行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

計算流體力學和實場調查應用於台灣建築物環境風場之研究(第 3 年)
研究成果報告(完整版)

計 畫 類 別 ：個別型
計 畫 編 號 ：NSC 95-2221-E-032-054-MY3
執 行 期 間 ：97 年 08 月 01 日至 98 年 07 月 31 日
執 行 單 位 ：淡江大學土木工程學系

計 畫 主 持 人 ：張正興

處 理 方 式 ：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 98 年 12 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ■ 成 果 報 告
□期中進度報告

計算流體力學和實場調查應用於台灣建築物環境風場之研究

計畫類別：■ 個別型計畫　　□ 整合型計畫
計畫編號：NSC 95-2221-E-032-054-MY3
執行期間：2006 年 08 月 01 日至 2009 年 07 月 31 日

計畫主持人：張正興
共同主持人：
計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：□精簡報告 ■完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：
□赴國外出差或研習心得報告一份
□赴大陸地區出差或研習心得報告一份
□出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
□國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
□涉及專利或其他智慧財產權，□一年□二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學土木工程學系

中　華　民　國　98　年　10　月　31　日

計算流體力學和實場調查應用於台灣建築物環境風場之研究

張正興[1]　林金賢[2]
[1]淡江大學土木工程系副教授
[2]淡江大學水資源及環境工程系博士班

摘要

本研究主要利用數值模擬程式（fluent 6.3）進行風環境的模擬預測分析；選擇的位置於台中市七期重劃區。在數值模擬方面：採用標準紊流模式與經修正（ Renormalization Group）紊流模式進行模擬分析。數值模擬分析與風洞試驗結果相互比較：(1）16 個方向無因次化速度的數值模擬（標準紊流模式）預測與風洞試驗之相關性（correlation）介於 0.53～0.92，平均值為 0.81；(2）62 個數值模擬測點與風洞試驗相互比較之下，其平均誤差約為 20～30％；(3）若使用 Davenport 舒適度評估準則，數值模擬預測與風洞試驗的趨勢是相當一致，但數值模擬的預測是較為保守的；(4）最後使用 Hunt 舒適度評估準則，數值模擬的預測則較為嚴重。

關鍵詞：風洞試驗、計算流體力學、行人風場評估

一、前言：

因科技的發展帶動著建築物所能建造的高度不斷向上竄升，建築物在地面造成的風場加速現象則是隨著建築物高度而日趨嚴重。由於高層建築之新建將對地面行人環境風場(pedestrian level wind environment)造成改變，進而影響行人在此區域活動之舒適性甚至於有危害行人安全的可能。因此在台灣環境影響評估法規與台北市綜合設計公共開放空間設置及管理維護要點也規定，對於新建高層建築需要進行行人舒適度之風洞試驗。

因石油不斷的高漲的情狀下，尋求相關的替代能源將是未來趨勢。近來興建高樓因綠建築指標與環評的需求，都會裝設小型風力發電系統，但常常會提到：風力發電系統要裝設何處才能產生最大效能。此時數值模擬將可以提供建築師一些初步的設計與選擇位置的考量，並減少風洞試驗所需要的花費。

近年來隨著電腦運算速度快速地提升，CFD 數值模擬的發展上更是加快了腳步。相較於傳統風洞實驗，數值模擬之優勢在於可獲得整個流場裡任意點之數據資料而非某些單純藉由經驗所訂出之特定測點，成本上亦能節省模型製作或實際量測之時間、金錢與人力。

CFD 數值模擬發展以來，在環境風場應用方面上早已大量使用，但都只對於基本的幾何形狀進行模擬與風洞試驗進行比較分析，然而要應用於實際仍然需要進一步的研究。

當風流經複雜的都市地形時，建築物之幾何形狀、高度、建築物表面突出狀況、排列方式都會直接影響風場的變化與通風效益的評估；當風場經由上游處之建築物影響

時，會有局部加速、角隅強風與尾流的現象產生[1,2,3]。

都會商區在一些大樓底層提供了購物、商場、餐廳、兒童遊玩乃至戶外展覽的空間。但是這些安排往往存在著因為鄰近高樓改變了風向、風勢而使之經常暴露在惱人的強風之下，失去了它原先設計的美意。[4]

在紊流模式之模擬方面，已發展出數套紊流模式，諸如 standard $\kappa-\varepsilon$ model、modified $\kappa-\varepsilon$ model、realizable $\kappa-\varepsilon$ model、renormalization group (RNG)based $\kappa-\varepsilon$ model 與 Reynolds stress transport model(RSTM)、subgrid scale(SGS) model、large eddy simulation(LES)…等等。計算流體力學數值模擬中，並沒有一套紊流模式可完全適用於所有問題的求解，各種紊流模式建立時理論背景強調處不同之結果使得各模式有其優劣之處因而適用方向和領域各不相同。

Kim[5]於之 1999 年的研究中，挑選了 standard、realizable、RNG $\kappa-\varepsilon$ model 與 RTSM model 等紊流模式進行二維山丘模擬時，與實驗結果比較後發現 RTSM model 之預測結果較佳；然而透過三維矩形斷面之鈍體進行模擬時，卻是 realizable $\kappa-\varepsilon$ model 較接近於實際量測值。在多數研究中概略的比較後，似乎以應用在大尺度渦漩模擬 LES(large eddy simulation)的 SGS model 可用之範圍最廣，但其最大的缺點就是計算量最大，因此求解時耗費的時間也會增加。傳統使用之 standard $\kappa-\varepsilon$ model 雖是模擬精度較低的模式，僅在模擬渠流或管流等簡單流場時，能輕易得到滿意的答案。其最大的優勢就在於可於短時間內快速得到概估的流場特性，可謂之簡單而完整。

在建築物週遭行人風場的模擬方面，He & Song[6]進行了台北某地區之大樓週遭風場模擬，其使用了以弱壓縮流(weakly compressible flow)方程式為基礎之 LES model 進行都市區域之模擬。但由於採用這種模擬方式為非穩態計算，故求解時間必隨著方程式計算量之增加而增加。另外，Uchida and Ohya[7]則於 1999 年在日本地區兩座 1000m 以下的小山之間做過大區域的氣候現象模擬。

對於在建築物週遭栽種樹木的部分，由於植栽對環境風場可造成的影響會有遮擋、過濾、導引、偏向等作用，因而在某些風速較大之區域能夠有效地降低風速。1999 年 Murakami[8]等人的研究結果顯示植栽之配置的確可降低些微風速，並在行道上有樹蔭的部分降低太陽輻射熱帶來的高溫，可降低不舒適狀況之產生。但特別需要注意的是，種植位置或疏密分佈不當之關係，亦可能造成部分區域反而由於植栽的導引或偏向作用使得風速不降反升，造成反效果。

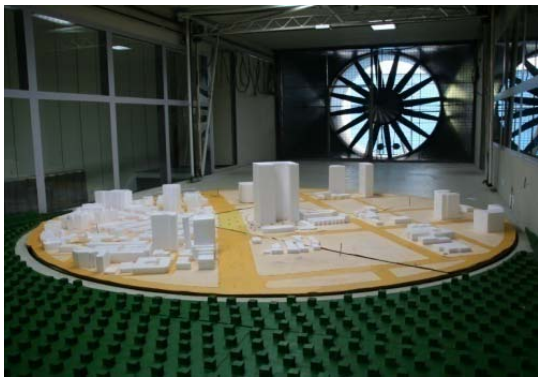
在複雜的建築物週遭進行行人風場的模擬與風洞試驗相互比較之下發現：不同幾何狀之高寬比、街道寬度、上游處建築物排列方式影響了下游處之風場的變化。在風洞進行不同方向角變化，對於某些測點所產生的變化；當風向角為 45 度時，所量測風速值為最高。Zhang[9]進一步使用數值模擬與風洞試驗相互比較發現：利用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 紊流模式，所得結果與實驗最為接近；在網格的繪製上：使用非結構性網格，並在建築物的四周局部地將網格加密，此結果將有利於往後更複雜地形模擬的依據。

二、風洞試驗

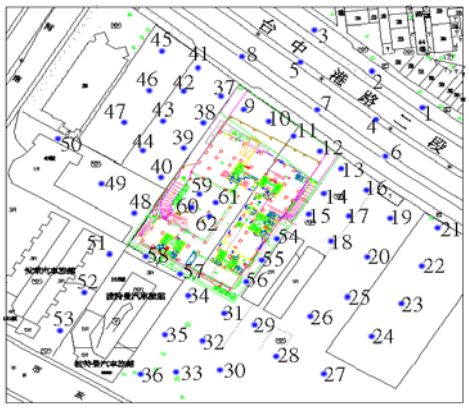
本研究主要針對興建後，基地內、外之微氣候行人風場效應的情形。淡江大學風洞的試驗段為 2.0m 高、3.2m 寬、18.0m 長，試驗段設有 3.0m 直徑之轉盤。興建大樓為單獨一棟大樓，樓高（含屋突）約為 142 公尺。環境風場風洞試驗採用 1:300 模型縮尺，以主建築物為中心，模擬半徑 450m 範圍內之建築，置於風洞試驗段轉盤上，如圖一所示。

行人風場的量測主要採用 Irwin 於 1981 年所發展出來的無方向性地表風速計測器來進行量測。其原理是利用管與管中之細管(即管中管，內外兩管共一中心軸，但內管突出較高)，兩者間之壓力差，參照預先率定之結果，可迅速、實用地量測到行人高度上之水平方向風速。

行人量測高度約為 1.5～2 公尺，若是換算至風洞縮尺約為 0.05～0.07 公分。本研究主要有 62 個測點進行風洞試驗與 CFD 的預測進行相互比較，其測點位置如圖二。



圖一 風洞試驗模型



圖二 風洞試驗量測位置點

三、數值模擬

3.1 建築物幾何形狀建立

圓盤周邊的地形圖（1/1000 的數值地形圖檔），可向台中市政府都市發展局提出申請並付費。

數值地形提供風洞試驗相當重要的資訊並縮短人工描圖的花費。但如何快速地將數值地形上的點座標快速地匯入計算流體力學 Gambit2.4 軟件中，是需要加以考量。

由於 Autocad 軟件有微軟 VBA 巨集可用[10]，吾人便自行撰寫介面程式，將數值地形圖上的點座標轉換成 Gambit 2.4 可直接讀入的 journal 檔案[11]。如此一來，建立幾何形狀只需要一小時便可以達成，而不需要人力鍵入座標等繁複的動作；不容易產生錯誤的訊息且發生當機的現象，如圖三、四。

圖三點座標擷取

圖四 Gambit 輸入檔

3.2 網格繪製

因複雜且不規則形狀之都市地形，主要以非結構性網格進行繪製且儘量避免 equisize skew >0.97。行人風場量測高度為 0.06 公分，因此在 0~0.2 公分的範圍進行網格加密。

3.3 逼近流

利用實驗室所量測出高度與亂流強度、高度與風速之間的關係進行迴歸分析。輸入固定模擬的風速 10（m/sec）、α 值為 0.25、δ 值為 400 公尺；最後給予 FLUENT6.3 所輸出（write profile）X、Y、Z 相對位置的檔案路徑，程式將會輸出包括速度剖面、κ（動能、Turbulent Kinetic Energy）以及 ε（黏滯消散率、Viscous Dissipation Rate），κ、ε 兩個變數可依下列經驗公示來表示：

$$k = (TI * U(z))^2 \qquad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{U_*^3}{\mathrm{K}y} \qquad (2)$$

Turbulent intensity:紊流強度
K :von Karman constant 值為 0.4
U_*：摩擦速度

3.4 御制方程式

在計算流體力學中，沒有一個紊流模式對於所有的問題是通用的。紊流模式的選擇主要依靠以下幾點：流體是否為可壓性、建立特殊可行的問題、精度的要求、時間的限制。FLUENT 6.3 中[12]，提供了六種不同的紊流模式，在本次模擬中，主要針對 standard $\kappa-\varepsilon$ 、RNG $\kappa-\varepsilon$ 進行與實驗數據進行分析比較。

連續方程式：

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \qquad (3)$$

動量方程式：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{u_i' u_j'}) + g_i \qquad (4)$$

$$-\overline{u_i' u_j'} = \frac{1}{\rho}\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \qquad (5)$$

$-\overline{u_i' u_j'}$ ：雷諾應力

$\mu_t = \dfrac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$ μ_t ：紊流黏滯性

g_i ：物體之重力

k ：動能

standard $\kappa-\varepsilon$ 是簡單而且完整的紊流模式，主要求出速度和長度尺度。在 FLUENT 中，標準 $\kappa-\varepsilon$ 模型自從被 Launder and Spalding 提出之後，就變成工程上流場計算中主要的工具之一；它是個半經驗的公式而且從實驗現象中總結出來所得。其方程式如：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_h})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon \qquad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{1}{\rho}C_{\varepsilon 1}G_k\frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (7)$$

σ_k ：κ 之紊流 Prandtl number(普郎特數)

σ_ε ：ε 之紊流 Prandtl number(普郎特數)

G_k :層流速度梯度而產生的紊流動能

RNG $\kappa-\varepsilon$ 模式來源於嚴格的統計技術，雖然與 standard $\kappa-\varepsilon$ 有相似的地方，但兩者之間的差異如下：

(1) RNG $\kappa-\varepsilon$ 模式中，在 ε 方程中加了一個可解析方程式。

(2) 考慮到了湍流漩渦，提高了在這方面的精度。

RNG $\kappa-\varepsilon$ 模式為紊流 Prandtl 數提供了一個可解析公式，然而 standard $\kappa-\varepsilon$ 使用是常數。

這些特點使得 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模式比 standard $\kappa-\varepsilon$ 模式有更廣泛的流動，已提高其可信度和精密度。其方程式如下：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_k \mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon \qquad (8)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{1}{\rho}C_{\varepsilon 1}G_k\frac{\varepsilon}{k}-\left[C_{\varepsilon 2}+\frac{C_\mu \rho \eta^3(1-\frac{\eta}{\eta_0})}{1+\beta\eta^3}\right]\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (9)$$

α_k：κ 有效紊流 Prandtl number(普郎特數)之倒數

α_ε：ε 有效紊流 Prandtl number(普郎特數)之倒數

μ_{eff}：有效地紊流黏滯性

$\eta=\frac{Sk}{\varepsilon}$　S:張力變形的尺度量測

η_0=4.38　β=0.012

四、數值模擬與風洞試驗比較

計算流體力學中的紊流模式主要有 standard $\kappa-\varepsilon$、RNG(renormalized groups) $\kappa-\varepsilon$、realizable $\kappa-\varepsilon$……等多種模式[12]。根據日本 AIJ[13]建議，一開始使用標準的紊流模式進行模擬分析，先確定出模擬準確度是否可以接受，進一步嘗試不同模式進行相互比較。

4.1 Davenport and Hunt 評估準則介紹

舒適度評估準則主要選用 Davenport[14]和 Hunt[15]。主要差異在：Davenport 主要以平均風速進行評估並區分成五種不同的狀況（長時間站坐、短時間站坐、慢走、快走、危險）；Hunt 以有效風速（平均風速＋3＊擾動風速）並區分成四種不同的狀況（長時間站坐、短時間站坐、行走區、危險），如表一。詳細資料請參閱相關文獻。

表 1 Davenport 與 Hunt 評估準則比較

	狀況	平均風速 有效風速	速度 （m/sec）	發生機率	備註
Davenport (1975)	長時間停留	U_{mean}	>3.6	<1.5%	發生機率依據：分別以一週、一個月、一年內發生一小時的機率可得 1.5、0.3、0.02%。
	短時間停留	U_{mean}	>5.4		
	慢步	U_{mean}	>7.6		
	快走 （有精神的走）	U_{mean}	>9.8		
	危險	U_{mean}	>15.2	>0.02%	
Hunt , Poulton & Mumford (1976)	長時間停留	U_e	>6.0	<10%	$U_e= U_{mean}+ 3*U_{rms}$
	廣場、公園	U_e	>9.0		
	不舒適 （危險）	U_{mean}	>9.0	>1%	
	行走區 （有精神的走）	其它風速（有效風速超過廣場，但平均風速低於危險）			

4.2 數值模擬與風洞試驗（Davenport 評估準則）

標準（standard）紊流模式中與風洞試驗的比較如圖五、六、七所示：在藍色區域（16、17、18）、咖啡區域（25、26、28、31、34、33）、紅色（54、55、56、59～62）等位置，風洞試驗的無因次化風速會比數值模擬來的高，因此數值模擬的結果會較不保守。就 CFD 與風洞試驗相關性進行比較，其相關性約為 0.76，此結果仍然是可以被接受的。

網格獨立性測試，原先網格數約為 800000，增加網格至 1410000 時，相關性可從 0.76 提升至 0.79，但模擬的時間則需要增加一倍以上。

根據日本 AIJ[13]文獻，當主建築物上流處時，CFD 與風洞試驗的結果是相當吻合的；若是位於建築物下流處(down stream)或是尾流區（wake flow）時，其結果是較不

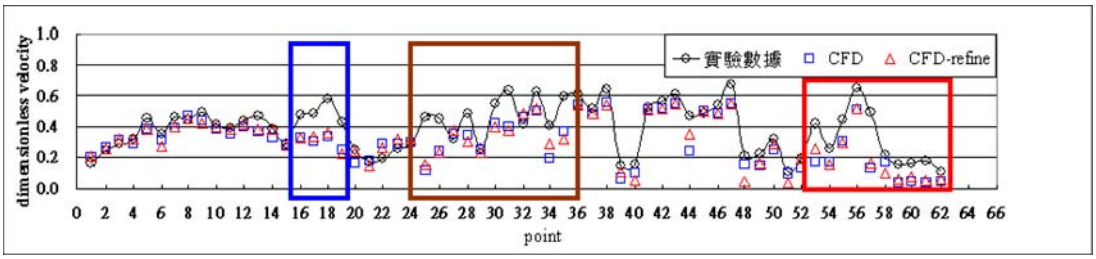
好的。

如圖八所示：當風向為北風時，建築物左側的中庭，右側、下方巷道，皆位於尾流區，因此 CFD 預測的結果並無法與實驗相吻合。

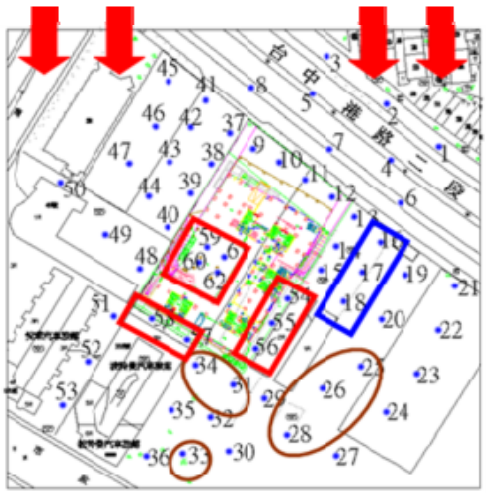
剩下 15 個方位的相關係數，如圖九所示：當風向為南、南南西風時且紊流模式為標準時，相關係數分別為 0.54、0.53；若為 RNG 模式，相關係數分別為 0.46、0.58。

當風向為西風時且紊流模式為標準時，相關係數可達 0.92；若為 RNG 模式，相關係數則降低至 0.81。剩餘風向的相關係數都介於 0.7～0.8 之間。

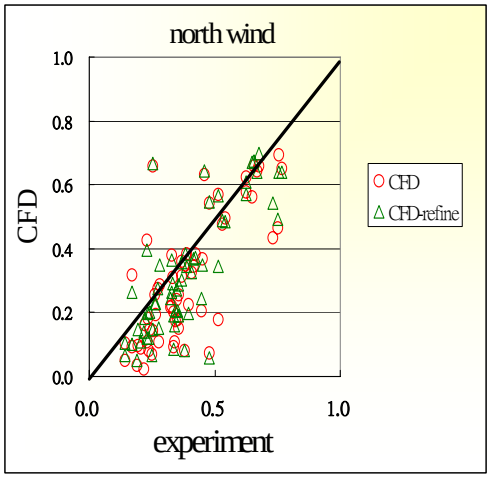
就整體平均值而言：標準模式下，相關係數平均值為 0.81；RNG 模式下，相關係數平均值為 0.76。因此，標準紊流模式會比 RNG 紊流模式來的好，且標準模式是較容易收斂且縮短數值模擬的時間。



圖五 無因次化平均風速之數值模擬與風洞試驗（東風）



圖六 點位置圖



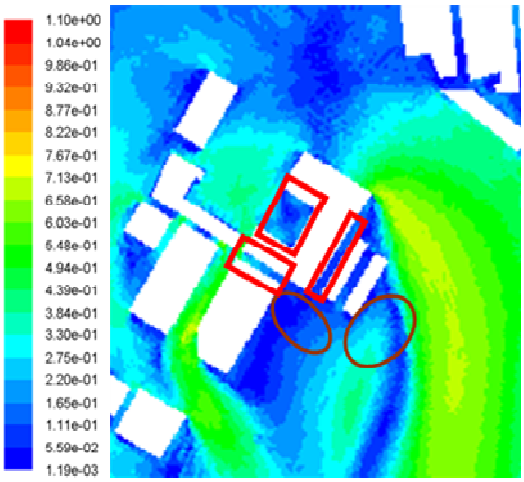
圖七 北風相關性

若將16方位的無因次化速度與台中氣象資料帶入Davenport評估方法，便可以得到圖十、十一舒適度評估的結果。若假設風洞試驗結果是正確的情況之下，咖啡色區域：風洞試驗無因次化風速會比CFD模擬的來的大，因此CFD模擬結果會比較保守。若是藍色區域：則是相反的結果，風洞試驗的結果是較為保守。

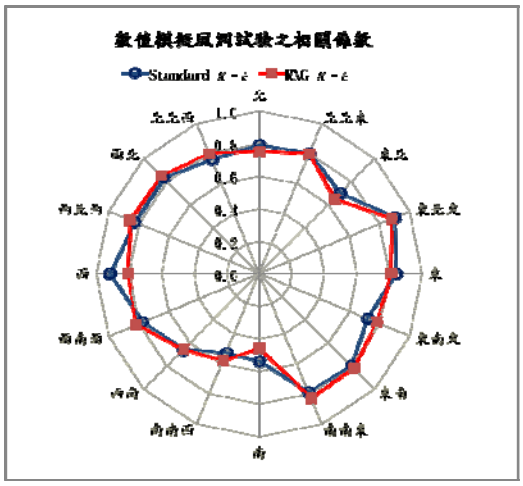
在數值模擬中，採用RNG紊流模式進行模擬分析，可得16個方位無因次化速度。其結果如圖十二所示。

比較圖十、十一、十二：若假設風洞試驗結果是正確的情況之下，咖啡色區域：編號11在標準紊流模式下，其評估結果與實驗相符合，但RNG的紊流模式則較為保守；編號47在RNG紊流模式下，其評估結果與實驗相符合，但標準的紊流模式則較為保守。至於剩下實驗量測的測點，兩種不同紊流模式評估的結果，其趨勢都是一致的。

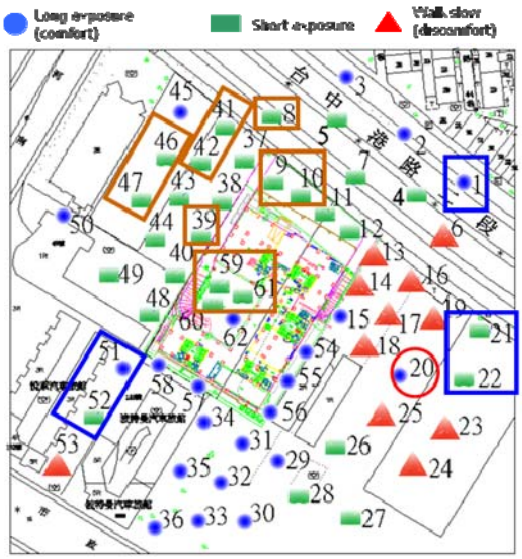
風洞試驗量測時，因量測儀器本身的誤差，或是Irwin probe的損壞與先前的校正是否正確[13]。如測點20就可以清楚看出，風洞試驗的結果是不太正確的結果。



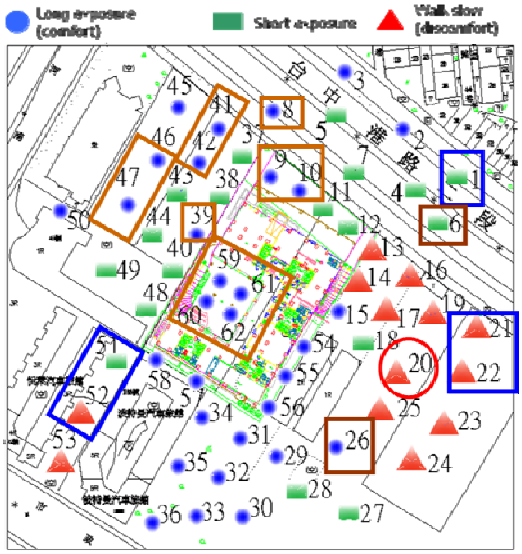
圖八等速度（The contour of velocity）



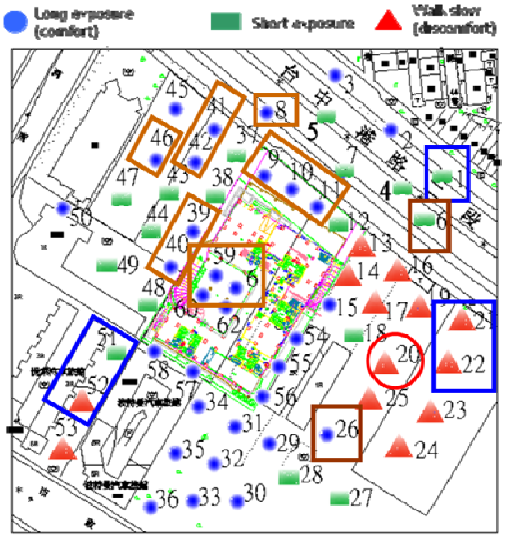
圖九 數值模擬與風洞試驗的相關係數



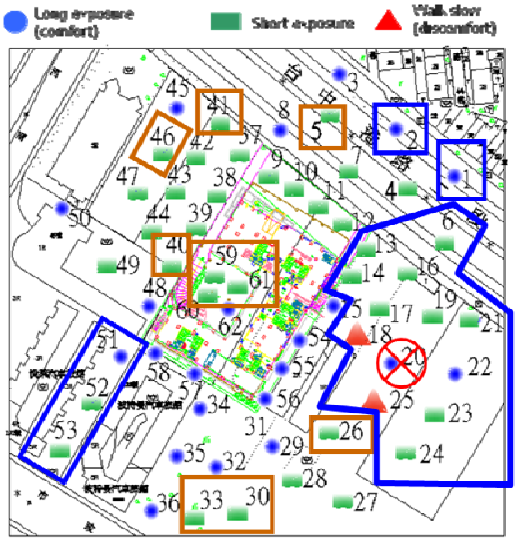
圖十 風洞試驗評估的結果



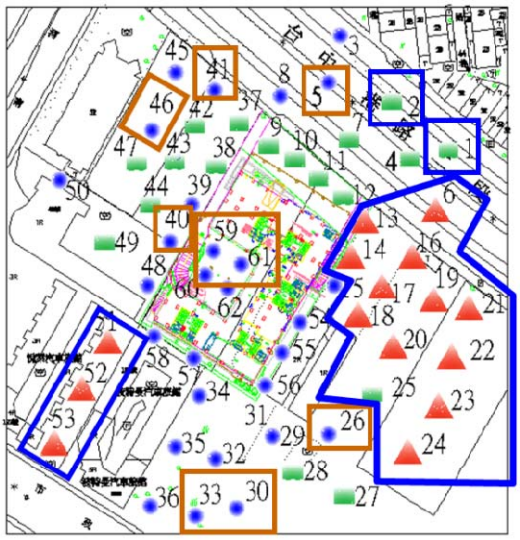
圖十一 數值模擬評估的結果(standard)



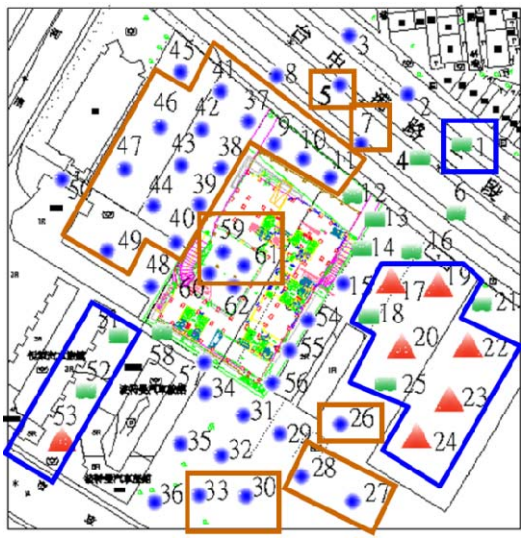
圖十二 數值模擬評估的結果(RNG)



圖十三 風洞試驗評估的結果



圖十四 數值模擬評估的結果(standard)



圖十五數值模擬評估的結果(RNG)

4.3 數值模擬與風洞試驗（Hunt 評估準則）

Hunt 以有效風速（平均風速＋3＊擾動風速）並區分成四種不同的狀況（長時間站坐、短時間站坐、行走區、危險）。當高風速、低擾動時，會讓人們感覺到不舒適；但低風速、高擾動時，也會讓行人感覺不舒適。利用有效風速來評估行人風場舒適度是未來的方向。

就計算流體而言，想跑出速度的擾動值必須模擬非穩態（unsteady）狀況，所消耗的時間較多且模擬結果是否可以直接應用於風洞試驗之先前評估，仍需要加以考慮。根據文獻[13]，模擬複雜的都市地形時，若採用非穩態進行模擬分析，數值的結果與實驗數據的趨勢是不一致的。

數值模擬可以直接輸出紊流強度，將紊流強度乘上平均風速便可以得到擾動速度。將平均風速與擾動風速帶入 Hunt 評估準則中，最後可以得到風洞試驗的實驗數據，如圖十三；數值模擬之標準紊流模式，如圖十四；數值模擬之 RNG 紊流模式，如圖十五。

比較圖十三、十四、十五：若假設風洞試驗結果是正確的情況之下，藍色區域：編號 1 在 RNG 與標準紊流模式下，風洞試驗的結果較為保守；編號 17、18、19、20、22、23、24、53 在 RNG 與標準紊流模式下，數值模擬的結果是較為嚴重的。咖啡色區域：編號 5、40、41、46、59、60、61 在 RNG 與標準紊流模式下，數值模擬的結果是較為保守。至於 RNG 與標準紊流模式最大差別：編號 9、10、11、37、38、42、43、44、47，RNG 紊流模式無法正確地模擬出風洞試驗結果，使得數值模擬的結果都是較為保守；編號 13、14、16、25，RNG 紊流模式與風洞試驗的結果是相當一致的。

五、結論

本研究一開始必須解決都市複雜地形如何快速、正確地讀入Gambit 2.4前置繪圖軟體中；緊接著是非結構網格繪製與網格數目控制。

就Davenport評估準則而言：標準模式下，相關係數平均值為0.81；RNG模式下，相關係數平均值為0.76。62個測點之數值模擬測點與風洞試驗相互比較之下，其平均誤差約為20～30%。若考慮工程上的應用：標準紊流模式具有好的收斂性、較高數值穩定性、縮短模擬的時間等優點。整個數值模擬趨勢而言：計算流體力學於平均風速之風環境的應用是可以被接受。

就Hunt評估準則而言：數值模擬的預測相較於風洞試驗的結果有部分是嚴重、有部分卻較為保守；因此數值模擬的趨勢並無法像Davenport評估結果那樣的好。

六、參考文獻

[1]B.E. Lee, M. Hussain, B. Soliman, Prediction natural ventilation forces upon low-rise buildings, ASHRAE J. 22 (1980) 35-39

[2]A.C. Khanduri, T. Stathopoulos, C. Bedard, Wind-induced interference effects on buildings-a review of the state-of-the-art, Eng. Struct. 20(1998) 617-630

[3]R. Jozwiak, J. Kacprzyk, J.A. Zuranski, Influence of wind direction on natural ventilation of apartment buildings, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 60(1996) 167-176.

[4]M. bottema, A method for optimization of wind discomfort criteria, Building Environment 35(2000) 1-18

[5]S.E. Kim, F. Boysan, Application of CFD to Environmental Flows, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 81(1999) 145-158.

[6]J. He, C.C.S. Song, Evaluation of Pedestrian Winds in Urban Area by Numerical Approach, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 81(1999) 295-309

[7]T. Uchida, Y. Ohya, Numerical Simulation of Atmospheric Flow Over Complex terrain, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 81(1999) 283-293

[8]S. Murakami, et al., CFD Analysis of Wind Climate from Human Scale to Urban Scale, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 81(1999) 57-81

[9]A. Zhang, C. Gao, L. Zhang, Numberical simulation of the wind field around different building arrangement, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 93(2005) 891-904

[10]林龍震 “AutoCAD 2000 LISP/VBA 程式設計” 松崗電腦圖書資料公司 2000

[11]Gambit 2.4 user guide

[12]Fluent 6.3 user guide

[13]R. Yoshie , A. Mochida, Cooperative Project for CFD Prediction of Pedestrian Wind Environment in The Architectural Institute of Japan (AIJ), Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95(2007) 1551~1578

[14]N. Isyumov, A. G. Davenport, The Ground Level Wind Environment in Build-up Areas, Process of The 4th International Conference on Wind Effects on Building and Structure, Cambridge University Press (1975) 403-422

[15]J. C. R. Hunt, R, C. Poulton, J. C. Mumford, The Effect of Wind on People; New Criteria Based on Wind Tunnel Experiment, Building and Environment, 11(1976) 15-28