

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫二：高層建築風力與結構互制之系統識別及振動舒適 度研究(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2745-E-032-007-URD

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：吳重成

計畫參與人員：林勝偉,莊鎮宇

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 11 月 18 日

高層建築風力與結構互制之系統識別及振動舒適性研究(1/3)

期中報告

1. 前言

台灣屬典型海島型氣候，夏季受太平洋環流影響，颱風頻仍，冬季則受東北季風侵襲，東北部首當其衝，對建築物及公共建設頗具潛在威脅(參考文獻 1)，雖然中低層建築之結構要求大都由地震力主控，但對於高層建築之結構要求則超越耐震設計規定而由風力主導。再者，隨材料科技之日新月異，質量輕且強度高之材料陸續被引進土木及建築業，高層建築及高塔結構愈形普遍；馬來西亞吉隆坡的新地標雙塔大樓、台北新光大樓、高雄東帝士國際廣場大樓及目前即將完工的 101 層台北國際金融中心大樓即為著名代表例子。這些土木結構因重量及勁度減小使得風力對其影響相對愈形顯著。

目前土木建築所遭遇的風載效應，比較明顯者包括抖振及渦散現象，顫振、扭轉發散、馳振等其他現象則較不明顯。一般風力規範僅著重考慮亂流引起的抖振效應，依亂流風力之隨機特性將平均值當中心點分成兩部份之加成：即平均風力加擾動風力，前者為靜態作用力，可依靜力分析法進行分析，後者之影響則以隨機振動法進行分析。制定風力規範時則將擾動風力對結構之影響以機率概念轉換成等值靜態風力，加進平均風力後定義一所謂"陣風反應因子"，以擬靜載重方式規範風力大小。國內有關建築物設計風力規範之最新建議(參考文獻 3)對於建築物抖振效應(包括順風向及橫風向)所受風載已有詳細規定，並對於迴避渦散鎖定現象之結構自然頻率範圍提供基本準則，一般考慮建築物風力效應只要遵照規定適當設計結構強度，應無安全之虞。

然而近年來由於質量輕且強度高之材料的引進，構材斷面需求相對變小，甚至出現超高之建築(如台北 101 金融大樓)，使得建築物勁度變小而更易受風載影響而產生較大變形；如前所述，結構在較大變形之情形下，常與風場擾動形成交互作用而造成所謂的氣彈現象。欲對超高層建築進行氣彈現象之研究，風力之取得之傳統方式為應用氣彈模型之直接風壓量測再予積分，亦即先建構具縮尺勁度、質量之建築模型(通常只考慮單自由度)，再於模型表面安裝風壓測管，當建築模型受風振動時同時量測瞬時表面風壓，再予面積積分得到瞬時表面風力。此傳統風壓量測方式通常較適用於規則斷面之建築；若建築外型複雜，甚至包含許多折角或曲線，風壓測管之佈置與該點風壓代表性將嚴重影響風力結果之正確性，在實驗操作上為一大考驗。因此基於高層建築結構安全考量，本計畫之第一年研究內容為提出新的氣彈實驗設計方式，除可改進前述之缺點之外，亦將提出一套有系統之結構與風力互制之強制振動識別流程，並以方型斷面之大樓模

型為代表進行識別，以檢驗其正確性。

2. 強制振動下受風結構物之運動方程式

考慮單自由度高層建築，其底部以連桿連接彈簧與阻尼於振動平台，圖 1 所示為順風向振動之示意圖（橫風向為垂直紙面方向振動）。若同時受風載及振動平台之水平強制振動，其運動方程式可表示如下：

$$J\ddot{\theta} + cd(d\dot{\theta} + \dot{x}_0) + kd(d\theta + x_0) = M(t) = \int_0^h z f(z,t) dz \quad (1)$$

其中 J 為建築物對旋轉軸之轉動慣量（Mass Moment of Inertia）， θ 為建築物之轉動角位移、 k 、 c 分別為彈簧勁度與阻尼、 d 為連接彈簧延伸桿長度、 h 為建物高度、 $M(t)$ 為建物所受外力矩、 $f(z,t)$ 為建物所受分佈風荷載（為高度 z 之函數）， x_0 為振動平台之水平向擾動之絕對位移。為方便推導，令 $x_0 = d \cdot \theta_0$ ；系統勁度

$k_\theta = kd^2$ ；系統阻尼 $c_\theta = cd^2$ ；系統自然頻率 $\omega_\theta = \sqrt{k_\theta/J}$ ；系統阻尼比

$\xi_\theta = c_\theta / (2J \omega_\theta)$ ，則式(1)可改寫成：

$$J(\ddot{\theta} + 2\xi_\theta \omega_\theta \dot{\theta} + \omega_\theta^2 \theta) = -c_\theta \dot{\theta}_0 - k_\theta \theta_0 + M(t) \quad (2)$$

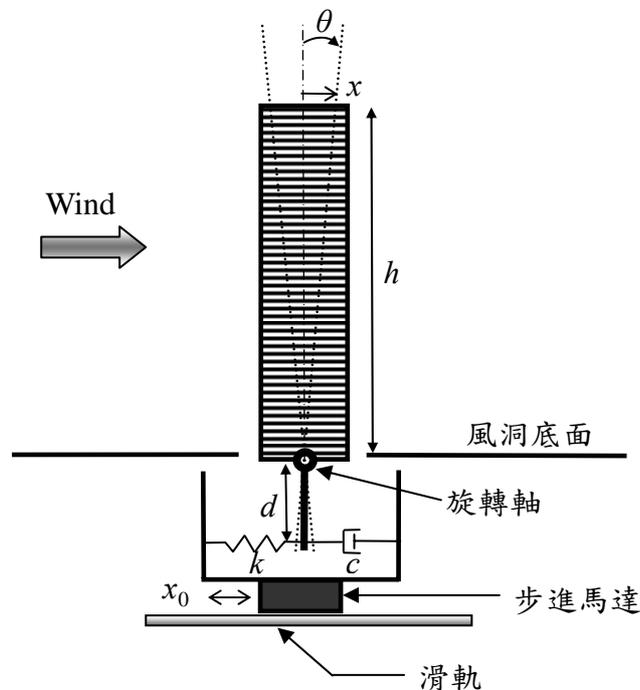


圖 1：氣彈模型之強制振動試驗架構圖

3. 結構物之系統識別

若在無風狀態下（亦即 $M(t)=0$ ），結構反應由強制振動引起，將式(2)取傅立葉轉換（Fourier Transform），則由 θ_0 引起 θ 之頻率反應函數(Frequency Response Function) $H_{\theta\theta_0}(i\omega)$ 為：

$$H_{\theta\theta_0}(i\omega) = \frac{F(\theta)}{F(\theta_0)} = \frac{-2\zeta_\theta\omega_\theta(i\omega) - \omega_\theta^2}{((i\omega)^2 + 2\zeta_\theta\omega_\theta(i\omega) + \omega_\theta^2)} \quad (3)$$

其中 ω 為強制振動之圓周頻率。

在系統識別實驗中，使用白噪音（White Noise）作為強制振動源，量測相對應之 θ 及 θ_0 之時間歷時，以快速傅立葉轉換（Fast Fourier Transform，FFT）計算出頻率反應函數 $H_{\theta\theta_0}(i\omega)$ 。再比較理論式(3)，以複數曲線擬合（Complex Curve-Fitting）方式求取兩曲線之加權平方誤差達最小時所對應之 ζ_θ 、 ω_θ ，即得到結構系統之阻尼比與自然頻率。

另外，結構系統之轉動慣量則以下列方式求得。將額外的質量依序加載於結構物，產生額外轉動慣量 ΔJ ，使用上述識別方法識別加載後結構系統之轉動向自然頻率 ω_θ 。由於結構勁度 k_θ 不變，因此轉動慣量與轉動向自然頻率的關係可寫成：

$$\frac{1}{\omega_\theta^2} = \frac{1}{k_\theta}(\Delta J + J) \quad (4)$$

以 $\frac{1}{\omega_\theta^2}$ 為縱軸， ΔJ 為橫軸繪圖，則斜率與縱軸截距分別為 $\frac{1}{k_\theta}$ 、 $\frac{J}{k_\theta}$ ，將縱軸截

距除以斜率即可得到原結構之轉動慣量 J 。

4. 風力與結構互制行為之系統識別

當結構變形過大足以改變結構週遭之氣流行為，而導致風力之改變時，即產生風力與結構之互制行為，或稱氣彈現象。高層建築受風可能引起氣彈現象，尤其以橫風向較為顯著。

理論推導：

首先藉由橋樑顫振 (Flutter) 理論之概念，若高層建築受平滑流場之擾動，可將其轉動向氣動力矩表示為轉動角位移之函數如：

$$M(t) = \rho U^2 D^2 \left\{ K B_1^* \frac{D \dot{\theta}(t)}{U} + K^2 B_2^* \theta(t) \right\} \quad (5)$$

其中 ρ 為空氣密度； U 為平均風速； D 為建物斷面寬度； ω 為結構振動的圓周頻率 (單位 rad/sec)； $K = \frac{D\omega}{U}$ 為無因次化頻率 (其倒數為無因次化風速)。就物理

意義而言， B_1^* 可視為無因次化氣動力阻尼， B_2^* 可視為無因次化氣動力勁度，但一般兩者皆非常數，而為無因次化頻率 K 之函數。本研究中，風力與結構互制行為之系統識別即在識別 B_1^* 與 B_2^* ，其理論與方法敘述如下。

將式(5)以傅利葉轉換至頻率域得

$$\bar{M}(iK) = H_{M\theta}(iK) \cdot \bar{\theta} \quad (6)$$

其中 $H_{M\theta}(iK)$ 為由 θ 引起 M 之頻率反應函數，表示為

$$H_{M\theta}(iK) = \rho U^2 D^2 (i K^2 B_1^* + K^2 B_2^*) \quad (7)$$

若式(7)中之 $H_{M\theta}(iK)$ 函數曲線可進一步模擬成一等效線性系統 (Equivalent Linear System) 之頻率反應函數，其分子分母為 (iK) 函數之多項式之比值，亦即

$$H_{M\theta}(iK) = \rho U^2 D^2 \left[\frac{\bar{b}_n (iK)^n + \bar{b}_{n-1} (iK)^{n-1} + \dots + \bar{b}_1 (iK) + \bar{b}_0}{(iK)^m + \bar{a}_{m-1} (iK)^{m-1} + \dots + \bar{a}_1 (iK) + \bar{a}_0} \right] \quad (8)$$

其中 \bar{a}_i 、 \bar{b}_i 為常數係數，且分子階次大於分母階次 (i.e., $n > m$)。式(8)或可改寫成以 $(i\omega)$ 為函數之多項式比值如：

$$H_{M\theta}(i\omega) = \frac{b_n (i\omega)^n + b_{n-1} (i\omega)^{n-1} + \dots + b_1 (i\omega) + b_0}{(i\omega)^m + a_{m-1} (i\omega)^{m-1} + \dots + a_1 (i\omega) + a_0} \quad (9)$$

其中

$$a_i = \bar{a}_i \left(\frac{D}{U} \right)^{i-m} \quad (i = 0, 1, \dots, m-1), \quad b_j = \rho U^2 D^2 \bar{b}_j \left(\frac{D}{U} \right)^{j-m} \quad (j = 0, 1, \dots, n) \quad (10)$$

因分子階次大於分母階次，式(9)可再改寫為以商式及餘式表示，如：

$$H_{M\theta}(i\omega) = \sum_{j=0}^l Q_j (i\omega)^j + \frac{c_{m-1}(i\omega)^{m-1} + c_{m-2}(i\omega)^{m-2} + \cdots + c_0}{(i\omega)^m + a_{m-1}(i\omega)^{m-1} + \cdots + a_1(i\omega) + a_0} ; \quad l=n-m \quad (11)$$

因此，依線性系統理論，其時間域之狀態方程式(State Equation)可表示為：

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{A}_\theta \mathbf{Z} + \mathbf{B}_\theta \theta \quad (12)$$

$$M = \mathbf{C}_\theta \mathbf{Z} + \sum_{j=0}^l Q_j \theta^j \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_{m-1} \\ Z_m \end{bmatrix}_{m \times 1} ; \quad \mathbf{A}_\theta = \begin{bmatrix} -a_{m-1} & -a_{m-2} & \cdots & -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{m \times m} ; \quad \mathbf{B}_\theta = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{m \times 1} ;$$

$$\mathbf{C}_\theta = [c_{m-1} \quad c_{m-2} \quad \cdots \quad c_0]_{1 \times m} \quad (14)$$

假設此狀態方程式的轉換函數分子分母階數分別為 $n=3$ 與 $m=2$ 時，則此時

$$l=1, \quad \mathbf{A}_\theta = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_\theta = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_\theta = [c_1 \quad c_0]. \quad Q_0、Q_1 \text{ 則分別代表轉動角}$$

位移引起的氣動力勁度常數及轉動角速度引起的氣動力阻尼常數。將式(13)代入式(2)可得：

$$J \ddot{\theta} + c_\theta \dot{\theta} + k_\theta \theta = -c_\theta \dot{\theta}_0 - k_\theta \theta_0 + \mathbf{C}_\theta \mathbf{Z} + Q_0 \theta + Q_1 \dot{\theta} \quad (15)$$

結合式(15)與式(13)經整理可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{A} \mathbf{q} + \mathbf{B} (-c_\theta \dot{\theta}_0 - k_\theta \theta_0) \\ \theta &= \mathbf{C} \mathbf{q} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{其中 } \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -J^{-1}(k_\theta - Q_0) & -J^{-1}(c_\theta - Q_1) & J^{-1}\mathbf{C}_\theta \\ \mathbf{B}_\theta & 0 & \mathbf{A}_\theta \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ J^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} ;$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (17)$$

因此結構在受風下，由強制振動 θ_0 之擾動所引起之結構反應 θ 之頻率反應函數可表示為

$$H_{\theta\theta_0}^W(i\omega) = \left(\mathbf{C}((i\omega)\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{Q}_0 \right) \cdot (-c_\theta(i\omega) - k_\theta) \quad (18)$$

將 $\mathbf{A}_\theta = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ， $\mathbf{B}_\theta = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ， $\mathbf{C}_\theta = [c_1 \quad c_0]$ 代入式(17)與式(18)，經整理得

$$H_{\theta\theta_0}^W(i\omega) = \frac{\frac{-c_\theta}{J} \cdot (i\omega)^3 - \frac{1}{J} \cdot (c_\theta \cdot a_1)(i\omega)^2 - \frac{1}{J} \cdot (c_\theta \cdot a_0 + k_\theta \cdot a_1)(i\omega) - \frac{1}{J} \cdot (k_\theta \cdot a_0)}{(i\omega)^4 + \left(a_1 + \frac{1}{J} \cdot c_\theta - \frac{1}{J} \cdot Q_1 \right) (i\omega)^3 + \left(\frac{1}{J} \cdot c_\theta \cdot a_1 - \frac{1}{J} \cdot Q_1 \cdot a_1 + a_0 + \frac{1}{J} \cdot k_\theta - \frac{1}{J} \cdot Q_0 \right) (i\omega)^2} + \frac{1}{J} \cdot (-c_1 - Q_0 \cdot a_1 + k_\theta \cdot a_1 - Q_1 \cdot a_0 + c_\theta \cdot a_0)(i\omega) + \frac{1}{J} \cdot (-Q_0 \cdot a_0 + k_\theta \cdot a_0 - c_0 \cdot a_1 - c_0) \quad (19)$$

互制行為之系統識別：

在固定風速之平滑流場中，同時使用振動平台，以白噪音方式擾動結構，量測結構反應 θ 與振動平台之擾動位移 $x_0 (= d \cdot \theta_0)$ ，計算 θ_0 引起之 θ 頻率反應函數

$H_{\theta\theta_0}^W$ 。以矩陣 \mathbf{A}_θ 、 \mathbf{C}_θ 中之 a_1 、 a_0 、 c_1 、 c_0 及 Q_0 、 Q_1 為參數，使用基因演算法

(Genetic Algorithm) 進行 $H_{\theta\theta_0}^W$ 實驗值與理論值(式(19))平方誤差之最佳化(Optimization)。

5. 實驗架構

震動平台

本研究所使用的振動平台為水平向之振動裝置，如圖二所示，由伺服馬達透過導螺桿趨動，根據輸出的電壓值而產生位移，對應關係為 0.44 cm / 1 volt。

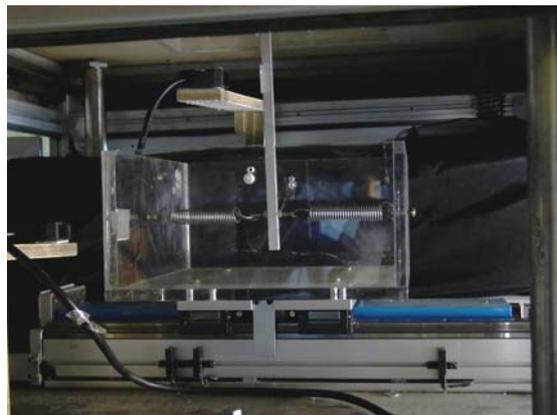


圖 2：水平向振動裝置

結構模型

為探討基本理論之正確性，選定之建築物為較具代表性之方型斷面之高層建築，如圖 3 所示。



圖 3：方型斷面之高層建築模型

5. 實驗結果與討論

待完成。