

## 半圓頂型屋蓋結構表面平均風壓設計值之探討

### Design Values of External Pressure Coefficients for Domed Roofs

羅元隆<sup>1</sup> 李家豪<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 淡江大學土木工程系助理教授 (E-mail: [ylo@mail.tku.edu.tw](mailto:ylo@mail.tku.edu.tw))

<sup>2</sup> 淡江大學土木工程系大專生

國科會計畫編號：NSC-102-2221-E-032-031-

#### 摘要

大跨徑屋蓋結構為現今社會常見的結構型態之一，具有大空間且多功能的特性。依建築物耐風設計規範，此類結構物高寬比多偏小應可歸類為低矮建物。然而由於跨度大且材質輕的特性，屋蓋表面受風壓分布影響甚鉅，一般不建議以簡易計算方式給定設計風載重，並另行於規範中表列表面風壓係數值進行設計。本研究進行以探討各國規範於大跨徑屋蓋結構中半圓頂型屋蓋結構表面風壓係數的設計值為主，輔以風洞實驗結果，進而探討目前國內規範對於此部分設計值之給定是否適宜，並提出未來規範修訂之建議方案。由初步的風洞實驗結果與規範設計值之比較可看出，除了表面風壓特性應具有分區概念(Zoning concept)以外，屋蓋結構的高跨比( $f/D$ )與側牆高跨比( $h/D$ )對於分區之影響亦應列入規範修訂考量。

關鍵字：半圓頂型屋蓋結構、表面風壓分布、高跨比、分區

#### Abstract

Domed roof structures, or large span roof structures, are one of the most welcomed structural types in the society for its spatial feature and multi-functional performance. Most of them are categorized as low-rise buildings by the definition of current Taiwan code; however, its less-weight and long span characteristics make wind pressures dominate its structural response greater than seismic loads do. The simplified methodology for design wind loads may not be adoptable once complicated behavior occurs. Instead, the design values of pressure coefficients are given in tables or graphs for analytical design procedure. In this research, wind tunnel tests and the existing design values in several codes are mainly discussed. First the zoning concept is illustrated over the roof and determined by non-dimensionless factors, such as roof's and wall's height-span ratios. Then it is demonstrated that the existing design values in codes may cause over conservative or unfavorable unsafe design in local area of the roof surface.

Keywords: Domed roof, External pressure coefficient, Height-span ratio, Zoning

## 一、前言

大跨徑屋蓋結構為現今社會常見的結構型態之一，具有空間大且功能多的特性。此類結構因跨度大且常呈現曲面外型，結構行為受風力影響甚重。我國不久前即發生過半圓頂型儲煤槽因受強風吹襲、導致結構破壞的事故。依照我國現行建築物耐風設計規範精神，大跨徑屋蓋結構的耐風設計應透過外風壓係數與內風壓係數之淨值，並乘以尖峰因子及有效面積所得的風力，作為作用於屋蓋表面等值靜力分布的載重模式。其中外風壓係數受曲面造型影響甚鉅，因此規範中常以表格方式方便工程師查詢。綜觀我國、美國、日本耐風設計規範中有關此類結構物的相關表格，屋蓋結構一般可分為兩類：半圓頂型屋蓋(Domed roof)和拱型屋蓋(Arched roof)。日本 AIJ-2004 規範及美國 ASCE7-10 規範均對此兩類屋蓋提供表格查詢，外風壓係數於屋蓋各位置的設計值，僅需透過跨高對跨度之比值、底座(Base)高對跨度之比值，即可簡單地以線性內插方式求得。然而我國規範中僅針對拱型屋蓋提供設計值參考，半圓頂型屋蓋的外風壓係數設計值則付之闕如。

國內外有關大跨徑屋蓋結構-半圓頂型屋蓋類的研究自六零年代起即有不少文獻發表，直到近代仍有不少專家學者持續進行風洞實驗，並提出許多半經驗公式用以描述此類結構的氣動力行為。Maher [7]針對不同幾何外型半圓頂型屋蓋進行平均風壓分布的量測，並改變屋蓋表面粗糙度進行高雷諾數範圍的探討。Toy et al. [12]量測表面風壓以及在兩組不同紊流邊界層下屋蓋結構周圍的流場特性。Ogawa et al. [4]基於紊流邊界層風洞實驗建立不同幾何外型的半圓頂屋蓋的簡單風壓場模式。Letchford and Sarkar [6]探討表面粗糙度對整體結構拖曳力及升力之影響。Tsugawa [14]、Kawamura [5]分別對半圓頂型屋蓋結構具有大型開孔以及具有裙樓高度的不同系統進行風壓分佈的研究。Hongo [3]研究逼近流和圓頂幾何形狀的影響，並基於實驗結果提出估計結構元件和桁架的設計風載重經驗公式。Uematsu et al. [15]對一單層格子圓頂結構進行紊流邊界層風洞實驗，將數據以 POD 技巧模擬並重新組合，重現圓頂上的風載重時間序列。Cheng and Fu [2]針對雷諾數不同進行半圓頂型屋蓋在平滑流場與紊流邊界層一系列的風洞實驗，探討分離現象的發生機制與其受雷諾數之影響。Qiu et al. [10]針對雷諾數及幾何外型修正 Yeung [18]所提出針對半圓頂型屋蓋的平均風壓係數模式，獲得不錯的近似結果。

在考慮結構物本身動力行為下，亦有不少文獻針對結構物受風下的動態行為進行探討。Ogawa et al. [9]假設曲面屋蓋的動力反應為一抖振行為，忽略氣動力效應與曲面屋頂位移的互制關係，利用模態疊加法計算曲面屋蓋動態效應。Nakayama [8]則認為該類結構具有特殊且高次的主要控制模態，藉由擾動應變能能量來找出控制該結構變形的模態，並由頻率域模態分析得到動態效應。Yasui et al. [16、17]曾針對長跨距屋頂做風洞實驗並以 Monte Carlo method 模擬，在時間域分析上以高階模態計算長跨徑屋頂由風所引起的動力反應。Ksaperski [4]提出 Load Response Correlation (LRC)方法，透過載重與結構反應的相關性分析，對於線性系統可計算出對應於選定之特定結構反應的載重分佈；對於非線性系統也可以得到相當不錯的近似值。

本研究以風洞實驗為基礎，探討半圓頂型屋蓋結構的風壓分布特性以及規範設計值。首先根據屋蓋周圍流場不同的特徵進行分區，並與日本 AIJ-2004 [10]、美國 ASCE7-10 [1]規範中所列之分區進行比較。接著則以本研究風洞實驗結果、日、美規範、以及 Yeung [18]所提出之平

均風壓係數分布模式進行外風壓係數設計值的討論，並提出本研究針對此類屋蓋結構的外風壓係數建議值，做為未來修訂規範之參考。

## 二、風洞實驗

### 2.1 實驗架構

本研究於 12.5 (m) × 1.8 (m) × 1.8 (m) 大氣邊界層風洞進行紊流場下不同幾何造型的半圓頂型屋蓋表面風壓分布量測。以粗糙元素及錐形三角架模擬紊流邊界層特性，如圖 1 所示為紊流場之平均風速垂直剖面分布與紊流強度分布，照片 1 則為風洞實驗架設實況。其中平均風速剖面約略符合我國標準地況 B 所代表的鄉鎮地形，以指數律近似可得地況指數為  $\alpha = 0.27$ ；紊流強度分布於模型高度處約為 18~23%。實驗模型可分為半圓頂型屋蓋模型(roof model)及圓形底座模型(circular base model)兩部分。藉由變化兩模型高度可得出 20 種不同幾何造型的實驗模型組合，其幾何符號意義如表 1 所示。

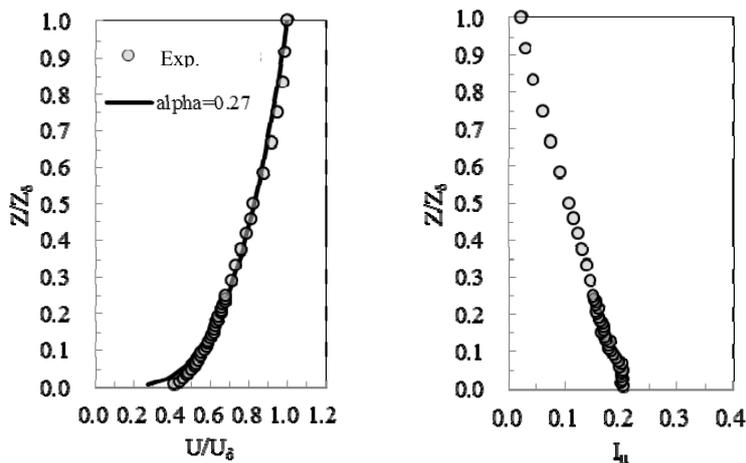


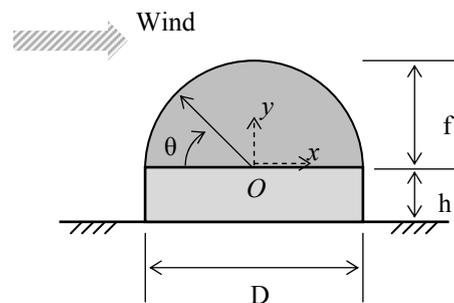
圖1 平均風速剖面(左)及紊流強度剖面(右)  
(其中 $\delta$ 為邊界層厚度高度)



照片1 風洞實驗架設實況

表1 實驗模型組合及其幾何符號意義

D = 0.3m	
f/D	0.1 ~ 0.5
h/D	0.0、0.1、0.2、0.5
共有20組不同幾何外型的半圓頂型屋蓋結構模型。	



由於曲面造型其周圍風場特性受雷諾數( $R_e$ )影響，其定義為  $R_e = \rho U_H D / \mu$ 。其中  $\rho$  為流體密度； $U_H$  為模型頂部高度平均風速； $D$  為半圓頂型屋蓋跨度(直徑)； $\mu$  為動黏滯力係數。根據上述實驗設置可計算得雷諾數範圍為  $1.12 \sim 1.56 \times 10^5$ 。此雷諾數範圍約屬於臨界雷諾數，風場變化頗大，然而 Cheng and Fu [2] 研究成果指出，由於受到逼近流紊流強度影響，流場在雷諾數  $10^5$  範圍可趨於穩定。此外，計算 20 組實驗模型所造成的遮蔽比(Blockage ratio)最大者約為 2.1%，小於 5% 可視為流速穩定。

本研究探討風壓分布特性以半圓頂型屋蓋平行於來風風向的子午線(meridian)為主，所佈風壓孔均位於此中央子午線上。每組實驗模型共量測 14 段相當於實場 10 分鐘的紀錄長度，以利於後續風壓係數計算時所需的段平均。此外，風壓量測值受風壓管線扭曲、內徑大小及管線長度所造成的訊號放大或減小現象，則透過反傅立葉法以風壓管線本身的機械轉換函數修正之。

## 2.2 風壓係數公式

為探討風洞實驗結果與規範中的外風壓係數值，所量測之瞬時風壓值均以平均風速壓予以無因次化，瞬時風壓係數及平均風壓係數之定義如下：

$$C_{p,i} = \frac{p_i - p_s}{0.5 \rho U_H^2} \quad (1)$$

$$\overline{C_p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1-N} C_{p,i} \quad (2)$$

其中  $p_i$  為時間點  $i$  的模型表面瞬時動壓； $p_s$  為風洞參考靜壓；式(1)之分母為模型高度平均風速壓，式(2)中的  $N$  為每段風壓量測值長度。計算每段平均風壓係數值後，以段平均值作為實驗結果值進行比較。為了瞭解風壓於子午線上下游變化關係，除平均風壓係數外，兩相鄰瞬時風壓歷時分布之間的相關係數亦可用以輔助討論。相關係數定義如下：

$$R_j = \left| \frac{E[p_j(t)p_{j+1}(t)]}{\sigma_{p_j} \sigma_{p_{j+1}}} \right| \quad (3)$$

其中  $p_j(t)$  為第  $j$  個風壓孔之風壓歷時； $\sigma_{p_j}$  為第  $j$  個風壓孔之擾動風壓值。

## 2.3 平均風壓係數經驗公式 – Yeung' model

Yeung [18] 提出以正弦函數為基底之平均風壓係數經驗公式，藉由 Toy and Tahouri [14] 提出的分區方式，以  $f/D$  為變數隨著  $\theta$  位置不同的平均風壓係數值。其定義如下：

$$\overline{C_p}(\theta) = \begin{cases} \overline{C_{p_{\min}}} + (\overline{C_{p_{\max}}} - \overline{C_{p_{\min}}}) \sin^2 \left( \frac{-0.5\kappa\pi(\theta - \theta_{\min})}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \right) / \lambda(\kappa) & 0 < \theta < \theta_{\min} \\ \overline{C_{p_{\min}}} + (\overline{C_{p_s}} - \overline{C_{p_{\min}}}) \sin^2 \left( \frac{-0.5\kappa\pi(\theta - \theta_{\min})}{\theta_s - \theta_{\min}} \right) / \lambda(\kappa) & \theta_{\min} < \theta < \theta_s \\ \overline{C_{p_s}} & \theta_s < \theta < \pi \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda(\kappa) = \sin^2\left(\frac{\kappa\pi}{2}\right) \quad (5)$$

$$\kappa = -1.4\left(\frac{f}{D}\right)^2 + 2.7\left(\frac{f}{D}\right) \quad (6)$$

式(4)中  $\overline{C_{p\min}}$  最小平均風壓係數值的對應角度位置為  $\theta_{\min}$ ； $\overline{C_{p\max}}$  最大平均風壓係數值的對應角度位置為  $\theta_{\max}$ ； $\overline{C_{p_s}}$  尾跡區平均風壓係數值的對應角度位置為  $\theta_s$ 。Yeung [18]提出的平均風壓係數經驗公式將子午線上風壓係數依角度  $\theta$  從上游至下游分為三區，式(4)中的係數  $\theta_{\min}$ 、 $\theta_{\max}$ 、 $\theta_s$ 、 $\overline{C_{p\min}}$ 、 $\overline{C_{p\max}}$ 、 $\overline{C_{p_s}}$  均以觀察實驗結果而得知，如圖 2 所示。

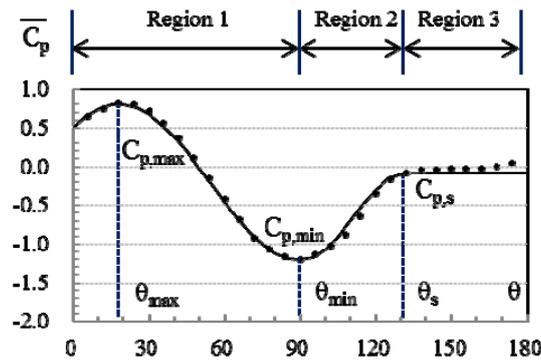


圖2 Yeung's model 係數示意圖

### 三、結果與討論

#### 3.1 風洞實驗結果

圖 3 顯示為平均風壓係數分布的風洞實驗結果。當  $f/D = 0.1$  時，因為屋蓋跨高與跨度比甚低，曲面造型效應不明顯，因此係數值僅在上游前端及下游尾端約 10 度範圍有變化。隨著  $f/D$  增加為 0.2、0.3 時，曲面效應逐漸明顯，同時出現底座高效應，最大負風壓係數值(約莫 90 度)隨著  $h/D$  增加而變大。 $f/D$  由 0.3 增加至 0.5 時，下游部分的風壓係數漸趨穩定，此穩定範圍隨著  $f/D$  值的變大而變大。一般來說，此範圍之形成為流體沿著曲面屋蓋流動，因流體慣性力與表面黏滯力無法平衡而產生分離現象所致。分離點後流體持續捲動而產生紊流，此時的流場擾動性大而平均值趨近於 0。曲面效應自  $f/D = 0.2$  後上游前端即出現正值風壓係數，此為受到逼近流正向風壓之影響；觀察  $f/D = 0.5$  且  $h/D = 0.0$  實驗，最大正風壓係數值出現於約莫 20 度，前端風壓係數值較低，根據 Toy et al. [12] 風洞實驗結果，判斷應是位於模型前方與地面形成的馬蹄渦流 (Horseshoe vortex)。此外，由  $f/D = 0.5$  且  $h/D = 0.0$  實驗可觀察到，當屋蓋跨高相對於底座高較低時，上游前端發生分離現象而較類似一般矩柱體的流場特性。

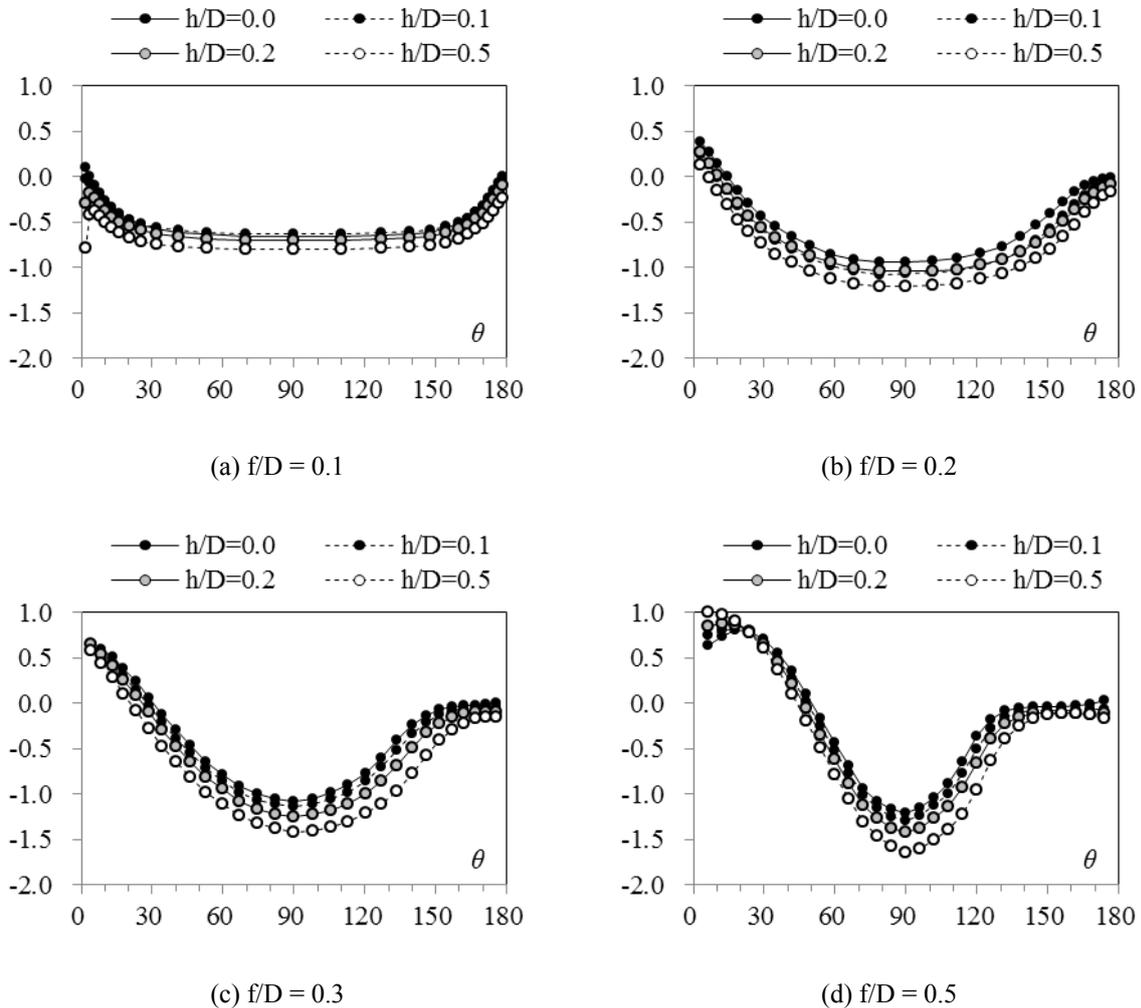


圖3 風洞實驗平均風壓係數分布( $f/D = 0.4$ 系列因篇幅受限故不列入)

### 3.2 風壓分布特性 – 分區特徵

根據式(3)計算兩相鄰風壓點間的相關係數分布可得圖4。除  $f/D = 0.1$  系列以外， $f/D = 0.2 \sim 0.5$  系列均可由分布曲線上發現兩相對較低的相關係數值。其中上游的低相關點若對應平均風壓係數分布曲線，則可看出約略對應於正平均風壓係數值轉為負平均風壓係數值的位置，其發生位置隨著  $f/D$  增加而往下游移動且越明顯；下游的低相關點則可大致對應至分離點發生位置 (Cheng and Fu [2])，其發生位置隨著  $f/D$  增加而往上游移動且越為明顯。另外，由  $f/D = 0.5$  系列可看出，隨著  $h/D$  的增加，發生位置稍微向下游移動。若參考圖2中 Yeung' model 示意圖，則可發現其位置約等同於  $\theta_s$  位置。對  $f/D = 0.1$  系列而言，低相關性僅出現在上游前端，此應為流體於0度角發生分離並於後方形成尾跡區，因而中下游均無相對低的相關性係數出現。

若以 Ogawa [9]所提及的分區概念進行分區，則可將  $f/D = 0.2 \sim 0.5$  系列分為三區，而  $f/D = 0.1$  系列僅以兩區表示。分區的界線可以相關係數作為判斷依據，相對低點的相關係數值為界線發生處，以  $f/D$  及  $h/D$  作為變數進行不同外型組合的內插，得到目標屋蓋結構的正確分區位置。

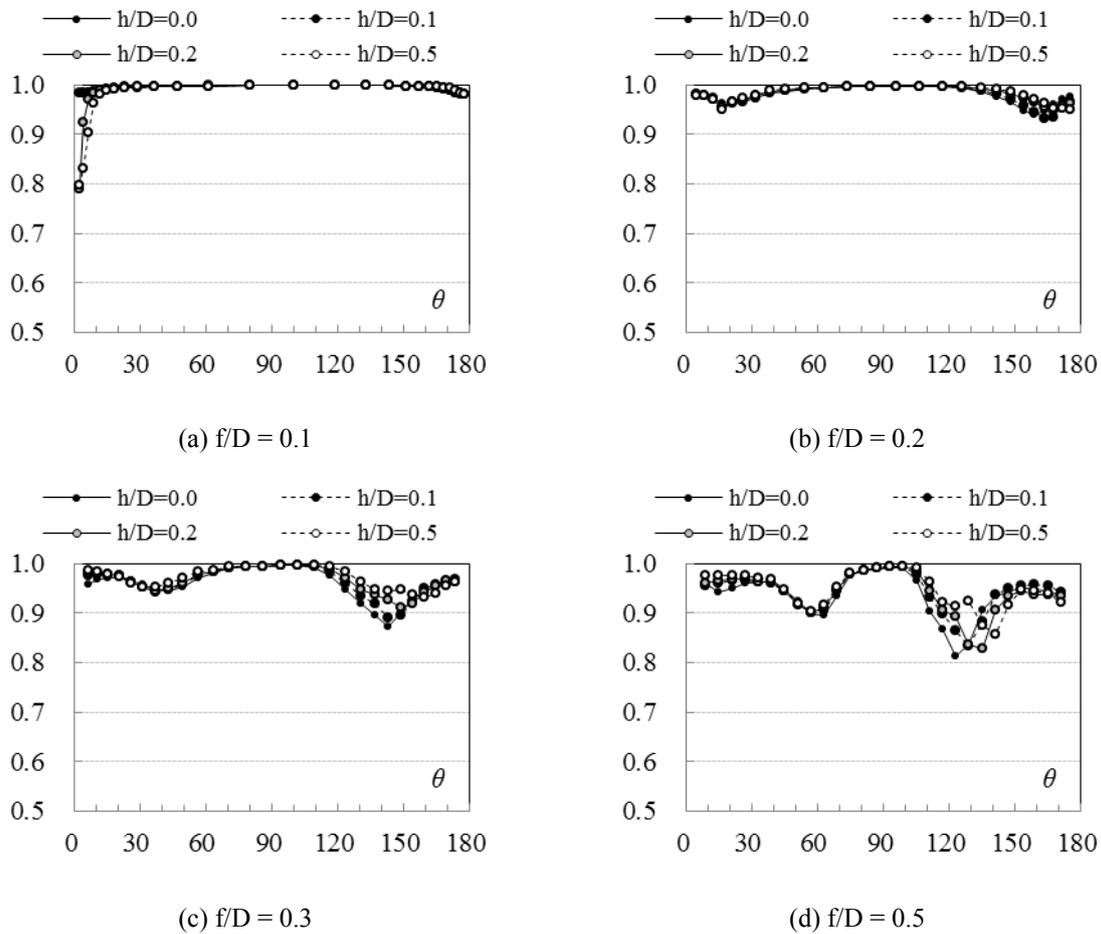


圖4 相鄰兩風壓間相關性係數分布( $f/D = 0.4$ 系列因篇幅受限故不列入)

### 3.3 設計值分布趨勢

進行規範設計值與風洞實驗結果比較前，須先行了解各國規範對半圓頂形屋蓋的定義，以及外風壓係數值的給定方式。如圖 5 所示，日本 AIJ-2004 規範中，半圓頂型屋蓋的幾何範圍為  $f/D = 0.0、0.1、0.2、0.5$  及  $h/D = 0.0、0.25、1.0$ ，值的給定可分為四區，區內均視為定值。以線性內插方式，求取目標屋蓋的  $f/D$  及  $h/D$  所對應的各區外風壓係數值進行設計。美國 ASCE7-10 規範中定義半圓頂型屋蓋  $f/D$  範圍為  $0.05 \sim 0.5$ ， $h/D$  範圍為  $0.0 \sim 0.5$ 。屋蓋表面的外風壓係數值由 A、B、C 三點的外風壓係數值，沿弧長以線性內插方式求得，其中 A、B、C 三點的外風壓係數值為  $f/D$  及  $h/D$  之函數，可由圖表查詢求得。此外，ASCE7-10 規範中定義兩種係數分布方式，Case A 為 A、B、C 三點的外風壓係數值直接線性內插而得；Case B 定義上游  $0 \sim 25$  度間為定值 A， $25$  度以後均與 Case B 一致。

本研究就規範定義方式將中央子午線上各風壓孔位置以  $\theta$  為坐標系統方進行比較。由於本研究進行風洞實驗之模型數量頗多，限於篇幅，將僅就其中一組系列( $h/D = 0.1$ )作為比較探討。

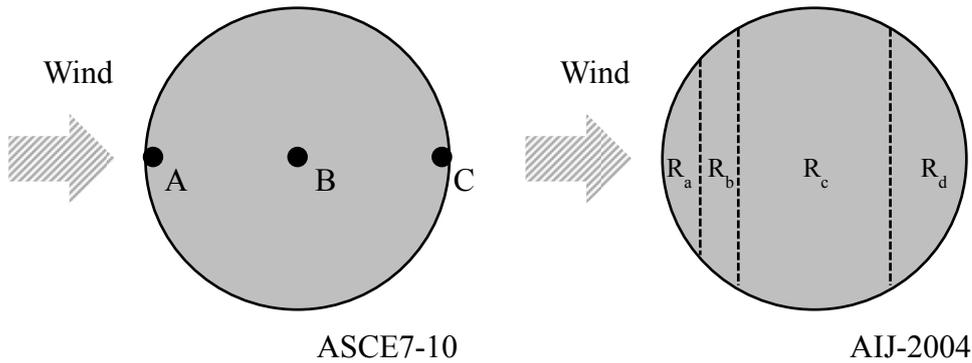


圖5 日本AIJ-2004及美國ASCE7-10半圓頂型屋蓋分區示意圖

日本 AIJ-2004 規範中將屋蓋表面分成四區且區內為定值，固可由圖 6 中看出均呈現階梯式分布。其分布趨勢大致與風洞實驗結果符合，然而部分區域，如屋蓋頂部，設計值均較實驗值不保守，可能有結構不安全之虞。此外，以上節中所提及的分區概念為原則進行設計，或許三個分區更具流場特性上的物理意義。美國 ASCE7-10 規範中僅以上、中、下游三點沿弧長作線性內插，故設計值分布呈現兩段式直線。相對應於 AIJ-2004，其準確性更低且分布趨勢不完全具有物理意義。比較 ASCE7-10 中兩種係數分布模式，Case B 在上游區域的設計值較能符合風洞試驗結果。而在  $f/D = 0.2 \sim 0.4$  系列中，其設計值均有大範圍的不保守現象。除了  $f/D = 0.1$  系列，Yeung's model 在其他系列中均有不錯的近似結果。探究  $f/D = 0.1$  系列不準確的原因可能為 Yeung's model 以正弦函數為基底進行近似，而風洞實驗值較傾向於 Tapper Cosine 分布，因而在上下游區域有不保守現象出現。然而應用 Yeung's model 必須觀察式(4)中的六個待定係數，造成工程師不易直接進行設計。

### 3.4 本研究提出補充 Yeung's model 模型

為了能更便利於工程師使用 Yeung's model，本研究先就平均風壓係數較具有規則性變化的  $f/D = 0.2 \sim 0.5$  系列進行擬合。以多項式做為基本擬合方程式型態，並以  $f/D$  及  $h/D$  作為函數變數，擬合出式(4)中的六個待定係數。多項式擬合方程式以最高階 2 階為限，擬合係數為下式(7)所示，以 MATLAB 的 fit 指令擬合各待定係數所成的曲面。擬合結果的係數值如表 2 所示，其中較不敏感的係數均予以省略。

$$\text{Coefs in Eq. (4)} = C_1 + C_2 \left( \frac{f}{D} \right) + C_3 \left( \frac{h}{D} \right) + C_4 \left( \frac{f}{D} \right)^2 + C_5 \left( \frac{f}{D} \right) \left( \frac{h}{D} \right) + C_6 \left( \frac{h}{D} \right)^2 \quad (7)$$

如圖 7 所示為風洞實驗結果、Yeung's model、以及利用 Eq. (7) 擬合待定係數之一則結果範例。由圖 7 中可知，若欲獲得與實驗結果完全一致的趨勢則須付出提高階數的代價，同時也使應用價值降低。Qiu et al. [10] 使用類似的手法提出以雷諾數作為函數變數的多項式擬合方程式，然而為了能兼具應用性與準確性，其方程式至多為  $f/D$  或  $h/D$  的一階，即式(7)中省略  $C_4$  及  $C_6$  項。由本研究進行擬合的系列均獲得不錯的結果，半圓頂型屋蓋結構的(平均)外風壓係數值分布僅需透過  $f/D$  及  $h/D$  即可得知，應能兼具應用性與準確性。然而本研究  $f/D = 0.1$  系列結果中，

即可看出兩種不同型態的外風壓係數值分布，需更進一步探討  $h/D$  對忽略曲面效應的門檻。

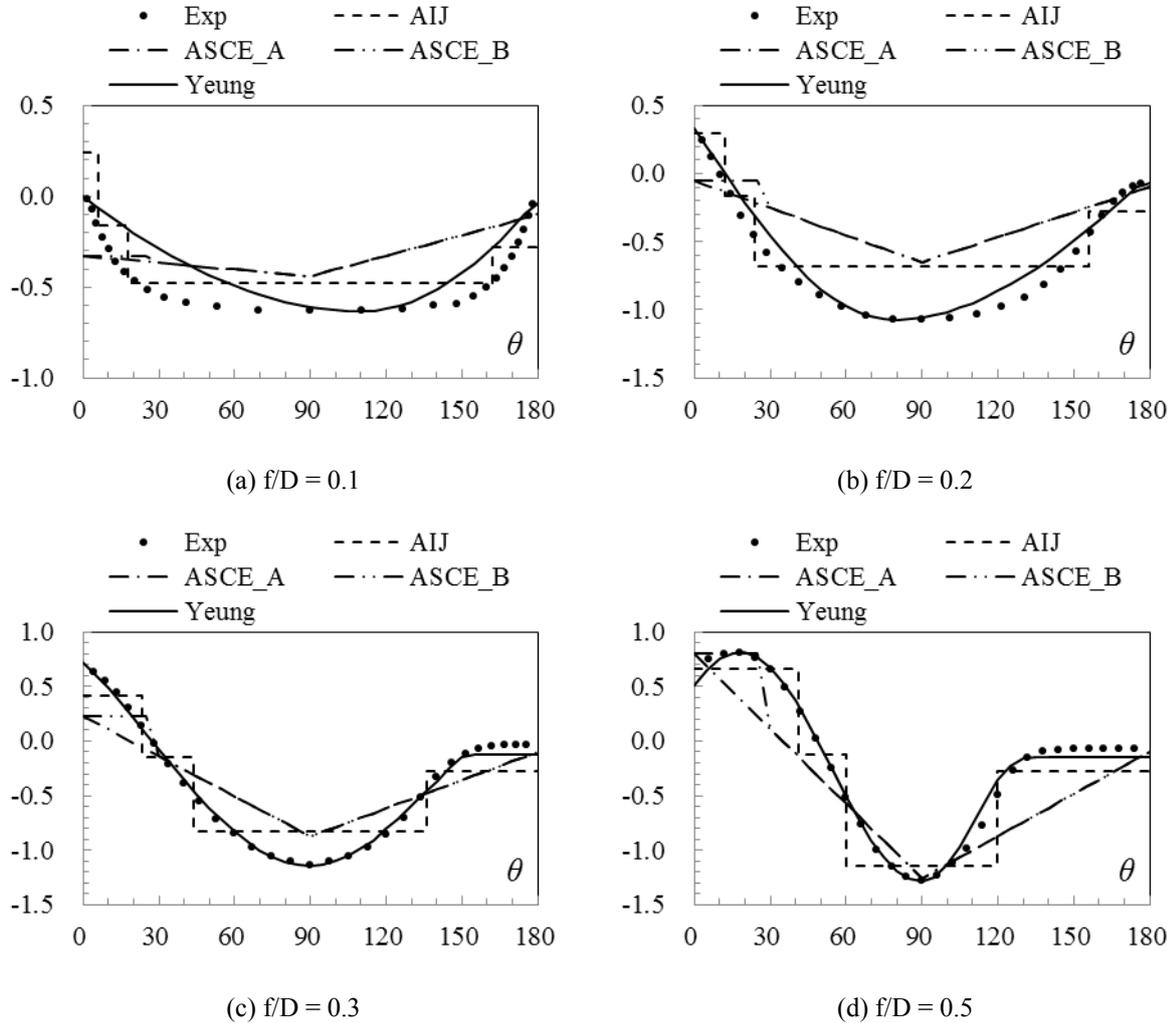


圖6 規範、風洞實驗結果、Yeung's model之比較( $f/D = 0.4$ 系列因篇幅受限故不列入)

表2 式(7)擬合係數值

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
$\theta_{max}$	5.0	-45.8	-9.9	156.3	-86.4	47.2
$C_{p,max}$	-0.3	4.9	-0.5	-5.5	2.6	-0.5
$\theta_{min}$	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$C_{p,min}$	-0.6	-2.3	-0.5	2.2	-1.3	0.6
$\theta_s$	204.5	-271.6	34.8	218.8	33.6	-32.9
$C_{p,s}$	-0.2	-0.3	-0.4	0.4	0.5	0.2

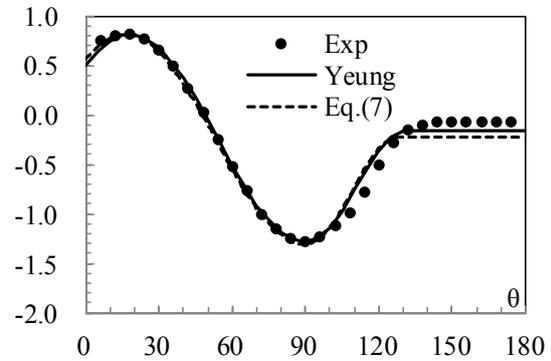


圖7 風洞實驗結果、Eq. (4)、Eq. (7)比較  
(以 $f/D = 0.5$ 、 $h/D = 0.1$ 為例)

#### 四、結論

本研究進行以探討日美規範於半圓頂型屋蓋結構表面風壓係數的設計值為主，輔以風洞實驗結果，探討目前日美規範設計值之給定是否適宜，並提出未來規範修訂之建議方案。由風洞實驗結果與規範設計值之比較結果可看出，規範設計值無法給予正確的(平均)載重分布，勢必造成此類結構的部分構件保守而部分構件極度不保守的現象。此外，表面風壓特性應具有分區概念(Zoning concept)，屋蓋結構的高跨比( $f/D$ )與側牆高跨比( $h/D$ )對於分區之影響應同時列入規範修訂考量。本研究提出以 Yeung [18]的分佈模式為主， $f/D$  與  $h/D$  為變數的係數擬合多項式，獲得與風洞實驗值頗為一致的擬合效果，且均可適用於  $f/D = 0.1 \sim 0.5$  及  $h/D = 0.0 \sim 0.5$  的外型。值得做為未來規範修訂之參考。

#### 參考文獻

1. ASCE Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures 7-10. ASCE SEI.
2. Cheng, C. M., Fu, C. L., 2010. Characteristics of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 98, 328-344
3. Hongo T., 1995. Experimental study of wind forces on spherical roofs, Ph.D Thesis, Tohoku University
4. Kasperski M., 1992. Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design. *Eng. Struct.*, 14, 27-34
5. Kawamura, S., Kiuchi, T., Mochizuki, T., 1992. Characteristics of wind pressure acting on spatial large dome, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 42, 1511-1512
6. Letchford, C. W., Sarkar, P. P., 2000. Mean and fluctuating wind loads on rough and smooth parabolic domes. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 88, 101-117.
7. Maher, F. J., 1965. Wind loads on basic dome shapes. *J. Struct. Div. ASCE ST3.* 219-228
8. Nakayama, M., Sasaki, Y., Masuda, K., Ogawa, T., 1998. An efficient method for selection of vibration modes contributory to wind response on dome-like roofs. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 73, 31-43
9. Ogawa, T., Nakayama, M., Murayama, S., Sasaki, Y., 1991. Characteristics of wind pressures on basic structures with curved surfaces and their response in turbulent flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 38, 427-438
10. Qiu, Y., Sun, Y., Wu, Y., Tamura, Y., 2014. Modeling the mean wind loads on cylindrical roofs with consideration of the Reynolds number effect in uniform flow with low turbulence. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 129, 11-21
11. Recommendations for Loads on Buildings (2004). Architecture Institute Japan. Tokyo, Japan
12. Toy, N., Moss, W. D., Savory, E., 1983. Wind tunnel studies on a dome in turbulent boundary layers. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 11, 201-212
13. Toy, N., Tahouri, B., 1988. Pressure distributions on semi-cylindrical structures of different geometrical cross-section. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 29, 263-272.
14. Tsugawa, T., Hongo, T., Suzuki, M., 1992. Experimental study of wind pressure and wind force characteristics on dome shaped openable roofs, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 42, 1509-1510
15. Uematsu, Y., Yoshida, M., Inoue, A., Hongo, T., 1997. Wind loads and wind-induced dynamic behavior of a single-layer latticed dome. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 66, 227-248
16. Yanli H., Dong S., Gong J., 2001. Wind response analysis method of spatial lattice structures in frequency domain with mode compensation (In Chinese), *Spatial Structures*, Jun, 7, No.2, 3-10
17. Yasui H., Marukawa H., Katagiri J., katsumura A., Tamura Y., Watanabe K., 1999. Study of wind-induced response of long-span structure. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 83, 277-288
18. Yeung, W. W. H., 2007. Similarity study on mean pressure distributions of cylindrical and spherical bodies. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 95(4), 253-266