以數值計算方法評估方柱形狀建築物之受風效應

方富民* 鍾政洋** 李振豪**

關鍵字:建築研究,數值模擬,風洞試驗

摘要

本研究以大氣邊界層中平坦空曠地形上高寬比為4之單一方柱為基準問題,先以風洞建築模型 試驗量取風場與柱體之風力係數作爲數值模擬結果驗證之基本資料,繼以微可壓縮流的計算流體動 力學數值方法,配合以空間平均的大渦模擬與次網格紊流模型進行風場之計算,並將數值與量測結 果相互比對驗證,進而評估數值模擬在建築風力分析之適用性與可行性。最後,研究中再依據數值 模擬結果與風洞實驗數據之比對與探討,初步研擬工程實務上可接受的 CFD 模擬參考原則。

Evaluation of Wind Effect of a Square Prism by Numerical Simulation

F. M. Fang^{*} C. Y. Chung^{**} C. H. Li^{**}

KEYWORDS: Building Study, Numerical Simulation, Wind Tunnel Test

ABSTRACT

In the study, a single square building with an aspect ratio of 4 in a flat territory is set as the benchmark problem to assess how the application of numerical simulation is valid for the evaluation of the wind effects of the building. Wind tunnel measurements were firstly performed to measure the force coefficients associated with a building model and the results were taken as the basis for the verification of the numerical results. Numerical simulations, based on a weakly-compressible-flow method with a space-averaged large-eddy-simulation technique and a subgrid-scale turbulence model, were then carried out in parallel and the results were compared to the measurement data. After the accuracy and validity of the numerical method was verified, extensive numerical investigations were conducted to propose certain general guidelines for the applications of CFD methods in evaluating the wind effect buildings.

^{*} 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 40227 ** 國立中興大學土木工程學系博士班研究生

Ph.D. students, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan 40227

一、前言

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之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。利用數值方法為運算基礎,使得不易求解之流體力學理論,藉由 高速電腦之便利,得以快速並達到模擬流體於各種邊界條件下的運動方式。同時,配合以影像後處 理,可將其運動過程及結果顯示出來,其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。

之前典型相關的 CFD 研究, Murakami et al.(1992)曾利用 k-ɛ及大渦模擬(large eddy simulation; LES)兩種紊流模式進行預測,結果顯示 k-ɛ模式計算結果與實驗結果有明顯差距,而 LES 模式則與 實驗結果較為符合。Delaunay et al.(1995)及 Mikkelsen and Livesey(1995)則利用修正後之 k-ɛ 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 and Mochida(1995)針對方形突出物的流況來比較應用 k-ɛ、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(2006)與 Fang et al. (2003)。

在傳統的建築風力研究中,採用風洞試驗量測的方法需要較高之實驗成本且相對地費時。隨 著計算機軟硬體的長足進步,藉其高速運算與大量處理資料之能力,運用計算流體動力學的方法進 行風場之解析,並與風洞試驗相互配合已成爲國際風工程界的重要趨勢。

使用數值模擬的方法具有高效率與經濟性的特點。分析者在沒有縮尺效應的顧慮下,得以系統化地從事各種來風條件(雷諾數、風向)與幾何條件(建築結構外形狀、尺度)下問題的探討,並獲得整場與所有風場變數之全時資料。誠然,數值計算並非毫無缺點,如針對複雜結構外形或地貌的風場預測,以目前的模擬能力仍有一些課題(如紊流模型)亟待解決即為一例。

目前內政部頒布的「建築物耐風設計規範及解說」(2006)第五章中有"建築物之耐風設計,依本規範無法提供所需之主要抗風系統設計風力或是外部被覆物之設計風壓風力資料時,得以風洞試驗作為耐風設計之依據"之規定,並針對風洞試驗之主要項目、應遵守之模擬要求與設計時風洞試驗報告之引用等方面提出了相關之建議。然而,在數值模擬方法應用於耐風設計方面並無著墨,此與國際主流趨勢相較確有遺珠之憾。因此,有關 CFD 方法應用在建築物之耐風設計評估上的準確 性與可行性,實有進一步探討之必要。

二、目的

本研究以大氣邊界層中平坦空曠地形上單一方柱為基準問題(benchmark problem),首以風洞 模型試驗量取風場與柱體之風力係數作爲數值模擬結果驗證之基本資料,再以流體動力學數值方法 進行風場之計算,繼將數值與量測結果相互比對驗證,進而評估其適用性與可行性。最後,再依據 數值模擬結果與風洞實驗數據之比對與探討,初步研擬工程實務上可接受的 CFD 模擬參考原則。

研究中之試驗部份係於內政部建築研究所風洞試驗室之低速風洞進行;在數值計算上則選定 微可壓縮流(weakly-compressible-flow method; WCF; Song and Yuan, 1988)的 CFD 數值方法,配合 以空間平均(space averaged)的大渦模擬(LES)與次網格紊流模型(sub-grid scale turbulence model) 從 事風場之計算,以進行方柱受風效應之比較與分析。

三、方法概述

3-1 風洞試驗

風洞模型試驗量測之配置如圖 1 所示。風洞試驗段長 30 m,斷面為 4.0 m(寬)× 2.6 m(高),最 大風速為 37 m/s。為針對符合風力規範之地況 C 為探討之基準風況進行柱體受風效應之比較與探 討,研究中於風洞測試段適當佈設錐形渦流產生器(spire)與地表粗糙元(roughness elements),以製 造出預定之來流風況。方柱建築模型係以厚度為 2 mm 之壓克力板粘合而成,其截面尺寸為 10 cm(寬)×10 cm(深),高度(H)為 40 cm。試驗中相應之阻塞比(blockage ratio)小於 4%。



圖1 風洞試驗簡示圖

圖2顯示風洞試驗中空流場(無設置建築模型)情況來流截面(方柱迎風面上游120 cm 或3H 處) 相應之平均風速剖面與風速均方根値(root-mean-square)剖面,此將作爲後續數値模擬中入流邊界條 件給定之依據。其中, U_{δ} =14.01 m/s,爲高度 120 cm 處之平均風速;邊界層厚度(δ)爲 120 cm;u'、 v'與 w'分別爲順風 X 方向、水平橫風 Y 方向與垂直 Z 方向之風速均方根擾動量。



圖 2 來流截面之風速剖面:(a)平均值剖面;(b)均方根值剖面

3-1-1 風速量測

風速之量測係使用 DANTEC 之恆溫流速儀(constant temperature anemometer),熱線探針的率定 乃應用已率定的薄膜式壓力轉換器,在風洞入口處地面架上皮托管(平行中心線),將其動靜壓接於 薄膜式壓力轉換器上,再利用熱線探針所得的電壓值與薄膜式壓力轉換器轉換後的風速得出一條四 次方多項式的迴歸率定曲線,以爲後續流速儀風速轉換之依據。

在使用恆溫流速儀進行來流風況量測時,採用之取樣頻率為1000 Hz,每測點量測時間為300秒。

3-1-2 建築模型表面風壓量測

為量測柱體表面之風壓分佈,試驗中於方柱模型表面適當位置佈設 240 個間距為 0.5 至 3.5 cm 之壓力量測孔。風壓孔以內徑 1mm 長度 20 cm 之 PVC 軟管將風壓訊號導入電子式壓力掃瞄器 (ZOC33/64 PX)。本掃描器每個單一模組有 64 個壓力輸入管,對應 64 個壓電式壓力感應器,每一 壓力感應器皆可單獨校正。實驗前需經具白噪音(white noise)特性之擾動壓力信號進行率定,驗證 無扭曲頻率達 35Hz 以上。管線系統連接至 Scanivalve 模組上的壓力輸入埠,電子式壓力掃瞄器以 64 個量測孔為一模組,壓力量測模組安置於模型內部,模型規劃以鄰近 64 個孔位規劃為同一壓力 模組,分別接入電子式壓力掃瞄器。各模組連接至壓力訊號處理系統(RAD BASE 3200),可支援類 比數位之轉換,最高可支援 8 個模組,其解析度為 16 bits,最大採樣頻率為 500Hz, 擷取之資料轉 換完成之後藉由此系統傳至個人電腦儲存分析。

模型表面風壓量測過程中,採樣頻率為 250 Hz,時間為 300 秒,並以側方模型頂高處之靜壓 為參考壓力(p₀)。

3-2 數值模擬

研究中之數值計算上係採用微可壓縮流的 CFD 數值方法,配合以空間平均的大渦模擬與次網 格紊流模型進行風場之計算,以進行方柱受風效應之比較與分析。本 WCF 數值模擬方法(Song and Tuan, 1988)為應用有限體積法(finite volume method)之研究型軟體,據以求解之連續與動量方程式 分別為:

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

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

其中,p 與 \overline{V} 為經過空間平均後之壓力與速度向量;K 與 ρ 分別為流體之整體彈性模數(bulk modulus of elasticity)與密度;t 為時間;v 與 v_t 分別代表流體之片流(laminar)與紊流黏滯度(turbulent viscosity)。此外,紊流黏滯度係應用 Germano et al.(1991)提出的動態次網格紊流模型(dynamic subgrid-scale turbulence model),依據如下(3)式獲得:

$$v_{t} = (C_{S}\Delta)^{2}\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$
⁽³⁾

其中, C_s與Δ分別為 Smagorinsky 常數與濾格尺度(filter width); S_{ii} 為應變張量(strain tensor)。

本數值方法在非恆定(unsteady)紊流(turbulent)流場計算過程中,式1與式2之求解係應用有限 體積法以隱式(implicit scheme)的方式進行。

3-2-1 邊界條件處理

風場模擬中在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,柱面與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。

當採用大渦模擬(LES)方法時,針對的流場變數則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。由於實際來流風況爲紊流的形態,在速度的呈現上除了包括平均値(mean)外也應考慮擾動量(fluctuation),而爲了要模擬出一個與研究中風洞試驗匹配的紊流來流風場,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來流風速情況。過程中係以試誤(try-and-error)的方式,適當地選取來流風速在水平(Y)方向與垂直(Z)方向上之空間相關性(spatial correlation)後,模擬出既定之風速剖面,以作爲後續流場計算中來流邊界條件之輸入資料。圖3顯示數值模擬而得之來流風速均方根值剖面,此與風洞試驗量測結果(圖2a)相較,有不錯之吻合度。其中,由於地面屬不可滑動、不可穿透之固體邊界,故愈近地面時風速均方根值則隨著遞減至零。



圖 3 來流截面之風速均方根值剖面比較

3-2-2 數值計算區域

在兼顧計算結果之精確度與計算效率之考量下,研究中典型風場模擬採用之計算區域 (computation domain)如圖 4 所示。計算格網採用直角正交格網(520×396×346),最小格網之尺寸(於 柱體角落處)為 0.025D(D 為方柱之寬度)。典型之平面計算格網如見圖 5。



圖 4 典型計算區域簡示圖:(a)平面; (b)立面



圖 5 典型計算格網:(a)平面; (b)立面

四、結果比較

研究中進行數値計算採用之電腦具有 Intel Core 17 920 四核心處理器,單機能進行 8 個執行緒 運作,其每秒浮點運算次數(FLOPS)約為 58G。在運算時係將四台電腦架構成平行計算叢集,使得 計算速度提升至約 150G。典型計算中,無因次真時(real time)為 80, CPU 時間需 12.5 天。

4-1 柱體表面風壓分佈

依據風洞試驗量測結果,圖6與圖7分別以無因次之平均風壓係數($\overline{C_p}$)與均方根値風壓係數 (C_p)顯示方柱表面風壓空間分佈之情形。其中,

$$\overline{Cp} = \frac{\overline{p} - p_0}{0.5\rho U_H^2} \quad ; \quad Cp' = \frac{p'}{0.5\rho U_H^2}$$
(4)

 \bar{p} 與 p' 分別為平均壓力與壓力均方根値; p_0 為參考壓力; U_H 為高度在 40 cm (H)處之平均來流 風速(12.04 m/s)。







圖 9 數值模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖

另一方面,應用 WCF 方法,採用如圖 4 所示之計算區域與 520×396×346 直角正交格網(最小 格網之尺寸為 0.025D),以圖 2 為依據給定入流截面之邊界條件,圖 8 與圖 9 則為數值模擬方柱表 面風壓分佈之結果。與風洞試驗結果(圖 6 與圖 7)相較下顯示,儘管在壓力係數等值線相應之數字 上有些許差異,本數值模擬可以正確地將柱面風壓分佈之形態預測出來。

4-2 柱體阻/升力與等値阻/升力

若忽略剪應力之效應,將柱面之壓力作面積積分後,合力在順風(along wind)向與水平橫風 (across wind)向之分量,則為柱體承受之總阻力(drag)與水平升力(lift)。此外,將柱體在順/橫風向之 總力矩除以方柱高(H)後得到之等値阻力與水平升力,可以表徵柱體受力作用點位置之變化。表 1 列舉了數值模擬與試驗量測柱體阻力係數(C_D)、水平昇力係數(C_L)、柱頂等値阻力係數(C_{D,eq})與柱 頂等値水平升力係數(C_{L,eq})之統計比較結果(平均與均方根値)。所列為柱體受風作用下承受之平均 値(以"__"表示)與均方根値(以"," 表示)阻/升力係數之比較。其中,

$$C_{\rm D} = \frac{F_{\rm D}}{\frac{\rho}{2} U_{\rm H}^2 \rm{DH}}$$
(5)

127

$$C_{L} = \frac{F_{L}}{\frac{\rho}{2} U_{H}^{2} DH}$$
(6)

$$C_{D,eq} = \frac{M_D}{\frac{\rho}{\rho} U_{\mu}^2 D H^2}$$
(7)

$$C_{L,eq} = \frac{M_L}{\frac{\rho}{2} U_H^2 B H^2}$$
(8)

其中,FD與FL分別為柱體總阻力與水平升力;MD與ML為柱體在X-Z與Y-Z面上承受之總力矩。

| | 風洞試驗結果 | 數值模擬結果 | 相對誤差(%) |
|-----------------------|--------|--------|----------|
| $\overline{C_{D}}$ | 1.09 | 1.17 | 7.3 |
| C _D ' | 0.16 | 0.18 | 12.5 |
| $\overline{C_L}$ | -0.06 | -0.004 | (正確値應爲零) |
| C _L ' | 0.31 | 0.31 | 0.0 |
| $\overline{C_{D,eq}}$ | 2.56 | 2.88 | 12.5 |
| C' _{D,eq} | 0.38 | 0.47 | 23.7 |
| $\overline{C_{L,eq}}$ | 0.05 | 0.06 | (正確値應爲零) |
| $C'_{L,eq}$ | 0.77 | 0.76 | 1.3 |

表1 方柱阻力係數與水平升力係數統計值之比較

由表 1 所列各項風力係數之比較來看,儘管在平均風壓係數與風壓係數均方根值圖中顯示有 所差異,然而在柱體整體受風統計值之比較上,其相對誤差應在可接受的範圍中,顯示目前使用之 數值方法在方柱受風效應之模擬上具有不錯之預測能力。

五、數值模擬中相關設定之檢討

5-1 最小格網尺寸

為了要瞭解數值模擬格網數與最小格網尺寸對計算結果之影響並據以檢討個案模擬之採用準則,研究中以方柱情況為例,取用如圖 4 所示之計算區域,採用四種不同密度之格網系統(參見表 2)進行數值模擬。結果顯示,當格網密度漸低時,柱面壓力分佈之變化趨勢大致相同,但在空間上的解析度則相對較差。

| 格網編號 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 最小格網尺寸 | 小格網尺寸 0.025D | | 0.05D | 0.1D |
| 格網數 | 520×396×346 | 496×368×332 | 448×328×320 | 412×296×284 |
| 柱體側面格網數 | 36×144 | 24×84 | 18×72 | 8×36 |

表2 四種不同密度之格網系統說明

表 3 列舉了方柱阻力係數(C_D)、水平升力係數(C_L)、柱頂等値阻力係數(C_{D.eq})與柱頂等値水平 升力係數(C_{L,eq})之統計比較結果(平均與均方根値)。其中,當格網變粗時,由於數值擴散效應增大, 使得C_D'漸減,然而相應C'_{D,eq} 値之變化則不顯著。誠然,理論上使用愈細密之格網會得到愈精準的 數値結果,但相對地會顯著增加計算所需之時間。因此,表 3 之結果顯示,仍以採用格網 1(格網 數:520×396×346;最小格網尺寸:0.025D)為宜。

| | | | 數 値 | 結 果 | |
|------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|
| 試驗結果 | | 格網1 | 格網2 | 格網 3 | 格網 4 |
| $\overline{C_{D}}$ | 1.09 | 1.17 | 1.14 | 1.09 | 1.06 |
| C _D ' | 0.16 | 0.17 | 0.16 | 0.10 | 0.08 |
| $\overline{C_{L}}$ | -0.06 | -0.004 | -0.002 | 0.009 | 0.028 |
| C _L ' | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.28 | 0.26 |
| $\overline{C_{\text{D,eq}}}$ | 2.56 | 2.88 | 2.74 | 2.63 | 2.58 |
| $C_{D,eq}^{'}$ | 0.38 | 0.47 | 0.44 | 0.42 | 0.48 |
| $\overline{C_{L,eq}}$ | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.09 |
| C' _{L,eq} | 0.77 | 0.76 | 0.73 | 0.67 | 0.55 |

表 3 不同格網系統數值計算方柱結果比較

5-2 計算區域大小

數值模擬再以方柱情況爲例,應用WCF軟體進行風場模擬以探討計算區域對計算結果之影響。

5-2-1 柱體水平兩側淨空改變之影響

當柱體上游、頂側與下游之淨空保持與圖 4 所示相同的情況下,表 4 為三個不同柱體兩側淨空之比較結果。大體上,當兩側淨空由 2H 增加為 3H 時數值統計結果無明顯改變,但將兩側淨空由 2H 減為 1.5H 時數值統計結果之誤差則有增加之趨勢。

| 試驗結果 | | 數 | 値 結 | 果 |
|-----------------------|-------|-------|--------|-------|
| 柱頂淨空 | | 1.5H | 2H | 3Н |
| $\overline{C_{D}}$ | 1.09 | 1.26 | 1.14 | 1.08 |
| C _D ' | 0.16 | 0.23 | 0.16 | 0.14 |
| $\overline{C_{L}}$ | -0.06 | -0.09 | -0.002 | 0.002 |
| C_{L} ' | 0.31 | 0.42 | 0.30 | 0.30 |
| $\overline{C_{D,eq}}$ | 2.56 | 2.88 | 2.74 | 2.70 |
| $C_{D,eq}$ | 0.38 | 0.54 | 0.44 | 0.43 |
| $\overline{C_{L,eq}}$ | 0.05 | 0.11 | 0.08 | 0.08 |
| $C'_{L,eq}$ | 0.77 | 0.91 | 0.73 | 0.78 |

表 4 不同柱體兩側淨空數値計算方柱結果比較 表 5 不同柱頂淨空數値計算方柱結果比較

| 試驗結果 | | 數 | 値 結 | 果 |
|-----------------------|-------|-------|--------|-------|
| 柱頂淨空 | | 1.5H | 2H | 3Н |
| $\overline{C_{D}}$ | 1.09 | 1.26 | 1.14 | 1.08 |
| C _D ' | 0.16 | 0.23 | 0.16 | 0.14 |
| $\overline{C_L}$ | -0.06 | -0.09 | -0.002 | 0.002 |
| C _L ' | 0.31 | 0.42 | 0.30 | 0.30 |
| $\overline{C_{D,eq}}$ | 2.56 | 2.88 | 2.74 | 2.70 |
| C' _{D,eq} | 0.38 | 0.54 | 0.44 | 0.43 |
| $\overline{C_{L,eq}}$ | 0.05 | 0.11 | 0.08 | 0.08 |
| C' _{L,eq} | 0.77 | 0.91 | 0.73 | 0.78 |

5-2-2 柱頂淨空改變之影響

當柱體上游、兩側與下游之淨空保持與圖 4 所示相同的情況下,表 5 顯示三個不同柱體頂側 淨空之比較結果。整體而言,當頂側淨空由 2H 增加為 3H 時數值統計結果略有改進然不顯著,然 當頂側淨空由 2H 減為 1.5H 時數値計算統計結果與風洞試驗結果之差異則有增加之趨勢。

5-2-3 柱體下游淨空改變之影響

當柱體上游、兩側與頂側之淨空保持與圖 4 所示相同的情況下,表 6 為四個不同柱體下游淨 空之數值比較結果。由表中可見,下游淨空應至少為 6H 方能確保數值模擬結果之正確度。

| 試驗結 | 試驗結果 | | 數 値 結 果 | | | |
|-----------------------|-------|-------|---------|------|--------|--|
| 柱面下游淨空 | | 3Н | 4H | 5H | 6H | |
| $\overline{C_{D}}$ | 1.09 | 1.37 | 1.31 | 1.20 | 1.14 | |
| C _D ' | 0.16 | 0.08 | 0.12 | 0.19 | 0.16 | |
| $\overline{C_L}$ | -0.06 | 0.010 | 0.03 | 0.01 | -0.002 | |
| C _L ' | 0.31 | 0.22 | 0.24 | 0.29 | 0.30 | |
| $\overline{C_{D,eq}}$ | 2.56 | 3.03 | 2.96 | 2.81 | 2.74 | |
| $C_{D,eq}$ | 0.38 | 0.27 | 0.31 | 0.45 | 0.44 | |
| $\overline{C_{L,eq}}$ | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.09 | 0.08 | |
| $C'_{L,eq}$ | 0.77 | 0.56 | 0.54 | 0.69 | 0.73 | |

表 6 不同柱體下游淨空數値計算方柱結果比較

六、討論

除了 WCF 研究型 CFD 方法外,研究中亦嘗試以兩套商用軟體—美國 Ansys 公司推出的 Fluent 與日本的 Star-CD 進行平行的風場計算。結果發現,在應用這兩套商用軟體時除了在與風洞試驗結 果之比對上產生了較大之差異外,在執行數値計算的過程中,亦發生了一些有待克服的技術層面的 問題:

1. 硬體記憶容量的限制

兩個商業軟體的運算能量取決於計算機的記憶容量,儘管使用目前的 HP ProLiant BL460c 工作站級的刀鋒伺服器計算機從事數値計算,在計算格網密度上仍有其限制。

2. 程式中預設値可能導致錯誤的結果

在商業軟體程式中常給定一些預設(default)値或條件,以避免結果的發散(divergence)。若使用 者未能仔細檢查各預設條件是否適用於既定之情況,可能會與預定之情況不符。換言之,數值模擬 之執行者對商用軟體中各項之設定需頗爲熟稔,並在計算過程選項中作正確的設定,否則極易得到 不正確的計算結果。

3. 入流邊界紊流風速條件之給定

兩個軟體在入流邊界條件的給定上具有固定的輸入模式,但在針對本研究中入流邊界紊流風速條件之給定上則難以適用,導致數值模擬中來流之紊流剖面難以符合風洞試驗之量測結果。

4. 輸出資料方式的不便性

二商用軟體的輸出資料缺乏彈性,係以全場全時所有速度與壓力之形態呈現。使用者需在大量的輸出資料中擷取所需之部份資料進行後處理,造成了工作上的不便並降低了效率。

七、結論

本研究以大氣邊界層中平坦空曠地形上高寬比為 4 之單一方柱為基準問題,先以風洞建築模型試驗量取風場與柱體之風力係數作爲數值模擬結果驗證之基本資料,繼以微可壓縮流(WCF)的計算流體動力學數值方法,配合以空間平均的大渦模擬與次網格紊流模型進行風場之計算,並將數值與量測結果相互比對驗證,進而評估數值模擬在建築風力分析之適用性與可行性。

研究中發現,以數值模擬方法進行建築物風力分析是可行的。儘管在執行數值計算的過程中仍有一些技術面的困難度有待克服外,以本研究採用 WCF 研究型軟體的應用爲例,在進行建築物風力分析上,確實能提供精確度不錯的結果,以爲耐風設計之依據。

最後,本研究在應用 WCF 風場預測的精確度方面,針對了格網系統(格網密度、最小格網尺 寸)與計算區域大小(柱體兩側、頂側、下游淨空)進行檢討,並以大氣邊界層中平坦空曠地形上高 寬比為4單一方柱之基準問題為例,初步建議了工程實務上可接受的 CFD 模擬準則,以供相關研 究與未來規範訂定之參考。茲條列如後,:

- 研究結果顯示,空間平均的 LES 方法對本研究個案結果之預測準確度較時間平均的 k-ε 方法高。 故在從事數值模擬時,其紊流模型宜採用空間平均的大渦模擬(LES)。
- 2. 在流場計算區域之選定上,柱體上游、兩側、頂側與下游之淨空應分別至少為 3H、2H、2H 與 6H(H 為柱體高度)。
- 3. 模擬計算最小格網應小於 0.025D(D 為柱體寬度)。

誌 謝

本研究承蒙內政部建築研究所研究計畫 097301070000G1015 補助研究經費,特此申謝。

參考文獻

內政部建築研究所(2006)〈建築物耐風設計規範及解說〉,營建雜誌社編印,台灣。

- Delaunay, D., Lakehal, D. and 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 Symposium on Future Development for Environment Restoration and Disaster Reduction Technologies: 79-84, Taichung, Taiwan.
- Fang, F.M., Li, Y.C. and Liang, T.C. (2003), CWE development in Taiwan," Proceedings of 2003 International Wind Engineering Symposium: 107-122, Tansui, Taiwan.
- Germano, U., Piomelli, P. and Cabot, W.H. (1991), A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Physics of Fluids*, 3: 1760-1765.
- Gomes, M.G., Rodrigues, A.M. and Mendes, P. (2005), Experimental and numerical study of wind pressures on irregular-plan shapes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93: 741-756.
- Kondo, K., Murakami, S. and Mochida, A. (1997), Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67/68: 51-64.
- Mikkelsen, A.C. and Livesey, F.M. (1995), Evaluation of the use of the numerical k-ε model Kameleon II, for predict-ing wind pressures on building surface, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 57: 375-389.
- Murakami, S. and 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.
- Murakami, S., Mochida, A., Hayashi, Y. and 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.
- Song, C.C.S. and Yuan, M. (1988), A weakly compressible flow model and rapid convergence methods, *Journal of Fluids Engineering, Transactions ASME*, 110: 441-455.