

# 橋梁結構安全快速診斷

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<sup>[1]</sup>。尤其九二一地震造成的橋梁受損，嚴重損害有26座<sup>[2]</sup>。地震後，在如此大範圍且大數量的橋梁需工程人員進行地震後特殊檢測<sup>[3]</sup>的情況下，不只人力是很大議題，時效反而更重要。若能有監測資料協助工程人員將橋梁受損情況先分類，可使人力有效應用於先進行是否受損的判定，可避免有些民眾等不及判定便已進入橋梁，導致在餘震時倒塌造成死傷。國內外有很多橋梁結構安全監測系統<sup>[4-6]</sup>，但由於規劃的感測器數量多，資料量大，分析結果費時，成本高，工程人員不易使用等因素，且台灣幾萬座橋梁無法皆採用，只適合重要橋梁使用。故本文希望建議一套橋梁結構安全快速診斷系統，只使用三個加速度規，所用分析方法與橋梁耐震設計規範結合，地震後快速提供與橋梁耐震設計值相關的數據，協助工程人員在前往現地評估是否受損前先用初步判斷依據，並安排前往評估順序。

## 二、橋梁結構安全監測與耐震設計

國內橋梁耐震設計規範<sup>[7]</sup>靜力分析法中，等級II地震之水平設計地震力( $V_H$ )規定如下：

$$V_{II} = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left( \frac{S_{a,II}}{F_{u,II}} \right)_m W \quad (1)$$

其中，

$S_{a,II}$ 為等級II地震水平譜加速度係數，

$I$ 為用途係數，

$W$ 為橋梁振動單元靜載重，

$\alpha_y$ 為起始降伏地震力放大倍數，

$F_{u,II}$ 為等級II地震結構系統地震力折減係數。

此水平設計地震力為設計地震(475年回歸期)及近斷層效應作用下，橋梁在初始降伏時的彈性基層剪力(Base Shear)。 $S_{a,II}$ 即橋梁在假設阻尼比(Damping Ratio)的單自由度系統(Single-Degree-of-Freedom System, SDOF)承受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,  $S_a$ )。 $1.2\alpha_y F_{u,II}$ 表示對線彈性反應譜加速度的韌性折減。因此，橋梁振動單元靜載重( $W$ )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(Peak Ground Acceleration, 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 $0.4S_{II,S}$ 為設計地震PGA值， $S_{II,S}$ 為工址短週期之等級II地震水平譜加速度係數，即動態載重係數( $DLF=S_{a,II}/PGA$ )最大值為2.5。垂直地震力為水平地震力的2/3，對橋面板與橋墩之影響皆須考慮。

單自由度(Single Degree of Freedom, SDOF)系統在地震作用下的運動方程式為

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

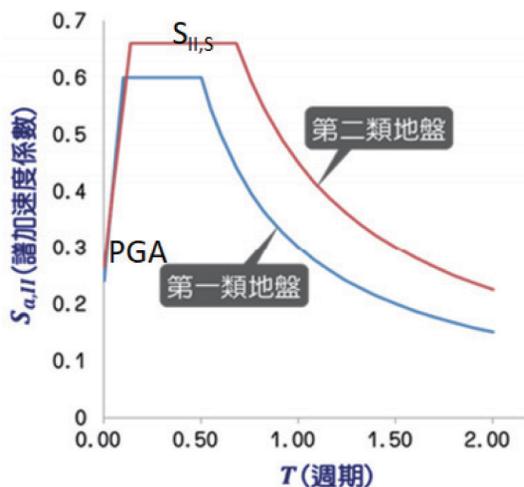
or  $\ddot{u}'(t) + \frac{4\pi h}{T} \dot{u}'(t) + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 u(t) = 0$

where (2)

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

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

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， $\ddot{u}_g(t)$ 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(Spectral Acceleration, Sa)為絕對加速度反應 $\ddot{u}'(t)$ 的最大值，譜位移(Spectral Displacement, Sd)為位移反應 $u(t)$ 的最大值。



▲ 圖1 彈性設計反應譜<sup>[8]</sup>

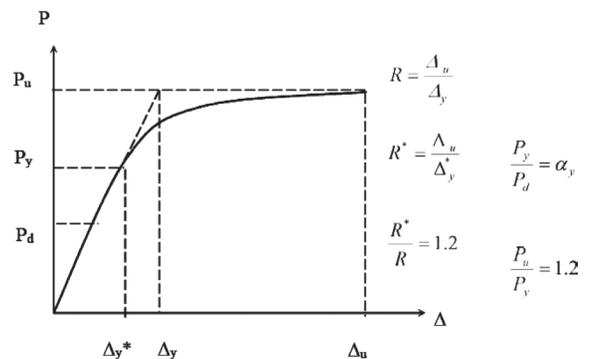
規範對加速度有規定，但相對位移無規定，只要求無落橋，即降伏地震力(圖2中Py)下位移最大值( $\Delta y^*$ )與橋墩高或橋面版比值無規定，可參考其他橋梁設計規範對撓度之限制。

圖中設計地震力Pd若為等級II地震降伏之設計地震力，則降伏地震力與其差異為 $\alpha_y$ 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, Sd)。

等級I地震之水平設計地震力 $V_I$ (一般工址與近斷層區域)

$$V_I = \frac{IS_{a,II}}{3.25\alpha_y} W \quad (3)$$

相對側向位移限制之地震力無規定。



▲ 圖2 橋梁設計地震力Pd、降伏地震力Py、極限地震力Pu與韌性容量R<sup>[7]</sup>

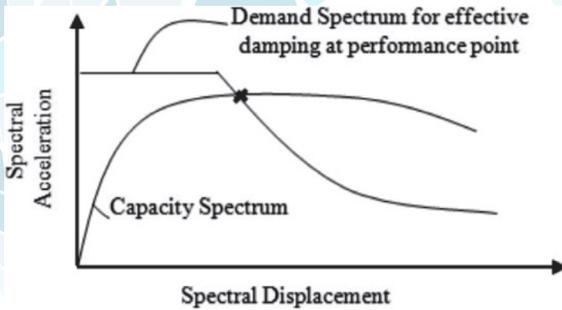
譜加速度(Sa)與譜位移(Sd)之關係可構建容量反應譜(Capacity Spectrum)如圖3所示，單自由度系統在線彈性行為時，由公式(2)可知當位移為最大值(Sd)時，速度為零，此時絕對加速度(可用Sa來近似)與譜位移(Sd)為直線關係，其關係為2

$$\frac{Sa}{Sd} \approx \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{k}{m} \quad (4)$$

因此，結構物單位質量的勁度(k/m)可用譜加速度(Sa)(或採用與譜位移同一時間點的絕對加速度值)與譜位移(Sd)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(Sa)與譜位移(Sd)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。由於勁度為自然頻率的平方，對結構物受損較敏感。



▲ 圖3 容量反應譜<sup>[9]</sup>

### 三、橋梁結構安全快速診斷

本方法採用三個加速度規，分別安裝於基面、橋墩頂及橋面板最大位移點，安裝位置盡量靠近軸心，以降低扭轉的影響。分別用二個單自由度系統來模擬。

橋墩頂的運動方程式如下，橋墩頂絕對加速度 $\ddot{u}_1^t(t)$ 代表基層剪力。橋墩頂與基面間可視為單自由度系統，即基面絕對加速做為地表加速度，可得橋墩整體動態反應。

$$\ddot{u}_1^t(t) + \frac{c_1}{m_1} \dot{u}_1(t) + \frac{k_1}{m_1} u_1(t) = 0 \quad (5)$$

橋面板的運動方程式如下，橋面板絕對加速度 $\ddot{u}_2^t(t)$ 代表基層剪力。橋面板與橋墩頂間可視為單自由度系統，即橋墩頂絕對加速做為地表加速度，可得橋面板整體動態反應。

$$\ddot{u}_2^t(t) + \frac{c_2}{m_2} \dot{u}_2(t) + \frac{k_2}{m_2} u_2(t) = 0 \quad (6)$$

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)、橋墩頂譜加速度(Sa)、橋面板譜加速度(Sa)、橋

墩頂譜位移(Sd)、橋面板譜位移(Sd)、橋墩頂動態放大係數(DLF)、橋面板動態放大係數(DLF)、橋墩與橋面板勁度、橋墩與橋面板各方向第一自然週期等結果(示於表1)，協助工程人員在評估是否半倒前先行初步判斷依據，並安排前往評估順序。

對於交通流量大橋梁，譜加速度與譜位移會受車載之影響，其影響程度需經長期監測結果進行修正。

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)<sup>[10]</sup>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)。

▼ 表1 橋梁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
橋墩頂譜加速度(Sa, gal)	小於橋墩頂譜加速度彈性設計值(Py/m)
橋面板譜加速度(Sa, gal)	小於橋面板譜加速度彈性設計值(Py/m)
橋墩頂譜位移(Sd)/橋墩高度	小於撓度限制
橋面板譜位移(Sd)/橋面板跨度	小於撓度限制
橋墩頂動態放大係數(DLF)	彈性設計反應譜放大係數
橋面板動態放大係數(DLF)	彈性設計反應譜放大係數
橋墩勁度(k1/m1, (rad/s) <sup>2</sup> )	勁度折減率<30%
橋面板勁度(k2/m2, (rad/s) <sup>2</sup> )	勁度折減率<30%
橋墩第一模態自然週期(Tn, Hz)	自然週期增大率<15%
橋面板第一模態自然週期(Tn, Hz)	自然週期增大率<15%

#### 四、結語

本文所建議的橋梁結構安全快速診斷系統，只使用三個加速度計，所用分析方法與橋梁耐震設計規範結合，可在地震後快速提供橋梁結構與耐震設計值相關的數據，包含地表加速度(PGA)、橋墩頂與橋面板譜加速度(Sa)、譜位移(Sd)、動態放大係數(DLF)、勁度、各方向第一模態自然週期，協助工程人員在前往現地評估是否受損前先有初步判斷依據，並安排評估順序。對於橋梁超載、下陷、腐蝕、疲勞、老化等問題，則需搭配其他感測器及相關檢測方法。

#### ✉ 參考文獻

- [1] [https://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/encyclopedia/eq070\\_more.htm](https://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/encyclopedia/eq070_more.htm)，中央氣象局，2018年9月14日。
- [2] 國家地震工程研究中心，九二一集集大地震全面勘災精簡報告，NCREE-99-033，1999年。
- [3] 交通部，公路橋梁檢測及補強規範，2018。
- [4] Collins, J., Mullins, G., Lewis, C., Winters, D., State of the Practice and Art for Structural Health Monitoring of Bridge Substructures, Report No. FHWA-HRT-09-040, FHWA, 2014.
- [5] 張嘉峰、邱信諺、賴澄燦、鄭丁興，橋梁健診系統建置與評估，土木水利第四十三卷第一期，2016。
- [6] 宋裕祺、張國鎮等，橋梁監測與結構健康診斷，土木水利第四十五卷第五期，2018。
- [7] 交通部，公路橋梁耐震設計規範，2018。
- [8] 曾榮川等，公路橋梁耐震性能設計規範草案案例研究，交通部臺灣區國道新建工程局，2015。
- [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.
- [10] Hollos, S., and Hollis, J. R., Recursive Digital Filters: A Concise Guide, Abrazol Publishing, 2014.