

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫五：側向與扭轉互制效應下高層建築之減振控制與風洞試驗

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-032-017-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：淡江大學土木工程研究所

計畫主持人：吳重成

計畫參與人員：林偉傑、傅國賢

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 12 月 24 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

側向及扭轉互制效應下高層建築之減振控制與風洞試驗(1/3)

計畫編號：NSC 91-2211-E-032-017

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：吳重成 淡江大學土木系

計畫參與人員：林偉傑、傅國賢 淡江大學土木系研究生

一、中文摘要

台灣近年來經濟急速起飛，建築物有愈蓋愈高的趨勢。由於結構物的高度增加，使得其勁度較一般建築為小，當受到風力擾動時，往往會造成過大的結構反應，尤其高層建築更為明顯，整個結構物來回振盪的結果，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。欲解決上述振動問題，研究發現結構控制可提供有效對策。本研究計劃提出對於具狹長型矩形斷面之高層建築，應用結構控制之抗風減振研究，目的在就抖振及渦散引起的側向及扭轉向互制之振動問題，以風洞試驗方式驗證結構控制（包括主動與被動控制）之可行性。研究內容預計在 91、92、93 年度三年期間完成，91 年度之重點在於建構具側向與扭轉向位移之多自由度氣彈力實驗模型及系統識別、建構氣動力模型及風力頻譜，並進行無控制之風洞試驗。92 年度（2/3）之重點在設計建構調頻液柱阻尼器（TLCD），並架構一水平向之震動裝置（校正基準平台），進行元件性能之測試與校正，及被動控制下模型反應之數值模擬。93 年度（今年度，3/3）之重點在藉多自由度氣彈力實驗模型之風洞試驗，探討扭轉與側向反應同時存在時之氣彈互制效應與應用主動控制（AMD）之減振對策與實驗驗證。本文為 91 年度完成之研究成果報告。

關鍵詞：高層建築、結構控制、調頻液柱阻尼器、主動質塊阻尼器、扭轉反應、風洞試驗、校正基準平台、基準問題

Abstract

The economical development of Taiwan in the past decades has facilitated more and more construction of higher buildings in many urban areas where the space is highly limited. Because of their stiffness lessened, these buildings become more susceptible to wind excitation. Especially for high-rise buildings, the wind-induced responses, including displacement and acceleration on which building serviceability and comfort of occupants depend, are frequently excessive. In literatures, the use of structural control has been demonstrated to be efficient in reducing the wind-induced vibration for high-rise buildings. Therefore, the objective of this research is to investigate the applicability of structural control (active and passive control) through wind tunnel experiments to buildings with lateral-torsional motion under the excitation of buffeting and vortex shedding. This research project is scheduled to complete in three years. The main tasks of the 1st year are to (i) construct the scaled aeroelastic building model with lateral-torsional motion and

conduct system identification; (ii) construct the scaled aerodynamic building model and obtain wind load spectrum; and (iii) perform wind tunnel tests for no control case. The tasks in the 2nd year will be emphasized on (i) designing TLCDS with optimal parameters; (ii) designing the testing calibration platform, composed of a horizontally actuating shaker and a single-degree-of-freedom calibration frame, for acquiring the property of TLCDS device; and (iii) performing numerical simulation for the passive control case. In the 3rd year, the tasks are to investigate the aeroelasticity existing in the scaled building and search the strategy of efficient active control (AMD) for the building with lateral-torsional motion through wind tunnel tests. This report contains the completed results in the 1st year.

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

二、前言與文獻回顧

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；再者，隨材料科技之日新月異，質量輕且强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（Twin Tower）大樓、台北新光大樓、高雄東帝士國際廣場大樓及正在興建中的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；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抖振效應；台灣地理位置同時位於強震及強颱風區，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。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强度高材料之引進，構材斷面需求相對變小，甚至出現超高之建築，使得建築物勁度變小而更易受風載影響而產生變形，造成建築物之服務度（Serviceability）不足；另外，因結構實際受風之行為屬動態反應，這些高層建築物來回擺盪之振動現象亦常造成使用人員之不舒適（Discomfort），對於精密儀器亦可能造成損壞，人員不舒適度取決於樓層加速度大小，保守標準為 15 cm/sec^2 ，以美國紐約帝國大廈為例，頂層之擺盪最大振幅在 30~60 cm 之間，最大加速度亦在 20~30 cm/sec^2 之間，遠超過舒適度標準。

欲解決上述振動問題，研究發現結構控制可提供有效對策（參考文獻 4,5,6）。結構控制可分為主動及被動控制兩種不同的型式。近年來，結構控制在高樓抗風減震的應用已漸行普遍，其中被動式結構控制包括調諧質塊阻尼器（Tuned Mass Damper, TMD）調諧液體阻尼器（Tuned Liquid Damper, TLD）及調諧液柱阻尼器（Tuned Liquid Column Damper, TLCD）之發展較為成熟，繼 1977 波士頓 Hancock Tower(244m) 及 1978 紐約之 Citycorp Center Building (278m) 裝置 TMD 阻尼器視為此類被動消能裝置應用之濫觴後，TMD、TLD 及 TLCD 已漸為美日澳等先進國家的許多新建高層建築大樓、機場塔台及纜索支撐橋塔所採用，作為抗風減振之裝置。TMD、TLD 或 TLCD 類型被動裝置之基本原理乃是藉共振原理使振動能量重新分配，由於質塊（TMD）或液體（TLD、TLCD）之振動吸收結構部份振動能量並利用阻尼器自身具備之阻尼特性予以消能。實際應用例子如美國 1997 完工之 Washington National

Airport Control Tower (67.5m) 及日本 Meiko-Nishi 大橋之橋塔內之 TMD 裝置、日本 1993 年完工之 Tokyo International Airport Tower at Haneda (77.6m) 內安裝之 TLD 裝置及位於 Tokyo 之 26 層 Hotel Sofitel (Cosima)、大板 Hyatt Hotel 與 Inchida Building 內之 TLCD 裝置。另外主動式結構控制中使用主動調諧質塊阻尼器 (Active Tuned Mass Damper, ATMD) 或主動質塊驅動器 (Active Mass Driver, AMD) 之發展亦頗為成熟, 主動式結構控制必須具備提供外力之元件, 此元件一般為需靠電力供給施力能量之致動器(Actuator)裝置, 目前使用較普遍的大型致動器可分為油壓式(Hydraulic)與電動馬達式(Electric Motor)二種。主動控制雖然需要電力供給, 但因為風載無時無刻存在, 控制機構須長期一直持續運作著, 成本效益頗高, 非常適合抗風減振應用, 而且根據研究結果, 主動式結構控制之減振效果亦較被動式優越許多(參考文獻 4,5,6)。應用 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 1998 高雄東帝士國際廣場大樓 (85 層); 應用 AMD 之一例為 Kyobashi Seiwa Building, 其 AMD 以懸吊方式代替滑軌方式減低摩擦力。

雖然結構控制在風力工程之應用已有實際工程例子, 但都僅考慮如何減低抖振 (Buffeting) 效應, 且制振之設計理念也大多只考慮第一振態反應, 橫風向反應甚至未考慮渦散效應。其實在很多研究結果及實際高層結構反應中顯示: (1) 位移反應或許由第一振態主控, 但加速度反應則顯然含有相當程度之第二、三振態(參考文獻 7); (2) 對於位在強風區(平均風速 40~50 m/sec)之六十層以上高樓, 渦散現象可能相當明顯, 甚至與結構共振形成鎖定而造成橫風向過大位移影響結構安全, 此為規範未能考慮的部份(參考文獻 8,9,10,11), 因此如何更深入探討以上所述兩點情形下之高層建築之抗風減振問題乃是工程界刻不容緩之重要課題。

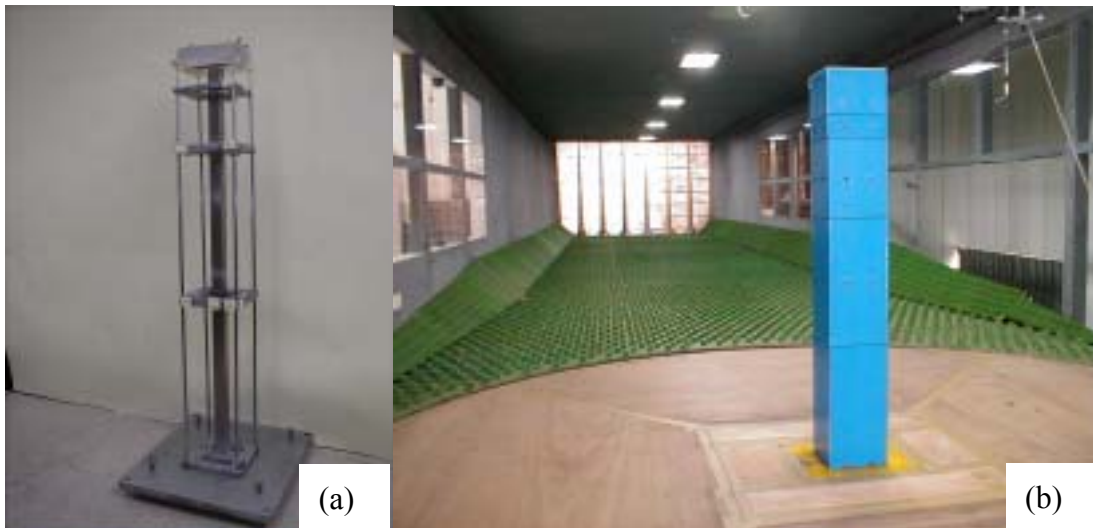
另外, 文獻上雖有相當多有關於結構控制應用之減振研究(包括筆者先前之研究, 參考文獻 4,5,6), 但多僅止於數值模擬階段; 鈍體形狀之高層建築的風載效應相當複雜, 以目前發展相當成熟之計算流體力學來模擬風力狀況, 其真確性仍需與若干基本風載問題之試驗結果互相印證才能得知, 因此若欲模擬實際風載情況甚至建築受風反應, 最直接也最可信賴方式即為風洞試驗。一般而言, 結構風工程之風洞試驗可分為氣動力模型試驗與氣彈力模型試驗, 前者用來量測風力係數與風力載重(頻譜), 後者因可直接量測結構反應, 故可用來探討結構與氣流間之氣彈行為。

再者, 以前述幾類結構控制之元件設計而言, 不論被動或主動元件, 國內目前之自製研發仍在起步階段, 被動式消能裝置之設計方法或許成熟, 然而製造出之元件因其消能性質之特殊性, 其性能測試不像其他減振阻尼器(如黏彈阻尼器)可以使用致動器以週期性來回推動獲取遲滯圈方式得到, 亟需建立另外一套性能測試之架構作為是否達到設計要求之校正。而主動式控制裝置之研發製作更因需具備機電方面及結構力學方面整合技術, 其性能測試中隱含之挑戰性更高。

二、研究目的

筆者近幾年來投注心力以風洞試驗進行高層建築之抗風減振研究, 目前已完成方形斷面之多自由度高層建築之 AMD 主動控制應用與氣彈力風洞試驗驗證(模型及風洞試驗架構請見圖一), 部分成果已發表於期刊論文中(見參考文獻 12), 其中對於使用線性馬達致動器組合成 AMD 控制裝置之技術以臻成熟。本研究計劃延續先前之研究導向, 提出對於具狹長型

矩形斷面之高層建築，應用結構控制之抗風減振研究，目的在就抖振及渦散引起的側向及扭轉向振動問題，以風洞試驗方式驗證結構控制（包括主動與被動控制）之可行性。研究內容共分成三年分別在 91、92、93 年度逐步完成。91 年度（1/3）之重點在於建構具側向與扭轉向位移之多自由度氣彈力實驗模型及系統識別、建構同外型之氣動力模型及建立其風力頻譜，並進行無控制之風洞試驗。92 年度（2/3）之重點在設計建構調頻液柱阻尼器（TLCD）架構一水平向之震動裝置（校正基準平台），進行元件性能之測試與校正。93 年度（3/3）之重點在藉多自由度氣彈力實驗模型之風洞試驗，探討扭轉與側向反應同時存在時之氣彈現象識別，以及應用主動控制（AMD）之減振對策。本文內容為 91 年度（1/3）完成之研究成果報告。



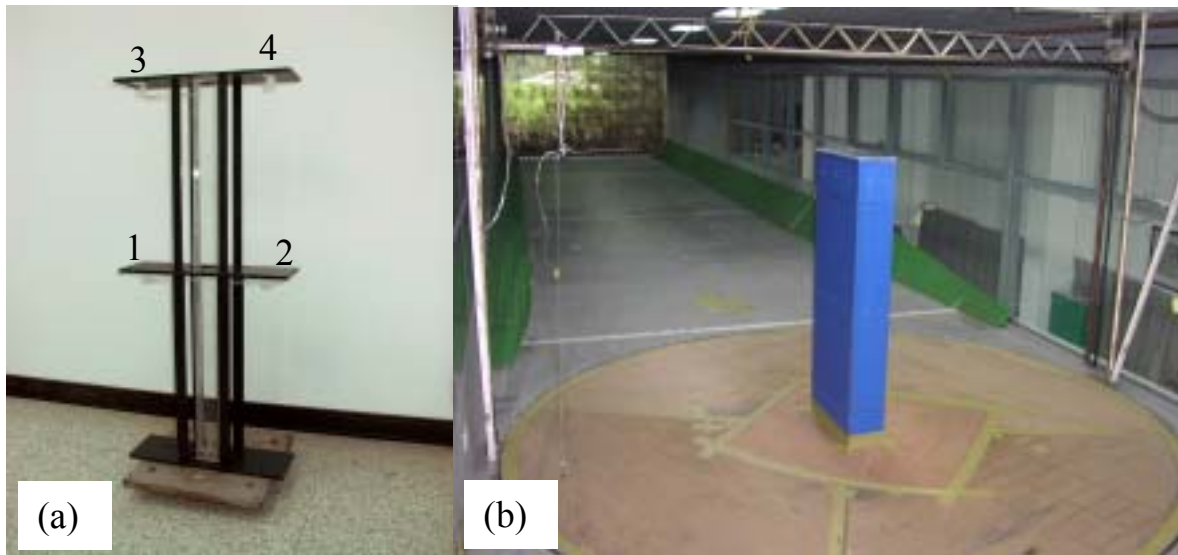
圖一：(a) 1:300 高層建築縮尺模型骨架；(b) 置於大氣邊界層風洞之高層建築縮尺模型

三、研究方法、結果與討論

本計劃之研究方法為理論推導、實驗量測與數值分析並重，以淡江大學土木研究所之風洞實驗室進行風洞試驗，模擬實際風載情況，探討具扭轉反應之高層建築因抖振(Buffeting)及渦散(Vortex Shedding)引起的振動問題，應用被動及主動控制方式提出制振對策，供爾後工程界應用之參考。

91 年度（1/3）已完成之研究成果詳細內容請參閱（參考文獻 13）

1. 已完成具側向與扭轉向位移之多自由度高層建築縮尺氣彈力試驗模型。以目前國際間正擬提出之第二代具側向與扭轉向位移之風擾振動基準問題之結構原型（Prototype）為模擬對象。此結構為一高 54 層（192m）斷面長寬比為 3:1（72mx24m）狹長型矩形之高層建築大樓，因長與寬方向結構勁度之差異使得結構側移反應為短向主控。已建構完成一個含兩質塊具 4 個自由度（兩個側向、兩個扭轉向）之縮尺氣彈力試驗模型，其結構主體骨架如圖二（a）所示，圖二（b）為覆以外牆之完成模型置於風洞之照片。其中長度縮尺為 1:160，速度縮尺為 1:6，密度縮尺為 1:1，其他縮尺則依相似(Similarity)原理計算得到，分別為時間縮尺 1:26.667（或頻率縮尺 26.667:1）加速度縮尺 4.444:1。



圖二：(a)具側向與扭轉四自由度之縮尺高層建築模型骨架；
(b) 置於風洞之高層建築完成模型

2. 已完成量測器材之購置、測試及架設。
3. 已完成主動控制實驗器材之購置、測試及氣彈力模型之系統識別。為進行此高層建築氣彈力模型之系統識別，依序架設線性馬達致動器於頂層 1、2、3、4 位置（見圖二(a) 所示），以白噪音命令輸入各個致動器，使其上之主動質塊產生運動以擾動整個結構，同時量測結構反應作為輸出進行系統識別。例如當致動器置於 1 位置時（輸入），各點加速度（輸出）如圖三之(a)、(b)、(c)、(d)所示，藍線為實驗曲線，紅線為識別擬合曲線。圖四則為系統識別所得之四個模態頻率、阻尼比與振型。已完成建構氣彈力模型之時域運動方程式及狀態方程式之識別，此部分引用另一子計畫 - 高層建築受風力載重之非線性分析：時間域模式（主持人林堉溢）之研究成果。
4. 已完成高層建築之縮尺氣動力模型。如圖五所示為置於大氣邊界層風洞之高層建築同外型之縮尺氣動力模型，此模型為以巴沙木及保力龍製成之剛性模型。
5. 已完成氣動力模型之風力頻譜。應用力平衡儀量測其於大氣邊界層風洞中所受各方向之基底剪力（或力矩），其頻譜即代表各方向之總風力（力矩）頻譜，結果如圖六及圖七所示，圖六為短軸風向所形成之風力頻譜，在 x 座標約 1.0 左右之尖峰值對應到氣動力模型之自然頻率，在應用時將忽略不計此部分，另外在 x 座標約 0.1 左右之尖峰值則對應渦散頻率；圖七為長軸風向所形成之風力頻譜，在 x 座標約 0.4 左右之尖峰值對應到氣動力模型之自然頻率，同樣地，在應用時將忽略不計此部分，值得注意的是此情況並無出現明顯渦散振動。此處實驗中有關力平衡儀之量測技術乃引用自另一子計畫 - 風洞實驗風力量測分析（主持人鄭啟明）之累積研究成果。
6. 已完成高層建築模型反應量測之風洞試驗。

7. 已完成無控制時高層建築模型反應之數值模擬。將識別後之氣彈力模型運動方程式，配合氣動力模型得到之風力頻譜，以數值模擬計算結構反應。與風洞試驗結果比較後，其結果略有差異，其差異為來自氣彈效應之影響，詳見（參考文獻 13）。此氣彈效應之識別為 93 年度（第三年）之預定研究內容。

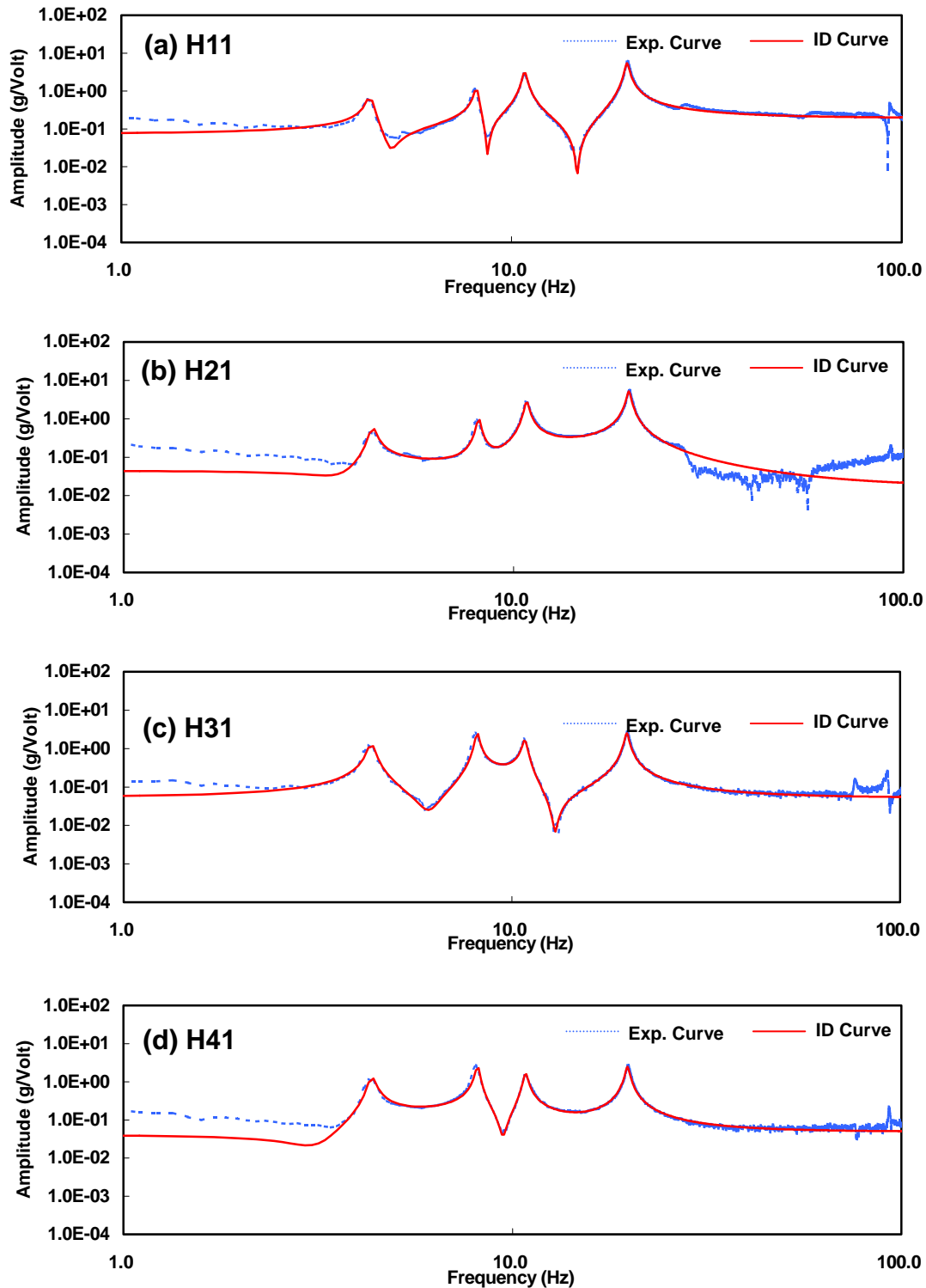
四、計畫成果自評

本研究藉風洞模擬真實流場探討結構受風反應，近程目標為經由結構控制（包括主動與被動控制）實驗獲取對高層建築側向及扭轉向振動問題之寶貴經驗，供爾後落實實際工程之參考；遠程目標為配合國際間結構控制相關學術組織正擬提出之第二代風擾振動基準問題 (Benchmark Problem)，提供爾後學者一合乎真實情況之物理模型，供學術界作為控制效果之比較平台。

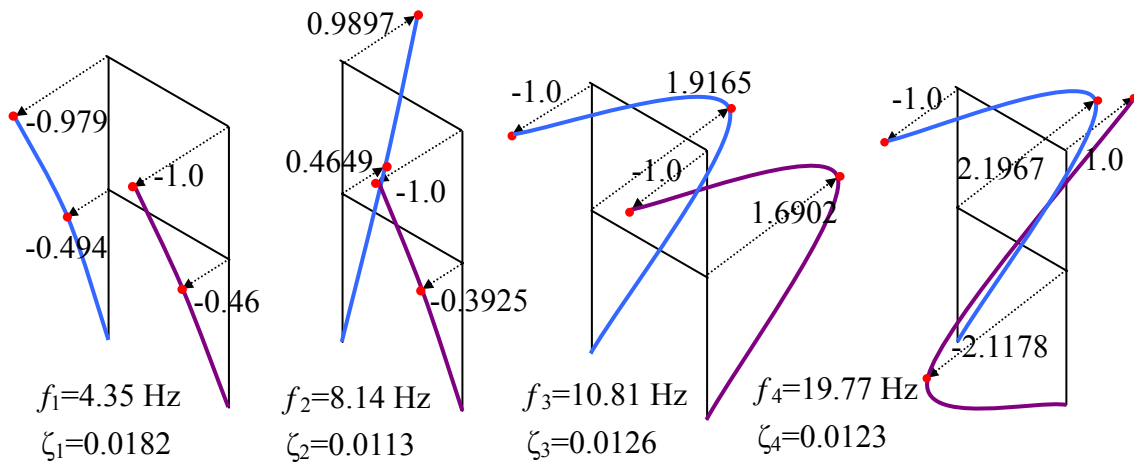
五、參考文獻

1. 蔡益超、林宗賢，”建築物所受風力有關規範之研擬”，行政院國科會防災科技研究報告 73-24 號，台北，1984。
2. Simiu, E. and Scanlan, R. H., “Wind Effects on Structures”, John Wiley, NY, 1996.
3. 蔡益超、陳瑞華、項維邦，”建築物風力規範條文、解說及示範例之之研訂”，內政部建築研究所研究報告 CSSE85-05B，1986。
4. Wu, J. C., Yang, J. N. and Schmitendorf, W., “Reduced-order H_{∞} and LQR Control for Wind-Excited Tall Buildings”. *Journal of Engineering Structures*, 20 (3), 222-236, 1998.
5. Wu, J. C. and Yang, J. N., “Active Control of Transmission Tower under Stochastic Wind”. ASCE, *Journal of Structural Engineering*, 124 (11), 1302-1312, 1998.
6. Wu, J. C. and Yang, J. N., “Sliding Mode Control for Wind-Excited Benchmark Problem”, *Proceedings of Second World Conference on Structural Control*, pp. 1445-1454, Kyoto, Japan, June 28-July 1, 1998.
7. Kareem, A., “Wind-Excited Response of Buildings in Higher Modes”, ASCE *Journal of Structural Division*, Vol. 107, No. ST4, pp. 701-706, 1981.
8. 陳若華、鄭啟明、盧博堅，”高層建築物與邊界層流場之氣動力互制現象”，*中國土木水利工程學刊*，第九卷，第二期，pp. 271-279, 1997。
9. 陳若華、鄭啟明、盧博堅，”橫風向振動對三維方柱體所受風力特性的影響”，*The Chinese Journal of Mechanics*, Vol. 13, No. 1, pp. 33-44, 1997。
10. Bearman, P. W. and Grahm, J. M. R., “Vortex Shedding from Bluff Bodies in Oscillatory Flow: A Report on Euromech 119”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 99, pp. 225-245, 1980.
11. Vickery, B. J. and Steckley, A., “Aerodynamic Damping and Vortex Excitation on an Oscillating Prism in Turbulent Shear Flow”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 49, pp. 121-140, 1993.
12. Wu, J. C. and Pan, B. C., “Wind Tunnel Verification of Actively Controlled High-Rise Building in Along-Wind Motion”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No.12-15, Nov., pp. 1933-1950, 2002.

13. 林偉傑，2003，"高層建築風力與結構側向與扭轉向反應之互制效應研究"，碩士論文，June，淡江大學土木工程研究所。



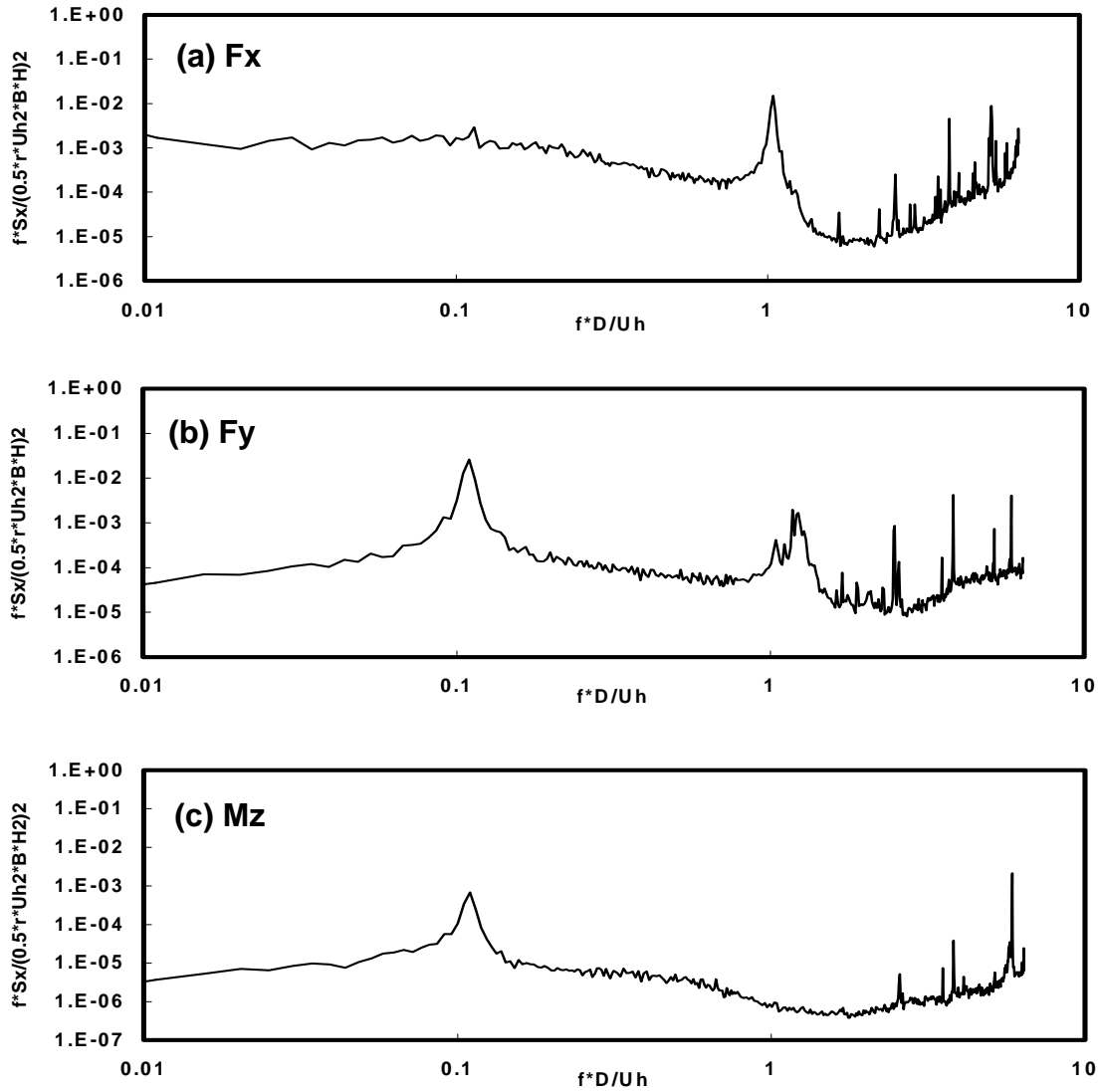
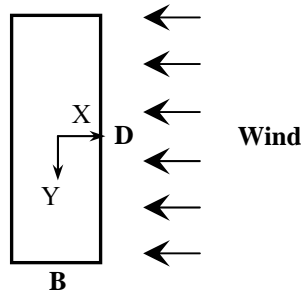
圖三：致動器置於 1 位置時之加速度轉換函數及識別



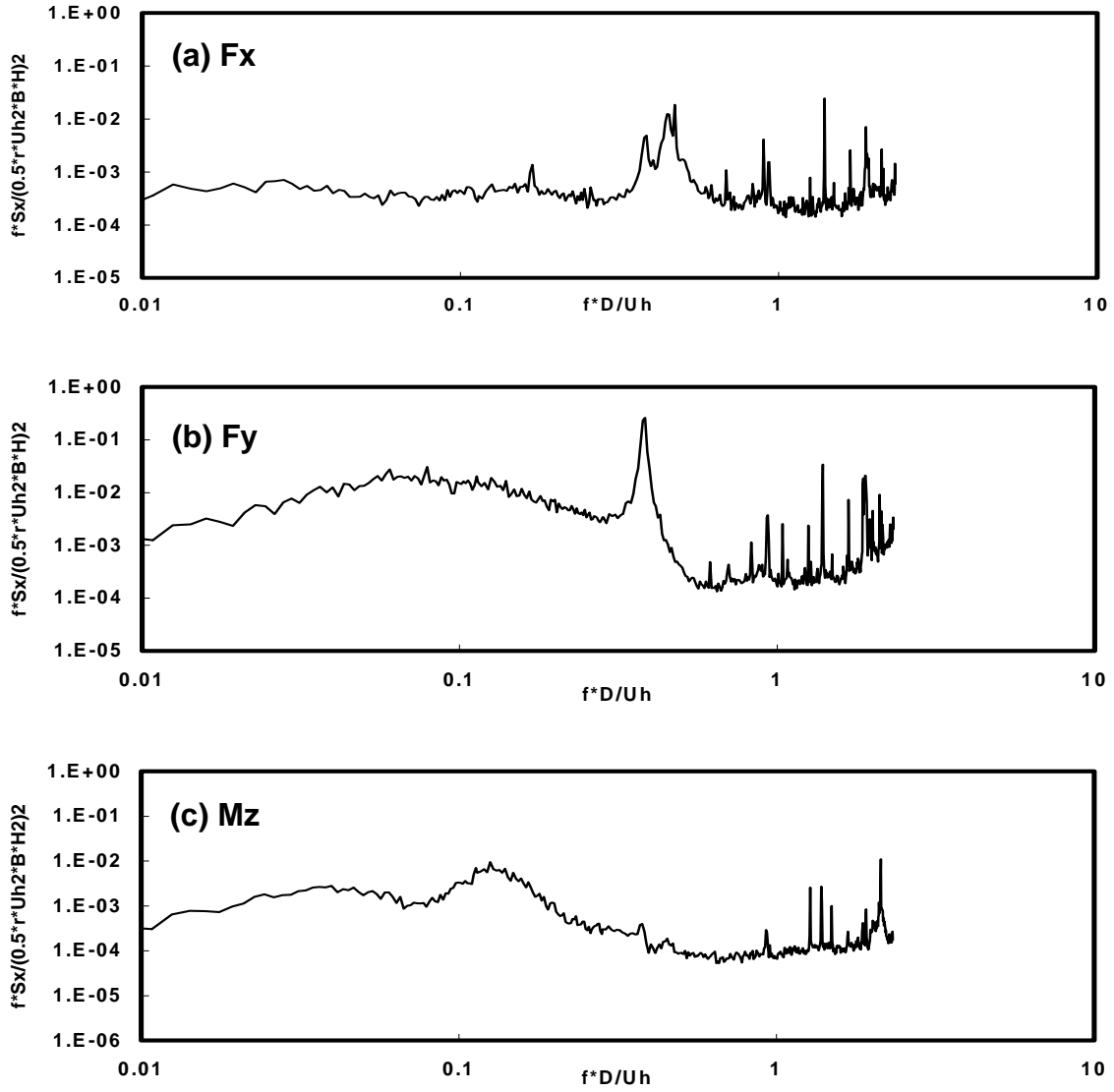
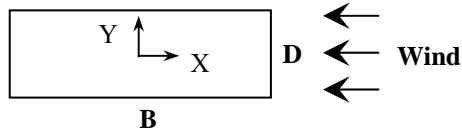
圖四：氣彈力模型之頻率、阻尼比與振型



圖五：置於大氣邊界層風洞之 1:160 縮尺之高層建築氣動力模型



圖六：應用力平衡儀於氣動力模型測得之風力頻譜(短軸風向)：(a) X向風力頻譜；(b) Y向風力頻譜；(c) Z向風力轉矩頻譜



圖七：應用力平衡儀於氣動力模型測得之風力頻譜（長軸風向）：(a) X 向風力頻譜；(b) Y 向風力頻譜；(c) Z 向風力轉矩頻譜