

應用高自然頻率力平衡儀探討多孔性外牆對建築物風荷載之影響

陳若華^{1*} 張淇喻²

¹*建國科技大學土木工程系 副教授

²淡江大學風工程研究中心 專任研究人員

摘要

本研究利用高自然頻率力平衡儀進行氣動力實驗，探討多孔性外牆在不同配置條件下對於建築物模型風荷載的影響。實驗模型包括方形斷面、矩形斷面及圓形斷面等柱體，檢討包括多孔牆立面占比、夾層連通性、風攻角等條件對於氣動力模型所受風荷載的影響。透過氣動力實驗成果發現對於方形斷面柱體而言，在與來流方向正交情形下，不同多孔性外牆占比的橫風向基底剪力風力頻譜主頻所對應的無因次化頻率逐漸增加的趨勢，頻譜尖峰呈現向右漂移的現象。因此隨多孔性外牆占比逐次增加，主導史特赫數的特徵寬度逐漸過渡到內部柱體寬度，又受到多孔外牆干擾側面分離剪力流的作用，頻譜峰值漸次下降；多孔性外牆占比由 0% 至 100% 變化，可改變史特赫數達到約 25% 的漂移，有助於避開敏感風速對於建築物的影響。圓柱體模型隨多孔外牆占比的增加，其橫風向頻譜尖峰下降，但主頻位置並未漂移。在夾層空間連通性方面，對於抑制橫風向擾動風力的效果須為空間相連通的夾層才有作用亦獲得驗證。

關鍵字：高自然頻率力平衡儀、多孔性外牆、風荷載、風力頻譜

Keywords:High natural frequency force balance, porous exterior wall, wind loadings, wind force spectrum

1.前言

本研究探討建築物具備多孔性外牆之雙層幕牆配置方式對於建築物的風荷載影響，規劃透過氣動力實驗系統化的分析，可獲得較廣泛且具實務應用價值成果。在整體風荷載的考慮方面，雙層幕牆夾層連通、夾層間距、開孔率等因素的影響性。

2.研究內容

2-1 氣動力實驗規劃

本研究探討具備多孔性外牆的雙層幕牆對建築物整體風荷載之影響，風洞實驗與淡江大學風工程中心合作，使用高自然頻率力平衡儀量測。風洞斷面為寬 220 公分及高 180 公分，屬吸入式風洞，試驗段上游架設格柵及端板產生均勻紊流場，進行建築物氣動力模型實驗研究，紊流強度為 10%，試驗風速控制在 10m/sec，並於模型高度處外側架設皮托管以監控風速。為降低風洞地面造成之邊界層影響，另於格柵下游架設離風洞地表 30 公分高之端板平面設置待測模型，端板開孔處可提供模型升降與改變角度等動作所需，實驗量測時以塑膠薄片遮蔽開孔與模

型底座間的間隙。本研究量測以建築模型基底剪力為主。量測所得時序列資料，透過時間域及頻率域分析，計算平均風力及擾動性風力，並進一步推估極值。

模型製作要求質量輕、剛性高且尺寸細節精確，以 3D 列印方式一體成形。模型安裝於力平衡儀後，連接資料擷取系統，利用敲擊試驗量測此「模型-力平衡儀」系統的自然頻率，系統自然頻率約為 55Hz。以典型正方斷面柱體的史特赫數反推達到系統共振的風速估計達 45m/sec，本實驗採用 10m/sec 風速，可確保不造成系統共振影響量測內容。氣動力模型如圖 1 所示造形包括方形斷面建築模型搭配多孔式外牆，研究多孔式外牆之雙層幕牆運用於一般建築物的情形；以及圓柱造形構造物模型搭配多孔式外牆之雙層幕牆，研究運用於如煙囪、號誌桿、風力發電機塔身等耐風性能提升的應用。

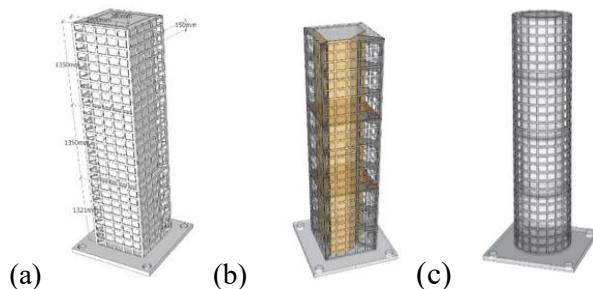


圖 1 氣動力模型外觀 (a) 模型 1~3 (b) 模型 4 (c) 模型 5

2-2 資料分析

1. 風力係數：

實驗中由高自然頻率力平衡儀量測所得之風荷載資料首先做 55Hz 的低通濾波後，計算氣動力係數定義如下所示：

$$\text{平均風力係數 } C_{Fx} = \frac{\overline{Fx}}{\frac{1}{2}\rho U^2 BH} \quad (1)$$

$$\text{擾動性風力係數 } C'_{Fx} = \frac{\sqrt{\overline{F_x'^2}}}{\frac{1}{2}\rho U^2 BH} \quad (2)$$

其中 F_x 為在模型 x 軸向風力時序列資料， \overline{Fx} 為 x 軸向平均風力， $\sqrt{\overline{F_x'^2}}$ 為 x 軸向擾動性風力的均方根值，另模型 y 、 z 軸向受風力亦相同方式處理。 ρ 為空氣密度， U 為平均風速， B 為模型寬度(矩形斷面模型取橫斷面積之平方根值、圓斷面為直徑)， H 為模型高度。

2. 相關性係數(Correlation coefficients)：

考慮不同位置兩點的壓力立時資料可推估其相關性係數，計算方式如下

$$\rho_{x,y} = \frac{E[(X-\mu_x)(Y-\mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

其中 $E[...]$ 代表期望值， μ_x 、 μ_y 為時序列資料之平均值， σ_x 、 σ_y 則為其標準差。

3 結果與討論

3-1 風力作用機率特性與係數變化

各模型的 X 向與 Y 向基底剪力時序資料其機率密度函數(PDF)並與常態分布函數相比較顯示，不論是不具備多孔性外牆的條件、模型外部全部或部分設置多孔性外牆等配置的條件下，模型整體的基底剪力其機率特性均保持接近常態分佈狀況。

風攻角的影響，以模型 1 為例，如圖 2 所示。在基底剪力係數之平均值方面，不同多孔性外牆安裝方式(case1~4)對於各向基底剪力係數之平均值無明顯影響，風攻角 0 度與 90 度對應的 X 向與 Y 向基底剪力係數為相對應關係。在擾動值方面，風攻角 0 度時，X 向基底剪力擾動值無明顯變化；Y 向基底剪力的擾動值有明顯變化，隨多孔性外牆占比增加而逐漸下降。顯示多孔性外牆對於順風向的風力影響幾無作用，對於橫風向風力的擾動性有明顯抑制的特徵。此現象主要在風攻角為 0 且四面向夾層空間彼此相連通的情形下發生，其他風攻角則較不明顯。

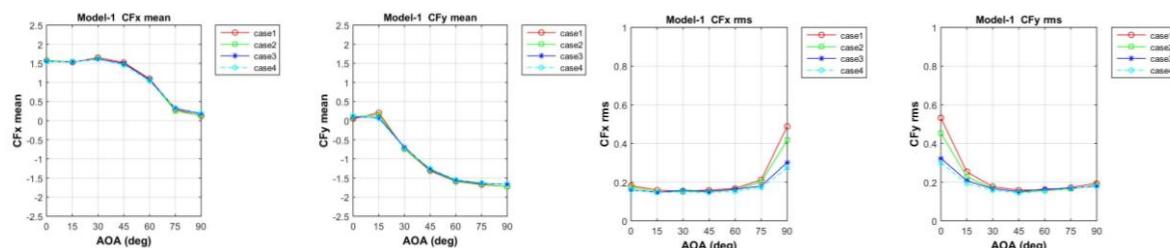


圖 2 模型 1 外立面均裝設多孔性外牆條件下，X 向與 Y 向基底剪力係數平均值與擾動值

如四面夾層間具有隔板，使四面夾層空間為各自獨立，如模型 2，其各風攻角與不同多孔性外牆配置條件下，X 向與 Y 向基底剪力係數的平均值與擾動值僅隨風攻角變化，並未隨多孔性外牆安裝方式而有所變化。

模型 3 斷面為矩形，隨風攻角由 0 度到 90 度的改變，以 X 向為基準計算之深寬比由 0.667 變化為 1.5，由淺矩柱變化為深矩柱。X 向基底剪力係數的平均值由正值逐漸下降至零值附近。而 Y 向基底剪力係數的平均值變化趨勢相反，風攻角 90 度時 Y 向基底剪力為深矩柱之阻力係數型態，略低於淺矩柱之情形。

模型 4 其中央模型為不對稱之梯形斷面，風攻角由 0 度變化至 90 度時，梯形斷面之斜邊由下游側風面轉變為上游迎風面，中央模型柱被不同多孔性外牆安裝方式所包圍。X 向基底剪力係數之平均值無明顯影響。Y 向基底剪力係數之平均值則隨多孔牆面占比增加而小幅度回升，顯示多孔牆的外圍形狀主導整體氣動力作用平均力。擾動值部分，變化趨勢與模型 1 類似，風攻角 0 度時，X 向基底剪力擾動值無明顯變化，但 Y 向基底剪力的擾動值隨多孔性外牆占比的增加，而逐漸明顯下降。

模型 5 為圓柱體，外圍多孔牆安裝分為四段，因此本研究採用之立面多孔牆占比變化情形，考慮 7 種變化(case 1~7)，如圖 3 所示，模型 5 基底剪力係數的平均值隨不同多孔性外牆立面設置占比均無明顯變化，擾動值部分主要變化在 Y 向基底剪力係數，隨多孔性外牆立面設置占比的增加，Y 向擾動性基底剪力係數呈下降趨勢。與夾層空間完全連通的矩柱體風攻角 0 度時的表現類似，對於橫風向風力的擾動性有明顯抑制的特徵。

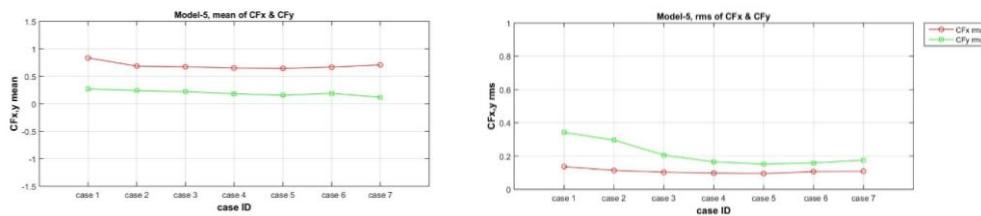


圖 3 模型 5 外立面裝設多孔性外牆條件下，X 向與 Y 向基底剪力係數平均值與擾動值

3-2 雙向風力作用的相關性

由各模型在不同外立面均裝設多孔性外牆條件下，五種模型在不同立面條件下，X 向與 Y 向基底剪力的相關係數多在 $+-0.2$ 之間，顯示兩者之相關性偏低。以風攻角 0 度為例，由於多孔外牆的存在，如夾層空間有相通連接，則上游迎風面的正壓氣流可部分轉入側風面的分離剪力流場(負壓作用)，如前段所述，對於橫風向擾動風力有所影響；但由相關係數的變化，兩者之相關性並未明顯受到其影響。圓柱體的雙向風力作用相關性亦不高。

3-3 風力作用的極值特性

各模型基底剪力時序列資料的機率密度函數分布情形，如前文驗證均接近常態分佈，本研究採用 Mayne and Cook(1979)建議的極值推估方式，推估 X 向與 Y 向基底剪力係數極端值(peak values)並估算陣風因子(gust factor)。屬於方形斷面或矩形斷面的模型 1~4，其基底剪力風力係數極值，風攻角 0 度、90 度，尖峰因子均在 3~3.5 之間，依據我國「建築外耐風設計規範與解說」建議陣風因子可採用 3.4，實驗結果顯示與規範建議值甚為近似。模型 5 為圓柱體，其雙向尖峰因子亦均在 3.4 附近。模型 5 的雙向尖峰風力係數推估，隨立面多孔性外牆的占比增加而逐漸下降，方柱體類似亦有類似的變化趨勢，因此多孔性外牆有助於減低 X 及 Y 雙向尖峰風力作用。

模型 1~4 變化風攻角，不同多孔性外牆占比的基底剪力風力係數尖峰因子在 3~4 之間，以分布在 3.5 附近較多。而尖峰風力係數在不同多孔性外牆占比條件下(case1~4)，仍以風攻角 0 度附近較有變化，特別是 Y 向尖峰風力係數明顯隨占比增加而下降。研究結果亦顯示各立面夾層如不相連通，Y 向尖峰風力係數在風攻角 0 度時，其值約在 2.0 附近幾無變化；各立面夾層如相連通，則會隨多孔性外牆占比的增加而下降，全部立面均具有多孔性外牆時可降至 1.0 附近。

3-4 多孔性外牆對風力頻譜之影響

本研究針對風攻角 0 度與 90 度兩種狀況下的基底剪力風力頻譜進行探討。模型 1 風攻角 0 度時，如圖 4 所示，在不同多孔性外牆占比的 X 向基底剪力風力頻譜各不同多孔性外牆占比的條件下均呈現相近似的情況，且頻譜為寬頻型態無明確的主頻，與矩柱體順風向頻譜類似。不同多孔性外牆占比的橫風向基底剪力風力頻譜主頻所對應的無因次化頻率逐漸增加的趨勢，頻譜尖峰呈現向右漂移的現象。因此隨多孔性外牆占比逐次增加，主導史特赫數的特徵寬度逐漸過渡到內部柱體寬度，又受到多孔外牆干擾側面分離剪力流的作用，因此頻譜峰值漸次下降，因此多孔性外牆占比由 0%(case 1)至 100%(case 4)變化，可改變史特赫數達到約 25% 的漂移，對

於避開敏感風速對於建築物的影響，可考慮透過附掛部分多孔性外牆方式加以調整。

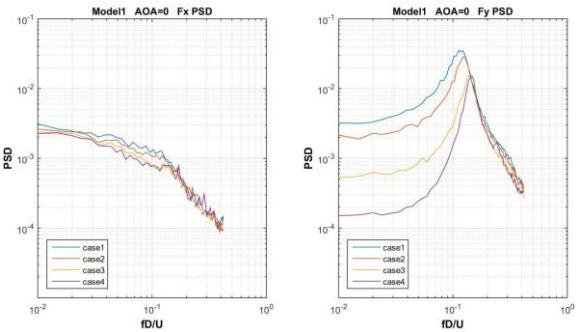


圖 4 模型 1 在風攻角 0 度時，基底剪力風力頻譜隨多孔性外牆占比變化之情形，(a)X 向風力頻譜，(b)Y 向風力頻譜

風攻角 0 度時，模型 2 在不同多孔性外牆占比的條件下均呈現相近似的情況，且頻譜為寬頻型態無明確的主頻，與矩柱體順風向頻譜類似。而橫風向風力頻譜各不同多孔性外牆占比的條件下，頻譜為窄頻型態有明確的主頻。

模型 3 為矩形斷面柱體，以風向作用而言，風攻角 0 度時，模型 3 屬於淺矩柱型態；風攻角 90 度時，模型 3 屬於深矩柱型態。結果顯示淺矩柱的順風向(風攻角 0 度時的 X 向)風力頻譜各不同多孔性外牆占比的條件下均呈現相近似的情況，頻譜未呈現寬頻型態，受到淺矩柱有利後方尾流渦漩形成，因此具備明顯主頻，但無主頻漂移或強度下降的情形。而深矩柱型態的順風向(風攻角 90 度時的 Y 向)風力頻譜各不同多孔性外牆占比的條件下均呈現相近似的情況，頻譜為寬頻型態，深矩柱除後方尾流渦漩形成，另在側邊有分離剪力流再接觸現象，頻譜出現兩個峰值，但隨多孔性外牆占比改變峰值的中心頻率無漂移及強度下降的情形。

模型 4 的中央柱體為矩形斷面缺角形成類似梯形斷面之柱體，外立面之多孔性外牆則保持正方斷面形式。以風向作用而言，風攻角 0 度時，柱體的型態為無缺角的立面面對來流，缺角部分屬於下游側。順風向(X 向)基底剪力頻譜呈現寬頻型態，且不隨多孔性外牆占比改變。橫風向風力頻譜在各不同多孔性外牆占比的條件下均呈現相近似的情況，與模型 1 情形類似。

模型 5 的圓形斷面之柱體，外立面之多孔性外牆亦為圓柱形，與中央圓柱保持 1 公分的夾層間距。由於圓柱體的雙向對稱，風洞實驗僅考慮風攻角 0 度時，搭配不同多孔性外牆占比的條件，順風向(X 向)基底剪力頻譜為寬頻型態，無明顯主頻的分布。橫風向(Y 向)基底剪力頻譜為窄頻特徵，具有明顯主頻尖峰。隨多孔性外牆占比的增加，橫風向風力頻譜的主頻峰值有逐漸下降的趨勢。對比有關 Y 向基底剪力風力係數擾動值的變化趨勢，由完全封閉的外牆立面到全部立面均為多孔性外牆(case1~5)，其 Y 向基底剪力風力係數擾動值有下降約 50%，而主頻並未隨多孔性外牆的占比增加而有漂移現象，此特徵與方柱體的實驗結果略有不同。

4 結論

1. 模型的 x 向與 y 向基底剪力機率密度函數不論具備多孔性外牆的條件狀況，與常態分布函數均保持相近似。

2. 具備多孔性外牆基底剪力的風力係數變化方面，不同面向的多孔外牆夾層空間相連通，對於橫風向擾動風力有較大的影響，內部中央模型的形狀變化、夾層空間的大小對於基底剪力係數的平均值與擾動值似無明顯差異。
3. 當建築物外部以多孔性外牆形成外部形狀的改變，仍足以影響整體氣動力特性，內部建築物的形狀其影響性將大幅下降。因此，對於建築物受風作用的調控，利用多孔性外牆加以調整，具有應用價值。在夾層空間連通的情形下，越高立面佔比的多孔性外牆，對於抑制橫風向擾動風力作用越具效果。本研究顯示多孔性外牆具備抑制橫風向擾動的能力。
4. 各模型在不同外立面均裝設多孔性外牆條件下，其 X 向與 Y 向基底剪力的相關係數多在 +/-0.2 之間，顯示兩者之相關性偏低。
5. 正方斷面柱體、矩柱體、圓柱體等各模型在不同外立面均裝設多孔性外牆條件下，尖峰因子均在 3~3.5 之間，依據我國「建築外耐風設計規範與解說」建議陣風因子可採用 3.4，實驗結果顯示與規範建議值甚為近似。
6. 對於方形斷面柱體而言，在與來流方向正交情形下，不同多孔性外牆占比的橫風向基底剪力風力頻譜主頻所對應的無因次化頻率逐漸增加的趨勢，頻譜尖峰呈現向右漂移的現象。隨多孔性外牆占比逐次增加，主導史特赫數的特徵寬度逐漸過渡到內部柱體寬度，又受到多孔外牆干擾側面分離剪力流的作用，頻譜峰值漸次下降；多孔性外牆占比由 0%(case 1) 至 100%(case 4) 變化，可改變史特赫數達到約 25% 的漂移，有助於建築物避開敏感風速的影響。圓柱體模型隨多孔外牆占比的增加，橫風向頻譜尖峰下降，但主頻位置並未漂移。

5. 參考文獻

- [1] Gerhardt, H. J., F. Janser, (1994). Wind loads on permeable facades, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 53, 37-48.
- [2] Cook, N.J., J.R. Mayne, (1979). A novel working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design, Journal of Industrial Aerodynamics, 4 149--164
- [3] Gang Hu, Jie Song, Sina Hassanli, Robert Ong, K.C.S. Kwok, (2019). The effects of a double-skin façade on the cladding pressure around a tall building, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 191, 239–251
- [4] Lo, Yuan-Lung, Yu-Ting Wu, Chung-Lin Fu, Ying-Chang Yu, (2020). Wind load reduction effects on inner buildings by exterior porous façades, Building and Environment, Vol.183, pp.107-148.
- [5] Kwok, KCS, Samali, B, Hu, G, Tse, KT (2014). 'Wind-induced response reduction of a tall building with an innovative façade system', in ST Smith (ed.), 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), vol. II, Byron Bay, NSW, 9-12 December, Southern Cross University, Lismore, NSW, pp. 993-998. ISBN: 9780994152008.
- [6] 陳若華, 2020, 建築物外加多孔隙外牆風荷載之風洞實驗研究, 第八屆全國風工程研討會, 國立台灣科技大學, 台北市。

6. 謹謝

本研究本研究承蒙國科會大力支持(計畫編號：NSTC 112-2637-E-270-001 -)，得以順利完成，特此申謝。