



大樓結構安全快速診斷

三聯科技股份有限公司／鄭丁興



一、前言

台灣位處地震帶上，地震活動頻繁，自1901年起已有102次災害性地震^[1]。尤其九二一地震造成的建物受損，全倒有51753戶，半倒有54406戶^[2]。在如此大範圍且大數量的建物需技師鑑定全倒或半倒的情況下，技師人力是很大議題。若能有監測資料協助技師將建物受損情況先分類，可使技師人力有效應用於先進行半倒的判定，可避免有些民眾等不及判定便已進入建物內，導致在餘震時，建物倒塌造成死傷。國內外有很多結構安全監測系統^[3-6]，但由於感測器數量多，資料量大，分析結果費時，技師不易使用。故本文希望建立一套大樓結構安全快速診斷系統，只使用三個加速度規，所用分析方法與大樓耐震設計規範結合，地震後快速提供建物與耐震設計值相關的數據，協助技師在鑑定是否半倒或全倒前先用初步判斷依據，並安排鑑定順序。

二、結構安全監測與耐震設計

國內建築物耐震設計規範^[7]靜力分析法中，最小設計水平總橫力(V)規定如下：

$$V = \frac{S_{ad}I}{1.4\alpha_y F_u} W \quad (1)$$

其中，

S_{aD}為工址設計水平譜加速度係數

I為用途係數

W為建築物全部靜載重

α_y 為起始降伏地震力放大倍數

F_u 為結構系統地震力折減係數

此最小設計水平總橫力為設計地震(475年回歸期)及近斷層效應作用下，建築物在初始降伏時的彈性基層剪力(Base Shear)。S_{aD}即結構物假設為阻尼比(Damping Ratio)5%的單自由度系統(SDOF)在地表加速度作用下的線彈性結構物最大絕對加速度，定義為譜加速度(Spectral Acceleration, S_a)。1.4 $\alpha_y F_u$ 表示對線彈性反應譜加速度的韌性折減。因此，建築物全部靜載重(W)前的所有係數代表建築物在初始降伏時所承受的最大絕對加速度S_a。譜加速度(S_a)與地表加速度極值(PGA)的比值，可定義為動態載重係數(Dynamic Load Factor, DLF)，此值可從圖1中查得，其中0.4SDS為設計地震PGA，即動態載重係數(DLF=S_{aD}/PGA)最大值為2.5。

單自由度(SDOF)系統在地震作用下的運動方程式為

$$\ddot{u}(t) + \frac{4\pi h}{T} \dot{u}(t) + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 u(t) = -\ddot{u}_g(t)$$

$$\text{or } \ddot{u}'(t) + \frac{4\pi h}{T} \dot{u}'(t) + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 u(t) = 0$$

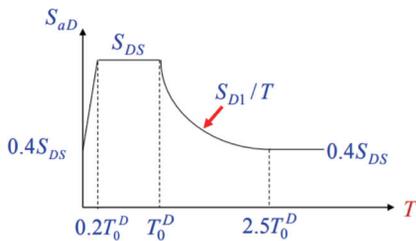
where

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{k}{m}$$

$$\ddot{u}'(t) = \ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)$$

其中， $\ddot{u}(t)$ 為結構物在地震作用下的加速度反應， $\dot{u}(t)$ 為結構物在地震作用下的速度反

應， $u(t)$ 為結構物在地震作用下的位移反應， $\dot{u}_g(t)$ 為地震加速度歷時， h 為結構物阻尼比， T 為結構物自然週期， k 為結構物勁度， m 為結構物質量。譜加速度(S_a)為絕對加速度反應 $\dot{u}'(t)$ 的最大值，譜位移(Spectral Displacement, S_d)為位移反應 $u(t)$ 的最大值。



▲ 圖1 彈性設計反應譜， T 為結構物自然週期(秒)， S_{DS} 為震區設計水平譜加速度係數^[8]

除對加速度有規定外，規範亦對層間相對側向位移進行限制，即降伏地震力(圖2中 P_y)下位移最大值(Δ_y^*)與層高比值不大於0.005。圖中設計地震力 P_d 若為避免中小度地震地震降伏之設計地震力，則降伏地震力與其差異為 α_y 倍。層間相對側向位移在單自由度系統(SDOF)，即代表譜位移(Spectral Displacement, S_d)。

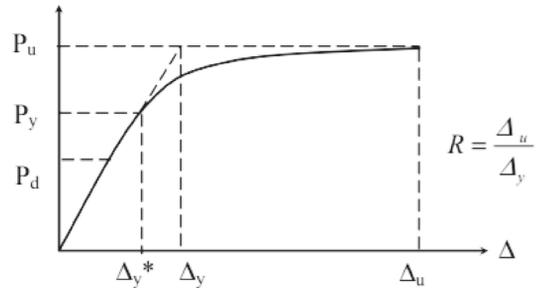
避免中小度地震地震降伏之設計地震力(一般工址與近斷層區域)

$$V = \frac{IF_u}{4.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W$$

$$\left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m = \begin{cases} \frac{S_{aD}}{F_u}, \frac{S_{aD}}{F_u} \leq 0.3 \\ 0.52 \frac{S_{aD}}{F_u} + 0.144, 0.3 < \frac{S_{aD}}{F_u} < 0.8 \\ 0.7 \frac{S_{aD}}{F_u}, \frac{S_{aD}}{F_u} \geq 0.8 \end{cases} \quad (3)$$

層間相對側向位移限制之地震力為

$$V = \frac{IF_u}{4.2} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W \quad (4)$$

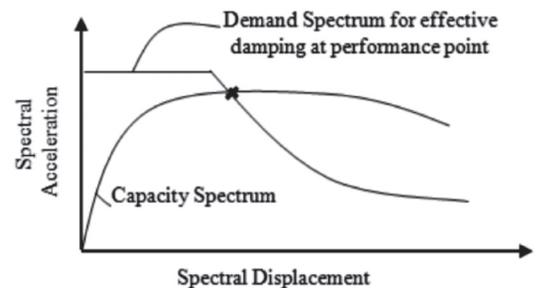


▲ 圖2 結構物設計地震力 P_d 、降伏地震力 P_y 、極限地震力 P_u 與韌性容量 R [7]

譜加速度(S_a)與譜位移(S_d)之關係可構建容量反應譜(Capacity Spectrum)如圖3所示，單自由度系統在線彈性行為時，由公式(2)可知當位移為最大值(S_d)時，速度為零，此時絕對加速度(可用 S_a 來近似)與譜位移(S_d)為直線關係，其關係為

$$\frac{S_a}{S_d} \approx \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = \frac{k}{m} \quad (5)$$

因此，結構物單位質量的勁度(k/m)可用譜加速度(S_a)或採用與譜位移同一時間點的絕對加速度值與譜位移(S_d)之比值來代表。當結構物進入非彈性或塑性行為時，譜加速度(S_a)與譜位移(S_d)之比值將會下降，即勁度減少(或自然週期增大)，結構物可能受損。結構物初始勁度(或自然週期)，可採用微地動監測結果或第一次有感地震結果。由於勁度為自然週期的平方，對結構物受損較敏感。



▲ 圖3 容量反應譜^[9]



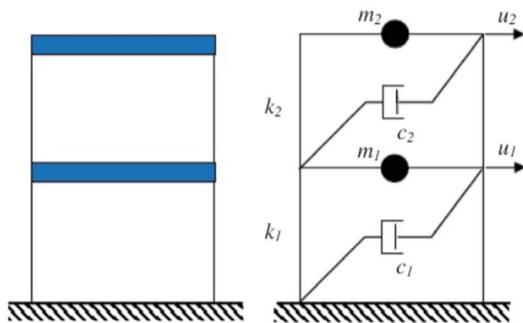
三、大樓結構安全快速診斷

本方法採用三個加速度規，分別安裝於頂樓、一樓及地表，安裝位置盡量靠近剪力中心，以降低扭轉的影響。可用二自由度系統(2DOF)來模擬(圖4)，其運動方程式如下：

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1'(t) \\ \ddot{u}_2'(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

將兩方程式相加，可得一樓的運動方程式如下，頂樓絕對加速度 $\ddot{u}_2'(t)$ 與一樓絕對加速度 $\ddot{u}_1'(t)$ 相加代表基層剪力。頂樓與一樓間可視為單自由度系統，即一樓絕對加速做為地表加速度。亦可只使用頂樓與地表進行單自由度(SDOF)系統分析，可得大樓整體動態反應。

$$(\ddot{u}_1'(t) + \frac{m_2}{m_1} \ddot{u}_2'(t)) + \frac{c_1}{m_1} \dot{u}_1(t) + \frac{k_1}{m_1} u_1(t) = 0 \quad (7)$$



▲ 圖4 二自由度(2DOF)系統

依據前節耐震設計規範理念，本方法可於地震結束後，迅速提供包含地表加速度(PGA)、頂樓譜加速度(Sa)、基層剪力(Base Shear)、頂樓譜位移(Sd)、一樓層間相對位移、動態放大係數(DLF)、大樓與一樓勁度、大樓各方向第一自然週期等結果(示於表1)，協助技師在鑑定是否半倒或全倒前先有初步判斷依據，並安排鑑定順序。

▼ 表1 大樓結構安全快速診斷結果

各方向量測結果	診斷依據
地表加速度(PGA, gal)	小於地表加速度彈性設計值
頂樓譜加速度(Sa, gal)	小於譜加速度彈性設計值(Py/m)
基層剪力(Base Shear, gal)	小於基層剪力彈性設計值(V)
頂樓譜位移(Sd)/頂樓高度	層間相對側向位移角<0.5%
一樓層間相對位移/一樓高度	層間相對側向位移角<0.5%
動態放大係數(DLF)	彈性設計反應譜放大係數
大樓勁度(k/m, (rad/s) ²)	勁度折減率<30%
一樓勁度(k ₁ /m ₁ , (rad/s) ²)	勁度折減率<30%
第一模態自然週期(Tn ₁ , Hz)	自然週期增大率<15%
2016/09/20	37.7

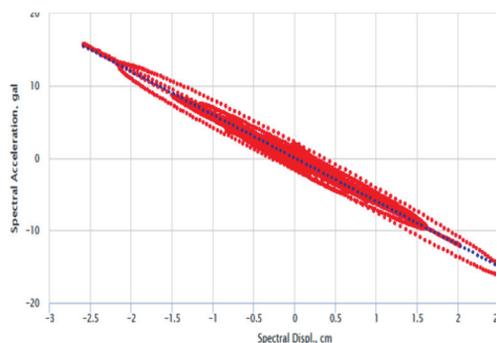
對於勁度之另一評估方式，可將譜加速度與譜位移的歷時資料，經由Butterworth帶通濾波器(Bandpass Filter)將低頻與高頻雜訊濾除後，進行線性回歸分析，其斜率即代表勁度(k/m)。

四、應用實例

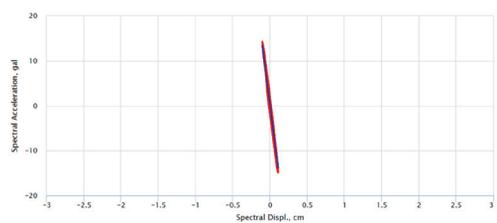
以26層鋼構大樓為例，在頂樓、一樓及地表裝有三聯科技的Palert Plus地震儀(圖5)，共紀錄到兩筆地震2018年10月23日及2019年4月18日，結構安全快速診斷結果示於表2。結果顯示，本方法可提供穩定的結果，大樓整體及一樓勁度值與第一筆地震結果差異約14.2%及10.4%，小於設定的30%，層間相對位移角小於0.5%，大樓無受損。



▲ 圖5 三聯科技的Palert Plus地震儀



(a)頂樓絕對加速度-屋頂地表位移



(b)基層剪力-一樓地表位移

▲ 圖6 頂樓及一樓容量反應譜

▼ 表2 26層鋼構大樓結構安全快速診斷結果

地震事件量測結果	20181023	20190418	診斷結果:OK
地表加速度(PGA, gal)	3.53	22.19	<85.7
頂樓譜加速度(Sa, gal)	6.76	34.57	<85.7
基層剪力(Base Shear, gal)	6.62	41.71	<85.7
頂樓譜位移(Sd)/頂樓高度(%)	0.015%	0.031%	<0.5%
一樓層間相對位移/一樓高度(%)	0.009%	0.015%	<0.5%
動態放大係數(DLF=Sa/PGA)	1.92	1.56	1.0
大樓勁度(k/m, (rad/s) ²):線性回歸	6.92	5.94	折減率 14.2%<30%
一樓勁度(k1/m1, (rad/s) ²):線性回歸	14253	127.7	折減率 10.4%<30%
第一模態自然週期(Tn1, sec)	2.389	2.578	增大率 7.9%<15%

五、結語

本文所建議的大樓結構安全快速診斷系統，只使用三個加速度規，所用分析方法與大樓耐震設計規範結合，可在地震後快速提供大樓結構與耐震設計值相關的數據，包含地表加速度(PGA)、頂樓譜加速度(Sa)、基層剪力(Base Shear)、頂樓譜位移(Sd)、一樓層間相對位移、動態放大係數(DLF)、大樓與一樓勁度、大樓各

方向第一模態自然週期，協助技師在鑑定是否半倒或全倒前先用初步判斷依據，並安排鑑定順序。此方法亦可應用於大樓內軟弱層或隔(減)震層，以早期評估結構物弱點或隔(減)震效果。

☒ 參考文獻

- [1] https://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/encyclopedia/eq070_more.htm，中央氣象局，2018年9月14日。
- [2] 謝志誠，九二一災後重建Q&A，全國民間災後重建聯盟，修訂版，2000年。
- [3] Carde, E. P., and Fanning, P., Vibration Based Condition Monitoring: A review, Structural Health Monitoring, Vol. 3(4), pp. 355-377, 2004.
- [4] Ulusoy, H. S., Kalkan, E., Fletcher, J. P. B., Friberg, P., Leith, W. K., Banga, K., Design and Implementation of A Structural Health Monitoring and Alerting System for Hospital Buildings in the United States, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012.
- [5] Loh, C.-H., Yu, I.-N., Lin, P.-Y., Chiang, H.-W., Lin, Y.-M., Seismic Safety Assessment of Structures using Recursive Subspace Identification, Report No. NCREC-18-024, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan, 2018.
- [6] 林錦隆、林其璋、林大鈞，建築結構健康監測之快篩方法，2018土木防災與環境永續研討會，2018。
- [7] 內政部，建築物耐震設計規範及解說，內政部100.1.19台內營字第0990810250號令，2011。
- [8] 鍾立來，結構耐震設計導論(八)：設計反應譜，台大開放式課程，2016。
- [9] Mazumder, R. K., and Ansary, M. A., Application of capacity spectrum method based on ATC40 and BNBC 1993, Int. J. of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, Vol.3, No.4, Oct. 2014.