

# 內湖案建物之結構健康監測暨 制震壁效能驗證

## 依107年1023與108年0418地震紀錄分析結果比較

國立中興大學土木工程系／林其璋・國立高雄科技大學營建工程系／林錦隆 

### 一、前言

台灣地處環太平洋地震帶，地震頻繁，對居民生命財產及民生相關工程設施安全威脅甚大，而台灣西部人口密集地區斷層密佈，存在地盤累積能量引發規模六以上地震之隱憂。目前，地震仍無法準確預測，在地震過後，儘速對於可能或是已經受到損害的土木及建築結構進行損害評估，以確保其安全性及功能性，是一項必要且困難的任務。對於一般系統簡單且規模較小型之建築結構，以目視判斷損害程度或許可行，但對於系統較複雜且大規模的結構物，如水壩、橋樑、高樓等，若以人員現地勘查方式進行損害評估，不僅費時、費力，而且對於結構內部無法目視的損害並不易察覺，尤其是樓房結構，常會因內部裝潢或其他建築用途上的設施，掩蓋住結構損壞部位，造成損壞評估的不正確。況且，建築物在其使用年限之內，也會因其他因素（如材料疲勞、腐蝕）造成結構體內部退化損傷，當這些損壞未被察覺而擴大時，容易造成結構桿件喪失承載能力，甚至危及整體結構安全。因此，發展結構非破壞檢測技術，確屬必要。

過去發展了許多結構局部安全查驗的方

法與監測系統，使用這些方法需事先預知損壞位置，同時結構桿件最好暴露在外而且可以到達，方能進行進一步的損壞探測。然而，實際情況，上述假想條件並不容易達到，因此，發展非破壞檢測技術，應從整體結構系統或廣域非破壞檢測技術著手，先確定結構有無損壞、損壞程度及損壞區域，接著再進行局部現場檢測，較為完備可行。近三十年來，由於感應器及數位科技之迅速發展，國立中興大學土木工程系林其璋教授研究團隊著手研究以量測結構物動態反應、並依此量測反應推求結構物動態特性之方法來進行損壞診斷<sup>[1]-[8]</sup>。欲求得結構系統動態特性，可經由系統識別技巧來達成，一般結構系統識別方法，主要係藉由量測結構輸入外力及引致之動態反應輸出，進而利用特定之數學方法而求得符合此一組輸出/輸入關係之結構系統。利用系統識別技巧所萃取的結構動態參數（含頻率、阻尼與振形），有助於評估結構物之實際健康狀況。

自1992年起，中央氣象局在國內數十棟建築物中裝設強震監測系統，林其璋教授研究團隊曾利用這些地震紀錄，驗證所發展系統識別與損壞診斷方法之準確性及可靠度。其中，最



值得一提的就是診斷國立中興大學土木環工大樓受1999年921集集地震（ $M=7.3$ ）造成的中度破壞，以及台東消防局大樓受2006年台東卑南地震（ $M=6.2$ ）造成的嚴重破壞，結果顯示所評估之損壞診斷結果與現場勘查記錄一致。由此可知，利用結構物受天然外力作用所引致的動態反應記錄，識別該結構動態特性，進而評估其健康狀態、損壞程度及損壞位置，已經是可行的技術。此外，隨著結構控制技術的提升，裝設隔減震裝置的結構物愈來愈多，雖然該裝置可在實驗室進行完整的元件測試，但實際安裝於結構物後，組成一個結構系統，每個隔減震裝置必須各司其職，且現地與實驗室的環境條件有很大的不同，如何驗證該隔減震裝置的真實效用，成為重要課題。

林其璋教授研究團隊與三聯科技公司進行多年的產學合作，已成功將結構健康監測與診斷技術，應用於一棟位於台北之八層樓鋼筋混凝土建築結構，並獲得良好的成效。本文將以一棟位於台北市內湖區地上26層、地下3層且裝設黏彈性制震壁之鋼結構大樓為目標結構，利用107年10月23日以及108年4月18日兩筆實測地震紀錄，進行該大樓結構健康監測、診斷與制震壁減震效益之評估。

## 二、研究方法

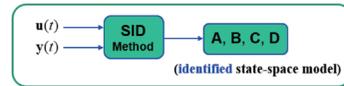
### 1. 系統識別結構動態參數

如前所述，利用系統識別方法（註9、註10），可萃取結構物的模態參數（含頻率、阻尼與振形），有助於評估結構物之實際健康狀況。其中，識別之結構阻尼比可用以評估目標大樓結構全體制震壁對整個結構系統阻尼的貢獻。圖1為系統識別方法的示意圖，利用實測

地表加速度 $u(t)$ 為輸入值，結構各樓層實測加速度 $y(t)$ 為輸出值，即可求得結構之狀態空間模式。接著，輸入實測地表加速度到識別的模式中，可預測結構之樓層加速度，比較預測與實測之樓層加速度，即可驗證所識別結構模式的正確性，而結構物之模態參數（含頻率、阻尼與振形）即可由該結構模式是系統矩陣A計算而得。

#### ■ Identification of State-Space Model

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \mathbf{A}z(t) + \mathbf{B}u(t) & u(t) &= \text{system input (ground acc.)} \\ y(t) &= \mathbf{C}z(t) + \mathbf{D}u(t) & y(t) &= \text{system output (structural node acc.)} \end{aligned}$$



#### ■ Predict Node Accelerations



▲ 圖1 系統識別方法示意圖

### 2. 層間力平衡法

圖2(a)為 $N$ 層建築結構受地震作用的數學模型，圖2(b)為結構第 $l$ 層到第 $N$ 層之自由體圖。由該自由體圖之力平衡（總慣性力=層間回復力+層間阻尼力）可得：

$$F_{l,l}(t) = k_l x_{l,r}(t) + c_l \dot{x}_l(t) \quad (1)$$

其中， $k_l$ 與 $c_l$ 分別為第 $l$ 層之層間(interstory)勁度與阻尼係數； $x_{l,r}(t)$ 與 $\dot{x}_{l,r}(t)$ 為 $l$ 層之層間變位與層間速度，可依下式計算

$$x_{l,r}(t) = x_l(t) - x_{l-1}(t) \quad (2)$$

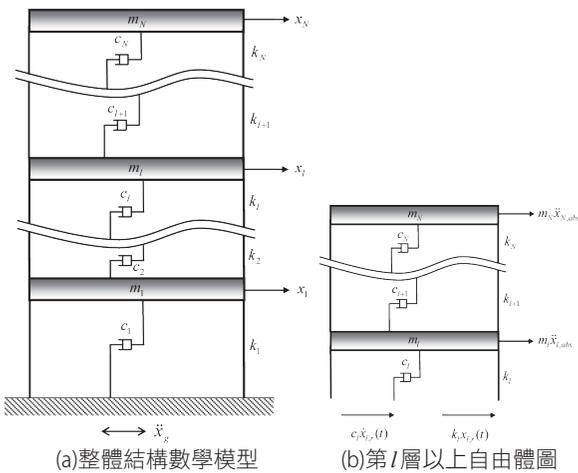
$$\dot{x}_{l,r}(t) = \dot{x}_l(t) - \dot{x}_{l-1}(t) \quad (3)$$

$F_{l,l}(t)$ 則為總慣性力，可由下式計算

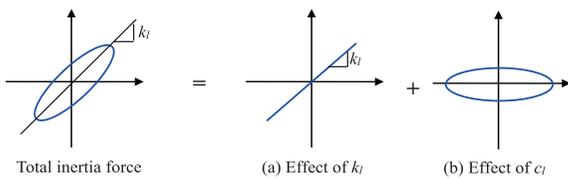
$$F_{l,l}(t) = \sum_l^N m_l \ddot{x}_{l,abs}(t) \quad (4)$$

其中， $m_l$ 與 $\ddot{x}_{l,abs}$ 分別為第 $l$ 層之質量與絕對加速

度。使用此法時，需量測每樓層的絕對加速度，並且假設每樓層的質量為已知(利用樓地板面積估計)。接著，利用積分技巧，求得樓層絕對速度與位移，並以式(2)與式(3)計算層間相對速度與位移；此外，總慣性力可由式(4)計算。將總慣性力 $F_{I,t}(t)$ 與層間變位 $x_{I,t}(t)$ 繪圖，可得圖3之遲滯迴圈。由該圖可知，總慣性力包含了層間回復力與阻尼力的貢獻，且由該圖即可逐層識別層間勁度 $k_f$ 與阻尼係數 $c_f$ 。



▲ 圖2 系統識別方法示意圖



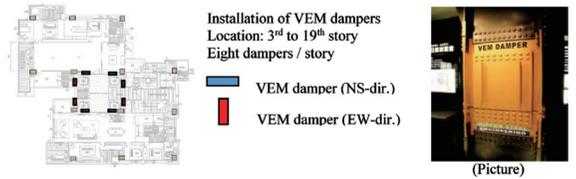
▲ 圖3 結構第 $l$ 層遲滯迴圈圖

### 三、目標結構與實測地震紀錄

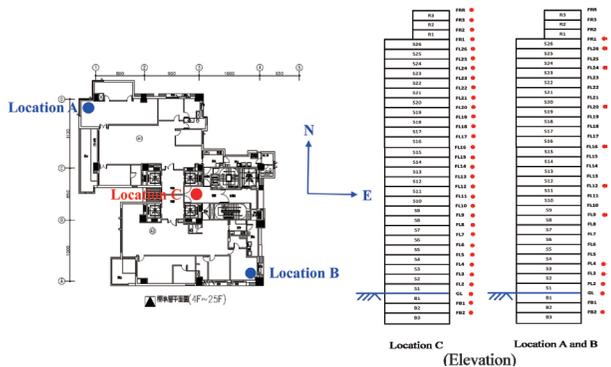
#### 1. 目標結構

本案目標結構座落於台北市內湖區，為地上26層、地下3層之鋼結構大樓。此建築於

3F-19F的每層樓皆安裝4組X向與Y向的黏彈性制震壁，成為裝設阻尼減振裝置的鋼結構系統，如圖4所示。三聯科技公司於此目標結構裝設加速規，如圖5所示，建構完整的振動量測系統。



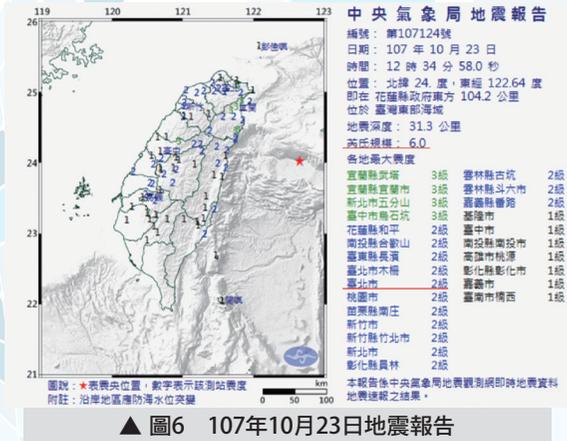
▲ 圖4 制震壁安裝位置



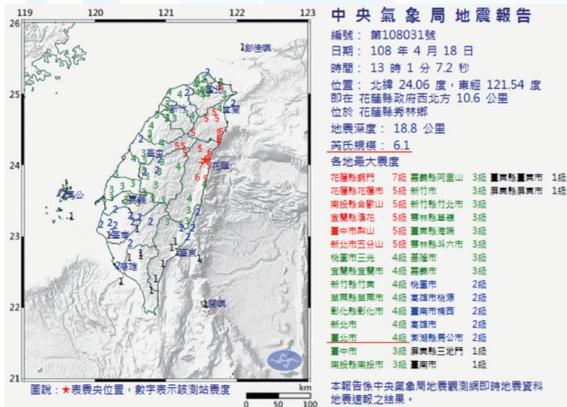
▲ 圖5 三軸加速規安裝位置

#### 2. 實測地震紀錄

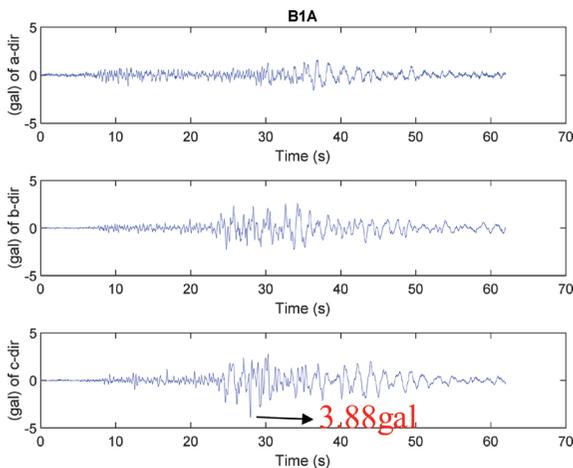
圖6與圖7為量測系統測試完成後所量到的兩次地震報告，分別是107年10月23日震央位在花蓮外海的地震，與108年4月18日震央在花蓮縣秀林鄉的地震。其中，後者在台北市產生的最大震度為4級。圖8與圖9分別為兩次地震於目標結構場址所實測之地表加速度歷時圖，每張圖分成三張小圖，由上而下依序是Z向、NS向與EW向的加速度歷時，比較兩次地震之水平最大地表加速度(PGA)，4月18日地震約為10月23日地震的6倍。



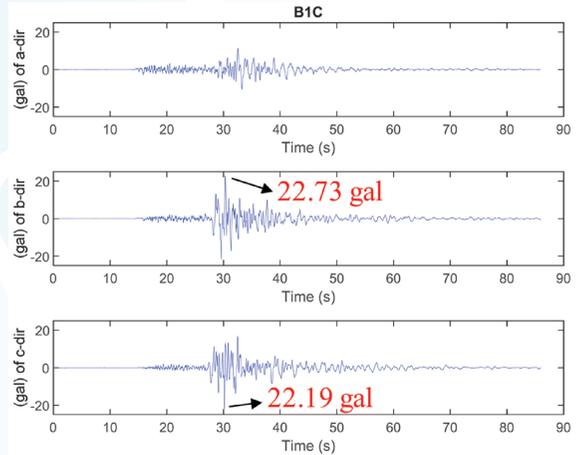
▲圖6 107年10月23日地震報告



▲圖7 108年4月18日地震報告



▲圖8 目標結構場址之地表加速度歷時(107年10月23日)

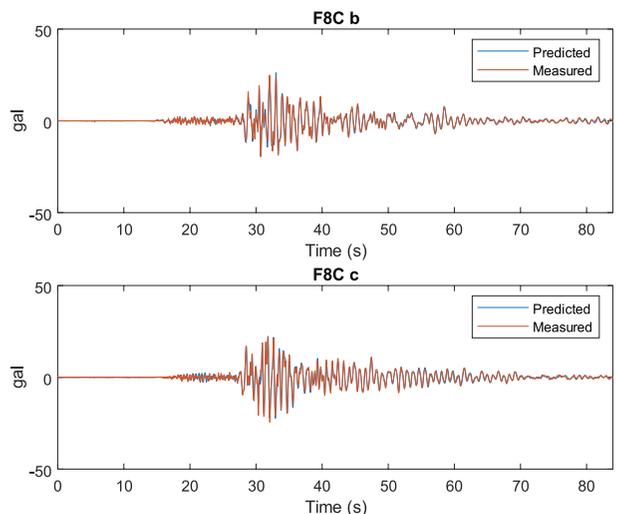


▲圖9 目標結構場址之地表加速度歷時(108年4月18日)

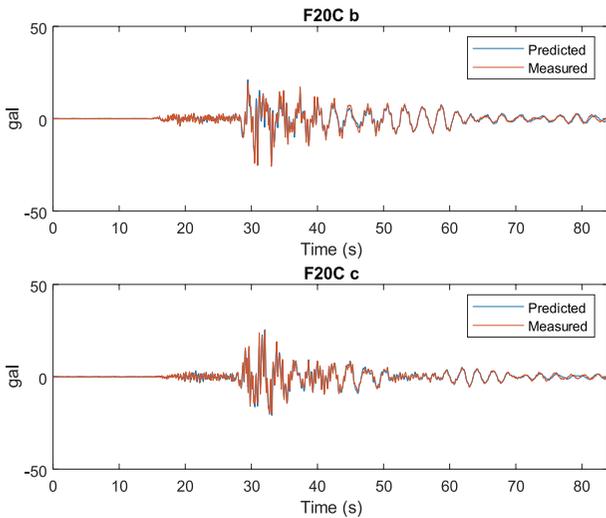
#### 四、分析結果

##### 1. 結構系統識別結果

圖10及圖11比較加速度反應，其中包含系統識別模型預測值與原始量測值，兩者越接近表示系統識別結果越準確。由圖可知，預測值與實測值十分接近，顯示系統識別結果的正確性。



▲圖10 理論模型預測值與實測值之比較(8樓，南北向(上)與東西向(下)之比較；4月18日地震紀錄)



▲ 圖11 理論模型預測值與實測值之比較(20樓，南北向(上)與東西向(下)之比較；4月18日地震紀錄)

表1-表4分別表示兩次地震所識別之結構NS向與EW向之模態頻率與阻尼比。由表可知，108年4月18日地震紀錄之識別頻率較低，表示地震較大時，結構變形較大，整體結構系統勁度降低，這與事實相符；此外，模態阻尼比較大，亦為地震較大時，層間相對速度較大，制震壁提供較大之消能效果。

▼ 表1 結構南北(NS)向動態參數(10月23日地震紀錄)

| 南北(NS)向 | 第1模態   | 第2模態   | 第3模態   |
|---------|--------|--------|--------|
| 頻率      | 0.38Hz | 1.13Hz | 2.08Hz |
| 阻尼比     | 2.50%  | 2.62%  | 2.50%  |

▼ 表2 結構東西(EW)向動態參數(10月23日地震紀錄)

| 東西(EW)向 | 第1模態   | 第2模態   | 第3模態   |
|---------|--------|--------|--------|
| 頻率      | 0.43Hz | 1.28Hz | 2.38Hz |
| 阻尼比     | 2.45%  | 2.51%  | 3.16%  |

▼ 表3 結構南北(NS)向動態參數(4月18日地震紀錄)

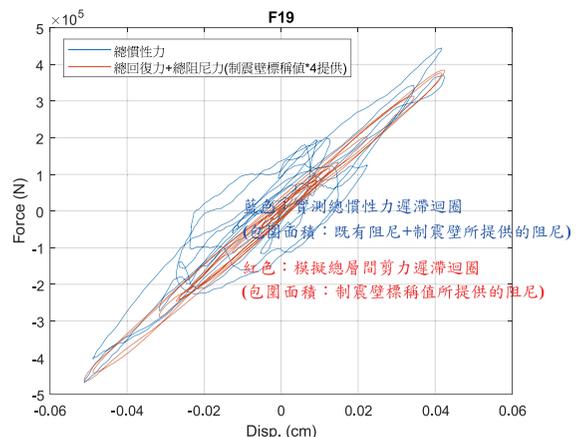
| 南北(NS)向 | 第1模態    | 第2模態    | 第3模態    |
|---------|---------|---------|---------|
| 頻率      | 0.36 Hz | 1.08 Hz | 1.97 Hz |
| 阻尼比     | 2.90 %  | 2.70 %  | 2.94 %  |

▼ 表4 結構東西(EW)向動態參數(4月18日地震紀錄)

| 東西(EW)向 | 第1模態    | 第2模態    | 第3模態    |
|---------|---------|---------|---------|
| 頻率      | 0.41 Hz | 1.18 Hz | 2.20 Hz |
| 阻尼比     | 3.66 %  | 3.38 %  | 3.89 %  |

## 2. 層間力平衡評估結果

圖12為107年10月23日地震作用下，目標結構19樓之層間遲滯迴圈圖，藍色線為總慣性力之遲滯迴圈，紅色線是模擬之總層間剪力(回復力+阻尼力)。由圖可知，層間阻尼的行為較複雜，並非如理論假設與層間速度成正比之線性黏滯行為；此外，實測之層間消能面積(藍線包圍面積)，大於制震壁標稱值所能提供的消能面積(紅線包圍面積)，因為結構存在既有材料阻尼，此分析結果合理，符合事實。此外，由於此次地震的尖峰地表加速度僅達3.88gal，所引致之層間速度不大，故制震壁的效能尚未被有效激發。

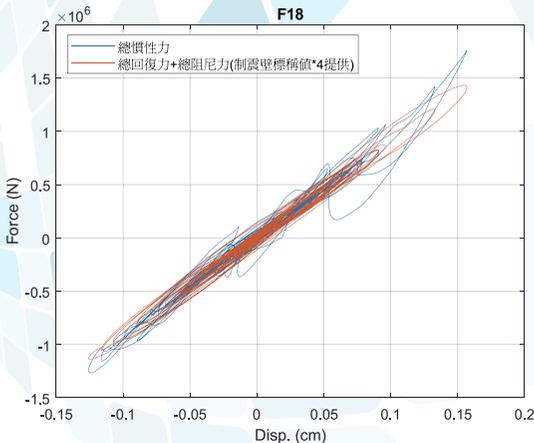


▲ 圖12 層間(19樓)遲滯迴圈(10月23日地震紀錄)

圖13為108年4月18日地震作用下，目標結構18樓之層間遲滯迴圈。由圖可知，實測之層間消能面積(藍線包圍面積)，與制震壁標稱值所提供的消能面積(紅線包圍面積)相近，顯



示制震壁提供了該樓層之絕大部分消能(阻尼係數)。



▲ 圖13 層間(18樓)滯迴圈(4月18日地震紀錄)

## 五、結語

本案以一棟26層裝設黏彈性制震壁之鋼結構大樓結構為例，並以兩次實測地震紀錄進行該大樓結構健康監測與制震壁減振效能評估，得到以下之結論：

1. 地震PGA較大時，識別結構頻率較低，模態阻尼較大，與結構受震學理與事實相符。
2. 因為結構存在既有阻尼，實測之層間阻尼(滯迴圈面積)，較制震壁標稱值所能提供的阻尼大，結果合理。制震壁所提供的阻尼無法分離出，僅能以標稱值評估。
3. 地震PGA愈大，引致之層間速度愈大，本文發展方法愈能顯現制震壁的消能效益。
4. 透過量測系統之適當安裝，本文發展分析方法確實可以達成結構健康監測、合理診斷與減震裝置效能驗證之目標。

## ☒ 參考文獻

[1] Lin, C.C., Soong, T.T., Natke, H.G., "Real-time system identification of degrading structures", Journal of Engineering

Mechanics, ASCE, 116, 10, 2258-2274, 1990.

- [2] Ueng, J.M., Lin, C.C., and Lin, P.L., "System Identification of Torsionally-Coupled Buildings", Computers and Structures, 74, 667-686, 1999.
- [3] Lin, C.C., Wang, C.E., Wu, H.W., and Wang, J. F., "On-line building damage assessment based on eEarthquake records", Smart Materials and Structures, 14, 137-153, 2005.
- [4] Lin, C.C., Hong, L.L., Ueng, J.M., Wu, K.C. and Wang, C.E., "Parametric identification of asymmetric buildings from earthquake response records", Smart Materials and Structures, 14(4), 850-861, 2005.
- [5] Wang, J.F., Lin, C.C., Yen, S.M. "A Story Damage index of seismically-excited buildings based on modal frequency and mode shape", Engineering Structures, 29, 2143-2157, 2007.
- [6] Lin, C.C., Wang, J.F., and Tsai, C.H. "Dynamic parameter identifications for irregular buildings considering soil-structure interaction effects", Earthquake Spectra, 24(3), 641-666, 2008.
- [7] Wang, J.F., Lin, C.C., Lin, G.L. and Yang, C.H. "Story Damage Identification of Irregular Buildings Based on Earthquake Records", Earthquake Spectra, 29, 963-985, 2013.
- [8] Lin, C.C., Lin, G.L. and Hsieh, K.S. "Damage Assessment of Seismically-excited Buildings through Incomplete Measurements", Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, 136, Issue 6, 061801, 2014.
- [9] Juang, J.-N., Phan, M., Horta, L.G., and Longman, R.W., "Identification of observer/kalman filter Markov parameters: theory and experiments", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 16, No. 2, pp.320-329, 1993.
- [10] Juang, J.N., Applied System Identification, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994.