

結合高精度數值地形模型進行都會地區風場模擬

方富民¹ 黎益肇^{2*} 賴冠廷³

¹ 國立中興大學土木工程系教授

^{2*} 淡江大學風工程研究中心研究員

³ 淡江大學風工程研究中心研究助理

摘要

本研究以數值模擬為主，風洞試驗為輔，以高精度數值地形模型資料導入風環境模擬計算之格網製作。另透過數值模擬與風洞試驗資料之交互比對，以新北市新板特區為研究對象，忽略地形高程變化下，確認數值模式的可靠度。另比較研究區的行人風場在導入數值地形模型資料前後之風速，檢討地形高程變化對於風環境影響之可能性。與風洞實驗相比，數值模擬結果略有低估的狀況，但相關性結果呈現良好的線性相關。如經過適當修正後，導入合理的風環境舒適度評估準則，數值模擬應可成為評估行人環境風場的良好工具。此外，雖然選定的研究區屬於平坦地形，在加入實際DSM表面後的無因次平均風速變化並不顯著。但整體來看，大部分測點的無因次平均風速有明顯提升。故就安全性考量，模擬時應適當納入地形因素，以符合現地之風場狀況。

關鍵字：數值地形模型、數值模擬、行人風環境

Keywords: Digital Terrain Model, Numerical Simulation,
Pedestrian Wind Environment

1. 前言

因都會區蓬勃的發展，人口的密集度也隨著增加；在有限的土地限制之下，必須興建較高的建築物來符合人們居住與活動的需求。高樓建築物在地面會造成局部風場加速的現象且行人風環境的改變，影響行人及低樓層建築使用者的安全性及舒適性問題，進而影響行人在此區域活動之舒適性甚至於有危害行人的安全，因此對於新建高層建築的行人風場環境評估已是設計時的必要條件。

DTM(Digital Terrain Model)數值地形模型，泛指任何以數值化(digital)的方式來展現3D空間地形起伏變化的狀況)，目前世界上絕大多數國家的測繪界均改用數值高程模型 (Digital Elevation Model 簡稱DEM) 此一名詞來代替DTM。早期的格網解析度為40 m×40 m，由於衛星航照及光達技術發達，現已有5 m×5 m以

下之高精度數值地形模型。由於計算流體力學軟體的發展迅速，部分軟體廠商發展了便於一般人使用的商用風環境評估軟體，讓使用者得以在利用建模軟體建構好主量體以及鄰近的 3D 模型後，透過簡單的設定後得到風場模擬資訊。進行風環境模擬時，除依據數值模型建構建築量體模型外，該地區之地表高程需合理考量。如能在前述之高精度數值地形模型基礎上，快速建構貼近實際的區域風環境模擬格網，對於風環境評估的正確性及可靠性將進一步提升。

本研究以數值模擬為主，風洞試驗為輔，以高精度數值地形模型資料導入風環境模擬計算之格網製作。另透過數值模擬與風洞試驗資料之交互比對，以新北市新板特區為研究對象，忽略地形高程變化下，確認數值模式的可靠度。另比較研究區的行人風場在導入數值地形模型資料前後之風速，檢討地形高程變化對於風環境影響之可能性。

2. 研究方法

本研究選定台灣都會研究區域-新北市新板特區進行模擬風場研究，其模型縮尺為 1/250。模擬範圍為以新北市政府為中心半徑 450 公尺區域，範圍內建築量體約為 70-80 棟，以保麗龍製作量體模型。風速量測以 Irwin 探針量測行人高度(約 2 公尺，縮尺實驗高度為 8 mm)處之平均及擾動風速，據以了解風速風向特性及評估該地區之風環境舒適性，並作為數值模擬評估風環境舒適性之參考依據。

為導入高精度數值地形模型於 CFD 風場模擬中，本研究向內政部地政司申請研究區域範圍內，也就是新北市新板特區的高精度數值地形模型(DTM)，精度為 5 公尺一格。將得到之資料轉換成地形高程模型，與建築模型結合後，製作格網以進行研究區之實尺寸模擬。充分結合高精度數值地形模型與 CFD 風場模擬 2 種技術，探討高精度數值地形模型對於 CFD 風場模擬的效益。

2.1 風洞實驗

風洞試驗於內政部建築研究所風洞實驗室進行，圖一為實驗之平均風速剖面及其紊流強度剖面，指數律 $\alpha=0.25$ ，邊界層厚度 $\delta=1.6$ m，相應縮尺為 1/250，平均風速符合我國「建築物耐風設計規範與解說」所定義之 B 地況特性。紊流強度部分，近地表紊流強度約為 20%，隨高度逐步衰減，在邊界層層緣處約為 4%，入流之平均風速與紊流強度公式如後：

$$\frac{UZ}{U_s} = \left(\frac{Z}{\delta}\right)^\alpha \quad (1)$$

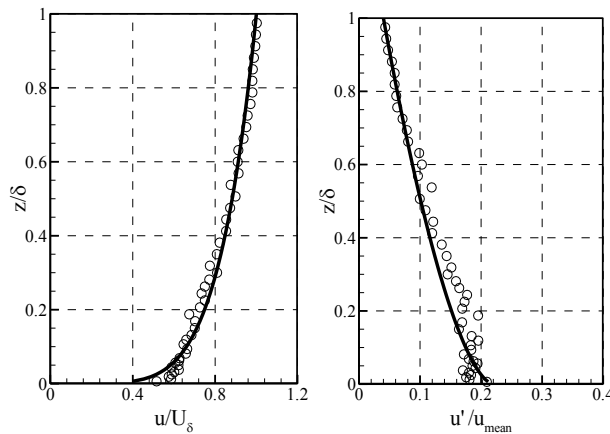
$$= I(\theta)0.22\left(\frac{Z}{\delta}\right)^{0.6} \quad (2)$$

本研究選定新北市新板特區作為研究區，以新北市政府大樓(高度 141 m)為

中心，模擬範圍為半徑 450 公尺。本區域數值地形圖如圖二所示。於北側為板橋火車站及站前廣場，建築高度達 117 公尺；西側為板信商業大樓，樓高為 166 公尺；東側為大遠百，為此區域最高之建築，最高高度為 211 公尺。此區大樓林立，預計會有較為強烈的行人風效應。

有鑑於地表風速計對低於 1 m/s 以下的風速的可靠度較低[2]，且本研究的行人風環境問題著眼於大樓興建後的強風，以往於行人風場風洞實驗中量測強風發生的位置常依據經驗進行佈點判斷，缺少合適的理論支持。為經濟且有效地利用實驗設備，合理的判斷強風發生區域，故本研究實驗測點之佈設乃利用 CFD 針對當地 3 個常季風風向(圖三)，也就是北風(N)、東北東風(NEN)和東風(E)進行初步模擬，並找出高風速發生的位置進行佈點，初步模擬結果如圖四。整合 3 個模擬方向模擬結果，找出風速較大的位置進行佈點。風速計佈設點位分布如圖五所示，合計共佈設 28 個測點。

實驗之邊界層層緣風速(U_δ)為 9.5 m/s。實驗時以北風為起點，標記為 0° ，每 22.5° 逆時針旋轉圓盤一次，共 16 個風向角。每次紀錄地表風速計資料，實驗取樣頻率為 250 Hz，取樣時間為 132 秒。

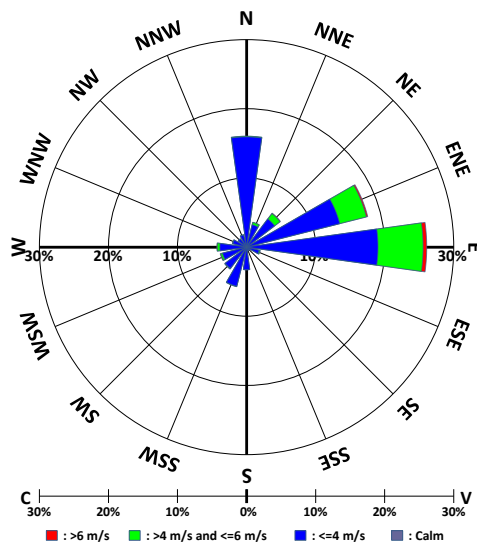


圖一：風洞試驗入流剖面

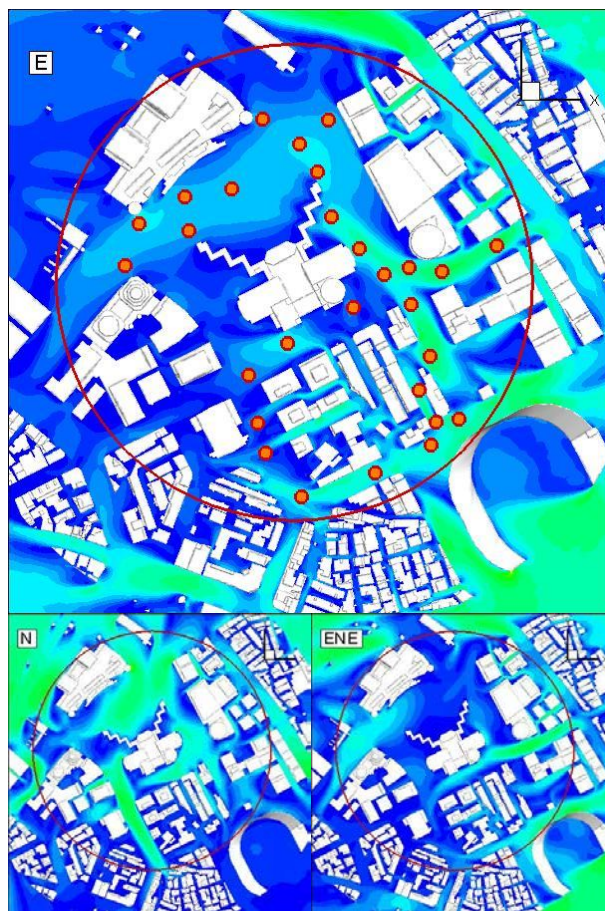


圖二：風洞試驗模擬範圍

測站：板橋 時間：2004-2014 全年



圖三：研究區風花圖



圖四：研究區初步模擬與佈點



圖五：研究區實驗佈點

2.2 數值模擬

本研究採用泛用型計算流體力學軟體 FLUENT 進行風場模擬工作，其乃基於以有限體積法(finite-volume method)為架構所建構出來的計算流體動力學程式，以求解如下之連續方程式與動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

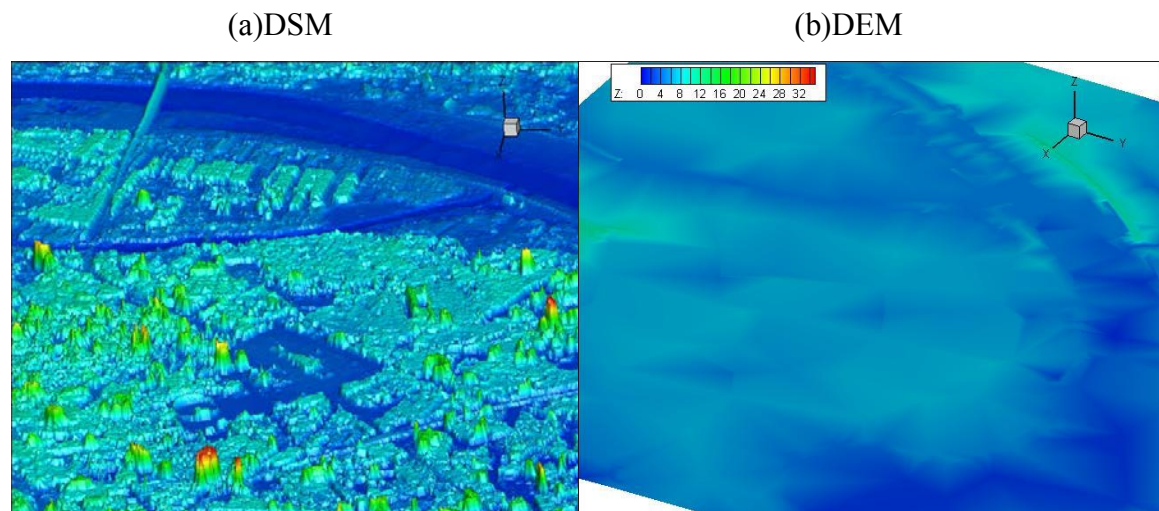
其中， u 、 v 、 w 為速度在 x 、 y 、 z 三個方向之分量； t 為時間； f_x 、 f_y 、 f_z 為場加速度在 x 、 y 、 z 座標上之分量； p 為壓力； ρ 與 ν 分別為流體之密度與運動黏滯度(kinematic viscosity)。另在 RANS 模式下採用 realizable $k-\epsilon$ model 進行建築周圍微氣候之模擬。本模式滿足雷諾應力的約束條件，可以更精確地模擬平面和圓形設流的擴散速度，旋轉流計算、具有壓降梯度的邊界層流計算和分離流計算等問題，其計算結果更符合真實情況。可有效改善 standard $k-\epsilon$ model 的缺點，提升精度。

2.3 高精度數值地形模型

本研究蒐集了研究區的高精度數值地形模型(DSM、DEM)，並將其轉換成 PLOT3D 格式，用來製作研究區之面網格。所蒐集之新板特區高精度數值地形模型圖號分別為 96232088、96232089、96232098、96232099，矩陣大小分別為 512×561、511×561、511×560、511×561，解析度為 5 公尺一格，整體涵蓋範圍為 10.2 km×11.2 km。

本區域之數值表面模型 DSM(圖六 a)，其中包含建築物及植栽等地表覆蓋物，最高高度為 126 公尺，最低高度為 1.62 公尺。由圖面可以看出建築群的輪廓線以及北側大漢溪及淡水河之河道區域，另和先前蒐集得來的數值地形圖比對建築高度後發現，因為本次蒐集之 DSM 模型資料建置時間較早(96 年所建置) [5]，並未包含近期已興建完成的建築以及高架橋等相關資料，因而與現有狀況產生落差。

圖六 b 為研究區數值高程模型 DEM，扣除建築、橋梁及地表植栽後，本區域的高程變化並不明顯，最高高程為 38.75 公尺，最低高程為 1.02 公尺，將結合此部分資料進入研究區之 CFD 風環境模擬之中。



圖六：研究區高精度數值地形資料

3. 結果討論

本研究首先比較各測點於 16 個風向下，數值模擬與風洞實驗之無因次平均風速(U_i/U_8)結果的精度及相關性。待確認平整地形之數值模擬結果後，再進一步討論加入 DSM 地形模型後對於地表風場之影響。

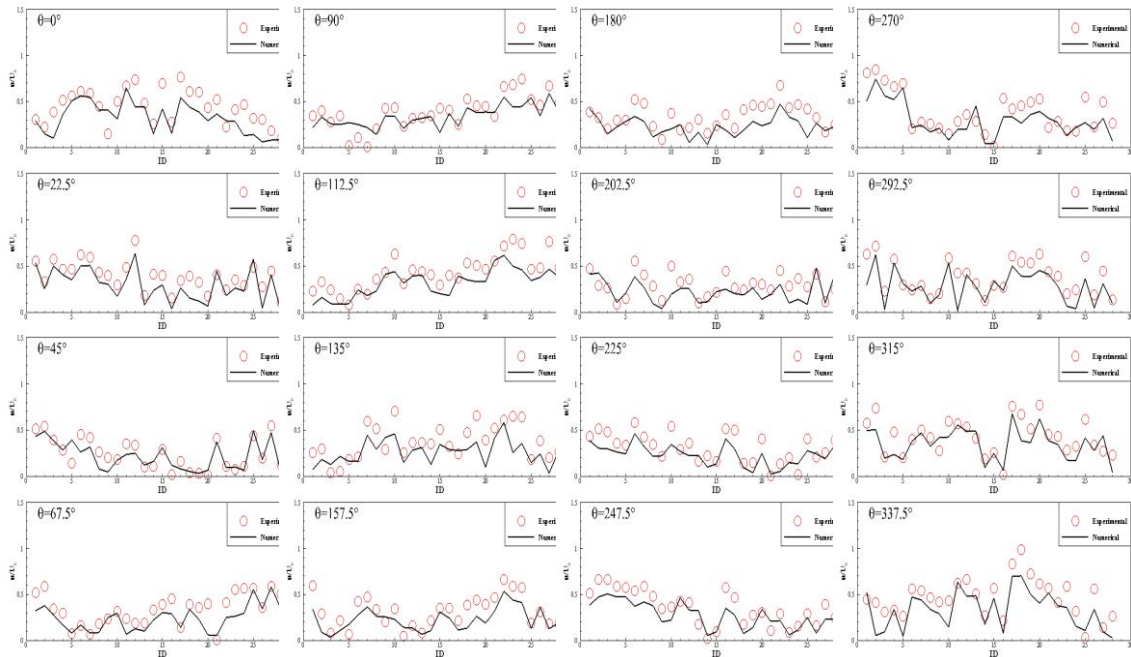
3.1 模擬結果比較

圖七顯示 27 個測點在 16 個風向角下的無因次平均風速比較結果，結果顯示實驗與模擬之間的風速變化趨勢與量級均相當一致，但模擬結果似乎有些低估。如進一步檢視實驗與模擬之間的誤差分析(圖八)，可以明顯的發現到數值模擬有

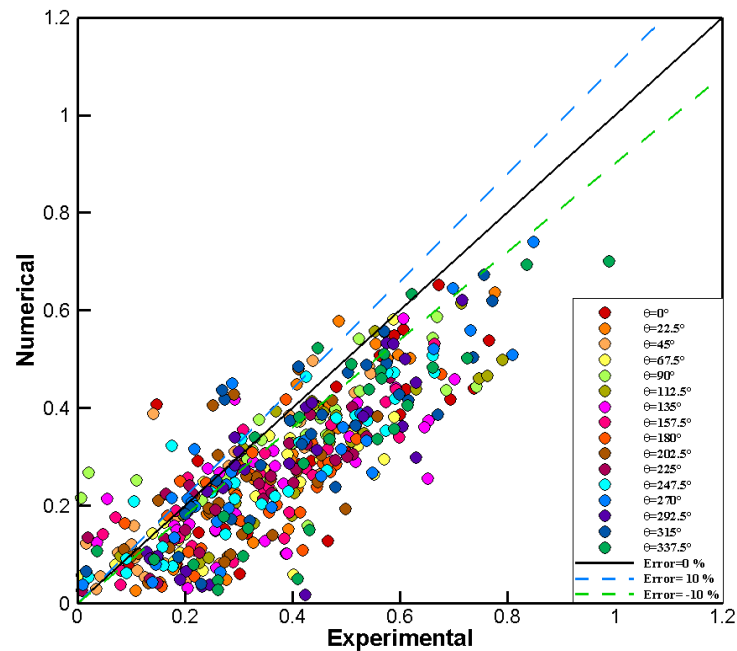
低估的狀況，尤其是低風速的時候誤差值更為凸顯，整體平均誤差

($error = \frac{|x - y|}{x} \times 100\%$) 為 50%，平均速度比 ($U_{Rat} = \frac{y}{x} \times 100\%$) 為 97%，整體看來是低估

的。



圖七：研究區各測點無因次平均風速結果比較



圖八：風洞實驗與數值模擬誤差分析

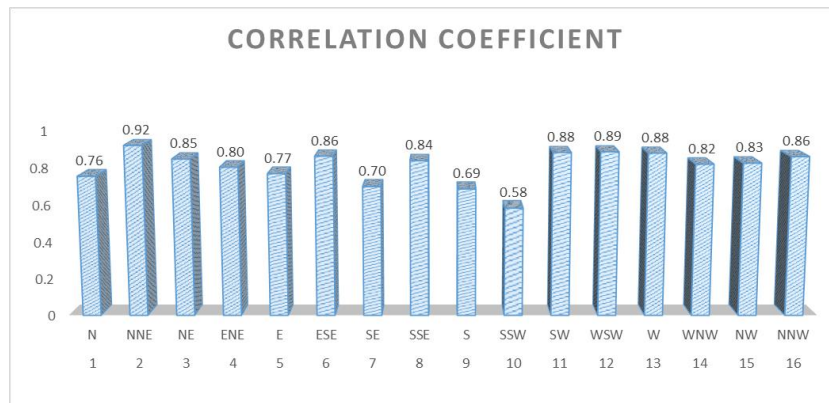
為了解風洞實驗與數值模擬的無因次平均風速之相關性，故將各點之平均無因次風速按各風向來計算二者之間的相關性，相關性係數之公式如後：

$$R_{xy} = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (5)$$

其中， x 為實驗值結果， y 為模擬結果， $\bar{\quad}$ 代表平均值。理論上，相關性係數一般可按三級劃分：

- (1) $|R_{xy}| < 0.4$ 為低度線性相關；
- (2) $0.4 \leq |R_{xy}| < 0.7$ 為顯著性相關；
- (3) $0.7 \leq |R_{xy}| < 1$ 為高度線性相關。

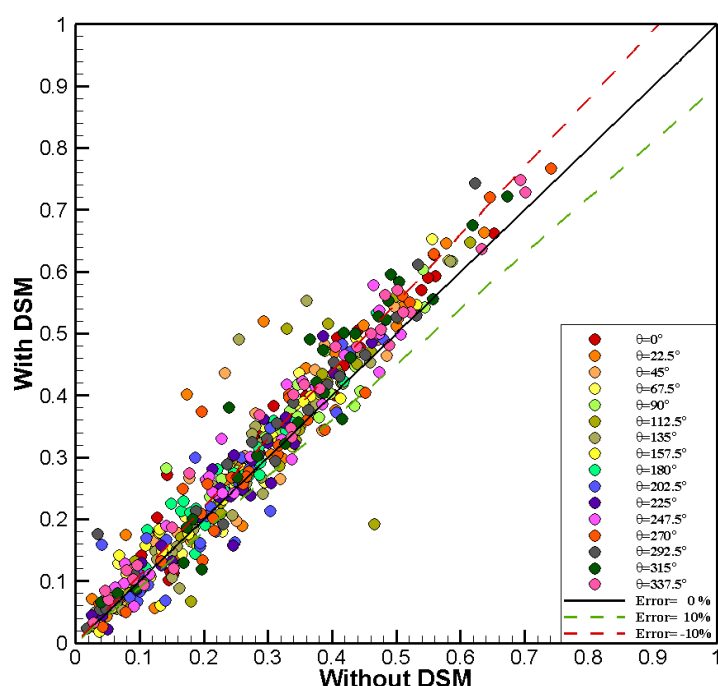
由圖九的相關性係數結果可以得知，各風向的相關性大多落在高度線性相關 ($R_{xy} > 0.7$)，僅於 S、SSW 風向屬於顯著性相關 ($R_{xy} = 0.69$ 、 0.58)，而整體平均相關係數為 0.81，同屬於高度線性相關。



圖九：各風向之相關性係數

3.2 DSM 結果

在考慮地形效應下，加入高精度數值地形模型 DSM 之表面網格後，各測點的變化並不顯著。與加入 DSM 表面的模擬結果相比，由圖十可以觀察出，雖然選定的研究區屬於平坦地形，雖然加入實際 DSM 表面後的無因次平均風速變化並不顯著，其平均差異值為 19%。但整體來看，大部分測點的無因次平均風速有明顯提升，其平均風速比為 111%。



圖十：DTM 表面加入前後比較

4. 結論

以 CFD 模擬風環境並與風洞實驗量測進行比對，結果具有不錯的吻合度。雖然數值模擬結果有低估的現象，但相關性結果呈現良好的線性相關。如經過適當修正後，導入合理的風環境舒適度評估準則，數值模擬應可成為評估行人環境風場的良好工具，惟須遵循相關準則進行，以確保模擬的可靠度。此外，雖然選定的研究區屬於平坦地形，在加入實際 DSM 表面後的無因次平均風速變化並不顯著。但整體來說，大部分測點的無因次平均風速有明顯提升。故就安全性考量，模擬時應適當納入地形因素，以符合現地之風場狀況。

5. 誌謝

本研究承蒙內政部建築研究所 105 年委託研究計畫「應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬」補助，計畫編號：10515B0006，特此申謝。

6. 參考文獻

- [1] AIAA, 1998, Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations, AIAA G-077-1998.
- [2] Irwin, H. P. A. H., 1981, A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds". J. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 7, pp.219-239.
- [3] Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa,

- T., 2008, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1749-1761.
- [4] Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., Shirasawa, T., 2005, Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan , *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, pp.1551–1578.
- [5] 陳思仁、王成機，內政部數值地形模型建置現況及加值應用，2007，*國土資訊系統通訊*，61 2007.03，2-14。