

# 應用層間變位角於結構損傷指標

三聯科技股份有限公司 / 余以諾

## 一、前言

全球估計每年發生五十萬次地震，其中約有十萬次地震為有感地震、一百次左右的損傷地震，而地震分布相當不平均，台灣交通部統計，2018年整年，台灣就發生1077次有感地震。

近年對於結構健康監測的觀念逐漸興起，運用加速度感測器量測結構物振動資訊，並透過此數據來進行SHM(Structural Health Monitoring)演算法分析，提供使用者一個結構損傷判斷的依據，其方法主要分為兩大類<sup>[1]</sup>：

### 1. 模型擬合法(Model-based method)：

建立一個參考模型(Reference model)，將模型係數擬合於實際結構，透過識別動態參數來更新模型(Model updating)，並從係數的改變判斷結構物的變化。

優點：理論基礎較完善，實驗環境越佳，會越接近理論解。

缺點：耗時成本高，偶有奇異解及非唯一解的困擾(較常出現於簡化模型)，此外建模階段也需要詳細考察目標結構。

常見方法：子空間識別法、隨機子空間識別法等求得動態參數後，以有限元素法擬合。<sup>[2]</sup>

### 2. 訊號分析法(Measured data only)

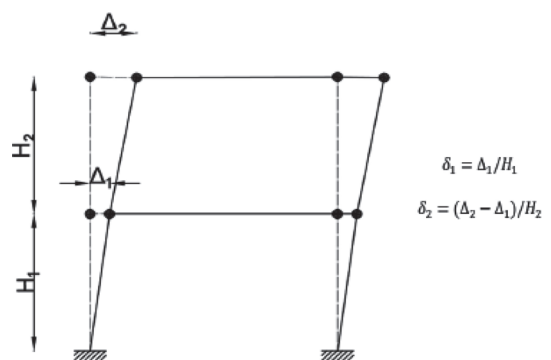
純粹使用量測訊號，基於力學基礎去識別損傷，沒有建模階段。

優點：跳過建模階段，方法具備可移動性(同時應用於不同目標結構)。

缺點：所得到的答案相較於模型法，較為概略，且損傷判別為相對的，可藉由大量試驗，找尋合適的損傷指標。

常見方法：

- (1) 自然頻率時變分析：計算便利，透過簡單的時間頻率轉換即可求得，但對於低頻率敏感度的破壞形式較難掌控，需要精度高的儀器以及演算法或是結構進入高度塑性才能求得，例:剪切破壞結構<sup>[3]</sup>；另有些結構自然頻率受周遭環境影響大，例:離岸平台受海水互作用<sup>[4]</sup>(Farrar, et al., 1994)，頻率變化無法真實反映損傷情況。
- (2) 層間變位角：透過地震當下加速度計數據積分兩次得到位移值，扣除地表位移值後，以求得相對位移，如圖1所示。



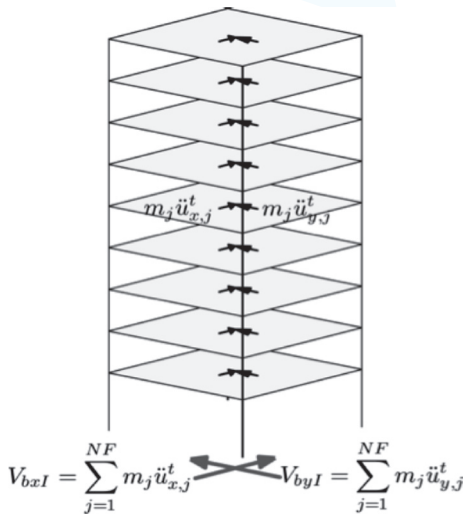
▲ 圖1 層間變位角示意圖(擷取自<sup>[8]</sup>)

將單一樓層相鄰樓板位移除上樓高，即為層間變位角；層間變位角應用於結構物損傷評估，已有相當多的研究，2010 California Building Code (ICBO, 2010)<sup>[5]</sup>，



說明結構物需有足夠的勁度抵抗地震力造成的層間位移、ATC-40(Applied Technology Council)<sup>[6]</sup>提供了非線性側推分析的模型設計概念，而FEMA(Federal Emergency Management Agency)底下的HAZUS Program(Earthquake Loss Estimation Methodology)所延伸出的Advanced Engineering Building Module(AEBM)<sup>[7]</sup>，提出在不同結構形式下，不同層間位移角所對應的損傷程度。

- (3) 層間剪力波傳遞速度：安裝加速度器於樓層間，在地震事件發生後，量測出剪力波在樓層間的傳遞速度，當傳遞速度下降時，結構物有損傷的趨勢。<sup>[9]</sup>



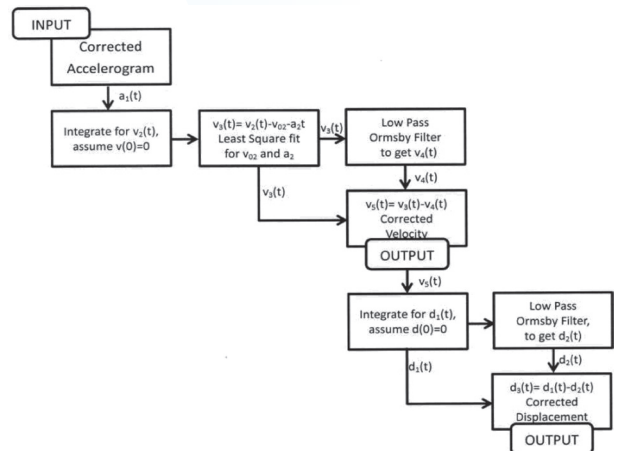
▲ 圖2 基底剪力計算(擷取自<sup>[11]</sup>)

- (4) 容許基底剪力：如圖2，藉由累加各樓層質量與地震作用下的樓層加速度，求得地震作用下的樓房基底剪力值，若此數值大小超過容許值，可視為結構損傷。其容許值訂定方式，可透過結構分析軟體的側推分析估計。<sup>[10]</sup>

## 二、研究方法

本文根據AEBM所提出的層間變位角損傷指標(Inter-Story Drift Ratio of Structural Damage State)，將記錄的加速度，配合Ormsby wavelet Filter來求得位移。Ormsby wavelet為一個商用地震分析軟體常用小波，在目標頻率為帶寬時有著良好表現，相較於Ricker wavelet，Ormsby wavelet在複雜的土壤岩石環境下，能夠更有彈性的重建地震資料。<sup>[11]</sup>

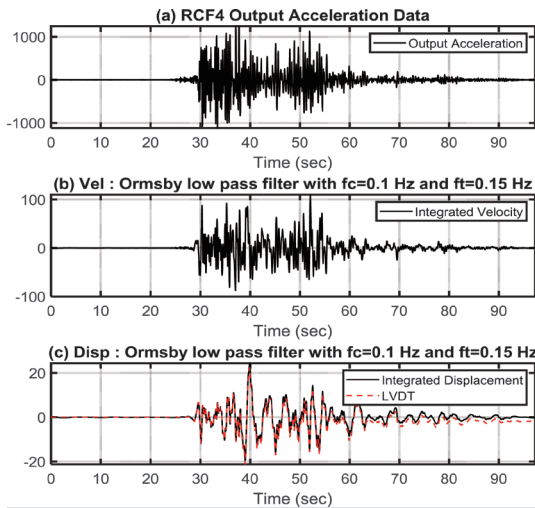
而使用Ormsby Wavelet Filter其積分流程圖如圖3，透過此濾波器在每次積分時進行基線修正，以消除長周期波的影響。



▲ 圖3 Ormsby Wavelet Filter積分法流程圖

並也有透過實驗數據與LVDT位移計比較印證，結果如圖4，實驗配置如文獻<sup>[12]</sup>。

本文採用平均層間變位角(Average Inter-Story Drift Ratio)：定義為相對位移除上距離，例如樓頂相對地表位移除上樓高。特別使用於，加速度器數量有限時，當平均層間變位角求得後，我們可以藉由查表，來判斷樓房的損傷情況。



▲ 圖4 在RC單層樓雙柱實驗與LVDT比較結果

表1為基於大量測推分析資料的統計結果，需請有相關工程背景人員，確立樓房在表單上對應的形式，若需要更為精確的損傷指標，可針對個別結構物進行有限元素側推分析。此方法希望能在地震結束後，能給予現場人員第一時間的判斷依據，詳細損傷情況則需請結構技師判斷。

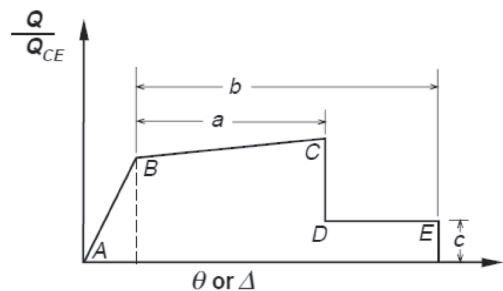
▼ 表1 HAZUS Average Inter-Story Drift Ratio of Structural Damage States(擷取自AEBM)

Model Building Type	Structural Damage States			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
Low-Rise Buildings – High-Code Design Level				
W1, W2	0.004	0.012	0.040	0.100
S1	0.006	0.012	0.030	0.080
C1, S2	0.005	0.010	0.030	0.080
C2	0.004	0.010	0.030	0.080
S3, S4, PC1, PC2, RM1, RM2	0.004	0.008	0.024	0.070
Low-Rise Buildings – Moderate-Code Design Level				
W1, W2	0.004	0.010	0.031	0.075
S1	0.006	0.010	0.024	0.060
C1, S2	0.005	0.009	0.023	0.060
C2	0.004	0.008	0.023	0.060
S3, S4, PC1, PC2, RM1, RM2	0.004	0.007	0.019	0.053
Low-Rise (LR) Buildings – Low-Code Design Level				
W1, W2	0.004	0.010	0.031	0.075
S1	0.006	0.010	0.020	0.050
C1, S2	0.005	0.008	0.020	0.050
C2	0.004	0.008	0.020	0.050
S3, S4, PC1, PC2, RM1, RM2	0.004	0.006	0.016	0.044
S5, C3, URM	0.003	0.006	0.015	0.035
Low-Rise (LR) Buildings – Pre-Code Design Level				
W1, W2	0.003	0.008	0.025	0.060
S1	0.005	0.008	0.016	0.040
C1, S2	0.004	0.006	0.016	0.040
C2	0.003	0.006	0.016	0.040
S3, S4, PC1, PC2, RM1, RM2	0.003	0.005	0.013	0.035
S5, C3, URM	0.002	0.005	0.012	0.028
Mid-Rise Buildings <sup>1</sup>				
All	Mid-Rise Building Types	2/3 * LR	2/3 * LR	2/3 * LR
High-Rise Buildings <sup>1</sup>				
All	High-Rise Building Types	1/2 * LR	1/2 * LR	1/2 * LR

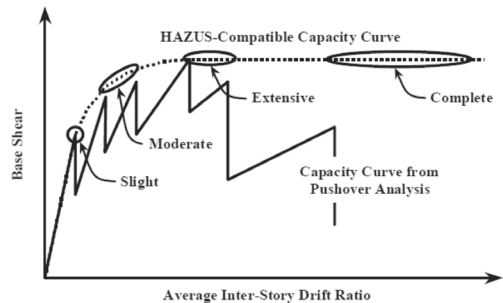
### 損傷指標定義

NEHRP Guidelines中<sup>[13]</sup>，提出一套非線性靜力分析(Nonlinear Static Procedure, NSP)的模型及理論，HAZUS以這五個控制點(Control Point)，定義出四種損傷狀態(Damage State)。

輕度破壞：定義為第一個結構桿件達到控制點位C，如圖5所示，等同於HAZUS側推分析圖中的第一個鋸齒峰值，如圖6所示。



▲ 圖5 理想構件受力與位移關係圖(擷取自NEHRP Guidelines)



▲ 圖6 側推分析曲線與損傷狀態示意圖(擷取自AEBM)

中度破壞：一半以上的結構桿件超過控制點位C，損壞程度至少5%。

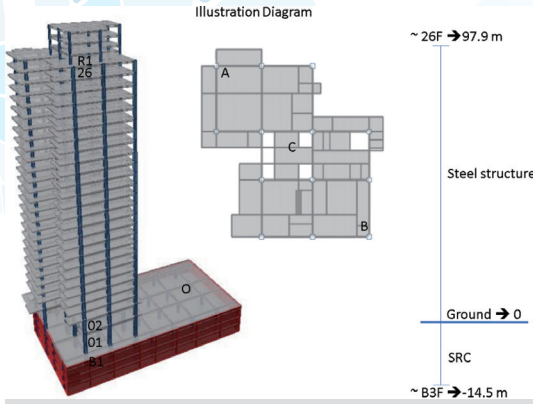
嚴重破壞：一半以上的結構桿件超過控制點位C，損壞程度至少25%。

完全破壞：一半以上的結構桿件達到控制點位E，結構物已經失去側向抵抗力，損壞程度達50%。

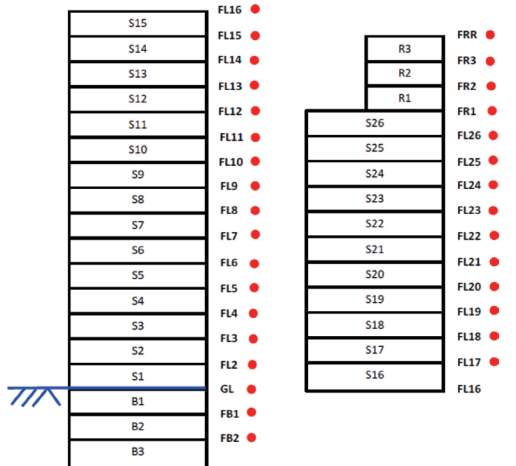


### 三、目標結構

採用坐落於台北市內湖區的鋼結構大樓，如圖7所示，地下三層(-14.5m)、地上26層(97.9m)，在AEMB手冊中，屬於高樓房屋結構。質心加速度位置裝設於各樓層，如圖8所示。



▲ 圖7 目標結構平面立面結構圖(附標高)

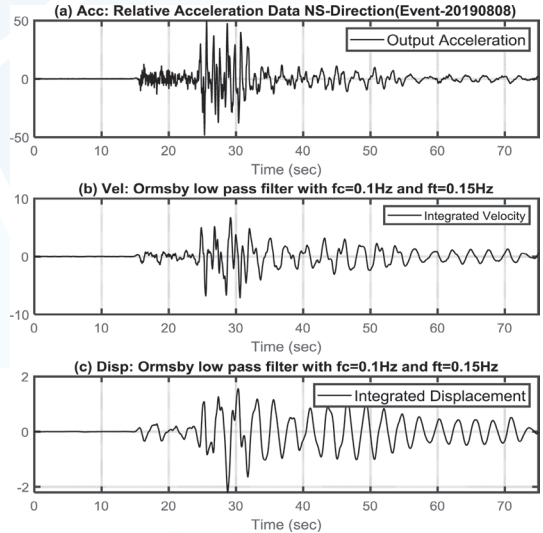


▲ 圖8 C點質心位置在全樓層裝設加速度計(三聯科技公司)

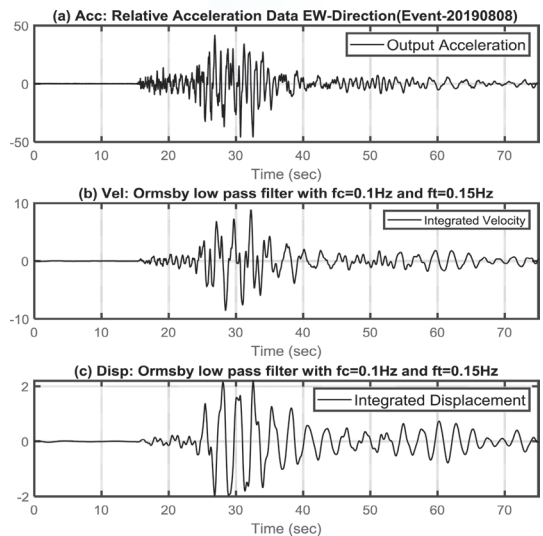
### 四、實際分析

採用108年8月8號發生於台灣東部外海，芮氏規模為6的地震事件，加速度反應在26樓層最大約50gal。將此加速度值與一樓(GL)加速度值相減，得到相對加速度，再透過兩次積分

求得相對位移，除上樓高97.9公尺，得到平均層間位移角，計算過程如圖9、圖10所示。



▲ 圖9 108年8月8號，碧湖畔相對位移積分過程(NS向)



▲ 圖10 108年8月8號，碧湖畔相對位移積分過程(EW向)

最後根據表1，查詢結構形式以及樓高所對應的損傷指標，萃取出表2，來檢核損傷情況。

▼表2 碧湖畔層間變位角損傷指標

Model Building Type	Slight	Moderate	Extensive	Complete
S1(HR)	0.003	0.006	0.015	0.04

Drift Ratio =  $2.202(\text{cm}) \times 0.01(\text{m/cm}) / 97.9(\text{m}) = 0.000225$   
(NS向, 低於輕度破壞界線)

Drift Ratio =  $2.199(\text{cm}) \times 0.01(\text{m/cm}) / 97.9(\text{m}) = 0.000225$   
(EW向, 低於輕度破壞界線)

從結果顯示, 此結構在26樓反應達到50gal時, 仍然處於彈性階段, 此為地表到26樓的平均的損傷評估結果, 只需要裝設兩台加速度器, 但若要針對個別樓層, 可額外加裝加速度器, 以求得單一樓層的層間變位角。

## 五、結語

系統識別用於損傷評估已有數十年的發展歷史, 即使如此, 單純透過分析結果, 大部分的演算邏輯, 要給予使用者一個較準確的損傷依據是有其困難性的。

而本文採用方法為平均層間變位角, 透過相對加速度積分兩次求得相對位移, 再除上樓高求得, 配合Advanced Engineering Building Module(AEBM)所提供的損傷指標, 針對不同形式的、不同樓高的結構物, 給予一個較有依據的評估標準。

針對積分方法本文的演算法採用了Ormsby Wavelet Filter, 為一種零相位偏移的帶寬濾波器, 目的在於消除長周期波所造成的誤差值, 未來有機會配合三聯科技加速度器內建自動追零(Auto Offset)演算邏輯以及即時積分功能, 建立一套即時的損傷評估系統。

## ☒ 參考文獻

[1] Ulusoy, H., Kalkan, E., Fletcher, J., Friberg, P., Leith, W., and Banga, K. "Design and

Implementation of a Structural Health Monitoring and Alerting System for Hospital Buildings in the United States." (2012)

[2] I.N. Yu "Seismic Safety Assessment of Structures using Recursive Subspace Identification" (2018)

[3] C.F. Li "Time-frequency analysis techniques using measurement signals for Structural Health Monitoring"(2018)

[4] Farrar, C.R., W.E. Baker, T.M. Bell, K.M. Cone, T.W. Darling, T.A. Duffey, A. Eklund, and A. Migliori, Dynamic Characterization and Damage Detection in the I-40 Bridge Over the Rio Grande. (1994)

[5] 2010 California Building Code California Code of Regulations

[6] Applied Technology Council (ATC) "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings" (1996)

[7] HAZUS-MH "Advanced Engineering Building Module (AEBM)" (2001)

[8] JunwonSeo 1, Jong Wan Hu 2, and BurteDavaajamts "Seismic Performance Evaluation of Multistory Reinforced Concrete Moment Resisting Frame Structure with Shear Walls" (2015)

[9] Todorovska, M.I. and Trifunac, M.D. Impulse response analysis of the Van Nuys 7-story hotel during 11 earthquakes and earthquake damage detection. (2008)

[10] Naeim, F., Lee, H., Bhatia, H., Hagie, S., and Skliros, K., CSMIP instrumented building response analysis and 3-D visualization system. (2004)

[11] Ryan, H. Ricker, Ormsby; Klander, Bntterwo-A Choice of Wavelets. (1994)

[12] C.H. Loh, J.H. Mao, J.R. Huang, "Damage Detection of Reinforced Concrete Structures Using Nonlinear Indicator Functions" (2010)

[13] NEHRP GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS (FEMA Publication 273)