

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

柯昱明

景丰科技股份有限公司環境工程師

台北市大安區復興南路二段 286 號 4 樓

Tel:02-23778011#207, E-mail:ymko@simenvi.com.tw

一、 前言

近年來隨著環保意識的抬頭，人們開始重視健康及居住環境品質，都市裡的空氣污染問題逐漸成為關注的目標。此外，臺灣大大小小數十個工業區內，無論是工廠產生之排放物或是異常事件造成之洩漏等污染排放，對於園區內之人員及周圍居民健康的影響，也是不容忽視的議題。一般用來評估上述種種問題的方法，大致可分為理論推導、實場監測、風洞實驗及數值模擬，早期在進行研究時，以理論推導與風洞實驗為最主要之方式，而數值模擬則因受限於電腦的運算速度，能應用的範圍受到許多限制。直至近年來由於電腦技術的快速發展，在運算能量大幅提升的情況下，計算效能與可處理問題之複雜度皆已達符合實際應用之水準，使得過去需要耗用大量資源，甚至難以進行的模擬都成為可應用之對象，計算流體力學模式 (Computational Fluid Dynamic, CFD) 於風環境中之模擬案例亦逐年增加。本文中將藉由開源之計算流體力學模式「OpenFOAM」，研究於複雜建築環境下，風場及污染物擴散所受之影響。

探討尺度介於為數百公尺至數公里，如都市及工業區等議題時，建築物之幾何形狀對於環境風場會產生明顯的影響。尤其在繁榮的都市中，大量高樓建築對於風的流動形成干擾，高樓與高樓間之風道、或是建築物群中之街道等都會對風場產生加速的作用 (Dutton et al., 2005)，這些影響可能使得污染物容易累積於特定區域，而過高的風速則容易使行人之舒適度受到影響，因此在進行此類議題的探討時，將建築物的影響納入為一件相當重要的事項。CFD 是一種對於模擬複雜的地形地物，掌握複雜流場具有著良好效果的工具，藉由 CFD 分析行人風場，可迅速且精準的分析各建築物對整體風場之影響。因此，無論是於開發階段對於建築物的先期評估、環境風場的現況了解、行人舒適度的評估改善方式，或是污染物傳輸行為的掌握，皆非常適合以 CFD 作為研究方法。

二、 模式簡介及建置

環境風場的特性，在於建築物周圍的流況相當複雜，建築物的幾何形狀會直接對風場造成影響，因此模擬時應同時包含主建物及其周遭的鄰近建築。於實際模擬時，為確保鄰近建築之影響有被納入模擬中考量，常需將模擬域擴展至百公尺至公里之較為寬廣的大小。而為精確模擬風場現象，所使用之網格又必須足夠解析地形地物之幾何形狀及各式風場現象，寬廣的模擬域與高解析度之網格配置兩者之因素導致將可能產生數量龐大的網格，如此數量的網格不僅提高模擬的困難度，也會增加前後資料處理的時間。因此，模式本身的強度，以及對於各種資源的支援及使用上的效率與便利性也成為選擇模式的重要關鍵。

本文中採用之 CFD 模式為「OpenFOAM」，為國內外著名之計算流體力學軟體，模式擁有涵蓋廣泛領域的物理計算模組，本身也包含資料之前處理、後處理工具，由模擬開始前地形、建築之幾何資料導入、網格劃分建構，以及模擬完成後之資料分析及可視化皆有完整工具可以支援，而由於其本身開源之特性，使用者可依自身需求發展、修改模式功能，也常有使用者開發特定領域上的功能後公開分享，供其餘使用者參考。模式原始之開發及運行環境為 Unix 系統，也有部分社群開發維護的分支可以於 Windows 系統上安裝使用，可依使用者之需求決定要於何種系統上使用，若需進行功能開發或是取用社群分享之套件，建議以 Unix 作為開發環境較為適合。

2.1 前處理及網格建置

應用 CFD 模式於風場分析的模擬流程可參考圖 1.1，模擬開始前之資料前處理工作為整個模擬流程中相當重要的一環，其中包括網格模型建立、初始、邊界條件設置等。如何建立出品質良好的網格為 CFD 模擬中一件重要的工作，品質不佳的網格將導致模擬之不確定性提升，甚至造成模擬結果的發散而無法獲得答案，可說網格模型之品質對於後續模擬結果成敗有著決定性的影響。案例之幾何形狀越複雜，網

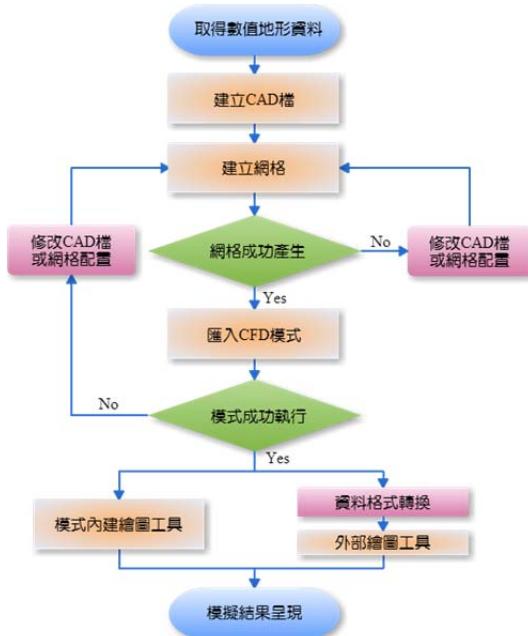


圖 1.1 環境風場模擬流程

格模型的建立越困難。複雜案例之處理，首先需準備好幾何形狀描述檔案，經網格工具讀取、編修幾何形狀後產出網格，再匯入模式進行模擬。OpenFOAM 除可直接導入市面上常見之網格工具產生之網格外，本身內建模組 SnappyHexMesh 也可用來產生網格。在產生網格的過程中，可設定預期生成之網格配置，也有區域劃分、局部加密、漸進加密、平滑處理及品質控管參數等功能，亦可直接對產出之網格進行品質檢測及分析，檢測項目包含長寬比 (aspect ratio)、非正交性 (non-orthogonality)、偏斜 (skewness) 等檢測網格品質之參數，品質良好之網格可直接供 OpenFOAM 模式運算使用。若分析結果發現產出之網格品質不符需求，可鎖定品質不佳的網格群處理，或再回到前端藉由修改幾何檔案及網格配置參數調整網格品質。

2.2 物理模組

OpenFOAM 擁有許多物理模組，除基本的勢流、純量傳輸等求解器外，在模擬穩態/非穩態流場 (steady / unsteady state)、可壓縮/不可壓縮流 (compressible / incompressible flow) 等不同情境時，由於統御方程式的不同，在 OpenFOAM 裡也分別建立著獨立的求解器，在一般情形下，環境風場的問題大多符合不可壓縮流之假設，因此可直接選擇不可壓縮流之求解器。而要進行穩態模擬與非穩態模擬之決定，則應考量案例是否需受時間變化影響結果，若關注的案例對於時間變化並不敏感，則適合選擇穩態流場。此外，流體依運動方式可分為層流及紊流，環境風場中大多數情況皆屬於紊流，於計算流體力學中，紊流流場是以紊流模式進行模擬，例如直接求解法 (Direct numerical simulation, DNS)、 $k-\varepsilon$ 模式、大渦模擬(Large Eddy Simulation, LES)等，其中 DNS 為目前最精準之解法，但於實際應用上因解析至最小紊流尺度之計算資源過於龐大，以目前之電腦運算能量來看，能夠使用之場合仍然相當有限。

$k-\varepsilon$ 模式假設渦流的尺度與紊流動能 k 以及消散率 ε 有關，以時間平均的連續方程式及 N-S equation，配合包含紊流動能 k 與消散率 ε 之控制方程式解出紊流流場。LES 模式則是直接求解大於網格尺度之渦流，而小於網格的部份則以次網格模式(Sub Grid scale model, SGS)模擬。後兩者各自擁有數量眾多的研究及應用案例，LES 模式對於紊流流場之掌握相對於 $k-\varepsilon$ 模式來說較為精準，但所耗費之資源也較多。除上所述外，尚有許多紊流模式，常見之紊流模式於 OpenFOAM 內皆有模組可使用，應用時應依據所需之精準度、時間效率及運算

能量等考量，挑選適當的紊流模式來做使用。

2.3 邊界條件

CFD 模擬中另一項關鍵為邊界條件，邊界條件反映著模擬區域外部的流場環境，並且會影響整個內部流場的流動，因此所選擇的邊界條件必須合乎實際的物理規則，否則將導致計算結果無法收斂，或是計算出不合理的流場。例如在模擬域中只給定入流邊界及牆面而沒有給定任何流出口，在這種不合理情境時，計算結果將會發散。通常的設置中會包含入、出流口以及牆面，邊界條件的性質常以指定速度、壓力或其梯度的值來設定。在風場案例中，入流口的邊界常使用指定速度值的方式，配合風剖來給定不同高度上的風速值，出流口的邊界則常設定為自由流出或定壓力。此外，給予邊界適當的位置也相當重要，若邊界距離流場內結構物過近，周圍受建築物影響之流場可能無法充分發展就觸及邊界而干擾模擬結果，於環境風場的模擬中，側向及頂部邊界建議應距離主要建築物高度五倍以上距離 (Mochida et al., 2002; Shirasawa et al., 2003)，而下游出口邊界應距離主要建築物高度的十倍以上距離 (Tominaga et al., 2008)，才可使影響降至最低。

2.4 後處理

後處理的部分主要分為資料分析與繪圖，模式本身可依指定座標配置測點，取出速度、壓力等數值結果，進行時序分析等處理，進一步的功能也有許多使用者開發之輔助程式進行資料分析與再應用。繪圖方面，模式整合同為開源軟體的 ParaView，常見之商用軟體 Tecplot、Ensight 等亦可配合 OpenFOAM 之數據格式，使用上相當容易即可繪製出等值線、面、向量、流線或是動畫類影像，以視覺化的方式，由各面向呈現流場細部，將更完整之資訊提供給後續的研究分析使用。

三、 模式驗證

至今已有許多研究對於 OpenFOAM 計算之準確度進行驗證 (Vranckx et al., 2013; Miao et al., 2014)，為進一步了解應用於環境風場領域之適用性與風場特性，且確保模式建置無誤，本文將以於建築物影響下之環境風場為主題進行驗證。驗證分為兩部分，第一部分為單一建築物周圍風場之驗證，第二部分則是複雜建築區域內之流場情形驗證，將上述兩案例之模擬結果與測量值進行比對，證明模式計算之準確性，並了解誤差可能產生之原因。

3.1 案例驗證（一）

模式驗證的部分首先採用 Ishihara (1998) 之實驗數據，其設置為將一長、寬、高比值為 1:1:2 之高層建築物放置於平面上，上游以隨高度變化之風速入流，建築物周圍之三維風速以探針測量，此案例可反映出風場經過結構物後受其干擾所產生之影響，因此相當適合用於檢驗數值模式。模擬設置（圖 3.1）參考實驗數據，設定建築物之長與寬 $b = 0.08$ 公尺、高度 $H = 0.16$ 公尺，並將兩側及垂直方向之邊界延伸至建築物高度之五倍以上，下游側則延伸至建築物高度之十倍以上，且阻塞比小於 3% (Tominaga et al., 2008)，避免建築物周圍流場受到邊界的影響，入流風速依實驗測量值，依高度設置風速剖面（圖 3.2）。圖 3.3 為模擬結果與實驗數據比較，可看出於風剖中低於建築物高度之部分，因受建築物影響，於前方即開始產生變化，高層風則仍可維持風速，至建築物後方時，由於尾流現象的影響，風速呈現降低甚至向前迴流之情形，隨著逐漸遠離建築物至下游，風速剖面漸漸回復初入流時之狀態。實驗數據及模擬結果之比較結果顯示模式於掌握建築物周圍之風場速度分布情形相當精準。

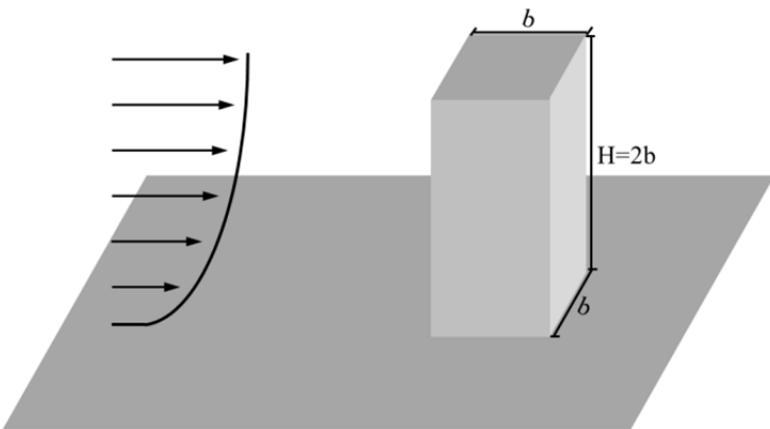


圖 3.1 模擬設置示意圖

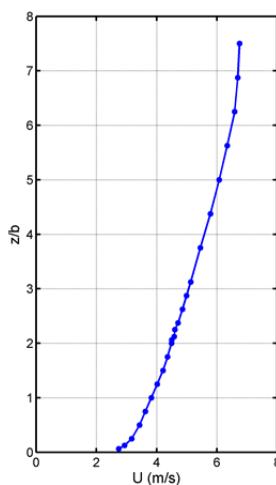


圖 3.2 風速剖面

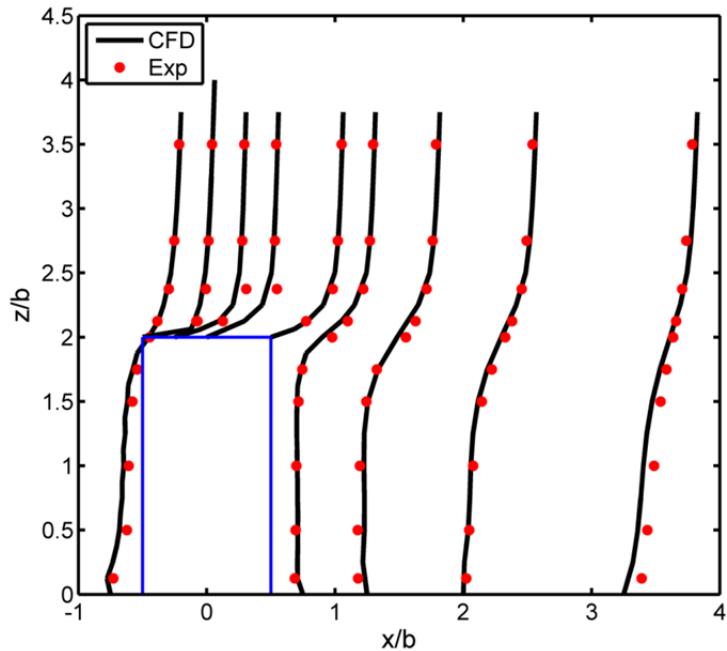


圖 3.3 CFD 模擬結果與實驗值比較

3.2 案例驗證（二）

第二部分以較複雜之情境做為驗證，參考 Yoshie (2005) 對於都會區建築物群之風場研究之實驗數據，實驗之尺度為 1/400，主建物位於流場中央（圖 3.4），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四周（圖 3.5），測量高度距地面 5 mm（實際之 2 m 高處），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。CFD 模擬設定參考實驗設置建立模擬域及建築，模擬域之長、寬、高皆為 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，目標區域再以局部加密方式提升網格解析度，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 3.6、圖 3.7。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 3.8，圖中橫坐標為各測點之編號，縱座標為測點之風向與 U_H 之風速比，其中風速較強之區域中以點 48、51 之風速差異最大，約為 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° 風向下之平均偏差(Mean Bias)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。

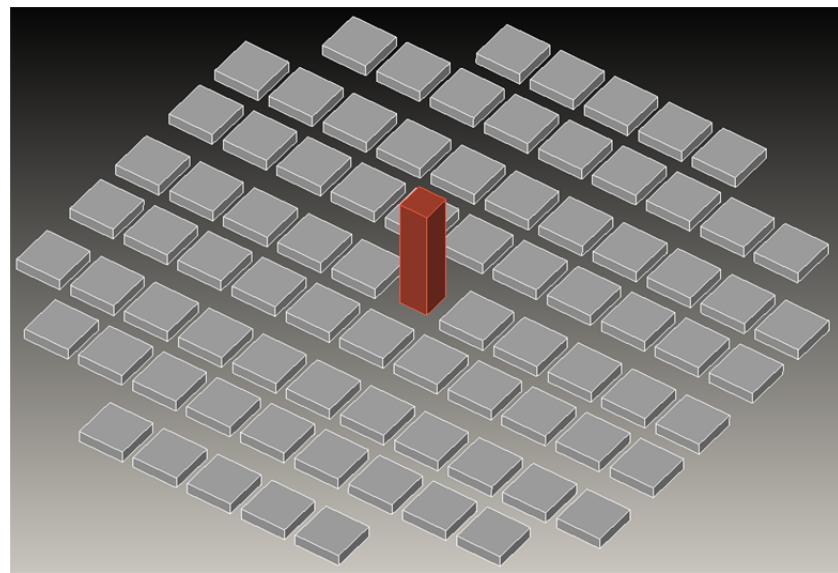


圖 3.4 建築物配置（紅色為主建物）

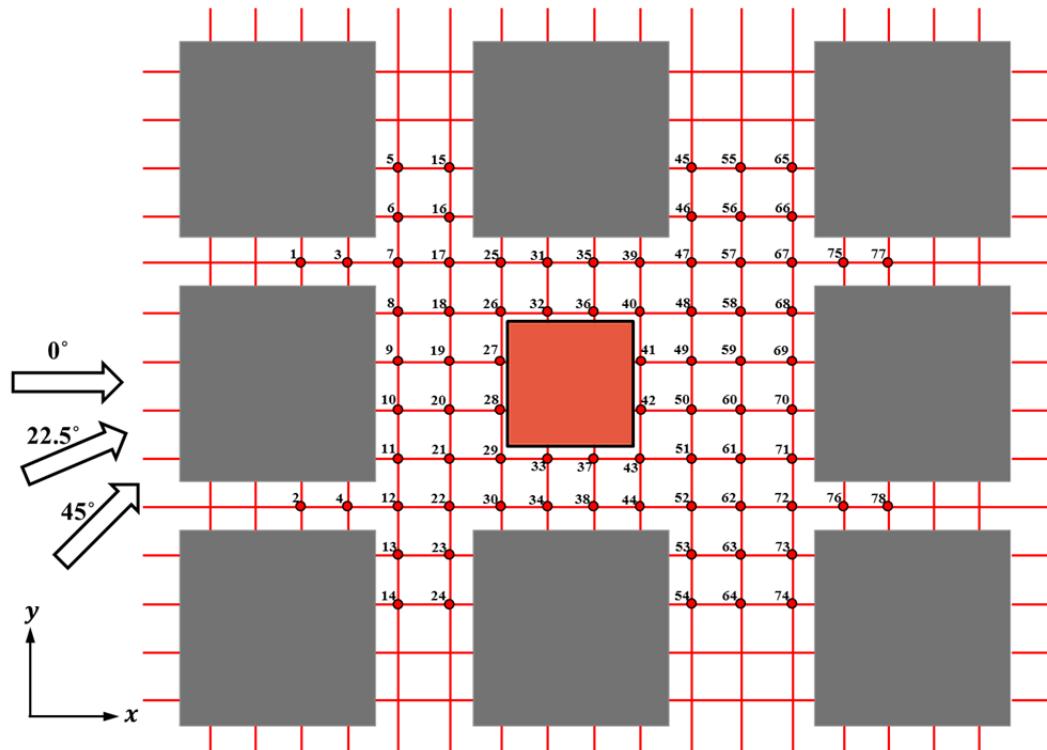


圖 3.5 測點位置

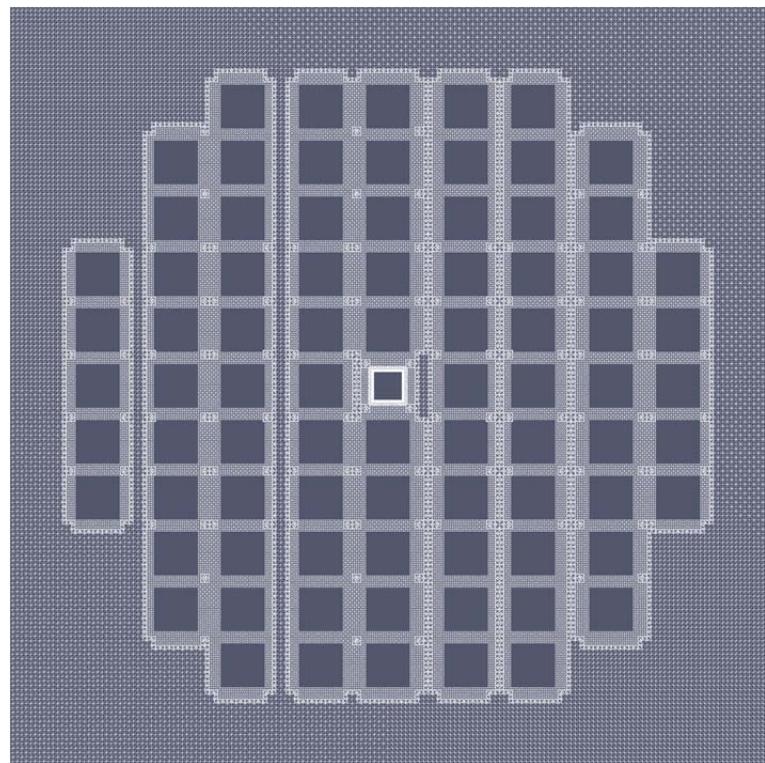


圖 3.6 網格配置（俯視）

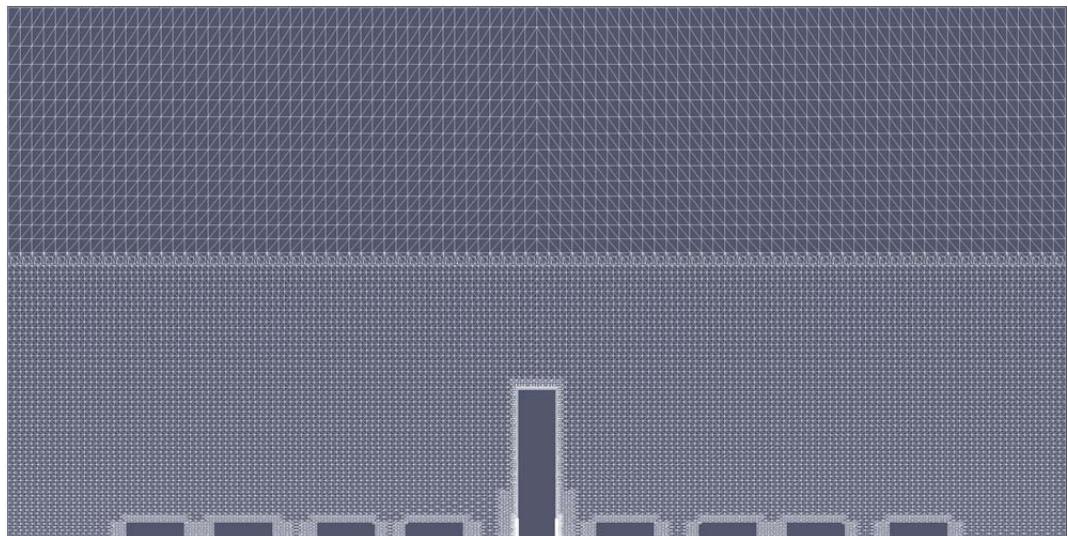


圖 3.7 網格配置（側視）

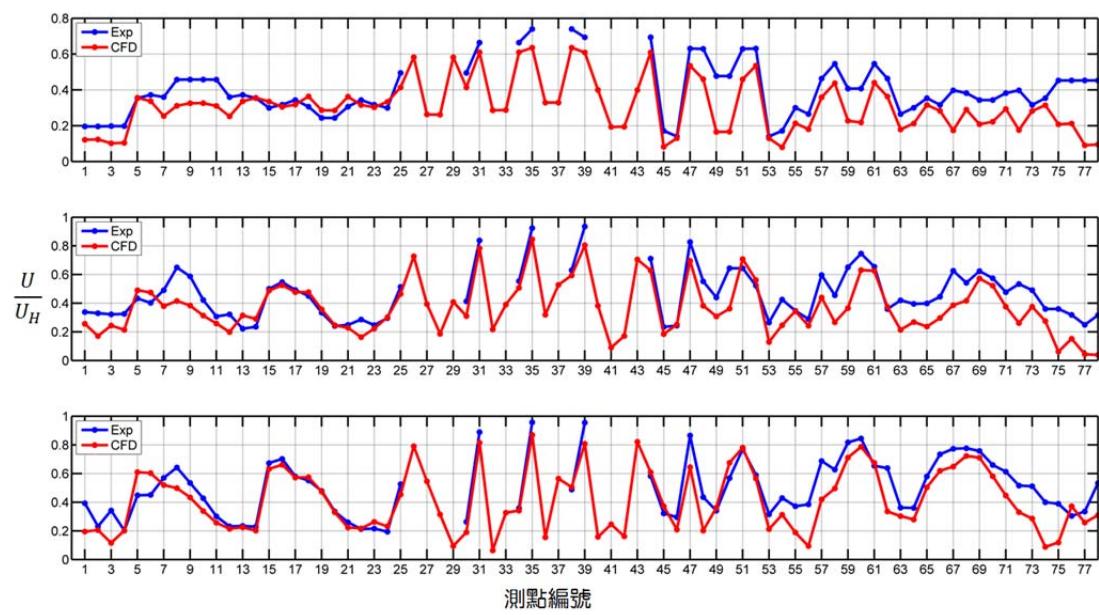


圖 3.8 CFD 模擬結果與實驗資料比較

(紅線為 CFD 模擬結果、藍線為實驗值)

四、行人風場模擬

行人風場 (Pedestrian wind)一般指離地 1.5~2.0 公尺處，為人於路上行走高度的風場，於此高度中風場容易受該區域的地形、道路與建築物之幾何形狀配置所影響，在某些風速情況下有時會使行人感覺到不舒適、干擾活動，在風速更高之情況下甚至會造成災害，因此評估建築物對於風場之影響為一重要課題。行人風場的評估主要是了解該處建築物對其周遭各個重要場所、人群路經、聚集地點及所有可能受影響範圍之區域內的風場影響，尤其在建築物興建、改建前、後對於該地風場狀況之差異。本研究中以位於新北市之新建大樓做為實際案例，以計算流體力學模式模擬之方式分析行人於此區域活動之舒適度所受到的影響。

4.1 氣象資料分析

臺灣位處北半球東亞季風氣候區，一般而言，夏季吹西南季風，冬季吹東北季風，但因地形不同等因素致各地風向及風速有著局部性差異。統計十年內(2004 – 2014)之風場資料，臺北地區全年之盛行風向為東風（圖 4.1），而以冬、夏季來看，冬季盛行風向與全年相同，皆為東風，夏季之風向則以東風至南風為主。以風速進行分析，各月之平均風速介於 1.8~3.1m/sec 之間，年平均風速為 2.5 m/sec。

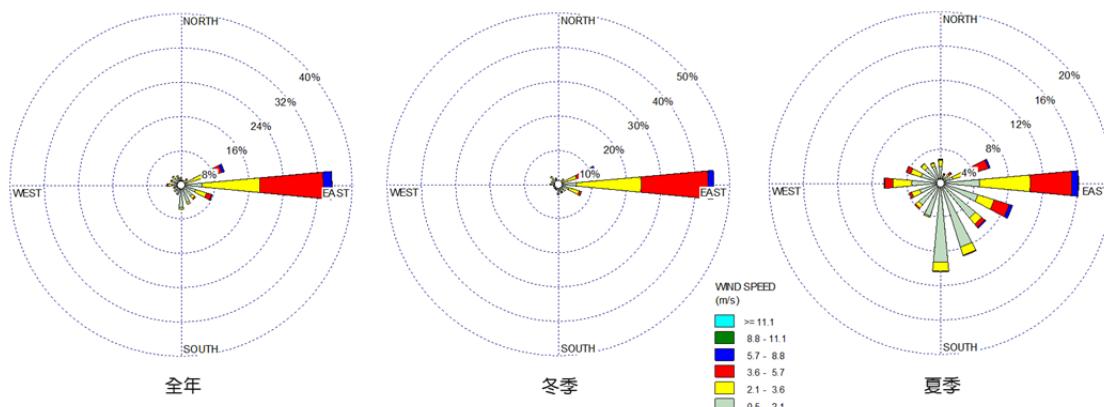


圖 4.1 中央氣象局台北站各風向發生機率

4.2 行人風場舒適度評估準則

評估行人風場之舒適度，需考量之因素包括風速、行人活動方式及評估場所特性，許多研究提出不同的行人風場舒適度評估標準。以風速來說，在不考慮溫度、濕度、噪音等其他條件的情形下，風速越大越容易使人感到不舒服，一般來說平均風速 $V > 5 \text{ m/s}$ 會使人開始感到不舒適，隨著風速增加不舒適感也逐漸增加，而到風速 $V > 20 \text{ m/s}$ 則可能會造成危險。在行人活動方式及評估場所特性的部分，大多數研究將行人活動分為站立、坐、行走，又依評估場所特性將活動行為分為長時間、短時間，快走、慢走等不同分類，依照分類給定不同之適宜風速與舒適度級別分類，例如 Davenport et. Al (2007) 將行人於各種區域中不同的活動方式分類為：(1) 長時間停留；(2) 短時間停留；(3) 散步；(4) 快走；等四種舒適度等級，各研究之舒適度評估標準彙整於表 4.1。本研究中採用 Lawson (1990) 之評估標準，將舒適度分為：

- (1) 長時間站坐：平均風速超過 2 m/s 的機率小於 5%，進行各種戶外活動時皆感舒適之等級，適合長時間停留，可作為戶外餐廳、咖啡店、休憩場所之參考舒適度。
- (2) 短時間站坐：平均風速界於 2 m/s 至 6 m/s 之間，且大於 6 m/s 的機率小於 5%，塵土及紙片會受風吹拂飛揚，長時間停留可能會產生些微不舒適，於公園座椅、公車站、建築之入口處等場所發生尚不會明顯造成行人不舒適。
- (3) 行走：平均風速界於 6 m/s 至 10 m/s 之間，且大於 10 m/s 的機率小於 5%，於此風速環境下會影響行人坐定的舒適感，而能接受的風速於行走時較高些，能接受之場所包含路面、人行道、公園廣場等。
- (4) 不舒適：平均風速超過 10 m/s 的機率大於 5%，於此風速下逆風行走會感到困難，妨礙行人的各種活動，並且明顯產生不舒適感。

表 4.1 行人風場舒適度評估標準文獻

舒適度評估標準	舒適度等級	參考風速	風速範圍 (m/s)	發生機率
Davenport (1972)	長時間站坐	\bar{U}	> 3.5	< 5 %
	短時間站坐	\bar{U}	> 5.5	< 5 %
	散步	\bar{U}	> 7.5	< 5 %
	快走	\bar{U}	> 10	< 5 %
Hunt (1976)	長時間站坐	$\bar{U} + 3U_{rms}$	> 6	< 10 %
	短時間站坐	$\bar{U} + 3U_{rms}$	> 9	< 10 %
	行走	$\bar{U} + 3U_{rms}$	> 9	> 10 %
	不舒適	\bar{U}	> 9	> 10 %
Lawson (1990)	長時間站坐	\bar{U}	> 2	< 5 %
	短時間站坐	\bar{U}	> 6	< 5 %
	行走	\bar{U}	> 10	< 5 %
	不舒適	\bar{U}	> 10	> 5 %
Soligo (1998)	坐定	GEM	< 2.5	≥ 80 %
	站立	GEM	< 3.9	≥ 80 %
	行走	GEM	< 5	≥ 80 %
	不舒適	GEM	< 14	> 20 %
NEN8100 (2006)	坐定	\bar{U}	> 5	< 2.5 %
	散步	\bar{U}	> 5	< 5 %
	快走	\bar{U}	> 5	< 10 %
	不舒適	\bar{U}	> 5	< 20 %
Shane (2011)	坐定	\bar{U}	≤ 3.9	> 70 %
	站立	\bar{U}	≤ 6.1	> 80 %
	行走	\bar{U}	≤ 8.3	> 80 %
	不舒適	\bar{U}	> 8.3	> 20 %
	危險	\bar{U}	> 25	> 0.01 %
Mississauga (2014)	坐定	GEM	≤ 2.8	> 80 %
	站立	GEM	≤ 4.2	> 80 %
	行走	GEM	≤ 5.6	> 80 %
	不舒適	GEM	≥ 5.6	> 80 %

* GEM (Gust Equivalent Mean) speed = max(mean speed, gust speed/1.85)

4.3 行人風場模擬

本研究中以計算流體力學模式 OpenFOAM 模擬高樓建築之興建對於行人風場舒適度之影響。模擬中主建物為一高 90 公尺之建築物，建築配置如圖 4.2，模擬域則以主建築物為中心，建立長、寬 900 公尺範圍內建築物之三維數值模型，再將此區塊往各方向延伸 400 公尺做為模擬範圍，以避免邊界對於目標區域之影響。模擬域之長、寬為 1,700 公尺、高為 700 公尺，網格設定以建物周圍及鄰近區域最密，外圍及高空較疏，總網格數約為 833 萬，網格之配置可參考圖 4.3、圖 4.4。邊界條件的部分，上游風速邊界以具代表性之風速設置，風速剖面如圖 4.5，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處理。模擬中以 16 個方位之風向入流，並於模式中設定 48 個不同座標之測量點，進行風場分析及行人風場舒適度之評估。



圖 4.2 建築物配置（紅色為主建物）

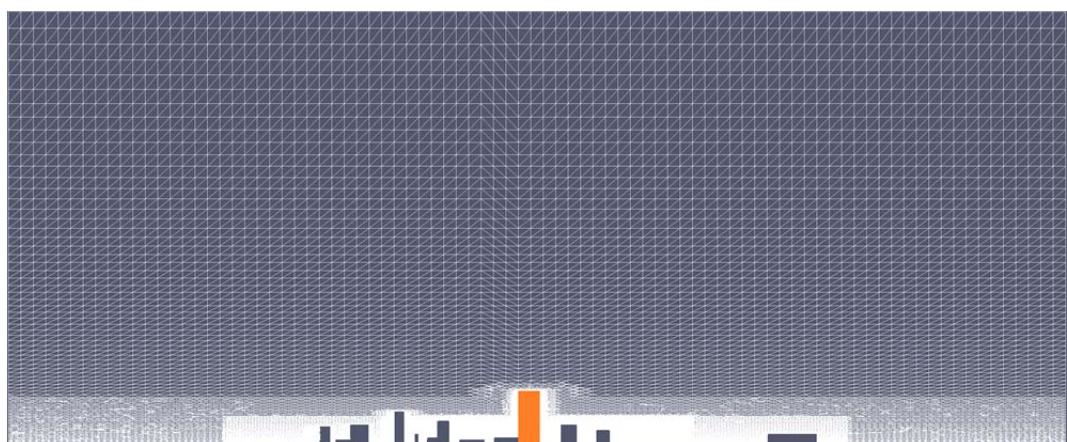


圖 4.3 網格配置（側視）



圖 4.4 網格配置（俯視）

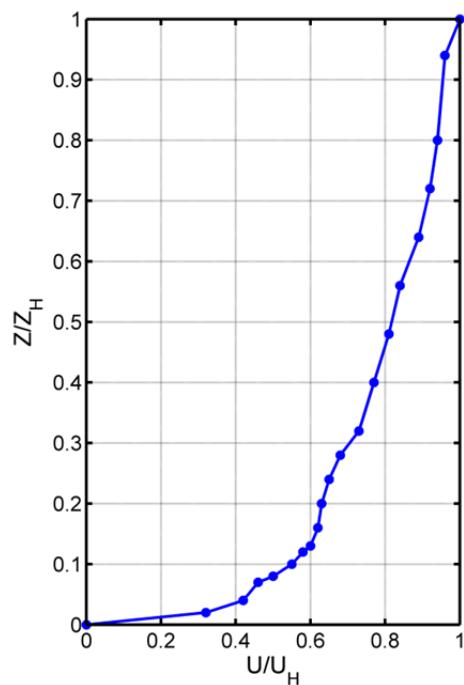


圖 4.5 模擬入流設定之風速剖面

4.4 案例結果分析

本案例於興建大樓後，區域風場會受到建築造成之影響而改變，圖 4.6 至圖 4.9 為盛行風向（東風）下，大樓鄰近地區擷取行人高度 $H = 1.5\text{ m}$ 處之風速圖，由圖 4.6 及圖 4.7 之模擬結果顯示，在大樓興建後，由於可供風流通之斷面積縮減，產生束縮效應，使得流速加快，以及建築迎風面之下切作用影響，造成大樓前方（圖 4.7、圖 4.9 中之區域 1）、大樓北方巷道（區域 2）及大樓西南方氣流匯流點（區域 3）產生風速增加的現象，平均增加之幅度約為 0.3 m/s 。

大樓周圍之行人舒適度評估可參考圖 4.10、圖 4.11，圖中綠色區域為舒適度等級較高之「長時間站（坐）」，黃色區域為舒適度等級一般之「短時間站（坐）」，於此案例中並沒有區域之舒適度等級低至「行走」或「不舒適」。由圖 4.6 及圖 4.7 中可看出，由於興建大樓後風速增加，主要加速區域之舒適度等級皆由「長時間站（坐）」降低至「短時間站（坐）」。

圖 4.12、圖 4.13 為各測點之舒適度等級評估結果，其中點 14、15、18、21 於興建前、後之舒適度等級皆為「短時間站（坐）」，點 13、34 之舒適度等級於興建後皆由改善「短時間站（坐）」改善至「長時間站（坐）」，而大樓正前方之點 3、5、6 及大樓邊角之點 9、10、19、20、30，以及外圍之點 34、38 之舒適度等級則由「短時間站（坐）」降低至「長時間站（坐）」，各測點於興建前、後之舒適度等級評估結果整理於表 4.2。

前文提到，因不同的區域使用規劃，適用之舒適度標準亦不相同，若該區域規劃用途為戶外餐廳、咖啡廳等場所，則該區域之舒適度等級應滿足「長時間站（坐）」之標準，而用途為路邊座椅、走道等場所，則舒適度標準僅需滿足「短時間站（坐）」、「行走」即可。假如預期在建築物興建完成後，對於行人風場之影響可能改變舒適度而導致不符區域使用特性時，應規畫如植栽、防風柵等改善措施，或是調整建築物之設計，降低對於行人舒適度之影響，也可降低危險發生之機率，保障周遭安全。

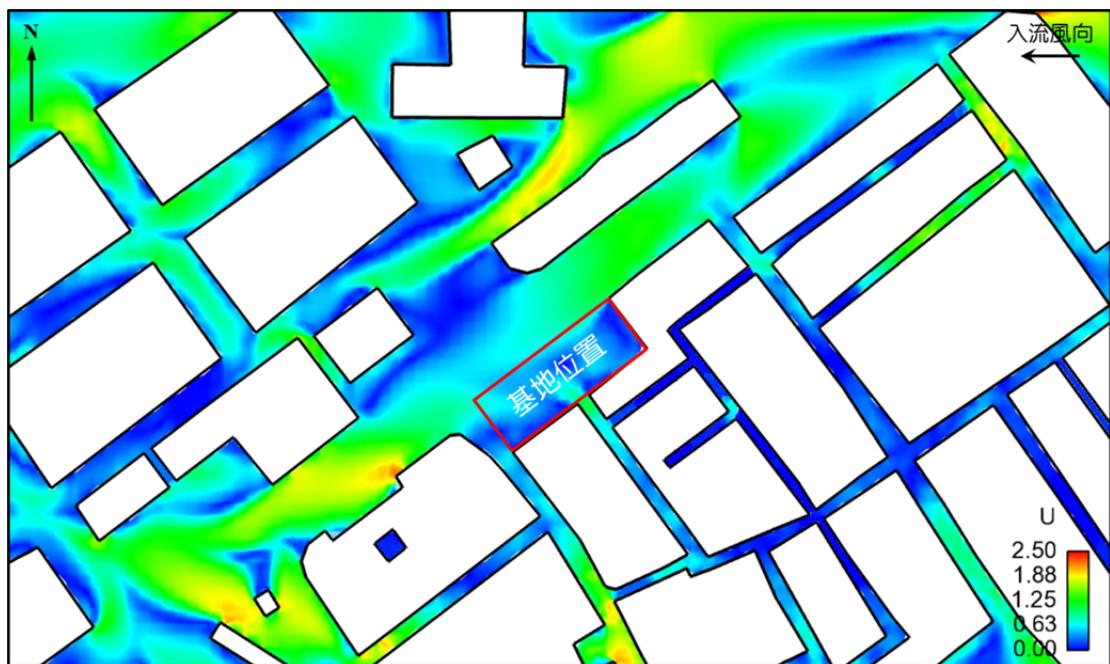


圖 4.6 盛行風向（東風）下行人高度（ $H=1.5\text{ m}$ 處）風速等值圖—興建前

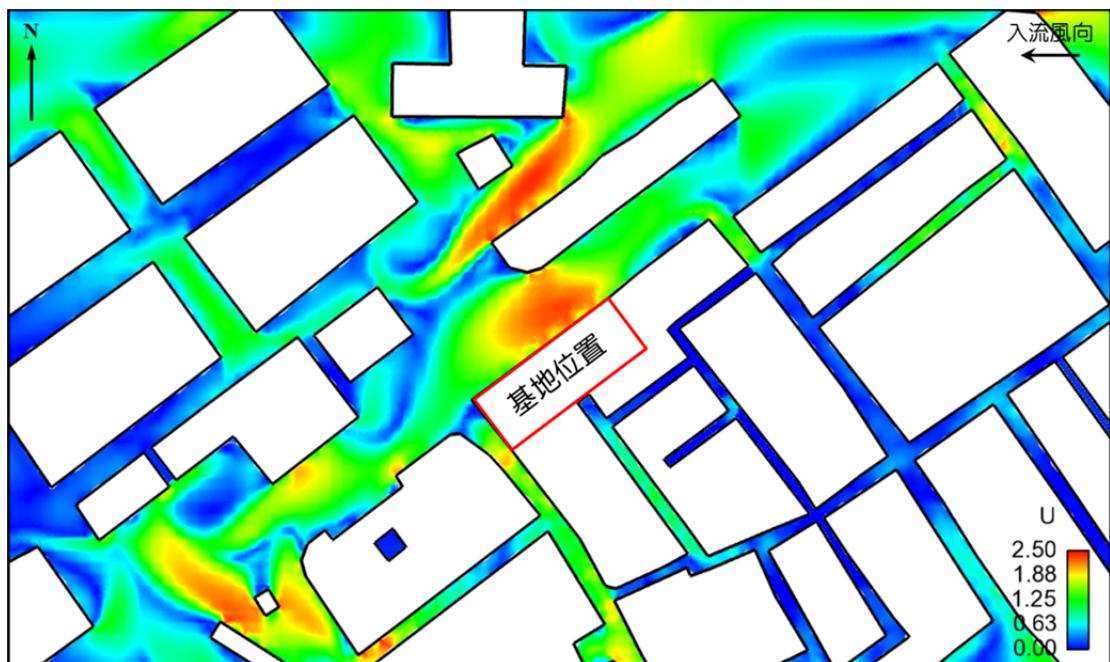


圖 4.7 盛行風向（東風）下行人高度（ $H=1.5\text{ m}$ 處）風速等值圖—興建後

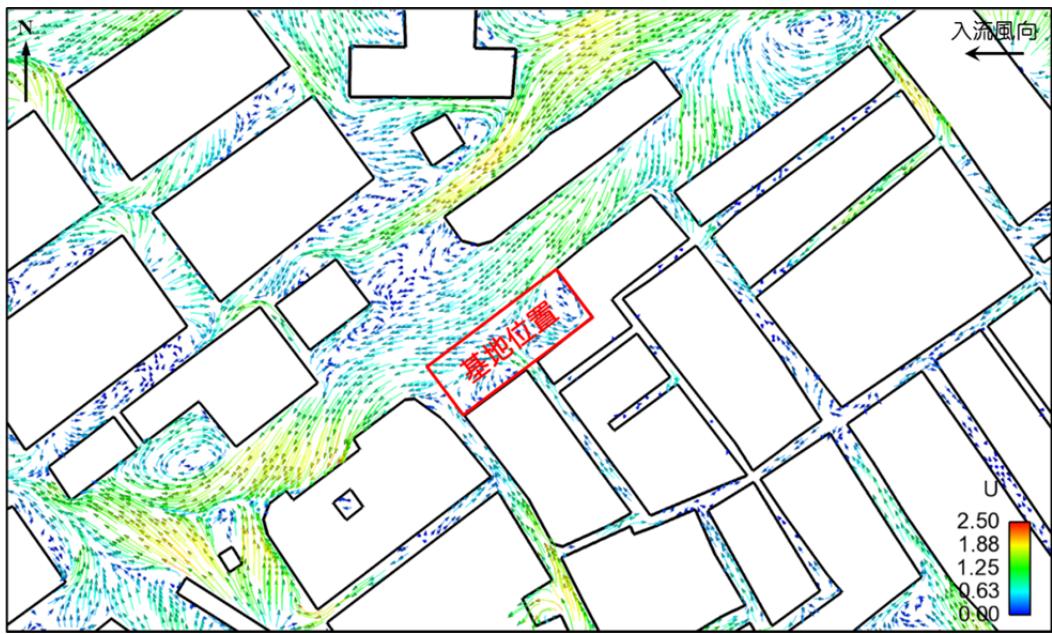


圖 4.8 盛行風向（東風）下行人高度（ $H=1.5\text{ m}$ 處）風速向量圖—興建前



圖 4.9 盛行風向（東風）下行人高度（ $H=1.5\text{ m}$ 處）風速向量圖—興建後

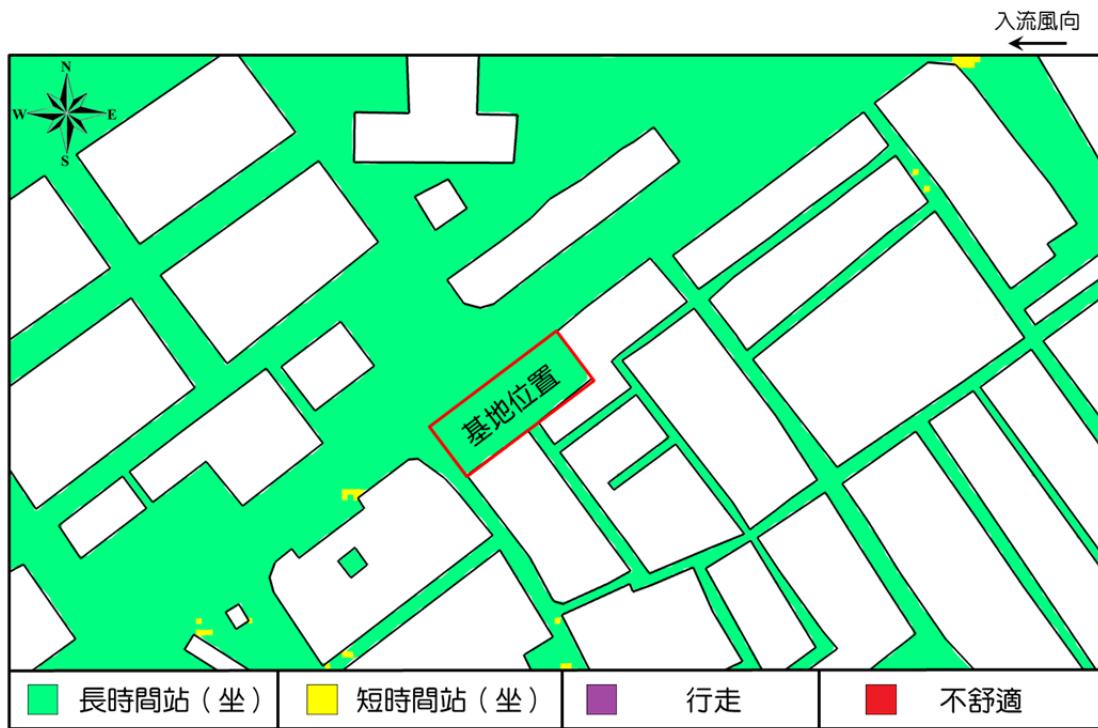


圖 4.10 盛行風向（東風）下行人高度（ $H=1.5\text{ m}$ 處）之舒適度等級—興建前

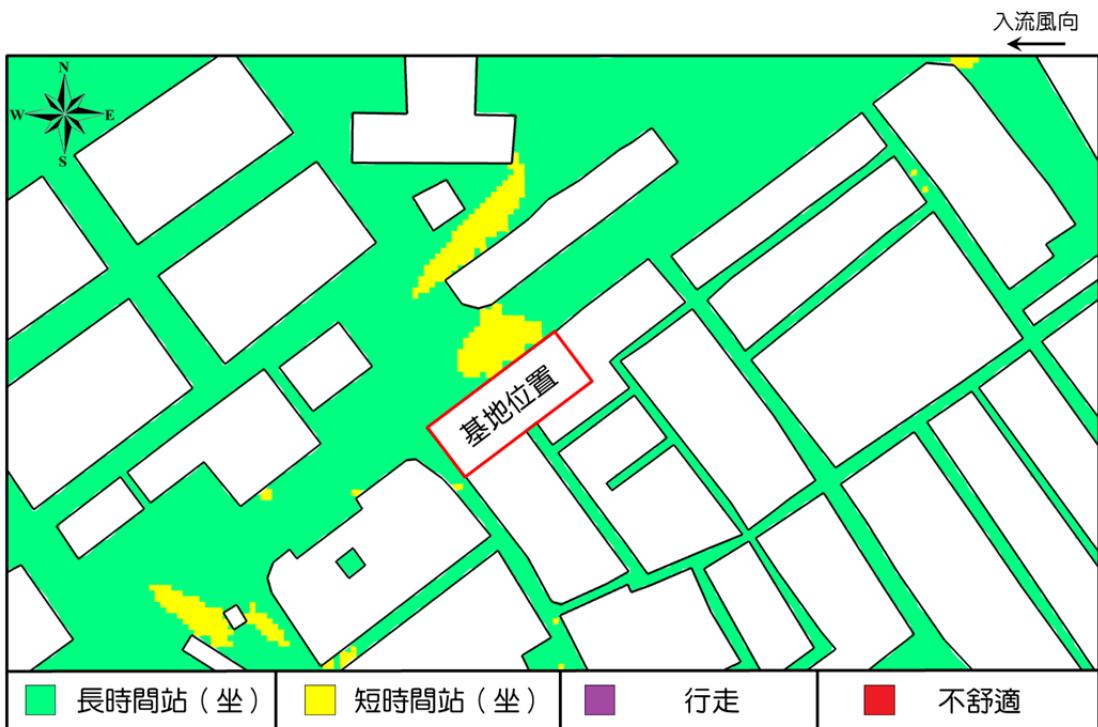


圖 4.11 盛行風向（東風）下行人高度（ $H=1.5\text{ m}$ 處）之舒適度等級—興建後

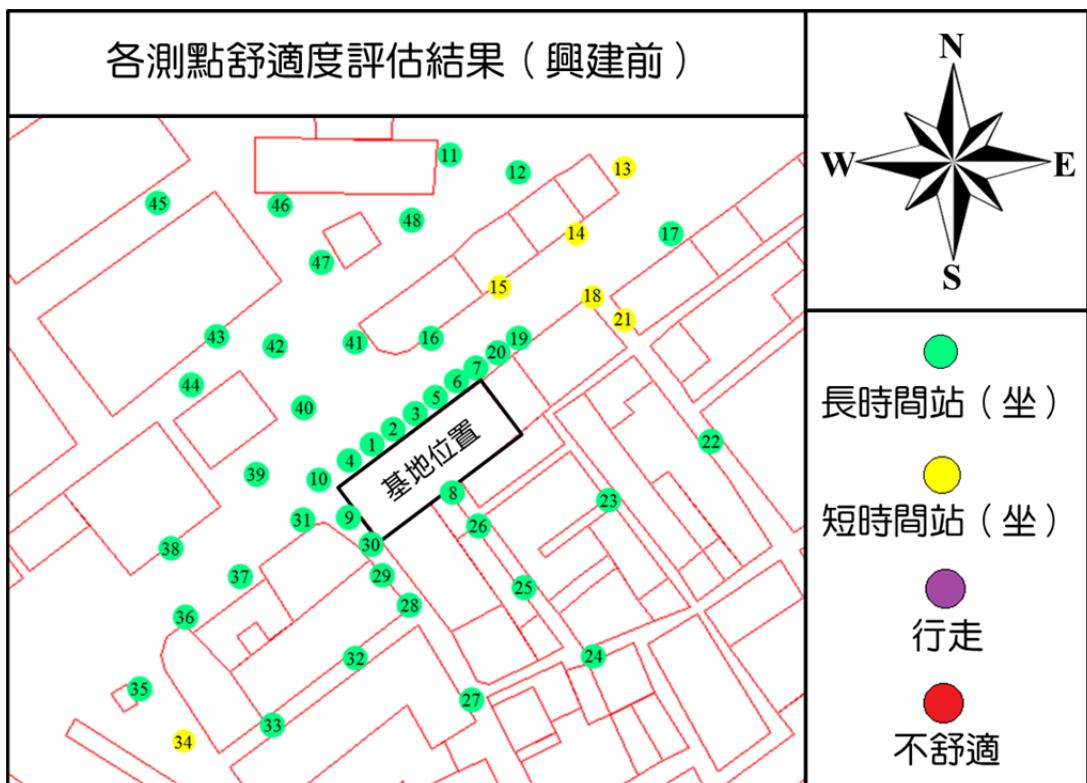


圖 4.12 各測點之舒適度等級評估結果—興建前

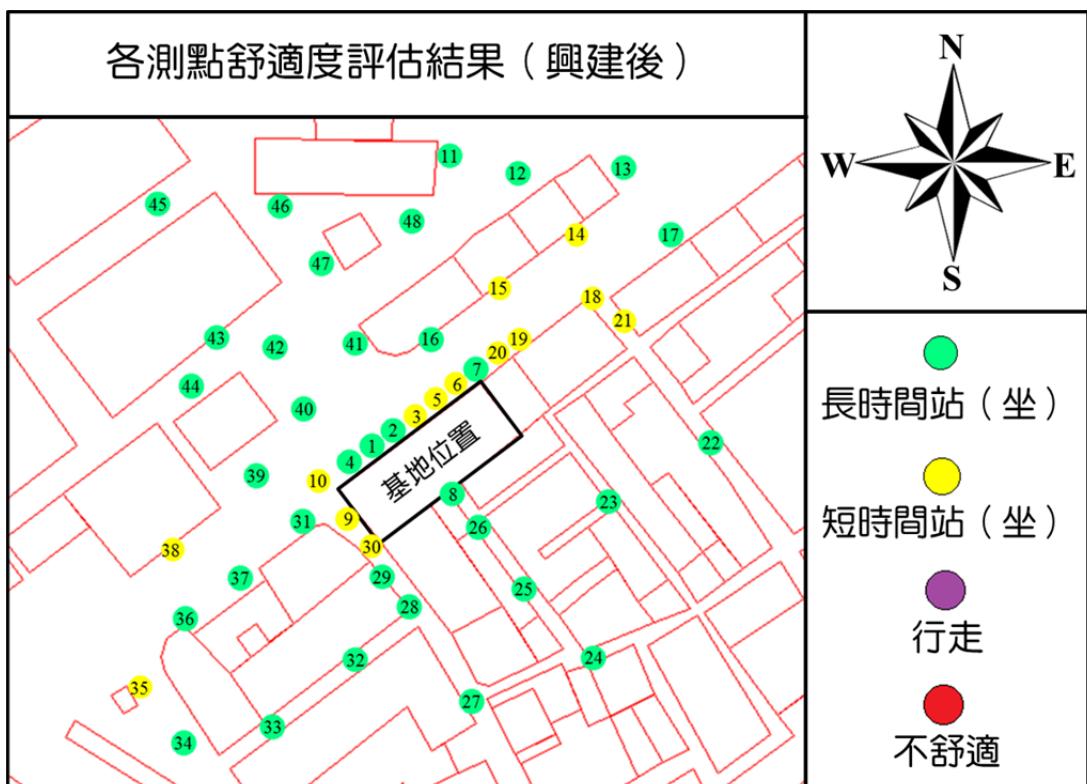


圖 4.13 各測點之舒適度等級評估結果—興建後

表 4.2 各測點舒適度評估結果

測點	興建前舒適度	興建後舒適度
1	長時間站坐	長時間站坐
2	長時間站坐	長時間站坐
3	長時間站坐	短時間站坐
4	長時間站坐	長時間站坐
5	長時間站坐	短時間站坐
6	長時間站坐	短時間站坐
7	長時間站坐	長時間站坐
8	長時間站坐	長時間站坐
9	長時間站坐	短時間站坐
10	長時間站坐	短時間站坐
11	長時間站坐	長時間站坐
12	長時間站坐	長時間站坐
13	短時間站坐	長時間站坐
14	短時間站坐	短時間站坐
15	短時間站坐	短時間站坐
16	長時間站坐	長時間站坐
17	長時間站坐	長時間站坐
18	短時間站坐	短時間站坐
19	長時間站坐	短時間站坐
20	長時間站坐	短時間站坐
21	短時間站坐	短時間站坐
22	長時間站坐	長時間站坐
23	長時間站坐	長時間站坐
24	長時間站坐	長時間站坐
25	長時間站坐	長時間站坐
26	長時間站坐	長時間站坐
27	長時間站坐	長時間站坐
28	長時間站坐	長時間站坐
29	長時間站坐	長時間站坐
30	長時間站坐	短時間站坐
31	長時間站坐	長時間站坐
32	長時間站坐	長時間站坐
33	長時間站坐	長時間站坐
34	短時間站坐	長時間站坐
35	長時間站坐	短時間站坐
36	長時間站坐	長時間站坐
37	長時間站坐	長時間站坐
38	長時間站坐	短時間站坐
39	長時間站坐	長時間站坐
40	長時間站坐	長時間站坐
41	長時間站坐	長時間站坐
42	長時間站坐	長時間站坐
43	長時間站坐	長時間站坐
44	長時間站坐	長時間站坐
45	長時間站坐	長時間站坐
46	長時間站坐	長時間站坐
47	長時間站坐	長時間站坐
48	長時間站坐	長時間站坐

五、 結論

- (1) 本文介紹開源之三維計算流體力學模式「OpenFOAM」及應用計算流體力學模式於環境風場模擬之方法，並驗證此模式於環境風場應用上之準確度。
- (2) 模式驗證部分採用 Ishihara (1998) 於單一高樓建築下之實驗數據。模擬結果顯示，本文使用之模式於掌握建築物周圍之風場速度分布情形相當精準。
- (3) 複雜環境下之風場驗證採用 Yoshie (2005) 於複雜建築情境下之風場實驗數據，實驗資料及模擬結果比較顯示，整體之風速分布與實驗數據相比有良好之一致性，證明模式適用於模擬複雜流況之風場。
- (4) 環境風場之實際應用案例以新北市之新建大樓進行模擬，模擬結果中可看出於大樓興建後，鄰近區域各位置之風速、風向所受到之影響。
- (5) 風場模擬結果配合 Lawson (1990) 提出之行人舒適度評估準則，分析鄰近地區舒適度指標，並藉由興建前、後之舒適度分析，了解大樓之興建對於行人風場舒適度之影響，以測點分析結果來看，有 2 測點之舒適度等級提升，10 測點舒適度等級降低，其餘測點則維持不變，整體來說，模擬域中各測點之舒適度等級皆符合其使用目的。
- (6) 以 CFD 做為模擬分析工具，可迅速準確的模擬複雜建築物群周圍之流況，而因 CFD 可提供全域之完整數值資料，再與各種視覺化工具配合，可以更靈活之方式，由不同的角度觀察並呈現結果。

參考文獻

- [1] Alan G. Davenport Wind Engineering Group, “WIND TUNNEL TESTING: A GENERAL OUTLINE”, 2007.
- [2] Cermak Peterka Petersen, “WIND IMPACT ASSESSMENT - CPP”, Wind Engineering and Air Quality Consultants, CPP Project: 7694, 2014.
- [3] City of Mississauga – Planning and Building Department, Development and Design Division, “Urban Design Terms of Reference – Pedestrian Wind Comfort and Safety Studies”, 2014.
- [4] J.C.R. Hunt, and Fernholz, “Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer : a report on Euromech 50”, *J. Fluid Mech.* 70,3, pp.543-559, 1975.
- [5] J.C.R. Hunt, E. C. Poulton, and J. C. Mumford, “The Effects of Wind on People; New Criteria Based on Wind Tunnel Experiments”, *Building and Environment*, Vol. 11, pp. 15-28, 1976.
- [6] M. Eaddy and W. H. Melbourne, “ENVIRONMENTAL WIND SPEED MEASUREMENTS ON A WIND TUNNEL MODEL OF THE WATERFRONT PLACE DEVELOPMENT, PORT MELBOURNE”, MEL Consultants Report No. 83/12, 2012.
- [7] Miao et al., “Numerical Study of Traffic Pollutant Dispersion within Different Street Canyon Configurations”, Hindawi Publishing Corporation – Advances in Meteorology, Volume 2014, Article ID 458617, 2014.
- [8] Mochida et al., “Comparison of various k- ε models and DSM applied to flow around a high-rise building – report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment – ”, *Wind and Structures*, Vol. 5, No. 2-4, pp.227-244, 2002.
- [9] Mohamed Sakr Fadl and John 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*, Vol. 2, No. 2, pp.131-143, 2013.
- [10] Stijn Vranckx and Peter Vos, “Final report OpenFOAM CFD simulation of pollutant dispersion in street canyons: Validation and annual impact of trees”, ATMOSYS, Action 9.2/Part II, pp.1-31, 2013.
- [11] Ted Stathopoulos, “Wind and Comfort”, EACWE 5, 2009.
- [12] 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.

- [13] W.D. Janssen, B. Blocken, and T. van Hooff, "Pedestrian wind comfort around buildings: comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study", *Building and Environment*, 2012.
- [14] W.H. Melbourne, "CRITERIA FOR ENVIRONMENTAL WIND CONDITIONS", *Journal of Industrial Aerodynamics*, Vol. 3, pp. 241-249, 1978.
- [15] Wendy Janssen, Bert Blocken, and Twan van Hooff, "USE OF CFD SIMULATIONS TO IMPROVE THE PEDESTRIAN WIND COMFORT AROUND A HIGH-RISE BUILDING IN A COMPLEX URBAN AREA", 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, pp. 1918-1925, 2013.
- [16] 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.
- [17] 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。
- [18] 王曉剛, "德鑫大樓行人風場模擬研究", 義守大學機械與自動化工程系, 2008。
- [19] 朱佳仁, "風工程概論", 科技圖書公司, 台北, 2006。
- [20] 朱佳仁, "台中市中國醫藥大學附設醫院興建外傷暨急症中心及癌症中心超高層大樓評估報告", 國立中央大學土木工程學系, 2005。
- [21] 朱佳仁, "台中市順天建設惠國段新建大樓之環境風場評估報告", 國立中央大學土木工程學系, 2007。
- [22] 林金賢, "新北市新莊線菜寮站新建大樓評估報告", 祺風工程科技有限公司, 2014。
- [23] 鄭啟明、羅元隆, "風力規範之標準地況分類與紊流邊界層特性研究", 中華民國建築學會「建築學報 68 期增刊(技術專刊)」, 2009。