臺灣建築學會「建築學報」第84期,97~106頁,2013年6月,夏季號 JOURNAL OF ARCHITECTURE, No. 84, pp.97~106, Jun. 2013, Summer

# 建築物氣彈力反應數值模式建構與風洞試驗研究

林建宏\* 方富民\*\* 鍾政洋\*\*\* 顏呈益\*\*\*\*

**關鍵字:**建築研究,氣彈力行為,數值模擬,風洞試驗

## 摘要

本研究以風洞模型試驗資料為本,據以發展出預測大氣邊界層流中高層建築受風互制行為之數值方法,作 為分析風域中高層建築動態反應之初步模式,進而應用風洞試驗與數值模擬各自之優勢,深入探討流場與結構 相互影響之機制。研究中係以平坦開闊地形中三維方形截面之獨立柱體為基準問題,分別針對氣動力與氣彈力 兩種情況進行風域中方柱形狀建築物之受風效應與動態反應之細部探討,繼而建立足以正確描述相應動力特性 之數値計算模式,以供相關風力問題分析之用。

# Development of the Aero-elastic Numerical Model of Buildings and Wind Tunnel Study

J. H. Lin<sup>\*</sup> F. M. Fang<sup>\*\*</sup> C. Y. Chung<sup>\*\*\*</sup> C. Y. Yen<sup>\*\*\*\*</sup>

KEYWORDS: Building Study, Aero-elastic Behavior, Numerical Simulation, Wind Tunnel Test

# ABSTRACT

Based on the measurement results of wind tunnel tests, the goal of the study is to develop the numerical skills and methods in predicting the interactive dynamic behavior of a high-rise building and its surrounding wind flow. The achieved numerical model is expected to be used to analyze the dynamic response of a high-rise building at a preliminary design stage. In the study, a boundary-layer flow past an isolated cylinder with a square cross-section is considered the bench-mark problem. The flow effect and the structural responses are investigated under aero-dynamic and aero-elastic conditions. Accordingly, a numerical model, capable of correctly describing the related dynamic characteristics of the problem, is developed for future applications of related analysis.

\*內政部建築研究所工程技術組組長

**收件日期**: 2012.05.31; 接受日期: 2012.09.04

Director, Engineering Technology Division, Architecture and Building Research Institute, Ministry of Interior, Taiwan <sup>\*\*</sup>國立中興大學土木工程學系教授(通訊作者 Email: fmfang@nchu.edu.tw)

Professor, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan \*\*\*\*國立中興大學土木工程學系研究生

Graduate students, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan \*\*\*\*\* 國立中興大學土木工程學系研究生

Graduate students, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan

# 一、前 言

隨著營建技術的進步,國內高層建築物大量的出 現。由於目前超高層建築物特色多採用質輕堅韌的鋼 骨結構,結構系統阻尼較傳統混凝土構造為低,且因 其高度高,故構造物的柔性增加,建築物受風作用行 為的考量則更形重要。通常建築物的橫斷面多為非流 線形,風場中於建築物之下風處常產生渦散(vortex shedding)現象,對建築物而言則導致了非恆定之風 荷重,復因其結構動力特性而導致了振動與位移反應 之發生。對高層建築物而言,由於其相對勁度較低, 在順風(along-wind)向、橫風(acrosswind)向及扭 轉(torsional)向位移反應相對地較大。因此,在風力 設計觀點中,動態位移成為評估高樓使用者舒適度之 重要指標之一。

建築物的順風向位移反應直接反映出來流風場的 作用,因此在考量上多以平均値為主。又因其相應之 擾動風力較為寬頻,所形成的位移擾動値亦不大,對 於結構安全的影響較小。另一方面,橫風向反應來則 自建築物周邊分離剪力層的渦散過程,其相應之擾動 風力較屬窄頻之範疇,如與結構物特徵頻率接近,易 與結構之振動發生共振行為(resonance),建築物所形 成的位移擾動量較大。此類因建築物振動而引起之二 次互制(interaction)或氣彈力效應(aero-elastic effect),乃為風工程中有關高層建築研究之重要課題。

## 二、背景

近五十年來隨著電腦運算速度及技術的提升,利 用計算流體動力學(computational fluid dynamics; CFD)的方法來求解流體各種物理現象變化不再是那 麼遙不可及。數值模擬技術也因電腦的提升,發展更 上了一層樓。CFD 應用的範圍非常的廣泛,舉凡機 械、土木、航太、電子、車船、醫工、大氣、化材甚 至於軍事領域。以往進行環境風場評估及風洞試驗, 都需耗費龐大的金錢、時間及人力。近年來,計算流 體力學運用在鈍體空氣動力學、建築風環境的評估、 街谷污染擴散分析模擬,都有不錯的結果。 內政部建築研究所風洞試驗室歷年有關高層建築 之風力研究中,無論是自剛性的氣動力建築模型到反 映風場與結構振動互制效應柔性氣彈力建築模型的風 力問題研討,在風洞試驗的資料庫建置與研究成果上 愈見成長。以平坦地形中柱形建築物的問題爲例,經 由模型試驗量測,建築物的區域環境風場(如行人道 風)、受風效應(表面風壓、柱體風荷重)與振動反應 均已建立了一套成熟的技術程序與分析方法,以充分 提供國內工程與產業界在建築風工程相關問題的分析 與服務。為進一步擴展風力分析上的廣度與服務能 量,促進本國家級試驗室在風場與結構動力數值模擬 技術與能力之提昇實爲現階段亟待精進的重要目標。

## 三、目的

本研究之目的主要在提昇建研所試驗室在風場 與結構動力數值模擬之經驗與能力,並配合以既有之 風洞試驗分析達到相輔相成之效果,增益其在工程與 產業界之主導性與服務之能量。研究中以平坦地形中 三維方形截面之獨立柱體為基準問題,分別針對氣動 力(aero-dynamic)與氣彈力(aero-elastic)兩種情況, 建立足以正確描述相應風場與建築物動力特性之數值 計算模式,以供相關風力分析之用。

#### 四、相關研究

之前在氣動力情況相關的典型 CFD 研究,在數值 模擬方面,Murakami et al. (1992)曾利用 k-c及大渦 模擬(large eddy simulation; LES)兩種紊流模式進行 預測,結果顯示 k-c模式計算結果與實驗結果有較爲明 顯的差距,而 LES 模式則與實驗結果較爲符合。 Delaunay et al. (1995)及 Mikkelsen & Livesey(1995) 則利用修正後之 k-c模式進行短矩柱表面風壓預測,結 果顯示在背風面風壓部分數值模擬有低估之趨勢。 Murakami & Mochida (1995)針對方形突出物的流況 來比較應用 k-c、ASM(algebraic stress model)及 LES 模式之預測結果,發現 LES 模式有較其他模式精準的 表現。Gomes et al. (2005)亦針對多種規則斷面之鈍 體表面風壓進行風洞實驗及數值模擬計算之比較。而 國內學者之相關研究,典型者如 Fang et al. (2003) 與 Fang (2006)。

渦散造成的氣彈力現象會受結構阻尼、來風紊流 強度等因素所影響。在低結構阻尼、低紊流強度情況 中,結構物常會呈現明顯的氣彈力現象。在有關氣彈 力情況相關的典型風洞試驗研究中,針對高寬比為10 的細長方柱,來流風速剖面指數為 0.1 及 0.3,結構阻 尼比在 1.5%以下時, Kawai (1992) 指出方柱在横風 向之位移呈現發散之結果。Vickery & Steckley (1993) 於來流風速剖面指數為 0.112、建築物高寬比 13.3、阻 尼比為 0.5%的風洞實驗中也發現了位移發散的情 形。Matsumoto (1986) 在高寬比 4 之矩柱氣彈力模 型試驗指出,於均勻紊流場以及風速剖面指數分別為 0.2 與 0.4 等三種來流風場情況中,只有長寬比小於 1.0 的矩柱會發生渦散引發的自勵振動(self-excited)行 爲;而在高結構阻尼、高紊流強度下,則不易發生氣 彈力現象。此外, Kawai (1992) 指出, 高寬比為 10 的方柱於均匀風場中,當結構阻尼比為高於 1.13%時 則無渦散造成的振動; Kwok & Melbourne (1981) 亦 指出,高寬比為9的方柱在城市地形中,當結構阻尼 比在 0.25% 以上時便無鎖定現象發生。

與本研究頗爲相關的研究中, Cheng et al. (2002) 利用高寬比為7的方柱於不同大氣邊界層流場進行氣 彈力模型風洞試驗。研究結果顯示,當來流風場形態 屬都市地況時因較大的紊流強度破壞渦散作用的完整 性而使結構未能在共振風速附近發生鎖定現象,故其 氣動力阻尼皆爲正値。至於在平坦開闊地的風場中, 當史庫頓數(Scruton number, Scr)小於2.18時,兩種 高寬比之方柱皆出現渦散現象與急流現象合併發生的 狀況,而負値氣動力阻尼於臨界風速之後便維持在最 低値。當 Scr 介於2.76 與5.82 之間時,則僅出現渦散 產生之鎖定現象,負値氣動力阻尼於臨界風速處有最 小値。至於在 Scr 大於 6.28 的情況中,氣彈力不穩定 現象消失,氣動力阻尼成爲正値。

# 五、方法概述

本研究係以大氣邊界層C地況平坦空曠地形中高

寬比(H/D)為7:1之獨立方柱建築物為基準問題(參 見圖1),以風洞試驗分別針對氣動力(壓力)模型 (aero-dynamic pressure model)與剛性氣彈力模型 (rigid aero-elastic model)量取柱體之風力係數(壓力 模型)與方柱之橫風向動態反應(氣彈力模型),作為 數値模式確認與數値模擬結果驗證之比對依據。在數 値模擬上以氣動力情況為始,首先建立不考慮互制效 應(當建築物之振動反應不顯著)時風場與建築物風 力預測之數値模式,繼而針對氣彈力情況(互制效應 明顯時),藉風場與結構動力方程式的交替解析,完成 氣彈力數値模式之建構。此外,為便於分析結果之比 較,研究中探討之柱體具平滑表面,即不考慮表面粗 糙度對風場之影響。



研究中之氣動力試驗係採用壓力模型,而於壓克 力模型表面佈設密集之壓力孔,各孔以 PVC 管連至電 子式壓力掃瞄器以獲得柱體表面風壓之時序列資料, 據以計算建築物模型之相關風力係數。

至於在氣彈力試驗中則採用剛性氣彈力模型,藉 由模型史庫頓數(Scruton number; Scr)之改變(針對 Scr≤2.5、2.5≤Scr≤5.5及Scr≥5.5等三個區間分別 取一個案進行探討),以雷射位移計量得柱頂在橫風向 之振動位移反應,進而獲取不同來風速度下柱體振動 量(時均值與均方根值),以作爲驗證數值模式計算結 果之比對依據。在進行風洞試驗時,來流風速由低風 速開始逐次增加並跨越渦散共振風速。來流剖面如圖 2所示。



#### 5.2 數值模擬

數值模式之建立係以氣動力(剛性結構)情況為 始,並逐步擴展至氣彈力(柔性結構)之情況。前者 僅包含流體(風場)之動態計算;後者除了風場模擬 外,另需併入結構動力計算,而以流體與結構兩套動 力方程式之交替解析方能正確反映出風場與結構間之 互制效應。

研究中流場之計算係採用微可壓縮流 (weakly-compressible-flow method)方法(Song& Yuan, 1988),以模擬建築物鄰近區域之三維 (three-dimensional)非恆定(unsteady)紊流(turbulent) 風場。數值模式中另應用大渦模擬法配合次網格紊流 模型(subgrid-scale turbulence model),以反映出真實 風場中之紊流特性。本數值模擬方法求解之連續與動 量方程式分別為:

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \mathbf{K} \nabla \cdot \vec{\mathbf{V}} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overrightarrow{\mathbf{V}}}{\partial t} + \overrightarrow{\mathbf{V}} \cdot \nabla \overrightarrow{\mathbf{V}} = -\nabla \frac{\mathbf{p}}{\rho} + \nabla \cdot [(\mathbf{v} + \mathbf{v}_t) \nabla \overrightarrow{\mathbf{V}}] \qquad (2)$$

其中,p與 V 爲經過空間平均後之壓力與速度向量;

K 與  $\rho$  分別為空氣之整體彈性模數 (bulk modulus of elasticity) 與密度; t 為時間; v 與 v<sub>t</sub>分別代表流體之 層流 (laminar) 與紊流黏滯度 (turbulent viscosity)。 此外,紊流黏滯度係應用 Smagorinsky (1963) 提出的 次網格紊流模型 (subgrid-scale turbulence model), 依 據如下 (3) 式獲得:

$$\mathbf{v}_{t} = (\mathbf{C}_{s}\Delta)^{2} \sqrt{2\mathbf{S}_{ij}\mathbf{S}_{ij}}$$
(3)

其中,  $C_s \bigoplus \Delta$  分別為 Smagorinsky 常數與濾格尺度 (filter width);  $S_i$  為應變張量 (strain tensor)。

本數値方法在非恆定(unsteady)紊流(turbulent) 流場計算過程中,(1)式與(2)式之求解係應用有限 體積法(finite-volume method)針對各計算網格採用 MacCormack(1969)之顯隱格式進行。

#### 5.2.1 邊界條件處理

在風場模擬中數值邊界條件之處理上,對固定邊 界(stationary boundary)而言,計算中係於計算區邊 界外之鏡射點(phantom point)給定適當物理量的方 式,以正確地反應出邊界之特性。在速度方面,入流 截面之速度採用預定來流分佈之給定值以定義入流形 態;地面之鏡射點則給予不可滑動條件(no-slip condition),而在其他可穿透邊界(上邊界、側邊界 與出流截面)之鏡射點則依據零梯度之物理特性給定 之。在壓力方面,除將出流截面之平均壓力定為流場 之參考壓力外,其餘邊界之壓力給定均基於零梯度之 物理特性予以處理。

5.2.2 來流風速之數值模擬

當採用大渦模擬方法時,由於針對的流場變數屬 於空間平均的形式,故在入流邊界上動態條件給定之 須作特別的處理,而當實際來流風況爲紊流的形態 時,在速度的呈現上除了包括平均值(mean)外也應 考慮擾動量(fluctuation)。爲了要模擬出一個與風洞 試驗匹配的紊流來流風場以供大渦模擬計算之所需, 研究中採用了 Kondo et al. (1997)建議之頻譜法 (spectral method),以產生所需非恆定形式的紊流來 流風速情況。過程中係以試誤的方式,適當地選取來 流風速在水平橫風(y)向與垂直(z)向之空間相關 性(spatial correlation)後模擬出既定之風速剖面,以 爲後續流場計算中來流邊界條件之輸入資料。

## 5.2.3 數值計算區域與格網

在兼顧風場計算精度與效率的考量下,典型之流 場計算區域(computation domain)如見圖3,計算格 網數為191×109×141,最小格網大小為0.05D。在垂 直方向,計算區之高度取14D(D為方柱斷面寬度)。 在水平方向,計算區水平橫(y)向之間距為7.5D, 而入流/出流截面與柱體之間距亦取足夠之長度(8D 與24D),確使因邊界引致之誤差降至極低。



(a) 水平面



(b) 垂直面(中心剖面)圖 3 典型計算區域與格網圖

## 5.2.4 結構動態反應計算

結構動力計算使用之柱體縱(x)向與水平橫(y) 向之運動方程式為

$$\ddot{\theta}_{x} + 2\xi_{x}\omega_{x}\dot{\theta}_{x} + \omega_{x}^{2}\theta_{x} = \frac{M_{x}}{(I_{o-o})_{x}}$$

$$(4)$$

$$\ddot{\theta}_{y} + 2 \xi_{y} \omega_{y} \dot{\theta}_{y} + \omega_{y}^{2} \theta_{y} = \frac{M_{y}}{(I_{o-o})_{y}}$$
(5)

其中,θ<sub>x</sub>及θ<sub>y</sub>分別為兩個方向之傾角位移(一階與二 階導數分別為振動角速度與角加速度);M<sub>x</sub>及M<sub>y</sub>分別 為因風力造成之基底力矩(自流場計算結果中獲得); Ioo 為相應為基底之轉動慣量;ξ及ω分別為柱體之阻 尼比及角頻率。

#### 5.2.5 風場與結構互制動力計算

在考慮氣彈力的模擬時,為了要真確地反映出風 場與結構振動間引致之互制效應,需將前述之紊流風 場與結構動力計算以交替解析的方式進行。換言之, 數值模擬首先求得瞬間風場之結果,並將柱體承受之 瞬間風力併入柱體振動之計算中以獲得該時之瞬間振 動位移與速度。柱體之動態反應繼需納入下一瞬間風 場模擬邊界條件之給定中,以獲得新時間之風場結果 研究;依此週而復始。

在本研究中非恆定情況下的計算過程,時間增量 (time increment)為 5.7×10-5秒,每計算個案之總真 時(real time)採 300秒(與風洞試驗量測情況一致)。

#### 六、實驗與數值模式結果

#### 6.1 入流剖面模擬結果

圖 4 顯示數值模擬所得到之風場剖面結果,與既 定之 C 地況風場特性相比(亦參見圖 2),本模擬結果 具不錯之吻合程度,此將作為後續風場模擬計算上游 入流邊界條件給定之依據。

#### 6.2 氣動力試驗及模擬結果



依據試驗結果,圖5顯示C地況來流中柱面之平 均與均方根風壓係數等值圖;相同參數下之數值模擬 結果於圖6所示;表1亦列舉出相應之風力係數(亦 參見附錄符號表)。藉比較風壓係數等值圖及風力係數 資料可發現,數值模擬之結果具相當程度之準確性。

#### 6.3 氣彈力試驗及模擬結果

氣彈力之試驗乃針對C地況來流進行3個史庫頓數(Scr=6.74、3.15與1.18)之柱體振動量測。史庫



其中,m\*為柱體一般化質量;ρ為空氣密度;ξ為結構 阻尼比;φ為結構振態。由於方柱在橫風向之振動遠 較順風向明顯,研究中乃著重於橫風向之反應分析。 另一方面,因為柱體模型屬剛性者,在柱頂之反應最 顯著,故以柱頂之歷時位移資料作為分析之對象。



圖 5 柱面風壓係數等値圖(試驗結果)

Development of the Aero-elastic Numerical Model of Buildings and Wind Tunnel Study



【註】基於問題之對稱性,本係數理論上應爲零值。

依據試驗結果,圖7顯示在不同風速下3種史庫 頓數柱頂之橫風向位移均方根值( $\sigma_y$ )與氣動力阻尼 比( $\xi_a$ )之變化。圖中之風速係以無因次(dimensionless) 之形式表徵:U<sub>s</sub>為共振約化風速(reduced resonance speed);U<sub>r</sub>為約化風速(reduced velocity),分別定義 如後:( $f_s$ 為橫風向結構頻率;U<sub>H</sub>為高度為H之來流 風速;(U<sub>H</sub>)<sub>s</sub>為共振發生時高度為H之來流風速)

$$U_{r} = \frac{U_{H}}{f_{s} D}$$
(7)

 $U_{r} = \frac{(U_{H})_{s}}{f_{s}D}$ (8)

此外,試驗中在各來流風速下以預先設定之橫風向 位移(約5cm)為始,持續記錄釋放後之位移反應,繼根 據振幅的衰減率求得相應之整體阻尼比,並由整體與結構 阻尼比之差得到相應之氣動力阻尼比(ξa)。

當考慮互制效應時,研究中亦循上述的三種氣彈 力試驗的情況(Scr=1.46,3.15與6.74)進行數值模擬。 依據數值計算結果,圖8分別為在3個史庫頓數所相 應之柱頂橫風向振動反應均方根值(σ<sub>y</sub>)以及氣動力 阻尼比(ξ<sub>a</sub>)隨著來流風速改變之關係圖(以無因次 之形式呈現)。與試驗結果比較後可見,大體上數值模 擬之結果與試驗結果有不錯的一致性。在Scr=1.46的 情況,數值預測確能表現出柱頂橫風向振動擾動量隨 著風速增加而增加並趨向發散的現象。至於在兩個較 高史庫頓數的情況(Scr=3.15與6.74),除了橫風向振 動擾動量尖峰值的預測呈現略爲低估的情形外,對氣 動力阻尼比變化的預測尙稱吻合。



# 七、討論

風域中鈍體(bluff body)外形建築物由於渦散 (vortex shedding)的產生,因此其鄰近風場呈現非恆 定的變化形態。隨著時間而改變的風場影響建築物的 表面風壓,使得結構體承受的風力亦具有時變性。對 高層結構物而言,由於其相對地較軟,當風力引起的 振動顯著時,結構的動態反應將對其鄰近風場與承受 之時變風力造成程度上的影響,此時相應之結構物的 整體阻尼比亦會有所不同。

本研究針對方柱建築物的風場是一個典型的鈍

體流,在大氣邊界層形式的來流中因柱面分流 (separation)之產生而於柱後形成馬蹄型渦流 (horse-shoe vortex),而因渦散引致的柱體振動又以 (水平)橫風向最為顯著。由於問題中風場變化主要 的無因次頻率(或史特赫數 St)不受風速改變之影響, 故隨著風速之增加風場之頻率亦增。而當渦散頻率與 結構橫風向頻率相近時,由於共振(resonance)效應 的發生導致了柱體最大橫風向振動現象的發生。

儘管台灣目前的高樓建築之高寬比(H/D)以4:1 居多,然一般而言其因風力引致之互制效應並不顯 著。本研究為確實比較數值模擬建築之氣彈力反應結 果,故採用高寬比為 7:1 互制效應較顯著之情況進行 問題之探討與分析。

研究中在兩個較高史庫頓數的情況中(Scr = 3.15 與 6.74),風洞試驗與數值的結果(圖 8a 與圖 8b)均 顯示當來流風速自低速漸增時,氣動力阻尼比(即整 體阻尼比與結構阻尼比之差值) 隨之減少,因此柱頂 橫風向振動量擾動量(  $\sigma_y$ ) 隨之增加。而在共振發生 時(U<sub>r</sub>=U<sub>s</sub>時),氣動力阻尼比呈近於零之最低值,而 相應之ov呈最大值。超過共振區後,儘管來流風速續 增,氣動力阻尼比之變化約略維持平緩,但oy反而漸 減。故由以上之分析得知,互制效應的程度與結構和 渦散頻率接近的程度息息相關。當兩個頻率幾乎一致 時,結構振動過程中自風場獲得之能量最鉅,因而在 橫風向以最明顯的程度助長了柱體振動量的形成。另 一方面,當來流風速逐漸遠離共振風速時,自風場中 獲得能量挹注之比重漸低;無論是在低風速或高風速 情況,互制作用在提昇柱體振動量上之貢獻比重則趨 式微。

至於在史庫頓數為最低之情況(Scr = 1.46),圖 8c 之結果與其他兩個較高史庫頓數的情況並不盡相 同。當來流風速自低速漸增時,氣動力阻尼比亦隨之 減少,然因本情況之結構阻尼比(0.8%)遠較其他兩 個情況(3.7%與6.0%)為低,僅管在來流未達共振風 速前,卻已因整體阻尼比之過低(但仍為正値)而造 成了柱頂橫風向振動量擾動量(oy)劇增的現象。

此外,在研究中數值模擬的準確度方面,研究結 果顯示,於氣動力情況柱面風壓係數(圖5、圖6)與 柱體風力係數(表 1)以及氣彈力情況柱體振動反應 之預測(圖 8)上皆有約 10%之差異。究其原因,應 主要是源於風場數値計算中採用之格網仍不夠細密之 故。Murakami et al. (1992)以學術研究水準之觀點 曾建議,採用大渦模擬紊流計算時最小格網大小應為 0.01D(本研究採用 0.05D)。以本研究典型模擬個案 為例,使用 I7-920 系列中央處理器之個人電腦另配合 以通用計算圖形處理器(general-purpose computing on graphics processing unit)平行處理後需 3 天之計算時 間。若採用 0.01D 最小格網進行同等之三維風場計 算,則將耗時約百倍(5<sup>3</sup>倍)。基於現有計算能量之 限制並考量數值模擬在現階段之實用性,研究中僅能 在預測結果與計算工作執行面間作兼顧之抉擇。相信 隨著電腦在硬體上之快速進展,採取更細密之格網以 獲得更為精準計算結果之可行性將指日可待。

# 八、結 論

本研究之目的主要在以平坦地形中三維方形截 面之獨立柱體爲基準問題,分別針對氣動力與氣彈力 兩種情況,建立足以正確描述相應風場與建築物動力 特性之數値計算模式,以供相關風力分析之用。目前 獲得的結論計有如後五項:

- (1)由氣動力(壓力)模型試驗獲得了C地況方柱 表面風壓分佈結果與相應之風力係數,可作為 爾後相關研究之資料比對依據。
- (2)自C地況中3種史庫頓數之剛性氣彈力模型試驗中獲得了在柱頂橫風向位移均方根値(σ<sub>y</sub>)
   與氣動力阻尼比(ξ<sub>a</sub>)變化關係,並進行了其間互制效應之細部探討。
- (3)建立了流場與剛性氣彈結構物耦合之數值模式。在氣彈力之情況,數值預測結果顯示柱體於橫風向之均方根值振動量略較風洞試驗量測值低(約10%),而柱體橫風向氣動阻尼比之變化則與風洞試驗結果有不錯之吻合度。

## 誌 謝

本研究承蒙內政部建築研究所研究計畫(編號 10062B001)補助研究經費,特此申謝。

#### 參考文獻

- Cheng, C. M., Lu, P. C., & Tsai, M. S. (2002). Acrosswind aerodynamic damping of isolated square shaped buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1743-1756.
- Delaunay, D., Lakehal, D., & Pierrat, D. (1995).Numerical approach for wind loads prediction on buildings and structure. *Journal of Wind Engineering*

and Industrial Aerodynamics, 57, 307-321.

- Fang, F. M. (2006). Some CFD applications in bluff-body aerodynamics. *Proceedings of Future Development for Environment Restoration and Disaster Reduction Technologies Symposium* (pp. 79-84). Taichung: The Center for Environmental Restoration and Disaster Reduction, National Chung Hsing University.
- Fang, F. M., Li, Y. C., & Liang, T. C. (2003). CWE development in Taiwan. *Proceedings of 2003 International Wind Engineering Symposium* (pp. 107-122). New Taipei City: Tamkang University.
- Gomes, M. G., Rodrigues, A. M., & Mendes, P. (2005). Experimental and numerical study of wind pressures on irregular-plan shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 741-756.
- Kawai, H. (1992). Vortex induced vibration of tall buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, 117-128.
- Kondo, K., Murakami, S., & Mochida, A. (1997). Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67 & 68, 51-64.
- Kwok, K. C. S., & Melbourne, W. H. (1981).
  Wind-induced lock-in excitation of tall structures.
  Journal of the Structural Division, 107(1), 57-72.
- MacCormack, R. W. (1969). The effect of viscosity in hyper-velocity impact crattering. *Proceedings of AIAA Hypervelocity Impact Conference* (Paper No. 69-354).
  VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Matsumoto, T. (1986). On the across-wind oscillation of tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 24, 69-85.
- Mikkelsen, A. C., & Livesey, F. M. (1995). Evaluation of the use of the numerical k-ε model Kameleon Π, for

predicting wind pressures on building surface. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 57, 375-389.

- Murakami, S., Mochida, A., Hayashi, Y., & Sakamoto, S. (1992). Numerical study on velocity-pressure filed and wind forces for bluff bodies by k-ε, ASM and LES. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, 2841-2852.
- Murakami, S., & Mochida, A. (1995). On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54, 191-211.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99-164.
- Song, C. C. S., & Yuan, M. (1988). A weakly compressible flow model and rapid convergence methods. *Journal of Fluids Engineering Transactions* ASME, 110, 441-455.
- Vickery, B. J., & Steckley, A. (1993). Aerodynamic damping and vortex excitation on an oscillating prism in turbulent shear flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 49, 121-140.