

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

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)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-103 - E -14 -

執行期間：103 年 1 月 1 日至 103 年 12 月 31 日

計畫主持人：羅俊雄 教授

執行機構：國立台灣大學 工學院 地震中心

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

- 赴國外出差或研習心得報告 1 份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 103 年 11 月 21 日

政府研究計畫(期中)報告摘要資料表

計畫中文名稱	結構物強震監測紀錄應用於結構物耐震評估之研究		
計畫編號	MOTC-CWB-103-E-14		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立台灣大學工學院地震中心		
年度	103	執行期間	103-1-1 ~ 103-12-31
本期經費(單位千元)	400.		
執行進度	預定(%)	實際(%)	比較(%)
	40	40	100
經費支出	預定(千元)	實際(千元)	支用率(%)
	120.	120.	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	羅俊雄		趙書賢
			黃昱婷 林佩娟
			熊婉羸
報告頁數		使用語言	中文
中英文關鍵詞	Subspace Identification, Seismic response data of structures, 子空間系統識別、結構強震觀測資料		
研究目的	<p>本研究配合中央氣象局對結構物地震反應所進行強地動觀測計畫，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。研究中亦建置該結構物之常態微振動量測暨分析系統，並與強震監測系統進行整合，建立完整之地震及微振反應之量測架構，及建置自主性系統分析。分析中納入當前成熟且符合建物的結構健康診斷方法。將所開發之軟硬體加以整合並完成一套符合實務應用之結構健康診斷系統。研究內容含：</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p>		

<p>研究成果</p>	<p>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 2-10 及式 2-11 相比較，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進行比較，如下圖所示。圖中為一般 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。</p>
<p>具體落實 應用情形</p>	<p>建立自動化量測系統(結合強震及微振)及資料分析系統，可進行結構健康診斷自動化及線上分析，提升結構物之健康監測。</p>
<p>計畫變更 說明</p>	<p>(若有)</p>
<p>落後原因</p>	<p>(若有)</p>
<p>檢討與建議(變更 或落後之 因應對 策)</p>	

(以下接全文報告)

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

羅俊雄 趙書賢
國立台灣大學 國家地震工程中心

林昭儀 郭鎧紋
中央氣象局地震測報中心

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。研究中亦建置該結構物之常態微振動量測暨分析系統，並與強震監測系統進行整合，建立完整之地震及微振反應之量測架構，及建置自主性系統分析。分析中納入當前成熟且符合建物的結構健康診斷方法。將所開發之軟硬體加以整合並完成一套符合實務應用之結構健康診斷系統。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。前處理的過程主要包含了：

(1)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。

(2)低通濾波器--將各感測器量測所得之訊號，利用低通濾波器進行濾波，濾波的能量下降段起始頻率值為 25Hz。

(4)降低取樣率--將各感測器量測所得之訊號，將取樣率由 200Hz 降低為 50Hz，如此可以提高對結構物基本低頻振態系統識別的準確度。

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。

The objective of this research includes:

(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,

(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.

第一章 應用子空間識別法於結構物之識別

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，其結構物強震監測系統分布圖如圖 1.1.1 所示。

強地動觀測計畫使用之強震監測系統由四部分組成，包含感應器、電纜線、訊號轉換器及即時資料蒐集分析系統。其系統可接收 30 或 60 個記錄頻道，安全性高且具有多項即時資料分析以及可同時蒐集高、低倍率震波資料之功能。於本論文將選取七棟結構物及一座核電廠圍主體，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。安裝於結構物上的強震儀型號分別列於表 1.1.1，其感應器記錄取樣率為每秒 200 點或 250 點，系統使用 19 位元數值式強震儀，可記錄 $\pm 2G$ 的地震。於本章中，首先將針對所選取之一般 RC 建物作為研究對象，特殊結構將於第四章介紹，核電廠圍主體縮尺模型則於第五章討論。其分析結構位置分布如圖 1.1.2 所示。

1.2 應用子空間識別法於結構物之識別分析與討論

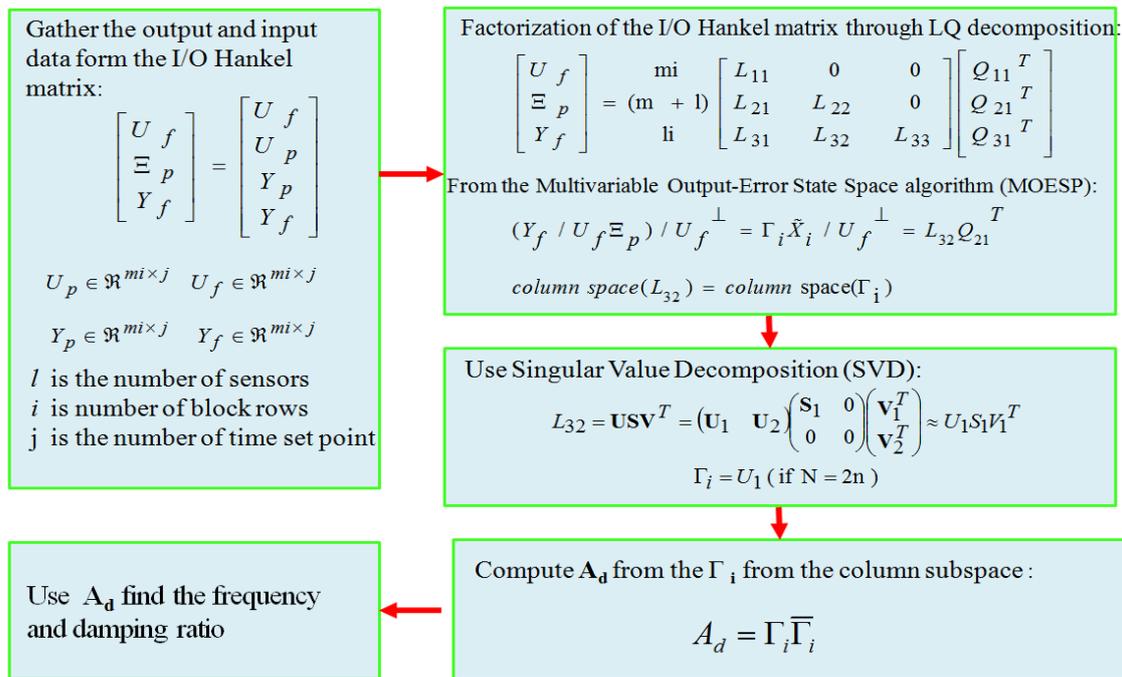
為了得到最佳的系統識別結果，以及提高運算效率，本研究蒐集所得之訊號，都會先經過前處理，再進行後續系統識別的工作，以得到結構之模態特性。前處理的過程主要包含：

- 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。



以下將說明選取之建築物運用資料型子空間識別法(SI-DATA)識別頻率、阻尼和振態，並對識別結果做討論及探討。

1.2.1 台灣大學新生大樓

台灣大學新生大樓是棟地上五層樓、造型特殊、機能顯露的鋼筋水泥建築(圖 1.2.1(a))。興建於 1961 年，長約 65 公尺，寬約 15 公尺，高度為 24.05 公尺的長形建築物，與椰林大道平行。此棟建物自 1999 年起開始記錄至 2006 年共有 54 筆地震紀錄，本文所分析之地震震央位置圖如圖 1.2.1(b)所示，包含不同震央距離、震源深度及地震規模。該建物內安裝了 26 個單軸向力平衡感應器於一樓樓地

板下、二樓樓地板下、四樓樓地板下及頂樓樓地板下，其強震系統感應器安裝位置剖面圖如圖 1.2.2 所示，樓層配置圖詳見圖 1.2.3。觀察各測點的位置後，選取一樓的 CH. 22、23、25、26 紀錄做為地震輸入值，另選取二樓的 CH. 13、15、16、17、四樓的 CH. 8、10、11、12 及頂樓的 CH. 1、2、3、4 紀錄作為建築物受震後的輸出值，將經過前處理的訊號以資料型子空間識別法(SI-DATA)進行系統識別。首先定義參數，選擇漢克矩陣之大小 $i=100\sim 130$ ；另外由於分析時，結構物低頻部分為研究者較關心部分，故於本文中系統階數取 10，希望能由穩定圖中觀察到低頻分布情形。

本棟結構物自 1999 年起開始記錄地震資料，於本文中針對所有共 54 筆紀錄進行 SI-DATA 系統識別，並取穩定圖之識別結果繪製於圖 1.2.4(a)，此圖為識別之系統頻率、阻尼對應於地震事件最大輸入地表加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)，由此圖可觀察到儘管在某些事件下無法識別出第二個頻率，但依舊可看出有兩個頻率的分布情形。由圖 1.2.4(a)知系統識別結果可能會受 PGA 影響，故將識別頻率與其相對應之 PGA 繪製於圖 1.2.4(b)，觀察到有兩個明顯的頻率區塊分布，第一個識別頻率落於 2.3Hz~2.6Hz，第二個識別頻率落於 2.7Hz~2.8Hz；圖 1.2.4(c)阻尼比則落於 1%~5%之間，與規範中之假設相符。其系統頻率皆隨著 PGA 越大而越小；另一方面系統阻尼比則隨著 PGA 越大而越大；將識別之頻率及阻尼比繪製於圖 1.2.4(d)，可看出阻尼比隨著頻率越低而越高。

從前步分析結果知道系統有兩個基本頻率，然而這兩個頻率分別代表的振態行為即是下一步要探討的內容。首先選取兩筆不同地震強度的事件，事件一發生於 1999/9/20，最大地表輸入加速度為 86.3gal；事件二則是在 2004/11/08，最大地表輸入加速度為 17.12gal。經由 SI-DATA 分析結果穩定圖如圖 1.2.5(a)所示，在地表輸入加速度較大時，其識別頻率分別落於 2.3Hz 及 2.8Hz；在地表輸入加速度較小時，其識別頻率分別落於 2.4Hz 及 2.8Hz，並將識別頻率對應之振態繪製於圖 1.2.5(b)，由此圖可知道於本棟建物識別之第一個頻率為縱向(Longitudinal)振態頻率；第二個頻率為橫向(Transverse)振態頻率。

1.2.2 中興大學土木環工大樓

中興大學土木環工大樓位於台中市南區，興建於 1961 年，是一棟地下一層、地上七層樓的鋼筋混凝土建築。其建築長度約 65.6 公尺、寬度約 37.5 公尺及高度約 26.2 公尺(圖 1.2.6(a))。此棟建物自 1994 年開始記錄地震資料，其結構在 1999 年 921 集集大地震後有些損壞，爾後歷經一年的時間修復。於本論文中，將分析本棟結構物自 1994 年至 2013 年共 79 筆地震紀錄，其震央分布如圖 1.2.6(b)所示。其紀錄可分為三期，第一期為 1994 年至 1999 年，結構未受破壞期；第二期為 1999 年至 2000 年，結構物受損壞並歷經修復期；第三期為 2000 年以後，結構物完成修復後。該建物內安裝了 26 個單軸向力平衡感應器於地下室一樓地坪上、一樓樓地板上、一樓樓地板下、四樓樓地板下及七樓樓地板下，另有同型態之三向感應器安裝於自由場，所有感應器皆以電纜線連至紀錄系統。其強震系統感應

器安裝位置剖面圖如圖 1.2.7 所示，樓層配置圖詳見圖 1.2.8。

觀察各測點的位置後，選取地下一樓地坪上的 CH. 4、8、6、10 紀錄做為地震輸入值，另選取二樓的 CH. 24、25、26、27、四樓的 CH. 12、13、14、15 及七樓的 CH. 18、19、21、22 紀錄作為建築物受震後的輸出值，以資料型子空間識別法 (SI-DATA) 進行系統識別。其訊號前處理方式與前節所述相同，原始訊號經低通濾波器，將高頻部分濾除後降低取樣頻率，作 SI-DATA 系統識別，其參數設定：漢克矩陣大小 $i=50\sim 100$ ，系統階數取 10。

自 1994 年至 2013 年本棟建物共有 79 筆地震紀錄，於本文章中分別對其作 SI-DATA 系統識別，其識別之系統頻率、阻尼比及相對應之最大輸入地表加速度繪製於圖 1.2.9(a)，從此圖可觀察到於 1999 年 9 月 21 日之前，系統識別震態頻率分別落於 3Hz 及 4Hz 附近；1999 年至 2000 年建築物一樓因地震而有所損壞，結構勁度降低，其識別之系統振態頻率皆有明顯的降低，分別落於 2Hz 及 3Hz 附近左右；在 2001 年後，因結構進行加勁補強，所以識別震態頻率上升回到 2.7Hz 及 3.6Hz 附近，接近於原先結構物之自然頻率。另一方面，將頻率與阻尼比分別與 PGA 繪製於同一張圖(圖 1.2.9(b)(c))，同樣可發現隨著 PGA 越大，其頻率會越低而阻尼比越高，故將識別頻率及相對應之阻尼繪於圖 1.2.9(d)可觀察到隨著頻率之降低，阻尼比越大。

由於本建物歷經破壞及修復，故針對 921 地震前後各選一筆資料進行系統識別。事件一發生於 1999/07/07，最大地表輸入加速度為 4.76gal；事件二則是在 2012/6/14，最大地表輸入加速度為 1.12gal。經由 SI-DATA 分析結果穩定圖如圖 1.2.10(a)及圖 1.2.11(a)所示，從穩定圖中可明顯的觀察到三個頻率，為了瞭解此三個頻率的振態形式，故將此三個識別頻率對應之立體振態繪製於圖 1.2.10(b)及圖 1.2.11(b)，由此圖可知道第一個及第二個識別頻率為水平振態頻率，第三個頻率為扭轉頻率；並發現很明顯的差異在於 921 地震前(事件一)所識別出來的系統頻率落於 3.14Hz 及 4.04Hz 附近，而 921 地震損壞後，結構修復完成後(事件二)，其識別頻率則落於 2.75Hz 及 3.63Hz 附近。

1.2.3 台科大營建系館

本建築為地下一層，地上八層之 RC 建築，建於 1979 年。大樓長約 80 公尺、寬約 6.5 公尺、高約 35.3 公尺，是一棟長寬比很大的長形建物(圖 3.2.12(a))。其大部分空間皆作為實驗室、教室及辦公室。該建物內安裝了 30 個單軸向力平衡感應器於地下室一樓地坪上、一樓樓地板下、二樓樓地板上、三樓樓地板下、六樓樓地板下及頂樓樓地板下，所有感應器皆以電纜線連至紀錄系統。其強震系統感應器安裝位置剖面圖如圖 1.2.13 所示，樓層配置圖詳見圖 1.2.14。觀察各測點的位置後，選取地下室一樓地坪上的 CH. 1、2、7 紀錄做為地震輸入值，另選取一樓的 CH. 8、9、11、三樓的 CH. 14、15、17、六樓的 CH. 18、19、22 及頂樓的 CH. 26、27、29 紀錄作為建築物受震後的輸出值，以資料型子空間識別法 (SI-DATA) 進行系統識別。其訊號處理方式可參考 1.2.1 章台大新生大樓，將原始訊號經低通濾波

器，將高頻部分濾除後降低取樣頻率，作 SI-DATA 系統識別，其參數設定：漢克矩陣大小 $i=50\sim 100$ ，系統階數取 10。

本棟建物自 1994 年開始記錄至 2011 年，共有 134 筆紀錄，於本文中將所有紀錄皆以 SI-DATA 分析，並將其識別之頻率、阻尼比與相對應之最大輸入地表加速度繪製於圖 1.2.15(a)，從此圖中可看到三個系統頻率被清楚的識別出來，並將其頻率與對應之 PGA 繪製於圖 1.2.15(b)，明顯的看到頻率分布為三個區塊，為了觀察方便，將頻率對應於 PGA 及頻率與阻尼比之間的關係分別繪製於圖 1.2.16~18，可明顯的看出第一個振態頻率落於 1.3Hz~ 1.5Hz(圖 1.2.16)、第二個振態頻率落於 1.6Hz~2Hz 左右(圖 1.2.17)、第三個振態頻率則落於 2Hz~4Hz(圖 1.2.18)。其頻率變化趨勢同前幾章結果相似，隨著 PGA 越大而減少；圖 1.2.15(c)為阻尼比與相對應之 PGA，阻尼比落於 1%~5%之間，其變化趨勢隨著 PGA 越大而增加，但是阻尼比的識別結果就無法像頻率一般有明顯的三個區塊，而是聚集在一起並有相同的變化趨勢。圖 1.2.15(d)為阻尼比與頻率關係圖，由此圖亦可觀察到頻率與阻尼比間的變化趨勢，隨著頻率越高，其相對應之阻尼比越低。

同前分析步驟，此棟分析識別出三個系統頻率，然而這三個頻率分別代表的振態為何則需要進一步的探討，故選取兩筆不同地震強度的事件，事件一發生於 2001/06/14，最大地表輸入加速度為 53.71gal；事件二則是在 2004/05/16，最大地表輸入加速度為 1.31gal。經由 SI-DATA 分析結果穩定圖如圖 1.2.19(a)所示，從穩定圖中可明顯地看出三個穩定的識別頻率，並分別繪製模態圖如圖 1.2.19(b)，從圖中可看到第一個為橫向(Transverse)振態頻率，這是因為此棟建物為長形建物，橫向勁度較柔軟，故橫向頻率較易被激發；第二個為扭轉(Torsional)振態頻率；而縱向(Longitudinal)頻率則比較高，為第三個振態頻率。同樣的，從這兩筆不同大小之地震事件，可知在地表輸入加速度較大時，其識別頻率會較小。

1.2.4 交通大學公教宿舍

交通大學為第三期公教住宅，已更名為德馨大廈，位於新竹市建中路及建功一路交叉口，為一門字型純 RC 鋼構架，地下兩層及地上十四層，地下兩層為機械房及停車場，地上十四層皆為住宅使用。建於 1991 年，建物長邊約 51 公尺、短邊約 42.7 公尺、高度約 42.6 公尺(圖 1.2.20(a))。自 1994 年 10 月開始記錄地震資訊，至 2011 年共有 79 筆記錄，於本論文中所分析之地震震央分布圖可參考圖 1.2.20(b)，該建物內安裝了 24 個單軸向力平衡感應器於地下室二樓地坪上、一樓樓地板下、二樓樓地板下、三樓樓地板下、七樓樓地板下及十四樓樓地板下，所有感應器皆以電纜線連至紀錄系統。其強震系統感應器安裝位置剖面圖如圖 1.2.21 所示，樓層配置圖祥見圖 1.2.22。觀察各測點的位置後，選取地下室二樓地坪上的 CH.1、2、5 紀錄做為地震輸入值，另選取一樓的 CH.7、8、9、二樓的 CH.10、11、12、三樓的 CH.13、14、15、七樓的 CH.16、17、18 及十四樓的 CH.19、20、23 紀錄作為建築物受震後的輸出值，以資料型子空間識別法(SI-DATA)進行系統識別。其訊號處理方式可參考 3.2.1 章台大新生大樓，將原始訊號經低通濾波

器，將高頻部分濾除後降低取樣頻率，作 SI-DATA 系統識別，其參數設定：漢克矩陣大小 $i=50\sim 90$ ，系統階數取 10。

本棟建物自 1994 年以來共有 79 筆記錄，於此處將所有紀錄皆以 SI-DATA 做系統識別，其識別之頻率、阻尼及相對應之最大地表加速度 PGA 繪製於圖 1.2.23(a)，由此圖可明顯的看到系統頻率在 1999 年 9 月 21 日後有明顯的下降。於 1999 年 9 月 21 日之前，系統識別第一及第二振態頻率分別落於 1.8Hz 及 2Hz 附近；1999 年歷經 921 地震後，其識別之系統第一及第二振態頻率皆有明顯的降低，分別落於 1.4Hz 及 1.8Hz 附近，由此識別結果可猜測此結構物位於新竹，距離 921 集集大地震之震央位置不遠，故有可能因為 921 地震而造成結構有所損壞，進而導致結構系統特性同中興大學土環大樓，因破壞發生，系統頻率有明顯的下降。另一方面，將頻率與 PGA 繪製於圖 1.2.23(b)，可看到兩個明顯的頻率區塊分布，其頻率變化趨勢隨著 PGA 越大而減少；另將阻尼比與 PGA 繪製於圖 1.2.23(c)，阻尼比分布于 1%~5% 之間，儘管阻尼比的分布情形沒有如同頻率一般有明顯的區塊分布，依舊可以看到隨著 PGA 的變化趨勢，當 PGA 越大時，阻尼比亦越大；故將頻率及阻尼繪製於圖 1.2.23(d) 可以觀察到隨著頻率之減少，阻尼比越趨增加。

由前面討論的識別結果知道此棟建築物在歷經 921 集集大地震後，系統特性有明顯的變化，故於此處選取兩筆分別記錄於 921 地震前後的地震紀錄繪製 SI-DATA 穩定圖並觀察其振態形式。事件一紀錄於 1994/10/05，最大地表輸入加速度為 19.6gal；事件二則是記錄於 2011/04/30，最大地表輸入加速度為 9.06gal。經由 SI-DATA 分析結果穩定圖如圖 1.2.24(a) 所示，從穩定圖中可明顯地看到有兩個穩定的識別頻率，並分別繪製振態圖於圖 1.2.24(b)。從振態圖中可知第一個識別系統頻率為縱向(Longitudinal)振態頻率，於 921 地震前後識別結果分別為 1.6Hz 及 1.4Hz；第二個識別系統頻率為橫向(Transverse)振態頻率，其識別結果分別為 2Hz 及 1.8Hz。

1.2.5 桃園縣市政中心

本棟結構物為地下三層總深度 15.8 公尺，地上十七層總高度 69.55 公尺的鋼筋混凝土結構，該建物長邊約 89.35 公尺、短邊約 36 公尺(圖 1.2.25(a))。自 1994 年 6 月開始記錄地震資訊，至 2011 年共有 116 筆記錄，於本論文中所分析之地震震央分布圖可參考圖 1.2.25(b)，該建物內安裝了 26 個單軸向力平衡感應器於地下室三樓樓地板上、一樓樓地板下、一樓樓地板上、二樓樓地板下、五樓樓地板下、十樓樓地板下、十四樓樓地板下及頂樓樓板上，所有感應器皆以電纜線連至紀錄系統。其強震系統感應器安裝位置剖面圖如圖 1.2.26 所示，樓層配置圖詳見圖 1.2.27。

觀察各測點的位置後，選取地下室三樓地板上的 CH. 4、5 紀錄做為地震輸入值，另選取一樓的 CH. 7、8、9、二樓的 CH. 10、11、12、五樓的 CH. 13、14、15、十樓的 CH. 16、17、18 及十四樓的 CH. 20、21、22 及頂樓的 CH. 24、25、26 紀錄作為建築物受震後的輸出值，以子空間識別法(SI-DATA)進行系統識別。其訊號處

理方式可參考 1.2.1 章台大新生大樓，將原始訊號經低通濾波器，將高頻部分濾除後降低取樣頻率，作 SI-DATA 系統識別，其參數設定：漢克矩陣大小 $i=50\sim 90$ ，系統階數取 10。

自 1994 年至 2011 年共有 116 筆紀錄，將所有紀錄皆以 SI-DATA 做系統識別，其識別之頻率、阻尼及相對應之最大地表加速度 PGA 繪製於圖 1.2.28，此圖顯示識別之系統頻率有兩個且分布範圍很廣，識別之第一個振態頻率落於 0.9Hz 附近，而第二振態頻率則落於 2.2Hz 附近。因第一振態及第二振態識別之頻率分布範圍距離較大，故將頻率對 PGA 關係圖、阻尼比對 PGA 關係圖及阻尼比對頻率關係圖皆分第一振態及第二振態表示，如圖 1.2.29 所示。由此圖發現頻率對應於 PGA 在低頻時變化幅度較小，在高頻時，則有較大之變化，其值隨著 PGA 增加而明顯地減少；然而阻尼比對應於 PGA 則沒有如前幾章節的識別結果有明顯的變化趨勢，反而是在低輸入地表加速度時有較廣的分布。

針對不同地震強度大小選擇兩筆記錄探討其穩定圖及振態，事件一記錄於 2002/03/31，最大地表加速度為 64.35gal，事件二則是記錄於 2009/11/05，最大地表加速度為 2.79gal。經由 SI-DATA 分析後，將穩定圖繪製於圖 1.2.30(a) 及模態繪製於圖 1.2.30(b)，由穩定圖可觀察到有三個頻率穩定地被識別出來，其中前兩個頻率非常的接近，另外，儘管此兩筆地震資料記錄於不同大小之地表加速度作用下，其識別結果並無明顯的變化。從振態圖可發現，第一個識別頻率為縱向(Longitudinal)振態頻率，分布於 0.6Hz 附近；第二個識別頻率為橫向(Transverse)振態頻率，分布於 0.65Hz 附近，由於這兩個頻率非常的接近，所以在圖 1.2.28 中只會看見一條頻率分布於 0.65Hz 附近。另外，由振態圖可知頻率落於 2Hz 左右的振態為第二個橫向振態頻率(2nd Mode for Transverse)。

1.2.6 台電大樓

台灣電力公司總管理處辦公室大樓，簡稱台電大樓(圖 1.2.31(a))，是台灣電力公司總管理處所在地，可容納三千人自用辦公，位於台北市中正區。該建物於 1982 年落成，地上二十六層，地下三層，長邊約 52.16 公尺、短邊約 39.6 公尺、高度為 114.54 公尺，為台灣第一棟超過百公尺的大樓。自 1994 年開始記錄地震訊號，截至 2012 年共有 97 筆地震紀錄，其地震震央分布如圖 1.2.31(b)所示。該建物主樓內安裝了 18 個單軸向力平衡感應器於地下室三樓樓板上、一樓樓地板上、九樓樓地板上、十九樓樓地板上及頂樓樓板上，所有感應器皆以電纜線連至紀錄系統。其強震系統感應器安裝位置剖面圖如圖 1.2.32 所示，樓層配置圖詳見圖 1.2.33。觀察各測點的位置後，選取地下室三樓地板上的 CH.1、2、4、5 紀錄做為地震輸入值，另選取一樓的 CH.7、8、九樓的 CH.9、10、十九樓的 CH.11、12 及頂樓的 CH.13、14、16、17 紀錄作為建築物受震後的輸出值，以資料型子空間識別法(SI-DATA)進行系統識別。其訊號處理方式可參考 1.2.1 章台大新生大樓，將原始訊號經低通濾波器，將高頻部分濾除後降低取樣頻率，作 SI-DATA 系統識別，其參數設定：漢克矩陣大小 $i=50\sim 100$ ，系統階數取 10。

本文分析自 1994 年至 2012 年共 97 筆地震資料，進行 SI-DATA 系統識別，將識別之系統頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度共同繪製於圖 1.2.34，由此圖可看到 SI-DATA 明顯的識別出三個頻率，而阻尼比則分布於 1%~3% 之間。分別將這三個振態頻率、阻尼比及 PGA 之關係以圖 1.2.35~37 表示。由圖 1.2.34 可知第一振態頻率落於 0.35Hz~0.4Hz、第二振態頻率落於 1Hz~1.2Hz、第三振態頻率落於 1.8Hz~2.2Hz，並皆可觀察到儘管變化幅度小，其識別頻率依舊隨 PGA 增加而減少，阻尼比則隨著 PGA 增加而增加。

選擇不同大小之地震，事件一紀錄於 1999/9/20，最大地表輸入加速度為 55.89gal，事件二則紀錄於 2009/06/28，最大地表輸入加速度為 1.71gal，分別將其識別結果繪製於穩定圖及振態圖，探討其識別之三個頻率分別為何種振態。由圖 1.2.38(a) 可看出有三個不同區塊的頻率穩定的被識別出來，分別落於 0.36Hz、1.1Hz 及 1.9Hz 附近，並將這三個頻率對應之振態繪製於圖 1.2.38(b)，由此圖可發現顯示於穩定圖中的第一個識別頻率中包含縱向及橫向的第一振態(Mode 1)；第二個識別頻率則包含縱向及橫向的第二個振態(Mode 2)；第三個識別頻率則為第三個振態(Mode 3)。

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。

將上節中所識別之系統頻率分別以柱狀分布圖表示，如圖 3.3.1~圖 3.3.6 所示，並計算各振態下的平均頻率，其整理如下：

1. 台灣大學新生大樓(圖 1.3.1)：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。
2. 中興大學土木環工大樓(圖 1.3.2)：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。
3. 台科大營建系大樓(圖 1.3.3)：第一個橫向振態頻率為 1.35Hz；第一個扭轉向振態頻率為 1.77Hz；第一個縱向振態頻率為 2.2Hz。
4. 交通大學公教宿舍(圖 1.3.4)：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(圖 1.3.5)：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。

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 結構含中間層隔震系統之識別

隔震設計於結構耐震上的應用目前已逐漸趨於成熟，並廣泛地被工程界接受為一種有效的結構防震方法。近年來隨著隔震技術逐漸成熟且被廣為應用，除了基礎隔震建築物外，中間層隔震建築物的實務案例與日俱增。所謂的中間層隔震建築即是將隔震層置於建築物基礎以上的樓層(通常設置於一樓頂)，由於隔震層以上的結構體在地震來襲時會發生平移現象以隔絕吸收能量，因此在設計隔震層時需預留碰撞間隔，所以與基礎隔震建物相比，中間層隔震系統較容易滿足建築上之功能需求，除了在都會區內施工較基礎隔震建物方便，其排水、通風與維護皆更為簡易。

隔震系統安裝的目的即是希望在強震作用下，水平方向具有足夠的柔性以延長結構物周期，因一般地震的重要週期大多在 0.1 秒~1 秒之間，而一般建築的基本周期也大都在此範圍內，因此在地震來襲時，結構物會有較大的震動。故在建物中安裝隔震系統可延長建築物的週期至 2 秒以上，使建物因地震而產生的加速度反應可大量減少，可降低地震力對建物之作用力。於本章節將針對結構含中間層隔震系統做系統識別，探討其結構物在地震作用下之系統動態特性。

2.1 台灣大學土木新建研究大樓簡述及強震儀配置

台大土木新建研究大樓(圖 2.1.1(a))位於辛亥路及基隆路口，於 2008 年落成，為一地下一層、地上八層且在一樓樓頂安裝中間層隔震系統的特殊結構。本棟建築在結構設計上除了配合預鑄施工之細節外，最大特色乃採中間層隔震設計，並使用國內自行設計製作之隔震系統，使其在 2500 年回歸週期之地震下，結構得以保持彈性。此棟大樓於一樓樓頂安裝十九個 90cm 隔震墊於主要的柱位，以及數支速度型消能阻尼器提高系統阻尼比，當地震來臨時，可有效地減少大樓之搖晃程度，並可有效的減低土研大樓之扭轉效應及隔震層之位移，配置圖可參考圖 2.1.2。

此外，本棟大樓亦被列於交通部中央氣象局強地動觀測計畫中之觀測建物。氣象局已於此棟建物安裝 24 個加速度感測器、4 個位移計及 3 個加速度計於自由場，其強震監測系統安裝位置剖面圖可視圖 2.1.3，各樓層之強震儀裝設配置圖參考圖 2.1.4：

- (1) 於基礎(地下室)裝設水平長短兩向加速度計共 4 個及 2 個垂直加速度計。紀錄輸入結構之地震力。
- (2) 於隔震層下方(2 樓)裝設 1 個水平長向、1 個水平短向加速度計及 1 個垂直向加速度計。另外於隔震層上方安裝 4 個水平長短向位移計。
- (3) 於 3 樓裝設之水平長短向與基礎同，垂直向則多裝設一處。
- (4) 6 樓位於 3 樓與頂樓的中間樓層，於質心處裝設 2 個水平向加速度計，做為參考樓層。
- (5) 頂樓加速度計裝設方法與 3 樓相同，欲探討結構扭轉與搖擺放大效應。
- (6) 自由場裝設三軸向加速度計，其紀錄可探討土壤-結構互制效應。

2.2 應用子空間識別法於結構物之識別分析與討論

本棟建物除了安裝強震監測系統外，還安裝了微震連續監測系統。於本論文中，首先針對五筆微震資料，使用協方差隨機子空間識別法(SSI-COV)做系統識別，了解結構物在一般狀態下的系統特性；爾後將針對自 2009 年以來共 47 筆地震紀錄(圖 2.1.1(b))使用資料型子空間識別法(SI-DATA)識別系統動態特性，探討結構物在地震下之反應，及利用中間層隔震層之位移紀錄，來探討隔震層之效用。

2.2.1 應用隨機子空間識別法(SSI-COV)識別系統參數

由於微震量測資料無輸入項，故在做微震訊號分析時，採用隨機子空間識別法識別系統特性。觀察各測點的位置後，選取二樓的 CH.7、8、三樓的 CH.10、11、13、15、六樓的 CH.17、18 及頂樓的 CH.19、20、22、24 紀錄作為建築物受震的後的輸出值，以協方差型子空間識別法(SSI-COV)進行系統識別。然而在做系統識別前，需做訊號處理，減少干擾項之影響。其訊號處理方式如下：

1. 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，故於此分析前先將訊號經過低通濾波器(Low-pass Filter)，其作用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。本章節採用的低通濾波器為 Butterworth IIR，其階數為 10，由於結構物低頻部分為研究者所關注，所以選擇截止頻率為 10Hz。
2. 降低取樣頻率：由於子空間識別法為時間域分析方法，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，較易決定結構物之主要頻率。於本章節中，將取樣頻率自 200Hz 降到 50Hz。
3. 進行 SSI-COV 分析：首先定義參數，於本章節中選擇漢克矩陣之大小 $i=100\sim 200$ ，可觀察於不同矩陣大小下，其識別結果愈趨穩定；另外由於分析時，結構物低頻部分為研究者較關心部分，於本章節中系統階數取 20，希望能由穩定圖中觀察到低頻分布情形。

於本章節中，分析五筆微震紀錄，其中有兩筆紀錄於 2014/02/20；另外三筆紀錄於 2014/04/28。分別經過 SSI-COV 做系統識別，其穩定圖如圖 2.2.1(b)及圖 2.2.2(b)

所示，由穩定圖中可觀察到有三個頻率被識別出來，分別落於 1.36Hz、1.67Hz 及 1.75Hz 附近，由於此三個頻率分布情形皆出現於每一筆分析結果的穩定圖中，所以我們可以先大膽的假設此三個頻率為結構之基礎振動頻率，然而其分別代表的振態形式則須繪出模態圖才可以做判定。另外，從穩定圖中可看到當漢克矩陣越大，即 number of row 越大，表示列入參考之資訊越多，其識別結果越趨穩定。

2.2.2 應用子空間識別法(SI-DATA)識別系統參數

由微震訊號所識別出的系統頻率為平時結構物之系統特性，於此處將利用由強震監測系統所量測的強震訊號以 SI-DATA 識別系統特性。觀察各測點的位置後，先不考慮土壤-結構之間的互制效應，選取地下室一樓的 CH.1、2、4、5 紀錄做為地震輸入值，另選取二樓的 CH.7、8、三樓的 CH.10、11、13、15、六樓的 CH.17、18 及頂樓的 CH.19、20、22、24 紀錄作為建築物受震的後的輸出值，以資料型子空間識別法(SI-DATA)進行系統識別。在做系統識別前，同樣地需做訊號處理，以減少干擾項之影響。其訊號處理方式同 2.2.1 章節中所述，將訊號經低通濾波器，10Hz 以上的訊號皆濾除，然後降低取樣頻率自 200Hz 至 50Hz，再以處理過的訊號經由 SI-DATA 進行系統識別。

自 2009 年起至 2013 年共有紀錄 47 筆地震資料，首先設定漢克矩陣列數為 200、系統階數取到 20，使用 SI-DATA 進行系統識別，從穩定圖中可得前六個模態，分別將識別之模態頻率、阻尼比值及相對應之最大地表輸入加速度繪於圖 2.2.3 及圖 2.2.4。由圖 2.2.3 中可發現在不同的地震事件下，經量測之資料，所得到的結構頻率並非固定值，而是隨著地震事件的不同而有所改變。結構的前三個識別模態頻率分別落於 1.3Hz、1.6Hz 及 1.7Hz 附近，其識別結果與使用微震資料識別的結果相同，另外於此圖中亦可發現，在輸入地表加速度較大時，系統識別所得到之模態頻率則越低、阻尼越高。圖 2.2.4 為高振態，其高振態之識別效果較差，故於本篇論文中將不繼續探討其效應。圖 2.2.5(a)為識別之頻率對應於最大地表加速度 PGA，從此圖中可看到第一及第二模態頻率隨著 PGA 增加而減少，成一線性關係，也就是當地震越大，結構的頻率就越低，此一趨勢與隔震結構之特性吻合，然而第三個振態在輸入地表加速度較大時，則不容易被識別出來；圖 2.2.5(b)為識別之阻尼比對應於最大地表加速度，從此圖中可發現阻尼隨著 PGA 之增加而增加。圖 2.2.5(c)為識別之模態頻率及模態阻尼比之關係圖，兩者成一線性關係，此現象與隔震層之特性吻合，因該結構於小地震時，隔震層尚未進入降伏消能，因此結構較硬，模態頻率較高，而阻尼比較低；而當結構受到大地震作用時，隔震層迅速進入降伏而開始消能，因此結構較軟，模態頻率較低、阻尼比則較高。一般結構的阻尼比約為 2%~5%，而此結構在大地震時，其阻尼比有達 7% 以上，可大致證明該結構所裝設支消能減震裝置，於地震時能夠發揮作用，減少地震對結構物的影響與衝擊。

然而針對這三個頻率分別對應的振形則由後續之分析來探討。後續分析將分為兩部分，第一部分將針對小地震進行分析，探討其結構物在地震作用下之振動

行為；第二部分則對大地震進行分段分析，探討結構物在強震下的動態反應。

小地震訊號識別

從上述結果之討論，知道不同地表輸入加速度大小將影響識別之結果，所以接下來選擇八筆小地震事件紀錄，並且探討其頻率相對應的振態形式。首先設定漢克矩陣列數為 200、系統階數為 6，然後進行 SI-DATA 系統識別，分別得到系統頻率、阻尼及振態。表 2.2.1 中列出了這八筆地震紀錄時間、最大地表輸入加速度、頂層最大加速度及識別之系統頻率及阻尼。選擇其中一筆紀錄於 2012/06/13，圖 2.2.6(a)為此事件之縱向及橫向輸入地表加速度時間歷時，並將其識別之系統頻率、阻尼及相對應之振形繪於圖 2.2.6(b)，由此圖可知道第一個識別的頻率為 1.33Hz、阻尼比為 2.13%，並且從振形圖可知此為橫向(Transverse)振態頻率；第二個識別頻率為 1.59Hz、阻尼比為 2.19%，為縱向(Longitudinal)振態頻率；第三個識別頻率為 1.67Hz、阻尼比為 2.83%，為扭轉(Torsional)振態頻率。

因此，統整上述之識別結果可以粗略地整理以下資訊：

- (1) 第一個識別頻率為橫向振態頻率，其頻率範圍落於 1.3Hz~1.4Hz。
- (2) 第二個識別頻率為縱向振態頻率，其頻率範圍落於 1.55Hz~1.65Hz。
- (3) 第三個識別頻率為扭轉振態頻率，其頻率範圍落於 1.65Hz~1.8Hz。
- (4) 阻尼比則分布較無規則性，但其主要分部皆落於 1%~3%之間。

大地震訊號識別

接下來選取四筆大地震事件紀錄，其事件基本資訊列於表 2.2.2。圖 2.2.7 為各事件之地表輸入加速度時間歷時，將時間歷時分為前震、主震及震後三個不同時間段進行系統識別，探討其動態特性。事實上，在使用 SI-DATA 進行系統識別時，對於不同之地震紀錄需使用不同之參數設定；另外，對於同一事件，但不同時間區間，因選取之訊號點數不同，故系統識別參數亦有所不同，所以本章節所使用之系統參數列於表 2.2.3，並且將識別結果繪於圖 2.2.8，從此圖可觀察到結構在不同事件下所識別之時變性頻率及阻尼。在主震作用下，其系統頻率有明顯的下降，阻尼有明顯的上升。並將各事件識別之振形分別繪製於圖 2.2.9~12，可觀察到在某些事件下，在主震來臨前因訊號較小，所以第三個模態無法被識別出來；另外，由振形圖可知道第一個識別頻率皆為橫向振態，第二個識別頻率皆為縱向振態及第三個識別頻率皆為扭轉振態。此識別結果與小地震的識別結果相呼應。

2.2.3 系統識別考慮土壤-結構互制效應

在做 SI-DATA 分析時，其輸入項可以分為兩種：一種為不考慮土壤-結構互制效應，以結構物基層的紀錄視為地震輸入項，即前章之分析；另一種即是考慮土壤-結構互制效應，將自由場之地震紀錄視為地震輸入項。其結構互制圖如圖 2.2.13 所示，因此針對不同輸入地震力有兩種公式如下：

1. 不考慮土壤-結構互制效應，其系統輸入項來自結構基礎(U_{T_0})。頂樓反應

(U_{Tb}) 與結構基礎反應 (U_{To}) 之間的轉換公式為：

$$\frac{U_{Tb}}{U_{To}} = \frac{\beta_1(\omega/\tilde{\omega}_1^*)^2 + 1 - (\omega/\tilde{\omega}_1^*)^2 + 2i\tilde{\xi}_1^*}{1 - (\omega/\tilde{\omega}_1^*)^2 + 2i\tilde{\xi}_1^*}$$

(1)

$$1/\tilde{\omega}_1^{*2} = 1/\omega_1^2 + 1/\omega_R^2$$

(2)

2. 考慮土壤-結構互制效應，其系統輸入項來自結構基礎 (U_g)。頂樓反應 (U_{Tb}) 與自由場反應 (U_g) 之間的轉換公式為：

$$\frac{U_{Tb}}{U_g} = \frac{\beta_1(\omega/\tilde{\omega}_1^*)^2 + 1 - (\omega/\tilde{\omega}_1^*)^2 + 2i\tilde{\xi}_1^*}{1 - (\omega/\tilde{\omega}_1^*)^2 + 2i\tilde{\xi}_1^*}$$

(3)

$$1/\tilde{\omega}_1^2 = 1/\omega_1^2 + 1/\omega_R^2 + 1/\omega_H^2$$

(4)

比較式(2)及式(4)可知，若考慮土壤-結構互制效應，其系統振動頻率會小於不考慮土壤-結構互制效應。因此於本章，將自由場之紀錄視為輸入，並以 SI-DATA 識別系統頻率，其輸出項及參數設定皆同前章設定，圖 2.2.14 為系統識別是否考慮土壤-結構互制效應的結果比較圖，藍色點為不考慮土壤-結構互制效應下的識別頻率，而紅色的星號則為考慮土壤-結構互制效應，從比較圖看來，本棟建物之土壤互制效應對系統頻率的影響不大。

2.2.4 隔震層之行為探討

傳統結構之耐震設計是以建築物本身的強度及延展性來抵抗地震力；而隔震系統則是以隔振消能系統來延長結構週期及增加阻尼以減少結構之地震力反應。根據耐震規範中所述，隔震系統須具備以下條件：

1. 在垂直方向上有足夠的剛性及乘載容量來承受上部結構的重量。
2. 在強震作用下，水平方向具有足夠的柔性以延長結構週期，隔離地震震波進入建築物，降低水平地震力。
3. 隔震層具有消能裝置以控制建築物因週期延長所可能導致的位移增加。
4. 須具足夠之水平勁度以抗風力。
5. 須具足夠的回復勁度，使隔震結構在經過地震後能回復到原來位置。

首先，探討結構在地震下的振動行為。圖 2.2.15 為最大地表加速度(PGA)及頂層最大加速度(PA)反應之關係圖，由此圖可觀察到當輸入之地表加速度越大時，其頂層加速度與最大地表加速度之比值越小，可知隔震層確實在強震來臨時具有減

少其頂層加速度反應的效能。圖 2.2.16 為小地震來臨時第一橫向(Trans.)及縱向(Long.)振態，圖 2.2.17 為大地震來臨時結構在震前及主震時的振動行為，由圖可以知道當強震來臨時，中間隔震層的位移有明顯的增加。圖 2.2.18 則是將所選取的四筆大地震紀錄分別探討在強震時結構之振動行為。

利用設置於中間隔震層的位移計記錄來探討隔震層位移及系統特性之關係及與上下部結構之間的關係。圖 2.2.19 為隔震層最大位移與識別之系統週期最大加速度反應譜峰值關係圖，另外圖 2.2.20 則是識別頻率與隔震層最大位移之關係圖，由於隔震層具有較大的柔性，當結構週期增加時，系統頻率會降低、加速度反應會減少，但位移反應會增加。然而上部結構對於基礎可能會產生較大的相對位移，因此隔震系統須加裝消能裝置以減少相對位移。利用頂樓及 3 樓量測之加速度反應計算上部結構的相對位移、及隔震層與地下一樓的加速度反應相減計算下部結構的相對位移，並與中間層位移共同繪於圖 2.2.21，由此圖可以看到儘管隔震層的位移明顯，但上部結構因消能系統而相對位移較小。

2.3 嘉南大圳隔震橋之分析

該橋為三跨連續變斷面預力箱型梁穿越橋，跨徑配置為 40m+65m+40m，橋面淨寬 16.1m，梁深變化從 1.9m 至 3.7m，橋面南北向分離且皆採用部份雙向隔震設計。橋梁之隔震系統乃採用鉛心橡膠支承墊(Lead-rubberbearing, LRB)安裝於兩橋墩墩頂上，以及人造橡膠支承墊安裝於兩橋台。另外亦在橋台與橋墩上設置剪力鋼棒。橋台上的剪力鋼棒只允許於橋軸方向移動，橋墩上的剪力鋼棒則可任意方向移動，藉此達到部份雙向隔震行為。如圖 2.3.1 所示，此橋梁震儀之分佈情況共有 24 個方向及位置。今亦延用子空間識別方法探討該橋梁之動態特性。分析以採用 transverse 方向資料進行解析。使用 63 筆記錄(由 1999 至 2013)。圖 2.3.2 為南二高嘉南大圳橋量測所得地震資料之震央、規模與震源深度圖。配合強震觀測系統，如圖 2.3.1 所示，考慮以 Ch. 7 及 Ch. 10 為輸入訊號及以 Ch. 14, Ch. 15, Ch. 17, Ch. 20, Ch. 22 為輸出進行系統識別。圖 2.3.4 為南二高嘉南大圳最大量測自由場加速度與量測時間分析圖。圖 2.3.3 為南二高嘉南大圳所識別之模態頻率圖。圖 2.3.5a 為南二高嘉南大圳識別模態頻率和最大量測基礎加速度(PGA)與最大量測結構加速度(PA)之關係圖。圖 2.3.5b 為南二高嘉南大圳識別模態頻率與阻尼比之關係圖。此結果表示在較大地震力作用下整體橋梁之振動頻率因隔震系統之效應而有降低，而阻尼比也因隔震系統之效應而提高。

第三章 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。

3.1 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，如 2~30，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 3.1.1 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 3.1.2 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，

$$T = 0.07h^{3/4}, \quad f = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

其他建築物之週期經驗公式

$$T = 0.05h^{3/4}, \quad f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

圖 3.1.3 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：

$$f = 4.0917e^{-0.0227H} \quad (3.3)$$

表 1.1.1 安裝於結構物上的強震儀廠牌及型號

位置	強震儀廠牌	強震儀型號
台灣大學新生大樓	KINEMATRICS	FBA-11
中興大學土木環工大樓	TOKYO SOKUSHIN	SV355,SV355P
台科大營建系館	KINEMATRICS	FBA-11
交通大學公教宿舍	KINEMATRICS	FBA-11
桃園縣市政中心	KINEMATRICS	FBA-11
台電大樓	KINEMATRICS	FBA-11
台灣大學土木研究大樓	TOKYO SOKUSHIN	AS-2000C
羅東核電廠圍主體縮尺模型	KINEMATRICS	FBA-13

表 2.2.1 台灣大學土木研究大樓：選取八筆較小地震之數據，使用 SI-DATA 做系統識別之結果

Earthquake Name	PGA (gal)	PA (gal)	PA/PGA (ratio)	Freq. 1	Freq. 2	Freq. 3	Damp. 1	Damp. 2	Damp. 3
2009/07/13	0.87	7.16	8.2	1.3	1.54	1.59	2.05	1.7	3.26
2009/11/05	3.64	13	3.6	1.34	1.62	1.71	1.55	2.45	2.14
2010/02/22	1.14	4.78	4.2	1.38	1.72	1.77	1.39	2.18	1.6
2010/07/08	3.21	13.5	4.2	1.32	1.55	1.66	1.77	3.88	2.43
2010/07/25	1.62	8.3	5.1	1.32	1.64	1.68	1.77	2.25	2.45
2012/06/13	3.4	10.25	3.0	1.33	1.59	1.68	2.1	2.14	2.79
2012/11/05	0.99	4.9	5.0	1.36	1.63	1.7	1.56	2.19	1.76
2013/03/07	5.3	14.72	2.8	1.33	1.58	1.67	2.03	3.26	2.9

表 2.2.2 台灣大學土木研究大樓：選取四筆較大地震事件之基本資料

Earthquake Name	Epicenter		Depth (km)	Mag. (M _L)	PGA (gal)	PA (gal)	PA/PGA (ratio)
	Long.	Lat.					
2009/07/13	122.22	24.02	18.08	6	24.64	45.91	1.86
2009/12/19	121.66	23.79	43.78	6.92	27.71	48.78	1.76
2011/04/30	121.81	24.65	75.02	5.81	14.64	29.4	2
2012/06/09	122.31	24.26	69.88	6.62	13.54	29.75	2.2

表 2.2.3 台灣大學土木研究大樓：使用 SI-DATA 分析大地震事件時使用之參數設定
(i 為漢克矩陣列數、Order 為系統階數)

Earthquake Name	Before shock		Main shock		After shock			
	T=10~30 sec		T=30~50 sec		T=50~70 sec		T=70~90 sec	
2009/07/13	i	Order	i	Order	i	Order	i	Order
	140	12	170	20	200	8	200	8
	T=10~30 sec		T=30~50 sec		T=50~70 sec		T=70~90 sec	
2009/12/19	i	Order	i	Order	i	Order	i	Order
	200	14	200	14	140	6	140	6
	T=10~28 sec		T=28~40 sec		T=40~60 sec		T=60~80 sec	
2011/04/30	i	Order	i	Order	i	Order	i	Order
	140	16	170	18	150	6	150	6
	T=18~30 sec		T=30~50 sec		T=50~70 sec		T=70~90 sec	
2012/06/09	i	Order	i	Order	i	Order	i	Order
	130	18	130	12	200	6	200	6

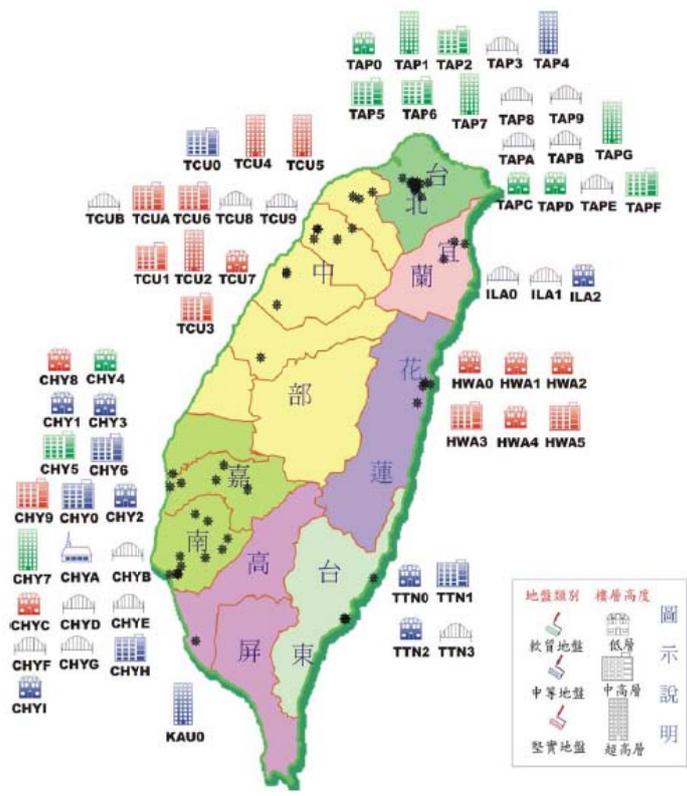


圖 1.1.1 交通部中央氣象局結構物強震監測系統分布圖

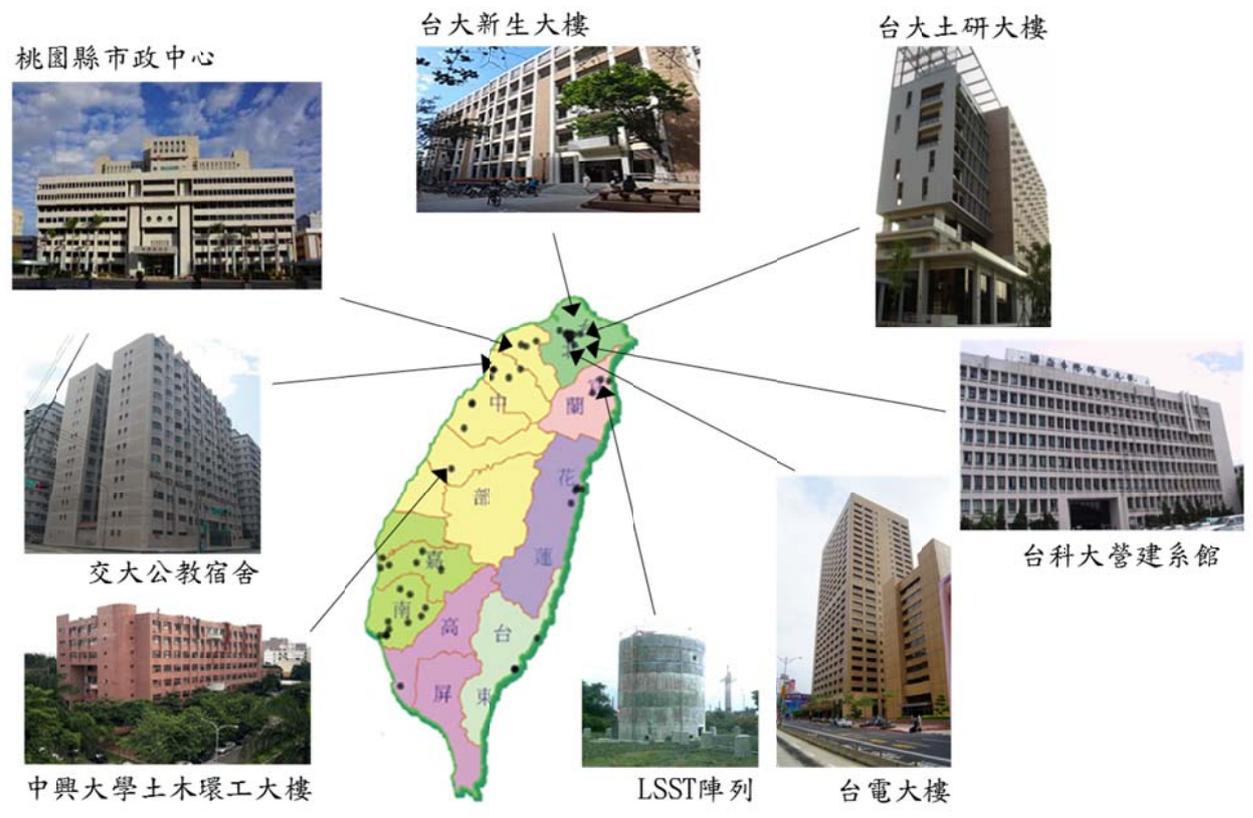
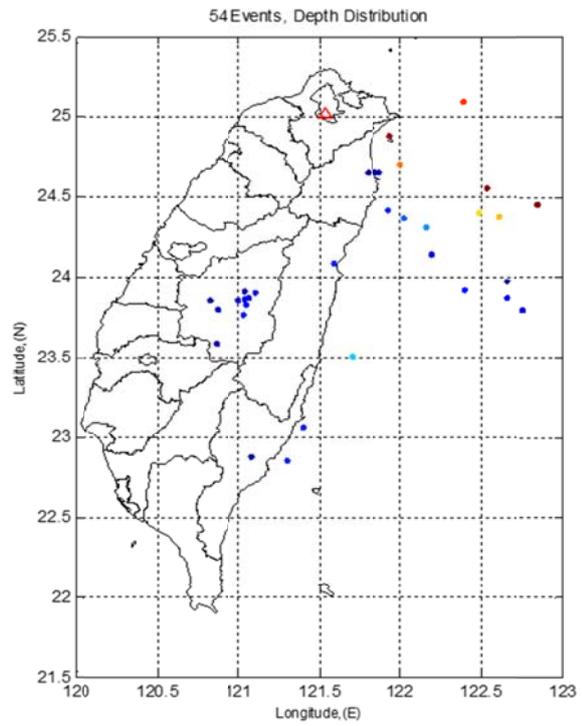


圖 1.1.2 本論文中分析之建物分布圖



(a)



(b)

圖 1.2.1 台灣大學新生大樓：(a)實照圖(b)分析之地震震央位置圖

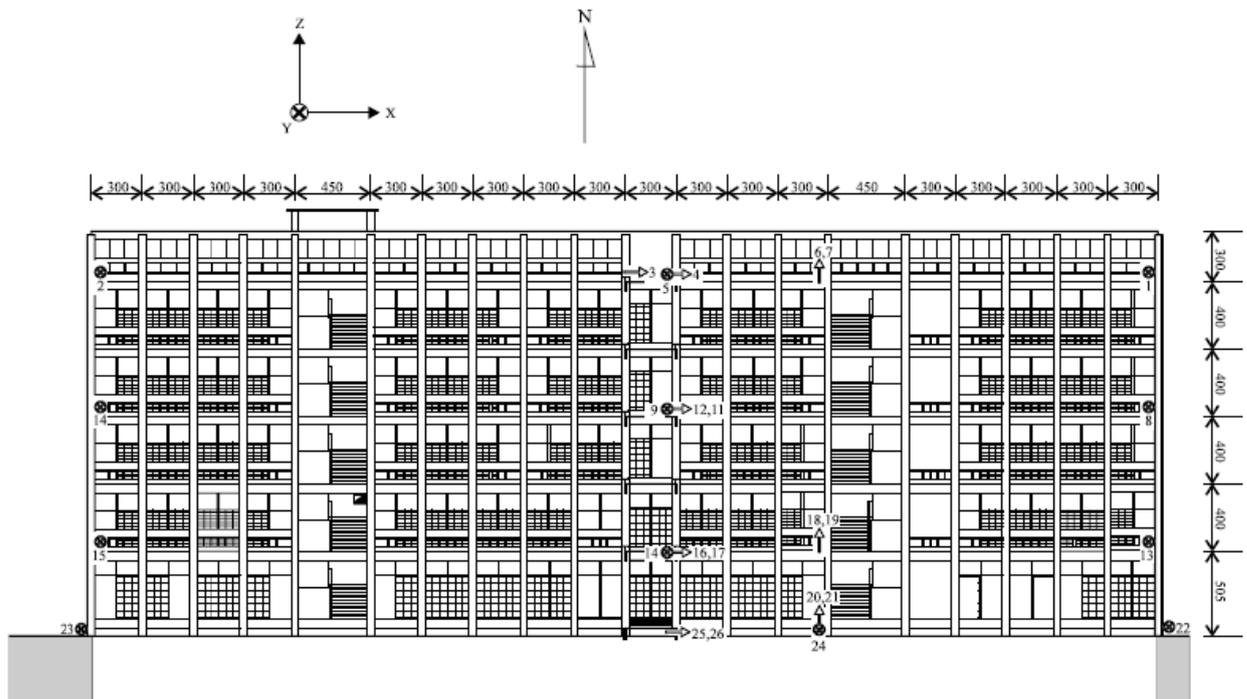


圖 1.2.2 台灣大學新生大樓強震監測系統感應器安裝位置剖面圖

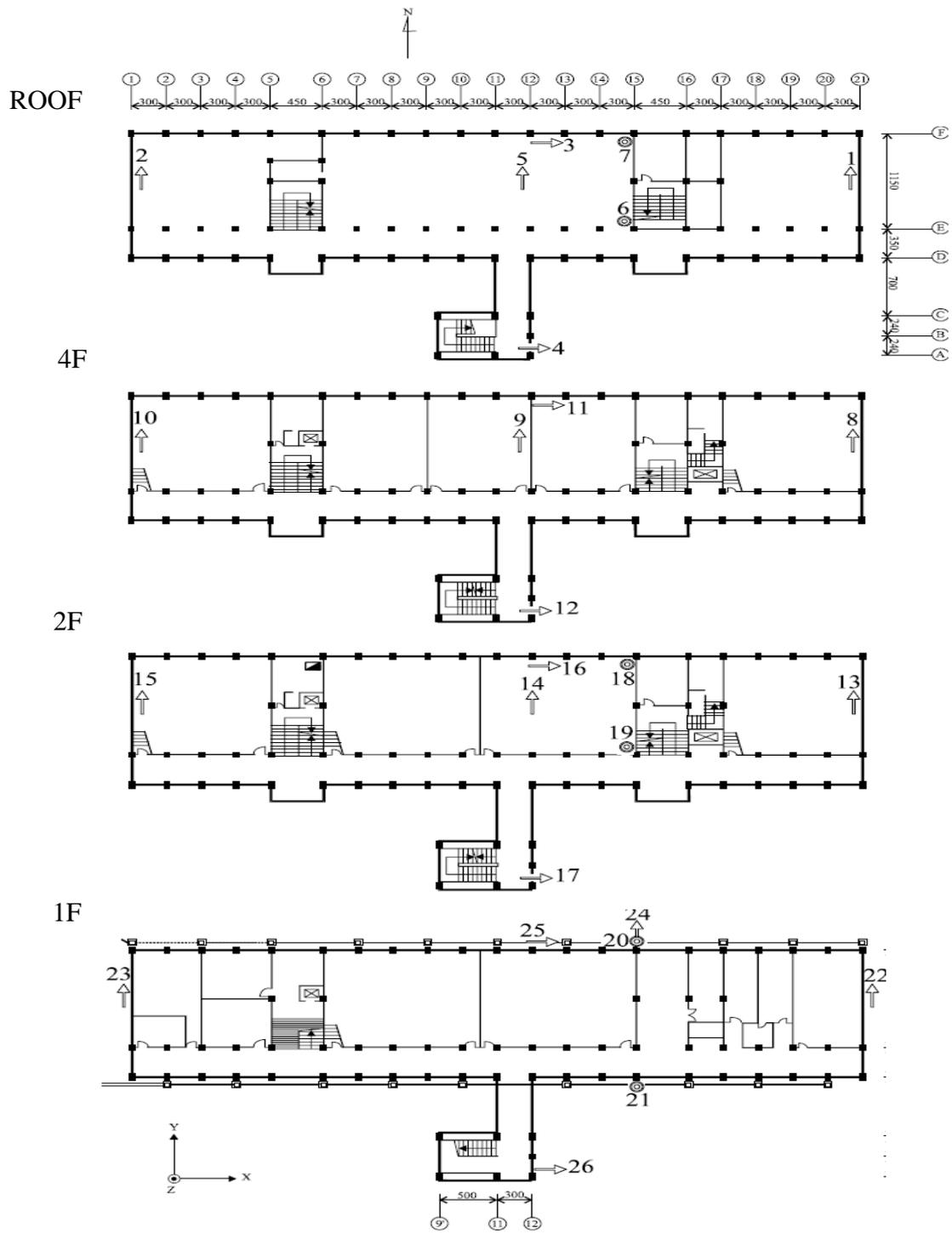
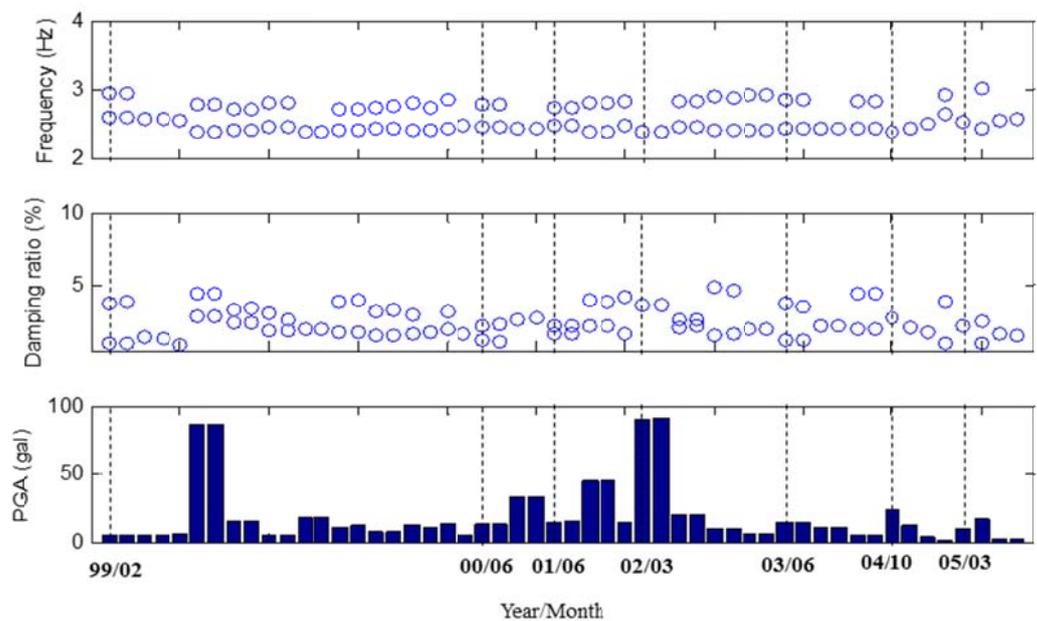
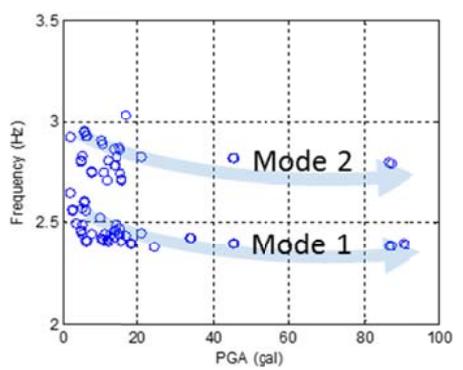


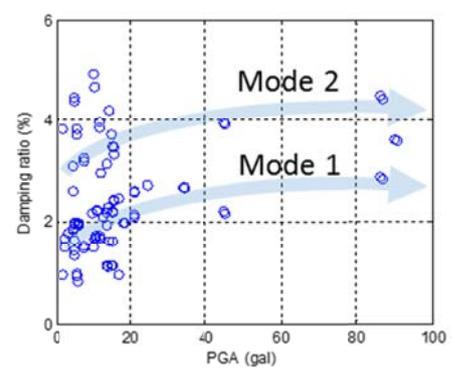
圖 1.2.3 台灣大學新生大樓強震監測系統感應器安裝位置平面圖



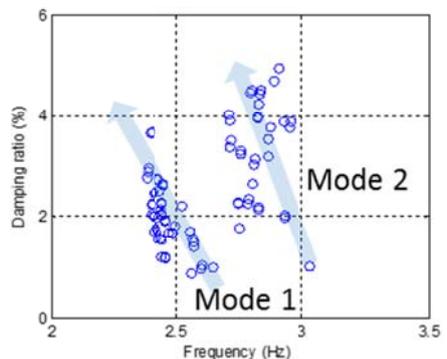
(a)



(b)

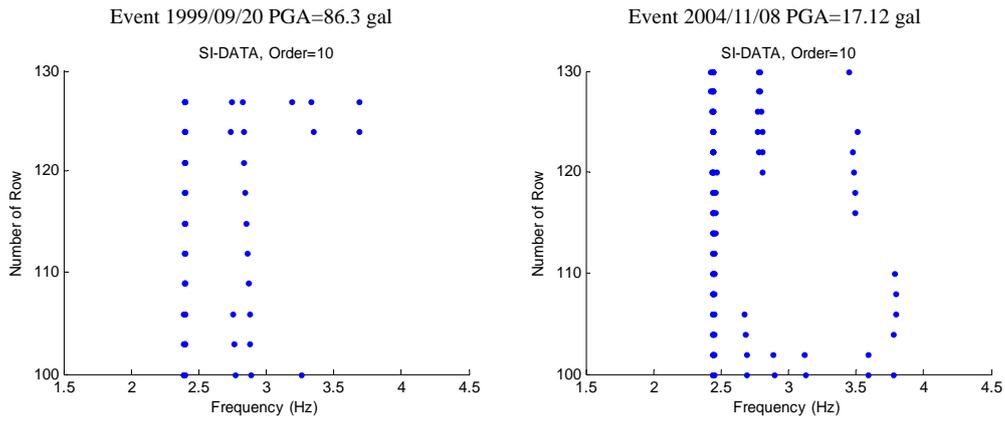


(c)

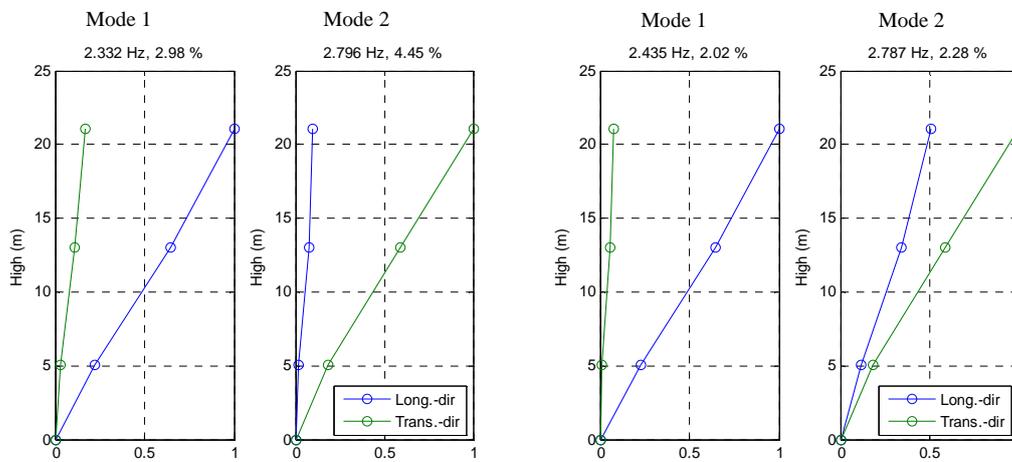


(d)

圖 1.2.4 台灣大學新生大樓使用 SI-DATA 識別結果：識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度



(a)



(b)

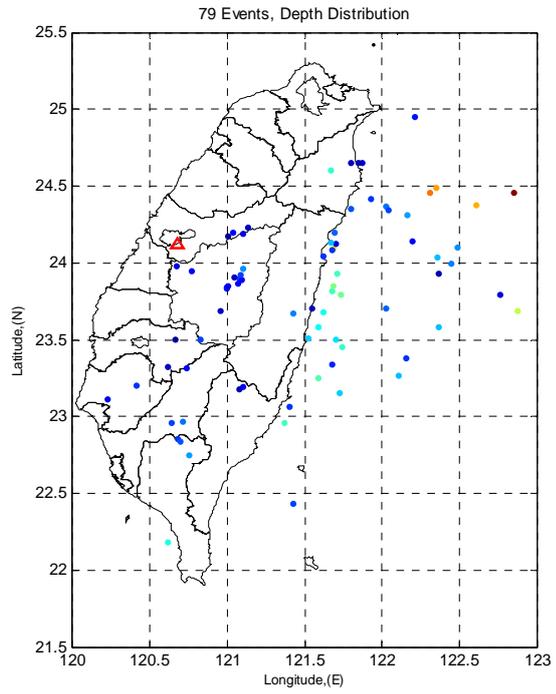
圖 1.2.5 台灣大學新生大樓使用 SI-DATA 識別結果：穩定圖及振形

(a) SI-DATA 穩定圖

(b) 第一模態振形 mode1(縱向)及第二模態振形 mode2(橫向)之比較



(a)



(b)

圖 1.2.6 中興大學土木環工大樓：(a)實照圖(b)分析之地震震央位置圖

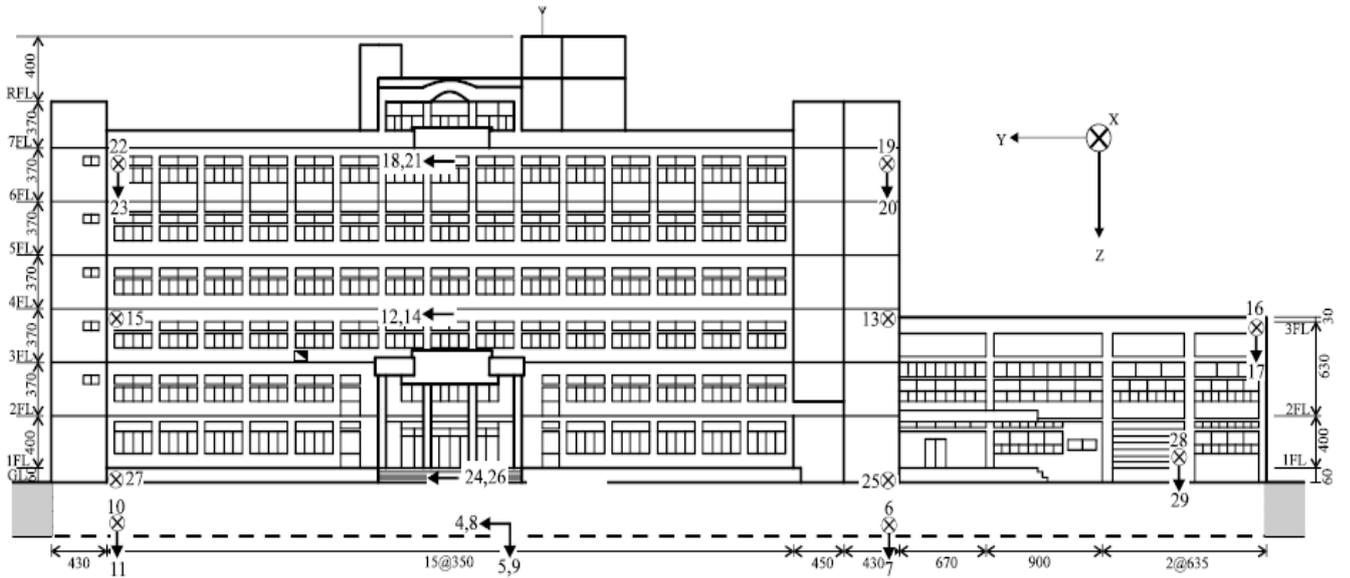
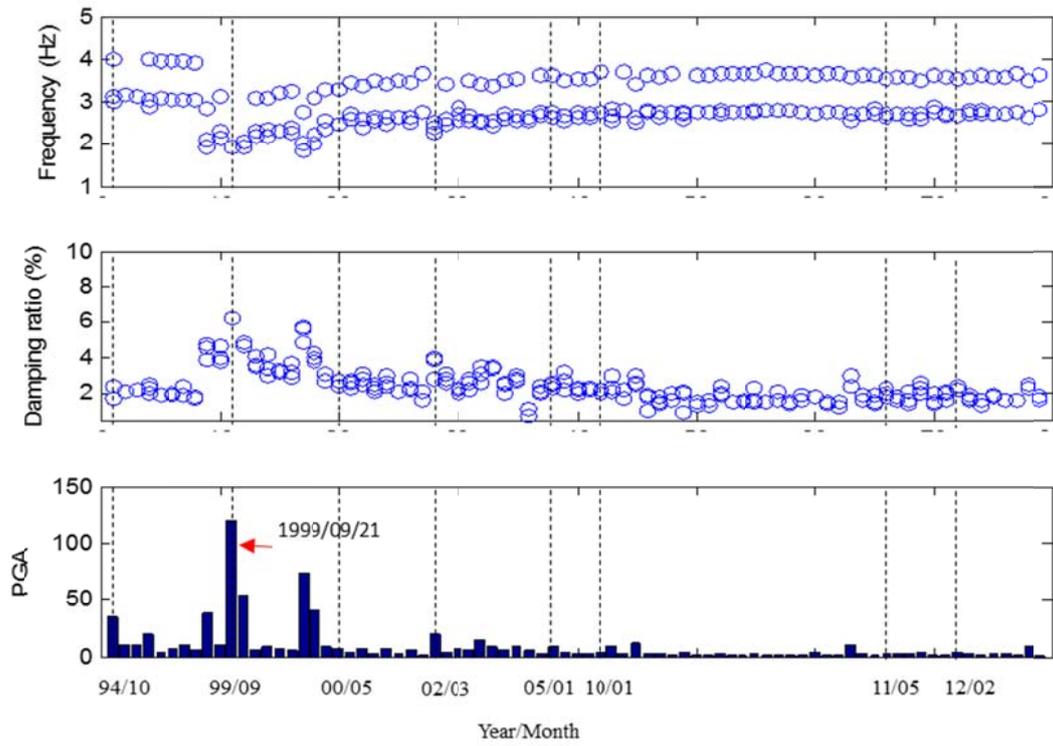
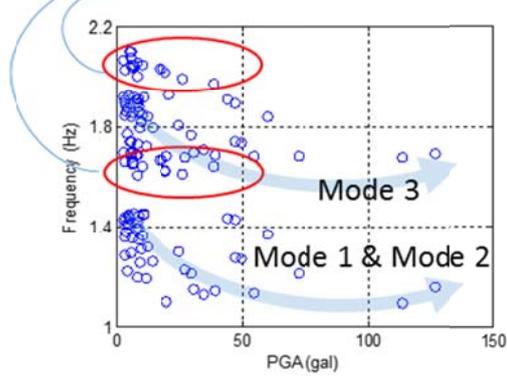


圖 1.2.7 中興大學土木環工大樓強震監測系統感應器安裝位置剖面圖

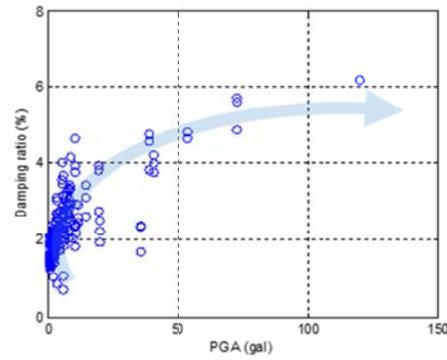


(a)

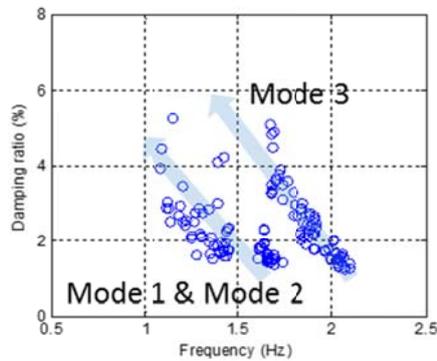
921地震前訊號識別結果



(b)



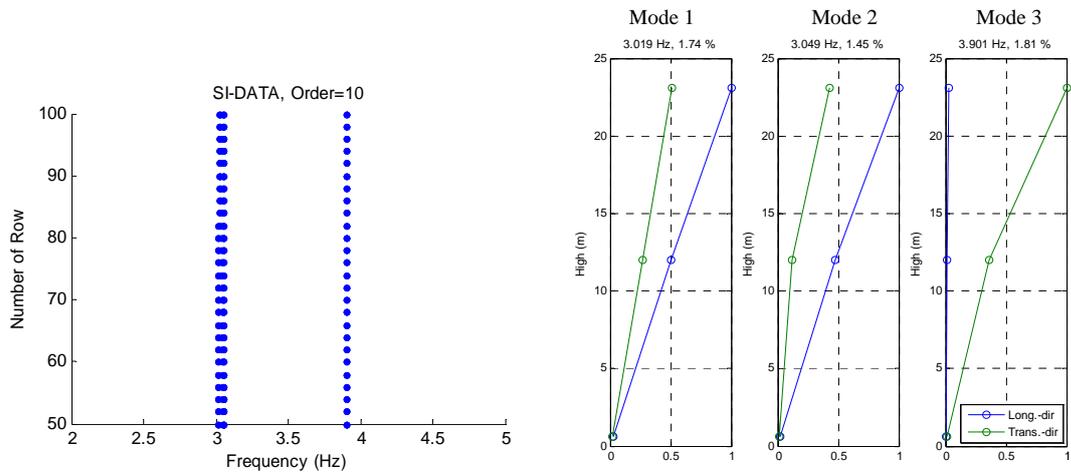
(c)



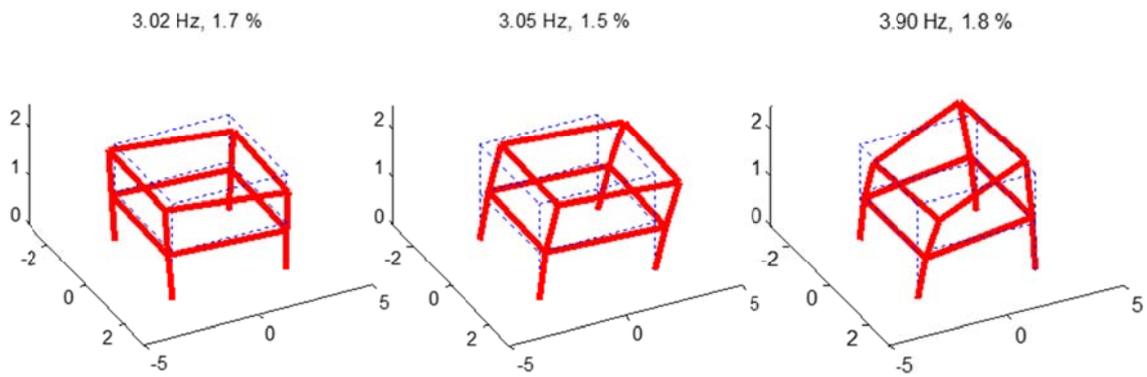
(d)

圖 1.2.9 中興大學土木環工大樓使用 SI-DATA 識別結果：識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

Event 1999/07/07 PGA=4.76 gal



(a)



(b)

圖 1.2.10 中興大學土木環工大樓使用 SI-DATA 識別結果：穩定圖及振形

(a) SI-DATA 穩定圖及模態圖(921 地震前事件)

(b) 第一模態振形 mode1、第二模態振形 mode2(水平向)及第三模態振形 mode 3(扭轉向)之立體圖比較

Event 2012/06/14 PGA=1.12 gal

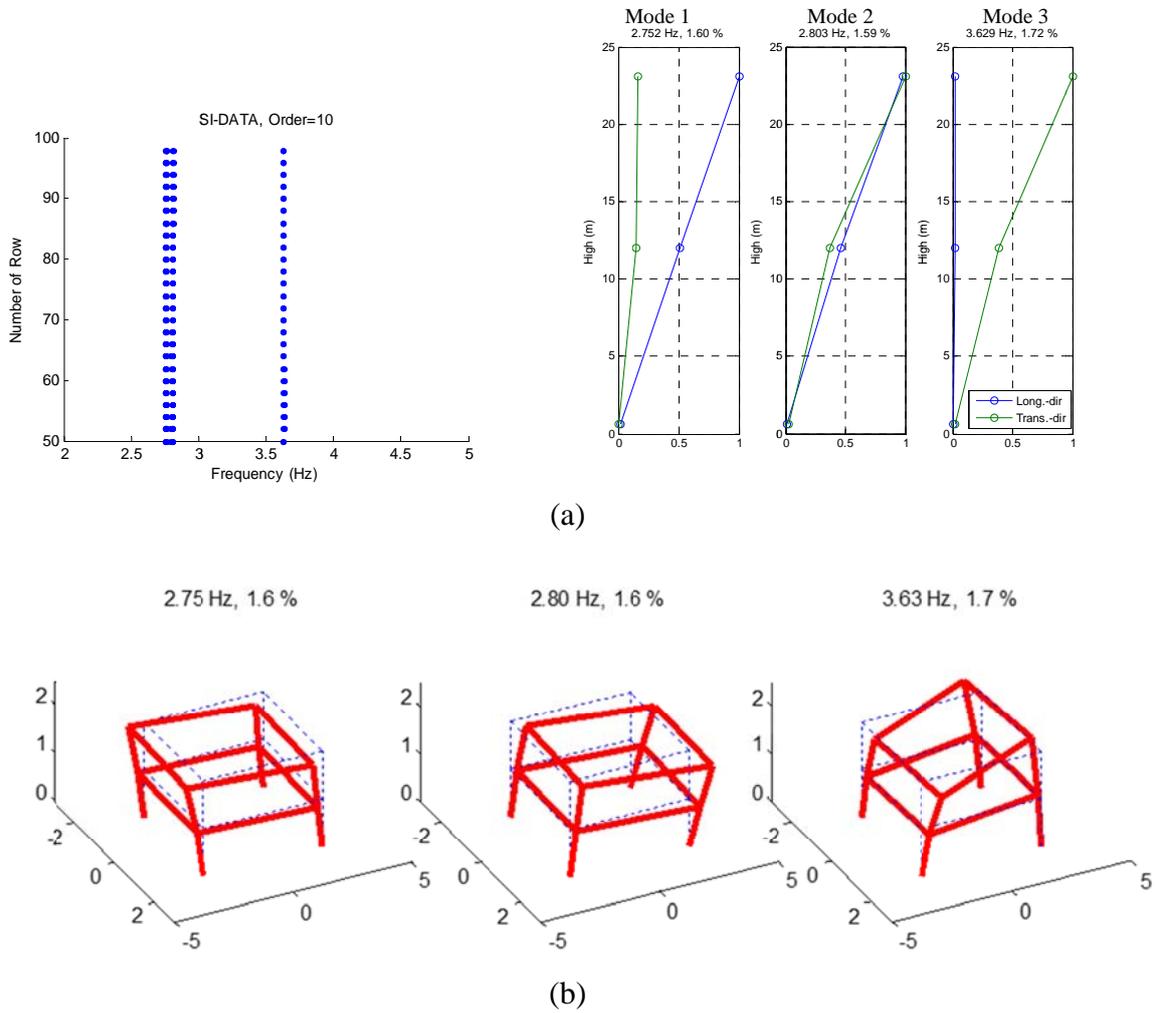
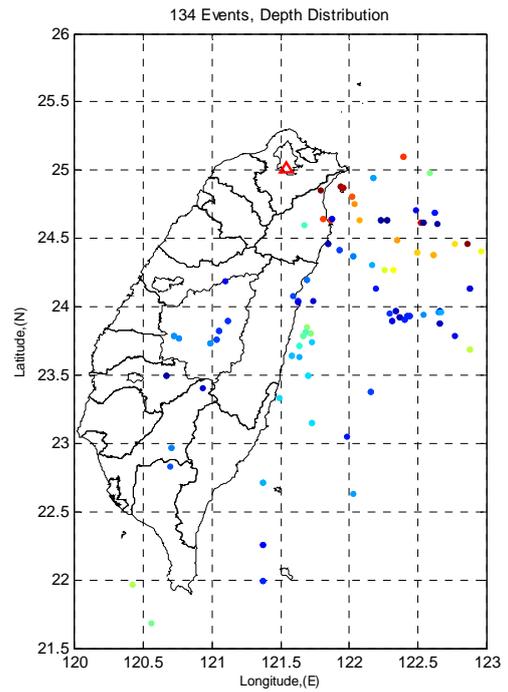


圖 1.2.11 中興大學土木環工大樓使用 SI-DATA 識別結果：穩定圖及振形

(a) SI-DATA 穩定圖及模態圖(補強後事件)

(b) 第一模態振形 mode1、第二模態振形 mode2(水平向)及第三模態振形 mode 3(扭轉向)之立體圖比較



(a)

(b)

圖 3.2.12 台科大營建系大樓：(a)實照圖(b)分析之地震震央位置圖

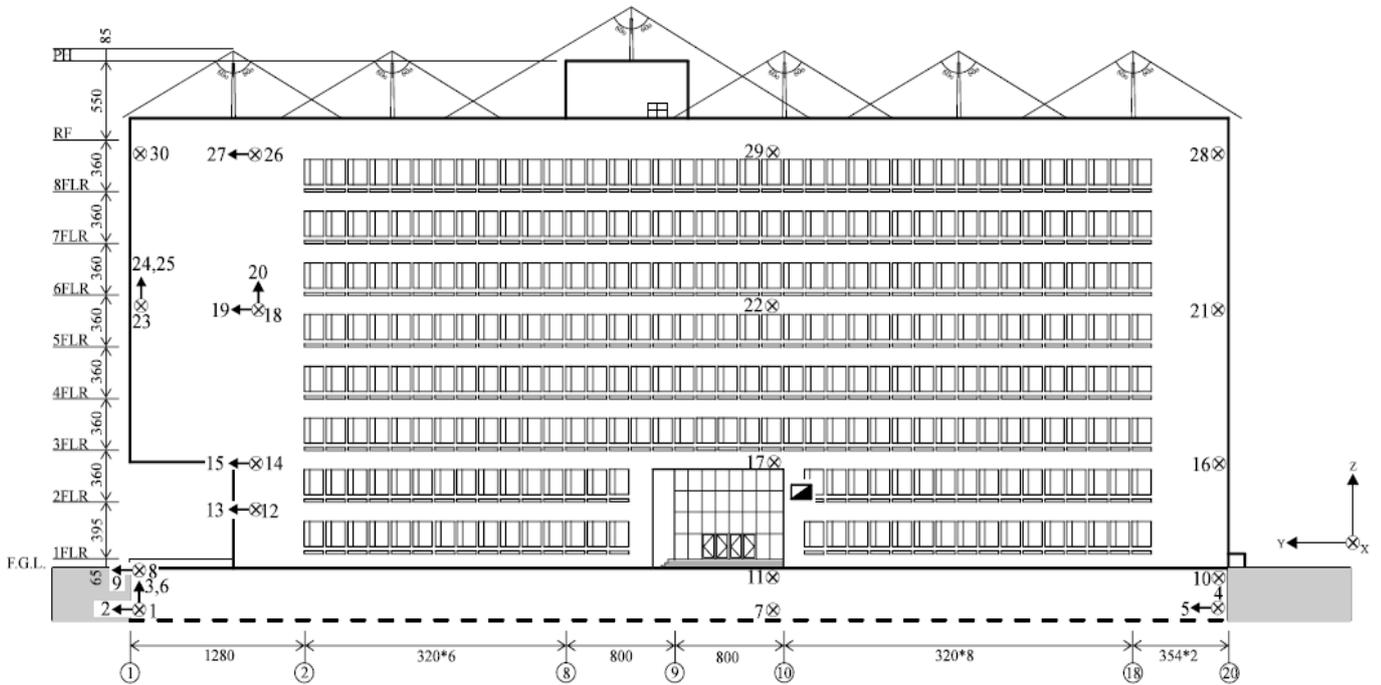


圖 1.2.13 台科大營建系大樓強震監測系統感應器安裝位置剖面圖

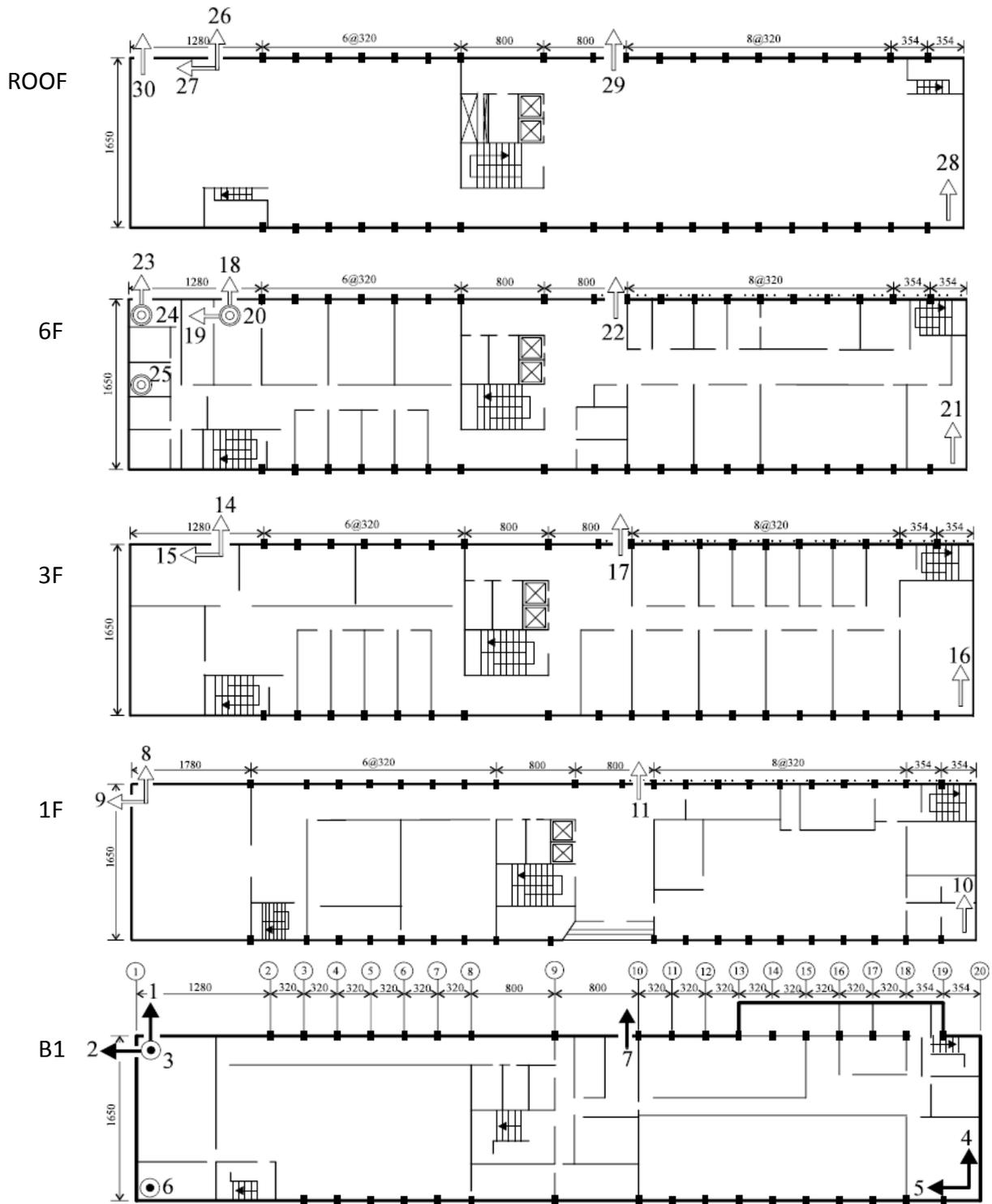
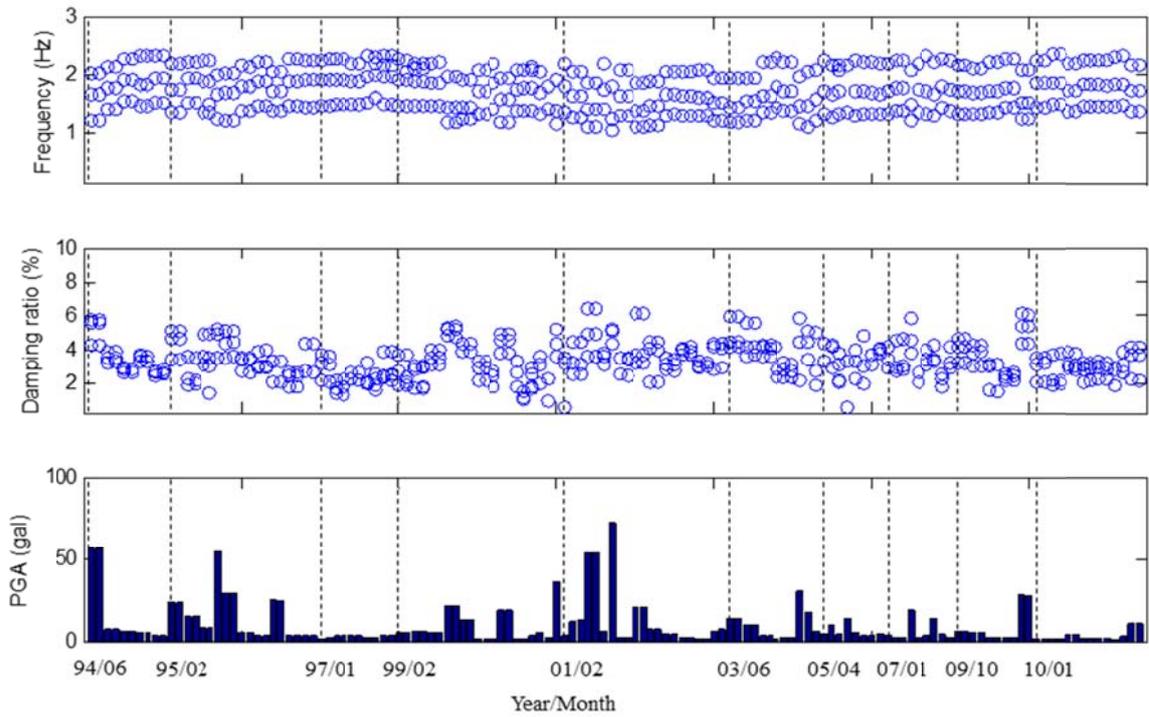
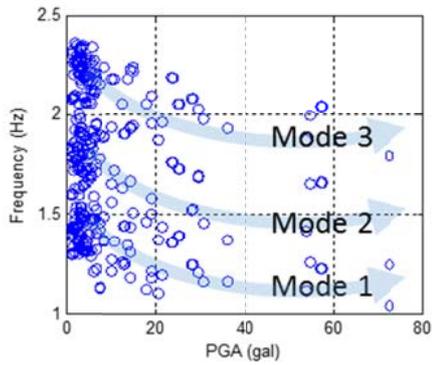


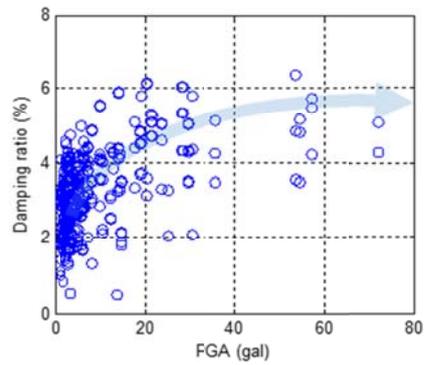
圖 1.2.14 台科大營建系大樓強震監測系統感應器安裝位置平面圖



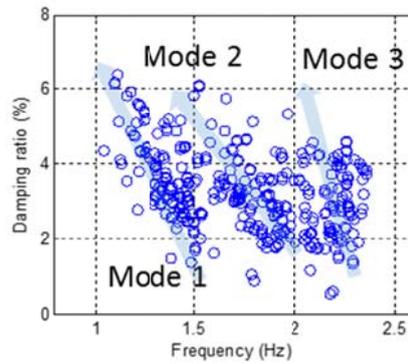
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 1.2.15 台科大營建系大樓使用 SI-DATA 識別結果：識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

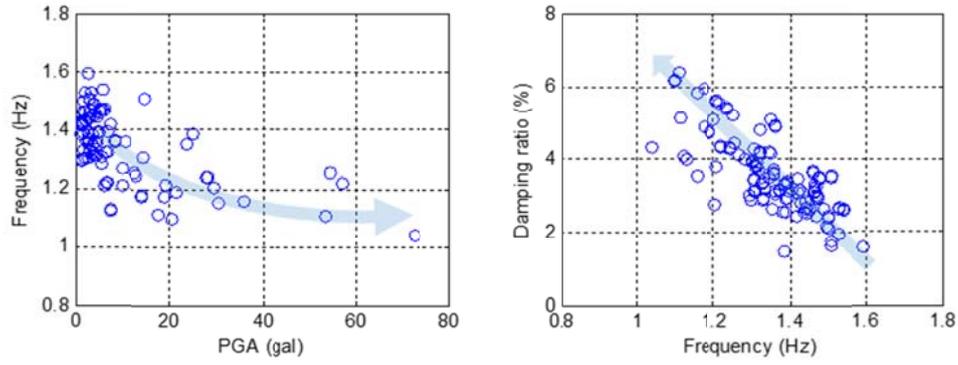


圖 1.2.16 台科大營建系大樓使用 SI-DATA 識別結果：第一模態
識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

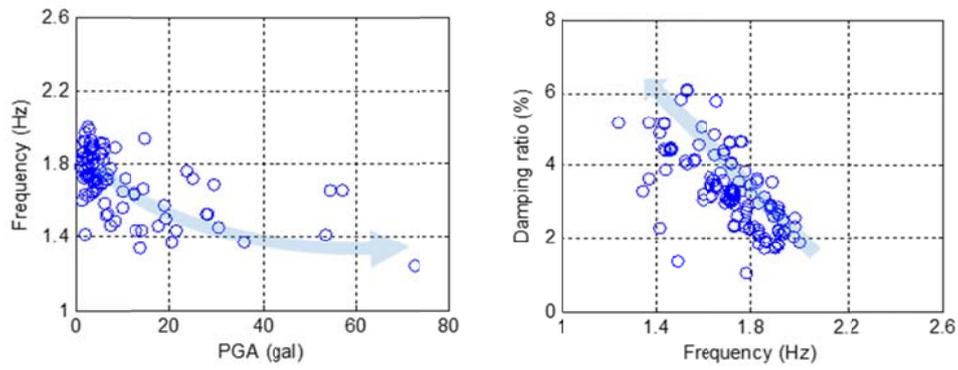


圖 1.2.17 台科大營建系大樓使用 SI-DATA 識別結果：第二模態
識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

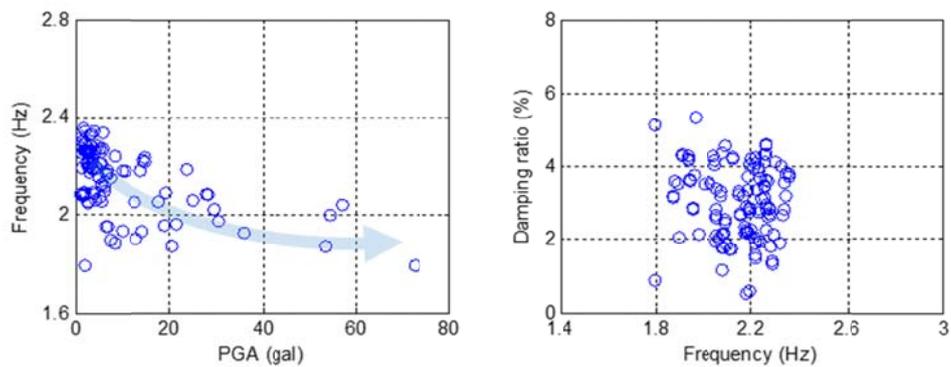
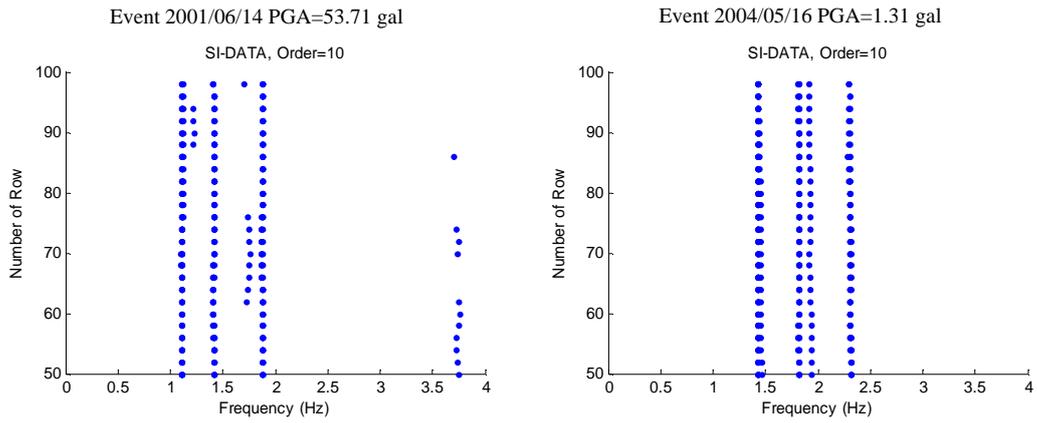
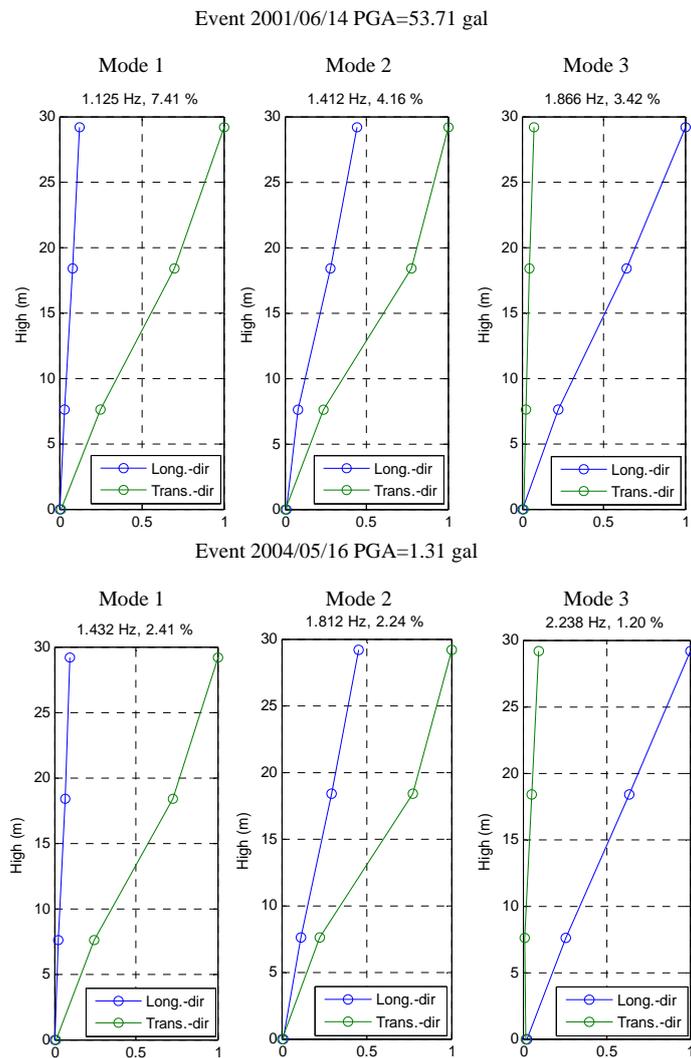


圖 1.2.18 台科大營建系大樓使用 SI-DATA 識別結果：第三模態
識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度



(a)

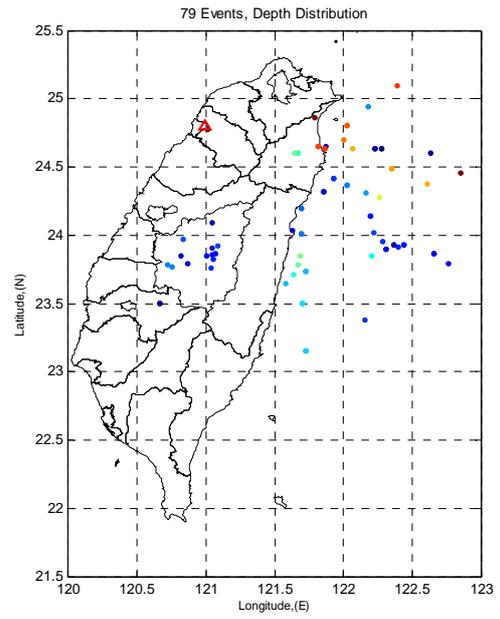


(b)

圖 1.2.19 台科大營建系大樓 SI-DATA 識別結果：穩定圖及振形

(a) SI-DATA 穩定圖

(b) 第一模態振形 mode1(橫向)、第二模態振形 mode2(扭轉向)及第三模態振形 mode 3(縱向)之比較



(a)

(b)

圖 1.2.20 交通大學公教宿舍：(a)實照圖(b)分析之地震震央位置圖

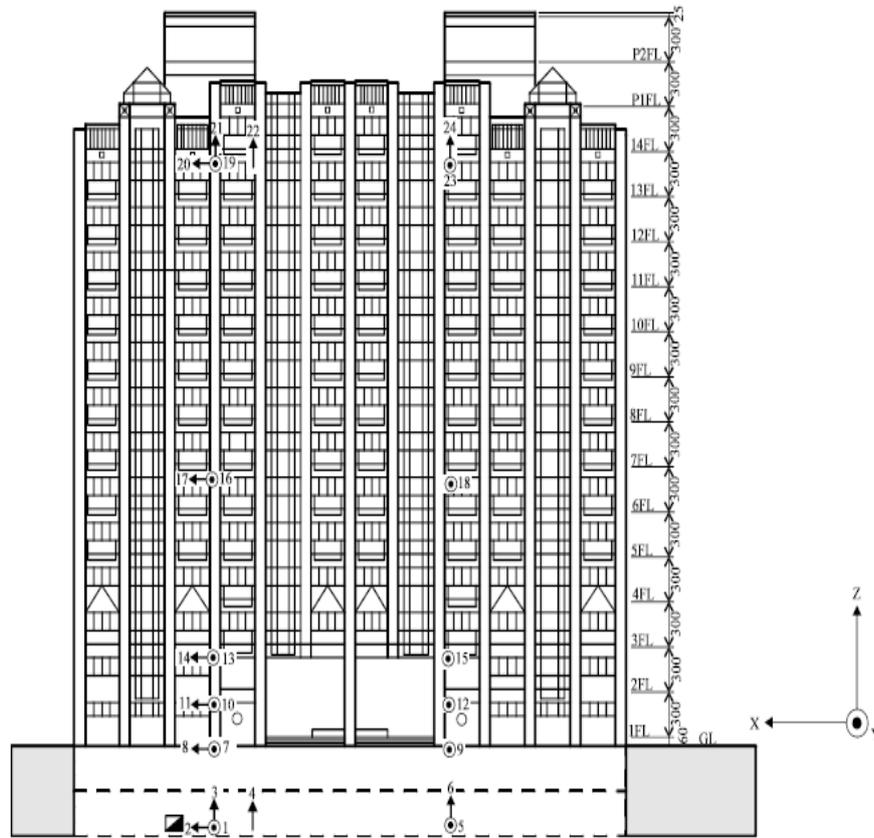


圖 1.2.21 交通大學公教宿舍強震監測系統感應器安裝位置剖面圖

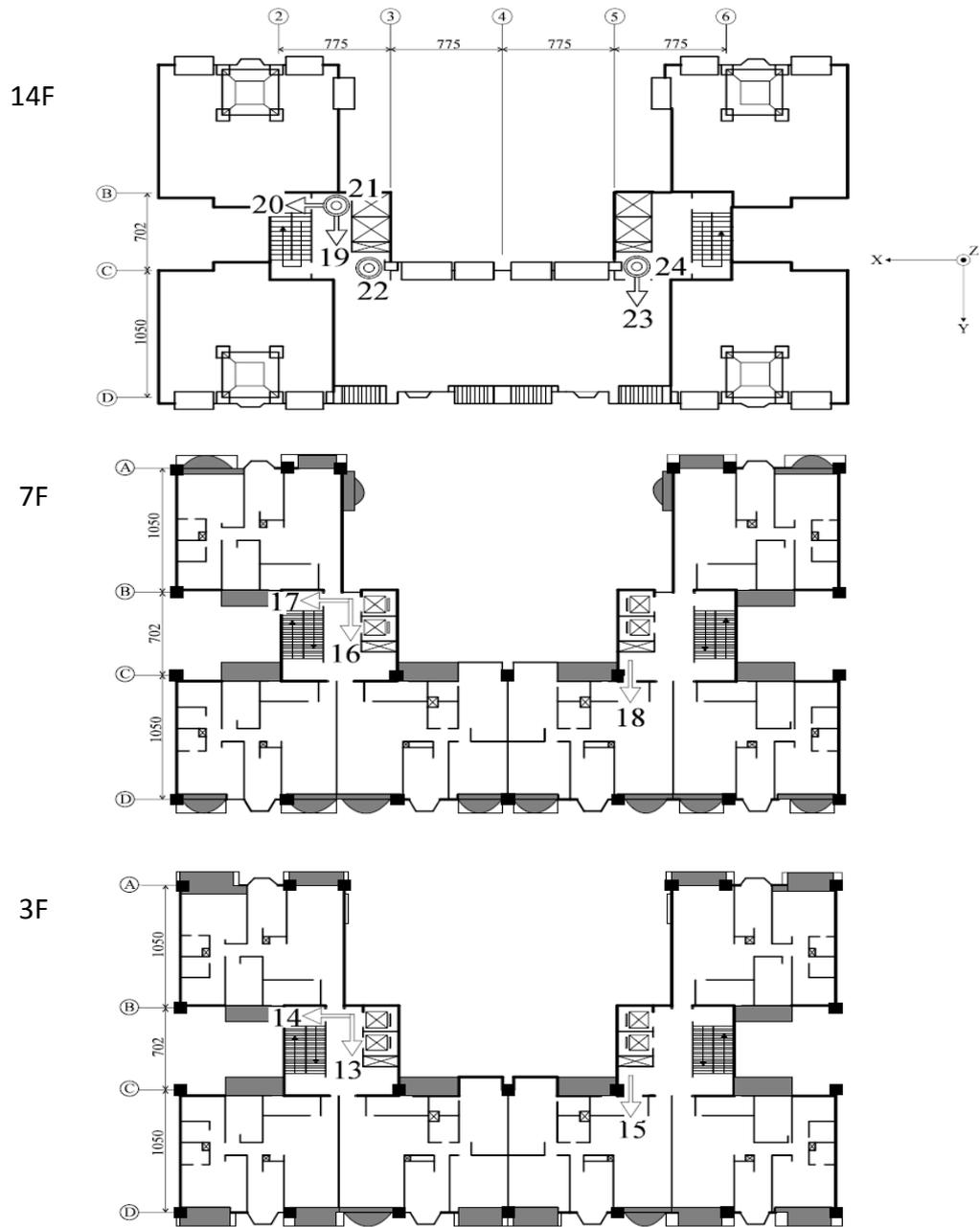


圖 1.2.22 交通大學公教宿舍強震監測系統感應器安裝位置平面圖-1

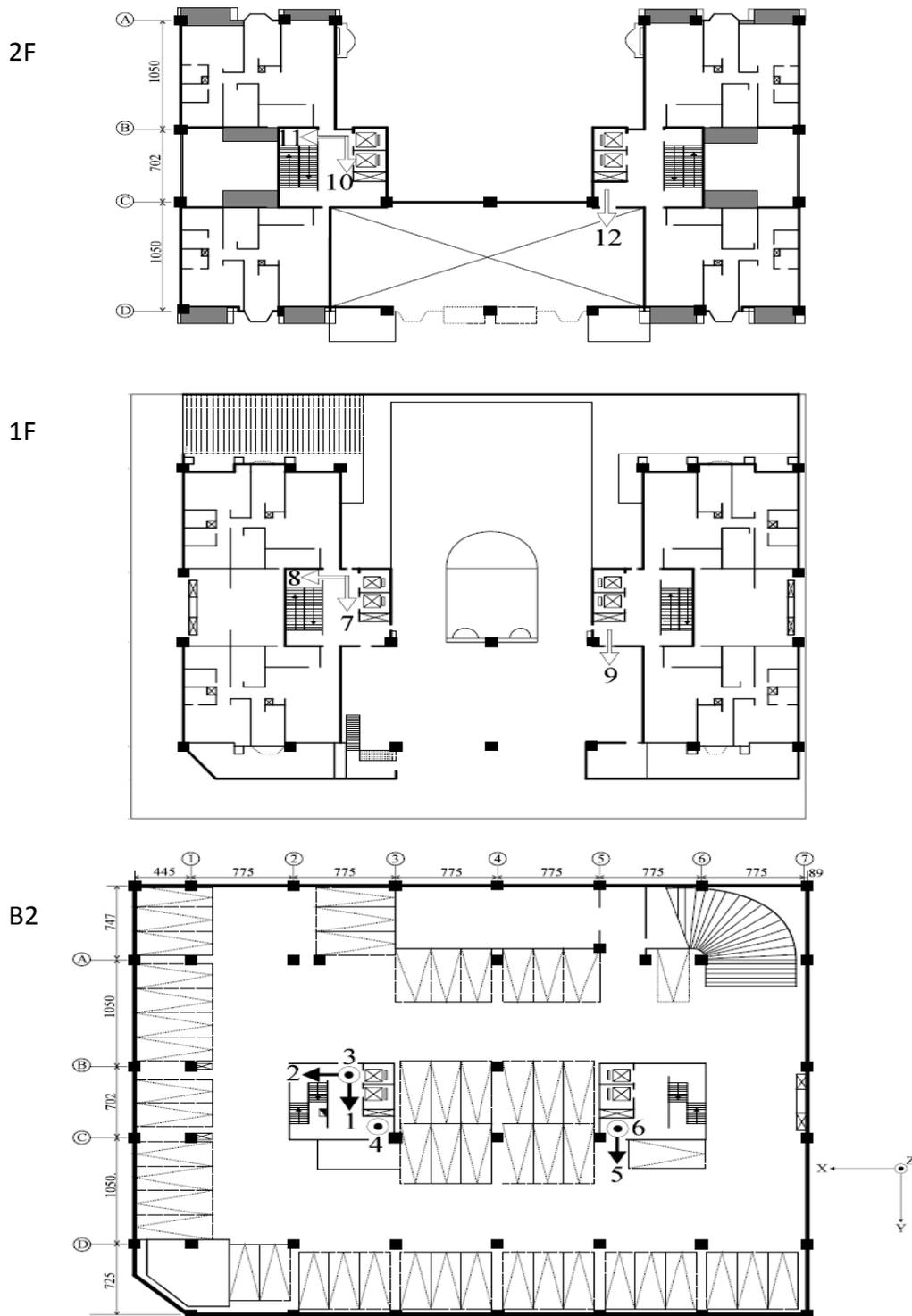
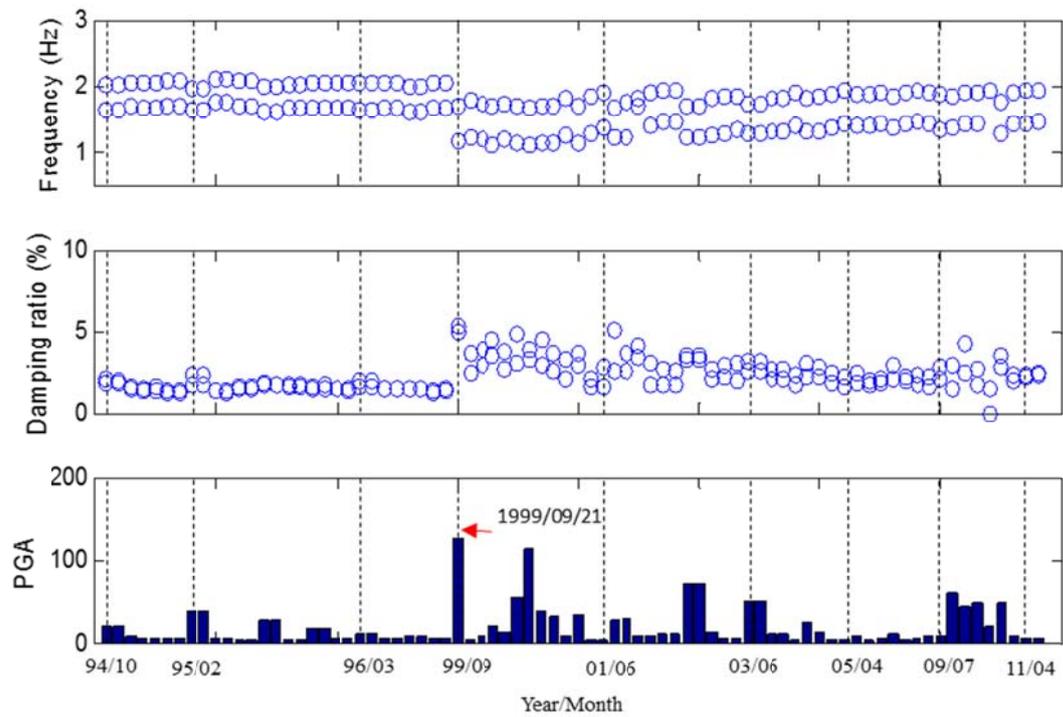
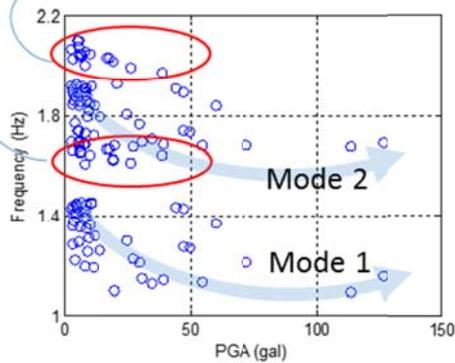


圖 1.2.22 交通大學公教宿舍強震監測系統感應器安裝位置平面圖-2

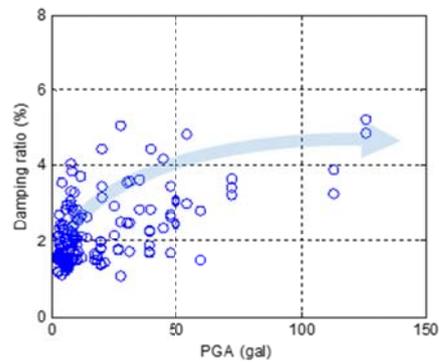


(a)

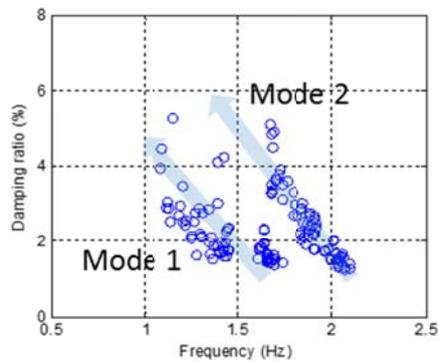
921地震前訊號識別結果



(b)

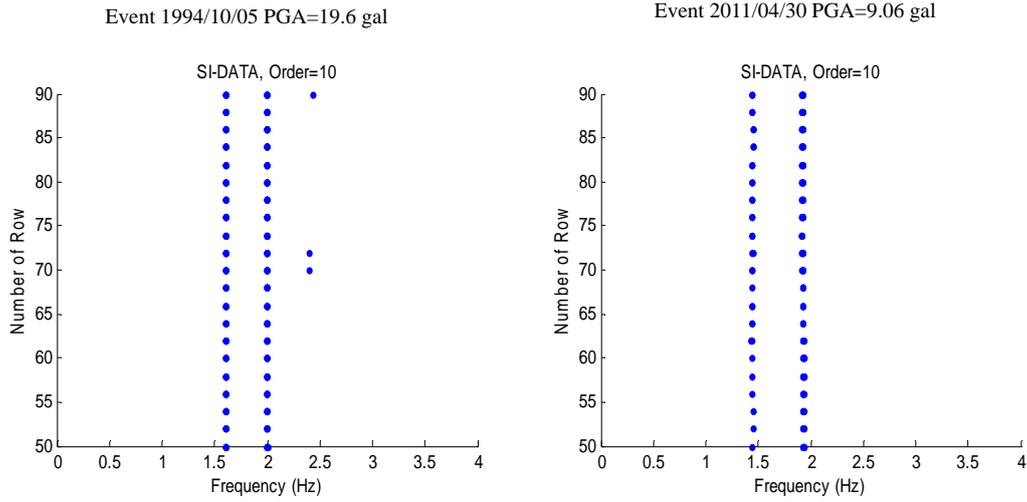


(c)

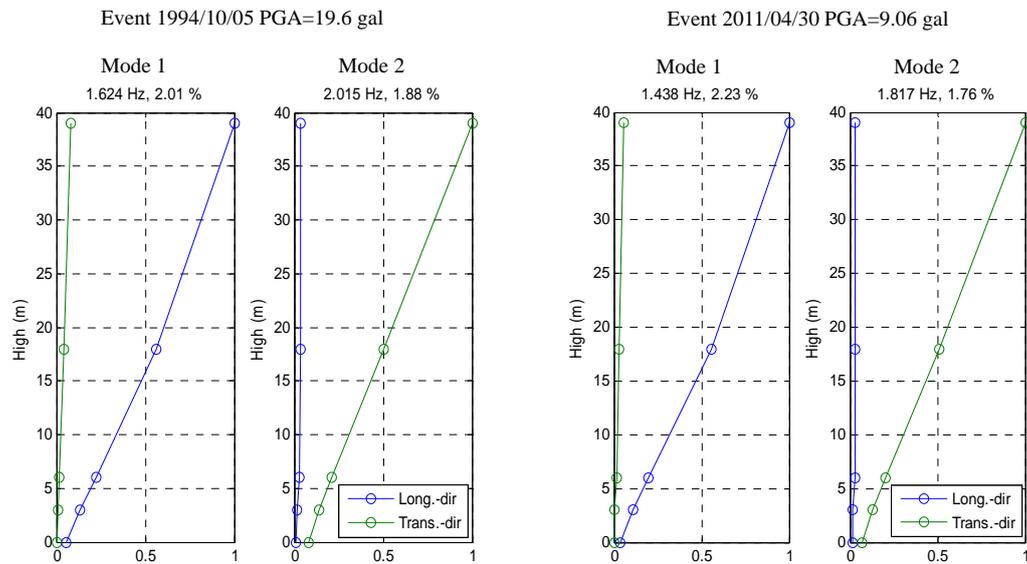


(d)

圖 1.2 23 交通大學公教宿舍使用 SI-DATA 識別結果：識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度



(a)



(b)

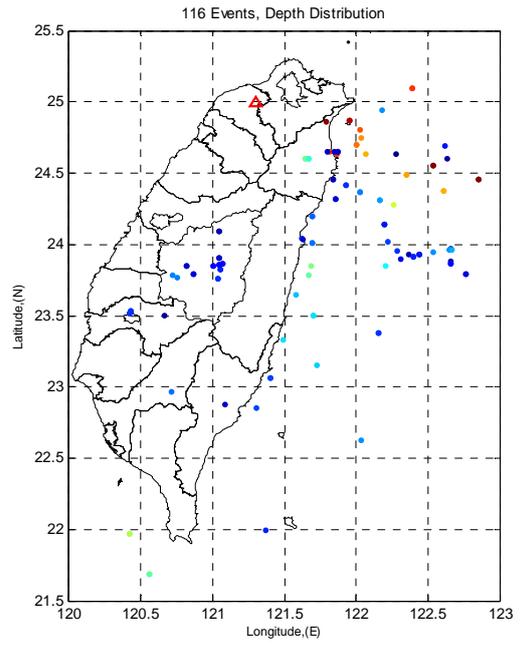
圖 1.2 24 交通大學公教宿舍 SI-DATA 識別結果：穩定圖及振形

(a) SI-DATA 穩定圖

(b) 第一模態振形 mode1(縱向)及第二模態振形 mode2(橫向)之比較



(a)



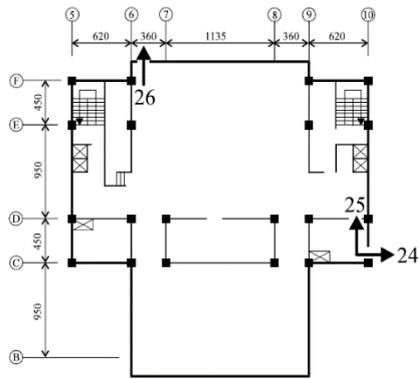
(b)

圖 1.2.25 桃園縣政府市政中心：(a)實照圖(b)分析之地震震央位置圖

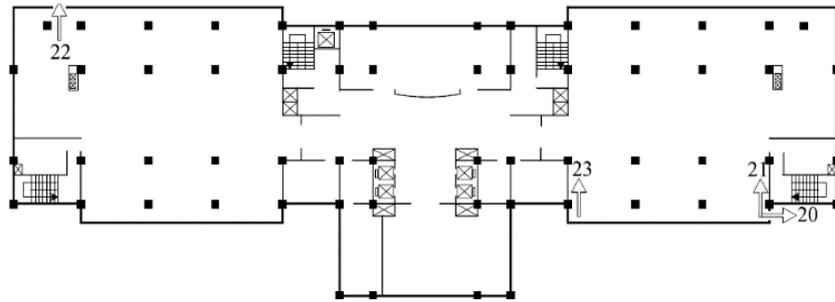


圖 1.2.26 桃園縣政府市政中心強震監測系統感應器安裝位置剖面圖

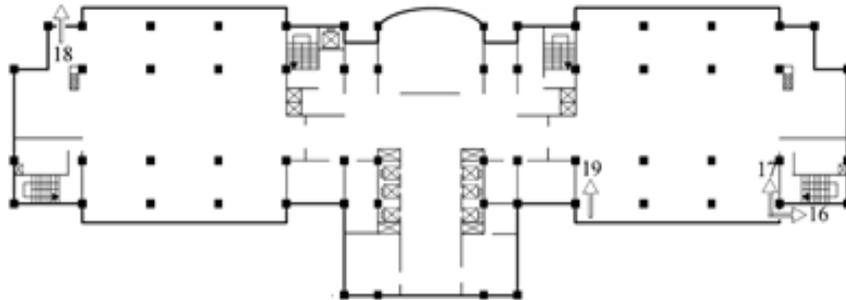
ROOF



14F



10F



5F

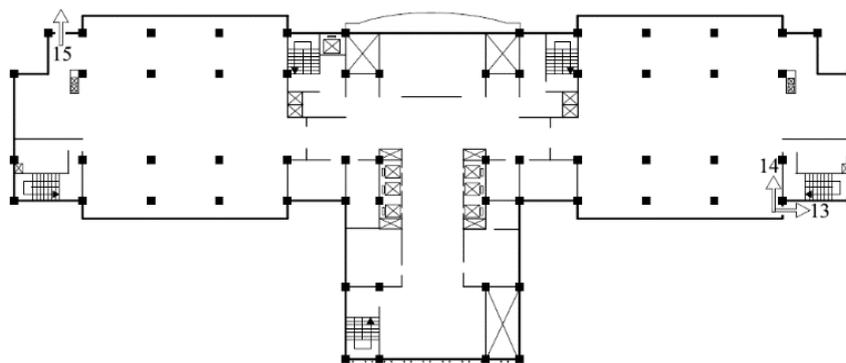


圖 1.2.27 桃園縣政府市政中心強震監測系統感應器安裝位置平面圖-1

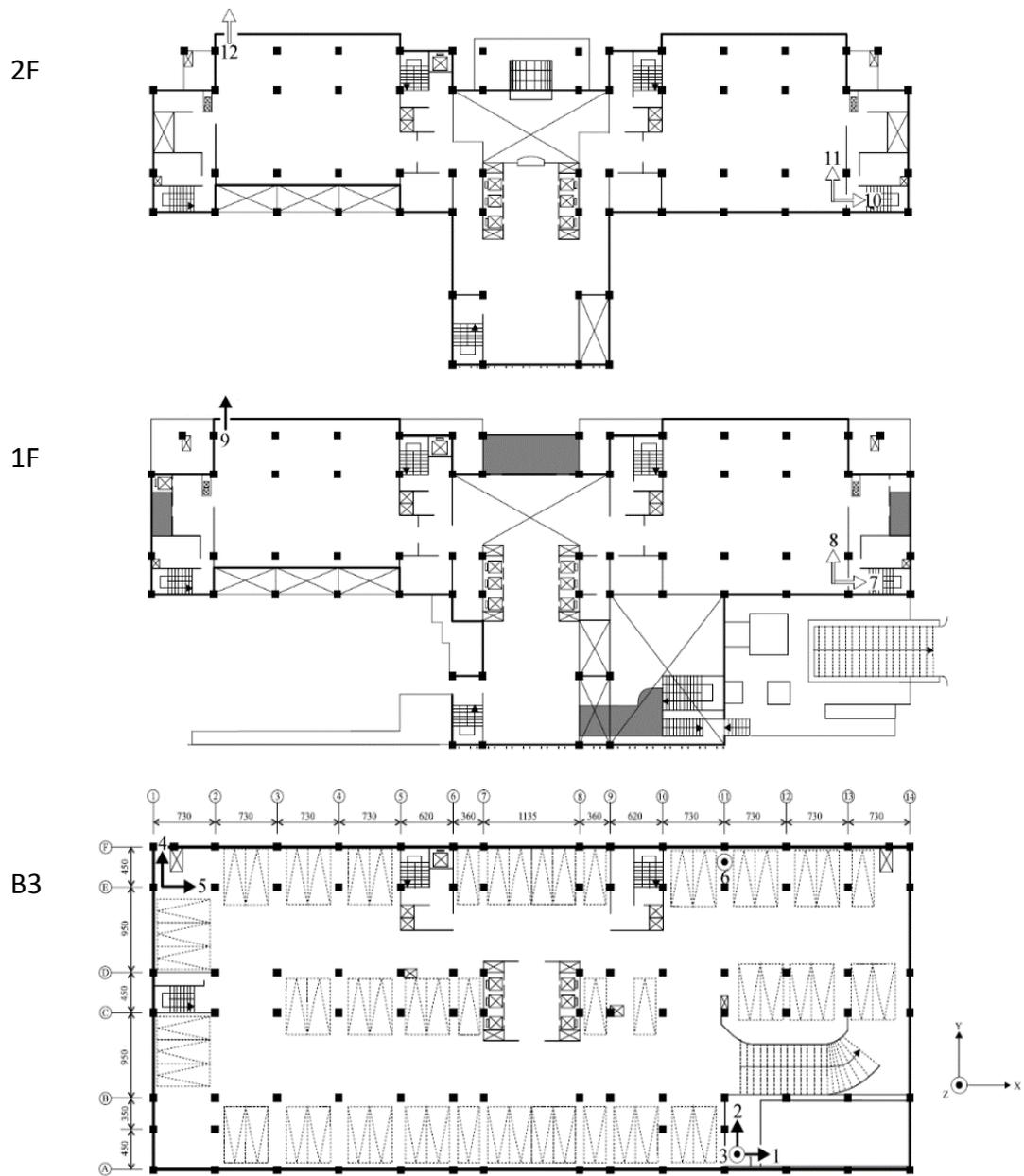


圖 1.2.27 桃園縣政府市政中心強震監測系統感應器安裝位置平面圖-2

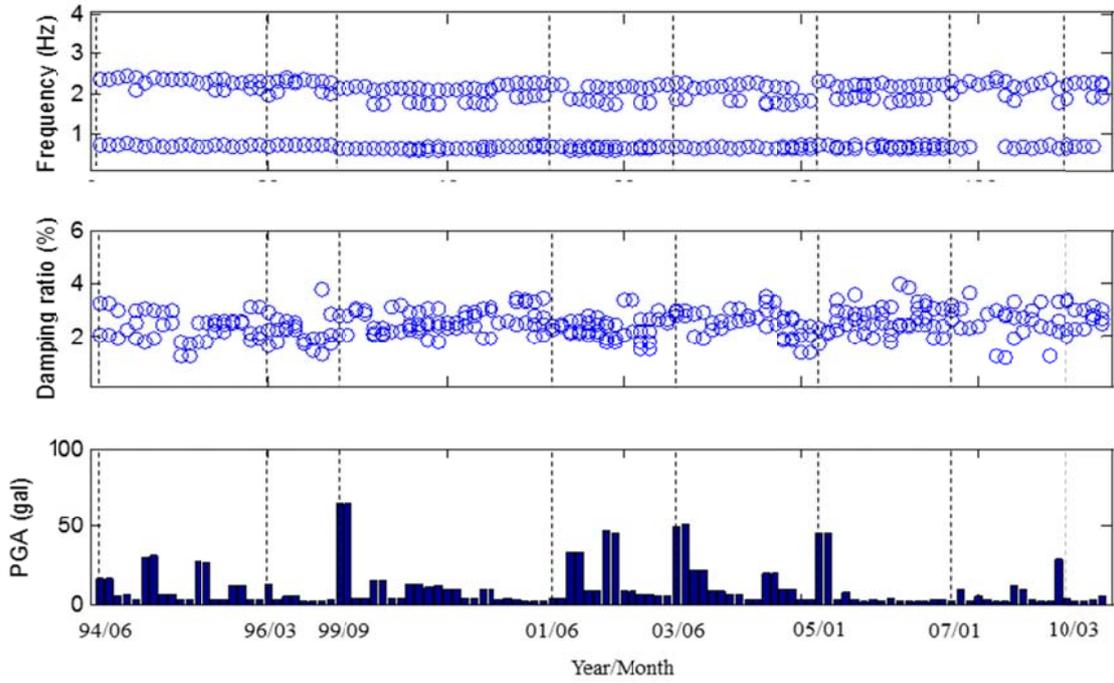


圖 1.2.28 桃園縣政府市政中心使用 SI-DATA 識別結果：識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

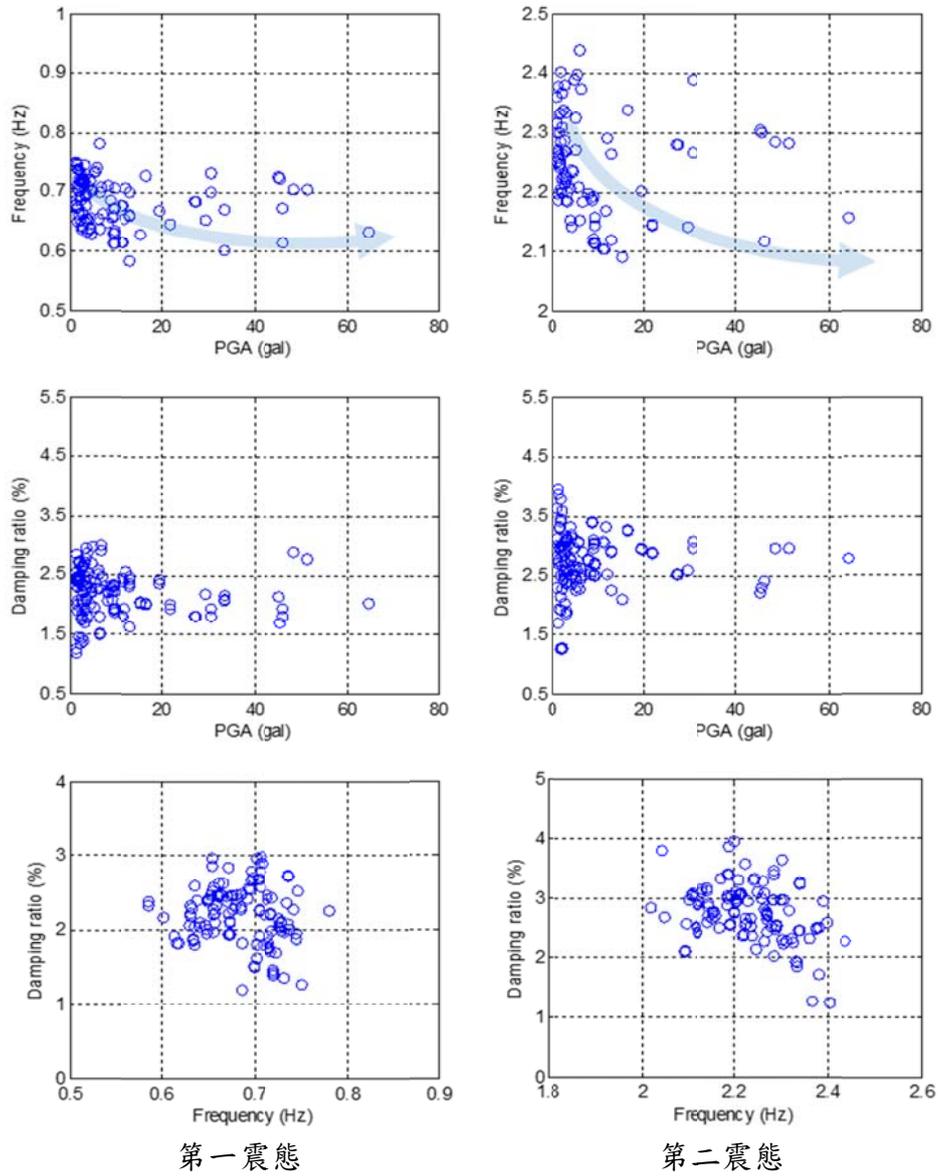
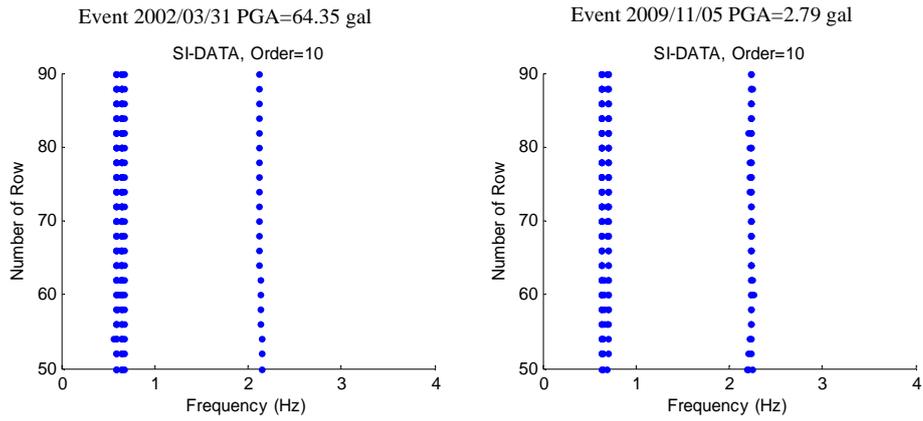
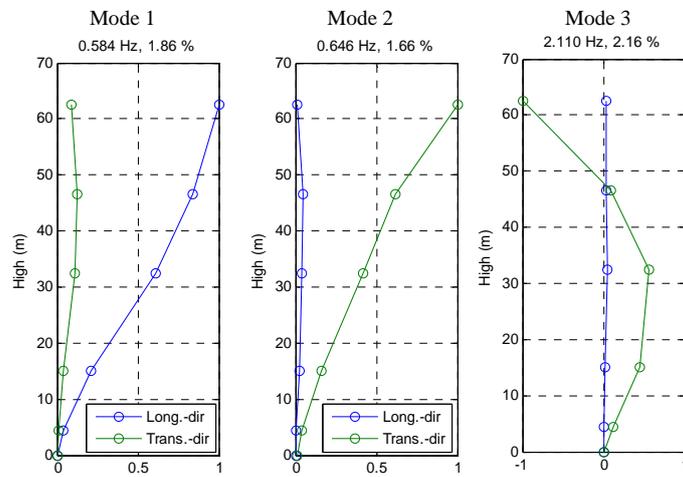


圖 1.2.29 桃園縣政府市政中心使用 SI-DATA 識別結果：識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

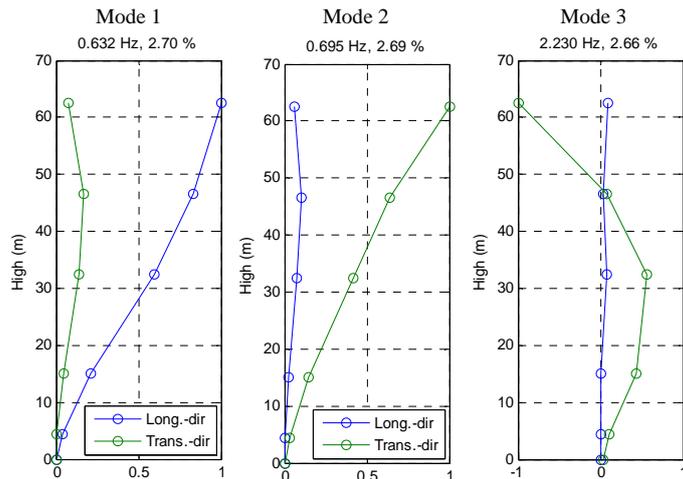


(a)

Event 2002/03/31 PGA=64.35 gal



Event 2009/11/05 PGA=2.79 gal

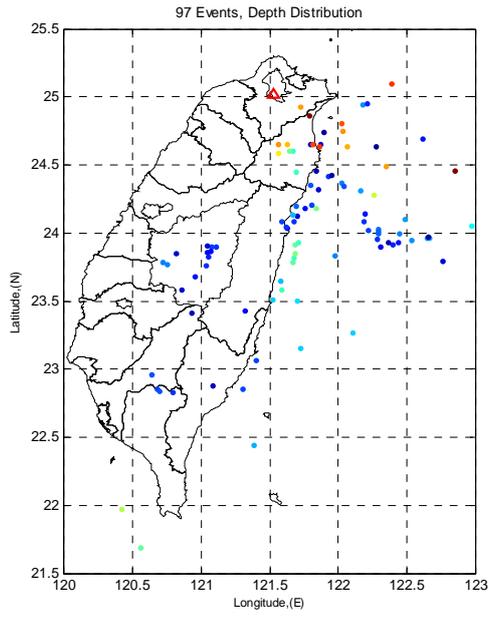


(b)

圖 1.2.30 桃園縣政府市政中心 SI-DATA 識別結果：穩定圖及振形

(a) SI-DATA 穩定圖

(b) 第一模態振形 mode1(縱向)及第二模態振形 mode2(橫向)之比較



(a)

(b)

圖 1.2.31 台電大樓：(a)實照圖(b)分析之地震震央位置圖

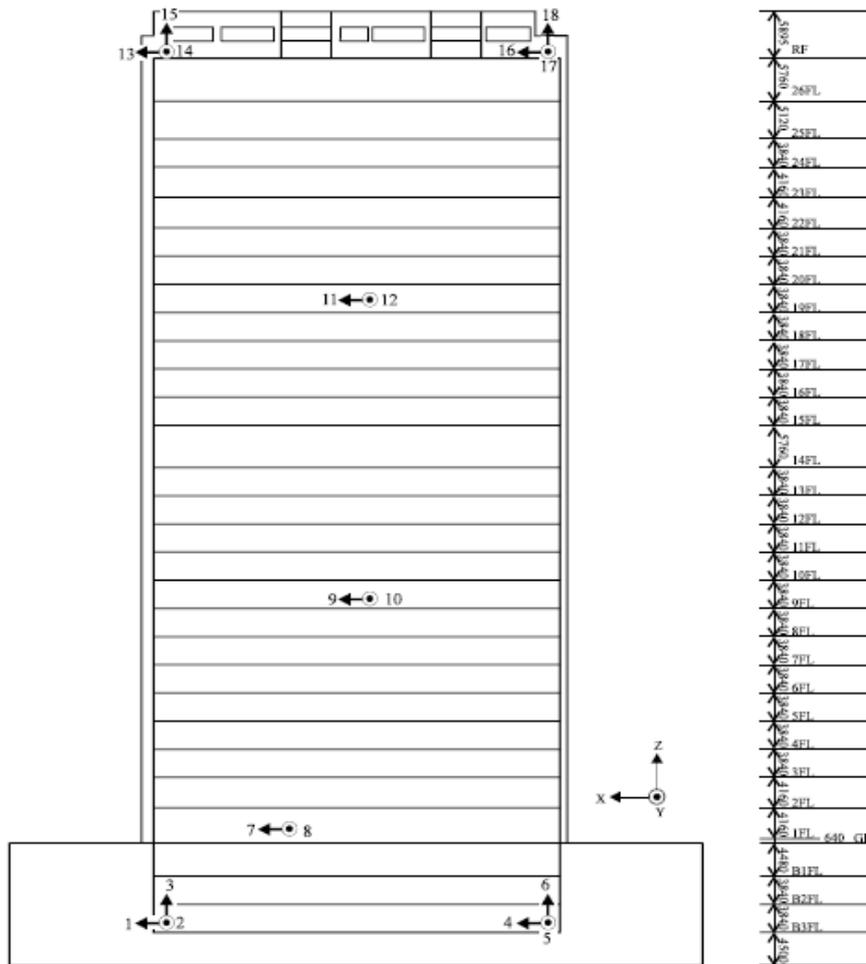


圖 1.2.32 台電大樓強震監測系統感應器安裝位置剖面圖

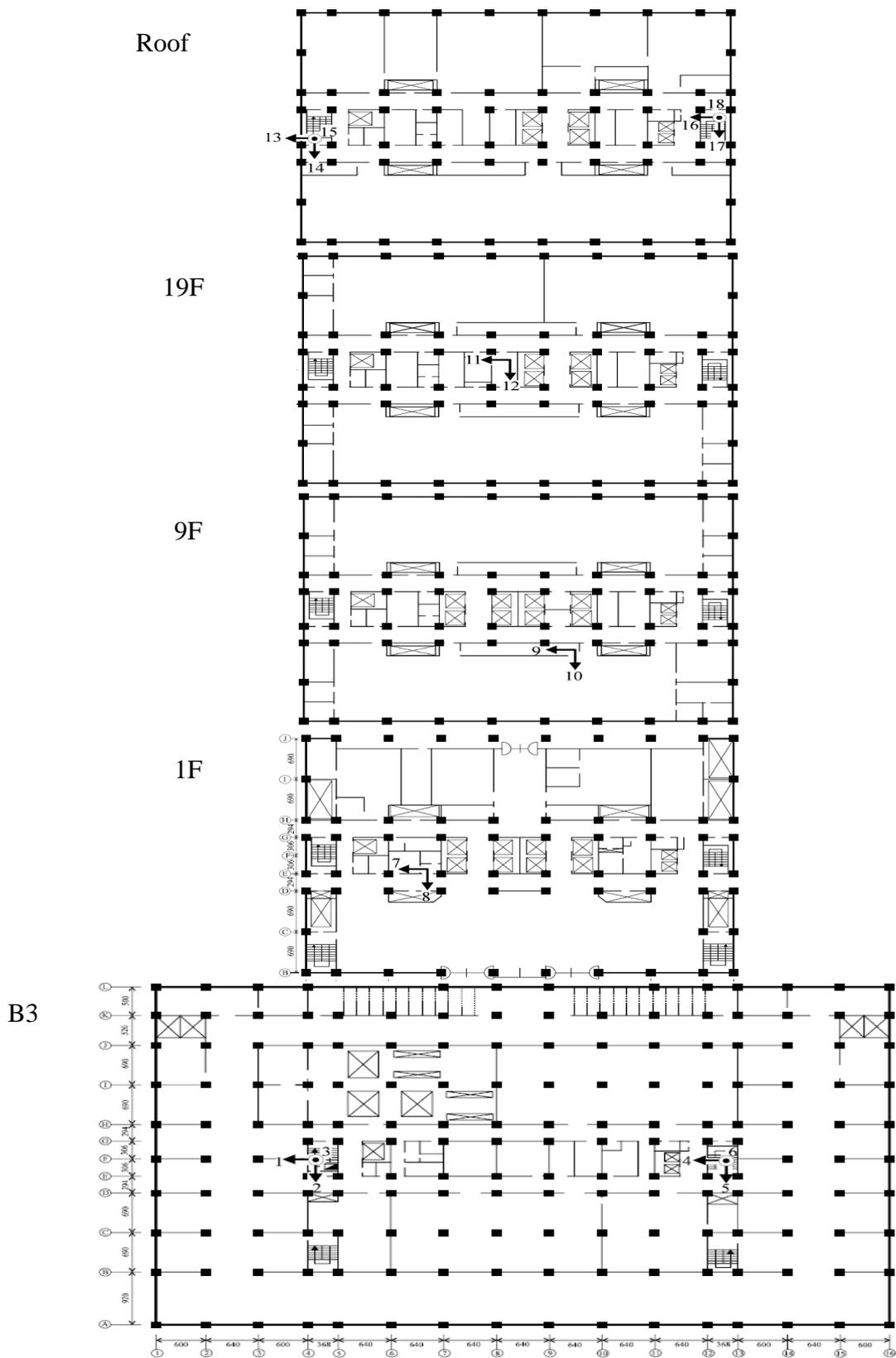


圖 1.2.33 台電大樓強震監測系統感應器安裝位置平面圖

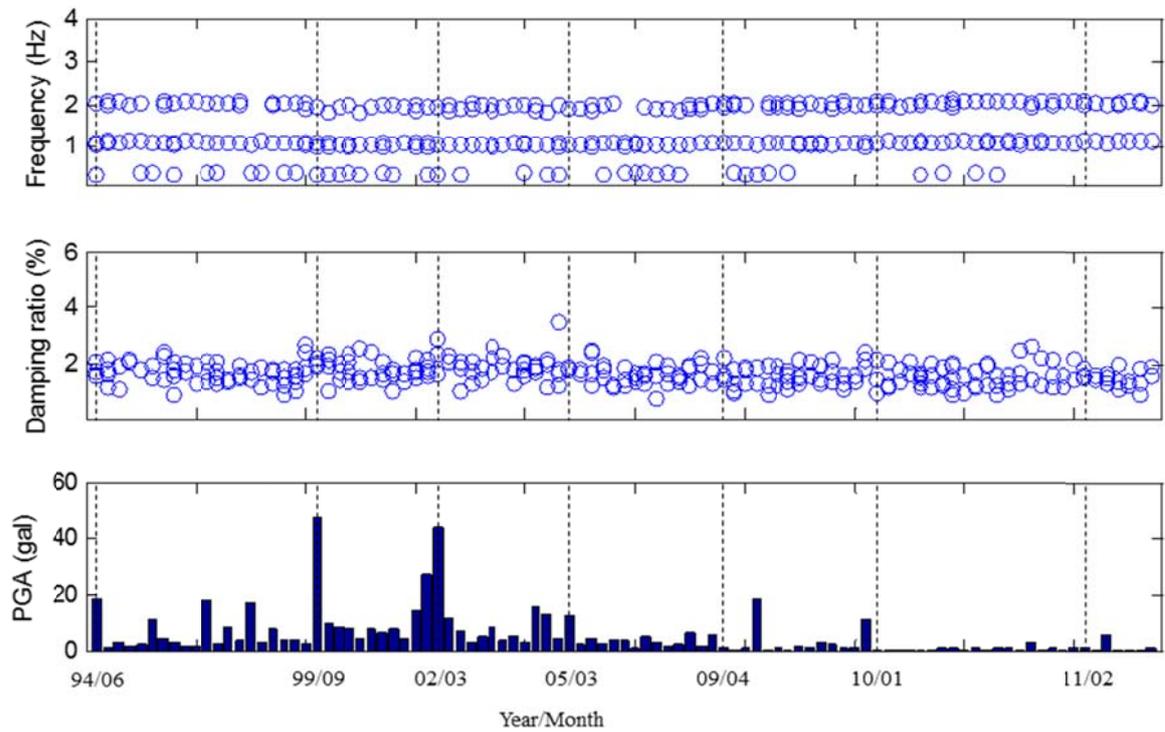


圖 1.2.34 台電大樓使用 SI-DATA 識別結果：識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

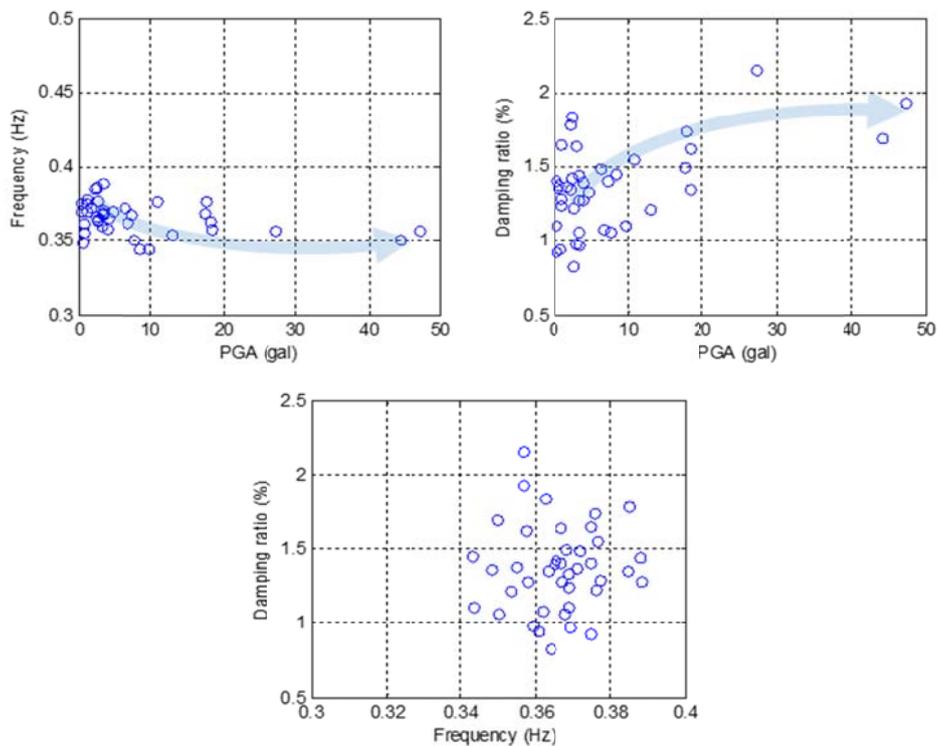


圖 1.2.35 台電大樓使用 SI-DATA 識別結果：第一振態識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

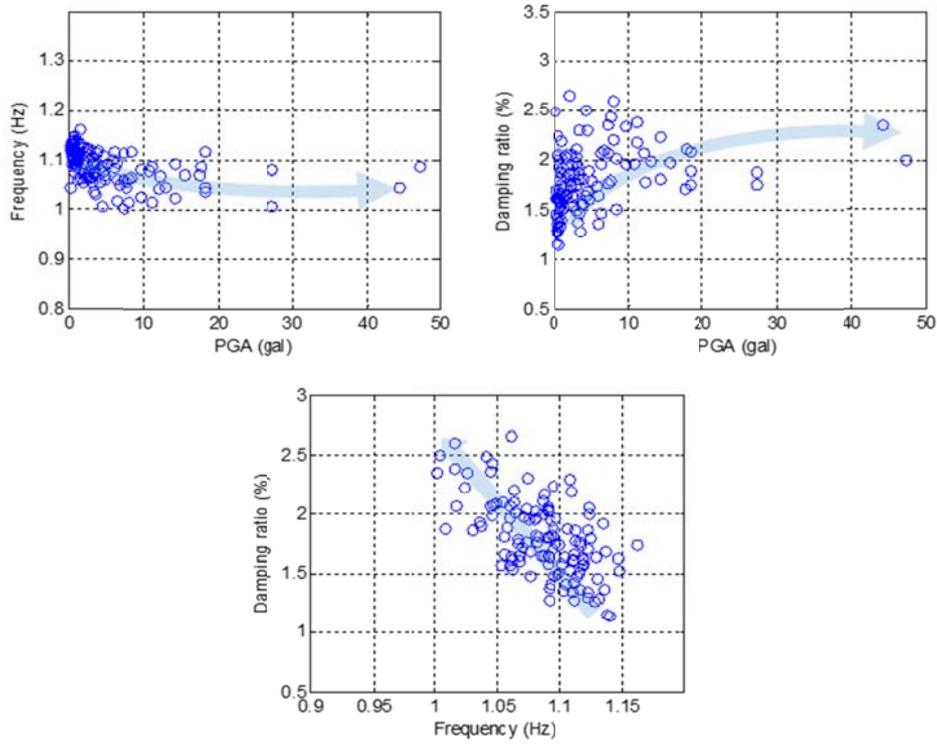


圖 1.2.36 台電大樓使用 SI-DATA 識別結果：第二振態
識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度

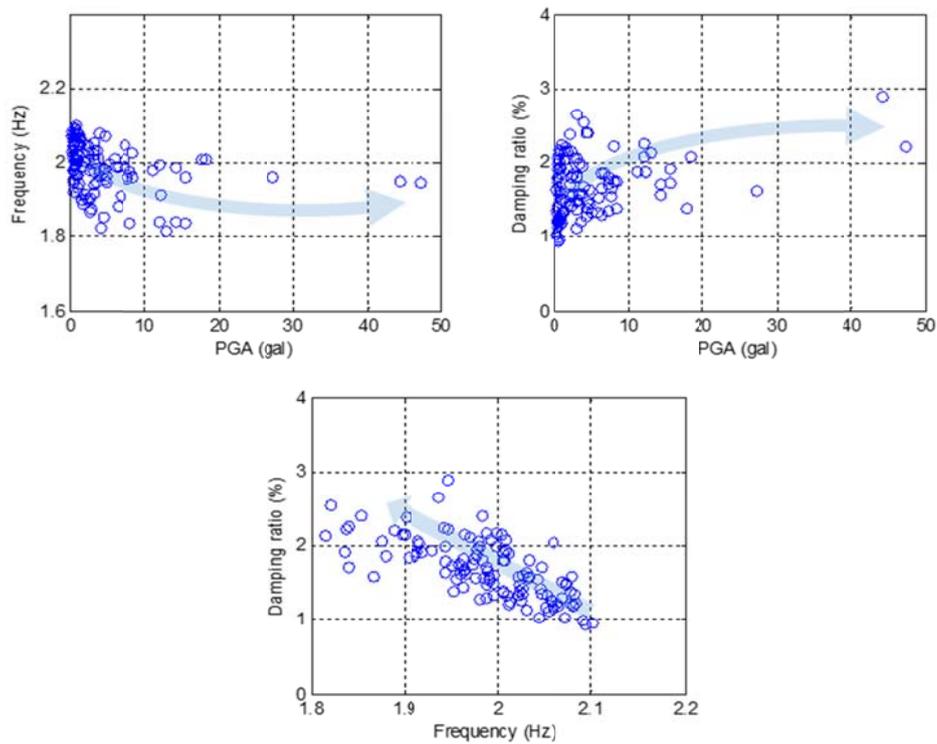
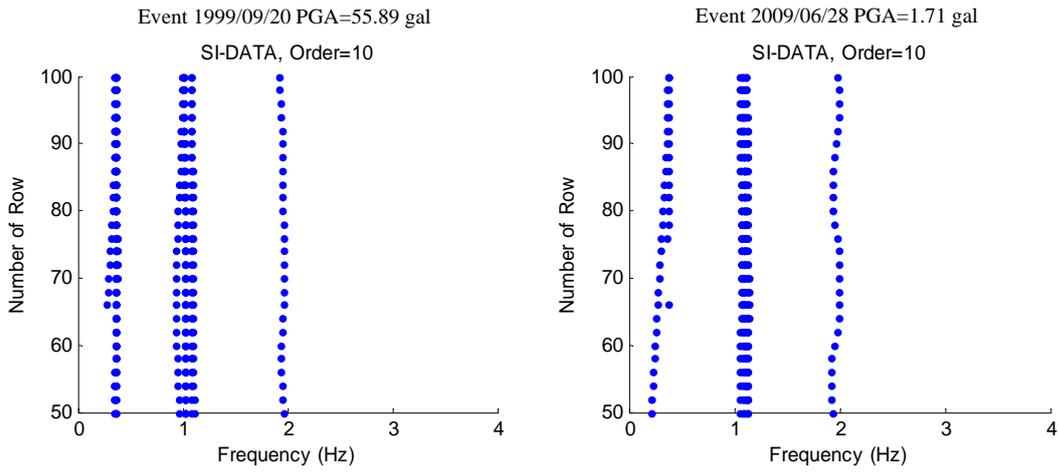
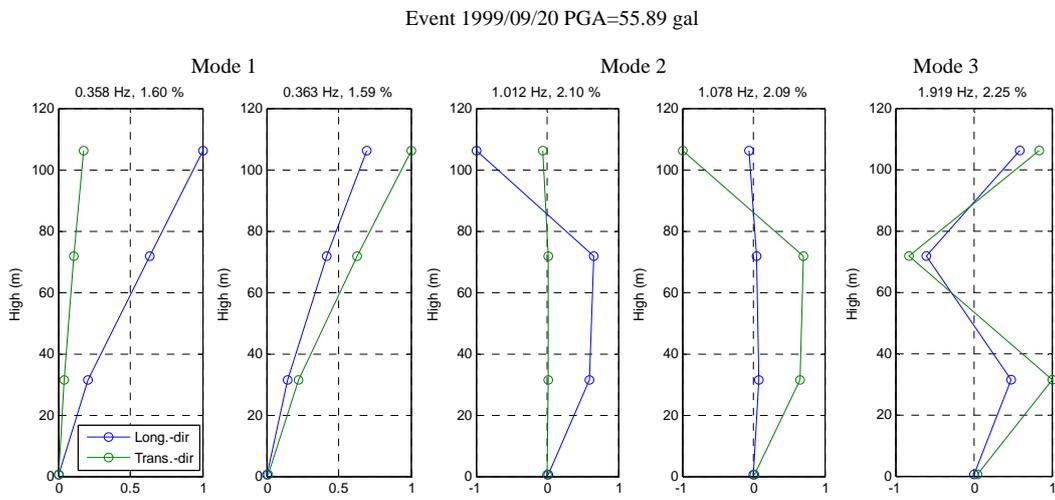


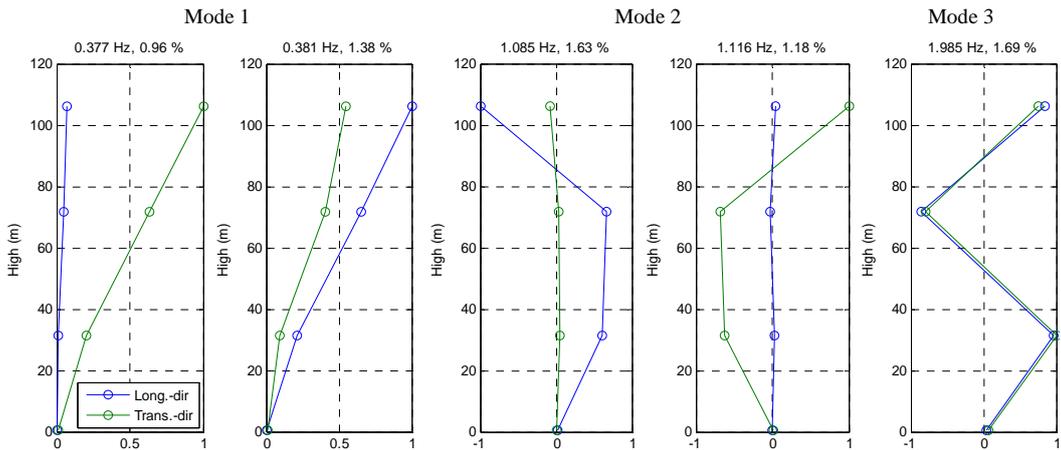
圖 1.2.37 台電大樓使用 SI-DATA 識別結果：第三振態
識別頻率、阻尼比及相對應之最大地表加速度



(a)



Event 2009/06/28 PGA=1.71 gal



(b)

圖 1.2.38 台電大樓 SI-DATA 識別結果：穩定圖及振形

(a) SI-DATA 穩定圖

(b) 系統前三個模態振形之比較

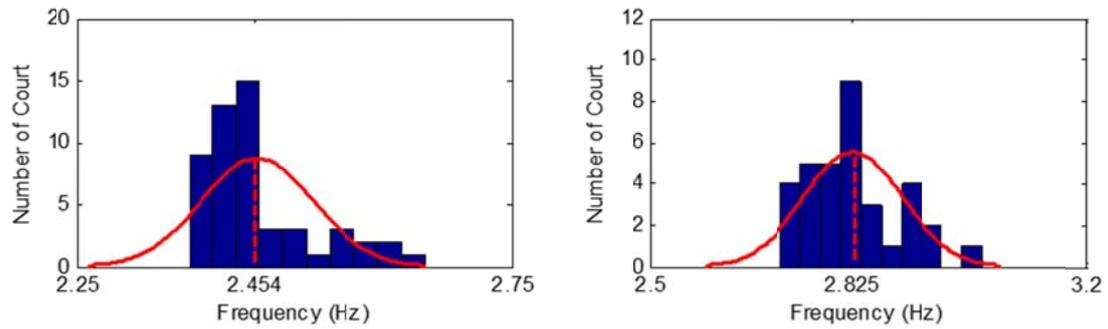


圖 1.3.1 台灣大學新生大樓使用 SI-DATA 識別系統頻率分布圖

(a)縱向(Longitudinal)振態頻率 2.45Hz

(b)橫向(Transverse)振態頻率 2.83Hz

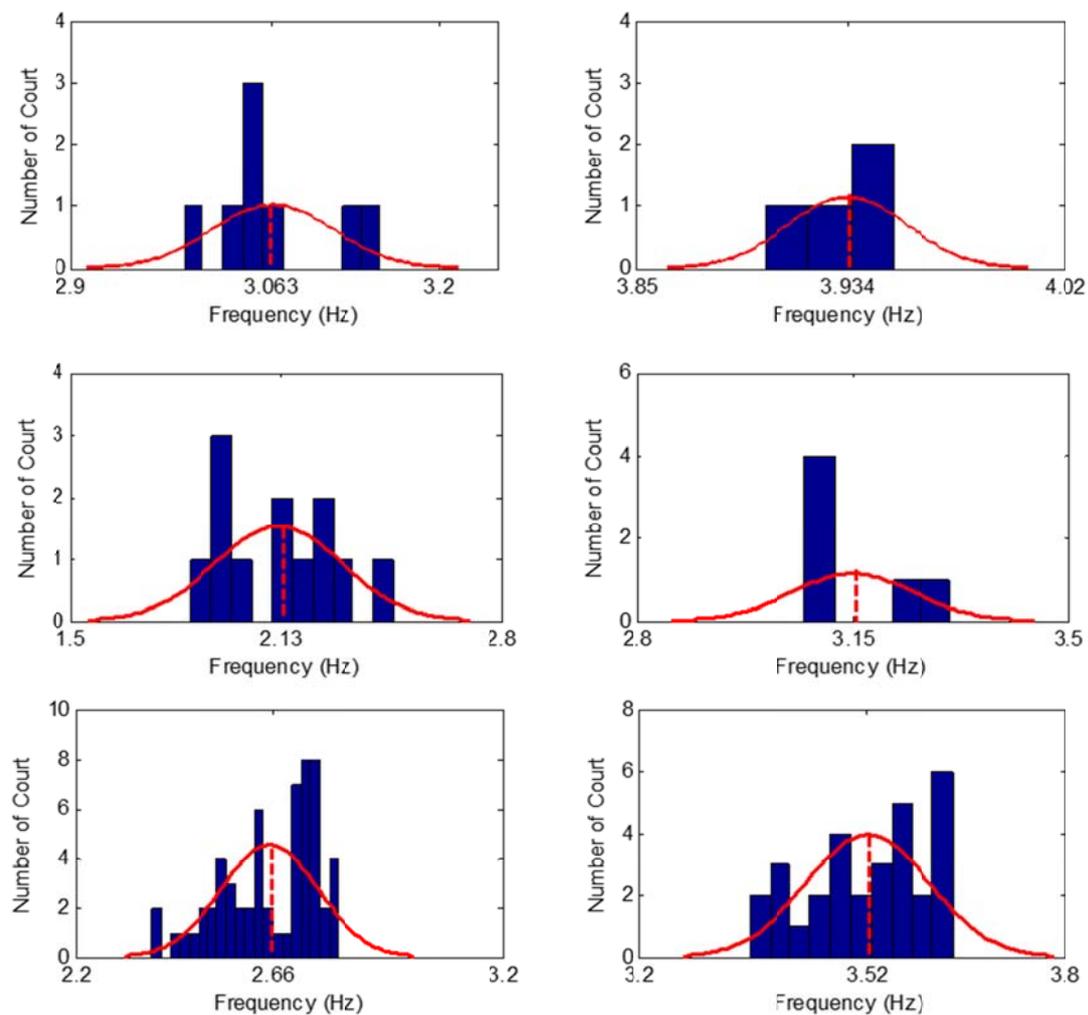


圖 1.3.2 中興大學土木環工大樓使用 SI-DATA 識別系統頻率分布圖

(a) 1994/10 至 1999/07，縱向、橫向振態頻率 3.06Hz 及扭轉向振態頻率 3.93Hz

(b) 1999/09 至 2000/05，縱向、橫向振態頻率 2.13Hz 及扭轉向振態頻率 3.15Hz

(c) 2001/03 至 2012/06，縱向、橫向振態頻率 2.66Hz 及扭轉向振態頻率 3.52Hz

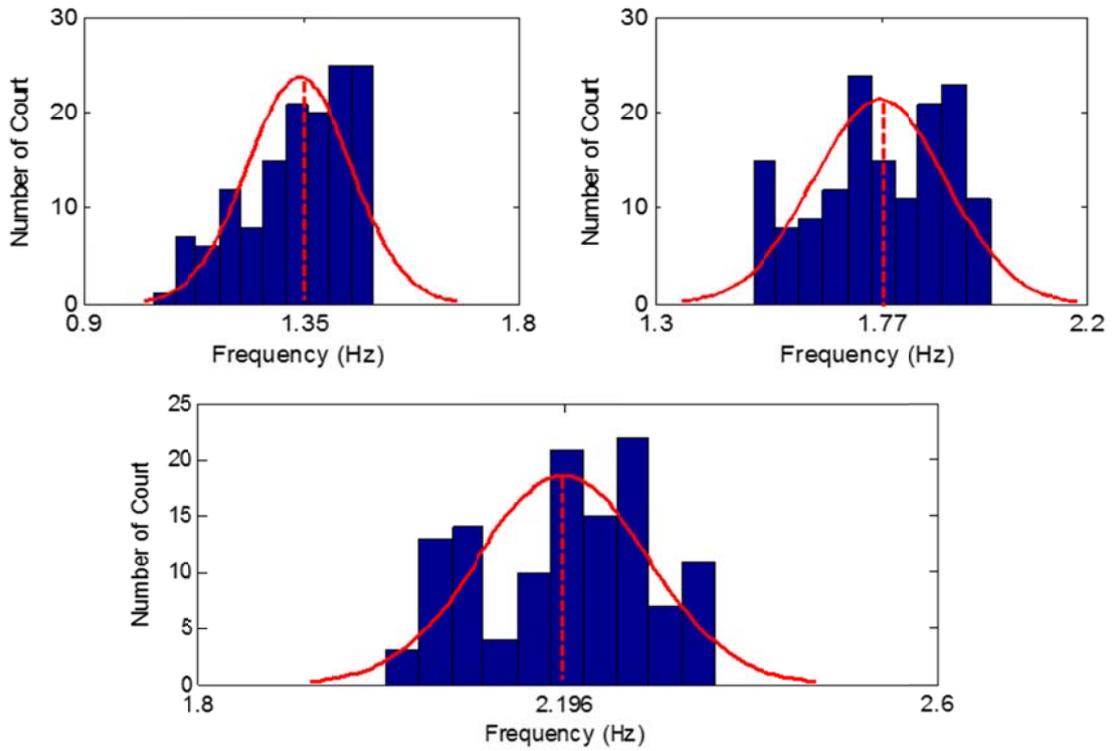


圖 1.3.3 台科大營建系大樓 SI-DATA 識別系統頻率分布圖

- (a) 橫向振態頻率，其頻率分別為 1.35Hz
- (b) 扭轉振態頻率，其頻率分別為 1.77Hz
- (c) 縱向振態頻率，其頻率為 2.2Hz

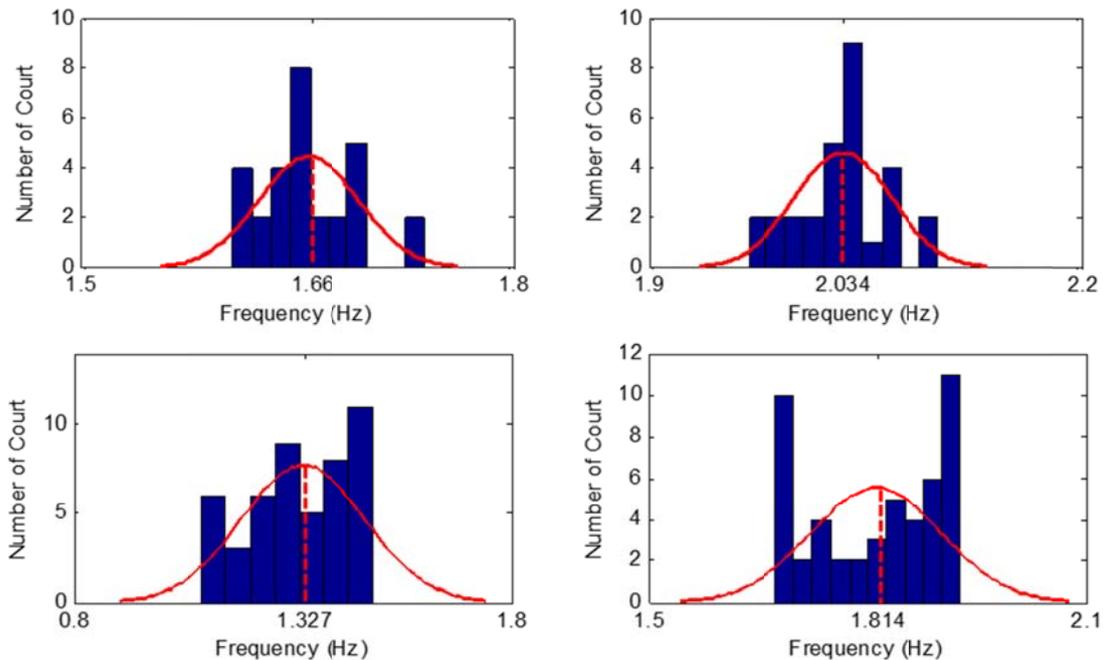


圖 1.3.4 交通大學公教宿舍 SI-DATA 識別系統頻率分布圖

- (a) 1994/10 至 1998/07，縱向振態頻率 1.66Hz 及橫向振態頻率 2.03Hz
- (b) 1999/09 至 2011/04，縱向振態頻率 1.33Hz 及橫向振態頻率 1.81Hz

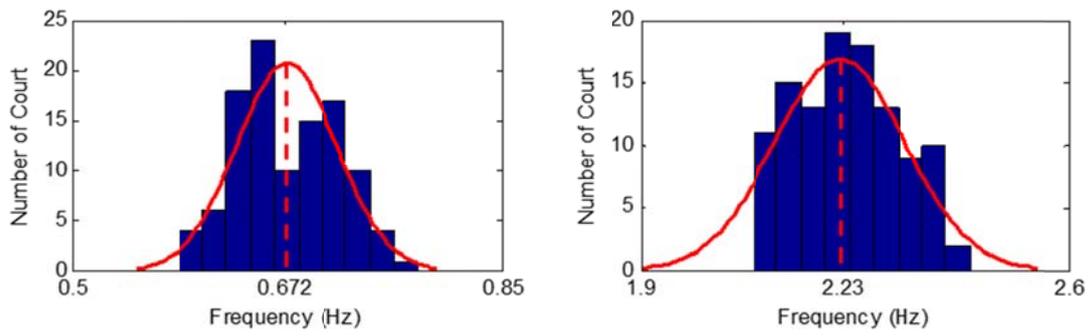


圖 1.3.5 桃園縣政府市政中心 SI-DATA 識別系統頻率分布圖

(a) 第一個縱向及橫向振態頻率 0.67Hz

(b) 第二個橫向振態頻率 2.23Hz

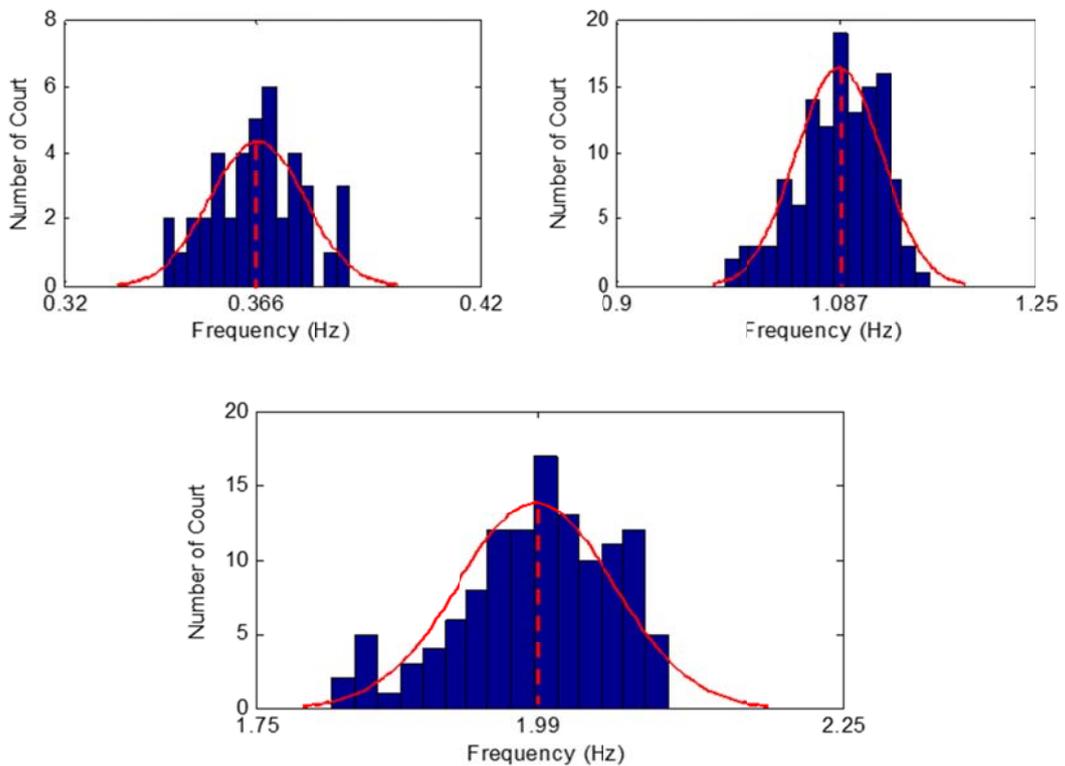
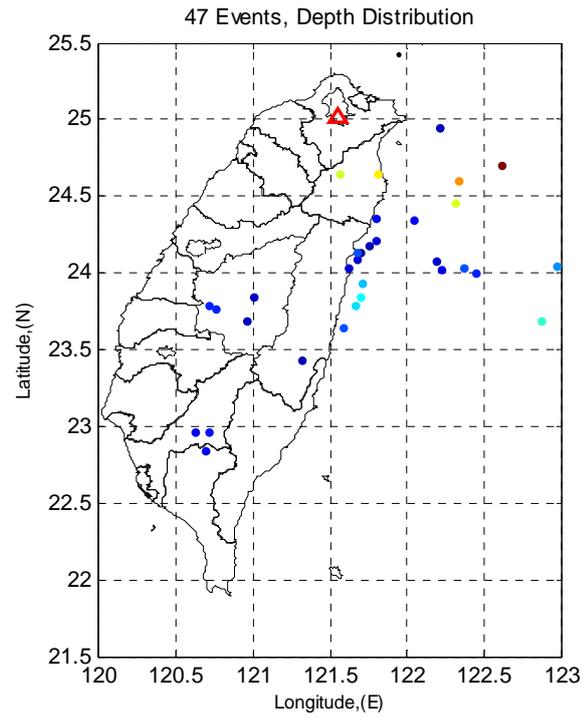


圖 1.3.6 台電大樓 SI-DATA 識別系統頻率分布圖

(a) 第一個縱向及橫向振態頻率 0.37Hz

(b) 第二個縱向及橫向振態頻率 1.09Hz

(c) 第三個振態頻率 1.99Hz



(a)

(b)

圖 2.1.1 台灣大學土木研究大樓：(a)實照圖 (b)分析地震震央分布圖

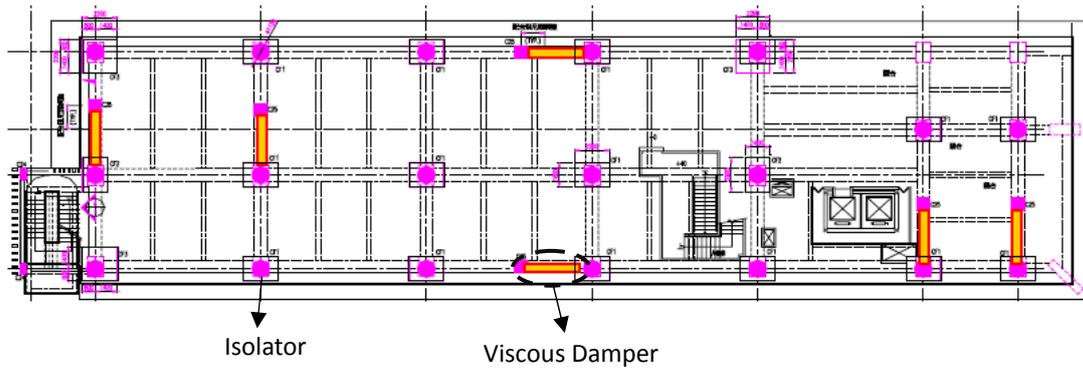


圖 2.1.2 台灣大學土木研究大樓二樓隔震層配置

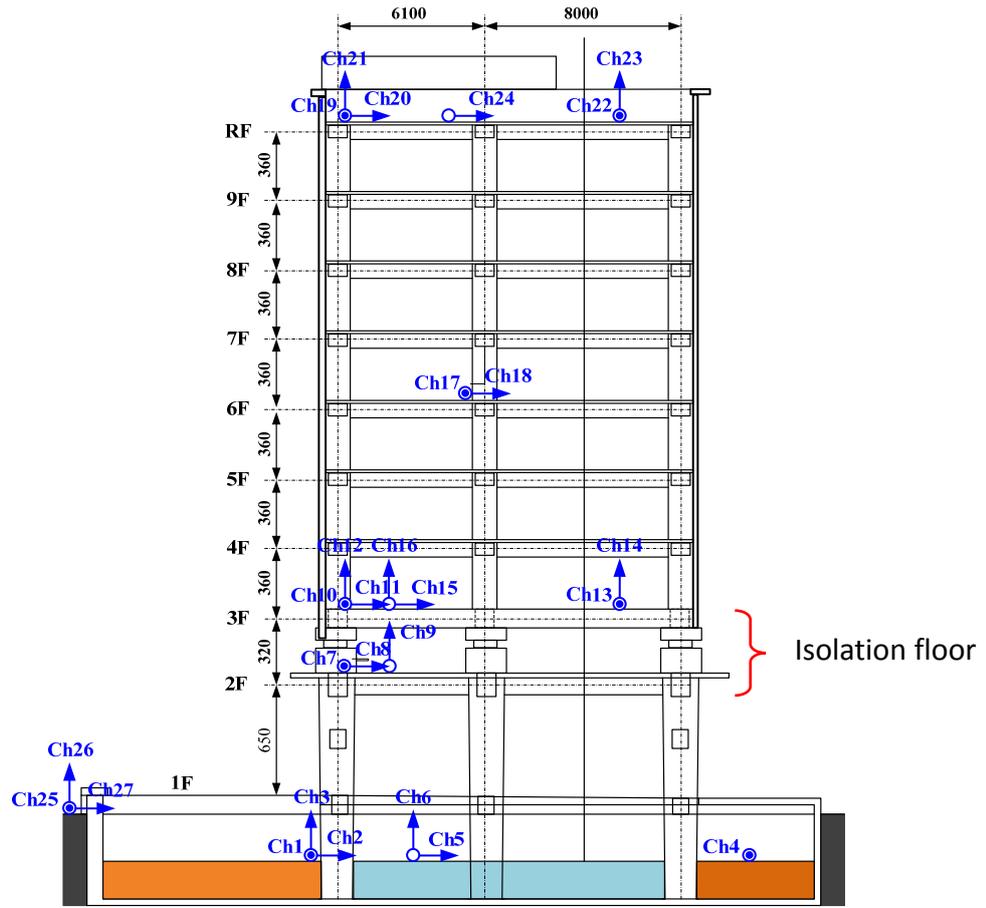


圖 2.1.3 台灣大學土木研究大樓強震監測系統感應器安裝位置剖面圖

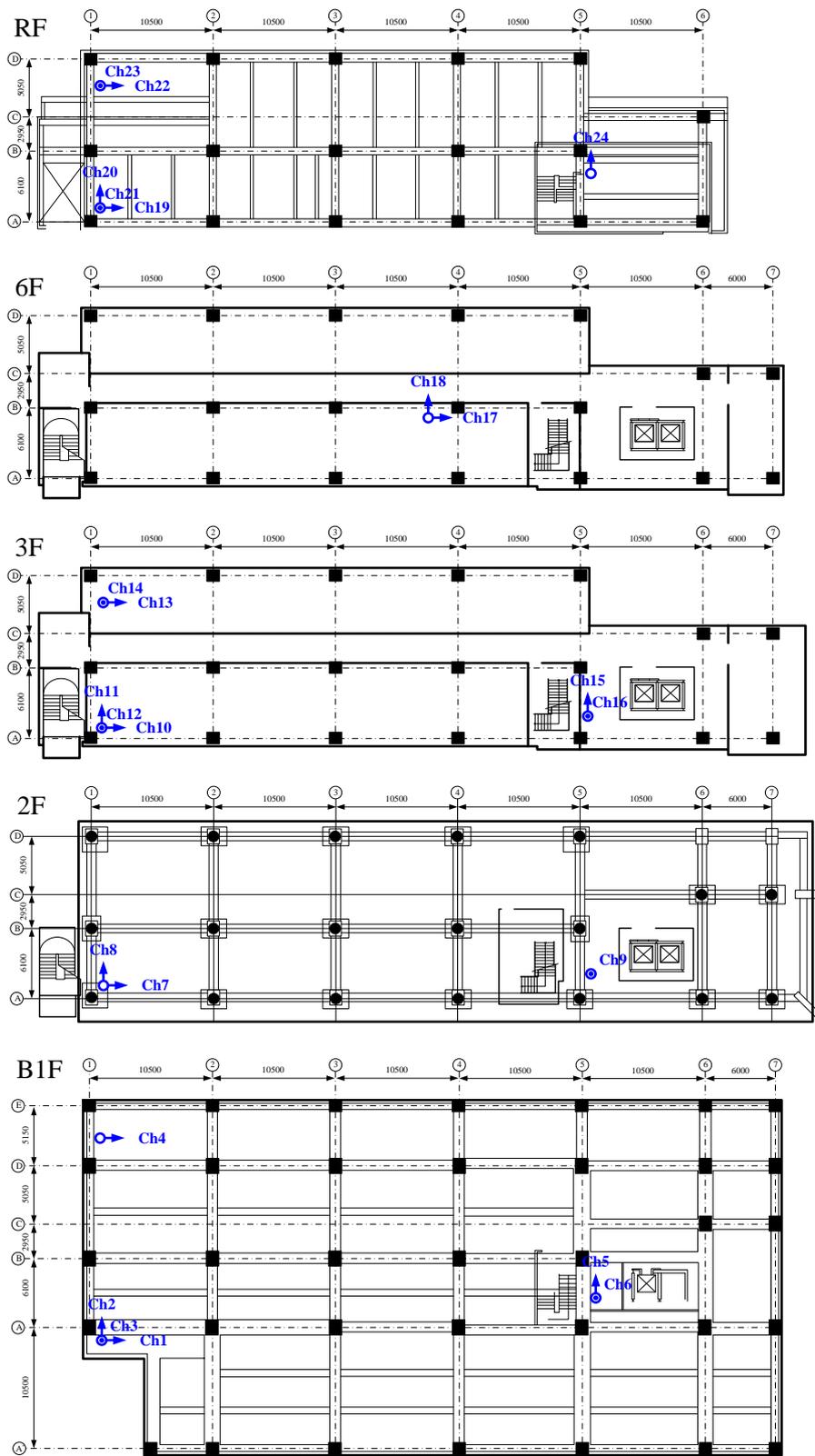
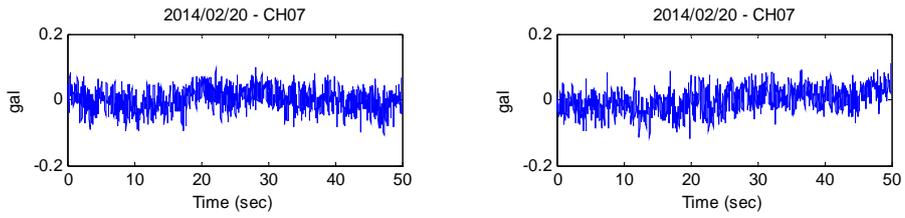
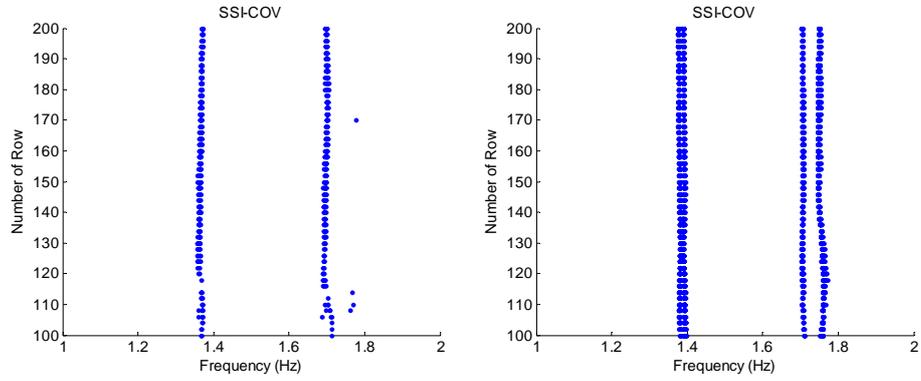


圖 2.1.4 台灣大學土木研究大樓強震監測系統感應器安裝位置平面圖



(a)



(b)

圖 2.2.1 台灣大學土木研究大樓使用 SSI-COV 識別結果: 2014/2/20

(a) 紀錄加速度之時間歷時

(b) SSI-COV 穩定圖

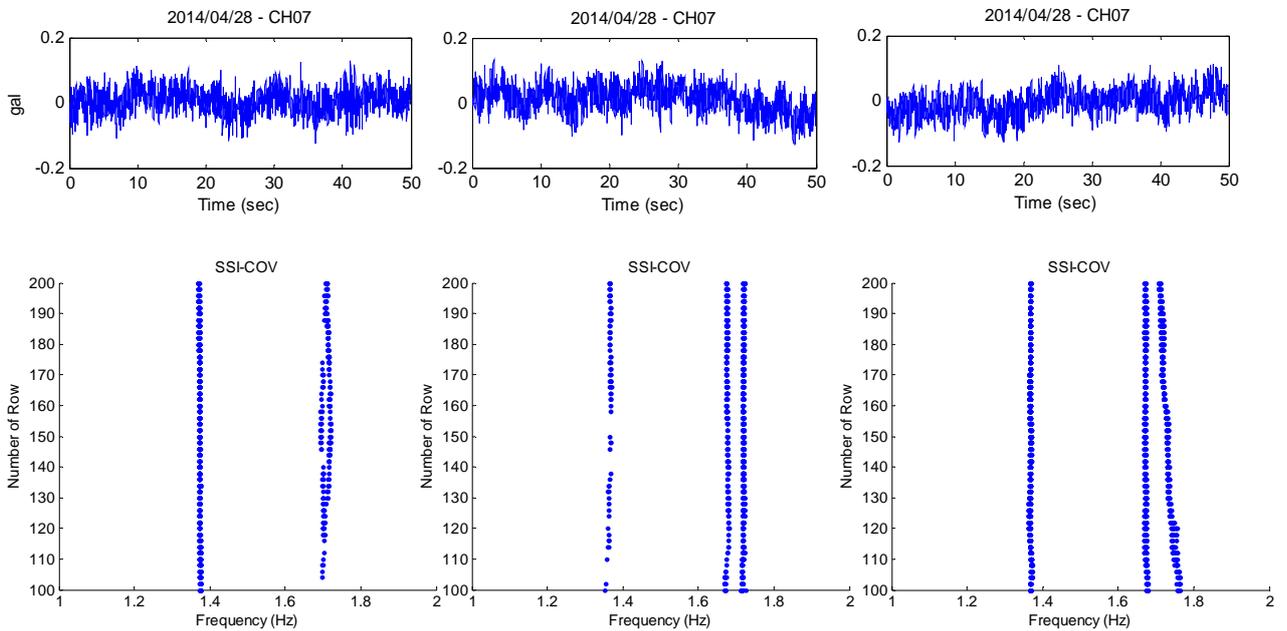


圖 2.2.2 台灣大學土木研究大樓使用 SSI-COV 識別結果 : 2014/4/28

(a) 紀錄加速度之時間歷時

(b) SSI-COV 穩定圖

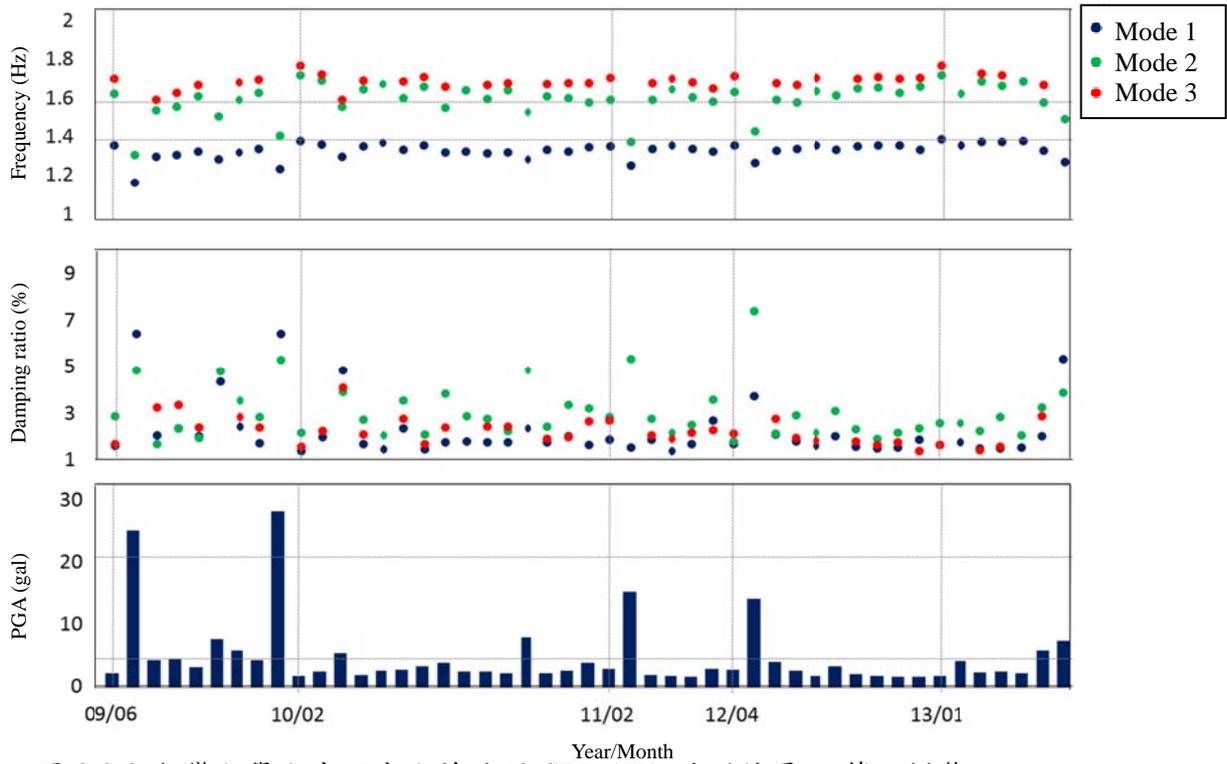


圖 2.2.3 台灣大學土木研究大樓使用 SI-DATA 識別結果：第一模態
 識別之系統頻率及阻尼對應於最大輸入地表加速度(PGA) - 橫向、縱向及扭轉向

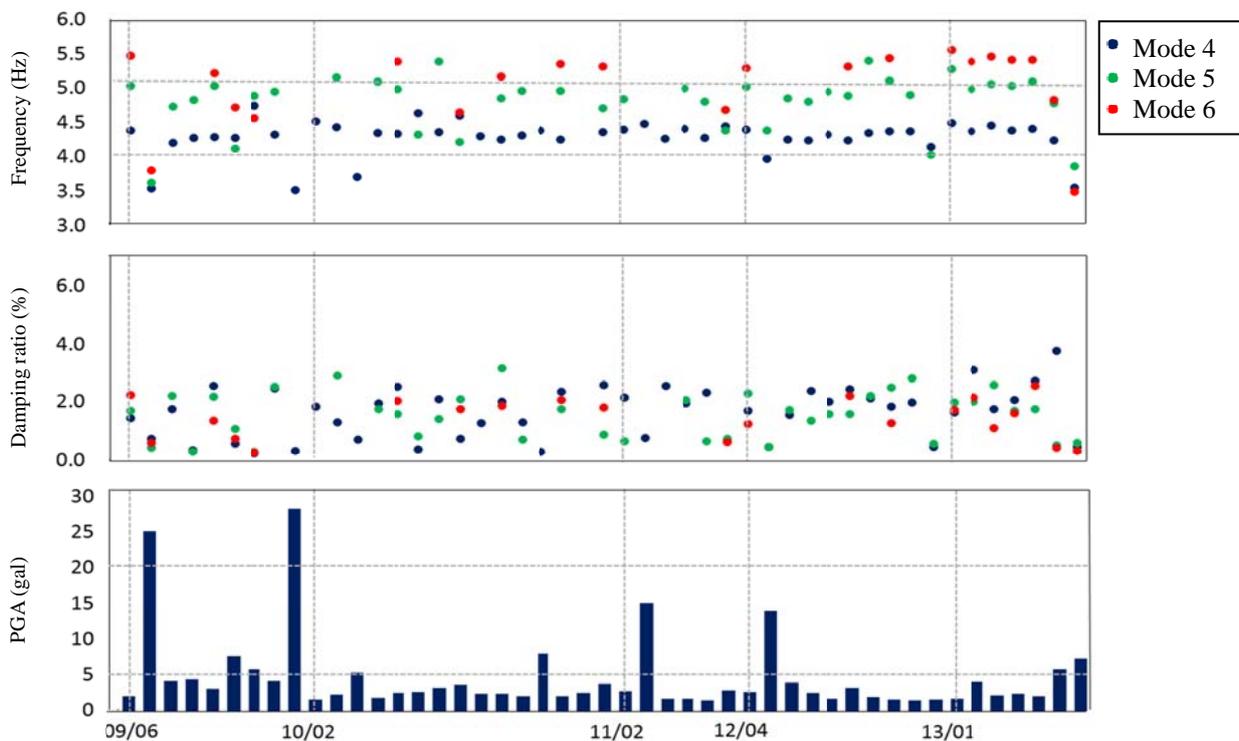
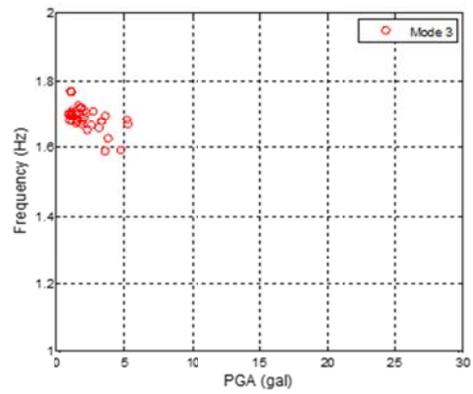
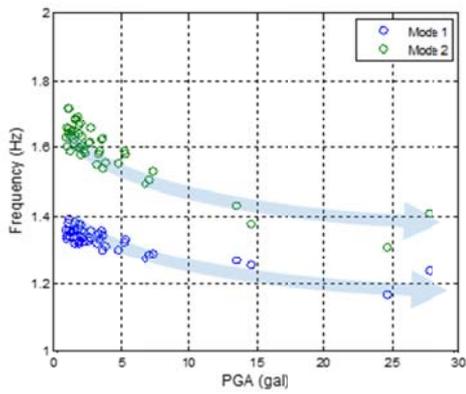
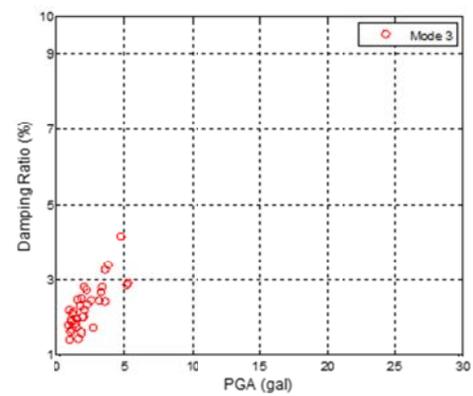
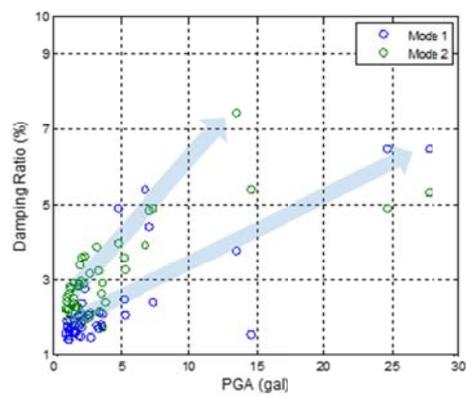


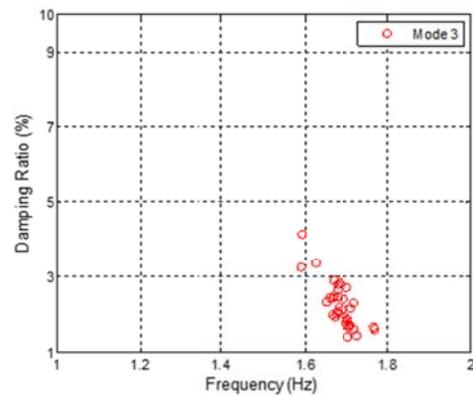
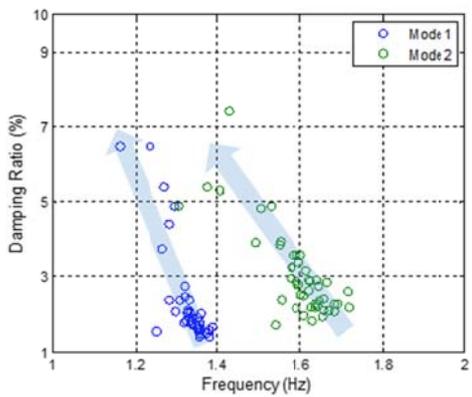
圖 2.2.4 台灣大學土木研究大樓使用 SI-DATA 識別結果：第二模態
 識別之系統頻率及阻尼對應於最大輸入地表加速度(PGA) - 橫向、縱向及扭轉向



(a)



(b)



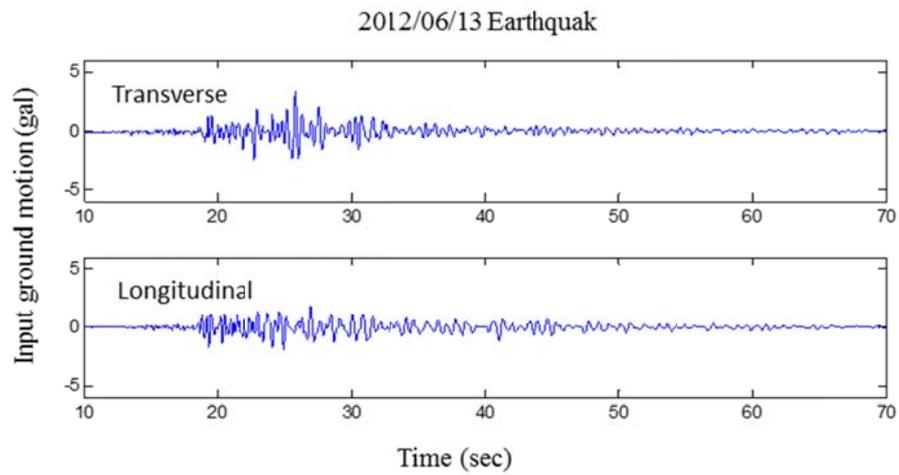
(c)

圖 2.2.5 台灣大學土木研究大樓使用 SI-DATA 識別結果：第一模態

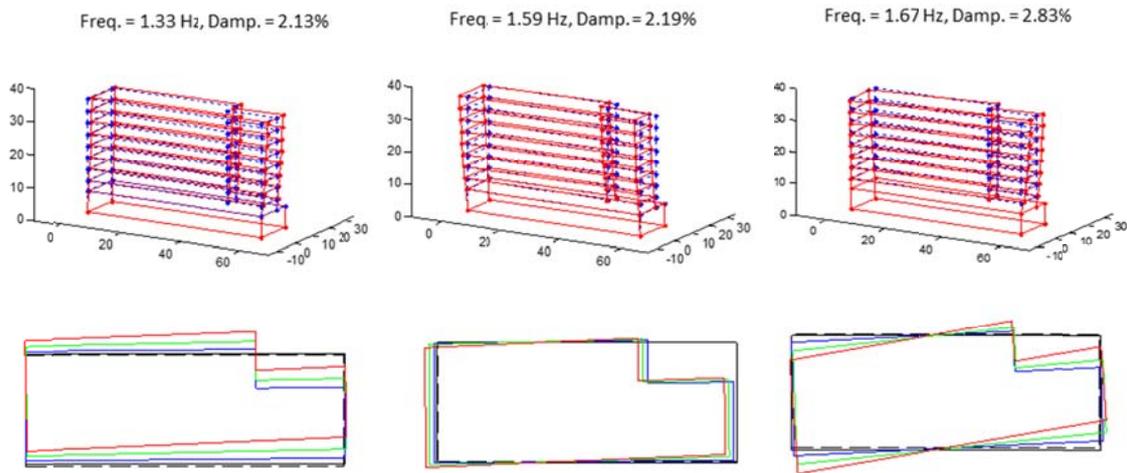
(a) 識別之長向及短向系統頻率相對應於最大輸入地表地震力

(b) 識別之阻尼相對應於最大輸入地表地震力

(c) 識別之系統頻率及阻尼間之關係圖



(a)



(b)

圖 2.2.6 台灣大學土木研究大樓選取事件：2012/06/13

(a) 輸入地表之縱向及橫向時間歷時

(b) SI-DATA 識別之系統頻率、阻尼及振形

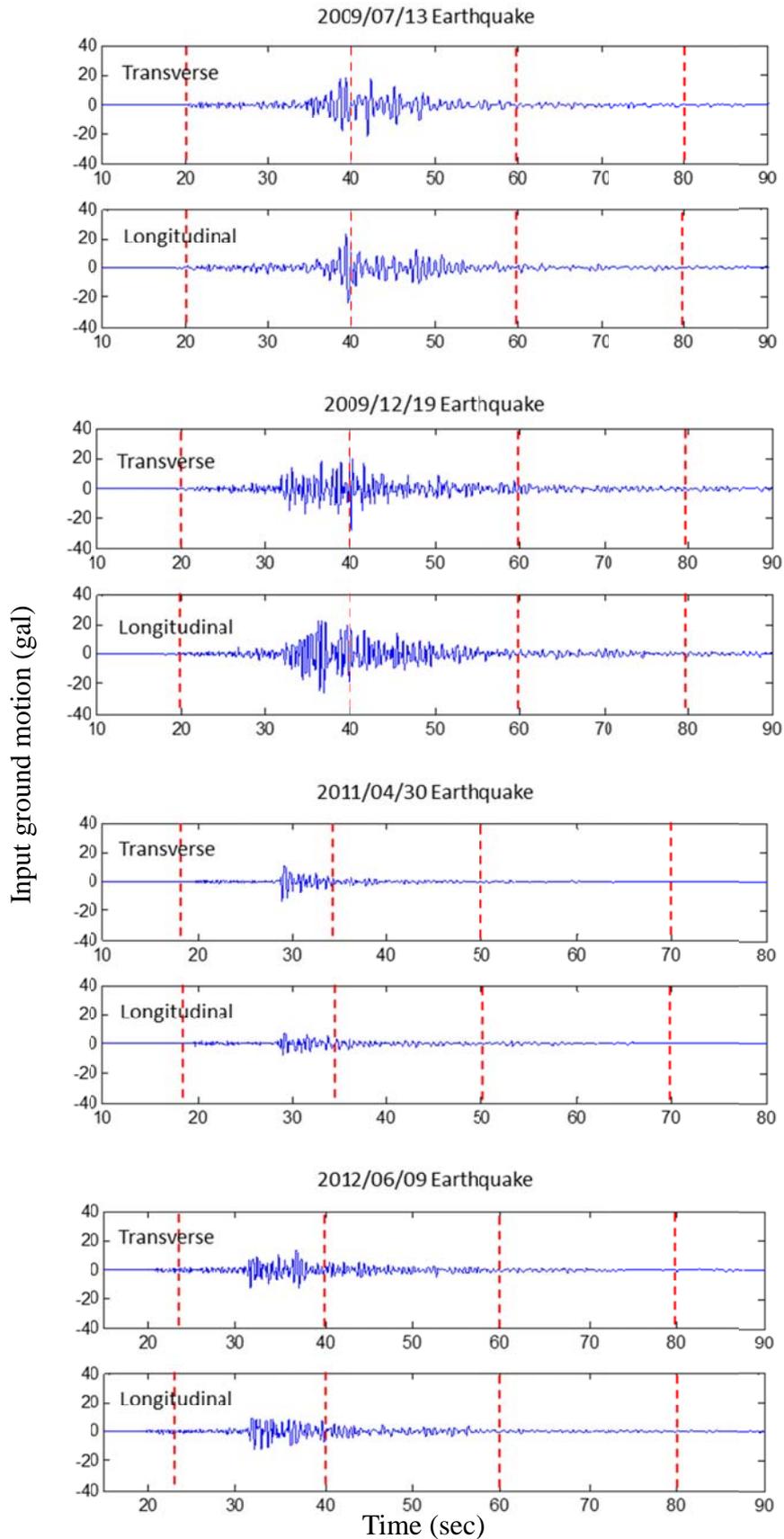
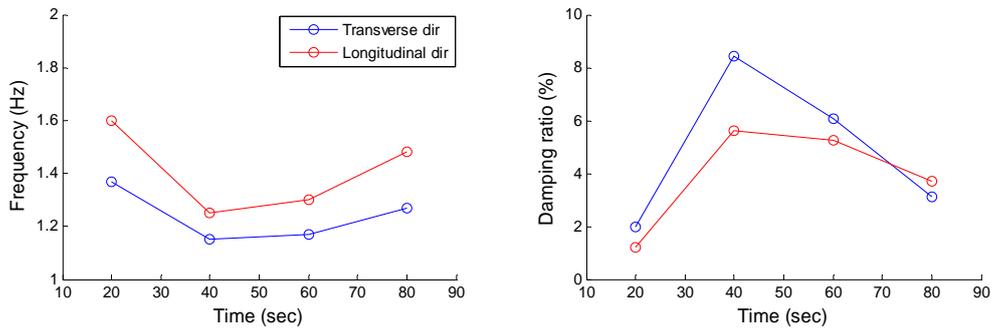
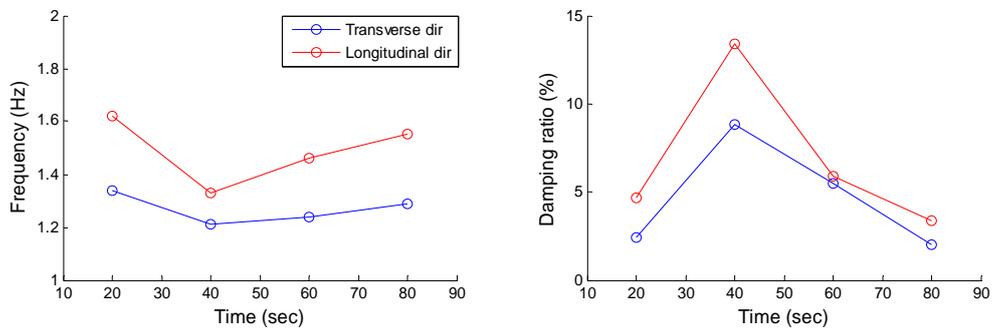


圖 2.2.7 台灣大學土木研究大樓：選取大地震事件之時間歷時
虛線表分段做系統識別

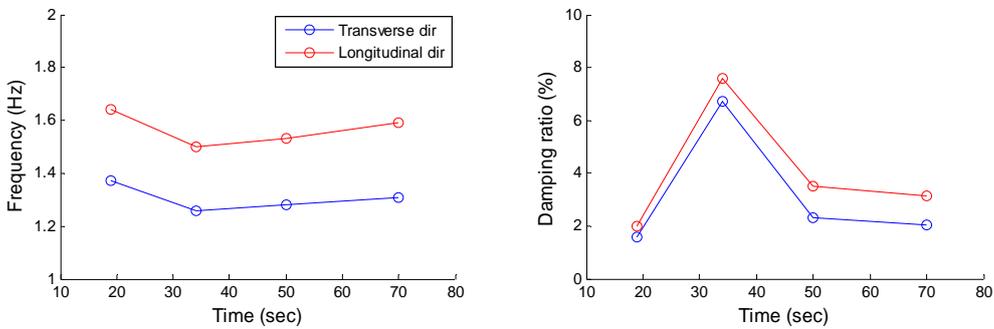
2009/07/13 Earthquake



2009/12/19 Earthquake



2011/04/30 Earthquake



2012/06/09 Earthquake

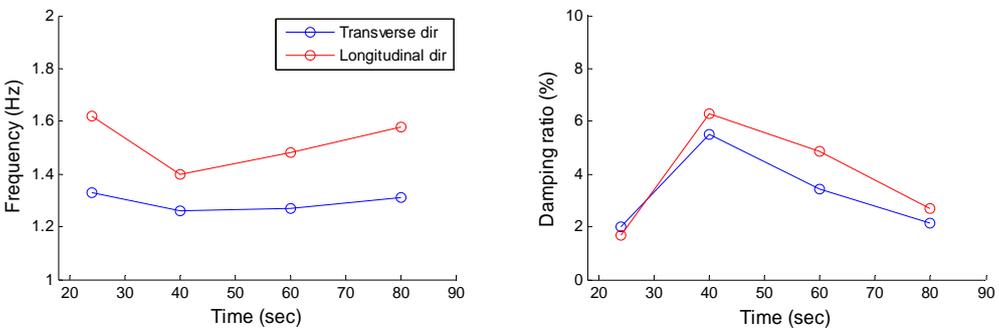
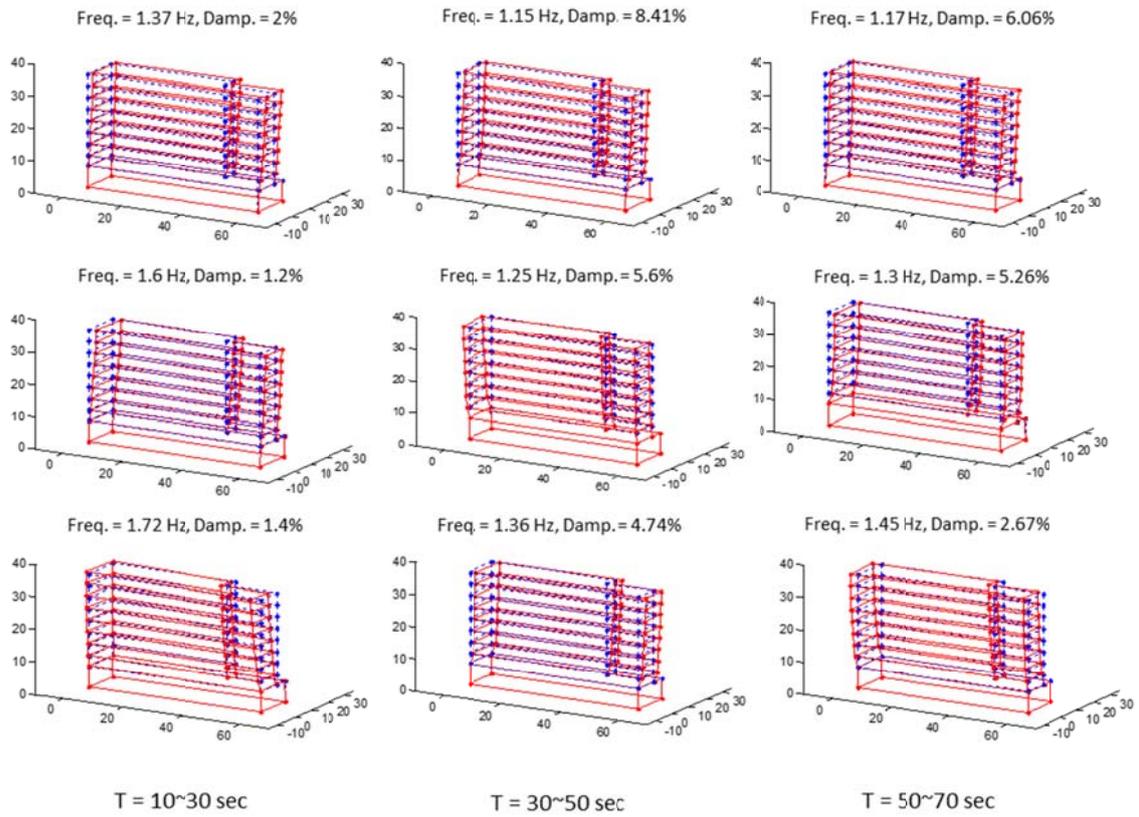
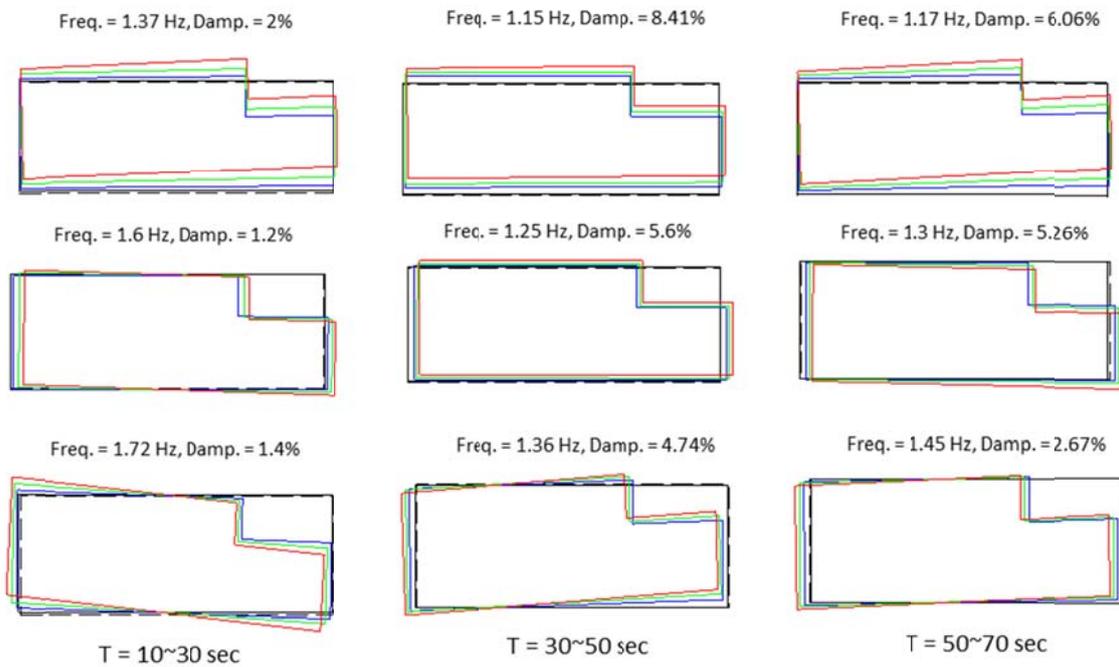


圖 2.2.8 台灣大學土木研究大樓：大地震事件之系統識別結果
頻率及阻尼比的動態特性



(a)

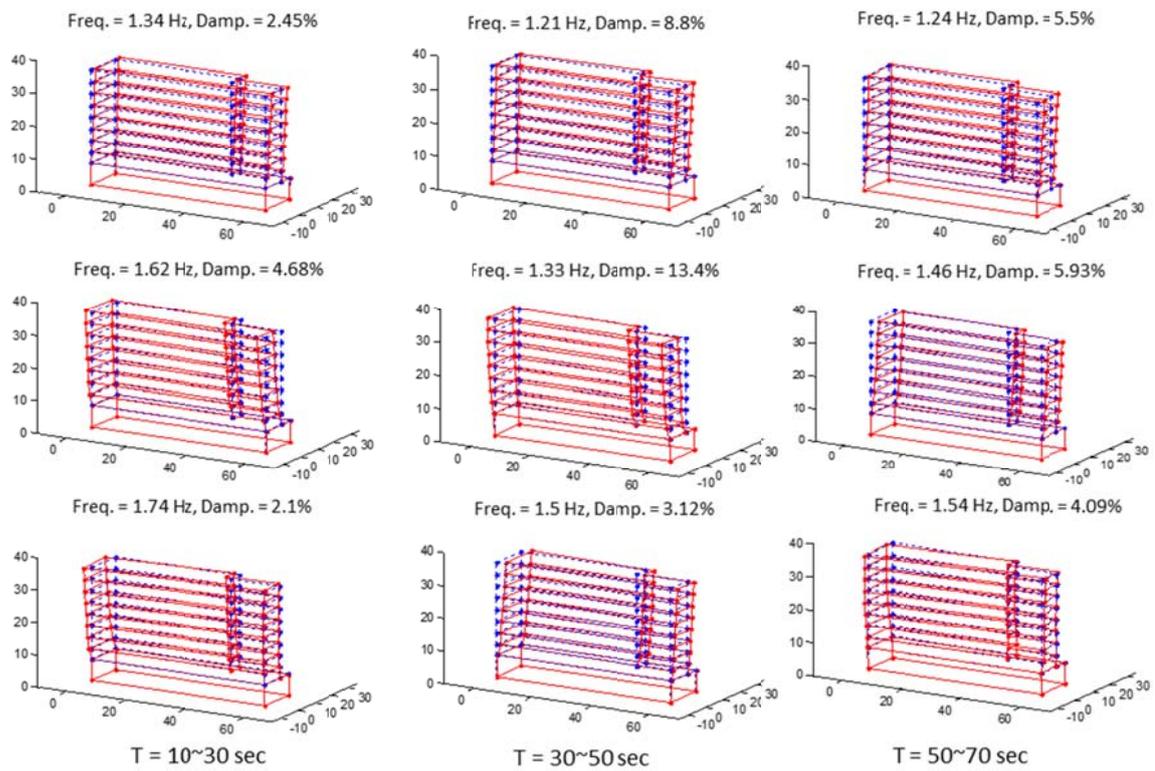


(b)

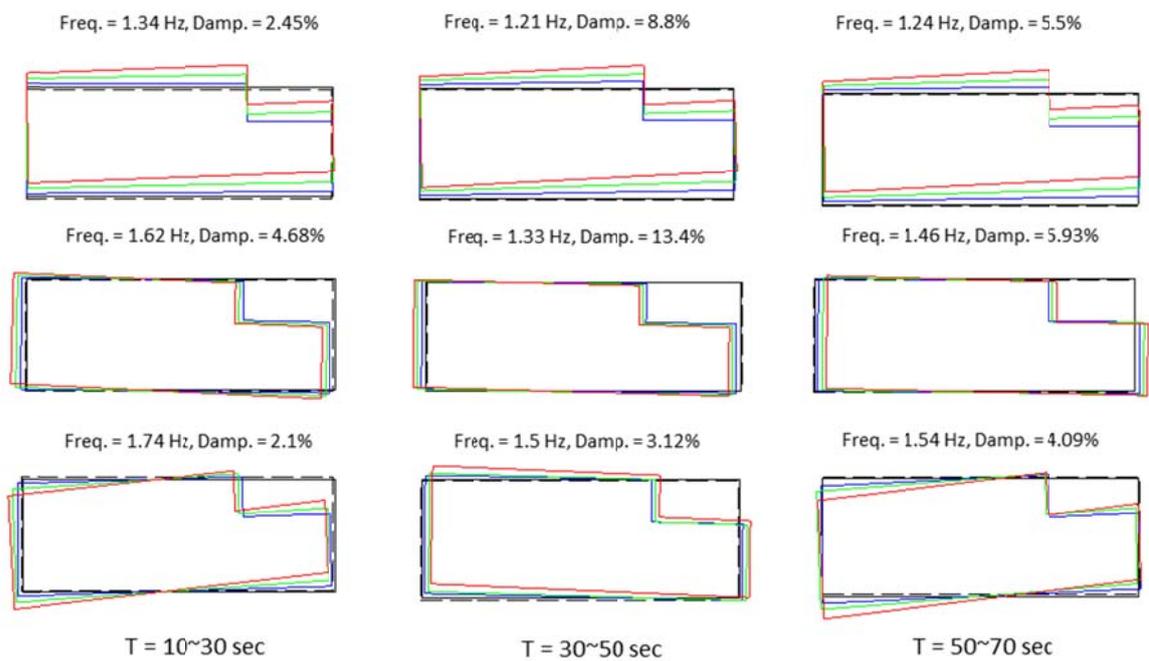
圖 2.2.9 台灣大學土木研究大樓分段識別結果：事件 2009/07/13

(a) 振態立體圖

(b) 振態上視圖



(a)

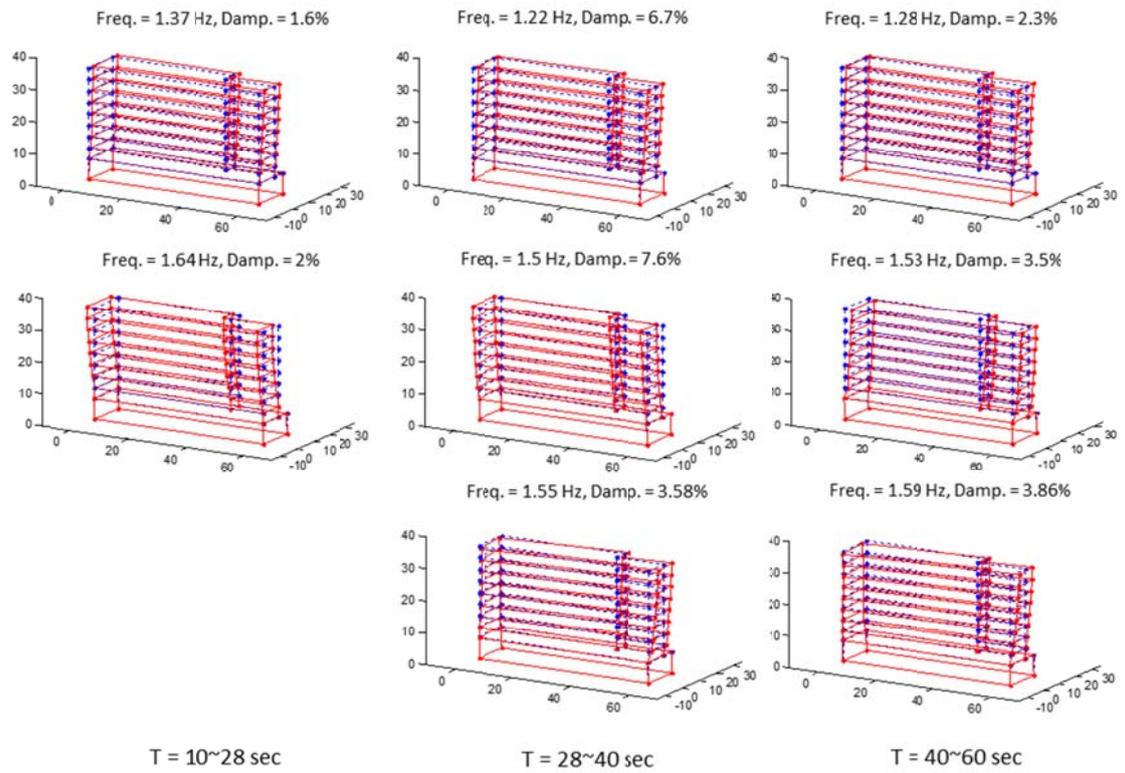


(b)

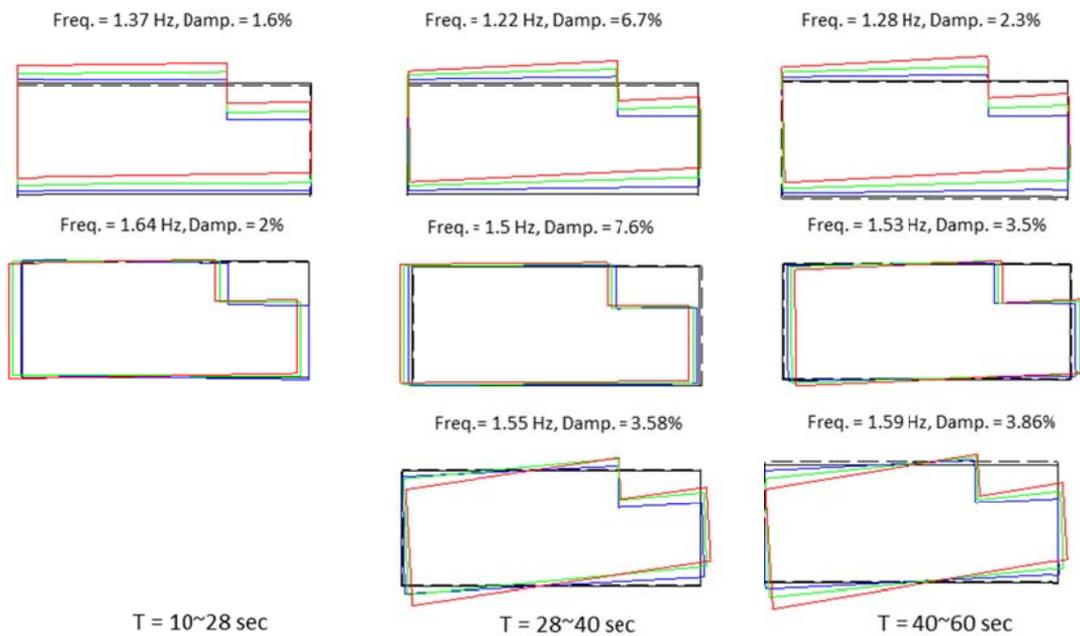
圖 2.2.10 台灣大學土木研究大樓分段識別結果：事件 2009/12/19

(a) 振態立體圖

(b) 振態上視圖



(a)

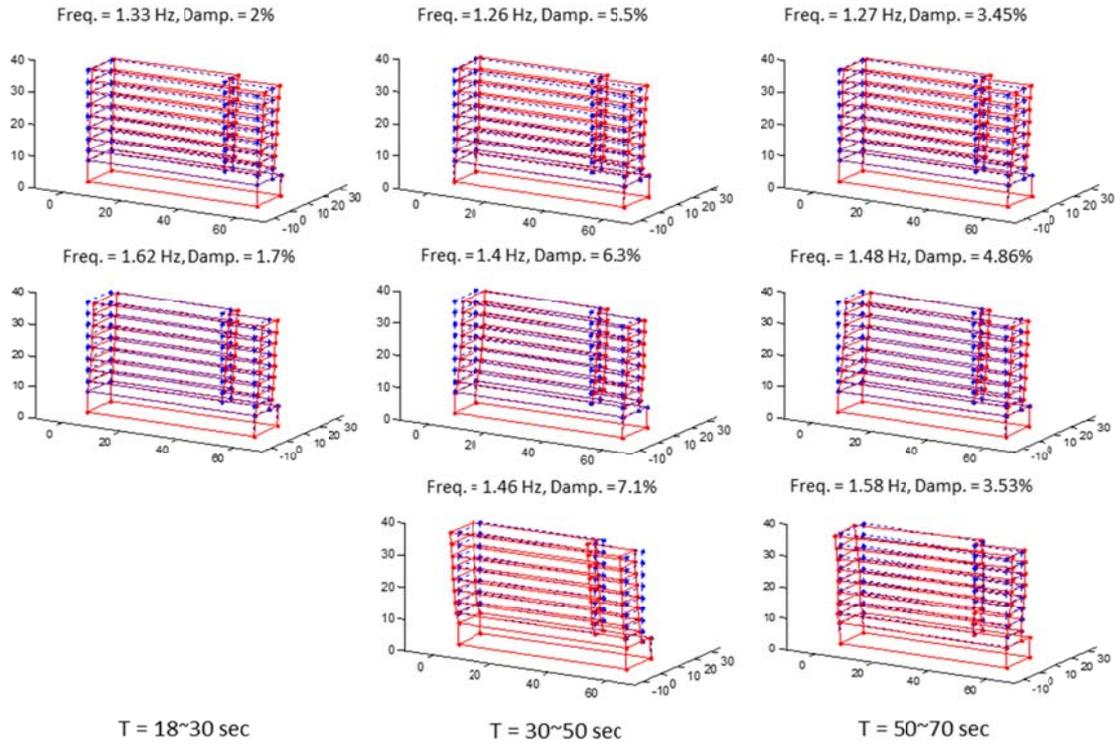


(b)

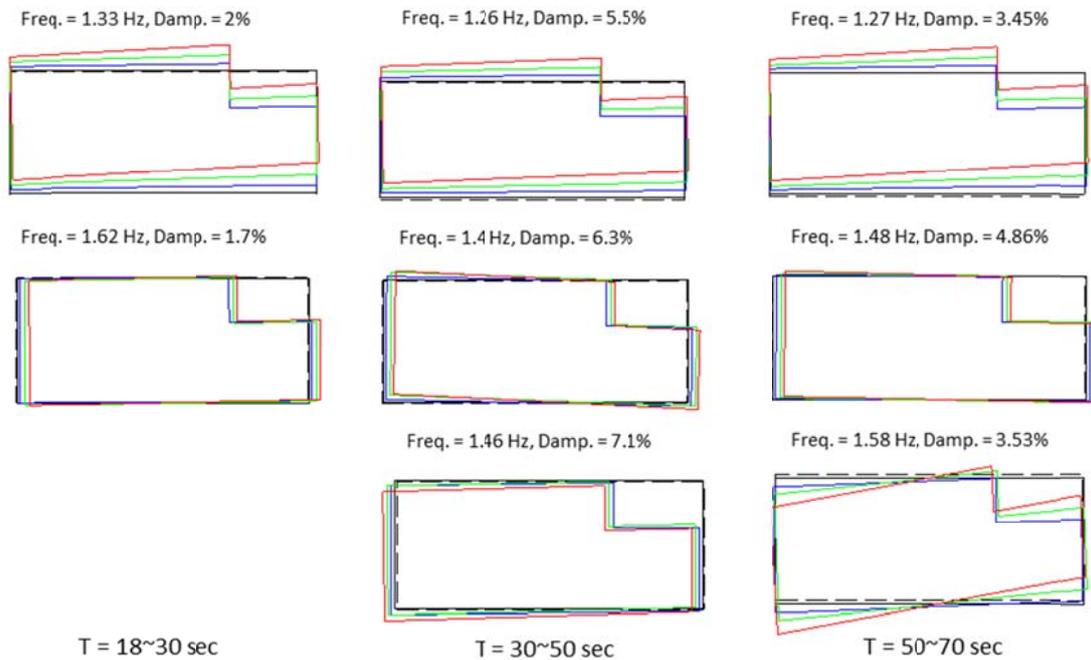
圖 2.2.11 台灣大學土木研究大樓分段識別結果：事件 2011/04/30

(a) 振態立體圖

(b) 振態上視圖



(a)



(b)

圖 2.2.12 台灣大學土木研究大樓分段識別結果：事件 2012/06/09

(a) 振態立體圖

(b) 振態上視圖

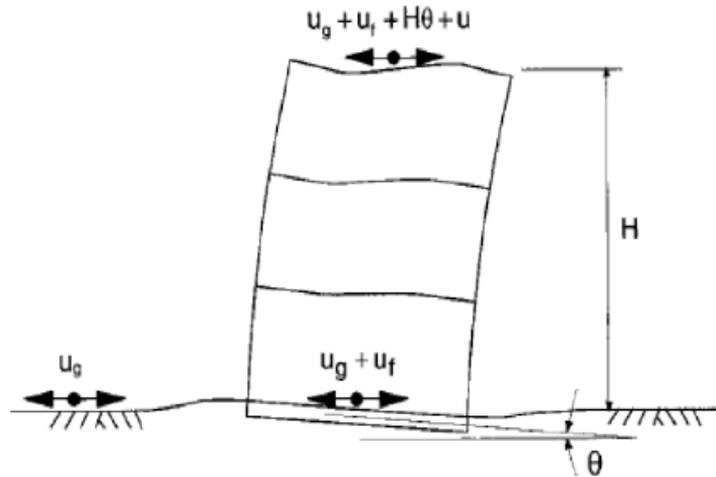


圖 2.2.13 系統識別考慮土壤-結構互制效應示意圖

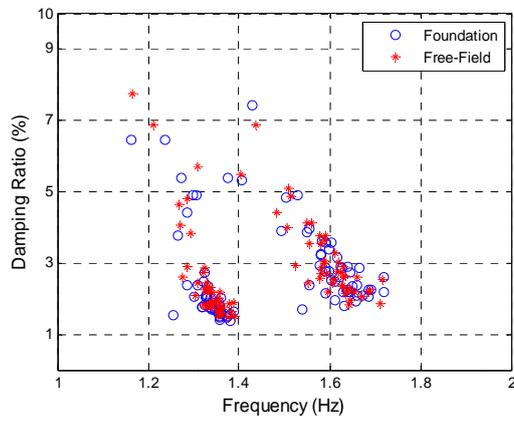


圖 2.2.14 台灣大學土木研究大樓使用 SI-DATA 分析考慮土壤-結構互制效應與否之比較圖

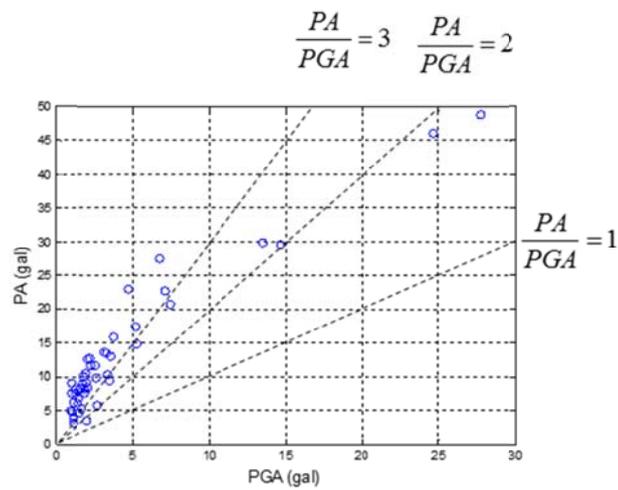


圖 2.2.15 台灣大學土木研究大樓量測之最大地表輸入地震力對應於頂層最大加速度之關係圖

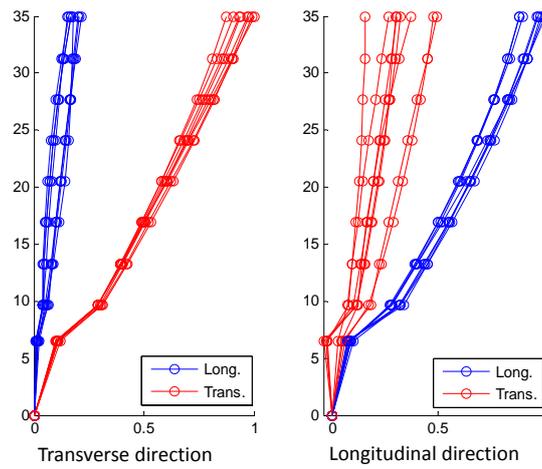
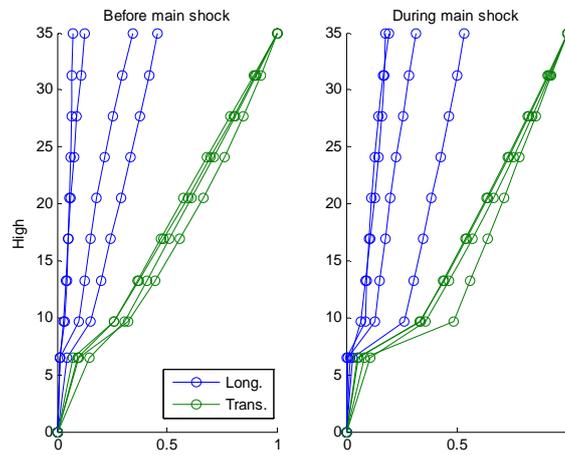
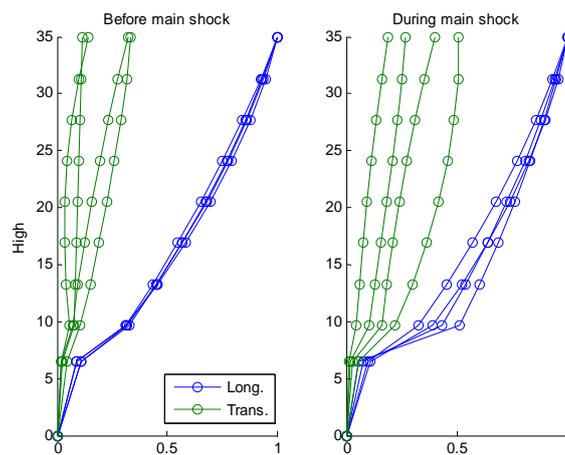


圖 2.2.16 台灣大學土木研究大樓小地震事件識別模態振形比較圖
 (a) 第一橫向(Transverse)振態 (b)第一縱向(Longitudinal)振態



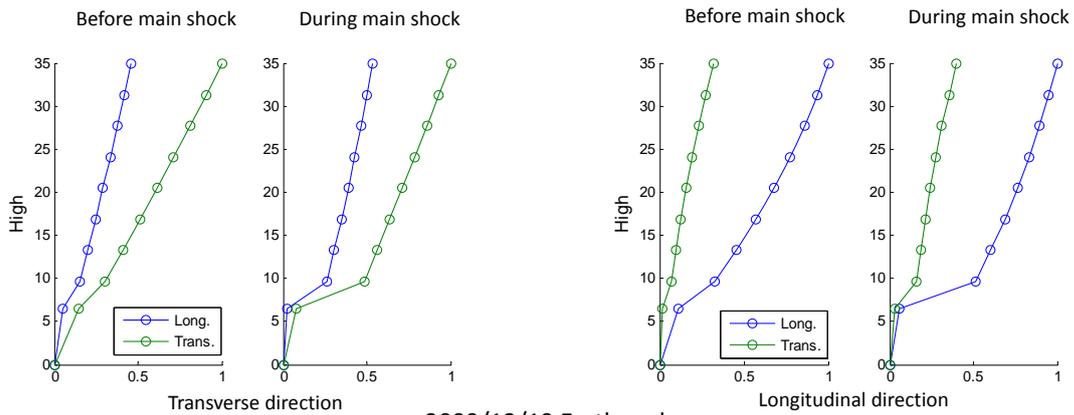
(a) Transverse dir



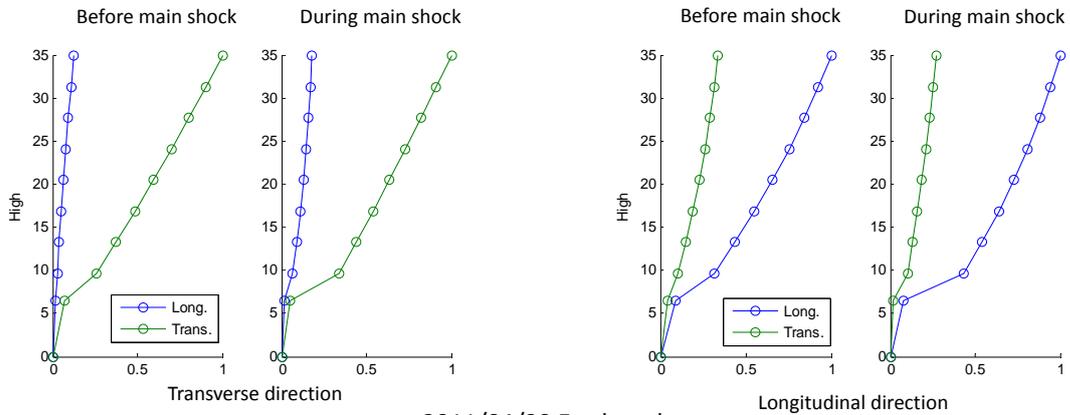
(b) Longitudinal dir

圖 2.2.17 台灣大學土木研究大樓大地震事件識別模態振形比較圖
 (a) 第一橫向(Transverse)振態 (b)第一縱向(Longitudinal)振態

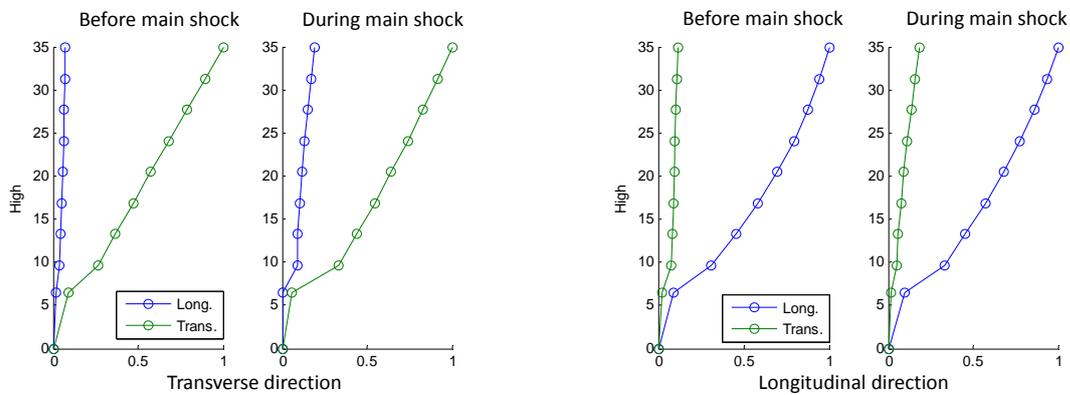
2009/07/13 Earthquake



2009/12/19 Earthquake



2011/04/30 Earthquake



2012/06/09 Earthquake

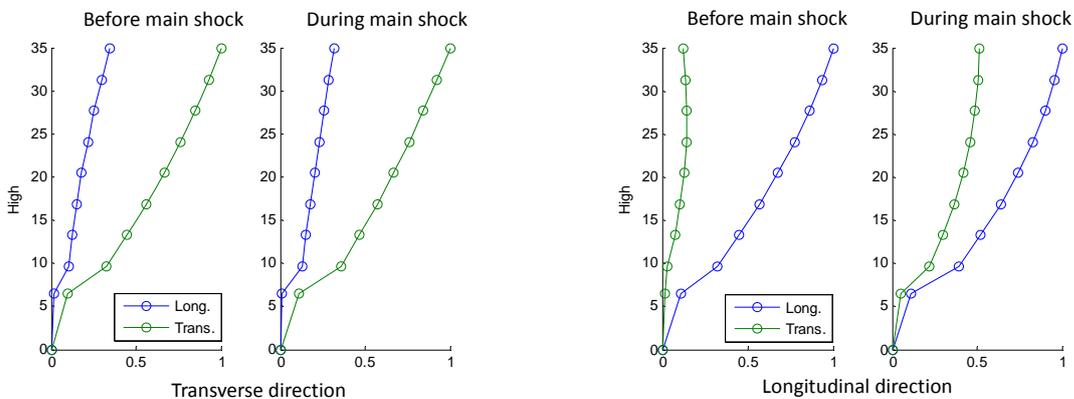


圖 2.2.18 台灣大學土木研究大樓大地震震前區及主震區識別模態振形比較圖

(a) 第一橫向(Transverse)振態 (b) 第一縱向(Longitudinal)振態

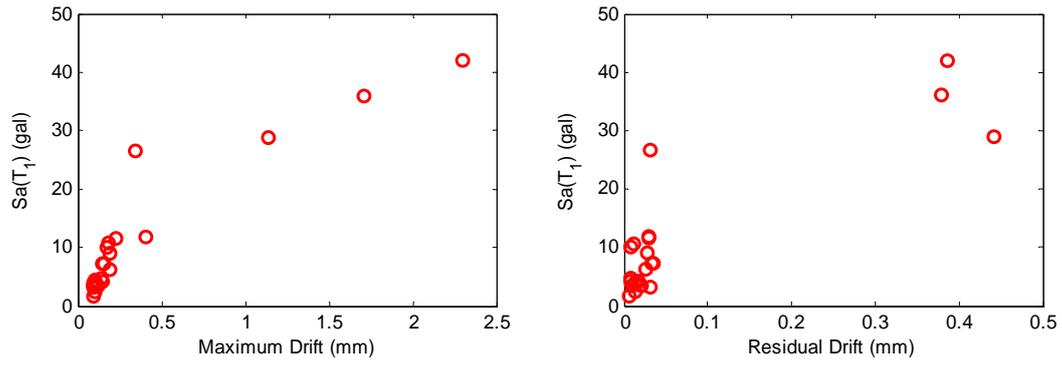


圖 2.2.19 台灣大學土木研究大樓隔震層位移與加速度反應譜峰值之關係
(a)層間位移 (b)層間永久變位

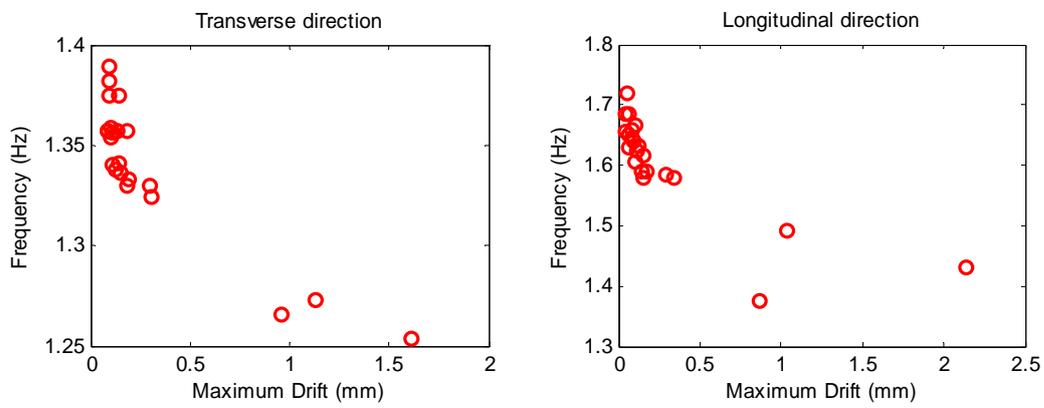


圖 2.2.20 台灣大學土木研究大樓隔震層位移與識別頻率之關係
(a)層間位移 (b)層間永久變位

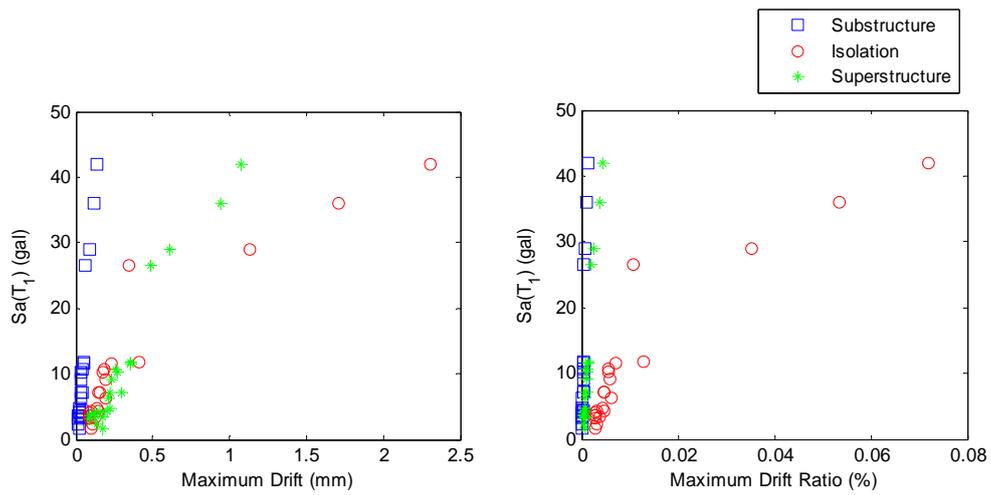


圖 2.2.21 台灣大學土木研究大樓下部結構及上部結構對隔震層之相對位移

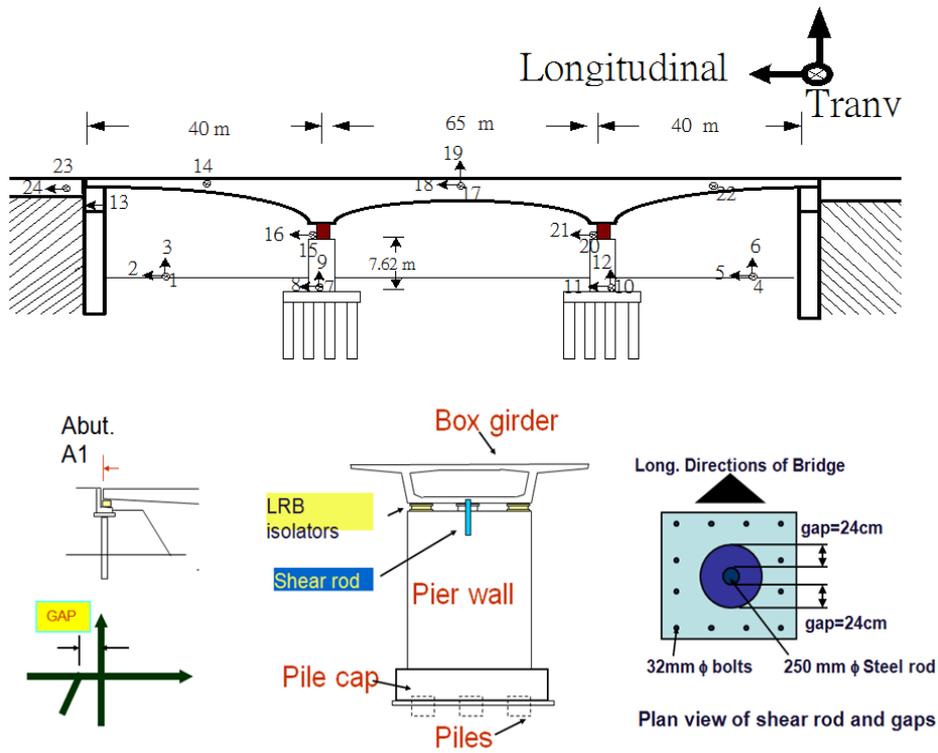


圖 2.3.1: 南二高嘉南大圳橋強震儀配置圖。

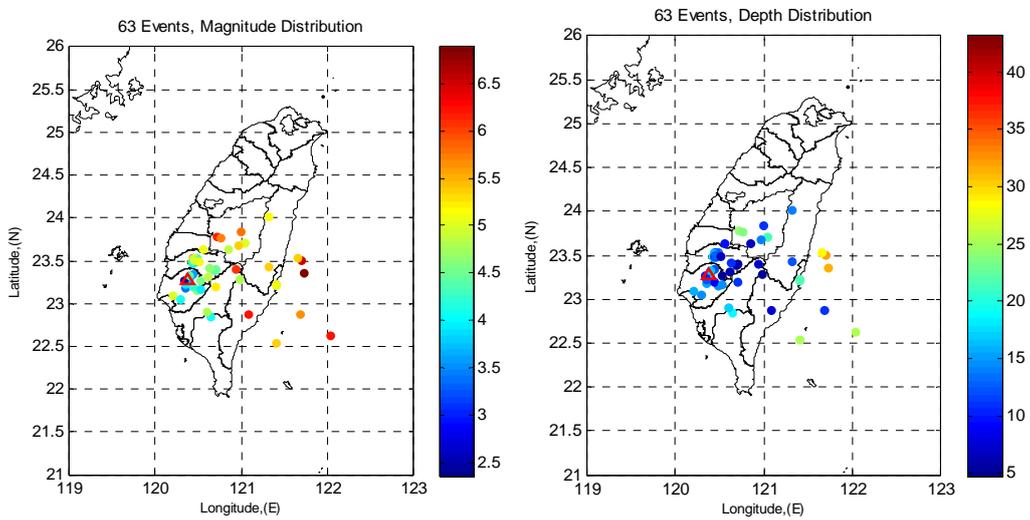


圖 2.3.2: 南二高嘉南大圳橋量測所得地震資料之震央、規模與震源深度圖。

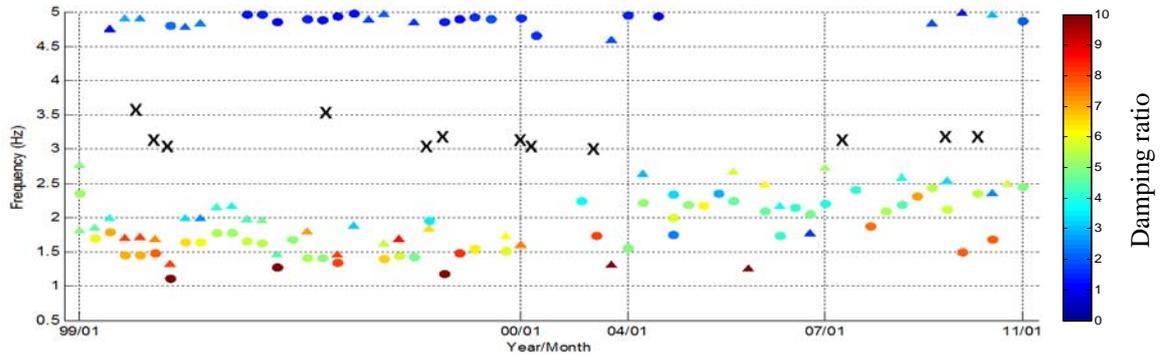


圖 2.3.3: 南二高嘉南大圳所識別之模態頻率圖。

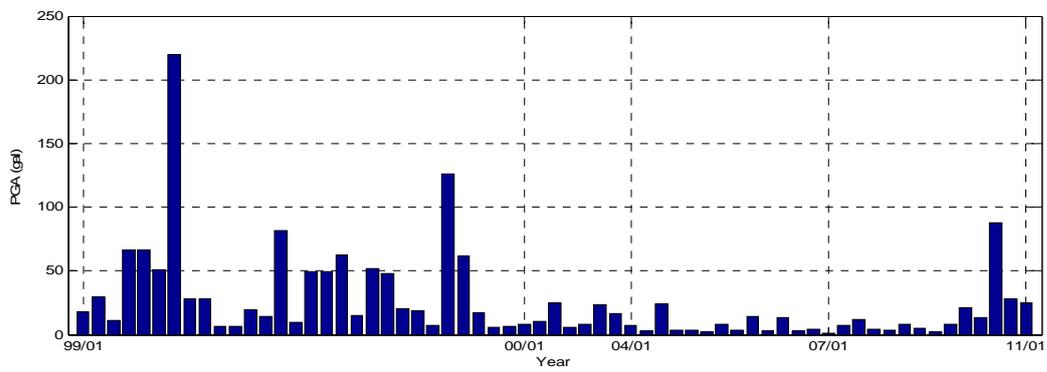


圖 2.3.4: 南二高嘉南大圳最大量測自由場加速度與量測時間分析圖。

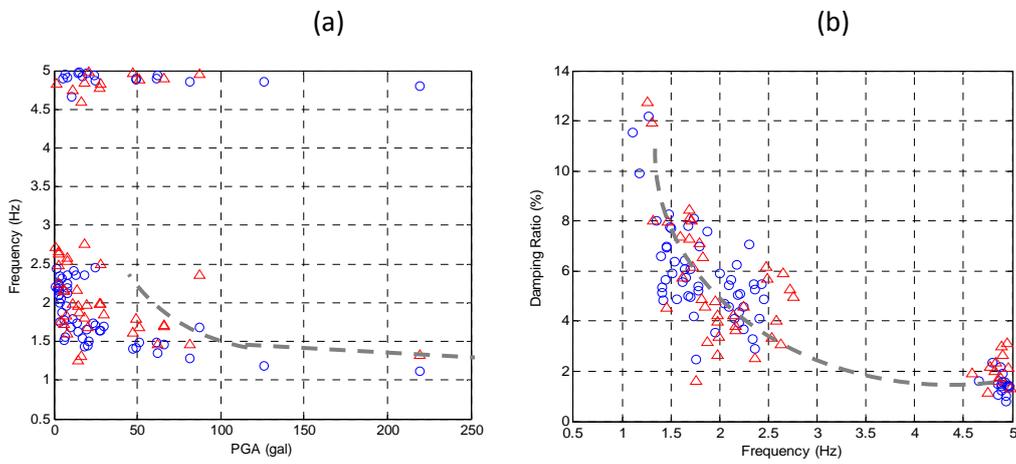


圖 2.3.5: (a) 南二高嘉南大圳識別模態頻率和最大量測基礎加速度(PGA)之關係圖。(b) 南二高嘉南大圳識別模態頻率與阻尼比之關係圖。

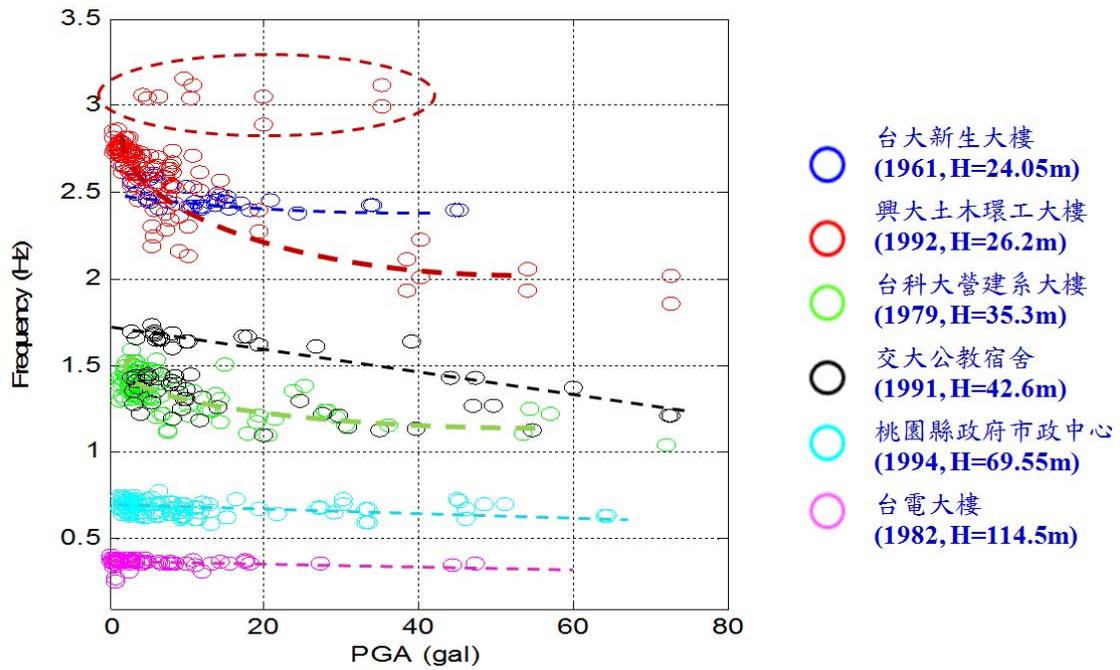


圖 3.1.1: 六棟建物所識別模態頻率與 PGA 之關係圖。

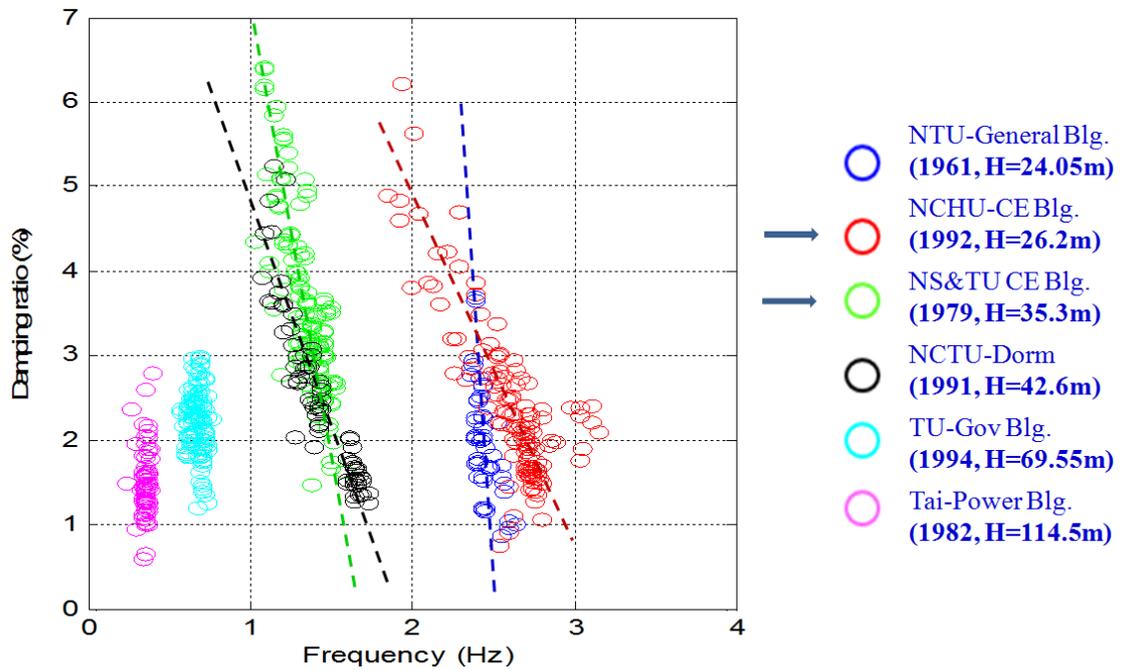


圖 3.1.2: 六棟建物所識別模態頻率與阻尼比之關係圖。

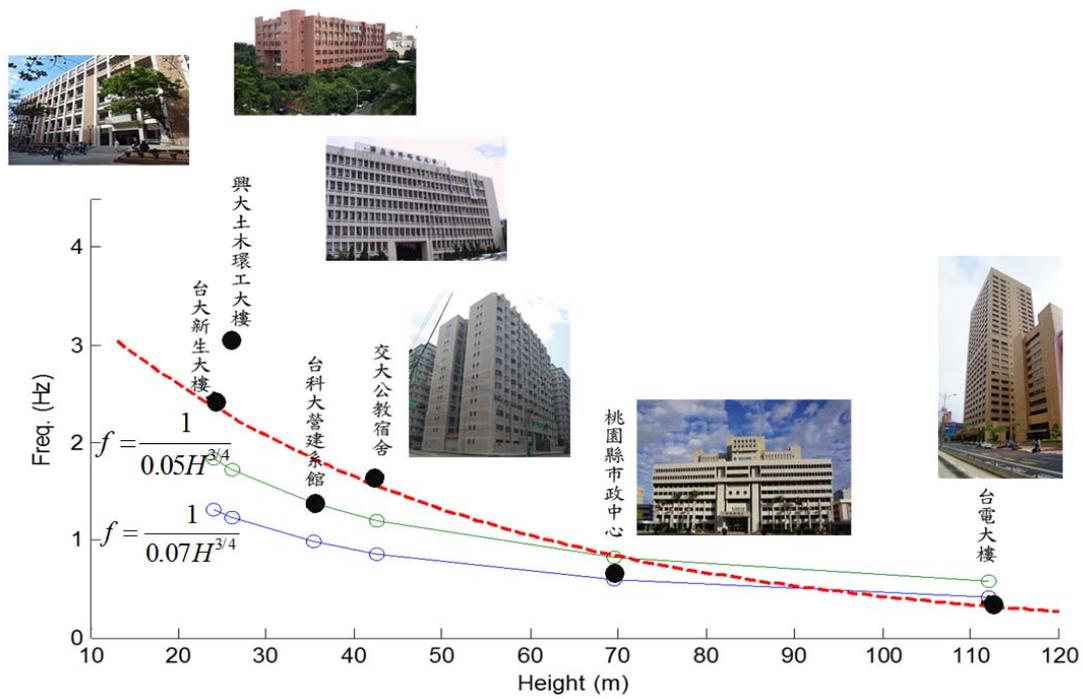


圖 3.1.3: 比較規範與現階段所提 RC 構造物主振動頻率與建物高度之關係圖。