

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫四：高層建築結構受風力載重之非線性分析-時間域 模式

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-032-016-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：林堉溢

計畫參與人員：黃靖祺

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 28 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高層建築結構受風力載重之非線性分析 - 時間域模式(I)

Nonlinear Analysis of High-rise Buildings under Wind Excitations- A Time Domain Approach (I)

計畫編號：NSC 91-2211-E-032-016

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：林堉溢 淡江大學土木系

計畫參與人員：黃靖祺 淡江大學土木系

一、中文摘要

本研究計畫的第一年主要是採用數值分析方法，在時間域下分析高層建築受風反應的預測。此時間域分析採用多點自回歸模式，將風速之理論頻譜轉換成具有時間歷時的外力，再以有限元素分析程式，計算此結構物受風的反應及內力。最後以一棟31層建築作為分析的例題，考慮在不同設計風速下，以此時間域模式計算結構順風向之動態反應及桿件內力。在忽略結構非線性條件下，此時間域模式與傳統頻率域模式分析結果頗為一致，因此可驗證此時間域分析模式的正確性。本年度計畫所發展的時間域分析模式將可用於後續計畫，以探討結構非線性對動態反應及設計風載重的影響。

關鍵詞：高層建築、順風向、頻率域、時間域、自回歸模式

Abstract

The purpose of this year project is to analyze the dynamic responses of high-rise buildings by using a time domain approach. An AR process is used to transform the target frequency spectrum into a time domain for performing the dynamic analysis. At a design wind speed, the time-dependent wind loads at each floor are generated based on the

distribution of mean wind speed and fluctuating wind speed along the building's height. These time-dependent wind loads are then used as input in the finite element analysis to evaluate the structural responses.

By using this method, a building of 31 stories subjected to dynamic wind loads was analyzed. The results obtained from this proposed time domain approach are compared with those obtained from the frequency domain analysis. The comparison of these results indicates that they are in good agreement. Therefore, this time domain approach can be used in the oncoming year projects to investigate the effects of structural nonlinearities on the dynamic responses and design wind loads.

Keyword: high-rise buildings, along wind, frequency domain, time domain, AR.

二、緣由與目的

高層建築的設計除了地震的問題需要考量以外，細長建築物，尤其是當其自然頻率 $f_n < 1$ Hz 或高度/短邊的比值 > 5 即是所謂柔性建築物，對風的敏感性程度大增，風力常會大於地震力而控制建築物之結構設計。除此以外，屋頂受風舒適度變位之控制，也常會主控建築物之結構設

計。於是，風力對於超高層大樓結構的影響愈形重要。

對於分析高層建築結構的風力反應，一般多採用頻率域之分析方法，然而在頻率域架構下，結構非線性動態反應較難以考量，而且結構桿件內力無法直接求得。當建築物受強風吹襲時，其引起之結構變形不容忽視，結構材料也可能進入非線性。因此本研究採用時間域分析來探討結構非線性對動態反應及設計風載重的影響。本研究計畫的第一年是以發展一時間域分析模式為主，利用多點自回歸模式將風速之理論頻譜轉換成具有時間歷時的外力，再以有限元素法分析結構物受風的反應及內力。

三、理論背景

1. 頻率域

高層建築受風反應的計算上，常用的基本假設有以下幾項：(1)忽略高次項振態，(2)準穩定定理，(3)條狀理論 [1, 2]。

建築物的拖曳向位移反應主要為迎風面紊流或陣風擾動在結構物迎風面造成的正壓及背風區尾跡渦旋造成的負壓，共同合成的拖曳力，其數學式可寫成：

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2(t) \cdot A \cdot C_D \\ &\approx \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{U}^2 \cdot A \cdot C_D + \rho \cdot u'(t) \cdot \bar{U} \cdot A \cdot C_D \quad (1) \\ &= \bar{F}_D + F'_D(t) \end{aligned}$$

其中 C_D 為拖曳力係數， ρ 為空氣密度， A 為荷重面積。其頻譜即為

$$S_D(n) = \frac{4 \bar{F}_D^2}{\bar{U}^2} S_{u'}(n) \quad (2)$$

其中 \bar{F}_D 為平均拖曳力， $S_{u'}(n)$ 為縱向擾動性風速頻譜， $S_D(n)$ 為縱向擾動性風力

頻譜。

因此，外力造成的位移反應頻譜即為：

$$S_X(n) = S_D(n) \cdot |H(n)|^2 \quad (3)$$

此 $|H(n)|^2$ 為機械阻抗函數。而此位移反應頻譜的面積積分值，是為結構反應的變異數：

$$\sigma^2_X = \int_0^\infty S_X(n) dn \quad (4)$$

2. 時間域

本文所使用的縱向速度擾動頻譜 S_u ，採用 kaimal [3] 之經驗式，其公式如下：

$$\frac{n \cdot S_u(z, n)}{u_*^2} = \frac{200 \cdot f}{(1 + 50 \cdot f)^{5/3}} \quad (5)$$

其中 $f = \frac{n \cdot z}{U(z)}$ ， n 是頻率(Hz)， u_* 為摩擦風速(m/sec)， z 為距地表面任意(樓層)高度(m)， $U(z)$ 為距地表面任意(樓層)高度平均風速(m/sec)。而縱向速度擾動交頻譜，採用以下表示式：

其中 $f = \frac{n \cdot z}{U(z)}$ ， n 是頻率(Hz)， u_* 為摩擦風速(m/sec)， z 為距地表面任意(樓層)高度(m)， $U(z)$ 為距地表面任意(樓層)高度平均風速(m/sec)。而縱向速度擾動交頻譜，採用以下表示式：

$$S_{ij}^c(r, n) = \sqrt{S_{ii}(z_i, n)} \cdot \sqrt{S_{jj}(z_j, n)} \cdot \exp\left[-\frac{n \cdot C_z |z_i - z_j|}{1/2 \cdot (U_{z_i} + U_{z_j})}\right] \quad (6)$$

其中 S_{ii} 、 S_{jj} 分別為距地表任意兩點之縱向速度擾動頻譜， z_i 、 z_j 為距地表任意兩點(樓層)高度(m)， U_{z_i} 、 U_{z_j} 為距地表任意兩點(樓層)之平均風速(m/sec)， C_z 是指數遞減係數，一般取 10。

若樓層數為 m ，則上述頻譜可表為：

$$[S_{r_j}^c] = \begin{bmatrix} S_{r_1, r_1} & S_{r_1, r_2} & \dots & S_{r_1, r_m} \\ S_{r_2, r_1} & S_{r_2, r_2} & \dots & S_{r_2, r_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{r_m, r_1} & S_{r_m, r_2} & \dots & S_{r_m, r_m} \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (7)$$

其中 $r = u$ 經傅立葉轉換，相關函數矩陣 $\mathbf{R}(\tau)$

可表為：

$$[R(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} [S_{r_j}^c] e^{i2\pi n \tau} dn \quad (8)$$

其中 τ 為時間延遲。

—多點 AR(P) 向量數學式可表為[4]：

$$U_t = \Phi_1 U_{t-1} + \Phi_2 U_{t-2} + \dots + \Phi_p U_{t-p} + a_t \quad (9)$$

其中 U_t 為在時間 t 時為零平均的 m 度向量， Φ_i ($i=1,2,\dots,p$) 是自回歸係數矩陣($m \times m$)， a_t ($= B_0 \epsilon_t$) 是零平均的白噪音， B_0 是係數矩陣用來調整 a_t 。

經適當整理，上式可表為一般化的 Yule Walker 方程式矩陣[5]，

$$\begin{bmatrix} R(0) & R^T(1) & R^T(2) & \dots & R^T(p-2) & R^T(p-1) \\ R(1) & R(0) & R^T(1) & \dots & R^T(p-3) & R^T(p-2) \\ R(2) & R(1) & R(0) & \dots & R^T(p-4) & R^T(p-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ R(p-1) & R(p-2) & R(p-3) & \dots & R(1) & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1^T \\ \Phi_2^T \\ \Phi_3^T \\ \vdots \\ \Phi_p^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(1) \\ R(2) \\ R(3) \\ \vdots \\ R(p) \end{bmatrix} \quad (10)$$

以上相關函數矩陣 $R[\]$ 可以由式(8)求得

四. 例題分析與結果

1. 結構物描述：

為一地上三十一層之鋼骨大樓，一樓樓高為 4.7m，二樓樓高為 4.0m，三樓以上為標準層樓高 3.1m，三十及三十一樓樓高為 3.5m，樓層高度為 99.4m，含屋突總樓高 108m。結構為長方型規則平面，其面積 15m×30m，結構系統採用正交抗彎構架，梁柱樓版考慮為水平剛性隔版，樓版為一鋼筋混凝土結構。

2. 分析參數

- (1) 基本參考風速分別採為 30m/s、50m/s、70m/s。
- (2) 粗糙長度值 (Z_0) 為 1m。
- (3) 結構物平面寬度 $B=15m$ 為順風向作用力之迎風面，平面深度 $D=30m$ 。
- (4) 各層樓之紊流強度採用流場地況

係數 ($\beta=0.24$) 之風洞實驗值，如圖 1 所示。

(5) 基本參數：阻尼比 $\beta=3\%$ 、風力係數 $C_D=2$ 、空氣密度 $\rho=1.22Kg/m^3$

3. 時間域與頻率域動態位移反應之比較

高層建築在不同的基本參考風速下，經數值分析後，受順風向之位移擾動反應，如圖 2-3 所示，圖中實線為時間域分析之結果，而虛線則為頻率域分析之結果。由圖中可看出時間域及頻率域分析之位移反應隨風速增加而增加，並且隨著樓層高度愈高其位移的反應愈大，最大的位移量發生在第 31 層頂點處的位置。時間域分析與頻率域分析結果之誤差皆小於 4%。如表 1 所示。從此比較分析結果可驗證此時間域分析模式的正確性。

五. 結論

- (1) 利用 AR 模式可以精確地將目標頻譜轉為風速擾動歷時。
- (2) 時間域與頻率域的分析比較結果差異在 4% 以內，因此可驗證此時間域分析模式的正確性。
- (3) 利用本年計畫發展的時間域分析模式將可用於後續計畫，以探討結構非線性對動態反應及設計風載重的影響。

六. 參考文獻

1. Kareem, A., "Wind Excited Response of Building in Higher Modes", J. Struct. Div., ASCE, Vol.107, NO. ST4, pp. 701-706, 1981.
2. Kareem, A., "Dynamic Response of High-rise Buildings to Stochastic Wind Loads" J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, " Vol. 41-44, pp.1101-1112, 1992.
3. Simiu, E. and Scanlan, R. H., *Wind Effects on Structures*, 2nd ed., John Wiley & Sons,

New York, U.S.A, 1986.

4. Wei, W. W. S., *Time Series Analysis Univariate and Multivariate Methods*, Addison-Wesley Publishing Co., Redwood City, California, U.S.A., 1990.
5. Box, G. E. P. and Jenkins, G. M., *Time Series Analysis Forecasting and Control*, 2nd ed., Holden-Day, San Francisco, U.S.A., 1976.

表 1 頂層樓板擾動位移反應 R.M.S 比較

基本參考風速	30 m/s	50 m/s	70 m/s
時間域	0.0118	0.0280	0.0458
頻率域	0.0114	0.0273	0.0444
誤差	3.39%	2.50%	3.06%

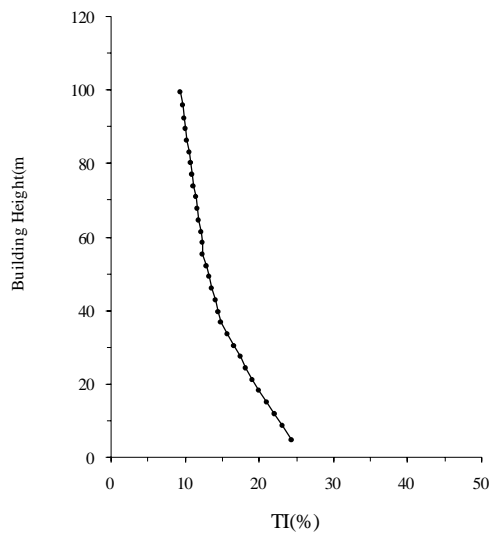


圖 1 地況係數(=0.24) , 沿樓層高度之紊流強度

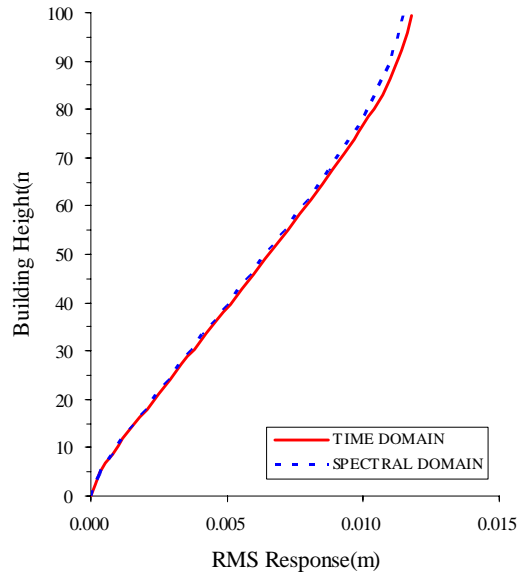


圖 2 時間域與頻率域之順風向反應 (30m/s)

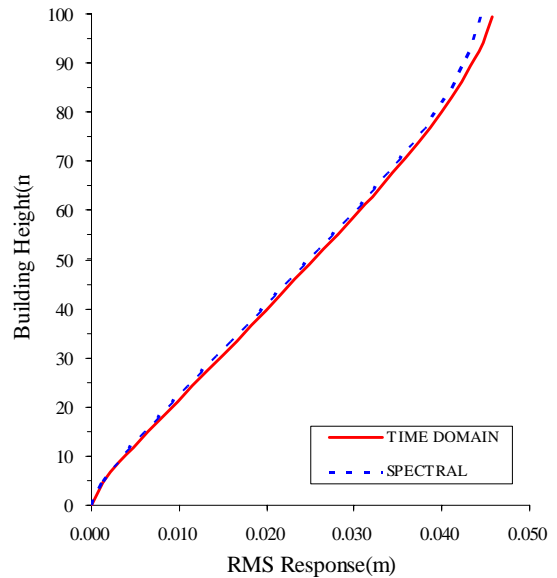


圖 3 時間域與頻率域之順風向反應 (70m/s)