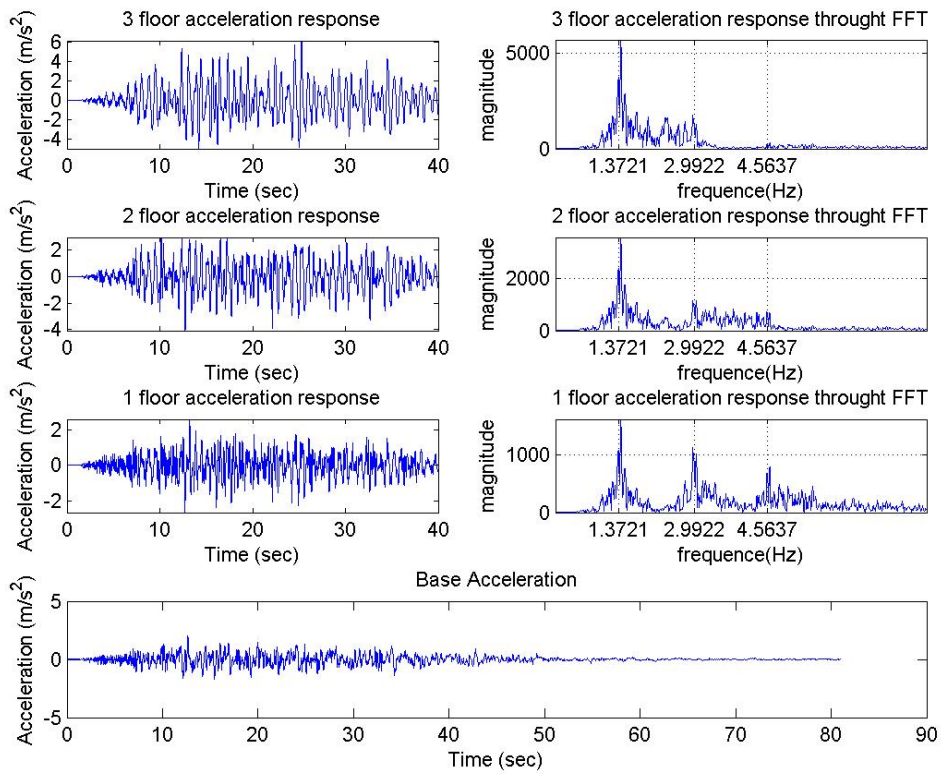


圖 4. 48 最下圖所示為輸入之地表加速度 (el centrol)，其上方三圖左邊由下到上依序為一、二、三層樓之加速度反應，右邊分別為其加速度反應之傅立業轉換。

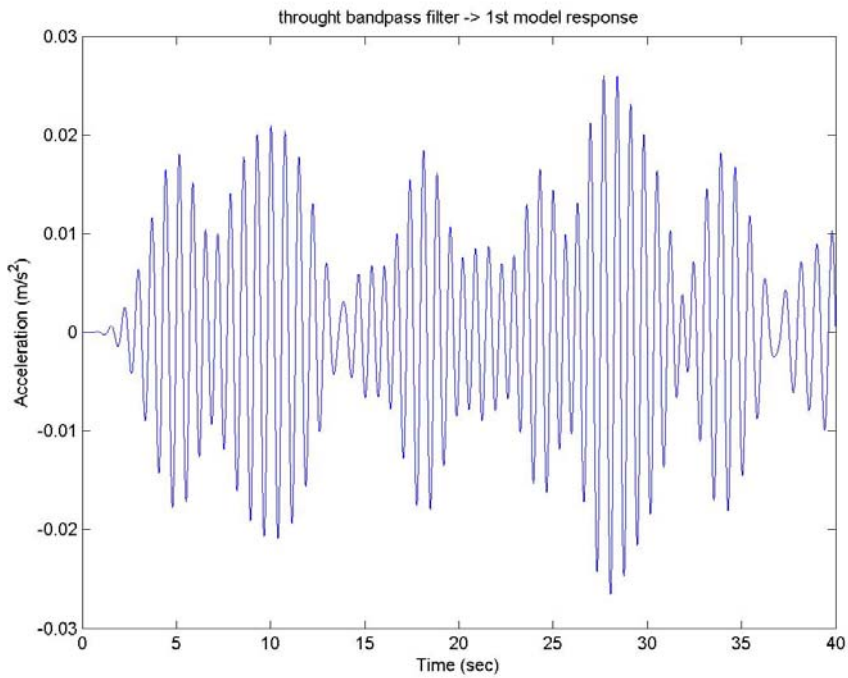


圖 4. 49 圖(4.48)一樓之地表加速度帶通濾波器後所得到的加速度反應歷時圖。

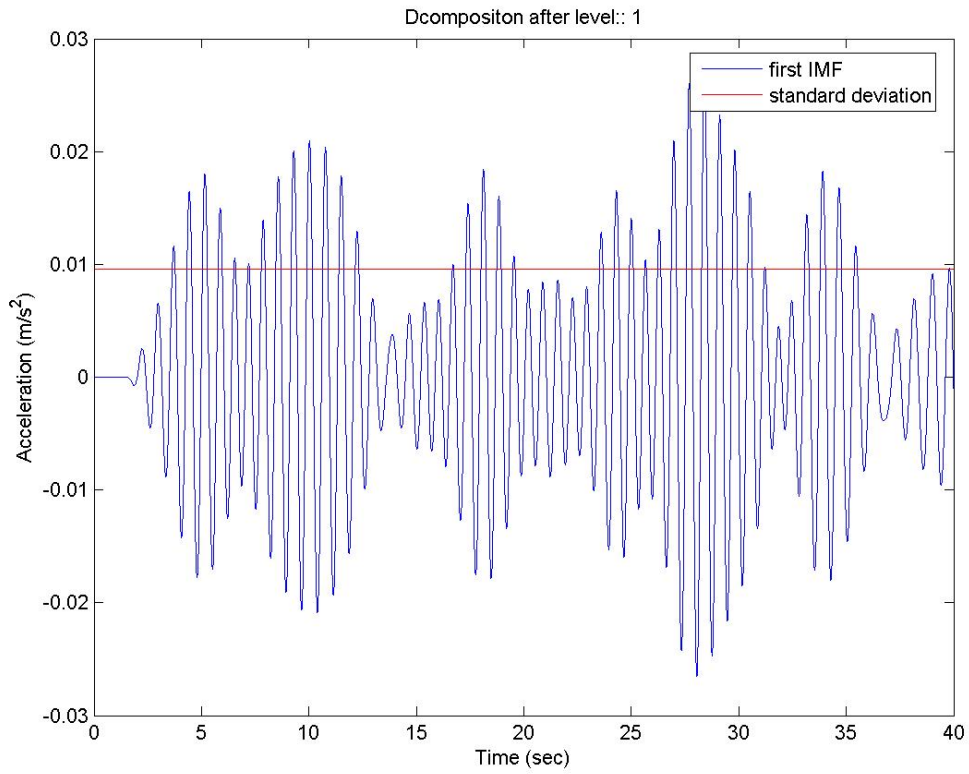


圖 4. 50 將圖(4.49)所得到第一個模態反應經過數次轉移後所得到的第一個內建模態函數(曲線)，直線為此內建模態函數的標準差。

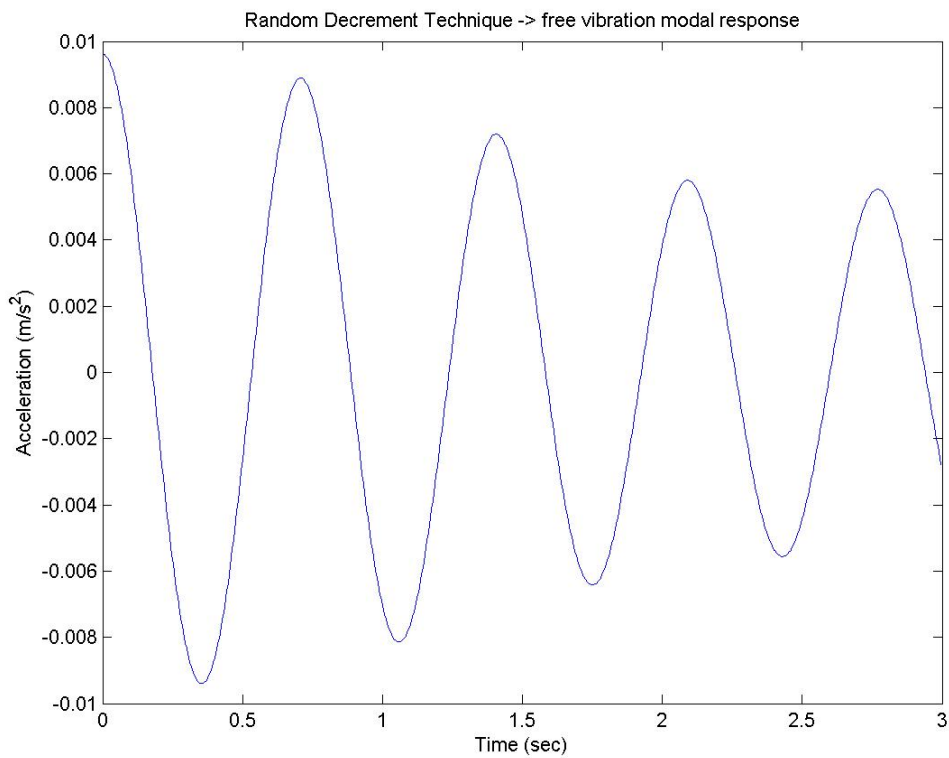


圖 4. 51 運用隨機遞減法得到自由振動衰減訊號。

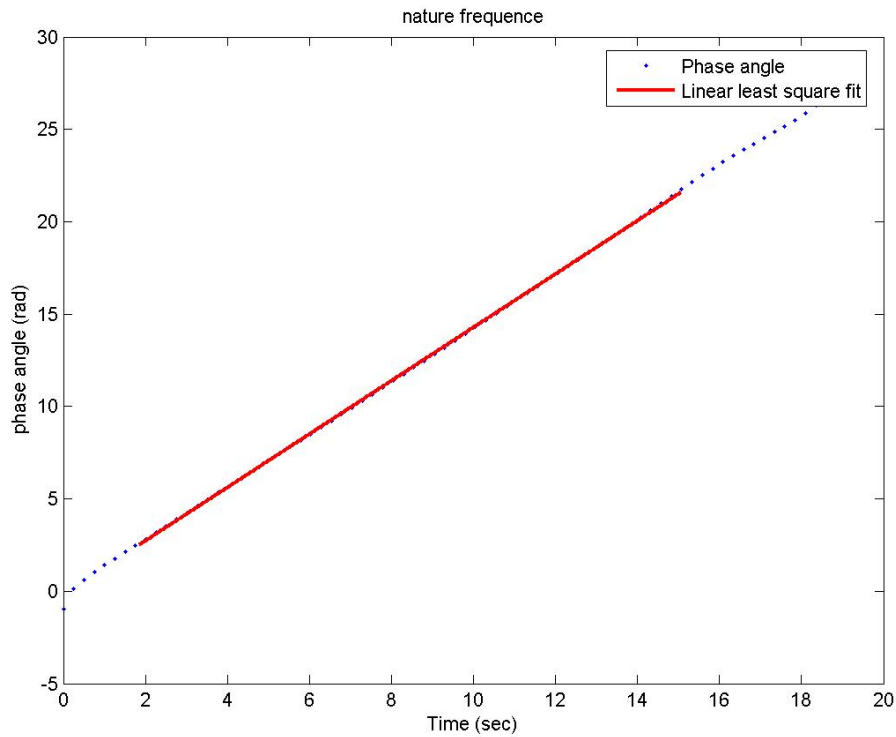


圖 4. 52 經過希伯特轉換後得到相位角對時間的關係圖(黑點)，直線段為最小平方法近似直線。

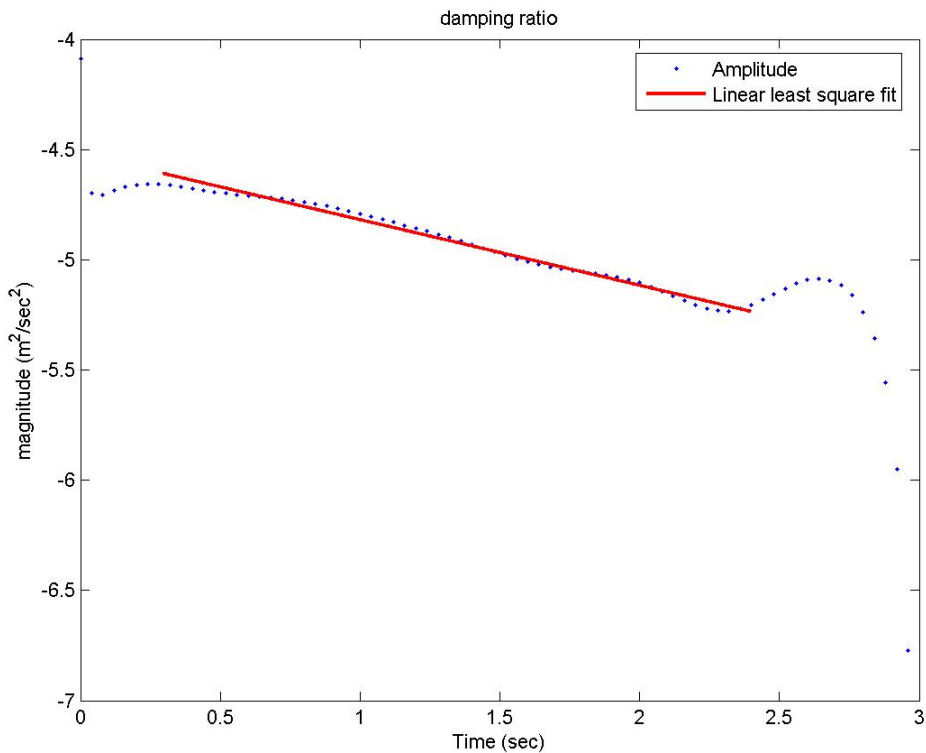


圖 4. 53 經過希伯特轉換後得到的瞬時振幅取自然對數後對時間的關係圖(黑點)，直線段為最小平方法近似之直線。

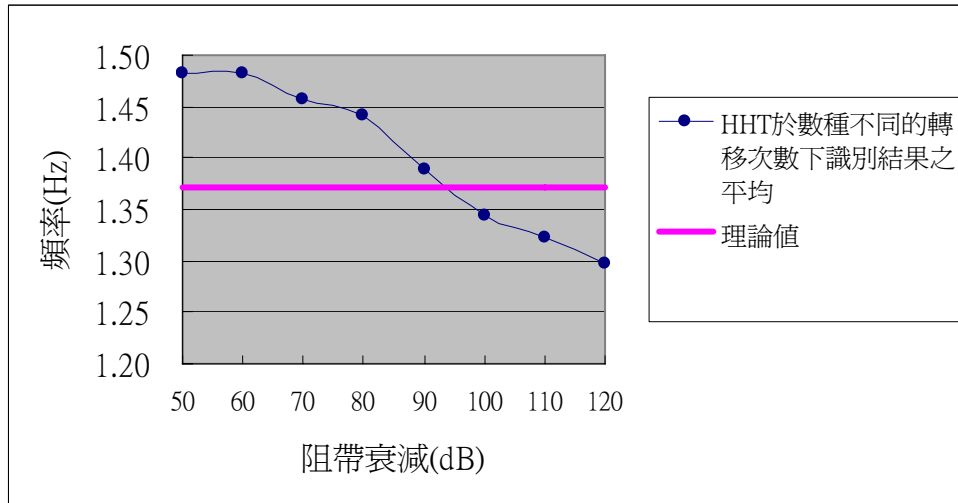


圖 4. 54 輸入外力為 El-Centro 地震，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第一個模態的平均自然頻率做見表 (4.15)。

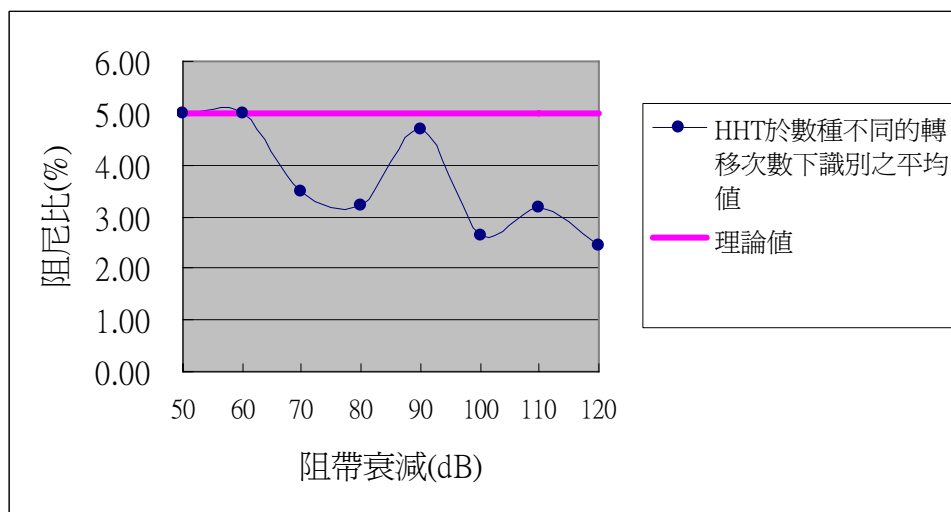


圖 4. 55 輸入外力為 El-Centro 地震，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第一個模態的平均阻尼比見表 (4.15)。



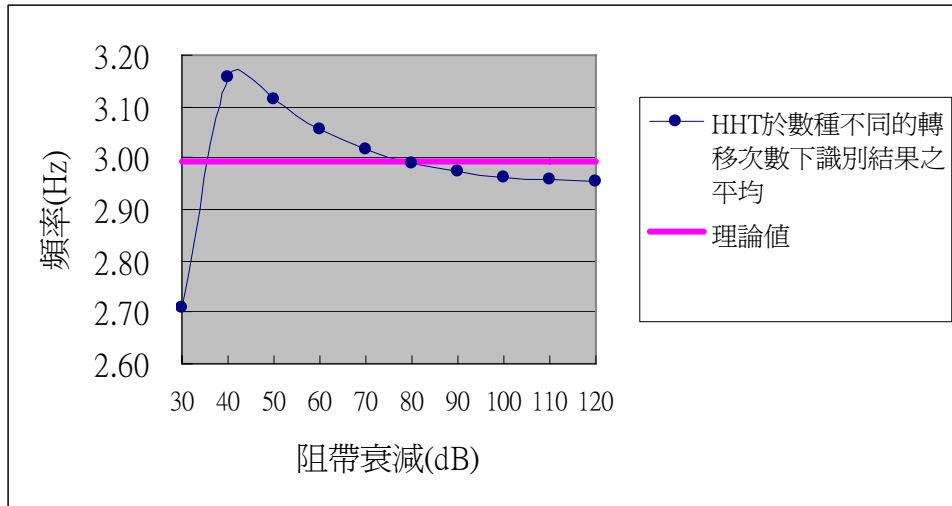


圖 4. 56 輸入外力為 El-Centro 地震，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第二個模態的平均自然頻率做見表 (4.16)。

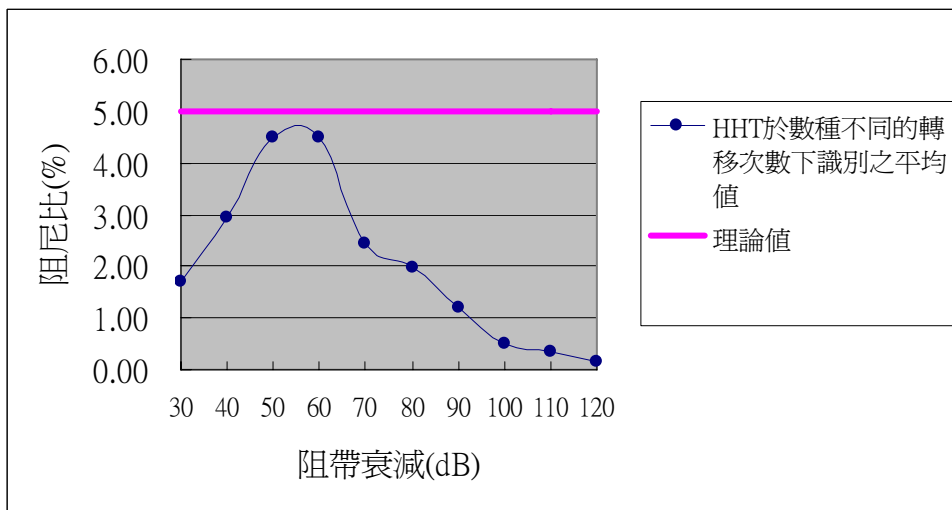


圖 4. 57 輸入外力為 el-centro 地震力，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第二個模態的平均阻尼比見表 (4.16)。

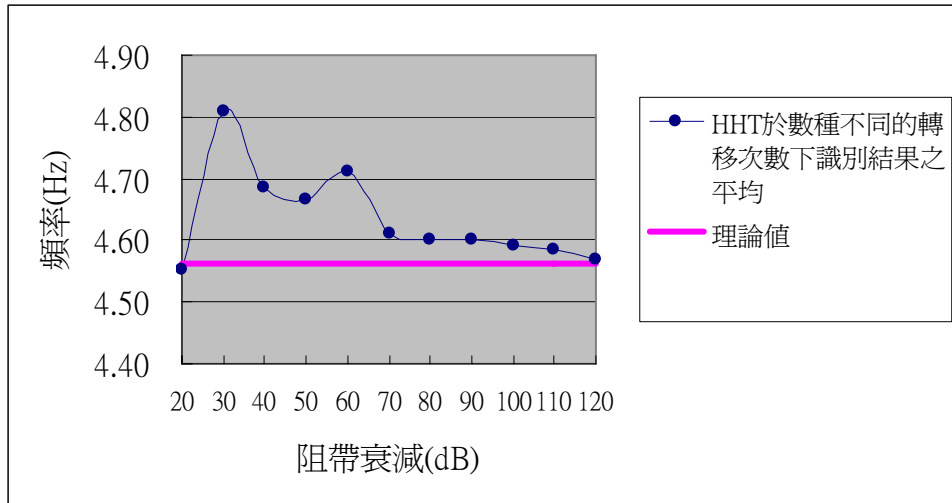


圖 4. 58 輸入外力為 El-Centro 地震力，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第三個模態的平均自然頻率見表 (4.17)。

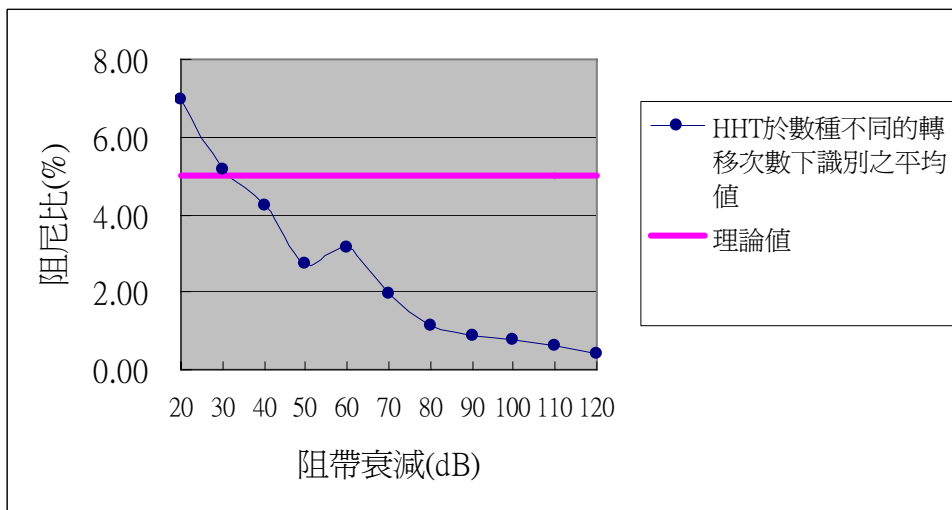


圖 4. 59 輸入外力為 El-Centro 地震，以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第三個模態的平均阻尼比見表 (4.17)。

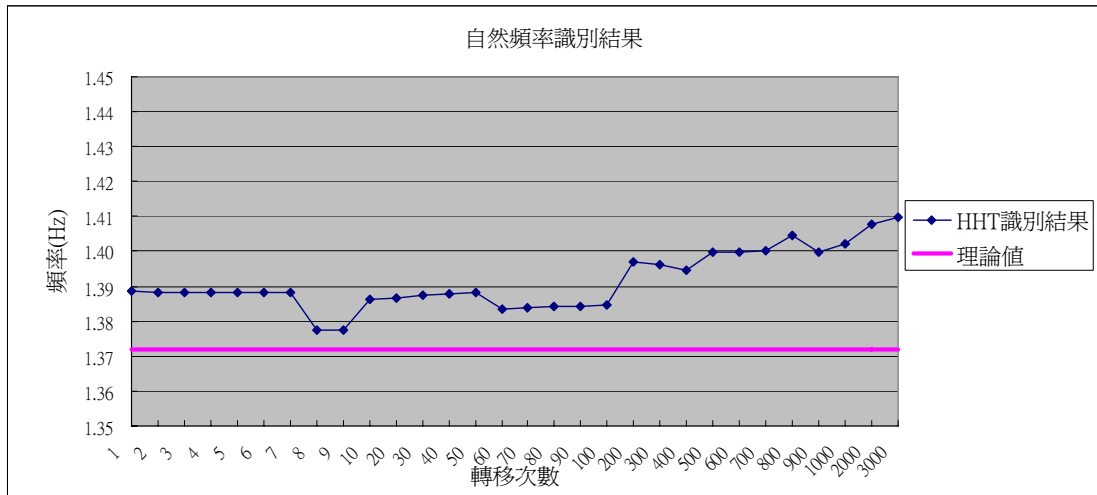


圖 4. 60 輸入外力為 El-Centro 地震，比較轉移次數與第一個模態自然頻率識別的結果見表 (4.18)。

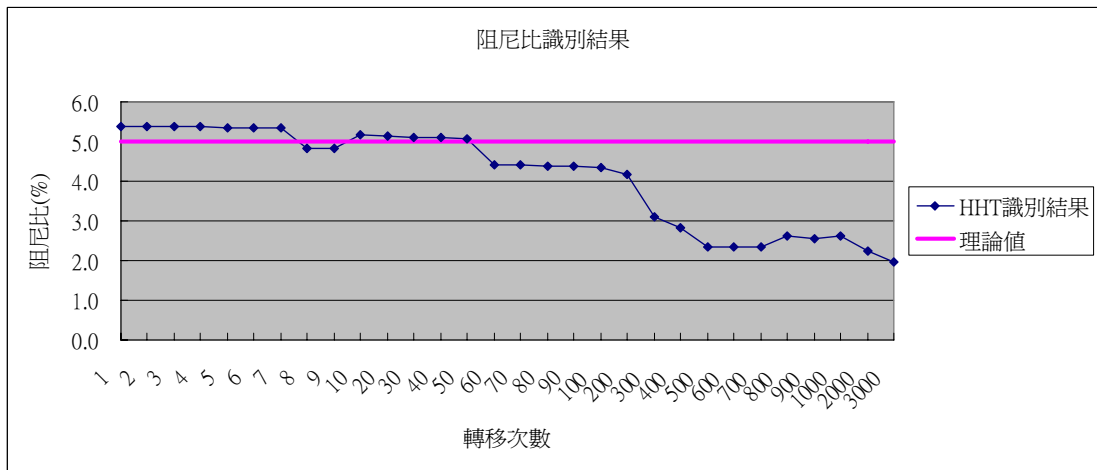


圖 4. 61 輸入外力為 El-Centro 地震，比較轉移次數與第一個模態阻尼比識別的結果見表 (4.18)。

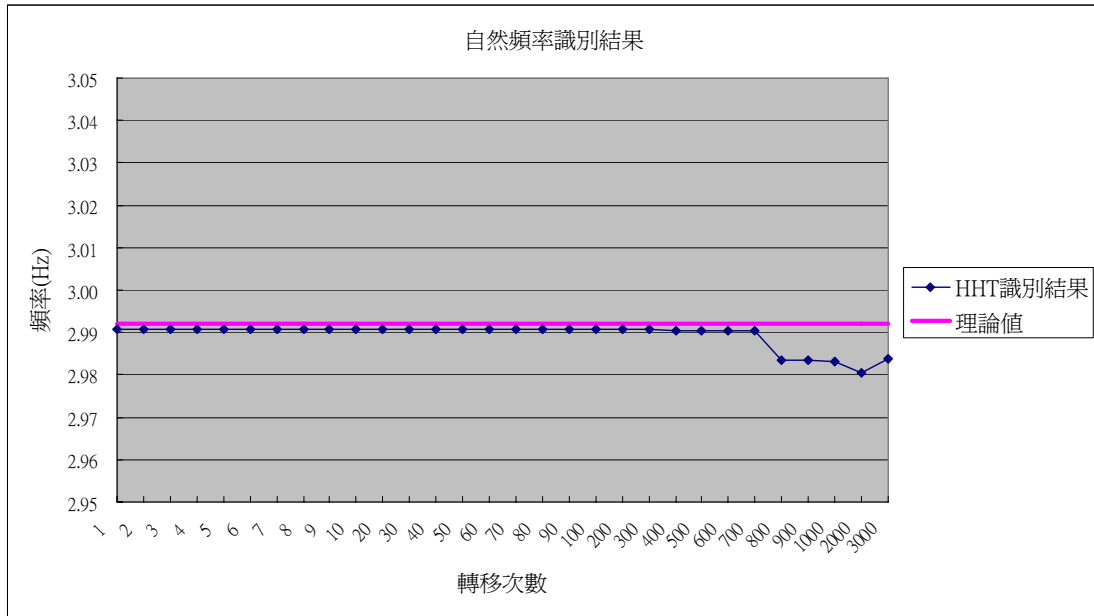


圖 4. 62 輸入外力為 El-Centro 地震，比較轉移次數與第二個模態自然頻率識別的結果見表 (4.19)。

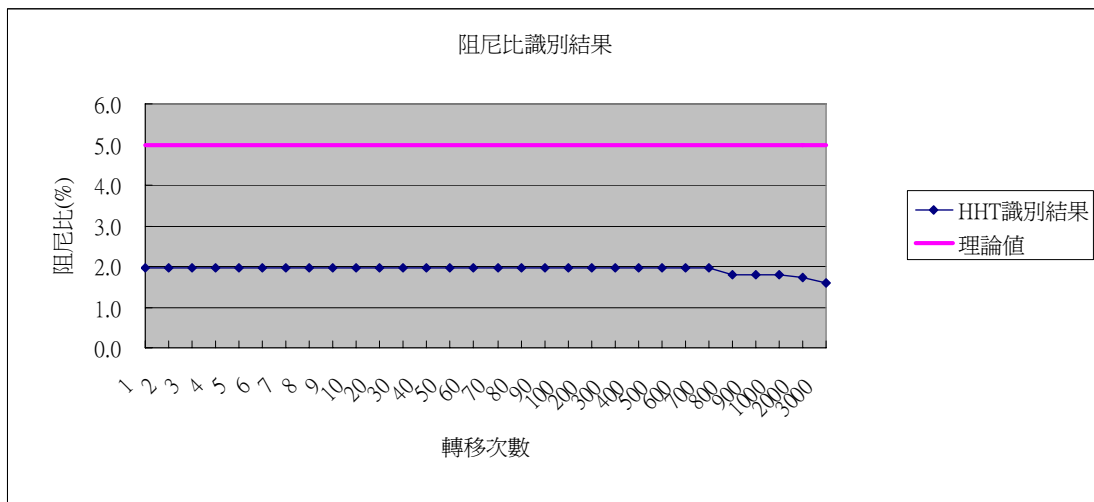


圖 4. 63 輸入外力為 El-Centro 地震，比較轉移次數與第二個模態阻尼比識別的結果見表(4.19)。

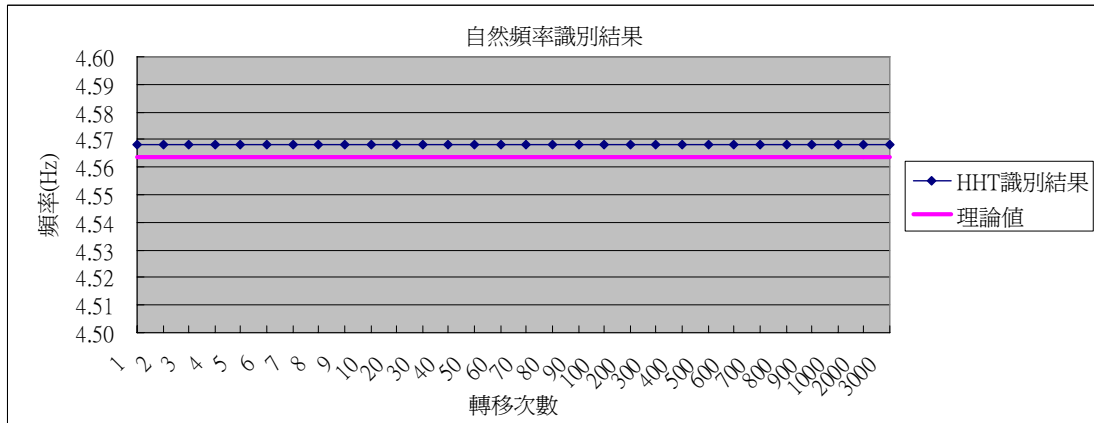


圖 4. 64 輸入外力為 El-Centro 地震，比較轉移次數與第三個自然頻率識別的結果見表 (4.20)。

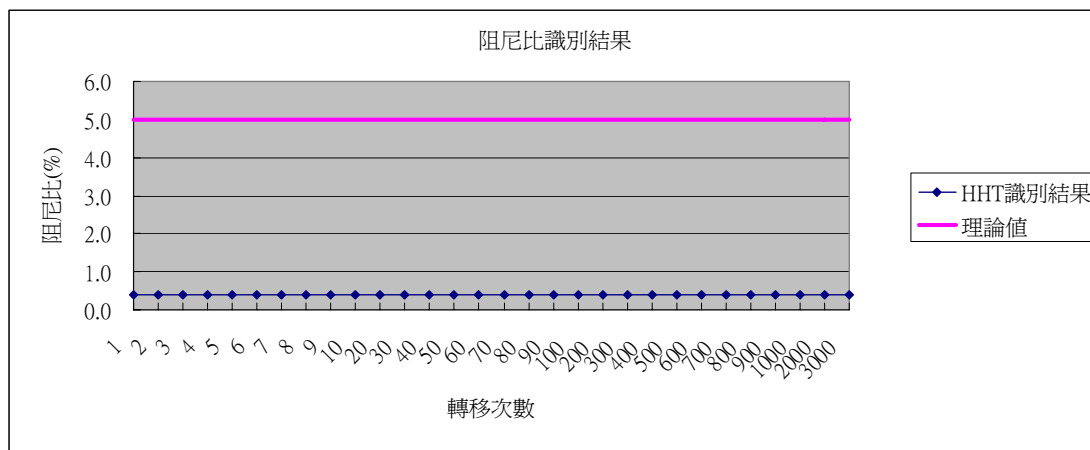


圖 4. 65 輸入外力為 El-Centro 地震，比較轉移次數與第三個模態阻尼比識別的結果見表 (4.20)。

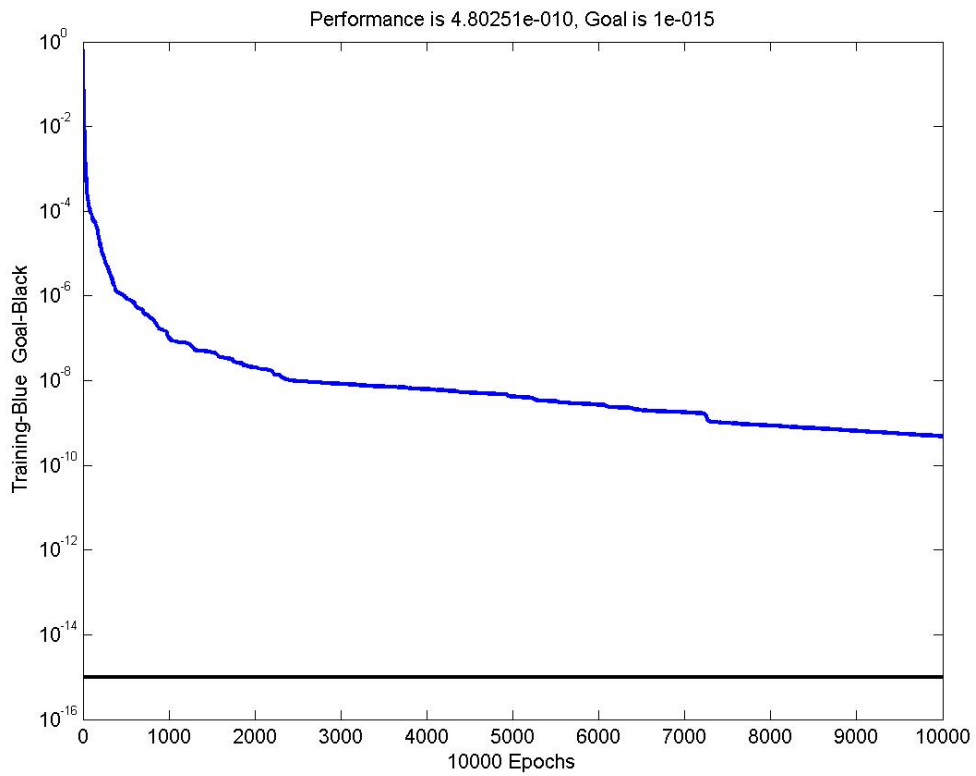
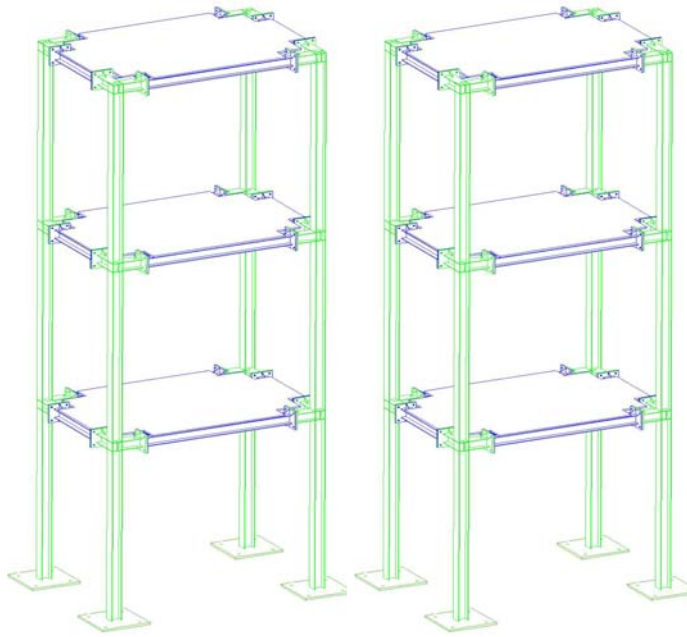
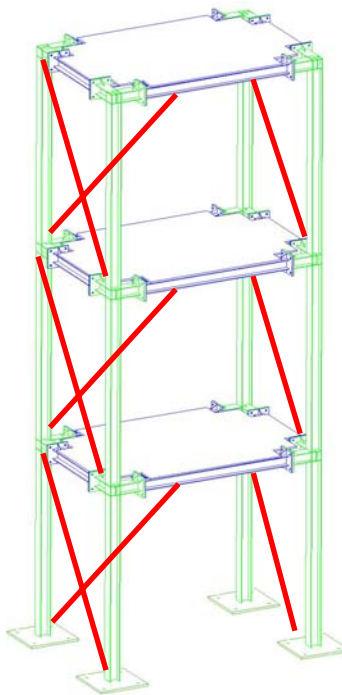


圖 4. 66 數值模型，輸入外力為 El-Centro 地震，類神經網路收斂圖。

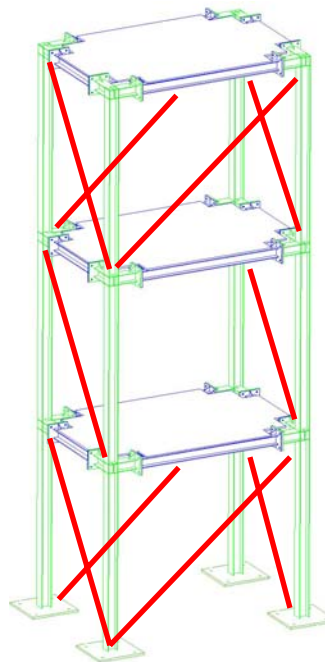
Benchmark A B C1 & D



Benchmark C2



Benchmark C3



Benchmark C4

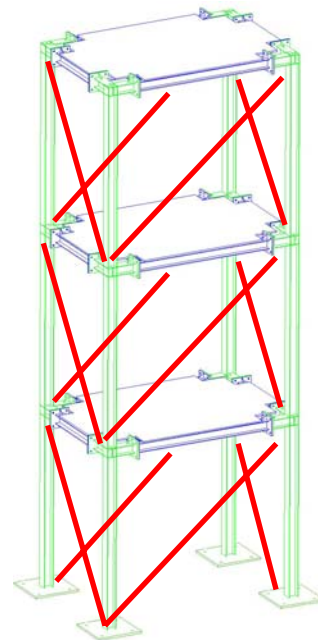


圖 5.1 Benchmark 模型構造圖

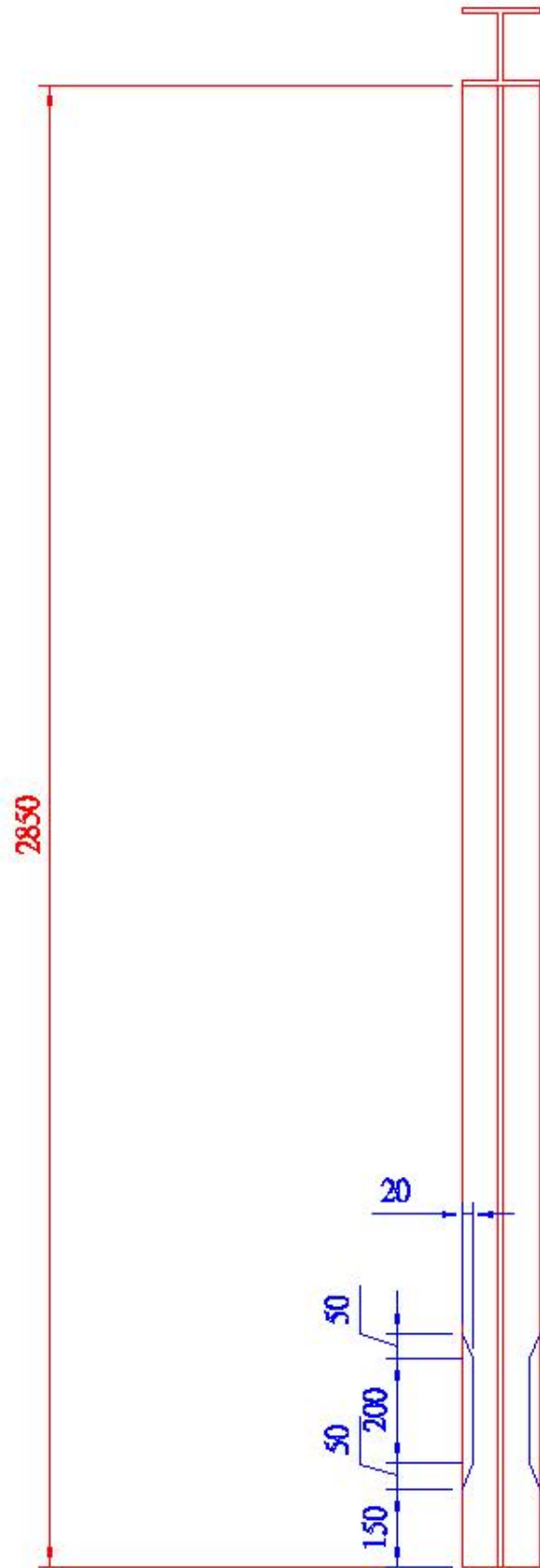


圖 5.2 脆弱桿件的構造



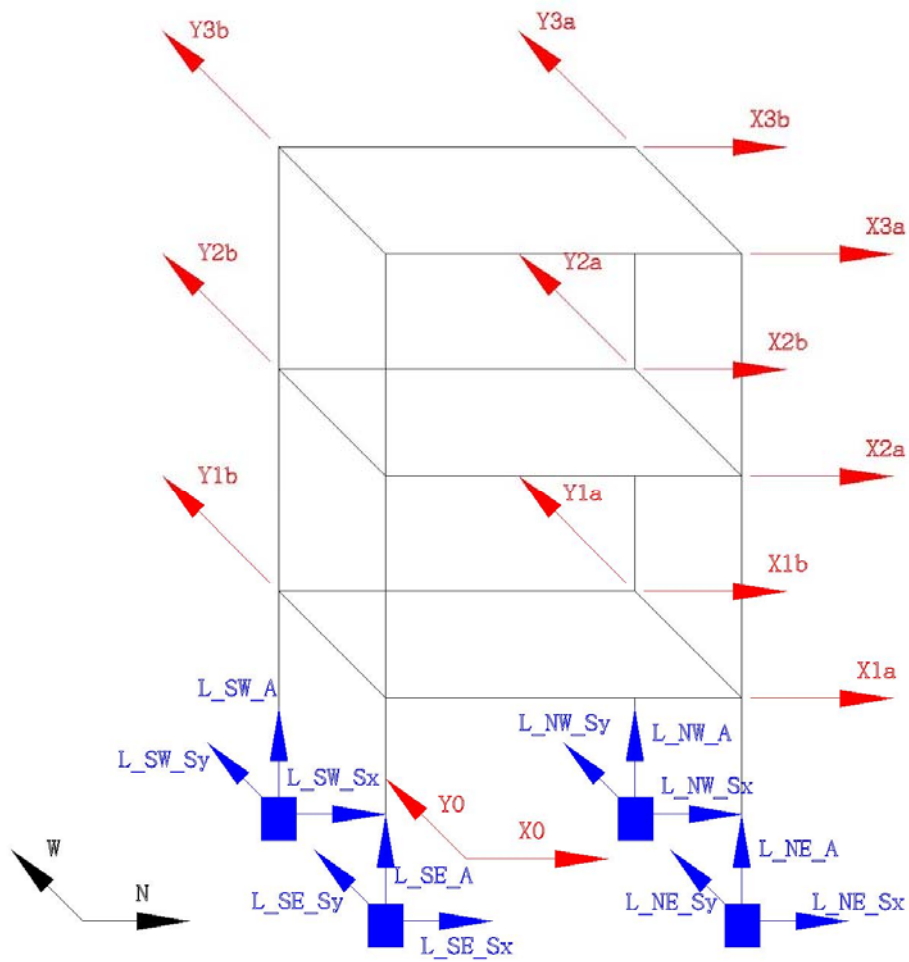


圖 5.3 感應器配置圖

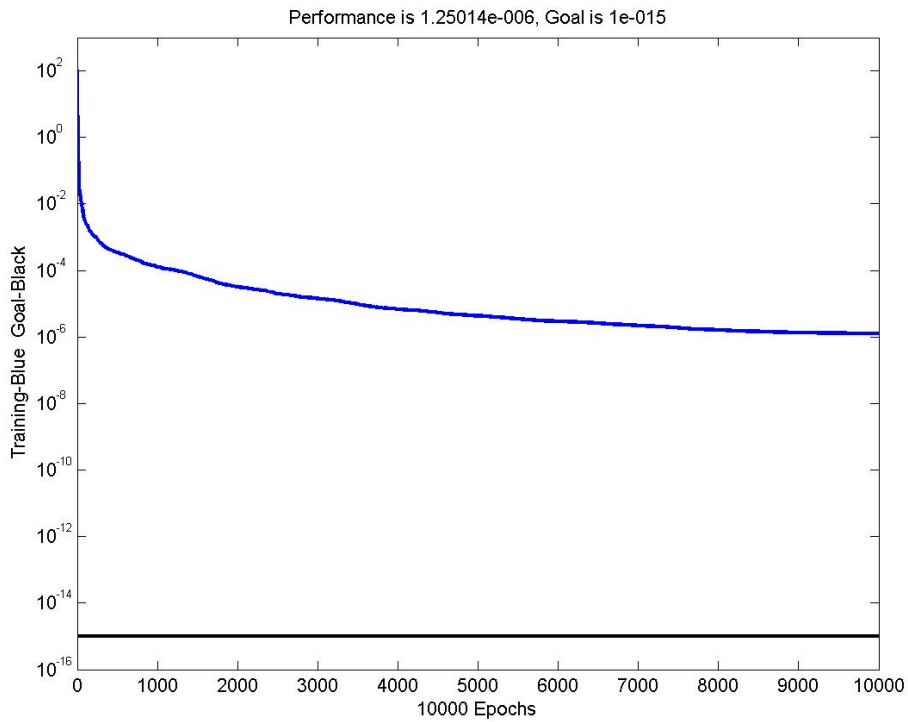


圖 5. 4 以試驗編號 A1 的數據訓練類神經網路所得的收斂圖。

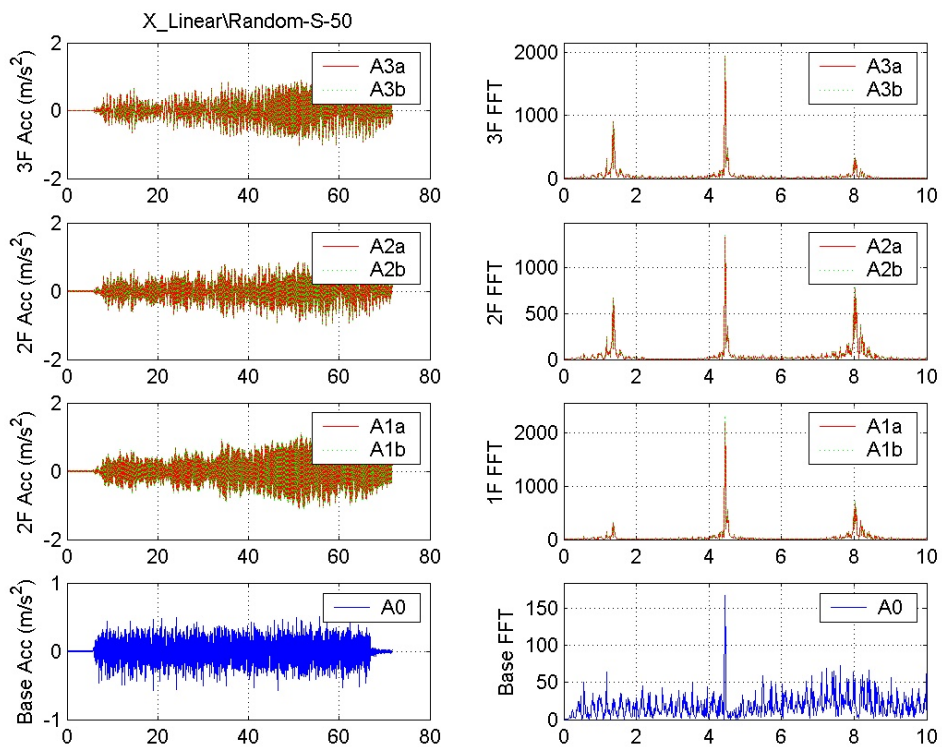


圖 5.5 試驗編號 A1 實驗後各感測器的反應紀錄，左圖為地表量測到的加速度反應，右圖為其快速傅立業轉換的結果。

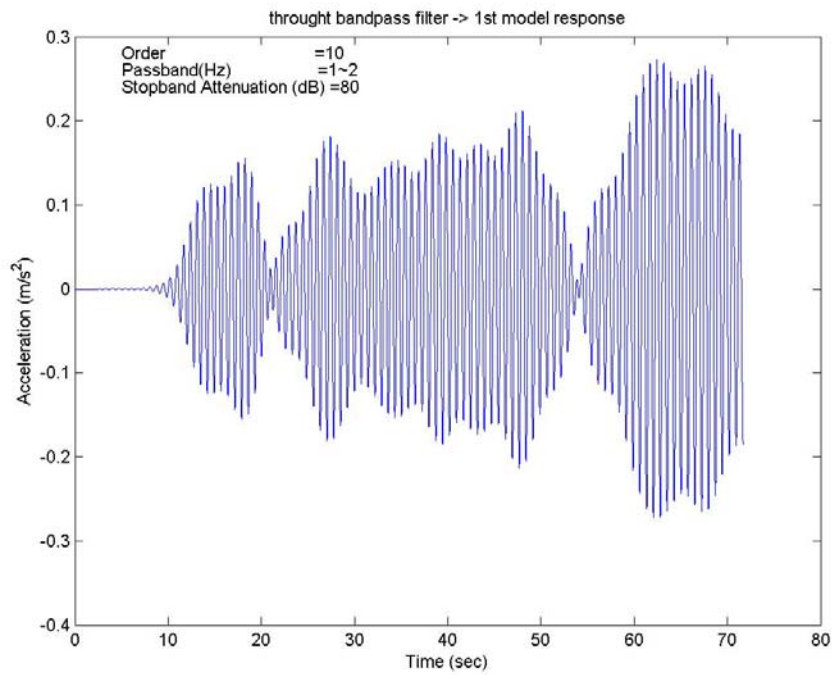


圖 5.6 將試驗編號 A1 二樓量測之訊號經過帶通濾波器後得到第一個模態的加速度反應歷時圖。

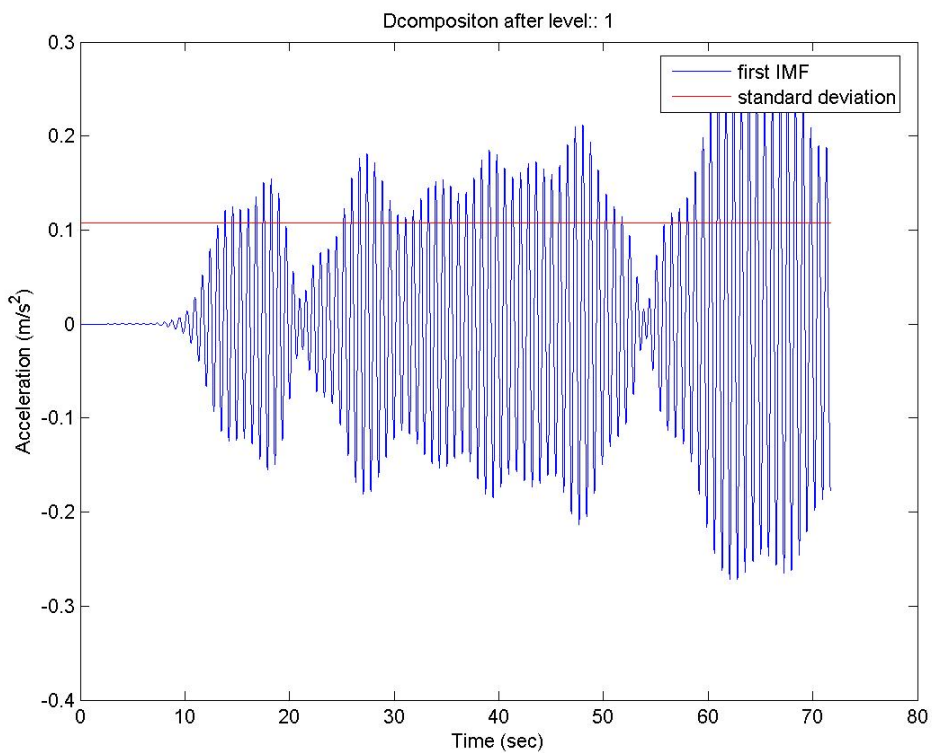


圖 5.7 第一個內建模態函數(曲線)，直線為此內建模態函數的標準差。

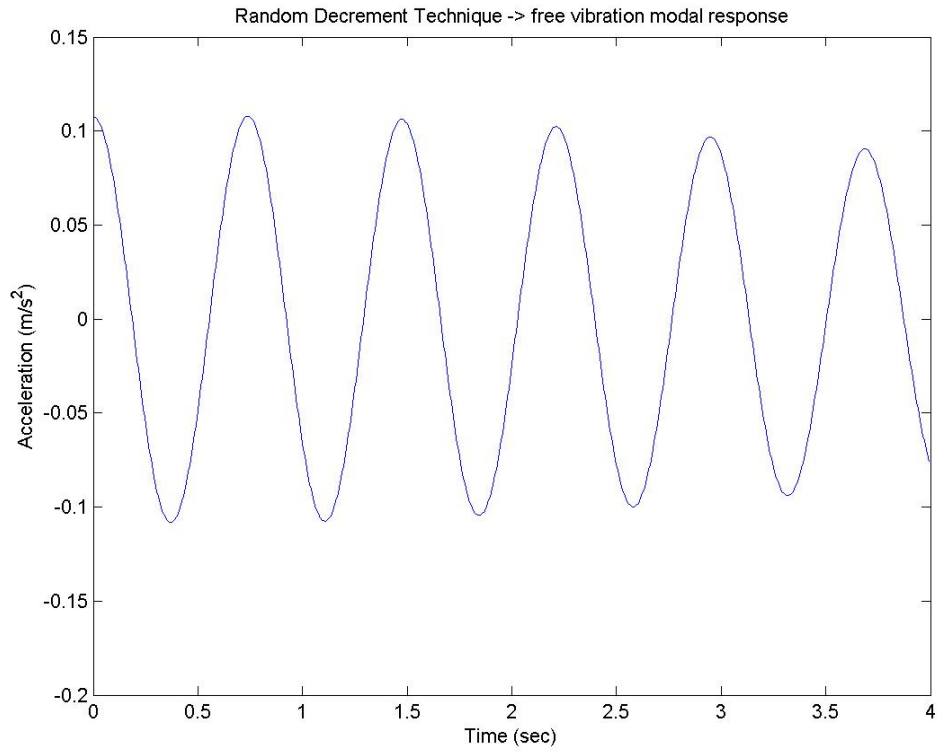


圖 5.8 運用隨機遞減法得到自由振動衰減的訊號。

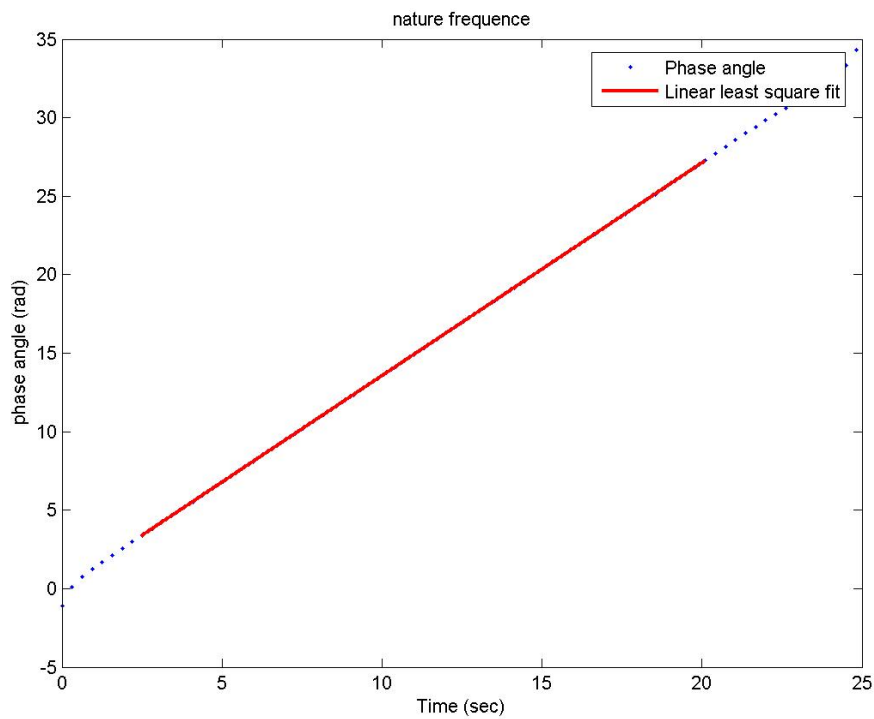


圖 5.9 經過希伯特轉換後得到相位角對時間的關係圖(黑點)，直線段為最小平方方法近似直線。

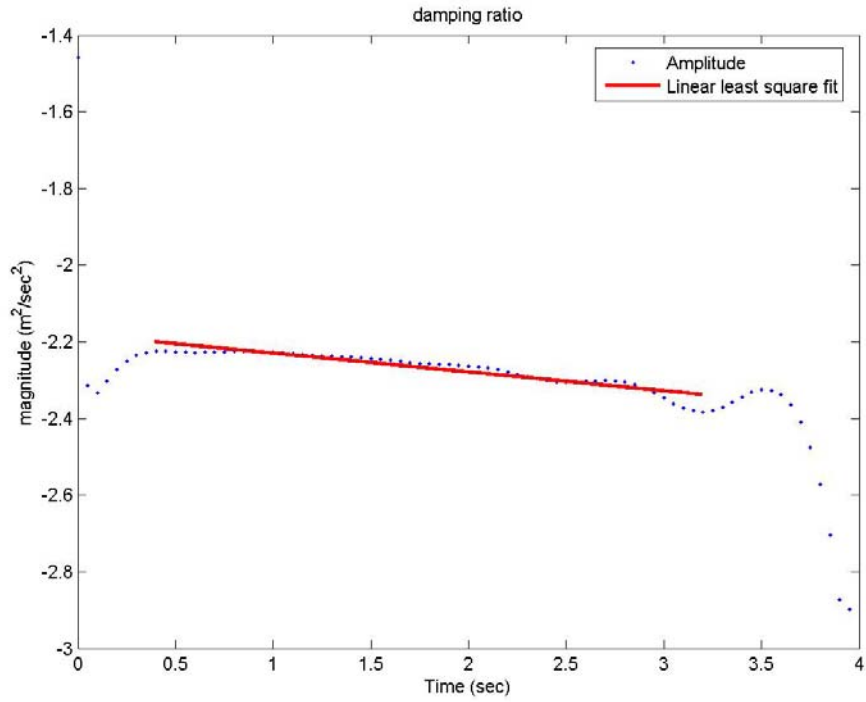


圖 5.10 黑點所示為經過希伯特轉換後得到的瞬時振幅取自然對數後對時間的關係圖，直線段為最小平方方法近似之直線。

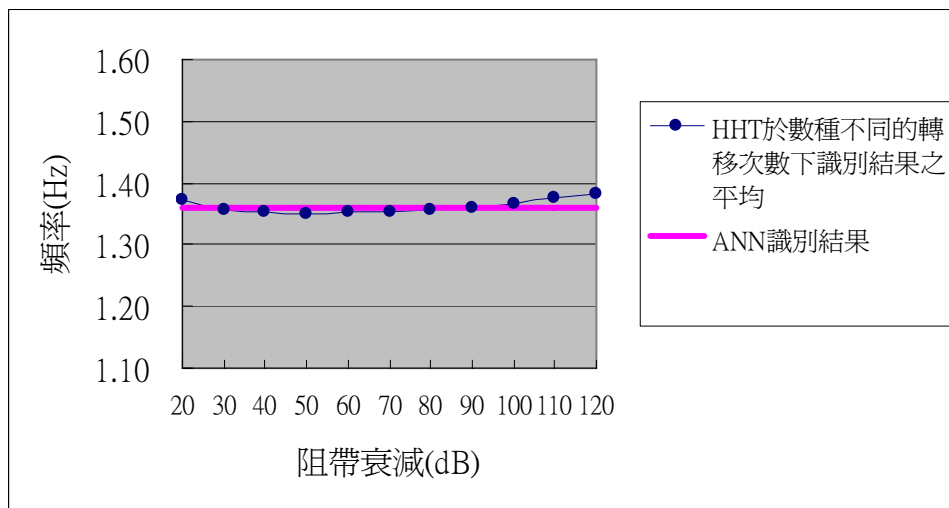


圖 5.11 試驗編號 A1 的數據以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第一個模態的平均自然頻率見表 (5.1)。

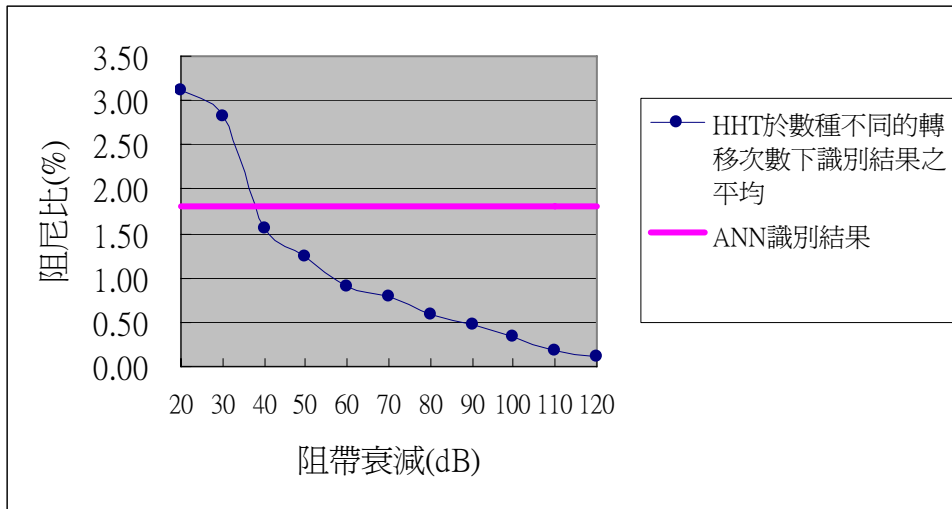


圖 5.12 試驗編號 A1 的數據以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第一個模態的阻尼比做平均見表 (5.1)。

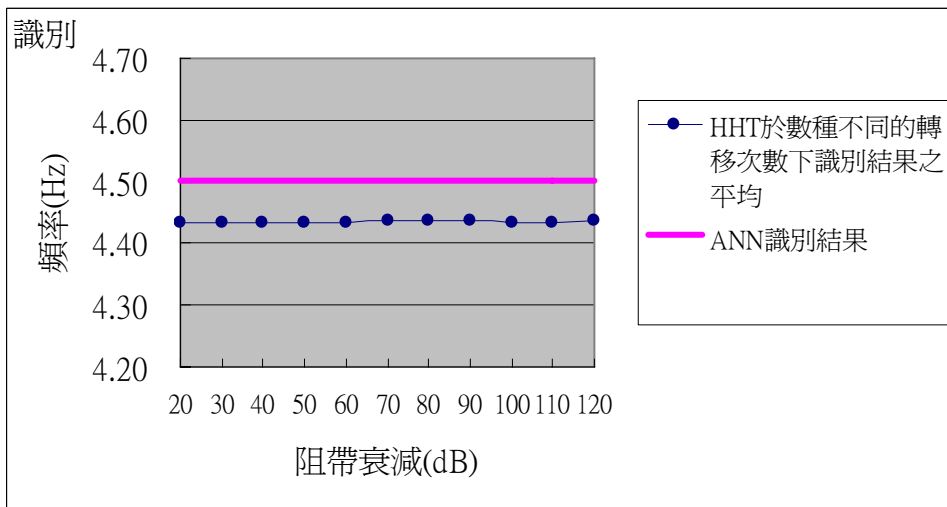


圖 5.13 試驗編號 A1 的數據以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第二個模態的平均自然頻率見表 (5.2)。

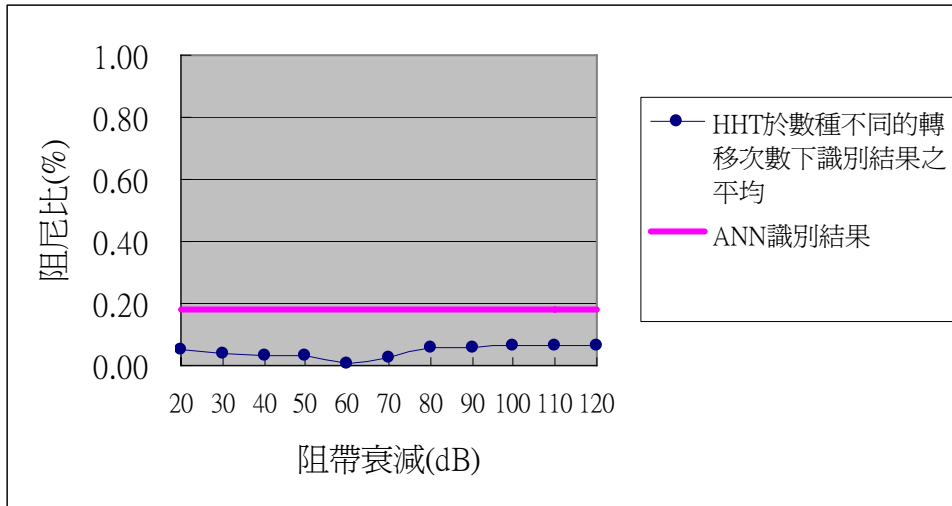


圖 5.14 試驗編號 A1 的數據以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第二個模態的阻尼比做平均見表 (5.2)。

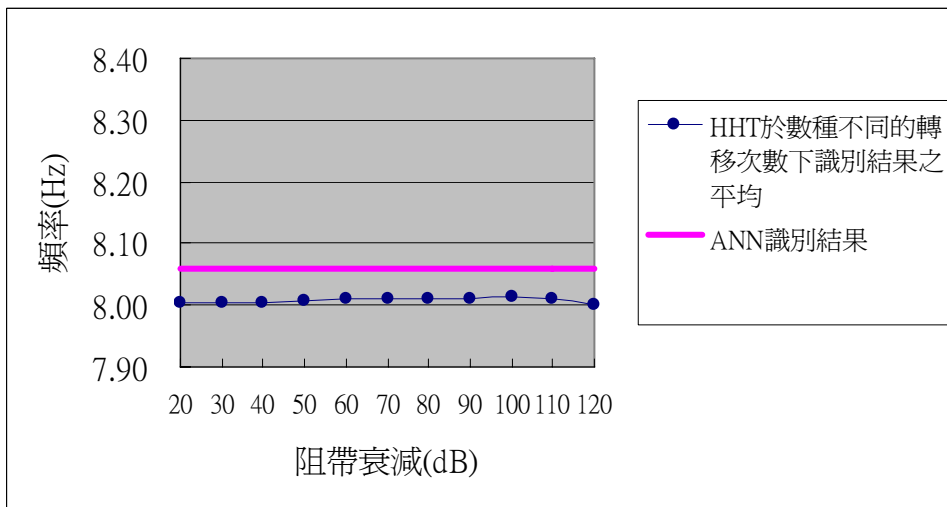


圖 5.15 試驗編號 A1 的數據以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第三個模態的自然頻率做平均見表 (5.3)。

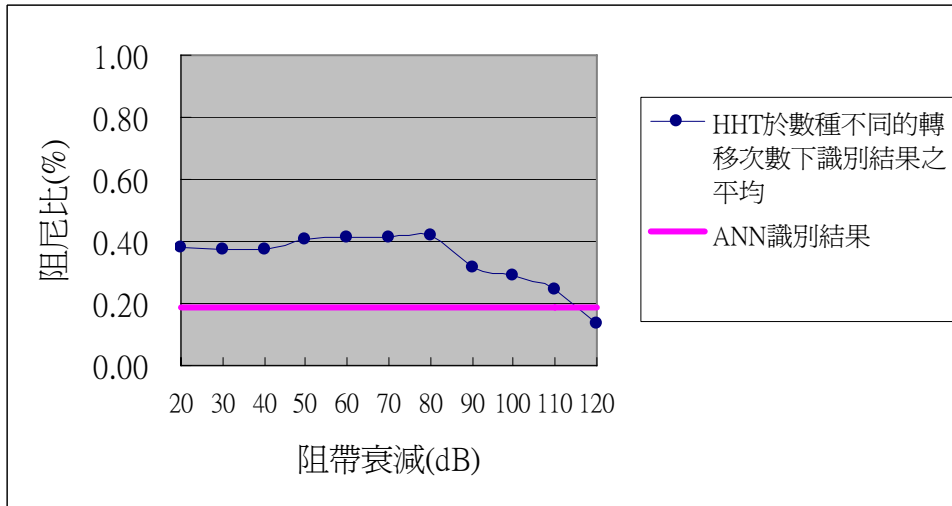


圖 5. 16 試驗編號 A1 的數據以 10 階濾波器在各阻帶衰減下，得到第三個模態的平均阻尼比做見表 (5.3)。

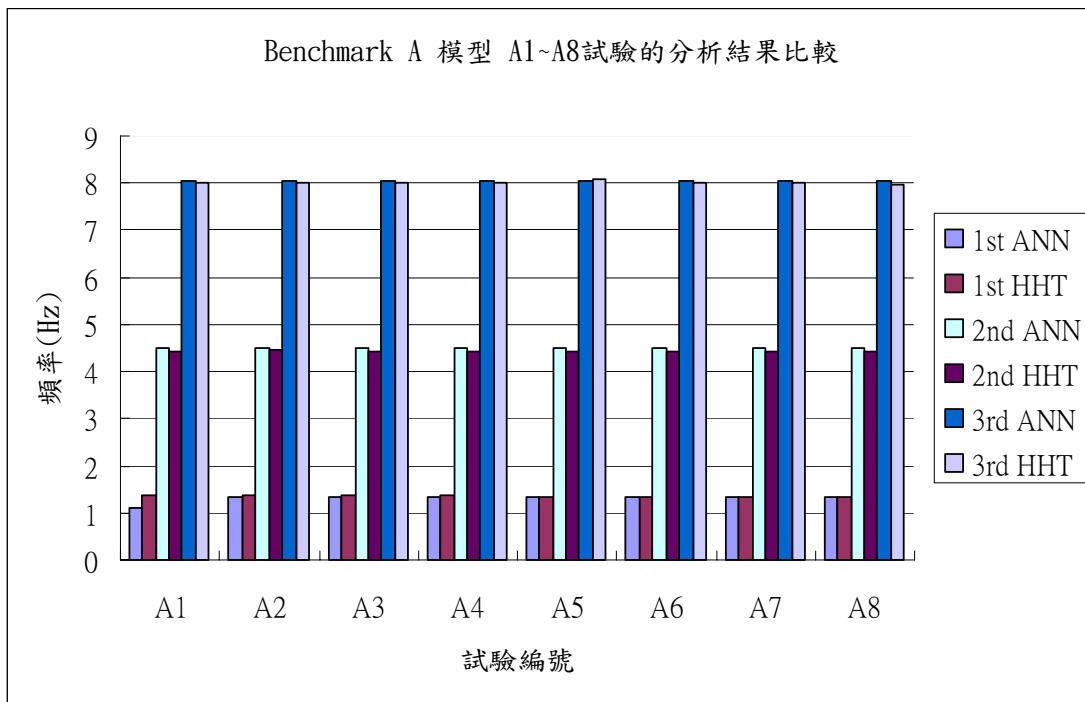


圖 5.17 試驗編號 A1~A8 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較



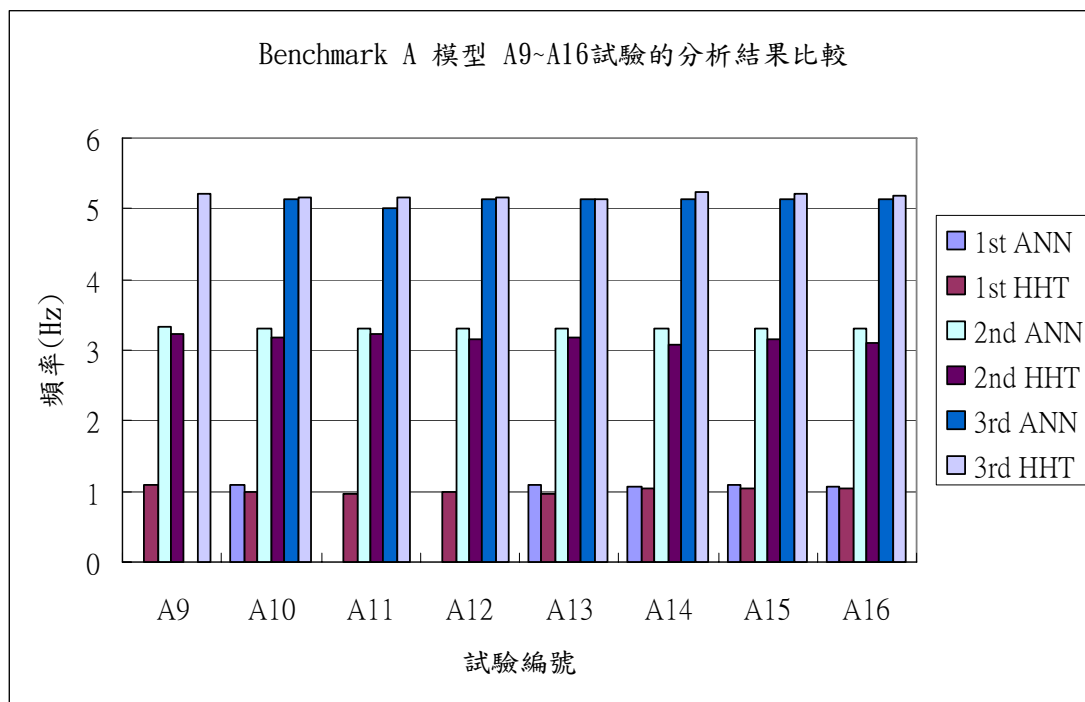


圖 5.18 試驗編號 A9~A16 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

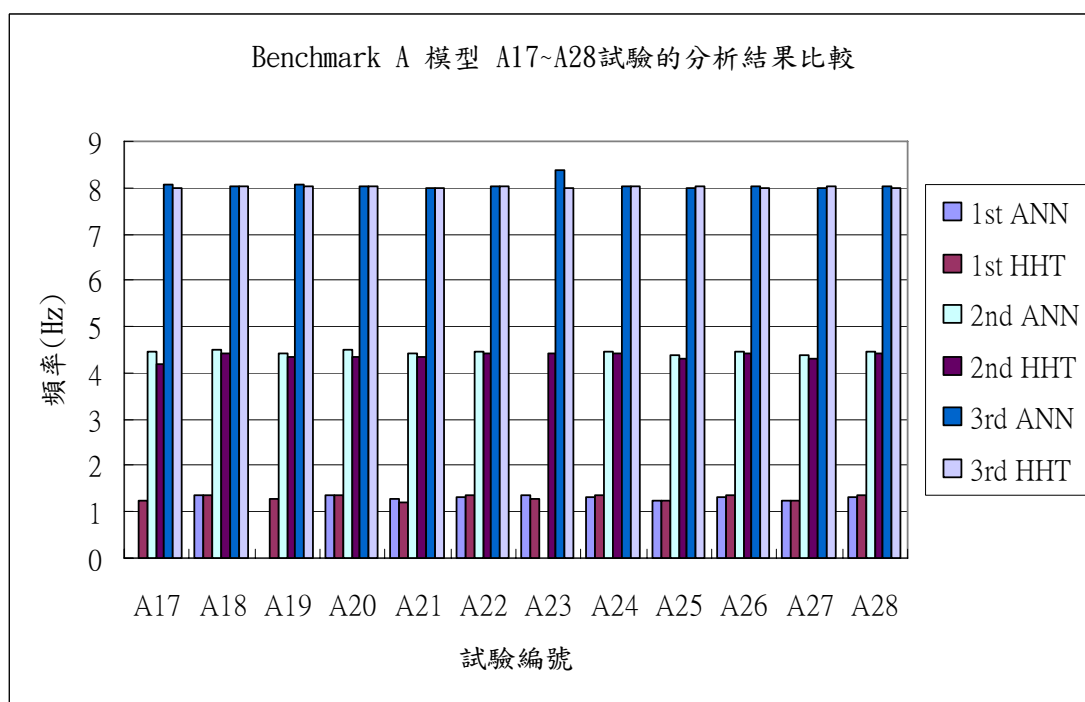


圖 5.19 試驗編號 A17~A28 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

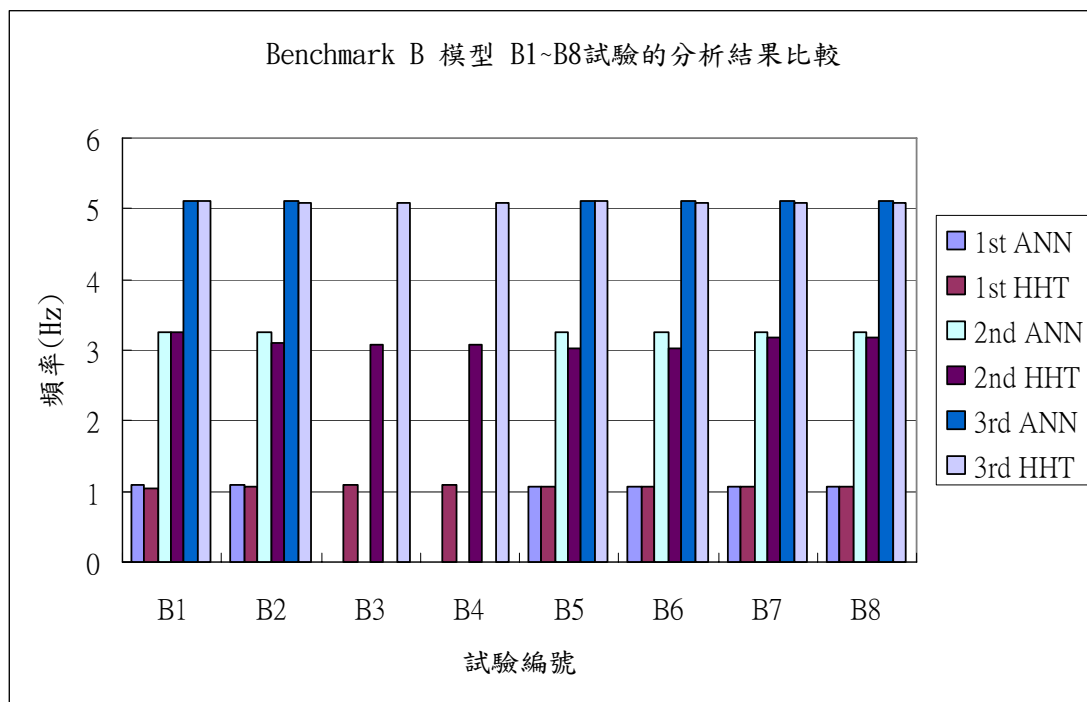


圖 5.20 試驗編號 B1~B8 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

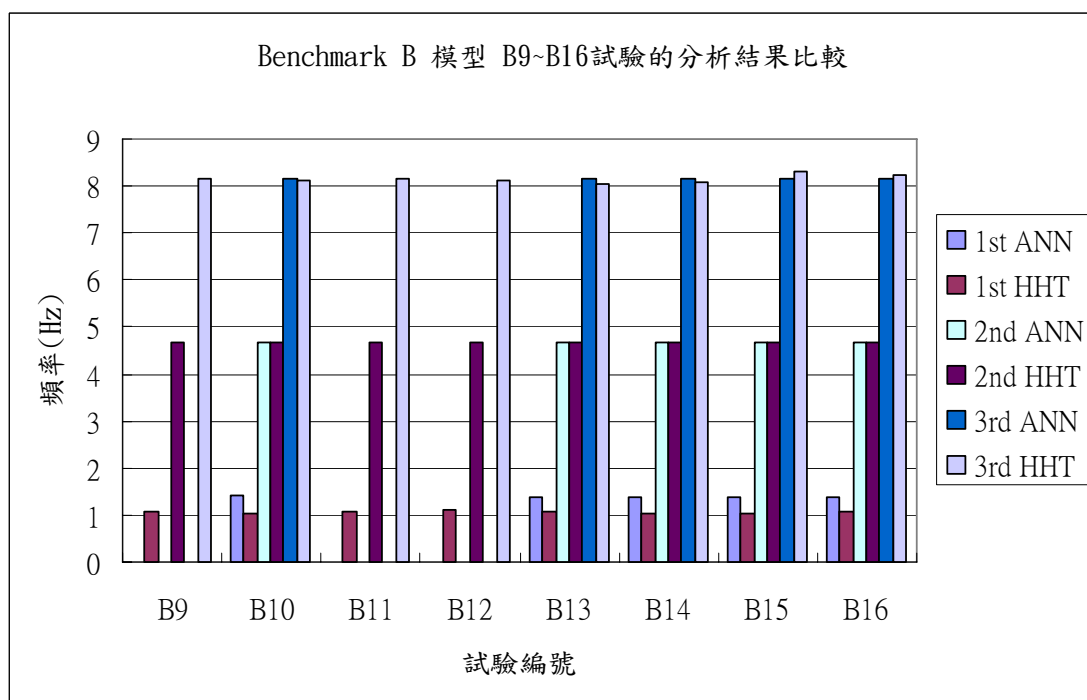


圖 5.21 試驗編號 B9~B16 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

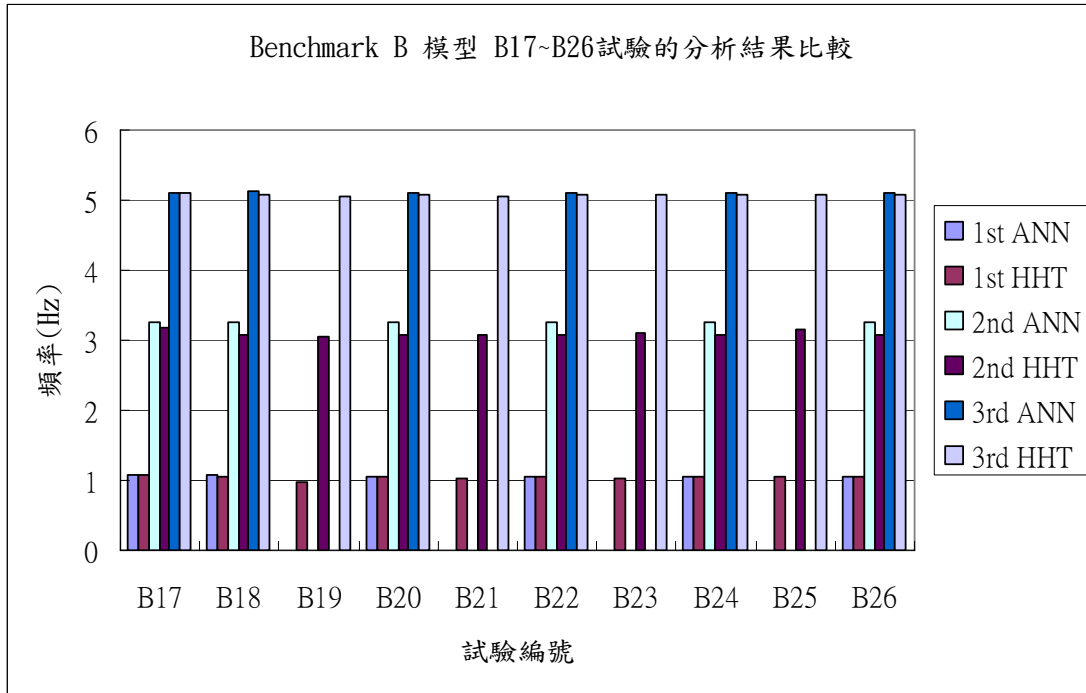


圖 5.22 試驗編號 B17~B26 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

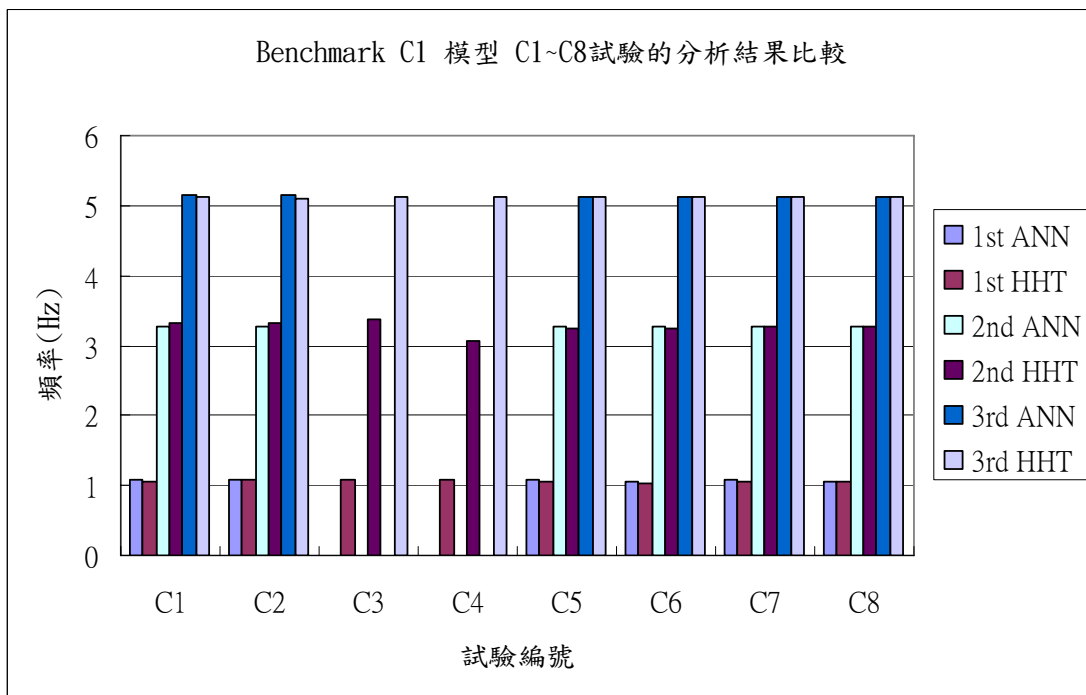


圖 5.23 試驗編號 C1\_C1~C1\_C8 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

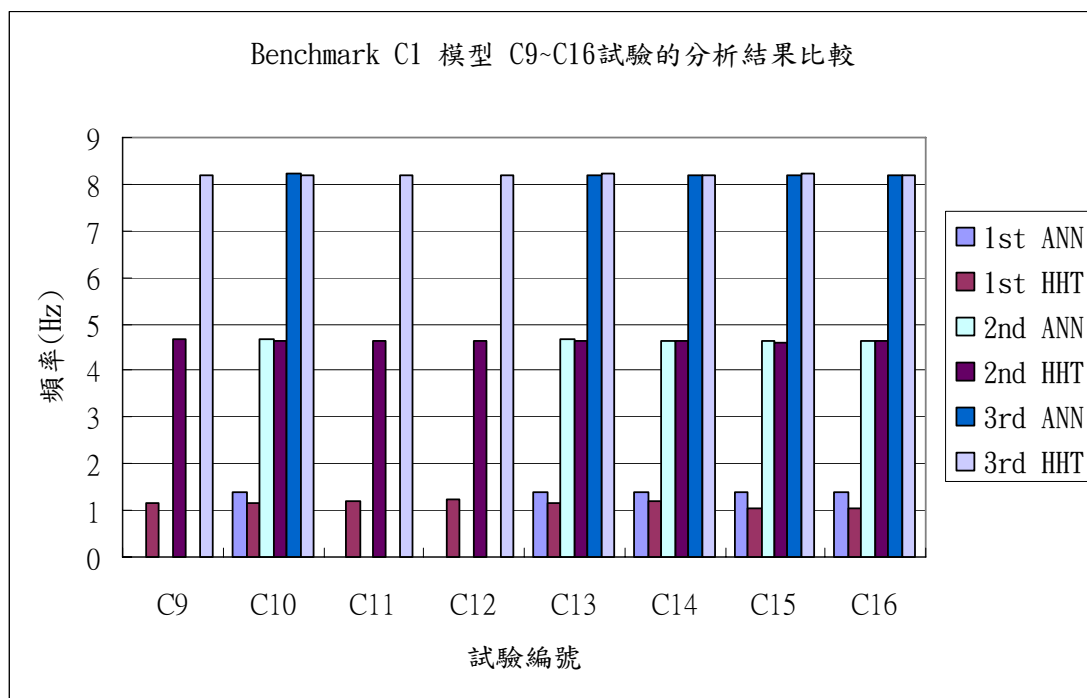


圖 5.24 試驗編號 C1\_C9~C1\_C16 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

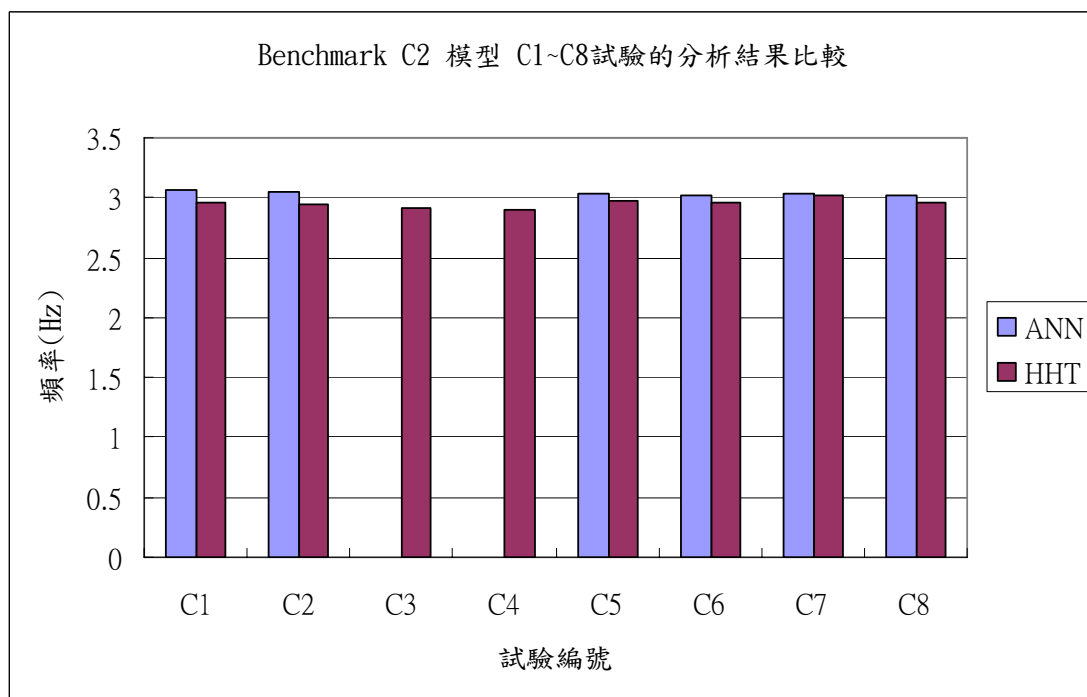


圖 5.25 試驗編號 C2\_C1~C2\_C8 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

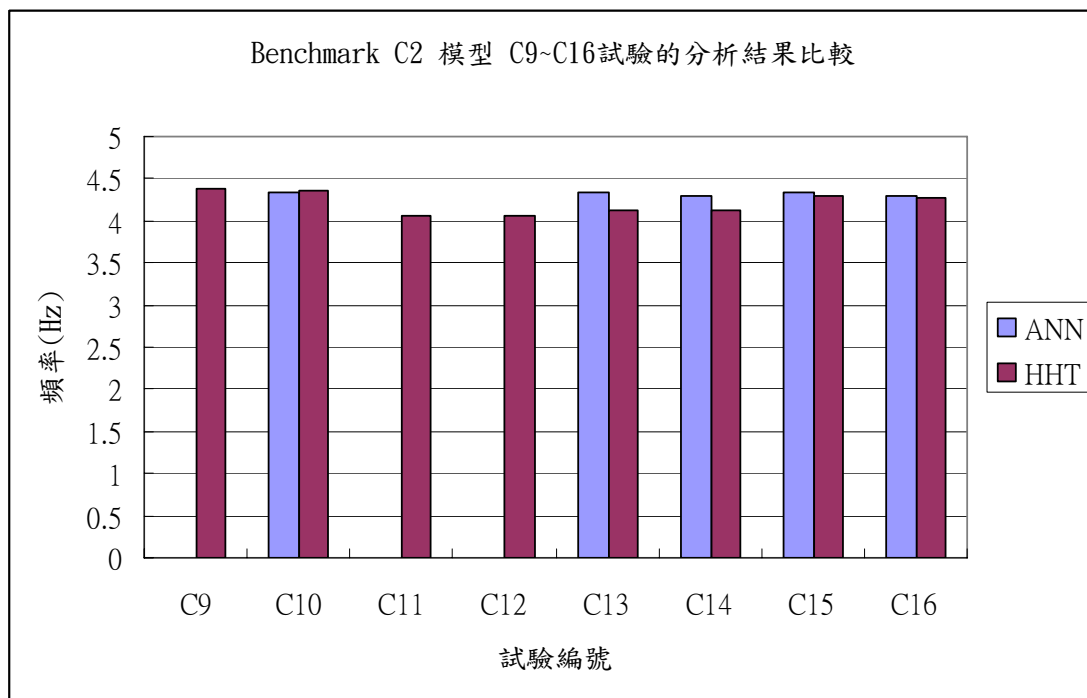


圖 5.26 試驗編號 C2\_C9~C2\_C16 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

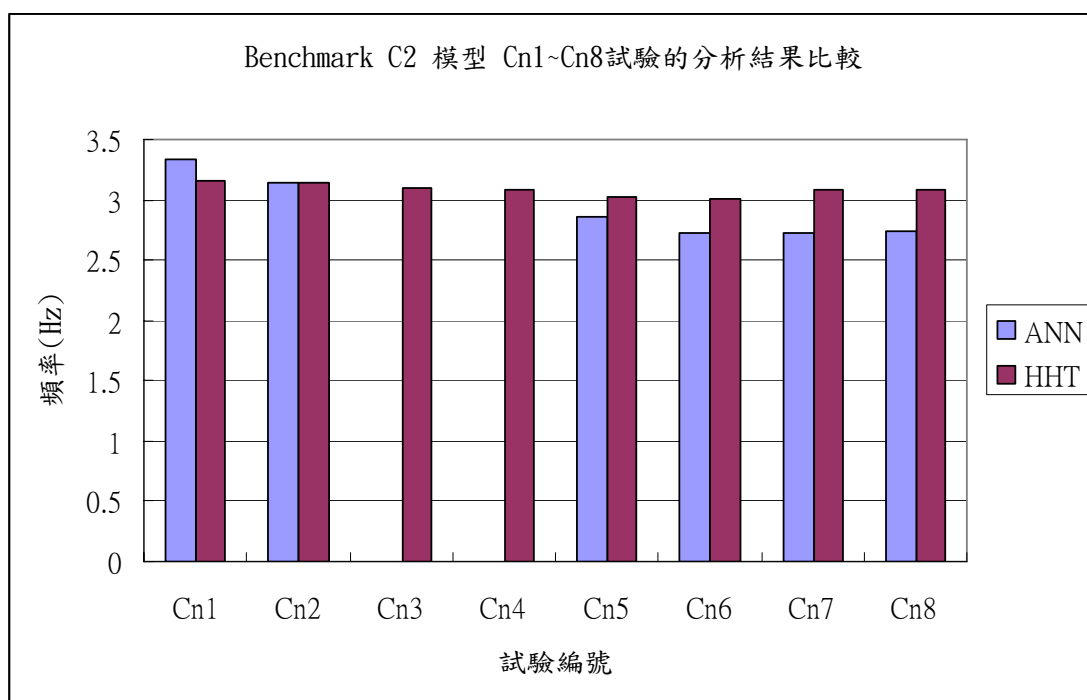


圖 5.27 試驗編號 C2\_Cn1~C2\_Cn8 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

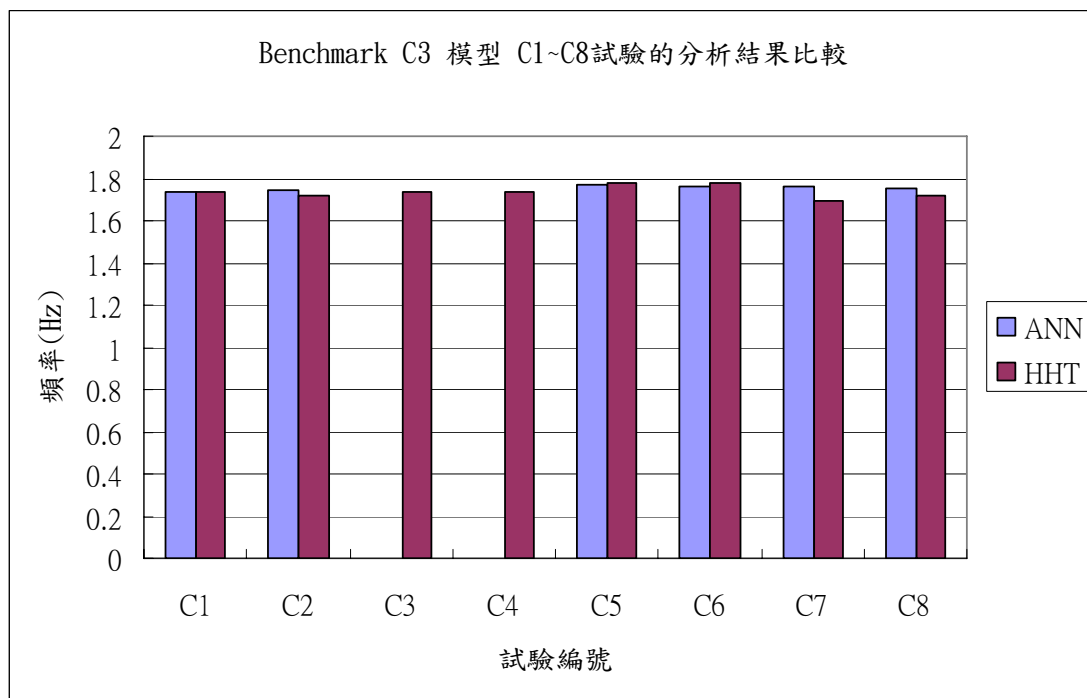


圖 5.28 試驗編號 C3\_C1~C3\_C8 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

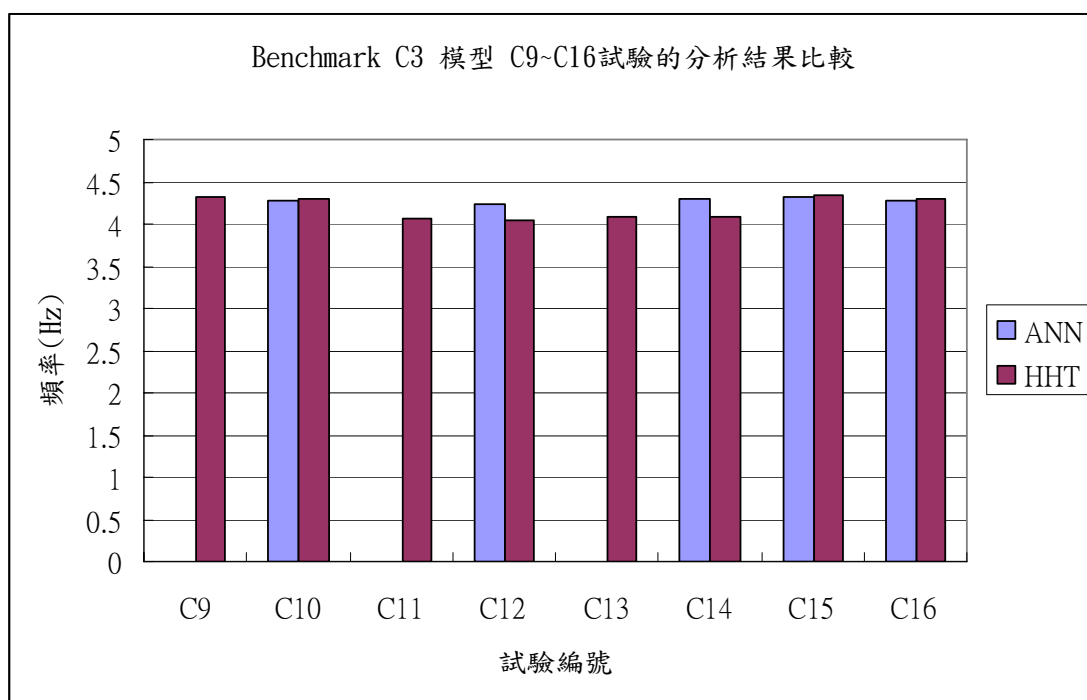


圖 5.29 試驗編號 C3\_C9~C3\_C16 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

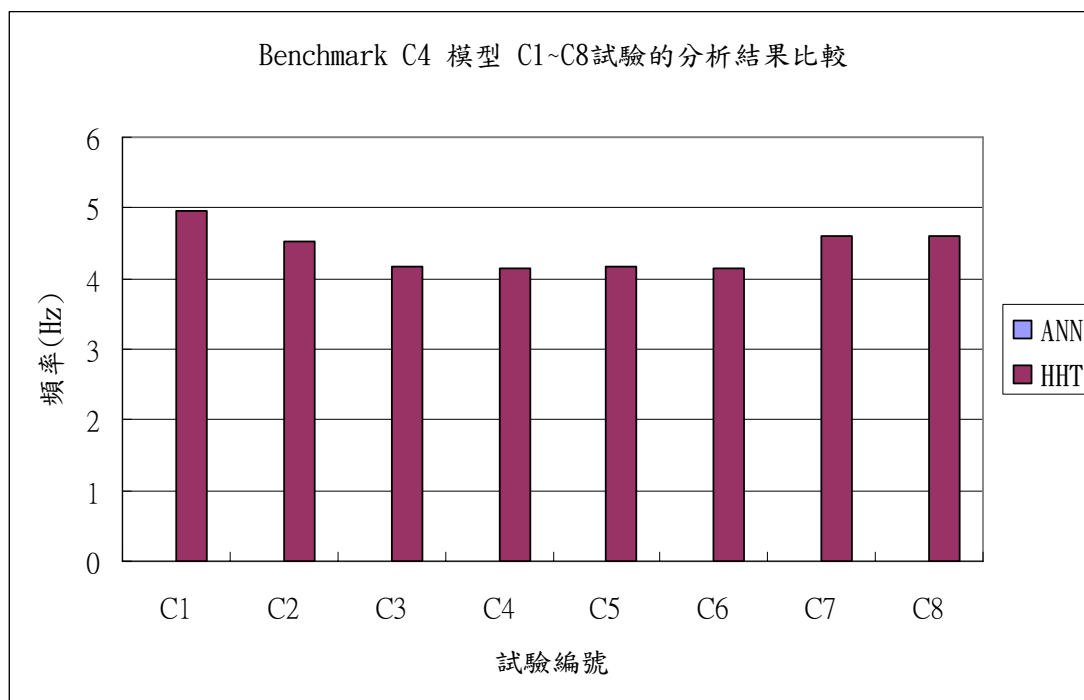


圖 5.30 試驗編號 C4\_C1~C4\_C8 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

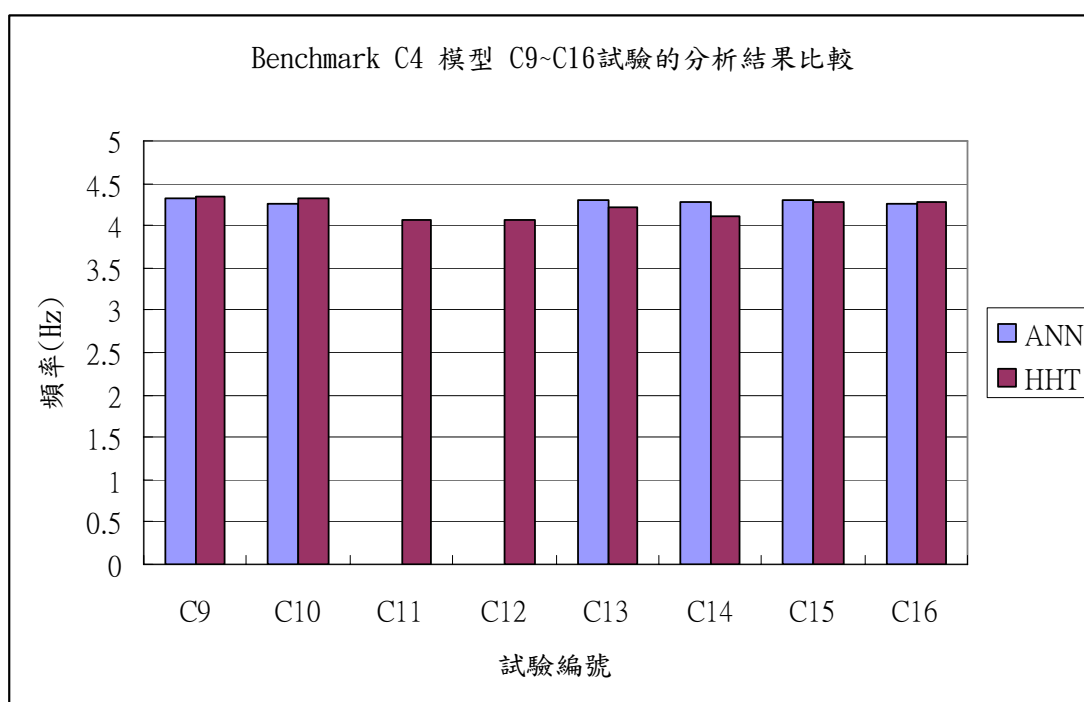


圖 5.31 試驗編號 C4\_C9~C4\_C16 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

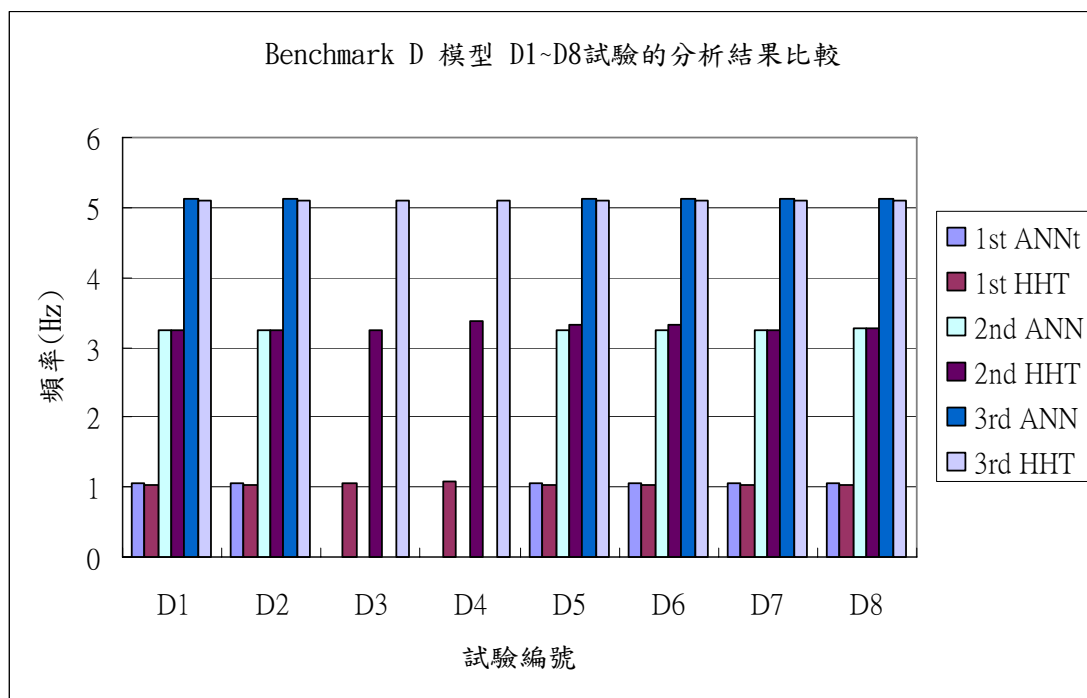


圖 5.32 試驗編號 D1~D8 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

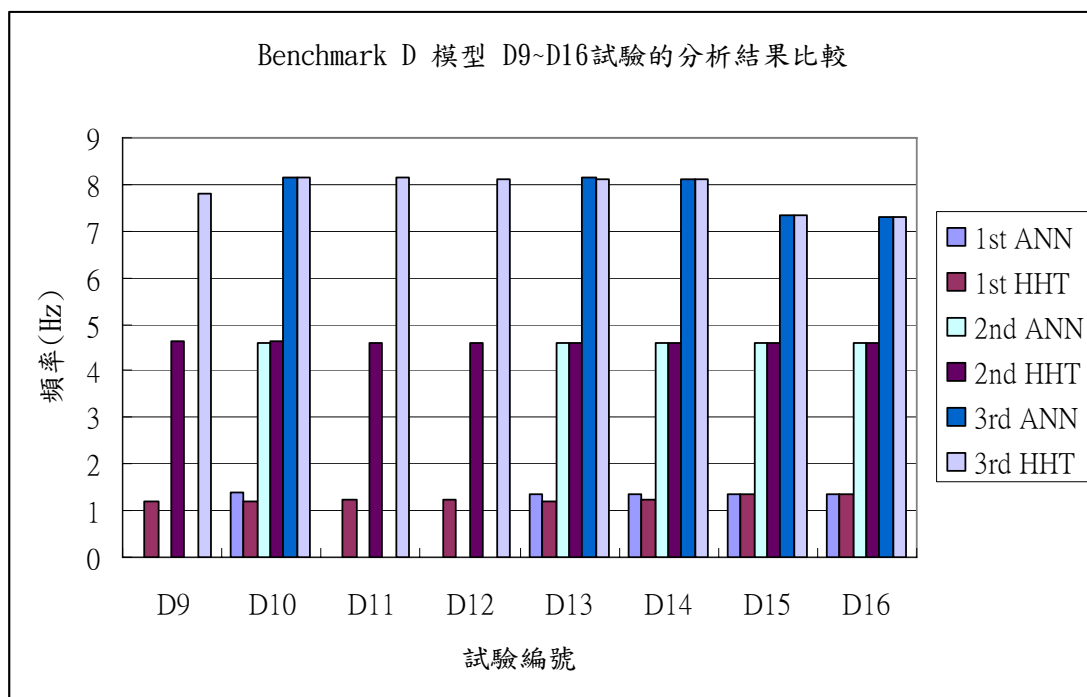


圖 5.33 試驗編號 D9~D16 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較



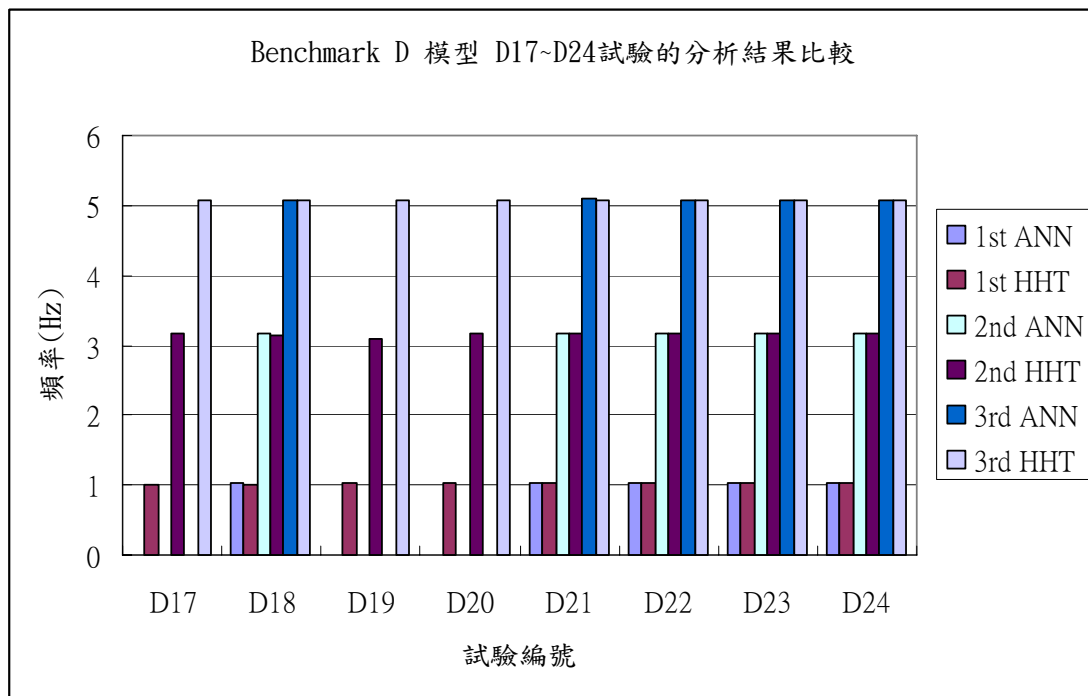


圖 5.34 試驗編號 D17~D24 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

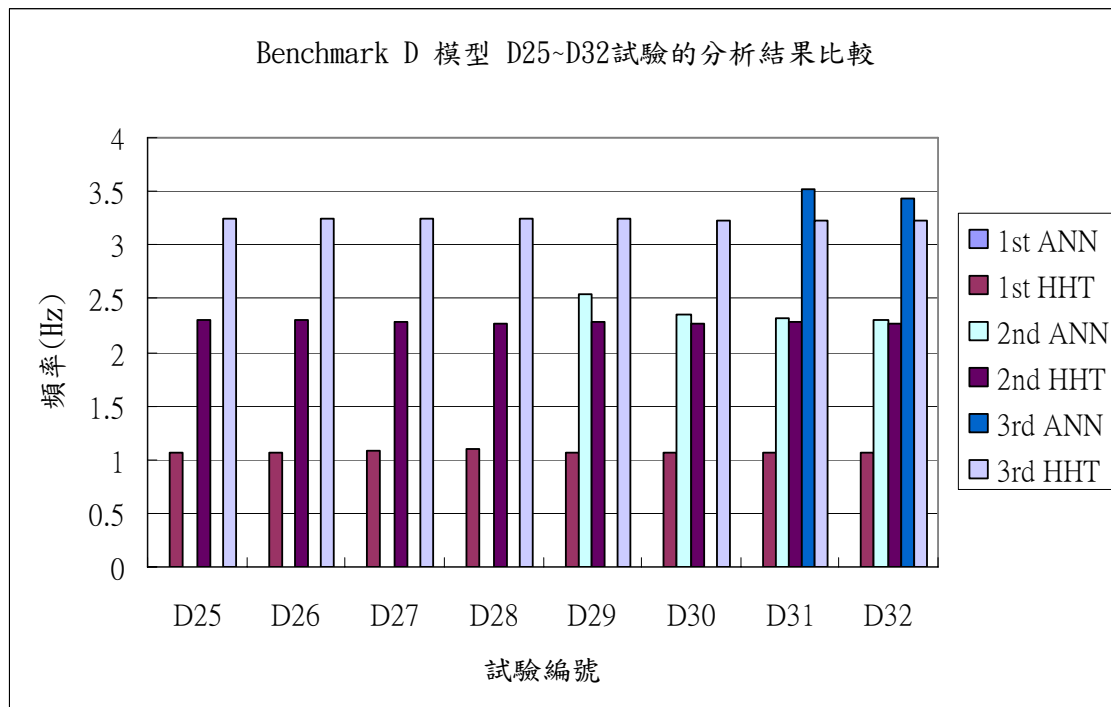


圖 5.35 試驗編號 D25~D32 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較

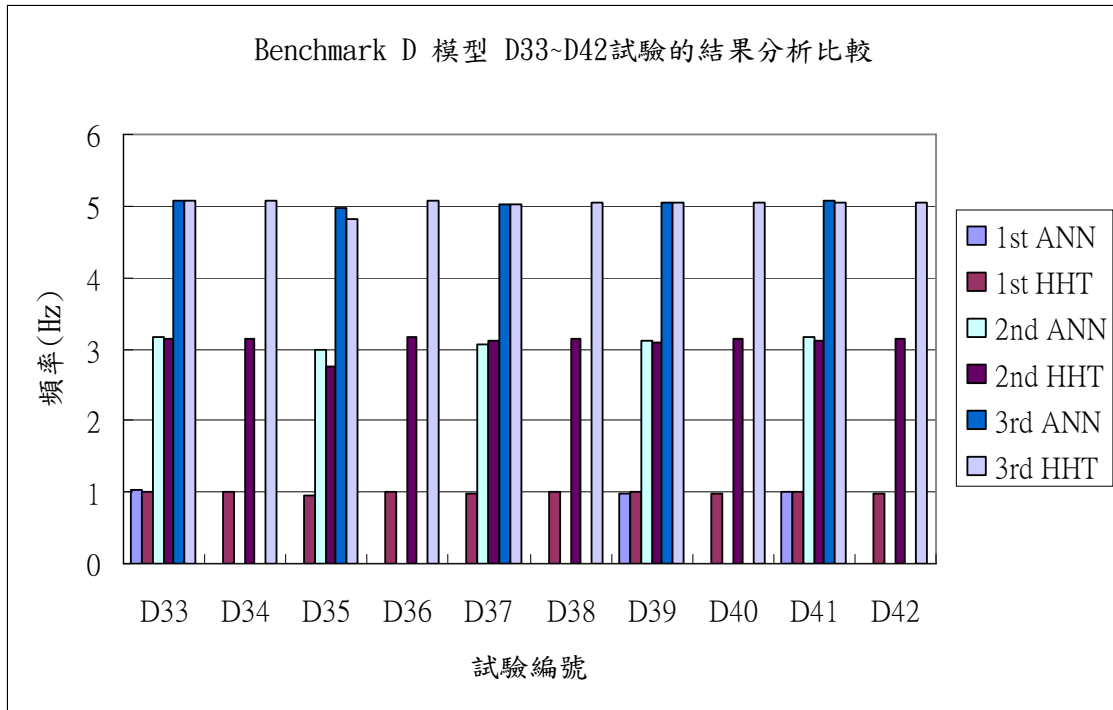


圖 5.36 試驗編號 D33~D42 的數據經 ANN 與 HHT 識別出的自然頻率比較