

以計算流體力學模式探討縮尺效應 及建模範圍對於環境風場之影響

柯昱明¹、陳尉豪¹、李盛全²、陳錦煌³

景丰科技股份有限公司,工程師¹,副總經理²,總經理³

摘要

本文採用開源三維計算流體力學模式「OpenFOAM」，進行環境風場議題的探討。縮尺效應之研究採用Yoshie (2005)之指標案例，藉由改變其模型之尺度，分析於不同尺度之環境風場模擬中，縮尺效應對於建築周圍風場的影響。此外，在模擬複雜的都市風環境時，常需建立大範圍之都市建築模型，建模範圍的增加也造成整體評估時程延長。本研究中依複雜度設立數種不同之建築分布情境，再於各情境中分別建立不同範圍之建築模型，藉由分析各案例之模擬結果，找出兼顧準確度及效益之合理建模範圍。

關鍵詞：環境風場；計算流體力學；縮尺效應；建模範圍；高層建築；OpenFOAM

A Study of Scale Effect and Influence of Surrounding Building Range on Environmental Wind Field Using CFD model.

Ko Yu-Ming¹, Chen Wei-Hao¹, Lee Sheng-Chuan², Chen Jim-Huang³

Environmental Simulation Co. Ltd., Engineer¹, Vice General Manager², General Manager³

Abstract

The study adopts “OpenFOAM”, an open-source three-dimensional computational fluid dynamics model, to explore issues relating to environmental wind field. The investigation on scaling effect adopts the benchmark of Yoshie (2005). Also the scaling effect to the environmental wind fields around buildings in simulations of environmental wind fields at different scales is investigated by varying the scale of the model. Besides, in simulations of wind fields in urban area, which exhibits a higher level of complexity, it usually requires to build a large-scale model for the buildings in the urban region. The wider range thus makes the overall time course of evaluation longer. In this study, several scenarios with different building distributions of different complexity levels are set up, and the building models differing in ranges are respectively built in these scenarios. Also, a reasonable model range with reasonable accuracy and efficiency is developed by analyzing simulation results of the respective cases.

Key words : environmental wind field, CFD, scale effect, surrounding building Range, high-rise building, OpenFOAM

1. 前言

隨著社會發展，多數人口集中於都會區內居住，隨之而來環境的高度開發以及對於生活品質的重視，使得都會區中的環境議題逐漸成為焦點，其中都市中環境風場的議題扮演著關鍵的角色，從居住環境的通風、城市裡污染物的傳輸到行人風場舒適度等，都影響著我們生活中的舒適、健康及安全，如何合理的對於環境風場進行分析，也成為一個重要的課題。

環境風場的評估方法，大致上可分為理論分析、風洞實驗、實場監測及數值模擬，每種方法皆有各自的優點及適用範圍。一般研究及工程應用上，理論分析配合風洞實驗的使用了相當長的一段時間，有著相當可靠的成果，在都市風環境的應用上，因實驗模型與真實情境的尺度不同，分析時須考慮相似性的限制。實場監測則沒有尺度問題，但如需詳細的時間、空間資料則需要較多的人力、物力來進行，也不容易應用於預測，使用上受到限制。數值模擬在近年來電腦計算能力的發展下，計算效能與處理複雜問題之能力已達實務應用之水準，並有著不受尺度限制以及容易取得全模擬域中風場時、空間之訊息的特色，相當適用於環境風場的評估分析，本文之研究將採用計算流體力學（Computational Fluid Dynamic, CFD）模式，以數值模擬之方法進行環境風場分析。

除尺度可能會對結果造成影響外，在環境風場中，氣流經過建築周圍時會受其干擾而導致風速的增減，並於建築周圍產生下切、繞流、尾流等現象。這些現象在建築密集，且高低、疏密分布不均的都會區中，將會互相影響而導致結果更加複雜。例如於行人風場或是都市規劃的研究議題中，常鎖定一些關注區域如高樓建築周圍、公共場所等，並將關注區域內之建築納入模擬範圍中建立建築模型，但除了關注區域內的建築，位於該區域周邊之鄰近建築亦會對風場產生影響，因此應增加建築模型建立之範圍，但建築模型範圍的擴大會使得評估時程延長，如何在兼顧準確度及效益的情況下，找出合理的建模範圍，也是本文探討的重點。

2. 研究方法

2.1 模式簡介

本文中採用著名之開源（Open Source）計算流體力學模式「OpenFOAM」，模式本身的物理計算模組涵蓋領域廣泛，可針對不同物理情境選用對應之求解器，於航空、機械、環境等眾多領域皆有使用者進行研究及應用。模式本身之前、後處理完整，可滿足地形、建築之幾何資料導入、網格劃分、資料分析、2D、3D 繪圖及動畫製作等需求。在紊流的處理上，也包含大渦模擬（LES）、 $k-\varepsilon$ 模式、直接數值解（DNS）等紊流模式。在本文的模擬中，使用 OpenFOAM 模式中求解三維穩態不可壓縮之 RANS 方程式之求解器「simpleFoam」，配合工程應用中常見之標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式進行環境風場的模擬分析。

2.2 模式驗證

柯（2014）曾以 OpenFOAM 模式進行 CFD 模式與風洞實驗結果之比較，研究中參考 Yoshie (2005) 之都會區建築物群風場實驗數據，建立尺度為 1:400 之模型，主建物位於流場中央（圖 1），長、寬為 62.5 mm，高 $H=250$ mm，周遭之低矮建築物之長、寬為 100 mm，高度為 25 mm。測量點之位置分布於主建物周圍（圖 2），測量高度距地面 5 mm（真實尺度中 2 m 高），主建物高 ($H=250$ mm) 處之風速 $U_H=6.61$ m/s，實驗採 0° 、 22.5° 及 45° 三個風向，分別測量該風速下各測點之風速值。模擬設定中，模擬域尺寸及建築位置參考實驗設置建立，模擬域之長、寬、高為 1.8m，水平方向建立均勻網格，垂直方向網格由頂部向下逐層加密，再以局部加密之方式提升目標區域的網格解析度，以主建物及周圍鄰近區域最密，外圍較疏，總網格數約 296 萬，網格配置如圖 3、圖 4。上游風速邊界依實驗量測之風

速剖面設置，下游側設定為零梯度之開放邊界，側向及頂部邊界為自由滑移邊界，建築物之表面及地表則以壁面函數設定。各風向之模擬結果皆為收斂時之答案，模擬與實驗值之比較結果如圖 5，圖中橫坐標為各測點之編號，縱座標為測點風速與 U_H 之比值，其中風速較強之區域中以點 48、51 之風速差異較大，約達 25%，其餘各點之差異皆於 15% 以下，差異較明顯之區域主要發生於建築後方之尾流區。整體來看，各風向模擬值之趨勢皆與量測資料相符， 0° 、 22.5° 及 45° 風向下之平均誤差分別為 -23%、-20% 及 -15%，CFD 之模擬結果相較於實驗值略有低估之情形。

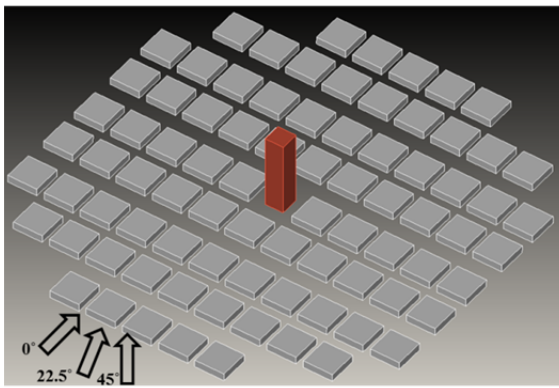


圖 1 模擬配置圖

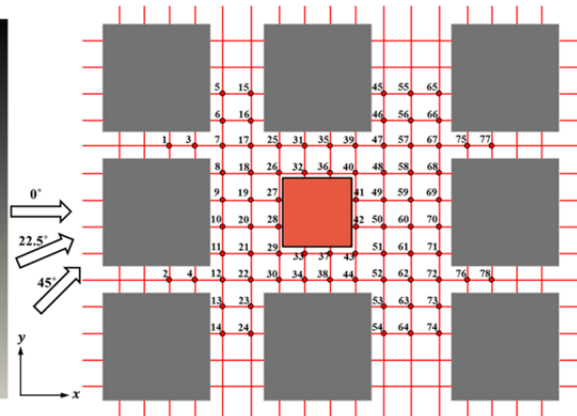


圖 2 觀測點位置

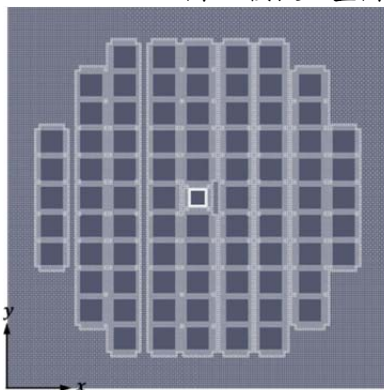


圖 3 網格配置俯視圖

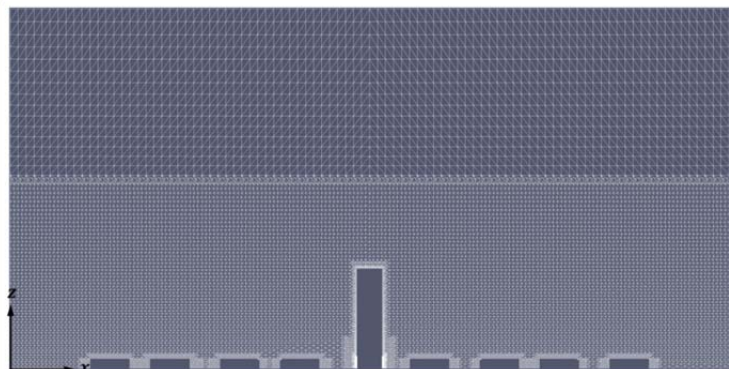


圖 4 網格配置側視圖

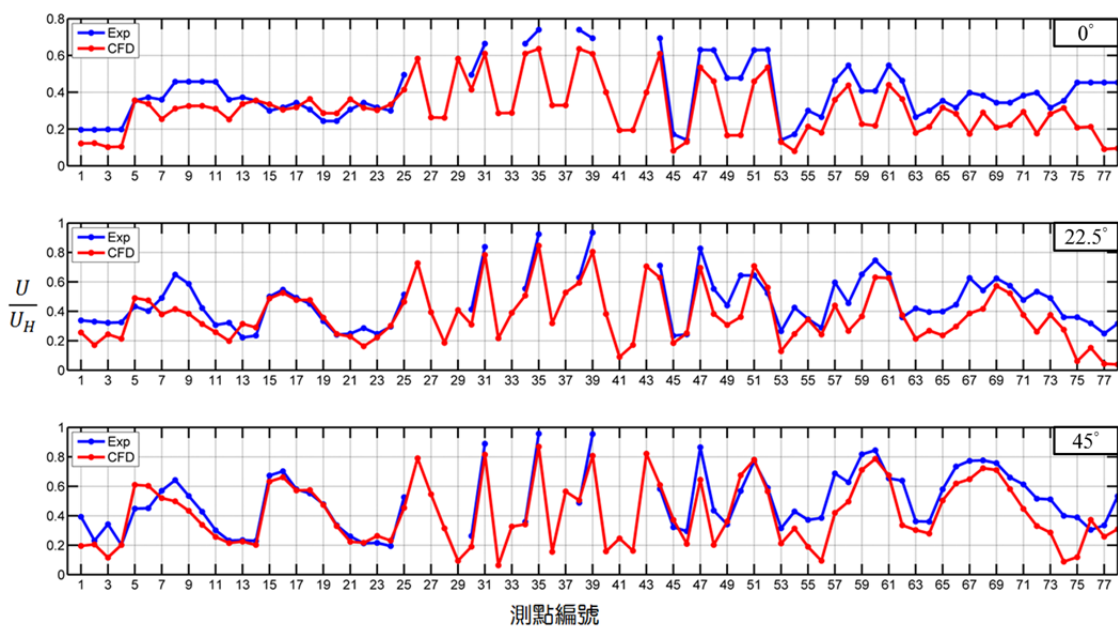


圖 5 各風向下 CFD 模擬結果與實驗資料比較圖

3.問題探討

3.1 縮尺效應探討

縮尺效應對於風場試驗的影響一直是受關注的議題，過去已有許多研究進行各情境中縮尺效應影響的探討 (Hunt, 1981; Stathopoulos, 1983; Liu, 2014 等)，在可滿足相似性的情境下，縮尺效應對於其結果所造成的產生的影響可能輕微至可忽略之程度，但在特定情境下，縮尺效應則可能造成結果明顯的影響，Blocken (2014) 歸納前人研究，舉出幾種在風工程域中，縮尺效應會對於結果產生較明顯影響的情境：

- (1) 含有相對微小卻會對流況造成明顯影響的結構 (如狹窄的通道、開口)
- (2) 研究區域廣大使得縮尺倍率過高 (如都市尺度以上)
- (3) 邊界層問題中大氣穩定度分類為穩定與不穩定
- (4) 由浮力驅動的風場問題
- (5) 雨水、砂塵等多相流問題
- (6) 龍捲風、下擊暴流等劇烈天氣現象

本文中將鎖定(1)、(2)兩項在都市風環境的研究中容易遇到受影響之情境。都市建築結構中，常可發現窄巷、建築物開口、或是因設計而產生之狹窄通風途徑，這些狹窄的通風途徑於不同尺度中，其內部的流場型態如層流、紊流分布區域可能有著相當大的差異 (圖 6)，因此若觀測點所在位置位於或是接近此等容易受影響之區域內，則觀測到的結果很可能會受到影響。此外都市風環境的研究中，常會將數百公尺甚至數公里範圍之建築納入研究範圍，再將遮蔽率 (blockage ratio) 及邊界條件等因子納入考量，則除了建築物所在區域外還可能需向外延伸一段緩衝區域，縮尺之倍率常因此而增加，較高的縮尺倍率則可能容易產生更明顯之縮尺效應，本篇研究將藉由不同倍率尺度之模擬，分析縮尺效應對於風場觀測結果的影響。

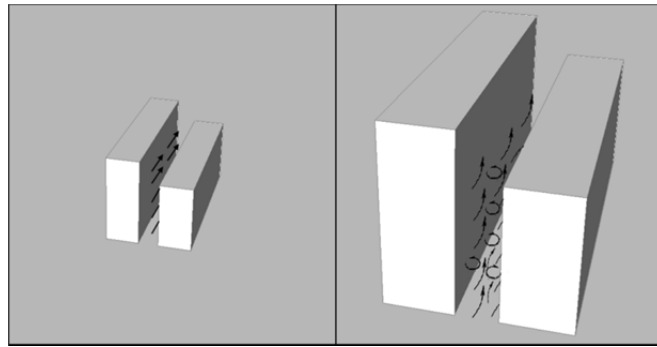


圖 6 不同尺度不同尺度下縮尺效應於狹縫之流場型態示意

3.1.1 模擬設置

縮尺效應於環境風場的影響，將以變更不同縮尺比例之方式進行研究，案例共分為 1:400、1:40、1:4 及 1:1 四種不同縮尺比例 (圖 7)，其中 1:400 之模擬沿用 2.2 節之驗證案例，其餘案例則以 1:400 之模型等比例分別放大至 1:40、1:4 及 1:1 之尺度分別進行模擬，藉由在不同的縮尺尺度下各測點的風速分布情形，分析因尺度效應對於測點風速造成的影響。

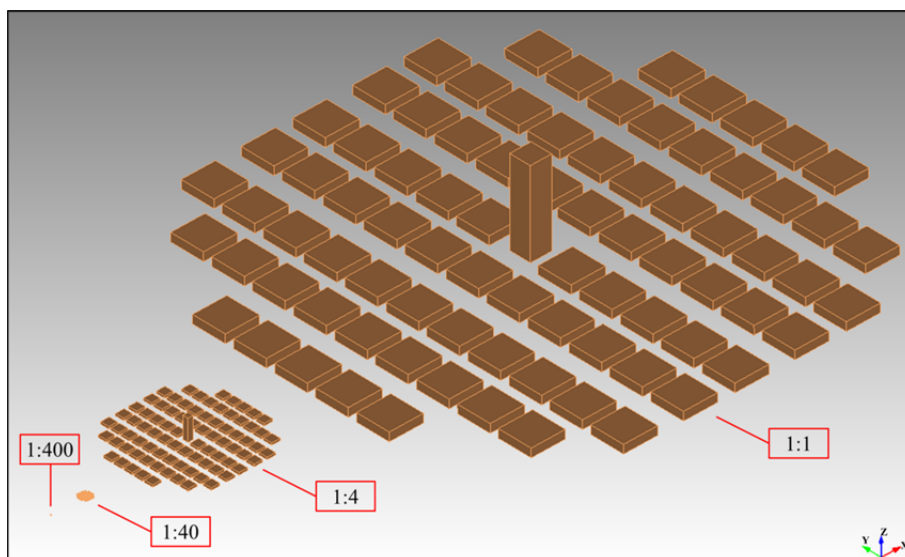


圖 7 各尺度之等比例模型

3.1.2 模擬結果

不同尺度下各測點之風速分布如圖 8，由圖中結果可發現在不同尺度的情況下，會造成測點風速的差異，多數測點在尺度差異增加時風速的差距也隨之增加。依測點的位置分布來看，受影響較明顯的測點多分布於建築的角隅處、較狹窄的建築間通道及高樓後方的尾流影響區域內，而較寬敞通道中的測點所受到的影響較小，此結果也與前人研究之結論相符。在風向的部分， 0° 入流的風向中各測點受尺度影響產生的差距較大， 45° 的案例中測點風速受影響最小，可能是因不同入流風向下，因建築迎風面形狀不同，使得建築間之渠道效應及後方尾流的型態亦不相同，使得尺度效應的影響較不明顯。不同尺度之間各測點風速之相關性如圖 9，圖中同樣可顯示出當尺度的差異增大時，風速的差距也隨之增加，在縮尺尺度差距較小的 1:1 及 1:4 兩案例中，測點風速有著較好的一致性，而在真實尺度 (1:1) 及實驗尺度 (1:400) 之間，整體風速的差距最為明顯。

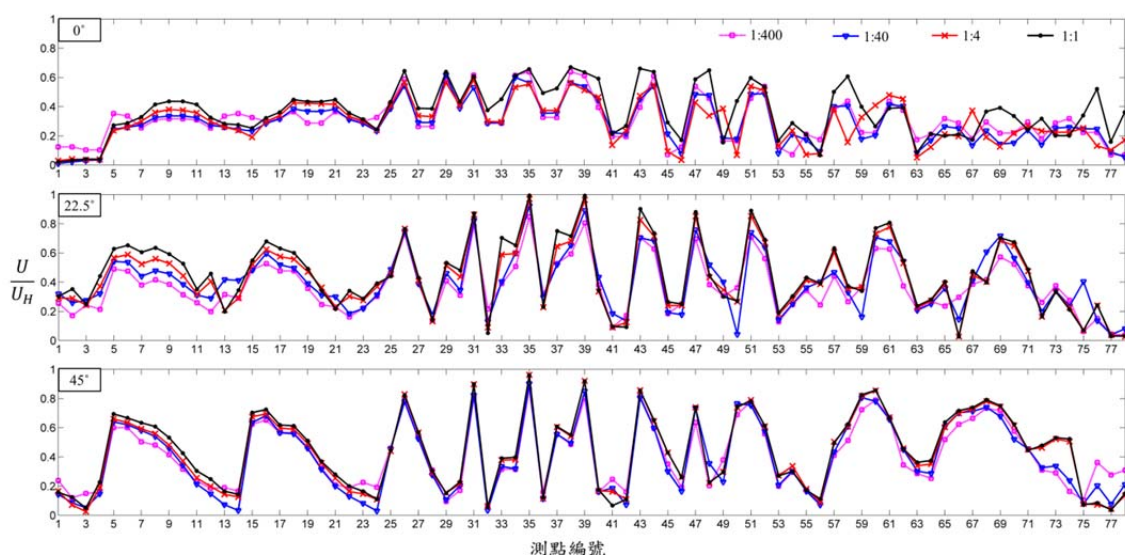


圖 8 各風向下縮尺效應於各測點風速之影響

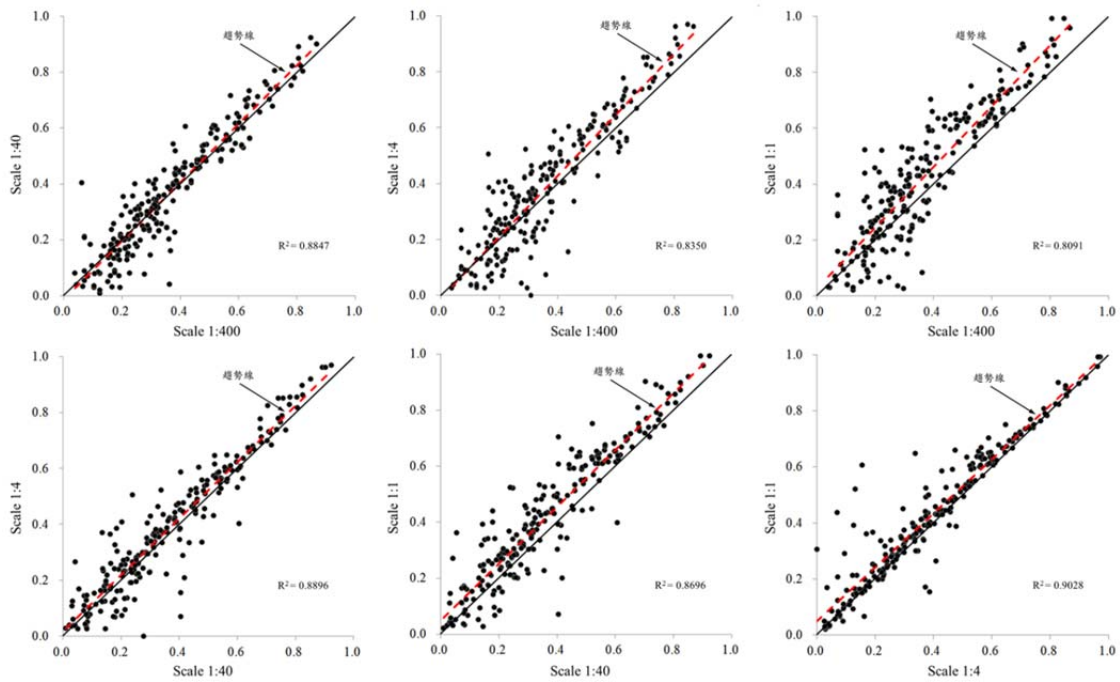


圖 9 不同模擬尺度間之測點風速關係

3.2 建模範圍影響探討

都市風場模擬案例中，設定建模範圍時通常以主建物之高度為參考標準，例如郭(2009)研究中提到，於行人風場模擬時，建模範圍應以高層建築物為中心，建立其最大寬度的8倍或300公尺(取較大者)以上範圍內之建築模型；Tominaga(2008)則提出應建立主建物高度1-2倍半徑內所有建築物，並建議應再往外延伸一個街區(Yoshie et al., 2005)，以確保高層建築周圍之風場特性有考慮到外圍建築之影響。實際應用時，測點位置常需包含高層建築周圍數個街區以內之範圍，而在評估都市通風環境時，也常需考慮輸出廣泛區域之風場資料。因此，外圍建築物的增加或減少，是否會對觀測目標、甚至整個觀測區域產生影響，於本文中將進行探討。

3.2.1 模擬設置

在本案例中，將建立三種不同建築分布情境(圖10)，圖中紅色塊體代表高層建築，於情境一中周邊建築物之排列方式為正規排列，情境二之周邊建築為交錯排列，情境三除交錯排列外尚有高低差之分布。每種情境各進行六個案例模擬(圖11)，案例編號(a)~(f)分別代表以主建物為中心向外增加1~6排數之鄰近建築。模擬域之長、寬為1400 m，高度為400 m，中心高層建築之長、寬為 $B=25$ m，高度為 $H=80$ m，周圍低矮建築物之長、寬為25 m，於情境一、二中，低矮建築之高度皆為20 m，情境三之低矮建築高度則以20 m、40 m兩種交錯分布，建築與建築之間之距離為25 m，並於主建物周圍 $4H$ 之範圍內設置觀測點，測點位置分布如圖12、13。邊界條件的部分，上游給定風速剖面入流，於主建物高度 $H=80$ m處之風速為3.1 m/s，入流風向設定為南風，側向及頂部為自由滑移邊界，下游側為零梯度之開放邊界，總網格數約為420萬。

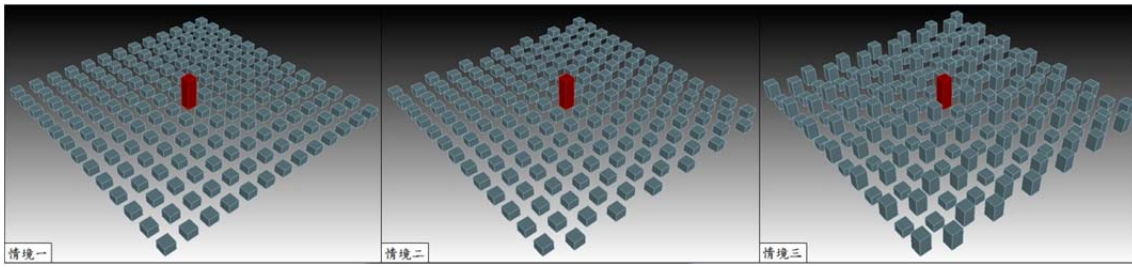


圖 10 建築分布情境

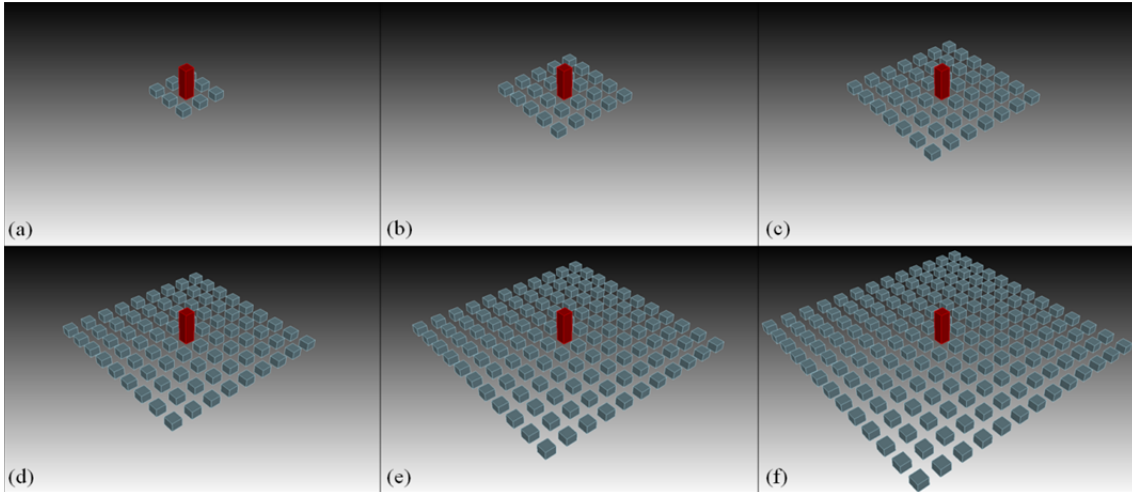


圖 11 各案例中不同建模範圍之建築分布圖

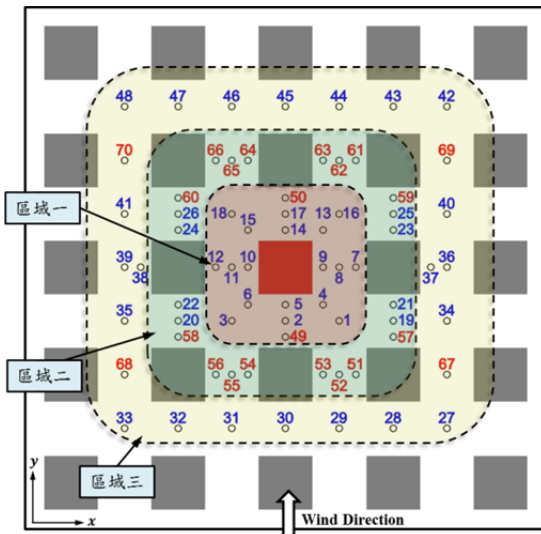


圖 12 情境一測點位置分布圖

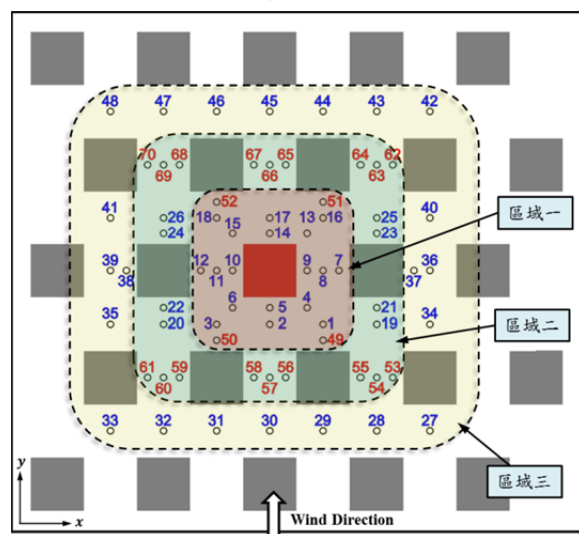


圖 13 情境二、三測點位置分布圖

3.2.2 模擬結果

模擬結果中各測點之風速分布如圖 14，各情境中位置皆相同的測點以藍色標示、不同位置的測點則以紅色標示。模擬結果顯示，位於區域一（約主建物距離 1B 範圍內）的測點，在情境一時，建模範圍增加而使測點風速受到的影響微乎其微，但在情境二、三的結果中，建模範圍的增加則會明顯影響測點風速，(b)、(c) 兩案例中之風速與其他案例相比差距明顯偏高，直到建模範圍增加至案例(d)時，區域一內測點風速所受的影響才降低。在區域二也有相似的現象，但因測點位置較為外側，案例(d)的建模範圍仍不足以滿足不受影響的條件。區域三的模擬結果則顯示除案例(d)、(e)之結果差距較小外，其他案例中測點風速皆明顯因建模範圍之影響而產生較大幅度的改變，且建模範圍越小，測點風速受到的影響就越明顯。

以建模範圍較為保守的案例(f)為標準時，其餘案例相對於(f)之差異如圖 15，圖中案例(a)~(e)之均方根誤差分布以指數的型態降低，顯示隨著外圍建模範圍的增

加，各測點風速應可收斂至一穩定狀態，不再受建模範圍增加之影響或是影響非常輕微，而在建模範圍不足的情況下，模型範圍的增、減皆會對模擬結果產生較大的影響，部分測點之無因次化風速差異可達 0.5 以上。

整體來看，在不同複雜度的情境下，建模範圍的影響也有著不同的反應，在較單純的情境中，於測點外圍增加 2~3 排建築，則誤差即可降至可接受的範圍內。而較複雜的情境下，若欲達測點風速不再改變之狀態，則需將測點外圍 3 排甚至 4 排的建築一併納入建模範圍，才可使測點風速達到穩定，且於越複雜的建築分布情境下，所需之建模範圍則可能更廣。

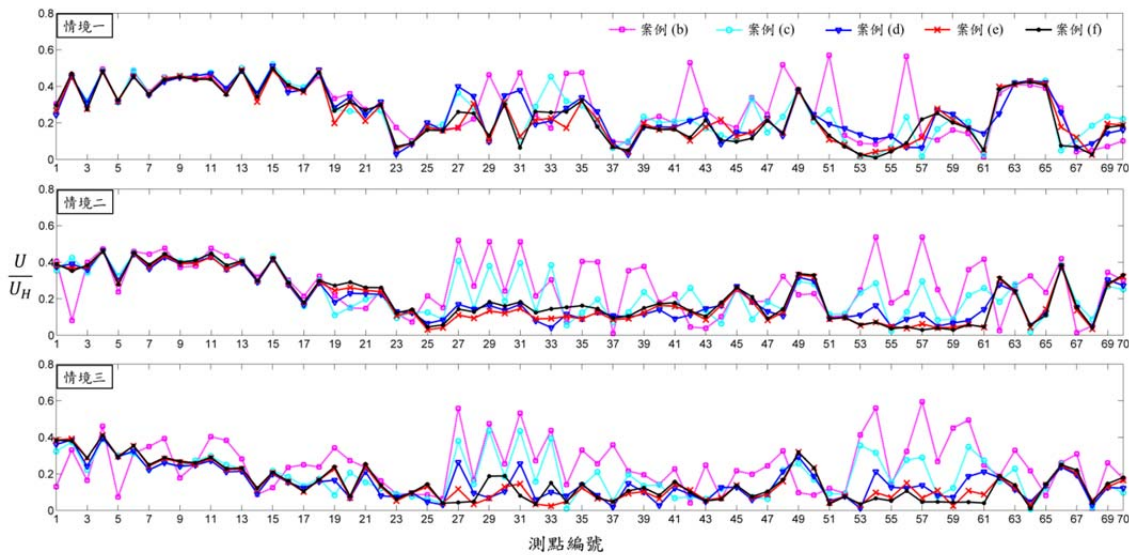


圖 14 不同情境中建築排數對測點風速影響比較圖

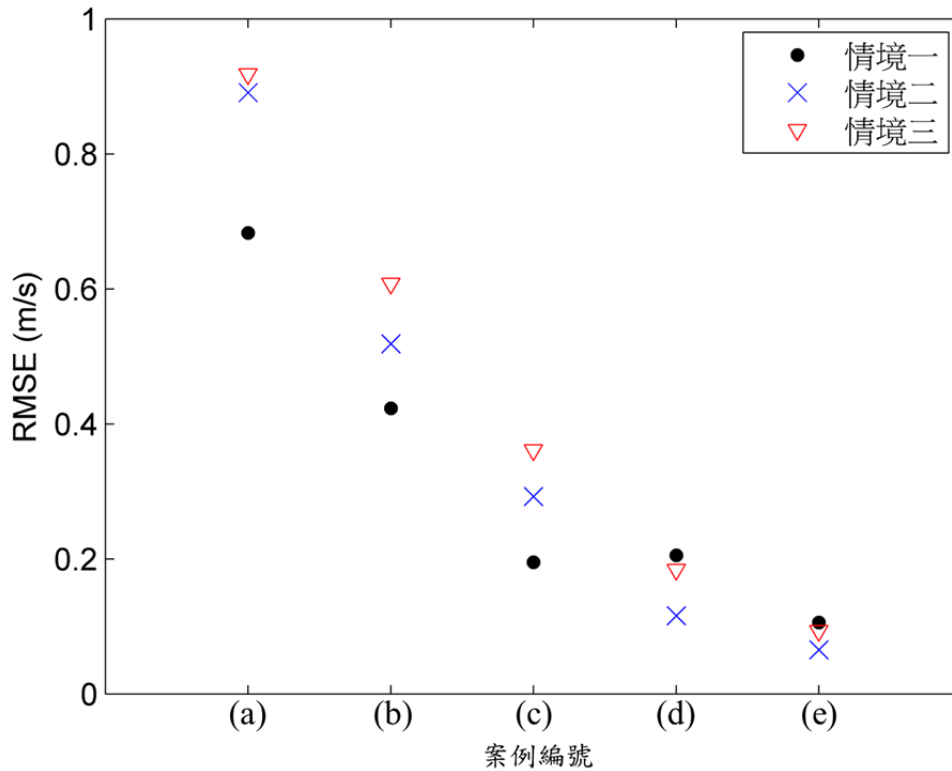


圖 15 各情境下不同案例相對於案例(f)之差異

4. 結論

本研究應用計算流體力學模式「OpenFOAM」，探討於不同情境之環境風場中，縮尺效應及建模範圍對於風場之影響。縮尺效應影響之研究以 1:400、1:40、1:4 及 1:1 四種不同縮尺比例之案例進行，模擬結果顯示，測點之風速會受到縮尺效應之影響，受影響較明顯的測點多分布於建築的角隅處、較狹窄的建築間通道及高樓後方的尾流影響區域內，當尺度差異增加時，風速的差距也隨之增加，真實尺度（1:1）及實驗尺度（1:400）之間，整體風速的差距最為明顯。

建模範圍影響的研究以三種不同複雜度之建築情境進行分析，每種情境分別建立不同範圍之建築模型，模擬結果顯示隨著建築的複雜度不同，測點外圍至少應建立 2-4 排以上之建築模型，於建模範圍不足的情況下，模型範圍的增、減會對模擬結果產生明顯的影響，較單純的情境下測點外圍僅需 2 排建築模型即可，而越複雜的建築分布情境需更遠之建模範圍，於測點量測之風速方為合理。

本文之研究中雖已進行數種不同複雜度之建築分布情境的模擬，但於現實之都會區中，建築物群的座落位置、高低分布更為複雜，後續之研究可使用真實之都市模型進行探討，而在建立模型及規劃測點位置時，應充分考量適當的建模範圍，並確保建立模型時於測點位置以外含有足夠之建築，以降低不必要之干擾。

參考文獻

- [1] A. Hunt, “Scale Effect on Wind Tunnel Measurements of Surface Pressures on Model Buildings”, Proceedings of the Colloquium “Design with the Wind”, CSTB, Nantes, France (1981).
- [2] Alan G. Davenport Wind Engineering Group, “WIND TUNNEL TESTING: A GENERAL OUTLINE” (2007).
- [3] B. Blocken, “50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 129, pp.69-102 (2014).
- [4] Benli Liu et al., “Numerical evaluation of the scale problem on the wind flow of a windbreak.”, Scientific Reports 4, Article number: 6619 (2014).
- [5] M. Fadl and J. Karadelis, “CFD Simulation for Wind Comfort and Safety in Urban Area: a Case Study of Coventry University Central Campus.”, International Journal of Architecture, Engineering and Construction (IJAEC), volume 2 (2), pp.131-143 (2013).
- [6] R. Sigrid, “Validation Process for CFD Simulations of Wind Around Buildings.”, European Built Environment CAE Conference (2008).
- [7] T. Stathopoulos and D. Surry, “Scale Effects in Wind Tunnel Testing of Low Buildings”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 13, pp.313-326 (1983).
- [8] Tominaga et al., “AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp.1749-1761 (2008).
- [9] Yoshie et al., “Cross Comparisons of CFD Prediction for Wind Environment at Pedestrian Level around buildings – Part 1, Comparison of Results for Flow-field around a High-rise Building Located in Surrounding City Blocks”, APCWE-VI, pp.2648-2660 (2005).
- [10] 丁育群、朱佳仁,「高層建築物風場環境評估準則研議」,內政部建築研究所 (1999)。
- [11] 柯昱明、李盛全、陳錦煌,「計算流體力學模式於環境工程上之應用(一)——高樓建築對環境風場及行人舒適度之影響」,桃園市大學校院產業環保技術服務團,環保簡訊,第二十八期 (2014)。
- [12] 郭建源,「風洞試驗應用於行人風場環境影響評估之研究」,內政部建築研究所 (2009)。