

低矮建物屋頂表面極值風壓之特性分布探討

羅元隆^{1*} 林逸崧²

^{1*}淡江大學土木工程系助理教授

²淡江大學土木工程系大四生

摘要

本研究以四種不同斜率屋頂的低矮建物模型作為研究對象，以風洞試驗方式針對每一模型進行不同風攻角下的表面風壓量測，累積足夠的標本數量以繪製屋頂上每個風壓孔的極值風壓係數非超越機率分布。接著以廣義極值分布函數作為擬合非超越機率分布曲線之目標函數，識別出函數的形狀參數因風壓孔位置及屋頂斜率不同而造成之分布趨勢差異。同時根據局部設計風載重的理論中，極值設計風速以及極值風壓係數的乘冪關係式所涉及的非超越機率分布曲線對局部設計風載重的影響進行探討，並與國內外規範中常見以Cook-Mayne值作為設計的結果進行比較，提出在不同非超越機率分布曲線下的載重設計值差異性。

關鍵字:低矮建物，極值分布曲線，風壓係數

Keywords: Low-rise building, Extreme value distribution, Pressure coefficient

1. 前言

八零年代初期，美國風工程專家 N. J. Cook [1]對於結構物受風作用下的風載重設計值評估，提出一個基本但卻影響甚鉅的問題：如何評估一結構物在某特定風險(Target risk)的設計風速下，造成具有相同風險的風載重效應？這個問題暗示了在評估結構物的風力載重時，包含了至少兩個具有隨機性的組成原因：(1)特殊事件的極值風速，例如暴風、熱帶低氣壓氣旋、急速下降氣流等；(2)在此特殊事件下所造成的極值氣動力效應。

在評估極值風速部分，多種極值分布模型，例如甘保分布(Gumbel distribution)、廣義極值分布(Generalized Extreme Value distribution, GEV)、廣義普勒托分布(Generalized Pareto distribution, GP)等極值分布模式，常被用以作為極值母分布，探討在特定誤差機率下所得到的合理設計風速。在評估氣動力效應部分，則通常考慮三項極重要的因子：極值資料的組成、極值分布曲線的目標百分比、以及該百分比的信任區間。在以縮尺模型進行的風洞實驗條件下，德國學者 M. Kasperski [2]進一步擴大 N. J. Cook [1]所提出的問題為四個需要深入加以

釐清的子問題：風洞實驗進行時單筆紀錄所需要的時間長度為何？多少筆記錄方可視為獨立紀錄的最小需要量？極值分布曲線的目標百分比及信任區間應當設定為多少，方可代表合理的氣動力效應？根據縮尺原則，數分鐘的風洞實驗即可等同於實場尺度的數小時。因此，當評估一小時的設計值時，僅有少數筆資料可用以分析而無法保證其統計的資料穩定性。在這種情況下，通常將一小時分為六筆十分鐘，增加原本的資料量為六倍進行分析，給出較具合理的分析結果。然而如此一來，單筆資料的長短對於氣動力效應的影響則必須加以探討。

目前我國建築物耐風設計規範仍處在多處需要修訂的狀態。由於從實場直接獲得的資料數據不足，國內外學者長年的研究成果多半透過風洞實驗進行，方獲得對建築物周遭流場特性之掌握瞭解。然而風洞實驗為基於物理縮尺理論，模擬大氣邊界層而來。由實驗中獲得的數據，若不經過統計學之探討，則無以成為規範中提供給工程師實際作為設計的依據。因此，固然建立兼具各類型建築物的氣動力資料庫對於規範修訂甚為重要，實驗所得的氣動力參數數據經由統計學的分析與處理，則更為規範修訂之所需。

本研究以 4 種不同斜率屋頂的低矮建物模型作為研究對象，以風洞試驗方式針對每一模型進行屋頂表面風壓量測，累積足夠的標本數量以繪製極值風壓係數的非超越機率分布。接著以 Reverse-Weibull 函數作為擬合非超越機率分布曲線之目標函數，找出 Reverse-Weibull 函數的形狀參數因風壓孔位置及矩形斷面不同而造成之分布趨勢差異。同時根據局部設計風載重的理論中，極值設計風速以及極值風壓係數的乘冪關係式所涉及的非超越機率分布曲線對局部設計風載重的影響進行探討，並與國外規範中常見以 Cook-Mayne 值作為設計的結果進行比較，提出在不同非超越機率分布曲線下的載重設計值。

2. 設計風壓係數理論背景

2.1 基本理論

設計風載重 w_{des} 可以由下式求得：

$$w_{des} = \frac{1}{2} \rho_{des} \cdot v_{des}^2 \cdot c_{des} \quad (1)$$

其中 v_{des} 為極值風速設計值； c_{des} 為極值風壓係數設計值。式(1)的空氣密度雖是一個隨機變數，但一般來說常假設為一固定值。對於以平均一小時風速的極大值來說， ρ_{des} 可以簡單假設為 1.25 kg/m^3 。若考慮設計風載重的非超越機率，則可以透過極值風速及極值風壓係數兩者的機率分布予以乘冪而得：

$$p(w > w_{des}) = \int_{v=0}^{\infty} f_v(v) \cdot \int_{c=c_{lim}}^{\infty} f_c(c) dc dv \quad (2)$$

其中 c 為極值風壓係數； v 為極值風速； $f_v(v)$ 為極值風速的機率分布； $f_c(c)$ 為極值風壓係數的機率分布。式(2)中的內層積分範圍下限 c_{lim} 可由設計風載重的計算值與外層積分的真實極值風速換算求得：

$$c_{lim} = \frac{2 \cdot w_{des}}{\rho \cdot v^2} = \frac{v_{des}^2 \cdot c_{des}}{v^2} \quad (3)$$

式(2)的內層積分的機率密度分布若以累積機率密度分布取代，並將式(3)代入，則可改寫為：

$$p(w > w_{des}) = \int_{v=0}^{\infty} f_v(v) \cdot [1 - F_c(c_{lim})] dv = p_{target} \quad (4)$$

其中 $F_c(c)$ 為極值風壓係數 c 的累積機率密度分布。式(4)表示設計風載重的超越機率由極值風速的機率密度分布與極值風壓係數的累積機率密度分布兩者之乘冪決定。一般來說通常設計載重的超越機率等同於設計風速的超越機率。因此，當建築物等級被決定，設計風速的超越機率亦隨之確定，接著決定極值風壓係數的積分範圍後，透過式(4)中的乘冪運算，確認設計風載重的超越機率確定等同於設計風速的超越機率。因此，式(4)的實際運作模式其實為一連串對極值風壓係數的試算結果。

2.2 極值分布形狀參數對設計百分比之影響

為平衡式(4)等號兩邊的超越機率值， $F_c(c)$ 分布型態將決定風壓係數的設計值，亦即影響設計百分比的選定。Cook and Mayne [3]以甘保分布假設為極值風壓係數的累積機率分布型態，考量實驗可能產生的極值擾動，因此建議以非超越機率分布之78%處作為選取極值風壓係數設計值的方案。此方案目前為國內外各規範所採用。此78%的設計百分比亦可以下式表示之。

$$c = U_c + 1.4/a_c \quad (5)$$

其中 U_c 為數筆極值風壓係數之眾數(Mode)， $1/a_c$ 則為其標準差。1.4為考量極值

擾動程度為 20%左右之值，可換算為非超越機率分布的 78%。目前亦有部分規範直接採用 80%。以風洞實驗的實際執行面來說，不可能針對每個案例進行筆數十分龐大的紀錄，再進行極值分析推估設計值。因此，通常執行若干筆紀錄(多數為 20 筆以下)後，取其眾數及標準差代入式(5)以推估出設計值。

本研究以 Reverse-Weibull 函數作為極值風壓係數的累積機率密度分布函數模式，探討其分布尾端性狀(Tail characteristics)對設計值的影響。Reverse-Weibull 函數可寫為：

$$F(x) = \exp \left[- \left(f_1 - f_2 \frac{x - m_x}{\sigma_x} \right)^{\frac{1}{\tau}} \right] \quad f_1 = \Gamma(1 + \tau) \quad f_2 = \sqrt{\Gamma(1 + 2\tau) - f_1^2} \quad (6)$$

其中 Γ 為 Gamma 函數， m_x 為極值風壓係數的平均值， σ_x 為極值風壓係數的標準差。而此分布的尾端性狀(Tail characteristics)則由形狀參數 τ 決定。若 $\tau > 0$ ，則式(6)曲線呈現凹面分布，與廣義極值分布第 III 型相同；若 $\tau < 0$ ，則式(6)曲線呈現凸面分布，與廣義極值分布第 II 型相同。若 $\tau \rightarrow 0$ ，則式(6)可直接改寫為甘保分布(Gumbel distribution)或者廣義極值分布第 I 型([4])：

$$F(x) = \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\gamma + \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{x - m_x}{\sigma_x} \right) \right] \right\} \quad \gamma = 0.577216 \quad (7)$$

圖 1 顯示出式(6)在不同的 τ 值變化下的分布特性以及式(7)的直線特性。

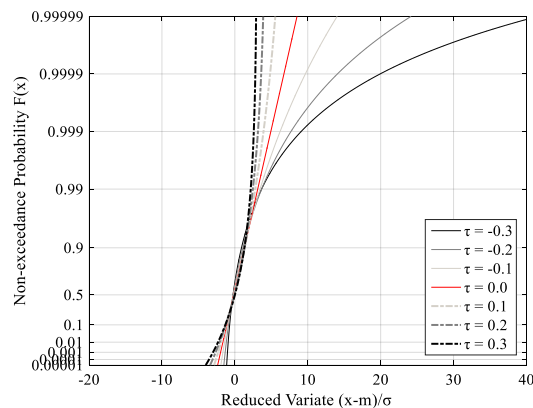
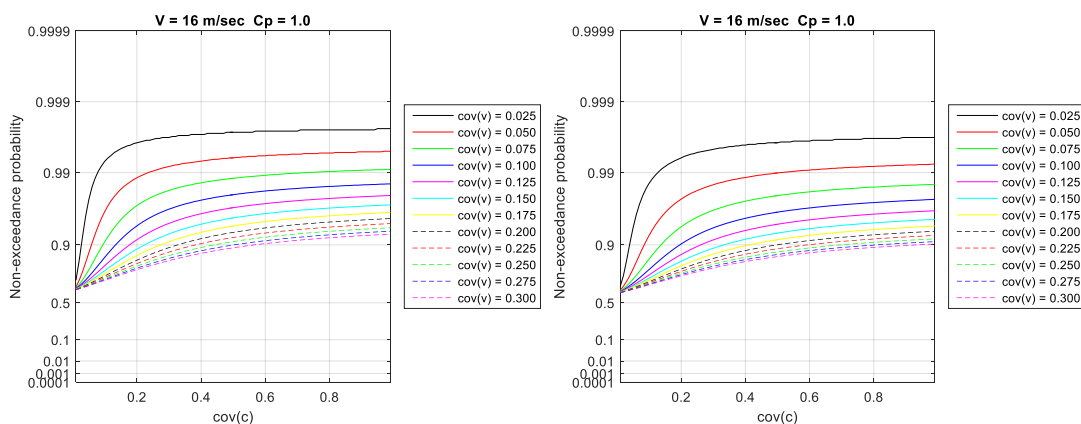


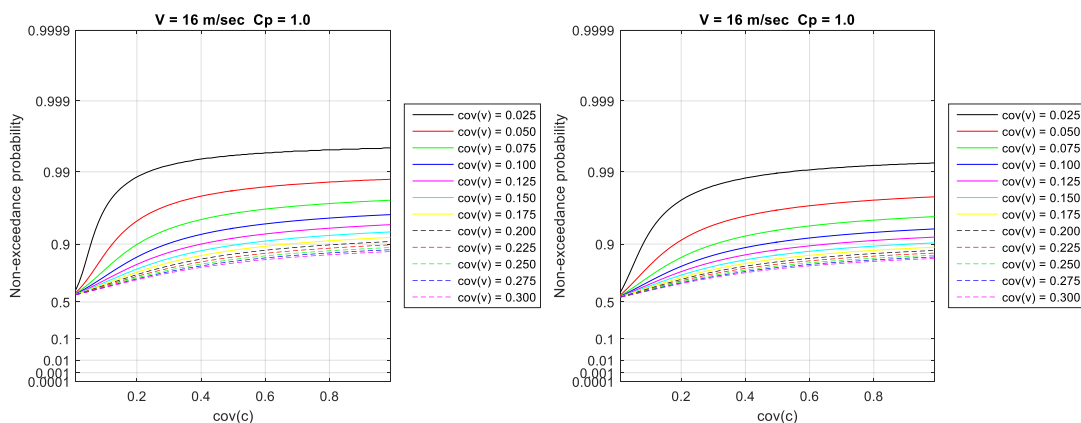
圖 1：Reverse-Weibull 在不同 τ 值下的尾端性狀變化

Kasperski [5]曾以參數分析的方式進行極值風壓係數的最佳超越機率百分比的推估。以下根據其推估過程，擴大參數探討範圍作為解釋。假設極值風速的分布如式(7)呈現甘保分布，則可假設極值風速平均值 m_v 為 16 m/sec，此時形狀參數 τ_v 為 0。為了呈現紊流強度的影響，則假設極值風速的擾動程度為 $cov(v)$ 範圍在 2.5%~30%間，亦即 σ_v 為 0.4~4.8 m/sec。極值風壓係數的分布如式(6)隨著形狀參數 τ_c 的改變而變化，假設極值風壓係數的平均值為 1.0，標準差值的變動為 0.0~1.0之間。根據以上實驗中普遍出現的數值作為假設，進行式(4)的疊代計算，推估出對應於各種參數假設下的最佳非超越機率百分比，如圖 2 所示。



(a) $\tau_v = 0 \quad \tau_c = -0.2$

(b) $\tau_v = 0 \quad \tau_c = -0.1$



(c) $\tau_v = 0 \quad \tau_c = 0.0$

(d) $\tau_v = 0 \quad \tau_c = 0.1$

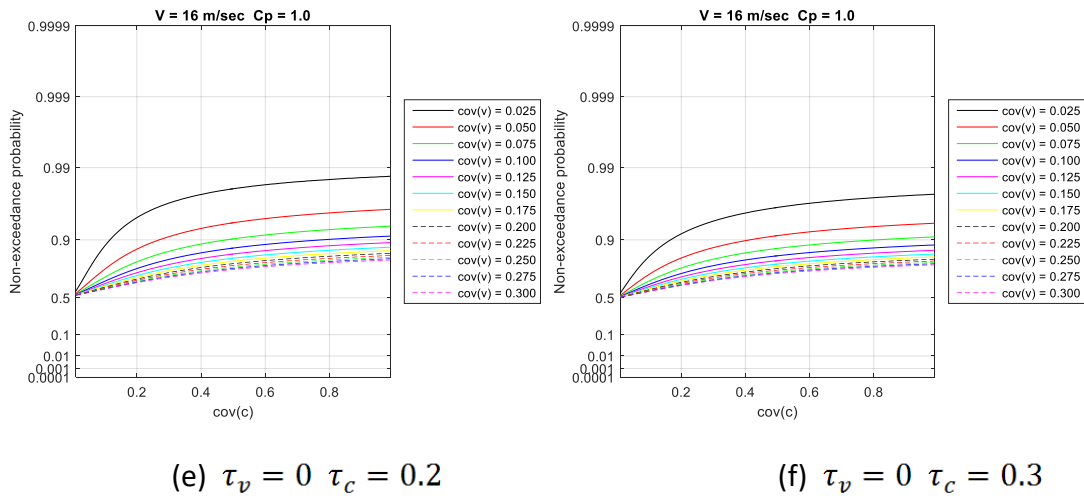


圖 2：各種不同 $\tau_c(-0.2 \sim 0.3)$ 於 $\tau_v = 0$ 時之最佳非超越機率百分比分布圖

由圖 2 結果可看出，Cook and Mayne 係數(78%)並非適用於所有變化，在假設極值風速與極值風壓係數均為甘保分布且擾動範圍均小於 20%時，78%可為一保守的建議值。然而若兩者之一的型態不屬於甘保分布而在其尾端性狀上有凹面或凸面的特性時，則將大大地改變此建議值。一般來說，流體經鈍體尖銳處而產生分離的正下游處通常會具備高度非高斯特性，而此非高斯特性即直接反應在極值分布曲線的尾端性狀上。

3. 風洞實驗設置與數據處理

3.1 流場模擬

本研究在淡江大學風工程研究中心第一號館中的紊流邊界層風洞試驗室進行試驗。風洞主體斷面尺寸為 22 公尺長、2.2 公尺寬、1.8 公尺高。為了詳細量測低矮建物模型屋頂表面的風壓分布，模型製作縮尺比例為 1/20，十分靠近地表邊界層。故本研究流場模擬以均勻紊流場為主，採用平均風速為 8.8 m/sec 且紊流強度約 12%的剖面特性。且為了避免模型受到風洞試驗段地表粗糙度影響，故以平台端版架高模型約 30 cm，並以導流板設置於端版前端，確保流體不產生小尺度紊流。均勻紊流則以交叉形式的垂直柵板架設於模型前方 180 cm 處產生。實驗架設如圖 3 所示，剖面特性及模型高度風速頻譜則如圖 4 所示。



圖 3：風洞內端版架設與柵板設置

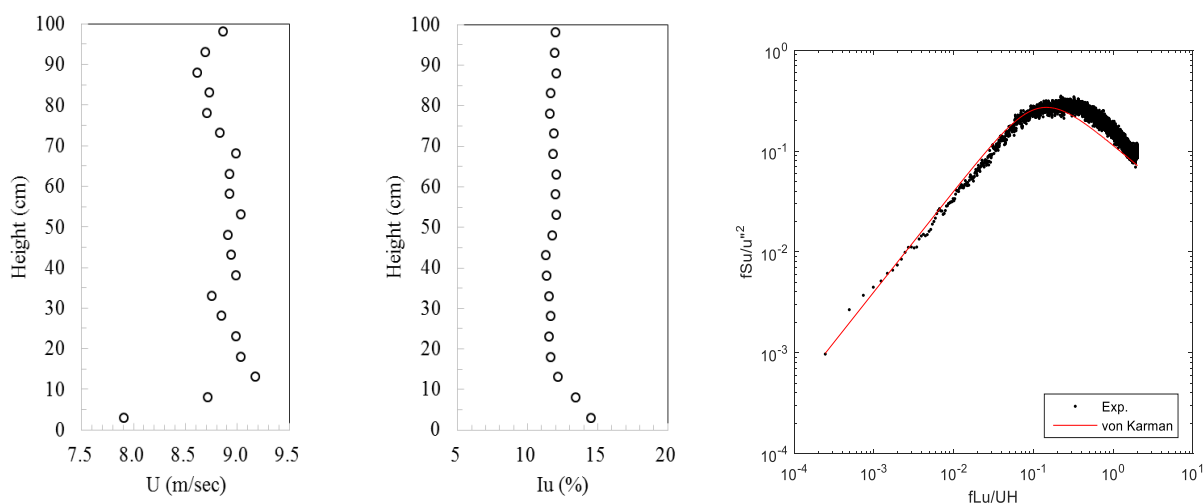


圖 4：均勻紊流場特性

(左：平均風速剖面；中：紊流強度剖面；右：模型高風速頻譜)

3.2 低矮建物模型

本研究探討不同屋頂斜率以及不同風攻角下對於極值風壓係數之影響，因此製作 4 組 1/20 縮尺模型，長、寬皆為 30 cm × 20 cm，屋簷為 15 cm 高，屋頂斜率則為 15°、20°、25° 及 30°，簡單命名為 TYPE_1、2、3、4。表一列出 4 組模型參數。迎風面積約為 459 cm²，而風洞試驗段有效斷面積為 33000 cm²，阻塞比約為 1.71%，故可忽略遮蔽效應產生之影響。風向角則為 0°、15°、30°、45°、60°、75° 及 90° 共 7 個來風向，圖 6 所示為 0° 風向角。4 組模型屋頂表面均布置 130 個風壓孔位，其位置如圖 7 所示。



圖 5：TYPE_1 模型照片

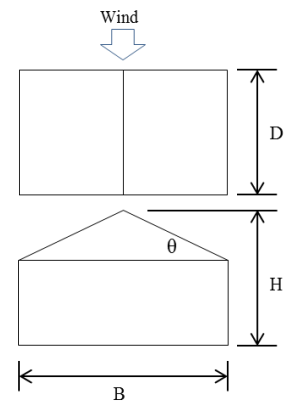


圖 6：模型尺寸定義示意圖

表一：模型資訊

模型編號	屋頂斜率 θ (度)	H(cm)	D(cm)	B(cm)	風壓孔數	最大迎風面積(cm^2)
TYPE_1	15	19	20	30	130	504
TYPE_2	20	20.5	20	30	130	523
TYPE_3	25	22	20	30	130	543
TYPE_4	30	23.7	20	30	130	565

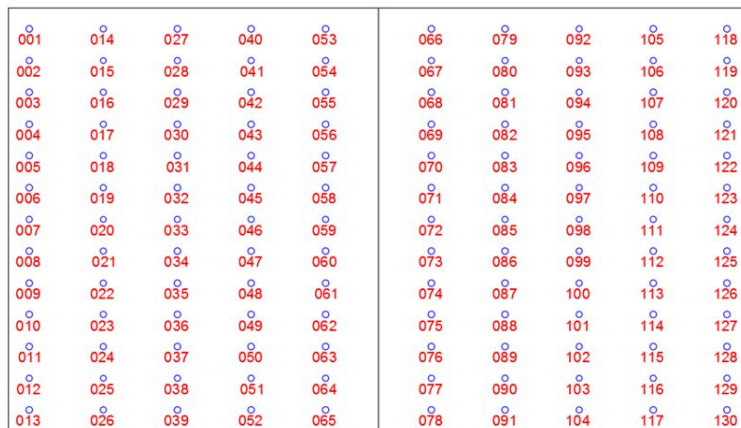


圖 7：風壓孔位示意圖(對照圖 6)

3.3 管線率定

實驗使用 SCANIVALVE 電子壓力掃描器進行風壓取值，採樣頻率 200 Hz，每筆採樣時間為 81.92 秒，採樣長度為 16,384 個資料點，每組風向角皆採樣 60 筆以便後續極值分析。當模型表面的壓力經由管線傳遞至壓力掃描器時，壓力訊號會受風壓管之幾何尺寸影響而被扭曲，因此須將風壓訊號受扭曲的部分進行還原。本研究利用圖 7 中顯示原始訊號和扭曲訊號兩者間之關係，以傅立葉逆轉換方式推測原始風壓訊號。本研究所有模型均採用 130 公分長之管線。

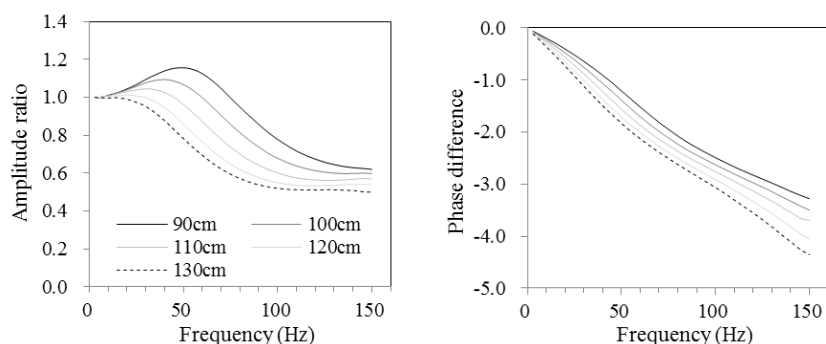


圖 7：五種管線長度用以進行管線率定的振幅與相位差函數

3.4 數據處理

針對每組風壓模型的每一風壓孔所量測到的 60 筆紀錄，首先以模型高度處所架設的探針量測到的風速作為正規化的參考風速，將風壓時間序列換算成瞬時風壓係數。如下式：

$$c_p(t) = \frac{p(t)}{1/2 \rho \bar{U}_H^2} \quad (8)$$

其中 $c_p(t)$ 為瞬間風壓係數； $p(t)$ 為每筆風壓序列； \bar{U}_H 為模型高平均風速。將瞬時風壓係數取其每筆紀錄的最大值最小值為極值風壓係數。若假設流場地況為開闊地況且實場 10 公尺高的設計風速為 42.5 m/sec，則針對本實驗縮尺計算，實場一小時紀錄應為風洞內紀錄時間 850 秒左右。在此實驗數據長度不足狀況下，本研究暫且不討論實場一秒極值風壓而單純以討論實驗單筆紀錄內的最大最小值為原則。

4. 結果分析與討論

4.1 屋頂角落處極值風壓係數分布特性

由於受限於篇幅，探討結果以屋頂角落處共 8 個風壓孔位的極值風壓係數分布為主要探討對象，亦即圖 7 中的 Tap#1、Tap#53、Tap#66、Tap#118、Tap#13、Tap#65、Tap#78 以及 Tap#130。利用每個孔位的 60 筆紀錄的極值風壓係數，進行式(6)與(7)的擬合。接著依照該孔位的平均風壓係數的正負符號，選擇主要設計對象為最大風壓係數或最小風壓係數，最後將該孔位在 4 組不同模型、7 個不同風攻角的形狀參數曲線繪出。

圖 8 所示為 Tap#1 與 Tap#118 在屋頂斜率 15°(TYPE_1 模型)、0° 風攻角下的最大極最小風壓係數擬合結果。由於 Tap#1 及 Tap#118 均為負值平均風壓係數，

因此極值風壓係數應由最小風壓係數控制，故應挑選最小風壓係數的形狀參數作為考慮最佳設計百分比的參數。

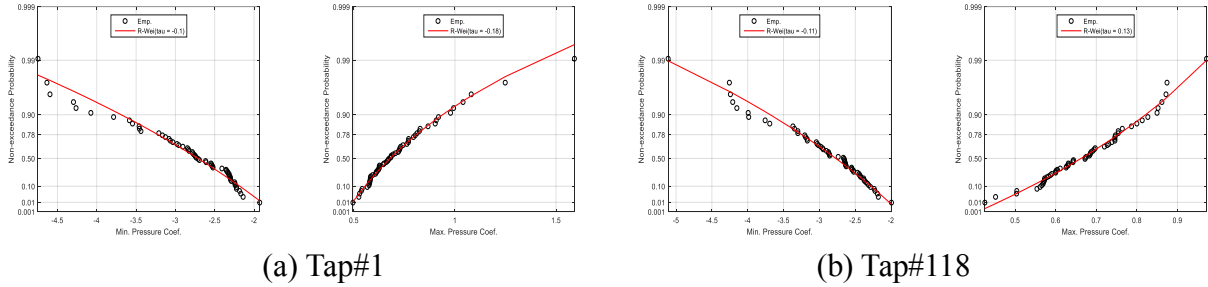


圖 8：屋頂斜率 15°、0° 風攻角下 Tap#1 與 Tap#118 的極值風壓係數擬合結果

圖 9 所示為 8 個風壓孔進行上述判斷後所繪出之形狀參數曲線。可由曲線看出，在不同風攻角下所造成的形狀參數改變，亦可以很清楚地看出形狀參數幾乎全不為 0 (非高斯特性、非甘保分布)。在此情況下，設計百分比極可能不為 Cook & Mayne 係數(78%)，而改由極值分布的擾動程度作為主要控制參數。

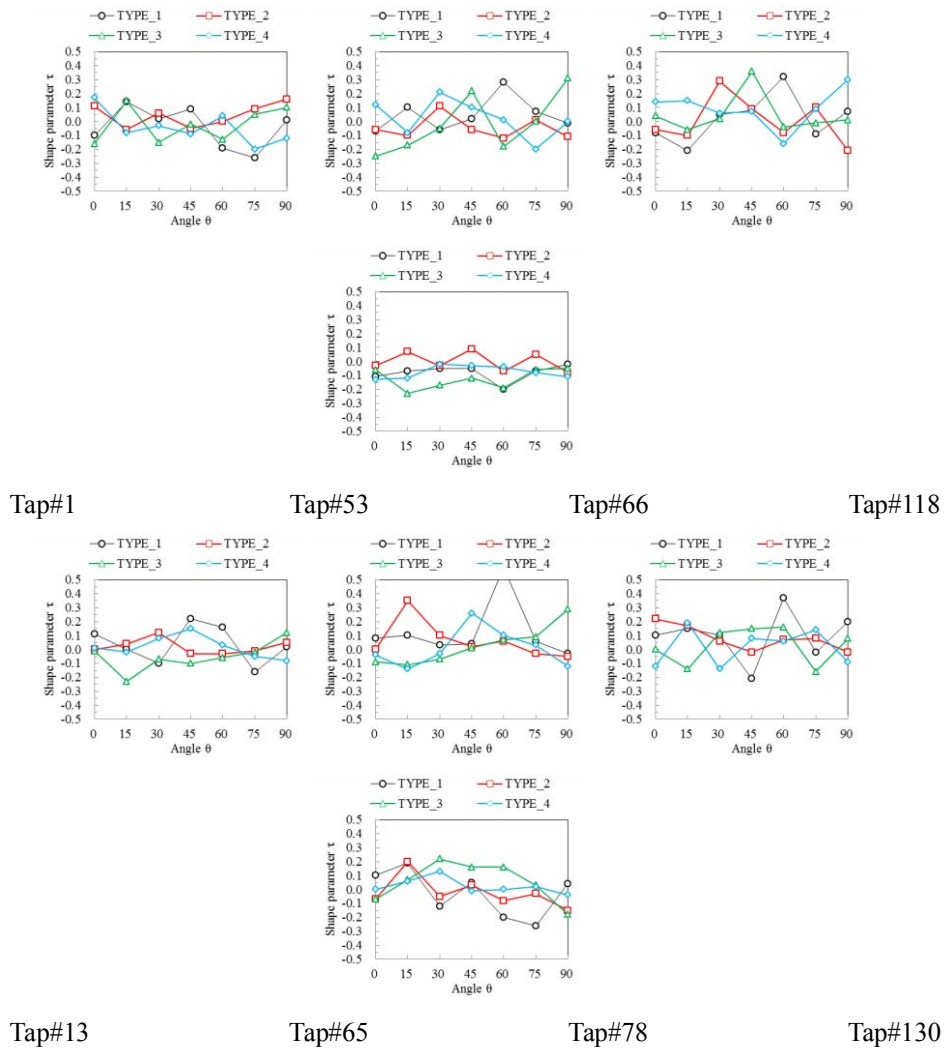


圖 9：8 個風壓孔位在不同模型、不同風攻角下的形狀參數變化

4.2 最佳極值風壓係數設計百分比

將4組模型在7個不同風攻角下的形狀參數與極值擾動程度(c.o.v.)進行式(1)至(4)的疊代計算，則可獲得每個風壓孔的最佳設計百分比。圖 10 顯示為所有風壓孔最佳設計百分比的分布。由圖中可看出，Cook and Mayne (1985)所建議的78%基於 Gumbel 分布曲線的假設有時候會造成載重過於保守或過於非保守的可能性。

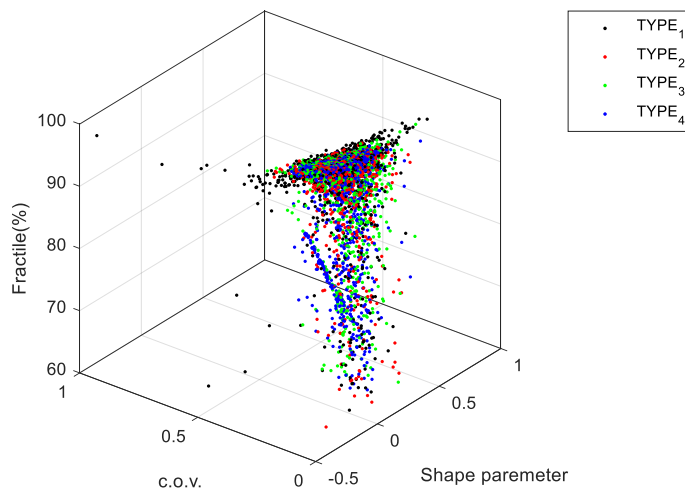


圖 10：風壓孔最佳設計百分比分布圖

5. 結論

由擬合分析結果得知，非超越機率分布函數的形狀參數分布因風壓孔位置而異，範圍約在-0.3至0.5之間。位於正迎風面上的風壓分布與來風風速呈現相同的形狀參數，且分布曲線為非高斯分布與我國規範假設不同。而流體分離點發生位置後方的負風壓區則有較大的絕對值形狀參數，顯示其設計值將隨著迴歸期的長短有很顯著的差異。一般來說，Cook and Mayne (1985)所建議的78%非超越機率設計百分比基於 Gumbel 分布曲線的假設；若以本研究所得之結果進行建議，則局部風載重的設計值應隨著不同極值分布曲線而有所調整，方能得到較為合理的載重設計值。

6. 參考文獻

- [1] Cook, N. J., 1985. Towards Better Estimation of Extreme Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol.9, pp.295–323.
- [2] Kasperski, M., 2009. Specification of the Design Wind Load Based on Wind Tunnel Experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.91(4), pp.527-541.

- [3] Cook, N. J. and Mayne, J. R., 1980. A Refined Working Approach to the Assessment of Wind Loads for Equivalent Static Design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol.6(1-2), pp.125-137.
- [4] Gumbel, E. J., 1958. *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York.
- [5] Tamura, Y., Kareem, A., 2013. *Advanced Structural Wind Engineering*. Springer, Japan.