

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 高層建築受風載行為之減振控制及風洞試驗研究(I)

計畫編號：NSC 89-2211-E-032-034

執行期限：89年8月1日至89年7月31日

主持人：吳重成 淡江大學土木系

計畫參與人員：潘柏辰、劉致宏 淡江大學土木系研究生

### 一、中文摘要

本文使用多自由度之高層建築縮尺模型，裝置主動質塊驅動器(Active Mass Driver)於頂層樓進行主動控制之風洞試驗研究，藉由量測之資料建構一套設計主動控制法則的可靠模式，以風洞試驗證實此模式應用於高層建築順風向反應減振之可行性。本試驗為國內首次成功將主動控制應用在風洞實驗上之實例，可做為爾後學術界驗證控制理論減振效果之基準(Benchmark)試驗平台。

**關鍵詞：**高層建築、主動質塊驅動器、主動控制、風洞試驗

#### Abstract

In this research, a reliable and feasible design process of active control for the along-wind induced motion was proposed and its applicability has been verified through the wind tunnel experiments conducted on a scaled high-rise building model equipped with active mass driver (AMD) system. This research is the first trial of employing active control to the tunnel tests and its success provides a fine benchmark platform for other active control studies in the future.

**Keywords:** High-rise Building, Active Mass Driver System, Active Control, Wind Tunnel Tests

### 二、緣由與目的

由於現代社會都市化，人口都集中都市地區，再加上用地面積有限，建築物有愈蓋愈高的趨勢。由於結構物的高度增加，在受到風力

擾動時，往往會造成過大的結構反應，尤其高層建築更為明顯，整個結構物來回震盪的結果，除了有安全上之顧慮外，也會造成使用人員不舒適及精密儀器之損壞。尤其台灣屬於海島型氣候，颱風及季風一年四季交替發生，風害對高層建築具有潛在的威脅，如何減低高層建築受風力作用時所產生的振動問題實為目前工程界亟須解決的要務。

目前對於結構抗風減振問題最有效的解決之道為使用結構控制方法。結構控制可分為主動及被動控制兩種不同的型式，在國外已經廣泛地運用在許多結構物上[1]，用來減低外力(如風力、地震力)所產生過大的結構反應，位處於太平洋地震帶的日本及台灣地區，被動隔震裝置及消能裝置在土木結構上的應用已漸漸普遍。近年來，主動控制於受風力作用之高層建築結構之應用也漸漸被廣泛探討；應用主動質塊阻尼器(Active Tuned Mass Damper, ATMD)較著名的幾個實例包括日本1991年完工的東京 Sendagaya Intes 大樓(58公尺)，1992年完工的大阪 Applause Tower (161公尺)，1993年完工的 Kanazawa 大樓(131公尺)，1997年完工的大阪 Harbis Osaka 大樓(190公尺)以及台灣1998年完工的高雄東帝士國際廣場大樓(85層)等；中國大陸最近計畫將主動質塊驅動器(Active Mass Driver, AMD)的裝置應用在南京塔(310公尺)的抗風減振上，其可行性已由數值模擬結果得到證實[6, 7]。由上述例子可看出，主動質塊驅動器及主動調諧質塊阻尼器的發展已經成熟，可以廣泛應用在實際工程上。一般而言，主動控制之效果較被動控制為佳，然而主動控制需要電力驅動控制裝置，這也是主動控制應用於地震制振及減振時最大的疑慮，因為地震幾十年甚至幾百年才發生一次，且地震發生時通常伴隨著停水及停電，花費大量經費在設置主動控制裝置之經濟效益可能不大。然而，風力之作用無時無刻存在，控制機構需持續地運作，於實際應用上之經濟效益頗高，故結構主動控制非常適合用於高層建築結構之抗風減振。

由於結構受風力的行為頗為複雜，在落實

主動控制之實際應用前必須建立可靠之風力模型並進行結構之數值模擬分析，才能確保完善之控制效果；尤其在使用主動控制之情況下，控制力是否對結構反應造成反效果，乃是落實主動控制應用之一大隱憂。一般而言，在無控制的狀況下，風力所引起的結構反應以低頻為主，土木結構的低頻模態及頻率特性，以目前技術之成熟度可由現場量測資料經系統識別準確得知，據此建立理論結構系統後再配合使用文獻上適當之理論、數值或現場實測之風力模型進行結構反應分析。然而，應用主動控制時是否可以直接以此理論結構系統進行分析，則端賴控制機構與結構間是否存在互制效應 (Control-Structure Interaction, CSI)；若存在相當程度互制效應，則可能對結構反應造成反效果[8]。因此，本研究建構一個具有主動控制機構的多自由度高層建築縮尺模型，以風洞試驗模擬建築物真實受風狀況，根據縮尺模型之風洞實驗量測進行研究，研究目的在藉由量測之資料建構一套設計主動控制法則的可靠模式，當落實於真實高層建築時，可依此模式進行主動控制之抗風減振應用。本文使用之主動控制機構為主動質塊驅動器，架設於模型頂層，藉淡江大學土木工程研究所之風洞實驗室進行試驗，主要探討主動控制於結構順風向(Along-Wind) 振動反應的減振效果。基本上結構順風向反應包括靜態與動態兩部份，前者為平滑流場導致的平均風力引起，後者則為紊流場所引起，稱為抖振 (Buffeting)，主動控制只針對抖振行為作減振控制。本文考慮之平均風速範圍，尚未形成橫風向共振鎖定 (Lock-in)，平均風速若達共振鎖定之後的情況較為複雜，另撰文討論。本文使用的系統識別(System Identification) 方法可將控制機構與結構之間的互制效應納入考量，其乃根據量測資料以曲線擬合 (Curve-Fitting) 的方法來建立結構系統。另外，因在實際控制應用上加速度計的價格較為低廉，較符合經濟上的考量，且安裝簡單，故本文設計控制法則時強調使用絕對加速度量測做回饋，且配合採用 Linear Quadratic Gaussian (LQG) [3, 4] 控制理論來設計。最後，以主動控制之風洞試驗結果驗證所提模式之可行性。

### 三、結果與討論

本實驗所使用的模型採用第二屆世界結構控制研討會提出之抗風減振基準問題[5]之結構為模擬對象，為一高 76 層具方形斷面之

高層建築結構。為求真實模擬結構受風行為，且考慮可能存在多振態反應，建構一個 4 個自由度之縮尺試驗模型 (見圖一)，配合淡江大學土木工程研究所風洞實驗室的規格，應用相似(Similarity)原理進行實體縮尺，縮尺比例分別為：長度縮尺 1 : 300、速度縮尺 1 : 6、密度縮尺 1 : 1，其它物理量之縮尺則依計算得知，如時間縮尺 1 : 50 (頻率縮尺 50 : 1)，加速度縮尺 1 : 0.12，質量縮尺 1 :  $2.7 \times 10^7$ 。圖一 (a) 為未加外牆前空構架模型的外觀；圖一 (b) 為模型覆以外牆後置於風洞內之外觀。模型之結構型式為剪力房屋，覆以外牆後之總高度為 102cm，長寬為 16cm×16cm，因此模型高寬比為 6.4。為求真實模擬結構之頻率分佈及振態，除各自由度間柱尺寸不同外，4 個自由度的質量由低至高為 2.4 kg、2 kg、1.3 kg、1.15 kg，分別位於離地面高約 50cm、77cm、90cm 及 96cm，其反應代表原建築結構之第 37、58、68 及 76 層樓反應。由總質量及體積得縮尺模型之密度約為  $300\text{kg/m}^3$ ，與原建築結構一致。根據初步之系統識別結果，結構模型之四個自然頻率與對應的阻尼比分別為 6.30、31.34、64.36、132.64 Hz 與 2.45 %、1.74 %、3.12 %、2.23 %。結構模型的前三個振態如圖二所示。

主動質塊驅動器(AMD)的設計概念，為利用主動質塊運動所造成的慣性力施力於結構物上。本實驗使用線性馬達來模擬主動質塊驅動器裝置之行為，控制機構主要包含馬達控制器、線性馬達和主動質塊，線性馬達驅動主動質塊運動，二者組合成主動質塊驅動器裝置，架設於結構頂層之樓板上，如圖三所示；馬達控制器為一般常使用的 PID (Proportional-Integral-Derivative) 控制器，藉由線性馬達內建之光學尺量測質塊位置進行回饋控制，以控制線性馬達跟隨輸入命令的反應。本實驗設定控制器所依循的輸入命令為加速度訊號模式；故當訊號之頻率過低時，並無法對結構物反應產生影響，而且會引起主動質塊過大位移。因此在進行主動控制時，讓控制命令通過一數位式低頻濾波器 (High-Pass Filter) 再輸入線性馬達，其中濾波頻率設於 2 Hz，如此可避免主動質塊位移過大，但不影響控制效果。線性馬達本身重 700g，置於頂層後，頂層總重為如前所述 1.15kg，線性馬達上面之主動質塊重 228g，最大可出力範圍為 15 Nt，主動質塊最大可移動距離為 $\pm 1.25\text{cm}$ 。

結構模型之第一、二、四個自由度裝設位移計及加速度計，分別量測順風向各自由度之

相對於地的位移與絕對加速度，表示為  $x_{ji}$  及  $\ddot{w}_{ai}$  ( $i = 1, 2, 4$ )。同時亦量測主動質塊之絕對加速度，表示為  $\ddot{w}_{ad}$ ，其與質塊質量之乘積即代表主動控制力大小。本研究為模擬實際大氣邊界層之環境風場，使用適當之邊界層元素及擾流板（見圖一（b））形成一個屬於大城市市郊地形之紊流場，其中邊界層梯度高度 (Gradient Height) 為 400m，垂直平均風速分佈之指數律 (Power Law) 指數 值為 0.23。另外，在與模型等高度之略迎風處裝設皮托管以量測流場平均流速。

風洞試驗時以三種不同的平均風速 (7.11m/s、8.32m/s 及 8.82m/s) 之紊流場測試 LQG 控制之控制效果。如前所述，所採用邊界層紊流場的特性屬於大城市市郊地形，邊界層梯度高度 400m，垂直平均風速分佈之指數律值為 0.23。三種平均風速分別對應於原建築十公尺參考風速 (Reference Wind Velocity) 19.4 m/sec、22.7m/sec 與 24.1m/sec；若換算成一般標準地況 (梯度高度 300m，值為 0.15) 則原建築十公尺參考風速為 26.1 m/sec、30.5m/sec 與 32.4m/sec。LQG 控制法則乃根據平均風速 8.32m/s 作用下之標稱系統作設計，使用權重  $Q = \text{diag}[1, 1, 1, 100, 200, 300, 0]$  及  $R = 10^{-3}$ ，調整命令  $U$  之大小不超過 1 Volt，以第一、二、四自由度 (原建築之第 37、58 及 76 層樓) 之絕對加速度作回饋，亦即  $y = [\ddot{w}_{a1}, \ddot{w}_{a2}, \ddot{w}_{a4}]'$ 。在平均風速 7.11m/s、8.32m/s 及 8.82m/s 下之實驗結果分別列於表一、二及三。實驗結果顯示，結構反應尖峰值折減率或均方根折減率均達 50% 上下，減振效果相當卓越。如一般理論預測，風速之增加只增加其順風向風力之強度，而不會顯著改變其頻譜分佈型態，表一、二及三之實驗結果亦顯示同樣結論，亦即，以相同之 LQG 控制法則進行即時控制，在不同的平均風速下得到結構反應尖峰值折減率或均方根折減率皆相當近似。

#### 四、計畫成果自評

本研究於台灣淡江大學土木研究所之風洞實驗室架設一 4 個自由度之高層建築縮尺實驗模型，於頂層樓裝置一主動質塊驅動器，以風洞試驗模擬建築物真實受風狀況，藉由量測之資料建構一套設計主動控制法則的可靠模式。風洞試驗結果相當卓越，證實了此模式於高層建築順風向反應減振應用之可行性。本試驗為國內首次成功將主動控制應用在風洞實

驗上之實例，可做為爾後學術界驗證控制理論減振效果之基準 (Benchmark) 試驗平台。

#### 五、參考文獻

1. Kobori, T., Inoue, Y., Seto, K., Iemura, H. and Nishitani, A. (editors) (1998), *Proceedings of Second World Conference on Structural Control*, John Wiley & Sons, N. Y.
2. Moore, B. C., 1981, "Principal Component Analysis in Linear System: Controllability, Observability and Model Reduction", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 26, No. 1, pp. 17-32.
3. Spencer, B. F., Suhardjo, J., and Sain, M. K., 1994, "Frequency Domain Optimal Control Strategies for Seismic Protection", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 120, No. 1, pp. 135-156.
4. Skelton, R. E., 1988, *Dynamic Systems Control: Linear Systems Analysis and Synthesis*, John Wiley, NY.
5. Yang, J.N., Wu, J.C., Samali, B. and Agrawal, A.K. A Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings. *Proc. 2<sup>nd</sup> world Conference on Structural Control 1998*, Vol.2, pp. 1407-1416, John Wiley & Sons, New York.
6. Wu, J.C., Yang, J.N., 1998, "Active Control of Transmission Tower under Stochastic Wind," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 11, Nov., pp. 1302-1312.
7. Wu, J. C., Yang, J. N., 2000, "LQG Control of Lateral-Torsional Motion of Nanjing TV Transmission Tower", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, No. 8, Aug., pp. 1111-1130.
8. Wu, J. C., 2000, "Modeling of an Actively Braced Full-Scale Building Considering Control-Structure Interaction", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, No. 9, Sep., pp. 1325-1342.

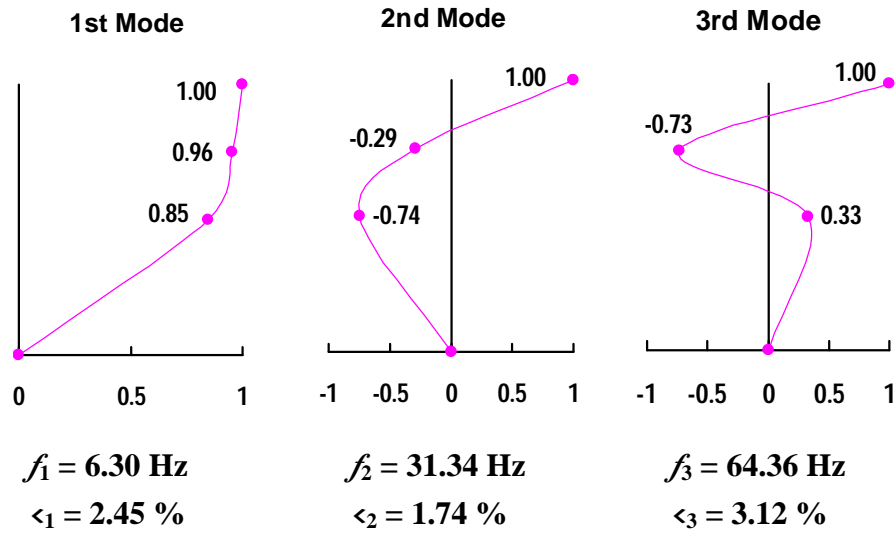


(a)

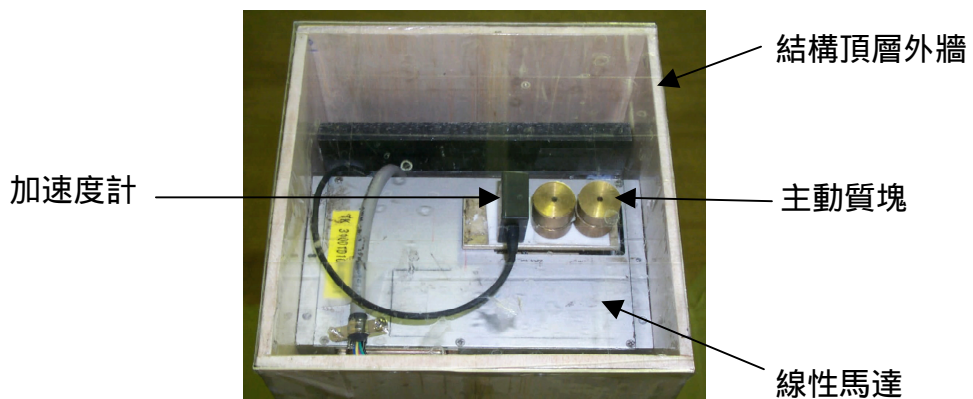


(b)

圖一：(a) 空構架模型的外觀；(b) 覆以外牆後之模型置於風洞內之外觀



圖二：結構模型的前三個振態



圖三：主動質塊驅動器 (Active Mass Driver)

表一：平均風速 7.11m/s 下 LQG 控制實驗與無控實驗值比較表

平均風速=7.11m/s					
	DOF	無控制	LQG 控制	尖峰值折減率 (%)	均方根折減率 (%)
尖峰位移值 (mm)	1	0.4379	0.2098	52.0973	-
	2	0.4608	0.2242	51.3465	-
	4	0.5287	0.2719	48.5817	-
尖峰加速度值 (g)	1	0.0671	0.0456	32.0651	-
	2	0.0622	0.0324	47.9150	-
	4	0.0741	0.0383	48.3456	-
位移均方根值 (mm)	1	0.1072	0.0509	-	52.5177
	2	0.1056	0.0518	-	50.9683
	4	0.1110	0.0590	-	46.8756
加速度均方根值 (g)	1	0.0175	0.0089	-	49.0286
	2	0.0178	0.0079	-	55.6441
	4	0.0206	0.0095	-	53.9162
主動質塊尖峰絕對加速度值(g)	-	0.0589	0.2553	-	-
最大命令值 (Volt)	-	0	0.4843	-	-

表二：平均風速 8.32m/s 下 LQG 控制實驗與無控實驗值比較表

平均風速=8.32m/s					
	DOF	無控制	LQG 控制	尖峰值折減率 (%)	均方根折減率 (%)
尖峰位移值 (mm)	1	0.6010	0.2542	57.7038	-
	2	0.5930	0.3143	46.9983	-
	4	0.6311	0.3017	52.1946	-
尖峰加速度值 (g)	1	0.0993	0.0435	56.1934	-
	2	0.0967	0.0397	58.9452	-
	4	0.1081	0.0514	52.4514	-
位移均方根值 (mm)	1	0.1532	0.0636	-	58.4856
	2	0.1493	0.0667	-	55.3248
	4	0.1475	0.0743	-	49.6271
加速度均方根值 (g)	1	0.0240	0.0105	-	56.2500
	2	0.0249	0.0094	-	62.2490
	4	0.0284	0.0115	-	59.5070
主動質塊尖峰絕對加速度值(g)	-	0.1047	0.3228	-	-
最大命令值 (Volt)	-	0	0.5285	-	-

表三：平均風速 8.82m/s 下 LQG 控制實驗與無控實驗值比較表

平均風速=8.82m/s					
	DOF	無控制	LQG 控制	尖峰值折減率 (%)	均方根折減率 (%)
尖峰位移值 (mm)	1	0.6760	0.3614	46.5385	-
	2	0.6592	0.4232	35.8010	-
	4	0.7482	0.5213	30.3261	-
尖峰加速度值 (g)	1	0.1320	0.0696	47.2727	-
	2	0.1023	0.0453	55.7185	-
	4	0.1481	0.0864	41.6610	-
位移均方根值 (mm)	1	0.2077	0.0839	-	59.6052
	2	0.1923	0.0808	-	57.9823
	4	0.2218	0.0982	-	55.7259
加速度均方根值 (g)	1	0.0333	0.0147	-	55.8559
	2	0.0315	0.0115	-	63.4921
	4	0.0394	0.0155	-	60.6599
主動質塊尖峰絕對加速度值(g)	-	0.0926	0.5684	-	-
最大命令值 (Volt)	-	0	0.6082	-	-

附件：封面格式

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 高層建築受風載行為之減振控制及風洞試驗研究(I)

計畫類別：V 個別型計畫          整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2211-E-032-034

執行期間： 89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

計畫主持人： 吳重成

共同主持人：

計畫參與人員：潘柏辰、劉致宏

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位： 淡江大學土木系

中 華 民 國 90 年 12 月 6 日