

# 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與 風洞實驗之比較探討

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 95 年 12 月



# 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與 風洞實驗之比較探討

研究人員：曹源暉

陳柏端

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 94 年 12 月



## 目 次

表 次 .....	III
圖 次 .....	V
摘 要 .....	VII
第一章 緒 論 .....	1
第一節 研究緣起與背景 .....	1
第二節 研究內容與方法 .....	2
第二章 實場量測與風洞實驗規劃 .....	5
第一節 文獻回顧 .....	5
第二節 資料擷取與處理 .....	8
第三節 實場量測設備與規劃 .....	13
第四節 風洞實驗設備與規劃 .....	17
第三章 實場量測及風洞實驗數據分析與探討 .....	25
第一節 數據採樣 .....	25
第二節 風速歷時之定常性評估 .....	29
第三節 風場特性與橋樑振動反應分析 .....	34
第四節 風洞實驗數據分析與比較探討 .....	45
第四章 結論與建議 .....	59
第一節 結論 .....	59
第二節 建議 .....	61
附錄一 期中審查會議紀錄 .....	63
附錄二 期末審查會議紀錄 .....	65
參考書目 .....	67

# 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

## 表 次

表 2-1 高屏溪斜張橋風洞實驗結果之比較 .....	8
表 2-2 測試區性能規格與用途 .....	19
表 3-1 實場量測頻道配置與取樣速率 .....	25
表 3-2 風洞實驗量測頻道配置與取樣速率 .....	28
表 3-3 Percentage Points of Run Distribution .....	31
表 3-4 風速歷時紀錄定常性檢驗結果 .....	33
表 3-5 風速頻譜回歸分析結果 .....	39
表 3-6 高屏溪斜張橋主樑振態頻率比較表 .....	45
表 3-7 全橋模型實驗之縮尺參數表 .....	47
表 3-8 全橋模型與原型橋樑振動頻率比較表 .....	47
表 3-9 風扇轉數與流場風速特性對應表 .....	49
表 3-10 橋樑受風反應紀錄分析比對結果 .....	57

# 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討



## 圖 次

圖 1-1 研究方法示意圖 .....	3
圖 1-2 計畫流程圖 .....	3
圖 2-1 TTU 風工程實驗場 .....	7
圖 2-2 頻譜函數之 aliasing 現象 .....	10
圖 2-3 隨機數據分析流程與項目 .....	12
圖 2-4 高屏溪斜張橋全貌 .....	14
圖 2-5 高屏溪斜張橋鋼纜及箱型橋樑結構 .....	14
圖 2-6 實場量測儀器設備 .....	15
圖 2-7 量測儀器設置位置 .....	16
圖 2-8 量測儀器配置圖 .....	16
圖 2-9 儀器佈設及操作情形 .....	17
圖 2-10 本所風洞實驗館外觀 .....	18
圖 2-11 風洞構造立面圖 .....	19
圖 2-12 高屏溪斜張橋模型斷面 .....	20
圖 2-13 高屏溪斜張橋模型 .....	20
圖 2-14 風洞實驗量測儀器 .....	22
圖 2-15 風洞實驗量測位置 .....	23
圖 2-16 加速度規佈設 .....	23
圖 2-17 風洞實驗情形 .....	23
圖 2-18 風洞實驗資料擷取畫面 .....	24
圖 3-1 實場量測資料擷取控制程序 .....	26
圖 3-2 風洞實驗資料擷取控制程序 .....	27

圖 3-3	風速歷時紀錄定常性檢驗例 .....	32
圖 3-4	風場分析程序圖例 .....	34
圖 3-5	風速歷時紀錄(第 30~40 分鐘) .....	37
圖 3-6	風向歷時紀錄(第 30~40 分鐘) .....	38
圖 3-7	風速頻譜(第 30~40 分鐘) .....	39
圖 3-8	橋樑振動分析程序圖例 .....	42
圖 3-9	橋樑振動速度反應(加速度積分) .....	43
圖 3-10	橋樑振動反應歷時(第 30~40 分鐘) .....	44
圖 3-11	橋樑振動反應頻譜圖(第 35~40 分鐘) .....	45
圖 3-12	全橋模型敲擊試驗反應譜 .....	49
圖 3-13	全橋模型振動反應及風速歷時(第 8 階段) .....	50
圖 3-14	橋樑位移振動平均值(位置 1-主跨 1/3 處) .....	52
圖 3-15	橋樑位移擾動均方根值(位置 1-主跨 1/3 處) .....	53
圖 3-16	橋樑位移振動平均值(位置 2-主跨 1/2 處) .....	54
圖 3-17	橋樑位移擾動均方根值(位置 2-主跨 1/2 處) .....	55
圖 3-18	橋樑加速度振動平均值(位置 1-主跨 1/3 處) .....	56
圖 3-19	橋樑加速度擾動均方根值(位置 1-主跨 1/3 處) ..	56

## 摘 要

關鍵詞：實場量測、風洞實驗、橋樑風工程

### 一、研究緣起

風工程領域的各項研究，皆在解決複雜邊界層風場下之工程問題，無論探討標的為建築構造物、橋梁或環境風場變化，採用之研究方法不外乎理論分析、數值模擬或風洞試驗，尤其是風洞實驗已逐步擴展其應用範圍，例如大氣邊界層流場研究、結構物受風反應研究、空氣污染擴散研究等等。然而，各種研究方法所獲致結果之可靠度與準確性仍需藉由實場監測做進一步比對與驗證。一般實場監測所需之人力與設備投資較高，且大自然環境之不確定因素亦難以掌握，因此，數據採集較為困難且易受環境干擾，如何判別採得數據之有效性與正確性便顯得相當重要。儘管如此，國際間學者專家投入實場監測之研究工作仍有愈來愈多之趨勢，尤其是長跨度橋樑之監測，包括丹麥 Great Belt East 懸索橋、美國 Sunshine Skyway Bridge 斜張橋、香港青馬大橋等等，而國內投入長跨度橋樑之受風反應監測則尚屬罕見，更遑論與風洞實驗結果進行比對驗證。因此，本計畫嘗試以國內長跨度斜張橋為對象，進行該橋樑受風反應之實場量測，量測結果再與風洞實驗進行比對，藉此初步瞭解構造物風洞實驗與實際反應之異同處，並期望對於未來風洞實驗技術與實場量測方法能有所助益。

### 二、研究方法及過程

本計畫以高屏溪斜張橋為探討對象，利用本所現有之儀器設備，進行該橋梁實際受風反應與風洞實驗結果之比較研究。實場量測部分，係於該斜張橋佈設加速度計及風速計等量測儀器，以資料擷取器

配合電腦設備，同步擷取並儲存風場風速、風向及橋樑振動加速度紀錄，其中風速資料將可供做風洞實驗風場模擬之參據。而在風洞實驗部分，則使用本所現有之高屏溪斜張橋全橋模型，經適當之架設與調整後，以本所風洞設備進行實驗，風洞流場採用平滑流場，測試風速則依據實場風速資料，經模擬相似律轉換後決定之，實驗結果將嘗試與該斜張橋實場量測而得之受風反應紀錄進行比對，初步探究風洞實驗與實場反應之密合程度，藉以檢討風場條件、量測技術、實驗方法、模型製作等因素之影響。同時，藉此計畫之執行得以熟悉實場量測方法、風洞實驗技術、以及相關之數據分析程序，逐步建立本所在風工程領域之實驗研究與檢測能力。

### 三、重要發現

#### (一) 實場量測部分

本計畫在實場量測部分，已初步建立本所在結構物振動反應之量測技術與能力，同時研擬出一套數據擷取與分析之基本程序，對於未來相關之現地檢測服務與研究，在時間與效益上，將有所幫助。另外，若後續從事類似之實場量測，由於陣風效應不過數秒鐘，在風速量測方面，應採用更大之取樣速率，以使在短歷時間之統計分析方面能有足夠之樣本數，與風洞實驗之比較探討亦較為容易。

#### (二) 風洞實驗部分

本計畫藉由實測之風場資訊，以做為與全橋模型風洞實驗結果之比對基礎，然而，實測所得之風場平均風速過小，約僅 3.5 m/s 而已，陣風效應亦不過數秒鐘，若以最大風速轉換至風洞流場流速，亦僅約 0.8m/s，因此採用較大流場流速，分階段量測橋樑振動反應，藉由回歸分析，預測低風速下之橋樑振動反應。經與實場量測數據比對結果，

在擾動均方根值方面，二者之差異約在 20% 以內，其中扭轉向差異更在 10% 以內，此初步比對結果顯示風洞實驗在良好的設計與控制下，應能可靠的預測與評估構造物受風反應行為。另外，本計畫亦初步建立本所在風洞實驗之量測技術與能力，研擬出一套數據擷取與分析之基本程序，對於未來相關之風洞檢測服務與實驗研究，在時間與效益上，將有所助益。

#### 四、主要建議事項

依據本計畫執行結果，針對風洞實驗與構造物實場監測之後續發展，分項建議如下。

##### 立即可行之建議

主辦機關：公共工程委員會、交通部、內政部等

協辦機關：內政部建築研究所

建築物耐風設計規範已頒布施行，規範中針對特殊構造物要求應進行風洞實驗，過去國內特殊構造物多委託外國實驗室執行風洞試驗，經由本計畫使用本所風洞設備進行全橋模型風洞實驗，加上過去在建築模型風洞實驗研究之成果，顯示國內已有足夠能力執行各類風洞實驗。因此，在構造物耐風設計或防風規劃上，除落實法規規定外，建議能在國內執行風洞實驗，有效提升工程與學術水準。

##### 中長期之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：相關學術團體

風洞實驗已成為解決大氣邊界層風工程問題之主要手法，實驗技術與方法為實驗成敗之主要關鍵，而實驗條件與假設亦為結果可靠性之重要因素，因此，為避免過多之不確定性存在，如何訂定一套完整之實驗規範，應是本所與學術界在未來可進一步探討之課題。

### 中長期之建議

主辦機關：公共工程委員會、交通部、內政部等

協辦機關：內政部建築研究所

國內特殊構造物日益增多，不論是超高層建築、巨蛋類長跨度屋頂構造、懸索式長跨度橋樑等等，皆為風力敏感構造物，為了確保構造物在生命週期內之安全性與使用舒適性，建議應逐步建立長期監測系統，除可做為構造物之健康檢測紀錄外，亦可供做相關研究使用，對提升工程技術與學術水準應有實質助益。

## ABSTRACT

**Keyword: field experiment, wind tunnel experiment,  
wind engineering on bridge**

### 1) OVERVIEW

The main goal of the research in wind engineering field is to study and solve complicated boundary layer problems. In analyzing wind effects on building structures, bridges or turbulent wind fields in urban area, the approaching methods used for most researchers are theoretical analyses, numerical simulations, and wind tunnel experiments. Recently, the application of wind tunnel experiments have gradually expanded to the area of the research for atmosphere boundary layers, building structures under wind loads, and air pollution diffusion problems. However, the reliability and accuracy of the results need to be further compared and verified with those from the field experiments, which require higher cost in manpower and experiment equipments, and the uncertainty factors caused by the natural environment are not fully understood. The process for collecting data is difficult and the results might not be free from disturbances, therefore, the judgment for the accuracy and effectiveness of the experiment data becomes important.

Even so, more and more researchers nation wide devote themselves in the field experiment, especially in the investigation of long span bridges, including Great Belt East in Denmark, Sunshine Skyway Bridge cable-stayed bridge in the US, and Tsing-Ma bridge in Hong Kong. However, the number of the research regarding the reactions of long span bridges under wind loads in Taiwan is few, not to mention the comparison of the results with those from wind tunnel experiment. This project studied the reaction of the long span cable-stayed bridge under wind loads in the natural field, and the results were then compared with those from the wind tunnel experiment to realize the difference of the

responses between the real bridge and the bridge model in the hope that it could benefit the experiment techniques for wind tunnel experiment and the measurement method for the field experiment in the future.

## **2) METHOD**

This project investigated the Kao-Ping River Bridge, a cable-stayed bridge, utilizing the experiment equipments of the ABRI to analyze and compare the results due to the wind loads with those from wind tunnel experiment. For the field experiment, accelerometers and anemometers were setup on the bridge. The data acquisition system and computer simultaneously collected the data of wind speed, angle, and vibration of the bridge (acceleration). The wind speed was then used as the reference speed in wind tunnel experiment.

For the wind tunnel experiment, after setup and adjusted the first mode frequency, the full bridge model of the Kao-Ping River Bridge was tested with smooth flow in the wind tunnel of the ABRI. The testing wind speed was based on the wind speed measured at the field experiment and then converted through the similarity formula. The results were compared with those from the field experiment in order to study the major factors such as the condition of the wind field, measure technique, experiment method, and the design of bridge model. Furthermore, through this project, the ABRI could also learn more about the methods of the field experiment, the techniques of the wind tunnel experiment, and the process of data analyses, and create step by step for the ABRI the ability of the research and experiment in the wind engineering field.

## **3) SIGNIFICANT RESULTS**

### **A) Field experiments**

The preliminary step for the technique and capability in measuring the vibration of structures of the field experiments for the ABRI has



constructed. The fundamental process for data acquisition and analysis has also been tested and performed. This whole system was effective and time saving and would be of great help to the future research and the inspection service on site.

In order to have sufficient data for statistic analyses within a short period of time, and to be easy in making the comparison with the wind tunnel experiments, it should be noticed that in measuring wind speeds, a higher sampling rate is recommended because windflaws lasted only in seconds, for the field experiment hereafter.

### **B) Wind tunnel experiments**

The wind speed measured in the field experiment was regarded as the referenced speed for full-bridge model in the wind tunnel experiment. However, the average wind speed was very low, down to 3.5 m/s, and most of the wind flows lasted not more than a few seconds. If transformed by the similarity formula, the number of peak wind speed was only equal to 0.8 m/s. Therefore, in the wind tunnel experiment, a higher wind speed was performed, and during the test, small increments of wind speed was used to examine the vibration response of the full-bridge model. Regression analysis was then applied to estimate the vibration response in low speed. The results showed that the difference was within 20% for the mean square root of the disturbance, and 10% for rotation. This concludes that under the proper design and control, the results of the wind tunnel experiment is reliable in estimating and assessing the responses of the structures subjected to wind loads.

## **4) RECOMMENDATIONS**

The conclusions and recommendations for the wind tunnel experiment and field experiment are listed as follows:

Direct feasible recommendation

Auspices: Public Construction Commission, Ministry of Transportation

and Communications, Ministry of the Interior

Collaborator: the Architecture and Building Research Institute

The regulation for wind design structure has been issued. It requires that the structures with special designs need to perform wind tunnel experiments. However, in the past, most of the experiment projects of special design structures were outsourced to the labs abroad. With the full-scale bridge model testing in the wind tunnel of the ABRI, together with the experiment experiences of several structure models, it shows that Taiwan should have the confidence and the ability to challenge and perform large scale and different kinds of wind tunnel experiments. Therefore, to promot the engineering and research levels, in the structures design for wind loads in the future, not only the design regulation should be followed, but also performing the wind tunnel experiment in Taiwan be recommended.

Mid term recommendation

Auspices: the Architecture and Building Research Institute

Collaborator: academic and research organizations

Wind tunnel experiment has become the major way in solving the atmosphere boundary layer problems. The technology and methodology of the experiment are the key factor to succeed, and the condition and assumption of the experiment are also important elements for the results to be reliable. Therefore, to avoid unnecessary uncertainties in the process of the experiment, a compact set of the standard is needed, and it is one of the challenging assignments for the ABRI and other academic and research organizations in the future.

Long term recommendation

Auspices: Public Construction Commission, Ministry of Transportation  
and Communications, Ministry of the Interior

Collaborator: the Architecture and Building Research Institute

The number of special designed structures is increasing in Taiwan,

such as high-rise buildings, gymnasiums with long span dome, and long span cable-stayed bridges, which are all very sensitive to wind loads. To be certain for the safety and comfort of these structures during their life cycles, it is recommended that long term monitor systems are necessary to be installed in these structures. The data recorded by these systems could be used to check the healthy conditions of the structures, and to provide to other academic organizations for relating research for the purpose in promoting the engineering technology and research level in the future.

# 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

## 第一章 緒 論

### 第一節 研究緣起與背景

進行風工程之空氣動力等相關研究時，除理論分析與數值模擬外，風洞實驗佔有極重要的角色，早期風洞實驗主要應用在航空工程，然而，隨著科技技術的發展，低速風洞實驗已逐步應用在非航空工程之研究與發展，例如大氣邊界層流場研究、結構物受風反應研究、都市風場環境研究、空氣污染擴散現象等，尤其近一、二十年來，隨著高層建築與長跨距橋梁的興起，風洞實驗的重要性正與日俱增，而國內有關風洞實驗技術在工程領域之研發與應用上，正處於起步、成長階段，亟須迅速累積經驗，發展相關實驗技術，以提升國際地位。雖然，過去國內幾件大型特殊工程案例之風洞實驗，包括台北 101 大樓、高屏溪斜張橋等，皆委由國外風洞實驗室進行測試工作，國內學研界未能藉此增進相關實驗與工程技術，著實可惜；然而，在國內風洞實驗設備日益完善下，未來除可協助特殊工程進行風洞實驗外，在研究發展之考量上，亦可針對現有構造物進行相關風洞實驗研究，並與過去國外實驗結果進行比對，探討結果之差異因素，進而建立更完整之風洞實驗技術。

由於風工程領域的各項研究，皆在解決複雜邊界層風場下之工程問題，無論探討標的為建築構造物、橋梁或環境風場變化，採用之研究方法是理論分析、數值模擬或風洞試驗，其結果之可靠度與準確性仍需藉由實場監測做進一步比對與驗證。然而，一般實場監測所需之人力與設備資源較高，而大自然環境之不確定因素亦難以掌握，因此，數據採集較為困難且易受環境干擾，如何判別採得數據之有效性與正

確性便顯得相當重要。儘管如此，國際間學者專家投入實場監測之研究工作仍有愈來愈多之趨勢，尤其是長跨度橋樑之監測，包括丹麥 Great Belt East 懸索橋、美國 Sunshine Skyway Bridge 斜張橋、香港青馬大橋等等。國內針對一般橋樑之動力特性檢測與識別已有些許經驗，但對於長跨度橋樑之受風反應監測則尚屬罕見，更遑論與風洞實驗結果進行比對驗證。因此，本計畫嘗試以國內長跨度斜張橋為對象，進行該橋樑受風反應之實場量測，量測結果再與風洞實驗進行比對，藉此初步瞭解構造物風洞實驗與實際反應之異同處，對於未來風洞實驗技術與實場量測方法應有所助益。

## 第二節 研究內容與方法

本所與淡江大學風工程中心曾於 94 年度合作執行「風洞實驗技術於土木建築構造物之應用與驗證計畫」，選取高屏溪斜張橋進行全橋模型風洞實驗研究，擬藉該計畫建立完整的橋樑風洞實驗技術。為瞭解橋樑風洞實驗技術之可靠程度，本計畫同樣以高屏溪斜張橋為探討對象，利用本所現有之儀器設備，進行該橋樑實際受風反應與風洞實驗結果之比較研究，同時熟悉實場量測方法、風洞實驗技術、以及相關之數據分析程序，以逐步建立本所在風工程領域之實驗研究與檢測能力。

實場量測部分，擬於該斜張橋佈設加速度計及風速計等量測儀器，以資料擷取器配合電腦設備，同步擷取並儲存風場風速、風向及橋樑振動加速度紀錄，其中風速資料將可供做風洞實驗風場模擬之參據。而風洞實驗部分，則使用本所現有之高屏溪斜張橋全橋模型，經適當之架設與調整後，以本所風洞設備進行實驗，風洞流場採用平滑流場，測試風速則依據實場風速資料，經模擬相似律轉換後決定之，

實驗結果將與該斜張橋實場量測而得之受風反應紀錄進行比對，初步探究風洞實驗與實場反應之密合程度，藉以檢討風場條件、量測技術、實驗方法、模型製作等因素之影響。本計畫所採行之研究方法如圖 1-1 之示意圖所示，計畫流程則如圖 1-2。

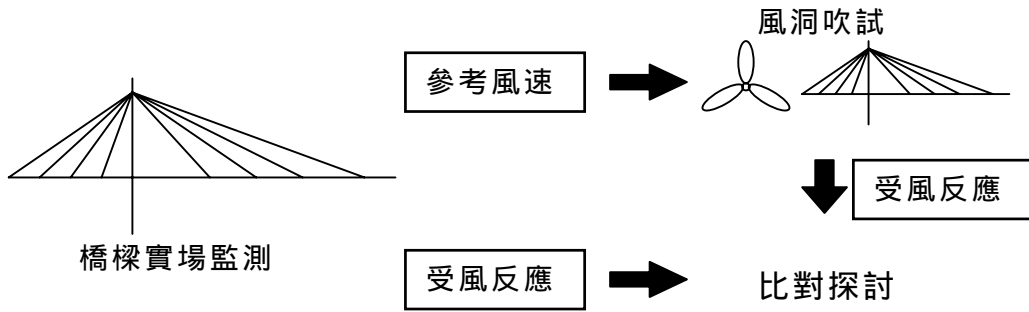


圖 1-1 研究方法示意圖

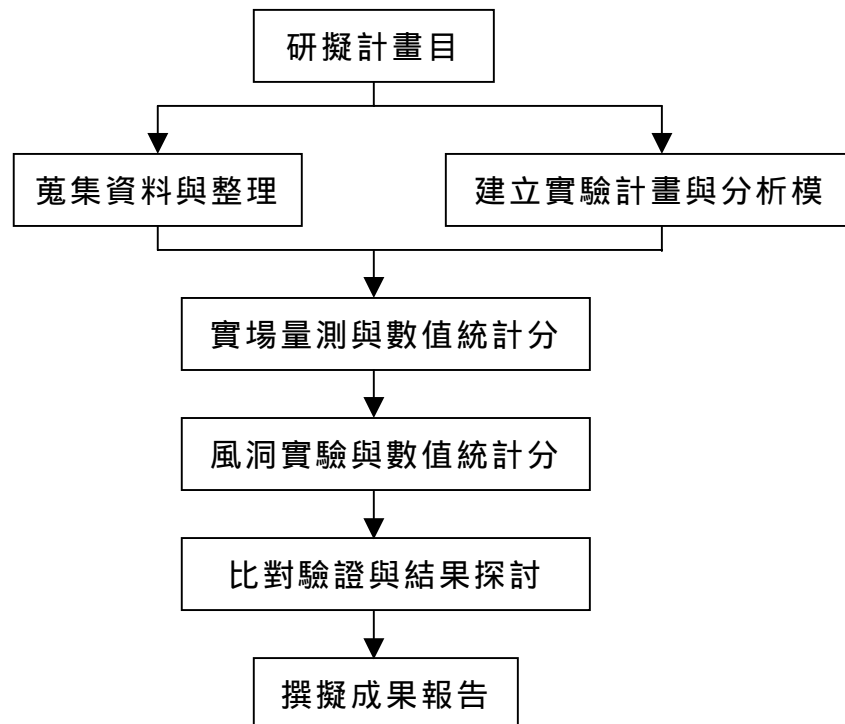


圖 1-2 計畫流程圖

# 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討



## 第二章 實場量測與風洞實驗規劃

### 第一節 文獻回顧

在風工程領域之研究與應用上，除理論分析外，風洞實驗佔有極重要之角色，近年來，隨著電腦科技之快速發展，數值模擬技術亦有顯著的進步；另外，為瞭解構造物實際受風反應現象，針對現有特殊構造物之監測計畫亦日益增多，這類實場監測或量測計畫之目的，不外乎：

- (一) 構造物系統識別 - 利用微振量測設備，實際量測構造物(包括建築物與橋梁)在環境外力作用下之振動反應，並透過系統識別方法，檢測分析實際構造物之振動特性，包括自然振動頻率與阻尼等，除得以與設計資料進行比對外，亦可建立該構造物結構特性之資料庫，作為未來應用之參考。
- (二) 橋梁之安全監測 - 由於橋梁監測數據可作為結構分析模式之驗證、設計假設與設計方法之回饋訊息、橋梁安全營運與維護之評估及管理、以及研究構造物與環境間之未知與不確定因素，有愈來愈多的大型橋梁設置長期監控儀器設備，包括丹麥 Great Belt East 懸索橋、美國 Sunshine Skyway Bridge 斜張橋、香港青馬大橋等，藉以監控橋梁在營運階段時，受車輛與風力、地震力作用下之振動、撓度等反應。此類監測系統之共同特徵為：
  - (1) 透過各種量測儀器設備獲取結構物受外力作用下之行為紀錄；
  - (2) 除構造物本體之行為監測外，亦著重環境條件之監測與紀錄分析，藉此開發即時性結構安全評估技術；
  - (3) 經由長期之監測，建立構造物生命週期內之健檢紀錄；

(4) 透過網際網路傳輸，可將此類資料庫與他人共享，促進風工程之研究發展。

(三) 驗證風洞實驗技術 - 由於風洞實驗係以模型縮尺進行模擬實驗，為使實驗結果足以預測原形構造或環境之真實狀況，需符合基本之測試條件，包括：

- (1) 針對構造物、週遭地況及流場等，配合風洞尺寸，考量適當之阻塞比(blockage ratio)，選擇適當的模型縮尺，並依實驗類別(項目)，合宜的遵守相似律準則；
- (2) 適當模擬構造物位址所在之邊界層風場特性，包括：逼近流之平均風速剖面及邊界層高度、逼近流在不同高度之擾動風速(紊流強度)分佈、逼近流擾動風速之頻率分佈特性、標的物與鄰近環境之近場模擬等。
- (3) 進行動態反應實驗，則結構模型尚需考量其質量分布、勁度、阻尼等特性之相似率，例如慣性力比、彈性力比、阻尼比、雷諾數等。
- (4) 量測儀器之反應特性須能滿足量測項目之需求。

由於風洞實驗尚無一定之實驗標準，為瞭解風洞實驗結果之可靠性與正確性，除儘量滿足上述測試條件、降低可能發生之誤差外，實場量測紀錄之比對，亦可提供風洞實驗技術與方法之驗證。以美國德州技術大學(Texas Tech University, TTU)為例，於1980年代建造一座實尺寸之量測實驗場(圖 2-1)，包括測風速之鐵塔、可旋轉之實驗屋、資料擷取室及各類量測儀器設備等，長期收集風場相關資訊，此類資訊亦可作為風洞實驗方法之驗證。



(a) TTU 風工程實驗場



(b) 量測鐵塔及量測儀器

### 圖 2-1 TTU 風工程實驗場

(照片來源：<http://www.wind.ttu.edu>)

本所於 94 年執行之研究計畫「風洞實驗技術於土木建築構造物之應用與驗證計畫 - 橋梁風洞實驗」，即基於國內在大型特殊橋樑之風洞實驗技術尚未臻完善與成熟，雖然在橋樑斷面模型試驗已累積一些經驗，然而對於大跨度懸索支撐橋樑的全橋模型試驗則沒有機會嘗試，因此藉由行政院國家科學技術發展基金之補助，利用本所新建完成之大型邊界層風洞，得以執行高屏溪斜張橋之全橋風洞實驗。該計畫之全橋模型試驗分別在平滑流及邊界紊流場進行實驗量測，主要進行顫振、抖振等橋梁動態穩定分析，全橋模型風洞實驗結果，並與斷面模型試驗、數值模式分析結果、以及丹麥 DMI 過去對該橋樑進行之風洞試驗結果做一比較，結果如表 2-1 所示，由該表中數值之差異程度，可顯示出風洞實驗具有相當程度之技巧(know-how)，各項風洞實驗因素之掌控與判斷，皆會影響實驗結果。

表 2-1 高屏溪斜張橋風洞實驗結果之比較

	丹麥 DMI 風洞實驗		風洞實驗技術於土木建築構造物之應用與驗證計畫 - 橋梁風洞實驗		
	斷面模型	全橋模型	斷面模型	數值分析	全橋模型
顫振臨界風速 (m/s)	95~140	> 83	-	146	> 120
渦流振動發生時之風速(m/s)	10.6 34	12 (平滑流場) 未發生(紊流場)	40 (平滑流場)	-	未發生
抖振 (風速 52m/s)	垂直向 0.144m 扭轉向 0.17°	垂直向 0.186m 扭轉向 0.14°	垂直向 0.216m 扭轉向 0.107°	垂直向 0.165~0.207m 扭轉向 0.054~0.072°	垂直向 0.079m 扭轉向 0.047°

## 第二節 資料擷取與處理

在進行各項量測計畫前，應先釐清資料之處理程序。隨機數據之擷取及處理方式與研究對象之物理現象及研究目的息息相關，一般可分為四個步驟，即數據收集、儲存、檢驗、以及數據分析。本計畫探討長跨度斜張橋之受風反應行為，研究標的為風速與橋樑結構，研究方法包括實場量測及風洞實驗。在大自然產生之強風或颱風，為一能量集中在低頻區域且頻寬分布廣之隨機過程(random process)，風速通常鮮有超過 60m/s(約 17 級風)；而長跨度斜張橋之自然振動頻率亦分佈在低頻區域，雖然橋樑位移振幅在強風吹襲下可能相當大，其加速度振幅一般不至於太大。因此在數據擷取及處理等作業上，即需根據

這些物理現象進行規劃。

### (一) 數據收集與儲存

在數據收集與儲存方面，實場部分主要量測風速及橋樑振動反應，風速僅考量二水平方向來風，垂直向風速不予考慮，因此選用二維超音波風速計，以 RS232 介面直接與電腦連接，橋樑振動則考慮量測橋面板之加速度反應，包括垂直向、扭轉向及拖曳方向，因此一個測站選用三個單軸加速度型傳感器，傳感器將加速度反應訊號以電壓值方式輸出，經線路傳送至電腦儲存前，需經過資料擷取器匯集並將訊號進行類比/數位(A/D)轉換，甚至濾波、加強等前處理，使訊號清晰且盡量摒除雜訊。另外，為能同步擷取並儲存風速風向資料及橋樑振動反應，本計畫採用美國國家儀器公司(National Instruments)發行之 LabView 軟體，進行風速計、加速度傳感器及資料擷取器之整合，傳輸資料以 AISC 格式儲存以供後續數據分析使用。

資料擷取器的主要功能為進行擷取訊號之 A/D 轉換，亦即將類比訊號數位化。由於訊號數位化後，許多雜訊與錯誤訊息將難以被察覺，因此在數位化之前需先確定二項條件，即訊號處理及取樣速率。訊號處理包括訊號加強與雜訊過濾，由於許多微小振幅之訊號強度與環境雜訊強度相當，在訊號由傳感器送出後，隨即經過放大器將訊號加強，以免在線路傳輸時受雜訊影響而失真。另外，許多較精密之資料擷取器內建有濾波器(Filter)，可在訊號進行數位化轉換前，將高頻雜訊濾除。

在取樣速率方面，需事先確立研究對象之頻率響應範圍與特性，依據欲量測之最大頻率值，設定資料擷取器之取樣速率。取樣速率大，固然可獲得較佳之訊號波形，然而大量的數值資料，徒增資料整

理與分析的困擾；而取樣速率過小，則有可能使原有之高、低頻訊號混淆，產生錯誤的訊號波形。由於定義某一頻率之完整週期至少需獲取二點訊號值，因此，假設取樣速率為  $f_s$  (取樣時間間格為  $t_s, f_s = 1/t_s$ )，則最大可辨識頻率為  $f_c = f_s/2$ ，此即所謂的 Nyquist 頻率。另外，值得注意的是，若原始訊號中有大於  $f_c$  之高頻率成分，則該高頻強度將反應在  $0 \sim f_s/2$  頻率範圍內，即所謂的 aliasing 現象，此將與原有低頻部分產生混淆，如圖 2-2 所示。為解決此現象，一般  $f_c$  可採用預期最大響應頻率之 1.5~2 倍，或在取樣之前，以濾波器將  $f_c$  以上之頻率部分濾除。

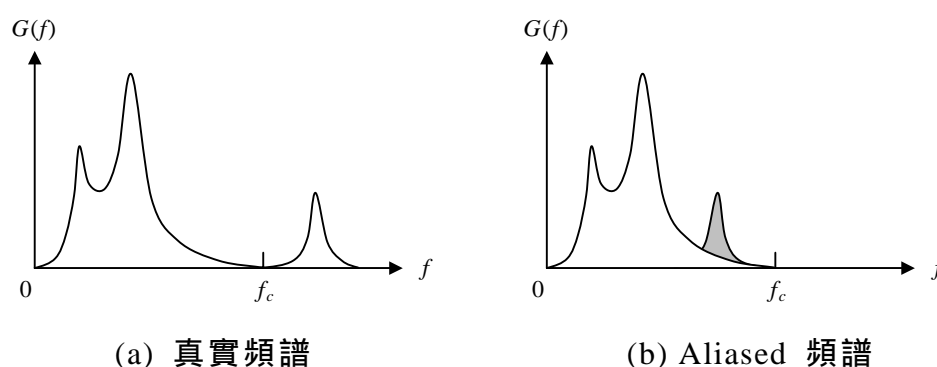


圖 2-2 頻譜函數之 aliasing 現象

## (二) 數據檢驗

隨機數據分析所使用之程序是否正確，與某些基本特性是否存在或隱含在這些數據中有很顯著之影響，其中最主要之基本特性為數據定常性(stationarity)、週期性(periodicity)及正規性(normality)，本計畫將僅檢驗數據之定常性。

一般狀況下，藉由量測所得之隨機數據，常無法依單純之物理現

象逕行假設其定常性，而須經由對隨機數據之時序列進行檢視，或基於某些參數進行統計測試，以評估其是否具定常性。然而，在測試一組樣本紀錄之定常性時，需做下列之基本假設：(1)在任何一筆給定之紀錄中，皆會適當反映出該隨機過程之非定常性特質；(2)相較於該紀錄資料之低頻部份，任何一筆給定之資料應具有相當長之歷時紀錄；(3)任何非定常性特質皆會在其均方值(mean square value)中顯現出時間趨勢。在上述幾項假設之下，隨機過程之定常性得針對單一紀錄  $x(t)$  進行測試，並說明如下：

1. 將給定之樣本歷時紀錄等分為  $N$  組相同長度之區段，各區段歷時紀錄假設為獨立紀錄；
2. 計算每個區段紀錄之均方值(或分別計算其平均值及變異數)，並將這些值依時間順序排列如下：

$$\overline{x_1^2}, \overline{x_2^2}, \overline{x_3^2}, \dots, \overline{x_N^2}$$

3. 測試這些均方值序列是否存有某些潛在的趨勢或變化。

採用上述方法判別數據是否具定常性時，需特別注意分割後區間所含有之數據量不可過小。另外，測試隨機數據之定常性有許多種方式，本計畫採用之非參數法，將於第三章之數據分析時再予以說明。

### (三) 數據分析

分析隨機數據特性之流程可概分為兩大類，分別為分析單一樣本紀錄流程，以及依據單一樣本紀錄之特性，分析一組樣本紀錄流程。若某一隨機過程具有定常性(嚴格的說應為 Ergodic random process)，則僅需分析單一樣本紀錄，即足以代表整個隨機過程特性。本計畫僅針對某事件之單一樣本紀錄進行分析。

一般而言，針對隨機樣本歷時紀錄所進行之分析項目，大體上包括：(1)期望值(expected values)計算，例如算術平均值(mean)、均方值

(mean square)、變異數(variance)、標準偏差(standard deviation)等，為統計分析之基本參數；(2)頻譜密度(power spectral density)函數分析，提供樣本歷時紀錄在頻率域之分佈狀況；(3)自相關(autocorrelation)函數分析，可藉此瞭解隨機變數在樣本歷時紀錄中，不同時間點之間的相關性；以及(4)其他物理特性分析。前三項之統計分析結果，除可供做研究標的物理特性分析之參據外，亦與前述之數據檢驗方法相關，如圖 2-3 所示。另外，在物理特性分析方面，為研究構造物受風反應行為，需分析探討的項目為風特性、構造物之振動特性、以及風與構造物之互制作用。在自然風場特性中，對構造物耐風設計最基本也最重要的首推平均風速分布，其次是風場的紊流特性，包括紊流強度、紊流尺度、紊流頻譜等。就構造物振動特性而言，最基本的應屬自然振動頻率，其次則為振態、阻尼等。由於本計畫旨在探討橋樑受風反應與風洞實驗間之比較，因此就橋樑結構振動特性，將僅著重在基本振動頻率之識別。

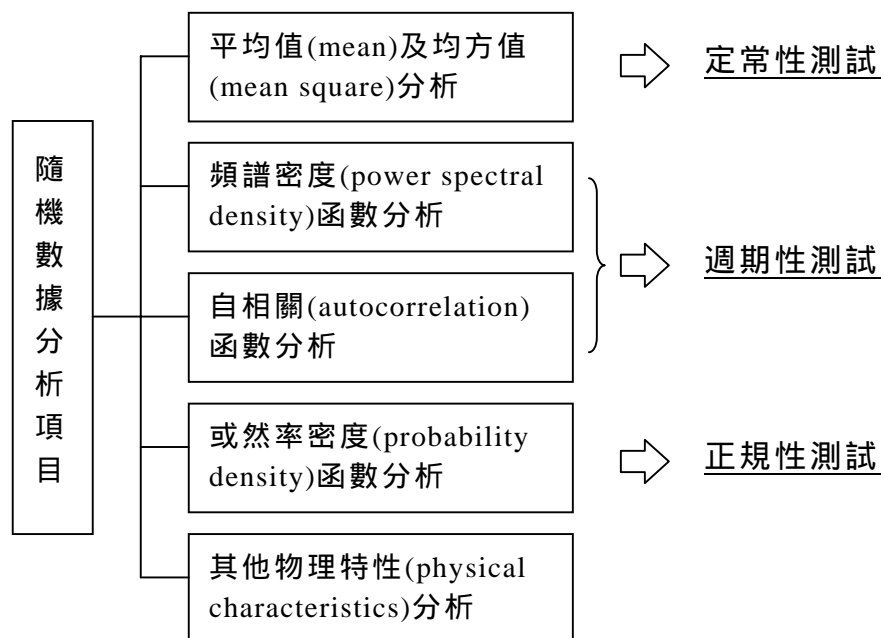


圖 2-3 隨機數據分析流程與項目



### 第三節 實場量測設備與規劃

為了探求風洞實驗結果與橋樑實際受風行為是否一致，本計畫以高屏溪斜張橋之實場量測與全橋模型風洞實驗之結果進行比較，驗證橋樑之基本振動頻率與受風振動反應之差異，以了解全橋模型風洞實驗結果之可靠性，建立本所風洞實驗方法與量測技術之基礎。

橋樑實場量測受限於場地因素，尤其是風速、風向不穩定，過往車流造成的振動，與高速公路現場佈線不易及安全之顧慮，皆有其困難需要克服，因此，實驗之規劃應妥善且設備應力求輕便簡易，以收事半功倍之效。

#### (一) 高屏溪斜張橋樑簡介

高屏溪斜張橋橫跨高屏溪，為南二高主要橋樑之一，全長 510 公尺，其主跨 330 公尺，為全銲接箱型鋼樑，副跨 180 公尺，為預力混凝土箱型樑，橋塔高約 183.5 公尺，如圖 2-4 所示。



## 圖 2-4 高屏溪斜張橋全貌

橋塔兩側各配置 14 組鋼纜，錨定在橋面中央，橋樑斷面結構為箱型梁，寬 34.4 公尺，高 3.2 公尺，如圖 2-5，橋樑以 1.7% 之坡度向東側傾斜。



(a) 鋼纜



(b) 箱型橋樑結構

圖 2-5 高屏溪斜張橋鋼纜及箱型橋樑結構

### (二) 實驗器材與設備

本次量測重點為橋址之風向、風速，以及橋樑振動之加速度反應，由於非屬長期之監測，因此，使用之量測設備及其規格說明如下：

1. 單軸微震加速度計，廠牌 Wilcoxon，型號 731A Seismic Accelerometer，為低頻加速度計，靈敏度為 10.2 V/g，範圍 0.5g、

頻率範圍在 0.1 Hz 至 340 Hz，如圖 2-6(a)。

2. 二維超音波風速計，廠牌為 Gill，型號 Windsonic，如圖 2-6(b)所示，輸出頻率 1 至 4Hz、量測風速範圍 0~60m/s (解析度 0.01m/s、精度 $\pm 2\%$ )、風向 0~359°(解析度 1°、精度 $\pm 3^\circ$ )。
3. 資料擷取器：廠牌為 National Instruments，型號為 NI Compact-DAQ 之可攜式量測儀器，具 8 個擴充槽，為 USB2.0 介面，使用 NI 9215 電壓訊號處理模組，為 BNC 接頭、16 位元、4 通道、100kS/s 同步擷取，如圖 2-6(c)，並配合 LabView 軟體擷取數據。



(a)微震加速度規

(b)超音波二維風速計

(c)資料擷取系統

圖 2-6 實場量測儀器設備

### (三) 實驗規劃與實場量測實驗

本次實驗量測斷面位置在主跨上，約距離橋塔 1/3 處，如圖 2-7 所示。橋樑受風力影響之基本振動模態，包括垂直向、扭轉向與拖曳向擾動，因此需要設置 1 個風速計與 3 個加速度計，其中 2 個為垂直

向，用以測量垂直與扭轉之擾動，1 個水平放置以量測拖曳向之擾動。為了減少車流經過所引起之干擾風場，風速計設置於距離橋面 2 公尺高，且伸出橋護欄約 2 公尺之處，如圖 2-8 所示。各儀器設備佈設情形及實際量測操作狀況，如圖 2-9。



圖 2-7 量測儀器設置位置

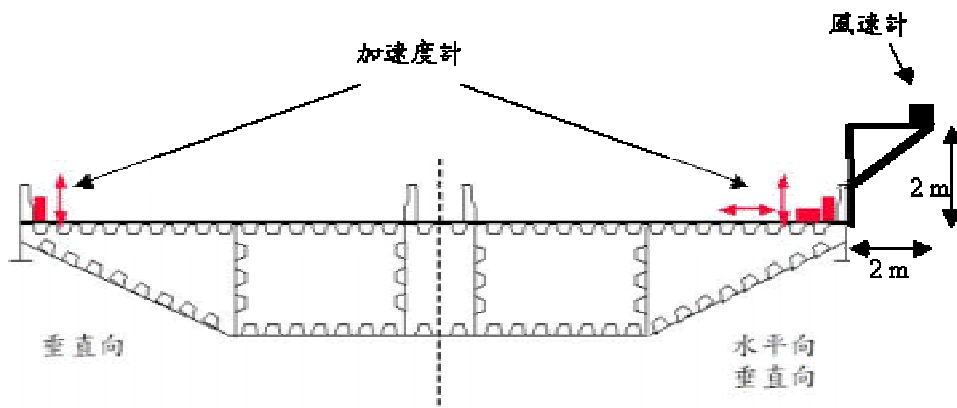


圖 2-8 量測儀器配置圖



(b) 加速度計設置(垂直及水平向)



(c) 加速度計設置(垂直向)



(d) 實際量測操作

**圖 2-9 儀器佈設及操作情形**

#### 第四節 風洞實驗設備與規劃

本計畫在風洞實驗方面，主要之實驗項目與目的，著重在量測全橋模型之基本振動頻率與受風之加速度與位移反應，並與實場量測之

結果進行比較，藉由二者間之差異性評估，可做為改良風洞實驗方法及量測技術之參考。

### (一) 實驗設備與量測器材

本所風洞實驗館設於台南縣歸仁鄉成功大學航太校區內，為地下一層、地上三層之建築物，主建物之建築面積約 1,300m<sup>2</sup>，總樓地板面積約 3,270m<sup>2</sup>，建築物高度為 14.2m(如圖 2-10)。風洞本體基本上為一垂直向閉迴路系統，總長為 77.9 m，最大寬度為 9.12 m，最大高度為 15.9 m(如圖 2-11)；風洞具有兩個測試區，各測試區之規格、性能、設備等如表 2-2 所示，本計畫之風洞實驗將在第二測試區進行。



圖 2-10 本所風洞實驗館外觀

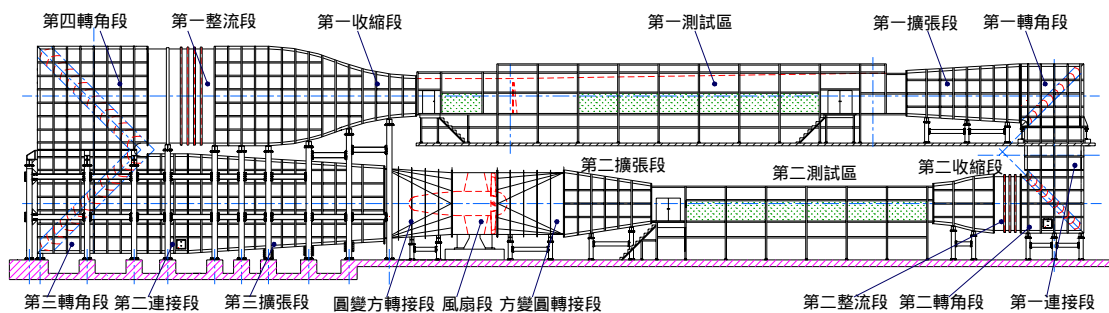


圖 2-11 風洞構造立面圖

表 2-2 測試區性能規格與用途

	第一測試區	第二測試區
尺寸 (寬×高×長)	4 m×2.6~3 m×36.5 m	6 m×2.6 m×21 m
最大風速	30 m/s	20 m/s
用途	1.流體力學研究； 2.建築物相關風工程研究； 3.污染擴散實驗。	1.橋樑測試研究； 2.建築物相關風工程研究。
輔助設施	1.配置二個旋轉盤，直徑 1m 及 3m； 2.三維移動機構； 3.可調式上蓋板。	配置一個旋轉盤，直徑 3m。

風洞實驗所使用之全橋模型與量測儀器設備，說明如下：

1. 高屏溪全橋模型：採用本所 94 年度之計畫案所製作之全橋模型(何明錦，文獻 1)，模型幾何縮尺為 1：125，全橋模型跨徑長約 4.08 公尺、橋面板寬 27.6 公分、梁深 2.56 公分；橋梁勁度以鋼板模擬，依據模擬相似律，鋼梁部分採用 2.68cm×0.33cm 鋼板，預力混凝土梁部分採用 2.68cm×0.33cm 鋼板，橋梁模型斷面如圖 2-12 所示；鋼纜部分以鐵絲加彈簧模擬，全橋模型如圖 2-13 所示。

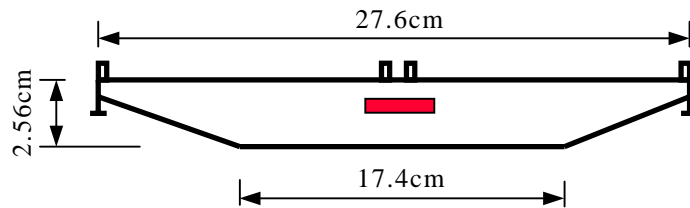


圖 2-12 高屏溪斜張橋模型斷面



圖 2-13 高屏溪斜張橋模型

2. 皮托管：採用皮托管進行平滑流場風速量測，如圖 2-14(a)所示，由皮托管量測到的風壓變化，經壓力電壓轉換器轉換為類比電壓值。
3. 單軸加速度規及配件：量測全橋模型橋面板之振動加速度值，



量測範圍 $\pm 50g$ 、靈敏度  $100mV/g$ 、響應頻率  $2\sim 10kHz$ ，如圖 2-14(b)所示。

- 雷射測距儀：使用兩種雷射測距儀，長距離雷射測距儀輸出電壓與距離之轉換關係為  $1\text{ Volt} = 2\text{ cm}$ ，如圖 2-14(c)；短距離雷射測距儀輸出電壓與距離之轉換關係為  $1\text{ Volt} = 1\text{ cm}$ ，如圖 2-14(d)；雷射測距儀在量測前應有歸零的動作。
- 資料擷取器：廠牌為 National Instruments，型號為 NI Compact-DAQ 之可攜式量測儀器，具 8 個擴充槽，為 USB2.0 介面，使用 NI 9215 電壓訊號處理模組，為 BNC 接頭、16 位元、4 通道、 $100kS/s$  同步擷取，如圖 2-6(c)，並配合 LabView 軟體擷取數據。



(a) 皮托管



(b)單軸加速度規



(c) 長距離雷射測距儀

(d) 短距離雷射測距儀

圖 2-14 風洞實驗量測儀器

## (二) 儀器設置與風洞實驗

實驗室內之儀器設置較實場量測容易，因此，除了配合實場量測之規劃，本實驗選取 2 個斷面設置量測儀器，分別為距離橋塔  $1/3$  跨距(位置 1)及  $1/2$  跨距(位置 2)處，如圖 2-15 所示。於位置 1 及位置 2 處，各設置 2 個長距離雷射測距儀，用以量測橋樑垂直向位移振動，再設置 1 個短距離雷射測距儀，用以量測橋樑拖曳向位移振動。另外，於位置 1 處之橋面板上，再加置 2 個加速度規，量測橋樑垂直向加速度振動，如圖 2-16 所示。

進行風洞實驗時，取樣速率皆設為 100 Hz，每階段取樣時間定為 3 分鐘，圖 2-17 顯示全橋模型風洞實驗之情形，圖 2-18 為資料擷取系統運作畫面。

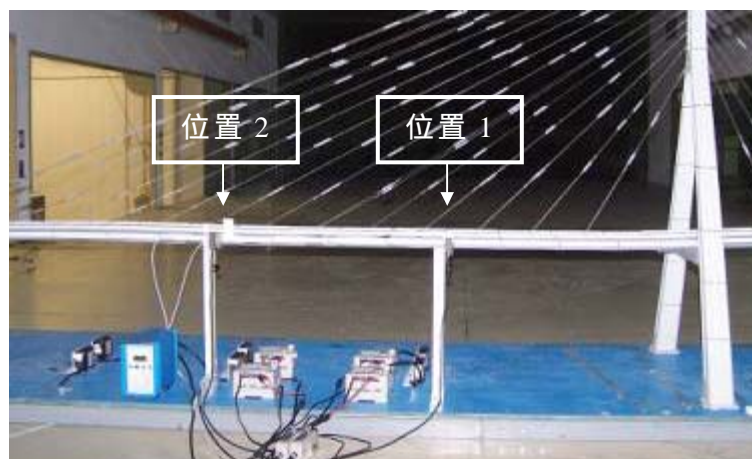


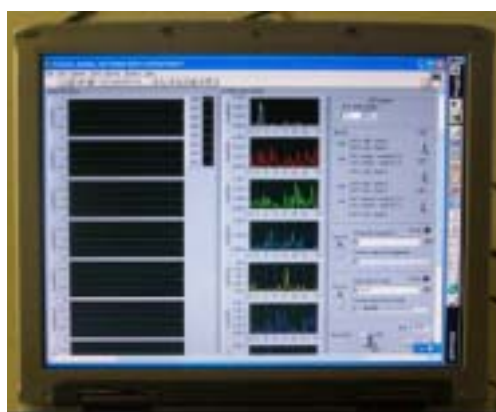
圖 2-15 風洞實驗量測位置



圖 2-16 加速度規佈設



圖 2-17 風洞實驗情形



**圖 2-18 風洞實驗資料擷取畫面**

## 第三章 實場量測及風洞實驗數據分析與探討

### 第一節 數據採樣

本計畫在執行高屏溪斜張橋實場量測時，就風場量測方面，考量風速能量多集中在低頻區域，採用二維超音波風速計量測風速及風向歷時，取樣速率訂為儀器上限之 4 Hz；而由於橋樑屬於水平向之構造物，風速垂直向分佈狀況並不重要，因此僅使用一個風速計，置於距橋面板上方約 2.5m 之高度處，同時向橋樑護欄外側延伸出約 1.5m，意圖減少車輛經過時產生風擾動之影響。在量測橋面板加速度振動方面，參考原始設計數據及文獻資料所述及之橋樑自然振動頻率範圍，將加速度傳感器之取樣速率訂為 100 Hz 應綽綽有餘，本次量測僅選擇一個測站，約位於靠近橋塔之三分點位置，於兩外側護欄上各設置一個垂直向之加速度傳感器，另於其中一個護欄再加置一個拖曳向(與橋軸垂直之水平方向)加速度傳感器。風速計與三個加速度傳感器皆連接至同一台電腦，以 LabView 軟體所撰擬之程式進行操控及同步、連續取樣與儲存，訊號擷取頻道與儀器之對應如表 3-1 所示，擷取畫面如圖 3-1，總計採樣時間約 44 分鐘。

**表 3-1 實場量測頻道配置與取樣速率**

頻道	儀器	量測方向	取樣速率
1	加速度計	垂直向	100 Hz
2	加速度計	拖曳向(水平向)	100 Hz
3	加速度計	垂直向	100 Hz
RS232	風速計	二維水平向	4 Hz

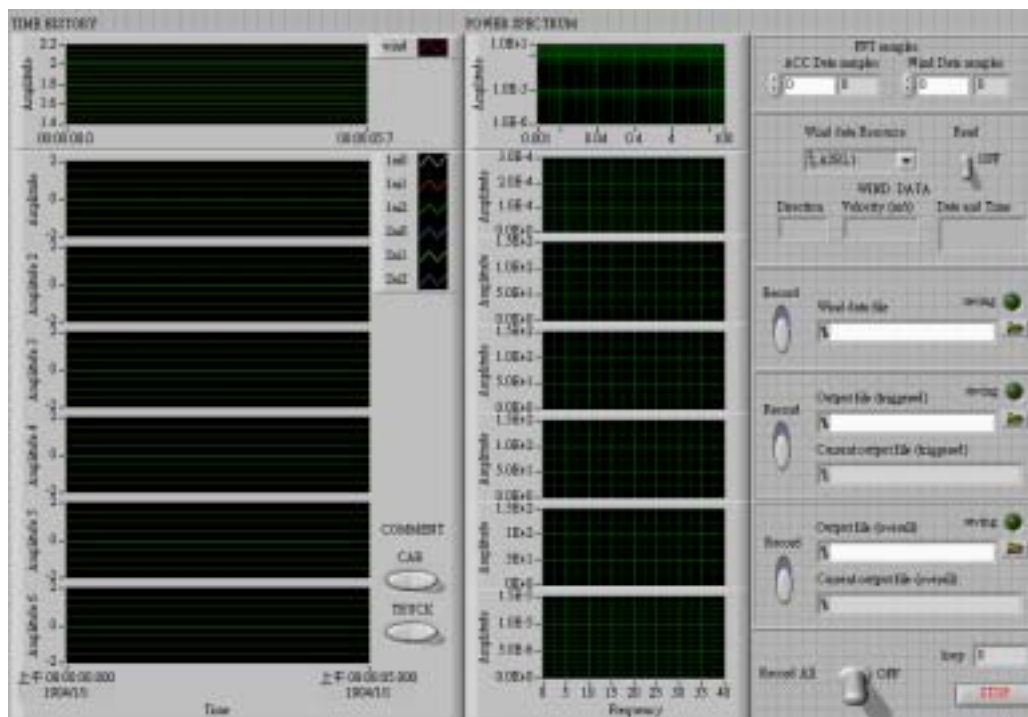


圖 3-1 實場量測資料擷取控制程序

在高屏溪斜張橋全橋模型風洞實驗部分，風洞風場以皮托管量測，橋面板振動以雷射位移計及加速度規量測，由於模型幾何縮尺採用  $1/125$ ，時間縮尺為  $1/\sqrt{125}$ ，速度縮尺為  $1/\sqrt{125}$ ，依模擬相似律準則，風洞之風速對應於實場風速需修正  $1/\sqrt{125}$  倍，橋樑模型之振動頻率需修正  $\sqrt{125}$  倍，基於紀錄及分析之方便性，皮托管、雷射位移計及加速度規之取樣速率皆訂為 100 Hz，並連接至同一台電腦，以 LabView 軟體所撰擬之程式進行操控及同步、連續取樣與儲存，擷取畫面如圖 3-2 所示，訊號擷取頻道與儀器之對應如表 3-2。由於實場量測之風速轉換至風洞流場之風速時，風速值相當小(約 0.7 m/s 以下)，流場不易

穩定且訊號亦受雜訊干擾，因此以本所風洞風扇之轉數控制，從 20 至 160 rpm(風速約 2 至 10 m/s)分 8 階段進行量測，每階段之採樣時間為 3 分鐘。

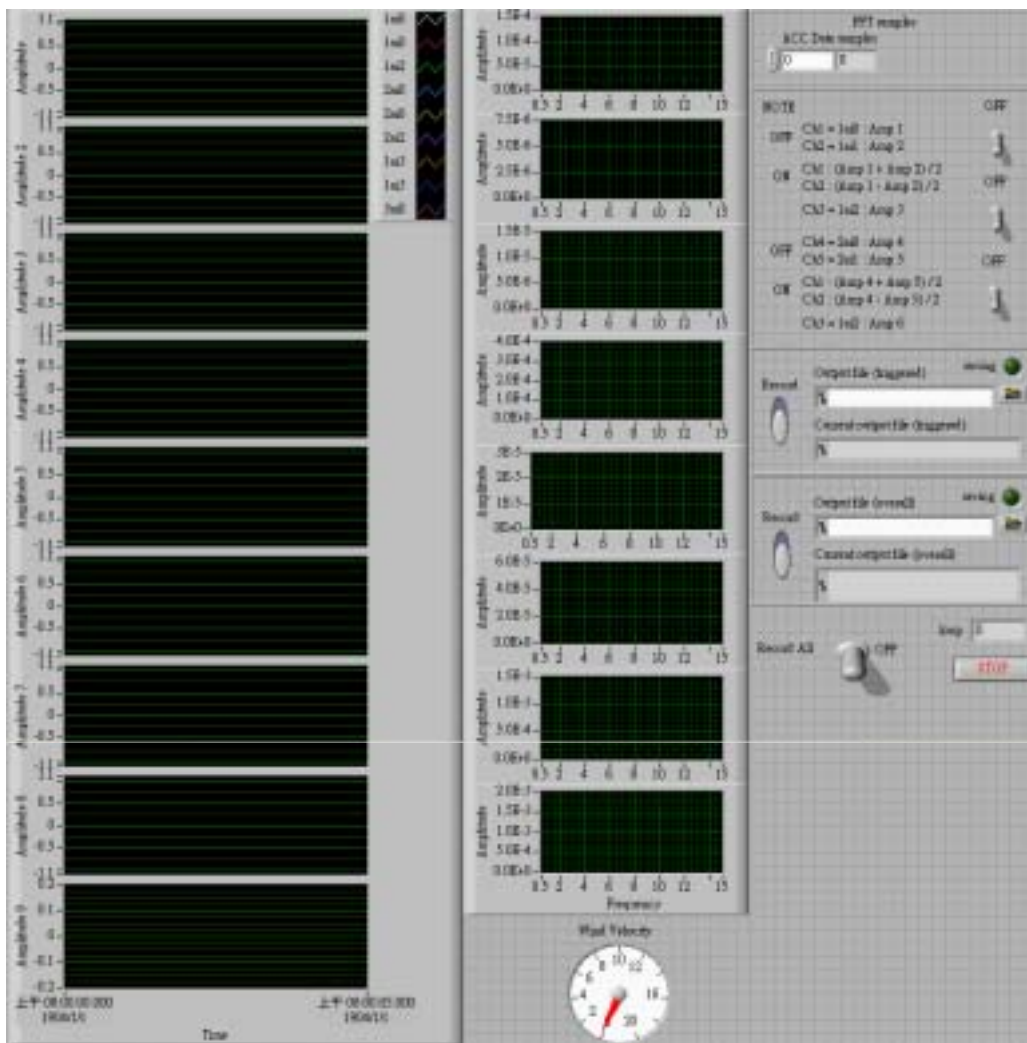


圖 3-2 風洞實驗資料擷取控制程序

**表 3-2 風洞實驗量測頻道配置與取樣速率**

頻道	量測位置	儀器	量測方向	取樣速率
1	位置 1	長距離雷射位移計	垂直向	100 Hz
2	位置 1	長距離雷射位移計	垂直向	100 Hz
3	位置 1	短距離雷射位移計	拖曳向	100 Hz
4	位置 2	長距離雷射位移計	垂直向	100 Hz
5	位置 2	長距離雷射位移計	垂直向	100 Hz
6	位置 2	短距離雷射位移計	拖曳向	100 Hz
7	位置 1	加速度計	垂直向	100 Hz
8	位置 1	加速度計	垂直向	100 Hz
9		皮托管	流場風速	100 Hz

另外，大自然風場中之瞬時風速屬於三維向量，一般而言，量測所得之瞬時風速，可表示為平均風速與擾動風速之和，以向量表示，則如式(3-1)所示。

$$U(z,t) = \bar{U}(z) + u(z,t) + v(z,t) + w(z,t) \quad (3-1)$$

其中  $U(z,t)$ ：瞬時風速向量；  
 $\bar{U}(z)$ ：平均風速向量；  
 $u(z,t)$ 、 $v(z,t)$ 、 $w(z,t)$ ：分別為順風向、橫風向、垂直向之擾動風速向量。



由於本計畫採用一個二維風速計量測實場風速，量測所得為一組水平向之風速及風向數據，且風速及風向皆隨著時間而變，因此在分析由實場量測所得之風速紀錄時，應先計算欲分析時段之平均風向(一般可取 10 分鐘歷時)，根據此平均風向，將瞬時風速分解為  $x$ (平均風向之方向)、 $y$ (垂直平均風向之方向)二方向。其後計算該時段風速記錄之  $x$  向平均風速，而  $y$  向平均風速應接近於零，再以瞬時風速減去平均風速值即為擾動風速值。因此，式(3-1)可簡化為

$$U(t) = \bar{U} + u(t) + v(t) \quad (3-2)$$

其中  $U(t)$ ： $x$  向之瞬時風速；  
 $\bar{U}$ ： $x$  向之平均風速；  
 $u(t)$ 、 $v(t)$ ：分別為  $x$  向、 $y$  向之擾動風速。

## 第二節 風速歷時之定常性評估

大氣邊界層風場大多為非穩態之紊流流場，因而風速會隨著時間而呈現隨機性的變化，通常受陣風之影響，短時間量測之風速會大於長時間量測之平均風速，換言之，平均風速會隨著平均時間而不同。若針對某一地點進行長時間之風速量測，則會得到一段隨時間變化、類似隨機變數之風速歷時樣本紀錄。由於在進行風場特性分析時，往往只能針對單一様本進行統計分析，並期望此分析結果得以代表整個母體之特性，因此常需做定常性之假設，而為檢驗此項假設是否合宜，則須對該隨機樣本紀錄進行定常性檢驗評估。若數據經由評估後可歸屬於定常性，則可依傳統頻率域分析方法，將時間歷時經由 FFT 後轉

換為頻率域做頻譜分析，觀察此風速歷時之特性。然而，數據經過判斷後若屬於非定常性，則需經由解析方法，將此非定常性歷時分解後，求得定常性歷時，繼而以 FFT 作頻譜分析，得知該風速歷時之特性。

依據第二章第二節提及之隨機數據定常性檢驗說明，本計畫針對實場量測而得之風速歷時紀錄，依據 Simiu 建議之方法(文獻 4)，所採用之測試方式說明如下：

1. 由實場量測之風速歷時紀錄中，選取一段紀錄為樣本；
2. 將此風速樣本紀錄區分成 N 個區間，每個區間含有相同數量之風速紀錄值；
3. 計算各個區間紀錄之均方值，並將這些值依時間順序排列如下，

$$\overline{x_1^2}, \overline{x_2^2}, \overline{x_3^2}, \dots, \overline{x_N^2};$$

4. 計算上述均方值序列之中位數(median),  $\overline{x_m^2}$ ;
5. 計算各均方值與均方值中位數之差( $\overline{x_i^2} - \overline{x_m^2}$ )，該差值依同樣順序排列，將會有正負之變化；
6. 依排列順序，計算正負之變化群數  $r$ ，舉例如下；

$$\begin{array}{cccccccc} + & + & - & - & - & + & + & - & + & + & - & - & - & + \\ \underbrace{\hspace{1.5em}} & \underbrace{\hspace{2.5em}} & \underbrace{\hspace{1.5em}} & \underbrace{\hspace{0.5em}} & \underbrace{\hspace{1.5em}} & \underbrace{\hspace{2.5em}} & \underbrace{\hspace{0.5em}} & \underbrace{\hspace{1.5em}} & \underbrace{\hspace{0.5em}} & & & & & & \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & & & & & & & & r=7 \end{array}$$

7. 給定顯著參數(level of significance) $\alpha$ 值，若  $r_{N/2; 1-\alpha/2} < r < r_{N/2; \alpha/2}$ ，則此樣本紀錄判定為具定常性，其中  $r_{N/2; 1-2/\alpha}$  及  $r_{N/2; 1-2/\alpha}$  可查表 3-3。

判斷數據之定常性後，即可進行後續之風場特性分析，例如平均風速、紊流強度、紊流尺度、頻譜特性等。

**表 3-3 Percentage Points of Run Distribution**

Values of  $r_{n;\alpha}$  such that  $\text{Prob}[r_n > r_{n;\alpha}] = \alpha$ , where  $n = N_1 = N_2 = N/2$

$n=N/2$	$\alpha$					
	0.99	0.975	0.95	0.05	0.025	0.01
5	2	2	3	8	9	9
6	2	3	3	10	10	11
7	3	3	4	11	12	12
8	4	4	5	12	13	13
9	4	5	6	13	14	15
10	5	6	6	15	15	16
11	6	7	7	16	16	17
12	7	7	8	17	18	18
13	7	8	9	18	19	20
14	8	9	10	19	20	21
15	9	10	11	20	21	22
16	10	11	11	22	22	23
18	11	12	13	24	25	26
20	13	14	15	26	27	28
25	17	18	19	32	33	34
30	21	22	24	37	39	40
35	25	27	28	43	44	46
40	30	31	33	48	50	51
45	34	36	37	54	55	57
50	38	40	42	59	61	63
55	43	45	46	65	66	68
60	47	49	51	70	72	74
65	52	54	56	75	77	79
70	56	58	60	81	83	85
75	61	63	65	86	88	90
80	65	68	70	91	93	96
85	70	72	74	97	99	101
90	74	77	79	102	104	107
95	79	82	84	107	109	112
100	84	86	88	113	115	117

實際進行定常性測試時，係在全部 40 分鐘之量測紀錄內，選取一段 10 分鐘之風速紀錄樣本，將其分成 20 個區間進行檢驗，每個區間為 30 秒，各含有 120 個風速紀錄值。選取方式先從 0 分鐘開始至 40 分鐘分成四段，接著從 2.5 分鐘、5 分鐘及 7.5 分鐘開始，分別至 32.5 分鐘、35 分鐘及 37.5 分鐘止，各分成三段。圖 3-3 顯示其中一段風速均方值及其中位數之變化情形，經檢視後可得  $r = 9$ ，經選定顯著參數  $\alpha = 0.05$ ，查表 3-2 可得  $r_{10;0.975} = 6$ ， $r_{10;0.025} = 15$ ，此  $r$  值落在 6 與 15 之間，可判定本段風速樣本紀錄具定常性。經檢驗所有測試區段後，結果整理如表 3-4 所示，顯示本風速實測紀錄大體上可判定具有定常性。

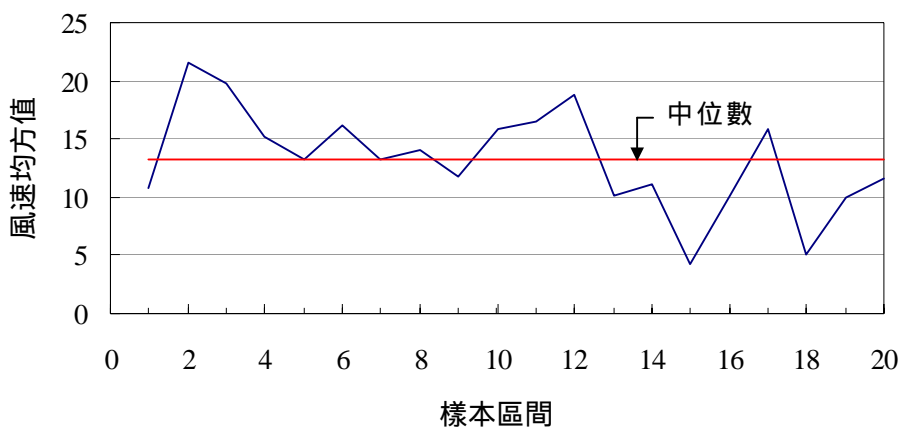


圖 3-3 風速歷時紀錄定常性檢驗例

表 3-4 風速歷時紀錄定常性檢驗結果

區 段	$r$	$r_{10:0.975}$	$r_{10:0.025}$	定常性判定
0~10 分鐘	9	6	15	是
2.5~12.5 分鐘	8	6	15	是
5~15 分鐘	9	6	15	是
7.5~17.5 分鐘	8	6	15	是
10~20 分鐘	6	6	15	否
12.5~22.5 分鐘	8	6	15	是
15~25 分鐘	8	6	15	是
17.5~27.5 分鐘	8	6	15	是
20~30 分鐘	7	6	15	是
22.5~32.5 分鐘	9	6	15	是
25~35 分鐘	11	6	15	是
27.5~37.5 分鐘	8	6	15	是
30~40 分鐘	9	6	15	是

### 第三節 風場特性與橋樑振動反應分析

#### (一) 風場特性分析

風場特性之表徵，主要為平均風速、紊流強度、紊流尺度、以及風速頻譜等，經由式(3-2)之計算，可得某一時段之平均風速及擾動風速，擾動風速隨時間變化，可用來計算該地區的紊流特性，以評估該地形風場之紊流強度及紊流尺度；另外，風速歷時經由 FFT 轉換後可獲得該地區風場之風速頻譜。本計畫採用 LabView 軟體，進行相關分析程序之撰擬，如圖 3-4 所示，分析之內容說明如后。

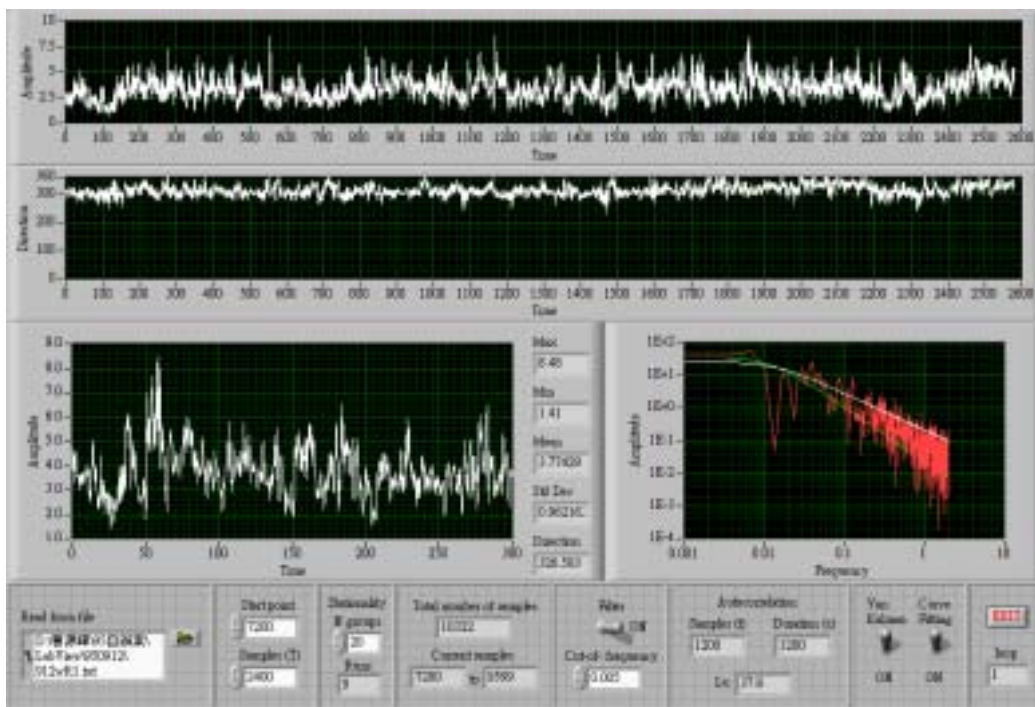


圖 3-4 風場分析程序圖例

2. 平均風速， $\bar{U}$

某一高度處之平均風速可由下列公式計算：

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (3-3a)$$

$$\text{或} \quad \bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(t_i) \quad (3-3b)$$

其中  $T$ ：取樣時間；

$U(t)$ ： $x$  向瞬時風速；

$N$ ：樣本數；

$U(t_i)$ ：時間  $t_i$  時之  $x$  向樣本風速。

3. 紊流強度， $I_u$

某一高度處之紊流強度可由下列公式計算：

$$I_u = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{\bar{U}} \quad (3-4)$$

其中  $\bar{U}$ ： $x$  向平均風速；

$\sqrt{\overline{u^2}}$ ： $x$  向擾動風速之均方根， $\overline{u^2}$  可由式(3-5)求得。

$$\overline{u^2} = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \quad (3-5a)$$

$$\text{或} \quad \overline{u^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u^2(t_i) \quad (3-5b)$$

其中  $u(t)$ ： $x$  向擾動風速；

$u(t_i)$ ：時間  $t_i$  時之  $x$  向樣本擾動風速。

#### 4. 紊流尺度, $L_u$

$x$  向紊流尺度長度可由下列公式計算：

$$L_u = \frac{\bar{U}}{\sigma_u^2} \int R_u(\tau) d\tau \quad (3-6)$$

其中  $\bar{U}$ ： $x$  向平均風速；

$\sigma_u$ ： $x$  向風速之標準偏差(  $\sqrt{u^2}$  )；

$R_u(\tau)$ ： $x$  向風速之自相關函數，可由式(3-7)求得。

$$R_u(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)U(t+\tau)dt \quad (3-7a)$$

$$\text{或} \quad R_u(\tau_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U(t_k)U(t_{k+i}) \quad (3-7b)$$

#### 5. 風速頻譜

將風速歷時經由 FFT 轉換後可獲得該地區風場之風速頻譜。風速頻譜中，在接近或小於結構物自然頻率時，對結構物有較大之影響，而高於結構物自然頻率的部分則影響較小。國際間有許多學者針對不同地區進行風場長期監測後，提出許多風速頻譜之經驗公式，本計畫量測而得之風速頻譜將與 von Karman 提出之經驗公式(式 3-8)進行比較(文獻 4)，並將以同一函數模式，設定不同變數變化，進行線形回歸分析(curve fitting)。



$$\frac{fS_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4\left(\frac{fL_u}{U}\right)}{\left[1 + 70.8\left(\frac{fL_u}{U}\right)^2\right]^{5/6}} \quad (3-8)$$

其中  $S_u(f)$ ：風速頻譜；

$\sigma_u$ 、 $L_u$ 、 $\bar{U}$  分別風速之標準偏差、紊流尺度、平均風速。

高屏溪斜張橋現址之風場風速量測紀錄，經前面章節判定為具正常性後，選取其中一段 10 分鐘之風速歷時紀錄進行後續數據分析。以下係針對 30~40 分鐘之風速紀錄進行探討與說明。

依所選取之時間段，其風速與風向之歷時紀錄分別如圖 3-5 及 3-6 所示，平均風向為 320 度，風速最大值為 8.48 m/s，最小值為 0.84 m/s，平均風速則為 3.49 m/s。紊流特性方面，紊流強度為 0.30，紊流尺度為 37.8 m。

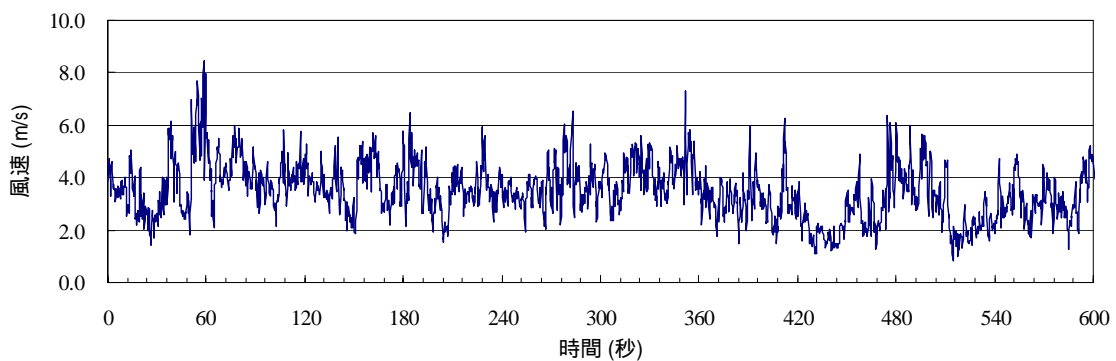


圖 3-5 風速歷時紀錄(第 30~40 分鐘)

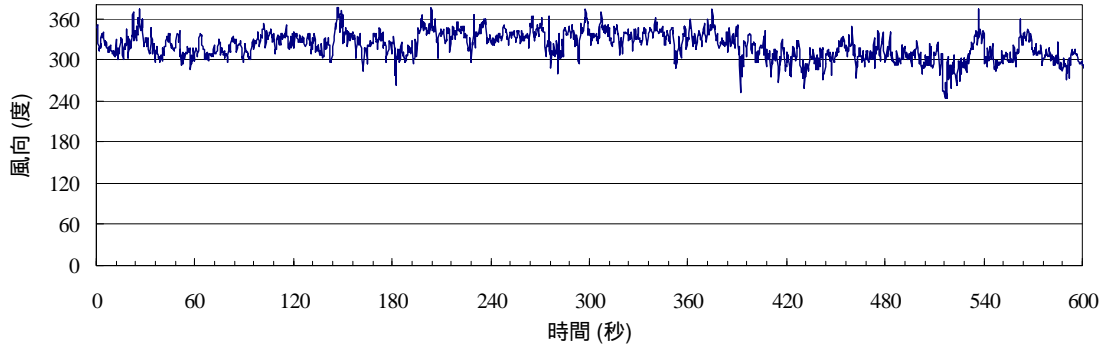


圖 3-6 風向歷時紀錄(第 30~40 分鐘)

風速頻譜方面，將風速歷時經由 FFT 轉換後，如圖 3-7 所示，該圖中亦將 von Karman 提出之風速頻譜經驗式一併顯示，以資比較。另外，為嘗試對實場量測而得之風速頻譜進行線形回歸分析，以 von Karman 所提之經驗公式為基礎模式，如式(3-9)所示，進行 7 組不同參數選擇之回歸分析，分別為(1)只改變參數  $a$ 、(2)只改變參數  $b$ 、(3)只改變參數  $c$ 、(4)改變參數  $a$  及  $b$ 、(5)改變參數  $a$  及  $c$ 、(6)改變參數  $b$  及  $c$ 、(7)改變參數  $a$ 、 $b$  及  $c$ ；分析結果如表 3-5 所示。圖 3-7 中所顯示者為第七組之回歸線形。

$$\frac{fS_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{a\left(\frac{fL_u}{U}\right)}{\left[1 + b\left(\frac{fL_u}{U}\right)^2\right]^c} \quad (3-8)$$

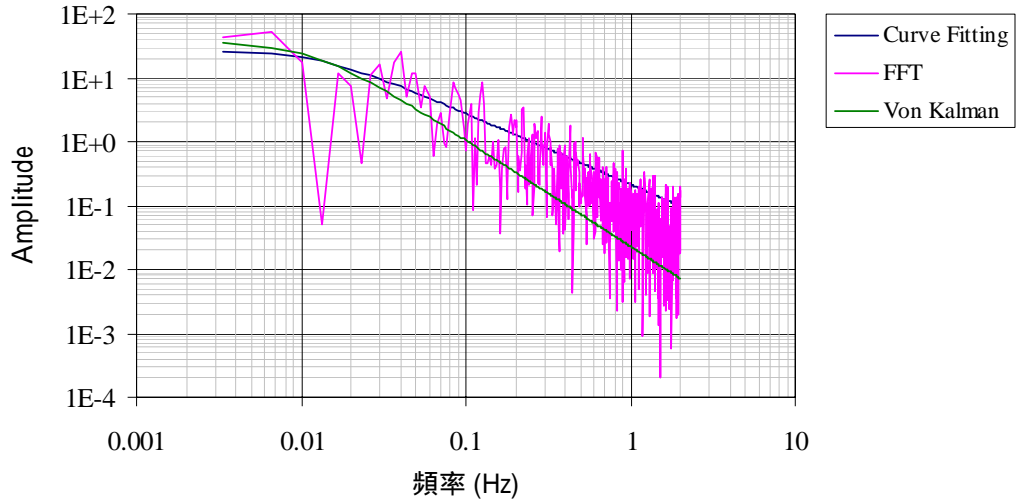


圖 3-7 風速頻譜(第 30~40 分鐘)

表 3-5 風速頻譜回歸分析結果

	a	b	c	誤差比較
von Karman 公式	4.00	70.8	0.833	10.5
第一組	2.74	70.8	0.833	6.04
第二組	4.00	87.8	0.833	7.30
第三組	4.00	70.8	0.787	7.34
第四組	2.00	14.3	0.833	5.44
第五組	2.33	70.8	0.520	5.31
第六組	4.00	222.8	0.527	6.90
第七組	2.24	50.2	0.556	5.29

註：誤差採用 Mean Squared Error 評估

## (二) 橋樑振動反應分析

橋樑動力特性之表徵，主要為自然振動頻率、阻尼及振態等，且為橋樑結構固有之基本特性。該基本特性可經由有限元素數值模擬分析求得，亦可透過橋樑實際振動反應量測，經由系統識別方法分析而得。對於斜張橋而言，該基本特性會表現在三個主要構造體上，分別為橋塔、纜線及橋面結構。斜張橋在風力作用下之反應，可分為靜態反應及動態反應，靜態反應主要由平均風力所造成，與橋樑之勁度有關，動態反應則由擾動風力造成，與橋樑之動力特性相關。風力對於懸索類橋樑之氣動力效應，主要包括顫振(flutter)、抖振(buffeting)、渦散振動(vortex-induced vibration)及扭轉不穩定(torsional divergence)等現象。

基於本計畫僅在嘗試探討斜張橋實際受風反應與風洞全橋模型實驗間之契合性，並不擬針對斜張橋進行動力特性識別，因此在橋樑振動反應之量測上，僅紀錄橋面板一個測站之加速度振動反應。由於橋面板之振動頻率可分為垂直向、扭轉向及拖曳向(與橋長方向垂直之水平方向)，因此，由量測所得之三個加速度紀錄(包括兩個不同位置之垂直向及一個水平向)，需經簡單換算至垂直、扭轉及拖曳方向，如式(3-9)所示，轉換後可得各向加速度歷時。

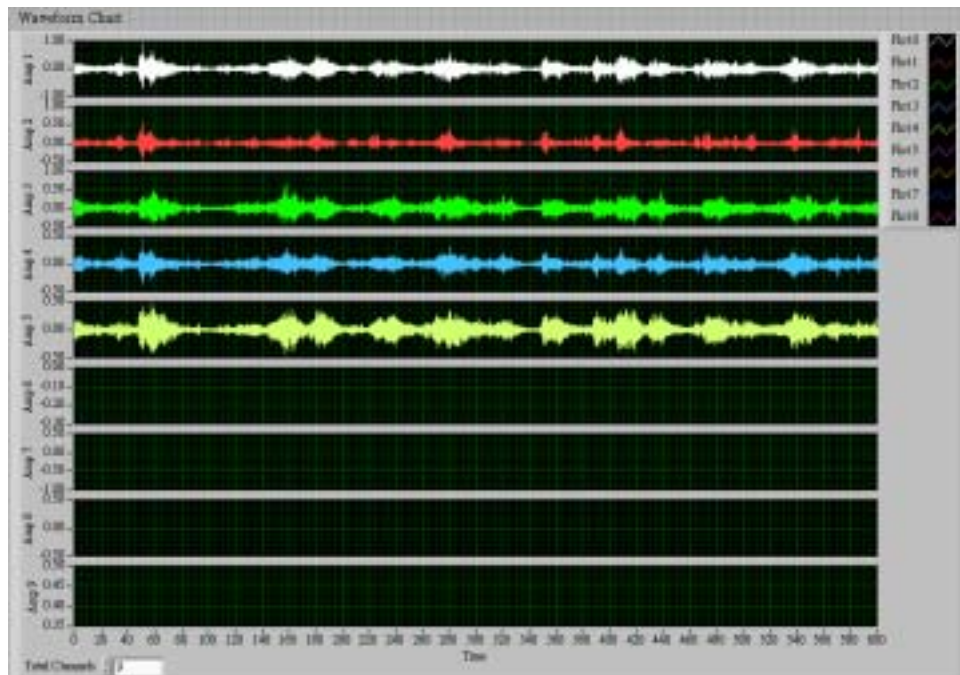
$$A_v = (a_{v1} + a_{v2})/2 \quad (3-9a)$$

$$A_t = (a_{v1} - a_{v2})/2 \quad (3-9b)$$

$$A_d = a_h \quad (3-9c)$$

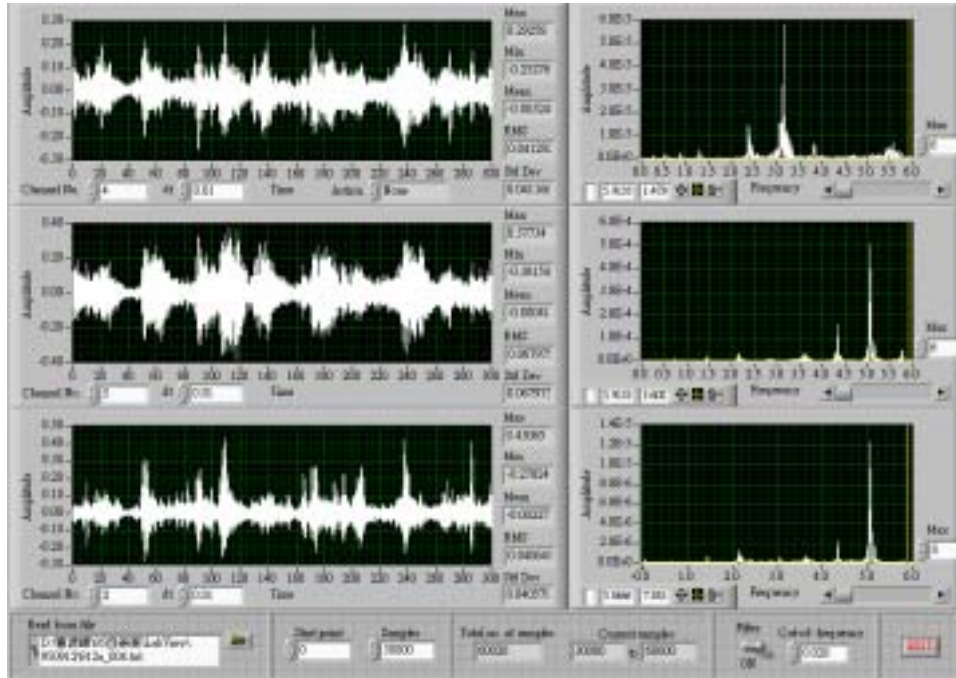
其中  $A_v$ 、 $A_t$  及  $A_d$ ：分別為垂直向、扭轉向及拖曳向加速度；  
 $a_{v1}$ 、 $a_{v2}$  及  $a_h$ ：分別為兩側護欄處量測而得之兩個垂直向  
 加速度及一個水平向加速度。

本計畫採用 LabView 軟體，進行相關分析程序之撰擬，分析畫面如圖 3-8(a)(b)所示，加速度歷時紀錄讀取後，可逕分割進行統計分析及頻譜分析。由於圖 3-8(b)中顯示，加速度歷時之頻譜分析在低頻部分之分佈並不明顯，因此將加速度歷時妥予積分，以確定低頻之頻譜分佈，如圖 3-9 所示。各向加速度歷時彙整如圖 3-10；加速度歷時之頻譜分佈彙整如圖 3-11。本次實場量測結果經與陳建州等(文獻 5)所量測者相當接近，如表 3-6 所示。



高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

(a) 橋樑振動反應全部歷時讀取畫面



(b) 橋樑振動反應分析畫面

圖 3-8 橋樑振動分析程序圖例

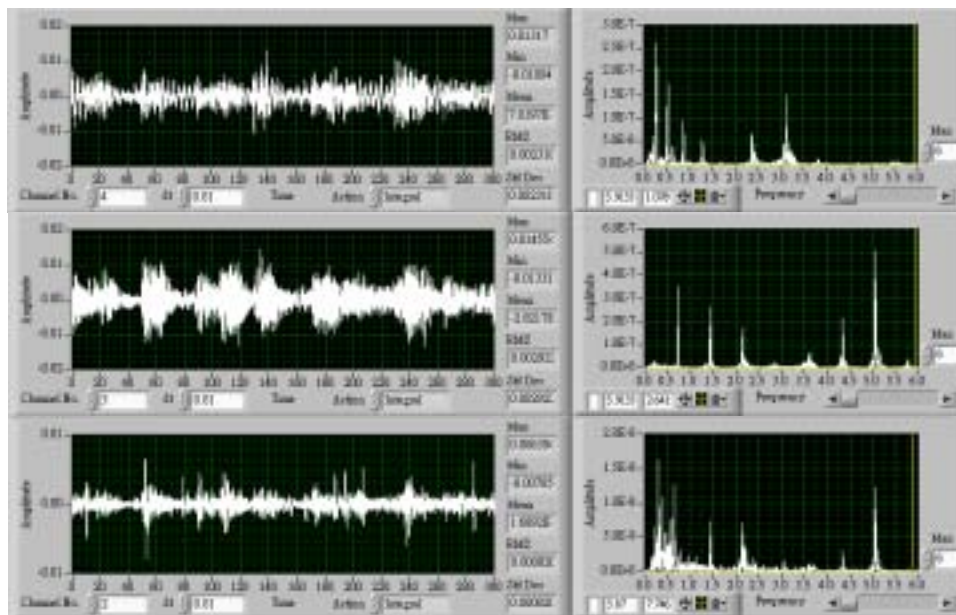


圖 3-9 橋樑振動速度反應(加速度積分)

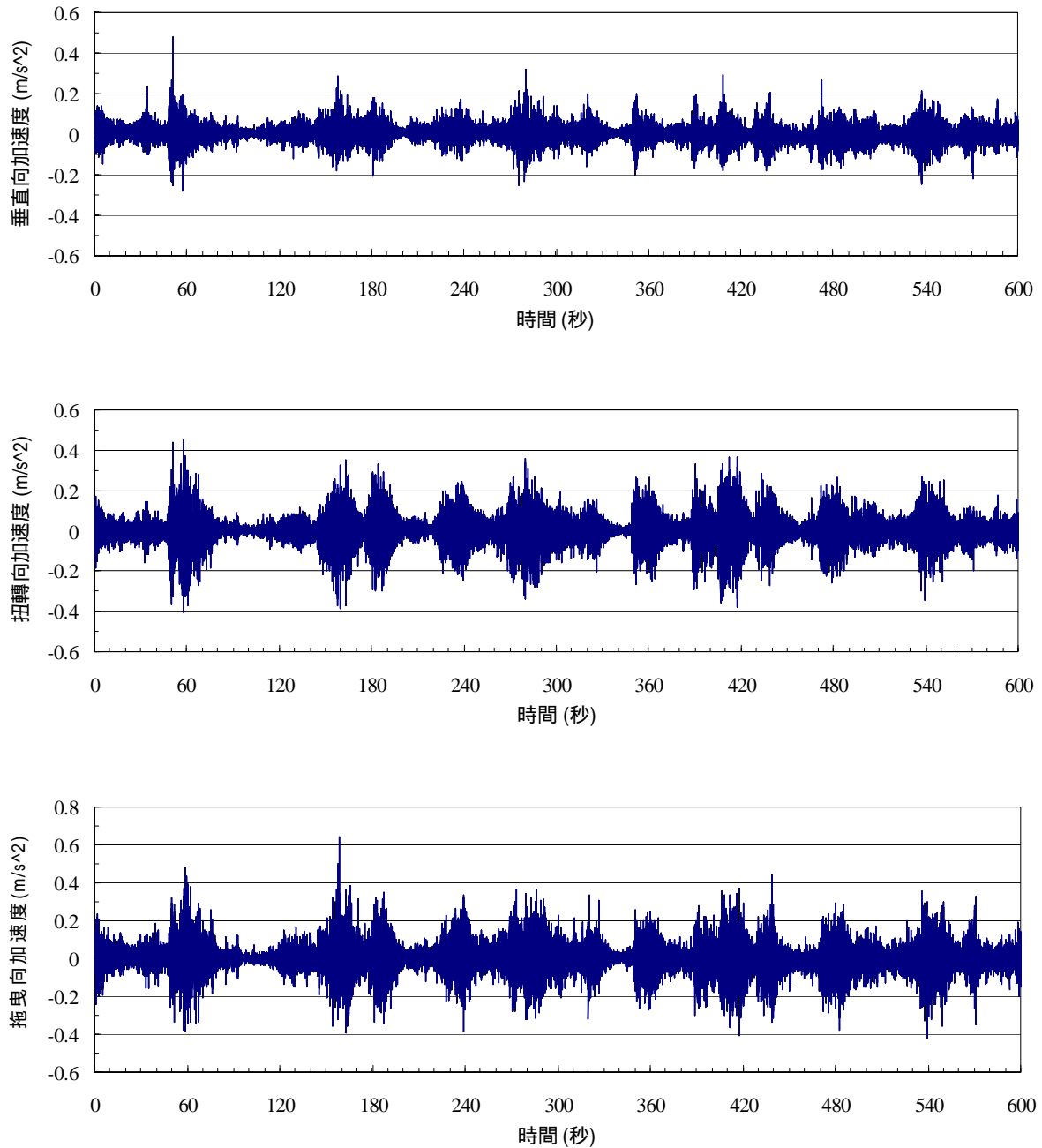


圖 3-10 橋樑振動反應歷時(第 30~40 分鐘)

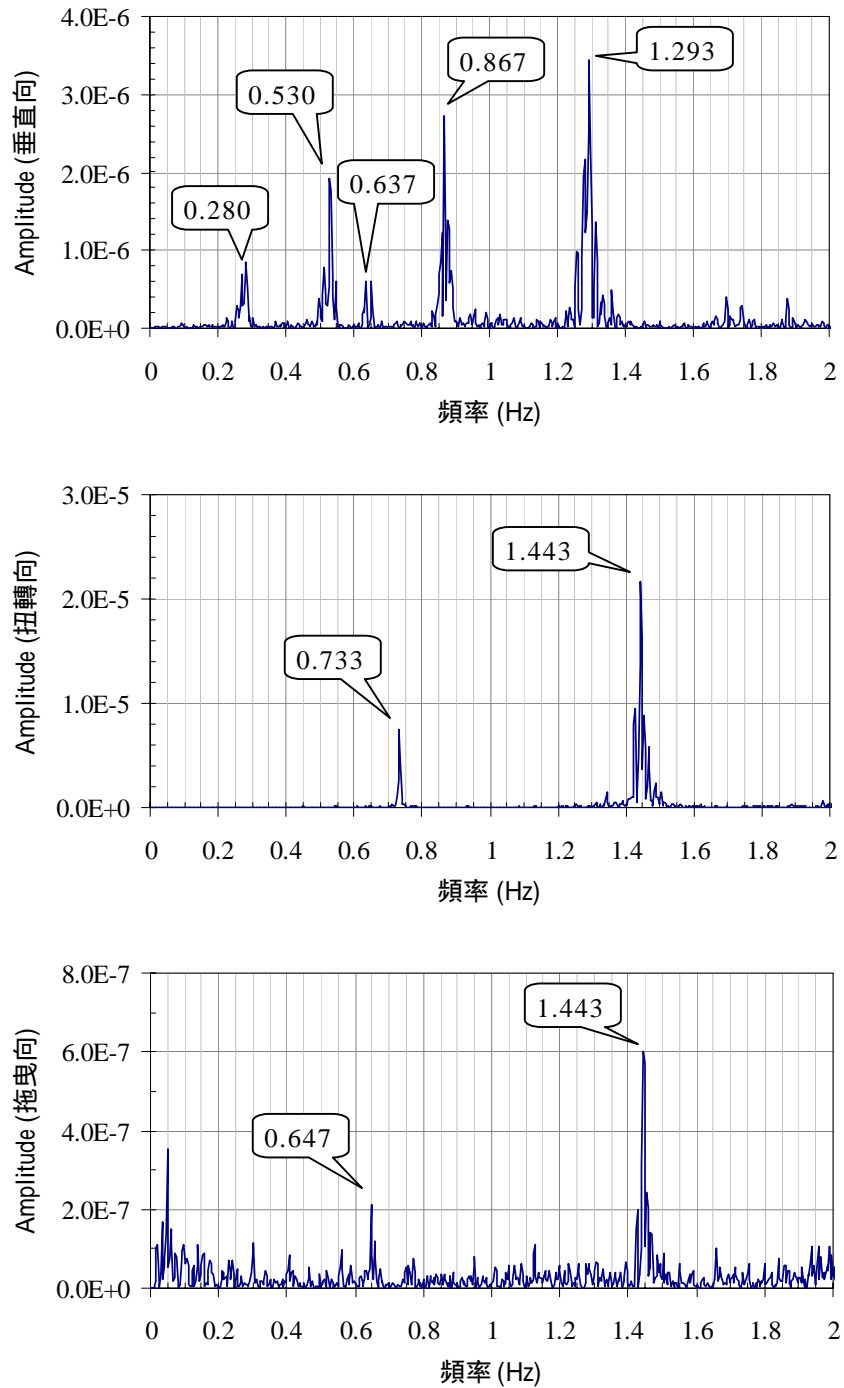




圖 3-11 橋樑振動反應頻譜圖(第 35~40 分鐘)

表 3-6 高屏溪斜張橋主樑振態頻率比較表

振態	振動方向	文獻 5 (Hz)	本案量測值 (Hz)
1	垂直向	0.275	0.280
2	垂直向	0.520	0.530
3	垂直向	0.640	0.637
4	拖曳向	0.650	0.647
5	扭轉向	0.740	0.733
6	垂直向	0.875	0.867
7	垂直向	1.300	1.293

#### 第四節 風洞實驗數據分析與比較探討

##### (一) 模擬相似律

由於風洞實驗以模型縮尺進行模擬實驗，為使實驗結果足以預測原形構造或環境之真實狀況，需遵守模擬相似律原則，包括流場特性及模型特徵尺度等。本計畫所使用之全橋模型，配合本所風洞之斷面尺寸，採用 1/125 之縮尺比例，相關之縮尺參數如表 3-7 所示。全橋

模型之幾何尺寸、橋樑勁度、質量等，已依該縮尺比例製作完成，因此，在進行本案風洞實驗時，尚應符合之測試條件說明如下：

1. 適當模擬邊界層風場特性

邊界層風場特性包括：逼近流之平均風速剖面、逼近流之擾動風速(紊流強度)分佈、逼近流擾動風速之頻率分佈特性、標的物週遭環境之近場模擬等。

2. 適當考慮雷諾數效應

雷諾數為流體慣性力與黏滯力之比值( $R_e = \frac{\rho UB}{\mu}$ )，理論上，風洞模型實驗之雷諾數應與實場一致，然而，實場狀況之雷諾數多在  $10^7$  以上，一般風洞實驗無法達到，惟前人研究結果亦顯示，鈍體氣動力實驗之雷諾數若在  $10^4$  以上，風洞流場特性則不受雷諾數大小之影響。

3. 調整橋形

在架設模型時，需調整全橋模型之纜線張力及橋面板邊界條件，使模型之自然振動頻率與原形橋樑間能符合模擬相似律原則。經敲擊振動測試後，模型之反應譜如圖 3-11 所示，與文獻 1 比較，整理如表 3-8，尚能符合要求。

表 3-7 全橋模型實驗之縮尺參數表

	符號	參數值
幾何縮尺	$\lambda_L$	$\frac{1}{125}$
速度縮尺	$\lambda_V$	$\frac{1}{\sqrt{125}}$
時間縮尺	$\lambda_T = \lambda_L / \lambda_V$	$\frac{1}{\sqrt{125}}$
頻率縮尺	$\lambda_f = 1 / \lambda_T$	$\sqrt{125}$
加速度縮尺	$\lambda_A$	1
密度縮尺	$\lambda_\rho$	1
阻尼比	$\lambda_\xi$	1

(資料來源：文獻 1)

表 3-8 全橋模型與原型橋樑振動頻率比較表

	實場量測橋樑頻率(Hz) <sup>註</sup>	縮尺模型頻率理論值(Hz) <sup>註</sup>	模型敲擊試驗之反應頻率(Hz)
第一垂直振態 $f_v$	0.273	3.05	2.90
第一扭轉振態 $f_\theta$	0.730	8.16	8.35
第一拖曳振態 $f_d$	0.609	6.81	6.20
頻率比( $f_\theta / f_v$ )	2.67	2.67	2.88

高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

(註：詳參考文獻 1)

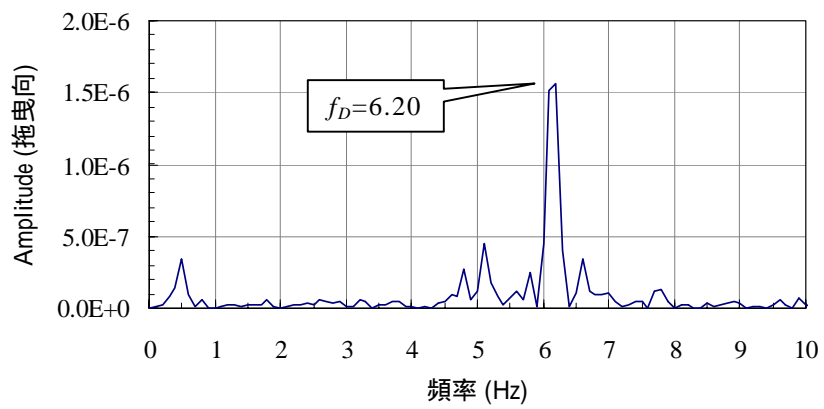
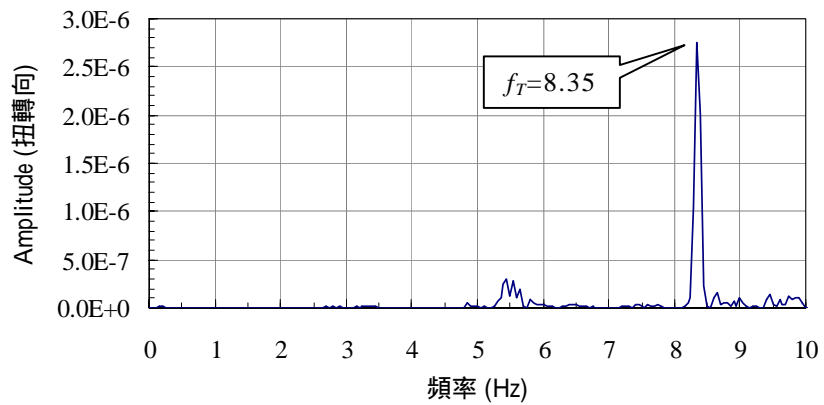
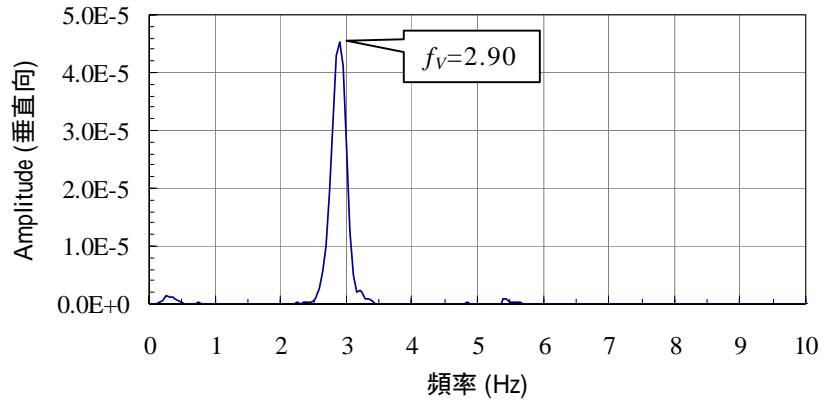


圖 3-12 全橋模型敲擊試驗反應譜

## (二) 風洞流場控制

為使風洞實驗結果得以和實場量測之橋樑振動反應進行比較，風洞實驗提供之流場應與實場量測之風場特性相當。然而，本計畫於實場量測之 40 分鐘歷時內，測得之瞬時風速最大為 8.58 m/s，最小為 0.62 m/s，平均風速為 3.43 m/s，轉換至風洞流場風速則在 0.77 m/s 以下，該風速在進行風洞實驗時流場並不穩定，且風速太低，量測訊號易受雜訊影響，因此，改以本所風洞風扇之轉數控制，從 20 至 160 rpm 分 8 階段進行量測。風洞流場風速以皮托管量測，壓力與風速之轉換如式(3-10)所示，各階段風扇轉速對應之流場風速特性整理成表 3-9。

$$U = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (3-10)$$

其中  $U$ 、 $P$  及  $\rho$  分別為流場風速、皮托管測得之壓力差及空氣密度。

表 3-9 風扇轉數與流場風速特性對應表

風扇轉速(rpm)	平均風速(m/s)	紊流強度
20	2.66	0.044
40	3.19	0.038
60	4.33	0.019
80	5.47	0.014
100	6.67	0.013
120	7.89	0.012
140	9.16	0.012

## 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

160	10.42	0.11
-----	-------	------

### (三) 全橋模型振動反應比較

本次風洞實驗係以風扇轉數為流場控制基準，將實驗分成 8 個階段進行量測，以第 8 階段為例(風扇轉速為 160 rpm)，量測所得之橋樑模型振動歷時如圖 3-13 所示。

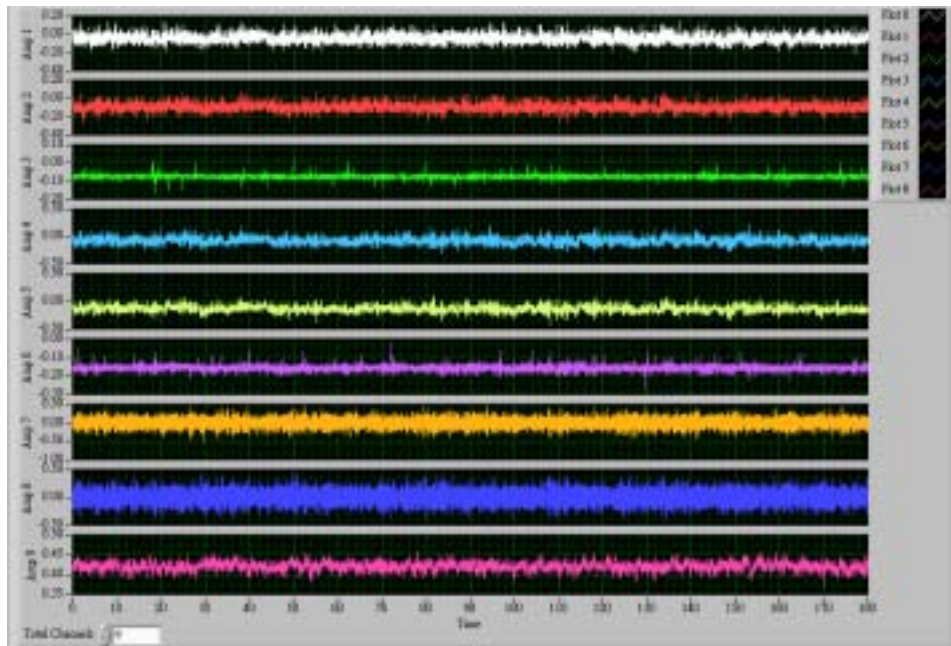


圖 3-13 全橋模型振動反應及風速歷時(第 8 階段)

選取各階段第 60~120 秒區間進行分析，先將橋樑模型振動反應依式(3-9)進行修正，並將電壓值還原成物理量，最後再轉換回原型橋樑之振動反應，換算結果如圖 3-14 及圖 3-18 所示。

### 第三章 實場量測與風洞實驗數據分析

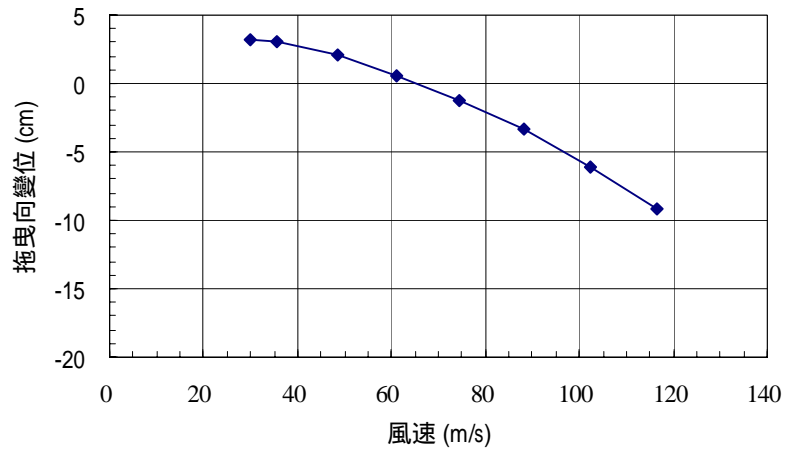
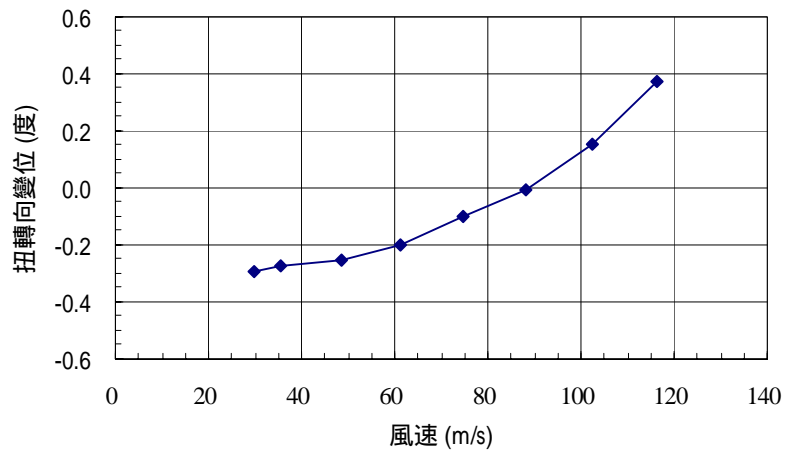
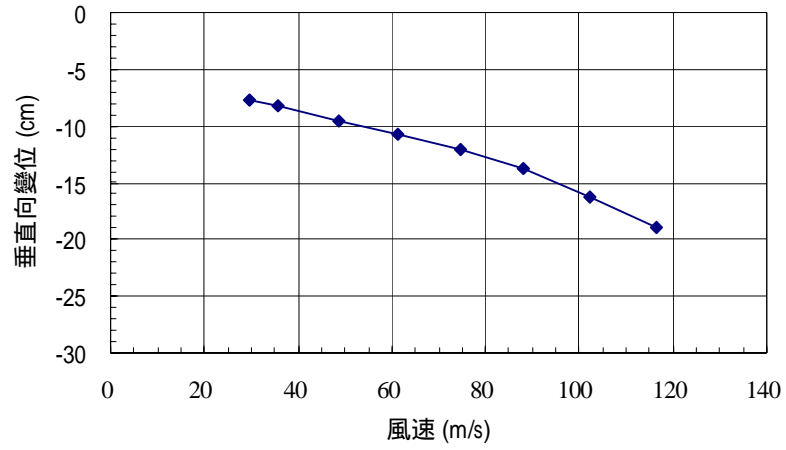


圖 3-14 橋樑位移振動平均值(位置 1-主跨 1/3 處)

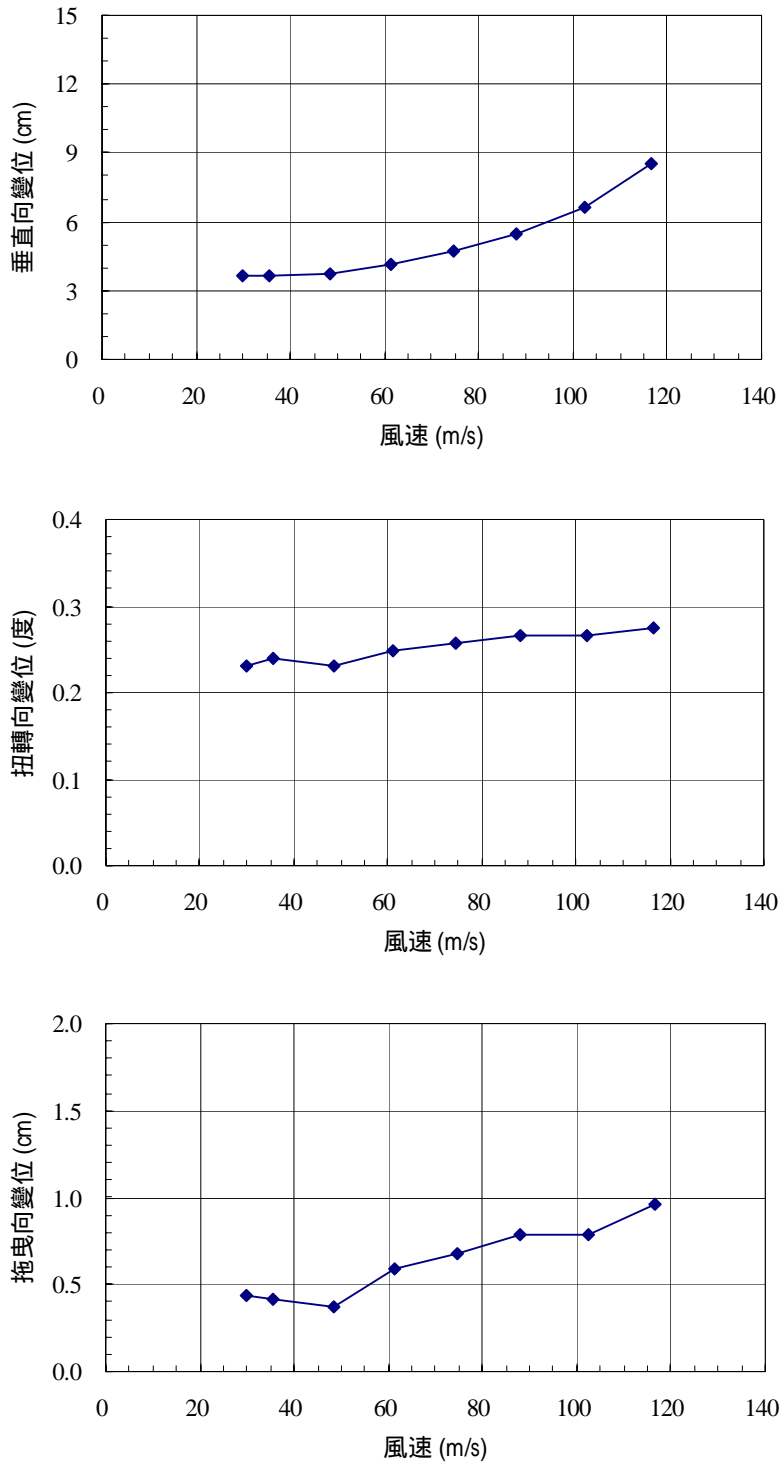




圖 3-15 橋樑位移擾動均方根值(位置 1-主跨 1/3 處)

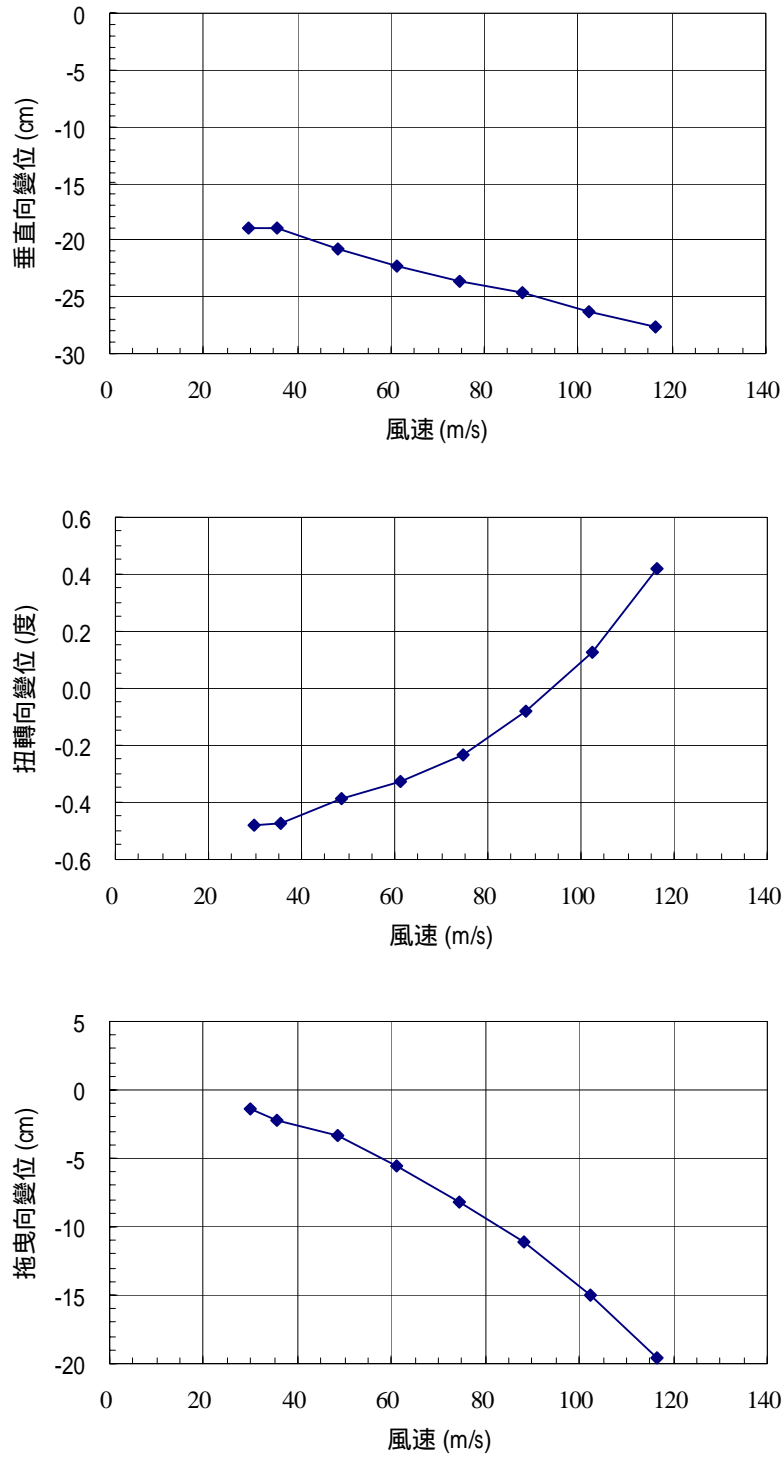


圖 3-16 橋樑位移振動平均值(位置 2-主跨 1/2 處)

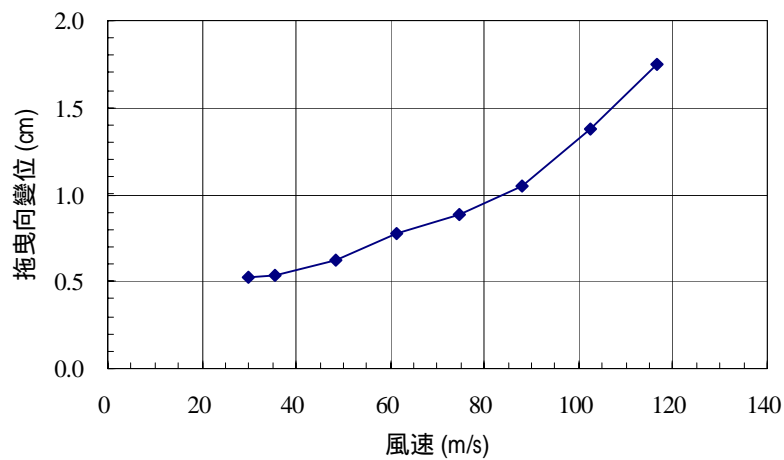
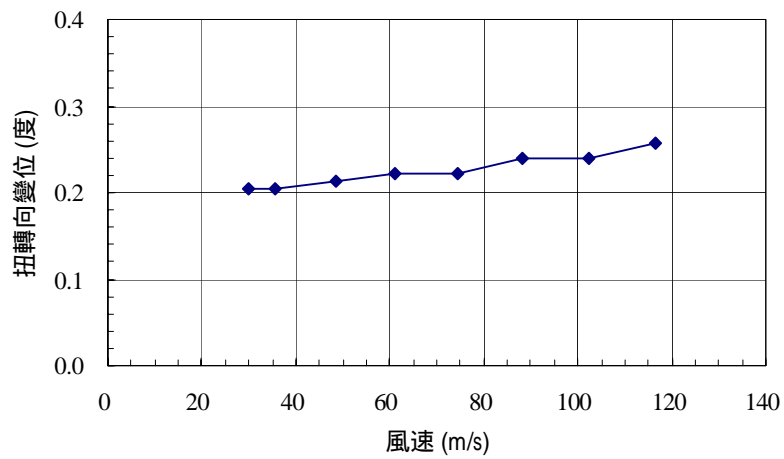
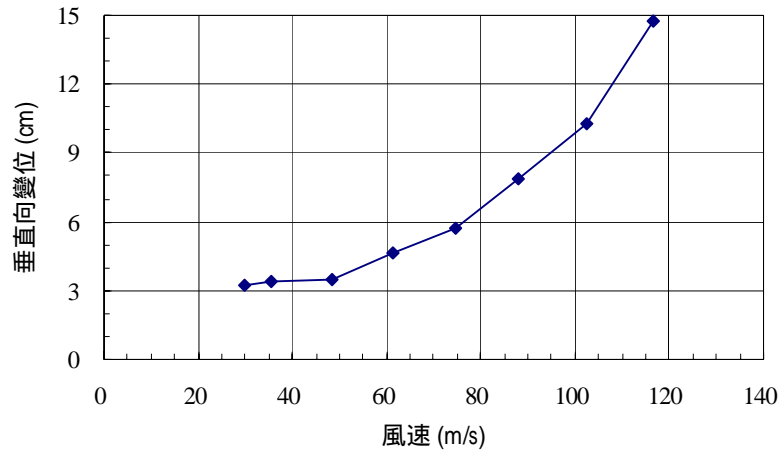


圖 3-17 橋樑位移擾動均方根值(位置 2-主跨 1/2 處)

本計畫嘗試比較橋樑實際受風反應與風洞模型實驗結果之差異性，因此擬針對二者之加速度反應進行比較探討。風洞實驗中，全橋模型位置 1 所設置之加速度計與實場設置加速計位置相對應，垂直向及扭轉向加速度擾動均方根值，經轉換回原型橋樑之振動反應，如圖 3-18 及 3-19 所示，圖 3-19 中亦同時顯示回歸分析結果，做為與實場量測結果比較之參考。

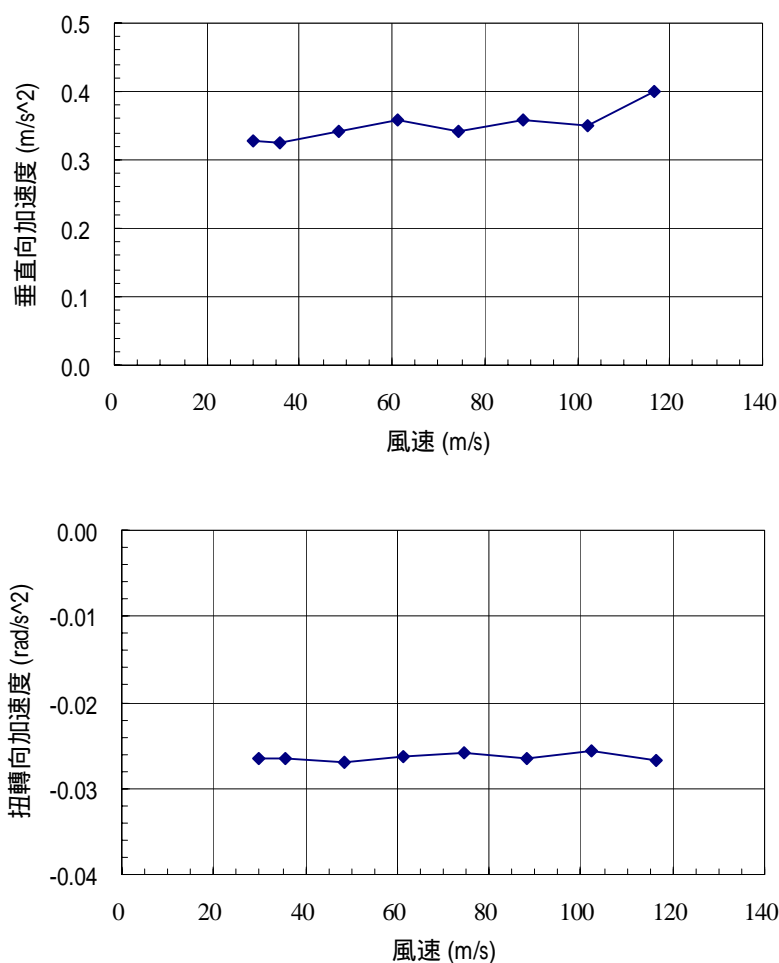


圖 3-18 橋樑加速度振動平均值(位置 1-主跨 1/3 處)

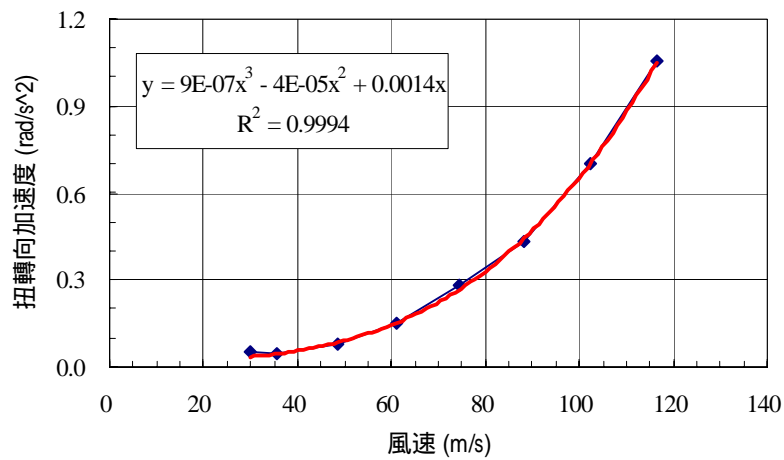
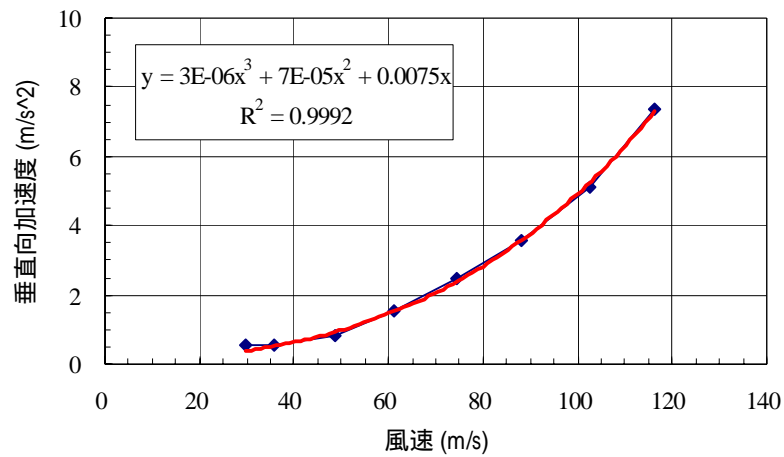


圖 3-19 橋樑加速度擾動均方根值(位置 1-主跨 1/3 處)

在橋樑實場量測方面，受天候之影響，量測當日之風速並不大，而由於無法封閉道路，車輛行經橋樑時，對橋樑會造成相當顯著之振動，因此，在儲存量測資訊時，同時以人為註記方式將車輛行經橋樑之紀錄一併儲存於檔案中，以備比對分析之參考。全橋模型風洞實驗中，橋樑模型之振動係僅由風力所引起，在進行受風反應之比較探討時，需儘量摒除車流振動之因素。高屏溪斜張橋主跨長 330 公尺，車輛行經該橋跨約需 12 秒，因此挑選的反應歷時需有足夠長之無車流時段。經檢視全部 44 分鐘的反應歷時紀錄，僅能篩選出兩段約 20 秒無車流紀錄(約第 23 及 41 分鐘)，以其間之 6 秒鐘加速度反應歷時，配合當時之風速紀錄進行分析比對，如表 3-10 所示。

表 3-10 之橋樑實際受風反應與全橋模型風洞實驗比較中發現，加速度振動反應之平均值差異較大，橋樑實際加速度反應平均值接近零，而風洞實驗值皆接近一固定值，可能係儀器系統誤差所造成；而在擾動均方根值方面，二者之差異約在 20% 以內，其中扭轉向差異更在 10% 以內，此初步比對結果令人滿意，也顯示風洞實驗在良好的設計與控制下，應能可靠的預測與評估構造物受風反應行為。

**表 3-10 橋樑受風反應紀錄分析比對結果**

平均風速 (m/s)	橋樑實際受風反應			全橋模型實驗預測值	
	方向	平均值	擾動 RMS	平均值	擾動 RMS
3.3	垂直向 (m/s <sup>2</sup> )	0.0005	0.0330	0.36	0.0256
	扭轉向 (rad/s <sup>2</sup> )	-4.7E-5	0.0042	0.027	0.0042

高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

5.5	垂直向 ( $m/s^2$ )	0.0089	0.0374	0.36	0.0439
	扭轉向 ( $rad/s^2$ )	-1.6E-4	0.0060	0.027	0.0066

## 第四章 結論與建議

### 第一節 結論

本計畫以高屏溪斜張橋為對象，利用本所現有儀器設備，對該橋樑進行實場受風反應之量測與分析，並與全橋模型風洞實驗結果進行比較探討，除藉此熟悉實場量測方法與風洞實驗技術外，並得以初步瞭解構造物風洞實驗與實際反應之異同處，同時研擬與整合相關數據分析程序，以逐步建立本所在風工程領域之實驗研究與檢測能力。綜合本計畫執行成果，說明如下：

#### (一) 實場量測部分

由於大自然環境不易掌控，欲量測構造物受自然力作用下之反應並不容易，因此就本案高屏溪斜張橋而言，欲獲得更佳之量測數據，必須進行長時間之監測，累積更多之資訊，從而進行更精確之分析與探討。另外，一般狀況下，橋樑振動反應之外力來源，包括風力與車流，車輛行經橋樑所造成之振動不易從量測數據中分離，因此若要純粹探討實際橋樑受風反應並不容易，本案係採人為紀錄方式記載車輛通行狀況，雖然不夠科學與精確，卻仍可做為探討現有橋樑純受風反應之一種手段，未來若能進一步探討車流影響，以及車流與強風下橋樑反應之交互影響，對探討現有橋樑之安全性將更有幫助。

本計畫在實場量測部分，已初步建立本所在結構物振動反應之量測技術與能力，同時研擬出一套數據擷取與分析之基本程序，對於未來相關之現地檢測服務與研究，在時間與效益上，將有所幫助。另外，若後續從事類似之實場量測，由於陣風效應不過數秒鐘，在風速量測

方面，應採用更大之取樣速率，以在短歷時間之統計分析方面能有足夠之樣本數，與風洞實驗之比較探討亦較為容易。

## (二) 風洞實驗部分

一般橋樑風洞實驗，多在探討強風作用下之結構安全性與穩定性，唯有探討渦流振動、行車舒適性或類似本計畫之橋樑受風反應之比較探討時，才將注意力放在低風速範圍。風洞流場在低風速下不易穩定，加上儀器設備之雜訊影響，使得在處理擷取訊號之判斷上，增加許多困擾，因此，事前各項儀器設備之率定，以及選擇適當之擷取系統與監控軟體，便顯得相當重要。

本計畫藉由實測之風場資訊，以做為與全橋模型風洞實驗結果之比對基礎，然而，實測所得之風場平均風速過小，約僅 3.5 m/s 而已，風速最大為 8.5 m/s，最小為 0.8 m/s，陣風效應不過數秒鐘，以此最大風速轉換至風洞流場流速，約僅 0.8m/s，此流場相當不可靠，因此採用較大流場流速，分階段量測橋樑振動反應，藉由回歸分析，預測低風速下之橋樑振動反應，經與實場量測數據比對結果，在擾動均方根值方面，二者之差異約在 20% 以內，其中扭轉向差異更在 10% 以內，此初步比對結果顯示風洞實驗在良好的設計與控制下，應能可靠的預測與評估構造物受風反應行為。另外，本計畫亦初步建立本所在風洞實驗之量測技術與能力，研擬出一套數據擷取與分析之基本程序，對於未來相關之風洞檢測服務與實驗研究，在時間與效益上，將有所助益。



## 第二節 建議

依據本計畫執行結果，針對風洞實驗與構造物實場監測之後續發展，分項建議說明如下。

### 立即可行之建議

主辦機關：公共工程委員會、交通部、內政部等

協辦機關：內政部建築研究所

建築物耐風設計規範已頒布施行，規範中針對特殊構造物要求應進行風洞實驗，過去國內特殊構造物多委託外國實驗室執行風洞試驗，經由本計畫使用本所風洞設備進行全橋模型風洞實驗，加上過去在建築模型風洞實驗研究之成果，顯示國內已有足夠能力執行各類風洞實驗。因此，在構造物耐風設計或防風規劃上，除落實法規規定外，建議能在國內執行風洞實驗，有效提升工程與學術水準。

### 中長期之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：相關學術團體

風洞實驗已成為解決大氣邊界層風工程問題之主要手法，實驗技術與方法為實驗成敗之主要關鍵，而實驗條件與假設亦為結果可靠性之重要因素，因此，為避免過多之不確定性存在，如何訂定一套完整之實驗規範，應是本所與學術界在未來可進一步探討之課題。

### 中長期之建議

主辦機關：公共工程委員會、交通部、內政部等

協辦機關：內政部建築研究所、相關學術單位

國內特殊構造物日益增多，不論是超高層建築、巨蛋類長跨度屋

## 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

頂構造、懸索式長跨度橋樑等等，皆為風力敏感構造物，為了確保構造物在生命週期內之安全性與使用舒適性，建議應逐步建立長期監測系統，除可做為構造物之健康檢測紀錄外，亦可供做相關研究使用，對提升工程技術與學術水準應有實質助益。

## 附錄一 期中審查會議紀錄

內政部建築研究所 95 年度「建置本所風洞之煙流流場可視化技術研究」、「高屏溪斜張橋受風反應實場監測與風洞實驗之比較探討」、「建築材料實驗群建築先進工程技術應用之探討」自辦研究計畫期中審查會議紀錄

- 一、時 間：95 年 7 月 31 日（星期一）下午 2 時 30 分
- 二、地 點：15 樓第一會議室
- 三、主持人：李主任秘書玉生
- 四、記錄：劉文欽、陳柏端、張邦立
- 五、出席人員：如簽到單
- 六、簡報內容：(略)
- 七、綜合討論意見：

### (一) 建置本所風洞之煙流流場可視化技術研究

邱顧問昌平

- (1) 以煙流技術進行風場可視化之研究，已具初步成果。
- (2) 文字、圖、表等仍須有稍許修正。

### (二) 高屏溪斜張橋受風反應實場監測與風洞實驗之比較探討

邱顧問昌平

- (1) 本研究計劃進行高屏溪斜張橋之實場監測與橋樑模型之風洞實驗後，以量測之結果進行分析比對，工作十分複雜，但極有意義。
- (2) 全橋模型之縮尺模型製作要點，宜簡要說明結構模擬理論以及如何選用材料。(圖 1-6 之註解及文字之描述仍不很清楚)。
- (3) 簡報中所提之 DMI 試驗亦請在以後之報告中說明之。

(三) 建築材料實驗群建築先進工程技術應用之探討

邱顧問昌平

- (1) 本研究利用建研所建築材料實驗群大樓及大型力學實驗室工程興建之機會，同步辦理許多先進工程技術之研究，相當有價值，目前之成果顯現相當完整且豐富。
- (2) 很多現場之施工步驟、儀具埋設、數個階段的觀測或量測等作業繁多，在在需要承商及監造單位配合，故欲善其事，在工程構想階段或規劃階段即須納入考量而於委託契約或工程合約中明訂額外之配合事項；推動委員會亦應如是。

八、會議結論：

- (一) 與會學者專家之意見，請研究團隊作為後續研究之參考。
- (二) 本次會議同意完成期中簡報，請積極辦理後續研究工作。

九、散會：下午 5 時 30 分

## 附錄二 期末審查會議紀錄

內政部建築研究所 95 年度自辦研究計畫「高屏溪斜張橋受風反應實場監測與風洞實驗之比較探討」、「建置本所風洞之煙流流場可視化技術研究」與「邊界層流中雙棟鄰近建築物之受風效應研究」期末審查會議紀錄

一、時間：95 年 12 月 25 日（星期一）上午 9 時 30 分

二、地點：本所簡報室（台北縣新店市北新路 3 段 200 號 13 樓）

三、主持人：葉組長祥海 記錄：陳柏端

四、出席人員：(如簽到單)

五、報告事項：(略)

六、與會人員發言要點：

(一)「高屏溪斜張橋受風反應實場監測與風洞實驗之比較探討」

邱顧問昌平

1. 對長跨度橋樑之受風反應辦理實場監測與風洞實驗之技術(理論與實驗)，基本上已有一些初步成果。
2. 第三章中對於風速及加速度之量測，分別將其取樣時之頻率設定為 4 Hz 及 100 Hz(配合儀器)，文字不宜用“取樣頻率”。圖 3-1 及圖 3-2 非為“控制程序”，似為資料擷取之儀器操控(圖 3-8 亦同)。

葉組長祥海

1. 本案風力多大時橋樑始發出限制車行之警訊，可否索尋相關資訊，並作實驗測試之。

(二)「建置本所風洞之煙流流場可視化技術研究」

邱顧問昌平

1. 本研究主要是在建立風洞實驗室風洞流場(煙流)可視化之

## 高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

- S.O.P.，建置並使用一些儀器及佈設、操作（主要為煙霧產生器、雷射光幕產生器（氫離子雷射）等），已有一些初步成果。
2. 本研究亦做油流化可視化實驗；惟前者已有甚多需克服之困難問題尚待改善，宜集中一個重點繼續努力。

葉組長祥海

1. 可視化之定性描述狀況，經由設備儀器程式轉為數位化之定量化模式，已有相關研究方法，請加以蒐集資料，並多著墨。

### (三) 「邊界層流中雙棟鄰近建築物之受風效應研究」

邱顧問昌平

1. 以雙方柱試體（ $H/D=6$ ）在邊界層流下之風洞實驗結果與數值分析結果互相比較兩者皆相當接近，顯示成果不錯。
2. 使用之中文名詞建議如下：試體之  $L=B=D=20\text{cm}$ ；雙柱間距  $S$  與  $D$  之比（ $S/D$ ）稱為間距比；柱體高度  $H$  與  $D$  之比（ $H/D$ ）稱為高寬比；表 4-1 各長度之無因次單位宜加註。

葉組長祥海

1. 數值分析模式限制條件多，變化狀況複雜不易模擬，建請多利用風洞實驗推導研究發展成果。

中華民國結構技師工會全國聯合會 江技師新煌

1. 本案研究雙棟建築物之風洞效應，非常有意義，因國內高樓建築多，雙棟建築間之互相影響，值得研究，建議後續能針對更多不同類狀況加以探討，以供設計之參考。

## 七、結論：

1. 與會委員及專家代表意見請詳實紀錄，並請研究同仁參酌修正，以充實計畫內容，儘速依自行研究執行期程提出成果報告。

## 八、散會(中午 12 時)

## 參考書目

### 中文部分

1. 何明錦、葉祥海、鄭啟明，「風洞實驗技術於土木建築構造物之應用與驗證計畫 - 橋梁風洞實驗」，內政部建築研究所，2005.12。
2. 陳振華、王寶璽、歐陽綦，「斜張橋動力試驗與分析」，中華民國第七屆結構工程研討會，2004.08。
3. 「虎門大橋主橋自振特性測定」，同濟大學學報，1999.04。
4. 朱佳仁，「風工程概論」，科技圖書，2006。
5. 陳建州、陳瑞華、張君旭，「高屏溪斜張橋穩定性之定期監控」，中華民國第六屆結構工程研討會，2002.08。
6. 陳振華、王仲宇、王顯霖、辜琪嬪，「淺談橋梁監測系統-以南方澳大橋為例」，中華民國第六屆結構工程研討會，2002.08。

### 英文部分

1. John H.G, Macdonald, "Evaluation of buffeting predictions of a cable-stayed bridge from full-scale measurements", J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91(2003) 1465-1483。
2. J. B. Frandsen, "Simultaneous pressures and accelerations measured full-scale on the Great Belt East suspension bridge", J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89(2001) 95-129。
3. J. M. W. Brownjohn, A. Zasso, G. A. Stephen, R. T. Severn, "Analysis of experimental data from wind-induced response of a long span bridge", J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 54/55 (1995) 13-24。
4. Emil Simiu, Robert H. Scanlan, "Wind Effects on Structures", 3<sup>rd</sup> edition, 1996.

高屏溪斜張橋受風反應實場量測與風洞實驗之比較探討

5. Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, “Random Data: Analysis and Measurement Procedures”, 1971.
6. ASCE, “Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures”, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 67.