

結構物強震監測紀錄應用於結構物耐震評估之研究：

建構結構物強震及常態反應特徵分析之軟硬體系統整合研究

Integrate Software and Hardware for Building Structure Health Monitoring under Operating Condition

主管單位：交通部中央氣象局

羅俊雄¹

趙書賢²

林佩娟¹

Chin-Hsiung Loh¹

Shu-Hsien Chao¹

Pei-Chuan Lin¹

¹ 國立臺灣大學工學院地震中心

² 國家地震工程中心

摘要

中央氣象局地震測報中心近十多年來在臺灣強地動觀測計劃之執行下，對選定之建築物及橋梁有強震網之建置，以收集其地震反應，做為回饋往後對結構物耐震設計之參考。對此所收集到之地震反應資料，有必要加以進行系統化之分析，建立資料庫。其中以特殊構造之建築物（如具中間層隔震之台大土木新研究大樓）及隔震橋梁或長跨度橋梁（如嘉南大圳隔震橋），更有必要做此分析及資料庫之建置，分析結果未來可供該結構物耐震能力評估之依據。2013 之研究計劃(MOTC-CWB-102-E-10) 選擇三棟建築物及三座橋梁（台大土木系新研究大樓；台電大樓；中興大學土木環工大樓；南二高嘉南大圳橋；牛欄河二號橋），進行該結構物所收集到之地震反應進行分析，探討該結構物動態特性及比較不同地震反應下之不同。針對每個地震反應事件所分析之結果建立該結構物分析報告書，並比較不同地震事件之反應分析，建立評估及診斷報告。反應分析報告書內容將包含下列事項：

1. 結構物之描述(含強震儀之位置、結構形式、構造種類等)。
2. 收集到之紀錄反應歷時及其反應頻譜。
3. 利用子空間系統識別法與遞迴子空間識別法探討結構物振頻、阻尼比，並探討結構物動態特性之時變性。研究所得之各結構相關的資料皆已存檔備存，可供後續的研究參考與相關應用。

本 2014 年之研究亦配合中央氣象局對結構物地震反應所進行強地動觀測計劃，選擇五棟建築物及兩棟特殊結構(含台大土研新隔震大樓及一座隔震橋梁)，進行該結構物所收集到之地震反應進行詳細分析(加入近期最新所收集之資料)，配合新開發高穩定性之 SI 方法，探討該結構物動態特性及比較不同地震反應下之不同。針對每個地震反應事件所分析之結果建立該結構物之振動頻率(双向)、振動阻尼及振態。並比較不同地震事件之特徵反應，並針對特殊(異常)事件再予以更深入分析其原因。為了得到最佳的系統識別結果，以及提高運算效率，蒐集所得之訊號，都會

先經過前處理，再進行後續系統識別的工作，以得到結構之模態特性。研究內容含：

(1) 建立自動化量測及分析之系統，可進行結構健康診斷自動化及線上分析；以成熟之結構健康診斷方法為基礎並依實務需求進行適當調整，使方法具有「自動化」之特性。

(2) 簡便的分析方法整合介面，以利於理論發展成果得以進入系統驗證並且落實於實務中。配合先進的資料分析方式，引入可信度高之結構動態特徵之識別。並針對特殊事件予以深入分析，了解異常結構動態特性之原因。

關鍵詞： 系統識別， 結構物地震反應， 結構物評估及診斷報告

Abstract

This proposal is to continue the researches on the identification of structural dynamic characteristics of buildings/bridges including the data collected in the year of 2013. Based on the CWB Taiwan Strong Motion Instrumentation Program (TSMIP) four instrumented buildings (Tai-Power building, NTU-CE isolated building and NCHU-CE building) and one instrumented bridges (Chia-Nan Isolated building) are selected as the target structures for the analysis. The most update subspace identification (SI) technique will be used to extract the dynamic characteristics (natural frequencies, damping ratios and mode shapes) of these structures with the consideration of removing spurious modes. The time-varying system natural frequencies, damping ratios and mode shapes for some particular events will be discussed in details. In this study, a smart structure system is developed that can automatic archive the the building response data in its operating condition and conduct the system identification analysis. Through the long term analysis of different earthquake events, the abnormal dynamic characteristics will be discussed in more details.

The content of this research include:

(1) Develop a smart sensing system which can archive the structural response data from its operating condition. Automatic system identification method will be used to analyze the data and display the dynamic characteristics of the structure.,

(2) Integrate the hardware and software of the system identification and implemented in the real structure (NTU-CE building),

(3) Use the update subspace identification (SI) technique to identify the system dynamic characteristics (including mode shapes, damping ratios and natural frequencies). For the abnormal cases a more detail analysis (such as time-frequency analysis) will be applied.

Keywords: System Identification, Seismic response of structure, Structural assessment,

第一章 應用子空間識別法於結構物之識別

台灣位於地震帶上，經常發生嚴重的地震災害，造成人民生命財產的損失。因此了解結構物在強震時的反應，訂定經濟且安全的房屋耐震規範，發展減少地震災害的方法已是刻不容緩的工作。有鑑於此，中央氣象局於民國八十一年度起執行「強地動觀測計畫」，藉由安裝在不同地質、不同高度及特定之結構體中設置觀測儀器，記錄強震時結構物之反應，提供予學術界及工程界研究，評估現有結構是否需要補強，並據以訂定安全、經濟且適合台灣地區使用之耐震設計規範。

中央氣象局對於結構物站址的選定主要依循下列原則：(1)結構物所在之地盤特性，依硬度分為軟弱地盤、中等地盤及堅實地盤(2)結構物之自由振動週期，分為低層建築物(振動週期 <0.5 秒)、中高層建築物(振動週期 0.5 秒 ~ 1.5 秒)及超高層建築物(振動週期 >1.5 秒)(3)非結構因素，考慮該棟結構物的建築功能，例如學校、醫院或通信設施等，來決定是否列入儀器安裝對象。依上述之原則，中央氣象局已完成 52 棟建築物及 17 座橋梁之結構物強震監測系統安裝，其結構物強震監測系統分布圖如圖 1. 所示。

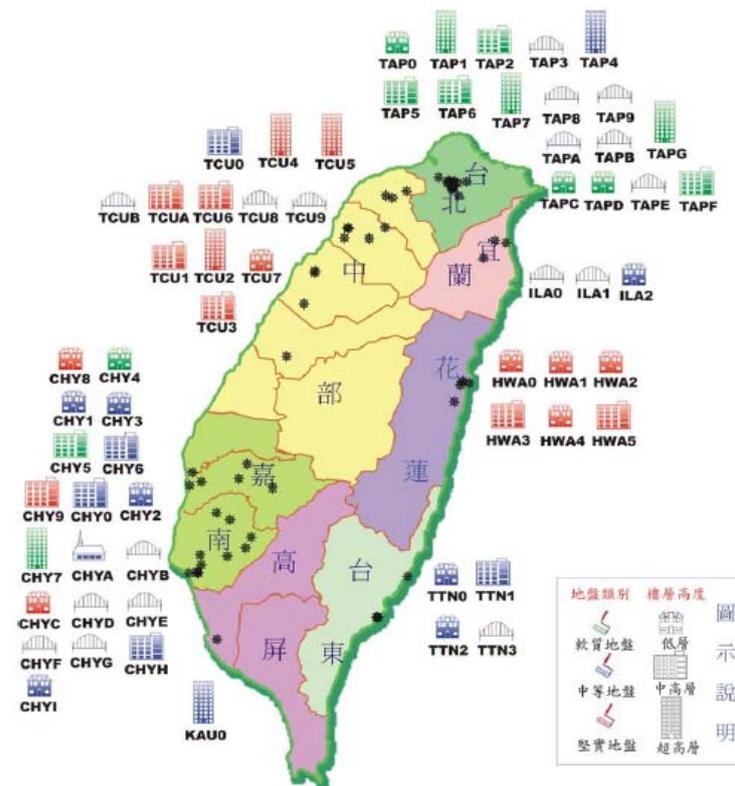


圖 1:交通部中央氣象局結構物強震監測系統分布圖

1.1 中央氣象局強地動觀測計畫

台灣位於地震帶上，經常發生嚴重的地震災害，造成人民生命財產的損失。因此了解結構物在強震時的反應，訂定經濟且安全的房屋耐震規範，發展減少地震災害的方法已是刻不容緩的工作。有鑑於此，中央氣象局於民國八十一年度起執行「強地動觀測計畫」，藉由安裝在不同地質、不同高度及特定之結構體中設置觀測儀器，

記錄強震時結構物之反應，提供予學術界及工程界研究，評估現有結構是否需要補強，並據以訂定安全、經濟且適合台灣地區使用之耐震設計規範。

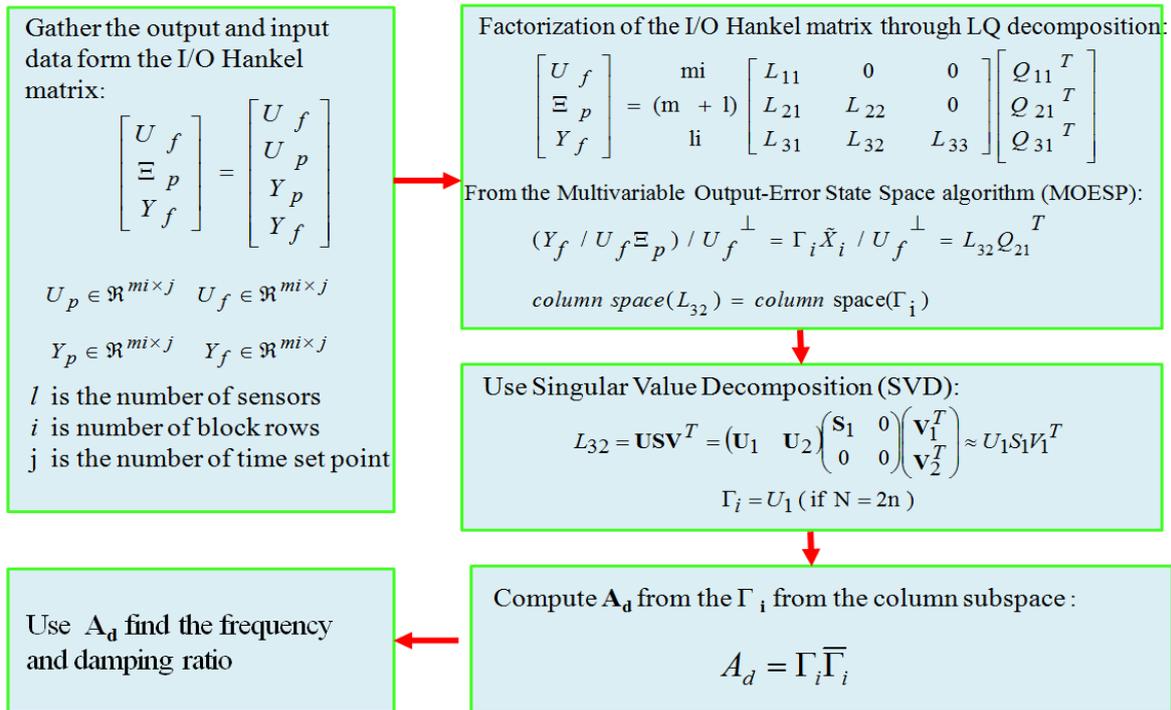
中央氣象局對於結構物站址的選定主要依循下列原則：(1)結構物所在之地盤特性，依硬度分為軟弱地盤、中等地盤及堅實地盤(2)結構物之自由振動週期，分為低層建築物(振動週期 <0.5 秒)、中高層建築物(振動週期 0.5 秒~ 1.5 秒)及超高層建築物(振動週期 >1.5 秒) (3) 非結構因素，考慮該棟結構物的建築功能，例如學校、醫院或通信設施等，來決定是否列入儀器安裝對象。依上述之原則，中央氣象局已完成 52 棟建築物及 17 座橋梁之結構物強震監測系統安裝。於本論文將選取七棟結構物，其結構物分別為台大新生大樓、中興土木環工大樓、台科大營建系館、交大公教宿舍、桃園縣市政中心及台電大樓，此六棟皆為一般 RC 結構；另外一棟為台大土木研究大樓，是一含中間層隔震系統之特殊建築。

1.2 應用于空間識別法於結構物之識別分析與討論

為了得到最佳的系統識別結果，以及提高運算效率，本研究蒐集所得之訊號，都會先經過前處理，再進行後續系統識別的工作，以得到結構之模態特性。前處理的過程主要包含：

- a. 排除異常訊號：排除量測異常的訊號，避免使用到異常的訊號進行系統識別，而得到錯誤的分析結果。
- b. 訊號擷取：依據量測訊號能量，個別計算其能量達 5%及 95%的時間，分別為擷取訊號之起始時間及結束時間。如此可確保用於分析的訊號皆為訊號之主要能量段。
- c. 濾波：在擷取訊號時常伴隨著雜訊的產生，為了使分析結果不受到雜訊之影響，故在使用 SI-DATA 做系統識別前先對原始訊號做濾波動作。低通濾波器(Low-pass Filter)在系統識別中可消除高頻部分之噪音干擾，以增加穩定圖的穩定性，使分析者較易從穩定圖中判斷系統特性。本文採用的低通濾波器為 Butterworth IIR，其階數為 10，截止頻率為 25Hz。
- d. 降低取樣頻率：由於 SI-DATA 為時間域分析方法，降低取樣頻率可以增加波型週期，在繪製穩定圖時可以得到較佳的結果，如此可以提高對結構物基本低頻振態系統識別的準確度。於本文中，將取樣頻率自 200Hz 降到 50Hz。

針對地震資料之分析採用子空間識別法(Subspace identification, SI)。此方法是系統識別方法中較為先進的方法之一，此方法可根據地震的歷時紀錄(包含地表與各樓層的絕對加速度紀錄)識別出結構所對應的狀態空間模型(State space model)，根據此狀態空間模型可再解出結構系統的模態頻率、阻尼與振形等模態參數，在已知質量矩陣且模態參數識別良好的狀況下甚至可直接計算出結構的阻尼與勁度矩陣。其分析流程所示。



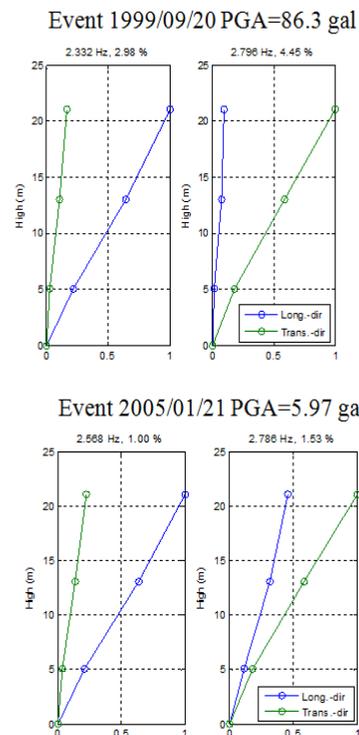
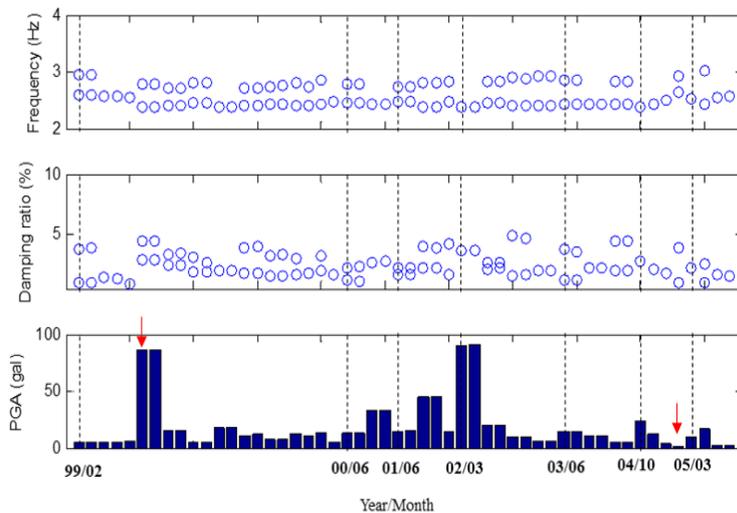
1.3 識別結果整理

上節中已對這六棟建物做系統識別，並且分別探討頻率、阻尼比與最大輸入地表加速度之間的關係，及各個識別頻率相對應的振態形式。於本節將針對其識別之系統頻率做一總整理，以便後續之討論。

1. 台灣大學新生大樓：第一個縱向(Longitudinal)振態頻率為 2.45Hz；第一個橫向(Transverse)振態頻率為 2.83Hz。

□ 系統識別結果

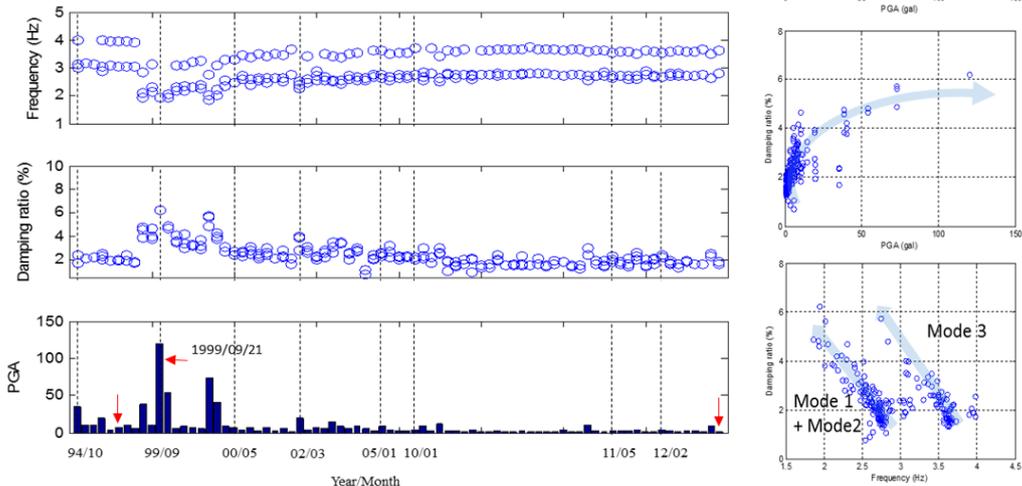
- a. SI-DATA 結果：Number of row 100~130，Order 10
- b. 識別之第一振態(縱向)及第二振態(橫向)



2. 中興大學土木環工大樓：本棟結構物之識別結果可分為三期，(a)921 地震前事件，第一個縱向及橫向振態頻率為 3.06Hz，第一個扭轉向振態頻率為 3.93Hz；(b)921 地震後結構物受損壞，第一個縱向及橫向振態頻率為 2.13Hz，第一個扭轉向振態頻率為 3.15Hz；(c)結構加勁補強後，第一個縱向及橫向振態頻率為 2.66Hz，第一個扭轉向振態頻率為 3.52Hz。

□ 系統識別結果

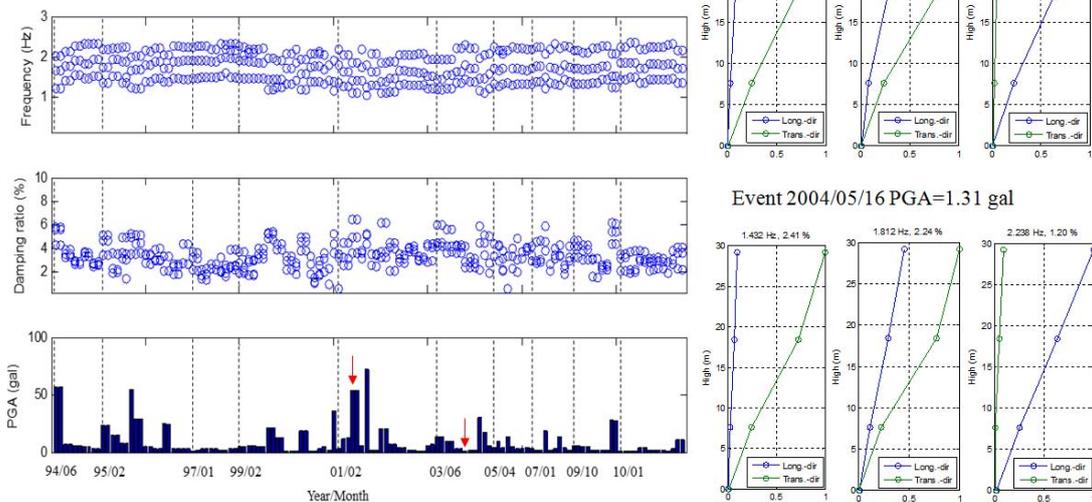
- 列數：50~100，Order:10
- 不同最大地表輸入加速度下識別模態頻率與阻尼比
- 識別模態頻率與地表輸入最大加速度關係圖
- 識別模態頻率與阻尼比之關係



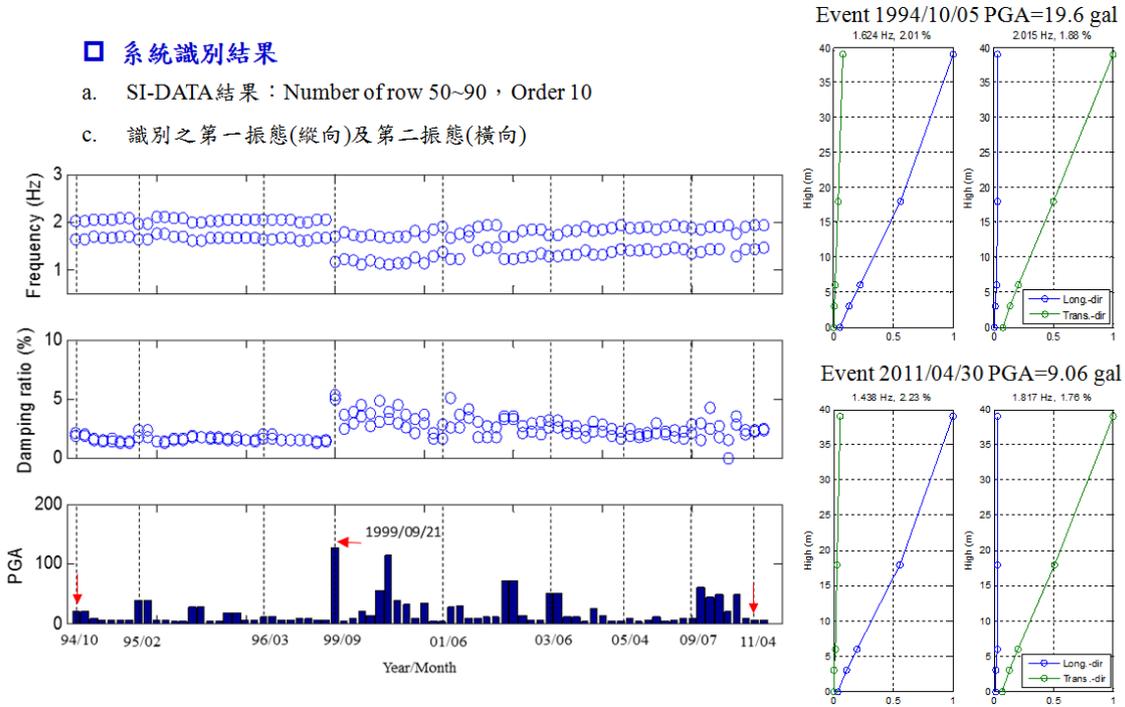
3. 台科大營建系大樓：第一個橫向振態頻率為 1.35Hz；第一個扭轉振態頻率為 1.77Hz；第一個縱向振態頻率為 2.2Hz。

□ 系統識別結果

- SI-DATA結果：Number of row 50~100，Order 10
- 識別之第一振態(橫向)、第二振態(扭轉向)及第三振態(縱向)



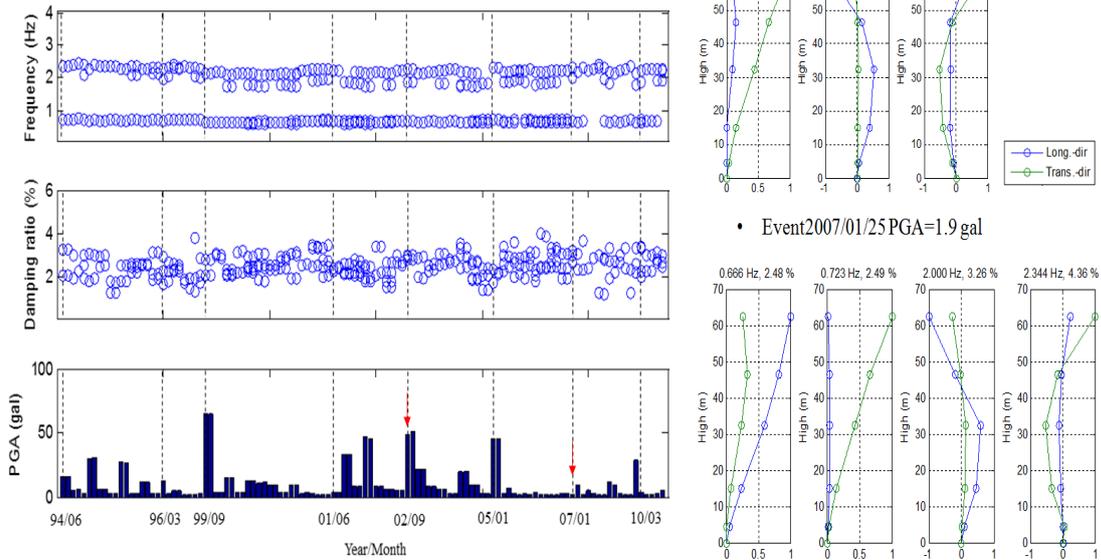
4. 交通大學公教宿舍：本棟結構物之識別結果可分為兩期，(a)921 地震發生前事件，第一個縱向振態頻率為 1.66Hz，第一個橫向振態頻率為 2.03Hz；(b)921 地震發生後事件，第一個縱向振態頻率為 1.33Hz，第一個橫向振態頻率為 1.81Hz。



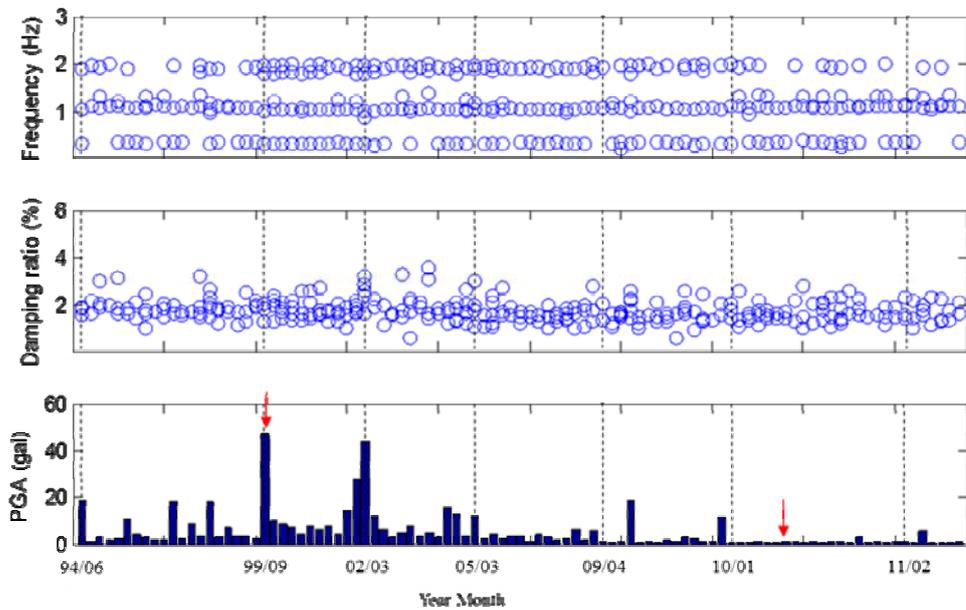
5. 桃園縣政府市政中心：第一個縱向及橫向振態頻率為 0.67Hz；第二個橫向振態頻率為 2.23Hz。

□ 系統識別結果

- a. SI-DATA 結果：Number of row 50~90，Order 10
- b. 識別之前四個振態頻率



6. 台電大樓(圖 1.3.6)：第一個縱向及橫向振態頻率為 0.37Hz；第二個縱向及橫向振態頻率為 1.09Hz；第三個振態頻率為 1.99Hz。



第二章 結論與未來展望

本文研究採用中央氣象局過去在台灣的結構佈設的強震觀測網觀測所得之資料，選擇七棟建築物及一棟特殊建築，利用結構物的長時間監測資料，透過所量測到的訊號使用子空間識別法得到系統特性，了解各結構的模態特性，以及其隨著地震事件不同的變化。另外更進一步使用識別之第一個模態頻率與國內耐震規範中結構設計第一震態頻率經驗公式比較。

2.1 結論

採用子空間識別法進行系統參數識別，需要先決定擷取之資料長度、漢克矩陣列數 i 及系統階數，其值對於識別結果有很大的影響。根據本研究分析經驗大約有以下的整理：

1. 系統階數的選定：此數值的選定決定識別結構振態數的多寡。真實結構物的模態其實是無限多個，但只有前幾個主要模態在地震作用下會被激發出來，因此在做第一次的參數設定時，先將系統階數取高一些，並將分析結果繪製於穩定圖，由於一開始取的系統階數很多，穩定圖會較零亂，無法分辨系統特性，但依舊可以看到主要振態的分布；因此下一步則是將系統階數逐漸降低，直到可以清楚的分辨系統特性，然後藉由振形來判斷是否為結構模態。
2. 漢克矩陣列數設定：列數取的越多表示列入分析的資料越多，識別結果相對之穩定。然而列數取太多亦會造成矩陣運算上的耗費時間，因此取系統穩定後之列數即可。
3. 擷取資料長度與系統階數之關係：若擷取的資料長度越短，在作系統分析

時，因為表示參與分析之資料訊息越少，故系統階數的設定必須要設多一點，以免漏掉系統模態。

由系統識別的結果可以發現，大部分的結構本身具有非線性的行為，因此觀測所得的模態頻率值會隨著地震力的大小而改變，依據所選擇的幾棟分析結果來看，可以得以下之資訊：

1. 頻率在地震下的動態變化情形：由識別模態頻率與最大地表輸入加速度的圖中可以知道較矮樓層的建物，如中興土木環工大樓、台科大營建系館及交大公教宿舍，其識別模態頻率在地震來臨時變化較大；相較之下，高樓層的頻率變化則較小，如桃園縣市政中心及台電大樓。
2. 了解結構物是否有損壞：識別之模態頻率變化可作為結構物是否受損的依據。以中興大學為例，在 921 地震前，其系統第一個識別頻率約為 3Hz，地震過後結構受損，系統頻率驟降為 2Hz，經過結構補強後，系統頻率再度回升至 3Hz 附近。一般來說，健康的結構系統頻率應維持在一定頻率附近，而不會有如此明顯的落差，因此長時間的頻率變化情形可以幫助使用者進行結構健康診斷，了解結構物是否有損壞與損壞的情況為何。
3. 幫助釐清結構系統的阻尼比：由觀測的結果可以觀測到阻尼比的變化。於一般 RC 結構，其阻尼比分布於 1%~5% 之間，與國內結構設計規範之假設相符；另外於特殊結構，如台大土木研究大樓，阻尼比分佈達 8% 左右，由此識別結果可以看到該大樓裝置的消能減震器在大地震來臨時，可以有效的提高結構的消能能力，減少地震力對結構物的衝擊。
4. 土壤-結構互制效應：將自由場的量測資料視為地震輸入，結構物反應視為地震輸出，如此可以觀察結構物受土壤的影響，如 LSST 震列，分析時考慮土壤效應及不考慮土壤效應之識別結果，可以看到前者的識別頻率較低，耐震能力較差，因此在做結構設計時須特別注意土壤與結構間的互制效應。

圖 2 則將六棟結構之識別模態頻率和最大量測基礎加速度(PGA) 繪出予以比較。同時圖 3 則將六棟結構之識別模態頻率與阻尼比繪出予以比較。

最後，將一般 RC 建築的識別模態頻率與國內建築物耐震設計規範節 2.6 式 3.1 及式 3.2 相比較，分別為鋼筋混凝土建築物、鋼骨鋼筋混凝土建築物及鋼造偏心斜撐建築物之週期經驗公式，

$$T = 0.07h^{3/4}, \quad f = \frac{1}{T}$$

其他建築物之週期經驗公式

$$T = 0.05h^{3/4}, \quad f = \frac{1}{T}$$

圖 4 為本論文中分析之第一個模態頻率與設計規範公式之關係圖。圖中亦繪出一般 RC 建物分析之第一個模態頻率平均值與設計規範公式之關係圖，由此圖可以看到在高度 50 公尺以下的建築，識別頻率大部分都高於規範中的設定；而在高樓建築，其識別頻率則與耐震規範中的經驗公式相近。因此於此處利用這幾筆資料回歸

出一條公式，希望能與真實結構物更加符合，其式如下所示：

$$f = 4.0917e^{-0.0227H}$$

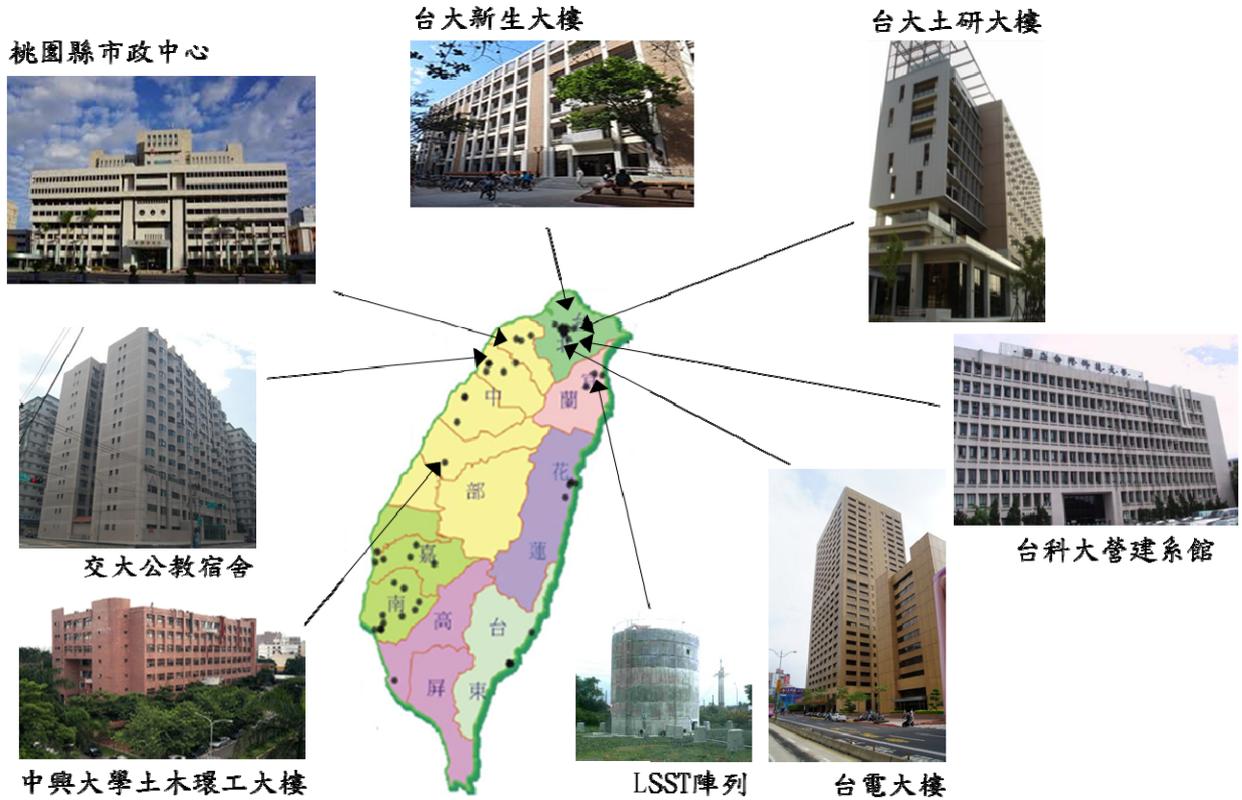


圖 1 本論文中分析之建物分布圖

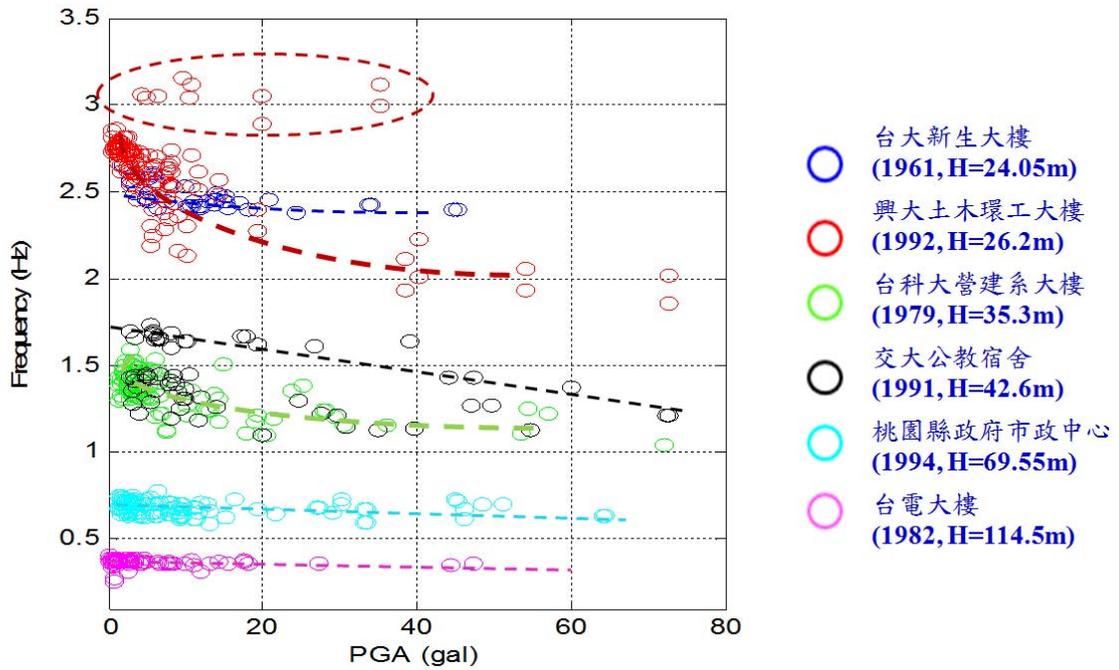


圖 2: 六棟建物所識別模態頻率與 PGA 之關係圖。

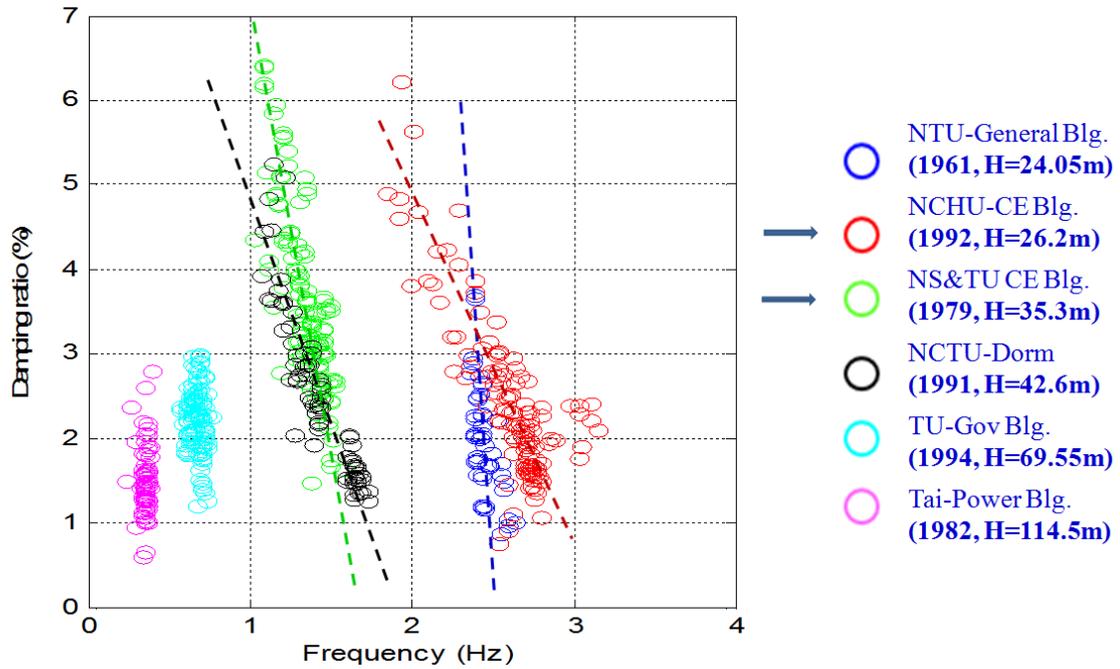


圖 3: 六棟建物所識別模態頻率與阻尼比之關係圖。

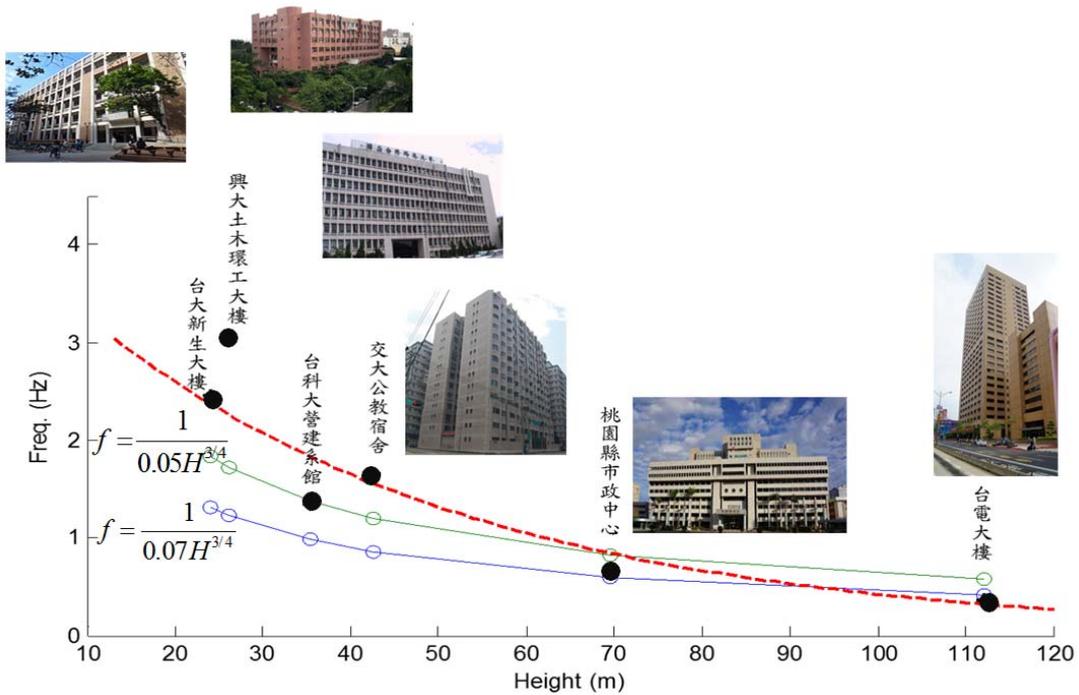


圖 4: 比較規範與現階段所提 RC 構造物主振動頻率與建物高度之關係圖。