

# 運用 CFD 進行都市通風對行人熱舒適性之影響評估

黎益肇<sup>1</sup> 方富民<sup>2\*</sup> 張仕獻<sup>3</sup> 張正興<sup>4</sup>

**關鍵詞：**都市熱環境、自然通風、風洞試驗、數值模擬。

## 摘 要

本研究針對一處位於板橋江子翠的典型都會區，採用風洞模型試驗及數值模擬的方法探討其風環境流通效應，並評估夏季弱風期間相應戶外熱環境的行人舒適性。研究中首先進行模型縮尺為 1/250 的風洞試驗量測，其結果係作為風場數值模擬結果比對驗證之依據。待數值預測模式之精準度確立後，再依據模擬而得之風場結果進行研究區內行人舒適性的評估。研究結果顯示，數值模擬的運用能提供可靠的風環境細部資料，有助於戶外熱環境行人舒適性的分析。此外，經由相關研究評估方法的整合，研究中也展現了一套熱環境中行人舒適性的評估程序。在從事老舊建築區的都市更新規劃時，研究中建議的風環境分析方法當可作為爾後熱環境行人舒適性評估的重要參考。

## THERMAL COMFORT ASSESSMENT OF URBAN VENTILATION BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Yi-Chao Li

*Taiwan Building Technology Center  
National Taiwan University of Science and Technology  
Taipei, Taiwan 106, R.O.C.*

Fuh-Ming, Fang Shi-Xian Zhang

*Department of Civil Engineering  
National Chung Hsing University  
Taichung, Taiwan 402, R.O.C.*

Cheng-Hsing Chang

*Department of Civil Engineering  
Tamkang University  
New Taipei City, Taiwan 25137, R.O.C.*

**Key Words :** urban thermal environment, natural ventilation, wind tunnel, numerical simulation.

## ABSTRACT

By performing wind tunnel model measurements and CFD flow simulations in a designated region at Banqiao District, the local pedestrian thermal comfort was assessed. At the beginning, pedestrian wind speeds at selected locations of a 1/250 scaled model were measured and the results were used to guide and confirm those from the simulations. The results of numerical predictions were then used to perform pedestrian comfort analyses in the designated region. Results showed that CFD could be applied to provide fairly acceptable prediction wind environment data in help with the execution of thermal comfort analyses. Moreover, a procedure of

<sup>1</sup> 國立臺灣科技大學臺灣建築科技中心專案助理教授

<sup>2</sup> \*通訊作者，國立中興大學土木系教授

<sup>3</sup> 國立中興大學土木系博士班研究生

<sup>4</sup> 淡江大學土木系教授

thermal comfort assessments was demonstrated by an integration of the available methods from the previous related studies. In future urban planning, accordingly, similar wind environment analyses should be carried out before the reconstruction in the aged buildings area as thermal comfort is concerned.

## 一、前言

隨著台灣經濟的快速發展以及都會區的人口聚集，建築物之高層化與高密度化已為大勢所驅。高層建築可視為巨型的阻礙物，氣流因為建築物的存在而改變了行進方向，進而形成了下切、縮流、渠化、渦漩 (vortex)、角隅流 (corner flow)、尾流 (wake) 以及穿堂風 (through flow) 等典型的風場效應。這些效應除了在冬季季風或颱風期間可能會引起建築物或建築群後發生瞬間的強風，影響行人及低樓層建築使用者的安全性及舒適性外，在夏季期間於建築物下風處也常會因為遮蔽效應而產生弱風區域，使得空氣對流減弱而降低了戶外自然通風的程度。一般而言，在密集的都市區域中由於建築量體大，對風場形成明顯的阻礙，常在都會區中心形成嚴重的弱風區域。當戶外環境風場通風量不足時，往往會導致如後現象：(1) 因都市熱島效應使得戶外溫度的增高，影響了人體舒適度；(2) 空氣中因污染物的蓄積而加重都市內環境污染的程度；(3) 因建築物內外通風交換率之降低而弱化了室內通風量，有礙於室內人員之健康。

都市地區的行人風環境的舒適性以及安全性的需求是非常重要的，尤其是在高層建築鄰近處，強風往往會被導引至行人高度區域使得行人感受到不舒適甚至於危險的狀況。有關強風對於行人的影響研究頗多，典型者如 Durgin 與 Chock [1] 述及高樓的新建也隨之形成了不利於行人舒適性的地面強風。Wise [2] 報導了因地面強風而導致了商店顧客望之卻步的實例。Lawson 與 Penwarden [3] 認為，在某高層建築附近吹起瞬間陣風的危險風況必須要為兩位老太太因摔倒致死的事件擔負責任。時至今日，大多數的都市規劃者已漸體認到行人風環境之舒適性以及安全性至為重要，並要求新建高樓在設計規劃階段應進行相關地面風力的研究。目前本國已有新北市政府在都市審議規範中提及需考慮此等問題之發生。在風環境舒適性和安全性的考量上，通常包括統計氣象資料的空氣動力資訊以及風的安全性準則 [4-8] 的結合。實驗所獲得之空氣動力資訊則必須轉換到目標建築物鄰近氣象站的氣象統計資料。在評估的位置，轉換的戶外氣象站氣象統計資料必須結合舒適及安全準則，據以評估該區域風的舒適性及安全性。

## 二、背景與相關研究

在行人熱舒適性方面目前已有一些建議的指標可供參考，諸如 PMV (predicted mean vote)、ET\* (new effective temperature) 以及 SET\* (new standard effective temperature) 等 [9]。Chen 等 [10] 預測在夏季時公寓街區的戶外熱環境，採用了耦合的方式模擬對流、輻射和傳導，並自模擬中獲得

了都市區域的風速、溫度、濕度以及平均輻射溫度 (MRT)。為評估戶外熱環境的行人高度熱舒適性，研究中計算了 SET\* 的空間分布。此外，在評量香港都會區所需要的通風環境並兼顧在現況下執行的困難度，香港中文的團隊 (CUHK) [11] 提出了一個權宜的方法，並針對香港地區須進行空氣流通評估的都市發展用地，提出了一項風環境評估標準，即當每小時地面平均風速的中位數達至 1 m/s，其效果大致與撥扇取涼的效果相符。本標準包括下列兩個可以達標的情形：(a) 評估地區內 80% 的測試點全年每小時平均風速的中位數  $\geq 1$  m/s，以及夏季每小時平均風速的中位數  $\geq 1$  m/s 時；(b) 評估地區內 95% 的測試點全年每小時平均風速的中位數  $\geq 0.6$  m/s 及夏季每小時平均風速的中位數  $\geq 0.6$  m/s 時。

相較於風洞實驗，數值模擬或計算流體動力學 (computational fluid dynamics, CFD) 的運用在風環境的評估上具有其優勢。一般而言，風洞模型實驗僅能在都市區域中呈現有限測點的分析結果，無法提供受測區域完整的評估影像，測點的布置方式端賴測試者的經驗而定。另一方面，CFD 則可提供完整、全時段、所有流場變數的完整資訊，便於整體與系統化的細部分析。此外，風洞實驗必需在縮小的模型中進行，而 CFD 可以針對實際尺寸的情形下進行而免於縮尺相似性的顧慮，在從事大範圍都市區域的分析具有其優越性。為了提升 CFD 在風環境評估的效益，日本建築學會 (Architectural Institute of Japan, AIJ) 與 Tominaga 等提出了相關模擬的準則 [12,13]。該準則的內容乃基於 CFD 預測、風洞實驗與實場量測，針對 7 種典型測試個案的結果進行交互的比對，探討在各個流場狀況下 CFD 條件設定產生之影響，並建議了若干 CFD 在執行時應遵循的準則。歐盟的科學與技術領域合作研究單位 (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research, COST) Franke 等 [14,15] 執行了類似的工作，並提出了相應的 CFD 模擬準則，以為歐洲進行相關模擬的參考依據。

## 三、目的與說明

為了探討進行都市地區戶外行人熱舒適性評估的可行性，本研究選擇一個研究區進行舒適性評估演練。首先採用風洞模型試驗量測近地表風速，並根據風洞試驗量測結果以及當地氣象資料，找出以體感溫度指標 SET\* 的舒適性門檻以及等效風速，據此展現評估戶外溫熱環境的初步程序。另一方面，研究中並依循 AIJ 以及 COST 所建議的 CFD 模擬準則，平行地進行數值計算以獲得可靠的風場模擬結果。除了與實驗結果比較以驗證數值模擬的準確度外，並進一步探討弱風區域的風場行為及原因。

## 四、研究方法

針對新北市板橋江子翠地區進行舒適度評估，本研究採用風洞模型試驗以及 CFD 模擬來探討局部區域的行人風場。風洞實驗數據除用來確認 CFD 模擬的可靠度，並進一步分析設計區域的行人風環境舒適性。主要考量夏季下午為溫熱感應最嚴酷之時段，研究中經由蒐集分析氣象資料後得到夏季之風速、溫度及濕度統計資料，並計算受測區域夏季下午的體感溫度 SET\*指標，據以評估受測區的熱環境舒適性。

### 4.1 研究區概況

本研究選定新北市板橋區江子翠北側區域作為研究區(參見圖 1)，板橋區作為新北市的商業核心，成為擁有眾多新建大樓的發展快速區塊。許多政府的相關計畫在該仍持續發展的區域進行指引並改善風環境，前述特點為該區域被選為研究區的主要原因。本區域中間有 64 號東西向快速道路橫越，另為大漢橋之起點向北與新莊連接。區域北側靠基隆河有板橋巨蛋大樓，其 5 棟高約 115 公尺大樓，間距 5 公尺。其餘部分高樓均落在東北側區域(高約 30~60 公尺)。南側區域建築較為低矮，屬於老舊型社區，高度多落在 3~6 樓之間(約 12 公尺~24 公尺之間)。

在氣象資料的蒐集上，依據板橋當地氣象站(位於研究區東南側約 2 公里處) 2006 至 2015 年間的資料，研究區夏季(6 月至 9 月)風速統計結果如見圖 2。由圖可見本區域夏季兩個主要風向分別是北風(18.9%)和東風(14.1%)，相應的平均風速分別是 0.54 m/s 和 3.27 m/s。

表 1 顯示板橋氣象站的溫度及相對濕度的統計結果，夏季平均溫度(28.78 °C)高於年平均溫度(23.01 °C)。夏季下午時段(13:00 至 19:00)每小時平均溫度由最高的 32.32 °C(中午 1 時)緩降至 28.61 °C(下午 7 時)，溫差達 3.71 °C。另一方面，相對濕度在這段期間的變化僅有 8.8%，且皆低於全年平均相對濕度(74.66%)與夏季平均相對濕度(73.83%)。一般來說，該地區夏季下午時段的溫濕度相當高，並不有利於戶外行人的熱舒適性。



圖 1 研究區衛星圖 (資料來源 google map)

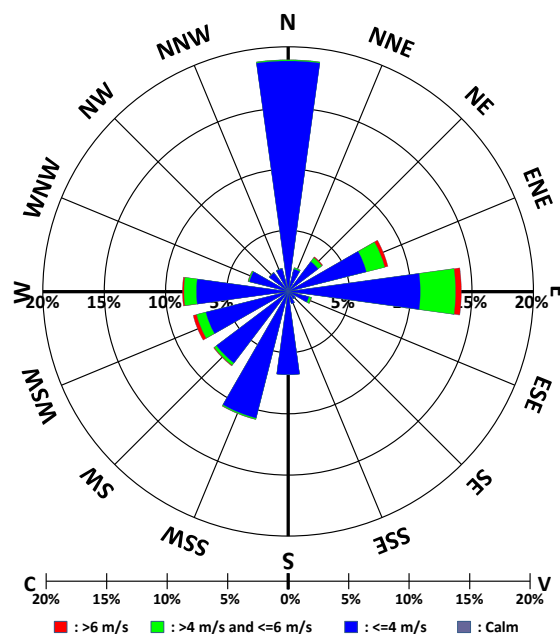


圖 2 板橋測站風花圖

表 1 板橋測站溫濕度統計結果

|           |       |       |       |            |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|
| 全年均溫 (°C) | 23.01 |       |       | 全年平均濕度 (%) | 74.66 |       |       |
| 夏季均溫 (°C) | 28.78 |       |       | 夏季平均濕度 (%) | 73.83 |       |       |
| 時間        | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00      | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
| 溫度 (°C)   | 32.32 | 31.87 | 31.18 | 30.44      | 29.82 | 29.21 | 28.61 |
| 濕度 (%)    | 64.38 | 65.85 | 67.47 | 69.19      | 70.23 | 71.43 | 73.19 |

### 4.2 風洞實驗

風洞試驗係於內政部建築研究所的大型風洞設施中進行。針對研究區進行的風洞模型試驗(圖 3)中模型縮尺為 1/250，模擬範圍為半徑 450 公尺的圓形區域，範圍內建築量體約為 70 至 80 棟，乃以保麗龍製作量體模型。地面行人區域的風速係以 Irwin [18] 所設計的地表風速計以約略均勻分佈的配置方式(共計 37 個測點)量測行人高度(2 公尺)處之平均值及擾動(均方根)值，以獲得研究區內風速風向等風環境的特性，並作為數值模擬驗證之依據。

圖 4 顯示實驗中來流之平均風速剖面及其紊流強度剖面。在平均風速剖面方面，大氣邊界層厚度( $\delta$ )為 1.6 m(相



圖 3 風洞模型試驗照片圖

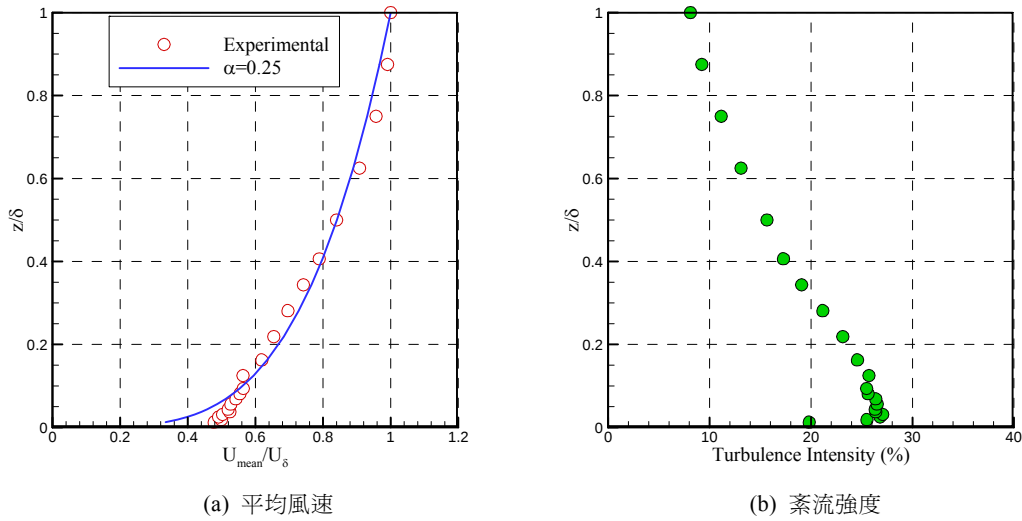


圖 4 風洞試驗大氣邊界層來流平均風速與紊流強度剖面

應為實際的 400 m)，指數律 ( $\alpha$ ) 為 0.25，符合本國「建築物耐風設計規範與解說」中所定義之市郊地況 (B 地況) 特性。至於在紊流強度的部分，近地表的紊流強度約為 28%，並隨著地面高度的增加而逐步衰減至約 8%。試驗量測中大氣邊界層的層緣風速 ( $U_\delta$ ) 為 11.93 m/s。實驗時以北風為起始風向 (標記為  $0^\circ$ )，每  $22.5^\circ$  逆時針旋轉圓盤一次，共計 16 個來流風向情況，以量測紀錄地表風速計的結果。實驗中風速量測之採樣頻率為 250 Hz，採樣時間為 132 秒。

### 4.3 數值模擬

本研究採用泛用型計算流體力學軟體 ANSYS FLUENT [19] 進行風場模擬工作，此乃基於有限體積法 (finite-volume method) 所建構出來的計算流體動力學程式，以求解如後之連續方程式與動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $u$ 、 $v$ 、 $w$  為速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三個方向之分量； $t$  為時間； $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  為場加速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  座標上之分量； $p$  為壓力； $\rho$  與  $\nu$  分別為流體之密度與運動黏滯度 (kinematic viscosity)。在 RANS 的模式下，風場模擬採用 realizable  $k-\epsilon$  model 進行建築周圍微氣候之模擬。本模式滿足雷諾應力的約束條件，可以精確地模擬平面和圓形射流的擴散速度，旋轉流計算、具有壓降梯度的邊界層流計算和分離流計算等問題。

風場模擬中採用之最小網格尺寸為 0.5 m，最大網格尺寸則為 12.5 m，建築物表面之無因次距離 ( $y^+$ ) 小於 30。採用非結構化網格配置，總網格數量約為 730 萬。在收斂殘差設定部分，連續以及速度項之收斂殘差為  $10^{-5}$ ，而  $k$  及  $\epsilon$  之收斂殘差為  $10^{-6}$ 。

在計算區域大小方面 (參見圖 5)，入流 (inlet) 截面至研究區中心以及研究區中心至出流截面的距離分別為  $5H$  與  $20H$  ( $H$  為研究區域內最高建築的高度，115 m)，計算區域兩側間距離為  $9H$ ，在垂直方向 ( $z$ ) 的高度則為  $8H$ 。模擬區域相應的阻塞比小於 5%。

模擬中入流邊界條件的給定主要是依據風洞試驗量測而得的平均風速以及紊流強度剖面 (參見圖 4)，並依據 Durbin 與 Petterson Reif [20] 提出以對數律為基礎之平均風速、紊流動能以及紊流消散率建議式來擬合，其公式為：

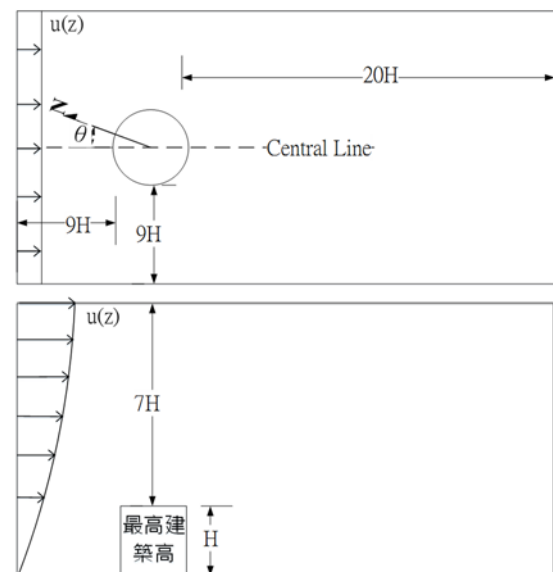


圖 5 CFD 模擬計算域配置圖

$$\begin{aligned}
 U(z) &= \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \\
 k(z) &= \frac{u_{ABL}^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \\
 \varepsilon(z) &= \frac{u_{ABL}^{*3}}{\kappa(z)}
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $u_{ABL}^*$  為摩擦速度 (friction velocity)， $\kappa$  為 von Karman 常數 (0.4)， $C_\mu$  為 standard  $k-\varepsilon$  model 常數 (0.09)。 $z_0$  為粗糙高度 (於市郊地況採用 0.5 m)。另為使入流剖面特性至受測圓盤區維持穩定，模擬中採用 Blocken 等 [21] 建議之地表剪應力邊界條件 (wall shear stress boundary condition)，於地表邊界之剪應力以  $\tau_w = \rho(u_{ABL}^*)^2$  給定。

## 五、結果討論

### 5.1 熱舒適性門檻

為進行都市地區通風效應評估，了解研究區域之 SET\* 指標分布概況，故必須先針對研究區之氣象資料進行分析。影響人體對環境的冷熱感覺項目主要分為環境因素及人體因素兩大部分，其中環境因素包括氣溫、濕度、周壁輻射溫度與風速，而人體因素則是代謝量與著衣量。近年來有關戶外熱環境研究之熱舒適指標中以 MRT (mean radiant temperature)、SET\* 及 PET (physiological equivalent temperature) 熱舒適度指標最常被國內、外研究者採用。表 2 為 Matzarakis 等 [22] 界定之體感溫度 SET\* 與感覺、生理現象之關係。其中，SET\* 在 25.6 ~ 30°C 間時為稍微溫暖，輕微不能接受的感覺狀態。而在林子平 [23] 針對台灣地區的戶外熱舒適性研究結果中，SET\* 的可接受範圍為 23 ~ 33.1°C。

在考慮板橋地區夏天下午 1 點至 7 點間不同之氣象條件下，研究中引入氣溫及濕度之概念，依據影響人體舒適度之六項因子演算，以求解在不同風速條件下 SET\* 值之變化，並找出達到戶外熱舒適性 SET\* 可接受範圍時相應之最小風速值。SET\* 之計算採用 Charlie Huizenga 與 Marc Fountain 於 1994 年所設計的「UC Berkeley Thermal Comfort Program」[0]。分析時將儀器所測得之溫度、平均熱輻射溫度、相對濕度、風速等物理環境因子及調查所得之活動狀態與人的衣著量等數據輸入程式中，以得出影響人體舒適度之可忍受的最小風速值。另外，溫度與相對濕度的數據則依據夏季下午時刻的氣象資料統計後帶入分析。

表 2 SET\* 與人體感覺、生理現象之關係 [22]

| SET* (°C)   | 感覺          | 生理現象      |
|-------------|-------------|-----------|
| > 37.5      | 非常熱，極大不適    | 蒸發調節失敗的增加 |
| 37.5 ~ 34.5 | 熱，非常不能接受    | 大量出汗      |
| 34.5 ~ 30   | 溫暖，不舒服、不能接受 | 出汗        |
| 30 ~ 25.6   | 稍微溫暖，輕微不能接受 | 輕微出汗，血管舒張 |
| 25.6 ~ 22.2 | 舒適，可接受      | 生理熱中性     |
| 22.2 ~ 17.5 | 稍微涼爽，輕微不能接受 | 血管開始收縮    |
| 17.5 ~ 14.5 | 涼爽，不能接受     | 身體緩慢降溫    |
| 14.5 ~ 10   | 冷，非常不能接受    | 開始發抖      |

由於近 10 年板橋區氣象資料中並未包含黑球溫度的紀錄，分析時乃以各時段之平均溫度取代。當人的夏季衣著量設定之絕緣值平均取 0.5 clo，人體代謝率採用站立狀態 (1.2 met)，在不同時段之風速 (0.3 ~ 3 m/s) 與 SET\* 對應圖如圖 6 所示。平均風速 3 m/s 是一個臨界值，若風速高於此值，則可能會發生行人強風的不舒適。因此，適當的微風將有效和緩戶外體感溫度，並增進舒適性。若以體感溫度 30°C 作為熱舒適性的門檻，由圖 6 可見下午 1 點之風速需達到 1 m/s 以上才能讓行人感覺舒適。此結果與 CUHK 所定義之香港地區舒適性門檻風速，即搖扇取涼相應之 1 m/s 風速相同。

### 5.2 等效風速

為評估夏季時各測點的戶外熱舒適性，另須計算夏季之等效平均風速 ( $U_{eq}$ )，即該測點在夏季時的平均風速，其公式如下：

$$U_{eq} = \sum_{i=1}^{16} P_i C_{Bi} \left( \frac{u_{2i}}{U_\delta} \right), \quad C_{Bi} = U_{mi} \left( \frac{\delta}{z_m} \right)^\alpha \quad (3)$$

其中  $P$  為各風向發生之機率，下標  $i$  為風向。 $C_B$  為風速轉換因子，可將邊界層厚度處之風速轉換到氣象站高度之風速。 $U_m$  為氣象站在不同風向的平均風速， $z_m$  為測站高度 (14 m)， $u_{2i}$  為 2 公尺高處 (行人高度) 之平均風速。經由 (3) 式可計算得各測點在考慮各個風向的發生機率後，統計所得的等效平均風速。

由於風洞實驗的有限測點 (37 個) 結果並不足以完整代表研究區域的風環境，較不適合採用 CUHK [11] 所建議的方式來進行熱舒適性評估。分析時乃先將風洞試驗結果經過分級並與 CFD 比對。其中，CUHK [11] 的戶外通風風速分級分別為：(1)  $U_{eq} < 0.6$  m/s, (2)  $0.6$  m/s  $\leq U_{eq} < 1$  m/s and (3)  $U_{eq} \geq 1$  m/s。

圖 7 顯示風洞試驗中 37 個測點等效風速分級結果。在研究區域中，有 24 個測點落在第 2 級，僅有 3 個測點落在第 1 級，10 個測點落在第 3 級。另將實驗測點等效風速結果與 CFD 模擬結果比較後發現 (圖 8)，除了 7 個測點之外，

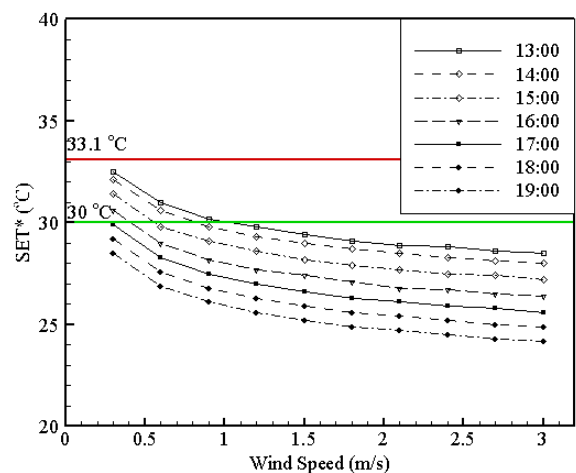


圖 6 板橋測站於夏季下午時段之人體於站立狀況下 SET\* 隨風速之變化圖



圖 7 風洞實驗之等效風速分級結果

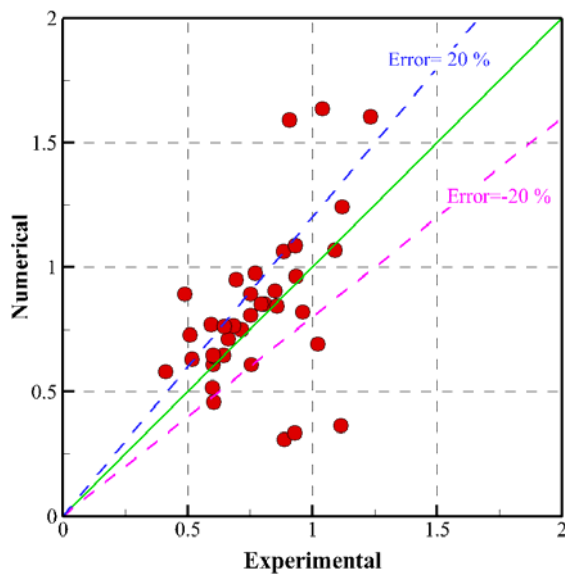


圖 8 風洞實驗與 CFD 模擬之等效風速比較

大部分測點的相對誤差均小於 20%。整體來說，CFD 模擬結果略為高估。然若將前述分級的結果與實驗與 CFD 結果相較，模擬的命中率則高達 89.2%。

### 5.3 熱舒適評估

研究中基於 16 個大氣邊界層入流風向的模擬結果，繼依據前述等效風速 ( $U_{eq}$ ) 以及相應的行人風速等級來進行研究區域的熱舒適性評估。0 顯示研究區的等效風速空間分布，在本區域的北側由於空間開闊，等效風速相對較高並超過 1 m/s (第 3 級)，顯見此區域通風條件良好。在東南側區域，由於主要為學校的戶外操場，同樣地具有不錯的戶外通風特性 (第 3 級)。至於在中間的快速道路附近，等效

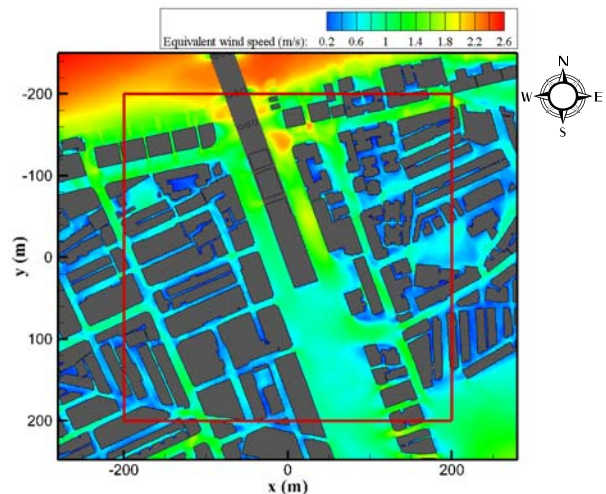


圖 9 CFD 模擬之研究區等效風速分布圖

表 3 研究區之等效風速分級所占面積百分比。

| 分級    | 第一級<br>$U_{eq} < 0.6$ | 第二級<br>$U_{eq} \geq 0.6$ | 第三級<br>$U_{eq} \geq 1$ |
|-------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| 面積百分比 | 51.87 %               | 48.13 %                  | 21.45 %                |

風速多高於 0.6 m/s，故其通風條件應視為可接受 (第 2 級或更佳) 的層次。然而在低矮建築區域的部分狹小巷弄，相應的等效風速小於 0.6 m/s (第 1 級)，其通風條件較差。

若針對研究區內一個 200 m × 200 m 的選定範圍 (如圖 9 方框所示)，應用 CUHK [11] 的評估方法進行評估後，由表 3 的結果可見，等 1 級、第 2 級、第 3 級之相應面積百分比分別為 51.87%、26.68% 以及 21.45%。由於過半面積的等效風速落在第 1 級，故本區域的熱舒適性應未達良好熱舒適性的情況。

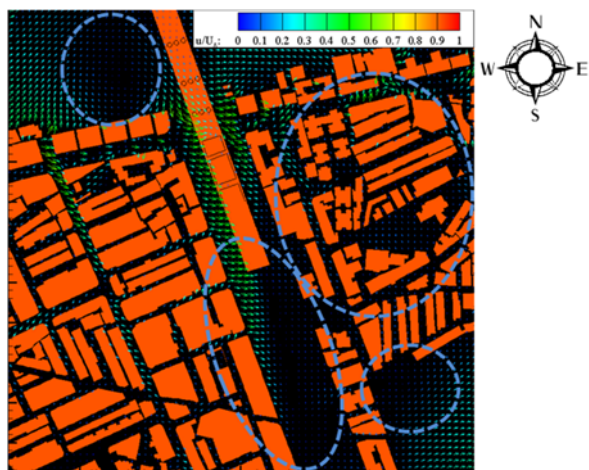


圖 10 北風狀況下之行人高度風速速度向量分布

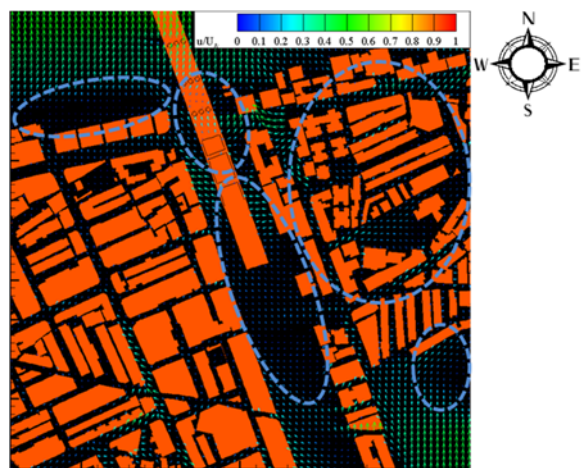


圖 11 東風狀況下之行人高度風速速度向量分布

最後，經由 CFD 模擬而得的地面風場結果，可以進一步地用以分析本方形區域中熱舒適性的程度。圖 10 與圖 11 顯示在相對於兩個主要季風風向（北風和東風）時的行人高度速度向量空間分佈。在北風發生時，由於西北側區域有 5 棟 115 公尺高、間距 5 公尺的大樓，對其下風處產生明顯的遮蔽效應。此外，因下游街道之走向與來風的風向約略垂直，使得大樓下游區域的在快速道路邊緣，其等效風速可以達到 1 米以上。而該區域北側與快速道路垂直之道路為較佳之通風區域，在北風以及東風時（圖 11）此區域有較強之風速，因此等效風速可以達到 1 m/s 以上。前述結果亦顯示 CFD 模擬能夠更詳細地處理行人風場的分析並對於熱舒適性相當有幫助。因此在熱舒適性的考量下，建議在未來的城市規劃中，應該在老化建築區域重建之前進行類似的風環境分析。

## 六、結 論

本研究利用板橋江子翠區為研究區域，進行風洞實驗測量和 CFD 模擬，以評估該地的行人熱舒適性。由行人高

度等效風速的比較結果顯示，CFD 能提供相當可靠的風環境模擬預測，可以有效地輔助夏季行人熱舒適性的評估分析。此外，經由研究區現地氣象資料與體感溫度分析的整合，較之於過往相關研究的評估方法，驗證了本熱舒適性評估的程序的可行性。

## 誌 謝

本研究承內政部建築研究所委託研究計畫補助（計畫編號：10415B0006），並感謝內政部建築研究所風雨風洞實驗室設備與人員技術支援，特此申謝。

## 參考文獻

1. Durgin, F.H. and Chock, A.W., "Pedestrian wind levels: a brief review," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 108 (ST8), pp. 1751-1767 (1982).
2. Wise, A.F.E., "Wind effects Due to groups of buildings, Session 3: Effect of buildings on the local wind," *Proceedings of the Royal Society Symposium Architectural Aerodynamics*, London, United Kingdom, pp. 26-27 (1970).
3. Lawson, T.V. and Penwarden, A.D., "The effects of wind on people in the vicinity of buildings," *Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, London, United Kingdom, pp. 605-622 (1977).
4. Davenport, A.G., "An approach to human comfort criteria for environmental wind conditions," *Colloquium on Building Climatology*, Stockholm, Sweden (1972).
5. Hunt, J.C.R., Poulton, E.C., and Mumford, J.C., "The effects of wind on people; new criteria based on wind tunnel experiments," *Building and Environment*, Vol. 11, pp. 15-28 (1976).
6. Melbourne, W.H., "Criteria for environmental wind conditions," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 3, pp. 241-249 (1978).
7. Murakami, S., Iwasa, Y., and Morikawa, Y., "Study on acceptable criteria for assessing wind environment ground level based on residents' diaries," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 24, pp. 1-18 (1986).
8. Penwarden, A.D., "Acceptable wind speeds in towns," *Building Science*, Vol. 8, pp. 259-267 (1973).
9. Auliciems, A. and Szokolay, S.V., *PLEA Note 3 : Thermal Comfort, 2nd ed.*, Passive and Low Energy Architecture International, Queensland, Australia, pp. 15-41 (2007).
10. Chen, H., Ookaa, R., Harayama, K., Kato, S., and Li, X., "Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction," *Energy and Building*, Vol. 36, pp. 1247-1258 (2004).
11. Chinese University of Hong Kong, "Urban climatic map and standards for wind environment feasibility study," Planning Department report, Hong Kong (2012).
12. Architectural Institute of Japan, *AIJ Guidebook for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings, 1st ed.*, Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan, pp. 79-97 (2016).

13. Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., and Shirasawa, T., "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 1749-1761 (2008).
14. Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., and Carissimo, B., *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment*, COST Office, Brussels, Belgium, pp. 7-51 (2007).
15. Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Kru" s, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., Miles, S.D., Wisse, J.A., and Wright, N.G., "Recommendations on the use of CFD in wind engineering, COST Action C14, impact of wind and storm on city life built environment," *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*, van Beeck, J.P.A.J., Waterloo-sesteenweg, Belgium (2004).
16. Mochida, A., Tominaga, Y., Murakami, S., Yoshie, R., Ishihara, T., and Ooka, R., "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 Structure*, Vol. 5, pp. 227-244 (2002).
17. Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., and Zhu, J., "A new k-ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation," *Computers Fluids*, Vol 24, No. 3, pp. 227-238 (1995).
18. Irwin, H.P.A.H., "A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 7, pp. 219-239 (1981).
19. ANSYS Fluent Software Description, Available online: <https://www.ansys.com/>.
20. Durbin, P.A., and Petterson Reif, B.A., "Statistical theory and modelling for turbulent flows," Wiley, Chichester, UK (2001).
21. Blocken, B., Stathopoulos, T., and Carmeliet, J., "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems," *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 238-252 (2007).
22. Matzarakis, A., Mayer, H., and Iziomon, M.G., "Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature," *International Journal of Biometeorology*, Vol. 43, pp. 76-84 (1999).
23. 林子平, 熱濕氣候區戶外熱舒適接受範圍與環境設計對策, 兩岸三地都市微氣候評估研討會論文集, 臺南, 第 77-82 頁 (2007)。
24. UC Berkeley Thermal Comfort Program, Available online: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>.

---

|                |    |
|----------------|----|
| 108 年 3 月 3 日  | 收稿 |
| 108 年 4 月 23 日 | 修改 |
| 108 年 6 月 24 日 | 接受 |