

利用反復式模型改良法於結構系統健康診斷

林正紋 黃志偉 蔡文賢

逢甲大學土木工程學系

台中市西屯區文華路 100 號

摘要

本文對於結構系統承受地震力之健康診斷，提出統計信心區間模型改良 (refinement) 法，此法係指使用估算結構參數的 95% 信心區間，在最小平方迴歸中判斷其統計意義。當參數之信心區間包含「零」值時，在統計上便足以刪除該參數，因此反覆此參數篩選程序，直至所有參數之統計意義無法更進一步地被改善，剩餘的參數將為改良之模型。另外，為了確認結構參數的 95% 信心區間為最適當的選擇，本文將其與 90% 及 99% 的信心區間做一比較測試。這項新發展的模型改良法，已執行於多變數多項展開式之級數模型 (線性、泰勒級數以及冪級數模型) 中，為安全評估提供了更精確的結構辨識。

關鍵詞：統計信心區間，模型改良法，健康診斷

Health Diagnosis of Structures Using a Repetitive Model Refinement Approach

JENG-WEN LIN, CHIH-WEI HUANG and WEN-HSIEN TSAI

Department of Civil Engineering, Feng Chia University

No. 100 Wenhwa Rd., Seatwen, Taichung, Taiwan 40724, R.O.C.

ABSTRACT

This research proposes a statistical confidence interval-based model refinement approach for the health diagnosis of structural systems subjected to seismic excitations. The proposed approach uses the 95% confidence interval of the estimated structural parameters to determine their statistical significance in a least-squares regression setting. When the confidence interval of the parameters covers the “null” value, it is statistically sustainable to truncate them. Thus, the remaining parameters repetitively undergo such a sifting process for model refinement until all statistical significance cannot be further improved. Other confidence intervals, such as the 90% and 99%, of structural parameters are also tested for comparison and validation purposes. This newly developed model-refinement approach is implemented for the developed series models of multivariable polynomial expansions: the linear, as well as the Taylor and the power series models, thereby leading to a more accurate identification of structures for safety assessment.

Key Words: statistical confidence interval, model refinement approach, health diagnosis

一、前言

公共建築之結構健康監測與損害偵查的系統辨識，已漸漸走向世界研究活動的最前端。對於公共安全問題而言，如地震等之天然災害使得建築物及橋樑的監測與偵查是相當重要的，而未來將因基礎建設系統的老化問題，會將其重要性凸顯出來。

從過去的研究中，可以發現許多由數據資料發展出的線性模型用於大型公共結構的健康監測及損害偵查法中，由於線性的特性限制了其效用 [5]，所以為了協助損害之評估，需創造出非線性數學模型的方法。許多結構物都需要非線性模型 [1, 2]，即使在其他方面的線性結構，隨著結構中遲滯影響的傳播與演變，當其損害進展至非線性時，非線性模型也就變得很重要。雖然近十年內已出現各種不同版本的非線性系統辨識，如 Koh et al. [4]、Smyth et al. [10] 與 Sohn and Law [11]，但仍面臨重大的挑戰。可能的模型之不確定性、樣本誤差及其他的量測誤差來源，均影響了辨識計劃的成功 [2]。由於環境負載的隨機特性，在一個機率的架構底下，其分析辨識之方法學，會得到較純熟的結果。

本研究提出統計信心區間模型改良法，並且為了結構系統的健康監測，將此方法應用於已開發的幕級數模型 [6] 中，在此關心的是，非線性結構系統承受地震力之突然損害，亦即整體結構區域辨識而無中間階段之量測。在實驗室中對鏈型結構系統（如圖 1 之剪力型態建築物）模擬由地震引起的地表動作，來評估量測結構物的加速度及速度之時間歷時反應，而對應的結構物位移，則由所量測的速度積分後求得。

本研究實驗流程如下：將一座三層樓 30% 縮尺鋼構架置於逢甲大學自製振動台上（如圖 1），使其承受一維方向的激發力（以 El-Centro (California) 與 Chi-Chi (TCU084, Taiwan) 兩地震引起的加速度為主信號），並量測鋼構架每一層樓之加速度及速度的時間歷時反應。利用非線性分析軟體 (NSAT) [12] 建構此三層縮尺鋼構架模型，並經過 NSAT 計算後求得每層樓之勁度。由上述實驗所量測得到結構物速度之時間歷時反應，對其積分後求得對應之結構位移。接著將回復力 $r(t)$ 、鋼構架之位移 $u(t)$ 、量測之鋼構架速度 $\dot{u}(t)$ 及加速度 $\ddot{u}(t)$ 代入已發展之幕級數模型，反復執行迴歸分析與信心區間篩選參數之程序，最後會得到一個最終改良模型，此模型中的係數 a_2 ，即為估算之結構勁度。最後以 NSAT 之結果為標準，即可計算出以模型改良法估算所得結構勁度



圖 1. 一個基準結構系統的問題

與 NSAT 分析結果之相對誤差。

二、利用非線性應力分析技術估算勁度

考慮一個簡化的基準結構系統問題（圖 1：三層樓 30% 縮尺鋼構架），其承受一維方向的激發力。以 1940 年 El-Centro (California) 與 1999 年 Chi-Chi (TCU084, Taiwan) 兩地震引起的加速度為主信號（1201 個資料點， $\Delta t=0.0005$ 秒），來評估結構物的反應。該結構物在每層樓（自由度）的配置包含樓版、樑、柱，由結構幾何學及材料型態，獲得結構質量的估算，經過簡單的計算後，一、二、三樓的質量分別為 530.65 公斤、530.65 公斤與 514.67 公斤。

逢甲大學蔡崇興教授首先發展出非線性應力分析技術 (NSAT) 的電腦程式來估算結構參數（如勁度）做結構分析，比較特別的是它能夠分析結構物在線性或非線性範圍內，應力—應變隨時間變化的動力特性。利用 NSAT 電腦程式，執行靜態分析以估算每層樓的勁度（於結構物最高層處給一單位側向力當作輸入，則可自動計算出每層樓間的相對

位移)，估算出一、二、三樓之勁度分別為 1652892.562 N/m、1524390.244 N/m 及 1582278.481 N/m。

然而因使用靜態分析法無法直接獲得相對速度，所以其他的結構特性（如阻尼係數）不能以同樣的方法來估算，因此提出替代的選擇（於多項迴歸中，以統計模型改良法進行結構系統非破壞評估）。此新發展的模型改良法，可解釋模型的不確定性，且由於模型的簡化，其可應用於廣泛多樣化的級數模型，並能在結構震動控制中成爲一項經濟的設計。

三、結構冪級數模型化

由於結構系統辨識之效能，高度依賴所採用的系統模型，因此必須建立一個適當且可「最佳」描述系統行爲之模型。在描述系統特徵方面，Juditsky 等人 [3] 指出，非線性黑盒子模型化程序之品質，在於所欲辨識之模型的「表現次」（階）（越多的參數數目用於描述模型，越有彈性的爲近似值）與量測（或然的）誤差（與參數數目成比例）間，總是某種程度的妥協結果。此折衷辦法引導本研究尋找一個初始有彈性之級數模型，並且接著改良此模型至無法再進一步地簡化。

此冪級數模型化程序 [6]，用來表示非線性結構系統之行爲（如剪力型態的建築物）。爲了方便起見，考慮一個單自由度的非線性結構，其運動方程式可表示爲：

$$m\ddot{u}(t) + r(u(t), \dot{u}(t), t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

其中 m 表結構質量， $u(t)$ 表結構位移， $\dot{u}(t)$ 表結構速度， $\ddot{u}(t)$ 表結構加速度， $\ddot{u}_g(t)$ 表地表加速度， t 表時間， $r(t)$ 表一時間函數之回復力。回復力隨時間的變化爲一內含 $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $\ddot{u}(t)$ 與 $r(t)$ 的四變數函數（ $r(u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t), r(t), t)$ ），由於結構的遲滯， \dot{r} 可表示爲：

$$\dot{r} = \sum_{i=1}^N (a_{1i}u + a_{2i}\dot{u} + a_{3i}\ddot{u} + a_{4i}r)^i \quad (2)$$

其中 N 表需要的最高階層，且其通常爲使用者自定 [13]。利用此回復力冪級數表示式，將可能重現如 Duffing 與 van der Pole 之非線性振動模型，且可能重現主要的 Bouc-Wen 模型，這些均爲工程應用中常見之模型 [8]。在級數模型中，通常選擇使用三階，而且一個高階模型大概很可能只顯

示出微小的改善 [2]，其三階冪級數模型可表示爲：

$$\begin{aligned} N = 3, \\ \dot{r} = (a_1u + a_2\dot{u} + a_3\ddot{u} + a_4r) + \\ \left(a_5u^2 + a_6\dot{u}^2 + a_7\ddot{u}^2 + a_8r^2 + \right. \\ \left. a_9u\dot{u} + a_{10}u\ddot{u} + a_{11}ur + a_{12}u\dot{u}\dot{u} + a_{13}\dot{u}r + a_{14}\ddot{u}r \right) + \\ \left(a_{15}u^3 + a_{16}\dot{u}^3 + a_{17}\ddot{u}^3 + a_{18}r^3 + \right. \\ \left. a_{19}u^2\dot{u} + a_{20}u^2\ddot{u} + a_{21}u^2r + a_{22}\dot{u}^2u + a_{23}\dot{u}^2\ddot{u} + a_{24}\dot{u}^2r + \right. \\ \left. a_{25}\ddot{u}^2u + a_{26}\ddot{u}^2\dot{u} + a_{27}\ddot{u}^2r + a_{28}r^2u + a_{29}r^2\dot{u} + a_{30}r^2\ddot{u} + \right. \\ \left. a_{31}u\dot{u}\ddot{u} + a_{32}u\dot{u}r + a_{33}u\ddot{u}r + a_{34}\dot{u}\ddot{u}r \right) \end{aligned} \quad (3)$$

且由（3）式中取出的線性項，建立一個線性級數模型，可表示爲：

$$\dot{r} = (a_1u + a_2\dot{u} + a_3\ddot{u} + a_4r) \quad (4)$$

此外，由（3）式中移除非線性之交錯項，形成泰勒級數模型，可表示爲：

$$\begin{aligned} \dot{r} = (a_1u + a_2\dot{u} + a_3\ddot{u} + a_4r) + (a_5u^2 + a_6\dot{u}^2 + a_7\ddot{u}^2 + a_8r^2) + \\ (a_{15}u^3 + a_{16}\dot{u}^3 + a_{17}\ddot{u}^3 + a_{18}r^3) \end{aligned} \quad (5)$$

四、模型改良法與勁度估算

本研究利用信心區間檢定與 Matlab 軟體之迴歸（regress）程式，提出一個改良已開發的冪級數模型（例如至三階）之一般程序。在多項迴歸中，檢定估算的結構參數之 95% 信心區間，以判斷其統計意義。任一水準的信心區間 C 對於一個參數而言，藉由一種方法並從樣本資料中做一個區間計算，該方法有可能產生一個包含參數真值的信心區間 C ，如圖 2 [7]。選擇 95% 信心區間是因爲：（1）慣例；（2）越高的信心區間導致越嚴謹的參數選擇，因此有較小的或然率包含非線性參數，這樣的情形一般而言，對或多或少有非線性行爲的系統並不好。

假如參數的信心區間包含「零」值，在統計意義上移除對應的參數項，而維持信心區間不包含零的參數。反復執行迴歸與分析被篩選參數的信心區間結果之程序，以改良模型，直到所有參數於統計上皆成立，也就是在模型改良法結束後，所有估算參數之 95% 信心區間均不包含零值。

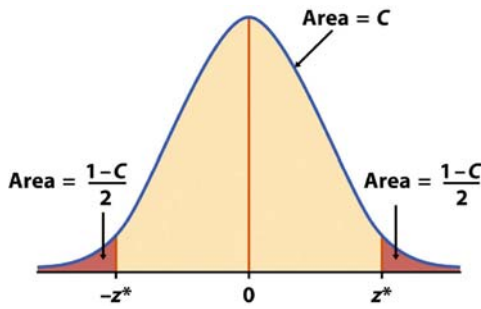


圖 2. 信心區間 C 為標準常態曲線下，-z*與 z*間的區域 [7]

為了驗證本文提出之模型改良法是有效的，考慮遲滯結構的基準問題（圖 1）。其進行多項迴歸之具體步驟如下所述，依步驟（一）、（二）、（三）、（四）執行順序：

步驟（一）將數據 $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $\ddot{u}(t)$ 與 $r(t)$ 代入公式（2）之幕級數模型；

步驟（二）執行多項迴歸分析 → 觀察參數之信心區間；

步驟（三）假如參數之信心區間包含“零”值，則移除所對應之參數項，並跳至步驟（二）反復執行；假如參數之信心區間沒有包含“零”值，則跳至步驟（四）；

步驟（四）得到最終之改良模型。

在多項迴歸中，假設無法獲得結構參數大小的初始資訊，而且為未知的模型型態。表 1 列出，在 El-Centro 地震下，結構物一樓以幕級數模型進行多項迴歸的結果。y 表回復力隨時間的變化，而 x_j 項對應到（2）式中的參數項 a_j 。R-square 值 [7] 表示，y 值中變化的百分比（86.76%），即多項最小平方迴歸中 x_j ($j=1, 2, 3, \dots, 34$) 能夠解釋 y 的程度。

保留 95% 信心區間不包含零值的估算參數項，且再次執行多項迴歸，將可得到表 2 之結果。因此，該項統計篩選程序，在第一輪中，保留對結構回復力有貢獻的參數。可對當前改良後之模型繼續執行如上述的篩選程序，直到其統計意義無法更進一步的被改善，如此將大大地降低了辨識誤差。這是因為每次均移除了沒有貢獻的項，而實際有貢獻的項，則賦予更多的統計意義，如結果顯示（表 1、2 中的 x2 參數），其 95% 信心區間的範圍縮短了。一方面，就精確性而論，相當於變化的範圍縮短了；另一方面，就正確性而論，連同簡單隨機抽樣無偏差實驗設計，此法篩選參數逼近其實際值並無偏頗。

表 1. El-Centro 地震下，基準結構（圖 1）一樓之幕級數模型多項迴歸

R-square = 0.8676

y (\dot{r})	Coef.	[95% Conf. Interval]	
x1 (u)	6.90E+05	-6.14E+05	1.99E+06
x2 (\dot{u})	1.71E+06	1.65E+06	1.77E+06
x3 (\ddot{u})	-6.32E+03	-1.17E+04	-917.1361
x4 (r)	1.2725	-1.6862	4.2311
x5 (u^2)	0	0	0
x6 (\dot{u}^2)	5.18E+06	5.26E+05	9.84E+06
x7 (\ddot{u}^2)	-7.69E+03	-2.26E+04	7.20E+03
x8 (r^2)	-0.0012	-0.0068	0.0043
x9 ($u\dot{u}$)	0	0	0
x10 ($u\ddot{u}$)	0	0	0
x11 (ur)	-3.62E+03	-7.30E+03	64.1619
x12 ($\dot{u}\dot{u}$)	7.75E+04	-2.17E+05	3.72E+05
x13 ($\dot{u}r$)	-41.9171	-230.1198	146.2857
x14 ($\ddot{u}r$)	-9.0846	-22.4924	4.3232
x15 (u^3)	0	0	0
x16 (\dot{u}^3)	0	0	0
x17 (\ddot{u}^3)	-8.86E+03	-8.65E+04	6.88E+04
x18 (r^3)	8.61E-06	-4.53E-07	1.77E-05
x19 ($u^2\dot{u}$)	0	0	0
x20 ($u^2\ddot{u}$)	0	0	0
x21 (u^2r)	-4.71E+06	-7.89E+06	-1.54E+06
x22 (\dot{u}^2u)	0	0	0
x23 ($\dot{u}^2\dot{u}$)	0	0	0
x24 (\dot{u}^2r)	2.06E+04	9.14E+03	3.20E+04
x25 (\ddot{u}^2u)	0	0	0
x26 ($\ddot{u}^2\dot{u}$)	-2.89E+06	-4.64E+06	-1.14E+06
x27 (\ddot{u}^2r)	-11.5366	-99.2053	76.1320
x28 (r^2u)	-0.7761	-7.6149	6.0627
x29 ($r^2\dot{u}$)	0.0228	-0.4561	0.5017
x30 ($r^2\ddot{u}$)	0.0066	-0.0345	0.0476
x31 ($u\dot{u}\dot{u}$)	0	0	0
x32 ($u\dot{u}r$)	-6.02E+04	-2.72E+05	1.52E+05
x33 ($u\ddot{u}r$)	-8.73E+03	-1.85E+04	1.08E+03
x34 ($\dot{u}\ddot{u}r$)	-1.78E+03	-3.29E+03	-276.9786
_cons	-234.2783	-1.28E+03	807.5441

繼續反復此篩選程序，將會依序得到表 3、4、5 之結果。表 5 清楚的顯示出，最後改良的模型僅僅只有 3 項，同時模型也從原始的樣子大大地被簡化了，而仍維持著高的 R-square 值。事實上，R-square 值從初始到最後的改良模型，並沒有減少很多，僅在 1% 的範圍內，這足以成爲一個好的模型改良法 [7]。被簡化的模型，不僅有益於大間距多自由度之系統辨識及其相關參數之估算，而且也益於系統震動控制之設計。

表 2. 第一輪，改良冪級數模型之多項迴歸

R-square = 0.8580

y	Coef.	[95% Conf. Interval]
x2	1.69E+06	1.64E+06 1.74E+06
x3	-1.28E+04	-1.48E+04 -1.09E+04
x6	2.90E+06	-1.26E+06 7.06E+06
x21	2.33E+05	-5.06E+05 9.72E+05
x24	2.32E+04	1.39E+04 3.25E+04
x26	-1.38E+06	-2.75E+06 -1.06E+04
x34	-786.1098	-1.54E+03 -27.6879
_cons	-134.8043	-676.2847 406.6762

表 3. 第二輪，改良冪級數模型之多項迴歸

R-square = 0.8577

y	Coef.	[95% Conf. Interval]
x2	1.69E+06	1.64E+06 1.74E+06
x3	-1.31E+04	-1.48E+04 -1.14E+04
x24	2.39E+04	1.47E+04 3.32E+04
x26	-1.35E+06	-2.72E+06 1.10E+04
x34	-772.4205	-1.53E+03 -15.2043
_cons	55.6485	-294.7011 405.9982

表 4. 第三輪，改良冪級數模型之多項迴歸

R-square = 0.8572

y	Coef.	[95% Conf. Interval]
x2	1.67E+06	1.63E+06 1.72E+06
x3	-1.32E+04	-1.49E+04 -1.15E+04
x24	2.23E+04	1.32E+04 3.13E+04
x34	-100.6358	-439.7029 238.4312
_cons	46.9317	-303.7153 397.5787

表 5. 第四輪，改良冪級數模型之多項迴歸

R-square = 0.8572

y	Coef.	[95% Conf. Interval]
x2	1.68E+06	1.64E+06 1.72E+06
x3	-1.32E+04	-1.49E+04 -1.15E+04
x24	2.19E+04	1.29E+04 3.09E+04
_cons	46.6801	-303.8708 397.2309

表 5 中，最後估算的參數值對應到 x2 項，也就是結構勁度，其值為 1.6828×10^6 ，伴隨的 95% 信心區間範圍為 1.6428×10^6 到 1.7228×10^6 。與 NSAT 的結果（1652892.562 N/m）比較，線性勁度參數為好的辨識，其伴隨的 95% 信心區間也包含了 NSAT 的結果。由比較顯示出，提出之模型改良法的統計結果，並沒有與參數估算的正確路徑脫軌，事實上還能滿足涵蓋樣本或模型的誤差。以 NSAT 之結果做為比較標準，兩方法間估算勁度的相對誤差，從初始的冪

級數模型（3.26%）降低至最終的改良模型（1.81%），如表 6 所示。事實上，95% 信心區間模型改良法，於獲取結構特性上不太可能失敗（在一個樣本資料中，會失敗的機率僅僅只有 5%（1-95%）[7]）。

對於無法得到結構模型型態之事前資訊的隨機模型，提出之模型改良法亦可應用於線性、泰勒級數（無交錯項的冪級數（2）式）之級數模型。結果證明與使用 NSAT 模擬模型比較時，統計上改良之冪級數模型能得到最小的相對誤差。表 6 與表 7 列出三層樓基準結構（圖 1）之勁度辨識，以 El-Centro 與 TCU084 之震動資料，分別使用於 NSAT 與多項迴歸中，並在多項迴歸分析中對於線性、泰勒及冪級數模型使用提出的模型改良法。以 NSAT 的結果為標準，即可求得相對誤差，平均相對誤差也分別列於表 6 與表 7 的最後一行。總平均相對誤差，如表 8 所示，意味著與 NSAT 的結果比較時，於勁度估算中改良的冪級數模型有最小的相對誤差（4.18%）。從 El-Centro 與 TCU084 兩激發力均為獨立的 5% 失敗機率測試案例中，其產生的結果顯示出，的確 95% 信心區間法僅僅只有 0.25%（5%*5%）的失敗機率。

另外，為了與其他的信心區間比較，引進了 Constant Forgetting Factor (=0.99) [9] 的方法於多項迴歸中來估算勁度，分別於 90%、95% 及 99% 信心區間中進行測試，最後得到的結果，95% 信心區間的總平均相對誤差仍為最低（圖 3）（能夠更進一步將改良的冪級數模型的相對誤差 4.18% 降低至 3.90%）。

五、結論

對於非線性結構系統之健康診斷，本文提出一個有效的 95% 信心區間模型改良法，其效力已顯示於結構勁度之估算。利用非線性應力分析技術（NSAT）之結果為標準，於多項迴歸中，從初始發展的冪級數模型至統計的改良模型，相對誤差已經被降低。以回復力隨時間變化之函數（可使用加速度、速度、位移及回復力本身之多變數多項展開式來解釋）及其在無法得到結構物型態之事前資訊的條件下，使用這樣的模式建立初始的冪級數模型，連帶線性級數與泰勒級數模型也可以被建立。為了成功的辨識，於每一輪多項迴歸中，反復地移除冪級數模型中多餘的參數，直到所有被篩選的參數均維持其統計意義。

表 6. 三層樓基準結構勁度辨識結果之列表，以 El-Centro 之震動資料

El-Centro	1F		2F		3F		
NSAT	1652892.562		1524390.244		1582278.481		
	Multiple Regression	Relative Error	Multiple Regression	Relative Error	Multiple Regression	Relative Error	Average Relative Error
Linear	1675778.039	1.38%	1447016.977	5.08%	1495721.423	5.47%	3.98%
Refined Linear	1673535.628	1.25%	1452847.669	4.69%	1489493.423	5.86%	3.94%
Taylor Series	1677831.638	1.51%	1444270.142	5.26%	1494141.808	5.57%	4.11%
Refined Taylor Series	1673535.628	1.25%	1453215.954	4.67%	1498155.916	5.32%	3.74%
Power Series	1706818.785	3.26%	1426130.481	6.45%	1533070.090	3.11%	4.27%
Refined Power Series	1682763.571	1.81%	1436118.001	5.79%	1501463.290	5.11%	4.24%
Components		El-Centro 1F		El-Centro 2F		El-Centro 3F	
Linear		y x1 x2 x3 x4					
Refined Linear		y x2 x3 x4		y x2 x3 x4		y x1 x2 x3	
Taylor Series		y x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x15 x16 x17 x18					
Refined Taylor Series		y x2 x3 x4		y x2 x3 x4 x18		y x1 x2 x3 x18	
Power Series		y x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10 x11 x12 x13 x14 x15 x16 x17 x18 x19 x20 x21 x22 x23 x24 x25 x26 x27 x28 x29 x30 x31 x32 x33 x34					
Refined Power Series		y x2 x3 x24		y x2 x3		y x2 x3	

表 7. 三層樓基準結構勁度辨識結果之列表，以 TCU084 之震動資料

TCU084	1F		2F		3F		
NSAT	1652892.562		1524390.244		1582278.481		
	Multiple Regression	Relative Error	Multiple Regression	Relative Error	Multiple Regression	Relative Error	Average Relative Error
Linear	1457682.642	11.81%	1473249.961	3.35%	1531034.535	3.24%	6.13%
Refined Linear	1455331.312	11.95%	1475252.499	3.22%	1531034.535	3.24%	6.14%
Taylor Series	1466565.594	11.27%	1475982.273	3.18%	1525790.162	3.57%	6.01%
Refined Taylor Series	1461870.337	11.56%	1475862.919	3.18%	1523403.537	3.72%	6.15%
Power Series	1562098.679	5.49%	1467352.541	3.74%	1490372.498	5.81%	5.01%
Refined Power Series	1554378.400	5.96%	1475252.499	3.22%	1531420.489	3.21%	4.13%
Components		TCU084 1F		TCU084 2F		TCU084 3F	
Linear		y x1 x2 x3 x4					
Refined Linear		y x2 x3 x4		y x2 x3 x4		y x1 x2 x3 x4	
Taylor Series		y x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x15 x16 x17 x18					
Refined Taylor Series		y x2 x4 x17		y x2 x3 x4 x18		y x1 x2 x3 x8 x18	
Power Series		y x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10 x11 x12 x13 x14 x15 x16 x17 x18 x19 x20 x21 x22 x23 x24 x25 x26 x27 x28 x29 x30 x31 x32 x33 x34					
Refined Power Series		y x2 x3 x12 x13 x18 x21 x27 x29 x30 x34		y x2 x3 x4		y x2 x3	

表 8. 總平均相對誤差指出，改良的冪級數模型有最小的相對誤差（4.18%）

	EI-Centro	TCU084	Total Average Relative Error
Linear	3.98%	6.13%	5.06%
Refined Linear	3.94%	6.14%	5.04%
Taylor Series	4.11%	6.01%	5.06%
Refined Taylor Series	3.74%	6.15%	4.95%
Power Series	4.27%	5.01%	4.64%
Refined Power Series	4.24%	4.13%	4.18%

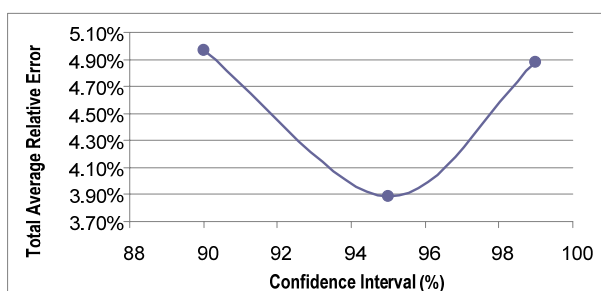


圖 3. 分別於 90%、95% 及 99% 信心區間中進行測試的結果

與 NSAT 結果比較，證明了統計改良模型的結構勁度估算誤差，可降低至約百分之四的相對誤差。結構參數，如勁度，不僅正確地被估算，而且其信心區間也包含了參數實際值，這說明了可能的模型之不確定性、樣本誤差及其他的量測誤差來源。從初始模型至模型改良之整體辨識方法，將可為安全評估提供直接可靠的結構現況指標。辨識結果亦可作為損害的結構或老化的基礎建設之未來檢驗方針，這可幫助判斷結構物修復或替換的優先處理順序。

誌謝

非常感謝行政院國家科學委員會贊助（research grant NSC 95-2221-E-035-111）此篇研究論文。

參考文獻

- Caffrey, J. P., S. F. Masri, F. Tasbihgoo, A. W. Smyth and A. G. Chassiakos (2004) A re-configurable apparatus for complex nonlinear dynamic systems. *Nonlinear Dynamics*, 36(2-4), 181-201.
- Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung and H. H. Liu (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis.

- Procedures of the Royal Society of London*, 454, 903-995.
- Juditsky, A., H. Hjalmarsson, A. Benveniste, B. Delyon, L. Ljung, J. Sjöberg and Q. Zhang (1995) Nonlinear black-box models in system identification: Mathematical foundations. *Automatica*, 31(12), 1725-1750.
- Koh, C. G., Y. F. Chen and C. Y. Liaw (2003) A hybrid computational strategy for identification of structural parameters. *Computers and Structures*, 81, 107-117.
- Lin, J. W. (2001) *Adaptive Algorithms for the Identification of Nonlinear Structural Systems*. Ph.D. Thesis, Columbia University, New York.
- Lin, J. W. and R. Betti (2004) On-line identification and damage detection in non-linear structural systems using a variable forgetting factor approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(4), 419-444.
- Moore, D. S. and G. P. McCabe (2005) *Introduction to the Practice of Statistics*, W.H. Freeman and Company, New York.
- Park, Y. J., Y. K. Wen and A. H. S. Ang (1986) Random vibration of hysteretic systems under bi-directional ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14, 543-557.
- Smyth, A. W., S. F. Masri, A. G. Chassiakos and T. K. Caughey (1999) On-line parametric identification of MDOF nonlinear hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 125, 133-142.
- Smyth, A. W., S. F. Masri, E. B. Kosmatopoulos, A. G. Chassiakos and T. K. Caughey (2002) Development of adaptive modeling techniques for non-linear hysteretic systems. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 37(8), 1435-1451.
- Sohn, H. and K. H. Law (1997) A Bayesian probabilistic approach for structure damage detection. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 1259-1281.
- Tsai, C. S. (1996) *Nonlinear Stress Analysis Technique-NSAT*. Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.
- Wen, Y. K. (1989) Methods of random vibration for inelastic structures. *Applied Mechanics Review*, 42(2), 39-52.

收件：96.04.10 修正：96.11.14 接受：96.12.26