

# 微振量測之應用以土木館連絡空橋為例

賴尚賢、張顯宗

德霖技術學院土木工程系 講師

## 摘要

微振量測利用高敏感度、高精確度的振動計（如速度計、加速度計等）量測自然外力（如風力、地震力或車輛載重等）所產生的微小振動，進一步將結構物位移、速度或加速度的反應歷時轉換反應輸出頻譜，即可求得結構物的動力特性值，如：自然頻率與阻尼比等。微振量測的優點包括：量測準備時間較短、量測過程不影響建築物使用、量測結果反應建築物實際情況。

微振量測可應用在識別建築物、橋梁及地盤基本振動週期等，亦可應用於結構健康檢查、震後受損結構評估、結構補強效果評估等非破壞性檢測。本文作者以校內連絡空橋兩層鋼筋混凝土構造物為研究對象，利用高靈敏度三軸速度計進行微振量測，推估結構物之基本振動頻率，並與有限元素數值分析結果比較，獲得相當之符合度。

關鍵詞：微振量測、振動分析、頻譜分析、基本振動頻率

## Structure Dynamic Measurement with Ambient Vibration Test

Shang-Hsien Lai, Hsein-Tsung Chang

Lecturer, Department of Civil Engineering, De Lin Institute of Technology

## Abstract

Ambient vibration test (AVT) adopts the high sensitive and good accuracy vibrometers (accelerometers or velocimeters) to measure the structure micro amplitude due to the environment exciting resources such as wind, vehicles or equipments. Using the spectrum analysis, the vibration records would convert from time domain to frequency domain, then after, it may evaluate the structure dynamic characteristics including the fundamental frequencies and damping ratio. The main advantages of AVT technique are less time consuming, no interrupting the structure operation and more representative of the real structure conditions.

The AVT technology is good for the dynamic identification of the building, bridge and ground domain frequency, furthermore, the AVT will be hopefully applied as NDT (non destructive test) for the structural health monitoring, the building assessment before and after earthquake and the retrofit performance evaluation. In this article, the authors report their AVT research on a two stories concrete structure via a high sensitive tri-axial velocimeter, as comparing with the numerical simulation, the AVT frequencies show the feasible result.

Keywords: ambient vibration test, vibration analysis, spectrum analysis, fundamental dynamic frequency

## 壹、結構動態試驗方法

依據試驗規模及目的，結構動態試驗方法可分成下列幾種：[1,2]

- (1) 微振試驗 (ambient vibration test)：主要量測結構受外界(如風力)不規則干擾所產生的微小振動，來測定結構物的基本動力特性。
- (2) 自由振動試驗 (free vibration test)：對結構系統施加初始的位移或速度，量測結構的自由振動衰減曲線，以求得基本頻率與阻尼係數。
- (3) 外力激振試驗 (force vibration test)：量測結構物在固定頻率外力或地震、風力、爆炸或車輛等作用之動態振動反應。
- (4) 共振法 (resonance test)：利用特殊的激振器對結構施加簡諧荷載，使結構發生共振現象以觀察結構的基本頻率。
- (5) 振動台試驗 (shaking table test)：由電腦控制油壓振動台對結構施以單向或多向的振動，以模擬結構物受震動態行為。

在各種方法中，微振量測法最為簡便，其利用高敏感度、高精確度的振動計(如速度計、加速度計等)量測自然外力(如風力、地震力或車輛載重等)所產生的微小振動，進一步將結構物位移、速度或加速度的反應歷時轉換反應輸出頻譜，即可求得結構物的動力特性值，如：自然頻率與阻尼比等。

## 貳、振動量測處理程序

### 一、感應器與前置放大器

常用振動感應器有電容式 (Condenser Type)及壓電式 (Piezoelectric Type)兩種，其中電容式感應器的敏感性高且量測頻率偏向低頻，較適合建築結構工程使用。選用感測計及控制介面應考慮重點：[3]

- (1) 可信度：俱備相當的靈敏度及精確度
- (2) 工作性：長期連續或反覆檢測都可維持一定的準確性
- (3) 環境適應性：俱有相當的耐候性及保護性
- (4) 量測範圍：確定其有效量測範圍是否適當
- (5) 資料擷取：可快速掃瞄感測計輸出信號並進行研判、過濾及處理動作
- (6) 資料後續處理：電腦存取容易且程式操作簡便
- (7) 自我偵測及排錯性：發生故障自動顯示以便及時維修或更換

### 二、轉換器及放大器

類比數位化轉換器將所量測感應器電壓變化之類比訊號轉換為數位訊號，並且正確放大至完成滿足數位動態範圍的訊號，以確保數位訊號的最大解析度。[4,5]

### 三、資料擷取

#### (1) 取樣頻率的決定

依據 Shannon's Sampling Theorem: 數位訊號的上限為取樣頻率的一半, 亦即取樣頻率定為每秒 500 次, 則數位訊號的上限不可超過 250Hz, 超過部份所得到錯誤的結果稱之為假象 (aliasing), 因此, 取樣頻率的一半所對應數位訊號的上限亦稱為 Nyquist Frequency.。

#### (2) 頻寬時間乘積理論

當訊號進入 FFT 分別時必須要注意頻率解析頻寬與擷取訊號的平均時間必須滿足：

$$BT=1\text{-----}(1)$$

此亦稱為海德堡不確定原理(Heidelberg's uncertainly theorem)其說明時間域的不確定與頻率域的不確定的乘積必須大於或等於 1; 對 FFT 分析表示頻率線的間距必須為擷取時間長度的倒數, 也就是當擷取時間長度為 10 秒時, 頻率線間距為 100mHz。

### 四、訊號處理

依據訊號在量測時間內的變動性, 可成穩態訊號及非穩態訊號兩大類: [4,5]

(1) 穩態訊號: 訊號平均特性不會因時間而變動, 因此可使用振幅、頻率及相位等參數來描述其訊號特性。其可細分為:

(a)週期訊號: 會在一段時間之後重複相同的訊號者, 例如: 機械等速運轉時所產生的振動, 對應任意時間點均可預測其振幅。

(b)隨機訊號: 訊號雖不具備週期特性, 但可利用統計方法(機率密度或機率分佈、平均值、平方平均值 RMS 等)找出其分佈或組成參數, 例如: 雨滴打在雨傘上的聲音就是隨機訊號。

(2) 非穩態訊號: 無法使用參數來描述其訊號特性者。其可細分為:

(c)暫態訊號: 訊號的時間很短暫, 例如: 鐵鎚敲擊所產生的振動。

(d)連續訊號: 連續的非穩態訊號類似穩態連續訊號加上暫態訊號所組成, 例如: 演講中演說者所發出的聲音訊號。

### 五、頻率分析與濾波

頻率分析是時間域的訊號轉換為頻率域的訊號, 最主要的目的在探討個別頻率的振幅值及其對整體訊號的貢獻度。[4,5]

#### (1) 快速傅立葉轉換

1753 年 Bernoulli 提出弦振動模式的線性組合, 其後, 1807 年 Fourier 提出以正弦諧波級數表示週期訊號, 1829 年 Dirichlet 對傅立葉級數建立數學模型, 而於 1965 年由 Cooley 及 Turkey 建立快速傅立葉轉換(FFT, Fast Fourier Transform)成為頻率分析最主要的工具。

## (2) 數位濾波

主要將訊號中超出設定頻率上下限範圍的頻率成份加以過濾排除，有關頻率上下限範圍，可分為低頻、寬頻及高頻等設定。

# 參、微振量測規劃

## 一、量測對象

量測對象選擇本校土木館與第二教學大樓間之連絡空橋，其為兩層(高度：6M、3M)鋼筋混凝土結構物，結構配置方整(長寬：12M、2.5M)、構架單純、無太多外加牆體、樓板厚度尺寸固定等特性，相關結構尺寸與測點規劃，如圖 1 所示。

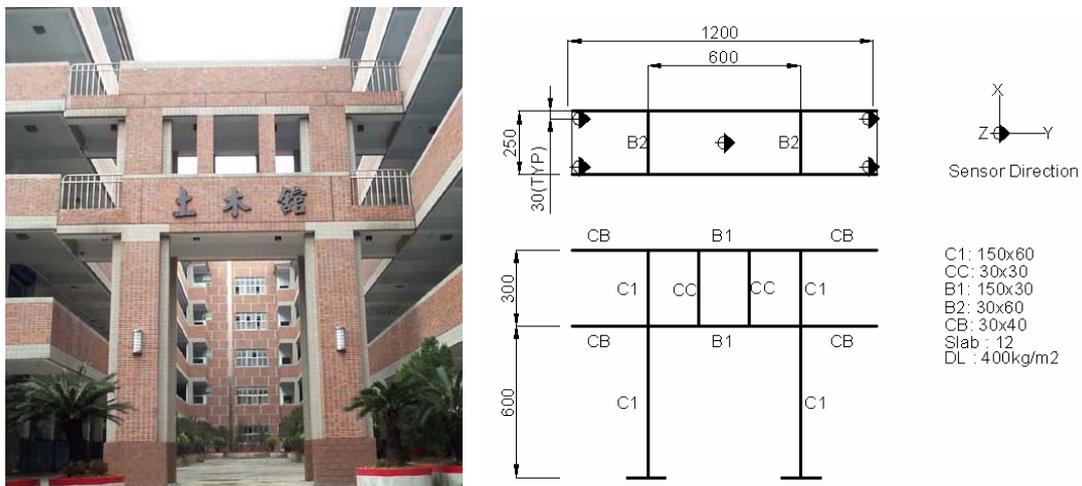


圖 1 土木館連絡空橋現況、結構尺寸與測點規劃

## 二、量測儀器

使用瑞士 Walesch 公司所產製之型號為 MST-103VSE15D 三軸速度計，如圖 2 所示。其工作頻率範圍：1~315Hz，俱高靈敏度、可變化量測範圍及內建放大器之特性；三軸速度計設定量測範圍 10 mm/s 及靈敏度 1.5 V/mm/s。[6]



圖 2 MST-103VSE15D 三軸速度計

### 三、訊號資料擷取系統：

採用 imc C1 多功能 8 頻道資料擷取器，量測每頻道取樣頻率為 100Hz，各頻道取樣時間為 2 分鐘，每個測點同時量測三個方向振動量，如圖 3 所示。[7]

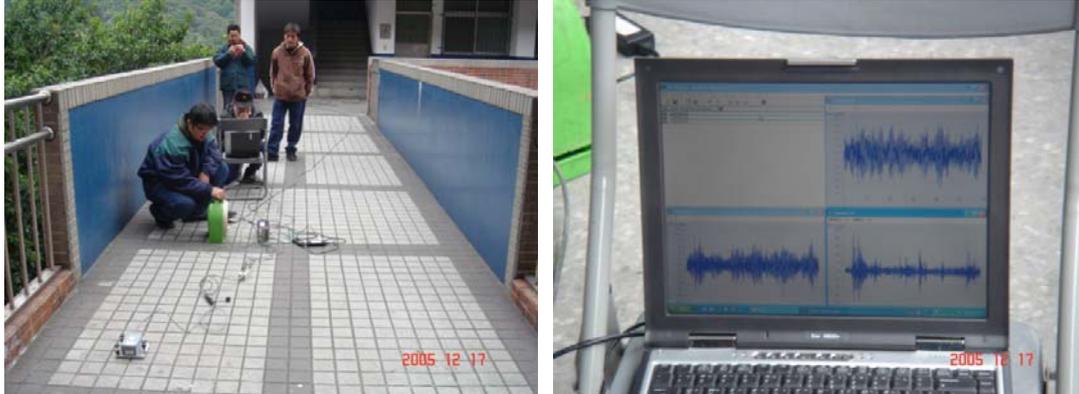


圖 3 訊號資料擷取操作過程

### 四、資料處理與分析方式：

(1) 使用 imc FAMOS 程式直接將所有訊號擷取資料進行後續處理，包括：

FFT：將時間域之資料轉換成頻譜資料

數位濾波：將低於 0.1Hz 及高於 20Hz 之雜波予以排除。

(2) 將各測點及各方向之 FFT 資料（共 30 筆）進行統計分析，包括：

- a、計算單一頻譜資料的最大速度值
- b、選取單一頻譜資料中大於最大速度值 30% 以上之尖峰值
- c、求出上二項速度值所對應之振動頻率值
- d、將 30 筆頻譜資料之振動頻率值統計其出現次數
- e、次數愈多者即為結構物可能基本振動頻率

## 肆、有限元素分析

### 一、有限元素分析方式：

利用有限元素法將連絡空橋結構進行數值分析以便與量測結果相互比對，相關結構尺寸參考圖 1，使用 CSI SAP2000 有限元素程式分析，梁及柱構件以 Frame Element 模擬，版則使用 Plate Element 模擬外加 400kg/m<sup>2</sup> 之自重，如圖 4 所示。

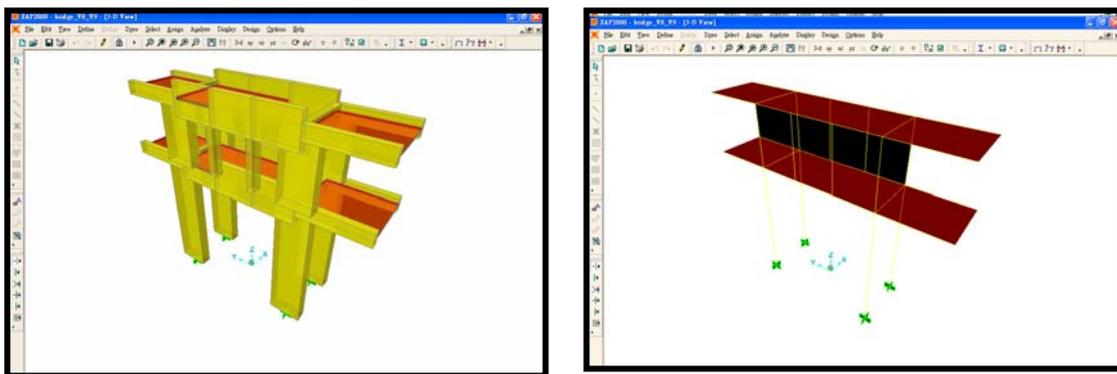


圖 4 SAP2000 空橋結構分析模擬圖

二、有限元素分析結果：

空橋結構基本振態計算採用動力分析(Ritz vector)計算初始 12 個基本振動週期，詳表 1。

表 1 空橋結構基本振動週期

振態	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
週期(sec)	0.513	0.387	0.208	0.186	0.186	0.167	0.107	0.100	0.098	0.091	0.041	0.034
頻率(Hz)	1.948	2.585	4.803	5.371	5.391	5.984	9.355	10.000	10.204	11.038	24.390	29.412

初始 4 個基本基本振態模型，如圖 5 所示。

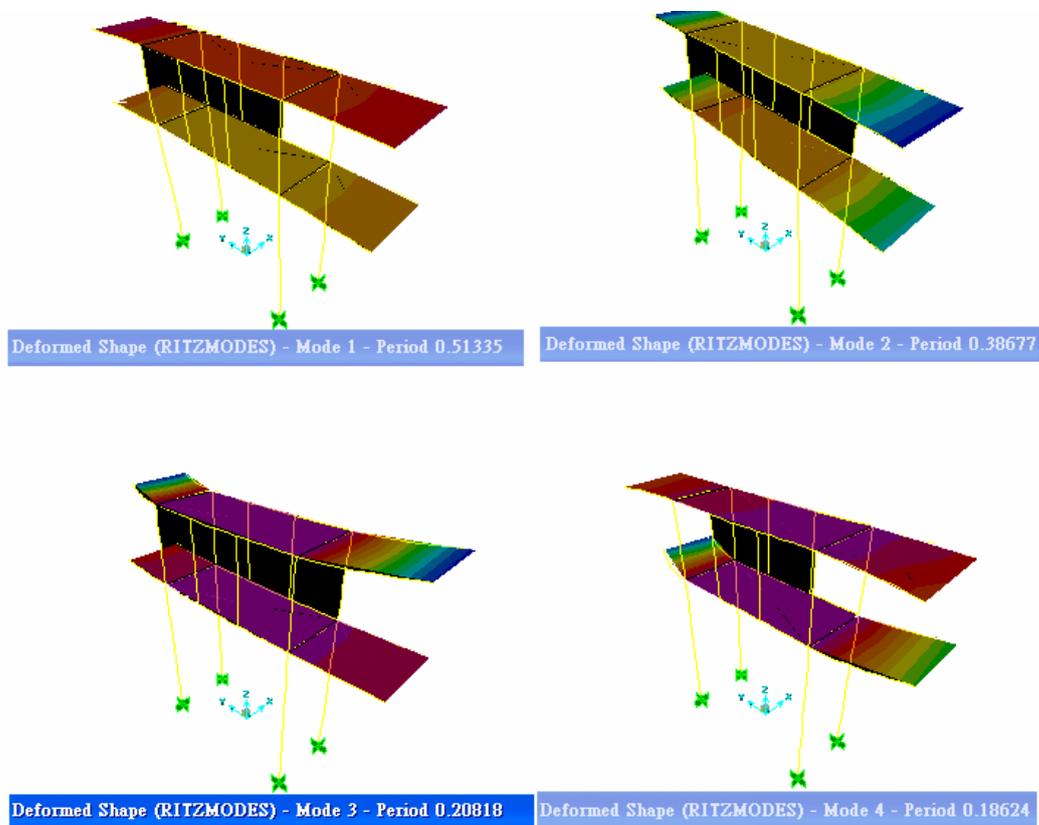


圖 5 空橋結構初始 4 個基本振態模型

## 伍、微振量測結果分析與比較

### 一、微振量測結果統計

測點所量測微振的振譜歷時資料，經快速傅立葉轉換(FFT)及數位濾波處理之頻率域頻譜，可用來判斷結構物的自然振動頻率，如圖 6 所示。

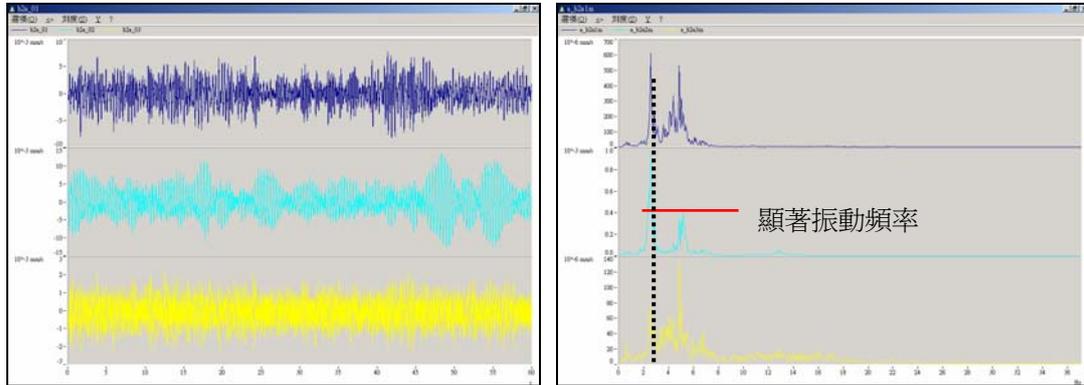


圖 8 振譜歷時資料(左)與頻譜資料(右)之比較

在頻譜圖中每一個波峰位置代表結構物產生較大的振動響應，此時所對應之振動頻率稱為顯著振動頻率，其可能是結構物的自然振動頻率亦或外力振動源(如：風、車輛、設備運轉)作用頻率；需要進一步篩選並以統計方法決定結構物的自然振動頻率，此包括：

- (1) 選取貢獻度較大之波峰值，取最大值 30% 以上，並記錄其對應之顯著頻率
- (2) 將 30 組頻譜資料以統計方式，列出顯著頻率出現次數，如圖 7 所示。
- (3) 依據顯著頻率出現次數排序，出現次數愈高者愈可能是結構物的自然振動頻率，詳表 2

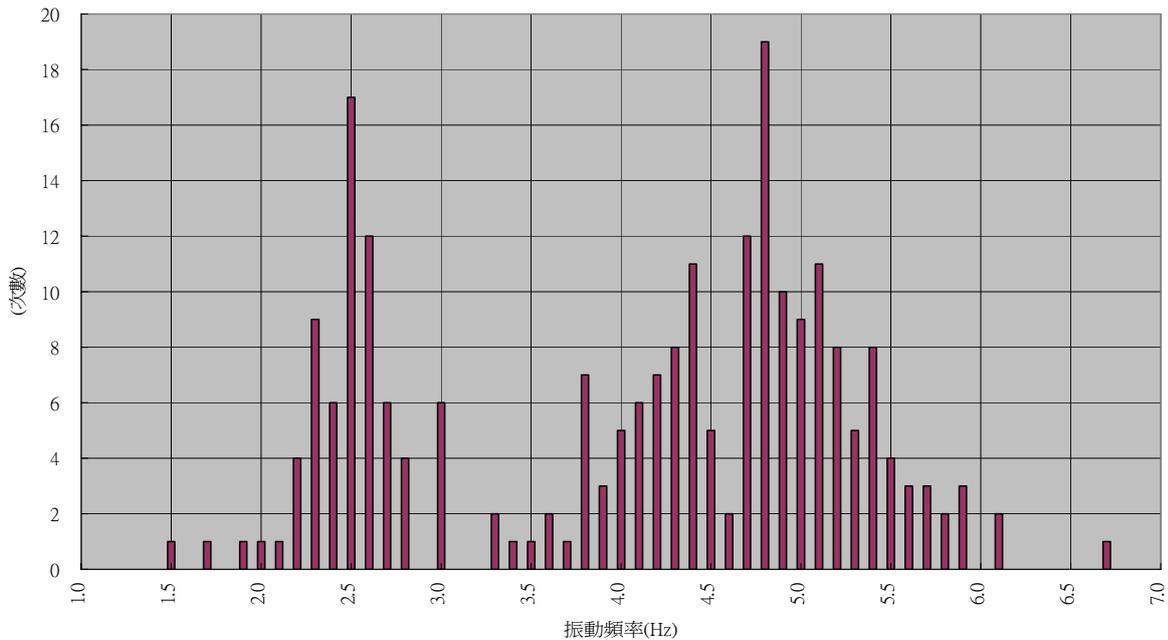


圖 7 顯著頻率出現次數統計圖

表 2 量測顯著頻率出現次數排序

頻率 (Hz)	4.8	2.5	2.6	4.7	4.4	5.1	4.9	2.3	5	4.3	5.2	5.4
出現次數	19	17	12	12	11	11	10	9	9	8	8	8

## 二、數值分析比較

將表 1 數值分析與表 2 微振量測結果比較，歸納如下：

1. 結構物受地震作用所產生之振動行為，屬於超低頻振動(<10Hz)，在數值分析得到基本振動頻率愈低值，愈有共振放大可能性。
2. 微振量測結構物的自然振動頻率為：2.3Hz, 2.5~2.6Hz, 4.3~4.4Hz, 4.8Hz, 5~5.1Hz 及 5.2Hz，此與數值分析中振態 2,3,4,5 結果相近。
3. 由於使用三軸速度型振動計無法接收加速度微振量，此可能造成數值分析振態 1(1.984Hz) 未能反應。
4. 在數值分析假設柱底為固接，實際使用聯合基礎以及土壤勁度將降低柱底剛性，振態 1 之頻率可能大於 2Hz。
5. 微振量測之可讀性及信賴度，與振動計選用、觀測數量及訊號處理設備之操作熟悉度有關。

## 陸、結論

微振量測方式利用高靈敏度的振動計，觀察風力、交通、設備運轉等環境振動對結構物所產生反應，此可以應用在識別建築物、橋梁及地盤基本振動週期外；亦可進一步應用於結構健康檢查、震後受損結構評估、結構補強效果評估等等，其快速且非破壞性檢測特性，值得推廣。於此，特別感謝 93 級二技部黃哲煒、陳盈達、郭彥廷、李洋銘及簡偉庭等同學協助量測工作。

## 柒、參考文獻

1. 李維森、吳俊岳，「結構基本動態試驗簡介」，  
<http://www.cv.ncu.edu.tw/Civil/cber/BrgEng/Inspect/Ambient/ambient.html>
2. 呂良正，「微振量測應用」，第三屆營建產業永續發展研討會，中華民國營建工程學會 P101~120，2005 年 11 月。
3. 王仲宇，「橋梁結構之檢測、監測與評定作業」，交通部運輸研究所『建立台灣地區橋梁管理系統』研究案，民國 90 年 3 月。
4. Beckwith T.G, Marangoni R.D, 「Mechanical Measurement」, Addison-Wesly Publishing Co, 1990
5. 蔡國隆、王光賢、涂聰賢，「聲學原理與造音量測控制」，全華科技，2005 年 4 月。
6. 三軸速度計規格，<http://www.walesch.ch/>
7. 訊號資料擷取系統，<http://www.imc-berlin.de/en/messtechnik/>