第十一屆全國風工程學術研討會

女兒牆整合空氣動力導流設計提升建築屋頂風能潛力之數值分析

陳彥廷[1]　阮于軒[2]
[1]製造科技研究所 國立臺北科技大學/研究生
[2]機電學院 國立臺北科技大學/指導教授

摘要

屋頂女兒牆是建築中常見的建築元素，建築屋頂上方有顯著影響，女兒牆常導致氣流分離、紊流生成及風影區形成。為解決此問題，本研究提出一系列女兒牆整合空氣動力導流設計，透過導引並加速氣流，以提升屋頂風速 甚至改善紊流強度，並得到風機最佳安裝位置與高度。本研究進行三維CFD(Computational fluid dynamics) 模擬，將單棟理想建築與改良構型進行比較，評估其在紊流強度及風能密度上的影響。結果顯示，圓角型角隅邊緣結構具有可行且可擴展的潛力，可作為優化屋頂風能採集的解決方案。研究成果提供可轉移的設計策略，以促進再生能源融入建築環境，並支持未來淨零城市的永續分散式能源系統發展。

研究方法

本研究旨在探討不同建築角隅邊緣構型及女兒牆設計對屋頂風能性能之影響與提升潛力。模型採用日本建築學會提出**之 1:1:2 單棟理想建築**為基礎，分別設計4種不同建築角隅模型(圖1)以及六種女兒牆模型(圖2):

a) Case S為尖角邊緣構型
b) Case C為單邊導角邊緣構型
c) Case C4為四邊導角邊緣構型
d) Case R 為單邊圓角邊緣構型
e) Case R4為四邊圓角邊緣構型

a) Case PS為直牆女兒牆
b) Case PR為圓角女兒牆
c) Case PMR為直牆加圓角混合型女兒牆
d) Case PMC為直牆加導角混合型女兒牆
e) Case PDA為不連續正交錯直牆女兒牆
f) Case PDB為不連續逆交錯直牆女兒牆

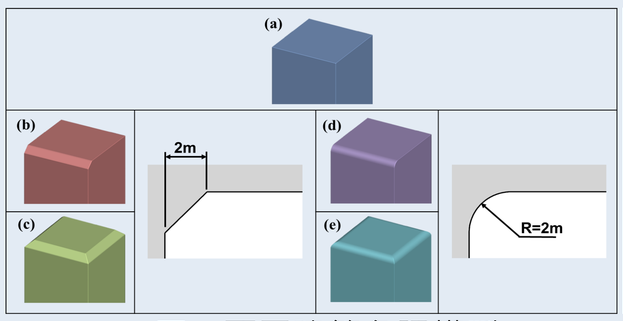

圖1. 不同建築角隅模型

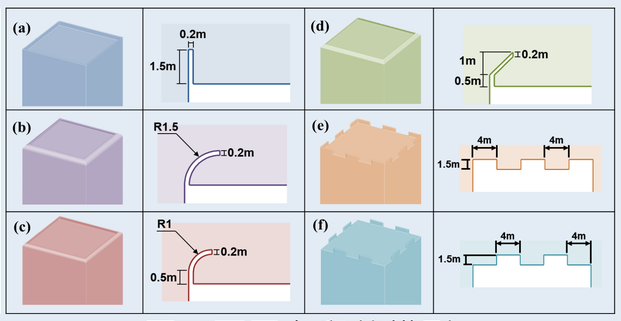

圖2. 不同女兒牆模型

所有設計皆以實際都市尺度設定，並利用 CFD 數值模擬進行分析。計算域如圖3，依據 Tominaga 等人[1]建議設定為 840 × 420 × 240 m，入口距建築迎風側 5H、出口 15H，以涵蓋完整尾流區。入口風速分佈依據 Richards 與 Hoxey 模型設定[2]，採用大氣邊界層風速梯度公式(1)-(3)，並取參考風速 Uref = 4.58 m/s（z = 40 m）。邊界條件如表1設置，紊流模型採用雷諾應力模型（RSM），以 ANSYS Fluent® 進行三維穩態不可壓縮模擬，並透過 SIMPLE 演算法耦合壓力與速度，所有方程均採二階精度離散化，殘值收斂至 10^{-6}。

$$(1)\ U \equiv \frac{U}{\kappa}\ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \qquad (2)\ \varepsilon = \frac{U^3}{\kappa(z+z_0)} \qquad (3)\ k = \frac{U^2}{\sqrt{C_\mu}}$$

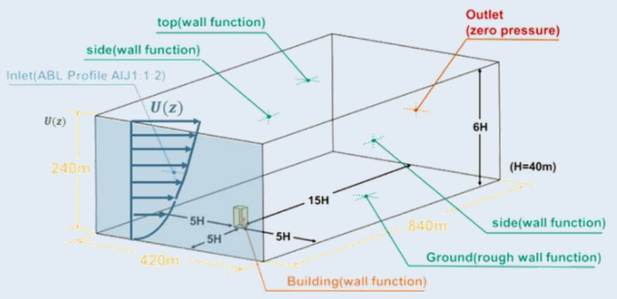

圖3.邊界條件示意

表1.邊界條件設定

入口	依據大氣邊界層（Atmospheric Boundary Layer, ABL）平均風速梯度分佈。
出口	設定為一大氣壓壓力條件
地表	粗糙度長度取 z0 = 0.01 m，並採用 Standard log-law 壁面函數
建築壁面	設定為不滑移邊界條件
左右兩側	設為對稱邊界條件
上邊界	設為對稱邊界條件

計算網格由 ANSYS Meshing® 建立，全域約 1,000 萬至 1,500 萬格，於屋頂區域細化至0.2 m，以確保流場解析度與穩定性。紊流模型驗證部分，參考 Meng 與 Hibi（1998）風洞實驗資料[3]，比較 SKE、RKE、RNG 及 RSM 模型，結果如圖4顯示，**RSM** 能最準確再現紊流動能分佈，故選為主要分析模型。整體模擬結果可用以比較不同角隅與女兒牆構型對風能潛力的影響。

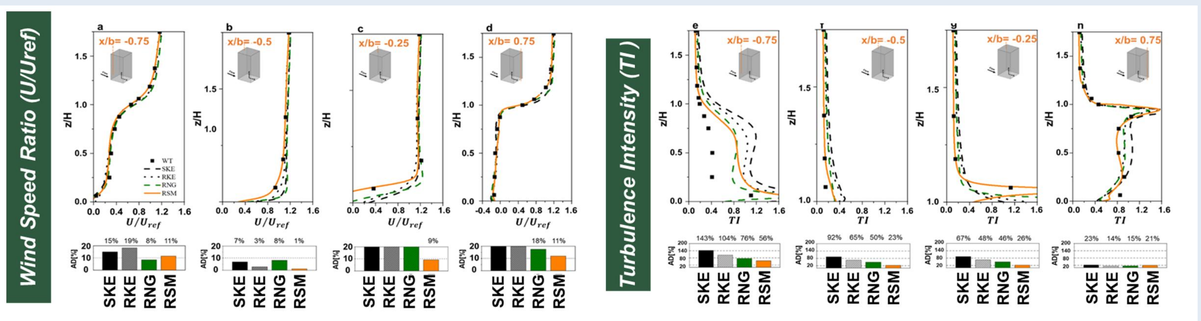

圖4.紊流模型驗證

結果與討論

本研究以風能密度（PD）評估屋頂風能潛力。圖5顯示，在建築前緣，四邊圓角構型（Case R4）風能密度較基準模型（Case S）提升 **66.3%**，而在建築中心，導角構型（Case C）表現最佳，其最大 PD 為 Case S 的 **六倍**。圖6則是女兒牆部分，圓角女兒牆（Case PR）於前緣 **3 m** 高度時效果最佳，中心區則需 **5 m** 以上才能穩定運行，最大 PD 較直牆式（Case PS）高出**七倍**。

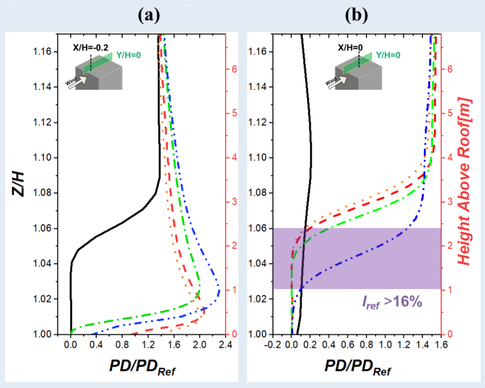

圖 5. 建築邊緣形狀之Y/H=0切面的風能密度大小比較，重點關注兩個不同位置:(a) X/H =0.2(b) X/H=0

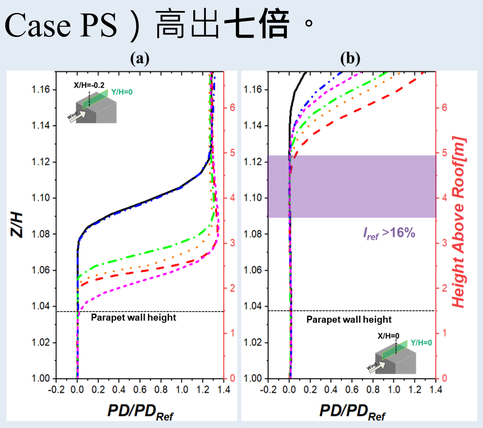

圖 6. 各女兒牆構型之Y/H=0切面的風能密度大小比較，重點關注兩個不同位置:(a) X/H =0.2(b) X/H=0

針對女兒牆構型，Case PR 與 PMR 具最強加速效應與最大高速區，風能潛力最佳；Case PMC 在中央形成穩定高速氣流，利於風機安置；而開口設計的 Case PDA 與 PDB 雖減弱中央加速，但局部紊流區具潛在應用價值。整體而言，圓角與導角構型較直牆能有效提升風能密度並降低紊流強度。

本研究以體積積分分析四區域的平均風能密度，又分為外內部(I、II與III、IV)，以及前後部(II、III與I、IV)，結果顯示 II 與 III 區域表現最佳。如圖 9 所示，Case R4 較 Case S 提升 **165.1%**，顯示角隅圓角化能有效增強風能潛力；外部區域較內部高**5.5%**，前部則較後部高**49%**。女兒牆部分（圖 10），Case PR相較 Case PS提升**134.2%**，外部區域高於內部約**18.9%**，而後部較前部低 **65%–70%**。綜合結果顯示，圓角邊緣與圓角女兒牆設計最能提升屋頂風能效益。

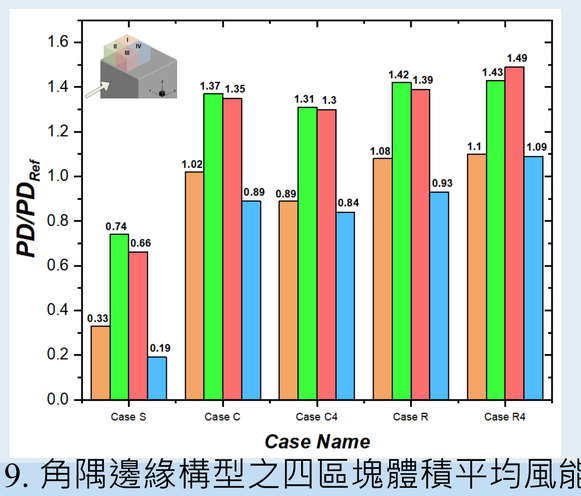

圖 9. 角隅邊緣構型之四區塊體積平均風能密度結果圖

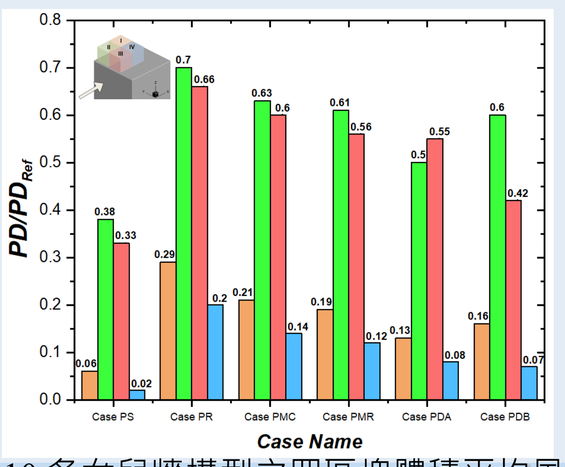

圖 10.各女兒牆構型之四區塊體積平均風能密度結果圖

本研究以風能密度（PD）評估屋頂風能潛力。圖5顯示，在建築前緣，四邊圓角構型（Case R4）風能密度較基準模型（Case S）提升 **66.3%**，而在建築中心，導角構型（Case C）表現最佳，其最大 PD 為 Case S 的 **六倍**。圖6則是女兒牆部分，圓角女兒牆（Case PR）於前緣 **3 m** 高度時效果最佳，中心區則需 **5 m** 以上才能穩定運行，最大 PD 較直牆式（Case PS）高出**七倍**。

圖7及圖8顯示各構型於垂直剖面中的風能密度分布，白色區域代表不適合設置風力渦輪機的位置。根據國際電工委員會（IEC）標準 IEC 61400-2 [4]，當參考紊流強度 I_{ref} 超過**16%** 時即不適合安裝風機，因此本研究以 $I_{ref} = 0.16$為臨界值進行評估。由圖7(b)至圖7(e)可見，相較於基準構型Case S（圖7(a)），可安裝區域與風能潛力皆有明顯提升。

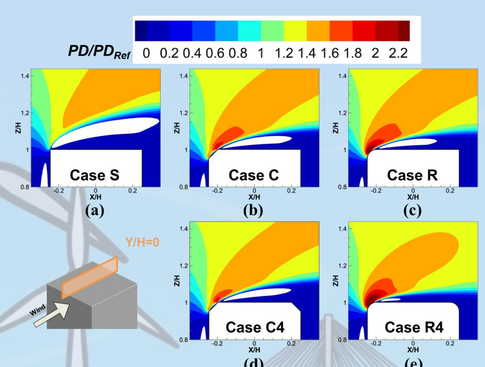

圖 7. 各角隅邊緣構型之垂直切面中風能密度分布

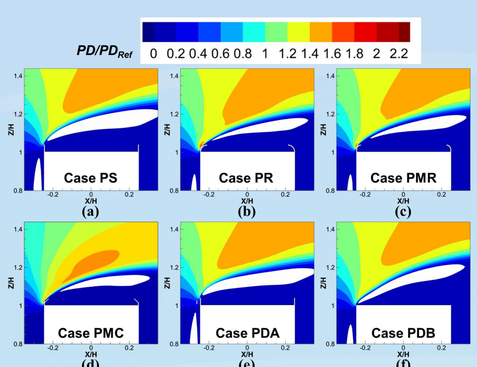

圖 8. 各女兒牆構型垂直切面中風能密度分布

致謝

本研究成果承蒙國科會計畫 NSTC 113-2628-E-027-001和NSTC 114-2628-E-027-001 及教育部補助大專校院STEM領域及女性研發人才培育計畫「邁向淨零城市-推動性別共融之跨域永續綠領人才培育計畫」之補助與支持，得以順利完成。在此謹向國科會與教育部表達誠摯感謝。

參考文獻

[1] Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, and T. Shirasawa, “AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, no. 10–11, pp. 1749–1761, Oct. 2008.
[2] P. J. Richards and R. P. Hoxey, “Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-E turbulence model”.
[3] Y. Meng and K. Hibi, “Turbulent measurements of the flow field around a high-rise building,” Wind Eng. JAWE, vol. 1998, no. 76, pp. 55–64, 1998,doi: 10.5359/jawe. 1998.76_55.
[4] Wind turbines. Part 2, Small wind turbines, Edition 3.0. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2013.