




# 振動感應技術之應用：

## 921地震教育園區毀損南棟教室之結構健康監測

科博館921地震教育園區／王哲夫 

### 一、前言

位於台中市霧峰區的「921地震教育園區」為88年9月21日集集地震後，以毀壞光復國中原址為根基所興建的一座地震博物館。園區內最撼動人心的保存原址，莫過於遭斷層撕裂的PU跑道以及崩塌的毀壞教室。園區特別將其中「南棟毀損教室」設計為一座觀眾可穿越並近距離觀察的毀損結構，由於這座教室原有的層間柱均已嚴重受損，必須在有利於展示的前提下實施結構補強。其中有四根柱分別採用了不同補強工法外，教室內的損壞柱邊使用了大量的壓克力牆。由於此教室結構健康攸關觀眾安全，筆者規劃於教室內建置了一套結構健康監測系統。本文即針對此一特殊建築結構個案，介紹監測系統之硬體配置，以及教室結構動態參數的分析結果，此結果對於結構健康狀

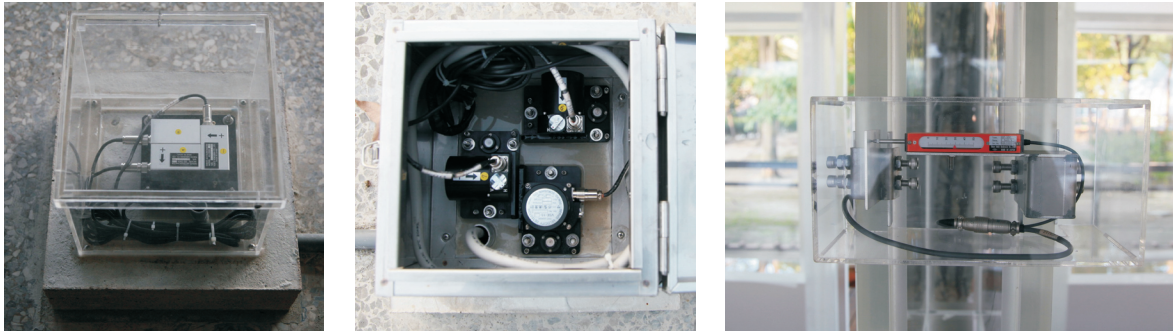
態基準值的建立相當重要，為後續用來判斷結構體質是否產生改變的依據。

### 二、南棟毀損教室與結構健康監測系統概述

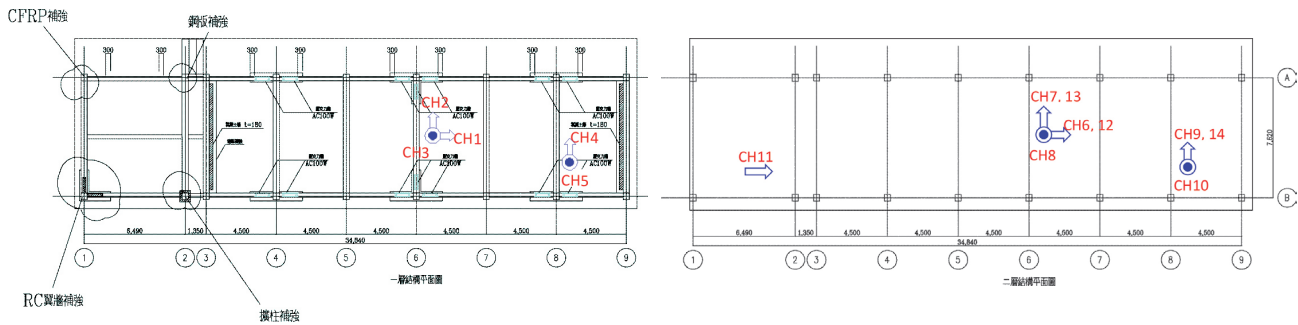
展示之毀損南棟教室為一單層樓結構，樓地板平面約 $35\text{m} \times 11\text{m}$ 。集集地震造成本教室屋頂沿走廊方向(x向)約有16cm的永久變形。為補強本毀損結構，本教室短向(y向)增設兩道RC牆，教室西側邊緣四根柱分別以碳纖維包覆工法、鋼板補強工法、擴柱補強工法、與RC翼牆補強工法補強，兼作補強工法之展示。除此之外，教室內在柱的周邊共設了12組長向(x向)的壓克力牆，與2組短向(y向)壓克力牆。圖1為其現況照片。



▲ 圖1 九二一地震教育園區毀損南棟教室與壓克力補強現況



▲ 圖2 (左)單軸向加速度計 (中)高敏感度速度計 (右)位移計



▲ 圖3 毀損南棟教室結構監測系統感應器安裝位置與量測方向示意圖 (左：一樓平面；右：二樓平面)

本教室結構健康監測系統包括單軸向加速度計六只、單軸向高感度速度計五只、與位移計四只；圖2為其外觀，圖3為安裝平面圖。其中地面層五個加速度計使用頻道CH1至CH5，用來量測地面在地震中三個軸向之地表加速度，同時可檢核基底水平轉動量；屋頂板五只高敏感度速度計裝設在兩個點位，可量測微震與強震，每一速度計均輸出加速度量(CH6~CH10)，其中三個水平向速度計同時輸出速度量(CH12~14)；屋頂另外加一具x方向(CH11)加速度計作為檢核使用。位移計安裝於四組壓克力牆，用來監測壓克力牆膨脹變化量。

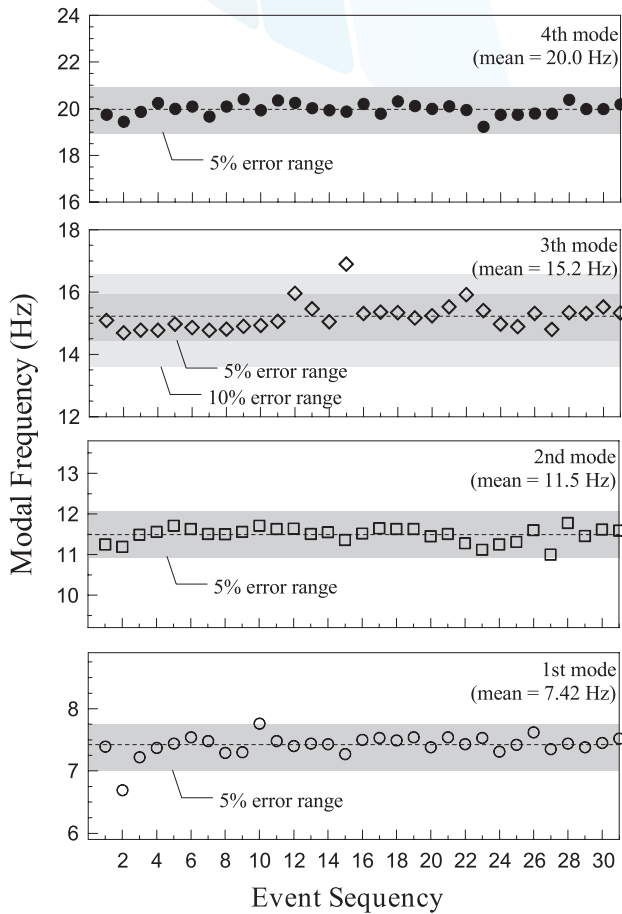
### 三、南棟毀損教室之動態特性

本系統收集了2010/11/21(M6.1花蓮地震)至2011/9/22期間29筆地震事件之量測紀錄，可經由分析瞭解本教室的動態特性。本文應用莊哲男教授所開發之資訊矩陣系統識別法(SRIM)[1-3]，經由輸入與輸出量測的反運算，求得結構系統不同振動模態之頻率、阻尼比、與振形。本研究將地面三個方向(CH01, CH02, 及CH03頻道)之地表加速度視為輸入，屋頂版六個感應器視為輸出，以SRIM法求得各地震事件之結構系統前4個模態參數。其中2010/11/21地震事件由於震度較大，分為初震段與強震段兩個事件分別進行分析。



### 1. 模態頻率識別結果

圖4為各事件所得之結構前四個模態頻率，圖中標示了各樣本偏離平均值5%及/或10%的誤差範圍。結果發現，除第一模態第2事件(2010/11/21強震段)所識別頻率較低，其餘事件的識別頻率均在平均值7.42Hz之5%範圍內變化。第二至第四模態頻率大致也在5%誤差範圍內，僅在第三模態有一個異常(outlier)。從此結果可判斷，當此結構振幅大，第一模態頻率會暫時降低，震後又恢復原貌，而結構頻率隨著地震事件的不同，識別頻率稍有差異，誤差範圍大約在5%以內。



▲ 圖4 毀損南棟教室各地震事件下之識別模態頻率

▼表1 毀損南棟教室(a)各個地震事件之識別模態阻尼比(b)2011/11/21初震段識別之模態頻率與振形

(a)

模態序	1	2	3	4
識別阻尼比範圍(%)	0.4~6.24	1.17~2.77	1.46~4.8	0.33~1.68
平均值(%)	1.53	1.73	2.88	0.83

(b)

模態序	1	2	3	4	
模態頻率 (Hz)	7.4	11.3	15.2	19.6	
模態振形	CH06(x)	1.000	-0.021	-0.052	0.151
	CH07(y)	-0.026	-0.056	-0.246	-0.084
	CH08(z)	0.080	-0.175	-1.000	1.000
	CH09(y)	-0.038	0.177	-0.250	-0.115
	CH10(z)	-0.011	1.000	-0.068	0.341
	CH11(x)	0.912	-0.019	-0.070	-0.017

### 2. 模態阻尼比識別結果

表1(a)為前四個模態阻尼比的識別結果，包括29個事件所識別之阻尼比範圍與平均值，可看出模態阻尼比之變異較頻率為大。其中第一模態阻尼比的最大值6.24%係來自於2010/11/21地震的強震段，也說明了結構在較大變形時有阻尼增加的現象。整體來看，南棟教室結構系統在小震下的基本模態阻尼比不大，不到2%。

### 3. 模態振形識別結果

為清楚瞭解結構各模態所對應的振形 (mode shape)，選擇2010/11/21花蓮地震初震段事件所識別得到的模態振形列示於表1(b)。從表中數據可清楚發現，第一模態僅在CH06 (x向) 與CH11 (x向) 有主要的分量，



且兩位置比例相近，可判定第一模態的主要運動模式為屋頂板x方向的近似剛體運動。第二模態至第四模態則以垂直為主、水平為輔的耦合振形。其中第三模態為CH08所在屋頂版局部z向、與屋頂y向剛性平移的耦合運動。

#### 四、結語

本文針對921地震教育園區毀損南棟教室結構健康監測系統所量測到的地震紀錄進行結構動態參數識別。由本研究可以發現，南棟教室的弱向為長向(x向)的平移運動，自然頻率約為7.42Hz，而短向(y向)平移頻率高達15.2Hz，約為長向之兩倍，換算為勁度則為4倍。由此可知本建築補強後為「長向弱、短向強」，與原始學校建築類似，初步研判本建築原有4面損壞短向隔間牆與2面增建RC牆提供了不少的勁度。此研究可知，本結構之結構健康監測，建議應以監測長向平移(即第一模態)之動態特性變化為主。而小地震下的結構頻率較阻尼比更能作為穩定可靠的健康指標。實務上可採取強震後的小地震紀錄來識別模態頻率，當頻率小於7.42Hz之5%時，結構系統即可能有損壞之疑慮。

#### 五、參考文獻

1. J.N. Juang, "System Realization using Information Matrix," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 21, No. 3, pp. 492-500, 1997.
2. C.C. Lin, C.E. Wang, H.W. Wu, and J.F. Wang, "On-line Building Damage Assessment Based on Earthquake Records," Smart Materials and Structures Vol. 14, No. 3, pp. S137-S153.

3. C.C. Lin, J.F. Wang, and C.H. Tsai, "Dynamic Parameter Identifications for Irregular Buildings Considering Soil-Structure Interaction Effects, Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 3, pp. 641-666.

#### 附錄 毀損南棟教室FBA感應器與三聯科技Palert 感應器訊號比較

在921地震教育園區結構健康監測系統CH01~CH03感應器所在地面鄰近不遠處，另外安裝了一只三聯科技所開發之Palert三軸向加速度感應器(圖5)。相較於園區CH01~CH03之力平衡式加速度型感應器(FBA)，Palert採用原理為新型之微機電系統(Micro Electro Mechanical System, MEMS)，因此體積與成本均較FBA感應器為低，目前MEMS之概念已廣泛應用於行動通訊載具。



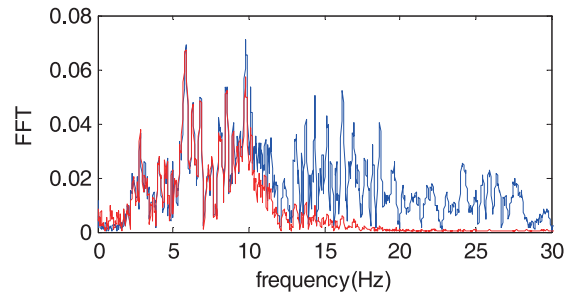
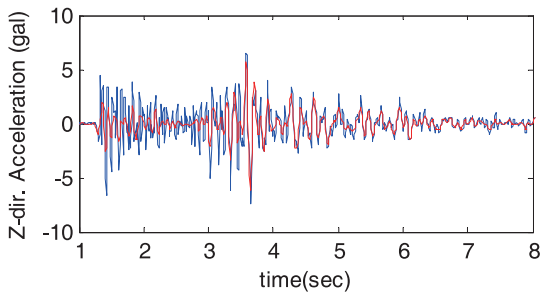
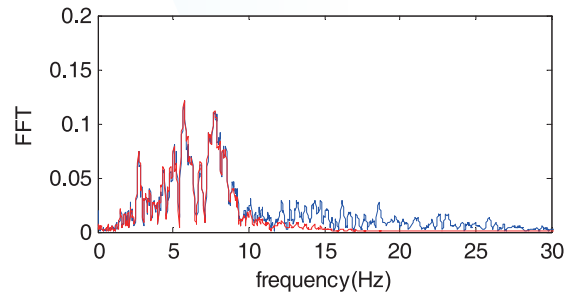
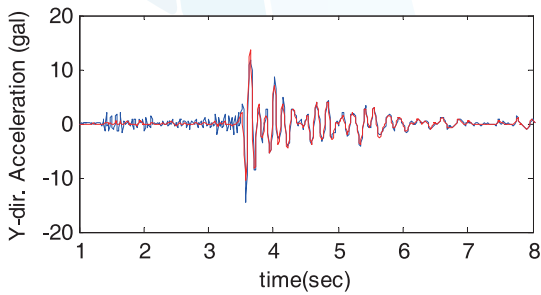
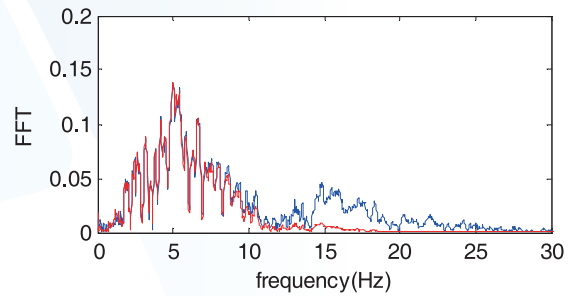
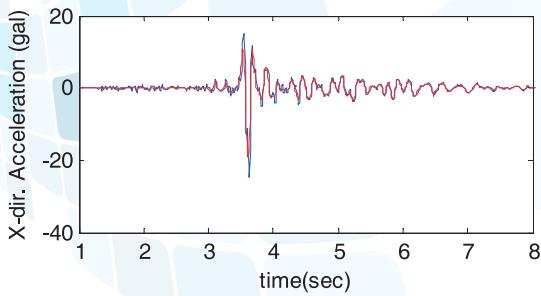
▲ 圖5 三聯科技Palert

為與Palert感應訊號相互比對檢核，以2014/3/14台中烏日近震為例，將本園區FBA型感應器CH01~CH03與(分別代表x, y, 與z軸向) Palert三軸向加速度歷時訊號繪如圖A1左欄，另將各訊號之快速傅立葉轉換(FFT)頻譜繪於圖A1



右欄。由FFT比較發現，兩種感應器在10Hz以下範圍成分比例大致相同，而Palert訊號在10Hz以上逐漸減小，此係Palert內建數位濾波設定為10Hz以上濾除所致，這也使Palert在約3.5秒以前量測到的P波段振幅、以及S波段最大振幅均有

低估現象，為瞭解Palert在10Hz以上的表現，目前已將本園區Palert濾波設定調高為20Hz。由目前分析可知，兩種感應器在此事件中的0~10Hz範圍的訊號成分相當接近，因此本文識別得到的結構第一模態頻率7.42Hz應相當可信。



▲ 圖A1 921地震教育園區FBA感應器(圖中藍線)與Palert MEMS感應器(圖中紅線)加速度時間歷時訊號與頻譜比較