

運用 CFD 探討建築形體優化對都市通風效能之影響

林秉勳¹ 鍾政洋² 蔡綽芳³ 郭建源⁴ 李宜庭^{5*}

^{1*} 國立臺南大學綠色能源系 研究生

² 國立成功大學航太中心 博士

³ 內政部建築研究所 組長

⁴ 內政部建築研究所 博士

⁵* 國立臺南大學綠色能源系 副教授

摘要

隨著都市氣候調適需求提升與微氣候品質改善的重視加劇，建築形體對通風效能之影響日益受到關注。為探討其通風潛力與改善效果，本研究以板橋車站周邊市民廣場為研究場域，建立代表性之建築環境模型，並採用計算流體力學方法進行風場模擬分析。經風洞試驗比對驗證後，結果顯示雷諾應力模型能夠準確預測風速分布與紊流強度，適合應用於都市尺度風場模擬之精確性評估。本研究進一步針對原始建築配置與五種建築配置優化方案進行比較分析，結果顯示，透過適當的建築配置調整，能有效導引氣流路徑，並顯著提升整體通風效率。本研究成果有助於深化對建築配置與都市風場交互機制之理解，亦可作為都市設計與都市更新策略制訂之科學依據，促進具氣候韌性與永續效益之都市空間規劃發展。

關鍵字：都市通風，建築形體優化，通風效能，計算流體力學

Keywords: Urban Ventilation, Building Form Optimization, Ventilation Efficiency, Computational Fluid Dynamics.

1. 研究背景與目的

1.1 研究動機

隨著都市化快速發展，高密度建築與大面積不透水鋪面加劇都市熱島效應，不僅提升能源消耗，亦對淨零排放目標構成挑戰。都市風廊作為改善都市微氣候與強化自然通風的重要規劃工具，已被多個城市納入設計準則。然而，在實際空間發展中，若建築配置未經合理設計，仍可能阻斷氣流通道，削弱風廊效果，甚至造成通風瓶頸與熱累積現象。現階段相關研究多聚焦於單一風廊形態之優劣比較，對於不同建築配置對整體風場與微氣候影響之探討仍相對有限。因此，本研究旨在透過風洞試驗與(Computational Fluid Dynamics, CFD)模擬，探討不同建築配置條件下都市風廊導風效果與通風改善潛力，期能提供都市規劃與設計審議之參考依據。

1.2 研究目的

本研究旨在探討不同建築配置條件對都市風廊導風效果、微氣候環境與自然通風效率之影響。以板橋車站周邊街廓為研究對象，考量其高密度建築與交通樞紐特性，透過夏冬季節風向條件下之 CFD 模擬，分析各類建築配置對行人層風場之影響。同時，研究亦輔以風洞試驗進行驗證，以確認數值模擬之準確性與適用性。最終，提出具參考性的建築配置策略，作為未來都市設計與建築開發參考之依據。

2. 研究方法

本研究採用 ANSYS Fluent[®] 22.1 進行板橋車站建築群之三維穩態風場數值模擬。模擬過程係基於連續方程式(Continuity equation)、動量方程式(Momentum equation)及紊流模型方程式(Turbulence equations)建構數值模型，以解析建築環境中之氣流分布與通風特性。本研究所使用之統御方程式如下：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho_{ref} g_i \quad (2)$$

上式中符號 u_i 為 i 軸方向之速度向量；此外，參數 p 、 ρ 、 μ 、 μ_t 和 g_i 分別表示為壓力、密度、分子黏滯係數、紊流黏滯係數和重力項。

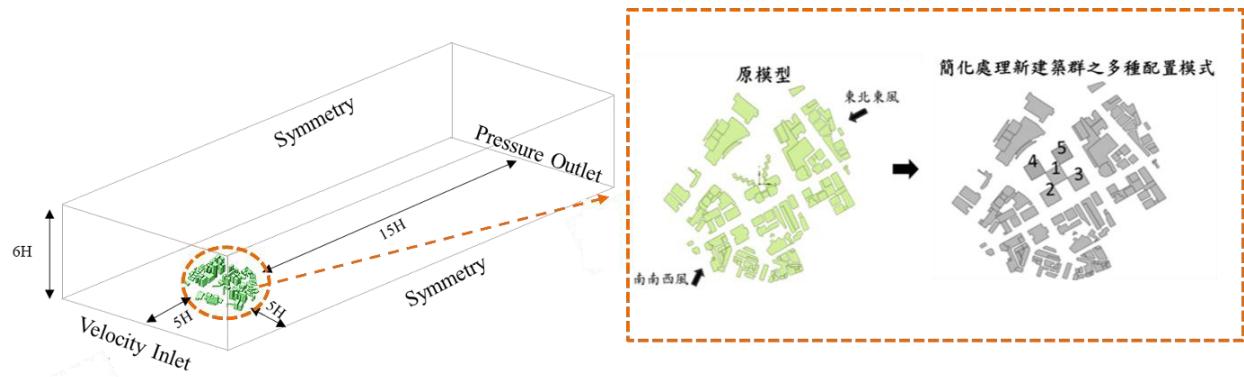
採用雷諾應力紊流模型(Reynolds Stress Model, RSM)作為湍流閉合模型，主要原因在於其能針對壁面結構周圍的分離與回流區域，提供更強的預測能力[1]。與僅以標量各向同性假設處理湍流的渦黏度模型(Eddy Viscosity Models, EVM)相比，RSM 透過解析雷諾應力張量的各分量，能更準確地描述湍流的各向異性特徵。此外，相較於計算成本高昂的直接數值模擬(Direct Numerical Simulation, DNS)與大渦模擬(Large Eddy Simulation, LES)，RSM 模型兼具合理的計算效率與預測準確性[2,3]。先前研究亦證實 RSM 應用於都市風場計算時具有良好的可靠性[4]，故本研究選用 RSM 紊流模型進行板橋車站建築群周遭風場之數值分析。

計算域尺寸係依建築高度($H = 215$ m)進行設定，為降低邊界效應並確保尾流充分發展，上方與側向邊界分別距離建築群約 $5H$ ，下游出口則延伸至 $15H$ 。入口邊界採用對數律風速剖面，並根據不同季節風向指定參考風速，夏季南南西風條件下設定為 1.9 m/s，春、秋、冬季東北東風條件下則為 2.66 m/s。出口邊界設為壓力出口、地面與建築表面採無滑移壁面設定，並套用標準對數壁面函數處理近壁層氣流行為，側邊界與頂部則採對稱邊界條件。

通風效能的評估採用兩項指標：風速比(Velocity Ratio, VR)與空氣交換率(Air Change Rate, ACH)[5,6,7,8]。其中，VR 定義為監測點風速與參考高度之自由流風速的比值，用以衡量行人層的相對通風效率；而 ACH 則反映建築或區域內空氣更新的效率，其計算方式如下：

$$ACH = \frac{Q}{V} \times 3600 \quad (3)$$

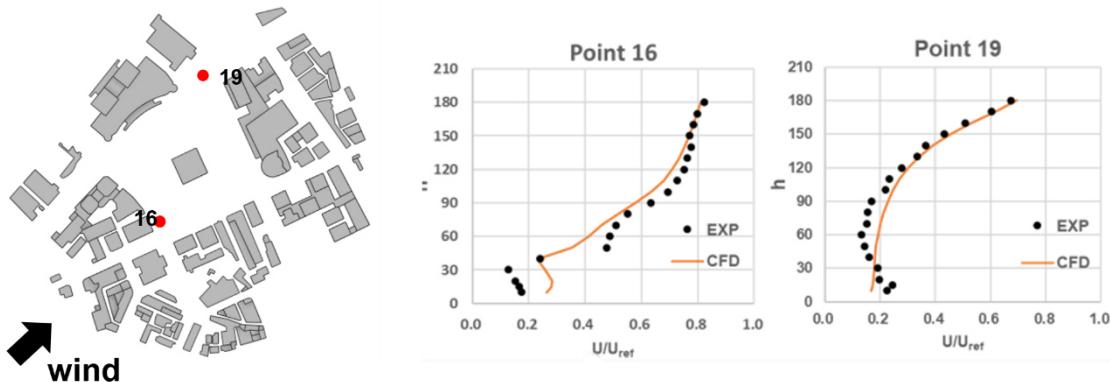
其中， Q 為通過研究區邊界的流量(m^3/s)， V 為研究區體積(m^3)。



圖一：CFD 數值分析之邊界條件設定示意圖與研究模型示意圖

3. 風洞結果驗證比對

數值模擬結果與風洞實驗之垂直風速分布曲線在各高度皆呈現高度一致性，無論為南南西風(SSW)或東北東風(ENE)條件，模擬值與實測值之趨勢一致，顯示模擬結果能夠準確再現風洞試驗中之風速分布，驗證其在都市風場模擬中的可靠性與準確度。

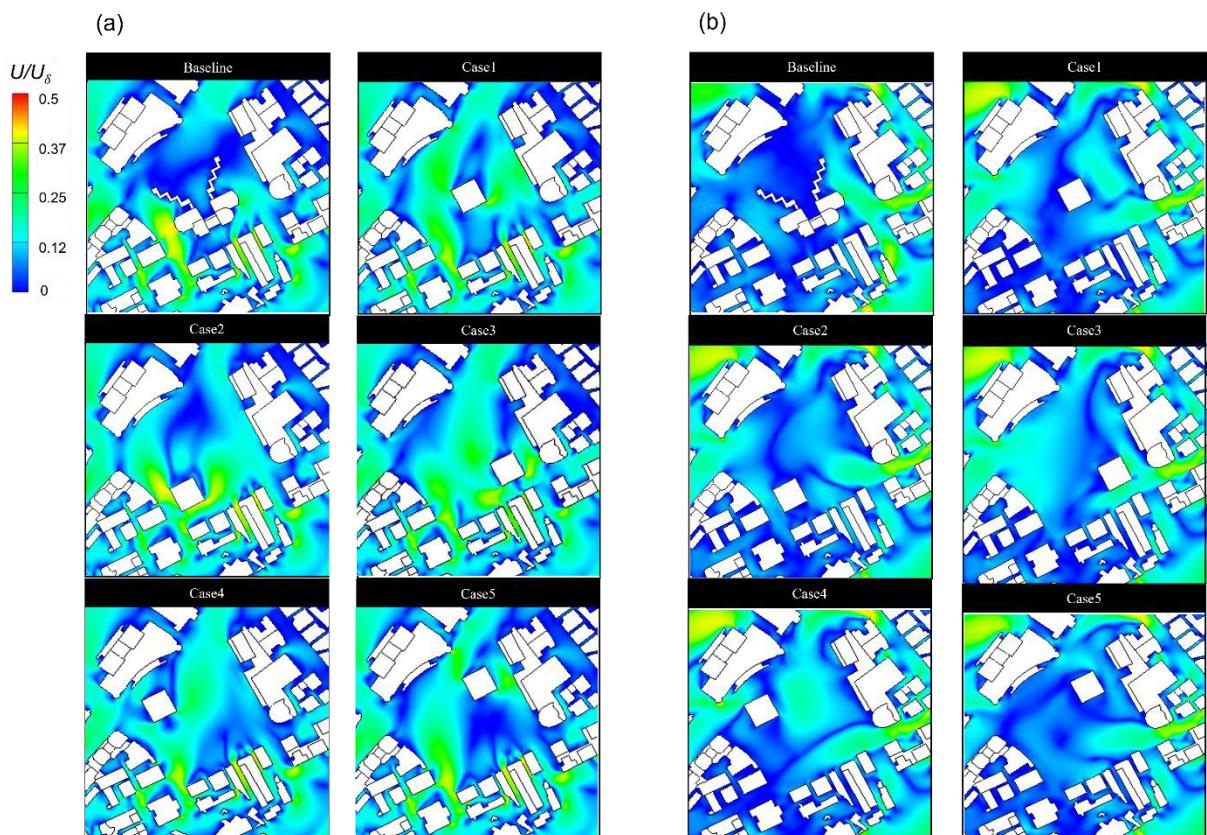


圖二：南南西風速驗證圖

4. 結果

本研究針對板橋車站更新區域，於 2 m 行人層高度進行無因次風速分布(U/U_δ)之模擬分析，比較原始配置與五種優化配置在南南西風(SSW)與東北東風(ENE)條件下之通風表現，模擬結果如圖(a)、(b)所示。在圖(a)所示之南南西風條件下，原始配置於中央街廓呈現顯著低風速區， U/U_δ

僅約為 0.10–0.15，形成通風死角。改善配置中，Case 1、Case 2 與 Case 4 因角隅導流效應產生加速效果，使中央街廊風速提升 $U/U_\delta \geq 0.30$ ，Case 3 則透過建築量體調整，引導氣流均勻穿越街廊，不僅弱風區明顯縮減，平均風速亦提升至 $U/U_\delta \approx 0.35$ 。相對而言，Case 5 導風效果有限，風速僅達 $U/U_\delta = 0.10–0.20$ ，整體通風表現仍不理想。在圖(b)所示之東北東風條件下，原始配置於中央與南側街廊風速亦偏低，約為 $U/U_\delta = 0.10 – 0.20$ 。改善後，Case 1 與 Case 3 成效顯著，能有效導引氣流進入中央區域，風速提升至 $U/U_\delta = 0.30 – 0.45$ ，並改善通風均勻性，Case 4 透過體量重組，使部分區域風速提升至約 $U/U_\delta = 0.25$ 。然而，Case 2 與 Case 5 於街廊內仍存在大範圍弱風區($U/U_\delta = 0.10 – 0.20$)，通風改善幅度有限。綜合比較南南西與東北東風條件下之模擬結果，Case 1 與 Case 3 於行人層的平均風速皆較原始配置提升 2 至 3 倍，整體表現最佳，顯示建築配置之優化對於提升都市通風品質具關鍵性影響。



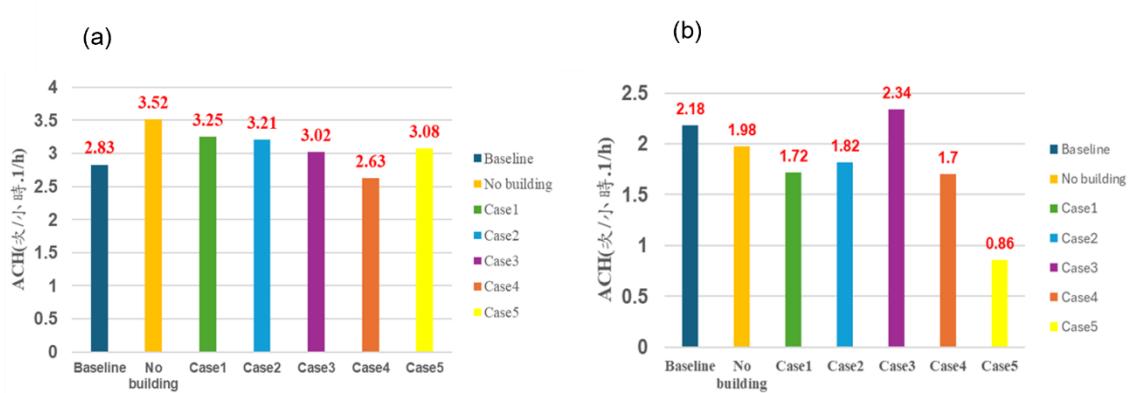
圖三：2 m 行人層高度無因次風速分佈於(a)南南西風與(b)東北東風下原始配置與五種建築配置比較

於表一中在南南西風與東北東風條件下，Case3 配置的風速提升比例均可達 75%，平均表現最佳，顯示其通風改善效果穩定且顯著；相較之下，Case5 的平均風速提升比例最低，南南西風與東北東風分別僅為 58% 與 40%，顯示其在提升街廊通風與氣流通透性方面效果有限。

表 1：各案例下風速增益區域比較

案例	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
南南西風	85%	71%	75%	66%	58%
東北東風	46%	37.6%	75.2%	55%	40%

在南南西風條件下，中央建築移除後的 ACH 值較原始配置提升約 24%，顯示中央開口能有效促進通風。其中 Case1 與 Case2 表現最佳，雖未達完全開放情境，但仍明顯優於原始模型；Case5 亦具改善潛力，而 Case3 與 Case4 效益有限。相對地，在東北東風下，移除中央建築反而使 ACH 降低，顯示上游遮蔽對通風造成不利影響。僅 Case3 能略優於基準，呈現正面改善效果，其餘配置皆未達基準水準，其中 Case5 最差，顯示配置差異對通風品質影響顯著。



圖四：各建築配置在(a)南南西風與(b)東北東風條件下之 ACH 比較

5. 結論

本研究針對板橋車站更新區域，分析不同建築配置對行人層風場分布與換氣效能之影響。模擬結果顯示，在各項改善配置中，Case 3 在南南西風與東北東風條件下的風速提升幅度皆達 75%，整體表現最佳，風場穩定且換氣效能顯著提升。Case 1 亦展現良好導流效果，能有效改善中央街廓風速均勻性並提升換氣次數。相較之下，Case 2 與 Case 4 僅具有限度改善，效益較為侷限，而 Case 5 平均風速提升幅度最低，在南南西風與東北東風條件下分別僅為 58% 與 40%，通風改善效果最差。綜合 ACH 結果可得，不同建築量體配置具有明顯導流差異，適當配置能有效提升風場均勻性與近地層換氣效率。其中，Case 1 與 Case 3 在雙風向條件下皆具穩定且優越表現，突顯建築布局與體量調整在改善都市微氣候與提升通風品質中的關鍵作用。

6. 參考文獻

- [1] 洪波等。基於幾何模型和數值模擬的居住區日照通風樹木最佳化設計。參見：建築模擬。海德堡：清華出版社，2011 年，第 351-363 頁。
- [2] ELSAYED, Khairy ; LACOR, Chris。旋風分離器入口尺寸對流動模式和性能的影響。應用數學建模，2011，35.4：1952-1968。
- [3] ANSYS, Theory Guide 4.11, Reynolds Stress Model (RSM).
- [4] LEE, Yee-Ting, et al. Effect of void space arrangement on wind power potential and pressure coefficient distributions for high-rise void buildings. *Journal of Building Engineering*, 2023, 75: 107061.
- [5] KLUKOVÁ, Zuzana; NOSEK, Štěpán; FUKA, Vladimír. Capability of air exchange rate to predict ventilation of three-dimensional street canyons. In: *EPJ Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019. p. 02042.
- [6] JON, Kwang Song, et al. Influence of wind direction on the ventilation and pollutant dispersion in different 3D street canyon configurations: Numerical simulation and wind-tunnel experiment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30.11: 31647-31675.
- [7] LIN, Man, et al. Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. *Building and environment*, 2014, 79: 152-167.
- [8] WEN, Chih-Yung; JUAN, Yu-Hsuan; YANG, An-Shik. Enhancement of city breathability with half open spaces in ideal urban street canyons. *Building and Environment*, 2017, 112: 322-336.